

天然气输气管道系统雷电灾害综合防御的研究

邹德培¹, 陶学林¹, 王楚凤¹, 潘江萍²

¹邵阳市气象局, 湖南 邵阳

²益阳市气象局, 湖南 益阳

收稿日期: 2025年10月15日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月17日

摘要

随着城镇燃气管网规模的快速扩张,其雷电灾害脆弱性日益凸显。本研究聚焦天然气输配系统中的场站、阀室及埋地管线等关键设施,通过分析特定区域的历史闪电定位数据与雷灾案例,系统评估了现有防雷措施的效能。研究创新性地将闪电地闪密度、强度、陡度等多维参数融合,构建了精细化的雷电灾害风险评估模型,并据此提出了“分区、分级、重点防护”的综合防御策略。最终,研究成果转化形成了地方标准草案的核心技术内容,为提升城镇燃气系统的雷电灾害韧性提供了理论依据与工程实践指南。

关键词

天然气管道, 雷电灾害, 风险评估, 综合防御, 闪电定位数据

Research on Comprehensive Lightning Disaster Protection for Natural Gas Pipeline Transmission Systems

Depei Zou¹, Xuelin Tao¹, Chufeng Wang¹, Jiangping Pan²

¹Shaoyang Meteorological Bureau, Shaoyang Hunan

²Yiyang Meteorological Bureau, Yiyang Hunan

Received: October 15, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 17, 2025

Abstract

With the rapid expansion of urban gas pipeline networks, their vulnerability to lightning disasters has become increasingly prominent. This study focuses on key facilities within natural gas transmission and distribution systems, such as stations, valve chambers, and buried pipelines. By analyzing historical lightning location data and case studies of lightning disasters in specific regions, it

文章引用: 邹德培, 陶学林, 王楚凤, 潘江萍. 天然气输气管道系统雷电灾害综合防御的研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(6): 1080-1086. DOI: 10.12677/mse.2025.146127

systematically evaluates the effectiveness of existing lightning protection measures. Innovatively, the research integrates multiple lightning parameters—including ground flash density, intensity, and steepness—to develop a refined risk assessment model for lightning disasters. Based on this model, a comprehensive protection strategy of “Zoning, Grading, and Key Point Protection” is proposed. Ultimately, the research findings have been translated into the core technical content of a draft local standard, providing a theoretical basis and practical engineering guidance for enhancing the resilience of urban gas systems against lightning disasters.

Keywords

Natural Gas Pipeline, Lightning Disaster, Risk Assessment, Comprehensive Protection, Lightning Location Data

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城镇天然气系统是维系城市运转的“生命线”工程，其安全运行至关重要。然而，系统中大量的自控设备(如 SCADA 系统、场站仪表)与露天构筑物分布广泛，极易遭受直击雷与雷电电磁脉冲的侵害，可能导致供气中断、设备损毁，甚至引发次生灾害，对公共安全与能源保障构成严重威胁。

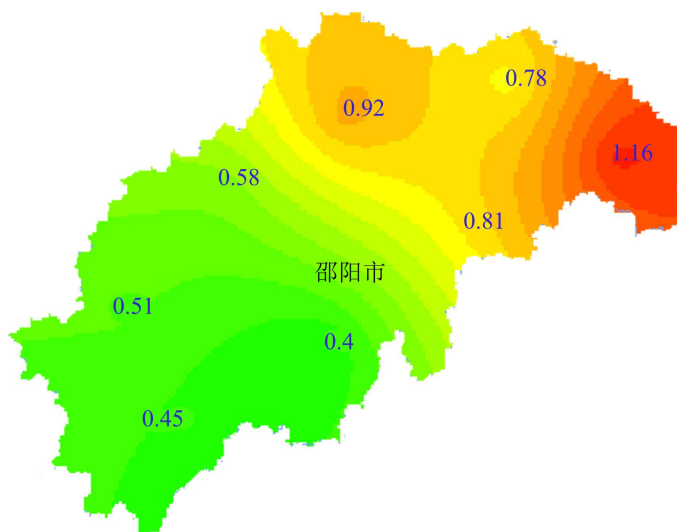
传统的防雷设计多依赖于年平均雷暴日这一单一宏观参数，虽具普适性，但难以精准反映区域雷电活动的时空异质性与致灾强度[1]。近年来，随着闪电定位系统的普及，基于地闪密度等参数的雷电风险评估方法逐步应用于电力、通信等领域[2] [3]。在燃气系统方面，张小俊等[4]强调了接地系统在防雷中的重要性；王巨丰等[5]对油气管道雷击风险进行了分析。然而，现有研究多侧重于单一防护措施或定性分析，缺乏一套融合多维度雷电参数、适用于天然气输配系统全链条的精细化风险评估方法与综合防御体系。

因此，本研究旨在填补这一空白。通过深入分析邵阳等地区高精度闪电定位数据，揭示区域雷电致灾因子特征；在此基础上，构建一套融合地闪密度、强度与陡度的雷电灾害风险评估数学模型；并以此为核心，建立一套涵盖“风险评估-工程防护-监测预警-管理维护”的“分区、分级、重点防护”综合防御体系，最终通过案例验证其有效性，为提升城镇燃气系统的雷电灾害综合防御能力提供科学、可操作的解决方案。

2. 天然气系统雷电灾害风险特性分析

2.1. 致灾因子特征

基于对邵阳及周边地区 2016~2020 年 ADTD 闪电定位系统数据的分析(见图 1)所示，本研究区域雷电活动呈现以下特征：负地闪占据主导地位，占比高达 93%；雷电流幅值主要集中分布于 20~40 kA 区间。一个需要重点关注的现象是，尽管正地闪发生频次较低(约占总地闪的 7%)，但其平均电流强度高达 63.45 kA，显著高于负地闪的平均强度(-44.10 kA)，表明正地闪虽少，但单次事件的破坏潜力更大。时间分布上，雷电活动呈现明显的双峰特征，主要集中在 3~4 月(春季峰)与 7~9 月(夏季峰)，这与区域内记录的雷灾事故高发期高度吻合。



数据来源：湖南省闪电定位监测网。处理方法：采用克里金插值法对五年累计地闪数据进行空间化处理，生成网格地闪密度图[6]。

Figure 1. Spatial distribution map of cloud-to-ground lightning density in Shaoyang region (2016~2020)
图 1. 邵阳区域地闪密度空间分布图(2016~2020)

2.2. 承灾体脆弱性

天然气系统的脆弱环节具有多样性：

场站与阀室：作为管网的核心节点，是防雷的重点区域。其内部密集布设的 SCADA 系统、PLC 控制器、压力/流量变送器等电子电气设备对雷电引发的过电压和电磁脉冲极为敏感。

埋地管道：传统观念中埋地管道受土壤保护，雷电流可能通过接地系统或土壤耦合侵入，对管道防腐层、阴极保护系统造成击穿或干扰，长期可能诱发腐蚀，甚至在雷电流泄放点因地电位升高而发生反击。

系统性风险：由于系统高度自动化，单一节点(如关键阀室)的雷击故障可能通过控制网络产生连锁效应，影响整个管网的运行调度与安全稳定性。

3. 雷电灾害风险评估模型构建

为克服传统雷暴日参数的局限性，本研究提出一种融合多维雷电参数的精细化风险评估模型。

3.1. 模型参数与数学表达式

风险评估指数(R)由地闪密度(N_g)、雷电流平均强度(I_{avg})和雷电流陡度(S)三个核心参数加权计算得出，其数学表达式如下：

$$R = w_1 \cdot N_g + w_2 \cdot I_{avg} + w_3 \cdot S$$

其中：

R ：雷电灾害风险指数，无量纲，值越大表示风险越高。

N_g ：地闪密度(单位：次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$)，物理意义为单位面积每年遭受的地闪次数，直接反映雷击概率。计算方法为统计期内总地闪次数与区域面积的比值。

I_{avg} ：雷电流平均强度(单位：kA)，物理意义为雷电流能量的表征，影响雷击点的热效应与机械效应。计算方法为统计期内所有地闪电流绝对值的平均值。

权重系数的确定采用层次分析法(AHP)结合专家咨询法。通过构造判断矩阵,邀请 10 位防雷与燃气领域专家对三个参数的相对重要性进行两两比较。一致性检验通过后,计算得出各参数的权重为: w_1 (地闪密度)=0.5, w_2 (平均强度)=0.3, w_3 (陡度)=0.2。此权重分配反映了雷击频率是风险的基础,而雷电流的强度和陡度则决定了灾害的严重程度[7]。

根据计算得到的风险指数(R), 将天然气管道沿线的雷电风险划分为三个等级, 以便于实施差异化防护:

中风险(Level 2): $R_{avg} - 0.5\sigma < R \leq R_{avg} + 0.5\sigma$ 。该区域需加强防护，如优化接地、增加 SPD 后备保护。

高风险(Level 3): $R > R_{avg} + 0.5\sigma$ 。该区域为重点防护区，必须采取最高等级的综合性防护措施，并作为监测预警的核心区域。

通过模型计算和图 1 数据得到如图 2 所示邵阳区域天然气输气管网沿线雷电风险区划图, 后续用于邵阳某一处案例分析。

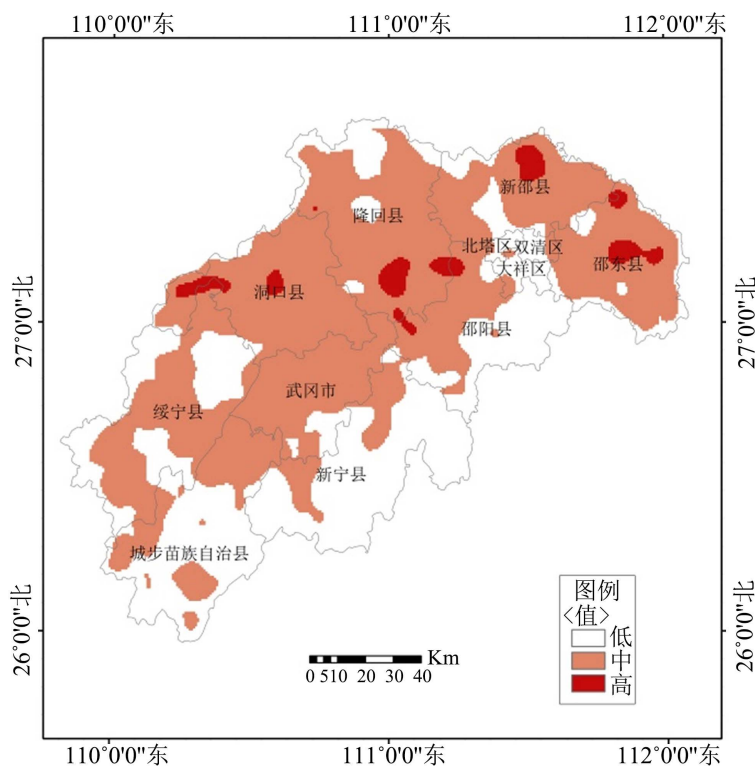


Figure 2. Lightning risk zoning map along the natural gas pipeline network in Shaoyang region
图 2. 邵阳区域天然气输气管网沿线雷电风险区划图

4. 综合防御体系构建与实践

基于前述风险评估结果,遵循“主动预防、系统防护、重点加强”的原则,构建以下五位一体的综合防御体系。

4.1. 外部直击雷防护系统

接闪器:在场站内高大建筑、放空管等位置安装避雷针、避雷带,形成有效接闪网络。对于图 2 中标识的高风险区阀室,可考虑增加提前放电式接闪器或优化避雷针布局。

引下线与接地系统:采用多根对称布置的引下线,并构建综合接地网。特别地,对于风险评估模型识别出的高强度雷电流区(高 I_{avg} 值区域),接地电阻值要求应更为严格,达到 $\leq 0.5 \Omega$ 。接地网应尽量采用环形接地体,降低跨步电压和接触电压,并与埋地管道的防腐系统进行等电位连接,防止电化学腐蚀和雷电反击。

4.2. 内部过电压(电涌)防护系统

这是保护控制系统的核心。按照雷电防护区(LPZ)概念,实施多级 SPD 防护。

第一级(LPZ 0~1 边界):在场站电源总配电柜入口处安装 I 级分类试验的电压开关型 SPD,泄放巨大的直击雷电流。

第二级(LPZ 1~2 边界):在机房配电箱或设备前端安装 II 级分类试验的电压限制型 SPD,进一步限制残压。

第三级(精细保护):在 SCADA 机柜、关键仪表(如压力变送器、流量计)的信号线、电源前端安装相应的信号 SPD 或精细保护级 SPD。尤其在雷电流陡度(S 值)较高的区域,应优先选择响应时间更快、箝位电压更低的 SPD 产品,以有效抵御快速的电磁脉冲冲击。

等电位连接:所有 SPD、设备金属外壳、电缆屏蔽层等均以最短路径与等电位连接带连接,消除电位差。

4.3. 雷电监测与预警系统

利用外部资源:接入国家及省级雷电监测预警网,获取区域雷电活动预报和实况信息。

建设本地系统:在风险评估确定的高风险场站(如图 2)安装大气电场仪,实时监测本地电场强度变化,实现提前 15~30 分钟的局地预警。

智能联动:预警信息可与 SCADA 系统联动,在雷暴来临前自动执行安全预案,如切换备用线路、加强安全巡检等。

4.4. 日常巡检与维护制度

定期检测:每年雷雨季节前,对全部防雷接地装置的接地电阻、SPD 状态进行检测和记录。检测周期可根据风险等级动态调整,高风险区每年两次,中低风险区每年一次。

防腐层检测:定期检测埋地管道的防腐层完整性,避免因防腐层破损在雷击时形成点蚀泄漏。

档案管理:建立完整的防雷设施档案,记录设计、施工、检测、维护的全生命周期信息。

4.5. 应急预案与演练

制定详细的雷电灾害专项应急预案,明确雷暴天气下的巡检、值守、处置流程。定期组织演练,确保在雷电导致系统故障或泄漏时,能够迅速、有效地启动应急响应,将损失和影响降至最低。

5. 案例验证与讨论

为验证本文所提模型与方法的有效性与其可操作性,选取邵阳县地区某一段长约 25 公里的天然气管段如图 3 所示,为选取案例阀室 C 竣工后详情(包含 1 座门站 A、2 个阀室 B 和 C,以及埋地管线)进行案例应用。



Figure 3. Valve chamber C on a Shaoyang natural gas pipeline segment
图 3. 邵阳某天然气管段阀室(阀室 C)

5.1. 风险评估应用

收集该管段周边 2016~2020 年闪电定位数据,代入 3.1 中构建的风险评估模型进行计算。结果显示:门站 A 区域地闪密度中等但雷电流强度偏高,综合评定为中风险(Level 2);阀室 B 位于地闪密度低值区,评为低风险(Level 1);阀室 C 地处丘陵地带,地闪密度、雷电流强度及陡度三项指标均显著高于周边,风险指数 R 远超阈值,评定为高风险(Level 3);沿线管线风险等级随空间分布变化,与风险区划图(图 2)吻合。

5.2. 防护设计对策

根据风险评估结果,实施差异化防护:

门站 A (中风险): 严格执行标准防雷设计,并在电源系统增加第二级 SPD 保护,对关键仪表信号线路加装信号 SPD。

阀室 B (低风险): 执行基本防雷配置,重点关注接地电阻的日常维护。

阀室 C (高风险):

外部防护: 增设独立避雷针,扩大保护范围;采用降阻剂等措施,将接地电阻严格控制在 0.5Ω 以下。

内部防护: 实施三级 SPD 防护,特别是在信号线入口使用高性能防浪涌保护器;加强机房的屏蔽措施。

监测预警: 在该阀室安装大气电场仪,并接入 SCADA 系统实现自动联动。

5.3. 讨论

通过本案例可以看出,本文提出的风险评估模型能够精细、量化地识别出管网系统中的雷电灾害高风险点,从而使防护资源的配置更具针对性和经济性。将风险评估结果与具体的工程防护、监测预警措施直接挂钩,形成了“数据驱动设计、风险指导防护”的闭环管理,显著提升了防御体系的科学性和效能。该方法为城镇燃气系统的雷电安全管理和标准制定提供了可复制、可推广的实践范例。

6. 结论

本研究通过深入分析天然气系统的雷电灾害机理,将先进的闪电监测数据与工程防护实践相结合,发展了一套涵盖“风险评估、工程防护、预警应急”的综合防御技术体系。核心创新在于构建了融合地闪密度、强度与陡度的多维雷电灾害风险评估模型,并明确了风险等级划分标准。基于该模型,文章系统构建了“分区、分级、重点防护”的五位一体综合防御体系,并通过案例研究验证了其有效性与可操作性。该体系通过地方标准的形式进行固化与推广,能够有效指导城镇天然气系统的防雷设计、检测与运维工作,显著提升其应对雷电灾害的韧性,为城市的公共安全与能源保障提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 林维勇. GB 50057-2010, 建筑物防雷设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- [2] 黄智慧. GB/T 21714-2015, 雷电防护[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [3] 张小俊, 李建国. 城市燃气系统防雷接地技术研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(8): 38-42.
- [4] 梅卫群, 江燕如. 建筑防雷工程与设计[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [5] 王巨丰, 等. 油气管道雷击风险分析及防护措施研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(S1): 45-50.
- [6] 邹德培, 潘江萍, 杨玲. 基于闪电定位数据的雷电灾害风险及防御对策研究[J]. 科技创新导报, 2021, 18(22): 46-50.
- [7] 王佩, 宋楠, 邹德培. 基于雷电流幅值分级的地闪时空特征研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(22): 118-122.