

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.024

# 高速永磁同步电机的转子结构强度分析研究

李振平<sup>1</sup>, 占彦<sup>2</sup>

(1. 北京动力机械研究所, 北京 100074; 2. 蒂森克虏伯采矿物料搬运技术(中国)有限公司, 北京 100020)

**摘要:**针对高速永磁同步电机转子结构设计及强度问题,对转子结构形式和永磁体材料的选择、轴径尺寸的确定、护套与永磁体之间的过盈配合、转子强度分析方法等方面进行了研究。开展了护套与永磁体之间过盈量的理论分析,使用解析法建立了转子动态过盈量的计算公式,提出了高速永磁同步电机转子的结构强度校核方法。在理论分析的基础上,利用 ANSYS-workbench 有限元软件对一台最高转速为 7 2000 r/min 的 10 kW 高速永磁同步电机的转子进行了热-结构耦合强度分析计算。研究结果表明,永磁体与护套之间的动态过盈量决定了转子的强度,该电机转子的过盈量最佳值为 0.03 mm ~ 0.05 mm,该转子设计合理可靠,可以满足设计要求;该有限元仿真方法能够方便地实现内嵌式转子的结构强度分析,为转子的结构优化设计提供一定的依据。

**关键词:**高速永磁电机;转子;护套;结构强度;过盈量;热-结构耦合分析

中图分类号:TM351;TH39;TH123+.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0900-04

## Rotor strength analysis of high speed permanent magnet machine

LI Zhen-ping<sup>1</sup>, ZHAN Yan<sup>2</sup>

(1. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China; 2. ThyssenKrupp BulkTec (China) Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** Aiming at the structural design and strength of high-speed permanent magnet synchronous motor rotor, the selections of rotor structure and permanent material, determination of rotor shaft's dimensions, the interference fit between protective sleeve and permanent magnets, and analysis method of rotor strength were investigated. After the theoretical analysis of interference between protective sleeve and permanent magnets, the calculation formula for dynamic interference was established by analytical method, a method was presented to check the structural strength of rotor. Based on the theoretical analysis, combined with a 10 kW high-speed permanent magnet synchronous motor with maximum speed of 72 000 r/min, heat-structural coupling analysis of rotor was carried out by ANSYS workbench software. The results indicate that the strength of the rotor is determined by the dynamic interference, and the optimal value of interference is 0.03 mm ~ 0.05 mm for the rotor, the design is reasonable and meets the design requirements; the finite element simulation method can easily analyze the structural strength of the embedded rotor, provide the basis for the optimization design of the rotor.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; rotor; protective sleeve; strength analysis; magnitude of interference; thermal-structural coupling analysis

## 0 引言

高速永磁同步电机具有体积小、转矩密度高、低速大转矩输出、转子发热小等优势,尤其是较高的动态响应速度,很容易实现较高的稳速精度和快速正反转切换,具有广泛的应用前景,如高速机床、飞轮储能、电主

轴、天然气管道中采用的离心压缩机和鼓风机以及分析设备中的真空泵等<sup>[1-4]</sup>。

转子是高速永磁电机的核心部件,转子的永磁体通常选用烧结钕铁硼或钕钴永磁材料,该类型材料能够承受很大的压应力而不能承受较大的拉应力,需要采取护套保护,永磁体和护套之间采用过盈配合,从而给永磁体施加预先压应力,补偿高速旋转时离心力产

生的拉应力<sup>[5-6]</sup>。

护套与永磁体之间过盈量的确定是一个复杂问题。高速旋转下离心力会使永磁体和护套之间的过盈量减小;在高温情况下由于护套材料的线膨胀系数与永磁体材料有所不同,也使过盈量减小<sup>[7-8]</sup>。为了保证永磁体和护套之间有足够的接触压力,必须选择合适的过盈量,使电机高速运转时永磁体受一定的压应力,同时护套的所受应力在许用强度范围内。

文献[9]分析了转子与护套之间过盈量对转子强度的影响;文献[10]分析了金属材料护套与碳纤维护套的优缺点,并对采用碳纤维护套的电机转子进行了强度分析。文献[11]针对一台额定转速为 60 000 r/min 的高速电机转子进行了强度分析,利用有限元法进行了仿真计算,仿真结果与理论计算接近,但未考虑温度影响。

本研究主要针对高速永磁电机转子的结构设计和强度分析,重点对护套与永磁体之间的过盈量进行研究,介绍护套与永磁体的过盈量的理论计算方法,并结合一台最高转速为 72 000 r/min 的 10 kW 高速永磁同步电机,采用 ANSYS workbench 分析过盈量对护套和永磁体的应力水平的影响。

1 转子结构设计

根据高速永磁电机转子结构形式的国内外研究现状分析,高速电机永磁体多采用两极圆柱形实心结构。为了保护永磁体,本研究在永磁体外面增加非导磁合金钢护套。永磁体和护套之间通过过盈配合,实现扭矩和轴向力的传递。圆筒形护套采用不导磁、高强度的镍铬铁合金制成,既作为永磁体的保护套,又作为转轴与机械负载连接。采用实心圆柱形永磁体可以提高永磁体的抗去磁能力,减小电枢反应对永磁体磁密的影响。同时,可保证转子沿径向各向同性,有利于转子的动态平衡。

其结构如图 1 所示。

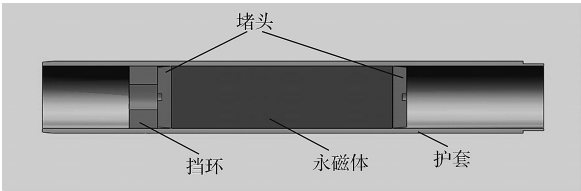


图 1 采用实心圆柱形整体永磁体的转子结构  
永磁体的直径大小、护套厚度以及过盈量对高速永磁同步电机的电磁、热以及机械性能均有着很大的影响。

1.1 转子外径初选

由于转速很高,在设计高速永磁电机的转子时,必须综合考虑电机转子的直径和长度。高速旋转的电机转子要承受较大的离心力,其数学表达式为:

$$F = A\rho D_2^2\omega^2/4 \tag{1}$$

式中: $\rho$ —电机转子的单位体积质量, $A$ —转子截面积, $D_2$ —转子外径, $\omega$ —转子角速度。

将式(1) 改写为离心应力:

$$\sigma_{\text{stress}} = \frac{F}{A} = \frac{\rho D_2^2\omega^2}{4} = \rho v^2 \tag{2}$$

式中: $v$ —转子表面线速度, $v = \omega D_2/2$ 。转子须满足强度条件:

$$\sigma_{\text{stress}} = \rho v^2 \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} \tag{3}$$

式中: $[\sigma]$ —材料许用应力, $\sigma_s$ —材料的屈服极限, $S$ —安全系数。

由式(1) 可知,电机转子承受的离心力大小与转子转速的平方和转子外径的平方均成正比。转子转速越高,外径越大,则离心力越大。因此,为了降低高速永磁同步电机转子所承受的离心力,必须对转子直径进行严格地限制。从离心力的角度来看,转子直径应该越小越好。但是转子直径也不能太小,因为转子要有足够的空间放置永磁体,且细长型的转子刚度可能不够。因而直径与长度需要有一个合适的比例。

1.2 材料的选择

钐钴(SmCo) 永磁材料是 20 世纪 60 年代中期兴起的磁性能优异的永磁材料。依据成分不同,钐钴永磁材料分为 SmCo<sub>5</sub> 和 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>。其特点是剩余磁感应强度,磁感应矫顽力及最大磁能积都很高;退磁曲线基本上是一条直线,回复线基本上与退磁曲线重合,抗去磁能力强。本研究中 10 kW 高速永磁同步电机转子的永磁体选用 Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, 护套选用不导磁的高温合金 GH4169 和 GH3625。

转子各组成部分的材料性能参数如表 1 所示。

表 1 转子材料性能参数

| 材料名称                             | 密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量<br>/MPa           | 泊松<br>比 | 热膨胀系<br>数 10 <sup>-6</sup> /K | 热导率/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------|---------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| GH4169                           | 8240                         | 2.01 × 10 <sup>5</sup> | 0.3     | 12.6                          | 12.2                                          |
| GH3625                           | 8200                         | 2.01 × 10 <sup>5</sup> | 0.3     | 12.5                          | 12                                            |
| Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub> | 7800                         | 1.13 × 10 <sup>5</sup> | 0.23    | 12                            | 10                                            |

2 永磁体与护套的过盈配合

2.1 位移分析

永磁体与护套之间的过盈量可以采用解析法进行分析,主要包括 3 个方面<sup>[12]</sup>:

(1) 静态过盈量

护套与永磁体之间采用过盈配合。静态过盈量即装配过盈量,为永磁体外半径与护套内半径之差:

$$\delta_s = r_{mo} - r_{si} \tag{4}$$

式中: $\delta_s$ —装配过盈量, $r_{mo}$ —永磁体外半径, $r_{si}$ —护套内半径。

## (2) 高速旋转位移

转子高速旋转会产生离心力,在其作用下永磁体及护套会产生径向位移,其位移计算如下:

$$u_{d,si} = A_s r_{si} + \frac{B_s}{r_{si}} - \frac{\rho_s (1 - \nu_s^2) \omega^2 r_{si}^3}{8E_s} \quad (5)$$

式(5)中:

$$A_s = \frac{(3 + \nu_s)(1 - \nu_s)(r_{si}^2 + r_{so}^2)\rho_s \omega^2}{8E_s}$$

$$B_s = \frac{(3 + \nu_s)(1 + \nu_s)r_{si}^2 r_{so}^2 \rho_s \omega^2}{8E_s}$$

$$u_{d,mo} = A_m r_{mo} + \frac{B_m}{r_{mo}} - \frac{\rho_m (1 - \nu_m^2) \omega^2 r_{mo}^3}{8E_m} \quad (6)$$

式(6)中:

$$A_m = (3 + \nu_m)(1 - \nu_m)(r_{mi}^2 + r_{mo}^2)\rho_m \omega^2$$

$$B_m = (3 + \nu_m)(1 + \nu_m)r_{mi}^2 r_{mo}^2 \rho_m \omega^2$$

式中: $u_{d,si}$ —旋转时护套内表面径向位移; $u_{d,mo}$ —旋转时永磁体表面径向位移; $\rho_s, \rho_m$ —护套、永磁体密度; $E_s, \nu_s, E_m, \nu_m$ —护套、永磁体的弹性模量和泊松比; $\omega$ —旋转角速度; $r_{so}$ —护套外半径; $r_{mi}$ —永磁体内半径。

高速旋转后的过盈量为:

$$\delta_d = \delta_s - \Delta\delta_d = (r_{mo} - r_{si}) - (u_{d,si} - u_{d,mo}) \quad (7)$$

## (3) 温度位移

受温度影响,护套与永磁体会产生热位移,永磁体热位移较小一般不考虑。温度改变时护套内表面的温度位移:

$$u_{t,si} = \left[ \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)}{2(1 - \nu_s)} - \nu_s + \frac{1 + \nu_s}{2(1 - \nu_s)} \right] r_{si} \alpha \Delta T \quad (8)$$

式中: $\alpha$ —材料线膨胀系数; $\Delta T$ —温差; $u_{t,si}$ —温度改变时护套内表面径向位移。

护套与永磁体之间的动态过盈量等于静态过盈量减去高速旋转产生的径向位移及温度位移。动态过盈量的大小是保证永磁体在高速运转下不产生破坏的根本原因。永磁体与护套间的动态过盈量为:

$$\delta_t = \delta_d - u_{t,si} = (r_{mo} - r_{si}) - (u_{d,si} - u_{d,mo}) - u_{t,si} \quad (9)$$

由以上分析可知,转子工作时主要受离心力、温差应力和装配应力作用。离心力的增大和温度的升高,均会造成过盈量的减小。因此,转子的强度校核条件应为:在一定过盈量条件下,考虑温度及离心载荷的作用,护套的最大应力是否超过材料的强度极限以及永磁体是否与护套分离。

# 3 转子强度计算

## 3.1 有限元模型

最高转速 72 000 r/min,输出功率 10 kW 的电机转子护套外径为 32 mm,转子永磁体外径为 27.5 mm。

单元类型为 solid186,离散为 11 125 个单元。

有限元模型如图 2 所示。

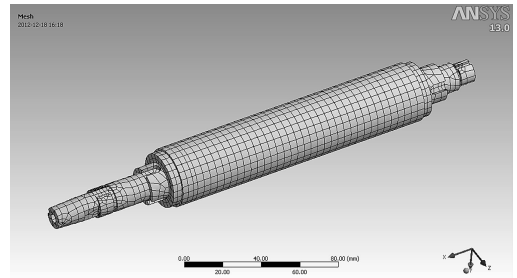


图 2 转子有限元模型

## 3.2 转子热-结构耦合分析

由第 2 节分析可知,需对转子进行热-结构耦合分析,以校核其强度。

### 3.2.1 转子热分析

通过电磁仿真可以计算出永磁体及护套的热生成量,进而分析出转子的温度分布。永磁体与护套的内部热生成量分别为:2.3 W 和 20.5 W。最高温度为 94 °C,热计算结果如图 3 所示。

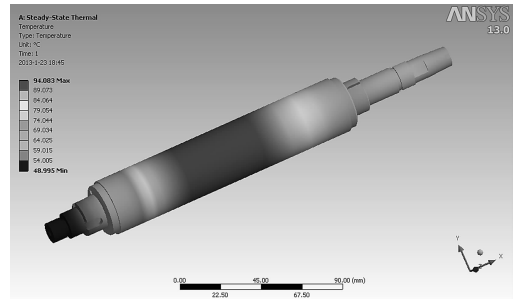


图 3 转子温度分布

### 3.2.2 转子热-结构耦合分析

本研究将温度载荷输入至结构计算中完成热-结构耦合计算。在 ANSYS workbench 中 offset 设置过盈量,该方法简便可靠,护套与永磁体接触为非线性接触,采用惩罚函数法,接触面设置为 Frictional,摩擦系数为 0.1,施加惯性载荷为 72 000 r/min,过盈量设置为 0.04 mm。永磁体表面受压应力 29 MPa,护套与永磁体未分离,满足使用要求。

永磁体径向应力云图如图 4 所示。

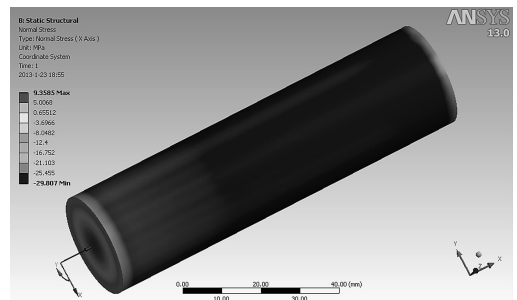


图 4 永磁体径向应力云图

护套最大应力为 359.5 MPa,GH4169 在 650 ℃屈服极限为 650 MPa,满足使用要求。

护套的等效应力云图如图 5 所示。

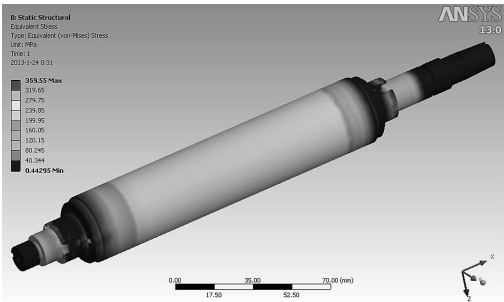


图 5 护套等效应力云图

3.2.3 不同过盈量下转子强度计算

不同过盈量下计算结果如表 2 所示。

表 2 不同过盈量下计算结果

| 工况                            |            | 转子最大<br>温度/℃ | 永磁体表面<br>压应力/MPa | 护套最大等<br>效应力/MPa |
|-------------------------------|------------|--------------|------------------|------------------|
| 转速<br>/(r·min <sup>-1</sup> ) | 过盈量<br>/mm |              |                  |                  |
| 72 000                        | 0.02       | 94           | 9.8              | 297.5            |
| 72 000                        | 0.03       | 94           | 19.58            | 298.59           |
| 72 000                        | 0.04       | 94           | 29               | 359.5            |
| 72 000                        | 0.05       | 94           | 39.9             | 448              |
| 72 000                        | 0.06       | 94           | 50               | 537.24           |
| 72 000                        | 0.08       | 94           | 69               | 719              |

3.3 结果分析

由表 2 可知,随着过盈量的增加,永磁体表面压应力增大,同时护套的等效应力也增大。过盈量太小会导致永磁体与护套分离,过盈量太大会导致护套发生破坏,过盈量的选取需要考虑永磁体表面压应力,护套等效应力,过盈装配工艺等条件。该转子永磁体与护套的最佳过盈量为 0.03 mm~0.05 mm,过盈量选取 0.04 mm 可以满足使用要求。

4 结束语

本研究通过对高速永磁电机的转子结构分析,考虑温度及过盈量影响,采用 ANSYS workbench 软件对转子进行热-结构耦合的三维应力场分析,计算选取了多组过盈量,最终确定护套和永磁体之间的最佳过盈量,得出了以下结论:

(1)针对高速永磁电机,由于永磁体抗拉强度小,

无法承受高速下的离心力,转子一般采取内嵌式设计,采用护套保护永磁体,永磁体与护套采用过盈装配,以保证施加一定预压力保护永磁体。永磁体与护套之间的过盈量需要通过准确的应力分析计算确定。

(2)永磁体与护套之间的动态过盈量由 3 个因素影响:静态过盈量、高速旋转下的位移、热位移。转子实际的过盈量会随着电机工作温度和旋转速度的改变而发生改变。转子的强度校核条件为,在一定过盈条件下,永磁体表面承受一定压应力,即未与护套分离,同时护套最大等效应力未超过许用值。

(3)永磁体与护套在不同过盈量下其内部应力水平不同,存在最佳过盈量,工程上可以采用 ANSYS workbench 软件计算确定过盈量值,该方法计算简单可靠。

参考文献(References):

[1] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报,2006,28(3):258-263.

[2] 黄云凯,余莉,胡虔生. 高速永磁电动机设计的关键问题[J]. 微电机,2006,39(8):6-9.

[3] 张钊,陈涛,周勇. 永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真[J]. 兵工自动化,2014,33(4):75-78.

[4] CHO H W, KO K J, CHOI J Y, et al. Rotor natural frequency in high-speed permanent magnet synchronous motor for turbo-compressor application[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(10):4258-4261.

[5] 王伟奇. 高速永磁同步电机转子强度分析[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2008.

[6] 马平,张伯霖,李锻能,等. 高速机床电主轴过盈配合量的计算[J]. 组合机床与自动化加工技术,1999(7):22-27.

[7] 张松,艾兴,刘战强. 基于有限元的高速旋转主轴过盈配合研究[J]. 机械科学与技术,2002,23(1):15-17.

[8] 程文杰,耿海鹏,冯圣,等. 高速永磁同步电机转子强度分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27):87-94.

[9] 姚阳,方攸同,董凡,等. 飞轮储能系统中高速电机转子的分析设计[J]. 机电工程,2014,31(10):1306-1310.

[10] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 高速永磁电机转子不同保护措施强度分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):195-202.

[11] 丁鸿昌,肖林京,张华宇,等. 高速永磁电机转子护套过盈配合量计算及应力分析[J]. 机械设计与研究,2011,27(5):95-98.

[12] 王继强,王凤翔,鲍文博,等. 高速永磁电机转子设计与强度分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):140-145.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

李振平,占彦. 高速永磁同步电机的转子结构强度分析研究[J]. 机电工程,2016,33(7):900-903.