

文章编号 1004-924X(2006)01-0116-05

静电陀螺仪空心球转子变形分析

张军安¹, 邱长华¹, 颜明², 王彦国¹, 毛雨辉¹

(1. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要:提出了基于有限元方法对静电陀螺仪空心球转子离心变形、温度变形、压力变形和综合变形的分析方案,并给出了减少变形的措施。分析结果表明:转子的变形主要是由温度引起的,压力和离心产生的变形相对比较小;离心变形对转子的球形度影响较大,但变形值要比温度引起的变形值约小2个数量级;温度变化对转子的半径变化产生较大影响,但主要影响转子与电极之间的间隙,对转子的球形度几乎没有影响;同样,压力变形对球形度影响较小,对半径影响也较小。因此,在结构设计时将转子半径变化考虑进去,并加以补偿,则对转子半径的影响就可以忽略。可以通过在四个标准大气压和五个标准大气压下将空心球转子研磨成球形,来消除离心变形对转子球形度的影响。结果还表明该方案对空心转子静电陀螺仪转子的研制具有重要的应用价值。

关键词:静电陀螺仪;空心转子;铍材;离心变形;温度变形;压力变形;综合变形

中图分类号:U666.12 **文献标识码:**A

Analysis on hollow rotor deformation of electrostatic suspended gyroscope

ZHANG Jun-an¹, QIU Chang-hua¹, YAN Ming², WANG Yan-guo¹, MAO Yu-hui¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: A scheme to analyze the centrifugal deformation, temperature deformation, pressure distortion and synthesis distortion of the hollow rotor of ESG (the Electrostatic Suspended Gyroscope), and the measures to reduce the deformation were presented. The analysis results show that the rotor deformation is mainly caused by the temperature, the centrifugal deformation can produce a great impact on the spherical roundness of the rotor, but the deformation value is litter than that of the temperature deformation by second order of magnitude. The temperature takes great effect on the rotor radius by mainly affecting the clearance between the rotor and the electrode, the pressure distortion takes little effect on the spherical roundness and the rotor radius in the same way. Therefore, the rotor radius should be taken account, and compensated for designing a structure. The effect of the centrifugal deformation on the spherical roundness of the rotor could be reduced by grinding the hollow rotor into sphere lapped on four or five atmospheres. The results also show that this scheme is applicable for developing the hollow rotor of ESG.

Key words: electrostatic suspended gyroscope; hollow rotor; beryllium; centrifugal deformation; temperature deformation; pressure distortion; synthesis distortion

收稿日期:2005-09-22; 修订日期:2005-11-22.

基金项目:“十五”国防重点预研项目(No. 413090201)。

1 引言

静电陀螺仪是目前世界上最高精度的惯性器件,静电陀螺仪由球形转子、电极壳体组件、屏蔽罩、真空系统、信号读取系统、静电支承系统、加转线圈和定中线圈等几部分组成。转子是静电陀螺仪的核心元件,转子的非球形是产生静电干扰力矩的根本原因^[4]。产生转子非球形的因素有两种,一种是加工误差;另一种是转子在工作时由于高速旋转和工作环境条件(压力、温度等)变化产生的变形。减少加工误差就需要提高加工、计量设备精度,摸索新的工艺途径等;而减少变形就需要对转子变形进行分析,采用优质材料,选用恰当的结构形式。因此,确定转子的材料和结构、分析、计算转子的变形,提高转子在工作时的动态球形度和长期的尺寸稳定性是研制高精静电陀螺仪需要迫切解决的问题。

2 静电陀螺仪的工作原理及特点

静电陀螺仪是一种自由转子陀螺仪,在一个球形转子和具有数对金属电极的电极壳体组件的超高真空的球腔里,利用静电场的静电引力将球形转子悬浮起来高速旋转,支承控制系统接受转子与电极之间的电容变化信息,并对电极施加反馈电压以调整作用在转子上的静电引力,使转子在电极壳体内处于稳定的平衡状态。

静电陀螺仪同其它类型的陀螺仪相比,具有其独特的优点。因为静电陀螺仪利用静电支承代替机械支承,并且转子是在超高真空的球腔里旋转,所以静电陀螺仪消除了机械支承所固有的摩擦力矩、弹性力矩,同时也避免了液体或气体扰动等引起的干扰力矩,与常规陀螺仪相比具有以下特点:基础精密零件少,只有一个运动部件即高速旋转的转子,所以它的机械结构也比其它类型的陀螺仪要简单一些,而且也相应提高了陀螺仪工作的可靠性;干扰来源少,陀螺漂移率低而且具有高重复性和可预测性;转子与壳体之间为“力矩绝缘”,作用在壳体上的干扰力矩或指令力矩传不到转子上去,只有直接作用在转子上的力才能形成力矩;当转子相对壳体有线位移时,支承力的作用点也随之移动,不存在框架陀螺仪的非等弹性效

应;对于外表面为理想球形的转子,静电引力不能构成力矩,因此转子外表面的非球形是形成静电场干扰力矩的基本因素。

3 静电陀螺仪空心转子的材料选择^[1,3]

静电陀螺仪是在一个球形转子和具有数对金属电极的电极壳体组件的超高真空的球腔里,利用静电场的静电引力将球形转子悬浮起来高速旋转的,这就要求转子的重量要轻,同时要保持在工作时的动态球形度和长期的尺寸稳定性。

铍具有优良的物理性能和机械性能。其一,铍具有低密度、高弹性模量、低泊松比,转子在实际的工作条件下,高速旋转的转子产生离心变形会使球表面成为非理想的球形,在两极处转子向内收缩,其变形位移有最大负值,在赤道处转子向外膨胀,其变形位移有最大正值,两极处转子的收缩量和赤道处转子的膨胀量分别为: $\omega(0) = -(1+v)\lambda$, $\omega(\pi/2) = \lambda$, 变形后椭球形转子的长短轴之差为: $\omega(\pi/2) - \omega(0) = (2+v)\lambda$ 。其中 $\lambda = \rho\omega^2 r_0^3 / E$, ρ 为转子材料密度, ω 为转子角速度, r_0 为转子半径, v 为转子材料泊松比, E 为转子材料的弹性模量,转子的变形量与 $\rho(2+v)/E$ 成正比,弹性模量越大、密度越小、泊松比越小的材料转子变形越小,铍的密度为 1.85 g/cm³,约为铝的 2/3,钛的 1/2;铍的弹性模量为 3.09×10^5 MPa,约为铝的 4 倍,钛的 2.5 倍;单位重量铍的刚度约为钢、铝、钛等金属的 6 倍。其二,铍具有高导热率和高比热容、低热膨胀系数并与其它结构材料相容,高导热率使转子在工作环境下具有较小的热应力,高比热容使转子在外界热源作用下具有小的温升,这可减少温度对转子变形的影响。铍的导热率为 190 W/(m·K),比同重量的其它金属大;铍的比热容高,是所有金属中热容量最大的一种,热扩散性好,热变形小,热应力小。铍的热膨胀系数与电极碗的高纯度氧化铝陶瓷的热膨胀系数较为接近,有利于保证球与电极碗间隙的稳定性。其三,铍对光的反射率高,有利于光电传感器对光电信号的读取。铍具有无磁性、高导电率等优点,这有利于减少杂散电磁场对转子的干扰力矩。铍具有良好的焊接性,可实现扩散焊、钎焊

和熔焊。铍具有以上诸多优点,使铍成为精密惯性仪表的首选材料。由于铍的弹性模量与密度之比是所有金属中最高的,具有可精密加工性的优点,也使得铍成为静电陀螺转子的最佳材料。

4 静电陀螺仪空心转子的结构及工作情况

为保证转子极轴位置信号的正确读取,转子必须要获得唯一的最大主惯性轴。本文设计了一种方案,空心球的外表面为半径为 25 mm 的圆球面,空心球的内腔体为椭球面,空心球极轴处的壁厚为 0.5 mm,赤道处的球壁厚为 1.5 mm。转子工作是以 300 Hz 的转速旋转,会产生离心变形;转子工作时工作线路产生热量,使得工作时转子的温度高于加工计量时的温度,因此会产生热变形;转子加工计量时是在一个标准大气压环境下进行的,而转子是工作在超高真空的球腔内,因此会产生压力变形。

5 仿真结果

铍的有关物理参数为:比重为 1.85×10^3 (kg/m^3),弹性模量为 3.03×10^{11} (Pa),泊松比为 0.03,热膨胀系数为 1.15×10^{-5} ($1/^\circ\text{C}$)。利用有限元分析软件 ANSYS,对上述结构方案在以下 4 种载荷工况下分别进行了仿真分析:载荷工况一:转子由加工计量时的零转速升到工作时 300 Hz 的高速转速;载荷工况二:温度由转子加工计量时的 20°C 升高到工作时的 55°C ,即工作热载荷为 35°C ;载荷工况三:气压从加工计量时的一个大气压(1.01×10^5 Pa)降到工作时的超高真空(近似为零);载荷工况四:前 3 种载荷工况同时作用。由于静电陀螺转子是球体,是轴对称类型的,现取 1/4 截面作为有限元模型进行分析,分析结果如图 1(图中数值单位为:m)。

转子在 4 种工况下的最大变形点、极点和赤道处变形点的变形值见表 1,表中负号表示向内收缩变形。从表 1 和图 1 中可以看出:

表 1 转子在 4 种工作情况下主要点的变形值

Tab.1 Values of deformation on the main points under the four working conditions.

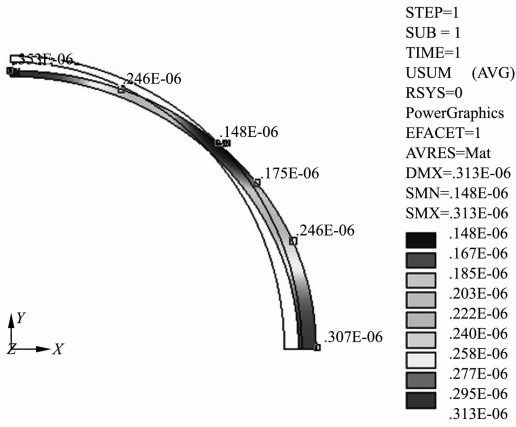
载 荷 工 况	载荷工况一	载荷工况二	载荷工况三	载荷工况四
极点变形值(mm)	-0.313×10^{-3}	0.101×10^{-1}	0.185×10^{-3}	0.993×10^{-2}
赤道最大变形值(mm)	0.307×10^{-3}	0.101×10^{-1}	0.700×10^{-4}	0.104×10^{-1}
转子最大变形值(mm)	-0.313×10^{-3}	0.101×10^{-1}	0.185×10^{-3}	0.104×10^{-1}

温度变化对转子的半径产生较大变化($10.1 \mu\text{m}$),但主要影响转子与电极之间的间隙,对转子的球形度几乎没有影响;同样,压力变形对球形度影响较小,对半径影响也较小。因此,在结构设计时将转子半径变化考虑进去,并加以补偿,则对转子半径的影响就可以忽略。但是,离心变形对转子的球形度影响较大,空心球转子外表面的非球形是形成静电场干扰力矩的基本因素,必须严格控制。下面给出了解决方法。

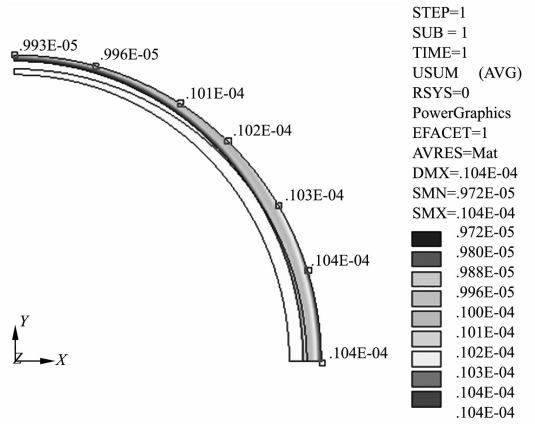
解决办法一,静电陀螺球转子采用铍材,其制造工艺是先将铍坯挤压成棒料,挤压工艺产生的棒料沿挤压轴向的热膨胀系数大于垂直轴方向的热膨胀系数。再将棒料加工成两个形状相同的空心半球,空心半球外表面是球形,内表面是椭球形。将两个半球焊接成球转子,转子的极轴应与

棒料的轴向一致,转子在低于工作温度下研抛成球形。当升高到工作温度时,转子成椭球。当转子绕极轴旋转到工作转速时,离心应力又使转子变成圆球。该种方案需要严格控制铍棒料沿挤压轴方向和垂直于挤压轴方向的热膨胀系数,另外,对陀螺温控精度要求也很高,技术难度很大,目前国内难以实现。解决办法二,利用各向同性的铍材加工成内球面为椭球形的空心球转子,在高于一个标准大气压下研磨成球形,在真空电极腔体内形成椭球形状,在受工作载荷的情况下近似形成球形。

转子在工作时同时受到以下 3 种载荷:转子由加工计量时的零转速升到工作时 300 Hz 的高速转速;温度由转子加工计量时的 20°C 升高到工作时的 55°C ;气压从加工计量时的大气压降到工



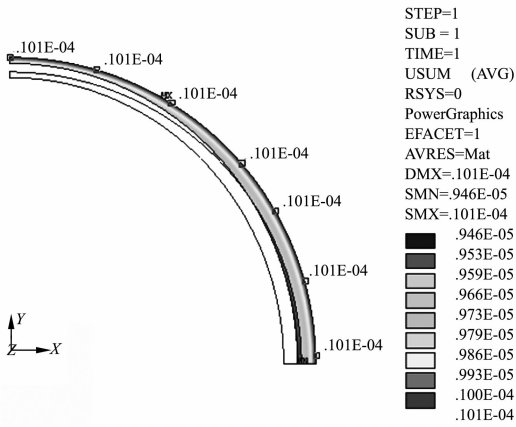
(a) 载荷工况 1
(a) Load case 1



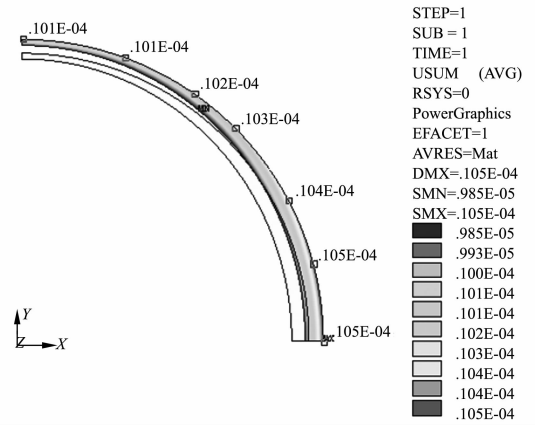
(d) 载荷工况 4
(d) Load case 4

图 1 不同载荷下的转子变形图

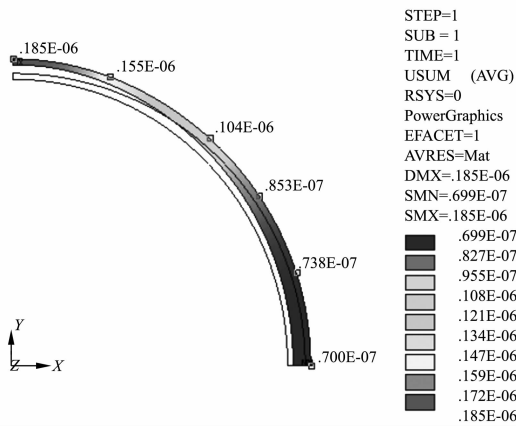
Fig. 1 Distortion of the rotor undergoing different loads



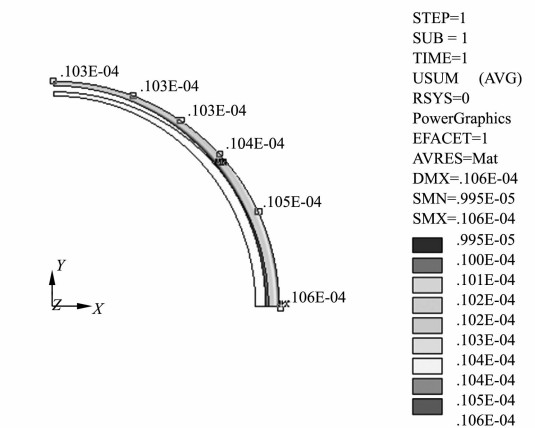
(b) 载荷工况 2
(b) Load case 2



(a) 两个大气压下加工的球工作时的变形图
(a) Work distortion of the ball lapped on two atmospheres



(c) 载荷工况 3
(c) Load case 3



(b) 三个大气压下加工的球工作时的变形图
(b) Work distortion of the ball lapped on three atmospheres

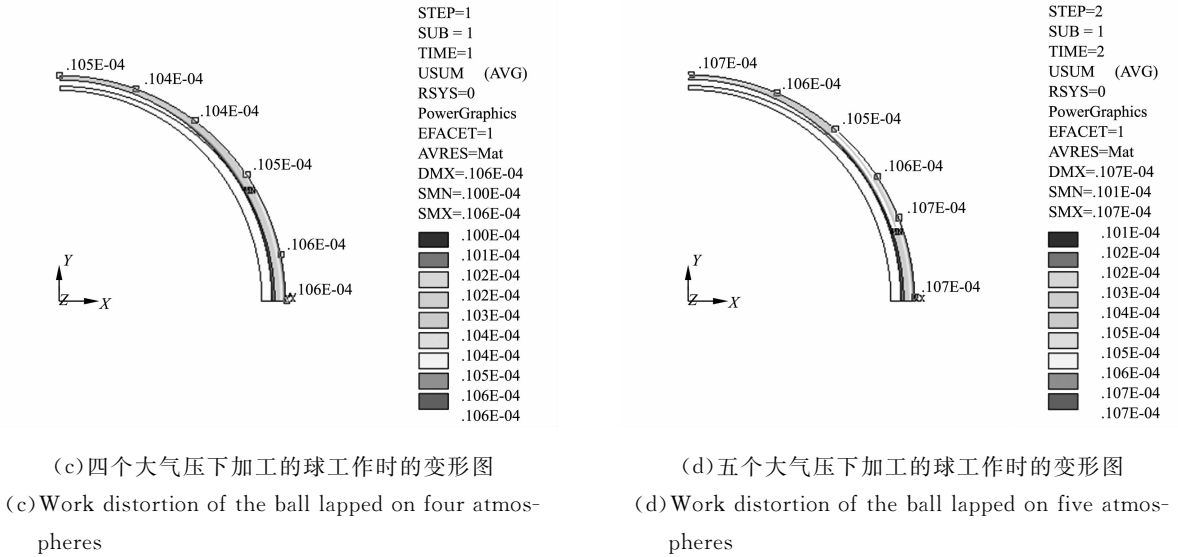


图 2 不同大气压下研磨加工的球转子工作时的变形图

Fig. 2 Distortion of the working rotor with rubbing conditioned on different atmospheric pressures

作时的超高真空(近似为零)。对不同大气压下研磨的球转子在工作时的变形做了仿真分析,分析结果如图 2 所示(图中数值单位为:m),从仿真结果可以看出,在四个标准大气压和五个标准大气压下研磨的球转子,在受到 3 种工作载荷时球的圆度最好。

6 结束语

转子的变形主要是由温度引起的,压力和离

心产生的变形相对比较小;离心变形对转子的球形度影响较大,但变形值要比温度引起的变形值约小 2 个数量级;温度变化对转子的半径产生较大变化,但主要影响转子与电极之间的间隙,对转子的球形度几乎没有影响;同样,压力变形对球形度影响较小,对半径影响也较小。因此,在结构设计时将转子半径变化考虑进去,并加以补偿,则对转子半径的影响就可以忽略。可以通过在四个标准大气压和五个标准大气压下将空心球转子研磨成球形,来消除离心变形对转子球形度的影响。

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,1979:81-83.
LIU Y Z. *The kinetics of ESG*[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1979:81-83. (in Chinese)
- [2] 高钟毓. 静电陀螺仪技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
GAO ZH Y. *The Technology of ESG*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 咎春燕,屠启基,石慧. 静电陀螺转子用铍材的基本要求[J]. 中国惯性技术学报,2003,11(5):63-66.
ZAN CH Y, TU Q J, SHI H. Basic requirements for beryllium of ESG rotor[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(5): 63-66. (in Chinese)
- [4] 颜明. 小型静电陀螺仪总体技术及误差理论分析[D]. 上海:上海交通大学,2002.
YAN M. *General technology and error analysis of miniature electrostatically suspended gyroscope*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002. (in Chinese)
- [5] 刘涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
LIU T, YANG F P. *Mastering ANSYS*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:张军安(1976—),男,黑龙江人,哈尔滨工程大学机电工程学院博士研究生,主要从事惯性元器件技术研究。

邱长华(1944—),男,哈尔滨工程大学机电工程学院教授,博士生导师。E-mail: junanzhang@163.com