

# 方形与圆形永磁机构的比较

游一民<sup>1,2</sup>, 陈德桂<sup>1</sup>, 孙志强<sup>1</sup>, 王胜林<sup>3</sup>, 刘向军<sup>4</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安高压电器研究所, 陕西, 西安 710077;  
3. 陕西警官职业学院, 陕西 西安 710043; 4. 华北电力大学, 北京 102206)

## Comparison between Square and Circular Permanent Magnet Mechanism

YOU Yi-min<sup>1,2</sup>, CHEN De-gui<sup>1</sup>, SUN Zhi-qiang<sup>1</sup>, WANG Sheng-lin<sup>3</sup>, LIU Xiang-jun<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Police Vocational College, Xi'an 710043, China;  
4. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘要:** 通过对方形与圆形永磁机构动特性的计算,对两种机构的性能进行了比较。在满足真空断路器分、合闸速度特性的情况下,圆形机构的铁心和永久磁铁的质量、机构的体积与总重量都明显小于方形机构,而且在分、合闸操作过程中,分、合闸线圈的峰值电流和消耗的能量也较小,但方形机构的结构比较灵活,它可以在维持长度不变的条件下,在厚度方向扩展,以满足断路器机构箱体尺寸的要求,同时方形机构有利于发展系列化产品。

**关键词:** 真空断路器; 方形永磁机构; 圆形永磁机构

**中图分类号:** TM561

**文献标识码:** A

**Abstract:** The paper describes the dynamic characteristics of square and circular permanent magnet mechanisms. On condition of satisfying the dynamic characteristics of vacuum circuit breaker, the masses of iron core and permanent magnet, the size and the total weight of the mechanism with circular structure are obviously less than those with square one. Furthermore, compared with the square structure, consumption energy and the peak value of the operation current with the circular structure are less too. On the other hand, the structure with the square type is more flexible. Its width can be extended to meet the requirement of the mechanism roomsize while the length remains unchanged. Meanwhile, it is easier to develop a series of products.

**Key words:** vacuum circuit breaker;

square permanent magnet mechanism;

circular permanent magnet mechanism

## 1 引言

近年来,一种用于中压真空断路器的永磁保持、电子控制的电磁操动机构(简称永磁机构)在户内、户外中压断路器领域对传统的弹簧机构提出了挑战,引起了开关行业的关注。它的原理、结构特点、性

能以及与其相配的免维护真空断路器的开发研制已成为电器制造企业和运行部门的热点。

从国内及国外永磁机构的产品可以看出,永磁机构的形状大致有两种:一种为圆形,另一种为方形。ABB Calor Emag 开关设备公司研制出了 VM1 型真空断路器所配的永磁机构为方型<sup>[1]</sup>。英国的 Whipp & Bourne 公司生产的 GVR 柱上真空断路器上的永磁机构,其形状为圆形,见图 1。

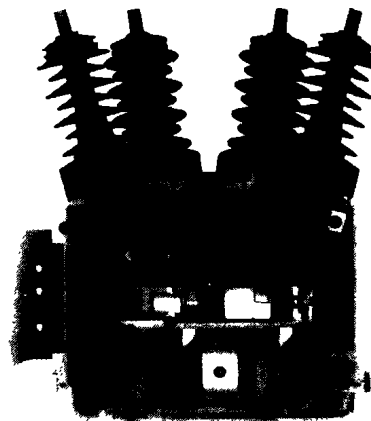


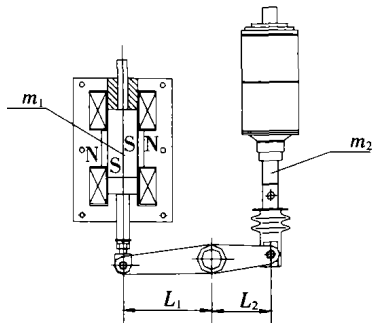
图 1 GVR 柱上真空断路器

近几年国内生产的永磁机构也有圆形和方形两种,例如西安高压电器研究所设计的 ZW33 型户外柱上真空断路器的永磁机构为方形, ZW33A 型户外柱上真空断路器的永磁机构为圆形,南京自动化研究所生产的 ZW 型户外柱上真空断路器的永磁机构也为圆形。那么,到底是哪种机构更优,或者是在什么情况下选用哪一种机构,可以通过对机构及断路器进行静态和动态特性分析,得出一个优选的方案。

## 2 静态和动态性能分析

电磁机构的动态方程,在电路上必须遵循电压平衡方程,在运动上必须遵循达朗贝尔运动方程,在磁场上必须遵循麦克斯韦方程,这些方程间存在相

互的联系,构成了描述动态过程的微分方程组<sup>[2]</sup>。图2所示为一种双线圈式永磁机构,当机构的线圈通过电容器进行放电时(电容器上的电压为*U*),线圈电流由零开始逐渐增加,若线圈电阻为*R*,忽略铁心中的涡流,对线圈回路可写出电路微分方程和机构动作方程如下:



*m*<sub>1</sub>, *m*<sub>2</sub>——灭弧室动触头和机构动铁心的质量

图2 开关及永磁机构的动作原理图

$$\frac{d\Phi}{dt} = u_c - iR \quad i = C \frac{du_c}{dt} \quad (\text{电容器放电})$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_c L_1^2 - F_r L_1 L_2 - (\eta_1 L_1^2 + \eta_2 L_2^2)v}{J + m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2}$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

$$\Phi = f_1(i, x) \quad F_c = f_2(i, x) \quad F_r = f_3(x)$$

初始条件为:  $\Phi|_{t=0} = 0, v|_{t=0} = 0, x|_{t=0} = 0$ 。

式中:*i*为线圈电流; $\Phi$ 为通过线圈的磁链;*U*为直流电源电压;*C*为电容器的电容值;*u<sub>c</sub>*为电容器上的电压;*R*为回路电阻; $\eta_1$ 为动铁心的阻尼系数; $\eta_2$ 为灭弧室的阻尼系数;*J*为拐臂的转动惯量;*v*为铁心运动速度;*x*为铁心行程;*L<sub>2</sub>*为灭弧室动触头距转动轴的距离;*L<sub>1</sub>*为永磁机构距转动轴的距离;*F<sub>c</sub>*为机构的输出力,包括线圈电流产生的电磁力、永久磁铁产生的永久磁力,在机构及永久磁铁一定的情况下,它是电流*i*和行程*x*的函数。如果给定一个动铁心的位置和电流的大小,采用有限元非线性磁场的计算方法,可以计算出不同工作气隙下和不同线圈电流下的磁场分布及静态吸力特性<sup>[3]</sup>。*F<sub>r</sub>*为反作用力,是行程*x*的函数,对于真空断路器而言,它由触头弹簧、分闸弹簧、灭弧室的自闭力,灭弧室在分闸状态下的反力以及摩擦阻力组成。

该微分方程组可直接用数值法求解,将时间变量*t*离散化,用四阶Runge-Kutta法求解,编制了永磁机构的动特性计算软件。软件采用可视化仿真技术,前处理部分采用人机对话的形式输入真空断路器的负载特性和传动装置几何参数,计算方法采用有限元与机械、电路瞬态方程耦合算法,后处理不但可输出开关行程、速度、线圈电流和电磁吸力随时间的变化曲线,并且可以三维动画形式表示机构运动过程。该软件通过了试验验证<sup>[4]</sup>。使用该软件对方形

与圆形机构的动特性进行了计算。

为了更好地比较两种机构的动特性以及机构的体积,假设两种机构的合、分闸保持力相同,分、合闸线圈的窗口截面积分别相等,传动比相同(以传动比为1:1.57为例),机构动铁心的行程相同,表1示出了方形与圆形机构的分合闸特性比较。

表1 方形机构与圆形机构的合、分闸特性

形状	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>I<sub>分</sub></i>	<i>I<sub>合</sub></i>	<i>v<sub>1分</sub></i>	<i>v<sub>2分</sub></i>	<i>v<sub>合</sub></i>
圆形	1.3	432	1.63	18.31	18.86	0.66	0.73	0.51
	1.4	375	1.21	21.85	23.24	0.72	0.80	0.55
	1.5	336	0.94	25.14	27.50	0.76	0.86	0.58
	1.6	286	0.71	30.76		0.82	0.94	
	1.7	252	0.56	36.35		0.87	1.00	
方形	1.3	432	2.09	19.21	20.61	0.65	0.71	0.45
	1.4	375	1.56	23.05	24.97	0.70	0.78	0.51
	1.5	336	1.22	26.72	29.23	0.75	0.85	0.54
	1.6	286	0.91	33.16		0.82	0.93	
	1.7	252	0.71	39.81		0.88	1.00	

注:①*d*——线圈的线径/mm *N*——线圈的匝数 *R*——线圈的直流电阻/ $\Omega$  *I<sub>分</sub>*, *I<sub>合</sub>*——线圈在分合闸时的峰值电流/A  
*v<sub>1分</sub>*——真空灭弧室在刚分6 mm时的平均分闸速度/( $m \cdot s^{-1}$ )  
*v<sub>2分</sub>*——真空灭弧室全程的平均分闸速度/( $m \cdot s^{-1}$ )  
*v<sub>合</sub>*——真空灭弧室全程的平均合闸速度/( $m \cdot s^{-1}$ )  
 ②圆形永磁机构尺寸 $\phi 140 \text{ mm} \times 132 \text{ mm}$ ,动铁心质量1.67 kg,永久磁铁质量0.511 kg,永磁机构产品总质量12.84 kg;方形永磁机构尺寸 $161 \text{ mm} \times 179 \text{ mm} \times 153 \text{ mm}$ ,动铁心质量3.28 kg,永久磁铁质量0.614 kg,永磁机构产品总质量20.23 kg。

图3为永磁机构分闸时,分闸线圈的峰值电流与平均分闸速度的关系。图4为永磁机构合闸时,合闸线圈的峰值电流与平均合闸速度的关系。从图3,图4可以看出,如果要使断路器达到相同的分、合闸速度,方形机构需要的分、合闸线圈的电流较圆形机构的电流大。也可以说,对于两种机构而言,相同的分、合闸电流,配圆形机构的断路器所获得的分、合闸速度略有增加。从这一点看,圆形机构优于方形机构。

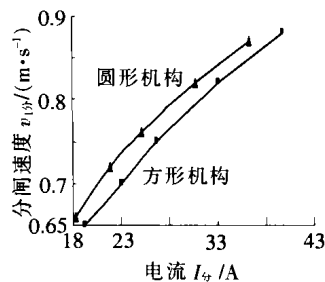


图3 分闸线圈峰值电流与平均分闸速度的关系

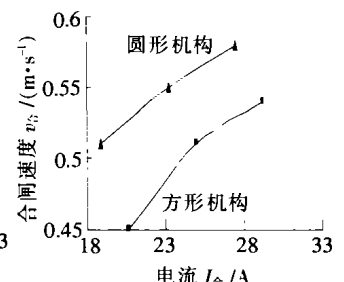


图4 合闸线圈峰值电流与平均合闸速度的关系

从表1可以看出,在机构的合闸、分闸保持力相同,其分、合闸线圈的窗口截面积分别相等,传动比相同,机构动铁心的行程相同,非工作气隙相同的情况下,圆形机构的动铁心质量为1.67 kg,永久磁铁的质量为0.511 kg,机构的总质量为12.84 kg;而方形机构的动铁心质量为3.28 kg,永久磁铁的质量为0.614 kg,机构的总质量为20.23 kg。可见,无论机构铁心的质量还是机构的体积与总质量,方形机构都明显大于圆形机构。同时动铁心的质量大,在分、合

闸操作过程中,消耗的能量就大。永久磁铁的质量大,就会增加产品的成本。因此,单从机构本身出发,圆形机构优于方形机构。

表1仅对某种特定结构与尺寸的方形机构与圆形机构进行了比较,为了说明其普遍性,可以从以下两方面进行分析。

(1)从表1可以看出,方形机构中的永久磁铁的质量稍大于圆形机构中的永久磁铁的质量,这是由于圆形机构是一个轴对称结构,铁心沿圆周的磁场是均匀的,而方形机构的磁场在厚度方向是不均匀的。因此,当方形机构沿厚度方向中间的磁场已达到饱和,而边缘的磁场却很小,为了使合闸保持力达到要求,方形机构的永久磁铁的体积大于圆形机构永久磁铁的体积。从表1还可以看出,方形机构中动铁心的质量明显大于圆形机构中动铁心的质量。在圆形机构中,由于永久磁铁是均匀地分布在动铁心的圆周上,而方形机构的永久磁铁只能在动铁心的两侧,要达到同样的表面积,方形机构永久磁铁的高度就大于圆形机构永久磁铁的高度,方形机构中动铁心的高度就较大,因此,方形机构中动铁心的质量明显大于圆形机构中动铁心的质量。

(2)圆形永磁机构线圈全部被磁轭包围,线圈的一周都能与铁心、磁轭及工作气隙形成闭合磁路。然而,对于方形机构,它的其中两侧的线圈被磁轭包围,能与铁心、磁轭及工作气隙形成闭合磁路,而另外两侧的线圈不被磁轭包围,不能形成闭合磁路。同样的电流所产生的磁力较小。并且,由于方形机构动铁心的质量大,在分、合闸操作过程中,消耗的能量较大。

但是,圆形机构也有不利的因素,即它的机构不灵活。如在有些产品的设计中,机构所占用的空间在某个方向的尺寸上是有一定限制的,例如ABB公司

的VM1型真空断路器的机构箱深度就只有约160mm,机构的宽度就必须小于160mm。如果用圆形机构,为了克服真空灭弧室的合闸保持力,机构的直径就会大于160mm,因此就不宜实现。而对于方形机构,结构就比较灵活,它可以在保证长度小于160mm的情况下,在厚度方向扩展,使机构满足断路器机构的要求。方形机构的另一个优势是,对于不同开断容量的断路器,机构可以在长度方向保持不变的情况下,在厚度方向扩展,发展出系列产品。由于方形机构的主要部件是冲压件,有利于批量生产。

### 3 结语

方形机构与圆形机构各有其利弊,应该对不同的具体结构进行具体分析,选择适合所配断路器的机构形式。

### 参考文献:

- [1] Z Li, L A Renforth, D W Auckland, et al. Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autoreclose Application [A]. Trends in Distribution Switchgear [C], London, 1998.
- [2] 孟庆龙, 颜威利. 电器数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [4] You Yiming, Chen Degui. The Optimal Design Parameters Selection of Permanent Actuator for Vacuum Circuit Breaker Based on Dynamic Characteristic Analysis [A]. 10th ISDEIV Proceedings[C], Tours, France, 2002.

作者简介:游一民(1963-),女,山西人,博士,高级工程师,主攻高压电器及其产品设计。

(上接第435页)

表7 神经网络输出结果

样本	气体的标定值 / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )						神经网络的识别结果 / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
1	0	0	0	0	0	40	0.738 1	0.698 6	3.526 4	2.444 4	0.797 8	40.676 5
2	0	0	0	0	0	30	0.503 6	2.179 0	2.437 0	2.361 6	0.410 7	29.588 0
3	0	0	0	40	0	0	2.104 3	1.856 2	1.025 3	41.964 9	0.134 2	1.957 8
4	0	0	0	30	0	0	2.023 1	1.677 6	1.010 2	34.520 1	0.220 2	1.823 9
5	0	40	0	0	0	0	1.025 6	37.651 3	1.832 0	1.906 4	0.026 5	1.918 8
6	0	30	0	0	0	0	1.103 5	29.399 0	1.243 6	1.959 3	0.041 2	2.051 4
7	0	0	0	0	8	0	0.234 2	0.126 7	0.320 1	2.072 8	7.623 2	0.448 5
8	0	0	0	0	6	0	0.186 2	0.104 2	0.203 0	2.384 4	5.799 9	0.534 9
9	40	0	0	0	0	0	41.138 0	1.164 0	1.265 1	2.038 0	0.268 0	1.379 0
10	30	0	0	0	0	0	29.351 0	1.635 1	1.023 0	1.863 0	0.102 5	1.201 2
11	0	0	40	0	0	0	1.053 0	2.178 0	41.463 0	1.822 0	0.129 0	2.075 0
12	0	0	30	0	0	0	0.977 0	1.042 0	29.466 0	1.045 0	0.068 0	2.125 0

[2] 黄贤武, 郑薇霞. 传感器原理与应用 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995.

[3] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

作者简介: 佟继春(1978-), 男, 硕士研究生, 从事电气设备绝缘在线监测研究。