

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.007

大气边界层内闪电通道电流及其FDTD模拟辐射电场的研究

周筠珺^{1,2}, 达选芳¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;

2. 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)

摘要: 为了更加深入地了解大气边界层内闪电通道电流及其产生的辐射电场特征, 笔者首先利用6种闪电通道电流衰减模型, 分析了大气边界层内通道电流随高度的衰减特性; 其次利用二维FDTD方法模拟了大气边界层内各主要高度上, 距闪电通道4个不同水平距离的水平及垂直辐射电场随时间的变化特征。得到的结果表明: ①在大气边界层内各主要高度, 各闪电通道电流衰减模型造成的衰减差异由大至小依次为: MTLTQ、MTLE、MTLT、MTLCOS、MTLL及TL; ②在0 m高度、4个水平距离上, 闪电通道的水平辐射电场主要为负值; 在两个较远水平距离、15 m高度上, 同时存在正、负极大值; 而于其余高度、各水平距离均为正值, 且幅值绝对值的量级均在 $0\sim 10^4$ V/m之间; ③闪电通道垂直辐射电场, 于200 m及500 m高度、距通道20 m及50 m的水平距离, 以及于500 m高度、距通道200 m的水平距离均相对较为复杂; 而于2 500 m高度距通道的各水平距离的特征最为简单, 在8.6 μ s或8.9 μ s后出现负的增大; 而除此之外均为单一极大值的正值变化。6种闪电通道电流衰减模型中, MTLL于大气边界层内各主要高度的衰减差异较为适中, 且具有一定的代表性; 而二维FDTD可以有效地模拟闪电通道在大气边界层内的辐射电场的水平及垂直分量。

关键词: 大气边界层; 闪电通道; 电流; 电场

Study on Lightning Channel Base Current and Its Radiated Electric Fields by Using FDTD Method in the Atmospheric Boundary Layer

ZHOU Yunjun^{1,2}, DA Xuanfang¹

(1. College of Atmospheric Science, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To more thoroughly reveal the characteristics of lightning channel base current and its radiated electric fields in the atmospheric boundary layer, six attenuation models of lightning channel base current are employed to analyze the attenuation characteristics of the current versus altitude, and the two-dimensional FDTD method is adopted to simulate the variations of the horizontal and vertical electric fields radiated by the lightning channel at four distances from the channel with time. The results indicate that: 1) The six attenuation models are listed descendingly as follows according to their attenuation differences at different altitudes: MTLTQ, MTLE, MTLT, MTLCOS, MTLL, and TL; 2) The horizontal radiated electric fields at four horizontal distances from the lightning channel and the altitude of 0 m are almost negative, and the ones at two farther horizontal distances and the altitude of 15 m have both positive and negative maxima, while the ones at other horizontal distances and altitudes are all positive with the absolute values within $0\sim 10^4$ V/m; and 3) The vertical radiated electric fields at the

收稿日期: 2016-01-21; 修回日期: 2016-03-14

基金项目: 四川省教育厅项目(16CZ0021); 北京市自然科学基金重点项目(8141002); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目资助(CMAGJ2015M51)。

Project Supported by Education Department of Sichuan Province(16CZ0021), Natural Science Foundation of Beijing(8141002), Key Technology Integration and Application of Chinese Meteorological Bureau(CMAGJ2015M51).

altitudes of 200 and 500 m and the horizontal distances of 20 and 50 m from the channel, as well as at the altitude of 500 m and the horizontal distance of 200 m, are rather complicated, but the ones at the altitude of 2 500 m and different horizontal distances are very simple, which exhibit negative increase after 8.6 or 8.9 μs , while the fields in other conditions exhibit positive variation with one maximum. It is concluded that of all six models the MTLL gains moderate attenuation difference at all altitudes, so it is a representative model, and the FDTD methods can effectively simulate the horizontal and vertical radiated electric field components of CG (cloud-to-ground) lightning channel in the atmospheric boundary layer.

Key words: atmospheric boundary layer; lightning channel; current; electric field

0 引言

雷电具有复杂的物理过程,其中地闪尤为如此^[1-3]。无论是正地闪或是负地闪,其首次回击及继后回击所产生的强烈电磁辐射,对于人类活动的主要空间区域(即地面及其以上 2 500 m 的高度范围)大气边界层内的物体,特别是各类与人类生产及生活密切相关的电气设备,都能产生十分明显的影响。因此,就地闪主要物理过程中的大电流所产生的强电磁辐射特征的研究,一直是学术界关注的焦点,并对此进行了大量的研究^[4-13]。

目前,学术界对于地闪回击阶段的电流特征已有了一定的了解,并通过研究给出了一些地闪的回击模型。这些回击模型主要包括:气体动力模型、电磁模型、分布回路模型,以及工程模型;而在这些模型中,尤以工程模型被学术界较为接受^[4]。虽然在回击模型的基础上,又建立了诸如:MTLL、MTLE、MTLT、MTLTQ、MTLCOS、DU、BG 及 TL 的地闪回击电流的衰减模型^[5];但是对于这些回击电流衰减模型在大气边界层内各主要高度上,所产生的衰减差异及模型的代表性等问题,学术界仍知之甚少。而与此同时,对大气边界层内地闪回击通道电流所产生的辐射电场各分量进行准确的估算和模拟,也是目前学术界所面临的难题之一。

鉴于此,文中首先利用地闪回击电流衰减模型,分析大气边界层各主要高度所产生的衰减差异,并讨论各模型的代表性;其次通过 FDTD 方法模拟地闪回击电流所产生的辐射电场的水平及垂直分量,进而对其进行深入的分析。

1 地闪回击通道电流及其随高度的衰减

对于地闪回击的工程模型而言,可以利用式(1)来表示地闪回击通道电流沿通道的时空分布,且可据此来计算地闪回击的辐射电场^[4]。

$$i(z', t) = u(t - z'/v_f)P(z')i(0, t - z'/v) \quad (1)$$

式(1)中: $u(t)$ 为 Heaviside 方程; $P(z')$ 为依赖于高

度的衰减因子; v_f 为回击速度; v 为电流的波形传播速度。

$$u(t - z'/v_f) = \begin{cases} 0 & t < z'/v_f \\ 1 & t \geq z'/v_f \end{cases} \quad (2)$$

在地闪回击通道底部电流方程中,由于 Nucci^[14]给出的方程(3)与 Berger 等^[15]的实验结果较为一致,因此得到了较为广泛的应用。

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^2}{(t/\tau_1)^2 + 1} \exp(-t/\tau_2) + I_{02} [\exp(-t/\tau_3) - \exp(-t/\tau_4)] \quad (3)$$

式(3)中: $I_{01}=9.9 \text{ kA}$; $\tau_1=0.072 \text{ }\mu\text{s}$; $\tau_2=5 \text{ }\mu\text{s}$; $\eta=0.845$; $I_{02}=7.5 \text{ kA}$; $\tau_3=100 \text{ }\mu\text{s}$; $\tau_4=6 \text{ }\mu\text{s}$ 。

由于地闪回击通道电流不仅是时间的函数,同时也是高度的函数,因此通常而言其会随着高度增加而出现衰减。6种地闪回击通道底部电流衰减模型及其公式见表1。

表1 6种地闪回击通道底部电流衰减模型及其公式
Table 1 Six kinds of attenuation model of CG lightning channel base current and their equations

衰减模型	$P(z')$
MTLT	$P(z') = \frac{1 + (1 - 2z'/H)^3}{2}$
MTLTQ	$P(z') = \frac{[1 + (1 - 2z'/H)^3]^2}{4}$
MTLCOS	$P(z') = 0.95 - 0.9 \frac{z'}{H} + 0.05 \cos\left(\frac{5\pi z'}{H}\right)$
MTLL	$P(z') = 1 - \frac{z'}{H}$
MTLE	$P(z') = \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right)$
TL	1

为了分析地闪回击通道底部电流在大气边界层内随高度的衰减特征,文中针对6种衰减模型MTLT、MTLTQ、MTLCOS、MTLL、MTLE及TL,分析Nucci的地闪回击通道底部电流于大气边界层内15、200、500、2 500 m 4个主要高度上衰减后随时间的分布特征。

6种衰减模型下,地闪回击通道底部电流于

15、200、500、2 500 m 4 个高度, 在大气边界层内衰减后随时间的分布特征见图 1。由图 1 可知, 在大气边界层内的 4 个主要高度上地闪回击通道底部电流在 MTLTQ 衰减模型下, 随时间的分布差别最大, 在 15、200、500、2 500 m 高度上的电流最大值分别为 17.1、15.7、14.0、10.0 kA; 而与 MTLTQ 模型下电流随时间分布特征相近的是 MTLE 模型, 其于 4 个对应高度上的电流最大值则分别为 17.0、16.1、14.9、10.1 kA。除了以上 2 个模式外, 于 4 个高度差

别较大的则是 MTLT 模型, 其于 4 个对应的高度电流最大值则分别为 17.1、16.3、15.4、12.4 kA。而衰减时间分布差别紧随以上 3 个模型的分别是 MTLTQ 和 MTLT 模型; 对于 MTLTQ 模型, 4 个对应的高度上电流最大值则分别为 17.1、16.4、15.3、14.0 kA; 对于 MTLT 模型, 4 个对应的高度上电流最大值则分别为 17.0、16.9、16.3、13.9 kA; 而 TL 模型为无衰减模型。由此可见, 在 6 种衰减模型中, MTLTQ 和 MTLT 模型衰减差别于各主要高度上较为适中。

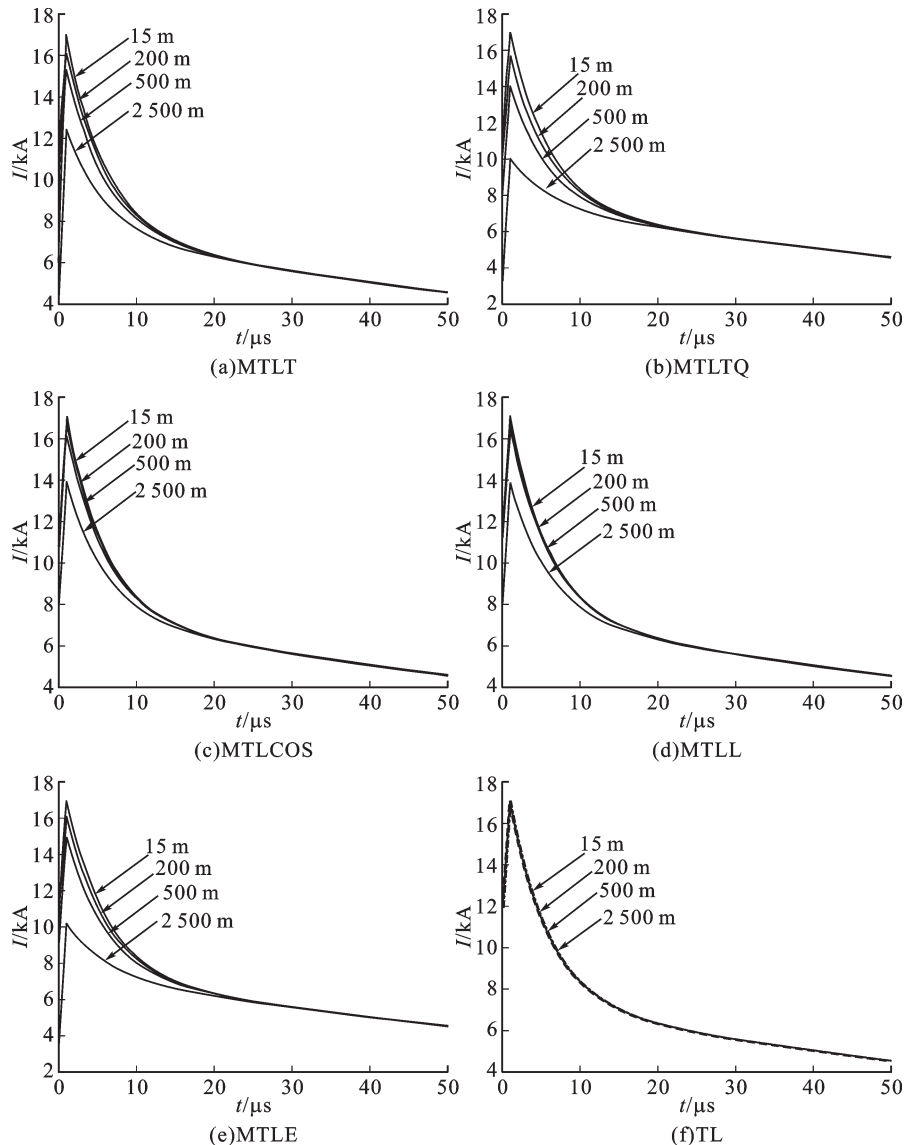


图 1 6 种衰减模型下地闪回击通道底部电流于大气边界层内经衰减后随时间的分布

Fig. 1 Distributions of CG lightning channel base current with time in the atmospheric boundary layer under six kinds of attenuation model

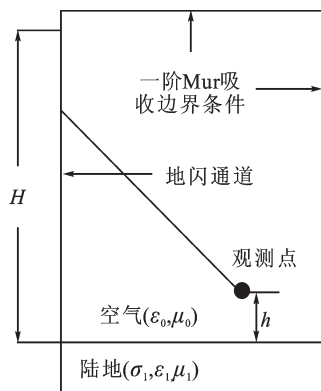
为了使讨论的模型较具有代表性, 将选取地闪回击通道电流衰减幅度介于中间的 MTLT 模型作为地闪回击通道电流源的衰减模型, 进而讨论其辐射电场的分布特征。

2 利用 FDTD 方法模拟地闪回击通道电流的辐射电场

2.1 地闪回击通道电流的水平辐射电场

在文中地闪回击通道产生的电场计算中, 地闪

回击通道由垂直的电流源阵列来表示,其中使用的FDTD方法(时域有限差分)为柱坐标下的二维FDTD。时域内不同位置的地闪回击产生的电场波形由二维FDTD的方法计算。二维FDTD的工作范围 $2\,000\text{ m}(x\text{ 轴})\times 2\,700\text{ m}(z\text{ 轴})$,其中的格距为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,时间步长为 1.66 ns ,计算中采用一阶Mur吸收边界以模拟无限空间,具体的地闪回击通道电流辐射电磁场在大气边界层内的传播见图2。



σ —电导率; ε —介电常数; μ —磁导率。

图2 地闪辐射电磁场在大气边界层内的传播

Fig. 2 Propagation of electromagnetic fields radiated by CG lightning channel over ground

计算中,地闪回击通道的高度 H 设置为 $7\,500\text{ m}$,电流源采用Nucci^[14]的设置,而衰减模型则采用在各高度上差别适中的MTLL模型。陆地的电导率 $\sigma_1=0.001\text{ S/m}$,陆地介电常数 $\varepsilon_1=10$;空气的介电常数 $\varepsilon_0=8.85\times 10^{-12}$,空气与陆地的磁导率相同,即 $\mu_0=\mu_1=4\pi\times 10^{-7}\text{ H/m}$ 。

地面及 15 m 高度距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 水平辐射电场随时间的分布见图3。在地面上(图3(a)), $10\text{ }\mu\text{s}$ 内 20 m 及 50 m 处水平辐射电场随时间的分布变化都较快,特别是前 $2\text{ }\mu\text{s}$ 尤为如此。 20 m 处水平辐射电场的极大值出现在 $0.5\text{ }\mu\text{s}$,其值为 $-4\,250\text{ V/m}$, $10\text{ }\mu\text{s}$ 时下降为 -610 V/m ;而 50 m 处水平辐射电场的极大值则下降为 $0.4\text{ }\mu\text{s}$ 时的 $-1\,600\text{ V/m}$, $10\text{ }\mu\text{s}$ 时则下降为 -80 V/m 。在 15 m 高度上(图3(b)),虽然也是前 $2\text{ }\mu\text{s}$ 变化较快,但 20 m 及 50 m 水平辐射电场随时间的分布与在地面上的分布特征完全不同, 20 m 处水平辐射电场的极大值出现在 $0.5\text{ }\mu\text{s}$,其值为 $3.375\times 10^4\text{ V/m}$, $10\text{ }\mu\text{s}$ 时下降为 $0.835\times 10^4\text{ V/m}$; 50 m 处水平辐射电场的极大值出现在 $1\text{ }\mu\text{s}$,其值为 $0.625\times 10^4\text{ V/m}$, $10\text{ }\mu\text{s}$ 时下降则为 $0.235\times 10^4\text{ V/m}$ 。 200 m 及 500 m 高度距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 水平辐射电场随时间的分布见图4。

由图4可知,距地闪回击通道水平距离 20 m

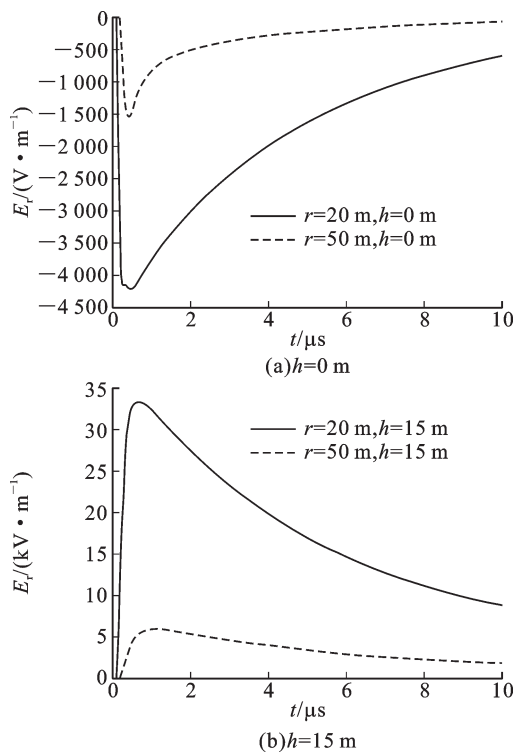


图3 0 m 及 15 m 高度、距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 水平辐射电场随时间的分布

Fig. 3 Distributions of horizontal radiated electric field with time at 0 m and 15 m over ground beside CG lightning return stroke channel for 20 m and 50 m

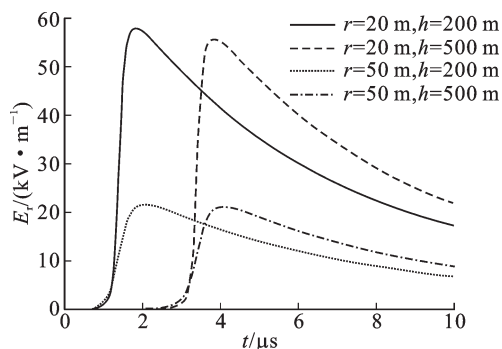


图4 200 m 及 500 m 高度距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 水平辐射电场随时间的分布

Fig. 4 Distributions of horizontal radiated electric field with time at 200 m and 500 m above ground beside CG lightning return stroke channel for 20 m and 50 m

及 200 m 的高度,水平辐射电场从 $0.7\text{ }\mu\text{s}$ 开始迅速上升,在 $1.8\text{ }\mu\text{s}$ 时达到极大值 $5.76\times 10^4\text{ V/m}$,此后便呈下降趋势,在 $10\text{ }\mu\text{s}$ 时已下降为 $1.75\times 10^4\text{ V/m}$;在同样的水平距离于 500 m 的高度,水平辐射电场则从 $2.7\text{ }\mu\text{s}$ 开始迅速上升, $3.8\text{ }\mu\text{s}$ 时达到极大值 $5.53\times 10^4\text{ V/m}$ 。

距地闪回击通道水平距离 50 m 于 200 m 的高度,水平辐射电场亦是从小 $0.7\text{ }\mu\text{s}$ 开始迅速上升,在 $2\text{ }\mu\text{s}$ 时达到极大值 $2.20\times 10^4\text{ V/m}$,此后缓慢下降,在

10 μs 时已下降为 $0.72 \times 10^4 \text{ V/m}$; 距地闪回击通道水平距离 50 m 于 500 m 的高度, 水平辐射电场则亦是 2.7 μs 开始迅速上升, 在 4 μs 时达到极大值 $2.18 \times 10^4 \text{ V/m}$, 此后缓慢下降, 在 10 μs 时已下降为 $0.83 \times 10^4 \text{ V/m}$ 。

由此可见, 距地闪回击通道水平距离较近的 20 m 及 50 m, 距地闪回击通道的水平距离越近, 水平辐射电场极大值就会越大, 而距离地面的高度主要影响了水平电场极大值出现的时间, 对极大值大小的影响则较小。距离地闪回击通道 200 m 及 500 m 于 0、15、200、500 m 高度水平辐射电场随时间的分布见图 5。

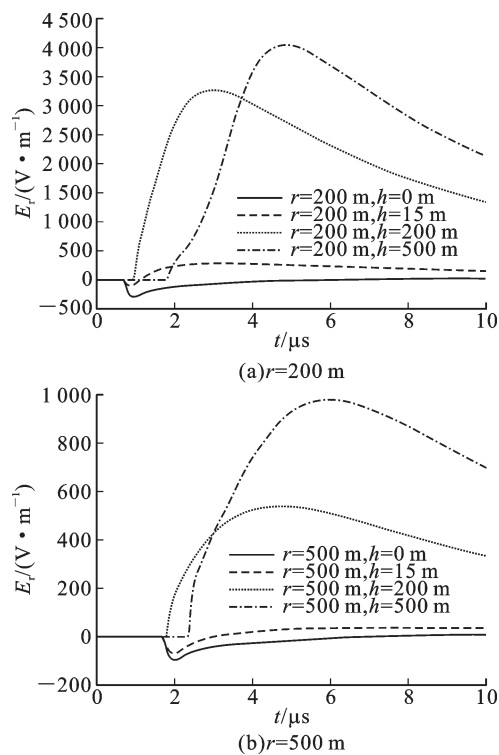


图 5 距离地闪回击通道 200 m 及 500 m 于 0、15、200、500 m 高度水平辐射电场随时间的分布

Fig. 5 Distributions of horizontal radiated electric field with time at 0, 15, 200 and 500 m above ground beside CG lightning return stroke channel for 200 m and 500 m

由图 5(a)可知, 距地闪回击通道 200 m 的距离, 于 0 m 及 15 m 的高度上水平辐射电场随时间的变化较为接近, 在 0.7 μs 时开始发生变化, 到 0.92 μs 时分别出现极大值, 分别为 -280 V/m 及 -95 V/m; 此后地面上的水平辐射电场逐渐减小到接近 0 V/m, 而于 15 m 的高度则出现了反向的增大, 在 2.2 μs 时达到了 260 V/m, 然后逐渐减小到 10 μs 时的 130 V/m。而于 200 m 及 500 m 的高度上水平辐射电场随时间的变化也较为相似, 200、500 m 的高度水平辐射电场分别从 0.94 μs 及 1.8 μs 时开始迅速增大, 而它

们的极大值则分别为 2.9 μs 时的 3 270 V/m 及 4.8 μs 时的 4 000 V/m, 极大值出现后则均开始下降, 在 10 μs 时分别下降为 1 350 V/m 及 2 160 V/m。

由图 5(b)可知, 距地闪回击通道 500 m 的距离, 在地面及 15 m 的高度上水平辐射电场随时间的变化同样也较为接近, 在 1.8 μs 时开始发生变化, 到 2 μs 时均出现极大值, 分别为 -95 V/m 及 -75 V/m; 此后地面上的水平辐射电场也逐渐减小到接近 0 V/m, 而于 15 m 高度的则出现了小幅的反向增大, 最终稳定于 34 V/m。而于 200 m 及 500 m 的高度上水平辐射电场随时间的变化也同样较为相似, 200、500 m 的高度水平辐射电场分别从 1.8 μs 及 2.4 μs 时开始迅速增大, 而它们的极大值则分别为 4.7 μs 时的 530 V/m 及 6 μs 时的 980 V/m, 极大值出现后则均开始下降, 在 10 μs 时分别下降为 350 V/m 及 700 V/m。

由此可见, 尽管距地闪回击通道的水平距离有较大的差异, 但是在 0 m 及 15 m 高度上水平辐射电场随时间的变化是较为接近的, 而于 200 m 及 500 m 的高度水平辐射电场随时间的变化趋势也是相似的, 只是距地闪回击通道水平距离更近的水平辐射电场幅值会明显较大。2 500 m 高度距离地闪回击通道 20、50、200、500 m 水平辐射电场随时间的分布见图 6。

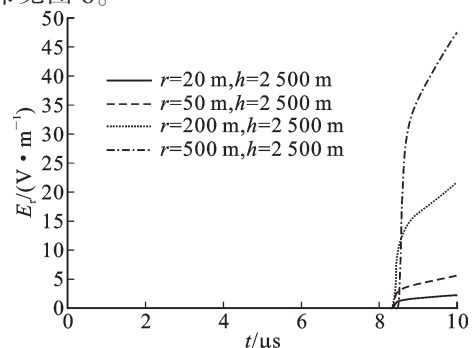


图 6 2 500 m 高度距离地闪回击通道 20、50、200、500 m 水平辐射电场随时间的分布

Fig. 6 Distributions of horizontal electric field with time at 2 500 m above ground beside CG lightning return stroke channel for 20, 50, 200, 500 m

由图 6 可知, 在 2 500 m 的高度上, 距离地闪回击通道 20、50、200 m 水平辐射电场均从 8.4 μs 开始随时间增大, 而 500 m 水平辐射电场则从 8.5 μs 开始增大, 在 10 μs 时 4 个高度上对应的水平辐射电场的幅值分别则为 2.5、5.8、22、47.5 V/m。这一高度上于不同的距地闪回击通道的水平距离上的水平辐射电场明显有别于其他高度的分布特征。

采用二维 FDTD 方法对于地闪回击通道电流产

生的水平辐射电场进行计算,其结果与 Li 等得到研究结果较为一致^[16]。

2.2 地闪回击通道电流的垂直辐射电场

距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 于 0、15、200、500 m 的高度垂直辐射电场随时间的分布见图 7。

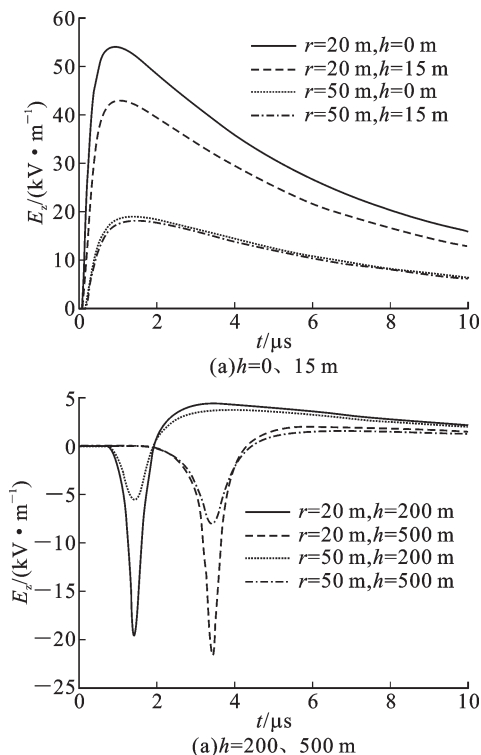


图 7 距离地闪回击通道 20 m 及 50 m 于 0、15、200、500 m 的高度垂直辐射电场随时间的分布

Fig. 7 Distributions of vertical radiated electric field with time at 0, 15, 200 and 500 m above ground beside CG lightning channel for 20 m and 50 m

图 7(a)给出了距离地闪回击通道 20 m 及 50 m、于 0 m 及 15 m 高度的垂直辐射电场随时间的分布,其中距离地闪回击通道 20 m 的两个高度上垂直辐射电场幅值 10 μs 内整体较大,0 m 及 15 m 高度的极大值分别为 0.8 μs 的 5.45 kV/m 及 1 μs 的 4.32 kV/m;而距离地闪回击通道 50 m 的 2 个高度上垂直辐射电场幅值 10 μs 内较为接近且整体相对于 20 m 2 个高度的较小,其极大值均出现在 1.1 μs 分别为 19 kV/m 及 18 kV/m;因此,距地面 15 m 高度以内,在 20 m 及 50 m 水平距离上垂直辐射电场随时间的变化特征是较为相似的。

图 7(b)为距离地闪回击通道 20 m 及 50 m、而于 200 m 及 500 m 高度的垂直辐射电场随时间的分布。于 200 m 高度的两个水平距离上的垂直辐射电场随时间的变化趋势是一致的,即均在 1.4 μs 出现负的极大值,分别为 -19.6 kV/m 及 -6 kV/m;此后则迅速减小,在 1.9 μs 时绝对值减小到 0;在 3 μs

时都出现了正的极大值,分别为 4.2 kV/m 及 3.8 kV/m,此后则是缓慢的减小。于 500 m 高度的两个水平距离上的垂直辐射电场随时间的变化趋势同 200 m 高度的基本相同,只是正负极大值出现的时间都有所滞后,负的极大值出现在 3.4 μs,其值分别为 -22.5 kV/m 及 -7.8 kV/m;5.2 μs 时出现了正的极大值分别为 2.3 kV/m 及 1.2 kV/m。

由此可见,200 m 及 500 m 的高度,决定垂直辐射电场极大值出现时间的主要因素是距地面的距离,而决定幅值绝对值的主要因素则是距地闪回击通道的水平距离。距离地闪回击通道 200 m 与 500 m 于 0、15、200、500 m 高度垂直辐射电场随时间的分布见图 8。

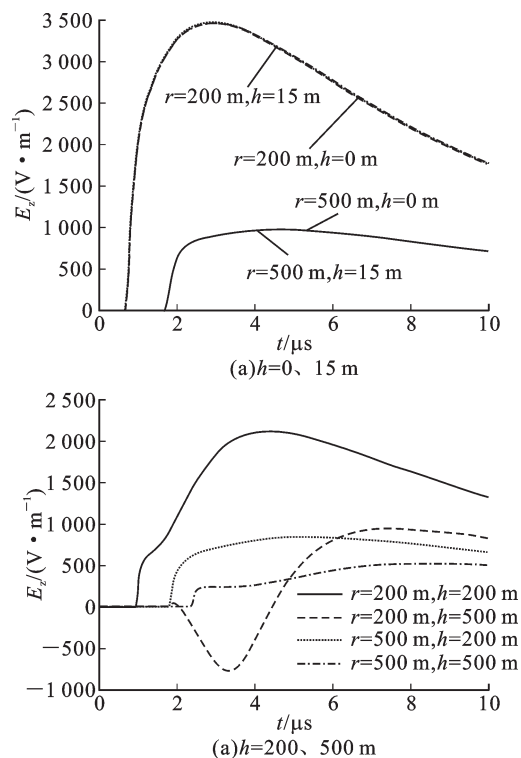


图 8 距离地闪回击通道 200 m 与 500 m 于 0、15、200、500 m 高度垂直辐射电场随时间的分布

Fig. 8 Distributions of vertical radiated electric field with time at 0, 15, 200 and 500 m above ground beside CG lightning return stroke channel for 200 m and 500 m

由图 8(a)可知,距地闪回击通道水平距离 200 m 及 500 m,于 0 m 及 15 m 2 个高度的垂直辐射电场变化趋势基本一致,在 10 μs 内均为具单极值的正值分布。距地闪回击通道水平距离 200 m,于 2 个高度的极大值均出现在 2.9 μs,其值分别为 3 455 V/m 及 3 438 V/m;而距地闪回击通道水平距离 500 m 于 2 个高度的极大值则出现在 4.5 μs,其值分别为 978 V/m 及 977 V/m。

由图 8(b)可知,除了距地闪回击通道 200 m,于

高度 500 m 垂直电场随时间的分布同时具有正、负的极大值, 分别为 $3.5 \mu\text{s}$ 的 -775 V/m 及 $7.8 \mu\text{s}$ 的 944 V/m ; 其余的 3 个垂直电场随时间的分布均呈现为典型的“Hump”型^[4]。其中距地闪回击通道 200 m, 于高度 200 m 的极大值为 $4.6 \mu\text{s}$ 的 2120 V/m ; 而距地闪回击通道 500 m, 于高度 200 m 及 500 m 的极大值则分别为 $5.7 \mu\text{s}$ 的 845 V/m 及 $8.6 \mu\text{s}$ 的 525 V/m 。

距离地闪回击通道 20、50、200、500 m, 于 2 500 m 高度垂直电场随时间的分布见图 9, 它们的分布特征都是相似。除了 500 m 距离的分布, 其余的均在 $8.6 \mu\text{s}$ 开始垂直电场由 0 转向负的增大, 500 m 距离的分布先是正的增大, 在 $8.9 \mu\text{s}$ 时达到 2.98 V/m , 然后出现反向的增大。同样该高度上于不同的距地闪回击通道的水平距离上的垂直辐射电场也明显有别于其他高度的分布特征。

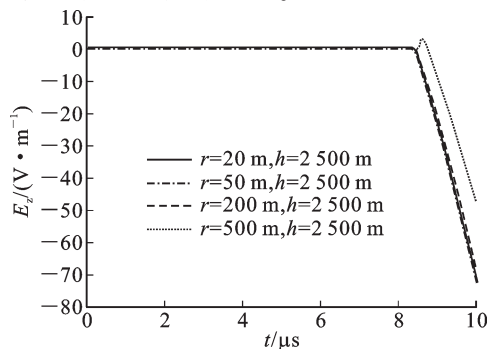


图 9 距离地闪回击通道 20、50、200、500 m 于 2 500 m 高度垂直辐射电场随时间的分布

Fig. 9 Distributions of vertical radiated electric field with time at 2 500 m above ground beside CG lightning return stroke channel for 20, 50, 200 and 500 m

采用二维 FDTD 方法对于地闪回击通道产生的垂直辐射电场进行计算, 该结果与 Jiang^[8]、Sorwar^[17]及 Delfino^[18]的结果较为一致。

3 结论

笔者在利用 6 种地闪回击通道底部电流衰减模型, 分析大气边界层内地闪回击通道电流随时间变化的基础上, 通过二维 FDTD 方法对地闪回击通道产生的水平及垂直辐射电场进行了分析, 并得到以下主要结论。

1) 在 6 种地闪回击通道底部电流衰减模型中, MTLL 模型于 4 个高度上的衰减差别较为适中, 且具有一定的代表性。在大气边界层内, 二维 FDTD 方法可以较好地模拟地闪回击通道电流所产生的水平及垂直电场分量。

2) 于 0 m 高度, 在距离地闪回击通道 20、50、

200、500 m, 地闪回击通道电流的水平辐射电场主要为负值, 且其极大值的绝对值随着距地闪回击通道距离增大而减小。于 15 m 的高度, 在距地闪回击通道的 4 个水平距离上, 水平辐射电场较为复杂, 其中距通道 20 m 与 50 m 的为正值, 而距通道 200 m 与 500 m 的则同时出现了正、负的极大值, 同样距地闪回击通道越远则水平辐射电场的绝对值越小。于 200 m 及 500 m 的高度, 水平辐射电场均为正, 其中于 200 m 的水平辐射电场的极大值均比于 500 m 高度在同样水平距离出现的时间早, 而于同样的高度随着距地闪回击通道水平距离的增加, 水平辐射电场极值出现的时间明显延后。于 2 500 m 的高度 4 个水平距离上在 $8.4 \mu\text{s}$ 或 $8.5 \mu\text{s}$ 后水平辐射电场开始增大, 且水平距离越远增大的幅度越大。

3) 距地闪回击通道较近 20 m 与 50 m 水平距离的地闪回击通道电流的垂直辐射电场, 于 0 m 高度及 15 m 的高度较为一致, 其幅值均为正且量级相同; 而于 200 m 及 500 m 的高度则较为复杂, 均同时存在正、负极大值。距地闪回击通道较远的 200 m 与 500 m 水平距离的地闪回击通道电流的垂直辐射电场, 除了距地闪回击通道水平距离 200 m 于 500 m 高度同时具有正、负的极大值, 及于 2 500 m 的高度较为简单外, 其余的垂直辐射电场均呈典型的“Hump”型。于 2 500 m 的高度垂直辐射电场, 在 4 个距地闪回击通道的水平距离上差异不大, 于 $8.6 \mu\text{s}$ 或 $8.9 \mu\text{s}$ 开始负的增大。

参考文献:

- [1] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 161-167.
LI Ruifang, WU Guangning, CAO Xiaobin, et al. Formula for probability of lightning current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 161-167.
- [2] 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[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1893-1897.
CHEN Jiahong, TONG Xuefang, GU Shanqiang, et al. Distribution characteristics of lightning current magnitude measured by lightning location system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1893-1897.
- [3] 王晓嘉, 陈亚洲, 李冰, 等. 基于斜向通道模型的雷电电磁场近场近似特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 648-654.
WANG Xiaojia, CHEN Yazhou, LI Bing, et al. Approximate characteristics of lightning electromagnetic field in nearby area generated by oblique channel[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 648-654.

- [4] RAKOV V A, UMAN M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 403-426.
- [5] JAVOR V. Approximation of a lightning channel-base current with a two-rise front Proceedings of abstracts [C]//11th Int. Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism IOPE 2010.Sofia;[s.n.], 2010: 88-89.
- [6] SILVEIRA F H, De CONTI A, VISACRO S. Lightning over-voltage due to first strokes considering a realistic current representation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(4): 929-935.
- [7] JAVOR V, RANCIC P D. A channel-base current function for lightning return-stroke modeling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1): 245-249.
- [8] JIANG Zhidong, ZHOU Bihua, LIU Yawen, et al. A multiresolution time-domain method for LEMP calculation and comparison with FDTD[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(2): 419-426.
- [9] ZHANG Q, LI D, ZHANG Y, et al. On the accuracy of wait's formula along a mixed propagation path within 1km from the lightning channel[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 1042-1047.
- [10] BABA Y, RAKOV V A. Applications of the FDTD method to lightning electromagnetic pulse and surge simulations[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China;[s.n.], 2014: 325-339.
- [11] COORAY V. Horizontal fields generated by return strokes[J]. Radio Sci., 1992(27): 529-537.
- [12] COORAY V. Horizontal electric field above and under-ground produced by lightning flashes[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(4): 936-943.
- [13] SHOORY A, MOINI R, SADEGHI S H, et al. Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(1): 131-145.
- [14] NUCCI C A, DIENDORFER G, UMAN M A, et al. Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(D12): 20395-20408.
- [15] BERGER K, ANDERSON R B, KRONINGER H. Parameters of lightning flashes[J]. Electra, 1975(80): 223-237.
- [16] LI D, ZHANG Q, WANG Z, et al. Computation of lightning horizontal field over the two-dimensional rough ground by using the three-dimensional FDTD[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(1): 143-148.
- [17] SORWAR M G, GOSLING I G. Lightning radiated electric fields and their contribution to induced voltages electromagnetic compatibility[C]//1999 IEEE International Symposium.[S.l.]: IEEE, 1999: 635-639.
- [18] DELFINO F, PROCOPIO R, ROSSI M, et al. Prony series representation for the lightning channel base current[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 308-315.

周筠珺(1968—),男,教授,主要从事大气电学及云雾物理学研究。

(上接第36页)

- 分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1709-1718.
- LIU Xiaofan, CUI Xiang, WU Hengtian, et al. Measurement and analysis on electromagnetic disturbance of intelligent electronic device current transformer ports due to switching operations in a 500 kV Gas Insulated Substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1709-1718.
- [20] 赵军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695.
- ZHAO Jun, CHEN Wei Jiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [21] 嵇建飞, 杨逸飞, 袁宇波, 等. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 998-1007.
- JI Jianfei, YANG Yifei, YUAN Yubo, et al. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 998-1007.
- 张荐(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电磁场理论及其应用、电力系统电磁环境与电磁兼容。
- 焦重庆(1981—),男,博士,副教授,研究方向为电磁场理论及其应用、电力系统电磁环境与电磁兼容。