

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.005

直流输电线路离子流场有限元计算研究综述

邹岸新, 徐禄文, 籍勇亮, 宫林, 侯兴哲, 吴高林

(国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 直流输电线路在运行中会发生电晕现象,由此产生的离子流场是环境问题关注的焦点。基于有限元的离子流场计算方法由于更符合线路实际情况且计算精度较高,受到了国内外学者的重视。为系统阐述基于该方法的国内外研究成果,并为今后该领域的研究提供有益参考,文中重点分析了现阶段基于有限元的二、三维离子流场计算方法的优缺点,同时还分析了建筑物和人体对离子流场的影响研究现状。通过对比分析认为:基于有限元三维离子流场的计算方法将会在今后的实际工程中发挥重要作用。最后为对直流线路或者交直流混合线路电磁环境进行全面而准确的评估,应当加强地形及天气方面等的影响研究。

关键词: 离子流场;有限元方法;二维;三维

Review of the Researches on Finite Element Calculation of Ion Flow Field for DC Transmission Lines

ZOU Anxin, XU Luwen, JI Yongliang, GONG Lin, HOU Xingzhe, WU Gaolin

(Electric Power Research Institute of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China)

Abstract: DC transmission lines generate corona, resulting in ion flow field. This kind of ion flow field has become one of the focuses in research of environmental problems. The finite element based calculation method of the ion flow field has attracted more and more attention because it accords with actual situation of transmission lines and has higher calculation precision. This paper expounds the corresponding researches both in China and abroad in order to provide a reference for the future research in this domain. In the paper, the advantages and disadvantages of the finite element based two-and three-dimensional calculation methods of ion flow field are analyzed, and the researches on the effects of building and human body on the ion flow field are discussed. Contrastive analysis indicates that the three-dimensional calculation method of ion flow field will play an important role in engineering. In addition, it is suggested that more attentions should be paid to the influences of terrain and weather for comprehensive and accurate assessment of electromagnetic environment for the DC or AC/DC hybrid transmission lines.

Key words: ion flow field; finite element method; two-dimensional; three-dimensional

0 引言

由于直流输电具有线路输电能力强、损耗小、两侧交流不需同步、发生故障时对电网的损失较小,且适合跨区域远距离点对点大功率输电等诸多优点,近年来得到了快速发展,然而,由直流输电线路引发的电磁环境问题受到了人们的广泛关注,必须采取措施加以限制。相对于交流输电线路而言,

直流输电线路产生的电磁环境问题有其自身的特点。在高压交流输电线路运行时,带电离子只在导线周围很小的区域内作往返运动,在相导线之间、相导线与大地之间不存在带电离子。而对于高压直流线路,由于极性固定,在两极导线电晕产生的带电离子中,与导线极性相反的离子被拉向导线,极性相同的离子将被推离导线。这样,在两极导线与大地之间的整个空间将充满带电离子,双极直流输电线路离子流分布示意图见图 1。因而,形成了由导线表面电荷产生的电场和由空间离子产生的电场

的叠加而成合成电场;空间离子在电场力和其他因素的作用下形成了离子流密度。合成电场和离子流密度就是表征直流输电线路电磁环境影响的两个重要参数。

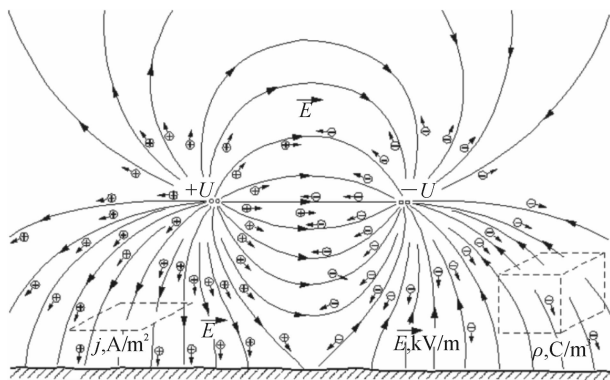


图1 直流输电线路离子流分布

Fig. 1 Ion flow of DC transmission lines

准确计算合成电场和离子流密度对评价直流输电线路电磁环境影响具有非常重要的意义,国内外学者对其进行了广泛深入的研究。目前,工程上的简要计算一般采用基于 Deutecsh 假设的数值计算方法,基本思想是认为空间电荷只影响电场大小而不改变其方向,从而把问题简化为电力线上的一维问题,进而使用数值算法求解^[1],但是该方法的计算精度公认比较低。随着有限元计算方法引入到合成电场和离子流密度的计算之中,其计算精度可以得到较大提高^[2],能更好满足实际工程中输电线路架设条件比较复杂的计算需要。

文中详细介绍了直流输电线路离子流场的主要计算方法,并分析了各计算方法的特点;同时还介绍了直流输电线路离子流场在建筑物及人体周围的分布和相关影响的研究最新情况,并展望了今后研究的重点与方向。

1 离子流场控制方程

直流输电线路离子流场的计算是通过对直流输电线路静电场与离子运动相互耦合的求解来完成。导线电晕产生的正、负离子在空间中除了受电场力作用外,还受到离子迁移、离子扩散和风速等因素的影响。同时,为了减少编制程序的难度,一般都要采用某些假设:导线周围电离层的厚度忽略不计、空间电荷只影响电场的强度、带电离子只受电场力的作用沿着电场线方向运动、正负极的起晕电压相等等。不同学者在进行具体计算时使用的假设不完全一样,但是差异不大。

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho^+ - \rho^-}{\epsilon_0} \\ E_s = -\nabla \varphi \\ J^+ = \rho^+ k^+ E_s + \rho^+ W - D^+ \nabla \rho^+ \\ J^- = \rho^- k^- E_s - \rho^- W - D^- \nabla \rho^- \\ J = J^+ + J^- \\ \nabla \cdot J^+ = -\frac{R \rho^+ \rho^-}{e} \\ \nabla \cdot J^- = \frac{R \rho^+ \rho^-}{e} \\ \nabla \cdot J = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: E_s 为合成电场场强,kV/m; J^+, J^- 分别为正负离子流密度,A/m²; ρ^+, ρ^- 分别为正负离子空间电荷密度,C/m³; k^+, k^- 分别为正负离子的迁移率,m²/(V·s); D^+, D^- 分别为正负离子的扩散系数,m²/s; R 为离子的复合系数; W 为风速矢量(风速方向垂直于线路),m/s; ϵ_0 为真空介电常数,10⁻⁹/(36 π),F/m; e 是基本电子电量,1.602×10⁻¹⁹ C。

2 基于有限元的计算方法研究

2.1 有限元方法基本原理

有限元法以变分原理为基础,把所求物理问题的数学模型一边值问题转化为相应的变分问题,即泛函求极值问题。提出用有限元方法计算直流离子流场为这个领域的研究注入了新的活力。20世纪80年底计算机技术的突飞猛进的发展使得计算机的存储容量和计算速度都大为提高,从而基于有限元的计算方法得到了快速发展。

所有基于有限元方法的离子流场计算方法,必须将控制方程中的泊松方程利用离散剖分的方法进行求解,可以证明:式(1)中的泊松方程: $\nabla^2 \varphi = -(\rho^+ - \rho^-)/\epsilon_0$ 与下列变分问题等价,且有唯一解

$$F(\varphi) = \int_s \left[\epsilon \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \epsilon \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - 2\rho\varphi \right] dx dy = \min. \quad (2)$$

有限元方法适用于有限区域的计算,因此,需要将计算输电线路电场的无限域转化成有限域来考虑。具体的方法是在离导线较远处划出一条假想的边界(即人工边界),这样,导线表面、地面和人工边界所围成的封闭平面区域即为计算区域。因此,解泊松方程所需的边界条件也就是导线表面、地面和人工边界3种边界所须满足的条件。已知条件包括:导线表面电压、地面电压及人工边界电压。

导线表面:

$$\varphi = \pm U (U \text{ 为导线运行电压}). \quad (3)$$

地面: $\varphi=0$ 。(4)

人工边界:假定人工边界离导线足够远,以至空间电荷对该处电场的影响与导线电荷相比可基本忽略,认为在人工边界上的电位是由导线电荷产生的标称电位,由模拟电荷法求得。

$$\varphi=U_{\text{biaoch}} \quad (5)$$

2.2 二维有限元方法计算

2.2.1 一般有限元方法

一般有限元方法的主要思路是:将描述离子流场的控制方程转化为三阶非线性偏微分方程,然后分解为两个等效的泊松方程再进行求解。该方法以空间电位为变量,同时利用有限元方法对泊松方程和电流连续性方程离散化求解,通过迭代求得结果。文[3]利用该方法进行了二维离子流场的求解。他们在国外学者研究的基础上^[2,4]提出了一种空间电荷密度更新公式,通过给出电荷密度初值后,根据电场的计算结果更新空间电荷密度。其更新式为

$$\begin{cases} \rho^{\text{new}}=\rho^{\text{old}}+\delta\rho \\ \delta\rho=\alpha\frac{E_{\text{cal}}-\delta\varphi}{\frac{1}{2}E_c(\varphi_A+\varphi_B)} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: ρ^{new} 为电荷密度更新值; ρ^{old} 为上一迭代步的电荷密度值; E_{cal} 为上一迭代步两场计算所得的导线表面电场强度平均值; E_c 为导线的起晕场强; φ_A 、 φ_B 为两个等效泊松方程的解; α 为待定参数,通过不断尝试取值,能够试到使误差下降最快。

该方法可以较快地解决单极和双极高压直流输电线路的离子流场计算问题。但是不能够考虑风速,这是该方法的缺点之一。对于实际运行的线路,风速对离子流密度的影响较大,要准确计算离子流场的分布且符合实际情况,必须考虑风速的影响。

2.2.2 上流有限元方法

针对迭代过程中的数值不稳定和初值选择难的问题,1981年日本学者Takuma等人提出了一种根据逆流差分原理计算空间电荷密度的有限元计算方法—上流有限元法(upstream FEM),并于1987年对其中电位的求解作了进一步的改进^[5],从而使得在一般的初值条件下,电位和电荷密度都能较好地收敛。这种方法能较好地完成单极和双极直流离子流场的计算。上流有限元法求解空间电荷密度的计算不是一个解大型方程组的过程,而是根据已知条件(导线表面假定的空间电荷密度)由导线表面开始,运用适当的方法从内向外逐步求解,直到最后计算出所有点的电荷密度。该方法舍弃Kaptzov假设,而认为导体表面电荷密度保持不变。

节点*i*的上流元*ijm*判定方法见图2:逆时针转,节点*i*的下一个点定义为*j*,第2个点定义为*m*。向量**b**和**c**分别为向量*mi*和*ji*逆时针旋转90°所得到,若*i*点的空间电荷迁移速度**V**与**-b**和**c**的夹角都小于90°,则该三角元为上流元,符合这个条件的**V**限制在如图2所示的虚线范围内。相应的数学描述见式(7)

$$\begin{cases} b_j V_x + c_j V_y \leq 0 \\ b_m V_x + c_m V_y \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: V_x 、 V_y 为空间电荷在*i*点的*x*和*y*方向的速度; b_j 、 c_j 、 b_m 、 c_m 为向量的节点坐标。

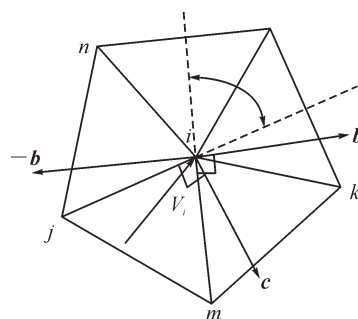


图2 节点*i*的上流元*ijm*判定

Fig. 2 Judgement of the upstream element for *ijm*

近年来,国内学者也对上流有限元法进行了广泛的研究。文[6]用上流有限元法(upstream FEM)求解空间电场,并考虑了风速(0~8 m/s),对单极高压直流输电线路进行了仿真计算。文[7]将模拟电荷法与上流有限元方法相结合对单、双极直流电晕笼中的离子流场进行了仿真计算;另外文[8]对上流有限元方法进行了改进;在利用上流有限元方法计算直流离子流场过程中使用连续边界条件,显著提高计算精度,同时笔者还改进了导线表面电荷密度初始值的计算方法和更新迭代方法,使计算中可以考虑分裂导线的情况。笔者还将改进的上流有限元方法计算了同塔双回和交直流混合线路离子流场的计算,取得了显著的效果^[9-10]。

上流有限元法除了能将风的因素考虑在内,还可以对同塔双回高压直流线路及交直流混合线路的离子流场进行计算。但是该方法针对过大的风速时(强风 10 m/s),不易于收敛,且计算繁琐,同时如果网格剖分不够细也会影响计算结果的精度。该方法舍弃Kaptzov假设,而认为导体表面电荷密度保持不变,具有一定的局限性。

2.2.3 有限元与有限体积混合算法

文[11]提出了用于除尘器内部离子流场的有限元与有限体积混合算法。该方法利用有限元法求解泊松方程、有限体积法求解电流连续性方程,通

过时域计算最终获得稳态计算结果,但是该方法未考虑不同极性电荷间的复合过程。

文[12]首次采用了有限元与有限体积混合算法对高压直流输电线路的离子流场进行了计算,并仿真分析了风速对单极分裂导线的高压直流线路的离子流场分布影响。其仿真分析的风速可达 16 m/s,但是在计算控制容积公共边上的电荷密度时,并没有考虑到该公共边的空间位置,而只是简单的认为公共边上的电荷密度是迎风或背风单元上电荷密度的平均值。因此,该方法在求解电流连续性方程时只有一阶精度,不能达到工程计算中一般要求的二阶精度。

文[13]针对该方法进行了改进,可分析含分裂导线的双极性直流输电线路。在求解泊松方程时,采用边界电场约束方程,提高了导体表面场强的计算精度。该方法对双极性电晕问题的控制方程进行了时间和空间上的离散。在第 i 个控制容积上对面积积分,然后利用散度定理,并在时间上离散,可得

$$\begin{cases} \rho_{i,n+1}^+ = \rho_{i,n}^+ - \Delta t \cdot R \rho_{i,n}^+ \rho_{i,n}^- S_l / e - \frac{\Delta t}{\Omega_i} \sum_{m=1}^{N_i} \rho_{i,m}^+ k^+ E_{i,m} L_{i,m} \\ \rho_{i,n+1}^- = \rho_{i,n}^- - \Delta t \cdot R \rho_{i,n}^+ \rho_{i,n}^- S_l / e + \frac{\Delta t}{\Omega_i} \sum_{m=1}^{N_i} \rho_{i,m}^- k^- E_{i,m} L_{i,m} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $\rho_{i,n+1}^+$ $\rho_{i,n}^+$ $\rho_{i,n+1}^-$ $\rho_{i,n}^-$ 为某一迭代前后时间间隔的空间电荷密度, Ω_i 为第 i 个控制容积; m 为控制容积棱边的编号; N_i 等于第 i 个节点的相邻节点数的 2 倍; Δt 为时间步长; $L_{i,m}$ 为表示第 i 个控制容积的第 m 条棱边的长度; $\rho_{i,m}$ 和 $E_{i,m}$ 分别为该棱边中点处的电荷密度和电场强度。

有限体积网格示意图见图 3, 有限元与有限体积混合算法较上流有限元方法在风速影响的仿真方面有较大的提高, 其风速可以达到 16 m/s。但是进行三角单元网格剖分后, 需要对有限元体积网格进行再次剖分, 前期处理工作较大, 计算量较上流有限元方法更大, 计算时间稍长。

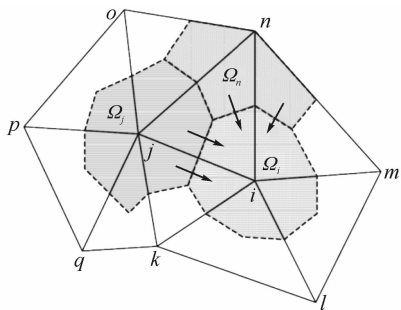


图 3 有限体积网格示意图

Fig. 3 Control cells of finite volume method

2.2.4 基于电力线的有限元方法

文[14-16]的基本思路是以有限元求解泊松方程, 沿着电力线通量管计算电荷密度(认为沿着通量管电流处处相等)。笔者在这方面作了一系列工作, 从单极到双极, 从单根导线到分裂导线, 布置从水平到垂直, 将场域从有限扩展到无限, 考虑正负极不同的迁移率和起晕电压等。方法的有效性在一些算例中得到验证。但由于电荷密度沿着确定的方向求解, 这类方法还不能分析风的影响。文[17]针对该方法, 在文[14-16]研究双极单导线离子流场的基础上, 提出了分析双极分裂导线离子流场的方法, 无需将分裂导线等效成单根导线, 鉴于子导线间的相互作用, 提出了双极分裂导线离子流场的剖分方法。见图 4, 笔者对多分裂导线绘制电力线, 然后绘制出等电位线, 再进行网格划分计算, 取得了很好的计算效果。

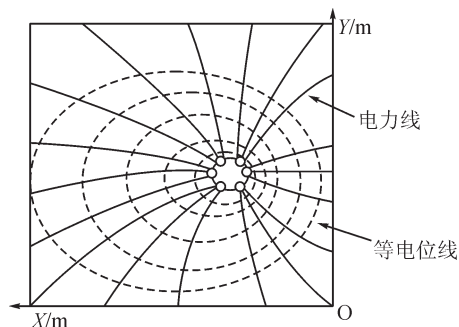


图 4 双极分裂导线离子流场有限元求解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of solving the ionized field of bipolar bundled conductors by FEM

该方法计算离子流场强前期剖分麻烦, 计算量大, 也不能考虑风速的影响, 具有局限性。但是该方法在无风情况下, 其计算精度较其他方法要高; 同时该方法又是基于电力线进行离子流计算的, 对于计算直流输电线路的电晕损失具有重要意义。

2.3 三维有限元方法计算

为了深入研究直流输电线路下方人员活动时的合成电场分布与离子流密度状况问题, 以及输电走廊紧张地区线下建筑物的合成电场问题, 离子流场计算必须要用三维的方法来取代二维计算方法。

文[18]报导了静电除尘器中三维离子流场的计算方法, 但还只是集中在单极离子流场计算方面。在直流输电线路三维离子流场的计算中, 双极问题不可避免, 但基于有限元双极三维离子流场数值计算方法较少。文[19]提出了一种双极三维离子流场的数值计算方法—三维上流有限元法。笔者将该方法分别应用于同轴圆柱、同心球的离子流场计算, 计算结果与解析解吻合得很好。然后将其应用于直

流线路下方存在建筑物时的合成电场计算。

该方法是在二维上流有限元方法的基础上提出的,其关键步骤是寻找和判断上流元。四面体单元见图 5,对于图 5 的情况,若要根据已知节点 K 、 L 、 M 的电荷密度来求节点 N 的电荷密度,就必须判断与 N 相关的四面体单元 $KLMN$ 是否构成上流元,即判断 N 处的电荷速度矢量反向延长线是否穿过四面体单元 $KLMN$ 。随后文[20]对三维上流有限元方法进行了改进,主要是将迭代过程中前后两步的空间电荷密度按比例分配形成新的空间电荷密度,有效提高了三维上流有限元的计算效率。

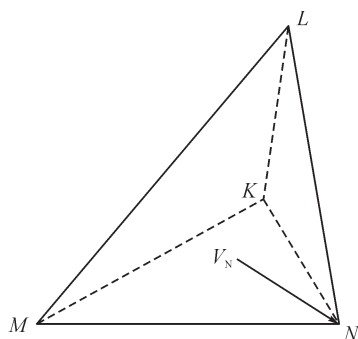


图 5 四面体单元

Fig. 5 Tetrahedron element

3 交直流混合线路合成电场计算研究

近几年,随着电网建设的快速发展,中国已经出现了交直流同走廊并行线路,而交直流同塔架设线路预计在不久的将来也会出现。同走廊与同塔混架交直流线路可以节约线路走廊,影响这两种线路的主要制约因素是交流线路和直流线路形成的混合电场。相对于单纯的直流线路合成电场问题,混合电场中的电流连续性方程体现了时域性,见式(9)。此外,混合电场中的泊松方程与电流连续性方程的边界条件也都是变化的,离子流场从静态变成了动态。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^+ \mathbf{k}^+ \mathbf{E}) = -R \rho^+ \rho^- / e \\ \frac{\partial \rho^-}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho^- \mathbf{k}^- \mathbf{E}) = -R \rho^+ \rho^- / e \end{cases} \quad (9)$$

1981 年,文[21]首次提出了交直流同塔架设线路混合电场计算的公式,即将直流与交流地面电场计算后直接相加。1996 年,文[22]在此基础上提出了一种改进的混合电场计算方法,认为某一时刻的交流线路等同于一条相同电压的直流线路。然后将一个周期内所有时刻的合成电场值综合在一起,得到混合电场的直流与交流分量。这一方法近年来

被文[23]应用到特高压交直流同走廊线路的混合电场的计算当中。该方法将混合电场的动态过程看成多个静态问题,虽然可以进行相关计算,但是忽略了不同时刻间前后电场的联系。

2011 年,文[24]提出了混合电场计算的时域迎风有限元法,认为线路表面的电荷密度与导线表面标称场强超过起晕场强的部分成线性关系。这一假设实际上与 Kaptzov 假设是相矛盾的。为了使得 Kaptzov 假设在混合电场的计算中得到满足,文[25]提出了一种基于有限体积混合电场计算的方法。该方法采用了在每一时间步进行迭代计算以获得满足 Kaptzov 条件的电荷发射值。文[26]基于上流有限元法和向后欧拉法,提出了一种同塔交直流线路混合电场的时域计算方法,该方法能考虑交流导线电晕放电的影响。文[27]的计算方法还被扩展到了三维情况,并且成为了目前唯一一种可以用于预测直流线路跨越交流线路时地面三维混合电场的方法^[27]。

4 基于有限元计算方法的离子流场影响研究

基于有限元计算方法的离子流场影响研究主要包括:线路参数、建筑物及人体对离子流场的影响研究。文中不再阐述线路参数对离子流场影响研究。下面主要就建筑物及人体对离子流场的影响研究进行介绍。

4.1 建筑物周围离子流场计算研究

对于直流线路下方存在建筑物时的离子流场分布计算,国内学者走在前列,主要包括华北电力大学、清华大学以及武汉大学等高校的学者。文[28]利用 2D/3D 结合的方法,进行了房屋周围的离子流场分布计算。该方法利用二维上流有限元求得某一个计算区域面上的电位和电荷密度分布,作为三维上流有限元计算的人工边界,然后进行计算,边界设置见图 6;另外文[20]基于相同的建模方法,利用改进的上流有限元法进行了房屋附近合成场强的三维分布计算,同时还考虑了风速的影响。

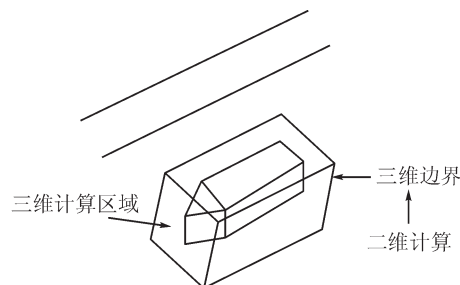


图 6 建筑物附近 3D 离子流场计算模型

Fig. 6 3D ion flow field calculation model near building

4.2 人体周围离子流场计算研究

外国学者较早地开展了直流线路下方人体的离子流场计算研究。日本学者曾应用边界元方法对线下存在人体时的离子流场问题进行了分析,但其电荷密度应用的是假设值,而不是通过离子流场迭代计算得到^[29]。中国学者蒋伟等人则利用 Ansys 软件建立了人体周围的二维离子流场计算模型,该方法主要思路是将人体分成头部、躯干、脚部 3 个部位分别建模,并在此基础上分析直流线路下方人体站立和行走时的二维离子流场分布^[30]。

人体周围的三维离子流场计算,国内学者同样走在前列。华北电力大学甄永赞利用上流有限元方法进行了人体的三维离子流场计算^[31],但是建模比较简单;武汉大学的黄国栋则利用改进的三维有限元方法进行了人体周围三维离子流场计算,该计算模型较为接近人体实际形状^[32]。人体模型见图 7。

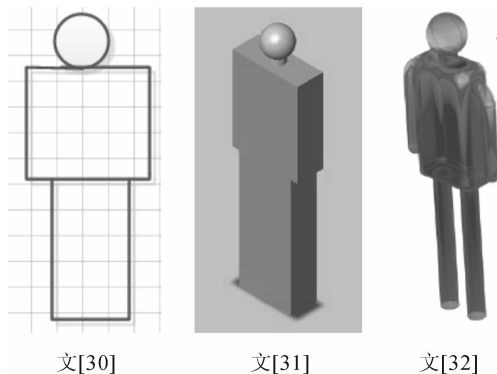


图 7 人体模型

Fig. 7 The body model

5 结论

文中阐述了 30 多年来基于有限元方法的直流输电线路离子流场计算研究概况,重点分析了基于有限元的二三维计算方法的特点以及建筑物和人体对离子流场的影响研究现状。基于此,对此提出了如下观点:

1)为了满足中国不断发展的特高压直流输电线路建设实际工程的需要,三维离子流场的有限元计算方法将不仅是今后的主要发展方向,而且其计算的适用性将会随着计算机技术的发展进一步提升。

2)中国幅员辽阔,各地区的地形条件和气候差异较大。为实现对不同地区直流线路电磁环境的准确评估,未来应当考虑复杂地形(地形凸凹、斜坡等)以及复杂天气(雨天、雾霾等)情况下的三维离子流场计算。

3)今后交直流混合线路越来越多,加强对线路下方存在建筑物、人体以及地形和天气的影响研究将具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] SARMA M P, JANISCHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on DC transmission lines, I: Unipolar lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(5): 718-731.
- [2] JANISCHEWSKYJ W, CELA G. Finite element solution for electrical fields of coronating DC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(3): 1000-1012.
- [3] 余世峰, 阮江军, 张宇, 等. 直流离子流场的有限元迭代计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 894-899.
YU Shifeng, RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, et al. Finite element iterative computation of direct current ionized field[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 894-899.
- [4] ABOELSAAD M M, SHAFAI L, RASHWAN M. Numerical assessment of unipolar corona ionized field quantities using the finite-element method[J]. IEEE Proceedings, 1989, 136(2): 79-86.
- [5] TAKUMA T, KAWAMOTO T. A very stable calculation method for ion flow fields of HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, PWRD-2(1): 189-198.
- [6] LU T, ZHAO Z, CUI X, et al. Analysis of the ionized field under HVDC transmission lines in the presence of wind based on upstream finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 2939-2942.
- [7] 尹晗, 郭剑, 张波, 等. 直流电晕笼中离子流场的计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 758-764.
YIN Han, GUO Jian, ZHANG Bo, et al. Calculation of the ion flow field in the DC corona cage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 758-764.
- [8] LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. Boundary condition improvements on ion flow field calculation of HVDC bipolar transmission lines[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008: 245-248.
- [9] LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. Ion flow field calculation of multi-circuit DC transmission lines[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008: 6-19.
- [10] WEI Li, BO Zhang, HE Jinliang, et al. Calculation of the ion flow field of AC-DC hybrid transmission lines[J]. IET Gener. Transm. Distrib., 2009, 3(10): 11-19.
- [11] MEROTH A M, GERBER T, MUNZ C D, et al. Numerical solution of nonstationary charge coupled problems[J]. Journal of Electrostatics, 1999, 45(3): 177-198.
- [12] LI Xin, CIRIC I R, RAGHUVEER M R. Investigation of ionized fields due to bundled unipolar DC transmission lines in the presence of wind[J]. IEEE Transactions on Power

- Delivery, 1999, 14(1):211-217.
- [13] 周象贤,卢铁兵,崔翔,等.基于有限元与有限体积分法的直流输电线路合成电场计算方法[J].中国电机工程学报,2011,31(15):127-133.
- ZHOU Xiangxian, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. A hybrid method for the simulation of ion flow field of HVDC transmission lines based on finite element method and finite volume method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 127-133.
- [14] AL-HAMOUZ Z, ABDEL-SALAM M. Finite-element solution of monopolar corona on bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2):380-386.
- [15] ABDEL-SALAM M, AL-HAMOUZ Z. A finite-element analysis of bipolar ionized field[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 31(3):2083-2088.
- [16] AL-HAMOUZ Z. Corona power loss, electric field and current density profiles in bundled horizontal and vertical bipolar conductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5):1182-1188.
- [17] 袁海燕,傅正财.基于有限元法的 ± 800 kV特高压直流输电线路离子流场计算[J].电工技术学报,2010,25(2):139-146.
- YUAN Haiyan, FU Zhengcai. Corona ionized field analysis of ± 800 kV HVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2):139-146.
- [18] LONG Zhengwei, YAO Qiang, SONG Qiang, et al. A second-order accurate finite volume method for the computation of electrical conditions inside a wire-plate electrostatic precipitator on unstructured meshes[J]. Journal of Electrostatics, 2009(67):597-604.
- [19] 甄永赞,崔翔,罗兆楠,等.直流输电线路三维合成电场计算的有限元方法[J].电工技术学报,2011,26(4):153-160.
- ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LUO Zhaonan, et al. FEM for 3D total electric field calculation near HVDC lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4):153-160.
- [20] 黄国栋,阮江军,杜志叶,等.直流输电线路下方建筑物附近离子流场的计算[J].中国电机工程学报,2012,32(4):193-198.
- HUANG Guodong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Calculation of the ionized field under DC transmission lines with buildings nearby[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):193-198.
- [21] CHARTIER V L, SARKINEN S H, STEARNS R D, et al. Investigation of corona and field effects of AC/DC hybrid transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Applications System, 1981, PAS-101(1):72-80.
- [22] ZHAO T, SEBO S A, KASTEN D G. Calculation of single phase AC and monopolar DC hybrid corona effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1454-1463.
- [23] YANG Yong, LU Jiayu, LEI Yinzhaoh. A calculation method for the hybrid electric field under UHVAC and UHVDC transmission lines in the same corridor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):1146-1153.
- [24] LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. Calculation of the ion flow field of AC-DC hybrid transmission lines[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2009, 3(10):911-918.
- [25] ZHOU Xiangxian, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. A time-efficient method for the simulation of ion flow field of the AC-DC hybrid transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):731-734.
- [26] 赵永生,张文亮.同塔交直流输电线路混合电场研究[J].电网技术,2014,38(1):120-125.
- ZHAO Yongsheng, ZHANG Wenliang. Research on hybrid electric field caused by HVAC and HVDC transmission lines erected on the same tower[J]. Power System Technology, 2014, 38(1):120-125.
- [27] ZHOU Xiangxian, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. Simulation of ion flow field at the intersection of HVDC and HVAC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2382-2389.
- [28] LI Wei, ZHANG Bo, HE Jinliang, et al. 2D/3D hybrid computation of ion flow field around house near HVDC bipolar transmission lines[C]//IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Chicago, America: IEEE, 2010: 1.
- [29] YAMASHITA M, SHIMIZU K, MATSUMOTO G. Development of a technique to evaluate human exposure to ion-current fields using boundary element method-for environmental assessment of high voltage transmission lines[J]. IEICE Transactions on Communications, 1994, E77-B(6):714-718.
- [30] 蒋伟,吴广宁,黄震,等.有限元法分析特高压直流线路对人体的影响[J].高电压技术,2008,34(9):1826-1830.
- JIANG Wei, WU Guangning, HUANG Zhen, et al. Analysis of effects on human body of UHVDC transmission line based on FEM[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9):1826-1830.
- [31] ZHEN Yongzan, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Total electric field calculation of body model under HVDC transmission lines[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [S.l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [32] HUANG Guodong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Improved 3-D upwind FEM for solving ionized field of HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33):152-159.
- 邹岸新(1985—),男,硕士,研究方向为电网电磁环境及噪声控制技术。
- 徐禄文(1968—),男,高级工程师,研究方向为电网电磁环境和噪声工程控制等。