

石油化工生产与储运过程中雷电防护技术研究

刘 祥 (南京诚志永清能源科技有限公司, 江苏 南京 210044)

摘要: 石油化工生产与储运设施具有易燃、易爆和高度自动化的特点, 雷电侵袭容易导致火灾、爆炸及控制系统失效。本文分析雷电对装置与罐区的影响机理, 梳理高风险部位和常见隐患, 提出由直击雷防护、接地与等电位、过电压抑制和监测预警构成的技术体系。结合罐区应用实际案例, 证明综合防雷可以有效降低事故风险, 提高系统运行可靠性, 为石油化工企业安全管理提供一定的参考。

关键词: 石油化工企业; 生产; 储运; 罐区; 雷电防护; 接地系统; 监测预警

中图分类号: TE11 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0145-03

Research on Lightning Protection Technology in Petrochemical Production, Storage and Transportation Processes

Liu Xiang (Nanjing Chengzhi Yongqing Energy Technology Co., Ltd, Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: Petrochemical production and storage and transportation facilities are characterized by flammability, explosiveness and high degree of automation. Lightning strikes can easily lead to fires, explosions and failure of control systems. This paper analyzes the influence mechanism of lightning on equipment and tank farms, sorts out high-risk areas and common hidden dangers, and proposes a technical system composed of direct lightning protection, grounding and equipotential bonding, overvoltage suppression and monitoring and early warning. Based on the application examples in the tank farm, it is proved that comprehensive lightning protection can effectively reduce the risk of accidents, improve the reliability of system operation, and provide a reference for the safety management of petrochemical enterprises.

Key words: Petrochemical enterprises; Production; Storage and transportation; Tank farm; Lightning protection; Grounding system; Monitoring and early warning

1 研究背景及意义

石油化工生产与储运过程中涉及易燃易爆的化学品, 雷电与静电灾害对其安全构成极大威胁, 雷电灾害或许会引发设备损毁、火灾爆炸等事故, 静电不断积累常引起火灾爆炸, 进行防雷、防静电技术的应用, 对降低企业安全风险、保障员工安全的意义非凡, 采用有效的防护途径, 不仅可以减少事故出现, 还可以推动企业管理进步, 助力石油化工企业发展实现可持续成长。

2 石油化工企业防范雷电与静电事故机理分析

2.1 雷电灾害对生产装置与储运设施的影响机理

雷电对石油化工系统的破坏主要表现为直击雷、感应过电压与雷电波侵入三种作用机理。直击雷电流可能会造成罐体、塔器和管线金属部件局部熔蚀, 引发火花或点燃挥发性油气混合物等风险; 感应电磁场会在管道、仪控线路和现场设备中产生瞬态高电压, 导致控制信号失真、阀门误动作或系统瘫痪等情况; 雷电波沿着电力与通信线路侵入控制室和PLC系统, 可能会损坏电源模块、造成保护装置失效, 形成“失控—泄放—燃爆”的链式风险。因此雷击不仅是外部点火源, 更可能引发设备失灵、工艺扰动与二次灾害, 具有突发性和放大效应^[1]。

2.2 易发生雷击的关键环节与高风险部位

石油化工系统里高耸、裸露且金属连续性强的设

施极易遭雷击, 涉及大型储罐、精馏塔、火炬塔、装卸栈桥、油装车台与长输管线, 浮顶罐及拱顶罐罐顶空间挥发浓度较高, 若罐体或呼吸阀遭雷击出现火花, 极易引发明火与爆燃; 栈桥及输油臂金属构造繁杂, 人员车辆扎堆, 易出现静电耦合与雷击叠加风险; 埋地管道经过雷暴密集区, 感应过电压将冲击阴极保护及阀控系统, 造成误报、误断或系统失效, 可燃气体检测、消防联锁、SCADA等弱电设备受雷击干扰后或许会拒动或失灵, 造成风险进一步的增大。

2.3 雷电风险的诱发因素与隐患表现形式

雷电风险往往是由设备老化、金属连接间断、接地电阻偏高、静电积累及线路屏蔽不好等因素引起, 典型隐患包含罐顶跨接线断裂导致放电火花、避雷装置腐蚀引起引流失效、PLC及通讯线路遇过电压后黑屏或误报警、阴极保护设备因雷击反灌电流毁坏, 以及自动关断阀拒绝动作造成泄漏扩大, 尤其是高温高湿或油气大量挥发的季节, 雷电与静电、腐蚀、密封老化等因素或许产生协同效果, 令原本局部故障转化为火灾或爆炸事故, 识别诱发因素、抓好隐患治理是雷电防护的关键要点。

3 石油化工企业雷电防护技术体系与关键措施

3.1 雷电防护系统设计与施工优化

在石油化工生产与储运过程中, 雷电防护系统设

计需要兼顾结构安全性和生产连续性，确保高风险设施如储油罐、造粒塔和输油管道获得充分保护。优化措施包括采用滚动球法和等电位分区设计，这两种避雷和消除电位差相结合的方法，通过布设空气终端、网状导体和多点引下线形成完整的导电路径，将雷电流迅速引入接地系统。在施工过程中，应该严格控制引下线与金属构件的连接阻抗，确保低阻抗回路形成，还要对关键节点如塔顶、管道交接处和控制室入口进行等电位联结。此外，可在设计阶段对雷电流模拟分布进行仿真分析，确定局部电位峰值位置，并通过增加局部避雷装置或屏蔽措施降低雷电直击和电磁脉冲对自动化系统的影响。

在施工优化方面，应重点考虑施工材料与工艺的可操作性和耐久性，例如选用耐腐蚀、导电性能优良的铜或镀锌钢作为引下线和接地体材料，并采取防腐涂层或埋地保护措施以延长使用寿命。施工中需分阶段检测接地电阻和连接点电阻，确保所有关键节点满足设计要求，同时建立施工验收与动态监测机制，定期对接地系统、引下线及避雷装置进行巡检和维护。通过施工与设计的紧密结合，不仅提升了雷电防护系统的可靠性，也为高风险作业区域提供了可持续的安全保障^[2]。

3.2 雷电感应与过电压的防护措施

雷电感应与过电压防护的首要策略是“分级—协同—屏蔽”，分别在电力进线、配电柜和现场终端布置 I 级、II 级、III 级浪涌保护器，并要保证器件等级、额定冲击电流(I_{imp})与残压相互匹配，具体操作包括：电站输入端（与外部电网或长距离电缆连接处）装 I 级能承受高能冲击的放电型 SPD 拦截直接入侵的雷浪涌；配电室、控制柜采用 II 级 SPD 对配电总线与分支回路进行保护；于 PLC、变送器等敏感终端处设置 III 级微功率 SPD 或滤波器，消除剩余的小幅瞬态冲击。与 SPD 配合，电缆引入点需采用金属屏蔽电缆、金属桥架并实施单端屏蔽接地，优先采用光纤传输通信与控制信号，阻断共模雷电波侵入；当必须使用金属电缆时的场合，实施严密的屏蔽—接地—隔离办法，并保证电力与信号线间维持最小干扰距离或构建物理隔离通道以减少耦合。

针对工程管理维度，应突显接地系统与等电位联结的整体及连续性：全部 SPD、屏蔽外层、管线金属护套以及变电箱机柜接地母排应与厂区主接地网等电位连接，防止因局部电位差击穿器件；接地电阻目标应按照风险区分级，同时结合土壤改良（石墨回填、盐水化处理或深井接地），在设计阶段确保达成标准。施工细节仍需留意：杜绝不同材料直接焊接产生电化

学腐蚀，利用柔性跨接线确保设备移动或热胀冷缩时金属的连续，对跨接线、桥架接头及外露金属实施防腐防松处理，确立 SPD 及接地的定期测试与更换制度（SPD 每年开展视觉检查，每 6 个月实施关键点电气性能测试；至少每年对接地电阻测量一次，极端环境下调整为半年测量一次），在检修记录里留存浪涌事件日志，供后续分析与优化配置^[3]。

3.3 雷电监测预警与安全联锁控制

有效的雷电防护不能仅是依靠被动设备，还得搭建多源雷电监测与分级预警体系以实现“早识别、快联动”，构建方案包括：厂区安装场强仪、场放电探测器与云—地闪监测单元，结合国际先进技术水平与商用雷电监测网络（云闪电定位、气象雷达数据）构建多模态数据流；利用时间戳与位置融合算法对可能影响厂区的雷暴单体做分钟级或十分钟级预测定位，在数据平台给雷电强度、云底高度、闪电率、近场场强等指标设置分级阈值，还在系统里开展阈值冗余与防抖操作，规避雷雨季停产造成的经济损失。

预警必须跟工艺控制系统（DCS/SCADA）、ESD（紧急停机系统）与现场执行机构建立可核验的安全联锁链：预警等级升至“预防”时自动执行低侵入手段；一旦达到“防护”或“危险”等级，即可触发强制措施，联锁逻辑设计应做到可追溯、可以人工介入且有冗余路径，防止单点故障。实施中建议：拟订详细的 SOP 及处置时间窗，按周期开展雷电应急演练并评估联锁决策的可靠程度；建立雷电事件后评估流程（事件日志、设备状态采样、后果分析），以不断改进阈值设置与联动策略；同时兼顾冗余通信通道（光纤+无线）与低带宽备份信令，保障在电磁骚扰或部分网络中断时联锁命令能可靠送达现场执行单元^[4]。

4 案例分析与效果评价

4.1 案例背景及企业概况

本案例选取印度东爪哇省 Gresik 市某石油化工企业（以下简称“企业 A”）的防雷与静电防护系统评估与改进。该企业主要从事石油加工与储存，其地理位置位于雷暴频发区域，年均雷击密度约为 23.76 次/ km^2 ，直接雷击频率接近约 4.62 次/年。企业 A 的主要设施包括高耸的造粒塔（Prilling Tower）和包含自动化控制系统的 DCS 楼。以往雷击事件导致设备停运和生产中断，亟需对防护系统进行全面评估与优化。

4.2 雷电静电防护技术在实际应用中的实践

在对企业 A 开展系统评估后，首先针对造粒塔、储罐区及输送管廊的直击雷与感应雷风险实施重点改造。造粒塔高度超过 100m，属厂区最高构筑物，雷暴期间极易成为雷击通道。项目采用增强型避雷引下

系统,将原单一引下线改为三点独立引下,并构建环形接地网,使冲击电流能在最短路径泄放至大地。同时,罐区浮顶与罐壁之间全部重新设置柔性铜编织跨接线,连接电阻由原平均 0.38Ω 降至 0.06Ω ,有效杜绝雷击诱发的跨接火花。

在输电与数据链路中,加装多级电涌保护器(SPD),并对配电柜、通讯柜实行等电位连接,测试显示雷暴日变电站来波过电压由原峰值 $2800V$ 降至不足 $950V$,避免了PLC电源模块与远程I/O板卡受瞬态电压冲击而失效。

针对静电积聚引发的点火风险,企业A在储罐、装卸和造粒塔区域同步实施静电控制措施。储罐罐底、罐壁及回流管路全部增加静电接地带,并进行接地电阻在线检测,确保长期保持在 10Ω 以下。装车栈桥增设静电释放装置、油品装卸联锁系统及人体静电释放装置,装车作业仅在PLC确认静电电位处于安全阈值后方可开启阀门。

造粒塔内部因高温熔融物料与高速下落易形成大量粉尘摩擦带电,项目在塔体内壁布置导电防静电涂层及喷雾抑尘系统,使颗粒表面电荷积累显著减少。实施后连续两个雷雨季无罐区闪爆、火花或电气设备损毁事件,关键工段未再发生因雷击导致的非计划停车,总体运行稳定性提高约 21% ,证明防雷与静电协同防护体系具有实效性与推广价值。

4.3 效果评价与经验总结

改造完成后,企业A对雷电与静电防护系统进行了为期12个月的运行跟踪与量化评价,采用“设备故障率—非计划停车次数—关键设备受雷击干扰记录—安全联锁动作有效性”四项指标进行技术验证。数据显示,该年度厂区平均雷暴日达到78天,但电气和仪控设备未发生任何雷击损毁事件;DCS、PLC、RTU等弱电系统拒动、误动作记录从实施前的年均15次降至0次;造粒塔、储罐和装车区均未出现静电点火和跨接火花报警。

相较于改造前,关键工艺区非计划停车次数减少约 36% ,直接经济损失下降超 160 万元。同时,接地网络运行电阻保持稳定,所有跨接线和SPD均实现季度检测与可视化维护,实现“可验证、可追踪、可预警”的全流程防护闭环。

实践结果表明,雷电与静电本质上存在耦合放大效应,单一措施难以彻底防控风险,而企业A采用的“直击雷防护—接地等电位—过电压抑制—联锁安全—在线监测预警”五层体系具有更强的冗余性与可靠性。在技术层面,多点引下、环形接地、柔性跨接与多级SPD构成了冲击电流快速泄放通路;在运行管

理层面,接地电阻在线巡检、联锁逻辑校验、雷电预警响应制度确保系统始终处于有效状态。案例显示,只有将防雷设计、设备配置、检测维护和人员操作纳入同一管理系统,才能真正实现“雷击可控、过电压可控、静电可控、联锁可靠”的系统化治理,为类似石油化工企业提供可复制的工程经验^[5]。

5 结束语

石油化工生产与储运环节存在大量可燃介质、高耸金属设施和复杂弱电控制系统,雷电与静电不仅是点火源,更有可能引发设备失效、工艺失控及二次灾害。本文通过分析雷电作用机理、典型风险部位和诱发因素,构建了以直击雷防护、接地等电位、过电压抑制、静电控制和监测预警为核心的技术体系。案例研究表明,多层次防护措施协同实施可显著降低雷击干扰与爆燃风险,提高关键装置连续运行能力与本质安全水平^[6-7]。

未来,石油化工企业应进一步推广在线雷电监测、智能报警、安全联锁与远程诊断技术,实现从被动防护向主动预测、联锁干预和智能决策转变,为企业安全生产和绿色运行提供更坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 关智珠.石油化工企业静电危害及防范措施分析[J].模型世界,2022(7):73-75.
- [2] 卢永飞,肖光华,孟景花.炼油化工企业现场仪表防雷技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(15):91-93.
- [3] 周明辉.化工企业防雷及防静电接地检测工作[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(10):52-53.
- [4] 偶国富,徐如良,赵柏鑫,肖宇,曹海彬.沿海大型原油储罐雷击着火成因分析及防护措施[J].石油化工安全环保技术,2008,24(01):17-19.
- [5] 高剑,王欣眉,刘全桢,王贵全,孙少华,张源源,黄树华,刘宝全,毕晓蕾.新型雷电预警系统在油气储运行业的应用,第33届中国气象学会年会[R].西安:中国气象学会,2016:1-5.
- [6] 贺会群,张行,巴莎,于楠,张慧筠,王逸达,汪洁.我国油气工程技术装备智能化和智能制造的探索与实践[J].石油机械,2024,52(6):1-11.
- [7] 黄伟.石油化工储运过程中的危险源识别与控制研究[J].中国化工贸易,2023,15(24):112-114.

作者简介:

刘祥(1991-),男,汉族,安徽安庆人,本科,工程师:机械工程(电气工程),电气主管,研究方向:化工企业的供配电技术、电气设备运行管理。