

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.009

## 集成式真空断路器永磁操作机构主要参数设计

吴育桐<sup>1</sup>, 杜钦君<sup>1</sup>, 吴磊<sup>2</sup>, 马炳图<sup>1</sup>, 刘家合<sup>1</sup>, 李伟强<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255022; 2. 淄博职业技术大学, 山东 淄博 255300)

**摘要:** 针对传统永磁真空断路器体积大、重量重、在狭小空间运行成本高的问题,提出了一种真空灭弧室和永磁操作结构一体化设计方案。将传统的真空灭弧室与永磁操作结构并列布局改为垂直布局,永磁操作机构中的保持部分与驱动部分直接作用于触头组件,与传统永磁断路器相比体积减少二分之一。集成式断路器新型永磁机构采用单线圈双向激励驱动,无需像传统双稳态断路器分别对分合闸线圈通电;并将圆环状永磁体切割为规律排列的瓦片型,优化磁路布局。建立永磁机构静磁—电磁—动力学物理场仿真模型,提出基于NSGA-III(第三代非支配遗传算法)在Comsol-MATLAB的联合优化方法,有效解决了永磁断路器参数优化设计中涉及复杂气隙迭代的电磁力与合闸保持力解析式难以嵌入优化算法约束条件的问题。通过机械特性与电寿命实验,证明研制的集成式永磁真空断路器样机达到了产品性能指标要求。

**关键词:** 集成式设计; 永磁真空断路器; 永磁机构; 非支配排序遗传算法; 联合优化

### Design of Main Parameter for Permanent Magnetic Operating Mechanism of Integrated Vacuum Circuit Breaker

WU Yutong<sup>1</sup>, DU Qinjun<sup>1</sup>, WU Lei<sup>2</sup>, MA Bingtu<sup>1</sup>, LIU Jiahe<sup>1</sup>, LI Weiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255022, China;  
2. Zibo Vocational and Technical University, Shandong Zibo 255300, China)

**Abstract:** In view of such issues as large volume, heavy weight, and high operating costs in confined spaces associated with traditional permanent magnetic vacuum circuit breaker (PMVCB), an integrated design scheme combining the vacuum interrupter (VI) and the permanent magnetic operating mechanism is proposed. The conventional side-by-side layout of the VI and the permanent magnetic operating mechanism is replaced by a vertical layout. The holding and the driving part of the permanent magnetic operating mechanism act directly on the contact assembly, resulting in a 50% reduction in volume compared to conventional permanent magnetic vacuum circuit breaker. The novel permanent magnetic operating mechanism of the integrated circuit breaker adopts a single-coil bi-directional excitation drive, eliminating the need to energize the opening and closing coils separately as in traditional bistable breakers. Furthermore, the annular permanent magnet is segmented into regularly-arranged tile-shaped pieces so to optimize the magnetic circuit configuration. A static magnetic-electromagnetic-dynamic physical field simulation model of the permanent magnetic operating mechanism is set up. A joint optimization methodology based on NSGA-III (non-dominated sorting genetic algorithm III) within Comsol and MATLAB is proposed, which effectively resolves the issues in the parameter optimization design of permanent magnetic circuit breakers where the analytical expressions of electromagnetic force and closing holding force involving complex air gap iteration are difficult to embed in the constraints of the optimization algorithm. It is proved by mechanical characteristic and electrical endurance tests that the prototype of the integrated permanent magnetic vacuum circuit breaker meets the product performance requirements.

**Key words:** integrated design; permanent magnetic vacuum circuit breaker; permanent magnetic operating mechanism; non-dominated sorting genetic algorithm; joint optimization

## 0 引言

永磁真空断路器(permanent magnet vacuum circuit breaker, PMVCB)作为电力系统配用电开关设备,高效、可靠和环保的特点使其成为智能电网配用电系统中重要组成部分<sup>[1]</sup>。

真空断路器用传统弹簧操动机构存在结构复杂、能耗高及分合闸响应慢等固有缺陷,难以完全适应智能电网对开关设备高可靠性与快速性的要求。在此背景下,电磁斥力与永磁机构的混合型操动机构应运而生,实现快速分合闸开断电操作<sup>[2]</sup>。动力操作机构中引入永磁机构可以有效弥补长驱动行程和20 kg以上的高质量动铁心情况下所导致的性能不足,混合操作机构更适合开发高压传输快速真空断路器<sup>[3]</sup>。针对传统双线圈双稳态永磁操作机构特性,为设计线圈开关动作电流相同的永磁断路器驱动电路,文[4]通过分析永磁机构本体转向其控制系统进而解决驱动电路的设计优化问题,文[5]则建立了考虑真空断路器开断过程中线圈温度效应和控制电路的多物理域联合仿真模型,利用分段线性化思想比较不同开断时刻动铁心位移与电流的关系,进一步提出了对双线圈操作过程中电流波形拟合的分析方法。文[6]通过有限元仿真处理磁场与电磁场相互耦合问题,提出等效电路模型中线圈电流、磁链的计算方法。

为将永磁技术的优势进一步拓展至高压应用场景,解决高压设备与断路器负载速度难以精确的控制问题,文[7]设计了智能单稳态永磁接触器的操动机构,文[8-9]分别从永磁机构设计与参数优化方法入手,将永磁摆角电机机构与新型双稳态永磁机构应用于126 kV高压真空断路器。文[10]通过分析永磁机构合闸状态下的三维静磁场,对合闸状态下永磁机构静磁吸力进行计算。文[11]提出了一种新型滑动变磁阻式永磁—电磁耦合执行机构,并基于等效磁路法建立了双稳态执行机构的变磁阻可控电磁力理论模型。

垂直布局虽在过往研究中有所探讨,但因存在对零部件加工精度要求高、整机装配难度大、绝缘结构配合复杂等工程难题,未成为主流设计方案。为契合未来高压配电领域对高效、智能、轻量化设备的需求,文中通过结构集成化设计,将灭弧室与操动机构同轴布置取消横向传动链,采用智能算法联合静磁—电磁—机械耦合场对参数进行优化,系统性地解决了上述存在的部分瓶颈问题。优化后的永磁机构在真空断路器保证绝缘性能的前提下,

显著降低了对高精度加工的依赖,提高了装配可行性,并通过样机实验验证了其工程适用性与性能可靠性,从而推动了该结构走向实际应用。

## 1 集成式永磁真空断路器结构设计

### 1.1 传统型永磁真空断路器结构分析

传统分布式永磁断路器见图1,永磁体与驱动操作线圈布置在驱动机构的两侧,横向布置机械传动链长,使永磁操作机构不能直接与动触头驱动机构结合,必须通过同步转轴将磁力作用传递到真空灭弧室的触头机构。分布式结构在长期使用中容易产生机械松动,影响操作的可靠性和稳定性。

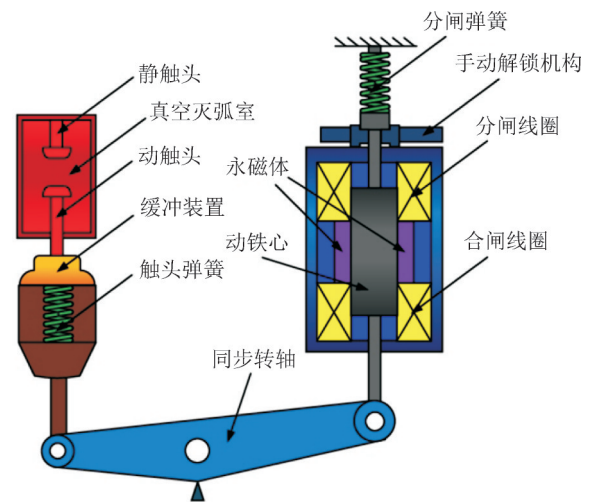


图1 传统双线圈双稳态永磁断路器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional dual-coil dual-stable permanent magnet circuit breaker

### 1.2 集成式永磁真空断路器结构设计

永磁真空断路器通过对功能集成的结构创新设计,将真空灭弧室与永磁操作机构沿垂直轴线同轴布置,取消传统横向传动结构,实现永磁断路器永磁机构直接驱动触头组件。将辅助弹簧放置于永磁机构机腔内,永磁铁、动铁心、静铁心及励磁线圈组合成一个集成单元,沿垂直轴线对称分布,磁通路径最短,有效减少漏磁,集成式永磁真空断路器结构见图2。

## 2 集成式永磁操作机构分析及参数设计

为实现永磁真空断路器快速、可靠的分合闸操作,通过高度集成化永磁机构设计,将永磁驱动、弹簧储能与机械传动的元件融为一体。将整块圆环永磁体分割为多块瓦片型,PMVCB操作机构三维爆炸图见图3。采用Halbach瓦片阵列优化磁路布局,将永磁体沿圆周规律排列于静铁赠外极S与内极N两个极性部分之间。永磁体在圆周方向上形成均

匀的径向磁场,提供稳定的磁力。

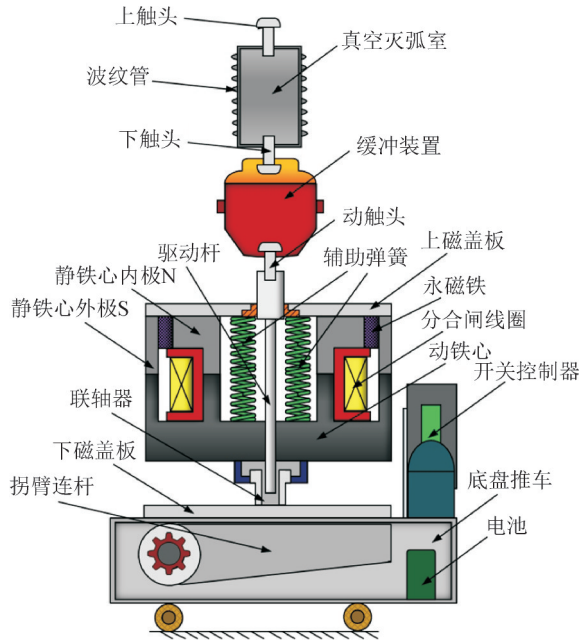


图2 集成式PMVCB内部结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the integrated permanent magnet circuit breaker structure

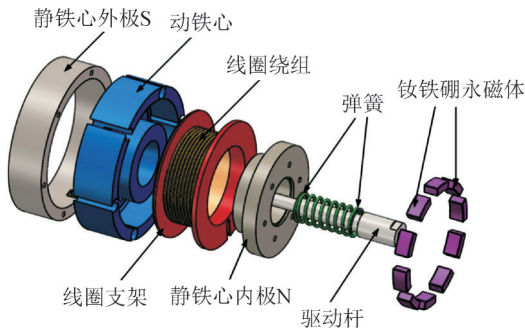


图3 PMVCB操作结构三维爆炸图

Fig. 3 PMVCB operation structure 3D explosion diagram

### 2.1 永磁机构动态模型分析

永磁机构的动态过程本质上是强耦合的多物理场问题。除磁场麦克斯韦方程外,永磁机构动态过程还遵循电压平衡方程和达朗贝尔方程<sup>[12]</sup>。以直流电压为电源的动力学状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{F_{mag} - F_f(x, \frac{dx}{dt})}{m} \\ \frac{d\psi}{dt} = U_c - iR \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \psi|_{t=0} = \psi_0 \\ v|_{t=0} = v_0 \\ x|_{t=0} = x_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $U_c$ 为直流电压; $F_{mag}$ 、 $F_f$ 分别为动铁心受到的电磁力、运动反力; $i$ 、 $\psi$ 分别为线圈电流、电磁系统全磁链; $t$ 为时间; $m$ 为系统运动部件归算到动

铁心的质量; $v$ 为动铁心的移动速度; $x$ 为动铁心移动的位移。

通过求解动铁心位移和速度参量推测机构的动作时间,据此评估是否满足快速响应的要求;利用位移等实测数据可反演推算永磁机构设计的参数是否需修正;动铁心运动的主推动力由电磁力产生,需对其进行精准的动力学模拟,确保动铁心在运动域内产生充足的推动力。永磁机构动态模型分析求解对永磁机构主要参数设计具有重要指导意义。

### 2.2 永磁体几何参数设计

永磁机构的主要参数包括永磁体的厚度、弧长半径、高度等几何参数,影响操作机构执行速度及合闸保持力。永磁机构合闸保持力为

$$F_{hold} \geq mg + F_{spring} + F_{friction} \quad (2)$$

式(2)中: $F_{hold}$ 为永磁机构受到的合闸保持力,主要由永磁体提供,大于等于系统运动部件归算到动铁心的重力等负载反力,即保留一定裕度; $F_{friction}$ 为摩擦力; $F_{spring}$ 为辅助弹簧产生的负载反力,可由胡克定律计算得到。在考虑弹簧自由高度时,应设计为小于永磁机构腔体高度的70%~80%,为压缩行程和动铁心的运动留出空间。

将动铁心开槽后,原本连续的导电材料分割为多个独立的部分,切断涡流的环状电流路径,减少涡流强度,见图4(a)。在理想状态下,动、静铁心间的磁场均匀分布。通过麦克斯韦公式<sup>[13-14]</sup>计算出动铁心所受的吸力,与永磁保持力相匹配为

$$F_{static} = \frac{B_{air}^2 \cdot S_m}{2\mu_0} \quad (3)$$

式(3)中: $B_{air}$ 为工作磁通,由动铁心磁化曲线确定,一般取1.6~1.7 T; $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>为真空磁导率。

动铁心有效截面积 $S_m$ 为两个圆环面积减去每个凹槽的面积 $A_{groove}$ 乘凹槽数量 $n$ ,其计算公式为

$$S_m = \pi \times [(R'_{shell})^2 - (R'_{core})^2] + \pi \times (R_{shell}^2 - R_{core}^2) - n \times A_{groove} \quad (4)$$

为满足新型永磁机构小型化、高性能,选用高矫顽力、强剩磁以及抗退磁力强的钕铁硼为永磁材料,设计的瓦片型永磁体结构见图4。所需永磁体体积计算公式为

$$V_{PM} = S_{PM} \cdot h_{PM} \cdot N_{PM} = \pi \cdot [(R_r + L_{PM})^2 - R_r^2] \cdot h_{PM} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \cdot N_{PM} \quad (5)$$

式(5)中: $R_r$ 、 $h_{PM}$ 、 $L_{PM}$ 、 $S_{PM}$ 分别为永磁体内侧半径、永磁体高度、永磁体径向厚度、永磁体内表面面积; $\alpha$ 为永磁体的机械夹角,以弧度制表示; $N_{PM}$ 为永磁体数量。

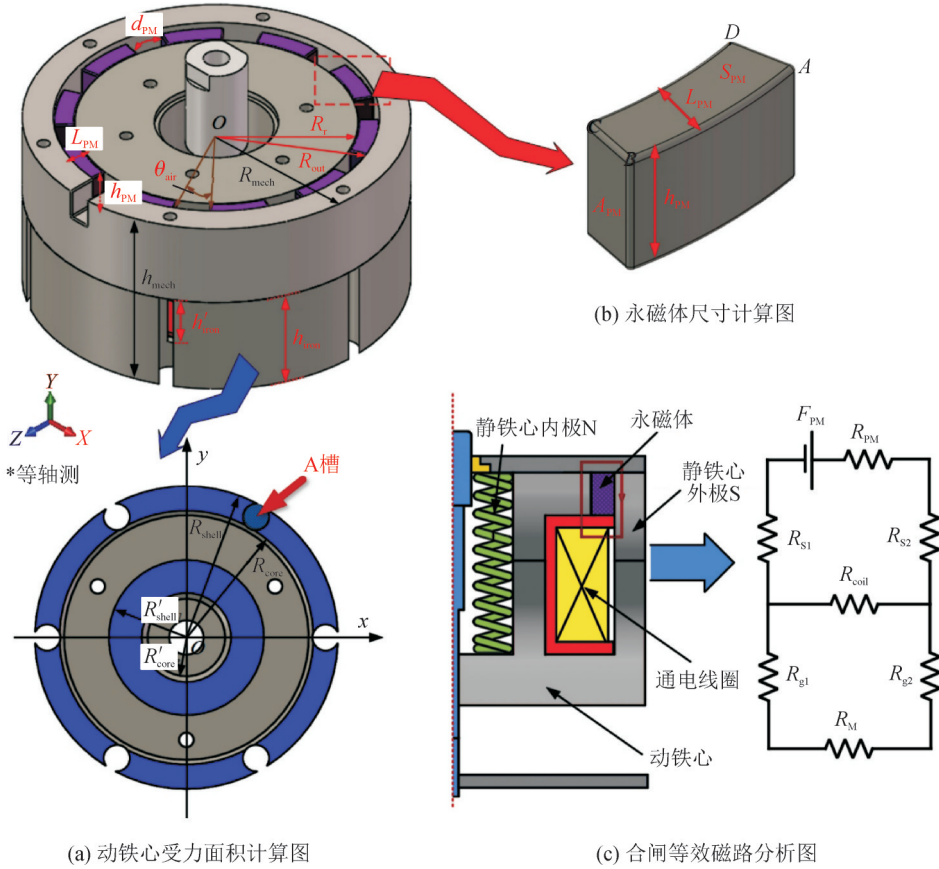


图4 PMVCB操作结构设计图

Fig. 4 Design diagram of PMVCB operation structure

理想状态下忽略漏磁系数,根据磁通连续性原理计算单一永磁体内表面面积 $S_{PM}$ 为

$$\begin{cases} B_{air} S_m = B_{PM} S_{PMtotal} \\ S_{PM} = \frac{S_{PMtotal}}{N_{PM}} = \frac{B_{air} S_m}{N_{PM} \cdot B_{PM}} \end{cases} \quad (6)$$

永磁机构磁路等效模型见图4(c),由磁路欧姆定律可得永磁体磁动势与永磁机构磁阻计算表达式

$$\begin{cases} F_{PM} = B_{air} S_{PM} R_{total} \\ R_{total} = R_{S1} + R_{g1} + R_M + R_{g2} + R_{S2} + R_{PM} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left( \frac{l_{S1}}{\mu_{rS1} S_S} + \frac{l_{S2}}{\mu_{rS2} S_S} + \frac{l_M}{\mu_{rM} S_M} + \frac{\delta_1}{S_m} + \frac{\delta_2 + \delta_3}{S_\delta} + \frac{L_{PM}}{\mu_r S_{PMtotal}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $F_{PM}$ 、 $R_{PM}$ 、 $R_S$ 、 $R_M$ 、 $R_g$ 分别为永磁体磁动势、永磁体磁阻、静铁心磁阻、动铁心磁阻、铁心之间的间隙磁阻。

通过永磁机构磁动势表示永磁体径向厚度为

$$L_{PM} = \frac{NI}{H_c} = \frac{\sum HI}{H_c} = \frac{[B_{air} \delta_1 + B_2(\delta_2 + \delta_3)]}{\mu_0 H_c} \quad (8)$$

式(8)中: $\sum HI$ 为各磁路长度与其工作磁场强度乘积之和; $B_2$ 为非工作的气隙磁密; $\delta_1$ 为动、静铁心间的气隙; $\delta_2$ 、 $\delta_3$ 分别为永磁铁与静铁心间内、外导磁面的气隙; $H_c$ 为永磁体矫顽力。描述永磁体被外界磁化过程动态响应方程为

$$B_{PM} = \mu_0(H_c + M) = \mu_0(H_c + M_r + M') \quad (9)$$

式(9)中: $M$ 为永磁体磁化强度; $\mu_0$ 为真空磁导率; $M_r$ 为永磁体饱和磁化强度; $M'$ 为永磁体在外部磁场作用下的感应磁化强度。

根据高斯定律,永磁体的高度需满足一定的磁通量要求,可推导永磁体高度与其分布间隔为:

$$h_{PM} = \frac{B_{PM} S_{PM}}{\pi B_r R_r} \quad (10)$$

$$d_{PM} = \frac{\pi(R_r + R_{out})}{N_{PM}} - L_{PM} \quad (11)$$

式(10)、(11)中: $B_r$ 为永磁体剩磁,通常为永磁体工作点的磁场强度 $B_{PM}$ 的75%; $R_{out}$ 为永磁体的外径,为内半径 $R_r$ 与径向厚度 $L_{PM}$ 相加。

### 3 集成式永磁操作机构主要参数优化

为克服初步设计中传统迭代计算和经验公式的不足,并尝试将保持力约束嵌入优化算法,需建立永磁体几何参数与合闸保持力的显式关系。合闸状态下永磁保持力由永磁体提供,永磁体体积影响着式(3)麦克斯韦公式中工作气隙磁通 $B_{air}$ ,为此应重新建立永磁体几何参数其沿磁路产生的永磁吸力关系。分析可知永磁吸力与永磁体体积存在如下的近似关系

$$F_{\text{emtotal}} \propto \frac{B_{\text{PM}} \cdot V_{\text{PM}} \cdot N_{\text{PM}}}{2\mu_0 R_{\text{总}}^2} \quad (12)$$

永磁体几何参数耦合关系复杂且相互影响<sup>[15]</sup>, 体积与磁通呈现非线性关系。径向充磁的瓦片型永磁体漏磁路径呈现轴向主导特性, 故引入漏磁系数  $K_l$ 。考虑漏磁效应的气隙磁通量  $\Phi_g$  以及工作气隙磁通密度  $B_{\text{air}}$  表示为

$$\Phi_g = \frac{\Phi_{\text{PM}}}{K_l} \quad (13)$$

$$B_{\text{air}} = \frac{\Phi_{\text{PM}}}{S_m} = \frac{B_{\text{PM}} \cdot S_{\text{PMtotal}}}{K_l S_m} \quad (14)$$

等效退磁场强度  $H_{\text{ext}}$  由气隙磁场产生, 代入永磁体非线性内禀退磁曲线决定的工作点  $B_{\text{PM}}$  中, 同时基于永磁机构磁场实验拟合公式对漏磁系数  $K_l$  建立等式, 联立方程得到  $B_{\text{air}}$  推导方程

$$\begin{cases} H_{\text{ext}} = \frac{B_{\text{air}} \delta_1}{\mu_0 L_{\text{PM}}} \\ B_{\text{PM}} = \mu_0 \mu_r \left( H_c - \frac{B_{\text{air}} \delta_1}{\mu_0 L_{\text{PM}}} \right) \\ K_l = 1 + \frac{R_g}{R_{\text{leak}}} = 1 + \frac{0.75\delta_1}{h_{\text{PM}}} \\ B_{\text{air}} = \frac{\Phi_g}{S_m} = \frac{1}{K_l S_m} \cdot \frac{B_{\text{PM}} S_{\text{PMtotal}}}{K_l} \end{cases} \quad (15)$$

可进行反演推导永磁体  $R_r$ 、 $h_{\text{PM}}$ 、 $L_{\text{PM}}$  几何尺寸参数显式解, 分别表示永磁体内侧半径、永磁体径向厚度、永磁体高度, 作为主要优化变量

$$\begin{cases} R_r = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sqrt{8\mu_0 S_m F_{\text{emtotal}} \left( 1 + \frac{0.75\delta_1}{h_{\text{PM}}} \right)}}{B_{\text{PM}} N_{\text{PM}} \alpha L_{\text{PM}}} - L_{\text{PM}} \right] \\ h_{\text{PM}} = \frac{0.75\delta_1}{\frac{B_{\text{PM}} N_{\text{PM}} \alpha L_{\text{PM}} (2R_r + L_{\text{PM}})}{\sqrt{8\mu_0 S_m F_{\text{emtotal}}}} - 1} \\ L_{\text{PM}} = -R_r + \sqrt{R_r^2 + \frac{\sqrt{8\mu_0 S_m F_{\text{emtotal}} \left( 1 + \frac{0.75\delta_1}{h_{\text{PM}}} \right)}}{B_{\text{PM}} N_{\text{PM}} \alpha}} \end{cases} \quad (16)$$

非支配排序遗传算法<sup>[16-19]</sup>被广泛应用于解决具有多个相互冲突目标函数的复杂问题。参考点的非支配排序策略指导种群的进化, 改善解的多样性。通过交叉与变异改进遗传操作, 有助于避免早熟收敛, 提高算法在搜索空间的能力, 提升搜索效率。通过多次迭代, 逐渐逼近 Pareto 最优解<sup>[20]</sup>。

为将高精度多物理场仿真与智能优化算法无缝融合, 文中使用 Comsol-MATLAB 联合仿真优化<sup>[21]</sup>。与传统手动修改模型文件耗时长易生错相比, 联合优化可直接求解电磁-结构-运动耦合场, 避免依赖简化的模型解析解或经验公式, 减少计算永磁保持力与电磁力产生的误差。同时, 嵌入的物理场模块可直接对优化算法输出隐式函数如永磁体的  $B-H$  曲线以及合闸保持力等, 精确捕捉边缘磁通效应, 相比解析公式大幅度提升计算精度。基于 MATLAB-Comsol-NSGA-III 联合参数优化的流程见图 5。

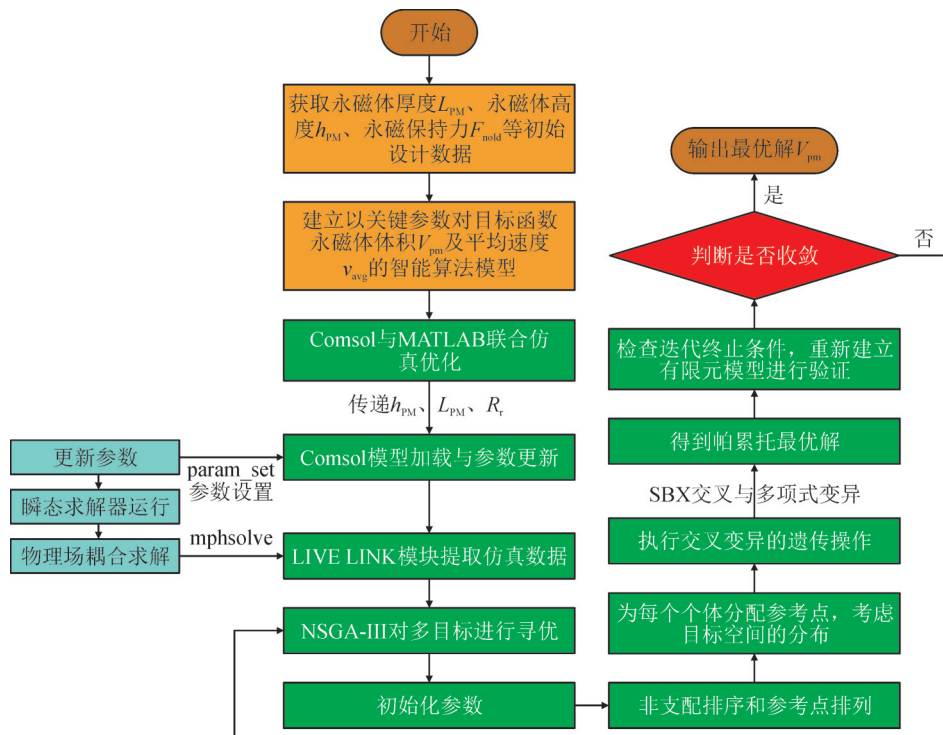


图5 参数优化流程图

Fig. 5 Flowchart of joint parameter optimization

为更清晰直观描述永磁机构各尺寸参数,避免三维图中可能出现的重叠、遮挡等问题,由平面视角分解永磁操作机构主尺寸图,见图6。

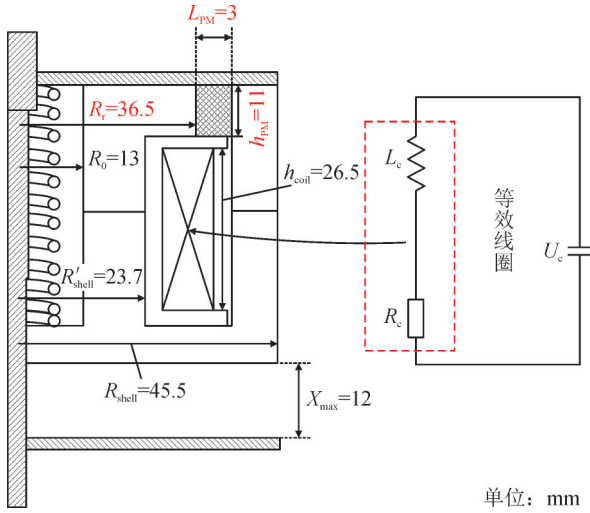


图6 永磁操作机构主尺寸图

Fig. 6 Main dimension drawing of permanent magnet control mechanism

### 3.1 目标函数确立

永磁机构在设计中应在满足保持力要求的前提下,使永磁体用量最小。永磁机构的优化目标函数定义为

$$F_1(x) = V_{PM} \quad (17)$$

考虑到磁通连续定理,保持机构动、静铁心内环与外环接触面之间气隙磁感应强度相等,约束条件为动铁心在未通电静磁场所受吸力,应大于等于初始设计值。永磁机构体积变换的过程中合闸保持力涉及气隙磁密的迭代计算,以式(3)麦克斯韦方程动铁心受到的磁吸力表示

$$F_{hold} = F_{static} \quad (18)$$

为避免漏磁失控、确保永磁线性增益区域及节省永磁体原材料,给定参数范围

$$\begin{cases} \min F_1(x) = \min V_{PM}(L_{PM}, h_{PM}, R_r) \\ F_{hold} \geq 5843 \text{ N} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 3 \text{ mm} \leq L_{PM} \leq 12 \text{ mm} \\ 8 \text{ mm} \leq h_{PM} \leq 30 \text{ mm} \\ 35 \text{ mm} \leq R_r \leq 100 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

动铁心平均速度对分合闸成功以及降低燃弧时间和冲击碰撞起着关键作用,而通过式(1)分析其在行程中运动的主要推动力为线圈产生的电磁力  $F_{mag}$ ;线圈匝数与通入电流保持一致的情况下与永磁体独立几何参数存在不同变化规律的非线性耦合关系,故作为优化过程中的另一目标函数

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = F_{mag} + mg + F_{spring} - F_{friction} \\ \max F_2(x) = \max v_{avg} = \frac{1}{t_{action}} \int_0^{t_{action}} v(t) dt \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中,  $t_{action}$  为动铁心动作的响应时间。

在满足一定开距内平均分闸速度要求的前提下,为减小冲击反弹、延长断路器机械寿命,其末速度作为约束条件采取动铁心接触撞击静盖板位移过程中的能量守恒进行求解

$$\frac{1}{2} m_{iron} v_{end}^2 = \int_{X_{max}}^{X_{min} + \Delta X} (F_{mag} + m_{iron}g + F_{spring} - F_{friction}) dx \quad (21)$$

鉴于此,分闸末速度应被限制在一规定范围

$$v_{end} \leq 3 \text{ m/s} \quad (22)$$

通过 LiveLink 数据接口模块提取磁场中磁吸力以及固体动力学瞬态仿真中位移—时间—速度数据,作为其函数解。即除目标函数永磁体体积计算外,永磁保持力、平均速度以及末速度计算公式均被基于数值仿真结果构造的有限元模型替代。

### 3.2 优化求解流程

通过非支配排序将 Pareto 层级划分:第1层为不被任何其他个体支配的解。第2层为仅被第1层个体支配的解。依此类推,直到所有个体被分层。永磁机构中  $V_{PM}$ 、 $v_{avg}$  作为优化目标,量纲差异较大,需在进行参考点关联前标准化目标值

$$f'_i = \frac{f_i - f_{i,min}}{f_{i,max} - f_{i,min}} \quad (23)$$

式(23)中,  $f_{i,min}$ 、 $f_{i,max}$  为当前种群中第  $i$  个目标的最小、最大值。

参考点可能分布在永磁体体积小、均速高的区域,引导算法对其进行平衡。计算每个个体到参考点的垂直距离,选择最近的参考点作为其关联点

$$d(f, r) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{f'_i - r_i}{w_i} \right)^2} \quad (24)$$

式(24)中:  $r$  为参考点坐标;  $w_i$  为权重向量(一般取1)。

针对连续变量永磁体尺寸参数对父代种群的  $R_r$ 、 $h_{PM}$ 、 $L_{PM}$  个体独立执行交叉操作,模拟二进制交叉(SBX),生成子代

$$\begin{cases} \text{子代} = \begin{cases} 0.5 \cdot [(1 + \beta)y_p + (1 - \beta)y_q] \\ 0.5 \cdot [(1 - \beta)y_p + (1 + \beta)y_q] \end{cases} \\ \beta = (2u)^{1/(\eta_m + 1)} \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中,  $\beta$  为分布因子。

多项式变异对个体基因值按概率进行扰动

$$\begin{cases} y' = y + \delta \cdot (ub - lb) \\ \delta = \begin{cases} (2u)^{1/(\eta_m + 1)} - 1 & u < 0.5 \\ 1 - [2(1 - u)]^{1/(\eta_m + 1)} & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

式(26)中:  $\delta$  由多项式分布生成;  $\eta_m$  为变异分布指数。

最后对计算结果进行边界检查,判断子代和变异生成的  $R_i, h_{PM}, L_{PM}$  是否符合式(19)中所给定的参数范围。若符合则对最近10代最优解的差异计算,若变化率小于阈值即终止,否则继续返回交叉变异进行迭代

$$\frac{PF_{best}^{(t)} - F_{best}^{(t-10)}P}{PF_{best}^{(t-10)}P} < \xi \quad (27)$$

式(27)中,  $\xi$  为最优解变化率。

### 3.3 结果分析

NSGA-III 帕累托解集见图7,无法在永磁体体积最小同时取到平均速度最大值,即两个目标函数存在冲突。

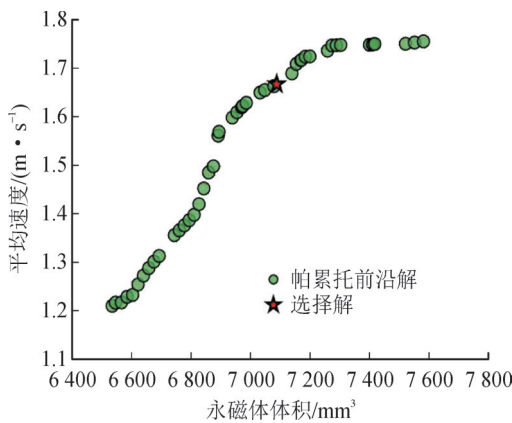


图7 NSGA-III 帕累托解集

Fig. 7 NSGA-III pareto solution set

当速度趋于较高值时,此时永磁体积增大,说明提升平均速度需以更大的体积为代价。将优化后的数据点进行筛选,选择解集中红色关键点并重新运行有限元仿真模型,以验证结果的合理性。

## 4 永磁机构仿真分析

### 4.1 永磁机构磁场静态合闸保持力分析

采用三维有限元分析(FEA)<sup>[22]</sup>对永磁机构静磁场进行稳态分析见图8,对弹簧操纵机构预拉力研究作为依据。图8(b)中红色矢量箭头表示磁场方向和强度。磁力线在永磁体和铁心内部形成闭合回路,避免磁力线不均匀性导致的机构内部磁力分布不均泄漏磁场,影响机构性能。

图8(c)、(d)显示磁通密度在静、动铁心附近达到较高值,形成静磁场吸合力,在其他区域的磁密较低,形成较大的磁密梯度。磁密在关键区域保持相对均匀,确保结构件各部分受到均匀的磁力,提高机构的运行效率和寿命。

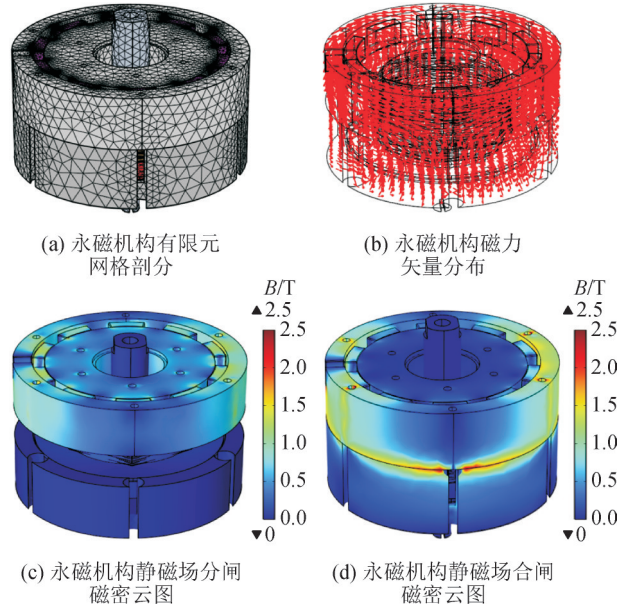


图8 永磁机构静磁场有限元仿真图

Fig. 8 Finite element simulation diagram of static magnetic field of permanent magnet mechanism

永磁机构静磁场产生的永磁吸力随位移的变化见图9,动铁心和保持部分之间的距离减小至1~2 mm时,永磁吸力开始急速增加直到在合闸位置达到最大值。通电后动铁心开始移动,气隙增大,磁路被破坏,静态保持力对动铁心运动的阻碍将迅速减小,有助于实现快速分闸操作。永磁体几何参数优化后的永磁保持力在合闸状态下得到提升,并随着动铁心分闸行程下降更为迅速,使得动铁心在分闸过程中更好的克服保持力完成动作。

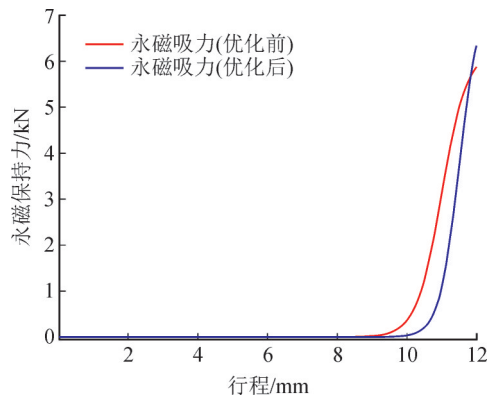


图9 静磁场永磁吸力随位移的变化

Fig. 9 The change in the permanent magnet attraction of the static magnetic field with displacement

### 4.2 永磁机构电磁场动态电磁力分析

采用二维有限元分析对永磁机构内部进行分析见图10。图10中磁密值在永磁机构静、动铁心贴合区域较高,而在其他区域磁密逐渐降低。电磁装置在分合闸状态下,增加磁场的聚集使电磁装置获得更好的导磁性能,减少不必要的磁泄露。

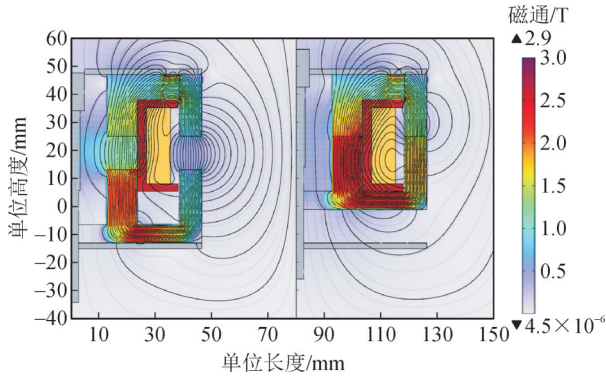


图 10 永磁机构二维电磁场有限元磁通密度模

Fig. 10 Two-dimensional electromagnetic field finite element open flux density mode

不同行程—电流下动铁心所受的电磁力见图 11, 电磁合力保持在较高稳定的数值, 确保动铁心具有稳定的运动状态。在行程距离 1 mm 左右的终端位置, 合力到达峰值后磁路的某些部分进入磁饱和状态出现电磁力急剧下降的现象, 防止动铁心因惯性超出工作范围而损坏。

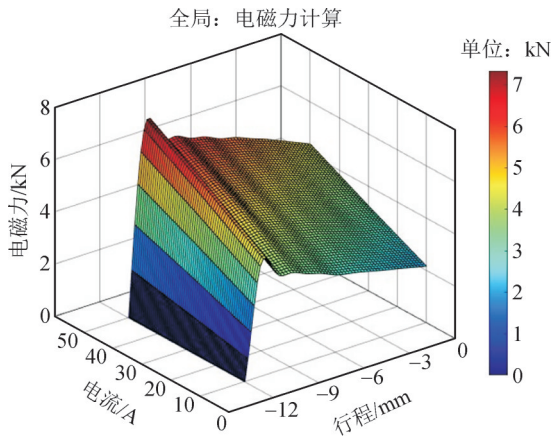


图 11 优化前动铁心电磁合力曲线

Fig. 11 Electromagnetic force curve of the moving iron core before optimization

参数优化后的电磁力曲线见图 12, 永磁机构在初始阶段施加更大的电磁驱动力, 使动铁心在前期达到更高的加速度; 在运动后期, 通过永磁吸力调整混合磁场策略, 加快速度下降, 使动铁心更快地趋于静止, 降低了动铁心末速度。

### 4.3 永磁机构固体动力学运动分析

在固体动力学加入弹簧以模拟真实工况, 对永磁机构进行分闸操作。对永磁机构永磁体几何参数优化后, 动铁心位移曲线见图 13。优化前分闸速度为 1.308 m/s, 分闸末速度为 2.88 m/s; 优化后分闸速度为 1.67 m/s, 动铁心末速度为 2.36 m/s。

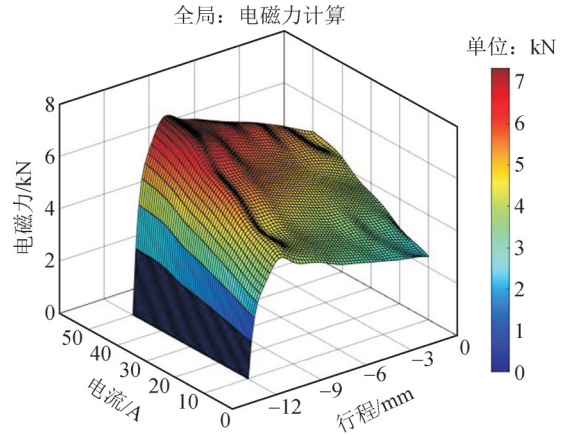


图 12 优化后动铁心电磁合力曲线

Fig. 12 Optimized electromagnetic force curve of the moving iron core

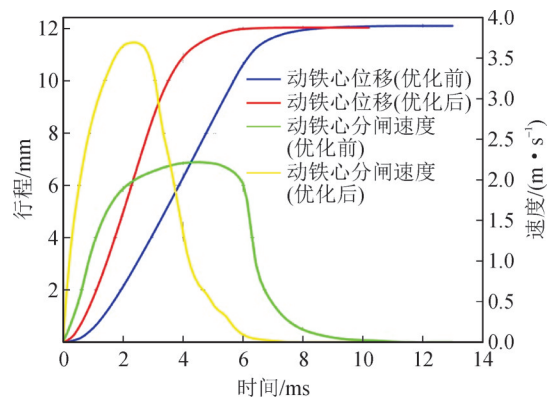


图 13 动铁心动力学优化前后曲线

Fig. 13 Dynamic iron core dynamics optimization before and after curves

结果表明, 优化后永磁体厚度与内侧半径减小, 材料体积减少, 使用更少, 但仍能满足性能要求, 降低了生成成本。永磁体高度略微增加, 弥补了厚度减少带来的磁性能变化, 具体参数优化结果见表 1。永磁保持力提升的同时系统响应速度更快, 降低了动铁心的末速度, 达到性能和机械寿命的平衡, 提升运行效率。

表 1 参数优化结果对比

Table 1 Comparison of parameter optimization results

优化项目	初始设计	优化结果
永磁体厚度/mm	6.7	3.0
永磁体高度/mm	9	11
永磁体内侧半径/mm	38.5	36.5
永磁保持力/N	5 843	6 296
永磁体体积/mm <sup>3</sup>	11 459.28	7 087.06
动铁心外半径/mm	45.0	39.5
平均速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.308	1.670
分闸时间/ms	9.17	7.51
动铁心分闸末速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2.88	2.36

### 5 PMVCB 实验分析

雷电耐压实验验证电气设备在模拟雷电冲击下能否保持绝缘性能<sup>[22-26]</sup>,确保设备在实际雷击或高电压条件下的安全性。使用冲击电压发生器产生高压脉冲,施加到测试设备上,设备未出现击穿或闪络现象,绝缘水平符合要求。雷电冲击电压加压曲线与实验示波见图 14、15。雷电冲击电压波形标准波形应符合 GB/T 16927.1—2011 的规定:

- 1)波前时间 1.2 μs,允许偏差±30%。
- 2)半峰值时间 50 μs,允许偏差±20%。
- 3)峰值允许偏差±3%。

设计的永磁机构内部各元器件与样机见图 16,在未启动开关控制器通入驱动电流下进行合闸保持力测试,监测动铁心是否有脱落现象。

设备测试合闸力范围在 50~20 000 N。静态机械特性测试仿真和实验结果见图 17,在动铁心距离分闸位置 10.28 mm 处,合闸保持力为 65 N;在动铁心合闸处,合闸保持力为 6 093 N,表明永磁机构具有良好的保持特性。仿真与实验结果误差较小,证明设计的永磁机构适配其真空断路器。

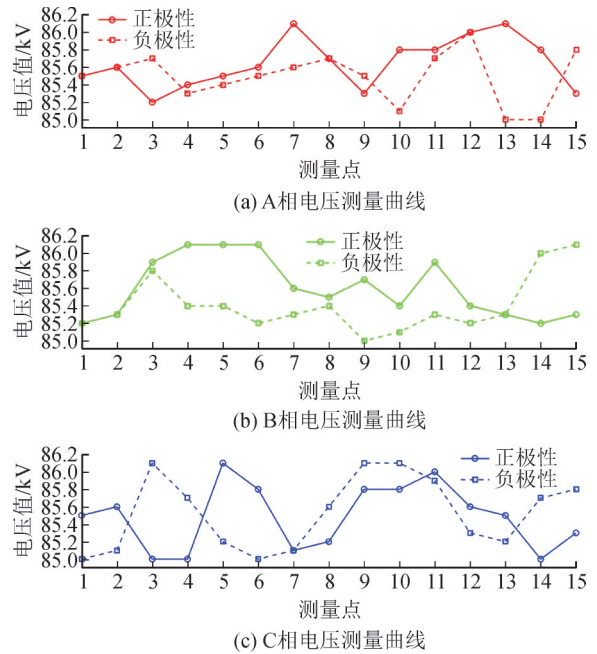


图 14 三相断路器雷电加压曲线

Fig. 14 Lightning impulse test curves for three-phase circuit breaker

电寿命试验与合闸保持力测试后,对断路器进行动态机械特性实验<sup>[25]</sup>见图 18。设备配有显示屏和操作按键,便于在测试过程中实时监测动铁心的运动行程。

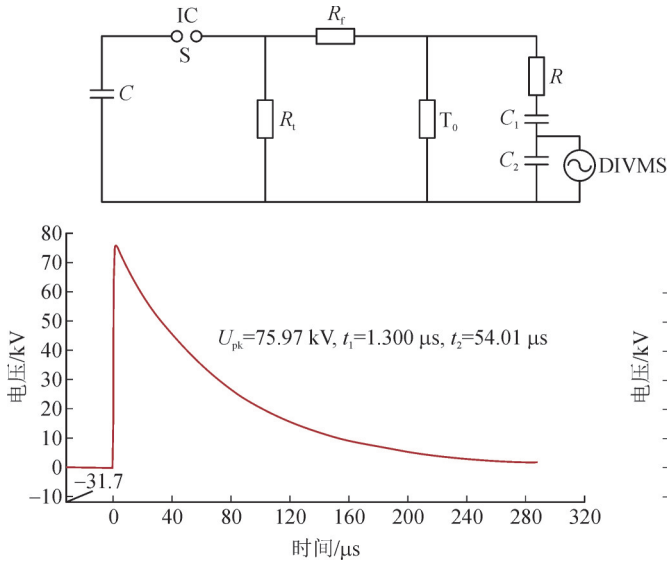


图 15 雷电冲击电压实验示波图

Fig. 15 Oscilloscope waveform of lightning impulse voltage experimente

仿真结果与动态机械特性实验对比见图 19。实验显示断路器分闸时间为 9.16 ms,动铁心运动速度为 1.31 m/s,满足断路器的快速分断特性。在不考虑启动时间与撞击回弹的情况下,吻合较好,存在一些较小程度误差的原因主要是仿真材料与实际材料特性之间仍有差别,包括摩擦力偏差等其他

C	冲击发生器电容	S	冲击点火球隙
R <sub>1</sub>	波尾电阻	C <sub>1</sub>	高压臂电容
R	阻尼电阻	C <sub>2</sub>	低压臂电容
T <sub>0</sub>	试品	DIVMS	示波器
R <sub>2</sub>	波头电阻		

机械因素等未考虑。

选用同类型产品 12 kV 双稳态永磁真空断路器与文中设计的集成式永磁真空断路器试验样机各参数进行对比,各项具体参数对比结果见表 2。结果表明新型断路器满足小型化配电设备技术要求且符合国家电器产品质量使用要求。

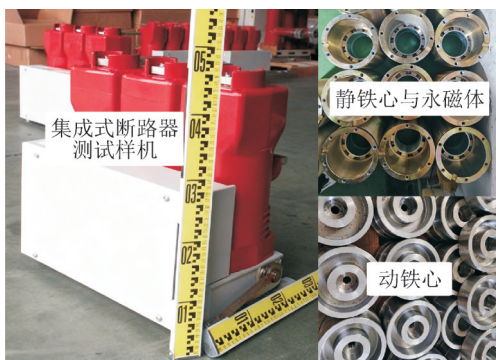


图 16 永磁机构各元器件与样机试验图

Fig. 16 Permanent magnet mechanism components and prototype test diagram

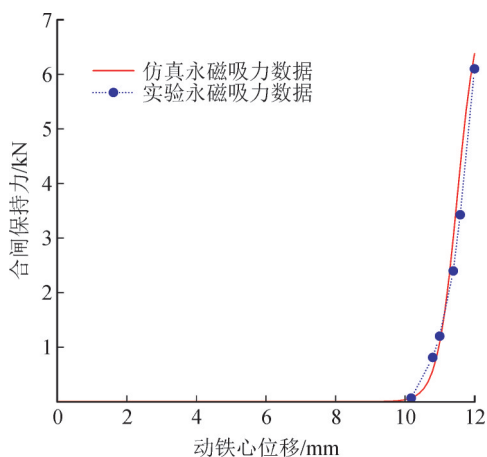


图 17 仿真和静态机械特性测试实验结果

Fig. 17 Experimental results of simulation and static mechanical properties testing

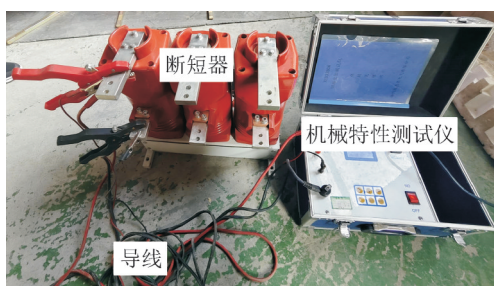


图 18 集成式 PMVCB 动态机械特性实验图

Fig. 18 Integrated PMVCB mechanical characterization experiments

## 6 结语

文中针对传统真空断路器尺寸大、重量重、维护成本高等问题,通过集成式设计,将真空灭弧室与永磁机构垂直同轴布置,减少了传统永磁机构横向布置带来的机械损耗。对比传统分布式结构,高度集成化垂直布局应考虑电磁兼容性与磁干扰风险,分合闸大电流产生的强瞬变磁场对永磁体的剩磁、线圈的电感参数以及附近的电子传感器造成干

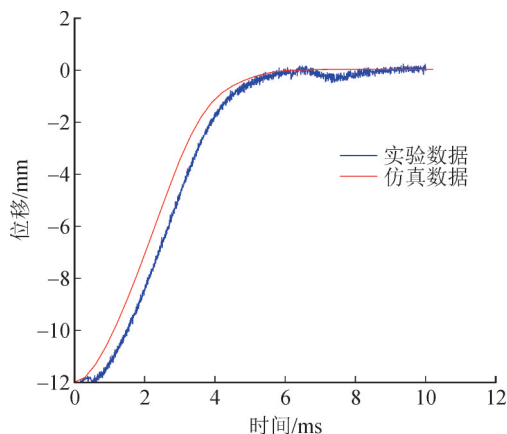


图 19 仿真和动态机械特性测试实验结果

Fig. 19 Results of simulations and dynamic mechanical properties testing

表 2 样机主要技术参数对比

Table 2 Comparison of key technical parameters of the prototype

样机型号	传统 PMVCB	集成式 PMVCB
额定电压/kV	12	12
额定电流/A	630	630
短路开断电流/kA	31.5	31.5
永磁体厚度/mm	5	3
永磁体高度/mm	29	11
样机宽度/mm	310	150
样机高度/mm	400	427
样机长度/mm	225	165
合闸保持力/N	4 100	6 093
动铁心行程/mm	22	12
分闸平均速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.00	1.31
分闸时间/ms	22.00	9.16
机械撞击次	10 000	12 000

扰。为此,文中建立了一种将辅助弹簧置于功能相同的永磁机构内的混合驱动结构,将圆环状永磁体切割为规律排列的瓦片型,优化了整体磁路布局<sup>[27-31]</sup>。

通过建立高精度多物理场联合智能算法模型,规避传统解析约束瓶颈,更精确的实现了永磁机构各目标函数的协同优化,降低了垂直布局集成式永磁断路器零部件加工精度需求高的苛刻要求。对永磁体几何参数优化的结果表明略微增加永磁体高度可弥补减少厚度带来的磁性性能变化,在缩小永磁体体积情况下提高保持力与分闸速度。

研制的样机通过了电气寿命和机械特性实验测试,验证了文中设计的集成式永磁真空断路器满足配电设备技术要求。与传统永磁真空断路器相比,集成式永磁真空断路器在保证相同的技术指标情况下体积减少了二分之一,同时为未来高压设备小型化提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.  
LIN Xin. Permanent magnet mechanism and vacuum circuit breaker[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 李志兵, 颜湘莲, 刘北阳, 等. 混合型快速机构真空断路器设计与试验[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1791-1799.  
LI Zhibing, YAN Xianglian, LIU Beiyang, et al. Design and test of vacuum circuit breaker with hybrid fast operating mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1791-1799.
- [3] WEI Siyi, YAO Xiaofei, NIU Yuqian, et al. A hybrid long-stroke operating mechanism for a fast vacuum circuit breaker at transmission voltage[C]//2024 7th International Conference on Electric Power Equipment - switching Technology (ICEPE - ST). Xiamen: IEEE, 2024: 172-175.
- [4] 于庆广, 肖 宜, 赵 彪. 10 kV 永磁断路器驱动电路设计及其脉宽调制仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 36-40.  
YU Qingguang, XIAO Yi, ZHAO Biao. Design of driving circuit for 10 kV permanent magnetic vacuum circuit breaker and PWM-based simulation of its realization[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 36-40.
- [5] 张立岩, 王永兴, 王 瑞, 等. 考虑温度效应的永磁机构及其控制系统多物理域联合仿真与设计[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4710-4717.  
ZHANG Liyan, WANG Yongxing, WANG Rui, et al. Multi-physics co-simulation and design of permanent magnet actuator and control system considering temperature effect[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4710-4717.
- [6] 洪育凡, 黄泽钰, 张宇佳. 基于COMSOL双稳态永磁操动机构的仿真研究[J]. 装备制造技术, 2023(7): 89-91.  
HONG Yufan, HUANG Zeyu, ZHANG Yujia. Simulation study on COMSOL bistable permanent magnet actuator[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(7): 89-91.
- [7] 汤飞龙, 柯昌辉, 许志红. 智能单稳态永磁接触器动作特性的联合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1641-1650.  
TANG Longfei, KE Changhui, XU Zhihong. Cosimulation of action characteristics of intelligent monostable permanent magnet contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1641-1650.
- [8] 李昊旻, 林 莘, 徐建源. 126 kV 真空断路器永磁摆角电机操动机构的设计与动态特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1664-1669.  
LI Haomin, LIN Xin, XU Jianyuan. Design and dynamic performance analysis of permanent magnet swing angle motor operating mechanism for 126 kV vacuum circuit breaker[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1664-1669.
- [9] JIANG Jiaming, LIN Heyun, FANG Shuhua. Optimization design of a permanent magnet actuator for 126 kV vacuum circuit breaker [J]. IEEE, 2018, 28(3): 1-5.
- [10] 宾丁炜, 黄彦全, 喻 泉, 等. 单稳态永磁真空断路器铁芯动态电磁力计算方法研究[J]. 电工技术, 2020(13): 10-13.  
BIN Dingwei, HUANG Yanquan, YU Quan, et al. Study on dynamic electromagnetic force calculation method of iron core in monostable permanent magnet vacuum circuit breaker[J]. Electric Engineering, 2020(13): 10-13.
- [11] 陈家祥, 薛 雷, 夏 天, 等. 磁驱双稳态执行机构设计及优化[J/OL]. 机械科学与技术: 1-8[2025-09-20]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240148>.  
CHEN Jiaxiang, XUE Lei, XIA Xia, et al. Design and optimization of magnetic drive bistable actuator[J/OL]. Mechanical Science and Technology: 1-8[2025-09-20]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240148>.
- [12] 田 宇, 朱苛姿, 许家源, 等. 10 kV 快速分相断路器样机研制[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2346-2350.  
TIAN Yu, ZHU Kelou, XU Jiayuan, et al. Development of 10 kV high-speed vacuum breaker prototype[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2346-2350.
- [13] 王凯东, 王 毅, 张明志. 12 kV 真空断路器半双稳态永磁机构的设计[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(4): 29-36.  
WANG Kaidong, WANG Yi, ZHANG Mingzhi. Design of half bistable permanent magnetic actuator used in 12 kV vacuum circuit breaker[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(4): 29-36.
- [14] 张 力, 阮江军, 黄道春, 等. 双盘式线圈结构快速斥力机构设计与运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 255-264.  
ZHANG Li, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on the design and movement characteristics simulation of a fast repulsion mechanism based on double-coil structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 255-264.
- [15] 王华清, 黄道春, 双明镜, 等. 融合连续过渡模型与 Helmer 模型的真空断路器开断模型研究[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1731-1741.  
WANG Huaqing, HUANG Daochun, SHUANG Mingjing, et al. Interruption model of vacuum circuit breaker based on continuous transition model and helmer model[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1731-1741.
- [16] 肖怀硕, 李清泉, 张 岩, 等. 基于非支配排序遗传改进算法的故障限流器的优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2444-2450.  
XIAO Huaishuo, LI Qingquan, ZHANG Yan, et al. Optimization of fault current limiter configuration based on improved NSGA-2[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2444-2450.
- [17] 王梦琪, 郑 征, 梅其良, 等. 基于非支配排序遗传算法 NSGA-III 的多目标屏蔽智能优化研究[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(2): 422-428.  
WANG Mengqi, ZHENG Zheng, MEI Qiliang, et al. Research on multi-objective shielding intelligent optimization method based on non-dominated sorting genetic algorithm NSGA-III[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2025, 59(2): 422-428.
- [18] 朱云辰, 程明骏, 郑昕文, 等. 基于优化第三代非支配排序遗传算法的城市应急设施模糊选址[J]. 浙江大学学(工学版), 2024, 58(9): 1832-1843.  
ZHU Yunchen, CHENG Mingjun, ZHENG Xinwen, et al. Fuzzy location selection of urban emergency facilities based on optimized non-dominated sorting genetic algorithm III[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2024, 58(9): 1832-1843.

- [19] 丘明, 饶双全, 诸嘉慧, 等. 基于磁一路耦合分析法的高温超导环形储能磁体电磁优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(s2):176-182.  
QIU Ming, RAO Shuangquan, ZHU Jiahui, et al. Electromagnetic optimization design of a toroidal hts-smes magnet using magneto-circuit coupling analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(s2):176-182.
- [20] YU Xiaoman, LIANG Deshi, QIN Taotao, et al. Simulation research of magnetic field for electrodes in DC vacuum circuit breaker[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Germany: IEEE, 2018: 275-278.
- [21] TAYLOR E D, EISELT M, TSCHIESCHE R, et al. Electrical life of vacuum interrupters for load current switching[J]. IEEE, 2022, 50(9):2642-2651.
- [22] 赵书涛, 黄伟杰, 刘会兰, 等. 高压断路器触头烧蚀及电寿命评估研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(2):491-504.  
ZHAO Shutao, HUANG Weijie, LIU Huilan, et al. Review of research on contact ablation and electrical life assessment of high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 491-504.
- [23] 何志鹏, 赵虎. 微型断路器电寿命评估[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4):1031-1040.  
HE Zhipeng, ZHAO Hu. Electrical lifespan evaluation of miniature circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4):1031-1040.
- [24] TIAN Yu, XU Jiayuan, DENG Yuan, et al. Development and tests of ZW - 126/D2000 - 40 vacuum circuit breakers with controlled switching technology[J]. CSEE, 2022, 8(1):249-257.
- [25] 孙曙光, 魏硕, 王景芹, 等. 基于深度学习的万能式断路器剩余寿命预测优化方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5):200-207.  
SUN Shuguang, WEI Shuo, WANG Jingqin, et al. Optimization method for remaining life prediction of conventional circuit breaker based on deep learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5):200-207.
- [26] 汤龙飞, 陈明俊, 栾世旭. 双稳态永磁操动机构气隙磁通解耦控制技术[J]. 电工技术学报, 2025, 40(8):2441-2450.  
TANG Longfei, CHEN Mingjun, LUAN Shixu. Air gap flux decoupling control technology for bi - stable permanent magnet actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(8):2441-2450.
- [27] 陈涛, 王贝贝. 中压真空断路器抗震性能仿真与试验分析[J]. 电器与能效管理技术, 2025(8):45-51.  
CHEN Tao, WANG Beibei. Simulation and experimental analysis of seismic performance for medium voltage vacuum circuit breakers [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(8):45-51.
- [28] 赵莹, 贾晨曦, 韩英爽. 磁控真空断路器机械特性的影响因素研究[J]. 电器与能效管理技术, 2025(1):33-38.  
ZHAO Ying, JIA Chenxi, HAN Yingshuang. Study on factors influencing mechanical characteristics of magnetically controlled vacuum circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(1):33-38.
- [29] 赵莉华, 冀一玮, 吴月峥, 等. 基于电机电流的高压断路器弹簧操作机构的LM-BP故障诊断算法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 48-55.  
ZHAO Lihua, JI Yiwei, WU Yuezheng, et al. LM - BP fault diagnosis algorithm for spring operating mechanism of high voltage circuit breaker based on motor current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9):48-55.
- [30] 李燕燕, 张杰, 王俊伟. 真空断路器弹簧操动机构分闸弹簧的优化设计方法[J]. 电器与能效管理技术, 2024(9):29-33.  
LI Yanyan, ZHANG Jie, WANG Junwei. Optimal design method for opening spring of vacuum circuit breaker spring operating mechanism[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024 (9):29-33.
- [31] 付威, 苏伟平, 王艺衡, 等. 真空开关中杯状纵磁触头铁心结构对磁场分布的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(12):78-83.  
FU Wei, SU Weiping, WANG Yiheng, et al. A study on the influence of the iron core structure on the magnetic field distribution in the cup-shaped axial magnetic contact of vacuum interrupters[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12):78-83.

吴育桐(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机控制技术及应用(E-mail: m17865596053@163.com)。

杜钦君(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子装置及控制技术、机器人技术(通信作者)(E-mail: duqinjun@sdu.edu.cn)。