先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022080502

测试设备对高精度光纤陀螺误差的影响及抑制方法研究

曹康渊[1,2]，丁东发[2*]，冯文帅[2]，范梓涵[2]，于海成[2]

（1. 北京航天控制仪器研究所，北京 100039；2. 北京航天时代光电科技有限公司，北京 100094）

摘　要： 分析了影响光纤陀螺仪测试精度的主要误差因素，详细研究了速率转台、测试工装、时间基准源等常见测试设备对光纤陀螺误差的影响。提出了基于高精度计数器对于转台精度评价结合长周期、转台固定周数的测试等抑制方法。实验结果表明，采取抑制措施后，测试工装误差引起的零偏测试误差减小了 66.7%，速率转台误差引起的标度因数绝对误差以及时间基准误差引起的标度因数重复性误差均减小了一个数量级。研究结果对高精度光纤陀螺仪精度的提升以及测试设备的改进具有指导意义。

关键词： 光纤陀螺；高精度；测试设备；误差抑制

中图分类号： TN253；TP212.14　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0744－08

Research on the Influence and Suppression Method of Test Equipment on High-Precision FOG

CAO Kangyuan[1,2], DING Dongfa[2], FENG Wenshuai[2], FAN Zihan[2], YU Haicheng[2]

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Instruments, Beijing 100039, CHN;
2. Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co. Ltd., Beijing 100094, CHN)

Abstract: The main error factors affecting the accuracy of interferometric fiber optic gyroscopes (I-FOGs) were firstly analyzed. Subsequently, the influence of test equipment, such as angular rate turntable, test fixture and time reference source, on the error of I-FOGs were researched. Finally, a suppression method based on the high-precision counter for the accuracy evaluation of the turntable combined with the long-period and fixed-cycle test method of the turntable was proposed. With this method, the experimental results demonstrate that the zero bias test error caused by the test fixture error is reduced by 66.7%, both the scale factor absolute error caused by angular rate turntable error and the scale factor repeatability error caused by time reference error are reduced by an order of magnitude. This research is of great significance to the experimental equipment improvement and accuracy improvement of I-FOGs.

Key words: FOG; high-precision; test equipment; error suppression

0　引言

惯性技术是各类运动载体惯性导航、制导控制、定位定向、姿态稳定和控制以及过载传感的核心技术，陀螺仪是惯性系统的核心部件，用于敏感载体相对惯性空间的角运动，测量载体的角位移和角速度。光纤陀螺仪作为一种无转动部件的光学陀螺仪，具有精度高、寿命长、结构设计灵活、启动时间快、体积小等优点，一直受到世界各国普遍关注。目前光纤陀螺仪的精度已经由战术级、导航级跨越至战略级。高精度光纤陀螺仪的关键技术成为研究重点[1]。

随着光纤陀螺的精度需求不断提升，尤其高精度光纤陀螺精度指标要求优于 0.001(°)/h，标度因数精度要求优于 1 ppm，原有的测试设备、测试方法等已不能满足高精度光纤陀螺的精度评价要求，因此高精度光纤陀螺精度评价方法研究以及测试技术研究是一项越来越重要的研究工作。为了保证高精度光纤陀螺仪的测试精度，测试中需要考虑的测试

收稿日期：2022－08－05.

*通信作者：丁东发　E-mail：ddf13@sina.com

误差包括：测试设备误差、输入条件误差、信息读取误差、模型误差以及数据处理和环境噪声的影响等[2]。

高精度光纤陀螺对测试环境较为敏感[3]，引入较多测试误差，目前已有大量对光纤陀螺的测试误差进行分析与抑制的研究，以提升光纤陀螺的精度。文献[4]对光纤陀螺输出进行快速傅里叶变换评估了测试环境的影响。文献[5]分析了测试环境中的磁场对光纤陀螺零偏的影响，并验证了磁屏蔽对零偏磁场误差的抑制效果。文献[6]针对摇摆情况下的光纤陀螺的输出误差问题，采取高频角振动台及角速率积分方法分析了光纤陀螺仪在角振动台上的测试误差及其影响。文献[7]对光纤陀螺测试用温箱及数据采集器进行了优化，减小了测试误差。

测试设备引起的误差是高精度光纤陀螺测试误差的主要因素之一，研究其误差大小并抑制该误差将有助于更精确地评价高精度光纤陀螺实际性能，为高精度光纤陀螺的精度提升及误差抑制提供更精确、准确的设备保障。

光纤陀螺常见测试设备有速率转台、测试工装、时间基准源、数据采集器、电源、温箱及平板等[8]。本文以高精度光纤陀螺为研究对象，对速率转台、测试工装、时间基准源等常见的测试设备对光纤陀螺的误差影响进行理论分析与实验研究，为更好地对光纤陀螺精度进行准确评价以及抑制测试设备引入的测试误差等提供依据。

1　高精度光纤陀螺误差分析

光纤陀螺误差主要分为零偏相关误差和标度因数误差[9]。零偏相关误差各部分误差来源如图 1 所示。标度因数误差一般采用标度因数非线性、不对称性、重复性及标度因数温度灵敏度来表述，误差源见图 2。

温度对光纤陀螺误差影响较大，通过改进光纤环的绕制方式、改善光路环境或者进行温度补偿等措施可减小该误差。国内外已有不少研究针对温度误差进行抑制及补偿，取得了较好的效果[10]。完善磁屏蔽结构可减小磁场对光纤陀螺的影响。优化光源、Y 波导等光电子器件可提升光纤陀螺抗辐照水平[11]。温度、振动及辐照等因素形成的误差已可通过针对关键部分进行优化设计来进行抑制，或根据影响机理进行误差补偿。

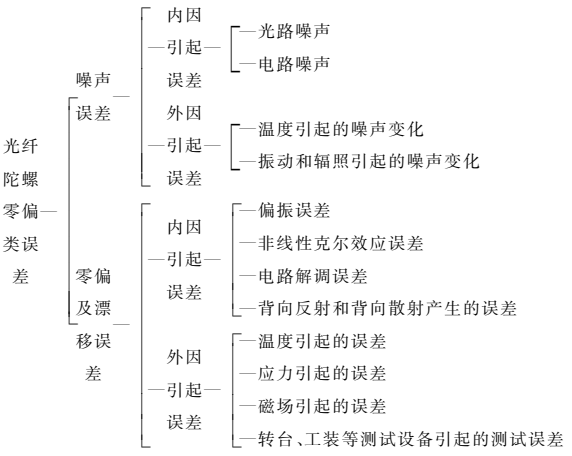


图 1　光纤陀螺零偏相关误差源

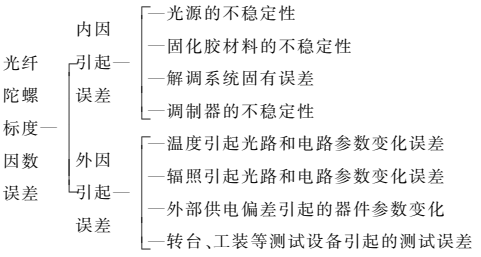


图 2　光纤陀螺标度因数误差源

除上述影响因素之外，测试设备亦会对高精度光纤陀螺误差产生重要影响。若不对速率转台、测试工装等常见的测试设备产生的误差进行分析及有效抑制，其将会成为影响高精度光纤陀螺精度评价以及精度进一步提升的瓶颈。

2　测试设备对高精度光纤陀螺的测试误差分析与抑制

测试设备是惯性仪表进行标定、测试及检验的专用设备[8]。光纤陀螺的测试设备误差主要因素包括速率转台、测试工装、时间基准源等设备参数误差，具体如图 3 所示。

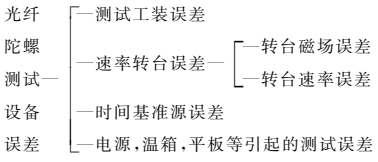


图 3　测试设备误差构成因素

速率转台的电机及框架都会对外产生磁场，进而对光纤陀螺仪核心部件光纤环产生影响，引起误差。转台位置速率控制系统在控制时需要一定的调节时间以及存在机械损耗等原因，实际速率和位置在不断波动，使高精度光纤陀螺输出产生误差。

测试工装引起的安装误差会使光纤陀螺敏感轴偏离基准，影响其输入角速度进而最终造成输出误差。不同精度的时间基准源发出的时间同步信号其稳定性和重复性相差较大，亦会对高精度光纤陀螺标度因数性能产生直接的影响。本文对速率转台、测试工装、时间基准源等测试设备引起的测试误差进行了详细研究。

2.1 测试工装安装误差对高精度光纤陀螺的影响

光纤陀螺内的光纤环在绕制过程中会产生失准角[12]，使光纤陀螺输入敏感轴偏离基准而产生误差，通过改善固化胶、对光纤环进行时效处理以及优化光纤环的粘接方式等措施，可有效减小失准角大小[13]。安装误差也会引起陀螺敏感轴偏差，需要对其误差影响进行分析及抑制。

光纤陀螺在测试过程中通常使用六面体工装或其他工装安装到测试台面上。固定高精度光纤陀螺过程中对各螺钉施加的力有一定的偏差，工装接触面、基准面等磨损变形情况也会使陀螺安装平面与测试台面产生倾角，引起实际敏感轴偏离基准轴，造成陀螺仪零偏和标度因数产生误差。图 4 为光纤陀螺坐标系示意图，x' 轴为光纤陀螺敏感轴，x 轴表示光纤陀螺测试台面的法线方向，陀螺敏感轴与测试台面法线方向的夹角 q 为光纤陀螺的安装误差角。

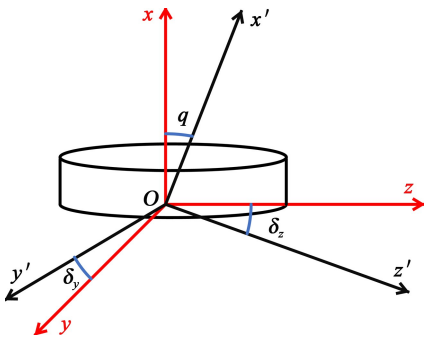


图 4 安装误差角示意图

2.1.1 安装误差对陀螺标度因数变化的影响

光纤陀螺输出信号可表示为[14]

$$D = K\omega_x + D_0 + D_{TM} + K_{xy}\omega_y + K_{xz}\omega_z + \varepsilon \quad (1)$$

式中，K 为标度因数；D_0 为零偏；D_{TM} 为温度、磁场等引起的零偏误差项；K_{xy} 为 x' 轴与 y 轴的失准角系数；K_{xz} 为 x' 轴与 z 轴的失准角系数；ω_x，ω_y 及 ω_z 分别为 x，y 及 z 轴的输入角速度；ε 为光纤陀螺的其他随机误差。标度因数误差表示为

$$\Delta K = K_T + \delta_y \frac{\omega_y}{\omega_x} + \delta_z \frac{\omega_z}{\omega_x} + K_\varepsilon \quad (2)$$

式中，K_T 为温度引起的标度因数误差项，K_ε 为光纤陀螺随机误差引起的标度因数误差项。光纤陀螺安装误差角一般较小且不会随时间及温度变化，结合式(2)可知其对标度因数变化的影响相对较小。由陀螺仪自身以及安装误差、测试工装误差产生的安装误差角一般在 5′以内，其中 5′的失准角引起的标度因数变化小于 2 ppm。

为研究安装误差对光纤陀螺标度因数变化的影响，首先进行高精度光纤陀螺的均匀对称的测试工装安装。分别将该工装旋转 0°，90°，180°及 270°四个位置，每个位置各进行两组角速率标定和安装误差测试。随后，对测试工装的安装面进行调整，以增大其安装误差。再将工装旋转 0°，90°，180°及 270°四个位置，每个位置各进行两组角速率标定和安装误差测试。

实验结果表明：均匀安装测试工装时，安装误差一般不超过 2′，对于转动测试工装上述四个角度，分别进行速率标定，其对应的光纤陀螺标度因数最大变化为 0.32 ppm。人为调整安装面后，使其安装误差最大约 4.5′，同样转动工装四个角度，光纤陀螺标度因数变化为 1.66 ppm。实验结果证实，一般的安装误差角对光纤陀螺标度因数变化有一定的影响，但相对较小，可通过提高测试工装的加工精度、陀螺仪的安装精度以及减小陀螺仪自身的失准角来实现。

2.1.2 安装误差对零偏误差的影响

光纤陀螺仪的零偏通常利用地球自转角速度在固定位置或多位置下的分量作为角速度输入进行测试并计算得到。地球东北天坐标系示意图如图 5 所示。定义地球某测试地点的纬度为 L_t，地球自转角速度为 ω_{ie}。光纤陀螺敏感轴 x' 轴朝天，当光纤陀螺绕测试台面的法线方向转动至不同位置时，若无

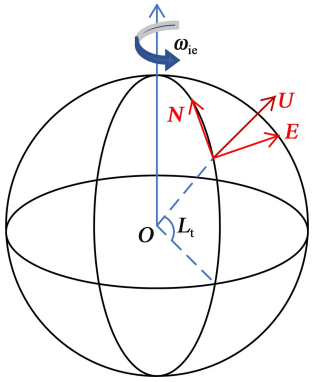


图 5 地球东北天坐标系示意图

安装误差存在，敏感轴指向保持不变，则其输入角速度完全相等。

实际上光纤陀螺仪装配至测试工装普遍存在安装误差，陀螺敏感轴不完全指天向，其在北天 NOU 平面的投影与天向 U 轴的夹角大小为 ϕ_U，定义北向为正方向，则陀螺敏感的角速度 ω_U 为

$$\omega_U = \omega_{ie}\sin(L_t + \phi_U) \tag{3}$$

如图 6 所示，设安装误差角为 q，陀螺敏感轴在大地 NOE 平面投影与北向 N 轴的夹角为方位角 α_0，陀螺敏感轴在北天 NOU 平面的投影与天向 U 轴的夹角 ϕ_U 可用安装误差角 q 表示：

$$\phi_U = \arctan(\tan q\cos\alpha_0) \tag{4}$$

设陀螺转动角度为 θ，定义天向观测逆时针方向为正，转动 θ 角度后陀螺敏感轴在大地 NOE 平面投影与北向 N 轴的夹角为

$$\alpha_\theta = \alpha_0 + \theta \tag{5}$$

则此时陀螺角速度输出 Ω_θ 为

$$\Omega_\theta = \frac{G_\theta}{K} = \omega_{ie}\sin(L_t + \arctan(\tan q\cos\alpha_\theta)) + \Omega_0 + e \tag{6}$$

式中，Ω_0 为光纤陀螺的零偏，在温度稳定后的一组测试时间内可认为不发生变化。G_θ 为光纤陀螺的数字量输出，K 为标度因数，e 为测试过程中产生的随机漂移噪声。

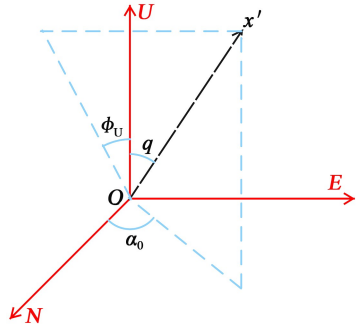


图 6　敏感轴朝天安装误差角在地球坐标系的投影图

图 7 及 8 分别仿真了在纬度为 40°4′、陀螺自身零偏为 0.010 1(°)/h 时，在不同安装误差角下光纤陀螺各位置的角速度输出以及最大偏差。从式(6)及图 7 可以看到，当方位角为 90°和 270°时，安装误差引起陀螺输出变化较小，而在 0°和 180°时变化较大。由图 8 可知，在转动陀螺位置时，安装误差角 2′的陀螺角速度输出的最大误差为 0.006 7(°)/h。当安装误差角为 5′时，陀螺角速度输出的最大误差为 0.016 7(°)/h。这会对高精度光纤陀螺的零偏性能产生较大影响。

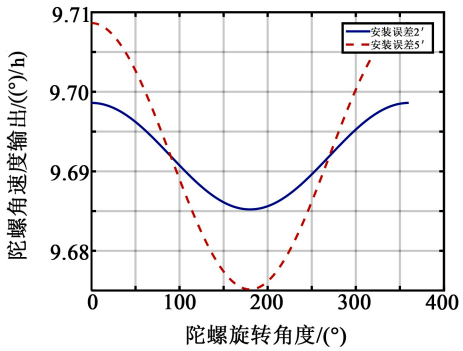


图 7　不同安装误差角下陀螺在各个角度的输出角速度曲线

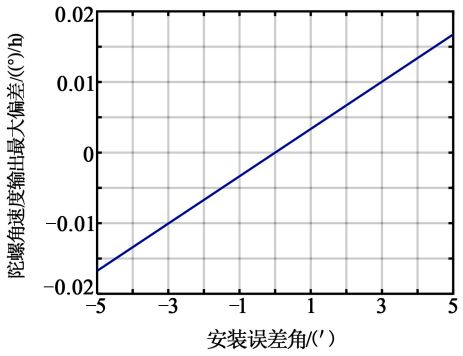


图 8　不同安装误差角下陀螺角速度输出的最大偏差曲线

2.1.3　安装误差对四位置寻北精度的影响

在光纤捷联惯性测量系统中，对准过程需要依靠光纤陀螺进行寻北，寻北精度是高精度光纤陀螺系统应用的一项重要性能指标。寻北通常采用光纤陀螺在四个特定位置测量的四位置方法[15]。该方案避开了光纤陀螺标度因数、零偏及地理纬度的影响，易于工程实现[16]。

四位置方法在寻北时将光纤陀螺 z' 轴朝天，陀螺敏感轴 x' 轴在大地 NOE 平面，在初始位置时与北向 N 轴的夹角为方位角 α_N，光纤陀螺转动相差 90°的四个位置输出分别为 G_{N1}，G_{N2}，G_{N3} 及 G_{N4}。

不考虑陀螺短时间内零偏及随机漂移变化，四位置时光纤陀螺的角速度输出 Ω_{Nn} 为

$$\Omega_{Nn} = \frac{G_{Nn}}{K} = \omega_{ie}\cos L_t\cos\left(\alpha_N + \frac{(n-1)\pi}{2}\right) + \Omega_0 + e \tag{7}$$

式中，n 为测量次数，方位角可表示为

$$\alpha_N = \arctan\frac{G_{N2} - G_{N4}}{G_{N3} - G_{N1}} \tag{8}$$

陀螺的安装误差使敏感轴 x' 与大地 NOE 平面形成大小为 q 的角度，敏感轴在大地 NOE 平面的投影与北向 N 轴的夹角为 α，该夹角在初始位置时定义为方位角 α_0。设 x' 轴在 NOU 平面的投影与 N 轴的夹角为 ϕ_N，与 x' 轴的夹角为 β，如图 9 所示，则

$$\alpha_n = \alpha_0 + (n-1)\pi/2 \tag{9}$$

$$\cos\beta_n = \sqrt{1-\cos^2 q \sin^2 \alpha_n} \tag{10}$$

$$\phi_N = \arctan\left(\frac{\tan q}{\cos \alpha_0}\right) \tag{11}$$

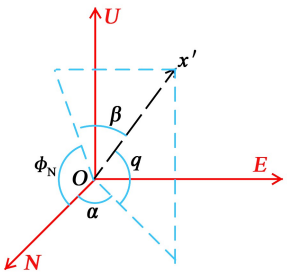


图 9 安装误差角在地球坐标系中的投影

光纤陀螺的角速度输出为

$$\Omega_n = \frac{G_n}{K} = \omega_{ie}\cos(L_t - \phi_N)\cos\beta_n + \Omega_0 + e \tag{12}$$

此时由安装误差引起的四位置寻北误差 δ 为

$$\delta = \arctan\frac{G_2 - G_4}{G_3 - G_1} - \alpha_0 \tag{13}$$

在纬度为 40°4′，陀螺零偏为 0.010 1(°)/h 时，陀螺仪的寻北误差仿真结果如图 10 所示。

图 10 结果表明，在方位角 0°及 90°附近时安装误差会对寻北精度造成较大影响，5′的安装误差角可引起寻北精度 50″的误差，2′的安装误差角可引起寻北精度 10″的误差。此外，考虑到光纤陀螺在正东、西向时会存在一定大小的死区，导致陀螺精度下降。综上，方位角为 45°附近时安装误差对寻北精度影响较小。为减小安装误差对寻北精度的影响并兼顾避免陀螺死区的影响，可利用高精度转台精确旋转特定角度使初始方向远离正东、正西、正南以及正北，最终在进行方位角解算时，通过补偿转台旋转的角度得到初始方位角。

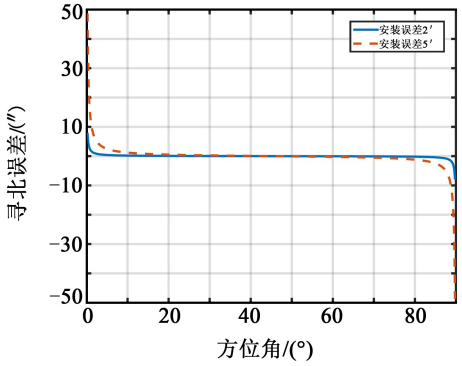


图 10 不同安装误差条件下陀螺仪寻北误差与方位角的变化曲线

2.1.4 安装误差引起的测试误差抑制方法

陀螺仪与测试工装存在的安装误差会使陀螺零偏和四位置寻北产生较大误差，因此需要对其采取抑制措施。在固定陀螺到工装的过程中，应首先紧固对角螺钉，且尽量采用相同的力使陀螺和工装完全贴合。使用水平仪定期检查工装接触面的平整度，必要时可选用不同厚度的刚性垫片对其进行修正，以减小安装误差角至 2′以下。另外可通过精确标定安装误差，建立数学误差模型对其进行补偿修正，以减小其对陀螺输出结果的影响。

一般情况下，测试工装产生的安装误差不超过 5′。由图 8 可知，在北纬 40°附近测试时，将安装误差由 5′降至 2′以下，在陀螺敏感轴指天时，角度输出最大误差可由 0.016 7(°)/h 减小至 0.006 7(°)/h，由安装误差引起的零偏误差减小 66.7%。

为检验安装误差抑制效果，本论文选用了一只零偏稳定性为 0.002(°)/h(100 s，1σ)的光纤陀螺仪，在高精度转台上进行四位置寻北对比实验。寻北前对光纤陀螺进行充分预热，以减小零偏和标度因数漂移带来的误差。每组四位置寻北实验重复 3 次，每个位置测量 3 min 以减小测试随机性。陀螺初始敏感轴大致指向北向，以放大安装误差的影响。初始位置寻北结束后利用高精度转台旋转 30°和 60°分别再次进行四位置寻北，安装误差抑制前后寻北测量结果如表 1 所示。

表 1 安装误差抑制前后寻北实验结果

转台旋转角度/(°)	安装误差抑制前		安装误差抑制后	
	方位角均值/(°)	方位角与转台旋转 0°时方位角差异/(″)	方位角均值/(°)	方位角与转台旋转 0°时方位角差异/(″)
0	0.178 6	/	0.183 0	/
30	30.162 67	−57.348	30.178 1	−17.64
60	60.158 5	−72.36	60.173 4	−34.68

在表 1 中，考虑到抑制前后测试工装初始位置发生变化，另外安装误差抑制后其大小、方向均会发生变化，会造成初始方位角差异；同时在测试过程中陀螺漂移、标度因数变化以及转台位置误差亦会引起测试误差。因此，通过分别比较方位角与转台旋转 0°时方位角差异，可以减小其常值误差影响。表 1 的实验结果表明，通过抑制安装误差与改进测试方法，可使初始方位角为 0°附近的寻北误差减小约 40″，验证了理论分析以及抑制方法的有效性。

2.2　转台精度对高精度光纤陀螺标定的影响分析

2.2.1　转台磁场对高精度光纤陀螺误差的影响

速率转台中通常包含金属框架和驱动电机，该结构使其成为较大的磁场发生源。当高精度光纤陀螺安装在转台台面时，由于光纤陀螺的法拉第效应，转台产生的磁场将会对陀螺零偏输出产生一定的影响。

本论文使用高精度高斯计对常见的速率转台的台面上磁场进行了详细测量，转台磁场大小约为 0.6～18 Gs。目前高精度光纤陀螺普遍采用多层磁屏蔽措施，其各轴向磁灵敏度通常可实现 10^{-4}(°)/(h·Gs^{-1})量级，且转台磁场较为稳定，因此转台磁场对高精度光纤陀螺的零偏误差影响较小。对于使用速率转台进行测试且对测试误差要求较严格的场合，可通过对转台进行磁屏蔽或者改善光纤陀螺的磁屏蔽性能来进一步减小转台磁场引入的测试误差。

2.2.2　转台速率精度对高精度光纤陀螺标定的影响

速率转台是光纤陀螺标度因数测试的通用测试设备[17]。转台的机械加工精度和速率精度直接影响着陀螺的测试精度。目前实验室通常使用的高精度转台绝对速率精度一般在 10^{-4}～10^{-6}(°)/s 量级(360°平均法测试，下同[18])。

控制转台以角速率 ω 转动，转台实际转动角速率为

$$\omega_r = \omega + \omega_\varepsilon \tag{14}$$

其中，ω_ε 为转台速率误差，则敏感轴朝天时陀螺数字量输出为

$$F = K(\omega_r + \omega_{ie}\sin L_t) + F_0 + \varepsilon \tag{15}$$

式中，F_0 为陀螺零偏(数字量)。根据式(15)可知，转台速率误差会引入附加的标度因数误差或绝对误差。

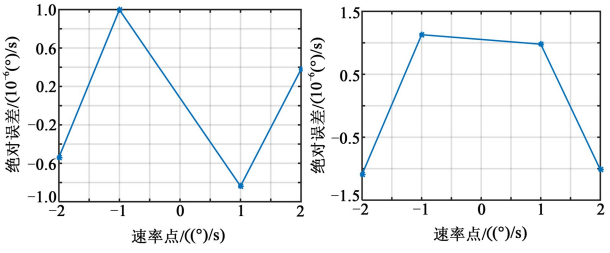
为了量化分析转台速率误差对高精度光纤陀螺标度因数性能的影响，本文分别采用速率精度为 10^{-6}(°)/s 量级的机械转台和 10^{-7}(°)/s 量级的高精度气浮转台进行陀螺标定试验，先采用高精度计数器(精度为 10^{-9} s)对两台转台进行精度监测，记录转台以固定速率转动 360°所需的时间，根据角度和时间计算其速率实际值及其绝对误差，测量结果如表 2 所示。

本文选取了一只零偏稳定性为 0.000 2(°)/h(100 s，1 σ)，标度因数非线性优于 0.5 ppm 的精密级光纤陀螺仪进行标度因数性能实验。将该陀螺仪分别安装在两台不同速率精度的转台上，为了避免温度变化对陀螺仪零偏和标度因数性能的影响，将转台的温度箱设定为恒定的 20 ℃，温度稳定后，转台依次设置为静止状态，1(°)/s，−1(°)/s，−2(°)/s 和 2(°)/s，为了减小转台的速率波动的影响，保证陀螺仪转过的角度为 360°的整数倍，每个角速度测试时间为 720 s，分别记录陀螺仪在不同角速度下的输出，根据 GJB 2426A-2015 计算在两个不同精度的转台上的陀螺仪输出，其绝对误差结果如图 11 所示。

表 2　转台速率精度测量结果

转台	速率/((°)/s)	计数器实测时间/s	实际速率/((°)/s)	速率绝对误差/((°)/s)
机械转台	1	360.000 523	0.999 998 5	-1.45×10^{-6}
	2	180.000 412	1.999 995 4	-4.58×10^{-6}
高精度气浮转台	1	360.000 143	0.999 999 6	-3.99×10^{-7}
	2	179.999 984	2.000 000 17	1.70×10^{-7}

图 11(a)为高精度光纤陀螺仪在机械转台上的绝对误差测试结果，绝对误差在 1×10^{-6}(°)/s 左右，图 11(b)为高精度光纤陀螺仪在高精度气浮转台上的绝对误差测试结果，其绝对误差约 1×10^{-7}(°)/s。试验结果表明，对于超高精度光纤陀螺仪标度因数性能测试，转台的速率误差(即转台的精度)已不容忽视，对于高端应用领域，转台精度直接影响了超高精度光纤陀螺仪的标度因数性能评价结果。此外，本文提出了基于高精度计数器对于转台精度评价结合长周期、转台固定周数的测试方法，也保证了超高精度的光纤陀螺标度因数绝对误差测试结果，为后续超高精度光纤陀螺以及其他惯性仪表的测试评价奠定了理论和实验基础。



(a)　机械转台　　(b)　气浮转台

图 11　机械转台和高精度气浮转台陀螺仪标定结果

2.3　时间基准源对高精度光纤陀螺标度因数性能的影响分析

目前，惯性系统使用的高精度光纤陀螺普遍采用外同步信号触发陀螺数据发送模式(即陀螺被动发数模式)，光纤陀螺数据发送频率由外同步信号的

周期决定，外同步信号通常由晶振等时间基准源分频得到，因此时间基准源的稳定性、重复性等精度指标将决定光纤陀螺的输出数据稳定性，尤其是标度因数性能。

为更直观地分析时间基准源精度对光纤陀螺标度因数性能的影响，针对于高精度光纤陀螺仪通常采用的角增量脉冲输出接口方式进行标度因数性能试验。角增量脉冲输出接口的光纤陀螺标度因数可表示为

$$K=\frac{\sum_1^n F_i-nF_0}{\sum_1^n \theta_i}=\frac{\sum_1^n F_i-nF_0}{\sum_1^n \omega t_i} \tag{16}$$

式中，ω 为转台的角速度，转动角增量为 θ_i，转动过程中第 i 个陀螺输出记为 F_i，则 n 为转动过程中采集的陀螺输出个数，F_0 为陀螺仪零偏，t_i 为同步信号周期，由晶振分频（$t=1/f$）得到。根据公式(16)可知，在陀螺仪标度因数测量时，晶振的时间误差将直接引入标度因数误差。

目前高精度光纤陀螺使用的晶振精度通常为高精度温补型晶振，一般可实现 1 ppm 水平，但用于高精度光纤陀螺测试设备的晶振差异较大，最大的可达全温 30～50 ppm。

为验证时间基准源精度对高精度光纤陀螺标度因数测试的影响，采用精度为 10^{-8} s 量级(0.01 ppm 量级)的信号发生器做陀螺仪的外同步信号，与普通晶振做同步信号时相对比，测试其陀螺仪标度因数结果差异。本文搭建了不同时间基准源的高精度光纤陀螺测试系统，如图 12 所示。

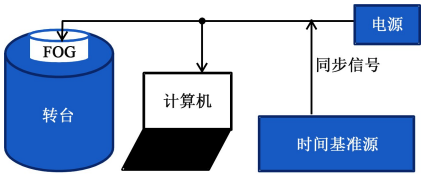


图 12 不同时间基准源的光纤陀螺测试系统示意图

本论文分别采用普通晶振及信号发生器作为时间基准源进行高精度光纤陀螺的标度因数重复性试验，测试过程保证相同的环境温度、预热时间等，试验结果如图 13 所示。

采用精度为 30 ppm 左右的 ZPB-28-32.768K-V3-A4-C2 型晶振做时间基准源，高精度光纤陀螺的标度因数重复性为 1.749 ppm(1σ)，采用精度为 0.01 ppm 的信号发生器做时间基准源的高精度光纤陀螺，标度因数重复性为 0.162 ppm(1σ)，相比采用普通晶振做外同步信号的提升了一个量级，为高精度光纤陀螺的标度因数性能提升以及性能评价改进提供了较强的设备保障能力。

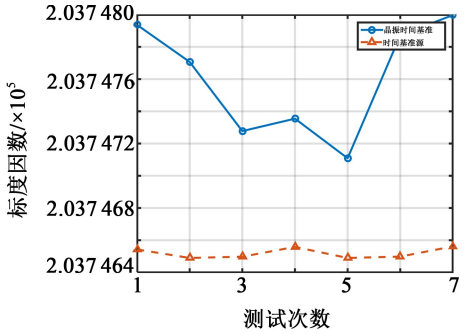


图 13 不同时间基准源陀螺仪标度因数测试结果

3 结论

本文理论分析了速率转台、测试工装、时间基准源等测试设备对高精度光纤陀螺测试误差的影响，搭建了测试设备对光纤陀螺测试误差影响的对比验证系统，并提出了减小测试设备引起的测试误差的抑制措施。

理论分析与实验结果表明：(1)测试工装的安装误差对高精度光纤陀螺仪的零偏误差的影响较大，采取不同高度的刚性垫片等措施可将安装误差由 5′控制至 2′以下，由安装误差引起的陀螺零偏误差可减小 66.7%；(2)转台速率误差直接影响高精度光纤陀螺的标度因数性能，采用本文提出的基于高精度计数器对于转台精度评价结合长周期、转台固定周数的测试方法，使文中的陀螺仪标度因数绝对误差由 1×10^{-6}(°)/s 降低至 1×10^{-7}(°)/s，相对于机械转台绝对误差减小了一个量级；(3)外部时间基准源的稳定性及重复性会影响外同步发数模式下的高精度光纤陀螺的标度因数性能，采用精度为 0.01 ppm 的信号发生器相对于普通晶振，可使高精度光纤陀螺的标度因数重复性误差由 1.749 ppm(1σ)减小至 0.162 ppm(1σ)。上述研究结果为后续超高精度光纤陀螺以及其他惯性仪表的测试评价奠定了理论和实验基础。

参考文献：

[1] 王 巍，于海成，冯文帅，等. 高精度光纤陀螺仪技术[M]. 北京：国防工业出版社，2021.
Wang Wei, Yu Haicheng, Feng Wenshuai, et al. High-precision Fiber Optic Gyroscope Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.

[2] 王常虹，董燕琴，陈效真，等. 惯性仪表测试技术的发展现状

与趋势[J]. 导航与控制，2017，16(4)：93-98.
Wang Changhong，Dong Yanqin，Chen Xiaozhen，et al. Development status and trend of inertial instrument testing technology[J]. Navigation and Control，2017，16(4)：93-98.

[3] 王惜康，高玉平，王平利，等. 光纤陀螺仪工作环境的测量与评估[J]. 时间频率学报，2016，39(1)：54-60.
Wang Xikang，Gao Yuping，Wang Pingli，et al. Measurement and evaluation of the working environment of fiber optic gyroscopes[J]. J. of Time and Frequency，2016，39(1)：54-60.

[4] 刘元元，杨永斌，冯文帅，等. 基于傅里叶变换的光纤陀螺测试环境自评估技术[J]. 光学学报，2019，39(4)：79-86.
Liu Yuanyuan，Yang Yongbin，Feng Wenshuai，et al. Self-evaluation technology of fiber optic gyroscope test environment based on Fourier transform[J]. Acta Optica Sinica，2019，39(4)：79-86.

[5] 谌尧周，王夏霄，高洋洋，等. 地磁场对高精度光纤陀螺仪零偏的影响机理研究[J]. 电子测量技术，2016，39(1)：147-150.
Chen Yaozhou，Wang Xiaxiao，Gao Yangyang，et al. Study on the influence mechanism of geomagnetic field on the bias of high precision fiber optic gyroscope[J]. Electronic Measurement Technology，2016，39(1)：147-150.

[6] 闾晓琴，黄鑫岩，高　峰，等. 光纤陀螺仪在摇摆状态下的误差测试分析方法[J]. 传感器与微系统，2019，38(7)：21-22，27.
Lv Xiaoqin，Huang Xinyan，Gao Feng，et al. Error test and analysis method of fiber optic gyroscope in rocking state[J]. Sensors and Microsystems，2019，38(7)：21-22，27.

[7] 孔　聪. 光纤陀螺数据采集与测试系统的设计[D]. 西安：西安电子科技大学，2012.
Kong Cong. Design of fiber optic gyroscope data acquisition and testing system[D]. Xi'an：Xidian University，2012.

[8] 严恭敏，李四海，秦永元. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 北京：国防工业出版社，2012.
Yan Gongmin，Li Sihai，Qin Yongyuan. An Inertial Instrument Test and Data Analysis[M]. Beijing：National Defense Industry Press，2012.

[9] 刘思琪. 光纤陀螺零偏及标度因数误差测试与补偿方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2016.
Liu Siqi. Research on measurement and compensation method of optical fiber gyro bias and scale factor errors[D]. Harbin：Harbin Engineering University，2016.

[10] 范运强，黄继勋，李　晶. 基于局部光路温度控制的光纤陀螺温度误差抑制方法[J]. 中国惯性技术学报，2020，28(6)：809-813.
Fan Yunqiang，Huang Jixun，Li Jing. Temperature error suppression method of fiber optic gyroscope based on local optical path temperature control[J]. Chinese J. of Inertial Technol.，2020，28(6)：809-813.

[11] 王　巍，丁东发，夏君磊. 干涉型光纤传感用光电子器件技术[M]. 北京：科学出版社，2012.
Wang Wei，Ding Dongfa，Xia Junlei. Optoelectronic Device Technology for Interferometric Optical Fiber Sensing[M]. Beijing：Science Press，2012.

[12] Mou Jiapeng，Su Jingjing，Miao Lijun，et al. Misalignment angle measurement and angle measurement deviation compensation of fiber optic gyroscope based on tilt sensor[J]. Optical Fiber Technol.，2021，63：102509.

[13] 郭超宇. 光纤陀螺输入轴失准角误差及补偿技术研究[D]. 北京：中国运载火箭研究院，2017.
Guo Chaoyu. Research on misalignment angle error and compensation technology of FOG input shaft[D]. Beijing：China Academy of Launch Vehicles，2017.

[14] 王　巍. 干涉型度光纤陀螺仪技术[M]. 北京：中国宇航出版社，2010.
Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology[M]. Beijing：China Aerospace Press，2010.

[15] 王夏霄，王　野，李立京，等. 光纤陀螺"四位置"误差机理研究[J]. 现代电子技术，2013，36(18)：138-141.
Wang Xiaxiao，Wang Ye，Li Lijing，et al. "Four-position" error mechanism of fiber optic gyro[J]. Modern Electronic Technology，2013，36(18)：138-141.

[16] 蔡迎波，乔永严. 单轴光纤陀螺寻北仪四位置寻北误差分析[J]. 光学与光电技术，2017，15(6)：84-88.
Cai Yingbo，Qiao Yongyan. Four-position north-seeking error analysis of single-axis fiber optic north finder[J]. Optics and Optoelectronics Technol.，2017，15(6)：84-88.

[17] 李绪友，张春梅，洪　勇，等. 光纤陀螺标度因数测试方法分析[J]. 仪器仪表学报，2016，37(10)：2211-2217.
Li Xuyou，Zhang Chunmei，Hong Yong，et al. Analysis of the measurement method of the scale factor of the fiber optic gyroscope[J]. J. of Instrument and Meter，2016，37(10)：2211-2217.

[18] GJB 1801-93. 惯性技术测试设备主要性能试验方法[S].
GJB 1801-93. Main performance test method of inertial technology test equipment[S].

[19] JJF 1210-2008. 低速转台校准规范[S].
JJF 1210-2008. Low-speed rotary table calibration specification[S].

作者简介：

曹康渊(1998—)，男，硕士研究生，主要研究方向为光纤陀螺噪声抑制技术；

丁东发(1976—)，男，研究员，硕士生导师，主要研究方向为光纤陀螺及光纤传感用光电子器件。