

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.
doi:10.11898/1001-7313.20150109

2011—2012 年广州高建筑物雷电磁场特征统计

王智敏¹⁾²⁾ 吕伟涛²⁾³⁾* 陈绿文⁴⁾ 齐 奇²⁾
杨欣怡¹⁾²⁾ 张 阳²⁾ 马 颖²⁾ 陈绍东⁴⁾

¹⁾(成都信息工程学院, 成都 610225)

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⁾(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)

⁴⁾(广东省防雷中心, 广州 510080)

摘 要

为研究不同高度的建筑物对雷电磁场的影响, 对 2011 年 7 月—2012 年 8 月广州高建筑物雷电观测试验中获取的雷电磁场波形数据进行统计分析, 共选取击中 14 个高建筑物的 40 次雷电(均为负极性雷电)的磁场数据, 结果表明: 高建筑物对回击磁场峰值有增强作用, 且建筑物越高对回击磁场峰值的增强作用越大, 高度在 200 m 以上的建筑物上雷电首次回击磁场峰值的几何平均值是高度在 200 m 以下的建筑物上的 2.4 倍; 高建筑物雷电回击的磁场波形呈多峰特征; 观测到的 20 次击中 200 m 以下高建筑物的雷电中, 有 13 次(65%)雷电首次回击的磁场波形出现后续峰值比初始峰值大的现象, 击中 200 m 以上高建筑物的 14 次雷电中有 8 次(57%)出现该现象; 40 次高建筑物雷电中有 22 次(55%)为多回击雷电, 135 个回击间隔时间的几何平均值为 69.1 ms, 多回击高建筑物雷电中有 10 次(45%)出现继后回击的磁场峰值大于首次回击磁场峰值的现象。

关键词: 自然闪电; 高建筑物; 回击; 磁场特征

引 言

闪电是一种自然现象, 发生时伴随着强电磁脉冲, 易对电力电子系统造成危害^[1]。近年来, 随着我国城镇化的快速推进, 各地的广播电视塔、摩天大厦等高建筑物(依据文献^[2], 本文规定高度为 24 m 以上的建筑物为高建筑物)越来越多。国内外很多学者对高建筑物上的雷电活动进行了研究^[3-5], 如 Bermudez 等^[6]对高建筑物上雷电过程中雷电流在建筑物顶端和底端的反射情况进行了探讨, 认为可将建筑物等效为无耗传输线, 而雷电流在高建筑物上以光速传播; Baba 等^[7]基于 MTLE (Modified Transmission Line Model with Exponential Current Decay with Height) 闪电回击工程模型对加拿大 CN 塔

(Canadian National Tower, 553 m)的闪电回击电磁场进行分析, 得出雷击高建筑物(553 m)所产生的电磁场峰值是相同强度但接地点在地面的雷电所产生电磁场峰值的 2.6 倍。其他一些研究结果还表明, 高建筑物除了对雷电过程的电磁场峰值有增强作用外, 对其周围的雷电发生频次、雷电流强度、电磁场波形特征都有影响。Diendorfer 等^[8]对奥地利 Gaisberg 山(海拔 1288 m)上 100 m 高塔上的雷电活动进行观测, 发现相对于高塔周围的雷电活动, 其发生频次有明显增加, 且所测的雷电流幅值增强了 20%。Hussein^[9]研究得出加拿大 CN 塔上雷电过程的电磁场回击波形的陡度、电磁场变化率均比无 CN 塔雷电过程的电磁场回击波形大, 通过对所测雷电流和磁场的比较发现, 两者具有很强的线性关系。前人的研究均只针对单个建筑物进行了分析,

2014-06-10 收到, 2014-09-29 收到再改稿。

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB441405), 国家自然科学基金项目(41475003, 41075003)

* 通信作者, email: wtlu@cams.cma.gov.cn

对于同一地区不同高度建筑物上地闪特征的研究很少,本文主要是对广州地区多个不同高度的高建筑物上地闪的磁场波形特征进行统计分析。

广州是我国经济比较发达的地区之一,城市建筑物平均高度居于全国前列,高建筑物分布相对集中。广州也是我国雷电频次较高的地区之一^[10],1951—2007年的年平均雷暴日数为76.8 d,属于多雷区^[11]。从2009年开始,中国气象科学研究院雷电物理和防护工程实验室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),架设了多种观测设备^[12],对发生在TOLOG东南方向高建筑物上的雷电进行综合观测^[3-4],获取了丰富的观测资料。本文对2011—2012年获得的磁场数据进行统计分析,以揭示广州高建筑物上的自然闪电的磁场特征。

1 试验观测和资料获取

在广州高建筑物雷电观测试验中,光学观测设备为多台普通摄像机和高速摄像机,电磁场的探测设备包括大气平均电场仪、快电场变化天线、慢电场变化天线和磁场天线。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,输出范围为 ± 10 V。电场变化以及磁场变化数据均采用DL750示波器同步采集存储,采样率是10 MHz,记录长度为2 s,预触发位置为40%。同时利用麦克风阵列开展了对雷声的探测^[13],对雷声声源进行定位。在数据分析过程中还利用了广东电力闪电定位系统得到的闪电发生的位置、极性和回击电流峰值等信息。为分析不同高度建筑物上雷电磁场的波形特征,本文选择2011—2012年40次能够确认接地点位置和雷电回击次数的高建筑物雷电进行分析,在确定雷电接地点位置和雷电回击次数时,综合应用了高速摄像、普通摄像、快慢电场变化、磁场变化和雷声的观测资料。图1给出了这40次雷电所击中的14个高建筑物的平面分布图,图2给出了1次击中440 m高的广州国际金融中心顶端雷电的高速摄像组合图像。这40次雷电接地点的高度为90~600 m,接地点到观测点的距离为140 m~3.3 km。

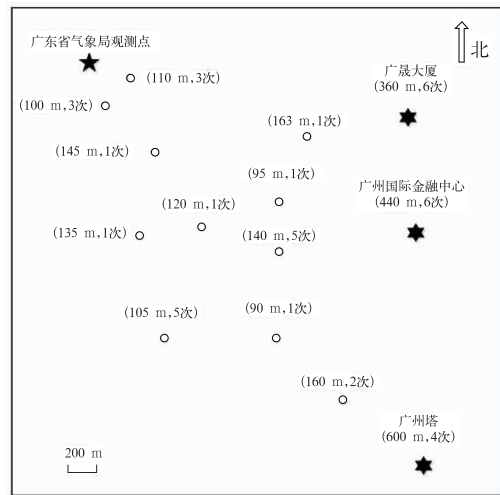


图1 40次闪电击中的14个高建筑物的平面分布图

Fig. 1 The plan view of 14 tall objects struck by 40 lightning flashes



图2 闪电 F1111 高速摄像图像组合

Fig. 2 A composite image of high-speed images of flash F1111

2 分析结果

2.1 高建筑物雷电回击磁场强度特征

由于高建筑物的存在会引起周围大气等电位面发生起伏和畸变,在高建筑物顶端大气等电位面分布较密集,大气电场强,因而在雷暴发生时更容易产生上行先导,从而导致高建筑物上发生更多的闪电过程(包括上行闪电和下行闪电),且由于高建筑物本身对闪电回击磁场强度有增强作用,会使高建筑物上雷电回击磁场幅值总体上强于周围其他区域的电磁场强度。Hussein等^[14]利用加拿大雷电定位网

(CLDN)和美国雷电定位网(NLDN)数据,对以加拿大 CN 塔为中心、100 km 半径范围内的闪电活动进行了分析,发现击中 CN 塔的闪电发生频次及其产生的电磁场幅值均明显大于不含 CN 塔的其他区域的闪电频次和其产生的电磁场幅值。

Bermudez 等^[15]将雷电回击电流由 0 上升到峰值的时间记为 t_f (算术平均值为 $1.07 \mu\text{s}$),电流波从建筑物顶部传输到底部并反射回来的时间记为 t ($t=2h/c$,其中 h 为建筑物高度, c 为光速)。当 $t > t_f$ 时,认为该建筑物为电学意义上的高建筑物;当 $t < t_f$ 时,认为该建筑物为电学意义上的矮建筑物。为了分析不同高度建筑物上雷电的磁场特征,基于以上定义,并考虑到实际观测得到的不同高度建筑

物上雷电样本数的分布情况,将高建筑物分为两类,以 200 m 高度为分界线($t=1.33 \mu\text{s}$),即高度在 200 m 以上(含 200 m)的高建筑物和高度在 200 m 以下的高建筑物。为消除噪声的影响,对所测磁场波形进行了滤波处理(程序设计低通滤波器去除了 DC~50 Hz 的工频噪声),通过对滤波后的波形分析,提取回击磁场峰值、回击间隔时间等波形参数。这里首先将不同探测距离的闪电的磁场峰值,距离归一化到 2 km 处得到表 1。在 40 次高建筑物雷电中,共包含了 175 次回击,其中首次回击和继后回击分别有 6 次和 4 次的磁场波形饱和,因此表 1 中只给出了 34 次首次回击和 131 次继后回击的磁场峰值统计结果。

表 1 归一化回击磁场峰值统计结果

Table 1 Statistical results of magnetic field normalized amplitude for return-stroke

建筑物高度	归一化磁场峰值									
	回击个数		算术平均值/(A·m ⁻¹)		几何平均值/(A·m ⁻¹)		中值/(A·m ⁻¹)		标准偏差/(A·m ⁻¹)	
	首次	继后	首次	继后	首次	继后	首次	继后	首次	继后
200 m 以下	20	78	1.97	1.34	1.53	1.06	1.63	0.92	1.57	0.94
200 m 以上	14	53	4.35	2.13	3.63	1.56	4.79	1.91	2.28	1.70
553 m (加拿大 CN 塔 ^[16])		31		1.12		1.01		1.00		0.41

由表 1 可知,200 m 以上和 200 m 以下的建筑物首次回击磁场峰值的几何平均值分别为 $3.63 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.53 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,继后回击磁场峰值的几何平均值分别为 $1.56 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.06 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,可以看出:200 m 以上的高建筑物对磁场的增强作用较 200 m 以下高建筑物更加显著,前者首次回击磁场峰值的几何平均值是后者的 2.4 倍。图 3 给出了 34 次雷电首次回击归一化磁场峰值随建筑物高度的变化(图中 N 为样本量,下同),由图 3 可以看出,随着建筑物高度的增加,磁场峰值有明显增大趋势。Bermudez 等^[17]利用 TL(Transmission Line)回击模型分析得到:建筑物越高,对回击磁场幅值的增强作用越大,本文所得结果与此相符。

高建筑物上的雷电类型有上行的,也有下行的,其中上行闪电的起始过程是从上行先导开始,其后是一连续电流过程,与人工触发闪电的起始过程相类似^[18],上行闪电后续的回击过程(若存在)与下行闪电的继后回击过程相同。本文分析的广州高建筑物雷电均为下行闪电,而加拿大 CN 塔上的雷电基本为上行闪电^[16,19],为便于比较,表 1 也给出了这

些闪电的继后回击的磁场峰值。由表 1 可以看到,高度在 200 m 以上的高建筑物继后回击的磁场峰值的几何平均值为 $1.56 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,比加拿大 CN 塔

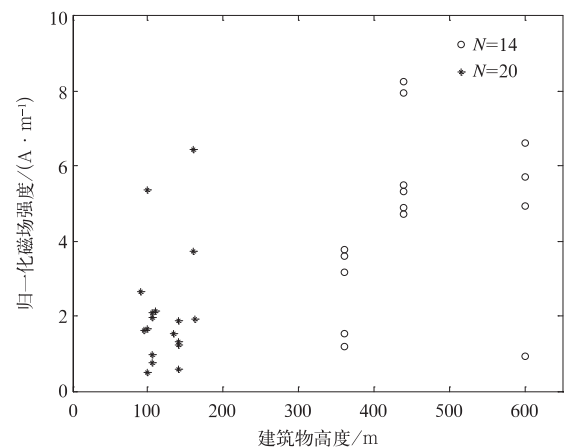


图 3 不同高度建筑物上雷电首次回击的归一化磁场强度

Fig. 3 The normalized magnetic field amplitude of the first return stroke of lightning to tall objects with different heights

所测磁场峰值几何平均值 $1.01 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 偏大 54%。其中,广州塔(600 m)和广州国际金融中心(440 m)继后回击的磁场峰值的几何平均值分别为 $3.05 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ($N=4$) 和 $2.43 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ($N=30$), 均明显高于加拿大 CN 塔所测磁场峰值。

2.2 高建筑物雷电回击磁场波形特征

本研究观测到的 40 次高建筑物雷电的首次回击和大部分继后回击磁场波形呈多峰现象, 对于每次回击的磁场波形, 本文将第 1 个峰和最大峰的峰值分别称为初始峰值 (P_1) 和绝对峰值 (P_A)。图 4 和图 5 分别给出了两次不同高度建筑物雷电首次回击的磁场波形, 其中闪电 F1201 的接地点高度 H 为 140 m, 闪电 F1215 的接地点高度为 440 m。由图 4 和图 5 可以看出, 这两次雷电过程的磁场波形在初始峰之后均叠加有明显的后续峰, 两图中磁场波形的绝对峰值 P_A 与初始峰值 P_1 的比值分别为 1.2 和 1.0。在 200 m 以下高建筑物所观测到的 20 次闪电中, 有 13 次(65%) 闪电首次回击的磁场波形出现后续峰值比初始峰值大的现象, 200 m 以上高建筑物的 14 次闪电中有 8 次(57%) 出现了该现象。Rakov 等^[20] 对高建筑物上雷电过程电流的传输情况进行了分析, 将闪电通道和建筑物都等效为具有一定阻抗的传输线, 其中闪电通道等效的阻抗大于建筑物本身的等效特征阻抗, 且建筑物底部的阻抗小于建筑物本身的等效阻抗。由于雷电流波在阻抗不连续处会发生反射, 因此, 雷电流波在建筑物和闪电通道的结合点处发生反射系数为负值的反射, 在建筑物底部与地面的结合处发生反射系数为正值的反射。受建筑物顶端和底端反射的影响, 及建筑物内部阻抗不连续的影响, 使雷电流波在建筑物内来回反射, 进而使磁场波形存在多峰。

对高建筑物上雷电首次回击和继后回击磁场波形的初始峰值和绝对峰值进行距离归一化(2 km)后的分析表明: 首次回击初始峰值的范围为 $0.48 \sim 8.26 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 几何平均值为 $2.44 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 绝对峰值的范围为 $0.48 \sim 8.84 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 几何平均值为 $2.92 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$; 继后回击初始峰值的范围为 $0.19 \sim 10.7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 几何平均值为 $1.24 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 绝对峰值的范围为 $0.19 \sim 12.3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 几何平均值为 $1.60 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$; 从几何平均值上看, 首次回击磁场波形的绝对峰值比初始峰值大 20%, 继后回击的大 29%。Rachidi 等^[21] 对加拿大 CN 塔上雷电过程所

产生的电磁场进行研究, 相对于接地点在地面的雷电过程, 高建筑物对雷电过程中首次回击产生的电磁场强度增加 2 倍, 继后回击的增加 3 倍。图 6a 和图 6b 分别给出了高建筑物上首次回击和继后回击绝对峰值与初始峰值的比较情况。图 6b 中的拟合直线比图 6a 中的拟合直线斜率更大, 可以看到, 高建筑物对继后回击的磁场绝对峰值有更大的增强作用。雷电磁场对周围电磁环境的影响主要是绝对峰值, 雷电定位系统探测到的磁场峰值也为绝对峰值, 通过对初始峰值和绝对峰值的研究, 能够更加深入地认识高建筑物对磁场波形特征的影响。

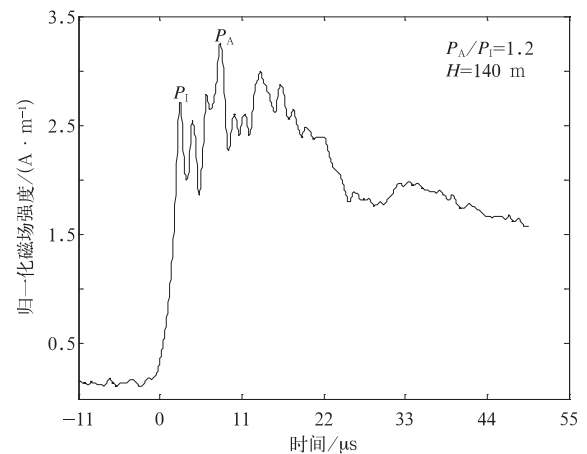


图 4 闪电 F1201 首次回击磁场波形
Fig. 4 Waveform of magnetic field of first return stroke for flash F1201

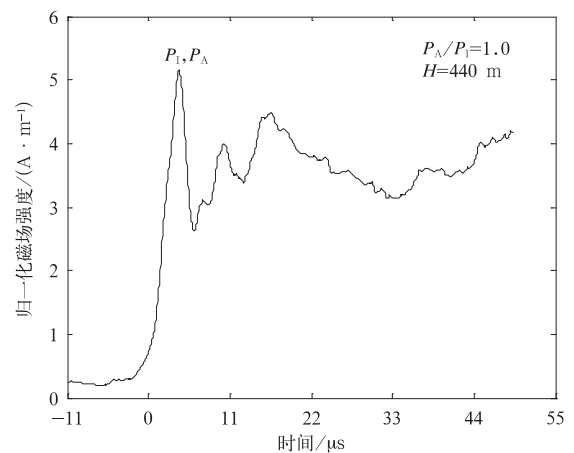


图 5 闪电 F1215 首次回击磁场波形
Fig. 5 Waveform of magnetic field of first return stroke for flash F1215

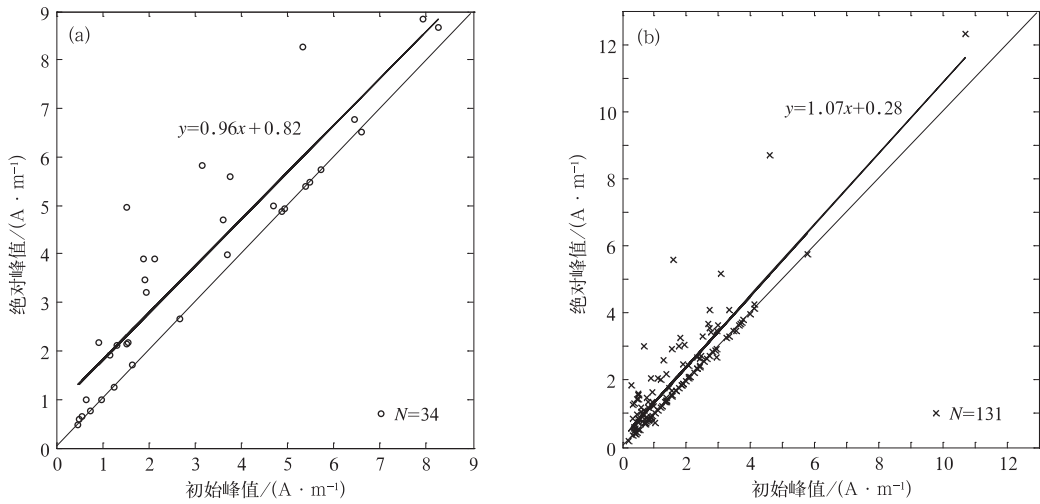


图 6 首次回击(a)和继后回击(b)初始峰值与绝对峰值的散点图
 Fig. 6 Scatter plot of amplitude of initial peak and absolute peak for first return stroke(a) and subsequent return stroke(b)

2.3 高建筑物首次回击和继后回击磁场特征

40 次高建筑物雷电有 22 次雷电(55%)包含多次回击,其中 200 m 以上高建筑物的 16 次雷电过程的平均回击数(算术平均值为 5)是 200 m 以下高建筑物 24 次雷电过程的平均回击数(算术平均值为 3)的 1.7 倍。

高建筑物上雷电过程的回击次数越多,产生的雷电电磁脉冲越密集,Diendorfer 等^[8]对奥地利 Gaisberg 塔上雷电活动进行了观测分析,发现塔上雷电回击的个数比附近接地点在地面的雷电过程回击个数更多。雷击高建筑物时会产生强的电磁干扰,且继后回击被认为是比首次回击更重要的干扰源^[21]。本研究观测发现,22 次多回击负地闪中有 10 次闪电(45%),继后回击的磁场波形中至少有 1 个磁场峰值大于其首次回击的磁场峰值。一般而言,自然闪电首次回击的雷电流强度大于继后回击,其产生的电磁场强度也大于继后回击。但由于继后回击的回击速度一般大于首次回击,雷电通道的电磁场辐射与回击速度有很大关系,更大的回击速度会导致更大的电磁场峰值,另一方面继后回击的上升时间比首次回击的上升时间要小,容易导致更大的雷电流陡度,使电磁场的辐射强度增加,且高建筑物存在会明显延长高幅值回击电流的持续时间^[22],进一步增大电磁场强度,使高建筑物上雷电流幅值较小的继后回击产生更大的电磁场峰值,导致高建

物上雷电过程产生强度更大、频次更高的雷电电磁脉冲。图 7 给出了闪电 F1211($H=105\text{ m}$)继后回击的磁场波形,其中 $P_A/P_I=1.4$ 。

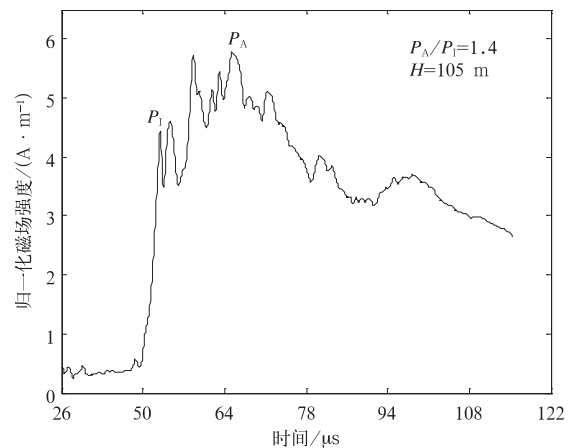


图 7 闪电 F1211 继后回击磁场波形
 Fig. 7 Waveform of magnetic field of subsequent return stroke for flash F1211

2.4 高建筑物雷电的回击间隔

本研究 40 次雷电中有 22 次是多回击雷电,共包含了 175 次回击,可以计算得到 135 个回击间隔。如图 8 所示,回击间隔时间为 4.5~473.4 ms,其中有 68%的回击间隔时间在 100 ms 以内,间隔时间的几何平均值(M_G)为 69.1 ms,与 Hussein 等^[23]对 1992—2001 年加拿大 CN 塔 160 次闪电统计得出

的平均回击间隔时间(62 ms)较为接近。在图8中填充颜色为灰色的柱状图表示高度在200 m以上建筑物的16次雷电过程的53次回击间隔时间为12.6~444.7 ms,其几何平均值为65.0 ms;填充颜色为白色的柱状图表示高度在200 m以下建筑物的24次雷电过程的82次回击间隔时间为4.5~473.4 ms,其几何平均值为71.5 ms。

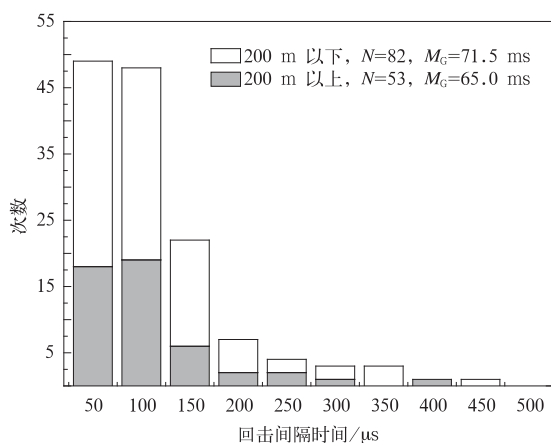


图8 回击间隔统计直方图

Fig. 8 The statistical histogram of inter-stroke time

3 小结

本文对2011—2012年广州高建筑物雷电观测试验中获取的雷电(均为负极性雷电)磁场波形数据进行统计分析,得到以下主要结果:

1) 高建筑物对回击磁场的幅值有增强作用,且建筑物越高对磁场幅值的增强作用越大。高度在200 m以上的建筑物和高度在200 m以下的建筑物上的雷电首次回击磁场波形峰值(归一化至2 km)的几何平均值分别为 $3.63 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $1.53 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,前者是后者的2.4倍。

2) 广州高建筑物上观测到回击磁场波形呈多峰现象,观测到的20次击中200 m以下建筑物的闪电中,有13次(65%)闪电首次回击的磁场波形出现后续峰值比初始峰值大的现象,击中200 m以上高建筑物的14次闪电中有8次(57%)闪电首次回击磁场波形也具有此特征。总体上看,34次闪电首次回击磁场波形的绝对峰值比初始峰值大20%,131次继后回击的大29%。

3) 40次高建筑物雷电中有22次(55%)为多回击雷电,共得到135个回击间隔时间,其几何平均值为69.1 ms。其中接地点在200 m以上的16次雷

电的53次回击间隔时间的几何平均值为65.0 ms,接地点在200 m以下的24次雷电的82个回击间隔时间的几何平均值为71.5 ms。

4) 22次多回击高建筑物雷电中有10次闪电(45%)出现继后回击的磁场峰值大于首次回击磁场峰值的现象。

本文基于广州高建筑物雷电观测试验获取的综合观测资料,对高建筑物上雷电磁场波形特征进行分析,对比不同高度范围的建筑物上的雷电磁场特征的差异。下一步将建立高建筑物雷电回击模型,利用实际观测得到的特征量优化模型中的参数设置,通过回击模型的数值模拟深入探讨在高建筑物雷电过程中各种不同因素对雷电流及电磁场波形的影响。

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] 中国建筑设计研究院,中国建筑标准设计研究院. GB50352—2005 民用建筑设计通则. 北京:中国建筑物工业出版社, 2005.
- [3] Rakov V V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 241-260.
- [4] Lu W, Chen L, Zhang Y, et al. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2012, 117(D19), doi: 10. 1029/2012JD018035.
- [5] 任晓毓,张义军,吕伟涛,等. 雷击建筑物的先导连接过程模拟. 应用气象学报, 2010, 21(4): 450-457.
- [6] Bermudez J L, Rubinstein M, Rachidi F, et al. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 2003, 108(D14), doi: 10. 1029/2002JD002973.
- [7] Baba Y, Rakov V A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D9): D9108, doi: 10. 1029/2004JD005505.
- [8] Diendorfer G, Schulz W. Lightning Incidence to Elevated Objects on Mountains. Paper of the 24th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Birmingham, England, 1998.
- [9] Hussein A. CN Tower Lightning Parameters. Paper of the 10th International Symposium on Lightning Protection (X SIPDA), 2009.
- [10] 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.
- [11] 张金,聂长春,陈玉华. 广州市雷暴日数变化特征分析. 成都信

- 息工程学院学报,2009,24(1):58-60.
- [12] 张义军,孟青,马明,等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报,2006,17(5):611-620.
- [13] 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.
- [14] Hussein A M,Jan S,Todorovski V,et al. Influence of the CN Tower on the Lightning Environment in Its Vicinity. Paper of the 21th International Lightning Detection Conference (IL-DC) Orlando Florida USA,2010.
- [15] Bermudez J L,Rachidi F,Janischewskij W,et al. Determination of lightning currents from far electromagnetic fields: Effect of a strike object. *Journal of Electrostatics*,2007,65(5):289-295.
- [16] Pavanello D,Rachidi F,Janischewskij W,et al. On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures;2. Experiment and model validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012),2007,112(D13). doi:10.1029/2006JD007959.
- [17] Bermudez J L,Rachidi F,Janischewskij W,et al. Influence of the height of an elevated strike object on the enhancement of lightning radiated fields. Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna,Italy,2003:5.
- [18] 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和应用. 应用气象学报,2012,23(5):513-522.
- [19] Janischewskij W,Hussein A M,Shostak V,et al. Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower (1978—1995). *IEEE Transactions on Power Delivery*,1997,12(3):1210-1221.
- [20] Rakov V A. Transient response of a tall object to lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,2001,43(4):654-661.
- [21] Rachidi F,Janischewskij W,Hussein A M,et al. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,2001,43(3):356-367.
- [22] 冯建伟. 高塔对雷击电流及其电磁辐射环境的影响. 南京:南京信息工程大学,2011:23-24.
- [23] Hussein A M,Milewski M,Burnazovic E,et al. Current Waveform Characteristics of CN Tower Negative and Positive Lightning. X International Symposium on Lightning Protection (SIPDA),2009:9-13.

Statistical Characteristics of Magnetic Field Produced by Tall-Object Lightning in Guangzhou During 2011—2012

Wang Zhimin¹⁾²⁾ Lü Weitao²⁾³⁾ Chen Lüwen⁴⁾ Qi Qi²⁾
Yang Xinyi¹⁾²⁾ Zhang Yang²⁾ Ma Ying²⁾ Chen Shaodong⁴⁾

¹⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

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

³⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

⁴⁾ (Lightning Protection Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080)

Abstract

With the development of society and economy, more and more tall objects, such as tall towers, skyscrapers and other kinds of high buildings are erected in China. It is a commonly used method to study physical mechanisms of lightning discharge by measuring the electromagnetic fields produced by the lightning occurring on tall objects. Characteristics of electromagnetic fields and the influence on the electromagnetic environment induced by lightning flashes occurring on or around the tall objects are also widely studied. Since 2009, a field experiment is conducted to study the physics process of lightning flashes striking on tall objects in Guangzhou. The Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou (TOLOG) is estab-

lished on the top of a building with a height of approximately 100 m that belongs to Guangdong Provincial Meteorological Bureau to observe lightning flashes striking on tall objects with different heights in Guangzhou. In this experiment, the height of observed lightning striking point is found to be within 90—600 m, while the distance between the lightning striking points and the observation point is within 140 m—3.3 km. Magnetic field data for 40 negative lightning flashes obtained during 2011—2012 are analyzed. Statistical results show that tall objects have an enhancing effect on the magnetic field induced by the lightning flashes striking on them. The taller the object is, the larger the enhancing effect will be. The geometric mean (GM) value of the magnetic field peak values induced by the lightning flashes to the objects taller than 200 m is 2.4 times of that induced by lightning flashes to the objects lower than 200 m. Waveforms of the lightning magnetic field always exhibit multi-peak behavior. Regarding the magnetic field waveforms of the first return stroke, 13 out of 20 cases in which the lightning flashes strikes objects lower than 200 m have the subsequent peak value that is greater than the initial peak value; 8 out of 14 cases in which lightning flashes that strike tall objects higher than 200 m exhibit the same characteristics. The GM value of inter-stroke intervals of all of 135 return strokes is 69.1 ms. Among them, the GM value is 65.0 ms for the inter-stroke intervals of the 53 return strokes occurring on the objects taller than 200 m, and 71.5 ms for the inter-stroke intervals of the 82 return strokes occurring on the objects lower than 200 m. In addition, 10 lightning flashes (45%) among 22 multi-stroke negative lightning flashes are found that the magnetic field peak value induced by subsequent return stroke is greater than that induced by the first return stroke.

Key words: natural lightning; tall structure; return stroke; magnetic field characteristics