基于PLC与上位机协同控制的矿用新能源测功机电控系统设计与应用*

张少骞[1,2],李富伟[1,2],敖燃柯[1,2],刘湘昱[1,2],黄元芯[1,2],刘碧芋[1,2],何巍[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对矿用新能源电驱装备在满载起步、坡道牵引、负载突变和长下坡制动等典型工况下测试验证不足的问题,基于PLC与上位机协同控制,设计了一套矿用新能源测功机电控系统。该系统可实现恒速运行、低速大转矩加载、负载突变模拟、VF分离分段控制、制动反拖及故障联锁保护等功能。以不同功率电机为对象开展台架试验,并结合某金属矿山新能源辅助运输装备进行现场应用验证。结果表明:系统恒速运行时,转速稳态误差在0.44%以内,转速波动在2.11%以内;系统低速大转矩加载时,实际平均转矩与设定值偏差在2.22%以内,转矩波动在6.7%以内;负载突变工况下,系统最大转速降低为8.6%,制动反拖工况下,母线电压峰值低于保护阈值;急停、超速、过载等保护测试准确率达到100%,急停平均响应时间为0.12 s。工程应用结果表明,该系统可为矿用新能源电驱系统出厂检验、检修复核和运维诊断提供了一种新的手段。

关键词:矿用新能源装备;测功机;电控系统;PLC;上位机

中图分类号:TD63;TD4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0194-09

Design and Application of an Electric Control System for a Mining New-Energy Dynamometer Based on PLC and Host Computer Collaborative Control

Zhang Shaoqian[1,2], *Li Fuwei*[1,2], *Ao Xinke*[1,2], *Liu Xiangyu*[1,2], *Huang Yuanxin*[1,2], *Liu Biyu*[1,2], *He Wei*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient testing and verification of mining new-energy electric drive equipment under typical working conditions such as full-load start, ramp traction, load mutation and long downhill braking, an electric control system for a mining new-energy dynamometer was designed based on PLC and host computer collaborative control. The system realizes the functions of constant-speed operation, low-speed high-torque loading, load mutation simulation, VF separation and segmented control, braking reverse drag, and fault interlocking protection. Bench tests were carried out with motors of different power ratings, and field application verification was conducted in combination with a new-energy auxiliary transport equipment at a metal mine. The results show that when the system is in constant-speed operation, the steady-state speed error is within 0.44% and the speed fluctuation is within 2.11%. When the system is under low-speed high-torque loading, the deviation between the actual average torque and the set value is within 2.22%, and the torque fluctuation is within 6.7%. Under load mutation conditions, the maximum speed of the system is reduced to 8.6%, and under braking reverse drag conditions, the peak bus voltage is lower than the protection threshold. The protection tests for emergency stop, overspeed and overload achieved an accuracy rate of 100%, with a average emergency stop response time of 0.12 s. The engineering application results show that the system provides a new means for factory inspection, maintenance review, and operational diagnosis of new-energy electric drive systems for mines.

Key words: New-energy mining equipment, Dynamometer, Electric control system, PLC, Host computer

---

* **收稿日期**:2026-05-08

基金项目:中央引导地方科技发展资金-金属矿山安全技术国家重点实验室建设项目(2024ZYT007);金属矿山安全技术国家重点实验室资助项目(2024GZKJ02)

作者简介:张少骞(2000—),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,主要从事矿山设备电磁兼容性研究。E-mail:997900143@qq.com

通信作者:李富伟(1983—),男,山东沂水人,高级工程师,研究方向为矿山机电安全技术。E-mail:18974939931@163.com

0 引言

随着矿山装备向新能源化、智能化和少人化方向发展,矿用无轨胶轮车、辅助运输车辆及特种装备正逐步由燃油驱动转向电驱动。相较于传统动力系统,电驱系统具有传动效率高、维护工作量小和污染物排放少等优势,但矿山运行环境复杂,车辆常处于满载起步、坡道牵引、频繁启停、载荷突变及长下坡制动等典型工况。若电驱系统在投入现场使用前缺少针对上述工况的测功验证,容易出现起步动力不足、坡道牵引不稳定、制动能量回馈异常及保护阈值整定不合理等问题,进而影响矿山运输安全和生产连续性。因此,构建能够复现矿山典型工况的新能源测功机电控系统,具有重要的工程应用价值。

近年来,围绕矿山装备动力系统优化、智能化运行和电驱控制等方面,国内外学者已开展了较多研究。孙严礼等[1]指出动力匹配对矿山机械运行效率和可靠性具有重要影响;王昊明等[2]、黄麟淇等[3]从智能化改造和运行数据采集角度推动了矿山生产效率提升;贾志强等[4]、罗浩[5]围绕矿用电驱系统及变频调速控制开展了相关研究;汪双柱[6]的三电联调测试表明,台架试验可提前发现电控匹配问题。在测功平台与试验评价方面,焦志辉等[7]、仝畅等[8]和李焱等[9]分别从底盘测功试验、整车能耗测试和传动系统参数匹配等角度开展了研究;在制动能量回收、能量管理、动态加载及故障诊断方面,郑斯林等[10]、李勇等[11]、孙善辉等[12]和Gong等[13]也取得了较多成果。总体来看,现有研究为矿山装备动力匹配、电驱控制和状态监测提供了理论与方法支撑,但其重点多集中于装备本体设计、运行监测或通用测试方法,对于如何依托测功试验平台复现矿山车辆满载起步、坡道牵引等典型工况及其工程实现方法,仍缺乏系统研究。

在自动化测试方面,可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、组态软件和数据采集系统已逐步应用于电机测试平台,可实现工况配置、实时监测和测试报告生成等功能[14-16];国外在电驱台架测试、再生制动和自动测试等方面也形成了较成熟的技术体系[17-20]。然而,现有平台大多面向普通工业电机或道路车辆电机,测试内容偏重基础性能验证。对于矿用新能源装备[21]而言,满载起步、坡道牵引、负载突变和制动反拖等特殊工况需要在台架上进行针对性设计,且PLC安全联锁、变频器多模式控制、电机频率(Voltage-Frequency, VF)分离分段试验及上位机数据追溯等功能尚未形成有机统一的整体方案。由此可见,面向矿用新能源装备的专用测功系统研究仍显不足[22],出厂检验、检修后状态复核与现场运维诊断之间也缺少统一的测试流程和数据追溯机制。

基于此,面向矿山新能源辅助运输装备的测试需求,本文设计了一种基于PLC与上位机协同控制的矿用新能源测功机电控系统。该系统以复现满载起步、坡道牵引等矿山典型工况为目标,构建了恒速运行、低速大转矩加载、负载突变和制动反拖等试验流程,形成了底层PLC安全联锁与上位机工况配置、状态监测和数据记录相结合的协同控制架构,并通过不同功率等级电机的台架试验及现场应用验证了系统性能。相关研究可为矿用新能源电驱系统的出厂检验、检修复核和运维诊断提供测试支撑。

1 系统总体架构

1.1 系统组成与工作原理

矿用新能源测功机电控系统由上位机监控平台、PLC控制器、远程I/O模块、变频器A、变频器B、被测电机、加载电机(或测功机)、联轴器、转矩传感器、转速传感器、电参数采集模块、能量回馈单元和安全保护回路组成。变频器A主要控制被测电机运行,变频器B控制加载端施加阻力转矩或反拖转矩。被测电机与加载电机通过联轴器和测功轴连接,轴端布置转矩与转速检测装置。PLC负责启停控制、模式切换、参数限幅、联锁判断和异常处理;上位机负责试验参数输入、矿山工况选择、曲线显示、报警记录和报告生成。

系统运行前,操作人员在上位机录入被测电机额定功率、额定电压、额定电流、额定频率、额定转速、目标转速、目标转矩和保护阈值。PLC接收参数后,对急停状态、运行允许信号、主回路反馈、变频器状态和通信状态进行判断。满足启动条件后,PLC根据试验模式向变频器A、变频器B发送速度、转矩或VF(电压和频率)分段控制指令。试验过程中,转速、转矩、电流、功率和母线电压等数据实时上传至PLC和上位机。当出现超速、过载、母线过压、通信异常或变频器故障时,PLC执行停机、限载或禁止启动逻辑。

系统总体框架见图1。由图1可知,矿用新能源测功试验过程为主线,体现控制流、数据流和能量流之间的关系。

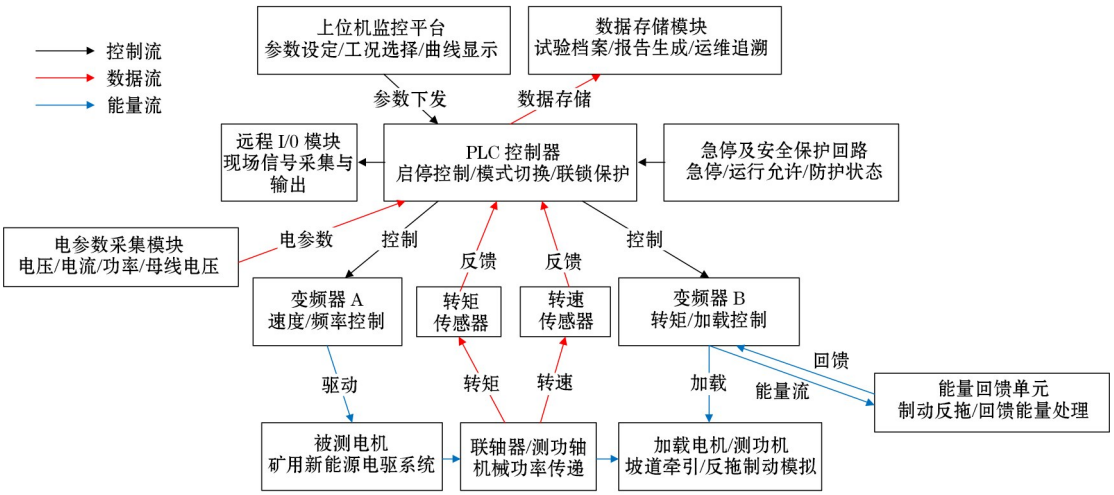


图 1 系统总体框架

Fig.1 Overall framework of the system

与普通电机试验台相比,该系统突出矿山工况复现能力。通过加载电机(或测功机)施加可控阻力转矩,可模拟满载起步和坡道牵引;通过阶跃加载,可模拟道路起伏和载荷突变;通过反拖控制,可模拟长下坡或减速制动过程;通过能量回馈单元,可监测制动回馈功率和母线电压波动。该结构可降低大功率试验对外部供电容量的要求,同时有利于长时间牵引和反拖制动工况测试。

1.2 面向矿山工况的试验功能

系统试验功能围绕矿山实际运行场景设置,主要包括空载起动、平巷恒速、低速大转矩加载、负载突变、制动反拖、VF 分离和故障保护。各功能及对应工况见表 1。由表 1 可知,系统并非单纯完成电机额定点测试,而是将矿山车辆运行过程转化为可重复执行的台架工况。该方式可在设备投入矿山现场使用前发现控制参数不匹配、转矩输出不足、回馈保护不合理等问题。

表 1 面向矿山工况的主要试验功能

Table 1 Main test functions for mining operation conditions

试验功能	对应矿山工况	主要监测参数	试验目的
空载起动	检修后状态确认	转速、频率、电流	验证基本启停和旋向
平巷恒速	平巷稳定行驶	转速、功率、电流	评价调速稳定性
低速大转矩	满载起步、坡道牵引	转矩、转速、电流	评价牵引能力
负载突变	道路起伏、载荷变化	转速跌落、功率峰值	评价抗扰动能力
制动反拖	长下坡、减速制动	制动转矩、回馈功率、母线电压	验证回馈安全
VF 分离	低频参数整定	频率、电压、电流、转矩	优化控制参数
故障保护	异常停机	急停、超速、过载、故障码	验证联锁可靠性

2 系统设计与控制策略

2.1 二次侧控制结构

二次侧控制系统采用 PLC 主控、硬接线联锁、通信数据补充、上位机监控结构。PLC 接收急停、运行允许、主回路状态、变频器故障、转速转矩和电参数信号,并根据试验模式向变频器 A、变频器 B 发送启动、停止、频率、转矩和模式切换指令。硬接线联锁用于急停和关键保护,保证通信异常或上位机异常时系统仍能进入安全状态。通信数据用于变频器参数写入、状态读取、报警码解析和母线电压监测。

二次侧控制架构见图 2。该架构强调上位机不直接控制变频器,所有运行指令均需经过 PLC 安全判断后执行,以减少误操作风险。图中控制流以黑色箭头表示,数据流以红色箭头表示(颜色标识见电子版)。

PLC 程序包括参数管理、运行许可判断、速度控制、转矩加载、VF 分离自动流程、能量回馈监测、故障保护和通信数据映射等模块。变频器 A、变频器 B 设置独立数据区,分别存储运行命令、工作模式、设定频率、设定转矩、反馈频率、输出电流、输出功率、母线电压、运行状态和报警代码。速度模式、转矩模式和 VF 模式仅在停机或允许切换状态下写入,避免运行中模式突变造成轴系冲击。

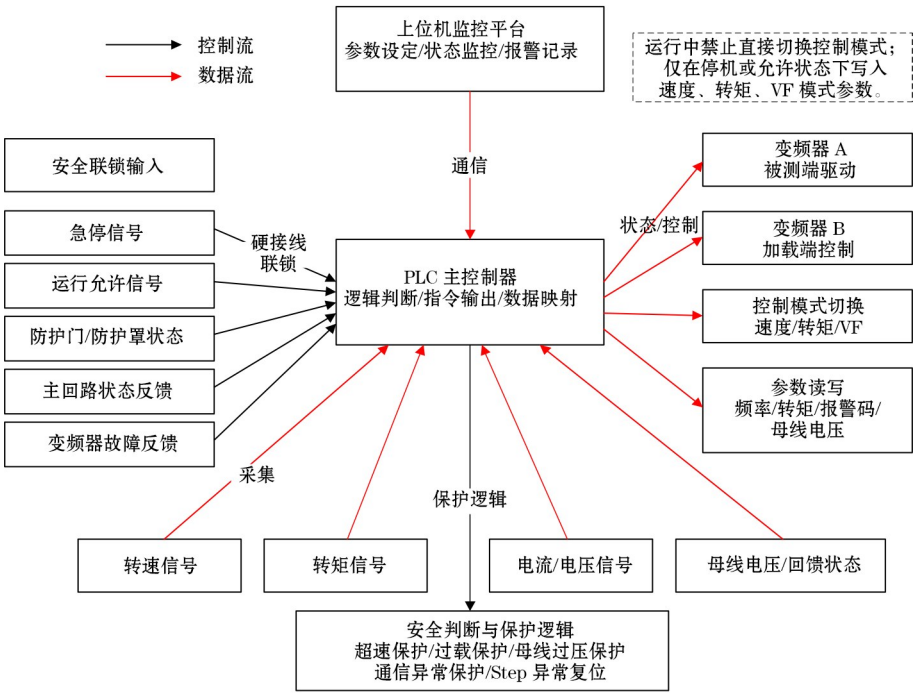


图 2　二次侧控制架构

Fig.2　Secondary-side control architecture

2.2　安全联锁与异常处理

矿用测功平台涉及大功率驱动、大转矩加载和高惯量旋转部件,安全保护需覆盖人员安全、设备安全和试验过程安全。急停保护为最高优先级,急停动作时 PLC 立即撤销运行指令并使变频器停机。过载保护根据转矩、电流和功率进行判断,允许短时冲击但限制持续越限时间。制动反拖过程中,PLC 持续监测母线电压,当母线电压接近保护阈值时限制反拖强度或执行停机保护。通信异常时,系统禁止新的启动指令并保持安全状态。VF 分离等自动流程通过 STEP 变量和定时器控制,当 STEP 变量超出范围、试验中断或故障发生时,系统自动复位运行标志和定时器,防止程序停留在不可控状态。

2.3　速度、转矩与功率计算

恒速控制用于模拟矿用装备在平巷内稳定行驶。上位机输入目标转速或目标频率后,PLC 对参数进行限幅并发送至被测端变频器。电机同步转速计算公式为:

$$n=\frac{60f}{p} \tag{1}$$

式中:n 为电机同步转速,r/min;f 为变频器输出频率,Hz;p 为电机极对数,取值由电机结构决定。

由于矿用电机在重载条件下存在转差,实际控制效果以转速传感器采集值为准。转速稳态误差为:

$$\delta_n=\frac{|\,n_{\mathrm{set}}-n_{\mathrm{act}}\,|}{n_{\mathrm{set}}}\times 100\% \tag{2}$$

式中:δ_n 为转速稳态误差,%;n_{set} 为设定转速,r/min;n_{act} 为实际平均转速,r/min。

低速大转矩加载用于模拟满载起步和坡道牵引。PLC 根据设定转矩和额定转矩计算转矩给定比例:

$$K_{\mathrm{T}}=\frac{T_{\mathrm{set}}}{T_{\mathrm{N}}}\times 100\% \tag{3}$$

式中:K_{T} 为转矩给定比例,%;T_{set} 为设定加载转矩,N·m;T_{N} 为被测电机额定转矩,N·m。若变频器以 0～10 000 表示 0～100%额定转矩,则 PLC 写入的转矩控制字为:

$$D_{\mathrm{T}}=\frac{T_{\mathrm{set}}}{T_{\mathrm{N}}}\times 10\,000 \tag{4}$$

式中,D_{T} 为转矩控制字,无量纲。机械输出功率按式(5)计算:

$$P_{\mathrm{m}}=\frac{Tn}{9\,550} \tag{5}$$

式中:P_{m} 为机械输出功率,kW;T 为轴端实测转矩,N·m;n 为实际转速,r/min;9 550 为单位换算系数。当同步采集输入电功率时,可计算系统效率:

$$\eta=\frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}}\times 100\% \tag{6}$$

式中:η 为系统效率,%;P_{out} 为输出功率,kW;P_{in} 为

输入功率,kW。

2.4 反拖回馈、VF 分离与限幅控制

在长下坡和减速制动工况下,矿用新能源车辆驱动电机可能由电动状态转为发电状态。平台通过加载端对被测端施加反拖转矩,模拟制动能量回馈过程。PLC 监测制动转矩、回馈功率、母线电压和变频器报警状态。当母线电压接近保护阈值时,系统限制反拖强度或执行停机保护。

VF 分离试验用于低频参数整定。试验前,上位机设定各阶段频率、电压和运行时间,PLC 按 STEP 顺序依次执行低频段、中频段和高频段运行。低频段重点观察转矩建立能力和电流峰值,中频段观察升速平稳性,高频段观察功率输出和电压利用情况。频率限幅关系为:

$$f_{\mathrm{cmd}}=\begin{cases}0, & f_{\mathrm{set}}\leqslant 0\\ f_{\mathrm{set}}, & 0<f_{\mathrm{set}}<f_{\max}\\ f_{\max}, & f_{\mathrm{set}}\geqslant f_{\max}\end{cases}\tag{7}$$

式中:f_{cmd}为 PLC 实际下发频率,Hz;f_{set}为上位机设定频率,Hz;$f_{\max}$为系统允许最大频率,Hz。

转矩限幅关系为:

$$T_{\mathrm{cmd}}=\begin{cases}0, & T_{\mathrm{set}}\leqslant 0\\ T_{\mathrm{set}}, & 0<T_{\mathrm{set}}<T_{\max}\\ T_{\max}, & T_{\mathrm{set}}\geqslant T_{\max}\end{cases}\tag{8}$$

式中:T_{cmd}为 PLC 实际下发转矩,N·m;$T_{\max}$为允许最大加载转矩,N·m。

母线电压保护逻辑为:

$$S_{\mathrm{p}}=\begin{cases}0, & U_{\mathrm{dc}}<U_{\mathrm{lim}}\\ 1, & U_{\mathrm{dc}}\geqslant U_{\mathrm{lim}}\end{cases}\tag{9}$$

式中:S_{p}为母线电压保护状态,0 表示未触发保护,1 表示触发保护;U_{dc}为直流母线电压,V;U_{lim}为母线电压保护阈值,V。

2.5 上位机监控与数据管理

上位机是系统的人机交互和数据管理中心,主要包括试验对象管理、矿山工况选择、参数设定、实时监控、曲线分析、报警记录、历史数据查询和试验报告生成等功能,其功能结构见图 3,图中功能逻辑流用黑色箭头表示,关键数据流用红色箭头表示(颜色标识见电子版)。

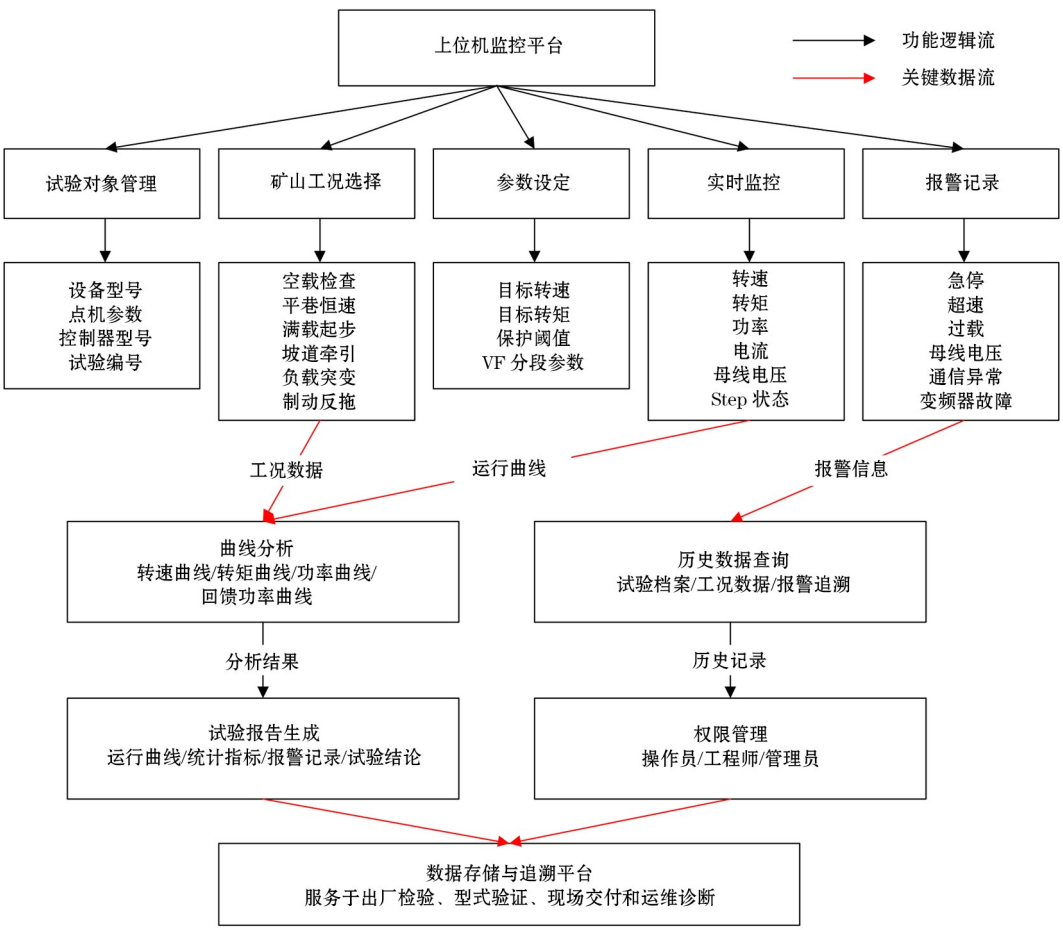


图 3 上位机功能结构

Fig.3 Functional structure of the host-computer monitoring system

试验过程中,上位机对试验对象、设定参数、运行曲线、统计指标、报警事件和操作人员信息进行记录。对于负载突变、制动反拖和故障停机等动态过程,系统采用较短采样周期,以捕捉转速跌落、电流峰值、功率峰值和母线电压波动;对于长时间稳态运行试验,可适当延长采样周期以降低数据存储压力。试验完成后,上位机自动生成试验报告,内容包括设备信息、试验工况、运行曲线、最大转速、平均转矩、功率峰值、电流峰值、母线电压峰值、报警次数和试验结论。该功能使平台不仅服务于单次测试,也可支撑矿用新能源装备的出厂检验、现场交付和运维追溯。

3 平台调试过程与结果分析

3.1 试验对象与试验条件

为验证系统对不同功率等级矿用新能源电驱电机系统的适应性,选取 M1、M2、M3 共 3 种功率等级电机作为试验对象,分别开展恒速运行、低速大转矩加载、负载突变、制动反拖、VF 分离和故障保护试验。试验前检查 PLC 与变频器通信、急停回路、运行允许信号、转速转矩采集、电参数采集和上位机记录功能。试验对象参数见表 2。

表 2 调试电机及对应矿山工况

Table 2 Tested motors and corresponding mining conditions

电机编号	额定功率/kW	额定转速/(r/min)	额定转矩/(N·m)	主要模拟工况
M1	45	1 500	286	空载检查、平巷恒速
M2	90	1 500	573	满载起步、坡道牵引
M3	160	1 500	1 019	负载突变、制动反拖

由表 2 可知,试验对象覆盖不同功率等级和典型矿山应用场景。低功率电机主要用于验证基础启停和恒速控制;中功率电机用于分析低速牵引和坡道加载能力;高功率电机用于验证负载突变、制动反拖和能量回馈过程中的动态稳定性。

3.2 不同功率电机恒速运行特性

恒速运行试验模拟矿用装备在平巷内稳定行驶。试验中,电机由静止状态升速至设定转速,并在稳定区间内运行。不同功率电机恒速运行结果见表 3。

表 3 不同功率电机恒速运行结果

Table 3 Constant-speed operation results of motors with different power ratings

电机编号	设定转速/(r/min)	平均转速/(r/min)	最大转速/(r/min)	最小转速/(r/min)	稳态误差/%	转速波动范围/%
M1	900	896	906	889	0.44	2.11
M2	900	902	910	894	0.22	1.78
M3	900	899	906	892	0.11	1.56

由表 3 可知,3 种功率等级电机均能稳定进入设定转速区间,稳态误差控制在 0.5%以内,转速波动范围控制在 2.11%以内。从动态过程来看,M1 功率较小、转动惯量较低,升速时间较短,但对负载扰动较为敏感;M2 升速过程较平稳,速度恢复能力较好;M3 由于系统惯量较大,升速时间相对较长,但进入稳态后波动较小。该规律说明,功率等级和转动惯量会影响升速响应速度,但 PLC 与变频器组成的速度控制链路能够满足矿用装备在平巷内稳定行驶条件下的测试要求。

3.3 低速大转矩加载特性

低速大转矩加载试验用于模拟满载起步和坡道牵引。试验中,被测电机保持低速运行,加载端逐步施加阻力转矩,记录转速、转矩、电流和功率变化。试验结果见表 4。

表 4 低速大转矩加载试验结果

Table 4 Results of low-speed high-torque loading tests

电机编号	试验转速/(r/min)	设定转矩/(N·m)	平均转矩/(N·m)	转矩峰值/(N·m)	转矩波动范围/%	功率峰值/kW	稳定时间/s
M1	300	180	176	195	6.7	6.1	2.1
M2	300	380	374	405	5.8	12.7	2.8
M3	300	700	688	746	5.2	23.4	3.6

由表 4 可知,低速加载过程中,实际平均转矩与设定转矩偏差控制在 1.58%～2.22%之间,转矩波动范围控制在 6.7%以内。M1 在加载初期转速跌落较明显,但恢复时间较短;M2 转矩建立过程较平稳,功率曲线无明显突变;M3 转矩峰值和功率峰值较高,加载稳定时间相对较长。该结果表明,随着功率等级提高,系统可承受的加载转矩和功率峰值增加,但控制稳定时间也相应延长。对于矿山车辆而言,低速大转矩加载数据可用于判断满载起步能力和坡道牵引能力是否满足现场要求。

3.4 负载突变与制动反拖动态响应

负载突变试验通过在恒速运行基础上施加阶跃加载,模拟矿山道路起伏、坡度突变和载荷变化。加载瞬间,转矩快速上升,转速出现短时下降,功率和电流达到峰值后逐渐稳定。制动反拖试验中,加载端对被测端施加反拖转矩,模拟长下坡或减速制动过程,重点监测制动转矩、回馈功率和母线电压。动态工况试验结果见表 5。

表 5 动态工况试验结果

Table 5 Results of dynamic operating condition tests

电机编号	试验项目	最大转速跌落/%	电流峰值/A	功率峰值/kW	母线电压峰值/V	恢复或稳定时间/s
M1	负载突变	8.6	118	18.5	—	1.7
M2	负载突变	6.4	216	39.8	—	2.3
M3	负载突变	4.9	358	72.6	—	3.1
M1	制动反拖	—	96	12.8	612	1.9
M2	制动反拖	—	185	28.6	628	2.6
M3	制动反拖	—	302	55.4	645	3.4

由表 5 可知,不同功率电机在负载突变工况下呈现不同动态特征。M1 转速跌落幅度较大,但恢复速度较快;M2 在转速跌落和恢复时间之间表现较均衡;M3 由于惯量较大,转速跌落幅度较小,但功率峰值和电流峰值更高。制动反拖过程中,回馈功率随制动转矩增加而上升,母线电压出现短时波动,但未超过保护阈值。该结果说明,系统能够反映矿用新能源电驱系统在道路阻力变化和长下坡制动工况下的动态响应规律。

3.5 VF 分离与故障保护验证

VF 分离试验按照 STEP 顺序完成低频段、中频段和高频段运行。各阶段频率、电压和运行时间与设定值一致,未出现 STEP 跳变、定时器失效或控制指令丢失。低频段电流和转矩数据可用于判断起步转矩补偿是否合理,中高频段数据可用于分析升速平稳性和功率输出能力。

故障保护试验对急停、超速、过载、母线过压、通信异常和 STEP 异常复位进行验证。结果见表 6。

表 6 故障保护验证结果

Table 6 Verification results of fault protection

测试项目	测试次数/次	正常响应次数/次	平均响应时间/s	结果
急停保护	20	20	0.12	正常
超速保护	20	20	0.28	正常
过载保护	20	20	0.35	正常
母线过压保护	20	20	0.31	正常
通信异常保护	20	20	0.46	正常

由表 6 可知,各类故障保护功能均能正常响应,保护动作准确率为 100%。其中,急停保护平均响应时间为 0.12 s,响应最快;通信异常保护平均响应时间为 0.46 s,响应时间主要受通信检测周期和异常确认时间影响。结果表明,系统能够满足矿用测功平台对安全联锁和异常停机的要求。

4 工程应用分析

4.1 现场应用场景

现场应用对象为某金属矿山新能源辅助运输装备。该矿山井下运输线路具有连续坡道多、弯道多、车辆启停频繁和单班运行时间长等特点,辅助运输车辆主要承担人员、材料及小型设备转运任务,对电驱系统低速牵引能力、坡道通过能力、制动稳定性和安全保护可靠性要求较高。传统交付检测和检修后复核主要依赖人工试车与经验判断,测试工况覆盖不完整,运行数据记录连续性不足,难以在设备投入运行前准确识别驱动参数匹配不当、低速转矩输出不足、制动回馈异常和保护阈值设置不合理等问题。

基于上述现场需求,将所设计的矿用新能源测功机电控系统应用于该矿山辅助运输装备的出厂检验和检修后状态确认。测试内容包括平巷内恒速运行、坡道牵引、重载起步、负载突变和制动反拖等工况,并采集转速、转矩、功率、电流、母线电压和故障状态等参数,再与现场运行记录结果进行对比分析。通过标准化台架测试与现场数据追溯相结合,可提高设备投运前性能验证的完整性和检修后状态判断的准确性。

现场应用过程中,上位机建立设备档案,记录设备编号、电机型号、控制器参数、试验人员、试验时间、工况模板和测试结果。设备投入矿山现场运行后,可将现场监测到的起步电流、坡道速度、功率峰值和报警信息与出厂测功数据进行对比,从而判断故障是来源于电机性能衰减、控制器参数变化、传动系统异常,还是现场载荷超限。

4.2 现场关键参数变化规律

现场应用验证中,对设备运行过程中的转速、转矩和功率变化进行跟踪。现场关键参数统计见表 7。在平巷内运行时,转速整体平稳,功率变化随载荷呈小幅波动;坡道牵引时,转矩和功率明显上升,转速出现一定程度下降,但仍保持在允许范围内;重载起步时,电流和转矩快速上升,随后逐渐进入稳定区间;制动反拖时,回馈功率和母线电压出现短时峰值。

表 7 现场运行关键参数统计结果

Table 7 Statistical results of key parameters in field operation

工况	平均转速/(r/min)	转速波动范围/%	平均转矩/(N·m)	转矩峰值/(N·m)	功率峰值/kW	运行状态
平巷内运行	875	2.4	315	386	35.4	正常
坡道牵引	642	5.8	586	724	48.7	正常
重载起步	318	7.6	692	816	32.5	正常
制动反拖	520	4.3	438	652	41.8	正常

由表 7 可知,在平巷内运行时,系统转速波动范围为 2.4%,转矩和功率变化较小,表明车辆稳定行驶

状态良好;坡道牵引时,平均转速下降至642 r/min,平均转矩增至586 N·m,说明坡道阻力显著增加;重载起步时,转矩峰值达到816 N·m,是各工况中的最高值,体现了矿用车辆起步阶段对低速大转矩输出能力的要求;制动反拖时,功率峰值为41.8 kW,运行状态正常,说明回馈过程未触发异常保护。

5 结论

针对矿用新能源辅助运输装备在平巷内运行、坡道牵引、重载起步、负载突变和制动反拖等工况下测试验证不足的问题,设计了基于PLC与上位机协同控制的矿用新能源测功机电控系统,并通过45,90,160 kW 3种功率等级电机试验及现场应用验证,得到如下结论。

(1) 系统构建了上位机监控、PLC控制、变频器执行以及传感器反馈的电控架构,可实现试验对象管理、工况选择、参数设定、实时监测、报警记录、运行曲线分析和试验报告生成等功能。上位机负责试验配置、数据记录和结果管理,PLC负责底层逻辑控制、模式切换、参数写入和故障联锁,能够满足矿用新能源电驱系统测功试验的自动控制与数据追溯需求。

(2) 恒速运行试验结果表明,45,90,160 kW电机在900 r/min设定转速下,平均转速分别为896,902,899 r/min,稳态误差分别为0.44%、0.22%、0.11%,转速波动范围分别为2.11%、1.78%、1.56%,说明系统速度控制稳定,可满足在平巷内稳定运行工况模拟的要求。

(3) 低速大转矩加载和动态工况试验结果表明,3种电机在300 r/min条件下,转矩波动范围为5.2%~6.7%,稳定时间为2.1~3.6 s;负载突变时最大转速跌落为4.9%~8.6%,恢复或稳定时间为1.7~3.1 s;制动反拖时母线电压峰值为612~645 V,未出现异常停机,说明系统能够模拟满载起步、坡道牵引、负载变化和制动反拖等典型运行工况。

(4) 故障保护试验中,急停、超速、过载、母线过压和通信异常保护均进行了20次测试,正常响应次数均为20次,保护动作准确率为100%,平均响应时间为0.12~0.46 s,表明系统具备较好的安全联锁和异常停机能力。

(5) 现场应用结果表明,平巷内运行、坡道牵引、重载起步和制动反拖工况下设备运行状态均正常。其中,平巷内运行的转速波动范围为2.4%,坡道牵引平均转矩为586 N·m,重载起步转矩峰值达到816 N·m,制动反拖功率峰值为41.8 kW。该系统可为矿用新能源电驱系统出厂检验、检修后状态确认和运维诊断提供数据支撑。

参考文献(References):

[1] 孙严礼,梁浩赟,刘庆伟.矿山机械设备动力系统优化设计与应用研究[J].今日制造与升级,2025(8):143-145.
Sun Yanli, Liang Haoyun, Liu Qingwei. Optimization design and application research of power system for mining machinery equipment [J]. Today's Manufacturing and Upgrading,2025(8):143-145.

[2] 王昊明,孙斌.矿山智能化改造对矿产资源循环利用效率提升的影响[J].清洗世界,2026,42(2):195-198.
Wang Haoming, Sun Bin. Impact of intelligent transformation of mines on improving the recycling efficiency of mineral resources[J]. Cleaning World,2026,42(2):195-198.

[3] 黄麟淇,李夕兵,李传奇.人工智能赋能金属矿开采的技术进展与未来图景[J].中国有色金属学报,2026,36(3):1144-1163.
Huang Linqi, Li Xibing, Li Chuanqi. Technological progress and future prospects of artificial intelligence empowering metal mining [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2026,36(3):1144-1163.

[4] 贾志强,何忠祥,李成阳,等.矿用隔爆电驱系统的控制系统设计[J].船电技术,2020,40(1):12-14.
Jia Zhiqiang, He Zhongxiang, Li Chengyang, et al. Design of control system for mine flameproof electric drive system [J]. Marine Electric & Electronic Technology,2020,40(1):12-14.

[5] 罗浩.副井提升机三电平交直交变频调速系统优化设计[J].机械工程与自动化,2024(3):162-164.
Luo Hao. Optimal design of three-level AC-DC-AC frequency conversion speed regulation system for auxiliary shaft hoist[J]. Mechanical Engineering & Automation,2024(3):162-164.

[6] 汪双柱.纯电动客车三电系统台架联调测试研究[J].汽车实用技术,2021,46(15):28-29+33.
Wang Shuangzhu. Research on bench joint debugging test of three-electric system for pure electric bus[J]. Automobile Applied Technology,2021,46(15):28-29+33.

[7] 焦志辉,郭圣权,周新伟,等.基于底盘测功机的非插电式混合动力牵引车电机电池冷却系统散热能力试验方法研究[J].汽车科技,2025(6):58-63.
Jiao Zhihui, Guo Shengquan, Zhou Xinwei, et al. Research on test method for heat dissipation capacity of motor and battery cooling system of non-plug-in hybrid tractor based on chassis dynamometer [J]. Automotive Science and Technology,2025(6):58-63.

[8] 仝畅,任烁今,李腾腾,等.重型车底盘测功机油耗的测试和统计[J].汽车安全与节能学报,2024,15(4):553-560.

Tong Chang, Ren Shuojin, Li Tengteng, et al. Measurement and statistics of fuel consumption of heavy-duty vehicles on chassis dynamometer[J]. Journal of Automotive Safety and Energy,2024,15(4):553-560.

[9] 李焱,朱恺.履带式工程车辆行走减速机系列化设计方法研究[J].矿业研究与开发,2019,39(7):110-113.
Li Yan, Zhu Kai. Research on serialized design method of travel reducer for crawler engineering vehicle[J]. Mining Research and Development,2019,39(7):110-113.

[10] 郑斯林,战凯,郭鑫,等.基于模糊控制的新能源地下铲运机制动能量回收控制算法研究[J].有色金属(矿山部分),2026,78(2):32-40.
Zheng Silin, Zhan Kai, Guo Xin, et al. Research on braking energy recovery control algorithm based on fuzzy control for new energy underground LHD[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2026,78(2):32-40.

[11] 李勇,杨珏,刘如成,等.大型电动轮矿车节能及零排放技术路线[J].煤炭学报,2022,47(5):2120-2130.
Li Yong, Yang Jue, Liu Rucheng, et al. Technical route of energy saving and zero-emission for large-scale electric mining truck[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5):2120-2130.

[12] 孙善辉,夏超英.电动汽车电机及驱动系统试验平台的设计与开发[J].电气传动,2006(2):42-44.
Sun Shanhui, Xia Chaoying. Design and development of a test platform for the motor and drive system of the electric vehicle[J]. Electric Drive,2006(2):42-44.

[13] Gong Y P, Jiang Y L, Cheng C, et al. A deep echo state network with scaling factor activation functions for fault diagnosis of electrical drive systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2025,11(3):7874-7884.

[14] 朱惠正,匡梅坤,李树民,等.基于工业互联网平台的矿井稳车集成监控系统开发[J].矿业工程研究,2026,41(1):73-78.
Zhu Huizheng, Kuang Meikun, Li Shumin, et al. Development of integrated monitoring system for mine winches based on industrial internet platform[J]. Mineral Engineering Research,2026,41(1):73-78.

[15] 李天文,柳振方,王斌,等.一种电机测试的检测平台设计与应用[J].机电工程技术,2024,53(2):295-298.
Li Tianwen, Liu Zhenfang, Wang Bin, et al. Design and application of a testing platform for motor testing[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(2):295-298.

[16] 徐威.基于PLC提升的矿山自机电控系统优化与故障诊断[J].世界有色金属,2026(5):25-27.
Xu Wei. Optimization and fault diagnosis of mine self-electric control system based on PLC enhancement[J]. World Nonferrous Metals,2026(5):25-27.

[17] Xing Y L, Xu T, Meng C J, et al. A braking energy management algorithm based on variable time domain and operating condition prediction for PHEV [C]//2024 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS). New York:IEEE, 2024:548-552.

[18] Shang H, Song Q, Wang G F. Research on dynamic load emulation algorithm for electric vehicle driving motor test bench [C]//Eighth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023). Bellingham:SPIE, 2023:181.

[19] Qiu Chengqun, Wan Xinshan, Wang Na, et al. A novel regenerative braking energy recuperation system for electric vehicles based on driving style[J]. Energy,2023,283:129055.

[20] Szumska E M. Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges[J]. Energies, 2025,18(10):2422.

[21] 任志勇,石琴.矿用电动无轨辅助运输装备发展现状及关键技术[J].煤炭科学技术,2021,49(7):118-123.
Ren Zhiyong, Shi Qin. Development status and key technologies of mine-used electric auxiliary trackless transport equipment[J]. Coal Science and Technology, 2021,49(7):118-123.

[22] 冯彦彪,邵俊恺,杨珏,等.矿用自卸车新能源技术研究现状与展望[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊1):343-350.
Feng Yanbiao, Shao Junkai, Yang Jue, et al. Research status and prospects of new energy technology for mining dump trucks[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(Suppl.1):343-350.