

文章编号 1004-924X(2018)03-0597-09

## 磁悬浮控制力矩陀螺锁紧机构可靠性设计及优化

汤继强\*, 赵韶璞, 王 阔

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 鉴于传统确定性优化方法没有考虑结构参数的随机性对结构性能的影响, 本文提出了一种基于可靠性灵敏度的锁紧弹片结构优化方法。首先, 以某磁悬浮控制力矩陀螺锁紧弹片为研究对象, 研究了有限元建模和失效模式; 然后, 考虑弹片结构尺寸和材料参数的随机性, 结合响应面法与一次二阶矩法, 研究了串联失效模式下弹片的可靠度计算方法, 进而推导了可靠性关于设计变量均值和方差的灵敏度计算公式; 最后, 根据灵敏度分析结果, 研究确定了弹片结构优化策略, 构建了弹片可靠性优化模型。分析了安全系数法和可靠性法优化结果的差异, 结果表明: 与安全系数法相比, 可靠性法的优化结果更好; 在保证弹片可靠度的前提下, 采用可靠性优化方法不仅使弹片质量下降了 23.71%, 使锁紧机构更加优化, 而且使陀螺房质量也下降了 0.98 kg, 有利于磁悬浮控制力矩陀螺整机结构的轻量化。

**关键词:** 力矩陀螺; 锁紧机构; 响应面; 一次二阶矩; 可靠性灵敏度; 轻量化

**中图分类号:** V414.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0597

## Reliability design and structural optimization of locking device for magnetic suspension control moment gyro

TANG Ji-qiang\*, ZHAO Shao-pu, WANG kuo

(School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: tjq\_72@163.com

**Abstract:** To avoid the negative effects of structural parameters' randomness on its properties, an optimization method of locking elastic sheet based on reliability sensitivity was proposed. Firstly, the finite element model and failure modes of the locking elastic sheet for a magnetic suspension control moment gyro were analyzed. Afterwards, considering the randomness of the structural sizes and material parameters of the elastic sheet, the reliability of the elastic sheet in the series failure mode were studied by using the response surface method and the first order second moment method. Furthermore, the calculating formulas of reliability sensitivity with respect to the mean and variance of random variables were derived. Eventually, the model of elastic sheet reliability optimization was built with the optimization strategy determined by the result of reliability sensitivity analysis. The difference influence of safety factor optimization and reliability optimization was analyzed. Experimental results indicate that the reliability optimization could get better optimization results

收稿日期: 2017-08-23; 修订日期: 2017-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 61773030, No. 61473018); 国家留学基金资助项目 (No. 201606025042)

compared with the safety factor optimization. The reliability sensitivity optimization method not only reduces the weight of the elastic sheet by 23.71% under the premise of ensuring the high reliability of the elastic sheet, but also reduces the weight of gyro room by 0.98 kg, which is beneficial to weight reduction of the magnetic suspension control moment gyro.

**Key words:** control moment gyro; locking device; response surface; first order second moment; reliability sensitivity; weight reduction

## 1 引言

由于磁悬浮轴承具有无接触、无需润滑、高转速、低功耗、长寿命、高精度等优点,磁悬浮控制力矩陀螺(Magnetic Suspension Control Moment Gyro, MSCMG)已成为一种新型的航天器姿态控制系统执行机构<sup>[1-3]</sup>。但因为磁轴承磁间隙的存在,必须采用额外的锁紧保护机构将转子锁紧,以防陀螺定、转子在卫星发射主动段发生碰撞与冲击,并在卫星入轨后解除锁紧,使转子正常悬浮工作<sup>[4-5]</sup>。因此,锁紧机构是保证 MSCMG 顺利入轨正常工作的核心组件。

弹片式锁紧机构通过钢丝绳勒紧弹片,抱紧转子将其锁紧,结构简单、可靠性高。早期的磁悬浮系统大多采用一次性弹片式锁紧机构<sup>[6-8]</sup>。为满足磁悬浮系统在地面调试及运输过程中多次锁紧/解锁的需求,文献[9]提出了一种基于电机驱动碳纤维弹片的可重复锁紧机构。文献[10]设计了一种分立式弹片锁紧机构,同样采用电机驱动丝杠螺母收紧钢丝绳实现锁紧。弹片是锁紧机构的关键部件,其性能对锁紧机构影响很大。锁紧状态下弹片的结构强度决定了锁紧可靠性;解锁时,其过低的 1 阶共振频率则可能引起转子系统共振。为了提高锁紧机构的性能,满足航天器轻量化设计的需求,弹片结构优化是十分必要的工作。文献[9]和[10]采用安全系数法与序列二次优化法,分别对一体式和分立式弹片进行优化。文献[11]研究了弹片的最大应力与 1 阶模态频率对结构尺寸的灵敏度,选取合适的设计变量对弹片进行优化。

文献分析表明,目前所进行的锁紧弹片的设计优化均在确定性领域进行<sup>[9-11]</sup>,而材料属性、几何尺寸、载荷以及边界条件等各类参数存在一定的随机性,由此导致虽然结构的确定性分析是安全的,但参数的随机性会导致结构失效。传统优化设计一般采用安全系数法来确保结构的可靠

性,但实际上并不能给出最优的安全系数,可能导致确定性优化得不到结构的最优值。可靠度计算及可靠性灵敏度分析可以综合考虑各变量的随机性,定量地给出结构安全工作的可靠度及各个变量对结构可靠度的影响程度,指导零件的可靠性设计和结构优化设计<sup>[12]</sup>。

零件可靠度分析方法主要分为解析法和数值模拟法。在工程应用中,解析法主要为一次二阶矩法和改进的一次二阶矩法(验算点法),前者计算简便,但不太适用于非线性功能函数;后者可以考虑非正态随机变量,并且通过迭代计算寻找满足功能函数的验算点,保证了可靠度指标的精度。在实际工程中零件结构往往复杂,无法给出功能函数的显式表达式,此时一次二阶矩法等解析法无法直接应用。响应面法通过构造功能函数的低阶表达式,将隐式或高阶功能函数转化为显式低阶功能函数,解决了零件隐式功能函数或非线性的程度高的问题,大大简化了结构可靠性计算问题<sup>[13-15]</sup>。数值模拟法主要为 Monte-Carlo 法,该方法通过对功能函数进行大量随机试验,得出零件结构的可靠度。Monte-Carlo 法通用性强,其收敛速度与基本随机变量的维数、功能函数的复杂度无关,且数值模拟的误差也容易确定,常用于检验其他算法<sup>[12,16-17]</sup>。

本文以本课题组所研制的 MSCMG 分立式锁紧弹片作为研究对象,将有限元模拟、响应面法以及可靠性理论相结合,推导了一种可靠度及可靠性灵敏度计算方法,并在此基础上进行了弹片结构优化。优化结果表明,本文算法有效,对锁紧弹片的可靠性优化设计具有重要意义。

## 2 锁紧弹片有限元分析

### 2.1 弹片应力分析

本文的研究对象为分立式弹片锁紧机构,通过电机驱动蜗杆实现锁紧/解锁,其结构如图 1 所示。

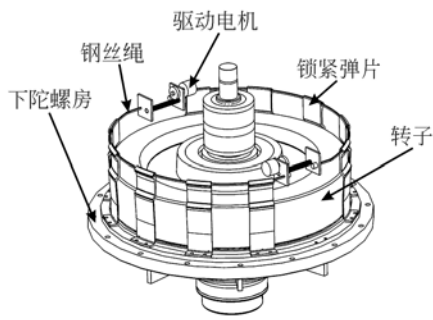


图 1 锁紧机构结构图  
Fig. 1 Schematic diagram of locking device

弹片是锁紧机构的关键部件,由三部分组成,如图 2(a)所示,下端为通过螺钉与陀螺房连接的固定端,中部为与陀螺转子相匹配的锁紧面,顶部为用于放置钢丝绳的环形槽。弹片横截面如图 2(b)所示。其中  $z_1$  为弹片所占圆周角,  $z_2$  为弹片高度,  $z_3$  为弹片厚度,  $z_4$  为固定端厚度,  $z_5$  为固定端宽度,主要尺寸见表 1。根据结构尺寸参数,在 ANSYS 软件中建立有限元模型,如图 2(c)所示。为避免对系统磁路的影响,弹片材料选用具有较好弹性的无磁铍青铜 QBe2,其材料属性如表 2 所示。

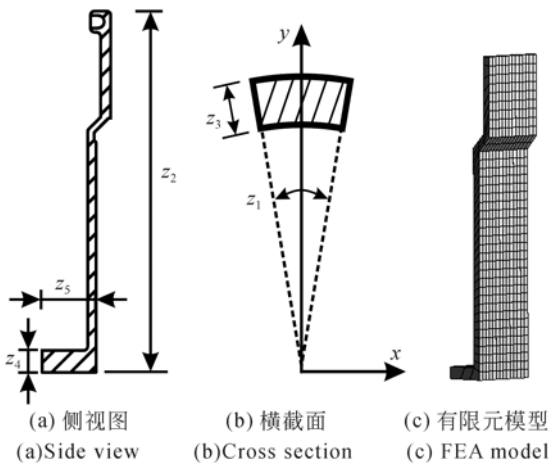


图 2 锁紧弹片模型图  
Fig. 2 Model of locking elastic sheet

表 1 弹片主要尺寸参数

结构参数	$z_1 / (^\circ)$	$z_2 / \text{mm}$	$z_3 / \text{mm}$	$z_4 / \text{mm}$	$z_5 / \text{mm}$
尺寸	7.0	80.0	2.0	3.0	10.0

表 2 弹片材料属性

Tab. 2 Material properties of elastic sheet

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	强度极限 /MPa
QBe2	128	0.3	8 300	580

通过对锁紧机构整体分析得到载荷与边界条件,进而得到 ANSYS 有限元强度分析结果,如图 3 所示。弹片的最大应力位于弹片侧面边缘处,最大应力值为 379.33 MPa。由于零件的材料性能、结构尺寸以及所受载荷等存在不确定性,为了保证结构安全可靠,引入安全系数  $f = 1.5$  进行校核。结果表明,弹片满足强度设计要求。

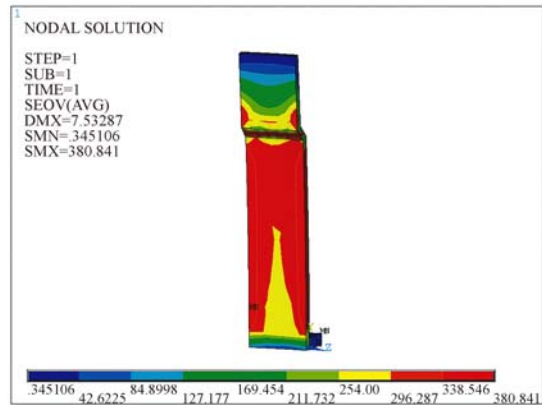


图 3 弹片锁紧状态应力云图  
Fig. 3 Stress cloud diagram of elastic sheet in locking state

### 2.2 弹片模态及振动分析

卫星入轨后,锁紧机构解锁,转子悬浮工作。若弹片的固有频率接近转子转频,则可能发生共振,影响系统正常运行。通过模态分析可以确定弹片的固有频率和振型,为进一步研究其振动特性,又对弹片进行了谐响应分析。解锁时,弹片下端固定,上端自由,模态分析得到结构前 4 阶固有频率和振型,如表 3 所示。取激励频率为 150~2 000 Hz,对弹片施加  $1 \text{ mm/s}^2$  加速度激励后,其顶端位移-频率响应曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在 210 Hz 处出现最大的位移峰值,说明在 210 Hz 处发生共振,与弹片 1 阶固有频率基本相同。对比其他阶次共振幅值发现,在结构振动过程中起主要作用的是 1 阶固有频率。因此为保证

锁紧机构的解锁状态可靠,需使弹片的 1 阶固有频率大于转子转频。

表 3 弹片模态及振型

Tab. 3 Modal and vibration of elastic sheet

阶次	固有频率/Hz	振型
1	212.33	径向摆动
2	1308.2	径向扭转
3	1403.3	轴向弯曲
4	2064.2	径向弯曲

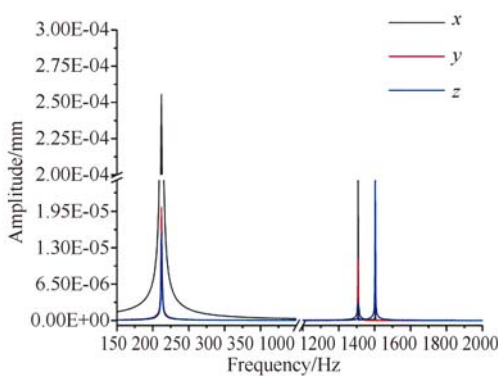


图 4 弹片位移-频率响应曲线

Fig. 4 Displacement-frequency response curve of elastic sheet

### 3 锁紧弹片可靠性分析

#### 3.1 设计变量

主要考虑弹片结构尺寸和材料属性对可靠性的影响,定义设计变量  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_6)$ , 其中  $z_1 \sim z_5$  为弹片结构尺寸,  $z_6$  为材料弹性模量。假设各个变量均服从正态分布,其均值  $\mu_i$  和标准差  $\sigma_i$  如表 4 所示。

表 4 设计变量的均值和标准差

Tab. 4 Mean and standard deviation of basic variables

设计变量	均值 $\mu_i$	标准差 $\sigma_i$
$z_1 / (^\circ)$	7.0	0.07
$z_2 / \text{mm}$	80.0	0.8
$z_3 / \text{mm}$	2.0	0.02
$z_4 / \text{mm}$	3.0	0.03
$z_5 / \text{mm}$	10.0	0.1
$z_6 / \text{GPa}$	128	6.4

#### 3.2 失效模式

可靠度是衡量产品或系统完成任务能力的一个度量。以随机变量  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  表示结构中的基本变量,  $g(Y)$  为结构的功能函数,即该函数表示结构的工作状态。

$$g = g(Y) \begin{cases} < 0 & \text{失效状态} \\ = 0 & \text{临界状态} \\ > 0 & \text{安全状态} \end{cases} \quad (1)$$

考虑零件存在多失效模式的情况,可将其可靠度及功能函数表示为:

$$R = P(G(Y) > 0), \quad (2)$$

$$G(Y) = (g_1(Y), g_2(Y), \dots, g_n(Y)), \quad (3)$$

式中:  $R$  为可靠度,  $G(Y)$  为总功能函数,  $g_i(Y)$  表示第  $i$  个失效模式的功能函数。

在零件失效模式较少的情况下,可将其视为串联关系<sup>[18]</sup>,则零件多失效模式的可靠度为:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (4)$$

由弹片的有限元分析结果可知,其失效模式主要有两个:

(1) 静强度失效,锁紧状态下过大的弯曲应力可能导致弹片塑性变形,其功能函数  $g_1$  为:

$$g_1 = \sigma_s - \max(\sigma), \quad (5)$$

式中:  $\sigma_s = 580 \text{ MPa}$ , 为弹片静强度极限,  $\max(\sigma)$  为弹片最大应力。

(2) 模态共振失效,解锁状态下,弹片一端固定一端自由,若其 1 阶模态频率接近转子转频,则容易发生共振,其功能函数  $g_2$  为:

$$g_2 = \omega_1 - \omega_f, \quad (6)$$

式中:  $\omega_1$  为 1 阶模态频率,  $\omega_f = 200 \text{ Hz}$ , 为陀螺转子的最大转频。

由式(4)可得,弹片可靠度为:

$$R^* = R_1^* R_2^*, \quad (7)$$

式中  $R_i^*$  为弹片  $g_i$  失效模式下的可靠度。

#### 3.3 响应面拟合

传统响应面法通常选取不含交叉项的二次多项式作为响应面函数,本文为提高响应面的近似精度,更好地反应真实功能函数的非线性,采用含交叉项的二次多项式作为响应面模型。

$$y = k_0 + \sum_{j=1}^n k_j x_j + \sum_{i < j} k_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^n k_{jj} x_j^2, \quad (8)$$

其中:  $k_0, k_j, k_{ij}, k_{jj}$  为待定系数;  $y$  为目标函

数;  $x_i, x_j$  为自变量。

通过有限元软件 ANSYS 中的 PDS 概率分析模块,设定 6 个设计参数,以失效模式  $g_1$  和  $g_2$  为目标函数,分析得到响应面函数系数见表 5。

表 5 响应面函数系数

Tab. 5 Coefficients of response surface function

功能函数	$g_1 = \alpha_0 + \sum_{j=1}^6 \alpha_j z_j + \sum_{i<j} \alpha_{ij} z_i z_j + \sum_{j=1}^6 \alpha_{jj} z_j^2$					
常数项	$\alpha_0 = -1571.53$					
线性项系数	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$			
	97.93	-12.87	1652.38			
交叉项系数	$\alpha_{33} = -20.04$					
二次项系数	$\alpha_{11} = -1.07$		$\alpha_{33} = -239.40$			
功能函数	$g_2 = \beta_0 + \sum_{j=1}^6 \beta_j z_j + \sum_{i<j} \beta_{ij} z_i z_j + \sum_{j=1}^6 \beta_{jj} z_j^2$					
常数项	$\beta_0 = 192.97$					
线性项系数	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
	20.20	-16.57	270.39	0.0011	26.72	1.80
交叉项系数	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{23}$	$\beta_{25}$	$\beta_{56}$	
	-0.27	-2.84	-2.00	-0.25	-0.55	
二次项系数	$\beta_{11} = 0.49$		$\beta_{22} = 0.12$		$\beta_{33} = 7.26$	

### 3.4 可靠度计算

可靠度计算的一次二阶矩法是将功能函数用泰勒级数展开,取其常数项和一阶项,根据求解公式得到可靠性指标。由可靠性理论得到各失效模式的可靠性指标为:

$$\beta_i = \frac{\mu_{g_i}}{\sigma_{g_i}} = \frac{E[g_i(Y)]}{\sqrt{\text{Var}[g_i(Y)]}}, \quad (9)$$

$$R_i = \Phi(\beta_i), \quad (10)$$

式中:  $\mu_{g_i}, \sigma_{g_i}$  和  $\beta_i$  分别为第  $i$  个功能函数的均值、标准差和可靠性指标,  $\Phi(\cdot)$  表示标准正态分布函数。

本文通过响应面拟合得到了弹片的显式二阶功能函数,由于拟合功能函数的非线性程度低,可采用中心点的一次二阶矩法进行快速求解。响应

面的一次二阶矩法的可靠性指标计算步骤如下:

(1) 设基本变量均值为  $X^* = (\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*)$ , 方差为  $\sigma^* = (\sigma_1^*, \sigma_2^*, \dots, \sigma_n^*)$ , 将响应面功能函数在均值处做一阶泰勒展开, 即:

$$y = y(\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right) (x_i - \mu_i^*). \quad (11)$$

(2) 计算展开后功能函数均值  $\mu_g^*$  和标准差  $\delta_g^*$ :

$$\mu_g^* = E[y(X^*)] = y(\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*), \quad (12)$$

$$\delta_g^* = \text{Var}[y(X^*)] = \sum_{i=1}^n \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^{*2}. \quad (13)$$

(3) 计算可靠性指标:

$$\beta_i = \frac{\mu_g^*}{\sigma_g^*} = \frac{y(\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^{*2}}}, \quad (14)$$

其中:

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} = k_i + \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n k_{ij} \mu_j^* + \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n k_{ji} \mu_j^* + 2k_{ii} \mu_i^*. \quad (15)$$

(4) 计算可靠度:

$$R_i = \Phi(\beta_i). \quad (16)$$

将弹片的响应面功能函数  $g_1$  和  $g_2$  代入式(14)和式(16), 得到各失效模式的可靠性指标和可靠度:  $\beta_1^* = 6.3701, R_1^* = 0.9999, \beta_2^* = 1.9361, R_2^* = 0.9736$ 。将弹片的失效看作各失效模式的串联, 根据式(7), 计算得到弹片的整体可靠度为:

$$R^* = R_1^* R_2^* = 0.9736.$$

通过 Monte-Calor 法进行检验, 计算得到结构多失效模式下的可靠度为:

$$R_{MCS} = 0.9747.$$

相对误差为:

$$\epsilon = |R^* - R_{MCS}| / R_{MCS} = 0.11\%.$$

因此, 在失效模式较少的情况下, 可以将失效模式视为串联, 并且通过响应面法将隐式功能函数转化为显式二阶多项式函数后, 使用一次二阶矩法计算零件的可靠度具有较高的精度, 可以满足一般的工程需要。

#### 4 锁紧弹片可靠性灵敏度分析

可靠性灵敏度即为可靠度对基本变量的偏导数,通过计算可靠性灵敏度可以分析基本变量对可靠度的影响程度,对可靠性优化设计有重要意义。在多失效模式情况下,假设基本变量服从正态分布,零件的可靠度关于其均值和标准差的灵敏度可表示为:

$$\frac{\partial R}{\partial \mu_i^*} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_i}{\partial \beta_i} \frac{\partial \beta_i}{\partial \mu_i^*} \prod_{j=1, j \neq i}^n R_j, \quad (17)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \sigma_i^*} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_i}{\partial \beta_i} \frac{\partial \beta_i}{\partial \sigma_i^*} \prod_{j=1, j \neq i}^n R_j, \quad (18)$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial \beta_i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\beta_i^2}{2}\right)}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \mu_i^*} = \frac{\left. \frac{\partial y}{\partial \mu_i^*} \right|_{X^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^{*2}}},$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \sigma_i^*} = - \frac{y(\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*) (2k_{it} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (k_{ij} + k_{jt})) \sigma_i^{*2}}{2 \left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^{*2}} \right]^3}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \sigma_i^*} = - \frac{y(\mu_1^*, \mu_2^*, \dots, \mu_n^*) \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^*}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{X^*} \right]^2 \sigma_i^{*2}} \right]^3}, \quad (21)$$

针对锁紧弹片,其可靠度对设计变量均值和标准差的灵敏度计算公式为:

$$\frac{\partial R^*}{\partial \mu_t} = \frac{\partial R_1^*}{\partial \beta_1^*} \frac{\partial \beta_1^*}{\partial \mu_t} R_2^* + \frac{\partial R_2^*}{\partial \beta_2^*} \frac{\partial \beta_2^*}{\partial \mu_t} R_1^* \quad (t = 1, 2, \dots, 6), \quad (22)$$

$$\frac{\partial R^*}{\partial \sigma_t} = \frac{\partial R_1^*}{\partial \beta_1^*} \frac{\partial \beta_1^*}{\partial \sigma_t} R_2^* + \frac{\partial R_2^*}{\partial \beta_2^*} \frac{\partial \beta_2^*}{\partial \sigma_t} R_1^* \quad (t = 1, 2, \dots, 6). \quad (23)$$

将弹片参数代入式(22)和式(23),计算结果见表 6。

表 6 弹片的可靠性灵敏度

Tab. 6 Reliability sensitivity of elastic sheet

设计变量	均值灵敏度 $\partial R^* / \partial \mu_i$	标准差灵敏度 $\partial R^* / \partial \sigma_i$
$z_1$	$8.77 \times 10^{-4}$	$-1.67 \times 10^{-6}$
$z_2$	$-3.12 \times 10^{-2}$	$-2.67 \times 10^{-2}$
$z_3$	$8.57 \times 10^{-1}$	$-4.65 \times 10^{-1}$
$z_4$	$5.26 \times 10^{-3}$	$-8.73 \times 10^{-5}$
$z_5$	$4.93 \times 10^{-2}$	$-2.31 \times 10^{-3}$
$z_6$	$8.23 \times 10^{-6}$	$-1.37 \times 10^{-5}$

从均值灵敏度计算结果可知,弹片所占圆周角  $z_1$ ,弹片厚度  $z_3$ ,固定端高度  $z_4$ ,固定端宽度  $z_5$  以及弹性模量  $z_6$  的增加将提高结构的可靠性,而弹片高度  $z_2$  的增加将降低结构的可靠度。从对可靠度的影响程度上看,几何尺寸均值的灵敏度要远大于材料属性的灵敏度。在结构尺寸参数中,弹片厚度  $z_3$  的均值对结构的可靠度影响最大,其次为弹片高度  $z_2$  和固定端宽度  $z_5$ 。因此在结构设计过程中,可以通过优化设计变量的均值来提高结构的可靠性。

对于标准差灵敏度来说,各个设计变量标准差的增加都将导致弹片可靠度降低。从影响程度来看,几何尺寸的标准差的影响更大,其中影响最大的为弹片厚度  $z_3$  的标准差。因此在加工阶段,要严格控制加工精度,尤其是弹片厚度  $z_3$  的精度,以降低加工误差对结构可靠性的影响。

#### 5 锁紧弹片结构优化

选取弹片的结构尺寸参数的均值为设计变量,具体取值范围由陀螺房内部空间确定,如表 7 所示。

表 7 弹片设计变量的取值范围

Tab. 7 Range of design variables of elastic sheet

设计变量	$z_1 / (^\circ)$	$z_2 / \text{mm}$	$z_3 / \text{mm}$	$z_4 / \text{mm}$	$z_5 / \text{mm}$
下限	5.0	78.0	1.0	2.2	6.0
上限	16.0	85.0	3.0	3.8	14.0

根据弹片可靠性的灵敏度分析结果可知,各变量对弹片可靠性的贡献值是不一样的。因此在弹片可靠性优化过程中,优化策略采用减小均值灵敏度为负或趋于 0 的变量的均值优化策略,以达到弹片结构优化的目的。建立弹片可靠性优化数学模型如式(24)所示:

$$\begin{cases} \text{Find} & X = (z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4 \quad z_5) \\ \text{Min} & M(X) \\ \text{s. t.} & P(g_1 > 0) \geq R \\ & P(g_2 > 0) \geq R \\ & X_k^l \leq X_k \leq X_k^u, \quad k = 1, 2, \dots, 5 \end{cases}, \quad (24)$$

式中:  $g_1$  和  $g_2$  为弹片的功能函数,即最大应力和 1 阶固有频率; $M(X)$ 为弹片质量; $R$ 为可靠度,选取可靠度为 1 进行研究。

将弹片可靠性优化设计结果与取安全系数 1.5 的确定性优化设计结果进行比较,如表 8 所示。可以看出,相比于初始设计,可靠性优化使得弹片质量减轻了 23.71%,最大应力值降低为 316.91 MPa,1 阶模态频率提高为 261.24 Hz,可靠度也提高为 1。相比于安全系数法,虽然可靠性优化使得最大应力上升,1 阶模态频率减小,但弹片的可靠度依然保持为 1,在没有降低可靠度的情况下,质量减轻了 7.65%。虽然相对初始设计,安全系数法优化也使弹片质量得到减少,可靠度提高为 1,达到了较好的优化效果,但是由于安

表 8 弹片优化结果对比

Tab. 8 Comparison of results of elastic sheet optimization

设计变量	初始设计	安全系数法	可靠性优化法
$z_1 / (^\circ)$	7.0	5.0	5.0
$z_2 / \text{mm}$	80.0	78.0	78.0
$z_3 / \text{mm}$	2.0	2.6	2.4
$z_4 / \text{mm}$	3.0	2.9	2.6
$z_5 / \text{mm}$	10.0	6.0	6.0
最大应力/MPa	379.33	275.36	316.91
1 阶模态频率/Hz	212.33	300.31	261.24
可靠度	0.9736	1	1
质量 $m/\text{g}$	25.17	20.79	19.20

全系数法优化的约束条件取决于安全系数的取值,而且在工程实践中无法准确选取最合适的安全系数,因此安全系数法的优化结果往往达不到最优。可靠性优化方法可以避免安全系数的选取,直接以可靠度为约束条件进行优化,可以达到更好的效果。

弹片优化结果表明,本文提出的可靠性优化方法与采用灵敏度分析得到的优化策略在保证弹片可靠度的前提下,达到了良好的优化效果。

陀螺房结构与弹片结构有关,在进行弹片结构优化的同时,陀螺房尺寸也随之变化,具体对比如图 5 所示。从优化前后对比图可以看出,陀螺房中部尺寸整体缩小,使得质量减小了 0.98 kg。由于陀螺房的质量在陀螺整机中占比很大,因此弹片结构优化对陀螺整机轻量化有重要作用。

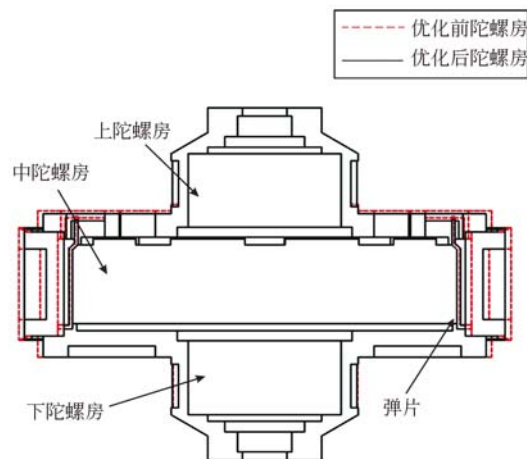


图 5 陀螺房优化前后对比图

Fig. 5 Comparison of gyro room before and after optimization

## 6 结 论

本文通过对锁紧弹片的有限元分析,得到了弹片的主要失效形式,分别为静强度失效和共振失效;视弹片失效模式为串联失效,将带交叉项的二次响应面法与一次二阶矩法相结合,推导了弹片可靠度和可靠性灵敏度的计算公式,计算得到弹片的可靠度为 0.9736,灵敏度分析结果表明弹片厚度是影响弹片可靠性的主要因素,且加工误差越大可靠性越低。通过可靠性灵敏度分析确定了弹片的优化方向,在提高弹片可靠度的同时,达

到了弹片质量减轻 23.71% 的良好效果。与安全系数法对比发现,可靠性优化能得到更好的优化结果。弹片结构优化对陀螺整机轻量化有重要意

义,优化结果表明,基于响应面的可靠性灵敏度计算方法在可靠性优化和结构轻量化设计过程中有一定指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 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.*, 2006, 14(4): 444-451. (in Chinese)
- [2] 张维煜,朱焯秋,鞠金涛,等.磁悬浮轴承研究现状及其发展[J].*轴承*,2016(12):56-63.  
ZHANG W Y, ZHU H Q, JU J T, *et al.*. Research status and development of magnetic bearings [J]. *Bearing*, 2016(12): 56-63. (in Chinese)
- [3] 宁欣,韩邦成,房建成.基于干扰观测器的双框架变速率控制力矩陀螺解耦控制[J].*机械工程学报*,2017,53(10):52-59.  
NING X, HAN B CH, FANG J CH. Disturbance observer based decoupling method of double-gimbaled variable speed control moment gyroscope[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(10): 52-59. (in Chinese)
- [4] 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):33-36,47.  
LIU X D, YU L H. Development of automatic locking system for magnetic bearing flywheel[J]. *Machinery & Electronics*, 2007(3): 33-36, 47. (in Chinese)
- [5] 闫晓军,张小勇,聂景旭,等.采用SMA驱动的小型空间磁悬浮飞轮锁紧机构[J].*北京航空航天大学学报*,2011,37(2):127-131.  
YAN X J, ZHANG X Y, NIE J X, *et al.*. Prototype SMA actuated locking device for small space magnetic bearing flywheels[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(2): 127-131. (in Chinese)
- [6] PENTLICKI C, POUBEAU P. Magnetic bearing momentum wheel[C]. *AIAA-6th Communications Satellite Systems Conference*, AIAA, 1976: 76-39.
- [7] LIVET J, BRETAUDEAU M. Temporary locking device for inertia wheel: United States, 4345485 [P]. 1982-08-24.
- [8] VAILLANT D G H, JOLY J. Device for temporarily locking a rotor onto a stator: United States, 4872357[P]. 1989-10-10.
- [9] 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)
- [10] 刘强,房建成.磁悬浮飞轮用可重复抱式锁紧装置[J].*光学精密工程*,2012,20(8):1802-1810.  
LIU Q, FANG J CH. Repeated clamping locking device for magnetic bearing flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1802-1810. (in Chinese)
- [11] 刘强,武登云,房建成,等.磁悬浮飞轮抱式锁紧机构碳纤维弹片优化设计[J].*振动、测试与诊断*,2016,36(4):708-715,810-811.  
LIU Q, WU D Y, FANG J CH, *et al.*. Optimization of carbon fiber elastic sheet of clamping locking device for magnetically suspended flywheel [J]. *Vibration Test and Diagnosis*, 2016, 36(4): 708-715, 810-811. (in Chinese)
- [12] 刘文琰.结构可靠性设计手册[M].北京:国防工业出版社,2008.  
LIU W T. *Structural Reliability Design Manual* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [13] 张学军,林延鑫,吴飒,等.结构可靠性的概率设计法综述[J].*装备环境工程*,2016,13(3):161-168.  
ZHANG X Y, LIN Y X, WU S, *et al.*. Review on probabilistic design method for structural reliability[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(3): 161-168. (in Chinese)
- [14] 李敏.可靠度分析的响应面法研究[D].重庆:重庆大学,2016.  
LI M. *Reliability Analysis of Response Surface Method Research*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [15] 蔡斌,邢海丰.响应面法在可靠性灵敏度分析中的应用[J].*机械设计与研究*,2016,32(4):28-30,36.  
CAI B, XING H F. Reliability sensitivity analysis

based on response surface method[J]. *Machine Design and Research*, 2016, 32(4): 28-30, 36. (in Chinese)

- [16] 徐东涛, 孙志礼. 基于 Monte Carlo 法的改进型 Delta 并联机构运动可靠性分析[J]. *机械设计与制造*, 2016(10): 167-169.

XU D T, SUN ZH L. Kinematic reliability analysis of the modified Delta parallel mechanism based on Monte Carlo method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(10): 167-169. (in Chinese)

- [17] ZHU Z F, DU X P. Reliability analysis with monte

carlo simulation and dependent kriging predictions[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138(12): 121403.

- [18] 刘喆, 陶凤和, 贾长洽. 多种失效模式履带车辆扭力轴可靠性稳健设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(4): 815-820.

LIU J, TAO F H, JIA CH ZH. Reliability robust design of tracked vehicle torque axis with multiple failure modes[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(4): 815-820. (in Chinese)

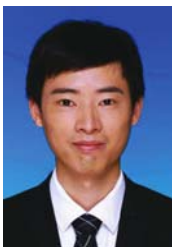
#### 作者简介:



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



赵韶璞(1993—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2015年于电子科技大学获得学士学位,主要从事磁悬浮控制力矩陀螺结构设计优化、仿真分析等方面的研究。E-mail:zbzspl@163.com



王阔(1991—),男,江苏宿迁人,硕士,2014年于山东大学获得学士学位,2017年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事陀螺结构设计优化、仿真分析、控制理论等方面的研究。Email:mewangkuo@126.com