

安徽理工大学学报(自然科学版)

第 32 卷第 3 期(总第 123 期)2012 年 9 月

目 次

淮南煤中矿物特征与成因分析	陈 萍,姜冬冬(1)
基于人工神经网络的隧道围岩稳定性分类	周盛全,吴基文(7)
基于隔离式 CAN 总线网络的煤矿通信系统设计	曲立国,黄友锐,唐超礼,等(12)
基于 Lebesgue 常数最小的最优保形重心有理 Hermite 插值	乔 洁,赵前进(17)
ZnO 气敏薄膜元件外延中非故意杂质演变机制	吴孔平,周孟然,蔡 俊,等(21)
基于 ANSYS 放顶煤液压支架顶梁仿真分析	周毅钧,董 营,郁向红(25)
基于多目标粒子群算法的网格工作流调度研究	孙妍姑,吴海波(29)
不同复垦类型木本植物重金属吸收积累差异	杨金香,李小龙(33)
微波辅助提取芦荟多糖的研究	安胜欣,王纪纪,唐小琼,等(37)
煤矿塌陷地不同复垦方式下土壤呼吸特征	赵 魁,张治国,杨 清,等(41)
煤矿带式输送机启动控制方式的探讨	姜筱瀛(46)
保形三次有理样条及其等距曲线	刘文艳,王 强,张养聪(50)
井下瞬变电磁探测空间金属体干扰影响测试分析	李培根(55)
带式输送机防撕裂实时检测技术研究	苏 畅,王从东(60)
关于曲柄滑块机构连杆运动瞬心线特征的研究	谭维奇,谢鸿满(63)
强夯振动监测及衰减规律研究	刘吉敏,王长柏(67)
急倾斜煤层开采地表移动规律数值模拟研究	朱 强,高明中,孙 超,等(71)
欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》,欢迎投稿	(54)

期刊基本参数:CN34-1220/N*1981*q*A4*74*zh*P*¥5.00*1000*17*2012-09

Contents

Characteristics and Geological Genesis of Minerals in Coals of Huainan	
.....	CHEN – Ping, JIANG Dong – dong (1)
Tunnel Surrounding Rock Stability Classification Based on Artificial Neural Networks	
.....	ZHOU Sheng – quan, WU Ji – wen (7)
Design of Coal Mine Communication System Based on Isolated CAN Network	
.....	QU Li – guo, HUANG You – rui, TANG Chao – li, et al (12)
Shape Preserving of Barycentric Rational Hermite Interpolation Basis on the Lebesgue Constant Minimizing ...	
.....	QIAO Jie, ZHAO Qian – jin (17)
Evolution Mechanism of Unintentional Doping in ZnO Gas Sensitive Film Element Epitaxy	
.....	WU Kong – ping, ZHOU Meng – ran, CAI Jun, et al (21)
Analysis of Roof Beam of Hydraulic Support for Top Coal Caving Mining Based on Simulation with ANSYS ...	
.....	ZHOU Yi – jun, DONG Ying , YU Xiang – hong (25)
Grid Workflow Scheduling Based on Multi – Objective Particle Swarm Algorithm	
.....	SUN Yan – gu, WU Hai – bo (29)
Difference of Heavy Metals Accumulation by Woody Plants at Different Reclamation Type of Area	
.....	YANG Jin – xiang, LI Xiao – long (33)
Study on the Microwave – assistant Extraction of Aloe Polysaccharide	
.....	AN Sheng – xin, WANG Ji – ji, TANG Xiao – qiong, et al (37)
Soil Respiration Characteristics of Different Reclamation Mode in Collapsed Coal Mine Area	
.....	ZHAO Kui, ZHANG Zhi – guo, YANG Qing, et al (41)
Discussion on Starting Control Mode of Belt Conveyor for Coal Mines	JIANG Xiao – ying (46)
Cubic Shape Preserving Rational Spline and Its Offset Curve	
.....	LIU Wen – Yan, WANG Qiang, ZHANG Yang – Cong (50)
Test and Analysis of Interference Effect of Metal during Detection in Mines by TEM	LI Pei – gen (55)
Real – time Detection Technology for Prevention of Conveyor Belt Ripstop	
.....	SU Chang, WANG Cong – Dong (60)
Research on Characteristics of Centrode of Link Motion of Crank – Slider Mechanism	
.....	TAN Wei – qi, XIE Hong – man (63)
Study on Vibration Monitoring and Attenuation Caused by Dynamic Compaction	
.....	LIU Ji – min, WANG Chang – bo (67)
Numerical Simulation of Ground Movement Behavior Caused by Mining of Multiple Seams with Big Dip	
.....	ZHU Qiang, GAO Ming – zhong, SUN Chao, et al (71)

淮南煤中矿物特征与成因分析

陈萍, 姜冬冬

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:煤中无机成分主要以矿物的形式存在, 矿物质作为煤中的组成部分, 在煤地质、开发、洗选、燃烧、气液化等方面有十分重要的意义。运用偏光显微镜、X射线衍射(XRD)和能谱扫描电镜(SEM-EDAX)等方法对淮南煤田煤中矿物做了分析。研究表明淮南煤中矿物含量占煤中显微组分的10%左右。常见矿物为硅酸盐矿物, 其次为碳酸盐矿物、氧化物矿物及少量硫化物矿物等。硅酸盐矿物中主要为高岭石、伊利石、伊蒙混层等粘土矿物, 少见有绿泥石和锆石, 偶见钠长石和白榴石; 碳酸盐矿物中除了常见的方解石和菱铁矿外, 在潘一井田1 048 m的深部, 发现了碳酸锶; 氧化物矿物主要为石英和金红石, 硫化物矿物主要有黄铁矿, 磷酸盐矿物大类除磷灰石外, 还鉴定出了煤中未曾发现过的磷铝钒石。结合沉积环境分析, 硅酸盐矿物、磷酸盐矿物多为陆源碎屑成因, 盐类矿物、氧化物矿物和碳酸盐矿物多为自生矿物, 伴有铁白云石, 石英与方解石的交代现象。

关键词:矿物; 煤; 成因

中图分类号:TD167 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)03-0001-06

Characteristics and Geological Genesis of Minerals in Coals of Huainan

CHEN - Ping, JIANG Dong - dong

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

Abstract: By using optical microscope, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), the contents and geological genesis of minerals in coals of Huainan are analyzed. Results show that in general the inorganic components in coals of Huainan are less than 10%. The dominant type of minerals in coals is silicate, with secondary carbonate and oxide minerals, followed by small amount of pyrite and other minerals. The silicate minerals mostly include kaolinite, illite and illite montmorillonite mixed-layer clay minerals. In addition to calcite and siderite, strontianite also includes in the coal of Pan Yi Mine in the depth of 1 048 meter. The oxide minerals are mainly quartz and rutile. Besides apatite, we first found $\text{BaAl}_2[\text{PO}_4](\text{OH})_2$ in coal. Combined with the sedimentary environment analysis of the Huainan coal, it is suggested that the silicate minerals and phosphate mineral causes of terrigenous clastic. The carbonate minerals and oxide minerals are authigenic minerals, and there are ankerite, quartz and calcite metasomatism.

Key words: minerals; coal; geological genesis

煤中无机成分主要以矿物的形式存在, 矿物质作为煤中的组成部分, 在煤地质、开发、洗选、燃烧、气液化等方面有十分重要的意义。煤中矿物的种类、数量和赋存方式是影响煤质的重要因素^[1], 同时煤中矿物质也是微量元素赋存的主要载体^[2]。研究煤中矿物质在环境方面的意义也愈来愈受到重视。在煤沉积环境以及其它煤地质学的研究中,

矿物是地球化学的重要标志。

1 样品制备与测试

本次研究样品19个, 分别采自淮南煤田潘集一矿、谢桥矿、顾桥矿、李一矿、新庄孜矿、张集矿、谢李深部等(见表1)。按GB474-1996进行了样品制备。根据GB-T8899-1998规定的程序和要

求,采用透反两用偏光显微镜,在干物镜反射光和粉煤光片条件下,鉴定煤中有机组分和矿物的含量与形貌;运用粉末 D/Max - RC 型 X 射线衍射 (XRD) 进行煤中矿物组成和含量测定;运用扫描电镜 X 射线光电子能谱仪 (SEM - EDAX), 分别对煤光片和煤的低温灰粉样进行矿物定性和形态观察。

本次选取了四个煤样品做了低温灰化处理,以消除煤中有机质,富集无机物,同时能最大限度保存原矿物的特征。灰化处理采用英国 EMITECH 公司生产的 K1050X 型等离子体低温灰化仪,在华中科技大学煤燃烧国家重点实验室完成。

2 淮南煤中矿物种类和含量

光学显微镜下观察,淮南煤田煤中矿物总量在

表 1 煤光片显微组分定量统计表

%

煤样来源	镜质组	惰质组	壳壳质组	有机总量	粘土	黄铁矿	石英	方解石	其它	矿物总量
新庄孜	55.4	30.3	8.7	94.4	4.0	1.0	0.1	0.3	0.2	5.6
李一	53.3	32.9	7.8	93.0	4.7	1.5	0.3	0.3	0.2	7.0
潘一	51.7	33.7	8.8	94.2	4.5	0.8	0.3	0.2		5.8
潘一	47.3	30.5	15.2	91.0	6.3	0.1	0.9	0.9	0.7	9.0
张集	64.6	22.8	12.6	95.58	3.22	0.31	0.84	0.05		4.42
谢一	61.1	25.6	7.3	94.0	5.0		0.3	0.3	0.4	6.0
谢桥	63.3	19.9	9.7	93.0	1.2	0.3	0.3	2.3	2.9	7.0
望峰岗	63.6	25.2	6.0	94.8	3.9	0.3	0.5	0.3	0.2	5.2
顾桥	63.7	21.5	4.1	89.3	4.9	2.0	1.1	0.9	0.8	10.7

表 2 淮南煤中矿物的 X 射线衍射分析结果

样品 编号	井田	采样深度 /m	矿物/%								
			高岭石	伊利石	石英	长石	方解石	铁白云石	白云石	赤铁矿	黄铁矿
1	潘一	721.47 ~ 725.35	85		5		10				
2	潘一	759.96 ~ 798.56	80		10		极少				
3	潘一	902.93 ~ 906.03	75		10		极少				
4	潘一	907.99	75	5	10	极少					
5	潘一	959.49	85		10						
6	潘一	925.07	75	5	10		极少				
7	潘一	1 000.56	85		10						
8	潘一	958.25 ~ 961.56	75	5	10		极少				
9	潘一	1 045.20 ~ 1 048.33	70		10		10		极少		
10	新庄孜	480.0	80		极少				极少	少	
11	李一矿	567.0	80	5	极少		极少				
12	谢一矿		85		5		极少	少			
13	张集	600.0	80		5		5				
14	顾桥	500.0	75		10		5				5
15	望峰岗	484.0	75		10		5		极少		极少
16	张集	445.3	85		10	极少	5			少	极少
17	潘一	933.28	75	5	极少			极少			少
18	谢桥	953.19	80	5	10	极少	极少				极少
19	顾桥	1 071.87	75		10	极少	5	少	极少		极少

注:16 ~ 19 样品为低温灰化样品

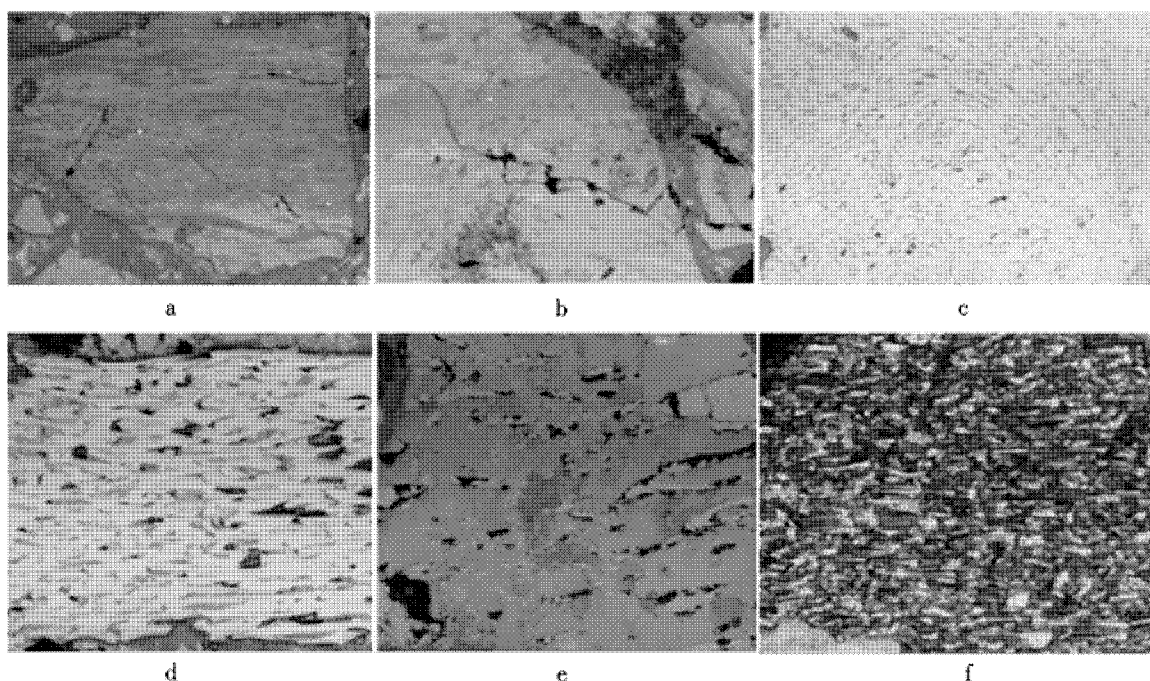
煤的显微组分中最高占 10%,最低不到 5%,主要产出四类矿物,即硅酸盐粘土矿物、碳酸盐矿物、硫化物和氧化物矿物,其中以粘土矿物含量最高(见表 1)。由 X 衍射分析结果(见表 2)得出,淮南煤中矿物高岭石含量为矿物总量的 70% 以上,最高可达 85%。氧化物矿物石英占矿物总量的 10% 左右,碳酸盐矿物方解石在 5% 左右,仅个别井田中会达到 10%,其他矿物含量不到 10%。淮南煤中黄铁矿含量极少,仅顾桥井田中黄铁矿含量相对较高,在 5% 左右。借助扫描电镜 X 射线光电子能谱仪进一步识别出煤中细小和稀少矿物的种类,包括磷酸盐矿物和卤化物矿物。

3 淮南煤中矿物特征和成因分析

3.1 硅酸盐矿物

淮南煤中最常见的矿物为粘土矿物。光学显微镜下赋存状态各异(见图1a~f)。

①呈条带状和有机质紧密结合,为同生粘土矿物;②充填有机质裂隙的粘土矿物,为后生粘土矿物;③充填有机质胞腔的粘土矿物,图1c和图1d分别为充填半镜质体和半丝质体胞腔中的粘土矿物,这类粘土矿物为煤化作用第一阶段泥炭聚集期和早期成岩作用阶段的产物。



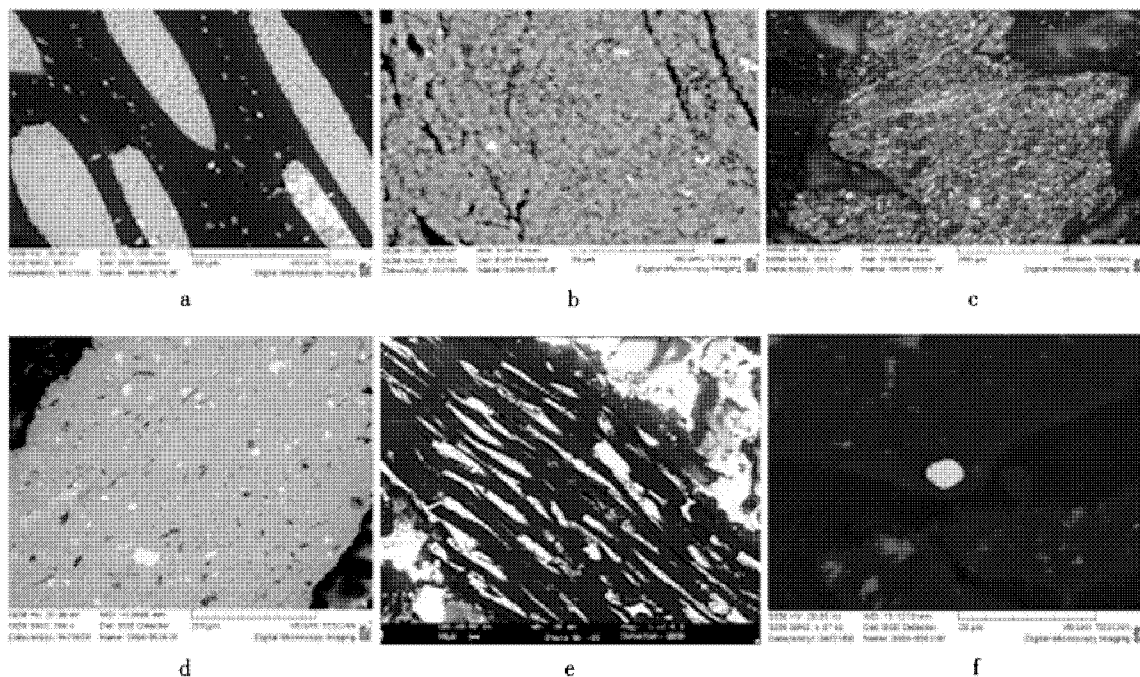
a. 潘一井田11-2煤层,条带状粘土矿物,和有机质结合原始沉积,反射光,放大200倍;b. 潘一井田11-2煤层,裂隙充填状粘土矿物,反射光,放大200倍;c. 望峰岗井田13-1煤层,充填结构半镜质体胞腔,反射光,放大200倍;d. 潘一井田1煤层,充填半丝质体空腔的粘土矿物,反射光,放大200倍;e. 望峰岗井田13-1煤层,比裂隙充填成因较早的粘土矿物,反射光,放大200倍;f. 望峰岗井田13-1煤层,矿化丝炭被粘土矿物交代成棒状,反射光,放大200倍。

图1 煤中粘土矿物

高岭石:淮南煤中高岭石含量占优势(见图中的2a~f),占矿物总量的80%左右(见表2)。一般认为高岭石是远离海相沉积的矿物,多为后生成因^[4]。在新庄孜井田的8煤层中发现聚集成板状的高岭石与磷灰石等共生。顾桥8煤层中发现有呈透镜体状的高岭石填充与有机质胞腔中,新庄孜和李一井田8煤层中见高岭石和黄铁矿紧密共生;这两种形态高岭石形成阶段与黄铁矿同期,属早期成岩阶段矿物^[3]。伊利石:伊利石含量在淮南煤中占矿物总量5%左右多与高岭石等粘土矿物共生。携入泥炭沼泽的碎屑物中的伊利石在沉积成岩作用过程中,受到沼泽水影响很容易蚀变成其它矿物,很可能是导致煤中粘土矿物伊利石含量很少的主要原因。伊蒙混层粘土矿物是由不同比例的伊利石、蒙脱石和绿泥石等规则或者不规则的互层

组成^[4],其成因分为自生和碎屑成因两类。通过扫描电镜在谢桥井田的8煤层和顾桥井田1煤层的低温灰样品中发现有伊蒙混层矿物,依据自生混层粘土矿物沉积成岩阶段的衍变方式,淮南煤中伊蒙混层矿物属自生成因的可能性很小,为陆源碎屑物成因的矿物。绿泥石是一种含铁镁的硅酸盐矿物,通过扫描电镜在潘一井田3煤层和顾桥井田的1煤层中发现梭状绿泥石,充填于有机质空隙中(见图2e),属于与成煤原始物质同时堆积的碎屑成因矿物。

白榴石和锆石为煤中极少见矿物,本次在潘一煤层930m深的煤样中发现一晶形完好的锆石颗粒(见图2f),煤中锆石一般是由风或水流带入泥炭沼泽,与成煤的原始物质共同堆积而存留至今。



a. 顾桥井田 13-1 煤层, 梭状高岭石, 填充有机质空隙, 扫描电镜, 放大 851 倍; b. 新庄孜井田 8 煤层, 凝结的蠕虫状高岭石, 扫描电镜, 放大 3 650 倍; c. 潘一井田 13-1 煤层, 絮状高岭石团块上散步着石英碎屑和黄铁矿颗粒, 扫描电镜, 放大 322 倍; d. 望峰岗井田 13-1 煤层, 集结的板状高岭石上散步亮色菱铁矿碎屑, 扫描电镜, 放大 386 倍; e. 潘一井田 3 煤层, 充填有机质裂隙的绿泥石, 扫描电镜, 放大 1 030 倍; f. 潘一井田 13-1 煤层锆石颗粒, 扫描电镜, 放大 1 220 倍。

图 2 煤中硅酸盐矿物

3.2 硫化物矿物

淮南煤中硫化物矿物仅发现有黄铁矿, 但其赋存形态多样 (见图 3 中的 a~f)。扫描电镜下可以清晰观察到组成黄铁矿集合体中的单晶结构, 包括同生-准生类型莓粒状黄铁矿、晚期成岩阶段的团块状黄铁矿、早期成岩阶段的结核状黄铁矿以及后生的节理裂隙充填状黄铁矿^[5]。

莓球状黄铁矿: 反射光干物镜下黄铁矿多呈球形, 少数与粘土矿物共生, 充填在半丝质体胞腔内。扫描电镜下, 莓球是由许多单颗粒黄铁矿组成, 颗粒晶形完整, 有立方体、八面体和五角十二面体等 (见图 3 的 a, b, c)。莓球状黄铁矿因其晶形完整、自形程度高、粒度小, 其最早可能形成于同生阶段, 定形于准生阶段, 属同生-准生类型黄铁矿。

团块状黄铁矿: 块度较大, 表面不均一, 形状不规则, 部分呈镶嵌状产出于镜质组的条带中。偶有与粘土矿物共生, 充填于破碎的细胞空隙中。充填黄铁矿是成岩晚期, 由含矿溶液沿空隙渗入并沉淀而成, 形成于晚期成岩阶段。

黄铁矿充填节理裂隙: 该类黄铁矿呈裂隙或者节理状切割煤的有机组分, 即为黄铁矿呈脉状切割

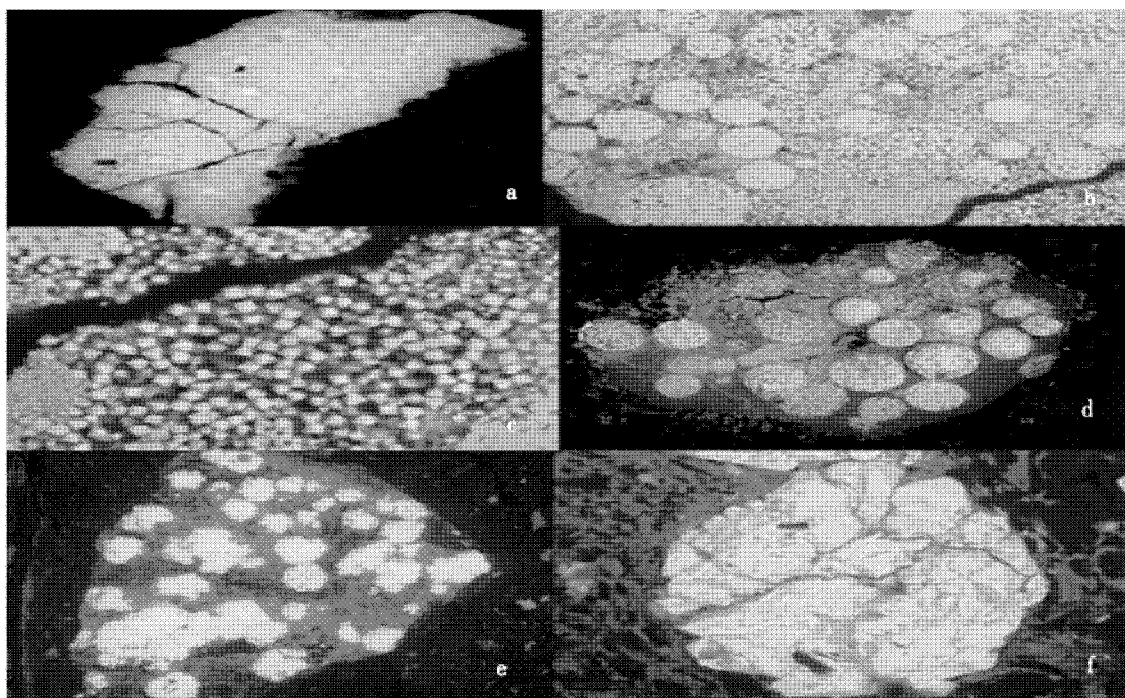
均质镜质体。属于后生阶段, 由地下水渗入或流入裂隙, 在还原条件下沉淀形成的产物。

3.3 碳酸盐矿物

淮南煤中常见的碳酸盐矿物主要有方解石、菱铁矿、石膏和铁白云石等 (见图 4 的 a~e), 本次在潘一井田 1 045 m 深的煤层中发现有大量的极少见碳酸盐矿物碳酸锶 (见图 4f)。煤中碳酸盐矿物多为成岩或后生阶段的自生矿物^[6]。

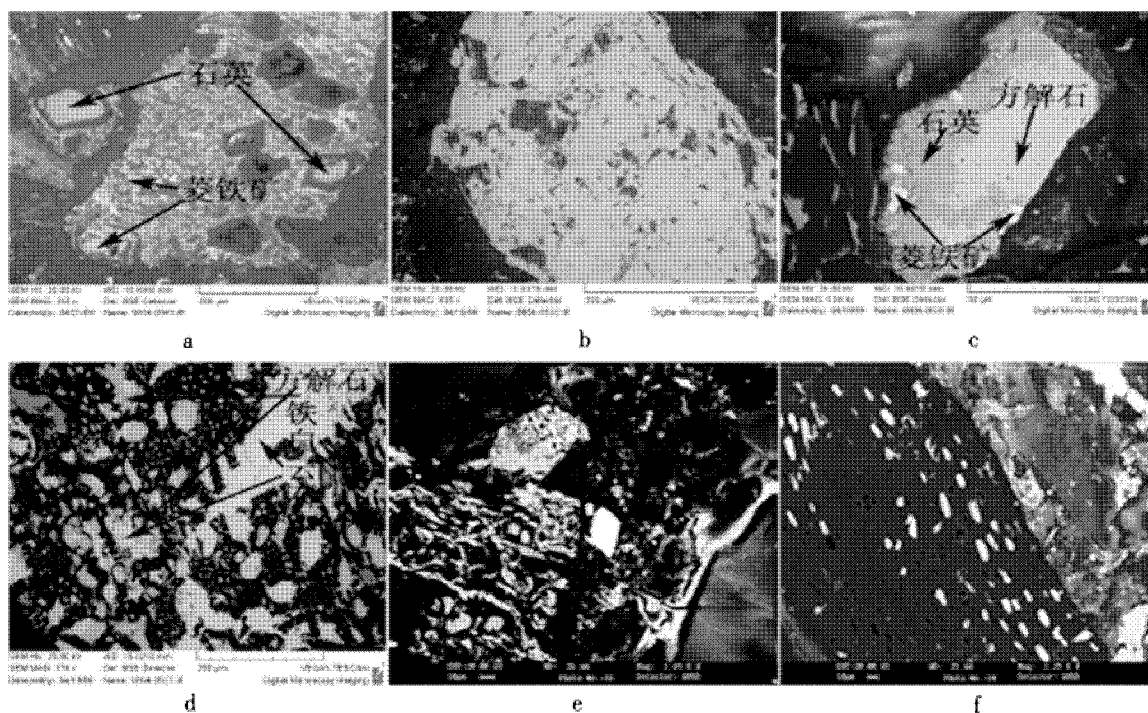
方解石: 煤中常见的自生矿物。扫描电镜下可以观察到方解石的不同赋存形态。如薄层片状结构和板状结构 (见图 4a, b), 方解石和石英、铁白云石等交代结构 (见图 4c, d)。在埋藏成岩作用过程中, 石英和方解石的相互交代现象是很常见的, 它们的相互交代作用是环境 pH 值和温度共同作用的结果: 石英和方解石的平衡条件为 pH 值 9.8, 温度 25℃。当 pH 值大于 9.8 时, 发生方解石交代石英的现象; 当 pH 值在 8~9 的范围内时, 方解石和石英均可沉淀, 当 pH 值小于 8 时, 出现石英交代方解石的现象。图 4c 中的方解石被石英交代发现于潘一 13-1 煤层, 该煤层位于二叠系上统上石盒子组, 沉积环境属弱氧化型的三角洲沉积, 沉积体系中溶液

pH 值小于 8,易出现石英交代方解石的现象。



a. 顾桥井田, 莓粒状黄铁矿, 扫描电镜, 放大 194 倍; b. 图 a 放大, 放大 2 190 倍; c. 图 a 放大, 放大 6 290 倍; d. 李一井田, 与高岭土共生的黄铁矿莓粒, 扫描电镜, 放大 834 倍; e. 新庄孜井田, 与高岭土共生的结核状黄铁矿, 扫描电镜, 放大 206 倍; f. e 的放大, 放大 1 660 倍。

图 3 煤中硫化物矿物



a. 顾桥井田 8 煤层, 薄层状方解石和石英、菱铁矿共生, 扫描电镜, 放大 350 倍; b. 潘一井田 13-1 煤层, 凝结的板状方解石, 扫描电镜, 放大 386 倍; c. 潘一井田 13-1 煤层, 方解石和石英发生交代作用, 扫描电镜, 放大 1 580 倍; d. 望峰岗井田 13-1 煤层, 铁白云石和方解石发生交代作用, 扫描电镜, 放大 376 倍; e. 顾桥井田 1 煤层, 方解石和铁白云石, 扫描电镜, 放大 1 690 倍; f. 潘一井田 1 煤层, 碳酸盐充填有机质孔洞, 扫描电镜, 放大 1 250 倍。

图 4 煤中碳酸盐矿物

铁白云石和菱铁矿:煤中常见的碳酸盐矿物。淮南煤中铁白云石有团块状集合体(见图 4e, f), 有的和方解石紧密共生(见图 4d)。这些铁白云石一般是在成煤晚期成岩阶段自生形成, 并且随着成岩作用的加深, 晚期的铁白云石趋于交代方解石(见图 4d)。菱铁矿通常是泥炭形成阶段的典型同生矿物, 大多形成于弱氧化性泥炭沼泽环境, 呈结核状或充填有机质裂隙中。

碳酸锶:为煤中极少见矿物, 本次仅在潘一井田 1 045.20 ~ 1 048.33 m 的深部煤层中发现有大量的碳酸锶矿物充填有机质胞腔中(见图 4f)。其形成于受海水影响的还原性泥炭沼泽环境, 锶为受海水影响的标志, 所以其成因可能为受海水影响沉积的同生矿物^[7]。

3.4 磷酸盐矿物

煤中主要的磷酸盐矿物为磷灰石。淮南煤田的新庄孜 8 煤层中发现有雪花状磷灰石散布在板状高岭石集合体上, 这些磷灰石和高岭石的形成时期大概相同, 一般是同生沉积的陆源碎屑矿物^[8]。

本次研究中还在望峰岗 13-1 煤层中发现了前人从未报道过的矿物磷铝钒石^[9], 呈梭状充填于有机质空隙中。自然界磷铝钒石多产于碳质或泥质板岩的石英脉中, 而石英脉多为热液成因, 所以推断此次发现的磷铝钒石应为陆源物质, 同成煤原始物质共同堆积成因的。

3.5 氧化物矿物

淮南煤中的氧化物矿物主要有石英和金红石, 石英和金红石是煤中常见矿物, 其中石英呈块状或颗粒状散布在高岭石集合体上(见图 2c), 金红石呈颗粒状同高岭石伴生。块状集合体石英有的与方解石共生(见图 4a) 有的被方解石交代(见图 4c), 这些都为自生石英, 从泥炭沼泽中的溶液中沉淀形成。而碎屑状石英和颗粒状金红石多是由陆源碎屑成因的同生矿物^[10]。

3.6 煤中其他矿物

钾盐:发现于潘一深部 903 m 处 13-1 煤层中, 有的散布在高岭石集合体上, 亦见颗粒完好的氯化钾晶体(见图 2f)。在德国、英国和原苏联顿涅茨等地区有些石炭纪煤中钾盐含量很高, 是因为煤系上覆的二叠纪盐矿床渗下的氯化物成因。潘

一 13-1 煤层顶底板多为泥岩和砂质泥岩, 且所发现钾盐含量极少, 呈颗粒状或碎屑状同粘土矿物伴生, 应为溶液中沉淀的自生矿物。

石膏:本次在低温灰样品谢桥和顾桥井田中发现了石膏, 大多为循环于煤或裂隙的水中沉淀的自生矿物。曾有报道石膏发育于煤的风化带, 但本次谢桥 8 煤层的 958.3 m 处和顾桥 1 煤层 1 071 m 处的深部煤层并未有风化带发育, 所以样品中石膏并非风化作用产物, 而为在煤中沉淀的自生矿物。

4 结论

1) 淮南煤中矿物含量占煤岩组分的 10% 左右。主要为粘土矿物, 占煤中矿物总量的 70% 以上, 其次为氧化物矿物石英, 占矿物总量的 10% 左右, 碳酸盐矿物方解石在 5% 左右, 个别井田中会达到 10%, 其他矿物含量不到 10%。顾桥井田中黄铁矿含量最高, 在 5% 左右, 其他井田中黄铁矿含量极少。

2) 淮南煤中矿物种类丰富。其中硅酸盐矿物最多, 除了煤中常见的高岭石、伊利石、伊蒙混层外, 还有煤中少见的硅酸盐矿物绿泥石和锆石; 碳酸盐矿物除了常见的方解石和菱铁矿外, 在潘一井田 1 048 m 的深部, 发现了大量的碳酸锶矿物, 碳酸锶为煤中极少见矿物, 对潘一深部煤中碳酸锶矿物还有待做进一步研究。淮南煤中氧化物矿物主要为石英和金红石; 硫化物矿物只发现有黄铁矿, 但产状多样; 磷酸盐矿物除了磷灰石外, 还鉴定出了煤中未曾发现过的磷铝钒石。其他偶见矿物还有石膏和钾盐等。

3) 淮南煤中矿物的盐类矿物、碳酸盐矿物和氧化物矿物多为自生矿物, 且氧化物矿物多与碳酸盐矿物伴生。其他硅酸盐矿物、磷酸盐矿物、氧化物矿物等, 大部分为同生的陆源碎屑矿物。

4) 淮南煤中矿物的结构和产状多样, 为研究煤的成因提供了重要依据。有的与有机质紧密共生, 有的成条带状充填有机质裂隙, 或充填有机质胞腔, 其中高岭石就可以作为远离海相沉积的标志。同为硅酸盐矿物的绿泥石, 呈条带状充填有机质裂隙, 是还原性沉积环境的标志。菱铁矿和铁白云石作为弱还原沉积环境的标志, 其赋存状态有块状, 有机质裂隙充填状等, 碳酸锶矿物充填有机质胞腔中, 为受海水影响的重要标志矿物。

(下转第 49 页)

基于人工神经网络的隧道围岩稳定性分类

周盛全^{1,2} 吴基文²

(1. 安徽理工大学土木工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了确定隧道围岩的稳定性, 选择合适的隧道支护形式及施工方法。利用人工神经网络处理围岩稳定性影响因素非线性能力强的特点, 对富溪隧道围岩的稳定性进行了分类, 选取了岩石质量指标、岩石单轴饱和抗压强度、岩石完整性系数、结构面强度系数和地下水渗水量5个主要影响因素作为网络的输入节点, 输出节点是反映围岩分类结果的定量指标, 也选取5个节点。采用归一化法对5个因素进行处理, 利用收集到的统计资料, 选取样本对围岩分类神经网络进行学习训练, 用训练好的网络对富溪隧道各测设段进行了分类和围岩稳定性级别的划分, 确定富溪隧道整体围岩稳定性较差, 尤其是隧道进口和出口(占隧道全长的27.1%), 为极不稳定围岩段。结果证明人工神经网络方法用于围岩稳定性分类结果是可靠的。

关键词: 人工神经网络; 连拱隧道; 围岩分类; 围岩稳定性分析

中图分类号: U452.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0007-05

Tunnel Surrounding Rock Stability Classification Based on Artificial Neural Networks

ZHOU Sheng-quan^{1,2}, WU Ji-wen²

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

Abstract: In order to determine stability of tunnel surrounding rocks, the appropriate form of tunnel support and construction methods were selected. By use of characteristics of artificial neural networks for dealing with nonlinear problems of surrounding rock stability, Fuxi tunnel surrounding rock stability was classified. Five main factors, such as rock quality, rock uniaxial saturated compressive strength, structural surface intensity coefficient and amount of groundwater seepage were selected as input node of the network; the 5 output nodes were selected, which are quantified indeces describing the surrounding rock classification results. By using the normalized method to deal with the five factors, and using statistical data collected, to select samples for rock classification neural network learning and training. With the trained network, classification of different sections of Fuxi tunnel and measurement of surrounding rock stability level were carried out. The results showed that stability of entire surrounding rocks of Fu-Xi tunnel is poor, especially at the intake and exit of the tunnel (accounting for 27.1% of the tunnel length) extremely unstable section. The results proved that the stability classification results obtained by artificial neural network method are reliable.

Key words: Artificial Neural Network; twin-arch tunnel; surrounding rock classification; surrounding rock stability

对隧道围岩稳定性进行分析评价的前提是通过各种手段确定围岩的稳定性类别。围岩分类是应用工程类比方法进行围岩评价, 为工程的设计和

施工提供依据的基础, 具有重要的实用价值。围岩分类, 以及在此基础上对各类围岩的成洞条件、开挖、支护要求做出评价, 并以此作为设计和施工的

收稿日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272278)

作者简介: 周盛全(1975-), 男, 安徽太湖人, 讲师, 在读博士, 从事岩土与地下工程教学与科研。

依据,是国外在二十世纪四十年代就很通用的方法。但是,随着人类对岩体力学特性认识的深入,隧道工程经验的积累和隧道工程施工技术的发展,围岩分类的原则和分类系统也在不断的改进和完善^[1-5],而现有的围岩分类方法,大多是根据围岩情况进行的主观判断,定量的手段还不尽完善。

1 工程概况

铜(陵)-黄(山)高速公路屯溪至汤口段呈近南北向通往我省黄山风景区,它是加速我省经济和旅游发展,加强安徽省与江、浙、赣、沪等省市联系的重要交通干道。皖南山区地形复杂,高速公路穿越各种地貌单元,特别是黄山汤口-歙县程坎等地段山高坡陡,为保护黄山风景区的自然和生态环境免受破坏,高速公路都以隧道穿越,其中富溪隧道位于黄山市徽州区富溪乡境内,地质条件相当复杂,是该高速公路上的一座双连拱隧道,全长 649 m,最大埋深 122.0 m。隧道单幅设计净宽 9.88 m,双幅净宽 22.06 m,净高 6.83 m,设计时速 80 km/h,设计荷载为汽车超-20、挂车-120,2% 单向横坡,路线前进方向为 1% 向上纵坡,直线型隧道。

隧址区地处休宁盆地边缘,地质条件较为复杂。构造形态上表现为一南翼被截断的复背斜,地层主要由中元古界黟县系牛屋组和大谷运组及镇头组组成^[6]。

2 围岩稳定性分析

2.1 人工神经网络简介

人工神经网络(ANN)理论是人工智能领域的新技术,其独特的拓扑结构和信息处理特点,很适

于解决岩土工程中“宽而浅”及非线性、非定量的技术问题。是由大量的处理单元(神经元,即网络节点)组成的高度并行的非线性动力学系统。人工神经网络的知识获取只需提供样本(范例),因而易于获取隧道工程知识、管理特性;工作时通过感知环境变化,由神经元的微活动产生系统的宏效应^[7]。因此,人工神经网络非常适于用来进行隧道围岩分类。

2.2 围岩分类的神经网络模型构建

由于遂道围岩稳定性受多种因素的影响,且各种影响因素的作用相互交叉,某种因素的影响程度会因地、因时、因工艺不同而变化。在网络模型中,要全面考虑所有的影响因素,目前还是不可能的;只能考虑一些起重要作用的因素,根据大量现场观测结果和实践经验,并参照文献[4]的方法选取如下的主要影响因素:

- 1) 岩石质量指标 (RQD);
- 2) 岩石单轴饱和抗压强度 R_w / (MPa);
- 3) 岩石完整性系数 (K_v);
- 4) 结构面强度系数 (K_f);
- 5) 地下水渗水量 W ($L \cdot \min^{-1}$)。

选取以上确定的 5 个主要影响因素作为网络的输入节点,即输入节点数为 5 个。输出节点即是反映围岩分类结果的定量指标,也选取 5 个节点;对围岩稳定性,根据文献[8]及国内外围岩分类的经验,将围岩分为五级,为简化算法和提高学习速度,采用规一化法对分类标准进行处理,归一化后的分类标准如表 1 所示。学习训练时网络输出节点的期望输出值所代表的围岩类别^[9-14]如表 2 所示。

表 1 经归一化处理后的围岩稳定性分类标准

类别	RQD	R_w	K_v	K_f	W
I(稳定)	>0.90	>1.20	>0.75	>0.8	<0.05
II(基本稳定)	0.90~0.75	1.20~0.60	0.75~0.45	0.8~0.6	0.05~0.10
III(稳定性差)	0.75~0.50	0.60~0.30	0.45~0.30	0.6~0.4	0.10~0.25
IV(不稳定)	0.50~0.25	0.30~0.15	0.30~0.20	0.4~0.2	0.25~1.25
V(极不稳定)	<0.25	<0.15	<0.20	<0.2	>1.25

注: RQD 、 R_w 、 W 所列数值为除以 100 以后的数值。

表 2 网络输出值代表的围岩级别

输出节点期望输出值					代表的围岩类别
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	I
0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	II
0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	III
0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	IV
0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	V

2.3 神经网络结果检验

利用收集到的统计资料,选取 12 个样本(表 3

前 12 个数据)对围岩分类神经网络进行学习训练。由于现场测量样本过少,而且要留取一部分样本用于训练好了的 BP 网络中,来识别围岩类别,因此,为了有足够的学习样本空间,提高网络的判别能力。根据文献[8]构造了表 3 中的后 12 个学习样本。

训练时隐层节点数取 6,迭代次数为仅为 6 次,控制误差为 0.00001;学习完成后即建立辨识模型,然后选取 3 个样本对网络进行检验,检验结果如表 4 所示。

表 3 围岩分类神经网络学习样本

序号	RQD /%	R _w /MPa	K _v	K _f	W /(L·min ⁻¹)	期望输出				
						V	I	II	III	IV
1	52.0	25.0	0.22	0.52	12.0	0	0	0.5	0.5	0
2	41.5	25.0	0.22	0.35	12.5	0	0	0	1	0
3	50.0	40.5	0.38	0.55	10.5	0	0	1	0	0
4	28.0	26.0	0.32	0.30	18.0	0	0	0	1	0
5	51.0	45.0	0.35	0.50	5.0	0	0	1	0	0
6	93.0	156.5	0.78	0.82	3.2	1	0	0	0	0
7	50.0	35.0	0.32	0.35	10.0	0	0	1	0	0
8	76.0	63.9	0.65	0.62	10.0	0	1	0	0	0
9	23.5	13.4	0.15	0.16	120	0	0	0	0	1
10	78.0	58.6	0.57	0.55	10.5	0	1	0	0	0
11	81.0	65.2	0.56	0.65	6.0	0	1	0	0	0
12	24.2	12.5	0.13	0.18	125.0	0	0	0	0	1
13	92.0	125	0.82	0.83	3.5	1	0	0	0	0
14	80.0	100	0.65	0.70	8.0	0	1	0	0	0
15	82.0	110	0.60	0.65	9.0	0	1	0	0	0
16	72.0	50.0	0.35	0.55	20.0	0	0	1	0	0
17	70.5	40.0	0.40	0.57	18.0	0	0	1	0	0
18	40.0	25.0	0.28	0.35	35.0	0	0	0	1	0
19	40.5	20.0	0.25	0.30	30.0	0	0	0	1	0
20	20.0	10.0	0.18	0.19	130.0	0	0	0	0	1
21	176.0	132.0	0.78	0.85	3.5	1	0	0	0	0
22	70.5	40.5	0.43	0.55	15.5	0	0	1	0	0
23	80.0	100.0	0.58	0.70	8.0	0	1	0	0	0
24	21.5	13.5	0.10	0.15	135.0	0	0	0	0	1

表 4 神经网络检验结果

序号	神经网络计算结果					辨识类别	实际类别
2	0.05	0.08	0.82	0.92	0.08	IV (III)	IV
4	0.03	0.01	0.11	0.95	0.10	IV	IV
5	0.01	0.05	0.92	0.03	0.04	III	III

学习训练时,网络均采用导入规则将各输入节点的指标值转变为 $[0,1]$ 区间的数值;也将神经元计算后的在 $[0,1]$ 区间的输出节点输出值按导出规则转变为原来的表达形式。其中,第二组网络输出数据为 $(0.05, 0.08, 0.82, 0.92, 0.08)$,分析可能是IV类,也可能是III类围岩,但IV类围岩可能性较大。

分类(见表 5)。其中 K205 + 828 ~ K205 + 970 段的样本,经网络处理后最终输出为 $(0.05, 0.10, 0.85, 0.72, 0.02)$,第三节点和第四节点输出值较接近,说明该段岩体分类等级判为 IV 偏 III 或 III 偏 IV,但前者可能性较大。

2.4 分析结果

用训练好的网络对富溪隧道各测设段进行了

表 5 富溪隧道围岩分类结果

测设里程	岩性风化 变质情况	RQD	R_w	K_v	K_F	W	输出级别 (水工规范)	公路规范 级别
K205 + 745 ~ K205 + 828	强 - 弱风化 变质粉砂岩	0.26	0.28	0.25	0.30	0.15	V	V
K205 + 828 ~ K205 + 970	微风化 变质粉砂岩	0.85	0.64	0.36	0.42	0.12	IV III	IV
K205 + 970 ~ K206 + 010	微风化 板岩	0.91	0.48	0.57	0.55	0.05	III	III
K206 + 010 ~ K206 + 080	微风化 变质粉砂岩	0.65	0.54	0.23	0.51	0.13	IV	IV
K206 + 080 ~ K206 + 240	微风化 变质粉砂岩	0.87	0.42	0.58	0.66	0.12	III	III
K206 + 240 ~ K206 + 280	微风化 变质粉砂岩	0.46	0.38	0.28	0.32	0.06	IV	IV
K206 + 280 ~ K206 + 365	强 - 弱风化 变质粉砂岩	0.23	0.25	0.28	0.17	0.14	V	V

注: RQD 、 R_w 、 W 所列数值为除以 100 以后的数值。

由于现行公路隧道围岩分类标准与文献[8]分类标准不同,但有关联性,文献[15]将围岩分为六级,但第六级主要考虑的是土体,而文献[8]主要以岩体为分类对象。因此,对于岩体稳定性分

类,上述两种分类体系在围岩分类级别上是一致的。经上述方法确定的富溪隧道围岩分类结果与专家确定的围岩分类结果对比如表 6 所示。

表 6 分类结果对比表

	K205 + 745 - K205 + 828	K205 + 828 ~ K205 + 970	K205 + 970 ~ K206 + 010	K206 + 010 ~ K206 + 080	K206 + 080 ~ K206 + 240	K206 + 240 ~ K206 + 280	K206 + 280 ~ K206 + 365
网络输出类别	V	IV (III)	III	III	III	IV	V
专家分类	V	IV	III	IV	III	IV	V

上述围岩分类结果与专家意见基本一致,这说明运用 BP 神经网络模型对围岩进行分类是可行

的,结果的准确性是可靠的。

表7 各种围岩类别所占比例表

围岩类别	III	IV	V
测设里程段	K205 + 970 ~ K206 + 010 K206 + 080 ~ K206 + 240	K205 + 828 ~ K205 + 970 K206 + 010 ~ K206 + 080 K206 + 240 ~ K206 + 280	K205 + 745 ~ K205 + 828 K206 + 280 ~ K206 + 365
围岩类别长度/m	200	252	168
占隧道全长比例/%	32.3	40.6	27.1

3 结论

1) 从表4的检验结果看,围岩分类神经网络模型的辨识正确率较高,具有准确、简便等特点,可以考虑大量影响因素,这些因素既可以是定量因素,也可以是定性或不确定因素,这是其它方法难以比拟的;该模型不仅免除了其它方法中对所选择的影响因素要事先赋予权值的过程,而且也不需要对各影响因素进行复杂的相关性分析,重复的因素或者没有影响的因素加入输入值也不会影响最后的结果,它们的权值会在运算中自动地迭代到零,这就给选择输入节点创造了比较宽松的条件。因此,BP神经网络用于隧道围岩分类的方法值得进一步完善和推广。

2) 由表7知,富溪隧道整体围岩稳定性较差,尤其是隧道进口和出口(占隧道全长的27.1%),为极不稳定围岩段。就隧道整体围岩类别而言,综合判定富溪隧道围岩稳定性介于稳定差和极不稳定之间。因此隧道成洞施工时应注意选用适当的施工方法,避免大面积整体开挖,应充分做好超前支护及初期支护,施工爆破时应注意选取适当药量。雨季施工时,应严格做好防止边坡滑塌措施。

参考文献:

- [1] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1980:23-35.
- [2] 陈振平,王鹏. 基于BP神经网络的隧道围岩分类[J]. 路基工程,2011(1):97-99.
- [3] 周盛全. 铜(陵)-黄(山)高速公路富溪隧道围岩分类及稳定性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [4] 朱素平,周楚良. 地下圆形隧道围岩稳定性的粘弹性力学分析[J]. 同济大学学报,1994,22(3):329-333.
- [5] CHARLES FAIRHURS, JUEMIN PEI. A Comparison Between the Distinct Element Method and the Finite Element Method for Analysis of the Stability of an Excavation in Jointed Rock [J]. Tunnelling and Under-ground Space Technology, 1990, 5(1):111-117.
- [6] 王军号,孟祥瑞. 可视化煤矿巷道支护设计专家系统的开发研究[J]. 煤炭工程,2011(5):7-9.
- [7] 雷学文,汤斌,王瑞芳. 工程围岩稳定性分类的人工神经网络识别[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2002:300-301.
- [8] 水利部东北勘测设计研究院. SL279-2002 水工隧洞设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [9] 丛爽. 面向对象 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 第2版. 合肥:中国科技大学,2003:15-24.
- [10] Y YANG, Q ZHANG. A Hierarchical for Rock Engineering Using Artificial Networks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30(4):207-222.
- [11] 闻新,周露,李翔,等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社,2003:68-75.
- [12] 周志华,曹存根. 神经网络及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:15-19.
- [13] 饶运章,侯运炳. 神经网络方法在围岩稳定性分级评价中的应用[J]. 黄金,2001,22(10):15-17.
- [14] 苏永华,马宁,胡检,等. 采用小样本统计理论的隧道围岩分类[J]. 公路交通科技,2010,8(27):66-80.
- [15] 重庆交通科学研究设计院. JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

基于隔离式 CAN 总线网络的煤矿通信系统设计

曲立国, 黄友锐, 唐超礼, 凌六一

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对煤矿设备与工业以太环网的可靠快速接入问题, 设计基于隔离式 CAN 总线网络的煤矿设备与工业以太环网的接入通信系统, 采用 ADM3052 进行隔离式 CAN 物理层收发器设计, 详细分析了如何计算控制器参数使隔离式 CAN 网络高速运行, 并采用 CANopen 协议作为 CAN 网络应用层通信协议。系统将隔离式 CAN 网络用于不同系统间的长距离的串行通信, 保障了煤矿恶劣环境中矿井通信的实时性和物理安全性。

关键词: 矿井通信; CAN 总线网络; 工业以太环网

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0012-05

Design of Coal Mine Communication System Based on Isolated CAN Network

QU Li-guo, HUANG You-rui, TANG Chao-li, LING Liu-yi

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

Abstract: In order to solve the problems of reliable and fast access to industrial Ethernet ring network of coal mine equipments, access communication system based on isolated CAN network is designed. It adopts ADM3052 for design of CAN physical layer transceiver. A detailed analysis is carried out about calculate control parameters so that the isolated CAN network can run at a high speed and CANopen protocol is used for CAN network application layer communication protocol. The system uses isolated CAN network for long distance serial communication. It guarantees real-time character and physical security of mine communication in harsh environment.

Key words: mine communication; CAN network; industrial Ethernet ring network

煤炭市场需求预计到 2015 年将达 40 亿吨, 在能源结构中的比例约占 50%, “十二五”时期煤矿安全生产面临着巨大的机遇和挑战。但随着对煤炭需求量不断增加, 煤矿开采强度不断加大, 高效安全的煤矿通信系统是十分必要的。目前现代化矿井通信系统主要采用工业以太环网作为通信骨干网, 结合工业现场总线网络和其它各种无线接入网络, 形成一个覆盖全矿井的监测、监控系统^[1-2]。

其中 CAN 作为一种高速、可靠的现场总线网络, 非常适合于煤矿井下关键设备的实时性监控^[3]。煤矿井下电气设备各异, 不同的电气设备通过 CAN 总线网络接入到工业以太环网, 连接两个系统的电缆总线上若出现不需要的电流和电压, 可能会导致严重问题。如电动马达等有较大电流开关的设备工作时会造成接地电位迅速变化, 其他感应电涌源还包括静电放电 (ESD) 和雷击^[4]。这些感应产生

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51104003); 教育部新世纪优秀人才资助项目 (NCET-10-0002); 安徽省杰出青年基金资助项目 (No. 1108085J03); 安徽高校省级自然科学基金资助项目 (KJ2012A097, KJ2010B061); 淮南市科技计划资助项目 (2011A07908)。

作者简介: 曲立国 (1979-), 男, 吉林舒兰人, 讲师, 硕士, 研究方向: 矿山物联网, 智能信息处理等。

的电涌会在线路上产生数百、甚至数千伏电位,表现为瞬态电流和电压浪涌。这些不受控制的电压和电流会破坏信号,并且对本地收发器元件和系统而言可能是灾难性的,会造成连接至总线的元件损坏并导致系统故障。CAN总线系统通过40米或更长的电缆运行并互连多个系统,因此极易受这类事件影响^[5]。为防范此类潜在性的破坏,总线上以及连接至总线的系统上的所有设备都必须参考同一地线。即连接至CAN总线的系统和每个CAN总线收发器都具有独立且隔离的地线。CAN总线系统参考同一地线可消除接地环路,从而防止接地环路和电涌破坏电路。隔离还允许CAN总线电路基准电平随电缆线路上出现的任何电涌而上升或下降。允许电路基准电压源随浪涌移动,而不是将其箝位于固定地,可防止器件受到损坏或毁坏^[6]。针对煤矿井下CAN总线网络特点,设计基于隔离式CAN总线网络的煤矿设备与光纤环网的接入通信系统,系统将隔离式CAN网络用于不同系统间的长距离的串行通信,保障了煤矿恶劣环境中矿井通信的实时性和物理安全性。

1 隔离式CAN网络通信系统设计

现代化煤矿通信骨干网为1000M工业以太网。它除接入各种监测监控系统外,将有线IP电话、无线移动电话、人员定位系统、数字视频系统都接入网络。主干网通过工业级交换机为全矿地面及井下各个子系统提供方便灵活的工业以太网接口。地面调度控制中心通过服务器完成矿山各系统的监控、人员安全感知、设备健康状态感知等。CAN总线网络分布在地面和井下,通过网关分段接入骨干网,实现井下主要工作区域的网络覆盖(见图1)。CAN总线网络除用于各种需要分布式移动监测,如移动变电站、采煤机等关键设备,还可用于矿山灾害监测,也可扩展为语音及视频提供传输通道。

由于CAN总线系统通常用于连接多个不同系统,铺设距离长,因此总线和所连接的各系统之间的隔离非常关键。隔离可以防止CAN总线电缆网络与连接至总线的系统之间的过压瞬变造成破坏,同时消除网络中的接地环路,减少信号失真和误差,并防止电压/接地失配影响电路,所以CAN总线采用隔离式网络,其结构如图2所示,设计电路

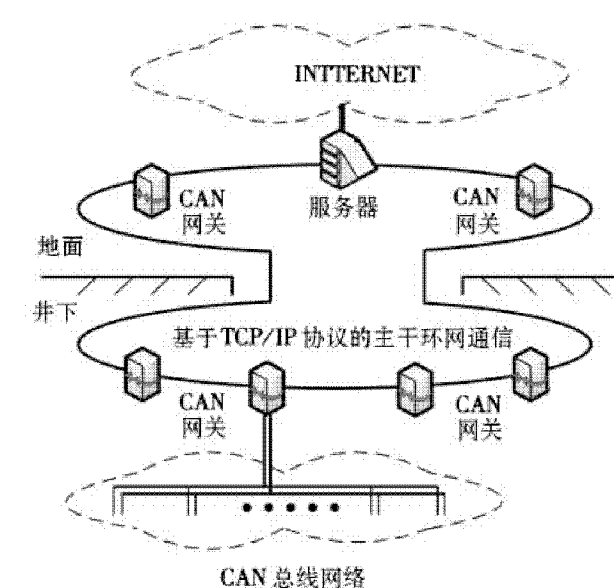


图1 煤矿以太网通信系统

如图3所示。

CAN总线要求通过电阻连接实现隐性状态,并要求通过CANH和CANL的组合实现显性状态。数字隔离器并不支持这种信号标准。因此,无法在CAN总线收发器与电缆之间插入数字隔离器。ADM3052是一款隔离式控制器区域网络物理层收发器,集成隔离DC/DC转换器,符合ISO 11898标准。ADM3052采用ADI公司的iCoupler数字隔离技术,ADM3052 CAN收发器在4线CAN总线配置与微控制器或DSP(数字信号处理器)之间提供5kVrms隔离,同时具有CAN总线规范所要求的物理层特性。在CAN协议控制器与物理层总线之间创建一个完全隔离的接口。

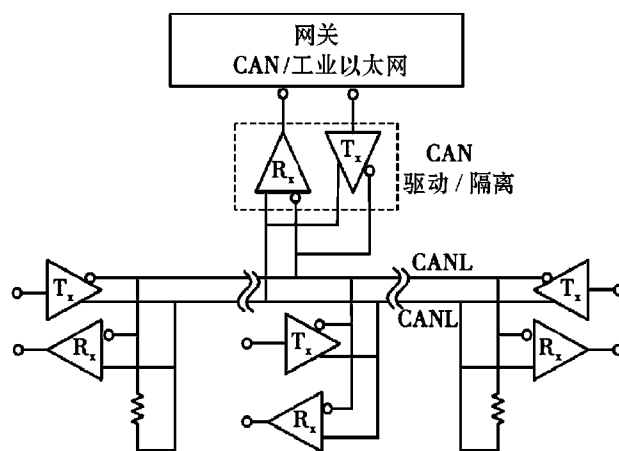


图2 CAN网络

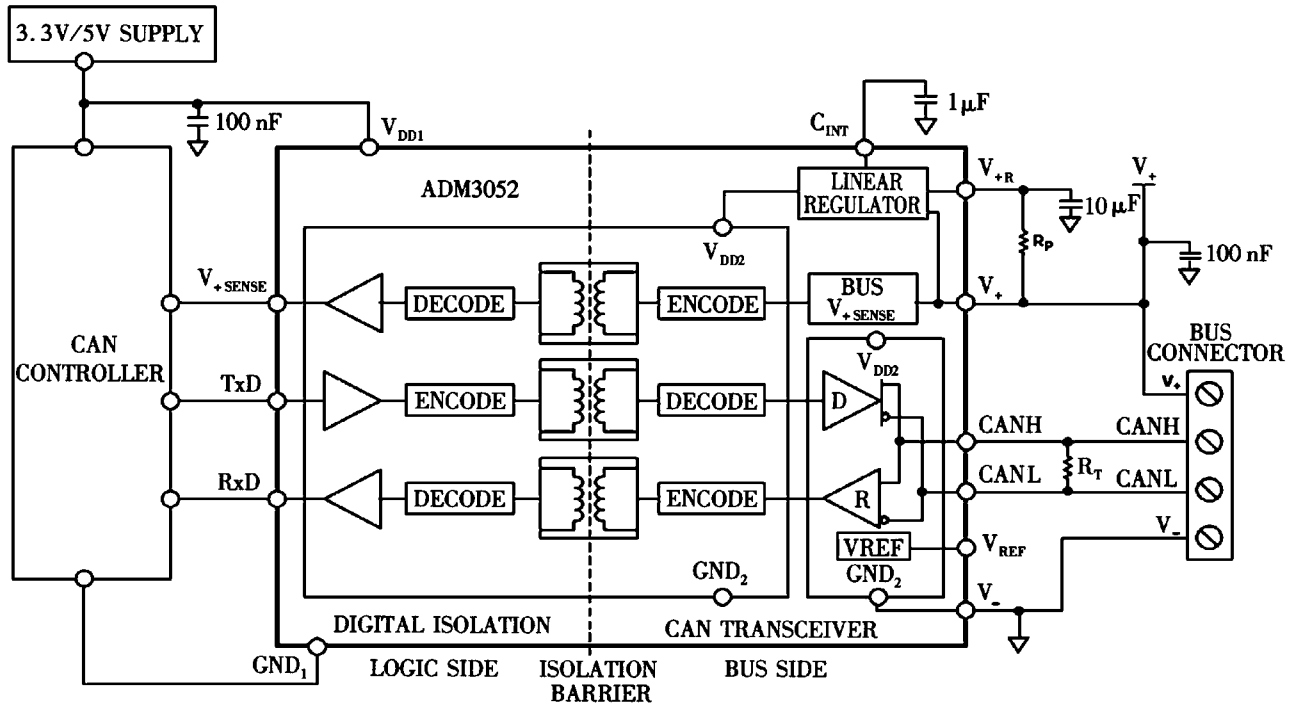


图 3 隔离式 CAN 网络通信电路

2 隔离式 CAN 网络通信参数分析

隔离式 CAN 网络的传播延迟比非隔离式 CAN 网络要长,但 ADM3052 的传播延迟显著短于光耦,能以最高 1Mbps 的数据速率工作。更短的传播延迟意味着处理器与总线之间的信号响应时间更快,这在仲裁期间特别重要,因为每个节点必须决定哪一条消息享有优先权并控制总线。因此,传播延迟时间将决定数据速率和总线的最大容许线路长度。一个 CAN 比特由四个独立的时间段组成(见图 4):同步段(SYNC_SEG)、传播段(PROP_SEG)、相位段 1(PHASE_SEG1)和相位段 2(PHASE_SEG2)。这些时间段可以在 CAN 控制器中进行编程。

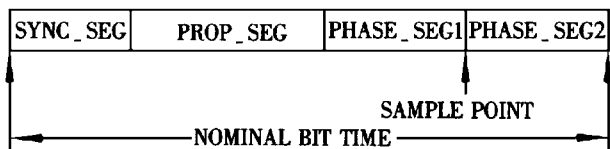


图 4 CAN 标称比特时间

CAN 采用逐位仲裁方式,不同的节点可以争夺总线访问权,这就导致多个节点同时传输数据。传输节点必须对总线上的数据进行采样,以便确定它是否赢得仲裁。由于系统的传播延迟,控制器必须补偿各位采样的时间。在控制器中设置 PROP_

SEG 可以提供此补偿。

使用如下假设条件:电缆长度为 20 m,数据速率或比特率为 1 Mbps,电缆传播延迟为 5 ns/m, CAN 控制器振荡器频率为 36 MHz。

对于 ADM3052,从 TxD 到 RxD 的传播延迟为 250 ns(最大值)。电缆的物理延迟等于 5 ns/m 乘以电缆长度 20 m,结果为 100 ns。因此,通过系统并返回的总传播时间为:

$$2(\text{传播延迟} + \text{收发器传播延迟}) = 2 \times (100 + 250) = 700 \text{ ns}.$$

为了给控制器编程,必须将寄存器设置为“时间量子”的整数倍。时间量子的时长等于 CAN 系统时钟的时间周期,设为 28 ns。

对于 28 ns 的时间量子,每位包括 36 ($1000/28 = 36$) 个时间量子。

$\text{PROP_SEG} = \text{ROUND_UP}(700 \text{ ns}/28 \text{ ns}) = 25$ 个时间量子。

从每位的 36 个时间量子中,减去用于 PROP_SEG 的 25 个时间量子 and 用于 SYNC_SEG 的 1 个时间量子,余下的时间量子分配给 PHASE_SEG1 和 PHASE_SEG2,每段 5 个。

CAN 系统时钟存在容差,因而会出现累积相位误差。这要求系统通过再同步跳跃(RJW)同步,RJW 为 4 和 PHASE_SEG1 二者中的较小值。

由此便可计算系统的振荡器容差 Δf 要求:

$$\Delta f_1 < RJW / (20 \times NBT) = 4 / (20 \times 36) = 0.006$$

$$\Delta f_2 < \text{Minimum}(\text{PHASE_SEG1 and PHASE_SEG2}) / 2 (13 \times NBT - \text{PHASE_SEG2}) = 5 / 2 (13 \times 36 - 5) = 0.005$$

这两个值中的较小者就是所需的振荡器容差 0.5%。

计算得出下列设置参数:

$$\text{SYNC_SEG} = 1, \text{PROP_SEG} = 25, \text{PHASE_SEG1} = 5, \text{PHASE_SEG2} = 5, \text{RJW} = 4。$$

3 通信协议

在 CAN2.0 规范中,除了定义物理层和数据链路层外,并未定义 ISO 参考模型的其他层结构。为了实现不同生产厂家的电气设备能通过 CAN 总线网络进行通信,系统应用层采用 CANopen 作为 CAN 网络通信协议,这样可实现不同设备的互用性与互换性,避免信息出现“信息孤岛”^[7-8]。系统采用 CANopen 作为 CAN 网络通信协议,并通过网关实现多个 CANopen 从站设备与基于 TCP/IP 的骨干网的相互通信。网关在 CANopen 网络上为 CANopen 主站,在 EtherNet 网络上为 TCP Server,可以实现多个 CANopen 从站与具有 TCP Client 设备之间的数据通信。CANopen 是基于 CAL (CAN Application Layer) 并继承了 CAL 的通讯和服务协议子集。CANopen 标准主要包括通讯子协定、设备子协定和寻址方案,它支持设备监控、网络管理和节点间的通讯。

一个 CANopen 设备至少需要对象字典、通信接口和应用程序,他们之间的联系如图 5 所示。CANopen 总线上收发通信对象的服务由通信协议接口实现,不同 CANopen 设备间的通信都是通过交换通信对象来完成的。CANopen 协议中定义了 4 种通信对象(通信模式),用于对不同作用的信息进行处理: NMT 对象(网络管理对象)、SDO 对象(服务数据对象)、PDO 对象(过程数据对象)、特殊功能对象。

其中对象字典用来设定设备组态及进行非即时的通讯。对象字典由 16 位元索引变量阵列构成,并通过变量调整设备的组态。一个 CANopen 设备至少需要一个服务数据对象 SDO (Service Data Object) 以支持必要的网络管理服务。CANopen 设备间采用 master/slave、client/server 和 producer/consumer 三种通信模型。其中 client/server 模型在

SDO 协定中定义, SDO client 将对象字典的索引及子索引传送给 SDO server, 并由此产生若干个需求数据的 SDO 封包。producer/consumer 通信模型设备至少需要一个过程数据对象 PDO (Process Data Object), 通过 PDO 协定可在多个节点间即时交换资料。为了保证 CANopen 设备的兼容性需求, CANopen 设备需要满足一致性、互用性和互换性。

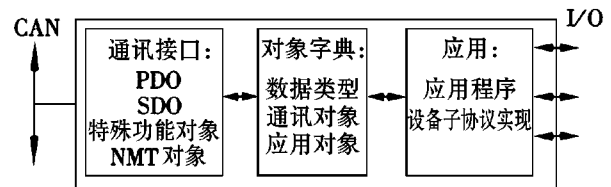


图5 CANopen 设备软件结构

CANopen 设备通过状态机 (state machine) 控制实现启动及重置。状态机需包括以下的几个状态: 初始化, 预操作, 操作和停止四个状态。当 CANopen 设备接收到网络管理 (NMT) 通讯对象, 根据状态变更命令, 状态机会转换到对应的状态。CANopen 设备节点必须支持最小 boot-up, CANopen 设备最小化 boot-up 节点状态转换如图 6 所示。图 6 中的字母 (a, b, d, e, f) 表示 CANopen 设备节点在不同状态时可以使用的通讯对象。

CANopen 设备节点状态转移由 NMT 命令服务发起, NMT 服务在任何时候都可使节点进入不同工作状态。NMT 命令函数如下:

1: Start_Remote_Node (0x01)

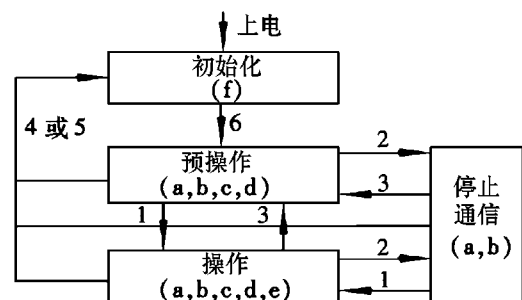
2: Stop_Remote_Node (0x02)

3: Enter_Pre-Operational_State (0x80)

4: Reset_Node (0x81)

5: Reset_Communication (0x82)

6: 设备初始化结束, 自动进入 Pre_Operational 状态, 发送 Boot-up 消息



a: NMT; b: Node Guard; c: SDO; d: Emergency; e: PDO;
f: Boot-up。

图6 CANopen 最小化 boot-up 节点状态转换图

在系统中各个从节点被配置成监测状态,从节点周期性的向主节点发送心跳报文,主节点通过心跳报文来判断各个从节点所处的工作状态(见图7)。在系统初始化后,首先从节点进入预操作状态,发送 Boot-up 报文通知主节点。然后主节点向从节点发送 SDO 报文对其进行对象字典配置,配置结束后向主节点发送握手信息。继续等待接收主节点的 NMT 报文,并根据 NMT 改变从节点工作状态。

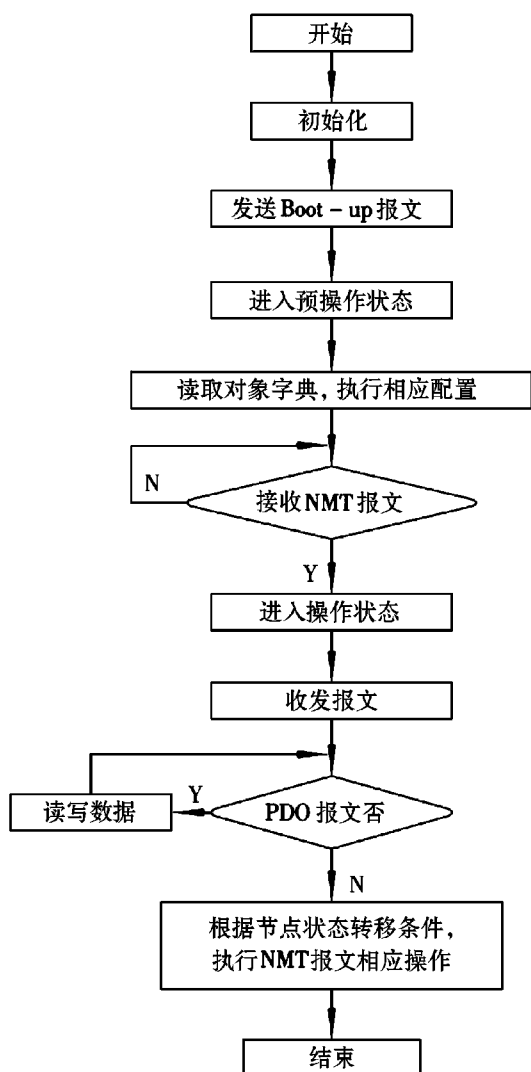


图 7 CANopen 协议通信流程

4 结论

CAN 总线规范的灵活性和高抗噪声干扰能力使该协议更适用于煤矿各系统间通信。针对系统间通信电缆系统很容易受过压瞬变和接地环路的干扰和破坏,设计基于隔离式 CAN 总线网络的煤矿设备与工业以太环网的接入通信系统,详细分析了高速通信下的隔离式 CAN 网络控制器参数,使其能以 1Mbps 的速度运行,并采用 CANopen 协议作为 CAN 网络应用层通信协议。系统将隔离式 CAN 网络用于不同系统间的煤矿长距离的串行通信,以数字方式将 CAN 总线与连接至总线的各系统隔离开来,减少信号失真和误差,并防止系统和元件受系统和总线电压及接地失配影响,同时 CANopen 在保证网络节点互用性的同时允许节点的功能随意扩展,保障了煤矿恶劣环境中矿井通信的实时性和物理安全性。

参考文献:

- [1] 董维武. 国外矿山通讯系统 (TTE) 研究现状 [J]. 中国煤炭, 2007, 33 (2): 74-76.
- [2] 陆奎, 范虎. 基于 EPON 技术的煤矿信息网建设的研究 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2011, 31 (1): 37-40.
- [3] 是利娜. 基于 CAN 总线的煤矿安全通信监控网络研究 [J]. 煤炭科技, 2009 (2): 6-8.
- [4] 张乐, 牛高. 漏泄通讯系统在矿井下的应用 [J]. 中国矿山工程, 2010, 39 (3): 64-66.
- [5] 周巧娣, 郑为贵, 蔡文郁. CAN 总线技术在煤矿安全监控系统中的应用 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2009 (1): 61-64.
- [6] 张东, 李长录, 王国辉, 等. 基于 CAN 总线的无线监控分站的设计 [J]. 煤矿安全, 2010 (10): 85-87.
- [7] 曹庆年, 赵博, 孟开元. CANopen 协议在工业控制网络中的应用 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2009, 24 (4): 75-78.
- [8] 武强, 杨玉岗. 基于 CANopen 协议的多机通讯设计 [J]. 微计算机信息, 2011, 27 (6): 87-89.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

基于 Lebesgue 常数最小的最优保形重心有理 Hermite 插值

乔洁, 赵前进

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:和传统的有理 Hermite 插值方法相比, 重心形式的有理 Hermite 插值具有许多优点, 如计算量小、具有好的数值稳定性、没有极点及不可达点等。进一步研究最优保形重心有理 Hermite 插值方法。以插值权为决策变量、以 Lebesgue 常数最小为目标函数、以保形、没有极点及不可达点等为约束条件, 建立优化模型求解最优插值权。给出的数值实例表明新方法的有效性。

关键词:重心有理 Hermite 插值; Lebesgue 常数; 权; 保形

中图分类号: O21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0017-04

Shape Preserving of Barycentric Rational Hermite Interpolation Basis on the Lebesgue Constant Minimizing

QIAO Jie, ZHAO Qian-jin

(College of Science, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: The barycentric rational Hermite interpolation possess various advantages in comparison with classical rational Hermite interpolants, for example, barycentric rational Hermite interpolants have small amount of calculation, good numerical stability, no poles and no unattainable points, regardless of the distribution of the points. The new shape preserving barycentric rational Hermite interpolation is presented, which with proper weights have no poles and no unattainable points. It is the key issue how to choose weights so that the interpolant with the minimum Lebesgue constant is obtained. The optimal interpolation weights are obtained based on an optimization model. Numerical examples are given to show the effectiveness of the new method.

Key words: Barycentric rational Hermite interpolation; Lebesgue constant; weights; shape preserving

近年来, 由于插值在信息通讯等领域的广泛应用, 插值问题的研究已成为热点^[1-3]。由于重心有理 Hermite 插值具有数值稳定性好、计算量小、具有很高的逼近阶和没有极点及不可达点等优点, 重心有理 Hermite 插值也倍受关注^[4-5]。一般而言, 如何选取插值权使得插值误差最小是重心有理 Hermite 插值问题的关键。文献[6]介绍了基于 Lebesgue 常数最小的重心有理插值, 而基于 Lebesgue 常数最小的重心有理 Hermite 插值是一种新的

解决重心有理 Hermite 插值的方法。具体地说, 是以插值权为决策变量, 以 Lebesgue 常数最小为目标函数, 同时以保证满足插值条件、保证重心有理 Hermite 插值函数无极点等形成约束条件, 建立优化模型求得最优权。

本文是在基于 Lebesgue 常数最小的重心有理 Hermite 插值的基础上, 研究重心有理 Hermite 插值的保形方法, 主要研究最佳保奇偶重心有理 Hermite 插值方法和将重心有理 Hermite 插值控制

收稿日期: 2012-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973050, 30570431, 60873144); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2009A50, KJ2007B173); 安徽省优秀人才基金资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0555); 国家863高技术研究发展计划基金资助项目(2006AA01Z104)。

作者简介: 乔洁(1987-), 女, 山西太原人, 在读硕士, 研究方向: 有理插值。

在两个函数之间的保形方法。

1 插值方法

给定 $n+1$ 个插值节点 $a = x_0 < x_1 < \cdots < x_n = b$, 当 $s_i = 2$ 时, 对应每个插值节点处的函数值 f_i 和导数值 f'_i 。设 $r(x) \in \Pi_n$, 对每个插值节点 x_i 有 $r(x_i) = f_i$ 且 $r'(x_i) = f'_i$ 。

1.1 重心有理 Hermite 插值

文献[7]于 1991 年发现了重心有理 Hermite 插值, 当 $w_{i,s_i-1} \neq 0, i = 0, 1, 2, \cdots, n$ 时, 存在有理函数 $r(x)$

$$r(x) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}} \sum_{j=0}^k \frac{f_i^{(j)}}{j!} (x-x_i)^j}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}}} \quad (1)$$

对于实数对 $(x_i, f_i^{(j)}), j = 0, 1, 2, \cdots, s_{i-1}, i = 0, 1, 2, \cdots, n$, 当 $i \neq j$ 时, $x_i \neq x_j$ 。

使得重心有理 Hermite 插值没有极点的必要条件为

$$\text{sign } w_{i,s_i-1} = (-1)^{s_i+1} \text{sign } w_{i+1,s_{i+1}-1} \quad i = 0, 1, 2, \cdots, n-1 \quad (2)$$

并且提到, 为了让插值函数 $r(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$ 可以在任何节点分布的情况下得到类似的效果, $q(x)$ 要满足以下条件:

- 1) $q(x) > 0$;
- 2) $|\frac{w(x)}{q(x)}|$ 一致连续。

1.2 Lebesgue 常数最小的有理 Hermite 插值

重心有理 Hermite 插值的 Lebesgue 常数为

$$A_n = \max_{a < x < b} \sum_{i=0}^n |b_i(x)| = \max_{a < x < b} \sum_{i=0}^n \left| \frac{\sum_{k=0}^{s_i-1} \sum_{j=0}^k \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1-j}}}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}}} \right| \quad (3)$$

那么, 以 Lebesgue 常数最小作为优化模型的目标函数为

$$\min A_n = \min_{a < x < b} \max_{a < x < b} \sum_{i=0}^n \left| \frac{\sum_{k=0}^{s_i-1} \sum_{j=0}^k \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1-j}}}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}}} \right| \quad (4)$$

以插值节点处的权为决策变量, 以 Lebesgue 常数最小为目标函数, 即式(4), 同时还要保证重心有理 Hermite 插值满足插值条件、无极点等。最后, 为确保优化算法解的唯一性, 对插值权加规范化约束 $\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} |w_{ik}| = 1$ 。综上, 得到基于 Lebesgue 常数最小的重心有理 Hermite 插值求解最优权的优化模型为

$$\begin{aligned} \max_{a < x < b} \sum_{i=0}^n \left| \frac{\sum_{k=0}^{s_i-1} \sum_{j=0}^k \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1-j}}}{\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}}} \right| &= \min \\ \text{s. t. } w_{i,s_i-1} &\neq 0, i = 0, 1, 2, \cdots, n \\ \text{sign } w_{i,s_i-1} &= (-1)^{s_i+1} \text{sign } w_{i+1,s_{i+1}-1} \\ &\quad i = 0, 1, 2, \cdots, n-1 \\ q(x) &= w(x) \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} \frac{w_{ik}}{(x-x_i)^{k+1}} > 0 \\ w(x) &= \prod_{i=0}^n (x-x_i)^{s_i} \\ \left| \frac{w(x)}{q(x)} \right| &\leq 1 \\ \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{s_i-1} |w_{ik}| &= 1 \end{aligned}$$

利用 LINGO 软件求解上述优化模型即得一组最优权。

2 保形重心有理 Hermite 插值

近几年, 重心有理插值的保形也被受学者关注^[8-9]。选取不同的插值权会得到不同的重心有理 Hermite 插值函数。由前面的分析可知, 基于 Lebesgue 常数最小的重心有理 Hermite 插值也是一种新的求得插值权的方法, 本文将在此基础上, 在优化模型中添加必要的约束条件来达到保形的目的。

2.1 保奇偶性

基于上述理论基础, 当已知被插值函数的奇偶性且插值区间是关于原点对称的, 在优化模型中添加适当的条件, 即可通过 LINGO 软件求得满足奇

偶性的插值权。

例1 被插值函数 $f(x) = \sin x$ 在插值区间 $[-0.15, 0.15]$ 上, 取 $s_i = 2$, 以 $x_0 = -0.15, x_1 = -0.1, x_2 = -0.05, x_3 = 0, x_4 = 0.05, x_5 = 0.1, x_6 = 0.15$ 为插值节点说明新方法的有效性。

显然, 被插值函数 $f(x) = \sin x$ 的定义域 $[-0.15, 0.15]$ 是关于原点对称的, 且在其定义域内 $f(x) = \sin x$ 是奇函数。那么, 在优化模型中加入约束条件 $r(-x) = -r(x)$, 通过 LINGO 软件计算, 得到插值权:

$$\begin{aligned} w_{00} &= 0.000001294855 & w_{10} &= 0.000001758036 \\ w_{20} &= 0.000001164800 & w_{30} &= 0.000001089568 \\ w_{40} &= 0.000001 & w_{50} &= 0.000001 \\ w_{60} &= 0.000001 & w_{01} &= 0.02182051 \\ w_{11} &= 0.2994106 & w_{21} &= 0.1786835 \\ w_{31} &= 0.000003781985 & w_{41} &= 0.1781987 \\ w_{51} &= 0.3000524 & w_{61} &= 0.02182321 \end{aligned}$$

利用 MATLAB 软件得到基于 Lebesgue 常数最小的最优保奇偶重心有理 Hermite 插值函数图像 (见图1) 及其误差图 (见图2), 由图1看出, 插值函数 $r(x)$ 是关于原点对称的, 因此求得的插值函数 $r(x)$ 是奇函数。

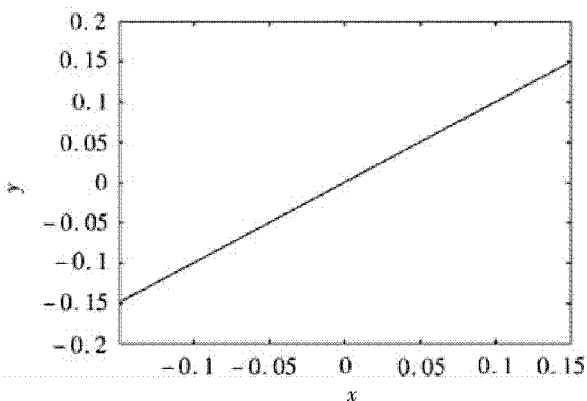


图1 本文方法得到的插值函数 $r(x)$

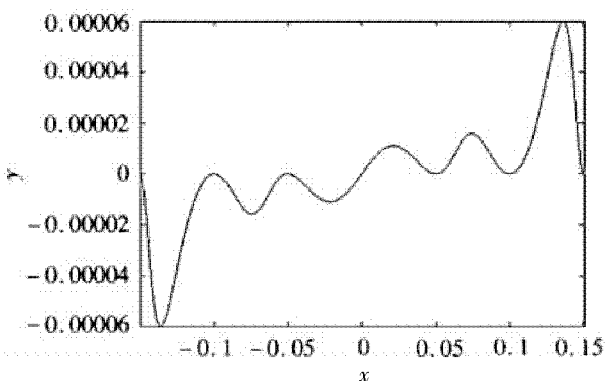


图2 本文方法得到插值函数的插值误差

从未加保形条件得到的插值函数图像 (见图3) 及其误差图像 (见图4) 中显然看出, 通过添加保形条件得到的插值函数优于未加保形条件得到的插值函数。

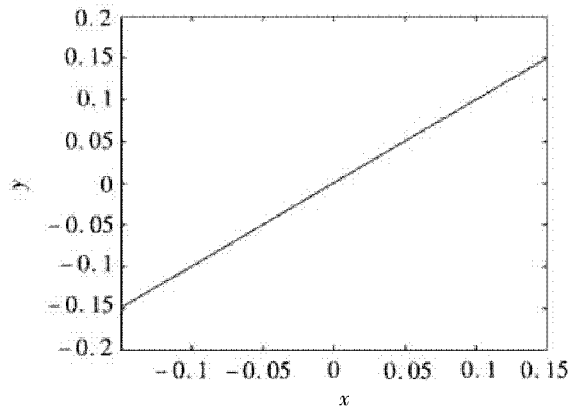


图3 未加保形条件得到的插值函数

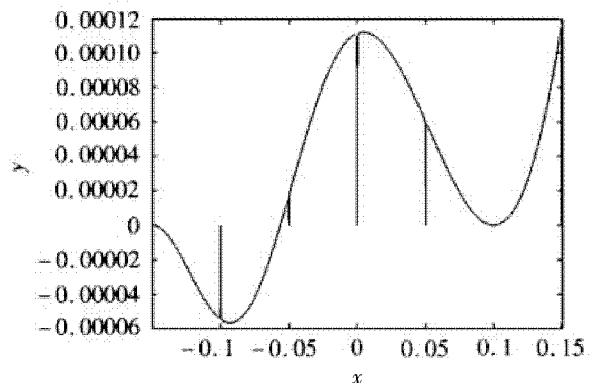


图4 未加保形条件得到插值函数的插值误差

2.2 控制插值函数的范围

如果被插值函数在已知曲线 $g(x)$ 和曲线 $h(x)$ 之间, 则可以在优化模型中添加约束条件, 使得插值函数 $r(x)$ 满足 $g(x) < r(x) < h(x)$, 这样就可以将插值函数控制在两个曲线之间。

例2 被插值函数 $f(x) = \arctan x$ 在插值区间 $[-0.3, 0.3]$ 上, 取 $s_i = 2$, 以 $x_0 = -0.3, x_1 = -0.2, x_2 = -0.1, x_3 = 0, x_4 = 0.1, x_5 = 0.2, x_6 = 0.3$ 为插值节点, 并已知被插值函数 $f(x)$ 在曲线 $g(x) = \arctan x - 0.04$ 和曲线 $h(x) = \arctan x + 0.04$ 之间。

那么, 将约束条件 $r(x) > \arctan x - 0.04$ 及 $r(x) < \arctan x + 0.04$ 添加到优化模型中, 通过 LINGO 软件计算, 得到插值权:

$$\begin{aligned} w_{00} &= 0.000001 & w_{10} &= 0.000001 \\ w_{20} &= 0.000001 & w_{30} &= 0.000001 \\ w_{40} &= 0.000001 & w_{50} &= 0.000001 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{60} &= 0.00006103668 & w_{01} &= 0.4224901 \\
 w_{11} &= 0.1010437 & w_{21} &= 0.000001 \\
 w_{31} &= 0.4315397 & w_{41} &= 0.02923211 \\
 w_{51} &= 0.01556232 & w_{61} &= 0.00006507557
 \end{aligned}$$

通过 MATLAB 软件得到的插值函数图像(见图 5)及其误差图像(见图 6),由图 5 可以看出,通过保形确实使得插值函数落在曲线 $g(x) = \arctan x - 0.04$ 和曲线 $h(x) = \arctan x + 0.04$ 之间。

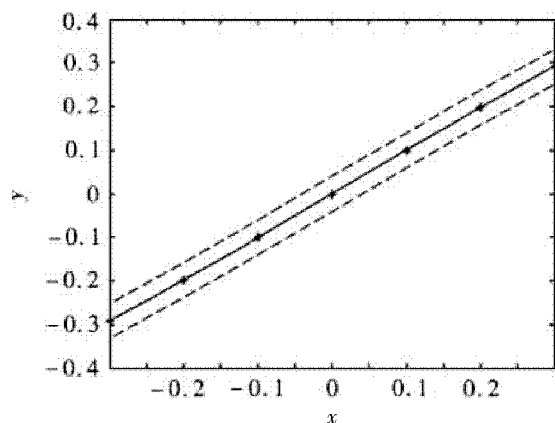


图 5 $g(x)$ 、 $h(x)$ 及本文方法得到的插值函数 $r(x)$

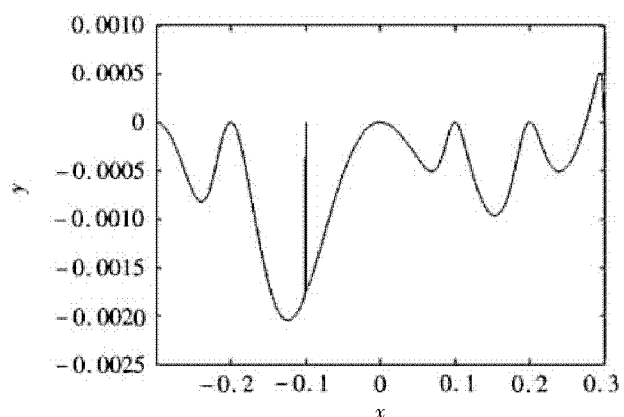


图 6 本文方法得到插值函数的插值误差

3 结论

本文在 Lebesgue 常数最小的重心有理 Hermite 插值方法的基础上,对重心有理 Hermite 插值进行

奇偶性和将插值函数控制在已知曲线之间的保形。通过建立优化模型,利用 LINGO 软件求得最优权,并由数值实例表明新方法的有效性。

参考文献:

- [1] MEIJERING E. A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing[J]. IEEE, 2002, 90(3): 319–342.
- [2] KLEIN G, BERRUT J P. Linear rational finite differences from derivatives of barycentric rational interpolants[J]. SIAM J. Numerical Analysis, 2012, 50(2): 643–656.
- [3] JESUS M C. Weighted interpolation for equidistant nodes[J]. Numerical Algorithms, 2010, 55(2–3): 223–232.
- [4] WEBB M, TREFETHEN L N, GONNET P. Stability of barycentric interpolation formulas[J]. Numerical Analysis, 2010, 24(4): 547–556.
- [5] ZHAO Q J, HAO Y P, YIN Z X, et al. Best Barycentric Rational Hermite Interpolation[C]// International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010(1): 417–419.
- [6] BERRUT J P. Lebesgue Constant Minimizing Linear Rational Interpolation of continuous Functions over the Interval[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1997, 33(6): 77–86.
- [7] SCHNEIDER C, WERNER W. Hermite Interpolation: The Barycentric Approach[J]. Computing – Special issue on archives for informatics and numerical computation, 1991, 46(1): 35–51.
- [8] NGUYEN H T, CUYT A, CELIS O S. Comonotone and coconvex rational interpolation and approximation[J]. Numerical Algorithms, 2011, 58(1): 1–21.
- [9] NGUYEN H T, CUYT A, CELIS O S. Shape Control in Multivariate Barycentric Rational Interpolation[C]// International conference on numerical analysis and applied mathematics, 2010, 1281: 543–548.

(责任编辑:何学华)

ZnO 气敏薄膜元件外延中非故意杂质演变机制

吴孔平, 周孟然, 蔡俊, 李良光, 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:采用金属有机源化学气相沉积(MOCVD)方法在(0001)蓝宝石上生长了具有缓冲层的氧化锌(ZnO)薄膜。利用变温霍尔效应(TDH), 电容电压测试仪(CV)和光致发光谱(PL)对其进行了表征。通过拟合变温霍尔效应的测试结果发现氧化锌缓冲层中存在两种浅施主能级, 一种的热激活能在50 meV左右, 另一种的激活能在10 meV左右。从对PL谱的带边峰的分峰拟合的结果来看也存在一个离导带有50 meV左右的浅能级。结合变温霍尔效应、CV和PL谱的分析结果表明: 50 meV左右的施主浅能级很可能是由蓝宝石衬底中的Al元素扩散至ZnO薄膜所致。

关键词: ZnO; 变温霍尔效应; 缓冲层

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0021-04

Evolution Mechanism of Unintentional Doping in ZnO Gas Sensitive Film Element Epitaxy

WU Kong-ping, ZHOU Meng-ran, CAI Jun, LI Liang-guang
HUANG You-rui

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

Abstract: ZnO films with buffer layers were grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) method on (0001) sapphire substrates. The electrical properties of ZnO buffer were investigated by temperature-dependent Hall (TDH), CV and PL. According to fit TDH data, it was found that there are two shallow donors in ZnO buffer film, with their activation energy at about 50 meV and 10 meV, respectively. The shallow donor at the energy of about 50 meV is assigned from fitted results of PL spectra. According to the references and the experiments, the shallow donor at 50 meV is ascribed to the diffused Al from sapphire during high temperature annealing and epitaxial growth process.

Key words: ZnO; TD Hall effect; buffer layer

氧化锌(Zinc Oxide, ZnO)基甲烷气敏传感器则是由于其本身是单极性半导体, 表面吸附着氧(O)或者带有悬挂键的O形成高势垒, 从而导致表面电阻较大, 一旦遇到CH₄气体后, 一定温度下, 吸附着的O会与CH₄气体所含的氢发生离子反

应。离子反应一方面使得高势垒降低, 另一方面使得表面的O向半导体体内扩散, 也就是使得体内的O空位向表面扩散, 改善ZnO半导体质量, 这些都会使得ZnO基甲烷气敏传感器电导率增加。这种传感器具有精度高、功耗小、响应度大、灵敏度高

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1208085QF116)。

作者简介: 吴孔平(1979-), 男, 安徽广德人, 讲师, 博士, 从事光电信息功能材料与器件工艺方面的研究。

等优点。同时, ZnO 半导体是应用最早的一种气敏材料, ZnO 气敏传感器是一种能够感知环境中某种气体及其浓度的敏感元件, 常用于定性或半定量报警性的气体分析^[1-2]。人们早在五十年代就已经研究发现 ZnO 的电导率受环境气氛的影响而改变的现象。由于现在制备方法和工艺手段大大的改善, 使得 ZnO 基半导体的掺杂和器件制造变的更加容易。因此, ZnO 基气体气敏传感器的研究吸引了国内外研究者的广泛关注。目前薄膜晶粒大小直接影响到探测器的响应时间。ZnO 薄膜晶粒大, 响应速度快, 上升时间为 792 ms, 光电流上升速度慢与氧在薄膜表面的吸附、脱附有关, 上升速度与类似块体的内部氧有关。而这些研究最终都遇到的困难, 主要体现在以下两个方面: 一方面, 传感器的工作温度较高, 一般在 400 °C 左右具有较好的灵敏度; 另一方面, 主要是矿井中的环境复杂, 温度、湿度、和压强等因素都会影响气敏传感器对 CH₄ 气体的选择性和灵敏度。由于 CH₄ 气体气敏传感器是将化学量转换成电信号的器件, 其本身对甲烷极度敏感, 在器件的表面会与含有一定浓度 (CH₄ 气体含量 5% ~ 16%) 的 CH₄ 气体反应, 从而改变了器件的电学特性。这类器件主要基于离子作用过程, 机理较为复杂, 也是 ZnO 基 CH₄ 气体气敏传感器实验研究争论的焦点, 因此急需对 ZnO 气敏传感器的物理机制开展研究。然而器件应用的基础在于获得高质量的外延材料与可控掺杂, 目前氧化锌在异质外延时普遍存在着较大的晶格失配, 通常选择与氧化锌晶格匹配比较相近的蓝宝石为衬底, 在较低温度下生长一层氧化锌缓冲层, 经过高温退火后再进行原位高温外延。而没有缓冲层的 c 面和 a 面蓝宝石上生长不出均匀的氧化锌外延层来^[3-4]。因此缓冲层在外延层生长过程中的变化是非常具有研究价值的。由于高质量的 ZnO 需要在很高的温度下进行外延得到, 而高温环境将会引起缓冲层结构、性质甚至掺杂的巨大变化。本文研究了 ZnO 高温外延过程中缓冲层的结构与性质的变化, 特别是非故意掺杂的变化机理。通过测量样品的电容电压特性 (CV), 变温霍尔效应 (TDH), 光致发光谱 (PL), 发现在高温下生长外延层时蓝宝石衬底中的 Al 元素向缓冲层发生了扩散。

1 实验

首先用金属有机源化学气相沉积方法 (MOCVD) 在温度 445 °C 条件下在蓝宝石上生长缓

冲层 (0.38 μm, 步骤 I), 记为样品 A; 进一步在笑气 (N₂O) 和氮气 (N₂) 条件下线性缓慢升温 (RAMP) 至 1 050 °C 退火 (步骤 II); 取其中一片记为样品 B, 在此基础上在 1 050 °C 首先低速生长激活层 (步骤 III), 记为样品 C; 最后在激活层上在 1 050 °C 生长高温 HT 层 (2.87 μm, 步骤 IV), 记为样品 D。所有样品的接触均采用钢金属作为欧姆接触, 在整个测量范围内接触良好。在本实验中, 霍尔测量采用变温霍尔测量系统 (Keythley Systems), 从低温 15 K 到室温 300 K。在零磁场下, 采用范德堡法对薄膜样品的直流电阻率进行测量。为了满足低磁场的要求, 磁场采用 0.2 ~ 0.3 T, 电流为 0.5 ~ 2 mA。除了变温霍尔实验, 在室温下对样品 B、样品 C 和样品 D 进行电容电压测试 (CV) 和光致发光谱 (PL) 的测量, 在电容电压测量中所加的偏压分别是 3.6 V, 2.5 V, 8 V。

2 结果与讨论

室温下样品 B、样品 C 和样品 D 的载流子浓度随深度变化如图 1 所示, 三个样品的 CV 测量显示原位生长和退火的样品 B 的掺杂浓度为 0.1 Ym⁻¹, 并且从界面向表面逐渐降低, 显示掺杂与蓝宝石与 ZnO 的生长界面存在关联, 一个可能的原因来自于高温下衬底中 Al 原子向表面的扩散。事实上, 继续的短时间高温生长的样品 C 则使得薄膜的电子浓度大幅度增加, 达 1 Ym⁻¹ 以上, 显示更多的 Al 在高温的环境下继续向 ZnO 缓冲层及表面的扩散。而当外延层较厚时, Al 原子的扩散得到了限制, 高温外延层显示 0.01 Ym⁻¹ 的掺杂浓度, 而生长表面可能存在一定厚度的相对较高电子浓度的掺杂层, 这可能来自于掺杂原子在表面的堆积或生长表面的吸附所致。

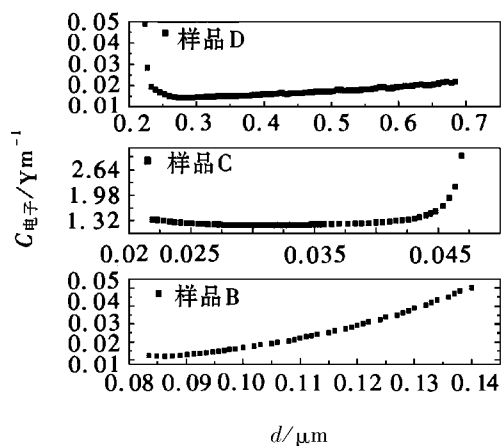


图1 样品 B、样品 C 和样品 D 的载流子浓度随深度的变化

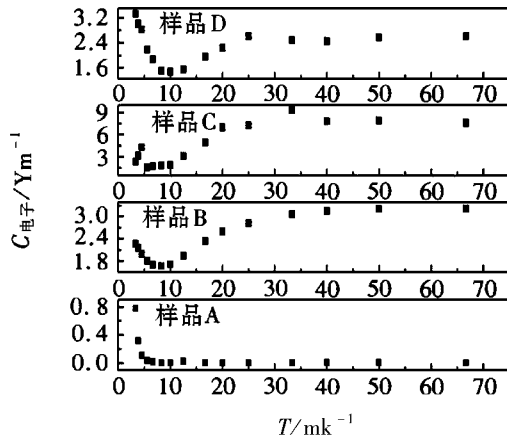


图2 样品的载流子浓度随温度的变化

对四个样品做变温霍尔效应测量,不同温度下的载流子浓度如图2所示,可以看出:除样品A外,其它样品的载流子浓度随温度的变化可以分成两个阶段:高温段和低温段。在高温段(大约100 K到300 K)载流子浓度是随温度降低而减少的,而在低温段(大约100 K以下)载流子浓度先随温度的降低而增加。文献[5]研究发现退火后的ZnO薄膜的表面或ZnO与蓝宝石衬底的界面处存在一层非常薄的高导层,在低温下体内的载流子被冻结,载流子主要由高导层贡献。假设整个薄膜是由上下两层构成,表面为非常薄的高导层,载流子浓度(n_1)和迁移率(μ_1)在低温下为恒定值,体内为一层,其载流子浓度(n_2)和迁移率(μ_2)分别是温度 T 的函数。体内载流子浓度和迁移率可以由以下方程来修正:

$$n_2 = \frac{(\mu_H n_H - u_1 n_1)^2}{\mu_H^2 n_H - u_1^2 n_1} \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{\mu_H^2 n_H - u_1^2 n_1}{\mu_H n_H - u_1 n_1} \quad (2)$$

式中: μ_H 和 n_H 为所测量的霍尔数据; μ_1 和 n_1 为归一化了的低温霍尔数据。

修正后的载流子浓度随温度的变化如图3所示。

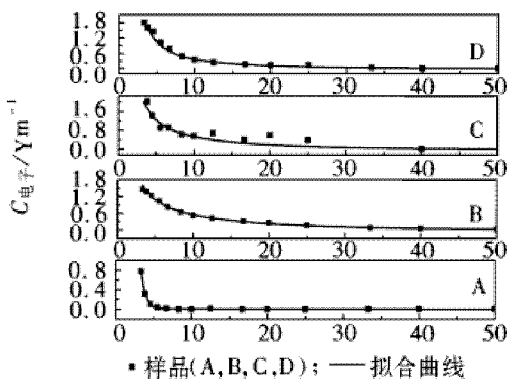


图3 样品修正后的载流子浓度随温度的变化及拟合的结果

在非简并 n 型半导体中,施主电荷平衡方程为^[6]:

$$n + N_A = \sum_{i=1}^k \left[\frac{N_{Di}}{1 + \frac{g_{Di} n T^{-3/2}}{N_C(1)} \exp\left(\frac{\Delta E_{Di}}{k_B T}\right)} \right] \quad (3)$$

式中: n 为载流子浓度; N_A 为总的受主浓度; N_{Di} , E_{Di} 和 g_{Di} 分别为第 i 个施主的浓度;激活能和简并因子: $N_C(1) = 2(m^* k_B / (2\pi h^2))^{3/2}$ 为绝对温度为1K时导带的有效态密度。利用施主电荷平衡方程式(3)进行拟合,得到一个浅施主和一个深施主(见表1)。

表1 样品拟合的载流子浓度与激活能级

样品	Nd1 /Ym ⁻¹	Ed1 /meV	Nd2 /Ym ⁻¹	Ed2 /meV	Na /Ym ⁻¹
A	526	151	0.05	3.2	0
B	3	50	2.51	7	0.01
C	7	49	3.02	10	0.005
D	9	47	1.61	11	0.009

在样品A中,除了一个浅施主外,有一个具有极高浓度的较深施主,这应来自于ZnO缓冲的某种本征缺陷或非故意掺杂,与薄膜的低温生长导致的较低的材料质量有关。高温退火导致Al原子从界面出向缓冲层的扩散,导致一激活能位于50 meV的施主能级,深施主的位置在50 meV左右与Al占Zn位^[7]或间隙锌^[8]的激活能相近,并且随高温时间的增加浓度也有所增加。而原有的较深的施主能级则由于高温退火,导致晶体质量的改进和本征缺陷浓度的降低而消失。而随着高温激活层和高温外延层的进一步生长,导致相对更多的Al原子的扩散和本征掺杂浓度的进一步增加,而相应的施主能级的激活能则保持基本一致。与CV测量结果相对应,显然高温层中测得的高载流子浓度尽管采用双层模型进行了拟合,但实际的霍尔测量结果应依然来自于缓冲层的贡献,这主要是由于双层模型一般假设存在一极薄的高导层,这在GaN外延中基本成立,而对ZnO而言,较厚的缓冲层使得霍尔效应的分析与处理变得较为困难。

为了进一步研究是否存在浅施主能级,对样品进行了光致发光(PL)谱测试。PL谱的测量及对近带边复合的发光谱拟合的结果如图4和表2所示。对近带边复合的发光谱进行拟合的结果显示三个发光峰,分别位于3.30 eV(P1)左右,3.25 eV

(P2)左右和 3.20 eV (P3), 其中 P2 峰仅出现在样品 B 和样品 C 中, 与 CV 测量数据比较显示, 该发光峰可能与 ZnO 中 Al 掺杂引入的能级的复合发光有关, 样品 C 的 P2 峰的相对强度也比样品 B 的要强, 这应与样品中较高的 Al 掺杂浓度有关, 虽然样品 C 由于晶体质量的下降导致一较低的绝对强度。样品 D 的 PL 中没有 P2 峰是因为较厚得高温外延层的吸收使得 P2 处的发射峰难以体现。

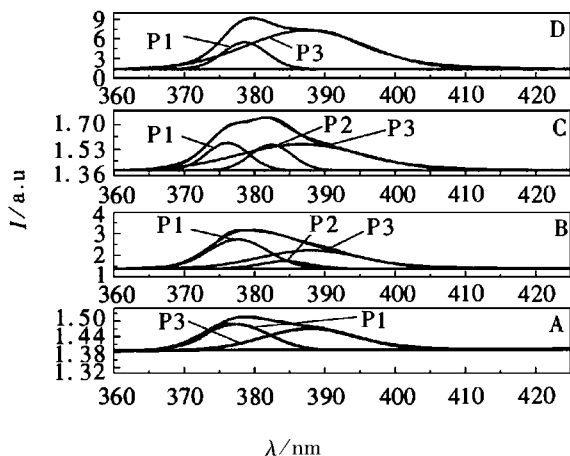


图 4 样品的 PL 测量及拟合的结果

表 2 根据样品的 PL 谱拟合的近带峰位与能级

样品	P1 /nm	E1 /eV	P2 /nm	E2 /eV	P3 /nm	E3 /eV
A	377	3.29	—	—	388	3.20
B	378	3.28	384	3.23	388	3.20
C	376	3.30	382	3.25	387	3.20
D	378	3.28	—	—	388	3.20

3 结论

通过变温霍尔效应, CV 和 PL 谱等测试手段对高温下 ZnO 外延生长中的缓冲层进行了电学性质与光学特性进行表征, 进而对实验结果进行拟合分析, 发现样品经过高温后出现了一个 50 meV 左

右的浅施主能级, 并且随着高温时间增长该施主的浓度也随之增加, 这主要来自于高温退火和生长高温外延层的过程中蓝宝石中的 Al 元素向缓冲层发生了扩散所致。

参考文献:

- [1] 朱蕴璞, 孔德仁, 王芳. 传感器原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 184 - 196.
- [2] 马正先, 韩跃新, 郑龙熙, 等. 纳米氧化锌的应用研究[J]. 化工进展, 2002, 21(1): 60 - 62.
- [3] R NAVAMATHAVAN, K K KIM, D K HWANG, et al. Deformation behavior during nanoindentation of epitaxial ZnO thin films on sapphire substrate[J]. Mater. Lett. 2007, 61: 2 443 - 2 445.
- [4] P FONS, K IWATA, A YAMADA, T Tanabe and H Takasu. Uniaxial locked epitaxy of ZnO on the a face of sapphire[J]. Appl. Phys. Lett. 2001, 77: 1 801 - 1 803.
- [5] W R LIU, B H LIN, S YANG, et al. The influence of dislocations on optical and electrical properties of epitaxial ZnO on Si (111) using a γ -Al₂O₃ buffer layer[J]. Cryst. Eng. Comm. 2012, 14(5): 1 664 - 1 671.
- [6] D C LOOK. Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices [M]. New York: Wiley, 1989: 106 - 117.
- [7] D C LOOK, G C FARLOW, P REUNCHAN. Evidence for Native - Defect Donors in n - Type ZnO [J]. Phys. Rev. Lett. 2005, 95(1): 225 502 - 225 505.
- [8] G BRAUER, W ANWAND, W SKORUPA. Defects in virgin and N + - implanted ZnO single crystals studied by positron annihilation, Hall effect, and deep - level transient spectroscopy[J]. Phys. Rev. B 2006, 74(2): 045 208 - 045 214.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)

基于 ANSYS 放顶煤液压支架顶梁仿真分析

周毅钧, 董 营, 郝向红

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为防止采煤工作面的顶板冒落, 保证生产和作业安全, 必须对顶板进行安全可靠的支护。利用三维软件 Solidworks 对顶梁进行了建模, 建立了放顶煤液压支架有限元模型, 使用 ANSYS Workbench 对不同受力方式进行了有限元分析和计算机模拟仿真分析, 找出顶梁在不同受力情况下最大应力和危险部位, 给出其在四种危险工作载荷状态变化下的变形和应力分布图, 对该支架结构的设计与改进提供了一定的理论依据。

关键词: 液压支架; 仿真; 顶梁; 应力分布

中图分类号: TD355 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0025-04

Analysis of Roof Beam of Hydraulic Support for Top Coal Caving Mining Based on Simulation with ANSYS

ZHOU Yi-jun, DONG Ying, YU Xiang-hong

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

Abstract: In order to prevent roof fall of coal mining longwall and ensure work safety in mining production process, safe and reliable support of roof must be carried out. Roof beam was modeled by using Solidworks, and model of hydraulic support for top coal caving for finite element analysis was established. Simulation analysis by using ANSYS Workbench identified the maximum stress and the dangerous parts of the roof beams in case of different load. Deformation and stress distribution under four kinds of dangerous work load were obtained, which provide a theoretical basis for design and improvement of the support structure.

Key words: hydraulic support; simulation; roof beam; stress distribution

为了防止在采煤工作面的煤炭生产过程中顶板冒落, 维持一定空间, 保证安全生产和正常进行各项作业, 必须对顶板进行安全可靠的支护。液压支架是以高压液体为动力, 由金属构件与液压元件组成的控制顶板与支护的重要设备, 它能实现支撑、切顶、移架、推移输送机等一系列工序。液压支架可以与可弯曲输送机、采煤机组组成综合机械化采煤设备, 对增加采煤工作面的产量、提高劳动生产率、降低成本、减轻工人的劳动强度和保证安全生产提供有效措施。经过多年的努力和发展, 我国液

压支架的设计和制造水平不断提高。其中两柱掩护式放顶煤液压支架, 是我国近年自主研发的一种新型放顶煤液压支架, 它提高了综采工作面自动控制程度, 为综采工作面的高产高效提供了有力保障, 是高产高效综采工作面迫切需求的一种应用前景十分广阔的架型。

新型放顶煤液压支架是一种回采率高, 夹矸少的液压支架。放顶煤开采法是在下部煤层中布置采煤工作面, 在矿山压力或人工爆破的时让上部煤炭从支架上的窗口放出。

收稿日期: 2012-07-23

基金项目: 中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划资助项目 (MTKJ2012-404); 淮阴工学院江苏省数字化制造技术重点建设实验室开放课题资助项目 (HGDML-0903)

作者简介: 周毅钧 (1973-), 男, 安徽来安人, 副教授, 硕士, 主要从机械制造及其自动化教学和研究工作。

放顶煤液压支架的结构型式多为支撑掩护式,在掩护梁后部带插板,插板可以伸缩或上下摆动,用来控制煤的排放和破碎大块煤等。两柱式放顶煤液压支架避免了四柱支架前后两排立柱受力不均这一问题,并加大了支护效率,还易于实现液压支架的电液自动控制一体化。其中顶梁是液压支架的重要承力结构,与顶板直接接触,承受载荷十分复杂,它反复支撑顶煤,以利于放煤。其主要作用包括:承受顶板岩石及煤的载荷;可对比较坚硬的煤层起到破碎作用;可为回采工作面提供足够的安全空间。因此对顶梁进行应力分析研究以便更好的设计顶梁和保护工作人员的安全具有十分重要的意义^[1-2]。

1 ANSYS Workbench 简介

ANSYS 自 20 世纪 70 年代以来,随着计算机和有限元理论的发展,在各个领域得到了高度的评价和广泛应用。自 ANSYS 7.0 开始,ANSYS 公司推出了 ANSYS 经典版和 ANSYS Workbench 版。ANSYS Workbench 是一个集成框架,整合了现有的各种应用,并将仿真过程结合在一起。ANSYS Workbench 中提供了与 ANSYS 系统求解器的强大交互功能的方法。这个环境提供了一个独特的 CAD 及设计过程的集成系统。ANSYS Workbench 把 ANSYS 系列产品融合在仿真平台,使数据无缝集成,实现传递以及共享,Workbench 为仿真模拟和设计提供了全新的平台,提高了仿真效率,利用 ANSYS 系列产品求解模块保证了仿真模拟的通用性和精确性。

ANSYS Workbench 分析问题主要包括以下几个流程:

- 1) 建立几何模型与网格划分;
- 2) 材料数据库的使用;
- 3) 边界条件施加;
- 4) ANSYS 各级求解;
- 5) 计算报告的自动生成。

用 ANSYS 经典版建立模型很不方便,若用 Solidworks 软件建立模型后导入 ANSYS 中经常会出现错误,而 ANSYS Workbench 可以建立模型并且较为方便,最主要的是现在的 ANSYS Workbench 和 Solidworks 软件可以兼容,当用 Solidworks 建立完模型后直接可以导入 ANSYS Workbench 中,而且不会发生导入错误信息。所以用 ANSYS Workbench 建立模型比 ANSYS 经典版建立模型更方

便、准确。

2 顶梁受力及建模分析

在综采工作面中,顶梁受顶板和矸石的作用,一般承受四种工作状态:顶梁中部承受集中载荷;两端承受集中载荷;承受扭转载荷;承受单侧受载。并对其强度、刚度及稳定性要求十分严格。

2.1 顶梁载荷的分布

由于顶梁与顶板的接触情况不同,实际载荷分布复杂。为了计算方便,假设顶梁与顶板均匀接触并且载荷为线性分布。

设顶梁长为 L ,顶板的集中载荷为 F_1 ,作用点距顶梁一端为 x 。当 $x \leq \frac{L}{3}$ 时,载荷呈三角形分布,

如图 1(a),顶梁前端比压 q_1 为 0,后端比压 $q_2 = \frac{2F}{3 \times Bm} \times 10^{-3}$ 。

当 $\frac{L}{3} < \frac{L}{2}$ 时,载荷呈梯形分布,如图 1(b),

顶梁前段比压 $q_1 = \frac{F_1 (X_0 - 2L)}{L^2 Bm}$,后端比压 $q_2 = \frac{F_1 (4L - X_0)}{L^2 Bm}$

式中: Bm 为顶梁宽度。

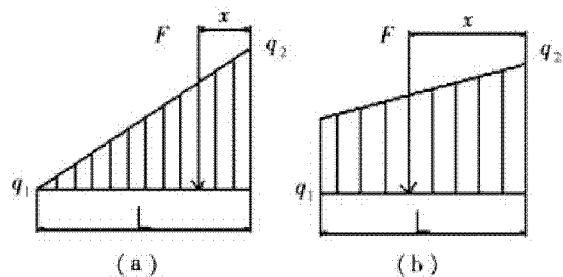


图 1 顶梁载荷分布

2.2 顶梁参数的确定

支架工作方式对支架顶梁长度影响很大,先移架后推溜的方式要求顶梁有较大长度;先推溜后移架的方式要求顶梁长度较短。支架顶梁长度与配套尺寸有直接关系。为了防止当采煤机向支架内倾斜时,采煤机滚筒不截割顶梁,又考虑到采煤机截割时,不一定把煤壁截割成一垂直平面,所以在设计时要求顶梁前端距煤壁最小距离为 300 mm,另外在输送机铲煤板前也有一定距离,一般为 135 ~ 150 mm。

则顶梁长度计算公式为

1) 掩护式顶梁长度 = (配套尺寸 + 底座长度 + $A \cos Q_1$) - ($G \cos P_1 + 300 + e$) + 掩护梁与顶梁铰点至顶梁后端点的距离。

2) 支撑式顶梁长度 = 配套尺寸 + 底座长度 - 300。

式中:配套尺寸为参考原煤炭部科学研究院制的综采设备配套图册确定;底座长度为底座前端至后连杆的距离; e 为支架由高到低顶梁前 endpoint 最大变化距离; Q_1 为后连杆与水平面的夹角; P_1 为掩护梁与水平面的夹角。

3 顶梁有限元模型建立

顶梁的结构复杂,按照其实际结构进行有限元分析非常困难,因此对模型进行简化。去掉顶梁的小孔、圆角、焊接处、耳板等受力较小部件,剩余主肋板、盖板等承受力较大的部件,用 Solidworks 软件建立模型(见图2)。

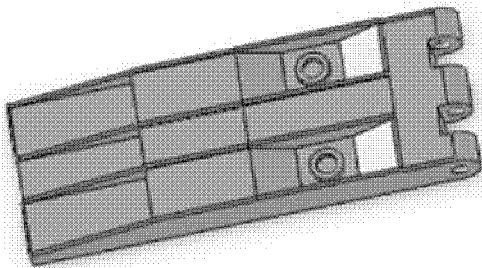


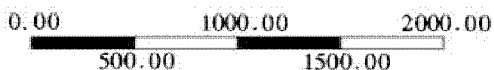
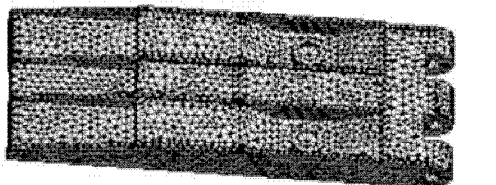
图2 顶梁模型

3.1 材料属性

该液压支架顶梁结构材料选用 20 Mn 钢,所以该模型的属性是各向同性,取弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7.8 \text{ kg/mm}^3$ 。

3.2 建立模型并划分网格

用 Solidworks 软件建立模型并导入 ANSYS Workbench,并且选用 SOLID92 单元,对实体进行自由网格划分,在划分过程中设置 smartsizing 的值为 20 mm 进行自由网格划分,得到支架顶梁的有限元模型(见图3)。



单位:mm

图3 顶梁网格划分

4 顶梁受力变化有限元求解及分析

4.1 中部承受集中载荷

由 ANSYS Workbench 得出 Von - Mises 图(见图4)可看出,其最大应力分布在顶梁的中部,由于是两柱式支架,只要保证其强度符合要求即可。

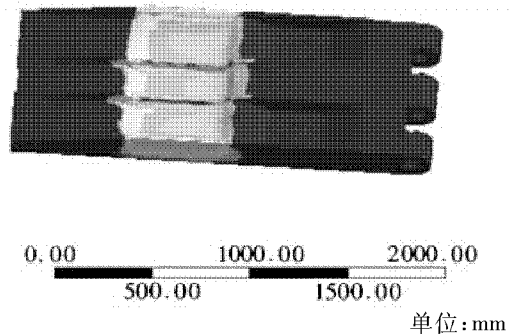


图4 中部受载 Von - Mises 图

4.2 两端承受集中载荷

由 ANSYS Workbench 得出 Von - Mises 图(见图5)可以看出,两端集中受载,柱窝处有最大应力,其次为与柱窝处相连接的主筋板上,这与实际液压支架实验所得的结果一致。为了增强顶梁的强度,保证支架的使用寿命,需要在设计支架顶梁的时候在支架四个柱窝的上边加两条加强板,这样就能保证支架的强度。

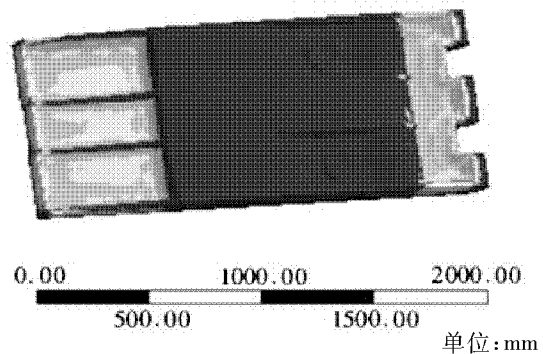


图5 两端集中受载 Von - Mises 图

4.3 承受扭转载荷

由 ANSYS Workbench 得出 Von - Mises 图(见图6)可以看出,最大应力分布在顶梁下部的销孔上。工作中销孔有可能会撕裂,因此应减小应力集中,改善结构设计或采用高强度材料。

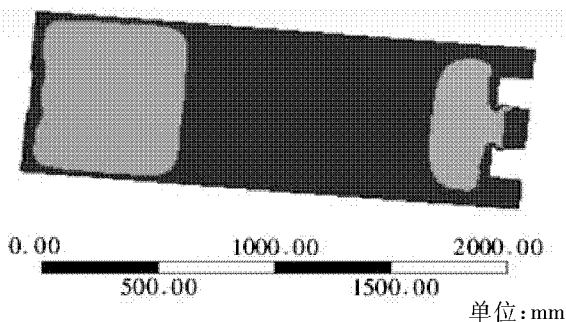


图6 扭转受载 Von - Mises 图

4.4 承受单侧受载

由 ANSYS Workbench 得出 Von - Mises 图(见图7)可以看出,顶梁单侧受载时最大应力出现在最外侧主肋板与顶梁下盖板连接处,说明顶梁单侧受载时该处容易撕裂,应采用加强肋、加大盖板厚度等措施提高强度。

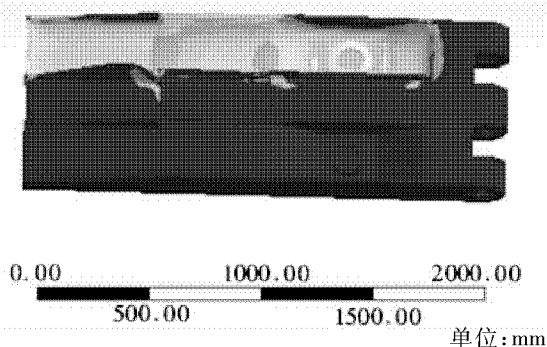


图7 单侧受载 Von - Mises 图

5 结语

本文介绍了 ANSYS Workbench 软件并对其顶梁进行有限元分析得到了顶梁内部的应力分布,采用有限元分析等现代设计方法提前发现结构件的薄弱环节,提出改进与优化措施,这样能更有效地利用材料,提高支架的可靠性和寿命,适应液压支架结构设计要求,使放顶煤液压支架能更适用于大采高综放开采。

1) 轻型化。对液压支架各部件进行受力分析和优化设计,使其结构紧凑,在满足强度等条件下,顶梁及底座尽量短些,使其轻型化。

2) 标准化。为了减轻支架质量,降低成本,提高对煤层厚度变化和顶板条件的适应性,使液压支架的危险性降低,对同一型号设计成系列化,适应不同煤层厚度的要求。

3) 材质强化。采用优质钢材,减轻支架质量,可先进行技术经济比较再选用材质。

4) 操作自动化。使其操作方便并能适应无人采煤工作面的需求,更能保证人身安全。

5) 高压化。各种阀类的压力等级加高,相应的强度增高,使阀和油缸的体积减小,使液压支架的质量减轻。

参考文献:

- [1] 李兵,何正嘉,陈雪峰. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京:清华大学出版社,2008:8-50.
- [2] 鲁忠良,景国勋,肖亚宁. 液压支架设计使用安全辨析[M]. 北京:煤炭工业出版社,2006:10-200.
- [3] 苏林军,朱峰. 放顶煤液压支架的创新与发展[J]. 煤炭科学技术,2011,39(4):87-90.
- [4] 吴震,王颖. 基于 ANSYS Workbench 液压支架整架有限元分析[J]. 煤矿机械,2009,30(9):106-107.
- [5] 刘红国,李炳文,巩明,等. 超静定液压支架顶梁的有限元分析[J]. 煤矿机械,2010,31(9):74-76.
- [6] 吴义珍. ZF3500/17/29 液压支架顶梁的有限元力分析[D]. 西安:西安科技大学,2007.

(责任编辑:李 丽)

基于多目标粒子群算法的网格 workflow 调度研究

孙妍姑, 吴海波

(淮南师范学院计算机与信息工程系, 安徽 淮南 232038)

摘 要: 网格环境的特点是开放性和动态性, 网格资源、用户和管理策略都可能随着时间动态地发生变化, 因此, 需要重点解决网格 workflow 调度系统中的多目标优化问题。将多目标粒子群优化算法应用于求解网格 workflow 调度中的多目标优化问题, 并尝试对 MOPSO 算法进行改进, 以更好地适应网格 workflow 调度系统。实验表明, 该算法是可行的且具有良好的可扩展性。

关键词: 网格 workflow; 任务调度; 多目标粒子群优化算法; 多目标优化

中图分类号: P283 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0029-04

Grid Workflow Scheduling Based on Multi-Objective Particle Swarm Algorithm

SUN Yan-gu, WU Hai-bo

(Department of Computerization and Information Engineering, Huainan Normal University, Huainan Anhui 232038, China)

Abstract: The grid environment is characterized by openness and being dynamic. Grid resources, users and management strategies may be dynamically changed with time, therefore it's important to solve multi-objective optimization problem in grid workflow scheduling system. In the paper Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithm was applied to multi-objective optimization problem of grid workflow scheduling, and the MOPSO algorithm was improved to better adapt to grid workflow scheduling system. Experimental results showed that the algorithm is feasible and has good extensibility.

Key words: grid workflow; task scheduling; multi-objective particle swarm optimization algorithm; multi-objective optimization

网格关注的核心是资源的共享和协同工作, 对网格 workflow 的研究正是为了更好地执行协同工作机制。目前网格 workflow 的相关研究主要有两个方向: 一是网格 workflow 的规范化、标准化; 二是网格 workflow 的实际应用及研究, 即采用网格 workflow 来管理复杂网格应用, 并研究和处理相关的问题^[1]。本文所做的网格 workflow 调度研究属于第二个方向。

网格 workflow 的调度可简单描述为一种映射, 它根据任务信息和当前的资源信息, 凭一定的策略找到一个调用执行服务时间最短的调度实例^[2]。具体过程可分为三步: 第一步是寻找和匹配最合适任务运行的资源; 第二步对资源的信息进行实时收

集, 然后对任务进行资源的分配, 即决定该资源上任务的执行顺序; 第三步任务的执行, 包括任务初始化、任务执行和任务结束。

网格 workflow 调度的目标是缩短整个程序的运行时间, 这是一个 NP 完全问题, 目前这一问题的解决多采用一些启发式算法, 如遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、模拟退火算法、粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)、差分演化 (Differential Evolution, DE) 算法及将多个算法进行融合构成新的算法等。遗传算法是一种全局随机搜索优化算法, 它借鉴了生物界的自然选择和生物进化而发展起来。其优点是具有种群多样性和全局

收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 安徽省高等学校青年教师科研资助计划自然科学基金资助项目 (2008jql133); 淮南师范学院自然科学研究基金资助项目 (2012LK07)

作者简介: 孙妍姑 (1978-), 女, 江西婺源人, 讲师, 硕士, 研究方向: 网格计算, 网格 workflow。

解空间搜索能力,缺点主要是早熟收敛问题和局部搜索能力较差的问题。文献[3]定义了三种收敛判据,并采用最优保存策略实现跨代保留,从而避免了算法的早熟收敛问题。文献[4]把服务质量引入网格工作流,为其调度提供依据,从而更多地从用户需求的方面进行考虑。文献[5]采用多算法融合,使免疫算子和遗传算子相结合来避免单一遗传算法的早熟和退化问题。模拟退火算法是一种启发式的随机搜索算法,基于蒙特卡罗求解法,通过模拟热力学中经典粒子系统的降温过程来找出全局最优解。文献[6]将遗传算法和模拟退火算法相融合,提出了一种遗传退火算法,目的是弥补使用单一算法的不足。

本文重点解决的是网格工作流调度中的多目标优化问题,即将多目标粒子群优化算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)应用于网格工作流的调度,并尝试对 MOPSO 算法进行改进,以更好地适应网格工作流调度系统。

1 标准粒子群优化算法

粒子群优化算法 PSO 其本质是对鸟群觅食行为的一种模拟。PSO 算法中的“粒子”对应于在一块区域内觅食的鸟,每个粒子依据其位置和速度决定飞行的方向和距离。粒子通过个体极值(Pbest)和全局极值(Gbest)来不断更新调整飞行,以寻找最好位置。Pbest 可看作粒子自己的飞行经验,Gbest 可看作粒子的同伴们的经验。PSO 算法是一种基于种群寻优的启发式搜索算法^[7]。公式(1)~公式(2)表示每一代粒子的位置和速度更新公式。公式(1)计算粒子 i 更新的速度,公式(2)计算粒子 i 新位置的坐标。

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^t + c_1 * \text{rand}_1(p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 * \text{rand}_2(p_{gd}^t - x_{gd}^t) \quad (1)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^t \quad (2)$$

式中: v_{id} 为粒子 i 飞行速度矢量的第 d 维分量; m 为该部落中粒子的总数; w 为惯性因子,作用是控制优化效率; p_{id} 为粒子 i 为经历过的最好位置的第 d 维分量; p_{gd} 为群体中所有粒子经历过的最好位置的第 d 维分量; c_1 和 c_2 为学习因子; rand 为随机函数。

本研究采用时间结束条件作为 PSO 算法的迭代结束条件。使用时间结束条件时,需要在 PSO 算法中给出了最大迭代次数 MAXG,只有当迭代的次数达到 MAXG 时算法才结束。时间结束条件方

法设置简单、易于实现,更适用于所有的优化问题(见图 1)。

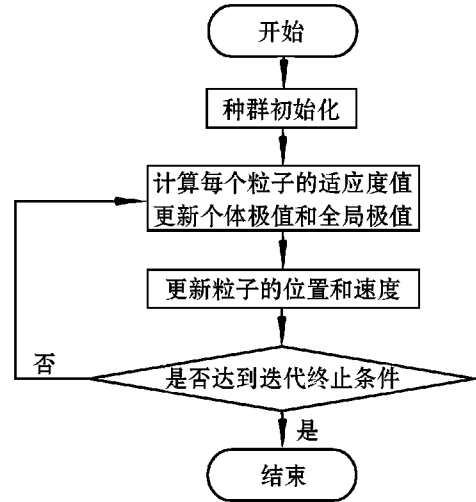


图 1 粒子群优化算法 PSO 流程图

2 MOPSO 算法及改进

2.1 MOPSO 算法

单目标优化问题与多目标优化问题之间有很大区别,其重点在于单目标优化问题是单个解或者一组连续的解,而多目标优化问题是一组或者几组连续解的集合^[8]。这种区别使得 PSO 算法在求解多目标优化问题时必须进行修改,并对 MOPSO 算法进行改进,以更好地适应网格工作流调度中的多目标优化问题(见图 2)。

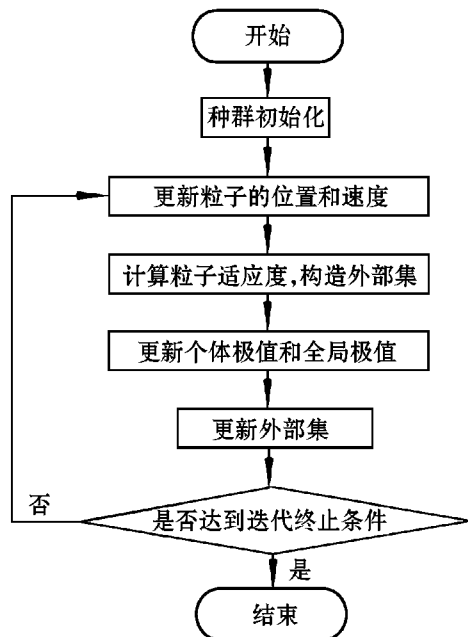


图 2 多目标粒子群优化算法流程图

2.2 MOPSO 算法的改进

PSO 算法应用于多目标问题的求解,还必须对算法进行改进,如:个体极值和全局极值的选取、粒子优劣的判断、是否对粒子施加扰动等。

1) 个体极值和全局极值的选择策略。全局极值 Gbest 的选择策略是 MOPSO 算法设计的重点。不同于单目标优化, Gbest 的选取和外部集的更新方式密切相关。本研究是基于 Pareto 支配的个体适应值来对 Gbest 进行选择。个体的适应值定义如下

$f_a = |P| - |P_a|$, P 表示粒子群体, P_a 表示 a 支配的粒子的集合, $| \cdot |$ 代表集合规模。

个体极值 Pbest 选择策略:根据 Pareto 支配机制来选取。

2) 外部精英集的维护。为了引导算法向非劣最优区域快速逼近,在种族之外设置了外部精英集,用以将算法运行过程中找到的 Pareto 支配解保存下来。

需要对外部精英集进行修剪和更新,这是因为外部精英集的容量是有限的,当其已满,且有新的非支配解要进入时,就需要去除一部分非支配解。修剪和更新所采取的策略主要有网格法、随机选择法和拥挤距离法等。本研究选用拥挤距离法,其思想是:计算每个个体的拥挤距离,当外部精英集 Ar 溢出时,删除拥挤距离最小的个体。计算拥挤距离的伪代码如下:

crowding - distance (I) // I 为外部精英集

$l = |I|$ // l 为 I 中解的数量

对每一个 $i, I[i]_d = 0$ // 对所有个体 i 的拥挤度初始化为 0

对每个目标函数 m $I = \text{sort}(I, m)$ // 根据个体 i 的每个子目标值对 I 中个体进行排序

$I[1]_d = I[l]_d = \infty$ // 外部精英集 I 中边界个体拥挤度为无穷

从 $i = 2$ 到 $l - 1$ 循环:

$I[i]_d = I[i]_d + (I[i + 1] \cdot m - I[i - 1] \cdot m) / (f_m^{\max} - f_m^{\min})$

END

其中, $I[i]_m$ 指个体 i 对于第 m 个目标函数的值, $I[i]_d$ 代表个体 i 的拥挤度, f_m^{\max}, f_m^{\min} 分别表示第 m 个目标函数的最大值、最小值。

3) 进化停滞问题的处理。首先判断是否进入进化停滞状态,如是就随机选择淘汰粒子。

$$P_e = \exp(-k/t) \quad (3)$$

P_e 为粒子被淘汰的概率, t 为进化停滞的代数, k 为取值在 $(0, 5)$ 的常数。该公式显示,随着停滞代数的增加,粒子被淘汰的概率以指数级快速加大。

3 基于 MOPSO 的网格 workflow 调度算法

3.1 粒子更新机制

公式(4)~公式(5)给出了粒子 i 的第 d 维的速度 V_{id} 和位置 X_{id} 的第 $t + 1$ 次迭代更新方程。

$$V_{id}(t + 1) = \text{Int}\{wV_{id}(t) + c_1 * \text{rand}() * [P_{id}(t) - X_{id}(t)] + c_2 * \text{rand}() * [P_{gd}(t) - X_{id}(t)]\} \quad (4)$$

$$X_{id}(t + 1) = X_{id}(t) + V_{id}(t + 1) \quad (5)$$

式中: w 为惯性权重, $w = (0.9 - 0.2) * (\text{MAXG} - t) / \text{MAXG} + 0.2$; c_1, c_2 为常数,取值在区间 $(0, 2)$ 上; GS 为对应于每个活动的候选网格服务集之数量。其他参数设置与前面相同。

3.2 改进的网格 workflow 调度算法

改进的网格 workflow 调度算法如下:

1) 初始化相关参数。

2) 初始化每个粒子。具体包括:① 多个粒子的集合产生粒子群 P : 为每一个活动随机地选择一个候选网格服务,构成单个粒子 $P[i], i \in [0, N)$, 则所有活动就对应了一个粒子群;② 初始化 Pbest: $Pbest[i] = P[i]$;③ 根据所有粒子的 Pbest 初始值 $Pbest[i]$, 找出种族的 Gbest 初始值;④ 给每个粒子的速度 V 初始化为 0, 即初始位置为 0;⑤ 对于每个粒子, 计算其相应的 5 个目标函数适应值 $obj[i][j], j \in [0, 5)$ 。

3) 初始化进化代数计数器 $t = 0$ 。

4) 创建外部精英集 Ar 。

5) 计算 Ar 中非劣解的拥挤距离并降序排列。

6) 更新每个粒子。包括:① 依据 2.2.1 小节给出的个体极值和全局极值的选择策略,从外部精英集 Ar 中为每个粒子选择 Gbest;② 依据上文中所列公式(4)更新 V , 依据公式(5)更新 X ;③ 将 X 代入目标函数,得到多目标函数适应值。

7) 更新外部精英集 Ar 。

8) 依支配关系更新 Pbest。

9) 判断进化是否停滞。如果停滞则依据公式(3)淘汰粒子,如果没有停滞则直接进入下一步。

10) 进化代数 $t = t + 1$ 。

11) 判断 t 是否达到最大进化代数 MAXG。达到则输出外部精英集 Ar , 算法结束; 否则跳到第 5 步继续执行。

4 实验与性能分析

本研究对多目标粒子群优化算法 MOPSO 进行改进, 将改进后的算法 IMOPSO 用于一个具有代表性的网格工作流实例, 使用 MATLAB6.0 进行仿真实验, 并与文献[9]中的算法(WMOPSO)作比较, 以便更好地检测性能。算法的参数设置如下: 种群大小 $N = 100$, 外部精英集 $Ar = 100$, 学习因子 $c_1 = 1$, $c_2 = 1.5$, 惯性权重 $w = (0.9 - 0.2) * (MAXG - t) / MAXG + 0.2$ 。测试分别运行 50 次, 取平均值为实验结果。

表 1 执行时间的比较

参 数	IMOPSO	WMOPSO
GS = 100, MAXG = 100, $j = 0.3$	1.135	1.058
GS = 100, MAXG = 200, $j = 0.4$	0.963	1.752
GS = 200, MAXG = 200, $j = 0.5$	0.237	1.766
GS = 200, MAXG = 200, $j = 0.6$	0.164	1.709
GS = 200, MAXG = 500, $j = 0.7$	1.019	4.253
GS = 300, MAXG = 500, $j = 0.7$	0.343	4.628

表 1 给出的是当候选网格服务 GS、进化代数 MAXG 和约束百分比 j 不同时, 算法 IMOPSO 和算法 WMOPSO 求解该问题的 CPU 时间开销。对比表 1 中的数据可以看出, 随着 GS、MAXG 的增加, IMOPSO 算法的执行时间均小于 WMOPSO 算法的执行时间, 且整体上较优于 WMOPSO。

5 结语

为了改善网格调度性能, 本文给出了基于多目

标的 PSO 网格工作流调度算法, 并根据网格工作流调度的特点, 对其中的几个问题进行改进, 包括: 个体极值和全局极值的选择策略、外部精英集的维护、进化停滞问题的处理。实验表明, 该算法是可行的且具有良好的可扩展性。

参考文献:

- [1] 何琨, 赵勇. 网格资源管理与调度研究综述[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(4): 1-5.
- [2] 陈鹏, 杜钦生. 网格及网格体系结构的研究[J]. 长春大学学报, 2007, 17(3): 66-68.
- [3] 郭文彩, 杨扬. 基于遗传算法的网格服务工作流调度的研究[J]. 计算机应用, 2006, 1(26): 54-56.
- [4] 付鹤岗, 武聪, 尤娟. 基于服务质量的网格工作流系统研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 162-164.
- [5] 李迪, 黄德才. 基于免疫遗传算法的网格工作流服务选择[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(6): 673-678.
- [6] 丁一鸣, 孙瑞志. 基于遗传退火算法的网格工作流调度研究[J]. 计算机应用, 2007, 6(27): 89-91.
- [7] DEELMAN E, GANNON D, SHIELDS M, et al. Workflows and e-Science: An overview of workflow system feature and capabilities[J]. Future Generation Computers System, 2008, 15(6): 12-18.
- [8] YU J, BUYYA R. Scheduling Scientific Workflow Applications with Deadline and Budget Constraints using Genetic Algorithm[J]. Scientific Programming, 2006, 14(2): 217-230.
- [9] 王金华, 尹泽勇. 基于 NSGA-II 和 MOPSO 融合的一种多目标优化算法[J]. 计算机应用, 2007, 2(11): 2 817-2 823.

(责任编辑: 李 丽)

不同复垦类型木本植物重金属吸收积累差异

杨金香, 李小龙

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:以淮南复垦区为例,根据复垦区覆土厚度和种植植被的不同,选取大通湿地生态区和潘一矿复垦区,两个代表性的采煤沉陷复垦区开展不同复垦类型木本植物对不同重金属(Cu、Zn、Cr、Ni、Pb和Cd)吸收积累差异研究。结果表明:构树、高杆女贞和水杉三种木本植物对重金属Zn、Cr、Ni、Cd和Pb的吸收富集能力表现一致;而对Cu的富集能力表现不一致。说明复垦类型会影响木本植物对重金属Zn、Cr、Ni、Cd和Pb的吸收积累。

关键词:复垦类型;木本植物;重金属;吸收积累

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)03-0033-04

Difference of Heavy Metals Accumulation by Woody Plants at Different Reclamation Type of Area

YANG Jin-xiang, LI Xiao-long

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

Abstract: According to the covering soil thickness and vegetation types in reclamation area, taking Huainan mine reclamation area as an example, select the chase wetland ecological zone and Panji No. 1 Coal Mine reclamation area, the two typical coal mining subsidence reclamation areas (Datong Ecological Wetland and Panji No. 1 Coal Mine Reclamation Area) were selected to study difference of heavy metal accumulation by woody plants at different reclamation type of area. The results showed that accumulation capacity of heavy metal Cu and Pb by *Citrus medica*, *ligustrum lucidum* and *metasequoia* is consistent; and accumulation capacity of Pb is inconsistent. Reclamation type affects absorption and accumulation capacity of heavy metals Zn, Cr, Ni, Cd and Pb by woody plants.

Key words: reclamation type; woody plants; heavy metals; accumulation

木本植物具有生物量大、较长的生长周期,以及对水肥依赖性不强、维护成本低等农学特性,对重金属等污染物具有一定的吸收积累,而且不参与食物链循环,避免了吸收积累的污染物对人体产生伤害。不同的植物对重金属污染的耐性存在着基

因型差异,即使同种植物的不同种群分布和生长于不同的环境条件下,由于长期受到不同环境条件的影响,也会发生不同种群之间的差异和分化,形成了不同的生态型^[1]。龙新宪通过野外调查和室内培养实验研究发现,古老铅锌矿土壤和九溪正常土

收稿日期:2012-08-12

基金项目:安徽省教育厅高校省级自然科学重点研究基金资助项目(KJ2009A088)

作者简介:杨金香(1980-),女,辽宁丹东人,讲师,在读博士,主要从事土壤污染及其防治教学和研究工作。

壤上生长的东南景天分别属于不同的生态型,两者对介质中 Zn 的耐性以及 Zn 的吸收和积累都表现出很大的差异。因此研究不同复垦区的木本植物的重金属富集、积累差异,为淮南矿区的土壤环境重金属污染治理、生态恢复重建有着重大的理论意义和现实意义。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域概况

淮南矿区直接采煤沉陷地的总面积为 101.5 km²,已占辖区总面积的 5.1%。矿区利用矸石填充沉陷地已有几十年历史,2005 年以来,淮南矿业集团实施了矿山地质环境治理工程,采用剥离表土,回填矸石,上覆粘土工艺,有计划、有步骤地覆土还田。根据复垦区覆土厚度和种植植被的不同,本次研究选取大通湿地生态区和潘一矿复垦区(大通湿地生态区表面覆土厚度平均 20 cm,潘一矿复垦区覆土深度为 80 cm 左右),两个具有典型代表性的采煤沉陷复垦区开展不同复垦类型木本植物重金属吸收积累差异研究^[2-3]。

1.2 样品采集

在两个复垦区内,筛选长势良好、材积相似(同种树种)的共有木本植物进行采样分析,共筛选采集木本植物树种 3 种,即栒树、高杆女贞和水杉,分别按照根、茎、枝、叶进行采集(其中栒树由于茎过细,为避免采样对其损害,故只采集根、枝、

叶),放入样品袋。土壤样品均匀布点,采集表土约 1 kg,装入塑料自封袋并贴上标签。

1.3 样品的预处理与测试

土壤样品放在置于通风、阴凉、干燥的地方,自然风干。风干后,拣去其中的石块、植物根系等杂物,按四分法的弃去多余部分,保留约 300 g 左右。用玛瑙研钵磨碎,过筛,装入自封袋密封保存。植物样品根据研究目的分部位处理,先用自来水将依附于表面的灰尘、泥土等附着物冲洗掉,再用二次去离子水漂洗两遍,然后自然晾干后用不锈钢刀切碎,称取 200 g 左右于瓷托盘中。在 105 ℃ 杀青 30 min 后,在 50 ℃ 的鼓风箱中烘至恒重。取出碾碎,过 60 目尼龙筛备用。将过筛样品混匀,装在棕色瓶中密封保存,贴标签、编号,以备测定(见表 1,表 2)。

表 1 测试方法

测试项目	测试方法
含水量	烘干法
容重	环刀法
孔隙度	容重换算法
酸碱度	LY/T 1239-1999
Cu、Cr、Zn、Ni	火焰原子吸收分光光度法
有机质	NY/T 1121.6-2006
速效磷	LY/T 1233-1999
速效钾	LY/T 1236-1999
阳离子交换量(CEC)	LY/T 1243-1999
Cd、Pb	石墨炉原子吸收分光光度法

表 2 复垦区土壤理化性质

项目	含水量	容重	孔隙度	pH	有机质	速效钾	速效磷	CEC
复垦区	/%	/(g·cm ⁻³)	/%		/%	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(cmol·kg ⁻¹)
大通	8.33	1.42	47	7.98	1.54	93.77	15.09	11.57
潘一	6.89	1.57	42.11	7.92	1.06	107.28	7.78	15.55

2 结果与分析

为了更好地研究不同复垦区同一树种对重金属吸收积累的差异,去除土壤重金属含量的影响,在数据分析时采用富集系数对每一树种进行比较。

2.1 栒树不同部位对重金属吸收积累的差异

对栒树不同部位重金属富集能力进行多簇分析,结果如图 1 所示。

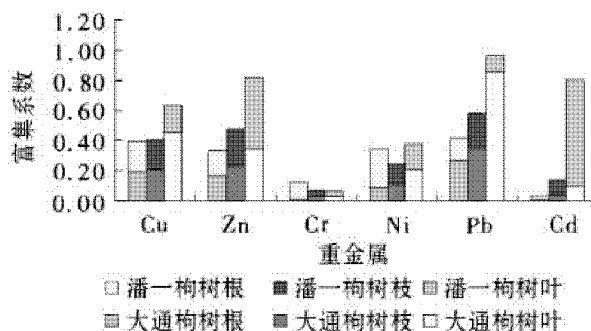


图 1 不同复垦区栒树重金属积累差异

由表1和图1可知,构树在大通生态湿地对重金属的吸收富集能力为: $Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Cr$; 在潘一矿复垦区: $Zn > Cd > Cu > Ni > Pb > Cr$ 。构树在不同复垦区中各个部位对Cu的吸收积累差异:根和枝对Cu的积累富集能力相差不大,叶的富集能力:大通 \gg 潘一,且构树对Cu总富集能力:大通 $>$ 潘一;各个部位对Zn的吸收积累,与Cu相似,根和枝对Zn的富集能力相差不大,但叶的富集能力:潘一 $>$ 大通,所以构树对Zn总富集能力:潘一 $>$ 大通;各个部位对Cr的吸收积累,根的富集能力:潘一 \gg 大通,枝跟叶的积累富集能力相差不大,所以构树对Cr总富集能力:潘一 $>$ 大通;各个部位对Ni的吸收积累,根的富集能力:潘一 \gg 大通,枝的富集能力:潘一 $>$ 大通,叶的富集能力:大通 $>$ 潘一,但相差不大,所以构树对Ni总富集能力:潘一 $>$ 大通;各个部位对Pb的吸收积累,根、枝和叶的富集能力均是:大通 $>$ 潘一,其中叶的富集能力:大通 \gg 潘一,故构树对Pb总富集能力:大通 \gg 潘一;各个部位对Cd的吸收积累,根、枝和叶的富集能力均是:潘一 $>$ 大通,且枝跟叶的富集能力:潘一 \gg 大通,所以构树对Cd总富集能力:潘一 \gg 大通。

2.2 高杆女贞不同部位对重金属吸收积累的差异

根据表1,对高杆女贞不同部位重金属富集能力进行多簇分析,结果如图2所示。

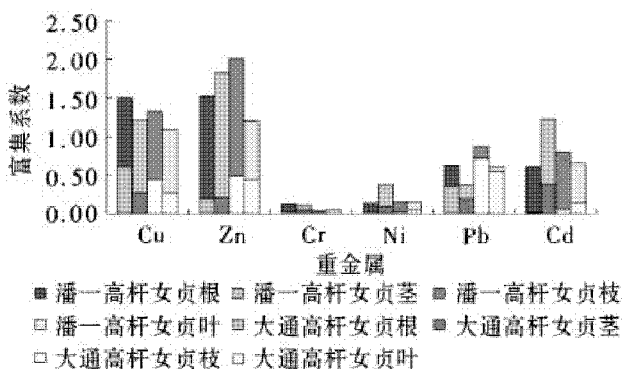


图2 不同复垦区高杆女贞重金属积累差异

根据表1和图2可知,高杆女贞在大通生态湿地对重金属的吸收富集能力为: $Pb > Cu > Zn > Cd > Ni > Cr$; 在潘一矿复垦区: $Zn > Cu > Cd > Pb > Ni > Cr$ 。高杆女贞在不同复垦区中各个部位对Cu的吸收积累差异:根、茎、枝和叶对Cu的积累富集能力均是:潘一 $>$ 大通,且茎、枝和叶的富集能力潘

一是大通复垦区的2~3倍,所以高杆女贞对Cu总富集能力:潘一 $>$ 大通;各个部位对Zn的吸收积累,根、茎、枝和叶对Zn的积累富集能力均是:潘一 \gg 大通,所以高杆女贞对Zn总富集能力:潘一 \gg 大通;各个部位对Cr的吸收积累,根、枝和叶的富集能力:潘一 $>$ 大通,茎的积累富集能力相差不大,所以高杆女贞对Cr总富集能力:潘一 $>$ 大通;各个部位对Ni的吸收积累,根、茎、枝和叶对Ni的积累富集能力均是:潘一 \gg 大通,所以高杆女贞对Ni总富集能力:潘一 \gg 大通;各个部位对Pb的吸收积累,根、茎、枝和叶对Ni的积累富集能力均是:大通 \gg 潘一,故高杆女贞对Pb总富集能力:大通 \gg 潘一;各个部位对Cd的吸收积累,根、茎、枝和叶对Cd的积累富集能力均是:潘一 \gg 大通,所以高杆女贞对Cd总富集能力:潘一 \gg 大通。

2.3 水杉不同部位对重金属吸收积累的差异

根据表1,对高杆女贞不同部位重金属富集能力进行多簇分析,结果如图3所示。

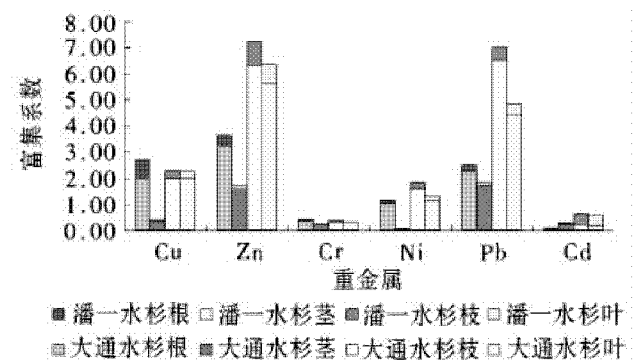


图3 不同复垦区水杉重金属积累差异

表1和图3可知,水杉在大通生态湿地对重金属的吸收富集能力为: $Zn > Pb > Cu > Ni > Cr > Cd$; 在潘一矿复垦区: $Zn > Cu > Pb > Cd > Ni > Cr$ 。水杉在不同复垦区中各个部位对Cu的吸收积累差异:根、茎、枝和叶对Cu的积累富集能力均是:大通 \gg 潘一,所以水杉对Cu总富集能力:大通 \gg 潘一;各个部位对Zn、Cr、Ni和Pb的吸收积累一致,根、茎、枝和叶对其积累富集能力均是:大通 \gg 潘一,所以水杉对Zn、Cr、Ni和Pb总富集能力也均是:大通 \gg 潘一;各个部位对Cd的吸收积累,根、枝和叶对Cd的积累富集能力均是:潘一 \gg 大通,茎的富集能力:大通 $>$ 潘一,但高杆女贞对Cd总富集能力是:潘一 $>$ 大通。

3 结论

根据不同复垦区的不同木本植物吸收、积累重金属特征研究,得出以下结论:

1) 不同的复垦区内,同种木本植物对不同重金属的富集、积累特征不同。其中三种木本植物对重金属 Zn、Cr、Ni、Cd 和 Pb 的吸收富集能力表现一致;而对 Cu 的富集能力表现不一致。这说明由于复垦厚度不同,即复垦类型不同,会影响木本植物的根系生长繁殖,以及底层煤矸石中重金属的解析,从而影响了重金属 Zn、Cr、Ni、Cd 和 Pb 的吸收积累特性。

2) 在复垦区内,构树对重金属 Cu 和 Zn 的吸收富集能力相对较强;高杆女贞对 Cu、Zn 和 Cd 的富集能力相对较强;水杉对 Cu、Zn 和 Pb 的富集能力相对较强。

在木本植物修复技术中,选择物种时,需要考虑修复积累率、修复植物的生物量、重金属的耐性^[8]、植物的种类、生长繁殖、亚细胞结构等特点,以及重金属的存在形态。所以,今后的研究方向应侧重于重金属的存在形态在植物不同生长期和复垦区土壤中的分布特点,为植物修复技术的推广和应用,重金属污染的治理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 龙新宪. 东南景天对锌的耐性和超积累机制研究[D]. 浙江大学, 2002.
- [2] 张治国, 姚多喜, 郑永红. 煤矿塌陷复垦区 6 种菊科植物土壤重金属污染修复潜力研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1 742 - 1 747.
- [3] YANG JINXIANG, ZHANG MINGXU. Migration law of heavy metals in coal gangue. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2011, Vol. 106.
- [4] PUNSHON T, LEPP N W, DICKINSON N M. Resistance to copper toxicity in some British willows [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 52: 259 - 266.
- [5] PULFORD ID, WATSON C. Phytoremediation of heavy metal - contaminated land by trees - a review [J]. *Environment International*, 2003, 29: 529 - 540.
- [6] GRANEL T, ROBINSON B, MILLS T, et al. Cadmium accumulation by willow clones used for soil conservation, stock fodder, and phytoremediation [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(8): 1 331 - 1 337.
- [7] YANG JINXIANG, ZHANG ZHIGUO, CHEN YONGCHUN, et al. The Study on Soil Improvement by Greening Tree Species in Coal Mine Reclamation Area, *Proceedings of the 3RD International Conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer*, 5: 221 - 224 (2010).
- [8] LASAT MM. Phytoretraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues [J]. *Journal of Hazardous Substance Research*, 2000, 2(5): 1 - 22.
- [9] UTMASIAN MNDS, WENZEL WW. Cadmium and zinc accumulation in willow and poplar species grown on polluted soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(2): 265 - 272.
- [10] VANDECASTEE LE B, MEERS E, VERVAEKE P, et al. Growth and trace metal accumulation of two *Salix* clones on sediment - derived soils with increasing contamination levels. *Chemosphere*, 2005, 58: 995 - 1 002.
- [11] 魏树, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 65 - 72.
- [12] MEUL M, VAN MEIRVENNE M. Kriging soil texture under different types of nonstationarity [J]. *Geoderma*, 2003, 112(3): 217 - 233.
- [13] WU J, NORVELL WA, HOPKINS DG, et al. Improved prediction and mapping of soil copper by kriging with auxiliary data for cation exchange capacity [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67(3): 919 - 927.
- [14] ANDRONIKOV SV, DAVIDSON DA, SPIERS RB. Variability in contamination by heavy metals: Sampling implication [J]. *Water Air Soil Poll*, 2000, 120(1): 29 - 45.
- [15] CATTLE J A, McBrantney A B, Minasny B. Kriging method evaluation for assessing the spatial distribution of urban soil lead contamination [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 1576 - 158.

(责任编辑: 姚多喜, 李 丽)

微波辅助提取芦荟多糖的研究

安胜欣, 王纪纪, 唐小琼, 章宏俊, 黄显清

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 将微波辅助提取技术应用于芦荟中水溶性多糖的提取, 寻求最佳提取工艺。采用单因素和正交试验, 分别考察了微波辐照时间、微波功率、液料比、提取 pH 四个因素对芦荟多糖提取率的影响。试验结果表明, 最佳提取条件为微波时间 120 s, 料液比为 1:30 (g/mL), 微波功率 455 W, 提取液 pH11.00, 在此时条件下提取率为 3.421%。

关键词: 芦荟; 芦荟多糖; 微波辅助提取; 正交试验

中图分类号: R284.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0037-04

Study on the Microwave – assistant Extraction of Aloe Polysaccharide

AN Sheng – xin, WANG Ji – ji, TANG Xiao – qiong, ZHANG Hong – jun

HUANG Xian – qing

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

Abstract: To apply the microwave – assistant extraction (MAE) to extracting the water – soluble polysaccharide of aloe and search for the optimum extraction process. The effects of microwave time, microwave power, the ratio of solid to liquid and extraction liquid pH on recovery of aloe polysaccharide were investigated by single factor and orthogonal design methods. The results showed the optimal conditions were microwave time 120 s, ratio of solid to liquid 1:30 (g/mL), microwave power 455 W, extraction liquid pH 11.00, by which the extraction rate of aloe polysaccharide reached 3.421%.

Key words: aloe; aloe polysaccharide; microwave – assistant extraction (MAE); orthogonal test

芦荟是百合科多年常绿肉质草本植物, 是一种天然药用植物。芦荟的化学成分十分复杂, 主要含有蒽醌类化合物、多糖、有机酸、氨基酸、多肽、多种微量元素等有效化学成分^[1]。其中芦荟多糖是芦荟中主要的生理活性成分之一, 是芦荟的主要药用和保健成分, 具有提高生物体免疫力、抗癌、抗肿瘤、抗糖尿病和抗衰老等功效^[2-9]。微波辅助提取技术, 是近年来发展起来的一种新方法。与传统方法相比, 具有提取速度快、提取率高、需要溶剂量少、操作简单等优点^[10-11], 已被应用于多种植物成分的提取。近年来在药用多糖提取方面也引起了研究者的关注。本文利用微波辅助提取的方法从

芦荟中提取多糖, 考察了微波功率、料液比、提取液 pH、提取时间等单因素对提取率的影响, 并通过正交实验选出了芦荟多糖的最佳提取条件。

1 材料和仪器

微电脑微波化学反应器 LWMC – 201 (南京陵江科技开发有限责任公司)、UV – 1600 紫外分光光度计 (北京瑞利分析仪器公司)、FA 2004N 电子天平 (上海精密科学仪器有限公司)。葡萄糖标准品 (中国食品药品检定研究所); 芦荟购于安徽亳州药材大市场; 其他均为分析纯。

收稿日期: 2012 – 07 – 13

基金项目: 安徽理工大学青年教师基金资助项目

作者简介: 安胜欣 (1979 –), 女, 河北保定人, 讲师, 硕士, 从事生物化学和天然产物提取方面的研究。

2 方法和结果

2.1 芦荟多糖的测定

2.1.1 对照品溶液的制备 精确称取 105℃ 烘干至恒重的葡萄糖 103.8 mg, 加水溶解并定容于 100 mL 容量瓶中。精密移取上述溶液 10 mL, 置于 100 mL 容量瓶中, 定容, 即得 0.103 8 mg/mL 的葡萄糖对照品溶液。

2.1.2 葡萄糖标准曲线的制作^[12] 分别取葡萄糖对照品溶液 0.00 mL、0.20 mL、0.40 mL、0.60 mL、0.80 mL、1.00 mL、1.20 mL 于比色管中, 加水补至 2.0 mL, 向各管加入 5% 重蒸苯酚 1 mL, 充分振荡摇匀后, 迅速加入浓硫酸 5 mL, 摇匀后放置 5 min, 置沸水浴中加热 15 min, 取出后迅速冷却至室温, 利用在浓硫酸作用下, 多糖水解成单糖, 并迅速脱水形成糠醛衍生物, 然后与苯酚缩合反应显色, 于 490 nm 处测定各溶液的吸光度。以吸光度 A 对质量浓度 C (mg/mL) 进行线性回归, 得回归方程: $C = 0.1474A - 0.0066$ ($r = 0.9990$)。

2.2 芦荟多糖提取工艺

称取经预处理的芦荟粉 5 份, 每份质量约 2 g 左右, 按照一定的液固比量取一定量的提取液(即具有不同 pH 的蒸馏水)于锥形瓶中, 置于微波反应器中, 在预设的微波功率下分别辐照处理一定时间, 趁热抽滤, 滤液浓缩后于 100 mL 容量瓶定容。吸取 5 mL 溶液置于 100 mL 烧杯中, 加入 4 倍体积的无水乙醇沉淀, 封口, 静置 4 h。将上述乙醇、多糖混合物离心, 所得沉淀依次用无水乙醇、石油醚、丙酮洗涤, 即得芦荟粗多糖。

2.3 芦荟多糖提取率的测定

将提取的多糖粗品处理后, 精密移取多糖溶液 2 mL 于试管中, 加入 5% 重蒸苯酚试液 1 mL 充分振荡摇匀后, 迅速加入浓硫酸 5 mL, 混匀, 摇匀后放置 5 min, 置沸水浴中加热 15 min, 取出后迅速冷却至室温, 于 490 nm 处测定吸光度。计算芦荟多糖的提取率。

$$GA\% = \frac{C \times V \times D}{W \times 10^3} \times 100$$

式中: C 为芦荟多糖的质量浓度, mg/mL; V 为芦荟粗多糖溶液体积, mL; D 为芦荟粗多糖溶液的稀释倍数; W 为芦荟样品干重, g; $GA\%$ 为芦荟多糖的提

取率。

2.4 单因素对微波提取效果的影响

考察各因素如微波提取时间、微波功率、料液比、提取液 pH 对多糖提取率的影响。

2.4.1 微波时间对多糖提取率的影响 预处理芦荟粉按料液比 1:25 (g/mL) 加入 pH5.30 的提取液浸泡 45 min, 在微波功率 325 W 条件下分别作用 30 s、60 s、90 s、120 s、150 s, 处理后计算多糖提取率(见图 1)。

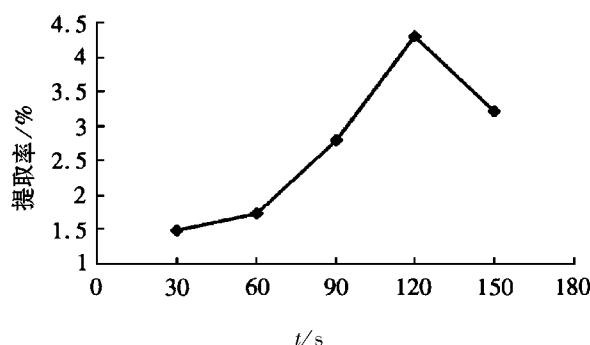


图 1 微波时间对多糖提取率的影响

由图 1 可见, 芦荟多糖提取率随微波时间的变化规律是先上升而后下降, 微波作用时间为 120 s 时候, 芦荟多糖的提取率达到最大值。其原因可能是: 微波时间越长, 多糖类化合物溶出的越多, 测定值越大。当提取时间为 120 s 以后, 可能由于多糖的热稳定性不好导致多糖的分解使多糖提取率下降。另外, 随着微波时间的延长细胞进一步破裂导致杂质也增多。因此, 选择提取时间 120 s 为最佳时间。

2.4.2 微波功率对多糖得率的影响 预处理芦荟粉按料液比 1:25 (g/mL) 加入 pH5.30 的提取液浸泡 45 min, 分别在微波功率为 260 W、325 W、390 W、455 W、520 W 作用下 120 s, 处理后计算多糖提取率(见图 2)。

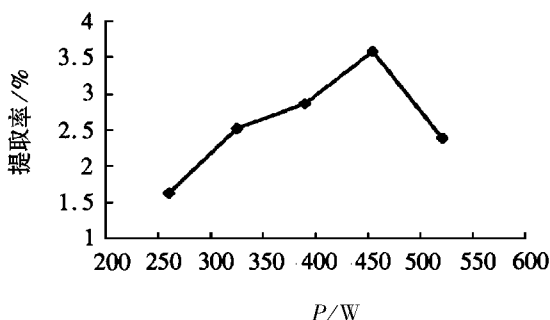


图 2 微波功率对多糖提取率的影响

从图2看出,微波功率为260 W~455 W时,随着微波功率增加,加热速率增大,分子运动速度加快,提取率逐渐增大,当微波功率为455 W时,提取率最高。微波功率继续增加时提取率反而降低,可能是由于微波功率的升高,温度也随之升高,引起了多糖类化合物损失而造成的。

2.4.3 料液比对多糖得率的影响 预处理芦荟粉分别按1:20、1:25、1:30、1:35、1:40的料液比(g/mL)加入pH5.30的提取液浸泡45 min,在微波功率455 W下作用120 s,处理后计算多糖提取率(见图3)。

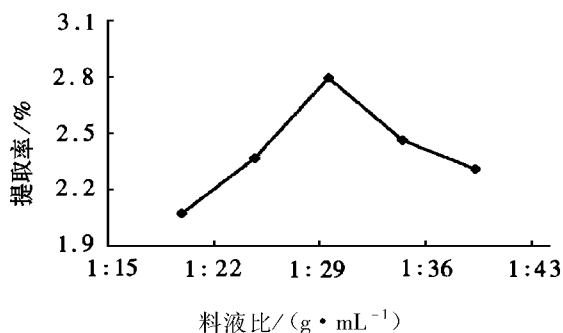


图3 料液比对多糖提取率的影响

由图3可知,料液比为1:20~1:30时,多糖提取率随料液比增加而增大,当料液比为1:30时,提取率达到最大。当料液比再增加时,多糖的提取率反而有所下降。原因可能是随着料液比的增加,提取液对微波能的吸收增加,导致细胞液对微波能吸收减少,细胞壁的破裂不完全。另外,过大的料液比使后期的浓缩等工序耗时、耗能较大,因此实验选取料液比1:30。

2.4.4 提取液pH对多糖得率的影响 预处理的芦荟粉按料液比1:30(g/mL)加入pH为2.99、5.02、7.02、9.08、11.00的提取液浸泡45 min,在微波功率455 W下作用120 s,处理后计算多糖提取率(见图4)。

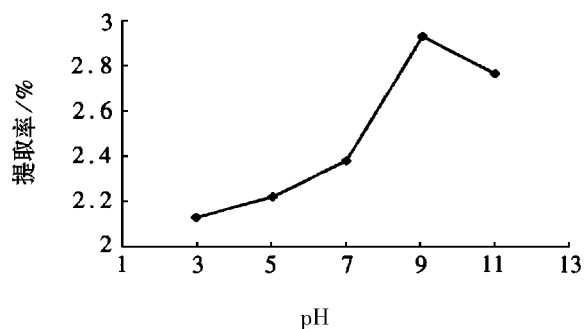


图4 提取液pH对多糖提取率的影响

由图4可知,在酸性条件下,多糖提取率较低,这可能是由于多糖中的糖甙键在酸性条件下容易水解,在提取过程中部分多糖水解造成的。随着pH的升高,多糖提取率上升,说明在碱性条件下有利于多糖的提取。

2.5 正交实验设计

在单因素考察的基础上,为进一步考察各种因素影响的显著性以及得出微波提取的最佳工艺条件,选取微波时间、提取液pH、微波功率和料液比四个因素,根据表L₉(3⁴)进行4因素3水平正交试验(见表1),数据平行2次测定。

表1 因素和水平

	A	B	C	D
	微波时间 /s	pH	微波功率 /W	料液比/ (g·mL ⁻¹)
1	90	7.02	390	1:25
2	120	9.08	455	1:30
3	150	11.00	520	1:35

以芦荟多糖提取率为考察指标,采用4因素3水平正交试验方案安排实验,对提取工艺进行优化(见表2)。

表2 试验设计与计算结果

试验号	A	B	C	D	提取率/%
1	1	1	1	1	2.784
2	1	2	2	2	3.370
3	1	3	3	3	2.839
4	2	1	2	3	3.414
5	2	2	3	1	3.016
6	2	3	1	2	3.289
7	3	1	3	2	2.898
8	3	2	1	3	3.027
9	3	3	2	1	3.333
K1	8.993	9.096	9.100	9.133	
K2	9.719	9.413	10.117	9.557	
K3	9.258	9.461	8.752	9.280	
k ₁	2.997	3.032	3.033	3.044	
k ₂	3.239	3.137	3.372	3.185	
k ₃	3.086	3.153	2.917	3.093	
R	0.726	0.365	1.365	0.424	

根据结果,运用正交设计的均值与极差分析微波功率、微波时间、提取液 pH 和料液比对芦荟多糖提取率的影响。极差分析表明:各因素对芦荟多糖提取率的影响主次顺序为: C > A > D > B, 即微波功率 > 微波时间 > 料液比 > 提取液 pH。均值分析表明,最佳工艺条件组合 $C_2A_2D_2B_3$, 即微波功率为 455 W、提取时间 120 s、料液比为 1:30、提取液 pH 为 11.00。因其最佳组合不在试验设计中,故需要做验证试验。按照最佳组合条件提取 3 次,得到芦荟多糖的提取率为 3.421%。

3 结论

1) 微波是一种超高速电磁波,具有很强的穿透作用,可以使植物细胞中的水分或有机溶剂迅速升温、升压,细胞壁穿孔,使成分从细胞中溶出。采用微波辅助提取,时间短、节能,操作方便。

2) 以提取率为试验指标,采用直观极差分析,确定了影响微波法提取芦荟多糖含量的主次因素为:微波功率 > 微波时间 > 料液比 > 提取液 pH。用正交试验得出微波提取芦荟多糖的最佳提取条件为:在微波功率为 455 W、提取时间 120 s、料液比为 1:30、提取液 pH 为 11.00,在此条件下芦荟多糖提取率达到 3.421%。

参考文献:

- [1] 陈国和,刘玉鑫,张新申,等. 芦荟的化学成分及其分离和分析[J]. 化学研究与应用,2002,14(2):133-136.
- [2] HU Y, YANG FM, HU QH, et al. New developments of bioactivity ingredients and its functions in aloe [J]. Food Science, 2003,24(6):158-161.
- [3] LI Y, LU Y. New developments used in medicine of aloe [J]. Chinese Journal of Drug Application and Monitoring, 2005(5):27-29.
- [4] 张方乐,方敏,王耀峰,等. 芦荟多糖的提取和体外抗氧化活性研究[J]. 粮油加工,2009(1):113-115.
- [5] 马欢杰. 多糖类抗肿瘤作用的研究进展[J]. 海峡药学,2010,22(2):102-104.
- [6] LI HZ, HU SL, LIU MC, et al. Effects and mechanisms of aloe on cell death in human lung squamous cell cancer[J]. European Journal of Pharmacology, 2001, 431(2):287-295.
- [7] 苗艳艳,禄保平. 芦荟多糖对肝癌细胞及外周血单个核细胞作用的研究[J]. 河南中医学院学报,2007, 22(3):17-18.
- [8] 吴广枫,汤坚. 芦荟多糖的纯化与体外抗氧化活性的研究[J]. 食品科学,2002,23(9):129-132.
- [9] 皮文霞,丁辉,程爱斌,等. 芦荟多糖的纯化工艺与体外抗肿瘤活性[J]. 中国天然药物,2007,59(6):425-427.
- [10] 张自萍. 微波辅助提取技术在多糖研究中的应用[J]. 中草药,2006,37(4):630-632.
- [11] 刘梅,米莹. 微波提取在中药领域的应用进展[J]. 天津药学,2009,21(5):62-64.
- [12] 马稳,袁红霞. 微波辅助提取芦荟中芦荟多糖的研究[J]. 食品科技,2008,33(9):162-164.

(责任编辑:何学华,范 君)

煤矿塌陷地不同复垦方式下土壤呼吸特征

赵 魁¹, 张治国^{1,2}, 杨 清¹, 安士凯², 张文影¹

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南煤炭工程技术研究院生态环境研究室, 安徽 淮南 232001)

摘 要:采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统, 测定淮南市大通煤矿塌陷地两种复垦区(煤矸石充填、化工垃圾充填)及非复垦对照区典型植被下土壤呼吸强度, 研究不同复垦方式下非生长季土壤 CO₂ 排放特征。结果表明土壤呼吸强度大小依次为: 煤矸石复垦区 < 化工垃圾复垦区 < 对照区, 两复垦区与对照区相比土壤呼吸差异均显著, 但两复垦区间土壤呼吸强度差异不明显; 各区土壤呼吸的主导因素不同, 煤矸石复垦区的显著影响因子是土壤温度, 化工垃圾复垦区的显著影响因子是土壤温度和空气湿度, 复垦区整体土壤呼吸受气温影响显著, 将复垦区整体对气温作曲线拟合, 得到的二次方程可以解释 69.1% 的土壤呼吸变异。

关键词:煤矿; 复垦方式; 土壤呼吸

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0041-05

Soil Respiration Characteristics of Different Reclamation Mode in Collapsed Coal Mine Area

ZHAO Kui¹, ZHANG Zhi-guo^{1,2}, YANG Qing¹
AN Shi-kai², ZHANG Wen-ying¹

(1. School of Earth Science and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China; 2. Department of Ecology and Environment, Coal Engineering Technology Research Institute, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Soil respiration intensity of typical vegetation types was measured in two reclamation areas (Coal gangue filling, chemical waste filling) of the Subsided Datong Coal Mining Area and the control area in Huainan with Li-8100 carbon flux recorder, characteristics of soil respiration in different reclamation areas in non-growing season were researched. The results indicated that the order of the soil respiration rate displayed from inferior to superior was Gangue Reclamation Area, Chemical Garbage Reclamation Area and Control Area, Analysis of variance showed that soil respiration intensity of two reclamation areas and that of the control area was significantly different, but the soil respiration intensity between the two reclamation areas was of no obvious; The dominant factors of soil respiration in each area are different: the significant impact factor of Coal gangue filling area is soil temperature, and that of chemical waste filling area are soil temperature and the relative humidity of the air, the soil respiration of the whole reclamation area affected by temperature is remarkable. Merging the two reclamation areas, the best fitting curve of the whole reclamation area was quadratic equation, which can explain the 69.1% of soil respiration.

Key words: Coal mine; reclamation mode; soil respiration

收稿日期: 2012-06-04

基金项目: 淮南矿业集团 2011 年科学技术资助项目

作者简介: 赵魁(1986-), 男, 河南新乡人, 在读硕士, 从事土壤碳循环研究。

土壤是陆地生态系统第一大碳库载体^[1],土壤呼吸的研究对探寻陆地生态系统碳循环机理具有重要的价值。煤矿塌陷复垦区土壤与自然土壤在理化性质等方面具有很大的差别,不同的复垦区土壤修复所采用的植被也有不同,这都有可能使土壤的呼吸强度出现大的差异,以致原本是碳汇的土壤-植被系统变成碳排放的源。近年来研究发现,非生长季土壤呼吸占年土壤呼吸量的14%~30%,是全年碳收支的重要组成部分^[2-4],显著地影响着生态系统碳平衡。因此,复垦区非生长季土壤呼吸的研究对于明晰矿区修复区生态系统中土壤碳的源汇效应、优化区域和全球的碳循环模型、预测生态系统对全球变化的响应具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大通生态修复区地处淮南市东部(N32°37', E117°01'),是对原泉大资源枯竭矿区进行生态环境修复后所形成的生态示范区,暖温带气候,年平均气温15.3℃,年降水量918mm,塌陷区的复垦方式有两种:煤矸石填埋复垦和化工垃圾填埋复垦,覆土为黄棕壤,质地为粘壤土,土壤有机质为1%~2%,pH为7.74±0.21,速效钾373.26±351.68mg/kg,较为丰富,速效磷为4.95±3.03mg/kg,较为缺乏,优势修复植被为香樟、桂花、紫穗槐、石楠、草地,复垦区西侧有非复垦区绿化带,土壤类型及优势植被类型与两复垦区相同。

1.2 试验设备

美国LI-COR公司设计制造的LI-8100自动土壤CO₂流量系统,RHD-07空气温湿度计等。

1.3 试验设计与数据处理

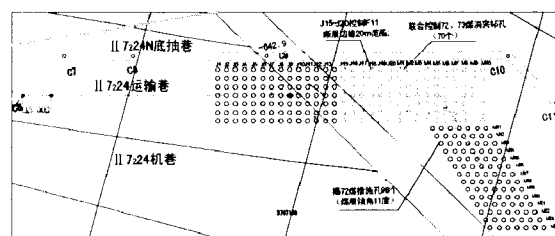
将大通塌陷复垦区划分为煤矸石复垦区(A区)及化工垃圾复垦区(B区),AB组合区即为整个大通塌陷复垦区,同时以西侧非复垦绿化区(C区)作为对照,依植被在各区选取六个点(香樟、桂花、紫穗槐、石楠、草地、裸地),于2011年11月~2012年1月测定各植被类型下土壤呼吸强度,土壤10cm处温湿度,地表20cm处空气温湿度,每月测一次,每次均测昼夜变化,测定时间为8:00,12:00,16:00,20:00,0:00,4:00,并于各样点采集0~10cm处土样,带回实验室测其理化性质。

本研究的数据统计分析及作图采用SPSS 19.0及Excel 2007软件。

2 结果与分析

2.1 不同复垦区的土壤呼吸强度比较

A、B、C三区的土壤呼吸强度的平均值分别为(0.78±0.22),(0.79±0.28)和(0.95±0.27)μmol·m⁻²·s⁻¹,其大小依次为A区<B区<C区(见图1)。三个区的土壤呼吸强度的差异显著(P<0.05),LSD多重比较发现A区与C区,B区与C区的差异均显著(P<0.05);A区与B区差异不显著(P>0.05)。由于三个区的土壤质地及植被类型相似,又处于同一气候条件下,因此,可以理解为土壤呼吸强度的差异是土壤复垦所致,但复垦方式对土壤呼吸强度差异的贡献不大。土壤呼吸主要是土壤微生物及植物根部的呼吸^[5],土壤复垦使原有的土壤条件受到不同程度的扰动,引起土壤微生物活性的改变,从而导致土壤呼吸强度的差异,而复垦方式相对于复垦本身对土壤呼吸的影响小得多,因而两种复垦方式下的土壤呼吸强度并无显著差异,本研究中,土壤复垦破坏了原有的土壤微生物活性,致使复垦区的土壤呼吸强度长期低于非复垦对照区。



试验区域

a, b 表示在 0.05 水平上差异。

A. 煤矸石充填区; B. 化工垃圾充填区; C. 非复垦对照区

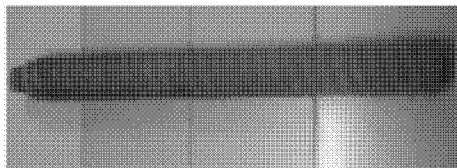
图1 各试验区土壤呼吸强度的均值比较

2.2 土壤呼吸强度及环境影响因子的变化

A、B、C三个区土壤呼吸强度昼夜变化明显,但都呈非对称的单峰曲线形式(见图2),三区最高值均出现在11:00~13:00之间,分别为0.95、0.96、1.27μmol·m⁻²·s⁻¹;最低值均出现在4:00~6:00之间,分别为0.68、0.66、0.83μmol·m⁻²·s⁻¹,这种昼夜变化趋势与大兴安岭白桦林、杂木林、落叶松三种不同林分的土壤呼吸强度及高原草甸土壤呼吸强度昼夜动态基本一致^[6-7]。

A、B、C 三个区的土壤温度也均呈非对称单峰曲线型式(见图3),自8:00开始升高,到13:00左右达到高峰,分别为3.65℃、5.33℃、5.16℃,之后持续下降,4:00~6:00达到最小值,分别为2.65℃、4.45℃、4.01℃,且三个区的的变化趋势一致,最大值和最小值与土壤呼吸强度有相同的时间区间;土壤10 cm处的湿度24 h内基本没有变化(见图4);地表20 cm处空气的温度和土壤呼吸强度有相同的昼夜变化趋势,13:00左右达到最大值,A、B、C区最大值分别为6.24℃、6.28℃、6.59℃(见图5);地表20 cm处空气的相对湿度与土壤呼吸强度则有相反的变化趋势(见图6)。

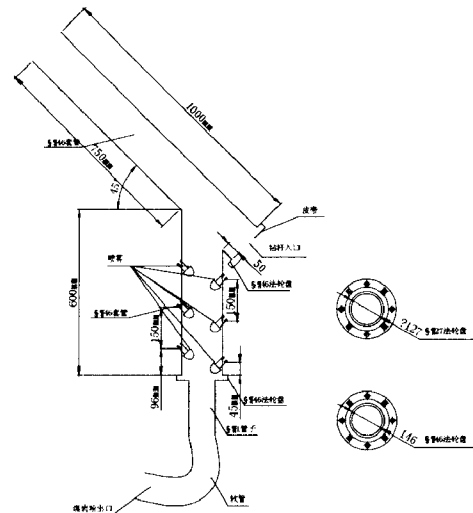
土壤温度和空气温度与土壤呼吸强度的变化较为一致,空气湿度与土壤呼吸强度的变化趋势相反,土壤湿度与土壤呼吸强度的变化关系不明显,这可能是由于土壤微生物及植物根部的代谢受土壤温度的影响,而土壤温度又受气温和空气湿度的制约,因而均和土壤呼吸强度构成不同程度的相关关系。



测定时间

1. 煤矸石充填区;2. 化工垃圾充填区;3. 非复垦对照区

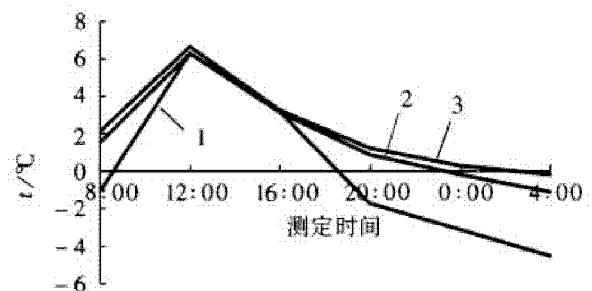
图3 各实验区土壤10 cm温度的昼夜变化



测定时间

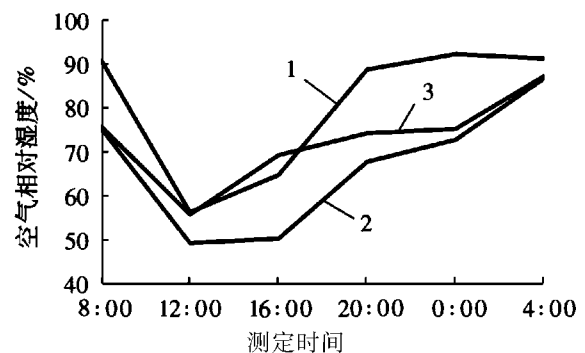
1. 煤矸石充填区;2. 化工垃圾充填区;3. 非复垦对照区

图4 各实验区土壤10 cm湿度的昼夜变化



1. 煤矸石充填区;2. 化工垃圾充填区;3. 非复垦对照区

图5 各实验区20 cm空气温度的昼夜变化



1. 煤矸石充填区;2. 化工垃圾充填区;3. 非复垦对照区

图6 各实验区20 cm空气湿度的昼夜变化

2.3 土壤呼吸强度的影响因素

有研究表明,土壤呼吸强度与大气温度、土壤温度有较好的指数相关性^[8-9],也有研究显示土壤呼吸强度与土壤湿度呈显著的线性相关^[10],为探讨三个试验区土壤呼吸强度的显著影响因子,分别对各区的土壤呼吸强度,土壤温度,土壤湿度,空气温度及空气湿度做 Pearson 相关分析,结果如表1

所示。

表 1 土壤呼吸强度与影响因子的 Pearson 相关分析

	影响因子	<i>R</i>	<i>P</i>
A 区	土壤温度	0.975 **	0.000
	土壤湿度	0.449	0.186
	空气温度	0.850 *	0.016
	空气湿度	-0.870 *	0.012
B 区	土壤温度	0.983 **	0.000
	土壤湿度	-0.317	0.270
	空气温度	0.888 *	0.009
	空气湿度	-0.837 *	0.019
C 区	土壤温度	0.843 *	0.017
	土壤湿度	-0.502	0.155
	空气温度	0.951 *	0.002
	空气湿度	-0.858 *	0.014
AB 组合区	土壤温度	0.481	0.057
	土壤湿度	-0.029	0.465
	空气温度	0.776 **	0.001
	空气湿度	-0.759 *	0.002

注: ** 和 * 分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平的显著差异。

各区的土壤呼吸强度除与土壤湿度相关性不显著外,与土壤温度、空气温湿度均呈显著相关,其

中 A 区、B 区、AB 区与土壤温度均呈极相关。为了避免由于各因子之间的自相关而导致土壤呼吸强度与某变量间的假相关,分别以各区的土壤呼吸强度为因变量,以各区与土壤呼吸强度相对应的土壤温度、土壤湿度、空气温度、空气湿度为自变量,做逐步回归分析,结果如表 2 所示。

A 区仅有土壤温度进入线性方程,说明土壤温度是影响 A 区土壤呼吸强度的主要因素,其可以解释土壤呼吸强度变异的 95.1%; B 区进入线性方程的因素有土壤温度和空气湿度,其共同解释土壤呼吸的 98.8%; 影响 C 区土壤呼吸强度的主要因素是空气温度,其可解释 C 区土壤呼吸强度的 90.4%; 由于煤矸石复垦区与化工垃圾复垦区的土壤呼吸强度差异不显著,故可将复垦区的土壤呼吸强度对各因素逐步回归,进入方程的因素为空气温度,其可解释复垦区土壤呼吸强度的 60.2%。有研究表明,只有在水分胁迫时,土壤呼吸强度才与土壤湿度显著相关^[11],本试验区土壤体积含水率在 20% 左右,含水率较大,使二者相关性不显著。空气温度决定了土壤的温度,并影响空气湿度的变化,最终通过影响土壤微生物及植物根系的活性对土壤呼吸强度起到了决定性作用。

表 2 各区土壤呼吸强度对影响因子的逐步回归

	逐步回归进入方程的因子	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整的 <i>R</i> ²	线性方程	<i>P</i>
A 区	土壤温度	0.975	0.951 **	0.939	$y = 0.016x + 0.056$	0.001
B 区	土壤温度、空气湿度	0.996	0.993	0.988 *	$y = 0.681x_1 + 0.004x_2 - 2.774$	0.044
C 区	空气温度	0.951	0.904 *	0.880	$y = 0.063x + 0.816$	0.004
AB 组合区	空气温度	0.776	0.602 *	0.563	$y = 0.027x + 0.766$	0.003

注: x 为进入方程的变量; x_1 为土壤温度, x_2 为空气湿度; ** 和 * 同表 1。

线性模型对变量间的相关关系的揭示未必是最明确的,为进一步探讨复垦区土壤呼吸强度更为

显著的模型,将复垦区土壤呼吸强度对其显著影响因素空气温度进行曲线拟合,结果如表 3 所示。

表 3 复垦区土壤呼吸强度与空气温度的拟合曲线

	<i>R</i>	<i>R</i> ²	拟合方程	<i>P</i>
线性	0.776	0.602 *	$y = 0.776 + 0.027x$	0.034
指数方程	0.760	0.578 *	$y = 0.759e^{0.033x}$	0.004
等比级数曲线	0.760	0.578 *	$y = e^{(0.003x - 0.275)}$	0.004
复合曲线	0.760	0.578 **	$y = 0.759 \times 1.003^x$	0.000
三次方程	0.848	0.720	$y = 0.729 + 0.032x + 0.005x^2 - 0.001x^3$	0.077
二次方程	0.831	0.691 *	$y = 0.737 + 0.02x + 0.003x^2$	0.034

注: x 为空气温度; ** 和 * 同表 1。

由表3可以看出,最佳拟合方程为二次方程,其可以解释土壤呼吸强度变异的69.1%;其次为线性方程,可以解释土壤呼吸强度的60.2%;再次是指数方程、等比级数方程以及复合曲线模型,均可解释土壤呼吸强度变异的57.8%。

3 结论

1) A、B两复垦区土壤呼吸强度差异不显著,且均与非复垦对照区C有显著差异,三区的土壤呼吸强度大小依次为:煤矸石复垦区<化工垃圾复垦区<对照区。土壤复垦破坏了土壤原有的微生物活性,致使其土壤呼吸强度低于甚至长期低于非复垦对照区,而复垦方式相对于复垦本身对土壤呼吸的影响小得多。

2) 土壤温度、空气温度、空气相对湿度及土壤呼吸强度的昼夜变化均呈非对称单峰曲线形式,而土壤湿度昼夜间基本无变化,土壤温度、空气温度与土壤呼吸强度的昼夜变化正向同步,空气湿度和土壤呼吸强度的变化趋势则正好相反。

3) 即便是在小尺度范围内,土壤呼吸强度的主导因素也不同,煤矸石复垦区土壤呼吸强度主要受土壤温度的影响,化工垃圾复垦区土壤呼吸强度的显著影响因子则是土壤温度和空气湿度,而复垦区整体上则受气温影响最大,复垦区土壤呼吸强度与气温的二次曲线具有最佳的拟合度,其可以解释大通复垦区土壤呼吸强度的69.1%。

参考文献:

- [1] THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC 1992 emission scenarios [R]. Cambridge University Press, 1995.
- [2] MARIKO S, NISHIMURA N, Mo W, et al. Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool-temperate deciduous forest, Japan [J]. Ecological Research, 2000, 15 (4): 363-372.
- [3] HUBBARD R M, RYAN M G, ELDER K, et al. Season patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forest [J]. Biogeochemistry, 2005, 73 (1): 93-107.
- [4] 王妮,汪涛,方精云,等. 冬季土壤呼吸:不可忽视的地气CO₂交换过程[J]. 植物生态学报,2007,31 (3): 394-402.
- [5] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20 (7): 778-783.
- [6] 李勇,刘继明,秦世立,等. 大兴安岭三种林分夏季土壤呼吸的日变化[J]. 东北林业大学学报,2011, 39 (10): 65-80.
- [7] CAO G M, TANG Y H, MO W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36 (2): 237-243.
- [8] 牟守国,董霁红,王辉,等. 采煤塌陷地充填复垦土壤呼吸的研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36 (5): 663-667.
- [9] 彭少麟,李跃林,任海,等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展,2002,17 (5): 705-713.
- [10] 邹建文,黄耀,宗良纲,等. 稻田CO₂、CH₄和N₂O排放及其影响因素[J]. 环境科学学报,2003,23 (6): 758-764.
- [11] WANG Y S, HU Y Q, JI B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland [J]. Advances in Atmospheric Science, 2003,20 (1): 119-127.

(责任编辑:何学华,范 君)

煤矿带式输送机启动控制方式的探讨

姜筱瀛

(煤炭工业合肥设计研究院, 安徽 合肥 230041)

摘要:对井下长距离、大运量、多滚筒驱动的带式输送机的启动控制方式进行了分析,在比较调压式软启动器、液力耦合器、CST可控软启动器等常见带式输送机启动器的基础上,提出使用高压变频器对皮带机实现变频启动、自动调速及控制,可显著节约电能,降低胶带输送机系统的设备损耗,延长皮带使用寿命。对高压变频器提出使用中心点钳位型三电平逆变器,可使输出电压波形更接近正弦波,谐波失真更小,使带式输送机的启动控制更加平滑。

关键词:带式输送机;软启动器;高压变频器;三电平

中图分类号:TD712.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1098(2012)03-0046-04

Discussion on Starting Control Mode of Belt Conveyor for Coal Mines

JIANG Xiao - ying

(Hefei Design Research Institute for Coal Industry, Hefei Anhui 230041, China)

Abstract: The start control of long distance, large transport capacity and multi - drum belt conveyor was analyzed. On the basis of comparison among voltage - tuning soft starter, hydraulic coupler, CST controllable soft starter and so on, the method that high voltage inverter is used to variable frequency starting, automatic speed regulation and control was proposed. This method can greatly save energy, reduce the loss and prolong the service life of the belt conveyor system. The application of the three - level neutral point clamped inverter can make the output voltage waveform closer to the sinusoidal waveform and reduce more harmonic distortion, so that the start control can be more smooth.

Key words: belt conveyor; soft starter; high voltage inverter; three - level

随着煤矿生产技术的不断发展,装备自动化水平的不断提高,煤炭产量也大幅增长,长距离、大运量、多滚筒驱动的带式输送机在煤炭运输系统中的应用日益广泛,是现代化煤矿高产高效的主要运输设备之一,如何解决煤矿皮带机系统传动效率低、启动电流大,对电网冲击及机械设备冲击大、功率不平衡、维护成本高等问题,是带式输送机系统设计中必须考虑的问题,而矿井生产条件的特殊性,使带式输送机时常处于轻载或无负载,且由于生产的需要,运输系统不能随时停车,因此,选择合适的启动方式,采用先进的调速技术,对矿井安全

生产、节能降耗,提高生产效率和经济效益具有重要的意义。

1 带式输送机常用启动控制方式

1.1 软启器

软启动器由三组反并联大功率晶闸管及其电子控制电路组成,并由速度反馈和电流反馈组成闭环调节系统,通过调节晶闸管导通角控制负载的初始电压,逐步控制加在电机上的电压和电流,平滑地增加电机转矩,当负载电机转速达到额定转速

时,通过旁路接触器短接晶闸管软启动器,使电机全压运行。其优点是电机启动平滑,可以降低电机的启动冲击电流,减少对电网和电机自身的冲击以及电机启动时对皮带的动张力,延长皮带使用寿命。缺点为不能调节电源频率,重载时往往不能启动,不能调速。

1.2 液力耦合器

液力耦合器是一种利用液体介质传递转速的机械设备,通过调节液体介质的压力,使输出轴的转速得以改变。其优点是结构简单、操作方便,对环境要求不高,价格便宜,多台电机驱动时,可逐台延时启动,可靠性较高。缺点是电动机必须空载启动,工频启动时启动电流很大,对皮带机带强要求较高,多点驱动时功率平衡不好控制,调速范围窄,能量转换效率低,损耗大,大容量电机还需附加电机软启动装置。

1.3 CST 可控软启动器

CST 减速器是一种带有电液反馈控制的齿轮减速器,由减速器、CST 电液控制元件以及冷却系统组成,通过调整离合器系统压力实现可控软启动和软停机,可降低 30% 的基本胶带张力,减少对设备的冲击,对电网无污染,但 CST 无法根据皮带的运量来调节电机转速,不宜使用于下运带式输送机,且价格贵,维护费用高,基本无节能功效。

1.4 变频启动

变频启动是把电压、频率固定不变的交流电转换成电压、频率均可变的交流电来驱动交流电动机,实现电机的变频软启动。这种方法调速范围宽、调速精度高、安装调试使用方便、保护功能完善、运行稳定可靠、节能效果显著。变频器分为交交变频和交直交变频。

交交变频器是直接把工频恒压电源转换成所需要的变频变压电源,没有任何中间环节,其特点为装置本身效率高,输出频率低,功率因数低,谐波电流大,对电网污染较严重,需治理谐波,主要适用于低转速、大容量的传动系统,如提升机等。

交直交变频器是先将工频交流电源通过整流变成直流,再经过逆变器将直流转换成频率及电压都可控的交流,根据直流电路中滤波方式的不同,分为电压源型和电流源型两种,其中以 AB 公司 PF7000 系列电流型变频器和 ABB 公司的 ACS6000 系列电

压型变频器都得到了较多的工程应用。电流型变频器的最大特点是能量可以回馈电网,发电制动方便,电压型变频器的最大特点是谐波电流小,功率因数高,两者均可实现远距离供电。

2 井下主运胶带机的变频启动控制

由于煤炭产量的不断提高,长距离、大运量、高带速的带式输送机成为井下煤炭运输的主要设备,且多为大功率、多电机驱动,通常需要中压供电,因此对电机的驱动控制提出更高要求,主要有以下几点:①启动电流要小,减少对电网的无功冲击,减少对机械设备的强烈冲击;②电机的启动转矩要大,可重载启动;③多电机驱动时的功率平衡以及各电机的速度同步精度要高;④起、制动过程要平稳,避免胶带和滚筒之间的打滑;⑤驱动控制方式有利于节能降耗;⑥使用方便、维护成本低,系统的运营效益高。

采用调压式软启动器、液力耦合器、CST 可控软启动器中的任意一种启动皮带机,虽能解决或部分解决胶带机软启、软停问题,但实际使用中存在诸多问题,如调压式软启动器受其控制原理的限制,重载时往往不能启动、不具备调速功能;采用液力耦合器,电动机必须空载启动,启动电流大,对机械设备有冲击、多驱动电机的功率平衡不好解决、传动效率较低,调速范围窄,低速时能量损耗大;CST 通过调节油膜间距实现软启动,但没有调速功能,不能实现过程控制,且油价昂贵,维护费用高等缺点。

伴随着电气传动技术,尤其是变频调速技术的发展,作为大容量传动的高压变频调速技术也得到了广泛的应用。高压电机利用高压变频器实现无级调速,既满足生产工艺对电机调速控制的要求,又可大幅度地节约能源,降低生产成本。尤其在高压、大功率、多电动机启动的带式输送机的应用,充分显示出其调速系统的诸多优势。

1) 实现了带式输送机系统的软启动。利用变频器平滑的启动特性,将电机的软启动和皮带机的软启动合二为一,通过电机慢速启动带动皮带机缓慢启动,将胶带内部贮存的能量缓慢释放,大大降低了对皮带机的胶带冲击及机械系统的影响。而变频器长于皮带机启动时间的特点,也降低对皮带带强的要求,进而降低设备初期投资。

2) 实现皮带机重载启动。对于皮带机恒转矩负载,变频器低频运行输出的高转矩可以满足皮带机重载启动的要求。变频器内部的工频旁路系统,

可以在变频器故障时应急使用和长期满载无需调速时使用。

3) 实现皮带机多电机驱动时的功率平衡。采用变频器对皮带机多电机进行驱动时,根据皮带机电机驱动装置的结构布置,变频器采用主从控制方式,可实现转矩或速度的全程跟踪,达到功率平衡和速度同步,主从变频器之间采用通讯传输。

4) 实现皮带机验带检修功能。低速验带是带式输送机检修的主要途径,变频调速系统为无极调速的交流传动系统,在空载验带状态下,变频器可调整驱动电机工作在0%~100%额定带速范围内进行长期验带运行,并能进行多段速度的设定。

5) 变频器高功率因数和低谐波含量,使得带式输送机系统无需另设无功补偿和滤波装置,提高了供电系统的功率因数;而采用变频器驱动之后,电机与减速器之间的直接硬联接,较之电机+液力偶合器+减速器或电机+CST驱动方式,皮带机系统总的传动效率要比后两种驱动的传动效率高5%~10%。

6) 自动调速与节能。由于煤矿特殊的生产条件,煤的产量不均匀导致皮带机的运煤量也不均匀,在负载较轻或无负载时,皮带机的高速运行对机械传动系统的磨损浪费较为严重,同时电能消耗也较低速运行大的多,且因矿井生产的实际需要,胶带输送机系统又不能随时停车。因此采用变频调速系统可根据运煤量的多少自动调节皮带机电机转速,既可大大节约电能,同时降低胶带输送机系统的设备损耗,延长使用寿命。

7) 当下运胶带机负载速度大于电动机速度或大惯量负载需要紧急减速时候,电流型高压变频器可将降速工况即发电机运行状态下负载反馈回的能量回送电网,利用再生制动快速降低电机转速,在确保下运胶带机安全生产的同时,节约了电能。

8) 目前井下防爆变频装置主要应用于660/1140V、710kW以下皮带机,尚无6/10kV大功率高压防爆变频器产品,对井下长距离、大运量、多滚筒驱动的带式输送机而言,高压变频器可达15km的远距离供电特点,满足了将变频器放在地面井口变电所到井下电机的长距离电力传输要求。

同时高压变频器由于受到功率元件的限制,电流型变频器的电压只能做到6kV,因此对于10kV供电系统,采用电流型变频器调速时,应采用降压变压器向6kV高压变频器供电,而电压型变频器则采用隔离变压器即可直接向10/6kV变频器供电,变频器的选择应根据电动机的额定电流选择。

另外,高压变频器可使用中心点钳位型三电平逆变器(Neutral Point Clamped, NPC)(见图1),每个桥臂由两个功率器件串联,这样可以使功率器件的耐压降低一半。三电平逆变器的IGBT一般采用模块化结构,其反向阻断电压较低,芯片比二电平的更薄,具有更低的开关损耗和正向压降。三电平逆变器单个桥臂的总损耗比二电平逆变器低60%。由于损耗较低以及输出电压在三个电平间切换,输出电压波形更接近正弦波,谐波失真更小,更符合电磁兼容EMC的要求。

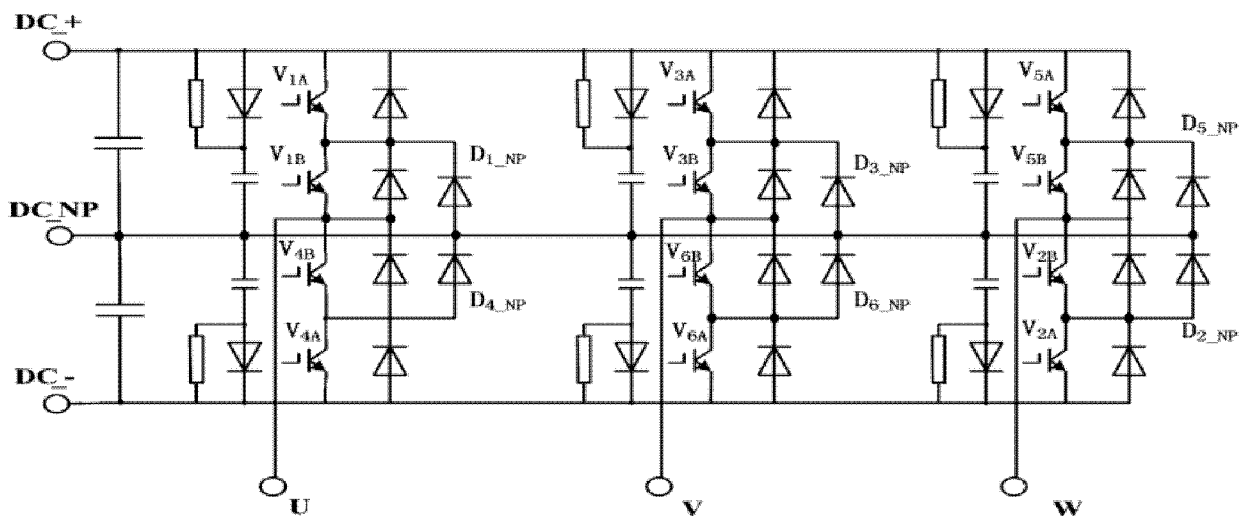


图1 中点钳位三电平逆变器

三电平逆变器每相输出状态有 3 个:正(P)、零(Z)、负(N),将三相的 3 种状态进行组合可生成 27 种电平状态,这 27 种状态又称三相三电平的 27 种空间电压矢量。要得到某一个空间的电压矢量,可用位于该区域的部分或全部电压矢量适时切换来逼近。在二极管钳位的三电平逆变器中,可以选择不同的矢量合成方法来实现 SVPWM 控制和中点电压的平衡问题。空间矢量脉宽调制在大范围的调制比范围内具有很好的性能,其控制结构简单,直流母线电压利用率高等优点,特别适合于皮带机的变频软起和自动调速控制。

3 结束语

利用技术先进、安全可靠的高压变频器对井下长距离、大运量、多滚筒驱动的主运皮带尤其是下运皮带实现变频软起、自动调速及自动控制,不仅提高矿井煤炭运输系统自动化水平,提高生产效率,降低现场维护量,而且节能效果显著,值得大力推广。对于高压变频器提出使用中心点钳位型三

电平逆变器,可使输出电压波形更接近正弦波,谐波失真更小,更符合井下电磁兼容的要求,使带式输送机的启动控制更加平滑。

参考文献:

- [1] 毛鑫. 变频技术防爆变频器的现状及发展[J]. 电气开关, 2009(6): 13-14.
- [2] 陈乐平. 矿井大倾角皮带机高压电动机软启动方式选择[J]. 中国设备工程, 2007(9): 40-41.
- [3] 祝龙记, 张旭立. 防爆变频器在煤矿应用中的关键技术[J]. 工矿自动化, 2012(10): 19-22.
- [4] 惠烨, 全振兴. 矿用隔爆兼本质安全型交流变频器的散热[J]. 矿山机械, 2009, 37(7): 14-16.
- [5] 曹连兵, 程红, 尚欣, 等. 矿用三电平逆变器空间矢量脉宽调制算法实现[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(6): 92-96.

(责任编辑:姚多喜)

(上接第 6 页)

参考文献:

- [1] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1995: 67-78.
- [2] HELLE S, ALFARO G, KELM V, et al. Mineralogical and chemical characterization of coals from southern Chile[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 44: 85-94.
- [3] 姜冬冬, 陈萍, 唐修义, 等. 淮南煤田 8 煤层中黄铁矿特征研究及成因分析[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(1): 22-26.
- [4] DAI SHIFENG, ZHOU YIPING, REN DEYI, et al. Geochemistry and mineralogy of the late Remian coals from the Songzao coalfield, Chongqing, southwestern China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(5): 678-688.
- [5] CHEN PING, JIANG DONGDONG. Characteristics and geological genesis of pyrites in coal of Huainan[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2010, 16(3): 311-315.
- [6] 陈实. 煤中矿物间的关联[J]. 矿业世界, 1997, 4: 11-14.
- [7] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 141-157.
- [8] 张慧, 李小彦, 郝琦, 等. 中国煤的扫描电子显微镜研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 43-59.
- [9] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝, 等. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 175-184.
- [10] E·斯塔赫. 斯塔赫煤岩学教程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990: 117-130.
- [11] 唐修义, 黄文辉, 赵继尧. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 85-109.
- [12] 刘新兵. 我国若干煤中矿物质的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(4): 109-144.

(责任编辑:姚多喜,李 丽)

保形三次有理样条及其等距曲线

刘文艳, 王 强, 张养聪

(安徽理工大学理学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了使有理插值样条及其等距曲线在工业设计、制造及计算机图形和 CAGD 领域有着更灵活更广泛的应用, 构造含参数三次有理插值样条模型, 生成插值有限个离散点的光滑曲线及其等距线, 该模型可通过选取其中的形状参数使得曲线具有保形性并达到一阶连续。并可通过适当调整插值函数中的参数进行交互式的修改, 以得到满意的曲线及等距线, 并可结合细分算法达到要求的逼近精度。

关键词: 有理样条; 保形性; 等距线

中图分类号: O242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0050-05

Cubic Shape Preserving Rational Spline and Its Offset Curve

LIU Wen - Yan, WANG Qiang, ZHANG Yang - Cong

(School of Sciences, Anhui University of Science Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to make rational interpolating spline and its equidistant curve to be more flexibly and more widely used in industrial design, manufacturing, computer graphics and CAGD fields, cubic rational interpolation spline model with parameters was constructed to generate a smooth interpolation curve and its equidistant line by finite number of discrete point data. In the model curve can be with shape retention and first - order continuity by select the shape parameters. The interactive modification can be carried out by appropriate adjustment of the parameters in the interpolation function, to obtain satisfied curve and its equidistant line, and with segmentation algorithm to meet the requirements of the approximation precision.

Key words: rational spline; shape preserving; offset curve

有理插值样条及其等距曲线在工业设计、制造及计算机图形和 CAGD 领域方面有着广泛的应用^[1-3]。近几年来, 对于有理样条和等距曲线的研究有了很大的进展^[4-5]。文献[6]是以 B 样条曲线为例, 给出了一种基于关键点的等距算法。文献[7]介绍了基于圆弧的 Bézier 多项式逼近, 提出了一种 Bézier 曲线的等距曲线的同次多项式逼近算法。本文研究了保形三次有理样条及其等距曲线的生成算法。

本文介绍的保形三次有理样条, 将成为 CAGD 中曲线设计的一灵活的工具, 它具有以下显著特

点: 插值函数具有显式表达式, 在应用和理论研究方面都非常方便; 插值函数具有局部性; 插值曲线具有保单调性和保凸性, 通过交互式选择形状参数即可得到理想的插值曲线, 无需改变插值数据。

1 三次有理样条插值

1.1 插值函数的构造

给定数据 $(x_i, f_i), i = 1, \dots, n$, 其中 f_i 为被插函数在分划点 x_i 上的函数值, 此处 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 。记 $h_i \triangleq x_{i+1} - x_i, \Delta_i \triangleq (f_{i+1} - f_i)/h_i$ 。令 $t \triangleq (x - x_i)/h_i$,

当 $x \in [x_i, x_{i+1}]$ 时, $t \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n-1$ 。

定义:

$$s(x) = s(x_i + h_i \cdot t) \equiv s_i(t) = \frac{P_i(t)}{Q_i(t)} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} P_i(t) &= \alpha_i f_i (1-t)^3 + W (1-t)^2 t + \\ &\quad V (1-t) t^2 + \beta_i f_{i+1} t^3 \\ Q_i(t) &= \alpha_i (1-t) + \beta_i t \end{aligned} \quad (2)$$

此处

$$\begin{aligned} W &= (2\alpha_i + \beta_i) f_i + \alpha_i d_i h_i \\ V &= (\alpha_i + 2\beta_i) f_{i+1} - \beta_i d_{i+1} h_i \\ \alpha_i, \beta_i &\text{ 为形状参数, 且都恒取正数, } d_i \text{ 表示函数} \\ &\text{在点 } x_i \text{ 处的导数值。容易验证} \end{aligned}$$

$$s^{(1)}(x) = s^{(1)}(t) h_i^{-1} = \frac{\sum_{j=0}^3 A_{ij} (1-t)^{3-j} t^j}{[\alpha_i (1-t) + \beta_i t]^2} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{i0} &= \alpha_i^2 d_i \\ A_{i1} &= 2\alpha_i^2 \Delta_i + 4\alpha_i \beta_i \Delta_i - \alpha_i^2 d_i - 2\alpha_i \beta_i d_{i+1} \\ A_{i2} &= 2\beta_i^2 \Delta_i + 4\alpha_i \beta_i \Delta_i - \beta_i^2 d_{i+1} - 2\alpha_i \beta_i d_i \\ A_{i3} &= \beta_i^2 d_{i+1} \end{aligned}$$

容易验证函数 $s(x) \in C^1[x_i, x_{i+1}]$ 是在点 x_i 和点 x_{i+1} 处的两点 Hermite 插值。

1.2 保证单调性和凸性的充分条件

当给出的数据不是单调的时候, 那么函数 $s(x)$ 通常也不是单调的, 研究三次样条插值保形性的条件。假设数据是单调递增的, 因此

$$f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n, \text{ 或 } \Delta_i \geq 0 \quad (4)$$

选取导数值 d_i 满足条件

$$d_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

在区间 $x \in [x_i, x_{i+1}]$ 上, 函数 $s(x)$ 单调递增的充要条件是 $s^{(1)}(x) \geq 0$ 。式(3)中的有理函数的分母是恒正的, 因此, 就要考虑式(3)中的分子, 如果 $A_{i1} \geq 0$ 且 $A_{i2} \geq 0$, 就会得到函数 $s^{(1)}(x)$ 是非负的, 且式(5)也是成立的。综上可以得到插值函数 $s(x)$ 的充要条件为 $A_{i1} \geq 0$ 且 $A_{i2} \geq 0$, 保证 $A_{i1} \geq 0$ 和 $A_{i2} \geq 0$ 的充分条件是

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} \geq \frac{d_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i - d_i} \quad (6)$$

如果式(6)成立, 那么函数 $s^{(1)}(x) \geq 0$ 。因此就可以证明下面的定理。

定理 1 给定一组单调递增的数据同时满足式(4)和式(5), 当式(6)成立时, 那么存在一类单调的含有参数 α_i, β_i 的有理(三次的/线性的)插值样条 $s(x) \in C^{(1)}[a, b]$ 。

通过形状参数的约束条件可以知道, 当给出的数据是凸数据时, 样条函数的结果也显示凸性。假设一组数据是凸数据。

$$\Delta_1 \leq \Delta_2 \leq \dots \leq \Delta_{n-1} \quad (7)$$

选择导数值 d_i , 那么

$$0 < d_1 < \dots < \Delta_{i-1} < d_i < \Delta_i < \dots < d_n \quad (8)$$

结合式(3), 得到

$$s^{(2)}(x) = s^{(2)}(t) h_i^{-2} = \frac{\sum_{j=0}^3 B_{ij} (1-t)^{3-j} t^j}{h_i [\alpha_i (1-t) + \beta_i t]^3} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} B_{i0} &= 2\alpha_i^3 (\Delta_i - d_i) + 2\alpha_i^2 \beta_i (2\Delta_i - d_i - d_{i+1}) \\ B_{i1} &= 6\alpha_i^2 \beta_i (\Delta_i - d_i) \\ B_{i2} &= 6\alpha_i \beta_i^2 (d_{i+1} - \Delta_i) \\ B_{i3} &= 2\beta_i^3 (d_{i+1} - \Delta_i) + 2\alpha_i \beta_i^2 (d_i + d_{i+1} - 2\Delta_i) \end{aligned}$$

在区间 $x \in [x_i, x_{i+1}]$ 上, 函数 $s(x)$ 具有凸性的充要条件是 $s^{(2)}(x) \geq 0$ 。由于 $\Delta_i - d_i > 0$ 并且 $d_{i+1} - \Delta_i > 0$, 可以推出 $B_{i0} > 0, B_{i3} > 0$ 。因此函数 $s(x)$ 具有凸性, 另外

$$B_{i0} \geq 0, B_{i3} \geq 0 \quad (10)$$

或

$$2\alpha_i^3 (\Delta_i - d_i) + 2\alpha_i^2 \beta_i (2\Delta_i - d_i - d_{i+1}) \geq 0 \quad (11)$$

$$2\beta_i^3 (d_{i+1} - \Delta_i) + 2\alpha_i \beta_i^2 (d_i + d_{i+1} - 2\Delta_i) \geq 0 \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以得到

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} \geq \frac{d_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i - d_i} \quad (13)$$

又

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} \leq \frac{d_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i - d_i}, \quad (14)$$

结合式(13)和式(14), 函数 $s(x)$ 的充分条件是函数 $s(x)$ 是凸函数。即

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{d_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i - d_i}, \quad (15)$$

定理 2 当式(15)成立时, 那么存在 C^1 连续的具有凸性的并且含有参数 α_i, β_i 的有理(三次的/线性的)插值样条 $s(x)$ 。

1.3 误差估计

对于式(1)中的分段有理三次插值函数的误差估计,不失一般性,只要考虑它的子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 就能得到下面的定理。

定理3 假设 $f(x) \in C^4[a, b]$, 函数 $s(x)$ 是由式(1)定义的分段有理插值函数。当 $x \in [x_i, x_{i+1}]$ 时,存在

$$|s(x) - f(x)| \leq \frac{\lambda_i h_i^3}{384\mu_i} C_1 + \frac{h_i \lambda_i}{4\mu_i} C_2 \quad (16)$$

其中

$$\lambda_i = \max\{\alpha_i, \beta_i\}$$

$$\mu_i = \min\{\alpha_i, \beta_i\}$$

$$C_1 = \{h_i \|f^{(4)}\| + 4 \|f^{(3)}\|\}$$

$$C_2 = \max\{|f_i^{(1)} - d_i|, |f_{i+1}^{(1)} - d_{i+1}|\}$$

证明 对于 $x \in [x_i, x_{i+1}]$, 记 $t = \frac{(x - x_i)}{h_i}$, $F(t) = f(x_i(t))$, $S_i(t) = s(x_i(t))$ 。其中 $x_i(t) = x_i + h_i t$ 。则 $f(x) - s(x) = F_i(t) - \frac{P_i(t)}{Q_i(t)}$, 令

$$R_i(t) = \alpha_i f_i (1-t)^3 + [(2\alpha_i + \beta_i)f_i + \alpha_i h_i f_i^{(1)}] (1-t)^2 t + [(\alpha_i + 2\beta_i)f_{i+1} - \beta_i h_i f_{i+1}^{(1)}] (1-t)t^2 + \beta_i f_{i+1} t^3$$

且

$$s_i(t) = F_i(t) Q_i(t) = f(x_i + th_i) [\alpha_i (1-t) + \beta_i t]$$

就有

$$|F_i(t) - \frac{P_i(t)}{Q_i(t)}| \leq |s_i(t) - R_i(t)| + \frac{|R_i(t) - P_i(t)|}{|Q_i(t)|} \quad (17)$$

由于函数 $R_i(t)$ 是关于 $s_i(t)$ 在点 x_i 和点 x_{i+1} 处的两点 Hermite 插值, 从三次 Hermite 插值的误差估计可以得到

$$|s_i(t) - R_i(t)| \leq \frac{1}{384} \max | \frac{d^4}{dt^4} s_i(t) |$$

或

$$|s_i(t) - R_i(t)| \leq \frac{1}{384} \max | F_i^4(t) Q_i(t) + F_i^3(t) Q_i^{(1)}(t) | \quad (18)$$

由式(2)可知

$$|Q_i(t)| = |\alpha_i (1-t) + \beta_i t| \leq \max\{\alpha_i, \beta_i\} \quad (19)$$

$$|Q_i^{(1)}(t)| = |\beta_i - \alpha_i| \leq \max\{\alpha_i, \beta_i\} \quad (20)$$

且

$$|F_i^{(j)}(t)| \leq h_i^j \|f^{(j)}\| \quad (21)$$

把式(19)、式(20)和式(21)带入式(18)可以得到

$$|s_i(t) - R_i(t)| \leq \frac{\lambda_i}{384} \{h_i^4 \|f^{(4)}\| + 4h_i^3 \|f^{(3)}\|\} \quad (22)$$

并且

$$|R_i(t) - P_i(t)| \leq h_i \{|\alpha_i (1-t)^2 t (f_i^{(1)} - d_i)| + |\beta_i (1-t)t^2 (d_{i+1} - f_{i+1}^{(1)})|\} \leq \frac{h_i \lambda_i}{4} \max\{|f_i^{(1)} - d_i|, |d_{i+1} - f_{i+1}^{(1)}|\} \quad (23)$$

又

$$\min |Q_i(t)| = \min\{\alpha_i (1-t) + \beta_i t\} \geq \mu_i \quad (24)$$

将式(22)、式(23)和式(24)带入式(18)中, 可以立刻得到定理的结论。

2 等距曲线

等距曲线在工程上有不同的应用, 在一定程度上推动了各种技术的广泛发展。给出一个正则参数曲线 $C(t) = (x(t), y(t))$, 它的等距曲线 $C_d(t)$ 是通过常数半径 d 定义的

即

$$C_d(t) = C(t) + dN(t) \quad (25)$$

其中 $N(t)$ 是 $C(t)$ 的单位法向量:

$$N(t) = \frac{(y'(t), -x'(t))}{\sqrt{y'(t)^2 + x'(t)^2}} \quad (26)$$

由于 $C(t)$ 是正则的, 从而可以确保 $(x'(t), y'(t)) \neq (0, 0)$ 和 $N(t)$ 在曲线 $C(t)$ 上能准确的定义出。式(26)中的分母含有平方根项, 因此, 即使给出的曲线 $C(t)$ 是多项式形式, 但它的等距曲线不一定是多项式或有理曲线。这一基本的不足之处在一定程度上促进了各种多项式和等距曲线有理逼近技术的发展。

事实上, 在许多工程应用领域, 这些曲线并不能给出使用数据的精确表示, 而是给出一些离散的数据点。调查方法显示通过给出的离散点来构造曲线及它的等距曲线在实际应用中有很大的潜力。假设 (x_i, f_i) , $i = 1, \dots, n$ 是给出的一组离散点, 其中 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 。使用上面的数据, 可以计算

出等距曲线的控制点

$$x_i^* = x_i - d \frac{d_i}{\sqrt{1 + d_i^2}}$$

$$y_i^* = y_i + d \frac{1}{\sqrt{1 + d_i^2}}$$

其中 d_i 是关于 x 在控制节点 x_i 处的导数值, d 是常量半径。

在大多数应用中, 导数参数 d_i 的数值是不知道的, 因此就需要从给定的数据 $(x_i, f_i), i = 1, \dots, n$ 或通过其他方式来确定。在本文中, 可以用三个不同点的逼近算法来计算, 即

如果 $\Delta_{i-1} = 0$ 或 $\Delta_i = 0$, 则 $d_i = 0$

否则

$$d_i = \frac{h_i \Delta_{i-1} + h_{i-1} \Delta_i}{h_i + h_{i+1}}, i = 2, 3, \dots, n-1$$

那么结束条件就是: 如果 $\Delta_1 = 0$ 或 $\text{sgn}(d_1^*) \neq \text{sgn}(\Delta_1)$, 那么 $d_1 = 0$, 否则

$$d_1 = d_1^* = \Delta_1 + \frac{h_1(\Delta_1 - \Delta_2)}{h_1 + h_2}$$

如果 $\Delta_{n-1} = 0$ 或 $\text{sgn}(d_n^*) \neq \text{sgn}(\Delta_{n-1})$, 那么 $d_n = 0$,

否则

$$d_n = d_n^* = \Delta_{n-1} + \frac{h_{n-1}(\Delta_{n-1} - \Delta_{n-2})}{h_{n-1} + h_{n-2}}$$

其中

$$\Delta_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i}, i = 1, 2, \dots, n$$

3 实验结果

保形有理三次样条的实验数据和结果如表1和图1所示, 在图1中样条在点 (x_4, y_4) 处并不是很光滑。可通过调整参数 α_i, β_i 来修改曲线的形状。调整 $\beta_5 = 1$ 到 $\beta_5 = 10$, 就得到相应的曲线(见图2)。实际上, 曲线是朝着点 (x_5, y_5) 延伸的。

表1 Sarfraz 数据

i	1	2	3	4	5
x_i	0	6	10	29.5	30
y_i	0	15	15	25	30

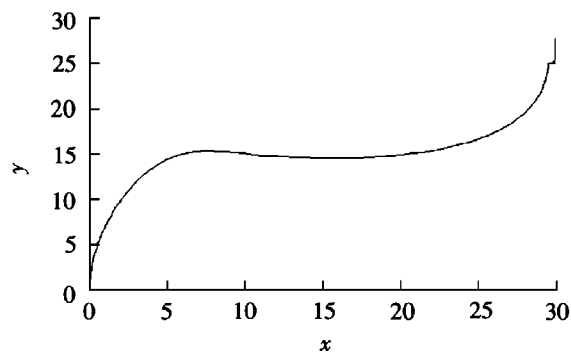


图1 数据一的有理三次样条曲线

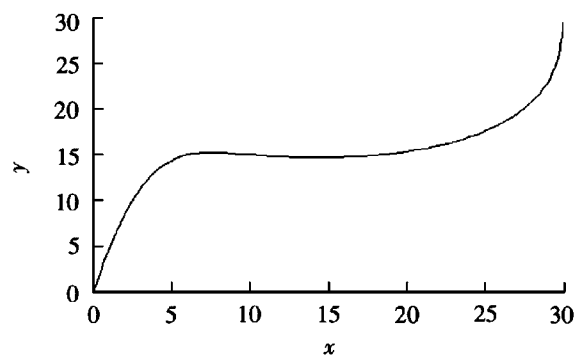


图2 数据一细化的有理三次样条曲线

插值样条的条件就是凸性。表2给出了一组凸数据, 图3是相应的曲线, 更好地说明算法的可行性及实验结果。

表2 凸数据

i	1	2	3	4
x_i	122	150	178	206
y_i	128	184	184	156

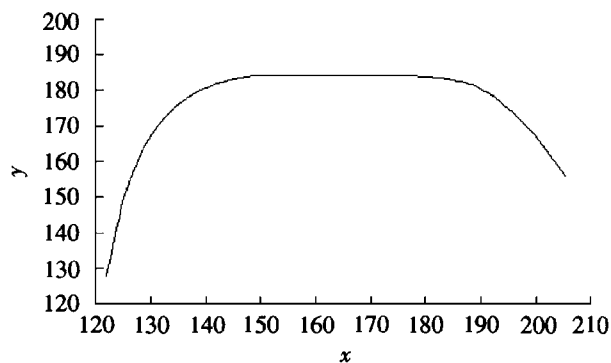


图3 数据二的有理三次样条曲线

为了说明算法更具有一般性, 表3是一组随机数据, 图4是对应的等距曲线, 更有力地说明此算法应用广范。

表3 随机生成数据

i	1	2	3	4	5	6
x_i	0.0	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6
y_i	0.00	0.01	0.04	0.16	0.25	0.36

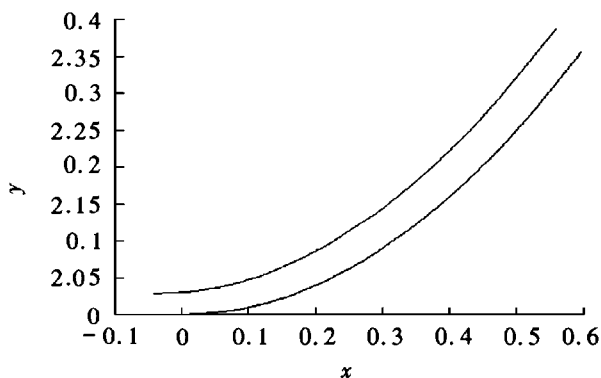


图4 数据三的等距曲线

4 结论

本文算法是用有限个离散点数据同时生成插值这些点的光滑曲线及其等距线,算法的实现是通过具有保形的三次有理样条的迭代过程实现的。通过调整插值函数中的参数 α_i 或 β_i 交互式的修改曲线形状,并结合细分算法提高精度直至得到满意的结果。这个算法的收敛精度依靠导数 d_i 的精度。 d_i 在本文中的精度为 $O(h^2)$ 。在实际操作中,可以

通过细分插值区间提高精度、导数值精度达到三阶时,函数精度达到四阶,得到精度更高的插值曲线及其等距线。

参考文献:

- [1] M Z HUSSAIN, N AYUB, M IRSHAD. Visualization of 2D Data by Rational Quadratic Functions [J]. Journal of Information and Computing Science, 2007, 2 (1): 17 - 26.
- [2] M SARFRAZ. A Rational Cubic Spline for Visualization of Monotonic Data: An Alternate Approach [J]. Computers and Graphics, 2003, 27: 107 - 121.
- [3] Q Wang, J Q TAN. Rational Quartic Spline Involving Shape Parameters [J]. Journal of Information and Computational Science, 2004, 1 (1): 127 - 130.
- [4] 谢进, 谭结庆, 李生锋. 有理三次 Hermite 插值样条及其逼近性质 [J]. 工程数学学报, 2009, 28 (3): 385 - 391.
- [5] 陈宝平, 赵俊岚, 尹志凌. 基于有理样条曲线的自由变形算法 [J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2010, 41 (4): 456 - 459.
- [6] 朱朝艳, 陈小雕. B 样条曲线的等距算法及应用 [J]. 工程图学学报, 2010 (3): 94 - 100.
- [7] 王珺, 江平. Bézier 曲线的等距曲线的同次多项式逼近 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21 (9): 1 251 - 1 256.

(责任编辑: 何学华)

欢迎订阅《安徽理工大学学报(自然科学版)》, 欢迎投稿

《安徽理工大学学报(自然科学版)》1981 年创刊, 季刊, 每期定价 5.00 元, 全年定价 20.00 元。《安徽理工大学学报(自然科学版)》为安徽理工大学主办的综合性学术刊物, 主要刊载地质工程、环境工程、测绘工程、采矿工程、安全工程、信息管理与信息系统、土木工程、建筑学、机械工程、测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、计算机科学与技术、矿物加工工程、化学工程与工艺、弹药工程与爆炸技术、制药工程、信息与计算科学、应用物理学、医学以及相关基础学科的学术论文和最新研究成果等。

本刊国内外公开发行, 侧重体现本校特色, 面向国内外组稿。本刊是《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊, 美国《化学文摘》(CA) 源期刊, 美国《剑桥科学文摘》(CSA) 源期刊, 俄罗斯《文摘杂志》(VINITI) 源期刊, 《中国科技论文统计》源期刊, 《中文科技期刊数据库》源期刊, 《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊, 此外, 本刊还是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊和《万方数据——数字化期刊群》上网期刊。另外, 本刊和全国各高校学报、科研院所出版的刊物均有学术交流, 凡被本刊发表的研究成果及论文, 能很快地传播并及时为国内外同行专家引用。

本刊参加全国非邮发报刊联合征订, 请读者向天津市大寺泉集北里别墅 17 号(邮编 300385) 天津市河西区联合征订服务部直接汇款订阅, 不必先索取订单, 由本刊负责将刊物寄给订户。也可直接向本刊订阅, 由邮局汇款到安徽省淮南市安徽理工大学学术出版中心。

邮政编码: 232001

电 话: 0554-6668044

E - mail: xzbzb@ aust. edu. cn

井下瞬变电磁探测空间金属体干扰影响测试分析

李培根

(福州华虹智能科技开发有限公司, 福建 福州 350004)

摘 要: 矿井瞬变电磁探测技术作为一种非接触式的快速勘探技术, 在煤矿安全生产中发挥了重要的作用。巷道实际探测中, 施工现场铁器、金属支护物等金属干扰体对数据采集产生重要影响。通过井下巷道探测环境, 模拟分析重叠回线线圈周边不同位置存在金属干扰体时, 瞬变电磁场的响应特征, 获得巷道体积空间中测试响应强度与变化规律认识, 为矿井瞬变电磁探测施工和结果判定工作提供参考。

关键词: 瞬变电磁探测, 金属干扰体, 体积空间响应

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0055-05

Test and Analysis of Interference Effect of Metal during Detection in Mines by TEM

LI Pei-gen

(Fuzhou Huahong Aptitude Science Development Co., LTD, Fuzhou Fujian 350004, China)

Abstract: As a kind of non-contact detecting technique, the mine transient electromagnetic method has played an important role in safety production of coal mines. During practical test, the disturbing bodies of steel lining on the job location have important affect on data collecting. Through practical testing experiment in laneway environment, the response characteristics of TEM are simulated and analyzed in the condition of different disturbing body's existence around the coil of overlap loop line. And its response intensity and variation rule can be gained in the volume space of laneway. It will provide the reference for the data collecting and result forecast of MTEM.

Key words: transient electromagnetic detection; disturbing metal body; response of volume space

煤炭作为我国经济发展主体能源的地位在今后相当长一段时期内不会改变, 煤炭企业的安全生产问题也越来越受到重视。其中矿井水害问题也随着煤炭资源开采深度的增加变得更为突出, 长期以来制约着我国煤炭安全高效开采。矿井瞬变电磁技术作为一种非接触式的快速勘探技术, 在井下巷道内探查其周围空间异常富水体时直接采用线圈发射和接收信号, 既适合井巷特殊条件又降低接地条件对探查结果的影响, 其应用效果较好, 应用范围甚广^[1-4]。瞬变电磁探测的主要干扰来源于地电场、工频干扰和井下巷道中存在的各种金属干扰体, 而地电场的影响是恒定的, 不随探测激励电

场而放大, 作为背景场存在, 对测量结果影响很小, 工频的干扰可以通过仪器加以抑制, 但巷道中存在的金属材料(锚杆锚网、铁轨、金属管路、各种电缆、工字钢、运输设备等)所产生的噪声随着激励电磁场的加大而加大, 产生很强的瞬变电磁响应, 是矿井瞬变电磁探测的主要噪音, 对数据的采集和处理影响较大, 降低了对岩层富水区域的预报准确性, 有时还会造成误判^[5-7]。因此, 弄清巷道测试条件下不同金属构件所引起的干扰程度和条件, 便于数据采集与处理技术应用, 对提高探测效果有着举足轻重的作用。

2 实体试验方案设计

2.1 试验地点

为了研究井下巷道实际探测环境下,矿井瞬变电磁测试线圈附近金属物对瞬变电磁场产生的响应特征,试验对同一个探测目标体在不同金属物探测背景进行测量与对比分析。试验地点为福建将乐华虹矿井物探试验基地地下试验场(见图1),实验区地层是二叠系下统童子岩组地层,为海陆交互相含煤沉积,基本构造形态为一对斜卧背向斜。测试点位于试验场主巷入口处右侧往林坑下山20 m处8号试验点,巷道标高+175 m,探测目标岩性以泥质岩为主,其次为砂岩和粉砂岩。

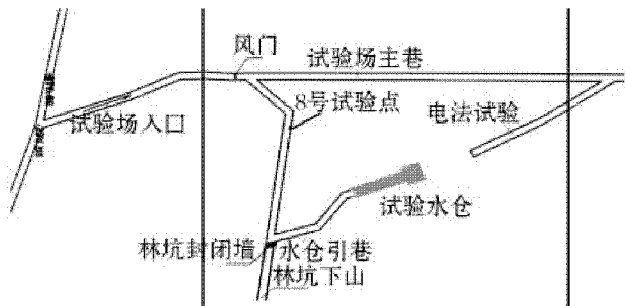


图1 试验点位置示意图

2.2 试验设计

8号试验点处为全岩巷道,无任何金属支护和线缆,巷度宽度为3.4 m,测试空间左右20 m范围内未放置试验用金属材料,在巷口通风设备等关闭条件下,采集基础背景岩层瞬变电磁响应的二次场测量值。根据试验要求,按先后顺序分别对背景电磁场条件、铁板干扰条件、U型钢干扰条件下重叠回线数据进行采集与对比。

图2为测试巷道测点分布平面图,测试时将边长2.0 m的重叠回线线框悬挂在巷道左帮岩石上,现场总共布置测点62个。根据巷道条件现场共布置横向测线(沿巷道走向方向)7条,横线间距0.5 m;同时形成沿线框法线方向的纵向测线6条,纵线间距1.0 m(见图2)。

2.3 数据采集

数据采集仪器为本公司自行研发的YCS80(A)型矿用瞬变电磁仪,重叠回线线框尺寸为2.0 m × 2.0 m,其中发射和接收线框匝数分别为10匝和20匝;金属干扰试验铁板尺寸为1.5 m × 1.5 m × 0.005 m,U型钢件长度为1.6 m。

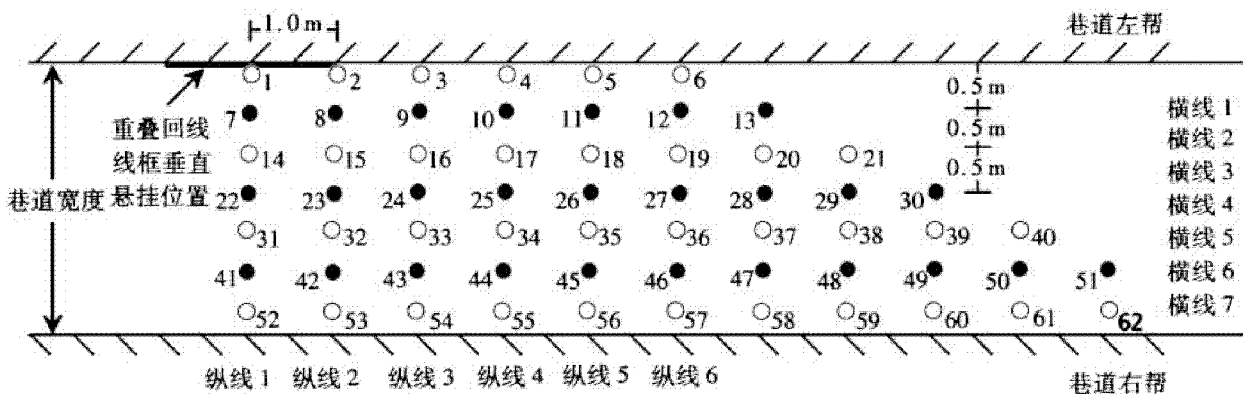


图2 试验点测试巷道测点分布平面图

试验技术参数中发射频率选择8.3 Hz,发射电流为2.6 A,数据叠加次数为32。采样间隔为1 μ s,测道数为40,即可记录时长为26.478 ms的感应信号。

实验时,全程固定重叠回线线框,将金属干扰体分别放置在各个测点处,采集干扰条件下瞬变电磁响应的二次场信号。如横测线1为测点1、2、3、4、5、6;纵测线1为测点1、7、14、22、31、41、52(见图2)。在进行铁板干扰体测试时,将铁板平面与线圈平面平行放置,并依次按各个测点移动,完成单条测线不同测点的瞬变电磁响应数据采集。

U型钢条件测试时是在不同点竖直放置U型钢后,测试过程与铁板测试相同,采集瞬变电磁响应的二次场测量值。

3 测试结果与分析

1) 背景测试。对于8号试验点瞬变电磁场背景测量,是在线圈固定,即将重叠回线线框悬挂固定在测点巷道左帮,其左右20 m空间内无任何金属物干扰条件下连续测量5次,再将各测道电位值算术平均后作为背景,为后续比较提供依据。

2) 铁板干扰试验。图3为铁板平行放置时横向测线1至横线7上各点的电压-测道曲线对比图,其中横坐标为测道数(对应为记录时间),纵坐标为对数电压观测值。

通过数据抽取,可以获得沿线圈平面法线方向铁板平行放置时所产生的电磁感应场影响,图4为纵向测线1-6中各点对应的电压-测道曲线图。

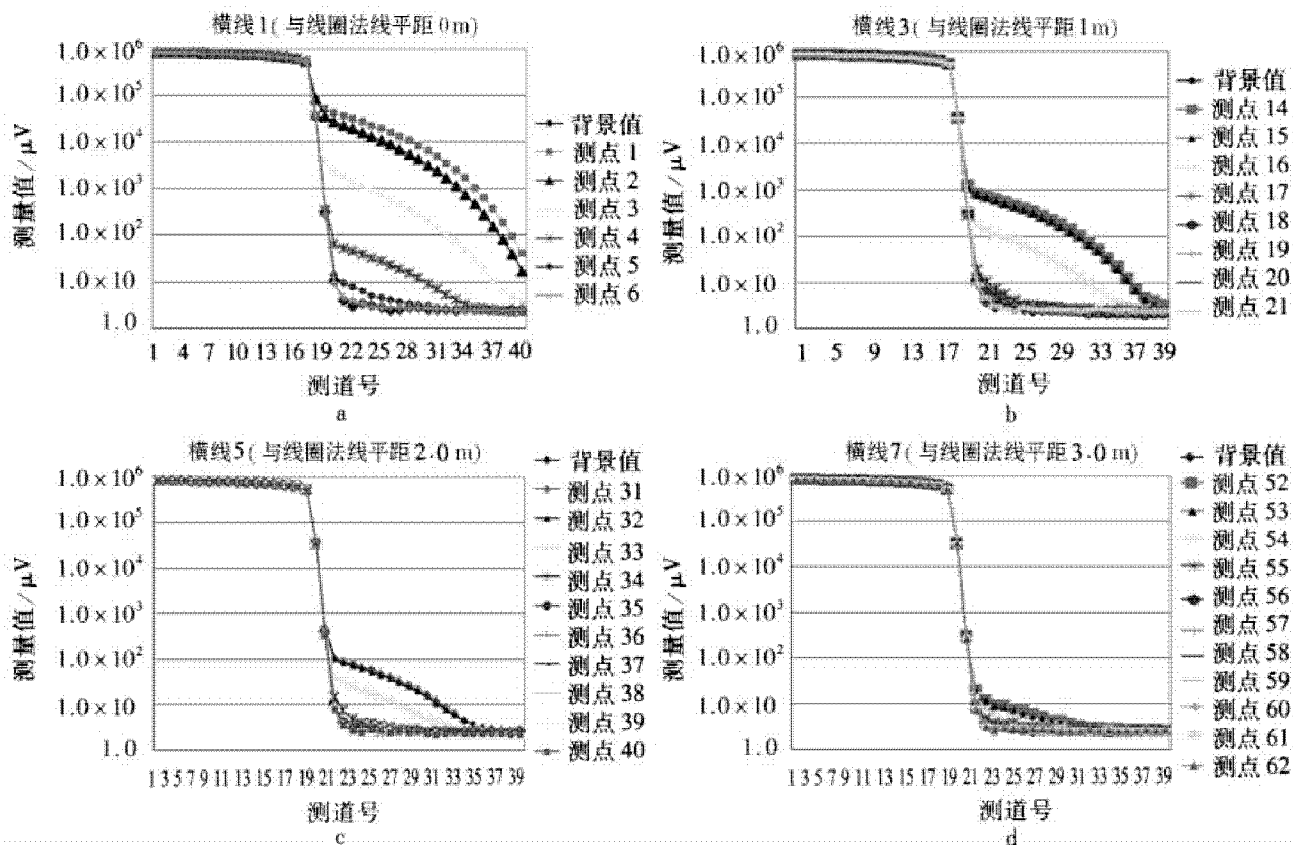


图3 铁板试验横测线电压-测道曲线图

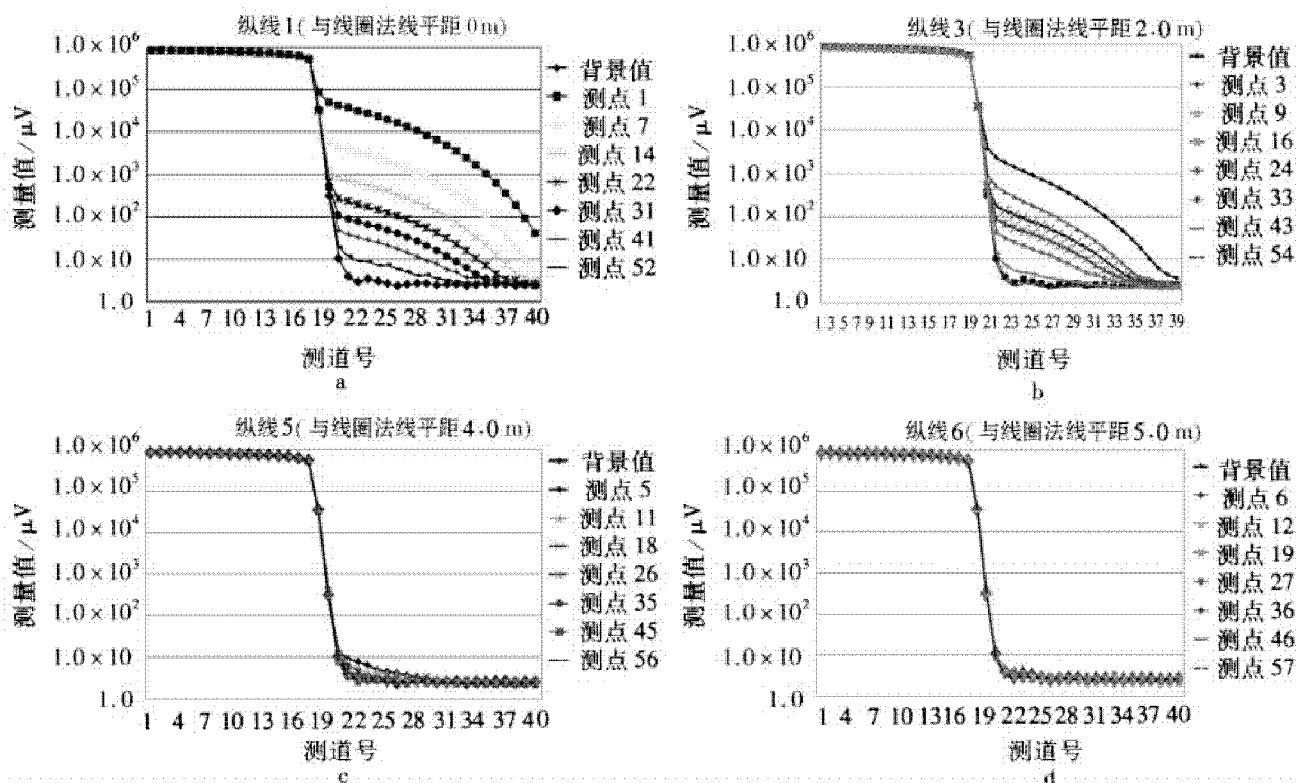


图4 铁板试验纵测线电压-测道曲线图

由图3、4可以看出,铁板干扰试验中对测试瞬变电磁场影响的观测时间主要集中在15~40测道之间,随着铁板体从线圈中心向巷道走向外侧移动,其影响程度逐渐减小。其中图3(d)显示,当铁板干扰体与线圈框平面相距达到3.0m时,其电压测量值与背景呈现为一个数量级,即由铁板产生的干扰影响较小;且与线圈侧边相距达到4.0m时(图4(c)),其电压测量值与背景相差很小;达到5.0m时(如图4(d)),测量值与背景近乎无差异,即由铁板产生的干扰影响消失。

纵横向测试结果分析,干扰场响应在线圈横侧向上减小幅度较法线平面方向大,如横向测线从第5测点(即铁板边缘离线框边2.0m)开始试验物的瞬变电磁场的响应值已全部减弱至与背景值同一

个数量级,影响基本消失。

3) U型钢干扰试验。数据采集时U型钢竖直放置,沿横测线1、3、5、7的各个测点移动,获得U型钢在各测点时的瞬变电磁场响应。图5为U型钢沿这4条横测线所获得的电压-测道曲线结果。图6为U型钢在线圈法线平面方向影响特征分布结果,其测线分别为纵线1至纵线4。

根据U型钢干扰试验的电压-测道曲线结果(见图5~图6)综合分析认为,从纵线方向的纵线1至4来看,从纵线3开始即测点离开线圈侧边1.0m时,U型钢对瞬变电磁场的干扰影响消失;从横线方向上看,从横线5开始即测点离开线圈平面2.0m时,U型钢对瞬变电磁场的干扰影响消失。

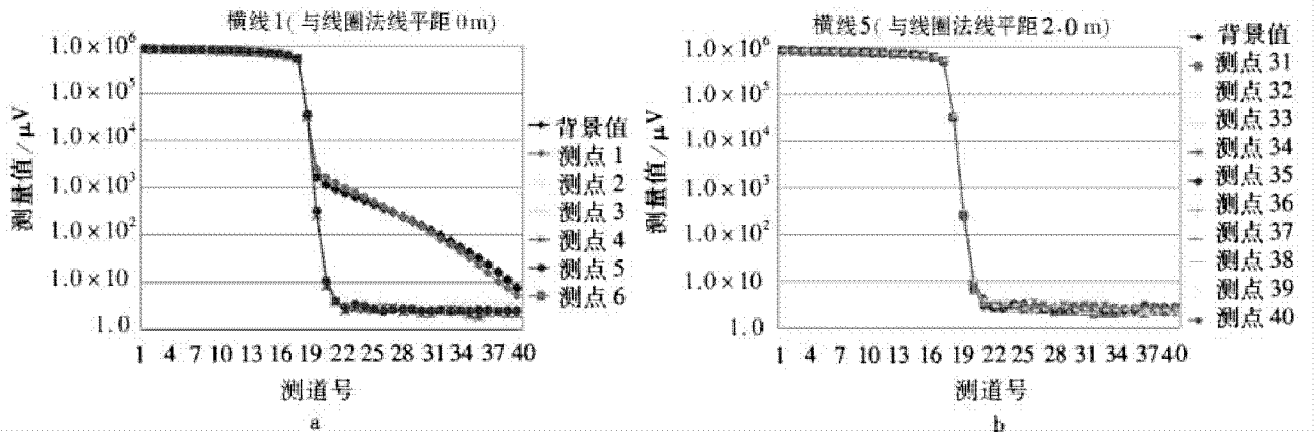


图5 U型钢试验横测线电压-测道曲线图

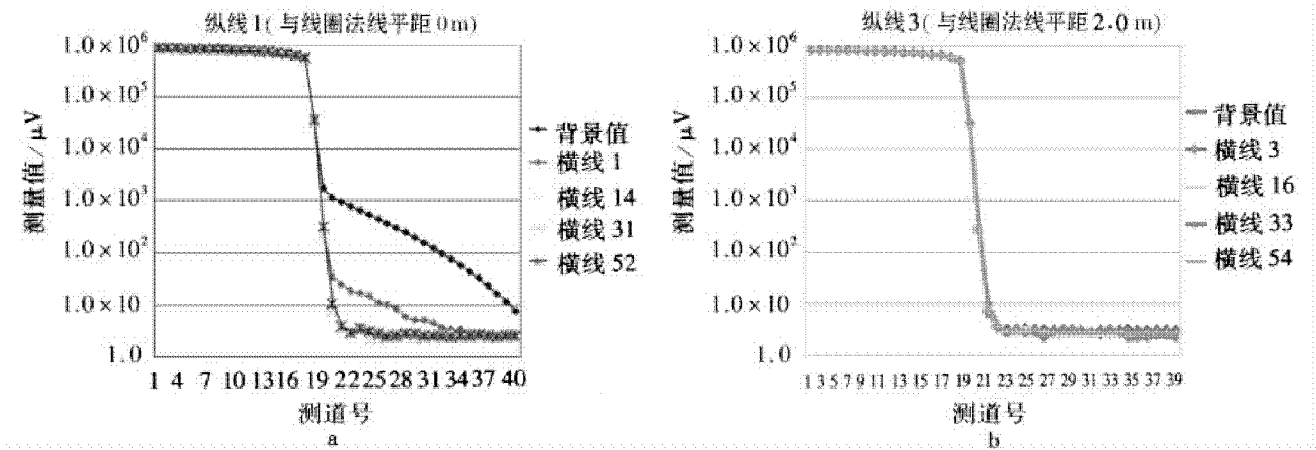


图6 U型钢试验纵测线电压-测道曲线图

试验中铁板面积较大,与U型钢相比,两者的测试电压值相差100倍以上,表明金属物件的体积对测试结果影响程度差别明显。图7为各测线测点移动时其中的第22测道观测值的变化趋势,在线圈中心的法线方向和横侧向上,观测电位值随试

验物件远离离开线圈,其响应值呈指数衰减,且在横向上其衰减的梯度明显大于法线方向,且有个拐点,出现在线圈内至线圈外的移动时,说明线圈正面框内金属干扰影响程度远较框外大。

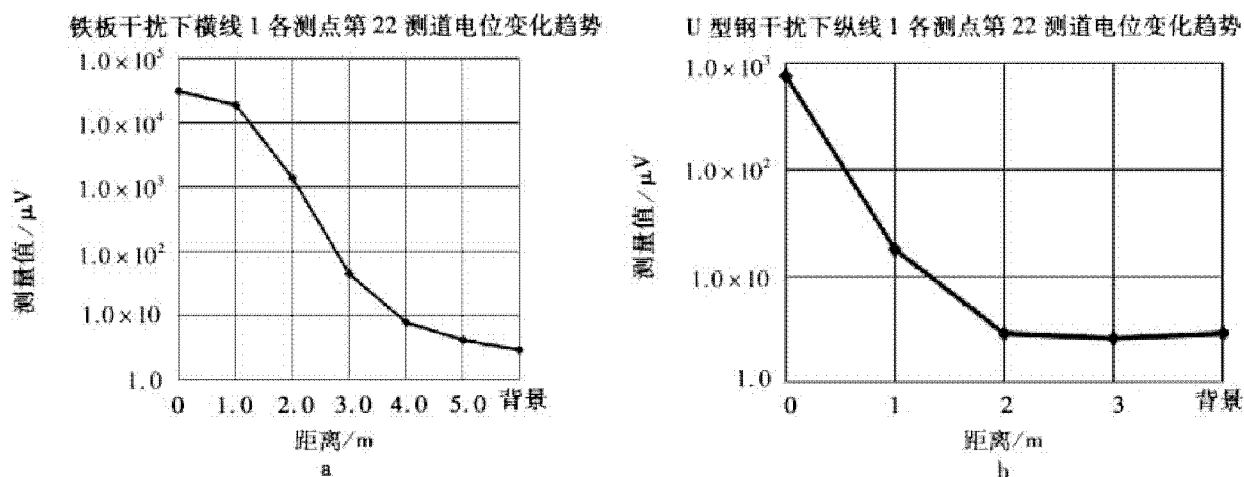


图7 不同金属干扰条件下测道观测值的变化趋势

4 结论

通过实际巷道不同金属物件对瞬变电磁场的干扰影响测试试验与分析,获得

1) 感应电磁场的分布在以重叠回线为中心的空间中,回线内分布密度相对高,当空间中存在金属体时,会改变这种高阻态的分布,金属体及其附近电流线密度增大,使得空间中的瞬变电磁响应加强。

2) 以重叠回线为中心的巷道空间中,存在一个响应体积空间,该空间中金属体的瞬变电磁场响应,在法线方向上随离开线圈的距离增加,观测电压值呈指数衰减,衰减速率与低阻体大小有关,体积越大则衰减速率越小;在横向上观测电压值呈指数衰减,但有明显的响应拐点,且出现在金属体从线圈内移到线圈外处。

3) 试验金属物条件下,线圈法线方向金属物离开线框平面2.0~3.0m、横侧面方向金属物离开线圈框边1.0~4.0m时,其影响程度消失。其中金属干扰体的体积和面积越大,则电磁场响应体积空间就越大;反之,响应体积空间就越小。

4) 测试体积空间中的金属干扰体,对瞬变电磁场观测的全程都有影响。因此需要对金属异常响应特征加以校正。

受测试时间和条件所限,对于金属干扰物件的

大小及所在巷道侧帮位置等细致的影响还需进一步测试与分析。

参考文献:

- [1] 张平松,刘盛东,李培根,等. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用[J], 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1107-1114.
- [2] 刘树才,刘志新,姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J], 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414-417.
- [3] 岳建华,姜志海. 矿井瞬变电磁探测技术与应用[J], 能源技术与管理, 2006(5): 72-75.
- [4] 于景邨,刘志新. 用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究[J], 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 542-546.
- [5] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机理与技术研究[D], 中国矿业大学, 2008.
- [6] 孟陆波,李天斌,段铮. 隧道超前地质预报中不良地质体的瞬变电磁响应特征[J], 中国铁道科学, 2011, 32(6): 69-75.
- [7] 武中华,李文尧. 矩形线圈自感的精确表达式[J], 物探化探计算技术, 2011, 33(5): 511-516.

(责任编辑:姚多喜,李 丽)

带式输送机防撕裂实时检测技术研究

苏 畅, 王从东

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 由于国内现有带式输送机防撕裂实时检测技术不但价格昂贵而且环境适应性差, 通过对带式输送机输送带发生撕裂事故原因及现有防撕裂实时监控技术的应用情况分析, 基于 zigbee 技术进行无线信息传输, 通过对输送带结构改进, 提出一套新的实时检测方案。利用检测输送带气囊内压力变化, 判断输送带工作情况是否正常。结果表明: 当发生刺穿、撕裂或断裂时立刻报警并制动, 能起到有效的检测和保护作用。

关键词: 输送带; 防撕裂; 实时检测

中图分类号: TD44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0060-03

Real-time Detection Technology for Prevention of Conveyor Belt Ripstop

SU Chang, WANG Cong-Dong

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: Existing domestic real-time detection technology of conveyor belt ripstop is not only expensive but also environmental adaptability. The causes of conveyor belt ripping accidents and the application of ripstop monitoring technology were analyzed. Based on the wireless information transmission with zigbee technology, a new real-time detection method was proposed with improvement of belt's structure. Conveyor belt working status can be determined by detection of pressure change in air bag of the belt. The results showed that the new method is effective in detection and protection from the accidents by immediate alarming and braking, when belt being punctured, ripped or broken.

Key words: conveyer belt; ripstop; real-time detection

带式输送机作为长距离连续运输设备广泛被应用于矿山、港口、电力、建筑等部门。带式输送机较其他输送设备, 具有连续输送能力强、运行效率高、易实现自动控制等诸多优点。但在实际使用过程中, 因为运输物料形状的不规则性, 如金属、岩块等硬锐物体卡在某处并划破输送带而造成输送带的刺穿、撕裂。由于输送带运行速度一般较高, 如不能及时发现、停车, 将会撕裂整条输送带, 影响生产的顺利进行, 并造成企业直接和间接经济损失。因此, 带式输送机输送带撕裂的预防和保护研究对企业单位而言意义重大^[1]。

常见撕裂原因和现象主要有:

1) 异物划伤: 损伤发生在溜槽下部, 当有硬锐

物体比溜槽纵向尺寸大时, 异物就会卡在溜槽下部通过输送带向前运动增压, 从而划伤输送带。

2) 输送带跑偏撕裂: 带式输送机在运行过程中, 输送带单侧偏移较多时, 在一侧形成褶皱堆积或折叠, 受到不均拉力或被夹伤及摩擦刮伤等造成撕裂。

3) 物料卡压堵塞撕裂: 该情况发生在溜槽下部。在特殊情况下大块物料卡在溜槽前沿与输送带之间, 强力挤压输送带造成撕裂。另一种情况是当装载点处给料突然增大, 使输送带装料堵塞, 经长时间摩擦, 而引起输送带撕裂。

4) 抽芯撕裂(只发生于钢丝芯输送带): 输送带在剧烈的冲击力作用下, 有时会造成钢丝芯断

裂,经长时间的磨、压、折、拉等外力作用,断裂的钢丝芯会从输送带接头处、粘口处磨损比较严重处露出盖胶。当露出达到一定长度时就可能绞入滚筒、托辊等处,随着输送带的运转,钢丝芯从输送带盖胶中抽出,造成撕裂^[2-3]。

为了有效预防输送带撕裂,从 70 年代开始,国内外专家陆续对输送带撕裂检测装置和防治方法进行研究,目前国外研究的装置,不仅从接触式发展到非接触式,还从单一化发展到智能化。检测方法也包括嵌入法、光电传感技术、超声波扫描技术和原子物理方法等。目前国内常用输送带撕裂检测的产品主要有棒形防撕裂装置、弦线式装置、条形板压力开关、物料泄露检测、超声波检测等^[4]。

上述带式输送机输送带撕裂检测的方法和设备存在造价高昂,维护复杂,误动作多,而且其检测动作只有在输送带撕裂后才能工作,不能在输送带发生撕裂事故第一时间进行预警。

1 新型气压式撕裂检测装置的设计

1.1 基本原理

新型气压式撕裂检测装置,包括输送带,数据采集发射模块和数据接收模块和检测控制模块。通过对输送带进行改装,将其连续分成若干段,每段底部设有充气封闭气囊,气囊内置有数据采集发射模块(见图 1)。数据采集发射模块包括微型气压传感器、微型位置传感器、数据采集处理器及无线发射器,数据采集发射模块可以采集气压和位置数据后通过无线发射器发射出来。数据接收模块设置在输送带附近,数据接收部分由无线接收器、解码器、编码器和微处理器组成,在微处理器控制下接收无线电传来的数据,当一组格式数据接收完毕后,由接收电路里的解码器对格式数据进行解码,并由编码器将解码后信息数据进行相应的编码和处理,然后将气压和位置信息传送给检测控制模块。所述的检测控制模块设置有数据监控软件及与输送带制动系统相连的计算机(见图 2)。

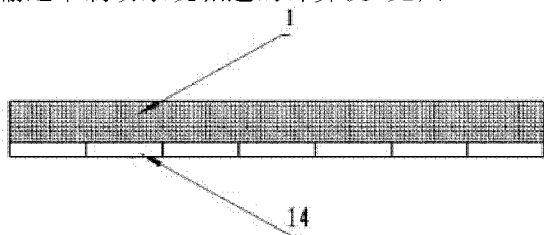
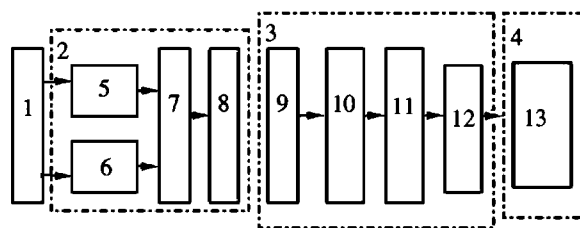


图 1 输送带的剖面图



1. 输送带;2. 数据采集发射模块;3. 数据接收模块;4. 检测控制模块;5. 微型气压传感器;6. 微型位置传感器;7. 数据采集处理器;8. 无线发射器;9. 无线接收器;10. 解码器;11. 编码器;12. 微处理器;13. 计算机;14. 封闭气囊

图 2 系统结构示意图

1.2 结构介绍及工作原理

首先将放置在封闭气囊 14 内的微型气压传感器 5 和微型位置传感器 6 进行编号,并在数据监控软件中按照编号分别显示相应的气压值和位置。在输送带正常工作状态下,根据所有微型气压传感器 5 通过带式输送机相同工作位置时测定的气压值,确定该工作位置输送带应有的合理的气压值变化区间,并将上述的气压值变化区间预设成正常工作气压值标准区间存入在数据监控软件中。数据监控软件将实时检测的输送带通过输送机某个位置的气压值和该位置正常工作气压值标准区间进行比较,当实时检测的气压值在上述的正常工作气压值标准区间内时,表明该通过位置的输送带正常工作;当气压值不在正常工作气压值标准区间内是则表明通过该位置的输送带工作异常。当出现上述的输送带工作异常时,通过实时检测的气压值相对于正常工作气压值标准区间的不同变化在监控系统中设置报警提示。实时检测的气压值超过正常工作气压值标准区间时表明该位置可能出现积煤或跑偏;当实时检测的气压值低于该正常工作气压值标准区间表明该位置的输送带出现裂口、老化等导致缓慢漏气;当实时检测的气压值瞬时变为 0 时,表明该未知的输送带出现刺穿、撕裂或断裂。出现上述的工作异常时数据监控软件通过带式输送机制动系统相连,可瞬时制动停止输送机工作。

1.3 带式输送机实时监控方法

在前面的描述可知,要完成新型气压式撕裂检测装置,必须具备实时监控系统,无线组网传输能力,和报警指示及记录功能等。

把改装的输送带,每段称为一个节点,每个节

点都有自己的实时监控及数据无线发射能力,如下图所示。首先每个节点都有自己的气压传感器和位置传感器,反应此段输送带的当前状态,再经过信号处理电路的滤波放大等得到一定的电压值,再送给AD转换,单片机控制其每隔一定时间转换一次,判断一次,与预先设定好的正常状态相比较,若超出范围则程序返回警报值,若在正常范围内则程序返回正常值。再把返回值和节点号经过预先规定的通信协议经过无线发射给终端(见图3)。

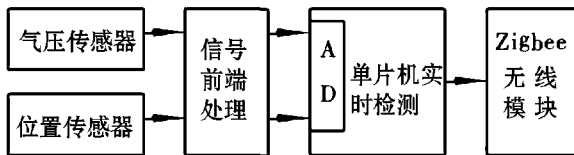


图3 节点检测功能图

单片机可选择德州仪器的MPS430F系列,具有16位总线的带FLASH的单片机,具有统一的中断管理,具有片内硬件乘法器、两个16位定时器、一个多路的12位的模数转换器、一个看门狗、支持8M的时钟等。其可以在超低功耗模式下工作,对环境和人体的辐射小,可靠性能好,加强电干扰运行不受影响,适应工业级的运行环境。综上所述其具备了16位定时器和自带12位AD,完全满足此装置实时性要求,其内部看门狗和高可靠性,给装置增强了稳定性(见图4)。

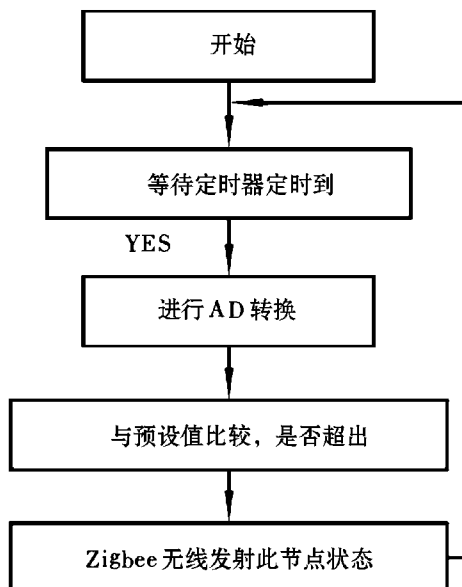


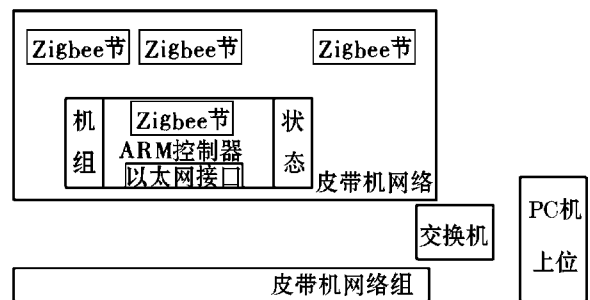
图4 节点检测流程

由于每个节点距离短,节点量大,所以综合考虑在一个输送机组内的节点选用zigbee技术进行无线组网。Zigbee是一种新兴的短距离、低功耗、低复杂度、高可靠性的无线网络技术,在整个网络

范围内,每一个Zigbee网络数据模块之间可以互相通信,且具有自动组网功能,并且每个网络节点不仅本身可以数据采集,还可以自动中转别的网络节点传过来的数据资料。Zigbee具有高可靠性,从很多方面为系统提供保障。物理层采用直接扩频技术,能在一定程度上抵抗干扰;应用层具有应答重传功能;MAC层的CSMA机制使节点在发送前先监听信道,从而起到避开干扰的作用;当Zigbee网络受到外界干扰无法正常工作时,整个网络可动态的切换到另一个信道上。从而保证了一个带式输送机网络的稳定性。

基于Zigbee的优点装置选用TI公司新一代SOC芯片CC2530,此芯片系统解决方案,支持IEEE802.15.4/Zigbee/Zigbee RF4CE标准。支持最新RemoTI的ZigBee RF4CE协议栈,以简化开发,允许芯片无线下载/空中升级;支持系统编程。此外其结合了一个完全集成的高性能的RF收发器。

考虑到每个带式输送机距离较远,井下工作环境情况,每个输送机网络必须有一个接收终端,把这个机器的Zigbee网络上的状态数据接受并以有线的方式发送到以太网上去,供远端PC机进行监控(见图5)。此终端可以增加自己的状态显示,报警输出等功能,方便机边工作人员及时发现。当然此终端有着控制带式输送机的功能,当检测到报警节点时,立即停机。



关于曲柄滑块机构连杆运动瞬心线特征的研究

谭维奇, 谢鸿满

(安庆职业技术学院公共基础部, 安徽 安庆 246003)

摘要: 绘出了平面曲柄滑块机构连杆运动的定瞬心线, 用图解法给出了瞬心线的轨迹的参数方程, 并分多种情况进行了讨论。用数学方法证明了当曲柄 AB 和连杆 BC 相等时, 对心曲柄滑块机构(偏距 $e=0$) 连杆 BC 运动的定瞬心线 π_4 和动瞬心线 π_2 均为圆, 其替代机构——内啮合圆柱齿轮传动机构中, 与内齿轮啮合的外齿轮上各点的运动轨迹分别为直线运动、圆运动、椭圆运动和内摆线运动。研究这些点的运动学特征, 将会大大拓宽机构运动设计的思路 and 范围。

关键词: 曲柄滑块机构; 瞬心线; 齿轮传动

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0063-04

Research on Characteristics of Centrode of Link Motion of Crank - Slider Mechanism

TAN Wei - qi, XIE Hong - man

(Department of Public Basic Courses, Anqing Vocational and Technical College, Anqing Anhui 246003, China)

Abstract: The fixed centrode of link motion of crank - slider mechanism was presented in the paper. The parameter equation of centrode track was given by graphical method and discussed at different situations. By mathematical method it was proved, that when the crank AB is equal to the connecting rod BC, the fixed link motion centrode π_4 and the variable centrode π_2 are both round (if offset $e=0$), and in its substitute, the internal spur gear transmission mechanism, trajectories of points on the external gear meshing with the internal gear is linear motion, circular motion, elliptical motion, and hypocycloidal motion, respectively. The research on the kinematics characteristics of the points will broaden mind and scope of mechanism motion designing.

Key words: crank - slider mechanism; centrode; gear transmission

当两构件互作平面平行运动时, 在这两构件上速度相同的瞬时重合点称为速度瞬心, 简称为瞬心。瞬心的位置只是瞬时的, 它将随两构件的运动而变化。如果将一切可能状态下的瞬心位置点连接起来, 就得到两条瞬心的轨迹, 称为相对瞬心线。如果两构件中有一构件为机架, 则在机架上的瞬心轨迹称为定瞬心线, 而在运动构件上的瞬心轨迹称为动瞬心线。平面四杆机构定瞬心线和动瞬心线如图 1 所示。

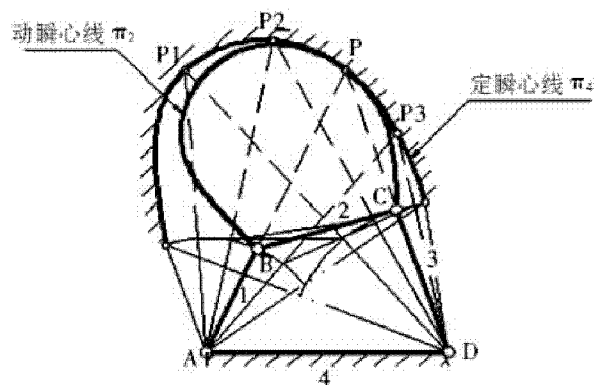


图 1 定瞬心线和动瞬心线求法

收稿日期: 2012-07-29

作者简介: 谭维奇 (1966-), 男, 安徽和县人, 副教授, 硕士, 研究方向: 应用数学。

图1中给出了定瞬心线 π_4 的求法,至于动瞬心线 π_2 的求法,可将连杆2作为机架,作出构件4相对于机架2的瞬心的一系列位置,将其连接成光滑曲线,即可得动瞬心线 π_2 。也可用覆盖三角形法求得动瞬心线 π_2 。

如将平面四杆机构演变为平面曲柄滑块机构,我们来探讨一下连杆运动瞬心线的一些特征。

1 连杆运动定瞬心线的特征

对心曲柄滑块机构(偏距 $e=0$)和偏置曲柄滑块机构(偏距 $e\neq 0$)连杆运动定瞬心线(见图2和图3)的特征。

平面曲柄滑块机构连杆运动的定瞬心线求法如同图1。图2所示对心曲柄滑块机构($AB < BC$, 偏距 $e=0$)连杆BC运动的定瞬心线 π_4 ,从图2可看出定瞬心线 π_4 关于X轴对称。图3所示偏置曲柄滑块机构(偏距 $e\neq 0$)连杆运动定瞬心线 π_4 ,它无对称轴。在图3和图4中,当 $AB \perp X$ 轴时,连杆BC对机架的速度瞬心P趋于无穷远, CP_∞ 为定瞬心线 π_4 的渐近线。

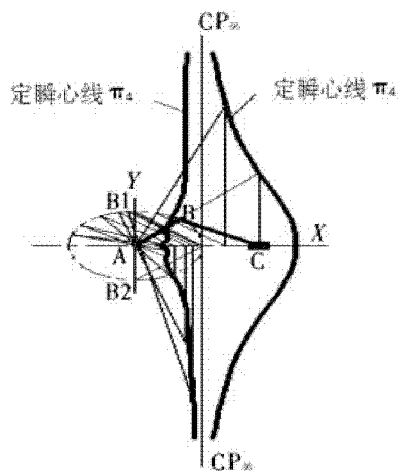


图2 ($e=0$)定瞬心线求法

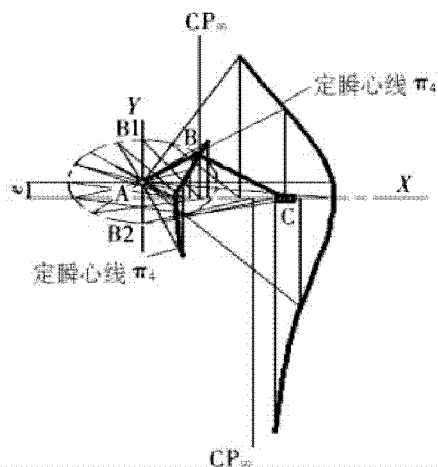


图3 ($e\neq 0$)定瞬心线求法

2 连杆BC运动瞬心线的特征

当曲柄AB和连杆BC相等时,对心曲柄滑块机构(偏距 $e=0$)连杆BC运动瞬心线(如图4所示)的特征。

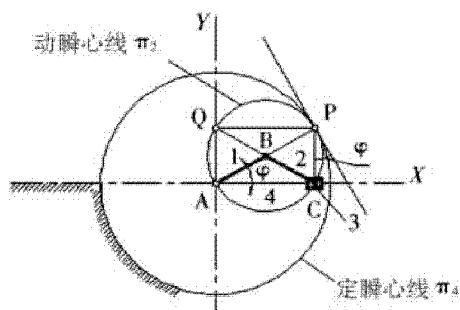


图4 定瞬心线和动瞬心线均为圆

从图4中可以看出, $PC \perp AC$,PC与AP相交于P。P点即为连杆BC相对于机架4的速度瞬心,无论滑块C处于什么位置,P点的运动轨迹就是连杆BC相对于机架4的定瞬心线 π_4 。 $AP = AB + BP$, $BC = BP$, $AP = AB + BC = 2AB = \text{定值}$ 。这说明构件2(连杆BC)相对于机架4的定瞬心线 π_4 是以A点为圆心,以 $AP = 2AB$ 长为半径的圆。

如果以构件2(BC)为机架,机构演变为曲柄摇块机构,AB为曲柄,且绕A点转动。 $PC \perp AC$,AP与PC相交于P,P点即为构件4相对于机架2(BC)的速度瞬心,无论滑块C处于什么位置,P点的运动轨迹就是构件4相对于机架2(BC)的动瞬心线 π_2 。 $AP = AB + BP = 2AB = \text{定值}$,这说明构件4相对于机架2(BC)的动瞬心线 π_2 是以B点为圆心, $AP = 2AB$ 长为直径的圆。

连杆BC的定瞬心线 π_4 和动瞬心线 π_2 均为圆,连杆BC的运动就相当于动瞬心线圆 π_2 沿定瞬心线圆 π_4 纯滚动,其接触点P即为连杆BC与机架4的速度瞬心。

互作平面平行运动的两构件总可用它们的相对瞬心线的纯滚动来实现,也就是说,它可以转化为运动完全相同的共轭曲线机构。图4中连杆BC运动的定瞬心线圆 π_4 和动瞬心线圆 π_2 必随两构件的相对运动而作无滑动的滚动,它可以用内啮合圆柱齿轮机构传动来替代。用固定内齿轮Z4替代定瞬心线圆 π_4 ,用齿轮Z2替代动瞬心线圆 π_2 (见图5)。图5和图4的运动规律将完全相同。

3 齿轮Z2上各点的运动特征

内啮合圆柱齿轮机构传动中,齿轮Z2替代动

瞬心线圆 π_2 后, 齿轮 Z_2 上各点的运动特征。

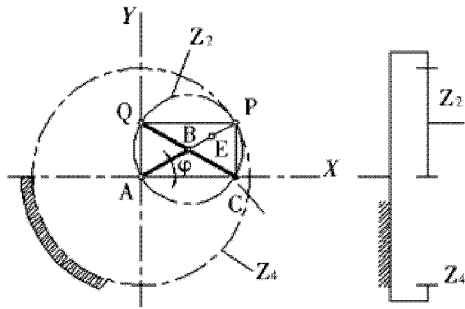


图 5 内啮合圆柱齿轮传动

在齿轮 Z_2 上, 建立坐标系如图 5 所示, 假定 $AB = a$, 则 $BC = BP = BQ = a$, 令曲柄 AB 转动的角速度为 ω , 转动时间为 t , $\phi = \omega t$, 各点的运动规律如下。

A 点: $X = 0$, $Y = 0$ 。速度 $v_A = 0$, $a_A = 0$

3.1 在 AP 线上, 各点的运动轨迹是圆

假定 E 为 AP 线上任意点, 令 $BE = b$, 则 E 点轨迹为

$$\begin{cases} x = (a+b)\cos\omega t \\ y = (a+b)\sin\omega t \end{cases} \quad (1)$$

从而求得任意点 E 的速度为

$$V_x = \frac{dx}{dt} = -(a+b)\omega\sin\omega t \quad (3)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = (a+b)\omega\cos\omega t \quad (4)$$

任意点 E 的加速度为:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -(a+b)\omega^2\cos\omega t \quad (5)$$

$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -(a+b)\omega^2\sin\omega t \quad (6)$$

E 点在 BP 区间, b 取正值; E 点在 AB 区间, b 取负值。

3.2 其它各点运动轨迹

在 CQ 线上, 除 C 点和 Q 点外, 其它各点运动轨迹一定是椭圆。

C 点运动轨迹为

$$\begin{cases} x = 2a\cos\omega t \\ y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$(8)$$

也就是说, C 点一定沿 X 轴作直线运动, C 点速度为

$$V_x = \frac{dx}{dt} = -2a\omega\sin\omega t \quad (9)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = 0 \quad (10)$$

C 点加速度为

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -2a\omega^2\cos\omega t \quad (11)$$

$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = 0 \quad (12)$$

Q 点轨迹为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 2a\sin\omega t \end{cases} \quad (13)$$

Q 点一定沿 Y 轴作直线运动, Q 点速度为

$$V_x = \frac{dx}{dt} = 0 \quad (15)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = 2a\omega\cos\omega t \quad (16)$$

C 点加速度为

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = 0 \quad (17)$$

$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -2a\omega^2\sin\omega t \quad (18)$$

CQ 线上其它各点运动轨迹一定是椭圆。如图 6 所示, 假定 M、N 为 CQ 线上任意点, 令 $CB = a$, $BM = b$, 为了方便, 不妨令 $NB = b$, 而 $\angle QCA = \angle PAC = \omega t$ 。很容易证明 M 点轨迹为

$$\begin{cases} x = 2a\cos\omega t - (a+b)\cos\omega t = (a-b)\cos\omega t \\ y = (a+b)\sin\omega t \end{cases} \quad (19)$$

$$(20)$$

N 点轨迹为

$$\begin{cases} x = 2a\cos\omega t - (a-b)\cos\omega t = (a+b)\cos\omega t \\ y = (a-b)\sin\omega t \end{cases} \quad (21)$$

$$(22)$$

这就是椭圆的参数方程, 其轨迹图形如图 6 所示。

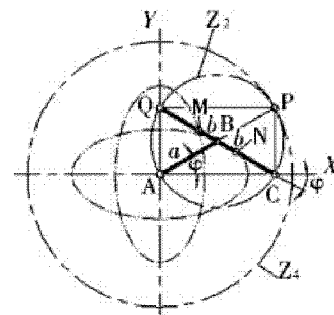


图 6 点的运动轨迹为椭圆

M 点速度为

$$V_x = \frac{dx}{dt} = (b-a)\omega\sin\omega t \quad (23)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = (a+b)\omega\cos\omega t \quad (24)$$

M 点加速度为:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = (b-a)\omega^2\cos\omega t \quad (25)$$

$$a_y = \frac{d^2 y}{dt^2} = -(a+b)\omega^2 \sin \omega t \quad (26)$$

对 N 点轨迹的讨论同 M 点。

图 6 可以转化为双滑块机构,椭圆规机构就是它的应用,如图 7 所示。

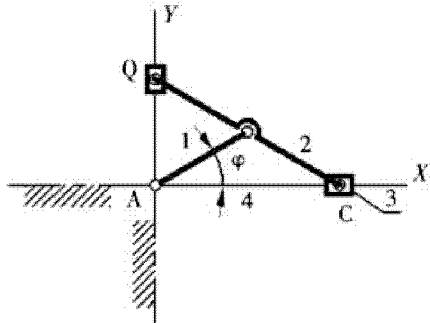


图 7 椭圆规机构

3.3 齿轮 Z2 上其它各点的运动轨迹为内摆线

如图 8 (a) 及其局部放大的图 8 (b) 所示, 设齿轮 Z2 上任意一点 F, 令 $AB = a$, $BF = r$, F 点绕 B 点转动, 而 B 点同时也绕 A 点转动, 可以设想 F 点所在的和 P' 点所在的是互相啮合的内外齿轮的节圆, 当 $\varphi = 0$ 时, F 点与 E 点重合, 当 AB 从 $\varphi = 0$ 旋转到图示位置时 ($\varphi = \varphi$), 上的 E 点运动到 F 点, 因为齿轮沿齿轮做无滑动的滚动, 所以的长度一定等于弧的长度,

$$\therefore P'E = (a+r)\omega t = P'F \angle P'BH = \frac{P'F}{r} =$$

$$\frac{(a+r)\omega t}{r}, \text{ 令 } \angle BFG = \angle BHE = \theta,$$

则 $\angle P'BH = \omega t + \theta, \theta = \angle P'BH - \omega t = \frac{(a+r)\omega t}{r} - \omega t = \frac{a\omega t}{r}$ 。由此可得, 任意点 F 的轨迹方程为

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t + r \cos \frac{a}{r} \omega t \\ y = a \sin \omega t - r \sin \frac{a}{r} \omega t \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t + r \cos \frac{a}{r} \omega t \\ y = a \sin \omega t - r \sin \frac{a}{r} \omega t \end{cases} \quad (28)$$

这就是内摆线的参数方程, 其轨迹图形如图 8 (a) 所示。因为 F 点是任意选定的, 所以这就证明了齿轮 Z2 上, 除 AP 和 CQ 线上的以外各点的运动轨迹是内摆线。

F 点速度为

$$V_x = \frac{dx}{dt} = -a\omega \sin \omega t - a\omega \sin \frac{a}{r} \omega t = -a\omega \sin \omega t + \sin \frac{a}{r} \omega t \quad (29)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = a\omega \cos \omega t - a\omega \cos \frac{a}{r} \omega t = a\omega \cos \omega t - \cos \frac{a}{r} \omega t \quad (30)$$

F 点的加速度为

$$a_x = \frac{d^2 x}{dt^2} = -a\omega^2 \cos \omega t + \frac{a}{r} \cos \frac{a}{r} \omega t \quad (31)$$

$$a_y = \frac{d^2 y}{dt^2} = -a\omega^2 \sin \omega t - \frac{a}{r} \sin \frac{a}{r} \omega t \quad (32)$$

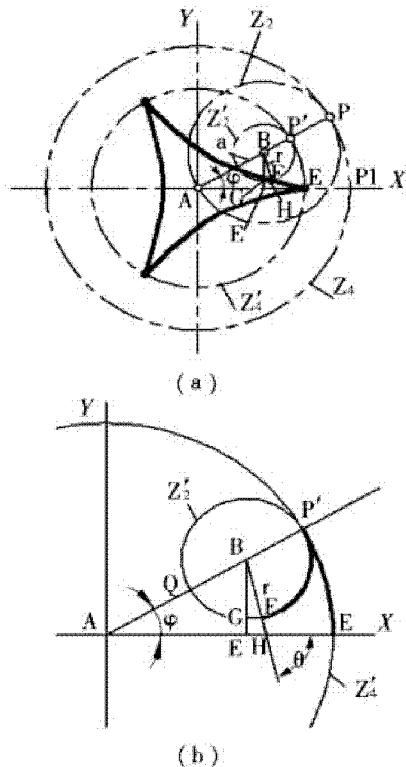


图 8 点的运动轨迹为内摆线

4 结束语

由此证明了当曲柄 AB 和连杆 BC 相等时, 对心曲柄滑块机构 (偏距 $e=0$) 连杆 BC 的定瞬心线 π_4 和动瞬心线 π_2 均为圆, 其替代机构——内啮合圆柱齿轮传动机构中, 与内齿轮啮合的外齿轮上各点的运动轨迹分别为直线运动、圆运动、椭圆运动和内摆线运动。研究这些点的运动学特征, 从而进一步进动力学特征 (本文未涉及) 的研究, 将会大大拓宽机构运动设计的思路和范围。

参考文献:

- [1] 天津大学. 机械原理 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [2] 张世民. 机械原理 [M]. 北京: 中央电大出版社, 1983.
- [3] 四川矿业学院数学教研组. 数学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1978

(责任编辑: 李 丽)

强夯振动监测及衰减规律研究

刘吉敏, 王长柏

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:强夯因其施工简单, 费用低等优点, 成为世界范围内受到广泛应用的一种地基加固处理技术。但是, 强夯施工过程中产生的地表振动也会对邻近的建筑物造成不同程度的损害。为了掌握强夯振动特征及加速度衰减规律, 以广东某核电站二期 BOP 区强夯地基加固工程为例, 通过现场实测振动加速度数据, 分析了强夯振动特征及不同夯能作用下强夯振动加速度衰减规律。结果表明, 强夯引起的地面振动持续时间较短, 在同一个夯点且夯能相同的情况下, 随着夯击数的增加振动加速度峰值大小呈现增加的趋势, 不同夯能作用下场地的加速度振动衰减规律可以用一个统一的公式表示, 便于强夯振动影响范围的确定。

关键词:强夯; 振动; 衰减规律; 监测

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0067-04

Study on Vibration Monitoring and Attenuation Caused by Dynamic Compaction

LIU Ji-min, WANG Chang-bo

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

Abstract: Dynamic compaction is a widely-used method in ground improvement around the world because of its simple constructing procedure and low cost. but, the surface vibration caused by dynamic compaction has different degrees impacts on the adjacent buildings during the construction process. In order to find out the vibration characteristics and the propagation and attenuation law caused by dynamic compaction, the dynamic compaction treatment of BOP section in a nuclear power station was taken as an example in this paper. Based on the site monitoring data, the vibration characteristics and the propagation and attenuation law caused by different dynamic compaction energy are analyzed. The results showed that the vibration duration time is very short; the peak value of vibration acceleration increases with the number of poundings, and one generalized formula is put forward. The attenuation law under different dynamic compaction energy can be expressed by a united formula. It's useful to determine the influence of the vibration.

Key words: dynamic compaction; vibration; attenuation law; vibration monitoring

强夯加固地基就是利用巨大的夯击能, 在地基中产生冲击波和动应力, 对地基土进行挤密, 提高土的强度并降低其压缩性^[1]。该方法施工简单, 费用较低, 加固夯实后能有效地提高其地基承载力, 解决地基不均匀沉降等问题。但是强夯法施工

中产生的强烈振动会对相邻的建筑物带来许多不利的影响, 必须要加以控制。因此, 许多科研工作者针对不同施工和场地条件下强夯振动的影响范围以及强夯振动的衰减规律进行了大量研究^[2-13]。本文结合广东某核电二期工程 BOP 区强

夯法加固处理过程中的振动监测,分析了该场区强夯振动衰减规律,并提出了便于现场应用的强夯振动衰减规律公式。

1 工程概况

根据设计要求,二期工程 BOP 区(由 AB 冷机修车间、AF 备件仓库及办公室和 HX 制氯站、现场第二施工电源配电室、QT 厂房等组成)采用强夯法进行加固处理,为保证强夯施工时核电一期工程核岛、常规岛、开关站等建构物的安全,以及二期土建施工期间新浇混凝土的质量不受强夯振动影响,在进行大规模的强夯施工之前,需对 BOP 区进行了强夯振动监测试验,以确定强夯振动衰减规律和影响范围。

BOP 区拟建场地原始地貌单元为剥蚀丘及沟谷,地形起伏较大,经人工挖填和场地平整后,由地面向下依次为人工填土层、冲洪积卵石和漂石层、坡积粉质粘土层、海积卵石和漂石层残积层、砂质粘土层、基岩。其中人工填土层由大小不均的岩块、砂、粘性土新近堆填而成,粒径以 4~15 cm 为主,个别超过 30 cm,层厚 1.0~12.0 m,为本次强夯主要处理层。冲洪积卵石和漂石层以角岩为主,块径 2~15 cm,层厚 1.90~3.95 m,以薄层状分布。坡积粉质粘土层含多量中等风化角岩碎块及砂,岩块棱角状,粒径以 2~8 cm 为主,层厚为 0.75~5.00 m。海积卵石和漂石层卵石成分主要为角岩和花岗岩,角岩占多数,粒径以 3~10 cm 为主,层厚约为 0.60~4.30 m。残积层砂质粘土层层厚为 1.70~5.00 m,为花岗岩残积土。场地下伏基岩为角岩。

距离核电一期工程较近的 AF 区强夯参数为夯锤重 17 t,直径 2.0 m,夯点间距为 4 m。其中第一个试夯区夯击落高 17.7 m,单点夯击能量为 301 t·m (3 010 kJ, 300 t·m 级);第二个试夯区夯击落高为 14.7 m,单点夯击能量 250 t·m (2 500 kJ, 250 t·m 级);第三个试夯区夯击落高为 11.8 m,单点夯击能量 200 t·m (2 000 kJ, 200 t·m 级)。

2 强夯振动监测

2.1 监测系统及设备

本次强夯振动效应测试系统中,传感器采用 891-Ⅱ型传感器(1 档测试加速度,2 档、3 档和 4 档均测试速度),数据记录采用 WS_USB 海量数字

记录仪及 Vib' SYS 数值振动信号采集分析系统(见图 1)。

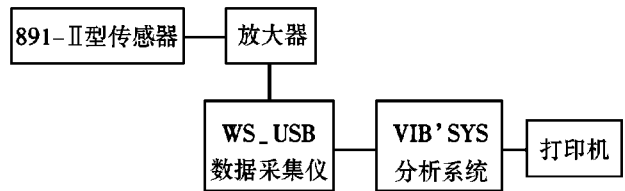


图1 加速度监测系统示意图

2.2 测点布置

从强夯实验区 AF 区至现浇混凝土廊道布置垂直、水平加速度传感器各 6 个(见图 2),其中夯区附近流动测点 2 个,1#~5#测点分别对应核岛、汽机房和 TB 厂房的振动监测,图 2 中未示出。测点传感器布置如图 3 所示。

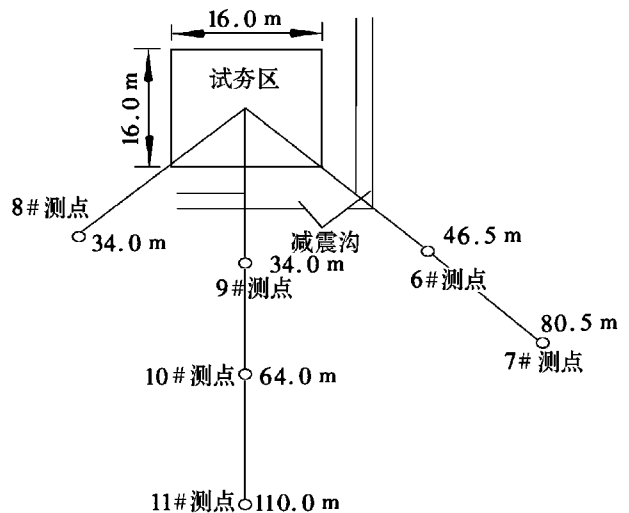


图2 测点布置示意图

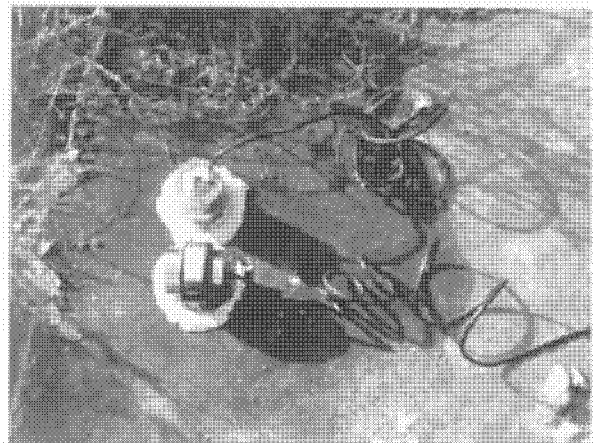


图3 7号测点传感器布置图

2.3 监测结果及分析

AF 区在 $250 \text{ t} \cdot \text{m}$ 夯能作用下距离夯源 30 m 处测点的实测垂直加速度代表性波形如图 4 所示, 该图反映了同一个夯坑从第一锤起夯至收锤标准的最后一击引起的振动全部过程, 另外, 从图 4 中局部放大图可以看出, 单锤强夯引起的振动持续时间在 1 s 左右。图 4a 中实测波形加速度峰值如表 1 所示, 同一夯坑强夯振动加速度与夯击数之间的关系如图 5 所示。结果表明, 在同一个夯点且夯能相同的情况下, 随着夯击数的增加强夯引起的振动大小呈现增加的趋势, 这种增加的趋势由快到慢, 最后基本趋于一致, 其它测点振动加速度也具有相似的变化规律。

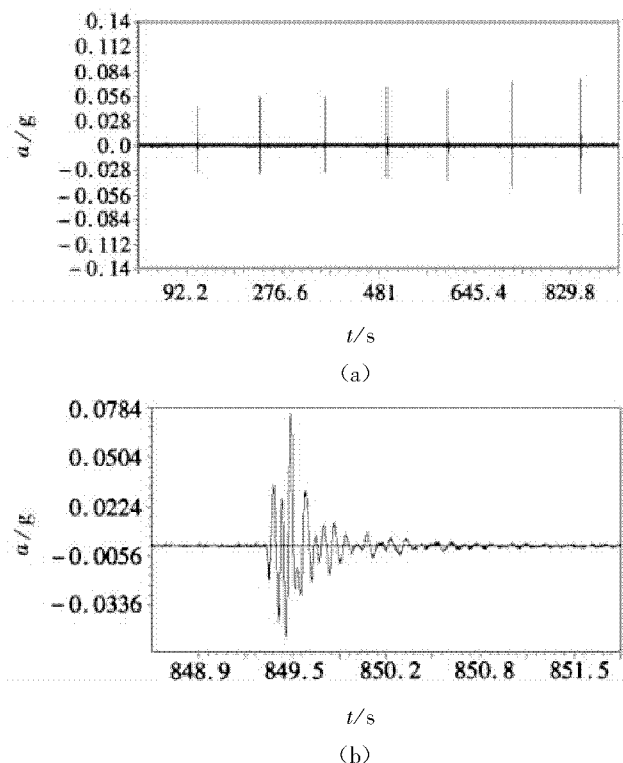
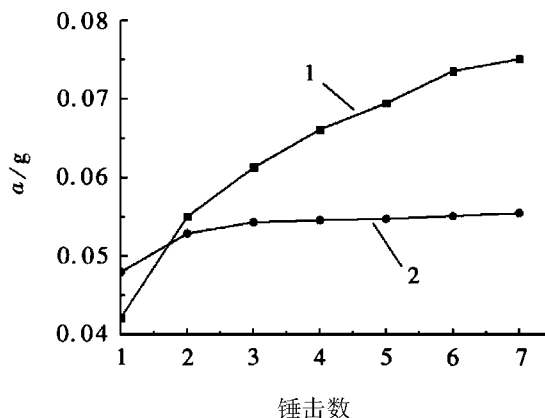


图4 代表性实测波形(a)及最后一锤局部放大图(b)

表1 同一夯坑不同夯击数引起的强夯振动加速度 g

n	1	2	3	4	5	6	7
竖向	0.042 2	0.055 1	0.061 3	0.066 2	0.069 5	0.073 6	0.075 1
水平	0.048 0	0.052 9	0.054 3	0.054 6	0.054 8	0.055 1	0.055 5



1. 竖向振动加速度; 2. 竖向振动加速度

图5 同一夯坑振动加速度与夯击数的关系

由于强夯的每一锤均存在振动大小的差异, 一般而言至收锤标准时即最后一锤的夯击所产生的振动值最大, 因此在进行强夯振动评价时, 可采用最后一击的振动幅值来对周边环境影响的评价分析, 本文根据强夯实测试验数据采用式(1)进行强夯振动加速度衰减规律回归分析。

$$a = k \left(\frac{Q^\alpha}{R} \right)^\beta \quad (1)$$

式中: a 为强夯引起的振动加速度, g ; Q 为夯能, $\text{t} \cdot \text{m}$; R 为夯点到测点之间的距离, m ; k 、 α 、 β 为振动衰减规律参数, 可由实测数据回归分析得到。

为方便公式的应用, 分别对 $\alpha = 1$ 、 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 四种情况进行回归分析(见表2)。由分析结果可以看出, 当 $\alpha = 1/2$ 时, 回归效果较好, 因而可作为施工阶段强夯振动控制计算公式。

表2 强夯振动加速度衰减规律回归分析

	$\alpha = 1$		$\alpha = 1/2$		$\alpha = 1/3$		$\alpha = 1/4$	
	a_{\perp}	$a_{//}$	a_{\perp}	$a_{//}$	a_{\perp}	$a_{//}$	a_{\perp}	$a_{//}$
k	0.01	0.002	0.362	0.222	2.537	1.143	6.346	2.494
β	2.033	1.652	2.148	1.776	2.125	1.768	2.102	1.754
γ	0.935	0.897	0.947	0.941	0.924	0.929	0.907	0.918

注: 表中 a_{\perp} 为垂直加速度, $a_{//}$ 为水平加速度。

3 结论

1) 强夯引起的地面振动持续时间较短,在同一个夯点且夯能相同的情况下,随着夯击数的增加振幅值大小呈现增加的趋势,这种增加的趋势由快到慢,最后基本趋于一致。

2) 采用式(1)进行强夯振动衰减规律回归分析,具有较好的相关性。且该式便于确定强夯振动的影响范围和工程振动控制的应用。

参考文献:

- [1] 蔡袁强,王大力,徐长节,等. 强夯加固机理及其环境影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2005, 26 (S1): 159 - 162.
- [2] 杨明,黄曙英. 强夯振动监测及评估方法在变电站工程中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2011, 44 (S1): 397 - 400.
- [3] 杨龙才,王炳龙. 强夯施工对环境振动的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24 (2): 16 - 20.
- [4] 孙进忠,谭捍华,祁生文,等. 强夯振动的频域分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (4): 412 - 415.
- [5] 水伟厚,朱建锋. 10000kN·m 高能级强夯振动加速度实测分析[J]. 工业建筑, 2006, 36 (1): 37 - 39.
- [6] 倪永军,滕忻利,张雪峰,等. 强夯地振动统计分析与评价[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32 (4): 78 - 82.
- [7] 陆凡东,方向,董文,等. 强夯施工对塑性混凝土防渗墙的振动测试分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31 (1): 68 - 71.
- [8] 刘国振,吕淑然,杨军. 强夯振动效应研究[J]. 安全与环境学报, 2003, 3 (6): 14 - 17.
- [9] 李润,简文彬,康荣涛. 强夯加固填土地基振动衰减规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (S1): 253 - 257.
- [10] 李福民,孙勇. 强夯加固地基振动影响的试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32 (5): 809 - 812.
- [11] 方磊,经绯,刘松玉. 强夯振动影响与构筑物安全距离研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2001, 31 (3): 29 - 32.
- [12] 程祖锋,李萍,湛会芹,等. 某港口工程地基处理中的强夯振动效应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (5): 740 - 744.
- [13] HWANG J H, TU T Y. Ground vibration due to dynamic compaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26 (5): 337 - 346.
- [14] 施有志. 强夯引起的振动规律及环境效应分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21 (3): 144 - 148.

(责任编辑:何学华,吴晓红)

(上接第62页)

为了更好的实现网络传输和实时监控,监控系统可采用多任务、多用户的 Linux 的操作系统,此系统不仅提供了 TCP/IP 和网络数据库的支持,而且还包括了丰富的网络服务。这样可以使装置在网络稳定性大大提高。

2 装置特点

本装置在带式输送机输送带上连续分段设置充气气囊,并在充气气囊内设置微型气压传感器和微型位置传感器,利用局部 Zigbee 无线组网发射接收数据,通过接收检测的气压值数据与正常工作气压值标准区间比较判断完成实时监控。本装置不仅当输送带出现刺穿、撕裂或断裂的等突发事件时第一时间报警并制动,而且可以判断输送带是否出现跑偏、打滑、积物等其他输送带常见问题。本装置不仅克服了以往带式输送机输送带防撕裂检测装置的功能单

一性问题,而且实现了检测的及时准确。

参考文献:

- [1] 张安宁,苏畅. 带式输送机防纵撕超前保护技术[J]. 煤炭科学技术, 2008 (10): 59 - 60.
- [2] 顾凯,陈伟,汪大春. 输煤皮带机皮带撕裂检测装置的设计[J]. 设备管理与维修, 2010 (5): 34 - 37.
- [3] 任晓德. 胶带机纵向撕裂综合保护系统研究[J]. 山西冶金, 2012 (1): 69 - 71.
- [4] 张安宁,尹中会. 带式输送机防纵撕保护研究现状及趋势[J]. 煤炭科学技术, 2007 (12): 77 - 79.

(责任编辑:李 丽)

急倾斜煤层开采地表移动规律数值模拟研究

朱 强, 高明中, 孙 超, 纪文涛, 任 飞

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了研究急倾斜煤层开采下地表沉陷的移动规律, 运用求解非线性大变形问题有限差分法(FLAC3D)对急倾斜煤层开采下进行数值模拟, 重点分析了岩体移动引起的地表变形。结果表明: 急倾斜煤层开采下地表在走向呈对称性下沉盆地, 而在倾向上呈非对称性的兜瓢形下沉盆地, 地表的变形主要集中在煤层顶板方向一侧, 以及最大下沉点和水平移动向煤层的上山方向偏移。

关键词: 急倾斜煤层; 地表沉陷; 数值模拟

中图分类号: TD823 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1098(2012)03-0071-04

Numerical Simulation of Ground Movement Behavior Caused by Mining of Multiple Seams with Big Dip

ZHU Qiang, GAO Ming-zhong, SUN Chao, JI Wen-tao, REN Fei

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to study the steep seam mining under surface subsidence movement law, numerical simulation which is used to solve the nonlinear large deformation problem of the finite difference method (FLAC3D) is carried out for studying of the steep seam in this paper, focus on analysis of rock caused by the movement of the surface deformation. The results show that: steep seam mining under the surface toward symmetric sink basin, and the intention was asymmetric pocket scoop-shaped sink basin, and deformation of the surface side of the seam roof direction, as well as the maximum subsidence point and move horizontally to the coal seam uphill offset.

Key words: steep seam; surface subsidence; numerical simulation

因采矿引起的岩层移动波及到地表, 使地表产生移动、变形、破坏的现象以及过程称为地表移动。开采引起地表移动过程受多种地质因素和开采因素影响, 随着采深、采厚、采煤方法以及煤层产状等因素的不同, 地表沉陷的大小也完全不同。煤系地层倾角是决定上覆岩层的移动和破坏形式及地表移动与变形程度的重要因素之一。当前我国“三下”采煤一直是国内外煤炭行业的重要研究课题, 煤矿开采引起地表沉陷问题一直以来都是矿山研究的热点问题。但是概率积分法只适用于缓倾斜煤层, 由于急倾斜煤层地质条件及破坏机理和水平煤层开采时有本质的不同, 所以对于急倾斜多

煤层开采引起地表移动的许多现象还没有得到满意的解释, 对于急倾斜煤层预计偏差较大。为此迫切需要对这类矿山的地表移动规律问题进行全面研究。本文用建立在拉格朗日算法基础上的FLAC3D有限元分析软件, 对因煤层开采引起地表沉陷规律进行了数值模拟研究, 对急倾斜多煤层开采造成的地表沉陷变形进行预测分析和探讨, 为工程实践提供理论依据。

1 地质背景

新集三矿位于凤台县境内, 处于淮南煤田中段南部的边缘。淮南新集三矿西三采区新生界地层

由第四系和第三系组成,厚度为 143 ~ 167 m,属于厚冲积层。煤层倾角平均为 60°。淮南新集三矿西三采区主要可采煤层有 2 层,分别为 13 - 1 和 11 - 2,煤层间距平均 55 m。由于井田特殊的区域构造位置,煤系地层呈不对称倾伏倒转褶曲形态,地层走向东西。采煤方法目前主要采用伪倾斜柔性掩护支架采煤法。采用全部垮落法管理顶板。

2 急倾斜多煤层开采数值模拟

2.1 模型的建立

根据模型设计的原则,结合新集三矿地质条件,模型的长宽高分别为 1 200 m, 700 m, 400 m (见图 1)。

2.2 本构关系的确立

岩石力学弹塑性数值分析中,物理模型的选择具有较大的灵活性,不同类型的岩体应当采用不同类型的、最适宜的模型。模型是否正确,是否符合

岩石的基本特性,直接影响到计算结果是否有价值。本文主要研究地表沉陷变形移动规律,各模型在开采前处于原岩应力状态,采用理想的弹塑性模型,破坏准则选用 mohr - coulomb 准则。

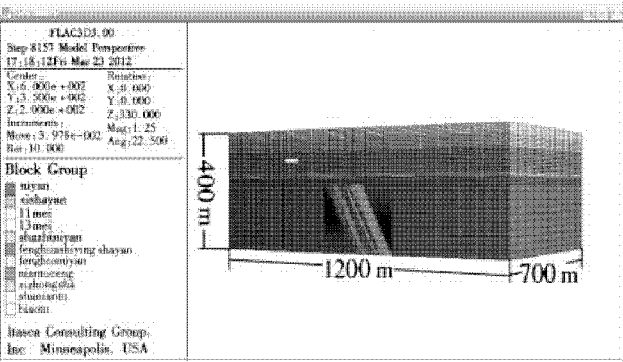


图 1 模型图

2.3 力学参数的选取及边界条件

力学参数的选取由综合因素所确定,以淮南新集三矿为地质原型并结合相关文献所提供的岩体力学参数取值,确定了相关力学参数 (见表 1)。

表 1 力学参数表

序号	岩层	厚度/ m	体积模量/ GPa	切变模量/ GPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	容重/ (kg · m ⁻³)
1	表土	20	0.083 33	0.011 36	0.125	24	0.3	1 790
2	砂粘土	10	0.2	0.030 76	0.126	15	0.12	2 000
3	细中砂	40	0.222 22	0.048 78	0.039	25	0.4	1 870
4	粘土层	75	0.456 522	0.082 677	0.155	30	1.2	2 140
5	风化泥岩	10	1.458 3	0.277 78	5.15	32	0.62	2 340
6	风化石英砂岩	25	5.134 6	1.076 61	2.8	36	2.3	2 680
7	砂质泥岩	15	2.8	0.56	2.4	35	1.8	2 440
8	泥岩	15	4.25	0.653 8	2.2	34	1.5	2 520
9	13#煤	5	0.8	0.16	0.8	20	1.3	1 420
10	泥岩	35	2.976 1	2.049 1	5.2	35	2	2 500
11	细砂岩	20	1.309 5	0.901 93	5.2	24	4	2 500
12	11#煤	5	0.8	0.16	0.8	20	1.3	1 420
13	泥岩	10	2.976 1	2.049 1	5.2	35	2	2 500
14	细砂岩	10	1.309 5	0.901 93	5.2	24	4	2 500
15	泥岩	50	2.976 1	2.049 1	5.2	35	2	2 500

由于研究地表沉陷,模型采用顶面为自由边界,前后左右以及底面为位移约束边界。

2.4 开采方案

模型采用走向长壁,单翼开采,由于研究目

的在于开采完 13 - 1 和 11 - 2 煤层后,地表的移动规律,因此简化开采过程。先开挖 13 - 1 煤,然后开采 11 - 2 煤,模型的煤层开采深度在垂直方向上为 140 m,沿煤层走向 (y 轴) 分布开挖,一次开挖 100 m (见图 2)。

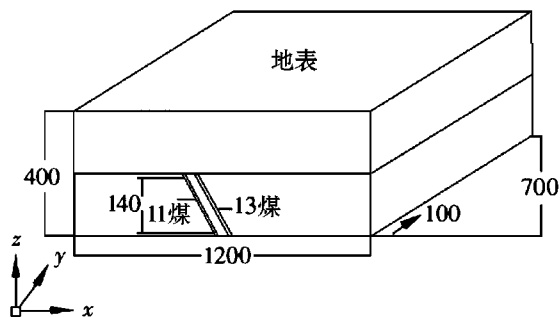


图2 模拟开采图(单位:m)

3 结果分析

通过 flac3D 开挖计算模拟求解,待煤层采完之后,沿煤层倾斜方向做位于 $y = 350\text{ m}$ 处的剖面,得其倾斜剖面的下沉和水平移动数据,导入 excel 里进行计算,得到地表移动变形数据(见图3~图7)。

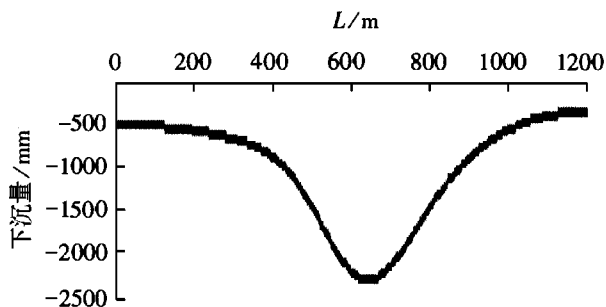


图3 下沉曲线

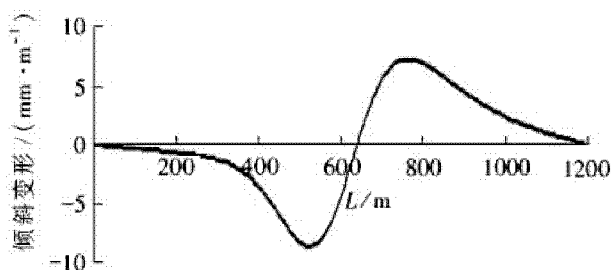


图4 倾斜变形曲线

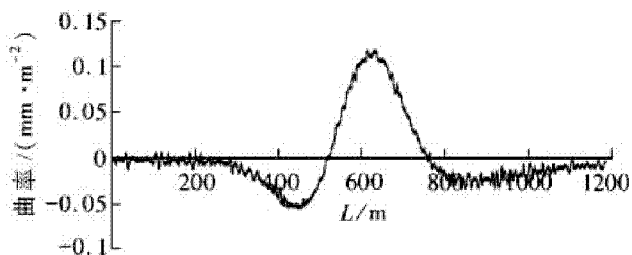


图5 曲率曲线

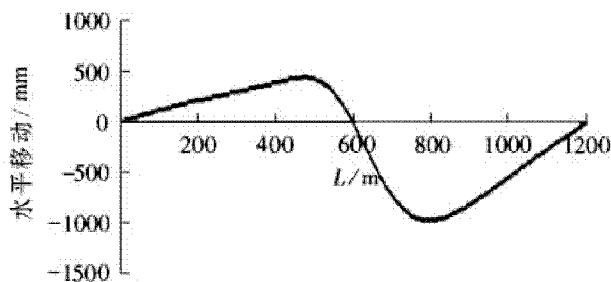


图6 水平移动曲线

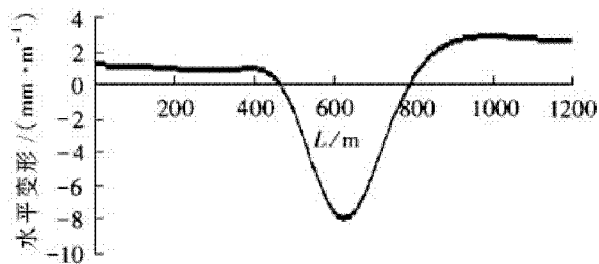


图7 水平变形曲线

由图3和图6可以看出,急倾斜煤层开采呈现出地表下沉的非对称性,13煤在上山方向顶板位于555 m,在下山方向顶板位于685 m,倾斜剖面地表的 最大下沉值 位于距13煤上山方向顶板95 m(即640 m)处,最大下沉值为2 329 mm,向采空区偏移,下山方向的影响范围要大于上山方向的影响范围;煤层倾斜变形曲线的非对称性也十分明显(见图4),曲线以640 m为零界点,上山一侧的倾斜变形以及最大值均大于下山一侧;曲率有一个正曲率区和两个负曲率区,两个负曲率区分布在采空区两侧,上山方向的负曲率区要大于下山方向负曲率区,而两个负曲率区的影响范围均大于正曲率区(见图5),但正曲率区最大值则大于负曲率区,正曲率区的最大值位于640 m处;地表水平移动的曲线的非对称性也很明显直观,下山方向一侧的水平移动最大值要明显大于上山方向(见图6);从倾斜剖面下沉盆地的特点来看,由于冲积层存在,地表影响范围稍大;地表下沉拐点位于倾斜剖面开采范围之外,上山方向拐点位于底板方向的50~70 m,下山方向拐点位于顶板方向的60~90 m,拐点附近地表下沉斜率变化剧烈;倾向上地表裂缝位于采区两侧边界附近,从下沉拐点开始向边界方向的120~130 m范围内;在采区倾斜剖面上,地表的受拉区主要分布于倾斜剖面的两侧(见图7),倾斜剖面中部采空区上覆地表则是以受压应力,受拉处处于最危险位置;采区开采在倾斜剖面上的地表影响范

围为 1 120 m; 倾斜方向上地表变形角度: 边界角为 $48^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 移动角为 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。

急倾斜煤层开采后采空区呈冒落拱形态, 急倾斜煤层开采的破坏范围主要是集中在采空区的偏上山方向 (见图 8)。岩层在自重应力的作用下直接顶顶板产生法向弯曲的同时, 易受沿层理面向采空区的移动和滑落。煤层顶板受剪切或拉伸破坏, 老顶向采空区弯曲, 老顶的弯曲可以分解为沿水平方向和竖直方向两个位移分量。老顶的弯曲变形, 必然引起其上覆基岩的变形。随着岩层运动的向上发展, 最终波及至地表, 使地表的变形呈现出非对称性。将地表数据导入 surfer 中得到地表沉陷的最终形态 (见图 9)

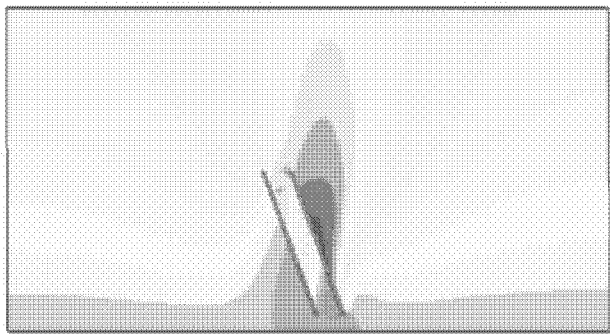


图 8 倾斜剖面冒落拱图

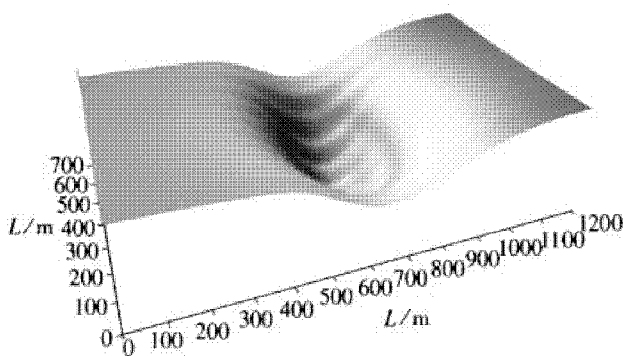


图 9 地表沉陷立体图

从图 9 中可以直观的看到, 新集三矿地表变形特征:

1) 急倾斜煤层开采后将在地表形成一个不规则的下沉盆地;

2) 在走向方向, 由于工作面走向开采范围较大, 地表走向方向为充分采动, 从而形成一个基本对称的下沉盆地剖面;

3) 在倾斜方向, 由于最大下沉点偏移, 就倾斜剖面上山方向与下山方向比较而言, 呈现出影响范围较小、下沉变化较快的特点, 从而在倾斜主断面上形成了一个非对称的兜瓢形下沉盆地剖面。

4 结语

根据以上分析, 从模型模拟所得的结果与新集三矿地表实际情况较吻合。基本得到了新集三矿地表的移动规律, 开采对地表的影响是一个动态发展的过程, 在走向呈对称性下沉盆地, 而在倾向上呈非对称性的兜瓢形下沉盆地。通过用 FLAC3D 对新集三矿急倾斜多煤层地表移动规律的数值模拟, 模型的建立基于新集三矿, 所选参数真实可靠, 能够较好的揭示新集三矿地表的形态特征和变形机理, 为进一步研究新集三矿地下安全开采提供了科学依据, 对地表建筑物的保护提供了研究基础。

参考文献:

- [1] 谢东海, 冯涛, 赵伏军. 我国急倾斜煤层开采的现状与发展趋势[J]. 科技信息, 2007 (14): 211 - 213.
- [2] 王金安, 冯锦艳, 蔡美峰. 急倾斜煤层开采覆岩裂隙演化与渗流的分形研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33 (2): 162 - 165.
- [3] 温彦良, 常来山, 张治强. 急倾斜煤层开挖岩移规律及对底板巷道布置的影响[J]. 煤炭技术, 2011 (5): 66 - 68.
- [4] 高明中, 余忠林. 厚冲积层急倾斜煤层群开采重复采动下的开采沉陷[J]. 煤炭学报, 2007, 32 (4): 347 - 352.
- [5] 张艳丽, 李开放, 任世广. 大倾角煤层综放开采中上覆岩层的运移特征[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30 (2): 150 - 153.
- [6] 杨帆. 急倾斜煤层采动覆岩移动模式及机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [7] 麻凤海, 丁彧. 大倾角多煤层开采地表移动规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业, 2009, 18 (6): 71 - 73.
- [8] 郭春颖, 焦申华. 大倾角特厚煤层水平分层 (深部) 综放开采地表沉陷与地表水渗流研究[J]. 中国矿业, 2008, 17 (7): 82 - 86.
- [9] 杜国栋, 李晓, 丁恩保. 矿体倾角对地表沉降的影响研究[J]. 金属矿山, 2006 (2): 9 - 11.

(责任编辑: 何学华, 吴晓红)