

大地电参数和地面等值厚度对地闪通道附近垂直电场的影响

于建立^{1,2,3},程 龙²,樊亚东³,张迎栋²,鲁志伟²

- (1. 潍坊学院信息与控制工程学院, 山东潍坊 261061;
2. 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;
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北武汉 430072)

摘 要: 为了深入理解地闪回击电磁脉冲特性,采用时域有限差分方法计算了地闪回击200 m以内地面、20 m高和50 m高的垂直电场. 分析了大地电导率、大地相对介电常数以及地面等值厚度三个特征量对该范围内垂直电场的影响. 结果表明,该范围内地面和空间垂直电场均在2~3 μs 的快速上升后出现时间较长的“平台”波形,“平台”高度和波头上升陡度均随回击距离和高度增加而非线性降低. 50 m远地面场和空间场“平台”高度随大地电导率增大分别提高和降低,10 μs 内最大变化5%~10%,并且此处“平台”高度随地面等值厚度增大而略有增加. 大地相对介电常数对该范围内垂直电场的影响可忽略.

关键词: 地闪; 电磁脉冲; 时域有限差分; 垂直电场; 大地电参数; 地面等值厚度

中图分类号: TM863 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)05-1159-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210120

Influence of Geoelectric Parameters and Ground Equivalent Thickness on Vertical Electric Fields Nearby the Return-Stroke Channel

YU Jian-li^{1,2,3}, CHENG Long², FAN Ya-dong³, ZHANG Ying-dong², LU Zhi-wei²

- (1. College of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China;
2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin, Jilin 132012, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of lightning electromagnetic pulse (LEMP) generated by cloud-to-ground lightning, the vertical electric fields within 200 m with the different heights of ground, 20 m high and 50 m high were calculated by using the finite difference time domain (FDTD) method. The influences of three characteristic parameters of earth conductivity, earth relative permittivity and ground equivalent thickness on vertical electric field were analyzed. Results show that, in this range, the vertical electric field on ground and in space appears a long "platform" waveform after a rapid rise of 2~3 μs . The platform height and the rise steepness of wave front decrease nonlinearly with the increase of return-stroke distance and height. The "platform" height of vertical electric fields with the return-stroke distance of 50 m on ground and in space increases and decreases respectively with the increase of the earth conductivity, and the maximum change is about 5%~10% within 10 μs . In addition, the "platform" height with the same return-stroke distance increases slightly with the increase of ground equivalent thickness. The influence of the earth relative permittivity on the vertical electric field in this range can be ignored.

Key words: cloud-to-ground lightning; electromagnetic pulse; FDTD; vertical electric fields; geoelectric parameters; ground equivalent thickness

1 引言

地闪回击电磁脉冲因具有上升陡度大、耦合路径复杂和传播范围广等特点,极易对绝缘水平相对较低的电气电子设备构成危害^[1-4].作为地闪电磁脉冲主要分量的垂直电场是雷电感应电压的激励源之一^[5].回击通道附近的垂直电场不仅变化梯度大而且幅值远高于水平电场^[6,7],系统研究该范围内的地闪垂直电场特性对于深入理解电磁耦合物理机制以及雷电感应电压的防护具有重要意义.

通过观测手段虽能直接获取回击电场的时域波形等数据,但受观测地点固定和地理环境等因素的限制无法对其特性进行系统而全面的研究.采用理论计算可以量化考察不同因素影响下地闪垂直电场的变化规律,系统反映其特性^[8].解析算法由于存在计算精度较低或较难反映各特征量对回击电场的影响等局限并未被广泛应用于地闪回击电磁脉冲的特性研究^[9].数值算法以矩量法(Method Of Moments, MOM)和时域有限差分法(Finite-Different Time-Domain, FDTD)为主,其中尤以FDTD法及其诸多改进方法的应用较为普遍^[9].此前,国内外学者在地闪回击电场研究领域开展了诸多的工作.耿雪莹等采用FDTD方法计算了回击通道附近地面存在规则建筑物时不同观测点位置的电场和磁场,讨论了建筑物高度及大地电导率对计算结果的影响^[10].高金阁等采用FDTD方法计算雷电电磁脉冲以及架空线雷电感应电压,并分析了大地电导率对导线不同观测点电压的影响^[11].杜远谋等采用FDTD方法对地铁车站中的地闪回击电磁场进行了模拟^[12].陈怀飞等采用偶极子计算方法对风力发电机遭受雷击时的电磁场进行了计算并对其辐射增强效应进行了研究^[13].宿志国基于三维FDTD方法计算了高塔遭受雷击时的空间电磁场并对电磁场的传播影响因素进行了分析^[14].范祥鹏基于Jefimenko方程推导得到了用于计算任意形态电流源激励下的时域电场^[15].Jiang等提出了多分辨率时域(Multi-Resolution Time-Domain, MRTD)计算方法对地闪电磁脉冲进行计算,并采用FDTD方法对计算结果进行对比验证^[16].Tatematsu等采用FDTD方法计算了雷直击建筑物以及雷击建筑物附近时建筑物内的电磁场^[17].Yamanaka等采用二维FDTD方法计算了雷击634 m高建筑物时27 km、57 km和101 km远处的垂直电场^[18].

目前,研究人员在地闪回击电磁脉冲尤其是地闪垂直电场方面的研究已取得诸多进展,但电磁脉冲特性研究还不够系统和全面.本文基于FDTD方法计算回击距离(观测点与回击通道间距离)200 m以内地闪垂直电场的地面场及一定高度的空间场,同时分析讨论了大地电导率和大地相对介电常数对计算结果的

影响.值得注意的是,地闪回击发生时,回击电流激励的电磁脉冲除在地上广域空间中分布外,还会“透射”到地面以下^[19,20].由于地下土壤的电参数与空气有区别,土壤厚度的取值大小将对地面及空间电磁场的计算产生不同程度的影响.另外,地闪电磁脉冲在地下的传播将随着深度的增加而严重衰减,当其取值超过一定数值后将不再对计算结果构成较大差异.文献[21,22]定义该参数为“地面等值厚度”并分析了该参数对地闪电磁脉冲的影响.其中文献[21]分析了地面等值厚度对地闪水平电场的影响,但并未分析对垂直电场的影响,文献[22]分析了地面等值厚度对地闪垂直电场的影响,但仅以地面场为研究对象,并没有考虑其对空间不同高度垂直电场的影响.本文除分析大地电参数的影响外,还对地面等值厚度取值对地面及空间两个不同高度垂直电场的影响进行了分析,所得结论有助于对地闪回击电磁脉冲特性的研究工作提供一定的推进.

2 计算方法

2.1 地闪电磁脉冲计算物理模型

本文计算地闪电磁脉冲需要对地闪回击发生的过程进行模拟处理,所采用的物理模型如图1所示.该模型做如下设置:

- (1) 地闪回击通道为与地面垂直的有限长通道(长度取值在后文介绍),不考虑通道的分支及曲折性.
- (2) 通道内回击电流的运动速度(回击速度)假设为恒定值(回击速度取值在后文介绍).
- (3) 暂未考虑地表起伏形态对计算的影响.

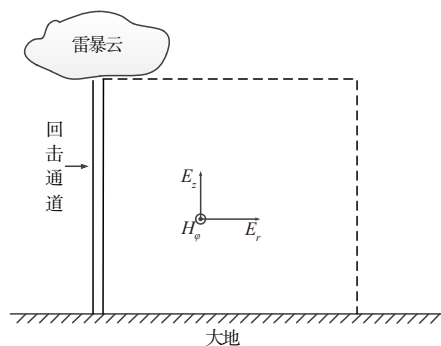


图1 地闪电磁脉冲物理模型图

2.2 地闪电磁脉冲计算方法

本文采用文献[21]中的方法计算地闪回击电磁脉冲,该方法可获得以回击通道为对称轴的二维场的半截面场.计算中基于天线模型模拟回击通道并采用FDTD法中的TM(Transverse Magnetic)模作为控制方程求解电磁场^[23]:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\mu_0 \frac{\partial H_\varphi}{\partial t} - \sigma H_\varphi \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} - \sigma E_r \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rH_\varphi)}{\partial r} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \quad (3)$$

式(1)~式(3)中, σ 、 ε 和 μ_0 分别为传播介质的电导率、相对介电常数和磁导率, E_r 、 E_z 和 H_φ 分别为地闪电磁脉冲中的水平电场、垂直电场和磁场. 二维场的计算涉及 4 个计算边界的数学处理: 其中回击通道作为有源边界采用安培环路定理计算, 鉴于 Mur 吸收条件所给出的差分格式可非常方便的应用于柱坐标系下 FDTD 的计算, 本文对另外三个边界采用 Mur 吸收条件处理^[23]. 计算中, 对时间步长 Δt 和空间步长 Δr 、 Δz 进行合理的取值, 采用 Courant 条件可以保证数值计算的稳定性^[23]:

$$\Delta t \leq \min(\Delta r \Delta z) / 2c, c \text{ 为光速} \quad (4)$$

式中 Δr 和 Δz 分别为水平方向空间步长(垂直于回击通道)和垂直方向空间步长(沿回击通道方向).

鉴于所用计算方法为成熟计算手段, 且本文旨在以数值计算为工具探索地闪回击垂直电场特性, 该方法的具体实现过程此处不再赘述.

2.3 基电流模型和回击模型

本文数值计算采用的回击基电流模型和回击模型如下:

基电流模型^[24]:

$$i(0, t) = I_{01} \cdot \frac{(t/\tau_1)^2}{[(t/\tau_1)^2 + 1]} \cdot e^{-t/\tau_2} + I_{02} \cdot (e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (5)$$

该模型中采用一个 Heidler 函数和一个双指数函数叠加拟合回击通道底部电流. 式中, I_{01} 和 I_{02} 决定回击电流的幅值, τ_1 和 τ_4 决定回击电流的上升时间, τ_2 和 τ_3 决定回击电流的下降时间.

回击模型^[25]:

$$i(z', t) = \begin{cases} (1 - z'/H)i(0, t - z'/v), & t \geq z'/v \\ 0, & t < z'/v \end{cases} \quad (6)$$

z' 为回击通道内任一点高度, t 为时间, $i(z', t)$ 表示 t 时刻通道内 z' 高处电流, v 为回击速度, H 为回击通道高度. 本文所选用回击模型为工程模型中的 MTLL (Modified Transmission-Line model with Linear current decay with height) 回击模型, 工程模型具有表达简单易实现的优点, 其中在与实测地闪回击电磁脉冲吻合性方面 MTLL 模型的优越性较为突出^[25-27].

本文计算方法的准确性验证已在文献[21]中实现, 此处不再重复叙述.

3 计算与分析

本文采用上述计算方法分别考察大地电导率 σ 、大地相对介电常数 ε 和地面等值厚度 d_g 三个特征参数对地闪回击 200 m 内垂直电场 E_z 的影响, 计算对象包括地面场和三个高度的空间场. 下文的计算结果中 r 为回击距离, h 为空间高度, 由于地闪电磁脉冲通过感应过电压对电气电子设备产生危害的强度主要取决于波头, 因此本文计算时间长度取 10 μs . 式(5)和式(6)中的计算参数设置为: $I_{01}=3.25 \text{ kA}$, $I_{02}=8.95 \text{ kA}$, $\tau_1=0.072 \mu\text{s}$, $\tau_2=16.67 \mu\text{s}$; $\tau_3=100 \mu\text{s}$, $\tau_4=0.5 \mu\text{s}$, $H=7500 \text{ m}$, $v=1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$. 此外, 三个待考察参数的初始值为 $\sigma=2.5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, $\varepsilon=10$, $d_g=50 \text{ m}$, 当考察对象为某特征参数时, 其他参数均保持初始值不变.

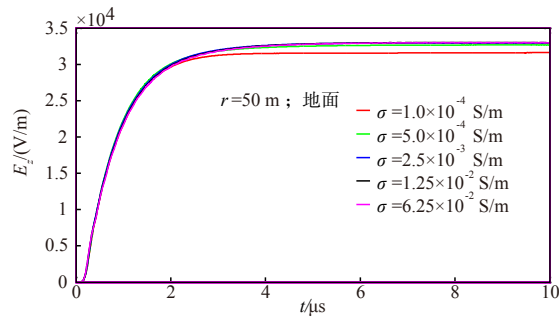
3.1 大地电导率的影响

考虑到不同地区地理环境存在差异, 大地电导率 σ 会存在较大的变化范围, 本文为考察 σ 对地闪回击通道附近 E_z 的影响, 将其取值范围设置为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ S/m} \sim 6.25 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ (以 5 倍规律递增). 图 2、图 3 给出了当回击距离为 50 m 和 200 m 时, 地面、20 m 和 50 m 三个高度处的地闪垂直电场在不同 σ 时的时域波形.

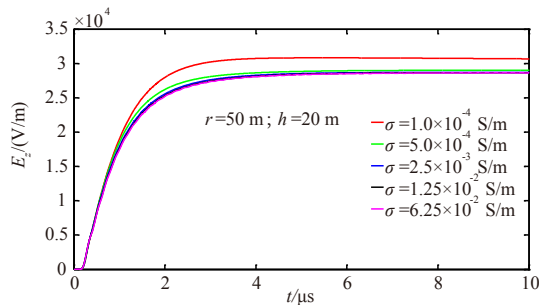
由图 2、图 3 可见, 回击距离 200 m 以内的 E_z 在 10 μs 以内的波形总体变化趋势为首先出现 2~3 μs 陡度相对较大的上升阶段, 之后是上升陡度明显减缓的近似“平台”状波形. 这是由于地闪回击电场中同时含有静电场、感应场和辐射场三个场分量, 近场中静电分量和感应分量占有较高比重, 远场中几乎仅剩辐射分量^[28]. 在本文所计算的回击范围内 E_z 中的静电分量非常高, 体现在时域波形中即存在时间相对较长的“平台”区. 相同情况下, 高度对 E_z 的影响主要体现在“平台”高度值和波头上升陡度. 地面以上的空间 E_z “平台”高度值随空间高度的增大呈非线性降低. 对比发现, E_z 的“平台”降低速度随高度增加而略有增大, 但降低幅度随回击距离的增大而减弱. 另外, 相同条件下空间高度由地面增至 50 m 高, E_z 的上升陡度略有减缓, 波头上升时间出现约 1 μs 的延长.

相同空间高度时, 200 m 以内回击距离对 E_z 的影响除了由于与辐射源距离的差异导致 E_z 场值发生变化外, 较为明显的体现为 E_z 的上升陡度减缓, 波头上升时间延长. 此外, E_z “平台”区的陡峭度也随着回击距离的增大略有增加. 对比发现, 随着回击距离的增大 E_z 场值的降低呈明显的非线性规律, 其衰减速度随回击距离增大而减弱, 这与此前研究人员所得的结论相符^[29,30].

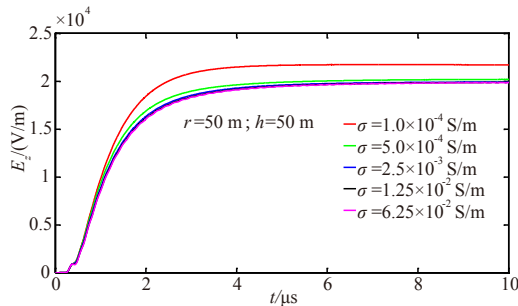
通过对比可知, 大地电导率 σ 对 E_z 的影响在不同空间位置有不同的体现. 回击距离 200 m 内, 相同空间高度时 σ 对 E_z 的影响随回击距离增大而降低, 且回



(a) 回击距离 50 m 地面垂直电场



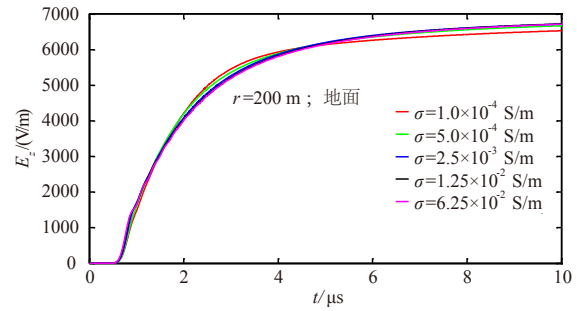
(b) 回击距离 50 m 高度 20 m 垂直电场



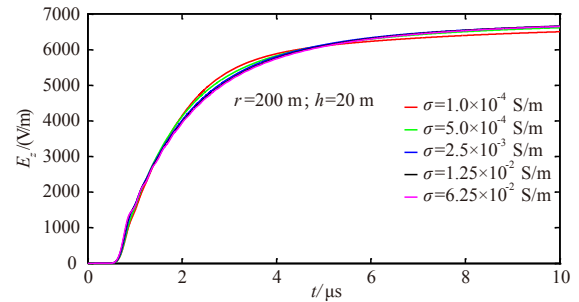
(c) 回击距离 50 m 高度 50 m 垂直电场

图 2 回击距离 50 m 不同大地电导率的垂直电场

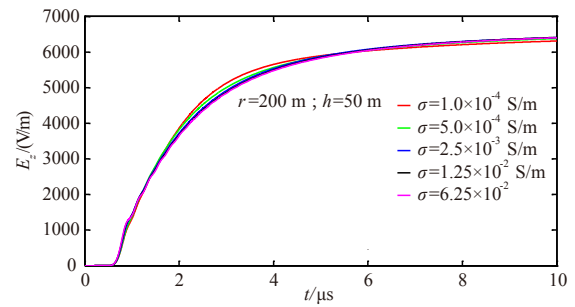
击距离到达 200 m 后 σ 的影响已很微弱. 图 2 中 50 m 远处, σ 对 E_z 的影响主要体现在“平台”区的高度和靠近“平台”区的波头上升陡度. 该距离空间场的波头上升陡度在约 $1 \mu\text{s}$ 以后均随着 σ 的增大而有所降低, 这导致不同空间高度对应的 E_z “平台”高度值出现差异. 对比该距离 3 个高度的 E_z 可见, 地面场中 E_z “平台”高度随 σ 增大而升高, 空间场 E_z “平台”高度则随 σ 增大而降低. 以 $t=10 \mu\text{s}$ 时刻为例, σ 从 $1.0 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ 增至 $6.25 \times 10^{-2} \text{ S/m}$, 从地面到 50 m 高处对应的 E_z “平台”高度提高率分别约为 4.3%、-6.7% 和 -8.5%. 可见 σ 对 E_z 地面场和空间场“平台”高度影响趋势相反, 且对空间场的影响随空间高度的增高而增强. 图 3 中当回击距离增至 200 m 时, σ 对 E_z 的整体影响已很微弱. 由此可见, 相同条件下, σ 对 E_z 的影响强度随着回击距离的增大而降低.



(a) 回击距离 200 m 地面垂直电场



(b) 回击距离 200 m 高度 20 m 垂直电场



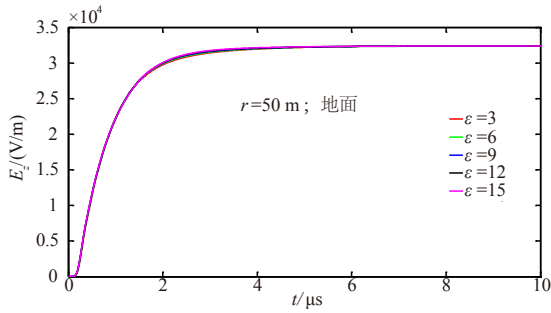
(c) 回击距离 200 m 高度 50 m 垂直电场

图 3 回击距离 200 m 不同大地电导率的垂直电场

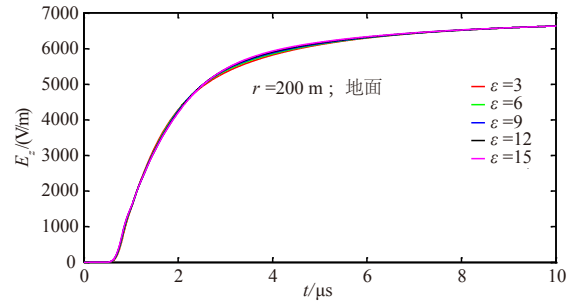
由于在该回击距离内, 静电分量和感应分量在 E_z 中占有绝对比重, 二者均对 σ 的变化敏感度较低, 其中尤以静电分量几乎对 σ 的变化不产生反应. 这说明在该距离内 E_z 的静电分量和感应分量所占比重随回击距离增大分别有所增加和降低. 值得注意的是, 上述 σ 对 E_z 的所有影响均在 $\sigma \geq 5.0 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ 后体现的非常微弱, 可见该回击范围内的 E_z 仅在 σ 较低时对 σ 的变化产生一定的敏感度.

3.2 大地相对介电常数的影响

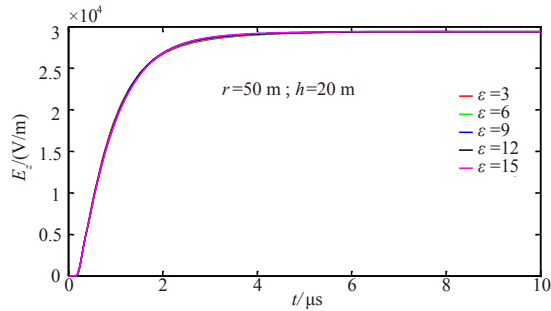
除大地电导率外, 大地相对介电常数 ε 也是重要的大地电参数之一. 本文为考察 ε 对地闪回击通道附近垂直电场的影响, 将其取值范围设置为 3~15 (以 3 为递增步长). 图 4、图 5 给出了当回击距离为 50 m 和 200 m 时, 地面、20 m 和 50 m 三个高度处的地闪垂直电场在不同 ε 时的时域波形.



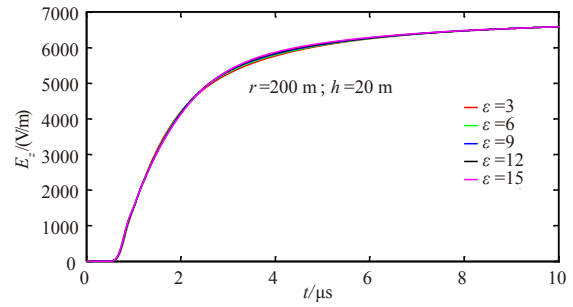
(a) 回击距离 50 m 地面垂直电场



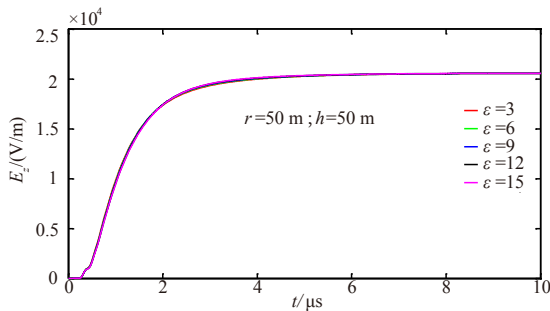
(a) 回击距离 200 m 地面垂直电场



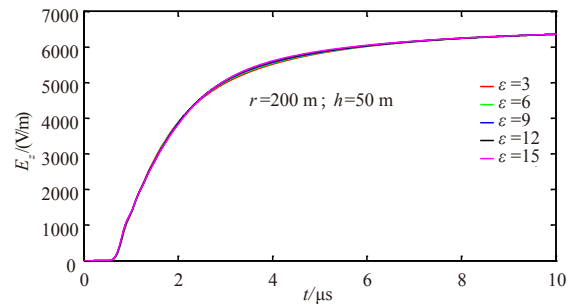
(b) 回击距离 50 m 高度 20 m 垂直电场



(b) 回击距离 200 m 高度 20 m 垂直电场



(c) 回击距离 50 m 高度 50 m 垂直电场



(c) 回击距离 200 m 高度 50 m 垂直电场

图 4 回击距离 50 m 不同大地相对介电常数的垂直电场

图 5 回击距离 200 m 不同大地相对介电常数的垂直电场

由图 4、图 5 与图 2、图 3 的对比可知, ϵ 对该回击范围内 E_z 的影响较 σ 明显更弱. 在本文所给的 6 个空间观测点中, ϵ 在整个给定区间内对 E_z 的影响均微乎其微, 仅在 E_z “平台”区的初始时刻附近有微弱影响. 这说明 E_z 中的静电分量和感应分量均对 ϵ 的变化近乎无反应. 由图 2~5 可见, 大地电参数对回击距离 200 m 以内 E_z 的地面场和空间场整体影响较弱.

3.3 地面等值厚度的影响

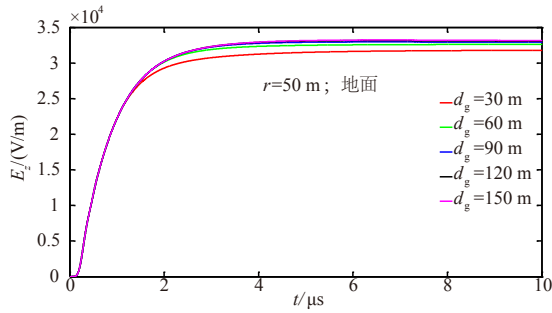
地闪回击电磁脉冲不仅存在于回击通道周围的广域空间内, 而且会在地面以下产生一定的“透射”深度. 目前该深度 d_g 无法实测获取, 但可以通过仿真计算探索其规律. 本文为考察不同 d_g 的取值对地闪回击通道附近 E_z 的影响, 将其取值范围设置为 30~150 m (以 30 m 为递增步长). 图 6、图 7 给出了当回击距离为 50 m 和 200 m 时, 地面、20 m 和 50 m 四个高度处的地闪垂直电

场在不同 d_g 时的时域波形.

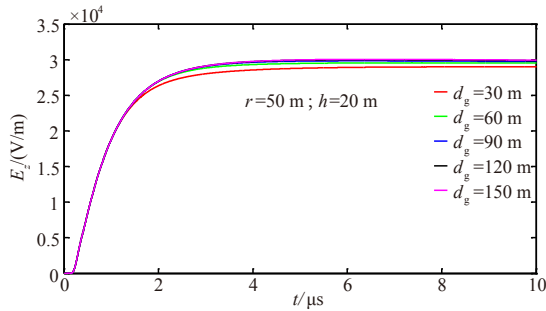
由图 6、图 7 与图 2、图 3 对比发现, d_g 对 E_z 的影响规律与大地电导率 σ 具有一定的相似性, 在 200 m 以内 d_g 的影响强度随着回击距离增大而逐渐减弱.

图 6 中当回击距离为 50 m, d_g 对 E_z 的影响仅体现在“平台”区高度, 随着 d_g 增大“平台”高度略有增加, 但增加的幅度随着空间高度的增加而降低. 以 $t = 10 \mu\text{s}$ 时刻为例, 当 d_g 取值从 30 m 增至 150 m 对应 3 个高度的 E_z “平台”增量分别为 4.3%、3.3% 和 2.8%. 图 7 中当回击距离增至 200 m, 不同 d_g 取值对 E_z 的影响已可忽略.

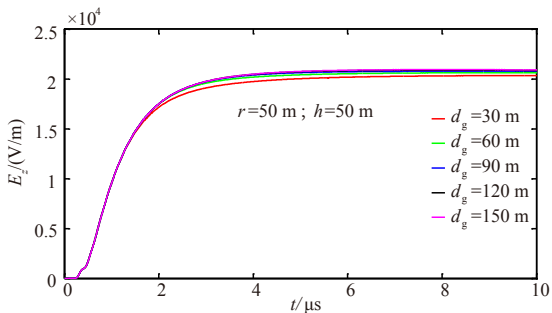
综上所述, 不同 d_g 的取值对回击距离 200 m 内 E_z 的微秒级波头过程无影响, 仅对波头之后的“平台”高度略有影响, 该影响不仅随空间高度增大而减弱, 同时随回击距离的增大而减弱. 通过地闪回击电磁脉冲



(a) 回击距离 50 m 地面垂直电场



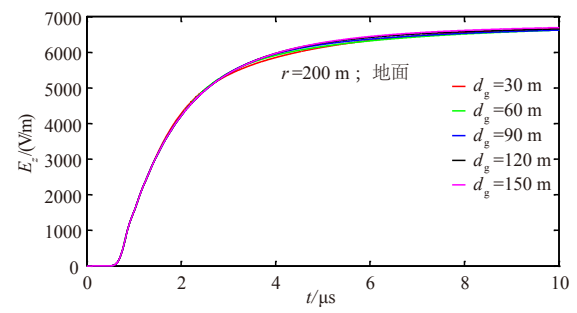
(b) 回击距离 50 m 高度 20 m 垂直电场



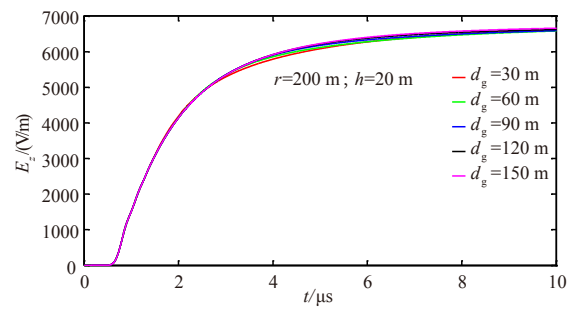
(c) 回击距离 50 m 高度 50 m 垂直电场

图 6 回击距离 50 m 不同地面等值厚度的垂直电场

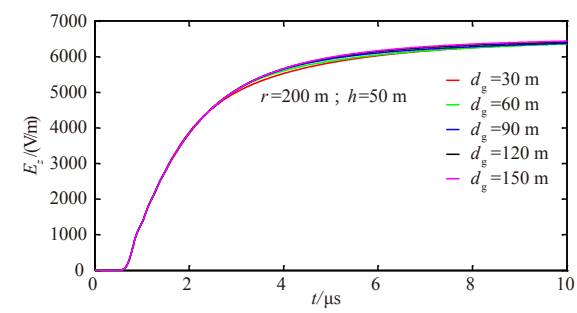
计算的控制方程式(1)~式(3)不难发现,引起电磁场在不同传播介质中产生变化的原因是不同介质中的电参数(大地电导率和大地相对介电常数)和磁参数(磁导率)存在不同程度的差异.地面等值厚度 d_g 取值越大电磁脉冲在地下土壤中的分布空间越大,则由介质参数差异所产生的影响将在一定程度上得以累加,该影响势必会在地面场及地面以上的空间场得以体现.对于空气和大地,二者的相对磁导率是一致的(均为1),因此差别在于二者的电参数.本文计算模型中将空气电导率设置为0,相对介电常数设置为1,由前文3.1和3.2的计算结果可知,由于该回击范围内的 E_z 主要由静电分量和感应分量构成,大地电参数对该回击范围内的 E_z 影响整体较弱.因此,通过电参数作为载体对 E_z 产生作用的 d_g 其影响规律与 σ 相似但影响强度必然弱于 σ .



(a) 回击距离 200 m 地面垂直电场



(b) 回击距离 200 m 高度 20 m 垂直电场



(c) 回击距离 200 m 高度 50 m 垂直电场

图 7 回击距离 200 m 不同地面等值厚度的垂直电场

4 结论

本文采用FDTD方法计算了地闪回击200 m以内地面及高度50 m以内的垂直电场.分析了大地电导率、大地相对介电常数以及地面等值厚度三个因素对该空间范围内垂直电场的影响.得到以下结论:

(1)该范围内垂直电场在微秒级的快速上升后呈较长时间的“平台”波形.“平台”高度和波头陡度均随空间高度和回击距离增加非线性降低.

(2)50 m远地面场和空间场“平台”高度随大地电导率增大分别增大和减小,大地相对介电常数对该范围垂直电场影响可忽略.

(3)大地电导率和地面等值厚度的影响规律较相似.

参考文献

- [1] 何金良, 曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 23-29.
- [2] 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: 42-48.
- [3] 王晓嘉, 陈亚洲, 万浩江, 等. 弯曲通道长度及倾斜角度对雷电电磁场影响研究[J]. 电子学报, 2017, 45(1): 246-250.
WANG Xiao-jia, CHEN Ya-zhou, WAN Hao-jiang, et al. The influence of tortuous channel length and tilt angle on lightning electromagnetic field[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(1): 246-250. (in Chinese)
- [4] 田明宏, 魏光辉, 刘尚合, 等. 基于 IEC 标准雷电后续回击电磁场的计算[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 951-954.
TIAN Ming-hong, WEI Guang-hui, LIU Shang-he, et al. The electromagnetic fields calculation of lightning subsequent return-stroke based on IEC standards[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 951-954. (in Chinese)
- [5] AGRAWAL A K, PRICE H J, Gurbaxani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, 22(2): 119-129.
- [6] MIKI M, RAKOV V A. Electric fields near triggered lightning channels measured with pockels sensors[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D16): 1-11.
- [7] 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.
- [8] 陈维江, 余辉, 贺恒鑫, 等. 雷电先导下行过程近地电场时空分布与模拟方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5221-5233.
CHEN Wei-jiang, YU Hui, HE Heng-xin, et al. Spatial-temporal characteristics and simulation method of the electric field near ground during lightning attachment process [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5221-5233. (in Chinese)
- [9] RAKOV V A, RACHIDI F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 428-442.
- [10] 耿雪莹, 高宇俊, 刘东东. 地面建筑物对地闪回击通道附近电磁辐射环境的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(4): 500-506.
GENG Xue-ying, GAO Yu-jun, LIU Dong-dong. Influence of buildings on the electromagnetic radiation environment near the lightning return strokes channel[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, 10(4): 500-506. (in Chinese)
- [11] 高金阁, 马京津, 马海鹏, 等. 基于 FDTD 传输线雷电感应过电压模拟研究[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1094-1101.
GAO Jin-ge, MA Jing-jin, MA Hai-peng, et al. Simulation of lightning induced overvoltage on transmission line based on FDTD[J]. Plateau Meteor, 2018, 37(4): 1094-1101. (in Chinese)
- [12] 杜远谋, 周筠珺. 基于时域有限差分方法的地铁车站地闪回击电磁场模拟[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 33-42.
DU Yuan-mou, ZHOU Yun-jun. Simulation of the metro station's lightning return-stroke electromagnetic fields based on finite-difference time-domain method[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(4): 33-42. (in Chinese)
- [13] 陈怀飞, 王宇, 孙通, 等. 风机回击电磁场波形特征及辐射增强效应研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2122-2130.
CHEN Huai-fei, WANG Yu, SUN Tong, et al. Study on waveform characteristics and radiation enhancement effect of lightning return stroke initiated from wind turbine [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2122-2130. (in Chinese)
- [14] 宿志国. 基于 FDTD 算法的高建筑物雷电电磁场模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [15] 范祥鹏. 基于 LF/VLF 快电场的闪电精细化定位和通道电参量反演方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学地球与行星科学学院, 2019.
- [16] JIANG Zhi-dong, ZHOU Bi-hua, LIU Ya-wen, 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.
- [17] TATEMATSU A, RACHIDI F, 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.
- [18] YAMANAKA A, NAGAOKA N, BABA Y, et al. Lightning strike to a tall-grounded object: part 2—LEMP calculation with a channel approximation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3): 736-744.

- [19] 杨波, 周璧华, 孟鑫. 地闪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 Bi-hua, MENG Xin. Distribution of cloud-to-ground lightning electromagnetic pulse fields under the ground[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(12): 8978-8985. (in Chinese)
- [20] 张少卿, 吴群. 闪电脉冲电磁场在地下空间的分布特性[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 1-13.
ZHANG Shao-qing, WU Qun. Distribution characteristics of lightning electromagnetic pulsed fields under the ground[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 1-13. (in Chinese)
- [21] 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 Jian-li, FAN Ya-dong, ZHAN Qing-hua, 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)
- [22] 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 Jian-li, FAN Ya-dong, ZHAN Qing-hua, 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)
- [23] 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: 238-244.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] GOMES C, COORAY V. Concepts of lightning return stroke models [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(1): 82-96.
- [27] YANG G, YU Z, ZHANG Y, et al. Evaluation of lightning current and return stroke velocity using measured far electric field above a horizontally stratified ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(6): 1940-1948.
- [28] 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.
- [29] CHEN Y, WANG X, 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.
- [30] 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.

作者简介



于建立 男, 1983年4月出生于吉林省通化市. 现为潍坊学院副教授、硕士生导师. 获省级科技进步奖1项. 在国内外发表学术论文10余篇.

E-mail: yu_jianli@foxmail.com