

# 半球谐振陀螺快速启动技术研究

方海斌<sup>1,2</sup>,雷霆<sup>1,2</sup>,卜继军<sup>1,2</sup>,周强<sup>1,2</sup>,韩世川<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;2. 固态惯性技术重庆市工程实验室,重庆 400060)

**摘要:**半球谐振陀螺是一种新型振动陀螺仪,在装备领域有着广泛的应用前景。制造误差、干扰源及工作环境的变化影响了半球谐振陀螺的快速启动性能。该文分析了半球谐振陀螺输出的影响因素,讨论了谐振子品质因数(Q)值特性、装配、温度及信号干扰对快速启动性能的影响,并针对敏感器制造和信号处理进行了优化改进。结果表明,优化改进后的半球谐振陀螺可在通电3 min内达到稳定,相比改进前的大于1 h有显著提升。

**关键词:**半球谐振陀螺;误差源;快速启动

**中图分类号:**TN384;TP212 **文献标志码:**A

## Research on the Fast Start Technology of Hemispherical Resonator Gyro

FANG Haibin<sup>1,2</sup>, LEI Ting<sup>1,2</sup>, BU Jijun<sup>1,2</sup>, ZHOU Qiang<sup>1,2</sup>, HAN Shichuan<sup>1,2</sup>

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing Engineering Laboratory of Solid Inertial Technology, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The hemispherical resonator gyro (HRG) is a new kind of vibratory gyro, which has a wide application prospect in the field of equipment. The fast start performance of HRG is affected by the manufacturing error, interference source and working environment. In this paper, the influencing factors of the output of HRG are analyzed, and the effects of Q value characteristics, assembly, and temperature and signal interference on the fast start performance are discussed. The fabrication and signal process of the sensitive devices are optimized and improved. The results show that the optimized and improved HRG can be stabilized within 3 minutes after power on, which is a significant improvement compared to more than 1 hour before the improvement.

**Key words:** hemispherical resonator gyro; error source; fast start

### 0 引言

半球谐振陀螺作为一种新型的哥氏振动陀螺,在海陆空天各领域有着广泛的应用前景。在工程化应用中,快速启动能力是一个非常重要的指标,关系到装备平台能否快速投入使用。因此,研究半球谐振陀螺的快速启动技术具有重要的工程意义。

### 1 半球陀螺输出的影响因素分析

半球谐振陀螺的输出可表示为

$$U_{\text{out}} = K\omega + k_1D_1 + k_2D_2 + k_3D_3 + \dots + k_nD_n \quad (1)$$

式中: $U_{\text{out}}$ 为陀螺输出; $\omega$ 为外界输入角速率; $K$ 为陀螺标度因数; $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ 分别为误差源1, 2, 3,  $\dots, n$ ;  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ 分别为误差源1, 2, 3,  $\dots, n$ 对陀螺输出的影响系数。

理想情况下,半球陀螺的输出值只与陀螺角速

率成正比,然而由于制造误差和电控误差的存在,实际陀螺的输出中包含了各种干扰源的影响,如式(1)中的 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ ,各干扰源影响陀螺输出的系数为 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ 。式(1)中的 $k_1D_1 + k_2D_2 + k_3D_3 + \dots + k_nD_n$ 为陀螺的零偏。如果零偏是一个不随环境和时间因素变化的固定值,则其可作为系统误差进行精确补偿,其本身大小不影响陀螺性能的稳定性。但是干扰源不稳定,易受温湿度、电磁场、应力场、时间等因素的影响,经过系数 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ ,最终影响陀螺的输出,从而使陀螺输出易受环境和时间因素的影响,给陀螺带来启动时间长(即开机很长时间才能达到标称精度)、零偏稳定性差等问题。因此,半球陀螺仪未经补偿的原始零偏越小越好,此时表示影响陀螺输出的干扰源最少,陀螺性能也越稳定。

为了分析问题,式(1)对模型做了简化,实际的输出模型比式(1)更复杂。半球陀螺通电工作后,自身的某些特性及干扰源随时间增加而出现缓慢的变化。这些因素通过某些通道影响了陀螺的输出,表现为陀螺需经过一段时间的预热才能达到稳定。自身随开机时间变化的因素包括谐振频率、品质因数(Q)值及其分布、装配精度等。干扰源随开机时间变化的因素包括电源波动、环境温度湿度、外界震动、噪声等。因此,若要提高陀螺的快速启动性能,首先需要找出对陀螺输出存在显著影响且易受环境和时间影响的干扰源,然后通过加工装配工艺、控制或补偿方案上的优化,降低这些因素对陀螺输出的影响,从而达到缩短启动时间的目的。

### 1.1 Q值特性的影响

由于加工缺陷的存在,谐振子的Q值存在各向异性,其随时间、温度等外界环境变化而变化,从而会留下较大的残余误差,该误差引起的系统漂移在驻波方位角上成正弦分布。Q值分布对陀螺零偏的影响如图1所示。Q值各向异性引起的零位误差随时间累积,造成了陀螺零偏及稳定性指标的恶化,且此误差无法从根源上进行消除<sup>[1]</sup>。

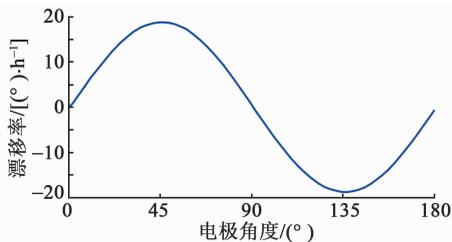


图1 Q值分布对陀螺零偏的影响

谐振子加工过程中,由于材料的脆性和局部机械载荷的影响,磨削玻璃表面时会损坏原有玻璃表面状态,表现为裂缝或缺口,同时加工使用的冷却液渗透到已产生的裂缝中,形成复杂的表面缺陷层。去除谐振子缺陷层可以获得较高的Q值,同时降低谐振子表面粗糙度,最终获得高性能的谐振子。

### 1.2 装配的影响

由于半球谐振子与激励罩和检测基座的球面间隙很小,安装间隙的不对称直接影响激励极和检测极间的电容值,在系统误差中表现为陀螺输出的检测信号的相位误差和信号的幅度误差。这需要设计制作高精度的专用装配夹具,在装配过程中采用对称检测方法以保证安装间隙的均匀性,使陀螺的装配精度满足设计要求。

由于制造误差的存在,实际半球陀螺的谐振子是非理想的谐振子,图2中 $Q_{\max}$ 为Q值最大轴, $Q_{\min}$ 为Q值最小轴, $f_{\max}$ 为频率最大轴, $f_{\min}$ 为频率最小轴, $\theta_1$ 为频率最小轴的角度, $\theta_2$ 为Q值最小轴的角度。在半球陀螺精密装配时,Q值最大轴的寻找和对准对陀螺敏感器性能有很大的影响。用测试夹具配合测试电路找出谐振子的Q值最大轴,并旋转激励电极对准该轴,同时保证周向间隙均匀性。

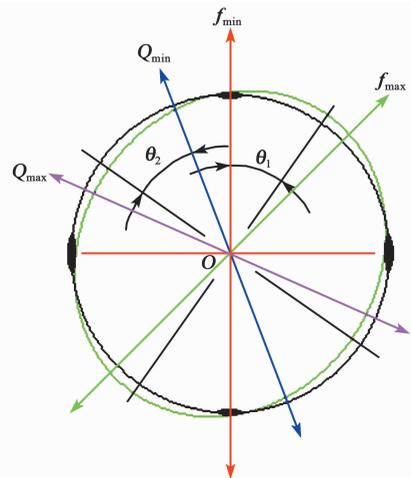


图2 谐振子性能特性图

球面间隙均匀性是导致驻波检测误差和控制施力不对称偏差的主要原因,也是半球谐振陀螺的系统漂移的来源<sup>[2]</sup>。

### 1.3 温度的影响

温度的变化会影响半球谐振陀螺的输出,因此有必要对半球谐振陀螺进行温度漂移补偿。当温度改变时,半球谐振陀螺谐振子的密度、杨氏模量、泊松比等材料属性会发生相应改变,同时由于温度造成的热胀冷缩效应,使谐振子的半径、壁厚等形状参数发生改变。谐振子的这些物理特性伴随温度变化而发生改变,从而引起陀螺数学模型的变化<sup>[1]</sup>。因此需要在器件级建立一套补偿机制,尽可能地减少因温度效应带来的模型变化而引起的控制结果的变化,减小因驱动控制和检测对温度敏感而引起的零偏稳定性的恶化。

### 1.4 信号干扰的影响

半球陀螺工作时采用静电控制,其控制信号为高压信号,检测信号则为微弱信号。采用三件套结构的半球陀螺,镀膜后的谐振子可在陀螺表头端起激励和检测信号之间屏蔽的作用。然而在信号传输通道中,仍然要注意处理好控制信号对检测信号

的干扰问题,否则容易对陀螺快速启动性能和零偏稳定性产生不利的影 响。

半球陀螺缓冲信号提取的模型如图 3 所示。谐振子内表面与读出电极之间形成电容,高压加到振子内表面,读出电极接入缓冲放大器。谐振子的物理振动引起电容量的变化,形成微弱的充放电电流<sup>[3]</sup>。缓冲电路的功能是  $I-V$  转换和放大。微弱电流的检测及放大的关键在于降低漏电流及运放的偏置电流对读出信号的影响。采用同轴等电位的方式优化读出电极与屏蔽电极的连接来降低漏电流对读出电流的影响。在缓冲电路 PCB 的设计上,对关键微弱电流的路径采取隔离屏蔽的方式,降低运放偏置电流对读出信号的影响。

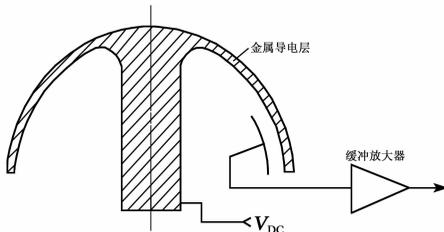


图 3 直流缓冲放大信号读出示意图

设计控制回路中陀螺内部电极结构,降低控制环路的耦合,提高控制精度。优化读出电极的互联方案和信号的引出方法,减小电极间、电极与机壳地间的寄生电容和电感,减小信号间的窜扰和耦合,提高检测信号的精度、减小控制信号的失真与干扰等,从而提升陀螺的快速启动性能。

## 2 改进措施及效果

通过以上分析,提升陀螺快速启动性能的主要途径有提高半球陀螺谐振子的  $Q$  值均匀性,提高装配的间隙均匀性,以及  $Q$  值轴与激励电极的对准精度,优化微弱信号处理技术与工艺。温度补偿技术对陀螺快速启动有一定帮助,但前提是能准确建立零偏受温度影响的误差模型,同时应尽量减小陀螺的原始零偏。

为了验证改进措施的有效性,采用如下措施制造了半球陀螺样机。

1) 优化机械加工化学方法,降低缺陷层深度,通过化学腐蚀进一步去除缺陷层,将  $Q$  值均匀性提升 2 倍。

2) 采用精确的电容检测手段和微位移控制方法,使  $Q$  值最大轴对准幅度控制电极,同时控制陀螺球面间隙均匀性提高 1 倍。

3) 优化信号传输设计及工艺,对检测信号加强屏蔽处理,降低控制信号及环境电磁干扰对检测信号的影响。冷开机情况下,改进前后陀螺的典型输出和零偏稳定性对比如图 4、5 所示。由图 4、5 可以看出,改进前,陀螺从通电到输出稳定(零偏稳定性达到  $0.02$  ( $^{\circ}$ )/h)。约需 1.6 h;改进后,陀螺通电进入工作状态,即基本达到输出稳定(零偏稳定性达到  $0.02$  ( $^{\circ}$ )/h),时间在 3 min 以内。

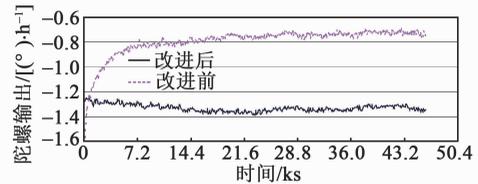


图 4 改进前后陀螺的典型输出对比(冷开机)

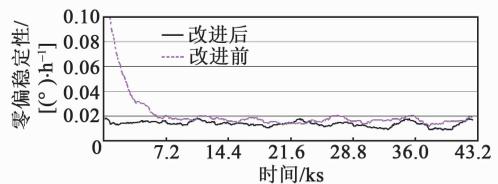


图 5 改进前后陀螺的典型零偏稳定性对比(冷开机)

对于零偏稳定性  $0.02$  ( $^{\circ}$ )/h 左右的半球谐振陀螺快速启动,可以不考虑进行温度补偿。对于精度更高的半球谐振陀螺的快速启动,增加温度补偿对其有一定的效果。

## 3 结束语

提升半球谐振陀螺的快速启动性能,首先应该降低陀螺的原始零偏,对于无法消除的部分,再考虑误差建模进行补偿。通过对陀螺谐振子加工、精密装配、微弱信号处理技术和工艺的优化,显著提升了半球陀螺的快速启动性能。实测结果表明,改进后陀螺可在 3 min 内达到输出稳定,相较于改进前 1 h 的预热时间有显著提升,证明了改进的有效性,具有重要的工程意义。

## 参考文献:

- [1] B. A. 马特维耶夫. 固体波动陀螺理论与技术[M]. 张群, 齐国华, 赵小明, 译. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [2] 刘付成, 赵万良, 宋丽君, 等. 半球谐振陀螺惯性敏感器及其空间应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2019.
- [3] 雷霆, 彭慧, 丁岑华, 等. 半球陀螺微振动电容检测模型与分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(1): 34-37. LEI Ting, PENG Hui, DING Qinghua, et al. Modeling and analysis of slight vibration capacitance of HRG[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2011, 33(1): 34-37.