

掘进机远程监控系统设计与位姿检测精度验证

张敏骏, 臧富雨, 吉晓冬, 蔡岫航, 吴 淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:为研究悬臂式掘进机远程控制与位姿检测方法精度验证问题,基于实地工况的调研,提出一种基于机载可编程控制器、机载传感系统、视频监控系統以及工控机的掘进机远程监控与位姿检测精度验证系统,并完成掘进机试验样机的改造,搭建模拟巷道,详细阐述了该系统的总体结构并说明了各部分的构建方法。以掘进机位姿检测试验为例,进行掘进机远程监控系统的调试与精度验证系统的功能性验证。结果表明,掘进机位姿测量精度验证系统与几种典型位姿测量方法的测角误差在 1° 以内,偏距误差在 0.01 m 以内,在试验过程中系统运行稳定且操作简便,显示界面直观,从而为掘进机远程监控与位姿测量技术进行了试验验证,为掘进机的无人化发展提供重要试验依据。

关键词:悬臂式掘进机;远程监控;位姿检测;精度验证

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)12-0048-06

Design of remote monitoring system for roadheader and accuracy verification of position and posture detection

ZHANG Minjun, ZANG Fuyu, JI Xiaodong, CAI Xiuhang, WU Miao

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the accuracy of cantilever roadheader remote control and position detection method, with the investigation of field conditions, the roadheader monitoring accuracy verification system based on airborne programmable controller, airborne sensor system, video monitoring system and industrial computer remote control and position detection system was proposed. Meanwhile, experimental prototype of the roadheader was enhanced and a simulation roadway was built. The system's overall structure and micro-structure of each part were detailed. Taking the test of roadheader position detection as an example, the performance of the remote monitoring system and the functionality of position detection precision verification system were conducted. The results show that the angle measurement error is within 1° comparing roadheader position detection accuracy verification system and these position detection methods, and the offset displacement error is within 0.01 m. In the test, the system runs steadily and is easily operated, and the interface displays clearly. Therefore, the roadheader remote monitoring and position detection could be verified. And it is the important test basis for the development of unmanned roadheader.

Key words: cantilever roadheader; remote monitoring; position detection; precision verification

0 引 言

当前煤炭开采深度不断增加,煤层开采危险系数不断增大,无人采掘装备作为当前国际煤炭领域的发展前沿和久攻未破的世界性难题^[1]。机器人化掘进装备的发展是确保我国具备煤炭能源持续生

产能力与矿工人身安全的重要举措^[2-3]。悬臂式掘进机是煤矿综掘工作面的核心机电设备,但由于环境的恶劣性与现有理论的局限性,尚未形成适当的综掘工作面远程监控系统,且掘进机位姿检测技术作为综掘工作面无人化的基础,尚未有合适的位姿检测精度验证系统。

收稿日期:2018-04-03;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.12.008

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB046306)

作者简介:张敏骏(1992—),男,山东泰安人,博士研究生。E-mail:zmj0424@qq.com

引用格式:张敏骏,臧富雨,吉晓冬,等.掘进机远程监控系统设计与位姿检测精度验证[J].煤炭科学技术,2018,46(12):48-53.

ZHANG Minjun, ZANG Fuyu, JI Xiaodong, et al. Design of remote monitoring system for roadheader and accuracy verification of position and posture detection[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 48-53.

悬臂式掘进机远程监控系统主要包括机载控制系统与远程监控系统。目前国内外尚未建立起系统的掘进机远程监控系统,文献[4-5]介绍了掘进机上位机监控系统与远程监控系统的设计与应用,在与掘进机结构类似或工况类似的盾构机与海底履带集矿车方面,国内外学者进行了一定的研究。文献[6-8]研制出盾构模拟试验系统,为试验的进行,设计了盾构机的远程监控系统。文献[9]研制出海底履带集矿车模拟试验系统的远程监控系统。文献[10-11]重点阐述了盾构掘进试验平台监控系统的开发与应用。

笔者在广泛调研国内外掘进机工作特点的基础上,设计了用于掘进机模拟试验平台且可对掘进机所有状态与参数进行动态显示的监控系统,另外搭建了可对各种掘进机位姿检测方法进行验证与对比的高精度掘进机位姿测量精度验证系统。选取了具有代表性的位姿测量方法开展掘进机位姿测量试验,对系统的功能进行验证,并分析了位姿测量精度验证系统的实用性。

1 悬臂式掘进机远程监控系统设计

1.1 系统功能

悬臂式掘进机远程监控系统可对掘进机与模拟巷道进行全方位监控,同时可实时显示、采集与记录掘进机参数与数据,以便于试验过程的管理并且可作为相应掘进机试验的验证数据。因此,该远程监控系统必须具备以下功能^[12]。①可实现对试验系统全部设备的远程控制;②可显示、采集与记录掘进机的所有数据;③可实现数据的保存、显示、查询、调用以及数据的处理与分析;④可显示掘进机各个视角实时动作与周围环境,监测设备的实时参数,并有相应的操作提示;⑤具有高可靠性与安全性,具有完备的自我诊断与自我保护功能。

1.2 硬件结构设计

根据掘进机远程监控系统的功能需求,系统由用可编程控制计算机,远程监控平台,数据采集器以及组态软件构成。其中,PCC作为机载控制系统完成掘进机各基本动作的控制;通过组态软件完成人机交互界面的搭建以及PCC数据的采集、储存与处理工作。监控系统的组成结构如图1所示。

图1中PCC选用的是X20系列产品,PCC相比于传统PLC计算能力更强且稳定性更佳,此系统可以提供各种级别的诊断功能以便于及早发现并处理故障,

其所有输入输出接口电路均采用光电隔离,可有效抑制外部干扰源对PCC的影响^[13]。PCC在系统中主要承担的任务为掘进机各机构的控制,以及完成与PCC相连的所有传感器测量的数据采集。PCC与所有的I/O及接线全部安装于掘进机电控箱中。

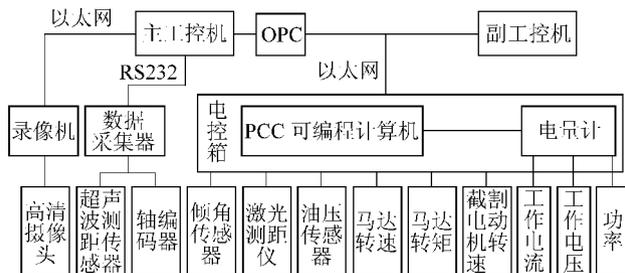


图1 掘进机模拟试验系统监控系统结构

Fig.1 Structure of monitor and control system for roadheader simulation test system

掘进机远程监控平台由主副2个工控机组成。选用组态王作为远程监控的组态软件,组态王可根据用户需求构造所需的数据采集管理系统与远程人机界面,且可以在PC工控机平台上进行二次开发^[14]。主副工控机通过以太网与机载PCC相连,通过贝加莱系统中的OPC(OLE for Process Control)实现工控机与PCC的数据交换,2个工控机之间可通过局域网进行数据交换与相互控制。主工控机除连接PCC之外同时连接数据采集器与录像机,可采集所有外置传感器的数据与摄像头采集的所有视频信息。由于该监控系统采用主副双工控机的控制模式,且同时与PCC相连,在试验的过程中若主工控机发生故障,则副工控机可获得系统的控制权,可保证系统的稳定运行与数据的安全储存。

1.3 软件结构设计

监控系统软件结构(图2)主要考虑软件的运行性能、开发成本、开发周期及系统维护等问题。

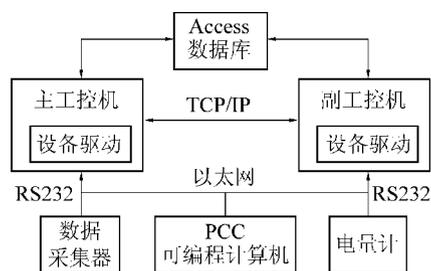


图2 监控系统软件结构

Fig.2 Software structure of monitor and control system

监控系统中PCC与数据采集器直接通过组态软件驱动进行数据采集,数据的存储同样通过组态

软件进行,同时建立试验数据库以供数据分析与调用。主副工控机的监控组态软件可以实现数据互通与数据共享。由于组态王没有提供数据采集器的设备驱动,因其具有开放的协议,可利用组态王提供的驱动开发系统进行相应驱动程序的开发^[15]。

监控系统的数据存储选择 ODBC 的驱动方式与 Access 数据库。数据存储完毕,系统采用主副双工控机的形式,双工控机可以相互访问各自的变量信息,主副工控机可以同时存储试验平台的所有状态信息作为备份,如果主工控机发生故障,副工控机仍可以记录数据且之前数据仍有备份。

1.4 监控系统人机界面设计

监控系统人机界面的设计主要任务为系统中各个控制界面与监测界面的设计,进行静态操作界面的绘制、动画的制作及界面中各个元素与变量列表的连接,同时建立各个界面之间的逻辑关系。基于人机工程学^[16],需重点考虑以下2点:

1) 在满足功能需求的基础上,尽量使界面简单清晰且易于操作,尽可能减少冗余界面,既保证人员操作简便,也可减少空间占用,并节约成本。

2) 界面切换简易且美观,设备状态的显示要明显,颜色设置需符合一般常识。

掘进机试验样机的远程控制可由控制中心通过自动控制算法的计算实现自动控制,若试验过程中没有智能算法,通过遥控手柄进行控制更加方便,遥控手柄如图3所示。控制信号在光纤上的透明传输,大幅延长控制距离。



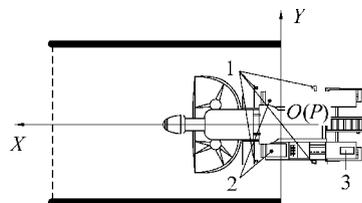
图3 远程遥控手柄按键实物

Fig.3 Real object of remote control handle key

2 掘进机位姿检测精度验证系统

文献[3,13,16]分别提出了基于空间交汇测量技术、超宽带技术与iGPS技术的掘进机位姿测量方法与精度验证分析。为检验位姿测量精度,建立了基于绝对测量的高精度掘进机位姿测量验证系统,如图4所示。

以上要求使人、机器、环境的功能符合操作人员的需求。监控系统界面逻辑关系如图5所示。



1—掘进机机载矿用高精度角度变送器;2—机载矿用激光测距仪;
3—高精度双轴倾角仪、手持式激光测距仪与高精度测角仪

图4 掘进机位姿测量精度验证系统

Fig.4 Precision verification system of position and posture detection for roadheader

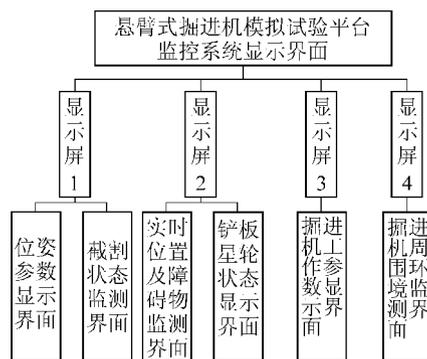


图5 监控系统人机交互界面结构

Fig.5 Structure of human-computer interaction interface for monitor and control system

位姿检测精度验证系统建立步骤如下:

1) 建立模拟巷道精度验证绝对坐标系。首先使用手持式激光测距仪反复测量验证系统坐标系原点 O ,巷道中线在底面的投影作为验证系统绝对坐标系的 X 轴,其正方向为掘进机试验样机的掘进方向, Y 轴方向由精密测角仪测量 X 轴顺时针偏转 90° 方向, Z 轴为 O 点竖直向上方向。

2) 掘进机坐标标定。首先使用手持式激光测距仪反复测量标定掘进机机身中心点在 XOY 平面内位置(图中 P 点)。控制掘进机使其 XOY 平面中心点与坐标原点 O 重合,利用手持式激光测距仪反复测量标定高精度双轴倾角仪的安装位置。

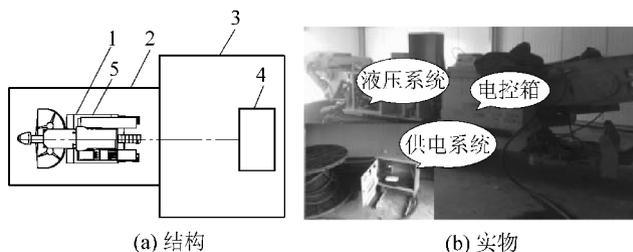
3) 掘进机位姿验证值获取。由文献[17]可得悬臂式掘进机在巷道内的5种机身位姿参数。验证值获取方法分别为:①车前距 L 。通过手持式激光测距仪测量 m 次车前距,读取 m 次机载激光测距仪测量值验证,对比值 $L_0 = (L_1 + \dots + L_m + L_{m+1} + \dots + L_{2m}) / (2m)$ 。②俯仰角与滚动角。通过外置高精度双轴倾角仪测量 m 次俯仰角与滚动角,并读取 m 次机载矿用角度变送器测量的俯仰角,验证值为 β_0 与 γ_0 。 $\beta_0 = (\beta_1 + \dots + \beta_m + \beta_{m+1} + \dots + \beta_{2m}) / (2m)$,

$\gamma_0 = (\gamma_1 + \dots + \gamma_m + \gamma_{m+1} + \dots + \gamma_{2m}) / (2m)$ 。③偏向角与偏向位移。通过测角仪与激光测距仪测量 m 次机身偏向角与偏向位移,各取算术平均值得到偏向角与偏向位移的真值。

3 掘进机模拟试验系统验证

3.1 掘进机模拟试验系统设计

掘进机模拟试验系统如图6所示。掘进机试验样机由EBZ-55超轻型掘进机改装而成,其总长为7 400 mm,宽度为1 500 mm,最大截割高度为2.8 m,最大截割底宽为3.52 m,截割最大有效断面面积为9.8 m²。试验样机上装有激光测距仪、油压传感器、倾角传感器、超声波测距传感器及电量计等,可实时测量掘进机的实时位置与位姿参数^[18]。



1—掘进机试验样机;2—模拟巷道;3—远程控制室;
4—远程监控系统;5—掘进机液压系统与机载控制器

图6 掘进机模拟试验系统结构与实物

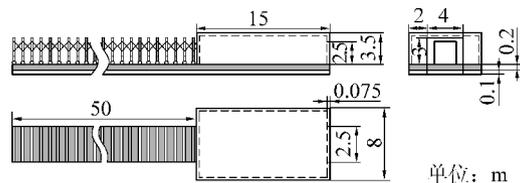
Fig.6 Structure and real object of roadheader simulation test system

监控系统作为试验样机改造的核心部分,实现对掘进机的控制,可在远程通过控制掘进机各个部位的运动,监控平台可实时监测掘进机各参数,还可同时记录掘进机相关试验过程中的所有数据。

模拟巷道如图7所示,其宽4 m,高3 m,最大长度达50 m,长度可以根据要求进行伸缩,巷道后方为远程控制室,可放置所有相关设备,模拟巷道结构为抽拉式轮式支架,可用帆布完全覆盖,覆盖物厚度与面积可根据试验条件的不同进行调整,可最大程度模拟巷道内的封闭与低光状态^[19],为位姿测量精度影响因素试验提供模拟条件。

针对综掘工作面特殊工况,掘进机在进行截割工作前,需保证掘进机进入正确位姿,位姿一旦确定,通过前铲板、后支撑以及履带的支撑功能,保证掘进机在进行截割前稳定支撑于巷道内,截割过程中因冲击与振动导致的掘进机位姿变化可由掘进机截割臂与回转台进行补偿。且掘进机的位姿参数以巷道坐标系为参考坐标系,因此巷道倾角不会对位

姿检测产生影响^[19]。



(a) 模拟巷道尺寸



(b) 模拟巷道实物

图7 模拟巷道尺寸示意及实物

Fig.7 Dimension figure and real object of simulation roadway

该模拟试验系统可进行掘进机机身位姿测量试验、不同形状断面自动截割轨迹规划模拟试验、掘进机智能控制试验等。

3.2 试验验证及效果分析

为验证悬臂式掘进机模拟试验系统的功能,探究掘进机位姿测量精度验证系统的实用性,开展了基于远程监控系统控制的掘进机试验样机位姿测量试验。试验现场照片如图8所示。



图8 试验现场照片

Fig.8 Experimental field photos

首先验证试验系统通信时间,远程监控平台与掘进机距离为75 m,传输数据所用的网线长度为200 m,由掘进机远程监控平台向机载PCC发送1帧数据,PCC接收指令后返回共5、10、15与20 MB数据,使用工控机计时器得总通信时间为0.039 2、0.078 3、0.117 2与0.156 3 s,此数据量大小远大于系统正常运行时的正常数据传输量,因此通信时间可以满足控制需求。

为验证掘进机位姿测量验证系统的可靠性,根据研究团队提出的掘进机位姿激光自动测量方法^[3]及超宽带掘进机位姿测量方法^[19],在图7模拟

巷道内对EBZ55掘进机试验样机进行位姿测量,以此作为位姿参数精度验证系统的对比,试验过程中模拟巷道全部封闭,为模拟巷道底板,在掘进机行驶路线布置厚度不同的木板与障碍物,由于在实际生产过程中,掘进机位姿检测是在掘进机截割之前,因此掘进机保持行驶状态即可,不必进行截割。同时,通过试验检验远程监控系统及模拟试验系统的运行稳定性,掘进机位姿检测试验现场照片如图9所示。试验仪器及参数见表1。



图9 掘进机位姿测量试验现场

Fig.9 Experiment site of pose detection for roadheader

表1 试验仪器及参数

Table 1 Name and parameters of experiment equipments

仪器	测量精度
LeicaTM30型自动全站仪	单点0.5"
TimedomainP440UWB测距模块	1 mm+1.5 ppm
LeicaD2型激光测距仪	0.01 m
BoschGAM220测角仪	0.001 m
TAISATS-2D型倾角仪	0.1°
YHJ001J型矿用激光测距仪	0.1°
SWT90型矿用角度变送器	0.01 m
	1°

分别用两棱镜法、等边三角形三棱镜法以及反向等边三角形三棱镜法激光位姿检测及超宽带位姿检测,在模拟巷道5~50 m区间内每隔5 m测量掘进机俯仰角、偏向角、翻滚角与偏距^[20],每个位置测量1 000次,超宽带信号脉冲间隔为100 ms。同时用掘进机位姿检测验证系统在相同位置检测掘进机位姿参数,其中俯仰角的试验数据见表2。

表2 俯仰角试验数据

Table 2 Experimental data of pitch angle

测量 距离/m	俯仰角/(°)				
	验证系统	方法1	方法2	方法3	方法4
5	7.01	7.011 1	7.010 9	7.008 3	6.792 6
10	7.04	7.041 4	7.039 0	7.042 0	6.794 2
15	7.03	7.027 8	7.033 9	7.033 3	7.314 8
20	6.98	6.982 7	6.985 7	6.984 4	6.652 3
25	6.94	6.937 5	6.933 7	6.936 9	6.592 5
30	7.04	7.042 9	7.047 6	7.038 4	7.432 3
35	7.02	7.016 1	7.027 4	7.022 2	7.461 4
40	7.05	7.056 4	7.041 1	7.049 1	6.568 3
45	6.97	6.976 5	6.979 0	6.967 8	7.532 1
50	6.99	6.984 3	6.999 3	6.993 2	6.268 3

注:方法1为超宽带位姿检测法;方法2为双棱镜激光位姿检测法;方法3为正向三棱镜激光位姿检测法;方法4为反向三棱镜激光位姿检测法。

经试验数据的对比,计算验证系统测量值与4种不同位姿检测方法的误差绝对值,误差绝对值变化趋势如图10所示。

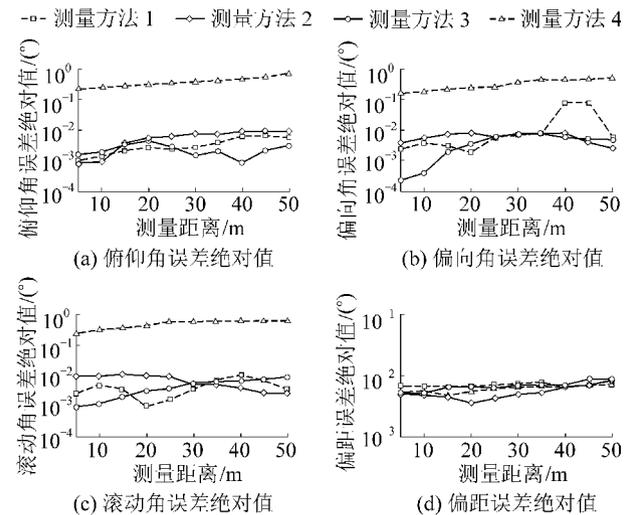


图10 验证系统与检测系统误差绝对值

Fig.10 Error absolute value of verification system and detection system

文献[19]介绍掘进机位姿激光检测姿态角的最大测量误差为0.01°,偏距最大测量误差为0.01 m。文献[3]中可得姿态角最大测量误差为0.2°~1.5°,掘进机位姿测量验证系统与掘进机位姿激光检测技术测得的姿态角误差绝对值均小于0.1°,偏距误差均小于0.01 m,超宽带位姿检测系统姿态角测量精度均小于1°,证明掘进机位姿检测验证系统可作为掘进机位姿检测试验的验证系统。

试验过程中,掘进机的前进与位姿调整由远程控制手柄控制,系统运行流畅稳定,验证系统的数据

均通过远程监测界面读取,并未出现异常情况,系统与机载 PCC 控制配合良好,共同完成掘进机试验样机的控制任务,主副工控机均可通过 PCC 进行控制与数据采集,并且通过网络实现主副工控机的数据共享与备份,提高了数据的安全性,使系统具备更强的安全性与可靠性。

4 结 论

1)介绍了掘进机远程监控系统的结构与工作原理,完成了掘进机试验样机的远程控制,构建了主副工控机远程监控系统,实现了试验样机的远程控制与在线监控,试验表明,该远程监控系统可以直观、准确且清晰地显示掘进机所有动作与相关数据,运行性能稳定,适用于多种掘进机试验研究。

2)研制了悬臂式掘进机模拟试验系统,完成了掘进机试验样机的改装以及模拟巷道的搭建,新型模拟试验系统在设备控制及操作系统上均有了较大程度的改进。

3)设计了高精度掘进机位姿测量验证系统,并通过掘进机位姿测量试验证明了系统的可靠性,该验证系统可作为掘进机位姿检测、定位、定向及纠偏试验的可行性验证与测量精度的对比系统。

参考文献(References):

- [1] 葛世荣,王忠宾,王世博.互联网+采煤机智能化关键技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):1-9.
GE Shirong, WANG Zhongbin, WANG Shibo. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 1-9.
- [2] 王虹.我国综合机械化掘进技术发展40年[J].煤炭学报,2010,35(11):1815-1820.
WANG Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1815-1820.
- [3] 符世琛,李一鸣,杨健健,等.基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J].煤炭学报,2015,40(11):2603-2610.
FU Shichen, LI Yiming, YANG Jianjian, et al. Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on ultra wide-band technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2603-2610.
- [4] 魏建华,宋德玉,陈宁.掘进机上位机监控系统的研究及实现[J].煤炭学报,2004,29(4):481-486.
WEI Jianhua, SONG Deyu, CHEN Ning. Theory and realization of supervision and control system for tunneling machine[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 481-486.

- [5] 杨健健,唐至威,王子瑞,等.基于 PSO-BP 神经网络的掘进机截割部故障诊断[J].煤炭科学技术,2017,45(10):129-134.
YANG Jianjian, TANG Zhiwei, WANG Zirui, et al. Fault diagnosis on cutting unit of mine roadheader based on PSO-BP neural network[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 129-134.
- [6] 施虎.盾构掘进系统电液控制技术及其模拟试验研究[D].杭州:浙江大学,2012:27-45.
- [7] 齐春,何川,封坤,等.泥水平衡式盾构模拟试验系统的研制与应用[J].岩土工程学报,2016,38(11):1999-2008
QI Chun, HE Chuan, FENG Kun, et al. Development and application of simulation test system for slurry balance shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 1999-2008.
- [8] 徐前卫,朱合华,唐卓华,等.可模拟泥水平衡盾构施工的室内模拟试验装置及使用方法:中国,ZL103437771A [P].2013-07-29.
- [9] 韩庆珏.深海履带式集矿机打滑及路径跟踪控制问题研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [10] 王晓明.基于组态软件的盾构试验平台控制与管理[D].南京:东南大学,2005:11-20.
- [11] 吴润华.盾构掘进试验平台监控系统的开发和应用[D].南京:东南大学,2005:13-21.
- [12] 胡国良,龚国芳,杨华勇.盾构模拟试验平台监控系统[J].农业机械学报,2007,38(1):164-167.
HU Guoliang, GONG Guofang, YANG Huayong. Condition monitoring system of simulator test rig for shield tunneling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 164-167.
- [13] 齐蓉,肖维荣.可编程控制器技术[M].北京:电子工业出版社,2009:30-33.
- [14] 张福建,朱兆霞,严德坤.基于组态王 6.5 的井下充填实验测控系统[J].工矿自动化,2005(3):17-19.
ZHANG Fujian, ZHU Zhaoxia, YAN Dekun. The experimental measure control system for underground filling based on Kingview 6.5[J]. Industry and Mine Automation, 2005(3): 17-19.
- [15] 曾庆波.监控组态软件及其应用技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.
- [16] 吴淼,贾文浩,陶云飞,等.基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机位姿自主测量方法[J].煤炭学报,2015,40(11):2596-2602.
WU Miao, JIA Wenhao, TAO Yunfei, et al. Autonomous measurement of position and attitude of boom-type roadheader based on space intersection measurement [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2596-2602.
- [17] 李睿.悬臂式掘进机机身位姿参数检测系统研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2012:41-48.
- [18] 魏景生,吴森.中国现代煤矿掘进机[M].北京:煤炭工业出版社,2015:123-132.
- [19] 陶云飞.掘进机位姿激光测量自动测量方法及系统研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2017.