

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.031

真空开关操动机构和在线监测研究

基于最优合闸速度设计 126 kV 真空断路器操动机构凸轮轮廓

李永林¹, 余砾², 李旭旭¹, 李倩², 韩桂全¹, 刘佩²,
王铭飞¹, 张博健², 闫静², 刘志远²

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001;

2. 西安交通大学电气工程学院电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:文中以合闸过程中燃弧时间最短为目标,提出了设计高电压等级真空断路器凸轮轮廓的方法。首先,通过实验确定合闸速度特性。得到 126 kV 真空断路器合闸燃弧时间与预击穿速度的数学关系,表明在预击穿速度为 1.15 m/s 时,126 kV 真空断路器的合闸燃弧时间最短;其次,由上述方法得到真空断路器合闸行程曲线确定凸轮轮廓线。根据合闸行程曲线上每个点确定弹簧操动机构主轴转角,并根据合闸弹簧所需要的能量确定机构储能轴转角,然后由主轴转角与储能轴转角的比值确定凸轮的轮廓曲线。最后,根据上述凸轮轮廓设计方法编制了凸轮设计软件,利用该软件设计的凸轮在 ADAMS 仿真软件中对整机进行仿真计算,仿真结果得到预击穿速度为 1.18 m/s,表明此设计能很好的满足设计要求。

关键词:126 kV 真空断路器; 合闸特性; 凸轮轮廓; 软件设计

Optimization Design of Operating Mechanism Cam Profile for a 126 kV Vacuum Circuit Breaker Based on an Optimal Closing Velocity

LI Yonglin¹, YU Li², LI Xuxu¹, LI Qian², HAN Guiquan¹, LIU Pei², WANG Mingfei¹,
ZHANG Bojian², YAN Jing², LIU Zhiyuan²

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The objective of this paper is to propose a design method to optimize the closing cam of a high-voltage vacuum circuit breaker approaching the minimum arcing time. First, the optimum closing speed characteristics are determined through experiments. The function of the prestrike closing velocity and the total arcing duration is obtained, which indicates that the closing time of a 126 kV vacuum circuit breaker is the minimum when the pre-breakdown speed is 1.15 m/s. Next, the cam profile is determined by the closing curve obtained. According to the closing curve of the vacuum circuit breaker, one can determine the rotation angle of the spring operating mechanism main shaft corresponding to each point on the curve. The energy storage shaft rotation angle is determined according to the energy required for the closing spring. Then, the cam profile is determined according to the ratio of the main shaft rotation angle and energy storage shaft rotation angle. Finally, a cam design software is developed according to the cam profile design method. The simulation results by ADAMS simulation software show that the pre-breakdown speed is 1.18 m/s, which indicates that the design perfectly satisfy the demands.

Key words: 126 kV VCB; closing characteristics; cam profile; software

0 引言

真空断路器由于其诸多优点在中高电压领域得

收稿日期:2016-10-18; 修回日期:2016-12-24

到了越来越广泛的应用^[1-3]。触头熔焊是真空断路器一个不可忽视的问题。真空断路器合闸过程中触头之间会产生电弧,电弧会导致触头表面金属发生熔化,当触头表面的金属熔化时,会导致触头闭合后最终焊在一起,这种现象称为动熔焊^[4-5]。在合闸过程中,触头间的距离不断减小,小到一定的程度时,触头间隙便再无法承受外加电压,此时电压会击穿触头间隙,这是合闸过程中触头的预击穿^[6]。触头的预击穿往往会导致电弧产生,电弧作用在触头表面上会产生许多宏观效应,例如触头局部产生相变(熔化、蒸发等)以及液滴飞溅等。这些效应使得触头表面组织结构和形貌发生微观上的变化,从而促使触头熔焊。另外,触头关合过程中不可避免地产生一连串的弹跳过程。跳动的幅度由几十到几百微米不等,弹跳持续的时间通常为几个毫秒^[7]。在触头弹跳的过程中,触头间的接触电阻会周期性地增大,在触头分离时会在触头间产生电弧。与预击穿类似,弹跳产生的电弧也会造成触头的熔焊。影响真空灭弧室动熔焊性能的主要因素有触头材料和触头弹跳^[8-11]。熔焊特性受到弹跳时所产生的电弧电压、电弧电流以及电弧持续时间的影响^[12]。

在合闸过程中,触头的预击穿与弹跳均与操动机构有关。对真空断路器操动机构进行合理的设计和优化,可以有效的减少触头预击穿和弹跳对于触头熔焊的影响,从而使断路器具有更好的抗熔焊性能。高压真空断路器中应用最广泛的是弹簧操动机构^[13]。弹簧操动机构动作原理简单、成本较低^[14]。然而,弹簧释放能量时,具有开始出力大,随着弹簧形变的减小出力逐渐减小的特点,而真空断路器的反力则是随着触头靠近不断增大的。弹簧出力特性与真空断路器的反力特性正好相反^[15]。为了使操动机构的出力特性与真空断路器的反力特性匹配,通常要通过凸轮和连杆对弹簧的出力进行转换。通过合理设计凸轮轮廓曲线,并且适当配置连杆机构,使得弹簧操动机构的出力能与真空断路器的反力进行较好的匹配^[16]。弹簧操动机构与真空断路器负载的匹配,关键在于凸轮机构的合理设计^[17]。文[18]就带有凸轮的弹簧操动机构的设计给出过详细的介绍。其中考虑了若干弹簧机构的性能要求,包括机构的摩擦、反力特性、以及凸轮的斜率等。姜琪教授课题组提出了一种按输出驱动力特性曲线设计凸轮机构的方法^[19-20]。他们指出传统的按从动件运动规律设计凸轮廓线的方法不能满足对输出力特性的要求。提出应按输出驱动力特性曲线与负载特性曲线相匹配设计凸轮机构,使操动机构满足输出驱动特性的要

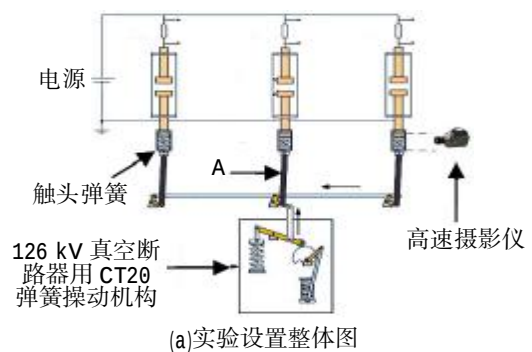
求。文中以合闸过程中动熔焊时间最短为目标,设计合闸速度特性,根据此速度特性提出了优化高电压等级真空断路器合闸凸轮的设计方法。

1 真空断路器合闸速度的优化

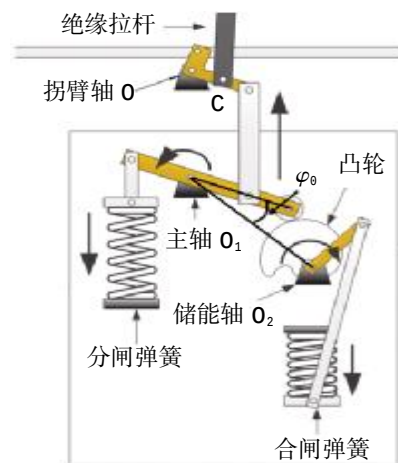
1.1 真空断路器合闸速度和弹跳时间测量实验

该实验的目的在于测量 126 kV 真空断路器在合闸过程中动触头的预击穿速度 ν_p 以及触头碰撞后的弹跳时间 T_B ,预击穿速度定义为从触头发生预击穿到触头物理相接触时间段内的平均速度。通过对实验数据的拟合,计算出两者的数学关系: $T_B=T(\nu_p)$ 。

126 kV 真空断路器结构图见图 1。操动机构采用 CT20 弹簧操动机构。合闸弹簧的预压力是可调的,调整范围 27 000~38 000 N。因此,可以通过调节合闸弹簧的预压力实现动触头合闸速度的调节,合闸速度为断路器在合闸过程中,动触头的运动速度。该速度的调节范围 0.7~2.1 m/s。



(a) 实验设置整体图



(b) CT20 弹簧操动机构

图 1 126 kV 真空断路器结构图

Fig. 1 126 kV VCB structure

在实验中,采用 126 kV 真空断路器合 12 V 直流电路,利用触头弹开时电流断续的特点测量触头弹开时间。

真空断路器合闸过程中,关于触头的弹跳时间的定义目前有两种不同的方法。一种是触头的弹跳

时间,即合闸过程中,从动静触头接触开始,到触头完全合闸结束为止,这一段时间称为触头的弹跳时间^[24];另一种是触头的弹开时间,即在触头合闸弹跳的过程中触头处于弹开状态的时间的总和。由于触头合闸碰撞的弹开时间与触头间的电弧能量更加相关^[28],对触头熔焊性能的影响更直接,因此,在文中主要研究触头合闸弹跳过程中的弹开时间。

126 kV 真空断路器在关合 12 V 直流电源时的典型电气连续性的示意图见图 2。由图 2 可以读出关合过程中,断路器各相在合闸弹跳过程的弹开时间。在触头碰撞后,A 相有 2 个 1 ms 和 1 个 2 ms 的弹开时间,弹开时间总共为 4 ms;B 相有 1 个 1 ms 和 1 个 1.7 ms 的弹开时间,弹开时间总共为 2.7 ms;C 相有 1 个 1.2 ms 和 1 个 1.3 ms 的弹开时间,弹开时间总共为 2.5 ms。其他实验结果均用该方法读出数据。

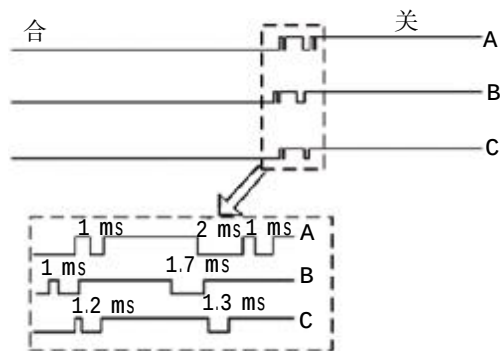


图 2 弹跳实验的电气连续性的示意图

Fig. 2 Electrical continuity diagram of the bounce experiment

采用 Phantom V10 型高速摄影机记录触头弹簧在关合过程中的运动情况测量合闸时的预击穿速度。由于触头弹簧的上端与动触头相连,下端与绝缘拉杆相连。因此,通过对触头弹簧上下两端位移的记录,高速摄影机既可以记录动触头在合闸过程中的位移,又可以记录机构在合闸时的行程。126 kV 真空断路器所处的 3 个典型状态见图 3。图 3 中包括分闸状态、触头刚合状态以及最终合闸状态。

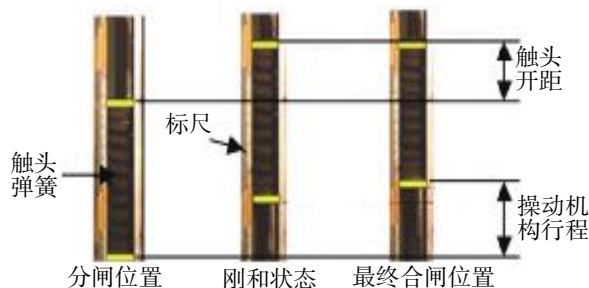


图 3 高速摄影机拍摄的 126 kV 真空断路器合闸弹簧

Fig. 3 126 kV VCB closing spring filmed by high-speed camera

由高速摄影机记录的真空断路器在一次合闸过程中的行程曲线见图 4。图 4 中的虚线为弹簧操动机构的合闸位移曲线,实线为动触头的合闸位移曲线。从图 4 中可以看出,在触头碰撞前,机构和触头具有相同的合闸速度。文中选用的 126 kV 真空灭弧室预击穿开距为 4.0 mm^[22]。因此,在这里读取触头在合闸碰撞前 4.0 mm 开距内的平均速度为所要研究的预击穿速度。

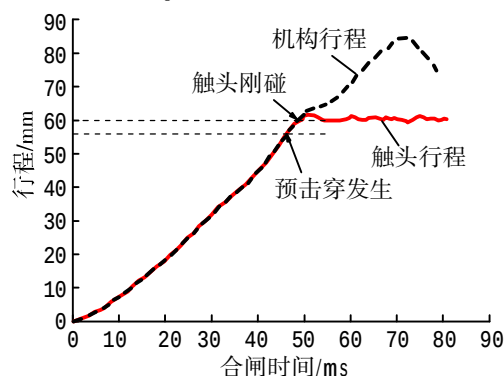


图 4 126 kV 真空断路器触头及机构行程示意图

Fig. 4 126 kV VCB contact and mechanism trip diagram

按照上文实验数据的读取方法,对 126 kV 真空断路器进行多次合闸操作,可以得到若干组预击穿速度和弹开时间的对应数据。126 kV 真空断路器预击穿速度与触头弹开时间关系图见图 5。由图 5 可以看出,各相触头的弹开时间虽然分布的较离散,但是随着预击穿速度的增大,弹开时间也是增大的,而且增大的趋势呈指数函数的形式。选取各个预击穿速度下弹开时间的最大值进行拟合,可以得到图 5 中的拟合曲线,即触头弹开时间最大值与预击穿速度的函数关系。

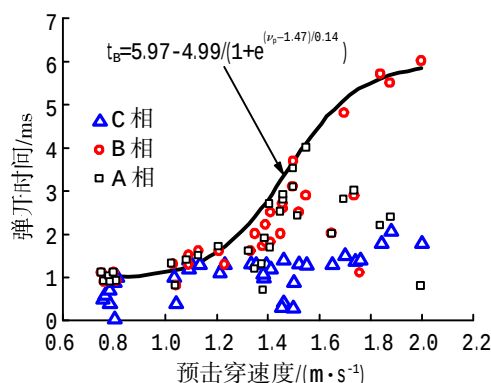


图 5 126 kV 真空断路器预击穿速度与触头弹开时间关系图

Fig. 5 Relation between 126 kV VCB pre-breakdown speed and bounce time

$$t_b = 5.97 - 4.99 / (1 + e^{(v_p - 1.47) / 0.14}) \quad (1)$$

式(1)中: t_b 是触头的弹跳燃弧时间; v_p 为动触头的预击穿速度。

1.2 真空断路器最优合闸预击穿速度

触头合闸过程示意图见图6。真空断路器合闸过程中触头的燃弧时间由两部分构成^[18]: t_p 和 t_B 。 t_p 是触头的预击穿燃弧时间; t_B 是触头的弹跳燃弧时间。因此,在合闸过程中,触头的燃弧时间 t_a 为:

$$t_a = t_p + t_B; \quad (2)$$

$$t_p = \frac{d}{\nu_p} \quad (3)$$

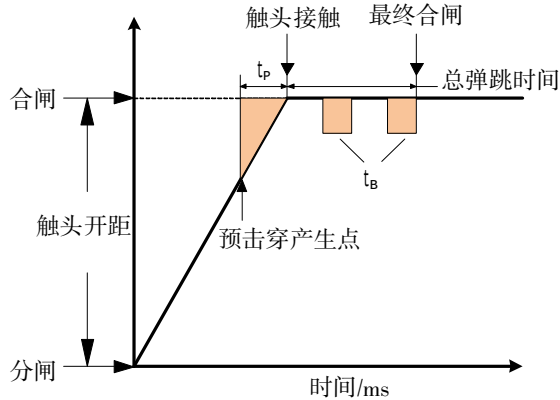


图6 触头合闸过程示意图

Fig. 6 Contact closing process diagram

所以将式(1)、(3)代入(2),可得

$$t_a = \frac{4}{\nu_p} + 5.97 - 4.99 / (1 + e^{(\nu_p - 1.47)/0.14}) \quad (4)$$

式(4)即为触头在合闸过程中的燃弧时间 t_a 与预击穿速度 ν_p 的函数关系。弹开时间与预击穿速度的关系见图7。从图7中看出,在合闸速度为 0.7 m/s 到 2.1 m/s 的范围内,随着合闸速度的增大,燃弧时间先减小后增大。正是由于这样的特性,使得合闸的燃弧时间存在一个最小值 t_{amin} , 当燃弧时间达到 t_{amin} 时,对应的速度为优化的预击穿速度,此时燃弧时间短注入触头间的能量少,可增强触头的抗动熔焊性能。文中得到的最优预击穿速度为 1.15 m/s。

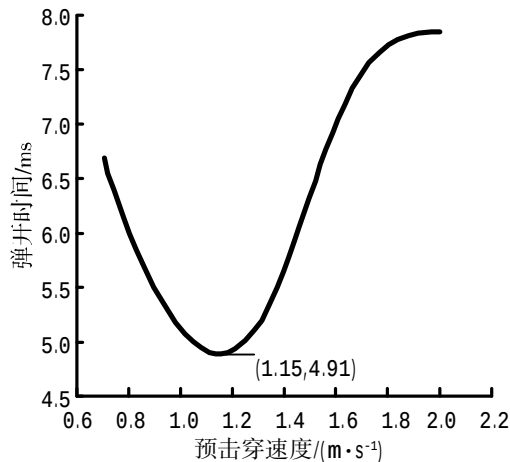


图7 弹开时间与预击穿速度的关系图

Fig. 7 Relation between arc firing time and pre-breakdown velocity

2 基于最优合闸速度的真空断路器操动机构凸轮设计方法

由上述方法得到了真空断路器的合闸行程曲线。首先,确定合闸行程曲线中每个点对应的主轴 O_1 (见图1)转角以及归算到绝缘拉杆A点上的动能和势能。由已知的负载力矩曲线得到每个主轴转角下对应的分闸弹簧和触头弹簧吸收的能量。由上述的动能、势能与分闸弹簧、触头弹簧吸收的能量之和得到合闸弹簧需要的总能量。并由此得到合闸弹簧的伸长量确定储能轴 O_2 (见图1)转角,最后根据主轴转角与储能轴转角的比值,即传动比,确定凸轮的轮廓曲线。

2.1 操动机构运动时的能量关系

真空断路器弹簧操动机构主轴的驱动力矩与反力矩相互配合的示意图见图8。根据断路器对操动机构合闸功能的要求,其驱动力须满足以下条件^[23]: 首先,起始合闸力应大于运动系统的起始阻力;其次,输出功必须大于开关所需的合闸功;最后,具有合适的出力特性,以获得最佳合闸速度特性。

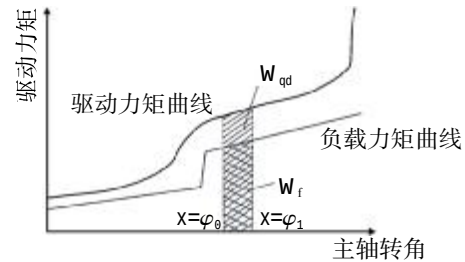


图8 驱动力矩与反力矩配合示意图

Fig. 8 Matching of driving moment and anti-moment

如图8所示,横坐标为在合闸过程中主轴转过的角度 φ ,纵坐标为归化到机构主轴上的力矩 T 。驱动力矩曲线与 $x=\varphi_0$, $x=\varphi_1$ 以及 x 所包围的面积 W_{qd} 代表的是合闸弹簧在合闸过程中传递到主轴上的驱动能量。

同理,负载力曲线与 $x=\varphi_0$, $x=\varphi_1$ 以及 x 所包围的面积代表的是机构合闸过程中消耗在压缩分闸弹簧和触头弹簧的能量 W_f 。由于负载力矩曲线是已知的,因此任何一个主轴转角所对应的 W_f 已知。

利用动触头的目标行程曲线,可以计算出每一个时刻 $t[i]$ 对应的速度 $\nu[i]$ 。

$$\nu[i] = \frac{s[i+1] - s[i]}{t[i+1] - t[i]} \quad (5)$$

W_{qd} 克服 W_f 后使断路器获得的能量 W_d 为

$$W_d = \frac{1}{2} m \nu^2 + \int_0^s mg ds \quad (6)$$

式(6)中: m 为归算到绝缘拉杆A点上的等效质

量; g 为重力加速度; v 为动触头的速度; s 为动触头行程。

因此可以得到合闸行程曲线中每一个点对应的合闸弹簧输出的能量 W_{qd} 为

$$W_{qd}=(W_d+W_f)/\eta_o \quad (7)$$

式(7)中, η 为机构将能量由储能轴传递给动触头过程中的效率因数。

2.2 主轴和储能轴转角确定

由图 1 可看出,从主轴 O_1 到拐臂轴 O 是 1 个铰链四连杆机构;从拐臂轴 O 到绝缘拉杆是 1 个偏距摇杆—滑块机构,通过下述分析可得到合闸特性曲线与主轴转角的关系。

铰链四连杆机构见图 9。 O 对应拐臂轴, O_1 对应主轴。其表达式由式(8)确定,式(8)中 λ_1 采用牛顿—辛普森方法求解非线性方程(8)^[24],可解得 λ_2 和 λ_4 的关系。由此可得到主轴转角 φ 与拐臂轴转角之间的关系。

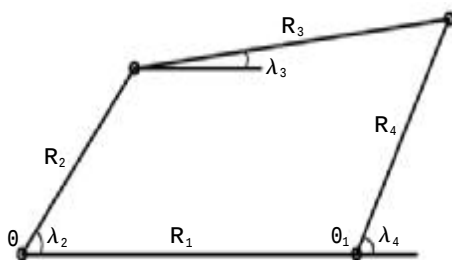


图 9 四连杆机构示意图

Fig. 9 Four-bar linkage

$$\begin{cases} R_2 \cos \lambda_2 + R_3 \cos \lambda_3 = R_1 \cos \lambda_1 + R_4 \cos \lambda_4 \\ R_2 \sin \lambda_2 + R_3 \sin \lambda_3 = R_1 \sin \lambda_1 + R_4 \sin \lambda_4 \end{cases} \quad (8)$$

偏距摇杆—滑块机构见图 10。 O 相当于拐臂轴, b 相当于绝缘拉杆的长度。滑块位移与摇杆转角之比,见式(9)。利用式(9)可以得到合闸曲线行程 s 和拐臂轴转角的关系。

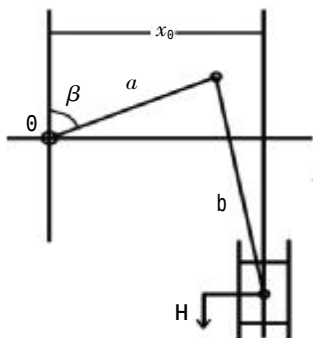


图 10 偏距摇杆—滑块机构示意图

Fig. 10 Offset rocker-slider mechanism

$$\frac{dH}{d\beta} = a \sin \beta + a \cos \beta \frac{x_0 - a \sin \beta}{b} \quad (9)$$

式(9)中: H 为滑块位移; β 为摇杆转角; a 为摇杆长

度; b 为连杆长度; x_0 为摇杆转轴到滑块中线的距离。

与上面得到的铰链四连杆机构分析结果一起可以得到动触头行程 s 与主轴转角 φ 的关系式为

$$\varphi = \varphi(S) \quad (10)$$

由 2.1 节可知合闸弹簧输出的能量 W_{qd} ,则合闸弹簧的形变量 H_{hz} 为

$$H_{hz} = \sqrt{H_0^2 - \frac{2W_{qd}}{k}} \quad (11)$$

式(11)中: H_0 为合闸弹簧初始形变量; W_{qd} 合闸弹簧释放的驱动能量; k 为合闸弹簧的刚度系数。

由图 1 可看出,储能轴与合闸弹簧组件也组成了一个偏距摇杆—滑块机构,可以利用式(9)得到储能轴转角 θ 和合闸弹簧伸长量 H_{hz} 之间的关系式为

$$\frac{dH_{hz}}{d\theta} = a \sin \theta + a \cos \theta \frac{x_0 - a \sin \theta}{b} \quad (12)$$

由式(5)-(7)、(10)-(12)可得到动触头行程 s 与储能轴转角 θ 的关系式为

$$\theta = \theta(S) \quad (13)$$

2.3 瞬时传动比的确定

由式(10)、(13)可以得到主轴转角和储能轴转角的函数关系式,从而由式(15)能够得到凸轮理论廓线。但是凸轮轮廓还未确定前,储能轴部分的质量无法归算到绝缘拉杆的 A 点上,因此无法直接计算出式(6)中的 W_d 。为了解决这个问题,可通过迭代方法进行求解,确定主轴和储能轴之间的传动比,从而确定归算到绝缘拉杆的 A 点上储能轴部分的质量。

1)假定在主轴转角 $\varphi[i]$ 处凸轮的传动比为 $d\varphi[i]/d\theta[i]$ 。

2)通过这个假定的传动比,可以得到主轴转角为 $\varphi[i]$ 时储能轴的转角 $\theta[i]$ 以及由式(12)可确定合闸弹簧的位移量 $H_{hz}[i]$,得到合闸弹簧能量 $W_{qd}[i]$,通过式(7)可以得到断路器获得的能量 $W_d[i]$ 。

3)利用上述假定的传动比,将储能轴部分的质量归算到绝缘拉杆的 A 点上,从而计算出断路器在 A 点上的等效质量 $m[i]$ 。由式(6)可推导出式(14),可计算出在该传动比下的合闸速度 $v_{temp}[i]$ 为

$$v_{temp}[i] = \sqrt{\frac{2\{W_d[i] - m[i]gs[i]\}}{m[i]}} \quad (14)$$

式(14)中: $v_{temp}[i]$ 为在假定传动比下主轴转角为 $\varphi[i]$ 时的合闸速度; g 为重力加速度; $m[i]$ 为在假定传动比下主轴转角为 $\varphi[i]$ 时归化在 A 点的等效质量; $W_d[i]$ 为在假定传动比下主轴转角为 $\varphi[i]$ 时断路器获得的能量; $s[i]$ 为主轴转角为 $\varphi[i]$ 时 A 点位移。

4)将 $v_{temp}[i]$ 与目标合闸行程曲线中计算出的合闸速度 $v[i]$ 比较, $v[i]$ 由式(5)得到。当 $|v[i] - v_{temp}[i]| \leq \varepsilon$ 时,可以认为此时假设的传动比 $d\varphi[i]/d\theta[i]$ 符合要

求,并记录对应的传动比,最终得到储能轴转角 θ 与主轴转角 φ 函数关系;若 $|v[i]-v_{\text{temp}}[i]|>\varepsilon$ 时,则 $d\varphi[i]/d\theta[i]=d\varphi[i]/d\theta[i]+\Delta(d\varphi/d\theta)$,重复上面的迭代过程,直至符合要求为止。

2.4 操动机构凸轮轮廓线的计算

利用2.3节通过迭代得到的储能轴转角 θ 与主轴转角 φ 函数关系可计算出操动机构凸轮轮廓线。

凸轮轮廓与从动滚轮摆角关系示意图见图11。采用反转作图法确定其理论廓线坐标。设凸轮不动,机架 O_1O_2 逆时针转动。 O_1 为主轴, O_1B_0 为摆动从动件。以储能轴 O_2 为圆心, O_2O_1 为半径作圆,当经过转角 θ 后, O_1 点转到 O_1' 点,从动件的起始位置从 O_1B_0 转到 $O_1'B_0$ 。由于凸轮转角 θ 与主轴转角 φ 之间的函数关系已由2.3节得到,因此凸轮转角 θ 对应的摆角 φ 已知。故可做线段 $O_1'C$ 与 $O_1'B$ 的夹角等于 φ ,且 $O_1'C=O_1'B$,从而得到从动件滚子中心B点的位置,该点也是凸轮廓线上的一点。

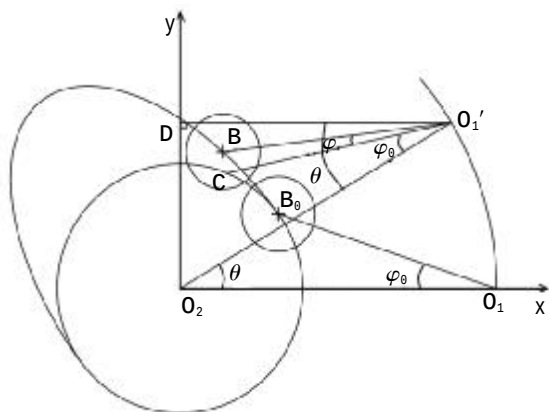


图11 凸轮轮廓与从动滚轮摆角关系示意图

Fig. 11 Relation between the cam and the swing angle of driven

由图11可得凸轮理论廓线上B点的坐标为

$$\begin{cases} x=l_{O_1O_2}\cos\theta-l_{O_1B_0}\cos[\theta-(\varphi+\varphi_0)] \\ y=l_{O_1O_2}\sin\theta-l_{O_1B_0}\sin[\theta-(\varphi+\varphi_0)] \end{cases} \quad (15)$$

以此类推,可得到凸轮廓线上的任意一点的坐标,将这些点连接起来得到凸轮理论廓线。

3 操动机构合闸凸轮设计实例

3.1 软件界面设计

系统运行后显示主界面见图12。图12中包括数据输入部分和结果输出部分。界面左侧空白用来查看凸轮设计结果。

3.2 合闸凸轮设计与仿真

应用上述软件对126 kV真空断路器配CT20弹簧操动机构的凸轮进行设计。计算得到的凸轮模型见图13。将此凸轮模型导入CT20弹簧操动机构

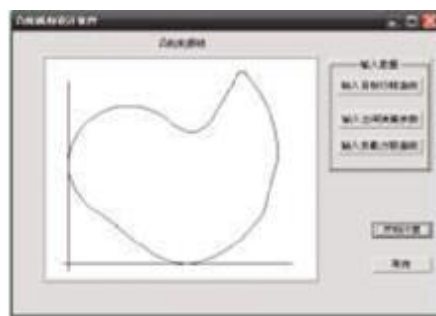


图12 程序主界面

Fig. 12 Main program interface

在ADAMS仿真软件对整机模型进行动态仿真。

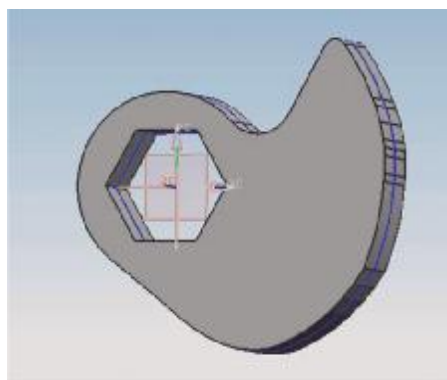


图13 建立的凸轮模型

Fig. 13 Cam model

采用优化凸轮后机构的行程曲线仿真结果见图14。由图14得到,机构动触头在触头碰撞前预击穿开距中的平均合闸速度为

$$\frac{(59.9-56.0)\text{mm}}{(0.0967-0.0934)\text{s}} = 1.18 \text{ m/s}.$$

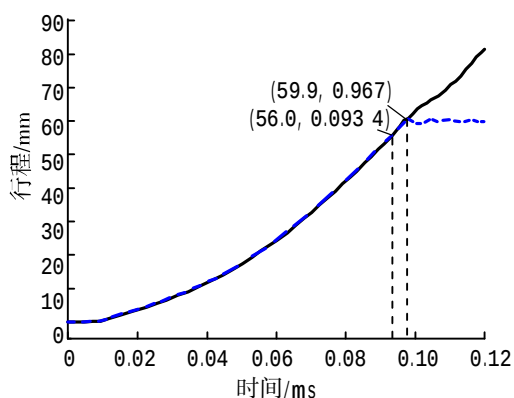


图14 采用优化凸轮后机构的行程曲线仿真结果

Fig. 14 Simulation results of the travel curve of the optimized cam mechanism

与设计目标接近,证明软件的计算结果能很好的满足工程实际应用的要求。

4 结论

文中以126 kV真空断路器为研究对象,为了

减少在合闸过程中产生触头熔焊现象,使触头的合闸燃弧时间最小得到最优合闸速度,并且以此速度为目标,对 126 kV 真空断路器配 CT20 型弹簧操动机构的凸轮进行优化设计。

1)126 kV 真空断路器合闸燃弧时间与合闸速度的数学关系,通过该函数可得到在预击穿合闸速度为 1.15 m/s 时,126 kV 真空断路器合闸燃弧时间最短。

2)根据真空断路器的目标合闸行程曲线,确定曲线上每个点对应的输出轴的转角,根据合闸弹簧所需要的能量确定储能轴转角,最后根据输出轴转角与储能轴转角的传动比确定凸轮的轮廓曲线。

3)设计的凸轮利用 ADAMS 仿真软件对整机进行运动仿真计算,得到预击穿速度为 1.18 m/s,表明此设计软件能很好的满足工程设计的要求。

参考文献:

- [1] 刘志远,耿英三,王季梅. 高电压真空断路器的技术进展[J]. 电气时代,2008(1): 80-84.
LIU Zhiyuan, GENG Yingsan, WANG Jimei. Introduction of high voltage vacuum circuit breaker technologies [J]. Electrical Age, 2008(1): 80-84.
- [2] JIANG Congjian, HENG Fang, LI Tao, et al. Development of BVAC.N99B1 vacuum circuit breaker [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(2): 40-43.
- [3] 李建基. 中压真空断路器的发展[J]. 电工电气, 2002(5): 1-5.
LI Jianji. Development of medium voltage vacuum circuit breaker[J]. Electrical and Mechanical Services, 2002(5): 1-5.
- [4] KISLIUK P. Arcing at electrical contacts on closure-part V the cathode mechanisms of extremely short arcs[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(7): 897-900.
- [5] KOREN P P, SLADE P G, LIN C Y. Welding characteristics of Ag-W contacts under high-current conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1980, 3(1): 50-55.
- [6] 张敬菽,陈德桂,游一民,等. 真空灭弧室预击穿的测量与分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 84-90.
ZHANG Jingshu, CHENG Degui, YOU Yimin, et al. Measurement and analysis of pre-breakdown in vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 84-90.
- [7] 李天和. 大功率开关装置的物理基础与工程应用[M]. 程礼椿,译. 北京: 电力工业出版社, 1982.
LI Tianhe. Physical foundation and application of high power switchgear[M]. CHENG Lichun, Translated. Beijing: Electric Power Industry Press, 1982.
- [8] SLADE P G. The vacuum interrupter: theory, design, and application[M]. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008: 304-318.
- [9] 刘向军. 开关电器触头熔焊机理分析[J]. 低压电器, 2006(9): 11-14.
LIU Xiangjun. Analysis of welding mechanism of switch electrical contacts[J]. Low Voltage Apparatus, 2006(9): 11-14.
- [10] SLADE P G. Electrical contacts[M]. New York: Marcel Dekker, 1999: 513-519.
- [11] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
SHU Delin. Mechanical properties of metal[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.
- [12] 于力,刘志远,王东,等. 真空断路器触头熔焊性能的研究综述[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 64-68.
YU Li, LIU Zhiyuan, WANG Dong, et al. Summary of the research on the fusion welding performance of vacuum circuit breaker contact[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 64-68.
- [13] 游一民,陈德桂,张银昌,等. 真空断路器关合速度与预击穿对同步关合的影响[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 85-89.
YOU Yimin, CHEN Degui, ZHANG Yinchang, et al. Effect of closing speed and pre-breakdown on synchronous closing of vacuum circuit breaker [J]. Techniques in Electrical Engineering, 2004, 19(7): 85-89.
- [14] 国家电力公司发输电运营部. 供电生产常用指导性技术文件及标准: 高压开关设备[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Transmission and Distribution Department of State Power Corporation. Technical guidance and standard for power supply production: High voltage switchgear[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [15] 楼家法. 高压开关机构设计[M]. 天津: 机械工业出版社, 1981.
LOU Jiafa. High voltage switch mechanism design [M]. Tianjin: Mechanical Industry Press, 1981.
- [16] 谭蓉. 110 kV 三相双断口真空断路器弹簧操动机构设计方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
TAN Rong. Research on design method of spring operating mechanism for 110 kV three-phase double-break vacuum circuit breaker [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [17] 苑舜. 高压断路器弹簧操动机构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

- YUAN Shun. High voltage circuit breaker spring operating mechanism[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [18] BARKAN P. The mechanical phenomena of circuit breakers[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- [19] 谭 蓉, 姜 琪, 张恩克. 按输出力(力矩)特性曲线设计凸轮机构[J]. 甘肃工业大学学报, 2000, 26(2): 16-19.
- TAN Rong, JIANG Qi, ZHANG Enke. Design of cam mechanisms according to output force characteristic curves[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2000, 26(2): 16-19.
- [20] 谭 蓉. 110 kV 三相双断口真空断路器弹簧操动机构设计方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- TAN Rong. Research on design method of spring operating mechanism for 110 kV three-phase double-break vacuum circuit breaker[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [21] KHARIN S N, NOURI H, AMFT D. Dynamics of arc phenomena at closure of electrical contacts in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5): 1576-1581.
- [22] 余 砾. 高电压等级真空断路器机械特性的优化设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
- YU Li. Optimization design for mechanical characteristics of high voltage vacuum circuit breakers[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2011.
- [23] 闫 静, 马志瀛, 金 黎. 真空断路器弹簧操动机构凸轮机构的优化设计[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 420-423.
- YAN Jing, MA Zhiying, JIN Li. Optimum design of cam mechanism for spring operating mechanism of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6): 420-423.
- [24] 约翰.F. 加德纳. 机构动态仿真——使用 MATLAB 和 SIMULINK[M]. 周进雄, 张 陵, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- GARDNER J F. Dynamic agency simulation-the use of MATLAB and SIMULINK[M]. ZHOU Jinxiong, ZHANG Ling, Translated. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- 李永林(1981—), 男, 工程师, 从事高压开关相关技术研究。
- 余 砾(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高压真空断路器的特性研究以及高压弹簧操动机构的设计。
- 李旭旭(1986—), 男, 工程师, 从事高压开关相关技术研究。
- 韩桂全(1983—), 男, 工程师, 从事高压开关相关技术研究。
- 刘 佩(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事电场计算分析 & 多断口真空断路器均压技术的研究。
- 王铭飞(1985—), 男, 助理工程师, 高压开关研发及相关技术研究。
- 张博健(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向高电压等级真空断路器技术。
- 闫 静(1973—), 男, 讲师, 从事新型高压电器、智能化电气设备的研究工作。
- 刘志远(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压等级真空断路器技术和真空电弧理论研究。