

水利工程电气系统防雷接地设计与防护技术探析

宋杰

贵港市润港工程勘察设计有限责任公司，广西，贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025090001

摘要：本文聚焦水利工程电气系统防雷接地设计与防护技术探析，确立了“安全核心、因地制宜、分级防护、经济高效”的总体设计原则，并梳理了相关的国家标准与技术依据。在此基础上，深入剖析了防雷接地系统的关键技术，详细阐述了以接闪器、引下线和接地体为核心的“外部拦截”体系，以及以等电位连接、屏蔽防护和浪涌抑制为核心的“内部疏导”体系。针对水利工作中大坝泄洪设施、水电站厂房、泵站及远程测报通信系统等不同区域与设备的特殊性，提出了差异化的专项防护技术方案。文章对防雷接地工程的施工质量控制要点、系统测试验收标准以及运行维护策略进行了全面论述，旨在构建一个从设计、施工到运维的全生命周期、立体化的防雷安全保障体系，以期为我国水利工程的防雷设计与实践提供有价值的参考。

关键词：水利工程；电气系统；防雷接地；外部防雷

Exploration on Lightning Protection Grounding Design and Protection Technology for Electrical Systems in Water Conservancy Projects

Song Jie

Guigang Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract : This paper focuses on the exploration of lightning protection grounding design and protection technology for electrical systems in water conservancy projects. It establishes the overall design principles of "safety as the core, adapting measures to local conditions, hierarchical protection, and cost-effectiveness," and sorts out relevant national standards and technical bases. On this basis, it delves into the key technologies of the lightning protection grounding system, elaborating in detail on the "external interception" system centered around air terminals, down conductors, and grounding electrodes, as well as the "internal diversion" system centered around equipotential bonding, shielding protection, and surge suppression. Given the specific characteristics of different areas and equipment in water conservancy projects, such as dam flood discharge facilities, hydropower station powerhouses, pump stations, and remote measurement and communication systems, differentiated specialized protection technical solutions are proposed. The paper comprehensively discusses the key points of construction quality control, system testing and acceptance standards, and operation and maintenance strategies for lightning protection grounding projects, aiming to construct a full-lifecycle, three-dimensional lightning protection safety assurance system from design to construction and operation and maintenance, with the goal of providing valuable references for lightning protection design and practice in China's water conservancy projects.

Keywords : water conservancy projects; electrical systems; lightning protection grounding; external lightning protection

引言

随着我国水利事业的现代化发展，水利工程正朝着大规模、智能化、自动化方向快速迈进。以计算机监控、数据采集与监视控制（SCADA）系统、远程测报等为核心的电气自动化技术，已成为保障水利工程安全、高效运行的关键“神经中枢”。然而水利工程多建于江河湖泊之畔，地形开阔、水文气象条件复杂，往往处于雷电活动高发区域。其电气设备，特别是大量高度集成、低耐压水平的微电子设备，极易遭受雷电电磁脉冲的冲击，导致设备损坏、数据丢失、系统瘫痪，甚至引发安全事故，造成巨大的经济损失和不良社会影响。因此构建科学、可靠、高效的防雷接地系统，是保障水利工程电气自动化系统安全稳定运行的先决条件和基础保障。鉴于此，本文立足于系统工程理念，对水利工程电气系统的防雷接地设计与防护技术进行深入探析。文章从设计原则与依据出发，系统阐述外部防雷

与内部防雷的关键技术，并结合大坝、水电站、泵站及远程通信系统等典型场景，提出专项防护方案，对施工、验收与运维全流程管理进行论述。旨在构建一个从规划、实施到运维的全方位、多层次、立体化的防雷安全体系，以期为提升我国水利工程防雷技术水平、保障国家水网安全提供理论参考与实践指导。

一、水利工程防雷接地系统设计原则

(一) 总体设计原则

水利工程电气自动化系统的防雷是一项系统工程，需从规划、实施到运维的全流程把控。前期规划需“因地制宜”，充分考量工程所在地的地理环境与气候条件^[1]。水利工程防雷接地系统设计，以安全为绝对核心，构建“外部拦截+内部疏导”的立体防护体系，全面保障设备、人员及工程稳定运行。设计必须因地制宜，紧密结合工程的雷电活动、地质水文与设备布局等特性，在高雷区强化防护，在高电阻率区采取降阻措施，在潮湿环境选用耐腐蚀材料。同时系统需与工程结构、电气、通信等深度融合，通过利用自然构件、整合接地系统来降低成本并避免干扰^[2]。在满足防护标准的前提下，方案应兼顾经济可行性与全生命周期成本，优先选用成熟技术并预留运维接口。依据设备重要性实施分级防护，将资源集中于PLC、主变压器等核心敏感设备，实现精准、高效、经济的全面防护。

(二) 主要设计依据

水利工程防雷接地系统的设计需以权威依据为支撑，确保方案的合规性与精准性^[3]。国家及行业标准规范是设计的法定基础，必须严格遵循《建筑物防雷设计标准》(GB 50057-2010)、《水利水电工程电气设计规范》(SL 581-2012)、《交流电气装置的接地设计规范》(GB/T 50065-2011)、《雷电防护系统部件》(GB/T 21714)、《水利水电工程防雷设计规范》(SL 257-2000)等核心标准，这些标准明确了防雷接地系统的技术要求、设计参数与测试方法，为设计提供法定依据。工程专项技术资料则是实现精准设计的关键，设计需以雷电灾害风险评估报告为依据明确区域雷电活动频率、强度及风险等级，依托地质勘察报告获取土壤电阻率、地层结构、地下水位等关键参数以支撑接地体设计与降阻措施制定，结合工程总体设计文件中的电气系统图纸、设备布局图等确保防雷接地系统与工程整体协调，参照设备技术说明书明确设备雷电耐受电压、接地要求等参数，实现防护方案与设备特性的精准适配^[4]。此外，设计还需参考行业内成熟的设计指南、技术手册及同类水利工程的成功案例，吸收实践经验以避免常见设计误区，同时严格符合工程所在地的地方标准与管理要求，确保设计方案既具备技术合理性，又拥有良好的合规性与可实施性。

二、防雷接地系统关键技术设计与实施

(一) 外部防雷系统设计

外部防雷系统作为水利工程雷电防护的第一道屏障，其设计需与构筑物特性深度适配，核心在于接闪、引下、接地三大环节的协同工作^[5]。接闪器设计需差异化配置，对高耸构筑物采用独立避雷针确保保护范围，对大面积平面则采用避雷带与避雷网（网格不大于10m×10m）组合防护，材质优先选用耐候导电的热镀锌钢或

不锈钢。引下线设计遵循“短直通畅”原则，沿构筑物外侧敷设，数量不少于两根且间距不超过18m，以确保雷电能量低阻传导。接地体是散流的关键，需依据地质勘察数据针对性设计，低电阻率区域采用复合接地网，高电阻率区域则通过换土、降阻剂或深井接地等措施优化，确保关键区域接地电阻不大于1Ω，一般区域不超过4Ω，从而将雷电能量安全高效地导入大地。

(二) 内部防雷系统设计

水利工程内部防雷系统通过等电位连接、屏蔽防护和浪涌抑制三大核心措施，保护PLC、远程测报终端等弱电设备。其基础是等电位连接，采用“总等电位+局部等电位”分级模式，在系统进线处用≥25mm²铜线将建筑主筋、各类金属管线等连接成统一等电位体，并在中控室等关键区域用≥16mm²铜线将设备外壳、电缆屏蔽层等做局部联结，以消除电位差^[6]。屏蔽防护则通过构建电磁屏障阻断干扰，要求电缆采用屏蔽型并穿金属管/线槽敷设且可靠接地，同时将中控室等关键区域建成屏蔽机房，确保屏蔽效能不低于80dB。浪涌保护是抑制过电压的关键，电源线路采用从高压到设备端的三级递进防护，通流容量逐级减小；信号线路则针对性配置与线路阻抗匹配的专用SPD。所有SPD安装均需遵循短直接地原则，并串联空气开关以实现过流保护，共同构建起多层次、精准的内部防护网络。

三、特殊区域与设备的专项防护技术

(一) 大坝及泄洪设施电气设备防护

针对大坝泄洪设备面临的雷击与潮湿威胁，防护方案整合了外部拦截与内部保护。外部通过在屋顶和传感器支架加装避雷带与避雷针来拦截直击雷，并利用大坝结构主筋作为高效引下线连接至坝基环形接地网，将所有金属设备统一接入，确保接地电阻≤4Ω^[7]。内部则采用防水屏蔽电缆穿镀锌钢管敷设，并在控制箱内配置防水型电涌保护器(SPD)，同时选用304不锈钢材质设备、加强接线密封、设置排水与呼吸装置，以全面抵御潮湿环境影响，保障设备安全。

(二) 水电站厂房与中控室防护

为应对水电站厂房高压设备与中控室弱电设备的不同雷击风险，需构建“高压区域分级防护、弱电核心全面屏蔽”的协同体系。针对厂房高压设备，以屋顶避雷网、钢结构引下线与全域接地网（电阻≤1Ω）阻断雷电波侵入，并在主变压器、配电柜及发电机出口形成三级SPD浪涌防护，同时高低压电缆分层隔离敷设^[8]。对于作为“神经中枢”的中控室，则采用效能≥85dB的屏蔽机房进行全面电磁屏蔽，通过等电位系统（导通电阻≤0.03Ω）连接所有设备金属部件，并对电源和通信线路实施三级精细SPD防护，最后配备UPS确保核心设备在雷击停电时持续运行。

(三) 泵站电气系统防护

泵站设备防护需综合应对浪涌、潮湿与腐蚀，外部采用“避

雷带+独立避雷针”组合防雷，通过热镀锌引下线连接至由铜包钢构建的复合接地网，所有设备外壳与底座均可靠接入并做防腐处理，确保接地电阻低于 2Ω ^[9]。核心设备防护上，电机电源采用穿防腐管的铠装屏蔽电缆，进线端加装SPD，外壳设专用接地线；变频器输入输出端均配置适配SPD；控制柜则选用防雨防尘柜体，内部设置等电位连接并分离强弱电。此外，定期检测SPD与接地电阻，雨季前重点检查防水密封。

（四）远程测报与通信系统防护

远程测报与通信系统的防雷核心在于“弱电精准防护、线路全程屏蔽、接地简化可靠”。设备本体采用“小型接闪+外壳接地”模式，在支架顶部加装微型避雷针，并将设备外壳可靠连接接地网；对于卫星天线等高耸设备，则单独设置独立避雷针，其引下线与设备接地系统分开敷设，避免干扰。线路防护实施“全程屏蔽+两端SPD”，信号与通信线路采用双屏蔽电缆并穿金属管敷设，同时在所有线路两端安装参数匹配的专用SPD。接地系统采用“简易高效+等电位互联”设计，就近利用金属构件构建接地网，高电阻率区域辅以降阻剂，并通过通信电缆屏蔽层与中控室主接地网实现等电位连接。通过中控室系统实时监控SPD状态和数据完整性，远程评估防雷系统有效性。

四、施工、验收与运行维护

（一）施工质量控制要点

施工质量控制以“材料合格、工艺规范、连接可靠、环境适配”为核心，严格依据设计文件和标准执行。材料进场须严格检验，金属材料需提供合格证与检测报告，确保热镀锌层厚度不低于 $65\mu m$ 、铜包钢层不小于0.25mm，浪涌保护器（SPD）必须有认证且参数与设计一致，严禁使用不合格材料^[10]。施工工艺上，接地体埋深不小于0.8m并避开不良地质，垂直接地极需机械压入；焊接连接必须保证搭接长度，焊后及时进行两道防锈漆和一道银粉漆的防腐处理，潮湿区域还需额外包裹防腐胶带；引下线敷设应短直顺直，固定规范，穿墙楼板需做好保护密封。针对水利工程特殊环境，大坝坝体接地需与混凝土浇筑同步焊接主筋，泵站等潮湿区设备须加装防水盒并做好电缆密封，岩石地区则采用钻孔灌浆法固定接地极。所有关键工序如接地体敷设、焊接节

点等均需做好隐蔽工程记录，留存影像资料与检测数据，确保施工全程可追溯。

（二）系统测试与验收

系统测试与验收由第三方机构牵头，联合多方共同实施，合格后方可投用。测试需覆盖防雷接地核心性能，其中大坝、中控室等关键区域接地电阻须 $\leq 1\Omega$ ，泵站等区域 $\leq 4\Omega$ ，且测试点不少于节点总数的30%。防雷性能方面，引下线导通电阻应 $\leq 0.1\Omega$ ，等电位连接电阻 $\leq 0.03\Omega$ ，中控室屏蔽效能需 $\geq 85dB$ ，SPD性能也须达标。此外，还需对主变压器进行跨步与接触电压测试，并对远程系统模拟雷击以检验数据传输稳定性。验收依据设计、施工及检测报告进行核验，合格则出具报告；若存在接地电阻超标等问题，必须限期整改并重新检测，直至全部符合要求。

（三）运行维护与管理

水利工程防雷运维以“预防为主、定期巡检、快速响应”为原则，并结合季节特点制定差异化计划。日常巡检根据风险等级划分，中控室等核心区每月1次，泵站等每季度1次，雷电高发期（4-9月）缩短为每月1次，重点检查接地、SPD状态、等电位连接及屏蔽电缆。每年开展一次全面检测，复测接地电阻、SPD参数等关键指标。维护上，SPD到期（3-5年）或接地体锈蚀超30%须及时更换，汛期前需进行专项检查与清理。同时建立雷电灾害应急预案，灾后迅速响应处置，并加强人员专业培训与应急演练，确保运维工作规范高效。

五、结束语

水利工程电气系统的防雷接地设计是一项系统性、综合性的工程，贯穿于工程的规划、设计、施工、验收及运行维护的全生命周期。本文通过对防雷接地设计原则、关键技术、专项防护方案以及运维管理策略的系统探析，旨在构建一个“外部拦截、内部疏导、分级防护、全程可控”的立体化安全防护体系。随着智能化、数字化技术在水利领域的深度应用，雷电防护技术也需与时俱进。希望本文的研究能为相关领域的工程技术人员提供有益的参考，共同推动我国水利工程防雷技术迈向更高的水平，为国家水网的安全、稳定、高效运行构筑坚实的技术屏障。

参考文献

- [1]岳林东. 水利工程电气自动化系统防雷技术 [J]. 建筑与施工, 2025, 4(12):151–152. DOI:10.12417/2811-0528.25.12.068.
- [2]葛雯静, 张宇亮. 水利工程电气自动化系统防雷技术研究 [J]. 现代建筑工程技术, 2025, 1(3). DOI:10.37155/3041-0819-0103-5.
- [3]张金凤. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 科技信息, 2011(21): 452. DOI:10.3969/j.issn.1001-9960.2011.21.352.
- [4]冯晶, 贾斌. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 商品与质量 (建筑与发展), 2013(9):596–596.
- [5]钟伟民. 探析水利工程电气自动化系统防雷措施 [J]. 建筑工程与设计, 2023, 2(5):22–24. DOI:10.12417/2811-0536.23.05.008.
- [6]孙会永. 水利工程电气自动化系统防雷技术 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2020(5):3913–3914. DOI:10.12277/j.issn.1005-0043.2020.05.1960.
- [7]孙跃文. 水利工程电气自动化系统防雷技术研究 [J]. 数码 - 移动生活, 2021(5):407. DOI:10.12277/j.issn.1673-0909.2021.05.268.
- [8]赵云亮. 建筑电气防雷接地系统施工简述 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(7):874–874. DOI:10.3969/j.issn.2095-2104.2015.07.0532.
- [9]李作琴. 水利工程电气自动化及其电气一次设计研究 [J]. 今日自动化, 2021(7):19–21.
- [10]王毅恒. 水利工程电气自动化系统防雷措施分析 [J]. 电脑校园, 2020(12):7389–7390.