

齐奇,吕伟涛,武斌,等. 广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测. 应用气象学报, 2020, 31(2): 156-164.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200203

广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测

齐奇¹⁾²⁾ 吕伟涛^{1)*} 武斌¹⁾ 马颖¹⁾ 陈绿文³⁾ 姜睿娇¹⁾²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

²⁾(中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049)

³⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要

利用广州高建筑物雷电观测站的高速摄像机在 2012—2018 年拍摄到的发生在两座尖顶建筑物广州塔(600 m 高, 12 次)和广晟国际大厦(360 m 高, 9 次)上的 21 次下行地闪光学数据, 结合广东电网闪电定位系统提供的回击峰值电流数据, 统计建筑物高度和回击峰值电流强度对闪击距离的影响, 并探讨闪击距离与上行连接先导起始时间的相关性。结果表明: 更高的建筑物上雷电的闪击距离更长, 广州塔闪击距离的中位数约是广晟国际大厦闪击距离中位数的 2 倍; 对于确定高度的建筑物, 闪击距离有随着回击峰值电流增强而变长的趋势, 且建筑物越高, 对应的回击峰值电流也越强; 在下行与上行先导连接前 0.1 ms 内, 二者的平均速率之比小于 4, 且速率比值在 0~1 这一区间的样本最多, 占比约 65%。

关键词: 高建筑物; 闪击距离; 光学观测; 回击峰值电流

引言

地闪的连接过程是闪电从先导阶段向回击阶段的瞬间转变过程^[1], 它直接与雷击的物理机制相联系, 是输电线、风力发电机和建筑物等雷电防护设计中重点关注的物理过程。该过程一般被认为包括两个阶段: 第 1 阶段为一个或多个上行先导从接地物体起始并朝下行先导发展, 第 2 阶段为上行和下行先导最后瞬间的击穿阶段(最后一跳)^[2]。闪击距离是雷电连接过程中一个重要的特征参量, 已发表的文献中有两种定义: 一些学者将闪击距离定义为上行连接先导从被雷击物体上激发出来的瞬间, 被雷击物体和下行先导头部之间的距离^[3], 通常认为在这一瞬间雷击目标被确定; 也有学者将闪击距离定义为在先导之间的最后击穿时, 下行先导头部到雷击物体之间的距离^[4]。

光学观测是研究闪击距离最直观的手段。许多学者已经通过光学观测对地闪连接过程进行了研究^[5-17], 但针对闪击距离这一参量的研究鲜见报道。Wang 等^[10]结合闪电连接过程光学观测系统(Lightning Attachment Process Observation System, LAPOS)记录的光学数据和回击峰值电流数据, 估算了一次人工触发闪电 7 次回击过程对应的闪击距离(触发闪电无首次回击, 均为继后回击)。Saba 等^[14]基于时间分辨率分别为 10000 帧/s 和 20000 帧/s 的高速摄像机对 3 次发生在两座高度不超过 60 m 的建筑上自然闪电的闪击距离进行了研究。Visacro 等^[15]利用时间分辨率为 20000 帧/s 的高速摄像机对发生在一座 60 m 高铁塔上的首次和继后回击中的闪击距离进行研究。虽然利用光学数据研究闪击距离具有较好的直观性, 但也存在客观上的不足。由于上行先导初始亮度较弱, 往往难以被摄像机捕获, 能分辨时其可能已经发展了数米甚至百米。此外, 天气条件

2019-10-08 收到, 2020-01-20 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研究发展计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金项目(41775010), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2017-Y009, 2018Z003)

* 通信作者, 邮箱: lyuwt@foxmail.com

(如云、雨和雾等)对闪击距离的光学观测影响也很大。因此,积累到足够的适合分析闪击距离的闪电光学数据并不容易。

除了利用光学观测数据直观地估算建筑物的闪击距离,一些学者也提出根据击中建筑物的回击峰值电流强度估算闪击距离的方法。自 Golde^[3]的工作以来,很多研究者提出回击峰值电流和闪击距离的关系式,大多是 $D=A \times I_p^B$ 形式^[15,18-22] (D 表示闪击距离, I_p 表示回击峰值电流, A 和 B 为常数)。Visacro 等^[15]统计了巴西一座 60 m 高塔上发生的 17 次雷电首次回击的闪击距离,发现闪击距离与回击峰值电流的关系为 $D=34 \times I_p^{0.45}$ 。在利用滚球法对建筑物进行防雷设计时,滚球半径(闪击距离)可由公式 $D=10 \times I_p^{0.65}$ 确定^[19]。上述研究给出了回击峰值电流与低矮建筑物闪击距离之间的关系,但对高建筑物上(特别是高度大于 200 m)回击峰值电流与闪击距离之间关系的研究并不多,相关的观测结果也很少。

本文利用 2012—2018 年在广州高建筑物雷电观测站观测到的广州珠江新城地区两座建筑物(顶部形状相似,均为尖顶型建筑)上发生的 21 次地闪连接过程的光学数据,分析闪击距离与建筑物高度、回击峰值电流强度的相关性,并探讨影响闪击距离的关键因子。

1 观测与数据

广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG)作为中国气象局雷电野外科学试验基地(CMA_FEELS)的重要组成部分,连续多年对广州珠江新城地区高建筑物上的闪电过程进行观测^[7,23-29],经过 10 年不断的建设发展,目前共包含 6 个观测点。本研究用数据由架设在 TOLOG 主观测站的两台 Photron FASTCAM 高速摄像机(编号分别为 HC-1 和 HC-2)获取。表 1 为摄像机的具体参数。利用闪电连接

表 1 高速摄像机参数

Table 1 Parameters of High-speed Video Cameras

观测时间	设备编号	型号	帧率/(帧/s)	焦距/mm	空间分辨率/(m/像素)	
					广州塔	广晟国际大厦
2012 年 6 月—2015 年 11 月	HC-1	Photron FASTCAM SA5	10000	14	4.7	3.0
2016 年 5 月—2018 年 9 月	HC-1	Photron FASTCAM SAZ	20000	14	4.7	3.0
2010 年 6 月—2018 年 9 月	HC-2	Photron FASTCAM SA5	50000	20	3.3	

过程光学观测系统^[30-31]的一个通道作为所有观测设备的触发源,每个触发事件由高精度 GPS 时钟授时,时间精度为 30 ns。此外,地闪定位数据由广东电网闪电定位系统获取,提供了地闪回击的时间、位置、极性和峰值电流等信息^[32]。Chen 等^[33]对 2007—2011 年从化人工触发闪电以及 2009—2011 年广州高建筑物雷电观测试验数据与广东电网闪电定位系统探测结果对比分析表明:定位系统反演的回击电流幅值的相对偏差为 0.4%~42%,相对偏差的算术平均值和几何中值分别为 16.3% 和 19.1%。

图 1 为 TOLOG 与广州塔(600 m 高)、广晟国际大厦(360 m 高)的相对位置,观测站到两座建筑物的水平距离分别约为 3.30 km 和 2.07 km。2012—2018 年在两座建筑物上观测到的能够分析建筑物闪击距离的地闪次数分别为 12 次和 9 次。观测站的高速摄像机在这两座建筑物距离上所拍摄图像

的空间分辨率见表 1。

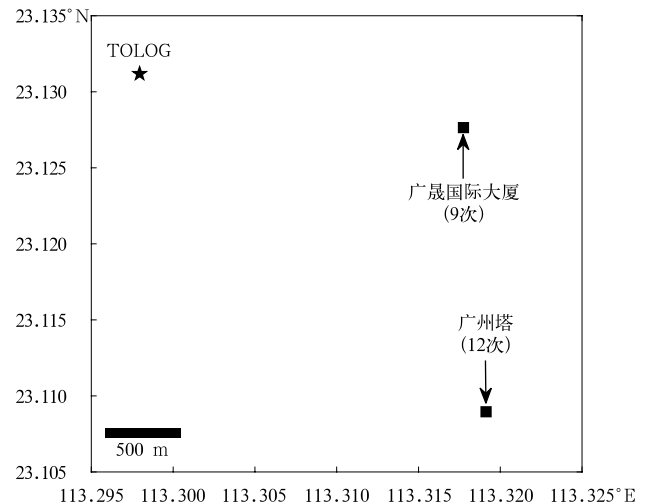


图 1 TOLOG 与广州塔和广晟国际大厦的相对位置示意图

Fig. 1 Location of the TOLOG, the Canton Tower and the Guangsheng International Building

2 两座高建筑雷电闪击距离统计

基于架设在 TOLOG 的高速摄像机拍摄的 21 次闪电光学数据,分析了 2 个高度不同的尖顶建筑物(见图 1)的闪击距离。需要指出的是,本研究基于闪电图像估算建筑物二维闪击距离,一定程度上会造成对闪击距离的低估。Gao 等^[9]通过比对 6 次高建筑物雷电中上行连接先导的三维速率(长度)和二维速率(长度)发现,前者平均约是后者的 1.3 倍。

图 2 展示的是利用帧率达到 10000 帧/s 的高速摄像机 HC-1 拍摄的一次广晟国际大厦上的闪电连接过程。文中将闪电回击开始时刻定义为零时刻。图 2c 是该次闪电首次回击发生 0.5 ms 后回击通道图像。图 2b 是在回击发生前 0.1 ms 的闪电图像,可以看到下行先导的分叉众多,上行连接先导发展的长度已经很长。图 2a 是高速摄像机观测到上行连接先导发展时的首帧图像,此时上行连接先导

已经发展了 3 m,闪击距离为 650 m。

通常,上行连接先导在能被高速摄像机观测到的首帧图像中,往往已经发展到一定长度,若使用这一帧图像中下行先导头部到被激发上行连接先导建筑物的距离估算闪击距离,会造成一定程度低估。Tran 等^[12]提出了一种反推估算方法(reverse propagation),该方法基于先导已经发展的长度和速率推算先导发展时间。Visacro 等^[15]利用该方法对闪击距离进行了估算,并指出仅仅使用首帧观测到上行先导的图像来估算闪击距离,能够产生高至 36% 的低估,而利用反推估算方法,能够更精确地估算闪击距离。在图 2a 中,上行连接先导的长度为 3 m,对应的发展速率为 $1.3 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此推测它起始于回击前 2.22 ms;此时下行先导的发展速率约为 $2.2 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,根据该速率值以及推测的上行先导起始时间,重新估算的闪击距离约为 654 m。

图 2 中,由于首帧观测到上行连接先导的图像中(图 2a)上行先导的长度较短(仅为 3 m),因此,利

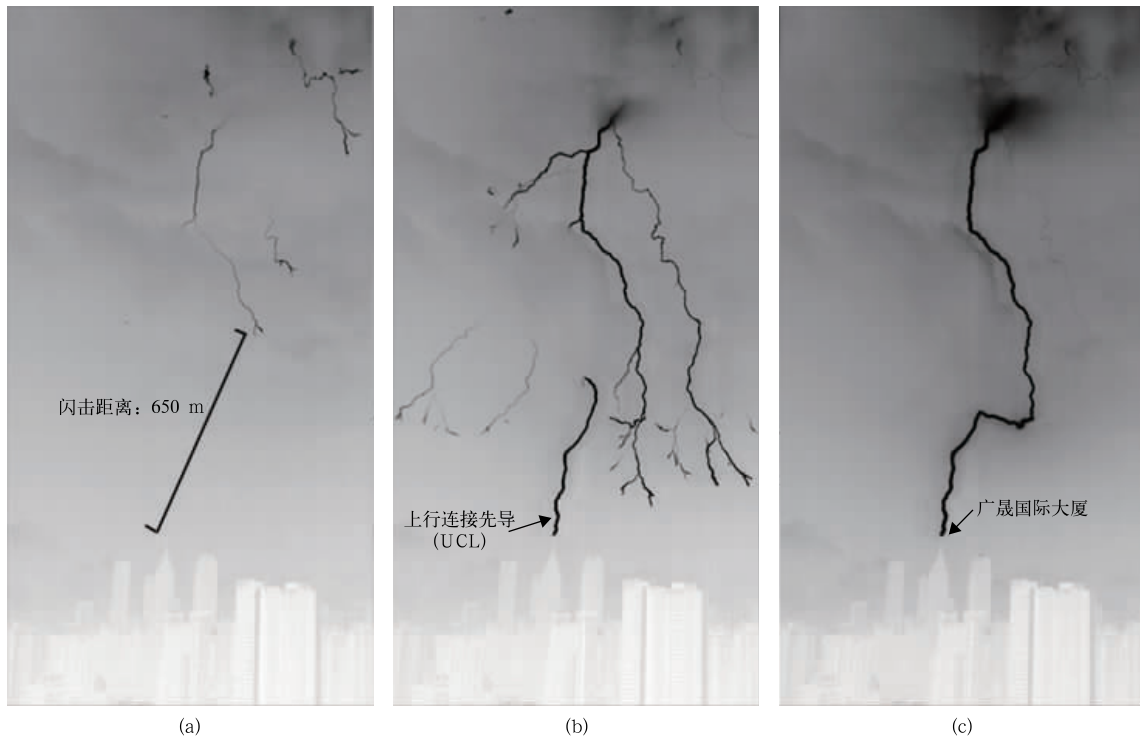


图 2 高速摄像 HC-1(10000 帧/s)拍摄的一次广晟国际大厦上发生的闪电过程图像
(a) - 2.2 ms, (b) - 0.1 ms, (c) 0.5 ms

Fig. 2 Lightning process images occurred on the Guangsheng International Building, obtained by high-speed video camera HC-1(10000 fps)
(a) - 2.2 ms, (b) - 0.1 ms, (c) 0.5 ms

用反推估算方法重新估算的闪击距离与仅从首帧观测到上行连接先导的图像中估算的闪击距离差别不大,但在 21 次闪电样本首帧观测到上行连接先导的图像中,上行先导长度范围为 3~121 m,平均长度约为 30 m,总体上反推估算方法对闪击距离的估算能够起到很好的订正作用,因此,文中 21 次闪电过程中闪击距离估算均采用该方法。结果显示:如果仅从能够观测到上行连接先导的首帧图像来估算闪击距离,其平均值为 672 m,而利用了反推估算方法后,闪击距离的平均值为 772 m,提高了 15% 左右。

图 3 为广州塔(600 m 高)和广晟国际大厦(360 m 高)这两座高度不同、形状相似的建筑物上闪击距离的箱型图。广州塔的闪击距离范围是 103~2225 m,中值为 981 m。广晟国际大厦的闪击距离范围是 237~771 m,中值为 508 m。可以看到,广州塔闪击距离的中位数要明显高于广晟国际大厦。这说明闪击距离在统计上有随着建筑高度的增高而增大的趋势。

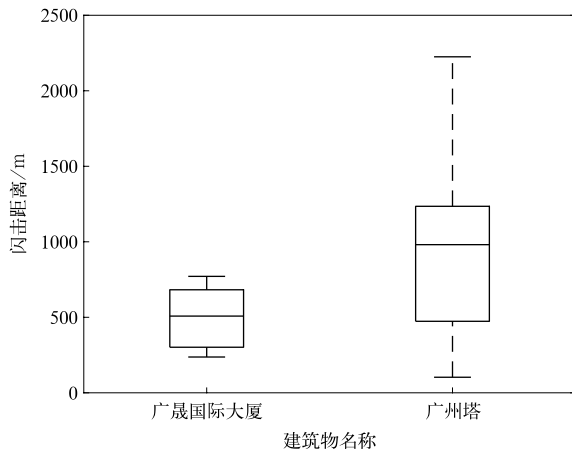


图 3 广州塔和广晟国际大厦的闪击距离
Fig. 3 Striking distance from the Canton Tower to the Guangsheng International Building

图 4 为广州塔和广晟国际大厦闪击距离与回击峰值电流之间的关系,同时也给出了 Visacro 等^[15]和 Love^[19]的研究结果。分别将两种数据进行拟合,得到 $D_{CT} = 34.59 \times I_p^{0.74}$ 和 $D_{GIB} = 20.56 \times I_p^{0.84}$,总体上闪击距离随回击峰值电流强度的增大而变长。广州塔闪击距离对应的回击峰值电流强度范围为 51~146 kA,平均值为 90 kA。广晟国际大厦闪击距离对应的回击峰值电流强度为 32~76 kA,平

均值为 50 kA。广州塔上的回击峰值电流明显强于广晟国际大厦,前者约是后者的 1.7 倍。

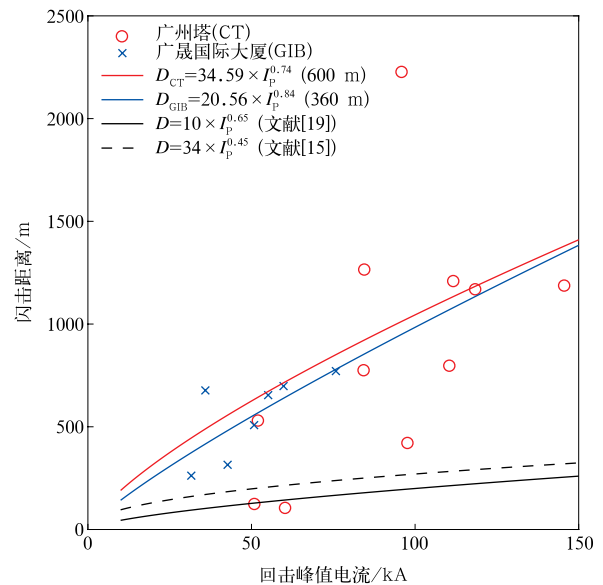


图 4 闪击距离与回击峰值电流关系
Fig. 4 The relationship of the lightning return stroke peak current to the striking distance

图 5 给出了闪击距离与上行连接先导起始时间之间的关系,拟合关系式为 $D = 496.2 \times T_b^{0.69}$,其中 T_b 表示上行连接先导的起始时间。广州塔上的上

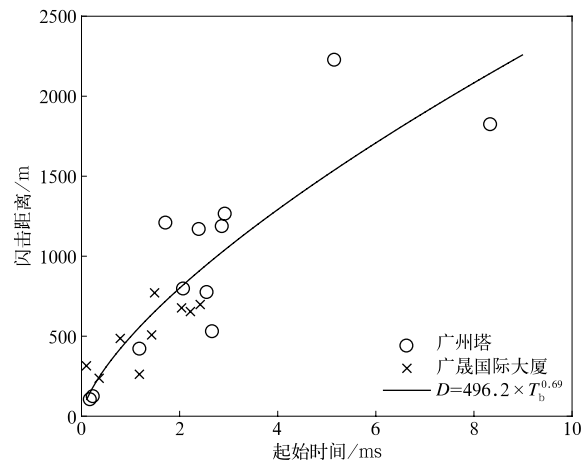


图 5 广州塔和广晟国际大厦闪击距离与上行连接先导起始时间的关系
Fig. 5 The relationship between initiation time of the UCL and the striking distance from the Canton Tower to the Guangsheng International Building

行连接先导起始于回击前 0.18~8.43 ms,平均值为 2.70 ms。广晟国际大厦上的上行连接先导起始于回击前 0.1~2.42 ms,平均值为 1.33 ms。表明建筑物高度越高,其顶部的电场增强效应越明显,在

雷暴天气过程中越容易达到上行先导起始的阈值,上行先导起始越早,对应的闪击距离也越长。

图6给出了21次闪电中上行先导与下行先导的二维平均速率统计结果。图6a为上行连接先导

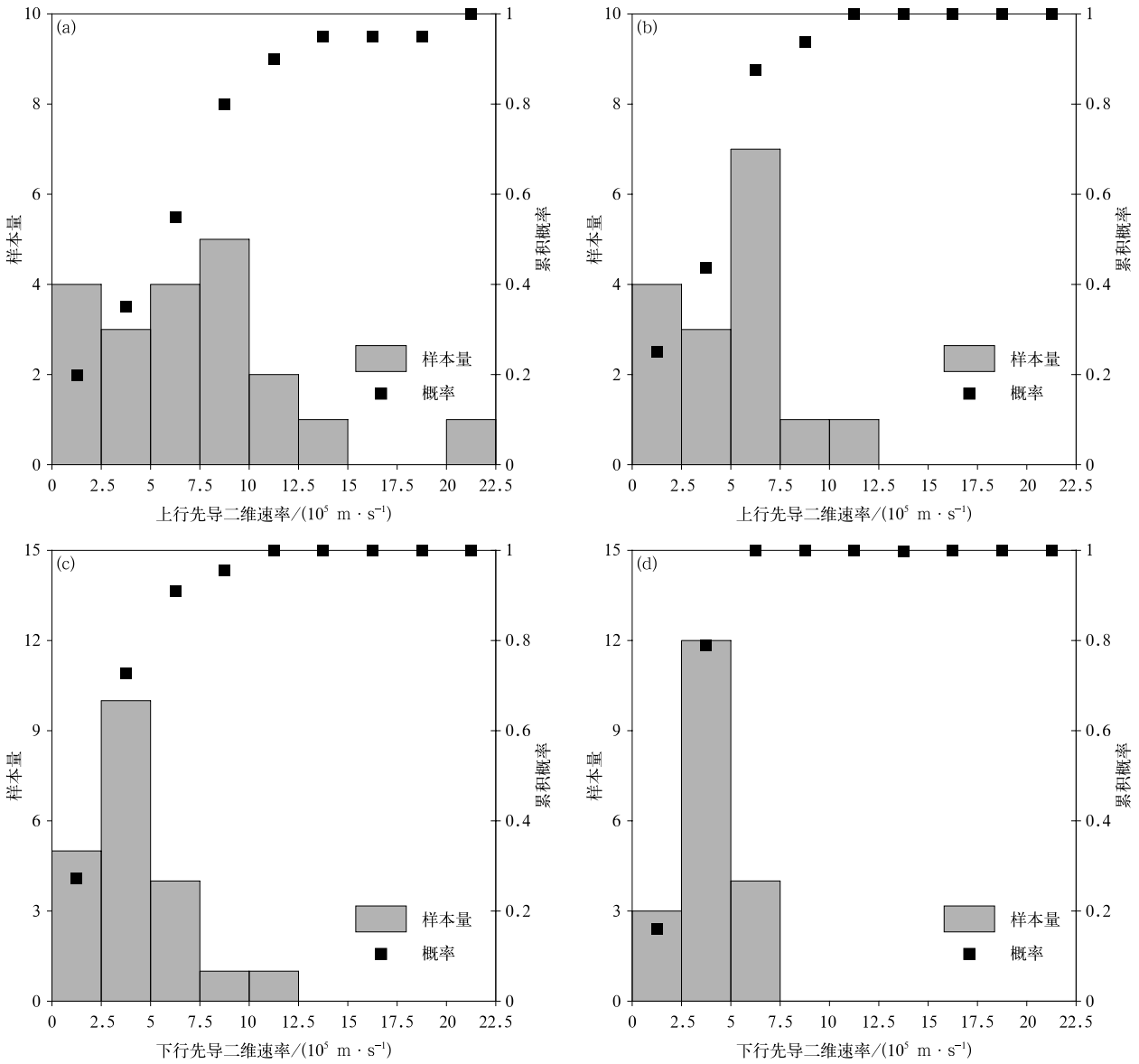


图6 上行先导与下行先导的二维平均速率统计

(a)回击前 0~0.1 ms 上行先导的速率,(b)回击前 0~0.5 ms 上行先导的速率,
(c)回击前 0~0.1 ms 下行先导的速率,(d)回击前 0~0.5 ms 下行先导的速率

Fig. 6 Two-dimensional average speeds statistic chart of upward connecting leader(UCL) and downward leader(DL)

(a)speeds of UCL from 0 to 0.1 ms before the return stroke,
(b)speeds of UCL from 0 to 0.5 ms before the return stroke,
(c)speeds of DL from 0 to 0.1 ms before the return stroke,
(d)speeds of DL from 0 to 0.5 ms before the return stroke

在回击前 0.1 ms 内的二维平均速率分布,可以看到,约 80% 的样本小于 $1.0 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 6b 为上行连接先导在回击前 0.5 ms 内的二维平均速率分布,速率超过 $1.0 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的样本仅占 6%。图 6c 为下行先导在回击前 0.1 ms 内的二维平均速率分布,约 90% 的样本速率小于 $7.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 6d 为下行先导在回击前 0.5 ms 内的二维平均速率分布,所有样本的速率均在 $0 \sim 7.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间,且 63% 的样本速率集中在 $2.5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 这一范围。

在建筑物防雷设计和先导模式中,下行先导与上行先导速率之比是一个重要参数,它决定了建筑物的吸引半径^[18]。Eriksson^[34-35]和 Rizk^[36-37]假设下行先导速率与上行连接先导的速率之比等于 1, Mazur 等^[38]假设该比率等于 2, Deller 等^[39-40]假设在连接过程中该比率从 4 变为 1, Saba 等^[14]对 3 次个例的分析发现在最后一跳前该比率近似为常数,分别约为 2.3, 3.1 和 4.8。图 7 给出了回击过程发生前 0.1 ms 内下行先导速率与上行连接先导速率的比值。由图 7 可以看到,在回击前 0.1 ms 内,这一比值小于 4。其中,速率比值小于 1 的样本最多,

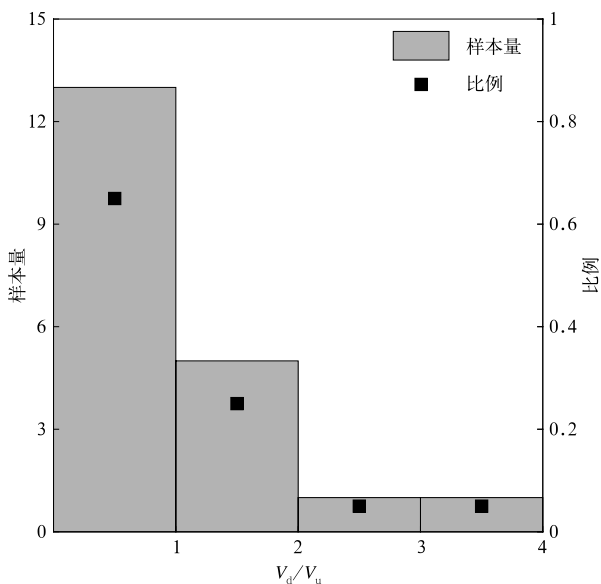


图 7 回击过程发生前 0.1 ms 内下行先导速率(V_d)与上行连接先导速率(V_u)的比值

Fig. 7 The ratio between the speed of downward leader(V_d) and that of upward connecting leader(V_u) during 0.1 ms before the return stroke

约占总样本量的 65%,且样本量呈随比例降低而减少趋势。

3 结论与讨论

本文利用高速摄像机提供的闪电光学数据,结合地闪定位数据的回击峰值电流信息,统计分析了广州塔(600 m 高)和广晟国际大厦(360 m 高)这两座尖顶建筑物上的闪击距离与建筑物高度、回击峰值电流强度和上行先导起始时间之间的关系,研究了连接过程中下行先导与上行连接先导的速率范围及其比值分布,具体结论如下:

1) 统计数据表明:更高的建筑物上闪击距离更长。600 m 高的广州塔闪击距离中值约为 1 km, 360 m 高的广晟国际大厦闪击距离中值约为 500 m。广州塔闪击距离的中位数明显高于广晟国际大厦,前者约为后者的 2 倍。

2) 对于同一高建筑物上的雷电,总体上其回击峰值电流越大,闪击距离越长。对于不同高度建筑物上的雷电,总体上建筑物越高,记录到的回击峰值电流越强。广州塔上的回击峰值电流要明显强于广晟国际大厦,前者约是后者的 1.7 倍。

3) 在连接过程中,下行先导与上行连接先导的二维平均速率比值在回击前 0.1 ms 内小于 4。其中,速率比值小于 1 的样本最多,约占总样本量的 65%。

需要注意的是,研究中所用回击峰值电流是闪电定位系统反演结果,而建筑物的高度对闪电定位系统反演得到的回击峰值电流强度有重要影响^[41-43]。Lafkovič 等^[43]对比加拿大 CN 塔(553 m 高)上 21 次回击电流幅值的直接测量结果和北美闪电定位系统(NALDN)的反演结果,指出 NALDN 的反演值大约为直接测量值的 2.6 倍。因此,在利用闪电定位数据获取闪电电流强度时,需充分考虑建筑物高度的影响。对于高度一定的建筑物,可近似认为其对定位系统获得的雷电流峰值反演结果影响大致相同。

除了上述讨论的闪电样本,还观测到 1 次侧击广州塔的闪电,这次闪电的闪击距离仅为 52 m。廖义慧等^[44]利用随机模式模拟了一座高度为 440 m 的建筑物上闪电的连接情况,模拟结果表明:侧击过程中,在建筑物侧面起始的上行连接先导长度与地面上起始的长度相近,根据下行先导起始点距离建

筑物的远近,其平均值为16~21 m;而在建筑物顶部起始的上行连接先导的长度平均值为187~317 m,远大于侧击时的数值。虽然目前观测的侧击样本还很有限,但结合模拟分析可以确定在高建筑物侧击发生时,闪击距离会远小于击中建筑物顶部的情况。

影响建筑物闪击距离的因素很多,除了建筑物的高度、回击峰值电流强度外,还包括建筑物的形状、材料和建筑物之间的相互影响等。此外,本文研究的是建筑物的二维闪击距离,从图像估算闪击距离时,会造成一定程度的低估。目前 TOLOG 在广州拥有6个观测站点,能够对珠江新城区域高建筑物上发生的闪电放电过程进行三维的观测研究,积累更多发生在不同高度建筑上的多站闪电样本,有助于全面深入分析高建筑物雷电的闪击距离特征,特别是三维发展特征。

参考文献

- [1] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [2] Rakov V A, Tran M D. The breakthrough phase of lightning attachment process: From collision of opposite-polarity streamers to hot-channel connection. *Electric Power Systems Research*, 2019, 173: 122-134.
- [3] Golde R H. Lightning Protection. Edward Arnold, London, 1973: 26-30.
- [4] Rakov V A, Lutz A O. A New Technique for Estimating Equivalent Attractive Radius for Downward Lightning Flashes // Proc 20th Int Conf on Lightning Protection, 1990: p. 2. 2.
- [5] Berger K, Vogelsanger E. Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955—1965 auf dem Monte San Salvatore. *Bull Schweiz Elektrotech Ver*, 1966, 57: 599-620.
- [6] Warner T A. Upward Leader Development from Tall Towers in Response to Downward Stepped Leaders. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, Italy, 2010.
- [7] Lu W, Zhang Y, Chen L, et al. Attachment Processes of Two Natural Downward Lightning Flashes Striking on High Structures. 30th International Conference on Lightning Protection. Power and Energy Soc, Cagliari, Italy, 2010.
- [8] Lu W, Chen L, Ma Y, et al. Lightning attachment process involving connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(20): 5531-5535.
- [9] Gao Y, Lu W, Ma Y, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmos Res*, 2014, 149: 193-203, DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.06.008.
- [10] Wang D, Gamera W R, Uman M A, et al. Lightning attachment processes of an “anomalous” triggered lightning discharge. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 1524-1533, DOI: 10.1002/2013JD020787.
- [11] Jiang R, Qie X, Wang Z, et al. Characteristics of lightning leader propagation and ground attachment. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 11988-12002.
- [12] Tran M D, Rakov V A. When does the lightning attachment process actually begin. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 6836-6922.
- [13] Lu W, Qi Q, Ma Y, et al. Two basic leader connection scenarios observed in negative lightning attachment process. *High Voltage*, 2016, 1(1): 11-17, DOI: 10.1049/hve.2016.0002.
- [14] Saba M M F, Paiva A R, Schumann C, et al. Lightning attachment process to common buildings. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 4368-4375, DOI: 10.1002/2017GL072796.
- [15] Visacro S, Guimaraes M, Murta Vale M H. Striking distance determined from high-speed videos and measured currents in negative cloud-to-ground lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 13356-13369.
- [16] Tran M D, Rakov V A. A study of the ground-attachment process in natural lightning with emphasis on its breakthrough phase. *J Sci Rep*, 2017, 7(1): 15761, DOI: 10.1038/s41598-017-14842-7.
- [17] 李俊, 张义军, 吕伟涛, 等. 一次多回击自然闪电的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 401-411.
- [18] Cooray V, Rakov V, Theethayi N. The lightning striking distance—Revisited. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(5/6): 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.09.008>.
- [19] Love E R. Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines. Colorado: University of Colorado, 1973.
- [20] Golde R H. The Lightning Conductor Lightning. San Diego: Academic, 1977.
- [21] Eriksson A J. The Lightning Ground Flash—An Engineering Study. Pretoria, South Africa: Faculty of Engineering, University of Natal, 1979.
- [22] Cooray V. A model for negative first return strokes in negative lightning flashes. *Phys Scr*, 1997, 55: 119-128.
- [23] 杨欣怡, 吕伟涛, 杨俊, 等. 3种阈值方法在闪电通道图像识别中的应用. *应用气象学报*, 2014, 25(4): 427-435.
- [24] 王智敏, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2011—2012年广州高建筑物雷电电磁场特征统计. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 87-94.
- [25] 陈绿文, 吕伟涛, 张义军, 等. 不同高度建筑物上的下行地闪回击特征. *应用气象学报*, 2015, 26(3): 311-318.
- [26] 吴姗姗, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于光学资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 203-210.
- [27] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 一次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. *应用气象学报*, 2019, 30(3): 257-266.
- [28] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 146-155.
- [29] 吕伟涛, 陈绿文, 马颖, 等. 广州高建筑物雷电观测与研究 10

- 年进展. 应用气象学报, 2020, 31(2): 129-145.
- [30] Wang D, Watanabe T, Takagi N. A High Speed Optical Imaging System for Studying Lightning Attachment Process // Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011: 937-940.
- [31] Chen L, Lu W, Zhang Y, et al. Optical progression characteristics of an interesting natural downward bipolar lightning flash. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 708-715, DOI: 10.1002/2014JD022463.
- [32] Zhang C, Lu W, Chen L, et al. Influence of the Canton Tower on the cloud-to-ground lightning in its vicinity. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122, DOI: 10.1002/2016JD026229.
- [33] Chen L, Zhang Y, Lu W, et al. Performance evaluation for a lightning location system based on observations of artificially triggered lightning and natural lightning flashes. *J Atmos Ocean Technol*, 2012, 29(12): 1835-1844, DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00028.1.
- [34] Eriksson A J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis. *IEEE Trans Power Delivery*, 1987, 2: 871-877.
- [35] Eriksson A J. The incidence of lightning strikes to power lines. *IEEE Trans Power Delivery*, 1987, 2: 859-870.
- [36] Rizk F A M. Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes. *IEEE Trans Power Delivery*, 1990, 5: 1983-1989.
- [37] Rizk F A M. Modeling of lightning incidence to tall structures Part II: Application. *IEEE Trans Power Delivery*, 1994, 9: 172-193.
- [38] Mazur V, Ruhnke L H, Bondiou-Clergerie A, et al. Computer simulation of a downward negative stepped leader and its interaction with a ground structure. *J Geophys Res*, 2000, 105 (D17): 22361-22369, DOI: 10.1029/2000JD900278.
- [39] Dellera L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the Leader Progression Model. I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures. *IEEE Trans Power Delivery*, 1990, 5: 2009-2022, DOI: 10.1109/61.103696.
- [40] Dellera L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the Leader Progression Model. II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs. *IEEE Trans Power Delivery*, 1990, 5: 2023-2029, DOI: 10.1109/61.103697.
- [41] Diendorfer G, Pichler H. Properties of Lightning Discharges to an Instrumented Tower and Their Implication on the Location of Those Flashes by Lightning Location Systems. 6th International Workshop on Physics of Lightning, 2006.
- [42] Baba Y, Rakov V A. Lightning strikes to tall objects: Currents inferred from far electromagnetic fields versus directly measured currents. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L19810, DOI: 10.1029/2007GL030870.
- [43] Lafkovic A, Hussein A M, Janischewskij W, et al. Performance Analysis of the North American Lightning Detection Network Using CN Tower Lightning Data. 19th International Lightning Detection Conference, 2006.
- [44] 廖义慧, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于闪电先导随机模式对不同连接形态的模拟. 应用气象学报, 2016, 27(3): 361-369.

Two-dimensional Optical Observation of Striking Distance of Lightning Flashes to Two Buildings in Guangzhou

Qi Qi¹⁾²⁾ Lü Weitao¹⁾ Wu Bin¹⁾ Ma Ying¹⁾ Chen Lüwen³⁾ Jiang Ruijiao¹⁾²⁾

¹⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering / State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

Abstract

Lightning can strike directly on buildings, lightning protection devices or the lateral surface of buildings, endangering buildings on the ground. Effective lightning protection measures can avoid lightning damage to buildings and prevent possible fire, explosion or other hazards. Striking distance is an important reference index in lightning protection design of buildings, which is widely used in various common lightning protection design methods, such as rolling ball method, collecting volume method, etc. With the de-

velopment of social economy, there are more and more tall-object in modern cities. It becomes more challenging to accurately estimate the striking distance of buildings with different heights and to formulate more effective lightning protection schemes. Up to now, lots of researches on the attachment process of natural lightning are conducted, especially by means of optical observation, which mainly benefits from the intuition of optical data. Although a large number of observations have been made on the lightning attachment process, reports on the striking distance are still rare.

Based on optical data of 21 lightning discharges on two steeple buildings, the Canton Tower (600 m, 12 cases) and the Guangsheng International Building (360 m, 9 cases) from 2012 to 2018, and data of return stroke peak current provided by Guangdong Power Grid Lightning Location System, influences of building height and return stroke peak current intensity on the striking distance are analyzed. Results show that the striking distance on higher buildings is longer, and the median lightning strike distance of the Canton Tower is about 2 times of that of the Guangsheng International Building. For buildings with a certain height, the striking distance tends to increase with the peak current increasing. Moreover, the higher the building is, the stronger the peak current of the corresponding return stroke is. The peak current of return stroke on the Canton Tower is obviously stronger than (about 1.7 times) that on the Guangsheng International Building. In the attachment process, the two-dimensional average speed ratio of the downward leader and the upward leader is less than 4 at 0.1 ms before the return stroke. The number of cases with a ratio of 0 to 1 is the largest, accounting for about 65% of the total number of cases.

Key words: tall-object; striking distance; optical observation; return stroke peak current