

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.025

基于BIM全景可视化的架空电力线磁场三维仿真计算研究

同 嘉

(中铁一院轨道交通工程信息化国家重点实验室, 西安 710043)

摘要: 随着国家智能电网高速发展, 输电网络覆盖面日趋扩大, 工程设计量和难度越来越大, 如何运用BIM技术有效提高磁场计算设计效率, 降低电力工程实施难度成为难点。本文通过研究BIM环境下的电力线磁场仿真计算, 提出了一种基于BIM全景可视化的电力线磁场三维数值算法, 结合BIM全景可视化、Biot-Savart定律等仿真研究, 计算得出的数值结果与电力磁场计算代表CDEGS得出的结果进行比较, 具有三维可视化、精度高等特点, 适用于BIM三维模型, 真正做到三维BIM一模多算、一体化设计, 为电力线磁场三维仿真计算和BIM电力设计未来深化推广打下坚实理论依据与设计基础。

关键词: BIM; 三维模型; 架空线路; 磁场仿真; CDEGS

Study of Overhead Power Line Magnetic Field 3D Simulation Calculation Based on BIM Panoramic Visualization

TONG Jia

(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization(FSDI), Xi'an 710043, China)

Abstract: With the rapid development of national smart grid, the coverage of transmission network is expanding day by day, and the engineering design is becoming more and more difficult. How to use BIM Technology to effectively improve the efficiency of magnetic field calculation and design, and reduce the difficulty of power engineering implementation has become a difficulty. In this paper, by studying the simulation calculation of power line magnetic field in BIM environment, a three-dimensional numerical algorithm of power line magnetic field based on BIM panoramic visualization is proposed. Combined with the simulation research of BIM panoramic visualization and Biot Savart law, the calculated numerical results are compared with the results of CDEGS, which has the characteristics of three-dimensional visualization and high precision and is suitable for BIM Three dimensional model, truly three-dimensional BIM one mode multi calculation, integrated design, for power line magnetic field three-dimensional simulation calculation and BIM power design to further promote the development of a solid theoretical basis and design basis.

Key words: building information modeling(BIM); three-dimensional model; overhead lines; magnetic field simulation; CDEGS

0 引言

由于磁场对人体存在潜在的不利健康影响, 电力线时谐电流引起的电力频率(50/60 Hz)磁场成为世界上大量论文研究的课题。经国际非电离辐射防护委员会 ICNIRP(international commission for

non-ionizing radiation)评估, 于2010年出版了限制时变电场和磁场暴露的指南^[1]。根据指南, 50 Hz磁感应强度的参考电平对于职业辐射为1 000 μT , 公众辐射为200 μT 。

在计算磁场电频频率的数值模型中, 常用方法的范围为矩量法、有限元法、边界元法、时域有限差

分法、电荷模拟法和各种混合法。在这些模型中的存在问题被认为是准静态的^[2],因此忽略磁场的衰减和相移对准确度的影响。基于 Biot-Savart 定律的简化二维模型可用于电力线磁场的计算^[3]。在常规模型中,电力线导体近似细线,并被视为与地球表面恒定距离的无限线源,线源数量等于电力线导体的数量,并考虑每个导体的影响。文[4]中提出了埋地电缆线磁场的计算方式和不同的磁屏蔽解决方案。

近年来,随着建筑信息模型 BIM(building information modeling, BIM)技术的普及,这些简化二维模型被更为复杂的三维模型逐步替代^[5],运用 BIM 三维模型技术可有效提高设计效率,提供施工中的信息化数据,大大降低电力工程实施难度。BIM 三维模型可清晰表达出电力线导体的悬链线形式等许多相关参数,可以更准确地获得在架空电力线在复杂场景中的磁场电频率

因此,文中提出了一种基于 BIM 全景可视化的电力线磁场三维数值模型。电力线跨距导体近似于一组直线、细线圆柱导体段,沿导体轴流动的时谐波电流近似于常数值。文中研究了成熟的三维模型、简化二维模型和电力磁场计算代表 CDEGS 软件包中的计算模型 HIFREQ 得出的电力线磁通密度分布结果之间的对比情况,提出的用于计算磁场的 BIM 三维准静态数值模型可用于计算电力线路和变电站的电场和磁场中更为广泛的时谐波准静态电磁模型,并将有限元技术应用于积分方程式当中。

1 电力线几何模型

用于计算电力架空线磁场的各种二维模型中,每条电力线导体悬链线近似于平均高度平行于地表的单根细线直线,并结合其载流量情况^[6]。该平均高度 h 可用以下表达式表示:

$$h = h_{\max} - \frac{2}{3} \cdot s \quad (1)$$

式(1)中: $h_{\max}$ 为导体的最高高度; s 为导体垂度。

由于电力线导体采用悬链线形式,这些二维模型只是一个粗略的近似值,因此,磁场计算的准确度有限,尤其当磁场点在电力线附近的时候^[7]。除了这些数据分析和数值二维模型,还有一些被广泛用于计算电力线和变电站电磁场的商业软件,包含使用同样的简化二维算法。通过对电力线电场强度的二维算法进行比较分析,可分为3种算法:①考虑短电力线和近似抛物线的导体电荷密度的算法;②考虑短电力线和近似常数的导体电荷密度的算法;③考虑无限电力线和近似常数的导体电荷密度

的算法。

另外,利用 BIM 模型实现的三维算法可以更加准确的考虑到架空电力线导体的悬链形式。在用于计算磁场的三维数值模型中,电力线导体代表了在空气中或在地面上的源。这些源、架空电力线相线、屏蔽线或埋地电缆相导体均沿着笛卡尔坐标系 (x, y, z) 的 x 轴定向。所选坐标系的原点在地面和电力线路段的中间。磁场计算在 $y-z$ 平面进行,垂直于观测到的电力线路段,见图1。

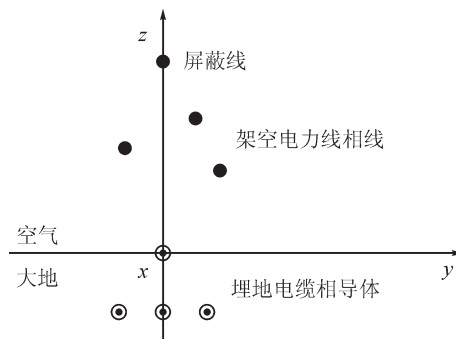


图1 电力线导体在全局坐标系中的位置

Fig. 1 Location of power line conductor in global coordinate system

有研究结果展示了用于分段架空电力线导体的数值算法,每条电力线跨度都必须进行单独分段^[8]。首先将架空电力线跨度的观测导体分为两部分,然后将这些部分细分为正交投影相等的细线直线段。架空电力线导体的第一部分位于起点 $T_b(-l/2, z_b)$ 和悬链曲线 $T_{\min}(u_{\min}, z_{\min})$ 的最低点之间,而第二部分位于 $T_{\min}$ 和终点 $T_e(l/2, z_e)$ 之间。导体分割处理的输入数据是最低点 $T_{\min}$ 的高度 $z_{\min}$ 和 $T_b(x_b, y_b, z_b)$, $T_e(x_e, y_e, z_e)$ 两点的坐标值。架空电力线跨距导体采用悬链线的形式,其架空电力线跨度长度在局部坐标中以余弦函数表示。

坐标系 (u, z) :

$$z = z_{\min} \cdot \cosh \frac{u - u_{\min}}{a} \quad (2)$$

$$a = \frac{\frac{l}{2} - u_{\min}}{\cosh^{-1} \frac{z_e}{z_{\min}}} \quad (3)$$

一般情况下,被认定的架空电力线跨距导体 Z_b 的起点高度与认定的终点 Z_e 高度不同,见图2。

在参考文献中发现,架空电力线跨距导体的悬链形式仅能相对精确地近似于6条直线细线段,而近似于10个直线段的每个架空电力线直线细线段从几何角度来看可视为最优^[9]。然而,在计算电场强度时,需要选取每个架空电力线跨距导体更多的直线段,而计算磁通密度时,仅需满足准确近似悬

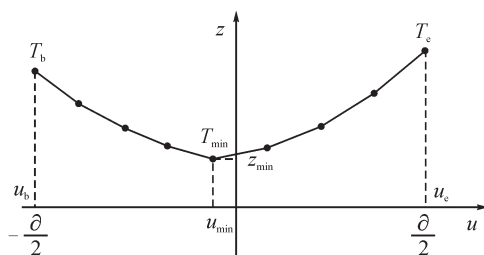


图2 局部坐标系中的架空电力线跨距导体

Fig. 2 Overhead power line spanning conductor in local coordinate system

链线的几何形状。

对于埋地电缆线相导体,它们必须被分成平行于地表的、最大可能长度的直段。而每个段均需定义其起点和终点的全局坐标,以及纵向相导体电流的值。

2 电力线磁通密度的计算

计算架空电力线和埋地电缆线的磁通密度的数值算法从数学意义上看是相同的,并且均基于Biot-Savart定律^[10]。在观测到的由空气和地面组成的两层介质中的空气中,任意选取场点 $T(x, y, z)$ 磁通密度矢量 $\mathbf{B}$ 的相量,由所有电力线导体段的影响总和决定,其公式为

$$\mathbf{B} = \{\bar{B}_x, \bar{B}_y, \bar{B}_z\} = \sum_{j=1}^{NS} \mathbf{B}_j = \sum_{j=1}^{NS} \frac{u_0 \cdot \bar{I}_j}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{\Gamma_j} \frac{d\mathbf{s}_j \times \mathbf{R}_j}{R_j^3} \quad (4)$$

式(4)中: $\bar{B}_x, \bar{B}_y, \bar{B}_z$ 为磁通密度的有效值(rms); B_j 为第 j 个圆柱形导体段磁通密度的相量; I_j 为第 j 个导体电流的相量; T_j 为沿着第 j 个导体段轴线定位的整合路径; R_j 为第 j 个导体段轴线上的点与场点之间的距离; R_j 为从第 j 个导体段轴上的点和一个场点的矢量; μ_0 为真空磁导率。

第 j 个圆柱形导体在起点 B_j 和终点 E_j 之间的分段与近似于常数值并由导体轴从起点流向终点的纵向电流 I_j ,见图3。

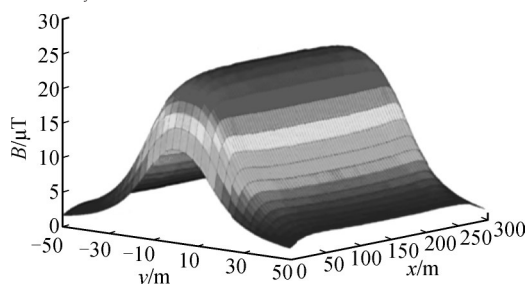


图3 圆柱导体段

Fig. 3 Cylindrical conductor segment

根据式(4),可得出表达式为

$$\mathbf{B}_j = \frac{\mu_0 \cdot \bar{I}_j \cdot l_j}{4 \cdot \pi \cdot \delta_j} \cdot \left[\frac{t_j}{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{B_j}} + \frac{1 - t_j}{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{E_j}} \right] \cdot \mathbf{d}_{0j} \quad (5)$$

式(5)中: L_j 为第 j 个圆柱形导体段的长度; δ_j 为场

点和第 j 个圆柱形导体段轴线所位于的路径之间的最短距离; $\mathbf{r}$ 为场点 T 的矢量; $\mathbf{r}_{B_j}$ 为起点的矢量; $\mathbf{r}_{E_j}$ 为终点的矢量; $\mathbf{d}_{0j}$ 为第 j 个圆柱形导体段的磁通密度的单位矢量; t_j 是辅助参数。

第 j 个圆柱形导体段的长度,如以下表达式:

$$l_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2 + c_j^2} \quad (6)$$

$$a_j = xE_j - xB_j$$

$$b_j = yE_j - yB_j$$

$$c_j = zE_j - zB_j \quad (7)$$

式(7)中: $(x_{B_j}, y_{B_j}, z_{B_j})$ 和 $(x_{E_j}, y_{E_j}, z_{E_j})$ 为第 j 个圆柱形导体段起点和终点的全局坐标。

式(5)中的辅助参数 t_j 为

$$t_j = \frac{a_j \cdot (x - xB_j) + b_j \cdot (y - yB_j) + c_j \cdot (z - zB_j)}{l_j^2} \quad (8)$$

场点 $T(x, y, z)$ 与第 j 个圆柱形导体段轴线所位于的路径之间的最短距离为

$$\delta_j = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s| = \sqrt{(x - xs_j)^2 + (y - ys_j)^2 + (z - zs_j)^2} \quad (9)$$

点 S_j 的全局坐标为

$$S_j = (xs_j, ys_j, zs_j) = S_j(xB_j + a_j \cdot t_j, yB_j + b_j \cdot t_j, zB_j + c_j \cdot t_j) \quad (10)$$

第 j 个圆柱形导体段的磁通密度的单位矢量为

$$\mathbf{d}_{0j} = \frac{\begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_j & b_j & c_j \\ x - xs_j & y - ys_j & z - zs_j \end{vmatrix}}{l_j \cdot \delta_j} \quad (11)$$

式(11)中, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 是笛卡尔坐标系的单位矢量。

根据式(4)-(11),由此可得出,磁通密度矢量的相量

$$\mathbf{B}_j = \mu_0 \cdot \frac{\bar{I}_j}{4 \cdot \pi \cdot \delta_j^2} \cdot \left[\frac{t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{B_j}|} + \frac{1 - t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{E_j}|} \right] \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_j & b_j & c_j \\ x - xs_j & y - ys_j & z - zs_j \end{vmatrix} \quad (12)$$

并且由以下表达式可得磁通密度的组成成分:

$$B_x = \mu_0 \cdot \frac{\bar{I}_j}{4 \cdot \pi \cdot \delta_j^2} \cdot \left[\frac{t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{B_j}|} + \frac{1 - t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{E_j}|} \right] \cdot [(z - zs_j) \cdot b_j - (y - ys_j) \cdot c_j] \quad (13)$$

$$B_y = \mu_0 \cdot \frac{\bar{I}_j}{4 \cdot \pi \cdot \delta_j^2} \cdot \left[\frac{t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{B_j}|} + \frac{1 - t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{E_j}|} \right] \cdot [(x - xs_j) \cdot c_j - (z - zs_j) \cdot a_j] \quad (14)$$

$$B_z = \mu_0 \cdot \frac{\bar{I}_j}{4 \cdot \pi \cdot \delta_j^2} \cdot \left[\frac{t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{B_j}|} + \frac{1 - t_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{E_j}|} \right] \cdot [(y - ys_j) \cdot a_j - (x - xs_j) \cdot b_j] \quad (15)$$

最后,所选场点 $T(x, y, z)$ 磁通密度的总有效值(rms)可通过式(16)计算

$$B = \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2 + |B_z|^2} \quad (16)$$

3 数值算例

通过具体工程案例,将由 BIM 三维参数化模型所得的电力线磁通密度分布结果与简化二维模型和用 CDEGS 软件包中 HIFREQ 计算模型所得的结果进行比较。

吴忠至中卫城际铁路线路全长 136.05 km,设计时速 250 km,由银西线吴忠站南端引出,向南沿京藏高速经关马湖和滚泉,穿越牛首山丘陵区至中宁东设站,向西沿黄河南岸经宣和至中卫市设中卫南站,是国家快速铁路网的重要干线。针对项目中电力架空线路设计,结合 BIM 可视化进行电力磁场计算。

设定选取具有三相(L_1, L_2, L_3)的架空电力线,每相具有两个导体,并在水平配置中选取两个屏蔽线(SW_1, SW_2),见图 4。相导体的类型为 AlFe 490/65 mm²,屏蔽线为 AlMgFe 170/70,相导体的半径 $r=15.30$ mm,屏蔽线的半径 $r=9$ mm。电力线频率 $f=50$ Hz,电力线段的长度为 300 m,这些均为 BIM 三维模型数值实例的输入数据。

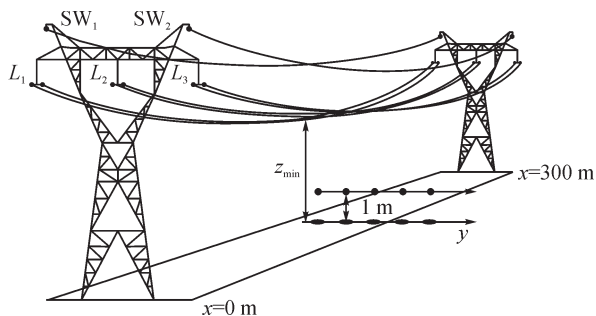


图4 架空电力线空间关系

Fig. 4 Space relationship of overhead power lines

表1给出了电力与几何输入数据。其中, $Z_{\min}$ 值代表架空电力线导体的最低高度,由于两座数值塔对称同等的高度, $Z_{\min}$ 位于跨中。在此具体工程实施案例中,所考虑的架空电力线跨度的起点 Z_b 和终点 Z_e 高度相等($Z_b=Z_e=Z$),导体垂度也相等($S=7.5$ cm)。除了这些数据,还有必要规定每条悬链线所分割出的总段数。假设所允许的最大导体电流流过相导体,尽管大多数情况下这是不可行的,同时已假定对称的运作条件。除此之外,文中描述的三维算法也可以被用于非对称的运作条件,如单项线路。

基于以上理论,结合研发 MAGBIM 模拟系统。磁通密度分布的计算沿着 y 向(横向的)轮廓在中跨进行,离地面 1 m 处(例: $z=1$ m)。

对于每段导体段,生成每个悬链线的起点和终点的全局坐标。CDEGS 软件包的 HIFREQ 计算模

表1 400 kV 架空电力线输入数据

Table 1 Input data of 400 kV overhead power line

类型	y/m	$Z_{\min}/m$	$Z_{\max}/m$	φ/kV	I/A
L_1	-10.2	20.0	12.5	$231\angle 0^\circ$	$965\angle -35^\circ$
	-9.8	19.8	13.2	$231\angle 5^\circ$	$960\angle -30^\circ$
L_2	-0.2	22.1	11.5	$231\angle -120^\circ$	$960\angle -150^\circ$
	0.2	21.3	12.1	$231\angle -120^\circ$	$960\angle -150^\circ$
L_3	9.8	20.3	12.2	$231\angle 120^\circ$	$960\angle 95^\circ$
	10.2	21.0	13.5	$231\angle 115^\circ$	$960\angle 90^\circ$
SW_1	-6.0	23.5	16.1	$0\angle 0^\circ$	$0\angle 0^\circ$
SW_2	6.0	23.7	16.2	$0\angle 0^\circ$	$0\angle 0^\circ$

型输入数据需要更多时间。

沿着观察剖面的磁通密度分布情况的总有效值和计算得出的磁通密度的有效值见图 5-8。图 5-8 中:2D model 为二维模型含义;3D model 为三维模型含义。

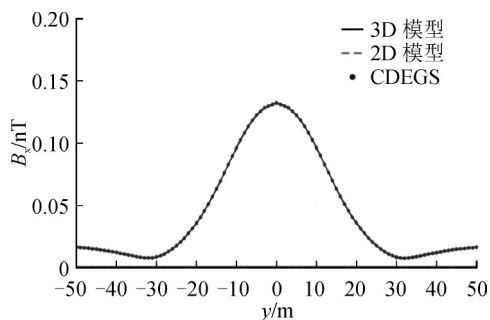


图5 磁通密度 x 成分的有效值

Fig. 5 Valid value of flux density x component

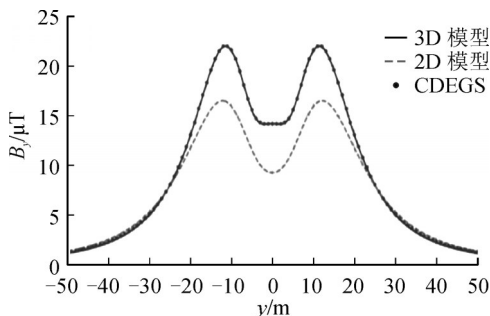


图6 磁通密度 y 成分的有效值

Fig. 6 Valid value of y component of flux density

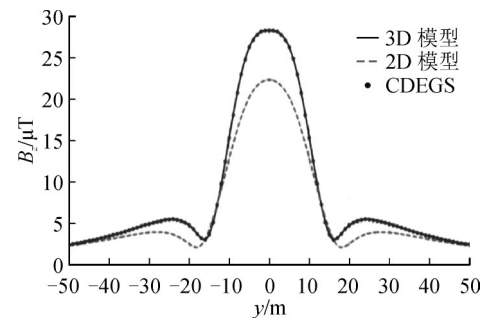


图7 磁通密度 z 成分的有效值

Fig. 7 Valid value of flux density z component

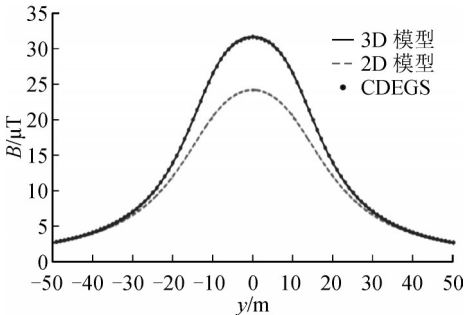


图8 总磁通密度的有效值

Fig. 8 Valid value of total flux density

通过比较所得的磁通密度分布结果,显示出考虑到电力线导体的悬链线的实际形状的实质影响。中跨的情况是最明显的,此时导体垂度也是最大的。所提出的三维模型和CDEGS软件包之间的总磁通密度的最大百分比误差为0.06%。三维模型和修改了导体平均高度的简化二维模型暂态^[11]之间最大百分比误差为23.6%。

由简化二维模型和先进的三维模型,所得出的总磁通密度的空间分布见图9、10。

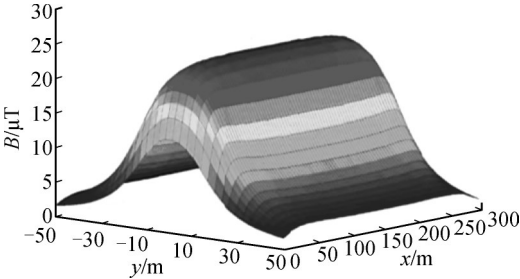


图9 二维模型计算出的磁通密度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of flux density calculated by 2D model

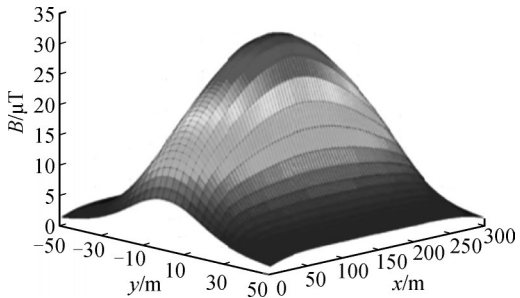


图10 三维模型计算出的磁通密度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of flux density calculated by three-dimensional model

使用三维模型计算磁通密度比使用二维模型得出的结果明显更为准确,但通常需要更长的计算时间。有了之前提出的算法和程序,可以有效解决之前难题。广泛使用的CDEGS软件包中的HIFREQ计算模型得出的结果和三维模型得出的结果是一致的,但计算时间相差很大。在选取的简单数例中,使用PFEMF计算磁通密度空间分布仅需5 s,x轴上取

301点,y轴上取101点,而使用CDEGS软件包中的HIFREQ模型进行同样的运算需要超过500 s。

同时,用于设计计算的BIM三维模型经可视化渲染后,在Autodesk系列软件^[12-13]环境下模拟得到架空线路真实场景下仿真实景效果,并可通过第三人称视角进行巡视检查、模拟所处磁场环境中的影响,见图11、12。

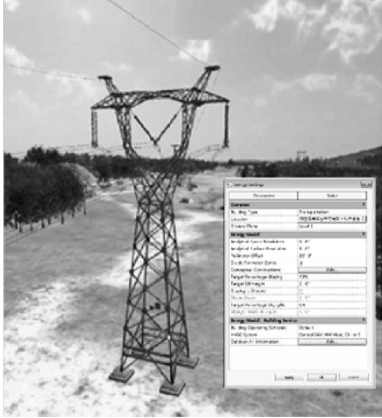


图11 架空线路BIM三维渲染模型

Fig. 11 3D BIM model of overhead line

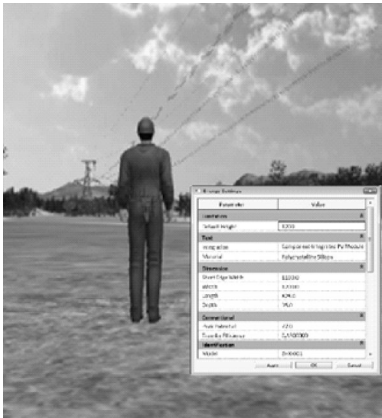


图12 BIM第三人称巡视检查模拟

Fig. 12 BIM third person inspection simulation

许多流行病学研究中广泛讨论了暴露于磁场可能对健康产生的影响,其中一些讨论可参考^[14-15]。在通过相导体的最大允许电流所得的架空电力线附近,见图5-10的电力线磁通密度分布结果,可较之为ICNIRP提出的指南^[16-17]。计算得出恰好处于电力线跨距导体的最低点以下的磁通密度最大值等于31.65 μT,这比国际指南手册^[18-20]中规定的辐射限制要低得多。通过加大与可观测到的电力线的距离,磁通密度的有效值大大降低。

尽管计算电力线磁场的各种三维算法均基于Biot-Savart定律,但其中提出的算法和这些三维算法之间仍有一定的差别。考虑到悬链线的确切形状,为了计算所有成分和总磁通密度,必须对复杂函数进行数值整合。文中使用BIM三维仿真技术,

加上优化数学模型,将其视作真正的悬链线形状,得出足够准确的结果。文中提出的用于计算磁场的三维准静态数值模型是用于计算电力线路和变电站的电场和磁场的更广泛的时谐波准静态电磁模型重要基础。

4 结语

文中提出了一种基于BIM全景可视化的电力线磁场三维数值算法,可应用于架空电力线相线和屏蔽线或是埋地电缆线相线,所提出的算法是结合BIM全景可视化、Biot-Savart定律等仿真研究,并将三维算法所得结果与CDEGS软件包的HIFREQ计算模型所得结果进行比较,架空电力线的数值实例证实了成熟三维准静态算法的准确度。使用三维模型代替二维模型能得出更为准确的磁通密度分布结果。此外,与CDEGS软件比较,三维模型输入数据操作更为简便,计算时间也更短。证明文中所提方法具有先进性,适用于BIM三维模型,真正做到三维BIM一模多算、一体化设计,为电力线磁场三维仿真计算和BIM电力设计未来深化推广打下坚实理论依据与设计基础。

参考文献:

- [1] 郝炳金.磁场对人体的作用机理探析[J]. 中国科技信息, 2014, 11(2):52-55.
HAO Bingjin. The mechanism of magnetic field on human body[J]. China Science and Technology Information. 2014, 11(2): 52-55.
- [2] 赵 伟,徐文佳.三相大电流互感器杂散磁场干扰等效测试方法[J]. 高电压技术, 2016, 11(3):651-658.
ZHAO Wei, XU Wenjia. Equivalent test method for stray magnetic field interference of three-phase high current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 11(3): 651-658.
- [3] 郑福昌.基于电磁协变理论由库仑定律导出毕奥-萨伐尔定律[J]. 黄冈师范学院学报, 2015, 6(9):45-49.
ZHENG Fuchang. Biot-Savart's law is derived from Coulomb's law based on electromagnetic covariance theory [J]. Journal of Huanggang Normal University, 2015, 6(9): 45-49.
- [4] 苏 超,刘振声. 220 kV 架空输电线路下工频电场的电磁感应仿真分析[J]. 广东电力, 2018, 1(2):106-112.
SU Chao, LIU Zhensheng. Electro-magnetic induction simulation analysis of power frequency electric field under 220 kV overhead transmission line [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 1 (2) 106-112.
- [5] 吴汉梅.特高压输电线路无源干扰的广义谐振研究[J].智慧电力, 2016, 44 (10):27-31.
WU Hanmei. Research on generalized resonance of passive interference in UHV transmission lines[J]. Smart Power, 2016, 44(10):27-31.
- [6] 王亦清,朱宁西.计及空间相关性的架空线路载流量预测方法[J]. 广东电力, 2017, 1(5):6-10.
WANG Yiqing, ZHU Ningxi. Prediction method of overhead line carrying capacity considering spatial correlation [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 1 (5): 6-10.
- [7] 阮江军,夏斐架.空线下交变磁场在人体中的感应电流计算[J]. 电力环境保护, 2005, 4(3):18-21.
RUAN Jiangjun, XIA feijia. Inductive current calculation of alternating magnetic field under air line in human body[J]. Electric Power Environmental Protection, 2005, 4(3): 18-21.
- [8] 刘思宁,黄欲成.架空线路导线交直流电阻比的分析与研究[J]. 智慧电力, 2018, 5(5):91-95.
LIU Sining, HUANG Yucheng. Analysis and research on AC/DC resistance ratio of overhead line conductors[J]. Smart Power, 2018, 5(5): 91-95.
- [9] VUJEVI M. Geometrical approximation of the overhead power line conductors[J]. International Review on Modelling and Simulations, 2014(7): 76-82.
- [10] 郭山厚.用Biot-Savart定律计算磁偶极子的磁场分布[J]. 忻州师范学院学报, 2006, 22(2): 23-25.
GUO Shanhou. Calculating the magnetic field distribution of magnetic dipole by Biot-Savart law[J]. Journal of Xinzhou Normal University, 2006, 22(2): 23-25.
- [11] 瞿合祚,黄彦浩.暂态仿真中直流输电系统恢复特性曲线修正方法[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 6(2):43-51.
QU Hezuo, HUANG Yanhao. A method for correcting the recovery characteristic curve of HVDC transmission system in transient simulation[J]. Power Information and Communication Technology, 2018, 6(2): 43-51.
- [12] 张建军,杨 晓.基于Autodesk Revit软件进行BIM设计的方法研究[J]. 中国市政工程, 2016, 4(3):93-98.
ZHANG Jianjun, YANG Xiao. Research on BIM design method based on autodesk revit software[J]. China Municipal Engineering, 2016, 4(3):93-98.
- [13] 田 静,白 珂. BIM在智能电网资产可视化中的应用[J]. 建筑技术, 2019, 7(2):22-25.
TIAN Jing, BAI Ke. Application of BIM in smart grid asset visualization management[J]. Building Technology, 2019, 7 (2): 22-25.
- [14] 彭清涛,王 京.应用生物体微弱磁场检测技术对某部电磁辐射作业人员进行健康评估研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 3(5): 189-193.
PENG Qingtao, WANG Jing. Health assessment of workers exposed to electromagnetic radiation using weak magnetic field detection technology of organisms[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 3(5): 189-193.

- [15] 杨新村. 限制工频电场与磁场暴露的ICNIRP导则研究[J]. 华东电力, 2002, 2(1): 13-16.
YANG Xincun. ICNIRP guidelines for restricting exposure to power frequency electric and magnetic fields[J]. East China Electric Power, 2002, 2(1): 13-16.
- [16] 姚继明, 郭经红. 一种电力无线频谱监测系统设计方案[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 11(3): 29-34.
YAO Jiming, GUO Jinghong. A design scheme of power wireless spectrum monitoring system[J]. Power Information and Communication Technology, 2018, 11(3): 29-34.
- [17] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)[J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.
- [18] 陈浩, 倪大成. 单环磁通门传感器的设计与仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 11(13): 123-127.
CHEN Hao, NI Dacheng. Design and Simulation of single-loop fluxgate sensor [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 11(13): 123-127.
- [19] 黄欢, 郭洁, 魏琪, 等. 杆塔冲击接地阻抗的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 217-222.
HUANG Huan, GUO Jie, WEI Qi, et al. Analysis of tower grounding impedance under lightning impulse by finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 217-222.
- [20] 刘英, 肖阳, 刘松华. 隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 123-130.
LIU Ying, XIAO Yang, LIU Songhua. Influence of cluster laying on permitted current rating of power cables in tunnels [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 123-130.
- 同嘉(1985—), 男, 工程师, 本科, 主要从事电力工程方向研究。

(上接第168页)

- [16] 胡京, 文习山, 蓝磊, 等. 棒-板长间隙正极性放电仿真模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1392-1397.
HU Jing, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Simulation model of rod-plane gap positive discharge[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1392-1397.
- [17] 阮江军, 唐烈峥, 邱志斌, 等. 基于流注起始判据的球—板—球短空气隙击穿电压计算[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 38-44.
RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, QIU Zhibin, et al. Breakdown voltage calculation of short sphere-plane-sphere air gap based on streamer inception criteria[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 38-44.
- [18] 胡毅, 刘凯, 刘庭, 等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1809-1820.
HU Yi, LIU Kai, LIU Ting, et al. Living working on EHV/UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1809-1820.
- [19] 石凯, 徐文洋, 雷东云, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业方式[J]. 电瓷避雷器, 2016(4): 6-11.
SHI Kai, XU Wenyang, LEI Dongyun, et al. Live working ways for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Insulator and Surge Arresters, 2016(4): 6-11.
- [20] 肖勇, 樊灵孟. 云广 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.
XIAO Yong, FANG Lingmeng. Yun-Guang ± 800 kV HVDC live working analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2206-2211.
- 李智琦(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路带电作业技术等。