石化行业提高储罐防雷安全的技术改进措施

马颖

中国石化工程建设有限公司

摘要：近年来原油储库、变电所等防雷等级要求高的场所由于接地网发生腐蚀、断裂等故障，遭受雷击引发火灾安全事故的情况日趋严重。针对此类安全事故隐患，开展雷击案例分析，提出合理、可靠的防护措施，结合防雷防静电接地电阻在线监测系统等科技措施，为原油储罐及变电所等场所的安全运行提供保障，也为防雷接地设计提供借鉴。

关键词：防雷接地电阻在线监测系统；储罐；检测；接地电阻

1　当前国内外石化安全生产形势

石油化工作为国民经济支柱行业，在我国国民经济中起着举足轻重的作用，多年来，为国家生产建设做出了很大贡献，但与此同时石化行业又是高危行业。近年来，多地发生多起油罐、输油管道等爆炸事故，造成多人伤亡。事故的发生和职业危害的侵害不但使企业蒙受了巨大的经济损失，也给受伤害者带来肉体和心理上的严重创伤，给社会带来不稳定因素。

随着全球气候变化的加剧和工业自动化程度的提高，雷电灾害发生的频率也逐年上升。由雷电引发的火灾、爆炸等事故造成了严重的财产损失和人员伤亡，雷电灾害已被列为 10 大自然灾害之一。原油储罐、大型变电所等均为高等级防火防爆场所其防雷接地措施要求严格，尤其是其防雷接地线的接地电阻必须符合要求，以备在遇到雷击时，安全地将雷电引入大地。

2　近年来国内储油罐雷击事故案例列举

1）1989 年某油库 5 号半地下储油罐被雷电击中着火爆炸，事故造成 40 名消防战士和 5 名油库职工牺牲，66 名官兵和 12 名油库职工受伤，烧毁油罐 5 座和 346 t 原油及配套设施，造成经济损失达几千万元。

2）1995 年 8 月 3 日某外浮顶金属原油罐遭受雷击着火，着火部位为罐壁与浮盘间 NW-SW 方向的 1/4 密封圈处。

3）2006 年 8 月 7 日某输油站 16# 容量为 15 万 m^3 原油储油罐罐顶遭雷击着火。

表 1　我国沿海某地区运行 5 ~ 10 年的储油罐进行地网开挖检查结果

主接地网腐蚀		接地引下线		电缆沟		垂直接地体	
平均腐蚀率	最严重的情况	平均腐蚀率	最严重的情况	平均腐蚀率	最严重的情况	平均腐蚀率	最严重的情况
60%	圆钢直径的 70%	58%	扁钢厚度的 68%	60%	扁钢厚度的 70%	65%	角钢厚度的 85%

图 1　电缆沟内接地腐蚀情况

图 2　被腐蚀 50% 以上的情况

图 3　运行 10 年的 ϕ 18 mm 圆钢直径仅剩 12 mm

4）2007 年 5 月 24 日某国家储备库 47 号 10 万 m^3 罐顶部遭雷击，雷击引发油罐一次或二次密封上的金属物与罐壁发生放电，电火花引爆了密封空间内的油气，高温和冲击波破坏了一次密封油气膈膜后引燃了原油；6 月 24 日 47 号罐再遭雷击起火。

5）2007 年 6 月 29 日某炼化企业 1 台容积为 5000 m^3 的内浮顶石脑油罐遭雷击，雷击引爆油罐呼吸口挥发油气，并进一步引爆储油罐内浮盘上方轻质油气与空气的混合物，爆炸瞬间炸开罐顶面积的 1/3，并导致内浮顶失稳，一侧陷入石脑油中，引发的油罐内部大火持续燃烧 20 min 后被扑灭。

3 检查结果

通过对我国沿海某地区运行 5 ~ 10 年的储油罐进行地网开挖检查如图 1 ~图 3 所示，其中水平地网开挖了 16 处，为总长度的 10%；垂直接地体检查为垂直接地体总数的 10%；引下线应为总引下线数量的 10%；网格搭接处、电缆沟长度均为各自总量的 10%。检查结果见表 1。

此外还存在其他缺陷：设备接地接触不良 4 处；设备未接地的 2 处；引下线与接地网连接超过 3 m 的有 10 处；水平地网埋深不足，小于 0.6 m 的有 10 处，共 100 m。

经数据统计，储油罐防雷接地工程中最容易发生腐蚀的部分为：接地网、接地引下线（地面以下）、接地引下线与地网焊接处等等，而接地工程作为储油罐预防雷击的重要组成部分，其接地电阻的检测作为衡量接地网运行状态的重要指标。

在快速准确地判断储油罐接地网的运行状态、发生腐蚀 / 断裂等故障点的具体位置等方面，单纯靠传统的人工测量手段，已经无法满足储油罐在此类安全隐患问题上的需要，本文将通过对防雷防静电接地电阻在线监测系统的剖析，对比传统接地电阻测量方法等，为储油罐在预防雷击、接地检测等安全生产问题上提供一种合理的、科学的解决方案。

表 2　国内外防雷防静电相关标准

地区	标准号	标准名称
北美	API RP 545—2009[4] API RP 2003—2008 NFPA 780—2008	易燃液体地上储罐的雷电防护推荐作法 防止静电、闪电和杂散电流引燃的措施
俄罗斯	Правила PA 153-39.4-078-01	储罐技术使用规则 干线石油管道储罐和石油供应站技术使用规则
中国	GB 15599—2009[5] GB 50183—2004 SY/T 6319—2016 GB 50074—2014 GB 50057—2010	石油与石油设施雷电安全规范 石油天然气工程设计防火规范 防止静电、闪电和杂散电流引燃的措施 石油库设计规范 建筑物防雷设计规范

表 3　各标准规范对接地电阻值的要求

序号	接地装置名称		接地电阻最大允许值 /Ω
1	35kV 变电所（高低压共用时）		4
2	6/10kV 装置电气室（高低压共用时）		4
3	单台运行容量为 100kVA 及以上变压器中性点接地		4
4	电气设备高低压共用接地装置		4
5	小电流接地系统电气设备高低压共用接地装置		10
6	1kV 以下重复接地		10
7	避雷接地	一类建筑物	10
		二类建筑物	10
		三类建筑物	30
8	防静电接地		100
9	油罐区接地		10
10	循环水冷却塔		30
11	钢筋混凝土烟囱		20

注：不同用途的接地共用一个总的接地装置时，其接地电阻值应符合其中最小值要求。

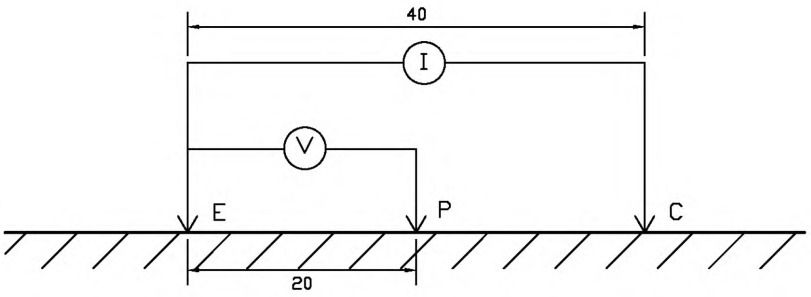

图 4　电压降法

国内外有关防雷防静电相关的规范标准见表 2，各标准规范对接地电阻值的要求见表 3。由此可见世界各个国家对安全生产问题的重视程度，因此，在这类防雷要求极高的场所，必须对防雷接地电阻进行经常性或连续性的检查和测量，以保证防雷接地的接地电阻低于安全要求阻值，进而保证防雷接地网的正常运行及储油罐的安全正常运行。

4 传统测量方法及优缺点

传统测量储油罐接地电阻的手段主要有电压降法和钳形法 2 种。

4.1 电压降法及其优缺点

电压降法是传统的测试方法，测试仪器分手摇式和数字式。测试仪发出

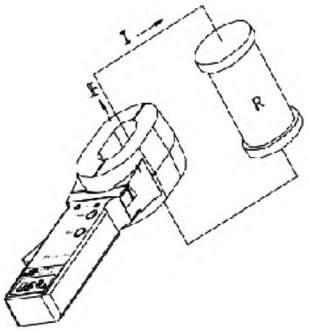

图 5　钳形法

的交流电沿着被测接地电阻、大地和电流极流动，接地电阻等 V/I，如图 4 所示。

C 是电流辅助电极，P 是电位辅助电极，两个辅助电极插入地下，分别用测试线与接地极和测试仪连接，只要辅助电极距离接地点 E 足够远，在直

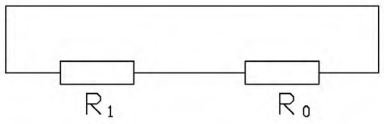

图 6　钳形法的测量原理

线布置时满足 E、P ＞ 20 cm，E、C ＞ 40 cm，就认为测量结果符合要求。

对于大型储油罐来说，运用电压降法的缺点是很突出的：储油罐附近往往都是混凝土地面或者为防火堤等障碍所隔，打辅助电极非常困难；由于电压降法测量的结果是接地网整体接地电阻值，因此必须将所测试的接地极引下线从断接卡处打开，测试完毕再恢复；安插辅助电极，打开然后再恢复引下线的螺栓，对于动辄数百，上千个接地点的油库来说，这样就使得测试接地电阻的工作极其繁重，且环境不易完全满足测试条件。当测试人员没有实际打开引下线，或辅助电极的放置位置、距离随意安排的时候，测试结果也就失去了可信度。

4.2　钳形法及优缺点

钳形法是接地电阻测试手段的一次革命。钳形测试仪分单口和双口两种，使用钳形法测试不需要打开接地极，直接将钳口套在引下线上就可测得数据，如图 5 所示。

钳形法的测量原理是测量回路电阻，其钳口部分由电压线圈和电流线圈组成，电压线圈提供激励信号，并在被测回路上感应一个电动势 E，在电动势 E 的作用下被测回路产生电流 I，从而根据 $R=E/I$ 得到被测接地电阻 R，其等效电路如图 6 所示。

测得的电阻实际为所测接地点对地电阻 R_1，和其他接地点对地电阻并联值 R_0 的和，当接地点足够多时，$R_1>>R_0$，此时 R_1+R_0 就可以看作是 R_1 的值。但所测接地点必须构成环路，因而对单点接地系统并不适用。

对于大型储油罐，钳形法有如下缺点：当接地引下线过宽，或者引下线紧贴罐壁，钳口卡不下时无法测量；在接地网电流较大时，会受到干扰，从而影响测试；在接地电阻值较大时，测试精度下降，一般表现显示的测试值偏大；钳形法在大型储油罐（接地点较多）测量时，其所测数据为估计值，并不是其测量点的真实值，存在一定的误差。而且，并不能快速准确地判断出故障所在位置。

4.3　小结

鉴于防雷接地系统对预防雷击灾害、保护储油罐安全的重要性，有必要清楚传统测量方法所带来的局限性，传统测量方法不仅耗时耗力，而且受人为因素的影响很大，此外传统测量方法也不能够准确快速地判断故障点所在位置，已经无法满足大型储油罐在防雷安全方面的需要。因此本文特别提出一种合理的、科学的解决方案（防雷防静电接地电阻在线监测系统），用以解决传统测量方法所带来的困扰。

5　防雷防静电接地电阻在线监测系统技术分析

针对传统测量方法存在的缺点，防雷防静电接地电阻在线监测系统在技术上进行了革新，针对大型储油罐的接地

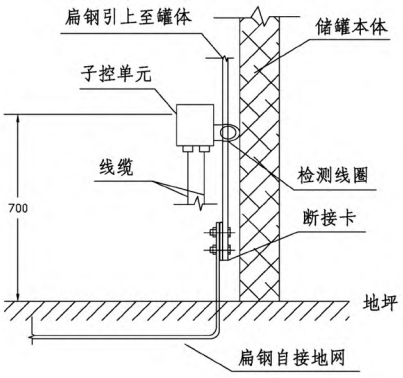

图 8　子控单元

网的运行状态可进行全天候的监控，确保储油罐区关键、重要设备、场所的安全运行。

5.1　系统介绍

防雷防静电接地电阻在线监测系统可以实时在线监测多路防雷接地线的接地电阻，通过对各接地电阻值进行整体复合计算，得出区域装置或油罐的整体电阻值。当某一路接地线的接地电阻超过设定的接地电阻值时，该报警系统即可进行报警并记录该信息，通知相关人员及时解决故障，从而有效地提高接

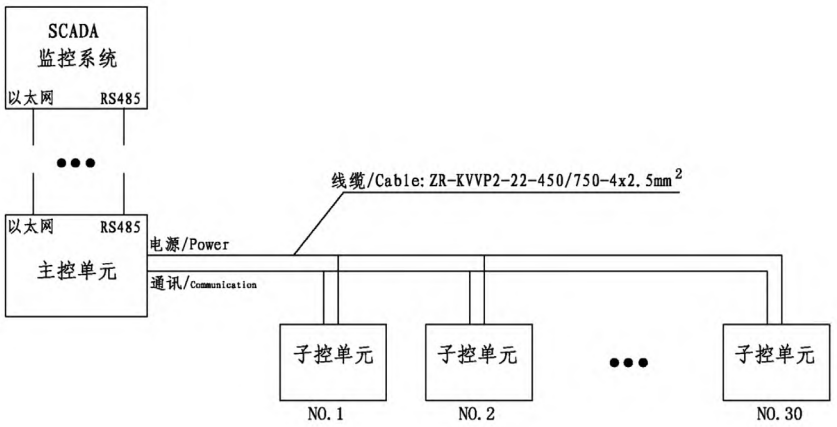

图 7　防雷防静电接地电阻在线监测系统

地线的可靠性，保证装置的抗雷击要求。

5.2 系统构成

防雷防静电接地电阻在线监测系统由 2 部分组成，包括主控单元和子控单元。在本系统中，主控单元通过控制电缆连接子控单元。主控单元本身具有显示、存储和报警功能，数据通过预留通讯接口（以太网 RJ45 或串口 RS485）上传给 SCADA 监控系统，系统构成如图 7 所示。

5.3 工作原理

5.3.1 子控单元

子控单元位于现场储油罐引下线上面，为数据检测执行机构，具体示意图如图 8 所示。

检测机构测量原理与钳形法测量原理一致，检测线圈提供激励信号，并在被测回路上感应一个电动势 E，在电动势 E 的作用下被测回路产生电流 I，从而根据 $R=E/I$ 得到被测回路接地电阻 R，R 等于测量点引下线对地电阻、其他引下线并联电阻以及接地网电阻的综合值。

5.3.2 主控单元

主控单元位于储油罐防火堤外围，为数据采集、分析、计算执行机构，要对储油罐各个接地点进行准确故障判断，测量出的综合值 R 就不能与钳形法一样进行估算，针对此问题的解决方案，特提出本系统的关键技术所在，利用各个检测点所采集的综合电阻值（包含 N 项未知数）形成 N 个方程的非线性方程组，求解 N 项方程式得到实际各个引下线的电阻数据，原理如图 9 所示。

5.4 技术优势

5.4.1 实时在线监控

传统人工测量方法存在一定的局限性：高温高压或易燃易爆的场所人不易进行人工测量、个别犄角处容易被忽视、正常运行的储油罐和装置不能进行测量等，防雷防静电接地电阻在线监测系统可全天候 24 h 实时在线监测所测量范围内接地电阻的运行状态。

5.4.2 准确判断故障点

在系统所测量的范围内，某一接地引下线发生腐蚀或断裂等安全隐患，系统可准确判断所在位置，告知运行人员及时处理故障问题。

5.4.3 历史数据可查询

在系统后台监控主机内，有历史数据库，历史曲线等运行轨迹可供用户查询，进行数据对比和分析。

5.4.4 提供报警信息

在系统后台主机可提供报警信息，主控单元可设置报警输出界限值（依据设计而定），另可提供报警输出干接点信号等。

5.4.5 测量精度高

在测量 1Ω 以下电阻值时，测量精度可达 3mΩ；在测量 1 ~ 100Ω 电阻值时，测量精度可达 ±0.6%。

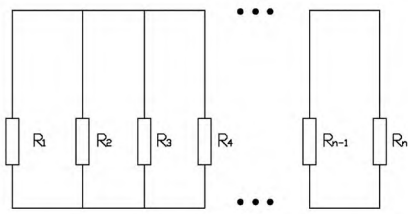

图 10 储油罐示意图

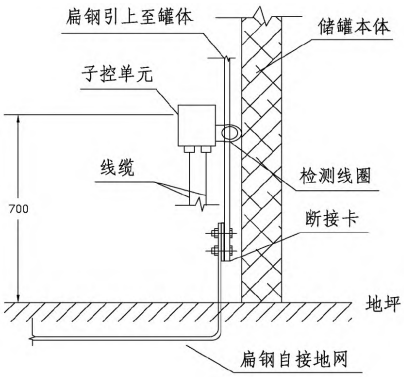

图 11 子控单元安装示意图

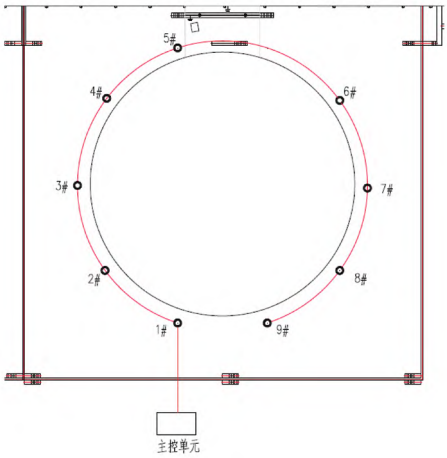

图 12 主控单元和子控单元现场分布

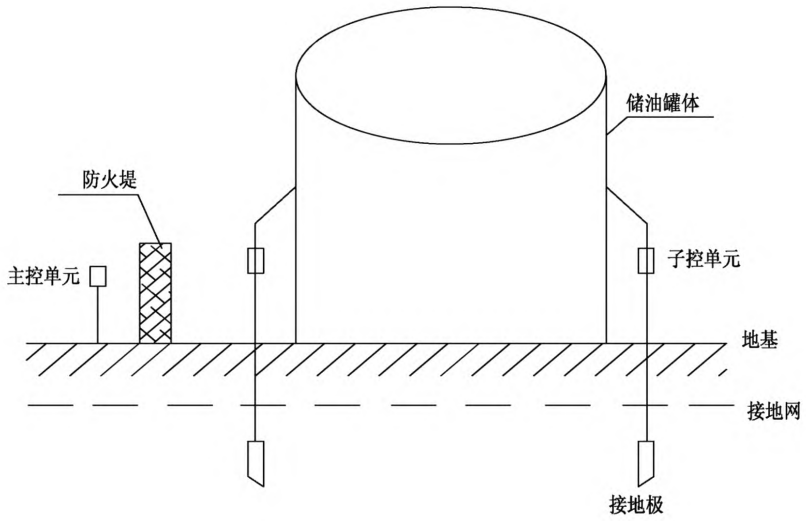

图 9 原理图

图 13 现场安装效果

表 4　测量数据

位号	电阻值 /Ω
P001	0.120
P002	0.109
P003	0.093
P004	0.082
P005	0.086
P006	0.060
P007	0.059
P008	0.090
P009	0.104

5.4.6　自身防护性能高

防爆等级：dIIBT4 、dIICT4；防护等级：IP55；抗雷电流冲击可达：100kA。大大提升现代化管理水平，所有测量数据均可通过主控单元上传全厂局域网内，方便日常监管。

6　实际案例应用分析

南方某沿海大型炼化一体化项目工程主要包括 100 万 t/a 乙烯和下游深加工 9 套化工装置，以及配套的公用工程、码头及储运设施等，接地电阻在线监测系统在该项目中进行了较广泛地应用，主要涵盖主要的变电站、装卸车区以及罐区等。防雷防静电接地电阻在线监测系统在乙烯低温罐中的应用，主控单元安装防火堤外围，子控单元安装在罐体接地引下线上（此罐体设 9 处接地引下线），实时在线检测接地电阻数据并上传给主控单元进行分析计算、存储等。相关安装和设计如图 10、图 11 所示，主控单元和子控单元现场分布如图 12 所示，现场安装效果如图 13 所示。

由测量数据可知，1# 储罐所有接地电阻值 R 均小于 4Ω，满足防雷设计规范关于接地电阻值要求，见表 4。当所测接地电阻值超过 4Ω 时，主控单元会发出报警信息，提示工作人员故障点位置，及时处理故障。全厂防雷接地监控系统未来的构想架构，如图 14 所示。

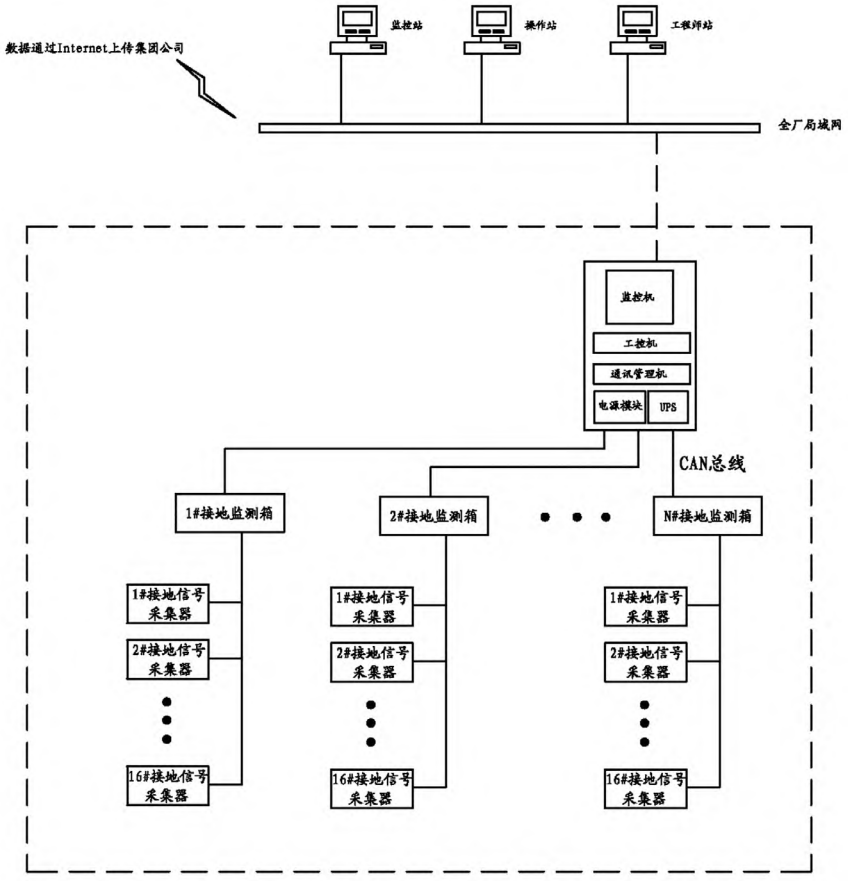

图 14　全厂防雷接地监控系统未来的构想架构

7　结语

对接地电阻的有效测量是保证防雷接地系统正常运行的重要组成部分，通过对防雷防静电接地电阻在线监测系统的技术特点以及实际应用案例的分析，与传统测量方法的对比，在不开挖接地网、不影响设备正常运行的情况下，实现了对接地网安全隐患及缺陷的快速准确诊断，极大地降低了遭受雷击事故的概率，对于提高储油罐整体防雷安全又迈进了坚实的一步。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局 . 建筑物防雷设计规范 : GB 50057—2010[S]. 北京 : 中国计划出版社 , 2010.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局 . 石油库设计规范 : GB 50074—2014[S]. 北京 : 中国计划出版社 , 2014.

[3] 中华人民共和国工业和信息化部 . 石油化工装置电力设计规范 : SH/T 3038—2017[S]. 北京 : 中国石化出版社 , 2017.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局 . 石油化工装置防雷设计规范 : GB 50650—2011（2022 年版）[S]. 北京 : 中国计划出版社 , 2022.

[5] 马宏达 . 防雷接地电阻的测量与实践经验 [J]. 建筑电气 , 1996(4): 16-18.

[6] 王龄 . 大型储油罐接地电阻测量方法 [J]. 石油化工安全环保技术 , 2010, 26(1): 29-37.

[7] 梁子斌 接地网接地电阻测量的原理、方法及意义 [EB/OL]. 原创力文档 , 2022-09-05[2025-05-05].

[8] 祝鹏 . 浅谈油库接地电阻值测量及接地装置的维护 [J]. 中国石油和化工标准与质量 , 2012, 32(11): 45-46.