

雷雨天气仪表雷击损坏成因与仪表接地防雷优化技术

江明佳

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]工业现场各类自动化仪表多露天布设或置于室外机柜内, 雷雨季节雷电过电压极易沿线缆、金属支架侵入仪表本体, 造成元器件击穿、线路烧毁等故障, 直接影响生产系统稳定运行。文章结合现场仪表布设环境, 从直击雷、感应雷、地电位反击三个维度梳理仪表雷击损坏诱因, 剖析现有接地防雷施工普遍存在的缺陷, 围绕接地系统改造、等电位联结、屏蔽布设、辅助防雷配套等方面提出优化技术方案, 为工业仪表防雷工程改造提供实操参考。

[关键词]自动化仪表; 雷击损坏; 接地系统; 防雷优化; 等电位联结

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20353

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

Causes of Instrument Lightning Damage during Thunderstorm Weather and Optimization Technology for Instrument Grounding and Lightning Protection

JIANG Mingjia

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: Various automation instruments in industrial sites are often installed outdoors or in outdoor cabinets. During thunderstorm seasons, lightning overvoltage can easily penetrate the instrument body along cables and metal brackets, causing faults such as component breakdown and circuit burnout, directly affecting the stable operation of the production system. The article combines the on-site instrument deployment environment to sort out the causes of instrument lightning damage from three dimensions: direct lightning strikes, induced lightning strikes, and ground potential counterattacks. It analyzes the common defects in existing grounding and lightning protection construction, and proposes optimized technical solutions around grounding system transformation, equipotential bonding, shielding layout, and auxiliary lightning protection matching, providing practical reference for industrial instrument lightning protection engineering transformation.

Keywords: automation instruments; lightning damage; grounding system; lightning protection optimization; equipotential bonding

引言

现代化工矿、化工、油气等生产场景大范围布设温度、压力、流量等自动化仪表, 部分仪表传感器露天安装在装置区、室外管廊, 配套信号线缆横跨厂区露天敷设, 仪表控制系统依托电缆接入中控机柜。雷雨气候条件下, 雷电除直接击中设备外, 产生的电磁脉冲还会在管线、线缆上感应瞬时高压, 通过接地回路窜入仪表内部, 是仪表元器件损毁的重要诱因。现阶段不少老旧厂区仪表防雷施工按照简易标准落地, 接地敷设不规范、等电位缺失、屏蔽处理粗放等问题普遍存在, 每逢雷雨天气频繁出现仪表失灵、电路板烧毁现象, 不仅增加仪表更换与检修成本, 还容易引发生产联锁误动作, 干扰正常工艺流程。立足雷击损坏机理, 找准接地系统现存短板, 落地针对性优化改造技术, 能够从根源降低仪表雷击故障率, 保障自动化仪表长期安

全稳定运行。

雷电对化工仪表的危害, 不只是我们肉眼看到的直接雷击, 更多是雷电放电瞬间产生的强电磁脉冲, 会在厂区金属管线、电缆线路上感应出瞬时高压电。普遍存在接地敷设不规范、等电位体系缺失、线缆屏蔽处理不规范、防雷保护层不足、后期维护不到位等一系列问题。每到雷雨季节, 厂区仪表就容易出现失灵、跳变、信号中断、电路板烧毁等各类故障。

这类问题看似单点设备故障, 实则隐患很大。频繁损坏仪表, 不仅会增加设备采购、更换、检修的人工和材料成本, 耽误日常维保进度, 更关键的是容易引发生产联锁误动作、工艺参数失控, 直接干扰正常生产工艺流程。有时候一块表坏了不算大事, 可联锁一旦误动, 整个装置都得跟着波动, 那代价就大了。

我们在日常工作中，必须真正吃透仪表雷击损坏的底层原因和机理，需要系统性地提升厂区仪表防雷能力，从根源上降低雷雨季节仪表雷击故障率，保障自动化仪表长期、稳定、可靠运行，为化工安全生产提供坚实的设备保障。

1 雷雨天气仪表雷击主要损坏成因

结合本人多年一线仪表检修、故障排查、防雷整改经验，厂区仪表雷雨损坏并非偶然发生，每一类故障都对应明确的诱因，下面逐项详细分析。

1.1 直击雷直接损毁仪表设备

雷电直接击中露天安装的仪表本体、金属支架或保护箱体时，巨大雷电流瞬间流经仪表外壳与内部线路，瞬时高温与电冲击直接击穿电路板、传感元件。高处管架、空旷区域布设的就地仪表受直击雷威胁最为突出，缺少外置接闪防护构件时，雷击发生后设备损毁速度快、故障程度重，多数仪表失去修复价值。

多数老旧现场的就地仪表只做了简单固定安装，没有配套外置接闪杆、避雷带、局部接闪防护构件。一旦遭遇直击雷，强大的雷电流瞬间释放，产生的高温和高压电冲击会直接摧毁仪表内部结构。从现场检修情况来看，被直击雷命中的仪表基本都是整体报废，电路板烧穿、端子熔断、传感器失效，基本没有修复价值，只能整体更换设备，对生产和运维成本影响非常大。

1.2 感应过电压侵入造成仪表内伤

很多人以为只有打雷直接打到设备才会坏，实际上现场 90% 的雷雨仪表故障都是感应雷造成的。雷雨云层放电产生大范围交变电磁场，厂区所有架空信号电缆、金属管线、桥架钢结构都处在交变磁场范围内。电磁感应作用下，线缆两端会瞬间感应产生非常高的瞬时过电压，这种电压远远超出仪表弱电工作耐受范围，高压电顺着信号线从就地仪表一直延伸到中控卡件、IO 模块。这类雷击损伤最大的特点就是隐蔽性极强，属于典型“内伤”。很多仪表雷雨过后外观完好无损，没有烧黑、没有破损，但是内部芯片、精密电容、信号处理电路已经出现隐性损坏。设备不会立马瘫痪，而是在雷雨结束后的几天甚至几周内，陆续出现测量漂移、数据跳变、测量不准、通讯断续等疑难故障，检修人员很难第一时间定位雷击诱因，排查起来耗时耗力。

同时现场老旧装置的敷设工艺遗留的强弱电缆同槽、同桥架敷设问题，会进一步加剧感应电压传导风险。高压动力线路感应产生的浪涌电压，非常容易串入低压弱电仪表回路，造成批量仪表异常损坏。

1.3 地电位反击诱发回路大面积损坏

地电位反击是现场多台仪表批量同时损坏的核心原因，也是最容易被基层运维人员忽略的雷击故障点。雷电落地后巨大雷电流会快速向四周大地扩散，雷击点周边土壤电位会瞬间大幅抬升。这也是为什么现场经常出现“一个机柜、一条回路、一片装置仪表批量损坏”的现象，基本都是地电位反击导致。

1.4 原有接地系统施工缺陷放大雷击风险

早期老旧化工建设项目仪表接地施工标准偏低、管控松，存在大量遗留缺陷，这些遗留问题直接放大了雷击损坏仪表的风险。普遍存在接地极埋设深度不足、接地干线线径选型偏小、接地搭接不规范、接地焊点虚焊、常年锈蚀等问题。仪表系统接地电阻（工频接地电阻）：一般要求 $\leq 4\Omega$ 。当仪表系统独立设置接地体，或厂区电气系统接地网电阻较大、仪表制造厂有特殊要求时，独立接地电阻应 $\leq 4\Omega$ 。共用接地（联合接地）情况：当仪表防雷接地（如电涌保护器 SPD 接地）与仪表工作接地、保护接地共用同一接地网时，接地电阻应满足共用接地网的最低要求，通常要求 $\leq 1\Omega$ 。当仪表防雷接地独立设置接地系统时，要求 $\leq 10\Omega$ 。化工装置长年累月运行下来，接地回路导通性能持续下降，土壤受潮、接地极腐蚀之后接地电阻升高大于规范标准的要求电阻值，雷电流无法快速泄放入地。

1.5 仪表外壳密封不严进水短路

夏季雷雨天气降雨量大、持续时间久、伴随大风，露天仪表长期经受风吹雨淋。很多在用老旧仪表使用年限久、老化严重，仪表外壳密封胶条老化变形、接线口密封填料脱落、壳体缝隙闭合不严，同时部分防爆挠性管安装角度不合理、防水弯缺失，导致防水能力大幅下降。

雷雨天气时，雨水会顺着仪表接线口、壳体缝隙、管线接口等薄弱位置渗入设备内部。轻微情况造成仪表检测异常、间歇性故障，严重时直接导致仪表内部的短路、回路故障触发工艺波动，极端情况下甚至会触发联锁造成装置跳车，造成安全生产事故。

1.6 接地与屏蔽未正确接上遇到强电磁干扰

在日常巡检中发现，大量现场仪表存在屏蔽层未接地、接地位置错误、接地断线、虚接、脱落等问题。很多施工人员安装图省事，仪表屏蔽层直接悬空不处理，或者随意接在设备壳体、普通支架上，没有按照规范单点接地接入接地干线。

仪表弱电信号本身抗干扰能力极弱，在雷雨天气强电磁环境下，一旦屏蔽失效、接地不良，外界雷电电磁干扰、

厂区动力设备电磁辐射会直接耦合进入信号回路。长期受强电磁干扰影响,仪表信号持续波动、基线漂移,久而久之导致内部电路工作异常、寿命衰减,叠加雷电过电压冲击后,极易直接发生损坏故障。

2 现有仪表接地防雷常见短板

2.1 接地网布局零散,未形成统一等电位体系

这种零散布局最大的问题,就是无法实现全厂全域地电位均衡。雷雨天气雷击发生后,各个点位地电位落差极大,地电位反击问题反复出现。哪怕单台仪表接地电阻检测达标、单点接地合格,但是整体接地体系不统一,整体防雷效果依然不达标,无法抵御雷电冲击。

2.2 接地施工工艺不规范,导通性能劣化

早期现场接地施工普遍存在偷工减料、工艺简化的问题。很多接地干线搭接位置直接采用铁丝缠绕、螺丝压紧的简易方式代替标准焊接工艺,长期在户外潮湿、腐蚀环境下,接头位置极易氧化、锈蚀、松动,最后变成虚接、半断路状态。

埋地接地线长期埋在化工腐蚀性土壤中,常年受到酸碱介质、雨水浸泡侵蚀,极易锈蚀变薄、断裂失效。同时很多露天仪表没有独立专用接地支线,接地引线直接随意搭接在设备支架、管廊钢结构上,接地路径不规范、泄放通道不顺畅,雷电过电压无法快速导入大地,最终全部转嫁到仪表设备上造成损坏。

2.3 屏蔽与接地配合不合理

屏蔽线缆接地不规范是现场最普遍、最顽固的老问题。长期以来施工标准不统一,现场普遍出现仪表屏蔽线缆一端接地、两端同时接地、多点乱接地,甚至完全不接地的乱象。错误的屏蔽接地方案,不仅起不到屏蔽防雷、抗干扰的作用,反而会在屏蔽层位置形成闭合环形接地回路。在雷电交变磁场作用下,环形回路极易感应出环流电压、感应电流,反而大幅加剧仪表损坏概率。

另外现场强弱电缆长期混敷、桥架无隔离,部分线缆使用年限久,屏蔽层破损、脱落、开裂后没有及时修补更换,形成大量雷电感应入侵通道,让仪表长期处于高风险雷击干扰环境中。

3 仪表接地系统防雷优化关键技术

针对排查出的所有短板问题,结合化工现场可施工、可落地、不停产的原则,制定一套系统性接地防雷优化改造技术方案。

3.1 全域统一接地网改造优化

彻底打破原有分区域零散接地的老旧模式,全面整合厂区原有所有零散接地极、接地干线。采用热镀锌接地扁

钢,将装置区就地仪表接地、中控机柜专用接地、电气设备保护接地、构筑物防雷接地全部连通整合,构建全厂统一的联合接地网。针对厂区局部砂石土质、盐碱土质、高阻土壤区域,通过补埋接地极、添加降阻剂、土壤改性等方式降低整体接地电阻,保证整个接地网具备充足的雷电流泄放能力。

同时将全厂管廊金属构架、仪表箱壳体、就地设备金属外壳全部可靠接入统一联合接地网,真正实现全厂全域地电位基本一致,从根源上消除区域电位差,彻底杜绝地电位反击造成的批量仪表损坏问题。

3.2 规范接地施工工艺整改

对所有老旧、锈蚀、线径不足、变形破损的接地干线、接地支线全部统一更换升级。所有接地搭接、接头位置全部采用热熔焊接工艺,彻底摒弃传统缠绕、螺丝卡扣等简易连接方式,保证接头无虚接、无锈蚀、导通稳定。

3.3 优化屏蔽线缆接地方式

统一仪表屏蔽线缆接地标准,根据模拟量信号、开关量信号、通讯信号等的不同特性,严格区分单端接地、双端接地规范,杜绝随意多点接地、不接地、两端乱接地的现象。全厂重新规整电缆桥架布局,严格落实强弱电缆分槽、分层、分桥架敷设,桥架中间加装金属隔离挡板,有效隔绝高压电磁耦合干扰。对所有老旧、破损、开裂、损坏的线缆屏蔽层、防护套管逐一排查修补、更换,切断雷电感应电压的传导途径。

3.4 增设分级浪涌防护配套

采用分级防雷理念,在中控机柜总进线端、各分支回路端子柜、室外就地仪表接线箱内,分级配套安装信号浪涌保护器与电源浪涌保护器。严格区分电源回路、信号回路的防雷型号,做到分级配置、逐级泄放。所有浪涌保护器全部就近、短距离可靠接入接地主干线,保证雷电浪涌瞬时能量可以快速分级泄放入地,有效限制线路过电压幅值,最大限度保护后端仪表精密电子元件与中控卡件设备。

4 后期运维管控配套保障措施

防雷改造不是一次性工程,改造完成后必须依靠常态化运维管理维持效果。

4.1 建立周期性接地检测制度

严格按照季节特点建立专项巡检机制,每年雷雨季节来临之前,完成全厂仪表接地、防雷设施全面专项巡检。重点排查接地连接点锈蚀、引线松动脱落、浪涌保护器失效、屏蔽层破损、设备密封失效等隐患,发现问题立即闭环整改。

4.2 完善施工现场管理

重新梳理、细化厂区仪表安装施工防雷接地标准,新增、改造仪表项目必须同步完成防雷接地施工,将接地工艺、屏蔽工艺、防水防雷措施正式纳入设备竣工验收必查项,从新项目源头杜绝遗留不规范问题。定期组织仪表运维人员开展防雷接地专业培训,让班组人员牢固掌握防雷原理、规范施工、隐患排查、缺陷整改的实操技能,提升现场防雷管理水平。

5 结语

综合以上,雷雨天气化工仪表雷击损坏,是直击雷冲击、感应过电压侵入、地电位反击等多重物理因素叠加导致,而接地系统设置不科学、施工粗放、后期管理缺失,是故障高发的核心人为因素。

通过实施全厂全域联合接地网改造、标准化接地工艺整改、屏蔽系统规范优化、分级浪涌防护配置、外露设备接闪补强等一系列综合优化技术,可以系统性重构厂区仪表防雷防护体系,大幅降低雷电导致的仪表损坏概率。仪

表防雷改造不能只做单点修补、局部整改,必须立足接地网络整体性统筹优化,统筹前期硬件改造和后期常态化运行管控,长期保持防雷、接地、屏蔽设施完好有效。

随着工业自动化仪表设备的进一步更新、厂区生产环境持续变化,需结合现场实际工况持续优化防雷方案,不断完善仪表接地防雷管控,真正实现仪表设备全周期防雷安全保障,持续为化工企业安全生产、平稳运行保驾护航。

[参考文献]

- [1]周嘉健,徐黄飞,吕玉嫦,等.机外仪表在天气雷达年维护中的应用[J].气象水文海洋仪器,2021,38(4):95-96.
- [2]鲁力,刘晨宇.雷暴天气下的仪表进近航段航线规划研究[J].航空工程进展,2022,13(2):150-158.
- [3]陈杨.冰雪天气对仪表着陆系统下滑天线有效地面的影响[J].电子世界,2018,1(21):102.

作者简介:江明佳(1999—),毕业于西南石油大学机械设计制造及其自动化专业,主要研究方向为自动化仪表防雷优化。