

文章编号 1004-924X(2013)10-2639-09

## 过盈装配的金属轮毂-复合材料飞轮转子

汤继强<sup>1,2</sup>, 张永斌<sup>1,2\*</sup>, 赵丽滨<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航技术国防重点学科实验室, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘要:**针对一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮,设计了一种由磁轴承、金属轮毂和 3 个复合材料圆环过盈装配而成的飞轮转子。通过加入金属轮毂来改善转子的应力分布、减小转子的径向应力,保证转子在高速转动状态下磁轴承和复合材料圆环之间的连接强度。转子圆环之间通过过盈装配提供初始压应力,以避免转子在高速转动时发生分层破坏;采用平面应力解析法和有限元法建立转子的应力分析模型,研究了金属轮毂、复合材料圆环厚度和环间过盈量对转子应力分布和强度的影响。最后,提出了转子的优化设计方案。实验结果显示,转子的额定转速达到 50 000 r/min,储能总量为 1 110 Wh,储能密度达到 40 Wh/kg。研究结果表明:加入金属轮毂、增大复合材料外环的厚度以及中环和外环的环间过盈量,可以提高转子的强度、极限转速和储能密度。

**关键词:**储能飞轮; 复合材料转子; 强度设计; 应力分析; 过盈配合

**中图分类号:** V249.1    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2639

## Interference fitted metal-composite material flywheel rotor

TANG Ji-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-bin<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Li-bin<sup>3</sup>

(1. *Science and Technology on Inertial Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. *Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System  
Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;*

3. *School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zhang6350668@foxmail.com*

**Abstract:** A flywheel rotor assembled by magnetic bearings, a metal hollow hub and three composite cylindrical rings was designed for a high energy storage density magnetic suspended flywheel. The hollow hub made of high strength steel 18Ni350 was used to change the distribution of centrifugal stress, reduce the maximum radial stress and ensure that the working gap of radial magnetic bearings was a constant when the rotor rotated at a high speed. The interference between rotor rings could provide an initial pressure to prevent the rotor from delamination when the rotor rotated at a high speed. In order to find out the quantitative relationship among these factors such as the properties of high strength steel hollow hub, the thickness ratio of rings and the mathematical calculation model was proved accurately by the interference between rings, an mathematical cal-

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61174003)

calculation model of the stress distribution was established by a simplified stress model and the mathematical calculation model was proved accurately by the finite element method. Finally, an optimized design scheme was proposed. Obtained results show that the strength distribution can be improved and ultimate speed of the rotor can be increased when the thickness of the outermost ring or the interference between middle ring and outermost ring are increased. When the rotate speed of the rotor is up to 50 000 r/min, the total storage energy can reach 110 Wh, and the corresponding specific energy density is about 40 Wh/kg. These results give a useful hint for the design and optimization of mental-composite flywheel rotors.

**Key words:** energy storage flywheel; composite material rotor; strength design; stress analysis; interference fit

## 1 引言

利用磁悬浮飞轮进行储能是一种高效无污染的储能技术,具有充放电速度快、储能密度高、寿命长等优点,在航天器姿控、电力调峰以及电动汽车中都有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。磁悬浮轴承在飞轮技术中的应用,消除了机械轴承带来的摩擦磨损,降低了振动和摩擦损耗,极大地提高了飞轮的极限转速<sup>[3-5]</sup>。然而,随着飞轮转速的提高,普通材料的强度无法克服飞轮因高速转动产生的离心力,限制了飞轮储能技术的进一步发展。复合材料具有密度小、强度高的优点,其在飞轮技术中的应用,克服了普通金属材料强度过低的问题,在一定程度上满足了磁悬浮储能飞轮的需求<sup>[6]</sup>。

然而由于复合材料的各向异性,其径向强度远远低于其环向强度,需要通过张力缠绕原位固化、胶接、过盈装配等技术手段提高其径向强度<sup>[7-8]</sup>。NAKI Tutnncu 对各向异性材料圆盘转子进行了分析,提出了各向异性转子应力的计算方法<sup>[9]</sup>;Sung K. Ha 通过理论分析和实验验证了转子尺寸、不同材料系统以及纤维缠绕角对转子应力分布的影响<sup>[8,10]</sup>,并且对纤维连续缠绕成型的转子和过盈装配成型的转子强度进行了比较<sup>[11]</sup>;Hasan Callioglu 等人对各向异性高速转子在压力载荷和热载荷作用下的应力分布进行了研究<sup>[12]</sup>;Shaobo Wen 等在考虑转子加减速和重力的情形下,用位移法对复合材料转子的储能密度进行了优化设计<sup>[13]</sup>;秦勇等人提出了基于叠加原理的多环过盈嵌套转子的应力计算方法,对转子过盈装配的初始应力进行了修正<sup>[14]</sup>;李成等讨论

了具有不同杨氏模量的复合材料对径向、环向应力和径向位移的影响,仿真分析了复合材料飞轮转子在不同边界条件、几何参数情况下的应力和位移<sup>[15]</sup>。以上学者的研究结果说明,多环过盈装配在复合材料转子圆环中产生径向的初始压应力,在转子高速转动时它会与离心拉应力相抵消,是提高复合材料转子径向强度的十分有效的措施。

本文针对课题组所研制的超导磁悬浮姿控/储能飞轮,提出了一种由磁轴承、金属轮毂和复合材料过盈装配的飞轮外转子设计方案<sup>[16]</sup>。采用空心杯磁轴承和电机作为飞轮的支撑和动力部件,通过金属轮毂将磁轴承和复合材料转子连接起来,磁轴承、金属轮毂和复合材料圆环之间通过过盈装配相连接,以在转子圆环中产生初始的径向压应力,提高转子的径向强度。本文利用平面应力理论和有限元的方法,建立金属轮毂和复合材料多环过盈装配的应力模型,分析金属轮毂、转子圆环厚度和环间过盈量等因素对飞轮转子强度的影响,提出转子的优化设计方案,提高了飞轮的转速,从而提高了储能密度。本文的研究结果可以为复合材料飞轮转子的设计、制造和优化提供依据。

## 2 转子应力分析

### 2.1 超导磁悬浮飞轮结构

本文所研究的超导磁悬浮储能飞轮结构如图 1 所示,为提高飞轮储能密度,飞轮采用外转子结构,电机和径向磁轴承组件安装在金属轮毂内腔,为转子提供转矩和径向支撑;金属轮毂的上下两端分别为轴向主动磁轴承和超导磁轴承,为飞轮

转子提供轴向支撑<sup>[16]</sup>。本文主要研究转子的力学特性和强度,其结构如图 2 所示,转子最内环为磁轴承和电机组件,次内环为金属轮毂,外侧 3 个环为复合材料,不同圆环之间通过过盈配合实现连接。金属轮毂为中空的结构,外缘采用了很小的厚度,可以保证轮毂与复合材料之间的连接强度,避免因与复合材料圆环径向变形量不同而发生松脱。同时,金属轮毂的引入,可以改善转子的总体应力分布,通过金属轮毂与复合材料内环的过盈配合,可以提高复合材料圆环的径向预应力,从而抵消因高速转动产生的离心力,保证转子的径向强度。

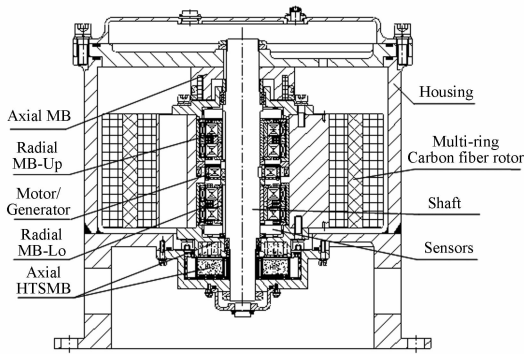


图 1 超导磁悬浮储能飞轮结构

Fig. 1 Sketch of superconducting energy storage flywheel

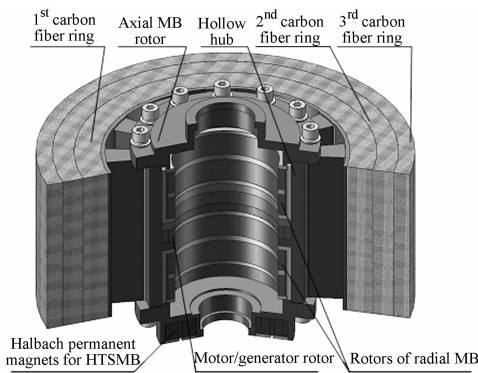


图 2 金属轮毂-复合材料转子结构

Fig. 2 Structure of metal-composite flywheel rotor

## 2.2 转子应力数值分析

论文对金属-金属、金属-复合材料以及复合材料-复合材料过盈装配模型进行统一建模,假设复合材料在缠绕时保持对称缠绕,则金属轮毂和复合材料环都可以简化为轴对称的平面应力问题

进行分析,从而得到转子圆环在极坐标系下的位移控制微分方程<sup>[8]</sup>:

$$r^2 \frac{d^2 u_r}{dr^2} + r \frac{du_r}{dr} - \lambda^2 u_r + \frac{r^2}{E_\theta} (\lambda^2 - \nu_\theta^2) \rho r \omega^2 = 0, \quad (1)$$

其中:  $\lambda = \sqrt{E_\theta/E_r}$ 。

其通解为:

$$u_r = C_1 r^\lambda + C_2 r^{-\lambda} + \frac{(\lambda^2 - \nu_\theta^2) \rho r^3 \omega^2}{E_\theta (\lambda^2 - 9)}. \quad (2)$$

在转子高速转动时,圆环在内外压力作用下的应力解和位移解,如公式(3)所示:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{(l r_o^2 + q_b) r_i^{\lambda+1} - (l r_i^2 + q_a) r_o^{\lambda+1}}{r_i^{2\lambda} - r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda-1} + \\ &\frac{(l r_i^2 + q_a) r_i^{\lambda+1} r_o^{2\lambda} - (l r_o^2 + q_b) r_i^{2\lambda} r_o^{\lambda+1}}{r_i^{2\lambda} - r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda-1} + l r^2 \\ \sigma_\theta &= C \frac{(l r_o^2 + q_b) r_i^{\lambda+1} - (l r_i^2 + q_a) r_o^{\lambda+1}}{A r_i^{2\lambda} - A r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda-1} + \\ &D \cdot \frac{(l r_i^2 + q_a) \cdot r_i^{\lambda+1} r_o^{2\lambda} - (l r_o^2 + q_b) r_i^{2\lambda} r_o^{\lambda+1}}{B r_i^{2\lambda} - B r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda-1} + \\ &(3\nu_\theta + \lambda^2) \frac{\rho \omega^2}{\lambda^2 - 9} r^2 \\ u_r &= \frac{(l r_o^2 + q_b) r_i^{\lambda+1} - (l r_i^2 + q_a) r_o^{\lambda+1}}{A r_i^{2\lambda} - A r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda} + \\ &\frac{(l r_i^2 + q_a) r_i^{\lambda+1} r_o^{2\lambda} - (l r_o^2 + q_b) r_i^{2\lambda} r_o^{\lambda+1}}{B r_i^{2\lambda} - B r_o^{2\lambda}} r^{-\lambda} + \\ &\frac{(\lambda^2 - \nu_\theta^2) \rho r^3 \omega^2}{E_\theta (\lambda^2 - 9)} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中:  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $u_r$  分别为转子圆环的径向、环向应力(单位:Pa)和径向位移(单位:m),  $q_a$  和  $q_b$  分别为圆环内外表面的压力(单位:N),且:  $A = E_\theta / (\lambda - \nu_\theta)$ ,  $B = -E_\theta / (\lambda + \nu_\theta)$ ,  $C = E_\theta \lambda / (\lambda - \nu_\theta)$ ,  $D = E_\theta \lambda / (\lambda + \nu_\theta)$ ,  $l = (3 + \nu_\theta) \rho \omega^2 / (\lambda^2 - 9)$ 。

## 2.3 转子应力场、位移场计算

对于多层不同材料过盈装配的圆环,要得到其应力场,首先要通过边界条件确定方程中的接触应力。对于  $N$  层不同材料转子,其最内层和最外层为自由面,径向应力为 0,即:

$$\sigma_r(r=r_{i1}) = \sigma_r(r=r_m) = 0.$$

对于圆环之间的过盈接触面,根据应力和位移连续性条件,在不发生失效破坏的情况下,其径向接触力相等,并且接触边界连续,即:

$$q_b(r=r_{j_0})=q_a(r=r_{(j+1)_i}),$$

$$u_r(r=r_{j_0})-u_r(r=r_{(j+1)_i})=\delta_{j,j+1}.$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{32} & K_{33} & K_{34} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{n-1,n-2} & K_{n-1,n-1} & K_{n-1,n} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & K_{n,n-1} & K_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{12} \\ p_{23} \\ p_{34} \\ \vdots \\ p_{n-2,n-1} \\ p_{n-1,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_{n-2} \\ C_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{12} \\ \delta_{23} \\ \delta_{34} \\ \vdots \\ \delta_{n-2,n-1} \\ \delta_{n-1,n} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用上述边界条件,可以建立多环过盈配合接触力和位移之间的关系矩阵,如公式(4)所示:

通过求解上述矩阵,可以得到各个圆环之间的接触力  $p$ ,利用公式即可以得到每个转子圆环的位移解和应力解。

### 2.4 转子应力有限元分析

尽管 Genta 指出,如果转子沿轴向的几何尺寸变化很小,则采用轴对称平面应力对其进行分析时,误差可以忽略<sup>[17]</sup>。然而,为了确定上述数值分析方法对金属轮毂-复合材料转子的适用性,并量化误差大小,论文采用有限元方法对前述方法进行了验证。采用 solid95 各向同性/各向异性结构单元对金属轮毂-复合材料转子建模,共建立 33 600 个有限元单元;通过有限元接触分析技术对其进行非线性分析,采用 Target170 和 Contact174 接触单元对过盈接触面建模,共形成 16 000 个接触单元。

有限元分析结果的对比可知,将平面应力分析方法应用于金属轮毂-复合材料类型转子的分析是合理的,从而可以使用前述的数值方法进行转子强度设计。

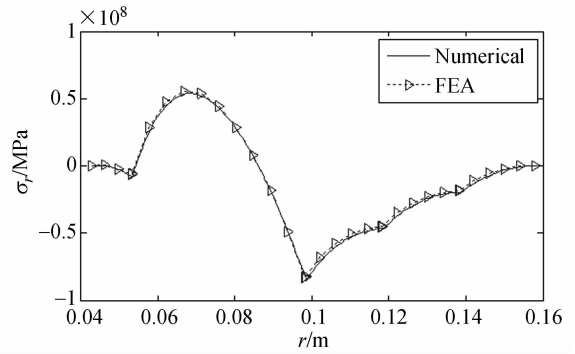


图 3 径向应力分布曲线  
Fig. 3 Radial stress distribution

表 1 转子材料参数

材料	TC4	3J33	T300	
$E/(10^{11} \text{ Pa})$	1.09	1.81	$E_\theta = 1.3$	$E_r = E_z = 0.09$
$\nu$	0.34	0.3	$\nu_{\theta r} = 0.3$	$\nu_{rz} = \nu_{\theta z} = 0.25$
$G/\text{MPa}$			$G_{rz} = 500$	$G_{\theta r} = G_{\theta z} = 200$
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	4 440	8 000	1 600	
$\sigma_s/\text{MPa}$	2 100	2 100	$X_r = 1 800$	$X_c = 1 400$
			$Y_t = 80$	$Y_c = 168$

转子材料选用钛合金 TC4、高强度钢 3J33 和复合材料 T300,材料参数如表 1 所示。转子内径为 42.5 mm,磁轴承/金属轮毂/3 个复合材料环厚度依次为 10,5,45,20,20,20 mm,环间过盈量依次为 0.2,0.25,0.3,0.3,0.4 mm。当转子以 40 000 r/min 的转速转动时,径向和环向应力分布曲线如图 3 和图 4 所示,从数值分析结果和有

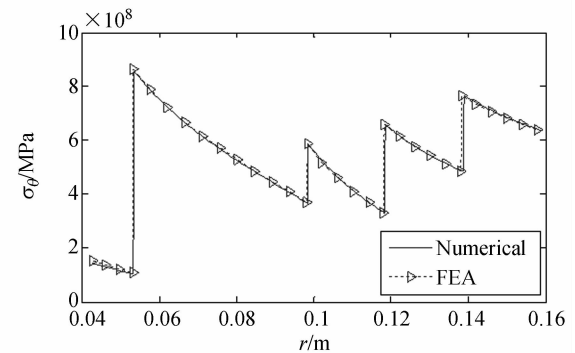


图 4 环向应力分布曲线  
Fig. 4 Circumferential stress distribution

## 3 转子强度影响因素分析

### 3.1 金属轮毂对转子强度的影响

对于复合材料转子,在没有金属轮毂时,其内径边缘为自由边界,径向应力为 0,然而当金属轮

毂加入以后,其位移受到限制,会产生一定的径向压应力,这会导致整个转子的应力分布发生变化。在 40 000 r/min 的转速下,采用数值计算方法分别对复合材料转子(case2)和金属轮毂-复合材料转子(case1)的强度进行研究,为保证变量的单一性,得到金属轮毂的加入对转子强度的影响,case1 和 case2 中复合材料圆环的厚度相同,都为 20 mm,环间过盈量为都为 0.3 mm。其应力分布如图 5 和图 6 所示。

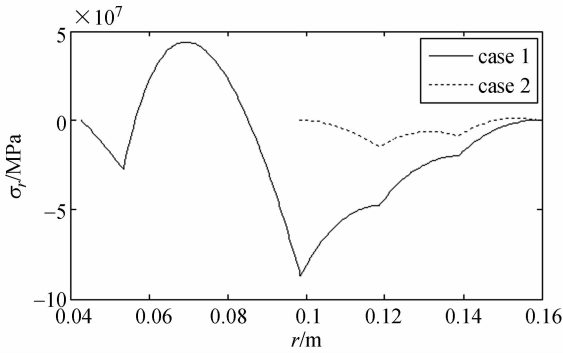


图 5 金属轮毂加入前后转子的径向应力

Fig. 5 Radial stress distribution of the rotor with and without steel hubs

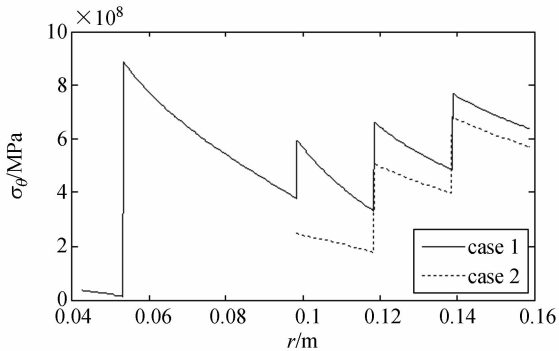


图 6 金属轮毂加入前后转子的环向应力

Fig. 6 Circumferential stress distribution of the rotor with and without steel hubs

从分析结果可知,金属轮毂的加入使转子的应力完全发生了变化,复合材料内环与金属轮毂之间的接触压力由 0 MPa 增大到 85.1 MPa,复合材料内环与中环的接触压力由 15.9 MPa 增大到 46.5 MPa,复合材料中环与外环的压力由 8.1 MPa 提高到了 19.4 MPa。由于各个接触面的接触应力都有较大程度的增大,说明金属轮毂的加入,在很大程度上提高了材料部分的径向强度,允

许复合材料承受更高的转速而不发生分层破坏,提高了飞轮的储能密度。复合材料中的环向应力也有较大程度的提高,但由于其环向强度很高,应力依旧在允许范围内。从总体上讲,金属轮毂的加入,提高了转子强度,有利于转子强度和飞轮储能密度的提高。

### 3.2 复合材料环厚度对转子强度的影响

为研究转子中复合材料圆环厚度对转子强度的影响,采用数值计算方法对采用不同复合材料圆环厚度排列的转子进行了应力分析。转子中,金属轮毂厚度保持不变,复合材料圆环的厚度变化如表 2 所示,其中  $T_1/T_2/T_3$  分别表示碳纤维内环、中环和外环的厚度。为保证变量的单一性,case1 到 case4 中金属轮毂和复合材料以及 3 个复合材料环间的过盈量分别为 0.25, 0.3, 0.3 mm。在 40 000 r/min 的转速下,转子强度的数值分析结果如图 7 和图 8 所示。

表 2 复合材料圆环厚度

Tab. 2 Thicknesses of composite rings in different rotors

转子厚度	$T_1$ /mm	$T_2$ /mm	$T_3$ /mm
case1	20	20	20
case2	30	20	10
case3	20	30	10
case4	10	20	30

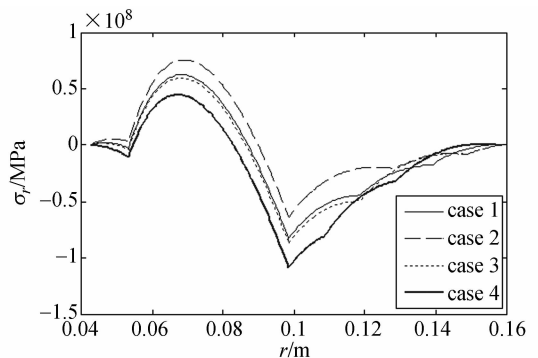


图 7 不同圆环厚度时转子的径向应力

Fig. 7 Radial stress distribution of rotors with different thicknesses of rings

从结果可知,当转子圆环厚度变化时,转子中的应力尤其是圆环过盈面的应力发生了明显的变化。与 case1 中的等厚圆环相比,当复合材料内环厚度增大时,会使环间最小接触压力减小 9 MPa,从而径向接触应力更加均匀;同时金属轮毂中的最

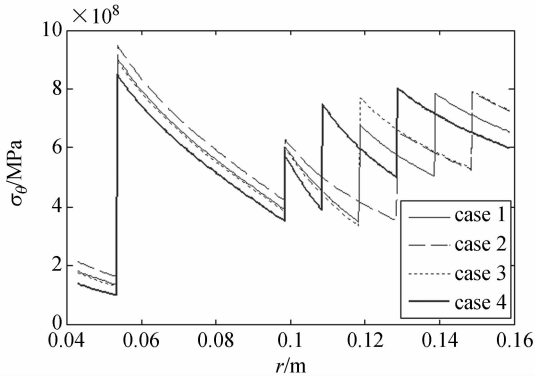


图 8 不同圆环厚度时转子的环向应力

Fig. 8 Circumferential stress distribution of rotors with different thicknesses of rings

大径向应力和环向应力分别增大 13 MPa 和 50 MPa;当复合材料外环厚度增大时,可以使环间的最小接触压力增大 15 MPa,金属轮毂中的径向应力和环向应力分别减小 17 MPa 和 57 MPa。综合对比以上应力变化趋势可以发现,增大复合材料内环的厚度,可以使转子中的应力更为均匀;增大复合材料外环的厚度,不仅会增加转子的径向强度,还会减小转子的环向应力,有利于转子强度的增加。

### 3.3 环间过盈量对转子强度的影响

为研究复合材料环间过盈量对转子强度的影响,对采用不同环间过盈量的转子进行了应力分析,环间过盈量数值如表 3 所示,其中  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  分别为金属轮毂与复合材料内环、复合材料内环与中环、复合材料中环与外环之间的过盈量。为保证变量单一,算例中各个复合材料环采用了相同的厚度,都为 20 mm。在 40 000 r/min 转速下,转子强度的数值分析结果如图 9 和图 10 所示。

表 3 转子环间过盈量

Tab. 3 Interference between rings in different rotors (mm)

转子厚度	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$
case1	0.25	0.3	0.3
case2	0.35	0.3	0.3
case3	0.25	0.4	0.3
case4	0.25	0.3	0.4

从结果可知,增大 2 个环间的过盈量,会使各

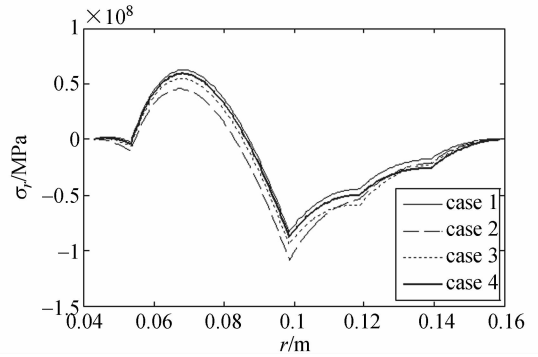


图 9 不同过盈量时转子的径向应力

Fig. 9 Radial stress distribution of rotors with different interferences

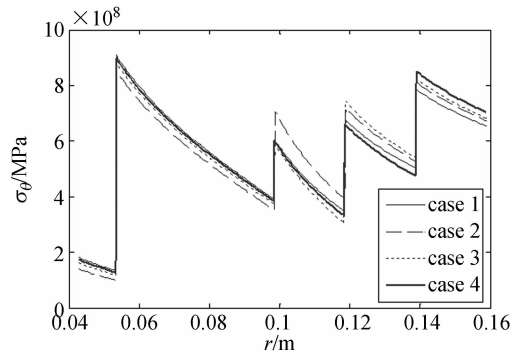


图 10 不同过盈量时转子的环向应力

Fig. 10 Circumferential stress distribution of rotors with different interferences

环间的接触压力增大,提高转子强度。复合材料内环和金属轮毂之间的过盈量增加时,会使金属轮毂与复合材料内环的接触压力增大 25 MPa,而复合材料中环与外环的接触压力仅增加 4 MPa,依旧是转子的薄弱环节。当复合材料中环与外环之间的过盈量增加时,会使此接触面的压力增加 9 MPa,同时转子的最大环向应力会增加 55 MPa,但是依旧在许用范围之内。综合以上分析可知,复合材料中环和外环之间的接触面为转子的薄弱环节,增大这两个接触面之间的过盈量,更有利于提高转子强度。

## 4 优化设计方案

在前述分析的基础之上,综合考虑金属轮毂、转子圆环厚度和环间过盈量对转子强度的影响,提出了转子的优化设计方案,图 11 为转子实物图,表 4 为转子的主要参数。复合材料内环采用

的是  $90^\circ$  和  $\pm 75^\circ$  缠绕,外侧两个环全部采用  $90^\circ$  缠绕的方式,3个复合材料环依次过盈装配到金属轮毂上,并且在  $10\,000\text{ r/min}$  的转速下对转子进行了合格检测。

根据 3.2 的分析结果,复合材料内环厚度较大时可以使转子中的应力更为均匀,而外环的厚度较大时,可以提高转子强度,最终 3 个复合材料圆环厚度分别设计为 21, 17, 23.5 mm; 根据 3.3 的分析结果,最外侧两个环的连接强度为转子的薄弱环节,为提高其强度,金属轮毂和三个复合材料圆环的环间过盈量分别为 0.3, 0.3, 0.4 mm。

在  $50\,000\text{ r/min}$  转速下,对优化设计方案进行了应力分析,复合材料圆环中的最大径向应力分别为  $-9.6$ ,  $-20.6$  和  $0.181\text{ MPa}$ , 分别位于各个转子圆环的外缘附近,而接触应力都为压应力,从而转子在  $50\,000\text{ r/min}$  下不会发生分层破坏。转子中的最大环向应力分别为 732、838 和  $1\,100\text{ MPa}$ 。经过最大径向应力准则、最大环向应力准则和蔡-吴准则校核,满足强度设计要求。

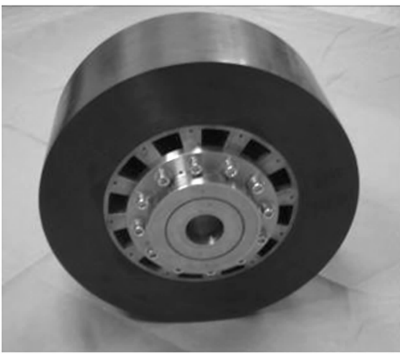


图 11 金属轮毂-复合材料飞轮转子实物图

Fig. 11 Appearance of mental-composite flywheel rotor

表 4 金属轮毂-复合材料飞轮转子主要设计参数

Tab. 4 Main characteristic of the designed mental-composite material rotor

项目	参数	项目	参数
复合材料	T300	金属轮毂材料	18Ni350
转子内径/mm	42.5	转子外径/mm	159.5
轴向长度/mm	131	圆环厚度/mm	45/21/17/23.5
转动惯量/ $\text{kgm}^2$	0.292	环间过盈量/mm	0.3/0.3/0.4
总质量/kg	27.66	额定转速/( $\text{r/min}$ )	50 000
线速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	835.1	最大转速/( $\text{r/min}$ )	52 500
总储能/Wh	1 110	储能密度/( $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	40

## 5 结 论

本文针对一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮,提出了一种金属轮毂-复合材料飞轮外转子设计方案,并对其进行了强度分析和优化。采用金属轮毂,能够保证磁轴承和复合材料部分的连接强度,改善复合材料的应力分布,提高其径向强度,最终提高飞轮的储能密度。在此基础之上,建立转子的应力分布模型,对影响转子应力分布的因素进行了分析。分析结果表明,加入金属轮毂,增大复合材料外环的厚度以及外环部分的环间过盈量,都可以增大转子的径向强度,对于提高飞轮的储能密度,是十分有利的因素。最后,根据前述分析结果,提出了转子的优化设计方案,使转子的额定转速达到  $50\,000\text{ r/min}$ , 储能总量为  $1\,110\text{ Wh}$ , 储能密度达到  $40\text{ Wh/kg}$ 。

## 参考文献:

- [1] BITTERLY J G. Flywheel technology: past, present, and 21st century projections [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1998, 13: 13-16.
- [2] 刘强, 房建成, 韩邦成, 等. 磁悬浮飞轮锁紧装置及其优化设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1814-1821.
- LIU Q, FANG J CH, HAN B CH, *et al.*. Locking

- device for magnetic bearing flywheel and its optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1814-1821. (in Chinese)
- [3] 王春城, 房建成, 汤继强, 等. 磁悬浮反作用飞轮热设计方法与实验研究[J]. *航空学报*, 2011, 32(4): 598-607.
- WANG CH E, FANG J CH, TANG J Q, *et al.*. Thermal design method and experimental research of magnetically suspended reaction flywheel [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32

- (4):598-607. (in Chinese)
- [4] 韩邦成, 刘强. 基于自锁原理的磁悬浮飞轮电磁锁紧机构[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2456-2464.  
HAN B CH, LIU Q. Electromagnetic locking device based on self-locking for magnetic suspended flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2456-2464. (in Chinese)
- [5] 刘彬, 房建成, 刘刚. 基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器实现磁悬浮飞轮主振动控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 151-157.  
LIU B, FANG J CH, LIU G. Implementation of active vibration control for magnetically suspended flywheel based on TMS320C6713B + FPGA digital controller [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 151-157. (in Chinese)
- [6] 文少波, 蒋书运. 复合材料储能飞轮充放电过程应力分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1839-1844.  
WEN SH B, JIANG SH Y. Stress analysis of composite energy storage flywheel in charge-discharge process [J]. *Acta Energy Solaris Sinica*, 2011, 32(12): 1839-1844. (in Chinese)
- [7] 白越, 黎海文, 吴一辉, 等. 复合材料转子设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 852-857.  
BAI Y, LI H W, WU Y H, *et al.*. Design of composite flywheel rotor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 32(12): 1839-1844. (in Chinese)
- [8] HA S K, KIM H T, HAN S C. Effects of rotor size and epoxy system on the process-induced residual strains within multi-rings composite rotors [J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38: 871-885.
- [9] TUTUNCU N. Effect of anisotropy on stress in rotating discs [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 1995, 37: 873-881.
- [10] HA S K, JEONG J Y. Effects of winding angles on through-thickness properties and residual strains of thick filament wound composite rings [J]. *Composite Science and Technology*, 2005, 65: 27-35.
- [11] SUNG K H, SEONG J K, SANA U N, *et al.*. Design optimization and fabrication of a hybrid composite flywheel rotor [J]. *Compos Struct*, [2012]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comstruct.2012.04.015>.
- [12] HASAN C, MUZAFFER T, GÜRKAN A. Stress analysis of curvilinearly orthotropic rotating discs under mechanical and thermal loading [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2005, 24: 831-838.
- [13] WEN SH B, JIANG SH Y. Optimum design of hybrid composite multi-ring flywheel rotor based on displacement method [J]. *Composite Science and Technology*, 2012, 72: 982-998.
- [14] 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 复合材料空心飞轮多环套装整体变形及应力简化精细分析[J]. 复合材料学报, 2003, 20(5): 95-99.  
QIN Y, XIA Y M, MAO T X. Simplified and fine analyses of the full deformation and stress of Pressfit of the hollow multi-ring composite flywheel [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(5): 95-99. (in Chinese)
- [15] 李成, 万志超, 郑艳萍, 等. 不同杨氏模量对复合材料储能飞轮应力及位移影响之比较[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1609-1614.  
LI CH, WAN ZH CH, ZHENG Y P, *et al.*. Comparison of effects of different young's moduli on stress and displacement of composite flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1609-1614. (in Chinese)
- [16] TANG JQ, FANG J C, GE S S. Roles of superconducting magnetic bearings and active magnetic bearings in attitude control and energy storage flywheel [J]. *Physica C*, 2012, 483: 178-185.
- [17] GENTA G. Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems [J]. *London: Butterworth & Co Ltd*, 1985: 60-69.

## 作者简介:



**汤继强**(1972—),男,重庆人,博士后,副教授,硕士生导师,2005年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术的研究。E-mail: tjq\_72@163.com



**赵丽滨**(1976—),女,博士,副教授,博士生导师,1996年于北京航空航天大学获得学士学位,2011年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事复合材料结构力学,结构分析及优化,结构可靠性,结构动力学,有限元及边界元中的数值方法等方面的研究。E-mail: lbzhao@buaa.edu.cn

## 通讯作者:



**张永斌**(1987—),男,河北保定人,硕士研究生,2011年于华中科技大学机械学位获得学士学位,主要从事磁悬浮控制力矩陀螺和磁悬浮飞轮的结构设计优化研究。E-mail: zhang6350668@foxmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)