第 50 卷 第 2 期：842-851　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 842-851
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230787

实验室模拟连续电流与通道光强度关系研究

周　蜜[1,2]，左芯睿[1,2]，范雅蓓[3]，范昊深[1,2]，蔡　力[1,2]，王建国[1,2]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072;
2. 雷电防护与接地技术教育部工程研究中心，武汉 430072;
3. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074）

摘　要：雷电连续电流是云载荷源向大地转移电荷的一种重要形式，这一过程产生的热效应可能对自然以及人居环境造成严重损害，这种热效应与连续电流波形和转移电荷量有关。在高压实验室电弧放电通道间隙产生了峰值范围为 233.8~633.3 A 的模拟雷电连续电流，利用红光敏感型(探测波长范围 200~1000 nm，峰值响应 600 nm)和近红外敏感型(探测波长范围 400~1000 nm，峰值响应 800 nm)两种光电探测器同步测量了通道光强度。结果发现，正常通道下测量得到的光强度波形能较好地跟随电流波形的变化，而电弧通道扭曲会导致测量得到的通道光强度波形产生畸变，这种畸变具体表现为光强度波形在持续阶段的凹陷，在所有光强度波形中发生畸变的概率为 19.8%。进一步探究了正常通道情况下模拟连续电流与通道光强度的关系，发现在不同光谱响应下，光强度峰值与电流峰值以及光强度-时间积分与电流电荷转移量之间均存在强烈的线性相关性。结果为使用电流与相关光强度关系进行连续电流波形与转移电荷量的准确反演提供了新思路。

关键词：连续电流；光强度；通道扭曲；相关性；电荷转移量

Correlation Between the Laboratory-generated Continuing Current and the Corresponding Channel Luminosity

ZHOU Mi[1,2], ZUO Xinrui[1,2], FAN Yabei[3], FAN Haoshen[1,2], CAI Li[1,2], WANG Jianguo[1,2]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Lightning Protection and Grounding Technology, Wuhan 430072, China; 3. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The lightning continuing current is an important form of transferring charge from the cloud sources to the earth. The thermal effect generated during this process may cause serious damage to natural environment as well as to the human habitats. This thermal effect is associated with the current wave shape and the transferred charge. Here, in the simulated high voltage laboratory, the simulated lightning continuing current with a peak range from 233.8 to 633.3 A was generated in the arc discharge channel gap. The channel luminosity was synchronously measured by two photodetectors which are sensitive to red light (a detection wavelength ranging from 200 nm to 1000 nm with the peak response of 600 nm) and near-infrared light (a detection wavelength ranging from 400 nm to 1000 nm with the peak response of 800 nm), respectively. The results show that the luminosity waveform measured under the normal channel can follow the current waveform faithfully while the tortuosity of arc channel will lead to the waveform distortion of channel luminosity. This distortion is specifically manifested as a significant ‘sag’ in the continuing stage of luminosity waveform, and the probability of distortion in all luminosity waveforms is 19.8%. The relationship between the simulated continuing current and channel luminosity was further investigated. A strong linear correlation was found between the luminosity peak and the current peak, as well as between the luminosity-time integration and the current charge transfer under different spectral responses. The obtained results provide a new approach to accurately estimate the continuing current waveshape and the transferred charge by using the correlation between current and luminosity.

Key words: continuing current; luminosity; channel tortuosity; correlation; charge transfer

——————————

基金资助项目：国家自然科学基金 (52277160; 51877155)；重大基础科研计划(JCKY2019207A029)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277160, 51877155), Major Basic Scientific Research Project of China (JCKY2019207A029).

0　引言

闪电辐射特性及其电磁脉冲破坏效应一直以来得到了广泛关注[1-5]。在云对地闪电中，连续电流可以看作是云电荷源和大地之间沿着之前先导—回击序列路径产生的准静态电弧，其电流幅值相对较低，一般为数十到数百安，持续时间为几到几百 ms。作为云对地闪电直接电荷转移的一种重要形式[6]，连续电流通常可以将数十库仑的电荷转移到地面，与之相关的高温热效应会产生大量热能，可导致金属烧蚀、熔化，严重时甚至会造成火灾和爆炸[7]。因此，有必要了解雷电连续电流相关物理过程并获得电流波形特征参数，进而提升雷电防护技术能力。

国内外许多学者针对连续电流的发生概率、幅值水平以及持续时间等进行了相关研究。如 Hagenguth 和 Anderson[8]在首次对帝国大厦进行闪电观测时发现了连续电流分量，得到电流平均值为 250 A。Kitagawa 等[9]和 Brook 等[10]发现新墨西哥雷暴中闪电连续电流的持续时间为 40~500 ms，电流变化范围为 38~130 A。大体上，连续电流具有较低的幅值和高达 ms 级的长持续时间（注：回击电流时间尺度为 μs 级），可以分为长连续电流(持续时间大于 40 ms)、短连续电流(10~40 ms)[11]和极短连续电流(3~10 ms)[12]。此外，Ballarotti 等[12]对巴西地区闪电进行研究，发现 28%的闪电回击，包括单回击闪电，都伴随着或长或短的连续电流。Medeiros 和 Saba[13]报道了 162 次负极性闪电中仅有 14%出现了长连续电流；张阳等[14]发现含连续电流的正极性地闪比例高达约 69%，其中 48.7%存在长连续电流过程。通过以上文献回顾可以发现，连续电流过程的放电特征存在地域性和电荷结构差异。

除上述电流幅值和持续时间外，连续电流的转移电荷量也是一项重要的参数，与之相关的研究也得到了广泛关注。连续电流过程是云层向地面传输电荷的主要阶段，一次回击通常仅能传输几库仑内的电荷量，而连续电流传输的电荷量可达到几十库仑甚至更多，能占据总电荷转移量的 75%以上。在连续电流过程中，由于电荷向地面的稳定转移，电场变化的幅度缓慢增加，早期对连续电流电荷转移量的估计主要通过电场测量得到[15-17]。而测量闪电通道的电荷转移量，本质上与测量通道电流密不可分，在有实测电流波形的情况下，电荷转移可以通过直接时间积分来估计。Miki 等[18]估计夏季闪电中长连续电流的平均值为 200 A，对持续时间大于 40 ms 的长连续电流的转移电荷量进行了估算，得到的平均电荷转移量约为 30 C。Kurihara 等[19]对一次回击及之后 190 ms 的连续电流进行直接数值时间积分估计电荷转移为 149 C。Lu 等[20]通过对近距离记录的磁信号进行数值积分，重建了初始连续电流和长连续电流的时间分辨电流波形，并计算了连续放电过程中的电荷转移。上述通过电场或磁场信号的手段为提供闪电转移电荷量的遥测提供了新方向。

由于闪电事件固有的不可预测性和不可重复性，直接测量电流的机会非常低。雷电流流过放电通道时会加热载流通道内的空气，并产生可测量的光学特征。与直接测量电流相比，利用光学手段对雷电通道进行观测更加容易，能够直观地展现雷电通道的几何形状和演化趋势等，且是一种不干扰闪电电弧的非侵入式方法。已有学者对雷电流与通道光强度的相关性展开研究，如张义军等[21]在空中触发闪电试验中发现高电流对应于强烈的发光，闪电通道电流与光强度之间存在很好的正相关性。Flache 等[22]分析了德国 Peissenberg 塔引发的 8 次上行闪电的高速视频图像和相应电流记录，使用通道亮度作为电流的表征确定了对应时刻的通道或支路电流大小。Qie 等[23]利用触发闪电通道光强度推断出发生在 M 分量前的背景连续电流幅值范围。上述研究成果为利用光信号间接获取电流相关信息提供了丰富的指导经验。

Mitchard 等[24-25]对比了实验室短间隙放电自击穿电弧与自然雷电放电电弧的光谱观测结果，发现两者具有极高的相似性，为实验室模拟闪电电弧的光学观测提供了依据。高压实验室内可模拟产生与自然界雷电流分量波形特征类似的电弧通道电流，并且具有可重复、可调节和易控制等优势[26-28]，为研究雷电电弧电流与通道光强度之间的关系提供了便利。目前，在实验室内已针对雷电回击电流、M 分量电流与通道光强度之间的关系进行了充分研究[29-32]，然而，关于连续电流及对应光强度相关特征还缺乏深入了解。本文在高压实验室电弧放电通道间隙模拟产生了雷电连续电流，其峰值范围为 233.8~633.3 A，同步测量了通道对应光强度，探究了模拟连续电流与通道光强度的关系，为使用光学方法进行闪电全过程连续电流波形与转移电荷量的

准确反演提供了新思路。

1 试验布置

传统方法一般采用蓄电池组串联可调电阻产生连续电流，在极短时间内形成大量的转移电荷，以模拟雷电流直接效应，其主要目的是探究雷电连续电流的损伤烧蚀特性[33-35]。本文未选择使用传统蓄电池组，其原因是作者曾尝试产生具有较长的持续时间模拟连续电流，但大量电荷通过电极产生强烈的热效应，导致电极出现可观的烧蚀现象，从而影响电弧通道的稳定性，难以得到定量的数据。

根据文献[36]，利用图 1 所示的分布式电路模型，闪电通道可以被描述为 RLC 传输线，其电压 U 和电流 I 的电报方程如下：

$$-\frac{\partial U(z',t)}{\partial z'}=L\frac{\partial I(z',t)}{\partial t}+RI(z',t) \tag{1}$$

$$-\frac{\partial I(z',t)}{\partial z'}=C\frac{\partial V(z',t)}{\partial z'} \tag{2}$$

式中：R、L、C 分别为闪电通道单位长度串联电阻、串联电感和并联电容；z' 为闪电通道方位纵坐标；t 为时间。通道的传输线参数会随时间和空间发生变化，即传输线是非线性且不均匀的。通道电感随携带 z 方向电流的通道核半径的变化而变化，通道电阻与通道电子密度及通道核半径有关。受此启发，在实验室内可构建集中参数链式网络电路，利用多组集中电感和电容模仿传输线，采用均匀分布参数产生波形相对平缓的连续电流。此外，这种链式回路的优势是采用不均匀分布参数可实现雷电流中一个回击—M 分量—连续电流序列过程的近似模拟。

根据上述原理，在高压实验室内搭建电弧放电通道电流与光强度同步观测试验平台，图 2 为试验布置示意图。该试验平台主要由模拟连续电流发生器、电流传感器、调波电阻、石墨棒状放电间隙、光强度观测系统、示波器以及传输数据的光纤与同轴电缆等组成。

这里需要强调的是，实验室模拟产生的电流只是在波形特征上类似自然界雷电流分量波形，而非在空间电场时空变化、放电尺度、放电通道演变等方面对自然雷电进行模拟。

模拟连续电流发生器如图 2(a)所示，其中包含变压器、整流器、电感–电容器组和钨铜半球形触发间隙等。试验中电感–电容器组由多个 L-C 链构成，每链电容器容量固定为 6 μF，每链电感值可调节范

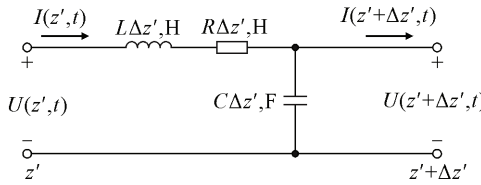


图 1 闪电通道的分布电路模型

Fig.1 Distributed circuit model of the lightning channel

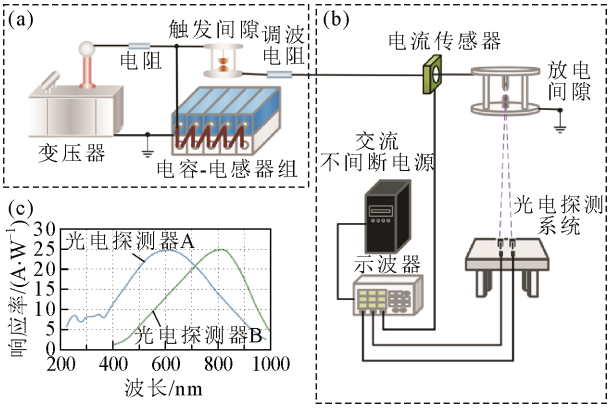


图 2 电弧放电通道电流与光强度同步观测试验平台

Fig.2 Experimental setup for synchronous observation of discharge channel current and luminosity

围为 1~3.6 mH，移动电感抽头位置可改变接入电感值。半球形电极之间的间距根据电流发生器充电电压的大小进行调整，充电电压越高，半球形电极间距越长。上下两个石墨棒状电极的空气间隙长度固定为 5 mm，如果增大击穿间隙，需要提高击穿电压，发生器产生的电流幅值也相应增大，无法对雷电流中低量值的部分进行模拟。将石墨放电间隙调整为 5 mm 长，可以实现较为稳定的放电，获取准确的放电光强度数据。将冲击电流发生器中的电容器组充电到规定的电压，铜钨半球形间隙点火触发，石墨棒电极击穿空气间隙放电。

图 2(b)中，回路电流由型号为 1423 的 Pearson 电流传感器测量，其具有 1 Hz~1.2 MHz 的带宽范围和 0.001 V/A 的输出灵敏度，最大测量电流–时间积分为 70 A·s，可与电路进行电气及物理隔离。放电间隙载流通道辐射的光强度由光强度观测系统测量，该探测系统主要由雪崩光电探测器、中性密度滤光片、延长套管和一个狭缝宽度可调的水平机械狭缝组成。为获得更加稳定的光强输出，使用光学隔振平台支撑和固定光强度观测系统，使机械狭缝中心与放电间隙通道中心严格对准，二者间距为 110 cm。由于测量所得到的光辐射强度会随观测距

离的增大而衰减，在本文中讨论的光强度是一个相对值。

雪崩光电探测器本质上是一种高度敏感的半导体电子器件，可利用光电效应将光转换为电。本文使用了两种不同型号的光电探测器，分别记为 A 和 B，二者典型的光谱响应曲线如图 2(c)所示。两种光电探测器的带宽范围均从 DC 到 50 MHz，光电探测器 A 可以测量涵盖紫外、可见光及近红外波段的光信号，其光谱响应范围为 200~1000 nm，在 600 nm 处具有峰值响应，而光电探测器 B 不包含紫外区的波段测量，光谱响应范围为 400~1000 nm，峰值响应为 800 nm。

电流传感器和光强度探测系统的输出信号由 200 MHz 带宽的 Tektronix MDO 3024 示波器同步记录，见图 2(b)。示波器的采样间隔为 0.4 ns，存储容量为 1 M 个采样点。为了消除环境光的影响，试验环境保持相对黑暗，此外，试验还测量了无电流阶段的背景光辐射强度，并在分析通道光强度数据时减去了背景光强度的算术平均值，以保证测量得到的通道光强度尽可能全部来自于电弧通道放电的辐射光。距离石墨间隙放电通道 3 m 左右放置了一个 Nikon D3300 静态相机（图 2(b)中未示出），用来记录放电时刻的电弧形态。该相机的曝光时间为 10 s，并在放电事件发生前约 1 s 触发，在一次放电期间可捕捉到电弧通道的全景。

设置充电电压为 30 kV，改变调波电阻和链式回路数等参数共产生了 16 组不同波形特征的模拟连续电流，相关的试验参数总结在表 1 中。这里报道产生的连续电流波形持续时间不超过 10 ms，与自然闪电的极短连续电流(3~10 ms)较为相似。

表 1　模拟连续电流试验参数设置

Table 1　Experimental parameters of the simulated continuing current

各链电容/μF	调波电阻/Ω	链式回路数	样本数
6	22.5	4	4
6	26.5	4	4
6	30.5	4	4
6	34.0	4	4
6	38.0	4	3
6	22.5	6	4
6	26.5	6	5
6	30.5	6	3
6	34.0	6	4
6	38.0	6	4
6	22.5	8	4
6	30.5	8	4
6	38.0	8	4
6	22.5	10	4
6	30.5	10	4
6	38.0	10	4

2　通道电流与光强度同步波形

试验中大部分通道电流对应的光强度波形均能保持大致相似且稳定的形状，然而在某些情况下，光强度波形会发生一定程度的畸变。结合电弧通道的发光形态，对比分析了两种光电探测器测量得到的光强度波形特征，其中电弧通道形态大致可分为两种类型：正常电弧通道和扭曲电弧通道。

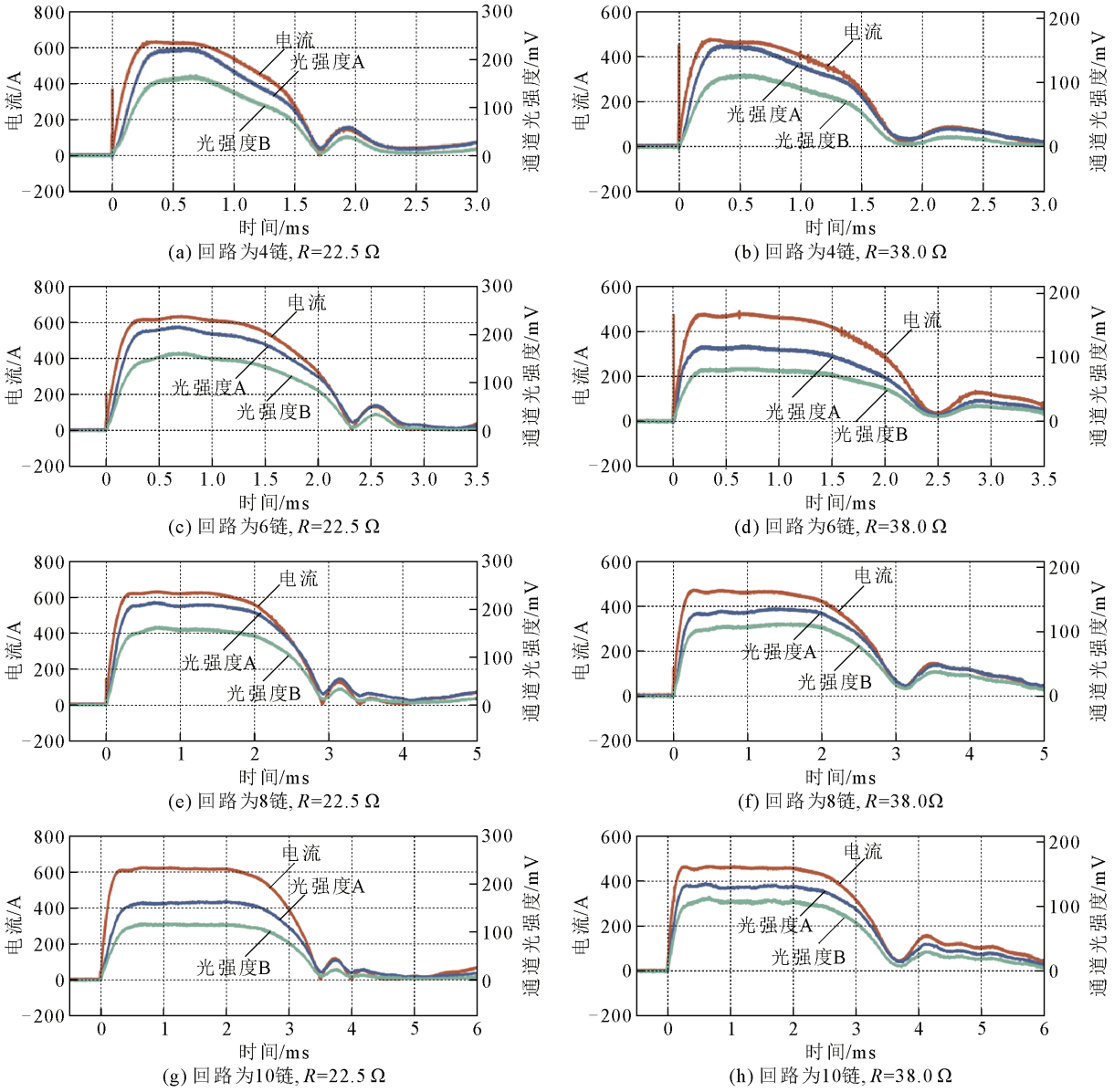
2.1　正常电弧通道

表 1 中包含的 16 组样本均为正常电弧通道下测量得到的连续电流。以图 3 为例，展示了其中 8 组模拟连续电流与光强度同步波形，大体上，两种光谱响应下的光强度波形均能较好地跟随电流波形的变化，光强度 B 的幅值略低于光强度 A 的幅值。随着链路数的增加，电流及对应光强度的持续时间也相应增长，其持续阶段的波形逐渐趋于平坦。

如图 4 所示为正常电弧通道下的模拟连续电流电弧形态照片与对应的电流-光强度同步波形，为了便于观察，对电弧通道发光部分进行了反色处理和对比度校正。图 4(a)中使用黄色虚线标示了电弧垂直中轴线，此处也是电极中轴线。对于图 4(a)中模拟连续电流对应的正常电弧通道，电弧形状在垂直方向上大致关于通道对称，且发光较为均匀；图 4(b)所示的两种光强度波形在上升阶段都略滞后于相应的电流波形。整体上，电流与光强度波形较为平滑，在发展阶段仅存在微小的波动。

2.2　扭曲电弧通道

图 5 为扭曲电弧通道下对应的电弧通道形态照片与电流-光强度同步波形，图 5(a)中同样使用黄色虚线标示了电极中轴线。图 5(a)中扭曲电弧通道在放电间隙中间急剧膨胀，并向周围发散，呈不规则扇形。与图 4(a)中的正常电弧通道相比，扭曲电弧通道与垂直中轴线之间存在一定角度，对称性较差。考虑到电弧漂移的混乱性，电弧通道的扭曲与焦耳热效应对石墨电极表面所造成的损伤密切相关。在重复多次放电后，电极表面出现了一定程度的烧蚀痕迹，导致电弧形状在反复漂移时难以保持稳定。图 5(b)为扭曲电弧通道下对应的电流与光强度同步



(a) 回路为4链, R=22.5 Ω (b) 回路为4链, R=38.0 Ω

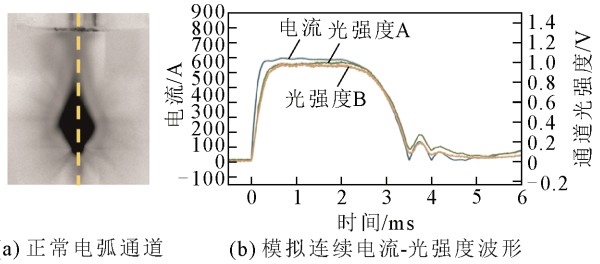
(c) 回路为6链, R=22.5 Ω (d) 回路为6链, R=38.0 Ω

(e) 回路为8链, R=22.5 Ω (f) 回路为8链, R=38.0Ω

(g) 回路为10链, R=22.5 Ω (h) 回路为10链, R=38.0 Ω

图 3 模拟连续电流与通道光强度波形

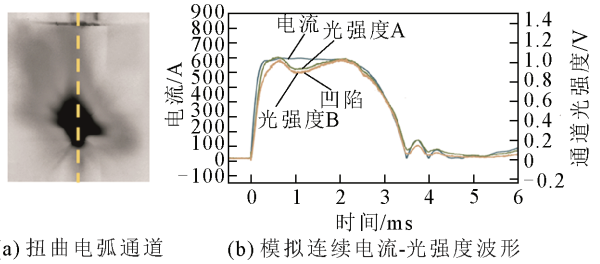
Fig.3 Waveforms of the simulated continuing current and channel luminosity



(a) 正常电弧通道 (b) 模拟连续电流-光强度波形

图 4 正常电弧通道和模拟连续电流-光强度波形

Fig.4 Normal arc channel and waveforms of the simulated continuing current and luminosity



(a) 扭曲电弧通道 (b) 模拟连续电流-光强度波形

图 5 扭曲电弧通道和模拟连续电流-光强度波形

Fig.5 Tortuous arc channel and waveforms of the simulated continuing current and luminosity

波形，两种光强度均在增加到峰值后立即下降，当下降到峰值的 80%左右时，光强度再次缓慢增加，达到第二次峰值，即在连续电流的持续阶段出现了明显的凹陷。此外，光强度 B 在接近峰值时波形上升沿陡度明显变缓，更加滞后于电流，而光强度 A 的波形在上升阶段与电流波形的变化趋势几乎一

致，二者间的延时显著减小。

试验总共获得了 111 个电弧通道光强度波形，其中发生畸变的波形个数为 22，统计得到模拟连续电流分量对应的电弧通道畸变概率为 19.8%。该结果表明，光强度波形畸变只占光学观测结果中很小的一部分，即畸变现象并不总是出现在每次光学观测中。由于畸变的光强度波形无法准确表征对应电流波形的相关特征，后续对模拟连续电流与光强度波形的特征参数关联分析均采用正常电弧通道测量的电流与光强度。

3　电流与光强度特征参数关系

3.1　电流峰值与光强度峰值

图 6(a)和(b)分别为光电探测器 A 与光电探测器 B 测量的光强度峰值与电流峰值的数据分布与线性拟合结果。为了直观和对应地展现出数据分布趋势，在图形上方和右侧分别显示了所有电流数据与通道光强度数据的直方分布图与概率密度估计曲线。图 6 中电流峰值范围为 233.8~633.3 A。

如图 6 所示，虚线为模拟连续电流峰值与通道光强度峰值的零截距线性拟合回归线，具有 95%置信区间的拟合线为最佳线性拟合回归线。图 6(a)中过原点拟合的电流-光强度峰值关系表示为 y=0.313x，线性相关系数为 0.928，表明电流峰值与光强度峰值存在显著的线性正相关关系。当使用光电探测器 B 对通道光强度进行探测，得到的电流与光强度关系如图 6(b)所示，当强制回归线过零点时，电流峰值与光强度峰值之间的关系可用线性拟合表达式 y=0.222x 表示，相关系数 R 为 0.885。图 6(a)和(b)的结果表明，两种光电探测器测量的光强度在峰值水平上存在一定差距，但两种光谱响应下的光强度峰值均随着电流峰值的增大而增大，二者之间存在较强的线性相关性。

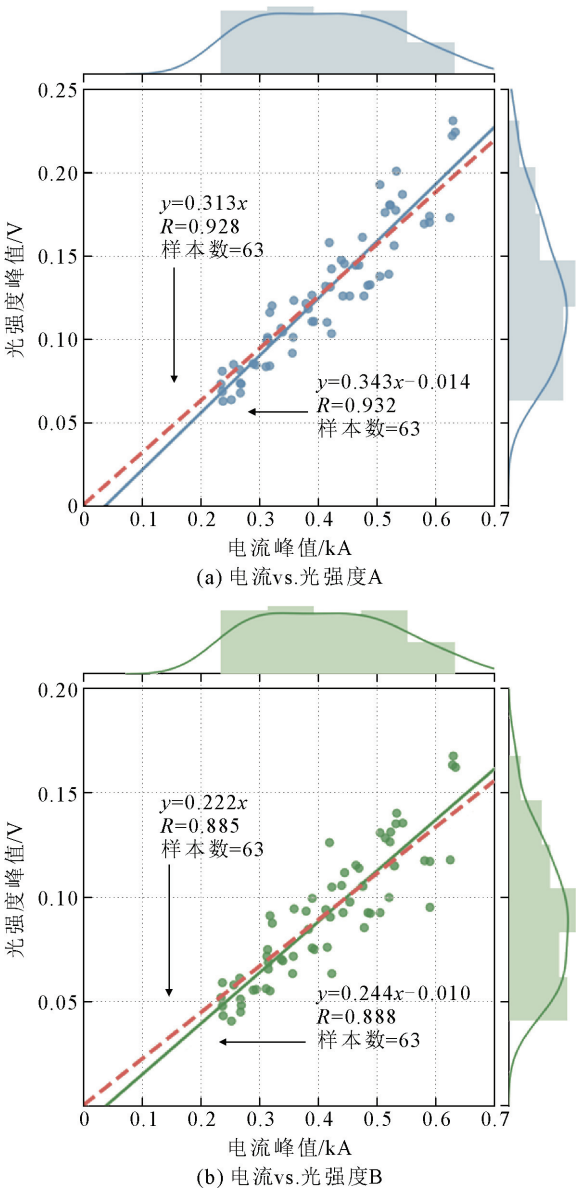


图 6　模拟连续电流与通道光强度的峰值关系及二者数据分布趋势

Fig.6　Relation and data distribution trend between the simulated continuing current peak and the channel luminosity peak

3.2　电流电荷转移量与通道光强度–时间积分

电流电荷转移量(即电流随时间的积分)在数学上对应于光强度对时间的积分。图 7(a)和(b)展示了电流电荷转移量与通道光强度-时间积分之间的关系，其中电流转移电荷量的范围为 0.35~2.08 C。当拟合线通过原点时，线性拟合式分别为 y=0.349x（光强度 A）和 y=0.206x（光强度 B），其相关系数均大于 0.9，表明通道光强度–时间积分与电流转移电荷量存在强烈的正比关系。上述结果显示，在两种光谱响应下，反演电流与实测通道电流结果相比均显示出了较高的拟合度。

Miki 等[18]曾通过高速摄影技术得到的光学照片估计自然闪电中长连续电流的持续时间，并利用连续电流平均值对持续时间大于 40 ms 的长连续电流的转移电荷量进行了估算，然而，Miki 等[18]对电流电荷转移量的估计仅使用了平均值而未计及波形的变化，预测结果与实际值可能存在较大差异。周蜜等[37]在研究人工触发闪电回击电流与通道光强度特征时，利用回击电流与光强度峰值关系实现了闪电全过程电流波形及转移电荷量的反演，预测得到的电荷量误差绝对值平均为 31.44%。这一误差的

产生是由于回击、M 分量和连续电流 3 种不同放电阶段的电流与光强度相关性不同所致，仅利用回击阶段的电流-光强度波形关系无法准确表征闪电放电全过程各分量的相关特性。应综合考虑不同放电阶段电流的持续时间和波形变化特征，获取接近于实际通道电流电荷转移量的预测电荷量结果，从而利用电流与相关光强度间的关系实现闪电全过程转移电荷量的精确反演。

4 讨论

本文在高压实验室电弧放电通道间隙模拟产生了雷电连续电流，同步测量了电流及通道对应光强度波形，分析了两种信号波形特征参数之间的相关性。结果表明，光强度波形与电流波形的变化趋势具有高度相似性，无论在 600 nm 还是 800 nm 处达到最大光谱响应，测量得到的光强度峰值与电流峰值之间均具有显著的线性相关性，这意味着可以在不直接测量放电电流的情况下，利用光信号推断电流相关特征参数，如峰值、持续时间等。此外，本文在实验室中得到的模拟连续电流与光强度的关系同样可扩展到沿雷电通道的电流测量中。Diendorfer 等[38]曾利用高速视频帧提取闪电亮度，分析了高塔顶部测量的 9 次闪电初始连续电流与通道亮度变化之间的相关性，结果显示在 10~250 A 的电流幅值范围内，二者之间具有良好的线性关系。Zhou 等[39]研究了人工触发闪电初始连续电流和连续电流过程中通道底部电流与积分亮度之间的关系，发现整体上通道亮度与电流呈明显正相关性。结合上述报道结果可知，实验室电弧放电电流和自然界雷电流与对应通道光强度的关系在一定程度上非常类似。

图 5 显示了放电通道形态对连续电流对应光强度波形的影响，即光强度波形产生畸变，这种畸变具体表现为光强度波形在持续阶段的凹陷。在雷电防护标准中通常假定连续电流具有恒定的电流值，然而实际上，连续电流强度并非总是保持稳定，而是随时间发生变化，呈现出多种特征的电流波形。利用高速摄像观测光学资料，吕伟涛等[40]结合闪电通道有、无 M 分量的发光特性差异和电场变化，将回击后的连续电流过程分为连续衰减型、独立型和延续型 3 种。此外，根据不同的电流衰减趋势，Fisher 等[41]将触发闪电中持续 10 ms 以上的连续电流波形细分为了四类，包含大致呈指数衰减、驼峰之后逐渐衰减、渐进式增减以及驼峰之后长时间稳定这 4 种变化趋势。基于 Fisher 等[41]的报道结果，Campos 等[42-43]研究了自然云对地闪电连续电流及对应辐射光强度变化特征，进一步将连续电流类型扩展为 6 种。本文对模拟连续电流电弧通道的分析表明，电弧通道的扭曲会导致对应光强度波形发生畸变，从而使波形持续阶段产生凹陷。自然雷电放电通道存在不同程度的弯曲和分支现象，由此导致的通道光强度波形必然存在多种畸变特征，若考虑通道扭曲

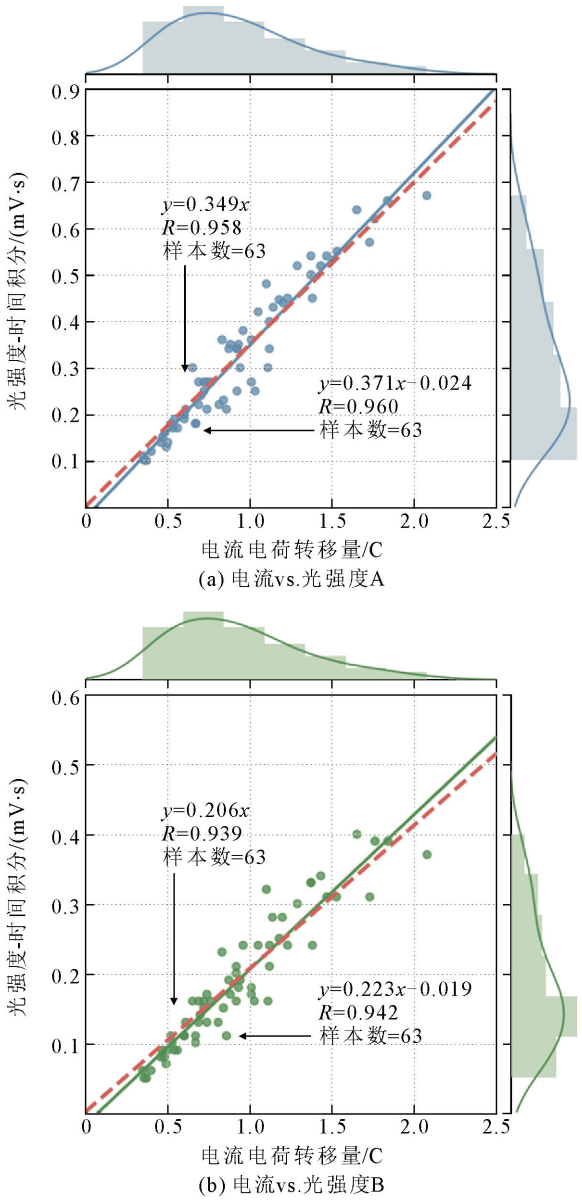


图 7 模拟连续电流电荷转移量与通道光强度-时间积分的关系及二者数据分布趋势

Fig.7 Relation and data distribution trend between the simulated continuing current charge transfer and the channel luminosity-time integration

的影响，结合电流与光强度的波形关联性，可推测连续电流可能不存在这么多种类型，至少，目前文献报道的触发闪电中的实测连续电流不存在过多的精细结构。实际观测得到的通道光强度波形极有可能受到通道形态的影响而表现出类似驼峰、凹陷等特征，还需结合其他观测手段等进行综合分析。

通常，在闪电通道上方会产生不同形态的弯曲或分支结构，若将闪电通道细分为若干微尺度的通道段，则每段的发展方向并不总是一致的[44]。Hill[45]曾通过光学照片测量了若干闪电回击通道的弯曲度，认为各通道段的方向变化呈高斯分布。值得注意的是，连续电流波形在不同通道高度基本保持一致，并不会随着放电通道的发展而发生衰变。由于底部放电通道一般无分支且相对笔直，若要获取稳定真实的连续电流波形，在实际观测中，可选择采集通道底部的光信号间接得到电流波形特征。

5　结论

本文在高压实验室的电弧放电通道内模拟产生了峰值范围为 233.8~633.3 A 的雷电连续电流分量，利用红光敏感型(探测波长范围 200~1000 nm，峰值响应 600 nm)和近红外敏感型(探测波长范围 400~1000 nm，峰值响应 800 nm)的两种光电探测器同步探测了通道光强度，探究了模拟连续电流与对应通道光强度的关系。得到的主要结论如下：

1）正常通道下测量得到的光强度波形能较好地跟随电流波形的变化，而电弧通道扭曲会导致测量得到的通道光强度波形产生畸变，具体表现为光强度波形在持续阶段的凹陷。统计得到光强度波形发生畸变的概率为 19.8%。

2）在两种不同光谱响应下，光强度峰值与电流峰值间均具有明显线性关系，光强度-时间积分与电流电荷转移量之间也存在强烈的线性相关性，可通过光信号间接推断电流相关特征参数，包括电流波形变化及转移电荷量等。

参考文献　References

[1] 秦　锋，陈　伟，王旭桐，等. 强电磁脉冲下金属氧化物避雷器瞬态响应特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3326-3333.
QIN Feng, CHEN Wei, WANG Xutong, et al. Transient response characteristics of metal oxide arrester under strong electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3326-3333.

[2] 周利军，魏仁伟，刘　聪，等. 多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老化特性[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3507-3516.
ZHOU Lijun, WEI Renwei, LIU Cong, et al. Impact aging characteristics of zinc oxide arrester under multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3507-3516.

[3] 李京校，李　敬，姚学玲，等. 古建筑屋顶琉璃瓦件模拟雷击破坏试验研究[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4750-4759.
LI Jingxiao, LI Jing, YAO Xueling, et al. Experimental study on simulated lightning damage to glazed tiles on roofs of ancient buildings[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4750-4759.

[4] 姚伟博，杨海亮，徐海斌，等. 超长金属丝电爆炸等离子体的轴向光辐射均匀性[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5102-5109.
YAO Weibo, YANG Hailiang, XU Haibin, et al. Axial uniformity of pulsed intense flash of extra-long metal wire electrical explosive plasma[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5102-5109.

[5] 蔡　力，刘　伟，徐　斐，等. 航空电磁超材料沿面及组合间隙直流电压放电特性[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4620-4627.
CAI Li, LIU Wei, XU Fei, et al. DC voltage discharge characteristics of aeroelectromagnetic metamaterials along surface and combined gap[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4620-4627.

[6] RAKOV V A, CRAWFORD D E, RAMBO K J, et al. *M*-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D19): 22817-22831.

[7] RAKOV V A, UMAN M A. Lightning: physics and effects[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.

[8] HAGENGUTH J H, ANDERSON J G. Lightning to the empire state building-Part III[includes discussion][J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1952, 71(3): 641-649.

[9] KITAGAWA N, BROOK M, WORKMAN E J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(2): 637-647.

[10] BROOK M, KITAGAWA N, WORKMAN E J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground[J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(2): 649-659.

[11] SHINDO T, UMAN M A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D4): 5189-5198.

[12] BALLAROTTI M G, SABA M M F, PINTO O JR. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(23): L23802.

[13] MEDEIROS C, SABA M M F. Presence of continuing current in negative cloud-to-ground flashes[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Lightning Detection. Broomfield, USA: [s.n.], 2012.

[14] 张　阳，张义军，孟　青，等. 北京地区正地闪时间分布及波形特征[J]. 应用气象学报，2010，21(4)：442-449.
ZHANG Yang, ZHANG Yijun, MENG Qing, et al. Temporal distribution and waveform characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(4): 442-449.

[15] WILSON C T R. On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1916, 92(644): 555-574.

[16] BROOK M, NAKANO M, KREHBIEL P, et al. The electrical structure of the hokuriku winter thunderstorms[J]. Journal of Geophysical

Research: Oceans, 1982, 87(C2): 1207-1215.

[17] KRIDER E P. Electric field changes and cloud electrical structure[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D11): 13145-13149.

[18] MIKI M, MIKI T, TANAKA D, et al. Continuing current characteristics of lightning flashes in summer[C] // Proceedings of 2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL). Nagoya, Japan:[s. n.], 2015.

[19] KURIHARA S, NAKATA H, HASHIMOTO Y, et al. A verification of estimation accuracy of lightning current waveform and charge transfer from measured E-field waveform[J]. Electrical Engineering in Japan, 2017, 198(3): 77-85.

[20] LU G P, FAN Y F, ZHANG H B, et al. Measurement of continuing charge transfer in rocket-triggered lightning with low-frequency magnetic sensor at close range[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, 175: 76-86.

[21] 张义军，刘欣生，王才伟，等. 空中人工触发闪电试验及特性分析[J]. 高原气象，1998，17(1)：55-64.
ZHANG Yijun, LIU Xinsheng, WANG Caiwei, et al. Experiment of artificially triggered lightning in altitude and analysis of its characteristics[J]. Plateau Meteorology, 1998, 17(1): 55-64.

[22] FLACHE D, RAKOV V A, HEIDLER F, et al. Initial-stage pulses in upward lightning: Leader/return stroke versus M-component mode of charge transfer to ground[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(13): L13812.

[23] QIE X, JIANG R B, WANG C X, et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D10): D10102.

[24] MITCHARD D, CLARK D, CARR D, et al. Technique for the comparison of light spectra from natural and laboratory generated lightning current arcs[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(9): 093502.

[25] MITCHARD D, WIDGER P, CLARK D, et al. Optical emission spectra of high current and high voltage generated arcs representing lightning[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(16): 164103.

[26] 董曼玲，刘晓鹏，郭 磊，等. 空气间隙击穿后放电通道内气体密度恢复特性[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4162-4168.
DONG Manling, LIU Xiaopeng, GUO Lei, et al. Recovery characteristics of gas density in discharge channel after air gap breakdown[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4162-4168.

[27] 罗东辉，袁 涛，司马文霞，等. 连续冲击电流作用下土壤放电通道体积特征参数提取方法及机理分析[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1791-1799.
LUO Donghui, YUAN Tao, SIMA Wenxia, et al. Mechanism and method of volume parameter extraction of soil discharge channel under successive impulse currents[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1791-1799.

[28] 张志劲，韦冬洪，蒋兴良，等. 低气压下开关柜空气间隙雷电冲击放电特性[J]. 高电压技术，2019，45(3)：914-921.
ZHANG Zhijin, WEI Donghong, JIANG Xingliang, et al. Lightning impulse discharge performance of switchgear air gaps at low air pressure[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 914-921.

[29] ZHOU M, FAN Y B, WANG J G, et al. Experimental investigation on correlation between fast-front lightning current and the resultant arc channel luminosity[J]. Journal of Electrostatics, 2020, 106: 103455.

[30] 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.

[31] ZHOU M, FAN Y B, WANG J G, et al. Laboratory generated symmetrical-waveshape lightning current versus arc channel luminosity[J]. Journal of Electrostatics, 2020, 108: 103503.

[32] 周 蜜，范雅蓓，王建国，等. 慢前沿冲击电流与放电通道光强度关系研究[J]. 电机与控制学报，2021，25(3)：8-16.
ZHOU Mi, FAN Yabei, WANG Jianguo, et al. Correlation between slow-front impulse current and resultant channel luminosity in air gap discharge[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(3): 8-16.

[33] 王建国，裴立献，薛 健，等. 雷电连续电流对铝合金板材的烧蚀特性[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3540-3545.
WANG Jianguo, PEI Lixian, XUE Jian, et al. Arc erosion effect of lightning continuous current on aluminum alloy sheet[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3540-3545.

[34] 刘亚坤，戴明秋，毕晓蕾，等. 三种冲击电流连续作用下铝 3003 合金的损伤特性[J]. 电工技术学报，2020，35(6)：1173-1180.
LIU Yakun, DAI Mingqiu, BI Xiaolei, et al. Damage characteristics of Al alloy 3003 suffered from three continuous impulse currents[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1173-1180.

[35] 孙晋茹，焦梓家，朱 鑫，等. 光纤复合架空地线雷电损伤模式及影响因素的实验及仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1872-1880.
SUN Jinru, JIAO Zijia, ZHU Xin, et al. Experimental and simulation study of damage mode and influencing factors of lightning damage to optical fiber ground wires under lightning impulse and continuous current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1872-1880.

[36] RAKOV V A, UMAN M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 403-426.

[37] 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.

[38] DIENDORFER G, VIEHBERGER M, MAIR M, et al. An attempt to determine currents in lightning channel branches from optical data of a high speed video system[C]//Proceedings of the International Conference on Lightning and Static Electricity. Blackpool, UK: Royal Aeronautical Society, 2003.

[39] ZHOU E W, LU W T, ZHANG Y, et al. Correlation analysis between the channel current and luminosity of initial continuous and continuing current processes in an artificially triggered lightning flash[J]. Atmospheric Research, 2013, 129/130: 79-89.

[40] 吕伟涛，张义军，周秀骥，等. 火箭触发闪电通道的亮度特征分析[J]. 气象学报，2007，65(6)：983-993.
LÜ Weitao, ZHANG Yijun, ZHOU Xiuji, et al. Analysis of channel luminosity characteristics in rocket-triggered lightning[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(6): 983-993.

[41] FISHER R J, SCHNETZER G H, THOTTAPPILLIL R, et al. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D12): 22887-22902.

[42] CAMPOS L Z S, SABA M M F, PINTO O, et al. Waveshapes of con-

tinuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations[J]. Atmospheric Research, 2007, 84(4): 302-310.

[43] CAMPOS L Z S, SABA M M F, PINTO O, et al. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning[J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2/4): 416-424.

[44] IDONE V P. Microscale tortuosity and its variation as observed in triggered lightning channels[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D11): 22943-22956.

[45] HILL R D. Analysis of irregular paths of lightning channels[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(6): 1897-1906.



周　蜜

1986—，男，博士，副教授，博导

主要从事雷电防护和接地技术方面的研究工作

E-mail: zhoumi927@whu.edu.cn

ZHOU Mi

Ph.D.

Associate professor



范昊深

2000—，男，硕士生

主要从事雷电防护和接地技术方面的研究工作

E-mail: fhs70073@whu.edu.cn

FAN Haoshen



左芯睿

2001—，女，硕士生

主要从事雷电防护和雷电物理方面的研究工作

E-mail: rachelz@whu.edu.cn

ZUO Xinrui



蔡　力(通信作者)

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工作

E-mail: caili@whu.edu.cn

CAI Li

Ph.D., Professor

Corresponding author



范雅蓓

1997—，女，硕士

主要从事带电作业技术方面的研究工作

E-mail: 846795177@qq.com

FAN Yabei



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工作

E-mail: wjg@whu.edu.cn

WANG Jianguo

Ph.D., Professor

收稿日期　2023-05-09　修回日期　2023-08-10　　编辑　陈　蔓