

宿志国, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 建筑物高度对地闪回击电磁场影响的模拟. 应用气象学报, 2018, 29(4): 487-495.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180409

建筑物高度对地闪回击电磁场影响的模拟

宿志国¹⁾²⁾ 吕伟涛^{2)*} 陈绿文³⁾ 马颖²⁾ 武斌²⁾ 齐奇²⁾ 吴姗姗²⁾

¹⁾ (南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 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⁾ (中国气象局广州热带海洋气象研究所广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080)

摘 要

基于三维时域有限差分数值算法(3D-FDTD)建立了雷击高建筑物电磁场传播模型,研究了负地闪击中不同高度建筑物时回击垂直电场、角向磁场以及水平电场沿地表的传播规律。模拟结果表明:建筑物的高度对雷电电场峰值的影响显著,如当建筑物高度从 100 m 增加至 600 m 时,在距离 $d=100$ m 位置的垂直电场峰值减小了 63%,水平电场正极性峰值的增加比例为 84%、负极性峰值的绝对值增加比例高达 130%;观测位置不变时,角向磁场峰值和水平电场正极性峰值均会随着建筑物高度的增加而增大;对于距离 $d=100$ m, 300 m 时,垂直电场的峰值随着建筑物高度的增加而减小,而 $d=500$ m 时,垂直电场峰值随着建筑物高度的增加呈现出先增大后减小的趋势;此外,建筑物高度会影响垂直电场峰值对距离的敏感程度,建筑物越低(高),相应的垂直电场峰值随着观测距离增大衰减越快(慢)。该文研究结果能够为现代化城市中高建筑物附近线缆、室外设备等的雷电防护方案设计提供参考。

关键词: 雷电; 高建筑物; 电磁场; 时域有限差分

引 言

当前,随着我国经济社会的快速发展和城市化进程不断加速,城市地区的高建筑物逐年增多并形成了具有一定规模的建筑物群。同时,由于高建筑物会吸引附近的闪电,且会产生上行闪电,一次雷暴过境时,高建筑物可能会遭受多次雷击,从而导致高建筑物附近区域的雷电电磁环境比较恶劣。因此,开展高建筑物雷电研究对于建筑物内部及其附近设备和线缆的雷电防护具有重要意义^[1-2]。

国内外很多学者已经对高建筑物雷电开展了很多研究^[3-25]。其中,在高建筑物雷电流和电磁场研究方面,Rachidi 等^[3]建立了雷击高塔传输线工程模型,并模拟了雷击 CN 塔情况下的垂直电场^[4]。Bermudez 等^[5]记录了 CN 塔 474 m 高度处的雷电流波形,并观测了距离 CN 塔 2 km 和 16.8 km 处的

雷电垂直电场和磁场。Pavanello 等^[6]基于 Bermudez 等人的观测结果,分别对雷电流和雷电电磁场进行模拟,进而验证了他们模型结果的准确性。Mimouni 等^[7]采用 2D-FDTD 对雷击高塔电磁场进行模拟,探讨了不同大地电导率对雷电电磁场的影响。Zhang 等^[8-9]研究了雷击高塔情况下的磁场-电流转换因子(FCCFs)以及土壤色散效应对雷电电磁场传播的影响。Heidler 等^[10]观测了距离 Peissenberg 塔 190 m 处的雷电电磁场,并给出了相应的电磁场波形。此外,还有一些学者针对一些特定高度的塔开展了高塔内部雷电流时空分布规律的研究,如加拿大的 CN 塔^[11]、俄罗斯的 Ostankino 塔^[12]、德国的 Peissenberg 塔^[13]、奥地利的 Gaisberg 塔^[14]以及瑞士的 Säntis 塔^[15]等。

但关于建筑物高度对地闪回击电磁场影响的研究报道较少,Fisher 等^[16]通过人工触发闪电试验获取了距离通道 9.3 m 和 19.3 m 处地面的雷电垂直

2018-03-05 收到, 2018-05-21 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(41475003, 51420105011)

* 通信作者, 邮箱: wtlyu@cma.gov.cn

电场,试验中他们依次采用了 4.5 m 和 11 m 高度的接闪杆,通过对比发现当接闪杆高度增大时,会减小其近距离处的垂直电场,然而在他们的观测试验中并没有探究更远距离处的垂直电场对接闪杆高度的依赖性。王智敏等^[17]首次对广州地区不同高度建筑物的地闪回击磁场开展了观测试验,他们通过统计分析得出,建筑物的高度越高对磁场峰值的增强作用越大,但在他们的观测研究中缺乏雷电垂直电场和水平电场等分量的研究。冯建伟^[18]采用电磁场解析算法研究了距离通道 2 km 处不同高度建筑物引起的雷电垂直电场和角向磁场,然而在他们的模拟研究中,大地的电导率是无限大的,即大地对雷电电磁场并没有损耗,但真实的大地有耗,其电导率是有限的。且他们的研究中未考虑雷击不同高度建筑物产生的雷电水平电场。事实上,根据 Agrawal 场线耦合模型^[26]可知,雷电水平电场是线缆中雷电感应过电压的主要耦合分量,因此,研究不同高度建筑物引起的雷电水平电场对于线缆的雷电防护也是十分重要的。再者,从雷电防护角度考虑,探究 500 m 以及更近距离范围内的雷电电磁场传播规律更具有实际意义。根据上述分析可知,已有研究大多集中于某一固定高度的塔进行相关研究,专门针对建筑物高度对雷电电磁场影响的研究较少。到目前为止,国内外关于建筑物高度对雷电水平电场影响的研究工作也还未开展,仍需要进一步完善,而且雷电垂直电场对建筑物高度的依赖性也需要进一步探讨。

因此,本文采用三维电磁场时域有限差分数值算法(3D-FDTD)并考虑大地有耗情况,对雷击不同高度建筑物产生的雷电垂直电场、水平电场以及角向磁场 3 个分量在近距离范围内(100~500 m)的传播规律进行全面研究,并深入探究了建筑物高度对上述 3 个分量的影响。

1 高建筑物回击模型和 3D-FDTD 建模

1.1 高建筑物回击模型简介

为了求解雷击高建筑物产生的电磁场,首先需要得到雷电流在通道和高建筑物内部的时空分布情况,本文采用 Baba 等^[27]提出的高建筑物回击模型,即集总电压源模型实现雷击高建筑物暂态过程。式(1)为雷电流沿着高塔($0 \leq z' \leq h$)情况:

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{\text{top}}}{2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_{\text{bot}}^n \rho_{\text{top}}^n I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_{\text{bot}}^{n+1} \rho_{\text{top}}^n I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right], \quad (1)$$

式(2)为雷电流沿雷电通道($z' \geq h$)情况:

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{\text{top}}}{2} \cdot \left[I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{z' - h}{v} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_{\text{bot}}^n \rho_{\text{top}}^{n-1} (1 + \rho_{\text{top}}) \cdot I_{\text{sc}} \left(h, t - \frac{z' - h}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right]. \quad (2)$$

其中, $I(z', t)$ 为雷电流沿高塔或雷电通道的时空分布表达式,单位:A; z' 为电流观测点的高度,单位:m; t 为时间,单位:s; ρ_{top} 为高建筑物顶部电流反射系数(量纲为 1); ρ_{bot} 为高建筑物底部电流反射系数(量纲为 1); n 为电流在高塔内部的反射次数; I_{sc} 为高塔与通道之间注入的雷电电流源,单位:A; h 为塔高度,单位:m; c 为光速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v 为雷电流沿通道的回击速度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

雷电通道与高塔之间的雷电电流源采用 Nucci 等^[28]提出的电流模型,表达式如下:

$$I(t) = \frac{I_1}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^2}{(t/\tau_1)^2 + 1} e^{(-t/\tau_2)} + I_2 \left[e^{(-t/\tau_3)} - e^{(-t/\tau_4)} \right]. \quad (3)$$

式(3)中, $I(t)$ 为雷电流,单位:A; $I_1 = 9.9 \text{ kA}$, $\eta = 0.845$, $\tau_1 = 0.072 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 5 \mu\text{s}$, $I_2 = 7.5 \text{ kA}$, $\tau_3 = 100 \mu\text{s}$, $\tau_4 = 6 \mu\text{s}$ 。

1.2 雷击高建筑物电磁场 3D-FDTD 建模

FDTD 数值算法^[29]直接在时域对麦克斯韦方程进行求解,理论上可以解决任意复杂媒质的电磁问题,该算法对计算机内存要求较低且计算速度较快,非常适合求解雷电相关的宽带问题。同时,FDTD 算法也被广泛应用于天线设计、电磁兼容、微波电路以及瞬态电磁学等领域。

在本文的模拟过程中,采用二阶 Liao 吸收边界条件^[30]吸收求解空间边界处的反射波。为了使离散后的差分方程组的解是收敛和稳定的,模拟过程中的空间和时间步长满足 Courant 稳定性条件^[31]。雷击高建筑物模型配置如图 1 所示,仿真工作空间为 $x \times y \times z = 800 \text{ m} \times 1300 \text{ m} \times 1700 \text{ m}$,全空间被划分成 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的立方体网格。雷电通道与观测点距离为 d ,本文主要研究距离雷电通道

$d=100\text{ m}, 300\text{ m}, 500\text{ m}$ 时, 建筑物高度 $h=100\text{ m}, 300\text{ m}, 500\text{ m}, 600\text{ m}$ 情况下观测点处的雷电电磁场波形。观测点位于地面上方 10 m 位置处, 高建筑

物顶部和底部的电流反射系数分别为 $\rho_{\text{top}}=-0.5$ 和 $\rho_{\text{bot}}=1$ 。大地厚度设置为 300 m , 大地的电导率为 1 mS/m , 相对介电常数为 10 , 相对磁导率为 1 。

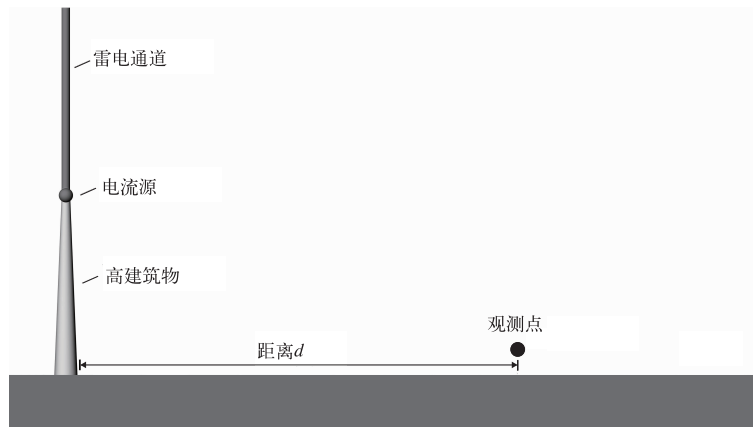


图 1 模型示意图

Fig. 1 Geometry model

为了验证本文所开发的 3D-FDTD 算法的有效性, 这里与文献[32]中雷击高建筑物垂直电场和角向磁场的模拟结果进行对比。文献[32]中的建筑物高度为 100 m , 观测点位于地面且距离通道 50 m , 由

图 2 可以看到, 本文的模拟结果与文献[32]的结果一致, 且设置模拟时建筑物高度为 100 m , 观测点位于地面且距离通道 50 m 。

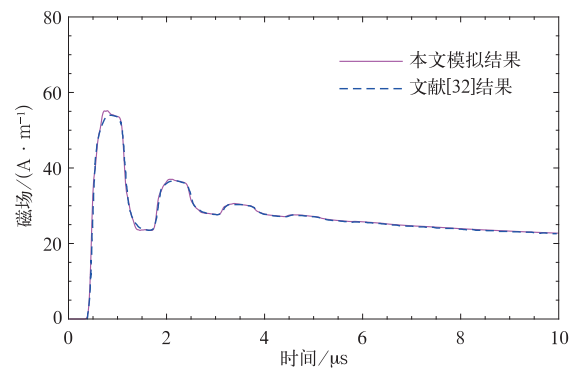
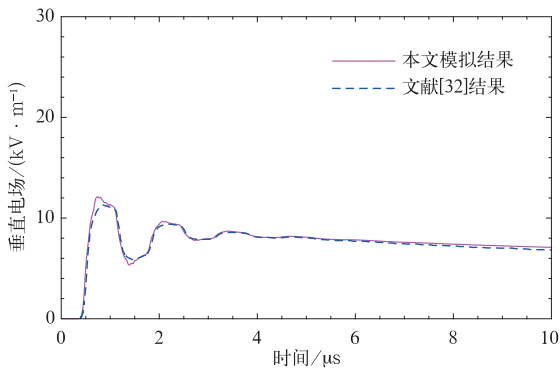


图 2 本文算法有效性检验

Fig. 2 Validation of the method used in this paper

2 模拟结果

图 3 显示了距离通道 $100\text{ m}, 300\text{ m}$ 和 500 m 处观测点上获取的雷电垂直电场波形, 表 1 给出了不同距离处、不同高度建筑物对应的垂直电场峰值。由图 3 可知, 相同雷电流击中不同高度建筑物所产生的垂直电场差异比较显著。在峰值方面, 对于距离

$d=100\text{ m}$ 情况, 当建筑物高度从 100 m 增加到 600 m 时, 对应的垂直电场峰值从 $8.59\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 单调递减至 $3.41\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$, 衰减比例高达 63% 。当距离 $d=300\text{ m}$ 时, 随着建筑物高度的增加, 对应的垂直电场峰值从 $3.26\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 单调递减至 $1.99\text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。从上述分析可知, 在距离小于 300 m 范围内, 模拟结果得到的规律与 Fisher 等^[16]通过观测结果得到的规律是一致的, 即当接闪体高度增大时, 会减小其

近距离处的垂直电场。但距离 $d=500\text{ m}$ 时,不同高度建筑物对雷电垂直电场峰值的影响较小,且当建筑物高度增加时,垂直电场首先从 $1.84\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 增大至 $1.88\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,然后减小至 $1.51\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,即 $d=500\text{ m}$ 情况下的垂直电场峰值随建筑物高度呈现出先增大后减小的趋势。

此外,由表1可以探究雷电垂直电场峰值对观测点距离的敏感程度。随着距离 d 从 100 m 增加至 500 m ,高度 $h=100\text{ m}$ 情况对应的电场峰值从 $8.59\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 衰减至 $1.84\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,衰减比例高

达 79% ,而高度 $h=300\text{ m}$ 和 600 m 对应的衰减比例依次为 61% 和 56% 。由此可见,由于高建筑物的存在,雷电垂直电场随着观测点距离增大而导致的峰值衰减程度完全不同,即高建筑物会影响垂直电场峰值对距离的敏感程度。基于上述分析,建筑物高度越小,相应的垂直电场峰值随着观测点距离的增加而减小得越显著,而当建筑物高度增加时,电场峰值随着观测点距离的增加而减小的趋势趋于缓慢,即电场峰值对观测点距离的敏感性随着建筑物高度的增加而下降。

表1 垂直电场峰值(单位: $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)

Table 1 Peak value of vertical electric field(unit: $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)

距离	$h=100\text{ m}$	$h=300\text{ m}$	$h=500\text{ m}$	$h=600\text{ m}$
$d=100\text{ m}$	8.59	4.86	3.70	3.41
$d=300\text{ m}$	3.26	2.83	2.20	1.99
$d=500\text{ m}$	1.84	1.88	1.62	1.51

雷击不同高度建筑物产生的垂直电场均具有多个波峰,不同高度时对应的波形脉冲宽度差异显著(如图3所示)。垂直电场波形脉冲宽度对建筑物高

度的依赖性十分明显,随着建筑物高度的增加,垂直电场波形脉冲宽度显著增加。

雷电角向磁场波形如图4所示,表2给出了相应

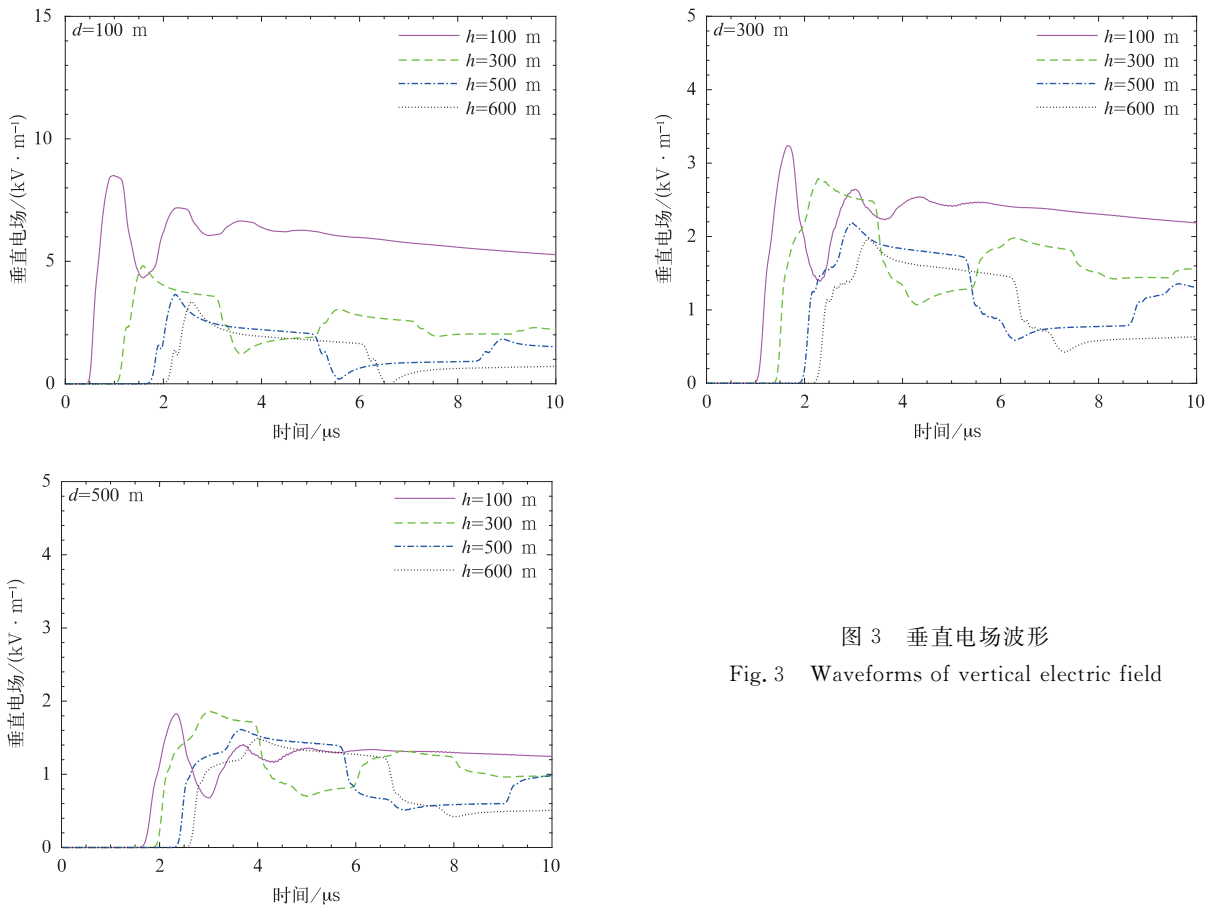


图3 垂直电场波形

Fig. 3 Waveforms of vertical electric field

的磁场峰值。由表 2 可知,随着建筑物高度从 100 m 增至 600 m,距离 $d=100\text{ m}, 300\text{ m}, 500\text{ m}$ 情况下的磁场峰值均呈增大趋势,这一规律与王智敏等^[17]通过观测结果得到的规律相一致,即建筑物的高度越高对磁场峰值的增强作用越显著。

关于角向磁场峰值对雷电通道与观测点距离敏感性方面,随着距离 d 从 100 m 增至 500 m,建筑物高度 $h=100\text{ m}$ 对应的磁场峰值从 $27.01\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

衰减至 $4.68\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$,衰减比例达到 83%,而高度 $h=300\text{ m}, 600\text{ m}$ 对应的衰减比例均为 81%。由此可见,随着距离增加,不同高度建筑物对应的磁场峰值衰减程度基本相同,即建筑物高度不会影响磁场峰值对距离的敏感程度。

在波形特征方面,角向磁场与垂直电场呈现出的特征基本一致,即多峰特征比较明显,且波形脉冲宽度也会随着建筑物高度的增加而增大。

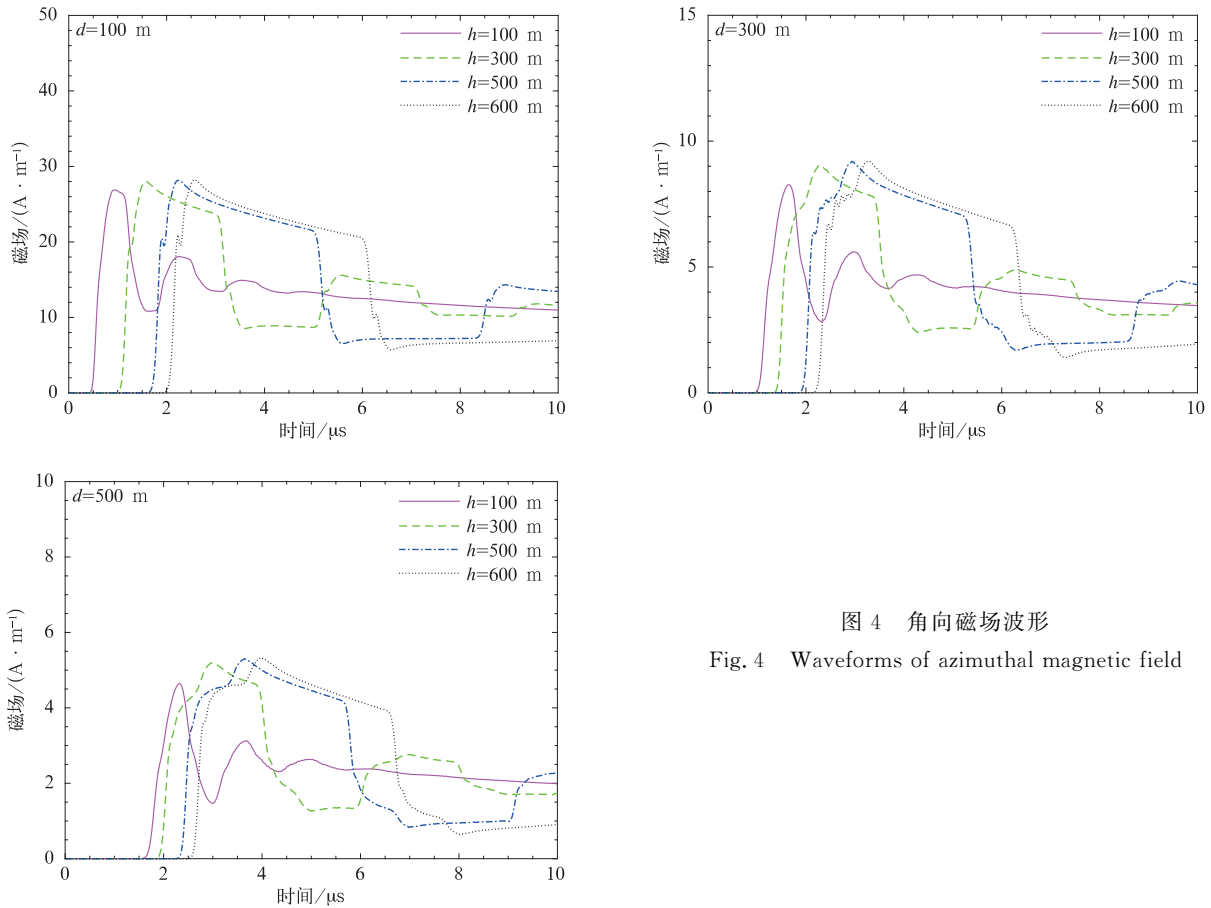


图 4 角向磁场波形
Fig. 4 Waveforms of azimuthal magnetic field

表 2 角向磁场峰值(单位: $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)

Table 2 Peak value of azimuthal magnetic field(unit: $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)

距离	$h=100\text{ m}$	$h=300\text{ m}$	$h=500\text{ m}$	$h=600\text{ m}$
$d=100\text{ m}$	27.01	28.12	28.29	28.37
$d=300\text{ m}$	8.31	9.10	9.22	9.27
$d=500\text{ m}$	4.68	5.21	5.37	5.40

雷击不同高度建筑物情况下的水平电场波形如图 5 所示,表 3 和表 4 分别为水平电场的正极性峰值和负极性峰值。由图 5 可以发现,雷电水平电场波形都存在显著的双极性特征。由表 3 可知,当观测点距离一定时,随着建筑物高度的增加,水平电

正极性峰值呈现单调递增趋势。对于距离 $d=100\text{ m}$ 情况,当建筑物高度从 100 m 增至 600 m 时,水平电场正极性峰值从 $0.70\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 逐渐增大到 $1.29\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,增加比例为 84%。由表 4 可知,当观测点距离固定时,随着建筑物高度的增大,水平电

场负极性峰值的绝对值也呈现单调递增的趋势。对于距离为 100 m 的情况,当建筑物高度从 100 m 增至 600 m 时,水平电场负极性峰值的绝对值从 $1.27 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $2.92 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,增加比例高达 130%。

在水平电场峰值对距离 d 的敏感性方面,随着距离 d 从 100 m 增至 500 m,高度 $h=100 \text{ m}$ 情况对应的电场正极性峰值从 $0.70 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 衰减至

$0.07 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,衰减比例为 90%,而高度 $h=300 \text{ m}$ 和 600 m 对应的衰减比例分别为 88%和 86%。由此可见,当距离 d 增加时,不同高度建筑物对应的雷电水平电场的衰减程度主要取决于距离 d ,即建筑物高度基本不影响水平电场峰值对距离的敏感程度。由图 5 还可以发现,雷击高建筑物产生的水平电场波形脉冲宽度对建筑物高度的依赖性也十分明显,随着建筑物高度的增加会显著增大。

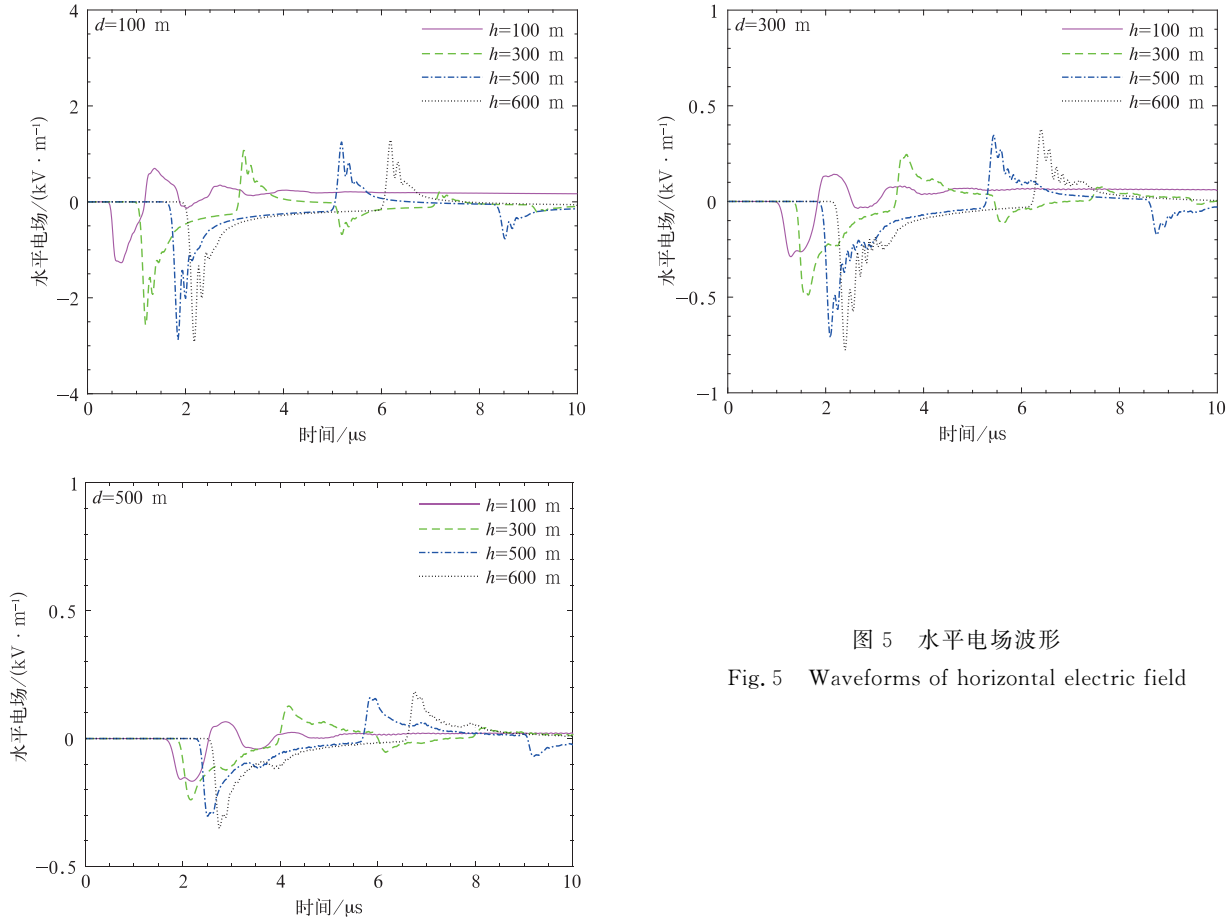


图 5 水平电场波形
Fig. 5 Waveforms of horizontal electric field

表 3 水平电场正极性峰值(单位: $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)

Table 3 Positive peak value of horizontal electric field(unit: $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)

距离	$h=100 \text{ m}$	$h=300 \text{ m}$	$h=500 \text{ m}$	$h=600 \text{ m}$
$d=100 \text{ m}$	0.70	1.08	1.25	1.29
$d=300 \text{ m}$	0.14	0.25	0.35	0.38
$d=500 \text{ m}$	0.07	0.13	0.16	0.18

表 4 水平电场负极性峰值(单位: $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)

Table 4 Negative peak value of horizontal electric field(unit: $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)

距离	$h=100 \text{ m}$	$h=300 \text{ m}$	$h=500 \text{ m}$	$h=600 \text{ m}$
$d=100 \text{ m}$	-1.27	-2.57	-2.87	-2.92
$d=300 \text{ m}$	-0.29	-0.49	-0.71	-0.78
$d=500 \text{ m}$	-0.17	-0.24	-0.30	-0.35

3 结 论

本文基于3D-FDTD电磁场数值算法对雷击不同高度(100~600 m)建筑物产生的垂直电场、角向磁场和水平电场进行了模拟研究,给出了上述3个分量在距离闪电通道500 m范围内的传播规律。通过对雷击不同高度建筑物的电磁场模拟结果进行对比,得到以下结论:

1) 雷击高建筑物产生的垂直电场、角向磁场和水平电场的峰值对建筑物的高度均比较敏感;角向磁场峰值、水平电场正极性峰值以及负极性峰值的绝对值均会随着建筑物高度的增加而增大;距离 $d=100$ m,300 m时垂直电场的峰值随着建筑物高度的增加而减小, $d=500$ m时垂直电场峰值随着建筑物高度的增加呈先增大后减小的趋势。

2) 建筑物高度对雷电垂直电场、角向磁场以及水平电场分量随距离变化特征的影响不同;建筑物高度会影响垂直电场峰值对距离的敏感程度,建筑物越低(高),相应的垂直电场峰值随着观测点距离的增大衰减越快(慢),但不会影响角向磁场和水平电场峰值对距离的敏感性。

3) 建筑物高度对雷电垂直电场、角向磁场以及水平电场3个分量的波形脉冲宽度影响显著,建筑物高度越高,波形脉冲宽度越大。

需要指出,为便于实现,在雷电电磁场数值模拟过程中采用的模型通常较为简单,参数也会采用一些理想情况下的设置,如本文模拟中使用的雷击高塔回击模型为无损的传输线模型,高塔底部反射电流近似为全反射,这与真实情况存在一定差异。另外,现代化城市中存在大量建筑物,下垫面非常复杂,这些都会导致实际测量结果与模拟结果有差异,但本文模拟分析得到的建筑物高度对雷电电磁场影响的一些规律性认识与实际观测一致。

参 考 文 献

- [1] 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), DOI: 10.1029/2004JD005505.
- [2] Rakov V A, Rachidi F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 428-442.
- [3] 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.
- [4] Rachidi F, Rakov V A, Nucci C A, et al. Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D23), DOI: 10.1029/2002JD002119.
- [5] 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. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, 47(1): 146-159.
- [6] 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*, 2007, 112 (D13), DOI: 10.1029/2006JD007959.
- [7] Mimouni A, Rachidi F, Azzouz Z. A finite-difference time-domain approach for the evaluation of electromagnetic fields radiated by lightning strikes to tall structures. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(9-10): 504-513.
- [8] Zhang Q, He L, Ji T, et al. On the field-to-current conversion factors for lightning strike to tall objects considering the finitely conducting ground. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(13): 8189-8200.
- [9] Zhang Q, Ji T, Hou W. Effect of frequency-dependent soil on the propagation of electromagnetic fields radiated by subsequent lightning strike to tall objects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(1): 112-120.
- [10] Heidler F H, Manhardt M, Stimper K. Transient response of the top structure of the Peissenberg Tower to lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(6): 1547-1555.
- [11] Janischewskij W, Hussein A M, Shostak V. Propagation of Lightning Current Within the CN Tower. *CIGRE Study Committee*, 1997, 33: 2-3.
- [12] Rakov V A. Transient response of a tall object to lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, 43(4): 654-661.
- [13] Heidler F, Wiesinger J, Zischank W. Lightning Currents Measured at a Telecommunication Tower from 1992 to 1998//14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001.
- [14] Diendorfer G, Hadrian W, Hofbauer F, et al. Evaluation of lightning location data employing measurements of direct strikes to a radio tower. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2002, 119(12): 422-427.
- [15] Romero C, Rachidi F, Paolone M, et al. Statistical distributions of lightning currents associated with upward negative flashes based on the data collected at the Sântis (EMC) tower in 2010 and 2011. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1804-1812.
- [16] Fisher R J, Schnetzer G H. 1993 Triggered Lightning Test

- Program: Environments Within 20 Meters of the Lightning Channel and Small Area Temporary Protection Concepts. Sandia National Labs, Albuquerque, United States, 1994.
- [17] 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.
- [18] 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: 50-52.
- [19] 谭涌波,张鑫,向春燕,等. 建筑物上侧击雷电的三维数值模拟. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 227-236.
- [20] 谭涌波,陈之禄,张冬冬,等. 高层建筑对周围建筑雷击保护距离的模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(4): 498-505.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李丹,张义军,吕伟涛. 风力发电机叶片姿态与雷击概率关系模拟分析. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 585-594.
- [24] 郭秀峰,谭涌波,郭凤霞,等. 建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 189-196.
- [25] 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.
- [26] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1980(2): 119-129.
- [27] Baba Y, Rakov V A. On the use of lumped sources in lightning return stroke models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D3), DOI: 10. 1029/2004JD005202.
- [28] Nucci C A, Diendorfer G, Uman M A, et al. Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D12): 20395-20408.
- [29] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [30] Liao Z P, Huang K, Yang B, et al. A transmitting boundary for transient wave analyses. *Science in China (Series A)*, 1984, 27(10): 1063-1076.
- [31] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [32] Baba Y, Rakov V A. Electromagnetic fields at the top of a tall building associated with nearby lightning return strokes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(3): 632-643.

Simulation of Structure Height Influences on Electromagnetic Field of Lightning Return Stroke

Su Zhiguo¹⁾²⁾ Lü Weitao²⁾ Chen Lüwen³⁾ Ma Ying²⁾
Wu Bin²⁾ Qi Qi²⁾ Wu Shanshan²⁾

¹⁾ (Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, 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⁾ (Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

Abstract

With the development of economy and society and the continuous acceleration of urbanization, there are more and more tall-objects in urban area. Tall-objects can attract nearby downward lightning and trigger upward lightning. When a thunderstorm occurs, tall-object may be struck multiple times, which lead to a severe lightning electromagnetic environment in the vicinity. Therefore, the study of lightning striking to tall-object is of significance to the lightning protection of nearby equipment and cables.

An electromagnetic model of lightning striking to tall-object is developed based on the three-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) numerical method. Using FDTD method, the propagation law of lightning vertical electric field, the azimuthal magnetic field and the horizontal electric field along the ground surface, produced by negative cloud-to-ground lightning flash to tall-object, is investigated considering cases of different heights (100–600 m) of tall-objects.

The amplitude of lightning short-circuit current waveform is 11 kA, and the corresponding 10%-to-90% rise-time is 0.15 μs . Simulation results show that the height of the tall-object plays an important role on the peak value of lightning electric field. For example, for the case of distance $d=100$ m, the peak value of vertical electric field decreases from 8.59 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ to 3.41 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ with the height of the tall-object increasing from 100 m to 600 m (decrement: 63%). Moreover, for horizontal electric field, the positive peak value increases from 0.7 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ to 1.29 $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ (increment: 84%), and the amplitude of negative peak increases up to 130%. The peak value of azimuthal magnetic field and horizontal electric field will increase with the tall-object height, when the distance of the observation point is constant. However, for the case of distance $d=100$ m, 300 m, the vertical electric field peak will decrease with the tall-object height increasing. Furthermore, for the case of $d=500$ m, the vertical electric field peak increase first and then decrease with the height. In addition, the tall-object height has an effect on the dependence of vertical electric field peak on distance d . For relative lower/taller strike object, the peak value of the corresponding vertical electric field attenuates quickly/slowly with the observation distance d . Results obtained are very useful for lightning protection design of power cables and electronic equipment in the vicinity of tall objects.

Key words: lightning; tall-object; electromagnetic field; finite-difference time-domain