

大跨度桥梁防雷检测关键技术与工程验证

杨春明, 曹 辉, 陈晓伟

(马鞍山市气象局, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 为解决大跨度桥梁防雷检测中的技术难点与工程实施问题, 科学优化防雷减灾方案, 利用某跨江悬索桥2019—2024年的运营数据, 基于理论建模、实测对比和工程验证等方法, 开展钢筋分流系数动态计算、索塔侧击雷分场景防护设计、三极夹角法接地电阻测量优化等技术研究。结果表明: 索塔侧击雷防护采用非垂直索面几何建模, 在23.8 m高度以上部分, 每隔10 m布设水平接闪带, 形成立体防护网络; 相较于传统直线法, 三极夹角法的测量效率提升3倍, 在复杂的地质条件下, 接地电阻误差从15.6%降至9.2%; 当多层级等电位连接与SPD分级防护架构协同实施后, 桥梁年均维护成本降低25%, 验证了该技术的工程实用性。当前研究聚焦大跨度桥梁防雷检测关键技术优化与工程验证, 未来可融合物联网技术, 在桥塔、缆索等关键部位布设智能传感器, 实现雷击数据实时采集与风险预警。

关键词: 大跨度桥梁; 防雷检测; 三极夹角法; 侧击雷防护; 工程验证

中图分类号: U443.7; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0285-05

Key Technologies and Engineering Verification of Lightning Protection Detection for Long-span Bridges

YANG Chunming, CAO Hui, CHEN Xiaowei

(Maanshan Meteorological Bureau, Maanshan 243000, China)

Abstract: In order to solve the technical difficulties and engineering implementation problems in lightning protection detection of large-span bridges, the lightning protection and disaster reduction scheme is scientifically optimized. By utilizing the operation data of a cross-river suspension bridge from 2019 to 2024, and based on the methods of theoretical modeling, actual measurement comparison and engineering verification, the research is conducted on the technologies such as dynamic calculation of steel bar diversion coefficient, protection design of cable pylon side-striking lightning scene, and optimization of grounding resistance measurement by three-pole angle method. The results show that the non-vertical cable plane geometric modeling is used for cable pylon side-strike lightning protection. For structures above 23.8 m in height, the horizontal lightning interception strips should be laid out every 10 m to form a three-dimensional protection network. The measurement efficiency of the three-pole angle method is three times higher than that of the traditional straight-line method. The grounding resistance error is reduced from 15.6% to 9.2% under the complex geological conditions. After the collaborative implementation of multi-level equipotential bonding and SPD hierarchical protection architecture, the average annual maintenance cost of the bridge is reduced by 25%, which verifies the engineering practicability of the technology. The current research focuses on the optimization and engineering verification of key technologies for lightning protection detection of long-span bridges. In the future, IoT technology can be integrated to deploy the intelligent sensors at key locations such as bridge pylons and cables, enabling the real-time collection of lightning strike data and risk early warning.

Keywords: long-span bridge; lightning protection detection; three-pole angle method; side-striking lightning protection; engineering verification

0 引言

雷电作为一种高能量、突发性强、致灾重的自然

灾害, 对交通基础设施构成了严峻的威胁^[1-4]。大跨度桥梁(如斜拉桥、悬索桥)通常跨越水陆交界的空旷地带, 其塔柱、缆索等主体结构暴露程度高, 防雷安全面临双重挑战。其一, 孤立高耸的结构易成为雷电直击的目标。历史案例显示, 雷击曾导致斜拉索保护层损坏、拉丝断裂, 甚至引发结构事故^[5-6]。其二, 桥梁内部集成了大量的电力、监控与通信设

收稿日期: 2025-12-06

基金项目: 安徽省气象局自主创新专项(AHQXZC202401);

马鞍山市科技计划项目(QX-2024-01)

作者简介: 杨春明(1974—), 男, 学士, 高级工程师, 从事雷电防护工作。

备,而复杂的缆索系统与电子设备集群,使得桥梁极易受到感应过电压的侵袭,进而导致设备损坏与系统瘫痪。

我国已颁布《桥梁防雷技术规范》(GB/T 31067—2014)、《大型桥梁防雷设计规范》(QX/T 330—2016)等一系列标准,为桥梁防雷提供了基础框架。在实践与研究中,郑键雄等^[7]针对斜拉索桥提出了“综合防雷”理念,强调外部与内部防雷的协同,以及施工与竣工检测的重要性,为防雷工程实施提供了系统性思路。然而,当前桥梁防雷仍面临3个方面的突出瓶颈:一是防雷分类与检测指标尚未统一,导致防雷工程实施中存在模糊地带;二是针对斜拉索、悬索等外露构件耐雷击性能的研究,仍缺乏科学、量化的评估方法;三是传统检测手段效率低、周期长,难以适应大跨度桥梁长周期、动态化的安全监测需求。尽管国内学者在雷暴电场仿真^[8]、雷电暂态特性^[9]、接地技术^[10-11]和防雷设计^[12-15]等方面已开展了诸多研究,但对大跨度桥梁防雷检测关键技术,尤其是钢筋分流计算、侧击雷防护范围精准界定、接地电阻高效测量等方面的系统性、创新性研究仍显不足。

为此,本文紧密结合现代防雷理论与工程实践,聚焦大跨度桥梁防雷检测中的核心难点,通过钢筋分流系数优化计算、索塔侧击雷保护范围精准建模、接地电阻测量方法改进等关键技术攻关,构建一套覆盖“首次检测—定期监测—风险预警”的全流程技术体系,并结合实际工程案例进行验证,以期为大跨度桥梁的雷电防护能力提升提供理论依据与技术支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究收集了2019—2024年某跨江悬索桥的运营数据,包括雷击事故记录、防雷检测报告、结构参数和环境监测数据等关键信息。

1.2 研究方法

本研究基于现代防雷理论,开展钢筋分流系数计算、索塔侧击雷防护建模、分层媒质接地电阻计算、等电位连接优化和SPD分级防护推导;分别对垂直和非垂直索面进行建模,分析侧击雷保护范围;对比传统三极直线法与三极夹角法的接地电阻测量效果。

2 大跨度桥梁防雷检测

2.1 检测类型

依据《建筑物防雷装置检测技术规范》(GB/T

21431—2023),大跨度桥梁防雷检测体系可划分为首次检测与定期检测2大类型,两者在检测流程、技术要点和周期设置上存在显著差异。

2.1.1 首次检测范畴

首次检测包含跟踪检测与投用后首次检测2种场景。跟踪检测是针对桥梁施工阶段的防雷装置开展的分阶段过程性检测,涵盖布局设计、材料选型、系统布线、安装工艺和电气导通性(过渡电阻)等关键环节。通过全程介入施工流程,从源头把控防雷工程质量,确保各环节参数符合设计标准。投用后首次检测指桥梁正式投入使用后的首次全面检测,需严格依照设计文件逐项核查,检测内容覆盖接闪器、引下线、接地装置、等电位连接和过电压保护等全系统要素,旨在建立初始状态数据库,为后续周期性监测提供基准参照。

2.1.2 定期检测机制

定期检测以周期性评估为核心。检测前需详细查阅历史检测记录,并对现场防雷装置进行踏勘,确认其物理状态和拓扑结构是否发生变更。若接闪器无结构变更,可免于重新计算保护范围;若发生几何参数调整或布局改变,则需依据现行标准重新核算保护范围。对于隐蔽工程的变更,需采取导电性能测试,以进行深度验证。其他检测项目(如接地电阻、等电位连接有效性)无论是否发生变更,均需按规范周期实施检测。在常规环境下,检测周期不超过12个月;对于地处雷电多发区或有雷击史的桥梁,检测周期缩短至6个月以内;在强雷电活动区域,需实施动态随检机制,重点关注雷雨季节前后防雷装置性能的变化,尤其需排查接闪器因雷击导致的熔断、烧蚀等显性损伤。通过“过程控制—初始评估—周期监测”的闭环设计,实现对大跨度桥梁防雷装置全周期的精准管控,有效提升桥梁雷电防护的科学性与时效性。

2.2 首次检测关键技术要点

2.2.1 钢筋分流系数优化计算

在利用桥墩基础钢筋网构建接地系统时,需重点关注距离地面0.5 m以下区域的引下线连接的钢筋截面积大小,要求每根引下线连接的钢筋表面积应满足 $S \geq 4.24 k_c^2$ 。根据规范要求,单根引下线的钢筋分流系数 k_c 取1.0;当采用2根及以上引下线,或接闪器呈非闭合多根布置时, k_c 取0.66;若为多根引下线,或接闪器构成闭合环路,则 k_c 取0.44。针对大跨度桥梁的特殊结构,由于其桥墩间距较大,可利用的

有效引下线数量相对不足,因此,推荐采用 $k_c=0.66$ 的取值方案,且对应的钢筋表面积需满足 $S \geq 1.85 \text{ m}^2$ 。在实际工程中,施工团队通过确保桥墩与承台主钢筋的焊接长度、同步开展施工过程检测等措施,保证接地体的截面积达标。若无法满足设计要求,应及时增设人工接地体,直至接地体的截面积符合标准。

2.2.2 索塔侧击雷保护范围建模

大跨度桥梁的悬索与斜拉索,除需防范直接雷击外,还需关注其侧击雷防护,后者是关键的技术难点。在防雷设计中,应在拉索外围设置专用接闪带,并确保其两端与预留等电位连接端子实现可靠电气贯通;同时,应配置伸缩补偿装置,以消除拉索形变产生的间隙,避免雷击电弧对保护层造成破坏。侧击雷保护范围计算应根据索面与桥面的相对角度分情况处理。一种是垂直索面场景,保护范围如图1所示,计算公式如下:

$$H = \sqrt{h_r^2 - (h_r - b)^2} + h \quad (1)$$

式中: H 为闪电侧击高度,m; h_r 为桥梁滚球半径,m,二类防雷建筑取45 m; b 为索面与桥面外侧灯杆的距离,或栏杆C、D点之间的宽度,m; h 为桥面外侧灯杆的高度,或栏杆B、C点之间的长度,m。如图1所示,A、B点为滚球与桥面灯杆(或栏杆)及索面的切点。

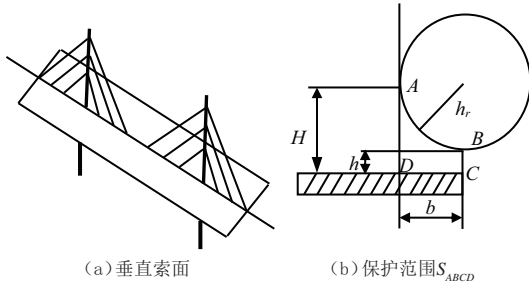


图1 垂直索面防侧击雷保护范围

另一种是非垂直索面场景,保护范围如图2所示,需引入索面倾斜角度 θ ,保护范围计算公式如下:

$$H = \sqrt{h_r^2 - \left[h_r - \sin(\pi - \theta - \arctan \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2} \right]^2} + \cos(\pi - \theta - \arctan \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2} \quad (2)$$

式中: H 为闪电侧击高度,m; h_r 为桥梁滚球半径,m,二类防雷建筑取45 m; θ 为桥面与索面夹角, $^\circ$; b 为索面与桥面外侧灯杆的距离,或栏杆C、D点之间的宽度,m,通常情况下,悬索桥吊索面的 b 值为0,斜拉桥斜拉索面的 b 值既可为0,也可不为0; h 为桥面外侧灯杆的高度,或栏杆B、C点之间的长度,m。当

桥塔高度超过侧击雷高度时,需自该高度起,每隔10 m沿塔周设置水平接闪带,形成立体防护体系。如图2所示,A、B点为滚球与桥面灯杆(或栏杆)及索面的切点。

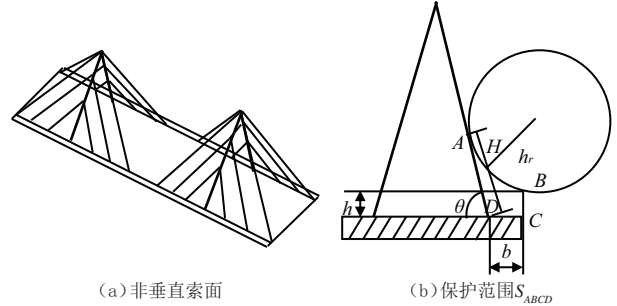


图2 非垂直索面防侧击雷保护范围

2.2.3 接地电阻测量方法改进

传统三极直线法要求电压极、电流极与被测接地装置呈直线布置,且间距需达到 $4 \sim 5 D$ (D 为检测对象最大对角线长度)。当桥址区存在沥青、水泥路面、岩石层等复杂的地质条件时,长距离布线需进行土方开挖或电极深埋,施工难度大且耗时耗力。同时,长距离布线易受地下金属管道、杂散电流干扰,尤其是在桥梁附属设施密集区域,测量值可能偏离真实接地电阻值。

该方法假设土壤为均匀媒质,但实际桥址区的土壤常存在电阻率梯度变化(如岩石层与黏土层交界处)。当土壤分层时,雷电流散流路径畸变,会导致测量值与真实值存在偏差。推荐采用三极夹角法优化测量流程,无需长距离布线,采用三角形回路布置,利用电磁感应互斥原理,可以减少外界金属结构造成的干扰。测量方法如图3所示,被测接地装置(E为桥墩,G为测试点)与电压极(P)、电流极(C)的布置距离要满足 $d_{GC}=d_{GP}=(4 \sim 5) D$,夹角 $\theta \approx 29^\circ$,在土壤不均匀区域,可缩短至 $d_{GC}=d_{GP}=2D$,因此,测量相对容易。

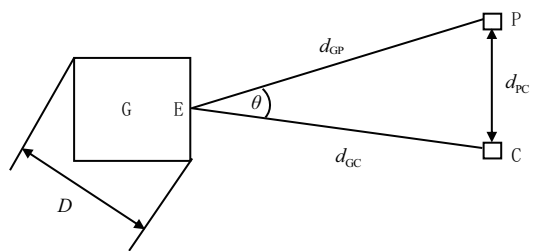


图3 三极夹角法测量桥墩接地电阻示意图

接地电阻 R_c 按公式(3)计算:

$$R_c = \frac{1}{2\pi L_r} \left[\rho_c \ln \frac{D}{d} + \rho \left(\ln \frac{8L_r}{D} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中: ρ 为混凝土外层媒质(如水体)电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ρ_c

为混凝土电阻率, $\Omega \cdot m$; L 为垂直接地极的长度, m ; d 为接地导体的直径, m ; D 为混凝土外壳的直径, m 。

2.2.4 等电位连接系统构建

由于大跨度桥梁具备接地引线长、阻抗高的特点,防雷设计需构建多层级等电位连接网络。一是纵向连接。在箱梁横向两侧顶板上层的钢筋,须每隔 30 m 引出热镀锌扁钢或圆钢(截面积 $\geq 100 \text{ mm}^2$, 长度 $\geq 100 \text{ mm}$),与桥面等电位连接带可靠焊接。二是横向连接。桥面两侧每隔 25 m 设置等电位连接点,同步实施防撞护栏、金属栏杆等纵向金属构件跨接,同时,确保悬索桥吊杆金属套管上、下端与桥面防雷装置电气连通。在管线防护上,电力、信号线缆、电缆桥架及金属屏蔽管每隔 30 m 进行电位均衡;多功能杆、监控设备接地装置与共用接地网的间距不大于 20 m 时,需直接连接,大于 20 m 时,需独立设置;等电位连接带须满足铜材截面积 $\geq 50 \text{ mm}^2$ 、钢材截面积 $\geq 100 \text{ mm}^2$,不达标者需重新处理。相关研究表明,通过优化等电位连接点布置密度与导体选型,可进一步降低电位差引发的雷击风险。这种方法尤其适用于解决大跨度桥梁长距离传导导致的电位不均衡问题^[16]。

2.2.5 过电压分级保护技术

为防范雷电过电压对桥梁电子系统的损害,桥梁可实施多级 SPD(电涌保护器)防护架构。

桥梁低压配电线路,在电源引入的总配电箱处,应装设 I 类试验的 SPD,其电压保护水平值应满足 $U_p \leq 2.5 \text{ kV}$;在配电线路配电箱、电子设备机房配电箱等处,应装设 II 类或 III 类试验的 SPD,作为后级保护;在靠近需要保护的设施处,应装设符合 II 类或 III 类试验的 SPD,其电压保护水平(U_p)值应小于被保护设备的绝缘耐冲击电压。检测中需重点核查多级保护的协调性及 SPD 选型匹配度,避免残压叠加或浪涌电流越级损坏设备。秦玉新等^[17]在南宁大桥的防护工程中实施了典型的两级电源 SPD 防护:在箱式变电站低压侧安装 65 kA 一级 SPD,在各照明系统配电箱处安装 40 kA 二级 SPD。该案例表明,针对桥梁不同系统(如道路照明、景观照明、检修照明)进行分级防护是有效且必要的。本研究在此基础上,将检测重点延伸至对多级 SPD 之间能量协调配合的验证,以及对 SPD 老化状态、标称放电电流(I_n)与电压保护水平(U_p)等关键参数的现场测试,形成了一套从设计符合性到运行有效性全覆盖的过电压防护检测流程。

2.3 定期检测关键技术要点

2.3.1 接闪器性能监测

接闪器是雷电防护的首道屏障,其定期检测需聚焦结构稳定性与电气连通性。检测内容包括:测量固定支架间距是否符合规范要求,单个支架应承受不小于 49 N 的垂直拉力;检查接闪器是否存在变形、机械损伤、断裂及锈蚀等缺陷;重点关注桥塔顶部外沿、桥塔横梁顶部外沿、斜拉桥最外缘斜拉索、悬索桥主缆等关键部位的明敷接闪器,采用导通测试仪,验证接闪器与引下线的电气连接可靠性,确保雷电拦截路径的连续性。

2.3.2 引下线系统评估

引下线的功能是构建接闪器与接地装置之间的雷电流泄放通道。检测要点包括:核查引下线布置的均匀性与对称性,要求沿塔柱、墩身和承台四周布设,平均间距不大于 18 m,若超出该间距,需在间距过大的桥墩两端增设 2 根引下线,并确认引下线的材料与规格,优先选用直径不小于 16 mm 的热镀锌圆钢或 50 mm $\times$ 4 mm 的热镀锌扁钢。检查结构钢筋的焊接质量,单桩引下线数量不得少于 4 根,且需与承台下层主筋形成可靠电气连接,以保障分流效率。

2.3.3 接地装置效能检测

接地装置以桥墩基础钢筋网为核心,检测重点包括接地电阻的精准测量与接地系统的完整性。接地电阻测量需根据接地网规模选择适配仪器:当地网面积小于 5 000 m^2 时,采用常规接地电阻测试仪;若地网面积超过 5 000 m^2 ,则需使用大地网测试仪,以提升测量的精度。评估基础钢筋焊接形成的闭合接地网的有效性,若实测电阻值不满足设计要求,需通过增设辅助地网等方式,优化接地性能;关注接地体与土壤(或水体)的接触状态,分析土壤电阻率变化对接地效能的影响,建立动态监测数据库。

2.3.4 电涌保护器(SPD)状态巡检

大跨度桥梁所处的高湿度、强风环境,易导致 SPD 性能劣化,定期检测可执行以下内容:通过外观检查、参数测试等手段,判断 SPD 是否出现老化、失效迹象;重点核查状态指示装置的预警信号(失效通常显示红色);对多次遭受雷击冲击的 SPD,需测量其标称放电电流(I_n)、电压保护水平(U_p)等关键参数,确认其是否仍满足设计阈值,一旦发现 SPD 劣化或失效,需及时更换,并记录更换前后的浪涌防护参数,确保过电压保护的连续性。

3 工程案例验证

3.1 工程概况与技术应用

3.1.1 工程概况

某跨江悬索桥作为典型的大跨度桥梁,具有雷暴活动频繁、结构复杂等特点,是验证防雷检测技术体系的理想案例。经现场踏勘与资料调研,该桥地处年平均雷暴日数 ≥ 40 d 的多雷暴区域,桥址区分布有水泥路面、岩石层等复杂地质条件。桥梁全长 6.3 km,主跨为 2.3 km,桥塔高 65.8 m,桥墩直径为 1.9 m。其接地系统参数如下:垂直接地极长度 $L=20.0$ m,直径 $d=0.022$ m,外层媒质(水体)电阻率 $\rho_1=35\ \Omega\cdot\text{m}$,混凝土电阻率 $\rho_2=280\ \Omega\cdot\text{m}$ 。桥面布置大量电子监测设备,加之桥体横跨水陆交界空旷地带,雷击风险显著高于常规建筑。

3.1.2 首次检测技术实施

在工程建设阶段的首次检测中,针对桥墩基础钢筋网,采用 $k_c=0.66$ 的分流系数进行计算,实测钢筋截面积为 $2.1\ \text{m}^2$,满足 $S\geq 1.85\ \text{m}^2$ 的设计要求。针对索塔侧击雷防护,因索面与桥面呈 60° 倾斜,采用非垂直索面场景建模。根据公式(2)计算保护范围($h_r=45\ \text{m}$, $\theta=60^\circ$, $h=12\ \text{m}$, $b=0.8\ \text{m}$),确定需在塔体高度 23.8 m 以上部分,每隔 10 m 设置水平接闪带,形成立体防护网络。对比接地电阻测量方法(见图 4),根据接地系统参数可知,传统三极直线法测得接地电阻为 $9.2\ \Omega$,改进的三极夹角法测得结果为 $9.9\ \Omega$,采用公式(3)得出的理论计算值为 $10.9\ \Omega$,表明三极夹角法将测量误差率从 15.6% 降低至 9.2%,同时,将单次测量时间从 6 h 缩短至 2 h,测量效率提升 3 倍。



图 4 某跨江悬索桥接地电阻现场检测实景

3.1.3 定期检测优化与成本效益

定期检测周期缩短至 6 个月(雷暴多发区),首次检测发现以下典型隐患:桥塔接闪带局部烧蚀并出现松动(清除烧蚀部位的氧化层及残渣后采用同材质焊接,更换承重 $\geq 49\ \text{N}$ 的不锈钢支架并重新校准位置);悬索桥主缆接闪网焊点断裂致过渡电阻超标

(清除氧化层后采用放热焊接修复,并测试导通性至 $\leq 0.2\ \Omega$);二级防护 SPD 状态指示器显示红色预警,且电压保护水平超标,升至 2.1 kV(更换同规格 II 类试验 SPD,并核查上、下级保护的协调性);桥面防撞护栏跨接导线断裂致过渡电阻超标,达到 $0.8\ \Omega$ (采用截面积 $\geq 100\ \text{mm}^2$ 的热镀锌扁钢跨接并焊接达标);悬索吊杆金属套管连接螺栓锈蚀松动(更换为不锈钢螺栓并涂抹导电膏,确保电气连通)等。通过全周期技术优化,桥梁年均防雷安全维护成本从传统方案的 80 万元降至 60 万元,降幅达 25%。

3.2 监测数据与效果分析

桥梁运营 6 年内,记录雷击事件 17 次(直接雷击桥塔 5 次、感应雷击桥面设备 12 次),因接闪器与 SPD 等防护体系有效运作,未发生设备损毁或人员伤亡事故,体现了良好的经济效益,验证了技术体系的工程有效性。

4 结 语

大跨度桥梁因其地理位置与结构特性,是雷电灾害的高风险载体。本文通过对防雷检测关键技术的系统性分析,得到以下结论。

(1)首次检测通过对钢筋分流系数动态调整、索塔立体防护范围的精准计算、接地电阻测量方法改进,以及等电位连接与过电压分级保护技术的协同应用,构建了适应桥梁复杂结构的初始检测关键技术,解决了传统方法在参数计算与现场实施中精度不足的问题。

(2)定期检测提出以接闪器完整性、引下线分流效率、接地装置长效性和 SPD 可靠性为核心的周期性评估框架,强调对高暴露区域(如桥塔顶部、斜拉索外缘)的重点监测,提出结合环境条件(雷电易发区检测周期缩短至 6 个月)动态调整检测频率,实现防雷装置全周期风险管控。

(3)工程案例表明,相较于传统方法,三极夹角法测量效率提升 3 倍,在复杂的地质条件下,接地电阻误差从 15.6% 降至 9.2%,年均维护成本降低 25%,验证了技术体系的工程适用性。

参考文献:

[1] 田德宝,冯瑜骅,张雪慧,等.2012—2017 年全国雷电灾害事故统计分析[J].科技通报,2020,36(1):42-47.
[2] 刘威,欧阳霖,项馨仪.2010—2022 年宁波镇海区雷电灾害特征分析[J].科技通报,2024,40(4):20-25.

(下转第 360 页)