[控制系统]

基于PLC技术的电牵引采煤机智能调速控制系统设计

文/周勇　王旭龙　王庆龙
兖煤菏泽能化有限公司赵楼煤矿

煤矿智能化建设是提高煤炭开采效率和安全性的关键，电牵引采煤机作为煤矿开采的核心设备，其调速控制性能直接影响生产效率。针对现有电牵引采煤机调速控制系统存在的问题，提出一种基于PLC技术的智能调速控制方案。该方案采用模糊PID控制算法，结合速度、位置和电流反馈，实现采煤机速度的精确控制。实验结果表明，该系统能够显著提高采煤机的速度控制准确度，降低能耗，具有良好的工程应用前景。

煤炭作为我国重要的基础能源，在国民经济中占据战略地位，提高煤炭开采效率和安全性是实现能源可持续发展的关键。《煤炭工业发展十三五规划》明确指出，要大力推进煤矿智能化建设，推动煤炭开采由规模化向质量效益型转变。电牵引采煤机作为煤矿开采的关键设备，其调速控制性可能直接影响采煤效率和安全[1]。本文提出一种基于可编程序逻辑控制器（PLC）技术的电牵引采煤机智能调速控制系统，旨在提高采煤机的运行效率和可靠性，为智能化矿山建设提供技术支撑。

电牵引采煤机调速控制现状分析

目前，电牵引采煤机主要采用直流或交流变频调速技术。直流调速系统响应速度快，但损耗大、维护成本高；交流变频调速具有节能高效的优势，但控制准确度和动态响应有待提高。此外，传统PID控制算法在面对采煤机负载突变、煤层硬度变化等复杂工况时，难以实现最优调速。例如，当采煤机切割负载从1.5 MW骤增至2 MW时，转速往往出现超调或振荡，影响采煤效率[2]。现有研究尝试引入智能控制理论，如模糊控制、神经网络等，但仍停留在仿真阶段，鲜有成熟应用。总体而言，电牵引采煤机调速控制技术有待进一步创新，以满足智能化矿山建设对采煤效率、可靠性和能耗的更高要求。

基于PLC技术的电牵引采煤机智能调速控制系统设计

1. 系统总体设计

本系统基于PLC技术，采用模块化设计思路，主要工作流程如下。

输入模块实时采集操作指令、位置、速度和负载等信号。这些数据随后被传输至中央处理模块，由PLC进行数据处理和智能决策。中央处理模块运用先进的控制算法，如PID或模糊逻辑，来优化调速策略。一旦计算出最佳的控制参数，中央处理模块将指令发送到输出模块，后者通过控制电机驱动器和制动系统来调整采煤机的速度和扭矩。同时，通信与监控模块确保系统与其他设备协同工作，并提供操作界面供操作员监控和调整系统参数。

2. 系统结构及关键技术

（1）输入模块

输入模块是本系统的信息采集前端，负责实时获取操作指令、位置反馈、速度信号和负载数据等。该模块选用西门子S7-1200系列PLC，配备8路

数字量输入（DI）、4路模拟量输入（AI）和2路高速脉冲输入（HSC）。其中，数字量输入采集操作面板的启停、正反转等开关信号；模拟量输入接收速度传感器（如旋转编码器）的4～20 mA标准电流信号，分辨率可达14 bit；高速脉冲输入连接增量式编码器，用于精确采集采煤机位置，最高支持200 kHz脉冲频率。输入模块还集成信号调理电路，包括隔离、滤波和电平转换等，以提高信号的抗干扰能力和可靠性[3]。例如，模拟量输入通道配备了5级RC有源低通滤波器，截止频率F_c=100 Hz，可有效抑制高频噪声。此外，输入模块支持断线检测、故障诊断等智能化功能，可及时发现传感器故障并报警，保证数据采集的完整性和准确性。输入模块将采集到的原始数据进行预处理后，通过Profinet工业以太网总线传送至中央处理模块，为后续的智能调速控制奠定了坚实基础。

（2）中央处理模块

中央处理模块是本系统的核心，负责对输入模块采集的数据进行处理，并根据智能控制算法生成优化的调速指令。该模块选用西门子S7-1500系列高性能PLC，搭载Intel Core i7处理器，配备8 MB用户内存和125 KB工作内存，支持最小32 μs的指令执行周期，可满足复杂控制算法的运算需求。在软件方面，中央处理模块基于西门子TIA Portal V16开发平台，采用SCL结构化控制语言编程，实现多种智能控制策略，包括模糊PID、神经网络预测等[5]。其中，模糊PID控制融合传统PID控制和模糊逻辑推理，通过对速度偏差e、偏差变化率e_c进行模糊化处理，自适应调整PID参数，提高系统的鲁棒性。控制器输出u可表示为

$$u = K_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int e\mathrm{d}t + T_d\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right) \tag{1}$$

式中，K_p、T_i和T_d分别为比例、积分和微分系数，通过模糊规则表动态调整。

此外，中央处理模块还引入卡尔曼滤波、Smith预估等算法，用于优化速度反馈信号，补偿系统延迟，改善控制品质。卡尔曼滤波通过递推估计状态变量的最优值，有效抑制测量噪声，滤波后的速度信号平稳性提高了2.5倍。中央处理模块基于优化后的反馈信号和设定值，运行智能控制算法，生成PWM占空比指令，实现采煤机速度的精准控制，并通过Profinet总线实时传送至输出模块。

（3）输出模块

输出模块是本系统的执行单元，负责将中央处理模块生成的控制指令转换为驱动信号，并精确控制电牵引采煤机的速度和扭矩。该模块选用西门子ET 200SP分布式I/O系统，配备8路数字量输出（DQ）、4路模拟量输出（AQ）和2路高速脉冲输出（PTO）。其中，数字量输出用于控制电机驱动器的使能、方向等开关量；模拟量输出提供−10～+10 V的标准电压信号，16 bit分辨率，用于调节电机转矩；高速脉冲输出直接控制IGBT功率模块，最高支持1 MHz脉冲频率，可实现电机的变频调速。输出模块采用智能功率模块（IPM），集成闸门驱动、过电流保护和过温保护等功能，显著提高系统的可靠性。IPM的输出电流I_o与控制信号占空比D的关系可表示为

$$I_o = \frac{V_{dc}}{R}D \tag{2}$$

式中，V_{dc}为直流母线电压；R为电动机等效电阻。

通过调节PWM占空比，可实现电流的精确控制，进而实现速度和转矩的调节。此外，输出模块还采用磁滞环电流跟踪技术，通过比较实际电流与参考电流，动态调整PWM占空比，使电流快速跟踪给定值，提高系统的动态响应性能。

（4）通信与监控模块

通信与监控模块是本系统的信息枢纽和人机交互界面，负责协调各模块间的数据交换，并为操作员提供实时监控和参数设置功能。该模块采用西门子SIMATIC WinCC V7.5软件平台，搭建基于TCP/IP协议的工业以太网通信架构。控制层和现场层设备通过Profinet总线互联，支持100 Mbit/s全双工通信，周期发送时间可达31.25 μs，满足系统的实时性需求。数据在网络中的传输延迟τ可用下式估算

$$\tau = \frac{L}{R} + \sum_{i=1}^{n}(T_i + P_i) \tag{3}$$

式中，L为数据帧长度；R为网络带宽；T_i为第i个节点的处理延迟；P_i为第i个节点的传输延迟；n为节点总数。

通过优化网络拓扑和参数设置，系统的平均传输延迟控制在1 ms以内。

监控模块采用B/S架构，基于HTML5和JavaScript开发跨平台的Web应用，可在计算机、

移动终端等设备上访问。监控界面提供丰富的图形化组态元素，包括实时曲线、柱状图和仪表盘等，直观展示采煤机的速度、位置和电流等关键参数。操作员可通过界面远程修改PID参数、速度设定值等，优化系统性能。此外，监控模块还集成故障诊断、报警管理和历史数据存储等功能，辅助操作员进行设备维护和过程优化。

实验与结果分析

1. 实验方案

为测试设计的基于PLC技术的电牵引采煤机智能调速控制系统的性能，搭建实验平台。实验在某矿业集团的综采工作面进行，选用MG500/1180-WD型电牵引采煤机。该采煤机额定功率为500 kW，最大牵引速度1.8 m/s。控制系统硬件由西门子S7-1500 PLC、ET 200SP分布式I/O和SINAMICS S120变频器等组成。实验采用煤层厚度为3.5 m、倾角为8°的工作面，煤的硬度系数f=1.8。

实验方案：首先，在采煤机上安装速度传感器、位置传感器和电流传感器等，并与PLC连接。然后，根据设计的控制算法，在TIA Portal V16软件中编写PLC程序，主要包括输入信号处理、模糊PID控制和PWM输出等功能模块。接着，将程序下载至PLC，通过WinCC组态软件设置速度给定值、PID参数等。最后，启动采煤机，在不同工况下进行测试，包括空载启动、正常采煤、巷道转弯等，记录速度、位置和电流等数据。实验中，速度给定值设置为1.2 m/s，速度反馈采用旋转编码器，分辨率为1 024 p/r。PID参数初始设置为K_p=2.5，K_i=0.8，K_d=0.1，并根据模糊规则表在线调整。实验重复进行10次，每次持续30 min，取平均值作为最终结果。

2. 实验结果与讨论

电牵引采煤机在不同工况下的速度控制性能参数见表1。由表1可知，采用本文设计的智能调速控制系统后，采煤机的速度控制准确度显著提高。在空载启动工况下，速度超调量仅为3.2%，调节时间1.8 s；在正常采煤工况下，速度波动率为±1.5%，优于传统PID控制的±5%的水平；在巷道转弯工况下，速度跟踪误差小于0.1 m/s，实现了平稳转弯。

系统的能耗优化效果见表2。与传统恒速控制相比，智能调速控制使采煤机的平均能耗降低12.4%，其中空载能耗降低20.1%，负载能耗降低9.6%。一方面是由于模糊PID控制算法的优化效果，降低速度超调和波动引起的能量损耗；另一方面，智能调速实现了速度的精确匹配，避免恒速控制下“大马拉小车”现象，提高了系统效率。以上实验结果表明，本文设计的基于PLC技术的智能调速控制系统能够显著改善电牵引采煤机的速度控制性能，提高采煤效率，降低能耗。

表1　智能调速控制系统速度性能参数

工况	速度超调量（%）	速度波动率（%）	调节时间/s	速度跟踪误差/(m/s)
空载启动	3.2	±0.5	1.8	-
正常采煤	-	±1.5	-	0.05
巷道转弯	-	±2.0	-	0.10

表2　智能调速控制系统能耗优化效果

控制方式	平均能耗/（kW·h/t）	空载能耗/（kW·h）	负载能耗/（kW·h/t）
恒速控制	8.5	30.2	6.2
智能调速控制	7.4	24.1	5.6
降低率（%）	12.4	20.1	9.6

结束语

本文针对电牵引采煤机调速控制中存在的技术挑战，设计一种基于PLC技术的智能调速控制系统。该系统采用模块化设计，由输入、输出、中央处理和通信监控四大模块组成，充分发挥了PLC技术的优势。系统集成了模糊PID控制、卡尔曼滤波和Smith预估等智能算法，显著提升了采煤机速度控制的准确度和动态性能。未来，需加强智能调速系统与煤矿综合自动化平台的深度集成，实现采煤过程的端到端优化控制，为智慧矿山建设贡献力量。EA

（收稿日期：2024-06-11）

参考文献

[1] 李金波，侯忠．煤矿皮带机智能调速系统及其节能分析[J]．能源与节能，2024(3)：87-89+94．
[2] 程玮，李申岩．选煤厂智能输煤系统[J]．工矿自动化，2023，49(S2)：36-39．
[3] 王俊．煤矿井下煤流运输智能视频调速系统[J]．工矿自动化，2023，49(S2)：33-35．
[4] 高斌．带式输送机智能调速控制系统的应用[J]．机械管理开发，2023，38(10)：165-166+169．