

云—地闪电地面水平电场在不同回击速度和地电参数时的波形特性

于建立^{1,2}, 樊亚东², 周 蜜², 蔡 力²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林吉林 132012; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北武汉 430072)

摘要: 针对地闪电电磁脉冲计算在广域和高精度方面存在的难题, 采用非均匀网格划分技术对均匀网格时域有限差分法进行改进, 所提出的非均匀网格时域有限差分法适合广域地闪电电磁脉冲计算. 计算了100 km以内的地闪地面水平电场(E_r), 揭示了 E_r 随回击距离变化所体现的波形变化规律. 同时分析了大地电导率(σ)和回击速度(v)对该距离内 E_r 的影响. 结果表明: E_r 在2km内呈单极性脉冲, 500m内在首次脉冲后出现过零现象且距离越远该现象越明显, 50~100km内呈双极性连续脉冲; E_r 的脉冲幅值、半峰值宽度、脉冲宽度、过零幅度均随 σ 增大而减小, $\sigma \leq 2.5 \times 10^{-3}$ S/m时尤为明显; v 对 E_r 的影响随距离增大明显增强, 100m以外的脉冲幅值和10km以外的过零幅度随 v 增大有明显提高.

关键词: 雷电电磁脉冲; 地闪; 非均匀网格时域有限差分; 地面水平电场; 大地电导率; 回击速度

中图分类号: TM86 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)08-1633-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200277

Waveform Characteristics of Ground Horizontal Electric Field of Cloud-to-Ground Lightning Under Different Return-Stroke Velocity and Geoelectric Parameters

YU Jian-li^{1,2}, FAN Ya-dong², ZHOU Mi², CAI Li²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Aim to difference limitations such as low computational accuracy and weak computational performance for wide-area lightning electromagnetic pulse (LEMP), a new non-uniform grid finite difference time domain (FDTD) algorithm is proposed for large space distant conditions based on traditional uniform grid FDTD algorithm. The ground horizontal electric fields (E_r) generated by cloud-to-ground lightning were calculated, and the distance between the observation point and the return-stroke channel (r) within 100km. This work revealed the typical waveform variation laws of E_r generated by cloud-to-ground lightning changed along the return-stroke distance. Meanwhile, the effect of the earth conductivity (σ) and return-stroke velocity (v) on E_r in this range was studied by using the non-uniform grid FDTD method. Results show that the waveforms of E_r present in single pulse when $r < 2$ km. There emerged zero-crossing phenomenon when $r < 500$ m, and the farther distance the more obvious. The waveforms of E_r present in bipolar pulse when r in the range of 50~100km. The pulse amplitude, half peak width, pulse width and the zero-crossing amplitude of E_r attenuate with the increase of σ , especially in the range of $\sigma \leq 2.5 \times 10^{-3}$ S/m. The influence of v on E_r increase significantly as return-stroke distance increases. The pulse amplitude of E_r increase significantly with the increase of v when $r > 100$ m, and the effect of v on the zero-crossing amplitude of E_r reflects the similar law when $r > 10$ km.

Key words: LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse); cloud-to-ground lightning; non-uniform grid FDTD (Finite Difference Time Domain); ground horizontal electric field; earth conductivity; return-stroke velocity

1 引言

雷电电磁脉冲 (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP) 的传播半径大且存在多样化的耦合方式,加之幅值高和上升陡度大等特点,对电气电子设备构成极大威胁^[1,2]. 随着计算机、微电子等高科技产品的广泛应用,LEMP 所带来的安全隐患越来越严重^[3-6]. 通过数学手段对不同物性参数下的回击过程及 LEMP 的变化规律进行定量计算,能够实现对 LEMP 的成因机理以及发展、传播和时空分布等特性进行全面而深入的了解. 这是开展 LEMP 防护工作的重要前提.

地闪回击 LEMP 的计算可分为解析法和数值法两类:一种考虑大地电参数的经典解析方法是通过求解 Sommerfeld 积分计算垂直电偶极子矢位函数获取地面上空间内任一点电磁场^[7]. 针对 Sommerfeld 积分式存在极点的问题,产生了诸多的简化处理方法. 当前应用较多的包括时域的偶极子法^[8,9]、单极子法^[10];频域的表面阻抗法^[11]、C-R (Cooray-Rubinstein) 公式法^[12]及它们的改进应用等. 数值计算方法中应用较多的有时域有限差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法和矩量法 (Method Of Moments, MOM).

各种计算方法在解决地闪 LEMP 问题时均存在不同程度的局限性,综合对比,FDTD 法因直观易解、应用简单且能够很好地考虑大地电参数等因素的影响而具有明显的优势^[1,13-17]. 制约该方法广域应用的主要原因是在其计算域内划分均匀网格,网格总数和对应的矩阵阶数均随计算距离的增大而增多. 几十千米及更远的远场计算将受限于计算机速度和容量而难以实现.

地闪回击通道高度多在几千米以内,极少达到百米级别^[18,19],而地闪 LEMP 的辐射半径可达数百千米甚至更远^[20,21],因此解决 FDTD 方法的应用局限性需考虑降低地闪 LEMP 辐射方向的网格数量. 地闪 LEMP 在传播过程中会产生强烈的衰减且衰减梯度随着回击距离由近及远而迅速减小. 为了节省硬件资源但不以牺牲计算精度为代价,本文在均匀网格 FDTD 法的基础上,引入非均匀网格生成法改进网格结构^[22]. 所提出的非均匀网格 FDTD 法在保证计算精度的前提下大大降低网格数量,可实现地闪回击广域 LEMP 的高精度计算.

Shoory 等人^[23]指出,在目前的研究成果中水平电场的观测数据较垂直电场明显要少,这是由于水平电场在回击电场中所占比重远小于垂直电场,而后者对前者的“掩盖”效应更加剧了水平电场的观测难度. 作者对垂直电场的研究工作已在他文开展^[24],同时因水平电场对诸如电力系统和高速铁路架空线等诸多环境的雷电感应电压均存在较高的作用强度^[1,2,25],对其特性进行计算研究很有必要. 本文采用非均匀网格 FDTD

法计算了地闪回击 100km 内的地面水平电场,揭示其时域波形随回击距离的变化规律,同时研究了大地电导率和回击速度对该范围内水平电场的影响. 研究结果有利于揭示 LEMP 的耦合特性及对雷电防护提供理论支撑.

2 地闪回击电场计算模型

2.1 基电流模型和地闪回击模型

回击电流是地闪 LEMP 的辐射源,本文采用应用较广的双指数函数和 Heidler 函数叠加作为基电流模型^[26]:

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

式中, I_{01} 和 I_{02} 为最大电流值, τ_1, τ_4 为电流上升时间常数, τ_2, τ_3 为电流下降时间常数.

回击模型通过数学手段实现了回击电流与地闪 LEMP 之间的联系. 鉴于回击模型中的工程模型表达简单易实现,本文采用应用较广泛的改进线性衰减传输线 (Modified Transmission-Line Model with Linear Current Decay with Height, MTL) 模型^[27]. 该模型回击电流可看做由通道底部电流源注入并随着高度的上升而呈线性衰减的特定电流:

$$i(z', t) = u(t - z'/v) \left(1 - \frac{z'}{H}\right) i(0, t - z'/v) \quad (2)$$

式(2)中, u 为阶跃函数,在 $t \geq z'/v$ 时为 1, 否则为 0, z' 为通道中任一点高度, v 为回击速度, v_r 为电流波传播速度, H 为回击通道高度.

2.2 非均匀网格 FDTD 计算方法

假设地闪通道垂直于地面,适合采用具有轴对称特性的天线模型进行模拟. 同时考虑地闪 LEMP 在 FDTD 法下可得到两组独立的解:包含 E_r, E_z, H_ϕ 分量的 TM (Transverse Magnetic) 模和包含 H_r, H_z, E_ϕ 分量的 TE (Transverse Electric) 模,因此可在柱坐标系下求解 TM 模对应的 Maxwell 方程^[28]:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\mu_0 \frac{\partial H_\phi}{\partial t} - \sigma H_\phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} - \sigma E_r \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rH_\phi)}{\partial r} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \quad (5)$$

式中, μ_0, σ 和 ε 分别代表传播介质的磁导率、电导率和相对介电常数,计算所得 E_r, E_z 和 H_ϕ 分别为水平电场、垂直电场和磁场.

非均匀网格 FDTD 法根据计算工况的需求设定两个回击距离阈值 r_{m1}, r_{m2} 和最小网格长度 r_{mi} . 图 1 中, r 方向网格长度 Δr 划分规律为: $r \leq r_{m1}$ 时, $\Delta r = r_{mi}$; $r_{m1} < r < r_{m2}$ 时,

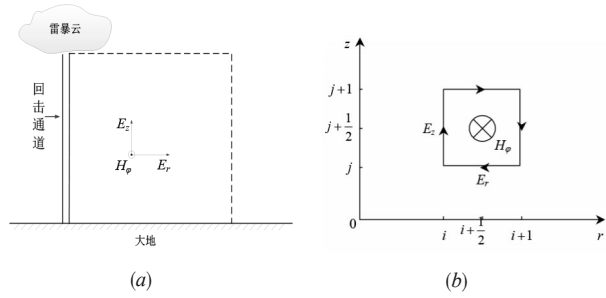


图1 回击通道及二维FDTD网格图

相邻 Δr 按设定变化率增长; $r \geq r_{m2}$ 时, Δr 保持最大值不变. 具体划分步骤如下:

步骤1 设置回击距离阈值 r_{m1} 、 r_{m2} , 及网格最小长度值 r_{mi} .

步骤2 定义 R_a 为网格尺寸变化率, 若 dr_i 和 dr_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 个网格的长度, 则二者满足: $dr_{i+1} = dr_i \times R_a$. 定义 M 和 L_r 分别为非均匀网格总数和非均匀网格区总长度(首先试验性地计算获取最适宜本计算机实际配置的最大 M 值, 定义为 N_m), 二者应满足:

$$(a) \quad L_r = r_{m2} - r_{m1} = r_{mi} + r_{mi}R_a + \dots + r_{mi}R_a^{M-1} = \frac{r_{mi}(1 - R_a^M)}{1 - R_a};$$

$$(b) \quad M = \text{INT} \left\{ \frac{\ln(L_r \frac{R_a - 1}{r_{mi}} + 1)}{\ln R_a} \right\} \quad (\text{INT为取整函数}).$$

步骤3 寻找同时满足(a)和(b)的 R_a 值, 自动更新生成所需要的网格结构.

非均匀网格FDTD的计算流程图如图2所示. 定义 Δz 、 Δr 和 Δt 分别为 z 方向空间步长、 r 方向空间步长和时间步长. 非均匀网格区域中的 Δr 根据实际计算需求进行取值. 以 E_r 为例, 第 n 时间步离散式为

$$E_r(r, z, t) = E_r[(i + \frac{1}{2})\Delta r, j\Delta z, n\Delta t] = E_r^n(i + \frac{1}{2}, j) \quad (6)$$

若 $t_n = n\Delta t$ 为电场计算取样时刻, 则 $(n-0.5)\Delta t$ 为相对应的磁场计算取样时刻, 式(7)~式(9)为 E_r 、 E_z 和 H_ϕ 三者的离散差分方程.

天线模型的轴对称特性可将三维电磁场简化为二维模型, 简化后存在4个边界(包含回击通道在内), 其中回击通道作为脉冲辐射源, 其差分方程可根据安培环路定理获得^[29], 如式(10)和式(11)所示.

$$E_r^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_r^n(i + \frac{1}{2}, j) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} [H_\phi^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) - H_\phi^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2})] \quad (7)$$

$$E_z^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n(i, j + \frac{1}{2}) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta r_i} [r_{i+1/2}H_\phi^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) - r_{i-1/2}H_\phi^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2})] \quad (8)$$

$$H_\phi^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) = H_\phi^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta r_i} [E_z^n(i + 1, j + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j + \frac{1}{2})] - \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta z} [E_r^n(i + \frac{1}{2}, j + 1) - E_r^n(i + \frac{1}{2}, j)] \quad (9)$$

$$E_z^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n(i, j + \frac{1}{2}) + \frac{8\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta r_i} H_\phi^{n+1/2}(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) \quad (10)$$

$$E_z^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n(i, j + \frac{1}{2}) + \frac{8\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta r_i} H_\phi^{n+1/2}(\frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}) - \frac{4\Delta t}{\pi\varepsilon\Delta r_i^2} I(0, j + \frac{1}{2}) \quad (11)$$

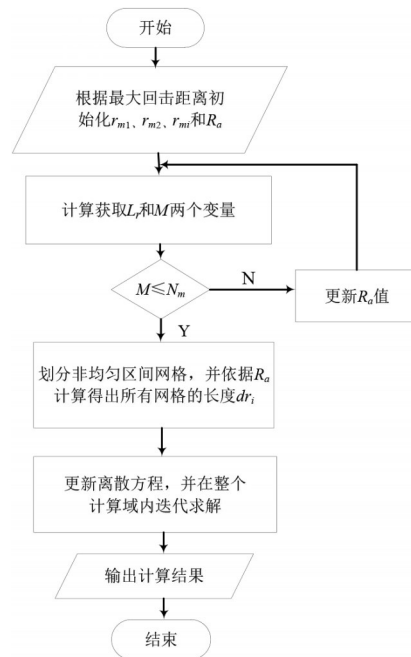


图2 非均匀网格FDTD法程序流程图

$I(0, j+1/2)$ 为 t_n 时刻回击通道距地面高度 $(j+1/2)\Delta z$ 处的电流元. 另外3个边界采用Mur吸收条件^[28]. 经过上述处理后, 时间步长 Δt 和 z 方向的网格步长 Δz 均为常量, 而 r 方向网格步长 Δr_i 为非常量, 为保证数值计算

迭代求解的稳定性,时间步长 Δt 和空间步长 $\Delta z, \Delta r_i$ 之间需满足一定的关系. 本文采用 Courant 条件进行控制^[28]:

$$\Delta t \leq \min(\Delta r_i, \Delta z)/2c \quad (c \text{ 为光速}) \quad (12)$$

本文所提方法在保证计算精度的前提下可大大降低地闪 LEMP 辐射方向(r 方向)的网格数. 以回击距离 100km 为例,若采用均匀网格 FDTD 法, r 方向网格数取 20000,在保证计算精度不变的前提下本文方法网格数可降为 4500 左右(考虑到计算效率问题,不同计算机配置的具体情况会有差别),计算过程不会出现数值色散.

2.3 方法验证

本文采用非均匀网格 FDTD 法对基于 9 站分布式甚低频/低频(Very Low Frequency/Low Frequency, VLF/LF)闪电电场观测系统实测的电场进行模拟. 如前文所述,受客观条件的限制,目前还难以对地闪水平电场进行准确的观测,因此闪电电场观测系统的观测对象均为地闪垂直电场. 图 3 与图 4 分别为当回击距离为 20km 和 100km 时,地面垂直电场的计算结果与 VLF/LF 闪电电场观测数据的对比.

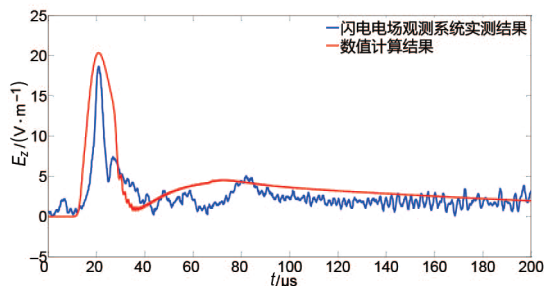


图 3 实测与模拟计算 20 km 地面垂直电场

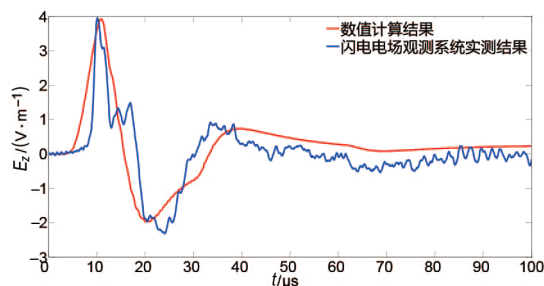


图 4 实测与模拟计算 100 km 地面垂直电场

由图 3 和图 4 可见,本程序计算结果与实测数据总体吻合较好. 需要说明的是,本文计算的回击距离为 100 km,若采用均匀网格 FDTD 方法,由于网格数太大,超出所用计算机的计算能力而无法实现. 故本文没有将非均匀网格 FDTD 法计算结果与均匀网格 FDTD 法相对比.

3 地闪回击水平电场特性计算

计算模型中的可调参数较多,对比发现水平电场受不同物理参数的影响差别较大,对大地电导率和回击速度的变化尤为敏感. 本文主要讨论这两个因素对回击距离 100km 以内水平电场的影响. 式(1),式(2)计算所需参数的基础设置为: $\tau_1=0.072\mu\text{s}, \tau_2=16.67\mu\text{s}, \tau_3=100\mu\text{s}, \tau_4=0.5\mu\text{s}, I_{01}=3.25\text{kA}, I_{02}=8.95\text{kA}$,大地相对介电常数 $\epsilon=10, H=7500\text{m}$. 当研究对象分别为大地电导率 σ 和回击速度 v 时, $v=1.5 \times 10^8 \text{ m/s}, \sigma=2.5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$. 每个观测点时长 t 取 $50\mu\text{s}$,考虑电磁波传播时间的影响,2km 内的零时刻指回击发生时刻,10km、50km 和 100km 的零时刻对应回击发生后的 $30\mu\text{s}, 160\mu\text{s}$ 和 $330\mu\text{s}$.

3.1 大地电导率对水平电场的影响

考虑到地闪 LEMP 的传播空间域非常大,所经地区的大地物性参数差别可能较大,故大地电导率的取值应设置较大的范围. 本节以 5 倍递增规律设置 σ 取为 $1 \times 10^{-4} \sim 6.25 \times 10^{-2} \text{ S/m}$,图 5 给出了 50m~100km 内地面水平电场波形.

由图 5 可见, E_r 波形特征随回击距离的增大而明显变化. 几公里以内的 E_r 呈现典型脉冲波形,随回击距离增大,由于脉冲的衰减陡度明显提高导致脉冲宽度由几十微秒下降到数微秒. 500m 以内 E_r 脉冲的衰减过程出现过零,过零幅度随回击距离增大而增大,10km 后较为明显. 50km 后,首次过零幅度可与初始脉冲相比拟. 当回击距离为 100km 时, E_r 表现为具有连续性的双极性脉冲,这是由于此处的 E_r 出现了 2 次甚至 3 次过零现象,且后续过零的幅值较首次明显要低.

对比发现,当 $\sigma \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 时可对 100km 内地面 E_r 有较强影响,并主要体现在脉冲幅值、半峰值宽度、脉冲宽度、过零幅度,四者均随 σ 增大而减小. 脉冲幅值在 10km 以内变化明显 ($\sigma \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 引起的幅值变化可达 70% 以上);半峰值宽度和脉冲宽度的变化主要在几百米以内;过零幅度的变化主要在 10km 以外.

出现以上各种现象的主要原因是: E_r 中的辐射分量对 σ 的变化最为敏感,其次是感应分量,而 σ 对回击通道中电荷激励产生的静电分量则几乎无影响^[30]. Cooray 认为,在几百米甚至几十米以内,地面处 E_r 的感应分量和辐射分量高于静电分量^[31]. 由于 σ 越大地面反射越强, E_r 通过地面的透射率越小,导致地面处 E_r 峰值越低. 另外,经过几十公里的传播后, E_r 中静电分量和感应分量衰减严重,辐射分量占主导,对 σ 变化敏感. 这说明, σ 对几百米内 E_r 脉冲幅值及 10km 以外过零幅度的影响主要由地面反射强度的改变而产生.

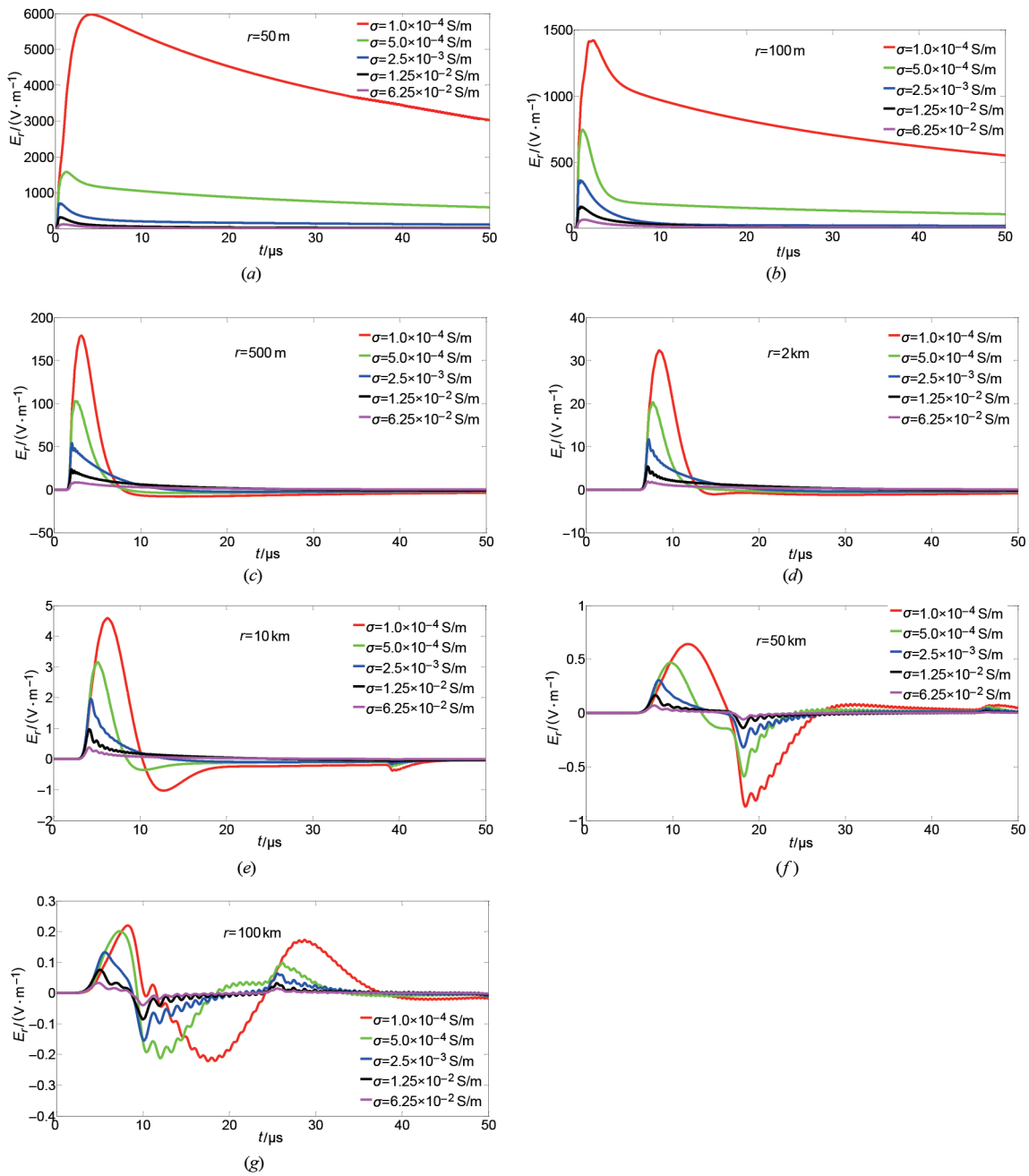


图5 不同 σ 时 E_r 的时域波形

3.2 回击速度对水平电场的影响

根据前人研究成果的积累可见,回击速度大多不超过光速^[30,32].为了尽可能全面地反应回击速度的影响,本节设置 $0.2c$ 为 v 的变化步长, v 取值范围为 $0.2c \sim 0.8c$.图6给出了50m~100km内地面水平电场波形.

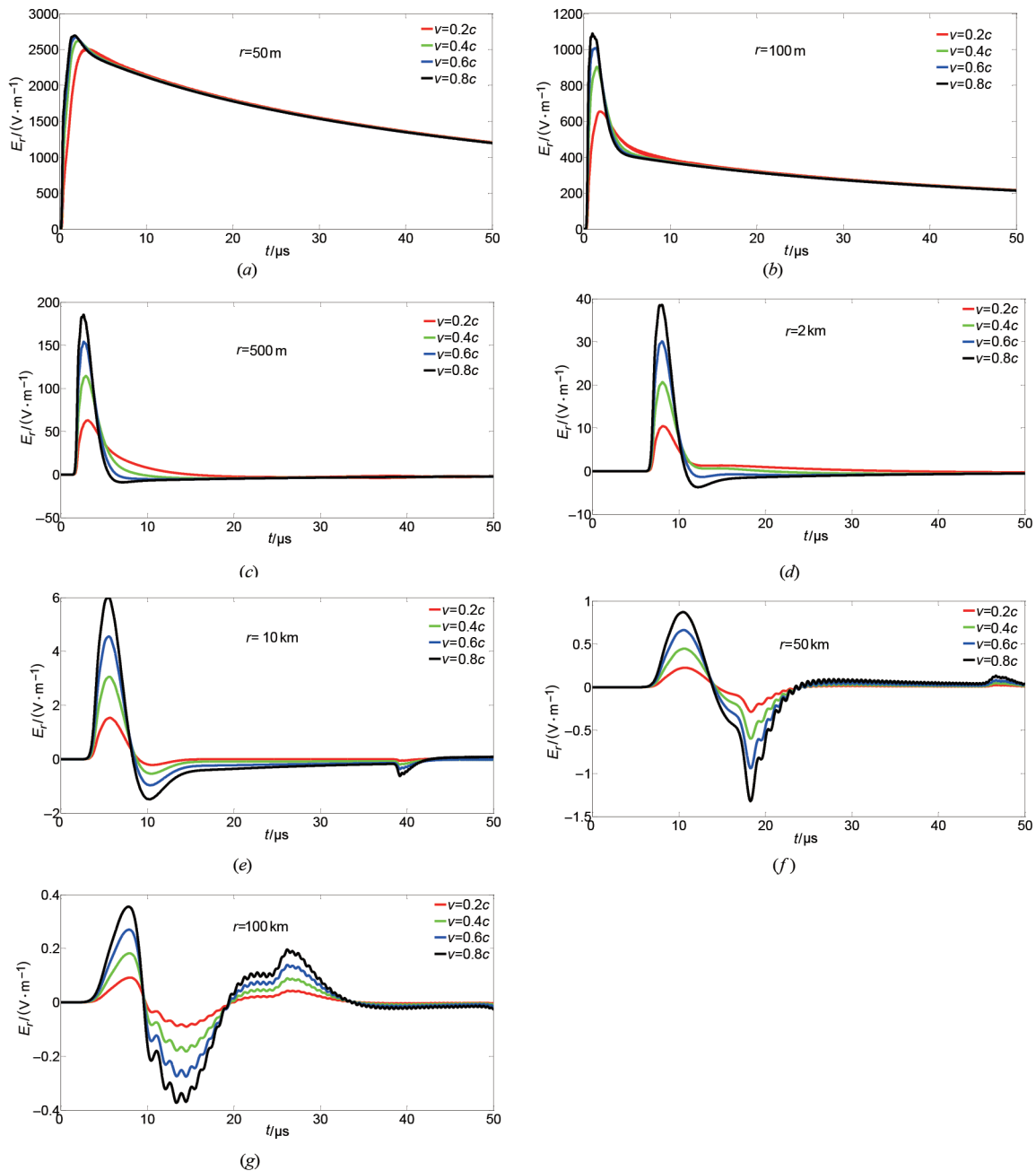
由图6可见,不同 v 取值时对应的地面 E_r 波形有明显差异,但 E_r 波形随回击距离增大所体现的变化趋势与图5基本一致.

随回击距离的增大, v 对地面 E_r 的影响增强.其影响主要体现在100m以外的脉冲幅值和10km以外的过

零幅度,二者均随着 v 增大而有明显提高,几公里以外的脉冲幅值和过零幅度与 v 有近乎相同的增长率. E_r 幅值及入射电场变化陡度均随 v 增大而明显提高,由此可见,入射电场的弛豫时间是产生此影响的主要因素.这同样可以解释本文计算结果中所反映的几十公里外的远场 E_r 对 v 变化更加敏感的现象.

此外, v 的影响还包括500m~10km范围内的 E_r 过零时刻随着 v 增大而有所提前.

对比发现, v 对几十米以内的 E_r 影响很小;当 $v < 0.6c$ 时可对几百米以内的 E_r 产生较强影响;当回击距

图6 不同 v 时 E_r 的时域波形

离超过几公里时, v 在整个取值范围对 E_r 的影响都很明显.

4 结论

本文对均匀网格 FDTD 法进行非均匀化改进, 所得新方法适合计算 100km 以内地闪回击 LEMP. 以大地电导率和回击速度为考察对象, 分析了二者对该范围内地面水平电场特性的影响. 结果表明:

(1) 几公里以内的地面水平电场呈单极性脉冲, 几

百米以内脉冲宽度随回击距离增大明显减小, 且出现过零现象. 10km 以外初始脉冲后的过零加剧, 到几十公里远呈现双极性连续脉冲.

(2) 地面水平电场的脉冲幅值、半峰值宽度、脉冲宽度、过零幅度均随着大地电导率的增大而减小, 且 $\sigma \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 时其影响尤为明显.

(3) 回击速度对地面水平电场的影响随回击距离的增大而明显增强. 其中, 100m 以外的脉冲幅值和 10km 以外的过零幅度随着 v 的增大有明显提高.

参考文献

- [1] 樊亚东, 于建立, 詹清华, 等. 基于多阶 FDTD 雷电感应过电压计算新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 336–343.
Fan Y D, Yu J L, Zhan Q H, et al. New method of lightning induced over-voltage based on multiple order FDTD [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):336–343. (in Chinese)
- [2] 何金良, 曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.2–18.
- [3] 李涵, 邓雨荣, 朱时阳, 等. 海-陆混合路径对雷电电磁场传播的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 229–235.
Li H, Deng Y R, Zhu S Y, et al. Propagation effects of the rough and ocean-land mixed path on the lightning-radiated electromagnetic fields[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 229–235. (in Chinese)
- [4] 张岩, 刘福贵, 汪友华, 等. 改进的双指数函数雷电流波形及其辐射电磁场的计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 133–139.
Zhang Y, Liu F G, Wang Y H, et al. A modify double exponential base-current and its application in evaluating the lightning EM fields[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):133–139. (in Chinese)
- [5] 李良福, 李家启. 雷电防护关键技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.12-30.
- [6] 王明邦. 架空配电线路防雷设计与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.16-34.
- [7] Mosaddeghi A, Shoory A, Rachidi F, et al. Lightning electromagnetic fields at very close distances associated with lightning strikes to the gaisberg tower[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D17): 5030–5038.
- [8] Uman M A, Mclain D K. Magnetic field of the lightning return stroke[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(28): 6899–6910.
- [9] Chen Y Z, Wang X J, Rakov V A. Approximate expressions for lightning electromagnetic fields at near and far ranges: Influence of return-stroke speed[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(7): 2855–2880.
- [10] Rubinstein M, Uman M A. Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31(2):183–189.
- [11] Cooray V. Horizontal fields generated by return strokes [J]. Radio Science, 1992, 27(4):529–537.
- [12] Rubinstein M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3):531–535.
- [13] Omari M, Mimouni A. Electromagnetic fields at very close range from a tower struck by lightning in presence of a horizontally stratified ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(1):166–173.
- [14] Luz E, Oliveira R, Machado P. Calculation of lightning-induced voltages and currents on the transformers courtyard of tucuruí hydroelectric generation plant using the finite-difference time-domain method [J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(4):1600–1611.
- [15] Zhang Q L, Zhang L, Hou W H, et al. Validation of the approximate time-domain method for the lightning-horizontal electric field at the surface of two-layer earth by using FDTD [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(5):1121–1128.
- [16] Aoki M, Baba Y, Rakov V A. FDTD simulation of LEMP propagation over lossy ground: Influence of distance, ground conductivity, and source parameters [J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120(16): 8043–8051.
- [17] 于建立, 樊亚东, 詹清华, 等. 特征参数对地闪通道附近地面水平电场的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3979–3987.
Yu J L, Fan Y D, Zhan Q H, et al. The influence of characteristic parameters on the ground horizontal electric field nearby return stroke [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):3979–3987. (in Chinese)
- [18] Yang G, Yu Z Q, Zhang B, et al. Evaluation of lightning current from magnetic field based on deconvolution method [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(3):679–684.
- [19] Javor V, Karl M L, Milica P R, et al. Analytical representation of measured lightning currents and its application to electromagnetic field estimation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1415–1426.
- [20] Nag A, Rakov V A, Tsalikis D, et al. Characteristics of the initial rising portion of near and far lightning return stroke electric field waveforms [J]. Atmospheric Research, 2012, 117(11):71–77.
- [21] Haddad M A, Rakov V A, Cummer S A. New measurements of lightning electric fields in Florida: Waveform

- characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D10101):1 – 26.
- [22] Yang M W, Chen Y C. AutoMesh: An automatically adjustable, nonuniform, orthogonal FDTD mesh generator [J]. *Antennas Spropagation Magazine, IEEE*, 1999, 41(2):13 – 19.
- [23] Shoory A, Rachidi F, Rubinstein M, et al. On the measurement and calculation of horizontal electric fields from lightning[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(3):792 – 801.
- [24] 于建立, 樊亚东, 詹清华, 等. 分层土壤时特征参数对地闪通道附近地面垂直电场的影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(5):1671 – 1679.
Yu J L, Fan Y D, Zhan Q H, et al. Influence of characteristic parameters on the ground vertical electric field nearby return stroke with layered soil [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(5):1671 – 1679. (in Chinese)
- [25] 边凯, 陈维江, 王立天, 等. 高速铁路牵引供电接触网雷电防护[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(10):191 – 199.
Bian K, Chen W J, Wang L T, et al. Lightning protection of traction power supply catenary of high-speed railway [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(10):191 – 199. (in Chinese)
- [26] 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 Atmospheres*, 1990, 95 (D12) : 20395 – 20408.
- [27] Rakov V A, Dulzon A A. Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke [J]. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*, 1987, 1: 87 – 89.
- [28] 葛德彪. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011. 261 – 290.
- [29] Yang C S, Zhou B H. Calculation methods of electromagnetic fields very close to lightning[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(1):133 – 141.
- [30] Romero F, Piantini A, Cooray V. On the influence of stroke current propagation velocity on lightning horizontal electric fields [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(4):940 – 948.
- [31] Cooray V. Some considerations on the "Cooray-Rubinstein" formulation used in deriving the horizontal electric field of lightning return strokes over finitely conducting ground [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 44:560 – 566.
- [32] Shoory A, Rachidi F, Rubinstein M, et al. Why do some lightning return stroke models not reproduce the far-field zero crossing? [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(D16204): 1 – 9.

作者简介



于建立 男, 1983年出生, 博士, 副教授, 硕导. 主要从事雷电电磁场计算、电力系统外部过电压及其防护等方面的研究工作.
E-mail: yu_jianli@foxmail.com



樊亚东(通信作者) 女, 1967年出生, 博士, 教授, 博导. 主要从事工程电磁场及应用、雷电防护与接地技术等方面的研究工作.
E-mail: ydfan@whu.edu.cn