

文章编号 1004-924X(2007)06-0852-06

# 复合材料飞轮转子设计

白 越<sup>1,2</sup>, 黎海文<sup>1,2</sup>, 吴一辉<sup>1,2</sup>, 宣 明<sup>2</sup>

1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033)

**摘要:** 考虑到转子与驱动机构的连接, 给出了一种金属轮毂加复合材料轮缘结构飞轮转子的设计方法。分析了转子材料、结构、连接及制作工艺等因素对储能密度的影响, 分析结果表明: 复合材料轮缘内外径比值  $\alpha$  是影响其储能密度的关键, 根据轮缘材料选取合理值, 对轮毂进行优化可以进一步提高转子的储能密度。分析中所用复合材料及胶粘剂力学常数的准确性是影响仿真结果的主要因素, 通过实验对其理论值进行修正可以进一步提高仿真结果的准确性。对实际应用中的一个具体飞轮转子进行了设计并制作出了转子, 在 20 000 r/min 转速范围内进行了旋转应力实验, 仿真分析与实验结果取得了较好的一致性, 证明了本文设计方法的正确性。

**关键词:** 复合材料; 飞轮转子; 储能密度; 仿真分析

**中图分类号:** TH133.7 **文献标识码:** A

## Design of composite flywheel rotor

BAI Yue<sup>1,2</sup>, LI Hai-wen<sup>1,2</sup>, WU Yi-hui<sup>1,2</sup>, XUAN Ming<sup>2</sup>

1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** A design method of flywheel rotor consisting of composite rim and metal hub is given considering connection between rotor and driving machine. The influence of the factors such as the material, configuration, connection and facture technics of rotor on the energy density is analyzed. In the result, the ratio of inner radius to outer radius of rim is a key factor for energy density, which is determined by rim material. Optimizing hub can also further improve the energy density. Due to the theory value of composite and the mechanic constant of glue is not exact, it has been revised via the experiment for improving the veracity of emulational results. A composite flywheel rotor is produced, moreover, the rotate stress testing is carried on the speed of 20 000 r/min. The results of emulation are consistent with test, it is proved to be right of the design method on the paper.

**Key words:** composite material; flywheel rotor; energy density; simulation analysis

收稿日期: 2007-01-26; 修订日期: 2007-03-21.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(No. B02X04Z); 中科院“十五”预研项目(No. 42201030108); 长春光机所青年基金资助项目(No. O59X12Q050)

## 1 引言

利用飞轮进行能量存储是由美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 Dr. Richard Post 在 1973 年提出的。飞轮储能和蓄电池储能相比,具有储能密度高、充放电次数多、寿命长、效率高、体积小、工作范围宽、无环境污染、可获得大的功率峰值等优点<sup>[1,2]</sup>。80 年代末期,随着高强度复合材料、磁悬浮技术等相关技术的发展,飞轮储能前景日益广阔,美国、加拿大等国的许多科研机构和公司开始投入力量进行此方面的研究工作<sup>[3-5]</sup>。

复合材料飞轮转子是储能飞轮系统中的关键部件,其设计及制作直接决定了系统性能。对于以空间应用为背景的复合材料飞轮转子,高储能密度是其最主要的目标,同时还要考虑到对体积的限制。国内外文献中对复合材料转子本身的优化设计及应力分析进行了较为详细的研究<sup>[6-8]</sup>,但没考虑到在实际应用中与驱动机构的连接问题,而连接问题在实际应用中是不可避免的。本文在考虑连接问题的前提下,针对应用于空间飞行器储能及调姿用复合材料飞轮转子,通过理论计算、有限元仿真以及实验的对比研究,分析材料及结构对转子储能密度的影响。在此基础上,探讨价格、制作工艺以及储能密度等综合性能较好的优化结构,同时探讨其制作工艺。

## 2 复合材料飞轮转子设计及制作

### 2.1 飞轮储能原理及其材料的选择

飞轮储能的基本原理是:电能经由电动机驱动飞轮升速转化为机械能,利用飞轮的惯性存储动能;当飞轮降速时,电动机做发电机运行,将飞轮存储的动能转化为电能。利用飞轮的升速和降速实现电能的存储和释放。

飞轮高速旋转时的动能就是飞轮的最大储能量  $E$ ,单位质量所存储的能量称为储能密度(比能量密度)  $U$ ,表达式为:

$$E = \frac{1}{2} I \bar{\omega}^2, \quad (1)$$

$$U = \frac{E}{m} = \frac{1}{2} \frac{I}{m} \bar{\omega}^2. \quad (2)$$

式中:  $I$ —飞轮轴向转动惯量,  $m$ —飞轮质量,  $\bar{\omega}$ —

飞轮转动角速度。

$U$  表达式中  $I/m$  与飞轮的材料特性和结构形状有关,而角速度  $\bar{\omega}$  受飞轮材料的比强度所限制。因此,储能飞轮要想得到高的储能密度,应采用低密度、高比强度材料,同时还要对飞轮结构形状进行优化设计<sup>[9]</sup>。由于碳纤维/树脂复合材料比强度高,可达到较高的储能密度,是目前国内外制作飞轮的首选材料,因此,选用碳纤维/树脂复合材料作为飞轮转子材料<sup>[10]</sup>。

### 2.2 转子结构

对于以空间应用为背景的复合材料飞轮转子设计,高储能密度是其最主要的目标。理论分析可知,对于旋转的回转体来说,要想得到高的储能密度,质量应该尽量分布在回转体边缘。飞轮转子一般由碳纤维/树脂复合材料直接在驱动轴上缠绕成盘形,驱动轴尺寸较小,轴和复合材料连接部位旋转应力高,限制了转子工作转速的提高。为了克服以上不足,本文提出的飞轮转子采用复合材料轮缘和金属轮毂构成,采用比强度高的碳纤维/树脂复合材料缠绕成轮缘,轮缘通过轮毂与驱动轴连接,在同样转速下,该结构飞轮转子中复合材料轮缘与轮毂连接部位旋转应力相对较小,提高了转子的工作转速。为得到高的储能密度,同时考虑碳纤维/树脂复合材料沿纤维方向的线膨胀系数很小( $(0.60 \sim 4.30) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ),因此轮毂材料选用比强度高且热膨胀系数小的钛合金。对轮缘和轮毂结构进行优化设计并优选连接工艺可以提高储能密度。由于碳纤维价格昂贵,采用复合材料轮缘和金属轮毂结构的飞轮转子具有成本低的优点。

### 2.3 轮缘设计

碳纤维/树脂复合材料具有可设计性,但缠绕加工工艺较复杂,不易制作形状复杂的飞轮;圆环形状轮缘加工工艺相对简单,储能密度高,体积紧凑,因此复合材料轮缘大多采用圆环状。假设复合材料轮缘结构如图 1 所示,则圆环形状轮缘质量和轴向转动惯量为:

$$m = \pi \rho h (R^2 - r^2), \quad (3)$$

$$I = \frac{1}{2} m (r^2 + R^2). \quad (4)$$

式中:  $r, R$ —飞轮内、外径,  $h$ —飞轮厚度。相应的储能密度为:

$$U = \frac{E}{m} = \frac{1}{4} (1 + \alpha^2) v_k^2, \quad (5)$$

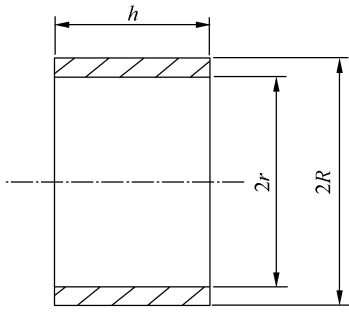


图 1 飞轮结构

Fig. 1 Flywheel configuration

式中 \$\alpha\$—飞轮内、外径比, \$v\_R\$—飞轮外径边缘线速度。由式(5)可知, 储能密度和飞轮外径边缘线速度的平方成正比, 同内、外径比 \$\alpha\$ 也有关系, 随 \$\alpha\$ 增大而增大。因此, 为了得到较大的储能密度, 应采用 \$\alpha\$ 和 \$R\$ 大的薄壁圆环结构。

根据飞轮转动时的应力分析可知最大周向应力:

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{1}{4} \rho [3 + \mu + (1 - \mu) \alpha^2] v_R^2, \quad (6)$$

最大径向应力:

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{1}{8} \rho (3 + \mu) (1 - \alpha)^2 v_R^2, \quad (7)$$

方程(6)、(7)当满足飞轮强度约束条件 \$\sigma\_{r\_{\max}} \leq \sigma\_r\$, \$\sigma\_{r\_{\max}} \leq \sigma\_t\$ 时, 得出:

$$\alpha = \alpha_1 = \frac{a_2}{2a_1} (1 - \sqrt{1 - 4a_1 a_3 / a_2^2}), \quad (8)$$

式(8)中:

$$a_1 = \sigma_t (3 + \mu) - 2\sigma_r (1 - \mu)$$

$$a_2 = 2\sigma_t (3 + \mu)$$

$$a_3 = (\sigma_t - 2\sigma_r) (3 + \mu)$$

\$\alpha\_1\$—\$\sigma\_t\$、\$\sigma\_r\$ 约束下 \$v\_R\$ 相同时的 \$\alpha\$ 值,

\$\sigma\_t\$、\$\sigma\_r\$—周向、径向强度极限。

碳纤维/树脂材料:

$$v_{R_{\max}}^2 = \min \left[ \frac{4}{\rho} \left[ \frac{\sigma_t}{3 + \mu + (1 - \mu) \alpha^2}, \frac{2\sigma_r}{(3 + \mu) (1 - \alpha)^2} \right] \right], \quad (9)$$

周向强度极限 \$\sigma\_t\$ 远大于径向强度极限 \$\sigma\_r\$, 整理公式(9)得:

$$v_{R_{\max}} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{2\sigma_r}{\rho(3+\mu)(1-\alpha)^2}} & 0 < \alpha < \alpha_1 \\ 2\sqrt{\frac{\sigma_t}{\rho[3+\mu+(1-\mu)\alpha^2]}} & \alpha_1 < \alpha < 1 \end{cases}, \quad (10)$$

将式(10)代入式(5)得最大储能密度和内、外径比 \$\alpha\$ 的关系

$$U_{\max}(\alpha) = \begin{cases} \frac{2\sigma_r(1+\alpha^2)}{\rho(3+\mu)(1-\alpha)^2} & 0 < \alpha < \alpha_1 \\ \frac{\sigma_t(1+\alpha^2)}{\rho[3+\mu+(1-\mu)\alpha^2]} & \alpha_1 < \alpha < 1 \end{cases}, \quad (11)$$

由 \$U\_{\max}(\alpha)\$ 的单调性分析知, \$U\_{\max}(\alpha)\$ 随 \$\alpha\$ 递增, 但 \$\alpha\_1 < \alpha < 1\$ 时的递增梯度相对 \$0 < \alpha < \alpha\_1\$ 时的递增梯度小得多。当内、外径比 \$\alpha\$ 取 \$\alpha\_1\$ 时, 飞轮储能密度接近最大, 当内、外径比 \$\alpha\$ 取 \$\alpha\_1 < \alpha < 1\$ 时, 飞轮的体积将变得很大, 而且此时储能密度的增加很有限, 所以对于外环来说, \$\alpha\$ 取 \$\alpha\_1\$ 时具有较好的综合性能。从应力分析的观点看, 当内、外径比 \$\alpha\$ 取 \$\alpha\_1\$ 时, 径向应力和周向应力同时达到强度极限, 充分利用了材料强度。所以, 在设计碳纤维/树脂复合材料高速飞轮转子外环时, 一般内、外径比 \$\alpha\$ 取 \$\alpha\_1\$, 此时飞轮具有较好的综合性能。仅当对重量有严格要求时, 可取 \$\alpha > \alpha\_1\$, 但此时飞轮转子的体积将变得很大。

以碳纤维增强/环氧树脂复合材料绕制飞轮为例, 材料性能为 \$\mu = 0.3\$, \$\sigma\_t = 4.0\$ GPa, \$\sigma\_r = 180\$ MPa, \$\rho = 1750\$ kg/m\$^3\$。代入式(8)计算得 \$\alpha\_1 = 0.69\$, 代入式(10)、(11)计算得图 2、3。

飞轮尺寸 (\$h, r, R\$) 根据要求的最大储能量, 参照本文计算所得内、外径比 \$\alpha\$, 同时考虑系统工作空间限制来确定。

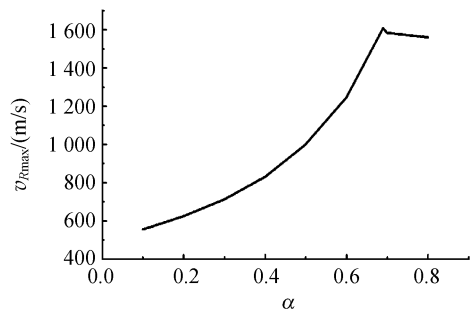


图 2 飞轮边缘线速度

Fig. 2 Rim speed of flywheel

## 2.4 轮毂设计

飞轮转子通过轮毂的中心孔与驱动轴相连接。轮毂的优化设计的目的有二: (1) 在满足强度的前提下, 使轮毂的轴向转动惯量最大, 也就是使轮毂的储能密度最大; (2) 使转动时的应力分布均匀, 充分利用材料的使用性能。有限元法是结构

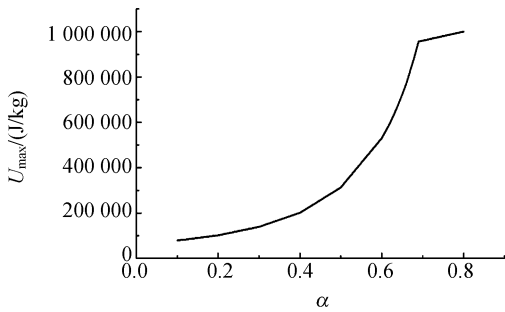


图3 飞轮储能密度

Fig. 3 Energy density of flywheel

设计理论和计算机技术相结合的产物,其精度高、计算规范<sup>[11]</sup>,利用有限元分析软件 ANSYS 对轮毂进行了优化设计。在满足强度的条件下,同时考虑加工工艺的可实现性,建立轮毂的优化模型,轮毂的应力分布如图4所示,从图4可以看出应力分布是比较均匀的。需要说明的是在图4中轮毂应力云图中深色部分对应的应力值较低,其目的是为后续的平衡工艺预留应力余量。

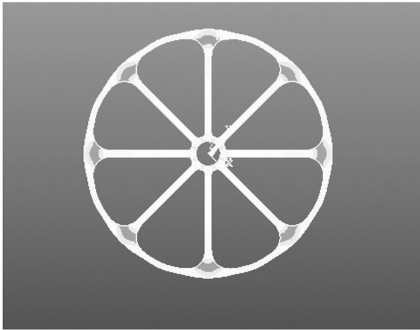


图4 轮毂应力图

Fig. 4 Wheel hub stress

### 3 转子制作工艺

对于本文所要设计的一个具体飞轮而言,材料选用碳纤维增强/环氧树脂复合材料,其材料性能如前文。由分析可知,取内、外径比  $\alpha = \alpha_1 = 0.69$ ,根据系统所限定的空间位置确定飞轮外径,取  $R=0.125$  m,飞轮厚度  $h$  根据所需总的储能要求计算,得  $h = 0.03$  m。

复合材料的连接可分为胶接、机械连接和混合连接等类型。胶接是最主要的连接方式,具有如下优点:无钻孔引起的应力集中,连接效率高,结构轻;抗疲劳、密封、减震及绝缘性能好;有阻止

裂纹扩展作用,破损安全性好;能获得光滑气动外形;不同材料连接无电偶腐蚀问题。对于本文所要设计的飞轮转子来说,上述优点正是所需要的,因此选用胶接的连接方式。通过仿真发现,采用低模量的韧性胶粘剂,可以使飞轮转子的应力减小。

增加胶层厚度,可以减小应力集中,提高连接强度,但厚度过大易产生气泡等缺陷,反使强度下降;胶层薄则要求被胶接件间贴合度高,因而不宜过薄。通过实验,优选胶层厚度,使其具有较好的综合性能。控制转子外环内径和轮毂外径尺寸的上下偏差,可以保证胶层厚度在要求的尺寸范围内。通过实验发现,对钛合金轮毂胶接面进行氢氟酸表面处理,对飞轮转子外环的胶接面进行有机溶剂清洗和表面打磨,可以有效提高胶接质量。

制作出的复合材料飞轮转子实物如图5所示。

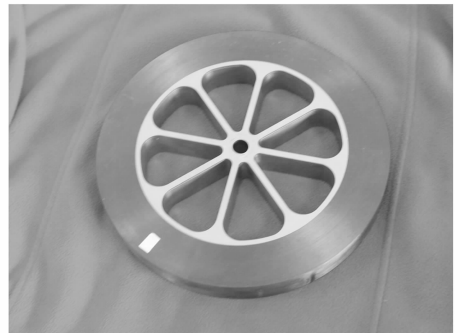


图5 复合材料飞轮转子

Fig. 5 Composite flywheel rotor

### 4 应力分析及实验

转子在高速旋转时产生惯性离心力,离心力导致转子中应力的出现,当应力达到材料的强度极限时,转子破损。应用 ANSYS 软件对转子进行应变分析,得到最大径向膨胀量同转速的对应曲线如图6中仿真曲线所示。建立了飞轮应变测试系统,测得转子最大径向膨胀量与转速的实际对应关系如图6中实验测试曲线所示。

从图6可以看出,仿真分析与实验测试结果具有较好的一致性,误差在6%以内。转速在2000 r/min以下时,实验值大于仿真值;2000 r/min~20000 r/min时,实验值小于仿真

值,且随转速升高差值略有增大。导致上述现象的原因有三:(1)制作的飞轮转子外圆周并不是理想的圆形,存在制作误差;(2)仿真时碳纤维复合材料与胶粘剂的力学参数是理论值,和实际值有偏差;(3)实验过程中仪器与测试人员的主观性带来不可避免的偏差。采用实验测定飞轮转子复合材料及胶粘剂的力学参数的方式能够进一步提高仿真分析与实验的一致性。

由图 6 对比结果可知,仿真结果具有较高的可信性,其精度足够满足工程应用的需要。通过

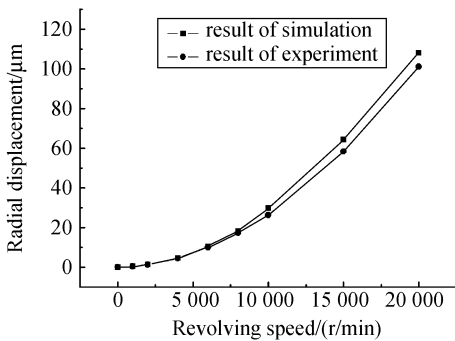


图 6 转子径向位移随转速变化曲线

Fig. 6 Radial displacement vs revolving speed

仿真和实验结果的对比,制作的飞轮转子极限转速为 50 000 r/min,该转速下的储能密度为 47.4 Whr/kg。

## 5 结 论

(1)对于碳纤维/树脂复合材料飞轮转子轮缘的设计分析可知,其内、外径比  $\alpha$  的合理选取是影响储能密度的关键。当  $\alpha=0.69$  时,所设计的转子轮缘具有较好的综合性能。通过对轮毂的优化设计,可进一步提高飞轮转子的储能密度;

(2)金属轮毂与复合材料外环采用胶接的连接方式是合理的,对复合材料环及金属轮毂进行表面处理可以有效提高胶接强度;

(3)仿真与实验结果具有较好的一致性,通过实验方式对复合材料及胶粘剂力学参数的理论值进行修正可以进一步提高仿真结果的准确性;

(4)本文提出的复合材料轮缘加金属轮毂结构的复合材料飞轮转子与其它结构相比,在价格、制作工艺以及储能密度上具有良好的综合性能。

## 参考文献:

- [1] 贾宏光,赵华兵,白越,等. 单轴储能及姿态控制一体化系统研究[J]. 光学 精密工程,2004,12(3):504-509.  
JIA H G,ZHAO H B,BAI Y, et al.. Single axis double flywheels integrated power and attitude control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3):504-509. (in Chinese)
- [2] 刘志华,白越,黎海文,等. 单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J]. 光学 精密工程,2006,14(1):127-132.  
LIU ZH H,BAI Y, LI H W, et al.. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double flywheels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 127-132. (in Chinese)
- [3] 韩邦成,房建成,吴一辉. 单轴飞轮储能/姿态控制系统的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(9):2511-2515.  
HAN B CH, FANG J CH, WU Y H. Simulation of a integrated power/attitude control system with single axis double flywheels[J]. *Journal of System Simulation*, 2006,18(9):2511-2515. (in Chinese)
- [4] 韩邦成,虎刚,房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. 光学 精密工程,2006,14(4):662-666.  
HAN B CH,HU G,FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 662-666. (in Chinese)
- [5] 杨杰伟,吴一辉,贾宏光,等. 轴向磁化永磁微电机磁场分析及设计方法研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(1):83-88.  
YANG J W, WU Y H, JIA H G, et al.. Design method and magnetic field analysis of axial-magnetized permanent magnet micromotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 83-88. (in Chinese)
- [6] HA S K, KIM D J,SUNG T H. Optimum design of multi-ring composite flywheel rotor using a modified generalized plane strain assumption[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2001, 49:993-1007.
- [7] HUANG J H,GEROGES M. Heterogeneous flywheel modeling and optimization[J]. *Materials and Design*, 2000, 21:111-125.
- [8] 秦永,夏源明. 复合材料飞轮结构及强度设计研究进展[J]. 兵工学报,2006,27(4):750-756.  
QIN Y, XIA Y M. Study on the structure and strength of composite flywheel[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27

(4):750-756. (in Chinese)

[9] 李文超,沈祖培. 复合材料飞轮结构与储能密度[J]. 太阳能学报,2001,22(1):96-101.

LI W CH, SHEN Z P. Composite material flywheel structure and energy storing density[J]. *Acta Energiae solaris Sinica*, 2001,22(1):96-101. (in Chinese)

[10] 李成功,傅恒志,于翹,等. 航空航天材料[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

LI CH G, FU H ZH, YU Q, *et al.*. *Aerospace Materials*[M]. Beijing:National Defence Industry Publishing Company,2002. (in Chinese)

[11] AMOLD S M, SALEEB A F, AL-ZOUBI N R. Deformation and life analysis of composite flywheel disk and multi-disk system[P]. NASA/TM,2001-210578.

作者简介:白越(1979—),男,博士,助研,主要研究方向为空间飞轮实用技术、空间摩擦及润滑学研究。E-mail: baiy@ciomp. ac. cn