

# 水利工程电气自动化系统防雷技术探析

朱 乐 谢腾腾

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

**摘要：**水利工程电气自动化系统因露天水域周边环境特性，雷电侵袭风险显著高于普通工业场景，易引发设备损毁、功能瘫痪等安全事故。本文基于防雷基础理论，分析系统雷电风险及薄弱环节，从外部防雷、内部防雷及过电压保护、防雷设备选型等方面，阐述适配水利工程的实操技术要点，明确接闪、接地、等电位连接等核心措施的实施规范。研究旨在构建针对性强、可靠性高的防雷体系，为水利工程电气自动化系统安全稳定运行提供技术支撑，降低雷电灾害造成的经济损失与安全隐患。

**关键词：**水利工程；电气自动化；雷电风险；防雷技术

引言：随着水利工程自动化水平提升，PLC、传感器等精密设备广泛应用，系统对雷电干扰的敏感性大幅增加。水利工程多地处露天水域，潮湿环境、复杂土壤条件及绵长线路，使防雷工作面临独特挑战。雷电灾害不仅会损坏电气设备，还可能导致防洪、供水等核心功能中断，威胁工程安全。基于此，本文探析防雷基础理论与系统风险，梳理关键防雷技术及设备选型要点，为优化水利工程电气自动化系统防雷设计、提升灾害防控能力提供参考。

## 1 水利工程电气自动化系统防雷基础理论

### 1.1 雷电的形成与破坏机理

雷电是大气中正负电荷云团放电形成的自然现象，其形成与水汽对流、大气电场极化密切相关，强对流天气下云内电荷分离加剧，当电场强度突破空气绝缘阈值时，便会产生闪电放电。雷电对水利工程电气自动化系统的破坏机理主要分为直接雷击和感应雷击两类：直接雷击是雷电直接击中系统设备或构筑物，强大的雷电流（可达数十至数百千安）通过设备形成热效应、电动力效应，瞬间烧毁元器件、破坏设备结构；感应雷击则是雷电放电产生的强电磁脉冲，在系统线路中感应出过电压，沿电源线、信号线侵入设备内部，损坏精密控制模块，这种破坏形式发生率更高，且易被忽视，对自动化系统的隐蔽性危害更大。

### 1.2 防雷技术核心原理

防雷技术的核心是通过“疏导、隔离、钳位”三重机制，阻断雷电能量对电气自动化系统的侵袭。疏导机制主要针对直接雷击，通过接闪、引下、接地系统将雷电流安全导入大地，避免能量在设备上积聚；隔离机制通过合理布置线路、设置屏蔽层，减少电磁脉冲对信号和电源线路的感应干扰，降低感应雷击风险；钳位机制

依靠防雷器（SPD）等设备，将线路中感应的过电压限制在设备耐受范围内，快速泄放过剩电荷，保护元器件不被过电压击穿。

### 1.3 水利工程电气自动化系统防雷特殊性

水利工程电气自动化系统的防雷具有以下特殊性，区别于普通工业场景。（1）工程多建于露天水域周边，湿度大、土壤导电性能复杂，接地电阻控制难度高，且水域易强化雷电放电概率，增加雷击频次；（2）系统覆盖范围广，从闸室、泵房到中控室，线路绵延距离长，架空线与水下电缆并存，易成为感应雷的传播载体；（3）自动化设备集成度高，PLC、传感器、远程控制模块等精密器件耐受电压低，对感应过电压更为敏感，一旦受损将直接导致防洪、供水等核心功能瘫痪，引发安全事故与经济损失，因此对防雷系统的可靠性、针对性要求更高<sup>[1]</sup>。

## 2 水利工程电气自动化系统雷电风险分析

水利工程电气自动化系统多处于露天水域周边，雷电风险较普通工业场景更突出，结合实际运营情况，核心风险主要体现在两方面：（1）设备损毁与功能瘫痪风险。直接雷击可瞬间击中闸室、泵房的高压设备，强雷电流产生的热效应与电动力效应会烧毁配电柜、变频器，导致水泵、启闭机等执行机构骤停；感应雷通过电源线、信号线侵入中控室，损坏PLC控制器、液位传感器等精密器件，这类故障占比超六成，修复周期长，且系统失灵后易引发连锁问题，如汛期防洪闸无法及时启闭导致水位超限，供水系统加压异常影响居民用水，极端情况还会因设备误动作引发安全事故。（2）薄弱环节叠加环境风险。工程线路跨水域、堤坝铺设，架空线易感应雷电脉冲，水下电缆长期浸泡导致绝缘层老化，被过电压击穿后故障排查难度大；水域周边土壤导电不均，

湿度变化易造成接地电阻波动,难以稳定导泄雷电流,老旧工程中自动化设备与传统机电设备混联,接口防雷能力不足,叠加汛期强对流天气频发,进一步放大雷电侵袭概率,给现场风险防控带来极大挑战<sup>[2]</sup>。

### 3 水利工程电气自动化系统防雷技术

#### 3.1 外部防雷技术在水利工程中的应用

##### 3.1.1 接闪装置的选型与安装设计

接闪装置作为外部防雷的第一道防线,选型要结合水利工程构筑物特性与雷电活动强度确定。(1)选型方面,优先选用耐腐蚀、抗风载能力强的接闪体,露天闸室、泵房等高大构筑物可采用避雷针,屋面平整的中控楼可选用避雷带,对于金属屋面构筑物,可利用屋面金属板作为接闪体,需确保金属板厚度达标且焊接牢固。

(2)安装设计遵循滚球法确定保护范围,确保自动化设备所在区域完全覆盖,避雷针安装高度需超出构筑物最高点至少0.5米,避雷带应沿屋面周边、屋脊等位置敷设,转角处采用圆弧过渡,避免锐角造型。(3)固定方式需适配水利工程潮湿环境,支架采用热镀锌材质,间距控制在1.5-2米,与构筑物墙体固定牢固,防止风吹晃动导致接触不良,接闪体与引下线的连接需采用焊接,焊缝长度不小于6倍钢筋直径,且做好防腐处理。

##### 3.1.2 引下线的布置与材料选用

引下线承担将雷电流从接闪体传导至接地系统的功能,布置与材料选用直接影响泄流效率。(1)材料选用上,优先采用热镀锌圆钢或扁钢,圆钢直径不小于12毫米,扁钢截面不小于120平方毫米、厚度不小于4毫米,避免使用铝质材料,防止在潮湿环境中快速腐蚀。(2)布置方式需遵循就近泄流原则,每座构筑物引下线数量不少于2根,对称布置在构筑物两侧,间距不大于18米,引下线应沿构筑物外墙垂直敷设,尽量缩短路径长度,减少雷电流传输阻力。(3)敷设细节上,引下线与构筑物表面距离不小于15毫米,避免与门窗、管线等金属构件近距离接触,穿越楼板或墙体时需加装保护管,保护管与引下线之间采用防火封堵材料填充,引下线中间不得有接头,若必须接头需采用焊接并强化防腐。

##### 3.1.3 接地系统的构建与优化

接地系统是外部防雷的核心,需适应水利工程土壤导电不均、湿度大的环境特点。(1)接地体设计可采用人工接地体与自然接地体结合的方式,自然接地体可利用构筑物基础钢筋,人工接地体采用环形接地网,沿构筑物外围敷设,接地体埋深不小于0.8米,避开积水区域与岩石层。(2)接地材料选用热镀锌钢材,环形接地网采用扁钢焊接成型,网格间距控制在5-10米,同时增设垂直接地

极,垂直接地极长度2.5-3米,间距5-8米,与水平接地网焊接连接,提升接地效果。(3)接地电阻优化需结合土壤特性,对于导电性能差的土壤,可在接地体周围敷设降阻剂,降阻剂需均匀包裹接地体,填充密实且与土壤充分接触,确保接地电阻值满足水利工程要求,中控室、泵房等关键区域接地电阻不大于4欧姆,普通区域不大于10欧姆,定期检测接地电阻变化,及时调整优化<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 内部防雷技术及过电压保护

##### 3.2.1 电源系统防雷保护技术

电源系统是雷电感过电压侵入的主要通道,需采取分级防雷保护措施。(1)分级防护设计,按电源进线端、配电柜、设备终端划分防护等级,进线端安装一级防雷器,配电柜内安装二级防雷器,精密自动化设备前端安装三级防雷器,各级防雷器动作电压逐级降低,形成梯度防护。(2)防雷器安装要求,防雷器需与电源线路并联连接,接线长度不超过0.5米,采用短直路径,避免迂回接线,接地引线与电源线分开敷设,间距不小于0.5米,防止相互干扰。(3)辅助防护措施,电源线路采用屏蔽电缆敷设,屏蔽层两端接地,穿越不同防雷区的线路需在分区交界处安装防雷器,同时配置浪涌保护器,抑制瞬时过电压,保护电源模块不被击穿,定期检查防雷器状态,及时更换失效器件。

##### 3.2.2 信号系统防雷保护措施

信号系统连接各类传感器、控制器,耐受电压低,需针对性采取防雷保护措施。(1)信号线路防护,采用屏蔽型信号电缆,屏蔽层单端或两端接地,根据信号类型确定接地方式,模拟信号线路屏蔽层单端接地,数字信号线路屏蔽层两端接地,电缆敷设远离电源线,间距不小于1米,交叉敷设时采用垂直交叉方式。(2)信号防雷器选型与安装,选用与信号频率、传输速率匹配的防雷器,避免影响信号传输质量,安装在信号线路进线端、设备接口处,接线牢固,接地可靠,接地电阻不大于4欧姆,防雷器接口与信号线路接口一致,确保连接紧密无松动。(3)线路布置优化,信号线路尽量采用穿管敷设,金属管两端接地,形成屏蔽保护,避免架空敷设,减少感应雷侵袭概率,不同类型的信号线路分开敷设,避免混线导致过电压传导。

##### 3.2.3 等电位连接技术的实施要点

等电位连接可消除不同金属构件间的电位差,防止雷电引发的电击与设备损坏。(1)等电位连接范围,将中控室、泵房内的金属构件、设备外壳、管线、电缆屏蔽层等全部纳入等电位连接体系,形成统一等电位面,避免电位差产生。(2)连接方式,采用镀锌扁钢作为等电位连

接线,截面不小于25平方毫米,设备外壳与等电位连接线采用螺栓连接或焊接,连接点做好防腐处理,确保导电良好,等电位连接线沿墙体、地面隐蔽敷设,避免影响设备操作与线路布置。(3)跨区等电位连接,不同防雷区之间的金属构件、线路穿越处,需进行等电位连接,在分区交界处设置等电位连接排,将两侧金属构件、屏蔽层连接至连接排,形成连续的等电位保护,同时与接地系统可靠连接,实现等电位与接地一体化防护。

### 3.3 水利工程电气自动化系统防雷设备选型

#### 3.3.1 防雷器(SPD)的选型与参数匹配

防雷器选型需结合水利工程环境特性与设备防护需求,确保参数匹配、性能稳定。(1)选型原则,优先选用符合国家相关标准的防雷器,具备耐潮湿、耐腐蚀、抗老化性能,适应水利工程露天、高湿度环境,根据防护对象(电源、信号)、防护等级确定防雷器类型,电源防雷器选用并联型,信号防雷器选用串联型或并联型,结合信号传输特性确定。(2)参数匹配要求,防雷器的额定电压需与系统工作电压匹配,动作电压低于设备耐受电压,通流容量满足所在区域雷电活动强度要求,电源防雷器一级通流容量不小于80kA,二级不小于40kA,三级不小于20kA,信号防雷器通流容量根据信号线路承载能力确定,同时匹配信号频率、插入损耗等参数,避免影响信号传输。(3)附加性能考量,选用响应时间短的防雷器,响应时间不大于25ns,具备状态指示功能,便于直观判断工作状态,支持热插拔的防雷器可优先选用,方便维护更换。

#### 3.3.2 其他防雷辅助设备的选用原则

除防雷器外,辅助防雷设备需配合主设备形成完整防护体系,选用时遵循实用性、适配性原则。(1)屏蔽材料选用,线路屏蔽采用铜质屏蔽网或铝箔屏蔽层,屏蔽效率不低于85dB,构筑物屏蔽采用金属板材,厚度不小于2毫米,确保屏蔽效果,屏蔽材料需具备良好的导电性能与耐腐蚀性能,适应水利工程环境。(2)接地材料选用,接地体、接地线优先选用热镀锌钢材,耐腐蚀、机械强度高,垂直接地极可选用镀锌角钢或钢管,水平

接地体选用镀锌扁钢或圆钢,接地线选用多股铜芯线,截面根据载流量确定,不小于16平方毫米。(3)连接器件选用,螺栓、夹子等连接器件选用铜质或镀锌材质,确保导电良好,螺栓规格与连接材料匹配,拧紧力矩达标,防止接触不良导致接地电阻增大,焊接材料选用与接地材料匹配的焊条,确保焊缝质量。

#### 3.3.3 防雷设备质量控制要点

防雷设备质量直接影响防护效果,需从采购、检验、存储等环节做好质量控制。(1)采购环节,选择具备生产资质、信誉良好的厂家,设备需附带产品合格证、检测报告,符合国家及行业相关标准,严禁采购三无产品,签订采购合同时明确质量要求与质保期限。(2)进场检验,设备进场后逐一核对型号、规格、参数,与设计要求一致,外观检查无破损、变形、腐蚀,进行导通测试、绝缘测试等性能检测,测试合格后方可投入使用,不合格设备严禁进场。(3)存储与安装质量控制,设备存储在干燥、通风的库房,避免潮湿、暴晒,远离腐蚀性物质,安装过程中严格按照施工规范操作,确保接线牢固、接地可靠,安装后进行整体性能测试,验证设备工作状态,定期开展质量复检,及时发现并处理质量隐患<sup>[4]</sup>。

结束语:水利工程电气自动化系统防雷是保障工程安全运行的关键环节,要兼顾外部拦截与内部防护,实现技术适配与质量管控并重。本文阐述的防雷技术及设备选型规范,贴合水利工程环境特殊性,可有效降低雷电风险。后续需结合工程实际优化防雷方案,强化设备全生命周期管理。

#### 参考文献

- [1]高洁.低压配电网架空线路防雷与接地优化策略[J].光源与照明,2025,(12):192-194.
- [2]张鹏飞.电力系统中的电气设备继电保护与防雷保护措施[J].光源与照明,2025,(12):239-241.
- [3]宋旭琳.输电线路差异化防雷设计与接地电阻智能监测技术[J].数字技术与应用,2025,43(12):108-110.