

煤矿机电自动化控制系统优化设计研究

马福龙

宁夏王洼煤业有限公司银洞沟煤矿 宁夏 银川 750004

摘 要: 自动化控制系统是煤矿机电设备安全高效运行的重要保障,其好坏直接影响到煤炭产量以及井下工作人员生命安全。目前大多数煤矿机电自动化控制系统存在控制精度较低、响应较慢、抗干扰能力差、系统孤岛化严重以及缺乏有效的故障检测手段等问题,不能适应现代化煤矿智能化发展的需要。基于此,本文首先介绍了煤矿机电自动化控制系统的结构特点和工作原理,然后详细阐述了现有的自动化控制系统在感知层、控制层与执行层中存在的主要问题及其原因,在此基础上提出了相应的改进措施并讨论了系统的整体优化方案及其实现途径,以期能够促进煤矿机电控制系统由“可用”到“好用、可靠、智能”。

关键词: 煤矿机电; 自动化控制; 系统优化; 智能矿山; 冗余设计

引言

煤矿机电设备自动化控制程度直接影响到煤矿安全生产以及生产率高低。虽然目前大部分煤矿已经应用了 PLC、变频调速、工业监控等基本自动化控制系统,可以进行设备远程启停以及监控工作,但是由于煤矿地质情况复杂且要求高产高效,现有的这些系统远远不能满足需要。其主要问题是:第一,控制仅处于“单机自动”,各子系统之间不能协同工作,总体协调还需要人工干预;第二,控制策略对于负载变化反应迟钝,传感器精度低造成的信息支持不够,通讯网络可靠性较差。以上原因使该系统经常发生错误动作、延迟或者无法正常运作的情况,影响生产并且存在安全隐患。所以研究机电自动化控制系统改进方案,在结构、算法、硬件和网络等方面提高整个系统性能,对促进煤矿装备由初级自动化向高级智能化发展有着重大的意义。

1 煤矿机电自动化控制系统的架构与运行特征

1.1 系统的基本架构

煤矿机电自动化控制系统一般采用分层分布式结构,从底层到顶层依次为设备层、控制层以及监控管理层。设备层包含所有生产设备和现场执行机构,例如采煤机截割部、输送机驱动滚筒、通风机叶片、水泵机组、液压支架立柱等,这些设备是接受控制命令进行工作的^[1]。控制层以 PLC、嵌入式控制器或者专用控制器为主,用于采集各种检测信号后进行相应控制运算并发出控制信号,是完成自动化任务的重要部分,在这一层次中还有变频器、软启动器、电磁阀等执行部件,它们把控制器发出弱电信号转换成驱动电动机、油缸的动力

源。监控管理层设于井上调度室,有工业 PC 机、服务器及大屏幕显示器等组成,装载组态监控软件,对各个分散控制器进行统一监视、设置参数以及遥控操作。一些较高级别系统还配有数据库管理系统和数据分析模块,为生产和管理提供参考依据。

1.2 典型控制对象及其运行特征

煤矿机电控制对象有明显行业特点。如带式输送机需要做到平缓启动防止出现大电流以及机械冲击、多台电动机同时工作需要功率分配、根据来煤量改变带速节约能源、发生跑偏或者打滑时停止工作等;提升机主要是对其速度进行控制使其能够按照预先设定的速度上升下降、匀速运行以及慢行并且在减速段以及停车位置达到毫米级别精度;通风机主要是为了满足矿井下各个需要供风地方的需求同时使自身耗电量最少即通过改变叶片角度或者转速使风压以及风量符合要求;而排水系统是典型的开关量与模拟量相结合对象,根据水位高低自动启停泵并且轮流使用不同设备。以上各种被控对象涉及到了连续过程控制、离散事件控制以及运动控制等多种类型,这对控制系统灵活性提出了较高要求。

2 现有自动化控制系统的主要问题分析

2.1 控制算法性能局限

目前煤矿机电系统仍然采用传统的 PID 控制或者其改进方法。对于线性定常系统, PID 有较好的控制作用,但是煤矿设备一般是非线性的、时变的——输送带动态特性随着载荷的变化而变化,提升机的质量惯性随着高度及载荷的不同而不同,通风管道阻力随着风门开启程度不同而改变。固定的 PID 参数不能在整个工作范围内

实现最优控制,往往需要人工根据经验调整参数或者人为地进行干预,降低煤矿自动化程度。而自适应控制、模糊控制和预测控制虽然已经在某些方面得到广泛应用,但是在煤矿中运用不多,主要是由于这些方法较为复杂,而煤矿用的控制器运算能力有限,在加上煤矿行业对于新技术持谨慎的态度所致。

2.2 传感检测系统的精度与可靠性不足

控制系统所能达到上限由信息决定。目前使用的矿用传感器,在精度、响应速度以及长期稳定性上都有所欠缺:用于位置检测行程开关与霍尔传感器分辨率较低,不能实现精确位置;用于压力检测应变片型传感器长时间工作后会出现零点漂移和温度漂移问题,造成控制误差积累;用于流量测量超声波流量计在有气泡或者含有颗粒物质水中测量结果差异很大^[2]。更为严重的是,这些传感器缺乏自诊断功能——出现故障时其输出可能会被误认为正常情况从而做出错误反应,也可能只是在完全失效之后才会发出警报,失去了提前预防以及容错机会。传感层的问题从根本上限制了整个系统性能上限。

2.3 通信网络的实时性与可靠性瓶颈

控制系统的通信需要通过网络进行,其时延以及稳定性对命令下达及时性以及数据准确性至关重要。目前很多煤矿依然采用现场总线方式,传输速率较低一般不超过 12Mbps,在多个设备同时上送信息时容易造成网络拥塞而产生时延,在一些需要快速闭环控制的情况下(例如提升机刹车系统需要达到毫秒级别反应速度),这样的时延可能导致命令无法及时生效。从通信冗余来看,大部分网络都是一条路径,在这条路径出现故障比如由于机械损伤或者连接处脱落等原因造成断路之后,该区域内的所有控制信息都无法传递出去,相应设备停止工作。虽然千兆工业以太网正在被越来越多地使用,但是在井下设备防爆认证周期较长并且更换较慢的情况下,先进的通信手段的应用远远落后于地面工业。

2.4 系统孤岛化与信息共享障碍

这是煤矿机电自动化最明显的问题。采煤、运输、提升、通风、排水等子系统大多为不同厂家在不同时间所建,控制器类型、通讯方式以及上位机软件各不相同,没有统一的数据接口标准,造成信息孤岛现象——通风不知道采煤工作面推进的速度,排水不能预知涌水量的变化情况,提升及运输通过电话联系来协调运转。分割状态使得整体最优控制无法进行,大量的过程数据白白浪费,不能转化为对生产管理有帮助的信息。这样

不但影响工作效率,而且增加了安全管理难度——某个地方出现问题后,相关的其他系统不能及时发现并且相互配合处理。

3 自动化控制系统的优化设计策略

3.1 控制器算法的优化升级

一是选择合适的控制方法,二是对现有控制算法进行工程应用上的改进。在控制方法上,对于输送带调速、通风机风量调节等存在明显非线性因素的对象可以采用模糊 PID 复合控制的方法,在线改变 PID 参数以保证在各种情况下都有良好的动态特性和较高的静态精度;而对于提升机的速度控制等需要较高跟随精度的情况可采用自抗扰控制的方法,利用扩展的状态观测器来不断估计并抵消外界及内部的各种干扰从而提高系统的鲁棒性^[3]。而在工程实现上,则需要有足够强计算能力的矿用控制器作为支撑,例如使用基于 Cortex-M 系列或者 Cortex-A 系列处理器的矿用本安型控制器才能满足较为复杂的算法需求,在此基础上还需要注意对控制律的设计做到合理有效,通过对实际被控对象进行建模然后根据这个模型来进行控制规律的设计以及仿真实验以避免纯凭经验的盲目性以及不确定性。

3.2 传感检测系统的精度提升与智能诊断

器件上要逐步淘汰精度不高、稳定性较差的老式矿用传感器,取而代之精度等级较高、具有温度补偿的新一代矿用传感器,比如用磁致伸缩位移传感器取代传统的行程开关可以做到连续的位置测量以及分辨率达到 0.1mm;用高精度的压力变送器结合数字滤波的方法即可消除液压试验台中由于压力波动所引起的干扰等。另一方面是在传感器模块中增加自诊断功能,在内部设置一个自检电路以及多个备用传感单元来对传感器本身的工作状况进行监控,一旦发现信号溢出范围、输出一一直保持或者变化过快等情况发生,则该传感器主动给主控制系统发送一条“无效数据”的信号不让其根据错误的数据进行错误的操作;而对于一些重要的被测物理量则可以采用多个传感器进行备份的方式,当主传感器出现故障之后主控系统会自动切换到备用传感器的数据并且报警提醒操作人员注意,这样就可以保证即使在传感出现问题的情况下也不会影响到整个系统的正常运转。

3.3 控制网络的结构优化与实时性保障

从网络结构来看,要采用冗余环形拓扑代替单链路结构——一旦环网某处出现故障点,通信的数据可以通过另外一路进行传送,网络恢复的时间可以控制在 50ms 之内,大大提升了通信的可用性。从传输介质来说,主

干网络要用煤矿专用阻燃光缆,它具有良好的防电磁干扰性能以及较长的传输距离,在井下恶劣电磁环境中使用。对于实时性的保证,可以采取通信流量分层的方法:把控制命令以及重要的状态信息定为高优先级,在交换机端口设置优先级队列保证闭环控制的数据的传输时延在毫秒级别;把视频监控、历史记录等非实时的信息降低为低优先级,防止大量的数据流对重要的控制通信造成影响。另外为了防止网络故障导致整个系统崩溃,在每个重要的控制器上还要有独立于网络的紧急停车功能,即在网络全部断开的情况下,设备可以在本地正常停止工作而不是无法控制。

3.4 系统集成与数据共享平台的优化设计

打破系统孤岛、实现数据互通是优化设计中最重要目标,在优化方面要建设一个集中的机电自动化集成平台,它有三层结构。接入层部署工业网关或者协议转换器,把各个子系统不同品牌控制器接入到一个标准化通讯协议栈中,进行数据采集以及下发指令操作。数据层有一个统一的实时数据库和历史数据库,把各个子系统的运行状态、工艺参数以及报警等信息集中存放在里面,形成整个矿山机电系统的全景图。而在数据整合基础上可以开发跨系统的联合控制功能,比如利用采煤机的位置信息、皮带上的煤流量以及提升机箕斗位置信息来进行采、运、提三者之间的联动调节,使得产量最高同时消耗最少的能量^[4]。集成平台的建设应该分阶段进行,首先实现数据融合和集中监控,然后慢慢添加联合控制和智能化的功能,不能一次性全部改造造成太大损失。

3.5 冗余设计与故障容错机制

煤矿生产连续性需要控制系统具有较高可靠性和容错性,在设计中要在必要处设置冗余。控制器冗余上,对如绞车、主通风机一类负荷设备的控制系统,要采取双 PLC 热备冗余方式——主控制器与备控制器同时工作,由主控制器发出指令,如果主控制器出现故障,

则由备用控制器在切换时间内接管控制权并且不影响操作者。电源冗余上,控制系统的供电必须有两路互为备用电源并且带有自动转换开关,在一路失去电力的情况下,转换时间不能超过电源模块的保持时间以保证控制器不会因为突然停电而重新启动。执行器冗余上,对于一些重要阀门或者驱动装置可以配备一个备用执行机构,当主要执行机构出现问题以后即可马上切换到备用执行机构并且维持当前状态。此外容错还要有软件层面的看门狗定时器、程序自我检测以及非法状态回退等措施,让系统在出现软件问题之后可以自动重启并继续工作而不是卡死。

4 结语

煤矿机电自动化控制系统优化设计是行业智能化转型的关键,涵盖算法、传感、网络及系统集成等综合技术。本文基于煤矿运行特征与环境约束,深入剖析现有系统在控制品质、信息获取、通信能力及协同方面的不足,提出分层分域优化策略。其核心目标是推动系统从“单机自动化、信息孤岛化、被动故障响应”的初级阶段,向“协同自动化、数据融合化、主动容错运行”的高级阶段演进。实现这一跨越需多维支撑:以控制器、传感器和通信设备的硬件升级为物质基础,以控制算法、集成架构和容错机制的软件优化为智能内核,并以实施策略和人员保障为转化条件。唯有将技术优化与组织保障紧密结合,方能实质性提升系统性能,为煤矿安全生产与高效运营提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张兴华,王强.煤矿机电设备智能控制技术研究进展[J].煤炭学报,2023,48(3):1421-1430.
- [2] 刘德明,陈建平.基于模糊 PID 的带式输送机调速控制优化[J].工矿自动化,2022,48(7):65-71.
- [3] 赵振东,吴海峰.矿用工业以太网冗余技术及实时性研究[J].煤矿安全,2021,52(10):112-117.
- [4] 李学军,王瑞.煤矿机电控制系统容错技术研究综述[J].煤炭科学技术,2024,52(1):201-210.