

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.018

导电微粒在稍不均匀场中荷电运动的离散元算法开发

朱胜龙¹, 罗沙², 康健², 杨立³, 刘静¹, 秦少瑞¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230022;
3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 研究导电微粒的荷电运动特性对治理气体绝缘开关设备中的导电微粒缺陷意义重大, 目前采用数值模拟对微粒荷电运动研究的方法较少, 且局限于欧拉法模拟。鉴于以上的问题, 提出了一种应用离散元计算微粒运动的新策略, 通过对比实验和算例的数据验证算法的准确性, 并成功模拟了多个球形微粒/粉尘和线形微粒的运动, 证明了该算法的应用优势与进一步的开发价值和潜力。

关键词: 导电微粒; 运动; 离散元; 算法开发

Development of DEM for Conductive Particulate Charge and Motion Under Slightly Non-uniform Electrical Field

ZHU Shenglong¹, LUO Sha², KANG Jian², YANG Li³, LIU Jing¹, QIN Shaorui¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Company Limited Research Institute, Hefei 230022, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230022, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The study of charge motion characteristic of conductive particle is of great significance for the treatment of conductive particle defect in gas insulated switchgear. At present the method of studying charge motion of particle with numerical simulation is less and is only limited to Eulerian simulation. In view of the above problems, a kind of new strategy to calculate the motion of particles based on discrete element method is proposed. The correctness of the algorithm is verified by comparing the results of experiments and calculation data, the motions of multiple spherical particles/dust and linear particles have been successfully simulated as well. The application advantage of the algorithm and the further development value and potential are proved.

Key words: conductive particles; motion; DEM; algorithm development

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中的导电微粒缺陷是其安全运行的隐患之一。微粒不仅会畸变空间电场的分布^[1], 也可以通过与电极接触而荷电、起举和运动^[2-3]。相关研究已表明, 当微粒运动附着在盆式绝缘子表面时可诱发沿面闪络甚至烧蚀破坏^[4], 因此研究微粒的荷电运动特性是非常重要的。

目前学者们大都倾向于直接通过实验测量微

粒的荷电量/荷质比和运动轨迹^[5-6]。该方法虽然直观, 但是很难做到定量分析微粒细观参数如杨氏模量、泊松比、滚动摩擦系数等对微粒荷电运动的影响, 而且测量荷电量/荷质比也具有一定的操作难度^[5]。相对实验法而言, 直接采用数值模拟的研究更加少见, 这是因为部分学者主要把仿真计算的思路集中于欧拉法上。在该问题的工程背景下, 由于待计算的微粒尺度很小, 如球形微粒的粒径通常以亚 mm 级^[7]为主, 但需要考虑的几何计算域却很大。欧拉法的核心正是在于对计算域的网格划分, 那么

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(51807045); 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902702)。

Project Supported by National Natural Science Foundation(51807045), National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902702).

必定会造成较大的计算量。如文[8-10]通过欧拉法建立了一些典型的比如微粒在体积较小的楔状结构电极(用以模拟GIS内的稍不均匀场)中的荷电运动模型,再运用有限元等数值算法离散和计算微粒的运动轨迹。然而即便如此,如果细究下来,欧拉法仍存在以下4点值得商榷的问题:

1)欧拉法描述的微粒实时运动实际上是计算网格在每一个时间步长下的运动,即在计算微粒运动的每一个时间步的数值方程之前,都要重新剖分一次网格^[9],这种做法必然对计算资源的需求较高。

2)每次重新剖分网格后,微粒所占的网格部分存在着变形^[11]的可能性(例如出现负体积或大畸变单元的报错),但事实上GIS内的金属微粒通常是被假设为刚体粒子,即不变形的固体微粒。微粒所占的网格是否能始终保持不变形依赖于计算的精度和数值变化的梯度这两大要素,尤其是模拟当微粒与壁面碰撞后,网格如何有效重构会成为一大难点。

3)该方法很难模拟当微粒体积较小、形状复杂及数量较多的情形,当微粒体积较小时,微粒周围的网格密度需要遵循一定的梯度渐次展开^[12],这就说明微粒边界处的网格数量非常巨大;至于当微粒形状复杂或微粒数量较多时,网格的复杂度必然更高。

4)由于欧拉法中的微粒本质上是网格,在后处理做图形化展示时需加以特别的修饰处理方能比较直观的表现微粒的运动状态,但这相当于又增加了额外的计算量和后处理成本。

因此文中基于离散元法(discrete element method, DEM),利用拉格朗日粒子构造真实的微粒模型;通过直接追踪拉格朗日粒子的运动实现了直观模拟的效果;算法采用Linux系统下的开源代码LIGGGHTS来实现,在公开的3.8.0版本的代码库里增加了电荷转移、库仑力以及计算所需各类相关变量和边界条件的定义代码;为了进一步展现算法的优势,文中不仅编写了计算单个/多个球形微粒的算例脚本,还开发了可用于计算线形微粒荷电运动的算例;最后通过比对算例与实验数据,验证了算法的准确性。该算法作为深入探索微粒荷电机理和运动特性的基础性研究,具有引导和深入开发的价值和潜力。

1 DEM的基础理论

DEM分析微粒运动是固体力学领域中的常用算法^[13],但单纯的固体力学问题并不考虑微粒会带电荷。本节按照DEM的建模和计算流程依次介绍算法中的拉格朗日粒子(下文如无特殊说明一律简

称为“粒子”,注意区分“微粒”,后者指用粒子构造的模型)与插入方式、碰撞接触模型、边界条件、荷电和运动控制方程。

1.1 粒子与插入方式

粒子是DEM的基本单元,常规的都是球形粒子,也有特殊的超球粒子^[14],文中采用球形粒子直接模拟普通的球形微粒,利用刚性键连接球形粒子的方法构造线形微粒^[15-17]。

对于DEM而言,粒子插入计算域的方式是编写算例的首要基础问题。通常来说,粒子有2种最常见的插入方法:①按指定的位置坐标插入,位置坐标即球心坐标;②设定好粒子数量再按高斯分布的排列随机插入在某个面上,例如计算域的底面。

1.2 碰撞接触模型

微粒与微粒、电极或固定壁面的碰撞接触在接触力学领域已有详细研究。根据Johnson的论述^[18],接触可分为弹性体Hertz法向接触、非弹性体接触、Mindlin切向接触等物理模型。目前应用最广,计算效果为各界认可的模型为Hertz-Mindlin模型^[13],见图1。其本质是将微粒的碰撞接触等效为弹簧机构,通过引入杨氏模量、泊松比、阻尼比、碰撞恢复系数、滚动摩擦系数^[19]等细观参数来描述碰撞接触力,进而计算出微粒碰撞时的角速度和转动惯量。

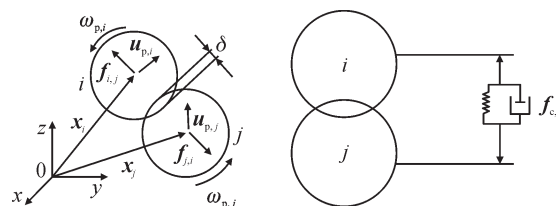


图1 Hertz-Mindlin模型(等同于Hertz-Tangential模型)

Fig. 1 Model of Hertz-Mindlin/Hertz-Tangential

1.3 边界条件

DEM的边界条件即判断文中1.2节中微粒是否发生接触的条件,源码中的范数定义式为

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| < r_i + r_j + 2\|\mathbf{u}_{\max,ij}\|N_{\text{verlet}}\Delta t \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{x}_i$ 、 $\mathbf{x}_j$ 、 r_i 、 r_j 分别是粒子*i*、*j*的位移矢量和半径; Δt 是离散元的时间步长; $\mathbf{u}_{\max,ij}$ 是粒子*i*与粒子*j*的最大速度; N_{verlet} 为近邻列表^[20]的刷新次数。

这里值得重点强调的是近邻列表的概念,近邻列表的内涵阐述在DEM领域也不多见。因为它是一种对微粒间作用力计算的优化策略^[21],如果一个DEM算例只考虑计算微粒的碰撞力,是不需要过分深究的,即使直接把 N_{verlet} 取0,计算结果都不会受到很大的影响^[20]。但是文中研究的是考虑微粒带电

的模型,微粒间库仑力的计算是非常重要的内容。近邻列表是统计算例设定的计算域全部区域或者某一范围内的区域中可能发生碰撞接触的微粒信息的表格。在算例的脚本代码中,衡量近邻列表统计区域范围与占用内存、CPU等计算资源耦合的变量定义为 $neighbor$,单位为 bin ,显然如果把 $neighbor$ 设置的过小,计算速度会明显加快,计算成本也可以减少,但精度会受到一定影响。经测试,文中算例中当插入的粒子数量小于1 000个时,设置 $neighbor$ 为 $5 \times 10^{-4} bin$,近邻列表每步更新会获得比较合理的结果。

1.4 荷电和运动控制方程

微粒的荷电机理十分复杂,宏观和微观^[22]都有不同的解释。文中作为将DEM用于计算微粒荷电的引入性探索,暂时只考虑微粒与电极的接触荷电、微粒与微粒之间的碰撞接触荷电两种机制。微粒与电极的接触荷电按照Lebedev N N等^[23]提出的公式计算

$$q_i = \pm \frac{2}{3} \pi^3 r_i^2 \varepsilon |E| \quad (2)$$

式(2)中: q_i 为微粒 i 的荷电量; ε 为模型内部介质的绝对介电常数; E 是电场强度矢量。微粒与微粒之间的碰撞接触荷电按照Soo S L提出的模型^[24]计算

$$\Delta q_i = -\Delta q_j = (q_j C_i - q_i C_j) / (C_i + C_j) \quad (3)$$

式(3)中: Δq_i 、 Δq_j 为微粒 i 、 j 之间的电荷转移量; C_i 、 C_j 是微粒 i 与 j 的电容,对于球形粒子来说 $C_i = 4\pi\varepsilon r_i$ 。

微粒的运动控制方程由牛顿第二定律和刚体定轴转动定律计算

$$\begin{cases} m_i \frac{du_i}{dt} = m_i g + E q_i + f_{\text{drag},i} + f_{\text{dep},i} + \Sigma(f_{q,ij} + f_{c,i}) \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \Sigma \frac{1}{2} (x_j - x_i) \times f_{c,i-1} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: g 是重力加速度; t 是时间, m_i 、 u_i 、 ω_i 、 I_i 分别为微粒 i 的质量、速度、角速度和转动惯量矢量; $f_{\text{drag},i}$ 、 $f_{\text{dep},i}$ 、 $f_{q,ij}$ 、 $f_{c,i}$ 、 $f_{c,i-1}$ 是微粒 i 的阻尼曳力(注意精确的拖曳力需要和流场做双向耦合计算,文中的 $f_{\text{drag},i}$ 就是背景流场对微粒起粘滞阻力作用的部分力,等同于文[2]第2.1节中的阻力)、电场梯度力、与微粒 j 之间的库仑力、碰撞力及其切向分量,当计算微粒与电极或壁面碰撞时 $x_j = 0$ 。上述力的计算在文[2, 25]中已有详细说明,文中不作赘述。需要补充的是文[2]给出的 $f_{\text{drag},i}$ 的系数拟合不够精确,计算需按照文[26]的拟合结果进行修正。

1.5 几种典型的算法对比

DEM与一般欧拉算法的对比详情见表1^[27-28]。

表1 算法对比

Table 1 Comparison of algorithms

算法	网格	离散格式	离散方法	积分策略	计算效率	数据记录的位置
DEM	一般不需要	中心差分	显式(隐式一般只用于研究失稳现象)	—	高	粒子的表面、重心
有限元		本质也是中心差分,但也可以通过修正权函数,制造出迎风差分的效果		边界一域(插值耦合通过格林公式实现)		网格节点
有限差分	需要	中心差分/迎风/顺风	显/隐式	—	隐式时通常较低	网格节点
有限体积		中心差分/迎风/顺风		网格面心与毗邻面心一体心(计算时通过高斯公式建立面心一体心插值的耦合)		一般都为网格形心

可以发现DEM的计算同有限元、有限差分、有限体积法一样也是数值离散连续方程,文中求解的基本运动方程为包含时间项的瞬态方程,因此表1的讨论均基于瞬态求解进行。DEM的离散格式和有限元法相同都是中心差分,但它是显式迭代计算,而有限元和有限体积法则是为了满足计算收敛性的需求(库朗数不能大于1),通常都采取隐式法^[29]去求解大型矩阵,这一点也是DEM比其它算法更高

效的根本原因。

1.6 DEM的计算流程框架

根据文中1.1至1.5节的内容,基于LIGGGHTS实现的DEM算例的设置和计算流程的框架见图2。

文中所有算例中的时间步长统一取 $2 \times 10^{-5} ms$;计算次数设置为 10^7 至 3×10^7 次不等;后处理由开源代码Paraview完成;计算在配置Intel Core i7-8700, 16 GB内存的台式机完成, Linux系统下可直

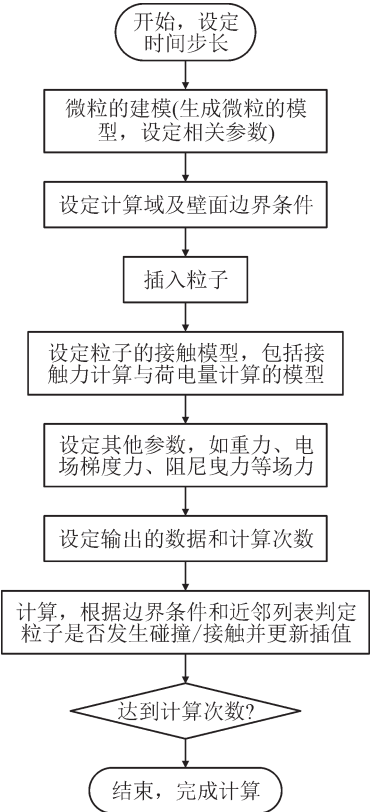


图2 DEM的计算流程

Fig. 2 Computational chart of DEM

接同步运行8个不同的算例,计算资源相对于欧拉法非常节省。

2 算例分析与验证

2.1 算例设置

文中以王健等的研究^[30]中简化的同轴圆柱体结构作为GIS模型,便于后续验证,算例模型见图3。这是因为对比K Sakai、高佳等学者采用的楔形电极下的稍不均匀场^[5,8,31],同轴圆柱体结构的稍不均匀场更加接近真实GIS内的电场分布,当模型中的内外圆柱半径比为1:3左右时,电场不均匀系数在1.6~1.7左右,符合稍不均匀场的定义要求^[9]。场强*E*按照式(5)计算

$$E = U_m \sin(2\pi f_{ac} t + \theta) r / [r^2 \ln(R_2/R_1)] \tag{5}$$

式(5)中:*U_m*、*f_{ac}*、*θ*为交流电压的幅值、频率和初相位,对直流工况,将*f_{ac}*取0, *θ*取90°即可;*R₁*=0.02 m, *R₂*=0.06 m 分别是图3模型中内外圆柱的半径,内圆柱表示高压导杆,外圆柱表示地电极;*r*是外圆柱内表面与内圆柱外表面的径向距离,模型*x*方向的长度取了0.03 m。由于算例中微粒(图3中黑点)粒径较小,为便于展示,文中将可视化图中*x*方向两侧的圆环壁面透明化处理,微粒体积亦放大10至20倍不等。后文算例中粒子、多球粒

子的子粒子的细观参数设置见表2。

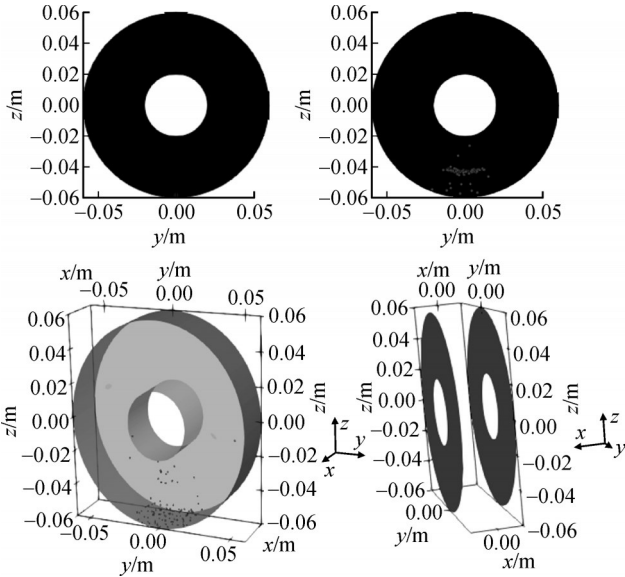


图3 算例模型的剖面图、立体图及模型壁面

Fig. 3 Cross and vertical section and wall of the model

表2 微粒的细观参数

Table 2 Physical properties of particles

对象	属性		取值
粒子	密度/(kg·m ⁻³)		2 700
	半径/mm		0.50/0.10/0.25
	杨氏模量/Pa		73×10 ⁹
	泊松比		0.360
	碰撞恢复系数	粒子—粒子	0.385
		粒子—电极/壁面	0.561
	摩擦系数(滚动)	粒子—粒子	1.400
		粒子—电极/壁面	1.160
壳/电极	密度/(kg·m ⁻³)		2 700
	杨氏模量/Pa		73×10 ⁹
	泊松比		0.360

最后补充一下其他边界条件的设定,当微粒与电极(高压导杆或地电极)碰撞时会荷载与电压极性相同的电荷,荷电量按式(2)更新;当微粒与*x*方向的壁面碰撞时,微粒的电荷被壁面吸收而清零。

2.2 仿真与实验的对比

2.2.1 单个球形微粒的运动

按照文[30]的实验参数和设定,本节算例按照模型内部温度293.15 K、填充介质为空气、气压为标准大气压的环境条件选定算例参数的取值(后文算例亦为同样设置),导杆加载幅值为40 kV的直流电压,粒径取0.5 mm,其他参数同表2。仿真了微粒从起举到完成一个冲击(微粒从地电极到导杆往返一次)的结果,结果见图4,刻度轴*q*反映了微粒所带的电荷量(下文如无特殊说明均是如此显示),仿真

结果和实验拍摄的轨迹较为接近,详情可见拟合的DEM计算的微粒径向运动高度比距和实验结果的

对比值,见图5,其中“比距”为微粒径向运动高度与地电极—导杆之间距离(0.04 m)的比值。

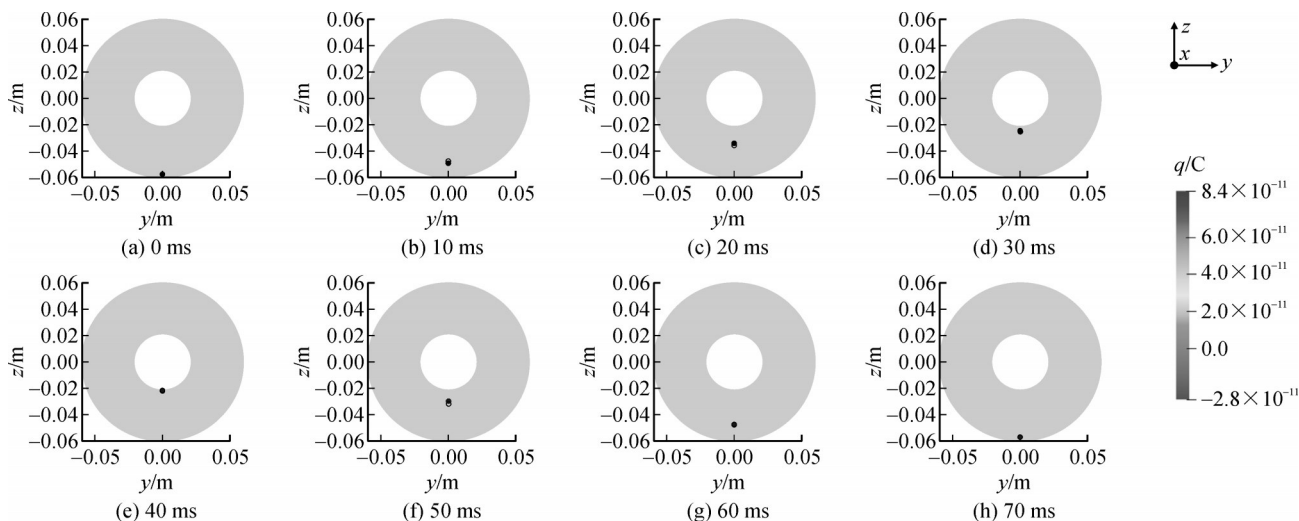


图4 微粒上升—碰撞—返回

Fig. 4 Lifting-touching-backing for the particle

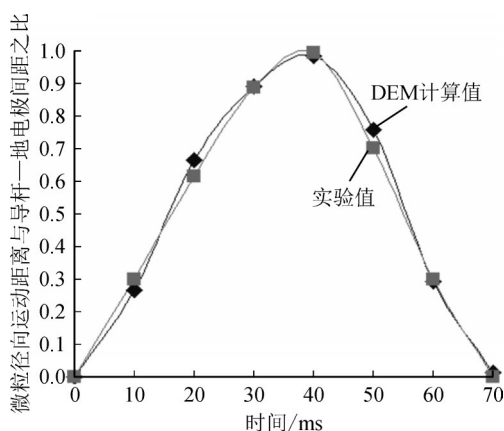


图5 与文[30]的实验对比

Fig. 5 Comparison with the experiment in paper 30

2.2.2 线形微粒的运动模拟

根据文[32],线形微粒显然是对GIS绝缘强度威胁更大的存在,但目前很少有关于线形微粒运动的仿真模拟,即使在欧拉法中也很少见。为弥补这一遗憾,文中采用了一种多球粒子模拟线形微粒的方法成功地复现了实验观测的线形微粒运动的部分现象。多球粒子模型见图6,共由9个相同的球形子粒子构成,子粒子半径为0.25 mm、重叠距离为2.5 mm,此时该粒子模型几乎可以与标准的圆柱线状结构等效^[15-17]。值得注意的是多球粒子的阻尼曳力系数、质量、表面积和转动惯量矩阵(式(4)中的 I_i)需按照Hölzer-Sommerfeld模型^[33]和其他相关文献[17,34-35]进行修正。本节算例中子粒子的其它参数均同表2,多球粒子的插入方式统一选择方式②,导杆上加载直流73 kV电压。

经调试,取 yOz 坐标面的平行截面透视观察可

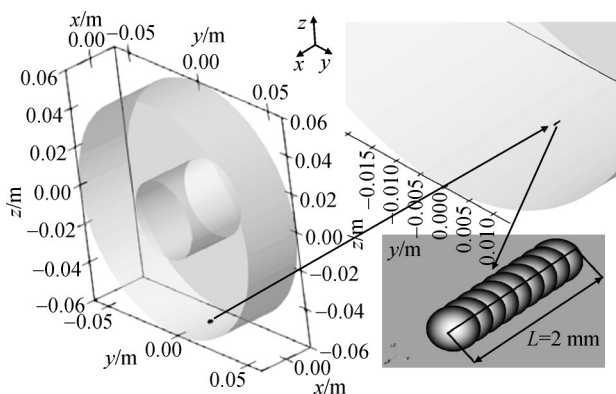


图6 GIS中的线形微粒

Fig. 6 Wire particle in GIS

获得比较好的观察视角,文中通过延时摄影的方法获得了线形微粒的动态分布图。线形微粒的起举—直立—上升—碰撞—翻滚—碰撞的动态分布图见图7,发现最初平躺的线形微粒经过荷电起举后确实是表现为直立姿态,这一点和实验^[32,36]中的观察较接近;当完成初次冲击之后,由于微粒每次与电极/壁面碰撞的反射角都不同,因此微粒的运动范围更大,这一点是其与球形微粒的本质区别。微粒在地电极(左)和高压导杆(右)处的“飞萤”抖动现象见图8,结果与文[2]第1.2节的描述有一定的类似,微粒在电极附近确实会在某一时刻呈现出旋转、上下小幅度的跳跃活动。以图8(a)为例,此时刻度线为微粒的角速度,可以发现微粒此时转速较高,因而会受到较大的切向和法向的阻尼曳力,再结合电场力的作用下形成了这种较为特殊的运动姿态。除此之外,在仿真至127 ms时刻开始,还发现了线形

微粒呈现出一种“螺旋上升”运动的姿态,结果见图9。微粒从位置“1”处开始到“2”与地电极发生碰

撞,依次沿箭头的指向经过“3”和“4”,呈现出典型的螺旋式轨迹特征。

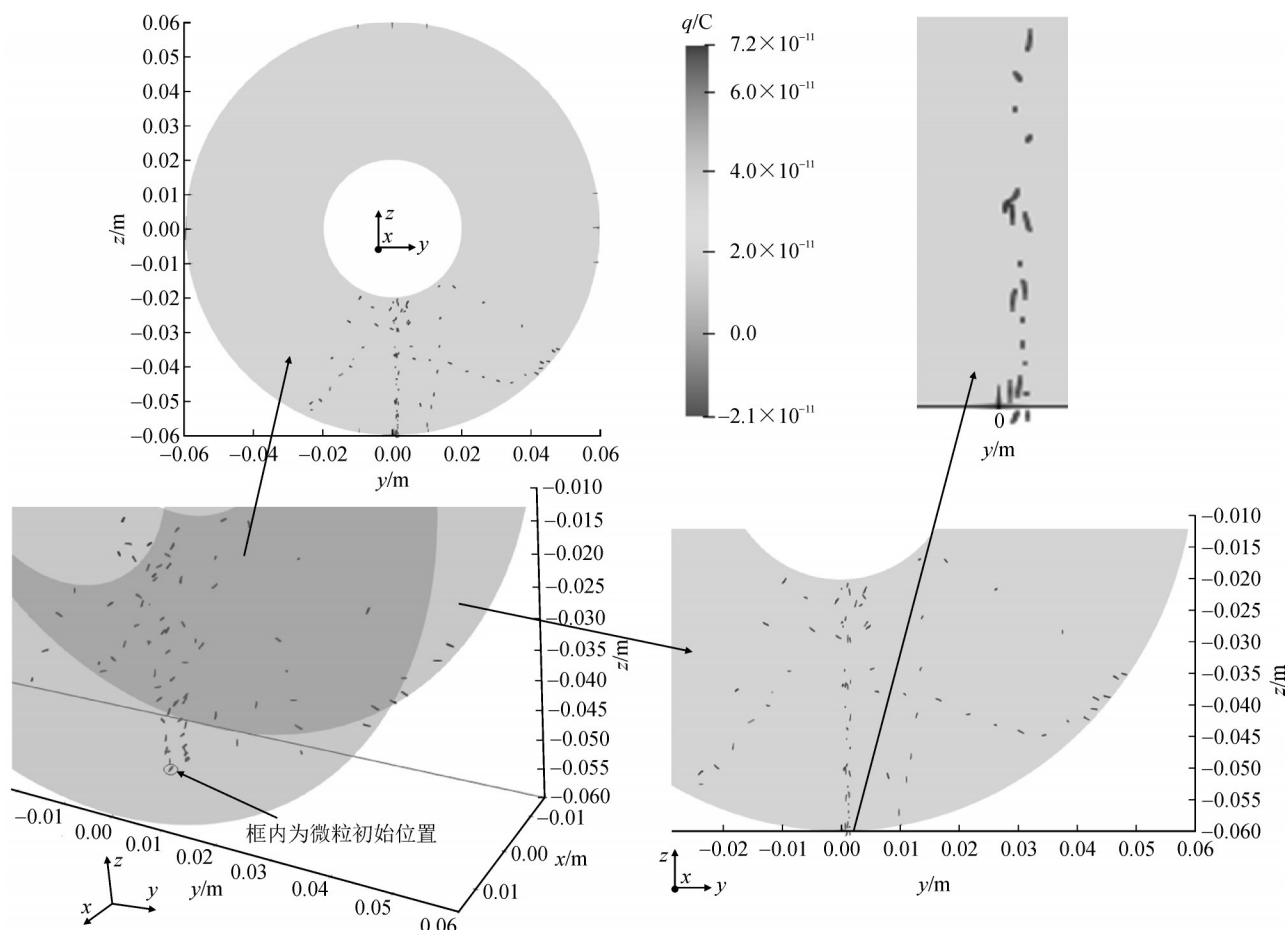
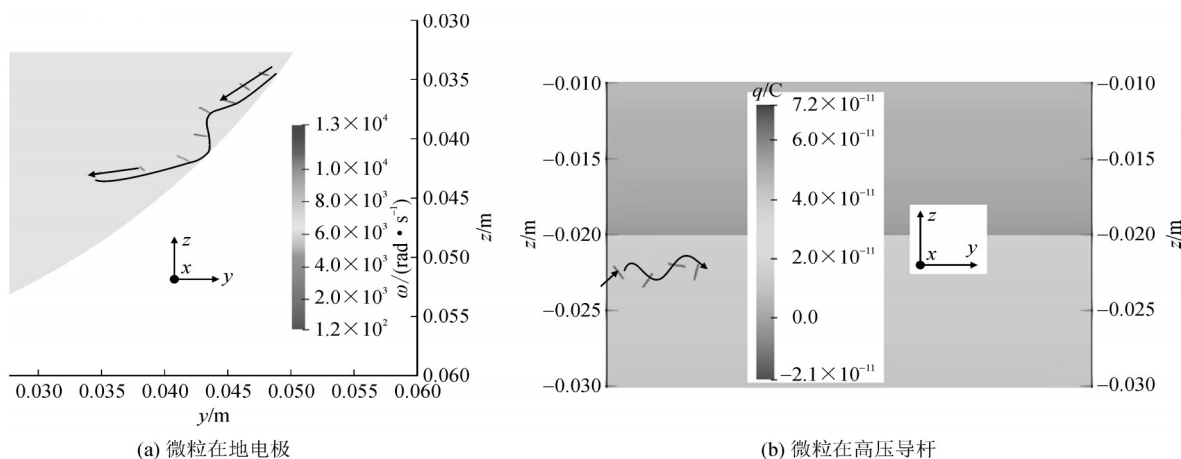


图7 线形微粒的实时动态追踪(0~100 ms)

Fig. 7 Time-traced of wire particle(0~100 ms)



(a) 微粒在地电极

(b) 微粒在高压导杆

图8 线形微粒的“飞萤”运动(52~59 ms, 90~93 ms)

Fig. 8 Flying firefly of wire particle(52~59 ms, 90~93 ms)

2.2.3 多微粒的运动

大量的工程经验表明, GIS内的微粒可能来源于断路器动静触头点等的机械摩擦作用^[32], 因此GIS腔体内很可能会产生多个体积更小的微粒粉尘, 但

目前缺乏多微粒运动模拟。为进一步展现DEM的优势, 文中模拟了初始时刻模型底部有100个粒径为0.1 mm微粒粉尘的算例, 粒子采用方式②插入, 电极上施加幅值为33 kV的交流电压, 结果见图10。

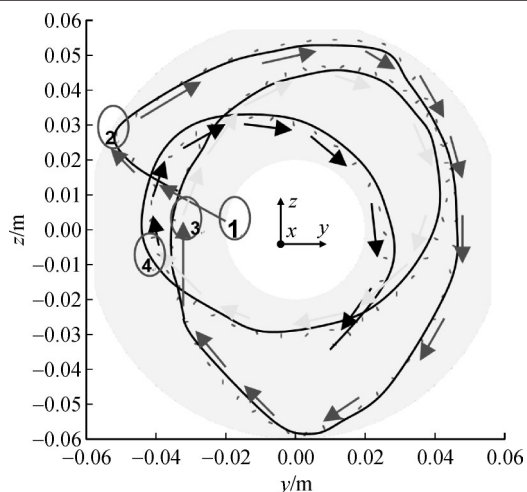


图9 线形微粒的“螺旋”运动轨迹详图(127~236 ms,运动方向:依次沿箭头的指向)

Fig. 9 The 'spiral' trajectory of wire particle(127~236 ms, direction: Along the direction of arrows)

发现在0~10 ms时刻,当大量的粉尘携带同种极性的电荷起举时,粉尘也在不断地扩散,这是携

带同性电荷的粒子间库伦斥力的缘故;而后随着交流电压的变化,粉尘团(此时的粉尘并未完全散开)开始了规律性地上下浮动;直到第29 ms时刻,由于一部分粒子已经先后与地电极发生过碰撞而荷载了不同极性的电荷,此时粉尘间开始存在相互吸引、碰撞分离、电荷转移等复杂现象,电荷的极性开始呈现出较大的差异;此后在36~51 ms时刻下,粉尘始终没有完全散开,这是粒间的库仑斥力、吸引力与方向持续变化的电场力共同作用的结果;最后直到51 ms时刻以后,粉尘之间由于分散程度已经较高,可认为此时携带异种极性电荷的粒子间的库仑力已经开始不足以维持粉尘聚集,粉尘倾向于向四周扩散;在53~94 ms时刻,微粒始终在图10中所示区域做类似于文[32]实验中观察到的“沙尘暴”运动,这是因为此时大多数粉尘经过了一段时间的接触荷电、受力和加速作用之后具有了相对较高的速度;最终在94 ms时刻,已经有少量的粉尘成功扩散至模型的上半区域。

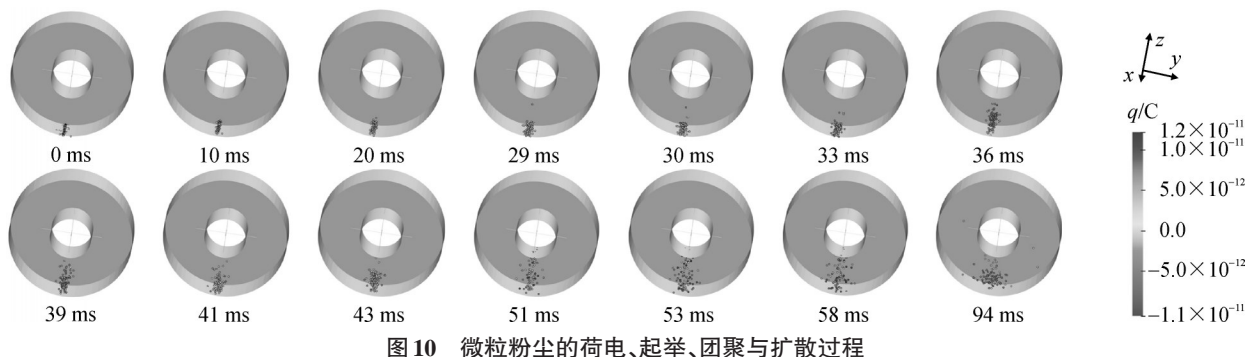


图10 微粒粉尘的荷电、起举、团聚与扩散过程

Fig. 10 Charging, lifting, agglomeration and diffusion of granular dust

相对于交流工况,粉尘在直流33 kV电压下明显扩散得更快。见图11,粉尘在41 ms时刻就已经比较分散。但随着仿真继续推进,发现直流电压下粉尘大都只在模型的下半区域内运动,呈现相对于交流情形更加猛烈的“沙尘暴”。这可能和直流电压下电场方向(由导杆指向地电极)始终恒定有关,再加上各粒子间的距离较大,库仑力很难影响到粉尘的运动方向,从而使得大多数粉尘更倾向于在模型下半区域的地电极和导杆之间往返运动。

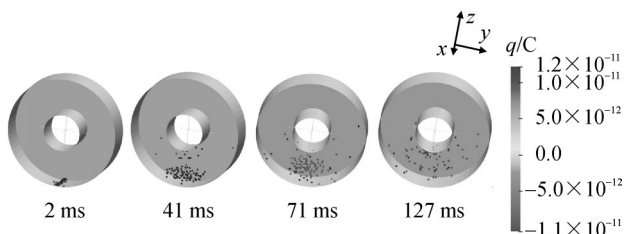


图11 粉尘在直流33 kV电压下的扩散过程

Fig. 11 Diffusion of granular dust under 33 kV DC

2.3 算法的其他补充说明

2.3.1 关于欧拉法

以商业有限元软件Comsol为例,构建文中2.2.1节中单个球形粒子的三维模型,网格剖分采取极细化、自适应条件下为40余万个网格单元;当粒子数量达到100个时,网格数量已经超过了400万,显然普通配置的计算机已经难以适应计算需求^[37]。

2.3.2 关于多球粒子

事实上计算多球粒子旋转的数学过程十分复杂,涉及到四元数和欧拉角理论^[35]。简单来说就是DEM中固定的全局坐标系和描述多球粒子的局部坐标系之间需要进行相应的变换,因为无论如何旋转,保证微粒的重心相对于微粒的局部坐标系恒定是必要的前提。在这种情况下,需要对多球粒子的转动惯量矩阵重新折算。

此外,多球粒子在碰撞时是单个或多个子粒子的碰撞,子粒子的荷电量仍然可以按照文中相应公

式计算,但其所得的电荷,文中按照子粒子表面积所占总面积的权重分配到每个子粒子上处理^[17]。至于线形微粒受到的各作用力的计算,则是直接算出多球粒子中各子粒子的受力,再折算到刚性键所在的轴方向上,最后进行叠加^[36]。该过程虽然略显繁琐,但是避免了文[38]中电场力的折算以及非球形粒子库仑力的推导工作,这也是DEM多球粒子在本案应用相对于超球粒子的优势。

2.3.3 关于LIGGGHTS的编译说明

开源代码LIGGGHTS最初由文[14, 20]的作者Kloss C等开发而成,文中根据式(2)-(4)及文中1.3节的边界设定改写了其系统库中的C++源代码并重新进行编译。程序开发和编译的具体操作流程可参考文[20]和LIGGGHTS官网上的说明,算例则是通过脚本代码的命令逐条执行,代码的编写思路即文中图2流程图所示。

3 结论

1)文中通过引入DEM,开发了一种可以计算GIS内稍不均匀电场下微粒荷电运动的新方法,对比以往的欧拉法,具有效率高、成本低、后处理展示效果直观的优越性。

2)拟合单个球形微粒运动的实验数据和文中算例的模拟结果,验证了算法的可靠性;通过计算多球粒子在直流电压下的荷电运动,再现了实验中线形微粒的“飞萤”和“螺旋”上升现象;模拟粉尘微粒在交/直流电压下呈现出的“沙尘暴”现象,揭示了粉尘从荷电、起举、团聚到扩散的细节过程,充分展示了DEM的优势,证明了该算法的开发价值和潜力。

参考文献:

- [1] SUN Guanyu, SONG Baipeng, GUO Baohong, et al. Simulation research on the influence of metal granule on vacuum flashover in pre-breakdown stage[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Germany: IEEE, 2018: 47-50.
- [2] 王 健. 直流GIL金属微粒的荷电运动机制与治理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WANG Jian. Research on moving mechanisms of charged metal particles in DC GIL and suppressing method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [3] 戴 锋, 陈 轩, 王立宪, 等. 直流GIL中球形金属颗粒运动特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 173-180.
DAI Feng, CHEN Xuan, WANG Lixian, et al. Kinetic characteristic analysis of spherical metal particles in DC GIL[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 173-180.
- [4] 王浩然, 郭子豪, 张丝钰, 等. 缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 982-992.
WANG Haoran, GUO Zihao, ZHANG Siyu, et al. Influence of UHV AC GIS spacer' defects on electrical field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 982-992.
- [5] 张乔根, 贾江波, 杨兰均, 等. 气体绝缘系统电极表面覆膜时金属导电微粒带电原因分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1287-1291.
ZHANG Qiaogen, JIA Jiangbo, YANG Lanjun, et al. Charging mechanism of metallic conducting particle on a dielectrically coated electrode in gas insulated system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1287-1291.
- [6] 杨志奎. 粉体颗粒荷电量测量方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
YANG Zhikui. Study on the method of measuring of powder particles charge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [7] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流GIS绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [8] 高 佳. 直流GIL中金属微粒运动特性及覆膜条件下电场分布的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
GAO Jia. Simulation study on motion characteristics and electric field distribution of metal particles in GIL inhomogeneous field[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [9] 刘宏宇. 直流电压下SF₆气体中球形金属微粒的运动及抑制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
LIU Hongyu. Research on motion and inhibition of spherical metal particles in SF₆ gas under DC voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [10] 张晓星, 周 畅, 崔兆仑, 等. 填充颗粒尺寸对介质阻挡放电降解SF₆的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4766-4776.
ZHANG Xiaoxing, ZHOU Chang, CUI Zhaolun, et al. Effect of particle size on degradation of SF₆ by dielectric barrier discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4766-4776.

- [11] 王 兵.非结构网格上的多介质流数值模拟方法研究[D].南京:南京理工大学,2008.
WANG Bing.Numerical simulation technique research for multi - material flows on unstructural moving grids[D].Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [12] YAO J, LIU G R, QIAN D, et al.A moving-mesh gradient smoothing method for compressible CFD problems[J]. Mathematical Models and Methods in applied Sciences, 2013,23(2):273-305.
- [13] 程 旷.基于离散元的渗流致断级配土颗粒运移数值分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2019.
CHENG Kuang.Study on DEM -based numerical methods for seepage-induced fine particle migration in gap-graded soils[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2019.
- [14] PODLOZHNYUK A, PIRKER S, KLOSS C.Efficient implementation of superquadric particles in discrete element method within an open-source framework[J]. Computational Particle Mechanics, 2017, 4(1): 101-118.
- [15] KRUGGEL - EMDEN H, RICKELT S, WIRTZ S, et al.A study on the validity of the multi - sphere discrete element method[J]. Powder Technology, 2008, 188(2): 153-165.
- [16] MA H Q, XU L , ZHAO Y Z.CFD - DEM simulation of fluidization of rod - like particles in a fluidized bed[J]. Powder Technology, 2016, 314:355-366.
- [17] FAVIER J F, ABBASPOUR-FARD M H, KREMMER M, et al.Shape representation of axi - symmetrical, non - spherical particles in discrete element simulation using multi - element model particles[J]. Engineering Computations, 1999, 16(4):467-480.
- [18] JACKSON R L, GHAEDNIA H, LEE H, et al.Contact mechanics[M]. New York:Springer New York, 2013.
- [19] 贾江波,陶风波,杨兰均,等.GIS中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J].中国电机工程学报,2006, 26(8):106-111.
JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al.Motion analysis of spherical free conducting particle in non - uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. Proceedings of The CSEE, 2006, 26(8):106-111.
- [20] KLOSS C, GONIVA C, HAGER A, et al.Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD - DEM[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2012, 12(2/3): 140-152.
- [21] PLIMPTON S.Fast parallel algorithms for short - range molecular dynamics[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 117(1):1-19.
- [22] 危 卫,张力元,顾兆林.工业中粉体颗粒的荷电机理及数值模拟方法[J].物理学报,2015,64(16):1.
WEI Wei, ZHANG Liyuan, GU Zhaolin.Particle charging mechanism and numerical metho dology for industrial applications[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16):1.
- [23] LEBEDEV N N , SKAL'SKAYA I P.Force acting on a conducting sphere in the field of a parallel plane condenser [J]. Soviet Physics Technology, 1962, 7(1):268-270.
- [24] CHENG L, SOO S L.Charging of dust particles by impact [J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(2):585-591.
- [25] HU G, HU Z, JIAN B, et al.On the determination of the damping coefficient of non-linear spring-dashpot system to model hertz contact for simulation by discrete element method[J]. Journal of Computers, 2010, 6(5):984-988.
- [26] GOOSSENS W R A.Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres[J]. Powder Technology, 2019, 352(1):350-359.
- [27] MOUKALLED F, MANGANI L, DARWISH M.The finite volume method in computational fluid dynamics[M]. Germany:Springer International Publishing, 2016.
- [28] HEINRICH J C, HUYAKORN P S, ZIENKIEWICZ O C, et al.An upwind finite element scheme for two - dimensional convective transport equation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1977, 11(1):131-143.
- [29] HUGHES T J R.A simple scheme for developing 'upwind' finite elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 12(9):1359-1365.
- [30] WANG J, LI Q, LI B, et al.Theoretical and experimental studies of the air gap breakdown triggered by a free spherical conducting particle in DC uniform field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4):1951-1958.
- [31] SAKAI K, LABRADO ABELLA D, SUEHIRO J, et al.Charging and behavior of a spherically conducting particle on a dielectrically coated electrode in the presence of electrical gradient force in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(4):577-588.
- [32] 季洪鑫.交流运行电压下GIS中金属颗粒运动行为及放电特征[D].北京:华北电力大学,2017.
JI Hongxin.Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in AC GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [33] HÖLZER A , SOMMERFELD M.New simple correlation formula for the drag coefficient of non - spherical particles [J]. Powder Technology, 2008, 184(3):361-365.

- for planar flexible multi-link transmission system including revolute clearance joints with irregular rough surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 115-129.
- [17] 敬 谦, 刘宏昭. 考虑圆柱副间隙的连杆机构动力学研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 32-39.
- JING Qian, LIU Hongzhao. Dynamic characteristics of linkage mechanism considering clearance of cylinder pair [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 32-39.
- [18] 李虹霏, 马少华. 考虑摩擦力的断路器操动机构动态特性仿真计算[J]. 电器与能效管理技术, 2023(1): 55-61.
- LI Hongfei, MA Shaohua. Simulation calculation of dynamic characteristics of circuit breaker operating mechanism considering friction[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(1): 55-61.
- [19] 刘亚陪, 王之军, 杜迎乾, 等. 高压断路器冲击动力学仿真[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(2): 56-59.
- LIU Yapei, WANG Zhijun, DU Yingqian, et al. The transient impact dynamic simulation of high-voltage double-acting circuit breaker[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(2): 56-59.
- [20] 董华军, 李东恒, 钟建英, 等. 12 kV 真空灭弧室触头合闸冲击下疲劳寿命研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3981-3988.
- DONG Huajun, LI Dongheng, ZHONG Jianying, et al. Research on fatigue life of contact in 12 kV vacuum interrupter under shocking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3981-3988.
- [21] 王 蕾, 管 臣, 李欣悦, 等. 快速真空开关电磁斥力机构瞬态动力学研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 72-77.
- WANG Lei, GUAN Chen, LI Xinyue, et al. Study on transient dynamic characteristics of electromagnetic repulsion mechanism for fast vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 72-77.
- [22] 胡鹏飞, 罗金良, 罗 彪, 等. 高速电主轴角接触球轴承热-力耦合特性研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(2): 76-79.
- HU Pengfei, LUO Jinliang, LUO Biao, et al. Research on thermal-mechanical coupling characteristics of high-speed motorized spindle angular contact ball bearings[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2023, 36(2): 76-79.
- [23] 董桂华, 何 洁, 王彩霞. 基于 Ls-Dyna 的高压断路器传动连杆优化设计[J]. 电气技术, 2019, 20(2): 33-36.
- DONG Guihua, HE Jie, WANG Caixia. Optimization of connecting rod of a circuit breakers based on Ls-Dyna[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(2): 33-36.
- [24] 涂文兵, 杨本梦, 杨锦雯, 等. 考虑滚动轴承故障处塑性变形的有限元建模与动力学特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 85-94.
- TU Wenbing, YANG Benming, YANG Jinwen, et al. Finite element modeling and dynamic characteristics analysis with plastic deformation at rolling bearing failure considered[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 85-94.
- [25] 王之军, 刘亚培, 王 刚, 等. 基于 Ls-Dyna 的高压断路器传动系统瞬态动力学仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 52-58.
- WANG Zhijun, LIU Yapei, WANG Gang, et al. Transient dynamic simulation and experimental study on high voltage circuit breaker transmission system based on Ls-Dyna[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 52-58.
- 赖颖东(1978—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电网中电力设备的故障诊断与预测(E-mail: changrun_zhao@163.com)。

(上接第 154 页)

- [34] ZHONG W Q, YU A B, LIU X J, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: Theoretical developments and applications[J]. Powder Technology, 2016, 302(1): 108-152.
- [35] KUIPERS J B. Quaternions and rotation sequences[M]. USA: Princeton University Press, 1998.
- [36] HOLMBERG M E, AKYUS M, GUBANSKI S M. Electric charge and field at lift-off for metallic particles in GIS[C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation. USA: IEEE, 1998: 53-56.
- [37] BLACKER T. Automated conformal hexahedral meshing constraints, challenges and opportunities[J]. Engineering with Computers, 2001, 17(3): 201-210.
- [38] PÉREZ A T. Charge and force on a conducting sphere between two parallel electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 56(2): 199-217.
- 朱胜龙(1980—), 男, 硕士研究生, 教授级高工, 研究方向为变电设备运维检修、专业管理及技术监督(E-mail: 451608783@qq.com)。