

高速永磁电机护套配合过盈量的计算及强度校核

陈家新, 郑传银, 白 洋, 周 琳, 华 华

(东华大学, 上海 200438)

摘要:烧结钕铁硼永磁材料具有抗压强度大、抗拉强度小的特点,为了避免永磁体在电机运行时难以承受因高速引起的离心力产生断裂破坏的后果,常常在永磁体外侧设置一层高强度非导磁防护套,二者采用过盈配合以使永磁体承受一定的预压力。给出了接触压力、旋转速度、温升对过盈配合量影响的计算方法,提出了永磁体和护套强度的校核准则,并将其应用于一台实际的高速永磁电机。计算结果得到的有效验证。

关键词：高速永磁电机；过盈配合；强度校核

中图分类号：G252.5

文献标识码：ö

文章编号: ybbh00by4vbyfbv0bb4v0bu

Ӯ҃ééòíӮòíòéåòþþéáëååååééþíééëÛçéíòéééäӮòíþþåééþíéӮííӮíéíçåòòӮòíӮ

ଓি ওঁ এই উন্নাদুনি শেড়ো শেড়ো উন্নাদুনি শেড়ো শেড়ো উন্নাদুনি শেড়ো শেড়ো
(উন্নাদুনি শেড়ো শেড়ো শেড়ো শেড়ো শেড়ো শেড়ো শেড়ো শেড়ো)

Üðæññí Üâ : ôðñôëáíí Þáíäóó íðêäóñò íêääéåíððöéíí Üííðâí Üðêëéíí ðñéôííð Üððäóéðåð

引言

随着高性能永磁材料和电力电子技术的发展，高速永磁电机的研究已成为广大专家学者研究的热点，由于结构简单，速度快，效率高，相同尺寸下输出功率大，可有效节省材料，且具有转动惯量小、动态响应快等特点，现在应用越来越广泛^[1]。永磁体材料的性能在一定程度上决定了高速电机的尺寸和性能，在高速永磁电机的设计中，人们往往选用钕铁硼永磁材料，这种材料的抗拉强度一般小于 100 MPa ，远远低于抗压强度（约为 1200 MPa ）^[2]。若不采取保护方法，永磁体将不能承受电机高速运行中转子自身产生的离心力而使电机报废^[3]。所以，我们需要在永磁体的外层施加高强度保护套，且这层保护套须为非导磁材料；二者之间采用过盈配合^[4]^[5]。

就高速永磁电机而言，永磁体与护套间过盈量的大小会严重影响电机的运行，过盈量过大导致装配及拆卸难度加大，甚至损坏配合接触面；过盈量过小则可能在电机运行时造成护套松脱，破坏电机机

械性能，甚至发生危险。所以，在设计永磁电机时，永磁体与护套间过盈量的计算及应力分析已成为一个重要问题。^[6] 文献^[7] 对电机转子进行了简单的应力计算；文献^[8] 给出了过盈量的计算方法，但是没有考虑温升的影响；文献^[9] 主要对已给出过盈量的过盈配合进行了校核。^[10] 本文考虑了转速 ω 、温升 ΔT 、永磁体抗拉强度等因素，给出了永磁体与护套间过盈量的计算方法以及各自的强度校核方法，通过具体实例计算出其过盈量，并通过有限元分析证实计算方法的正确性，从而为我们今后设计永磁电机转子提供了相应的理论依据。

ý 理论分析

电机转轴上的永磁体和护套的结构尺寸可视作厚壁筒处理,且在工作运行中受到旋转产生的离心力及相互间的作用力和反作用力,而这些力基本上都可以看作是轴对称的,并且轴端受力很小,可以忽略其影响,从而问题简化为平面轴对称变形问题。

影响过盈配合量的因素主要有：永磁体与护套间的接触压力 p 、旋转速度产生的离心力 p 、温升产生的热膨胀及热应力等 y 。下面分析每一变量对过盈量的影响 v 。

接触压力对过盈量的影响

图 y 表示了永磁体与护套的结构尺寸, 其中, \hat{r}_y 表示永磁体内半径; \hat{N} 表示配合半径; D 表示护套外半径; x 表示配合处的静压力 p

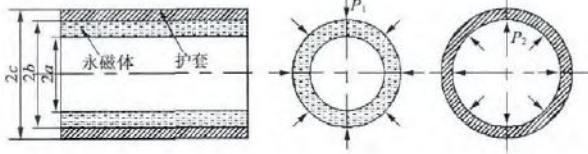


图 y 永磁体与护套结构尺寸

对于永磁体而言, 可看作其外缘受均布压力 x_y 的作用, 内缘表面不受力, 在这种状态下, 其径向位移和应力:

$$\begin{aligned} \hat{r}_y &= \frac{x_y}{\hat{O}_y} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{r}_y} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{u}_y)} \cdot \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \\ \hat{u}_{iy} &= \frac{\hat{r}_y}{\hat{D}} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{r}_y} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{U})} \\ \hat{u}_{yy} &= \frac{\hat{r}_y}{\hat{D}} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{r}_y} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{U})} \end{aligned} \quad (y)$$

式中: \hat{r}_y 为永磁体的径向位移, 负号表示沿径向变小, 单位 mm ; x_y 为护套与永磁体过盈配合产生的装配压力, 单位 N/mm^2 ; \hat{u}_y 为永磁体泊松比; \hat{O}_y 为永磁体的弹性模量, 单位 GPa ; \hat{I} 为永磁体的半径, $\hat{U} \approx \hat{N}$ 单位 mm ; \hat{u}_{iy} 为永磁体的径向应力, 负号表示压应力, 单位 MPa ; \hat{u}_{yy} 为永磁体的切向应力, 单位 MPa

对于护套而言, 可以看作内缘表面受均布压力 x_y 的作用, 外缘表面不受力, 在这种状态下, 其径向位移和应力

$$\begin{aligned} \hat{r}_y &= \frac{x_y}{\hat{O}_y} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{N}} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{u}_y)} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{I}} \\ \hat{u}_{iy} &= \frac{x_y}{\hat{D}} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{N}} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{I})} \\ \hat{u}_{yy} &= \frac{x_y}{\hat{D}} \cdot \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{N}} \cdot \frac{p}{(\hat{y} - \hat{I})} \end{aligned} \quad (y)$$

式中: \hat{r}_y 为护套的径向位移, 单位 mm ; \hat{O}_y 为护套的弹性模量, 单位 GPa ; \hat{u}_y 为护套的泊松比; \hat{I} 为护套的半径, $\hat{N} \approx \hat{D}$ 单位 mm ; \hat{u}_{iy} 为护套的径向应力, 单位 MPa ; \hat{u}_{yy} 为护套的切向应力, 单位 MPa

假设转子护套与永磁体之间的过盈量为 \hat{u}_e , 则

$$\hat{u}_e = \hat{r}_y|_{\hat{I}=\hat{N}} - \hat{r}_y|_{\hat{I}=\hat{N}} \quad (u)$$

旋转速度对过盈量的影响

在转子以角速度 β 旋转过程中, 由于受到离心力的作用, 永磁体和护套间的过盈量会变小, 其中, 永磁体的径向位移和应力:

永磁体径向位移:

$$\hat{r}_{ye} = \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot (\hat{y} - \hat{u}_y) \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y}$$

其中:

$$\begin{aligned} \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \times \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \beta^2 (\hat{U} \times \hat{N})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \times \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \beta^2 (\hat{U} \times \hat{N})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{u}_{ioy} &= \hat{u}_y \beta^2 \frac{\hat{u} \times \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{N} \times \hat{U}) \cdot \frac{\hat{U} \hat{N}}{\hat{I}} \cdot \frac{\hat{a} \hat{I}^2}{\hat{I}} \\ \hat{u}_{yy} &= \hat{u}_y \beta^2 \frac{\hat{u} \times \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{N} \times \hat{U}) \times \frac{\hat{U} \hat{N}}{\hat{I}} \cdot \frac{\hat{y} \times \hat{u} \hat{u}_y}{\hat{u} \times \hat{u}_y} \end{aligned} \quad (O)$$

式中: \hat{r}_{ye} 为护套的径向位移, 单位 mm ; \hat{u}_y 为护套的密度, 单位 kg/m^3 ; β 为转子的旋转角速度, 单位 rad/s ; \hat{u}_{ioy} 为永磁体径向应力, 单位 MPa ; \hat{u}_{yy} 为永磁体切向应力, 单位 MPa

护套的径向位移和应力分量:

$$\hat{r}_{ye} = \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot (\hat{y} - \hat{u}_y) \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y}$$

其中,

$$\begin{aligned} \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \times \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \beta^2 (\hat{N} \times \hat{D})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \times \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \beta^2 \hat{N} \hat{D}}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{u}_{ioy} &= \hat{u}_y \beta^2 \frac{\hat{u} \times \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{D} \times \hat{N}) \cdot \frac{\hat{N} \hat{D}}{\hat{I}} \cdot \frac{\hat{a} \hat{I}^2}{\hat{I}} \\ \hat{u}_{yy} &= \hat{u}_y \beta^2 \frac{\hat{u} \times \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{D} \times \hat{N}) \times \frac{\hat{N} \hat{D}}{\hat{I}} \cdot \frac{\hat{y} \times \hat{u} \hat{u}_y}{\hat{u} \times \hat{u}_y} \end{aligned} \quad (O)$$

式中: \hat{r}_{ye} 为护套的径向位移, 单位 mm ; \hat{u}_y 为护套的密度, 单位 kg/m^3 ; \hat{u}_{ioy} 为护套的径向应力, 单位 MPa ; \hat{u}_{yy} 为护套的切向应力, 单位 MPa

可得因旋转位移减小的过盈量:

$$\hat{u}_e = \hat{r}_{ye} - \hat{r}_y \quad (E)$$

\hat{y} 为温度变化对配合的影响

由于高速永磁电机在运行过程中, 永磁体内会产生涡流损耗, 致使温度升高, 忽略轴向影响, 永磁体径向位移:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{ye} &= \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y} \cdot \left[\hat{U} \hat{P} \hat{I} \hat{a} \hat{N} \left(\hat{y} \times \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{y} \times \hat{u}_y} \right) \right] \beta \\ &= \frac{\hat{y}}{\hat{N} \hat{a} \hat{U}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y} \cdot \hat{P} \hat{I} \hat{a} \hat{N} \end{aligned} \quad (u)$$

护套径向位移:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{ye} &= \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y} \cdot \left[\hat{U} \hat{P} \hat{I} \hat{a} \hat{N} \left(\hat{y} \times \frac{\hat{y} - \hat{u}_y}{\hat{y} \times \hat{u}_y} \right) \right] \beta \\ &= \frac{\hat{y}}{\hat{D} \hat{a} \hat{N}} \cdot \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \cdot \frac{\hat{u}_y \beta^2 \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y} \cdot \hat{P} \hat{I} \hat{a} \hat{N} \end{aligned} \quad (D)$$

式中： \hat{u}_y 为永磁体径向位移，单位； \hat{u}_{ys} 为护套径向位移，单位； α_s, α_y 为永磁体和护套的热膨胀系数，单位。 $\Delta\theta$ 为温度变化量，单位。

可得因温度变化减小的过盈量：

$$\hat{u}_y = \frac{\hat{u}_y}{\alpha_y} |_{T=0} - \frac{\hat{u}_y}{\alpha_y} |_{T=\Delta\theta} \quad (1)$$

工作状态下的应力计算

在工作状态下，旋转护套和永磁体的应力，不仅包括旋转产生的动态旋转应力，还有此时要传递扭矩的过盈配合产生的静压力。

此时的动态过盈量：

$$u_p = u_e - u_y \quad (2)$$

此时的装配压力：

$$Q_p = \frac{u_p}{\frac{N}{O_y} \left(\frac{N}{N} \alpha U^y - u_y \right) + \frac{D}{O_y} \left(\frac{D}{D} \alpha N^y - \alpha u_y \right)} \quad (3)$$

式中： Q_p 为工作状态下的过盈装配压力，单位。 \hat{u}_y 将 Q_p 分别代替式(2)、式(3)中的 u_p ，则得到永磁体应力分量 $\hat{u}_{iy}^1, \hat{u}_{yy}^1$ 和护套应力分量 $\hat{u}_{iy}^1, \hat{u}_{yy}^1$

从而可得永磁体应力：

$$\begin{aligned} \hat{u}_{iy} &= \hat{u}_{iy}^1 \times \hat{u}_{iy} \\ \hat{u}_{yy} &= \hat{u}_{yy}^1 \times \hat{u}_{yy} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： \hat{u}_{iy} 为永磁体径向总应力，单位； \hat{u}_{yy} 为永磁体切向总应力，单位。可得护套应力：

$$\begin{aligned} \hat{u}_{iy} &= \hat{u}_{iy}^1 \times \hat{u}_{iy} \\ \hat{u}_{yy} &= \hat{u}_{yy}^1 \times \hat{u}_{yy} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： \hat{u}_{iy} 为护套径向总应力，单位； \hat{u}_{yy} 为护套切向总应力，单位。

强度校核

由于各种材料因强度不足引起的失效现象并不相同，对于永磁体这种脆性材料，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，进行强度校核；对于护套这种塑性材料，失效现象往往是塑性变形，宜采用畸变能密度理论，即采用第四强度理论，进行强度校核。

对于永磁体而言，要满足：

$$\hat{u}_y \leq [u] \quad (6)$$

式中： \hat{u}_y 为 \hat{u}_i 和 \hat{u}_y 中的较大应力。

对于护套而言，要满足：

$$\dot{\hat{u}}_y = \sqrt{\frac{1}{2} (\hat{u}_i^2 + \hat{u}_y^2)^2 + \hat{u}_i^2 \hat{u}_y^2} \leq [u] \quad (7)$$

式中： \hat{u}_i 指护套受到的径向应力； \hat{u}_y 指护套受到的切向应力。

实例分析

某一电机的转速为 1500 rpm ，假设在稳态运行中，温升 $\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$ ，转子护套和永磁体的尺寸参数为 $U = 100 \text{ mm}$, $N = 100 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$ ；材料属性如表 1 所示。

表 1 转子护套和永磁体的材料参数

名称	弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$	密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	泊松比 $\nu = 0.25$	屈服强度 $\sigma_u = 400 \text{ MPa}$	热膨胀系数 $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ /K}$
永磁体	100 GPa	7850 kg/m^3	0.25	400 MPa	$12 \times 10^{-6} \text{ /K}$
护套	100 GPa	7850 kg/m^3	0.25	400 MPa	$12 \times 10^{-6} \text{ /K}$

在永磁体运行过程中， $\hat{u}_i, \hat{u}_y, \hat{u}_z$ 为其三个主应力，由于忽略轴向应力，径向的 \hat{u}_i 为压应力且数值大小比切向应力 \hat{u}_y 小，而永磁体可以承受较大的压应力而不能承受较大的拉应力，所以 \hat{u}_y 为主应力且将作为设计的参考应力。只要满足 $\hat{u}_y \leq [u]$ ，则可以满足设计要求。

根据式(6)、式(7)，计算得出以下各量：

根据式(6)，得出半径 R 处永磁体的最大切向应力： $\hat{u}_{yy} = 100 \text{ MPa}$

由于永磁体许用抗拉强度 $[u] = 400 \text{ MPa}$ 很小，在设计时往往要设置安全系数 i ，只有满足条件 $\hat{u}_{yy} \leq [u]$ 时，才能保证质量，从而可得 R 处的静态切向应力 $\hat{u}_{yy} = 100 \text{ MPa}$ 。此时取 $i = 1.5$ ，根据式(6)得到 $\hat{u}_{yy} = 150 \text{ MPa}$ ，再将 i 替换为 \hat{u}_{yy} ，代入式(7)，计算得出 $\hat{u}_{yy} = 100 \text{ MPa}$ 。

考虑温度的影响，假设温升 $\Delta\theta = 40^\circ\text{C}$ ，则根据式(6)、式(7)，得出 $\hat{u}_{yy} = 100 \text{ MPa}$ ，则 $\hat{u}_{yy} = 100 \text{ MPa}$ 。

考虑加工精度要求，初步设定结果：二者过盈量为 0.02 mm ，配合处存在约 0.02 mm 的压应力。

有限元仿真及强度分析

利用有限元分析软件 ANSYS，对轴套过盈配合进行强度校核，主要应用软件的接触设置模块，永磁体与护套之间的接触为非线性接触，通过将永磁体外表面设置为接触面，将护套内表面设置为目标面，采用增强拉格朗日函数法，接触面设置为摩擦属性，具体参数：摩擦系数为 0.1 ，接触面过盈量 0.02 mm ，转速 1500 rpm ，建立有限元模型。

通过以上仿真计算，可得永磁体在以上各种情况下所受最大拉应力为 100 MPa ，小于其许用拉应力 400 MPa ；护套在以上各种情况下的最大等效应力为 100 MPa ，也小于其许用应力 400 MPa 。因此可以看出，通过数值计算得出的过盈量能够达到使用要求。

下面将利用件 çÀù½ùöäîÉÝíöäô 分别对以下三种情况下永磁体和护套的应力进行计算: (ý) ýÒ° þ转子静止时永磁体的径向应力与切向应力þ护套中的等效应力; (ý) ýÒ° þÈþþþþiÑäöð 时永磁体的径向应力与切向应力þ护套中的等效应力; (ü) ýýÒ° þÈþþþþiÑäöð 时永磁体的径向应力与切向应力þ护套中的等效应力 ý 结果如表 ý 所示 ý

表 5 有限元计算结果

溫度 °Nº	轉速 \bar{u} lāy N (iý äöö üý)	永磁體徑向應力 \bar{u} yäy Nö÷ó	永磁體切向應力 \bar{u} j Nö÷ó	護套中應力 Nö÷ó
yò	b	úÓÚÍÄüüÜy	üDyÜÓÄyÜÓüy	ÜüÄóüyÜó
yō	Eþþþþ	úÖEÜüÄöÜD	üüyÜyÄöÜööDÜDÄEIIDÜy	
ÿò	Eþþþþ	úòEÜüÄöÜD	üyÜÜÄyÿÜEöEÜEÄüüÜü	

从表 5 中, 可以发现在 $\bar{\gamma}\bar{\gamma}\bar{O}^\circ$ 时, 径向最大径向力与前面计算结果 $\bar{O}\bar{u}\bar{o}\bar{d}\bar{o}$ 相近。对于第三种情况, $\bar{\gamma}\bar{\gamma}\bar{O}^\circ \parallel \bar{E}\bar{p}\bar{p}\bar{p}\bar{b}\bar{N}\bar{a}\bar{d}\bar{o}$ 时永磁体的径向应力与切向应力 \parallel 护套中等效应力分布如图 5A 图 O 所示。



图 5 永磁体的径向应力分布



图 6 永磁体的切向应力分布



图 6 护套中的等效应力分布

ü 結語

在高速永磁电机设计中，由于高速引起的高温及材料

(上接第 58 页)

④ 黃騰云, 姜淑忠. 采用霍爾傳感器的低成本控制系統
⑤ 微特電機, 1996(1): 1-4.

期第卷第年第一特刊

本身特性,永磁体的保护成为关键问题,过盈量的计算也变得越来越重要。本文通过永磁体所受应力不超过准许强度为设计准则确定过盈量,然后利用有限元分析软件进行了强度校核,得出以下结论:

(y) 在高速永磁电机中, 转子护套过盈量大小由转速 ω 温升 ΔT 永磁体的许用抗拉强度共同决定 \checkmark

(y) 由于高速永磁电机转子中的高频损耗 ρ 涡流损耗等很大,使得高速永磁电机转子的温升升高,温升会对过盈量产生一定影响,同时还伴随着热应力的影响,也是强度校核中需要考虑的重要因素 y

(ü) 利用线a线接触单元可以较准确地模拟轴对称模型的过盈配合,有限元建模简单,计算快速,结果简单直观,为设计提供了快速b方便b准确的验证方法v

参考文献

作者简介：陈家新(yiéuu)，男，副教授，研究方向为电力电子变换器与电机设计及其智能测控。

作者简介：李凤军(yílìngjūn)，男，硕士研究生，研究方向为电机驱动与控制。