

基于改进的Agrawal架空配电线路感应雷过电压计算

为了增强配电线路供电的稳定性，并对线路的防雷保护提供有效的科学依据，推导了雷电通道周围空间任意点的电磁场数学模型，利用Maxwell方程组求出任意点的水平电场分量、垂直电场分量与横向磁场分量，并考虑了大地电导率对水平电场分量的影响。建立了多导传输线Agrawal场线耦合模型，结合时域有限差分法（FDTD）和时域电报方程将传输线电报方程中的时间和空间离散化，通过迭代直接在时域内求解传输线上各处的电压和电流响应。最后运用Matlab设计开发了能对架空配电线路感应雷过电压进行计算和分析的软件，实现了对线路状态的实时、准确评估。

李 兵 李中建 朱晓文 刘振民/国网重庆彭水县供电有限责任公司
高 参/重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室



李 兵/工程师

关键词/Keywords

感应雷过电压 ·
多导传输线 ·
场线耦合 ·
时域有限差分法 ·

随着我国经济的迅猛发展，生产、生活对输配电线路的供电稳定性要求也越来越高。输电线路常架设于自然环境中，容易受到雷击等外界因素的影响。对于110 kV及以上高压输电线路，直击雷过电压对线路的绝缘影响最为严重，但它只占雷击率的10%。我国35 kV及以下配电网线路大多没有安装避雷线，加上自身绝缘水平不高，容易发生雷击事故，其中由感应雷过电压引起的故障率更是超过了90%。因此，针对这一现状，对35 kV以下架空输电线路感应雷过电压的计算及防护研究就具有了非常重要的意义。

架空线路感应雷过电压规程法计算较为简单，仅计算静电分量，未考虑雷电磁场的水平分量对输电线路的作用，还忽略了雷电流的波形特征、线路结构及大地电导率等影响因素，因此其估算结果不准确，难以满足雷电防护的要求。

本文对雷电磁场空间分布进行了

研究，通过雷电回击数学模型，采用积分的方法计算出雷电通道周围的电磁场；接着建立了雷电通道周围电磁场与架空线路耦合数学模型（Agrawal耦合模型），用时域有限差分法（FDTD）推导出输电线上感应雷过电压和过电流公式，使计算架空输电线上感应雷过电压更为简单。

雷电磁场的计算

在雷击地面形成主放电时，地面上的电流为雷电通道的基电流。基电流向上运动，速度的大小一般取为 $c/3 \sim c/2$ （ c 为光速），向上运动形成回击电流，回击电流具有很大的幅值，其大小一般在 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ A范围内，并会产生很强的电磁场强度。

1. 雷电流回击数学模型

回击电流具有很大的幅值和瞬变特性，会产生较强的电磁场，影响的空间范围极广，是引起感应过电压的主要原因。实际工程中，雷电通道可近似为一个与地面垂直的单极子天线，如图1所示。为了将回击电流和基底电流进行有效关联，选择了MTL模型对雷电回击通道进行模拟，假定主放电电流从地面开始，沿着电流通道按照某种方式向上传播，即随着高度不断增加，电流会不断减小，但是波形不会改变。MTL模型的雷电流表达式为

$$i(z', t) = \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \quad t \geq \frac{z'}{v} \quad (1)$$

式中， λ 为衰减系数； v 为回击电流波前移动速度。

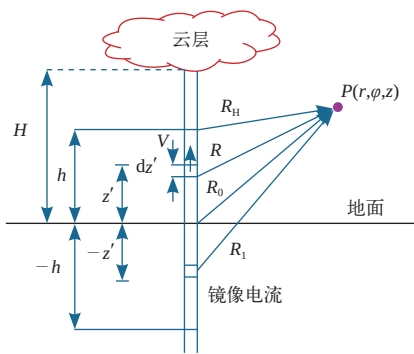


图1 雷电回击通道模型

2. 雷电电磁场计算

根据Maxwell方程组推导出空间任意场点 $P(r, \varphi, z)$ 的电场和磁场强度（假设地面为理想导体），其表达式为

$$de_r(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) \int_0^t \left(0, \tau - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) i\left(0, t - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right) + \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) \frac{\partial i\left(0, t - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

$$de_z(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2r(z-z') - r^2}{R^5} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) \int_0^t \left(0, \tau - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{2r(z-z') - r^2}{cR^4} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) i\left(0, t - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right) - \frac{r^2}{c^2R^3} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) \frac{\partial i\left(0, t - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (3)$$

$$dh_\varphi(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) i\left(0, \tau - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right) + \frac{r}{cR^2} \exp\left(-\frac{z'}{\lambda}\right) \frac{\partial i\left(0, t - \frac{z'}{v} - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (4)$$

式中， $e_r(r, z, t)$ 、 $e_z(r, z, t)$ 和 $h_\varphi(r, z, t)$ 分别为水平电场、垂直电场和磁场强度； ϵ_0 、 μ_0 和 c 分别为介电常数、磁导率和光速； r 和 z 分别为径向坐标和轴向坐标； z' 为雷电通道某一点的轴向坐标。

根据镜像法可知，通过镜像电流与放电通道电流产生的电磁场叠加，对 z' 进行积分可得雷电

流在任意点产生电磁场的各个分量，用Cooray - Rubinstein法计算电场的水平分量，即

$$E_{rg}(r, z, \omega) = E_r(r, z, \omega) - H_\varphi(r, 0, \omega) \frac{c\mu_0}{\sqrt{\epsilon_{rg} + \frac{\sigma_g}{j\omega\epsilon_0}}} \quad (5)$$

式中， $E_r(r, z, \omega)$ 为假设地面是理想导体时，距离地面高度为 z 的水平电场对应分量的傅里叶变换形式； $H_\varphi(r, 0, \omega)$ 为假设地面是理想导体时的傅里叶变换形式； ϵ_{rg} 为相对介电常数； σ_g 为地面电导率。

架空配电线路感应雷过电压计算

架空配电线路的雷电感应过电压问题实际就是计算外加电磁场励磁下的线路电压、电流响应，即场线耦合问题。求解该问题的通用方法是基于天线理论求解Maxwell方程组，但基于天线理论的线路过电压计算时间过长，因此采用基于传输线理论的Agrawal模型。

1. 改进的Agrawal场线耦合模型

对于三相配电线路，需在单相场线耦合模型的基础上进行改进，建立多导传输线的Agrawal模型，其等效电路模型如图2所示，传输线励磁源是沿导体切向电场分量引起的分布电压源，并考虑了大地电导率的因素。

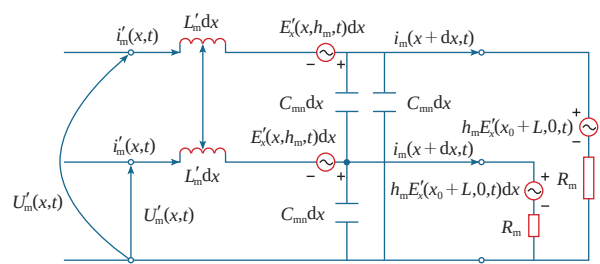


图2 多导传输线Agrawal场-线耦合电路模型

在外电磁场励磁下含分布源的电报方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{v}^{sca}(x, t) + \mathbf{L}' \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i}(x, t) + \mathbf{Z}_g(t) \otimes \mathbf{i}(x, t) = \mathbf{E}_x^{inc}(x, h, t) \\ \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i}(x, t) + \mathbf{C}' \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{v}^{sca}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\mathbf{v}^{sca}(x, t)$ 为散射电压； $\mathbf{i}(x, t)$ 为线路中的感应电流； $\mathbf{L}'$ 为多导线单位长度电感矩阵； $\mathbf{C}'$ 为多导线单位长度电导矩阵； $\mathbf{Z}_g(t)$ 为大地阻抗的时域形

式； $E_x^{\text{inc}}(x, h, t)$ 为入射电场在导线处的水平分量； $\otimes$ 为卷积积分； $L' = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left(\frac{r_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2}{r_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2} \right)$ ； $C' = \varepsilon_0 \mu_0 L'^{-1}$ 。

其中大地阻抗 $Z_g(t)$ 的解析表达式为

$$Z_g(t) = \min \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2\pi h} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{rg}}}} \\ & \frac{\mu_0}{\pi T_{ij}} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_{ij}}{t}} \cos\left(\frac{\theta_{ij}}{2}\right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{4} \exp\left(\frac{T_{ij} \cos \theta_{ij}}{t}\right) \cos\left(\frac{T_{ij} \sin \theta - \theta_{ij}}{t}\right) - \right. \\ & \left. \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} a_n \left(\frac{T_{ij}}{t}\right)^{\frac{(2n+1)}{2}} \cos\left(\frac{2n+1}{2} \theta_{ij}\right) - \frac{\cos \theta_{ij}}{4} \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中

$$a_n = \frac{2^n}{1 \times 3 \times \cdots \times (2n+1)}$$

式中， n 为自然数； h_i 、 h_j 分别为导线 i 、 j 对地面的垂直高度； r_{ij} 为导线 i 、 j 之间的水平距离； x 为线路位置。

2. 传输线方程的FDTD数值求解

在传输线模型中，由于求解对象是输电线上的电流和电压响应，因此可以运用FDTD算法对电压、电流在空间和时间上采取交替采样的离散方式，将含时间变量的耦合方程转化为一组差分方程。本文采用的是一维时域差分法，将传输线沿线的传输方向以空间间隔 Δx 进行一维空间离散，其空间分段形式如图3所示。电压和电流节点交替出现，相邻电压、电流节点时间差为 $\Delta t/2$ ，空间间隔为 $\Delta x/2$ ，其时空迭代关系如图4所示。

将式 (6) 按第一中心差分公式离散得

$$\frac{V_{i,k+1}^{n+1} - V_{i,k}^{n+1}}{\Delta x} + R_{ij} \frac{I_{i,k}^{n+1} + I_{i,k}^n}{2} + L_{ij} \frac{I_{i,k}^{n+1} - I_{i,k}^n}{\Delta t} = \frac{V_{si,k}^{n+1} + V_{si,k}^n}{2} \quad (8)$$

$$\frac{I_{i,k+1}^{n+1} - I_{i,k}^{n+1}}{\Delta x} + G_{ij} \frac{V_{i,k+1}^{n+1} + V_{i,k+1}^n}{2} + C_{ij} \frac{V_{i,k+1}^{n+1} - V_{i,k+1}^n}{\Delta t} = 0 \quad (9)$$

式中， $V_{i,k}^n$ 为第 i 根导体 k 节点（即 $(k-1)\Delta x$ 处）在 $n\Delta t$ 时的电压； $I_{i,k}^n$ 为第 i 根导体 k 节点（即 $(k-1/2)\Delta x$

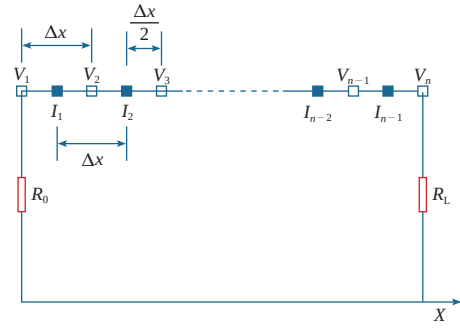


图3 沿架空线空间离散

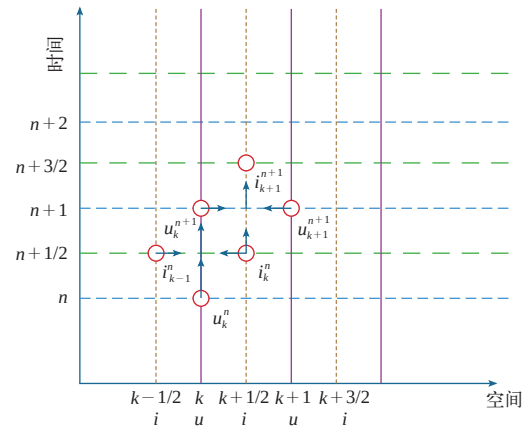


图4 电压、电流空间采样示意图

处）在 $(n+1/2)\Delta t$ 时的电流。

由式 (8)、式 (9) 整理得到电流、电压的 FDTD 迭代公式为

$$V_{i,k}^{n+1} = \left(\frac{C_{ij}}{\Delta t} + \frac{G_{ij}}{2} \right)^{-1} \left[\frac{I_{i,k}^n - I_{i,k+1}^n}{\Delta x} + \left(\frac{C_{ij}}{\Delta t} - \frac{G_{ij}}{2} \right) V_{i,k}^n \right] \quad (10)$$

式中， $k=1,2,3,\dots,k_{\max}$ ； $n=0,1,2,\dots,N_{\max}$ 。

$$I_{i,k}^{n+1} = \left(\frac{I_{ij}}{\Delta t} + \frac{R_{ij}}{2} \right)^{-1} \left[\frac{V_{si,k}^{n+1} + V_{si,k}^n}{\Delta x} - \frac{V_{i,k+1}^{n+1} - V_{i,k+1}^n}{\Delta x} + \left(\frac{I_{ij}}{\Delta t} - \frac{R_{ij}}{2} \right) I_{i,k}^n \right] \quad (11)$$

式中， $k=2,3,\dots,k_{\max}-1$ ； $n=0,1,2,\dots,N_{\max}$ 。

由式 (8)、式 (9) 可知， $(n+1)\Delta t$ 时刻的散射电压可由 $n\Delta t$ 时刻的散射电压和 $(n+1/2)\Delta t$ 时刻的电流计算出来； $(n+3/2)\Delta t$ 时刻的电流可由 $(n+1)\Delta t$ 、 $n\Delta t$ 时刻的散射电压和 $(n+1/2)\Delta t$ 时刻的电流计算出来。

架空配电线路感应雷过电压的软件开发

基于以上感应雷过电压的算法，运用 Matlab 软件编制计算程序，采用 C++ 与 Matlab 混合编程和

C++程序实现线路计算模型的建立，同时实现模型与Matlab之间消息的传递，软件设计框图如图5所示。

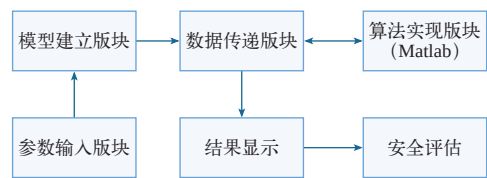


图5 软件设计框图

具体工作流程是：①输入各项线路参数、杆塔绝缘子参数、雷电流参数、雷击点距导线水平距离以及大地电导率等参数；②在模块建立中根据各项参数建立相应仿真模型，并用图形化界面（2D或者3D）显示线路的具体结构模型；③给Matlab中计算矩阵方程等计算模型提供所输入的参数，实现消息传递；④在Matlab中采用基于本发明的算法对传递过来的数学模型进行计算；⑤将结果回传给C++处理程序，在显示模块中直接显示Matlab计算的感应过电压、过电流的波形及大小。

结合10 kV配电线路的特征，由本软件计算三相导线感应过电压。在软件主界面过电压计算项中，输入以下参数：雷电流幅值为60 kA，雷电回击速度为 1.5×10^8 m/s，雷电流最大变化率为50 kA/ μ s，大地电导率为0.01 S/m，土壤介电常数为10，线路长度为1 000 m，衰减系数为430 m^{-1} ，导线半径为0.005 m，雷击点至导线的距离为80 m，A相导线与C相导线距地高度为10 m，B相导线距地高度为12 m。

经软件计算后，得出A相导线的感应雷过电压沿线分布曲线，如图6所示。

由图6可知：在已知线路参数下，此软件可快速准确地计算出非理想大地情况下架空配电线路上的感应雷过电压值；在相同参数条件下，将本软件的计算结果与文献[1]中的感应雷过电压沿线

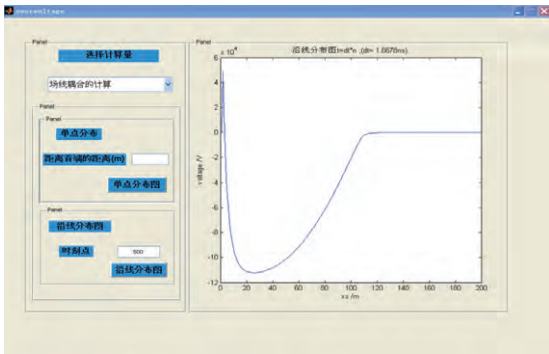


图6 感应雷过电压计算模块

分布波形进行对比，具有较高的相似度。

结束语

建立了计算雷电通道产生的电磁场模型，并考虑大地电导率对水平电场分量的影响；针对三相配电线路，对Agrawal场线耦合模型进行了改进，构建了感应过电压、过电流方程，并用时域有限差分法求解出配电线路上任意点的感应雷电压和电流；在此基础上开发了可以准确、快速计算配电线路感应雷过电压的分析软件。

为了进一步提高软件计算方法的准确性，在以下几个方面进行了深入研究：①定量分析雷电流回击传播速率、雷电通道高度、雷击点至导线的距离、路线损耗与雷电流强度等因素对过电压的影响；②在一些复杂配电线路（如架空线路弯曲、实际线路的孤垂情况下），对时域有限差分计算方法进行完善。

参考文献

[1] Zhu Z Q, Wu L J, Xia Z P. An accurate subdomain model for magnetic field computation in slotted surface- mounted permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (4) : 1100-1115.

(收稿日期：2015-03-04) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告