

# Research on Key Technologies of Lightning Protection Grounding and Electromagnetic Compatibility in Low-Voltage Engineering

Lei Liu

Yijie Transportation Systems (Beijing) Co., Ltd., Beijing, 102403, China

## Abstract

Low-voltage engineering systems are critical to building automation, communication infrastructure, security systems, and data center operations. Their stability directly impacts the security and reliability of information systems. However, these systems are vulnerable to transient overvoltages, induced lightning strikes, and electromagnetic interference caused by complex electromagnetic environments and lightning surges, which may lead to signal distortion or system failure. With the expansion of system scale, increased equipment density, and higher transmission rates, traditional lightning protection grounding and electromagnetic compatibility (EMC) designs have become inadequate. This paper proposes a technical framework—"zoned protection, equipotential bonding, multi-level protection, and coordinated EMC design"—based on lightning coupling mechanisms, electromagnetic interference characteristics, and engineering case studies. The framework provides technical references for constructing and maintaining low-voltage engineering protection systems.

## Keywords

low-voltage engineering; lightning protection grounding; electromagnetic compatibility; surge protection; equipotential bonding; shielding technology; system protection

## 弱电工程中防雷接地与电磁兼容性关键技术研究

刘磊

亿雅捷交通系统（北京）有限公司，中国·北京 102403

## 摘要

弱电工程系统在建筑智能化、通信、安全防护和数据中心运行中至关重要，其稳定性直接影响信息系统的安全与可靠。受复杂电磁环境和雷电冲击影响，弱电设备常遭受瞬态过电压、感应雷及电磁干扰破坏，导致信号失真或系统瘫痪。随着系统规模扩大、设备密度增加、传输速率提升，传统防雷接地与电磁兼容设计已难适应需求。本文结合雷电耦合机理、电磁干扰特征及工程实例，提出“分区防护—等电位联结—多级保护—电磁兼容协同设计”技术框架，为弱电工程防护体系构建与运行维护提供技术参考。

## 关键词

弱电工程；防雷接地；电磁兼容；浪涌保护；等电位联结；屏蔽技术；系统防护

## 1 引言

弱电系统在现代建筑与城市基础设施中已形成高度集成的智能化体系，包括通信网络、视频监控、楼宇控制、消防报警、门禁管理、数据中心设备等多类子系统。其核心特点是信号弱、电压低、对干扰敏感度高；同时系统运行连续性与数据完整性要求极高，任何瞬间干扰均可能导致严重后果。雷电放电、电磁脉冲、谐波以及复杂电磁环境下的耦合干扰是影响弱电工程安全的主要外部因素。雷电放电可通过直击、感应、电磁辐射等途径进入系统，引发设备损坏、数

据丢失以及信号中断。高速信号设备增多、线路密集叠加、建筑钢结构复杂化，使得电磁干扰传播路径更加多样化。传统经验式接地及防护措施已难以适应智能化高密度弱电系统的需求。工程实践表明，以综合接地、等电位联结、屏蔽、隔离、多级浪涌保护以及 EMC 协同设计为核心的整体解决方案，可显著提升系统稳定性。基于此，本文在理论分析和工程经验基础上，对弱电工程中防雷接地与电磁兼容性关键技术进行深入研究，从机理、设计、实施和管理多维度构建综合防护体系，为弱电工程建设和运行提供技术支持。

## 2 防雷接地系统的原理与构成

### 2.1 弱电系统雷电危害机理分析

弱电设备的电气绝缘水平较低，对冲击电压、瞬态电

【作者简介】刘磊（1982-），男，中国北京人，工程师，从事弱电工程设备安装研究。

流和电磁脉冲极为敏感。雷电放电过程中产生的高能电流沿建筑金属体、引下线、线路或空间耦合进入室内设备,形成多种破坏机制。直击雷将雷电流直接引入线路或设备,极易造成电源系统和传输介质断裂、熔毁。感应雷通过磁场耦合和静电感应产生高幅值浪涌,使信号线和电源线瞬间承受远高于耐压等级的电压。雷电电磁脉冲(LEMP)叠加高频成分,可对高速弱电信号链路产生串扰和畸变,尤其对千兆级网络通信、同轴视频传输及RS485总线设备造成显著干扰。在金属管道、电缆梯架、建筑钢结构形成的复杂反射路径中,雷电能量反复耦合,增大弱电系统受损风险。弱电设备内部电子元件高度集成,布线密集,一旦遭受雷电冲击,其损坏程度往往是不可逆的。因此,弱电工程需构建由接闪系统、屏蔽系统、接地系统及多级浪涌保护体系组成的完整防雷体系,减少雷电能量进入弱电网络的可能性,并通过低阻路径有效泄放雷电流。

## 2.2 防雷接地系统构成及技术要求

弱电工程的防雷接地系统主要由保护接地、防雷接地、工作接地和功能接地组成。这些接地既有独立功能,又需通过等电位联结构成整体接地网络。建筑物基础钢筋接地体是常用且效果稳定的接地形式,接地电阻控制在规范要求范围内,可为雷电流提供安全泄放路径。弱电机房、监控中心、通信机房等区域需设置独立的功能接地,用于设备信号参考点保持稳定。为免地环路产生,功能接地需与防雷接地在总等电位处统一连接。设备间电位差是导致干扰的重要因素,通过均压措施能有效减少金属性能差异造成的耦合干扰。在接地引下线设计中,应充分利用建筑钢柱、金属管道等自然接地体,提高接地系统的整体导通能力。弱电接地系统的导体截面积应满足雷电冲击耐受要求,并采取可靠焊接或专用连接件保证其电气连续性。

## 2.3 弱电线路防雷设计要点

弱电线路布设必须考虑雷电感应的传播路径及其衰减规律。室外弱电线路宜采用金属管线或全屏蔽电缆埋地敷设,减少雷电电磁脉冲耦合。架空线路需设置避雷线或采用光纤替代铜缆,光纤不导电,可大幅降低雷电耦合风险。室内布线需与强电线路保持足够的间距,避免共管敷设导致电磁耦合增强。对于长距离传输线路,应在分界点安装适配的信号型浪涌保护器(SPD),各级SPD需按电压保护水平、最大通流容量及响应速度进行匹配。数据中心弱电线路应采用双路冗余架构,并配合屏蔽舱、机柜接地和等电位地网设计,使整体系统形成低阻抗防护网络。

# 3 电磁兼容性设计的基本原则与关键技术

## 3.1 弱电系统电磁干扰类型与传播路径分析

弱电工程中的电磁干扰来源广泛,包括高频辐射、大功率设备开关动作、电机启动、高频逆变器谐波、无线电设备辐射、静电放电以及雷电电磁脉冲等。电磁干扰的传播

途径主要有传导耦合、感应耦合、辐射耦合和共阻抗耦合。传导耦合表现为干扰信号沿电源线、信号线进入设备内部,引发控制逻辑紊乱或通信错误。感应耦合在长距离布线环境中更为突出,尤其在多芯电缆、并行敷设的弱电线束中,磁场变化会导致串扰增强。辐射耦合主要由无线发射设备、变频器或雷电电磁场产生,其干扰范围较广。共阻抗耦合发生于多个设备共用接地时,地电位差导致干扰电流进入弱电设备。

随着弱电系统传输速率不断提升,高频信号的电磁敏感度增加,EMC设计必须基于系统、电缆、机柜、接地等多层面协同优化。

## 3.2 屏蔽、隔离与布线防护策略

屏蔽是抑制电磁辐射和感应耦合的最有效手段。弱电工程中常用的屏蔽方式包括金属屏蔽层、屏蔽机柜、屏蔽机房和金属桥架。屏蔽材料的连续性决定屏蔽效果,接缝处需采用导电连接条确保电气连通。对于高频通信线路,应优先选择双屏蔽电缆或光纤线路。隔离是弱电系统EMC的关键策略之一。通过物理隔离、隔离变压器、光电隔离器件等方式,可有效阻断干扰传播路径。弱电线路布设需与强电保持水平间距与垂直交叉要求,避免强电磁场直接耦合到弱电回路。布线规划应基于电磁环境特点进行层级管理,电源线、控制线、信号线分别布设,减少混线带来的干扰风险。对于变频器、UPS、开关电源等设备,应单独布设屏蔽线槽并与弱电保持距离。采用星型接地与单点接地模式,可减少地环路电流,改善系统抗扰性。

## 3.3 浪涌保护与电磁兼容性协同设计

弱电工程浪涌保护不仅涉及雷电浪涌,还要考虑来自电网的操作过电压、开关瞬态等干扰。多级梯级式SPD配置是弱电系统常用的防护方式,在建筑总配电、弱电机房、设备输入端形成三级过电压保护体系。SPD的选型应结合耐压水平、最大通流能力、残压指标、响应时间等参数,确保各级保护之间的能量协调性。电磁兼容性协同设计需将接地、等电位联结、屏蔽技术、线路隔离与浪涌保护统一规划。SPD接地引线需保持最短路径,避免引线电感导致残压升高。对高频设备,应采用低阻抗接地网络,提高干扰电流泄放能力。对于EMC要求严格的场景,如数据中心、智能交通控制中心等,可采用电源滤波器配合SPD,实现差模与共模干扰同步抑制。

# 4 弱电工程防雷与EMC的协同防护体系构建

## 4.1 分区防护理念及其工程应用

弱电工程中的雷电电磁防护应基于分区理念,按照IEC标准将建筑内部划分为不同的雷电保护区(LPZ)。外部区域为LPZ0,特点是完全暴露于雷电环境;进入建筑内部后,根据电磁屏蔽与保护措施逐步形成LPZ1、LPZ2等区域。弱电机房、监控中心、通信节点等属于内部高要求区

域,需构建增强型屏蔽与接地框架。分区防护体系通过屏蔽、等电位联结、SPD 保护等措施,使雷电能量逐级衰减,确保敏感设备处于稳定环境。区域之间的连接点需设置浪涌保护器和等电位连接端子,使不同区域间电位稳定,避免跨区电位差导致的干扰传递。工程实践表明,在大型综合体、医院、数据中心项目中采用分区防护理念,可显著降低雷击损坏率,提高弱电系统运行安全性。

#### 4.2 接地系统的综合化与一体化建设

弱电工程接地体系分散建设易造成地电位不一致,导致干扰耦合增强。现代弱电工程强调综合接地模式,将保护接地、工作接地、防雷接地、功能接地统一在总接地系统中,通过等电位联结网保证电位一致性。建筑主体钢筋作为天然接地体可显著降低接地阻抗,增强雷电流泄放能力。弱电机房内部采用“地板网—机柜网—等电位端子—建筑地网”的多层接地架构,使设备与机房区域电位保持一致。接地导体需布设成环形结构,减少高频雷电流产生的电感阻抗,提高泄放效率。一体化接地建设不仅提升防雷效果,也为 EMC 设计提供稳定基础,使屏蔽机柜、桥架、设备外壳等均具备统一参考电位,避免高频干扰在不同金属体之间反射与叠加。

#### 4.3 弱电系统综合防护的工程实施路径

弱电工程综合防护需在设计阶段、施工阶段与运行阶段形成闭环。设计阶段应完成防雷分区、接地网络、布线系统、屏蔽措施与 SPD 等整体规划;施工阶段严格执行连接质量、屏蔽连续性、等电位联结、SPD 安装等工艺要求;运行阶段需定期检测接地电阻、SPD 状态、高频地阻抗及线缆屏蔽完整性,确保长期有效。工程实施需建立统一的金属体管理制度,对桥架、线槽、机柜、金属管道进行电气连续性测试。弱电系统的供电部分需采用隔离式供电、滤波装置以及干线冗余设计,保证在雷电或强电干扰环境下系统不中断运行。

### 5 典型弱电场景下的应用与案例分析

#### 5.1 数据中心防雷接地与 EMC 构建案例

数据中心弱电系统包括机房供电、UPS、通信网络、监控系统、服务器集群等多类敏感设备,其电磁兼容与防雷要求最高。工程中采用双层机房地网,外部地网连接基础钢筋,内部地网连接机柜系统,确保电位统一。高频接地采用扁铜排构建环形地网,提高高频雷电流泄放能力。网络设备采用屏蔽机柜、机柜门接地带、桥架屏蔽层连续焊接等措施,形成闭合屏蔽体。所有弱电线路进入机房前设置分区 SPD;电源线配置三级 SPD;通信线采用带屏蔽光纤为主的组合架构,避免雷电耦合。案例运行数据表明,在多次强雷暴天气中,该数据中心未出现通信中断或设备损坏,验证了综合防护体系的有效性。

#### 5.2 智能建筑弱电系统的电磁环境控制策略

智能建筑内部弱电系统密集,包括综合布线、监控、消防、BA 系统等。建筑内部强弱电线路多次交叉,空间紧凑,容易形成复杂电磁环境。工程采取分层布线策略,弱电桥架与强电桥架分层布设,通过金属隔板抑制耦合。通信线路采用屏蔽双绞线并结合金属桥架形成屏蔽通道。机房区域使用金属屏蔽机柜,监控主机通过专用功能接地稳定电位。对于干扰源较强的区域,如配电间、变频机房,通过增加隔离距离、设置金属网罩等方式强化屏蔽效果。该策略显著降低信号噪声,改善监控系统图像质量,提高综合布线稳定性。

#### 5.3 户外弱电系统的雷电防护与传输安全设计

户外摄像机、门禁设备、通信基站、道路监控等弱电设备暴露于复杂雷电影响。工程主要采用全光纤传输替代铜缆,减少雷电电磁脉冲耦合。设备外壳需与支撑杆体可靠接地;杆体应与地网形成低阻通路。摄像机前端配置信号型 SPD,供电线路设置防水型浪涌保护装置。对于跨区域传输线路,通过金属护管及埋地屏蔽层提高抗干扰能力。监控系统控制箱内设置等电位端子,使设备、电源、信号线统一接地。工程测试显示,在雷暴季节,该系统运行稳定,无大规模损坏现象。

### 6 结语

弱电工程的防雷接地与电磁兼容性建设是保障智能化系统稳定运行的技术基础。随着弱电系统规模不断增加、传输速率提升以及建筑金属结构复杂化,传统防护方法已难以完全应对雷电高能量冲击与复杂电磁环境。基于系统化理念构建的综合防护体系,包括分区防护、等电位联结、多级 SPD、防护接地系统构建、屏蔽技术、隔离措施与 EMC 协同设计,对于弱电系统安全性具有重要意义。未来弱电工程的防护技术将朝着数字化、智能化和高频化方向发展。通过电磁环境实时监测、雷电预警系统、智能 SPD、地网阻抗动态检测等技术手段,可实现弱电系统的主动防护。工程建设需进一步推动标准化体系完善,强化防雷与 EMC 的协同管理,使弱电系统具备更高的可靠性与抗扰性,为建筑智能化、智慧城市及数字设施运行提供持续的安全保障。

#### 参考文献

- [1] 林思源.防雷保护技术在建筑弱电系统中的应用[J].科技展望,2016,26(25):107.
- [2] 王亮.工程弱电系统的检测技术与应用[J].通信电源技术,2019,36(09):248-249.
- [3] 曹满.浅析建筑物弱电系统的防雷技术[J].宁夏农林科技,2013,54(03):84-85.
- [4] 蔡汝金.浅谈建筑物弱电系统防雷保护应用措施[J].科技风,2011,(24):165.
- [5] 丁福财.建筑强电、弱电工程施工过程中常见问题与对策[J].电子世界,2014,(18):69.