

文章编号 1004-924X(2009)09-2206-06

静电陀螺仪长球形空心转子的径向变形设计

孙新民,陶丽芝

(河北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要:为改善静电陀螺仪球形空心转子的动态圆度,将转子静态时设计成两极长、赤道短的长球形,以补偿由离心载荷引起的两极向内收缩、赤道向外膨胀产生的圆度误差。首先,根据弹性力学薄壳理论的载荷弹性变形计算公式,应用小变形独立作用与合成原理,构建了静电陀螺仪空心转子表面径向载荷的径向变形与离心载荷的径向变形的迭加计算公式。然后,按该迭加计算公式构造了两极长、赤道短的长球形空心转子。最后,以示例对构造的长球形空心铍转子的设计、加工、测量进行了说明。实验结果表明:该加工后的长球形空心铍转子的极点半径比赤道半径长 $0.52 \mu\text{m}$,与设计值 $0.54 \mu\text{m}$ 相吻合。

关键词:静电陀螺仪;球形空心转子;长球形空心转子

中图分类号:V241.5;U666.1 **文献标识码:**A

Deformation design of long-spherical hollow rotor of electrostatic suspended gyroscope

SUN Xin-min, TAO Li-zhi

(College of Mechanical Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)

Abstract: For improving the dynamic roundness of the sphere hollow rotor in an electrostatic gyro, a rotor was designed to be a long sphere with long-polarized and short-equatorial diameters in a static state to compensate the roundness error caused by the centrifugal load. According to the load elastic distortion formula from the elasticity shell theory, the superposition formula of surface distortions produced by the radial load and the centrifugal load for hollow Be rotor in the Electrostatic Suspended Gyroscope (ESG) was established by using the small distortion independent action and synthesis theory. Then, a long spherical hollow Be rotor with long-polarized and short-equatorial diameters was constructed by the superposition formula. Finally, a sample was taken to explain the design, processing and survey of the long spherical hollow rotor. Experimental results indicate that the polar radius of the long spherical hollow Be rotor is $0.52 \mu\text{m}$ longer than equator radius, which is well coincident with the design value of $0.54 \mu\text{m}$.

Key words: electrostatic suspended gyroscope; spherical hollow rotor; long-spherical hollow rotor

收稿日期:2008-09-24;修订日期:2008-10-24.

基金项目:国防科工委十一五预研基金资助项目(No. 51309050202)

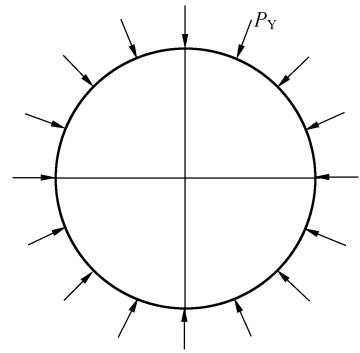
1 引言

球形空心转子是静电陀螺仪的核心元件,它的品质优劣在很大程度上决定着静电陀螺仪长时间自主导航精度的高低。其中,最重要的品质之一是球形空心转子高速旋转时须保持良好的工作形态——圆球形。球形空心转子工作形态的圆球形误差主要来源于离心变形,而离心变形产生于球形空心转子做高速旋转时,在离心力的作用下引起的弹性变形,弹性变形使球形转子变为两极短、赤道长的扁球形,从而产生较大的静地支承干扰力矩和漂移。

文献[1]应用弹性薄壳理论对空心球形转子的静态载荷和动态载变形做了解析分析;文献[2-3]从空心转子离心变形后变为理想圆球形的角度构造了长球形空心转子表面,并给出了表面任意点坐标计算公式,但是,对构造的长球形空心转子表面用何种方法成形未作说明;文献[4]仅介绍了美国和法国的高精度静电陀螺仪采用的两极长、赤道短的长球形空心转子。文献[5-7]则仅对球形空心转子的变形做了有限元分析。本文从分析球形空心转子在不同状态和载荷作用下的变形规律入手,根据离心变形规律,利用径向载荷变形补偿方法构造了两极长、赤道短的长球形空心转子表面,以保证在高速旋转工作时能具有较为理想的圆球形。这样,不但解决了空心转子长球形表面的设计问题,而且提供了如何获得长球形表面的成形方法——径向载荷变形成形法。

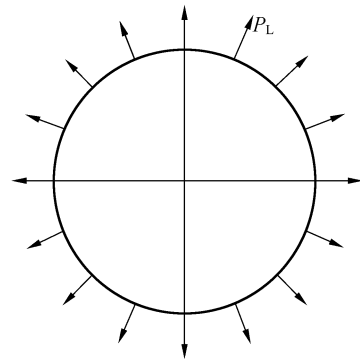
2 球形空心转子变形分析

球形空心转子所受载荷分为静态载荷和动态载荷。静态载荷又可分为均布径向压力和均布径向拉力(因重力与径向载荷相比较小,故忽略不计),如图1所示,引起的球面各点变形方向为径向,即指向球心或背离球心。动态载荷为离心力,如图2所示,引起的球面各点离心变形方向垂直于旋转轴(极轴)。



(a) 均布径向压力

(a) Equispaced radial pressure



(b) 均布径向拉力

(b) Equispaced radial pulling force

图1 球形空心转子静态载荷分布图

Fig. 1 Distribution of static load of spherical hollow rotor

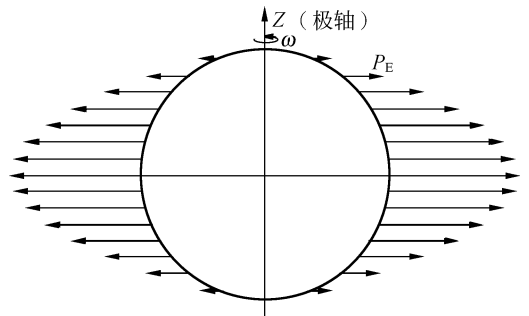


图2 球形空心转子离心载荷分布图

Fig. 2 Distribution of dynamic load of spherical hollow rotor

2.1 径向载荷变形分析

由于球形空心转子为内腔真空、两极薄赤道厚的薄壁壳体,当表面受均布径向力作用时,引起的各点径向变形大小不同,变形规律为极点处径

向变形最大壁厚最小、赤道处径向变形最小壁厚最大。若球形空心转子受均布径向压力作用,则由圆球形变为两极短、赤道长的扁球形,如图 3 所示。反之,若球形空心转子受均布径向拉力作用,则由圆球形变为两极长、赤道短的长球形,如图 4 所示。

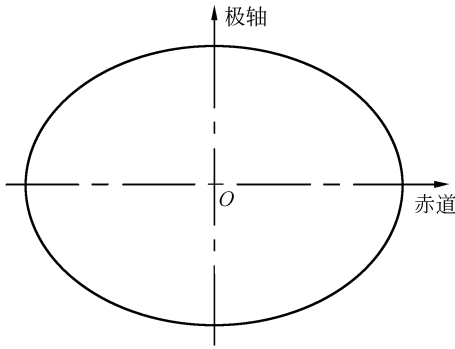


图 3 扁球形空心转子

Fig. 3 Flat spherical hollow rotor

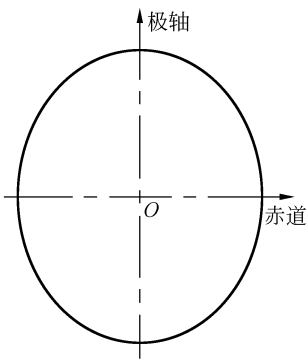


图 4 长球形空心转子

Fig. 4 Long spherical hollow rotor

2.1.1 受径向压力的变形计算

设非均匀壁厚的球形空心转子表面所受均布径向压力为 p_Y 、表面半径为 r_0 、任一点壁厚为 b 。由文献[1]知,表面任一点的径向变形计算式为:

$$\omega_Y = -\frac{(1-\mu)r_0^2 p_Y}{2Eb}, \quad (1)$$

式中 E 为转子材料弹性模量; μ 为转子材料泊松比。

由式(1)可以看出,对材料一定的球形空心转子,当转子外受压力作用时,径向变形为负值,表示转子表面向球心收缩,其变形大小与转子半径的平方和径向压力成正比,与转子壁厚成反比。受径向压力作用后,转子的表面任一点向径计算

式为:

$$\rho_Y = r_0 - \frac{(1-\mu)r_0^2 p_Y}{2Eb}. \quad (2)$$

2.1.2 受径向拉力的变形计算

当球形空心转子外受均布径向拉力作用时,径向变形为正值,表示转子表面向外径向膨胀。同理,向外膨胀的径向变形计算式为:

$$\omega_L = \frac{(1-\mu)r_0^2 p_L}{2Eb}. \quad (3)$$

受径向拉力作用后,转子的表面任一点向径计算式为:

$$\rho_L = r_0 + \frac{(1-\mu)r_0^2 p_L}{2Eb}. \quad (4)$$

由式(1)~式(4)知,若转子材料、半径、径向均布载荷一定,则球形空心转子的径向变形有以下特点:

1. 径向变形大小决定于转子表面各点壁厚。对于非等壁厚的球形空心转子受径向均布载荷作用后,其形态变为非球形。而且,当径向均布载荷为径向压力时,转子表面向球心收缩;当径向均布载荷为径向拉力时,转子表面从球心向外膨胀。

2. 若转子壁厚从极点到赤道由最小变到最大,则径向变形从最大变到最小。因此,受径向压力的球形空心转子将收缩为两极短、赤道长的扁球形;受径向拉力的球形空心转子将膨胀为两极长、赤道短的长球形。

2.2 离心载荷径向变形分析

设球形空心转子绕极轴以角速度 ω 旋转,由文献[1]知,在离心力的作用下,表面任一点的离心径向变形计算式为:

$$\omega_E(\theta) = -\frac{\rho\omega^2 r_0^3}{E} \left[\frac{\mu}{2} + \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \cos 2\theta \right], \quad (5)$$

式中 θ 为转子表面任一点的纬度角; ρ 为转子材料密度。

由式(5)知,当 $\theta=0 \sim \pi/4$ 时,离心径向变形为负值,表示转子表面向内收缩;当 $\theta=\pi/4 \sim \pi/2$ 时,离心径向变形为正值,表示转子表面向外膨胀。而且,在极点处即 $\theta=0$,极点向内径向收缩变形具有最大负值;在赤道处即 $\theta=\pi/2$,赤道面各点向外径向膨胀变形具有最大正值。因此,球形空心转子绕极轴以角速度 ω 旋转时,在离心力的作用下,将变为两极直径短、赤道直径长的扁球形,与图 3 所示相似。

3 变形独立作用与合成原理

由误差独立作用原理知,上述的空心转子径向载荷引起的径向变形和离心载荷引起的径向变形均属于小变形,且分别独立作用,其综合变形满足误差合成原理。为减小转子表面离心载荷引起的径向收缩变形部分,可利用径向拉力引起的径向膨胀变形与之补偿,由变形合成原理,空心转子的径向综合变形等于径向拉力引起的径向变形与离心力引起的径向变形的线性迭加。将式(3)和式(5)进行线性迭加,可获得空心转子径向综合变形计算式:

$$w_F(\theta) = w_L + w_E(\theta) = \frac{(1-\mu)r_0^2 p_L}{2Eb} - \frac{\rho\omega^2 r_0^3}{E} \left[\frac{\mu}{1} + \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) \cos 2\theta \right]. \quad (6)$$

4 空心转子长球形表面的径向变形设计

空心转子长球形表面的径向变形设计分为两步。第一步,根据补偿离心变形量确定所需的径向拉力;第二步,将径向拉力代入式(3)和式(4)计算出表面各点径向变形和向径。

4.1 径向拉力的确定

根据空心转子径向综合变形计算式(6),令在极点处($\theta=0$)的径向综合变形等于零,则可导出极点处径向拉力的计算式:

$$p_L' = \frac{2b_1\rho\omega^2 r_0(\mu+1)}{1-\mu}, \quad (7)$$

式中 b_1 为极点处壁厚。

4.2 空心转子表面各点径向变形和向径

将式(7)确定的径向拉力 p_L' 代入径向拉力变形计算式(3),可获得空心转子表面各点的径向变形计算表达式:

$$w_L' = \frac{b_1\rho r_0^3\omega^2(1+\mu)}{Eb}, \quad (8)$$

将式(8)确定的径向拉力变形代入式(4),可获得长球形空心转子表面各点的向径表达式:

$$\rho_L' = r_0 + \frac{b_1\rho r_0^3\omega^2(1+\mu)}{Eb}. \quad (9)$$

5 设计与试验示例

5.1 径向变形设计

设计内腔为“椭球型”长球形空心铍材转子,如图5所示。已知圆球形半径 $r_0=23\text{ mm}$,极点壁厚 $b_1=0.20\text{ mm}$,赤道壁厚 $b_2=2.00\text{ mm}$,密度 $\rho=0.00185\text{ g/mm}^3$,泊松比 $\mu=0.05$,弹性模量 $E=310\text{ GPa}$,工作角速度 $\omega=450\text{ rad/s}$ 。

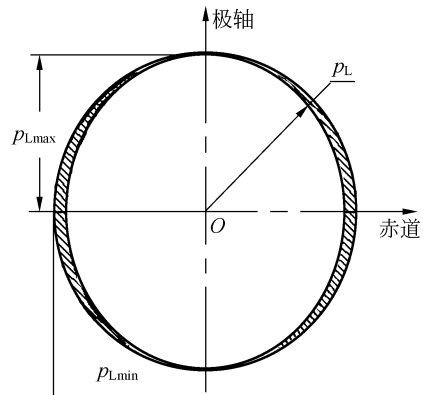


图5 长球形空心铍球极轴截面图

Fig. 5 Polar axis section graph of long-spherical hollow Be spheroid

(1) 计算构造长球形空心铍球所需的径向拉力

由式(7)计算出所需的径向拉力 p_L' :

$$p_L' = \frac{2b_1\rho\omega^2 r_0(\mu+1)}{1-\mu} = \frac{2 \times 0.20 \times 1.85 \times (2 \times 450\pi)^2 \times 23 \times (0.05+1)}{1-0.05} \approx 0.15 \text{ (MPa)}.$$

其中,内腔“椭球型”球形空心铍球表面各点壁厚的计算式为:

$$b = 23 - \sqrt{21^2 \cos^2 \theta + 22.8^2 \sin^2 \theta}, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}.$$

(2) 计算球形空心铍球表面各点径向变形

由式(8)计算出球形空心铍球各点径向变形 w_L' :

$$w_L' = \frac{b_1\rho r_0^3\omega^2(1+\mu)}{Eb} = \frac{1.22 \times 10^{-4}}{23 - \sqrt{21^2 \cos^2 \theta + 22.8^2 \sin^2 \theta}}, \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}.$$

(3) 计算长球形空心铍球表面各点向径

由式(9)计算出长球形空心铍球各点向径

ρ_{L}' :

$$\rho_{L}' = r_0 + \frac{b_1 \rho_0^3 \omega^2 (1 + \mu)}{Eb} = 23 + \frac{1.22 \times 10^{-4}}{23 - \sqrt{21^2 \cos^2 \theta + 22.8^2 \sin^2 \theta}}, 0 < \theta < \frac{\pi}{2}$$

其中,极点向径(半径) $\rho_{\max} = 23.000\ 06\ \text{mm}$,赤道向径(半径) $\rho_{\min} = 23.000\ 06\ \text{mm}$ 。极点半径比赤道半径长 $0.54\ \mu\text{m}$ 。

5.2 加工及测量

长球形空心铍转子加工及测量的主要装备为压力舱、四轴球体自动研磨机、精密圆度仪,实验步骤和结果如下:

(1) 在通常环境下,先在四轴球体自动研磨机上加工出圆球形毛坯球,并留有一定的加工余量;

(2) 把通常环境下加工的圆球形毛坯球装入压力舱内的四轴球体自动研磨机上;

(3) 关闭舱门,对舱内加压,使压力达到等效于设计计算所需的径向拉力 ρ_{L}' 。开启四轴球体自动研磨机,对球体表面进行研磨(研磨工艺参数为:金刚石研磨膏,四研具转速为 $40\ \text{r/min}$,研磨压力为 $4\ \text{N}$,研磨时间为 $40\ \text{min}$);

(4) 研磨停止后,卸掉压力,取出加工后的铍球。用高精度圆度仪测量空心铍球极轴截面,测量结果如图 6 所示。由图 6 可知,铍转子极轴截面轮廓为两极长、赤道短的长球形,而且由图中给出的轮廓圆度误差可知,极点半径比赤道半径约长 $0.52\ \mu\text{m}$,与设计值 $0.54\ \mu\text{m}$ 相吻合。

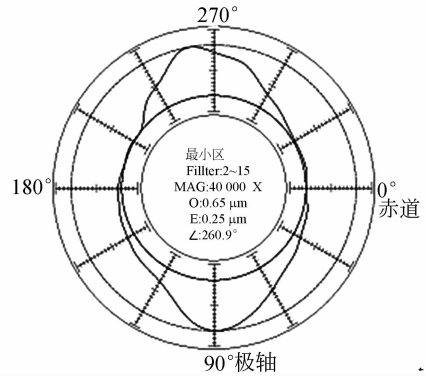


图 6 长球形空心铍转子主截面轮廓图

Fig. 6 Principal section outline of long-spherical hollow Be rotor

6 结 论

综上所述,长球形空心转子径向变形设计方法具有以下特点:

(1) 利用径向拉力引起的径向膨胀变形构造空心转子的长球形表面,解析概念清晰,设计参数易于确定。

(2) 方法中的径向拉力以及引起的径向膨胀变形易于实现,即将原有的球体加工设备引入与径向拉力相等的压力作为加工环境压力,并在此加工环境压力下把空心转子加工成圆球形,脱离加工环境压力后,该转子将膨胀为两极长、赤道短的长球形,其极点半径比赤道半径长 $0.52\ \mu\text{m}$,与设计值 $0.54\ \mu\text{m}$ 相吻合。

(3) 按本方法设计的两极长、赤道短的长球形空心转子与球形空心转子相比,在高速旋转工作时,依靠自身产生的离心变形由静态的长球形变为近似的圆球形,具有更高的动态圆度、较小的圆球形误差,使静电陀螺仪的随机漂移精度进一步提高。

参考文献:

- [1] 刘延柱. 静电陀螺仪动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
LIU Y ZH. *Electrostatic Gyro Dynamics* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1979. (in Chinese)
- [2] 王佩纶. 静电陀螺仪转子的变形与长球形转子的设计原理[J]. 南京工学院学报,1978(1):114-130.
WANG P L. Electrostatic gyro rotor's distortion

and prolate rotor's principle of design[J]. *Journal of Nanjing Engineering Institute*, 1978(1):114-130. (in Chinese)

- [3] 南京工学院陀螺仪及导航仪器教研组. 静电陀螺仪转子的变形与长球形转子的设计原理[R]. GF05642,1977,4:1-26.
Gyroscope and navigator research group of nanjing insititute of engineering. *Electrostatic Gyro Rotor's Distortion and Prolate Spheroid Rotor's Principle*

- of Design [R]. GF05642, 1977, 4: 1-26. (in Chinese)
- [4] 高钟毓. 静电陀螺仪技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
GAO ZH Y. *Electrostatic Gyro Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 刘瑞歌. 静电陀螺仪空心球转子弹性变形分析及参数优化[D]. 唐山:河北理工大学, 2005.
LIU R G. *Elastic Deformation Analysis and Parameter Optimization of Electrostatic Gyro Hollow Rotor* [D]. Tangshan: College of Mechanical Engineering Hebei Polytechnic University, 2005. (in Chinese)
- [6] 张森, 孙新民, 程相文, 等. 静电陀螺仪空心球形转子的动态变形[J]. 河北理工学院学报, 2006, 28(3): 48-51.
ZHANG S, SUN X M, CHENG X W, *et al.*. Electrostatic gyro hollow sphere be rotor's dynamic distortion[J]. *Journal of Hebei Technical Institute*, 2006, 28(3): 48-51. (in Chinese)
- [7] 张军安, 邱长华, 颜明, 等. 静电陀螺仪空心球转子变形分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 116-120.
ZHANG J A, QIU CH H, YAN M, *et al.*. Distortion analysis of electrostatic gyro hollow ball rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 116-120. (in Chinese)

作者简介:



孙新民(1952—),男,河北曲阳人,教授,主要从事静电陀螺仪转子技术研究。E-mail: sxm@heut.edu.cn



陶丽芝(1982—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事机械动力学的研究。E-mail: xiaotao8970@sina.com

● 下期预告

大型激光装置光学元件的稳定性设计与分析

谢娜, 周海, 张军伟, 林东晖, 陈良明

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

大型高功率固体激光装置对打靶精度有很高的要求,总的打靶精度通常在几十微米。而分配到单个光学元件的稳定性指标只有几微米或者几个微弧度,某些光学元件的稳定性指标甚至小于一微弧。这就对结构的稳定性提出了很高的要求,因此在结构设计中要着重考虑稳定性。首先,以大型激光装置为背景,以关键光机系统为例进行稳定性设计。然后,应用有限元理论对关键光学元件及其支撑结构的稳定性进行分析,以验证光机结构设计的合理性。分析结果表明:腔镜的最大转角为 $0.14 \mu\text{rad}$,注入系统角漂元件的最大转角为 $0.423 \mu\text{rad}$,光束切换模块反射镜的最大转角为 $0.394 \mu\text{rad}$ 。关键光学元件均满足稳定性设计指标和 1.5 的裕度系数。