

引用格式:解志远,刘伟涛. 矿山充填移动式环管试验装置自动化控制系统开发与应用[J]. 有色设备,2025,39(5):73-78.
XIE Zhiyuan, LIU Weitao. Development and application of automation control system for mobile loop pipe experimental device of mine back filling[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2025,39(5):73-78.

矿山充填移动式环管试验装置自动化控制系统 开发与应用

解志远, 刘伟涛

(北京金诚信矿山技术研究院有限公司, 北京 100071)

[摘要] 在矿山充填工程中,环管试验装置是开展充填料浆输送特性研究的关键设备,对保障充填系统安全、高效运行具有重要意义。充填环管试验装置系统设备和实验过程的自动化和智能化是必然选择。移动式充填环管试验装置的自动化使环管试验装置的所有测量数据、工艺流程、设备状态、实验参数等在人机界面上集中显示,设备控制和实验参数设置可在人机界面集中操作,最终实现了环管试验装置运行的自动化与试验流程的智能化,显著提升了充填料浆输送特性研究的效率与数据可靠性,为保障矿山充填系统的安全、高效运行提供了技术支持。

[关键词] PLC; PID 控制; 移动环管试验; 动画模拟; 数据智能分析; 自动化控制

[中图分类号] TD853 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0073-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.010

0 引言

膏体充填技术因其环保、节能、减排、安全、高效等优势已在全世界被广泛认可并应用^[1-2],代表着矿山充填技术的发展方向,被誉为 21 世纪绿色开采新技术^[2]。在膏体充填系统设计中,充填料浆管道输送参数的选择具有举足轻重的作用,由于国内外矿山充填材料的组分和粒级组成千差万别,大多数矿山不能完全参考其他矿山的运行参数,只能依据矿山充填材料实际情况通过试验进行测定。环管试验是矿山充填工艺设计的重要依据和必不可少的环节^[3]。随着自动化充填系统在国内开始逐渐应用^[4-6],环管试验自动化也是必然趋势。

移动式装置把环管试验系统集中到集装箱内,是可移动的、能够重复利用的充填试验装置,解决了现有料浆流变测试仪使用不方便、测试参数不准确、不全面和实验室环管试验消耗人力、物力、财力过大,需时过长等问题,为充填系统设计提供准确的流变参数,为充填的料浆配合比设计及管网布置提供

重要的数据支持。

针对移动式环管试验装置特点和现状,开发移动式环管试验装置自动化系统,实现试验参数工艺过程人机界面集中显示,设备和试验过程自动记录,实验环管特性和数据的自动处理和计算的自动化系统,取代了过去的由人工抄表记录试验参数,手动操作设备调节环管矿浆流量,操作设备,人工统计计算实验数据的费时、费力模式。

1 移动式环管试验装置及自动控制架构

1.1 移动式环管试验装置组成和自动控制要求

移动式环管试验装置的设备均安装在 40GP 集装箱内,使该套装置可移动到现场试验。如图 1 所示,整套装置由料浆制备系统、环管输送系统、控制和数据采集系统组成。料浆制备系统由搅拌机、搅拌机、给水泵和电磁阀、给料机、水位传感器,给水流量计等设备组成,用于试验料浆的制备。环管输送系统是由渣浆泵和试验管路、阀门、压力变送器、矿浆流量计、浓度计等组成闭环的料浆循环系统。

[收稿日期] 2025-06-10

[第一作者] 解志远(1981—),男,河北秦皇岛人,工程师,大学本科,主要从事电气工程与自动化相关工作的设计与研究工作。

为了移动式环管试验装置的设备的正常运行,需为系统配置供配电系统。搅拌器电机和渣浆泵电机的功率分别为 7.5 kW 和 30 kW,按照搅拌器和环管试验流量需实时变化的工艺要求,变频调速。料浆制备系统的给水装置要求能按照试验料浆需水量,按照设定质量自动加水。试验中环管的流量必须实时自动变化,变化的流量目标值需按照试验要求自动生成。系统的工艺流程、设备运行状态及控制、环管压力、流量等参数在人机界面实时显示,实时记录采集。系统设备在人机界面集中控制,试验控制参数在人机界面设置。控制系统根据采集的数据,绘制计算曲线,计算结果和分析曲线,使移动式环管试验装置实现试验数据处理智能化。

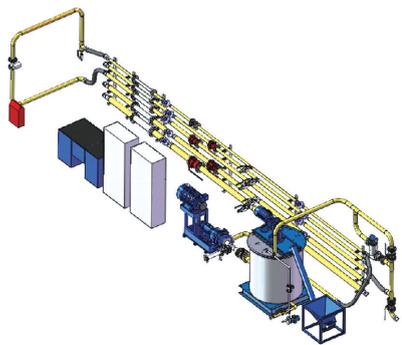


图 1 移动式膏体充填环管试验装置设备和管道布置

Fig. 1 Mobile paste backfill loop test rig and its pipeline layout

1.2 控制系统硬件和网络组成。

针对移动式环管试验装置试验工艺特点和自动控制要求,设计配电变频柜用于整体装置的供配电,分别为渣浆泵和搅拌器配备功率 30 kW 和 7.5 kW 的变频器,使渣浆泵和搅拌器具备变频调速的硬件条件,为给水泵和电磁阀、给料机等相应设备的供电,为启停控制搭建硬件条件。

PLC 控制柜是整套装置的控制中枢,配置 PLC,通讯模块等元件。本系统使用国产可编程控制器(CPU 型号为 T24S0R-e)为控制核心。根据系统模拟量信号采集的需要,添加了模拟量输入模块 S08AI 和模拟量模块 S08XA。

系统选择工业计算机和显示屏为 WinCC 组态软件和 MATLAB 软件的硬件支撑,是试验装备人机交互的硬件条件。

根据试验环管压力,流量实时测量采集的工艺要求,系统配置压力变送器、矿浆流量计、给水流量计、液位变送器、浓度计,把相应测量位置的进料管和回料管的压力值、环管的矿浆流量、搅拌桶的给水流量、搅拌桶的矿浆液位和环管的料浆浓度转化为 4~20 mA 标准电信号,接入 PLC 的模拟量相应输入口,进行测量信号的模数转换。渣浆泵和搅拌器的变频器的 RS485 口通过通讯电缆接到 PLC 的 RS485 口,遵循 Modbus-RTU 通讯协议,PLC 能实时读取变频器状态参数并发送控制命令。

工控机和 PLC 均用带有 RJ45 接头的 8 芯屏蔽双绞线接到工业交换机,使工控机和 PLC 建立硬件连接。PLC 和工控机上的 WinCC 软件组态人机界面的数据传输,遵循 Modbus-TCP 通讯协议。人机界面和 MATLAB 软件均在工控机运行,遵循 OPC 通讯协议,实现人机界面与 Matlab 通讯。

2 移动式环管试验装置下位机开发

为了实现移动式环管试验装置自动控制要求,下位机选则 PLC 组件。PLC 是当前矿业自动化生产活动中不可或缺的主控制器^[7]。为了提升移动式充填环管试验装置 PLC 控制系统的效率和可靠性,在程序设计中采用结构化编程,强调模块化设计和过程设计^[8],同时考虑不同设备的自动化要求和控制工艺特点不同而差异化设计。

2.1 变送器的模拟量数字化转换

将移动式环管试验装置配置的各种变送器采集系统相应位置的压力、流量、液位和料浆浓度转化为 4~20 mA 标准电信号。将 S08AI 模拟量模块所用通道设置为电流信号,电流范围为 4~20 mA,4 mA 转化为 PLC 的数字量为 4 000,20 mA 转化为 PLC 的数字量为 20 000。

对模拟量进行工程量数字化转换,转换公式为式(1):

$$OUT = (IN - 4000) / (20000 - 4000) \times (\text{量程上限} - \text{量程下限}) + \text{量程下限} \quad (1)$$

子程序按照转换公式编程,实现模数转换,把电流信号转换为工程实测数值。

各个变送器测量数值在主程序中分别调用子程序 A-D,把相应变送器模拟量输入变量,量程上限、下限变量、中间变量分别赋值子程序 A-D 对应

引脚。通过子程序 A - D 处理计算,实现各变送器的电流信号的工程实测数值转换。

2.2 料浆制备系统控制

料浆制备系统的给料螺旋泵用于把充填料粉送入搅拌桶。在人机界面按钮控制启动停止,下位机与人机界面通讯,开关量输出控制给料螺旋泵启停,给料螺旋泵带动充填料粉进入搅拌桶。

由给水泵、给水电磁阀组成的给水系统选择自动控制,给水泵的启停和给水电磁阀的开关由设置的搅拌桶水位高度和设置的试验给水需要质量自动控制。人机界面设置要求的搅拌桶水位上限和本次需加水质量。人机界面点击自动给水按钮,则打开水电磁阀,启动水泵,开始向搅拌桶加水。PLC 编程实现每隔 200 ms 采样一次给水流量值,通过采集到的给水流量计测的流量值进行换算,计算出 200 ms 的加水质量,对加水质量进行累加计算,计算出实时加水的总质量。对实时加水的总质量与设定的本次需加水质量进行比较,当加水的总质量大于等于设定的本次需加水质量或搅拌桶的水位高于搅拌桶水位上限时停止给水泵运行,关闭给水电磁阀和给水泵,停止加水。实现了按照设定需加水质量或搅拌桶水位上限自动加水的过程自动控制。

搅拌桶的搅拌器用于搅拌搅拌桶内的料浆。搅拌器配备变频器,可变频调速。PLC 按照 Modbus - RTU 通讯协议与该变频器通讯,读取变频器实时状态和频率,设置变频器的启停和运行频率,实现搅拌器的启停和调速功能。

2.3 环管输送系统控制

环管输送系统实现试验料浆在试验管路中按照不同的流量循环,采集循环管路中的实时流量、压力、矿浆浓度,由人机界面进行记录、归档、试验分析及计算。

渣浆泵是实现料浆在试验管路循环的动力源,通过变频调速,调节试验管路的矿浆流量。PLC 按照 Modbus - RTU 通讯协议与变频器通讯,读取变频器实时状态和频率,设置变频器的启停和运行频率,实现渣浆泵的启停和调速功能。渣浆泵的转速调节选择自动控制,渣浆泵的转速由设定的环管矿浆流量进行 PID 调节,使环管矿浆实际流量经过 PID 调节后等于给定的环管矿浆流量。

本文中,由流量计测得的矿浆流量的实际值与

矿浆流量的设定值输入到 PID 控制功能模块,经过 PID 调节输出渣浆泵的频率值。渣浆泵的频率值通过 Modbus - RTU 通讯给变频器,控制变频器调速。环管的矿浆流量随着给定矿浆流量的变化而调节,调节后矿浆流量值等于给定值。PID 控制如图 2 所示。

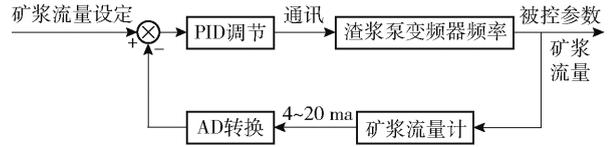


图 2 PID 控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the PID control system

矿浆流量调节的自动控制分为无试验模式、基准零点试验模式、流变特性试验模式及触变特性试验模式。

选择无试验模式下,给定矿浆流量值需在人机界面上直接输入设置。

选择基准零点试验模式、流变特性试验模式,给定矿浆流量按照人机界面上设定的参数,自动计算给定。在人机界面设置所选试验模式的参数,包括开始流量设置、结束流量设置、流量变化间隔设置、变化时间间隔设置。试验开始后,给定矿浆流量值等于开始流量设置的值,每隔变化时间间隔设置的时间间隔,给定矿浆流量值自动增加流量变化间隔设置设定的值,直到给定矿浆流量值大于等于结束流量设置的值,结束试验。

选择触变特性试验模式,给定矿浆流量同样按照人机界面上设定的参数,自动调节给定,不同的是给定矿浆流量值先逐渐增加后逐渐减小。在试验的前半阶段与基准零点试验模式和流变特性试验模式相同,在后半阶段,当矿浆流量设置值大于等于结束流量设置的值时,给定矿浆流量值自动减小流量变化间隔设置设定的值,直到矿浆流量设置值小于等于“开始流量设置”的值,结束试验。

矿浆流量实际值会根据给定矿浆流量通过 PID 控制调节渣浆泵的速度,随着给定矿浆流量值的变化而变化,调节后等于当时给定矿浆流量值。

通过基准零点试验模式、流变特性试验模式、触变特性试验模式的 PLC 编程,使给定矿浆流量值按照设计自动变化,通过 PID 控制,实际矿浆流量值也跟随给定矿浆流量值自动变化,实现试验系统矿浆

流量调节的自动化,智能化过程。试验矿浆流量自动调节控制 PLC 程序流程如图 3 所示。

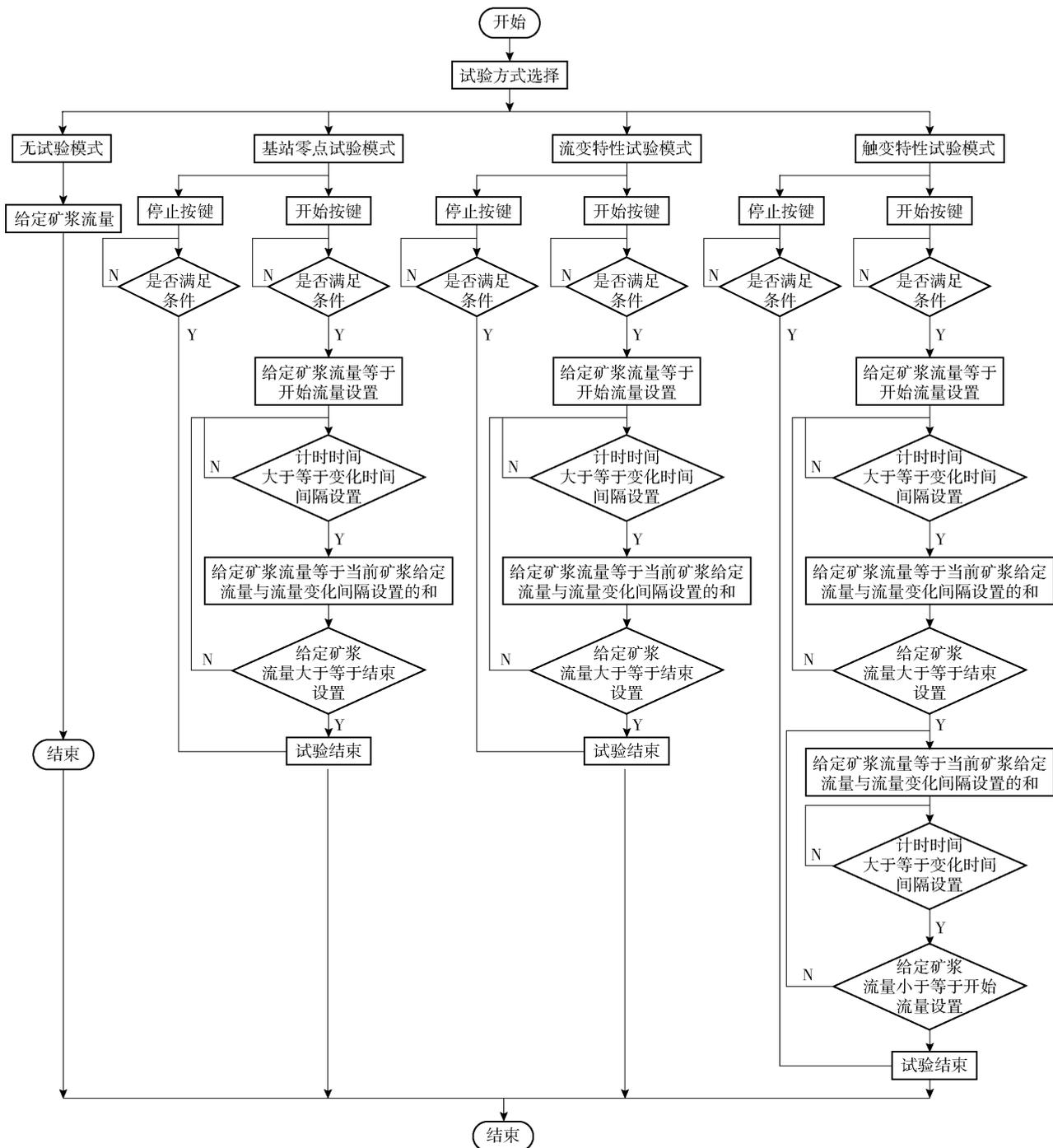


图 3 试验矿浆流量自动调节控制 PLC 程序流程

Fig. 3 Flowchart of the PLC program for automatic control of experimental slurry flow rate

3 移动式环管试验装置人机界面开发

3.1 人机界面功能实现

移动式环管试验装置的人机界面采用 WinCC

组态软件实现其功能。WinCC 具有界面直观、功能丰富等特点^[9],在移动式充填环管试验装置系统中,通过 WinCC 软件组态设计,遵循 Modbus - TCP 通讯协议与由 PLC 组成的下位机建立通讯,在变量

管理器中创建需要显示和控制的变量,读写下位机 PLC 对应的变量的值,实现试验装置系统的实时数据的获取。在 WinCC 软件变量管理器中的变量与设计的监控画面相应动画建立连接,使监控画面显示系统设备状态,显示变送器、仪表测量的系统参数值。在监控画面控制设备状态,设置系统和控制参数。人机界面设计的画面有:登录画面、工艺显示画面、操作显示画面、智能试验画面、趋势图画面等,各个画面之间通过位于画面上部的画面切换按钮切换画面。

登录画面是初始画面,人机界面运行后首先进入该画面。在登录画面操作人员选择管理人员或操作人员登录系统。以管理人员登录系统拥有全部权限,以操作人员登录系统只有过程控制权限。

在工艺显示画面,动画模拟仿真移动式充填环管试验装置系统中的工艺流程。该画面可直观显示环管的工艺路径和试验管径信号,渣浆泵、搅拌桶和搅拌器、给料装置、给水泵、给水阀的工艺位置和状态,各变送器和仪表的工艺安装位置和测量值;给料装置、搅拌器、给水泵、给水阀、渣浆泵均可通过画面中的启动停止按钮或点击对应图形弹出的小窗口控制启停,设置参数,实现手动和自动控制。

操作显示画面和智能试验画面是移动式充填环管试验装置的智能试验参数设置和操作画面。在该画面显示各个传感器的测量值、进料管和回料管的压力差值,设置试验的进料管和回料管管径,显示渣浆泵的状态、转速,设置渣浆泵的启停和速度给定方式。为基准零点试验、流变特性试验、触变特性试验分别设置开始流量、结束流量、流量变化间隔、变化时间间隔等试验参数;分别显示试验的状态和当前给定的矿浆流量;控制各种试验模式的开始和停止。工艺显示画面和该画面左上角选择试验模式,点击相应的试验模式的单选框,上部显示框显示选中模式的名称,当前试验模式为显示框显示的模式。智能试验画面设置的参数传递给 PLC 相应变量。PLC 按照设置参数与程序自动调节渣浆泵转速,使环管流量按照试验要求自动调整。

趋势图画面显示系统压力 1、压力 2、压力 3、压力 4、矿浆流量、给水流量、矿浆浓度、搅拌桶液位的实时曲线和历史趋势曲线。

3.2 人机界面与 Matlab 的数据交互处理

利用 Matlab 在数据分析、矩阵处理、数据校正、实时曲线绘制等诸多方面具有的强大的功能^[10],对移动式环管试验装置的基准零点试验、流变特性试验和触变特性试验中的试验数据进行处理。

Matlab 软件通过 OPC 通讯实时获取人机界面从 PLC 中传输的移动式环管试验装置试验过程中环管流量值,压力差值,基准零点试验、流变特性试验、触变特性试验设置和测量值等数据,然后在 Matlab 中利用相关函数和脚本编程,进行处理、计算、生成在线监测曲线,计算零点特性、流变特性、触变特性结果。曲线分析,显示读取参数、计算结果和分析曲线。使移动式环管试验装置实现试验数据处理智能化。

4 结语

经过实际充填环管试验的检验,移动式充填环管自动化系统表现出良好的性能和显著的优势。试验效率得到了大幅提升,与传统的手动试验方式相比,节省了大量的人力和时间成本。同时,系统实现了环管试验过程的自动化和智能化,减少了人工操作的干扰,提高了试验数据的准确性和可靠性。这为科研人员和工程技术人员提供了更加高效、便捷的试验平台,有助于推动充填环管试验技术的发展和應用。

综上所述,移动式充填环管试验装置自动化系统通过先进的自动化技术和智能化设计,实现了试验设备和过程的全面升级。从人机界面的集中控制到各种试验模式和系统的自动化运行,再到数据处理的智能化,每一个环节都体现了该系统的先进性和实用性。在实际应用中,该系统不仅提高了试验效率和质量,更推动了相关领域试验技术的进步,具有广阔的应用前景和推广价值。

[参考文献]

- [1] 王勇,吴爱祥,王洪江,等.从屈服应力角度完善膏体定义[J].北京科技大学学报,2014,36(7):855-860.
- [2] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
- [3] 李国政,于润沧.充填料浆环管实验计算机仿真应用的研究[J].采矿工程,2008(4):21-24.
- [4] 夏长念,孙学森.充填采矿法及充填技术的应用现状及发展趋势[J].中国矿山工程,2014,43(1):61-64.

- [5] 董宪久,王长军,柳小胜. 充填采矿法在盘龙铅锌矿矿柱回收中的应用[J]. 矿业研究与开发,2015,35(8):19-22.
- [6] 董培林,寇向宇,李向东,等. 基于 PLC 控制的充填自动化系统改造[J]. 采矿技术,2021,21(6):187-190.
- [7] 陈光磊. 智能矿山电气自动化控制中 PLC 技术的应用探索[J]. 冶金与材料,2024(3):112-114.
- [8] 王卓敏. 基于 PLC 和 WinCC 的矿井主风机监控系统的研究[J]. 煤矿机械,2014(10):81-83.
- [9] 刘培发. 基于 PLC 与 Wincec 的无水试压控制系统的设计与实现[J]. 自动化应用,2023(5):99-101,105.
- [10] 李相育,钱宇. 基于 OPC 的 Matlab 与 WinCC 的无缝集成[J]. 微计算机信息,2007(31):197-199.

Development and application of automation control system for mobile loop pipe experimental device of mine back filling

XIE Zhiyuan, LIU Weitao

(Beijing JCHX Mining Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: In mine backfilling engineering, the loop pipe experimental apparatus is a critical piece of equipment for studying the transport properties of backfill slurry, playing a significant role in ensuring the safe and efficient operation of the backfill system. The automation and intelligentization of the system equipment and experimental process for this apparatus represent a necessary trend. This paper focuses on the automation of a mobile backfill loop pipe experimental apparatus, which enables the centralized display of all measurement data, process flows, equipment status, and experimental parameters on a human-machine interface (HMI). Furthermore, equipment control and experimental parameter setting can be centrally operated *via* the HMI. The implementation of this system achieves the automated operation of the apparatus and the intelligentization of the experimental process, significantly enhancing the efficiency and data reliability of backfill slurry transport property research, and providing technological support for safeguarding the safe and efficient operation of the mine backfill system.

Keywords: PLC; PID; mobile pipe loop test; animation simulation; intelligent data analysis; automation control system

