

闪电脉冲电磁场在地下空间的分布特性

张少卿[†] 吴群

(哈尔滨工业大学, 电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

(2012年6月4日收到; 2012年8月13日收到修改稿)

为了研究闪电脉冲电磁场 (LEMP) 在地下传播的过程与空间分布特性, 本文采用一种改进的时域有限差分法 (FDTD) 计算了 LEMP 在整个地下空间的传播过程. 与以往发表的研究只局限在个别观察点的讨论不同, 本文通过计算得到了空间中所有网格位置上的电磁场、时间导数、功率密度和能量密度及它们的峰值, 并将它们按照空间坐标表示在相应的分布彩图中. 发现在靠近地表和远离闪电通道的区域内, LEMP 的各个分量同时在平行和垂直地面的两个方向上呈指数型衰减. 其中磁场与水平电场的峰值在整个空间极性统一, 且呈现类双指数形分布. 而垂直电场在地下的峰值分为极性相反的两个区域, 并且靠近闪电通道的区域呈类球状分布. 其他特性参量也有类似以上的空间分布特点. 并且本文通过对不同大地电导率、电容率、放电通道模型和基电流情况的计算, 发现虽然在个别情况下 LEMP 在地下空间的数值整体增大, 但整体分布特征并未改变. 即使是在水平或垂直分层大地的情况下, 同一层内部仍然具有相同的分布规律. 甚至是在击中避雷针情况下, LEMP 在地下空间的分布特点也仍然未变. 而这些分布规律和特征的发现和利用, 将为地下管线、设备、线缆的电磁防护设计与位置规划提供重要的支持.

关键词: 闪电, 电对磁场, 分布特性

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.62.029202

1 引言

闪电脉冲电磁场 (LEMP) 作为一种大范围高功率的辐射源, 很有可能对电子电气设备、输电线路和通信电缆等造成干扰并引起故障. 随着易感电子设备和线缆越来越多的被使用, LEMP 被越来越多的关注和研究^[1,2]. 通常情况下, 对于 LEMP 研究方向主要包括: LEMP 的观测与分析^[3-5]; LEMP 计算方法的研究与改进^[6-8]; LEMP 与线缆和设备耦合实验与其计算方法的研究^[9-11]; 复杂的地表环境和土壤电磁参数对 LEMP 的影响^[12-14]. 由于大多数的设备、线缆、天线和传感器都被布置在地上空间, 多数对于 LEMP 的研究集中在地面以上的区域. 但是随着人类经济的需求和科技的发展, 以及全球极端天气的加剧, 越来越多的矿道、燃气与输油管线、隧道、罐体、地下掩体建筑以及与之相连的各种线缆出现在地下空间. 而 LEMP 作为一种全球范围的、发生地点有随机性的、高功率的

(甚至可能引起矿道口瓦斯爆炸^[15]) 的电磁辐射源, 其对地下设施和人员的危害性不言而喻. 而作为地下设备与线缆 LEMP 防护的基础, 研究 LEMP 在地下空间的分布特性更是具有重要的意义.

此前有关于 LEMP 在地下空间的研究不多, 主要集中在 LEMP 在地下的计算方法^[7,16,17] 和对于埋地线缆感应过电压的计算^[18,19]. 就作者所知, 只有文献 [20] 对 LEMP 在大地中的分布做了专门的探讨. 但它与其他已发表的研究类似的是, 这些研究都是通过对比几个参考点上的 LEMP 变化, 来推测 LEMP 在整个区域大略的变化趋势和分布特点. 导致这种情况的一个重要原因就是过于巨大的计算和存储量. 对于单个点位置上 LEMP 的计算, 现有大部分计算方法 (如 sommerfle 积分法及其快速等效算法、Cooray-Rubinstein (CR) 公式法等) 都有很好的表现. 但是如果需要得出整个计算空间中每个细小单元上的 LEMP, 这些算法需要付出的计算时间将是不可承受的. 另一方面, 如果需要将空间中所有单元上的 LEMP 不失真的存储起来并进一

[†] 通讯作者. E-mail: shaoqing.c.z@gmail.com

步提取其特征, 则对于所有已发表的算法 (包括传统的 FDTD 方法), 其数据存储量都是不可接受的. 但若要得出 LEMP 在地下空间的分布特性, 以上两方面的需求却恰恰都是现有计算方法无法避免的.

综上所述, 为了满足这些需求, 作者将传统的 FDTD 方法改造为一种实时中断处理的 FDTD 方法. 通过这种改进的 FDTD 方法, 整个空间每个单元网格上的 LEMP 和其特征参量 (峰值、最大变化率、功率密度和能量密度) 被计算得到并被表示在多组地下空间分布彩图中. 通过分析各个参量在地下空间的分布图和传播过程, 得到了 LEMP 在地下空间的衰减规律和分布特点. 这些规律和结论将为各种地下管线及线缆的布置规划, 地下设施的电磁防护设计提供重要的参考.

2 计算方法与验证

2.1 计算模型与方法

一般而言, 计算 LEMP 的方法可以分为三类: 1) 基于 sommerfeld 积分的数值等效方法 [21,22]; 2) 传统电磁场数值方法 (如 FDTD, MOM 方法) [23-25]; 3) CR 公式及其简化算法 [22,26,27]. 如上文所述, 若要得出 LEMP 在地下空间的分布特性, 整个地下空间中的每一个单元网格上的 LEMP 需要计算、保存后抽取其特征参量. 而这样的计算量和存储量对于现有方法是不可承受的. 举例来说, 对于一个长 3 km 的闪电通道, 如果需要得到其 2 km 范围的 LEMP 分布特性. 当整个二维空间 (轴对称空间的简化) 被分为 1 m^2 的单元网格时, 共需要计算 6 百万个网格点上的 LEMP. 而就作者所知, 在保证足够精确度的前提下, 最快的计算单个观测点上 LEMP 的算法需要 1.4 s 左右 [22]. 按此计算, 完成整个空间的计算大约需要 2333 h, 即 97 d. 如果要进一步得到 LEMP 的空间分布特性, 以文献 [22] 的抽样率保存前 $20 \mu\text{s}$ 每个网格点上的 LEMP 波形, 仅三个电磁场分量需要约 550 GB 的存储空间 (每个单精度数占用 4Byte 存储空间).

传统的 FDTD 方法在计算整个空间 LEMP 方面有着别的算法无可比拟的优势. 它通过求解 Maxwell 方程组计算整个空间中每一个网格上每一个时间步进的电磁场. 但是由于闪电放电通道的跨度大, 同时其产生的 LEMP 又具有很宽的频谱分量, 这导致采用 FDTD 计算 LEMP 时的网格数量较多. 并且当需要获得 LEMP 的空间分布特性时, 为

了得到精确的分布图, 其网格也要求划分的较细, 这导致采用 FDTD 计算 LEMP 时的网格数量更多. 所以, 如果为了提取每个网格上 LEMP 特征来得到空间分布特性, 而将空间中每个网格上的 LEMP 波形信息都存储起来, 存储量是十分巨大的. 作者通过在 FDTD 程序的时间步进间加入了一种“处理窗”程序, 包括中断和处理程序以及各种标志位. 通过“处理窗”程序 (窗的具体时间宽度视精度要求而定) 得到 LEMP 的瞬时场值、时间导数等特征参量, 然后经过对比、筛选、乘积和求和等运算得到在整个计算范围内每个网格上的特征参量. 换言之, 就是将整个 LEMP 提取特征的过程分解后加入到了 FDTD 的不同时间步进之间, 绕开了巨大的存储量, 直接得到了 LEMP 在空间中的分布特性.

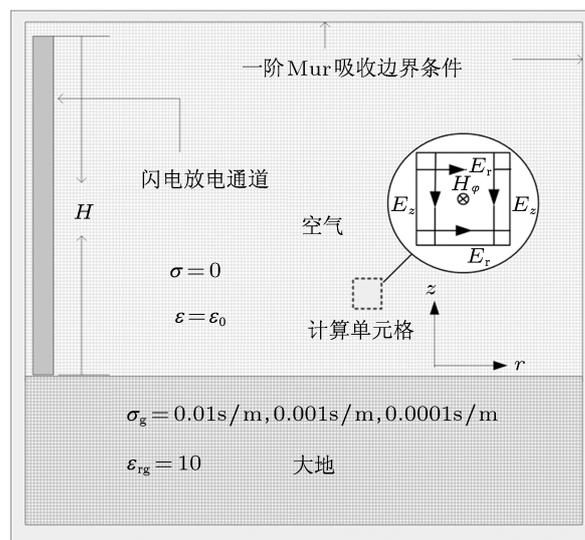


图1 计算模型示意图

在本文中, 作者在二维圆柱坐标系中采用上述改进的 FDTD 方法计算 LEMP, 如图 1 所示. 闪电放电通道被放置在整个计算区域的最左边, 地面与 r 方向平行. 闪电放电通道的长度 H 设为 2500 m, 大地厚度设为 300 m, 计算的最远距离为 2000 m. 整个计算空间被划分为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的单元网格, 时间步进设为 1 ns. 边界设为一阶 Mur 吸收边界条件. 其中大地的电导率分别设为 0.01 S/m, 0.001 S/m 和 0.0001 S/m. 采用 TL 模型计算闪电放电点通道的电流, 具体公式如下:

$$I(z, t) = I_{\text{base}} \left(0, t - \frac{z}{v} \right), \quad (1)$$

其中 $I(z, t)$ 是放电通道在高度 z 处的电流, v 为回击的速度. $I_{\text{base}}(0, t)$ 为通道的基电流, 其被表示为两个 Heidler 函数的和, 具体公式如下:

$$I_{\text{base}}(0, t) = \frac{I_1}{\eta_1} \left(\frac{t}{\tau_{11}} \right)^{n_1} \frac{e^{-t/\tau_{12}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}} \right)^{n_1}} + \frac{I_2}{\eta_2} \left(\frac{t}{\tau_{21}} \right)^{n_2} \frac{e^{-t/\tau_{22}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}} \right)^{n_2}}, \quad (2)$$

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

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

2.2 方法验证

为了验证这种改进的 FDTD 方法的正确性, 作者将其结果与其他方法计算的结果进行对比. 其中放电通道基电流的设置与文献 [7] 相同, 具体数值

如表 1 所示.

表 1 放电通道基电流参数设置

I_1/kA	$\tau_{11}/\mu\text{s}$	$\tau_{12}/\mu\text{s}$	n_1	I_2/kA	$\tau_{21}/\mu\text{s}$	$\tau_{22}/\mu\text{s}$	n_2
10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

图 2 为本文方法与文献 [7] 中 Sommerfled 方法的对比, 两个观测点距离通道水平距离 50 m, 距离地面深度分别为 5 m 和 10 m. 其中 (a) 为大地电导率为 0.01 S/m 的水平电场, (b) 为大地电导率为 0.001 S/m 的水平电场. 可以看到, 两种方法在不同电导率和深度的情况下都十分符合. 作者还计算了地上空间中的 LEMP, 发现本文方法得到的结果与已发表的其他方法及实测得到的数据都很符合. 由于篇幅限制, 这里不再给出其他对比结果. 可以说, 本文方法在各种不同情况下都能达到较高的精度, 能够保证结果的正确性和准确度.

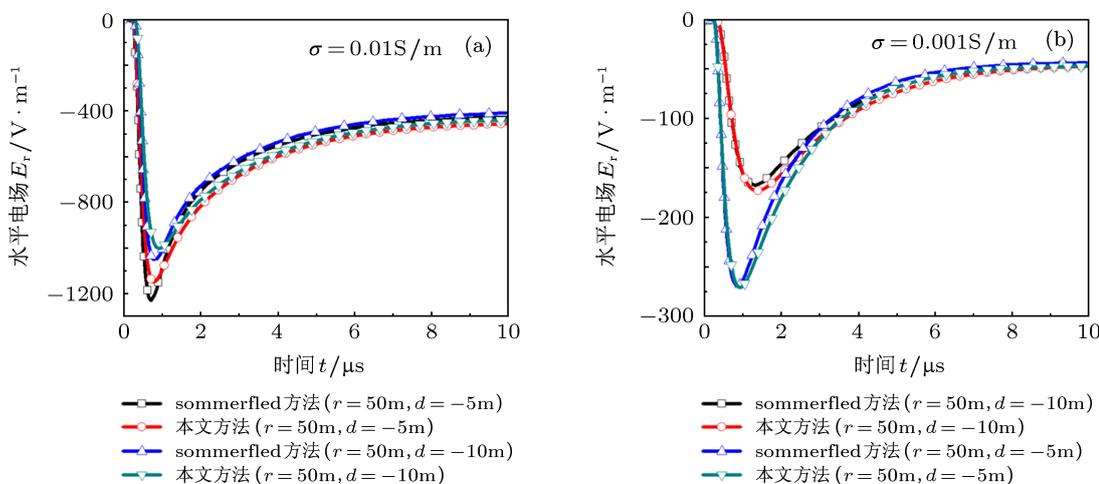


图 2 本文结果与 Sommerfled 方法的对比 (a) 为大地电导率为 0.01 S/m 的水平电场; (b) 为大地电导率为 0.001 S/m 的水平电场

3 计算结果与讨论

本文选取 LEMP 的峰值、其变化率的峰值、功率密度峰值和能量密度作为其主要特征参量. 之所以这样选择, 是因为 LEMP 的峰值与其变化率的峰值是电磁兼容设计和电磁防护规划中十分重要的参量, 是估算线缆感应电流和缝隙耦合电压等问题的主要输入量之一. 而 LEMP 的功率密度峰值和能量密度则分别从瞬时和累积两个方面对 LEMP 的能量变化进行了描述. 对于闪电在地下空间总辐

射功率的计算和复杂电子系统的防护设计都是重要的参考.

为了研究 LEMP 在大地中的分布规律, 作者通过改进的 FDTD 方法, 计算得到了整个空间每个单元网格上的 LEMP 和以上所述的特征参量, 并将其表示为地下空间分布图. 本节不仅给出了这些参量在地下空间的分布图和其在不同方向上的衰减规律, 而且在后半部分分别讨论了不同大地电参数、放电通道模型、基电流和击中避雷针情况对 LEMP 在地下空间分布特征的影响.

3.1 LEMP 及其峰值的分布

图 3 为 LEMP 在地下空间水平电场 (E_r) 的分布. 图 3(a) 至 (e) 分别为 $2 \mu\text{s}$, $4 \mu\text{s}$, $6 \mu\text{s}$, $8 \mu\text{s}$ 和 $10 \mu\text{s}$ 时每个网格上 E_r 的瞬时值. (f) 为前 $80 \mu\text{s}$ 时间每个网格上 E_r 的峰值 ($E_{r\text{max}}$). 可以看到 E_r 的瞬时值和峰值在整个地下空间都呈类双指数形分布. 并且对于 E_r 而言, 其靠近地面区域的变化速度比深层区域的变化速度快. 从图 3(a) 至 (e) 可以看到 E_r 在不同区域的时域波形特点: 在地表附近区域, E_r 快速的沿地表方向增加, 并且在 $4 \mu\text{s}$ 之后相对缓慢的衰减, 这使得在该区域各个颜色范围变宽; 而在沿深层区域, E_r 一直在缓慢的增长, 但增速随着时间变缓.

为了更清楚的得到 $E_{r\text{max}}$ 的分布规律, 作者抽取不同水平距离和不同地下深度的 $E_{r\text{max}}$ 曲线放在一起, 如图 4 所示. 可以看到, $E_{r\text{max}}$ 在水平方向和垂直方向都呈指数型衰减. 并且随着距离放电通道水平距离的增加, $E_{r\text{max}}$ 的衰减速率大于深度增加时的衰减速率. 也就是说, 相对于埋藏深度的增加, 远离放电通道对于减少埋地线缆和设备的电磁干扰和感应过电压的作用更加明显.

图 5 为 LEMP 在地下空间垂直电场 (E_z) 的分布. 与 E_r 不同的是, E_z 在地下空间的分布分为两部分, 且极性相反. 其中靠近放电通道的区域呈类球形分布. 从图 5(a) 至 (e) 可以看到 E_z 在不同区域的时域波形特点: 在远离通道的地表附近区域, E_z 的衰减速度很快, 且在这个区域 E_z 传播速度也较快. 而在放电通道附近区域, E_z 一直缓慢的增长, 整体以击入点为圆心呈类球形空间分布. 可以看到, 在这一区域的 E_z 衰减很慢, 影响范围也比较大, 并且其极性与前一区域相反. E_z 峰值 ($E_{z\text{max}}$) 的分布与其瞬时值类似.

与前文相似, 为了更清楚的得到 $E_{z\text{max}}$ 的分布规律, 作者将不同水平距离和不同地下深度的 $E_{z\text{max}}$ 曲线放在一起, 如图 6 所示. 可以看到, $E_{z\text{max}}$ 在水平方向和垂直方向都呈指数型衰减. 其中在靠近放电通道的深层区域, $E_{z\text{max}}$ 的极性发生变化, 这与图 5(f) 中该区域的类球形分布特点相符. 与 $E_{r\text{max}}$ 一样, $E_{z\text{max}}$ 在水平方向上的衰减速度大于垂直方向上的衰减速度. 并且发现在地下空间中同一位置上, $E_{r\text{max}}$ 是 $E_{z\text{max}}$ 数值大小的十倍以上, 这与 LEMP 在地上地表附近空间传播时的情况相反.

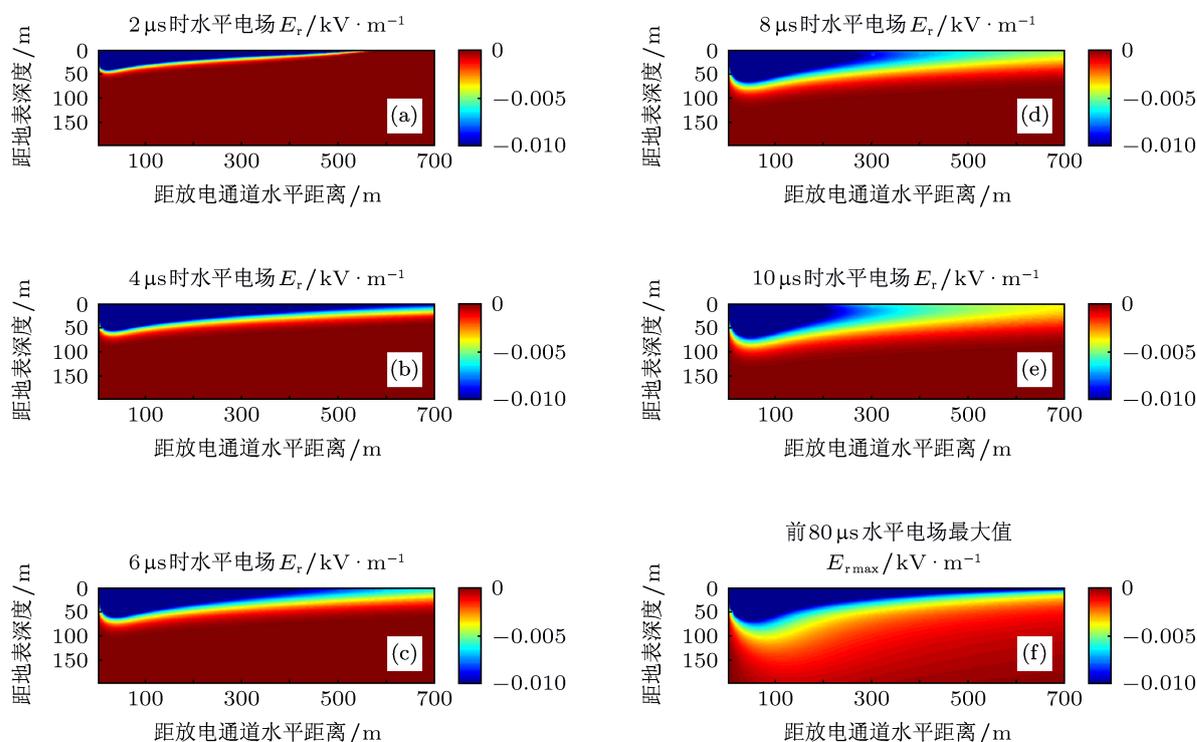


图 3 LEMP 在地下空间水平电场的分布 (a) $2 \mu\text{s}$ 时的瞬时值; (b) $4 \mu\text{s}$ 时的瞬时值; (c) $6 \mu\text{s}$ 时的瞬时值; (d) $8 \mu\text{s}$ 时的瞬时值; (e) $10 \mu\text{s}$ 时的瞬时值; (f) 前 $80 \mu\text{s}$ 每个网格上的峰值

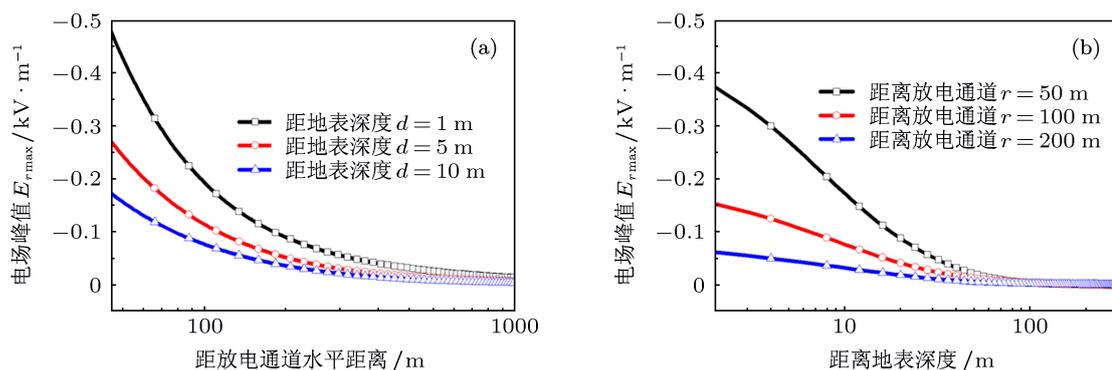


图4 LEMP在地下空间水平电场峰值的变化规律 (a)不同深度情况下,随水平距离变化的规律;(b)不同水平距离情况下,随深度变化的规律

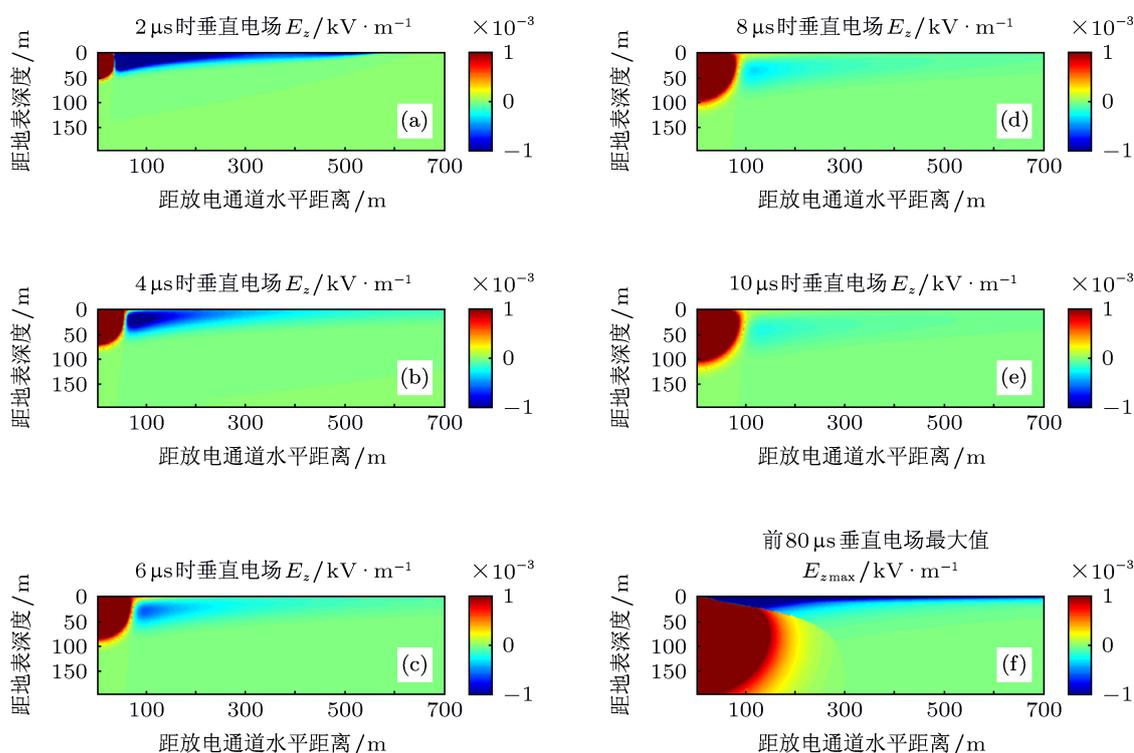


图5 LEMP在地下空间垂直电场的分布 (a)2 μs时的瞬时值;(b)4 μs时的瞬时值;(c)6 μs时的瞬时值;(d)8 μs时的瞬时值;(e)10 μs时的瞬时值;(f)前80 μs每个网格上的峰值

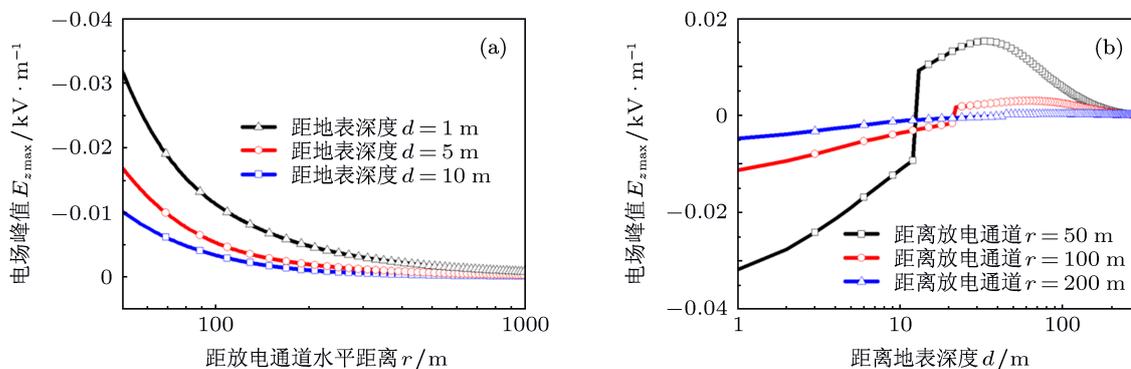


图6 LEMP在地下空间垂直电场峰值的变化规律 (a)不同深度情况下,随水平距离变化的规律;(b)不同水平距离情况下,随深度变化的规律

图 7 为 LEMP 在地下空间切向磁场 (H_ϕ) 的分布. 与 E_r 的分布类似, H_ϕ 的瞬时值和峰值 ($H_{\phi\max}$) 在整个地下空间都呈类双指数形分布. 同样, 不同水平距离和不同地下深度的 H_ϕ 峰值曲线被放在一起进行比较, 如图 8 所示.

可以发现, 与 $E_{r\max}$ 的分布类似, $H_{\phi\max}$ 分别在水平和垂直方向上呈指数型衰减. 并且其与 $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 一样, 在水平方向上的衰减速度大于垂直方向上的衰减速度. 但不同的是, 在水平和垂直两

个方向上, $H_{\phi\max}$ 的衰减速度比 $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 的都缓慢.

3.2 LEMP 时间导数及其峰值的分布

LEMP 的时间导数能够反应其电磁场的变化趋势以及变化率的大小. 作者通过对每个单元网格上每间隔 20 ns 的变化率进行计算和处理, 得到 LEMP 在整个地下空间每一网格上各个分量的时间导数以及在前 80 μs 每一点上时间导数的峰值.

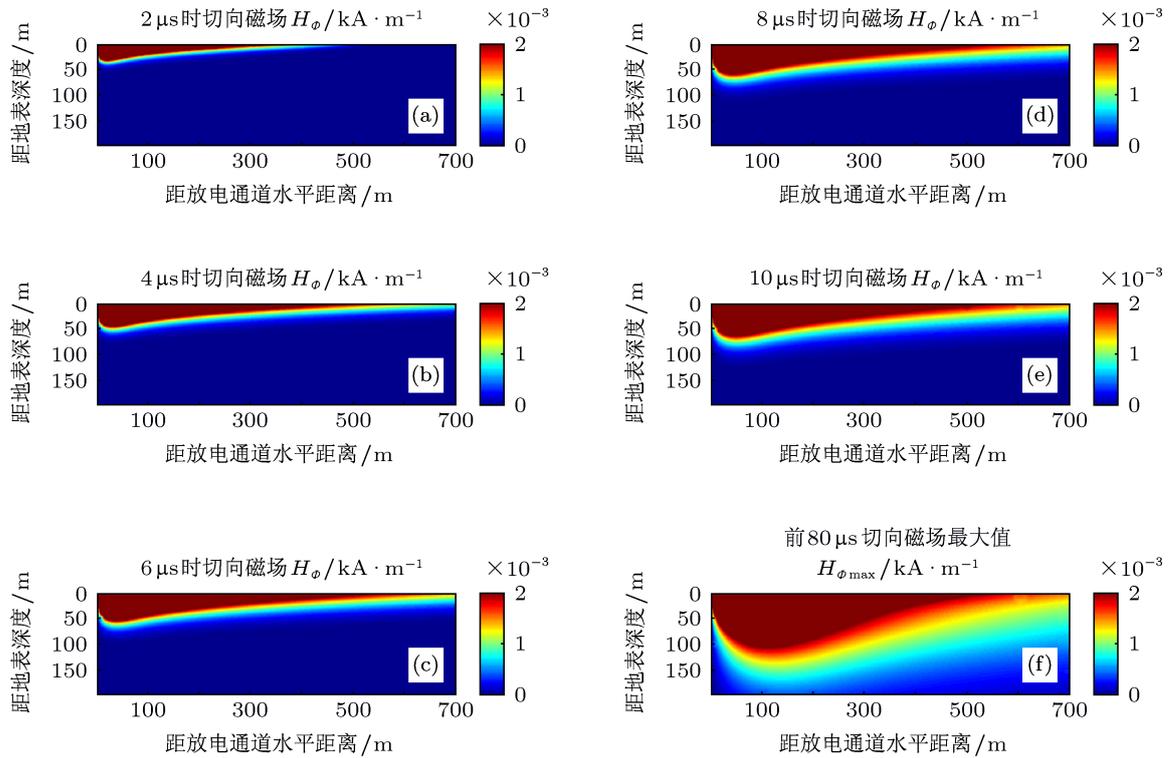


图 7 LEMP 在地下空间切向磁场的分布 (a) 2 μs 时的瞬时值; (b) 4 μs 时的瞬时值; (c) 6 μs 时的瞬时值; (d) 8 μs 时的瞬时值; (e) 10 μs 时的瞬时值; (f) 前 80 μs 每个网格上的峰值

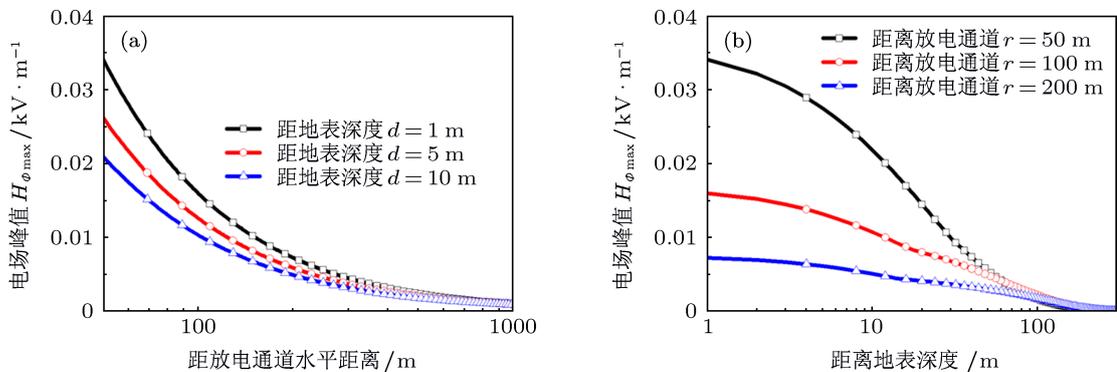


图 8 LEMP 在地下空间切向磁场峰值的变化规律 (a) 不同深度情况下随水平距离变化的规律; (b) 不同水平距离情况下随深度变化的规律

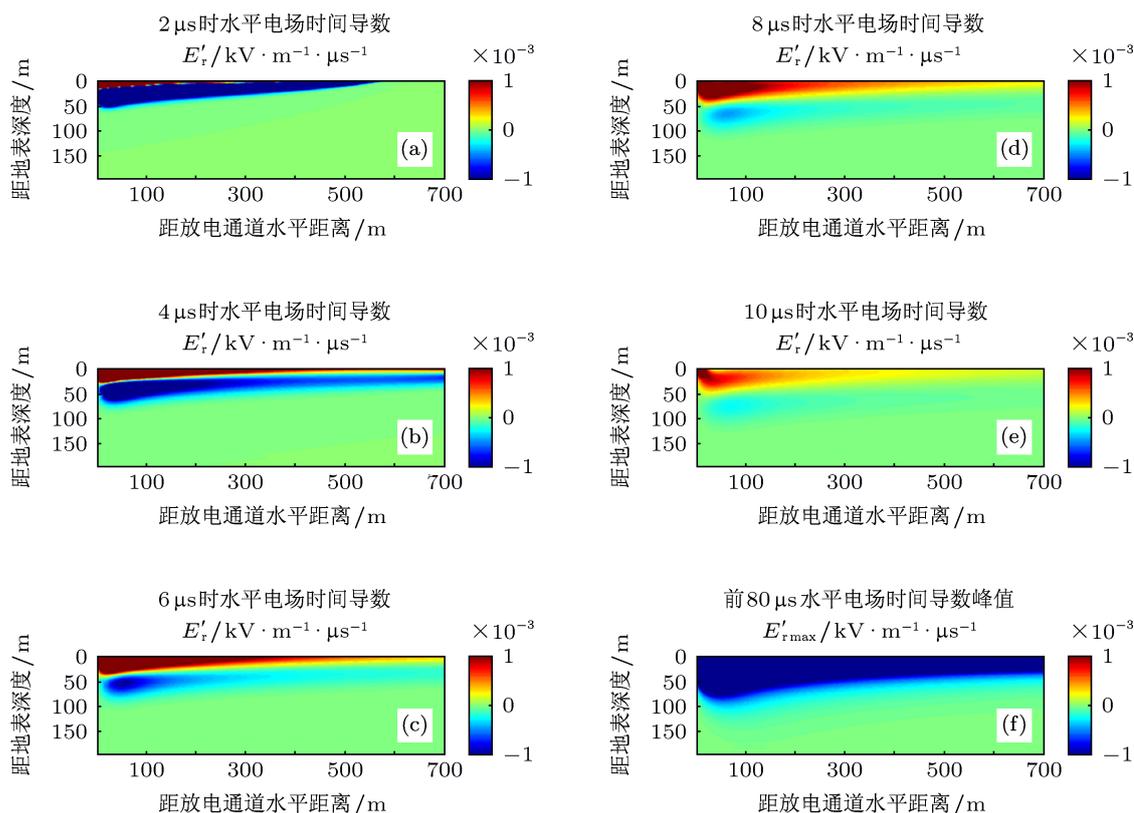


图9 LEMP在地下空间水平电场时间导数的分布 (a) 2 μs 时的瞬时值; (b) 4 μs 时的瞬时值; (c) 6 μs 时的瞬时值; (d) 8 μs 时的瞬时值; (e) 10 μs 时的瞬时值; (f) 前 80 μs 每个网格上的峰值

图9为LEMP在地下空间水平电场时间导数(E'_r)的分布. 其中(a)至(e)分别为2 μs 、4 μs 、6 μs 、8 μs 和10 μs 时每个网格上 E'_r 的瞬时值.(f)为前80 μs 时间每个网格上 E'_r 的峰值($E'_{r\max}$). 可以看到, E'_r 在地下区域的分布可以分为两种不同极性的区域: 一个先出现的快速发展和衰减的负值区, 和一个随后出现的缓慢衰减的正值区. 正是这样的分布变化产生了这些区域中 E_r 波形的初始峰和随后的缓慢下降特征. 这与已发表研究中得到的地下 E_r 波形特点相符. 并且从(f)可以看到, E'_r 的峰值($E'_{r\max}$)在整个地下空间中呈双指数形分布, 且均为负值. 换言之, $E'_{r\max}$ 是由 E_r 初始峰的上升沿产生的, 而峰值之后下降沿的变化率较小.

图10为LEMP在地下空间垂直电场时间导数(E'_z)的分布. $E'_{z\max}$ 与 $E_{z\max}$ 的分布相似, 也分为两部分, 且极性相反. 其中靠近放电通道的区域呈类球形分布. 与LEMP其他两个分量的时间导数相似的是在靠近地面区域, E'_z 的峰值($E'_{z\max}$)是由 E_z 初始峰的上升沿产生的. 但不同的是, 在靠近放电通道的地下区域, $E'_{z\max}$ 是由 E_z 初始峰后的下降沿产生的. 也就是说, E_z 初始峰后下降沿的变化率

超过了峰前上升沿的变化率, 并且 E_z 在此区域会有方向的翻转(即极性的变化, 可参考前一小节), 这一点需要在电磁防护设计中被考虑, 尤其是对于在垂直方向有间隙的各种管道、罐体和设备屏蔽壳.

LEMP在地下空间切向磁场时间导数(H'_ϕ)及其峰值($H'_{\phi\max}$)的分布特征与 E'_r 和 $E'_{r\max}$ 相似, 但是极性与其相反.

3.3 LEMP功率密度及其能量密度的分布

LEMP的功率密度即它的坡印廷矢量. 它代表了在单位时间内单位面积上(本文中即为单元网格)流过的能量. 其数值和方向可以通过求电场和磁场的叉积获得. 由于本文是在二维柱坐标系下讨论, 所以LEMP的功率密度可以分为水平功率密度(P_r)和垂直功率密度(P_z)两个方向的分量. 按照右手定理, LEMP功率密度水平方向轴与 r 方向相反, 垂直方向轴与 z 方向一致. 图11(a)和(b)为前80 μs 时LEMP在地下空间功率密度峰值的分布. 可以看到, 水平功率密度峰值($P_{r\max}$)在地表附近区域为

r 方向. 而在放电通道附近的区域, 其为 $-r$ 方向. 垂直功率密度峰值 ($P_{z\max}$) 在整个区域都为 $-Z$ 方向.

并且 $P_{r\max}$ 与 $P_{z\max}$ 的分布分别与 $E_{z\max}$ 与 $E_{r\max}$ 的分布类似.

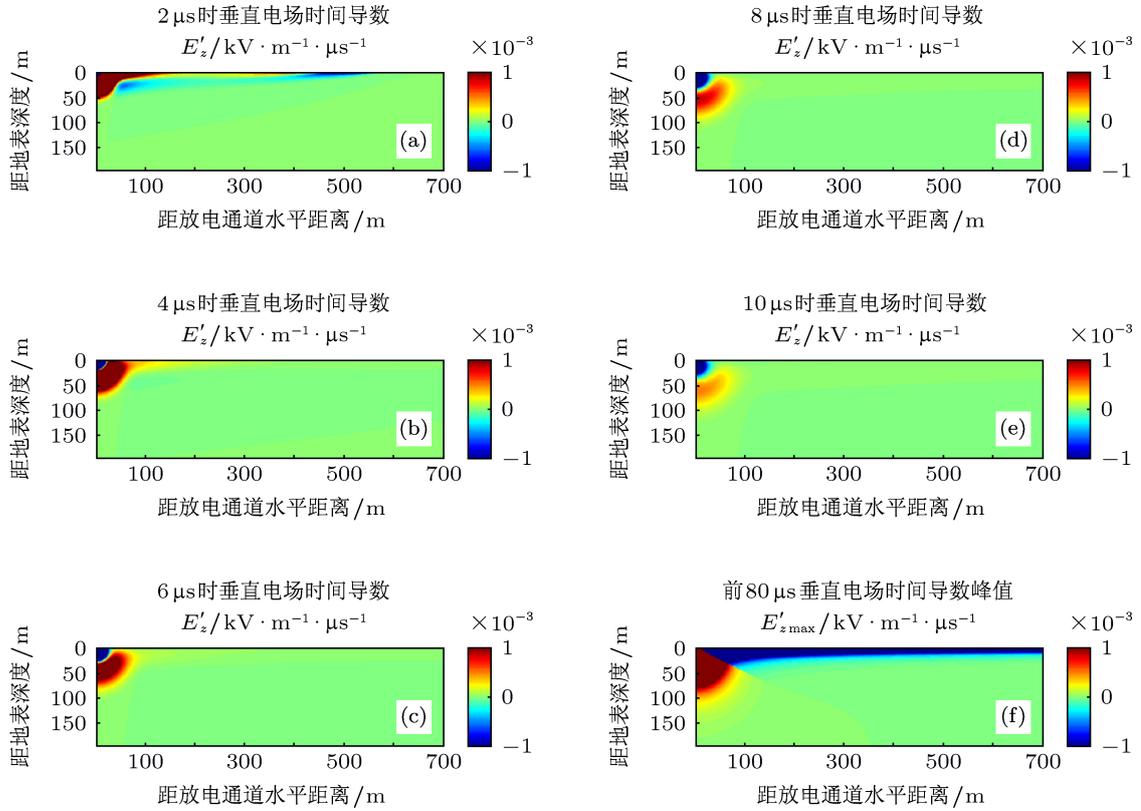


图 10 LEMP 在地下空间垂直电场时间导数的分布 (a) 2 μs 时的瞬时值; (b) 4 μs 时的瞬时值; (c) 6 μs 时的瞬时值; (d) 8 μs 时的瞬时值; (e) 10 μs 时的瞬时值; (f) 前 80 μs 每个网格上的峰值

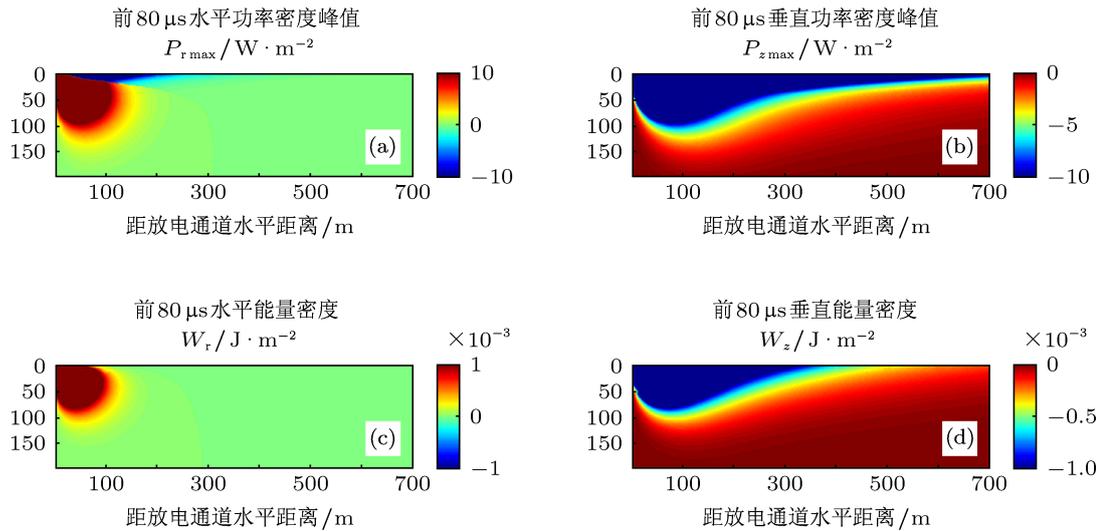


图 11 LEMP 在地下空间功率密度和能量密度的分布 (a) 前 80 μs 水平功率密度峰值; (b) 前 80 μs 垂直功率密度峰值; (c) 前 80 μs 水平能量密度; (d) 前 80 μs 垂直能量密度

将 P_r 与 P_z 在时间上积分, 便可以得到 LEMP 的水平方向能量密度 (W_r) 和垂直方向能量密度 (W_z). 图 11(c) 和 (d) 为前 80 μs 时 LEMP 在地下空间能量密度的分布. 可以看到, W_r 的主要能量集中在靠近放电通道的区域, 呈类球形分布. W_z 的主要能量集中在靠近放电通道的区域和地标附近区域, 呈类双指数形分布.

3.4 大地电参数变化对 LEMP 的影响

为了研究不同大地电导率对 LEMP 在地下空间分布的影响, 作者分别计算了电导率为 0.01 S/m,

0.001 S/m 和 0.0001 S/m 时各个参量的空间分布. 由于篇幅限制, 这里只给出不同大地电导率对 LEMP 峰值的影响. 又由于前文已经给出了电导率等于 0.01 S/m 的情况, 所以这里只列出其他两种情况. 图 12 为 LEMP 峰值在地下空间水平电场的分布. 其中 (a) 至 (c) 为电导率等于 0.001 S/m 时的分布, (d) 至 (f) 为电导率等于 0.0001 S/m 时的分布. 需要额外说明的是, 由于当电导率变化时 $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 的数值整体变化较大, 所以在低电导率情况时, 将 $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 的色彩表示范围分别设为高电导率情况时的 10 倍. $H_{\phi\max}$ 的色彩表示范围不变.

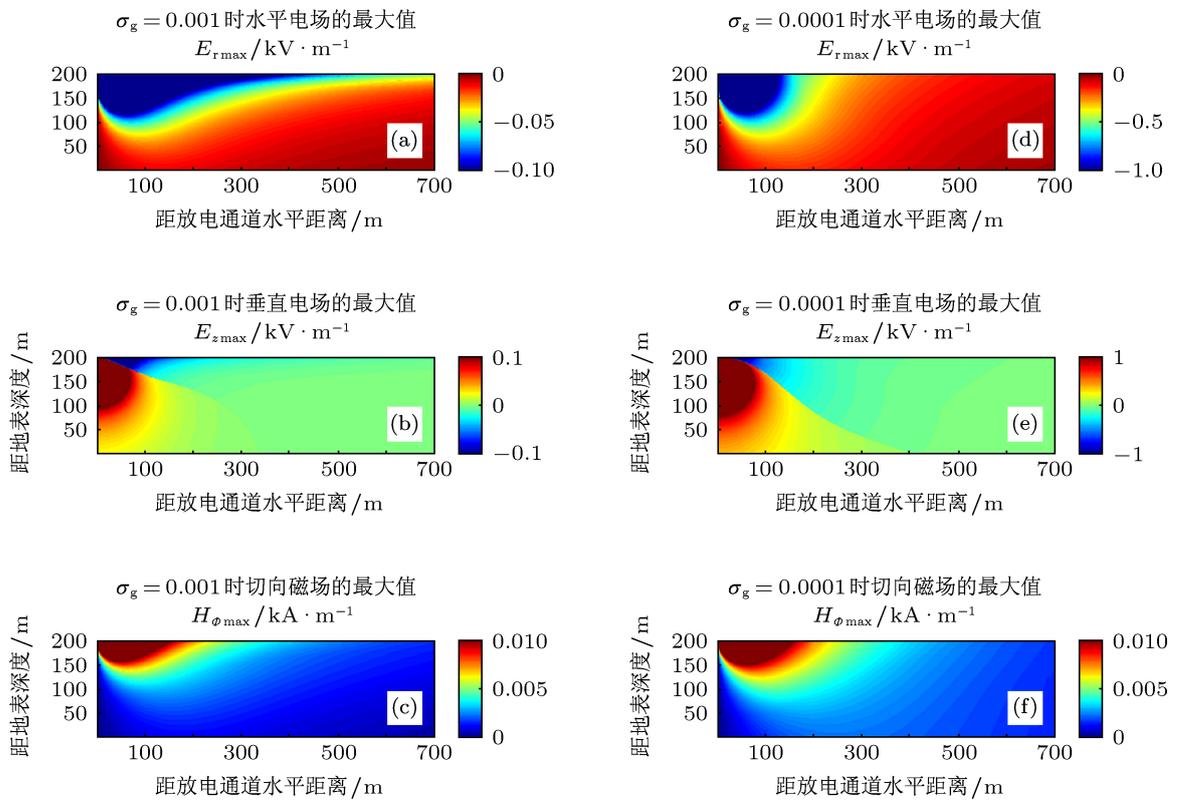


图 12 LEMP 峰值在地下空间的分布 (a) 电导率为 0.001 S/m 时的 $E_{r\max}$; (b) 电导率为 0.001 S/m 时的 $E_{z\max}$; (c) 电导率为 0.001 S/m 时的 $H_{\phi\max}$; (d) 电导率为 0.0001 S/m 时的 $E_{r\max}$; (e) 电导率为 0.0001 S/m 时的 $E_{z\max}$; (f) 电导率为 0.0001 S/m 时的 $H_{\phi\max}$

可以看到, 随着大地电导率的变化, LEMP 电场分量 $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 变化较大, 而磁场分量 $H_{\phi\max}$ 变化很小. 且随着电导率的增大, $E_{r\max}$ 和 $E_{z\max}$ 同时减小. 这个与文献 [20] 得到的结果符合. 从整个空间分布的角度看, 随着电导率的减小, 由于 LEMP 峰值在地表附近区域的增加量小于深层区域的增加量, 其在整个地下空间的分布形状在水平方向被“压缩”. 但对于分布规律而言, 虽然整个地下空间的 LEMP 峰值增大, 但其整体分布的特点并没有太

多改变.

笔者同样计算了多种电导率的情况, 发现电导率的变化对 LEMP 在地下空间分布影响很小. 其分布规律也没有变化, 与前文所述一致.

真实大地一般具有不均匀性, 但其可以近似处理为若干层的水平分层或垂直分层的土壤结构 [28]. 作者分别计算了水平分层和垂直分层情况时 LEMP 在地下空间的分布. 发现 LEMP 虽然在不同层分界面附近部分区域有一些反射和增强, 但是

其大体分布规律并未改变. 在同一层之间, 其分布特性也变化不大.

图 13 为水平分层大地情况时 LEMP 峰值在地下空间的分布. 上层大地的厚度为 30 m. (a)—(c) 为上层电导率为 0.01 S/m 下层电导率为 0.001 S/m 时的电磁场峰值. (d)—(f) 为上层电导率为 0.001 S/m 下层电导率为 0.01 S/m 时的电磁场峰值. 其中小图

为深 50 m, 长 100 m 范围的放大图. 且为了更好的观察分布规律, 小图的数值范围是大图的 10 倍以上. 可以看到, 在水平分层大地的地下空间, 虽然 LEMP 的数值在部分区域有变化, 但在同一层内的分布规律与均匀大地情况时的规律基本相同. 可以说前文所述的分布规律和特性同样适用于水平分层大地情况.

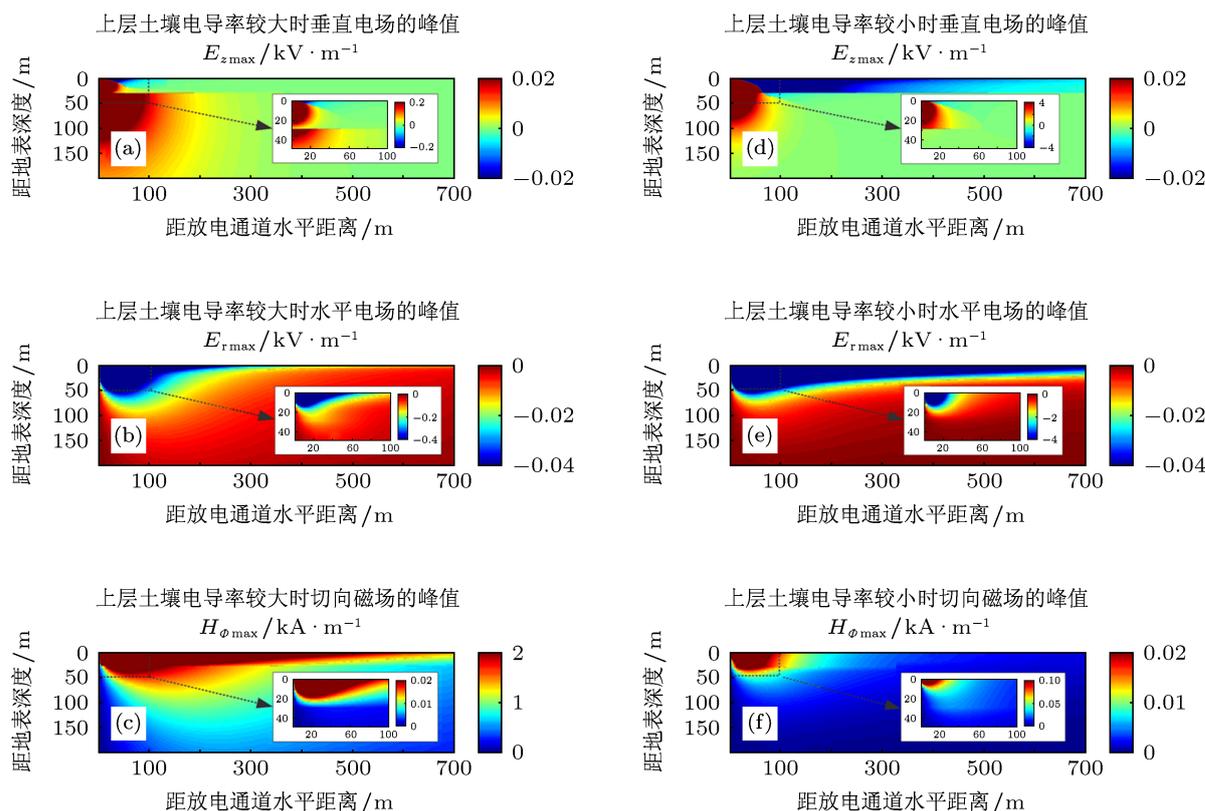


图 13 水平分层大地情况时 LEMP 峰值在地下空间的分布 (a)—(c) 上层电导率为 0.01 S/m 下层电导率为 0.001 S/m 时的 E_{zmax} , E_{rmax} , 和 $H_{\phi max}$; (d)—(f) 上层电导率为 0.001 S/m 下层电导率为 0.01 S/m 时的 E_{zmax} , E_{rmax} , 和 $H_{\phi max}$

而垂直分层大地的情况与水平分层大地情况相似, LEMP 只是在不同层分界面附近部分区域有一些反射和增强, 但是其大体分布规律并未改变. 在同一层内的分布规律与均匀大地情况时的规律基本相同.

3.5 放电通道模型与基电流对地下 LEMP 的影响

为了研究不同放电通道模型对 LEMP 在地下空间分布的影响, 作者分别计算了采用相同基电流时 TL, MTL, MTL 和 DU 四种模型的情况. 发现放电通道模型主要影响高空 LEMP 各个参量的空

间分布, 对于地下空间的分布规律影响十分微小.

作者也采用相同放电通道模型, 计算了不同基电流的情况. 发现基电流波形对 LEMP 各个参量的空间分布有一定的影响, 但是总体分布规律仍未改变.

图 14 为基电流采用双指数函数、Heidler 函数、以及实测闪电电流三种情况下, LEMP 在地下空间的电场分布. 其中双指数函数情况时, 基电流数值设置与文献 [20] 相同. 实测电流为 Barker^[29] 测量得到. 可以看到, 除了数值上有一些浮动, LEMP 在地下空间的电场分布规律并未改变. 前文所述规律与分布特性具有一定的通用性, 适用于现有常用的各种放电通道模型和基电流.

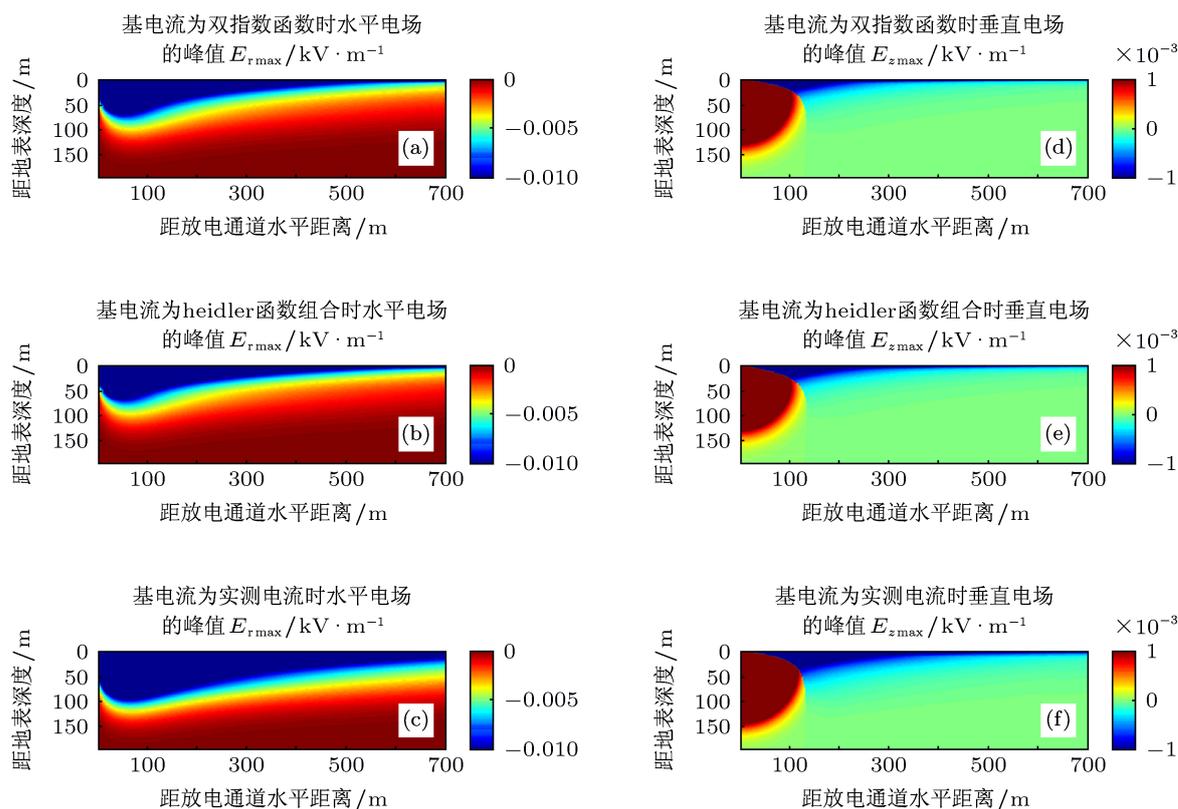


图 14 不同基电流情况时 LEMP 峰值在地下空间的分布 (a)—(c) 不同基电流情况时的水平电场峰值; (d)—(f) 不同基电流情况时的垂直电场峰值

3.6 击中避雷针对地下 LEMP 分布的影响

作者同时还计算了闪电击中避雷针时 LEMP 各个分量在地下空间的分布. 其中雷电流和金属体内的电流采用文献 [30] 的设置. 发现击中避雷针对地下 LEMP 分布的影响比较小, 整体的分布特征和规律与前文所述一致.

4 结论

本文通过一种改进的二维 FDTD 方法, 计算并得出了 LEMP 在地下空间中每一个网格上峰值、时间导数、功率密度和能量密度. 并将其表示在多组空间分布图中. 通过分析, 主要结论如下:

1. 在大地浅层区域, LEMP 峰值在水平和垂直方向都呈指数型衰减, 且衰减速率不同. 总体呈类双指数形分布. 其中垂直电场峰值在放电通道附近有单独的不同极性的类球形分布区域. 此分布特点在不同大地电参数、不同放电通道模型和基电流情况下不变.

2. LEMP 在地下空间中时间导数的分布包括两个不同极性的区域. 这两个区域范围的变化构成了 LEMP 各个分量波形上的初始峰值. LEMP 各分量时间导数峰值的分布和其电磁场峰值分布相似. 其大都由电磁场初始峰值的上升沿产生, 唯有垂直电场在放电通道附近区域的时间导数峰值由其电场初始峰值的下降沿产生.

3. 大地电导率和放电通道基电流对 LEMP 在地下空间的数值影响较大. 随着电导率的减小, 虽然整个地下空间的 LEMP 峰值增大, 但其整体分布特点和规律并未改变. 大地电容率和放点通道模型对 LEMP 在地下空间的分布影响极其微小.

4. 对于分层大地的情况, LEMP 虽然在不同层分界面附近部分区域有一些反射和增强, 但是其整体分布规律并未改变. 在同一层内, 其分布特性也变化很小.

5. 击中避雷针对地下 LEMP 分布的影响比较小, 其整体的分布特征和规律与直接击中大地情况的相同.

通过对不同情况的计算和验证, 可以说以上结

论以及文中结果的通用性很强. 无论是在不同电参数的大地中, 还是分层大地, 甚至是击中避雷针的情况, LEMP 在地下空间的分布都具有相同或十分相似的特点和规律. 这些分布特征和规律的发现及应用, 一方面可作为地下电子设备、线缆和建筑针

对 LEMP 的过电压预测、防护设计和线缆路径规划等多方面的理论基础; 另一方面也可以对埋地线缆或重要地下设施周围的避雷系统接地点位置的规划提供参考.

- [1] Rachidi F 2011 *11th International Symposium on Lightning Protection*, Fortaleza, Brazil, October 3–7, 2011 p304
- [2] Rakov V A, Rachidi F 2009 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **51** 428
- [3] Wang C X, Qie X S, Jiang R B, Yang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 039203 (in Chinese) [王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 杨静 2012 物理学报 **61** 039203]
- [4] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, Yang J, Zhang Q L, Liu M Y, Wang J F, Liu D X, Pan L X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 079201 (in Chinese) [蒋如斌, 郗秀书, 王彩霞, 杨静, 张其林, 刘明远, 王俊芳, 刘冬霞, 潘伦湘 2011 物理学报 **60** 079201]
- [5] Zhao Y, Qie X S, Kong X Z, Zhang G S, Zhang T, Yang J, Feng G L, Zhang Q L, Wang D F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6616 (in Chinese) [赵阳, 郗秀书, 孔祥贞, 张广庶, 张彤, 杨静, 冯桂力, 张其林, 王东方 2009 物理学报 **58** 6616]
- [6] Cooray V 2010 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **52** 936
- [7] Delfino F, Procopio R, Rossi M, Rachidi F, Nucci C A 2007 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **49** 401
- [8] Yang C, Zhou B 2004 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **46** 133
- [9] Yang J, Qie X S, Wang J G, Zhao Y, Zhang Q L, Yuan T, Zhou Y J, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1968 (in Chinese) [杨静, 郗秀书, 王建国, 赵阳, 张其林, 袁铁, 周筠珺, 冯桂力 2008 物理学报 **57** 1968]
- [10] Yang B, Zhou B H, Gao C, Shi L H, Chen B, Chen H L 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 256
- [11] Kirawanich P, Kranthi N, Gunda R, Stillwell A R, Islam N E 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5892
- [12] Delfino F, Procopio R, Rossi M, Rachidi F 2009 *J. Geophys. Res.* **114**
- [13] Zhang Q L, Yang J, Jing X Q, Li D S, Wang Z H 2012 *Atmos. Res.* **104** 202
- [14] Cooray V, Rakov V A 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 773
- [15] Novak T, Fisher T J 2001 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **37** 1555
- [16] Petrache E, Rachidi F, Paolone M, Nucci C A, Rakov V A, Uman M A 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 498
- [17] Cooray V 2001 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **43** 75
- [18] Paolone M, Petrache E, Rachidi F, Nucci C A, Rakov V A, Uman M A, Jordan D, Rambo K, Jerauld J, Nyffeler M, Schoene J 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 509
- [19] Yang B, Zhou B H, Chen B, Wang J B, Meng X 2012 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **54** 323
- [20] Yang B, Zhou B H, Meng X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8978 (in Chinese) [杨波, 周璧华, 孟鑫 2010 物理学报 **59** 8978]
- [21] Barbosa C F, Paulino J O S 2010 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **52** 640
- [22] Delfino F, Girdinio P, Procopio R, Rossi M, Rachidi F 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 755
- [23] Ren H M, Zhou B H, Rakov V A, Shi L H, Gao C, Yang J H 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **50** 651
- [24] Shoory A, Moini R, Sadeghi S H H, Rakov V A 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 131
- [25] Mimouni A, Rachidi F, Azzouz Z 2008 *J. Electrostat.* **66** 504
- [26] Li D M, Wang C, Liu X H 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 395
- [27] Caligaris C, Delfino F, Procopio R 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **50** 194
- [28] He J L, Zeng R 2007 *Grounding Technology of Power System* (Beijing: Science Press) p23 (in Chinese) [何金良, 曾嵘 2007 电力系统接地技术 (北京: 科学出版社) 第 23 页]
- [29] Philip P B, Thomas A S, Andre R E, Jean P B 1996 *IEEE Trans. Power Del.* **11** 980
- [30] Yoshihiro B, Vladimir A R 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D03101

Distribution characteristics of lightning electromagnetic pulsed fields under the ground

Zhang Shao-Qing[†] Wu Qun

(School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 4 June 2012; revised manuscript received 13 August 2012)

Abstract

In order to repeat the propagation and its distribution characteristics, the lightning electromagnetic field (LEMP) in the entire space is calculated by a modified finite difference time-domain (FDTD) approach in this paper. Different from issued results, in which the electromagnetic field operates only at some discrete points near the ground, the LEMP and its time derivatives, power density and energy density at each unit in the whole space under the ground are calculated and expressed as groups of pictures. We find LEMPs attenuate exponentially in the horizontal and vertical direction, in the area near the ground and far from the discharge channel. The peak values of horizontal electric field and azimuthal magnetic field each have an unaltered polarity and their contours are similar to double exponential functions in the entire space under the ground. However the peak values of vertical electric field can be divided into two opposite-polarity parts in the whole area under the ground, and the contours in the area near the strike channel are spherical in shape. The other components have similar features. We also calculate the LEMPs with different values of ground conductivity, ground permittivity, return model and base current, and the characteristics of distribution are not changed, although the values are enhanced integrally in some cases. And in the layered earth, the LEMP has similar contours inside the layers. Even in the case of striking to the lightning rod, the characteristics of distribution are not changed. These patterns and distribution characteristics of LEMP can provide support and reference in shielding design and route planning under the ground.

Keywords: lightning, electromagnetic field, distribution characteristics

PACS: 92.60.Pw, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.62.029202

[†] Corresponding author. E-mail: shaoqing.c.z@gmail.com