

[井下排水泵]

煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设计

文/郭末红
贵州水城矿业股份有限公司大河边煤矿

煤矿井下排水泵电气控制系统是煤矿生产中不可或缺的组成部分，负责保证矿井内水位的稳定，以避免水害对矿井安全造成威胁。这一系统通过整合电气元件和控制逻辑，实现对排水泵的有效监控与管理。然而，由于井下恶劣的工作环境和复杂的操作要求，现有的控制系统面临着自动化水平低、能耗高和故障率频繁等挑战。分析当前煤矿井下排水泵电气控制系统的结构和工作原理，指出其存在的主要问题；详细论述系统硬件优化和软件优化的具体措施，包括控制算法的优化和数据采集处理系统的升级；通过在模拟的井下环境中进行实际测试，验证优化措施的有效性，展示优化后系统性能的显著提升。

在煤矿开采过程中井下排水系统的效率与安全性对矿山的稳定运营至关重要。煤矿井下排水泵电气控制系统作为这一体系的核心，通过精确调控排水泵的起动、运行和停止，确保井下水位的精确控制，从而防止水害事故的发生。然而，随着矿井深度的增加和开采条件的复杂化，传统的排水泵控制系统面临着众多挑战，包括系统响应速度慢、调节准确度低、能源消耗高及维护困难等问题。上述问题不仅影响到排水效率，也增加运行成本，严重时甚至可能危及矿工安全。因此，对现有煤矿井下排水泵电气控制系统进行优化设计，显得尤为迫切和必要。

现有系统结构与工作原理

1. 排水泵电气控制系统

排水泵电气控制系统由高压电源、变频调速器、软起动器、可编程序控制器（PLC）、断路器、接触器、传感器和控制面板等部分组成。系统通过高压电源向排水泵提供动力，常见额定电压为6 kV或10 kV，功率范围从数百千瓦到数兆瓦不等，能够驱动大型多级离心泵实现连续排水。变频

调速器在该系统中起着至关重要的作用，其作用是根据井下水位变化，调节电动机的转速，控制水泵流量，以此实现节能高效的运行。变频器的调速范围通常为0~50 Hz，具体数值由井下水文条件决定，电流调节范围可达0%~120%额定电流^[1]。同时，PLC控制器则负责整个系统的自动化逻辑控制。其处理周期通常小于10 ms，能够实时响应井下水位传感器、压力传感器等多种输入信号，做出精确的逻辑判断与输出控制指令。PLC控制的IO点数依据系统规模变化，从几十点到上千点不等，常用型号包括西门子S7-200和S7-300系列或其他工业标准型号。排水泵电气控制系统的启动通常采用软起动器，软起动器能够有效减少起动电流峰值，其启动电流通常设定在2~4倍的额定电流范围内，以减少电动机起动时的机械冲击和电网电压波动，起动时间可以根据水泵特性调节，一般在5~30 s之间。

2. 井下环境中的电气控制要求

电气控制系统必须能够承受井下特有的湿润、多尘以及可能的瓦斯爆炸环境，同时确保控制准确度和可靠性。所有电气设备需满足防爆标准，按

照国际电工委员会（IEC）或国家安全生产监督管理局（SAWS）的规定，至少达到Exd I Mb或Exd IIB T4级别的防爆认证，确保在瓦斯或尘埃激发的潜在爆炸环境中安全运行。电气控制系统的设计必须考虑到井下恶劣的温湿度条件。温度变化范围通常在-5~40℃之间，而相对湿度则可能高达95%以上。这要求控制系统的所有组件，如传感器、PLC和变频器等，都应采用高防护等级的密封措施，至少满足IP65级别的防尘防水标准，保证长期在高湿度和温差环境下的稳定运行。井下电气控制系统还需具备高度的电磁兼容性（EMC）^[2]。由于井下环境中存在大量电气设备，易产生电磁干扰。因此，所有控制系统组件必须符合EMC指令2014/30/EU的要求，通过严格的电磁兼容性测试，如EN 61000-6-2（抗干扰能力）和EN 61000-6-4（发射限制）标准。考虑到井下电源的不稳定性，电气控制系统还应能适应电源波动。系统应能承受至少±10%的电压波动和频率波动±5 Hz的条件，保障在电源不稳定的情况下仍能可靠运行。以井下环境中电气控制要求的主要参数及其规范值见表1。

表1 主要参数及其规范值

参数项	规范值	说明
防爆标准	Exd I Mb, Exd IIB T4	适用于瓦斯及粉尘潜在爆炸环境
防护等级	IP65	保护设备免受尘埃入侵和水泳的影响
温度范围	-5~40℃	设备应能在此温度范围内稳定工作
湿度范围	最高95%	设备应能在高湿环境中正常操作
电磁兼容性	符合EN 61000-6-2和EN 61000-6-4	确保系统在电磁干扰环境下的正常工作
电源波动适应性	电压±10%，频率±5 Hz	设备需适应一定范围的电源波动，保证在不稳定电源下的正常运行
应急电源系统	至少30 min运行时间	在电源中断情况下，关键系统能继续运行

通过符合上述参数和规范，煤矿井下排水泵电气控制系统能在极端和不稳定的环境中维持高效和安全的运行，确保矿井的正常排水和安全生产。

煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设计

1. 系统硬件优化

煤矿井下排水泵电气控制系统的硬件优化旨在提升系统的可靠性、稳定性和能效，以适应复杂的

井下工作环境。优化应包括高效电机的选型，通常采用IE3或IE4级别的高效电机，其效率可达96%以上，以降低能耗，适应矿井长时间的高负荷运行。同时，为实现对排水泵的精确控制，应配置先进的变频器，其功率因数应不低于0.95，调频范围可在0~50 Hz之间灵活调节，保证在不同水位和流量条件下的节能运行。变频器的输出电压需与电动机额定电压相匹配，通常为380 V、660 V或1 140 V，适应不同井下电网电压要求，且在变频启动时最大限度减少冲击电流。硬件优化还需采用软起动器，以减少排水泵启动时的电流冲击，起动电流应控制在额定电流的2~3倍范围内，起动时间可设定为5~30 s，以减少电网波动和机械应力^[3]。为提高系统的自动化和智能化水平，优化还需在PLC中集成更多的I/O模块，扩展至至少128点的输入输出通道，以满足井下复杂信号的采集与处理要求。PLC的处理周期应控制在10 ms以内，确保对多点数据的实时响应与精准控制。系统中还应加强传感器的优化配置，采用准确度更高的压力传感器和液位传感器，压力传感器的测量范围应覆盖0~10 MPa，准确度可达0.25%，液位传感器则应选用测量准确度在±0.5%的超声波或电容式传感器，以确保井下水位监测的可靠性。

2. 系统软件优化

（1）控制算法优化

在煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设计中，控制算法的优化是确保系统高效、稳定运行的核心环节。传统的比例-积分-微分（PID）控制算法在排水泵系统中广泛应用。然而，为应对井下环境的复杂性，需对其参数进行优化调整，以提高系统响应速度和稳态准确度。控制算法优化的首要任务是准确选择比例增益、积分时间和微分时间，参数对系统的动态特性至关重要。PID控制方程的表达式为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中， $u(t)$ 为控制输出； $e(t)$ 为系统误差； K_p 为比例增益； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数。

通过调整参数，可以实现对排水泵转速和流量的精确控制，确保系统在水位波动或负荷变化时迅速响应。在实际优化过程中， K_p 一般取值范围在

0.5~2.0之间,以确保系统具有足够的调节强度; T_i 通常取值为5~20 s,以避免累积误差导致的系统偏差; T_d 则用于预测误差的变化趋势,通常设定在1~5 s,以平滑系统响应,防止过度调节或震荡。为进一步提升控制性能,还可引入自适应模糊控制算法,通过模糊逻辑实时调整PID参数,根据井下实际水文条件优化控制效果。这种算法能够根据当前系统状态的误差及误差变化率,动态调整 K_p 、 T_i 和 T_d ,从而使系统能够在复杂的工况下保持高效、稳定运行^[4]。

2. 数据采集与处理系统的升级

在煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设计中,数据采集与处理系统的升级是提高系统准确度与实时性的关键。井下环境复杂多变,水位、压力和电动机运行状态等多种参数必须通过高准确度的传感器实时采集,并通过高效的数据处理系统进行分析与响应。优化后的数据采集与处理系统应采用分布式架构,以满足复杂工况下的实时监测与处理需求。在数据采集部分,液位传感器的采样频率应至少达到1 Hz,以确保实时反映井下水位变化;压力传感器的准确度应达到0.25% FS(满量程),保证测量数据的可靠性。数据处理系统的优化需采用高速数据处理单元(如PLC或工业计算机),其处理周期应控制在5~10 ms内,确保对采集数据的快速处理与反馈调节。数据采集系统中,各类传感器信号的采集计算公式为

$$y(t) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t) + b \quad (2)$$

式中, $y(t)$ 为处理后的系统输出; $x_i(t)$ 为不同传感器采集的原始数据; w_i 为各信号的权重系数; b 为系统偏置值。

式(2)展示了多传感器数据融合的过程,不同传感器权重由系统工况实时调整,以提高数据准确度与可靠性。优化后的数据处理系统可通过多层次的滤波和数据融合算法,消除干扰信号,并对异常数据进行实时预警处理。系统还应集成大数据分析 with 云计算平台,利用海量数据对排水泵的运行状态进行预测性维护,提高系统运行的智能化水平。

优化设计测试

1. 测试环境

在进行煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设

计测试时,测试环境的构建至关重要,需要模拟真实的井下工况,以确保测试结果的准确性与代表性。测试环境需具备多种复杂因素的综合模拟条件,包括高湿度、高粉尘、高温差及不稳定电源等恶劣环境。测试区域的温度范围设定为-5~40℃,相对湿度则维持在90%以上,以模拟井下常见的潮湿条件;同时,粉尘浓度设定为10 mg/m³,以评估控制系统在高粉尘环境下的耐受性和稳定性。整个测试环境通过控制室远程监控,采用IP65等级的防护设备,确保所有电气元件免受粉尘和水分的侵蚀。测试中电源电压波动范围控制在±10%以内,电源频率波动控制在±5 Hz,以评估系统在电网不稳定条件下的适应能力。测试环境中配置一套多泵并联排水系统,每台排水泵的额定功率为500 kW,额定电压为1 140 V,系统设计排水量为3 000 m³/h,以模拟不同水位条件下的排水需求。变频器的调速范围设定为0~50 Hz,以调节电动机转速并控制排水流量,同时软启动器用于控制泵的起动电流,起动电流控制在2~3倍的额定电流范围内,起动时间设置为10 s,以确保在电动机起动时减少电流冲击^[5]。测试环境还包括大量传感器用于实时数据采集,包括液位传感器、压力传感器和电动机温度传感器。液位传感器的测量范围设定为0~10 m,准确度为±0.5%;压力传感器的测量范围为0~10 MPa,准确度为0.25%;电动机温度传感器用于监测电动机绕组温度,测量准确度为±1℃。所有传感器信号通过PLC控制系统进行实时采集和处理。PLC的处理周期设定为10 ms,以确保系统对井下水位变化的快速响应。数据处理单元通过高速数据总线与控制室相连,数据传输速率为100 Mbit/s,确保大数据量的实时传输与处理。

2. 测试结果

测试结果表明系统的整体性能在效率、响应速度及稳定性方面显著提升。测试主要包括系统启动性能、运行效率、响应时间、故障诊断能力和长期稳定性等方面。系统的启动性能测试显示,通过引入软启动技术,启动电流峰值成功降低30%,从而减轻对电网的冲击和电动机的机械应力。具体数据显示,优化前启动电流峰值为电动机额定电流的6倍,优化后降至4倍,明显提高电气设备的安全运行水平。关于系统的运行效率,通过使用高效能

电动机（IE4级）和高准确度变频器，系统整体能效提升约15%。这一提升主要表现在电动机运行时的电能消耗明显减少，具体从优化前的85%提高到98%。这不仅节省能源，还降低运行成本。在响应时间方面，系统对液位变化的响应速度从原来的15 s优化到5 s内，大幅提升对突发水害的快速反应能力。这得益于PLC和传感器性能的提升及更有效的数据处理算法，使得系统能更快地执行控制命令。

故障诊断能力也有了显著提升，通过集成的智能监控系统，能够在故障发生前预警，故障诊断时间从原来的数小时缩短到分钟级。此外，系统的长期稳定性在连续运行6个月的测试中表现优异，故障率由原来的每月1次减少到每6个月不超过1次，详细的测试结果对比数据见表2。

表2 测试结果对比数据

测试项目	优化前数据	优化后数据
启动电流峰值倍数	6倍额定电流	4倍额定电流
系统效率（%）	85	98
响应时间（液位变化）/s	15	5
故障诊断时间	数小时	数分钟
长期运行故障率	每月1次	每6个月不超过1次

优化设计的煤矿井下排水泵电气控制系统在多个关键性能指标上都有显著的提升，这将对煤矿的安全生产和经济效益产生深远的影响。

结束语

综上所述，对煤矿井下排水泵电气控制系统的优化设计不仅能提升排水效率和系统稳定性，还能在矿井水害管理中发挥至关重要的作用，显著提升矿山安全生产的水平，具有重大的社会价值和经济效益。通过科学的方法论和技术手段，该优化设计旨在实现矿井安全与经济效益的双重提升，为煤矿井下排水泵电气控制系统的研究和应用提供一个可行性的技术路线和理论基础。EA

（收稿日期：2024-10-23）

参考文献

[1] 余延妃. 消防水泵电气控制设计可靠性研究[J]. 工程建设与设计, 2020(15): 50-51, 54.

[2] 史华建. 综采工作面排水泵电气自动化控制系统的设计[J]. 机械管理开发, 2020, 35(3): 192-193, 212.

[3] 杨卫国. 消防水泵电气控制中有关问题的探讨[J]. 电子技术与软件工程, 2015(14): 165-166.

[4] 谭福恩. 氯碱整流柜冷却水泵电气控制系统设计[J]. 电工技术, 2015(7): 52, 66.

[5] 朱魁伟. 矿井排水设备的电气控制技术应用[J]. 科技创业家, 2013(22): 237.

