

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.019

双动自能式灭弧室静侧传动系统动力学仿真与优化

赖颖东¹, 林志军¹, 张俊¹, 钟国思¹, 赵昌润²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529000; 2. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 在高压断路器分闸与合闸过程中, 静侧传动系统的强度直接影响产品的机械寿命, 550 kV 断路器与以往的产品相比, 提高了电压等级, 意味着更难满足机械寿命要求, 因此需要更加准确地预测和提高静侧传动系统的结构强度以保证寿命要求。文中建立了双动自能式灭弧室静侧传动系统的柔性瞬态动力学模型, 该模型基于 Hypermesh 进行前处理, 并利用 Ls-dyna 进行了瞬态动力学仿真求解。在分析过程中运用了显示算法, 充分考虑了网格类型、接触类型、间隙、碰撞冲击等因素的影响。应力仿真结果表明: 不同速度工况下, 分合闸操作过程中关键零部件存在高应力风险, 文中以拉杆销为例, 列出了其高应力分布图以及应力时域曲线, 峰值应力达到了约 380 MPa, 存在优化的空间。同时还输出了零部件之间的接触力, 速度曲线, 以及系统能量等结果, 这些仿真结果表明: 接触力大小和方向以及速度变化均符合实际运动趋势, 沙漏能始终未超过内能峰值的 5%, 接触未发生明显的滑移和穿透, 这些结果确保了仿真分析的合理性。随后针对高应力区域进行了设计方案优化并和原方案进行了仿真对比。对比结果表明: 各个风险点的峰值应力明显降低, 横梁、导轨、小垫片上的风险点应力下降比例最高可达到 50%, 优化效果明显。对优化方案进行了疲劳寿命分析, 寿命结果表明: 关键零部件的应力风险点可以达到 10 000 次以上。最终进行了机械寿命实验, 实验结果表明: 优化方案能够满足万次机械寿命的实验要求且未发生过度磨损, 验证了仿真结果以及优化设计的有效性。

关键词: 高压断路器; 瞬态动力学; 显示算法; 静侧传动系统; 优化设计

Dynamic Simulation and Optimization of Static Side Transmission System for Double Moving Self-energized Interrupter

LAI Yingdong¹, LIN Zhijun¹, ZHANG Jun¹, ZHONG Guosi¹, ZHAO Changrun²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Jiangmen Power Supply Bureau, Guangdong Jiangmen 529000, China; 2. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In the process of opening and closing of high voltage circuit breaker, the strength of transmission system directly affects the mechanical fatigue life of the product. For the 550 kV circuit breaker, the voltage level is improved compared with previous products, which means it is more difficult to meet the requirement of mechanical life. So it is necessary to predict and improve the structural strength of static side transmission system more accurately to meet the fatigue life target. In this paper, the flexible transient dynamic model for static side transmission system of double moving self-energized interrupter is established. The model is based on Hypermesh for pre-processing. The transient dynamics is solved by Ls-dyna. During the analysis process, the explicit algorithm is used, and the grid type, contact type, gap influence, collision impact are fully considered. The stress simulation results show high stress risk in the key parts during opening and closing operation under different speed conditions. Taking the pull rod pin as an example, the high stress distribution map and stress time domain curve are listed. The peak stress reaches about 380 MPa, and there is room for optimization. At the same time, the results of contact force, velocity curve and system

energy between components are also output. These simulation results show that the magnitude and direction of contact force and the change of speed are in line with the actual movement trend. The hourglass energy has never exceeded 5% of the peak internal energy, and there is no obvious slip and penetration in the contact. So these results ensure the rationality of the simulation analysis. Then the design concept is optimized for the high stress area and compared with the baseline concept by simulation. The comparison results show that the peak stress of each risk point is significantly reduced, and the stress reduction ratio of the risk point on the cross beam, guide rail and small gasket can reach up to 50%, which means the optimization effect is obvious. The fatigue life of the optimization scheme is analyzed, and results show that the stress risk point of the key parts can reach more than 10 000 times. Finally, the mechanical life experiment is carried out, and results show that the optimization scheme can meet the requirements of ten thousand mechanical life without excessive wear, which verifies the effectiveness of the simulation results and the optimization design.

Key words: high voltage circuit breaker; transient dynamic; explicit algorithm; static side transmission system; optimization

0 引言

灭弧室的结构设计对当下开断性能有着重要影响,不仅需要考虑到灭弧室的电气性能,而且还需要重点考虑机械性能,机械可靠性是保证电气可靠性的重要保障^[1-2]。高压断路器为了降低操作功,提高吹弧能力,采用双动自能式灭弧室结构。高电压等级的断路器在进行开断的过程中,通常需要在仅仅几十 ms 内就完成分闸和合闸的操作^[3-4]。传动系统在此瞬时过程中不仅要承受来自触头的较大冲击载荷,同时还要克服部件之间因惯性力导致的瞬时碰撞和摩擦力^[5-7],此过程中应力会以应力波的形式进行传播,并在不同部件之间的接触边界发生改变时进行反射叠加,最终形成相对复杂的应力应变状态,这可以借助有限元时域积分方法进行求解。近年来,电网对各类断路器产品的机械寿命有着越来越高的要求标准,而 550 kV 断路器由于电压等级更高,分合闸速度更快,导致静侧传动系统各个零部件在运动过程中会产生更大的冲击,在多次循环冲击载荷下易发生疲劳破坏,增加了强度风险,因此更难满足万次寿命实验要求^[8-9],静侧部件通常作为传动系统结构强度最薄弱的区域,需要对其进行重点分析,这对提高整个灭弧室的机械可靠性有着深远影响。

传动系统在分合闸过程中的运动是一个高度非线性的问题。在当前的多体动力学分析中,动力学的控制方程一般是微分代数方程(DAE),常见仿真分析求解方程的算法是基于 Newmark 方法对结构进行分析^[10],除此之外其他常见的多体动力学求解算法还有 Newton-Euler 方法, Kane 方程方法,增广拉格朗日法等^[11],但这些方法都是基于确定性假设条件的。一部分研究学者运用刚性假设进行多刚

体动力学分析,张建超等^[12]建立了多刚体连杆动力学模型并仿真了运动特性,赵海洋^[13]建立了曲柄滑块刚体动力学模型,分析了作用机理和特性响应。该方法通常用来获得运动关系及载荷,无法获得时域应力。也有部分研究学者运用刚柔耦合的方法进行强度分析,邢垒垒^[14]建立了断路器触头系统的刚柔耦合模型,通过仿真分析了连杆断裂失效的原因,周荡等^[15]建立了含间隙刚柔耦合多杆机构模型,研究了间隙以及柔性杆件对运动精度的影响。

在断路器静侧传动系统进行分合闸的过程中,部件自身会发生弯曲变形,进而产生动能和弹性势能之间的相互转换。同时在碰撞力作用下会产生部件之间的相互回弹及动能消耗。除此之外,各个相连部件之间不可避免的存在摩擦接触,而且部分部件之间的配合是间隙配合,接触状态和应力一直在发生变化。这些因素对静侧传动系统的动态响应是至关重要的。部分学者也对这些因素进行了研究,韩钊等^[16]通过冲击函理论验证了柔性杆更能还原理想运动副的运动特性,建立了含间隙平面柔性多连杆传动系统,可以获得更接近于实验值的动态结果。敬谦^[17]结合 Coulomb 摩擦定律和 Hertz 接触定律,对比了 $H-C$, $L-N$ 等不同的接触力模型,并最终基于 Winker 弹性基底模型提出了一种接触模型,不仅考虑了接触变形量与材料属性之间的关系,而且通过粘滞阻尼项考虑了接触体动能与弹性势能和耗散能之间的转换关系。李虹霏等^[18]搭建的断路器操动机构模型,充分研究了碰撞接触力模型与摩擦模型,对广义碰撞进行了研究。

由于刚体动力学及刚柔耦合动力学分析都无法全面的考虑接触、碰撞、全柔性、摩擦、间隙等因素的影响,而这些因素往往是非常重要且无法忽视

的。因此,为了充分提高模型的精度,随着技术的进步与发展,显示动力学得以用于现代高压电器中进行多类问题的解决,如瞬时大变形动力学,多重非线性准静态问题,以及复杂接触碰撞问题的求解^[19-21]。

文中基于显示算法,建立了静侧传动系统全柔性体动力学模型,考虑了接触、碰撞以及间隙等相关因素的影响,能够更为准确地评估静侧传动系统的动态响应,为后续的优化设计奠定基础。随后将显示动力学计算得到的应力应变结果导入到疲劳软件当中,进行了应变疲劳分析,并最终进行了实验验证。

1 显示动力学算法

对于非线性动力学问题,系统的运动求解方程可描述为^[22]

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka_t = Q(t) \quad (1)$$

式(1)中: M 为质量矩阵; C 为刚度矩阵; K 为质量矩阵; $Q(t)$ 为节点载荷向量, $Q(t) = F_{\text{ext}}(t) + F_{\text{in}}(t)$, F_{ext} 为外载荷矢量, F_{in} 为内力矢量。

$$F_{\text{in}} = \int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F_{\text{hg}} + F_{\text{con}} \quad (2)$$

式(2)中: $\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega$ 为单元等效节点内力, B 为单元应变矩阵, σ_n 为节点应力, Ω 为对单元的积分; F_{hg} 为沙漏阻力; F_{con} 为接触力^[23]。

动力学分析中,除了需要考虑弹性力之外,还需要考虑惯性力及阻尼力,求解常微分方程组的方法有隐式算法和显示算法。隐式方法通过线性加速度假设,来推导出下一时间步的速度及位移,该方法常用于稳态及准静态分析当中。而显示算法在 Ls-dyna 当中,采用中心差分法对运动方程进行积分。该方法运用线性位移假设,通过两时刻点的位移来推导出中间时刻点的速度,进一步推导出当前时刻的加速度。因此显示算法能更准确的描述出当前时刻的惯性力,常被用于瞬态及高度非线性的准静态计算当中。在 Ls-dyna 中心差分法中,速度和加速度可用位移进行如式(3)表示

$$\dot{a}(t) = \frac{1}{2\Delta t}(-a_{t-\Delta t} + a_{t+\Delta t}) \quad (3)$$

$$\ddot{a}(t) = \frac{1}{\Delta t^2}(a_{t-\Delta t} - 2a_t + a_{t+\Delta t}) \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)可得到式(5)

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) a_{t+\Delta t} = Q - \left(K - \frac{1}{\Delta t^2} M \right) a_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) a_{t-\Delta t} \quad (5)$$

式(5)中: $\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right)$ 称为有效质量矩阵;

$Q - \left(K - \frac{1}{\Delta t^2} M \right) a_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) a_{t-\Delta t}$ 称为有效载荷矩阵。

对线性方程组(5)进行求解,可获得 $t + \Delta t$ 离散时间点的位移。将得到的位移代入几何方程和物理方程可以求得 $t + \Delta t$ 时刻的单元应变及单元应力。

2 模型建立

2.1 模型前处理

2.1.1 几何建模

断路器静侧传动系统在工作过程中各个部件之间的接触与间隙均会影响动力学响应,需要尽量将模型考虑完整。整个模型主要包含导轨、拨叉、齿条、推杆、静弧触头、销轴、垫片等部件。使用 UG 进行三维建模。

2.1.2 网格类型及划分

常用的实体网格类型共有 4 种,分为 1 阶四面体单元、1 阶六面体单元、2 阶四面体单元以及 2 阶六面体单元。在瞬态动力学的计算当中,线性 1 阶四面体单元是常应变单元,计算精度较差,通常只适用于位移求解,而 2 阶六面体单元收敛性较差,同样不建议使用。2 阶四面体单元虽相比 1 阶四面体单元精度更高,但是和 1 阶六面体相比,在求解精度相同的情况下,计算量远大于 1 阶六面体。而对于动力学问题,其计算量往往是非常巨大的,因此不推荐使用 2 阶四面体,2 阶四面体的优势是划分简单,通常只有在处理结构极为复杂而无法用六面体划分网格的几何体时,才会不得不考虑采用 2 阶四面体单元,否则优先采用 1 阶六面体单元进行网格划分。

文中断路器静侧传动结构全部采用六面体网格进行拓扑划分,模型单元总数控制在 30 万以内,由于静侧传动系统各个零部件相对复杂,无法直接进行六面体网格划分,因此需要对三维模型进行拓扑分割后再进行六面体网格划分。以横拉杆为例,展示了横拉杆的拓扑分割以及网格划分见图 1。

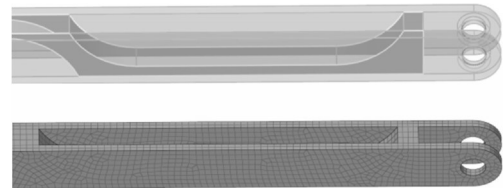


图1 拓扑分割和网格划分

Fig. 1 Topology segmentation and meshing

以相同的方法,可以完成对其他零部件的拓扑分割和网格划分。

2.1.3 材料参数

传动系统在分合闸工作过程中会承受循环冲击载荷,产生交变应力。由于冲击载荷过大,在机械寿命实验中,经常会出现几百次几千次时就发生断裂的情况,因此说明在工作碰撞的过程中,个别位置的应力会在瞬时时刻超过材料屈服点,基于应变疲劳理论,在这种情况下结构极易发生塑性变形,产生不可恢复的应变。因此在分析中各材料应当设立屈服点。文中采用MAT24材料卡片对各个零部件进行材料定义,考虑了材料的弹塑性以及失效模型。

2.1.4 边界条件

1)模型约束。在分合闸的过程中,法兰几乎保持静止不动,因此约束法兰安装孔的6个自由度。另外静弧触头受到触头座等部件的约束,几乎只会沿着X轴的正向进行运动,因此释放静弧触头前端局部区域X轴的平移自由度,约束其他自由度来防止静弧触头产生其他方向的蹿动。

2)载荷输入。整个传动系统的运动由拉杆的实测速度曲线来进行驱动。对拉杆的前段局部区域施加速度特性曲线。由于分闸速度较大,会产生较大的惯性力及集中应力,故分别验证7.0、7.5 m/s两种平均速度下的分闸运动,同时验证最大平均速度4.3 m/s下的合闸运动。以7.5 m/s平均速度的分闸工况为例,用于驱动拉杆运动的实测分闸速度曲线见图2。

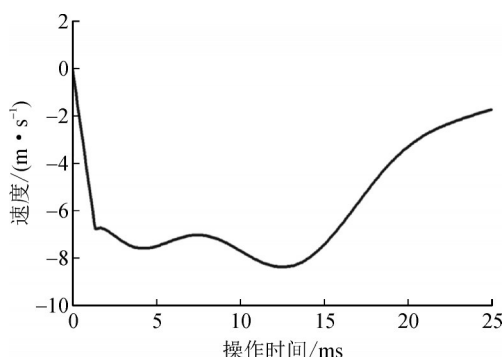


图2 驱动速度曲线(平均速度7.5 m/s)

Fig. 2 Velocity driving curve(average 7.5 m/s)

模型当中除了输入的强迫速度曲线,还需要考虑触头抱紧力的影响。分闸时,对触头施加峰值2 kN的抱紧力,当推杆销和拨叉接触后抱紧力大小降为1 kN。抱紧力的大小同实测值接近且稍微大于实测值,因此更加保守,合闸的抱紧力施加过程同分闸过程相反。

3)接触设置。模型中的所有接触均采用库伦摩擦模型,其摩擦力计算公式为^[24]

$$F_r = \mu \cdot F_n \quad (6)$$

式(6)中: F_n 为压力; $\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|v|}$ 为摩擦系数, μ_d 为动摩擦系数, μ_s 为静摩擦系数, c 为衰减指数, v 为接触面间的相对速度。类似碰撞这种伴有数值噪声的问题,常常将静摩擦及动摩擦系数设置为相同的值,避免产生额外噪声。本次分析中,设置摩擦系数如下: $\mu_d = \mu_s = 0.1$,模型当中总共设立了30组接触对。在Ls-dyna当中,存在多种接触类型,文中选用双向对称接触,利用罚函数法在主从面之间进行双向搜索,罚函数的刚度取决于单元尺寸以及材料属性,使用这种接触类型的好处是使模型在运动过程中不易发生接触失效及穿透,同时避免了不必要的接触搜索,提高了计算效率。

2.2 求解设置

在显示动力学计算当中,仿真的时间步长需要小于临界时间步长才能保证计算稳定,临界时间步长取决于系统在无阻尼条件下的最高固有频率,公式为

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (7)$$

式(7)中, Δt^{crit} 为临界时间步长,临界时间步长是应力波穿过模型中最小单元尺寸所需的时间。时间步长 $\Delta t = 0.9 \frac{L}{C}$, L 为特征单元尺寸,不同的单元类型,尺寸不同。文中的仿真模型均为六面体Solid单元。 L 代表六面体单元上表面顶点和下表面顶点形成的对角线长度。 c 代表材料声速,不同单元类型的材料声速计算公式同样不同,文中采用的Solid单元的声速计算公式为

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (8)$$

式(8)中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比; ρ 为密度。由式(8)可知,最小单元尺寸直接影响了计算步长,因此需要控制单元的大小及数量,以减少计算时长。但是模型中不可避免存在极个别尺寸较小的单元,若自定义步长,可能超过了部分单元的临界时间步长,导致计算不稳定。Ls-dyna可以运用质量缩放的方法,通过删除极小单元来缩短计算时长,求解器将会增加该部分单元的质量,来保证目标时间步长。但在后处理时应关注质量缩放的比例,保证结果的有效性,过大的质量缩放比例将会导致结果失真。

动力学求解往往采用缩减积分单元来减少计

算量,只有四边形单元和六面体单元才能使用缩减积分。虽然这种方法令求解更有效率,并且也能获得精确解,但是在这类网格产生不规则的位移变形时(比如梯形变形)会产生单元自锁现象,此时单元的计算应变能为零,会产生有别于刚体运动的零能模式,使计算结果失去意义,因此需要进行沙漏控制。

文中,设置仿真模型的时间步长为 $0.015\ \mu\text{s}$,衰减系数为 0.9。为减少运动总时长,只截取分闸合闸过程中传动系统运动最苛刻的缓冲阶段的时间作为总的分析时长,这样不仅考虑了最严苛的受载工况,而且提高了计算效率。平均速度 $7\ \text{m/s}$ 的分闸分析时长为 $16\ \text{ms}$,平均速度 $7.5\ \text{m/s}$ 的分闸分析时长为 $15\ \text{ms}$,平均速度 $4.3\ \text{m/s}$ 的合闸分析时长为 $24\ \text{ms}$ 。设置质量缩放 ENDMAS,设置沙漏控制因子为 0.1。

3 仿真分析结果

3.1 应力分析

3.1.1 应力时域云图

通过仿真分别得到原状态样机在 7.0 、 $7.5\ \text{m/s}$ 不同平均分闸速度下的应力变化云图,以及 $4.3\ \text{m/s}$ 平均速度下的合闸应力变化云图。

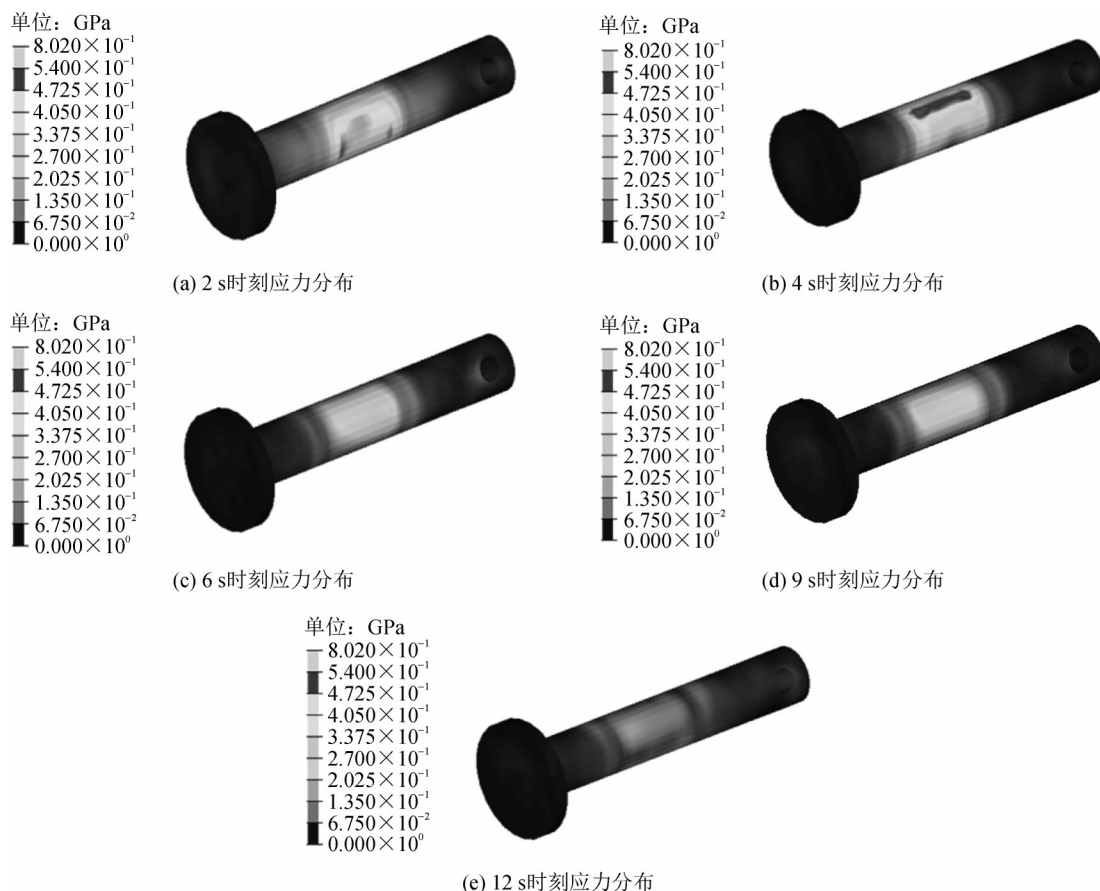


图3 断路器分闸过程拉杆销应力分布

Fig. 3 Stress distribution of the rod pin during opening process of circuit breaker

通过应力时域变化云图,可以识别出应力较大的几个时刻,断路器静侧的一些主要部件在实验中经常存在着强度不足的现象,根据应力较大时刻的云图,可以识别出各个主要零部件上的应力危险区域。以拉杆销为例,由于销轴在静侧传动系统设计中是重点部件,数量较多,若设计不合理容易出现过度磨损及失效行为。列出了 $7.5\ \text{m/s}$ 分闸速度下,不同时刻下拉杆销的应力变化情况见图3,从图3可以看到最大应力往往出现在中心端部局部位置,因为拉杆销在长度方向上的接触状态不均匀,极易在实验过程中发生局部过度磨损而失效。

同理可以得到其他重要部件不同工况下的应力变化云图,如横梁、横推杆、导轨、拨叉、齿条、齿条销以及垫片等,识别出响应的风险区域,为下一步进行优化奠定基础。

3.1.2 应力时程曲线

对识别的风险点进行应力时域曲线的输出,可以得到整个运动过程中应力随时间的变化,从而可以得到峰值应力。根据应力分布特点,通过下一步优化部件的形状来降低峰值应力。拉杆销应力时程曲线见图4,用同样的方法得到另外零部件上风险点的应力曲线。

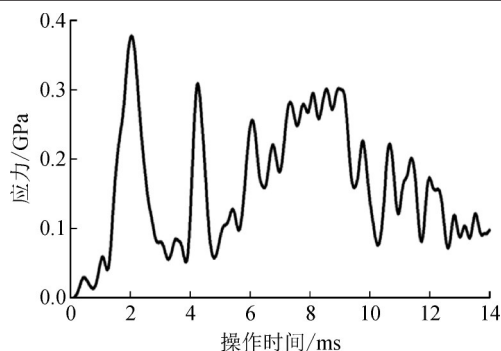


图4 拉杆销应力时程曲线

Fig. 4 Rod stress curve time domain curve

3.2 接触受力分析

以推杆销和拨叉之间的接触为例,在分闸运动过程中,推杆销和拨叉内侧接触并带动拨叉进行运动,在推杆销拨叉之间建立接触对,并仿真获得该接触对上的受力,见图5。从图5可以看到在7.5 m/s分闸速度下,推杆销运动带动拨叉转动,开始 X 方向上的载荷为负值,在8 s后由于推杆销同拨叉另外一个面发生接触, X 方向的载荷变为正值。整个过程中 Y 方向的载荷几乎为零,且 Z 方向的载荷始终为正,所以所受合力主要为 X 方向和 Z 方向载荷的合成,符合分闸运动的实际情况。获得的受力结果不仅可以作为后期强度设计的载荷输入依据,而且有利于评估运动过程的合理性。用同样的方法可以获得另外29组接触对在不同分闸速度下的接触力以及合闸运动下的接触力。

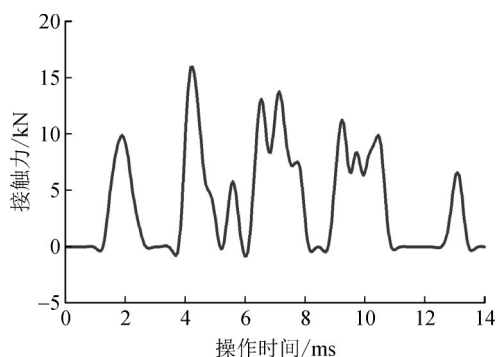


图5 拉杆销和拨叉间接触力

Fig. 5 Contact force between rod and plucking fork

3.3 速度分析

静弧触头分闸过程的速度时程曲线见图6,从图6可以看到速度趋势整体呈现出先增后减的趋势。同刚体动力学仿真相比,瞬态动力学往往在运动启动前期存在一定的滞后,这是由于摩擦间隙以及柔性体的影响,更加贴近实际工况。得到的速度曲线对后期电弧仿真和电场仿真结果有一定影响,通常可以采用瞬态动力学的速度或位移结果作为输入^[25]。

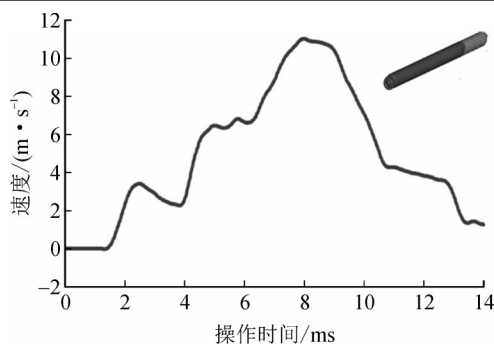


图6 静弧触头速度随时间变化

Fig. 6 Static arc contact velocity variation with time

3.4 能量分析

输出的能量结果可以来评估结果是否失真,以7.5 m/s分闸工况为例,输出了沙漏能、内能及动能的变化趋势见图7。

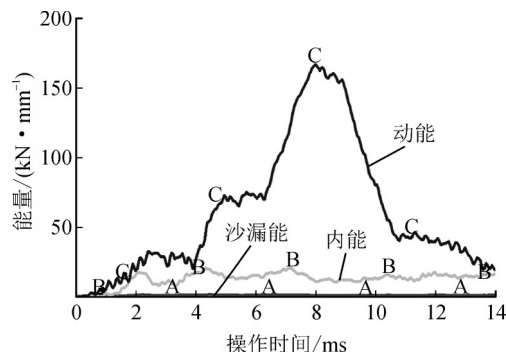


图7 动能、内能及沙漏能变化

Fig. 7 Kinetic energy, internal energy and hourglass energy change

分析得到,增加质量几乎为零,且沙漏能始终未超过内能峰值的5%,动能遵循速度变化趋势,呈现先增后减的趋势。

断路器分闸过程滑移能量变化见图8,输出了接触滑移能,可以得出整个曲线呈现类似线性的稳定上升趋势,没有出现负值以及快速变化的情况,因此模型当中未出现明显的接触滑移以及穿透现象。

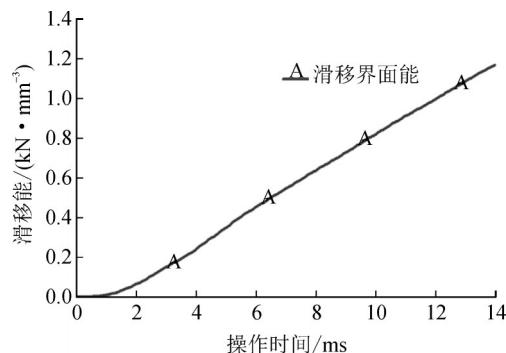


图8 断路器分闸过程滑移能量变化

Fig. 8 Sliding interface energy change in opening process of circuit breaker

基于上述能量结果可得,基于当前边界条件下的分析计算结果是合理有效的。

3.5 不同分闸速度工况对比

对原状态样机进行分闸 7.0 m/s 及 7.5 m/s 的两种工况对比。通过对比可以得出,当平均速度由 7.5 m/s 降低至 7.0 m/s 时,各零部件的应力整体降低,减小了零部件过度磨损及失效的风险。因此,过大的分闸速度会导致惯性力增加从而进一步导致应力的升高,因此需尽可能地将分合闸速度控制在合理的范围之内。

3.6 优化设计

根据前面各个工况得到的不同部件的应力分布,针对传动系统的横梁、横推杆、推杆销、导轨、拨叉、齿条、齿条销以及垫片高应力区域进行设计优化,以降低高风险区域的应力。优化过程中进行了多个方案的尝试并选出了相对最优方案作为最终投产方案。

通过对比,最终方案在 7.0、7.5 m/s 分闸工况以及 4.3 m/s 合闸工况下,各个风险点的峰值应力相比原状态方案整体均有明显降低,其中导轨、横梁、小垫片上的风险点应力下降比例最高可达到 50%,基本可视为满足强度要求。

以导轨为例,列出了某高应力点优化前后的应力时域曲线对比见图 9,原状态应力峰值为 629 MPa,优化后的应力峰值降低为 318 MPa,应力下降了 49%,大大降低了寿命试验断裂的风险。

3.7 疲劳寿命分析

在 nCode 软件中建立静侧传动系统的应变疲劳

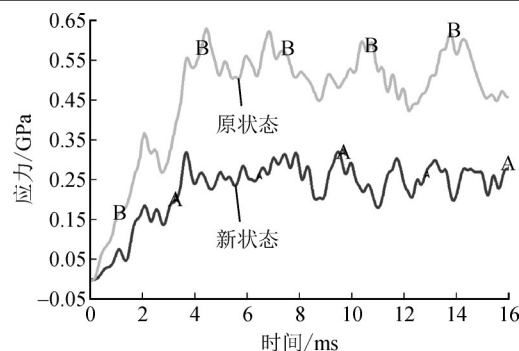
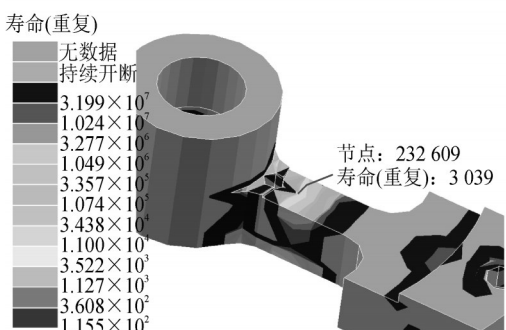
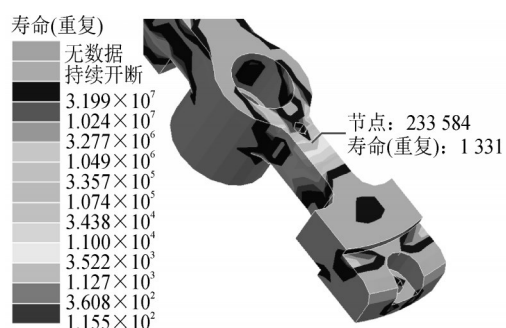


图9 导轨优化前后的应力曲线对比

Fig. 9 Comparison of stress curves before and after optimization of guideway

寿命分析流程,并将分闸和合闸各个时刻的应力应变结果,材料的 $E-N$ 曲线导入,静侧传动完成一次分闸和合闸记为一次完整的循环,通过雨流计数法对一次完整循环下的冲击载荷历程进行技术统计,随后计算出损伤累计,并预测出静侧传动系统的疲劳寿命及危险区域,以验证优化的效果。

以寿命最低的横梁为例,列出了原方案和优化方案寿命云图的对比见图 10,通过观察可以得到,在对横梁进行结构优化后,其寿命整体均有明显的升高。其中,原方案存在两个明显的低寿命点,分别为 1 331 次和 3 039 次,因此原状态样机在机械寿命实验过程中将会存在很大的断裂风险。优化后,这两个低寿命点的寿命分别提升至 10 650 次和 36 420 次,满足万次寿命实验要求。



(a) 横梁原状态寿命云图及低寿命点

(b) 横梁优化方案寿命云图及低寿命点

图10 横梁原方案及优化方案寿命对比

Fig. 10 Comparison of fatigue life between original scheme and optimization scheme of crossbeam

用同样的方法对其他的零部件也进行疲劳寿命的分析及优化,原方案除了横梁外,其他主要部件,如导轨、横拉杆、拉杆销等均存在部分低寿命点寿命小于10 000次,低寿命点的位置大多与瞬态动力学得到的高应力区域相近,在进行设计优化后,整个静侧传动系统的主要零部件各个位置仿真得到的寿命值均在万次以上,可以满足机械寿命实验目标要求。

4 机械寿命试验验证

机械寿命试验是验证产品在要求的机械特性以及不进行检修的前提下,能够承受的分合闸空载操作次数的实验。

首先按照原状态生产了断路器的试验样机,该样机在进行了约2 000次型式试验时,试验失败,对样机进行解体检查,发现了横梁断裂现象,后面又进行了多次实验,也出现过几千次时拉杆断裂,导轨过度磨损等相关问题。因此说明了原方案样机确实存在明显的低周疲劳问题,且无法满足国标10 000次的要求。证明了仿真计算得出的部分低寿命点的寿命小于10 000次是相对准确的,操作次数为2 000次时,原方案横梁断裂的图片见图11。

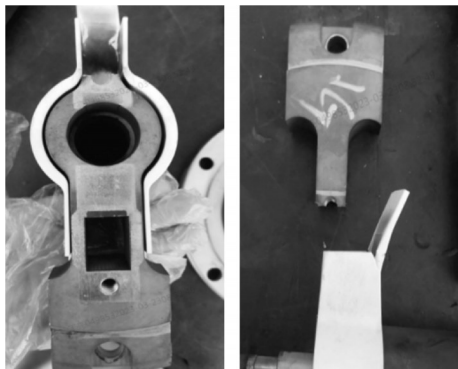


图11 原方案验后的横梁断裂图

Fig. 11 Fracture diagram of original scheme crossbeam after test

优化后的550 kV断路器空载分合闸操作共进行了10 000次机械寿命实验的验证,满足国家标准要求未发生故障。在完成万次实验后,对整个样机进行解体操作及分析,可以发现关键零部件,如拉杆,横梁,导轨,拉杆销,拨叉以及齿条等关键零部件都未发生变形断裂以及过度的磨损,机械状态良好。以拉杆和静触头为例,展示了万次试验后的拉杆和触头的状态见图12。

通过复测机械特性曲线,万次后的行程曲线与操作初始阶段的曲线之间无明显偏差,且断路器刚合,刚分点变化不大,证明试验是符合国家标准的,

因此验证了优化设计的合理性以及仿真结果的准确性。



图12 10 000次机械操作后优化方案的拉杆及静弧触头状态

Fig. 12 The state of new scheme pull rod and static arc contact after 10 000 mechanical operations

5 结论

文中运用UG建立了550 kV双动自能式灭弧室静侧传动系统三维模型,在此基础上应用Hypermesh建立了有限元模型,并最终结合Ls-dyna进行了显示动力学分析,模型考虑了杆件柔性,间隙,接触和摩擦等重要因素的影响,充分评估了结构强度,并验证了结果合理性。针对高风险区域进行了设计优化迭代。仿真对比了不同方案在不同工况下的应力水平,根据计算结果获得了满足强度要求的最优方案,并最终进行了寿命的仿真及寿命实验的验证。基于当前的分析结果可得到如下结论:

1)通过对灭弧室静侧传动系统进行显示动力学分析,可以得到横梁、导轨、推杆、垫片等主要零部件的高应力风险区域以及应力峰值。

2)过大的分闸速度会产生较大的惯性力,从而增大强度风险,所以应合理地进行结构设计并控制分闸速度在合理的范围内。

3)通过对速度、接触力、沙漏能、内能、滑移能等结果的判断,可以得出基于当前仿真边界下的结果是相对可靠的。

4)根据瞬态动力学得到应力分布以及时程曲线对各个主要零部件进行设计优化,并通过应力及寿命仿真对比得出了最终的投产设计方案。

5)经机械寿命计算及实验验证,最终优化方案能够满足万次机械寿命的实验要求。验证了仿真结果的准确性。

参考文献:

- [1] 刘思奇,沈 兵,庄劲武,等. 混合型真空限流断路器短燃弧间隙下的介质恢复强度实验研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 284-291.
LIU Siqi, SHEN Bing, ZHUANG Jinwu, et al. Experimental study on vacuum dielectric recovery of hybrid current

- limiting circuit breaker with short arcing time and short gap [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2):284-291.
- [2] 李 博, 包涌泉, 彭振东, 等. 基于改进型直流真空断路器弧后暂态仿真及介质恢复特性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8):1752-1760.
- LI Bo, BAO Yongquan, PENG Zhendong, et al. Post-arc transient simulation and dielectric recovery analysis based on improved DC vacuum circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8):1752-1760.
- [3] 彭诗怡, 刘 衍, 周涛涛, 等. 基于操作力矩的高压隔离开关机械缺陷只能诊断[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8):1356-1367.
- PENG Shiyi, LIU Yan, ZHOU Taotao, et al. Intelligent diagnosis technology of mechanical defects of high voltage disconnecter[M]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7):1356-1367.
- [4] 温伟杰, 李鹏宇, 李 斌, 等. 多端口机械式直流断路器的动作策略与参数优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11):86-94.
- WEN Weijie, LI Pengyu, LI Bin, et al. Operation strategy and parameter optimization of multi-port mechanical DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11):86-94.
- [5] 熊 杰, 刘 彬, 于海波, 等. 快速机械开关机械特性和结构强度研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7):68-75.
- XIONG Jie, LIU Bin, YU Haibo, et al. Research on mechanical characteristics and structural strength of high-speed mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7):68-75.
- [6] 王浩然, 陈 允, 吴泽华, 等. 断路器绝缘拉杆动态性能模拟试验[J]. 电工技术学报, 2021, 36(z1):312-320.
- WANG Haoran, CHEN Yun, WU Zehua, et al. Dynamic characteristics test of insulation pull rod for circuit breaker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(z1):312-320.
- [7] 赵洪山, 赵 阳, 宋 玮, 等. 基于结构分析的断路器操作机构的建模及仿真分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8):32-40.
- ZHAO Hongshan, ZHAO Yang, SONG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of operating mechanism for circuit breaker based on structural analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8):32-40.
- [8] 林 莘, 庚振新, 谭盛武, 等. 550 kV 单断口自能式断路器短路开端过程数值计算与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10):123-129.
- LIN Xin, GENG Zhenxin, TAN Shengwu, et al. Numerical calculation and analysis of 550 kV single-break self-blasting circuit breaker during the short circuit interrupting process[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):123-129.
- [9] 孙龙勇, 徐 刚, 李付永, 等. 550 kV 滤波器组断路器的研究设计[J]. 高压电器, 2020, 56(12):67-74.
- SUN Longyong, XU Gang, LI Fuyong, et al. Research and design of circuit breaker for 550 kV filter bank[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12):67-74.
- [10] 黑 棣, 郑美茹, 孙珂琪. 基于 Newmark 法两端支座松动拉杆转子动力学分析[J]. 机械设计, 2021, 38(1):115-126.
- HEI Di, ZHENG Meiru, SUN Keqi. Dynamic analysis on the rod-fastening rotor system with pedestal looseness based on the Newmark method[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1):115-126.
- [11] 栾建举, 杜茂华. 基于 ADAMS 的机械四连杆机构运动仿真分析[J]. 软件, 2020, 41(2):162-165.
- LUAN Jianju, DU Maohua. Motion simulation analysis of mechanical four-bar linkage based on ADAMS[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(2):162-165.
- [12] 张建超, 钱 峰, 李相源, 等. 含间隙多连杆机构动力学仿真分析[J]. 机电工程技术, 2022, 51(1):42-45.
- ZHANG Jianchao, QIAN Feng, LI Xiangyuan, et al. Dynamic modeling and analysis of multi-link mechanism with clearance[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(1):42-45.
- [13] 赵海洋, 王金东, 何富君, 等. 含间隙运动副往复机构动力学虚拟仿真教学实验设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8):162-166.
- ZHAO Haiyang, WANG Jindong, HE Fujun, et al. Design of virtual simulation teaching experiment for the dynamics analysis of reciprocating mechanism with joint clearance[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(8):162-166.
- [14] 邢垒垒. 基于有限元仿真软件的多刚体及刚-柔耦合分析在万能式断路器中的应用[J]. 电器与能效管理技术, 2022(7):81-85.
- XING Leilei. Application of multi-rigid body and rigid-flexible coupling analysis based on finite element simulation software in air circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(7):81-85.
- [15] 周 荡, 姜岸委, 陈敏慧, 等. 含间隙刚柔耦合多杆机构运动精度分析[J]. 电动工具, 2020(4):13-16.
- ZHOU Dang, JIANG Wei'an, CHEN Huimin, et al. Analysis of kinematic accuracy of rigid-flexible coupling multi-bar mechanism with clearances[J]. Electrokinetic Tool, 2020(4):13-16.
- [16] 韩 钊, 连子豪, 郑恩来, 等. 含非规则粗糙间隙表面铰链关节的平面柔性多连杆传动系统动态误差与运动副磨损周期行为分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19):115-129.
- HAN Zhao, LIAN Zihao, ZHENG Enlai, et al. Analysis of dynamic error and wear cycle behavior of kinematic pair

- 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)。