

有限元电场计算时模型表面网格精细控制方法

田雨¹,杜志叶¹,柳双¹,金硕²,蒙绍新³,金颀¹,周文峰¹

(1. 武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;2. 湖北工业大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430068;
3. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院 电网环境保护国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:大型复杂模型有限元电场求解过程中,所关注设备表面网格的精细化控制往往难度较大。为此,对有限元电场数值计算时网格划分的相关基本原则进行讨论,考虑实体模型的基本几何结构,提出了基于多层外包实体实现设备表面网格精细控制的思想,在此基础上研究了有限元建模方法。以简单三维模型为例,分别介绍了外包实体生成算法、区域划分原则及相关操作流程。以标准模型为例介绍了所提方法的具体应用过程,同时对外包实体的参数设定进行了讨论。将该方法应用于 ± 1100 kV特高压换流站直流阀厅设备表面电场计算中,计算所得模型表面电场过渡平滑,电场强度最大值为13.8 kV/cm。该方法有效实现了模型表面网格的精细控制,对大型复杂有限元模型的高效、精确建模具有一定的指导意义。

关键词:外包实体;网格控制;有限元法;电场计算;特高压阀厅;模型

中图分类号:TM 501

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911004

0 引言

有限元法是电场计算中应用较为广泛的一种数值方法。当应用有限元法对大型复杂模型进行电场分析时,必须针对全模型展开建模和计算。同时为了保证有限元法的计算精度,往往需要对关注设备的表面网格进行精细控制。但是当求解域内实体较多且结构复杂时,实现整体有限元模型的精细建模较为困难,且易造成大量网格堆积,难以保证计算效率^[1-3]。

有限元建模过程是电场分析中相对重要的一个环节,要求考虑的问题多,需要的工作量大,其对计算规模、计算结果和计算精度都会产生很大的影响^[4]。ANSYS作为功能强大的有限元软件,其4种网格划分方法,即延伸划分、映像划分、自由划分及自适应划分法均无法有效实现大型复杂有限元模型的精细建模。文献[5-6]对全模型中局部结构单独进行场域分析,操作相对简单快捷,但未考虑整体模型中其余组件的影响。文献[7-9]提出了借助ANSYS模块化和参数化的建模思想,利用并行求解方法实现了复杂模型的有限元建模及求解,该方法解决了大规模计算量问题,但对于局部关注区域网格的精细控制不足,对电场求解效果的改善不明显。文献[10-12]对有限元自适应网格生成方法进行了介绍,自适应网格生成技术能够根据当前网格上的分析计算结果,以一种最优或近乎最优的方式调整旧网格或生成新网格,从而大幅提高有限元分析过

程的自动化程度与分析结果的可靠性。但在现有的计算机硬件条件下,实现大型复杂模型的整体自适应网格划分难度较大。文献[13-15]利用子模型法实现了阀厅模型的电场求解,并取得了较为理想的计算结果。但子模型法求解过程较为繁琐,效率不高,并且进行边界插值时会带来一定的传递误差。

本文从模型基本几何结构出发,考虑有限元电场计算时网格划分的基本原则,基于ANSYS有限元分析平台,提出了一种基于模型表面多层外包实体的有限元建模方法。利用标准模型对本文方法的计算结果进行分析对比,验证了本文方法的高效性及准确性。基于本文方法实现了 ± 1100 kV特高压换流站直流阀厅高效、精细化的有限元建模,对阀厅全场域电场分布进行了准确计算。本文研究内容对大型复杂有限元模型电场数值计算的开展具有一定的指导意义。

1 外包实体建模方法基本原理

1.1 有限元网格划分基本原则

有限元网格的划分一方面要考虑对各物体几何形状的准确描述,另一方面也要考虑对变形梯度的准确描述。一般随着网格密度的增加,计算精度提高,而计算效率相应降低,所以,实现整体网格的合理分配至关重要。对于数据变化梯度较大的区域,为了较好地反映数据的变化规律,应采用较为密集的网格。并且,网格之间应具有良好的过渡性,网格密集区域与网格稀疏区域间的过渡应相对平稳,否则将对计算结果的准确性产生影响。

开展有限元电场数值分析时,场域内导体设备一般为载荷集中部位,一般施加相应的工作电压,表面电场强度相对较大。阀厅模型中支柱绝缘子屏蔽

收稿日期:2019-03-20;修回日期:2019-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477120,51741708)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477120,51741708)

球表面电位分布如图1所示,由图可直观看出,屏蔽球表面电位梯度最大,电场主要沿屏蔽球表面法向分布,切向分量基本为0。在有限元求解过程中,如果在某一方向的应力梯度很大,单元则需要相当大的边长比,最小边放在梯度最大处^[16-17]。因此,进行有限元电场计算时,对载荷集中部位进行网格加密,可以控制网格在设备表面的分布沿法向密集些、沿切向稀疏些,在保证计算结果准确可靠的基础上,有效减少全模型网格划分数量。

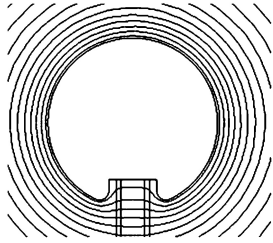


图1 支柱绝缘子屏蔽球表面电位分布

Fig.1 Surface potential distribution of post insulator shielding ball

1.2 基于外包实体的有限元建模方法

基于上述有限元网格划分的基本原则,本文提出了外包实体建模的思想,即对模型进行区域离散之前,首先沿关注设备表面法向等距生成多层外包实体,每层外包实体相应地剖分为1层网格。控制外包实体厚度由内向外逐层增大,同时控制网格沿设备表面的切向尺寸尽量大一些,最终在确保网格平稳过渡的前提下,在关注设备表面生成由内向外厚度逐层增加的多层加密网格,实现网格的精细控制。

为了便于对网格进行精细控制,同时保证网格的整体质量,外包实体应与原模型保持同一几何形状。以图2所示的球和四面体模型为例,基于基本数学几何结构,就外包实体生成及区域划分方法进行介绍。

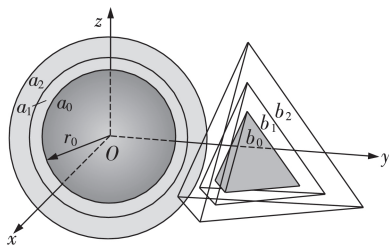


图2 外包实体模型

Fig.2 External surround entities model

1.2.1 外包实体生成算法

图2中所示两实体模型分别为球 a_0 及四面体 b_0 ,其中球 a_0 的球心位于平面直角坐标系原点。 a_0 与 b_0 互不相交。球 a_0 沿径向向外偏移 Δh_i 时生成半径为 r_i 的球,即形成第1层外包实体;相应地,对于第 i 层

外包实体有 $\Delta h_i = r_i - r_{i-1}$ 。记四面体 b_0 各顶点的编号分别为 $B_{0,1}, B_{0,2}, \dots, B_{0,4}$,其中各顶点对应的坐标分别为 $(x_{0,1}, y_{0,1}, z_{0,1}), (x_{0,2}, y_{0,2}, z_{0,2}), \dots, (x_{0,4}, y_{0,4}, z_{0,4})$ 。四面体 b_0 各个面沿其法向向外偏移 Δh_i 时生成四面体 b_i ,形成第1层外包实体。四面体外包实体生成方法如图3所示,顶点 $B_{0,1}$ 对应生成顶点 $B_{1,1}$,则有:

$$\overrightarrow{OB_{1,1}} = \overrightarrow{OB_{0,1}} + l = \overrightarrow{OB_{0,1}} + l_1 + l_2 + l_3 \quad (1)$$

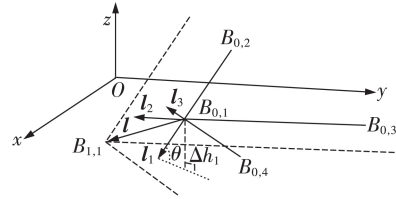


图3 四面体外包实体生成方法

Fig.3 External surround entities generation method for tetrahedron

图3中,四面体顶点 $B_{0,1}$ 为凸顶点,此时有:

$$l_1 = \frac{\Delta h_i}{\sin \theta} \frac{\overrightarrow{B_{0,2}B_{0,1}}}{|\overrightarrow{B_{0,2}B_{0,1}}|} \quad (2)$$

$$\sin \theta = \frac{|(\overrightarrow{B_{0,3}B_{0,1}} + \overrightarrow{B_{0,4}B_{0,1}}) \times \overrightarrow{B_{0,2}B_{0,1}}|}{|\overrightarrow{B_{0,3}B_{0,1}} + \overrightarrow{B_{0,4}B_{0,1}}| |\overrightarrow{B_{0,2}B_{0,1}}|} \quad (3)$$

其中, θ 为 l_1 与 Δh_i 夹角的余角。

同理可分别求解得出 l_2 与 l_3 。

由上述步骤可得 $B_{1,1}$ 的坐标为 $(x_{1,1}, y_{1,1}, z_{1,1})$ 。同理可依次解出每层四面体 b_j 所对应的顶点坐标 $(x_{j,n}, y_{j,n}, z_{j,n})$,其中 j 为第 j 层外包实体编号, n 为每层四面体各顶点编号。

对于一般多面体而言,其顶点存在凹凸性。凹顶点外包实体生成方法如图4所示。

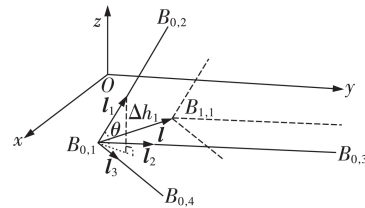


图4 凹顶点外包实体生成方法

Fig.4 External surround entities generation method for concave vertex

当顶点 $B_{0,1}$ 呈凹性时,有:

$$l_1 = \frac{\Delta h_i}{\sin \theta} \frac{\overrightarrow{B_{0,1}B_{0,2}}}{|\overrightarrow{B_{0,1}B_{0,2}}|} \quad (4)$$

$$\sin \theta = \frac{|(\overrightarrow{B_{0,1}B_{0,3}} + \overrightarrow{B_{0,1}B_{0,4}}) \times \overrightarrow{B_{0,1}B_{0,2}}|}{|\overrightarrow{B_{0,1}B_{0,3}} + \overrightarrow{B_{0,1}B_{0,4}}| |\overrightarrow{B_{0,1}B_{0,2}}|} \quad (5)$$

同理,可分别求解得出 l_2 与 l_3 。

1.2.2 外包实体区域划分

外包实体生成完毕后,对整体模型进行区域划

分。当求解域存在较多的实体模型时,所生成外包实体间以及外包实体与原模型间易发生区域交叠,此时,应对整体场域进行合理划分,确保原模型的完整性。

图2所示的球和四面体模型中, a_2 和 b_2 即存在区域交叠。现假设交叠区域为 ΔV ,则有:

$$\Delta V = V_{a_i} \cap V_{b_j} \quad i, j = 1, 2, \dots \quad (6)$$

其中, V_{a_i} 为实体模型 a_0 第 i 层外包实体所在区域; V_{b_j} 为实体模型 b_0 第 j 层外包实体所在区域。

设实体模型 a_0 、 b_0 的介质属性分别为 ε_1 、 ε_2 ,外包实体介质属性为 ε_3 。当存在区域交叠时,交叠区域介质属性应满足以下原则。

(1)当 $\Delta V = V_{a_i} \cap V_{b_j} \neq \emptyset$ 时,表明实体模型 b_0 的第 j 层外包实体与实体模型 a_0 存在区域交叠,交叠区域的介质属性归为 $\varepsilon_{\Delta V} = \varepsilon_1$ 。

相同地,当 $\Delta V = V_{a_i} \cap V_{b_0} \neq \emptyset$ 时,有 $\varepsilon_{\Delta V} = \varepsilon_2$ 。

(2)当 $\Delta V = (V_{a_i} \cap V_{b_j}) \neq \emptyset$ 且 $\Delta V \cap (V_{a_0} \cup V_{b_0}) = \emptyset$ 时,表明仅外包实体间存在区域交叠,即实体模型 a_0 的第 i 层外包实体与实体模型 b_0 的第 j 层外包实体间存在交叠,交叠区域的介质属性应归为 $\varepsilon_{\Delta V} = \varepsilon_3$ 。

按照上述原则完成区域划分,实现各区域属性归类后,基于外包实体即可实现模型表面网格的精细化控制。对阀厅模型中D侧换流变出线套管圆柱形均压球进行外包实体区域划分,划分结果如附录A中的图A1(a)所示。由于均压球直接与套管及内部导杆芯子相连,其周围介质并不单一,所生成的3层外包实体与套管及内部导杆芯子存在交叠,交叠区域为 ΔV 。

根据上述外包实体区域划分原则,套管及内部导杆芯子作为原模型,应保证其完整性,故交叠区域 ΔV 的介质属性应与相应原模型保持一致,最终完成剖分后的网格分布如图A1(b)所示。

1.2.3 基于外包实体的有限元建模流程

根据上述外包实体建模方法的基本原理,基于专业有限元分析平台ANSYS,使用APDL命令进行参数化编程即可程序化实现有限元建模过程。同时,对于工程问题而言,大型复杂模型一般会借助第三方专业建模软件进行建模,如Solidworks软件等,故也可借助建模软件直接实现多层外包实体建模,然后与ANSYS平台进行搭接,从而更为简单快捷地实现本文思想。基于外包实体的有限元建模流程如图5所示。

2 模型表面网格精细化控制方法

2.1 网格精细化控制方法的具体应用

以图6所示的不接地导体球与点电荷模型为例,基于多层外包实体对模型表面网格精细化控制

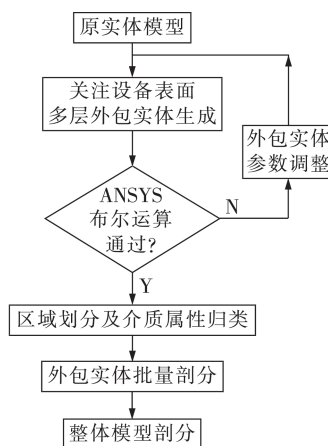


图5 基于外包实体的有限元建模流程

Fig.5 Flowchart of finite element modeling based on external surround entities

方法的具体应用效果进行介绍。

在点电荷 $q=1\text{ C}$ 的空气中,置有一半半径 $R=1\text{ m}$ 的不接地导体球,球心至点电荷的距离 $d=5\text{ m}$ 。

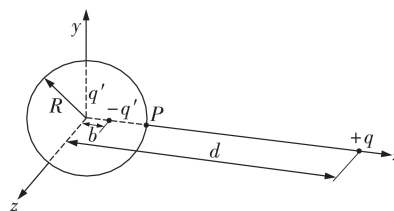


图6 不接地导体球与点电荷模型

Fig.6 Model of ungrounded conductor ball and point charge

首先使用镜像法对导体球表面点 P 的电场强度,即导体球表面最大的电场强度进行求解,求得点 P 电场强度的解析解为:

$$E_P = \frac{q'}{4\pi(R-b)^2} - \frac{q'}{4\pi\varepsilon_0 d^2} = 1.5728 \times 10^9 (\text{V/m}) \quad (7)$$

其中, q' 及 $-q'$ 为集中镜像电荷,满足 $q'=qR/b$, b 为 $-q'$ 与导体球球心距离,满足 $b=R^2/d$; ε_0 为空气介电常数, $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

使用本文方法对不接地导体球与点电荷模型进行静电场求解。按上文所述,在导体球表面生成3层外包实体,具体参数如表1所示。

表1 导体球表面外包实体参数

Table 1 External surround entity parameters on surface of conductor ball

参数	参数值	参数	参数值
层数	3	$\Delta h_2/\text{mm}$	50
$\Delta h_1/\text{mm}$	30	$\Delta h_3/\text{mm}$	70

对整体模型进行区域划分,完成各区域属性归类后,通过对外包实体各边线的划分,实现导体球表面网格的精细控制。按照上文所述剖分原则,控制

网格长宽比为2,得到导体球表面网格分布如附录B中的图B1所示。由图可见,由于外包实体的控制,导体球表面生成了3层逐层加密的网格,且沿模型表面切向的网格尺寸大于法向的网格尺寸,整体网格分布均匀,满足网格划分原则。

完成全场域网格划分后,所生成的单元数量约为39万。对上述模型进行静电场求解,得到导体球表面电场分布见附录B中的图B2。由图可以看出,计算所得的导体球表面电场过渡平滑,最大电场强度位于点P,电场强度的最大值为 $1.5714 \times 10^9 \text{ V/m}$ 。

同时,采用常规有限元网格划分方法直接基于ANSYS平台对上述模型进行剖分。控制导体球表面的网格尺寸为30 mm,与本文方法保持一致。对所生成的有限元模型进行相同条件下的静电场计算。结合模型解析解,对比2种方法所得的计算结果如表2所示。

表2 不同方法所得计算结果

Table 2 Calculative results of different methods

所用方法	网格数量	点P电场强度/ ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	计算误差/%
解析法	0	1.5728×10^9	0
本文方法	39万	1.5714×10^9	0.09
常规方法	67万	1.5711×10^9	0.11

由表2可以看出,由于未采用外包实体对导体球表面网格进行精细化控制,常规有限元网格划分方法剖分所得的网格数量达到了67万,远大于本文方法的39万。同时由于本文方法对导体球表面法向网格进行了加密,其计算所得结果较常规方法误差更小。由此可得,本文方法有效减小了计算机资源消耗,提高了计算效率,同时保证了计算精度。

2.2 模型表面网格加密层数的研究

基于多层外包实体对模型表面网格进行精细化控制时,模型表面网格加密层数对整体计算效率及计算精度有直接影响。现以上述不接地导体球与点电荷模型为例,对网格加密层数的影响进行具体分析。

对导体球分别生成不同层数的外包实体,具体参数同表1,采取相同剖分方法及加载方式,对点P的电场强度进行求解。不同层数表面网格加密情况下的计算结果如表3所示。

表3 不同网格加密层数下所得的计算结果

Table 3 Calculative results of mesh with different encryption layers

网格层数	网格数量	点P电场强度/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	47万	1.5714×10^9
2	41万	1.5713×10^9
3	39万	1.5714×10^9
4	38万	1.5714×10^9

由表3可以看出,随着网格层数的增加,整体模型网格划分数量不断减少。这是由于本文方法在进行网格划分时适当控制了网格沿模型表面切向的尺寸大于法向尺寸,网格加密层数越多,控制得到的最外层网格尺寸越大,使得整体求解域网格划分数量减少。

网格加密层数为1—4层时,计算得到的点P电场强度基本相同,计算误差皆小于0.1%。网格加密层数为1层时,模型表面网格的整体密度较大,有效保证了计算精度,相应地,此时整体模型网格数量也高达47万。而网格层数增加至4层时,模型表面切向网格密度大,计算精度得以保证,但随着外包实体层数的增加,整体模型实体增多,对于大型复杂模型而言,区域划分及网格剖分的难度也进一步增大。

综上所述,建议将模型表面网格加密层数设为3层,此时整体网格数量得到了有效控制,计算精度也相对较高,区域划分及网格剖分操作也易于开展。

2.3 模型表面加密网格长宽比的研究

理想的网格长宽比为1,但此时易造成计算规模过大,而长宽比过于大时,可能会引起网格畸变,影响计算精度。现以不接地导体球与点电荷模型为例,对模型表面加密网格的长宽比进行讨论。

采用表1中的外包实体参数,采取相同的剖分方法及加载方式,对点P的电场强度进行求解。不同表面加密网格长宽比下的计算结果如表4所示。

表4 不同表面网格长宽比计算所得结果

Table 4 Calculative results of surface mesh with different length-width ratios

网格长宽比	网格数量	点P电场强度/ ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	计算误差/%
2	39万	1.5714×10^9	0.09
3	32万	1.5748×10^9	0.13
4	27万	1.5794×10^9	0.42
5	25万	1.5841×10^9	0.72

由表4可得,网格长宽比由2增大到5时,整体网格数量随之由39万降至25万;但由于网格数量的降低,计算精度也相应降低,计算误差由0.09%增大至0.72%。对于大型复杂模型而言,这一趋势会更为明显。故建议合理的模型表面加密网格长宽比为2或3。

3 $\pm 1100 \text{ kV}$ 特高压阀厅设备表面电场计算

$\pm 1100 \text{ kV}$ 直流是我国正在建设的一个全新输电电压等级,开展 $\pm 1100 \text{ kV}$ 特高压直流的研究对于提高我国直流输电技术的研究能力和自主创新能力具有重要意义。目前,普遍采用数值仿真的手段对阀厅内金具表面电场进行计算,以指导金具的合理设计,保障换流站阀厅的安全稳定运行^[18]。

以 ± 1100 kV 换流站极 I 高压阀厅金具表面的电场数值计算为研究对象,根据阀厅内部实际结构建立 3D 全模型如附录 C 中的图 C1 所示。为了提高剖分效率,避免不必要的计算,对阀片及套管等部位进行了合理简化。

对阀厅内屏蔽金具表面网格进行精细控制,由于其结构多样,尺寸差异较大,为保证网格的合理划分,对不同内径大小的金具生成相应厚度的外包实体,具体参数如表 5 所示。

表 5 阀厅金具表面外包实体参数

Table 5 External surround entity parameters on surface of valve hall fittings

金具内径/mm	层数	Δh_1 /mm	Δh_2 /mm	Δh_3 /mm
<300	3	10	20	30
300~1000	3	20	40	60
>1000	3	30	60	90

基于所生成外包实体完成金具表面多层网格加密,最终全模型剖分完毕后,所生成单元的总量约为 2500 万,节点总量约为 3300 万。

进行有限元静电场计算时,采用瞬时电压加载法,以轻载 219.6°时刻电位作为加载条件^[19]。阀厅内壁作为求解域边界加载 0 电位,悬浮导体施加悬浮电位,其余各设备施加实际工作电位。计算得到阀厅金具表面电场分布如附录 C 中的图 C2 所示。

由上述计算结果可以看出,阀厅模型表面电场过渡平滑,计算所得的电场强度最大值位于 ± 1100 kV 出线光电流互感器(OCT)上部均压环表面,最大值为 13.8 kV/cm,其余部位的电场强度相对较小。

4 结论

针对大型复杂模型有限元建模困难的问题,本文提出了基于多层外包实体的设备表面网格精细化控制思想,并对其布尔操作算法进行了研究,实现了大型复杂有限元模型的高效、精确建模,所得结论如下:

(1)对外包实体生成算法、区域划分原则及相关操作流程进行了介绍,基于电场数值计算有限元网格划分原则,实现了模型表面多层网格加密;

(2)以不接地导体球与点电荷模型为例,介绍了本文方法的具体应用流程,验证了其精确性及高效性,并讨论得出合理的模型表面网格加密层数为 3 层,合理的模型表面网格长宽比为 2 或 3;

(3)将本文方法应用于 ± 1100 kV 特高压阀厅设备表面电场计算中,计算所得的阀厅模型表面电场过渡平滑,电场强度最大值位于 ± 1100 kV 出线 OCT 上部均压环表面,为 13.8 kV/cm,有效实现了本文方法在大型复杂模型电场求解时的具体应用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘超,阮江军,廖才波,等. 1000 kV 特高压交流输电线路直升机平台带电作业侵入路径[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):64-70.
LIU Chao,RUAN Jiangjun,LIAO Caibo,et al. Approaching paths of helicopter live-line work platform to 1000 kV UHV AC transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(6):64-70.
- [2] 王加龙,彭宗仁,刘鹏,等. ± 1100 kV 特高压换流站阀厅均压屏蔽金具表面电场分析[J]. 高电压技术,2015,41(11):3728-3736.
WANG Jialong,PENG Zongren,LIU Peng,et al. Analysis of electric field on the surface of grading and shielding fittings inside ± 1100 kV ultra-high voltage converter valve hall[J]. High Voltage Engineering,2015,41(11):3728-3736.
- [3] ANSARI S U,HUSSAIN M,MAZHAR S,et al. Mesh partitioning and efficient equation solving techniques by distributed finite element methods;a survey[J]. Archives of Computational Methods in Engineering,2017,26(1):1-16.
- [4] 李海峰,吴冀川,刘建波,等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程,2012,23(3):368-377.
LI Haifeng,WU Jichuan,LIU Jianbo,et al. Finite element mesh generation and decision criteria of mesh quality[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,23(3):368-377.
- [5] 陈东,乐波,郭贤珊,等. ± 1100 kV 特高压换流站支柱绝缘子屏蔽球参数优化设计[J]. 高电压技术,2017,43(10):3189-3197.
CHEN Dong,YUE Bo,GUO Xianshan,et al. Optimal design of shielding ball parameters for post insulator of ± 1100 kV UHV converter station[J]. High Voltage Engineering,2017,43(10):3189-3197.
- [6] 陆佳政,谢鹏康,方针,等. 重覆冰条件下防冰防雷绝缘子电场仿真与伞裙优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):199-204.
LU Jiazheng,XIE Pengkang,FANG Zhen,et al. Electric field simulation and sheds optimization of anti-icing and anti-lightning insulator under heavy icing condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):199-204.
- [7] 田冀焕,周远翔,郭绍伟,等. 直流换流站阀厅内三维电场的分布式并行计算[J]. 高电压技术,2010,36(5):1205-1210.
TIAN Jihuan,ZHOU Yuanxiang,GUO Shaowei,et al. Distributed parallel computation of the 3D electric field in the HVDC converter valve hall[J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1205-1210.
- [8] 王栋,阮江军,杜志叶,等. 并行求解含有电位悬浮导体的静电场数值问题[J]. 中国电机工程学报,2011,31(6):131-136.
WANG Dong,RUAN Jiangjun,DU Zhiye,et al. Parallel numerical computing of electrostatic field model of conductors with floating potentials[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(6):131-136.
- [9] LIU P,DINAVAH V. Finite-difference relaxation for parallel computation of ionized field of HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(1):119-129.
- [10] LIAN Y Y,HSU K H,SHAO Y L,et al. Parallel adaptive mesh-refining scheme on a three-dimensional unstructured tetrahedral mesh and its applications[J]. Computer Physics Communications,2006,175(11-12):721-737.
- [11] NOGUCHI S,NAOE T,IGARASHI H,et al. A new adaptive mesh refinement method in FEA based on magnetic field conservation at elements interfaces and non-conforming mesh refinement technique[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017,53(6):1-4.
- [12] KACEWICZ B. Adaptive mesh point selection for the efficient solution of scalar IVPs[J]. Numerical Algorithms,2017,

- 77(1-3):1-19.
- [13] HUANG D, RUAN J, CAI W, et al. Flashover prevention on high-altitude HVAC transmission line insulator strings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(1):88-98.
- [14] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. 直流换流站阀厅内部场域电位和电场强度子模型法数值求解[J]. 电网技术, 2011, 35(9):158-163. WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of potential and electric field intensity in field domain of valve hall of DC converter station by sub-model method[J]. Power System Technology, 2011, 35(9):158-163.
- [15] 金硕, 甘艳, 阮江军, 等. 特高压直流输电系统阀厅金具表面电场精细求解[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1299-1305. JIN Shuo, GAN Yan, RUAN Jiangjun, et al. Accurate calculation method of electric field on the surface of converter valve fittings in UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1299-1305.
- [16] 陈龙, 樊兴旺, 王猛, 等. 有限元四边单元网格模型的参数化重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(4):680-688. CHEN Long, FAN Xingwang, WANG Meng, et al. Parametric reconstruction of four-sided finite element mesh model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(4):680-688.
- [17] DORICA M, GIANNACOPOULOS D D. Toward optimal mesh quality improvements for adaptive finite element electromagnetics with tetrahedral[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2):989-992.
- [18] 姬大潜, 刘泽洪, 邓桃, 等. 特高压直流输电系统稳态运行时高端阀厅内部的电场分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(12):3000-3008. JI Daqian, LIU Zehong, DENG Tao, et al. Analysis of overall electric field in high-voltage valve hall end on steady state of UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):3000-3008.
- [19] 杜志叶, 朱琳, 阮江军, 等. 基于瞬时电位加载法的 ± 800 kV特高压阀厅金具表面电场求解[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1809-1815. DU Zhiye, ZHU Lin, RUAN Jiangjun, et al. Surface electric field calculation of firings inside ± 800 kV valve hall using electrostatic field instantaneous load method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1809-1815.

作者简介:



田 雨

田 雨(1995—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为电磁场数值计算(E-mail:yu_tian@whu.edu.cn);

杜志叶(1973—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电磁场数值计算、特高压直流输电关键技术(E-mail:Duzhiye@126.com)。

Precise mesh control method on model surface for finite element electric field calculation

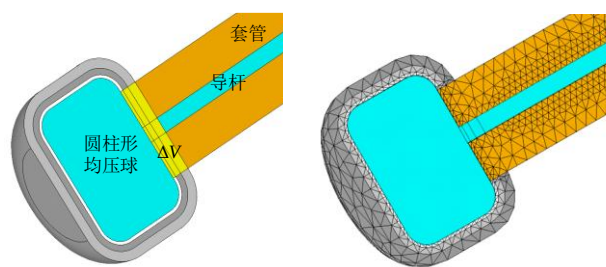
TIAN Yu¹, DU Zhiye¹, LIU Shuang¹, JIN Shuo², MENG Shaoxin³, JIN Qi¹, ZHOU Wenfeng¹

- (1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
3. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute
Wuhan Branch, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the process of solving electric field of the large and complex finite element models, the precise mesh control of the concerned equipment surface is often difficult. To overcome this problem, the basic principles of meshing in the numerical calculation of finite element electric field are discussed, considering the basic geometric structure of the entity model, the idea of precise mesh control based on multilayer external surround entities for equipment surface is proposed, based on which, an effective finite element modeling method is developed. Taking a simple three-dimensional model as an example, the algorithm of external surround entities generation, the principle of regional division and related operation process are introduced. Taking the standard model as an example, the specific application process of the proposed method is introduced, and the parameter setting of the external surround entities is discussed. The proposed method is applied to the calculation of surface electric field of DC valve hall in ± 1100 kV UHV converter station. The calculated surface electric field is smooth, and the maximum electric field intensity is 13.8 kV/cm. The proposed method can effectively realize the precise mesh control of the model surface, and has certain guiding significance for the efficient and accurate modeling of large and complex finite element models.

Key words: external surround entities; mesh control; finite element method; electric field calculation; UHV valve hall; models

附录 A



(a) 外包实体区域划分

(b) 网格分布

图 A1 圆柱形均压球模型（剖视图）

Fig.A1 Cylindrical shielding ball model (sectional view)

附录 B

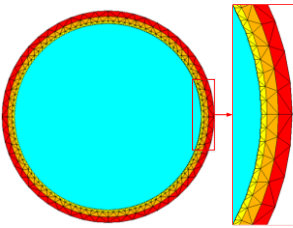


图 B1 导体球表面网格分布（剖视图）

Fig.B1 Mesh distribution on surface of conductor ball (sectional view)

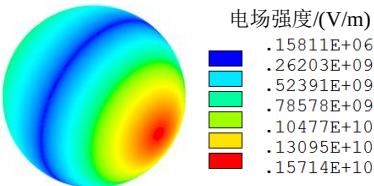


图 B2 本文方法计算所得的导体球表面电场分布

Fig.B2 Calculated electric field distribution on surface of conductor ball by proposed method

附录 C

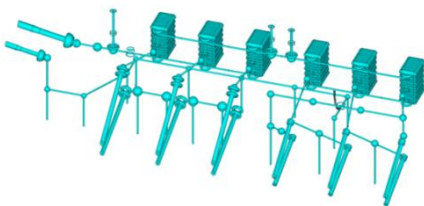


图 C1 ±1 100 kV 换流站阀厅模型

Fig.C1 ±1100 kV converter station valve hall model

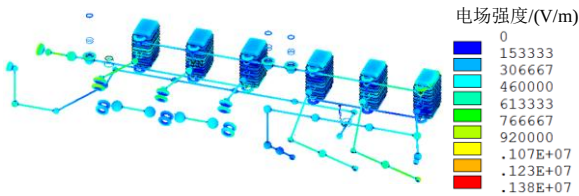


图 C2 ±1100 kV 阀厅模型表面电场分布

Fig.C2 Surface electric field distribution of ±1 100 kV valve hall model