第 52 卷 第 6 期：2940-2951 高电压技术 Vol.52, No.6: 2940-2951
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251022

人工触发闪电条件下通信线缆瞬态响应特性

雷小雨[1,2,3]，周　蜜[1,2,3]，段邓垒[1,2,3]，王建国[1,2,3]，蔡　力[1,2,3]，曹金鑫[1,2,3]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；2. 电网环境保护全国重点实验室，武汉 430072；
3. 雷电防护与接地技术教育部工程研究中心，武汉 430072）

摘　要：闪电释放的大电流及其辐射电磁脉冲是电力及通信设备故障甚至损坏的重要原因。线缆在雷电冲击中的耦合效应受其敷设高度、路径形态及与雷击点相对位置等多种因素影响，进而直接关系到系统的抗扰性能。因此，深入理解不同布设形式下埋地线缆的雷击瞬态响应规律具有重要意义。在广东雷州半岛的野外雷电试验基地搭建了钢结构试验平台，采用人工触发闪电技术，将雷电引至试验平台上方的引雷塔(直接雷击)及邻近变电站(邻近雷击)等不同位置，同步观测了分别布设于平台下方地面与平台表面的 22 m 长双屏蔽层六芯通信线缆的瞬态电压响应，以及闪电通道光辐射强度、雷电流、辐射电磁场等。分析结果表明，直接雷击情况下，在闪电回击阶段 2 类线缆电压均呈负极性主导的双极性波形，地面线缆电压峰值更高(0.77~1.09 kV)、上升时间更短(0.82~0.98 μs)，平台线缆电压衰减更慢。邻近雷击情况下，因雷电流散流方向改变，2 种线缆电压波形均发生极性逆转，峰值显著降低，且地面线缆同样电压峰值更高。相关性分析结果表明，线缆电压峰值与通道磁场及光辐射强度峰值均呈亚线性关系，线缆电压峰值与通道电流峰值、电流变化率峰值间均呈超线性关系。对于 2 种雷击位置，地电位抬升引起的电势差在线缆雷电瞬态响应中起主导作用，不同雷击位置主要通过改变散流路径来影响线缆电压的极性与强度。本研究为评估通信线缆在真实自然雷电环境中的瞬态响应提供了实验依据。

关键词：通信线缆；瞬态响应电压；雷击位置；线缆布设位置；人工触发闪电

Transient Response Characteristics of Communication Cables Under Artificially Triggered Lightning Strikes

LEI Xiaoyu[1,2,3], ZHOU Mi[1,2,3], DUAN Denglei[1,2,3], WANG Jianguo[1,2,3], CAI Li[1,2,3], CAO Jinxin[1,2,3]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China;
3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Lightning Protection and Grounding Technology, Wuhan 430072, China)

Abstract: Lightning-generated high currents and radiated electromagnetic pulses are major causes of communication cable malfunctions. The lightning coupling effects of cables are influenced by multiple factors, including the installation height, the routing configuration, and the relative position to the lightning strike point, which directly determine the interference immunity of system. Therefore, it is of great significance to understand the transient response of cables to lightning under different conditions. A steel platform with communication cables was built at the experiment site on Leizhou Peninsula, Guangdong Province, China. By using rocket-triggered lightning, strikes were triggered to various locations, including a launch tower above the platform (direct strike) and a nearby substation (close-up strike). Synchronous measurements captured transient responses of two 22-meter double-shielded six-core communication cables (one on the ground, the other on the platform) under different deployment and strike conditions, along with lightning channel luminosity, lighting current and radiated electromagnetic field signals. Results show that direct strikes induce bipolar voltage waveforms in both cables, dominated by negative peaks during the return-stroke stage. The ground cable exhibits higher peaks (0.77~1.09 kV) and shorter rise times (0.82~0.98 μs), while the platform cable shows slower attenuation. For the close-up strike, changes in lightning current dispersion reverse cable voltage polarity with reduced peaks, with the ground cable still having higher peaks. Correlation analysis reveals that, during return-stroke stages, cable voltage peaks have a sublinear relationship with magnetic field and luminosity peaks, and a superlinear relationship with lightning channel current peaks and current change rate peaks. For both direct and close-up strikes, the potential difference caused by ground potential rise dominates cable transient responses. Different strike locations affect the cable voltage polarity and intensity primarily by altering current dispersion paths. These findings provide experimental references for evaluating

the transient response of communication cables under actual lightning environments.

Key words：communication cable; transient response voltage; lightning strike location; cable layout location; artificially triggered lightning

0　引言

线缆作为电力系统二次回路、建筑设施以及交通运输工具(如飞机、船舶)中不可或缺的组成部分，在电能输送与信息通信中发挥着至关重要的作用。受限于不同应用场景的结构条件和功能需求，线缆的敷设方式呈现出多样性，可被埋设地下、铺设于地面，或架设于构筑物顶部等不同位置。然而，在雷电活动频繁的区域，这些线缆极易受到雷电效应的影响。雷电流直接作用或雷电通道释放的强电磁脉冲分别通过传导与感应等方式与线缆耦合，引发高幅值及不同持续时间的瞬态响应[1-2]。在极端条件下，这类瞬态过电压和浪涌电流可能导致通过线缆相连接的端口或设备受损，严重时甚至影响整个系统安全与稳定运行[3]。系统地研究雷击条件下线缆的瞬态响应规律，对于提升关键系统的电磁安全防护能力具有重要意义。

近年来，线缆系统雷击瞬态响应特性成为电磁兼容与高电压技术领域的重要研究方向。现有研究围绕多种影响因素展开，主要包括屏蔽方法[4-7]、终端负载[8-9]、运行状态与敷设环境(土壤电阻率)[10-12]等系统内部条件，以及雷电流波形参数[13-14]与多根线缆之间的电磁耦合[15-16]等外部激励条件。这些研究从不同角度揭示了雷电流及雷电电磁脉冲与线缆系统之间复杂的相互作用机制，推动了对雷击影响规律的深入理解。目前，相关研究多采用数值仿真或实验室条件下冲击电流注入试验等方法开展系统分析，虽取得了显著成果，但可能与实际雷击条件存在偏离。

在实际雷击情境下，部分线缆可能直接暴露于瞬态强电磁场中，形成高幅值感应电压，给信号完整性和抗扰设计带来挑战。空间结构因素还会显著影响雷电电磁场分布，例如当雷电通道与线缆分布于建筑物不同侧面时，建筑物结构可在一定程度上屏蔽雷电辐射场，减弱线缆所受电场强度及其感应电压响应[17-19]。此外，雷电流直接作用引发的地电位抬升会在地表及土壤中形成明显电势差，致使地面敷设或埋地线缆承受共模电压干扰，进而引发端口过电压甚至设备损坏[20-23]。这些复杂耦合机制相互交织，难以通过传统的数值仿真或实验室冲击注流手段全面再现。因此，为深入揭示通信线缆在实际雷击条件下的瞬态响应特性，亟需在真实或可控雷电环境中开展系统的现场试验研究，以获取具有代表性和工程指导意义的实测数据，并支撑后续模型构建与防护优化。

人工触发闪电技术为雷电瞬态响应及耦合效应研究提供了一种可控、可重复的实验手段，该技术通常采用火箭拖曳接地导线的方法，在雷暴条件下将导线迅速送入云地强电场区，诱发先导通道与云中电荷建立连接，进而触发闪电。相较于自然雷电观测的随机性与不可预测性[24-25]，人工触发闪电在时间与空间上具备高度可控性，便于多点布设与同步测量的系统试验设计。已有研究表明，人工触发闪电的回击过程在物理机制、电流波形和传播特征等方面与自然闪电的后续回击高度一致，具有较好的代表性[26-27]，因此，该技术常被用于模拟自然雷击场景，支撑雷电电磁环境、耦合路径及其对系统响应机制的深入研究。

目前，国内外已有学者利用人工触发雷电技术对线缆系统的雷电瞬态响应开展了相关研究，并取得一定进展[28-30]。然而，现有研究多集中于架空输电线路的雷电耦合行为[31-32]，而针对通信线缆在复杂耦合路径作用下的响应规律仍缺乏系统的实地观测与实证分析。此外，不同敷设方式(地面铺设、埋地敷设、屋顶敷设等)下，线缆系统在面对相同雷电源激励时的响应差异，其耦合路径、屏蔽性能及接地条件的影响机制尚不明确。上述问题直接关系到通信系统的雷电防护策略、线缆布线方案以及系统的安全性与可靠性设计。

为揭示通信线缆在真实雷击条件下的瞬态响应规律，本文搭建了一个配备共用接地网的钢结构平台，在平台表面及地面分别铺设了双屏蔽层六芯信号线缆。采用人工触发闪电技术，在平台附近引雷塔及变电站区域分别触发雷击，并同步采集雷电流、通道光辐射强度、近区电磁场及线缆端电压等多源数据。通过对比分析引雷塔与变电站 2 种雷击位置下平台线缆与地面线缆电压响应特征，揭示了线缆端部电压与光辐射强度及近区磁场间的定量关

系，进一步探讨了不同雷击位置对耦合机理的影响。

1 试验布置与数据概况

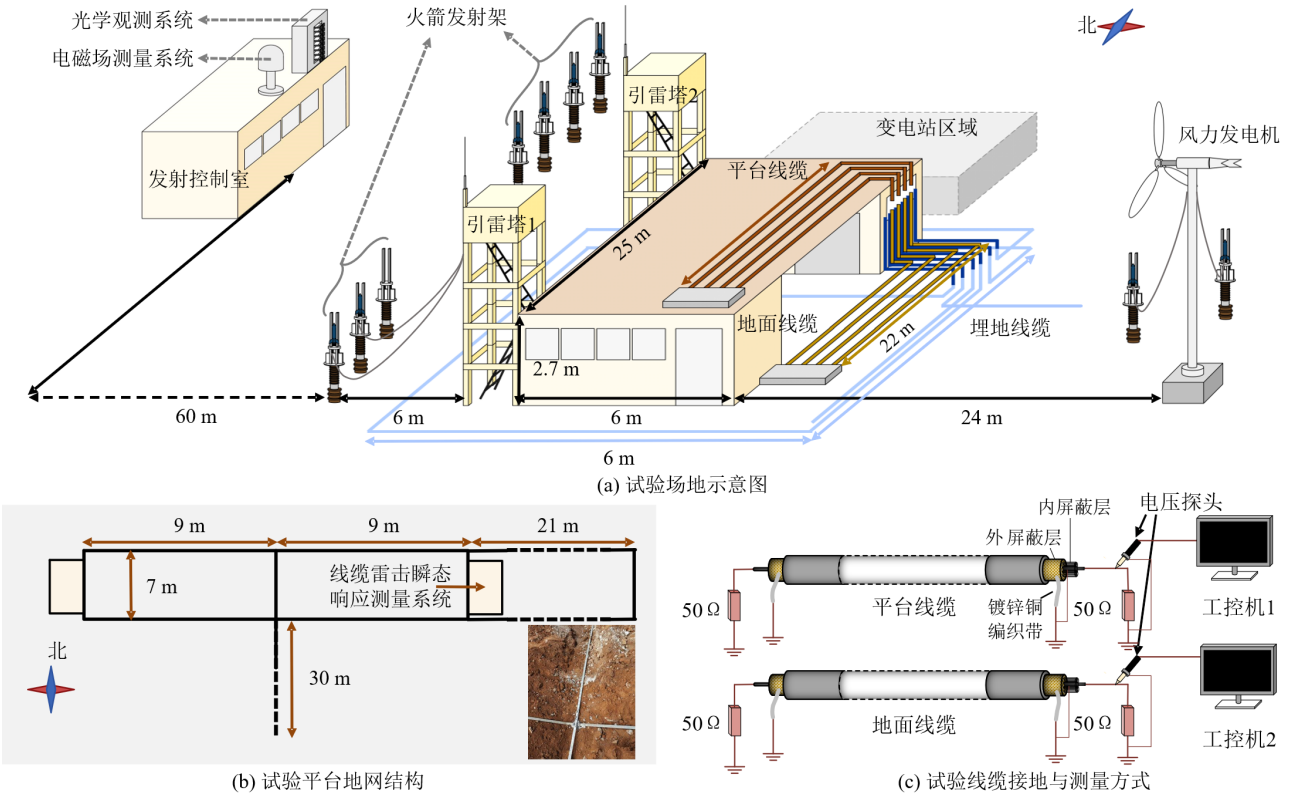
1.1 试验布置

本研究依托的野外雷电试验基地位于广东省湛江市雷州半岛，建成于 2022 年夏，主要用于开展人工引雷试验，研究雷电物理及效应机制、传播特性及对电力和通信系统的影响。开展本文报道的研究工作时，基地安装了 2 座引雷塔、1 个钢结构试验平台、1 座模拟变电站、1 架风力发电机、9 个火箭发射架及 1 个发射控制室等设施，如图 1(a)所示。

钢结构试验平台由钢材平板和钢支架制成，长 25 m、宽 6 m、高 2.7 m，其结构示意图见图 1(a)。平台下方埋设有由纵横交错的镀锌扁钢构成的公共接地网，埋深约 0.7 m，图 1(b)中的插图展示了接地网结构示意图。为研究通信线缆在雷击下的瞬态响应特性及其影响因素，在试验平台表面、平台侧面地面及地下分别布设了多种类型的线缆，分别称为平台线缆、地面线缆和埋地线缆。平台线缆和地面线缆由东向西直线铺设，长度约 22 m，一端接入试验平台东侧的测量舱室内，另一端接至西侧的端接匹配电阻箱(见图 1(a))。本文选取分别布设于平台和地面的双屏蔽六芯通信线缆作为研究对象。试验中，所有线缆两端的金属屏蔽层均就近接地(连接至接地网)，试验线缆的芯线两端通过 50 Ω 电阻接地，见图 1(c)，以模拟端口阻抗，该数值也与所用电缆的波阻抗接近。有研究采用人工向大地注入冲击电流的手段，分析过线缆不同终端处理方式对线缆电压测量结果的影响，具体见文献[33]。

平台底部东西两侧的测量舱室顶部以钢平板相连。线缆芯线电压是指该线缆一端芯线与地之间的电位差，使用带宽 DC~500 MHz 的 100 X 电压探头进行测量。信号经由电压探头传送至搭载了高速数据采集卡(采样率 10 MS/s、采样长度 2 s)的工控机进行采集存储。

平台旁边的 2 座引雷塔顶层各安装了一套型号为 1423 的 Pearson 电流传感器线圈，其带宽范围为 1 Hz~1.2 MHz，输出灵敏度为 0.001 V/A，最大测量电流为 500 kA。电流线圈以穿心方式安装于引流杆的引下线上，当雷击击中引雷塔时，雷电流将沿引流杆流过电流线圈，进一步沿引下通道流入接地网及覆盖其周围的土壤，并向四周及远处扩散。随着电流的变化，在电流线圈内产生变化的磁通，从而在传感器线圈中感应出与雷电流成比例的电压信



(a) 试验场地示意图

(b) 试验平台地网结构

(c) 试验线缆接地与测量方式

图 1 线缆雷击瞬态响应电压测量系统布置

Fig.1 Layout of the measurement system of cable transient response voltage under lightning strikes

号，该电压信号首先传输至 HBM ISOBE5600 光纤隔离测量与传输系统的发射端，转换为光信号后，通过光纤链路传输至发射控制室的接收端，再将光纤传输的光信号还原为电压信号，并输入至 Yokogawa 示波记录仪进行波形采集与数据存储。光纤作为非导电传输介质，天然具备电磁屏蔽能力，实现了雷击高压区与敏感测量设备之间的电气隔离。

钢结构试验平台北侧约 70 m 处设有发射控制室，其顶部布设了闪电通道光学观测系统和电磁场测量系统，用于同步记录闪电放电过程中的通道光辐射强度变化以及由雷电流激发的近区空间电磁场。电场测量采用带宽为 200 Hz~1 MHz、时间常数为 1 ms 的快天线；磁场测量使用以铁氧体芯为核心的磁场传感器，其 3 dB 带宽为 40 Hz~0.8 MHz。该传感器以直径 1 cm、长度 177 mm 的铁氧体棒为基体，外部均匀绕制环氧树脂绝缘铜漆包线。

光学观测系统设有 8 个观测通道，每个通道均由雪崩光电探测器、延长套管、中性密度滤光片、可调水平机械狭缝及相应连接组件构成。因雷电流通道发光光谱范围主要集中在红光敏感带和近红外敏感带，采用 2 种不同型号的光电探测器，其中红光敏感型光电探测器带宽为 DC~50 MHz，可测量光谱范围为 200~1 000 nm，响应峰值为 600 nm；近红外敏感型光电探测器带宽为 DC~50 MHz，可测量光谱范围为 400~1 000 nm，响应峰值为 800 nm。通过不同光学密度的滤光片，每个通道可将同一强度的光信号转换为不同强度的电压信号，单位为 V。本研究中的光学测量结果反映的是相对变化，并非绝对物理量[34-36]。基于光辐射强度信号进行定量分析的结果可作为参考，以辅助说明光辐射强度、磁场强度、线缆瞬态响应电压之间的关联，而非实际定量关系。

2023 年，在发射控制室内，采用 Yokogawa DL850E 示波记录仪，以 50 MS/s 采样率，2 s 采样长度采集闪电电流、电磁场和光辐射强度数据。2024 年，改用 Yokogawa DL950 进行记录，仅将通道光辐射强度的采样率调整为 10 MS/s，其余设置不变。

1.2　数据概况

2023 年与 2024 年夏季，广东雷州野外雷电试验基地共成功触发闪电 19 次。为分析雷击位置对线缆系统瞬态响应特性的影响，本文选取其中 7 次代表性闪电事件进行分析，依照时间顺序编号为闪电 1—闪电 7，相关记录情况见表 1。

表 1　触发闪电信息及各通道记录回击数统计

Table 1　Information of triggered lightning and counts of recorded return strokes for each channel

序号	时间	雷击位置	记录的回击数			
			雷电流	光信号	电磁场	线缆电压
1	2023-07-18T15:57	引雷塔 1	—	5	5	13
2	2023-07-18T16:05	引雷塔 1	—	9	9	11
3	2023-07-18T16:10	引雷塔 1	—	2	2	5
4	2023-07-18T18:00	变电站	—	1	1	1
5	2023-07-18T18:05	引雷塔 1	—	2	2	2
6	2023-07-18T18:54	引雷塔 1	—	1	1	1
7	2024-06-25T17:35	引雷塔 1	3	3	3	3

表 1 中，闪电 1—闪电 6 均触发于 2023-07-18，闪电 7 触发于 2024-06-25，尽管其发生环境与气象条件可能存在差异，但线缆系统布设、测量配置与 2023 年保持一致。2023 年的引雷试验中，由于测量雷电流的 HBM ISOBE5600 光纤隔离测量与传输系统接收端出现故障，导致雷电流数据异常，这一问题在 2024 年得到解决。在所选事件中，6 次闪电击中位于试验平台上方的引雷塔 1 顶端引流杆，该引流杆通过引下线连接至钢结构平台并接入接地网，此类事件定义为“直击触发闪电”。闪电 4 为唯一击中变电站区域的事件，定义为“邻近触发闪电”。

2　线缆电压波形特征分析与参数分布

2.1　直击闪电

图 2 展示了代表直击闪电的闪电 1 中通道光辐射强度、磁场、电场及线缆电压的同步变化波形。由图 2 可知，箭式先导阶段发光信号弱，未被识别；回击过程中光辐射强度显著增强，其波形可分为快速上升、快速下降和缓慢下降 3 个阶段。

回击阶段光辐射强度上升时间分布在 0.88~1.05 μs 之间，最大值为 2.22 μs。在回击的下降沿或回击间隔中，存在可使闪电通道光辐射局部增强的 M 分量过程，表现为叠加在光信号波形背景值上的脉冲波形。

如图 2 所示，在一次完整的回击过程中，虽然电场波形顶部出现饱和情况，但其波形整体呈“V”型，可划分为 2 个阶段。前一阶段电场向负极性增

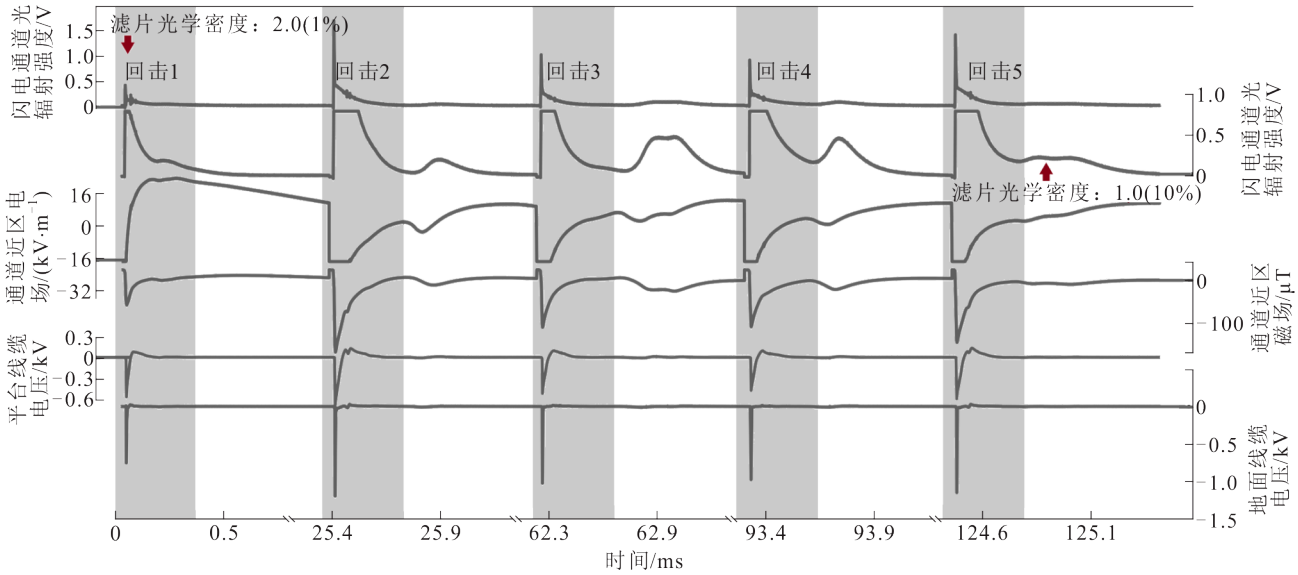


图 2 闪电 1 通道光辐射强度、电场、磁场及线缆电压同步波形

Fig.2 Synchronous waveforms of luminosity, electric field, magnetic field and cable voltage waveforms in flash 1

强，对应回击正式起始前的箭式先导过程；后一阶段电场向正极性增强，对应回击过程。通道磁场强度与光辐射强度均呈单极性特征。回击阶段磁场波形先迅速增强至峰值，随后经历衰减速度逐渐减缓的下降过程。相较于通道光辐射强度波形快、慢下降阶段间明显的衰减速度差异，磁场的下降过程中衰减速度的切换不明显。各次直击闪电的回击阶段磁场峰值总体分布在数十微特斯拉至数百微特斯拉之间，而磁场上升时间处于 5.40~6.20 μs 之间。图 2 下方 2 幅子图分别展示了闪电 1 的 5 个回击阶段的平台线缆电压和埋地线缆电压波形，大体上，线缆电压均呈负极性，且平台线缆的电压峰值整体上小于地面线缆。

图 3 为 2024 年闪电 7(含 3 次回击)中通道雷电流、光辐射强度、电磁场的同步测量波形，右侧为回击 2 中上述参量的同步放大波形。一次完整回击过程中，电流波形呈典型脉冲特征，以回击 2 为例，雷电流波形先经快速上升沿抵达峰值，再经快下降、慢下降 2 个阶段衰减至 0，且波形整体维持负极性。在 3 个回击中，雷电流的平均上升时间为 0.37 μs，半峰宽度为 20.40 μs，平均峰值为 4.48 kA。当雷电流幅值达到峰值时，闪电通道光辐射强度也达最大

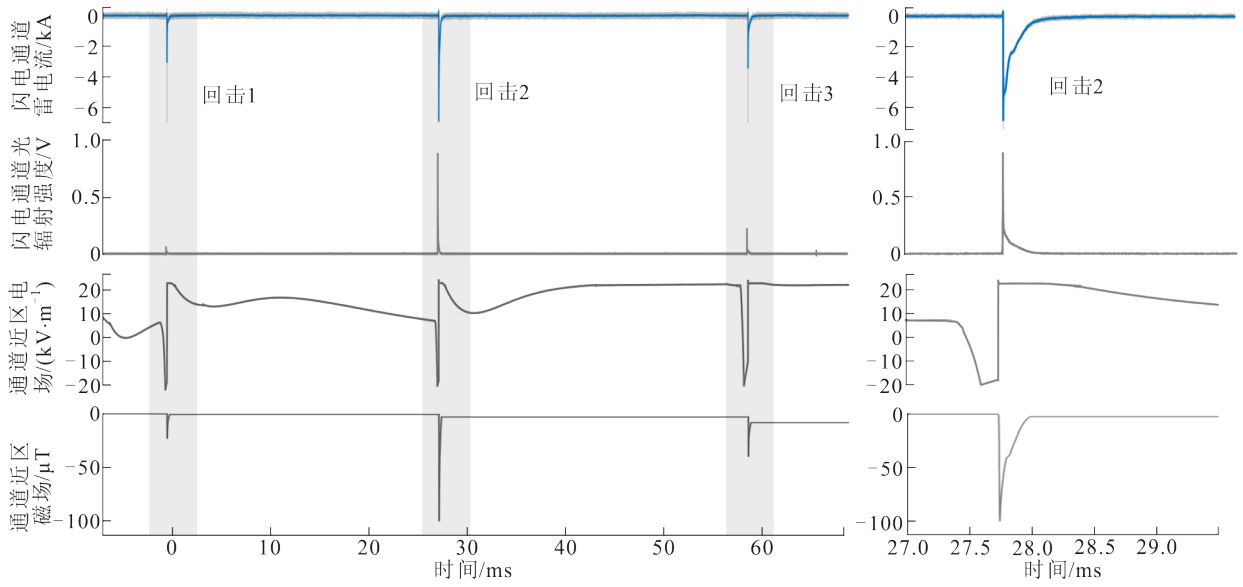


图 3 闪电 7 通道雷电流、光辐射强度、电场、磁场同步波形

Fig.3 Synchronous waveforms of lightning current, luminosity, electric field and magnetic field in flash 7

值，光辐射强度变化与雷电流几乎同步。电场波形同样与电流波形关联紧密，电场先朝负极性增强，继而向正极性增强。磁场变化与雷电流类似，先快速增强至负峰值，随后进入衰减过程。

为定量对比地面线缆与平台线缆在直击闪电下的瞬态特性差异，对各回击中的线缆电压波形参数进行统计分析。图 4(a)以闪电 1 中回击 1 的平台线缆电压为例，定义波形参数。将电压负峰值和正峰值分别定义为峰值(取绝对值)和反峰值，反峰值与峰值之间的百分比为反峰比。上升时间定义为电压达到 10%峰值点和 90%峰值点的时间，并计算上升阶段的最大变化率。半峰宽度定义为峰值两侧 50%峰值点的时间间隔。因 2 类线缆回击电压负极性部分更强，统计其负极性阶段持续时间为单极持续时间。此外，作用积分定义为电压波形的平方对时间的积分，积分起点为各回击起始时刻，积分长度取 1 ms。

如图 4(b)—图 4(d)所示，地面线缆电压峰值分布在 0.77~1.09 kV 之间，平台线缆电压峰值相对较低，分布范围为 0.40~0.56 kV。然而，地面线缆电压反峰值(0.01~0.03 kV)低于平台线缆(0.04~0.13 kV)，因此地面线缆电压反峰比明显小于平台线缆，二者的中位数分别为 1.81%和 18.4%。值得注意的是，图 4(d)表明 2 种布设方式的线缆电压反峰比中均存在 3 个明显较大的离散值，这 3 个值对应闪电 7 的 3 个回击。由于闪电 7 的回击强度较弱，线缆电压峰值明显小于其他直击闪电。此外，2024 年试验中土壤含水条件等因素可能改变，使闪电 7 回击中地面线缆和平台线缆反峰电压均增大。图 4(e)展示了线缆电压从 0 增大至峰值过程中的最大变化率，地面线缆的电压最大变化率范围为 1.74~2.50 kV/μs，平台线缆电压最大变化率较低，分布于 0.85~1.43 kV/μs 之间，表明平台线缆的电压上升沿略缓于地面线缆。

图 4(f)—图 4(h)为地面线缆与平台线缆的波形参数分布箱线图，通过对比得出，平台线缆电压上升时间、半峰宽度及持续时间均长于地面线缆。其中，地面线缆上升时间集中于 0.82~0.98 μs 之间，略高于平台线缆(1.13~1.35 μs)。此外，地面线缆电压上升更快，且峰值后衰减速度也更快，其整个负极性阶段高频成分均高于平台线缆。由图 4(i)中的电压作用积分分布可知，地面线缆和平台线缆电压的作用积分分布范围分别为 0.69~1.35 V^2·s 和 1.44~3.23 V^2·s。可见，在直击闪电回击过程中，地面线缆的电压虽瞬态响应强度更高，但其响应能量低于平台线缆。

2.2　邻近闪电

雷击变电站(闪电 4)可代表邻近闪电，仅含 1 次回击。由于示波记录仪与工控机存在记录时间差，定义回击起始时刻为时间零点进行校准，绘制校准

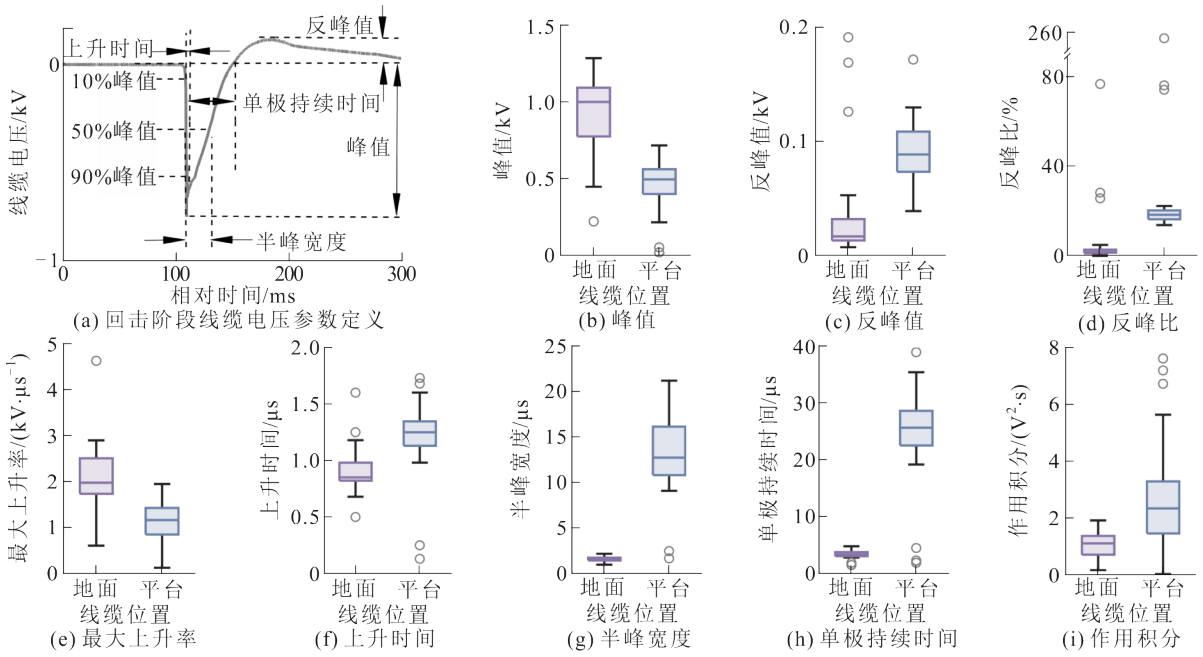
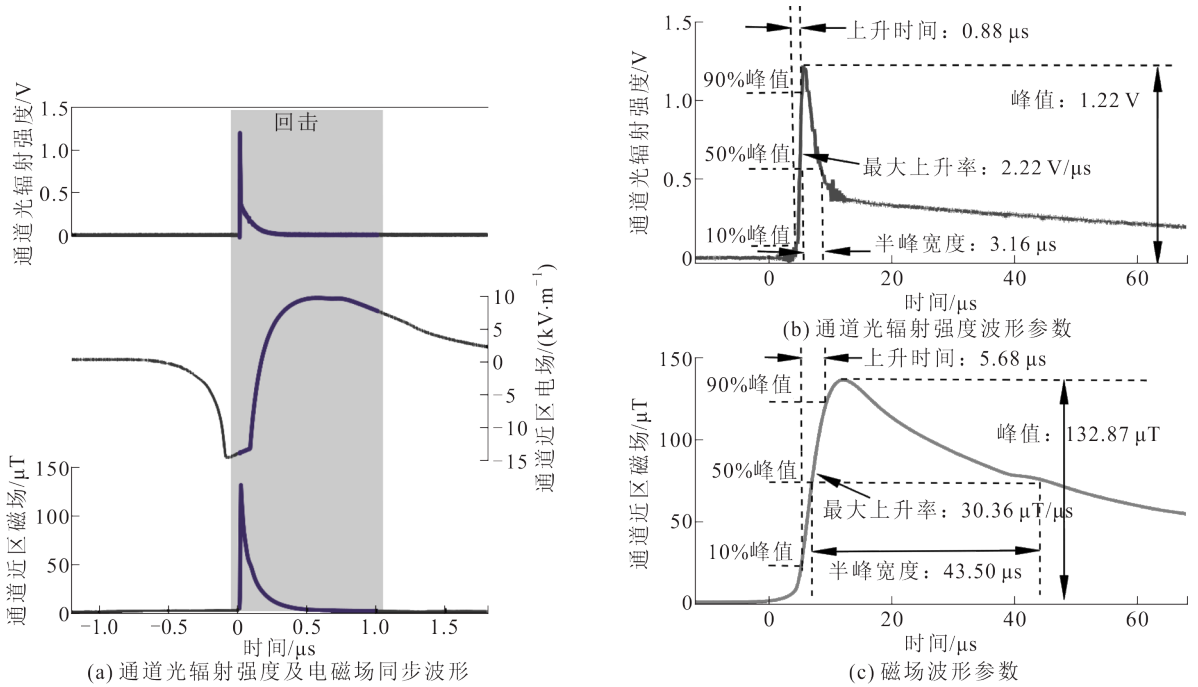


图 4　直击闪电中回击阶段平台线缆与地面线缆的电压波形参数定义及对比

Fig.4　Definition and comparsion of waveform parameters for platform cable and ground cable during return-stroke stages in direct lightning strikes

后回击过程中闪电通道的光辐射强度波形与通道近区电磁场同步波形，如图 5(a)所示。雷击变电站时回击过程的光、磁波形与直击闪电无显著差异，在到达峰值前均呈现快速上升沿，峰值后磁场波形衰减速度渐缓并最终归零，通道光辐射强度则呈现快、慢 2 个衰减阶段。闪电 4 电场波形出现饱和，从有效部分可推导出其具有先降后升“V”型特征的大致波形，对应闪电“箭式先导-回击”过程，与直击闪电回击阶段电场波形高度相似。

图 5(b)与图 5(c)分别展示了闪电 4 回击中光、磁信号的波形参数。通道光辐射强度峰值达 1.22 V，上升时间与半峰宽度分别为 0.88 μs 和 3.16 μs。光辐射强度最大上升率为 2.22 V/μs，经峰值归一化后为 1.82 V/μs。图 5(c)所统计的回击阶段磁场峰值、最大上升率、上升时间、半峰宽度分别为 132.87 μT、30.36 μT/μs、5.68 μs、43.50 μs。结果表明，闪电 4 的通道光辐射强度、磁场各波形参数与直击闪电相差不大，二者在通道光辐射特性及近区磁场特性方面无显著差异，放电过程及特性基本一致。



(a) 通道光辐射强度及电磁场同步波形　(b) 通道光辐射强度波形参数　(c) 磁场波形参数

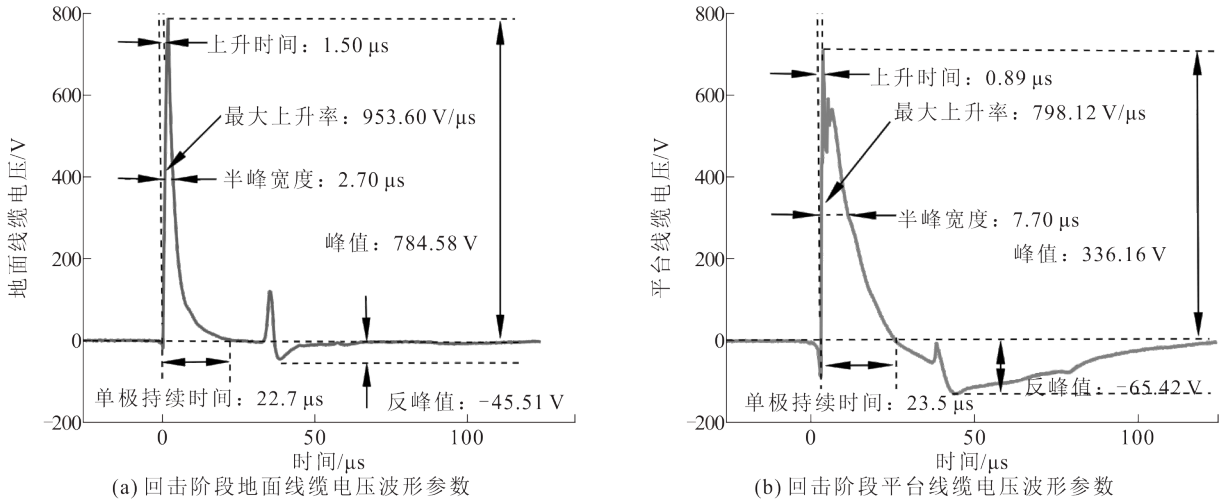
图 5　闪电 4(邻近闪电)中回击阶段光辐射强度、电场、磁场波形及波形参数计算

Fig.5　Waveforms and parameters of luminosity, electric field and magnetic field during return-stroke stage in flash 4 (close-up strike)

图 6(a)和图 6(b)分别展示了闪电 4 回击阶段地面线缆和平台线缆的电压波形。2 种布设位置下线缆电压波形主要呈正极性，起初经历一个小幅值负极性脉冲，随后迅速上升至正极性峰值再逐渐衰减。图 6(b)中，波形起初的负向脉冲可能是由回击前的箭式先导放电过程所导致的。由于电压极性翻转，将电压峰值定义为正极性峰值，反峰值定义为负极性峰值，单极持续时间定义为电压正极性阶段的持续时间，其余参数定义与图 4(a)一致。当雷击位置由引雷塔 1 变为变电站后，电压整体呈正极性。地面线缆峰值达 784.58 V，仍高于平台线缆；而地面线缆电压反峰值为 45.54 V，略低于平台线缆。地面线缆电压上升率为 953.60 V/μs，高于平台线缆(798.12 V/μs)。地面线缆和平台线缆的电压上升时间分别 1.50 μs 和 0.89 μs，与直击闪电下的电压上升时间差异较小。在闪电 4 中，回击阶段平台线缆的电压半峰宽度为 7.70 μs，虽仍长于地面线缆电压半峰宽度(2.70 μs)，但相较于直击闪电中平台线缆电压的半峰宽明显缩短。平台线缆电压单极持续时间为 23.5 μs，基本未超出直击闪电下平台线缆电压半峰宽范围；地面线缆电压的单极持续时间从直击闪电中的几微秒增长至 22.7 μs。此外，2 根线缆的电压作用积分分别为 1.25 V^2·s 和 0.68 V^2·s。

3　线缆雷击响应与通道辐射量相关性

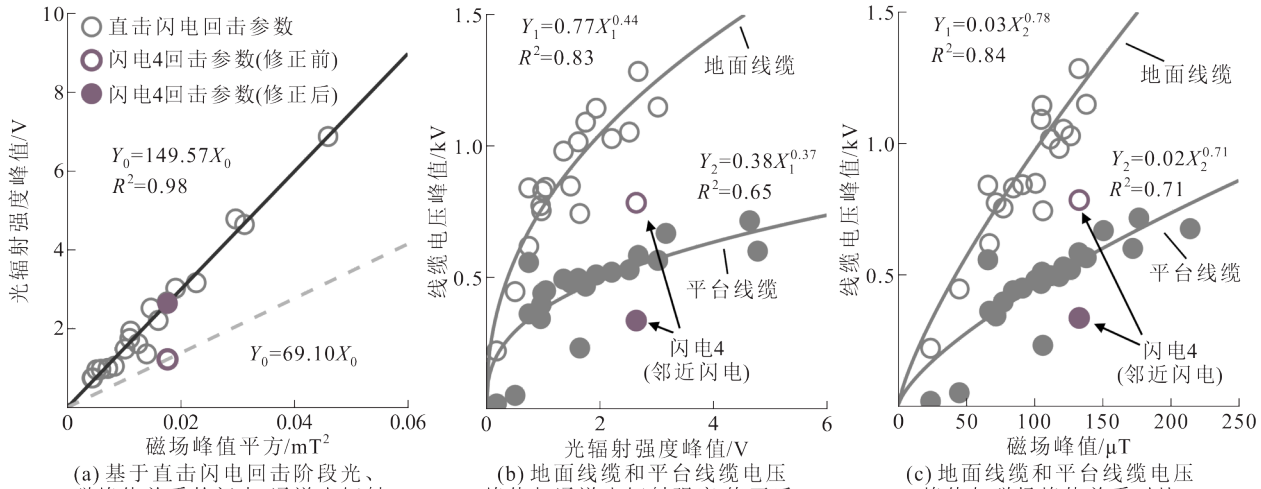
图 7(a)呈现了直击雷回击阶段通道光辐射强度



(a) 回击阶段地面线缆电压波形参数　(b) 回击阶段平台线缆电压波形参数

图 6　闪电 4(邻近闪电)中线缆的瞬态响应波形及波形参数计算

Fig.6　Transient response waveform and waveform parameter calculation of cable voltage during return-stroke stage in flash 4(close-up strike)



(a) 基于直击闪电回击阶段光、磁峰值关系的闪电4通道光辐射强度峰值修正　(b) 地面线缆和平台线缆电压峰值与通道光辐射强度(修正后)峰值关系对比　(c) 地面线缆和平台线缆电压峰值与磁场峰值关系对比

图 7　直击闪电和闪电 4(邻近闪电)回击阶段线缆电压峰值与光辐射强度峰值、磁场峰值的相关性对比

Fig.7　Comparison of correlations between peak cable voltage versus peak luminosity and peak magnetic field during return-stroke stage in direct lightning strike and flash 4(close-up strike)

与磁场的相关性分析结果。线性回归直线过原点时，拟合方程为 X_1=149.57X_0，式中 X_1 为光辐射强度峰值，X_0 为磁场峰值平方，拟合相关系数 R^2=0.98，这表明通道光辐射强度峰值与磁场峰值的平方成正比。基于此拟合关系对闪电 4(邻近雷击)的通道光辐射强度峰值进行修正。修正前，代表闪电 4 回击参数的带颜色环形散点在黑色拟合直线下方，其斜率为 69.10，表明闪电 4 中测量的通道光辐射强度受到更强削弱，需进行放大处理。因此，取图 7(a)中 2 条直线方程斜率比值(约为 2.16)作为闪电 4 通道光辐射强度的放大系数，将环形散点修正为圆形散点，使闪电 4 光、磁峰值关系与直击闪电一致。

图 7(b)与图 7(c)中灰色散点分别对应线缆电压峰值与通道光辐射强度峰值、线缆电压峰值与磁场信号峰值间的相关关系，图中采用最佳拟合方式，Y_1 和 Y_2 分别表示回击阶段地面线缆电压峰值和平台线缆电压峰值，X_1 和 X_2 分别表示光辐射强度峰值和磁场峰值。4 个拟合方程幂函数次数均小于 1，表明线缆电压峰值与光辐射强度峰值、磁场峰值间均表现为亚线性关系。图 7(b)与图 7(c)中 4 个拟合方程的 R^2 均大于 0.6，呈现明显的相关关系。对比可知，地面线缆电压峰值与光、磁信号峰值的拟合方

程系数分别为 0.83 和 0.84，均强于平台线缆的拟合效果。为对比闪电 4 和直击闪电在“闪电通道特性-线缆响应特性”关系上的差异，图 7 中以散点标出闪电 4 中地面及平台线缆的回击参数，散点均分布在直击闪电拟合线下方，表明同等强度的触发闪电下，当雷击位置从引雷塔 1(线缆远测量端)变为变电站(线缆近测量端)后，线缆电压峰值下降。

为建立闪电电流与线缆电压间的关联，图 8 利用包含地面真实电流的 2024 年数据进行进一步分析，发现通道光辐射强度峰值与地面线缆、平台线缆的电压峰值间均存在亚线性关系，且 2 根线缆电压峰值与雷电流峰值之间的拟合系数 R^2 均大于 0.9，呈现出强相关性，见图 8(a)和图 8(b)。图 8(c)与图 8(d)中灰色散点分别对应于回击阶段线缆电压峰值与雷电流峰值的分布关系，以及线缆电压峰值与雷电流变化率峰值的相关关系，图中 X_3 和 X_4 分别表示电流峰值和电流变化率峰值。结果显示，4 个拟合方程的幂次均大于 1，表明线缆电压峰值与闪电通道电流峰值、电流变化率峰值之间均存在超线性关系。

4 讨论

本研究基于野外人工触发闪电试验，同步观测了直击雷和邻近雷下通道雷电流、光辐射强度及近区电磁场等的波形特性与参数分布，分析了线缆布设位置与雷击位置对线缆瞬态响应的影响。结果表明，邻近雷击下 2 种布设位置的回击阶段线缆电压峰值均小于直击雷，同时电压极性改变。并且，2 种雷击位置下，地面线缆电压幅值均高于平台线缆。此外，地面线缆、平台线缆电压峰值与通道光辐射强度和磁场强度的峰值均呈现幂函数关联关系。

雷电流的传导过程及其引发的电磁效应共同决定了线缆电压变化。当闪电击中引雷塔(直击闪电)时，雷电流沿引流杆、引下线流向钢结构试验平台并经接地网扩散，使地电位升高且分布不均[37]，这一过程中线缆两端接地点的电位差导致电流流动。线缆屏蔽层两端接地形成的低阻抗回路，产生反向磁场来抑制芯线磁通变化，同时平衡线缆两端地电位差[38]。实验中，平台线缆靠近雷击终点，其芯线电流虽强，但钢制平台增强了屏蔽层的屏蔽效能，使芯线与屏蔽层间电位差减小。因此，仅考虑地面电位差时，平台线缆电压低于地面线缆。除地电位抬升机制外，闪电的电磁辐射效应也会对线缆瞬态响应产生重要影响[39]。闪电通道近区磁场由与雷电流成正比的感应分量和与其变化率相关的辐射分量构成[40-41]。平台线缆直接暴露于空间电磁环境，感应电压较高；而地面线缆受钢制平台屏蔽，感应电压较低；即仅考虑电磁感应耦合时，平台线缆电压更高。

已有研究表明，通过分析地电位抬升引起的电势差与雷电流峰值或其变化率之间的相关性，能判断其对瞬态响应的主导性[42]。文献[43]指出，闪电回击过程中的通道亮度峰值与雷电流峰值之间具有平方关系。由于缺失 2023 年电流数据，图 7 无法直接建立闪电电流与线缆电压间的相关性，通过通道亮度峰值与线缆电压峰值间的亚线性关系可推断线缆电压峰值与雷电流峰值电流间应存在直接比例关系。图 8(c)也展示了 2 根线缆上的电压峰值与雷电流峰值均存在相关性，再次验证了上述观点。此外，图 7(b)中地面线缆电压峰值与光辐射强度峰值间的拟合方程比例系数比平台线缆更高，表明由雷电流入地泄放引起的地电位抬升对地面线缆的瞬态响应

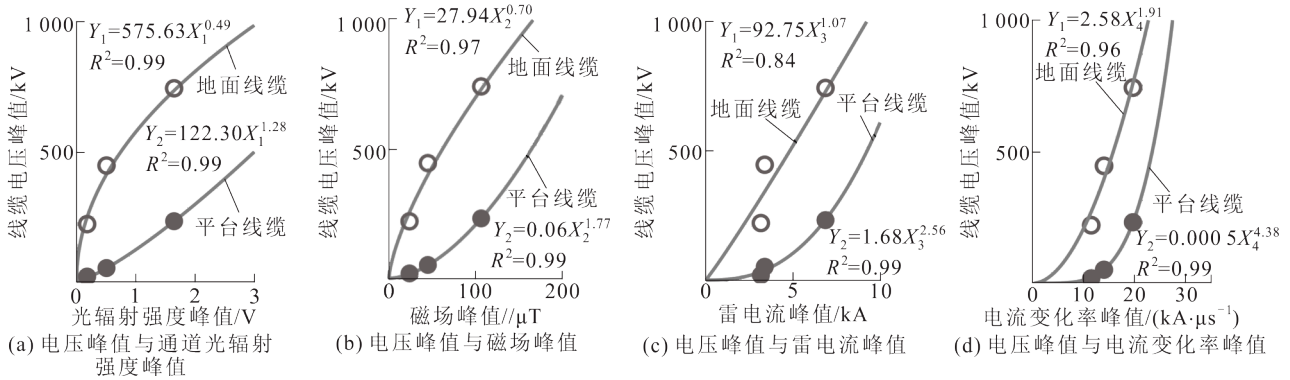


图 8 闪电 7 回击阶段线缆电压峰值与光辐射强度、磁场、雷电流及其变化率峰值的相关性对比

Fig.8 Comparison of correlations between peak cable voltage and peak luminosity, magnetic field, lightning current and its derivative during the return-stroke stage in flash 7

应影响更大。

雷击位置由引雷塔 1 变为变电站区域时，线缆电压峰值减小且极性反转，如图 9 所示。线缆产生高幅值雷电瞬态响应的主要机制包括雷电流入地所致的地电位抬升引起的电势差与雷电流变化激发的空间电磁场引发的感应耦合电压[44-45]，本文中线缆的雷电瞬态响应电压至少由传导分量和感应分量叠加而成。引雷塔 1 与变电站位于线缆的同一侧，且二者与线缆的垂直距离相当，如图 9 所示。2 种雷击位置下闪电激发的电磁感应场对线缆耦合效应差异较小，因此地电位抬升为主要影响因素。而雷击位置不同，雷电流散流路径产生差异，导致地电位抬升不一致。试验平台下方设置的金属地网具有良好导流能力，闪电击中引雷塔 1 时雷电流沿地网从线缆芯线远端流入、近端流出，形成负极性电压；闪电击中变电站时，电流大部分向东远离平台区域，小部分经线缆近端流入，导致其对地电位差呈正值。虽然雷电流极性不变，但线缆中雷电流传导方向改变使电压极性转变，这一现象揭示了雷电流入地路径及其在地网中分布特性对线缆瞬态响应的主导作用。

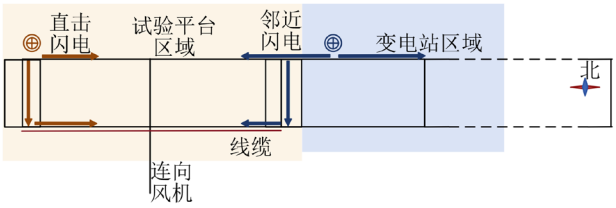


图 9　直击闪电及邻近闪电电流在地网中的散流方式

Fig.9　Current dispersion patterns in the grounding grid for direct and close-up strikes

本研究仍存在局限性，可在未来加以改进。由于雷击变电站位置事件较少，无法对回击阶段线缆电压波形参数进行统计，可考虑更广泛的参数范围(更多雷击位置、线缆铺设位置)，同时可进一步探索其他因素(如线缆类型)的影响。另外，试验中未考虑动态环境因素对线缆电压的影响，在后续研究中可结合建模与参数敏感性分析进一步探究土壤湿度、温度等因素对线缆瞬态响应电压的实时影响。尽管存在上述限制，本文所收集的数据仍可为研究中线缆电压、光辐射强度、电磁场与通道电流之间的关联分析提供支撑，研究结果揭示了雷击位置与线缆布设方式对瞬态响应特性的耦合机制，为评估与通信线缆相连接的设备在复杂雷电环境中的易损性提供了实验依据。

5　结论

本文基于人工触发闪电试验数据，分析了不同雷击位置下 2 种布设位置线缆的瞬态响应波形特性和参数分布规律，研究了线缆雷击瞬态响应与闪电通道的关联关系及响应机理，主要研究结论如下：

1）在直击雷回击阶段，地面布设与平台布设的线缆均呈现以负极性为主的双极性瞬态电压波形，且电压峰值达到千伏量级。与平台线缆相比，地面线缆电压波形具有更高的峰值(0.77~1.09 kV)、更短的上升时间(0.82~0.98 μs)、半峰宽度和单极持续时间，表明地面布设更易受雷击引发的强瞬态电压影响。

2）2 种布设方式的线缆电压峰值与闪电通道光辐射强度峰值、磁场峰值均呈现幂函数关联关系，表明地电位抬升引起的地表电势差在雷击引发的线缆瞬态响应中起主导作用，其中地面线缆的电压响应对雷电流泄流路径的敏感性更高。

3）邻近闪电下，雷击位置改变导致雷电流散流路径和传导方向改变，线缆中传导电流方向变化，2 种布设方式的线缆电压极性改变且幅值下降。地面线缆在该类雷击事件中的电压峰值和最大上升率仍显著高于平台线缆，其反峰值更小，表明雷电流泄放路径与地网结构对线缆瞬态响应具有重要影响。

参考文献　References

[1] BRIGNONE M, MESTRINER D, PROCOPIO R, et al. On the stability of FDTD-based numerical codes to evaluate lightning-induced overvoltages in overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1): 108-115.

[2] 周蜜，丁文汉，王建国，等. 闪电连接高度对地面电场波形的影响[J]. 电工技术学报，2021，36(4)：857-868.
ZHOU Mi, DING Wenhan, WANG Jianguo, et al. Effect of lightning junction height on ground electric field waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(4): 857-868.

[3] 周桐，杨庆，罗庆亮，等. 配电线路雷击断线过程中的交流电弧侵蚀研究[J]. 中国电机工程学报，2025，45(10)：4077-4090.
ZHOU Tong, YANG Qing, LUO Qingliang, et al. Research on AC arc erosion during lightning disconnection of distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 4077-4090.

[4] TANAKA H, BABA Y, BARBOSA C F, et al. Protective effect of shield wires against direct lightning flashes to buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1628-1635.

[5] YEUNG C, WANG J G, DU Y P, et al. Assessment of electromagnetic shielding effectiveness in multi-layer and single-layer shielded cables against the lightning electromagnetic pulse considering different shielding strategies[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 243: 111514.

[6] 司马文霞，袁涛，刘亚坤，等. 多重雷击对电力系统雷电防护的影响与挑战[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3992-4005.
SIMA Wenxia, YUAN Tao, LIU Yakun, et al. Effects of multiple lightning strokes on power system protection and associated challenges[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3992-4005.

[7] TANAKA H, BABA Y, BARBOSA C F. Effect of shield wires on the lightning-induced currents on buried cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(3): 738-746.

[8] ZHOU M, WANG X X, WANG J G, et al. Transient voltage characteristics of power cables in a full-scale wind turbine: effect of grounding configurations and shielding method of power cables[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 246: 111640.

[9] 杨庆，柯锟，胡军，等. 电力系统中的雷电暂态感知、监测和应用[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3303-3323.
YANG Qing, KE Kun, HU Jun, et al. Lightning transient sensing, monitoring and applications in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3303-3323.

[10] DA SILVA W C, DE AZEVEDO W L M, D'ANNIBALE J L A, et al. Lightning analysis of grounding system in wind farms: comparison between interconnected overhead ground wire and underground bare cables[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 242: 111417.

[11] BOUSSAYOUD L, NEKHOUL B. Transient electromagnetic lightning disturbances induced in the collector cables of a wind farm[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 241: 111345.

[12] NAZARI M, MOINI R, FORTIN S, et al. On the performance of grounding, bonding, and shielding systems for direct and indirect lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1): 135-143.

[13] ZHAO W H, WANG J G, ZHOU M, et al. Lightning current risetime influence on inductive coupling effect of secondary shield cable in substation[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 232: 110389.

[14] AHMED R J, GOMES C, KADIR Z, et al. Voltage distribution of a wind turbine transformer under direct lightning strike: effects of the grounding of cable shield[J]. Advanced Science Letters, 2016, 22(7): 1800-1804.

[15] GUO Y M, ZHOU M, ZHENG S Q, et al. Study on the induction coupling response characteristics of parallel cables[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020: 1158-1160.

[16] ZHOU M, ZHAO W H, ZHENG S Q, et al. Lightning inductive coupling characteristics of parallel cables: computation and measurement validation[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2023, 17(3): 115-124.

[17] VILLAMIL S N, MESTRINER D. Lightning-induced voltage on overhead conductors in urban areas: a study on how the air gap between buildings affects the shielding effect[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 247: 111795.

[18] TOSSANI F, BORGHETTI A, NAPOLITANO F, et al. Lightning induced overvoltages on overhead lines shielded by nearby buildings[C]//2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal: IEEE, 2016: 1-6.

[19] TOSSANI F, BORGHETTI A, NAPOLITANO F, et al. Lightning performance of overhead power distribution lines in urban areas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 581-588.

[20] ŠTUMPF M, ANTONINI G. Lightning-induced voltages on transmission lines over a lossy ground-an analytical coupling model based on the Cooray-Rubinstein formula[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1): 155-162.

[21] PU S Z, LI X C, LI H M, et al. Analysis of change in ground potential caused by soil discharge channel and the interference on cable[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.

[22] ZHANG B, LI C R, LIU Z R, et al. Analysis of transient in secondary cable due to a direct lightning strike on grounding grid[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(4): 1183-1190.

[23] ALIPIO R, SCHROEDER M A O, AFONSO M M. Voltage distribution along earth grounding grids subjected to lightning currents[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4912-4916.

[24] 杜勇，黄良灿，沈小军，等. 输电线路雷电绕击风险评估多源数据融合可视化方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：1877-1888.
DU Yong, HUANG Liangcan, SHEN Xiaojun, et al. Multi-source data fusion visualization method for transmission line lightning shielding failure risk evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1877-1888.

[25] 蓝磊，张昊琛，邓冶强，等. 基于雷电屏蔽性能和空气间隙放电的交叉跨越区段参数安全阈值研究[J]. 电网技术，2025，49(7)：3074-3083.
LAN Lei, ZHANG Haochen, DENG Yeqiang, et al. Study on crossover section threshold parameters of uhv lines based on the lightning shielding performance and interline breakdown characteristics[J]. Power System Technology, 2025, 49(7): 3074-3083.

[26] HE J L, YANG G H, LI Q X, et al. First altitude-triggered lightning experiment associated with an elevated wind turbine blade on the ground[J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(18): e2024GL109400.

[27] 刘向科，任渝帆，蒋如斌，等. 基于人工引雷技术的外浮顶油罐直接雷击过电压试验研究[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4782-4789.
LIU Xiangke, REN Yufan, JIANG Rubin, et al. Overvoltage measurement on the external floating roof oil tank model directly stroke by artificially triggered lightning[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4782-4789.

[28] KUMAR U, RAKOV V. Electrical stress on the outer insulation of buried cables due to a nearby lightning strike to ground[C]//2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal: IEEE, 2016: 1-7.

[29] PAOLONE M, PETRACHE E, RACHIDI F, et al. Lightning induced disturbances in buried cables-part II: experiment and model validation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3): 509-520.

[30] DECARLO B A, RAKOV V A, JERAULD J E, et al. Distribution of currents in the lightning protective system of a residential building-part I: triggered-lightning experiments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2439-2446.

[31] SOARES JR A, SCHROEDER M A O, VISACRO S. Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1447-1452.

[32] 边凯，陈维江，李成榕，等. 架空配电线路雷电感应过电压计算研究[J]. 中国电机工程学报，2012，32(31)：191-199.
BIAN Kai, CHEN Weijiang, LI Chengrong, et al. Calculation of lightning induced overvoltage on overhead distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 191-199.

[33] ZHAO W H, ZHOU M, FAN Y D, et al. Lightning coupling induced voltage of secondary cables in substation with different terminal load and grounding dissipation paths[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 5971-5982.

[34] 周蜜，左芯睿，范雅蓓，等. 实验室模拟连续电流与通道光强度关系研究[J]. 高电压技术，2024，50(2)：842-851.
ZHOU Mi, ZUO Xinrui, FAN Yabei, et al. Correlation between the laboratory-generated continuing current and the corresponding channel

luminosity[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 842-851.

[35] 范雅蓓，周蜜，王建国，等. 实验室类回击电流与通道光强度的关系[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4404-4411.
FAN Yabei, ZHOU Mi, WANG Jianguo, et al. Correlation between laboratory generated return-stroke-like current and the channel luminosity[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4404-4411.

[36] 周蜜，卢泳茵，王建国，等. 人工触发闪电回击电流与通道光辐射强度关系[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2839-2848.
ZHOU Mi, LU Yongyin, WANG Jianguo, et al. Return-stroke current and resultant channel luminosity in rocket-triggered lightning[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2839-2848.

[37] ZHANG Z H, SHI W D, KANG P, et al. Electromagnetic interference on secondary systems of UHVDC convertor substation caused by ground potential rise[C]//2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2018: 895-898.

[38] ZHOU M, GUO Y M, ZHAO W H, et al. Comparison of shielding effectiveness of different shielding methods for multi-core cable on lightning surge current[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(5): 1742-1749.

[39] YAMANAKA A, ISHIMOTO K, TATEMATSU A. Direct lightning surge analysis of distribution lines considering LEMPs from lightning channel and struck pole in EMT simulation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(6): 1909-1920.

[40] ZHOU M, DING W H, WANG J G, et al. Effects of long upward connecting leader channel on electromagnetic fields for lightning striking to tall towers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(5): 1461-1470.

[41] RACHIDI F, JANISCHEWSKYJ W, HUSSEIN A M, et al. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(3): 356-367.

[42] 颜旭，张义军，杜赛，等. 触发闪电产生的地网地电位抬升及暂态效应[J]. 应用气象学报，2020，31(2)：247-256.
YAN Xu, ZHANG Yijun, DU Sai, et al. Ground potential rise and transient response of the grounding grid based on the triggered lightning[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(2): 247-256.

[43] ZHOU M, WANG D H, WANG J G, et al. Correlation between the channel-bottom light intensity and channel-base current of a rocket-triggered lightning flash[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(23): 13457-13473.

[44] 杨庆，张新东，孙健，等. 10 kV 配电线路感应雷过电压波形特征实测分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(24)：8900-8910.
YANG Qing, ZHANG Xindong, SUN Jian, et al. Waveform analysis on characteristics of lightning induced overvoltages on 10 kV overhead distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8900-8910.

[45] 颜旭，揣国权，王孝波，等. 1 次触发闪电引起的地网地电位抬升观测及分析[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4120-4128.
YAN Xu, CHUAI Guoquan, WANG Xiaobo, et al. Observation and analysis of ground grid potential rise by one triggered lightning flash[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4120-4128.



LEI Xiaoyu

雷小雨
2001—，女，硕士生
主要从事雷电防护和雷电物理方面的研究
E-mail: xiaoyulei@whu.edu.cn



ZHOU Mi
Ph.D., Professor
Corresponding author

周　蜜(通信作者)
1986—，男，博士，教授，博导
主要从事雷电防护和接地技术方面的研究
E-mail: zhoumi927@whu.edu.cn



DUAN Denglei

段邓垒
2001—，男，硕士生
主要从事雷电防护和雷电物理方面的研究
E-mail: ddl0711@whu.edu.cn



WANG Jianguo
Ph.D., Professor

王建国
1968—，男，博士，教授，博导
主要从事雷电防护与接地技术、高电压绝缘与测试技术等方面的研究
E-mail: wjg@whu.edu.cn



CAI Li
Ph.D., Professor

蔡　力
1987—，男，博士，教授，博导
主要从事雷电探测和雷电防护方面的研究
E-mail: caili@whu.edu.cn



CAO Jinxin
Post-doctrate

曹金鑫
1995—，男，博士(后)
主要从事雷电防护与接地技术、高电压绝缘与测试技术等方面的研究
E-mail: jinxin.cao@connect.polyu.hk

收稿日期　2025-07-07　在线出版日期　2025-10-17　　编辑　程子丰