

# 紧圈材料对永磁电机气隙磁通的影响

米春亭<sup>①</sup>季小尹<sup>②</sup>

**摘要** 首次提出在永磁电机中使用导磁紧圈,同时使用磁路法、作图法及有限元法计算紧圈材料对气隙磁通的影响,并对两种典型结构的永磁电机进行计算,均说明使用导磁紧圈可比使用非导磁紧圈获得更大的气隙磁通;而比使用焊接紧圈成本低、工艺简单。样机的实验结果与计算结果是一致的。

**关键词** 电机,电动机/发电机,永磁,紧圈材料,气隙磁通

## 引言

为固定磁钢和满足高速旋转的强度要求,永磁电机的转子须设置紧圈[1-4]。紧圈可以由非导磁材料制成[2,4],也可由磁性-非磁性材料焊接构成[1,3,4]。前者工艺简单,成本低,但气隙磁通小;后者可获得较大气隙磁通,但工艺复杂,造价昂贵,一般场合较少采用。为此,本文提出在永磁电机中使用导磁紧圈,进行计算与实验验证。

## 1 磁路法

图1是两种典型的永磁电机转子结构,图2是其等值磁路图。图中, $G_s$ 、 $G_f$ 分别是气隙磁导和极尖

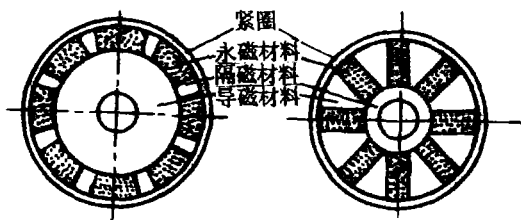


图1 永磁电机转子结构

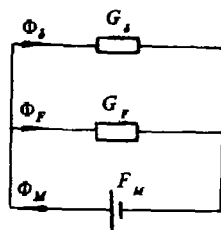


图2 等值磁路图

下紧圈的漏磁导;  $\Phi_M$ 、 $\Phi_s$ 、 $\Phi_f$ 分别是磁钢发出的磁通、气隙磁通和极尖下紧圈中的漏磁通;  $F_M$ 是磁钢的磁势。由图2可导出:

$$\Phi_s = \frac{1}{1 + G_M / G_s + G_f / G_s} \cdot \Phi_{M0} \quad (1)$$

① 西北工业大学副教授

本文收到日期: 1992年1月9日

② 西北工业大学讲师

对于焊接紧圈，极尖下漏磁可忽略，式 (1) 简化为：

$$\Phi'_s = \frac{1}{1 + G_M / G'_s} \cdot \Phi_{M0} \tag{2}$$

对于非导磁紧圈，极尖下漏磁仍可忽略，但气隙相应增大，于是：

$$\Phi'_s = \frac{1}{1 + G_M / G'_s} \Phi_{M0} \tag{3}$$

式中， $G'_s$  为考虑紧圈后的气隙磁导。

导磁紧圈极尖下漏磁较大，其磁通即式 (1)。

为定量比较，将式 (3) 减去式 (1)，并将磁导具体表达式代入，得

$$\Delta\Phi = \frac{\Phi_{M0}}{(1 + G_M / G'_s)(1 + G_M / G_s + G_F / G_s)} \frac{\delta F}{\alpha\tau} \cdot \varepsilon \tag{4}$$

$$\varepsilon = B_f / B_s - \mu_M b_M K_s / \mu_o l_M \tag{5}$$

式中， $\delta_f$  为紧圈厚， $\alpha$  为极弧系数， $\tau$  为极距， $\mu_M$  为磁钢磁导率， $b_M$  为磁钢宽， $l_M$  为磁钢充磁方向长， $\mu_o$  为气隙磁导， $K_s$  为气隙系数， $B_f$ 、 $B_s$  分别为采用导磁紧圈时极尖下紧圈中磁密和气隙磁密。

式 (4)、(5) 表明， $\varepsilon > 0$ ，则非导磁紧圈磁通大； $\varepsilon < 0$ ，则导磁紧圈磁通大。通常，紧圈中较饱和，因而  $B_f / B_s = 2 \sim 4$ ，而  $\mu_M = \mu_o K_s > 1, b_M \gg l_M$  (一般  $b_M / l_M = 4 \sim 10$  以上)，故由式 (5) 可以看出， $\varepsilon$  一般小于零，也就是说，选用导磁紧圈可获得较大的气隙磁通。

## 2 作图法及有限元法

以上磁路法导出的计算公式由于  $G_F$  的非线性， $\varepsilon$  及  $\Delta\Phi$  仍不易求出，为此可使用作图法或有限元法[5]。作图法如图 3 所示，其直观易行，但精度较低。

有限元法可得到比较精确的结果，还可绘制出直观的磁力线分布图。

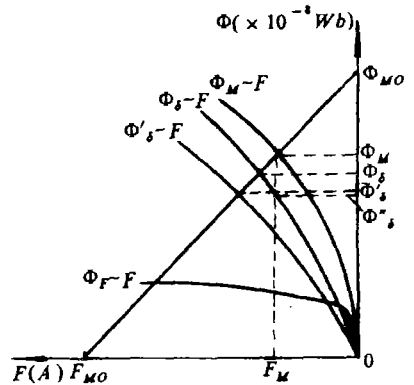


图 3 作图法

## 3 算例

### 3.1 WJF-1.2 稀土永磁航空同步发电机

该电机为 4 极径向激磁结构，额定功率 1.2kVA，额定转速 12000rpm，紧圈厚 1.0mm，磁钢为钕钴永磁材料，充磁方向长 4.5mm，宽 16.4mm，计算及实测结果列于表 1，磁力线分布如图 4 所示。

表 1 WJF-1.2 空载磁通计算与实测结果(Φ,单位 10<sup>-3</sup>Wb)

	作图法	有限元法	实测值	有限元法与实测值相对误差
非导磁紧圈	71 600	64 529.3	63 429.7	1.7%
导磁紧圈	70 400	69 979.9	—	—

表1中, 空载磁通是由空载电势反算出的, 用磁路法算出  $\varepsilon = -2.66$ , 结合表1可以看出, 导磁紧圈的空载磁通比选用非导磁紧圈大8.4%, 说明各种计算方法的计算结果是一致的. 样机采用非导磁紧圈, 实测值与计算值也基本一致.

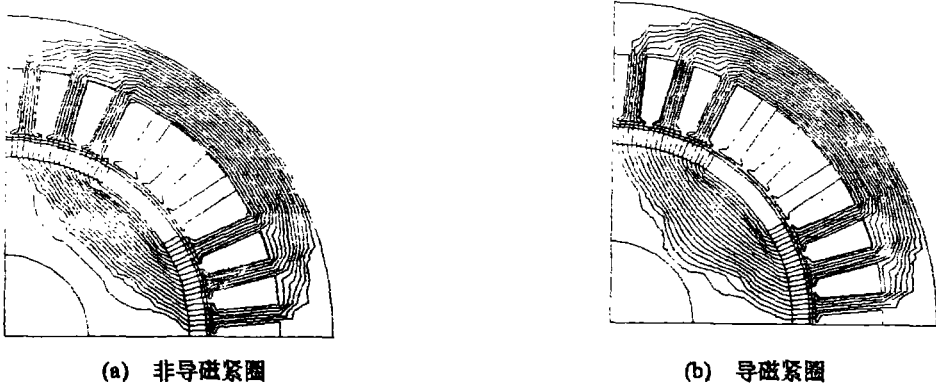


图4 WJF-1.2 磁力线分布

### 3.2 FXT52-6 纺织稀土永磁同步电动机

该电机为6极切向激磁结构, 额定功率0.6kW, 额定转速1000rpm, 紧圈厚1.0mm, 磁钢为钕铁硼永磁, 充磁方向长4mm, 宽32.5mm, 计算与实测结果列于表2, 磁力线分布如图5所示.

表2 FXT52-6 空载磁通计算与实测结果( $\Phi, \times 10^{-8} \text{wb}$ )

	作图法	有限元法	实测值	有限元法与实测值误差
非导磁紧圈	190 746	150 599	—	—
导磁紧圈	238 540	209 516	204 479	2.4%

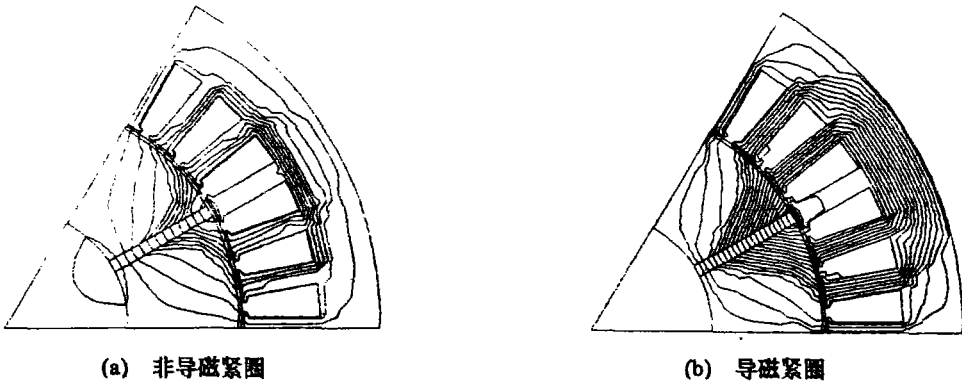


图5 FXT52-6 磁力线分布

磁路法算出  $\varepsilon = -14.75$ , 不同计算方法都说明导磁紧圈的空载磁通远大于非导磁紧圈 (大39%), 样机使用导磁紧圈, 计算结果与实测结果是吻合的.

## 4 结 论

研究表明, 在永磁电机中使用导磁紧圈是一种行之有效的方法, 且优于非导磁紧圈及焊接紧圈。

### 参 考 文 献

- [1] Bailey L J, Richter E. **Development Report on a High-speed Permanent Magnet Generator**. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications (WS-1), Dayton, Ohio, U.S.A., 1976:235~250
- [2] Knudson L I. **Design Considerations for the Optimization of SmCo PM Alternations**. In: WS-1: 251~258
- [3] Demerdash N A. **Comparison Between Features and Performance Characteristics of Fifteen Hp SmCo and Ferrite Based Brushless DC Motors**. *IEEE Tran PAS*, 1983, PAS102(1): 104~112
- [4] Andresen E C. **On the Torque of SmCo PMSM with Speed Control**. In: WS-7, Beijing, China Acad. pub. 1983: 1~11
- [5] 米春亭, 陆鹤庆. 稀土永磁同步电动机磁路计算方法. *微电机*, 1992, 25(3): 12~17

## Effect of Ring Material on Air Gap Flux of Permanent Magnet Machine

*Mi Chunting                  Ji Xiaoyin*

( Department of Automatic Control  
Northwestern Polytechnical University )

Either non-magnetic rings or welded rings consisting of alternate magnetic and non-magnetic segments are used at present to hold in place the magnets and pole pieces of high-peripheral-speed rotor of permanent magnet (PM) machines[1~4]. The authors use three different methods—equivalent magnetic circuit method, graphical method and finite element method — to prove that magnetic rings can also be used for PM machines and are better than the above-mentioned two types of rings.

The contributions of this paper are believed to be:

1. The authors are the first to propose using magnetic rings in PM machines and to prove that the amount of air gap flux of a PM machine with a magnetic ring is greater than that of a PM machine with a non-magnetic ring. Compared with a PM machine with a welded ring, the use of magnetic ring instead can lower product cost and make technology process simpler.

2. The authors are the first to compare the amounts of air gap fluxes of PM machines obtainable with different ring materials and to derive two important calculation formulas, e.g., eqs.(4) and (5).

Two types of PM machines are computed and tested. One is a rare-earth cobalt PM synchronous generator used in aerospace and the other is a rare-earth NdFeB PM motor used in textile industry. The computed results are in good agreement with test results.

**Key words** electric machine, electric motor / generator, permanent magnet, ring material, air gap flux