



地面建筑物对地闪回击通道附近电磁辐射环境的影响

摘要

采用有限电导率下的时域有限差分(FDTD)方法,分析了建筑物对地闪回击电磁环境的影响.结果发现建筑物对回击电场的影响较为明显,对磁场影响较小,建筑物高度 $h_b=50\text{ m}$ 时对磁场的影响不大于10%.建筑物顶部电场受自身高度的影响较大,屋顶中部的垂直电场随建筑物高度的增加而增大,水平电场随建筑物高度的增加而减小.建筑物高度为20、50和100 m时,屋顶中部的垂直电场分别约为地面处的1.3、1.7和2倍,水平电场约为地面处的0.9、0.8和0.7.电导率分别取0.001和0.1 s/m时对比发现,地表处的水平电场受电导率的影响较大,电导率越大,地表处水平电场的幅值越小,此时建筑物的存在对其影响不明显.地表以上一定高度处的水平电场则受观测点位置和建筑物的影响更加明显.

关键词

时域有限差分;雷电电磁场;回击;建筑物

中图分类号 P427.3

文献标志码 A

收稿日期 2016-09-30

资助项目 河北省气象局指导性项目(15zc04);廊坊市气象局科学研究项目(201502)

作者简介

耿雪莹,女,硕士,研究方向为雷电电磁场及雷电监测预警等.gengxueying@126.com

¹ 廊坊市气象局防雷中心,廊坊,065000

0 引言

闪电瞬态电磁辐射脉冲沿地表传播时,有耗地表(包括光滑和起伏不平的复杂地表)可能对电磁波的传播产生严重影响^[1-7].地势越复杂,地面电导率越小,相应的衰减越大.同时,由于高频分量的优先衰减,远距离辐射场波形的上升沿时间明显增大,造成TOA(Time of Arrival)时差定位结果出现误差^[1].目前雷电监测定位系统及快慢电场变化测量仪^[8-9]等仪器均利用雷电产生的电磁场来遥测其放电参数.这些仪器往往被要求安装在比较开阔平坦的室外地面,但随着社会的发展和城市化进程的加快,其安装环境也更为复杂,影响测量数据的准确性.另外,自然界中的山体、树木以及人工建筑等地物必然会对电磁场的传播造成一定影响.

最早对雷电产生电磁场进行研究,是Uman等^[10]于1975年开始的.1994年,Rubinstein等^[11]推断17层高的楼房顶部电场值将会增大.2001年,Bonyadi-ram等^[12]在频域下用矩量法^[13]计算,提出电场值的增大是由于场点存在不同高度的建筑物.对应建筑物高度分别为20、40和60 m,其电场增大的比值分别为3.5、5.3和6.2.他们在计算中,将建筑物看作金属立方体,地面看作平坦的良导体.Bermudez等^[14]在加拿大多伦多,利用533 m高的CN塔做了实验,当闪电击中CN塔时,他们分别测量了距塔2和17 km处的2幢4层高的楼房顶部的垂直电场与水平磁场的值.同时,他们运用自己推导的表达式进行了计算,并与实际测试值相比较.结果,实测的垂直电场和水平磁场均比计算得到的值大了1.4倍.值得注意的是,Bermudez等^[14]计算电磁场时,考虑了遭受雷击的建筑物,即CN塔对附近电磁场的影响,但没有考虑场点处存在的建筑物.张明霞等^[15]采用矩量法分析了山体对雷电辐射场的影响,结果表明:由于山体的散射,造成在背向山体的一侧雷电辐射场显著下降,如果山体高为500 m,在山体背向雷电通道的一侧磁场减小70%.另外还有很多学者进行过相关的研究^[16-19],从这些研究可以看出,场点处存在的建筑物能够对其周围电场产生显著的影响,使场点处的电场值明显增大,并且可知建筑物附近的地表面电场会明显减小^[19].

但是,目前建筑物对地闪回击电磁辐射场影响方面的研究较少,同时,探测仪器周围的高层建筑对其的影响是不容忽视的,如仪器架设在楼顶或建筑物附近,都会使测量结果失真.另外,建筑物周围空间

电磁场的变化,也会影响附近架空输电线上产生的耦合电压,给电力系统造成损害.本文主要计算不同电导率下地闪回击电磁场在空间中的辐射传播,并探讨建筑物对其的影响,计算得到建筑物周围电磁场的分布情况.同时也可以给闪电定位结果的优化提供参考,从而对雷电监测、预警及防护工作提供一定的支持.

1 计算模型的建立

为了讨论地面建筑物对地闪回击通道附近电磁辐射环境的影响,本文建立了如图 1 所示的模型.图中闪电通道垂直于地面,通道高度 $H=7.5\text{ km}$,地面以下土壤层的厚度为 $h=100\text{ m}$, $\sigma_1=0.001\text{ S/m}$, $\epsilon_1=10$, $\mu_1=1$.在闪电通道附近有一宽为 50 m 的建筑物,该建筑物的高度(h_b)分别为 $20,50$ 和 100 m .在建筑物附近设置了 3 个观测点,观测点 1 位于建筑物靠近雷击点侧 50 m 处,观测点 2 位于建筑物顶部正中,观测点 3 位于建筑物远离雷击点一侧 50 m 处.当建筑物与雷击点的地面距离(d)分别为 $150,250$ 和 500 m 时,计算 3 个观测点处的电场与水平磁场的大小,并分别与建筑物高度 $h_b=0\text{ m}$ 时的值相比较,就可以得出建筑物对其附近地闪回击电磁辐射环境影响的大小.

本文主要采用有限电导率下二维柱坐标时域有限差分(FDTD)方法,其电场和磁场的配置如图 2 所示.在计算时选取的离散网格空间步长为 $\Delta r = \Delta z = 1\text{ m}$,时间步长为 $\Delta t \approx 1.667\text{ ns}$,满足 Courant 稳定性条件.边界条件采用一阶 Mur 边界,回击电磁场计算采用 MTLL 模型,其中电流的时空分布如下:

$$\begin{cases} i(z',t) = (1 - z'/H) i(0,t - z'), & z' \leq vt, \\ i(z',t) = 0, & z' > vt, \end{cases} \quad (1)$$

其中, z' 表示通道中回击所到达的点的高度, H 为闪电通道的总高度,本文取 $H=7.5\text{ km}$. v 为电流波的传播速度,等于回击速度,本文取 $v=1.5 \times 10^8\text{ m/s}$. t 是时间.

通道底部电流选取了 Berger 等^[20]观测得到的首次回击和继后回击 2 种典型参数,如表 1 所示.曾经有一些学者也选用过这 2 种回击参数,如 Rachidi 等^[21].波形采用的是双 Heidler 函数,其公式^[22]为

$$i(0,t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1 + (t/\tau_{11})^{n_1}} \exp(-t/\tau_{12}) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{n_2}}{1 + (t/\tau_{21})^{n_2}} \exp(-t/\tau_{22}), \quad (2)$$

其中:

$$\eta_1 = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}}\right) \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}}\right)^{\frac{1}{n_1}}\right], \quad (3)$$

$$\eta_2 = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}}\right) \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}}\right)^{\frac{1}{n_2}}\right]. \quad (4)$$

表 1 2 种 Heidler 函数中采用的通道底部电流参数

Table 1 Parameters of the two Heidler functions used to reproduce the considered undisturbed channel base current waveshapes

	$I_{01}/$ kA	$\tau_{11}/$ μs	$\tau_{21}/$ μs	n_1	$I_{02}/$ kA	$\tau_{12}/$ μs	$\tau_{22}/$ μs	n_2
首次回击	28	1.8	95	2	/	/	/	/
继后回击	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

通过计算,可以得到建筑物附近 3 个观测点处电场的垂直分量、水平分量,以及水平磁场的变化情况.

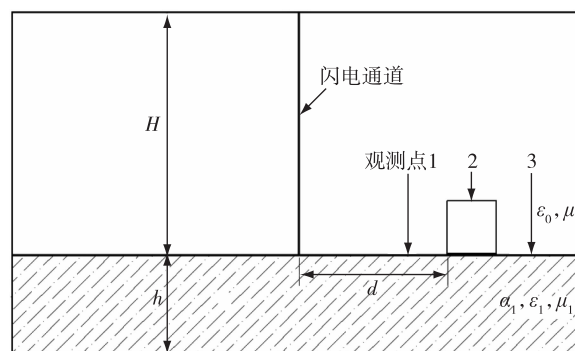


图 1 闪电通道与建筑物示意
Fig. 1 Schematic diagram of lightning channel and the observation points

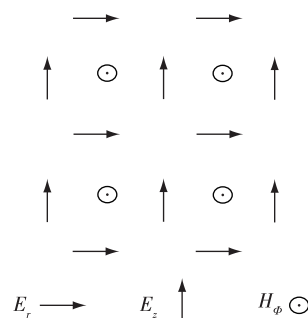


图 2 二维柱坐标中电场和磁场的配置
Fig. 2 Configurations of electric and magnetic fields under 2D cylindrical coordinate

2 计算结果及分析

2.1 建筑物对垂直电场(E_z)的影响

图3给出了建筑物对垂直电场(E_z ,单位:kV/m)的影响.其中图3a、3b为首次回击对应的 E_z ,图3c、3d为继后回击对应的 E_z .不存在建筑物时,观测点2位于地面处,在点2上方距地面50 m高度处设观测点2'.可以看出,没有建筑物存在时,观测点1、2、3处的 E_z 幅值逐渐减小,观测点2'处的 E_z 幅值略小于点2.而加入50 m高的建筑物之后,位于建筑物顶部的观测点2处 E_z 的幅值显著增大,远大于观测点1处的值,同时,点1与点3处的幅值明显减小.可见,建筑物对其顶部及周围的垂直电场影响较为显著.另外,经过计算,闪电通道与建筑物距离较近时,地面电导率不同对垂直电场基本无影响.

表2给出了继后回击时,不同情况下3个观测点处的垂直电场与地面垂直电场的比值.通过分析,可以得出:

1) 观测点2处的 E_z 随建筑物高度的增加而明显增大,说明建筑物顶部的地闪回击电场垂直分量受到建筑物自身高度的影响较大.如果建筑物的顶部

装有快、慢电场变化测量仪等仪器,其测量到的垂直电场值会有不同程度的增加.

2) 观测点1和3处的 E_z 受到建筑物的影响,均有不同程度的衰减,且点3处的值小于点1处,说明建筑物对其后侧的 E_z 衰减更为明显.当仪器需要安装在建筑物周围地面上时,必须考虑这一影响.经计算发现,当观测点3与建筑物的距离为50 m时,建筑物对地表 E_z 幅值的影响很大,其值减小至不存在建筑物时的59%,而到200 m时这一比值上升到93%,可见,随着距离的增加,建筑物对地表处垂直电场的影响效果显著减小,故仪器安装时应尽量远离建筑物.

3) 经过计算可知,建筑物的宽度对其顶部垂直电场也有较大影响,宽度越宽,垂直电场的增量越小.

2.2 建筑物对水平电场(E_r)的影响

雷电发生时,架空输电线上耦合的过电压主要与水平电场有关.如果架空线经过建筑物附近,则其周围的水平电场也会受到建筑物的影响.图4给出了首次回击过程中,不同电导率条件下建筑物对水

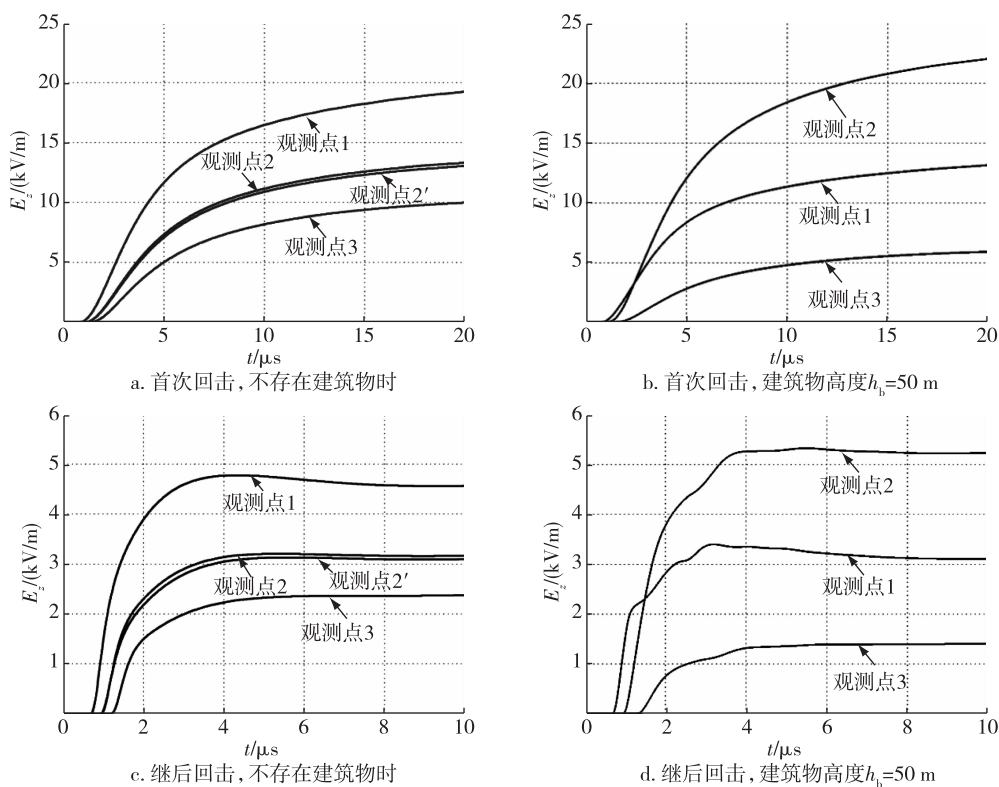


图3 $d=250$ m时3个观测点处的 E_z

Fig. 3 E_z at three observation points with $d=250$ m

表2 3个观测点处的垂直电场 E_z 与地面电场的比值(继后回击)

Table 2 Ratio of vertical electric field (E_z) vs. ground vertical electric field at 3 observer points (subsequent return-stroke)

观测点	与闪电通道的水平距离 d/m	建筑物高度 h_b/m		
		20	50	100
观测点1 (建筑物靠近闪电通道一侧)	150	0.91	0.76	0.64
	250	0.89	0.71	0.56
	500	0.87	0.66	0.46
观测点2 (位于建筑物顶部中间位置)	150	1.32	1.61	1.86
	250	1.34	1.65	2.04
	500	1.35	1.70	2.11
观测点3 (建筑物远离闪电通道一侧)	150	0.84	0.59	0.32
	250	0.85	0.60	0.35
	500	0.88	0.61	0.37

平电场(E_r ,单位:V/m)的影响.可以看出, E_r 呈现负极性、单极性的特点.电导率越大,地表处 E_r 的幅值

越小,可见电导率对水平电场的影响较大.

进一步研究发现,虽然建筑物对地面的水平电场影响较小,但对一定高度处的空间水平电场产生较大影响,而地面电导率对空间水平电场的影响较小.同时,随着观测点与建筑物距离的增加,影响逐渐减小.

图5给出了继后回击时水平电场的情况,表3中给出的是继后回击时,不同情况下3个观测点处的水平电场与地面水平电场的比值.通过分析,可以得出以下结论:

1)观测点2处的 E_r 随建筑物高度的增加而逐渐减小,建筑物顶部的地闪回击电场水平分量受到建筑物自身高度的影响较大;

2)观测点1处的 E_r 受到建筑物的影响而增加,观测点3处的 E_r 有所减小,说明建筑物对 E_r 具有较为明显的反射作用,且建筑物高度越高,反射越明显.

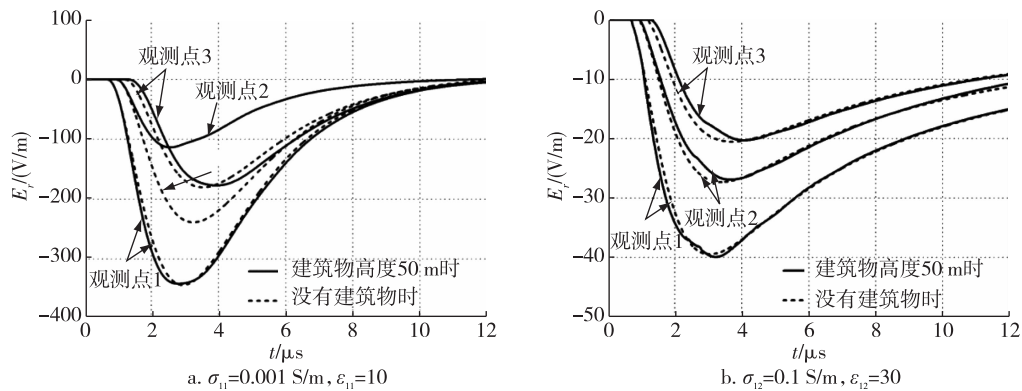


图4 首次回击, $d=250$ m时3个观测点处 E_r

Fig. 4 E_r at three observation points for the first return-stroke with $d=250$ m

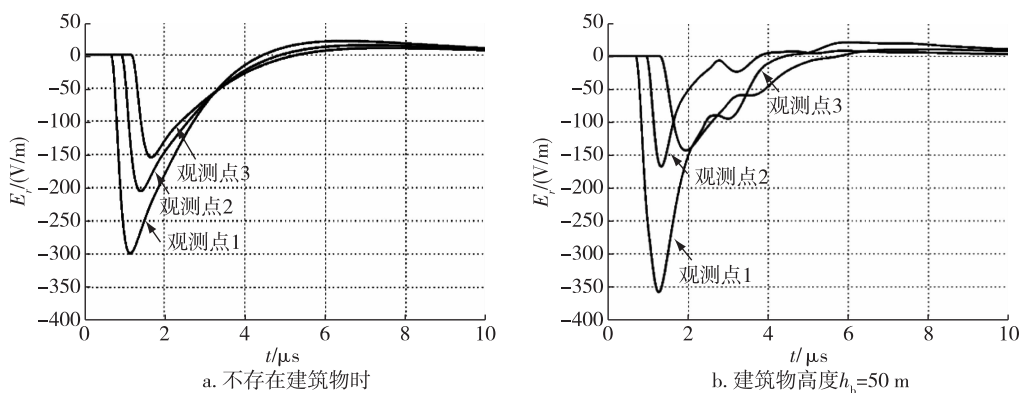


图5 继后回击, $d=250$ m时3个观测点处的 E_r

Fig. 5 E_r at three observation points for subsequent return-stroke with $d=250$ m

表 3 3个观测点处的水平电场 E_r 与地面电场的比值(继后回击)

Table 3 Ratio of horizontal electric field (E_r) vs. ground horizontal electric field at 3 observer points (subsequent return-stroke)

观测点	与闪电通道的水平距离 d/m	建筑物高度 h_b/m		
		20	50	100
观测点 1 (建筑物靠近闪电通道一侧)	150	1.06	1.16	1.22
	250	1.07	1.20	1.33
	500	1.08	1.22	1.4
观测点 2 (位于建筑物顶部中间位置)	150	0.85	0.74	0.54
	250	0.88	0.82	0.69
	500	0.89	0.86	0.80
观测点 3 (建筑物远离闪电通道一侧)	150	0.97	0.88	0.68
	250	0.98	0.93	0.77
	500	0.99	0.96	0.85

2.3 建筑物对水平磁场(H_ϕ)的影响

图 6 给出了建筑物对水平磁场(H_ϕ , 单位: A/m)的影响.其中图 6a、6b 为首次回击对应的 H_ϕ ,图 6c、6d 为继后回击对应的 H_ϕ .可以看出,建筑物对其附近的水平磁场影响不大,建筑物高度 $h_b = 50$ m 时对其周围磁场的影响不大于 10%.目前采用的雷电

监测系统主要是通过天线环捕捉回击磁场的方式对地闪参数进行反演,因此,在安装此类系统时,建筑物对其的影响可以不考虑.

3 结论与讨论

本文采用二维柱坐标下的 FDTD 方法,计算了有限电导率下的地闪回击电磁场,分别从首次回击和继后回击 2 方面研究讨论了建筑物对地闪回击电磁辐射环境的影响,结果表明:

- 1) 建筑物对地闪回击电场影响较为明显,对磁场的影响较小;
- 2) 通过对比观测点处的电场与地面电场的比值,发现建筑物顶部电场受自身高度的影响较大,屋顶中部的垂直电场随建筑物高度的增加而增大,水平电场随建筑物高度的增加逐渐减小,同时建筑物的宽度对其顶部垂直电场也是有较大影响的,宽度越宽,垂直电场的增量越小;
- 3) 随着建筑物与闪电通道距离的增加,建筑物对地表处电场的影响显著减小;
- 4) 通过对比不同电导率情况下的水平电场,发现地表水平电场受地面有限电导率的影响非常明

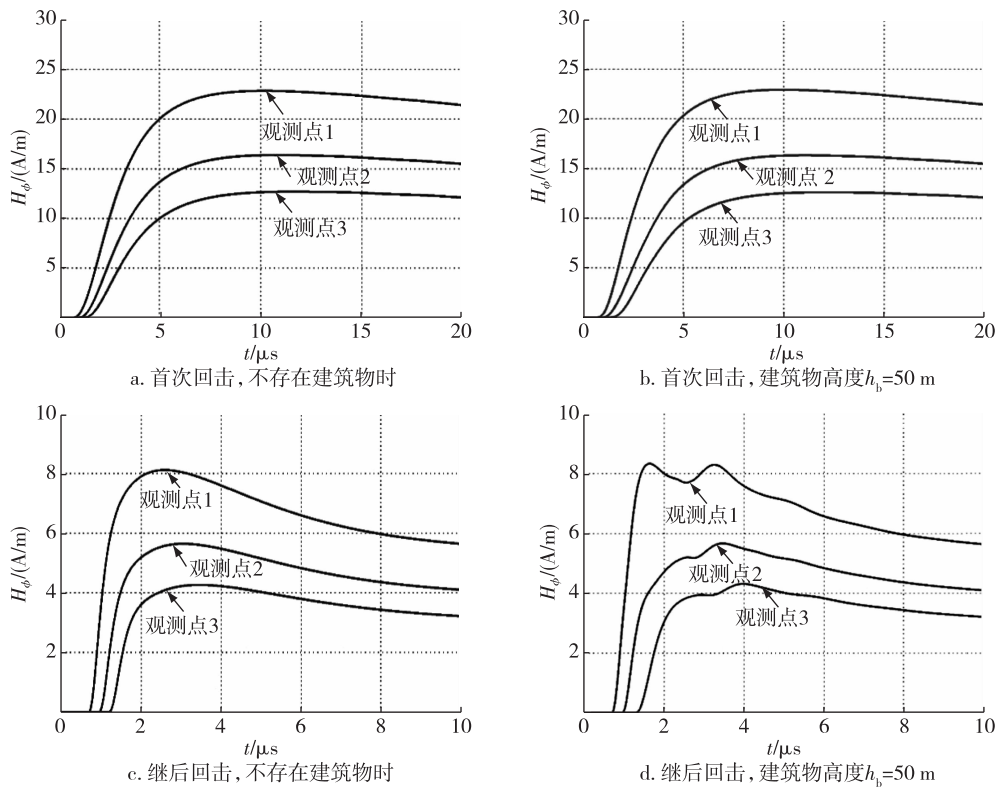


图 6 $d = 250$ m 时 3 个观测点处的 H_ϕ

Fig. 6 H_ϕ at three observation points with $d = 250$ m

显,但建筑物的存在对地表水平电场的影响效果不显著,而地面以上一定高度处的水平电场则受观测点位置和建筑物的影响更加明显。

由于文中采用的是二维算法,与真实的三维空间环境存在一定的差异,因此建筑物在三维环境中对地闪回击电磁辐射的影响还需进一步研究。

参考文献

References

- [1] 张其林, 鄯秀书, 王振会, 等. 地面电导率对地闪回击辐射场传输的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2036-2040
ZHANG Qilin, QIE Xiushu, WANG Zhenhui, et al. Effect of the infinite conducting earth on the lightning-generated electric field [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2036-2040
- [2] 张其林, 鄯秀书, 张廷龙, 等. 雷电流波形的观测及沿通道时空分布的数值模拟[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1829-1832
ZHANG Qilin, QIE Xiushu, ZHANG Tinglong, et al. Observation and numerical simulation of lightning discharge current along the lightning channel [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1829-1832
- [3] 张其林, 冯建伟, 赵忠阔, 等. 分形闪电通道模型的建立及其电磁辐射特征分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6): 719-724
ZHANG Qilin, FENG Jianwei, ZHAO Zhongkuo, et al. Formulation of fractal channel model and characteristics of corresponding electromagnetic fields [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(6): 719-724
- [4] 张其林, 刘明远, 杨璟, 等. 近距离地闪电场变化及对通道电荷密度分布的响应研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 847-854
ZHANG Qilin, LIU Mingyuan, YANG Jing, et al. Characteristics of the close leader/return stroke electric field change and its response to the corresponding charge density along the lightning channel [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(4): 847-854
- [5] 张其林, 张源源, 李东帅, 等. 地形地表的不规则起伏对雷电电磁场传输的影响[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 357-365
ZHANG Qilin, ZHANG Yuanyuan, LI Dongshuai, et al. Effect of irregular terrain on propagation of lightning electromagnetic field [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(2): 357-365
- [6] 耿雪莹, 张其林, 刘明远. 地面建筑物(群)对雷暴云大气电场影响的模拟研究[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 827-833
GENG Xueying, ZHANG Qilin, LIU Mingyuan. Effect of tall building on thunderstorm electric field [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(5): 827-833
- [7] 欧阳双, 张其林, 李颖, 等. 地表湿度导致土壤电参数变化对雷电电磁场传播的影响[J]. 气象科技, 2012, 40(6): 1018-1024
OUYANG Shuang, ZHANG Qilin, LI Ying, et al. Impact on lightning electromagnetic field propagation of soil electrical parameter variation induced by varying surface soil moisture [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(6): 1018-1024
- [8] 鄯秀书, 郭昌明, 张翠华, 等. 地闪回击的微秒级辐射场特征及近地面连接过程分析[J]. 高原气象, 1998, 17(1): 44-54
QIE Xiushu, GUO Changming, ZHANG Cuihua, et al. Radiation electric field of return stroke and attachment process near the ground [J]. Plateau Meteorology, 1998, 17(1): 44-54
- [9] 王怀斌, 鄯秀书, 张义军, 等. 云闪和地闪的波形采集、数据处理及其初步应用[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 74-78
WANG Huaibin, QIE Xiushu, ZHANG Yijun. Detecting and processing waveform from C-G and cloud lightning discharge and its preliminary application [J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(1): 74-78
- [10] Uman M A, McLain D K, Krider E P. The electromagnetic radiation from a finite antenna [J]. American Journal of Physics, 1975, 43(1): 33-38
- [11] Rubinstein M, Montandon E, Ianoz M. Analysis of multi-station cloud lightning electric field pulses recorded with the Swiss LPATS network [C] // The 22nd Int Conf Lightning Prot, 1994
- [12] Bonyadi-ram S, Moini R, Sadeghi S H H, et al. The effects of tall buildings on the measurement of electromagnetic fields due to lightning return strokes [C] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001, 2: 1001-1004
- [13] Miller E K, Poggio A J, Burke G J. An integro-differential equation technique for the time domain analysis of thin wire structure, I. The numerical method [J]. Journal of Computational Physics, 1973, 12(1): 24-28
- [14] 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
- [15] 张明霞, 赵志斌, 崔翔, 等. 应用矩量法分析山体对雷电辐射场的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 120-128
ZHANG Mingxia, ZHAO Zhibin, CUI Xiang, et al. Analysis of the influence of mountain on lightning-radiated field by using the method of moment [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 120-128
- [16] Diendorfer G, Schulz W. Lightning incidence to elevated objects on mountains [C] // The 24th International Conference on Lightning Protection, 1998: 173-175
- [17] Pavanello D, Rachidi F, Rubinstein M, et al. Electromagnetic environment in the immediate vicinity of a tower struck by lightning [C] // Eur Electromagn Symp, 2004
- [18] Miyazaki S, Ishii M. Influence of elevated stricken object on lightning return-stroke current and associated fields [C] // The 27th International Conference on Lightning Protection, 2004: 122-127
- [19] Baba Y, Rakov V A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike ob-

- ject[J].Journal of Geophysical Research,2005,110,doi:10.1029/2004JD005505
- [20] Berger K, Anderson R B, Kroninger H. Parameters of lightning flashes[J].Electra,1975(41):23-37
- [21] Rschidi F, Janischewskyj W, Hussein A M. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers[J].IEEE Transactions on Electro-
- magnetic Compatibility,2001,43(3):356-367
- [22] Mimouni A, Rachidi F, Azzouz Z E. A finite-difference time-domain approach for the evaluation of electromagnetic fields radiated by lightning strikes to tall structures[J].Journal of Electrostatics,2008,66(9/10):504-513

Influence of buildings on the electromagnetic radiation environment near the lightning return strokes channel

GENG Xueying¹ GAO Yujun¹ LIU Dongdong¹

¹ Lightning Protection Center, Langfang Meteorological Bureau of Hebei Province, Langfang 065000

Abstract We analyzed the effect of tall buildings on the lightning return-stroke electromagnetic fields by using finite-difference time-domain (FDTD) technique. Results show that tall buildings have obvious effect on the return-stroke electric fields and weak effect on magnetic fields (less than 10% when the building is 50 m high). The electric field at the top of buildings is closely related with the building height, and the vertical/horizontal component of the electric field gradually increases/decreases with the increase of building height. When the building is high as 20 m, 50 m, and 100 m, the vertical electric field at the building top is 1.3, 1.7, and 2 times of that at the ground level, respectively, while the horizontal one is 0.9, 0.8, and 0.7 times, respectively. We also analyzed the factors influencing the electric fields near tall buildings. The ground level horizontal electric field is obviously affected by the ground surface finite conductivity, the greater the soil conductivity, the faster the negative amplitude decays. While the horizontal electric field above the ground is affected by the buildings as well as the observation point location.

Key words FDTD (finite-difference time-domain); lightning electromagnetic fields; return-stroke; buildings