

我国深立井冻结法凿井安全现状与思考

程桦^{1,2}, 蔡海兵²

(1. 安徽大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230039;2. 安徽理工大学土木建筑工程学院,安徽 淮南 232001)

摘要:在收集大量相关文献基础上,深入分析了我国中东部和西部地区水文与工程地质特点和采用人工冻结凿井法施工深立井的安全现状及存在问题,认为对于中、东部地区,深冻结井冻结管断裂、井筒破坏、冻结壁冻融后井筒出水、井筒连接硐室失稳破坏等是威胁冻结井筒安全的主要危险源;西部地区则是对其特殊地层认识不足,在冻结壁形成规律、井壁结构设计理论、施工工艺等诸多方面缺乏深入研究和工程实践,导致井壁破裂、淹井等事故时有发生。最后,针对引起安全事故的原因,提出急待解决的关键技术及技术途径。

关键词:冻结法凿井;深立井;安全现状;关键技术

中图分类号:TD265 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0001-06

Safety Situation and Thinking about Deep Shaft Construction with Freezing Method in China

CHENG Hua^{1,2}, CAI Hai-bing²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei Anhui 230039, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Hydrological and engineering characteristics in the middle east and west areas of China and the current safety situation and existing problems in deep shaft construction with artificial freezing method were thoroughly analyzed on the basis of a great deal of relative references. The freezing pipe rupture, shaft destruction, shaft water-exit after freezing wall frost thawing, breakage of shaft coupling chamber etc are main danger fountainhead of threatening freezing shaft safety in the middle east area. In the west area, the specific strata are not adequately understood, shortage of deep researches and engineering practices in many aspects, such as forming regularity of freezing wall, shaft structure design theory, shaft construction technology etc, results in accident occurrence from time to time, such as shaft breakage, water flooding into mine. Finally, aiming at the causation of arising safety misadventure, the key technologies needed to immediately solve and technical approaches were brought forward.

Key words: freezing sinking; deep shaft; safety situation; key technology

进入21世纪以来,我国中、东部地区主要矿区浅部煤炭资源几近枯竭,煤炭开采深度以20 m/a速度增加。以山东、安徽、河南等省为例,新建煤矿立井井筒深达800~1 000 m,具有冲积层深厚、地压大、含水丰富等特点,如正在建设的安徽杨村矿井冲积层厚达525 m,正在筹建的山东万福矿井表土层更是厚达750 m^[1]。随着我国西部大开发战

略的实施,西部煤炭资源开发如火如荼,在陕西榆林、宁夏宁东、内蒙古鄂尔多斯等地区,已开工建设多个矿区,与中、东部地区新井建设相比,西部地区矿井上覆冲积层虽薄,但立井井筒穿越地层多以白垩系、侏罗系等深厚富含水岩层为主,如将要开发建设的内蒙古红庆河煤矿井筒穿过白垩系岩层厚达500 m,立井施工难度大^[2]。

人工冻结凿井法是在深厚冲积层或富水软岩层中施工煤矿立井井筒最常用的工法之一。我国自1955年开滦林西矿西风井首次采用冻结法施工以来,已施工了700多个立井井筒,累计冻结井筒延米达到150 km^[3]。虽然经过50多年来的研究与工程实践,我国人工冻结凿井法理论与技术取得了巨大进步,但因我国中、东部以及西部地区新井建设出现的一系列工程技术难题未得到有效解决,导致深立井井筒在冻结施工或后期运营过程中,影响安全的事故时有发生。本文旨在分析我国深立井冻结法凿井安全事故现状基础上,主要从技术层面分析事故产生原因,提出相应的解决策略。

1 中、东部地区冻结井筒安全现状

目前我国中、东部地区新建深立井井筒的主要

表1 我国近几年完成的部分冻结法凿井深立井(中、东部地区)

井筒名称	冲积层厚度	冻结深度	净直径	冻结壁厚度	布孔方式	m
济西主井	457.78	488	4.5	7.5	主孔+辅孔	
济西副井	458.5	488	5.0	7.6	主孔+辅孔	
涡北主井	413.9	476	5.5	6.8	主孔+辅孔	
涡北副井	410.5	470	6.5	7.0	主孔+辅孔	
丁集主井	530.45	552	7.5	11.0	外圈孔+中圈孔+内圈孔	
丁集副井	525.25	550	8.0	12.0	外圈孔+中圈孔+内圈孔	
丁集风井	528.65	552	7.5	11.0	外圈孔+中圈孔+内圈孔	
龙固副井	567.7	650	7.0	11.5	外圈孔+中圈孔+插花内圈孔	
赵固副井	518.0	575	6.5	9.5	外圈孔+插花内圈孔	
郭屯主井	587.4	702	5.0	6.8	外圈孔+中圈孔+内圈孔+防片孔	
口孜东主井	568.15	740	7.5	11.5	外圈孔+中圈孔+内圈孔+防片孔	
口孜东副井	571.95	620	8.0	12.5	外圈孔+中圈孔+内圈孔+防片孔	

但是,由于立井水文与工程地质的复杂性、冻结法凿井一些关键技术的滞后以及施工质量等因素影响,致使部分深立井冻结井筒在施工过程中发生了诸如冻结管断裂、井壁破坏等安全问题。

1.1 冻结管断裂

冻结管断裂是立井冻结凿井中存在的主要安全问题,冻结管一旦断裂,会造成盐水泄露,冻结壁因盐水侵蚀而部分融化,在很大程度上削弱冻结壁的强度和稳定性,进而引起断管连锁反应,同时在冻结壁中形成透水涌砂“窗口”,从而会导致淹井等重大安全事故。如早在1984年,安徽淮南谢桥矿副井冻结施工中,就有5根冻结管发生断裂现象,8天后便造成了透水淹井事故。

特点:①井筒深度急剧加大,由原先400~500 m,增至600~1 000 m;②穿越第四纪冲积层深厚(400~600 m)。鉴于此,国内有关高校和科研单位以及施工单位的技术人员,针对理论明显落后于工程实践的现状,围绕存在的关键技术难题,开展了一系列攻关研究,在深井冻结设计理论与施工技术诸多方面取得系列研究成果,有利推动了冻结法凿井的科学与技术进步。

在此期间,冻结法凿井方面取得的主要科技成果有:多圈孔冻结方式、深井冻结壁设计方法及多圈孔温度场分布规律、高强高性能混凝土配制与工艺、新型系列高强冻结井壁结构及其设计计算理论、立井快速凿井方法等,并采用冻结法顺利完成了一大批深立井建设工程(见表1)。

在近几年两淮矿区的新井建设中,一些深立井冻结井筒也在施工过程中也相继出现了冻结管断裂现象^[4~6](见表2)。

表2 两淮矿区新建深立井冻结井筒断管事故

矿井	井筒	断管层位/断管根数/发生时间/		
		m	根	a
张集北矿	副井	280~315	7	2004
界沟矿	风井	180~200	4	2004
涡北矿	风井	210~350	11	2004
顾北矿	副井	182.7~363	43	2005
孙疃矿	副井	200	2	2005
卧龙湖矿	主井	159.3	1	2005
钱营孜矿	风井	210.8	3	2007
谢桥矿	中央风井	178、253	2	2008

冻结管断裂事故一般发生在厚粘土层中,这是因为粘土含水量较低、冻结速度慢、冻土的强度低、冻结粘土的强膨胀性和冻结壁的蠕变变形等原因导致的。大部分井筒首先发生断管的是内圈孔,这是因为内圈孔距井帮最近,在井筒表土层分段高掘进过程中,靠近井帮的冻结管最容易断裂。如淮南顾北矿副井井筒净直径8.1m,表土层厚度464m,井筒采用冻结法施工,冻结孔采用三圈孔布置(外圈孔+中圈孔+插花内圈孔),于2005年5~10月,该井筒施工过程中连续发生43根冻结管断管,分别为外圈孔9个,中圈孔21个,内圈孔13个,幸好补救措施实施及时、到位,避免了淹井事故发生^[7]。

综合分析深立井冻结井筒冻结管断裂原因,主要有以下几方面:

1) 地质条件复杂。深厚表土层的地压随着深度的增加而增大,地压作用下冻结壁产生较大变形,特别对于深厚粘土层和钙质粘土层,冻结壁过度的变形会导致冻结管断裂;另在粘土层位与其他层位交界处,由于冻土扩展速度的不同,使得交界处冻结壁厚度不连续,冻结管局部会产生应力集中,从而发生断裂现象。

2) 冻结孔成孔质量差。深井冻结孔钻进过程中,钻孔偏斜难于控制,导致冻结管偏斜过大,特别是部分内圈孔向井心方向偏斜,离井帮的距离较近,由于地层压力的作用和冻结壁的变形,冻结管极易发生断裂。

3) 冻结管焊接质量差。冻结管在低温状态下,呈现较强的脆性特征,冻结管管口连接处焊接质量不高,在地压、土层摩擦力和温度应力等复杂应力作用下焊缝容易开裂,进而产生断管现象。

4) 冻结的影响。冻结方案设计不合理,会造成冻结孔圈径偏小和冻结壁厚度减薄;冻结制冷控制不当,会使得冻结壁的强度和稳定性得不到保证;盐水流量分配不均,影响冻结壁的均匀性等,均会导致深立井冻结井筒产生断管现象。

5) 掘进影响。井筒掘进速度过快,冻结壁的发展时间不够,井帮温度偏高;掘进段高大,井帮暴露时间长等,均会导致冻结管发生断裂。

1.2 井筒施工阶段井壁破坏

发生在施工期和运行期的深立井冻结井筒井壁破坏因其机理不同,出现的破坏形态也有较大差异。因双层钢筋混凝土塑料夹层复合井壁结构是我国深厚冲积层冻结井筒的主要支护结构,在施工

阶段,发生的大量冻结深立井井壁破坏形式主要为:井壁混凝土浇筑过程中炸模;外层井壁产生斜向或环向裂缝;内层井壁出现大量环向裂缝,情况严重时会出现井壁脱落、掉渣等现象。

1.2.1 模板变形失稳 该类事故多发生在冬季施工。究其原因主要是外层井壁砌筑多选用整体下放式金属大模板,冬季施工混凝土入模温度低($<14^{\circ}\text{C}$),严重迟滞了混凝土初凝时间,加之,立井施工管理不到位、没按规定及时紧固模板连接件、变形模板修复不及时等多方面因素,均会导致模板发生变形失稳,进而造成混凝土炸模。近年来,两淮矿区呈发生几起此类事故,严重危及施工人员人身安全。

1.2.2 冻结压力 冻结压力大小与土层性质、埋深、冻结温度、井壁结构、施工工艺等因素有关。特别在深厚膨胀性粘土层冻结凿井中,在原始冻结力和回冻冻胀力共同作用下,造成冻结井外层井壁呈斜裂缝破坏,严重者不得不采用拆除重新浇筑措施。另外冻结管偏斜、盐水流量分配不均等,造成的非均匀冻结压力也是导致外层井壁破坏原因之一。

1.2.3 温度应力 立井井壁浇注属大体积混凝土施工,特别对于C60以上高强混凝土,如控制不好水泥用量,就会导致冻结井壁在浇注混凝土前后温差过大,从而在井壁内形成约束温度应力,造成井壁产生裂纹或裂缝。对于深立井而言,因水平地压大对冻结井壁约束作用强烈,与浅立井相比,更易产生温度应力裂纹(缝)。从近年来施工的冻结深立井统计数据来看,高达60%以上的井筒都或轻或重的发生了该种破损。

1.2.4 混凝土施工质量 现场施工中,因水灰比控制不严、混凝土外加剂特别是早强剂的投料不规范、入模温度过低、混凝土振捣不密实和养护环境差等,均会导致外层井壁因早期强度偏低而破坏,内层井壁因温度应力产生裂缝。

1.3 井筒运行阶段井壁破坏

近十年来,特殊地层中新建的冻结深立井在设计时多考虑了竖向附加力对井壁的影响,研究并采用竖向可缩性井壁结构,以有效衰减因疏水沉降产生的竖向附加力。期间,对运行阶段冻结井筒主要安全威胁有:因开采疏水产生的竖向附加力导致部分冻结井筒破损,如江苏天能集团龙固矿副井、淮北海孜矿西风井等;因开采地面工厂下保护煤柱引起的地层移动产生的竖向附加力造成的井壁破

损(江苏天能集团沛城矿主、副井);冻结壁融化造成的井筒内大量涌水;冻结深立井连接硐室群失稳破坏等。

1.3.1 特殊沉降地层冻结井筒井壁破損 近十年来,发生在黄淮地区特殊地层的冻结井筒破損机理为:立井井筒穿过的冲积层底部含水层直接覆盖在风化基岩层之上,矿井生产的疏排水,引起底含水层水位下降、二次固结,导致上覆地层随之沉降,由此产生作用于井筒之上的竖向附加力(负摩擦力),造成井壁破坏。

针对沉降地层条件下立井井壁发生大范围的破裂现象(已有100多个井筒),国内相关高校和科研单位,经过大量研究,提出了“卸压槽法”、“地面加固地层法”等井筒破裂治理方法,如安徽理工大学根据“竖让横抗”的原则,提出了“双卸压槽法不停产修复破裂井壁技术”,并形成了一整套相应的设计方法和施工技术。

该井筒破裂治理技术已在安徽淮北、山东兗州、山东济宁、江苏徐州、河南永城等矿区,成功主持修复了13个破裂井壁。通过采取有效措施和不断技术创新,该研究成果又于2004~2007年在黑龙江省东荣二矿主、副井、安徽省临涣矿西风井、河南省陈四楼矿副井、江苏省龙固副井的破裂井壁修复工程中得到了推广应用,消除了安全隐患,至今各井筒均运行良好^[8]。

1.3.2 冻结壁融化后井筒漏水 与400m以浅冻结井相比,深冻结井具有冻结壁厚、冻结温度低、解冻时间长等特点。因冻结井冲积层段均采用双层井壁结构形式,且外壁采用短段掘砌工艺施工,具有接茬多、防水效果差特点,为减少冻结壁解冻后井筒涌水量,通常在冻结壁开始冻融,壁间温度升至3~5℃时,实施壁间注浆以封堵外层井壁、壁间以及内壁漏水通道。

工程实践表明,对深冻结井而言,当壁间温度升到5℃左右时,壁间注浆效果多不理想。如淮南丁集矿、顾北矿等,在冻结壁化冻至井筒涌水量大幅增加后,实施壁间注浆施工才能取得预期封水效果。但因该时段预警时间短,井筒涌水量增加具有突然性,对井筒安全构成严重威胁。如丁集矿主、副、风三个井筒实施壁间注浆时,井筒涌水量已达30m³/h左右,顾北矿主井更达近100m³/h。

究其原因,主要是对深立井厚冻结壁冻融规律缺乏深刻了解,加之,在高地压作用下,壁间注浆通道的连通性较差所致。

1.3.3 冻结深立井连接硐室群失稳破坏 煤矿立井井筒连接硐室群系指马头门(井筒与井底车场大巷相连接的部分)、马头门上、下段井筒及其附近的其它硐室。硐室群位处矿井的咽喉部位,设计断面大,在施工期间,围岩反复受到扰动,不仅影响了施工期内围岩的应力、破損区、硐周位移,而且还影响到硐室群在运行期中的稳定性。如江西曲江矿副井(累深850m)、山东唐口矿副井(累深1029m)、安徽刘店矿风井(累深762m)、淮南望峰岗矿副井(累深817m)等在马头门及其上、下段井筒处均不同程度发生了断裂、掉顶、破損等现象,有的虽几经维修,但仍屡修屡坏,给煤矿造成了巨大的经济损失,严重威胁矿井的安全生产^[9]。

国内对煤矿深井硐室群的破坏机理和支护方式进行了一些有益的研究,研究成果主要为深井硐室群中马头门这一特定复杂结构的支护技术,并侧重于支护结构失效后的修复技术及其优化,未将马头门上、下段井筒及其周边小硐室群纳入研究的范围内,难以从总体上阐明硐室群围岩失稳机理及支护结构的力学特性。目前,我国每年深井连接硐室群发生失稳破坏矿山呈增长趋势,应引起高度重视。

2 西部地区冻结井筒安全现状

在我国西部地区煤炭开发建设中,立井井筒穿越地层以白垩系、侏罗系等深厚不稳定富含水岩层为主,该类岩层具有成岩年代晚、强度低、弱胶结、易风化和易水解等特点,且其含水层多为孔隙、裂隙含水层,浆液扩散难、预注浆效果差。在西部深厚不稳定富含水岩层冻结法凿井中,由于冻结井设计理论缺乏系统的分析,且尚无成熟的施工经验可以借鉴,现主要存在以下几方面的技术和安全问题。

2.1 凿井施工方法选择不当

长期以来,我国中、东部地区因新生界深厚地层多采用冻结法、钻井法和注浆法(基岩段)凿井。在西部地区初期建井过程中,往往认为西部地区大面积缺水且白垩系、侏罗系为岩石,地面预注浆、工作面预注浆及壁后注浆等可以解决含水层涌水问题,进而多采用普通法凿井施工。结果施工中岩层涌水量大、岩石泥化、井筒片帮严重,加之排水能力有限,井壁质量低劣,发生个别井壁垮裂及淹井等一系列事故,最后无法继续施工只得改用冻结法^[10]。陕西亭南矿和内蒙古东胜煤田塔然高勒矿井就是典型的例子。工程返工无疑导致了建井工

期的延长和投资成本的增加。

2.2 冻结方案制定不合理

由于对白垩系、侏罗系地层岩性及工程水文地质特性缺乏足够的认识,且冻结设计和施工单位均来自于中、东部地区,故在制定冻结方案时,习惯将中、东部地区基岩冻结法的设计方法和冻结参数沿用到西部,从而出现冻结壁交圈时间延迟的现象。如内蒙古赉诺尔煤田灵东矿风、副井,内蒙古东胜煤田塔然高勒矿主、副、风井等。另外,在井筒掘砌过程中,工作面涌水,不得不采用加强冻结的处理措施。

由于对西部地区地质特征和人工冻土的物理特性缺乏统一的认识,同一矿井的不同井筒,冻结方案存在较大的差异,这种现象在我国中、东部地区是极为少见的。如内蒙古母杜柴登矿井,因冻结控制层位的选择不同,造成主井、风井同样为直径6.5 m的井筒,而冻结壁设计厚度竟相差1.3 m。

白垩系、侏罗系等地层无明显的隔水层,当采用全深冻结时,因冻结孔壁和冻结管之间的环形空间导通含水层,在与井筒相邻的马头门及硐室施工中,冻结壁解冻后时常出现下部冻结管串水,导致工作面涌水和淹井的安全事故。如纳林河二矿主、副和风井施工到底,冻结解冻后马头门、装载硐室施工时出水,将井筒淹至静水位,不得不采用排水和注浆处理措施^[1]。

2.3 冻结施工技术有待改进

与我国中、东部地区相比,西部地区矿井工程地质条件有其鲜明的自身特点。如新生界地层含水率低,煤层可冻性差;一般基岩含水量均较低等。因此,在强化冻结可冻性差的地层、冻结状态评判(交圈)、以及爆破对基岩冻结管危害防护等冻结施工技术方面,还有待深入研究。如内蒙古赉诺尔煤田灵东矿风井和副井,由于对其煤系地层冻结特性缺乏深入了解,在施工至煤系地层时,曾因工作面水量增大,而一度停工。

3 几点思考

由上分析可见,我国中东部与西部地区井筒水文与工程地质情况有很大差距,采用人工冻结法施工深立井存在的安全危险点,既有相同之处,但更多的是区域水文与工程地质特点造成的不同之处。从技术层面来看,尽管冻结凿井法已是一种成熟的

特殊工法,但是,由于地质条件、井筒深大等因素的变化,相关基础研究、设计理论、施工技术与工艺滞后于工程实践已是不争的事实,急待开展相关研究,来适应工程实际需要。

3.1 中东部地区

1) 在冻土物理学的理论框架下,开展人工深厚冲积层多圈管冻结地层的温度场、水分场二场耦合问题,以及温度场、水分场、应力场三场耦合问题的理论与试验研究,建立相应的耦合计算模型,揭示水热力耦合机理,给出具有工程意义的简化解析计算方法;采取理论解析、数值模拟和现场实测验证的手段,着重研究开挖工况条件下的冻结壁变形与力学特性。

2) 系统分析近几年国内冻结深井温度场、冻结压力、水文变化等大量实测数据,获得中、东部地区典型地层(粘土、砂层)深井冻结压力分布规律,建立具有区域代表意义的半理论半经验冻结压力计算公式。

3) 研究新型高强冻结井壁结构及其设计理论,揭示冻结壁与井壁结构共同作用机理,分析冻结管实际受力状态,从冻结管低温物理性能、接头结构与焊结工艺等诸多方面,创新冻结管施工工艺。

4) 研究多圈管冻结下冻结壁各区域温度场融化特性和规律,获得多圈管融冻时间比,为科学确定壁后注浆时间防止井筒出水提供理论依据。

5) 研究复杂地质条件下深立井(700~1 000 m)连接硐室群围岩对施工顺序、开挖与支护方式等人为因素的动态响应规律,获得自然地质因素和人为因素与深立井连接硐室群围岩稳定性之间的内在普适性规律,以期解决深立井连接硐室群在施工和运行期的安全问题。

3.2 西部地区

因西部地区特殊地层冻结井设计理论和施工技术缺乏系统研究,冻结设计理论滞后工程实践。鉴于问题的复杂性和紧迫性,应通过基础理论研究和工程实践的提炼总结,建立符合西部地区特殊地层条件的冻结井设计与施工技术体系。

1) 收集西部地区已建或在建矿井井筒工程与水文地质资料,研究分析其水文与工程地质特性,在总结该地区新井建设经验基础上,针对普通凿井法和特殊凿井法的适应性特点,分类该地区矿井工程地质,为科学选择施工方法提供可靠依据。

2) 以西部地区典型人工冻岩土(新生界粘性土和砂土、白垩系和侏罗系含煤岩层)为研究对象,系统研究其工程热力特性和力学行为,为冻结壁设计提供理论依据。

3) 理论与试验研究西部地区典型地层条件下的冻结温度场分布规律,注重对西部地区新生界缺失砂性地层以及全基岩冻结壁交圈时的工程表征、冻结方式、冻结壁设计参数、冻结温度场交圈的工程判断方法等方面的研究。

4) 加强我国西部地区在建冻结井温度场、冻结压力、井壁内、外力等现场实测工作,研究适应该地区冻结井实际的冻结壁厚度、冻结壁热工计算、平均温度、井帮温度预测等设计计算公式。

5) 基于该地区冻结井内、外力实测数据,理论与试验研究符合我国国情的西部地区全基岩冻结井井壁结构形式和设计计算理论。

4 结语

随着我国经济社会的快速发展,能源问题将成为制约我国可持续发展的重要瓶颈之一。因此,我国中、东部地区煤炭生产基地的战略地位将日趋重要,西部地区煤炭开发将如火如荼。随着科研和工程技术人员对上述问题的攻关解决,必将我国冻结法凿井技术提高到一个崭新水平,实现安全、快速建设矿井的目标。

参考文献:

- [1] 程桦,姚直书,荣传新,等.深厚冲积层立井冻结设立理论现在与思考[C]//周兴旺,金川,汪仁和,等.矿山建设工程技术新进展——2006年全国矿山建设学术会议论文集(上册).徐州:中国矿业大学出版社,2006:257–263.
- [2] 程桦,姚直书,荣传新.我国西部地区冻结法凿井关键技术问题[C]//周兴旺,程桦,张伟林,等.矿山建设工程技术新进展——2009年全国矿山建设学术会议论文集(上册).合肥:合肥工业大学出版社,2009:23–29.
- [3] 周兴旺.我国特殊凿井技术的发展和展望[J].煤炭科学技术,2007,35(10):10–17.
- [4] 刘相寿,刘念全.井筒冻结管断管的处理[J].能源技术与管理,2006(1):92–94.
- [5] 盛延伸.再论冻结管断裂原因及防止断管的途径[J].煤炭技术,2009,27(7):176–177.
- [6] 吴康宁.冻结法凿井中的冻结管断裂及其防治[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2010,10(2):43–45.
- [7] 亢延民.煤矿井筒施工断管浅析[C]//周兴旺,金川,汪仁和,等.矿山建设工程技术新进展——2006年全国矿山建设学术会议论文集(上册).徐州:中国矿业大学出版社,2006:308–313.
- [8] 程桦,姚直书,荣传新,等.双卸压槽法不停产修复破裂井壁技术[R].淮南:安徽理工大学地下工程结构研究所,2003.
- [9] 程桦,蔡海兵,荣传新,等.深立井连接硐室群围岩稳定性分析及支护对策[J].煤炭学报,2011,36(2):261–266.
- [10] 胡德铨,曹静.白垩系侏罗系含煤地层岩石冻结[C]//周兴旺,程桦,张伟林,等.矿山建设工程技术新进展——2009年全国矿山建设学术会议论文集(上册).合肥:合肥工业大学出版社,2009:10–14.
- [11] 邓维国,申建红.西部地区煤矿建井期间存在问题的探讨[J].山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(S):160–165.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

基于 Adina 软件的大型边坡变形与稳定性分析

袁宝远, 周星汉, 许 瑶, 施文俊, 曾云路

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:边坡失稳是一种严重的地质灾害, 在详细的地质调查、分析基础上, 对枇杷园边坡的破坏模式进行分析, 利用 Adina 软件对边坡进行有限元计算, 分析边坡的应力分布, 根据强度折减法理论, 对边坡稳定性安全系数进行计算, 研究成果表明, 边坡可能沿软弱夹层滑动, 对边坡采取以抗滑桩加固措施进行了有限元计算, 验证加固方法的有效性。

关键词:岩质边坡; 稳定性分析; 边坡加固

中图分类号:P642 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)02-0007-05

Deformation and Stability Analysis of Large Slope Based on Adina Software YUAN Bao - yuan, ZHOU Xin - han, XU Yao, SHI Wen - jun, ZENG Yun - lu

(Institute of Earth Science and Engineering, Hehai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

Abstract: Slope failure is a kind of serious geologic disaster. Based on the detailed geological survey and analysis, failure mode of Pipayuan slope was analyzed. Finite element calculation with Adina software for the slope was performed, stress distribution in the slope was analyzed. According to the Strength reduction method, the safety coefficient for slope stability was calculated. The results showed that the slope probably slide along the soft interlayer. The effectiveness was verified by the finite element calculation for the slope with anti-slide pile reinforcement.

Key words: rock slope; stability analysis; slope reinforcement

雅砻江两岸山势巍峨, 层峦叠嶂, 高差悬殊, 是典型的高山峡谷地形地貌。研究区地处横断山东部, 该区总的地貌特征是: 山高谷深、崎岖陡峻。区域地势西北高, 东南低, 由海拔 5 000 ~ 4 000 m 降至 2 000 m 左右, 主要出露地层为元古界, 以浅灰色白云岩夹角砾状白云岩为主, 下部为砂页岩夹泥灰岩、泥岩。地震烈度为Ⅶ度。

该区域属川西高原气候区, 主要受高空西风环流和西南季风影响, 干、湿分明。每年的 11 月到次年的 4 月为旱季, 日照多, 湿度小, 日温差大, 降水很少, 只占全年的 5% 左右; 5 月到 10 月为雨季, 气候湿润, 日照少, 湿度较大, 日温差较小, 降雨集中, 且暴雨较多, 雨量占全年的 95% 左右。

枇杷园边坡位于锦屏水电站坝址下游雅砻江河段左岸盐源县枇杷园一带, 其分布范围从雅砻江

河水面至左岸上铺子台地, 相对高差约 400 m, 顺河向长度约 1 000 m。近以来, 边坡变形出现加剧现象, 在中下部出现了贯通张裂缝, 部分民房土墙和地板出现明显开裂、墙体倾斜, 为保证江岸和周围地区居民的安全, 应对枇杷园边坡进行变形与稳定分析, 提出相应的加固治理措施。

1 边坡地质条件

枇杷园边坡区出露的地层主要有震旦系上统灯影组白云岩、泥盆系中统灰岩、三叠系上统白果湾群砂岩夹页岩、第四系覆盖层, 以及华力西期侵入岩。由老至新分述如下:

1) 震旦系上统灯影组 ($Z_b d^3$): 为灰色至微红色厚层块状泥质白云岩、白云岩。出露于金河左岸桥头及大盐池营地一带。

收稿日期: 2012-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50539110)

作者简介: 袁宝远(1967-)男, 江苏海安人, 教授, 博士, 主要从事岩土体变形破坏及工程稳定性、工程岩土体安全监控理论和方法的研究和教学工作。

2) 泥盆系中统(D_2^{1-2}):灰色厚层块状灰岩、生物灰岩夹硅质结核灰岩。出露于F44-2断层以东,以及F45断层以东区域。受推覆构造影响,覆于三叠系上统白果湾群(T_3 bg)之上。

3) 三叠系上统白果湾群(T_3 bg):为灰色、灰黄色长石石英砂岩夹数层炭质页岩,局部夹煤线。Fx3断层以北;F43断层以南。主要出露于F43断层以南,以及Fx3断层以北。

4) 第四系覆盖层:可分为第四系冲、洪积层(Q^{al})及第四系残坡积、崩积层($Q^{el+dl+col}$)。

① 第四系冲、洪积层(Q^{al}):为冲积砂卵砾石,分布于河床及两岸河边,厚度5~20m。② 第四系残坡积、崩积层($Q^{el+dl+col}$):由块石、碎石及粘土组成,局部存在崩塌变位层状岩体,分布于两岸坡,厚度不稳定,一般厚10~60m,部份地带厚达60~

110m。

5) 华力西期侵入岩(γ_4^1):为灰绿色闪长岩,沿Fx5断裂侵入,厚度变化大,分布于枇杷园边坡体下伏基岩中。

边坡位于N侧近EW向的Fx3、E侧NNW向的F45、S侧近EW向的F43断层围限的断块内,其中近SN向的F₄₆及近EW向的Fx5断层由边坡体中部通过,因此边坡底部基岩有较大差异:F46断层以E基岩为三叠系上统白果湾组(T_3 bg)砂岩夹炭质页岩;F46断层以W,Fx5断层以N为灰绿岩侵入体,以S为震旦系灯影组(Zbd^3)白云岩、泥质白云岩。其中边坡后缘平台残留有泥盆系中统($D21-2$)灰色厚层块状灰岩、生物灰岩夹硅质结核灰岩。枇杷园边坡典型地质剖面见图1。

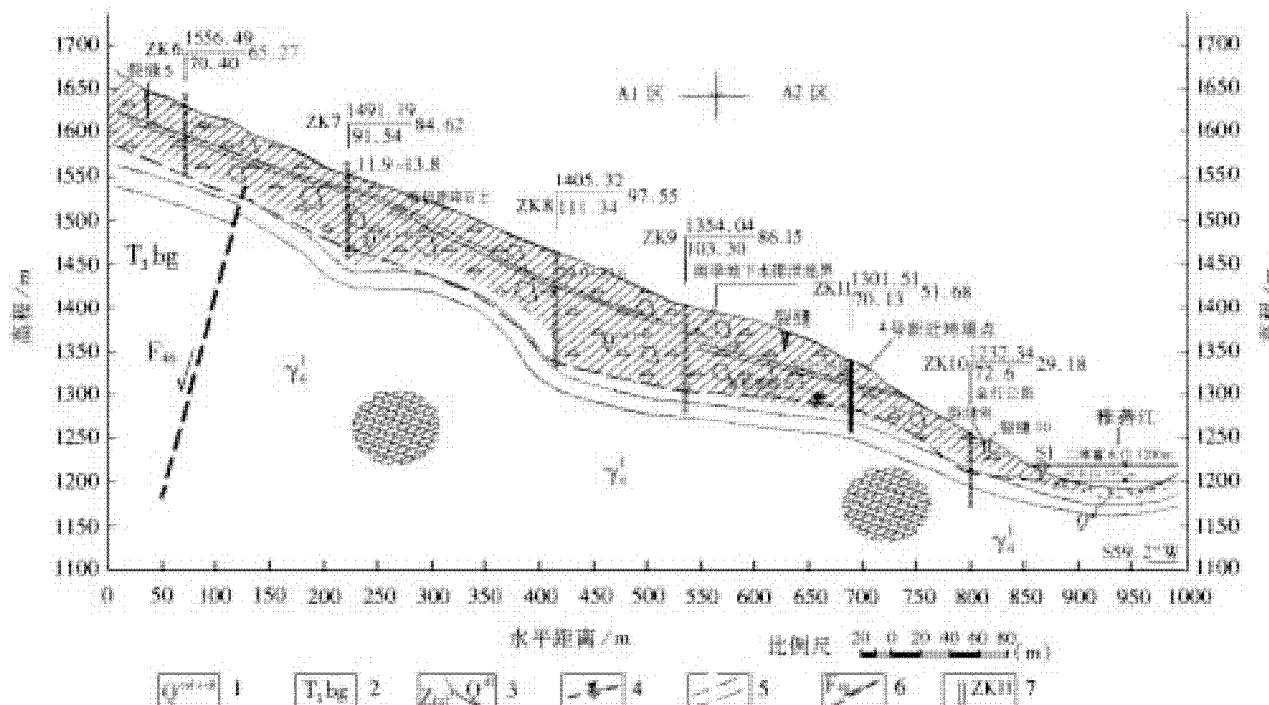


图1 枇杷园边坡典型地质剖面

2 边坡变形破坏特征

2.1 边坡面上裂缝分布

边坡面变形现象明显,已产生很多裂缝,通过对枇杷园边坡面上的裂缝分析发现:

1) 边坡面上裂缝较为发育,拉裂缝、剪裂缝、剪胀裂缝均有,滑动趋势、迹象非常明显。

2) 边坡下部前缘开裂变形较为严重。比较明显的有7条裂缝,分布高程:1 215~1 235m,裂缝

主要出现在公路上,给公路通行带来较大的影响。曾对开裂变形部位进行了混凝土封闭处理,但不久又重新开裂。

3) 边坡下部下游侧的裂缝1为一剪裂缝。分布高程为1 240~1 310m,长83m,宽5~25cm,呈直线状延伸至公路挡墙。裂缝与河流方向垂直。

4) 边坡上部有3条拉裂缝及1条剪裂缝。拉裂缝分布高程为1 377~1 660m。剪裂缝为裂缝2,分布高程为1 370~1 380m,长22m,宽5~30cm,呈直线状。裂缝与河流方向小角度相交。

2.2 变形失稳形式

在考虑边坡可能发生变形失稳形式时,主要考虑2种模式:浅层变形失稳、深部变形失稳。

1) 浅层变形失稳:该类型变形失稳主要存在于边坡体内有机质碎石土层以上坡体,该层由于有一定的连续性,抗剪指标低,并于公路附近临空出露,因此,存在以有机质碎石土层为底滑面向河床方向滑动的可能性。

2) 深部变形失稳:指沿基岩接触带以上边坡的变形失稳型式。1 240 m 高程至河边,下伏基岩坡度为 25° 左右,倾角较陡,并随着河床不断向下冲刷、侧向掏蚀,边坡切脚越来越严重,边坡前缘失去支撑而导致边坡失稳。

3 边坡 Adina 有限元软件计算分析

Adina 已经成为全球最重要的非线性求解软件之一,可以求解线性、非线性、动力学、流固耦合、渗流分析、混凝土浇筑分析等多方面的工程问题,特别

是在非线性、动力学及流固耦合分析等方面具有强大的优势,是全球唯一能做直接流固耦合的软件。

为了了解边坡可能发生破坏的部位和方式,研究边坡破坏的发生和发展过程,基于 Adina 软件建立了有限元计算模型,了解整个边坡内部的应力应变分布,从而判断该边坡的稳定与否及可能的发展趋势,并采用强度折减法计算不同工况下边坡最小安全系数。

模型的建立过程中,尽可能模拟各地质剖面的地质条件,以符合客观存在。同时考虑边坡枯期与汛期两种工况进行模拟。

边坡组成岩体按照其风化情况分成不同的材料,均是基于摩尔—库仑破坏准则的理想弹塑性材料。边界条件的设置为:底边完全固定,其余为自由边界。

计算所需地质材料参数等有关资料来源于工程地质勘察报告。计算中采用的各种材料参数见表 1、表 2。计算中地应力按自重应力考虑,水压力根据水压力分布情况用空间函数模拟。

表 1 枇杷园坡体表层土体物理力学参数

位置	描述	容重 /(kN·m ⁻³)	抗剪强度		压缩模量 E _s /MPa
			tan φ	C/kPa	
饱和状态	滑坡体内	块、碎石夹粘土	21.0	0.50	5
	滑坡体内	有机质碎石土 (分布不连续)	20.0	0.424	15
	与基岩接触带	碎石夹粘土	20.0	0.466	15
自然状态	滑坡体内	块、碎石夹粘土	20.0	0.55	15
	滑坡体内	有机质碎石土 (分布不连续)	18.0	0.466	25
	与基岩接触带	碎石夹粘土	19.0	0.509	25
					10.0

表 2 枇杷园坡体基岩物理力学参数

地层	风化程度	容重 /(kN·m ⁻³)	饱和抗压强度 /MPa	允许承载力 /MPa	变模 /GPa	抗剪强度			
						f'	C'/MPa	f'	C'/MPa
砂岩夹炭质	弱	26.2	18	1.5	0.4	0.45	0.2	0.5	0.25
页岩	微新	26.3	22	1.8	0.5	0.55	0.3	0.6	0.4
灰岩	弱	26.5	70	5	1.4	1.2	1.4	1.0	1.0
	微新	26.6	80	6.0	1.5	1.3	1.5	1.1	1.1
粉红色	弱	26.3	28	2.0	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5
白云岩	微新	26.4	35	2.5	0.8	0.8	0.7	0.8	0.5
灰色白云质	弱	26.5	50	3.5	1.2	1.1	1.2	0.9	0.9
灰岩	微新	26.6	65	4.5	1.4	1.2	1.3	1.0	1.0
极薄层板岩	弱	26.3	25	1.2	0.5	0.4	0.15	0.5	0.2
夹炭质层	微新	26.4	30	1.5	0.7	0.5	0.2	0.55	0.25
灰绿色	弱	26.4	40	2.5	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6
闪长岩(γ)	微新	26.5	50	3	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7

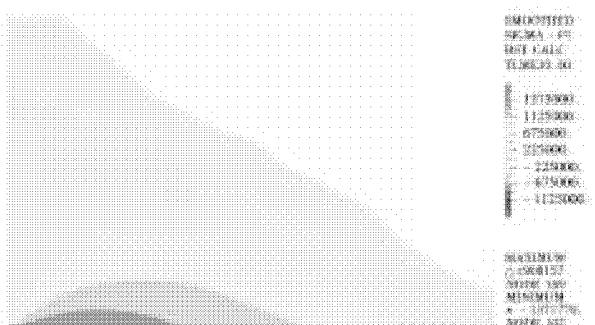


图2 剖面自然状态最大主应力分布云图

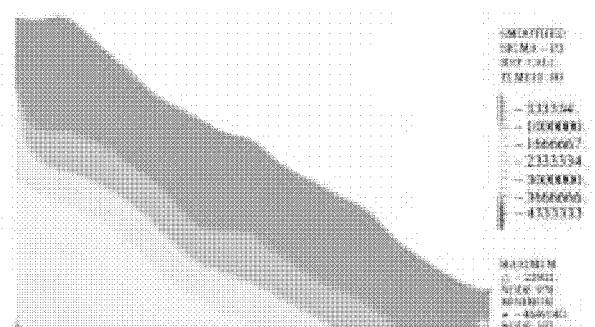


图3 剖面自然状态最小主应力分布云图

图2、图3分别为自然状态下典型剖面边坡最大主应力与最小主应力分布云图。图中拉应力为正值,压应力为负值,从图中可以看出,自重荷载情况下坡体的最大拉应力主要分布在坡体基岩面部;压应力整体都很大。汛期时期,覆盖层土体吸水而饱和,岸边外水位上涨,水压力增大。最大拉应力分布部位与自然状态基本一致,最大拉应力变化不大;压应力整体都很大。主要计算结果见表3。

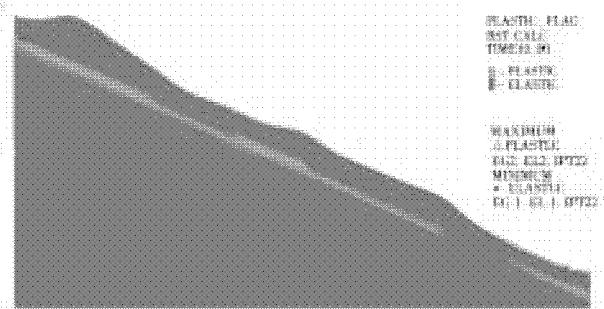
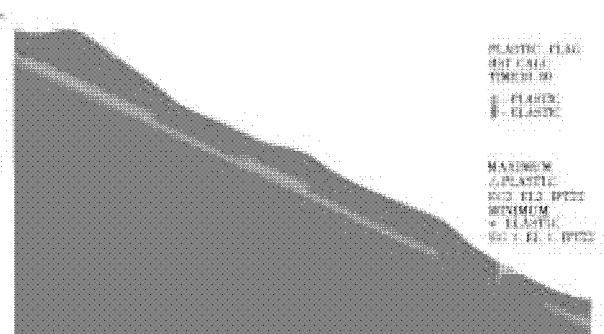
表3 边坡有限元计算主要结果

	自然工况		汛期工况	
	数值	位置	数值	位置
最大位移	0.157m	中部夹层	0.233m	中部夹层
最大压应力	4.65 MPa	下部基岩面	4.72 MPa	下部基岩面
最大拉应力	1.91 MPa	上部基岩面	1.92 MPa	上部基岩面

本文以折减系数F与无量纲位移 $E\delta_{max}/(\gamma H^2)$ 的关系曲线来判断边坡的极限平衡状态,从而确定最小安全系数。其中E为材料的弹性模量, δ_{max} 为计算结果有限差分网格节点的最大位移, γ 为材料的重度, H 为边坡的高度。当边坡接近临界平衡状态时,无量纲位移 $E\delta_{max}/(\gamma H^2)$ 随F的增加会有一个突然的增加,即位移产生突变,表现在 $E\delta_{max}/(\gamma H^2)$ 曲线上会出现明显的拐点,对应拐点

处的折减系数F即为边坡最小安全系数。

采用强度折减法分析边坡稳定时,通常将c、 ϕ 值同时除以折减系数进行折减即采用等比例强度折减的方法。自然状态工况,折减系数为1.13时边坡处于临界平衡状态,汛期工况,折减系数为1.06时边坡处于临界平衡状态。

图4 剖面自然状态 $F = 1.13$ 塑性区分布云图图5 剖面汛期工况 $F = 1.06$ 塑性区分布云图

由图4、图5可知,无论是在自然状态还是汛期工况下,边坡的塑性区都是分布在软弱夹层区域,该软弱夹层极有可能是该边坡的滑动面。

4 边坡加固计算分析

四川凉山枇杷园边坡开挖加固方案为:对边坡采取以抗滑桩支护措施和边坡截、排水为主的方法,保持和提高边坡岩体强度,保证边坡的整体稳定。其中采用抗滑桩,截面直径0.5 m,间排距5.0 m×5.0 m,桩长30 m,嵌固深度为10 m,分布在坡底至坡顶2/3处至坡脚。典型剖面抗滑桩加固计算图如图6所示。

加固后在汛期工况下,塑形区分布零散且范围很小(见图7)。根据强度折减法原理,汛期工况下,折减系数为1.33时边坡处于临界平衡状态,在汛期时,边坡的安全系数达到了设计安全系数要求,可见该加固方案是合理的。

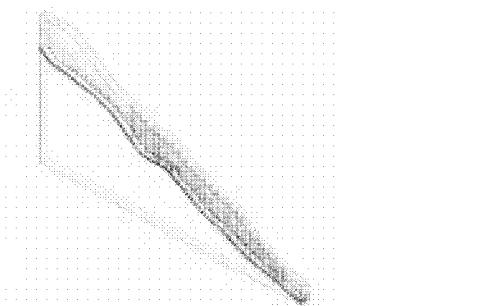


图 6 典型剖面抗滑桩加固计算图

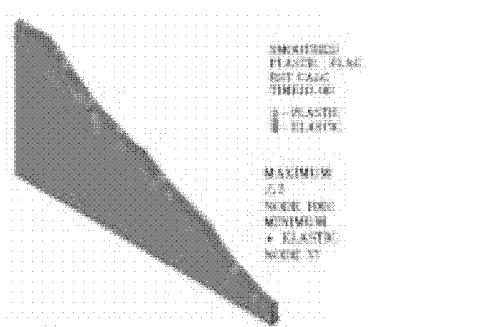


图 7 典型剖面加固后汛期工况塑性区分布

5 结论建议

1) 桃杷园边坡变形加剧现象及中下部出现了贯通张裂缝,表明边坡处于欠稳定状况,在集中降雨期可能失稳。

2) 从地质条件分析,边坡可能出现的失稳方式可能有两种:沿边坡体内有机质碎石土层的浅层变形失稳、沿第四系残坡积及崩积层与基岩接触带的深部变形失稳。

3) 通过 Adina 有限元分析得出边坡的塑性区都是分布在软有机质碎石土层,浅层变形失稳可能是该边坡的破坏方式。

4) 通过强度折减法计算得到汛期工况,折减系数为 1.06 时边坡处于临界平衡状态,边坡有限元分析的安全系数表明边坡处于临界失稳状态。

5) 对边坡采取抗滑桩加固措施的有限元分析表明固方案是合理的。

6) 由于降水对边坡稳定性影响较大,建议在加固边坡体的同时,采取有效的边坡截、排水措施,提高边坡的稳定性。

参考文献:

- [1] 王禹,张永,张赛.边坡变形失稳的分析评价研究[J].山西建筑,2012(05):140-145.
- [2] 唐善婷,江一舟.边坡失稳和稳定性分析方法的探讨[J].淮海工学院学报,2011(03):56-60.
- [3] YANG X L, YIN J H. Slope stability analysis with nonlinear failure Criterion [J]. J. Engrn. Mech. ASCE, 2003, 130(3):267-273.
- [4] 岳戈,陈权. ADINA 应用基础与实例详解[M].北京:人民交通出版社,2008:8-90.
- [5] 周桂云. 基于强度折减的边坡稳定安全系数有限元迭代解法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 58-61.
- [6] 黄晓航,赵明堂. 抗滑桩的设计与计算原理[J].中国水运,2008,8(3):161-164.

(责任编辑:李丽,姚多喜)

CH₄ 三自热重整制合成气催化剂的制备与性能

薛茹君, 王庆超

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 以稀土氧化物(CeO₂、La₂O₃)为助剂对Ni/类水滑石催化剂进行改性, 用于CH₄三自热重整反应, 旨在改善催化剂的活性和稳定性。以共沉淀法先制得铈(镧)掺杂的镁铝类水滑石(LDHs), 焙烧后再以浸渍法负载镍活性组分得到Ni/LDHs前驱体, 再焙烧得到NiO/CeO₂(La₂O₃)–MgO–Al₂O₃催化剂。用ICP–AES进行Ni、Mg、Al元素分析, BET法测试催化剂比表面积, XRD表征催化剂物相, H₂–TPR表征催化剂活性中心。考察了原料气组成为n(CH₄):n(CO₂):n(H₂O):n(O₂)=1:0.5:1.8:0.1时催化剂在750℃、0.1 MPa条件下CH₄三自热催化重整的稳定性及积炭性能。结果表明, 制得的Ni/CeO₂(La₂O₃)–MgO–Al₂O₃催化剂中, Ni组分以NiO形式存在于催化剂表面, 能降低催化剂还原活化温度; 在催化剂中掺杂CeO₂(La₂O₃)对其活性有一定程度的调控作用, 且能够很好地改善催化剂的抗积碳性能; 当Ni的质量分数为10%、Al与Mg的质量比为1.7时, 催化活性较好, 750℃、0.1 MPa时, CH₄转化率达到92.3%, CO₂转化率达到98.3%; 反应100 h后, Ni/CeO₂(La₂O₃)–MgO–Al₂O₃催化剂上的CH₄转化率仍可维持在75%以上。

关键词: Ni/CeO₂(La₂O₃)–MgO–Al₂O₃ 催化剂; 制备; CH₄–重整; 合成气

中图分类号: O643:TQ426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672–1098(2013)02–0012–05

Preparation and Performance of Catalysts for Tri – reforming of

CH₄ – CO₂ to Synthesis Gas

XUE Ru – jun , WANG Qing – chao

(School of Chemical Engineering and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to improve activity and stability of catalyst being used in reaction of methane tri – reforming , Ni/LDHs was modified with rare earth (CeO₂, La₂O₃). Ce (La) – doped Mg – Al layered double oxide support (LDO) was obtained through calcination at 500C from the corresponding Ce (La) – doped Mg – Al layered double hydroxides (LDHs) , which was prepared by co – precipitation method. Then the active component nickel was loaded on Ce (La) – LDO by impregnation to reconstruct the Ni/LDHs precursor. After roasting, the NiO/ Ce (La) – MgO – Al₂O₃ catalyst was prepared from the precursor at last. The Ni, Mg, Al elements in the catalyst was analyzed via ICP – AES. The specific surface area of the catalyst was tested by the BET method. The phase of the catalyst was characterized by XRD. The active center of the catalyst was characterized via H₂ – TPR techniques. The catalytic performance of the catalysts for tri – reforming of CH₄ – CO₂ to Synthesis Gas were tested with the feed gas which composition was n(CH₄):n(CO₂):n(H₂O):n(O₂) = 1:0.5:1.8:0.1 under 750 ℃ and 0.1 MPa. The results show that the NiO component was distributed on the surface of NiO/Ce (La) – MgO – Al₂O₃ catalyst, and the reduction temperature of NiO was decreased largely. The doping component CeO₂

收稿日期:2013–01–06

作者简介:薛茹君(1963–),女,江苏常州人,教授,博士,从事工业催化、纳米材料、矿物加工等方面的教学与研究工作。

(or La₂O₃) within the catalyst could adjust catalytic activity in a certain extent, and could improve the resistance performance to coke deposit greatly. The catalytic activity is better when the mass fraction of Ni is 10%, the mass ratio of Al, and Mg is 1.7. Under the condition of 750 °C and 0.1 MPa, the CH₄ conversion rate is 92.3%, and CO₂ conversion rate is 98.3%. After having reacted 100 h, the CH₄ conversion rate of Ni/CeO₂ (La₂O₃) – MgO – Al₂O₃ catalyst still remains above 75%.

Key words: Ni/CeO₂ (La₂O₃) – MgO – Al₂O₃ catalyst; preparation; CH₄ – reforming; synthesis gas

CH₄ 和 CO₂ 是温室效应的主要气体, 随着全球能源危机的加剧和温室效应的日益严峻, 近年来各种富含甲烷气体的 CH₄ – CO₂ 重整研究逐渐升温, CH₄ – CO₂ 重整反应用于综合利用 CH₄ 和 CO₂、保护环境、制备合成气均具有重要意义。CH₄ – CO₂ 重整的研究关键是开发高活性及高稳定性的催化剂。文献[1]发现 CH₄ 与 CO₂ 摩尔比为 1.3 的混合气体, 在 850 °C、0.1 MPa 下于重整过程中, 钯、铱、铂、铑等贵金属催化剂都可高效的促进 CH₄ – CO₂ 转化为合成气, 有较好的活性和稳定性, 生成的 H₂ 和 CO 的比例接近于等摩尔, 转化后体系中只有极少量的 CO₂。然而贵金属催化剂的成本太高, 工业应用受到限制。因此, 国内外催化学者都聚焦于非贵金属催化剂, 其中 Ni 基催化剂的活性最好, 接近于 Ru, 且价格低廉, 因此倍受关注。Ni 基催化剂虽然具有较高的初活性, 但容易积碳而失活。如何提高 Ni 基催化剂的抗积碳性, 是目前研究的热点。

甲烷临氧三自热重整 (tri-reforming, 即在同一个反应器内同时进行 CO₂ 重整、甲烷水蒸汽重整以及甲烷部分氧化三个反应) 反应有 3 大优点: 过程能效高 (反应过程实现部分自供热)、合成气 H₂/CO 值适宜 (可以调节)、缓解催化剂积炭 (引入氧)。目前, 三重整催化剂的研究主要集中在 Fe、Co、Ni 等第Ⅷ族过渡金属和贵金属 (Pt) 催化剂上, 而辅以 La₂O₃、CeO₂ 或 ZrO₂ 等助剂有利于增加抗积炭性能和提高活性及稳定性^[2]。文献[3]¹⁵报道了稀土氧化物改性的镍基催化剂对天然气 – CO₂ – 水蒸汽 – 氧联合重整制合成气的反应活性, La₂O₃ 改性的镍基催化剂具有较高的 CH₄ 转化率和 H₂ 选择性, 经 MgO 或 CeO₂ 改性的镍基催化剂具有较高的 CO 选择性, 适当比例的混合稀土改性镍基催化剂可同时获得较高的 CH₄ 转化率和 CO、H₂ 选择性。

煤层气的主要成分为 CH₄ (> 80%) 和 CO₂ (约 7%), 目前主要用作直接能源, 其能源利用率低, 如何高效化利用煤层气能源引起了各国的关

注。我国煤层气资源丰富, 近年来已初步实现商业化开采。利用 CH₄ – CO₂ 重整技术对煤层气进行处理和再利用可谓意义重大。鉴于煤层气中 CO₂ 含量相对较低, 可以采用工业废气作为 CO₂ 原料 (如利用电站收集廉价、高浓度 CO₂ 气体)。以天然气为燃料的发电尾气中含有 8% ~ 10% 的 CO₂、18% ~ 20% 的 H₂O 和 3% ~ 5% 的 O₂, 其余为 N₂, 利用三重整过程可直接将尾气用于煤层气催化反应制合成气, 这不仅可以减少发电站温室气体的排放, 同时还利用了烟气中的水蒸汽, 降低能量的消耗。因此, 三重整制合成气可以实现廉价合成气的生产, 也是未来充分利用煤层气甲烷的一个有效途径。此外, 通过三重整反应将 CH₄ 和 CO₂ 转化为合成气, 然后再通过 GTL 过程将合成气转化为甲醇等容易储存和运输的液体燃料, 再通过 MTO 或 MTP 过程将甲醇转化为烯烃, 不仅可以充分利用煤层气, 而且得到液化产品, 会带来巨大的经济效益。

本文通过共沉淀法先制得铈 (镧) 掺杂改性的镁铝水滑石载体, 再以浸渍法负载镍活性组分后获得 Ni/LDHs 前驱体, 焙烧后得到 Ni/CeO₂ (La₂O₃) – MgO – Al₂O₃^[4]。着重考察原料气含 CH₄、CO₂、H₂O 和 O₂ 时催化剂在 750 °C、0.1 MPa 条件下 CH₄ 三自热催化重整的稳定性及积炭性能。

1 实验部分

1.1 载体的制备

采用共沉淀法合成 CeO₂ – LDHs。将一定量的 Mg (NO₃)₂ · 6H₂O, Al (NO₃)₃ · 9H₂O, Ce (NO₃)₃ · 6H₂O 溶解于 180 mL 去离子水中制成溶液 A, 其中 n (Mg) : n (Al) : n (Ce) = 1:2: (0、0.01、0.05、0.10); 称取一定量的 NaOH 和 Na₂CO₃ 溶于 80 mL 去离子水中制成溶液 B。室温下将溶液 A 和溶液 B 以共加法混合, 过滤, 洗涤滤饼, 于 80 °C 烘干, 得到 CeO₂ – LDHs。

将 Ce (NO₃)₃ · 6H₂O 换成 La (NO₃)₃ · 6H₂O,

同上制备方法制得 La_2O_3 - LDHs。

将 CeO_2 (La_2O_3) - LDHs 于 500 °C 焙烧 4 h, 得到铈(镧)掺杂改性的 MgAl 复合氧化物。

1.2 催化剂的制备

用 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 溶液过量浸渍 CeO_2 (La_2O_3) - MgAl 复合氧化物, 其中 Ni 占总金属元素物质的质量分数分别为 5%、10% 和 15%, 在室温条件下重构 12 h, 在 80 °C 干燥 12 h, 得铈(镧)掺杂的 Ni/MgAl 类水滑石前驱体, 在 500 °C 焙烧 4 h, 制得 Ni/CeO_2 (La_2O_3) - MgO - Al_2O_3 催化剂。

1.3 催化剂的表征

元素分析: 准确称取 10 mg Ni/MgAl 类水滑石前驱体, 用 10 mL 浓盐酸溶解, 稀释后用电感耦合等离子发射光谱仪 ICP - AES (IR IS Intrepid XSP II 型, 美国热电公司生产) 测定溶液中的 Ni、Mg、Al 元素含量, 计算 Mg/Al 、 $\text{Ni}/(\text{Mg} + \text{Al})$ 原子比。

比表面积测试: 测试仪器为美国 Quantachrome 公司生产的 NOVA3000e 型自动吸附仪, 试样经 300 °C 减压处理 2 h, 以 N_2 为吸附质, 液氮温度下吸附, 室温脱附, BET 公式计算比表面积。

XRD 物相分析: 测试仪器为日本岛津 XRD - 6100 型 X - 射线衍射仪, $\text{CuK}\alpha$ 射线, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA。

H_2 - TPR 表征: TPR 实验在天津先权公司生产的 TP25000 型多用吸附仪上进行, 催化剂用量约 50 mg, 还原气为 10% H_2/Ar , 流量 20 mL/min, 升温速率 10 °C/min。

1.4 催化剂性能评价

催化剂稳定性评价采用固定床反应器, 催化剂用量为 150 mg (60 ~ 80 目), 反应前催化剂于 500 °C 用氢气还原 1 h。反应条件为: 原料气组成 $n(\text{CH}_4):n(\text{CO}_2):n(\text{H}_2\text{O}):n(\text{O}_2) = 1:0.5:1.8:0.1$ (摩尔比), 催化剂上空速为 12 000 mL/(h · g), 反应温度 750 °C、0.1 MPa。反应气体产物以 GC102M 型色谱仪在线分析, 氦气作载气, 碳分子筛色谱柱, TCD 检测, 催化剂的稳定性以 CH_4 转化率和反应时间的关系表示。

积炭性能评价是将催化剂在 750 °C 温度下反应 100 h 后, 考察其重量变化, 催化剂反应前后的重量差值即为催化剂的积炭量。

2 结果与讨论

2.1 XRD 表征

共沉淀法合成的 CeO_2 (La_2O_3) - LDHs 样品的 XRD 谱如图 1 所示。在 11.53°、23.44° 和 34.7° 出现了水滑石材料的 (003)、(006)、(009) 等晶面衍射峰, 说明合成的样品具有类水滑石结构。焙烧后镁铝类水滑石发生分解, 层状结构消失, 成为镁铝复合氧化物 (MgO - Al_2O_3), 其水滑石的特征衍射峰不复存在。利用水滑石的记忆效应可以在浸渍时重新获得水滑石层状结构, 制备负载型 Ni/MgAl - LDHs, Ni 主要分布在载体的表面, 再焙烧制得 Ni/CeO_2 (La_2O_3) - MgO - Al_2O_3 催化剂。

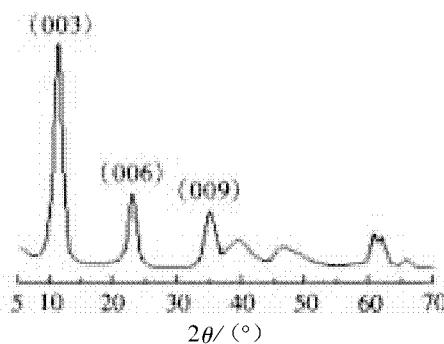
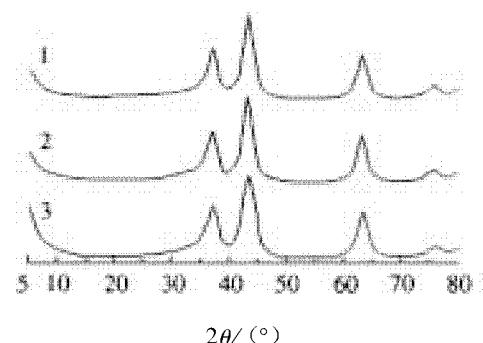


图 1 CeO_2 (La_2O_3) - LDHs 样品的 XRD 谱图

500 °C 焙烧后产物的 XRD 谱如图 2 所示, 焙烧后水滑石的特征衍射峰不复存在, 说明镁铝类水滑石发生了分解, 层状结构消失。焙烧产物中仅出现了 NiO 的物相峰, 没有出现 CeO_2 (La_2O_3) 物种的衍射峰, 这可能是由于 CeO_2 (La_2O_3) 量少, 分散在 MgO - Al_2O_3 晶格中, 没有成为单独存在的物相。而由于焙烧温度 (500 °C) 较低, Al_2O_3 的结晶度不高, 所以也没有出现 Al_2O_3 的衍射峰。



1. Ni/MgO - Al_2O_3 ; 2. Ni/CeO_2 - MgO - Al_2O_3 ;
3. $\text{Ni}/\text{La}_2\text{O}_3$ - MgO - Al_2O_3

图 2 Ni/CeO_2 (La_2O_3) - MgO - Al_2O_3 的 XRD 谱图

经过高温焙烧得到的 MgO-Al₂O₃ 复合氧化物, Mg、Al 达到原子水平的混合, 在提高载体比表面积的同时(比表面积测试值是 164.5 m²/g), 改善了单一 Al₂O₃ 载体表面酸性大的缺点, 增强了催化剂的抗积碳性能。

2.2 元素分析结果

铈(镧)掺杂量最低的 Ni/MgAl 类水滑石前驱体的元素组成测定结果(质量分数)为: Ni 9.78%, Al 19.95%, Mg 12.89%, O 50.03%, Na 0.64%, Ce 6.71%, (La 5.83%) 表明 Ce (La) 元素已成功引入到水滑石结构中。

2.3 H₂-TPR 表征

Ni/MgAl-LDHs 的 H₂-TPR 谱图如图 3 所示, 结合 MS 监测还原过程中的 H₂ 消耗峰和 CO₂、H₂O 脱除峰。样品在 300~400 °C、500~700 °C 出现 2 个耗氢峰, 分别对应层板中的镍及体相中镍被还原; 而直接制备的 MgO-Al₂O₃ 混合氧化物为催化剂载体时, 即便还原温度 >800 °C, NiO 的还原度也很低^[4-5]。这说明在高温焙烧过程中, 水滑石层状结构适度削弱了 Ni 物种与 MgO、Al₂O₃ 间的强相互作用, 抑止了 NiO-MgO 固溶体及 NiAl₂O₄ 尖晶石的生成, 降低了镍的还原温度。CO₂ 峰在 250~360 °C 出现, 对应于层间碳酸根分解; H₂O 峰分别在 180~230 °C、230~430 °C、500~780 °C 出现, 分别对应于层间水分子脱除、层板中的羟基脱水和 NiO 的还原出水及体相中 NiO 的还原出水。这与耗氢峰的温度基本一致。由图 3 可以确定催化剂的焙烧温度取 500 °C, 还原温度取 600 °C 最为适宜。

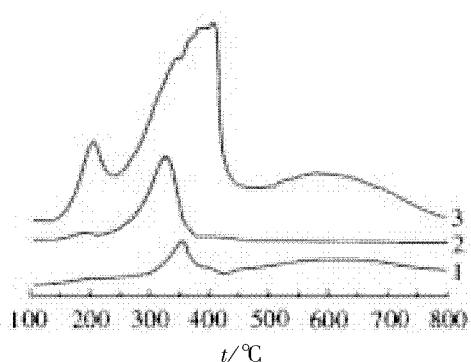


图 3 Ni/MgAl-LDHs 的 H₂-TPR-MS 谱图
1. H₂ 消耗量; 2. CO₂ 产量; 3. H₂ 气下水的产量

2.4 Ni/CeO₂(La₂O₃)-MgO-Al₂O₃ 的活性

原料气组成为 $n(\text{CH}_4):n(\text{CO}_2):n(\text{H}_2\text{O})$:

$n(\text{O}_2)=1:0.5:1.8:0.1$, 750 °C、0.1 MPa 时, CeO₂(La₂O₃) 掺杂改性前后 Ni/MgO-Al₂O₃ 催化剂的活性如图 4 所示。使用 100 h 后各催化剂的积碳情况如表 1 所示。

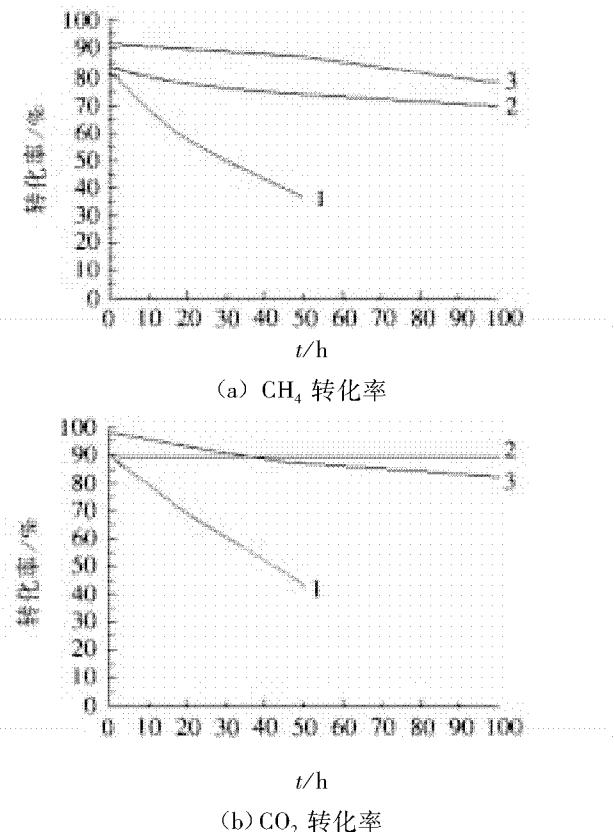


图 4 Ni/CeO₂(La₂O₃)-MgO-Al₂O₃ 催化剂的活性

由图 4 可以看出, CeO₂(La₂O₃) 掺杂改性都提高了 Ni/MgO-Al₂O₃ 催化剂对 CH₄ 和 CO₂ 的转化率; 也大大改善了催化剂的稳定性, 且 CeO₂ 与 La₂O₃ 对催化剂稳定性的改性效果非常接近。一般认为, La₂O₃ 和 CeO₂ 在 CH₄-CO₂ 重整用镍基催化剂中分别起结构型助剂和电子型助剂作用^{[3]16}。CeO₂ 掺杂改性使 Ni 基催化剂的供电子能力增强, 有利于其提供电子给 CO₂ 分子的反键 π^* 轨道, 使其活化分解, 故而使 CO₂ 的转化率有所增大。La₂O₃ 掺杂改性使 Ni 基催化剂的 Ni(110) 晶面的含量增加, 提高了其对 CH₄ 的离解活性^{[3]18}, 故而 La₂O₃ 掺杂改性后 Ni/MgO-Al₂O₃ 催化剂的活性有所提高。CeO₂(La₂O₃) 掺杂改性提高催化剂稳定性的原因可能是催化剂提供电子给 CO₂ 分子的反键 π^* 轨道, 使其活化分解, 并在催化剂表面产生有消炭作用的原子氧(O), 但不会进一步提供电子给 CO 分子的反键 π^* 轨道, 导致催化剂因 CO

歧化而积碳失活,故能够提高催化剂的稳定性^[6]。且CeO₂具有储放氧功能,以CeO₂掺杂改性载体材料能够改善载体的晶格氧-氧空穴循环^{[3][18]},实现表面积炭的转化,从而增强催化剂抗积炭性能,增加催化剂的稳定性。因此Ni/CeO₂-MgO-Al₂O₃催化剂的稳定性比Ni/La₂O₃-MgO-Al₂O₃的好。

表1 催化剂重整反应后的积碳情况

催化剂	时间/h	积碳量/%
Ni/MgO-Al ₂ O ₃	50	21.1
Ni/CeO ₂ -MgO-Al ₂ O ₃	100	5.8
Ni/La ₂ O ₃ -MgO-Al ₂ O ₃	100	6.9

由表1中数据可知,CeO₂(La₂O₃)掺杂改性都提高了催化剂的抗积炭性能,从而提高了催化剂的稳定性和使用寿命。

3 结论

1)采用重构法制备的催化剂前驱体具有水滑石的层状结构,500℃焙烧后得到MgO-Al₂O₃复合氧化物负载的NiO,其比表面积大,而NiO晶粒细小,主要分布在催化剂表面,这大大降低了NiO的还原温度(600℃)。

2)CeO₂(La₂O₃)掺杂改性后,Ni/MgO-Al₂O₃催化剂的抗积炭性能都有所提高,从而避免了催化剂的积炭失活,增加了催化剂的稳定性。且CeO₂与La₂O₃对催化剂的掺杂改性效果非常接近。

3)CeO₂(La₂O₃)掺杂改性的Ni/MgO-Al₂O₃催化剂对CH₄三自热催化重整制合成气反应有很好的催化性能,当原料气组成为n(CH₄):n(CO₂):

n(H₂O):n(O₂)=1:0.5:1.8:0.1,750℃、1.0×10⁵Pa时,CH₄转化率达到92.3%,CO₂转化率达到98.3%;反应100 h后,Ni/CeO₂(La₂O₃)-MgO-Al₂O₃催化剂上的CH₄转化率基本上维持在75%左右。

参考文献:

- [1] MURADOV N, SMITH F. Thermocatalytic conversion of landfill gas and biogas to alternative transportation fuels [J]. Energy & Fuels, 2008, 22 (3): 2 053 - 2 060.
- [2] SONG C S, PAN W. Tri-reforming of methane: a novel concept for catalytic production of industry useful synthesis gas with desired H₂/CO ratio [J]. Catalysis Today, 2004, 98 (4): 463 - 484.
- [3] 史克英,徐恒泳,张桂玲,等.天然气-二氧化碳-水蒸气-氧转化制合成气的研究——稀土助剂的作用[J].催化学报,2002,23(1):15-18.
- [4] DAZA C E, CABRERA C R, MORENO S, et al. Syngas production from CO₂ reforming of methane using Ce-doped Ni-catalysts obtained from hydrotalcites by reconstruction method [J]. Appl Catal, A, 2010, 378 (2): 125 - 133.
- [5] WOJCIECH G. Acid-base properties of Ni-MgO-Al₂O₃ materials [J]. Appl Surf Sci, 2011, 257 (7): 2 875 - 2 880.
- [6] LUCRÉDIO A F, JERKIEWICZ G, ASSAF E M. Cobalt catalysts promoted with cerium and lanthanum applied to partial oxidation of methane reactions [J]. Appl Catal, B, 2008, 84 (1-2): 106 - 111.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

激光诱导荧光技术的煤矿水源水质监测研究

周孟然, 聂梦雅

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:为了能够快速准确地判别煤矿突水水源, 提出了基于激光诱导荧光(LIF)技术的煤矿突水水源监测方法, 该系统以MC9S12XS128B微处理器为核心, 构建了共聚焦式检测子系统, 通过USB2.0协议实现硬件采集系统与上位机通讯的方案。通过对反馈回的激光诱导荧光光谱进行分析, 可以定量分析煤矿水源中水质离子的浓度, 因此就可以实时监测到突水水源的变化。该方法克服了传统方法无法实现对大面积水域的实时在线监测的难题, 能准确快速地得到结果。本研究可进行煤矿未知水样的水源判别, 为煤矿的安全生产提供决策依据。

关键词:煤矿突水; 激光诱导荧光; 光谱分析; 监测系统

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0017-03

Monitoring of Coal Mine Water Quality with Laser Induced Fluorescence Technology

ZHOU Meng - ran, NIE Meng - ya

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to quickly and accurately determine inrush water source in coal mines, inrush water source monitoring method based on laser induced fluorescence (LIF) technology was proposed. The system uses MC9S12XS128B microprocessor as the core to build confocal detection subsystem, and communication solution of hardware acquisition system with host computer is realized with USB2.0 protocol. On the basis of fed back laser-induced fluorescence spectroscopy analysis, quantitative analysis of water ion concentration can be done, real-time monitoring of inrush water source changes can be realized. By use of the method it was solved that the problem with traditional method, by which large area of waters can not be monitored in real time and on line, and monitoring results can be got accurately and quickly. The method can be used to discriminate unknown mine water source, which provides a decision-making basis for coal mine production safety.

Key words: Coal mine water inrush; laser induced fluorescence; spectrum analysis; monitoring system

近年来, 随着经济的高速发展, 矿产资源需求量急剧上升, 于是要求矿区加大向深部开采, 从而导致了各种矿坑突水事故频繁发生, 造成了严重的财产损失和人员伤亡。因此, 迅速判定突水水源及采取合理有效的治理措施已成为矿区安全中亟待解决的问题^[1]。

随着激光诱导荧光技术的出现和发展, 该技

术逐渐应用于水体水质的监测方面, 其具有快速、实时、非接触和不需试剂等优点^[2]。采用激光诱导荧光技术探测矿井水源的突变, 是基于通过激光激发矿井水源水体中的有机物发射荧光, 接收后向散射荧光进行分析得出水体有机物种类和浓度信息, 从而得到突水水源的变化^[3]。

1 激光诱导荧光技术原理

物质的波谱特性反映物质本身的属性和状态,不同的物质,其波谱特性不同。水体的各种光学活性物质对光辐射的吸收和散射性质决定了水体的光谱特征^[4]。

激光诱导荧光的方法是使激光器调谐到所选择的激发跃迁的中心频率后固定不变,然后用一个光谱仪测量这个能级所发射的荧光光谱来获得这个能级跃迁后的各终止分子能级信息,因为不同物质的激发能级不同,放出的荧光也是特异的,所以说每种物质的荧光光谱都是恒定的,即唯一性。根据荧光谱线的波长可以对物质进行定性分析。在一定实验条件下,荧光强度与被测物质的浓度成正比,据此可以对物质进行定量分析:

荧光是由物质吸收光能后发射而出,因此,溶液的荧光强度 F 和溶液吸收光能的程度以及物质的荧光量子频率有关。

$$F \propto (I_0 - I_t) \rightarrow F = j(I_0 - I_t) \quad (1)$$

$$\frac{I_t}{I_0} = 10^{-\varepsilon bc} \rightarrow I_t = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon bc} \quad (2)$$

j 为常数,取决于荧光物质的量子效率,根据 L-B 定律:

$$F = K'(I_0 - I_0 \cdot 10^{-\varepsilon bc}) = K'I_0(1 - 10^{-\varepsilon bc}) = K'I_0(1 - e^{-2.303\varepsilon bc}) \quad (3)$$

将式(3)展开,得

$$F = K'I_0 \left(2.303\varepsilon bc - \frac{(2.303\varepsilon bc)^2}{2!} + \frac{(2.303\varepsilon bc)^3}{3!} + \dots \right) \quad (4)$$

当 $2.303\varepsilon bc \leq 0.05$ 时(浓度很小,溶液较稀时),式(4)括号内第一项以后的各项均可忽略不计,所以:

$$F = 2.3jI_0\varepsilon cl \quad (5)$$

式中: j 为荧光物质的荧光效率; I_0 为入射光强度; ε 为荧光物质的摩尔吸光系数; c 为荧光物质的浓度; l 为样品池的厚度。

此式是荧光定量分析的基础,即可通过测量物质的荧光强度来测定其浓度。

对于一荧光物质的稀溶液,有

$$F = K \cdot C$$

即在稀溶液($A \leq 0.05$)情况下,当实验条件不变,即 j 、 I_0 、 l 不变时,荧光强度与该物质的浓度

成正比^[5-6]。

2 激光诱导荧光水源探测系统

2.1 系统原理框图

煤矿水源突水探测系统的基本构成如图 2 所示^[7]。其基本工作原理:从激光器发出的激光经二向色镜反射至主物镜,主物镜将激光束聚焦在监测点上,检测点处的水在激发下产生荧光,荧光由主物镜捕获后变成平行光,通过二向色镜后被聚光透镜聚焦至针孔。通过针孔的光再经滤光片滤除荧光以外的杂散光,最后被光电探测器接收,经电子电路放大后,经数据采集由计算机处理。由于可以采集煤矿井下水源,经过光谱分析后,得到水源中各离子浓度,从而得到水源水质的变化,进一步对煤矿突水情况进行分析。

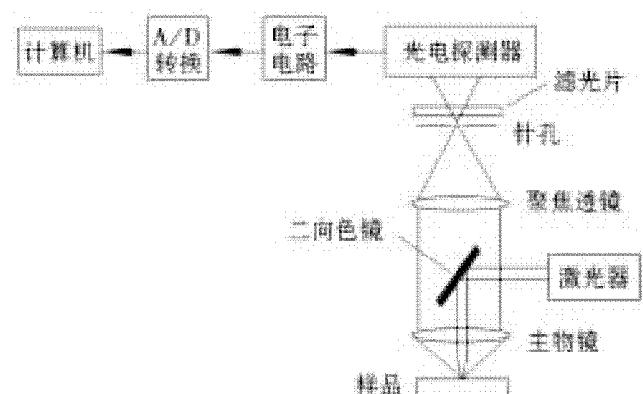


图 1 煤矿水源突水探测系统基本框图

2.2 系统构成

1) 激光器。与普通光源相比,激光除了单色性好、聚光性能优,更重要的是激光作为相干光源具有较高的光子流量,大大地提高了荧光检测的信噪比。激光器的选择主要遵循以下原则:① 根据所需激发光的光谱覆盖范围确定光源种类;② 考虑光源的功率及转换效率;③ 考虑光源的稳定性和可靠性;④ 考虑光源的结构、尺寸、寿命、价格等。因此,本文采用的激光器是 3 倍频 YAG 激光器,可同时输出 5 个波长,即 1 064 nm、532 nm、355 nm、266 nm 和 213 nm,其输出功率为 50~850 mJ,脉冲宽度为 6~20 ns,具有很好的输出功率,稳定性好,可作为激光诱导荧光检测的激发光源。

2) 光学透镜。考虑到其与荧光采集镜头的位阻因素,激光诱导荧光的聚光镜头应尽量选用焦距长的镜头。荧光采集镜头对激光诱导荧光实验

系统灵敏度的影响较大。数值孔径 (N_A) 是选择镜头的一个重要指标。透镜的采光效率与周围介质的折光指数 (n) 有如下关系:

$$\text{采光效率} = \sin^2 \left[\frac{\arcsin \left(\frac{N_A}{n} \right)}{2} \right]$$

可见,透镜的 N_A 值越大,其采光效率越高。但 N_A 大的透镜,其焦距很小,给检测设计带来一定的空间阻碍效应。同时,由于所产生的荧光波长不一,采用透镜收集时,给光线汇聚带来一定的影响。

3) 光电探测器、滤光片。滤光片有多种类型,比如:带通,短波通,长波通,窄带通。在系统中,滤波片的选择主要考虑激光波长。多波长荧光检测

器(多波长荧光检测器用若干个滤光片做单色器,因此又称为固定波长荧光检测)用短通路剪切式滤光片或宽带的光通带滤光片插在光源与流通池之间,作为激发滤光片(第一滤光片)限制最大激发波长。

3 实验数据分析

采集淮南煤矿位于 -700 m 西区行人暗斜井处 9 煤顶板砂岩的水源作为样品,样品激发的荧光经过光学系统接收后,通过电子电路放大,A/D 转换等一系列信号处理工作,待响应度校正后在荧光屏上显示光谱曲线(见图 2)。

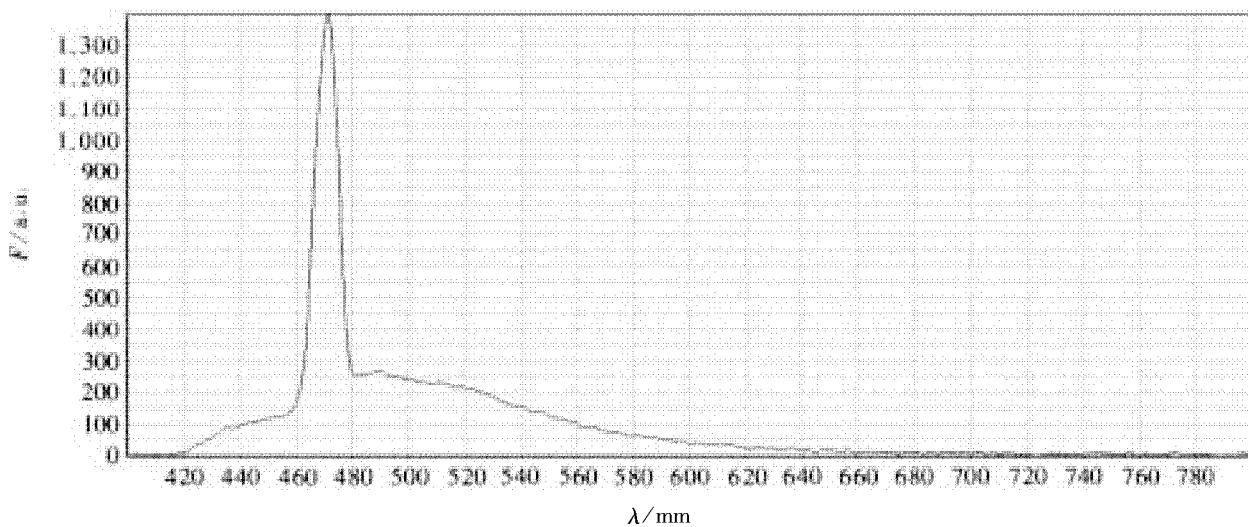


图 2 激光诱导荧光激发波长与荧光强度的关系

通过荧光光谱测定发现:对煤矿层位 9 煤顶板砂岩处水源来说,在 473 nm 波长处存在一个小尖峰。通过该荧光光谱,得出应用激光诱导荧光光谱技术可以利用光谱的有效信息,从而确定该水质中各离子的浓度,经过计算得出的结果如表 1 所示,将各含水层的评价标准(见表 2)与表 1 相比较可得出,该水质来源于顶板砂岩,与采样信息符合。通过取样分析突水水质与主要含水层水质特点,根据水质特征判断出可能的水源,该煤矿是主要含水

层有第四系上部含水层(一含)、第四系下部含水层(二含)、煤系含水层、煤 9 顶板砂岩含水层。经过反复调研发现各含水层水质成份中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 是煤矿突水时数值差异较大的特征离子,以各含水层(体)水质指标为背景,用特征离子与特征指标的变化幅度大小作为预警阈值,对煤矿突水预警,并在开采过程中,不断监测煤系地层地下水的水质变化,判断突水的可能性,及时预防突水事故,为煤矿安全开采提供依据。

表 1 水质资料

$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	pH	t/°C
148.83	74.15	1 153.4	167.26	1 325.83	930.42	6.9	22

表 2 含水层的评价标准表

	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	pH	t/°C
顶砂(I)	167	52	994	198	1 074	900	7	21
野灰(II)	777	163	1 099	89	1 921	1 999	7.15	38
奥灰(III)	846	124	917	117	1 742	1 943	7.5	43

(下转第 47 页)

树突细胞算法的形式化描述

邢建强, 方贤进

(安徽理工大学计算机科学与工程学院, 安徽 淮南 232002)

摘要: 尽管 DCA 算法在各种入侵检测方面的成功应用证实了 DCA 在检测率方面具有很好的性能, 但到目前为止, 对 DCA 算法仍然缺乏一种严谨的、形式化的定义与描述。在总结前人的研究成果的基础之上, 通过采用数学函数定义方法, 定义了算法元素的数据结构, 访问数据结构的过程操作函数, 目的在于对 DCA 算法进行简单的形式化描述, 将其应用于 DCA 算法中的伪代码当中, 具有一定的有效性, 为对 DCA 算法进行理论分析奠定了基础。

关键词: 人工免疫系统; 树突细胞算法; 形式化描述

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0020-03

Formal Description Of Dendritic Cells Algorithm

XING Jian - qiang, FANG Xian - jin

(School of Computer Science and Engineering, Anhui University Of Science and Technology, Huainan Anhui 232002, China)

Abstract: Despite that the successful application of the DCA algorithm in various intrusion detection confirmed that DCA has good performance in terms of detection rate, but so far, the algorithm is still lacking in rigorous, formal definition and description. Based on the previous researches, using mathematical function definition methods, data structure of elements of DCA and the process operation function to access the data structure were defined, in order to simplify formal description of the algorithm, and they were applied into the pseudo code of DCA, which has validity on some degree, and laid foundation for the theoretical analysis of DCA.

Key words: danger theory; artificial immune system; dendritic cells algorithm; formal description

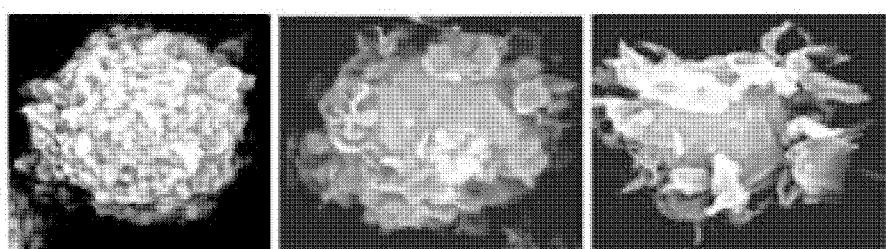
自从 2005 年由 Greensmith 提出 DCA 算法后, 该算法相继成功应用于实时嵌入式系统超时检测, SYN 扫描检测问题、僵尸网络 Botnet 检测问题^[1-4]等问题。这些应用不仅证实了 DCA 在检测率方面具有很好的性能, 而且与其它系统(如自组织映射 SOM、NSA、C4.5 决策树算法)相比降低了误警率。

但到目前为止, 对 DCA 缺乏一种严谨的、形式化的定义与描述, 如果一个算法缺乏形式化的描述, 则算法缺乏完备性, 会对算法的理解产生歧义, 从而导致算法的不正确应用与执行。本文首先对 DCA 算法基本原理进行简要的概述, 然后对 DCA

算法进行简单的形式化描述, 包括定义算法元素的数据结构、定义访问数据结构的过程操作函数。

1 DCA 算法的生物学机理

Danger theory 认为树突细胞(Dendritic Cells, DCs)是先天性免疫系统中的一种抗原呈递细胞(Antigen Presenting Cells, APC), 它负责对组织中各种分子信号进行组合, 并且有能力通过关联这些分子信号, 然后与局部组织环境中的以抗原为表现形式的标志物进行组合来激活或抑制免疫系统。



收稿日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61240023)

作者简介: 邢建强(1989-), 男, 山东日照人, 在读硕士, 研究方向: 领域信息安全。

DCs 以三种分化状态中的一种来执行其免疫功能。其初始为不成熟状态 (immature), DCs 暴露于几种分子信号的组合, 如果 PAMPs 和 Danger signals 信号的浓度更高, 则 DCs 转变为完全成熟状态 (fully mature), 指导与激活自适应免疫系统。相反, 如果组织环境中 Safe signals 信号浓度更高, 则引起 DCs 转变为半成熟状态 (semi - mature), 此时 DCs 对自适应免疫系统起到抑制作用。Inflammation 信号扮演一个对其他三类信号的自然放大器的作用。DCs 的三种状态 immature, semi - mature 和 fully mature。

DCA 算法的基本流程:

- 1) 未成熟 iDC 进入既机体组织, 采集 PAMP, 危险信号 DS, 安全信号 SS, 发炎信号 IS 以及抗原。
- 2) iDC 处理信号, 输出 CSM 信号, 并产生成熟信号 SMS 因子, 半成熟信号 MATS。
- 3) 比较 DC 内部累加的的 CSM, 如果 CSM 大于给定阀值, DC 回到淋巴结, 否则继续进行 1 和 2 步骤的操作。
- 4) DC 从机体组织回到淋巴结后, 比较 DC 输出的 SMS 和 MATS, 如果 SMS 大于 MATS, 那么 DC 变成半成熟状态, 提呈抗原 context 为 0, 表示抗原为正常抗原; 否则, DC 变成成熟状态, 提呈抗原 context 为 1, 表示抗原为异常抗原。DCA 算法给出了抗原异常的程度, 异常程度可以上下文环境成熟抗原值 (mature context antigen value, mcav) 表示。mcav 可以用如下公式表示

$$mcav = \frac{o_1}{o_1 + o_2}$$

以上公式中 o_1 是异常信号 MATS 的强度, o_2 是正常信号 SMS 的强度。

2 对 DCA 算法一般化形式描述

2.1 对 DCA 数据结构的定义

定义 $\text{Signal} \subseteq R^3$, $\text{Antigen} \subseteq N$, 为两种类型的输入数据, 在制定的时间期限 $\text{Time} \subseteq R$ 内, 输入数据被定义为 $S: \text{Time} \rightarrow \text{Signal} \cup \text{Antigen}$, $S(t)$ 表示输入数据, $t \subseteq \text{Time}$, Signal 中元素对应于 DCA 算法中的三类信号, 用三维向量来表示, 通常被规格化并预先定义在非负数范围内, Antigen 中的元素是分类值, 用自然数表示, 没有次序关系。

定义 W 为信号转换权值矩阵, 该矩阵有 3 行 2 列, $W_{ij} \subseteq R$, $i = 1 \cdots 3$, $j = 1 \cdots 2$ 。权值矩阵用于将三

类输入信号转换为二类输入信号, 它的值通常由用户预先确定, 其值的定义是以生物免疫学的实验为依据, 在算法执行期间保持常数。

拟用 List (A) 表示类型 A 的列表。用 Population 表示 DC 群体集合, 用 $N = |\text{Population}|$ 表示群体大小, 一个 DC 对象的数据结构由下列几个域组成:

1) 唯一的索引值 $i \in \{1, 2, \cdots, N\}$;

2) 生命期, 也就是 DC 的状态迁移阀值 $I: \text{Population} \rightarrow R$;

3) 信号情况的初始值 $K: \text{Population} \rightarrow R$, 其初始值为 0;

4) 一个列表 List (Antigen) 用于存储 DC 的抗原情况。

信号情况 K 是对 DC 已处理信号值的测量, 而抗原情况 List (Antigen) 是对被取样的抗原个数的记录, 每个 DC 对象都能够通过调用相关运算函数来更新其内部的数据结构之值。

DC 的输出存储在一个列表 $N \times R$ 中, 拟用 $lst(j)$ 表示 lst 的第 j 个元素, π_1 和 π_2 为投影函数分别用于获取一个二维向量的第一维和第二维的值。

2.2 对 DCA 中的过程操作的定义方法

为了对 DCA 的数据结构进行访问, 必须调用一系列的过程操作, 这些过程操作可以在函数层描述算法行为, 它们也是 DCA 最基本的算法元素, 形式化描述这些操作的目的是为了更简单、更清晰、更严谨地表达。

定义 Append (x, X) 为一个普通的函数用于将一个元素 x (二维向量) 追加到列表 X (一个二维向量列表) 中。 x 的类型决定了 X 的类型, 它们可以是 $N \times R$ 或 $R \times R$ 。此操作不同于集合的“并”, 因为列表中重复的元素不被删除。

在开始时刻 ($t = 0$), 算法通过指派 $I(j)$ 和 $K(j)$ 的初始值来初始化 DC 群体中的所有 DC 对象。此过程可定义为“DC initialization”。每个 DC 对象的生命期 $I(j)$ 的初始值可以用密度函数 (density function) 来生成, 这样既能满足均匀分布也能满足高斯分布。

定义 O 为信号转换函数, $O: \text{time} \rightarrow R \times R$

$$O(t) = \begin{cases} S(t) \cdot W^t, & S(t) \in \text{Signal} \\ \text{Null}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 \cdot 表示两个矩阵的乘法操作, 只要 $S(t) \in \text{Signal}$, 该操作就执行一个三维向量与 3×2 转换矩阵的乘法操作, 产生另一个二维向量组成了 2 个输

出信号,称之为CSM和 K ,如果 $S(t) \in \text{Signal}$ 则函数返回空值Null。

定义 F 为生命期更新函数, $F: \text{time} \times \text{Population} \rightarrow R$

$$F(t, i) = \begin{cases} I(i), & t = 0 \\ I(i) - \pi_1(O(t)), & F(t-1, i) \leq 0 \\ F(t-1) - \pi_1(O(t)), & \text{otherwise} \end{cases}$$

当 $t=0$ 时, F 的初始值 $I(j)$ 就是一个DC对象的生命期初始值,它反复减去CSM,信号值直到终止条件 $F(t-1, i) \leq 0$ 满足,然后其又恢复到其初始值 $I(j)$ 。

定义 G 为信号情况更新函数, $G: \text{time} \times \text{Population} \rightarrow R$

$$G(t, i) = \begin{cases} K(i), & t = 0 \\ K(i) + \pi_2(O(t)), & F(t-1, i) \leq 0 \\ G(t-1) + \pi_2(O(t)), & \text{otherwise} \end{cases}$$

当 $t=0$ 时, G 的初始值 $K(i)$ 就是一个DC对象所存储的初始信号值,它反复增加信号直到终止条件满足,然后其又恢复到其初始值 $K(i)$ 。

定义 H 为抗原情况更新函数, $H: \text{time} \times \text{Population} \rightarrow \text{List(Antigen)}$

$$H(t, i) = \begin{cases} \text{Append}(S(t), H(t-1, i), S(t) \in \text{Antigen}) \\ \text{Null}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

初始时 H 为空,当新的抗原个体到达时,它被DC取样并存储到自己的列表中直到终止条件满足。被选择的DC对象的索引号定义为 $i \equiv \theta \bmod N$,其中 θ 为到时间 t 时抗原个体的数量,这就是所谓的连续采样规则。

此处 r 与 ∂ 分别是DC对象中记录的信号和抗原情况,当终止条件满足时该函数把一个DC的输出(二维向量)追加到输出列表lst中,lst中的已处理信息用于产生分析阶段最后的检测结果。

定义 $R(t, i) = \{(r, a) | r = G(t, i) \wedge a \in H(t, i)\}$ 为一个DC对象的输出,则输出记录函数定义为: $(F(t, i) \leq 0) \wedge (t > 0) \Rightarrow \text{Append}(R(t, i), \text{lst})$

此处 r 与 a 分别是DC对象中记录的信号和抗原情况,当终止条件满足时该函数把一个DC的输出(二维向量)追加到输出列表lst中,lst中已处理信息用于产生分析阶段最后的检测结果。

定义每个抗原类型 α 的计数函数 $C: N \times N \rightarrow$

$\{0, 1\}$

$$C(j, \partial) = \begin{cases} 1, & \pi_1(\text{lst}(j)) = \partial \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

函数 R 计算所有与抗原类型 ∂ 相关的值的总和。对每个抗原类型都执行函数 C 与函数 R 。涉及到对整个lst表的扫描。

定义异常度计算函数 $K(\partial)$ 为

$$\beta = \sum_{j=0}^{n-1} C(j, \partial) \Lambda \gamma = \sum_{j=0}^{n-1} R(j, \partial)$$

$$\Rightarrow K(\partial) = \frac{\gamma}{\beta}$$

通过预先定义的阀值就能够通过 $K(\partial)$ 函数进行异常检测分类,阀值的定义依赖于所使用的数据集的基本特性。如果 $K(\partial)$ 大于预先定义的阀值就将抗原类型 ∂ 分类为异常,否则为正常。

3 结束语

本文在总结前人研究成果的基础上,首先阐明DCA的生物学机理,并给出了算法元素的数据结构、定义访问数据结构的过程操作函数。

针对DCA算法的下一步研究方向包括针对DCA算法在函数层使用定量计算、集合论、基本的计算功能例如加、乘、递归的方法等方面对算法进行清晰的描述。解决了DCA算法形式化定义问题之后,还欲对算法的时间复杂度、空间复杂度、算法的自动机模型等理论方面做进一步研究。

参考文献:

- [1] GREENSMITH J. The Dendritic Cell Algorithm [D]. University of Nottingham: Nottingham, UK. 2007:89–115.
- [2] LAY N, BATE I. Applying Artificial Immune Systems to Real – time Embedded Systems [C]// Evolutionary Computation, 2007, CEC 2007. Univ. of York, USA. 2007:3 743 – 3 750.
- [3] AI – HAMMADI Y, AICKELIN U, Greensmith J. DCA for Bot Detection [C]// Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. Hong Kong, China. 2008:1 807 – 1 816.
- [4] TOLERANCE M P. Danger and Extended Family [J]. Annual Review of Immunology, 1994, 12 (1):991 – 1 045.

(责任编辑:李丽,范君)

基于改进人工鱼群算法的 PID 控制器参数优化

吴姗姗, 黄友锐

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:针对基本人工鱼群算法易陷入局部极值, 难以保证得到全局最优解的问题, 提出基于改进人工鱼群算法的 PID 控制器参数优化方法, 在其基础上, 引入了攻击行为, 即当水中的食物稀少时, 鱼就会因为抢夺食物而发生攻击其他鱼的行为。通过仿真实验证明, 具有攻击行为的人工鱼群算法有助于引导人工鱼跳出局部最优解域, 在全局范围内搜索最优解, 提高了 PID 控制器参数优化的效率。

关键词:人工鱼群算法; PID 控制器; 优化

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)02-0023-04

Optimization of PID Controller Parameters Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm

WU Shan-shan, HUANG You-rui

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Due to basic artificial fish swarm algorithm easy to fall into local extremum, and difficult to guarantee to get global optimal solution, PID controller parameters optimization method based on improved artificial fish swarm algorithm was proposed, in which aggressive behavior was introduced, that is, when scarcity of food in water, the behavior that a fish attacks other fishes occurs because of food snatching. The results of simulation experiments showed that the artificial fish swarm algorithm with the aggressive behavior can help the artificial fish to jump out of the local optimal solution domain and seek it in the global range so that improve the efficiency of the PID controller parameters optimization.

Key words: artificial fish swarm algorithm; PID controller; optimization

PID 控制以其结构简单易操作, 控制效果好等特点, 已成为工业生产过程中最常用的控制方法, 对 K_p, K_d, K_i 三个参数进行优化可以使其控制性能达到令人满意的效果^[1]。传统的 PID 控制器对于线性和不变的系统的控制效果比较好, 而对于其他的系统的控制效果却是差强人意。随着智能算法的不断发展, 一些专家提出了新的优化方法, 将智能算法引入到对 PID 控制器参数的优化过程中。但是这些智能优化方法也存在某些不足, 如遗传算

法编码过程冗余, 计算量大, 模糊推理算法的参数和神经网络学习算法中的一些参数选择确定比较复杂, 没有一种系统的方法。

受到鱼群在水中觅食的启发, 文献[2]提出了一类新的算法, 即人工鱼群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)。水中的鱼寻找食物往往是通过自身或者追逐其他伙伴而寻觅到的, 因此鱼群通常都会聚集在水中食物最丰富的地方。根据鱼的这一习性, AFSA 利用构造的人工鱼来模仿真

收稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073101); 安徽高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2011A095)

作者简介: 吴姗姗(1986-), 女, 安徽淮南人, 在读硕士, 研究方向: 智能控制。

实鱼,通过模拟觅食、随机、聚群和追尾等一系列行为,来实现寻优。此算法操作简单,易实现,且具有较强地取得全局极值的能力。但是人工鱼群算法又存在不足和缺点,如后期搜索时盲目性大,运算效率低和寻优结果精度低^[3]。

针对上述的不足和缺点,本文以 AFSA 为基础,引入鱼群的攻击行为,提出了一种改进后的 PID 控制器参数优化方法。实验仿真结果表明,利用该算法对 PID 控制器参数进行优化,能使 PID 控制器具有良好的特性和控制效果。

1 人工鱼群算法

人工鱼是人们根据真实鱼虚拟出来的实体,人工鱼群算法通过模拟人工鱼的觅食,随机,追尾和聚群行为得到最优值,然后记录在公告板中,从而实现全局寻优^[4]。 N 为人工鱼的总数,人工鱼个体的状态为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,步长为 Step,视野为 Visual,尝试次数为 Try_numberTty_number,拥挤度因子为 δ ,人工鱼个体 i, j 之间的距离为 $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$ 。

1.1 觅食行为

设 X_i 为人工鱼 i 当前状态, X_j 是在其视野范围内随机选取一个状态,假设求的是极大值,如果 $Y_i > Y_j$ (若求极小值为 $Y_i < Y_j$),则人工鱼就向此方向移动一步。反之,重新选择 X_j ,仍随机选取,再次判断是否满足前进条件,如果尝试 Tty_number 次后仍不满足前进条件,则执行随机行为。

1.2 聚群行为

设 X_i 为人工鱼 i 当前状态, n_f, X_c 分别表示此探索领域内 ($d_{ij} < \text{Visual}$) 的人工鱼伙伴数目及中心位置,如果 $Y_c/n_f > \delta Y_i$,表示伙伴中心处的食物丰富而且人工鱼的数目不多,则朝伙伴的中心位置方向前进一步;否则执行觅食行为。

1.3 追尾行为

设 X_i 为人工鱼 i 当前状态, Y_j 为当前搜索邻域内 ($d_{ij} < \text{Visual}$) 的伙伴中最大的伙伴 X_j 。若 $Y_j/n_f > \delta Y_i$,表示伙伴 X_j 的状态有食物丰富而且人工鱼的数目不多,则朝 X_j 方向前进一步;否则执行觅食行为。

1.4 随机行为

就是在人工鱼的视野范围内随机选取一个状态后,朝该方向移动的行为。该行为简单易实现。

1.5 公告板

用来记录最优人工鱼的状态。人工鱼完成一系列行为后将自身的状态与公告板中的状态相比较。如果该状态比公告板的好,则将公告板信息写成自己当前状态。确保存储在公告板中的信息一直是最优人工鱼的状态信息。

2 改进人工鱼群算法

2.1 有攻击行为的人工鱼群算法

自然界中优胜劣汰的生存竞争法则使得任何动物为了生存,为了减少自身或其种族被外界不利环境因素以及其它同种或异种个体所伤害,就必须采取行之有效的攻击措施。鱼群同样也不例外,也具有攻击这种行为。攻击行为的执行者可以是单个鱼个体,也可以是多个鱼组成的鱼群集体^[5]。根据鱼群具有攻击行为这一特点,本文提出了一种改进的算法——具有攻击行为的人工鱼群算法(Attack Artificial Fish Swarm Algorithm, AAFSA)。

该算法是结合了攻击行为的人工鱼群算法。当水中的食物稀少时,鱼就会因为抢夺食物而发生攻击其他鱼的行为。

该行为设计为:人工鱼对其 Visual 范围内其他人工鱼食物进行评估,如果其食物浓度小于(大于)一定范围,则该人工鱼会有一定概率发生攻击其他鱼的行为。

其数学描述为:设 X_i 为人工鱼 i 当前状态, Y_j 为在当前搜索邻域内 ($d_{ij} < \text{Visual}$) 的伙伴中随机选择的伙伴 X_j 。若 $Y_i/Y_j < \beta n_f \delta$ ($\beta = \text{rand}(0, 1)$), 表示伙伴 X_j 的状态有食物丰富而且人工鱼的数目不多,则朝 X_j 方向前进一步;否则执行觅食行为。 β 表示攻击概率。

攻击行为其算法核心思想是在不违背自然鱼群的行为情况下,适当增加聚的能力,同时增加随机行为,有利于跳出局部最优。

2.2 算法描述

AAFSA 流程如图 1 所示。

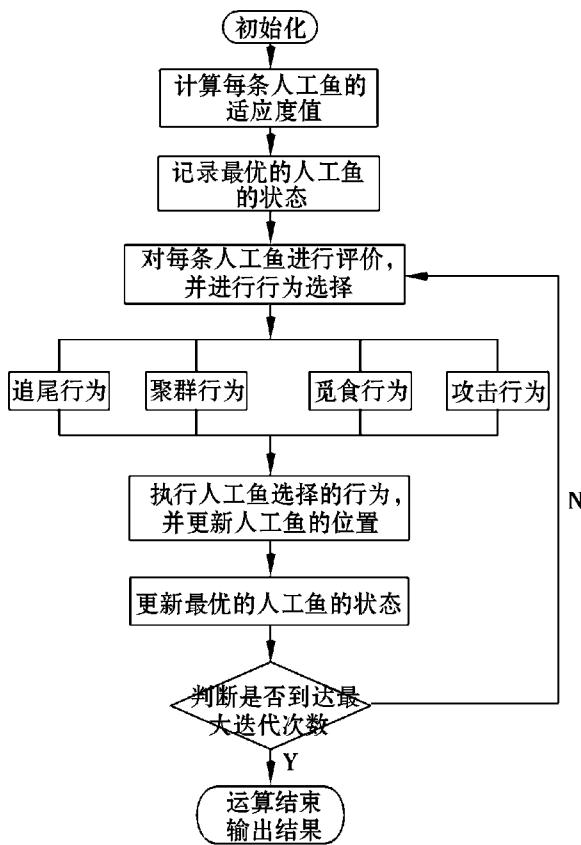


图1 AAFSA流程图

算法流程说明:

1) 对人工鱼群的各项参数进行初始化设置,如人工鱼群的总数 N ,人工鱼个体的状态 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,步长 Step, 视野 Visual, 拥挤度因子 δ , 尝试次数 Tty_number 等参数;

2) 依次计算出每个人工鱼状态的食物浓度,将食物浓度最大的人工鱼的状态记录到公告板中;

3) 将每个人工鱼分别模拟觅食、攻击、聚群和追尾行为进行对比评价后,选择最优的行为作为最终的行为来执行。把执行后的人工鱼状态与公告板的状态相比较,如果优于公告板,则及时更新公告板信息为自己当前状态。

4) 终止条件判断,如果不满足终止条件则转至第二步。

3 PID控制器参数优化过程

利用改进人工鱼群算法对PID控制器参数进行优化,其具体步骤如下^[6-7]:

1) 将PID的三个参数作为鱼群中的一条鱼的位置坐标,随机产生。初始化设置各个参数。

2) 模拟聚群、攻击、追尾和觅食行为,选择最优的行为作为最终的行为来执行。

3) 采用误差绝对值时间积分性能指标作为参

数选择的最小目标函数,即选取 J 的最小值,来达到令人满意的过渡过程动态特性;

以 $J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t)) dt + \omega_3 \cdot t_u$ 作为参数最优指标来控制能量过大,其中 $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制输出, t_u 为上升时间, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权值系数。由于可能存在超调,因此在发生超调时以 $ife(t) < 0, J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_4 |e(t)|) dt + \omega_3 \cdot t_u$ 作为最优指标,其中 ω_3 为权值系数, $\omega_4 \gg \omega_1$ 。计算出目标函数值,将最优的值记录到公告板中。

4) 更新公告板。鱼群经过一次行为选择后,把函数值与公告板中值相比较,将最优值记录在公告板上。

5) 接着下一次循环,直到完成最大迭代次数,输出最优解。

4 实验仿真

本文选取 $G(s) = \frac{400}{s^2 + 50s}$ 为被控函数,采样

时间为 1 ms, 输入指令为一阶跃信号。参数设置:人工鱼的总数 $N = 20$, 步长 Step = 0.7, 视野 Visual = 3, 尝试次数 Tty_number = 30, 拥挤度因子 $\delta = 10$, 攻击行为的发生概率 $\beta = 0.3$, 最大迭代次数 IT = 100。 K_p 的范围为 [0, 20], K_d, K_i 的范围为 [0, 1], $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001, \omega_3 = 2.0, \omega_4 = 100$ 。

首先分别随机产生 AFSA 算法和 AAFSA 算法的人工鱼初始位置,其坐标分别为人工鱼 PID 控制器的三个参数 K_p, K_d, K_i (见图2, 图4)。经过 100 次的迭代,人工鱼的最终位置如图3 和图5 所示,鱼群分散到几个局部最优点(包括全局最优点),可以看出 AAFSA 算法聚的行为更为明显。

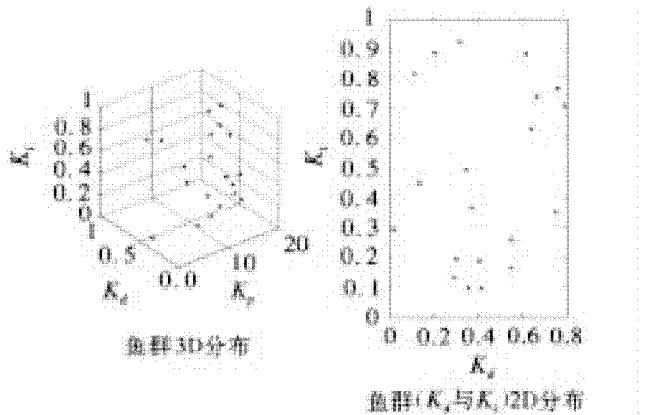


图2 AFSA的人工鱼的初始位置

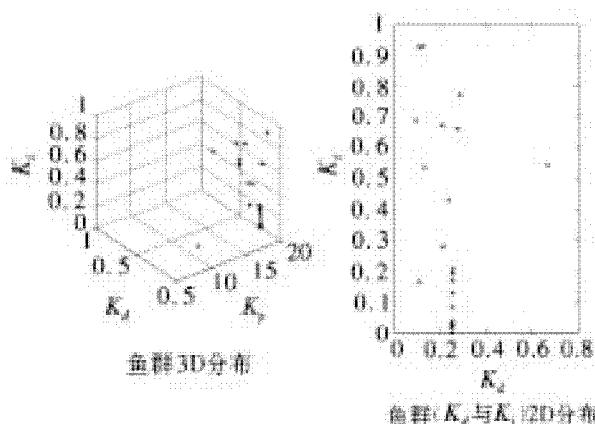


图3 AFSA 人工鱼的最后分布

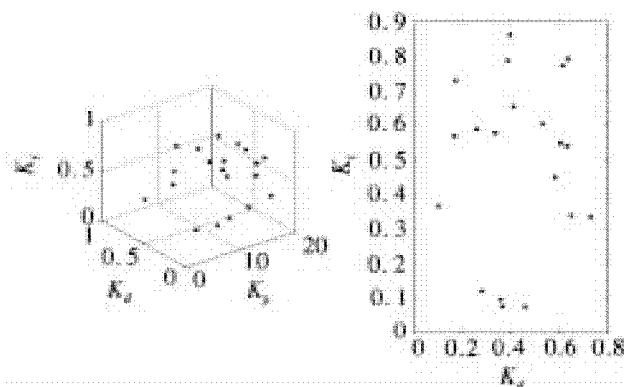


图4 AAFSA 的人工鱼的初始位置

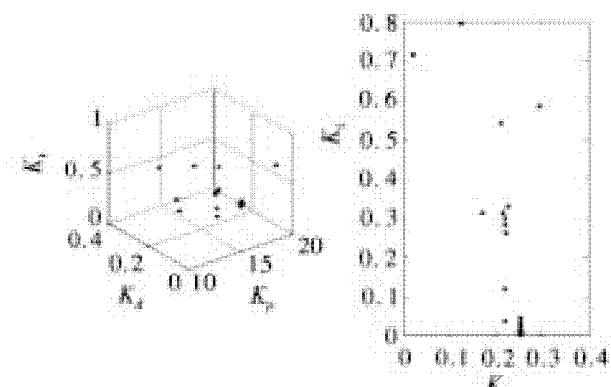


图5 AAFSA 人工鱼的最后分布

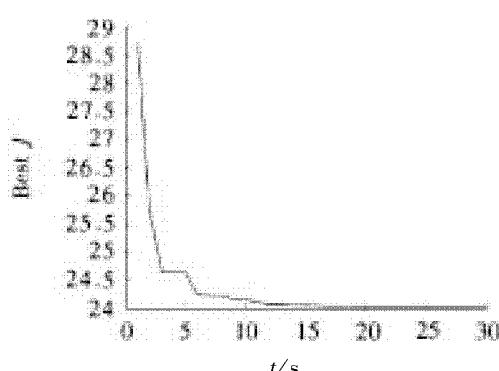
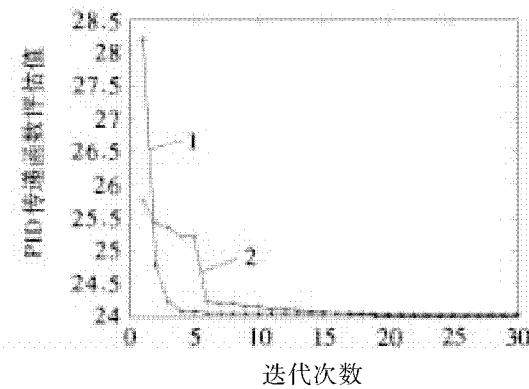
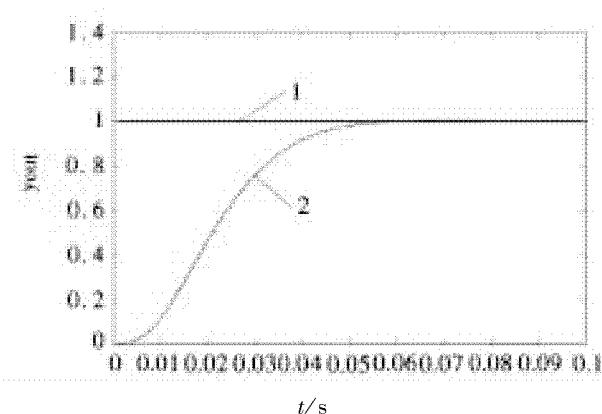
图6 AAFSA 的目标函数 J 的优化曲线

图7 AFSA 和 AAFSA 的收敛曲线比较



1. Ideal position signal; 2. Position signal tracking

图8 优化后的 PID 阶跃响应

从图7可以看出,相较于AFSA算法,AAFS A算法收敛速度很快,并且很快的到达最优值。

经过100次的迭代,PID优化结果为 $K_p = 19.9669, K_d = 0.2513, K_i = 0.1796$,目标函数最优值 $J = 24.0273$ 。

仿真结果表明AAFS A与AFSA相比较,具有更好的收敛特性,收敛过程也相对平稳些。

5 结语

PID控制器参数的细微变化都会对PID控制器的性能产生较大的影响。本文利用加入了攻击行为的人工鱼群算法对其参数优化,通过仿真实验,结果令人满意。实验表明,该算法确实对PID控制器参数具有优化作用,在收敛方面,更加准确;响应方面,速度更快。此算法提高了参数寻优的效率,使得PID控制器具有良好的控制效果。

(下转第55页)

基础隔震结构单向偏心扭转反应非线性分析

陈翠翠, 吴延辉, 李玉荣

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:通过有限元分析软件 SAP2000 计算分析, 研究了在阪神波、EL - CENTRO 波和汶川地震波三种不同地震作用下多层框架基础隔震结构和非隔震结构单向偏心下的地震扭转反应。对比研究表明, 对于单向偏心的结构来说, 采用基础隔震可明显地减少上部结构的扭转反应, 并有效地起到隔震作用。

关键词:基础隔震; 隔震结构; 扭转反应

中图分类号:TU352.1 文献标志码:A 文章编号:1672 - 1098(2013)02 - 0027 - 03

Nonlinear Analysis of Response to Base - isolated Structure One - way Eccentric Reverse Torsion CHEN Cui - cui, WU Yan - hui, LI Yu - rong

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: On the basis of calculation and analysis with finite element analysis software SAP2000, response of multistory frame base isolated structure and non - isolated structure to one - way eccentric torsion under the Hanshin wave, EL CENTRO wave and the earthquake wave in Wenchuan was studied. Comparative studies indicate that for unidirectional eccentric structure, base isolation can significantly reduce response of the upper structure to torsion, and effectively play the isolation effect.

Key words: base isolation; isolated structure; torsional response

目前, 实际工程设计和建设中, 为了建筑美观和功能等要求, 出现了大量的非对称建筑结构。通过对地震灾害的调查和分析, 认识到建筑物在地震作用下, 除了发生平动外, 还可能产生扭转振动。建筑结构的地震扭转效应将会加重结构的破坏, 在某些情况下甚至是造成建筑物破坏和倒塌的主要因素。1985 年墨西哥地震, 倒塌的房屋中有 15% 可以归结为结构不对称所产生的扭转作用引起的。1997 年日本兵库县南部发生 7.2 级的大地震, 震害调查发现, 由于结构不对称形成偏心, 在地震中产生扭转破坏是钢筋混凝土房屋典型破坏现象之一^[1]。房屋结构的扭转问题, 日益受到人们的重视, 但相关研究仍不够深入。

地震时引起结构扭转运动的原因之一是结构本身存在偏心。地震时, 作用在结构质量中心的惯性力将会对刚度中心产生扭转力矩, 迫使结构产生扭转耦联地空间振动^[2]。本文通过建立五层单向偏心的结构隔震与非隔震模型, 比较两种结构在三条不同的地震波作用下的地震扭转反应。

1 模型建立

1.1 模型简介

选取一 5 层基础滑移隔震结构, 柱距 6 m, 结构平面尺寸 30 m × 18 m, 框架柱截面尺寸 550 mm × 550 mm, 框架梁截面尺寸 300 mm × 550 mm, 层高

收稿日期:2013 - 01 - 09

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金重点资助项目(KJ2009A141);安徽省人才专项基金资助项目(2008Z033)

作者简介:陈翠翠(1985 -),女,安徽宿州人,在读硕士,研究方向:结构工程抗震。

3 m, 楼板厚度 120 mm。四层和五层在 X 方向的跨度分别为 4 跨和 3 跨。基础分别采用传统的非隔震固结基础和滑移隔震基础。滑移隔震基础采用 30 个滑移摩擦支座, 对称布置。模型的梁板使用 C30 混凝土, 柱使用 C35 混凝土, 模型中所有钢筋均为 HRB335。模型建筑楼面和屋面均布活荷载标准值均取 2.0 kN/m²。通过 SAP2000 软件建立的上部结构有限元模型如下图 1 所示。两种基础的上部结构自振周期见表 1 所示。

由于上部结构仅在 X 方向上存在偏心, 研究中仅输入 Y 方向的地震波, 使结构产生平扭耦联振动^[3], 三条地震波如表 2 所示, 加速度峰值按 8 度罕遇地震考虑 (400 cm/s²)。

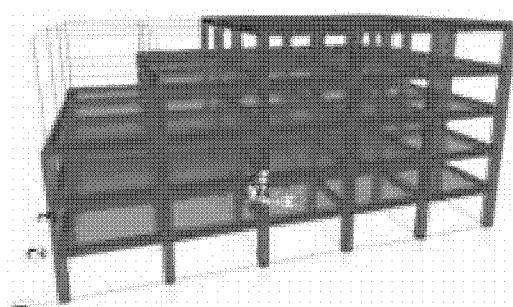


图 1 结构有限元模型

表 1 结构自振周期 s

	基础滑移隔震结构		非隔震结构	
一阶	3.458	Y 方向平动	0.494	Y 方向平动
二阶	3.367	X 方向平动	0.445	X 方向平动
三阶	2.915	绕 Z 轴转动	0.400	绕 Z 轴转动
四阶	0.702	绕 Z 轴转动	0.304	绕 Z 轴转动
五阶	0.423	绕 Y 轴转动	0.292	绕 Y 轴转动
六阶	0.388	绕 X 轴转动	0.156	绕 X 轴转动

表 2 三条地震波参数

地震波	加速度峰值/ 时间间隔/ 持续时间/		
	(cm · s ⁻²)	s	s
中硬土 EL - CENTRO	341.7	0.02	20
中软土 阪神波	-368.0	0.02	20
硬土 汶川波	304.8	0.02	20

1.2 支座模型参数设置

滑移隔震支座设置在一层的柱底, 每根框架柱底部均设置支座。由于 SAP2000 软件中没有特定的滑移摩擦隔震支座单元, 所以采用滑移摆隔震支

座单元来模拟基础滑移隔震。此时, 可将滑道半径取无穷大, 最大限度地接近于纯滑移。支座的方向属性数据如表 3 所示。摩擦系数在速度较快时取 0.15, 在较慢时取 0.20; 速度参数取 4.0。

摩擦摆支座的力学模型可以表示为线性弹簧和摩擦阻尼器的结合(见图 2)。支座滑动时, 支座的恢复力为

$$F = F_R + F_s$$

$$\text{其中 } F_R = K_b \mu = \frac{N}{R} \mu$$

$$F_s = \mu N Z_s$$

式中: F_R 为结构沿滑动曲面上升而产生的力; K_b 为支座的刚度; N 为支座的竖向压力; R 为滑动面的曲率半径, 可以通过改变滑动曲面的曲率半径改变其刚度, 从而改变结构的周期; F_s 为支座滑动时滑动面上的摩擦力, 采用微分连续摩擦力模型; μ 为滑动面上的滑动摩擦系数; Z_s 为滑动位移。

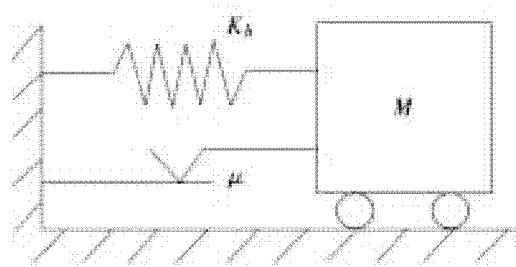


图 2 摩擦摆支座力学模型

表 3 支座的方向属性 kN/mm

	U1	U2	U3
线性分析有效刚度	4200	0.210	0.420
非线性分析有效刚度	4200	0.210	0.420

2 时程反应结果分析

2.1 扭转位移时程

两种结构在 EL - CENTRO 波、阪神波和汶川波作用下结构顶层的扭转位移反应时程如图 3 ~ 图 5 所示, 在图 3 和图 4 中明显看出, 隔震之后结构的扭转反应明显减小。但在图 3 中, 4 ~ 14 s 时间段的隔震结构扭转位移绝对值明显大于传统结构。这是由于在这时间段, EL - CENTRO 波的加速度相较于其余两条波小了很多。因此, 隔震效果不如另外两条波明显。但是从整个时程来看, 非隔震结构的最大位移还是明显大于隔震结构的。

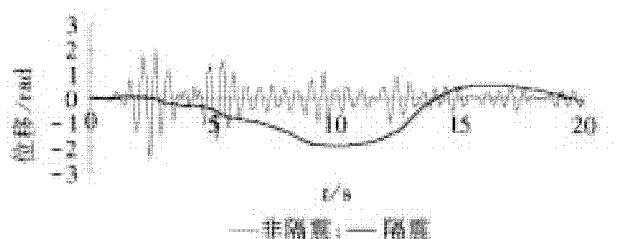


图3 EL-CENTRO波扭转位移反应

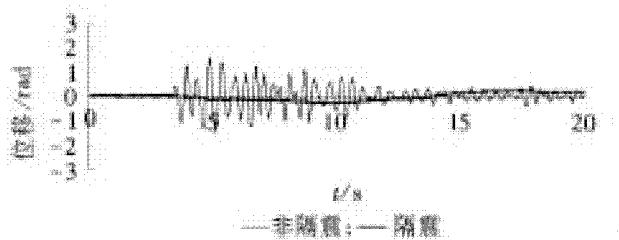


图4 阪神波扭转位移反应

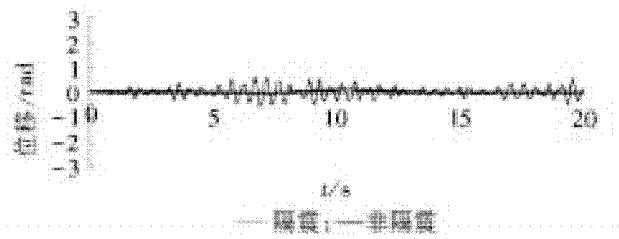


图5 汶川波扭转位移反应

2.2 扭转加速度时程

两种结构在三条地震波作用下的扭转加速度时程曲线如图6~图8所示,在三条地震波作用下,隔震前后的扭转加速度绝对值最大值如表4所示(括号内为最大加速度发生的时刻)。可见,采取滑移隔震之后,该节点的扭转加速度明显减小。

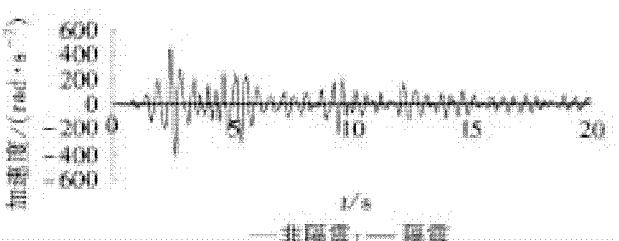


图6 EL-CENTRO波扭转加速度时程

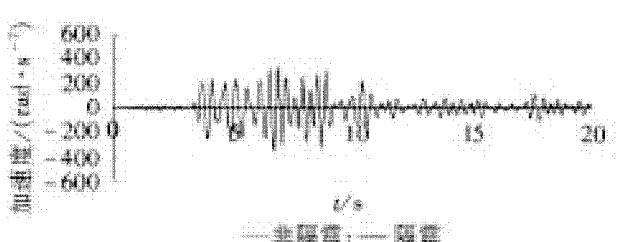


图7 阪神波扭转加速度时程



图8 汶川波扭转加速度时程

表4 隔震前后扭转加速度 rad/s^2

	EL-CENTRO	阪神波	汶川波
隔震前	499.01 (2.44s)	348.02 (6.74s)	161.37 (9.30s)
隔震后	2.88 (12.58s)	3.00 (7.40s)	0.63 (9.54s)

3 结论

通过上述有限元模拟分析,对基础滑移隔震结构和传统结构在三种地震波作用下的扭转位移反应和扭转加速度反应进行对比分析。研究表明,单向偏心结构在采用基础滑移隔震,可以较明显地减小上部结构的扭转反应,从而避免在大震下上部结构受扭破坏。

参考文献:

- [1] 崔鸿超.日本兵库县南部地震震害综述[J].建筑结构学报,1996,17(1):2~13.
- [2] 江宜城,唐家祥,李媛萍.多层框架抗震结构的地震扭转反应分析[J].工程抗震,2000(2):12~14.
- [3] 王建强,姚谦峰.基础隔震偏心结构扭转振动反应分析[J].四川建筑科学研究,2004(1):103~104.
- [4] PAN T C, KELLY J M. Seismic Response of torsionally coupled base isolated Building [J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1983, 11(6):49~770.
- [5] NAGARAJAIAH S, REINHORN A M, CONSTANTINOU M C. Torsional-Coupling in Sliding Base Isolated Structures [J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 1993, 119:130~149.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

电厂燃煤产物中重金属元素的环境影响评价研究

王 馨^{1,2}, 冯启言², 武旭仁³, 孟庆俊²

(1. 淮北师范大学生命科学学院, 安徽 淮北 235000; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 3. 山东煤田地质局, 山东 泰安 271000)

摘要:以山东矿区某两个电厂燃煤为例,探讨了燃煤产物中重金属元素的环境影响评价方法。测定了电厂原煤、飞灰、底灰中 As、Cu、Zn、Pb 这 4 种重金属元素的含量,通过浸泡实验测得了燃煤产物中重金属元素的浸溶率,计算出了燃煤产物中重金属元素对大气、水环境的污染因子。结果表明,电厂燃煤过程中,重金属元素挥发性较高,两电厂对大气环境的综合污染因子分别为 6.83 和 7.93,污染等级为重污染。对于水环境的综合污染因子为 4.35 与 3.38,也属重污染。

关键词:燃煤产物; 重金属元素; 环境影响; 污染因子

中图分类号:X51 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0030-04

Study on Environmental Impact Assessment of Heavy Metals in Coal Combustion Products

WANG Xin^{1,2}, Feng Qi - yan², WU Xu - ren³, MENG Qing - jun²

(1. School of Life Sciences, Huaibei Normal University, Huaibei Anhui 235000, China; 2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 3. Shandong Coalfield Geology Bureau, Taian Shandong 271000, China)

Abstract: Taking coal combustion products from two coal - fired power plants in Shandong as example, the environmental impact assessment method of heavy metals in coal combustion products was studied. 4 heavy metals of As, Cu, Zn, Pb, Hg in raw coal, fly ash, bottom ash of the power plants were determined. The leaching rate of heavy metals in the coal combustion products were determined by immersion test. Atmospheric pollution index, water pollution index were calculated. The results showed that the volatility of the heavy metals in the coal during coal combustion is high. The integrated pollution indices of the heavy metals in the coal from the two plants to atmospheric environment are 6.83 and 7.93, which belong to heavy pollution indices. The integrated pollution indices of heavy metals in the coal - fired products to water environment are 4.35 and 3.38 respectively, belonging to heavy pollution indeces.

Key words: coal combustion products; heavy metals; environmental impact; pollution index

由于我国的能源结构所限,约 76% 的电力仍然由煤炭产生,所以会伴随着大量的燃煤固体废弃物包括粉煤灰、炉渣等,而煤中含有一些微量的有害元素特别是重金属元素在燃烧过程中富集在这些废弃物^[1-2]中,随着排放直接污染大气环境,并

且在堆放过程中由于大气降水等而进入到地表和地下水环境以及土壤环境,对其造成污染^[3]。本文定量的分析了山东某两个电厂的原煤及燃煤产物中重金属元素 As、Zn、Cu、Pb 对大气及水环境的影响,并进行了评价,为今后的煤及燃煤过程对环

境的全面评价体系提供基础。

1 实验方法

1.1 原煤与燃煤产物的采集与制备

二电厂均位于山东西南矿区,所用炉前煤均为所处煤矿直接输送,其中电厂一是采用设计煤泥,为煤泥加中煤掺烧,所以重金属元素的测定结果为两种原煤的均值;电厂二采用的是煤矸石加中煤,测定结果也是采用的均值,而电厂飞灰、底灰为发电厂循环流化床锅炉烟道细灰与炉渣。原煤、飞灰及底灰样品的制备方法参见国家电力行业标准DL/T567.4—95。

1.2 原煤与燃煤产物中重金属元素的测定

为测定电厂燃煤产物中4种重金属对大气环境影响,本次样品测试主要采用等离子体质谱仪(X-Seris ICP-MS,美国Thermo Electron Co.公司产)。测试条件:正向功率,1 200 W;雾化气流速,0.80 L/min;辅助气流速,0.75 L/min;冷却气流速,13.50 L/min;内标元素,Rh、Re。二电厂原煤、飞灰、底灰中这四种重金属元素之含量见表2,根据微量元素含量和质量平衡原理,可计算出燃煤中各微量元素的挥发率及燃煤产物对微量元素的富集率。

1.3 燃煤产物中重金属的浸出实验

为测定电厂燃煤产物中4种重金属对水环境影响,分别对两个电厂的煤灰采用批浸溶试验,采用灰水比为1:10,配置了pH=5、pH=6.5和pH=8的三种不同溶液作为浸溶液,加盖拧紧,平放于振荡器上。调节振荡器频率120±5次/分,振幅40 mm,在室温下连续振荡8 h,然后静置16 h,用中性滤纸过滤,所得滤液即为浸出液。水样中重金属含量测定与上节中测试方法一致。

2 评价方法

评价电厂燃煤产物中微量元素的环境效应,实质上是评价煤中这些元素对环境的污染能力。在本文中电厂灰中微量元素的环境效应评价对于大气环境的影响采取的是原煤与燃煤产物中元素的挥发率以及综合因子评价法,对水环境的影响是依据浸溶的实验数据,借鉴了环境影响评价中的污染源综合评价方法,并做了适当改进为污染指标法。

定义粉煤灰中各微量元素对各环境要素(大

气、水、土壤环境)的单项污染因子^[4]

$$W_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: i 为微量元素, C_i 为对于大气环境,指煤中第*i*种元素的排放浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{0i} 为对于大气环境,指第*i*种元素的排放限值, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据公式(4), W_i 值越大,污染越严重。

而综合污染因子为

$$W = \sqrt{\frac{(\max W_i)^2 + (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i)^2}{2}} \quad (2)$$

从公式(2)中可以看出,此综合污染因子适当兼顾了单项污染因子的最高值和平均值,当然在本文中我们只针对大气环境,同时,根据综合污染因子,将煤中微量元素对环境的污染等级划分如表3所示。

表1 煤中微量元素对环境的污染等级划分

综合污染因子	0~0.59	0.6~0.99	1.00~1.29	1.30~1.99	≥2.00
污染等级	I	II	III	IV	V
等级评语	清洁	微污染	轻污染	中污染	重污染

3 大气环境影响评价

3.1 燃煤产物中重金属元素的挥发率

经测试得二电厂原煤与燃煤产物的4种重金属元素含量见表2,并列出了中国多数煤中的平均含量。由表2可以看出两电厂原煤中Cu、Zn、Pb含量均超出中国多数煤中的均值,也大大影响了底灰和飞灰中的含量。

表2 电厂原煤及燃煤产物中的微量元素含量 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

	元素	原煤	飞灰	底灰	中国多数煤中的含量
电厂一	As	2.50	3.00	1.00	5.00
	Cu	32.50	87.00	85.00	13.00
	Zn	100.00	95.00	126.00	35.00
	Pb	18.00	50.00	27.00	13.00
电厂二	As	2.00	4.00	4.00	5.00
	Cu	24.50	72.00	41.00	13.00
	Zn	62.50	139.00	147.00	35.00
	Pb	22.50	53.00	45.00	13.00

经工业测试可测得两电厂的原煤灰分分别为21.73%,13.9%,因两电厂均采用循环流化床,灰渣

比为6:4,取过量空气系数 $\alpha=1.4$,可算得燃煤产生的烟气量为 $7.67\text{Nm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据质量守恒原理计算两电厂的燃煤过程的挥发率以及其在底灰、飞灰中的富集率见表3。

表3 两个电厂燃煤产物的挥发率

样品来源	元素	飞灰:原煤	底灰:原煤	挥发率/%
电厂一	As	1.20	0.40	80.88
	Cu	2.68	2.62	42.37
	Zn	0.95	1.26	76.66
	Pb	2.78	1.50	50.75
电厂二	As	2.00	2.00	72.20
	Cu	2.94	1.67	66.19
	Zn	2.22	2.35	68.38
	Pb	2.36	2.00	69.24

根据表3可以看出电厂一中元素As、Zn的挥发率较强大于60%,As本身就是一种高温易挥发性元素,在900℃以上以上逸散强烈,而Zn可能由于在原煤含量就过高超出中国多数煤中均值的3倍。电厂二的4中重金属元素的挥发率均超过60%,且重金属元素均在燃煤产物中有所富集,大多数元素富集数大于1。

3.2 燃煤产物中重金属元素的排放浓度

根据表2中数据,及公式(1),对照大气污染物综合排放标准,可计算出燃煤中所测4种重金属元素对大气环境的排放浓度及单项污染因子见表4。

表4 重金属元素的排放浓度与大气污染因子

样品来源	元素	排放标准	排放浓度	单项污染因子
电厂一	As	0.50	0.26	0.53
	Cu	0.20	1.80	8.98
	Zn	3.00	9.99	3.33
	Pb	0.90	1.19	1.32
电厂二	As	0.50	0.19	0.38
	Cu	0.20	2.11	10.57
	Zn	3.00	5.57	1.86
	Pb	0.90	2.03	2.26

从表4中可以看出,两个电厂燃煤产物中Cu、Zn、Pb单项污染因子均大于1,尤其是元素Cu,单项污染因子分别达到了8.98和10.57,这与其在煤中的含量与挥发率及排放标准有关,Cu在两电厂原煤中的含量均大于中国多数煤均值2倍左右,因此本身对大气环境就有较大影响。虽然电厂一中Cu的挥发率不高但其原煤中含量大于电厂二,

电厂二中虽然原煤中含量小于电厂一,但是挥发率超出了60%,而且Cu元素的污染排放限值要低于其他各元素,相较排放浓度又较高,所以导致其单项污染因子超高,而两电厂的综合污染因子分别为6.83和7.93,据表1,污染等级均为重污染。

4 水环境影响评价

电厂燃煤废弃物堆场对环境产生的污染问题一直存在,其中的重金属元素更是随着大气降水及长期堆放对水系统和生物以及人类带来不同程度的损害^[5]。燃煤产物中重金属元素对水环境效应的研究,主要是潜在毒性的研究,一般采用灰渣水溶性试验作为评价这些元素的迁移性与赋存状态的重要手段^[6]。

4.1 电厂燃煤产物中重金属元素的浸溶率

在本次研究中,浸出实验采用了3个pH值来模拟不同环境条件下的大气降水情况,测得的各元素浸出含量见表5,灰水比为1:10,计算浸溶率见表6。

表5 电厂灰重金属元素浸出含量

测试样品产地	pH值	测试元素含量/(mg·L ⁻¹)			
		As	Zn	Cu	Pb
电厂一	5	—	0.14	0.01	0.30
	6.5	—	0.14	0.01	0.30
	8	—	0.14	—	0.30
电厂二	5	—	0.14	—	0.30
	6.5	—	0.13	0.01	0.20
	8	—	0.14	—	0.20

注:“—”指低于检出限

表6 电厂灰中重金属元素浸溶率

测试样品产地	pH值	测试元素浸溶率/%			
		As	Zn	Cu	Pb
电厂一	5	0.00	1.01	0.14	5.66
	6.5	0.00	1.01	0.14	5.66
	8	0.00	1.01	0.00	5.66
电厂二	5	0.00	1.47	0.00	6.00
	6.5	0.00	1.37	0.11	4.00
	8	0.00	1.37	0.00	4.00

由表5及表6可以看出元素As由于本身含量较低,浸出结果低于检出限,元素Cu也有低于检出限的情况,而元素Pb的浸出量较大,相应的浸溶

率也较大,这与 Pb 在燃煤产物中富集率最大密切相关。此外 pH 值对重金属元素的浸出也有影响,由于金属元素在酸性条件下容易浸出^[7-8],而粉煤灰呈碱性,导致浸泡溶液 pH 升高,表现为碱性,因

此 Cu、Zn、Pb 均在较低 pH 值下有较大浸出量。

据公式(1)及地表水、地下水、生活饮用水质量标准,计算电厂灰中重金属元素对水环境的污染因子如表 7 所示,其中不同 pH 值下的浸溶量取平均值。

表 7 电厂灰中微量元素对水环境的污染因子

测试样品产地与国家标准	测试元素/(mg·L ⁻¹)			
	As	Zn	Cu	Pb
地表水	0.050	1.000	1.000	0.050
地下水	0.050	1.000	1.500	0.100
生活饮用水	0.010	1.000	1.000	0.010
平均浸溶量	—	0.140	0.006	0.300
单项污染因子(地表水)	0.000	0.140	0.006	6.000
单项污染因子(地下水)	0.000	0.140	0.004	3.000
单项污染因子(生活饮用水)	0.000	0.140	0.006	30.000
平均浸溶量	—	0.140	0.003	0.23
单项污染因子(地表水)	0.000	0.140	0.003	4.60
单项污染因子(地下水)	0.000	0.140	0.002	2.30
单项污染因子(生活饮用水)	0.000	0.140	0.003	23.00

根据上表中数据与公式(2)计算得,电厂灰中微量元素对水环境的综合污染因子分别为 4.35 和 3.38,污染等级为重污染。主要由于元素 Pb 的单项污染因子相对较高,所以对水环境可能造成的影响较大,应引起重视。

5 结论

1) 电厂燃煤过程中,重金属元素挥发性都较高,其中 As、Zn 在两个电厂燃煤产物测试中挥发率均超过了 60%,两个电厂燃煤产物中 Cu、Zn、Pb 单项污染因子均大于 1,尤其是元素 Cu,单项污染因子分别达到了 8.98 和 10.57,这与其在煤中的含量与挥发率及排放标准限值密切相关,两电厂对大气环境的综合污染因子分别为 6.83 和 7.93,污染等级为重污染。

2) 由浸出实验结果看出元素 Pb 的浸出量与浸溶率较高,导致单项污染因子较高这与其在燃煤产物中富集率较大有关,两个电厂对于水环境的综合污染因子为 4.35 与 3.38,均属重污染。

3) 采用综合污染因子评价可以适当的兼顾单项污染因子较重的元素,并能反映出影响较大的污染因子,能较好的评价出电厂燃煤中重金属元素对环境的影响。

参考文献:

- [1] 郑楚光,徐明厚,张军营,等. 燃煤痕量元素的排放与控制 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002: 8 - 200.
- [2] 徐文东,曾荣树,叶大年. 电厂煤燃烧后元素硒的分布及对环境的贡献 [J]. 环境科学, 2005, 26 (2): 66 - 67.
- [3] ALPER BABA, ABIDIN KAYA. Leaching characteristics of solid wastes from thermal power plants of western Turkey and comparison of toxicity methodologies [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 73: 199 - 207.
- [4] 王帅杰,狄楠楠,王杰林,等. 煤中微量元素的环境效应 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (10): 179 - 182.
- [5] 高军林,台明青. 燃煤电厂 3 种固体废物对水环境影响的研究 [J]. 化学分析计量, 2010, 19 (4): 56 - 59.
- [6] IRENA TWARDOWSKA, JADWIGA SZCZEPANSKA. Solid waste: terminological and long - term environmental risk assessment problems exemplified in a power plant fly ash study [J]. The Science of the Total Environment, 2002, 285: 29 - 51.
- [7] 田采霞,郭保华,宋晓梅. 贮灰场粉煤灰中微量元素的浸泡试验研究 [J]. 粉煤灰, 2007 (5): 21 - 23.
- [8] 曹珊珊,吴光红,苏睿先. 模拟中性和酸性降雨及垃圾渗滤液浸泡粉煤灰及渣重金属浸出特征 [J]. 环境科学, 2011, 32 (6): 1 831 - 1 836.

六自由度工业机器人手臂正运动学分析与仿真

李宪华¹, 郭永存¹, 宋 韶²

(1. 安徽理工大学机械工程学院,安徽 淮南 232001;2. 上海大学机电工程与自动化学院,上海 200444)

摘要:针对川崎工业机器人手臂 FS03N 构型特点,采用 DH 法建立了机械臂的连杆坐标系,得到了以关节角度为变量的正运动学方程,采用 SolidWorks 建立了机械臂的三维实体模型。为了验证正运动学模型的正确性及直观地观察机械臂各部分的运动情况,编写相应接口程序,将机械臂实体模型导入 Matlab,融入正运动学算法,开发了机械臂运动仿真平台,从而验证了算法的正确性,并完成了机械臂的运动仿真。

关键词:机械臂;正运动学;仿真平台;归一化

中图分类号:TP241 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0034-05

Forward Kinematics Analysis and Motion Simulation Platform of A Six DOF Industrial Manipulator

LI Xian-hua¹, GUO Yong-cun¹, SONG Tao²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Considering the configuration characteristics of Kawasaki industrial manipulator FS03N, DH method was used to establish connecting link coordinate system, obtaining forward kinematics equations with joint angle variables. A 3D physical model was built with SolidWorks. In order to verify the correctness of the forward kinematics and visualize the manipulator movement, the interface programme was performed and the manipulator 3D physical model was imported into Matlab, combining with forward kinematics algorithm, the simulation platform of manipulator was developed. The correctness of the algorithm was verified and the manipulator movement simulation was completed based on the platform.

Key words: manipulator; forward kinematics; simulation platform; normalization

工业机器人手臂技术已相当成熟,定位精确,重复度高,然而大多数工业用机器人手臂控制系统封闭,对于机器人系统的开发与集成非常不利^[1-4],因此非常有必要对工业用机械臂进行研究。

机械臂运动学分析是实现机械臂运动控制与轨迹规划的基础,其中正运动学是最基本的问题,目前机械臂运动学模型建立主要采用 DH 法与旋量法^[5-6]。通过仿真的方法复现机械臂运动,能够

直观地监视手臂各部分的运动情况。Peter Corke 开发了基于 Matlab 的机器人工具箱,通过编写相应函数虽然可以实现手臂的运动,然而各连杆不具有实际机器人手臂的几何模型三维尺寸关系^[7]。S. H. Kim 基于 OpenGL 建立了机械臂的仿真环境,可以实现手臂的运动仿真^[8]。孙亮等基于 VC ++ 平台,建立了机械臂运动仿真平台,并进行了轨迹规划^[9]。

收稿日期:2013-01-02

基金项目:安徽省博士后基金资助项目;安徽理工大学引进人才(博士)基金资助项目

作者简介:李宪华(1980-),男,山东济南人,讲师,在站博士后,主要研究方向为机器人技术。

本文以川崎机械臂 FS03N 为研究对象,采用 DH 法对机械臂的正运动学问题进行研究,建立数学模型。运用 SolidWorks 对机械臂进行三维实体建模,将模型导入 Matlab,融入运动学正解方程,建立运动仿真平台,验证算法的正确性,并进行机械臂的运动仿真,记录运动路径。

1 正运动学

采用 DH 法对机械臂进行运动学建模,其思想为:在机械臂各关节处建立直角坐标系,然后确定每两个相邻坐标系间的转换矩阵,而后将得到的矩阵依次相乘,最终得到工具坐标系至基座的矩阵,从而确定工具坐标系在基坐标系内的位置和姿态。

1.1 连杆坐标系建立

FS03N 是具有 6 个旋转关节的六自由度串联机械臂,如图 1 所示。根据该手臂的构型特点,采用 DH 法建立各关节处的坐标系。首先确定基坐标系的位置及手臂的初始位置和姿态,然后采用 DH 法建立基坐标系与各关节处的坐标系, $x_0y_0z_0$ 表示基坐标系,原点位于第 1 关节轴线与第 2 关节轴线的公垂线与第 1 关节轴线的交点处,而后依次建立各关节处的坐标系, $x_6y_6z_6$ 为机械臂工具坐标系,机械臂坐标系如图 2 所示。

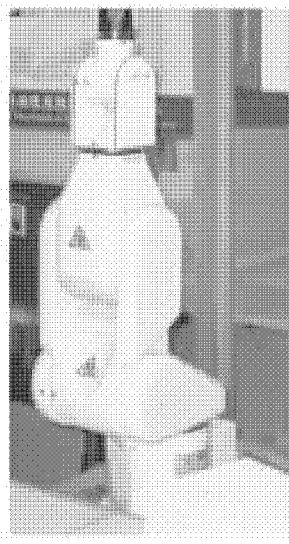


图 1 川崎 FS03N 机械臂

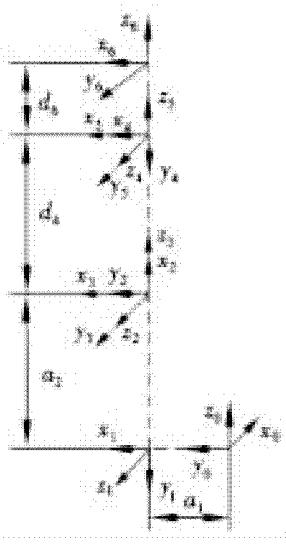


图 2 机械臂坐标系

1.2 运动学求解

完成各关节坐标系建立后,根据相邻关节坐标系间的关系可确定关节和连杆的 DH 参数,如表 1 所示,其中 α 、 a 、 d 为固定值, θ 为变量。机械臂相邻关节坐标系间的转换矩阵如式(1)所示。

表 1 机械臂 DH 参数

关节	θ_i /(°)	α_i /(°)	a_i /mm	d_i /mm	关节范围 /(°)
1	θ_1	α_1 (-90)	a_1 (120)	0	-160 ~ 160
2	θ_2	0	a_2 (250)	0	-60 ~ 150
3	θ_3	α_3 (90)	0	0	-150 ~ 120
4	θ_4	α_4 (-90)	0	d_4 (250)	-180 ~ 180
5	θ_5	α_5 (90)	0	0	-135 ~ 135
6	θ_6	0	0	d_6 (80)	-180 ~ 180

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -c_{\alpha_i}s_{\theta_i} & s_{\alpha_i}s_{\theta_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\alpha_i}c_{\theta_i} & -s_{\alpha_i}c_{\theta_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表 1 中机械臂 DH 参数代入式(1),得到相邻关节坐标系间的转换矩阵,再将得到的矩阵依次乘,从而得到包含关节变量的运动学正解,FS03N 机械臂工具坐标系到基坐标系的变换矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{T}_6^0 = \prod_{i=1}^6 ({}^{i-1}\mathbf{T}_i(\theta_i)) = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} n_x &= \{ [c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3]c_4 - s_1s_4 \} c_5 - (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3) s_6 - [(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)s_4 + s_1c_4]s_6 \\ n_y &= \{ [s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3]c_4 + c_1s_4 \} c_5 - (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3) s_6 - [(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)s_4 - c_1c_4]s_6 \\ n_z &= [(-s_2c_3 + c_2s_3)c_4c_5 + (s_2s_3 - c_2c_3)s_5]c_6 + (s_2c_3 + c_2s_3)s_4s_6 \\ s_x &= -\{ [c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3]c_4 - s_1s_4 \} c_5 - (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3) s_6 - [(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)s_4 + s_1c_4]c_6 \\ s_y &= \{ -[(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)c_4 + c_1s_4]c_5 + (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)s_6 - [(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)s_4 - c_1c_4]c_6 \\ s_z &= [(s_2c_3 + c_2s_3)c_4c_5 - (s_2s_3 - c_2c_3)s_5]s_6 + (s_2c_3 + c_2s_3)s_4c_6 \\ a_x &= [(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)c_4 - s_1s_4]s_5 + (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)c_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_y &= [(s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3) c_4 + c_1 s_4] s_5 + (s_1 c_2 s_3 + s_1 s_2 c_3) c_5 \\
 a_z &= -(s_2 c_3 + c_2 s_3) c_4 s_5 - (s_2 s_3 - c_2 c_3) c_5 \\
 p_x &= d_6 \{[(c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3) c_4 - s_1 s_4] s_5 + (c_1 c_2 s_3 + c_1 s_2 c_3) c_5\} + d_4 (c_1 c_2 s_3 + c_1 s_2 c_3) + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1 \\
 p_y &= d_6 \{[(s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3) c_4 + c_1 s_4] s_5 + (s_1 c_2 s_3 + s_1 s_2 c_3) c_5\} + d_4 (s_1 c_2 s_3 + s_1 s_2 c_3) + a_2 s_1 c_2 + a_1 s_1 \\
 p_z &= d_6 [(-s_2 c_3 - c_2 s_3) c_4 s_5 - (s_2 s_3 - c_2 c_3) c_5] + d_4 (-s_2 s_3 + c_2 c_3) - a_2 s_2
 \end{aligned}$$

式中 s_i 表示 $\sin \theta_i$, c_i 表示 $\cos \theta_i$ 。

工业机械臂大多采用一组完备的广义坐标 (X, Y, Z, O, A, T) 表示手臂位置和姿态, 而通过运动学计算得到的结果, 却包含位置与姿态矩阵, $[p_x \ p_y \ p_z]'$ 为工具坐标系的位置, $[n \ s \ a]$ 为姿态, 包含 9 个元素。为了与机械臂本身位姿表示一致, 采用欧拉角 (O, A, T) 表示机械臂姿态。欧拉角中各角度的转动次序是: ① 绕 OZ 轴转 O 角 $(R_{z,O})$; ② 绕转过后的 OY 轴转 A 角 $(R_{y,A})$; ③ 最后再绕转过后的 OZ 转 T 角 $(R_{z,T})$, 最后得到的矩阵如式(3)所示。

$$R_{O,A,T} = \begin{bmatrix} c_O c_A c_T - s_O s_T & -c_O c_A s_T - s_O s_T & c_O s_A \\ s_O c_A c_T + c_O s_T & -s_O c_A s_T + c_O c_T & s_O s_A \\ -s_A c_T & s_A s_T & c_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: c_O, c_A, c_T 分别表示 $\cos O, \cos A, \cos T$; s_O, s_A, s_T 分别表示 $\sin O, \sin A, \sin T$ 。

通过分析表示欧拉角的各坐标轴转动情况可知, 欧拉角 (O, A, T) 的几何关系为: ① O 角是 XZ 与 zZ 间夹角; ② A 角是 Z 与 z 间夹角; ③ T 角是 X_2 与 x 间夹角。 X_2 轴位于 zZ 平面, 与 z 轴成 90° 夹角, 如图 3 所示。

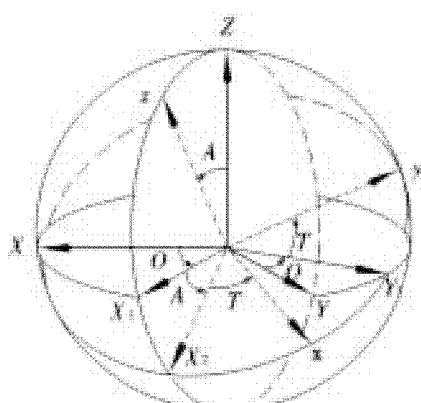


图 3 机器人手臂欧拉角几何关系

令 $R_{O,A,T} = [n \ s \ a]$ 如式 4 所示, 方程两边矩阵对应元素相等, 即可求得欧拉角三个角度具体值, 从而得到手臂位置与姿态 (X, Y, Z, O, A, T) 。

$$\begin{bmatrix} c_O c_A c_T - s_O s_T & -c_O c_A s_T - s_O s_T & c_O s_A \\ s_O c_A c_T + c_O s_T & -s_O c_A s_T + c_O c_T & s_O s_A \\ -s_A c_T & s_A s_T & c_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

2 SolidWorks 实体建模

机械臂 3D 运动仿真平台是机械臂系统比较重要的组成部分, 对于解释机械臂的工作原理, 动作过程与碰撞检测都具有非常重要的意义。

采用 SolidWorks 对川崎 FS03N 机械臂进行实体建模, 主要根据机械臂的外围尺寸结构约束关系进行, 而对于机械臂的内部控制及动力部分未进行模型建立。根据机械臂关节分布情况与构型特点, 分为 7 个部分进行实体建模, 即: 基座、连杆 1、连杆 2、连杆 3、连杆 4、连杆 5 与连杆 6, 在连杆包含关节处采用圆柱结构以便添加旋转约束, 各部分严格按照机械臂的三维几何关系进行建模, 如图 4 所示。完成各连杆建模后, 将模型载入 SolidWorks 装配文件, 固定底座, 依次插入连杆, 各连杆间加入旋转副约束关系, 最终完成机械臂的装配体, 如图 5 所示。

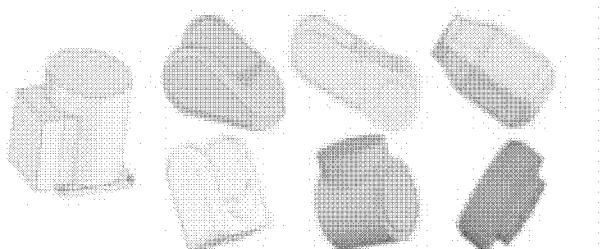


图 4 机械臂基座与连杆

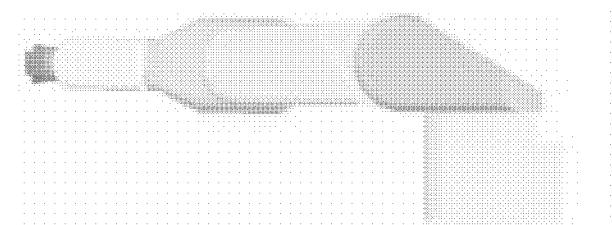


图 5 机械臂实体模型

3 运动仿真

3.1 仿真平台建立

为了验证正运动学模型建立的正确性及更直观地查看机械臂动作的情况,需要建立机械臂的仿真环境。因为 SolidWorks 实体模型无法直接导入 Matlab,所以必须建立两者之间的接口程序,仿真平台建立过程如图 6 所示,图 7 为机械臂仿真平台图形界面。

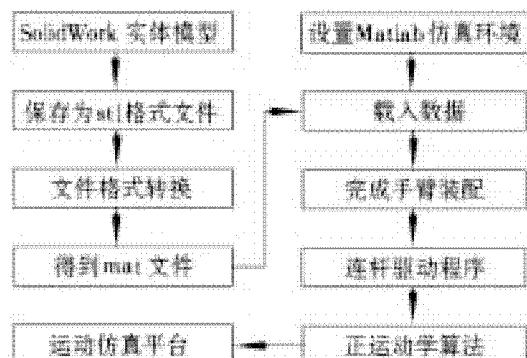


图 6 机械臂运动仿真平台建立流程图

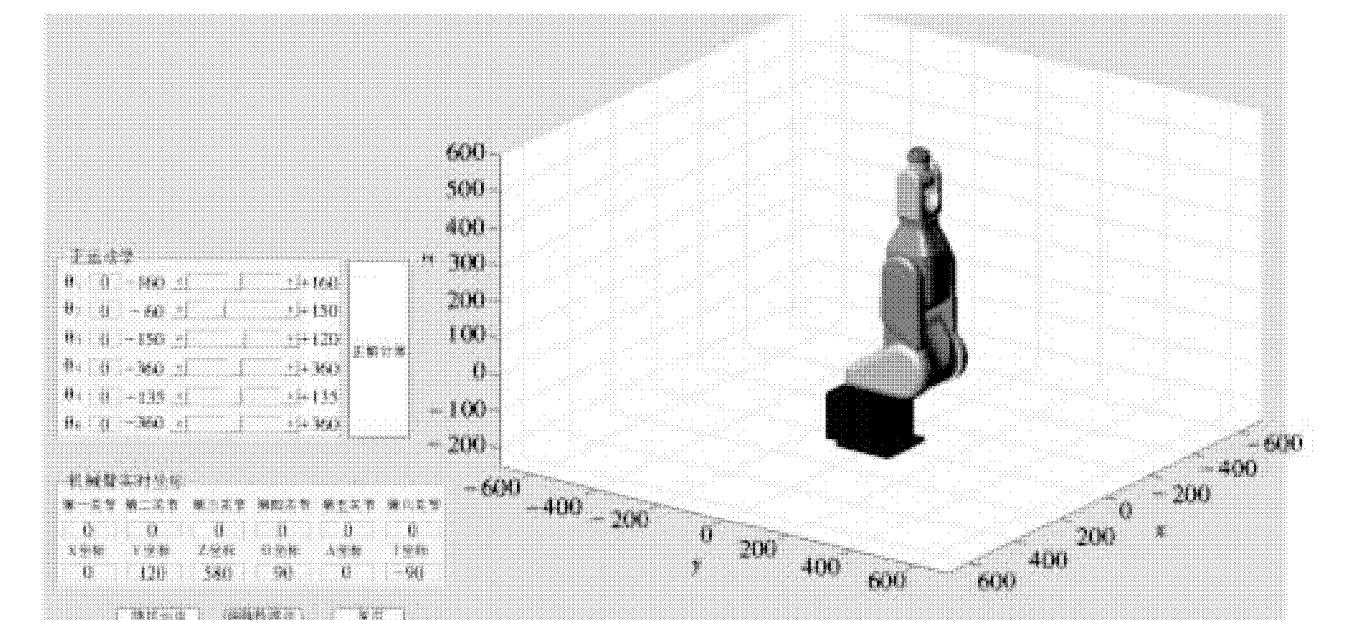


图 7 机械臂运动仿真平台

3.2 正运动学算法验证

图 1 所示为手臂的初始位姿,此时手臂各关节角度均为 0° ,而根据图 2 建立的坐标系,手臂关节角度此时并非全为 0° ,为了两者进行统一,在仿真平台中将各关节进行加权处理,以使此臂型下关节角度为 0° 。取四组机械臂特殊位置,并结合仿真平台中机械臂的位置,验证运动学正解计算的正确性。①手臂位于初始臂型,各关节角度都为 0° ,此时手臂位置应为 $(0, 120, 580)$;②第一关节转至 90° ,其它关节不动,此时手臂位置应为 $(120, 0, 580)$;③第二关节转至 90° ,其它关节为 0° ,此时手臂位置应为 $(0, 700, 0)$;④同理第三关节转至 90° ,位置应为 $(0, -210, 250)$;⑤第三关节转至 90° ,位置应为 $(0, 40, 500)$;通过仿真平台计算得到的以上 5 个手臂特殊臂型下的工具坐标系位置数据如表 2 所示,其臂型如图 8 所示,两者位置数据与臂型均一致,从而验证了正运动学模型的正确

性,而手臂姿态欧拉角,通过右手准则可以判定是正确的。

表 2 正运动学验证数据

组号	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	X	Y	Z
1	0	0	0	0	0	0	0	120	580
2	90	0	0	0	0	0	120	0	580
3	0	90	0	0	0	0	0	700	0
4	0	0	90	0	0	0	0	-210	250
5	0	0	0	0	90	0	0	40	500

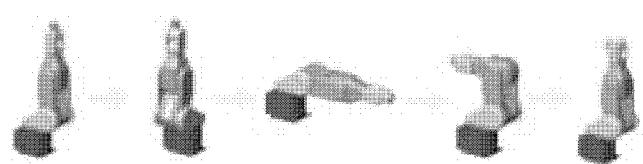


图 8 机械臂正运动学验证位置

3.3 运动仿真

仿真就是采用建立模型的方法复现实际物体运动发生的过程, 主要包含模型建立和实验仿真两个步骤。通过机械臂运动仿真能够得到机械臂动作的动画与工具坐标系运行的轨迹, 可以判断出机械臂动作的连贯性, 工作时有无干涉现象及是否能够满足空间操作需求。

由于机械臂在运动过程中, 各关节转过的角度不尽相同, 而运行时间却必须相同, 所以必须将各关节的运行时间进行归一化处理。为了更直观的观察机械臂工具坐标系经过的路径, 在机械臂的运行过程中, 将路径进行离散化处理, 用点标识出来, 这样机械臂末端扫过的路径便一目了然。机械臂在运行过程中, 可能包含几段路径, 所以机械臂在运行完第一段路径后, 将手臂此时的位置记为下一段的初始位置, 以避免每段路径都是从机械臂的初始位置开始。图9为机械臂运动仿真情况, 机械臂从(0,0,0,0,0,0)运动到(10,40,70,30,40,20), 再到(30,80, -60,50, -20,60), 再到(-30,50, -30, -20,20, -20), 最后到(-80,30, -70,110, 40,50), 仿真平台设有实时位姿表示文本框, 在机械臂运动过程中, 可以实时显示机械臂的位置与姿态, 从图中可以非常直观地看出机械臂工具坐标系运动过程中扫过的路径。

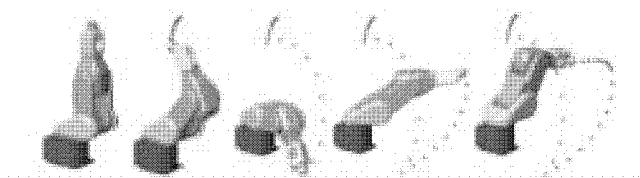


图9 机械臂FS03N运动仿真

4 结束语

运动学是机械臂研究领域中基础而关键的问题。本文针对川崎FS03N机械臂的运动学问题, 在分析机械臂构型结构的基础上, 采用DH法建立

机械臂的连杆坐标系, 并计算得到以关节角度值为变量的转换矩阵, 从而完成正运动求解。采用SolidWorks软件完成了该机械臂的三维实体建模, 编写接口程序, 将模型导入Matlab, 并将正运动学算法融入其中, 从而验证了正运动学求解的正确性, 更能够直观的监视机械臂各部分的运动轨迹。通过该方法可以解决具有该种构型的机械臂正运动学问题及运动仿真。

参考文献:

- [1] J S GU, C W DE SILVA. Development and implementation of a real - time open - architecture control system for industrial robot systems [J]. Engineering Applications and Artificial Intelligence, 2004, 17:469 - 483.
- [2] A ALBU - SCHAFER, S HADDADIN, CH OTT. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments [J]. Industrial Robot, 2007, 34 (5):376 - 385.
- [3] 康存锋, 杨建武, 费仁元. 开放式PC型运动控制器的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 5:800 - 802.
- [4] 孙斌, 杨汝清. 开放式机器人控制器综述[J]. 机器人, 2001, 23 (4):374 - 378.
- [5] 熊有伦, 唐立辛, 丁汉. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008:8 - 200.
- [6] J M SELING. 机器人的几何基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008:150 - 200.
- [7] PETER CORKE. Robotics, Vision and Control [M]. Berlin: Springer - Verlag Berlin and Heidelberg, 2011:50 - 128.
- [8] S H KIM, YOUNG HO KIM. Realization of a virtual simulator system on Window 98/NT environment [C]// International symposium on industrial electronics proceedings 2001: 216 - 220.
- [9] 孙亮, 马江. 六自由度机械臂轨迹规划与仿真研究[J]. 控制工程, 2010, 17 (3):388 - 392.

(责任编辑:李丽)

三种添加剂对松木屑/LDPE 微波共热解研究

汪 娟, 陈明强, 隋倩倩, 杨忠连, 王 君

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:早期热重分析研究表明,聚烯烃热解的温度比生物质温度高,生物质和塑料的热行为是独立的。在微波加热条件下,研究了三种添加剂(海泡石、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)在松木屑/LDPE 质量比为 10:1 的混料中进行共热解时,对共热解液相产率和化学成分的影响。通过方差分析发现,微波功率较添加剂对液相产率影响更为显著,600~1 000 W 较为适宜共热解;GC-MS 分析发现,海泡石抑制了愈创木酚及其衍生物的生成,但对 1-羟基-2-丙酮和乙酸(酐)可实现富集,平均含量分别达 20.10% 和 27.84%; Al_2O_3 可使 1-羟基-2-丙酮平均含量高达 22.47%,而紫丁香酚及其衍生物平均含量低至 1.97%; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 可促进热解产物定向转化为糠醛,平均含量最高可达 15.75%。

关键词:生物能;微波热解;共热解;固体废物利用

中图分类号:TK6 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0039-05

Study on Co-pyrolysis of Pine Sawdust and LDPE with Three Additives by Microwave Heating
WANG Juan, CHEN Ming-qiang, SUI Qian-qian,
YANG Zhong-lian, WANG Jun

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Early thermal gravimetric analysis showed that pyrolysis temperature of polyolefin is higher than biomass, and thermal behavior between biomass and plastic is independent. Influence of three additives – sepiolite, Al_2O_3 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – on the yields and chemical compositions of co-pyrolysis liquids (bio-oil) from the pine sawdust and low-density polyethylene (LDPE) mixed at weight ratio 10:1 using microwave heating was studied. Variance analysis showed that microwave power has more significant impact than these additives and the appropriate co-pyrolysis power is between 600 and 1 000 W. The liquids were analysed by GC-MS and the experimental data showed that sepiolite decreases generation of guaiacols, but enriches relative amount of 1-hydroxy-2-acetone and acetic acid (anhydride) in co-pyrolysis liquids, at 20.10% and 27.84% on average. Al_2O_3 maxed 1-hydroxy-2-acetone at 22.47% on average, and down eugenols to minimum at 1.97%. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ has directionality effect on 2-furancarboxaldehyde from the co-pyrolysis products which content maxed at 15.75% on average.

Key words: biomass energy; microwave pyrolysis; co-pyrolysis; solid wastes utilization

随着城市化进程的加快,固体废弃物处理日益成为困扰环境和发展的一大难题。松木屑在我国是一种常见农林固体废弃物,也是生物质能源转化利用的典型代表物^[1],在生物质热解制备生物油方面已有很多研究报告^[2-6]。低密度聚乙烯(Low

-Density Polyethylene, LDPE)在生产生活中的广泛应用,使之在城市垃圾中占有一定比重。能源和资源的可持续发展,对合理利用废弃物提出了新的要求^[7-10]。

微波作为一种非传统热源,近年来越来越多的

应用到化学反应中^[11~12]。微波加热过程中温度分布均匀,传热传质方向相同,有益于理想目标产物的获得。这种易于操作的加热方式由于其加热速率快,缩短了反应时间,减少了副产物的生成,且辐射内热方式便于控制加热均匀,受到了生物质快速热解的重视。

目前对塑料和生物质的共热解研究相对较少。早期热重分析研究表明,聚烯烃热解的温度比生物质温度高,生物质和塑料的热行为是独立的。本文拟采用微波作为热源,海泡石、Al₂O₃、Fe₂(SO₄)₃作为添加剂,对松木屑和LDPE进行共热解制取生物油,以确定微波功率和添加剂类型对热解液相产物的影响。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

松木屑取自淮南建材市场,LDPE颗粒购自齐鲁石化。

主要仪器与设备有:高速万能粉碎机(FW-400,北京中兴伟业仪器有限公司),干燥箱(101A-3,上海实研电炉有限公司),电子天平(ACS-1200JZB,中山市衡新电子有限公司),微波高温炉(NJL4-2型,南京杰全微波设备有限公司),气-质联用仪(QP-5050A GC-MS,日本Shimadzu)。

1.2 制样

将松木屑粉碎筛分后,取40~80目部分在自然条件下干燥至湿分约10%;LDPE颗粒未处理,约2~5mm。按NY/T 1881-2010《生物质固体成型燃料试验方法》进行工业分析和元素分析,结果见表1。

表1 原料样品的工业分析和元素分析 %

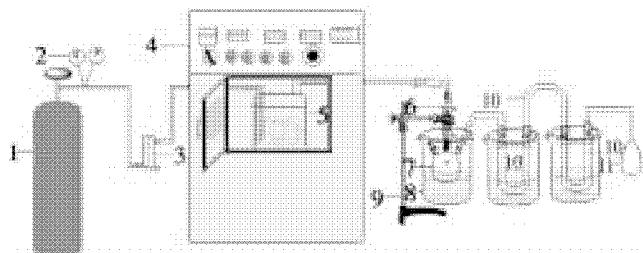
样品	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N
松木屑	12.69	0.28	73.42	13.61	49.10	5.21	0.50
LDPE	—	0.30	99.70	—	85.40	14.50	—

由表1知LDPE与松木屑是性质截然不同的原料样品,富含碳、氢。

按质量比10:1将松木屑和LDPE混合得到实验用试样。

1.3 共热解实验流程

实验装置如图1所示,用于共热解反应的石英反应器(外径10cm,高10cm)置于微波高温炉中,微波功率分别控制在400、600、800、1000W条件进行实验。



1. 氮气瓶;2. 压力表与减压阀;3. 转子流量计;4. 微波高温炉;5. 石英反应器;6. 直形冷凝管;7. 三口烧瓶;8. 冰盐浴;9. 铁架台;10. U形冷凝管;11. 集气袋

图1 共热解实验装置流程图

每次实验取20g松木屑、2gLDPE颗粒和2g添加剂,混合均匀后平铺于平底石英反应器底端装置,并加入2g左右的SiC作为热导体,以保证试样受热均匀。高纯N₂作保护气,流量2L·min⁻¹,实验前置换10min。石英反应器在微波高温炉中加热10min,反应产物通过导管引出,经冷凝管冷却后,在一浸入冰盐浴的三口烧瓶中收集液相,热解不凝气则通过气袋在流程尾端排气口收集。

1.4 生物油组成成分分析

共热解生物油经无水Na₂SO₄脱水后,使用气-质联用仪(GC-MS)分析其化学成分。仪器使用DB-17毛细管柱(0.25mmID×30m×0.25μm,Agilent J&W),检测器用带预置杆的高精度四级杆,真空排气系统为四级杆,载气为高纯He(99.999%)。程序升温设置为70℃维持5min,然后以10℃·min⁻¹的升温速率升至280℃。仪器参数设置见表2。

表2 气-质联用仪的分析参数设置

GC	MS
进样口温度 260℃	EI离子源
检测器温度 260℃	电子能量:70eV
柱前压力 80.8 kPa	电子增强器:1.65kV
分流比 1:12	扫描时间:0~19 min
总流量 19.2 mL·min ⁻¹	m/z:35~500 amu
柱流量 1.3 mL·min ⁻¹	全扫描方式(SCAN)
线速度 41.2 cm·s ⁻¹	

每份样品进样2次,每次 $1\mu\text{L}$ 。每份谱图从质谱离子流峰面积中由大到小选择20个峰进行分析。分析结果使用质谱数据库NIST21、NIST107、WILEY229和PMW_TOX2检索最概然有机化合物及其名称、分子式、化学结构等,并通过归一化峰面积确定各组分的相对含量。

2 结果与讨论

2.1 三种添加剂对共热解生物油收率的影响

相同实验条件下,不同添加剂随微波功率的提高所得生物油收率变化如图2所示。

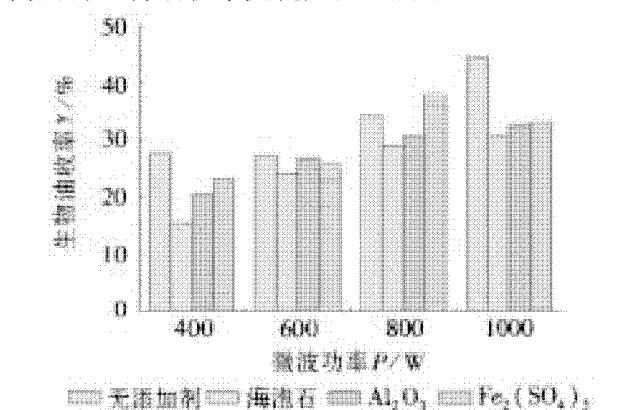


图2 三种添加剂对共热解生物油收率的影响

由图可知,在相同微波功率作用下,海泡石、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 的加入呈现出抑制生物油产生的趋势,尤其是海泡石相比无添加剂加入的混合试样,生物油收率下降约4%~8%。

尽管各种添加剂的加入试样及对比试样均呈现生物油收率上升的趋势,但通过二次多项式 $y = A \times P^2 + B \times P + C$ 拟合知,但其变化规律并不相同。添加剂加入后,实验区间内生物油收率随着微波功率的提高而逐渐放缓,而无添加剂时情况相反(见表3)。

表3 添加剂对共热解生物油收率的二次拟合系数

添加剂类型	A/P^2	B/P	$C/1$	R^2
无添加剂	7.00×10^{-5}	-0.066 8	43.364	0.996 6
海泡石	-4.00×10^{-5}	0.086 9	-12.417	0.999 9
Al_2O_3	-3.00×10^{-5}	0.058 5	1.433	0.999 3
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	-5.00×10^{-5}	0.086 2	-5.248	0.734 1

方差分析表明,微波功率的大小和添加剂的类型对生物油收率有显著影响,且前者影响更加明显,如表4所示。

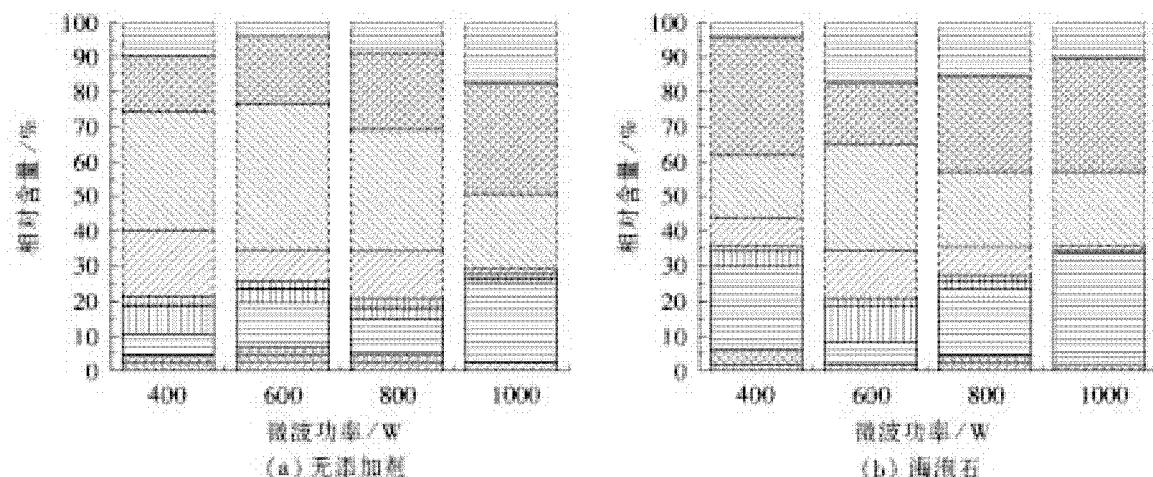
表4 微波功率和添加剂类型对生物油收率的方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit	显著性
微波功率	469.153 6	3	156.384 5	15.110 36	0.000 737	3.862 548	* *
添加剂类型	163.211 3	3	54.403 7	5.256 66	0.022 765	3.862 548	*
误差	93.145 4	9	10.349 4				
总计	725.510 3	15					

2.2 三种添加剂对共热解生物油成分的影响

以微波作为辅助热源,松木屑与LDPE以质量比10:1混料后,分别使用与LDPE等量的海泡石

(b)、 Al_2O_3 (c) 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (d) 作为添加剂后,共热解生物油成分的相对含量如图3所示,其中图(a)为无添加剂时的参照样。



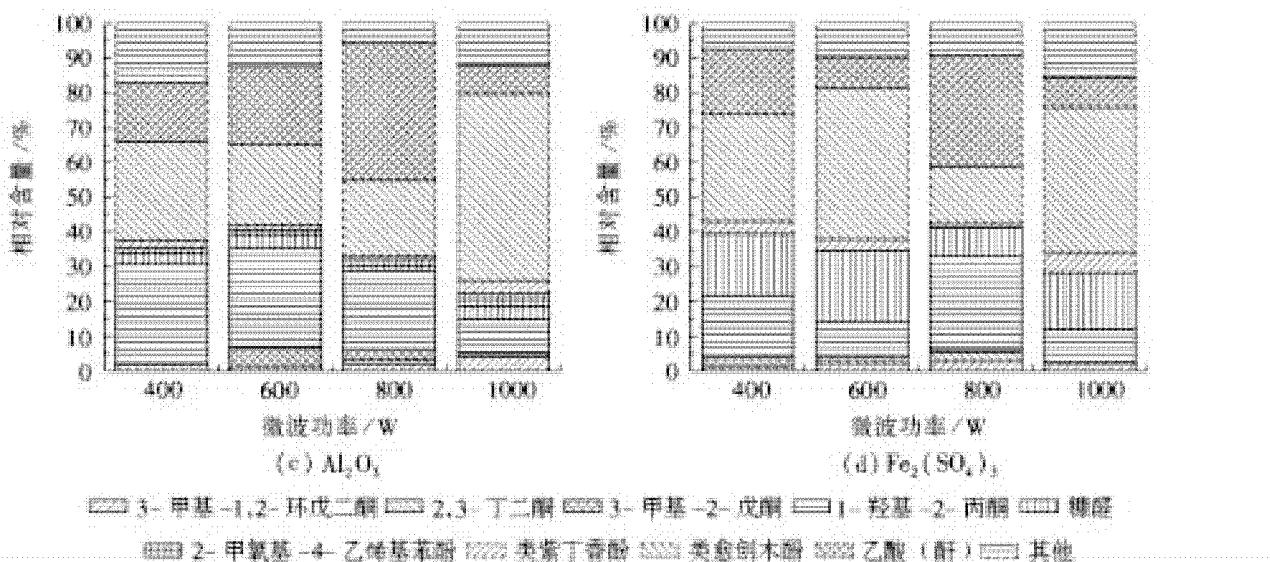


图3 三种添加剂对共热解生物油成分的影响

由图可知,共热解生物油主要由1-羟基-2-丙酮、糠醛、愈创木酚及其衍生物以及乙酸及乙酸酐四类产物所构成,其中在纯松木热解生物油中1-羟基-2-丙酮的含量较低^[13],应为松木屑/LDPE的共热解产物。

2.2.1 海泡石的影响 海泡石(Sepiolite)是一种层链结构含水镁硅酸盐粘土矿物,表面酸性很弱^[14]。实验结果表明,海泡石作为热解添加剂将明显降低生物油中愈创木酚及其衍生物的相对含量,实验区间内其平均含量22.84%,较无任何添加剂时降低10.25%;紫丁香酚及其衍生物相对含量亦受其影响,约降低2.84%;1-羟基-2-丙酮和乙酸(酐)平均含量分别为20.10%和27.84%,较无任何添加剂时分别提高7.29%和5.35%;糠醛含量变化不明显。

2.2.2 Al_2O_3 的影响 混料试样添加 Al_2O_3 后,紫丁香酚及其衍生物的平均相对含量仅约1.97%,较无任何添加剂时降低8.75%;而糠醛、愈创木酚及其衍生物和乙酸(酐)的平均含量相较小降低约1%,变化不大;1-羟基-2-丙酮平均含量为22.47%,较未添加前的试样共热解生物油提高约9.66%;且检出约3%的酮类化合物。

2.2.3 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 的影响 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 的加入使液相组成成分发生了较大的变化,其中糠醛的相对含量显著提高,平均值为15.75%,较之前高出11.76%;1-羟基-2-丙酮亦略有提高,平均含量

16.14%;紫丁香酚及其衍生物的相对含量变化接近 Al_2O_3 ,平均值3.43%,较无任何添加剂时降低7.28%;乙酸(酐)出现约5.38%的小幅下降;而愈创木酚及其衍生物的平均含量却无显著变化。

2.3 微波功率对共热解生物油成分的影响

相同实验条件下,微波功率对不同产物的生成影响各不相同,对于不同的化学品应选择一适宜的微波功率。综上实验结果知,如需生成低乙酸含量的生物油,在1 000 W以上添加 Al_2O_3 或 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 能取得较好的效果。但表3亦表明更高的功率不能提高生物油的收率,因此600~1 000 W应作为微波热解生物质较为适宜的功率进行使用。

3 结论

以微波作为热源,使用海泡石、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为添加剂,对松木屑和LDPE混料进行了共热解,通过GC-MS分析了共热解生物油的化学成分,得出以下结论:

- 对于共热解生物油中的四类典型代表物,海泡石可以富集1-羟基-2-丙酮和乙酸(酐),而愈创木酚及其衍生物平均含量达到最低22.84%; Al_2O_3 使1-羟基-2-丙酮平均含量达到最高22.47%,而紫丁香酚及其衍生物平均含量达到最低1.97%; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 能使热解产物定向转化为糠醛,平均含量达到最高15.75%;

2) 三种添加剂均会对生物油产率有抑制作用,但微波功率对生物油产率的影响更甚,热解反应可控制在600~1 000 W区间;

3) 适宜的微波功率和添加剂类型可以实现生物质的定向热解转化,得到高附加值化学品。

参考文献:

- [1] 黄国胜. 添加剂对生物质热解影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2009.
- [2] BRIDGWATER A V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading[J]. Biomass and Bioenergy, 2012 (38): 68~94.
- [3] COLLOT A G, ZHUO Y, DUGWELL D R, et al. Co-pyrolysis and co-gasification of coal and biomass in bench-scale fixed-bed and fluidised bed reactors [J]. Fuel, 1999, 78 (6): 667~679.
- [4] WANG G, LI A, QUAN C. Thermal decomposition of biomass/polylactic acid during co-pyrolysis [J]. Huagong Xuebao/CIESC Journal, 2009, 60 (Compindex): 1 787~1 792.
- [5] ZHANG L, XU S, ZHAO W, et al. Co-pyrolysis of biomass and coal in a free fall reactor [J]. Fuel, 2007, 86 (3): 353~359.
- [6] CHEN M, LIU S, WANG J, et al. Catalytic effects of several additives on co-pyrolysis of tobacco stalk and waste rubber tire power [C]// Proceeding 2011 Interantion Conference on Materials for Re-newable Energy & Environment, Shanghai (China), IEEE Press, May 20~22, 2011, 1:322~326.
- [7] SHARYPOV V I, BEREgovtsova N G, KUZNETSOV B N, et al. Influence of reaction parameters on brown coal-polyolefinic plastic co-pyrolysis behavior [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 78 (2): 257~264.
- [8] SHARYPOV V I, MARIN N, BEREgovtsova N G, et al. Co-pyrolysis of wood biomass and synthetic polymer mixtures. Part I: influence of experimental conditions on the evolution of solids, liquids and gases [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2002, 64 (1): 15~28.
- [9] CORNELISSEN T, JANS M, STALS M, et al. Flash co-pyrolysis of biomass: The influence of biopolymers [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2009, 85 (1~2): 87~97.
- [10] CORNELISSEN T, YPERMAN J, REGGERS G, et al. Flash co-pyrolysis of biomass with polylactic acid. Part 1: Influence on bio-oil yield and heating value [J]. Fuel, 2008, 87 (7): 1 031~1 041.
- [11] TIAN Y, ZUO W, REN Z, et al. Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (2): 2 053~2 061.
- [12] OMAR R, IDRIS A, YUNUS R, et al. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis [J]. Fuel, 2011, 90 (4): 1 536~1 544.
- [13] 陆强. 生物质选择性热解液化的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [14] 刘进军,瞿学良. 海泡石载体催化剂及其发展前景 [J]. 矿产综合利用,2002,4:30~34.

(责任编辑:李丽,范君)

C_h -空间中立型随机泛函微分方程解的稳定性

岳超慧, 张长勤

(安徽农业大学理学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 旨在研究非 Lipschitz 条件下 C_h -空间中具有无穷时滞的中立型随机泛函微分方程的解对初值的连续依赖性。 C_h -空间不同于一般的有界连续函数空间, 即 BC 空间; 而无穷时滞的随机泛函微分方程的研究方法亦区别于有限时滞的随机泛函微分方程。因此, 利用了 Bihari 不等式及其推论来进行稳定性的推导, 结合 Jensen 不等式、Cauchy 不等式等重要的不等式, 得到了在本文的假设条件下, 方程的解是均方稳定的这一结果。由此可见, 在一定的条件下, 将空间进行推广变化后, 具有无穷时滞的中立型随机泛函微分方程仍然具备一些很好的性质。

关键词: 中立型随机泛函微分方程; C_h -空间; 非 Lipschitz 条件

中图分类号: O211 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0044-04

Stability of the Solution to Neutral Stochastic Functional Differential Equations with Infinite Delay at Phase Space C_h

YUE Chao - hui, ZHANG Chang - qin

(School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036, China)

Abstract: The purpose of this paper is to study the stability of the solution to neutral stochastic functional differential equations with infinite delay at phase space C_h under non-Lipschitz conditions on the coefficients. Phase space C_h is different from generally boundary continuous function space, which is called phase space BC; whereas, the research method of stochastic functional differential equations with infinite delay is also distinguished from stochastic functional differential equations with finite delay. In this paper, we deduce the stability by means of Bihari inequality and its corollary, Jensen inequality, Cauchy inequality and other important inequalities. Finally, we obtain stability in mean square of the solution to INSFDEs under the assumptions of this paper. Thus it can be seen that under certain conditions, after the generalization of the phase space, neutral stochastic functional differential equations with infinite delay still possesses its good qualities.

Key words: neutral stochastic functional differential equations; Phase Space C_h ; non-Lipschitz conditions

随机微分方程(SDE)应用广泛^[1]。文献[2]给出了中立型随机泛函微分方程的相关结论。一个历史久远的系统需要用具有无穷时滞的随机泛函微分方程(ISFDE)进行研究, 对于 ISFDE 的研究, 相空间的选取较为关键。文献[3]²⁴²提到的 C_h -空

间得到了较好的应用, 文献[4]把 C_h -空间作为相空间得到了其解的相关结论。对于无穷时滞随机泛函微分方程的研究成果具体见文献[5-6]。文献[7]讨论了 C_h -空间中的 INSFDE 在系数满足非 Lipschitz 条件时, 方程的解具有存在唯一性。本

文将研究 C_h -空间中的 INSFDE, 将在方程系数满足非 Lipschitz 条件下, 给出其解的稳定性。

1 准备知识

对于函数 $x : [a, b] \rightarrow R^d$, 定义 $\|x\|^{[a, b]} = \sup_{a \leq s \leq b} |x(s)|$ 。 C 表示所有连续函数 $\varphi : (-\infty, 0] \rightarrow R$ 的集合。假设 $h \in C((- \infty, 0], R)$; $h(s) > 0$ 且满足 $l = \int_{-\infty}^0 h(s) ds < \infty$ 。则集合 $C_h = \{\varphi \in C : \int_{-\infty}^0 h(s) \|\varphi\|^{[s, 0]} ds < \infty\}$ 是一线性空间, 在其上

定义模 $\|\varphi\|_h = \int_{-\infty}^0 h(s) \|\varphi\|^{[s, 0]} ds$ 。 $(C_h, \|\cdot\|_h)$ 是 Banach 空间^{[3]243}。

对于 $0 \leq t_0 < T < \infty$, 设 $f : [t_0, T] \times C_h \rightarrow R^d$, $D : [t_0, T] \times C_h \rightarrow R^d$, $g : [t_0, T] \times C_h \rightarrow R^{d \times m}$ 为 Borel 可测的。

以 $|\cdot|$ 表示 R^n 中的 Euclidean 范数。如果 A 是一个向量或是矩阵, 它的转置表示为 A^T ; 如果 A 是矩阵, 它的 Frobenius 范数为 $\|A\| = \sqrt{\text{trace}(A^T A)}$ 。设 $t_0 > 0$ 为一常数, (Ω, \mathcal{F}, P) 是一完备概率空间, 其中 $\{\mathcal{F}_t\}_{t \geq t_0}$ 为满足通常条件的 σ -代数流, $W(t)$ 是定义在其上的 m 维 - Wiener 过程, 即 $W(t) = (W_1(t), W_2(t), \dots, W_m(t))^T$ 。

考虑如下 d -维具有无穷时滞中立型随机泛函微分方程:

$$d(X(t) - D(t, X_t)) = f(t, X_t) dt + g(t, X_t) dW_t, \quad t_0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中 $X_t = \{X(t+\theta) : -\infty \leq \theta \leq 0\}$, 为一 C_h -值随机过程。

式(1)的初始值如下:

$$X_{t_0} = \xi = \{\xi(\theta) : -\infty \leq \theta \leq 0\} \quad (2)$$

其为一 \mathcal{F}_{t_0} -可测的, C_h -值随机变量并且满足 $\xi \in \mathcal{M}^2((-\infty, 0]; R^d)$ 。

定义 1 称 $-\infty \leq t \leq T$ 上的 R^d -值随机过程 $X(t)$ 是式(1)具有初始值式(2)的解, 如果 $X(t)$ 满足以下几点:

- 1) $X(t)$ 是连续的且 $\{X(t)\}_{t_0 \leq t \leq T}$ 是 \mathcal{F}_t -适应的;
- 2) $f(t, X_t) \in \mathcal{L}^1([t_0, T]; R^d)$ 和 $g(t, X_t)$

$$\in \mathcal{L}^2([t_0, T]; R^{d \times m})$$

$$3) X_{t_0} = \xi \text{ 而且对于任意的 } t_0 \leq t \leq T \text{ 有 } X(t) = \xi(0) + D(t, X_t) - D(t_0, \xi) + \int_{t_0}^t f(s, X_s) ds + \int_{t_0}^t g(s, X_s) dW(s) \text{ a.s.}$$

若 $P\{X(t) = \overline{X(t)}\}$, 对所有 $-\infty \leq t \leq T\} = 1$, 称解 $X(t)$ 是唯一的。

本文假设条件如下:

(H1) 对任意的 $\varphi, \psi \in C_h$ 以及 $t \in [t_0, T]$ 有 $|f(t, \varphi) - f(t, \psi)|^2 \vee |g(t, \varphi) - g(t, \psi)|^2 \leq \kappa(|\varphi - \psi|_h^2)$, 其中 $\kappa(\cdot)$ 是从 R_+ 到 R_+ 的凸函数且单调增加, 并且 $\kappa(0) = 0$; $u > 0$ 时, $\kappa(u) > 0$; $\int_{0+} \frac{du}{\kappa(u)} = \infty$ 。

(H2) 对 $t \in [t_0, T]$, 存在 $K > 0$, 使得

$$|f(t, \mathbf{0})|^2 \vee |g(t, \mathbf{0})|^2 \leq K$$

(H3) 存在常数 $0 < K_0 < \frac{1}{64l^2}$ 对 $\varphi, \psi \in C_h$ 和 $t \in [t_0, T]$, $|D(t, \varphi) - D(t, \psi)|^2 \leq K_0 |\varphi - \psi|_h^2$ 且 $|D(t, \mathbf{0})|^2 \leq K_0$ 。

注 如下的例子将说明经典的 Lipschitz 条件是本文的特例^{[7]75}。

令 $K > 0$ 为常数, $0 < \delta < 1$ 为足够小的常数。定义

$$\kappa_1(u) = Ku, u \geq 0$$

$$\kappa_2(u) =$$

$$\begin{cases} u \log(u^{-1}), & 0 \leq u \leq \delta \\ \delta \log(\delta^{-1}) + \kappa'_2(\delta)(u - \delta), & u > \delta \end{cases}$$

$$\kappa_3(u) =$$

$$\begin{cases} u \log(u^{-1}) \log \log(u^{-1}), & 0 \leq u \leq \delta \\ \delta \log(\delta^{-1}) \log \log(\delta^{-1}) + \kappa'_3(\delta)(u - \delta), & u > \delta \end{cases}$$

2 解对初值的连续依赖性

在条件(H1)、(H2)和(H3)下, 式(1)解的存在唯一性已经得到^{[7]75}。本节将对解的稳定性进行讨论。

引理^[8] (Bihari 不等式) 令 $T \geq 0$, $u_0 \geq 0$; $u(t)$, $v(t)$ 是 $[0, T]$ 上的连续函数, $\kappa(\cdot) : R_+ \rightarrow R_+$ 是一个凸的连续增加的函数, 且对于每一个 $r >$

0,都有 $\kappa(r) > 0$,若有

$$u(t) \leq u_0 + \int_t^T v(s) \kappa(u(s)) ds, \quad 0 \leq t \leq T$$

则对 $t \in [0, T]$, $G(u_0) + \int_t^T v(s) ds \in \text{Dom}(G^{-1})$ 有

$$u(t) \leq G^{-1}(G(u_0) + \int_t^T v(s) ds)$$

这里 $G(r) = \int_1^r \frac{ds}{\kappa(s)}$, $r \geq 0$, G^{-1} 是 G 的反函数。

推论 引理的条件成立,且 $v(t) \geq 0$, $0 \leq t \leq T$ 。若对于任意的 $\varepsilon > 0$,存在 $t_1 \geq 0$,当 $0 \leq u_0 < \varepsilon$ 时,
 $\int_{t_1}^T v(s) ds \leq \int_{u_0}^\varepsilon \frac{1}{\kappa(s)} ds$,则 $u(t) \leq \varepsilon$ 。

为得到方程解对于初值的连续依赖性结论,给出其定义。

定义2 若对于 $\forall \varepsilon > 0$,存在 $\delta > 0$,当 $E|\xi - \eta|_h^2 < \delta$ 时,总有 $E|X^\xi(t) - Y^\eta(t)|^2 \leq \varepsilon$,称式(1)的解是均方稳定的。其中,式(1)满足初值条件 ξ 和 η 的解依次是 $X^\xi(t)$ 和 $Y^\eta(t)$ 。

定理 在条件(H1)、(H2)和(H3)下,式(1)的解是均方稳定的。

证 式(1)满足初值条件 ξ 和 η 的解依次是 $X^\xi(t)$ 和 $Y^\eta(t)$,因此

$$\begin{aligned} X(t) &= \xi(0) + D(t, X_t) - D(t_0, \xi) + \int_{t_0}^t f(s, \\ &\quad X_s) ds + \int_{t_0}^t g(s, X_s) dW(s) \text{ a.s.} \\ Y(t) &= \eta(0) + D(t, Y_t) - D(t_0, \eta) + \int_{t_0}^t f(s, \\ &\quad Y_s) ds + \int_{t_0}^t g(s, Y_s) dW(s) \text{ a.s.} \end{aligned}$$

继续演算得

$$\begin{aligned} X(t) - Y(t) &= \xi(0) - \eta(0) + D(t, X_t) - \\ &\quad D(t, Y_t) - [D(t_0, \xi) - D(t_0, \eta)] + \int_{t_0}^t (f(s, X_s) - \\ &\quad f(s, Y_s)) ds + \int_{t_0}^t (g(s, X_s) - g(s, Y_s)) dW(s) \end{aligned}$$

接下来可得

$$\begin{aligned} E|X(t) - Y(t)|^2 &\leq 5E|\xi - \eta|_h^2 + 5E|D(t, \\ &\quad X_t) - D(t, Y_t)|^2 + 5E|D(t_0, \xi) - D(t_0, \eta)|^2 + \\ &\quad 5E|\int_{t_0}^t (f(s, X_s) - f(s, Y_s)) ds|^2 + 5E|\int_{t_0}^t (g(s, X_s) - \\ &\quad g(s, Y_s)) dW(s)|^2 \end{aligned}$$

由相关不等式知

$$\begin{aligned} E|X(t) - Y(t)|^2 &\leq 5E|\xi - \eta|_h^2 + 5E|D(t, \\ &\quad X_t) - D(t, Y_t)|^2 + 5E|D(t_0, \xi) - D(t_0, \eta)|^2 + \\ &\quad 5(t - t_0)E\int_{t_0}^t |f(s, X_s) - f(s, Y_s)|^2 ds + 5E\int_{t_0}^t |g(s, \\ &\quad X_s) - g(s, Y_s)|^2 ds \end{aligned}$$

由条件(H1)和(H3),有以下不等式

$$\begin{aligned} E|X(t) - Y(t)|^2 &\leq 5l^{-2}E|\xi - \eta|_h^2 + 5K_0E \\ &\quad |X_t - Y_t|_h^2 + 5K_0E|\xi - \eta|_h^2 + 5(T - t_0)E\int_{t_0}^t \kappa(|X_s - \\ &\quad Y_s|_h^2) ds + 5E\int_{t_0}^t \kappa(|X_s - Y_s|_h^2) ds \end{aligned}$$

取上确界后可得

$$\begin{aligned} E(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X(s) - Y(s)|^2) &\leq 5(K_0 + l^{-2})E|\xi - \\ &\quad \eta|_h^2 + 5K_0E(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X_s - Y_s|_h^2) + 5(T - t_0 + \\ &\quad 1)E\int_{t_0}^t \kappa(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X_s - Y_s|_h^2) ds \leq 5(K_0 + l^{-2})E|\xi - \\ &\quad \eta|_h^2 + 5K_0l^2E(|\xi - \eta|_h^2 + \sup_{t_0 \leq s \leq t} |X(s) - Y(s)|^2) + \\ &\quad 5(T - t_0 + 1)E\int_{t_0}^t \kappa(l^2|\xi - \eta|_h^2 + l^2 \sup_{t_0 \leq r \leq s} |X(r) - \\ &\quad Y(r)|^2) ds \end{aligned}$$

整理并由Jensen不等式可得如下不等式

$$\begin{aligned} E(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X(s) - Y(s)|^2) &\leq \frac{5(K_0 + l^{-2} + K_0l^2)}{1 - 5K_0l^2} \\ E|\xi - \eta|_h^2 + \frac{5(T - t_0 + 1)}{1 - 5K_0l^2} \int_{t_0}^t \kappa(E(l^2|\xi - \eta|_h^2) + \\ &\quad E(l^2 \sup_{t_0 \leq r \leq s} |X(r) - Y(r)|^2)) ds \end{aligned}$$

这里,可令 $E|\xi - \eta|_h^2 \leq E(\sup_{t_0 \leq r \leq s} |X(r) - Y(r)|^2)$ 。由此可得

$$\begin{aligned} E(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X(s) - Y(s)|^2) &\leq \frac{5(K_0 + l^{-2} + K_0l^2)}{1 - 5K_0l^2} \\ E|\xi - \eta|_h^2 + \frac{5(T - t_0 + 1)}{1 - 5K_0l^2} \int_{t_0}^t \kappa(2l^2E(\sup_{t_0 \leq r \leq s} |X(r) - \\ &\quad Y(r)|^2)) ds \end{aligned}$$

亦即

$$\begin{aligned} 2l^2E(\sup_{t_0 \leq s \leq t} |X(s) - Y(s)|^2) &\leq \frac{10l^2(K_0 + l^{-2} + K_0l^2)}{1 - 5K_0l^2} \\ E|\xi - \eta|_h^2 + \frac{10l^2(T - t_0 + 1)}{1 - 5K_0l^2} \int_{t_0}^t \kappa(2l^2E \\ &\quad (\sup_{t_0 \leq r \leq s} |X(r) - Y(r)|^2)) ds \end{aligned}$$

由Bihari不等式,令 $u(t)=2l^2E(\sup_{t_0\leq s\leq t}|X(s)-Y(s)|^2),v(t)=\frac{10l^2(T-t_0+1)}{1-5K_0l^2},u_0=\frac{10l^2(K_0+l^{-2}+K_0l^2)}{1-5K_0l^2}E|\xi-\eta|_h^2。$

$\kappa(\cdot)$ 是一个从 R_+ 到 R_+ 单调增加的凸函数且当 $u>0$ 时, $\kappa(u)>0;\kappa(0)=0;\int_{0^+}\frac{du}{\kappa(u)}=\infty$ 。因此,对于 $M=v(t)\cdot T$,必然存在 $\varepsilon_0>0$,对任给的 $0<\delta<\varepsilon<\varepsilon_0$,当 $u_0=\frac{10l^2(K_0+l^{-2}+K_0l^2)}{1-5K_0l^2}$ $E|\xi-\eta|_h^2<\delta$ 时,有 $\int_{t_1}^T v(s)ds\leq M<\int_{u_0}^\varepsilon \frac{1}{\kappa(s)}ds$ 。由推论可得 $u(t)\leq\varepsilon$,定理得证。

参考文献:

- [1] 胡适耕,黄乘明,吴付科.随机微分方程[M].北京:科学出版社,2008:290-323.
- [2] MAO X R. Asymptotic properties of neutral stochastic differential delay equations [J]. Stochastic and Stochas-

(上接第19页)

4 结论

激光诱导荧光水源探测可突破地域范围及空间限制,有效及时地对水质情况、水源变化程度提供大量可用信息,为研究煤矿水源突变机理,及其突水防治提供了宝贵的数据及经验^[8]。LIF技术的灵敏度较高,检测效果好,使激光诱导荧光光谱成为检测超低浓度分子灵敏而有效的手段,可实现水源信息的准确、动态、快速发布,推动煤矿安全生产具有重大的意义。

参考文献:

- [1] 张慧,郑金龙.福建马坑铁矿主要含水层水化学特征与突水水源的识别[J].有色金属,2010,62(2):20-25.
- [2] 李宏斌,刘文清,张玉钩,等.水体中溶解有机物激光诱导荧光光谱分析方法[J].光谱学与光谱分析,

tic Reports,2000, 68:273-295.

- [3] 王克,黄启昌. C_h 空间与无限时滞的泛函微分方程解的有界性及周期解[J].中国科学,1987, 17A(3): 242-252.
- [4] 黄启昌.具有无限时滞的泛函微分方程的周期解的存在性[J].中国科学,1984, 14A(10): 881-889.
- [5] WEI F Y, WANG K. The existence and uniqueness of the solution for stochastic functional differential equations with infinite delay [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2007, 331:516-531.
- [6] 魏凤英.无限时滞随机泛函微分方程的基本理论[D].长春:东北师范大学,2006:45-58.
- [7] 岳超慧,张长勤,吴坚.非Lipschitz条件下 C_h -空间中立型随机泛函微分方程解的存在惟一性[J].山东大学学报:理学版,2013, 48(3):73-79.
- [8] REN Y, XIA N M. Existence, uniqueness and stability of the solutions to neutral stochastic functional differential equations with infinite delay [J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 210:72-79.

(责任编辑:何学华)

2006, 26(11):2 065-2 068.

- [3] 何磊.基于实测光谱的昆承湖水质遥感模型及反演[D].成都:成都理工大学,2010.
- [4] 周艺,周伟奇,王世新,等.遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J].水科学进展,2004,15(3):312-317.
- [5] 李麦亮.激光光谱诊断技术及其在发动机燃烧研究中的应用[D].湖南:国防科学技术大学,2004.
- [6] 赵南京,刘文清,张玉钩,等.激光诱导水体中DOM的荧光猝灭特性分析[J].光谱学与光谱分析,2006, 26(8):1 549-1 502.
- [7] 尚丽平,杨仁杰.现场荧光光谱技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009:25.
- [8] 蔡丽娜,刘平波,智长贵.水质遥感监测方法的探讨[J].测绘与空间地理信息,2008,31(4):68-73.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

单片机控制系统通信模型研究

刘 振

(皖西学院信息工程学院, 安徽 六安 237012)

摘要: 单片机是现代工业控制系统的重要组成, 单片机通信机制是控制系统稳定工作的基础。针对单片机控制系统中通信机制的设计问题, 分析了分布式控制系统的结构, 提出了单片机控制系统的通信模型, 根据系统采用的总线标准, 制定了相应的通信协议, 设计了通信帧的格式。

关键词: 单片机; 通信模型; 控制系统

中图分类号: TN915 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0048-04

Research on Communication Model of Single - chip Microcomputer Control System

LIU Zhen

(School of Information Engineering, West Anhui University, Lu'an Anhui 237012, China)

Abstract: The Single - chip microcomputer is an important component of modern industrial control systems. single - chip microcomputer communication mechanism is the basis of control systems stable work. In order to solve the problems of communication mechanism design in single - chip microcomputer control system, the basic structure of distributed control system was analyzed, and the communication model of single - chip microcomputer control system was proposed. According to the bus standard used in the control system, the corresponding communication protocol was established, and the format of the communication frame was designed.

Key words: single - chip microcomputer; communication model; control system

单片机在测量、控制等领域中有着广泛的应用。随着现代化工业的快速发展, 测量和控制的范围不断增加, 独立的单片机或者少量单片机组合的自主控制已经不能适应实际需要。单片机要想实现大规模工业控制和大范围的信息监测必须组成网络, 实现信息共享和联网控制。在更加复杂的实时控制领域中, 单片机还需要和计算机连接, 建立分布式的控制系统。因此, 单片机与单片机、单片机与计算机之间准确地通信成为系统稳定运行的基础。本文研究单片机通信中的关键技术, 分析以

单片机为主要构成的控制系统的组成结构、总线标准和通信协议, 从中找到设计单片机控制系统的一般方法。

1 系统结构

分布式控制系统, 一般分为三个层次, 信息管理层、操作监控层、设备控制层。系统的分层结构如图1所示, 将具体设备都抽象为网络节点。单片机处于系统的设备控制层, 一方面负责采集各类设备和环境信息传递给计算机, 另一方面接收计算机

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 六安市级科学资助项目(2012LW014)

作者简介: 刘振(1983-), 男, 安徽合肥人, 助教, 硕士, 研究方向: 嵌入式系统及应用。

的决策命令,实现对底层设备的控制。系统中与单片机直接相连的计算机处于操作监控层,利用监控软件,用户可以清晰地了解系统的运行状况,还可以向单片机发出命令,进而实时控制各类底层设备。分布式控制系统的最高层次是信息管理层,通过分析监控层传递的关键数据,为高层用户的决策提供参考。

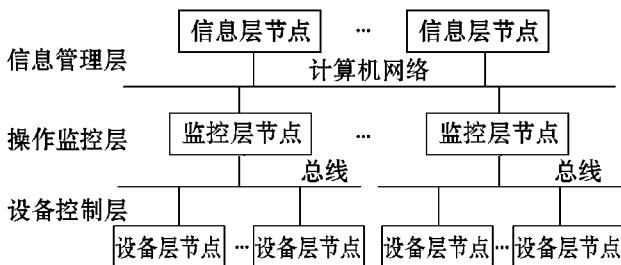


图1 系统分层结构

2 通信模型

由分布式控制系统的结构分析可知,信息层和监控层的设备主要是计算机,这两个层次之间的通信和控制实际属于计算机网络的范畴。单片机控制系统主要涉及分层结构中的监控层与设备层,其通信和控制主要在监控层计算机与设备层单片机之间进行。

监控层计算机与设备层单片机之间通常采用总线连接。虽然不同的总线标准对线路连接的规定不同,但是,从网络结构角度分析,可以将与单片机通信相关的系统结构用图2所示的通信模型来描述。操作监控层节点设备为计算机,设备控制层节点由接口电路、单片机和底层设备组成。从监控层到设备层的通信需经过接口模块,根据监控层与设备层之间通信协议转换的复杂程度,接口模块的组成会有一定变化。

由于计算机串行通信使用RS-232标准,因此接口模块通常为RS-232到其他标准的转换电路。如果设备层采用的总线控制协议比较复杂,则简单的接口电路不能实现协议控制功能,需要在接口模块中增设控制器,可以是单片机,也可以是其它具有控制功能的芯片。此时,接口模块除了能够实现标准信号间的变换功能外,还可以进行协议转换,具有了网关功能。

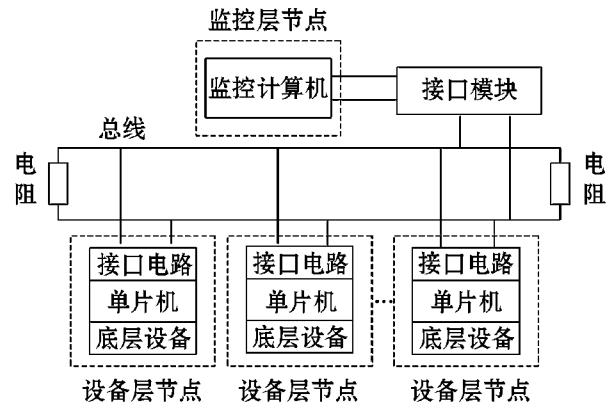


图2 通信模型

3 通信模式

通信模型中总线标准的选择取决于系统的通信模式。由于设备层单片机的各种操作是由上层监控计算机控制,设备层的单片机之间一般无需通信。因此,监控计算机与单片机之间可采用主从通信模式。总线标准可选用美国电子工业协会(EIA)制定的串行总线标准RS-485^[1]。RS-485总线基本可以满足控制系统监控层与设备层通信时,对传输速率、距离和负载节点等方面的要求。

但是,有些控制系统还要求设备层节点在一定条件下能够实现与上层节点的主动通信,这就需要采用多主通信模式,总线标准可选择CAN总线^[2]。CAN总线在设计时就考虑了多主控制和总线仲裁。当网络空闲时,任何一个节点都可以向其它节点发起通信连接,因此适合于多主通信的网络。

4 通信协议设计

通信协议是单片机控制系统信息传输的基础,只有通信双方遵守相同的通信协议,才能实现通信。由于通信协议与系统采用的通信模式和总线标准都有密切关系,在制定通信协议时必须综合考虑这些因素的影响。设计监控层与设备层之间的通信帧格式时,应根据系统选择的总线标准,制定相应的帧格式。

4.1 采用RS-485总线

由于RS-485总线只规定了线路的电气特性,未对通信协议做出具体定义,当设备层采用RS-485标准时,用户需根据系统功能进行协议设计。通过对控制系统的功能分析可知,监控层对设备层

主要是控制命令,设备层向监控层主要是传输信息。因此,可以根据上行和下行来定义通信帧格式。

4.1.1 监控层下行帧格式 借鉴点对点协议帧格式^[3],设计监控层下行帧格式如表1所示。帧头和帧尾,表示一帧的开始和结束,可以使用特殊字符。帧格式中设置目的地址字段,存放设备层单片机的地址标识。由于计算机除了发送控制命令以外,还需要对单片机上传的数据信息进行回应,因此在帧格式中设置帧类型字段,用以区分不同类型的帧,主要是控制帧和应答帧。根据帧类型的不同,信息域中的数据有不同的含义。帧类型为控制帧时,信息域的内容为各类控制命令,有单片机工作状态的设定和查询、信息上传、底层设备控制等,具体设置可由设计者根据系统需要制定。帧类型是应答帧时,信息域中可以设置相应字段实现对设备层上传数据的回应。帧校验存放校验信息。

表1 监控层下行帧格式 byte

帧头	目的地址	帧类型	信息域	帧校验	帧尾
1	1	1	1	1	1

上述监控层下行帧的设计,考虑了帧格式的通用性,如果设备层单片机采用多机通信模式,监控层的下行帧格式可以简化。当单片机工作在多机通信模式时,通过设置第九数据位,能够实现地址信息和数据信息的区分。通信中处于从机地位的设备层单片机首先只接收地址格式的信息,只有接收的信息与自己的地址标识相符,才与上层主机建立通信联系,并接收后续数据信息,否则恢复到接收地址信息状态。因此,在多机模式下,下行帧可以分为地址帧和控制帧两种类型。监控层计算机通过地址帧与目标单片机取得联系,再发送控制帧对单片机进行控制。

地址帧是由11位二进制比特组合而成,格式如图3所示,包括起始位、从机地址、第九数据位、停止位^[4]。在控制系统中,每个设备都有确定的地址标识,监控层计算机需要与设备层单片机建立联系时,就将相应单片机的标识写入从机地址区域。第九数据位用于实现帧类型的区分,当发送地址帧时,需设置为1,使从机能够识别出接收的是地址信息。



图3 地址帧格式

控制帧也使用11位二进制比特(见图4),其中,控制命令可由用户根据需要自行设定,发送控制帧时,第九数据位需置为0。



图4 控制帧格式

4.1.2 设备层上行帧格式 设备层单片机到监控计算机的通信主要是对控制命令的回复,包括正确接收命令的应答和各类信息的上传,制定设备层上行帧格式如表2所示。源地址字段存放设备层单片机的地址标识。帧长字段说明设备层上行帧总的字节数。信息域存储单片机上传的信息。为保证帧格式有一定通用性,信息域的长度应采用可变形式。

表2 设备层上行帧格式 byte

帧头	源地址	帧长	信息域	帧校验	帧尾
1	1	1	variable	1	1

4.2 采用CAN总线

CAN总线中数据的收发,需要具有控制器功能的芯片对接口电路进行控制。因此,通信模型中的接口模块需增加单片机作为控制芯片。由于监控计算机到接口模块部分通常使用RS-232总线,而设备层使用CAN总线通信。当监控层和设备层通信时,接口模块需要对监控层和设备层之间通信的帧格式进行转换,将控制层发送的下行帧,转换为CAN总线格式,并控制接口电路发送到总线上。对于设备层发来的CAN总线格式的帧,则需要转换为RS-232总线格式,传递给监控层。所以,系统的通信实际上分为控制层与接口模块通信以及接口模块与设备层通信两个部分,此时接口模块具有通信网关功能。

因为RS-232总线对通信协议没有明确格式要求,所以监控计算机和通信网关的通信协议,可

以根据系统的功能需要进行设计。其中,监控层到网关的下行帧主要包含对设备层的各种指令,通信网关上行通信的任务是将设备层发送的信息传递给监控层。因此,监控计算机和网关之间的通信帧,可以使用为 RS-485 总线标准设计的监控层下行帧通用格式和设备层上行帧格式。

网关和设备层通信的帧格式使用 CAN 总线标准格式,网关和设备层的单片机需要将通信数据按照 CAN 总线格式组成帧,再控制接口电路进行发送和接收。CAN 总线具体的帧格式可以查阅相关文献^[5],文中不再详述。

5 系统工作流程

在规定了系统中各部分通信帧的格式后,还需要设定系统的工作流程,保证系统能够正常运行。

1) 主从通信模式。主从式通信中,监控计算机首先向需要联系的设备层单片机发送下行帧,设备层单片机接收后,检查地址信息是否与自身地址标识相符。如果相符,单片机根据下行帧的命令要求,执行相关命令,并发送上行帧应答。若地址信息不符,则不予执行。若通信数据传输正确,接收方发送应答信息。若通信数据出现错误,接收方丢弃数据,等待重新发送。

2) 多主通信模式。控制系统工作在多主通信模式,可以使用主从模式中的工作流程,每次通信由监控计算机发起,单片机根据计算机命令执行操作和应答。也可根据多主通信模式的特点,让设备层单片机按照一定规则主动向监控计算机发送信息,从而简化监控计算机的巡检工作。

3) 重发机制。由于影响通信正常工作的因素很多,因此,当出现通信故障时,系统如何处理也是需要考虑的问题。借鉴数据链路层的超时重发机制,发送方在发送一帧后开始计时,在设定的时间内没有收到接收方的反馈,发送方认定数据丢失,启动重发机制。如果多次重发仍无反馈,则认定通信失败。

6 结语

本文研究了单片机控制系统的通信机制,给出了单片机控制系统的通信模型,分析了系统的通信模式和总线选择的关系。根据系统的功能需求,选取了合适的总线标准,设计了相应的通信协议并结合系统的通信模式,制定了工作流程,为单片机控制系统的研究和开发提供了参考。

参考文献:

- [1] JAN AXELSON. Serial Port Complete [M]. Lakeview Research, 2007: 79–88.
- [2] 饶运涛,邹继军,郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003: 18–19.
- [3] 谢希仁. 计算机网络 [M]. 第 5 版. 北京:电子工业出版社,2008: 73–74.
- [4] 李朝青. 单片机原理及接口技术 [M]. 第 3 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2005: 152–160.
- [5] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用 [M]. 第 2 版. 北京:清华大学出版社,2008: 67–73.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

矿井巷道地质钻孔三维可视化设计

杨华忠, 张平松

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:煤矿井下巷道掘进过程中施工多种前探钻孔, 用来进行地质构造、瓦斯气体及富水区等异常的预测。现有钻孔设计多为平面化过程, 对地质条件可视化程度低。以 VC++语言为平台, 构建巷道掘进顺层方向前探钻孔、高底抽巷道抽排钻孔及石门揭煤钻孔等不同类型钻孔的三维模型, 可全面满足钻孔设计控制需求, 输出钻孔施工生产中需要的各种平剖面图。所完成的井下巷道钻孔可视化系统, 设计信息量丰富可靠, 可提高勘探工作效率, 适用于矿井地测及抽排等实际生产工作。

关键词:井下钻孔; 三维可视化; 地质应用

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0052-04

Three-dimensional Visual Design for Geological Boreholes in Roadways of Mines

YANG Hua-zhong, ZHANG Ping-song

(School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In process of roadway excavation in coalmines advanced detection boreholes are performed to forecast abnormal geological structure, gas and water-rich areas. Existing borehole design is plane, with low degree of visualization of geological conditions. By use of VC++ language as a platform three-dimensional model was built for design of different types of boreholes such as detection boreholes along strike in coalbed, gas drainage boreholes in roadway above or beneath coalbed, and boreholes for coal seam discovering by crosscutting, which can fully meet drilling design control requirements, and output different kinds of plane and cross-sectional view drawings needed in borehole construction. By using the visualization system of drilling design in underground roadways, design is rich in information and reliable, and improves efficiency of exploration work, which is applicable in mine geological survey and gas drainage.

Key words: underground borehole; 3D visualization; geological application

煤矿井下钻探作为一种有效的对瓦斯、水文和构造等地质进行勘探的重要手段, 在矿井安全高效生产中起着重要的保障作用。通常钻孔施工过程

中会遇到地质构造异常, 钻孔真实轨迹及见煤信息与钻孔设计会存在一定的变化。煤矿地质测量部门和钻孔施工方会对施工钻孔进行前期设计, 确保

打钻任务顺利完成。目前,现有设计是在 CAD 设计系统中完成的二维平剖面图件,通过平面尺寸标注示钻孔参数及其经过层位等地质信息,其三维效果不强。文献^[1-9]资料显示,利用地质条件构建三维地质可视化系统工作研究内容较多,但针对钻孔三维辅助设计研究内容较少。论文通过构建井下巷道四种最主要的施工瓦斯抽排钻孔模型,编制相应的软件进行专门的三维辅助设计,对各种地质信息进行录入,并可结合钻孔特点输出所需要的平剖面 CAD 图,进一步提高了现场工作效率,在矿井生产管理中具有重要的作用。

1 三维钻孔模型设计

1.1 井下钻孔种类

根据钻孔所担负的主要任务与空间位置关系,煤矿井下目前设计的钻孔可分为四个大类,即:顺层钻孔、高抽巷钻孔、底抽巷钻孔及石门揭煤钻孔。其中顺层钻孔主要施工在煤层巷道掘进掌子面上,重点对前方地质条件及瓦斯条件进行探查与排放;高、底抽巷钻孔是在回采煤层工作面上、下方施工巷道的钻窝中施工的钻孔,工作面形成过程中为安全起见,在煤层的顶底板布置一条高抽巷道或底抽巷道来对煤层中的瓦斯进行抽放释压,保证上、下顺槽巷道掘进的安全进行及后期工作面的正常回采;石门揭煤钻孔,是为消除石门揭穿煤层时可能存在的突出危险,在石门向突出危险煤层打钻,排放煤层中的瓦斯,使得煤层的突出潜能得到释放,保证石门巷道安全穿过前方煤层。

因此,井下钻孔可视化设计就必须结合矿井钻孔设计技术要求,进行计算机软件编制,形成一套完整的钻孔设计、输出及预报软件系统。通过对钻孔的三维设计,直接输出相应的设计 CAD 图件,供通防技术人员进行煤矿井下钻探施工管理与应用。

1.2 三维钻孔设计

钻孔设计重点是对煤层及巷道位置进行控制,因此结合钻孔所在位置先固定煤层位置,再设计开钻孔(钻窝)位置,按设计方位进行钻孔布置。其中迎头顺层布钻设计主要是根据煤层与巷道参数,在巷道顺着煤层方向一次性导入多个钻孔,可以是单排也可以是多排布置。顺层布钻巷道设计流程主要是先导入顺层巷道,在三维视图中,可改变巷道或煤层块的长度和宽度;再根据需要对顺层

钻孔进行添加。图 1 为顺层钻孔中设计平面、剖面和断面视图(见图 1)。

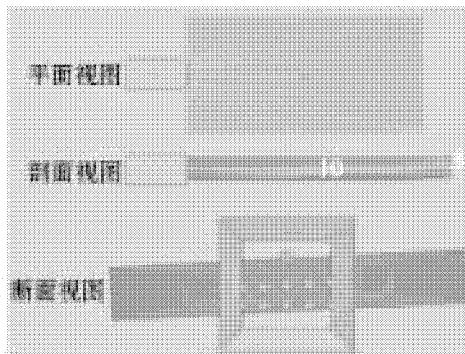
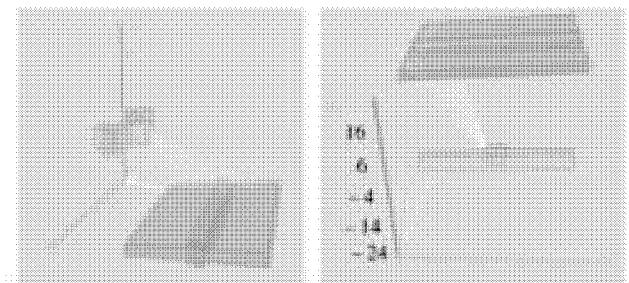


图 1 顺层钻孔中多排钻孔三维视图

高底抽巷设计时,是在巷道中一次性布设多个钻孔,控制下伏或上覆工作面的风巷或机巷两侧某一距离内的瓦斯抽排放。其中开孔断面是高(底)抽巷左、右帮或底板(即钻窝的掌子面及底板),终孔断面是上、下顺槽巷道向两侧延展某一长度的煤层顶底板。图 2 为高底抽巷道设计三维效果图,其主要是能对下伏或上覆煤层一定范围加以控制,通过瓦斯抽排保证上、下顺槽掘进的安全(见图 2)。



(a) 高抽巷道钻孔 (b) 底抽巷道钻孔

图 2 高底抽巷道布钻设计效果图

石门揭煤巷道布钻可以分为两种情况,即在石门巷道的迎头布钻和在巷道迎头两帮的钻窝布钻,其设计功能是根据煤层与巷道参数,在穿层石门巷道迎头一次性布设多个钻孔控制石门前方煤层的位置或抽放瓦斯。其开孔断面是石门巷道的迎头,终孔平面石门巷道迎头将要揭露煤层的顶底板。

1.3 钻孔剖面生成与输出

为了给生产单位提供平剖面图件用于生产管理,软件结合钻孔的三维设计结果,对平剖面进行转换,直接输出到 CAD 中,通过适当调整即可满足原设计的图件,其操作极为方便。巷道图元之间采用非直线形式,以实际角度进行弧形连接。根据巷

道的不同用途,其断面形状、宽度和高度各不相同,可以根据巷道断面的形状不同概况出几类模型。模型按照断面分类,可以简单分为矩形断面巷道、梯形断面巷道、拱形断面巷道、圆形断面巷道。图

3为顺层钻孔输出的各种平剖面及相关数据表格,与原来技术人员使用CAD软件手绘制作图件一致,能直接用于生产之中(见图3)。

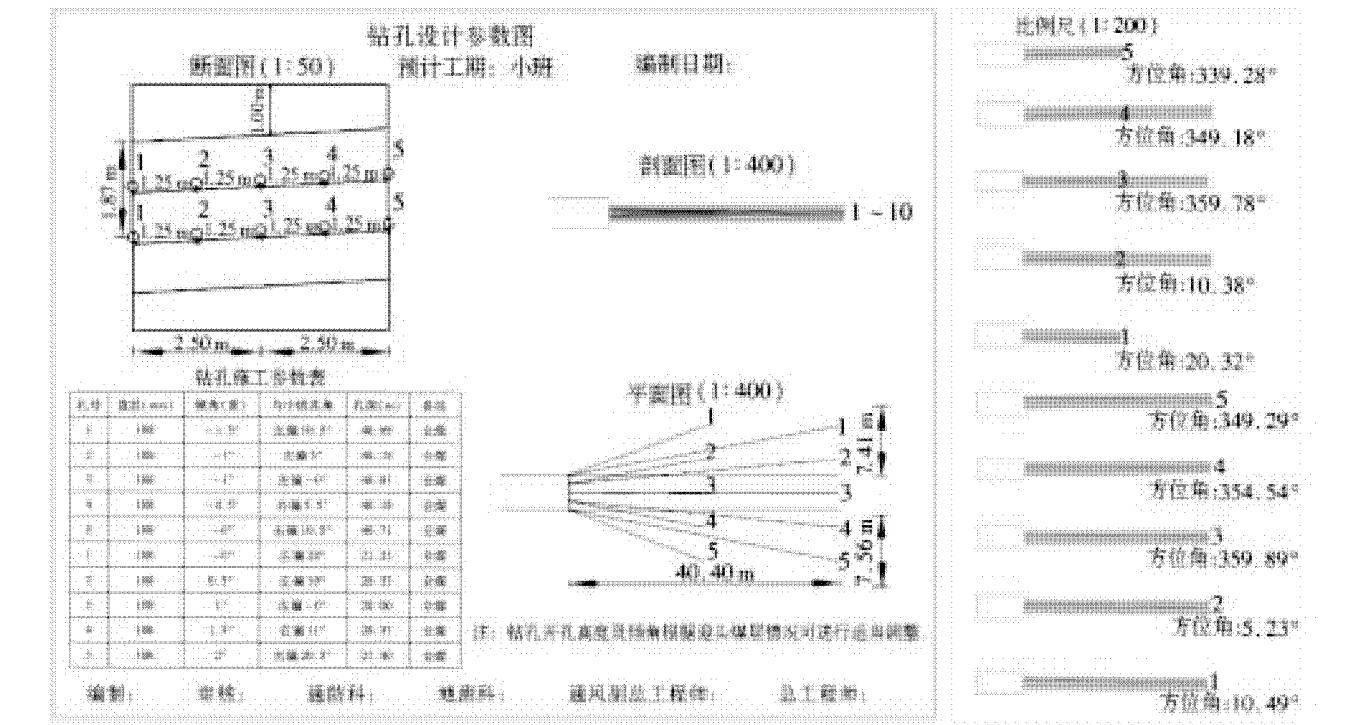
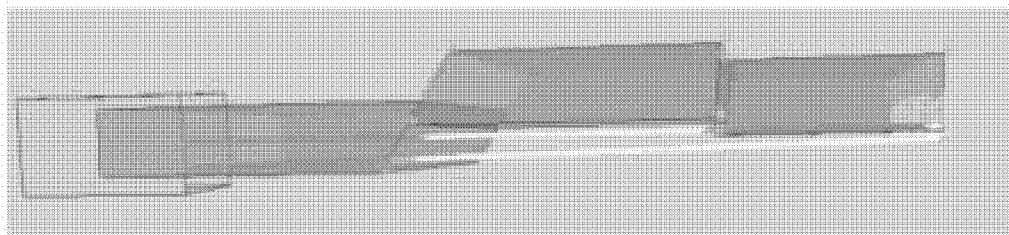


图3 设计钻孔的CAD输出

图4为煤层中存在构造条件时的三维结果反演表达,以及其输出的矢量图。由图4可以看出,

钻孔的见煤情况及断层的位置,可为后期的巷道掘进提供地质依据(见图4)。



(a) 煤层构造段三维显示

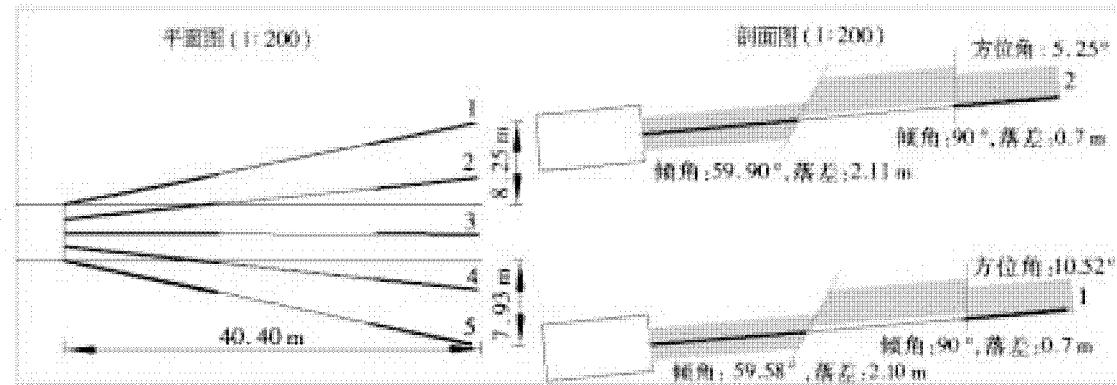


图4 断层构造在平剖图中输出表达

2 结论

井下钻孔可视化技术为煤矿井下各种抽、排钻探孔设计与成图提供计算机辅助,并能根据钻孔的见煤信息对煤层及周边的地质情况进行不同程度的表达。

1) 针对煤矿各种顺层巷道、高底抽巷道、石门揭煤巷道等抽排放或前探钻孔进行设计,实现了三维模型化并导出为 CAD 图件,其功能满足矿方通防技术人员对钻孔设计的需求。

2) 根据钻孔施工台账中的地质信息,采用表格直接录入和文件导入两种形式,在三维模型中对钻孔控制范围的地质信息交互反演,对煤层工作面的空间形态及预报构造进行显示,并直接导出为 CAD 图件。

3) 今后还需要对施工钻孔的三维空间特征进行深入细致表达,能更为精确地分析与控制探测区域前方的重要地质信息。

参考文献:

- [1] 宋仁波,江南. 基于 GIS 的三维地质可视化系统设计与

- 实现[J]. 工程地质计算机应用,2011(04):22-27.
- [2] 李香臣,徐洋林,李正元. XML 技术结合 Surpac 软件实现矿体三维可视化[J]. 矿山测量,2011(04):10-13.
- [3] 周爱华. 矿井地质三维可视化研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2003.
- [4] 车德福,殷作如,张瑞玺. 井巷工程三维建模及无缝开挖模拟技术[J]. 煤炭学报,2012,37(4):548-552.
- [5] 曹代勇,王占刚. 三维地质模型可视化操作的实现[J]. 煤炭学报,2004,29(4):422-424.
- [6] 李长春,王宝山,薛华柱. 基于 GTP 的煤矿地质体三维建模及剖切[J]. 煤炭学报,2008,33(11):1 268-1 271.
- [7] 杨成杰,吴冲龙,张夏林. 基于实体与块体混合模型的三维矿体可视化建模技术[J]. 煤炭学报,2012,37(4):553-558.
- [8] 李晓军,胡金虎,朱合华,等. 基于 Kriging 方法的煤层厚度估计及三维煤层建模[J]. 煤炭学报,2008,33(7):765-769.
- [9] 李章林,吴冲龙,张夏林,等. 煤炭三维地质建模信息系统的研制及关键技术[J]. 煤炭学报,2011,36(7):1 117-1 123.

(责任编辑:李丽,范君)

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 黄友锐. 基于遗传神经网络的自整定 PID 控制器[J]. 系统仿真学报,2003,15(11):1 628-1 630.
- [2] 李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38.
- [3] 江铭炎,袁东风. 人工鱼群算法及其应用[M]. 北京:科技出版社,2012:86-121.
- [4] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法

- [D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [5] 范玉军,王冬冬,孙明明. 改进的人工鱼群算法[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2007,24(3):23-26.
- [6] 黄友锐,曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京:科技出版社,2010:28-58.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2004:16-24.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

蹬空条件下上提面回采巷道顶板运动特征研究

陈登红^{1,2}, 华心祝^{1,2}, 杨科^{1,2}

(1. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要: 提高回采上限工作面(上提面)的回采巷道由于受到底部蹬空采动影响, 矿压显现较浅部其他回采巷道更加剧烈, 为安全生产需研究其老顶运动特征。通过悬臂梁理论计算拟合远距离上覆工作面及回采巷道基本顶受下部蹬空回采影响在初始影响段的下沉挠度曲线; 并通过数值模拟计算对比分析了理论计算结果及进一步计算分析了上覆工作面及回风巷的基本顶运动变形特征。结果表明: 数值模拟计算曲线与理论拟合曲线较好吻合, 结合工程实践, 其计算过程能够很好地反映顶板运动变形特征。研究结果能为类似条件下回采巷道布置提供一定参考依据。

关键词: 回采巷道; 顶板运动; 上提面

中图分类号: TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1098(2013)02-0056-06

Characteristics of Roadway's Roof Movement under Floor Failure in Longwall with Increased Upper Mining Limit

CHEN Deng-hong^{1,2}, HUA Xin-zhu^{1,2}, YANG Ke^{1,2}

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory of Safe and Efficient Coal Mining of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Due to upper mining limit of longwall is increased, roadway is affected by floor failure, which strata stress occurrence is more obvious than that in other shallow roadways. In order to assure safe mining the characteristics of roof movement are needed to study. By theoretical calculation of cantilever beam, subsidence deflection curves of fundamental roof of the wall and roadway which were influenced by lower seam mining, were fitted. Theoretical calculation results were compared with numerical simulation calculation results. Further more deformation characteristics of the wall and fundamental roof of return airway were calculated. The results showed that theoretical curve was well fitted with numerical simulation curve. Combining with engineering practice, the calculation results well reflect deformation characteristics of fundamental roof movement. The results provide a reference to roadway layout under the similar conditions.

Key words: roadway; fundamental roof movement; longwall with increased upper mining limit

随着开采技术不断的进步, 支护水平的大幅提高, 为尽可能多的回收国家煤炭资源, 着手开展提

高回采工作面的回采上限研究, 而且其研究的可行性和迫切性共存。在提高回采上限的过程中, 由于

收稿日期: 2012-10-15

基金项目: 高等学校博士点基金资助项目(20103415120001)

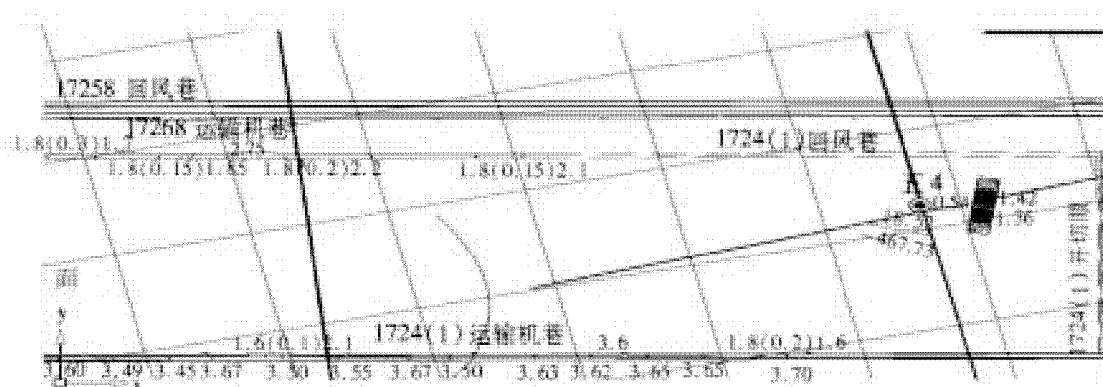
作者简介: 陈登红(1986-), 男, 安徽潜山人, 在读博士, 研究方向: 矿山压力与岩层控制。

受到下覆煤层回采采动影响,上提面回采巷道顶板破碎,掘进、回采过程中顶板急剧下沉,矿压显现异常剧烈。目前,针对采动影响下的上覆煤层回采巷道顶板运动特征研究,较多的出现在以保护层卸压开采为研究对象的课题里^[1-5],而部分针对浅埋煤层回采时矿压显现规律的研究很少考虑远距离下部煤层回采采动影响^[6],但是由于上提面回采巷道掘进时常受采动影响且埋藏比较浅,在特定条件下距深部煤层较远,从开采埋藏深度、采动影响的

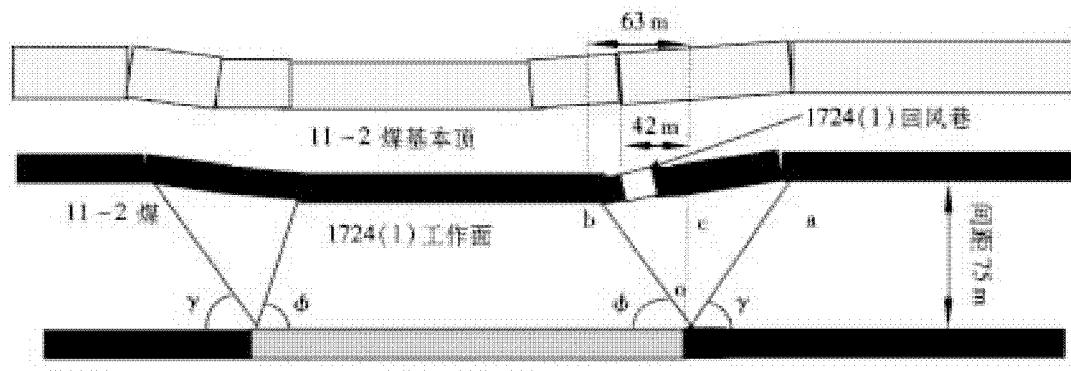
距离都显然不同于前面两种情况。为保障上提面安全高效回采,实现节约国家煤炭资源,需对采动影响的上提面回采巷道的顶板运动特征进行深入研究。

1 工程背景

以淮南矿业集团张集北矿 1724(1)工作面回风巷为例,分析其受到下部蹬空采动时,本煤层 1724(1)工作面回采巷道基本顶运动特征(见图 1)。



(a) 平面布置示意图



(b) 剖面布置示意图

γ —采动影响角,相似模拟实验取得; ϕ —充分采动角,相似模拟实验取得。

图 1 蹬空条件下 1724(1)工作面布置示意图

假设基本顶以给定变形的形式作用于下覆煤层,受蹬空采动影响的回采巷道基本顶的弯曲下沉对回采巷道的顶板变形具有控制作用,因此研究基本顶的下沉变形特征,为巷道顶板的控制、巷道空间位置优选提供一定的参考依据。

11-2 煤受底部 8 煤一次蹬空回采影响基本顶下沉影响范围可根据煤矿特殊开采技术^[7]及相似模

拟试验提供参数:采动影响角 $\gamma = 53^\circ$,充分采动角设 $\phi = 50^\circ$,11-2 煤和 8 煤层两层间距为 75 m,可算出 ab 段长度为 119.5 m,其中 bc 段 63 m,ac 段 56.5 m,由图 1 可知回风巷段尚未达充分采动,其附近煤层及顶底板仍受下部煤层采动影响,可将影响区靠近边界 a 端长度为 L 的一段基本顶区域设为悬臂梁。

2 上覆回风巷基本顶变形分析

2.1 理论计算

在回采8煤17268工作面和11-2煤1724(1)工作面基本顶下沉分析中,设11-2煤基本顶为半无限长悬臂梁,力学模型如图2所示。

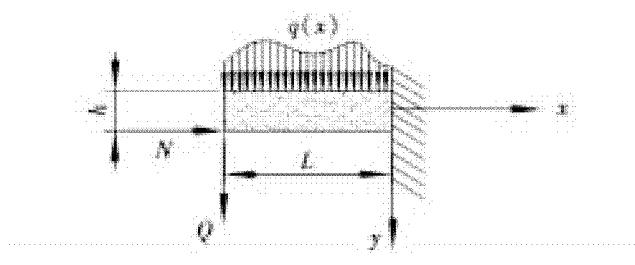


图2 力学模型

悬臂梁受到横向分布载荷 $q(x)$ 及轴向力 N 作用。由Winkler弹性地基假设有

$$q(x) = -ky \quad (1)$$

其中 k 为Winkler地基系数^[8],可用式 $\sqrt{\frac{E}{h}}$ 表示,将其视为半无限长梁,则参照Timoshenko的解,梁的弯曲变形微分方程为

$$EIy^{(4)} + Ny^{(2)} = q(x) \quad (2)$$

式中: EI 为抗弯刚度。

$$\text{令 } s = N/EI, r^2 = k/EI \quad (3)$$

则式(2)变为

$$y^{(4)} + sy^{(2)} + r^2y = 0 \quad (4)$$

特征方程为

$$\lambda^4 + s\lambda^2 + r^2 = 0 \quad (5)$$

$$\lambda_{1,2,3,4} = \pm\alpha \pm \beta i \quad (6)$$

式中: $\alpha = \sqrt{\frac{r}{2} - \frac{s}{4}}$; $\beta = \sqrt{\frac{r}{2} + \frac{s}{4}}$ 。

则方程解为

$$y = e^{\alpha x} (a\cos\beta x + b\sin\beta x) + e^{-\alpha x} (c\cos\beta x + d\sin\beta x) \quad (7)$$

代入边界条件及连续条件

$$x \rightarrow \infty, y = 0; x = 0, y = y_0, M_0 = EIy_0^{(2)}, Q_0 = EIy_0^{(3)} + Ny_0^{(1)} \quad (8)$$

最终下沉挠度结果为

$$y = e^{-\alpha x} \left(\frac{rM_0 + 2\alpha Q_0}{EI(r-s)r} \cos\beta x - \frac{2\alpha rM_0 + sQ_0}{2EI(r-s)\beta r} \sin\beta x \right) \quad (9)$$

根据关键层理论^[8]可算出,11-2煤基本顶为粉细砂岩,岩层性质如下: $h_0 = 2.3\text{ m}$, $E_0 = 7.838\text{ GPa}$, $I_0 = h_0^3/12 = 1.014\text{ m}^3$, 体积力 $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$, 其上的5.8m泥岩随之一起变形,视为老顶岩层上的载荷,泥岩 $E_1 = 4.851\text{ GPa}$, $h_1 = 5.8\text{ m}$ 。将相应数据代入式(3)可得

$$k = \sqrt{\frac{E}{h}} = 0.58 \times 10^2 \text{ MPa/m}, r = \sqrt{\frac{k}{EI}} = 0.085 \text{ m}^{-2}, \text{一般情况下, } r \text{ 远大于 } s, \alpha, \beta \text{ 计算过程中, } s \text{ 可忽略不计。故 } \alpha = \beta = 0.206 \text{ m}^{-1}, R_s = 5.17 \text{ MPa}.$$

为简便计算,忽略了 Δs_1 悬伸段相对 $x=0$ 处的下沉量,因此 $N\Delta s_1$ 也暂忽略不计。近似认为 $q_c = rh = (2.3 + 5.8)25 = 202.5\text{ kN/m}^2$ (h 为累计厚度), $Q' = q_c L$, $\Delta s = h/6$ 。

$$M_0 = \frac{1}{2}q_c L^2 + Q'L + N \frac{h}{2} = \frac{(R_s + N/h)h^2}{6} = 367.26L^2 \quad (10)$$

$$N = \frac{LQ'}{2(h - \Delta s)} = 52.83L^2 \quad (11)$$

$L = 3.6\text{ m}$, 则 $M_0 = 4.78\text{ MN}\cdot\text{m}$, $N = 0.68\text{ MN}$, $Q' = 0.729\text{ MN}$, $Q_0 = 2Q' = 1.458\text{ MN}$ 。反求 s 值极小,约为 $8.56 \times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$,满足假设条件。

将数据代入式(9),则受17268采动影响的11-2煤基本顶下沉挠曲线表达式为

$$y = e^{-0.206x} (0.01323 \cos 0.206x - 0.0072 \sin 0.206x) \quad (12)$$

$$M = y^{(2)} = e^{-0.206x} (4.78 \cos (0.206x) + 8.798 \sin (0.206x)) \quad (13)$$

通过Maple数学分析软件画出蹬空条件下11-2煤基本顶初始影响段的下沉曲线如图3所示。

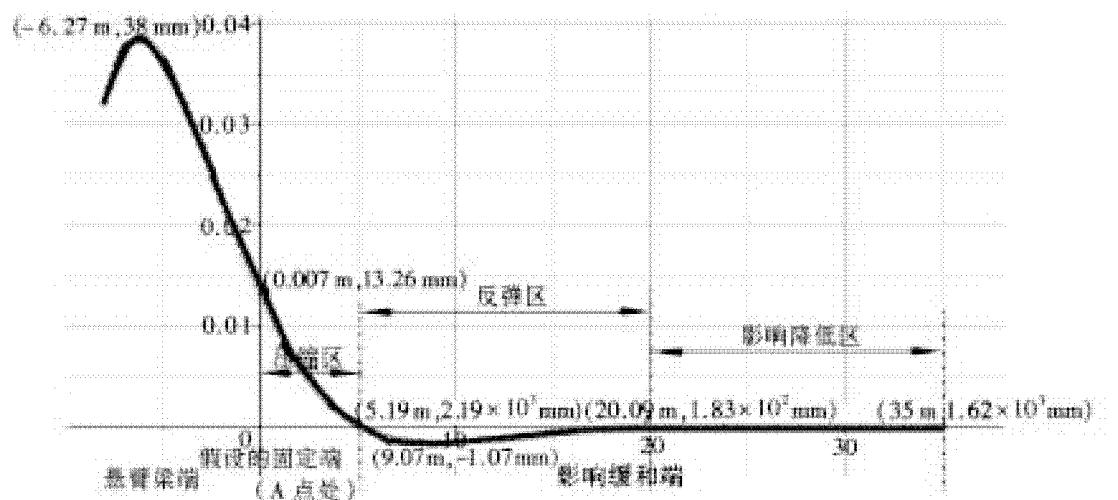


图3 1724 (1) 工作面基本顶采动影响初始段下沉挠度曲线图

从图3可知,在影响缓和端分别分为三区,压缩区:悬臂梁固定端向内5.19 m范围,顶板下沉量线性减小;反弹区:在5.19~20.09 m范围内,顶板下沉量为负,出现反弹;影响降低区:在20.09~35 m范围内,顶板下沉量很小,趋于原岩应力状态,即该段范围基本顶受采动影响很小。在蹬空影响的初始段即悬臂梁端,下沉曲线近似斜直线,与下沉盆地未达充分采动段的曲线相吻合。计算得到基本顶悬臂梁在距采动影响起始段6.27 m处,下沉挠度最大,最大值达38 mm。随着距离的增大,基本顶产生裂隙破坏,此时悬臂梁不再适合,因而在 $x = -6.27$ m以外出现了拐点而非线性增加。

从图1b可知,在未达充分采动的上覆煤层回风巷段,该处顶板下沉运动仍未稳定即未达充分采动,其下沉值始终比理论计算固定端的悬臂梁最大挠度值要大的多,具体影响值很难通过理论解析准确计算得出,在此拟用FLAC3D数值模拟计算分析。

2.2 覆回风巷基本顶变形的数值模拟

根据前述地质条件,结合现场实际开采情况,考虑模拟边界效应及采动影响范围,建立模型长×宽×高分别为300 m×400 m×150 m,模拟分析1724 (1)回风巷基本顶在下部17268工作面蹬空条件下掘进时的变形特征(见图4)。

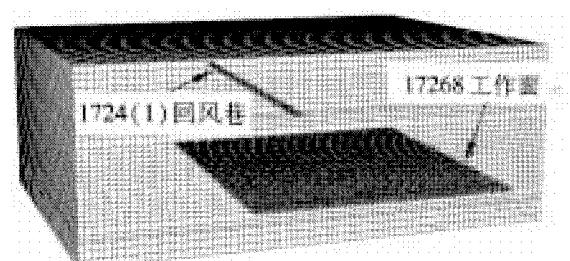
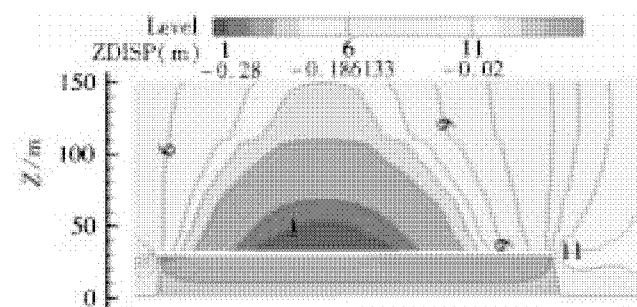


图4 数值模型

采用分步开挖17268工作面,监测不同采空区位置上覆1724 (1)工作面(11-2煤)基本顶下沉挠度曲线,最终模拟得到的工作面开挖150 m时,采空区后方75 m处上覆1724 (1)工作面(倾向)及回风巷基本顶下沉挠度曲线与理论计算固定端处的值较好吻合。由于模拟11-2煤层有3°倾角,被研究回风巷道所在标高位于模型100 m上下位置,走向剖面 $y=212.5$ m,相应得到结果处理如图5所示。



(a) 采空区75m处垂直位移云图

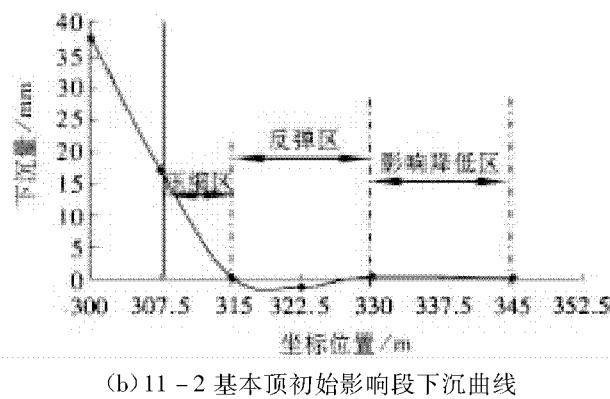
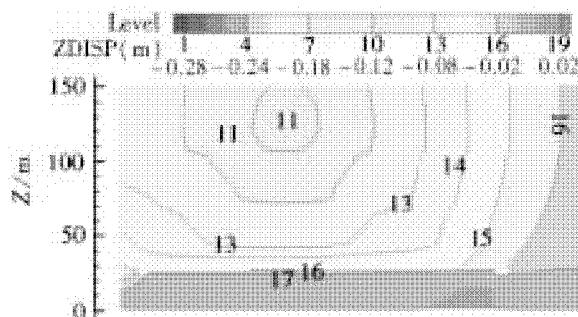
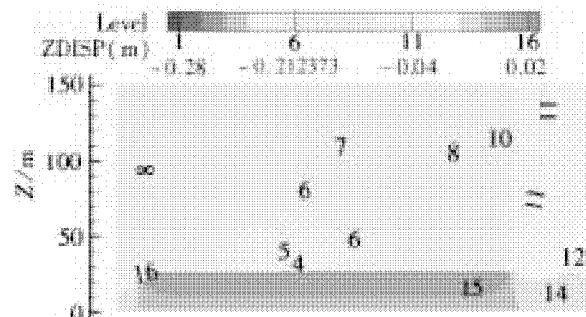


图5 下沉挠度曲线分析

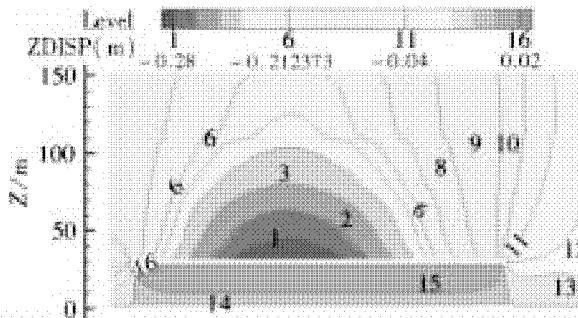
当下部17268工作面回采150 m时,按理论计算蹬空影响边界位置为 $x = 306.5$ m即距下部回采边界56.5 m,从图5b分析可知:在 $x = 307.5$ m处下沉挠度曲线与蹬空影响边界位置处理理论计算下沉挠度曲线相吻合,且影响缓和段三区分段明显,基本与理路计算吻合,因此可进一步通过数值模拟分析受下部蹬空回采影响,1724(1)工作面及回风巷基本顶运动变形特征(见图6)。



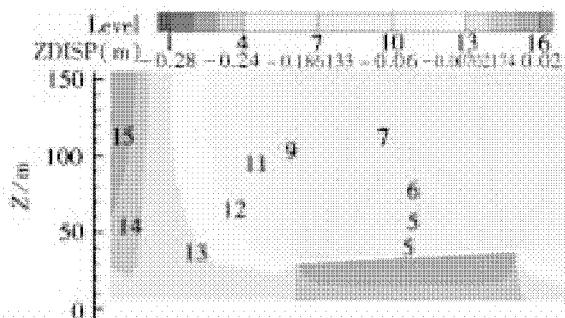
(a) 回采150 m时工作面处垂直位移云图



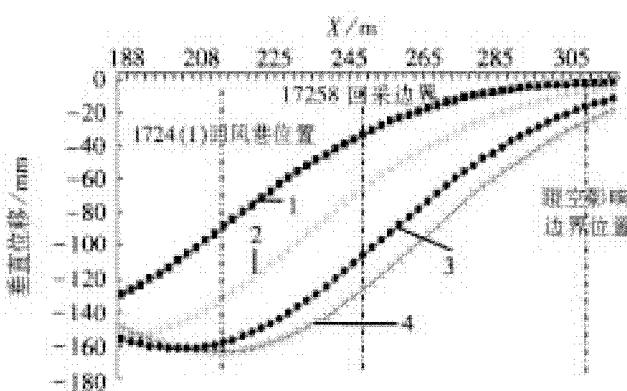
(b) 采空区30 m处垂直位移云图



(c) 采空区60 m处垂直位移云图

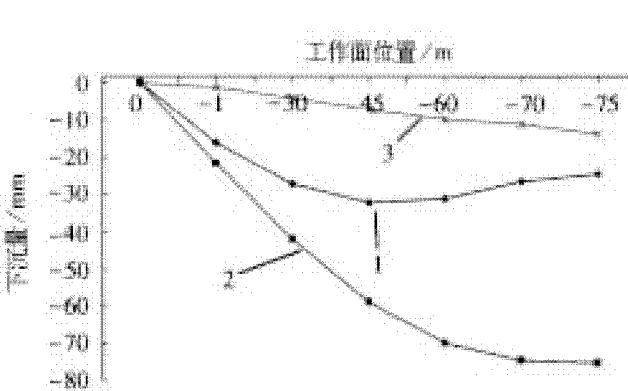


(d) 垂直位移云图(沿回风巷走向剖面)



1. 工作面位置; 2. 采空区30 m;
3. 采空区60 m; 4. 采空区75 m

(e) 上覆煤层基本顶下沉曲线(采空区不同位置处)



1. $x = 190$ m(工作面105#支架); 2. $x = 212.5$ m(回风巷中线);
3. $x = 307.5$ m(采动影响初始段)

(f) 上覆煤层基本顶运动特征曲线(不同部位处)

图6 蹬空条件下1724(1)工作面及回风巷基本顶变形特征

从图 6a~图 6c、图 6e 可知,当 17268 工作面回采 150 m 时上覆 1724(1)工作面回风巷基本顶在采空区不同位置处的变形曲线与图 1b 剖面图较好吻合。

从图 6d、图 6f 可知,随着退尺的增加,回风巷基本顶处于不断的下沉运动状态。在回采到 150 m 时采空区后方 60~75 m 上覆 1724(1)工作面回风巷基本顶位移量相对变化较小,基本趋于稳定。同时采空区 75 m 处上覆煤层基本顶初始影响段的下沉曲线与理论计算得到的基本顶初始影响段下沉曲线很好吻合。因此认为,采空区后方 75 m 上覆基本顶运动变化基本稳定。

从图 6f 可以看出,在 $x = 190$ m 附近(工作面的中上部)即与 17268 回采边界间相距 60 m 以外处(已达充分采动),采空区不同位置处上覆煤层基本顶最终相对工作面处下沉 24 mm,受采动影响程度小,围岩较完整;而布置在 $x = 212.5$ m 处的回采巷道在采空区不同位置处上覆煤层基本顶最终相对下沉量 75 mm,较 $x = 190$ m 处相对下沉量大的多,表明其受采动影响程度大,围岩相对破碎,即现有回风巷布置位置未达充分采动,受采动影响明显。

3 工程应用

从现场矿压观测来看,回风巷围岩破碎,受采动影响矿压显现剧烈,掘进、回采期间顶板下沉量、两帮移近量大,多处锚杆、锚索脱落(见图 7)。经注浆、补打锚索才满足生产回采要求。

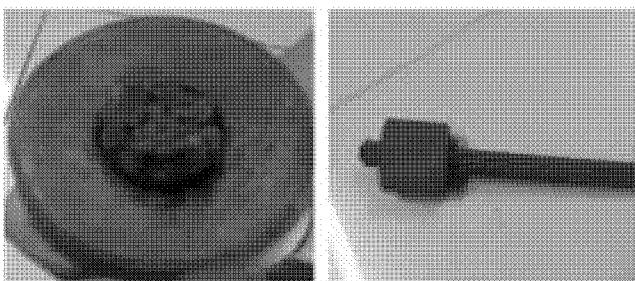


图 7 1724(1)回风巷锚索破坏图

工作面机尾段(回风巷附近)煤壁片帮严重,支架控顶高度小,断面收缩率大;但至工作面上部 105#支架左右(距端头约 22.5 m 即模拟的 $x = 190$ m 处)时围岩完整,回采时基本顶已达充分采动受下部煤层采动影响小,能很好满足 1724(1)工作面正常回采。

矿压观测结果亦表明:理论计算及数值模拟能

很好的反映上提面及回风巷基本顶变形特征,且为进一步优化巷道布置提供了一定的参考依据。

4 结论

1) 通过理论计算,采用悬臂梁假设,针对具体地质条件,分析了远距离下部煤层采动对上覆上提工作面基本顶在采动影响边缘处的下沉挠度公式,并用 Maple 软件绘出了上提面基本顶受采动影响初始段下沉挠度曲线图;

2) 通过数值模拟计算,得到了 1724(1)上提面及回风巷基本顶在 17268 采空区不同位置处的下沉曲线,该曲线与理论计算结果较好吻合,并且进一步模拟得到了蹬空条件下上提工作面及回采巷道基本顶变形特征;

3) 理论计算、模拟结果及工程实践表明:与 17268 回采边界间距 60 m 以外时(位于工作面 105 架以内),1724(1)工作面基本顶已达充分采动,采场围岩较机尾段及回风巷围岩更稳定,为巷道优化布置提供了参考。

参考文献:

- [1] 王海锋,程远平,侯少杰,等. 倾斜煤层远距离上被保护层连续卸压保护技术研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):210~214.
- [2] 涂敏,张向阳,张华磊. 下保护层开采对上覆煤巷的动态影响及控制研究[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(4):426~429.
- [3] 涂敏,缪协兴,黄乃彬. 远程下保护层开采被保护煤层变形规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(3):253~257.
- [4] 涂敏,黄乃彬,刘宝安. 远距离下保护层开采上覆煤岩体卸压效应研究[J]. 采矿与安全工程学报,2007,12(3):253~257.
- [5] 石必明,食启香,瞿世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(3):259~263.
- [6] 张杰,侯忠杰. 厚土层浅埋煤层覆岩运动破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(1):56~59.
- [7] 李德忠,杜俊林,连传杰,等. 煤矿特殊开采技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008:10~30.
- [8] 蒋金泉. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007:75~80.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

冻结井筒外壁受力信息化施工监测及分析

王再举,姚直书,邓昕,何超

(安徽理工大学土木建筑工程学院,安徽 淮南 232001)

摘要:为了保证冻结井筒外壁在施工和运行期间的安全,通过利用安全监测系统对冻结井筒外壁受力实时监测,分别获得了2个监测水平冻结井壁的钢筋应力、混凝土应变和冻结压力等数据。结果表明,冻结压力和钢筋环向应力呈现不均匀性;冻结压力、钢筋应力和混凝土应变均小于监测预警值和设计值,井壁结构安全可靠。

关键词:监测;水化热;均匀性;设计值

中图分类号:TD265.3 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0062-05

Monitoring and Analysis of Stress Acting on Outer Lining of Frozen Shaft Constructed with Information Technology

WANG Zai - ju, YAO Zhi - shu, DENG Xin, HE Chao

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to ensure safety of frozen shaft outer lining in its construction and operation, stress acting on outer lining of frozen shaft was monitored in real time by safety monitoring system, stress in reinforced steel, strain in concrete and freezing pressure of frozen shaft lining on two monitoring levels were obtained respectively. The results showed that freezing pressure and hoop stress in reinforced steel appear uneven; freezing pressure, reinforced bar stress and concrete strain are less than the early warning values and design values, structure of frozen shaft lining is reliable in safety.

Key words: monitoring; hydration heat; homogeneity; design value

由于安全生产需要,某煤矿现需新建副井。新井筒设计净直径6.0m,井筒深度429m。根据井筒检查孔勘探资料可知,北风井穿过地层为第四系冲积层,厚度261.25m,主要有粘土、砂质粘土和砂组成,表土及风化基岩段采用冻结法凿井。冻结段井壁采用双层现浇钢筋混凝土井壁,设计时为整体受力,施工时分层浇筑,外壁混凝土强度等级采用C35-C60,外壁厚度为600mm,环向、竖向钢筋采用直径为Φ25钢筋。通过对井壁内、外力信息的现场监测,实时分析施工过程中井壁的受力状况和力学特性,以确保井筒安全、高效地建成。

1 监测内容及元件布置

1) 监测方法。为了确保观测系统长期的稳定

性和可靠性,本次测量采取精度高、抗干扰性强、稳定性好的振弦式传感元件作为一次仪表,振弦式频率仪作为二次仪表^[1]。测试元件随工程施工埋入混凝土井壁中,其中钢筋应力采用振弦式钢筋应力计监测;混凝土应变采用振弦式混凝土应变计监测;冻结压力采用压力传感器量测;振弦式频率仪采用XP99振弦频率仪,其测量范围为300~6 000 Hz。

2) 监测元件布置。根据该煤矿井筒检查孔地质柱状图和井壁结构设计图,确定在冻结段井壁中布置2个监测水平,平均布置在粘土层中。第一、二水平粘土层厚度分别为15.61m和38.37m,累深289m和349m。

在井筒外壁外表面一周均布6个压力盒,从而确定冻结压力的大小。在井壁内排钢筋上等间距布

置6个测试断面,每个测试断面沿环向、竖向和径向各布置一个钢筋测力计,共18个钢筋计,以确定钢筋应力的大小;在井壁内缘等间距布置6个测试断面,每个测试断面沿环向、竖向和径向各布置一个混凝土应变计,共18个应变计,从而确定混凝土的应变(见图1),且2个监测水平测试元件布置相同。

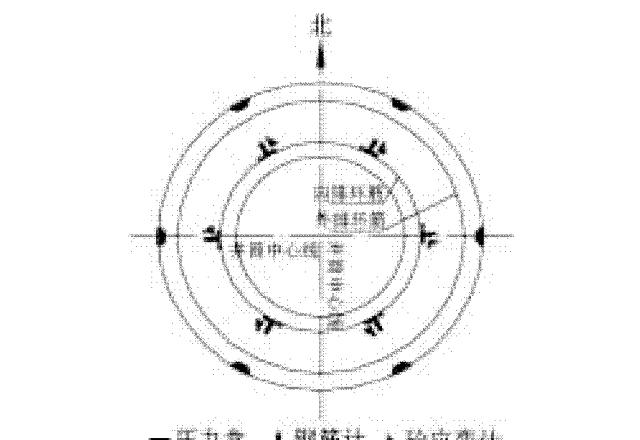


图1 测试元件布置图

2 监测结果分析

2.1 冻结压力

把两水平的元件埋设后,通过长期对两水平进行实时观测,获得了大量的数据,其冻结压力监测结果如图2所示。

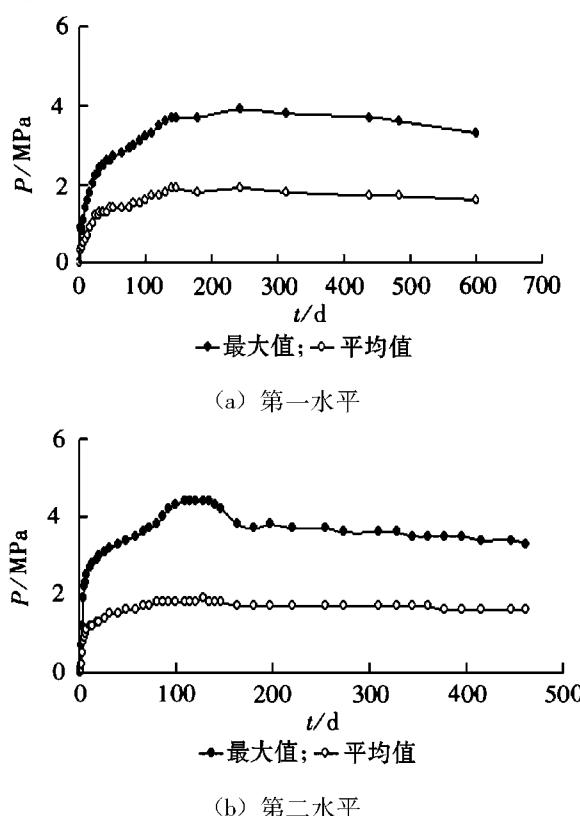


图2 冻结压力随时间变化曲线

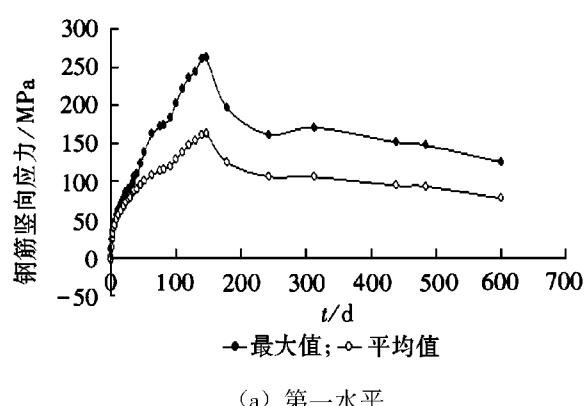
由图2可见,外层井壁承受冻结施工期间临时荷载——冻结压力时,第一水平(累深188 m)和第二水平(累深329 m)实测平均冻结压力最大值分别为3.8 MPa和4.4 MPa,压力监测指标仍远小于监测预警值和设计值。第二水平的冻结压力最大值较大,且图1b的冻结压力初期比图1a快,这是因为第二水平处于厚粘土层中。在外壁混凝土浇筑2~7 d内,冻结压力成直线型增长,主要是因为土体所积累的大量膨胀能得到释放,产生膨胀位移,同时,冻结壁在地压下发生蠕变,当二者变形受到外壁的阻碍时,产生了冻结压力,且增长迅速,尤其在厚粘土层这种现象更明显^[2]。随后,冻结压力缓慢上升,在145 d左右时,随着第一水平冻结壁的融化,冻结压力逐渐下降,但最终达到稳定。

冻结压力在同一水平大小不一,有的地方小,有的地方大。这是由于冻结管的偏斜、盐水流量分配的不均匀性等,冻结壁的温度、厚度、强度不均匀,从而导致冻结压力在同一测试水平不同方向上存在较大差异^[3]。这些差异如果是由于施工工艺造成的,可以控制;由于土壤本身造成的,则很难避免。

2.2 钢筋竖向应力和混凝土竖向应变

外层井壁的竖向受力状况可用实测的钢筋竖向应力和混凝土竖向应变来综合反映。

两水平钢筋竖向应力监测结果如图3所示,并且规定受拉为正,受压为负。井筒外壁内外侧温度随时间的变化如图4所示。



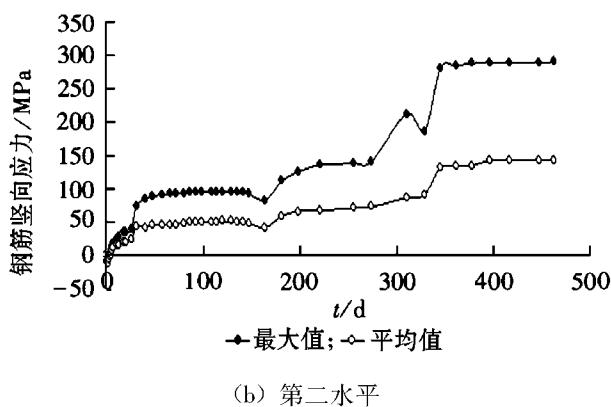


图3 钢筋竖向应力随时间变化曲线

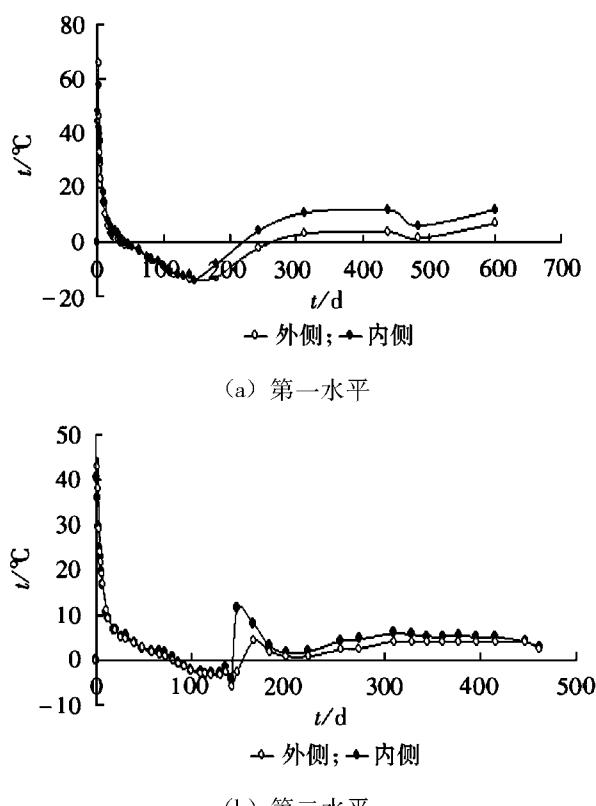


图4 井筒外壁内外侧温度随时间变化曲线

第一、二水平钢筋竖向拉应力最大值分别为 261.8 MPa 和 290 MPa, 均小于钢筋的屈服强度。在井壁浇筑的 2~7 d, 由于混凝土水化热的释放, 第一、二水平井壁外侧温度急剧升高到 65.9 °C 和 40.5 °C, 在此阶段, 钢筋竖向应力处于受压状态; 当混凝土水化热温度达到峰值后, 外侧温度开始降低, 其温降大于 83.5 °C, 这导致井壁内产生了较高的温度应力, 与外荷载耦合作用后, 使得井壁钢筋应力和混凝土应变在浇筑后变化较大, 相应的钢筋竖向应力也由受压状态进入受拉状态, 且拉应力增长较快, 但是当拉应力值达到一定值时, 井壁四周的混凝土会出现环形裂隙。而在工程实际施工中,

井壁出现了环向裂纹。

第一水平外壁在外侧温度达到最小值时, 钢筋竖向应力达到峰值, 随后拉应力缓慢减小, 这是由于冻结壁的融化, 冻结压力转化为土压力和水压力, 其值越来越小, 钢筋的竖向拉应力也越来越小。

第二水平外壁钢筋竖向拉应力(见图 3b)在 180 d 左右时, 由于冻结壁变形大和外壁受到的冻结压力增加, 井壁收缩受到的约束变大, 钢筋受到的拉应力也随之增加, 且拉应力最大值小于钢筋的屈服强度, 井壁安全。

由图 4 可以看出, 外层井壁内侧温度不同, 这主要是因为井壁外缘以及内侧由于冻结壁低温和井筒内环境温度较低所造成的。第一、二水平分别在 18 d 和 20 d 时内外侧温度平衡, 随后内外侧又产生温差。在内壁浇筑时期, 井筒外壁内外侧温度又逐渐升高, 套壁之监测水平时温度达到峰值, 随着内壁逐渐向上浇筑, 测点位置温度再次下降。

两水平混凝土竖向应变监测结果如图 5 所示。

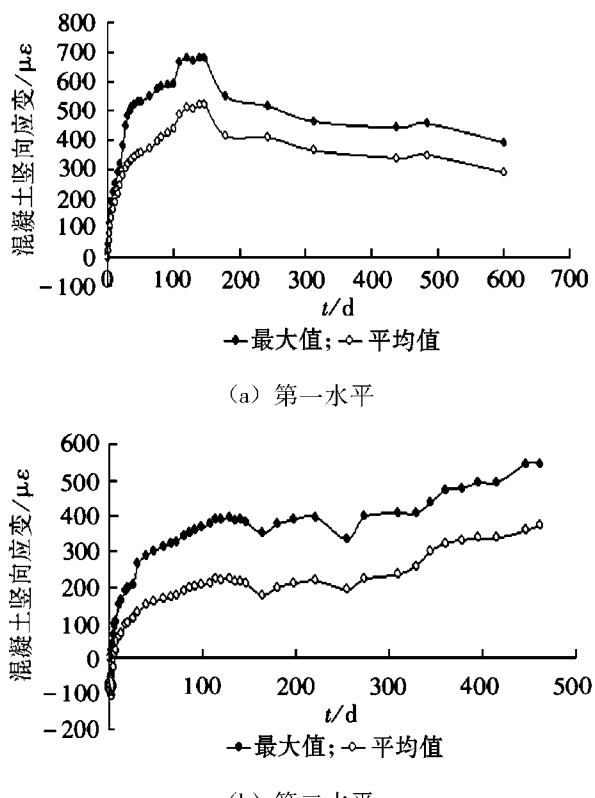


图5 混凝土竖向应变随时间变化曲线

两水平混凝土竖向应变和钢筋竖向应力变化趋势基本一致。第一水平混凝土竖向最大拉应变为 680.3 με, 第二水平混凝土竖向最大拉应变为 596.3 με。混凝土的应变值均小于预警值和设计值。在观测初期, 应变呈增长趋势, 是因为混凝土

受到冻结井壁约束而造成的。

2.3 钢筋环向应力和混凝土环向应变

井筒外壁环向受力特性可用实测的环向钢筋应力和混凝土环向应变来综合反映。第一、二水平钢筋环向应力监测结果如图 6 所示。

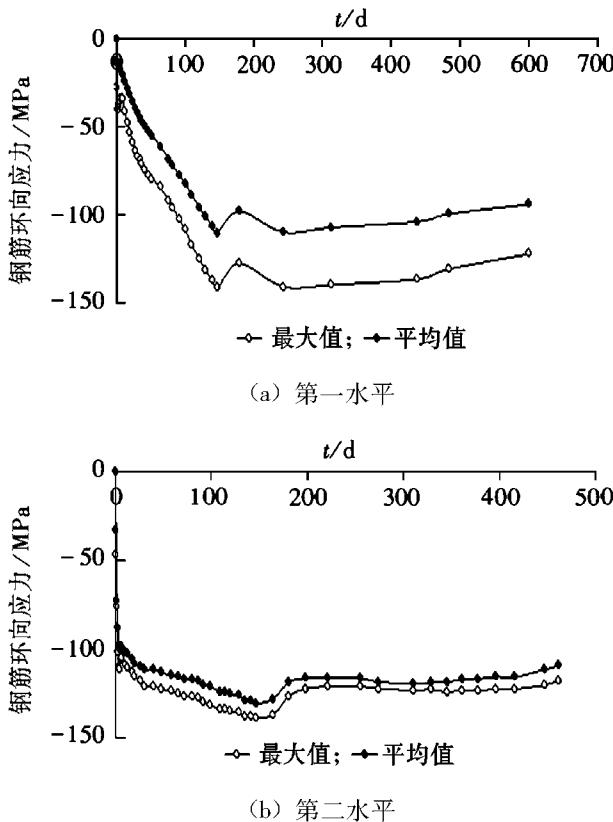


图 6 钢筋环向应力随时间变化曲线

由图 6 可知,钢筋环向压应力值在初期呈直线增长,这是因为混凝土水化热的释放,同时钢筋膨胀变形到约束时而产生的温度压应力,在初期,图 6b 压应力增长比图 6a 快;当混凝土水化热释放完后,钢筋承受温度拉应力,且井壁温度降低,伴随着冻结压力的缓慢增加,钢筋环向压应力也缓慢增长;当冻结压力稳定后,环向钢筋压应力也基本趋于稳定。实际上环向钢筋的应力值是自身温度应力、约束温度应力^[4]和冻结压力共同作用所产生的,此值小于设计值和预警值,说明在冻结井筒中采用现浇钢筋混凝土外壁时是安全可靠的。

钢筋环向应力的不均匀性。这是由于钻孔偏斜、冻结壁温度场分布不一和浇筑混凝土厚薄不均造成的,一般情况下,砂层和砾石层不均匀最为严重,而粘土层相对好些。第一、二水混凝土环向应变监测结果如图 7 所示。

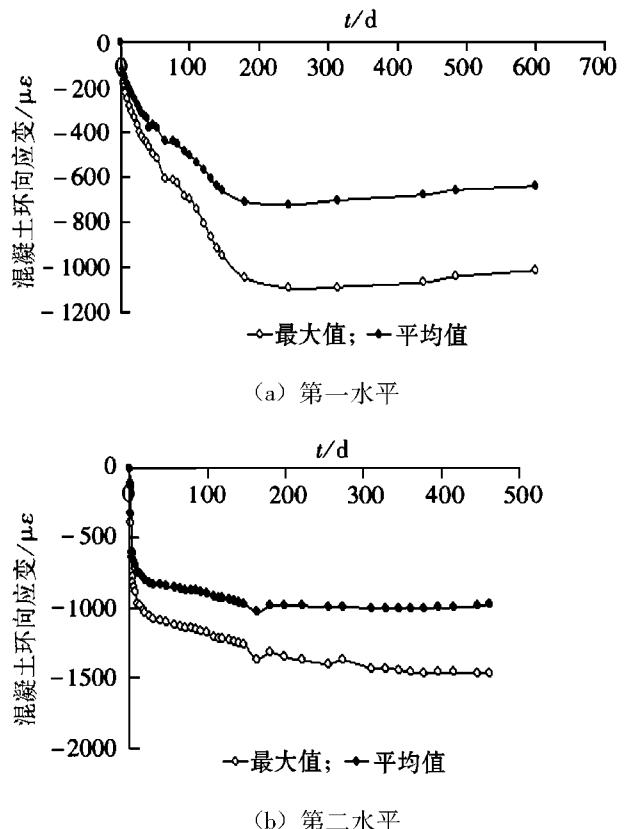


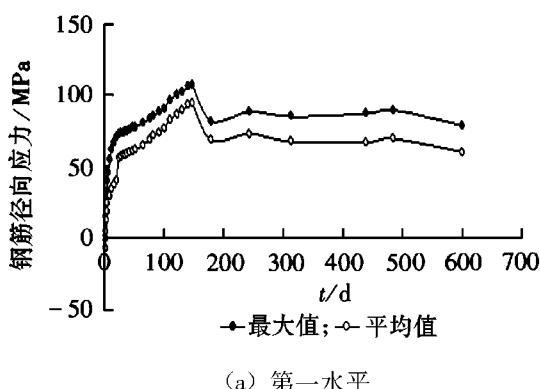
图 7 混凝土环向应变随时间变化曲线

由图 7 可知,观测初期,环向应变值呈线性增长趋势;观测后期,环向应变值趋于稳定状态,这与环向钢筋应力值变化情况基本相同,钢筋环向应力和混凝土环向应变一直处于受压状态,第一、二水平混凝土环向应变最大值分别位于西南侧和东侧,且两水平混凝土环向应变均小于预警值和设计值。

2.4 钢筋径向应力和混凝土径向应变

井筒外壁的径向受力状况可用实测的钢筋径向应力和混凝土径向应变来综合反映。

第一、二水平钢筋径向应力和混凝土径向应变监测结果如图 8 和图 9 所示。



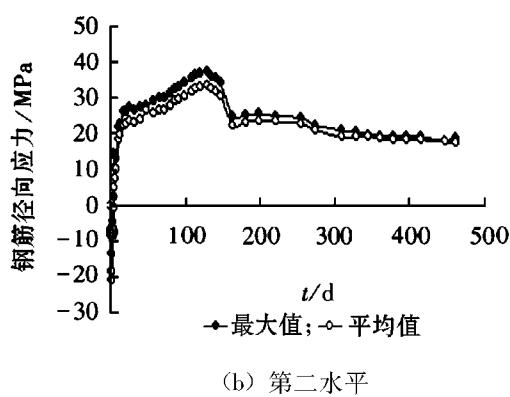


图8 钢筋径向应力随时间变化曲线

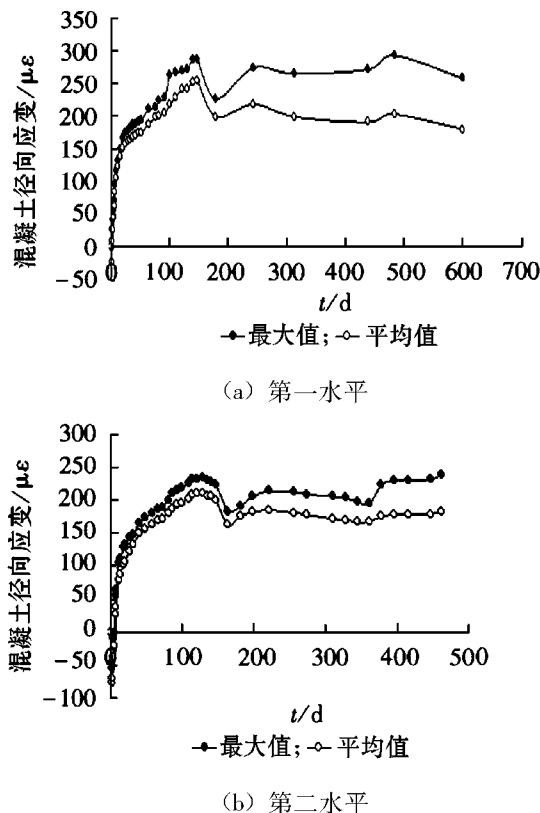


图9 混凝土径向应变随时间变化曲线

由图8可知,当混凝土水化热释放时,井壁温度升高,产生短期压应力,随着时间的增长,应力由压应力进入拉应力状态;钢筋径向拉应力迅速增长,当井壁产生较大收缩变形时,由于冻结壁约束的作用,在混凝土径向方向上,混凝土内部产生了较大的拉应力,第一水平钢筋径向拉应力最大值比第二水平大得多,这主要是由于第一水平冻结壁变形的最大值较大,导致井壁收缩受到的约束大,从

而使钢筋的径向拉应力值较大。在观测后期,钢筋径向应力值逐渐趋于稳定。

由图9可以看出,混凝土径向应变和钢筋径向应力变化趋势基本一致。第一、二水平混凝土径向应变最大值分别为 $292.5 \mu\epsilon$ 和 $229.2 \mu\epsilon$ 。混凝土环向应变均小于预警值和设计值,

3 结论

1) 从一、二监测水平的结果可以看出,当井壁产生收缩变形以后,由于冻结壁对井壁约束的作用,在井壁的径向和竖向方向上,混凝土内部都产生了较大的拉应力,并且随着冻结压力的不断改变而改变。

2) 冻结井筒外壁的冻结压力在混凝土浇筑初期增长较快,随后增长缓慢,达到峰值后开始减小,然后基本趋于稳定,稳定时两监测水平的冻结压力最大值为4.4 MPa。

3) 环向钢筋一直处于压应力状态,钢筋竖向拉应力的大小主要与混凝土水化热的高低有很大的关系,建议合理的配制混凝土的配合比,且井壁的厚度也不宜过大。

4) 冻结压力和环向钢筋应力都产生不均匀性,对井壁受力不利,所以元件埋设在粘土层比其他性质的土层的均匀性要好些。

5) 监测结果表明钢筋应力和混凝土应变均小于监测预警值和设计值,井壁安全性、可靠性较好。

参考文献:

- [1] 刘宝有.钢弦式传感器及其应用 [M].北京:中国铁道出版社,1986:50-51.
- [2] 蔡海兵,程桦,姚直书,等.深厚表土层冻结外层井壁受力状况的监测及分析 [J].煤炭科学技术,2009 (2):38-41.
- [3] 张荣立,何国伟,李铎.采矿工程设计手册 [M].北京:煤炭工业出版社,2002:98-99.
- [4] 姚直书,程桦,张国勇,等.特厚冲积层冻结法凿井外层井壁受力实测研究 [J].煤炭科学技术,2004 (6):49-52.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

天津地铁隧道修复工程冻土力学性能试验研究

李 凯, 程 华

(安徽建筑工业学院土木工程学院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 对处于天津地铁2号线的建国道站~天津站区间隧道修复工程, 为减小隧道修复对地层的扰动, 必须采用盾构法进行施工。然而, 由于普通加固法难以对修复前的土体进行加固, 为了更加安全与经济地进行修复, 需采用人工冻结法。为了给该修复工程提供冻结法设计参数和确保冻结施工过程的安全, 对其典型土层进行了室内实验研究, 确定了土体抗压强度、弹性模量、泊松比、剪切强度在不同温度下的损坏状态及其随温度变化的规律, 根据所绘制的实验曲线作出了定量分析, 得出了具有重要意义的结论。

关键词: 人工冻土; 抗压强度; 弹性模量; 泊松比; 剪切强度

中图分类号: TU311 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0067-04

Experimental Research on Frozen Soil Mechanical Performance in Tunnel Restoration Project of Subway in Tianjin City

LI Kai, CHENG Hua

(School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei Anhui 230022, China)

Abstract: In restoration project of tunnel section from Jianguo Road Station to Tianjin Railway Station of subway line 2 in Tianjin City, in order to reduce disturbance of the project to strata shield construction method must be used. However, due to the ordinary reinforcement method is difficult to reinforce the soil before restoration, in order to ensure safer and more economic construction use of artificial freezing method is required. In order to provide design parameters for freezing method used in the restoration project and ensure safety in the freezing construction process, indoor experimental study on the typical soil was conducted to determine the damage states of soil compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, shear strength at different temperature and their changes with temperature. According to the plotted experimental curves quantitative analysis was made, and conclusions with important significance were drawn out.

Key words: artificial frozen soil; compressive strength ; modulus of elasticity ; Poisson's ratio ; shear strength

随着天津地下空间的开发, 人工冻结法施工因其独特而超强的灵活性、适用性、可靠性、经济性和安全性, 优势尽显无疑, 已应用于天津地铁2号线建国道站~天津站盾构区间隧道修复工程中。在复杂水文地质条件的地下通道设计与施工中, 应该避免因基本参数的明显缺陷或较大误差而对工程以及周边环境产生严重的危害及影响。然而, 由于缺乏天津地铁该修复段冻土的物理力学参数, 这就不得不促使试验和计算出精确的数据, 建立完整的

框架体系, 从而确保冻结法在该隧道修复工程中的成功应用^[1]。

1 试验内容与方法

本次室内试验土样取自天津地铁2号线建国道站~天津站盾构区间的第⑥₁层粉质粘土, 第⑦₂层的粘土和第⑦₄层细砂作为典型土层(见表1)。首先使用削土刀、切土盘和切土器将土样修整成成Φ50 mm × 100 mm 的圆柱体, 必须保证试样

最小尺寸大于土样中最大颗粒粒径的10倍,并且两端面平齐。然后使用保鲜膜封装好试件,并给每个试件贴好相应的标签(上面注明编号、土性、标高、层位等)。在试验规定的温度^[2]条件下(-10℃、-15℃、-20℃)恒温养护48 h以上,最后在WDT-100微机控制冻结岩土试验机上分别按照上述不同温度加载而完成试验。其间需要保证试件轴线与试验机加载轴线基本重合,避免偏心加载。

表1 试验土样基本物理参数

土质	深度/m	含水率/%	湿密度 $\rho_w/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比e
⑥ ₁ 粉质粘土	61.1~61.7	25.57	1.97	1.728	0.71
⑦ ₂ 粘土	72.1~72.7	22.32	2.01	1.763	0.78
⑦ ₄ 细砂	74.1~74.7	16.77	2.07	1.816	0.53

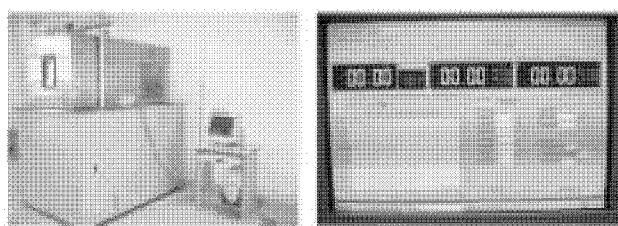


图1 WDT-100微机控制冻结岩土试验机

2 试验结果讨论与分析

2.1 试验结果

每种土样取3个在相同负温条件下所养护的试件进行抗压试验,再在不同负温条件下所养护的土样抗压强度取平均值,其结果如表2所示。

表2 不同负温下无侧限瞬时抗压强度实验数据 MPa

	冻土温度/℃					
	-10		-15		-20	
	抗压强度	均值	抗压强度	均值	抗压强度	均值
⑥ ₁ 粉质粘土	2.48		4.97		5.05	
	0.96	1.65	2.74	3.96	3.96	4.61
	1.50		4.71		4.82	
⑦ ₂ 粘土	4.05		4.44		7.02	
	3.29	3.76	5.2	5.09	5.46	6.71
	3.93		5.63		7.64	
⑦ ₄ 细砂	2.63		2.81		3.73	
	2.56	2.81	3.53	3.47	4.11	5.18
	3.23		4.08		7.69	

2.2 应力-应变曲线

⑥₁粉质粘土、⑦₂粘土和⑦₄细砂分别在温度为-10℃、-15℃、-20℃的条件下的冻土单轴抗压应力-应变曲线如图2所示,并且对各土层应力-应变模型曲线进行了拟合。

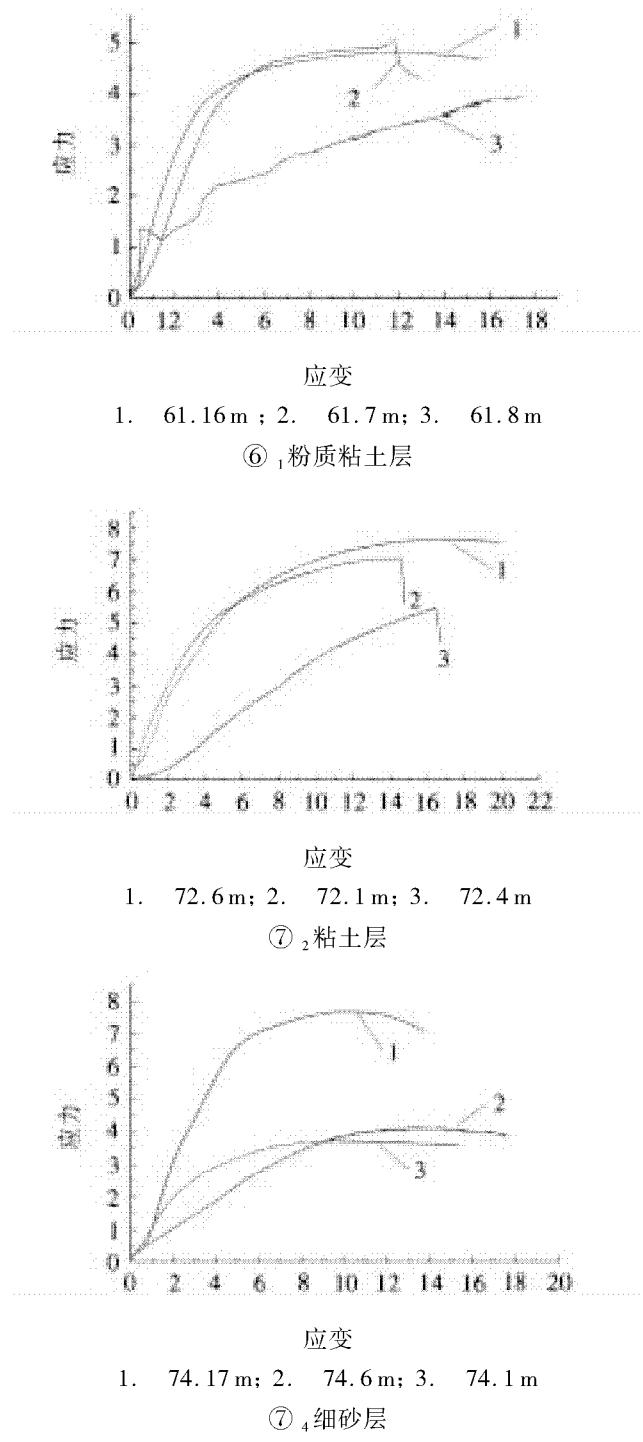


图2 不同土层单轴抗压应力-应变曲线

通过对大量试验数据进行的回归分析,发现天津地区该隧道修复段典型土层的应力-应变曲线都可用下述函数拟合表示:

$$\delta = a(1 - e^{-b\varepsilon})$$

式中: a 为在不同负温条件下的冻土极限强度; b 为冻土强度随应变变化的减小速率。

由图 2 及其所拟合的函数可以得出,在 -20°C 条件下粉质粘土⑥₁、粘土⑦₂ 和细砂⑦₄ 所得参数 a 、 b 值分别为 $(4.7807, 0.2921)$ 、 $(4.3433, 0.5763)$ 、 $(6.8615, 0.4328)$ 。据此可知, b 值在 $0.28 \sim 0.58$ 之间, 说明各土层冻土分别在 -20°C 时, 试样强度达到极限之后随着应变的不断增大而降低速度较为缓慢。3 种土层分别在 -20°C 下, 初期时应力迅速增大。然而, 当应力达到临界值后, 其增加幅度减慢, 可知, 应力-应变曲线发展变化趋势呈弱硬化状态; 温度减小到一定程度后, 粉质粘土、粘土和细砂曲线均呈软化状态, 特别是粘土, 当应力达到峰值后其降低非常明显, 该现象表明冻结温度的降低强化了冻土的脆性损坏特征。其原因是冻土中未冻水含量由于随着冻结温度的降低而逐渐衰减, 此时冰胶和固体颗粒若是粘得越紧密、越牢固, 强度也就越大, 进而以至冻土塑性随未冻水含量的衰减而逐渐不明显^[3]。

表 2 中的试验结果明显表明不同土体抗压强度从大到下依次为:粘土、细砂、粉质粘土。该现象的原因:在 -20°C 条件下粉质粘土中土颗粒间的粘结力不强。这是由于该类土体中的水分大多以结合水的形式存在, 然而自由水的冰点比结合水高很多。这就表明了在温度下降过程中, 粉质粘土较早达到冻结。粘土中的水分大多以自由水的形式存在, 并且其颗粒粒径比粉质粘土大, 从而在 0°C 以下可以冻结牢固。这促使其颗粒排列紧密, 土体胶结力度和抗压力度均可提高。细砂的土体颗粒粒径和自由水与结合水的比重均处在粘土与粉质粘土之间, 从而其粘结力度与抗压强度相对适中, 也处于二者之间。

2.3 抗压强度与温度的关系

根据表 2 数据进行分析可绘制出曲线如图 3 所示, 并分别拟合出 3 种土层的抗压强度与温度的关系式:

$$\textcircled{6}_1 \text{ 层粉质粘土: } \delta = 0.3012|T| + 1.4833$$

$$R = 0.9912$$

$$\textcircled{7}_2 \text{ 粘土: } \delta = 0.3829|T| + 1.4734, R = 0.9881$$

$$\textcircled{7}_4 \text{ 细砂: } \delta = 0.2934|T| + 0.8667, R = 0.9926$$

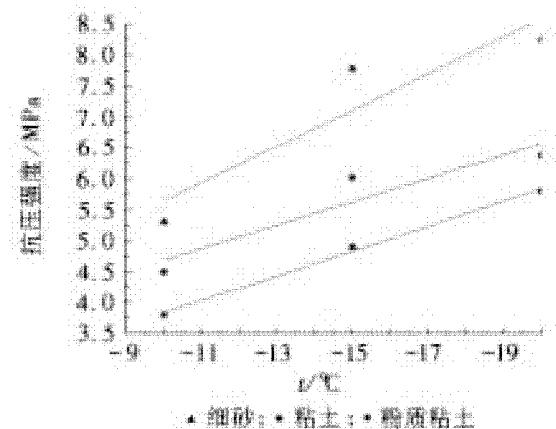


图 3 无侧限抗压强度与温度关系曲线

由图 3 及拟合的曲线方程, 可归纳出如下结论: 各土层的冻结强度在 -10°C 至 -20°C 间随着温度的逐渐衰减而逐次增大, 且 -20°C 时比 -10°C 时增加 $1 \sim 2$ 倍(冻结强度 -10°C 时在 $3 \sim 6\text{ MPa}$ 间, 而 -20°C 时在 $6 \sim 10\text{ MPa}$ 间)。线性相关系数很大, 均在 0.98 以上。粘土抗压强度随温度衰减而增加的速率, 比其它土层的抗压强度随温度衰减而增加的速率较大(粘土平均每降温 1°C 抗压强度增加 0.38 MPa ; 细砂和粉质粘土平均每降温 1°C 强度大约增加 0.3 MPa)。该现象表明粘土的内部颗粒胶结力度最大, 土体冻结效果最好^[4]。曲线方程回归直线的斜率说明了土层受冻结温度影响的程度为次序粘土 (0.38) 最大, 其次是粉质粘土 (0.3012), 细砂 (0.2934) 最小。

2.4 弹性模量及泊松比与温度的关系

冻土在荷载作用下会发生弹性变形, 本文研究了不同土层的弹性模量 E 、泊松比与温度的关系^[5] (见图 4 ~ 图 5)。

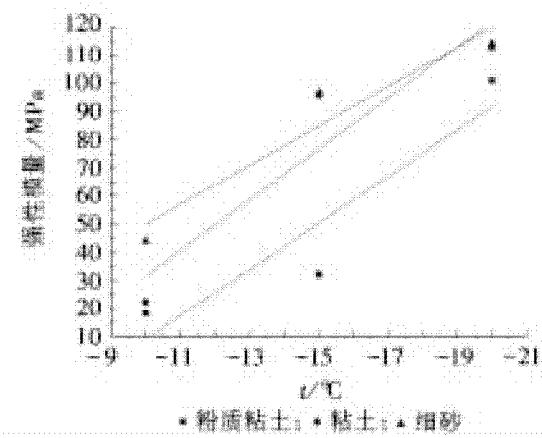


图 4 弹性模量与温度关系曲线

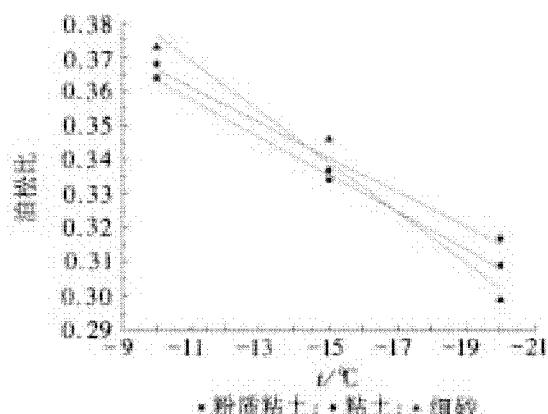


图 5 泊松比与温度关系曲线

根据上述所得关系曲线,通过线性回归分析,可以得出3种土体的泊松比与温度的关系分别如下:

$$\textcircled{6}_1 \text{ 层粉质粘土: } \mu = -0.006|T| + 0.37$$

$$\textcircled{7}_2 \text{ 粘土: } \mu = -0.0062|T| + 0.43$$

$$\textcircled{7}_4 \text{ 细砂: } \mu = -0.0054|T| + 0.427$$

上述关系式表明,可通过降低土体温度可提高

人工冻土的弹性模量。同时,泊松与温度呈近似线性关系,且泊松比随温度的降低而减小^[6-7]。

3 三轴剪切试验结果

土样的三轴剪切强度试验按轴向应变速率0.08%/min进行剪切加载(见图6)。对试样先进行固结,后冻结,达到设计温度后,恒温不少于24 h再进行剪切试验。在围压较小时,土层的三轴剪切指标参数由表3所示。

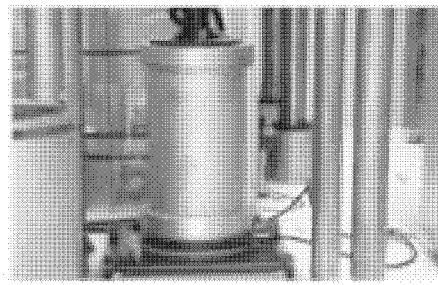


图 6 三轴加载系统

表 3 三轴剪切指标参数表

土位	含水率/ %	试验温度/ ℃	内摩擦角 φ/ (°)	凝聚力 c/ MPa	M-C 强度准则
					回归公式
第1组	25.57	-10	1.52	2.124	$\sigma_1 = 1.045\sigma_3 + 1.63$
		-15	1.37	2.368	$\sigma_1 = 1.022\sigma_3 + 3.69$
		-20	1.18	2.562	$\sigma_1 = 1.002\sigma_3 + 4.64$
第2组	22.32	-10	3.86	2.429	$\sigma_1 = 1.235\sigma_3 + 3.67$
		-15	2.535	3.123	$\sigma_1 = 1.186\sigma_3 + 5.04$
		-20	1.357	3.886	$\sigma_1 = 1.126\sigma_3 + 6.63$
第3组	16.77	-10	2.62	2.270	$\sigma_1 = 1.091\sigma_3 + 2.77$
		-15	1.88	3.066	$\sigma_1 = 1.060\sigma_3 + 3.34$
		-20	1.223	3.662	$\sigma_1 = 1.031\sigma_3 + 5.22$

由表3中可知:三轴抗剪强度指标由内聚力和内摩擦角确定,冻土的内摩擦角随着温度降低而降低,冻土的内聚力随着温度降低而增大。

4 结论

1) 系统地获得了天津地铁2号线建国道站~天津站盾构区间,隧道修复段土层冻土无侧限抗压强度、弹性模量、泊松比的定量值及其随温度变化的规律,研究成果将更好地服务于天津轨道交通的建设。

2) 从应力-应变曲线看,该修复段土层主要属于塑性破坏,而且天津地铁该修复段土层冻土的抗压强度随冻结温度的降低而呈线性增长状态。

3) 天津地铁2号线建国道站~天津站盾构区间隧道修复段典型土层人工冻土弹性模量随温度降低而线性增加,泊松比随温度降低而近似线性降低。

参考文献:

- [1] 杨平,张婷.人工冻融土物理力学性能研究[J].冰川冻土,2002,24(5):665-667.
- [2] 煤炭科学研究院. MT/T 593.4 人工冻土物理力学性能试验[S]. 北京:煤炭工业出版社,2011.
- [3] 常晓晓,马巍,王大雁.高围压下冻结粘土的抗压强度试验研究[J].冰川冻土,2007,29(4):636-638.
- [4] 肖海斌.人工冻土单轴抗压强度与温度和含水率的关系[J].岩土工程界,2007,11(4):62-63.
- [5] 洪军.人工冻结条件下上海饱和软粘土的力学特性试验研究[D].上海:同济大学,2008.
- [6] ISGF. Classification and laboratory testing of artificially frozen ground[J]. ASCEJ of Cold Regions Engineering, 1987, 1(1):22-47.
- [7] 程知言,颜庭成,秦江红.上海软土人工冻结热力学性质研究[J].地质与勘探,2005,41(2):90-92.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

RTP/RTCP 媒体流网络分段性能测量的研究与实现

刘 颖, 刘森晶

(北京经济管理职业学院信息学院, 北京 100102)

摘要: 分析已有针对 RTP/RTCP 媒体流的测量机制, 提出了一种在网络中部署测量点, 进行网络性能分段测量的方法。通过测量点发送额外的 RTCP RR 报文, 测量点分析 SR 和额外的 RR 报文, 实现对媒体流的网络性能分段测量与监控。在 linux 环境下开发测量点模块, 实现该测量方法。实验结果表明该方法对网络影响小, 复杂度低, 具有可行性。

关键词: 网络测量; QoS; RTCP

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1672-1098(2013)02-0071-04

Research on Network Segmentation Performance Measurement for RTP/RTCP Media Stream and Its Implementation

LIU Ying, LIU Miao-jing

(School of Information, Beijing Institute of Economic Management, Beijing 100102, China)

Abstract: Based on the analysis of existing RTP/RTCP media stream measurement mechanism, a network segmentation measurement method of media stream was proposed. In the method, measuring points are deployed in network. Media stream network segment performance is measured and monitored by measurement and analysis SR and extra RR packets sent from measurement points. The measurement system is implemented on Linux system. The experimental results showed that measurement by the method has small impact on network, low complexity and is feasible.

Key words: network measurement; QoS; RTCP

媒体流采用标准的 RTP 协议传输实时业务。RTP 协议本身不提供 QoS 保障, 需要实时控制协议 RTCP 实现 QoS 参数的计算, 为数据流的传输控制提供依据。RTCP 报文携带已发送数据信息和接收方统计的信息。利用 RTCP 数据可进行端到端的网络层 QoS 测量^[1-2], 包括传输媒体流的网络延迟, 延迟抖动和丢包率等, 实现最基本的测量目的。对于 QoS, 通常希望从两个方面来保证。当业务质量正常时, 例行检查业务质量, 防患于未然; 当业务质量出问题时, 尽快定位问题, 实施整改措施。为满足定位问题、整改网络的需要, 需要更精确的网络性能测量, 比如划分网段, 对不同网段实时监控。环回 RTP 数据流实现了延迟及抖动的分段测

量^[3-6]。主动测量中测量点之间相互发送测试报文, 实现网络分段测量。被动测量^[7-9]中测量点监听报文, 计算发送端和测量点之间的网络性能。主动测量或环回 RTP 数据流需要产生较多的测量报文, 增加了网络负担, 而被动测量方法只能监测媒体流从发送端到测量点的网络性能, 无法满足网络分段测量的要求。

本文首先根据 RTP/RTCP 媒体流传输时携带的信息计算网络 QoS 参数, 在此基础上提出了一种网络性能分段测量的方法。该方法中, 网络测量节点构造并发送额外的 RTCP RR 报文, 接收到额外 RR 报文的测量点通过分析 RTCP SR 和额外的 RR 报文, 实现网络性能的分段测量。实验表明,

该分段测量方法不给网络增加额外负担,不影响媒体流的传输性能。

2 测量系统设计

媒体流经过一个或多个网络域。网络划分为域内网段和域间网段。在每个网络域的入口和出口部署测量节点。测量节点可以集成在路由器中,也可以作为独立设备放置在路由器旁。测量系统

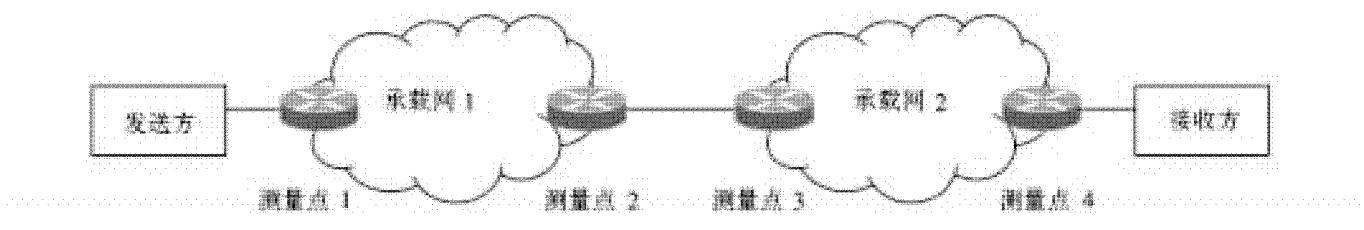


图1 测量系统

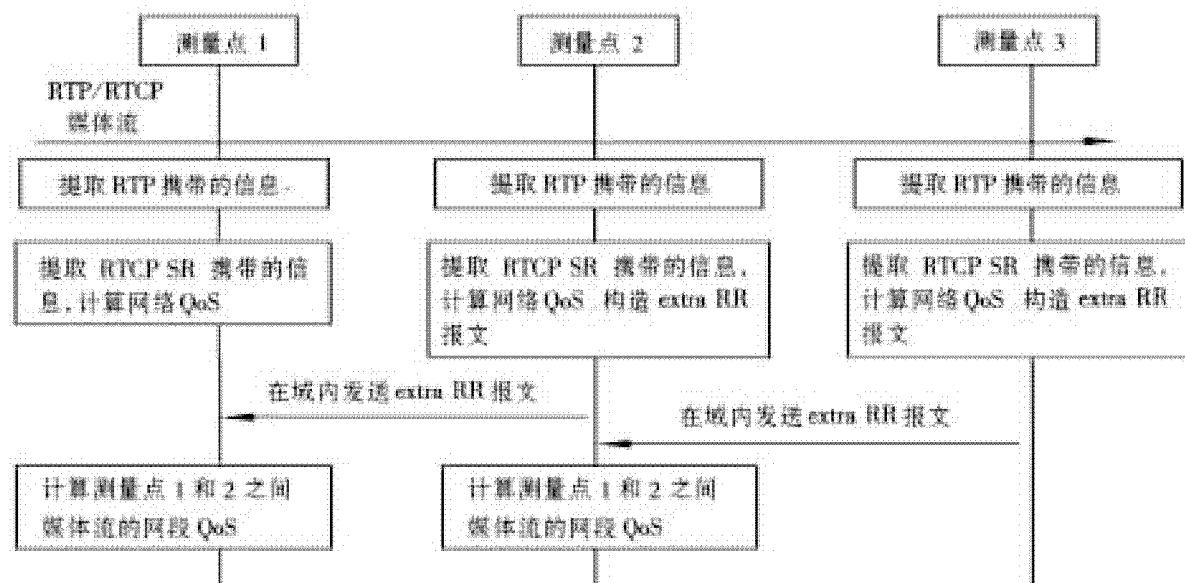


图2 网络分段测量原理

测量点 1,2,3 首先提取 RTP 报文携带的时间戳,计算延迟抖动。其次,测量点每收到一个 RTCP SR 报文,提取 SR 报文里的发送方信息,包括发送方同步源标识 SSRC 和 RTP 时间戳,并计算 RTP 数据流到达本地的网络 QoS 参数。QoS 参数包括从收到上一个 SR 报文到当前 SR 报文之间的 RTP 报文延迟抖动 jitter,从收到上一个 SR 报文到当前 SR 报文之间的丢包率 pl 和从收到该媒体流第一个报文到当前的累积丢包数 cl。

以 SSRC 和 RTP 时间戳为索引,记录下对应的 QoS 参数,即延迟抖动丢包率和累积丢包数,最后继续转发 SR 报文。

本测量方法的创新之处在于,除入口测量点 1

如图 1 所示。

媒体流采用 RTP/RTCP 协议传输,测量点使用发送者报告 SR 和接收者报告 RR 两种报文实现网络的分段测量。假设 RTP 媒体流从服务器发向客户端,经过测量点 1,2,3,4。因为测量点 4 和测量点 1,2,3 工作原理类似,所以以测量点 1,2,3 的工作过程来描述网络分段测量的原理,如图 2% 所示。

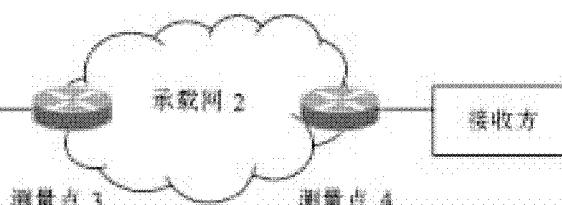


图1 测量系统

外,测量点 2,3,4 还需要生成 RTCP RR 报文。以测量点 2 为例,收到 RTCP SR 报文,计算 RTP 数据流到达本地的网络 QoS 参数后,还需要构造一个新的 RTCP RR 报文发给测量点 1。具体地,RR 报文头部 SSRC 域填写本测量点 2 的标识,比如 IP 地址。接收报告块填写收到当前 SR 报文时计算的 QoS 参数,即表 1 中的丢包率,累积丢包数,延迟抖动,以及收到当前 SR 报文时 RTP 报文携带的最高报文序列号,LSR 为当前 SR 报文携带的 RTP 时间戳,DLSR 为从收到 SR 报文到构造该 RR 报文的延迟时间。最后把新的 RR 报文发送给测量点 1。为了和接收方发送的 RR 报文区别,将测量点生成的 RR 报文称为 extra RR 报文,即额外的 RR 报文。

测量点 1 收到测量点 2 反馈的 extra RR 报文,查找本节点 QoS 参数表。用 extra RR 报文接收报告块中的 SSRC 和 LSR 索引到对应表项。读取接收报告块中的延迟抖动,丢包率和累积丢包数,和本地保存的值相比较,计算出媒体流在测量点 1 和测量点 2 之间传输时的网络性能,即可得到分段网络 QoS 参数。

$$\text{丢包率: } pl_{12} = pl_1 - pl_2$$

$$\text{累积丢包数: } cl_{12} = cl_1 - cl_2$$

网段的延迟抖动和每个测量点测得的延迟抖动不存在直接的线性关系,但可以定性的表示出网段的延迟抖动情况:

$jitter_2 > 2 * jitter_1$:高抖动

$1.5 * jitter_1 < jitter_2 < 2 * jitter_1$:较高抖动

$jitter_2 < 1.5 * jitter_1$:较低抖动

同样地,测量点 3 生成 extra RR 报文发送给测量点 2,测量点 4 生成 extra RR 报文发送给测量点 3。至此,可以获得测量点 1,2,3,4 之间的网段性能。测量点 1,2,3 还可以根据测量结果实时调整传输参数,比如选择网络性能好的路径,增加或减少网络带宽。

由于测量点并不知道媒体流经过的路径,特别是其上游测量点的位置。在本分段测量方法中,要求预先为测量点分配组播 IP 地址和 UDP 端口号,测量点加入相同组播组。测量点生成新的 extra RR 报文后,向路由器上接收到该媒体流的接口组播该 extra RR 报文。

3 系统实现

测量点功能模块设计如图 3 所示。

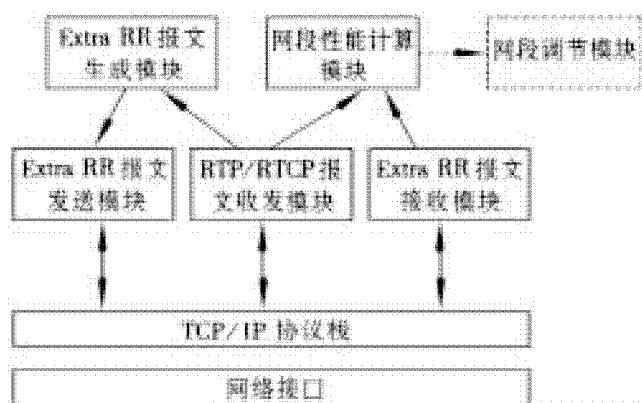


图 3 测量点模块设计

RTP/RTCP 报文收发模块捕获报文,计算从发送端到本地的网络 QoS 性能,然后转发报文。extra RR 报文生成模块根据 QoS 测量结果构造 extra RR 报文。Extra RR 报文发送模块负责向媒体流来的方向组播 extra RR 报文。Extra RR 报文接收模块提取 extra RR 报文里的接收报告块,上报给网段性能计算模块。网段性能计算模块比较接收报告块里的 QoS 信息和本地的 QoS 信息,计算媒体流在两个测量点之间的网络 QoS 性能。

入口测量点 1 不需要生成 Extra RR 报文,所以不包含 Extra RR 报文生成模块和 Extra RR 报文发送模块。出口测量点 4 不会接收 Extra RR 报文,不需要计算网段性能,所以不包含 Extra RR 报文接收模块和网段性能计算模块。测量点 1、2、3 在计算网段性能这一基本功能外,还可以包含网段调节模块,即根据网段性能调节媒体流传输过程。比如媒体流在本网段内的传输丢包率增加,选择一条新的路径或者调整传输带宽。本文对此模块不做深入研究。

针对上文提出的网络性能分段测量的方法,在 Linux 操作系统中实现测量点功能,对该方法性能进行定量分析(见图 4)。

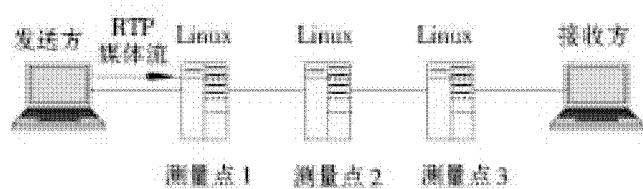


图 4 实验环境

发送方发送 15 min 的标清视频,发送速率为 5Mbps,3 个测量点分别执行主动测量、被动测量和本文所述的分段测量。设定每 3 min 进行一次网段性能测量,主动测量的方法为每 3 min 按照 RTP 媒体流传播途径,上游测量点向下游测量点发送仅供测量使用的数据流,测量数据以 2Mbps 的速率发送,持续 10 s。本文所述的分段测量方法为测量点 2 和 3 每 3 min 统计一次 QoS 参数,构造并发送 Extra RR 报文。被动测量方法为各测量点仅监控 RTP 和 RTCP 报文,无需生成新报文。网络以 0.2% 的丢包率随即丢包^[10]。

4 实验结果和分析

三种测量方法对网络负荷造成的影响不一样,

如图5所示。

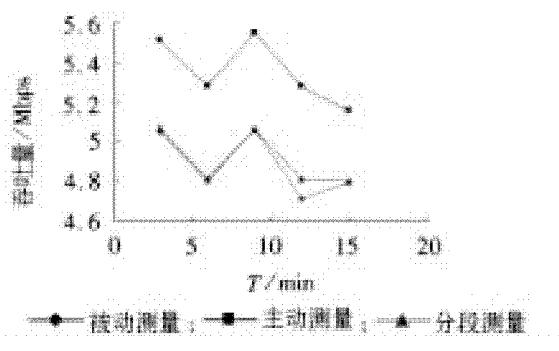


图5 网络吞吐量

分段测量对网络负荷没有造成大的影响,和被动测量相似。主动测量则加大了网络负荷8%左右。在现实网络环境中,假设在网络边沿部署N个测量点,主动测量的网段数量为 C_N^2 ,即在这些网段都需要发送测试数据。另外主动测量间隔越小,测试数据流越多,对网络负荷的影响就越大。而分段测量的方法只会产生很少量的extra RTCP RR报文,所以对网络负荷的影响不会随着网段数量的增加而明显增长,并且extra RTCP RR报文数量相对媒体流的报文数量可以忽略不计。

三种测量方法对媒体流传播延迟的影响如图6所示。

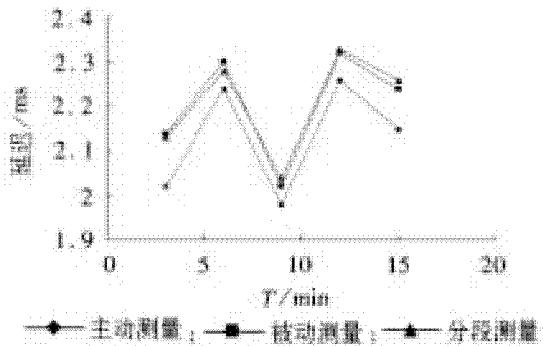


图6 媒体流传播延迟

三种测量方法中主动测量不分析原始的媒体流,所以对媒体流的传输没有影响。被动测量和分段测量分析 RTP 报文头部信息和 RTCP 报文,和主动测量相比,对媒体流传输有一定影响。分段测量造成的延迟会随着测量点数量的增加而增长。但在媒体流传播路径中,途径的测量点数量有限,所以该方法对媒体流的传输没有特别影响。

此外,通过分析可知三种测量方法得到的测量效果也不同。主动测量以较多的网络资源为代价得到网段的性能;被动测量方法简单,但无法得到网段性能;分段测量没有对网络造成过多负担即可获得网段性能。

5 结束语

测量点生成额外的RTCP RR报文,让每个测量点都能计算媒体流经过网络时的QoS参数,实现真正的网络分段测量。依据测量结果,网络管理者可以根据不同用户对媒体质量的不同要求,调整媒体流在网络中的传输参数,以满足用户的期望。该方法易实现,对网络负荷和媒体流传输影响都较小。

参考文献:

- [1] 解冲锋,杨明川,王琳.基于 RTP/RTCP 协议的流媒体业务性能测量[J].信息网络,2003,07:26~30.
- [2] 龚向阳;赵翔;林宇.基于实时传输协议的端到端网络测量方法:中国,CN1561078[P].2005-01-05.
- [3] 曾彬,张大方,张政.基于主动测试的流媒体业务性能测量工具设计与实现[J].计算机应用,2008,28(4):832~836.
- [4] 徐海泉.流媒体传输网络测量研究与实现[D].济南:山东大学,2011.
- [5] 杨帆.可用带宽主动测量算法的研究[D].北京:北京邮电大学,2008.
- [6] 蔡志平.基于主动和被动测量的网络测量技术、模型和算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [7] 杨峰.网络性能测量研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.
- [8] 黄鹂声.基于被动测量的IP网络性能与故障管理技术研究[D].成都:电子科技大学,2011.
- [9] 王玲玲.IPTV视频质量监控系统的研究与设计[D].苏州:苏州大学,2011.
- [10] 郑雄,王懿,张顺颐.IP网络性能指标及其测试方法的研究[J].网络与应用,2003,11:21~25.

(责任编辑:李丽)

新型固态断路器设计及过电压抑制方法研究

宫 毓

(淮南职业技术学院煤矿机电系,安徽 淮南 232001)

摘要:提出了基于集成门极换流晶闸管(IGCT)的新型固态断路器(SSB)的设计方案,给出了开关模块拓扑结构和新型智能固态断路器的结构图。并针对IGCT对过电压非常敏感的问题,采用了能够抑制固态断路器产生过电压的新方法,既通过容性的续流支路释放故障回路中的电磁能量,来达到降低过电压幅值的目的。同时对续流支路抑制过电压的工作机理进行了分析和仿真。仿真结果显示,续流支路对过电压的抑制效果明显。

关键词:固态断路器;IGCT;过电压抑制;续流支路

中图分类号:TM726 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1098(2013)02-0075-04

New Solid – State Breaker and Its Over – voltage Suppression Method GONG Yu

(Department of Mechanical and Electrical Engineering in Coal Mining, Huainan Vocational and Technical College, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: A design scheme of intelligent SSB (Solid State Breaker) based on IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) was presented. The topology of switch module and structure of SSB was proposed. For the problem of IGCT's strong sensitiveness to over – voltage, a method for reducing over – voltage was introduced, which releases the electromagnetic energy in fault circuit through a capacitive freewheeling branch to reduce over – voltage amplitude. The principle of over – voltage suppression with freewheeling branch was analyzed and simulated. The simulation results showed that freewheeling branch has obvious effectiveness in over – voltage suppression.

Key words: solid – state breaker; IGCT; over – voltage suppression; freewheeling circuit

中国分布式电网的建设已进入跃进式发展的阶段,而电力系统中的输配电设备的更新换代速度明显滞后于电网建设的发展。如何提高输配电设备的可靠性和稳定性,已成为电力行业研究的焦点。输配电设备中断路器是一个关键的电力设备,断路器技术性能的好坏将直接影响电网的正常运行^[1-2]。在目前的输电系统中大量采用机械式断路器,尽管它有导通稳定、带负载能力强等优点,但也存在不能实时、灵活、连续和快速的动作,易使事

故扩大等缺点,在断开负载时往往有电弧产生,触头易烧损,开断时间长,难以满足一些电力用户对故障电流的速动性要求,在运行过程中有噪声,机械电气寿命受到限制。固态断路器(solid – state breaker, SSB)是柔性交流输电系统中实现对电力系统参数和网络结构快速、灵活、准确控制的关键设备^[3-4]。因为功率开关器件的固态断路器具有很好的电流关断性能,所以自它问世以来就引起了广泛的关注。美国马尔文市大功率电力电子器件

厂已经制造出 15kV/600A 的高压固态断路器,可在 4 毫秒内完成开断;西屋公司也研制出了 13 kV/675A 的高压固态断路器;英国研制了 13 kV 的配电用高压固态断路器^[5]。本文提出一种采用通态压降低的集成门极换流晶闸管(Integrated Gate – Commutated Thyristor, IGCT),适用于 10 kV 电网电压等级的高压固态断路器,该断路器短路时的开断时间可达微秒级,能限制故障电流,提高了系统的稳定性;全密封无机械触点,不会产生电弧,使寿命不受开关次数的限制,减少故障率。文中对固态断路器产生过电压的机理进行了深入的分析,提出了如何抑制固态断路器开断时产生的过电压,主要是采用增设阻容支路,这就可使开断时产生的过电压抑制在允许范围之内。

1 新型固态断路器

新型固态断路器(SSB)开关模块采用通态压降低的集成门极换流晶闸管(IGCT),适用于 10kV 电网电压等级^[6-7]。IGCT 为一种新型的电力电子器件,因为它具有高电压、大电流,较小的开关损耗、较快的开关速度等一系列的优点,故可作为新型固态断路器的首选。ABB 公司生产的 IGCT 技术参数如表 1 所示。将二只 IGCT 串联,每只额定电压为 4.5 kV,则开关模块总计电压为 9 kV。

表 1 IGCT 主要技术指标

瞬时开关频率	20 kHz
开关关断时间	1 μs
di/dt	4kA/μs
dv/dt	10 ~ 20 kV/μs
交流阻断电压	6.5 kV
直流阻断电压	4.5 kV

考虑到 IGCT 在关断时会承受较高的电压上升率(du/dt),固态断路器的耐压等级要有一定的安全裕量,设计时不能低于 13 kV,因此固态断路器是由二只 9 kV 的开关模块串联组成的。开关模块的拓扑结构是由反并联的两路 IGCT 串联而成的(见图 1),能够分别导通正半周期和负半周期的电流。每个 IGCT 串联支路需增加一个 9 kV 的整流二极管,以保护 IGCT。每只 IGCT 均并联有 du/dt

缓冲电路、压敏保护电阻 R_v 和均压电阻 R_p 。因为 IGCT 的过流能力是比较低的,所以在开关模块串联构成固态断路器时就需要增加电流上升率(di/dt)的缓冲电路^[8-9]。

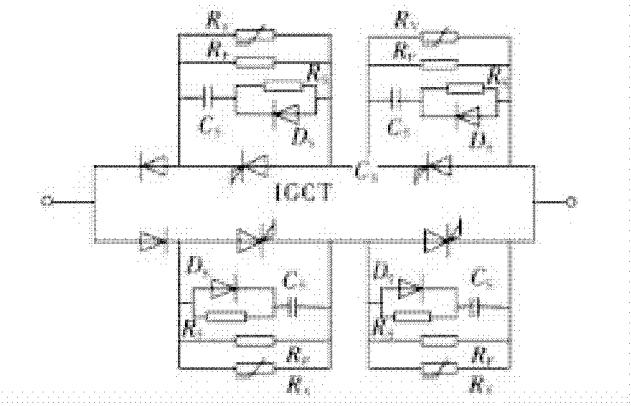


图 1 新型固态断路器结构图

固态断路器的控制分为两种工作状态:正常运行状态、故障保护状态。在正常工作状态下,SSB 的开断控制采用软开关控制技术,当通过开关的电流过零时关断开关器件,在支路电压过零点时开通 SSB。在系统侧发生故障时,断路器必须立即断开有故障的支路,保护敏感负载的正常运行。而当负载侧出现了短路故障时,为了防止故障进一步扩大,必须快速关断开关器件;如果监测到在工频正弦半周期内故障已消失,重新让开关器件开通,恢复 SSB 的闭合;如果故障一直存在,则开通并联支路的限流开关,限制故障电流的大小,导通时间最大限制为 15 个工频周期,可用来保护负载侧装置。固态断路器正常运行的控制策略是:在投入运行前,固态断路器首先要检查来自两侧电网的同步电压信号是否正常,只有当控制器收到“开机”的命令,并且检测到两侧电网的电压信号均有正常同步信号情况以后,才允许投入正常的运行。然后检查 SSB 开关是否处于分闸状态(即开关器件断开)。只有同时满足上述两个条件,才能发出触发脉冲,控制断路器在支路电压过零点时导通,进入通流状态。

断路器进入导通状态后,其自身的监控系统也进入了工作状态,通过在线监测被控馈线的电压和电流等参数,由数字处理子系统进行数据分析和计算。监控系统配置了显示窗口能实时地显示检测出的结果,并判断运行过程中是否发生了短路等故障。当检测到被控馈线发生故障时,能立即做出响应,进入故障处理子程序来进一步判断故障的性

质,并根据故障的严重程度执行相应的故障处理。

2 开断过电压抑制

由于SSB开断速度过快、截流等原因,器件本身需要承受很高的过电压冲击。固态断路器中过电压的防护主要依靠阻容缓冲电路和氧化锌避雷器两种方式^[10]。过电压缓冲电路中的缓冲电容 C_s 通常为5 μF以下(见图1),如果缓冲电阻 R_s 较小,在分断短路电流时引起的 du/dt 就会导致缓冲电容的涌流增大;而如果 R_s 较大的话则缓冲电路的响应速度就会降低,将达不到理想的限制过电压的效果。而且这两种方式都是对过电压的被动防护,没有从根本上消除过电压产生的原因。因此,为了限制故障隔离过程中 du/dt 的幅值,在固态断路器中增加一个阻容支路。采用增大电容来有效抑制过电压的幅值,固态断路器开断回路的等效电路如图2所示。

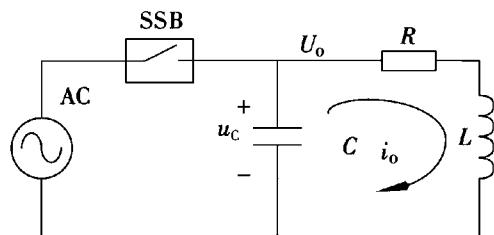


图2 SSB开断状态时等效电路

设 E 为线路中储存的电磁能量,其大小为

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

由此可以看出,如果增加了固态断路器负载侧的对地电容,就能够降低暂态过电压的幅值。固态断路器两端承受的电压 $u_s(t)$ 为

$$u_s(t) = u_E(t) - u_C(t) \quad (2)$$

根据KVL方程得到固态断路器两端承受的最大过电压为

$$u_s(t) = u_E + \frac{I_{IGCT}}{C\sigma} e^{-R/8L\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (3)$$

式(2~3)中: $u_E(t)$ 为电源侧瞬时电压; $u_C(t)$ 为负载侧瞬时电压; C 为对地分布电容; R,L 为负载侧电阻和电感。

由式(3)可知,如果固态断路器在开断的时候

能增大电容,那么就能有效地减少过电压的幅值。因此,在固态断路器中增加一个 RC 阻容支路(见图3),这个阻容支路由二极管桥组成,阻容支路连接在二极管桥中,由GTO来控制开断,且流过的电流是单方向的。在控制固态断路器断开之前,GTO是导通的, RC 阻容支路并在回路中,当固态断路器断开时接入了对地电容,过电压的幅值可以显著降低。

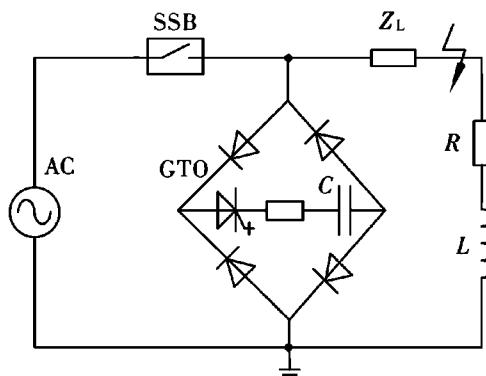


图3 带阻容支路的固态断路器

固态断路器中的开关器件有两种:IGCT和GTO,分别由各自的触发信号控制。在IGCT开断之前,首先触发GTO导通使 RC 阻容支路接通,延时10 μs后关断IGCT,固态断路器的开断过程由GTO导通和IGCT关断两个阶段。由于IGCT对短路电流有抑制作用,接入的阻容支路不会造成短路电流的增加,还可以为馈线上的感性短路电流提供相应的续流回路^[8~10]。

为了验证带阻容支路的固态断路器抑制过电压的效果,使用MATLAB\Simulink仿真软件对固态断路器的开断单相短路故障进行了仿真分析。供电电源线电压为10 kV,相电压为6 kV;短路故障发生前的等效负载电阻为120 Ω、等效电感为8 mH;故障线路的分布式参数:电阻0.153 Ω/km、电感0.356 mH/km、电容0.29 μF/km;导体标称截面120 mm²,载流量290 A。通过对比仿真,得出抑制过电压的对比波形如图4所示。图4a为不增加阻容回路的过电压波形,在开断时产生了大约1.8 pu(标么值)的过电压;图4b为增加阻容支路后断路器的开断过电压波形,在开断时产生了大约1.2 pu的过电压。过电压抑制效果明显。

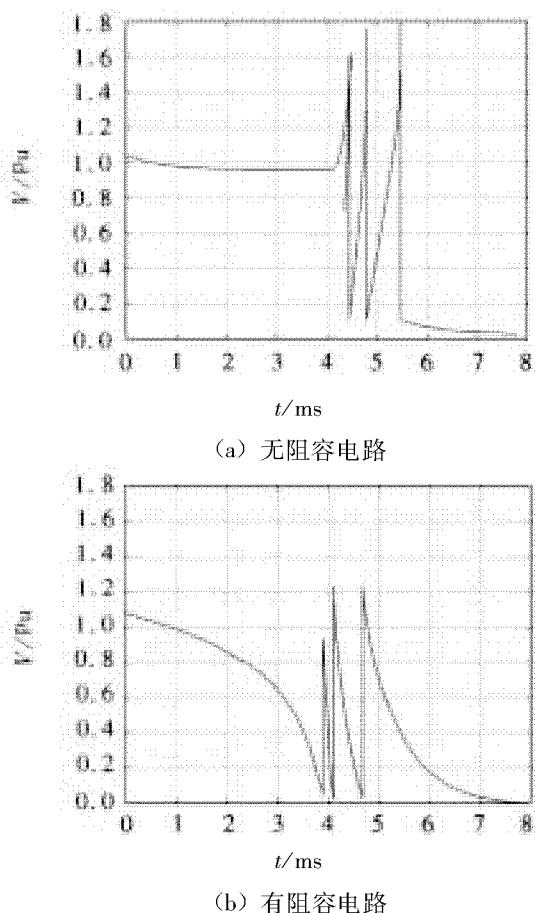


图4 固态断路器开断时的过电压波形

3 结论

新型固态断路器利用IGCT优良的关断能力和快速的关断特性,有利于故障的快速隔离,防止故障扩大。但由于固态断路器开断时分断电流过快,产生较大的过电压冲击,容易损害开关器件,提出采用增加阻容续流支路方法来减少过电压。通过10 kV电网电压的仿真验证,无续流支路的固态断路器在开断时产生的过电压为1.8 pu,而增加续

流支路后,开断时产生的过电压降低为1.2 pu,明显地抑制了开断过电压,因此,利用续流支路抑制过电压具有较好的实用价值。

参考文献:

- [1] 刘健,尹项根. DT - STATCOM 主电路结构与控制算法 [J]. 电力自动化设备, 2012 (3): 36 - 41.
- [2] 胡杰,王莉,穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (2): 52 - 55.
- [3] 吕玉祥,张志强,袁阔. 新型智能固态断路器研制 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (9): 112 - 114.
- [4] 冯源,郭忠文. 固态断路器技术的应用 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (10): 96 - 98.
- [5] 张志强. 基于IGCT的新型智能固态断路器仿真与设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008: 42 - 48.
- [6] 张明锐,金鑫,刘金辉. 一种抑制固态断路器过电压的新方法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (3): 37 - 41.
- [7] 严蕾,弋东方,洪琪,等. 中压电网过电压保护技术的探讨与研究 [J]. 装备制造技术, 2010 (2): 135 - 136.
- [8] 江道灼,王威,李电. 双向潮流固态限流器的控制策略与实验 [J]. 电力系统自动化, 2006 (9): 74 - 80.
- [9] MU JIANGUO, WANG LI, HU JIE. Analysis and design of topological structure for DC solid - state circuit breaker [C]//World Non - Grid - Connected Wind Power and Energy Conference. Nanjing, China: IEEE, 2009: 1 - 5.
- [10] 高彦成,张建文,王刚. 抑制真空断路器过电压的方法研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2009 (3): 448 - 449.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

两类噪声对光学双稳系统性质的影响

陶华拥^{1,2}, 王 兵²

(1. 安徽省淮南一中物理教研组,安徽 淮南 232001;2. 安徽理工大学理学院,安徽 淮南 232001)

摘要:利用斯特拉托诺维奇近似得到关联函数 $C(s)$ 表达式的基础上,分析高斯噪声和非高斯噪声对系统性质的影响。结果表明:① $C(s)$ 随非高斯噪声参数 Q 的增大出现峰值,表明随 Q 的增大,输出 x 的涨落的衰减先慢后快;② 高斯噪声强度 D 较小时, $C(s)$ 随 D 的增大而增大,但 D 超过一定数值时, $C(s)$ 不再随 D 的增大而变化;③ $C(s)$ 随自关联时间 τ 的增大出现极大值,且关联强度 λ 越小,该极大值越明显;④ λ 取值较小时, $C(s)$ 随非高斯噪声参数 q 的增大而增大, λ 取值较大时, $C(s)$ 随 q 的增大而减小,表明由于 λ 的取值不同, q 既可以延缓也可以加快 x 涨落的消退。

关键词:光学双稳系统;关联函数;非高斯噪声;高斯噪声

中图分类号:O415 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2013)02-0079-04

Effects of Two Kinds of Noises on Stationary Properties of an Optical Bistable System

TAO Hua-yong^{1,2}, WANG Bing²

(1. Physics Teaching and Research Group, Huainan No. 1 Senior High School, Huainan Anhui 232001, China; 2. School of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Using Stratonovich approximate, the effects of non-Gaussian and Gaussian noises on the correlation function $C(s)$ of an optical bistable system is investigated. It is found: ① There exists a peak in the curve of $C(s)$ versus non-Gaussian noise parameter Q , this means the decay rate of x fluctuation slow firstly, and then fast with increasing Q . ② As Gaussian noise intensity D has small values, $C(s)$ increases with increasing D , and $C(s)$ has no changes with increasing D as D has large values. ③ $C(s)$ has a maximum with increasing self-correlation time τ , and the smaller correlation intensity λ , the more obvious $C(s)$ maximum. ④ As correlation intensity λ has small values, $C(s)$ increases with increasing non-Gaussian parameter q , and $C(s)$ decreases with increasing q as λ has large values, namely, the parameter q can either accelerate or delay the fluctuation decay of x for different λ values.

Key words: optical bistable system; the correlation function; non-Gaussian noise; Gaussian noise

噪声对非线性系统的影响一直受到很多学者的关注,如在双稳系统、激光系统、生物系统等。文献[1]研究了加性色噪声和乘性色噪声驱动的双稳系统中随机共振现象,发现两个噪声的自关联时间及它们之间的关联强度都能导致信噪比双峰

和单峰之间的转换。文献[2]利用线性化近似方法,研究了包含色关联的泵噪声和量子噪声的单模激光系统的信噪比问题,发现了双共振现象。文献[3]分析了实部和虚部交叉关联的泵噪声对单模激光系统稳态性质的影响,发现关联强度对单模激光系

统的定态强度分布有显著的影响。在这些研究中,噪声都视为高斯型噪声。但是,许多实验和理论研究表明,在非线性系统中的噪声可能是非高斯噪声^[4-5]。文献[6]研究了非高斯色噪声驱动的双势阱中的随机共振现象。文献[7]研究了非高斯噪声对势垒穿越的影响,发现乘性的非高斯噪声导致共振激活。利用小时间延迟近似和统一色噪声近似,文献[8]研究了非高斯噪声驱动的时间延迟反馈双稳系统中的随机共振现象。

由于光学双稳器件在高速光通信、光存储等方面有很好的应用前景,所以光学双稳系统吸引了大量的实验和理论研究。文献[9]利用绝热近似理论,研究了乘性噪声和加性噪声以及信号驱动的光学双稳系统中的随机共振。文献[10]利用投影算子方法,研究了交叉关联白噪声驱动的光学双稳系统的性质。本文利用斯特拉托诺维奇近似研究乘性的非高斯色噪声和加性的高斯白噪声对光学双稳系统关联函数的影响。

1 系统的定态概率密度

文献[11]提出包含介质的光学腔被激光注入后,当激光与光学腔及介质的原子实现共振时可以得到如下方程

$$\frac{dx}{dt} = y - x - \frac{2cx}{1+x^2} \quad (1)$$

式中: c 为控制参数; y 为注入激光的模; x 为输出激光的模(y, x, c 已标度为无量纲量)。

当参数 c 取值较大且 y 的取值在一定范围内时,确定性势函数 $V(x) = -\int(y - x - \frac{2cx}{1+x^2}) dx$ 将出现两个稳定点和一个不稳定点,取 $c = 20.02$, $y_0 = 14.12$ 以保证系统出现双稳态。考虑输入激光和控制参数的随机涨落($y \rightarrow y_0 + \eta(t)$, $c \rightarrow c + \xi(t)$),可以得到包含噪声项的Langevin方程

$$\frac{dx}{dt} = y_0 - x - \frac{2cx}{1+x^2} + \frac{2x}{1+x^2} \xi(t) + \eta(t) \quad (2)$$

式中: $\xi(t)$ 为乘性的非高斯噪声项。

$$\dot{\xi} = -\frac{1}{\tau} \frac{d}{d\xi} V_q(\xi) + \frac{1}{\tau} \varepsilon(t) \quad (3)$$

$$\text{其中 } V_q(\xi) = \frac{Q}{\tau(q-1)} \ln [1 + \frac{\tau}{Q}(q-1) \frac{\xi^2}{2}] \quad (4)$$

$\varepsilon(t)$ 和 $\eta(t)$ 是高斯白噪声,具有下列统计性质。

$$\langle \varepsilon(t) \varepsilon(t') \rangle = 2Q\delta(t-t') \quad (5)$$

$$\langle \eta(t) \eta(t') \rangle = 2D\delta(t-t') \quad (6)$$

$$\langle \varepsilon(t) \eta(t') \rangle = 2\lambda \sqrt{DQ}\delta(t-t') \quad (7)$$

式(3-7)中: Q 和 D 分别为噪声 $\varepsilon(t)$ 和 $\eta(t)$ 的强度; τ 为 $\xi(t)$ 的关联时间; λ 为 $\varepsilon(t)$ 和 $\eta(t)$ 之间的关联强度且满足 $|\lambda| \leq 1$ 。

式(3)中的 q 为非高斯噪声系数,当 $q \rightarrow 1$, $\xi(t)$ 将退化为自关联时间为 τ 的高斯色噪声^[12]。

利用路径积分^[13],可以得到

$$\dot{\xi} = -\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \xi + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \varepsilon_{\text{eff}}(t) \quad (8)$$

其中

$$\langle \varepsilon_{\text{eff}}(t) \varepsilon_{\text{eff}}(t') \rangle = 2Q_{\text{eff}}\delta(t-t') \quad (9)$$

$$\langle \eta(t) \varepsilon_{\text{eff}}(t') \rangle = \langle \eta(t') \varepsilon_{\text{eff}}(t) \rangle = 2\lambda \sqrt{Q_{\text{eff}}D}\delta(t-t') \quad (10)$$

$$\text{噪声的有效关联时间 } \tau_{\text{eff}} = \frac{2(2-q)\tau}{5-3q}, \text{ 有效强}$$

$$\text{度 } Q_{\text{eff}} = \frac{2(2-q)^2}{5-3q} Q.$$

利用Novikov理论及Fox近似^[14],式(2)所对应的Fokker-Planck方程为

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = L_{\text{FP}}P(x,t) \quad (11)$$

$$L_{\text{FP}} = -\frac{\partial}{\partial x} F(x) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} G(x) \quad (12)$$

漂移系数 $F(x)$ 以及扩散系数 $G(x)$ 分别为

$$F(x) = f(x) + 4 \frac{Q_{\text{eff}}x(1-x^2)}{C(\tau_{\text{eff}})(1+x^2)^3} + 2\lambda \sqrt{Q_{\text{eff}}D} \frac{1-x^2}{(1+x^2)^2} \quad (13)$$

$$G(x) = 4 \frac{Q_{\text{eff}}x^2}{C(\tau_{\text{eff}})(1+x^2)^2} + 2\lambda \sqrt{Q_{\text{eff}}D} \frac{x}{1+x^2} + D \quad (14)$$

其中

$$f(x) = y_0 - x - \frac{2cx}{1+x^2} \quad (15)$$

利用式(11)可以得到系统定态概率密度

$$P_{\text{st}}(x) = N \frac{1}{G(x)} \exp \left(\int_x^{\infty} \frac{F(z)}{G(z)} dz \right) \quad (16)$$

N 为归一化常数,且当 $x \leq x_s$ 时, $C(\tau_{\text{eff}}) = 1 - \tau_{\text{eff}} f'(x_{s1})$;当 $x > x_s$ 时, $C(\tau_{\text{eff}}) = 1 - \tau_{\text{eff}} f'(x_{s2})$; x_{s1} , x_s 和 x_{s2} 分别表示定态点,满足 $x_{s1} < x_s < x_{s2}$ 。式(11)成立的条件为 $C(\tau_{\text{eff}}) > 0$ 。

2 系统稳定的性质

包含噪声的光学双稳系统在稳定时,输出模值 x 会出现涨落。 t 时刻的 $x(t)$ 与 $t+s$ 时刻 $x(t+s)$ 之间的联系可由双时稳定关联函数描述。

$$K(s) = \langle x(t+s)x(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2 \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \langle x(t+s)x(t) \rangle &= \iint x P_{\text{tran}}(x, t+s | x', t) \\ &\quad P_{\text{st}}(x') dx' dx \end{aligned} \quad (18)$$

跃迁概率密度为

$$P_{\text{tran}}(x, t+s | x', t) = \exp(L_{\text{FP}} s) \delta(x - x') \quad (19)$$

由式(17)和式(18)可得

$$\begin{aligned} \langle x(t+s)x(t) \rangle &= \int x \exp(L_{\text{FP}} s) x P_{\text{st}}(x) dx \\ &\quad (20) \end{aligned}$$

考虑到

$$\begin{aligned} \frac{dK(s)}{ds} &= \int x L_{\text{FP}} \exp(L_{\text{FP}} s) P_{\text{st}}(x) dx = \\ &\quad \int (L_{\text{FP}}^+ x) \exp(L_{\text{FP}} s) x P_{\text{st}}(x) dx \end{aligned} \quad (21)$$

即

$$\frac{dK(s)}{ds} = \frac{\langle x(t)L_{\text{FP}}^+(s)x(t+s) \rangle}{\langle (\delta x)^2 \rangle} \quad (22)$$

式(21)中 L_{FP}^+ 为 L_{FP} 的伴随算符,利用斯特拉托诺维奇近似 $\frac{\langle x(t)L_{\text{FP}}^+(s)x(t+s) \rangle}{\langle x(t)L_{\text{FP}}^+(t)x(t) \rangle} = \frac{\langle x(t+s)x(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$,可得

$$\frac{1}{K(s)} \frac{dK(s)}{ds} = \frac{\langle x(t)L_{\text{FP}}^+ x(t) \rangle}{K(0)} \quad (23)$$

其中 $K(0) = \langle (\delta x)^2 \rangle$ 。由式(22)可以得到

$$K(s) = K(0) \exp(-\mu s) \quad (24)$$

x 的归一化稳定关联函数为

$$C(s) = \frac{K(s)}{K(0)} = \exp(-\mu s) \quad (25)$$

$$\text{其中 } \mu = \frac{\langle G(x) \rangle_{\text{st}}}{\langle (\delta x)^2 \rangle_{\text{st}}} \quad (26)$$

利用式(25),可以分析非高斯噪声和高斯噪声对光学双稳系统稳定性质的影响。

高斯噪声强度 D 取不同值时,随着 Q 的增大, $C(s)$ 存在一个极大值(见图1),当 Q 逐渐增大时,系统涨落消退的速率会出现反转;即,随 Q 的增大,

涨落的消退由逐渐变慢到达最慢后又逐渐变快。高斯噪声强度 D 越小, $C(s)-Q$ 曲线上的峰值越明显,表明高斯噪声强度减小时,非高斯噪声对系统的影响会更明显。

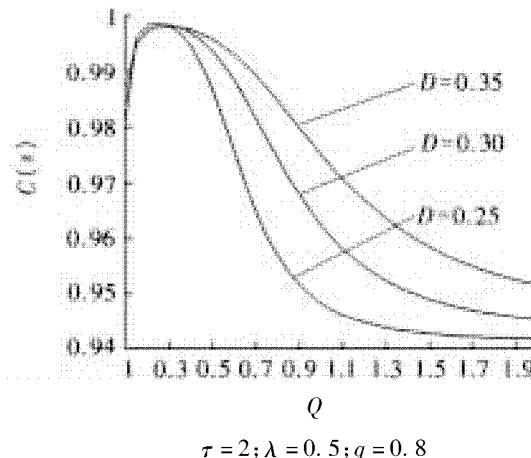


图1 关联函数 $C(s)$ 随非高斯噪声参数 Q 变化的曲线

$C(s)$ 随 D 的增大而增大,表明 D 越大,系统涨落消退的越缓慢,当 D 增大至一定数值时($D > 0.4$), $C(s)$ 几乎不再随 D 的增大而变化(见图2);另外,当 D 取值较小时,三条曲线分离比较明显,表明此时非高斯噪声参数 Q 对系统的影响较明显,但当 D 取值较大时三条曲线几乎重合,表明此时高斯白噪声的影响占主要部分。

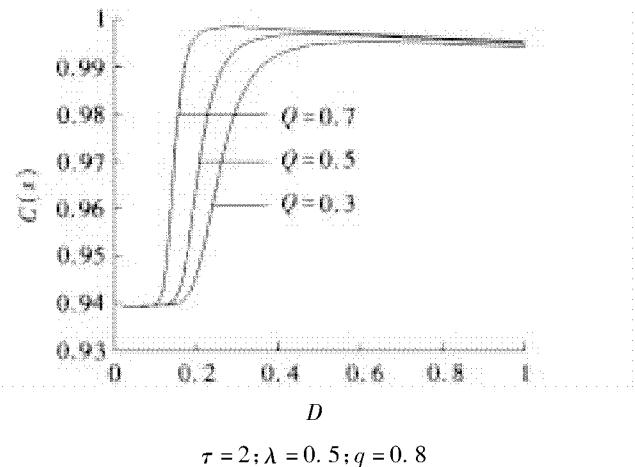


图2 关联函数 $C(s)$ 随高斯白噪声强度 D 变化的曲线

当 λ 取值较小时(如 $\lambda = 0.3$), $C(s)-\tau$ 曲线上出现明显的峰值(见图3),但随 λ 取值的增大, $C(s)-\tau$ 曲线逐渐变平,表明 λ 较小时,系统涨落衰退的速率随 τ 的增加出现先小后大的过程,但当 λ 取值较大时,系统涨落衰退的速率随 τ 的增加而变小直至不再变化。

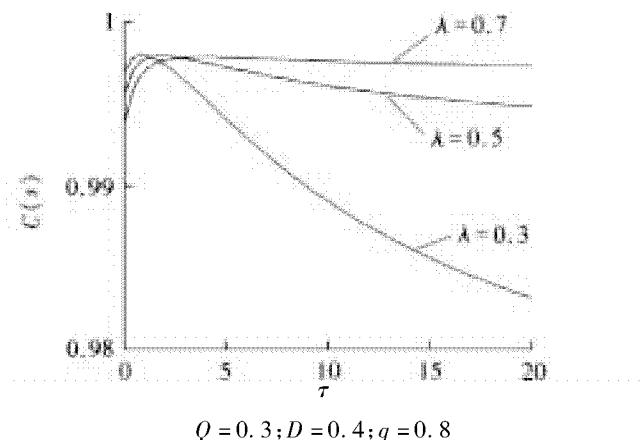


图3 关联函数 $C(s)$ 随非高斯噪声自关联时间 τ 变化的曲线

关联强度 λ 取不同值时, $C(s)$ 随 q 的变化影响较大(见图4),当 λ 取值较小时($\lambda = 0.2$), $C(s)$ 随 q 的增大而增大,表明 q 延缓了系统涨落的消退;但当 λ 取值较大时, $C(s)$ 随 q 的增大而减小,表明此时 q 加快了系统涨落的消退。

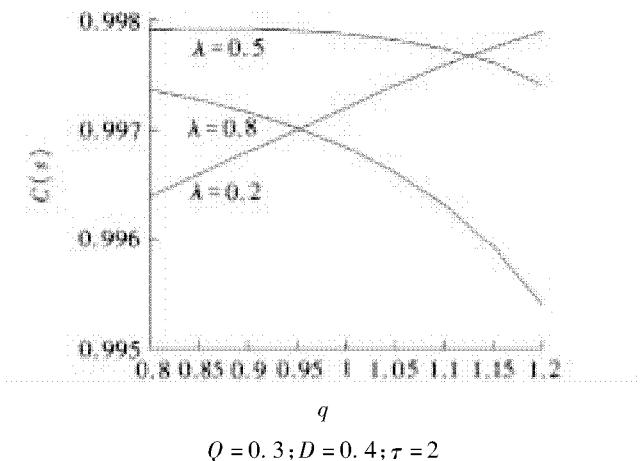


图4 关联函数 $C(s)$ 随非高斯噪声参数 q 变化的曲线

3 结论

本文研究了非高斯噪声和高斯噪声对光学双稳系统稳态性质的影响,具体分析了两种噪声对系统关联函数 $C(s)$ 的影响。研究表明,随非高斯噪声参数 Q 的增大, $C(s)$ 出现一个极大值;表明 Q 逐渐增大时,系统涨落消退的速率逐渐变小到达极小后又逐渐增大;高斯噪声强度 D 减小时,非高斯噪声对系统的影响更为明显。 D 越大,系统涨落衰退的越缓慢,但当 D 取值较大时,衰退的速率将不再随 D 增大而变化;由于关联强度 λ 的取值不同,非高斯噪声参数 q 既可能延缓也可能加快系统涨落的消退。

参考文献:

- [1] LUO X, ZHU S. Stochastic resonance driven by two different kinds of colored noise in a bistable system [J]. Phys. Rev. E, 2003, 67: 021104 (12).
- [2] HAN L B, CAO L, WU D J, et al. Stochastic resonance for bias signal - modulated noise in a single - mode laser [J]. Physica A, 2006, 366: 159 - 166.
- [3] ZHANG L, CAO L, WU D J. Steady - state analysis of a single - mode laser with cross - correlation between the real and imaginary parts of pump noise [J]. Physica A, 2006, 363: 181 - 186.
- [4] BORLAND L. Ito - Langevin equations within generalized thermostatics [J]. Phys. Lett. A, 1998, 245: 67 - 72.
- [5] FUENTES M A, WIO H S, TORAL R. Effective Markovian approximation for nonGaussian noises: a path integral approach [J]. Physica A:2002, 303: 91 - 104.
- [6] FUENTES M A, TORAL R, WIO H S. Enhancement of Stochastic Resonance: The role of Non Gaussian Noises [J]. Physica A, 2001, 295: 114 - 122.
- [7] GOSWAMI G, MAJEE P, GHOSH P K, et al. Colored multiplicative and additive non - Gaussian noise - driven dynamical system: mean first passage time [J]. Physica A, 2007, 374: 549 - 558.
- [8] WU D, ZHU S Q. Stochastic resonance in a bistable system with time - delayed feedback and non - Gaussian noise [J]. Phys. Lett. A, 2007, 363: 202 - 212.
- [9] 宁丽娟,徐伟. 光学双稳系统中的随机共振 [J]. 物理学报,2007,56(4):1 944 - 1 947.
- [10] DU L C, MEI D C. Intensity correlation function of an optical bistable system subjected to cross - correlated noises [J]. Phys. Lett. A, 2008, 372: 5 529 - 5 533.
- [11] BONIFACIO R, LUGIATO L A. Optical Bistability and Cooperative Effects in Resonance Fluorescence [J]. Phys. Rev. A, 1978, 18:1 129 - 1 144.
- [12] GARDINER C W. Handbook of Stochastic Methods [M]. 2nd ed. Springer, Berlin, 1985, Chap. 4.
- [13] BOUZAT S, WIO H S. New aspects on current enhancement in Brownian motors driven by non - Gaussian noises [J]. Physica A, 2005, 351: 69 - 78.
- [14] FOX R F. Uniform convergence to an effective Fokker - Planck equation for weakly colored noise [J]. Phys. Rev. A, 1986, 34:4 525 - 4 527.

(责任编辑:何学华)

安徽理工大学学报(自然科学版)

第33卷第2期(总第127期)2013年6月

目 次

- 我国深立井冻结法凿井安全现状与思考 程桦,蔡海兵(1)
基于 Adina 软件的大型边坡变形与稳定性分析 袁宝远,周星汉,许瑶,等(7)
 CH_4 三自热重整制合成气催化剂的制备与性能 薛茹君,王庆超(12)
激光诱导荧光技术的煤矿水源水质监测研究 周孟然,聂梦雅(17)
树突细胞算法的形式化描述 邢建强,方贤进(20)
基于改进人工鱼群算法的 PID 控制器参数优化 吴姗姗,黄友锐(23)
基础隔震结构单向偏心扭转反应非线性分析 陈翠翠,吴延辉,李玉荣(27)
电厂燃煤产物中重金属元素的环境影响评价研究 王馨,冯启言,武旭仁,等(30)
六自由度工业机器人手臂正运动学分析与仿真 李宪华,郭永存,宋韬(34)
三种添加剂对松木屑/LDPE 微波共热解研究 汪娟,陈明强,隋倩倩,等(39)
 C_h -空间中立型随机泛函微分方程解的稳定性 岳超慧,张长勤(44)
单片机控制系统通信模型研究 刘振(48)
矿井巷道地质钻孔三维可视化设计 杨华忠,张平松(52)
蹬空条件下上提面回采巷道顶板运动特征研究 陈登红,华心祝,杨科(56)
冻结井筒外壁受力信息化施工监测及分析 王再举,姚直书,邓昕,等(62)
天津地铁隧道修复工程冻土力学性能试验研究 李凯,程桦(67)
RTP/RTCP 媒体流网络分段性能测量的研究与实现 刘颖,刘森晶(71)
新型固态断路器设计及过电压抑制方法研究 宫毓(75)
两类噪声对光学双稳系统性质的影响 陶华拥,王兵(79)

期刊基本参数:CN34-1220/N * 1981 * q * A4 * 82 * zh * P * ¥5.00 * 1000 * 19 * 2013-06

Contents

Safety Situation and Thinking about Deep Shaft Construction with Freezing Method in China	CHENG Hua, CAI Hai – bing (1)
Deformation and Stability Analysis of Large Slope Based on ADINA Software	YUAN Bao – yuan, ZHOU Xin – han, XU Yao, et al (7)
Preparation and Performance of Catalysts for Tri – reforming of CH ₄ – CO ₂ to Synthesis Gas	XUE Ru – jun , WANG Qing – chao (12)
Monitoring of Coal Mine Water Quality with Laser Induced Fluorescence Technology	ZHOU Meng – ran, NIE Meng – ya (17)
Formal Description Of Dendritic Cells Algorithm	XING Jian – qiang, FANG Xian – jin (20)
Optimization of PID Controller Parameters Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm	WU Shan – shan, HUANG You – rui (23)
Nonlinear Analysis of Response to Base – isolated Structure One – way Eccentric Reverse Torsion	CHEN Gui – cui, WU Yan – hui, LI Yu – rong (27)
Study on Environmental Impact Assessment of Heavy Metals in Coal Combustion Products	WANG Xin, MA Qi – yan, WU Xu – ren, et al (30)
Forward Kinematics Analysis and Motion Simulation Platform of A Six DOF Industrial Manipulator	LI Xian – hua, GUO Yong – cun, SONG Tao (34)
Study on Co – pyrolysis of Pine Sawdust and LDPE with Three Additives by Microwave Heating	WANG Juan, CHEN Ming – qiang, SUI Qian – qian, et al (39)
Stability of the Solution to Neutral Stochastic Functional Differential Equations with Infinite Delay at Phase Space C _h	YUE Chao – hui, ZHANG Chang – qin (44)
Research on Communication Model of Single – chip Microcomputer Control System	LIU Zhen (48)
Three – dimensional Visual Design for Geological Boreholes in Roadways of Mines	YANG Hua – zhong, ZHANG Ping – song (52)
Characteristics of Roadway' s Roof Movement under Floor Failure in Longwall with Increased Upper Mining Limit	CHEN Deng – hong, HUA Xin – zhu, YANG Ke (56)
Monitoring and Analysis of Stress Acting on Outer Lining of Frozen Shaft Constructed with Information Technology	WANG Zai – ju, YAO Zhi – shu, DENG Xin, et al (62)
Experimental Research on Frozen Soil Mechanical Performance in Tunnel Restoration Project of Subway in Tianjin City	LI Kai, CHENG Hua (67)
Research on Network Segmentation Performance Measurement for RTP/RTCP Media Stream and and Its Implementation	LIU Ying, LIU Miao – jing (71)
New Solid – State Breaker and Its Over – voltage Suppression Method	GONG Yu (75)
Effects of Two Kinds of Noises on Stationary Properties of an Optical Bistable System	TAO Hua – yong, WANG Bing (79)