

接触压力对过盈量的影响

图 1 表示了永磁体与护套的结构尺寸, 其中, $\hat{U}$ 表示永磁体内半径; $\hat{N}$ 表示配合半径; $\hat{D}$ 表示护套外半径; $\times$ 表示配合处的静压力 y

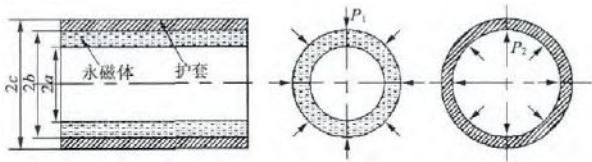


图 1 永磁体与护套结构尺寸

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

$$\begin{aligned} \div_y &= \frac{\times_y}{\hat{O}_y} \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{a}\hat{U}} \hat{b} \left[\left(\hat{y} - \hat{u}_y \right) \hat{I} \hat{a} \left(\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y \right) \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \right] \\ \hat{u}_{iy} &= \hat{a} \times_y \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{a}\hat{U}} \hat{b} \left(\hat{y} - \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \right) \\ \hat{u}_{yy} &= \hat{a} \times_y \frac{\hat{N}}{\hat{N} - \hat{a}\hat{U}} \hat{b} \left(\hat{y} \hat{a} \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \right) \end{aligned} \quad (y)$$

式中: $\div_y$ 为永磁体的径向位移, 负号表示沿径向变小, 单位 mm ; $\times_y$ 为护套与永磁体过盈配合产生的装配压力, 单位 MPa ; $\hat{u}_y$ 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, $\hat{U}$ $\hat{I}$ $\hat{N}$ 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 $\times_y$ 的作用, 外缘表面不受力, 在这种状态下, 其径向位移和应力

$$\begin{aligned} \div_y &= \frac{\times_y}{\hat{O}_y} \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{a}\hat{N}} \hat{b} \left[\left(\hat{y} - \hat{u}_y \right) \hat{I} \hat{a} \left(\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y \right) \frac{\hat{D}}{\hat{I}} \right] \\ \hat{u}_{iy} &= \times_y \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{a}\hat{N}} \hat{b} \left(\hat{y} - \frac{\hat{D}}{\hat{I}} \right) \\ \hat{u}_{yy} &= \times_y \frac{\hat{N}}{\hat{D} - \hat{a}\hat{N}} \hat{b} \left(\hat{y} \hat{a} \frac{\hat{D}}{\hat{I}} \right) \end{aligned} \quad (y)$$

式中: $\div_y$ 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, $\hat{N}$ $\hat{I}$ $\hat{D}$ 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

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

旋转速度对过盈量的影响

在转子以角速度 $\hat{p}$ 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:

$$\div_{ya} = \hat{D} \hat{N} \hat{a} \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \left(\hat{y} - \hat{u}_y \right) \frac{\hat{u}_y \hat{b} \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y}$$

其中:

$$\begin{aligned} \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \hat{b} (\hat{U} \hat{a} \hat{N})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \hat{b} (\hat{U} \hat{N})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{u}_{ioy} &= \hat{u}_y \hat{b} \frac{\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{N} \hat{a} \hat{U} \hat{a} \hat{I}) \\ \hat{u}_{yoy} &= \hat{u}_y \hat{b} \frac{\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{N} \hat{a} \hat{U} \hat{a} \hat{I}) \end{aligned} \quad (o)$$

式中: $\div_{ya}$ 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 ; $\hat{p}$ 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 ; $\hat{u}_{yoy}$ 为永磁体切向应力, 单位 MPa

护套的径向位移和应力分量:

$$\div_{ya} = \hat{D} \hat{N} \hat{a} \frac{\hat{D}}{\hat{N}} \left(\hat{y} - \hat{u}_y \right) \frac{\hat{u}_y \hat{b} \hat{N}}{\hat{D} \hat{O}_y}$$

其中,

$$\begin{aligned} \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \hat{b} (\hat{N} \hat{a} \hat{D})}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{D} &= \frac{(\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y) (\hat{y} - \hat{u}_y) \hat{u}_y \hat{b} \hat{N} \hat{D}}{\hat{D} \hat{O}_y} \\ \hat{u}_{ioy} &= \hat{u}_y \hat{b} \frac{\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{D} \hat{a} \hat{N} \hat{a} \hat{I}) \\ \hat{u}_{yoy} &= \hat{u}_y \hat{b} \frac{\hat{u} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{D}} (\hat{D} \hat{a} \hat{N} \hat{a} \hat{I}) \end{aligned} \quad (o)$$

式中: $\div_{ya}$ 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 ; $\hat{u}_{yoy}$ 为护套的切向应力, 单位 MPa

可得因旋转位移减小的过盈量:

$$\hat{u}_y = \div_{ya} \hat{a} \div_{ya} \quad (E)$$

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:

$$\begin{aligned} \div_{ye} &= \frac{\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{y} - \hat{u}_y} \frac{\hat{O}_y}{\hat{I}} \left[\hat{U} \hat{I} \hat{p} \hat{I} \hat{a} \hat{U} \left(\hat{y} \hat{a} \frac{\hat{u}_y \hat{I}}{\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y} \right) \hat{p} \right. \\ &\quad \left. \frac{\hat{y}}{\hat{N} - \hat{a}\hat{U}} \hat{U} \hat{I} \hat{p} \hat{I} \right] \hat{p} \hat{O} \end{aligned} \quad (u)$$

护套径向位移:

$$\begin{aligned} \div_{ye} &= \frac{\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y}{\hat{y} - \hat{u}_y} \frac{\hat{O}_y}{\hat{I}} \left[\hat{U} \hat{I} \hat{p} \hat{I} \hat{a} \hat{N} \left(\hat{y} \hat{a} \frac{\hat{u}_y \hat{I}}{\hat{y} \hat{a} \hat{u}_y} \right) \hat{p} \right. \\ &\quad \left. \frac{\hat{y}}{\hat{D} - \hat{a}\hat{N}} \hat{U} \hat{I} \hat{p} \hat{I} \right] \hat{p} \hat{O} \end{aligned} \quad (D)$$

式中： Δr_{ye} 为永磁体径向位移，单位 mm ； Δr_{ye} 为护套径向位移，单位 mm ； α_y 、 α_s 为永磁体和护套的热膨胀系数，单位 $1/^\circ\text{C}$ ； ΔT 为温度变化量，单位 $^\circ\text{C}$ 。

可得因温度变化减小的过盈量：

$$\Delta r_y = \Delta r_{ye} |_{T=0} - \Delta r_{ye} |_{T=T_0} \quad (1)$$

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：

$$\Delta r_p = \Delta r_s - \Delta r_y - \Delta r_{ye} \quad (2)$$

此时的装配压力：

$$Q_p = \frac{\Delta r_p}{\frac{1}{E_y} \left(\frac{N}{N} \frac{a \hat{U}^y}{a \hat{U}^y} \Delta r_y \right) + \frac{1}{E_s} \left(\frac{D}{D} \frac{a \hat{N}^y}{a \hat{N}^y} \Delta r_s \right)} \quad (3)$$

式中： Q_p 为工作状态下的过盈装配压力，单位 MPa ；将 Q_p 分别代替式 (3) 式 (4) 式中的 $\times_p \times_y$ ，则得到永磁体应力分量 $\hat{\sigma}_{iy}^i$ 、 $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 和护套应力分量 $\hat{\sigma}_{iy}^i$ 、 $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 。

从而可得永磁体应力：

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{iy}^i &= \hat{\sigma}_{iy}^i + \hat{\sigma}_{iy}^i \\ \hat{\sigma}_{yy}^i &= \hat{\sigma}_{yy}^i + \hat{\sigma}_{yy}^i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $\hat{\sigma}_{iy}^i$ 为永磁体径向总应力，单位 MPa ； $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 为永磁体切向总应力，单位 MPa ；可得护套应力：

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{iy}^i &= \hat{\sigma}_{iy}^i + \hat{\sigma}_{iy}^i \\ \hat{\sigma}_{yy}^i &= \hat{\sigma}_{yy}^i + \hat{\sigma}_{yy}^i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $\hat{\sigma}_{iy}^i$ 为护套径向总应力，单位 MPa ； $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 为护套切向总应力，单位 MPa 。

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^[1]。

对于永磁体而言，要满足：

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

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

对于护套而言，要满足：

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

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

实例分析

某一电机的转速为 1500 r/min ，假设在稳态运行中，温升 100°C ，转子护套和永磁体的尺寸参数为 $\hat{U}_p$ 、 $\hat{U}_y$ 、 $\hat{U}_s$ 、 $\hat{U}_a$ ；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 $\hat{E} (\text{Pa})$	密度 $\hat{\rho} (\text{kg/m}^3)$	泊松比 $\hat{\nu}$	屈服强度 $\hat{\sigma}_s (\text{MPa})$	热膨胀系数 $\hat{\alpha} (1/^\circ\text{C})$
永磁体	2.1×10^{11}	7200	0.25	200	11.5×10^{-6}
护套	2.1×10^{11}	7200	0.25	200	11.5×10^{-6}

在永磁体运行过程中， $\hat{\sigma}_i$ 、 $\hat{\sigma}_y$ 、 $\hat{\sigma}_s$ 为其三个主应力，由于忽略轴向应力，径向的 $\hat{\sigma}_i$ 为压应力且数值大小比切向应力 $\hat{\sigma}_y$ 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 $\hat{\sigma}_y$ 为主应力且将作为设计的参考应力。只要满足 $\hat{\sigma}_y \leq [\hat{\sigma}]$ ，则可以满足设计要求。

根据式 (3) 式 (4)，计算得出以下各量： $\hat{U}_p$ 、 $\hat{U}_y$ 、 $\hat{U}_s$ 、 $\hat{U}_a$ 。

根据式 (5)，得出半径 $\hat{r}$ 处永磁体的最大切向应力： $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 。

由于永磁体许用抗拉强度 $[\hat{\sigma}]$ 很小，在设计时往往要设置安全系数 $\hat{K}$ ，只有满足条件 $\hat{\sigma}_y \leq [\hat{\sigma}] / \hat{K}$ 时，才能保证质量，从而可得 $\hat{r}$ 处的静态切向应力 $\hat{\sigma}_{yy}^i$ 。此时取 $\hat{\sigma}_y = \hat{\sigma}_{yy}^i$ ，根据式 (6) 得到 $\hat{K}$ ，再将 $\hat{K}$ 替换为 $\hat{K}$ ，代入式 (7)，计算得出 $\hat{U}_p$ 、 $\hat{U}_y$ 、 $\hat{U}_s$ 、 $\hat{U}_a$ 。

考虑温度的影响，假设温升 100°C ，则根据式 (3) 式 (4)，得出 $\hat{U}_p$ 、 $\hat{U}_y$ 、 $\hat{U}_s$ 、 $\hat{U}_a$ ，则 $\hat{\sigma}_i$ 、 $\hat{\sigma}_y$ 、 $\hat{\sigma}_s$ 、 $\hat{\sigma}_a$ 。

考虑加工精度要求，初步设定结果：二者过盈量为 $\hat{U}_p$ ，配合处存在约 $\hat{U}_p$ 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 $\hat{\mu}$ ，接触面过盈量 $\hat{U}_p$ ，转速 1500 r/min ，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 $\hat{\sigma}_{yy}^i$ ，小于其许用拉应力 $[\hat{\sigma}]$ ；护套在以上各种情况下的最大等效应力为 $\hat{\sigma}_{yy}^i$ ，也小于其许用应力 $[\hat{\sigma}]$ 。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 σ_{max} 分别对以下三种情况下永磁体和护套的应力进行计算: (1) 转子静止时永磁体的径向应力与切向应力; (2) 护套中的等效应力; (3) 转子高速旋转时永磁体的径向应力与切向应力; (4) 护套中的等效应力。结果如表 1 所示。

表 1 有限元计算结果

温度 (°C)	转速 (r/min)	永磁体径向应力 (MPa)	永磁体切向应力 (MPa)	护套中应力 (MPa)
20	0	1.208	14.007	14.007
20	1000	1.208	14.007	14.007
20	2000	1.208	14.007	14.007

从表 1 中, 可以发现在 2000 r/min 时, 径向最大应力与前面计算结果相近。对于第三种情况, 2000 r/min 时永磁体的径向应力与切向应力在护套中等效应力分布如图 2 所示。



图 2 永磁体的径向应力分布



图 3 永磁体的切向应力分布



图 4 护套中的等效应力分布

结 语

在高速永磁电机设计中, 由于高速、高温及材料

(上接第 50 页)

- [1] 黄腾云, 姜淑忠. 采用霍尔传感器的低成本控制系统 [J]. 微特电机, 2015, 33(5): 50-53.

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大。本文通过永磁体所受应力不超过许用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。

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

(2) 由于高速永磁电机转子中的高频损耗、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。

(3) 利用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、准确的验证方法。

参考文献

- [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, 2015, 41(5): 50-53.
- [2] 王凤翔, 张伯霖, 李俊能, 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, 2015, 21(5): 50-53.
- [3] 王凤翔, 张伯霖, 李俊能, 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, 2015, 31(5): 50-53.
- [4] 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, 2015, 35(5): 50-53.

作者简介: 陈家新 (1978-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子变换器、电机设计及其智能测控。

作者简介: 李凤军 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动与控制。