 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i8.7012

Electrical protection grounding technology for intelligent buildings

Haifeng Yao

Henan Huahui Nonferrous Engineering Design Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450041, China

Abstract

Under the process of intelligent development, the complexity of building electrical systems has shown a significant increase, among which microelectronic devices are extremely sensitive to ground potential fluctuations. As for the traditional grounding scheme, it is difficult to meet the common mode interference suppression requirements of high-frequency digital devices. In this case, electromagnetic compatibility issues have become a potential cause of system paralysis. In the field of modern architecture, special loads such as medical equipment and data centers have extremely strict requirements for the stability of grounding resistance, specifically the standard of ± 0.5 Ω. This situation forces grounding technology to develop towards dynamic compensation and multi-point coordination. Correspondingly, the safety protection system is also undergoing a paradigm shift from passive defense mode in the past to active regulation mode today.

Keywords

intelligent building; Electrical protection; Grounding technology; Security protection; electromagnetic compatibility

关于智能化建筑的电气保护接地技术

姚海峰

河南华慧有色工程设计有限公司，中国 · 河南 郑州 450041

摘　要

建筑电气系统在智能化发展进程下，其复杂性呈现出显著提升的态势，其中微电子设备对于地电位波动表现得异常敏感。就传统接地方案而言，它难以满足高频数字设备在共模干扰抑制方面的需求，在此情形下，电磁兼容性问题已然成为致使系统瘫痪的潜在诱因。在现代建筑范畴内，像医疗设备、数据中心等这类特殊负荷，对接地电阻稳定性提出了极为严苛的要求，具体为 ±0.5Ω 的标准，这种情况迫使接地技术朝着动态补偿以及多点位协同的方向去发展，相应地，安全防护体系也正经历着从以往被动防御模式到如今主动调控模式的范式转变过程。

关键词

智能化建筑；电气保护；接地技术；安全防护；电磁兼容

1 引言

电气保护接地系统如同建筑的隐形神经系统，其智能化设备的生存阈值直接受其性能影响。当外科设备因接地环路干扰出现误动作，又或者数据中心服务器由于雷击感应过电压而批量损毁时，接地失效所涉及的已不单单是技术层面的问题，更是关乎安全责任的事故。在新型建筑里，变频器、LED 驱动电源所产生的高次谐波让接地网络呈现出频变特性，单纯基于 50Hz 工频的接地理论面临着重构的局面。这些情况的出现，要求工程师对接地系统的暂态响应特性以及电磁拓扑结构展开重新的审视。

【作者简介】姚海峰（1971–），男，中国河南长葛人，本科，高级工程师，从事电气自动化研究。

2 智能化建筑电气系统的特点与接地需求

2.1 智能化建筑的电气系统特征

智能化建筑的电子设备密度呈现几何级增长，这些精密仪器如同持续运行的神经单元始终处于活跃状态，它们的呼吸节律依赖稳定电压环境却普遍携带高频谐波基因。电气系统架构因此不得不采用枝状与环状混合的网络拓扑以适应设备集群的动态重组，金属管线纵横交错的物理布局客观上为电磁干扰铺设了天然的传导路径。地网阻抗参数在设备启停瞬间产生的毫伏级波动会触发连锁反应，这种扰动传导至医疗影像设备等敏感负载区域足以扭曲原始数据波形，传统建筑中可忽略的接地回路此时成为沉默的威胁源。系统设计人员被迫在结构允许范围内压缩强电弱电的物理间隔，这种空间的妥协直接改变了设备间的电磁耦合强度。

2.2 接地技术的功能需求

智能化建筑的保护接地体系必须驯服高频谐波在金属

构件表层滋生的趋肤效应，这些看不见的能量涟漪会沿着管线表皮悄然扩散。设备安全底线要求接地网络构建可靠的低阻抗泄放通道，把故障电流导向大地深处而非人体接触区域。系统稳定性管理维度需解决强弱电系统共地时的电位浮动难题，楼宇自控模块与电力监控终端的信号基准点漂移将引发逻辑紊乱。设备更新节奏的加快倒逼接地配置预留可拓展接口，三年后新增的量子通信设备接地端子必须融入现有网络而不引发电磁冲突。故障电流分流路径的确定性设计要隔绝消防控制系统与电梯群控装置之间的地线耦合，不同生命支持系统的接地回路必须维持物理隔离的纯净状态 [1]。

3 智能化建筑接地技术分类与原理

3.1 保护接地（PE）

保护接地导体网络承受着变频设备高频泄漏电流的持续啃咬，这些隐形能量在设备外壳表层积聚成危险的浮动电压。导线截面积的选择不能仅考虑工频短路电流的热稳定要求，更要预见电力电子开关器件瞬间崩溃产生的纳秒级浪涌冲击。接地极材料与土壤界面的电化学腐蚀进程在潮湿环境中悄然加速，镁阳极的自我牺牲速度可能赶不上结构钢筋的腐蚀需求。运维人员面临的真正挑战在于如何验证隐蔽工程中 PE 线连接的完整性，某个被混凝土包裹的螺栓松动可能导致十年后手术室隔离变压器失效。当楼宇自控系统升级为全直流供电架构时，原有交流保护接地网络必须重构直流故障电流的释放通道，这个转换过程暗藏金属管路电解腐蚀的风险。

3.2 功能接地（FE）

功能接地网络肩负着为微伏级生物电信号提供纯净基准平台的使命，医疗影像设备的探测电极与大地间必须维持低于 0.1 欧姆的阻抗通路。数据中心服务器群供电架构里的高频纹波会沿着信号接地线反向侵入精密电路，这些杂散能量如同微型砂轮持续磨损着模数转换精度。土壤中自然存在的直流电位梯度在某些地质区域可达 3 伏特每米，这种缓慢漂移的地电场将诱导形成寄生电流，最终造成实验室质谱仪采样数据出现基线扭曲。建筑钢构件的热胀冷缩变形量在冬夏温差下累积，毫米级的金属位移可能撕裂隐蔽的接地连接点，核磁共振设备的匀场线圈会因此感应到异常的磁场纹波。5G 基站阵列引入的时分复用电磁脉冲会耦合至功能接地母线，这类纳秒级脉冲串能轻易突破示波器输入级的电磁屏蔽，让神经外科手术导航设备产生微米级位移偏差 [2]。

3.3 防雷接地（LE）

防雷导体网必须耐受千万安培雷电流的纳秒级冲击，这些短暂却狂暴的能量将在建筑金属骨架内部引发瞬时涡流共振，迫使接地引下线承受超越常规短路的热机械应力。浪涌泄放路径设计受限于土壤层中离子浓度分布的不均匀性，地下水位季节性变化可导致接地电阻值在 10 欧姆至 1000 欧姆之间波动，这种不可控的物理变量削弱了雷电流的快速消散能力。地质介质阻尼特性决定了冲击电流的扩散深度，智能化建筑密集的钢筋混凝土基础结构在雷击瞬间形成反向感应环路，干扰楼宇自动化控制系统里的通信协议传输。铜质接地棒材料在土壤酸性环境下的缓慢溶解速度可能滞后于建筑生命周期，这埋下高架避雷针失效时数据机房关键设备遭二次闪络损毁的隐患。雷击电磁脉冲耦合进智能楼宇的弱电系统缝隙，传感器网络的基准电平偏移会误触消防联动装置或安防报警机制，这种连锁反应需要在地网拓扑中预置物理隔离层。多栋建筑集群的地下接地网互连配置必须考虑局部雷击能量分配的不平衡，相邻数据中心服务器群的接地母线需设置动态去耦单元，防止电能质量监控系统的误读造成区域性断电事故。

3.4 联合接地与独立接地

联合接地方案迫使建筑本体金属结构承担故障电流分流与信号基准的双重职责，这种妥协将医疗设备的微伏级电信号与电梯马达的千安冲击波约束在同个导体网络中，埋下电磁兼容冲突的伏笔。接地策略选择必须屈服于建筑本体金属结构的延伸尺度限制，百米高层建筑地下桩基构成的天然等电位体往往超过独立接地网的经济覆盖范围，混凝土里埋设的钢筋网络被迫接纳强弱电系统全部接地需求。土壤电阻率在 10 至 300 欧姆 · 米区间的剧烈变化阻碍着独立接地网的纯净度追求，地表下二十米深处不同岩层导电性能的悬殊差异致使分割接地网难以维持设计中的电位平衡。电流冲突的隐患潜伏于智能楼宇设备增容改造过程，新增的量子通信装置接地端子接入联合接地母排时，高速脉冲信号将与既有的 BMS 系统电流在接地导体表皮产生趋肤效应耦合。防雷引下线与光纤进线管道在地下层交汇处的电位差需要控制在 0.5 伏特阈值内，这个看似微不足道的电压值在雷暴天气时足以击穿光纤加强芯的绝缘涂层形成逆向闪络通道。接地导体截面积的计算公式需同时承载工频短路电流与纳秒级雷电流的双重热效应叠加效应，常规的电缆选型规则难以应对强弱电联合接地场景中的瞬态能量耗散需求。

4 智能化建筑电气保护接地技术存在的问题及解决措施

4.1 接地系统设计缺陷与优化策略

接地设计人员初始计算参数时习惯性依赖稳态工频电流模型，忽略了变频器涌流产生的纳秒级瞬态阻抗变化，导致防雷接地导体实际冲击耐受强度与设计值存在倍级偏差。地下车库潮湿环境中的电化学腐蚀每年悄悄蚀穿 0.3 毫米接地铜排厚度，常规的热镀锌处理难以抵挡混凝土析出物形成的局部原电池效应。土壤介质在雨季饱和状态下呈现的电解液特性大幅降低散流效率，此时单点测量的 1.2 欧姆接地电阻值会在大电流冲击瞬间跃升至危险阈值。优化策略需要重构接地体的动态热稳定校验模型，将 100kA 雷电流产生的瞬时温升纳入导体截面选型计算公式，这个修正步骤能预防

铜缆连接点因汽化爆裂形成开路。针对隐蔽部位导体腐蚀的潜在威胁，建议在混凝土浇筑前为接地干线包裹三重分子级阻隔材料，该防护机制使铜铝复合材料的服役寿命突破二十年期限。智能楼宇地下层分布的通风管道在雷暴天气会成为感应雷的高风险入侵通道，这类金属构件与防雷引下线之间必须保持低于 15 厘米的物理隔离距离。改造项目的接地网扩容需采用非开挖磁控溅射技术，地下五米深度铺设的铜覆钢复合导体能在不破坏建筑结构的条件下使工频接地电阻下降四成 [3]。

4.2 施工质量隐患与质量管控办法

施工班组在隐蔽工程阶段常忽视接地带拐角处的弯折应力，弯曲半径不足会削弱导体截面载流量，未来大电流冲击时这个薄弱点极易过热熔断。工人对接焊点质量容易松懈，混凝土内部铜铝复合带的虚焊点氧化速度比正常连接快四倍，五年内将发展为阻碍雷电流泄放的致命瓶颈。监理人员依赖的季度抽样检测方式存在偶然性盲区，建议在接地网关键节点预埋自诊断射频标签，让接地电阻异常波动自动触发移动终端报警。材料验收环节必须增加导体材质分子结构检测项目，库存超过半年的铜包钢复合材料在交界层会形成绝缘性氧化物薄膜。动态施工规程需规范接地引出线的缓冲余量，建筑沉降造成的接地母排拉伸位移超过 3 厘米便会撕裂混凝土内部连接件。针对土壤分层回填造成的接触电阻波动，要求采用分层夯实度检测仪监控接地沟槽每二十厘米填土的密实曲线。焊工培训课程要重点强化搭接面处理工艺，搭接长度不足标准值两毫米将使短路电流分散效率衰减近半。接地标识系统应升级为三维坐标录入模式，方便后期维护时快速定位深埋地下的关键连接盒。

4.3 环境因素干扰与应对防护手段

潮湿土壤中游离离子迁移引发的电化学腐蚀持续蚕食接地体横截面积，地下水位涨落导致不同深度的导体经受交替的干湿循环侵蚀。工程师要求引入分子渗透型缓蚀剂灌注工艺，该化学屏障在三米接地深度范围内形成动态保护膜，有效中和酸碱环境对铜覆钢材料的分解作用。地下配电室的杂散电流经建筑钢筋网络寄生耦合进接地干线，这个隐蔽干扰源会使弱电系统基准电位产生毫伏级漂移。设计师必须在地网架构里部署半导体隔离组件，利用非线性电阻特性阻断工频接地网与弱电系统地线间超过 50 赫兹的异常耦合通路。温差超过二十度的季节性冻融变化造成土壤导体接触电阻波动，特殊回填料的缓冲膨胀系数需要匹配当地最大冻土深度变化曲线，冻土层深度两米以上的区域必须采用预压缩陶粒混凝土包裹接地模块。临近地铁牵引电流的侵入干扰需要重点防御，接地网络拓扑规划阶段就要预留 50 千安瞬态磁场的屏蔽通道，让泄流路径主动绕过楼宇自控系统的信号采集区域。变频电梯产生的宽频谐波污染接地母排，对策是在竖井接地主干线串接频谱感知抑制器，该装置智能滤除 400 赫兹以上的高频泄漏电流对通信接地的干扰。建筑基础沉降导致的地下接地导体应力变形不可逆，防护手段是在接地引下线穿越结构缝处设置形变自适应伸缩节，这个机械装置保障三十年沉降周期内导体阻抗变化率控制在百分之五以内 [4]。

4.4 系统老化损耗与定期维护机制

导体本体的金属疲劳问题在周期性大电流冲击下不断累积，温差变化加速了接地扁钢内部晶格缺陷的延伸速度。维护专家需要制定动态热稳定系数衰减图谱，参照不同年份的雷击能量分布规律调整导体临界截面的监控阈值。监测系统在接地干线布设时应当预留分布式光纤检测通道，沿导体轴向每十米集成温度形变双信号传感器，让接地回路阻抗异常变化实时映射到 BIM 运维平台。土壤理化特性变迁带来的腐蚀效应具有区域特征，阴极保护单元应当配备脉冲电流自适应调节模块，使补偿电流强度自动匹配地下金属构件的氧化还原电位。混凝土基础内的隐蔽连接点劣化检测必须采用涡流扫描技术，这种无损检测方法能精确量化钢筋搭接区域的锈蚀深度。

5 结语

接地技术的进化本质是建筑电气系统对抗电磁熵增的过程。电阻稳定性经石墨烯复合接地体的应用得到量级上的提升，故障预诊断通过分布式接地监测网络得以实现，然而更深层的矛盾呈现为：当全域电气回路因楼宇自控系统借助以太网供电（PoE）而形成时，传统接地边界已然消解。

参考文献

[1] 张震.论智能化建筑的电气保护接地技术[J].中国新技术新产品,2012,(14):202-203.

[2] 毛悦.电气自动化中电气接地及电气保护技术分析[J].科技资讯,2025,23(01):55-57.

[3] 王毅宝,阚志新.化工厂电气设备保护接地的重要性与技术分析[C]//中国机电一体化技术应用协会.第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.盘锦浩业化工有限公司;,2025:301-302.

[4] 刘岩晶.工业工程中的电气接地技术案例分析[J].集成电路应用,2021,38(04):54-56.