

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.
doi:10.11898/1001-7313.20150306

不同高度建筑物上的下行地闪回击特征

陈绿文¹⁾²⁾³⁾ 吕伟涛¹⁾²⁾* 张义军¹⁾²⁾ 张 阳²⁾

¹⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044)

²⁾(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)

³⁾(广东省防雷中心,广州 510080)

摘 要

为了研究不同高度建筑物上发生的下行地闪回击特征差异,对 2009—2012 年广州高建筑物雷电观测试验中获取的能确认接地点高度的 58 次下行负极性地闪的综合同步观测资料进行对比分析。结果表明:接地点高度小于等于 200 m 和接地点高度大于 200 m 两类地闪的回击次数和回击间隔时间的差异不明显,但接地点高度大于 200 m 的地闪的首次回击电流幅值、继后回击电流幅值、首次回击光强脉冲的 10%~90%波前时间及 10%波前~50%波后半宽时间、继后回击光强脉冲的 10%~90%波前时间及 10%波前~50%波后半宽时间的算术平均值(几何平均值)分别为接地点高度小于等于 200 m 地闪的 1.8(2.1),1.5(1.4),7.4(7.4),3.1(3.4),4.6(4.3)和 2.4(3.6)倍。

关键词: 下行闪电; 高建筑物; 回击特征; 光强脉冲

引 言

闪电是发生于大气中的一种长距离放电现象,发生于雷云与地物之间的闪电放电称为地闪,往往会直接对人员、建筑物、电气电子设备等造成严重威胁^[1-3]。随着社会经济的发展,高建筑物越来越多,与普通低矮建筑物相比,通常高建筑物上发生雷击的概率更高,所受雷电的威胁也更大。

研究不同高度建筑物上闪电回击特征及其差异,有助于提高对高建筑物雷电物理过程的认识,为探索有效的防雷技术手段提供理论依据。在以往的工作中,人们发现高建筑物相当于在闪电先导通道和大地之间的一段传输线,雷电流在高建筑物上传播时会产生明显的折射、反射等波过程,因此,在同一高建筑物上不同高度测量到的雷电流波形之间存在明显差异^[4-5]。但以前研究人员通常只针对某一个高建筑物开展雷电观测试验,很少对同一地区不

同高度建筑物上发生的雷电特征参数进行观测和对比分析。另外,以往观测到的高建筑物上发生的闪电大多为上行闪电,很少观测到下行闪电,而上行闪电的回击过程一般与下行闪电的继后回击过程比较相似,但与下行闪电的首次回击过程之间存在一定差异,所以高建筑物对于首次和继后回击特征参数影响的差异仍不清楚。还有一些研究人员基于快、慢电场变化仪和闪电定位等资料对不同地区的闪电回击特征参数进行统计工作^[6-7]。但这类资料不能提供接闪建筑物的高度信息,所以也很难针对不同高度建筑物上发生的闪电回击特征进行对比分析。

2009 年起,中国气象科学研究院针对广州市高建筑物最为密集的珠江新城地区开展高建筑物雷电观测试验,获取了大量击中不同建筑物的下行负极性地闪的光、电、磁、声综合同步观测数据,为分析和对比不同高度建筑物上的下行地闪回击特征参数提供了可靠的基础资料。

本文将根据 2009—2012 年广州高建筑物雷电

2014-11-13 收到,2015-01-12 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41475003,41075003),中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2014R015)

* 通信作者, email: wtlu@cams.cma.gov.cn

观测试验中获取的综合同步观测资料以及相应的广东电网闪电定位资料,对发生在不同高度建筑物上的下行地闪的回击次数、回击间隔时间、回击电流幅值以及回击光强脉冲波形等回击特征参数进行统计和对比分析。

1 观测试验及资料

中国气象科学研究院 2009 年开始在广东省气象局一座高约 100 m 的建筑物顶部建立了广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG),对高建筑物上雷电活动及物理过程进行观测分析^[8]。广州高建筑物雷电观测试验的主要观测设备包括闪电连接过程光学观测系统(Lightning Attachment Process Observation System,简称 LAPOS)、数字化高速摄像机、快慢电场变化仪、宽带磁场变化仪、麦克风雷声探测阵列以及高精度 GPS 时钟等。LAPOS 主要由相机、垂直分布的 8 束水平光纤阵列以及对应的光电转换器及放大器等构成,当相机视野中发生闪电时,闪电通道将通过相机镜头成像到光纤阵面,然后光信号经过光纤传输到光电转换器及放大器后转换为电信号^[9]。数字化高速摄像机采用日本高速相机厂商 Photron 公司生产的 FASTCAM 系列高速摄像机,采样率设置为 1000 fps 以上。慢变化电场仪的时间常数为 6 s,带宽为 2 MHz,快变化电场仪的时间常数为 2 ms,带宽为 5 MHz。磁场天线由 75 Ω 同轴电缆构成,带宽为 100 Hz~0.5 MHz,天线环的面积为 30 cm \times 30 cm。试验中采用时间精度优于 50 ns 的 GPS 时钟对计算机和观测设备进行驯服校时,采用响应频率为 15~20 kHz 的电容式麦克风阵列(基线为 1 m)探测雷声信号^[10],观测系统的触发平台以及主要记录设备采用 YOKOGAWA DL-750(2012 年起升级为 DL-850)高速示波器,采样率设置为 10 MHz,记录长度为 1 s。

2009 年 6 月 25 日—2012 年 8 月 13 日广州高建筑物雷电观测试验中,可以确认有 58 次下行自然闪电(均为负极性,共包含 166 次回击)分别击中了 25 个建筑物。58 次自然闪电回击接地点位置的高度在 25~600 m 范围内,其中,3 次低于 50 m,31 次在 90~200 m 范围内,24 次在 300~600 m 范围内。图 1 给出了被 58 次闪电击中的 25 个建筑物的分布情况。表 1 给出了各建筑物被闪电击中的次数,表中

的建筑物序号对应于图 1 中的 25 个建筑物。本文在分析不同高度建筑物上发生的闪电回击特征差异的时候,根据观测范围内建筑物高度的实际分布情况,并考虑了 Bermudez 等^[11]对电学意义上的高建筑物的定义,将观测个例划分为接地点高度小于等于 200 m 以及接地点高度大于 200 m 两类情况进行对比,这与王智敏等^[12]的方法类似。

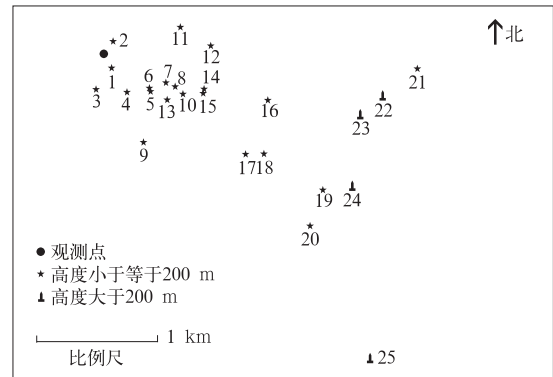


图 1 58 次闪电击中的 25 个高建筑物平面分布

Fig. 1 Distribution of 25 tall structures struck by 58 lightning flashes

表 1 各建筑物被闪电击中的次数
Table 1 The number of lightning flashes occurring on each tall structure

建筑物序号	建筑物高度 /m	闪电次数
1	35	1
2	115	2
3	35	1
4	110	3
5	25	1
6	90	2
7	145	3
8	100	2
9	120	1
10	100	1
11	110	1
12	105	1
13	140	1
14	105	4
15	100	1
16	140	3
17	105	1
18	160	2
19	90	1
20	140	1
21	160	1
22	340	2
23	360	6
24	440	8
25	600	8

2 回击特征参数统计

2.1 回击次数

回击次数 (N_s) 指的是一次自然闪电中包含的回击数量。在 58 个自然闪电个例中,有 55 次闪电的 N_s 可以根据光、电、磁同步观测资料准确确认,

由于各种原因(如当缺少记录时间长度不少于 1 s 的高速摄像记录时,仅靠电、磁场变化记录不能精确识别发生在 1 s 内的多次回击是否属于同一次闪电事件),有 3 次无法准确识别,没有纳入统计。在能确认 N_s 的 55 个自然闪电个例中,接地点高度小于等于 200 m 的有 33 次,大于 200 m 的有 22 次。图 2 给出了两种情况下 N_s 的概率分布情况。

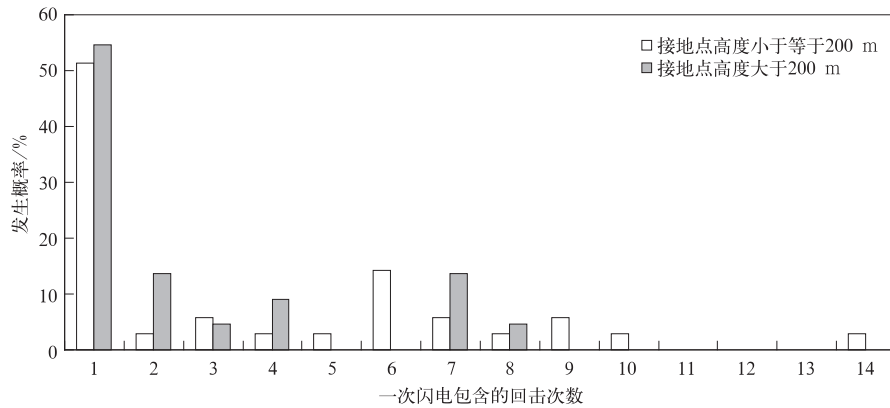


图 2 一次闪电包含回击次数的概率分布

Fig. 2 Distribution of the number of strokes per flash

对于接地点高度小于等于 200 m 的自然闪电, N_s 为 1~14 次,算术平均值大约为 3.7 次,大约有 51% 为单回击地闪。对于接地点高度大于 200 m 的自然闪电, N_s 为 1~8 次,算术平均值大约为 2.6 次,其中大约有 55% 为单回击地闪。有 3 次闪电的接地点高度小于 50 m,其 N_s 分别为 1 次、1 次和 6 次。总体上,相比于高度小于等于 200 m 的建筑物,高度大于 200 m 的建筑物上发生闪电的 N_s 平均值稍小,差别并不显著。

电中有 25 次为多回击自然闪电,可用于分析 T_{int} , 接地点高度小于等于 200 m 的有 15 次(共包含 95 次回击),其余 10 次接地点高度均大于 200 m(共包含 41 次回击)。图 3 给出了两种情况下 T_{int} 的概率分布情况。

2.2 回击间隔时间

回击间隔时间 (T_{int}) 指一次闪电中相邻两次回击发生时刻的时间间隔。在 55 次能确认 N_s 的闪

对于接地点高度小于等于 200 m 的多回击自然闪电, T_{int} 为 4~392 ms,算术平均值约为 95 ms,几何平均值为 66 ms。对于接地点高度大于 200 m 的自然闪电, T_{int} 为 11~446 ms,算术平均值约为 94 ms,几何平均值为 57 ms。接地建筑物高度小于 50 m 的多回击自然闪电只有 1 次,共包含 6 次回击事件, T_{int} 为 19~140 ms,算术平均值为 53.4 ms。

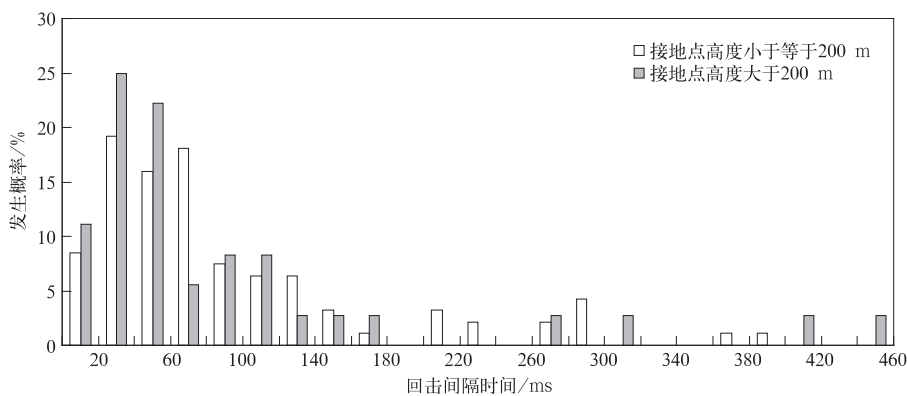


图 3 回击间隔时间概率分布

Fig. 3 Distribution of inter-stroke intervals

2.3 回击电流幅值

对于负极性回击,回击电流幅值(I_{peak})表示一次回击电流波形中的负向最大值。由于自然闪电回击电流难以直接测量,所以本文对 I_{peak} 的分析采用广东电网闪电定位系统相应的探测值,根据Chen等^[13]利用2007—2011年广州从化人工触发闪电电流直接测量值对该闪电定位系统电流幅值反演精度的评估结果,该闪电定位系统对 I_{peak} 反演结果相对误差的算术平均值和中值分别为16.3%和19.1%。当接地点高度小于等于200 m时,有30次自然闪电的首次回击具有相应的闪电定位记录, I_{peak} 为-320.1~-13.8 kA,算术平均值为-57.9 kA,几何平均值为-43.8 kA。当接地点高度大于200 m时,有24次自然闪电的首次回击具有相应的闪电定位记录, I_{peak} 为-234.8~-31.6 kA,算术平均值为-104.3 kA,几何平均值为-92.9 kA。图4给出了两种情况下首次回击 I_{peak} 的概率分布情况。由图

4可以看出,对于接地点高度小于等于200 m的自然闪电,首次回击 I_{peak} 集中分布于-60~-20 kA的区间(约占总数量的73%);而对于接地点高度大于200 m的自然闪电,首次回击 I_{peak} 绝对值则主要分布在-120~-100 kA的区间(约占总数量的29%)。

当接地点高度小于等于200 m时,有68次继后回击具有相应的闪电定位记录, I_{peak} 为-98.6~-12.5 kA,算术平均值为-34.1 kA,几何平均值为-30.8 kA。当接地点高度大于200 m时,有32次继后回击具有相应的闪电定位记录, I_{peak} 为-151.4~-12.9 kA,算术平均值为-50.1 kA,几何平均值为-42.6 kA。图5给出了两种情况下继后回击 I_{peak} 的概率分布情况。可以看出,对于接地点高度小于200 m的自然闪电,继后回击 I_{peak} 集中于-40~-20 kA区间(约占总数量的51%);而对于接地点高度大于200 m的自然闪电,继后回

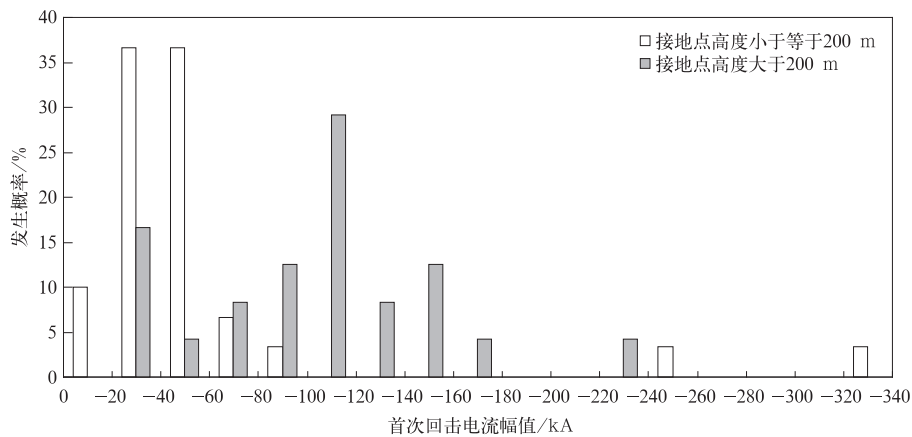


图4 首次回击电流幅值概率分布

Fig. 4 Distribution of peak currents of the first strokes

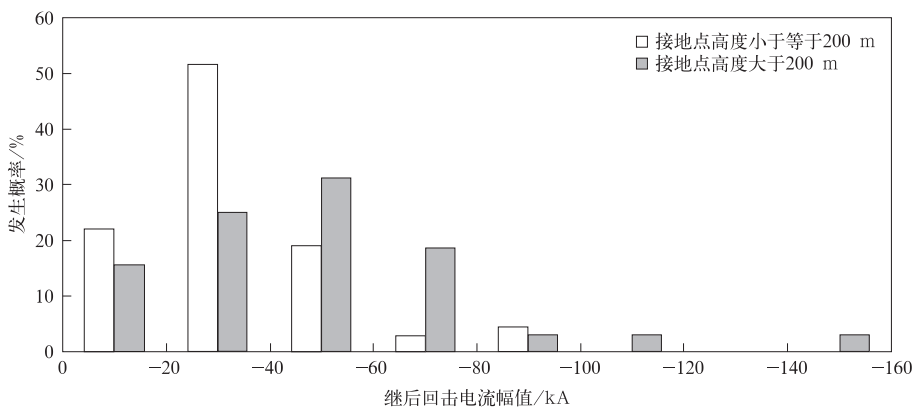


图5 继后回击电流幅值概率分布

Fig. 5 Distribution of peak currents of subsequent strokes

击 I_{peak} 则主要分布在 $-60 \sim -40$ kA 区间(约占总数量的 31%)。

2.4 回击光强脉冲波形

波前时间和半峰值时间(也称半宽时间)是脉冲波形的两个关键参数,通常波前时间是指脉冲波形从零上升到峰值的时间,半峰值时间是指从零上升到峰值然后下降到峰值的一半的时间。由于实际测量到的脉冲波形在起始和峰值处往往叠加很多振荡,很难确定其真实零点和峰值点,所以在本文中定义闪电回击光强脉冲波形上升期间 10% 峰值至上升期间 90% 峰值点的时间为 10%~90% 波前时间 (T_1),而将上升期间 10% 峰值至下降期间 50% 峰值点的时间定义为 10% 波前~50% 波后半宽时间 (T_2)。图 6 通过一次单回击下行地闪的 LAPOS 的 1 通道的实测波形对给出了 T_1 和 T_2 的示意图,该次闪电发生在 2012 年 5 月 6 日 15:55:50(北京时,下同),接地点位于广州市珠江新城区域高度约为 105 m 的建筑物的顶部(见图 1 中标号为 14 的建筑物)。在分析回击光强脉冲波形的时候,先对 LAPOS 各通道波形进行归一化处理得到各通道波形 T_1 和 T_2 的参数值,进行算术平均后得到该次回击的回击光强脉冲波形参数。

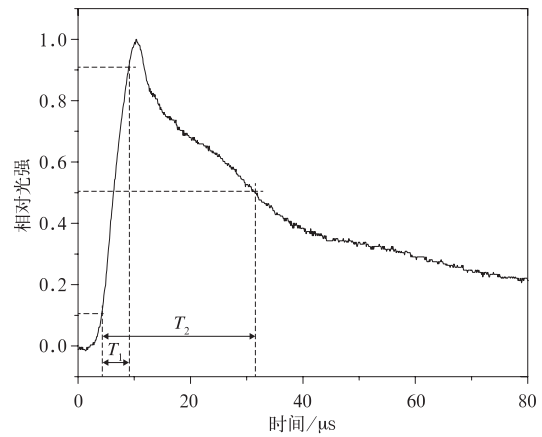


图 6 回击光强脉冲波形参数示意图
Fig. 6 Illustration for wave parameters of luminosity pulse induced by lightning return stroke

图 7 给出了首次回击和继后回击光强脉冲波形的 T_1 及 T_2 参数值与接地点高度的对比图。共有 30 次首次回击事件可以根据 LAPOS 资料分析回击光强脉冲波形参数值。当接地点高度小于等于 200 m 时,首次回击光强脉冲波形的 T_1 为 1.2~12.5 μs ,其算术平均值为 3.8 μs ,几何平均值为 3.1 μs ; T_2 为 7.0~81.0 μs ,算术平均值为 38.1 μs ,几何平均值为 32.5 μs (17 个样本)。当接地点高度

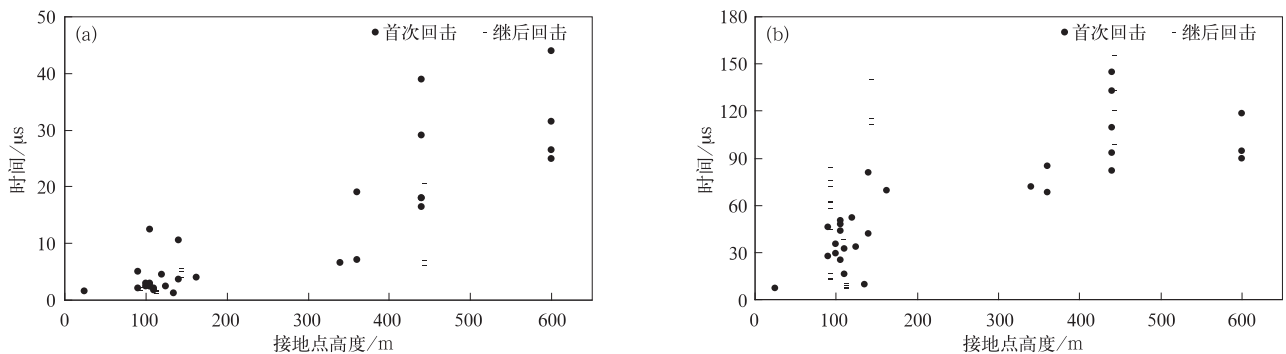


图 7 回击光强脉冲波形的 T_1 (a) 及 T_2 (b) 与接地点高度对比图
Fig. 7 T_1 (a) and T_2 (b) of luminosity pulses wave induced by return strokes versus heights of grounding points

大于 200 m 时,首次回击光强脉冲波形的 T_1 为 6.5~87.5 μs ,其算术平均值为 28.3 μs ,几何平均值为 22.7 μs ; T_2 为 68.0~248.5 μs ,其算术平均值为 119.8 μs ,几何平均值为 110.5 μs (13 个样本)。

共有 23 次继后回击事件可以根据 LAPOS 资料分析回击光强脉冲波形参数。当接地点高度小于等于 200 m 时,继后回击光强脉冲波形的 T_1 为 1.0

~5.5 μs ,其算术平均值为 2.2 μs ,几何平均值为 2.0 μs ; T_2 为 6.3~140.3 μs ,其算术平均值为 52.9 μs ,几何平均值为 35.0 μs (19 个样本)。当接地点高度大于 200 m 时,继后回击光强脉冲波形的 T_1 为 6.0~20.5 μs ,其算术平均值为 10.1 μs ,几何平均值为 8.8 μs ; T_2 为 98.5~155.0 μs ,其算术平均值为 126.5 μs ,几何平均值为 124.8 μs (4 个样本)。

3 回击特征参数分析

Saba 等^[14]分析了巴西南部获取的 233 个负地闪的高速摄像观测资料,指出约有 20% 的闪电为单回击, N_s 的算术平均值为 3.8, T_{int} 的算术平均值约为 83 ms。郟秀书等^[15]利用宽带慢天线电场变化仪在中国内陆高原地区观测到大约 39.8% 的负地闪为单回击闪电, N_s 的算术平均值约为 3.76, T_{int} 的算术平均值为 64.3 ms。张义军等^[16]对广州从化负地闪高速摄像观测资料和相应的地面电场变化观测资料进行分析,指出其中有 56% 为单回击地闪。在广州地区观测到的发生在高建筑物上的负极性下行地闪的 N_s 和 T_{int} 的平均值与上述研究人员的观测结果的差别不大,且接地点高度大于 200 m 和接地点高度小于等于 200 m 两类情况之间也没有明显差异。说明对于下行闪电而言, N_s 和 T_{int} 主要是受雷电内部电荷结构的影响,而与接闪建筑物高度的关系不大。

Diendorfer 等^[17]及 Baba 等^[18]指出,雷电流在高建筑物上会产生明显的折射、反射等波过程,反射波和入射波叠加会导致电流波最大峰值的增强,从而使回击磁场增强。Lafkovic 等^[19]将加拿大 CN 塔上 21 次 I_{peak} 的直接测量结果和北美闪电定位系统(NALDN)的反演结果进行对比,指出 NALDN 的反演值大约为直接测量值的 2.6 倍。根据本文 2.3 节的统计结果,接地点高度大于 200 m 的闪电的首次回击和继后回击的 I_{peak} 的平均值均远高于接地点高度小于等于 200 m 的闪电,说明更高的建筑物对闪电回击电磁场有更大的增强作用。

Hussein^[20]对加拿大 CN 塔(绝对高度 553 m)、美国的帝国大厦(绝对高度 443 m)以及德国的 Peissenberg 塔(绝对高度 160 m)的雷电流最大陡度的直接测量结果进行对比,指出总体上雷电流最大上升陡度随着接闪建筑物高度的增大而减小。虽然在广州高建筑物雷电观测试验中没有开展雷电流直接测量工作,但通过 LAPOS 观测到的回击通道的光强变化也可以在一定程度上反映出通道电流的变化情况^[21-22],根据本文 2.4 节的统计结果,接地点高度大于 200 m 的闪电的首次回击和继后回击的光强脉冲波形的 T_1 及 T_2 均远大于接地点小于等于 200 m 的情况,说明更高的建筑物会导致建筑物顶部之上回击通道中的电流上升陡度更缓以及电流

高值持续时间更长。

值得注意的是,根据本文 2.3 节、2.4 节的统计结果,接地点高度大于 200 m 的自然闪电的首次回击的 I_{peak} , T_1 以及 T_2 的算术平均值(几何平均值)分别为接地点高度小于等于 200 m 的自然闪电的 1.8(2.1), 7.4(7.4) 和 4.6(4.3) 倍,而接地点高度大于 200 m 的自然闪电继后回击的参数值为接地点高度小于等于 200 m 的自然闪电的 1.5(1.4), 3.1(3.4) 和 2.4(3.6) 倍。即相比于矮建筑物,更高的建筑物对于下行闪电首次回击特征参数的影响比对继后回击的影响更大。相比于矮建筑物,更高的建筑物在首次回击发生之前的下行负先导的作用下,更容易产生尺度更长的上行连接先导^[8]。另外,下行闪电首次回击电流波形与继后回击电流波形之间也存在较大差异,这些都是导致高、矮建筑物上发生的首次回击和继后回击特征参数存在差异的可能原因。

4 小 结

本文根据 2009—2012 年广州高建筑物雷电观测试验中获取的下行闪电的光电同步观测资料以及相应的广东电网闪电定位资料,对接地点高度小于等于 200 m 以及接地点高度大于 200 m 两类下行负极性地闪的回击次数(N_s)、回击间隔时间(T_{int})、回击电流幅值(I_{peak})以及回击光强脉冲波形参数(T_1 和 T_2)等进行对比分析,结果表明:

1) 接地点高度小于等于 200 m 的 N_s 的算术平均值为 3.7 次,接地点高度大于 200 m 的 N_s 的算术平均值为 2.6 次,两种情况下发生单回击地闪的概率都约为 50%。

2) 接地点高度小于等于 200 m 的 T_{int} 的算术平均值和几何平均值分别为 95 ms 和 66 ms;接地点高度大于 200 m 的 T_{int} 的算术平均值和几何平均值分别为 94 ms 和 57 ms。

3) 接地点高度小于等于 200 m 的首次回击和继后回击 I_{peak} 的算术平均值(几何平均值)分别为 -57.9 kA (-43.8 kA) 和 -34.1 kA (-30.8 kA);接地点高度大于 200 m 的首次回击和继后回击 I_{peak} 的算术平均值(几何平均值)分别为 -104.3 kA (-92.9 kA) 和 -50.1 kA (-42.6 kA)。

4) 接地点高度小于 200 m 的首次回击、继后回击光强脉冲波形参数 T_1 和 T_2 的算术平均值(几何

平均值)分别为 $3.8 \mu\text{s}$ ($3.1 \mu\text{s}$), $38.1 \mu\text{s}$ ($32.5 \mu\text{s}$), $2.2 \mu\text{s}$ ($2.0 \mu\text{s}$), $52.9 \mu\text{s}$ ($35.0 \mu\text{s}$);接地点高度大于 200 m 的首次回击、继后回击光强脉冲波形参数 T_1 和 T_2 的算术平均值(几何平均值)分别为 $28.3 \mu\text{s}$ ($22.7 \mu\text{s}$), $119.2 \mu\text{s}$ ($110.5 \mu\text{s}$), $10.1 \mu\text{s}$ ($8.8 \mu\text{s}$), $126.5 \mu\text{s}$ ($124.8 \mu\text{s}$)。

对于下行闪电而言,闪电的回击次数和回击间隔时间可能主要受雷电内部电荷结构的影响,而与接闪建筑物高度的关系不大。建筑物自身结构的长度、上行连接先导以及回击电流波可能是导致不同高度建筑物之间以及首次回击和继后回击之间特征参数差异的主要原因。今后将继续优化试验方案,获取更完善的高建筑物闪电光、电、磁、声同步观测资料,并建立高建筑物回击物理模型,详细分析高建筑物对下行闪电回击特征参数的影响。

参考文献

- [1] 张义军,周秀骥. 雷电研究的回顾和进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 829-834.
- [2] 马明,吕伟涛,张义军,等. 1997—2006年我国雷电灾情特征. 应用气象学报, 2008, 19(4): 393-400.
- [3] 高燧,张义军,张文娟,等. 我国雷击致人员伤亡特征及易损度评估. 应用气象学报, 2012, 23(3): 294-303.
- [4] Hussein A M, Janischewskyj W, Chang J, et al. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *J Geophys Res*, 1995, 100 (D5): 8853-8861.
- [5] Gorin B N, Shkilev A V. Measurements of lightning currents at the Ostankino tower. *Elektrichestvo*, 1984, 8: 64-65.
- [6] 陈家宏,冯万兴,王海涛,等. 雷电参数统计方法. 高电压技术, 2007, 33(10): 6-10.
- [7] 陈家宏,童雪芳,谷山强,等. 雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893-1898.
- [8] Lu W, Zhang Y, Chen L, et al. Attachment Processes of Two Natural Downward Lightning Flashes Striking on High Structures // Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection, 2010.
- [9] 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.
- [10] 杨了,吕伟涛,张阳,等. 改进的互功率谱相位法在雷声声源定位中的应用. 应用气象学报, 2014, 25(2): 193-201.
- [11] Bermudez J L, Rachidi F, Janischewskyj W, et al. Determination of lightning currents from far electromagnetic fields: Effect of a strike object. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65 (5): 289-295.
- [12] 王智敏,吕伟涛,陈绿文,等. 2011—2012年广州高建筑物雷电磁场特征统计. 应用气象学报, 2015, 26(1): 87-94.
- [13] Chen L, Zhang Y, Lu W, et al. Performance evaluation for lightning location system based on observation of artificially-triggered lightning and natural lightning flashes. *J Atmos Ocean Technol*, 2012. doi:10.1175/JTECH-D-12-00028.1.
- [14] Saba M, Ballarotti M G, Pinto O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *J Geophys Res*, 2006, 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415.
- [15] 鄯秀书,余晔,王怀斌,等. 中国内陆高原闪电特征的统计分析. 高原气象, 2001, 20(4): 395-401.
- [16] 张义军,吕伟涛,郑栋,等. 负地闪先导-回击过程的光学观测和分析. 高电压技术, 2008(10): 2022-2029.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Lafkovic A, Hussein A M, Janischewskyj W, et al. Performance Analysis of the North American lightning Detection Network Using CN TOWER lightning Data. 19th International Lightning Detection Conference, 2006.
- [20] Hussein A M. CN Tower Lightning Parameters: A Review. 2003 International Workshop on EM Radiation from Lightning to Tall Structures, 2003.
- [21] Diendorfer G, Zhou H, Pichler H. Review of 10 Years of Lightning Measurement at the Gaisberg Tower in Austria. Proc 3rd International Symposium on Winter Lightning, 2011: 185-190.
- [22] 张义军,杨少杰,吕伟涛,等. 2006—2011年广州人工触发闪电观测试验与应用. 应用气象学报, 2012, 23(5): 513-522.

Characteristics of Downward Cloud-to-ground Lightning Return Strokes Occurring on Tall Structures with Different Heights

Chen Lüwen¹⁾²⁾³⁾ Lü Weitao¹⁾²⁾ Zhang Yijun¹⁾²⁾ Zhang Yang²⁾

¹⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering, State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Lightning Protection Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080)

Abstract

To study the difference between characteristics of lightning return strokes occurring on tall structures with different heights, comprehensive observations for 58 natural downward negative cloud-to-ground lightning flashes with confirmed grounding points are analyzed. When heights of grounding points are below 200 m, the arithmetic mean and geometric mean values for the number of strokes per flash, inter-stroke intervals, peak currents of the first strokes, peak currents of the subsequent strokes, 10%–90% rise times of the first stroke optical pulses, widths from 10% wave front to 50% wave tail of the first stroke optical pulses, 10%–90% rise times of the subsequent stroke optical pulses, and widths from the 10% wave front to the 50% wave tail of the subsequent stroke optical pulses are estimated to be about 3.7 and 1 (33 samples), 95 ms and 66 ms (15 flashes containing 95 strokes), –57.9 kA and –43.8 kA (30 samples), –34.1 kA and –30.8 kA (68 samples), 3.8 μ s and 3.1 μ s (17 samples), 38.1 μ s and 32.5 μ s (17 samples), 2.2 μ s and 2.0 μ s (19 samples), 52.9 μ s and 35.0 μ s (19 samples), while values are estimated to be about 2.6 and 1 (22 samples), 94 ms and 57 ms (10 flashes containing 41 strokes), –104.3 kA and –92.9 kA (24 samples), –50.1 kA and –42.6 kA (32 samples), 28.3 μ s and 22.7 μ s (13 samples), 119.8 μ s and 110.5 μ s (13 samples), 10.1 μ s and 8.8 μ s (4 samples), 126.5 μ s and 124.8 μ s (4 samples) when heights of grounding points are greater than 200 m. On the whole, the number of strokes per flash and inter-stroke intervals of flashes occurring on structures taller than 200 m and those lower than 200 m are close. But peak currents of the first strokes, peak currents of the subsequent strokes, 10%–90% rise times of the first stroke optical pulses, widths from 10% wave front to 50% wave tail of the first stroke optical pulses, 10%–90% rise times of the subsequent stroke optical pulses, widths from the 10% wave front to 50% wave tail of the subsequent stroke optical pulses for the flashes occurring on structures taller than 200 m are greater than those occurring on structures lower than 200 m, and arithmetic mean (geometric mean) values of the former are 1.8 (2.1), 1.5 (1.4), 7.4 (7.4), 3.1 (3.4), 4.6 (4.3), 2.4 (3.6) times of the latter.

Key words: downward cloud-to-ground lightning flash; tall structure; characteristics of return stroke; luminosity pulse