

水利工程电气自动化系统防雷技术研究

葛雯静¹ 张宇亮²

1. 南通市通吕运河水利工程管理所 江苏 南通 226300

2. 南通市水利勘测设计研究院有限公司 江苏 南通 226300

摘要：随着科技快速发展，水利工程电气自动化系统防雷技术日益重要。本文探讨了屏蔽与接地技术、新型避雷器安装、瞬态电压控制器应用及多级电源防雷保护等关键防雷措施。通过分析实际应用案例，评估了防雷效果，并指出未来防雷技术需应对更高电压等级、更复杂电磁环境等挑战，同时向智能化、集成化方向发展，以提高系统稳定性和可靠性。

关键词：水利工程；电气自动化系统；防雷技术

引言：水利工程电气自动化系统防雷技术研究，旨在应对雷电对水利工程自动化设备的潜在威胁。随着电气自动化技术在水利领域的广泛应用，系统的稳定性和安全性变得尤为重要。雷击不仅可能导致设备损坏，还可能引发系统故障，影响水利工程的正常运行。因此，深入研究防雷技术，提高系统的防雷能力，对于保障水利工程的安全运行具有重要意义。

1 水利工程电气自动化系统概述

1.1 电气自动化系统在水利工程中的应用

(1) 水闸控制。通过电气自动化系统，水闸的开启和关闭可以实现远程自动化控制。系统能够根据实际水位、流量等参数，智能调整水闸状态，以满足防洪、灌溉、航运等多种需求。这种自动化控制方式不仅提高了水闸控制的精度，还大大减轻了人工操作的负担。(2) 泵站运行。电气自动化系统可以对泵站进行实时监控和控制。通过传感器收集泵站运行数据，系统能够自动调整泵站的运行状态，确保泵站以最优方式运行，从而提高泵站的抽水效率，降低能耗。同时，系统还能及时发现并处理泵站运行中的异常情况，保障泵站的安全运行。(3) 水位监测与数据采集。电气自动化系统通过安装在水库、河道等位置的水位传感器，实时采集水位数据，并将数据传输至中央控制室。系统能够对水位数据进行处理和分析，生成水位变化曲线图、报表等，为水利工程管理提供决策依据。此外，系统还能根据预设的水位阈值，自动触发报警机制，提醒管理人员及时采取应对措施。

1.2 系统组成与特点

电气自动化系统主要由硬件设备、软件平台、控制系统以及系统集成等部分组成。硬件设备包括传感器、控制器、通信设备等，用于采集、处理和传输数据；

软件平台与控制系统则负责数据的存储、分析以及设备的控制；系统集成则确保各子系统之间的无缝连接和协同工作。这些组成部分共同构成了电气自动化系统的基础，使其具有高度的自动化、智能化和可靠性。

2 雷击对水利工程电气自动化系统的危害

2.1 雷击类型与影响

(1) 直击雷：直击雷是指雷电直接击中物体，如水利工程的建筑物、线路或设备等。直击雷携带的电流极大，能够在瞬间产生高温和高压，对击中物造成严重的物理损坏。在水利工程电气自动化系统中，直击雷可能导致传感器、控制器等关键硬件设备损坏，甚至引发火灾等安全事故。(2) 球状雷：球状雷是一种较为罕见的雷击形式，它以球形或近似球形的发光体出现，能够跳跃和移动。球状雷对水利工程电气自动化系统的危害在于其难以预测和防御，一旦接触到系统设备，同样会造成严重的损坏^[1]。(3) 雷电感应：雷电感应是指雷电在附近区域放电时，由于电磁场的变化而在导体中产生感应电流和电压。在水利工程电气自动化系统中，雷电感应可能导致线路、电缆等导体中的电流和电压异常升高，进而对系统设备造成损坏。此外，雷电感应还可能干扰系统的正常运行，导致数据丢失、误操作等问题。

2.2 雷击危害的具体表现

(1) 设备损坏与报废：雷击可能导致系统硬件设备如传感器、控制器、通信设备等严重损坏，甚至报废。这些设备的损坏将直接影响系统的正常运行和监测功能。(2) 系统故障与瘫痪：雷击可能引发系统控制逻辑的混乱，导致系统无法正常工作。在极端情况下，雷击甚至可能使整个系统瘫痪，无法对水利工程进行监控和管理。(3) 数据丢失与误操作：雷击干扰可能导致系统数据的丢失或损坏，影响管理人员对水利工程的决策。

同时,雷击还可能引发系统的误操作,如误开或误关水闸、泵站等设备,对水利工程造成潜在的安全隐患。

3 水利工程电气自动化系统防雷技术

3.1 屏蔽与接地技术

(1) 屏蔽材料的选择与设置。屏蔽材料的选择应考虑其导电性能和屏蔽效能。常用的屏蔽材料包括金属网、金属箔和金属板等。在设置屏蔽层时,应确保屏蔽层能够完整地覆盖所有关键设备和线路,以减少雷电电磁脉冲的耦合。此外,屏蔽层应与接地系统良好连接,以确保雷电流能够迅速导入大地。(2) 接地系统的设计与实施。接地系统是将雷电流导入大地的关键通道。在设计接地系统时,应充分考虑土壤电阻率、接地体的形状和数量等因素。通常采用网状接地或多点接地方式,以减小接地电阻并提高接地效率。在实施过程中,应确保接地体与土壤之间的良好接触,并采取必要的降阻措施,如使用降阻剂或增加接地体面积等^[2]。(3) 接地电阻的降低与均压措施。接地电阻的大小直接影响到防雷效果。为了降低接地电阻,可以采取增加接地体数量、优化接地体布置、使用降阻剂等方法。同时,为了确保系统在雷击时各部分电位均衡,应采取均压措施,如设置均压环或均压带等,以防止因电位差过大而造成的设备损坏。

3.2 新型避雷器安装

(1) 传统避雷器与新型避雷器的比较。传统避雷器如阀式避雷器和氧化锌避雷器等在防雷保护中发挥了重要作用。然而,随着电力系统电压等级的提高和雷电活动的加剧,传统避雷器在某些方面已难以满足现代防雷保护的需求。新型避雷器如气体放电管避雷器和无压缩气体避雷器等具有更快的响应速度、更小的残压和更宽的保护范围等优点,逐渐成为防雷保护的首选设备。

(2) 新型避雷器的应用。气体放电管避雷器利用气体放电原理来吸收和泄放雷电流。当雷击发生时,气体放电管迅速导通,将雷电流导入大地,从而保护设备和线路免受损害。无压缩气体避雷器则采用特殊的气体放电结构,具有更小的体积和更高的可靠性。在水利工程电气自动化系统中,应根据具体场合和需求选择合适的新型避雷器进行安装。(3) 避雷器的选型与安装要求。在选择避雷器时,应考虑其额定电压、残压值、通流容量等参数,以确保在雷击时能够提供有效的保护。同时,避雷器的安装位置、数量和布置方式也应符合相关标准和规范的要求。在安装过程中,应确保避雷器与系统的电气连接可靠,并采取必要的防腐措施以延长使用寿命^[3]。

3.3 瞬态电压控制器与电压保护单元

(1) 瞬态电压控制器的功能与原理。瞬态电压控制器是一种用于限制瞬态过电压的设备。它能够在雷击或操作过电压产生时迅速动作,将过电压限制在安全范围内,从而保护设备和线路免受损害。瞬态电压控制器的工作原理通常基于非线性电阻或压敏电阻等器件的电压-电流特性。当电压超过设定值时,器件的电阻迅速减小,从而吸收并限制过电压。(2) 电压保护单元的设置与作用。电压保护单元通常设置在电气自动化系统的关键部位,如电源入口、控制器输入输出端口等。其作用是在雷击或操作过电压产生时保护这些部位免受过电压的损害。电压保护单元应具有快速响应、低残压、高可靠性等特点,以确保在雷击或操作过电压时能够提供有效的保护。(3) 保护单元的监测与控制策略。为了确保电压保护单元的有效性和可靠性,需要采取必要的监测与控制策略。首先,应定期对保护单元进行检查和维护,确保其处于良好工作状态。其次,可以采用实时监测技术来监控保护单元的工作状态,一旦发现异常情况及时采取措施进行处理。此外,还可以结合智能控制技术来提高保护单元的效率 and 准确性。例如,可以采用基于微处理器的智能控制单元来根据实时监测到的数据自动调整保护策略,以提高系统的稳定性和安全性。

3.4 多级电源防雷保护

(1) 四级保护方案。四级保护方案是一种全面的电源防雷保护措施,包括气体放电管、限流模块、压敏电阻和TVS管等四级保护设备。这些设备在雷击时能够逐级吸收和泄放雷电流,从而保护电源系统免受损害。在水利工程电气自动化系统中,应根据系统的具体情况和需求选择合适的四级保护方案,并确保各级保护设备之间的协调和配合。(2) 三合一防雷器的应用。三合一防雷器是一种集成了多种防雷功能的设备,具有体积小、安装方便、性能稳定等优点。在水利工程电气自动化系统中,三合一防雷器可以作为电源系统的重要防雷措施之一。它不仅可以提供全面的防雷保护,还可以节省安装空间和维护成本。在选择和安装三合一防雷器时,应确保其符合相关标准和规范的要求,并与其他保护设备相协调^[4]。(3) UPS不间断电源的防雷措施。UPS不间断电源是电气自动化系统的重要辅助设备,用于在市电故障时提供应急电源。然而,UPS本身也可能受到雷击的损害。因此,在UPS的输入端和输出端都应设置防雷设备,以保护UPS及其负载免受雷击的损害。常用的防雷设备包括压敏电阻、气体放电管和TVS管等。此外,还应定期检查UPS及其防雷设备的性能,确保其处于良好工作状态。在极端天气条件下,还可以考虑采用额外的保护措施,

如安装避雷针或避雷网等。

4 防雷技术在水利工程电气自动化系统中的应用案例分析

4.1 典型案例介绍

4.1.1 工程背景与防雷需求

通吕运河水利枢纽工程位于江苏省，该地区雷电活动频繁，年均雷暴日数较高。该工程的电气自动化系统负责控制水闸、泵站以及监测水位等关键功能，是确保运河通航、防洪和灌溉安全的关键。鉴于系统的复杂性和重要性，防雷需求尤为迫切，主要包括：有效防护直击雷和感应雷、提升设备的耐压能力、优化接地系统以及实现实时监测与预警。

4.1.2 防雷方案设计与实施

（1）外部防雷：在枢纽的关键位置安装高性能的提前放电避雷针系统，以保护整个枢纽区域免受直击雷的威胁。（2）内部防雷：在电气自动化系统的各个入口点安装多级电涌保护器（SPD），以确保雷电电流在进入系统前得到有效抑制。特别是，在关键设备的前端采用大通流能力的SPD，以提供额外的保护。（3）接地系统：

构建了一个复合接地网，采用低电阻率的材料，并使用了降阻剂以降低接地电阻。通过精心设计和施工，确保了接地系统的可靠性和稳定性。（4）电磁屏蔽：对控制电缆进行了双层屏蔽处理，以减少雷电电磁脉冲对系统的干扰。同时，机房采用了法拉第笼结构，提供了额外的电磁屏蔽保护。（5）等电位连接：将所有金属构件通过等电位连接带进行连接，以确保在雷击时系统内部不会产生过大的电位差。

4.1.3 防雷效果评估与监测

自防雷系统投入运行以来，通过在线监测系统对防雷效果进行了持续评估。数据显示，系统成功拦截了多次直击雷和感应雷攻击，关键设备的雷击损坏率为零。同时，接地系统的性能稳定，接地电阻的变化率远低于设计要求。通过模拟雷电流冲击测试，系统表现出了优异的抗扰度性能。

4.2 案例对比分析

4.2.1 不同防雷技术的效果对比

下表对比了三种典型水利工程中应用的防雷技术：

技术类型	应用工程	防护重点	雷击损坏率	维护成本	适用场景
传统避雷针+SPD	某小型水利工程	直击雷防护	较高	较低	常规水利设施
提前放电避雷针系统	通吕运河水利枢纽	综合防护	0	中等	大型枢纽工程
多级SPD防护	某中型泵站	设备保护	较低	较高	分布式系统

4.2.2 系统稳定性与可靠性的提升情况

通吕运河水利枢纽电气自动化系统应用综合防雷技术后，系统的平均无故障时间（MTBF）显著提高，从原来的数千小时提升至现在的15000小时以上。系统的可用率也得到了大幅提升，特别是在雷雨季节，故障报警次数显著减少，数据采集系统的信号干扰也大幅降低。

4.2.3 经济性与实用性的考量

（1）初期投资：综合防雷系统初期投入较高，但可大幅降低后期维修费用及停机损失，长期经济效益显著。（2）运行成本：在线监测系统虽增加维护预算，但能实时预警故障，提升系统可靠性，减少突发维修支出。（3）间接效益：保障水利枢纽稳定运行，避免防汛、通航、灌溉中断，社会效益远高于直接经济价值。（4）技术适应性：针对不同地区的气候和地质条件，防雷系统的设计和实施需要考虑多种因素。例如，在山区水利工程中，需要采用抗腐蚀设计；在平原地区，需关注土壤电阻率对接地系统的影响；在沿海地区，则需加强盐雾腐蚀防护。

结束语

综上所述，水利工程电气自动化系统的防雷技术研究是确保水利设施安全稳定运行的关键。通过采用屏蔽与接地技术、新型避雷器安装、瞬态电压控制器及多级电源防雷保护等措施，我们能够有效提升系统的防雷能力。未来，随着技术的不断进步，我们应持续探索更高效、智能的防雷技术，为水利工程电气自动化系统提供更加坚实的保护，推动水利事业持续健康发展。

参考文献

[1]陈进锭.水利工程电气自动化系统防雷技术研究[J].机电产品开发与创新,2022,(06):53-54.
[2]谢飞久.水利工程电气自动化系统防雷技术探讨[J].长江技术经济,2022,(04):36-37.
[3]郝志伟.水利工程电气自动化系统防雷措施分析[J].建筑理论,2023,(10):102-103.
[4]宋瑞卿.水利工程电气自动化系统防雷技术[J].建筑设计及理论,2024,(09):93-94.