

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.07.009

真空断路器弹簧操动机构的凸轮优化设计

汤凯航¹, 顾乐², 苏海博², 刘俊翔², 毕凡², 彭振搏³, 李兴宇³

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518; 2. 广东电网有限责任公司广州供电局电力科学研究院, 广州 510410; 3. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 在全球提倡绿色能源的大背景下,真空断路器被认为是实现高压开关无氟化的重要技术方案,其机械特性是电气性能实现的前提和基础。由于真空灭弧室独特的性能,目前126 kV真空断路器配用弹簧操动机构在合闸过程中存在合闸不到位的问题。因此文中以126 kV真空断路器配用CT弹簧操动机构为研究对象,进行输出与负载匹配特性分析计算,基于其匹配优劣结果阐述了一种机构凸轮优化的设计方法,优化后的凸轮通过输出与负载匹配特性分析,结果证明匹配度良好,可以实现可靠合闸。最后通过仿真验证和样机试验,证明了该优化方案的可行性。

关键词: 真空断路器; 弹簧操动机构; 凸轮轮廓曲线

Optimized Design on Cam of Spring Operation Mechanism for Vacuum Circuit Breaker

TANG Kaihang¹, GU Le², SU Haibo², LIU Junxiang², BI Fan², PENG Zhenbo³, LI Xingyu³

(1. Qingyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Qingyuan 511518, China; 2. Electric Power Research Institute, Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510410, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen Institute of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: In the context of global advocacy for green energy, vacuum circuit breakers are considered to be an important technical solution to achieve SF₆-free high-voltage switchgear, and its mechanical characteristics are the prerequisite and foundation to achieve electrical performance. Due to the unique performance of vacuum interrupter, the current 126 kV vacuum circuit breaker equipped with spring operating mechanism has problems of not closing to the end during the closing operation. Therefore, in this paper the 126 kV vacuum circuit breaker with CT spring operating mechanism is taken as the research object to perform the output and load matching characteristics analysis and calculation. Based on its matching advantages and disadvantages result, an optimization design method for the cam of the mechanism is described. It is proved by the result of the output and load matching characteristic analysis of the optimized cam that the matching is good and can achieve reliable closing operation. Finally, the feasibility of the optimization scheme is proved through simulation verification and prototype test.

Key words: vacuum circuit breaker; spring operating mechanism; cam profile curve

0 引言

2020年第75届联合国大会中国承诺二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年

前实现碳中和^[1-2]。在全球提倡绿色能源的大背景下,真空断路器以其开断能力强,电寿命长,环境友好等特点,已在中低压领域有了不少的应用^[3-4],但在高压领域涉及很少,随着电网容量的不断扩大和

收稿日期:2025-01-07; 修回日期:2025-03-09

基金项目:广东电网有限责任公司广州供电局科技项目资助(真空灭弧型环保GIS关键技术研究与应用)。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou Power Supply Bureau(Key Technology Research and Application of Environmentally Friendly GIS with Vacuum Interruption).

提倡绿色能源的大背景下,真空断路器正向着高电压、大电流、智能化、小型化、高可靠性等方向发展^[5-8]。

真空断路器被认为是实现高压开关无氟化的重要技术方案,其机械特性是电气性能实现的前提和基础^[9-10]。弹簧机构以其成熟的技术及相对较低的成本,已在中压真空断路器及其他高压断路器中广泛使用,因此,使弹簧操动机构配备在高压真空断路器中成为最好的选择之一。由于真空断路器弹簧操动机构的输出力与负载力没有实现良好的匹配,会导致合闸过程中引起拒合等问题,因此满足真空灭弧室在较大触头压力下完成可靠合闸动作,实现输出与负载的良好匹配,进行合闸凸轮轮廓曲线的设计尤为重要^[11-13]。

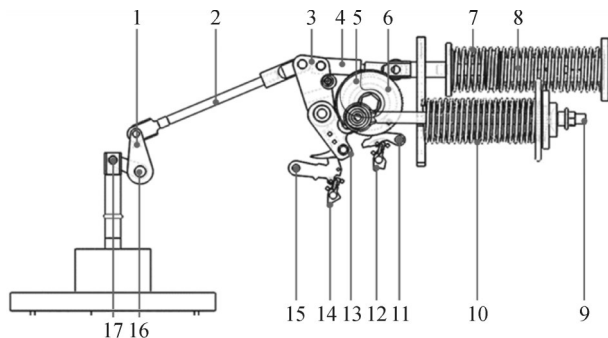
文中以126 kV真空断路器配用CT弹簧操动机构为研究对象,阐述一种基于粒子群算法的凸轮轮廓线绘制方法^[14-16],通过对弹簧操动机构传动链进行解析分析,以主轴旋转角度为优化变量,以合闸过程的能量匹配与速度技术要求为约束条件,以最小输出力矩与负载力矩的差值为目标函数,通过优化计算后将得到的结果进行凸轮与主轴旋转角的6次多项式拟合,进而平滑处理得到凸轮轮廓线坐标^[17],实现输出与负载的良好匹配,最后采用仿真与试验结合的方法验证优化方案,结果表明,优化后的凸轮大大改进了断路器合闸性能,并满足断路器的技术要求。

粒子群算法实现方便、准确性高、收敛速度快,在解决实际问题中具有优势。因此采用粒子群算法作为凸轮轮廓线优化算法^[18-23]。

1 弹簧操动机构动作原理

126 kV断路器合闸过程的机构传动原理图见图1。

首先合闸信号使合闸脱扣器带电工作,推动储能(合闸)保持小掣子12,储能(合闸)保持大掣子11在合闸弹簧10的作用下解除与棘轮6滚子的锁定,凸轮5及棘轮在合闸弹簧的作用下进行转动,凸轮推动内拐臂13滚子使内拐臂绕输出轴旋转,且小掣子顶住合闸保持大掣子。外拐臂3随输出轴旋转带动输出导杆运动,同时带动夹叉连杆4迫使分闸弹簧7压缩储能,输出导杆连接本体轴内拐臂绕本体轴旋转,而本体轴外拐臂1随着本体轴16旋转带动导电杆及动触头进行合闸操作。动触头在合闸过程走完开距后,还会压缩触头弹簧进行超行程过程。



1—输出拐臂; 2—输出连杆; 3—外拐臂; 4—夹叉连杆; 5—凸轮; 6—棘轮; 7—分闸弹簧; 8—缓冲器; 9—弹簧拉杆; 10—合闸弹簧; 11—储能(合闸)保持大掣子; 12—储能(合闸)保持小掣子; 13—内拐臂; 14—分闸保持小掣子; 15—分闸保持大掣子; 16—机构本体轴; 17—真空灭弧室动端。

图1 CT弹簧操动机构的传动原理图

Fig. 1 CT spring operation mechanism of the transmission principle diagram

2 弹簧机构输出与负载匹配特性计算

2.1 弹簧操动机构传动链力矩解析分析

弹簧操动机构的输出与负载匹配曲线主要是根据机构传动链中的输出力与负载力进行主轴归算得到的^[24-26]。首先,在合闸过程中输出力是由合闸弹簧的力 F_{he} 、自闭力 F_{zb} 以及灭弧室动触头的导电杆运动部分的重力 G 组成,而负载力包括分闸弹簧力 F_{fen} 、触头弹簧力 F_c 、摩擦力 f 以及缓冲力 F_d 。在进行传动链力矩分析时由于无法分析其运动的速度特性,而摩擦力 f 以及缓冲力 F_d 都与机构的运动速度有关,无法通过简单的力学分析得到,因此先忽略计算,后续仿真中将其加入分析。合闸过程的力学分析见图2。

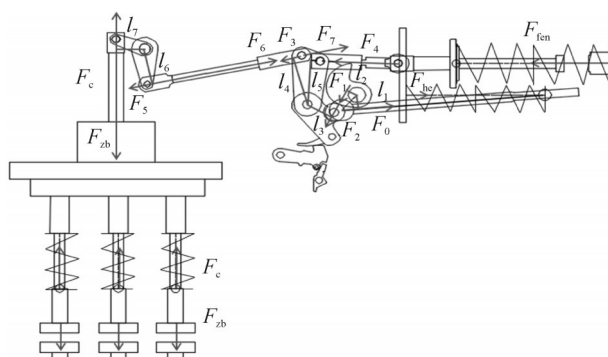


图2 合闸过程力学分析图

Fig. 2 Mechanical analysis diagram of the closing process

对真空断路器弹簧操动机构进行力学分析,首先合闸弹簧力等效到弹簧拉杆上为力 F_0 ,利用其力臂 L_1 ,得到凸轮与内拐臂滚子接触时的施加力 F_1 ,再通过力臂 L_2 ,进行凸轮力学传递为 F_2 ,最后利用其力臂 L_3 将最初的合闸弹簧力等效到主轴得到第1部分输出转矩 M_1 :

$$F_0 \times L_1 = F_1 \times L_2 \quad (1)$$

$$F_1 = F_2 \quad (2)$$

$$M_1 = F_2 \times L_3 \quad (3)$$

动触头运动时自闭力与重力同时也作为输出力,利用其力臂 L_6 转换为输出连杆的力 F_6 ,通过其力臂 L_4 将连杆对外拐臂的力 F_7 等效到主轴得到第2部分输出转矩 M_2 :

$$(F_{zh} + G) \times L_7 = F_6 \times L_6 \quad (4)$$

$$F_6 = F_7 \quad (5)$$

$$M_2 = F_7 \times L_4 \quad (6)$$

两部分输出力等效到主轴的总输出力矩 M_o 为

$$M_p = F_2 \times L_3 + F_7 \times L_4 \quad (7)$$

在合闸过程处于开距阶段时,只需进行分闸弹簧的压缩,利用分闸弹簧等效到夹叉连杆的力 F_4 与其力臂 L_5 ,最后等效到主轴的负载力矩 M_0 为

$$M_{11} = F_4 \times L_5 \quad (8)$$

在处于超行程阶段时,需压缩分闸弹簧和触头弹簧,利用触头弹簧 F_c 与其力臂 L_7 转换为输出连杆对机构本体轴的力 F_5 ,此时利用输出连杆力 F_3 与其力臂 L_4 等效到主轴的负载力矩为 M_c ,而整个超行程阶段的总负载力矩 M_o 为:

$$F_6 \times L_7 = F_5 \times L_6 \quad (9)$$

$$F_5 = F_3 \quad (10)$$

$$M_{lc} = F_3 \times L_4 \quad (11)$$

$$M_{12} = F_4 \times L_5 + F_3 \times L_4 \quad (12)$$

2.2 合闸过程输出力矩与负载力矩计算

2.2.1 等效到主轴的输出力与力臂的确定

合闸过程中输出力矩的归算分为两部分,合闸弹簧力等效到主轴上以及自闭力和重力等效到主轴上。

合闸弹簧释放将带动凸轮旋转,由图2可知合闸弹簧的力值及力臂长度与凸轮旋转角度存在几何关系,可根据凸轮旋转角度 θ 进而得到合闸弹簧的参数:

$$F_0 = (P_1 - K_1 \Delta X_1) \times \cos \left[\arcsin \frac{h \times \sin(\theta_0 + \theta)}{m} \right] \quad (13)$$

$$L_1 = h \times \sin \left[(\theta_0 + \theta) - \arcsin \frac{h \times \sin(\theta_0 + \theta)}{m} \right] \quad (14)$$

式(13)、(14)中: P_1 为合闸弹簧预紧力; K_1 为合闸弹簧刚度系数; ΔX_1 为合闸弹簧形变量。

凸轮传动部分见图3。凸轮与外拐臂滚子碰撞接触后,将带动主轴、内拐臂与外拐臂旋转动作,内拐臂驱动连杆机构运动,输出连杆部分见图4。

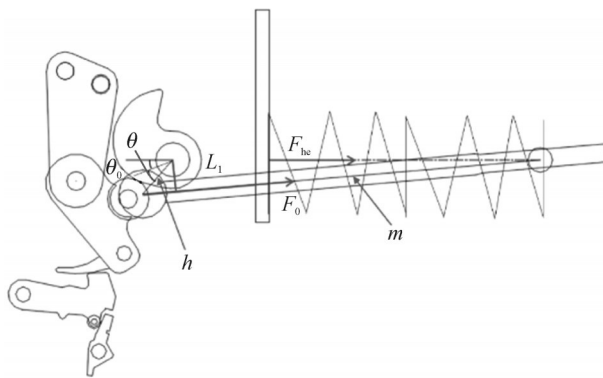


图3 凸轮传动部分图

Fig. 3 Cam drive some diagram

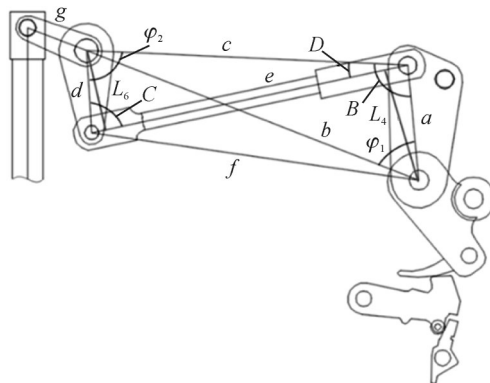


图4 输出连杆部分图

Fig. 4 Output connecting rod part of the diagram

其连杆力臂与主轴旋转角度 φ 存在几何关系, 几何关系为:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \times \cos(\varphi_1 + \varphi)} \quad (15)$$

$$\cos D = \frac{e^2 + c^2 - d^2}{2ec} \quad (16)$$

$$\cos B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (17)$$

$$\cos C = \frac{e^2 + d^2 - c^2}{2ed} \quad (18)$$

$$L_4 = a \times \sin[180 - (B - D)] \quad (19)$$

$$L_6 = d \times \sin C \quad (20)$$

连杆带动输出大拐臂与机构本体轴旋转,输出小拐臂带动真空灭弧室动导电杆部分完成合闸过程,机构本体轴部分见图5。

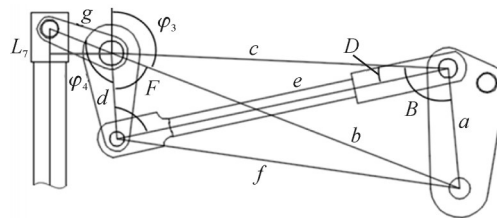


图5 机构本体轴部分图

Fig. 5 Part of the axis of the institution

其灭弧室动端力臂计算式为:

$$f = \sqrt{a^2 + e^2 - 2ae \times \cos(B - D)} \quad (21)$$

$$\cos F = \frac{b^2 + d^2 - f^2}{2bd} \quad (22)$$

$$L_7 = g \times \sin(360 - F - \varphi_3 - \varphi_4) \quad (23)$$

计算得到合闸弹簧力与各构件的动作用力臂,然后将其结果代入到分析得到的传动链力矩公式中,即可得合闸过程中等效到主轴的总输出力矩 M_p 。

2.2.2 等效到主轴的负载力与力臂的确定

在合闸过程中负载力矩的归算分为两部分,分闸弹簧力等效到主轴上以及触头弹簧等效到主轴上,见图6。

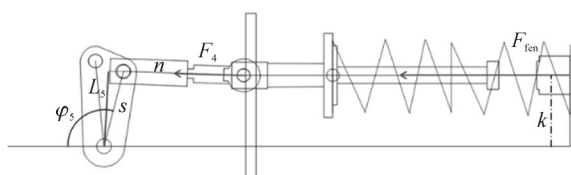


图6 分闸弹簧部分图

Fig. 6 Part of the springs part of the spring

首先进行分闸弹簧力及其力臂的计算,分闸弹簧在合闸过程时位于分闸缸中,当内拐臂随着主轴一起旋转时,将压缩分闸弹簧,其计算公式为:

$$F_{\text{fen}} = P_2 + K_2 \Delta X_2 \quad (24)$$

$$F_4 = F_{\text{fen}} \times \cos \left\{ \arcsin \left[\frac{s \times \sin(\varphi_5 + \varphi) - k}{n} \right] \right\} + F_d \quad (25)$$

$$L_5 = s \times \sin \left\{ (\varphi_5 + \varphi) - \arcsin \left[\frac{s \times \sin(\varphi_5 + \varphi) - k}{n} \right] \right\} \quad (26)$$

式(24)-(26)中: P_2 为分闸弹簧预紧力; K_2 为分闸弹簧刚度系数; ΔX_2 为分闸弹簧形变量。

其次触头弹簧在合闸过程时的力值为:

$$F_c = P_3 + K_3 \Delta X_3 \quad (27)$$

$$\Delta X_3 = S - D \quad (28)$$

式(27)、(28)中: P_3 为触头弹簧预紧力; K_3 为触头弹簧刚度系数; ΔX_3 为合闸弹簧形变量; S 为合闸总行程; D 为动静触头间的开距。

计算得到分闸弹簧力、触头弹簧力与各构件的动作用力臂,然后将其结果代入到分析得到的传动链力矩公式中,即可得合闸过程中等效到主轴的总负载力矩 M_{l1} 和 M_{l2} 。

2.3 弹簧操动机构合闸输出与负载匹配曲线

126 kV 真空断路器弹簧操动机构装配原始凸轮之后,通过将总输出力矩与总负载力矩归算到主轴,其中摩擦力和缓冲力由厂家提供的试验数据代入,即可仿真计算得到其匹配特性曲线,见图7。

从图7中可以看出输出与负载特性曲线匹配度较差,输出特性曲线并未完全覆盖负载特性曲线,

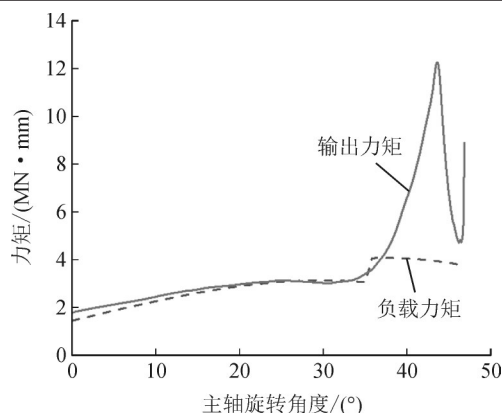


图7 原始机构凸轮输出与负载匹配曲线

Fig. 7 Primitive institutional cam output and load matching curve diagram

所以造成了真空断路器发生拒合现象。此外,输出特性曲线在后期明显有能量的大量损失,合闸过程中没有将能量进行有效利用。

匹配曲线绘制结果也为凸轮轮廓线的优化提供了一定的方向,所以需要根据真空断路器负载特性曲线进行输出特性曲线的调整,进而优化凸轮参数实现断路器的可靠合闸。

3 凸轮优化设计

3.1 确定目标函数

为了保证真空断路器的可靠性,断路器的输出能量须足够小,同时还要满足机构动作的完成。由于合闸能量过大会使真空灭弧室部件受到损坏,大大降低其寿命,所以在满足真空断路器目标参数的同时,改善其运动特性,提高弹簧操动机构的寿命尤为重要^[27-31]。

因此利用等效到主轴的输出力矩 $M_{\text{输出}}$ 与负载力矩 $M_{\text{负载}}$ 进行积分即可得到的输出能量 $W_{\text{输出}}$ 与负载能量 $W_{\text{负载}}$,以输出能量与负载能量的差值为目标函数:

$$\min f(x) = W_{\text{输出}} - W_{\text{负载}} \quad (29)$$

$$W_{\text{输出}} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{输出}}(\varphi) d\varphi \quad (30)$$

$$W_{\text{负载}} = \int_{\varphi_0}^{\varphi} M_{\text{负载}}(\varphi) d\varphi \quad (31)$$

凸轮与滚子接触时,等效到主轴的输出力矩是由等效到凸轮轴的输出力矩 $M_{\text{凸轮}}$ 利用主轴轴心到内拐臂滚子与凸轮接触力的力臂 $L_{\text{从动件}}$ 和凸轮轴轴心到内拐臂滚子与凸轮接触力的力臂 $L_{\text{凸轮}}$ 转换得到

$$M_{\text{输出}} = M_{\text{凸轮}} \times \frac{L_{\text{从动件}}}{L_{\text{凸轮}}} \quad (32)$$

利用滚子轴心与主轴轴心距离 c ,滚子轴心到凸轮轴轴心的长度 d ,主轴轴心到凸轮轴轴心的长度 b ,滚子半径 r ,凸轮轴轴心到凸轮与滚子接触点

的距离 e 进行模型几何关系分析, 计算 $L_{\text{从动件}}$ 和 $L_{\text{凸轮}}$ 随主轴旋转角度变化的长度:

$$L_{\text{从动件}} = c \times \sin \left[\arccos \left(\frac{d^2 + c^2 - b^2}{2dc} \right) - \arccos \left(\frac{r^2 + d^2 - e^2}{2rd} \right) \right] \quad (33)$$

$$L_{\text{凸轮}} = d \times \sin \left[\arccos \left(\frac{r^2 + d^2 - e^2}{2rd} \right) \right] \quad (34)$$

3.2 确定优化变量

凸轮轮廓线求解见图8。凸轮轮廓线的设计是利用凸轮运动的反转法建立理论轮廓线坐标关系式, 其原理见图9。

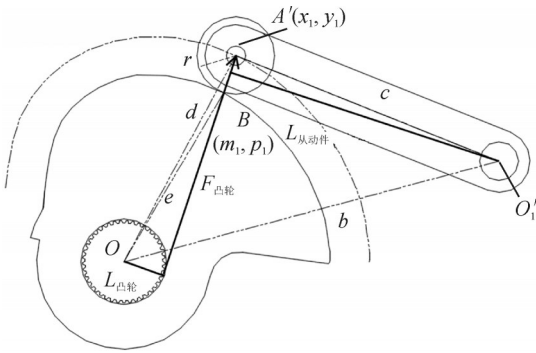


图8 凸轮轮廓线求解图

Fig. 8 The outline of the cam sequential solution

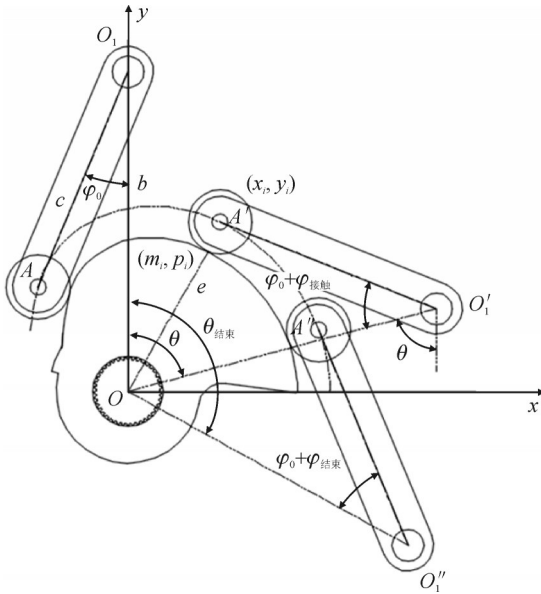


图9 凸轮反转法原理图

Fig. 9 Principle diagram of cam reversal method

通过将主轴旋转角 φ 与相对应的凸轮旋转角 θ 代入关系式中得到理论轮廓线每一点的坐标:

$$x = b \times \sin \theta - c \times \sin(\theta + \varphi_0 + \varphi) \quad (35)$$

$$y = b \times \cos \theta - c \times \cos(\theta + \varphi_0 + \varphi) \quad (36)$$

凸轮实际轮廓线为理论轮廓线的内包络线, 因此通过向量法, 即利用凸轮与滚子接触时的理论轮

廓线前后点坐标 (x_{i-1}, y_{i-1}) (x_{i+1}, y_{i+1}) 求解凸轮内包络线坐标为 (m_i, p_i) :

$$m_i = x_i + \frac{-y_{i+1} + y_{i-1}}{\sqrt{(-y_{i+1} + y_{i-1})^2 + (x_{i+1} - x_{i-1})^2}} \times r \quad (37)$$

$$p_i = y_i + \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{\sqrt{(-y_{i+1} + y_{i-1})^2 + (x_{i+1} - x_{i-1})^2}} \times r \quad (38)$$

$$e = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \quad (39)$$

对式(37)-(39)进行微分处理:

$$m_i = x_i + \frac{-\frac{dy}{d\varphi}}{\sqrt{\left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2}} \times r \quad (40)$$

$$p_i = y_i + \frac{\frac{dx}{d\varphi}}{\sqrt{\left(-\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2}} \times r \quad (41)$$

建立凸轮旋转角的循环函数, 经过循环将凸轮旋转角 $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, \dots, 142^\circ$ 代入 θ 中, 目标函数即为关于单一未知变量 φ 的函数, 因此文中优化的变量为主轴旋转角度 φ , 需进行循环求解进而得到主轴旋转角与凸轮旋转角的对应关系。

3.3 建立约束条件

弹簧操动机构完成可靠合闸需满足的基本要求为: 整个合闸过程中输出力矩曲线要完全覆盖负载力矩曲线; 断路器合闸的输出能量必须大于负载能量, 同时输出能量保证足够小; 平均合闸速度需满足真空断路器产品需求; 在合闸完成后, 缓冲器须尽可能吸收运动能量, 减小合闸弹跳时间。

1) 进行合闸过程的能量约束

$$W_{\text{输出}} - W_{\text{负载}} (\text{已知}) > 0 \quad (42)$$

2) 对输出力矩与负载力矩约束

$$\begin{cases} M_{\text{输出}}(\varphi) - 1.3M_{\text{负载}}(\varphi) > 0 & 0 < \varphi < 35.5 \\ M_{\text{输出}}(\varphi) - 1.5M_{\text{负载}}(\varphi) > 0 & 35.5 \leq \varphi \leq 47 \end{cases} \quad (43)$$

3) 平均合闸速度约束为

$$1.5 > v_c > 1.1 \quad (44)$$

4) 主轴旋转角度约束为

$$\begin{cases} 1 > \varphi_{i+1} - \varphi_i > 0 \\ 47 \geq \varphi \geq 0 \end{cases} \quad (45)$$

3.4 优化结果

利用 MATLAB 软件进行分析求解, 采用粒子群算法得到其最优解, 以主轴旋转角度 φ 为优化设计变量, 经过迭代计算得到的优化结果见表1。

表1 优化结果表

Table 1 Optimized results table (°)

θ	φ	θ	φ	θ	φ	θ	φ
0	0.17	36	14.17	72	29.73	108	40.71
2	0.67	38	15.03	74	30.57	110	41.17
4	1.26	40	15.9	76	31.41	112	41.63
6	1.93	42	16.78	78	32.16	114	42.07
8	2.64	44	17.65	80	32.82	116	42.51
10	3.38	46	18.52	82	33.49	118	42.94
12	4.14	48	19.39	84	34.16	120	43.35
14	4.92	50	20.27	86	34.72	122	43.75
16	5.73	52	21.14	88	35.48	124	44.14
18	6.56	54	22.01	90	36.13	126	44.52
20	7.37	56	22.88	92	36.49	128	44.78
22	8.26	58	23.74	94	37.21	130	45.23
24	9.04	60	24.41	96	37.74	132	45.57
26	9.88	62	25.47	98	38.26	134	45.92
28	10.73	64	26.33	100	38.76	136	46.21
30	11.78	66	27.18	102	39.26	138	46.53
32	12.44	68	28.04	104	39.75	140	46.79
34	13.36	70	28.89	106	40.23	142	46.99

3.5 凸轮轮廓线的确定

经过算法求解优化得到每两度凸轮旋转角与对应的主轴旋转角度,然后进行凸轮轮廓线的平滑处理,利用凸轮机构多项式运动规律拟合主轴旋转角与凸轮旋转角的6次多项式。将 θ 与 φ 进行拟合,即可得到拟合结果见图10。

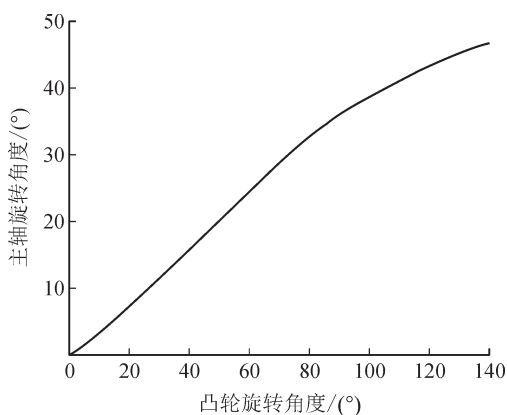


图10 凸轮与主轴旋转角度拟合图

Fig. 10 The cam and the spindle rotation angle

将拟合结果代入凸轮反转法公式中即可得到凸轮轮廓线每一点的横纵坐标,然后利用三维建模软件绘制完整的凸轮三维模型,优化后的凸轮模型三维图见图11。

3.6 凸轮优化后的匹配曲线

在不改变分合闸弹簧力值的情况下对凸轮轮廓线进行优化设计,节约了研发成本,可实现良好



图11 凸轮三维图

Fig. 11 Three-dimensional map of cam

的输出与负载匹配。同时将合闸弹簧的能量有效利用,防止造成能量的浪费,减小合闸过程中的弹跳问题,最终完成真空断路器的可靠合闸,凸轮优化后的输出与负载力矩匹配曲线见图12。

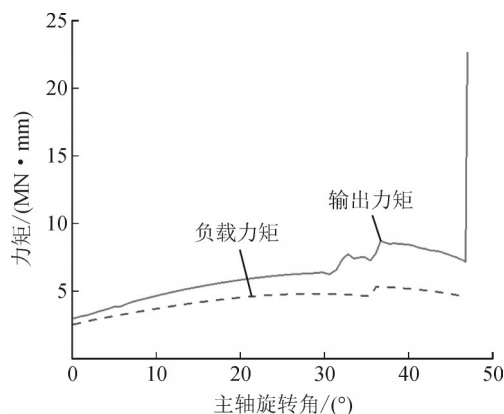


图12 优化后的输出与负载力矩匹配曲线

Fig. 12 Optimized output and load power matching curve

4 仿真验证

初始机构在进行试验时发生了拒合故障,因此首先将初始凸轮导入整体仿真模型中,利用动力学仿真软件对其进行仿真分析。仿真结果可知总行程为65.88 mm时就发生了机构拒合的问题,超行程并没有走完,合闸不到位导致真空断路器存在隐患,可能会引起事故发生。通过图7输出力矩与负载力矩匹配曲线的分析可知,在动静触头接触后,由于触头弹簧作用,导致负载力矩突然提升,此时负载力矩大于输出力矩,因此根据匹配特性较差的结果可以推测出合闸过程会发生拒合故障。

对优化设计凸轮后的模型重新进行装配进行仿真分析,合闸过程参数均满足技术要求,优化前后的参数对比结果见表2,合闸仿真行程对比曲线见图13。

由表2可知,利用Adams动力学仿真软件将优化凸轮前后的模型分别进行仿真计算后,超行程由原来的5.8 mm变为15 mm,真空断路器实现可靠合

表2 凸轮优化前后仿真曲线结果对比表

Table 2 Comparison table of the rear simulation curve results

参数	优化前	优化后
平均合闸速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.42	1.49
合闸弹跳时间/ms	4.13	4.98
行程/mm	60	60
超行程/mm	5.8 (合闸不到位)	15.0

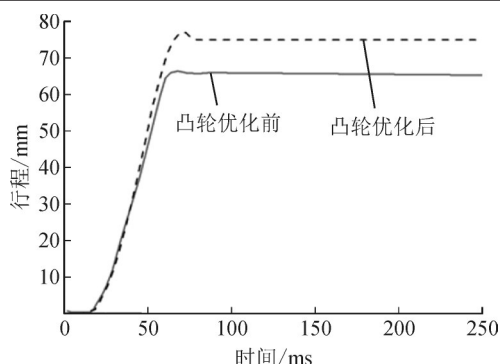


图13 凸轮优化前后仿真行程对比图

Fig. 13 Comparison map of the rear simulation itinerary before and after the cam

闸, 平均合闸速度有所提升, 变为 1.49 m/s , 合闸弹跳时间为 4.98 ms , 满足技术要求的 5 ms 以内。

5 试验验证

文中主要进行机械特性试验, 试验样机其他零部件保持一致, 分为原始凸轮与更换优化凸轮后两次试验, 采用 GKC433DR 高压开关测试仪来测试机构机械特性参数。优化后新的凸轮装配到样机中, 进行样机试验后可以实现可靠合闸, 优化前后的机械特性参数对比结果见表3, 合闸试验行程曲线见图14。

表3 凸轮优化前后试验曲线结果对比表

Table 3 Campaign comparison chart before and after the cam optimization

参数	优化前	优化后
平均合闸速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.38	1.42
合闸时间/ms	57.6	58.1
分合不同期/ms	1.2	2.1
合闸弹跳时间/ms	3.60	4.92
行程/mm	59.1	60.5
超行程/mm	4.1 (合闸不到位)	13.7

由表3可知, 超行程由原来的 4.1 mm 变为 13.7 mm , 其他机械特性结果也满足技术要求, 证明了该凸轮轮廓线优化方案的可行性。通过表2、3对比可以发现试验结果与仿真结果还存在一定的误差, 通过分

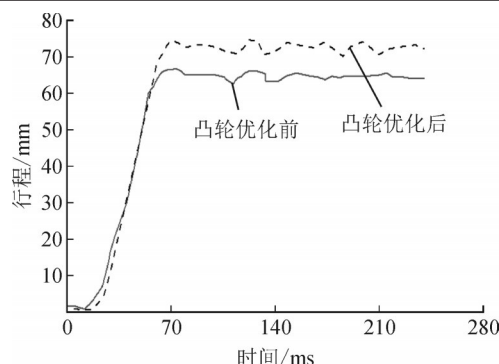


图14 凸轮优化前后试验行程对比图

Fig. 14 Campaign comparison chart before and after the cam optimization

析得出的结果为可能有两个原因导致合闸过程参数存在偏差:

- 1) 整体机构的摩擦力设置不够精确, 仿真过程中忽略了一定的碰撞能量损失;
- 2) 弹簧的阻尼参数设置与实际情况存在一定的偏差。

在实现可靠合闸后由于真空灭弧室中动触头受到自闭力的影响, 触头弹簧会发生振荡现象, 导致凸轮优化前后的行程曲线存在微小的振荡, 见图14。该振荡现象在实现可靠合闸之后, 不影响产品技术指标。

6 结语

通过理论计算、仿真验证以及样机测试, 证明了该凸轮轮廓线优化方案的正确性和可行性, 通过算法优化后的样机具备输出与负载特性匹配度良好, 合闸能量分配合理, 机械特性参数满足技术指标等特点。优化方案具有实际工程的参考意义, 也为弹簧操动机构的改进提供了优化方向。

参考文献:

- [1] 赵雪莹, 李根蒂, 孙晓彤, 等. “双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 436-446.
ZHAO Xueying, LI Gendi, SUN Xiaotong, et al. Key technology and application progress of Hydrogen production by electrolysis under peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality targets [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 436-446.
- [2] 张知, 赵海波, 冉晴月, 等. 考虑不同区域电网差异性的新能源消纳成本测算与分摊方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 20-31.
ZHANG Zhi, ZHAO Haibo, RAN Qingyue, et al. Calculation and allocation method for absorption costs of new energy considering the differences in regional power grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 20-31.
- [3] 赵江涛, 李建基. 中压真空断路器的演变和最新发展[J]. 电工电

- 气,2013(5):1-4.
- ZHAO Jiangtao, LI Jianji. Evolvement and the newest development of medium - voltage vacuum circuit breaker[J]. Electrotechnics Electric, 2013(5):1-4.
- [4] SLADE P G, VOSHALL R E, WAYLAND P O, et al. The development of a vacuum interrupter retrofit for the upgrading and life extension of 121 kV - 145 kV oil circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3):1124-1131.
- [5] 钟建英, 孙广雷, 杨葆鑫, 等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2):451-466.
- ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2):451-466.
- [6] 辛妍丽, 周文婷, 余泽远, 等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4):231-240.
- XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching - off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4):231-240.
- [7] 谢久明. 126 kV 高压真空断路器的机械特性及同步控制研究[D]. 北京:燕山大学, 2016.
- XIE Jiuming. Research of mechanical properties and synchronous control for 126 kV high voltage vacuum circuit breaker[D]. Beijing: Yanshan University, 2016.
- [8] 刘秉杰, 齐辉, 孙立强, 等. 浅谈真空断路器弹簧操动机构与设计[J]. 黑龙江科技信息, 2015(30):85-85.
- LIU Bingjie, QI Hui, SUN Liqiang, et al. Talking about the vacuum circuit breaker spring operation mechanism and design[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(30):85-85.
- [9] 李俊鹏. 浅谈真空断路器的特点及其优越性能[J]. 黑龙江科技信息, 2008, 30(30):47.
- LI Junpeng. Talk about the characteristics of the vacuum circuit breaker and its superior performance[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2008, 30(30):47.
- [10] 王季梅, 钱忠厚. 具有纵向磁场结构真空灭弧室的研究[J]. 西安交通大学学报, 1986, 29(1):33-39.
- WANG Jimei, QIAN Zhonghou. Research on the vacuum extinguishing room of the vertical magnetic field structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1986, 29(1):33-39.
- [11] ANABU S, KANEKO E, KOIKE H, et al. The applications of axial magnetic field electrodes to vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5):1395-1402.
- [12] 韩桂全, 姚晓飞, 张超军, 等. 基于阳极放电模式的杯状纵磁触头真空灭弧室分闸速度设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4):1264-1272.
- HAN Guiquan, YAO Xiaofei, ZHANG Chaojun, et al. Design of opening velocity for a vacuum interrupter with a cup - type axial magnetic field contact based on vacuum arc anode discharge mode [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):1264-1272.
- [13] 王文格, 饶兴华, 谭仕威. 一种凸轮曲线调制处理及粒子群优化方法[J]. 中国机械工程, 2014(19):2665-2668.
- WANG Wenge, RAO Xinghua, TAN Shiwei. A method for modulating cam curve and optimization using particle swarm technique[J]. China Mechanical Engineering, 2014(19):2665-2668.
- [14] 张子英, 田静宜. 高速凸轮动态设计方法研究[J]. 机械工程师, 2013(10):17-18.
- ZHANG Ziying, TIAN Jingyi. Dynamic design and simulation of high-speed cam[J]. Mechanical Engineer, 2013(10):17-18.
- [15] 郭良超, 韩国辉, 刘宇, 等. 高压断路器弹簧操动机构合闸凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2019, 55(10):13-18.
- GUO Liangchao, HAN Guohui, LIU Yu, et al. Optimum design of the closing cam in spring operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):13-18.
- [16] 杨朔, 谢凌东, 周宏辉, 等. 基于线阵相机的断路器分合闸速度测量系统[J]. 浙江电力, 2023, 42(4):109-116.
- YANG Shuo, XIE Lingdong, ZHOU Honghui, et al. A switching speed measurement system for circuit breakers based on a linear array camera[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4):109-116.
- [17] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- JI Zhen, LIAO Huilian, WU Qinghua. The particle group algorithm and application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] 季锐, 陈炳森, 陈韶光, 等. 基于中小型水电站盘车的数据采集及分析优化[J]. 大众科技, 2022, 24(9):1-4.
- JI Rui, CHEN Bingsen, CHEN Shaoguang, et al. Data acquisition, analysis and optimization based on turning gear of small and medium-sized hydropower stations[J]. Popular Science & Technology, 2022, 24(9):1-4.
- [19] 孙瑞, 章宝歌, 张振, 等. 新型多端口高压直流断路器拓扑对避雷器的影响[J]. 电瓷避雷器, 2023(4):27-37.
- SUN Rui, ZHANG Baoge, ZHANG Zhen, et al. Influence of new multi-port HVDC circuit breaker on lightning arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4):27-37.
- [20] 韩璞, 孟丽, 王彪, 等. 粒子群算法中粒子轨迹特性研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(12):235-240.
- HAN Pu, MENG Li, WANG Biao, et al. Characteristics of particle trajectory in particle swarm optimization[J]. Computer Simulation, 2015, 32(12):235-240.
- [21] 杨秀, 刘欣雨, 孙改平, 等. 基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3):65-75.
- YANG Xiu, LIU Xinyu, SUN Gaiping, et al. Energysaving optimization control of central airconditioning system based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3):65-75.
- [22] 熊军华, 赵迪迪, 刘国庆. 基于多目标粒子群算法的配电网无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3):26-32.
- XIONG Junhua, ZHAO Didi, LIU Guoqing. Reactive power optimization of distribution network based on multi - objective particle swarm optimization[J]. Power Capacitor & Reactive Power

- Compensation, 2023, 44(3): 26-32.
- [23] 陈 鹏, 郎需军, 国 震, 等. 基于改进BP神经网络和多目标粒子群算法的四回路导线布置优化[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 151-161.
- CHEN Peng, LANG Xujun, GUO Zhen, et al. Optimization of fourcircuit wire arrangement based on improved BP neural network and multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 151-161.
- [24] 田 源. 基于动力学仿真的开关柜断路器机构的设计与优化[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2019.
- TIAN Yuan. The design and optimization of the road breaker of the dynamic simulation Switch cabinet is optimized[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2019.
- [25] 余银钢, 潘天红. 新型双机构快速机械开关断路器结构与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 144-153.
- YU Yingang, PAN Tianhong. Structure and performance analysis of a new type of fast mechanical switch circuit breaker with a double mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 144-153.
- [26] 曾 鸣. 中压真空断路器传动特性分析与优化设计[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
- ZENG Ming. Analysis and optimization design of the transmission characteristics of the air-voltage interruption[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.
- [27] 李金泉. VEP断路器操动机构的设计与优化[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2022.
- LI Jinquan. The design and optimization of the VEP circuit breaker operation mechanism[D]. Xiamen: Xiamen Institute of Technology, 2022.
- [28] 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.
- [29] 徐可新. 高压断路器弹簧操动机构的优化与仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- XU Kexin. Optimization and simulation of the spring actuator for circuit breakers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [30] 邱鹏锋, 周思佳, 马宏明, 等. 恶劣环境下多参量融合的断路器操动机构辅助开关研究[J]. 西安工程大学学报, 2023, 37(6): 69-77.
- QIU Pengfeng, ZHOU Sijia, MA Hongming, et al. Research on the auxiliary switch of circuit breaker operating mechanism based on multi parameter fusion in harsh environments[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(6): 69-77.
- [31] 赵玉芝, 张 杰, 张 鹏, 等. 真空断路器弹簧操动机构合闸凸轮优化设计[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 205-210.
- ZHAO Yuzhi, ZHANG Jie, ZHANG Peng, et al. Optimum design of the spring actuator cam during closing operation in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 205-210.
- 汤凯航(1995—), 男, 助理工程师, 技师, 主要从事真空断路器研究及继电保护工作(E-mail: 330969150@qq.com)。
- 彭振搏(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电器智能化技术应用(通信作者)(E-mail: 1336929693@qq.com)。