第 49 卷 第 6 期：2589-2597　　高电压技术　　Vol.49, No.6: 2589-2597
2023 年 6 月 30 日　　High Voltage Engineering　　June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220749

人工引雷至架空线路与地面雷电流峰值估算比较

蔡　力[1]，胡　强[1]，彭向阳[2]，陈绍东[3]，周　蜜[1]，王建国[1]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院，广州 510080；
3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所，广州 510080）

摘　要：基于 2018—2019 年在广州从化进行的引雷至架空线路和引雷至地面两种火箭引雷试验，分析对比了两种引雷情况下在试验现场测得的回击实测电流峰值以及由雷电定位系统提供的回击估算电流峰值和回击远电场峰值，评估了两种引雷情况下雷电定位系统的电流估算情况。引雷至地面(线路)情况下 87(70)次回击实测电流峰值的几何平均值是 13.4(16.4) kA。相对于引雷至地面的回击，引雷至线路情况下回击电流峰值估算误差整体更偏向纵轴的负轴，这可能是因为电流峰值相同的回击，引雷至线路时产生的远电场峰值比引雷至地面时约低 14%。
关键词：雷电流；回击；雷电定位系统；人工引雷；架空线路；辐射电场

Comparison of Lightning Peak Current Estimation Between Triggered Lightning Striking the Overhead Line and the Ground

CAI Li[1], HU Qiang[1], PENG Xiangyang[2], CHEN Shaodong[3], ZHOU Mi[1], WANG Jianguo[1]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangdong Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China)

Abstract: On the basis of two types of rocket-triggered lightning experiments, i.e., lightning striking the overhead line and the ground, which were conducted in 2018—2019 in Conghua, Guangzhou, we comparatively analyzed the return stroke peak currents measured at the test site, the estimated return stroke peak currents, and the return stroke peak far electric fields provided by the Foshan Total Lightning Location System. Moreover, the current estimation of the lightning location system was evaluated for the two types of experiments. The geometric mean of 87 (70) measured return stroke peak currents in the case of lightning striking the ground (line) is 13.4 (16.4) kA. Compared with the lightning striking the ground, the estimation error of the return stroke peak current is more inclined to the negative axis of the vertical axis in the case of lightning striking to the line. The possible reason is that, for return strokes with the same peak current, the peak far electric field generated by lightning striking the line is lower by about 14% than that by lightning striking the ground.
Key words: lightning current; return stroke; lightning location system; artificially triggered lightning; overhead line; radiating electric field

0　引言

由于闪电发生位置和时间的不确定性，测量雷电流并非易事[1]。最开始，雷电流的测量是利用容易受到雷击的物体，如安装有测量设备的高塔[2-3]。之后，随着人工引雷技术的出现，研究人员利用人工引雷（触发闪电）来研究继后回击的电流[4]。总的来说，这些方法是低效的。在研究了闪电电流峰值和远距离电场峰值之间的强关联性后，研究人员开始使用闪电定位系统来估算闪电电流峰值[5-6]，这种方法的有效性已经在试验和理论上得到验证[7-8]。

研究者往往利用引雷至地面的回击来校正或评估闪电定位系统的估算电流功能。Jerauld 等[9]基于 2001—2003 年夏天在佛罗里达州进行的引雷试验评估了美国国家闪电探测网(NLDN)的性能。Mallick 等[10]利用 2011—2013 年在佛罗里达州获得的火箭引雷数据对全球闪电数据集(GLD360)的性能特征进行了评估。Zhu 等[11]通过 2014—2015 年在佛罗里达州获得的触发闪电数据，对全闪探测网地

基金资助项目：国家自然科学基金(52177154)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177154).

面系统(ENTLN)的性能进行了评估。Li 等[12]基于 2014 年的人工引雷数据校正了佛山全闪电定位系统的估算电流功能。

当雷电不是击中地面，而是击中高大物体时，闪电定位系统往往会高估回击电流峰值[13-14]，因为高塔的特征阻抗通常与雷电通道的等效阻抗不一样，这会造成雷电流的折反射[15]，多次反射会增加高大物体下部的电流，增加的电流会产生更大的电场峰值。Rachidi 等[16]指出，这种增强现象对于继后回击可能更加明显，因为与首次回击相比，继后回击电流波形具有更大的陡度和回击速度。Bermudez 等[17]得出了雷击高大物体时远距离电磁场的计算表达式，改进了 Thottappillil 等[18]提出的电场-电流方程，并给出了高物体和矮物体各自的校正系数。Baba 等[19]提出了雷击高大物体时 3 种电流的远场−电流转换系数，3 种电流分别是物体顶部的第 1 峰值电流和最大峰值电流以及物体底部的峰值电流。Pavanello 等[13]报告说，北美闪电探测网(NALDN)高估了击中 CN 塔闪电电流峰值约 3.5 倍，并验证了 Bermudez 等[17]和 Baba 等[19]提出的校正系数的有效性。Rakov[20]比较了在不同高度(4.5~540 m)的物体顶部测得的回击电流峰值，认为虽然高大物体会影响物体内部电流的分布，但是在物体顶部测得的回击电流峰值不会受到物体高度的影响。

对电力系统而言，架空线路是雷电防护的重要对象，架空线路的结构与高塔不同，它是否会像高塔一样影响闪电定位系统对回击电流峰值的估算是一个值得研究的问题。本文将分析引雷至地面和引雷至架空线路情况下闪电定位系统的回击电流估算是否有差别，并分析产生差别的原因。

1 试验和数据

2018 与 2019 年夏季，武汉大学雷电防护与接地技术教育部工程研究中心与广东电科院、中国气象局合作，在广东省广州市从化区开展了人工引雷试验。本研究一共进行了两种方式的引雷试验，一种是引雷至架空线路，一种是引雷至地面。图 1 给出了试验布置的示意图。

架空线路的塔距为 70 m，高度为 10 m，总长度为 1513 m，共包含 22 级杆塔。图 1 中离雷电流注入点最近的两级杆塔的编号为 14 号和 15 号。

本文雷电流的测量位置在雷电通道的底部，测得的电流也称雷电通道基底电流。当引雷至地面时，雷电流由引流杆引入安装在地面箱体(见图 1)的电流测量设备，经测量后直接流入土壤。引雷至线路情况下，雷电流首先由引流杆引入安装在塔发射架顶部箱体中(见图 1)的电流测量设备，被测量后经一根导线流入 10 kV 架空线路的 C 相，发射架与地面是绝缘的。对于引雷至线路的情况，电流测量设备为 1 mΩ 同轴分流器，测量范围为±50 kA，平均噪声水平为 300 A，3 dB 带宽为 DC−200 MHz。采集到的电流信号由光纤系统传输至控制室经示波器进行采样，采样率为 50 MHz。对于引雷至地面的情况，电流测量设备也是 1 mΩ 同轴分流器，示波器采样率为 10 MHz。

除电流外，还测量了雷电产生的远距离电场波形。远电场波形数据来自佛山全闪电定位系统(Foshan total lightning location system，FTLLS)。

FTLLS 距离引雷试验点 68~126 km，由 9 个探测子站组成，即 CCJ(86.5 km)、LPZ(72.5 km)、MCZ(125.7 km)、DTZ(74.3 km)、JAZ(112.4 km)、

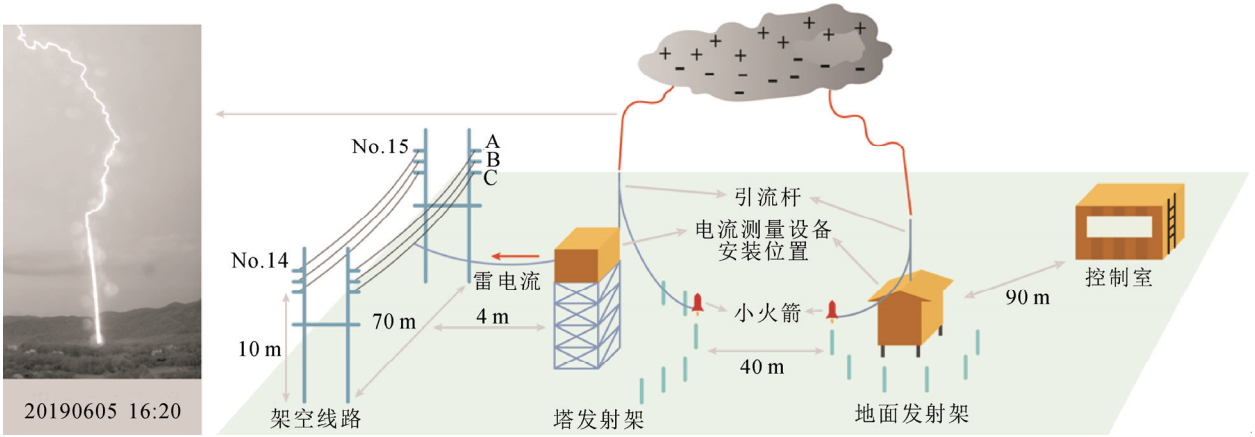


图 1 试验现场示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test site

BNZ(99.8 km)、LSZ(68.5 km)、LJZ(100.8 km)和CCZ(84.5 km)，地理位置分布见图 2。每个子站都安装有一个电场传感器，测量的数据由数据采集卡进行采集，采样率为 10 MHz，数据记录长度 500 μs，FTLLS 除了能够提供回击发生的位置和时间以及回击的估算电流峰值等数据，还能提供回击电场波形数据。

表 1 给出了 2018—2019 年获得的所有人工引雷事件的信息。所有触发闪电都是负极性的。一共发射了 82 枚火箭，引雷至地面情况下 47 枚，引雷至线路情况下 35 枚。成功触发 60 次闪电，其中 34 次击中地面，26 次击中线路，成功率为 73%。这 60 次闪电中，32%的闪电不包含任何回击，剩下 41 次闪电共包含 225 次回击。一些闪电事件没有记录到电流，它们的回击数通过同步测量的电场波形来确定。电流波形可供定量的分析的回击共有 157 次，其中引雷至地面 87 次，引雷至线路 70 次。本文将分析这 157 次回击的在实测电流峰值以及 FTLLS 提供的估算电流峰值和远电场波形。

2　回击实测电流波形特征

本试验测得的典型的触发闪电回击的电流波形见图 3。统计了这 157 次回击的实测电流峰值，分布直方图见图 4，统计结果见表 2。其中 N 指样本数，AM 指算数平均值，GM 指几何平均值，SD 指标准差，Min 指最小值，Max 指最大值。

从图 4 可以看出，回击电流峰值呈对数正态分布。引雷至地面情况下，回击电流峰值的算数平均值和几何平均值分别是 14.6 kA 和 13.4 kA，引雷至线路情况下则分别是 18.0 kA 和 16.4 kA，引雷至线路情况下回击电流峰值略微偏大。图 4 显示两种引雷情况下回击电流峰值的分布模式整体是相似的，两种引雷情况下样本最大分布区间均为 10~15 kA，均占 30%以上，引雷至线路情况下回击电流峰值的样本分布略微偏右一点。

本文测得的回击电流大小与文献中的比较一致，对比表 2 中不同文献的结果，可以发现不同地区测得的触发闪电回击的电流峰值差别不大，几何平均值均在 10~20 kA 之间。

Rakov[20]比较了雷电击中不同高度物体(4.5 m~540 m)时测得的雷电流峰值，发现电流峰值不会受到物体本身的影响，Schoene 等[25]也认为被击物体的电气特性不会影响回击电流峰值。Zhang

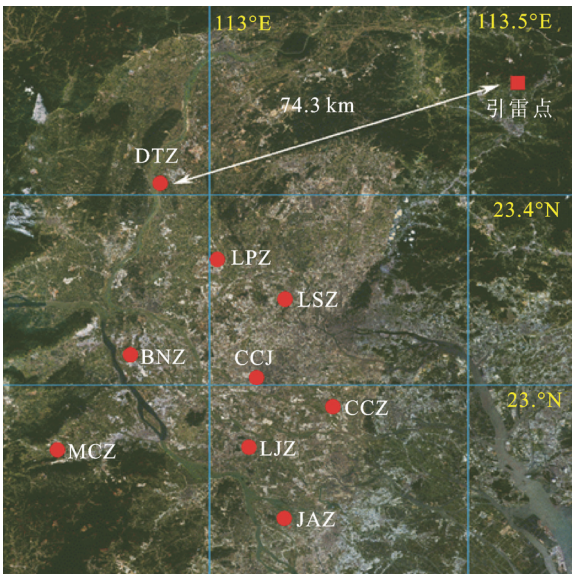


图 2　佛山全闪电定位系统子站分布

Fig.2　Distribution of sub-stations of the Foshan total lightning location system

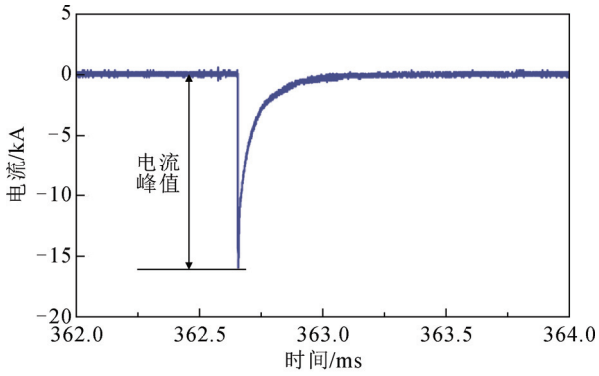
表 1　触发闪电信息

Table 1　Information about the triggered lightning flashes

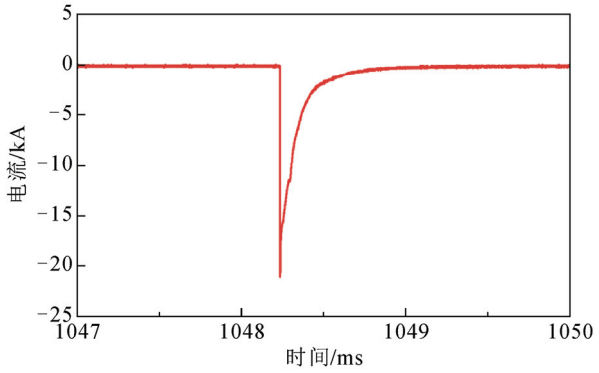
参数	引雷至地面	引雷至线路	合计
发射火箭次数	47	35	82
成功次数	34	26	60
成功率	72%	74%	73%
包含回击的闪电数量	21	20	41
包含回击的闪电占比	62%	77%	68%
回击数	105	120	225
电流可供分析回击数	87	70	157

等[27]的试验地点与本文相同，他们的试验工况是引雷至地面，测得的回击电流峰值的算数平均值和几何平均值分别是 17.7 kA 和 16.4 kA，与本文引雷至架空线路情况下回击电流峰值很一致。本文 2018 年的数据显示引雷至地面时电流峰值几何平均值是 14.5 kA，引雷至线路时则是 15.1 kA，二者很接近。基于以上事实，我们认为本研究中引雷至线路与地面雷电流的差别既不是架空线路的影响，也不是电流测量设备安装位置的影响。

回击电流峰值的累积概率分布曲线见图 5，圆圈和三角代表两种引雷情况下回击电流峰值的百分位数，相应的拟合曲线表达式分别见式(1)和式(2)，拟合决定系数分别是 0.98 和 0.97，其中 P 为累积概率，I 为电流峰值。IEEE(IEEE 1410-2010)推荐的继后回击电流峰值概率分布曲线计算公式见式(3)，我国电力行业(DL/T 620—1997)推荐的回击电流峰值



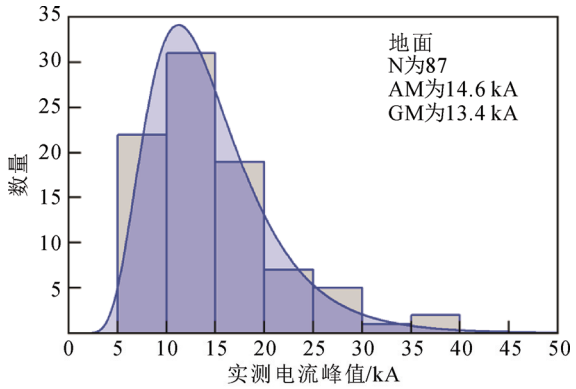
(a) 引雷至地面



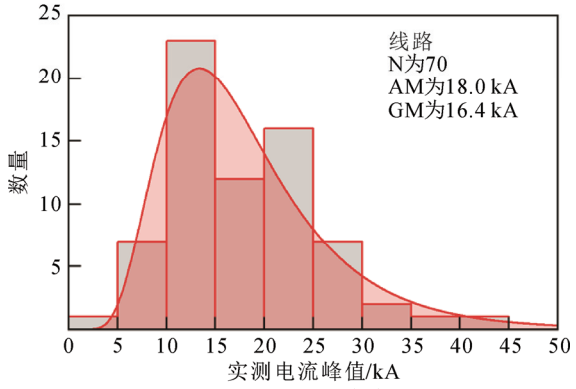
(b) 引雷至线路

图 3 典型回击电流波形

Fig.3 Typical return stroke current waveforms



(a) 引雷至地面



(b) 引雷至线路

图 4 回击电流峰值分布直方图

Fig.4 Histograms of return stroke peak currents

表 2 本文及文献中触发闪电回击实测电流峰值(kA)

Table 2 The measured peak currents (kA) for triggered lightning return strokes in this paper and in the literature

文献	N	AM	GM	SD	Min	Max
本文，地面	87	14.6	13.4	6.4	5.7	36.5
本文，线路	70	18.0	16.4	7.5	3.3	42.5
赵阳等[21]	21	17.2	14.6	10.5	6.6	41.6
张义军等[22]	106	17.9	16.1	—	3.0	41.7
Fisher 等[23]	45	—	12.0	—	—	—
Depasse[24]	54	11.0	—	5.6	4.5	49.9
Schoene 等[25]	21	13.0	11.1	7.0	4.3	28.7
Schoene 等[25]	144	14.0	12.4	6.9	2.8	42.3
Qie 等[26]	36	14.3	12.1	9.2	4.4	41.6
Zhang 等[27]	62	17.7	16.4	—	6.7	38.9

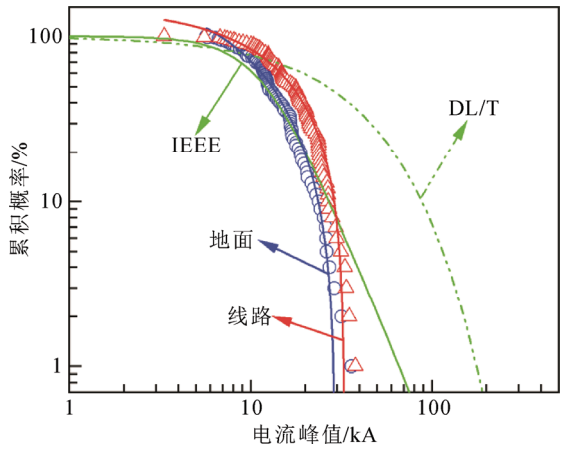


图 5 回击电流峰值累积概率分布

Fig.5 Cumulative probability distribution of return stroke peak currents

概率分布曲线计算式见式(4)。可以看到两种引雷情况下回击电流峰值的累积概率分布曲线接近。在回击电流峰值小于 25 kA 时，本文曲线与 IEEE 推荐曲线很接近。本文曲线与我国电力行业推荐曲线差异较大的原因是因为后者是针对所有回击而言的，并没有将首次回击和继后回击分开，而人工引雷闪电回击的电流峰值是接近继后回击的。《GB/T 50064—2014》对《DL/T 620—1997》推荐的概率公式进行了更新，说明了继后回击电流峰值的概率公式宜按 IEEE(IEEE 1410-2010)推荐的概率公式进行计算。

$$P = 213\mathrm{e}^{-I/11} - 14.5 \tag{1}$$

$$P = 208\mathrm{e}^{-I/26} - 57.3 \tag{2}$$

$$P = \frac{1}{1+(I/12)^{2.7}} \tag{3}$$

$$\lg(P) = -\frac{I}{88} \tag{4}$$

除电流峰值外，还统计了这 157 次回击电流波形的 10%~90%上升时间和半峰值时间(上升沿 50%~下降沿 50%)，参数分布直方图见图 6、图 7。

Schoene 等[25]表明架空线路的存在增加了回击电流的 10%~90%上升时间，在他们的试验中，当引雷至地面时，回击电流上升时间的几何平均值为 0.4 μs，引雷至线路时则为 1.2 μs。本文测得的数据也显示了这一现象，当引雷至线路时，回击电流上升时间的几何平均值为 0.47 μs，是引雷至地面情况(0.25 μs)的 1.9 倍。对于引雷至地面的情况，大多数回击的上升时间都分布在 0.1~0.3 μs 之内，占 71%。对于引雷至线路的情况，占比最大的范围是 0.4~0.6 μs，占 68%。回击电流上升时间的这种增加效应很可能是由于引雷至线路时雷电流遇到的较大线路特征阻抗(数百欧姆)造成的。

引雷至地面时，半峰值时间的几何平均值为 10.0 μs，引雷至线路时，几何平均值为 5.4 μs，这表明引雷至线路的回击上升得慢但下降得快。图 7 显示，引雷至线路时半峰值时间的最大分布区间为 0~3 μs，占 33%，引雷至地面时半峰值时间最大分布区间为 3~6 μs，占 24%。似乎架空线路的存在降低了回击电流的半宽时间。

3　闪电定位系统回击电流峰值估算

对于某次回击，如果它的电流在试验现场被成功测量，并且被闪电定位系统成功记录，那么就可以通过比较试验现场的实测电流和闪电定位系统的估算电流来分析闪电定位系统估算电流峰值的误差。本文共有 110 个这样的样本，引雷至地面有 65 个，引雷至线路有 45 个，这些样本的值见图 8。图 8 中灰色实线代表 $y=x$，两条灰色虚线代表 $y=x\pm2.5$。一个点越接近实线，表明这次回击的电流峰值估算越准确，只要一个点落在两条虚线之间，就意味着这次回击的估算电流误差不超过±2.5 kA。观察图 8，可以发现整体上圆点比方点更靠下，大部分圆点都分布在 $y=x$ 直线下方，很多甚至分布在 $y=x-2.5$ 直线下方，这表明两种引雷情况下雷电定位系统估算电流峰值与现场实测电流峰值的对比情况(或称“估算情况”)存在差别。

图 9 给出了两种引雷情况下估算误差箱线图，估算误差 δ 计算式见式(5)(i_v 为估算电流，i_a 为实测电

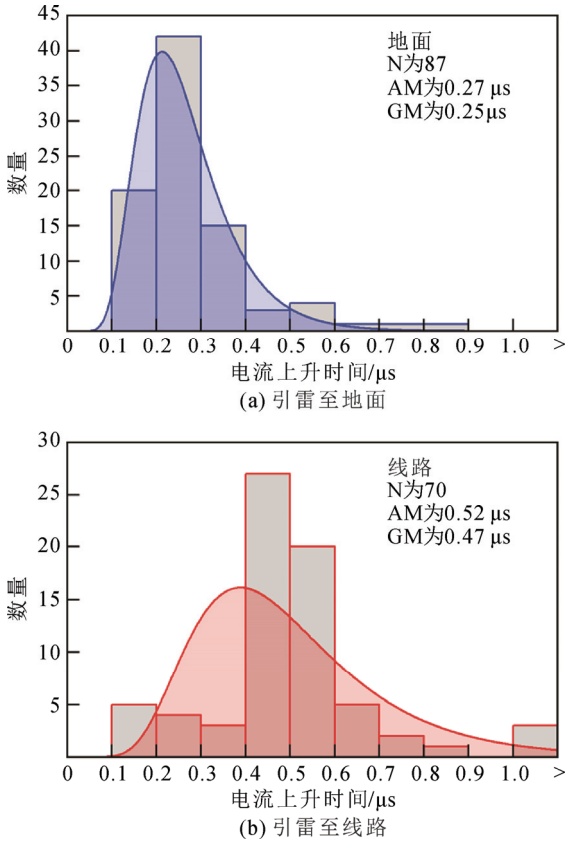


图 6　回击电流上升时间分布直方图

Fig.6　Histograms of return stroke risetime

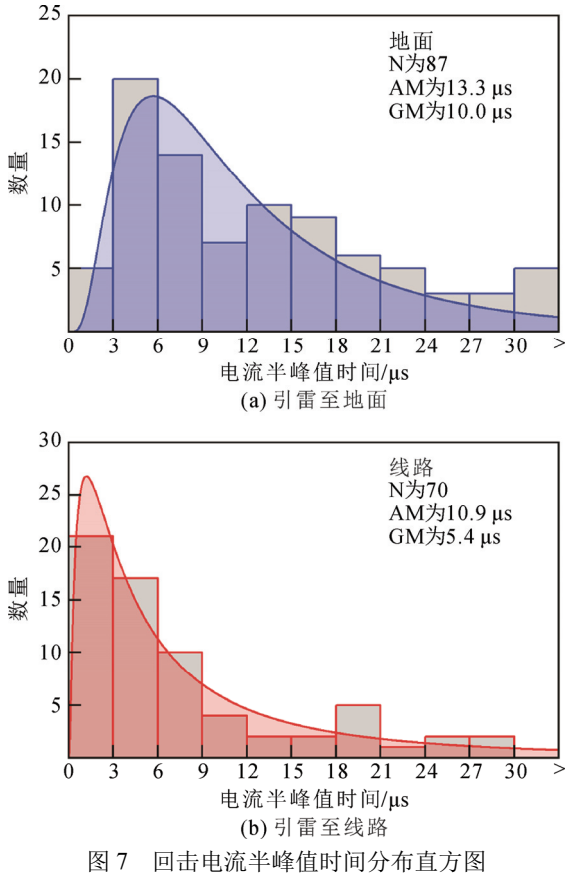


图 7　回击电流半峰值时间分布直方图

Fig.7　Histograms of return stroke half-peak width

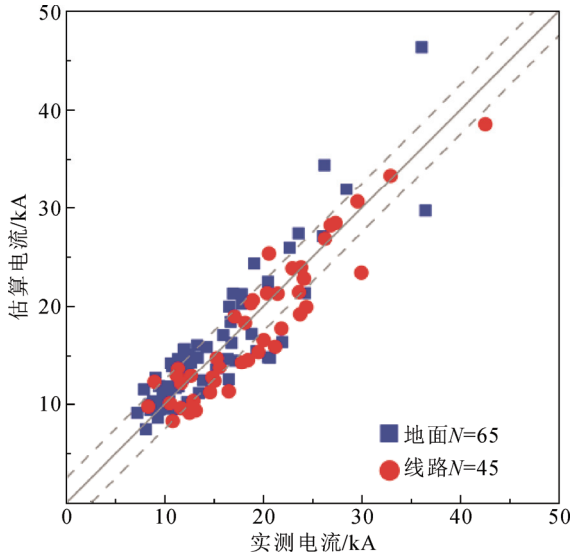


图 8 回击实测电流峰值-估算电流峰值散点图

Fig.8 Scatterplot of measured peak currents-estimated peak currents of return strokes

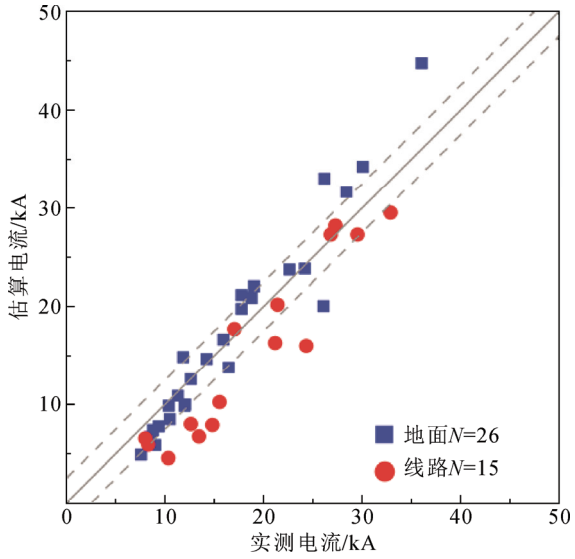


图 10 GDLLS 回击实测电流峰值-估算电流峰值散点图

Fig.10 Scatterplot of measured peak currents-estimated peak currents of return strokes from GDLLS

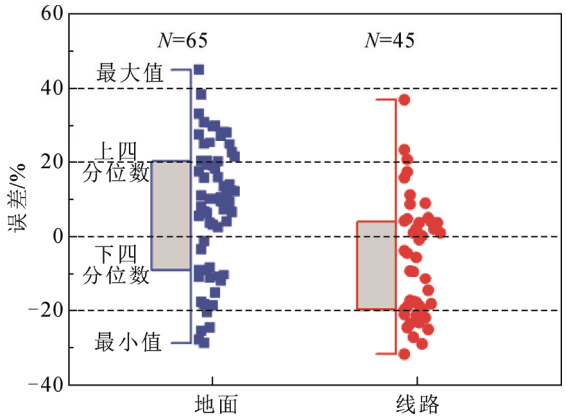


图 9 回击电流峰值估算误差箱线图

Fig.9 Box line diagram of the estimation error of the return stroke peak currents

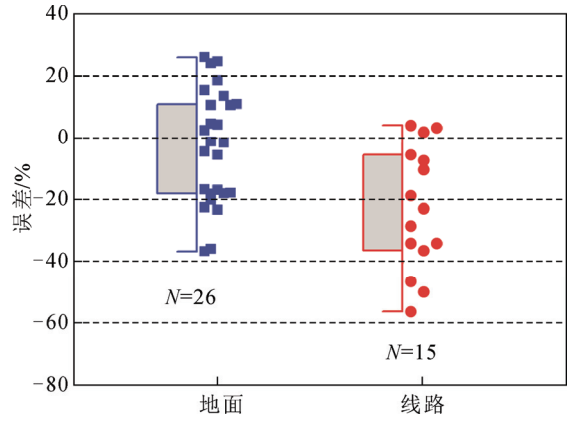


图 11 GDLLS 回击电流峰值估算误差箱线图

Fig.11 Box line diagram of the estimation error of the return stroke peak currents from GDLLS

流)。可以看到与引雷至地面情况相比，引雷至线路情况下回击电流峰值估算误差整体更偏向纵轴的负轴，这印证了图 8 数据所显示的差别。注意，这并不意味着引雷至线路情况下回击电流峰值的估算误差更大。

$$\delta = \frac{i_{\mathrm{v}} - i_{\mathrm{a}}}{i_{\mathrm{a}}} \times 100\% \tag{5}$$

值得注意的是，这种差别不仅体现在 FTLLS 提供的数据，广东电网闪电定位系统（Guang Dong lightning location system，GDLLS）提供的数据也显示了这种差别，这说明这种现象不是偶然的。GDLLS 的探测范围覆盖整个广东省，有 16 个探测站（截止 2012 年）[28]。本文获取了 GDLLS 2018 年的数据，见图 10、图 11。

图 10 所示分布模式与图 8 中呈现的一致，圆点普遍低于方点。图 11 所示分布模式与图 9 中呈现的一致，引雷至线路的数据更偏向纵轴的负轴。

4 回击远电场峰值与电流峰值

对于 FTLLS 而言，回击远电场峰值是影响回击估算电流峰值的关键参数。相对于 GDLLS，FTLLS 可以提供回击的远电场波形，本章将基于 FTLLS 提供的回击远电场数据分析造成图 8—图 11 中差别的可能原因。

根据麦克斯韦方程，垂直闪电在距离 r 处产生的时变垂直电场 $E_z(r,t)$ 的计算式见式(6)[29]。其中 h 是闪电通道某一点的高度，h_{b} 和 h_{t} 是闪电通道底部

和顶部的高度；R 是观测点到闪电通道某一点的距离；i 是回击电流。当观测距离足够远，例如数十千米，即 r 远大于 h，假设回击速度 v 是恒定的，式(6)可以改写为式(7)[29]，其中 ε_0 为真空介电常数，c 为真空中的光速，μ_0 为真空磁导率。式(7)表明回击的电流与远距离电场成线性正相关，即可以根据远电场峰值估算回击电流峰值。

$$E_z(r,t)=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\left(\begin{array}{l}\int_{h_b}^{h_t}\frac{2h^2-r^2}{R^5}\int_0^{\tau}i(h,\tau-R/c)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}h+\\ \int_{h_b}^{h_t}\frac{2h^2-r^2}{cR^4}i(h,t-R/c)\mathrm{d}h-\\ \int_{h_b}^{h_t}\frac{r^2}{c^2R^3}\frac{\partial i(h,t-R/c)}{\partial t}\mathrm{d}h\end{array}\right) \tag{6}$$

$$E_z(r,t)\approx\frac{\mu_0 v}{2\pi r}(i(h_t,t-r/c)-i(h_b,t-r/c)) \tag{7}$$

1989 年，Willett 等[30]根据人工引雷试验数据，得出了回击电流峰值和远电场峰值之间的经验方程，见式(8)。1992 年，Rakov 等[31]将式(8)改进为式(9)。

$$I=-3.9\times10^{-2}DE-2.7\times10^{3} \tag{8}$$

$$I=1.5-0.037DE \tag{9}$$

式中：I 是电流峰值，式(8)中单位为 A，式(9)中单位为 kA；D 是观测点到闪电通道的距离，式(8)中单位为 m，式(9)中单位为 km；E 是电场峰值，单位是 V/m。这两个经验方程被广泛应用于各闪电定位系统，FTLLS 也使用了类似的估算公式[12]，即 FTLLS 使用远电场峰值来估算电流峰值，是一套基于 VLF/LF 电场信号的闪电定位系统。

本文选择了 FTLLS 4 个距离具有代表性的子站(DTZ、CCZ、LJZ、MCZ)测量的远电场数据进行分析。图 12 给出了两种引雷情况下这 4 个子站测得的典型回击远电场波形。统计了这 4 个子站测量的这 157 次回击的远电场峰值，为了排除测量距离差异的影响，又由于远电场峰值与距离呈反比，按照惯例将远电场峰值折算至 100 km，折算后的远电场峰值称为折算电场峰值，折算电场峰值的分布直方图见图 13。

图 13 显示两种引雷情况下折算电场峰值的样本分布较为接近，引雷至地面情况下，51%的样本分布在 2~4 V/m 区间，引雷至线路情况下，44%的样本分布在这个范围。无论是算数平均值还是几何平均值，引雷至线路情况下回击的折算电场都略大 0.2 V/m。这样的结果有不合理性，因为第 3 章表明相对于引雷至地面的回击，引雷至线路情况下回击

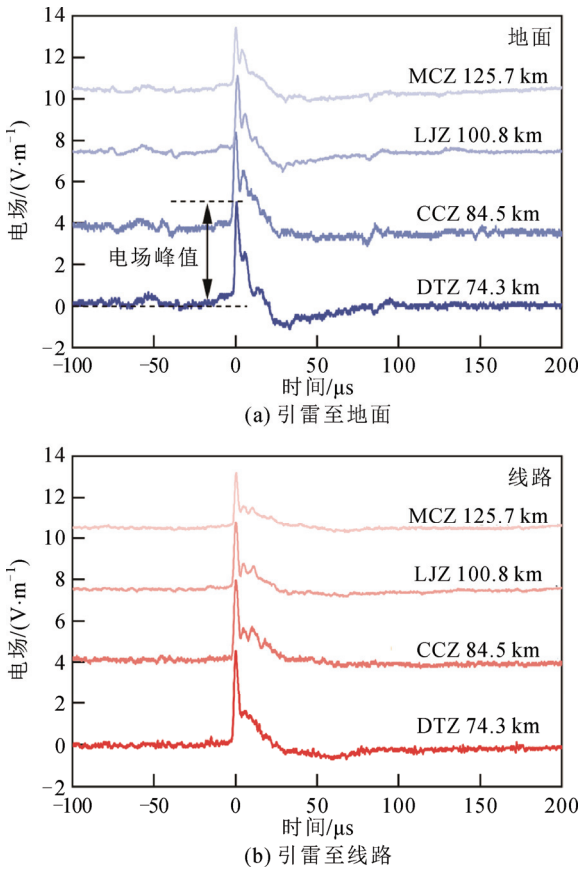


图 12　不同站点测得的回击远电场波形

Fig.12　Return stroke far electric field waveforms measured at different sub-stations

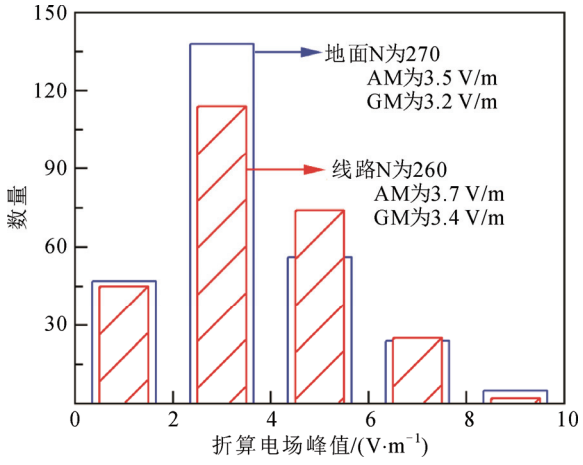


图 13　折算电场峰值分布直方图

Fig.13　Histogram of the normalized electric field peaks

电流峰值估算误差整体更偏向纵轴的负轴。造成这种不合理现象的关键原因是图 13 在对比电场峰值时并没有考虑电流峰值的影响，第 2 章表明引雷至线路情况下回击电流峰值偏大，引雷至线路情况下几何平均值是 16.4 kA，引雷至地面则是 13.4 kA。本文将那些电流在试验现场被成功测量的回击单独

进行统计，将这些回击的电场峰值不仅折算到 100 km，还折算至 15 kA，统计结果见图 14，图中柱状图顶部数字代表几何平均值，N 代表样本数。

可以发现，无论是 2018 年还是 2019 年，引雷至线路回击折算电场峰值的几何平均值都比引雷至地面的低。2018 年低 0.5 V/m，约低 14.7%。2019 年低 0.4 V/m，约低 13.3%。这意味着在两种引雷情况下电流峰值相同的回击产生的远电场峰值是不同的，引雷至线路的约低 14%。回击远电场峰值是影响闪电定位系统估算电流峰值的关键因素，电场峰值越低，估算电流峰值就越低。

图 15 所示的电流峰值和电场峰值的拟合图同样可以说明这一点，其中电场峰值数据来自 DTZ。引雷至地面和引雷至线路情况下的拟合曲线方程分别见式(10)和式(11)，其中 I 为电流峰值，E 为电场峰值。可以看到引雷至线路情况下拟合曲线的斜率更大，这同样表明回击电流峰值相同时，引雷至线路时产生的远电场峰值更低。这可能是两种引雷情况下雷电定位系统估算电流峰值与试验现场实测电流峰值的对比情况存在一定差别的原因。除此之外，由于在引雷回路中测量的电流不能直接等效为雷电通道中的底部电流，试验现场两种引雷情况下测量回路的不同也可能是形成这种差别的原因。

$$I = 2.8E + 3.5 \tag{10}$$

$$I = 3.0E + 5.0 \tag{11}$$

高塔会增加回击远距离电场峰值，从而导致闪电定位系统高估雷击高塔的电流。本文表明这个结论不适用于架空线路，相反，架空线路的存在会降低远电场的峰值。造成这种现象的原因可能是：第一，引雷至线路回击电流的上升时间较大，本文引雷至线路回击的电流上升时间是引雷至地面的 1.9 倍。Rachidi 等[16]指出，回击电流上升时间越大，该回击产生的远电场峰值可能越小。第二，雷电流在架空线路中的水平分布。当引雷至线路时，大约有一段 70 m 长的水平分布的雷电流，这部分电流携带的电荷在空间中也是水平分布的，这可能也是远电场峰值降低的原因。

5 结论

1）引雷至地面情况下 87 次回击实测电流峰值的算数平均值和几何平均值分别是 14.6 kA 和 13.4 kA，引雷至线路情况下 70 次回击实测电流峰值的算数平均值和几何平均值分别是 18.0 kA 和 16.4 kA。

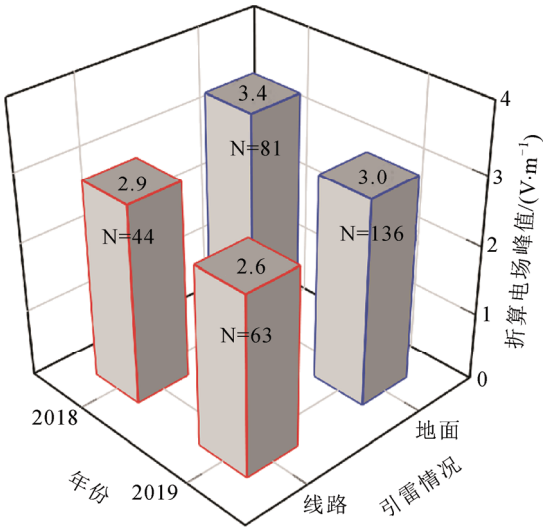


图 14 考虑电流峰值后折算电场峰值柱状图

Fig.14 Bar chart of the normalized electric field peaks after considering the current peaks

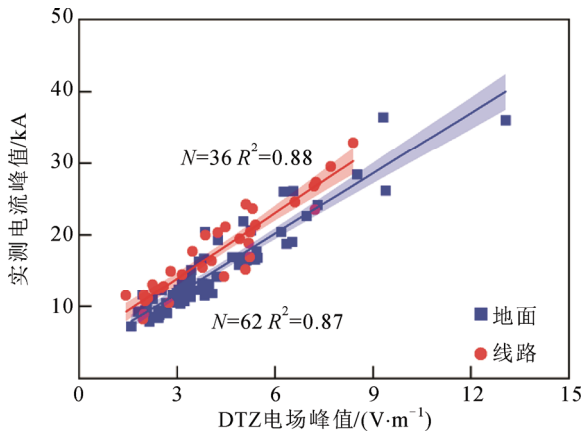


图 15 回击电流峰值−电场峰值拟合图

Fig.15 Fitting graph of return stroke peak currents-peak electric fields

2）两种引雷情况下雷电定位系统估算电流峰值与试验现场实测电流峰值的对比情况存在一定差别，引雷至线路情况下回击电流峰值估算误差整体更偏向纵轴的负轴。

3）两种引雷情况下电流峰值相同的回击产生的远电场峰值是不同的，引雷至线路的低约 14%，这可能是造成两种引雷情况下估算电流和实测电流的对比情况存在差别的原因。

参考文献 References

[1] 蔡 力，柯逸丰，王建国，等. 张北风电场雷击风机光电同步观测[J/OL]. 高电压技术，2022：1-10. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20211925.
CAI Li, KE Yifeng, WANG Jianguo, et al. Simultaneous photoelectric observations of natural lightning stroke on wind turbines in Zhangbei wind farm[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-10. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20211925.

[2] TAKAMI J, OKABE S. Observational results of lightning current on transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 547-556.
[3] HUSSEIN A M, JANISCHEWSKYJ W, MILEWSKI M, et al. Current waveform parameters of CN tower lightning return strokes[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 60(2/4): 149-162.
[4] 张其林，郄秀书，孔祥贞，等. 人工引发闪电和自然闪电回击电流波形的对比分析[J]. 中国电机工程学报，2007，27(6)：67-71.
ZHANG Qilin, QIE Xiushu, KONG Xiangzhen, et al. Comparative analysis on return stroke current of triggered and natural lightning flashes[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 67-71.
[5] 王　宇，谷山强，孟　刚，等. 雷电定位系统反演地闪回击电流的准确度受回击速度取值的影响[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1617-1624.
WANG Yu, GU Shanqiang, MENG Gang, et al. Effect of lightning return stroke speed on accuracy of inversed return stroke peak current using lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1617-1624.
[6] 李永福，司马文霞，陈　林，等. 基于雷电定位数据的雷电流参数随海拔变化规律[J]. 高电压技术，2011，37(07)：1634-1641.
LI Yongfu, SIMA Wenxia, CHEN Lin, et al. Law between parameters of lightning current and elevation based on lightning detection data[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1634-1641.
[7] RACHIDI F, THOTTAPPILLIL R. Determination of lightning currents from far electromagnetic fields[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D10): 18315-18321.
[8] RACHIDI F, BERMUDEZ J L, RUBINSTEIN M, et al. On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 60(2/4): 121-129.
[9] JERAULD J, RAKOV V A, UMAN M A, et al. An evaluation of the performance characteristics of the U. S. national lightning detection network in Florida using rocket-triggered lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D19): D19106.
[10] MALLICK S, RAKOV V A, NGIN T, et al. Evaluation of the GLD360 performance characteristics using rocket-and-wire triggered lightning data[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(10): 3636-3642.
[11] ZHU Y, RAKOV V A, TRAN M D, et al. Evaluation of ENTLN performance characteristics based on the ground truth natural and rocket-triggered lightning data acquired in Florida[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(18): 9858-9866.
[12] LI Q X, WANG J G, CAI L, et al. On the return-stroke current estimation of Foshan Total Lightning Location System (FTLLS)[J]. Atmospheric Research, 2021, 248: 105194.
[13] PAVANELLO D, RACHIDI F, JANISCHEWSKYJ W, et al. On the current peak estimates provided by lightning detection networks for lightning return strokes to tall towers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 453-458.
[14] 陈怀飞，王　宇，孙　通，等. 风机回击电磁场波形特征及辐射增强效应研究[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2122-2130.
CHEN Huaifei, WANG Yu, SUN Tong, et al. Study on waveform characteristics and radiation enhancement effect of lightning return stroke initiated from wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2122-2130.
[15] GUERRIERI S, NUCCI C A, RACHIDI F, et al. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1543-1555.
[16] 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.
[17] BERMUDEZ J L, RACHIDI F, RUBINSTEIN M, et al. Far-field-current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(1): 146-159.
[18] THOTTAPPILLIL R, UMAN M A. Comparison of lightning return-stroke models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D12): 22903-22914.
[19] BABA Y, RAKOV V A. Lightning strikes to tall objects: currents inferred from far electromagnetic fields versus directly measured currents[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(19): L19810.
[20] RAKOV V A. Transient response of a tall object to lightning[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(4): 654-661.
[21] 赵　阳，郄秀书，孔祥贞，等. 人工触发闪电电流波形特征参数分析[J]. 物理学报，2009，58(9)：6616-6626.
ZHAO Yang, QIE Xiushu, KONG Xiangzhen, et al. Analysis on the parameters of the current waveforms of triggered lightning[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6616-6626.
[22] 张义军，张　阳，郑　栋，等. 2008-2014 年广东人工触发闪电电流特征[J]. 高电压技术，2016，42(11)：3404-3414.
ZHANG Yijun, ZHANG Yang, ZHENG Dong, et al. Current characteristcs of triggered lightnings in Guangdong from 2008 to 2014[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3404-3414.
[23] 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.
[24] DEPASSE P. Statistics on artificially triggered lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D9): 18515-18522.
[25] SCHOENE J, UMAN M A, RAKOV V A, et al. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D3): D03106.
[26] QIE X S, JIANG R B, YANG J. Characteristics of current pulses in rocket-triggered lightning[J]. Atmospheric Research, 2014, 135-136: 322-329.
[27] ZHANG Y, ZHANG Y J, XIE M, et al. Characteristics and correlation of return stroke, M component and continuing current for triggered lightning[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139: 10-15.
[28] CHEN S M, DU Y, FAN L M. Lightning data observed with lightning location system in Guang-Dong province, China[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1148-1153.
[29] WACKER R S, ORVILLE R E. Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 U. S. National Lightning Detection Network upgrade: 2. Theory[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104(D2): 2159-2162.
[30] WILLETT J C, BAILEY J C, IDONE V P, et al. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D11): 13275-13286.
[31] RAKOV V A, THOTTAPPILLIL R, UMAN M A. On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D11): 11527-11533.



蔡　力
1987—，男，博士，副教授
研究方向为雷电物理、雷电探测、雷电防护
E-mail: cail@whu.edu.cn

CAI Li
Ph.D.
Associate professor



周　蜜(通信作者)
1986—，男，博士，副教授
研究方向为高压测量、雷电防护与接地技术、电磁兼容
E-mail: zhoumi927@whu.edu.cn

ZHOU Mi
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-02　修回日期　2022-10-11　　编辑　陈　蔓