

## 地表垂直分层条件下倾斜通道雷电电磁场特性研究

王晓嘉 陈亚洲\* 万浩江 王李鹏

(机械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室 石家庄 050003)

**摘要:** 为了得到垂直分层大地电导率和雷电回击通道倾斜角度对雷电电磁脉冲场(LEMP)的影响规律, 该文利用时域有限差分法对倾斜通道雷电电磁场进行了建模计算。研究表明, 当观测点位于倾斜回击通道下方时, 地表雷电电磁场峰值会随着回击通道倾斜角度的增加而出现明显的上升, 同时电磁场的上升沿变得更加陡峭。观测点与地表雷击点之间的水平距离越大, 雷电电磁场的峰值时间也就越大。对地表电磁场而言, 观测点同侧大地电导率主要影响雷电水平电场和角向磁场的初始峰值, 而观测点另一侧大地电导率的变化则主要影响水平电场和角向磁场波尾幅值。对地下电磁场而言, 增加埋地深度对垂直电场的衰减作用十分明显, 而对水平电场和角向磁场来说影响极小。

**关键词:** 雷电电磁脉冲场; 时域有限差分法; 分层大地电导率; 倾斜放电通道; 倾斜角度

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0466-08

DOI: 10.11999/JEIT160326

## Characteristics of Lightning Electromagnetic Fields from Oblique Lightning Channel Considering Vertical Stratified Ground

WANG Xiaojia CHEN Yazhou WAN Haojiang WANG Lipeng

(Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** The electromagnetic fields from oblique lightning channel are studied by using FDTD and considering the effects of vertical layered ground conductivity and lightning channel tilt angle. The calculation results show that the initial peak values of lightning electromagnetic fields will increase with increasing the channel tilt angle when the observation point is under the oblique lightning channel, and the rising edges of the electromagnetic fields become steeper. The peak time of the lightning electromagnetic fields will be greater with greater distance between the lightning stroke point on the ground and the observation point. For the electromagnetic fields on the ground surface, the ground conductivity at the same side of the observation point affects mainly the initial peak values of the horizontal electric field and azimuthal magnetic field; the ground conductivity at the other side affects mainly the amplitudes of the wave tail of the horizontal electric field and the azimuthal magnetic field. For the electromagnetic fields inside the ground, the vertical electric field will decrease with increasing the underground depth, but the horizontal electric field and azimuthal magnetic field underground is basically the same as that on the ground surface.

**Key words:** Lightning ElectroMagnetic Pulse (LEMP) fields; Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method; Layered ground conductivity; Oblique discharge channel; Tilt angle

### 1 引言

雷电是自然界中一种大规模静电放电现象, 当闪电发生时放电通道中雷电流的上升率极高, 可以高达几十 kA/ $\mu$ s, 这种强大的瞬态电流会产生强烈的电磁辐射效应, 对周围电子产品造成了巨大的威

胁<sup>[1-3]</sup>。由于电气设备主要布置在地上空间, 因此对雷电电磁脉冲(Lightning ElectroMagnetic Pulse, LEMP)场的研究主要集中在地面以上区域, 但是随着人类对地下空间的开发和利用, 越来越多的设备被转移至地下。为了更好地解决电子器件的雷电电磁场防护问题, 必须对地表及地下雷电电磁场展开相关研究。目前对雷电电磁场计算的常用方法有 Sommerfeld 积分法、简化近似方法(Cooray-Rubinstein 近似公式)以及时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)法。其中, Sommerfeld 积分法存在积分高度震荡、计算时间过

收稿日期: 2016-04-05; 改回日期: 2016-09-06; 网络出版: 2016-11-14

\*通信作者: 陈亚洲 chen\_yazhou@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51377171)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (51377171)

长等问题<sup>[4]</sup>；Cooray-Rubinstein 近似公式在计算地面水平电场时，其计算误差会随着观测点高度的增加、相对介电常数的减少以及距离的减小而加大，误差最大时可达 10%<sup>[5]</sup>；与 Cora-Rubinstein 近似公式相比，FDTD 法具有更高的准确率，可以直接考虑大地有限电导率的影响，并且更容易用计算机代码实现<sup>[6]</sup>，因此在雷电电磁场的研究中受到广泛的应用。

在国内，解放军理工大学的研究团队在早期开展了单层土壤对水平电场影响的相关研究<sup>[7]</sup>，文献<sup>[8]</sup>就水平分层大地电导率对雷电辐射磁场的影响进行了分析。后来，文献<sup>[9-12]</sup>就水平分层、垂直分层电导率对雷电电磁场的分布特性进行了比较系统的研究。需要指出的是，以上相关研究均是在大地分层条件下针对地表或空间电磁场展开的。近期，Mimouni 等人<sup>[13]</sup>首次在距离放电通道 100 m 范围内就分层电导率对地下雷电电磁场的影响进行了分析，并给出了其传播规律，但是其研究仅限于土壤水平分层，并没有涉及垂直分层条件下的地下电磁场。

除此之外，上述大地电导率的相关研究是在假设放电通道垂直于大地条件下完成的，而这一假设与自然界真实的放电通道相差甚远。1968 年，文献<sup>[14]</sup>通过高速摄像机对雷电放电过程进行观察发现，真实放电通道是由长度分布范围从短到小于 1 m 至长到大于 1 km 不等的弯曲通道构成，且通道方位角的平均变化绝对值为 16°。据此，国内外学者对非垂直放电通道雷电电磁场展开了相关研究<sup>[14-17]</sup>，但是以上研究工作大多是在大地为理想导体条件下进行的，并没有考虑大地有限电导率对电磁场的影响。

本文首先通过时域有限差分法对倾斜放电通道雷电电磁场进行建模，在此基础上研究土壤垂直分层条件下放电通道倾斜角度对地表电磁场的影响，最后给出垂直分层电导率对地表和地下倾斜通道电磁场的影响规律，为电磁场防护提出指导性的意见。

## 2 倾斜通道电磁场时域有限差分法建模

### 2.1 倾斜通道建模

在垂直通道雷电电磁场研究中，考虑到电磁辐射场各分量相对于放电通道具有对称性，一般采用 FDTD 法在 2 维柱坐标系下进行计算，但是在倾斜放电通道中电磁场各分量不满足对称性条件，因此需要在 3 维直角坐标系下展开研究，倾斜放电通道模型如图 1(a)所示。

图 1(a)中  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为分界面左侧和分界面右侧土壤电导率， $\epsilon_1, \epsilon_2$  为土壤介电常数，在自由空间中  $\sigma_0 = 0, \epsilon = \epsilon_0, nx_1, nx_2$  为土壤垂直分层网格厚度。 $\alpha$  为倾斜放电通道与  $z$  轴之间的夹角， $H$  为倾斜通道长度， $I$  为回击通道底部电流， $P(x, y, z)$  为观测点坐标， $r$  为观测点与雷击点之间的水平距离。

在 2 维柱坐标系下垂直通道模型中，电流源一般都沿  $z$  轴进行添加。但是在倾斜通道电磁场计算中由于不满足轴对称条件，这就需要对电磁场的加源方式进行重新考虑。为了得到有源区倾斜通道雷电电磁场的差分公式，假设倾斜通道垂直穿过  $S_2$  面， $S_2$  在  $xoy$  面的投影为  $S_1$  且  $S_1$  为 Yee 元胞的下表面(或上表面)，如图 1(b)所示，在图 1(b)中  $S_1, S_2$  的面积分别为  $ds$  和  $ds'$ ， $n$  为  $S_1$  的法向量。

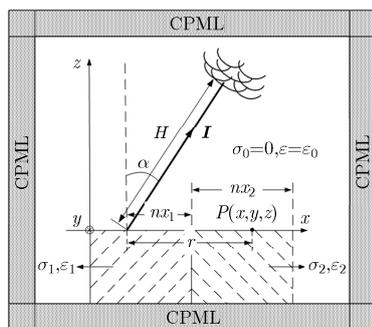
在 Maxwell 方程组中有

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \quad (1)$$

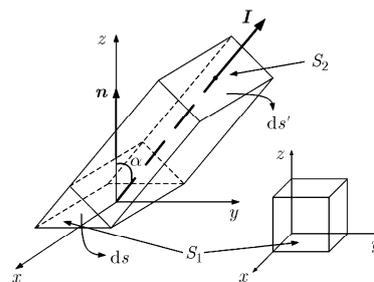
式(1)中， $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  分别为电场强度和磁场强度， $\mathbf{J}$  为电流密度。对式(1)在  $S_1$  上进行面积分，根据图 1(b)中  $S_1$  与  $S_2$  之间的位置关系，对电磁场进行差分离散，可得有源区  $E_z$  分量表达式为

$$E_z|_m^{n+1} = CA(m)E_z|_m^n + CB(m) \left[ (\nabla \times \mathbf{H})_z|_m^n - \frac{I}{dx dy} \right] \quad (2)$$

式(2)中， $m$  为电磁场分量在 Yee 网格中的坐标值，需要注意的是不同的电磁场分量  $m$  值是不同的，而  $CA(m), CB(m)$  分别为



(a) 倾斜通道电磁场模型



(b) 倾斜通道电流源模型

图 1 直角坐标系下倾斜通道雷电电磁场及其电流源模型

$$\left. \begin{aligned} CA(m) &= \frac{(\varepsilon(m)/dt - \sigma(m)/2)}{(\varepsilon(m)/dt + \sigma(m)/2)} \\ CB(m) &= \frac{1}{(\varepsilon(m)/dt + \sigma(m)/2)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

类似地可以得到放电通道穿过 Yee 元胞其它 4 个面时, 有源区各电场分量表达式为

$$E_x|_m^{n+1} = CA(m)E_x|_m^n + CB(m)\left[(\nabla \times H)_x|_m^n - \frac{I}{dydz}\right] \quad (4)$$

$$E_y|_m^{n+1} = CA(m)E_y|_m^n + CB(m)\left[(\nabla \times H)_y|_m^n - \frac{I}{dx dz}\right] \quad (5)$$

如果将式(2), 式(4), 式(5)中右侧的电流源项去除, 以上 3 式则变为直角坐标系下无源区各电场分量的差分方程。磁场分量差分表达式与电场类似, 由于篇幅限制在这里就不再给出磁场的空间差分方程。

在确定了有源区和无源区倾斜通道雷电电磁场差分方程之后, 需要对回击工程模型以及放电通道底部电流函数进行选取。本文选取传输线模型来描述雷电流的回击过程, 采用脉冲函数<sup>[15]</sup>来表示回击通道底部电流, 脉冲函数表达式为

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\xi} [1 - \exp(-t/\tau_1)]^\eta \exp(-t/\tau_2) \quad (6)$$

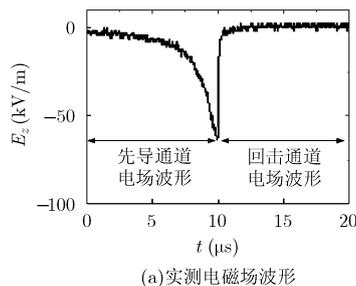
其中,  $I_0$  为底部电流峰值,  $\tau_1, \tau_2$  为电流上升、衰减时间常数,  $\eta$  为电流陡度因子,  $\xi$  为最大电流修正因子, 且

$$\xi = [\eta\tau_2 / (\tau_1 + \eta\tau_2)]^\eta [\tau_1 / (\tau_1 + \eta\tau_2)]^{\tau_1/\tau_2} \quad (7)$$

在计算过程中采用坐标伸缩完全匹配层 (Convolutional Perfectly Matched Layer, CPML) 吸收边界条件对边界处的雷电电磁波进行处理。

## 2.2 倾斜通道模型验证

为了验证所建模型是否有效, 计算结果是否正确, 我们将在距离放电通道 15 m 处对倾斜通道与垂直通道产生的垂直电场分量进行计算, 并将计算结果同文献[18]中的人工引雷实测电场波形以及文献[17]计算的垂直电场波形进行比较。在验证过程中,



(a) 实测电磁场波形

我们将采取双脉冲函数叠加的形式来描述实测回击通道底部电流, 采用指数衰减的传输线模型 (Modified Transmission Line model with Exponential current decay with height, MTLE) 对雷电回击过程进行描述, MTLE 模型表达式为

$$i(z', t) = e^{-z'/\lambda} i(0, t - z'/v) \quad (8)$$

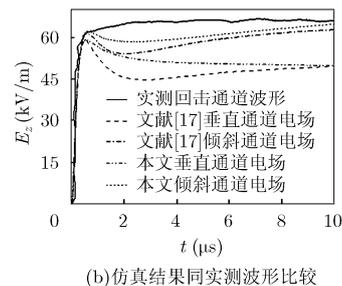
其中,  $\lambda$  为衰减常数, 在本文中取  $\lambda = 2$  km, 底部电流参数为:  $I_0 = 7.78$  kA,  $\tau_1 = 6.0 \times 10^{-8}$  s,  $\tau_2 = 7.5 \times 10^{-7}$  s,  $I_1 = 4.2$  kA,  $\tau_3 = 0.7 \times 10^{-6}$  s,  $\tau_4 = 1.4 \times 10^{-5}$  s。测量得到的先导电场和回击电场波形如图 2(a) 所示, 实测回击电场和计算得到的电场波形如图 2(b) 所示。

从图 2(b) 中可以看出, 本文所建模型得到的倾斜通道电场波形同测量电场之间的偏差要小于文献[17]倾斜通道电场同测量电场之间的偏差, 并且对比倾斜通道电场与垂直通道电场可以发现, 倾斜通道所产生的电场波形要更加接近文献[18]所测量得到的电场波形。据此, 我们可以判断出本文所建模型是有效的, 所得到的计算结果是正确的。

## 3 放电通道倾斜角度对 LEMP 影响

本节将针对通道倾斜角度变化对雷电电磁场的影响展开相关研究。由于倾斜角度对水平电场和垂直电场影响规律一致, 为了避免重复仅给出水平电场和角向磁场波形。在研究过程中我们选取一套典型的电流参数:  $I_0 = 30$  kA,  $\tau_1 = 4.05 \times 10^{-7}$  s,  $\tau_2 = 6.8 \times 10^{-5}$  s,  $\eta = 2$ 。回击速度  $v = 1.3 \times 10^8$  m/s, 回击通道长度  $H = 5$  km, 分层大地电导率分别为  $\sigma_1 = 0.0010$  S/m,  $\sigma_2 = 0.1000$  S/m, 垂直土壤分界面距放电通道的网格数  $n_{x1} = 10$ , 观测点  $P$  位于放电通道的正下方。此外, 鉴于倾斜通道计算空间较大, 为了满足需求我们取空间网格尺寸  $\delta = 4$  m, 时间间隔  $\Delta t = 2/c$ ,  $c$  为光速, 且  $c = 3 \times 10^8$  m/s。分别取  $\alpha = 0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ , 来对不同倾斜角度下的电磁场波形进行计算。计算结果如图 3~图 5 所示。

从图 3 可以看出, 在  $r = 100$  m 处水平电场和角



(b) 仿真结果同实测波形比较

图 2  $r = 15$  m 处仿真结果同实测结果比较

向磁场峰值均会随着倾斜角度的增加而出现上升，与此同时，倾斜角度越大电场波形的上升沿和下降沿越陡峭。磁场波形的上升沿受倾斜角度的影响虽然与电场波形相一致，但是磁场波形下降沿却没有电场波形下降沿那样陡峭，而是形成一个缓慢的下降斜坡，因此电场波形会在短时间内出现归零现象而磁场波形则不会。

从图 4 可以看出，在距离雷击点 200 m 处放电通道倾斜角度对电磁场的影响规律与  $r = 100$  m 处基本一致，但是仔细观察可以发现在相同倾斜角度条件下图 4 与图 3 相比电磁场波形的峰值时间会出现比较明显的推迟。出现这种现象的主要原因是当水平电场和角向磁场沿地表进行传播时，大地有限电导率的存在会使电磁场的高频分量不断衰减，具体表现就是观测点距离放电通道越远电磁场波形的峰值时间越长。此外，图 4(a)中不同倾斜角度的电场波形波尾幅值偏差也要比图 3(a)大。

当水平距离增加到  $r = 500$  m 时，与图 4 对比可以看出在相同倾斜角度条件下电磁场的峰值时间会进一步向后推迟，同时峰值时间的推迟也使得电磁场波形的上升沿变得更加平缓。从图 5 中还可以发现，电磁场峰值时间除了会受到水平距离的影响之外，还会受到放电通道倾斜角度的影响，即在相同距离条件下通道倾斜角度越大电磁场的峰值时间越长，而且不同倾斜角度的电场波形波尾幅值偏差也越大。

综合对比图 3~图 5 可以发现，在  $r = 100$  m 处电磁场波形的峰值时间并没有随通道倾斜角度的增加而改变，但是当观测点与雷击点之间的水平距离增加时，相同距离处电场波形的峰值时间会随着倾斜角度的增加而出现推迟，这表明水平距离的增加会使通道倾斜角度对电场峰值时间的影响变得更加明显。

#### 4 垂直分层电导率对倾斜通道 LEMP 影响

雷电电磁场特性除了受到放电通道自身因素影响之外，还会受到大地电参数的影响。本节将在大地垂直分层条件下，分别研究观测点侧(即分界面右侧)大地电导率和观测点另一侧(即分界面左侧)大地电导率对不同距离处雷电电磁场的影响。在研究过程中取放电通道的倾斜角度  $\alpha = \pi/6$ ，回击通道底部电流参数以及通道高度、回击速度等参数保持不变。

##### 4.1 分界面右侧电导率变化对雷电电磁场影响

分别取  $\sigma_1 = 0.0100$  S/m， $\sigma_2 = 0.0100, 0.0050, 0.0010, 0.0005$  S/m 对不同距离处的地表雷电电磁场和地下 4 m 处雷电电磁场进行计算，计算结果如图 6~图 8 所示，其中，(a1), (b1), (c1)代表不同距离处的地表电磁场分量，对应左侧纵轴；(a2), (b2), (c2)代表不同距离处的地下电磁场分量，对应右侧纵轴。

观察图 6(a1), 6(b1), 6(c1)可以发现，不同大地电导率的地表垂直电场波形完全重合，这说明大地

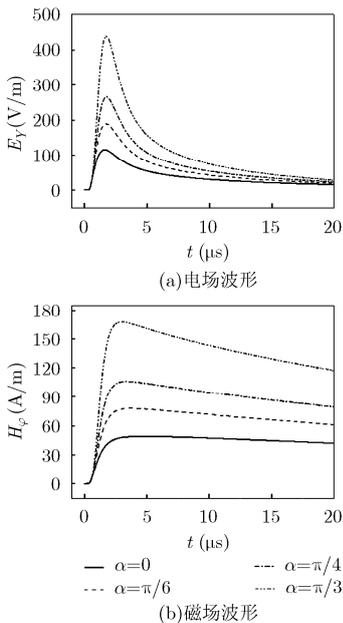


图 3  $r = 100$  m 处不同倾斜角度电磁场波形比较

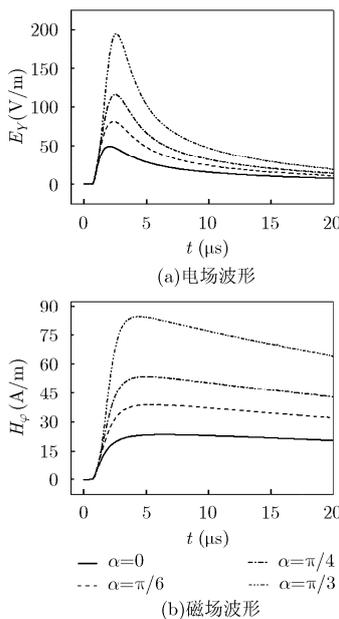


图 4  $r = 200$  m 处不同倾斜角度电磁场波形比较

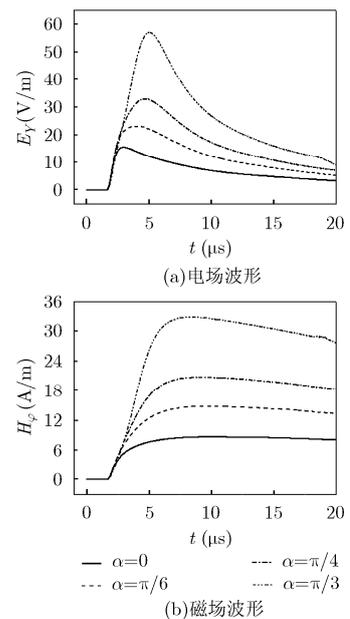


图 5  $r = 500$  m 处不同倾斜角度电磁场波形比较

电导率对地表垂直电场影响极小,这与前人的研究结论相一致;但是在图6(a2),6(b2),6(c2)中可以看出地下垂直电场受 $\sigma_2$ 的影响十分明显,大地电导率的减小会导致垂直电场初始峰值的上升,与此同时垂直电场的峰值时间也会随着电导率的下降而出现推迟。当大地电参数相同时,同一距离处地表垂直电场的幅值是地下电场幅值的数十倍之多,这表明埋地深度的增加会对垂直电场产生比较明显的衰减作用。

图7可以看出,当 $\sigma_1$ 固定而 $\sigma_2$ 发生改变时,地表水平电场峰值与地下水平电场峰值均会随着电导率的减小而迅速的上升。同时,水平电场波形的上升沿陡度和下降沿陡度均会随着电场峰值的升高而变得更加剧烈。比较不同距离处的电场峰值可以发

现,当 $\sigma_2$ 从0.0100 S/m减小到0.0005 S/m时,在 $r=100$  m处地表水平电场的峰值增加幅度为233%,在 $r=500$  m处其峰值增加幅度为326%,由此可以判断,大地电导率对水平电场的影响会随着距离的增加而增强。在大地电导率相同的情况下,比较相同距离处地表水平电场和地下水平电场可以发现,地下电场峰值要有所下降,但是其下降幅度非常有限;然而在 $r=200$  m处,地表(地下)电场峰值要比 $r=100$  m处地表(地下)电场峰值下降约50%, $r=500$  m处地表(地下)电场峰值要比 $r=100$  m处地表(地下)电场峰值下降约85%,这说明增加观测点与雷击点之间距离对水平电场幅值的衰减作用要明显大于增加埋地深度对水平电场幅值的衰减作用。

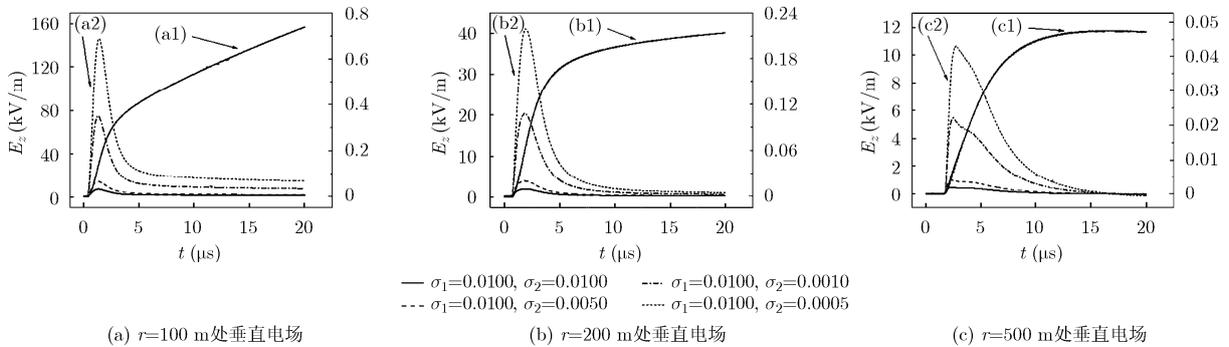


图6 不同 $\sigma_2$ 垂直电场波形比较

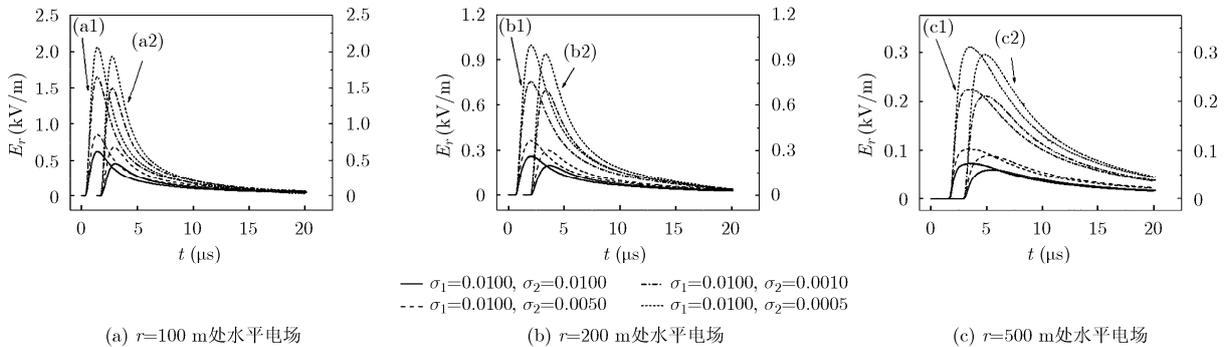


图7 不同 $\sigma_2$ 水平电场波形比较

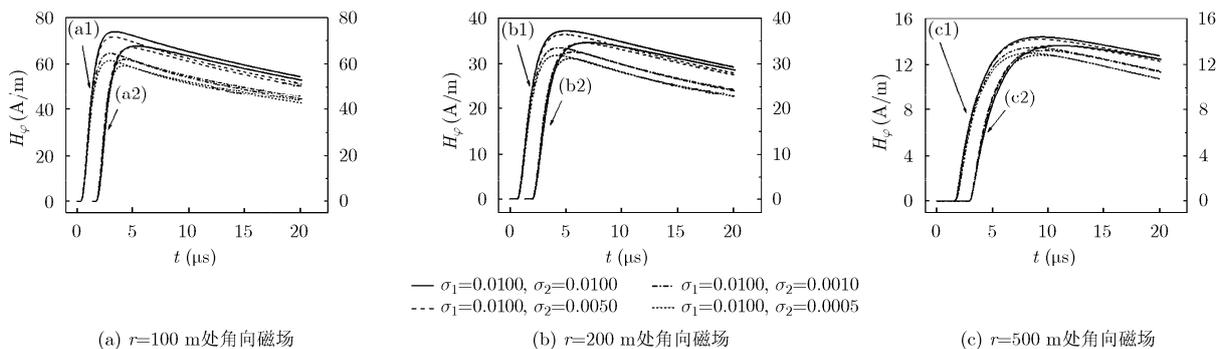


图8 不同 $\sigma_2$ 角向磁场波形比较

观察图 8 可以发现，右侧大地电导率对倾斜通道角向磁场的影响规律与水平电场相反，即磁场峰值会随着  $\sigma_2$  的减小而下降，同时  $\sigma_2$  对磁场分量的影响要明显小于对水平电场的影响，当  $\sigma_2$  从 0.0100 S/m 减小到 0.0005 S/m 时，地表磁场分量峰值变化幅度仅为 17%，而地表电场分量峰值变化幅度却达到 332%。同时对比相同距离处地表磁场与地下磁场可以看出， $\sigma_2$  对地表磁场的影响程度要略大于对地下磁场的影响；对于不同距离处的磁场，从图 8(a)~图 8(c) 中可以发现，随着水平距离的增加， $\sigma_2$  对磁场分量的影响将逐渐减小。

4.2 分界面左侧电导率变化对雷电电磁场影响

分别取  $\sigma_1 = 0.0100, 0.0050, 0.0010, 0.0005$  S/m,  $\sigma_2 = 0.0010$  S/m，对不同距离处的地表雷电电磁场和地下 4 m 处雷电电磁场进行计算，计算结果如图 9~图 11 所示，其中，(a1), (b1), (c1) 代表不同距离处的地表电磁场分量，对应左侧纵轴；(a2), (b2), (c2) 代表不同距离处的地下电磁场分量，对应右侧纵轴。

从图 9(a1), 9(b1), 9(c1) 中可以看出，当分界面右侧电导率固定而左侧电导率变化时，不同  $\sigma_1$  地表垂直电场波形完全重合；在图 9(a2), 9(b2), 9(c2) 中，地下垂直电场波形仅在峰值部分以及波尾下降沿部分存在微小的差别，由此可以判断左侧大地电导率改变对垂直电场分量影响极小，基本可以忽略。

从图 10(a) 可以看出，在  $r = 100$  m 处  $\sigma_1$  主要影响水平电场的波尾幅值，同时也会对电场初始峰值产生一定的影响；当  $r$  增加到 200 m 时， $\sigma_1$  对波尾幅值的影响明显减小；当水平距离进一步增加时，在  $r = 500$  m 处不同大地电导率的电场波形基本重合，这表明随着水平距离的增加左侧电导率对水平电场的影响在逐渐下降。出现这种现象的主要原因是，当观测点距离垂直分层土壤交界面较近时，左侧电导率的变化会对观测点处的平均电导率产生较大影响，导致水平电场波形随  $\sigma_1$  的变化出现一定的波动。但是左侧电导率的变化对大地平均电导率的影响也只是在一定范围内有效，如果观测点与分界面之间的距离增加，那么  $\sigma_1$  的变化对观测点处的平均电导率影响就会随之减小，当二者之间的距离超过某一特定范围时，左侧电导率对水平电场的影响将基本消失。

分别对比图 11(a1), 11(b1), 11(c1) 与图 11(a2), 11(b2), 11(c2) 可以发现，左侧电导率对地表磁场分量和地下磁场分量的影响规律相同，即磁场幅值会随着  $\sigma_1$  的减小而出现上升，这点与右侧电导率对角向磁场分量的影响规律相反。此外，对于不同距离处的磁场，从图 11(a)~图 11(c) 中可以发现，不同电导率磁场波形之间的偏差会随着距离的增加而减小。

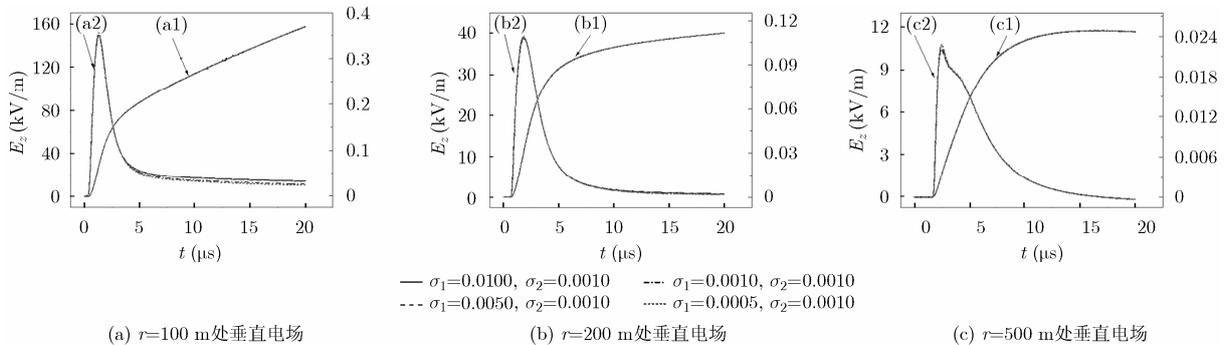


图 9 不同  $\sigma_1$  垂直电场波形比较

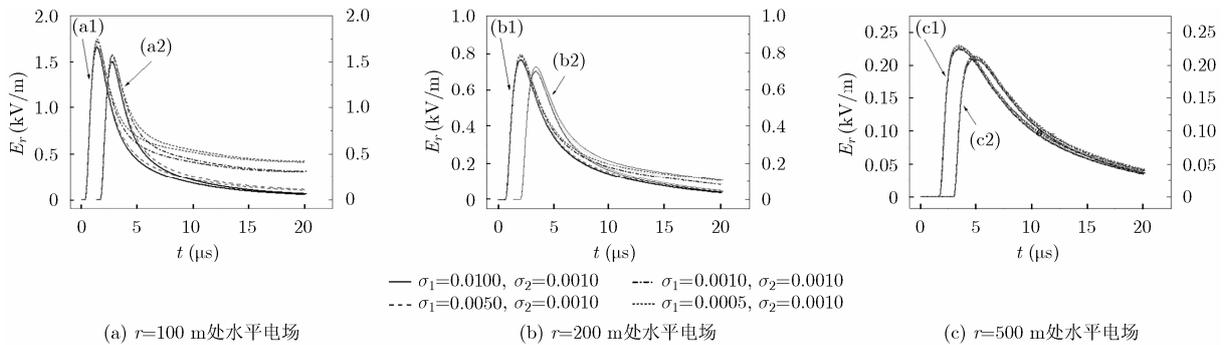
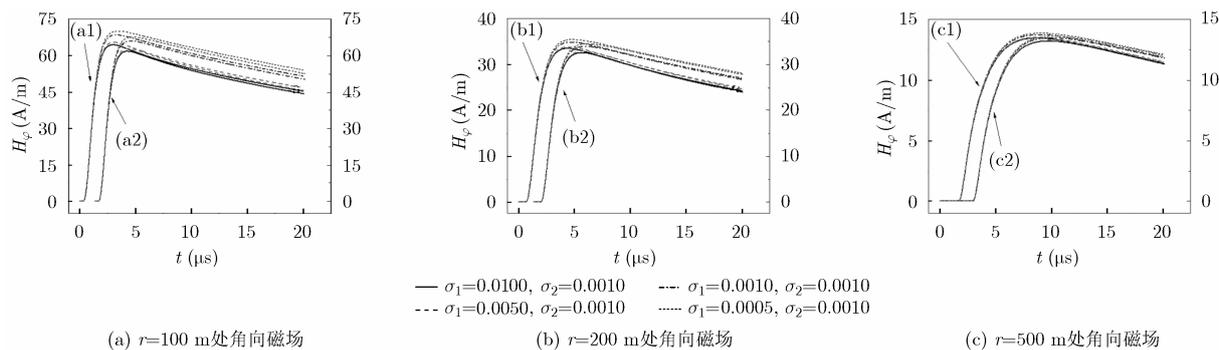


图 10 不同  $\sigma_1$  水平电场波形比较

图 11 不同  $\sigma_1$  角向磁场波形比较

综合观察图 9~图 11 中地表电磁场和地下电磁场可以发现, 增加埋地深度对垂直电场和水平电场的影响规律与 4.1 节相似, 但是  $\sigma_1$  改变时地下电场的衰减幅度要大于  $\sigma_2$  改变时地下电场的衰减幅度, 对于垂直电场的衰减尤其明显; 同时  $\sigma_1$  改变时距离对水平电场的衰减幅度也大于  $\sigma_2$  改变时距离对水平电场的衰减幅度。

## 5 结论

本文通过对 Maxwell 方程组进行差分离散, 推导了有源区倾斜通道雷电电磁场公式, 首次利用时域有限差分法对倾斜放电通道雷电电磁场进行了建模计算, 在此基础上就垂直分层大地有限电导率和放电通道倾斜角度等因素对地表和地下电磁场的影响进行了相关研究, 结果表明:

(1) 当观测点位于倾斜回击通道下方时, 放电通道倾斜角度的增加会导致雷电电磁场峰值出现明显的上升, 同时电磁场的上升沿变得更加陡峭。此外, 观测点与雷击点之间水平距离的增加使相同倾斜角度的电磁场峰值时间出现推迟, 同时还会使倾斜角度对电场峰值时间的影响变得更加明显。

(2) 对地表电磁场而言, 观测点侧大地电导率的变化主要影响水平电场和角向磁场的峰值部分, 并且对电场分量影响较大而对磁场分量影响较小, 对垂直电场则无任何影响; 观测点另一侧大地电导率主要影响水平电场和角向磁场的波尾幅值, 且电导率越小电磁场波尾幅值越大, 但是电导率对电磁场的影响会随着水平距离的增加而下降, 当水平距离超过某一特定范围时, 电导率对电磁场的影响将基本消失。

对地下电磁场而言, 埋地深度的增加对垂直电场的衰减作用十分明显, 但是对水平电场和角向磁场来说, 影响基本可以忽略不计。

## 参考文献

[1] 代健, 苏东林, 赵小莹. 基于 FDTD 的雷电脉冲对飞机介质舱

体内干扰作用的研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2093-2098.

DAI Jian, SU Donglin, and ZHAO Xiaoying. A research of lightning pulse interference with the medium cabin in airplane based on FDTD[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(9): 2093-2098.

[2] HUANGFU Youpeng, WANG Shuhong, TAO Xi, et al. Surge voltage and environmental electromagnetic field analysis for HV composite transmission tower under lightning strokes[C]. 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Raleigh, NC, USA, 2014: 445-450. doi: 10.1109/ISEMC.2014.6899013.

[3] TATEMATSU A, RACHIDI F, and RUBINSTEIN M. Analysis of electromagnetic fields inside a reinforced concrete building with layered reinforcing bar due to direct and indirect lightning strikes using the FDTD method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(3): 405-417. doi: 10.1109/TEMC.2015.2400132.

[4] COORAY V. Propagation effects due to finitely conducting ground on lightning-generated magnetic fields evaluated using sommerfeld's integrals[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 526-531. doi: 10.1109/TEMC.2009.2019759.

[5] ANDREOTTI A, RACHIDI F, and VEROLINO L. Some developments of the Cooray-Rubinstein formula in the time domain[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(5): 1079-1085. doi: 10.1109/TEMC.2015.2434771.

[6] RAKOV V A and RACHIDI F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 428-442. doi: 10.1109/TEMC.2009.2019267.

[7] 杨波, 周碧华, 孟鑫. 地内雷电电磁脉冲在大地中的分布研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8978-8985.

YANG Bo, ZHOU Bilua, and MENG Xin. Distribution of cloud-to-ground lightning electromagnetic pulse fields under the ground[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8978-8985.

- [8] 张明霞, 崔翔, 陈家宏, 等. 水平多层土壤对雷电定量精度的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2937-2943. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2009.12.024.  
ZHANG Mingxia, CUI Xiang, CHEN Jiahong, *et al.* Effect of horizontal multi-layer soil on lightning quantification[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(12): 2937-2943. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2009.12.024.
- [9] ZHANG Qilin, TANG Xiao, HOU Wenhao, *et al.* 3-D FDTD simulation of the lightning-induced waves on overhead lines considering the vertically stratified ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(5): 1112-1122. doi: 10.1109/TEMC.2015.2420653.
- [10] ZHANG Qilin, LI Dongshui, FAN Yanfeng, *et al.* Examination of the Cooray-Rubinstein (C-R) formula for a mixed propagation path by using FDTD[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D15309-1-D15309-7. doi: 10.1029/2011JD017331.
- [11] ZHANG Qilin, LI Dongshui, TANG Xiao, *et al.* Lightning-radiated horizontal electric field over a rough- and ocean-land mixed propagation path[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(4): 733-738. doi: 10.1109/TEMC.2012.2235444.
- [12] LI Dongshui, ZHANG Qilin, WANG Zhenhui, *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. doi: 10.1109/TEMC.2013.2266479.
- [13] MIMOUNI A, RCHIDI F, and RUBINSTEIN M. Electromagnetic fields of a lightning return stroke in presence of a stratified ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(2): 413-418. doi: 10.1109/TEMC.2013.2282995.
- [14] Hill R D. Analysis of irregular paths of lightning channels[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(6): 1897-1906. doi: 10.1029/JB073i006p01897.
- [15] 王晓嘉, 陈亚洲, 万浩江, 等. 斜向通道地表雷电电磁脉冲场分布规律研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 143-149. doi: 10.13443/j.ejors.2013040201.  
WANG Xiaojia, CHEN Yazhou, WAN Haojiang, *et al.* Distribution law of surficial LEMP for oblique channel[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(1): 143-149. doi: 10.13443/j.ejors.2013040201.
- [16] MOINI R, SADEGHI S H H, KORDI B, *et al.* An antenna-theory approach for modeling inclined lightning return stroke channels[J]. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76: 945-952. doi: 10.1016/j.epsr.2005.10.016.
- [17] IZADI M, AB KADIR M Z, GOMES C, *et al.* Analytical expressions for electromagnetic fields associated with the inclined lightning channels in the time domain[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2012, 40(4): 414-438. doi: 10.1080/15325008.2011.639130.
- [18] UMAN M A, SCHOENE J, RAKOV V A, *et al.* Correlated time derivatives of current, electric field intensity, and magnetic flux density for triggered lightning at 15m[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D13): ACL 1-1-ACL 1-11. doi: 10.1029/2000JD000249.
- 王晓嘉: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为雷电电磁场建模与仿真.
- 陈亚洲: 男, 1975年生, 教授, 博士, 研究方向为电磁脉冲防护与电磁兼容.
- 万浩江: 男, 1983年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷电与电磁防护.
- 王李鹏: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为雷电电磁场建模.