挠性陀螺刚度中心偏离因素分析及控制措施

蔡　曜　司玉辉　王玉琢　郭　伟　韩佳玮　杨晓龙
（西安航天精密机电研究所，西安 710100）

摘要：为解决挠性陀螺生产过程中刚度中心偏离，导致其振动附加漂移大的问题。分析了挠性陀螺振动附加漂移形成机理和调整刚度中心抑制振动附加漂移的机理，结合挠性陀螺的结构和生产工艺流程的特点，设计各生产工序间加测刚度中心的试验，确定装配工序是造成刚度中心偏离的主要工序。进一步分析识别装配工序中存在的影响因素，设计分离试验，确定前置放大板个体差异是造成刚度中心偏离的主要因素。制定相应的控制措施，优化挠性陀螺的生产工艺流程，保证各生产工序使用前置放大板的一致性。工程实践表明，控制措施可以有效保证刚度中心的稳定性，同时可以有效抑制振动附加漂移。研究成果对于挠性陀螺质量提升及稳定性控制具有指导意义。

关键词：挠性陀螺；刚度中心；振动附加漂移；工艺流程优化；前置放大板

中图分类号：V241.5+59　**文献标识码**：A

Analysis and Control Measures of Center Deviation Factor for Stiffness of Flexible Gyro

Cai Yao　Si Yuhui　Wang Yuzhuo　Guo Wei　Han Jiawei　Yang Xiaolong
(Xi’an Aerospace Precision Mechatronics Institute, Xi’an 710100)

Abstract: To solve the problem of large vibration-induced drift in flexure gyroscope production due to deviation of stiffness center, the formation mechanism and suppression mechanism of vibration-induced drift due to deviation of stiffness center were analyzed. Based on the structure and production process flow of flexure gyroscope, an experimental test was designed to measure the stiffness center at each production process step, and it was determined that the assembly process is the main process causing deviation of stiffness center. Further analysis identified the influencing factors in the assembly process, and a separation experiment was conducted to determine that the individual differences in the preamplifier are the main factor causing deviation of stiffness center. Control measures were formulated, and the production process flow of flexure gyroscope was optimized to ensure consistency in the use of the preamplifier. Engineering practice shows that the control measures can effectively ensure the stability of the stiffness center and effectively suppress vibration-induced drift. The research results have guiding significance for the improvement of flexure gyroscope quality and stability control.

Key words: flexible gyro; stiffness center; vibration additional drift; process optimization; preamplifier plate

1　引言

挠性陀螺是一种双自由度陀螺，具有响应速度快、可靠性高的特点，作为重要的惯性敏感器件，被广泛应用于航空、航天、兵器、船舶等领域[1]。挠性陀螺的实际使用环境存在着大量不同量级、不同频率的振动，会对陀螺产生干扰力矩，造成附加漂移，最终影响惯导系统的导航精度[2-3]。抑制振动附加漂移的有效方法

收稿日期：2023-11-19

是调整挠性陀螺的刚度中心，而刚度中心会受制造工艺的影响而发生偏移。在实际生产中，确保刚度中心调整准确、无偏移，是提升挠性陀螺抗力学性能，保证其在实际工况下测量精度的关键问题。

针对挠性陀螺的刚度中心调整，学者们进行了相关研究。黄国哲等[4]提出了一种挠性陀螺前置放大调理电路，包括调零电路、相位调试电路、刚度中心调整电路、梯度调试电路，其中刚度中心调整电路可以实现陀螺转子相对壳体角位置的调整，使陀螺输出电压对陀螺转子转速微变化不敏感。刘毅等[5]提出了一种挠性陀螺信号放大器，主要由处理放大模块和交流偏摆调试模块组成，实现了放大器小型化设计需求，且抗干扰能力进一步提升。两种模块组成抑制共模电路，可通过调整其中设置的电阻大小，调整挠性陀螺的刚度中心，克服加工精度误差对不同转速下挠性陀螺输出电压信号的影响，实现在一定转速变化下信号输出始终保持一致性和稳定性的目的。

从挠性陀螺振动附加漂移的形成机理出发，说明调整刚度中心可以有效抑制振动附加漂移的机理。针对实际生产中存在的刚度中心偏离问题，基于当前挠性陀螺的装配、调试工艺流程，通过理论分析、试验验证结合的方式，确定造成其偏离的主要工序、主要因素。针对主要因素制定行之有效的控制措施，优化工艺流程，保证刚度中心调整全流程中使用前置放大板的一致性。措施落实后，挠性陀螺的刚度中心调整准确、无偏移，随机振动中产生的附加漂移明显降低，抗力学性能显著提升。

2　振动附加漂移和刚度中心相关机理

2.1　振动附加漂移形成机理

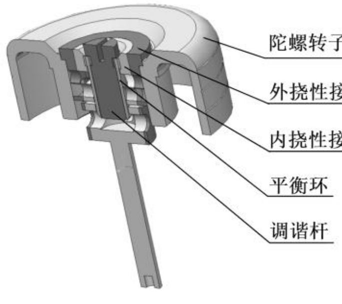

图 1　陀螺转子组件三维结构剖视图

挠性陀螺的挠性端回转部件称为陀螺转子组件，其主要由陀螺转子、外挠性接头、内挠性接头、平衡环、调谐杆构成，其三维结构剖视图如图 1 所示。

由于内、外挠性接头的结构特点，其既起着支撑陀螺转子的作用，又为陀螺转子提供了 2 个方向转动的自由度。

挠性陀螺正常工作时，若陀螺转子与回转轴之间出现相对偏角，则挠性接头将产生扭转弹性变形，产生正弹性力矩，作用到陀螺转子上。同时，平衡环还将做扭摆运动，震荡频率为转速频率的 2 倍，并产生一个与正弹性力矩方向相反的负弹性力矩，作用到陀螺转子上。当负弹性力矩正好补偿了正弹性力矩，即满足式（1）时，陀螺转子相对惯性空间具有很高的方位稳定性，满足动力调谐状态。

$$K_P=(I_e-\frac{I_z}{2})\dot{\theta}^2 \tag{1}$$

式中，K_P 表示挠性接头的正刚度系数；I_e 表示平衡环的赤道转动惯量；I_z 表示平衡环的极转动惯量；$\dot{\theta}$ 表示陀螺转子组件的回转角速度，单位：r/min，其对应的转速频率 $f=\dot{\theta}/60$。

在动力调谐状态下工作，挠性陀螺的漂移率较小，且不存在相关附加漂移。

为模拟挠性陀螺的实际工况，在生产制造过程中，需对产品进行随机振动力学试验，测量其振动附加漂移的大小，验证抗力学性能是否合格。

常见的随机振动功率谱型图如图 2 所示。

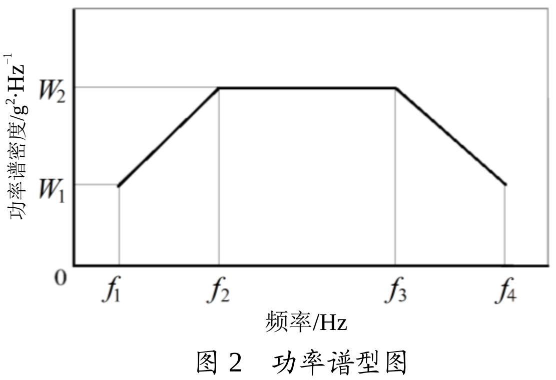

图 2　功率谱型图

挠性陀螺工作在随机振动工况下，振动将沿内挠性接头的回转轴向平衡环方向传递，使其随挠性陀螺本体一起振动。这将影响陀螺转子组件相对于惯性空间的回转角速度 $\dot{\theta}$，进而影响平衡环做扭摆运动的震荡频率，使产生的负弹性力矩无法正确补偿正弹性力矩，挠性陀螺出现欠调谐或过调谐故障。正、负弹性力矩的差值将作为振动附加干扰力矩作用在陀螺转子上，随时间随机变化，最终引起挠性陀螺产生振动附

加漂移。

2.2 调整刚度中心抑制振动附加漂移机理

挠性陀螺闭路工作时，陀螺转子相对壳体的角位置不同，回转角速度 $\dot{\theta}$ 变化对陀螺漂移的影响也不同。在生产制造过程中，总可以找到闭环工作的陀螺转子相对壳体处在某个角位置时，在调谐转速附近改变回转角速度 $\dot{\theta}$，陀螺的漂移将不变化或变化较小，这个角位置称为挠性陀螺的刚度中心[6]。

当挠性陀螺工作在精确的刚度中心时，即使受到随机振动工况的影响，引起回转角速度 $\dot{\theta}$ 发生小幅度随机变化，陀螺的漂移也将不受影响或影响较小，使振动附加漂移得以有效抑制。

刚度中心的调整精度（或偏离程度）可以由式（2）描述：

$$\xi_m = \frac{|\Delta U_m|}{|\Delta f|} \tag{2}$$

式中，$m\in\{X,Y\}$，表示挠性陀螺的 X、Y 两路；ξ 表示刚度中心的调整精度（偏离程度），该值越小，说明调整精度越高、偏离程度越小，反之则说明精度低、偏离大；ΔU 表示挠性陀螺静态下直流输出电压的极差；Δf 表示挠性陀螺电机转速频率变化的极差；转速频率 f 的变化量一般不超过设计值的±2%。

刚度中心调整方法的整体思路为：

a. 调整挠性陀螺中差动式电感传感器的零位调整电阻 R_X、R_Y，使陀螺转子闭路在传感器电气零位上。

b. 在某一限定范围内改变陀螺电机的转速频率 f，并记录各转速频率 f 对应的直流输出电压 U。

c. 反复调整 R_X、R_Y，使各转速频率 f 对应的直流输出电压 U 的极差 ΔU 最小。

d. 刚度中心调整完成，零位调整电阻 R_X、R_Y 最终决定陀螺转子工作在刚度中心，落焊相应阻值的电阻。

e. 刚度中心调整后会导致传感器的零位输出增大，通过传感器的移相电阻补偿。

3 刚度中心偏离因素分析

在挠性陀螺的生产制造过程中，存在刚度中心调整工序合格后，随机振动试验中产品振动附加漂移大，交收检验时刚度中心偏离的情况。基于当前产品刚度中心调整及后续生产制造工艺流程，确认造成刚度中心偏离的主要工序和主要因素。

3.1 陀螺结构和生产工艺流程

挠性陀螺由陀螺转子组件、磁滞电机、差动式电感传感器、力矩器、底座组件、前置放大板等构成。底座组件包括底座、密封盖、上盖、下盖。挠性陀螺的截面图如图 3 所示。

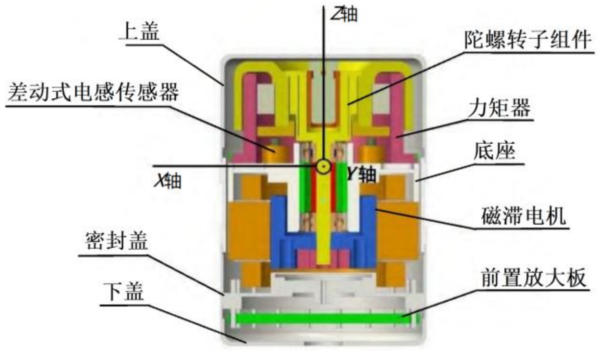

图 3 挠性陀螺截面图

由图 3 可知，陀螺转子组件、传感器、力矩器与磁滞电机对称分布在底座两侧，这种结构可以有效避免各元件之间的电磁干扰。上盖、底座、密封盖除保护高速旋转的陀螺转子和电机转子，阻隔陀螺外部的多余物外，还形成密封腔室，充入少量氦气，可以降低气体干扰力矩、延长贮存寿命，具有良好的散热性能。在密封盖上烧结有绝缘子，绝缘子上安装有前置放大板，陀螺内部各元件的电信号沿内引线、绝缘子、前置放大板、外引线这一路经输入和输出，与挠性陀螺同层级的伺服控制电路形成再平衡回路，实现其角速率测量功能。下盖设计有外引线的过线孔，安装在密封盖上，保护绝缘子、前置放大板、外引线及其焊点。

省略前端无关工序，影响刚度中心调整精度偏离的工艺流程如图 4 所示。

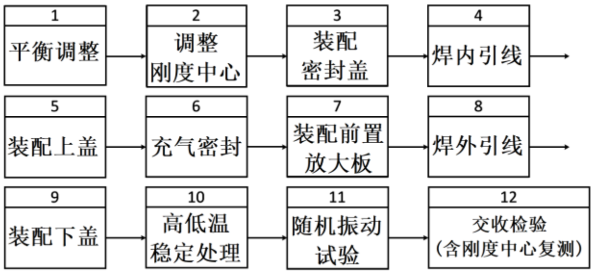

图 4 刚度中心调整相关工艺流程图

图 4 中，工序 1～2，挠性陀螺经平衡调整后，调整刚度中心至合格精度。在该调试工序中，挠性陀螺

已装配陀螺转子组件（含挠性接头）、磁滞电机、差动式电感传感器、力矩器，还未装配前置放大板。为使挠性陀螺工作于再平衡回路中，完成各项调试工作，处于该阶段的产品须与专用调试设备连接。专用调试台中设置工艺前置放大板、工艺伺服回路板，及调试所需开关、可变电阻、数显表等元器件，调整刚度中心所需电阻 R_X、R_Y 设置在工艺前置放大板上[7]。

工序 3 至 9，挠性陀螺完成焊线、安装前置放大板、合盖、充气等工序，形成完整的产品。

工序 10 至 11，挠性陀螺须经过温度、力学筛选试验。在随机振动试验中，部分产品存在振动附加漂移大的问题。

工序 12 为交检验收工序，对挠性陀螺的各项技术指标进行验收测试，其中包括刚度中心偏离程度的测试，发现相当一部分产品的刚度中心发生较大偏离。

3.2 偏离主要工序确认

为确认挠性陀螺生产过程中造成刚度中心偏离的主要工序，设计试验。

根据图 3 所示的工艺流程，在完成全部装配工序，以及工序 10 高低温稳定处理后，增加刚度中心测试工序，监控工序完成前后刚度中心偏离情况。经试验验证、统计分析，刚度中心测试结果如表 1 所示。

表 1 确认偏离主要工序的刚度中心测试结果 mV·Hz^{-1}

陀螺编号	工序 2 调整刚度中心		工序 9 装配下盖后				工序 10 高低温稳定处理后				工序 12 交收检验			
	ξ_X	ξ_Y	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$
NXTL01	0.03	0.02	0.44	0.37	0.41	0.35	0.45	0.37	0.01	0	0.48	0.31	0.03	0.06
NXTL02	0.03	0.01	2.43	0.18	2.4	0.17	2.39	0.19	0.04	0.01	2.34	0.24	0.05	0.05
NXTL03	0.01	0.06	0.65	2.02	0.64	1.96	0.61	2.02	0.04	0	0.59	2.03	0.02	0.01
NXTL04	0.05	0.04	0.13	0.23	0.08	0.19	0.06	0.28	0.07	0.05	0.05	0.25	0.01	0.02
NXTL05	0.05	0.06	2.96	0.44	2.91	0.38	2.97	0.49	0.01	0.05	2.91	0.55	0.06	0.06
NXTL06	0.02	0.02	2.88	0.49	2.86	0.47	2.86	0.47	0.02	0.02	2.87	0.41	0.01	0.05
NXTL07	0.02	0.03	0.97	3.07	0.95	3.04	0.9	3.07	0.07	0	0.82	3.14	0.08	0.07
NXTL08	0.06	0.02	0.58	0.18	0.52	0.16	0.58	0.21	0	0.03	0.58	0.23	0	0.02
NXTL09	0.01	0.01	0.49	1.64	0.48	1.63	0.5	1.68	0.01	0.04	0.42	1.76	0.08	0.08
NXTL10	0.01	0.05	1.07	0.88	1.06	0.83	1.09	0.94	0.02	0.06	1.07	0.95	0.02	0.01
最大值	0.06	0.06	2.96	3.07	2.91	3.04	2.97	3.07	0.07	0.06	2.91	3.14	0.08	0.08
最小值	0.01	0.01	0.13	0.18	0.08	0.16	0.06	0.19	0	0	0.05	0.23	0	0.01
平均值	0.029	0.032	1.26	0.95	1.231	0.918	1.241	0.971	0.03	0.027	1.213	0.988	0.036	0.043

表 1 中，ξ_X、ξ_Y 表示挠性陀螺 X 路、Y 路的刚度中心调整精度；$|\Delta\xi_X|$、$|\Delta\xi_Y|$表示两次刚度中心测试之间，X 路、Y 路调整精度变化量的绝对值。

由表 1 可知，工序 9 装配下盖后测试所得$|\Delta\xi_X|$、$|\Delta\xi_Y|$的最大值、最小值、平均值均为最大，且数据更为离散。按照平均值进行计算，$|\Delta\xi_X|$是另外两工序的 34～41 倍，$|\Delta\xi_Y|$是另外两工序的 21～34 倍，远大于其他刚度中心测试工序所得值。由此确认，高低温稳定处理、随机振动试验不会造成挠性陀螺刚度中心调整精度的偏离，造成其偏离的主要工序为装配工序（图 4 中工序 3～9）。

3.3 偏离主要因素确认

为确认挠性陀螺装配过程中造成刚度中心偏离的主要因素，分析了产品装配前后引起的主要差异，识别可能的影响因素，并通过试验验证。

3.3.1 主要因素分析

挠性陀螺装配密封盖、上盖，充气密封后，其内部充满氦气，压力为 0.3 个大气压。陀螺内部的气体环境发生改变，可能造成刚度中心偏离。

挠性陀螺装配前置放大板后，进行刚度中心测试时，不再使用专用调试设备中的工艺前置放大板、工艺伺服回路板。不同前置放大板、伺服回路板之间的个体差异，可能造成刚度中心偏离。

综上，由装配工序中识别的影响因素包括：气体环境差异、前置放大板个体差异、伺服回路板个体差异。

a. 气体环境差异分析

挠性陀螺生产过程中，为减小陀螺转子周围的气体阻尼系数，抑制弹性约束引起的漂移，同时解决热平衡时间延长和密封性问题，会对其内部进行抽真空，

再充 0.3 个大气压的氦气。这种陀螺内部气体环境的差异，对陀螺转子相对壳体的角位置影响不大，更有利于陀螺转子运转的稳定性，该影响因素不会造成刚度中心的偏离。

b. 前置放大板个体差异分析

挠性陀螺的差动式电感传感器输出的微弱信号，须先经过前置放大器放大后再输出，以提高信噪比，便于阻抗匹配。前置放大器具有足够高的共模抑制比和增益及较小的电子噪声。前置放大板 *X* 路的电路原理图如图 5 所示，*Y* 路与其类似。

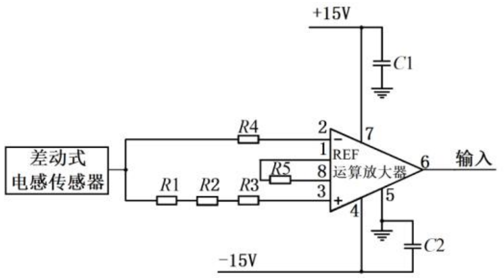

图 5　原理图

图 5 中，前置放大板的初始状态满足 *R*4 电阻阻值与 *R*1、*R*2、*R*3 电阻阻值之和相等。在调整刚度中心过程中，通过调整 *R*1、*R*2 电阻阻值的大小，改变阻值差，保证挠性陀螺工作于刚度中心位置。不同前置放大板之间，安装的 REF 运算放大器、电阻 *R*1～*R*5、电容 *C*1～*C*2 之间存在微小差异，这些差异组合成放大电路后，对挠性陀螺的直流电压输出也将造成影响，即影响式（2）中的 ΔU_m，进而影响 ξ_m，该影响因素会造成刚度中心的偏离。

c. 伺服回路板个体差异分析

伺服回路板可以使挠性陀螺工作于再平衡回路中，其主要电路模块包括带通滤波器、相敏解调器、陷波网络、校正网络、解耦网络、V/I 变换及功放。再平衡回路的组成框图如图 6 所示。

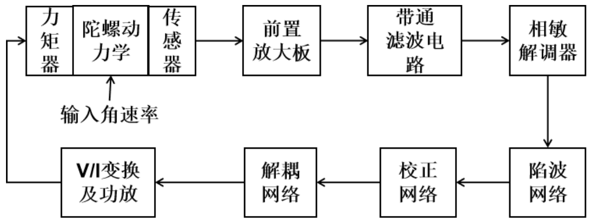

图 6　再平衡回路组成框图

伺服回路板的个体差异，主要影响挠性陀螺和再平衡回路连接后的系统带宽、阻尼比、标度因数等参数，对挠性陀螺的直流电压输出影响很小，该影响因素基本不会造成刚度中心的偏离。

3.3.2　试验验证

选取表 1 中挠性陀螺，在完整的陀螺状态下重新调整刚度中心，进行试验验证，设计的具体试验方案如下：

试验 1：挠性陀螺拆除上盖，此时其密封性被破坏，氦气溢出，陀螺内部由 0.3 个大气压的氦气气体环境变化为 1 个大气压的空气气体环境。复测刚度中心，确认气体环境差异因素是否引起刚度中心偏离。

试验 2：挠性陀螺更换前置放大板，保持 R_X、R_Y 的阻值不变。复测刚度中心，确认前置放大板个体差异因素是否引起刚度中心偏离。

试验 3：同一挠性陀螺，使用不同的伺服回路板测试刚度中心，确认伺服回路板个体差异因素是否引起刚度中心偏离。

试验结果如表 2～表 4 所示。由试验结果可知，前置放大板个体差异造成的$|\Delta\xi_X|$、$|\Delta\xi_Y|$最大值、最小值、平均值均为最大，气体环境差异、伺服回路板个体差异造成的$|\Delta\xi_X|$、$|\Delta\xi_Y|$各特征值接近于零。由此确认，气体环境差异、伺服回路板个体差异几乎不会造成刚度中心调整精度的偏离，造成其偏离的主要因素为前置放大板个体差异。

表 2　试验 1 结果　$mV\cdot Hz^{-1}$

陀螺编号	氦气 0.3 个大气压		空气 1 个大气压			
	ξ_X	ξ_Y	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$
NXTL01	0.05	0.02	0.05	0.02	0.00	0.00
NXTL02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.00	0.01
NXTL03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00
最大值	0.05	0.04	0.05	0.04	0.00	0.01
最小值	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00
平均值	0.037	0.033	0.037	0.030	0.000	0.003

表 3　试验 2 结果　$mV\cdot Hz^{-1}$

陀螺编号	初始状态		更换前置放大板后			
	ξ_X	ξ_Y	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$
NXTL04	0.04	0.01	0.51	0.47	0.47	0.46
NXTL05	0.03	0.08	0.20	0.38	0.17	0.30
NXTL06	0.02	0.06	1.01	0.32	0.99	0.26
最大值	0.04	0.08	1.01	0.47	0.99	0.46
最小值	0.02	0.01	0.2	0.32	0.17	0.26
平均值	0.030	0.050	0.573	0.390	0.543	0.340

表 4　试验 3 结果　　mV·Hz^{-1}

陀螺编号	初始状态		更换伺服回路板后			
	ξ_X	ξ_Y	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$
NXTL07	0.04	0.01	0.06	0.02	0.02	0.01
NXTL08	0.05	0.04	0.06	0.06	0.01	0.02
NXTL09	0.08	0.07	0.09	0.07	0.01	0.00
最大值	0.08	0.07	0.09	0.07	0.02	0.02
最小值	0.04	0.01	0.06	0.02	0.01	0.00
平均值	0.057	0.040	0.070	0.050	0.013	0.010

4　刚度中心控制措施

造成挠性陀螺刚度中心调整精度偏离的主要因素为前置放大板个体差异，故在生产过程中，应设置合理的工艺流程，保证调整刚度中心所用前置放大板和最终装配至陀螺中的前置放大板一致。优化后的工艺流程如图 7 所示。

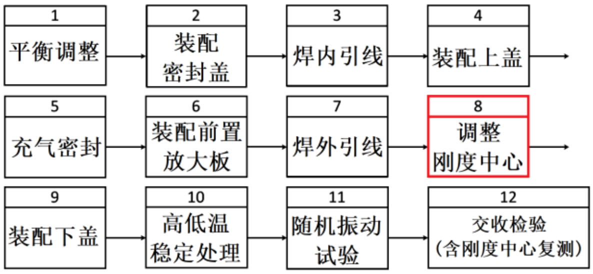

图 7　优化后工艺流程图

对比优化前后的工艺流程图，调整刚度中心的工序由装配密封盖前移至焊外引线工序后。调整过程所需电阻 R_X、R_Y 位置由已装配陀螺的前置放大板上引出，调整完成后，电阻 R_X、R_Y 落焊于已装配陀螺的前置放大板上。可保证调试、装配所用前置放大板的一致性，避免因个体差异造成的偏离。

5　工程实践

将原工艺流程生产的不合格挠性陀螺（NXTL01～NXTL10）按优化后工艺流程返工，从刚度中心调整精度、振动附加漂移两个维度验证控制措施的有效性、可靠性。

5.1　刚度中心调整精度控制效果

工艺流程优化后，挠性陀螺将在工序 8 调整刚度中心、工序 12 交收检验进行刚度中心调整精度的测试。该型号挠性陀螺对应的 Δf=10 Hz，要求 ξ_m 不超出 0.15 mV/Hz，具体测试结果如表 5 所示。

表 5　工艺流程优化后刚度中心实测值　mV·Hz^{-1}

陀螺编号	工序 8 调整刚度中心		工序 12 交收检验			
	ξ_X	ξ_Y	ξ_X	ξ_Y	$\lvert\Delta\xi_X\rvert$	$\lvert\Delta\xi_Y\rvert$
NXTL01	0.05	0.02	0.09	0.08	0.04	0.06
NXTL02	0.03	0.03	0.07	0.06	0.04	0.03
NXTL03	0.03	0.04	0.08	0.09	0.05	0.05
NXTL04	0.04	0.02	0.09	0.08	0.05	0.06
NXTL05	0.04	0.07	0.05	0.09	0.01	0.02
NXTL06	0.02	0.06	0.06	0.08	0.04	0.02
NXTL07	0.02	0.02	0.07	0.06	0.05	0.04
NXTL08	0.01	0.02	0.07	0.08	0.06	0.06
NXTL09	0.01	0.00	0.06	0.07	0.05	0.07
NXTL10	0.03	0.01	0.09	0.05	0.06	0.04
最大值	0.05	0.07	0.09	0.09	0.06	0.07
最小值	0.01	0.00	0.05	0.05	0.01	0.02
平均值	0.028	0.029	0.073	0.074	0.045	0.045

由表 5 可知，返工并进行后续生产工序、交收检验后的挠性陀螺，其刚度中心调整精度 ξ_m 满足技术指标要求，且变化量不大，约为平均裕度的 (0.045+0.045)/2÷[0.15−(0.028+0.029)/2]=37%。说明按照优化后工艺流程生产的挠性陀螺，刚度中心调整精度的平均水平，距离技术指标上界限的裕度充足，偏离问题有效解决，产品质量提升显著。

5.2　振动附加漂移控制效果

为验证挠性陀螺经调整刚度中心后抑制振动附加漂移的效果，挠性陀螺（NXTL04～NXTL06）在返工前（即表 4 中更换前置放大板后状态），以及刚度中心重新调整后（即图 8 中工序 10），均进行了随机振动试验，并在振动过程中采集陀螺 X 路、Y 路的直流电压输出值，采样频率 2 Hz，振动、采样时间 5 min。使用采集到的电压信号极差 $U_{R,m}$ 的量值表征振动附加漂移的大小，具体测试结果如表 6 所示。

表 6 工艺流程优化后振动附加漂移实测值

陀螺编号	返工前				刚度中心重新调整后			
	ξ_X	ξ_Y	$U_{R,X}$	$U_{R,Y}$	ξ_X	ξ_Y	$U_{R,X}$	$U_{R,Y}$
	/mV·Hz^{-1}		/mV		/mV·Hz^{-1}		/mV	
NXTL04	0.51	0.47	56.4	49.7	0.04	0.02	4.1	3.9
NXTL05	0.20	0.38	39.2	45.6	0.04	0.07	3.2	6.4
NXTL06	1.01	0.32	142.1	64.5	0.02	0.06	7.8	6.4
最大值	1.01	0.47	142.1	64.5	0.04	0.07	7.8	6.4
最小值	0.20	0.32	39.2	45.6	0.02	0.02	3.2	3.9
平均值	0.573	0.390	79.23	53.27	0.033	0.050	5.03	5.57

由表 6 可知，刚度中心调整后挠性陀螺的刚度中心调整精度平均值由 0.573 mV/Hz、0.390 mV/Hz 降低至 0.033 mV/Hz、0.050 mV/Hz，其振动附加漂移平均值由 79.23 mV、53.27 mV 随之降低至 5.03 mV、5.57 mV。说明调整刚度中心可以对振动附加漂移进行有效抑制。按照优化后的工艺流程生产挠性陀螺，可以有效提高其抗力学性能，保证功能、精度的高可靠性，控制措施显著有效。

6 结束语

从动力调谐和刚度中心的定义出发，分析确定了振动附加漂移的形成机理以及调整刚度中心抑制振动附加漂移的机理。针对挠性陀螺实际生产制造过程中刚度中心调整合格后，其调整精度又出现较大偏离，造成振动附加漂移增大，角速率测量精度降低的问题，通过理论分析和试验验证，确定了造成该问题的主要因素，制定了对策措施，通过了工程实践，具体为：

a. 原生产工序，调整刚度中心后还包括装配、温度筛选试验、力学筛选试验，通过各工序间加测刚度中心调整精度的方法，确定了装配工序是造成刚度中心偏离的主要工序。

b. 装配工序前后，挠性陀螺的工况差异主要包括气体环境差异、前置放大板个体差异、伺服回路板个体差异。通过对各差异点影响刚度中心调整精度的理论分析，并设计三个差异点相互独立的分离试验，确定了前置放大板个体差异是造成刚度中心偏离的主要因素。

c. 针对前置放大板个体差异造成挠性陀螺刚度中心偏离的问题，优化了挠性陀螺的生产工艺流程，将“调整刚度中心”工序置于“装配前置放大板”工序之后，以保证调整刚度中心使用的前置放大板与后续完整陀螺进行筛选试验、交收检验安装的前置放大板为同一部件，彻底避免了个体差异这一影响因素。

d. 工程实践表明，控制措施可以有效避免刚度中心的偏离，刚度中心调整精度平均水平距离技术指标上界限裕度充足，刚度中心稳定控制后，挠性陀螺的振动附加漂移也被有效抑制，其抗力学性能显著提升，问题得到有效解决。

参考文献

[1] 蔡曜，司玉辉，王玉琢，等. 陀螺电机轴承健康评估隐马尔可夫模型适应性设计[J]. 传感技术学报，2023，36(9)：1417−1425

[2] 叶庆斌. 动调陀螺线振动漂移误差测试方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2011.

[3] 郭祖华，俞文伯. 某挠性接头在路面随机激励下的响应分析[J]. 振动与冲击，2007(1)：144−147+154+167−168.

[4] 黄国哲，赵新海，武雷，等. 一种挠性陀螺前置放大调理电路及方法：CN202211451313.X[P]. 2023−03−10.

[5] 刘毅，陈耀山，廖天坤，等. 一种挠性陀螺仪的信号放大器 CN202122953424.8[P]. 2022−04−08.

[6] 周百令. 动力调谐陀螺仪设计与制造[M]. 南京：东南大学出版社，2002.

[7] 蔡曜，周景春，司玉辉，等. 挠性陀螺及挠性陀螺组件调试设备设计与应用[J]. 航空精密制造技术，2024，60(2)：18−22.