

土壤分层结构下传输线感应雷电压算法研究*

高金阁^{1,2}, 李京校¹

(1. 北京市气象灾害防御中心, 北京 100089;
2. 北京城市气象研究院, 北京 100089)

摘要: 针对架空传输线感应雷过电压求解时理想地表假设与真实情况之间的矛盾,提出了一种基于 Rusck 模型,利用等效线高取代实际线高的方法,实现了土壤电导率分层结构下传输线感应雷电压的快速求解.与 FDTD 模拟结果对比验证了该方法的有效性和优越性.研究表明:对于电导率小于 0.1 S/m 的单质土壤类型,求解感应电压时应考虑电导率的影响,且电压峰值随电导率减小而增大.对于分层土壤结构,当上层土壤导电性较小时,感应电压随上层土壤增厚而变大;反之,随上层厚度增加而减小,当厚度超过 5 m 时,可忽略分层结构的影响.

关键词: 土壤电导率; 分层结构; Rusck 模型; 感应雷电压

中图分类号: TM863

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390093

引言

雷电侵袭导致的线路故障已成为威胁电网安全可靠运行的主要因素^[1],在为架空线路防雷设计时,常以感应过电压研究为前提,针对这一问题,国内外开展了一些研究工作.Taylor 等^[2]、Agrawal 等^[3]、Rachidi^[4]采用了不同的雷电电磁分量作为激励源推导出感应电压耦合方程,其中 Agrawal 方程因其有效性得到观测试验验证而成为应用最广泛的耦合模型^[5-7].Høidalen^[8]考虑地表阻抗的影响提出了感应电压数值求解法;汤霄等^[9]采用 3D-FDTD 方法实现了土壤分层结构下感应过电压的求解.这些研究成果因算法复杂、耗时较长等缺点导致难以在电力工程中得到应用和推广.

高效算法已成为各研究领域的重要内容^[10-12].为分析雷电感应电压峰值的近似解,Rusck 在理想情况下首次提出电压峰值的估算方法,后被 IEEE 工作组采用^[13].我国《交流电气装置的过电压保护与绝缘配合》规程推荐了电压峰值解析公式^[14-15],高金阁等^[16]利用 FDTD 法对其进行分析并修订.Chowdhuri^[17]、Jankov^[18]、Andreotti 等^[19]从不同角度提出电压峰值估算公式的改进方法,但均忽视了土壤结构对感应电压的影响.Paulino 等^[20]利用拟合方法得到均匀有限电导率情况下电压峰值近似算法,但计算方法仍存在一些不足:一是采用拟合方法得到的计算公式缺少物理意义;二是不适用于分层土壤结构下感应电压的求解.

针对以上不足,本文将建立电导率水平分层土壤结构模型,利用有效线高代替实际线高的方法对 Rusck 模型进行改进,扩展其适用范围,实现在水平分层土壤结构情况下雷电感应电压

* 收稿日期: 2018-03-27; 修订日期: 2018-12-18

基金项目: 北京市自然科学基金(8192052)

作者简介: 高金阁(1987—),男,工程师(通讯作者. E-mail: gjg_ge@126.com).

求解的目的,将改进后 Rusck 模型仿真结果与 FDTD 仿真结果进行对比,验证了该模型的有效性和准确性.最后,利用该模型仿真研究土壤结构对感应电压影响规律发现:当土壤导电性较差时,感应电压的求解应考虑电导率的影响,随电导率减小电压峰值不断增大.对于电导率分层土壤结构,当上层土壤电导率小于下层土壤时,感应电压随上层土壤增厚而变大;反之,随上层厚度增加而减小.

1 Rusck 算法改进

1.1 模型参数介绍

当云地闪放电后,其回击通道会在周围空间产生强电磁脉冲,通过耦合作用使架空传输线上产生暂态过电压,从而引发输电网运行中断等事故.在利用计算机进行雷电感应电压模拟研究时,建立如图 1 所示的场线一体化模型,包括闪电回击通道、架空传输线和分层地表面.其中, v 为闪电回击速度, I_0 为基电流幅值, h 为传输线高度, d 为闪电通道与线路之间的水平距离,传输线径向方向与 rOz 平面垂直, σ, ϵ, μ 分别为电导率、介电常数和磁导率,下标 0, 1, 2 分别表示真空及上下层介质.建模时需要设置两个约束条件:一是闪电回击通道笔直且垂直于地面;二是地表面及土壤分界面平坦.

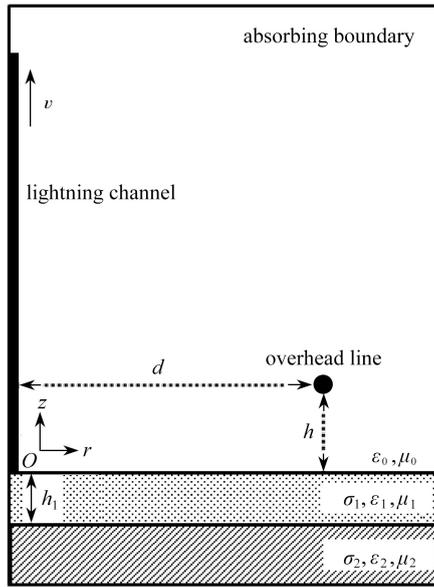


图 1 模型示意图

Fig. 1 The model schematic diagram

1.2 Rusck 模型简化

为了快速求解架空传输线雷电感应电压, Rusck 在假设地表面光滑无耗的条件下,利用镜像法得到雷电过电压峰值近似表达式:

$$V_p = \frac{1}{4\pi\sqrt{\mu_0}} \frac{I_0 h}{d} \left(1 + \frac{v_r}{\sqrt{2 - v_r^2}} \right), \quad (1)$$

式中 I_0 为垂直于地面的闪电电流强度(kA), h 为架空传输线的高度(m), d 为线路与闪电通道之间的距离(m), v_r 为闪电回击速度与光速的比值.对大量观测数据分析发现,自然闪电回击速度主要分布于 $6.7 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^8$ m/s, 而 IEEE 工作组推荐的典型值为 1.2×10^8 m/s. 利用

FDTD 模拟分析发现,选择典型值作为闪电回击速度计算感应电压峰值,最大误差仅为 3.2%。为实现公式简化的目的,对比电力行业规程公式,可将式(1)改写为

$$V_p = 40 \frac{I_0 h}{d}. \quad (2)$$

1.3 分层土壤结构引入

对于均匀有耗土壤介质,由于地表面处水平电场的存在导致零势面向下移动^[21],根据 Darveniza 半经验公式^[13],零势面下移深度 h_0 与土壤电导率满足关系:

$$h_0 = 0.15 \sqrt{1/\sigma}, \quad (3)$$

架空传输线与零势面之间的等效线高 h_{eff} 为

$$h_{\text{eff}} = h + h_0. \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),可以求解有限电导率情况下的雷电感应电压:

$$V_p = 40 \frac{I_0 h_{\text{eff}}}{d} = \frac{40 I_0 (h + 0.15 \sqrt{1/\sigma})}{d}. \quad (5)$$

利用式(5)便可分析单质土壤电导率对雷电感应电压峰值的影响规律.为了进一步研究土壤电导率分层结构对电压峰值的作用,可以将等式右侧改写为两项和的形式,即

$$V_p = V_p^m + V_p^n = \frac{40 I_0 h}{d} + \frac{6 I_0}{d \sqrt{\sigma}}, \quad (6)$$

式中 V_p^m 为线路高度与地面之间的电势差,定义为理想项; V_p^n 为地面与零势面之间的电势差,定义为阻抗项.从表达式可以看出,理想项与土壤结构类型无关,所以扩展 Rusck 模型时只需对阻抗项进行改进.感应电压与水平电场满足线性关系,设比例系数为 c ,则分层土壤结构与单质土壤结构对应的阻抗项电压峰值之比为

$$f = \frac{V_{\text{LP}}^n}{V_{\text{HP}}^n} = \frac{c E_{\text{LP}}(0)}{c E_{\text{HP}}(0)} = 1 + 2 \sum_{i=1}^{+\infty} k^i e^{-2h_1 \alpha i}, \quad (7)$$

$$k = \frac{\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_2}}{\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2}}, \quad (8)$$

式中 $E_{\text{LP}}(0)$ 和 $E_{\text{HP}}(0)$ 分别为土壤电导率分层和均匀情况下地表面处水平电场, h_1 为上层土壤厚度, k 为波在两种介质间的反射系数, σ_1 和 σ_2 分别为上层土壤电导率和下层土壤电导率, α 为水平电场随土壤深度减小的衰减因子,与上层土壤电导率有关^[22]:

$$\alpha = 0.3 \sqrt{10 \sigma_1} \approx \sqrt{\sigma_1}. \quad (9)$$

将式(7)~(9)代入式(6),便可以求解土壤电导率水平分层时雷电感应电压峰值,即改进后的 Rusck 近似算法:

$$V_p = \frac{40 I_0 h}{d} + \frac{6 I_0}{d \sqrt{\sigma_1}} \left(1 + 2 \sum_{i=1}^{+\infty} \left(\frac{\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_2}}{\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2}} \right)^i e^{-2ih_1 \sqrt{\sigma_1}} \right). \quad (10)$$

利用式(10)仿真模拟感应总电压及其两个分量的关系,如图2所示.模拟时设置传输线架设高度为 10 m,线路与回击通道之间距离为 100 m,上层土壤电导率为 0.01 S/m,厚度为 2 m,下层土壤电导率为 0.001 S/m.从图中可以发现,在忽视土壤结构的情况下得到的雷电电压峰值仅是总电压的一部分.通过数据分析可知,对于上述参数设置的土壤结构,理想项电压峰值占总电压的 74%,而阻抗项电压峰值占 26%.由此可以证明,在求解架空传输线雷电感应电压

时,应当考虑土壤结构类型对电压的影响.

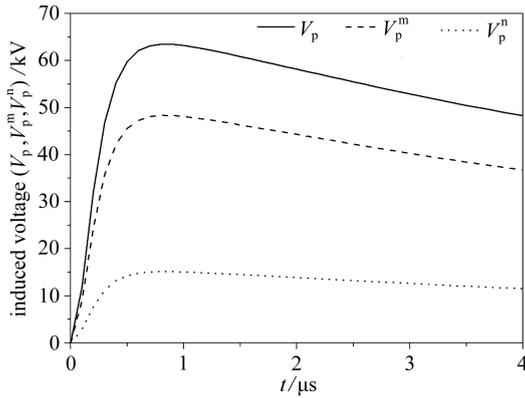
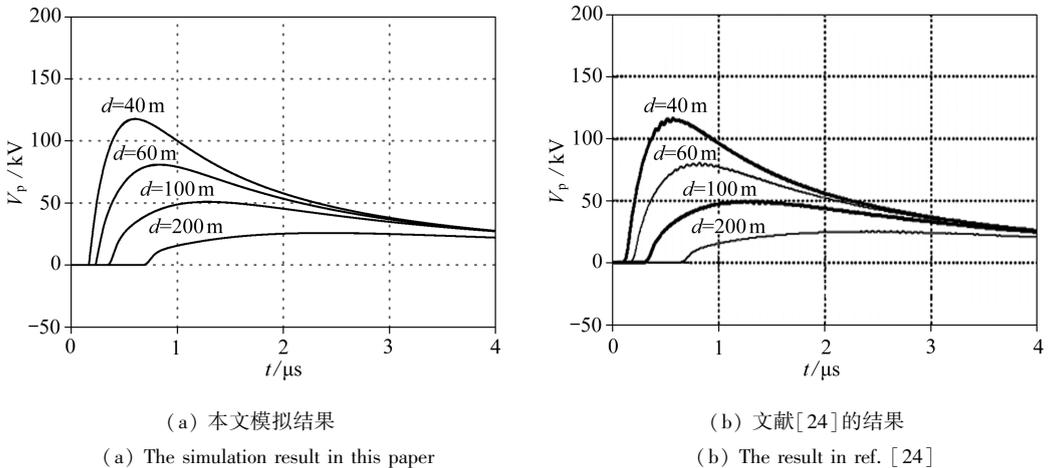


图2 感应总电压及其分量

Fig. 2 The lightning induced voltage and its component

2 改进后 Rusck 模型精度检验

为了利用 FDTD 方法检验改进后 Rusck 模型精度,首先对本文 FDTD 方法的有效性进行验证.在系统模拟时,设置 FDTD 的计算空间为 $1\,500\text{ m} \times 2\,000\text{ m}$,空间网格分辨率为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,时间步长为 1.66 ns ,吸收边界采用一阶 Mur 条件,实现利用有限空间模拟无限区域的目的^[23].图 3 为本文 FDTD 结果与 Baba 等^[24]结果的对比图.从图中可以发现,两者雷电感电压波形非常接近,随着观测距离 d 从 40 m 增大为 200 m ,本文模拟结果与 Baba 等^[24]结果之间的误差越来越小,数据分析发现最大误差值为 3.6% ($d = 40\text{ m}$).从而可以证明,本文 FDTD 方法具有较高的准确性,能够为 Rusck 近似算法改进研究提供支撑.



(a) 本文模拟结果

(a) The simulation result in this paper

(b) 文献[24]的结果

(b) The result in ref. [24]

图3 对比试验结果

Fig. 3 Comparison test results

在利用 FDTD 方法检验改进后 Rusck 模型精度时,定义两者之间的误差为

$$W = \frac{V_{p-F} - V_{p-R}}{V_{p-R}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中 V_{p-F} 为利用 FDTD 方法仿真的线路中点雷电过电压峰值, V_{p-R} 为改进后 Rusck 模型结果.

图 4 给出了当上层土壤电导率(0.001 S/m)小于下层土壤电导率(0.01 S/m)时两种方法的对比结果.从图中可以发现,当传输线与回击通道之间水平距离较近时($d < 100$ m),改进 Rusck 模型仿真结果为负偏差,误差值随距离减小.当距离大于 200 m 时,为正偏差,误差值随距离增大,但整体误差范围仍低于 10%.

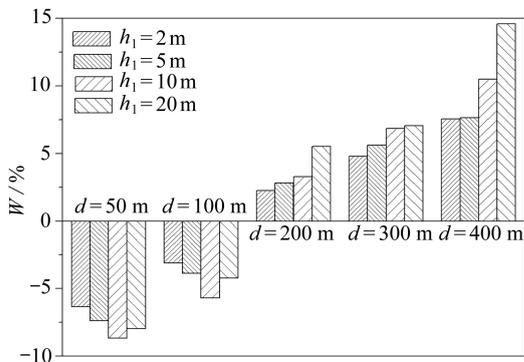


图 4 改进后 Rusck 模型精度检验

($\sigma_1 = 0.001$ S/m, $\sigma_2 = 0.01$ S/m)

Fig. 4 The accuracy test of the improved Rusck model

($\sigma_1 = 0.001$ S/m, $\sigma_2 = 0.01$ S/m)

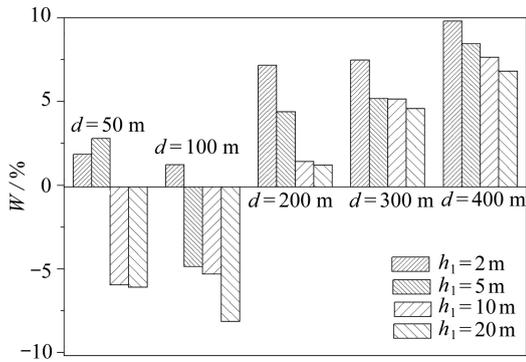


图 5 改进后 Rusck 模型精度检验

($\sigma_1 = 0.01$ S/m, $\sigma_2 = 0.001$ S/m)

Fig. 5 The accuracy test of the improved Rusck model

($\sigma_1 = 0.01$ S/m, $\sigma_2 = 0.001$ S/m)

当上层土壤电导率为 0.01 S/m,下层土壤电导率为 0.001 S/m 时,改进后 Rusck 模型计算雷电感应电压峰值误差结果如图 5 所示.从图中可以发现,当架空传输线与回击通道之间距离从 50 m 增大到 400 m,上层土壤厚度从 2 m 增加为 20 m 时,改进后 Rusck 模型的误差均低于 10%,平均误差仅为 2.2%.近距离处($d < 100$ m),误差值随上层土壤厚度增加显著升高,而中远距离处的误差则随上层土壤增厚逐渐减小.

通过上述误差试验分析可以证明,无论分层结构的上层土壤电导率大或者小,改进后的 Rusck 模型都能够有效求解雷电感应电压峰值.

3 土壤结构对雷电过电压影响分析

3.1 土壤电导率对感应电压的影响

土壤电导率取决于土壤中导电离子浓度和土壤含水量,在一般情况下,陶黏土、黄土、砂砾、多岩山地等典型土壤的电导率分别为 0.1,0.005,0.001,0.000 2 S/m.图 6 给出了不同土壤类型对雷电感应电压的影响,其中实线表示土壤电导率无限大的理想情况.从图中可以发现,传输线雷电感应电压随土壤电导率变小而增大.当土壤为导电性较好的陶黏土时,感应电压峰值与理想土壤情况趋于一致,所以对于电导率大于 0.1 S/m 的土壤类型,工程中可以忽略土壤电导率的影响.然而,对于黄土或导电性更差的土壤类型,假设地表为理想情况将会导致较大误差,特别是多岩山地,其感应电压值大于理想情况两倍.所以当传输线架设于砂砾、山地等低电导率土壤区域时,应适当提高线路雷电防护等级,以防御可能产生的更大感应雷过电压.

3.2 分层土壤结构对雷电过电压影响分析

为了分析土壤电导率水平分层结构对雷电感应电压的影响,首先固定上、下层土壤电导率分别为 0.001 S/m 和 0.01 S/m,进而模拟上层土壤不同厚度时,雷电在传输线上产生的感应电压,模拟结果如图 7 所示.从图中可以发现,随着上层土壤厚度的增加,雷电感应电压越来越大,当 $h_1 = 2$ m 时,感应电压峰值为 57.4 kV,当 $h_1 = 20$ m 时为 64.8 kV,约增加 13%.这种影响

规律可以从感应电压分量角度解释:雷电感应总电压由入射电压和散射电压组成,当具有较差导电性的上层土壤增厚时,地表等效阻抗不断增大,导致负极性散射电压分量减小,而正极性入射电压几乎不受影响,从而使得两个分量叠加后的电压幅值增大。

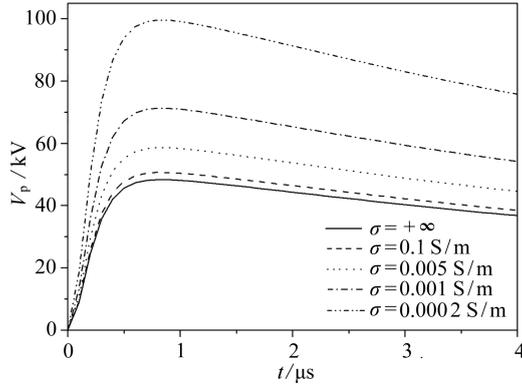


图 6 土壤电导率对感应电压的影响

Fig. 6 Effects of conductivity on the induced voltage

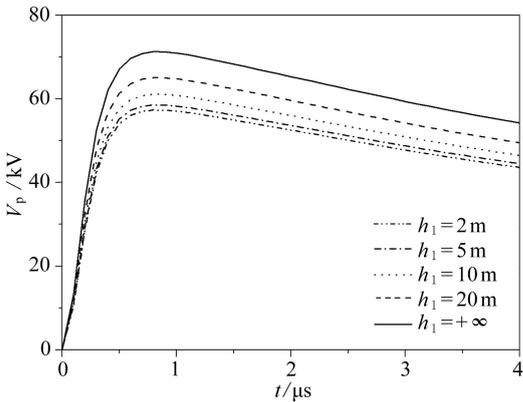


图 7 分层土壤结构对感应电压的影响

($\sigma_1 = 0.001 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$)

Fig. 7 Effects of the stratified structure on the induced voltage ($\sigma_1 = 0.001 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m}$)

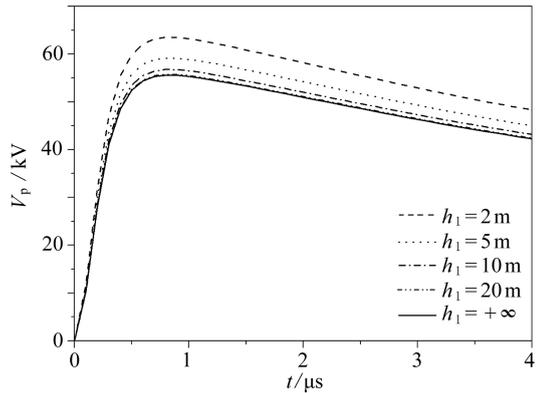


图 8 分层土壤结构对感应电压的影响

($\sigma_1 = 0.01 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.001 \text{ S/m}$)

Fig. 8 Effects of the stratified structure on the induced voltage ($\sigma_1 = 0.01 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.001 \text{ S/m}$)

在雷雨天气,贴近地表面的土壤会因含水量增加而具有更良好的导电性,图 8 给出了当上层土壤电导率大于下层土壤 ($\sigma_1 = 0.01 \text{ S/m}$, $\sigma_2 = 0.001 \text{ S/m}$)时,上层厚度对雷电感应电压的影响结果.从图中可以发现,雷电感应电压随上层土壤厚度的增加而逐渐减小,当厚度超过 5 m 时,感应过电压波形主要受上层土壤电导率决定,而下层电导率对电压的影响非常微弱.由此可以证明,对于上层导电性较好且厚度大于 5 m 的土壤结构,在工程中计算雷电感应电压可以忽视土壤分层的影响,而将大地视为全部由上层土壤构成。

4 结 论

为扩展 Rusck 模型在复杂土壤结构情况下的适用性,本文参考真实地表情况建立土壤结构模型,提出利用有效线高代替实际线高的方法,实现了 Rusck 模型在单质土壤结构时的应用,并进一步模拟分析了土壤分层结构对雷电感应电压的影响,得到如下结论:

1) 改进后 Rusck 模型公式简单实用,运行时间短,切合工程实际需要,与 FDTD 模拟结果对比验证了其有效性和优越性。

2) 当单质土壤电导率小于 0.1 S/m 时,感应电压求解时应充分考虑电导率的影响,电压峰值随电导率减小而增大。

3) 对于分层土壤结构,当上层导电性较差时,感应电压随上层土壤增厚而变大;反之,随上层厚度增加而减小,当厚度超过 5 m 时可以忽视土壤分层的影响。

参考文献(References):

- [1] 陈家宏, 赵淳, 谷山强, 等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2016, **42**(11): 3361-3375.(CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, **42**(11): 3361-3375.(in Chinese))
- [2] TAYLOR C D, SATTERWHITE R C, HARRISON C W. The response of a terminated two wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, **13**(11): 987-989.
- [3] AGRAWAL A, PRICE H, GURBAXANI S. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1980, **22**(2): 119-129.
- [4] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, **35**(3): 404-407.
- [5] 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 Jingge, MA Jingjin, MA Haipeng, et al. Simulation of lightning induced overvoltage on transmission line based on FDTD[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, **37**(4): 1094-1101.(in Chinese))
- [6] 高金阁, 张其林, 李东帅, 等. 粗糙表面对雷电水平电场影响的模拟研究[J]. 气象科学, 2013, **33**(6): 627-633.(GAO Jingge, ZHANG Qilin, LI Dongshuai, et al. Propagation effects of the rough surface on the lightning horizontal electric field[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, **33**(6): 627-633.(in Chinese))
- [7] 杨静, 郗秀书, 王建国, 等. 雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(3): 1968-1975.(YANG Jing, QIE Xiushu, WANG Jianguo, et al. Observation of the lightning-induced voltage in the horizontal conductor and its simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1968-1975.(in Chinese))
- [8] HØIDALEN H K. Analytical formulation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, **45**(1): 92-100.
- [9] 汤霄, 张其林, 李东帅, 等. 分层土壤结构下雷电感应过电压计算与分析[J]. 高电压技术, 2015, **41**(1): 84-93.(TANG Xiao, ZHANG Qilin, LI Dongshuai, et al. Calculation and analysis of lightning induced overvoltage with stratified ground structure[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(1): 84-93.(in Chinese))
- [10] 梁希强, 高强, 姚伟岸. 基于动力系统特性和群理论的一维周期结构瞬态响应的高效算法[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(2): 170-182.(LIANG Xiqiang, GAO Qiang, YAO Weian. An efficient algorithm based on dynamic system properties and group theory for transient responses

- of 1D periodic structures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(2): 170-182. (in Chinese)
- [11] 鲍四元, 邓子辰. 薄板弯曲自由振动问题的高精度近似解析解及改进研究[J]. *应用数学和力学*, 2016, **37**(11): 1169-1180. (BAO Siyuan, DENG Zichen. High-precision approximate analytical solutions for free bending vibrations of thin plates and an improvement[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(11): 1169-1180. (in Chinese))
- [12] 周凤玺, 曹小林. 深埋隧洞围岩应力的精确解与近似解的对比分析[J]. *应用数学和力学*, 2017, **38**(10): 1166-1179. (ZHOU Fengxi, CAO Xiaolin. Comparison between exact solutions and approximate solutions of deep tunnels[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(10): 1166-1179. (in Chinese))
- [13] DARVENIZA M. A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning-induced voltages that accounts for ground resistivity[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, **22**(1): 605-612.
- [14] 中华人民共和国电力工业部. 交流电气装置的过电压保护与绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997. (Ministry of Electric Industry of the People's Republic of China. Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: DL/T 620—1997[S]. Beijing: China Electric Power Publishing Company, 1997. (in Chinese))
- [15] 边凯, 陈维江, 李成榕, 等. 架空配电线路雷电感应过电压计算研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, **32**(31): 191-199. (BIAN Kai, CHEN Weijiang, LI Chengrong, et al. Calculation of lightning induced overvoltage on overhead distribution lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, **32**(31): 191-199. (in Chinese))
- [16] 高金阁, 李京校, 张仲, 等. 架空传输线雷电感应电压计算公式分析与修订[J]. *气象科学*, 2017, **37**(6): 845-850. (GAO Jinge, LI Jingxiao, ZHANG Zhong, et al. Analysis and revision for formula of lightning induced voltage on overhead transmission line[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, **37**(6): 845-850. (in Chinese))
- [17] CHOWDHURI P. Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1967, **114**(12): 1899-1907.
- [18] JANKOV V. Estimation of the maximal voltage induced on an overhead line due to the nearby lightning[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, **12**(1): 315-324.
- [19] ANDREOTTI A, ASSANTE D, MOTOLLA F, et al. An exact closed-form solution for lightning-induced overvoltages calculations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, **24**(3): 1328-1343.
- [20] PAULINO J O S, BARBOSA C F, LOPES I J S, et al. An approximate formula for the peak value of lightning-induced voltages in overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, **25**(2): 843-851.
- [21] RACHIDI F, NUCCI C A, IANOZ M, et al. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead line[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1996, **38**(3): 250-264.
- [22] ZHANG Q L, ZHANG L, TANG X, et al. An approximate formula for estimating the peak value of lightning-induced overvoltage considering the stratified conducting ground[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, **29**(2): 884-889.
- [23] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1981, **23**(4): 377-382.

- [24] BABA Y, RAKOV V A. Electric and magnetic fields predicted by different electromagnetic models of the lightning return stroke versus measured fields[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 479-487.

Study on Lightning Induced Voltages in Transmission Lines Under Soil Conductivity Stratified Structures

GAO Jinge^{1,2}, LI Jingxiao¹

(1. *Beijing Meteorological Disaster Prevention Center, Beijing 100089, P.R.China*;

2. *Beijing Urban Meteorological Research Institute, Beijing 100089, P.R.China*)

Abstract: To solve the contradiction between the ideal hypothesis and the real situation in solution of the lightning induced voltage model, the Rusck model was improved through replacement of the actual line height with the equivalent line height. This method enables fast solution of lightning induced voltages in transmission lines under soil conductivity stratified structures. The effectiveness and superiority of the improved Rusck model were verified through comparison with the FDTD results. The simulation results show that, for a single soil layer with a conductivity less than 0.1 S/m, the influence of the conductivity should be considered in solution of the induced voltage, and the peak voltage will increase with the decrease of the conductivity. For a stratified structure, the induced voltage will increase with the thickening of the upper soil layer with a less conductivity; on the contrary, the induced voltage will decrease with the thickening of the upper layer, and the effects of soil stratification can be ignored for the case of an upper soil layer with a thickness exceeding 5 m.

Key words: soil conductivity; stratified structure; Rusck model; lightning induced voltage

引用本文/Cite this paper:

高金阁, 李京校. 土壤分层结构下传输线感应雷电压算法研究[J]. *应用数学和力学*, 2019, 40(8): 917-925.

GAO Jinge, LI Jingxiao. Study on lightning induced voltages in transmission lines under soil conductivity stratified structures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, 40(8): 917-925.