

# 分瓣电刷在试验机组直流电机中的应用

陈万庆, 王军伟

(兰州电机股份有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 直流电机的容量越大, 相对的电枢电流也就越大。设计上, 大电流直流电机的绕组形式通常采用双蛙绕组, 这种绕组结构形式相对复杂, 影响换向的因素较多。以一台试验机组直流电机使用不同电阻率的电刷进行无火花换区测试, 试验结果对比分析表明: 使用高电阻率的分瓣电刷可以增大电刷横向电阻, 从而减小流过换向元件的短路环流, 消除刷下火花, 改善电机换向。同时, 电刷采用切向错位排列有助于降低换向元件的电抗电势, 从而更好地改善电机的换向性能。

**关键词:** 试验机组; 分瓣电刷; 对比分析; 改善换向

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0097-04

## Application of Split Brush in DC Motor of Test Set

CHEN Wanqing, WANG Junwei

(Lanzhou Electric Corporation, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The larger capacity of the DC motor, the greater relative armature current. In design, the winding form of high current DC motor usually adopts the double frog winding, and this kind of winding structure is relatively complicated, and there are many factors that affect the commutation ability of the DC motor. By using a brush with different resistivity to make sparkless commutation test in DC motor of test set, and based on comparative analysis on the test results, showed the facts that the split brush could increase the lateral resistance by using high resistivity brush, thereby the short circuit circulation of commutating winding was reduced, and brush spark was eliminated, and motor commutation was improved. At the same time, the tangential dislocation array of the brush was helpful to reduce the reactance electric potential of the commutating winding; therefore, the commutation performance of the motor was greatly improved.

**Key words:** test set; split brush; comparative analysis; improve commutation

## 0 引言

大型直流电机的发展关键是要解决换向困难问题。随着直流电机的容量增大, 电枢额定电流及电压相对较大, 随容量电机及换向器的尺寸也要加大。由此带来的问题就是漏磁通增加导致绕组的电抗电势上升, 换向器的线速度升高, 电刷的电流密度增大, 实际电流密度及换向器线速度已经接近电刷参数允许上限。这些不利因素都会使改善电机换向性能的难度加大。

2016年8月为某汽轮发电机厂试验站生产

的三联试验机组试验合格, 各项性能指标完全满足设计性能要求。此三联试验机组是兰州电机股份有限公司目前生产容量最大的试验机组, 机组试验过程中曾经遇到直流电机换向火花大, 换向器表面积碳、电刷烧损等问题。

## 1 直流电机的基本参数

### 1.1 电机基本数据

直流电机参数: 型号 ZS1250/500, 功率 2 750 kW, 额定电压 830 V, 额定电流 3 502 A, 极数  $2p=6$ , 转速 750 r/min, 电枢槽数  $Z=105$ , 换向

作者简介: 陈万庆(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计。

王军伟(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机试验。

器片数  $K=315$ , 电刷电流密度  $9.12 \text{ A/cm}^2$ , 换向器表面线速度  $31.4 \text{ m/s}$ , 绕组形式双蛙绕组, 并联支路数  $2a=24$ , 每极电刷数 20、电刷呈双排布置。

### 1.2 分瓣电刷的构造与换向性能

分瓣电刷是用同种牌号电刷块料按要求加工成规格完全相同的刷瓣, 再将若干个刷瓣用有机胶粘合在电刷压板上所构成的一种组合刷体。刷体尾部可根据需要每个刷瓣分别种植或整刷种植刷瓣。使用时, 一只分瓣电刷占据刷盒的一个刷孔, 用一只刷簧压紧。分瓣电刷可做成二分瓣、三分瓣、四分瓣, 目前采用较广泛的是双子电刷即二分瓣电刷。

电机换向时, 换向元件被电刷短路, 形成以换向元件、换向片、电刷构成的闭合回路。在电抗电势的作用下, 闭合回路产生短路电流, 短路电流横向流过刷体(接近换向器侧)。短路电流可以引发刷下火花, 短路电流越大, 火花越大。如要减小火花, 就必须设法减小短路电流。采用高阻率电刷、横向电阻比大的分瓣电刷是减小短路电流的可行方法之一<sup>[1]</sup>。

电刷分瓣的优点在于能够增大电刷的横向电阻, 从而有效降低换向元件的短路电流, 因此, 刷体分瓣可以起到改善换向的作用。刷体的分瓣数目越多, 横向电阻越大, 所以, 二分瓣电刷的横向电阻大于整体式电刷, 它的换向性能远远优于整体式电刷。分瓣电刷中, 四分瓣电刷换向性能最佳, 短路电流最小, 其次是三分瓣电刷, 二分瓣电刷的换向性能介于三分瓣与整体式电刷之间。分瓣电刷的无火花区性能在文献[1]中已有详细论述。

## 2 直流电机的换向

### 2.1 直流电机的换向原理

对于双蛙绕组的电机, 其绕组的结构形式是由双叠绕组与复波绕组组成的复合绕组。这种绕组的好处在于叠、波绕组连接互成均压, 无需加装均压线便能起到很好的均压效果。波、叠绕组通过换向片并联, 电机并联支路数成倍增加, 电枢各支路电流减小有利于电机换向<sup>[2]</sup>。如此特殊的绕组结构形式所具有的优越性, 使蛙绕组在大、中型试验机组直流电机中得到广泛应用。

波、叠绕组互为均压的接线方式, 促使相距

$K/p$  片距的两个同极性电刷换向片的电势成为等电位点, 连接于汇流环上的同极性电刷之间理论上不会形成环流。但是, 对于连接于相隔一片换向片上叠绕组换向元件的两个元件边情况就不同了。其一, 在换向过程中, 叠绕组换向元件匝链漏磁通的变化, 会在换向元件中感应一定的电抗电势, 方向企图维持原来的电流不变; 其二, 负载电流电枢反应效应会引起横轴电枢反应磁势, 由此产生的气隙磁密也会在换向元件中感应出切割电势  $e_A$ 。以上两种电势构成了换向元件的合成电势  $\Sigma e$ , 合成电势的大小是影响换向性能的主要成因。同理, 对于连接于相距  $K/p-2$  的换向片上波绕组换向元件的两个元件边同样也会产生合成电势。对于换向元件中的合成电势  $\Sigma e$ , 大容量直流电机一般都采取加装换向极产生附加换向电势予以抵消。

换向元件的横轴电枢反应磁密感应切割电势  $e_A$  的计算:

$$e_A = 2W_s v_a l B_A \quad (1)$$

式中:  $W_s$ ——换向元件匝数;

$v_a$ ——电枢表面线速度;

$l$ ——换向元件有效边长度;

$B_A$ ——横轴电枢反应磁密。

换向元件的感应电抗电势  $e_r$  的计算:

$$e_r = -L_r \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$L_r = 2W_s^2 l \xi \quad (3)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{2i_a}{\pi D b_b / v_a K b_k} \quad (4)$$

式中:  $\xi$ ——换向元件的比漏磁导;

$i_a$ ——并联支路电流;

$b_b$ ——电刷宽度;

$b_k$ ——换向片宽度;

$D$ ——电枢直径;

$K$ ——换向器片数。

### 2.2 改善换向的方法

换向元件中合成电势  $\Sigma e$  所产生的附加换向电流  $i_k$  是引起电刷火花的主要原因。因此, 减小合成电势  $\Sigma e$  和增加换向元件回路内的电阻, 限制附加换向电流  $i_k$  是改善换向有效方法<sup>[3]</sup>。具体方法如下: (1) 设法减小换向元件的电抗电势  $e_r$ ; (2) 产生适当的换向电势  $e_k$  以抵消电抗电势  $e_r$ 。

及切割电势  $e_r$ , 使  $\Sigma e = 0$ ; (3) 改进电刷。

为了减小电抗电势, 减少电枢绕组每个元件的匝数  $W_s$  (双蛙绕组  $W_s$  通常取 1)、电枢绕组采用短距形式及增大电刷宽度  $b_B$  等都可以抑制电抗电势过大。另外, 为了改善换向, 大、中型直流机都加装换向极、补偿绕组, 产生附加电势予以抵消电抗电势  $e_r$  及切割电势  $e_A$ 。换向极的磁路气隙一般可以调整, 通过调整来改变换向极气隙磁密  $B_K$ , 使换向元件切割气隙磁密所产生的换向电势  $e_K$  大小合适, 正好可以抵消电抗电势  $e_r$  及切割电势  $e_A$ 。同时补偿绕组可以适当补偿电枢反应磁势引起的主极磁场畸变。这些对于改善换向都是有利的。

电刷性能参数对换向的影响因素也是不可小觑的。有些换向不良的电机, 仅靠选择合适的电刷就能起到很好的效果。因此, 必须根据电机的电流及换向器线速度参数, 合理地选择电刷的牌号、规格及布置方式。

### 3 换向参数的调整

ZS1250/500 型 2 750 kW 直流电机试验过程中, 当负载电流大于 70% 时, 曾经出现换向火花变大现象。经过调整换向极气隙无火花区试验换向区域对称后, 额定电流运行刷下火花等级基本可达到 1 级。但满载长时间运行约 30 min 后换向开始恶化, 继续运行电刷滑出端火花随时间呈增大趋势, 刷下火花等级大于  $1 \frac{1}{2}$ , 部分电刷火花等级达到 2 级, 降低电枢电流火花无法消除, 换向性能无法恢复原有状态。停机检查发现部分换向片靠近滑出侧局部区域积碳, 用无水酒精擦拭, 积碳无法去除, 取刷观察发现电刷中部区域烧损变色, 电刷磨合镜面有碳化灼伤痕迹。待电机恢复至冷态后重新试验换向恶化情况无改观。

按照以往的经验, 对电机主极极距、换向极极距、刷距等参数及接线检查, 确认所有数据都符合设计要求。确定直流电机不存在制造缺陷后, 通过以下措施来改进该机组直流电机换向性能, 达到了很好的效果。

#### 3.1 调整换向极气隙来改善换向

直流电机在换向良好, 滑动接触正常时, 无火花换向区基本对称, 其正负外馈电流大致相等。当

换向极磁场偏弱或偏强时, 无火花区域随负载增加而上翘或下垂, 靠近区域末端偏到了横坐标轴一侧, 即只有一个方向的外馈电流才有无火花区。

当换向极磁场强度偏弱或偏强时, 一般可以通过改变换向极气隙大小来调整。计算公式如下:

$$\frac{\delta'_{w1}}{\delta_{w1}} = \frac{W_{i1} \pm (I_a/I_n)(W_w + W_c)}{W_{i1}} \quad (5)$$

式中:  $\delta'_{w1}$ ——调整后的换向极气隙;  
 $\delta_{w1}$ ——调整前的换向极气隙;  
 $W_{i1}$ ——消除电抗电势所需匝数;  
 $I_a$ ——正负反馈电流平均值;  
 $I_n$ ——额定电流;  
 $W_w$ ——换向极匝数;  
 $W_c$ ——补偿绕组匝数。

式(5)中, 当换向偏强时用+, 换向偏弱时用-。

电机在试验时, 曾多次做过换向极气隙调整。下面仅提供直流机在 D214 电刷无火花区调整对称、换向强弱合适后, 改用 T563 分瓣电刷无火花区测试的试验情况。电机的无火花换向区如图 1、图 2 所示。

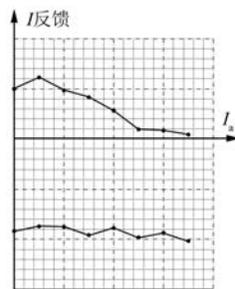


图 1 更换 T563 电刷调整前无火花换向区图

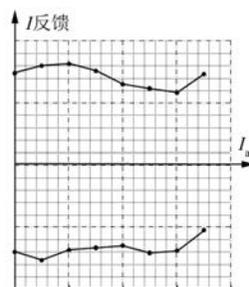


图 2 更换 T563 电刷调整后无火花换向区图

以上是更换 T563 电刷前、后无火花换向区试验图, 试验结果表明, 改用电阻率高于 D214 的

T563 分瓣电刷后,原本已经调整正常的无火花换向区,在更换为 T563 分瓣电刷后呈现换向偏强趋势,主要原因是电刷电阻率提高使其与换向器接触电阻变大,分瓣电刷的横向电阻较大,增大了换向元件回路内的电阻,有效地限制了附加换向电流  $i_K$ ,从而减小了换向元件的电抗电势  $e_r$ 。此时,经过重新调整换向极气隙使换向电势  $e_K$  与合成电势  $\Sigma e$  恢复平衡,无火花区域达到对称。试验结果充分印证了分瓣电刷有助于改善电机换向性能。

### 3.2 通过电刷切向错位来改善换向

将电刷错位是改善直流电机换向的一种有效措施。电刷错位排列如图 3 所示。

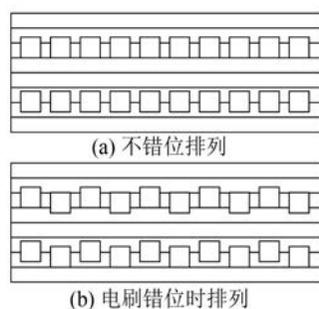


图 3 电刷切向错位示意图

当采用切向电刷错位时,其换向元件的换向

周期加长,即电流变化率  $di/dt$  变小,所以电抗电势也就减小了,有利于改善换向。

通过反复试验,同排偶数刷盒下加垫块切向错位 2 mm 时,无火花区无大变化,切向错位 3 mm 无火花区变宽,火花减小,电机换向好转。错位继续加大至 5 mm 时,电刷滑入端开始出现火花,换向变差。最终确认此试验机组直流电机在同排偶数电刷刷盒下加装垫块切向错位 3 mm 时换向效果最佳。

### 3.3 选用合适的电刷牌号

以前生产的试验机组用直流电机大都选用 D214 电刷,规格 20 mm×32 mm×64 mm,所以设计初期 ZS1250/500 型 2 750 kW 直流电机也采用了 D214 电刷。但试验时存在换向火花大,换向器表面容易积碳等现象。反复调整换向极气隙,发现换向稍有偏强时正极刷接触面烧损,偏弱时负极刷接触面烧损,无论如何调整换向区域都无法消除火花。改用电阻率较高的 D374N 整体式电刷问题依旧得不到解决。

经与电刷生产厂家共同分析,根据试验现象,建议使用性能更好的 T563 二分瓣电刷,规格 2(10 mm×32 mm×64 mm)。D214、D374N 和 T563 电刷性能比较如表 1 所示。

表 1 电刷性能参数对比

| 牌号    | 电阻率/<br>( $\mu\Omega\cdot m$ ) | 肖氏(洛氏)<br>硬度 | 体积密度/<br>( $g\cdot cm^3$ ) | 接触<br>压降/V | 摩擦因数 $\leq$ | 额定电流密度/<br>( $A\cdot cm^{-2}$ ) | 允许圆周速度/<br>( $m\cdot s^{-1}$ ) |
|-------|--------------------------------|--------------|----------------------------|------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| D214  | 28                             | 50           | 1.40                       | 2.4        | 0.25        | 10.0                            | 40                             |
| D374N | 58                             | (70)         | 1.56                       | 2.8        | 0.20        | 12.0                            | 60                             |
| T563  | 76                             | 58           | 1.58                       | 1.7        | 0.22        | 12.5                            | 41                             |

当换用 T563 分瓣电刷调整好无火花区域后,重新试验直流电机,换向得到了明显改善,试验情况前文中已经做了详细说明,这里不再赘述。机组在额定负载连续运行时火花等级 1 级,证明 T563 分瓣电刷能够彻底消除试验机组存在的直流电机火花问题。

## 4 结 语

各种牌号电刷的换向性能、摩擦因数、接触压降、磨损率都各不相同,各具不同的特性,所以并没有一种电刷能够适应所有的电机。从 ZS1250/500 型 2 750 kW 试验机组直流电机试验情况来看,造成直流电机换向火花偏大的主要原因是电刷牌号选用不当。通过改用 T563 2(10 mm×

32 mm×64 mm)分瓣电刷后,机组换向良好,运行稳定。试验可知 T563 电刷比较适用于试验机组的运行条件,为今后更大容量的试验机组设计、生产积累了宝贵经验。

### 【参考文献】

- [1] 刘炳尚,佟明心,胡静,等.电机用电刷无火花区测试方法[J].碳素,2002,110(2): 15-23.
- [2] 李发海,陈汤铭,郑逢时,等.电机学[M].北京:科学出版社,1991.
- [3] 胡鉴清,王洁民,高文英,等.电机工程手册(第2版)电机卷第4篇直流电机[M].北京:机械工业出版社,1997.

收稿日期: 2016 -12 -19