

文章编号: 1001-8948 (2020) 02-0020-04

# 有刷直流电机真空应用研究

钱华<sup>1</sup>, 李志鹏<sup>1</sup>, 陈辰<sup>1</sup>, 金焱翥<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十一研究所, 上海 200233; 2. 哈尔滨电碳厂, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 本文主要围绕各种有刷直流电机的特点, 针对真空环境应用的需求进行分析、研究和验证。经过有刷直流电机真空应用关键材料电刷的攻关研制, 并结合目前真空用电刷所达到的技术现状, 通过对不同类型有刷直流电机、不同负载的真空试验, 探索、验证了有刷直流电机真空长寿命应用的可行性。

**关键词:** 有刷电机; 真空; 寿命

doi:10.3969/j.issn1001-8948.2020-02-004

中图分类号: TM154.4 文献标识码: A

## The reserch of brush motors used in vacuum

QIAN Hua<sup>1</sup>, LI Zhi-peng<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, JIN Yi-zhu<sup>2</sup>(1.No.21 Research Institute of CETC, Shanghai 200233, China;  
2.Harbin Electric Carbon Factory, Harbin 150025, China)

**Abstract:** Around the features of different kinds of brush motors, the application requirements of brush motors used in vacuum are researched, analyzed, and verified in this paper. After the problems of key brush material of brush motors used In vacuum researched and tackled, combining the current situations of brush technology for vacuum condition, according to the tests of different kinds of brush motors under unequal load in vacuum, the feasibility of long using life of brush motors used in vacuum is researched and verified.

**Keywords:** brush motor; vacuum; using life

### 1 前言

有刷直流电机以其体积小、重量轻、控制简单、功率密度高等优点广泛应用于伺服控制系统中, 由于结构的特点, 采用机械换向的电刷与换向器在使用过程中会产生磨损的磨屑, 电机的使用寿命取决于电刷的磨损寿命; 同时随着电刷磨屑的增加将影响电机的绝缘电阻, 甚至影响电机的正常使用。在航空、航天的低气压、真空环境条件下, 电刷寿命远低于大气环境条件, 这是限制有刷直流电机在航空、航天应用的主要因素。虽然目前国内航天用电

刷材料的真空耐磨性能与美国、俄罗斯等国家相比, 尚有差距, 但就目前国内航天、航空电刷的实际情况, 针对各种有刷电机的特点, 选用适当的电机类型和功率密度, 通过理论分析和样机试验验证证明, 也可实现有刷电机真空长寿命的使用要求。

### 2 有刷直流电机真空长寿命应用可行性分析

#### 2.1 国内、外有刷直流电机真空环境应用情况

目前国内在卫星及其他航天器运动机构的驱动

收稿日期: 2020-04-03

作者简介: 钱华(1970-), 女, 本科, 高工。研究方向: 有刷直流电机设计与分析。Email: qianhua27sh@163.com.

中, 航天有刷电机仅应用于一次性展开机构及较短时间运行的运动机构中。美国、俄罗斯等在航天技术处于领先的国家, 有刷直流电机在航天应用已不仅限于短时间、一次性展开机构运行的运动机构, 已突破了有刷直流电机真空长寿命应用, 涉及多种有刷电机类型<sup>[1]</sup>。

国内通过数十年电刷行业对低气压、真空用电刷的研制, 适合航空条件低气压环境用电刷材料已有成系列产品品种, 即有刷直流电机在航空环境条件下有较为成熟和广泛的应用; 但有刷直流电机在真空环境的应用, 由于电刷材料真空耐磨性不足的限制, 还仅限应用于短时工作的运行机构中。

## 2.2 有刷电机真空环境应用的难点

有刷直流电动机的工作原理是: 外加电压通过电刷和换向器再添加到电枢线圈上, 电枢线圈在定子磁场中受到垂直于本身的切向电磁力, 在电磁力的作用下整个电枢旋转起来; 当电枢线圈分别交替地处在定子的N极或S极下, 线圈中电流的方向随着其所在的定子磁极的改变而改变, 这样使得电机的电磁转矩方向保持不变, 从而实现电机的连续运行。

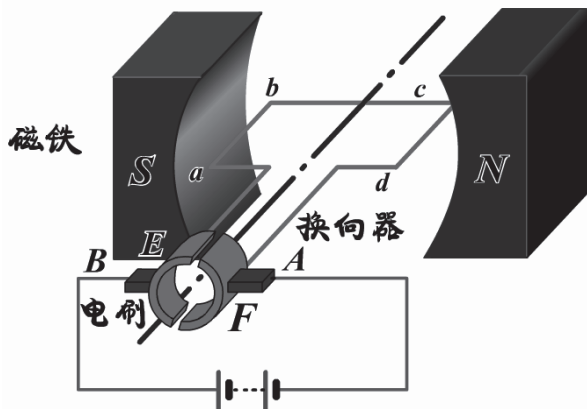


图1 有刷直流电动机工作原理图

Fig. 1 Working principle of brush DC motor

从有刷直流电机工作原理可知, 该类型电机通过电刷与换向器机械换向使得电刷两端建立直流电势, 完成直流电能与机械能的转换。换向过程实际是电刷和换向器相对运动的机械过程, 通常电刷采用碳刷, 换向器采用铜材, 电刷和换向器间的接触属于滑动接触。在结构上, 电刷固定在定子上, 换向器与电枢成一体。电机在运转过程中电刷材料存在磨损的情况, 因此, 电机的使用寿命主要取决于电刷材料的磨损寿命<sup>[2]</sup>。

有刷直流电机在通电运转过程中, 电刷的磨损包括机械磨损和电气磨损, 即有电流作用影响下的机械磨损<sup>[3]</sup>。由于组成电刷材料的主要成分碳石墨的耐磨性在大气和真空环境条件有较大差异, 以及大气条件下空气的作用 (主要是氧气和水气), 导致真空环境下普通电刷磨损较大气环境条件下严重得多, 甚至无法正常运行。

### 2.2.1 大气环境条件下有刷电机电刷运行情况

在大气环境条件下有刷直流电机通电运转过程中, 电刷在换向器表面滑动, 换向器表面就会生成一层薄膜, 这层薄膜主要由氧化亚铜薄膜和电刷与换向片间的碳素薄膜组成, 电刷与换向器的接触情况如图2所示。电机运行时, 电刷与换向器的机械磨损可能破坏换向器表面的氧化亚铜薄膜, 当电流经过, 换向片受热并与空气中水分接触, 便重新生成了氧化亚铜薄膜, 如此循环往复, 维持了“动”平衡,

而碳素薄膜起到了润滑作用。这层薄膜限制了被电刷短路的元件的短路电流, 使换向近于线性的电阻换向, 可以改善电机换向性能, 降低了电刷和换向器的磨损, 使电机能够稳定运行。

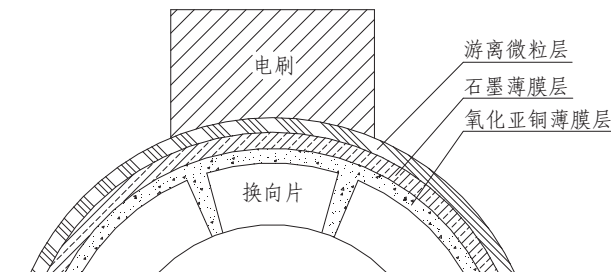


图2 电刷与换向器的接触情况

Fig.2 Contact between brush and commutator

### 2.2.2 真空环境条件下有刷电机电刷运行情况

#### ① 电刷在真空环境下的特性分析

组成有刷电机电刷的主要原材料是碳石墨, 该材料在真空条件下其摩擦系数较大气环境条件下明显增大, 电刷磨损量与水蒸气压和氧气压的关系如图3和图4所示。从图中可以看出随着水蒸气跟氧气的减少, 电刷磨损率呈指数增大。说明真空条件下电刷机械磨损严重加剧, 接触面润滑明显变差; 真空条件下散热性能差也造成电刷和换向器滑动接触进一步变坏, 导致电机温升较大气条件下明显增大, 电流也随之明显增加<sup>[4]</sup>。

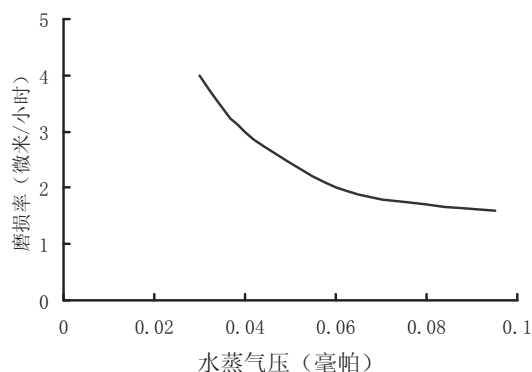


图3 磨损率随水蒸气压的变化曲线

Fig.3 Change curve of wear rate with vapor pressure

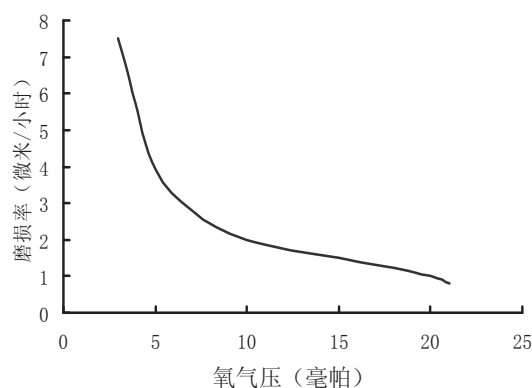


图4 磨损率随氧气压的变化曲线

Fig. 4 Change curve of wear rate with oxygen pressure

## ② 电刷在真空环境下的影响因素分析

电刷的磨损是影响有刷电机使用寿命的主要因素,电刷磨损主要有机械磨损和电气磨损两种。在真空条件下,电刷材料的磨损率成倍增大,导致电刷的机械磨损加剧;由于缺少水分和氧气,换向器表面氧化膜破坏后将无法再形成,即换向器表面润滑膜无法形成,换向较大气条件差,电气磨损加剧,接触面的机械磨损也随之加剧,电刷在真空环境下,机械和电气磨损都较大气环境下成数倍增加,电机工作的寿命和可靠性随之大幅度降低,这就是阻碍有刷直流电动机在航天器中广泛应用的关键问题。

## 2.3 有刷电机真空应用可行性分析

基于有刷电机真空应用电刷磨损严重的问题,多年来针对电刷真空耐磨性进行的研究,电刷能满足真空短时运行,但较正常大气条件的使用寿命尚有较大距离。通过对真空电刷磨损难点分析认为,解决途径可从两方面进行

1) 攻关研制满足真空环境使用的电刷材料,改

善电刷材料的真空耐磨性,提高电机的真空使用寿命。

2) 改善电机换向,减少因换向电流产生的电气磨损。通过选用换向良好的有刷电机类型或进行电机优化设计,减小换向电流、改善换向以达到减小真空电气磨损提高电机真空使用寿命的目的。

### 2.3.1 适合真空用电刷的攻关研制

根据电刷材料在真空环境下磨损严重的机理,目前适合真空用电刷的研制主要基于国内航空电刷应用的成功经验基础上,进行真空润滑改善,减小真空磨损率,提高真空耐磨性,以达到延长电刷真空使用寿命的目的。通过在电刷材料中添加提高真空耐磨性材料,如二硫化钼<sup>[6]</sup>、氟化碳等,采用不同的添加方式、添加比例和加工工艺的试制,并经常态和真空试验验证,摸索出适合真空用电刷的材料配比和加工方式。通过对电刷材料真空耐磨性的改善的多方案对比,电刷的真空使用寿命虽然远小于大气环境条件的使用寿命,但较改进前真空使用寿命均有不同程度的改善和提高。

如经攻关研制的某型号电刷A,具有抗磨性和换向性能好、寿命长、制造工艺较为复杂、圆周速度高等特点。该电刷材料以炭素为主,经混合、成型、焙烧、石墨化等工序,通过在石墨化料粉加入造粒 $\text{MoS}_2$ 再成型焙烧,或填 $\text{MoS}_2$ 芯柱后再浸渍处理而制得。

该类型电刷的使用温度高,我国和前苏联使用的有色电刷由于受材料和工艺的局限性使用温度一般低于 $180^\circ\text{C}$ ,而该型号电刷的长期允许工作温度为 $250^\circ\text{C}$ ,瞬间允许工作温度可达 $600^\circ\text{C}$ 。另外该类型电刷的使用高度高,有色电刷的使用高度一般不超过1.8万米,而该类型电刷可在2万米以上的高空中长期工作,真空使用寿命尚需试验验证。

### 2.3.2 适合真空用有刷电机类型分析

根据有刷直流电机的转子组成结构不同,可分为普通由铁芯电枢结构组成的有刷直流电动机和无铁芯式电枢结构的有刷直流电机。结合不同类型电机的结构、性能等特点,针对影响有刷电机航天环境的应用的因素,并结合前期有刷电机航天应用研究的经验,分析梳理适合有刷直流电机航天应用,特别是航天长寿命应用的可能性。

普通铁芯式电枢结构的有刷直流电动机以永磁式直流电动机为例,该类型电机具有尺寸小、重量轻、效率高和控制特性好等优点。

对于伺服特性要求较高以及较高调速特性的应

用场合,采用无铁芯式电枢结构有刷直流电动机,以空心杯电枢永磁式直流电机为例,相比较铁芯式有刷直流电动机,空心杯电机优势更加明显,具体优点有:

1)效率高 由于该类型电机转子没有导磁体,仅采用绕组绕制而成。不存在普通电枢结构因磁钢与电枢导磁体相对转动,磁场变化而产生的铁损。因此相比较普通电枢结构的电机,总损耗小,效率更高,目前国内最高效率可达80%以上,这在小功率驱动系统中优势明显。

2)换向好 由于电机转子没有铁芯,仅有线圈采用特殊加工方式组成,电机的自感和互感都较小,因此该类型电机换向良好。

3)寿命长 由于换向火花好,电动机效率高,因此电刷寿命较有铁芯的直流电动机长2~3倍。

4)惯量小 由于转子结构无铁芯,直接由绕组、绕组支架、转轴和换向器组成,因此转子惯量明显减小。

通过对上述两种类型电机的特点对比分析可以看出,空心杯电枢电机具有换向良好,功率密度高、寿命长等特点,相比较而言,在相同运行条件下,电刷的磨损量小于铁芯式电机。特别是在真空条件下,影响电刷磨损的电腐蚀磨损情况应小于有铁芯式电机。基于上述对比,分析认为采用空心杯电枢电机,电机输出功率合理选配,即电机带载的发热在合理区间内,采用较小的功率密度,使用目前满足短时间运行的真空用电刷,应可以达到延长真空使用寿命的目的。

为了验证上述设想,采用攻关研制的适合真空用电刷A进行了上述两种样机的真空寿命对比试验。

### 3 样机测试对比

将电刷A分别应用于铁芯式LYX型有刷直流电动机和无铁芯式SYK型空心杯电机进行了寿命试验对比。两种类型电机设定相同的试验参数:电刷电流密度 $3\text{ A/cm}^2$ ,线速度 $3.3\text{ m/s}$ 。具体对应电机性能参数见表1。

表1 电机性能参数表

Table 1 Motor performance parameter table

|        | 电刷电流密度<br>度 $\text{A/cm}^2$ | 电刷线速度<br>m/s | 负载电流<br>A | 负载转速<br>r/min |
|--------|-----------------------------|--------------|-----------|---------------|
| LYX 电机 | 2.6                         | 3.3          | 0.4       | 800           |
| SYK 电机 | 3.0                         | 3.3          | 0.3       | 4500          |

电机进行常态、真空带载试验,连续运转10h停2h,改变旋转方向,如此循环,累积运转时间。试验过程中用示波器监测电机的电流波形,每间隔10h记录电机的电流波形。寿命试验前后测试电刷长度,以此计算出电机运转100h后的电刷磨损量。

两种电机试验结果如下:

1)LYX 电机常态运转正常,100h磨损量不大于0.1mm;正常运转过程中电机温升不大于20K,真空运转约45小时后出现电流明显增大陡升至正常值得2倍,且继续增大,无法正常运行;拆开检查电机内部,在电刷附近有大量碳粉堆积;通过示波器检测的电流波形推断,电机电流明显增大时刻换向器片间短路。

2)SYK 电机常态运转正常,100h磨损量不大于0.03mm,电机温升不大于20K;100h真空运转正常,磨损量不大于0.1mm,电机温升不大于20K。示波器检测电机运转过程中的电流情况,常态与真空无明显差异。

### 4 结论

通过样机试验表明,通过选用换向良好的空心杯电枢电机,合理选用电机参数,使电机应用在真空下电机换向较好,真空使用寿命延长的效果较明显,特别是采用专门研制的改善真空润滑电刷后,真空下电机寿命有明显改善。

### 参考文献

- [1]D.Braun, D.Noon. Long Life DC Brush Motor for Use on the Mars Surveyor Program[J]. 32nd Aerospace Mechanisms Symposium, May 1998.
- [2]汤蕴璆,史乃. 电机学[M]. 机械工业出版社,1999.
- [3]R.J.Hamilton. DC Motor Brush Life[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2000, 36(6): 1682~1687.
- [4]冯智海,窦满锋,师春月. 真空条件下有刷电机电刷磨损的研究[J]. 微电机,2004, 37(5): 64~65.
- [5]霍金元,许少凡,刘献华,等. 二硫化钼-石墨-银基复合材料的载流摩擦磨损性能研究[J]. 金属功能材料,2013, 20(1):13~18.