

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.031

按输出力特性曲线设计凸轮轮廓曲线

程俊文, 李俊蒂, 桓露, 杨晨, 潘红伟

(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830001)

摘要: 针对以往设计断路器弹簧操动机构均是先确定满足动触头速度特性的输出力特性;再根据所需输出特性按照功或功率相等的等效原则计算动触头各行程下的凸轮轮廓半径;最后拟合出凸轮轮廓曲线。文中以设计真空断路器弹簧操动机构上配备的摆动滚子从动件盘形凸轮合闸行程中的轮廓曲线为模型,在以往的设计方法上提出了利用速度瞬心和微积分原理求得凸轮轮廓曲线的方法,该方法解决了传统设计方法繁琐的重复计算,不仅能方便的得到满足输出力特性曲线的凸轮轮廓,并能快速得到凸轮上各行程的压力角。用该方法得出的真空断路器合闸过程中的凸轮轮廓曲线与实际凸轮轮廓曲线进行对比,验证了方法的正确性,对设计弹簧操动机构中满足理想合闸特性的凸轮轮廓具有一定的借鉴意义。

关键词: 真空断路器; 弹簧操动机构; 合闸过程; 凸轮轮廓曲线

Design of Cam Profile Curve Based on the Output Power Characteristic Curve

CHENG Junwen, LI Jundi, HUAN Lu, YANG Chen, PAN Hongwei

(State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd. Electric Power Research Institute, Urumqi 830001, China)

Abstract: In the past, the circuit breaker spring operating mechanism was designed to first determine the output force characteristics satisfying the velocity characteristics of the moving contact, and then calculate the cam profile radius of the moving contact under each stroke according to the equivalent principle of equal work or power according to the required output characteristics. Finally, the cam profile curve is fitted. In this paper, the contour curve in the closing stroke of the wobbler-follower disc camshaft equipped on the spring operating mechanism of the vacuum breaker is designed as a model. In the previous design method, the principle of using the instantaneous center of the speed and calculus is proposed. The method of the cam profile curve solves the cumbersome repeat calculation of the conventional design method, and can not only easily obtain the cam profile satisfying the output force characteristic curve, but also quickly obtain the pressure angle of each stroke on the cam. The comparison of the cam profile curve and the actual cam profile curve during the closing process of the vacuum circuit breaker obtained by this method verifies the correctness of this method, and has a certain degree of design for the cam profile that meets the ideal closing characteristics in the spring operating mechanism. The design of the spring operating mechanism to meet the ideal closing characteristics of the cam profile has a certain reference value.

Key words: vacuum circuit breaker; spring operating mechanism; closing process; cam mechanism

0 引言

对于指定的真空断路器,分析其负载情况可以得到等效阻力曲线^[1-3],见图1中曲线1。由于超行程阶段触头弹簧的反力作用且触头弹簧的初始压力

较大,所以曲线1在由正常行程进入超程时会出现阶跃^[4]。而合闸弹簧的输出力特性见图1中曲线2。这与能保证断路器可靠合闸所需的输出力特性曲线(见图1中曲线3)匹配较差。所以,弹簧操动机构设计的要点是将合闸弹簧出力特性曲线2经过操动机

构传动后能够得到与负载特性曲线1更好匹配的出力特性曲线3^[5-7]。

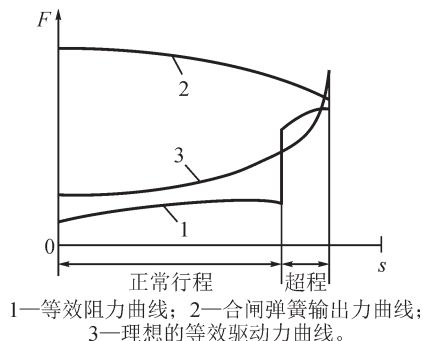


图1 等效力曲线

Fig. 1 Equivalent Curve

弹簧操动机构的传动机构通常是由凸轮—连杆机构串联而成^[8-9]。要使曲线2能变换为曲线3的形式通过连杆机构很难实现,这是由于在传动过程中连杆机构的传动比变化不大,只是起到传递力和运动的作用,因而用凸轮机构来改变传动比是比较合适的选择^[10-11]。

文中基于所需的出力特性曲线3,在已知弹簧操动机构合闸弹簧力曲线2的情况下,运用功或功率相等的等效原则得到整个操动机构的传动比,再结合各基本机构分析得到凸轮机构的传动比^[12-13]。在上述基础上区别于以往凸轮设计方法,将速度瞬心和微积分原理应用在凸轮设计中,方便的得到凸轮合闸行程中的轮廓半径和压力角。此理论方法对于摆动滚子从动件凸轮轮廓设计具有一定的通用性,并在实际样机中验证了其正确性和可行性,这对弹簧操动机构配用的凸轮设计提供了一种新的思路和方法。

1 凸轮传动比计算

根据动触头在合闸过程中所需的运动特性,在动触头上运用动能定理可得到动触头上等效输出动力 F_d 与动触头行程 s 之间的关系式^[14],即

$$\int_0^s (F_d - F_z) ds = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

式(1)中: m 为等效在动触头上的质量; v 为动触头的速度; F_z 为动触头上等效阻力。

将所需的动触头运动速度 v 代入式(1)可得所需的动触头等效输出动力 $F_d=f(s)$,其为动触头位移 s 的函数。

对于任意形式的合闸弹簧,其输入机构的力矩 M 均可表示为凸轮转角 θ 的函数 $M=M(\theta)$ 。若不考虑摩擦损耗,机构的输入功率应等于动触头的输出功率,从而有

$$F_d v = M \omega \quad (2)$$

$$\frac{F_d}{M} = \frac{\omega}{v} = \frac{d\theta}{ds} = C \quad (3)$$

$$C = C_{cam} \cdot C_{link} = \frac{d\theta}{d\eta} = \frac{d\eta}{ds} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: η 为从动件摆角; ω 为驱动凸轮的角速度。

连杆机构的传动比只与机构的尺寸和位置有关,根据平面连杆机构的运动分析即可得到从动件摆角 η 与动触头位移 s 之间的关系 $\eta=\eta(s)$ 。

$$\int_0^s F(s) ds = \int_{\theta_0}^{\theta} M(\theta) d\theta \quad (5)$$

由式(5)可得凸轮转角 θ 与动触头位移 s 之间的函数关系式 $s=s(\theta)$,由以上计算即可得到从动件摆角 η 与凸轮转角 θ 的函数关系 $\eta=f(\theta)$,进而得到凸轮的传动比 $\frac{d\eta}{d\theta}$ 。

2 凸轮轮廓尺寸计算

由以上计算分析可知,设计弹簧操动机构配用的凸轮机构时,确定了连杆机构的位置和长度后,根据所需的出力特性曲线即可得到凸轮机构的传动比函数关系式^[15-16]。对于摆动滚子从动件凸轮机构其运动示意图见图2^[17-21]。

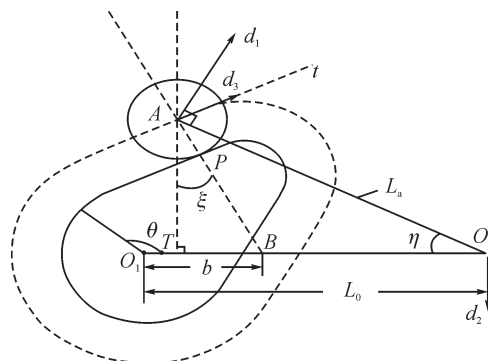


图2 摆动滚子从动件凸轮机构运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the swinging roller follower cam mechanism

凸轮绕 O_1 逆时针转动推动其摆动滚子从动件绕 O_2 顺时针转动,过凸轮与滚子的切点 P 作切线的垂线交 O_1O_2 于点 B ,由运动学分析可知点 B 为凸轮与摆动从动件的速度瞬心,根据速度瞬心的定义有

$$b d\theta = (L_0 - b) d\eta \quad (6)$$

式(6)中, $O_1B=b$ 。由此可得

$$b = \frac{L_0 \frac{d\eta}{d\theta}}{1 + \frac{d\eta}{d\theta}} \quad (7)$$

过滚子中心 A 作中心距 O_1O_2 的垂线交其于 T ,

记 $\xi = \angle TAB$, 则有

$$\tan \xi = \frac{b - (L_0 - L_0 \cos \eta)}{L_0 \sin \eta} \quad (8)$$

若将凸轮固定而顺时针转动机架 $d\theta$ 角度, 则从动件固定点 A 将垂直向下运动矢量 d_2 , 其大小为 $|d_2| = L_0 d\theta$; 与此同时, 从动件摆臂 O_2A 转动的角度为 $d\theta + d\eta$, 则滚子中心 A 相对于 O_2 点的位移矢量为 d_1 , 其方向垂直于摆臂, 大小为 $|d_1| = L_a(d\theta + d\eta)$ 。而滚子中心 A 的实际位移为 d_3 , 其运动方向为切线 t 的方向, 矢量大小为 $|\sigma|$, 由矢量关系 $d_3 = d_1 + d_2$ 可得

$$d\sigma = \sqrt{(|d_1| \sin \eta)^2 + (|d_1| \cos \eta - |d_2|)^2} \quad (9)$$

式(9)取 θ 的微分有

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \sqrt{\left[L_0 \left(1 + \frac{d\eta}{d\theta} \right) - L_0 \cos \eta \right]^2 + (L_0 \sin \eta)^2} \quad (10)$$

根据图2所示, 矢量 d_3 的方向角 α 变化的微分 $d\alpha$ 与 $d\theta$ 和 $d\xi$ 的关系为

$$d\alpha = d\theta - d\xi \quad (11)$$

而由式(6)对凸轮转动角 θ 求微分后可得

$$\frac{db}{d\theta} = \frac{L_0 \frac{d^2 \eta}{d\theta^2}}{\left(1 + \frac{d\eta}{d\theta} \right)^2} \quad (12)$$

将式(8)取 θ 的微分并结合式(12)可得

$$\frac{d\xi}{d\theta} = \frac{(\cos \xi)^2}{L_0 \sin \eta} \left[\frac{db}{d\theta} - \frac{d\eta}{d\theta} \frac{(b - L_0) \cos \eta}{\sin \eta} \right] \quad (13)$$

结合式(10)–(13), 可得凸轮的啮合曲线半径 R 为

$$R = \frac{d\sigma}{d\alpha} = \frac{d\sigma/d\theta}{d\alpha/d\theta} = \frac{(d\sigma/d\theta)}{1 - d\xi/d\theta} \quad (14)$$

在摆动从动件凸轮机构中有如下关系式。

$$\cos \eta = \frac{L_0^2 + L_a^2 - \rho^2}{2 \times L_0 \times L_a} \quad (15)$$

根据压力角的定义, 此凸轮机构的压力角 ψ 为

$$\psi = \eta + \xi \quad (16)$$

结合式(8)、(14)–(16)可求出所设计的凸轮在任意行程时的压力角 ψ 。

求出啮合曲线后将其向内等距滚子半径即可得到凸轮的轮廓半径。该方法引入速度瞬心和运用微积分中半径的微分表示, 能方便的求出凸轮任意转角的啮合半径及其轮廓半径。

3 实验验证

上述理论的正确性和可行性验证根据某公司的铁道用 GSR 27.5 kV/2 500 A 型真空断路器样机在实际合闸过程中的动触头位移曲线得到动触头上

所需的等效动力特性曲线, 然后根据以上理论求得弹簧操动机构配用的凸轮轮廓, 将理论值与实际样机中的凸轮在合闸段轮廓曲线进行对比来验证其正确性。其弹簧操动机构的传动简图见图3。

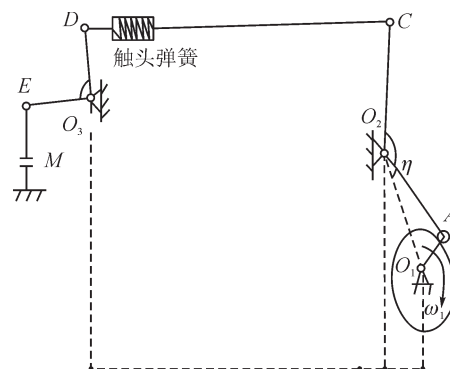


图3 GSR型真空断路器弹簧操动机构简图

Fig. 3 Schematic diagram of GSR vacuum circuit breaker spring operating mechanism

其凸轮和摆动滚子从动件的相对位置与图2有差别, 但分析方法相同。分析过程如上所示, 样机在实际合闸过程中的动触头位移曲线见图4。

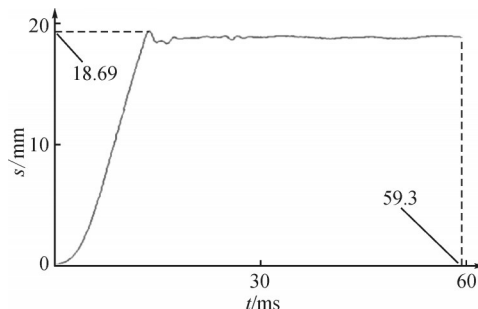


图4 样机实际合闸时动触头位移曲线

Fig. 4 The displacement curve of the moving contact during the actual closing of the prototype

根据分段取平均值的方法得到各样本点的速度为^[22]

$$v_i = \frac{s(i) - s(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \quad (17)$$

将式(17)代入式(1)即可得到使样本点处的合闸速度达到以上值所需的等效输出动力, 在取样点足够多的情况下即可得到准确的等效输出动力曲线 $F(s)$ 。

此弹簧操动机构采用的是平面涡卷弹簧, 根据其设计参数将其输出特性采用线性表达式则有输出力矩 M 对凸轮转角 θ 的函数为

$$M = \frac{6\,000}{5.5} \left(4 - \frac{\theta}{360} \right) + 25\,000 \quad (18)$$

将式(18)代入式(5)求得凸轮转角 θ 与动触头位移 s 之间的函数关系式 $s=s(\theta)$, 结合 $\eta=\eta(s)$ 即可得到凸轮从动件摆角 η 与凸轮转角 θ 之间的函数关系 $\eta=f(\theta)$ 。从而有凸轮机构从合闸开始至刚合点时所需的传动比曲线, 见图5。

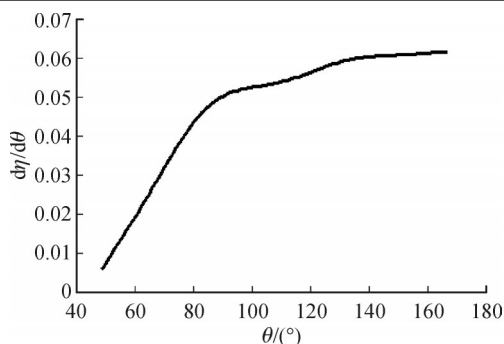


图5 动触头开距行程中所需的凸轮传动比

Fig. 5 Cam gear ratio required for moving contact distance

将样本点处的凸轮传动比值代入式(7)、(10)、(11)、(12)、(14)即可得到基于实际动触头合闸位移曲线求得的凸轮理论啮合半径。将此理论值与样机上的实际凸轮轮廓进行对比来验证理论的正确性,见图6。合闸开距行程中凸轮啮合半径的实际值与理论值分别对应于图6中的曲线1与曲线2。

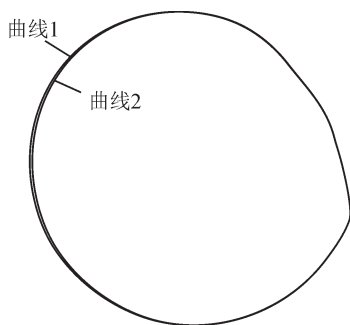


图6 合闸开距行程时凸轮的理论与实际啮合曲线

Fig. 6 The theoretical and actual meshing curve of the cam when closing the opening stroke

其在合闸开距行程段的凸轮啮合曲线理论值 R 与实际值 r 的部分数值对比见表1。

表1 凸轮啮合曲线理论值 R 与实际值 r 的部分数值对比Table 1 Comparison of partial values of theoretical value R and actual value r of cam engagement curve

$\theta/(^\circ)$	R/mm	r/mm	$\theta/(^\circ)$	R/mm	r/mm
50	42.12	42.05	105	45.64	45.99
60	42.31	42.30	115	46.64	47.04
70	42.73	42.79	125	47.69	48.15
80	43.38	43.53	135	48.80	49.30
85	43.79	43.98	145	49.96	40.47
90	44.22	44.46	155	51.14	51.66
95	44.68	44.95	165	52.34	52.85

由图6可看出,由上述理论方法计算出的凸轮啮合曲线半径与凸轮实际啮合曲线基本吻合,而凸轮实际轮廓是在啮合半径基础上向内等距摆动滚子从动件滚子的半径即可。等距后两者的差别将可以忽略不计,由此可以证明设计方法是正确可行的。

在计算过程中由于凸轮与从动件的安装位置和凸轮轮廓尺寸的差别,速度瞬心的位置和切线方向角变化的微分可能在计算上产生符号的差别,计算中切线方向角变化则是 $d\alpha = d\theta + d\xi$ 。

经过以上实验验证以及数据对比,以输出力特性曲线的凸轮设计在引入速度瞬心和微积分中半径的微分表示后,对于摆动滚子从动件凸轮机构其设计计算方法具有一定的通用性,并且结合具体机构也验证了其正确性和可行性。

4 结语

为保证动触头能够按要求完成合闸动作,根据输出力特性曲线来设计弹簧操动机构的凸轮机构具有很好的可行性,在以往设计方法的基础上引入速度瞬心和微积分基本方法后,能够快速得到所需的凸轮轮廓,而且能方便的验证压力角是否满足设计要求。

参考文献:

- [1] 楼家法. 高压开关机构设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
LOU Jiafa. Design of high voltage switch mechanism[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.
- [2] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1989.
ZHANG Guansheng. Theoretical basis of electrical appliances[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.
- [3] 汪利, 张益成. 按输出力特性曲线设计凸轮机构[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(4):85-88.
WANG Li, ZHANG Yicheng. Design of cam mechanism based on output force characteristic curve[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(4):85-88.
- [4] 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 breaker spring operating mechanism[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [5] 贝伊尔R. 机构运动学综合[M]. 北京:机械工业出版社, 1987.
BEYLE R. Institutional kinematics synthesis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987.
- [6] 楼家法. 从速度特性寻求断路器设计的准则[J]. 高压电器, 1989, 25(2):10-13.
LOU Jiafa. Seeking the criteria for circuit breaker design from speed characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(2):10-13.
- [7] 冯文伶, 成守勇. 弹簧操动机构合闸驱动凸轮的设计[J]. 高压电器, 1995, 31(5):31-33.
FENG Wenyu, CHENG Shouyong. Design of closing drive

- cam of spring operation mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(5):31-33.
- [8] 闫 静, 马志瀛, 金 黎. 真空断路器弹簧操动机构中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. Optimized design of the cam mechanism in vacuum actuator spring operation mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6):420-423.
- [9] 苑 舜, 王季梅, 谢国辉, 等. 从动力配合角度对真空断路器弹簧操动机构进行优化设计[J]. 高压电器, 1994, 30(5):3-7.
YUAN Shun, WANG Jimei, XIE Guohui, et al. Optimum design of vacuum interrupter spring operating mechanism from the perspective of power cooperation[J]. High Voltage Apparatus, 1994, 30(5):3-7.
- [10] KIM J H, KY A A. Optimal synthesis of a spring-actuated cam mechanism using a cubic spline[J]. Journal of Mechanical Engineering Science 2002, 6(8):216-245.
- [11] TZENG F C. On the dynamics of a spring-type operating mechanism for a gas-insulated circuit breaker in open operation using the Lagrange equation[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2002, 216(8):831-843.
- [12] JEONG G Y. Optimization of the spring design parameters of a circuit breaker to satisfy the specified dynamic characteristics[J]. Precision Engineering and Manufacturing, 2004, 5(4):43-49.
- [13] KIM K Y. Influence of spring dynamics and friction on a spring-actuated cam system[J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 71(8): 497-508.
- [14] 王连鹏, 王尔智. 真空断路器弹簧操动机构仿真与优化[J]. 高电压技术, 2006, 32(6):27-29.
WANG Lianpeng, WANG Erzhi. Simulation and optimization of vacuum circuit breaker spring operation mechanism [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6):27-29.
- [15] 陈保伦, 文亚宁. 断路器弹簧操动机构介绍[J]. 高压电器, 2010, 46(10):75-80.
CHEN Baolun, WEN Yaning. Introduction of circuit breaker spring operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10):75-80.
- [16] 申冰冰. 实用机构图册[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
SHEN Bingbing. Practical institution atlas[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
- [17] 苑 舜. 真空断路器操动机构的设计与优化[M]. 北京:中国电力出版社, 1997.
YUAN Shun. Design and optimization of vacuum circuit breaker operating mechanism[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [18] 吴 吉, 吕 鸿, 王流火, 等. 断路器槽凸轮曲线和负载特性的匹配[J]. 电气应用, 2015(13):76-83.
WU Ji, LYU Hong, WANG Liuhuo, et al. Matching of cam-shaft cam curves and load characteristics[J]. Electrical Applications, 2015(13):76-83.
- [19] 刘 洋, 赵中亭, 胡占楼. 高压真空断路器操动机构可靠性分析[J]. 电气制造, 2014(10):40-42.
LIU Yang, ZHAO Zhongting, HU Zhanlou. Reliability analysis of the operating mechanism of high voltage vacuum circuit breaker[J]. Electrical Manufacturing, 2014(10):40-42.
- [20] 成守勇, 李 跃, 臧凤欣, 等. 弹簧操动机构中凸轮的优化设计[J]. 电气制造, 2009(3):54-55.
CHENG Shouyong, LI Yue, ZHANG Fengxin, et al. Optimal design of cam in spring operation mechanism[J]. Electrical Manufacturing, 2009(3):54-55.
- [21] 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. Optimization design of closing cam of vacuum circuit breaker spring operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):205-210.
- [22] 李永林, 余 砾, 李旭旭, 等. 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[J]. 高压电器, 2017, 53(3):197-204.
LI Yonglin, YU Li, LI Xuxu, et al. Design of 126 kV vacuum circuit breaker operating mechanism cam profile based on optimal closing speed[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):197-204.
- 程俊文(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为真空断路器机械设计研究。
- 李俊蒂(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压开关以及高电压绝缘技术。
- 桓 露(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要从事中压开关机械设计研究。
- 杨 晨(1992—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事中压开关机械设计研究。
- 潘红伟(1986—), 男, 本科, 技师, 主要从事中压开关电气性能研究。