

改善直流牵引电机换向性能的研究与应用

朱利湘

(南车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以存在换向故障的 ZD114 - A 型电机为例, 介绍了直流牵引电机的换向理论和影响电机换向的各种因素, 并提出了改善其换向性能的各种措施。试验和实际应用结果证实了改善方案的有效性。

关键词: 直流牵引电机; 火花; 电刷; 换向极气隙; 极靴形状

中图分类号: TM331

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)04-0040-06

Research & Application of Commutation Improvement on DC Traction Motor

ZHULi-xiang

(CSR Zhuzhou Electric Motor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Taking ZD114-A traction motor with commutation fault as an example, it introduces the commutation theory of DC traction motor and the factors which influence the commutation of the motor, presents measurements to improve commutation performance. The test and practical applications show the validity of these improvement measurements.

Key words: DC traction motor; spark; brush; air-gap of commutating poles; shape of pole-shoe

0 引言

换向是直流电机的一个特殊问题, 对直流牵引电机而言, 它更是影响其正常运行的关键因素之一。由于电机的安装空间小而要求的功率转矩又大, 现代轨道机车用直流牵引电机各项参数的设计值趋于极限, 易使电机产品的换向火花超标, 严重时甚至会产生环火而损坏电机。因此如何改善直流牵引电机的换向性能, 成为国内外电机设计制造者共同追求和研究的目标。本文以机车用 ZD114 - A 型电机换向器异常磨损惯性故障为例, 提出了换向极气隙调整、优选电刷和改变换向极极靴形状等换向性能改善方案。原理分析及试验和实用结果表明, 该方案有效地解决了 ZD114 - A 型电机曾存在的换向火花超标问题。从 2008 年年初至今, 已有上千台新制或改制的 ZD114 - A 型电机在相关

机务段运用, 最长运用里程已达 70 万 km, 未曾出现因换向不良而产生的电机故障。

1 电机换向简介

1.1 换向的定义

直流电机运转时, 电枢绕组中的电势和电流是交变的, 借助于旋转着的换向器和静止的电刷配合工作, 才在电刷间获得直流电压和电流。当旋转的电枢绕组元件从一条支路经过电刷进入另一条支路时, 该元件中的电流从某一方向转变为另一方向, 这种电流方向的变换就称为换向。图 1 以一付电刷下的单迭绕组换向

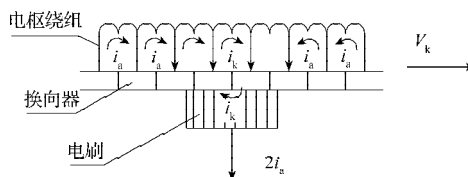


图 1 单迭绕组的电机换向过程示意图

Fig. 1 Diagram of commutating process for the motor with single lap winding

收稿日期: 2010-04-29

作者简介: 朱利湘 (1962 -), 男, 高级工程师, 主要从事电机产品的研究和开发工作。

为例, 示出电机的换向过程。

1.2 换向不良的特征

电机换向不良的具体特征就是在电刷与换向器间有换向火花产生。普通直流电机如果火花过大, 会引起换向器片和电刷出现严重的烧焦、凹坑和损害; 而设计参数接近极限值的牵引电机一旦火花过大, 极可能导致电机出现环火故障。国家标准GB755-65将直流电机火花分为5个等级(表1), 实际运行时电刷下的换向火花等级应小于规定等级(对直流牵引电机而言, 规定其大电流工况的火花等级一般不超过2级, 其余工况的火花等级不超过1级)。

表1 直流电机换向火花等级

Tab. 1 Grades of commutating sparks for DC motor

火花等级	电刷下的火花程度	换向器状态	电刷状态
1	无火花		
1 $\frac{1}{4}$	电刷仅小部分边缘有微弱的点状火花, 或有非放电性的红色火花	无黑痕	无灼痕
1 $\frac{1}{2}$	电刷大部分或全部边缘有轻微的火花	有黑痕, 但不发展, 可用汽油擦除	有轻微灼痕
2	电刷全部或大部分边缘有较强烈的火花	有黑痕, 用汽油不能擦除; 如若短时出现, 不出现灼痕	有灼痕; 如若短时出现, 不会被烧焦或损坏
3	电刷整个边缘有强烈的火花, 同时有大火花飞出	黑痕相当严重, 用汽油不能擦除; 即使短时出现, 也会出现灼痕	有灼痕; 即使短时出现, 也会被烧焦或损坏

1.3 换向火花产生的原因

产生换向火花的原因复杂, 主要有电磁、机械、化学等方面的原因或各因素的综合。本文主要分析电磁和机械方面的原因。

1.3.1 机械原因

换向器工作表面不圆或偏心、旧换向器工作表面粗糙不平、电刷表面粗糙以及电刷压力不合适等因素可能导致电刷与换向器接触不良或发生振动而产生火花; 而电刷不等距分布、磁极不等距分布或电刷不在物理中性位置上等原因使换向元件不能得到合适的换向磁场甚至受到主极磁场的作用, 也会引起换向火花。

1.3.2 电磁原因

正在换向的绕组处于两组电枢绕组之间的过渡状态, 在换向周期结束时, 绕组电流一定与开始时的电流大小相等而方向相反(图1)。嵌在电枢铁心里的电枢绕组是感性的, 绕组电感抵制换向绕组中的电流变化, 阻碍电机换向, 产生的感应电势通常被称为电抗电势 e_r , 它趋向于在后刷尖(即电刷滑出边)处产生大的换向火花和损耗。为帮助电机换向, 现代直流牵引电机均设置

换向极, 直流牵引电机还设置补偿绕组(见图2)。换向极和补偿绕组共同作用的磁势大部分被电枢反应磁势抵消, 其余部分在换向区内建立磁通密度 B_k , 并由此使旋转的电枢绕组获得换向电势 e_k 。 e_k 补偿 e_r , 因此 e_k 与 e_r 的方向相反。 e_r 与 e_k 的差值在换向绕组回路中产生附加换向电流 i_k (图1)。一旦 i_k 建立的换向回路的磁场能量过大, 就会产生换向火花。因此设法减少 i_k 可以达到改善换向的目的。

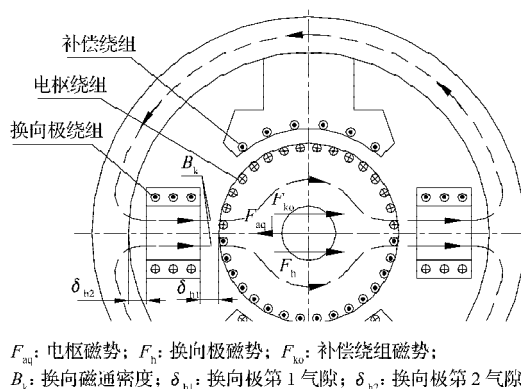


图2 电机换向区的磁势与磁通示意图

Fig. 2 Diagram of magnetic potential & magnetic flux in motor's commutating zone

2 改善换向性能的措施

对于新开发的直流电机而言, 即使各项参数设计得较好, 样机试验时的换向火花仍可能会超标。在排除所有机械原因后若仍发现有较大的换向火花, 则可采取调整电机换向极气隙、改变换向极极靴形状和电刷重新选型等3步措施改善电机换向。

2.1 调整电机换向极气隙

图2示出一对极的磁路。可以看出, 在换向区中存在3种磁势: 换向极磁势 F_h 、补偿绕组磁势 F_{ko} 和电枢反应磁势 F_{aq} 。磁势 $F_h + F_{ko}$ 大部分被 F_{aq} 抵消后, 剩余磁势 F_k 在换向区内建立磁通密度 B_k , 并由此使电枢绕组获得必须的换向电势 e_k (磁势方程如式(1)所示)。 e_k 值越接近 e_r 值, 电机的换向性能就越好。

$$F_h + F_{ko} - F_{aq} = F_k \quad (1)$$

换向磁路上各段的磁位降如下: 第1气隙磁位降 $F_{\delta 1} = B_{\delta 1} \delta_{h1} K_{\delta H} / \mu_0$ ($B_{\delta 1}$ 即 B_k)、第2气隙磁位降 $F_{\delta 2} = B_{\delta 2} \delta_{h2} / \mu_0$ 、换向极铁心磁位降 $F_{mh} = H_{mh} h_{mh}$ 、机座轭部磁位降 $F_{jh} = H_{jh} h_{jh}$, 故换向磁势 $F_k = F_{\delta 1} + F_{\delta 2} + F_{mh} + F_{jh}$ 。考虑到不饱和铁心和机座轭部的磁位降较小, 工程计算常采取近似计算:

$$F_k = B_k \delta_H K_{\delta H} / \mu_0 \quad (2)$$

式中: B_k ——换向磁通密度, 即 $B_{\delta 1}$; δ_H ——换向极等效

气隙长度,包括第1气隙和第2气隙; $K_{\delta H}$ ——换向极气隙系数; μ_0 ——空气的导磁系数。

对已制造的电机而言,因 F_h 、 F_{ko} 和 F_{aq} 值是确定的,故 F_k 也是确定的。要使该电机有良好的换向性能,需选择合适的 B_k 值。 B_k 过小,电机换向欠补偿;过大,则换向过补偿。从式(2)可看出,因 μ_0 和 $K_{\delta H}$ 是定值,为使 B_k 细调至合适值,可采用改变 δ_H 值的方法。生产现场通常采用的措施是调整换向极第2气隙,且最好是调整至稍过补偿的程度。

2.2 改变换向极极靴形状

F_k 在换向区内建立 B_k 。按换向极的极靴表面至电枢表面的磁压降相等的原则,磁力线越长的点,其磁通密度值越小,因此 B_k 值在电枢表面换向区内的分布曲线与换向极的极靴形状有直接关系(图3)。

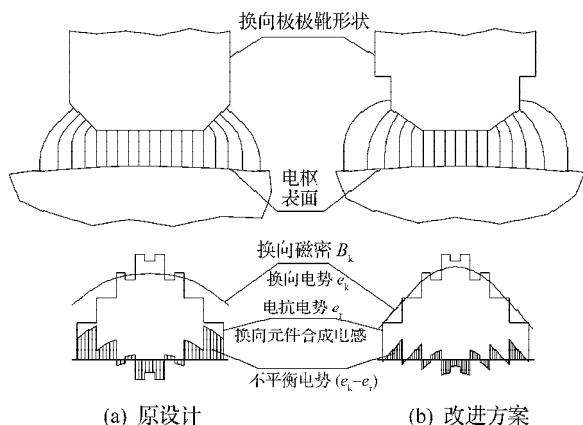


图3 改进前后电机的电抗波形及换向磁通的分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of reactance & commutating magnetic flux before and after improvement

换向电势 e_k (式(3))是由有效边在换向磁通密度为 B_k 的换向极磁场中移动而产生的。可以看出, e_k 的分布曲线形状与 B_k 完全一样(图3)。

$$e_k = B_k L_a v_a \quad (3)$$

式中: L_a ——电枢铁心长度; v_a ——电枢绕组圆周线速度。

由根据P·里赫捷尔法计算的电抗电势^[2]可知,处于换向区的电枢绕组的电抗电势 e_r 总成的分布曲线为阶梯形状(图3)。

理想的目标是: e_k 应与换向元件的电抗电势 e_r 相匹配,即不但 e_k 平均值与 e_r 平均值大小尽量相等,且二者的分布曲线尽量接近,使 e_k 与 e_r 的差值尽量小,这样才能使电机的换向火花较小。

经验表明,造成直流牵引电机换向火花大的原因多是由于电机换向磁通与电抗电势的分布曲线不匹配,多数情况是换向磁通密度曲线平缓而换向绕组的感抗

阶梯形曲线陡,造成中间部分的 e_r 大且两边部分的 e_k 也大。因此对这类电机,可采取换向极削角的方法来改善电机换向(图3)。

2.3 电刷选型

从图3可看出,由于 e_k 的分布曲线连续光滑,而 e_r 的分布曲线呈阶梯状,因此无法做到 $e_k - e_r = 0$ 。不平衡电势($e_k - e_r$)将会在换向绕组回路(该回路由换向绕组、换向片和电刷组成)中产生附加换向电流 i_k (图1)。只要 i_k 建立的换向回路的磁场能量很大,就会在电刷与换向器间产生换向火花。为抑制 i_k 的大小,就需选择合适的电刷,其中心思路就是增大换向回路的电阻值。

电刷的性能和品质对换向有很大的影响。为改善换向性能,现代直流牵引电机设计时,常选择高阻率电化石墨电刷以增大电刷电阻以及电刷与换向器之间的电压降,采用分裂式电刷结构(分为2片或3片)以增大电刷片之间的电阻,等等。不同规格的直流牵引电机,其影响换向的参数不一样,选择的电刷类型也不同。例如:电刷刷体的硬度要与换向器片的硬度相匹配,刷体过软,则电刷易磨耗;刷体过硬,则磨耗换向器。电刷电阻率要适中,选择高阻率电化石墨电刷可降低换向火花,但电刷电阻率若太高,换向器温升将增大,电刷与换向器的磨耗也会增大。为提高电刷使用寿命,采用浸渍树脂以增加电刷耐磨性,但大部分浸渍树脂在电机运行热态下会从电刷底面飞射出来,成为换向火花,因此浸渍物及其浸渍浓度是需电刷生产商多次试验选优的。

3 实施效果

2007年5月开始对ZD114-A型电机电刷与换向器异常磨耗惯性故障进行技术攻关。型式试验和出厂试验时发现,电机换向试验通不过,换向火花超标,达2级以上,尤其是电机发电工况时的换向火花更大。电机换向火花大虽然不是造成电刷与换向器异常磨耗故障的根本原因,但对换向器本身机械稳定性不好的电机,火花大会加速电刷与换向器的磨耗,增大换向器表面的温升,从而引发并加速换向器的变形。因此,将提高电机换向性能至合格水平作为ZD114-A型电机惯性故障问题攻关改进工作的重要内容之一。直流电机的换向可以用试验的方法进行调整,最常用的方法是无火花区试验和换向试验。根据试验结果,决定对ZD114-A型电机采用重新调整换向极气隙、改变换向极靴形状及优选电刷等3项改进措施。

3.1 改善电机换向补偿

3.1.1 电机的换向试验和无火花区试验

对4台ZD114-A型电机进行换向试验,检测规定的3个测量点,其换向火花均达2级以上。

进行无火花区试验,电动机工况固定磁场(96%)时,电机换向欠补偿约为4%;电动机工况深度削磁(40%)时,换向性能太差,无火花区无法测出;发电机工况固定磁场(96%)和深度削磁(40%)时,无火花区均无法测出。

3.1.2 调整换向极气隙

试验表明,ZD114-A型电机换向为欠补偿,故采取的第一步措施是减小换向极气隙值以增大 B_k 。调整后理想气隙 δ_H' 的计算公式如式(4)所示。根据 δ_H' 的计算

公式,重新调整ZD114-A型电机的换向极气隙值。使用DHT电刷,调整后的无火花区试验结果如图4所示,换向试验结果如表2所示。

$$\delta_H' = \delta_H / [1 - KH / (H - 1)] \tag{4}$$

$$H = 8ap(W_{ko} + W_h) / N \tag{5}$$

式中: δ_H ——原等效气隙; K ——磁场强度偏离率($K > 0$, 磁场偏强; $K < 0$, 磁场偏弱); H ——换向安匝比; a ——电枢绕组并联支路对数; p ——电机极对数; W_{ko} ——补偿绕组匝数; W_h ——换向极绕组匝数; N ——电枢绕组导体数。

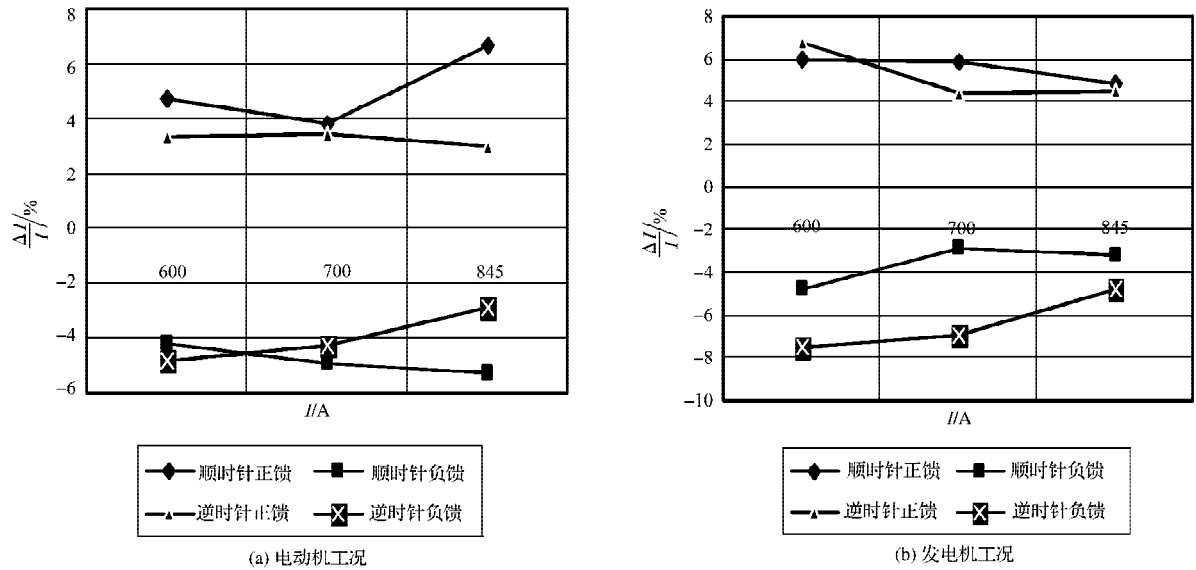


图 4 气隙调整后固定磁场(96%)无火花区试验结果
Fig. 4 Black zone test results of motor air-gap adjusting in rated magnetic field (96%)

表 2 气隙调整后电机换向试验结果
Tab. 2 Commutation test results of motor with air-gap adjusting

旋转方向	换向火花等级		
	额定点	高速点	大电流点
顺时针	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
逆时针	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
标准限值	$\leq \frac{1}{4}$	$\leq \frac{1}{4}$	$\leq \frac{1}{2}$

由无火花区试验和换向试验结果可以看出,减小电机换向极气隙后,电动机工况时换向稍过补偿,而发电机工况时换向接近对称;换向火花已由2级以上降为 $\frac{1}{2}$ 级。通过第2气隙调整,已将电机换向火花降低一个多等级,但仍未达到合格水平。

3.2 优选电刷

为进一步降低ZD114-A型电机换向火花,采取的

第2步改进措施是电刷重新选型。

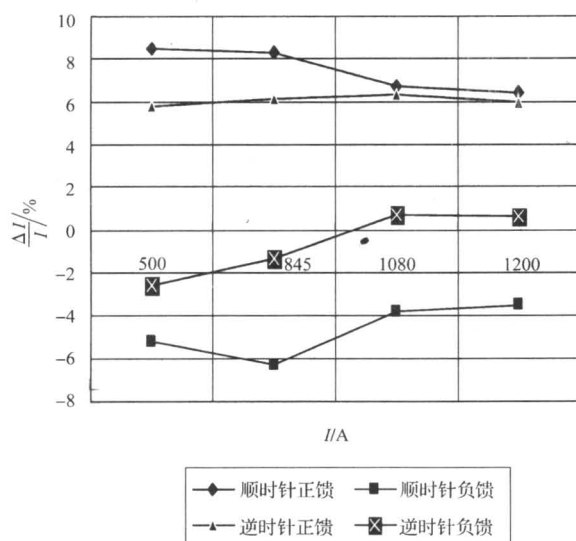
选用CE20型电刷进行试验,与装于同台电机上的DHT型电刷(当时电机普遍使用的电刷)对比。共装了5台电机,热态下进行电动机工况和发电机工况、2个转向的换向试验。以2号电机试验结果为例(表3),可以看出,采用CE20型电刷后,换向火花明显降低。

表 3 采用不同电刷的电机换向试验结果
Tab. 3 Commutation test results of motors with different brushes

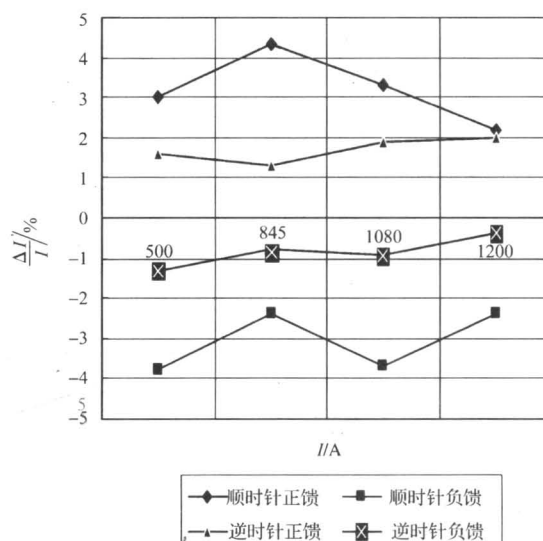
工况及 旋转方向	换向火花等级					
	采用 DHT 型电刷			采用 CE20 型电刷		
	额定点	高速点	大电流点	额定点	高速点	大电流点
电动机	顺时针	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	1	1
	逆时针	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
发电机	顺时针	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
	逆时针	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$

3.3 改变换向极靴形状

采用调整换向极气隙、优选电刷等措施后, ZD114-A 型电机换向性能大大提高并通过了出厂试验; 但型式试验和运行考核表明电机的换向性能仍不理想。型式试验时, 深度削磁(40%)的无火花换向区过窄, 无法测出; 电机装车运行时, 换向器表面氧化膜偏黑, 且随着运行时间的延续, 部分电机换向器表面黑片现象增多、黑片程度加深, 导致电刷的加速磨损, 因此必须进一步改进。



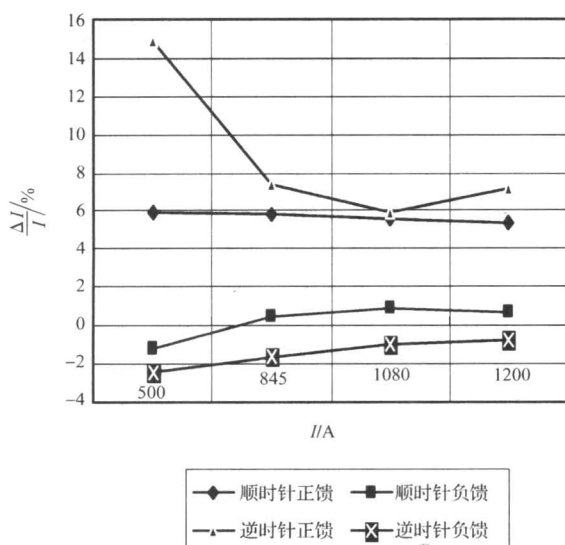
(a) 96% 磁场
(a) 96% magnetic field



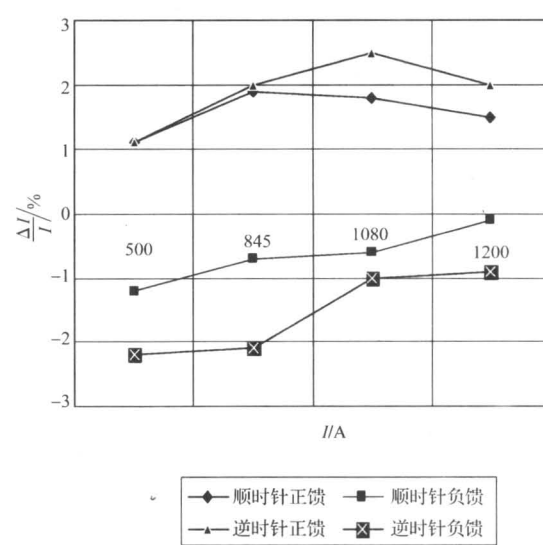
(b) 40% 磁场
(b) 40% magnetic field

图5 换向极靴削角后1号电机无火花换向区试验结果

Fig. 5 Black zone test results of 1# motor with sharpened commutating pole-shoe



(a) 96% 磁场
(a) 96% magnetic field



(b) 40% 磁场
(b) 40% magnetic field

图6 换向极靴削角后2号电机无火花换向区试验结果

Fig. 6 Black zone test results of 2# motor with sharpened commutating pole-shoe

3.3.1 改进方案

由图3可知, 不平衡电势($e_k - e_r$)较大是造成ZD114-A 型电机换向火花偏大的原因, 故采取削角方案进行改进, 减小换向极靴宽度和近极靴端的换向极极身宽度。经ANSYS有限元法计算后发现, 削角后的 B_k 分布曲线比削角前的陡(图3(b)), 改进方案已将($e_k - e_r$)减小。

3.3.2 试验结果

电机换向极靴削角后无火花换向区试验结果如图5和图6所示。

可以看出,电动机工况深度削磁(40%)时,无火花换向区已能测出,且试验时可见的蓝白色电气火花比以前减少。

电机换向极靴削角的换向试验结果如表4所示。可以看出,换向极靴削角后,电机换向火花又有所降低,

表4 换向极靴削角后电机换向试验结果

Tab. 4 Commutation test results of motors with sharpened commutating pole-shoes

旋转方向	换向火花等级					
	1号电动机			2号电动机		
	额定	高速	大电流	额定	高速	大电流
顺时针	1	1	1	1	1	$1\frac{1}{4}$
逆时针	1	1	1	1	1	1

几乎全为1级火花,即电机换向几乎无火花。

3.4 总结

采取改善措施前后ZD114-A型电机换向器表面状态如图7和图8所示,换向性能比较如表5所示。改进后的ZD114-A型电机已于2007年10月通过铁道部产品质量监督检验中心牵引电气设备检验站的型式试验,电机换向各项性能完全满足设计要求。

表5 改进前后电机换向试验结果比较

Tab. 5 Comparison of test results for the commutations between original motor and improved motor

阶段	换向火花等级	无火花换向区
改进前	2级以上	固定磁场(96%)时, 欠补偿4%; 深度削磁(40%)时, 不存在无火花区
第2气隙调整后	$1\frac{1}{2}$	固定磁场(96%)时, 补偿适中; 深度削磁(40%)时, 无火花区太窄而无法测出
电刷改型后	$1\frac{1}{4}$	固定磁场(96%)时, 无火花区宽度有增加
换向极靴削角后	1	深度削磁(40%)时, 无火花区已可清晰测出

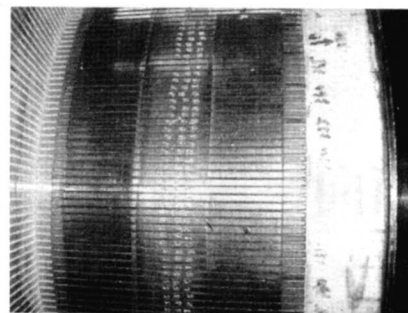


图7 改进前电机故障换向器表面

Fig. 7 Commutator surface of original trouble motor

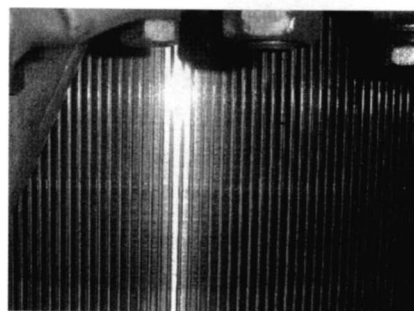


图8 改进后电机运用中的换向器表面

Fig. 8 Commutator surface of improved motor in operation

4 结语

针对ZD114-A型电机存在的换向器异常磨耗的惯性故障问题,提出了调整电机换向极气隙、改变换向极极靴形状和优选电刷型号等3项改进方案。试验及实际运行结果表明,改进措施实施后效果显著,保证了机车的正常运行,为相关设计和生产提供了值得借鉴的经验。该项目已于2009年12月通过湖南省科学技术厅组织的科技成果鉴定。

参考文献:

- [1] 郁飞(苏). 牵引电机[M]. 北京:人民铁道出版社,1959.
- [2] 纳霍德金(苏). 牵引电机设计[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.
- [3] Fitzgerald A E, Kingsley C Jr, Umans S D(美). 电机学[M]. 6版. 北京:电子工业出版社,2004.

欢迎订阅 2011 年《大功率变流技术》

双月刊

CN: 43-1486/U

国内订阅处: 全国各地邮局

邮发代号: 42-337