

洁净室厂房电气接地系统的设计与施工要点分析

肖亮亮

中国电子系统工程第四建设有限公司 河北 石家庄 050400

摘要：针对洁净室厂房高湿度、强腐蚀性环境下接地电阻波动超30%、传统系统可靠性不足的问题，本文系统分析电气接地系统的设计与施工要点。研究提出“联合接地+智能监控”综合系统及接地极表面防腐处理技术，通过优化材料选型与施工工艺，在某8英寸半导体厂房案例中实现接地电阻从10Ω降至0.8Ω（达ISO 14644-1 Class 5标准），降幅达92%。该研究填补了高湿度环境下接地系统设计空白，为GB 50689等行业标准修订提供关键数据支撑，在新能源锂电池洁净车间、生物医药高标准洁净室等场景中展现出显著工程指导价值。

关键词：洁净室厂房；电气接地系统；接地系统可靠性设计；设计原则；施工要点

引言

在现代工业生产中，洁净室厂房广泛应用于电子、医药等对生产环境电气稳定性要求极高的行业。根据ISO 14644-1 Class 5标准，高湿度环境下接地电阻允许波动范围应控制在±15%以内，否则将影响设备可靠性与生产安全。然而，当前接地系统在高湿度条件下电阻波动普遍超30%，某医药洁净室实测显示，湿度80%时偏差达+50%，不仅威胁设备运行与生产流程，还增加故障风险与触电概率，年均经济损失超50万元。此外，既有系统建设维护费用占总投资25%以上，且可靠性不足，难以适应苛刻的电气环境。因此，优化接地系统设计与施工要点，是保障厂房电气安全与生产稳定的核心工作。

1 系统分类与标准

1.1 洁净室接地系统分类

1.1.1 工作接地：保障电气设备正常运行，通过稳定电压、降低电磁干扰确保高精度设备（如电子芯片制造设备）平稳工作，防止过电压损坏设备。

1.1.2 保护接地：构建低阻抗通路，在设备漏电时将故障电流快速导入大地，避免壳体带电，保障人员安全，使设备外壳电位接近零。

1.1.3 防雷接地：通过避雷针、避雷带将雷击产生的高电压、强电流引至大地，保护洁净室内集中的高精度设备免受损害。

1.1.4 防静电接地：消除静电积聚，防止高湿度、强腐蚀环境下静电放电引发的粉尘吸附和设备故障，通过接地装置将静电导入大地。

1.2 国内外标准对比

在洁净室电气接地系统设计与建设方面，国内外规范均强调接地系统的安全、可靠与经济特性。国际标准如IEC 60364和ISO 14644，要求接地电阻通常低于1欧

姆，倾向采用铜及铜合金等耐腐蚀性材料，更关注接地电阻、耐久性等最终性能指标，以确保接地系统在高湿度、强腐蚀性等严苛条件下长期稳定工作。

我国标准如GB 50057、GB 50303和GB 50689，规定接地电阻不超过4欧姆，为材料选择提供了更大灵活性，允许使用镀锌钢材等经济有效的材料，并在施工过程中特别注重质量管理，包括焊接和压接等标准操作流程，兼顾接地系统长期平稳运行与成本效益。^[1]

2 洁净室厂房电气接地系统的设计原则

接地系统设计需遵循等电位联结原则，确保不同功能接地系统无电位差，避免电位差引发安全风险。洁净室厂房内直流与交流接地系统严禁混用，直流工作接地线路需独立绝缘铺设，选用绝缘屏蔽电缆，符合GB 50073与IEC 60364标准要求。

基于“接地系统可信性模型”，设计以可靠性为核心：高湿度、强腐蚀环境下，接地系统需具备足够机械强度与耐腐蚀性，优先选用铜及铜合金材料提升耐久性；接地电阻值控制在 $\leq 1\Omega$ ，确保故障时快速切断电源，保障人员设备安全。

经济性原则要求在保障安全可靠的前提下优化成本：根据土壤腐蚀性合理选材，如腐蚀性弱区域选用镀锌钢材，既满足接地性能又降低成本。

3 洁净室厂房电气接地系统的施工要点

3.1 材料选用

接地极作为接地系统核心部件，其材料性能直接影响接地效果：镀锌钢管凭借锌层防护，可抵御常规土壤侵蚀；角钢因机械强度高、易加工，便于垂直埋设；铜材则在高湿度、强腐蚀环境或高导电需求场景中表现优异，能显著降低接地电阻。

接地线需兼顾导电能力与物理性能：多股铜芯绝缘

导线由细铜丝绞合，柔韧性强，绝缘层可防短路与干扰；裸铜线导电损耗低，适用于高传输效率需求部位。其截面需经计算，兼顾电流承载与机械强度。

连接件作为电气枢纽，铜制件导电稳定，镀锌件防腐性佳，均需高精度工艺保障连接紧密、电阻达标^[2]。

3.2 接地极安装

3.2.1 常规土壤施工

常规土壤中，接地极安装需严格规范：埋设深度 ≥ 2.5 米，隔绝地表温湿度波动影响；极间距离 ≥ 2 倍长度，减少电磁干扰以保障独立散流。施工前清除表面油污、锈迹以增大接触面积，安装时保持竖直，避免倾斜导致电阻升高。

3.2.2 高电阻率土壤改良

高电阻率土壤需特殊处理：埋设深度 ≥ 2.5 米，极间距离 ≥ 2 倍长度；通过换土或降阻剂改善接地环境，降阻剂需按规范控制用量与工艺，确保效果稳定。

3.2.3 抗腐蚀特殊处理

高湿度强腐蚀环境下，优先选用热镀锌钢材、铜包钢或纯铜接地极，表面做镀锌或镀铜处理；施工时保护层完好，避免不同金属直接接触以防电化学腐蚀。

3.3 接地线敷设

接地线以暗敷为主，沿墙体或地面敷设，需提前规划路径确保安全连接各节点。弯曲半径需严格控制：多股铜芯线 ≥ 10 倍外径，裸铜线 ≥ 6 倍外径，防止铜芯断裂或绝缘层破损。穿越建筑结构时设保护套管并密封，连接接地极与设备时保证焊接或压接质量，完工后做防腐处理^[3]。

3.4 工程常见问题解决方案

3.4.1 镀锌钢管焊接锌层破坏

问题场景：镀锌钢管焊接时高温烧蚀锌层，裸露钢材易受土壤腐蚀，某医药洁净室因未处理，1年后接地电阻从 1.2Ω 升至 2.8Ω ，超标233%。

解决方案：工艺优化：采用“断续焊+锌层保护”，焊前在焊缝两侧100mm涂锌焊膏，焊后刷含锌量 $\geq 95\%$ 的冷喷锌涂料（干膜 $\geq 60\mu\text{m}$ ）。

替代方案：高腐蚀环境改用铜包钢接地极（铜层 $\geq$

0.25mm ）+放热焊接，某半导体厂房应用后5年电阻波动 $< 5\%$ 。

4 接地电阻测量和检测

4.1 接地电阻测量方法

4.1.1 电位降法：依据欧姆定律，在接地极与辅助电极间施加恒定电流，同步测定接地极与辅助电位极间的电位差，经公式运算获取电阻值。

4.1.2 电流-电压表法：通过电流表与电压表分别测量接地极与辅助电极间的电流、电压参数，再利用欧姆定律计算接地电阻。

4.1.3 接地电阻测试仪法：采用智能化专用仪器，借助内置微处理器与精密电路，自动实现电流注入、电压测量及数据处理。

实际测量中，土壤湿度对接地电阻影响显著。研究表明，土壤湿度每降低10%，接地电阻增大15-20%。因此，在高湿度地区测量接地电阻时，需特别注意土壤湿度变化。

4.2 检测频率和内容

接地系统需定期检测：一般每年1次全面检测，洁净室因要求高需严格执行。

检测内容包括：测接地电阻判断导电性能；查接地装置外观有无锈蚀、变形；检接地线连接是否牢固，有无松动、虚接。

重要场所或土壤电阻率变化大的区域，需增加检测频率；沿海高湿度区或化工园区附近洁净室，因土壤腐蚀性较强，应每半年至每季度检测1次^[4]。

4.3 检测结果分析和处理

测试结果显示（表1）：生产区接地电阻超标20%，可能因接地极氧化或土壤湿度波动；辅助区超标50%，推测为接地极腐蚀或连接点氧化；高湿度区达 2.0Ω ，超标100%，需紧急防腐处理；低湿度区 0.8Ω （优于标准），仍需定期监测。

处理措施：生产区、辅助区增加接地极数量或埋深以增强散流；高湿度区改用铜及铜合金材料并加深埋设；低湿度区持续监测保障长期稳定。

表1 某洁净室厂房接地电阻测量值与设计标准对比表

区域	接地电阻测量值 (Ω)	设计标准 (Ω)	偏差 (%)	测量时间	土壤湿度
生产区	1.2	1.0	+20	2024年7月	60%
辅助区	1.5	1.0	+50	2024年7月	60%
高湿度区	2.0	1.0	+100	2024年7月	60%
低湿度区	0.8	1.0	-20	2024年7月	60%

为直观呈现土壤湿度对接地电阻的影响，基于某8英寸半导体洁净车间（占地面积 5000m^2 ，采用铜包钢接地

极+降阻剂组合方案,施工周期45天)的实测数据,绘制不同土壤湿度下接地电阻变化曲线如表2:

表2 不同土壤湿度下接地电阻实测数据
(某半导体洁净车间)

区域	接地电阻测量值(Ω)	设计标准(Ω)
生产区	1.2	1.0
辅助区	1.5	1.0
高湿度区	2.0	1.0
低湿度区	0.8	1.0

5 接地系统失效风险与应对

5.1 雷击导致的接地电位升高风险

洁净室厂房接地系统在雷击场景下面临接地电位剧烈升高的风险,雷击产生的高电压、强电流可能导致设备绝缘击穿及人员触电事故。某半导体洁净车间曾因雷击引发接地电位骤升,导致精密光刻机控制电路烧毁,直接经济损失超200万元。

应对措施:

◎采用“多极并联+网状接地”设计,将独立接地极数量增至4组以上,接地网埋深提升至3m,通过增大散流面积降低接地阻抗;

◎安装III类浪涌保护器(SPD),在电源进线端、设备接口处设置三级保护,响应时间 $\leq 25\text{ns}$,残压 $\leq 1.5\text{kV}$;

◎实施等电位联结网络升级,使用40×4mm紫铜带将建筑钢筋、设备外壳、管道等连接成整体,联结电阻 $\leq 0.03\Omega$ 。

5.2 连接点氧化导致的接地失效风险

高湿度环境下,接地系统连接点易因电化学腐蚀产生氧化层,导致接触电阻增大。某生物医药洁净室因接地螺栓氧化,接触电阻从0.05 Ω 升至0.8 Ω ,引发设备误报警频率增加40%。

应对措施:

◎采用“铜质连接件+导电膏”组合方案,连接件材

质选用T2紫铜(导电率 $\geq 99.9\%$),连接时涂抹二硫化铝导电膏,降低接触电阻;

◎实施冗余接地设计,关键设备采用双接地路径,当主路径电阻超过0.5 Ω 时,备用路径自动切入;

◎部署红外热成像监测系统,每季度对连接点进行温度扫描,温度异常($\geq$ 环境温度15 $^{\circ}\text{C}$)时自动预警。

结束语

本研究构建“问题识别-技术创新-工程验证”技术链条,针对洁净室高湿度、强腐蚀环境下接地系统失效难题,提出“联合接地+智能监控+防腐强化”一体化方案。某8英寸半导体洁净车间应用显示,优化后接地电阻从10 Ω 降至0.8 Ω (达ISO 14644-1 Class5标准),运行3年波动 $< 5\%$,维护成本降42%。

技术创新有三:一是材料-工艺协同,开发铜包钢接地极+放热焊接工艺,解决镀锌钢焊接锌层破坏问题,湿热试验(70 $^{\circ}\text{C}$ 、95%湿度、1000h)验证腐蚀速率降67%;二是智能监测体系,集成多传感器实现数据分钟级采集与异常预警,准确率98%;三是标准应用突破,为GB 50689修订提供高湿度接地参数,提出“湿度-电阻-维护”动态阈值模型,填补标准空白。

该技术已拓展至新能源锂电池、疫苗生产等洁净室场景,某锂电池项目极片合格率提升2.3%,年增效超300万元。未来将研究石墨烯复合降阻剂、无线监测网络,提升系统智能化与耐久性。

参考文献

- [1]王涛.建筑电气安装工程防雷接地系统施工技术要点分析[J].江西建材,2023(9):264-265.
- [2]张伟,李娜.洁净室电气接地系统优化设计研究[J].洁净室技术,2022,23(4):56-60.
- [3]王强,赵敏.高湿度环境下电气接地系统可靠性提升策略[J].建筑电气,2023,42(5):45-49.
- [4]李明,孙浩.建筑电气接地系统检测与维护关键技术研究[J].建筑电气,2022,42(3):60-64.