

文章编号 1004-924X(2010)08-1814-08

磁悬浮飞轮锁紧装置及其优化设计

刘 强, 房建成, 韩邦成, 白国长

(北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

摘要:针对磁悬浮飞轮用一次性锁紧装置不可重复锁紧/释放的缺点,提出了一种基于电机、碳纤维弹片和钢丝绳的可重复锁紧装置,并给出了锁紧装置的结构和工作原理。根据执行锁紧过程碳纤维变形状况,将其分为弯曲变形和受压变形两个阶段,并在此基础上对锁紧装置进行了受力分析。利用多学科优化软件 iSIGHT 集成有限元分析软件对碳纤维弹片进行了优化设计,以材料强度、结构反力和共振频率多学科要求同时作为约束条件,采用针对离散变量的全域遍数法嵌套连续变量的序列二次规划法对碳纤维弹片质量进行优化。优化结果显示,碳纤维弹片个数为 12 时,碳纤维质量达到最小为 46 g,比初始质量 112 g 减少了 59%。结果表明,该优化方法提高了锁紧装置设计的可靠性和效率,对飞轮系统整体优化设计有重要意义。

关键词:磁悬浮飞轮;锁紧装置;多学科优化设计;混合离散变量;有限元;磁轴承

中图分类号:V414.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1814

Locking device for magnetic bearing flywheel and its optimization

LIU Qiang, FANG Jian-cheng, HAN Bang-cheng, BAI Guo-chang

*(Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Key Laboratory of
Fundamental Science for National Defense, Beihang University, Beijing 100191, China)*

Abstract: To remedy the defect of an one-off locking device which can not repeat locking or releasing for a magnetic bearing flywheel, a novel repeated locking device based on the motor, extension and shrinkage mechanism was proposed and the composition and working principles of the locking device were introduced. According to the deformation of carbon fiber, the locking process of locking device was divided into stages of bending and compressing, and its mechanical property was analyzed. The software of Multidisciplinary Design Optimization (iSIGHT) combined with the finite element analysis software (ANSYS) were applied to the optimization of carbon fibers. Then, by taking the structural strength, structural force and the resonance frequency as constraints, the carbon fiber was optimized by using the method of point-by-point comparing at macrocosm combined with the sequential quadratic programming method. The result indicates that the mass of carbon fiber reaches minimum by decreasing from 112 g to 46 g (is reduced by 59%) when the number of carbon fiber slices is 12. It is concluded that the method improves the reliability and efficiency of locking device designed, and has impor-

收稿日期:2009-10-16;修订日期:2010-01-18.

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(No. 60825305)

tant significance in the optimization design of flywheel systems.

Key words: magnetic bearing flywheel; locking device; multidisciplinary design; mixed dispersed variable; Finite Element Model (FEM); magnetic bearing

1 引 言

航天技术的发展对航天器的定姿、定轨精度提出了越来越高的要求,通常采用的稳定平台姿态的机械反作用飞轮和偏置动量轮逐渐显现出它们的缺陷与不足^[1]。磁悬浮飞轮系统是一种新型航天器姿态控制系统,与机械飞轮相比,在控制精度和使用寿命等方面具有明显优势^[2-4]。

磁悬浮飞轮在工作时,转子不是直接与定子刚性联接,而是在一定的磁保护间隙内弹性支撑,因此其必须采用额外的锁紧装置^[5-6]。当卫星处于发射段时,飞轮系统存在较大的振动载荷,为了防止飞轮系统的损坏,需通过锁紧装置将飞轮锁紧;在轨运行段,需解除飞轮原有的锁紧关系,使飞轮转子处于自由状态便于悬浮。因此,锁紧装置是磁悬浮飞轮中的关键部件,其可靠性、体积、质量、功耗等都必须严格符合要求。文献[7]介绍了1986年2月法国发射的“SPOT4”卫星所采用的气动锁紧装置,它依靠钢丝绳勒紧碳纤维压缩气囊抱紧飞轮,通过火工品斩断钢丝绳实现解锁功能。文献[8-9]研制了基于碳纤维和钢丝绳的锁紧装置。以上方案结构简单可靠,但只能使用一次。由于航天器发射前需进行相关试验和测试,需经常对其进行锁紧/释放,而当航天器变轨时,为防止自由状态的飞轮转子对航天器系统的干扰,也需要对飞轮进行锁紧,此外当航天器入轨工作时,还需解除原有的锁紧关系。所以,为了克服现有锁紧装置只能使用一次的缺点,有必要研制可重复锁紧装置。文献[10]研究了一种磁悬浮飞轮用电机锁紧装置,采用电机驱动来实现重复锁紧。文献[11]介绍了一种基于自锁原理的电磁锁紧装置。本课题组综合文献[7-10]所研究的锁紧装置的优点,并结合自主研制的磁悬浮飞轮的结构特点,提出了一种基于碳纤维和钢丝绳的可重复锁紧装置,利用电机作为执行机构来实现重复锁紧功能。

碳纤维弹片作为重复锁紧装置中的关键机

构,对飞轮系统的主要影响有:(1)在锁紧状态下,其所受的结构反力(解锁力)决定了系统的解锁可靠性;(2)当电机功率恒定时,钢丝绳最大张力保持不变,解锁力越大,碳纤维对飞轮转子的作用力(锁紧力)越小,即锁紧可靠性越低;(3)飞轮系统工作时,碳纤维弹片过低的一阶共振频率会引起飞轮系统共振,从而影响航天器定姿、定轨精度。因此,对碳纤维弹片进行优化设计具有重要意义。本文以碳纤维弹片质量为优化目标,考虑其材料强度、结构反力和一阶共振频率,通过改进文献[12-13]的设计方法,对弹片个数(离散变量)采用全域遍数法,对其它变量采用序列二次规划法,对结构进行了优化。

2 锁紧装置的介绍及其设计要求

2.1 结构及其工作原理

本文所研究的可重复锁紧装置结构见图1,其工作过程分为执行锁紧和执行解锁阶段。工作原理简述如下:当地面遥测量为“1”执行锁紧命令时,驱动机构(电机)带动螺杆正转,同时驱使固联在收紧机构(钢丝绳)2个旋向相反的螺母相向运动,使得收紧机构勒紧碳纤维弹片,从而抱紧飞轮转子将其锁紧;当地面遥测量为“0”执行解锁命令

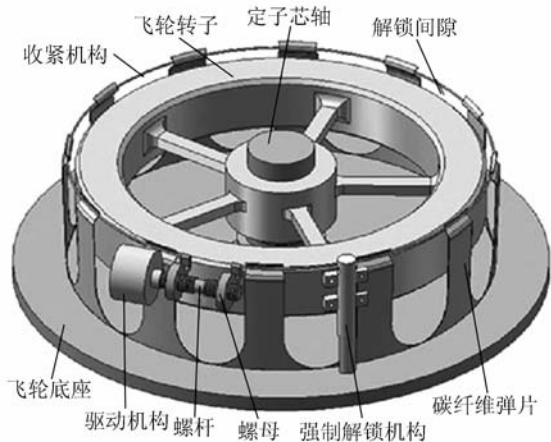


图1 锁紧装置结构示意图

Fig. 1 Structure of locking device

时,驱动机构带动螺杆反转,各部件朝相反方向运动,收紧机构将碳纤维弹片松开,释放飞轮转子。当飞轮进入预定轨道,锁紧装置出现故障不能进行解锁时,通过地面遥控火工品(强制解锁机构)斩断钢丝绳,对飞轮实施强制解锁。

2.2 设计要求

某型号卫星对锁紧装置有如下性能要求:

- (1)可重复锁紧、释放次数不少于 50 次。
- (2)执行锁紧和执行解锁时间不大于 2 min。
- (3)地面力学环境试验(正弦扫频、随机振动、冲击、离心试验)后,飞轮转子形状、转动惯量、动平衡度、质心不变,且无多余物产生。
- (4)发射段飞轮处于锁紧状态,定、转子间保护间隙完全消除,且无相对运动。
- (5)解锁间隙应大于 20 倍保护间隙。
- (6)锁紧装置必须有强制解锁机构。

3 锁紧装置力学分析

锁紧装置是磁悬浮飞轮额外的关键元件之一,是其进入轨道的先决条件。锁紧装置对飞轮的锁紧力决定了机构的锁紧程度,因此,必须对锁紧装置进行力学设计。碳纤维弹片作为锁紧装置的关键机构^[7-9],其变形后的回复弹力及变形量,决定了整个锁紧装置锁紧与解锁的可靠性,故需对它进行详细设计。

根据执行锁紧阶段碳纤维弹片变形状况,将其分为两个阶段:(1)弯曲变形阶段,电机驱动传动机构,通过收紧机构将碳纤维弹片从解锁位置弯曲变形至刚好靠上飞轮转子的外缘;(2)受压阶段,电机继续驱使收紧机构抱紧碳纤维弹片,使其对飞轮转子外缘有一定的预紧压力。

3.1 弯曲变形阶段

锁紧装置用碳纤维弹片为单层零度铺层材料。单层板在宏观上属于横观各向同性体或正交各向异性体,其 3 个弹性主方向为纤维方向 L (纵向),面内垂直纤维的方向 T (横向)和垂直板平面的方向 N (法向)。其材料属性如表 1 所示。

表 1 碳纤维属性

Tab.1 Properties of carbon fiber

属性名称	值
E_L	110 GPa
E_T	15 GPa
E_N	10 GPa
G_{LT}	5.3 GPa
G_{TN}	4.2 GPa
G_{LN}	4.2 GPa
μ_{LT}	0.33
μ_{TN}	0.02
μ_{LN}	0.02
密度 ρ	1 820 kg/m ³

由于碳纤维弹片厚度远小于其高度,所以,法线方向 N 有关的应力分量与面内应力分量相比可以忽略不计,即可以对其进行近似二维平面的应力分析。按线弹性力学,应力-应变关系为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kE_L & k\mu_{LT}E_T & 0 \\ k\mu_{TL}E_L & kE_T & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT}$ 为纤维面内的应力; $\varepsilon_L, \varepsilon_T, \gamma_{LT}$ 为纤维面内的应变。其中,比例因子 k 为:

$$k = (1 - \mu_{LT}\mu_{TL})^{-1} = (1 - \mu_{LT}^2 E_T / E_L)^{-1}. \quad (2)$$

对于一端固定的悬臂碳纤维弹片,在其自由端沿法向 N 施加 1 个力,则在此力的弯矩作用下,其横向 T 内的应力 $\sigma_T = 0$ 。从表 1 可知, $E_T \ll E_L$,所以, $k \approx 1$ 且 $k\mu_{LT}E_T \ll kE_L$,则式(1)可以简化为,

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_L \varepsilon_L \\ 0 \\ G_{LT} \gamma_{LT} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因此,可以对单层零度铺层碳纤维进行近似简化,即可采用各向同性对其进行弯曲应力-应变分析。本文所述的碳纤维的纤维方向与飞轮主轴平行,将单片碳纤维弹片等效为一根悬臂梁后,碳纤维转角 α 和挠度 ω 为:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{F}{E_L I} \left(h y - \frac{y^2}{2} \right) \\ \omega = \frac{F}{E_L I} \left(\frac{h y^2}{2} - \frac{y^3}{6} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

式中, h 为等效悬臂梁长度, I 为单片碳纤维截面惯性矩, F 为其所受径向力, y 为截面径向尺寸。如图 1 所示,解锁状态单边解锁间隙为 ε 时,要使

单片碳纤维弹片刚好靠上飞轮转子外边缘,所需的径向力 F_{r_1} 为:

$$F_{r_1} = \frac{3\varepsilon E_L I}{h^3}, \quad (5)$$

3.2 受压变形阶段

由于卫星发射时,存在较大的振动,为了消除定、转子在振动时的间隙,需对转子施加一定的预紧力。某型号振动等效加速度为 $a=16g$, g 为重力加速度。则转子振动中,产生的最大惯性力 F_g 为:

$$F_g = ma, \quad (6)$$

式中, m 为飞轮转子质量。平衡飞轮转子惯性力,单片碳纤维弹片所需的径向力 F_{r_2} 为,

$$F_{r_2} = \frac{\eta F_g \tan \beta}{n}, \quad (7)$$

式中, $\eta (>1)$ 为锁紧力安全系数, n 为碳纤维弹片个数, β 为飞轮边缘倒角。实际单片碳纤维弹片所需径向力 F_r 为以上两个阶段径向力之和,即

$$F_r = F_{r_1} + F_{r_2}, \quad (8)$$

此时,钢丝绳所受的拉力 F_d 为

$$F_d = \frac{F_r}{2\sin(\theta/2)}, \quad (9)$$

式中, θ 为单片碳纤维弹片所占圆周角。则螺母与螺杆间的扭矩 T 为,

$$T = F_d D \tan(\varphi + \varphi_f), \quad (10)$$

式中, φ 为螺纹升角, φ_f 为螺纹间摩擦角, D 为螺纹工程直径。将式(1)–(6)代入式(7)可得

$$T = \frac{D \tan(\varphi + \varphi_f)}{2\sin(\theta/2)} \left(\frac{3\varepsilon EI}{h^3} + \frac{\eta m a \tan \beta}{n} \right). \quad (11)$$

由式(11)可知,当确定了执行机构与传动机构的输出力矩 T 和锁紧装置参数后,锁紧程度的优劣由碳纤维弹片的3个参数(截面惯性矩 I , 片数 n 与单片碳纤维弹片所占的圆周角 θ) 决定。

4 碳纤维弹片优化设计

4.1 碳纤维方案

根据文献[7-9],碳纤维弹片一般为截切圆环形状,如图2所示。其截面形心横坐标为0,纵坐标 Y , 截面面积 S 和截面惯性矩 I 为

$$\begin{cases} Y = \frac{4\sin(\theta/2)[(r+\delta)^3 - r^3]}{3\theta[(r+\delta)^2 - r^2]} \\ S = \frac{\theta[(r+\delta)^2 - r^2]}{2} \\ I = \frac{(\theta + \sin \theta)[(r+\delta)^4 - r^4]}{8} - SY^2 \end{cases}, \quad (12)$$

式中, r 为碳纤维弹片内径。当碳纤维弹片厚度 δ 远小于其内径 r 时,式(12)可以简化为

$$\begin{cases} Y = 2(r\sin(\theta/2))/\theta \\ S = r\theta\delta \\ I = r^3\delta[(\theta + \sin \theta)/2 - (4\sin^2(\theta/2))/\theta] \end{cases}. \quad (13)$$

当飞轮转子外径确定后,碳纤维弹片内径 r 也随之确定。此时单片碳纤维弹片截面惯性矩 I 仅与其所占圆周角 θ 和厚度 δ 有关。

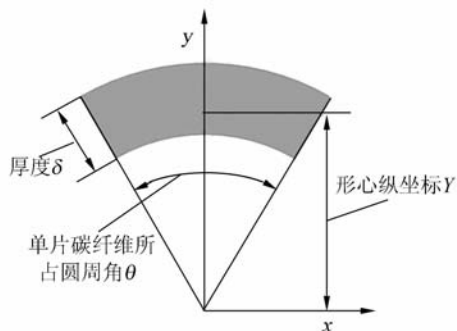


图2 单片碳纤维弹片截面图

Fig. 2 Section of carbon fiber slice

4.2 优化模型的建立

优化设计模型一般包括设计变量、目标函数、状态约束条件等部分,下面建立转子优化数学模型。

设计变量:在前文分析基础上,考虑碳纤维弹片固定深度,设置设计变量为:碳纤维弹片厚度 δ 、单片碳纤维弹片所占圆周角 θ 、碳纤维固定深度 λ 与弹片个数 n 。写成向量形式如下

$$\mathbf{X} = (\delta, \theta, \lambda, n). \quad (14)$$

可行域:由飞轮转子外形尺寸和锁紧装置结构尺寸共同决定。为限定碳纤维质量,根据工程经验将碳纤维总体尺寸限定如下,

$$\begin{cases} 0.7 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.1 \text{ mm} \\ 3^\circ \leq \theta \leq 20^\circ \\ 3 \text{ mm} \leq \lambda \leq 7 \text{ mm} \\ n = 4, 5, \dots, 11, 12 \end{cases}, \quad (15)$$

目标函数:使碳纤维的质量最小 M , 即,

$$M = \min f(\delta, \theta, \lambda, n), \quad (16)$$

式中,碳纤维弹片个数 n 为离散变量取整数,其它3个变量为连续变量,所以该函数的优化问题为1个非线性的混合离散变量优化问题。

约束条件:主要是从静力学和动力学性能角度对碳纤维弹片提出的要求。静力学性能要求碳

纤维弹片满足强度和刚度要求。强度要求主要是为使碳纤维弹片具有较高的可靠性(安全系数在 2 以上),要求碳纤维弹片在其上端径向变形 2 mm 下最大等效应力 $\sigma_{\max} \leq [\sigma]/2$, $[\sigma] = 3\ 500$ MPa 为碳纤维材料的许用应力。同时,为有利于锁紧,要求碳纤维弹片径向结构反力 $F_{r1} \leq 70$ N。为有利于解锁,要求弹片径向结构反力 $F_{r1} \geq 50$ N,即 $50\text{ N} \leq F_{r1} \leq 70\text{ N}$ 。动力学性能主要是对碳纤维弹片模态特性的要求,即避免飞轮在解锁工作状态共振,要求碳纤维弹片一阶共振频率大于 1.5 倍飞轮转子最高转速频率,对于最高转速 5 000 rad/min 的飞轮转子,要求碳纤维弹片一阶控制频率 $f_1 > 125$ Hz。

综上所述,碳纤维弹片需满足的约束条件为:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} < [\sigma]/2 \\ 50\text{ N} \leq F_{r1} \leq 70\text{ N} \\ f_1 \geq 125\text{ Hz} \end{cases} \quad (17)$$

4.3 优化设计与优化结果

传统的优化方法^[12-13]在优化过程中都没有改变优化对象的拓扑结构,这种方法虽然建模比较简单,但却缩小了优化的可行域。为提高碳纤维弹片的优化程度,进一步减小碳纤维弹片的质量,在优化过程中引入了碳纤维弹片个数这一设计变量 n 。在优化设计过程中,根据实际情况 n 取 4~12 的整数,由于离散变量 n 的定义域较小,所以最有效的优化方法是整体上采用针对 n 的遍数法,对其它连续变量采用序列二次规划法,全域的最大优点是可取可行域中所有满足约束条件自变量点的最小值。优化方法的数学描述如下:

$$\begin{cases} n = i \quad (i = 4, 5, \dots, 12) \\ M_i = \min f(X_i) = \min f(\delta, \alpha, \lambda, i) \end{cases} \quad (18)$$

M_i 为弹片数为 i 时碳纤维的优化质量。利用序列二次规划法计算 M_i ,具体计算流程如图 3。

根据前文所述优化模型,利用优化软件 iSIGHT 集成有限元分析软件计算所有碳纤维质量 M 。质量 M 及其对应最大应力 σ_{\max} 、一阶共振频率 f_1 、结构反力 F_{r1} 与弹片个数 n 的对应关系如图 4。

从图 4 可以看出,质量最优时, f_1 随 n 的增加而增加, F_{r1} 和 σ_{\max} 变化不大,且各 M_i 相差不大 ($< 2\%$),为使碳纤维弹片具有较高的共振频率,取弹片数 $n = 12$ 。 n 取 12 时,优化结果曲线如图

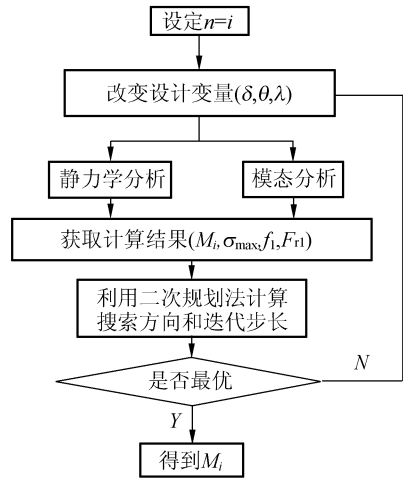


图 3 优化流程

Fig. 3 Optimization chart of carbon fiber

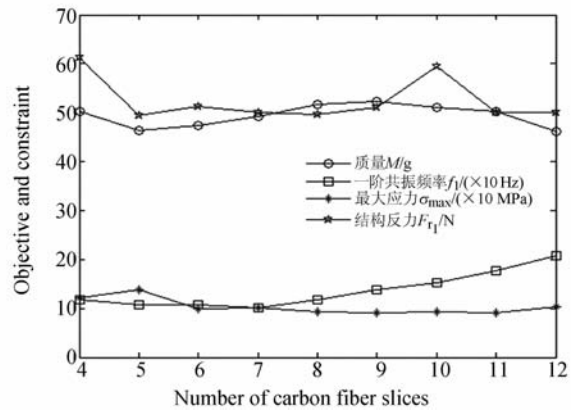


图 4 目标函数和状态变量与弹片个数关系

Fig. 4 Objective and constraint versus number of carbon fiber slices

5 和图 6 所示。图 5 为碳纤维设计变量在优化过程中的变化曲线,图 6 为目标函数和状态变量的变化曲线。

从图 5 可以看出,优化过程中单片碳纤维弹片所占的圆周角度 θ 较小,因此,单片弹片截面可以近似为矩形,则单片弹片可以近似为一端固支的悬臂梁。对于单层零度铺层的碳纤维材料,在受弯矩作用下,其应力-应变可以近似为式(3)。根据式(5)可得结构反力为,

$$F_{r1} = \frac{\epsilon r E_L}{4h^3} \theta \delta^3, \quad (19)$$

由于弹片高度远大于弹片厚度,则弯曲正应力远大于弯曲切应力,即最大应力近似为弯曲正

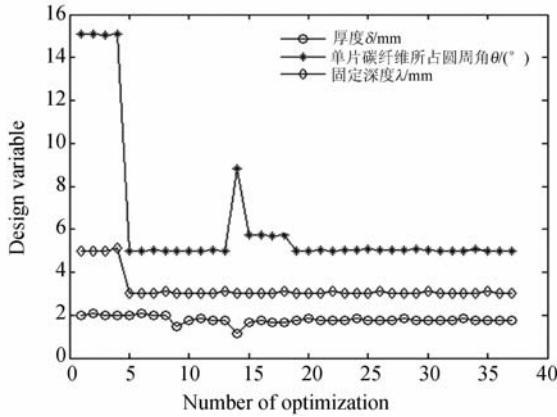


图 5 设计变量变化曲线

Fig. 5 Optimization curves of design variable

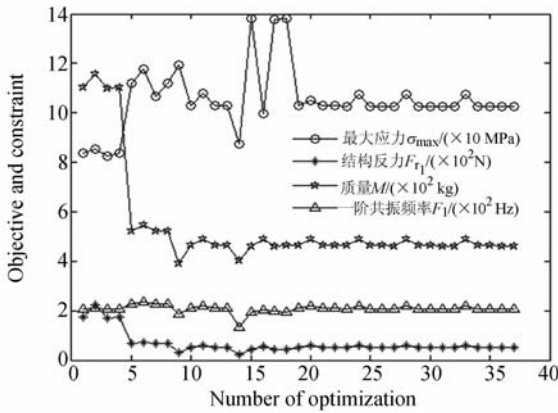


图 6 目标函数和状态变量变化曲线

Fig. 6 Optimization curves of objective and constraint

应力。

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{r1}h}{r\theta\delta^2/6} = \frac{3\epsilon E_L}{2h^2} \delta, \quad (20)$$

由图 8 可知,弹片的一阶振型为单片弹片径向摆动,即纤维方向的弯曲,其应力-应变可以近似为式(3),由此可得一端固支的悬臂梁的一阶共振频率为,

$$f_1 = (1.875)^2 \sqrt{\frac{E_L(r\theta\delta^3)}{\rho(r\theta\delta)h^4}} = 12.2 \sqrt{\frac{E_L}{\rho h^4}} \delta, \quad (21)$$

由式(19)可以看出 F_{r1} 与 $\theta\delta^3$ 成正比。由图 5,6 以及计算结果可知, δ 变化较小, θ 从 15° 变为 5° , 相应的 F_{r1} 从 172 N 降为 67 N。由式(20)可得 σ_{\max} 与 δ 成正比,这与图 5 中 δ 的变化曲线形状和图 6 中 σ_{\max} 的变化曲线形状相似。式(21)表明 f_1 与 δ 成正比,这也与图 5,6 中两者的变化曲线形状基本一致。

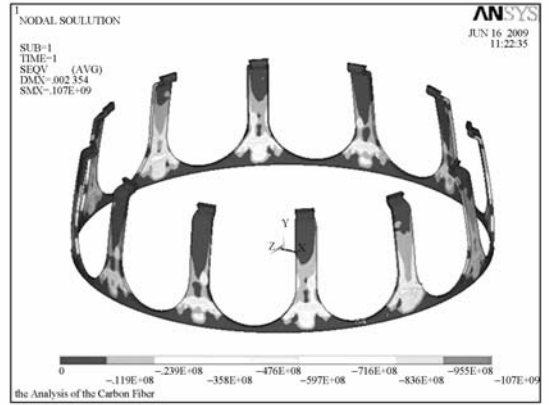


图 7 应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of carbon fiber slices

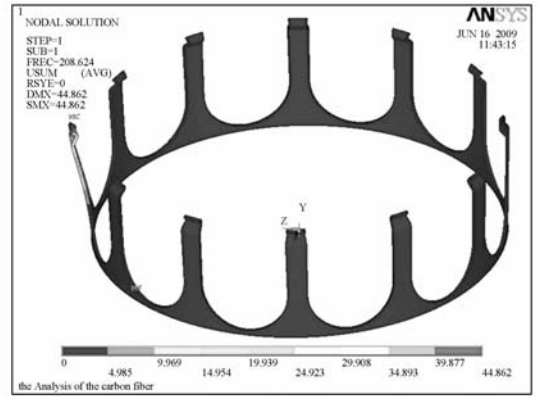


图 8 一阶模态

Fig. 8 The first model of carbon fiber slices

在最优设计变量下,碳纤维总质量为 46 g,利用有限元分析软件对最终设计方案进行静力学和动力学分析,碳纤维应力云图如图 7 所示,最大等效应力发生在碳纤维弹片根部,大小为 107 MPa($<[\sigma]$),且应力分布比较合理,模态分析得出一阶模态为 208 Hz,远大于转子最高转频,一阶振型如图 8。最终优化结果如表 2。

表 2 优化结果

Tab. 2 Optimal design results

变量	优化结果
碳纤维弹片数	12 片
碳纤维厚度	1.8 mm
单片碳纤维所占圆周角	5°
固定端深度	3 mm
最大等效应力	107 MPa
一阶共振频率	208 Hz
结构反力	50 N
最终质量	46 g

5 结 论

本文提出了一种磁悬浮飞轮用可重复锁紧装置,叙述了其结构及工作原理,并根据执行锁紧过程中碳纤维弹片的变形状态,将其分为弯曲变形阶段和受压阶段,对碳纤维弹片进行了受力分析。在此基础上,以多学科优化软件 iSIGHT 为平台,

集成有限元静力学和动力学模型,以碳纤维质量最小为优化目标,综合考虑碳纤维弹片的强度、结构反力、一阶共振频率等多种因素,对离散变量 n 采用全域遍数法,对其它变量采用序列二次规划法进行优化。最终碳纤维弹片安全系数达到 32,一阶固有频率为 208 Hz,结构反力为 50 N,质量为 46 g。

参考文献:

- [1] GERLACH B, EHINGER M, RAUE H K. Digital controller for a gimballing magnetic bearing reaction wheel[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and control conference and exhibit Aug. 2005*, 15-18, San Francisco, California:1-6.
- [2] XU Y L, DUN Y Q, WANG X H, *et al.* Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM[J]. *IEEE. Transactions on magnetics*, 2006,42(4):1363-1366.
- [3] 刘彬,房建成,刘刚.基于 TMS320C6713B+FPGA 数字控制器实现磁悬浮飞轮主动振动控制[J]. *光学精密工程*,2009,17(1):152-157.
LIU B,FANG J CH, LIU G. Implementation of active vibration control for magnetically suspended flywheels based on TMS320C6713B+FPGA digital controller[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1): 152-157. (in Chinese)
- [4] 房建成,杨磊,孙津济,等.一种新型磁悬浮飞轮用永磁偏置径向磁轴承[J]. *光学精密工程*,2008,16(3):444-451.
FANG J CH,YANG L,SUN J J,*et al.*. Novel permanent-magnet bias radial magnetic bearing used in magnetical suspended flywheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):444-451. (in Chinese)
- [5] LIVET J L, BRETAUDEAU M. Temporary locking device for inertia wheel. USA,4345485 [P]. 1982-08-24.
- [6] BEAU J F, GAUTHIER M. Kinetic wheel arrangement incorporating magnetic suspension provided with means for caging its rotor. USA, 4566740[P]. 1986-01-28.
- [7] PRIVAT M,COSTA A D. Penumatic locking device for magnetic bearing reaction wheel[C]. *Proceedings of the 10th European space mechanisms and tribology symposium, San Sebastian, Spain*, 2003:1-8.
- [8] GUELIS H V D,JOLY J L. Device for temporarily locking a rotor onto a stator. USA, 4872357 [P]. 1989-10-10.
- [9] 叶全红.磁悬浮反作用飞轮结构分析及优化设计与实验研究[D].北京:北京航空航天大学,2007.
YE Q H. *Structure analysis and optimum design for magnetically suspended reaction flywheel and experimental research*[D]. Beijing:Beijing university of aeronautics and astronautics master's degree paper,2007. (in Chinese)
- [10] 刘晓东,余立辉.磁悬浮飞轮自动锁紧系统的研制[J]. *机械与电子*,2007(3):33-36.
LIU X D, YU L H. Development of automatic locking system for magnetic bearing flywheel[J]. *Machinery & electronics*, 2007(3): 33-36. (in Chinese)
- [11] 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.*, 2006,14(4): 2456-2464. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 叶全红,李红,韩邦成.基于 Isight 的磁悬浮反作用飞轮优化设计[J]. *宇航学报*,2007,28(6):1619-

1623.

YE Q H, LI H, HAN B CH. Optimization design of magnetic bearing reaction wheel rotor using

iSIGHT software [J]. *Journal of astronautic*, 2007,28(6):1619-1623. (in Chinese)

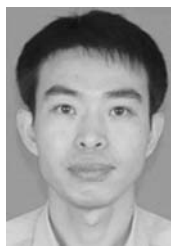
作者简介:



刘 强(1983—),男,江西九江人,博士研究生,2005 年于北京石油化工学院获得学士学位,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: liuqiangbuaa@aspe. buaa. edu. cn



白国长(1968—),男,河南许昌人,博士,副教授,2007 年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事磁悬浮飞轮和磁悬浮控制力矩陀螺用锁紧装置、机电一体化技术及控制技术研究。E-mail: bai_guochang@126. com



韩邦成(1974—),男,辽宁灯塔人,副教授,博士,2004 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间执行机构技术、磁悬浮技术及应用、磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术等机电一体化技术的研究。E-mail: hanbangcheng@ buaa. edu. cn

导师简介:



房建成(1965—),男,山东临沂人,博士,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,主要研究方向为航天飞行器姿态控制技术和自主定位导航技术以及航空航天飞行器 GNC 系统集成技术和信息集成技术。E-mail: fangjiancheng@ buaa. edu. cn

● 下期预告

反射温度补偿法的理论计算与实验验证

杨 楨,张士成,杨 立

(海军工程大学 船舶与动力学院动力工程系,湖北 武汉 430033)

为补偿环境辐射对红外测温的影响,根据红外辐射理论和红外热像仪的测温原理,介绍了反射温度补偿法的原理与实施方法,得到了该补偿方法的理论计算公式。通过相关实验,表明在被测物体周围存在高温物体的情况下,可采用反射温度补偿法来补偿高温物体的反射能量。红外反射镜的选取与被测物体的表面状况有关。若被测物体可视作朗伯体,则可选铝箔为红外反射镜;若被测物体为非朗伯体,则需选用与被测物体表面结构相似的物体为红外反射镜。对于朗伯体,经过反射温度补偿,能较为准确地测量物体的表面温度,将误差控制在 2% 以内;对于非朗伯体,经过反射温度补偿,能够较大地提高测温精度,其误差不超过 5%。该方法简单易行,精度较高,适用于大部分的红外热像仪,具有较大的推广价值。