基于优化模拟电荷法的直流输电线路电场特性计算

于建立1,2,3[†], 张迎栋², 程 龙², 鲁志伟²

(1. 潍坊学院 机械与自动化学院,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:为了提高模拟电荷法计算电场的精度并降低其计算复杂度,采用黄金分割法对模拟电荷法进行优化,提出 了一种精度高且易实现的模拟电荷设置方法.应用该模拟电荷法计算了直流输电线路导线表面电场,采用"化曲为 直"法绘制了电场线轨迹.在此基础上,基于通量线法对比分析了分裂导线表面最大场强在不同取值方法下求解合 成电场和离子流密度时带来的计算结果差异.结果表明:此优化模拟电荷法计算电场精度高,并能随导线参数的变 化灵活调整模拟电荷的设置;"化曲为直"法绘制电场线轨迹,可避免地面电场水平分量为0时微分方程结果不收敛 的问题;用分裂子导线表面最大场强的平均值与其中最大值所得合成电场和离子流密度的最大值分别相差10%和 30%以上,前者所得结果与实测值更为吻合.研究结果可为输电线路的设计及运维提供理论参考.

关键词:黄金分割法;优化模拟电荷法;分裂导线表面电场;通量线法;合成电场;离子流密度

引用格式:于建立,张迎栋,程龙,等.基于优化模拟电荷法的直流输电线路电场特性计算.控制理论与应用,2022, 39(3):469-479

DOI: 10.7641/CTA.2021.10648

Calculation of electric field characteristics of direct current transmission lines based on optimized charge simulation method

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

(1. School of Mechanical and Automation, 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: The charge simulation method was optimized using the golden ratio to increase its accuracy and reduce its computational complexity. Hence, a more precise simulation charge setting method that is easier to realize was put forward. The electric field on the surface of the direct current transmission line was calculated by using such simulation charge setting method, and the track of the electric field line was plotted by "turning curve into straight". Based on this and according to the flux tracing method, a contrastive analysis was carried out on the differences of computation results of ground total electric field and ion current density when the maximum field intensity on the surface of the divided conductor was acquired in different ways. The results show that this method has high accuracy in calculating electric field, and can flexibly adjust the setting of simulated charge with the change of wire parameters. The method of "turning curve into straight" can avoid the problem that the result of differential equation does not converge when the horizontal component of ground electric field is zero. The difference between the average value of the maximum electric field intensity on the surface of the splitter wire and the maximum value of the maximum electric field and ion current density is more than 10% and 30% respectively. The former result is more consistent with the measured value. The research results can provide a theoretical reference for the design and operation of transmission lines.

Key words: golden ratio; optimized simulated charge method; surface electric field intensity of bundled conductors; flux tracing method; ground total electric field; ion current density

Citation: YU Jianli, ZHANG Yingdong, CHENG Long, et al. Calculation of electric field characteristics of direct current transmission lines based on optimized charge simulation method. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(3): 469 – 479

收稿日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-10-26.

[†]通信作者. E-mail: yu_jianli@foxmail.com; Tel.: +86 13843225264. 本文责任编委: 张潮海.

1 引言

超高压直流输电线路的电场特性计算是分析电磁 环境的基础^[1],其对输电线路的设计及运维具有重要 作用.直流输电线路的电场特性计算,主要针对导线 表面电场、合成电场及离子流密度.

国内外对于导线表面电场的计算,主要有马克特 -门格尔法[2]、逐步镜像法[3]、有限元法[4]和模拟电荷 法[5-6]等. 马克特--门格尔法是将分裂导线等效为单根 等效导线,研究单根等效导线的电场,此法无法反映 每根分裂子导线表面电场的情况.逐步镜像法和有限 元法计算电场可以达到较高的精度,但逐步镜像法需 设置较多镜像电荷,计算复杂度较高,而有限元法在 材料设置、边界选择及网格剖分等方面复杂度明显较 高. 模拟电荷法(charge simulation method, CSM)因具 有无界性、原理简单、易于编程和实用性强等优点,而 被广泛采用.标准模拟电荷法,通常在各子导线中心 设置1个模拟电荷,其计算精度有限,不能满足工程需 要. 许多学者对模拟电荷法进行了优化, 文献[7]用经 验公式法来确定模拟电荷的位置,计算了不同数量模 拟电荷的子导线表面电场,但没有分析2-5个模拟电 荷的情况,且此方法并不能保证模拟电荷位置的最优. 文献[8]提出自适应模拟电荷法,在子导线内设置1个 模拟电荷,与标准模拟电荷法在子导线中心设置不同, 其位置通过自适应法确定,此法需人为设置精度,由 于1个模拟电荷可控制的精度有限,因此精度设置过 高可能导致无法求解. 文献[9]运用遗传算法和粒子群 算法搜寻子导线内模拟电荷的最优位置,因需设置诸 多参数其程序实现的复杂性较高,且参数设置的随机 性易引起计算偏差.目前,众多专家学者对模拟电荷 法进行了优化,但大多是对模拟电荷位置的优化,而 模拟电荷数量的确定往往取决于研究人员自身的经 验及其对场域的分析,因人而异的分析手段及经验难 免会增加许多不必要的计算量.

对于合成电场和离子流密度的计算,主要有通量 线法^[10]、迭代特征线法^[11]、上流有限元法^[12]和有限 差分法^[13]等方法.其中通量线法基于Deutsch假设,因 其简单高效,且能较准确预测地面合成电场和离子流 密度^[11],而被广泛采用.导线表面最大场强是通量线 法计算合成电场和离子流密度的一个参数,对于分裂 导线表面最大场强,通常有两种取值方法,分别是选 取所有子导线表面最大场强的平均值和其中最大值 作为分裂导线表面最大场强.而对于这两种不同取值 方法下求解合成电场和离子流密度时带来的计算结 果差异很少被讨论.

针对该现状,本文将一维黄金分割法(golden ratio, GR)扩展到二维,并对模拟电荷法进行优化,研究子导 线内设置多个模拟电荷的情况.此优化模拟电荷法能 够在保证较高计算精度的同时降低计算复杂度.应用 该优化模拟电荷法(golden ratio charge simulation method, GRCSM)计算了分裂导线表面最大场强,并与 COMSOL仿真结果进行比较,验证了GRCSM计算电 场的准确性.此外,通过GRCSM计算了导线表面电 场,采用"化曲为直"法绘制了电场线轨迹.在此基础 上,基于通量线法对比分析了用分裂子导线表面最大 场强的平均值和其中最大值求解合成电场和离子流 密度的情况,并与文献[14]中的实测值进行了比较.研 究结果有利于深入了解直流输电线路分裂导线表面 电场、地面电场及离子流密度的分布特性,可为输电 线路的设计及运维提供理论参考.

2 优化模拟电荷法

2.1 模拟电荷法

在导体内部设置若干个离散化的电荷(即模拟电荷),以大地为参考点,设置镜像电荷,然后根据导体 电极表面的几何形状,在电极表面设置与模拟电荷数 量相等的匹配点,建立如式(1)所示的模拟电荷线性代 数方程组.

由式(1)可得到模拟电荷的电荷值,然后在导体电极表面选取校验点,校验点一般在两个匹配点之间选择.按式(2)计算校验点电位,当校验点电位满足所需精度时,即当模拟电荷在导体边界产生的电位满足给定的边界条件时,便可用其等效代替导体电极表面连续分布的电荷,并用这些电荷的解析公式来计算被求解场域内任一点的电场强度^[15].

$$\varphi_a = P_{a1}Q_1 + P_{a2}Q_2 + \dots + P_{an}Q_n, \qquad (1)$$

$$\varphi_b = P_{b1}Q_1 + P_{b2}Q_2 + \dots + P_{bn}Q_n, \qquad (2)$$

其中: φ_a , φ_b 分别为第a个匹配点和第b个校验点的电 位; $P_{an}(P_{bn})$ 为第n个模拟电荷和镜像电荷在第a个匹 配点(第b个校验点)上产生的电位,不同类型的模拟电 荷计算式不同; Q_n 为第n个模拟电荷的电荷值(或电 荷密度).

2.2 黄金分割法

黄金分割法在一维寻优问题的应用中效果较好且 编程较为简单^[16].其基本原理是给定最优解所在的寻 优区间及收敛精度,根据式(3)-(4)选取区间内的两个 初始试探点*p*₁和*p*₂.寻优过程中通过比较试探点的目 标函数值来不断缩小搜索区间,并通过式(3)-(4)更新 试探点,当搜索区间缩小到给定的收敛精度,则迭代 结束^[17].

$$p_1 = b - 0.618(b - a), \tag{3}$$

$$p_2 = a + 0.618(b - a), \tag{4}$$

其中a, b分别为寻优区间的下限和上限.

以计算如图1所示函数的极小值为例,说明搜索区间的收缩方法.

如图1(a)所示, 若p1点函数值比p2点大, 极小点必

471

然在区间[p_1 , b], 那么令 $p_1 = a$, 则产生了新的区间[a, b]. 同理, 如图1(b)所示, 若 p_2 点函数值比 p_1 点大, 极小 点必然在区间[a, p_2], 那么令 $p_2 = b$, 则产生了新的区 间[a, b]. 到此区间缩短一次, 然后再根据式(3)–(4)选 择新的试探点, 继续比较函数值来缩小寻优区间, 直 至区间缩小到给定的收敛精度 ε , 即 $b - a < \varepsilon$ 时, 极小 值点为(b + a)/2.



2.3 模拟电荷优化设置

以如图2所示的±500 kV直流四分裂输电线路为 计算模型,模拟电荷采用无限长直线电荷,研究子导 线内设置多根模拟电荷的情况,导线参数如表1所示.



图 2 输电线路计算平面 Fig. 2 Calculation plane of transmission line

表	1	导线参数
Table 1	W	/ire parameters

导线参数	数值
型号	4 × LGJ-720/50
子导线外径/mm	36.23
极间距/m	14
分裂间距/m	0.45
对地高度/m	16.5
运行电压/kV	±500

当子导线内设置2根模拟电荷时,模拟电荷分别水 平和垂直排列在子导线内的同心圆上.子导线内设置 大于2根模拟电荷时,模拟电荷设置在子导线内同心 圆的内接正多边形顶点处.以图3所示的子导线内设 置3根模拟电荷为例,子导线半径为r,其同心圆半径 为r_s,模拟电荷设置在该同心圆内接正三角形的顶点 处.匹配点对应于模拟电荷的位置设置在子导线表面, 其数量与模拟电荷一致.校验点一般在匹配点之间设 置,校验点的数量可以多于匹配点,鉴于本文需要比 较校验点与匹配点的电位相对误差,故此在匹配点之 间设置与其数量相等的校验点.





由此可见,子导线内不同数量模拟电荷的最优分 布可以转换为在子导线内部搜寻最优同心圆的问题, 即若已知模拟电荷分布的最优同心圆半径,则可确定 模拟电荷的分布.文献[7]和文献[9]均采用在子导线 内同心圆周上设置模拟电荷的方法,最终目的都是搜 寻模拟电荷分布的最优同心圆,不同的是前者采用经 验公式法后者采用了遗传算法.经验公式法不能保证 位置最优,且不适用于模拟电荷数量为2~5的情况. 遗传算法搜索最优圆周的半径时因需设置诸多参数 致使其复杂性较高,且参数设置的随机性易引起计算 偏差.本文采用黄金分割法优化模拟电荷,既消除了 经验公式法的局限性又无需设置任何参数,具体优化 过程如下文所示.

GRCSM优化过程:

1) 模拟电荷数量初始值为2.

2) 定义*M* = *r*_s/*r* (0 < *M* < 1), 并以此为优化 变量. 为方便, 分别将*M*的初始上限和下限记为*a*和*b*. 因此, 最优*M*值位于区间(*a*, *b*)内, 最优同心圆位于半 径为*br*的圆内.

3) 按黄金分割原则确定两个初始M值: M₁ = b
 - 0.618(b-a), M₂ = a + 0.618(b-a), 如此可确
 定如图4所示的半径分别为M₁r和M₂r两个初始同心
 圆, 模拟电荷按前文所述原则分布在同心圆上.

4) 获取镜像电荷、匹配点和校验点的位置及匹配

点电位列向量 $V_{\rm m}$,分别列写匹配点和校验点的电位 系数矩阵 $P_{\rm m}$, $P_{\rm c}$.按式(5)计算模拟线电荷密度列向 量 τ ,然后按式(6)计算校验点电位列向量 $V_{\rm c}^{[9]}$.

$$\boldsymbol{\tau} = P_{\rm m}^{-1} \boldsymbol{V}_{\rm m}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{V}_{\rm c} = P_{\rm c} \boldsymbol{\tau}, \tag{6}$$

其中电位系数矩阵P_m和P_c中的元素P_{ij}均采用下式 进行计算:

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \ln \frac{(x_i - x'_j)^2 + (y_i - y'_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (7)$$

其中: ε_0 为介电常数, F/m; x_i , y_i 为子导线表面匹配点 或校验点的横纵坐标; x_j , y_j , x'_j 和 y'_j 分别为第j根模 拟电荷的横纵坐标、镜像电荷横纵坐标.

5) 以校验点与匹配点的电位平均相对误差构造 目标函数^[9]:

min fitness =
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{V_{ci} - V_{mi}}{V_{mi}} \right|}{n},$$
 (8)

其中:n为校验点个数; V_{ci} 为通过模拟电荷法计算的 第i个校验点电位,kV; V_{mi} 为第i个匹配点电位,kV.

6) 比较模拟电荷分布在两个同心圆上时的目标 函数值, 若fitness (M_1) < fitness (M_2) , 最优M值一定 位于区间 (a, M_2) ,即最优同心圆位于半径为 M_2r 的 同心圆内,如图4(a)所示. 令 $M_2 = b$,则产生了新的区 间(a,b),同时新的寻优空间为半径为br的同心圆内; 同理, 若fitness (M_1) > fitness (M_2) , 最优*M*值一定位 于区间 (M_1, b) ,即最优同心圆位于半径为 M_1r 的同心 圆和半径为br的同心圆组成的环内,如图4(b)所示.令 $M_1 = a$,则产生了新的区间(a, b),同时新的寻优空间 为半径为ar和br的同心圆所组成的圆环内.至此M值 所在区间和寻优空间均缩小一次,如图4所示,灰色区 域被排除掉. 然后回到步骤3), 如此循环, 不断缩小M 所在区间和寻优空间,当M所在区间或寻优空间缩小 到给定的收敛精度(本文收敛精度 ε 取10⁻⁵)时,即当b-a < 10⁻⁵时,可得当前模拟电荷数量下,使目标函 数值最小的最优M值.最优M值为(b+a)/2,最优同 心圆半径为(b+a)r/2.

7) 判断模拟电荷位置和精度是否满足要求,即模 拟电荷位置不能过于靠近子导线中心,过于靠近子导 线中心,容易引起电位系数矩阵"病态",影响计算精 度^[7].同时,电位误差应以满足工程需要为前提,即电 位误差应小于10^{-3[7]},以本文±500 kV输电线路为 例,由模拟电荷带来的电位误差应小于0.5 kV.若不满 足则模拟电荷数量加1,回到步骤2)重新循环;若满足 则优化结束.



Fig. 4 Initial concentric circles determined by golden ratio

2.4 电场强度和电位

获取满足要求的模拟电荷设置方法后,在每根子 导线计算平面所在圆周每隔1°取一个坐标点,然后在 输电线路下的计算区域,以两极线中间为起始位置, 在左右各50m的范围内,每隔1m取一个坐标点,按式 (9)-(10)分别计算坐标点处的场强和电位^[18].

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^n \tau_j [\frac{(x-x_j)}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - \frac{(x-x_j')}{(x-x_j')^2 + (y-y_j')^2}], \\ E_y = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^n \tau_j [\frac{(y-y_j)}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - \frac{(y-y_j')}{(x-x_j')^2 + (y-y_j')^2}], \\ E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \end{cases}$$
(9)

$$\varphi_i = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{j=1}^n \tau_j \ln \frac{\sqrt{(x-x_j')^2 + (y-y_j')^2}}{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}, \quad (10)$$

其中: n为模拟电荷数; x, y为子导线表面某点的坐标 (或输电线路下计算区域内某点的坐标); x_j, y_j, x'_j, y'_j和τ_j分别为第j根模拟电荷的横纵坐标、镜像电荷 横纵坐标以及模拟电荷线密度.

2.5 电场线轨迹方程

空间中任一点B(x, y),按式(9)分别计算该点在x和y方向上的标称电场 E_x 和 E_y ,则描述电场线轨迹的 微分方程为^[19]

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{E_y}{E_x} = f(x, y). \tag{11}$$

*B*₀(*x*₀, *y*₀)可设置为式(11)的初始条件,将*B*₀点作 为起始坐标,运用欧拉法或龙格库塔法求解微分方程, 可得到沿电力线方向的一系列坐标点.通过公式(9)– (10)可求得这些坐标点的标称场强及电位值.

需要注意的是,当计算地面场强时,由于*E*_x为0,此时用欧拉法或龙格库塔法解式(11)的微分方程,将 会出现结果不收敛的问题.为解决这一问题,本文采 用"化曲为直"的方法计算电场线轨迹.图5为输电线 路空间电场中任一条电场线.





rig. 5 Any electric field line in space electric field of transmission line

如图5所示,已知电场线上某点坐标为P(x,y), Q(x₁,y₁)为电场线上距离P点足够近的一点,采用 "化曲为直"将PQ用直线代替,则Q点坐标可表示为

$$\begin{cases} x_1 = x + \Delta x = x + \Delta ld \sin \alpha, \\ y_1 = y + \Delta y = y + \Delta ld \cos \alpha, \end{cases}$$
(12)

其中 Δl 为PQ两点的距离,即坐标点迭代步长,文中 取0.01;d为方向系数,当PQ方向与电场线同向取1, 反向取-1.

式(12)中的 α 可用P点合成场强E, x方向场强 E_x 和y方向场强 E_y 表示.即

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{E_x}{E},\\ \cos \alpha = \frac{E_y}{E}. \end{cases}$$
(13)

在导线表面选择初始点P₀, 按式(12)–(13)确定下 一个点P₁的坐标, 再以P₁坐标和式(12)–(13)确定下一 个点, 如此迭代, 直至电场线到达地面或另一极线的 子导线时, 则绘制结束.

2.6 合成电场和离子流密度

基于Deutsch假设,合成电场与标称电场方向相同 而幅值不同^[11],以式(14)表示两者关系

$$E_{\rm s} = AE, \tag{14}$$

其中: A为标量函数, E为标称场强.

离子流密度按式(15)计算

$$J = K\rho E_{\rm s},\tag{15}$$

其中K为离子迁移率^[20],本文 K_+ 取1.5×10⁻⁴ m²/(V·s), K_- 取1.7×10⁻⁴ m²/(V·s); ρ 为计算点的电荷 密度.

由式(14)可知, 计算合成场强的关键是求解标量 函数*A*, 可采用式(16)计算^[21].

$$\begin{cases} A^{2} = A_{e}^{2} + \frac{2\rho_{e}A_{e}}{\varepsilon_{0}} \int_{\varphi_{i}}^{U} \frac{1}{E^{2}} d\varphi, \\ \rho_{m}(i) = \frac{\int_{0}^{U} \int_{\varphi_{i}}^{U} \frac{\rho}{E^{2}} d\eta d\varphi}{\int_{0}^{U} \int_{\varphi_{i}}^{U} \frac{1}{E^{2}} d\eta d\varphi}, \\ \frac{1}{\rho^{2}} = \frac{1}{\rho_{e}^{2}} + \frac{2}{\varepsilon_{0}\rho_{e}A_{e}} \int_{\varphi_{i}}^{U} \frac{1}{E^{2}} d\varphi, \end{cases}$$
(16)

其中: A_{e} 为导线表面A值; φ_{i} 为计算点的电位; U为导 线运行电压; ρ_{e} 为导线表面电荷密度; η, φ 为沿电场线 的积分变量; ρ_{m} 为通过计算点的电场线上的平均电荷 密度.

由式(14)知,导线表面A值按下式计算:

$$A_{\rm e} = |\frac{E_{\rm on}}{E_{\rm max}}|,\tag{17}$$

其中: *E*_{max}为导线表面最大场强, 文中分别取分裂子 导线表面最大场强的平均值和其中最大值; *E*_{on}为导 线起晕场强.

由Peek公式^[22]可得正、负极线起晕场强计算公式

$$\begin{cases} E_{\rm on+} = 33.7m\delta(1 + \frac{0.24}{\sqrt{r\delta}}), \\ E_{\rm on-} = 31m\delta(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r\delta}}), \end{cases}$$
(18)

其中:m为导线表面粗糙系数,一般在0.4~0.6之间取 值^[23],文中m取0.5;r为导线等效半径,cm; δ 为空气 相对密度系数.

对于导线表面场强的边界条件,采用Kaptzov假 设^[24],即线路发生电晕后,其表面场强维持在起晕场 强.

导线起晕电压

$$U_0 = A_{\rm e}U,\tag{19}$$

任一条电场线上所有点的平均电荷密度可表示为

$$\rho_{\rm m_0} = \frac{\varepsilon_0 (U - U_0)}{\int_0^U \int_{\varphi_i}^U \frac{1}{E^2} \,\mathrm{d}\eta \,\mathrm{d}\varphi}.$$
 (20)

ρ_e可通过式(21)迭代计算, 当满足式(22)所给精度 条件时迭代终止.

$$\rho_{\rm e}(i) = \rho_{\rm e}(i+1) + \frac{\rho_{\rm m_0} - \rho_{\rm m}(i-1)}{\rho_{\rm m}(i-1) - \rho_{\rm m}(i-2)} \times \\
[\rho_{\rm e}(i-1) - \rho_{\rm e}(i-2)],$$
(21)

$$\left|\frac{\rho_{\rm m}(i) - \rho_{\rm m_0}}{\rho_{\rm m_0}}\right| < 0.001.$$
⁽²²⁾

将ρ_e代入式(16)式可得计算点的A和ρ值.最后, 根据式(14)和式(15)可得计算点的合成电场和离子流 密度.

3 计算结果比较

3.1 优化结果

GRCSM只需分割24次左右便可寻得最优解,优化 结果如表2所示.由表2可知,各子导线中心设置1根模 拟电荷时,校验点与匹配点的电位平均相对误差可高 达0.38%,以本文±500 kV输电线路为例,此时由模拟 电荷带来的电位误差高达1.9 kV,不能满足工程需要; 子导线内设置2根水平和垂直排列的模拟电荷,寻优 结果均为M取0.24时最佳,此时由模拟电荷带来的电 位误差高达1.85 kV,同样不能满足工程需要;子导线 内设置3根和4根模拟电荷时,虽然可以达到较高的计 算精度,但寻优结果M都过小,即模拟电荷过于靠近 子导线中心,容易使电位系数矩阵"病态",此时可以 认为模拟电荷越靠近子导线中心计算精度越高;子导 线内设置5根模拟电荷,寻优结果M取0.039时最佳, 校验点与匹配点电位平均相对误差约为0.0001%,此 时由模拟电荷带来的电位误差仅为0.5 V.

Table 2 GRCSM optimization results 模拟电荷数量 排列方式 最优M值 Min fitness 电位系数矩阵阶数 GRCSM运行时间/s 3.80×10^{-3} 1 8 3.70×10^{-3} 水平 0.24 16 0.005 2 垂直 0.24 3.70×10^{-3} 16 0.007 2.31×10^{-5} 正三角形 8.06×10^{-5} 0.016 3 24 4 正四边形 3.98×10^{-5} 2.01×10^{-6} 32 0.032 1.135×10^{-6} 5 正五边形 0.039 40 0.052 8.28×10^{-7} 正六边形 0.078 6 0.136 48

表 2 GRCSM优化结果

因此, GRCSM优化结果为子导线内设置5根模拟 电荷, 模拟电荷分布在子导线内的同心圆的内接正五 边形的顶点处, 如图6所示, 其中同心圆半径r_s取 0.039r. 由校验点与匹配点电位平均相对误差可知, 此时已具备较高的计算精度, 完全满足工程需要. 另 外, 笔者计算发现继续增加模拟电荷数对计算精度的 提高非常有限. 由表2可知, 当子导线内设置6个模拟 电荷时, 虽然计算精度进一步提高且收敛速度仍相当 快, 但此时由模拟电荷带来的电位误差较5个模拟电 荷时仅降低0.1 V. 值得注意的是, 此时电位系数矩阵 增加8阶, 尽管这对GRCSM收敛时间影响不大, 但会 明显增加后续电场计算的复杂度, 性价比较低.



Fig. 6 Schematic diagram of optimized distribution of simulated charge

3.2 电位比较

GRCSM计算的所有校验点电位值以及电位标准 值如图7所示.以匹配点电位(电位标准值)为基准, GRCSM计算的所有校验点的相对误差如图8所示. 图7表明, GRCSM计算的所有校验点电位误差均 在2 V以内. 图8表明, GRCSM计算的校验点的电位相 对误差在0.00035%以内, 平均相对误差约为0.0001%. 由此可见, GRCSM的计算精度较高.

3.3 电场比较

采用第2.3节所述计算模型,分别运用GRCSM和 COMSOL软件计算分裂导线表面场强.其中,COM-SOL中域内的材料参数如表3所示.

表 3 材料参数					
	Table 3 Material parameters				
	材料	相对介电常数	域		
	Copper	1	导线		
	Air	1	其他域		

COMSOL中关于无穷远边界的处理, 文献[25]中 对于有限元法计算输电线路离子流场中人工边界的 选取中, 建议双极性线路求解区域长和宽分别设定为 (7~11) H (H为输电线路最低点对地距离)和(3.5~ 5.5) H. 因此, 本文选取长和宽分别为9 H和4 H的矩形 求解域.

COMSOL中网格的剖分选择用户控制网格,采用 "自由剖分三角形网格"细化分裂导线区域的网格. 其中整体网格和分裂导线网格如图9所示.计算模型 中输电线路关于线路中心对称,忽略导线起晕后空间 离子流场的分布,那么理论上两极线中心线上的电位 为0.为检验COMSOL的计算误差,计算极线中心线 上的电位,计算结果如图10所示.



Fig. 7 Check point potential diagram

距地高度 / m



Fig. 8 Diagram of relative error between check point and matching point potential

由图10可知,极线中心线上的最大电位误差为 4.49 V,所有电位误差在-3.38~4.49 V之间,误差在 允许范围内.因此,可以用COMSOL的电场计算结果 来评估GRCSM计算电场的准确性.COMSOL和GR-CSM计算的分裂导线表面场强如图11所示.由于正负 极线的对称性,以负极线为例,两种计算方法的各子 导线表面最大场强如表4所示.







由图11可知, GRCSM和COMSOL计算的各子导 线表面一周的场强吻合度较高.由表4可知,若以 COMSOL计算结果为基准, GRCSM计算的子导线表 面最大场强最大误差仅为0.03 kV/cm.由此可见, GRCSM计算电场具有较高准确性.



第 39 卷



图 10 极线中心线上的电位计算结果

Fig. 10 Calculation results of potential on the center line of polar line

综上可见,采用黄金分割法对模拟电荷法进行优 化,无需像其他智能算法和有限元法一样进行过多的 参数设置. GRCSM在保证较高计算精度的基础上,不 仅降低了计算复杂性,同时减少了因参数设置的随机 性而引起的计算偏差.

表 4 不同计算方法的负极性子导线表面最大场强 Table 4 Maximum field strength on the surface of negative electrode sub conductor with differ-

ent calculation methods 负极性子导线序号 不同 场强种类 计算方法 1 2 3 4 最大场强 COMSOL 20.14 19.47 19.52 20.18 kV/cm 最大场强 GRCSM 20.14 19.44 19.50 20.19 kV/cm



图 11 不同计算方法的分裂导线表面一周场强线图 Fig. 11 Line diagram of one cycle field intensity on the surface of split conductor with different calculation methods

4 计算与分析

4.1 计算参数说明

采用文中所述方法,对±500 kV江城直流输电线路导线表面电场和地面电场进行计算分析,其计算模型与第2.3节所述一致,仅线路参数不同.其中,江城直流输电线路导线参数如表5所示.

当采用表5所示导线参数时,GRCSM寻优结果为 5个模拟电荷分布在半径为0.035r的子导线同心圆的 正五边形上,这与采用文中第2.3节计算模型和表1导 线参数的寻优结果相差不大.计算表明,分裂间距、子 导线外径和分裂数对寻优结果影响较大,而极间距、 导线对地高度、运行电压对寻优结果影响很小.由此 可见,由于表5导线参数中分裂间距的微小变化,才导 致寻优结果略微不同.此外,对于不同的导线参数, GRCSM的优化结果不同,即GRCSM能够随导线参数 的变化灵活调整模拟电荷的数量及位置.相比于 ±500 kV直流输电线路,±800 kV直流输电线路通常 采用六分裂导线,而更高等级的±1100 kV直流输电 线路通常采用八分裂导线,电压等级的改变对于计算 的影响仅体现在导线位置和参数发生变化.对于同塔 双回直流输电线路和交流输电线路,同样可以采用本 文方法确定模拟电荷位置,但是在电场求解时前者要 考虑导线排列方式的影响,后者不仅要考虑导线排列

适用于不同电压等级的输电线路电场的求解.

表:	5 导线参数
Table 5	Wire parameters
导线参数	数值

	>> •	
型号	4 × LGJ-720/50	
子导线外径/mm	36.23	
极间距/m	16	
分裂间距/m	0.50	
对地高度/m	29.25	
运行电压/kV	± 489	

4.2 导线表面电场的计算

各子导线表面电场的计算结果如图12所示.由于 极线间距远大于子导线半径,为增强图像的可观性, 图12(a)和(b)分别展示了正负极线的子导线表面二维 电场分布情况.





由图12可知,正负极线的子导线表面电场分布关 于线路中心对称.受其他子导线和大地的共同作用, 各子导线表面场强分布很不均匀,最高与最低场强之

差可达5 kV/cm: 对比发现. 同一水平线上的子导线最 大场强随着与线路中心距离减小而明显增强;同一垂 直线上的子导线最大场强随着与地面距离减小而略 有增强.此外,每根子导线的最大表面电场均出现于 背向4根子导线中心的位置,最小表面电场均出现于 面向4根子导线中心的位置.

4.3 地面电场及离子流密度计算

图13所示为电场线轨迹图,图14和图15所示为地 面标称电场、合成电场及离子流密度的计算值以及文 献[14]中对江城直流合成电场、离子流密度的实测值.





由图13可知,采用"化曲为直"法可以完整画出电 力线轨迹.此法无需求解微分方程,也就避免了地面 电场水平分量为0时微分方程结果不收敛的问题.

由图14-15可知,合成电场和离子流密度实测值与 计算值相比分散性较高,这是由于Deutsch假设不考 虑风的影响,且带电离子沿电场线轨迹运动.而实际 中在风的作用下,带电离子的运动轨迹可能会偏离电场线,即离子流场会发生变化,从而使合成电场发生变化.采用分裂子导线表面最大场强的平均值与其中最大值计算得到的地面合成电场的最大值分别为7.25 kV/m(正极)、-8.64 kV/m(负极)和8.04(正极)、-9.65 kV/m(负极),相差14.04%和11.69%;所得的离子流密度最大值分别为1.80 nA/m²(正极)、-2.12 nA/m²(负极)和2.43 nA/m²(正极)、-2.80 nA/m²(负极),相差35%和32.08%.



对比图14-15中合成电场和离子流密度的计算值 与实测值可知,采用分裂子导线表面最大场强所得两 个参量的计算结果与实测值的吻合度明显高于采用 最大值.因此,采用分裂子导线表面最大场强的平均 值计算的地面合成电场和离子流密度比用其中最大 值计算的更符合实际.同样也表明,在不考虑风速的 影响时,基于Deutsch假设的通量线法可以基本反映 输电线路合成电场和离子流密度的实际情况.

5 结论

本文将一维黄金分割法扩展到二维,对模拟电荷 法进行了优化,并计算了输电线路分裂子导线表面电 场、合成电场和离子流密度,得出以下结论:

 1) 黄金分割优化模拟电荷法实现过程简单且具 有较高的计算精度,可随导线参数的变化灵活调整模 拟电荷的数量及位置.此方法同样适用于导线分裂数 更多的特高压直流输电线路电场的求解;

2) 采用"化曲为直"法绘制电场线轨迹,不必求 解微分方程,从而避免了微分方程因地面电场水平分 量为0而结果不收敛的问题;

3) 用黄金分割优化模拟电荷法计算每根子导线 表面最大场强,分别取其平均值与其中最大值计算地 面合成电场和离子流密度.结果表明,前者计算的地 面合成电场和离子流密度与实测值更吻合.

参考文献:

- WANG Guoli, LI Min, LIU Lei, et al. Electromagnetic environment characteristics of UHVDC transmission line in high altitude area. *High Voltage Engineering*, 2018, 48(1): 264 – 274. (王国利, 李敏, 刘磊, 等. 高海拔特高压直流线路电磁环境特性研究. 高电压技术, 2018, 48(1): 264 – 274.)
- [2] GAN Yunliang, LU Tiebing. Calculation of surface electric field along ±800 kV DC transmission lines with bundled conductors. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(6): 44 – 46. (甘云良, 卢铁兵. ±800 kV直流输电线路分裂导线表面电场强度计 算. 南方电网技术, 2009, 3(6): 44 – 46.)
- [3] ABDEL-SALAM M, EI-MOHANDES M T H, EI-KISHKY H. Electric field around parallel DC and multi-phase AC transmission lines. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1990, 25(6): 1145 – 1152.
- [4] XIE Gonghao, FU Wanzhang, HE Wangling, et al. Calculation and research of audible noise of AC transmission lines(I) — threedimensional distribution. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2990 – 2998.

(谢龚浩, 付万璋, 何旺龄, 等. 交流输电线路可听噪声计算分析(I) ---3维分布. 高电压技术, 2019, 45(9): 2990 - 2998.)

- [5] WU Qi, LIU Xiaoming, ZOU Jiyan, et al. Numerical solution and accuracy validation of electric field using response surface methodology and geometric feature charge simulation method. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 2060 – 2066. (吴其,刘晓明, 邹积岩,等. 采用响应面法—几何特征模拟电荷法的 电场数值求解及精度验证. 高电压技术, 2018, 44(6): 2060 – 2066.)
- [6] VAHIDI B, TAYEBIFAR H, ALBORZI M J. Application of charge simulation method for investigation of effects of the trees on lightning protection of structures. *Journal of Electrostatics*, 2008, 66(3/4): 229 – 233.
- [7] WANG Zhenxue, MA Li, YE Huiying, et al. Optimization and application of charge simulation method for UHVDC transmission lines. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(1): 15 20.
 (王珍雪,马力,叶会英,等. 模拟电荷法在UHVDC输电线路中的优化及应用. 高压电器, 2016, 52(1): 15 20.)
- [8] SUN Caihua, ZONG Wei, LI Shiqiong, et al. A more accurate calculation method of surface electric field intensity of bundled conductors. *Power System Technology*, 2006, 30(4): 92 96.
 (孙才华, 宗伟, 李世琼, 等. 一种较准确的分裂导线表面场强计算方法. 电网技术, 2006, 30(4): 92 96.)
- [9] WANG R, TIAN J, WU F, et al. PSO/GA combined with charge simulation method for the electric field under transmission lines in 3D calculation model. *Electronics*, 2019, 8(10): 1 – 18.
- [10] MARUVADA P S, JANISCHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on DC transmission lines: I-unipolar lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 1969, PAS-88(5): 718 – 731.
- [11] QIAO Ji, XU Zhiwei, ZOU Jun, et al. A high-accuracy iterative method of characteristics without Deutsch assumption for calculating ion-flow field of HVDC overhead lines. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(19): 4419 4425.
 (乔骥, 徐志威, 邹军, 等. 一种消除Deutsch假设的高精度迭代特征 线方法求解高压直流输电线路离子流场. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4419 4425.)
- [12] SHEN Nanxuan, ZHANG Yuanhang, XU Peng, et al. Calculation and analysis of ground-level total electric field of HVDC lines in fog based on meteorological data. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7805 – 7815. (申南轩, 张远航, 徐鹏, 等. 基于气象数据的雾天气条件下高压直流

输电线路合成电场计算分析. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7805 – 7815.)

[13] LIU P, DINAVAHI V. Finite-difference relaxation for parallel computation of ionized field of HVDC lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(1): 119 – 129.

- 第3期
- [14] WANG Feng, FAN Jingmin, LI Min, et al. Application of the high precision upstream FEM to calculation of the ionized field of HVD-C transmission line. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(4): 1061 – 1067.

(汪沨,范竞敏,李敏,等.高精度上流有限元法在特高压直流输电线路离子流场计算中的应用.高电压技术,2016,42(4):1061-1067.)

- [15] HOFFMANN J N, PULINO P. New developments on the combined application of charge simulation and numerical methods for the computation of electric fields. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1995, 10(2): 1105 – 1111.
- [16] LIU Y T, YE N H, HU X L, et al. An improved fatigue damage model based on the virtual load spectrum of golden section method. *Fatigue* & *Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(8): 2101 – 2118.
- [17] RANJAN D, BALARAM K. Estimation of internal heat generation in a fin involving all modes of heat transfer using golden section search method. *Heat Transfer Engineering*, 2017, 39(1): 58 – 71.
- [18] RONG Jiangang, WU Xiong, LU Yao. Analysis on calculate error of conductor surface voltage gradient. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(11): 2789 2796.
 (容健刚, 邬雄, 路遥. 导线表面电位梯度计算的误差分析. 高电压技术, 2012, 38(11): 2789 2796.)
- [19] LIN Xiuli, XU Xinhua, WANG Dahui. Calcuation of electric field intensity of high voltage direct current transmission line. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 41(8): 1422 – 1426.
 (林秀丽, 徐新华, 汪大翬. 高压直流输电线路电场强度计算方法. 浙 江大学学报, 2007, 41(8): 1422 – 1426.)
- [20] TIAN Yi, HUANG Xinbo, TIAN Wenchao, et al. Time-domain mixed-hybrid finite element method for analyzing ion-flow field of HVDC and HVAC transmission lines. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(10): 85 – 94.

(田毅,黄新波,田文超,等.交直流输电线路离子流场的时域混合有限元法.电机与控制学报,2019,23(10):85-94.)

- [21] CUI Xiang, ZHOU Xiangxian, LU Tiebing. Recent progress in the calculation methods of ion flow field of HVDC transmission lines. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(36): 130 141.
 (崔翔,周象贤,卢铁兵. 高压直流输电线路离子流场计算方法研究 进展. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 130 141.)
- [22] PEEK F W. The law of corona and the dielectric strength of air-IV the mechanism of corona formation and loss. *IEEE Transactions on the American Institute of Electrical Engineer*, 2009, XLVI(6): 1009 – 1024.
- [23] YANG Yong, LU Jiayu, JU Yong. Contrast and analysis on total electric field at ground level under HVDC transmission lines by deutsch assumption-based method and finite element method. *Power System Technology*, 2013, 37(2): 526 532.
 (杨勇, 陆家榆, 鞠勇. 基于Deutsch假设法和有限元法的高压直流线路地面合成电场对比分析. 电网技术, 2013, 37(2): 526 532.)
- [24] JANISCHEWSKYJ W, GELA G. Finite element solution for electric fields of coronating DC transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, 98(3): 1000 – 1012.
- [25] ALHAMOUZ Z M. Adaptive finite element ballooning analysis of bipolar ionized fields. *IEEE Transactions on Industry Aplications*, 1996, 32(6): 1266 – 1277.

作者简介:

于建立博士,副教授,研究方向为电力系统过电压及其防护, E-mail: yu_jianli@foxmail.com;

张迎栋 硕士研究生,研究方向为输电线路雷电防护, E-mail:

1216646528@qq.com;

程 龙 硕士研究生,研究方向为输电线路雷电防护, E-mail: 1458075939@qq.com;

鲁志伟 博士,教授,研究方向为接地技术、电力电缆运行和电介质材料等, E-mail: lzw@neepu.edu.cn.