

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.001

磁力齿轮内转子护套过盈量计算及其应力分析^{*}

张炳义,戴思锐,冯桂宏

(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对磁力齿轮中转子在旋转时产生的离心力容易导致表贴式永磁体损坏的问题,将一个高强度过盈配合的保护套应用到永磁体的保护中。对内转子保护套与永磁体间的过盈配合量及其应力的计算方法进行了分析,对一台内转子速度为56 r/min,传动比为8的磁力齿轮,计算了内转子护套和永磁体的应力值以及护套的过盈量,并根据计算出的过盈量利用ANSYS Workbench15.0分析了护套和永磁体的应力,通过建立试验平台对稳定运行一段时间的样机进行了拆分,观察护套效果。研究结果表明:仿真结果接近理论计算值,内转子护套表面光滑无凸起,证明数值计算的准确性,该护套可用于保护永磁体。

关键词:磁力齿轮;过盈配合;应力分析

中图分类号:TH132.41;TM403

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0817-06

Interference fit calculation and stress analysis for rotor sleeve of magnetic gear

ZHANG Bing-yi, DAI Si-rui, FENG Gui-hong

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problems that centrifugal force produced by the rotor during the rotation of the magnetic gear was easy to cause the damage of the surface mount permanent magnet, the high-strength interference fit protective sleeve was investigated to protect the permanent magnet. After the analysis of the amount of interference fit and the calculation method of the stress between the inner rotor protection sleeve and the permanent magnet, for a magnetic gear speed of 56 r/min, the transmission ratio of 8, the interference fit and stress was calculated, then the stress of the permanent magnet was analyzed. According to the amount of interference and in order to analyze the stress of protective sleeve and permanent magnet by ANSYS Workbench15.0, the experiment platform was constructed and the stable operation of the prototype for a period of time was disassembled, the protective sleeve effect was observed. The results indicate that the simulation results are close to the theoretical values, and the surface of the inner rotor protective sleeve is smooth and free of bulge, it is proved the accuracy of numerical calculation. The protective sleeve can be used to protect permanent magnets.

Key words: magnetic gear; interference fit; stress analysis

0 引言

在现代工业中,为了提高电机的效率以及实用性,大多数场合都使用电机配合机械齿轮变速结构来实现

低速大转矩运行。机械齿轮在机械传动领域占有很重要的地位,在航空航天、交通运输和国防领域中都有广泛应用^[1]。一种新型结构的磁力齿轮,主要的永磁材料是烧结钕铁硼,转子在运行时离心力为主要载荷,钕

收稿日期:2016-12-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA061303);国家重大科学仪器设备开发资助专项(2012YQ05024207)

作者简介:张炳义(1954-),男,辽宁抚顺人,博士,教授,博士生导师,主要从事特种电机及其控制、低速大转矩电机方面的研究。E-mail:zhangby@sut.edu.cn

铁硼的抗拉强度比较小、抗压强度比较大,这样致使永磁体需要承受巨大的离心力,务必在永磁体外设置一个高强度的非导磁防护套,选用过盈配合给永磁体施加一定的预压力^[2]。

永磁体与护套间的过盈量直接影响了磁力齿轮性能,过盈量如果过大,那会带来装配困难等问题,甚至破坏配合表面,从而影响了磁力齿轮的电磁性能;过盈量如果过小,那可能使护套松脱,甚至会因为离心力过大而将永磁体损坏^[3]。因此,转子护套间的过盈配合量的设计以及应力分析,成为了磁力齿轮设计中一个关键问题。本研究主要针对的是一种 Halbach 阵列磁力齿轮,这种磁力齿轮装置克服了传统磁力齿轮传动扭矩小的不足,Halbach 阵列是将径向与切向阵列结合在一起的一种磁性结构^[4]。这种阵列的永磁体所产生的磁场是一侧加强,另一侧减弱,将 Halbach 阵列的充磁方法应用在磁力齿轮中,从而形成一种新型结构的磁力齿轮^[5-7]。在结构上,磁力齿轮主要由 3 部分组成:内部是内转子,磁极较少(高速转子),外部是外转子,磁极较多(低速转子),中间固定不旋转部分是由高导磁材料和低导磁材料交错构成的齿形定子(调磁环),起到调制内、外转子磁场的作用。

本研究的主要问题是齿轮内转子护套与表贴永磁体之间的配合,将从计算原理分析,计算护套与永磁体的过盈配合量及其应力,并结合 ANSYS Workbench 有限元仿真分析软件分析护套与永磁体的应力,将理论计算结果与仿真相结合,为磁力齿轮永磁体与护套间过盈配合的设计提供基础,并将设计出的护套应用在磁力齿轮样机中,对稳定运行一段时间的样机进行测试分析,用实验验证设计可行性。

1 过盈配合量的计算

当齿轮的内转子永磁体与其护套之间存在过盈时,就会在其配合的表面产生一个正压力,这使永磁体的内外径压缩,而转子护套的内外径扩张。永磁体和护套的结构尺寸在齿轮轴向长度上可以看作是厚壁筒,并且在工作运行状态时受到旋转产生的离心力以及相互间的作用力与反作用力,这些力基本上都是轴对称的,且轴端的受力很小,可以忽略,从而对问题进行了简化,变成了平面的轴对称变形问题。

本研究采用拉美(Lame)方程分析^[8]。内转子的永磁体与护套结构尺寸如图 1 所示。

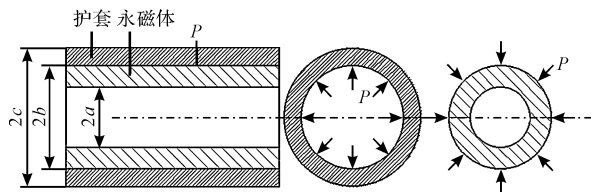


图 1 转子永磁体与护套结构尺寸图

a —永磁体的内半径; b —护套和永磁体之间的配合面半径; c —护套的外半径; P —护套与永磁体过盈配合面处产生的静压力

1.1 装配压力对过盈量的影响

根据拉美(Lame)方程,对于转子护套,仅受均匀的内压 P_s 的作用,应力分量与位移分量分别为^[9]:

$$\begin{cases} \sigma'_{re} = \frac{b^2 P_s}{c^2 - b^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \\ \sigma'_{\theta e} = \frac{b^2 P_s}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \\ u'_e = \frac{b^2 P_s}{E_e (c^2 - b^2)} \left[\frac{(1 + \nu_e) c^2}{r} + (1 - \nu_e) r \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ'_{re} —护套的径向应力,Pa; $\sigma'_{\theta e}$ —护套的切向应力,Pa; u'_e —护套的径向位移,m; P_s —护套与永磁体配合产生的静态过盈装配压力,Pa; E_e —护套弹性模量,Pa; ν_e —护套的泊松比; r —护套的半径, $b \leq r \leq c$,m。

对于内转子永磁体,仅受均匀外压 P_s 的作用,应力分量与位移分量分别为:

$$\begin{cases} \sigma'_{rm} = \frac{b^2 P_s}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \\ \sigma'_{\theta m} = \frac{b^2 P_s}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \\ u'_m = \frac{b^2 P_s}{E_m (b^2 - a^2)} \left[\frac{(1 + \nu_m) a^2}{r} + (1 - \nu_m) r \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ'_{rm} —永磁体的径向应力,Pa; $\sigma'_{\theta m}$ —永磁体的切向应力,Pa; u'_m —永磁体的径向位移,m; E_m —永磁体的弹性模量,Pa; ν_m —永磁体泊松比; r —永磁体的半径, $a \leq r \leq b$,m。

在不考虑温度的影响时,假设内转子永磁体与其护套之间的装配过盈量为 δ'_s ,由式(1 ~ 2)可得:

$$\delta'_s = u'_e|_{r=b} - u'_m|_{r=b} = \frac{b P_s}{E_e} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_e \right) + \frac{b P_s}{E_m} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_m \right) \quad (3)$$

1.2 旋转速度对过盈量的影响

以角速度为 ω 旋转进行分析,不去考虑转动带来

的切向刚性位移分量,仅仅考虑其相对的变形部分,并且假设外表面上不受力,是自由边界,由旋转圆轴

的方程,得到旋转内转子护套其应力分量和位移分量为:

$$\begin{cases} \sigma''_{re} = \frac{3-2\nu_e}{8(1-\nu_e)} \rho_e \omega^2 (b^2 + c^2 - \frac{c^2 b^2}{r^2} - r^2) \\ \sigma''_{\theta e} = \frac{3-2\nu_e}{8(1-\nu_e)} \rho_e \omega^2 (b^2 + c^2 + \frac{c^2 b^2}{r^2} - \frac{1+2\nu_e}{3-2\nu_e} r^2) \\ u''_e = \frac{(3-2\nu_e)(1+\nu_e)}{8E_e(1-\nu_e)} \rho_e \omega^2 r \left[(1-2\nu_e)(b^2 + c^2) + \frac{c^2 b^2}{r^2} - \frac{1-2\nu_e}{3-2\nu_e} r^2 \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ''_{re} —护套的径向应力,Pa; $\sigma''_{\theta e}$ —护套的切向应力,Pa; u''_e —护套的径向位移,m; ρ_e —护套的密度,kg/m³; ω —转子的旋转角速度,rad/s。

在自由边界下旋转时,永磁体的应力分量与位移分量为:

$$\begin{cases} \sigma''_{rm} = \frac{3-2\nu_m}{8(1-\nu_m)} \rho_m \omega^2 (b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2) \\ \sigma''_{\theta m} = \frac{3-2\nu_m}{8(1-\nu_m)} \rho_m \omega^2 (b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+2\nu_m}{3-2\nu_m} r^2) \\ u''_m = \frac{(3-2\nu_m)(1+\nu_m)}{8E_m(1-\nu_m)} \rho_m \omega^2 r \left[(1-2\nu_m)(b^2 + a^2) + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1-2\nu_m}{3-2\nu_m} r^2 \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ''_{rm} —永磁体的径向应力,Pa; $\sigma''_{\theta m}$ —永磁体的切向应力,Pa; u''_m —永磁体的径向位移,m; ρ_m —永磁体的密度,kg/m³。

通过式(4~5)可得到离心力对于永磁体与护套之间过盈量的减少量为:

$$\Delta\delta = u''_e|_{r=b} - u''_m|_{r=b} \quad (6)$$

1.3 温度变化对过盈量的影响

磁力齿轮在运行过程中,永磁体内会产生涡流损耗,这样致使温度升高,忽略其轴向影响,护套的径向位移为:

$$u_{te} = \frac{1+\nu_e}{1-\nu_e} \cdot \frac{\alpha_e}{r} \left[\int_b^r r dr + \left(b^2 + \frac{1-3\nu_e}{1+\nu_e} r^2 \right) \frac{1}{c^2-b^2} \int_b^c r dr \right] \Delta T \quad (7)$$

式中: u_{te} —护套的径向位移,m; α_e —护套的热膨胀系数,℃⁻¹; ΔT —温度变化量(温升),℃。

永磁体的径向位移为:

$$u_{tm} = \frac{1+\nu_m}{1-\nu_m} \cdot \frac{\alpha_m}{r} \left[\int_a^r r dr + \left(a^2 + \frac{1-3\nu_m}{1+\nu_m} r^2 \right) \frac{1}{b^2-a^2} \int_a^b r dr \right] \Delta T \quad (8)$$

式中: u_{tm} —永磁体的径向位移,m; α_m —永磁体的热膨胀系数,℃⁻¹。

通过式(7~8)可求出因温度变化使永磁体与护套间过盈量的减少量为:

$$\delta_t = u_{te}|_{r=b} - u_{tm}|_{r=b} \quad (9)$$

1.4 工作状态下过盈量计算

在工作状态下,旋转护套与永磁体之间的应力,不

仅包括旋转时产生的动态旋转应力,还包括此时要传递扭矩的过盈配合产生的静压力。

当计算永磁体与护套之间的应力时,由过盈配合产生的静压力作用是需要考虑的,将 P_d 分别代替式(1~2)中的 P_s ,然后将式(1)和式(4)叠加,就可以得到内表面所受均匀内压 P_d 时的旋转护套应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_{re} = \sigma'_{re} + \sigma''_{re} \\ \sigma_{\theta e} = \sigma'_{\theta e} + \sigma''_{\theta e} \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_{re} —过盈配合的旋转护套径向应力,Pa; $\sigma_{\theta e}$ —过盈配合的旋转护套切向应力,Pa。

将式(2)和式(5)叠加,就可以得到外表面受均匀外压 P_d 时的旋转永磁体应力分量:

$$\begin{cases} \sigma_{rm} = \sigma'_{rm} + \sigma''_{rm} \\ \sigma_{\theta m} = \sigma'_{\theta m} + \sigma''_{\theta m} \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_{rm} —过盈配合的旋转永磁体径向应力,Pa; $\sigma_{\theta m}$ —过盈配合的旋转永磁体切向应力,Pa。

2 强度校核

由于各类材料因强度不够导致的失效现象并不相同,对于永磁体这类脆性材料,失效现象是突然断裂,宜采用最大拉应力理论,即第一强度理论^[10],进行强度校核;对于护套这类塑性材料,失效现象通常是塑性变形,宜采用畸变能密度理论,即采用第四强度理论^[11],进行强度校核。

对于护套而言,要满足:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{re}-\sigma_{\theta e})^2+\sigma_{re}^2+\sigma_{\theta e}^2}\leqslant[\sigma]$$
$$[\sigma]=\frac{\sigma}{k_e}\tag{12}$$

式中： σ_{re} —过盈配合的旋转护套径向应力，Pa； $\sigma_{\theta e}$ —过盈配合的旋转护套切向应力，Pa； σ —护套的屈服强度，MPa； k_e —护套的安全系数。

对于永磁体而言，要满足：

$$\sigma_m\leqslant[\sigma]$$
$$[\sigma]=\frac{\sigma}{k_m}\tag{13}$$

式中： σ_m — σ_{rm} 、 $\sigma_{\theta m}$ 中的较大应力，Pa； σ —永磁体的抗压强度，MPa； k_m —永磁体的安全系数。

3 样机护套计算及强度验证

齿轮样机的具体参数、材料及属性如表 1 所示。

表 1 磁力齿轮结构参数、材料及属性

参 数	数 值
内转子护套外径/mm	336
护套与永磁体配合处直径/mm	330
永磁体内径/mm	310
内转子额定转速/(r·min ⁻¹)	56
护套材料	合金钢
永磁体型号	N38UH
护套密度 ρ /(kg·m ⁻³)	7 850
永磁体密度 ρ /(kg·m ⁻³)	7 550
护套弹性模量 E /Pa	2.05×10^{11}
永磁体弹性模量 E /Pa	1.5×10^{11}
护套泊松比 ν	0.3
永磁体泊松比 ν	0.23
护套屈服强度 σ /MPa	800
永磁体屈服强度 σ /MPa	70(抗拉强度)
护套温度膨胀系数 α /(℃ ⁻¹)	9.5×10^{-6}
永磁体温度膨胀系数 α /(℃ ⁻¹)	4×10^{-6}

3.1 不考虑温度影响时

应用式(4~6)，计算出转子护套和永磁体在配合面半径 $r=b$ 处的径向位移分量与过盈量的减少量。

护套径向位移分量：
$$u''_e=5.552\,524\,45\times10^{-9}\text{m}_0$$

永磁体径向位移分量：
$$u''_m=6.650\,530\,505\times10^{-9}\text{m}_0$$

过盈量的减少量：
$$\Delta\delta=u''_e|_{r=b}-u''_m|_{r=b}=$$
$$-1.098\,006\,06\times10^{-9}\text{m}=$$
$$-1.098\,006\,06\times10^{-6}\text{mm}_0$$

取永磁体的安全系数 $k_m=1.6$ ，不考虑温度影响时，可得永磁体与护套之间的动态过盈量为：

$$\delta'_d=4.982\,406\,56\times10^{-6}\text{m}=$$
$$0.004\,982\,406\,56\text{mm}_0$$

3.2 考虑温度影响时

假设在稳定运行中，温升 $\Delta T=50\text{℃}$ ，计算转子护套与永磁体在配合面半径 $r=b$ 处径向位移分量与过盈减少量。

护套的径向位移为：
$$u_{te}=0.783\,75\times10^{-4}\text{m}_0$$

永磁体的径向位移为：
$$u_{tm}=3.3\times10^{-5}\text{m}_0$$

温度变化使永磁体与护套间的过盈减少量为：
$$\delta_t=u_{te}|_{r=b}-u_{tm}|_{r=b}=$$
$$4.537\,5\times10^{-5}\text{m}_0$$

所以，考虑温度影响时，永磁体与护套间动态过盈量为：

$$\delta_d=\delta_s-\Delta\delta-\delta_t=$$
$$\delta'_d-\delta_t=$$
$$-4.039\,259\,3\times10^{-5}\text{m}_0$$

所以，永磁体与护套的静态装配过盈量为：

$$\delta_s=\delta_d+\Delta\delta+\delta_t=$$
$$4.982\,407\times10^{-6}\text{m}=$$
$$0.004\,924\,07\text{mm},$$

取 $\delta_s=0.005\text{mm}_0$ 。

静态装配正压力为：

$$P_s=\frac{\delta_s}{\frac{b}{E_e}\left(\frac{c^2+b^2}{c^2-b^2}+\nu_e\right)+\frac{b}{E_m}\left(\frac{b^2+a^2}{b^2-a^2}-\nu_m\right)}=$$
$$0.108\,632\,601\,7\text{MPa}_0$$

3.3 ANSYS Workbench 有限元分析

内转子过盈量配合的静态应力计算结果表明了拉美方程对较薄的圆筒计算误差较大，在仿真分析中过盈量的大小通过 Offset 设置会更加可靠^[12]。本研究采用的是 ANSYS Workbench15.0 对内转子永磁体与

护套的过盈配合进行有限元分析,其摩擦系数设置为 0.1,并在指定面施加转矩,建立有限元仿真模型,其剖分结果如图 2 所示。

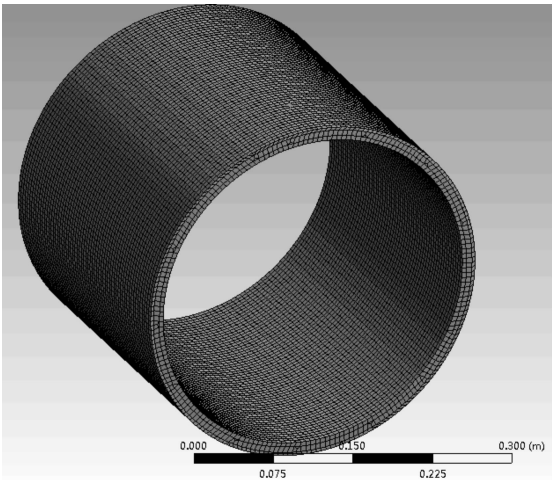


图 2 模型剖分图

仿真分析后的结果如图 3,图 4 所示。

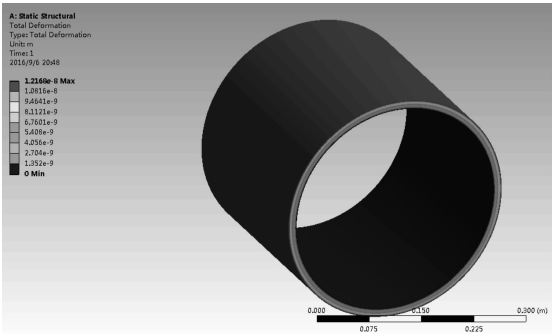


图 3 永磁体护套的形变量

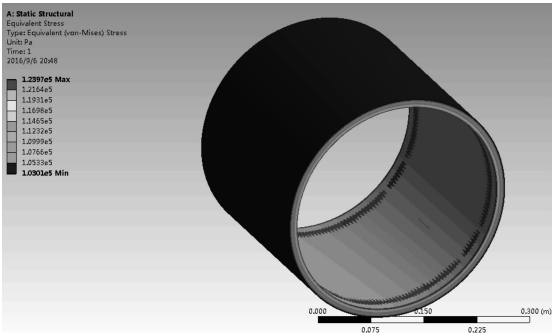


图 4 永磁体护套所受屈服压力

从仿真结果图中可以看出:网格剖分成许多个正六面体,这样细致的剖分可以使结果更加准确。护套具有一定的形变量,值得对应力进行分析。其中内转子永磁体护套所受的应力通过仿真得出为 0.11 MPa,与计算结果 $P_s = 0.108\ 632\ 601\ 7\ \text{MPa}$ 相吻合。

本研究利用有限元法与解析法对模型进行应力分

析,其结果如图 5、图 6 所示。

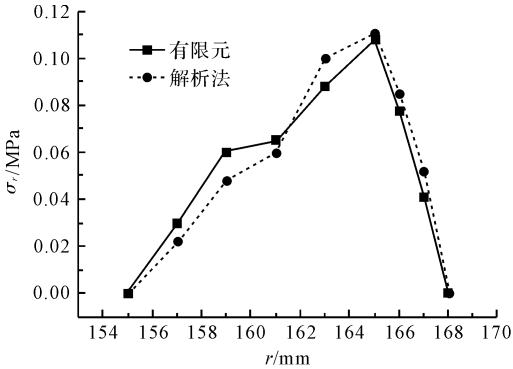


图 5 径向应力分布

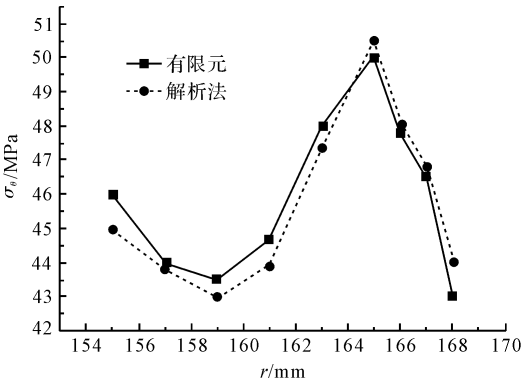


图 6 切向应力分布

如图 5、图 6 所示,本研究从转子永磁体到护套径向分析其受的径向应力与切向应力。通过比较有限元法与解析法结果,从图中可以看出,有限元分析结果与解析计算结果基本吻合。经强度校验后,永磁体满足第一强度理论,护套满足第四强度理论。

3.4 实验验证与结果分析

为了分析护套的效果,本研究搭建了样机的试验平台,如图 7 所示。

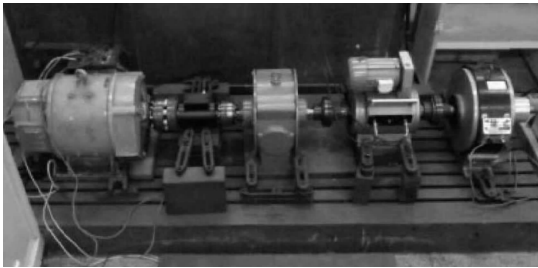


图 7 样机实验平台

样机内转子铁芯及护套如图 8 所示。

中间仪器为 Halbach 阵列式磁力齿轮样机,固定在实验台上稳定运行一段时间,再将样机拆开,观察其内转子,内转子护套表面光滑无凸起,说明根据数值计算得到的过盈量及装配正压力所做护套对永磁体起到

了保护作用,从而证明数值计算的准确性。



图 8 样机内转子铁芯及护套

4 结束语

表贴式永磁体的保护是齿轮设计环节的关键技术之一,能够准确地计算出永磁体与护套间的过盈配合,对于磁力齿轮的设计至关重要。本研究主要通过永磁体与护套间的接触压力、旋转速度产生的离心力、温升产生的热膨胀这 3 个方面研究对过盈配合量的影响,并应用 ANSYS 软件进行了有限元仿真加以验证,得到以下结论:

(1)对于磁力齿轮内转子护套和永磁体来说,装配过盈量的大小是由齿轮旋转的转速和永磁体的抗拉强度共同决定的;

(2)理论上为了将问题简化,忽略了旋转产生的离心力以及相互间的作用力与反作用力,看成是轴对称的力,这使得计算的结果有一定的误差,利用有限元分析软件,其分析的结果与理论计算结果比较接近,但是有限元分析软件中考虑了这些轴向应变的影响,所以仿真结果比理论计算结果要更准确些;

(3)通过强度理论的校验分析,可验证过盈配合

量的设计以及永磁体与护套的强度满足设计要求,护套对永磁体起到了保护作用。

参考文献 (References):

- [1] 刘 麓. 齿轮行业的现状及发展趋势[J]. 中国电子商务, 2015(1):260.
- [2] 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.
- [3] PANG Y, ZHU Z Q, HOWE D. Optimal split ratio for permanent magnet brushless motors[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, New York: IEEE,2003.
- [4] 井立兵,章跃进,李 琛,等. Halbach 阵列同心式磁力齿轮磁场分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):163-169.
- [5] 杜世勤,江建中,章跃进,等. Halbach 磁体结构磁场调制式同心磁性齿轮传动装置[P]:中国:200910196525. 6, 2010-03-03.
- [6] 章跃进,江建中,杜世勤,等. 直驱式正弦复合型永磁电机[P]:中国:201010608927. 5,2011-04-27.
- [7] 杜世勤. 新型磁齿轮复合电机的设计研究[D]. 上海:上海大学机电工程与自动化学院,2010.
- [8] 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,2004,23(1):15-17.
- [9] 卓卫东. 应用塑性力学[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [10] 俞茂宏. 强度理论新体系:理论发展和应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2011.
- [11] 余熙莹. 对于第四强度理论的修正[J]. 广西大学学报:自然科学版,2002,27(s1):63-66.
- [12] ZHANG Y, MCCIAIN B, FANG X D. Design of interference fits via finite element method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(9): 1835-1850.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张炳义,戴思锐,冯桂宏. 磁力齿轮内转子护套过盈量计算及其应力分析[J]. 机电工程,2017,34(8):817-822.

ZHANG Bing-yi, DAI Si-rui, FENG Gui-hong. Interference fit calculation and stress analysis for rotor sleeve of magnetic gear[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(8):817-822.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>