

DOI: 10.3901/JME.2022.17.058

# 考虑公差不确定性的快速真空开关机构 保持单元多目标优化\*

刘晓明<sup>1,2</sup> 姜文涛<sup>3</sup> 张煦松<sup>2</sup> 陈海<sup>2</sup> 韩旭<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401;

2. 河北省现代电工装备可靠性与智能化国际联合研究中心 天津 300401;

3. 天津工业大学机械工程学院 天津 300387)

**摘要:** 永磁保持单元为斥力操动机构在分合闸位置提供足够的保持力, 是维持机械开关分闸或合闸状态的重要元件, 其结构参数与出力特性是开关可靠分合闸的关键因素。针对保持单元敏感部件加工公差、装配一致性差、输出动态特性相互关联问题, 将区间不确定性模型引入保持单元系统出力特性分析中, 提出一种基于非支配排序粒子群算法的多变量多目标优化方法。首先, 基于保持单元三维有限元模型, 研究动铁芯与导磁环的公差不确定性对保持单元输出力的影响规律。然后, 以保持单元敏感部件公差影响分析为基础, 选取永磁保持单元机械参数为优化变量, 计及操动机构成本与弹跳大小, 同时考虑导磁环与动铁芯公差不确定性, 建立考虑公差不确定性的斥力操动机构保持单元多目标优化设计模型, 得到 Pareto 前沿非支配解集。最后, 基于所优化的保持单元结构, 搭建快速真空开关实验平台进行斥力操动机构分合闸实验, 该系统可在 15 ms 内完成分合闸动作。研究表明, 该优化方法保证了不同制造条件下斥力操动机构保持单元均能最大程度发挥其作用, 且允许动铁芯与导磁环参数设计较低等级公差。

**关键词:** 斥力操动机构; 公差设计; 区间不确定性; NSPSO; 多场耦合

**中图分类号:** TM561

## Multi-objective Optimization of Retaining Unit of Actuator for Fast Vacuum Circuit Switch Considering Tolerance Uncertainty

LIU Xiaoming<sup>1,2</sup> JIANG Wentao<sup>3</sup> ZHANG Xusong<sup>2</sup> CHEN Hai<sup>2</sup> HAN Xu<sup>1</sup>

(1. State Key of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

2. Hebei International Joint Research Center for Reliability and Intelligence of Modern Electrical Equipment, Tianjin 300401;

3. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387)

**Abstract:** The permanent magnet retaining unit provides sufficient holding force for the repulsive operating mechanism at the opening and closing position. It is an important component to maintain the opening or closing state of the mechanical switch. Its structural parameters and output characteristics are the key factors for the reliable opening and closing of the switch. Aiming at the problems of uncertain machining tolerance, poor assembly consistency, interrelated output dynamic characteristics of sensitive parts of retaining unit of repulsive operating mechanism, the interval uncertainty model is introduced into the analysis of output characteristics of retaining unit system, and a multivariable and multi-objective optimization method based on non-dominated sorting particle swarm optimization is proposed. Firstly, based on the three-dimensional finite element model of the retaining unit, the

\* 国家自然科学基金面上项目(52177139)和河北省省级科技计划(E2020202086, E2021202186)资助项目。20211019 收到初稿, 20220517 收到修改稿

influence law of the tolerance uncertainty of the moving iron core and magnetic guide ring on the output force of the holding element is obtained. Based on the tolerance influence analysis of the sensitive parts of the retaining unit, the mechanical parameters of the permanent magnet retaining unit are selected as the optimization variables, the cost and bounce of the operating mechanism are considered, the uncertainty of the tolerance of the magnetic guide ring and the moving iron core is considered, the multi-objective optimization design model of the retaining unit of the repulsive operating mechanism considering the uncertainty of the tolerance is established, and the set of non-dominated solutions of Pareto frontier is obtained. Finally, based on the optimized retaining unit structure, a fast vacuum switch experimental platform is built for the opening and closing experiment of the repulsive operating mechanism. The system can complete the opening and closing action within 15 ms. The research shows that the optimization method ensures that the retaining unit of the repulsive operating mechanism can play its role to the greatest extent under different manufacturing, and allows low grade tolerances for the parameters of the moving iron core and magnetic guide ring.

**Key words:** repulsive operating mechanism; tolerance design; interval uncertainty; NSPSO; multi field coupling

## 0 前言

在“双碳”背景下，清洁能源快速发展，电网需满足大量新建分布式光伏与风电的接入条件，同时 5G 基站、电动汽车充电设施、智能建筑等新型基础设施快速发展为交直流混合配电网带来新的技术挑战与高可靠保护需求。

直流电网短路电流幅值大，增长率高，亟需高可靠性直流断路器切断故障电流并隔离故障区域<sup>[1]</sup>；敏感负荷电压故障率高，切换频繁，迫切需要高性能切换开关以实现敏感负荷不间断供电<sup>[2-3]</sup>，快速断路器与切换开关迎来新的发展机遇。这两种装置均要求其机械开关具备快速动作能力，对机械开关操动机构提出更高要求。基于涡流效应的斥力操动机构良好匹配了快速断路器与切换开关的速度需求<sup>[4]</sup>。永磁保持单元结构简单，在分合闸位置保持力最大，在中间位置出力小，其出力特性完美匹配斥力操动机构快速性要求<sup>[5]</sup>，在工程应用中得到广泛应用。

邹积岩等基于永磁保持斥力操动机构研制了 12 kV 直流断路器，成功开断 8.5 kA 短路电流，给出了保持单元分合闸保持力设计要求<sup>[6]</sup>，并深入研究了电磁斥力机构多物理场耦合及其在产品设计中的影响<sup>[7]</sup>，提出一种电磁场、结构分析场及瞬态力场的协同仿真方法，围绕着斥力线圈外壳材料、厚度、径向匝数、核心连接部件尺寸等参数对快速开关进行了多场协同仿真的应力与形变研究<sup>[8]</sup>。程显等完成了双线圈电磁斥力机构设计，分别从导磁材料、结构参数等方面对斥力线圈盘进行了分析和优化设计<sup>[9]</sup>。HOU 等通过研制的高速 10 kV 直流断路器分合闸机械特性实验，验证了永磁保持金属盘式斥力机构方案的可行性<sup>[10]</sup>。ZHANG 等采用永磁保

持与电磁缓冲配合的方式实现了断路器分闸速度超过 5 m/s 的可靠分断<sup>[11]</sup>。艾绍贵等分别对 126 kV 单断口真空断路器弹簧操动机构、双稳态永磁操动机构，以及快速斥力机构在断路器合分闸操作冲击应力作用下易损部件的疲劳寿命进行了分析，证明了双稳态永磁操动机构疲劳寿命最高<sup>[12]</sup>。上述研究成果为改善机械开关动态特性，在斥力操动机构斥力单元出力特性影响因素分析及优化方面做出重要贡献，提高了能量转换效率，减小了开关体积与成本。但机械开关成功分合关键在于斥力单元与保持单元出力特性的可靠配合，不仅要考虑斥力单元的优化设计，还需考虑保持单元优化设计。

目前，斥力操动机构优化一般采用多参数单目标的蛮力法进行。实际工程应用中，工况不同，所需优化结构参数并非一致，有些场合需要机械结构小型化，有些场合则重点考虑成本，兼顾多目标优化的斥力操动机构设计具有理论和工程意义<sup>[13-14]</sup>。

此外，通常所建立的模型基本多采用确定性模型，即认为材料特性、载荷、几何尺寸等参数在优化过程中不存在摄动，但参数不确定性客观存在，其对优化目标性能影响已引起研究者广泛关注<sup>[15-16]</sup>。

郑宏伟等针对机械产品在可靠性设计和分析中存在大量不确定性问题，提出一种基于高阶矩最大熵方法的混合结构可靠性分析方法，该方法成功应用于旋压设备旋轮座体工程结构可靠性分析应用中<sup>[17]</sup>。郝耀东等针对带扭动力吸振器的动力传动系统，将区间不确定性优化模型引入，保证了吸振器均能最大效用，使得吸振器设计公差宽松，降低了工程成本<sup>[18]</sup>。廖代辉等针对机械系统建立了一种基于尺寸的区间优化方法，解决了机械系统关键

零部件的最优尺寸与最低成本尺寸公差这一矛盾问题,并在解决汽车偏置碰撞问题上得到验证<sup>[19]</sup>。彭海军等为在轨迹规划时研究不确定性对吊车运动的影响,提出一种基于区间模型的不确定性研究方法,可快速准确求出不确定性下吊车运动轨迹区间<sup>[20]</sup>。可见,公差区间不确定性对不同机械装置的工程成本与服役性能影响较大。

基于上述分析,有必要进行斥力操动机构保持单元加工公差区间不确定性的多目标优化设计,解决永磁保持单元运动质量大、保持力调节难及装配困难等问题。

本文针对 400 V/12.5 kA 快速真空开关的斥力操动机构保持单元参数相互耦合、公差区间不确定性影响相互关联的多变量多目标优化问题,提出一种考虑公差区不确定性的保持单元多目标优化设计方法。以 400 V/12.5 kA 快速真空开关操动机构为对象,选取永磁保持单元机械参数为优化变量,考虑敏感部件导磁环与动铁芯加工公差,以保持部分动铁芯质量与公差评价函数达到最小为优化目标,将有效分合闸保持力范围及磁铁质量作为多变量多目标优化的约束条件,采用非支配排序粒子群优化(Non-dominated sorting-particle swarm optimization, NSPSO)算法实现操动机构保持单元多参数多目标优化设计。基于所优化的操动机构结构参数,搭建快速真空开关实验平台,分析不同公差区间约束下快速真空开关操动机构保持单元多目标优化方法的有效性。

## 1 操动机构工作原理与公差影响分析

### 1.1 操动机构工作原理

针对 400 V/12.5 kA 快速真空开关工况条件,操动机构主要参数如下:分闸时间小于 8 ms,合闸时

间小于 10 ms;超程 1.0 mm,行程 5.5 mm。所设计金属盘式斥力操动机构结构如图 1 所示。

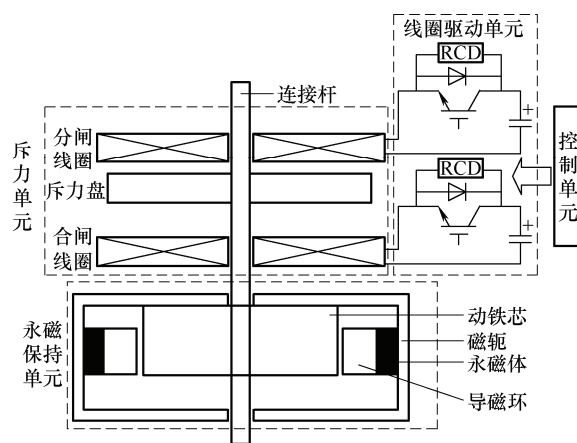


图 1 金属盘式斥力操动机构本体结构

斥力操动机构是一种利用涡流效应产生动力的新型快速驱动装置,其运动过程存在电、磁、热、力等多物理场相互作用。分闸线圈通电时,金属斥力盘与分闸线圈间产生向下的电磁斥力,实现与操动机构连接杆相连的灭弧室分闸;合闸线圈通电时,金属斥力盘与合闸线圈间产生向上的电磁斥力,实现与操动机构连接杆相连的灭弧室合闸;分闸位置时,永磁体、导磁环与磁轭形成闭合磁路提供分闸位保持力;合闸位置时,永磁体、导磁环与磁轭形成闭合磁路提供合闸位保持力。为提高金属盘与线圈之间感生磁场利用率,选取 2A12 高强度铝作为金属斥力盘材料,厚度为 20 mm 环氧树脂为分合闸线圈固定和密封骨架,保持部分动铁芯、磁轭与导磁环材料选用 10 钢。

本文主要研究考虑公差区不确定性的操动机构保持单元多参数多目标优化建模方法,并以样机机械特性实验验证区间不确定性多目标优化模型准确性,研究路线如图 2 所示。

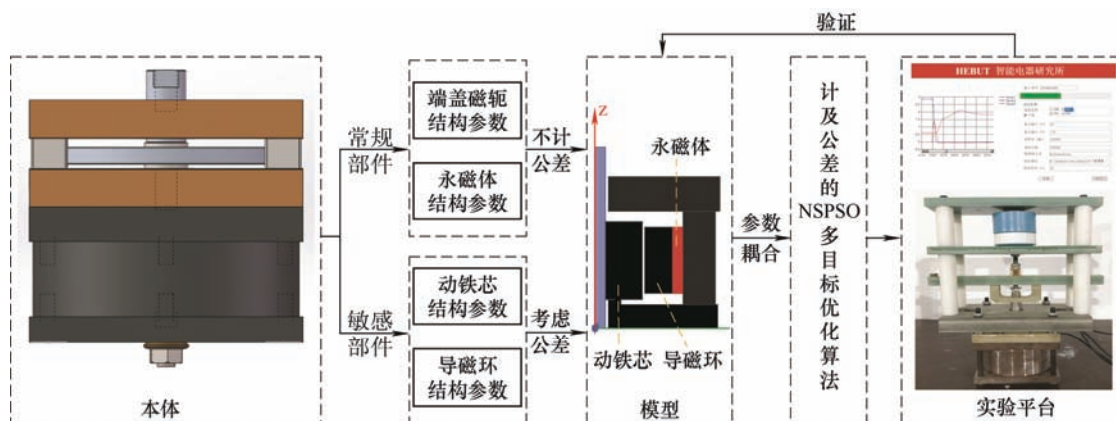


图 2 考虑公差区不确定性的操动机构保持单元多目标优化设计技术路线

## 1.2 保持单元敏感部件公差影响分析

所设计斥力操动机构部件组成如图 1 所示, 包括斥力单元和永磁保持单元。系统在优化设计前, 需考虑部件结构尺寸加工公差对目标性能的影响。由于空气磁阻率是 10 钢的近千倍, 所以保持单元的导磁环与动铁芯的加工间隙是影响保持部分出力特性的关键因素, 然而导磁环与动铁芯公差不确定性会导致间隙随机变化。若间隙过小, 机构多次分合闸运动后无法保证动铁芯与导磁环同心度一致, 二者存在接触的可能, 接触后保持力将发生突变, 导致开关分合闸失效; 反之, 若间隙过大, 动铁芯与导磁环无接触, 但相同尺寸永磁体条件下, 机构保持力将不满足分合闸要求。即, 小间隙操动机构保持力满足, 可靠性低; 大间隙操动机构可靠性较高, 保持力不满足要求。保持力值  $F$  可根据麦克斯韦吸力计算公式(1)得到。

$$F = \frac{B_1^2 S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中,  $B_1$  表示动铁心与保持单元上端盖间主磁通密度(T),  $S$  表示动铁心上端面工作面积( $\text{m}^2$ ),  $\mu_0$  为真空磁导率( $\text{H/m}$ )。

因需计算动铁芯从合闸位到分闸位不同位置保持力大小, 且  $B_1$  动态变化, 准确计算较难。为准确分析导磁环与动铁芯的加工公差产生的间隙不确定性对操动机构出力特性的影响规律, 采用有限元法建立机构保持单元三维数值分析模型, 实现保持力精确计算, 建模流程图如图 3 所示, 建立三维有限元模型如图 4 所示。

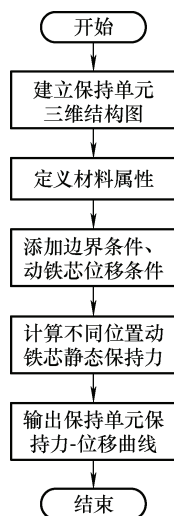


图3 保持单元建模流程图

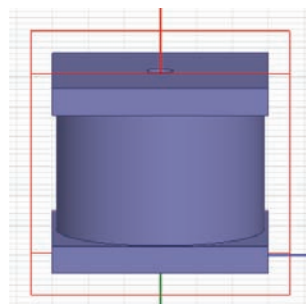


图4 保持单元三维有限元数值分析模型

保持单元初始设计结构尺寸下, 导磁环与动铁芯的间隙为 0.5 mm。再分别取间隙 0.3 mm、0.7 mm 与 1.0 mm 进行保持部分从合闸位到分闸位磁力仿真, 保持力变化曲线如图 5 所示。随着间隙增大, 分合闸保持力摄动随之增大, 合闸保持力从 0.3 mm 间隙的 2.37 kN 变为 1 mm 间隙的 1.5 kN, 变化率达 36.7%, 分闸保持力从 0.3 mm 间隙的 2.05 kN 变为 1 mm 间隙的 1.5 kN, 变化率为 26.8%。另外, 输出保持力在行程 0~1 mm 与 4.5~5.5 mm 存在明显差异, 将导致操动机构运动特性改变, 导磁环与动铁芯尺寸加工公差不确定性在设计时须加以考虑。

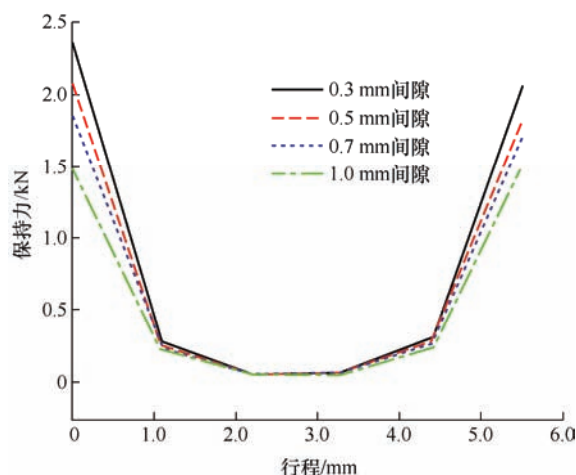


图5 不同间隙下保持单元出力特性

## 2 区间不确定性多目标优化

### 2.1 考虑公差设计的目标函数

斥力操动机构制备过程中, 往往先确定保持部分的结构, 再通过改变动铁芯、导磁环、磁铁、端盖与磁轭的尺寸逐步调节保持力输出值, 以达到开关耐受短路电流时保持力设计值, 过程中需多次测试保持力, 以达到理想效果。保持单元的设计公差值越小, 部件的合格率越低, 机构装配难度加大, 测试和反复调配的次数也越多。在设计阶段需考虑部件参数公差, 增加敏感部件设计



公差, 解决由设计公差带来的装配和调试难题, 以增加系统可靠性。

由 MOORE 提出的区间数被广泛应用于工程实际问题的不确定性分析, 本文将考虑公差的区间不确定性引入到操动机构保持单元优化设计中, 除保证保持单元输出保持力的性能外, 还需要保证敏感部件公差取值合理。以一个能够表征敏感部件尺寸公差大小的评价系数  $\zeta$  为目标函数, 即

$$\min_{X_i, \Delta X_i} [-\zeta] = \left[ -\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{\Delta X_i}{X_i}} \right] \quad (2)$$

式中,  $\zeta$  为对称尺寸公差评价系数, 它是对称尺寸公差( $\Delta X_i$ )与基本尺寸( $X_i$ )的函数。为适应求最小值的表达习惯, 在  $\zeta$  前面加负号, 其意义是  $\zeta$  的绝对值越大, 区间半径越大, 公差成本越小。

## 2.2 NSPSO 多目标优化方法

操动机构保持单元的设计既需考虑保持力满足开关分合保持力要求, 又需考虑加工与产品成本, 保持单元的优化设计问题属于多目标优化问题。常用的多目标优化方法, 一类是将多目标优化问题转化为相应的单目标优化问题, 各优化目标权值根据经验而定, 优化结果仅与所选中优化目标关联性较强, 而与转化为约束的优化目标关联性较弱。另一类是将多目标优化问题转化为 Pareto 前沿问题, Pareto 前沿的提出避免了第一类多目标优化方法固有缺点。其思路是在每次迭代更新过程中, 将单目标优化结果中最优群组优化值更新到 Pareto 前沿上, 以确定下一代新的优化变量。

常用多目标优化算法 NSGA-II 与 NSPSO, 二者均属于仿生算法, 都是在解空间随机产生初始种群, 在全局解空间进行随机搜索, 搜索重点集中在性能高的部分。而 NSPSO 中认知项和社会项前均加有随机数且具备记忆功能, 较优解的知识信息所有粒子都保存, 与 NSGA-II 相比进化个体能以更快速度收敛于最优解。另外, 相对于 NSGA-II, NSPSO 无需编码, 无交叉和变异操作, 粒子仅通过内部速度进行更新。针对 ZDT4 优化问题, NSPSO 的 10 次运行全部收敛到最优解, NSGA-II 只有 2 次到达局部最优, NSPSO 具有更好的传播和覆盖率<sup>[21]</sup>。前期研究表明 NSPSO 可实现工程问题多目标优化<sup>[22]</sup>。

综上, 本文采用 NSPSO 算法获得保持单元结构尺寸最优 Pareto 前沿解, 解决在操动机构给定性能水平及其公差不确定约束条件下, 求解关键零部件最优基本尺寸与最低成本尺寸公差问题。

## 3 操动机构保持单元优化设计

参照文献[17-20]提出的一种考虑公差的区间不确定性优化方法与文献[21]提出的 NSPSO 多目标优化方法, 本文提出一种以动铁芯质量与敏感部件尺寸公差负评价系数最小为优化目标, 以保持单元关键部位几何结构参数为优化变量, 考虑敏感部件公差为不确定因素, 以保持单元出力特性及相关的固有限制性条件为约束, 实现操动机构保持单元优化设计, 技术路线如图 6 所示。实施步骤如下。

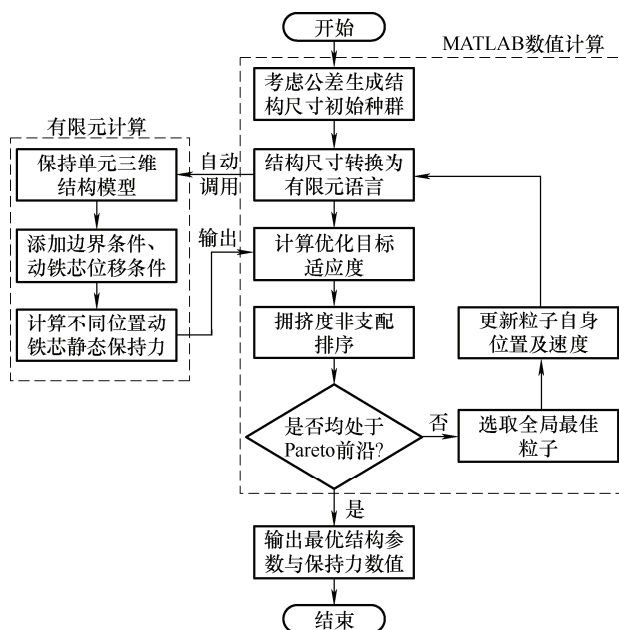


图 6 保持单元 NSPSO 多目标优化技术路线

- (1) 构建保持单元的确定性优化目标。
- (2) 考虑优化变量在实际生产与测量过程中误差影响, 引入设计公差指标。
- (3) 采用基于可靠性的区间可能度模型方法, 完成约束条件处理;
- (4) 将保持部分有限元电磁场瞬态建模步骤改写成 m 语言命令流形式; 再引入 NSPSO 算法适应度计算子程序中。
- (5) 生成保持部分结构参数初始种群与粒子速度。
- (6) 使用 m 语言, 将初代结构参数变量结构模型导入 Maxwell 求解器中。
- (7) 基于 Maxwell 求解器, 进行保持部分磁力有限元仿真, 根据约束条件提取适应度值及优化变量。
- (8) 将适应度返回 Matlab 多目标优化算法程序, 生成下一代优化变量。

(9) 重复上述步骤，直至满足停止准则，结束寻优，保存优化后结构参数。

### 3.1 目标函数与约束条件

所设计快速开关斥力机构保持单元采用永磁保持，轴对称仿真模型如图 1 中所示。机构设计过程中，动铁芯质量是机构分合闸弹跳大小的关键因素，而敏感元件公差大小则是机构生产成本与装配难易的关键因素。

选取优化目标函数为：(1)动铁芯质量  $M$ ；(2)负公差评价系数  $\zeta$ 。

根据真空快速开关操动机构保持部分出力特性、结构参数(单位：mm)及工程设计要求，考虑优化区间可行性，确定设计参数约束条件。

动铁芯半径  $X(1)$ :  $10.0 \leq X(1) \leq 42.0$ 。

导磁环厚度  $X(2)$ :  $5.0 \leq X(2) \leq 20.0$ 。

动铁芯半径公差  $\Delta X_1$ :  $0.05 \leq \Delta X_1 \leq 0.25$ 。

导磁环厚度公差  $\Delta X_2$ :  $0.05 \leq \Delta X_2 \leq 0.25$ 。

底座凸台宽度  $X(3)$ :  $2.0 \leq X(3) \leq 10.0$ 。

上端盖厚度  $X(4)$ :  $5.0 \leq X(4) \leq 20.0$ 。

磁轭厚度  $X(5)$ :  $5.0 \leq X(5) \leq 20.0$ 。

永磁体厚度  $X(6)$ :  $5.0 \leq X(6) \leq 20.0$ 。

根据真空快速开关参数要求和器件条件，斥力机构保持部分性能约束满足如下条件。

合闸保持力  $F_h(N)$ :  $1\ 200 \leq F_h \leq 2\ 400$ 。

分闸保持力  $F_f(N)$ :  $800 \leq F_f \leq 2\ 400$ 。

永磁体质量  $m(\text{kg})$ :  $m \leq 1.6$ 。

### 3.2 仿真与优化结果

设定保持单元结构参数初始种群规模为 30，收敛条件设置为所有粒子均收敛至 Pareto 前沿，采用 NSPSO 算法优化 400 V/12.5 kA 快速真空开关保持单元，得到 15 组处于 Pareto 前沿上的粒子，适应度解分布如图 7 所示；趋于左侧的参数是机构分合闸小弹跳的确保因素；趋于右侧的参数是机构加工低成本与装配低难度的确保因素。一般情况下，操动机构设计应结合开关实际工况综合考虑多种参数，择优选择。

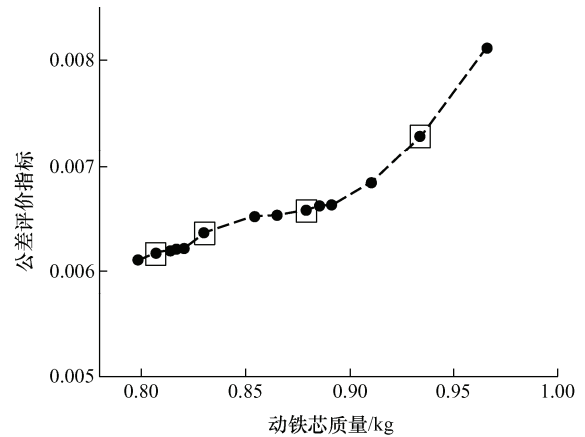


图7 保持单元多目标优化 Pareto 解

本设计方案要求动铁芯与负公差评价系数尽可能小为优化目标，图 1 中所对应的各部件的基本尺寸与公差的部分结果如表 1 所示。

表 1 优化组参数及优化结果

| 组别 | $(X(1)+\Delta X_1)/\text{mm}$ | $(X(2)+\Delta X_2)/\text{mm}$ | $X(3)/\text{mm}$ | $X(4)/\text{mm}$ | $X(5)/\text{mm}$ | $X(6)/\text{mm}$ | $\zeta$ |
|----|-------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------|
| 1  | $22.4 \pm 0.09$               | $2.7 \pm 0.05$                | 7.2              | 6.5              | 10.9             | 6.5              | 0.006 2 |
| 2  | $23.1 \pm 0.10$               | $3.1 \pm 0.06$                | 7.0              | 6.39             | 8.0              | 8.3              | 0.006 4 |
| 3  | $25.2 \pm 0.10$               | $3.7 \pm 0.08$                | 7.6              | 11.4             | 7.2              | 9.3              | 0.006 6 |
| 4  | $33.3 \pm 0.16$               | $9.2 \pm 0.10$                | 8.5              | 14.2             | 14.3             | 8.7              | 0.007 3 |

因为公差越小，机构加工成本与装配难度增加，选取表 1 中组别 4 的结构参数进行样机加工。加工后的保持部分采用电子万能压力机(型号：KeXin WDW310)进行保持部分的分合闸保持力测试，测试与优化后仿真力曲线如图 8 所示。

由图 8 可知，仿真得到合闸保持力 1 680 N，样机测试结果为 1 614 N，仿真误差 4.2%；仿真求得分闸保持力 1 600 N，样机测试结果为 1 662 N，误差 3.9%，实验测试结果证明了该多目标优化算法有效。保持单元优化后动铁芯与导磁环的间隙从设计初始值的 0.5 mm 间隙变为 0.7 mm，且优化后真空开关保持单元参数满足结构约束与保持力约束条

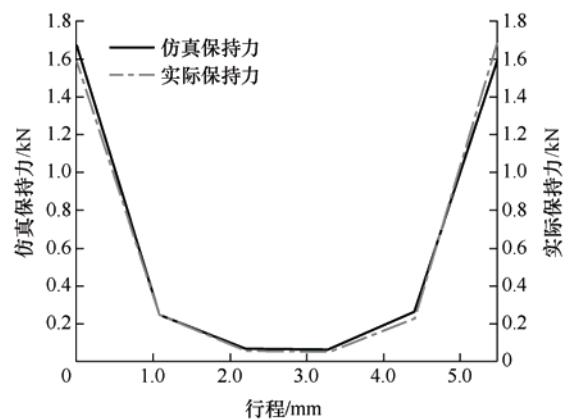


图8 保持单元合闸到分闸保持力曲线

件,满足工程优化设计要求,可实现操动机构防弹跳、低成本与易装配设计目标。

#### 4 操动机构运动特性实验研究

快速真空开关斥力操动机构分为保持部分与斥力部分,斥力装置用于为机械开关分合闸动作提供动力,是机械开关分合闸动作速动性的关键部分。所设计快速开关操动机构斥力部分采用铝盘-线圈式斥力方案,基于前期研究成果,斥力部分结构优化方法采用非支配排序遗传算法<sup>[23-25]</sup>。得到斥力部分非支配解集中斥力做功满足设计要求的结构参数组合,如表 2 所示。

表 2 斥力部分结构参数表

| 结构参数                | 数值       |
|---------------------|----------|
| 金属斥力盘半径/mm          | 70.0     |
| 金属斥力盘厚度/mm          | 10.0     |
| 分、合闸线圈匝数/匝          | 55/45    |
| 线圈铜线规格/mm           | 0.7×10.0 |
| 分闸电容/ $\mu\text{F}$ | 4 700    |
| 分闸电容电压/V            | 345.0    |
| 合闸电容/ $\mu\text{F}$ | 3 900    |
| 合闸电容电压/V            | 342.0    |

根据优化仿真模型及运算结果,参照前期设计经验,制备金属盘式快速真空开关试验样机如图 9 所示。为验证设计方案可行性,进行机械特性试验。试验设备包括:位移传感器(12 V/50 mm),示波器(TBS1064),电流探头(TRCP3000, 2 mV/A)。金属盘式快速真空开关分合闸过程运动特性实验结果如图 10 所示。试验样机分闸达到 5.5 mm 位移所用时间 5.7 ms,分闸线圈电流峰值 1 450 A;合闸完成 5.5 mm 位移所用时间为 7 ms,合闸线圈电流峰值 1380 A。实验研究表明,该快速真空开关优化设计方案在 15 ms 内完成开关分合闸整套操作,可提高敏感负荷用电的可靠性,所提出操动机构与保持单元优化方案可行。



图 9 快速真空开关试验样机

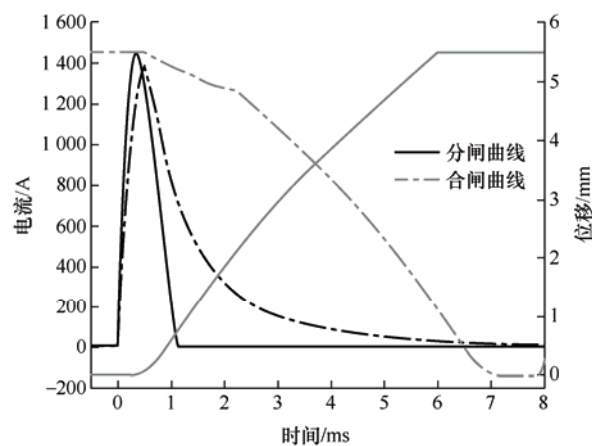


图 10 分合闸过程运动特性实验曲线

#### 5 结论

快速真空开关斥力操动机构设计与优化涉及集成多物理量磁场仿真,在虚拟空间中完成多变量隐动力学行为表征与映射,是实现相对应的物理实体装备可靠优化设计的有效途径。针对斥力操动机构保持单元优化设计包含公差区间不确定、成本及装配等问题,构建了一种能实现保持单元多性能目标参数的基本尺寸及其公差同步优化的区间优化方法。主要结论如下。

(1) 导磁环与动铁芯尺寸加工公差不确定性对导致二者间隙随机,影响了保持单元出力特性,合闸保持力从 0.3 mm 间隙的 2.37 kN 变为 1.0 mm 间隙的 1.5 kN,变化率为 36.7%,分闸保持力从 0.3 mm 间隙的 2.05 kN 变为 1.0 mm 间隙的 1.5 kN,变化率为 26.8%。

(2) 基于 NSPSO 算法的多软件联合优化方法有效,在满足保持力性能指标约束下,导磁环与动铁芯的间隙增大 0.2 mm,最大加工公差为 0.16 mm,大大降低了成本与装配难度。

(3) 基于优化后的操动机构保持单元结构参数,搭建 400 V/12.5 kA 快速真空开关实验样机,由开关机械运动特性实验曲线可知,样机完成分合闸操作用时 12.7 ms,在机械系统给定性能水平及其固有约束条件下,实现了关键零部件最优基本尺寸与最低成本尺寸公差问题,达到工程成本与服役性能良好配合。

#### 参 考 文 献

- [1] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.  
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage

- DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.
- [2] JAVAID U, FREIJEDO F D, DUJIC D, et al. MVDC supply technologies for marine electrical distribution systems[J]. CPSS Transactions on Power Electronics & Applications, 2018, 3(1): 65-76.
- [3] 崔学深, 张自力, 王泽忠, 等. 基于固态切换开关的感应电机类负荷电源快速切换新策略及参数计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 21-28.
- CUI Xueshen, ZHANG Zili, WANG Zezhong, et al. Novel rapid power switching strategy and its parameter calculation of induction motor-load based on solid state transfer switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 21-28.
- [4] 田阳, 田宇, 李志兵, 等. 高速机械开关单元多场耦合仿真优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1273-1280.
- TIAN Yang, TIAN Yu, LI Zhibing, et al. Multi-field coupling simulation optimization of high-speed mechanical switch unit[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1273-1280.
- [5] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818.
- HE Junjia, YUAN Shao, JING Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.
- [6] 董文亮, 邹积岩, 郭兴宇. 直流真空断路器模块的机械联动特性仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1005-1012.
- DONG Wenliang, ZHOU Jiyan, GUO Xingyu. Simulations and experimental research on dynamic characteristics of DC vacuum circuit breaker modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1005-1012.
- [7] 郭兴宇, 梁德世, 黄智慧, 等. 基于多场耦合的电磁斥力机构运动参数研究[J]. 高电压技术, 2022(2): 626-635.
- GUO Xingyu, LIANG Deshi, HUANG Zhihui, et al. Research on motion parameters of electromagnetic repulsion mechanism based on Multi-Field coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022(2): 626-635.
- [8] 王汝凡, 王德全, 邱军, 等. 快速开关多场协同仿真下的应力与形变研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2913-2923.
- WANG Rufan, WANG Dequan, QIU Jun, et al. Research on stress and deformation under Multi-field cooperative simulation of fast switch[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2913-2923.
- [9] 程显, 赵海洋, 葛国伟, 等. 快速斥力机构线圈盘磁场优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2643-2653.
- CHENG Xian, ZHAO Haiyang, GE Guowei, et al. Optimum design of coil disc magnetic field of rapid repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2643-2653.
- [10] HOU Yushan, SHI Zongqian, LI Sheng, et al. Research on fast opening process in electromagnetic repulsion mechanism[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019(1): 1-4.
- [11] ZHANG Mingzhi, WANG Yi, LI Peng, et al. A novel buffering method for permanent magnet electromagnetic repulsion mechanism[C]// 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Istanbul, Turkey, 2019: 354-358.
- [12] 艾绍贵, 衣立东, 姚晓飞, 等. 126 kV 真空断路器操动机构机械可靠性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 77-85.
- AI Shaogui, YI Lidong, YAO Xiaofei, et al. Research on mechanical reliability of operating mechanisms of 126 kV vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 77-85.
- [13] 顾涛, 李苏建, 林莹璐, 等. 周期式退火炉作批处理机的可重入批离散机流水车间调度[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 220-232.
- GU Tao, LI Sujian, LIN Yinglu, et al. Research on the re-entrant batch discrete flow shop scheduling for periodic annealing furnace as batch processor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2): 220-232.
- [14] 丁晓林, 王震坡, 张雷. 四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动系统参数多目标优化匹配[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 195-204.
- DING Xiaolin, WANG Zhenpo, ZHANG Lei. Powertrain sizing for four-wheel-independent-actuated electric vehicles based on multi-objective optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 195-204.
- [15] 刘胜利, 王兴东, 孔建益, 等. 多源不确定性下平面变胞机构运动可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 64-75.
- LIU Shengli, WANG Xingdong, KONG Jianyi, et al. Kinematic reliability analysis of planar metamorphic mechanism with multi-source uncertainties[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(17): 64-75.
- [16] 喻天翔, 赵庆岩, 尚柏林, 等. 考虑间隙不确定性的花键概率疲劳寿命预测方法[EB/OL]. [2022-01-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JXXB20210512000&u>



- niplatform=NZKPT&v=70CtNECuetuEZ2QgiTu81NsHXopMJR7lv\_x\_9TMCxGzmNL6SpFq9Wnsh6U9jg7o.
- YU Tianxiang, ZHAO Qingyan, SHANG Bolin, et al. Probabilistic fatigue life prediction method of spline considering clearance uncertainty[EB/OL]. [2022-01-24]. [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JXXB20210512000&uniplatform=NZKPT&v=70CtNECuetuEZ2QgiTu81NsHXopMJR7lv\\_x\\_9TMCxGzmNL6SpFq9Wnsh6U9jg7o](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JXXB20210512000&uniplatform=NZKPT&v=70CtNECuetuEZ2QgiTu81NsHXopMJR7lv_x_9TMCxGzmNL6SpFq9Wnsh6U9jg7o).
- [17] 郑宏伟, 孟广伟, 李锋, 等. 基于高阶矩最大熵方法的结构混合可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 282-290, 303.
- ZHENG Hongwei, MENG Guangwei, LI Feng. Hybrid reliability analysis for structures based on high-order moments and maximum entropy method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 282-290, 303.
- [18] 郝耀东, 何智成, 李光耀, 等. 考虑公差的扭转动力吸振器不确定性优化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(14): 1645-1660.
- HAO Yaodong, HE Zhicheng, LI Guangyao, et al. Uncertain optimization of torsional vibration damper considering tolerant design[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(14): 1645-1660.
- [19] 廖代辉, 卿宏军, 姜潮, 等. 尺寸公差区间描述及不确定性优化[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(2): 280-286.
- LIAO Daihui, QING Hongjun, JIANG Chao, et al. An interval description and uncertainty optimization method for dimension tolerance[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(2): 280-286.
- [20] 彭海军, 施博洋, 王昕炜, 等. 考虑区间不确定性的双摆吊车运动轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 204-213.
- PENG Haijun, SHI Boyang, WANG Xinwei, et al. Trajectory planning of double pendulum crane considering interval uncertainty[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 55(2): 204-213.
- [21] LI Xiaodong. A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multi objective optimization[C]// Genetic and Evolutionary Computation Conference, Chicago, IL, USA, 2003: 37-48.
- [22] 李培源. 低压直流真空断路器换流回路拓扑与灭弧室结构优化设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
- LI Peiyuan. Topology of converter circuit and structure optimization design of arc extinguishing chamber of low voltage DC vacuum circuit breaker[D]. Tianjin: Tiangong University, 2020.
- [23] 张艺. 机械式低压直流真空断路器快速操动机构设计与仿真[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- ZHANG Yi. Design and simulation of quick operating mechanism of mechanical low voltage DC vacuum circuit breaker[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021.
- [24] JIANG Wentao, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Analysis and experimental research on dynamic characteristics of operating mechanism of fast vacuum transfer switch[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 8(31): 1-4.
- [25] JIANG Wentao, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Analyses of electromagnetic buffer characteristics of operating mechanism for fast vacuum transfer switch[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 8(31): 1-4.

作者简介: 刘晓明(通信作者), 女, 1968年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代电器设计与应用、智能电器、高电压与绝缘技术。  
E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn  
姜文涛, 男, 1985年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械设计及理论、现代电器设计与应用。  
E-mail: jiangwentaoanda@163.com