光电技术及应用

光纤陀螺标度因数长期变化抑制技术研究

宋 建[1,2]，黄继勋[1,2*]，冯文帅[2]，刘元元[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： 高精度光纤陀螺广泛使用掺铒超荧光光纤光源，其输出光的平均波长会随着使用时间的增加发生漂移，导致光纤陀螺标度因数稳定性不能满足长期使用需求。文章提出一种平均波长长期稳定性提升技术，首先加入了泵浦功率控制回路，稳定泵浦功率减小泵浦源老化带来的泵浦功率损失和平均波长漂移；然后加入高斯滤波方案，滤除光谱中不稳定波段光以提升光谱稳定性与对称性，并通过仿真模拟优化了滤波器参数。实验结果表明，使用该方法的光纤陀螺光路平均波长稳定性提升了88%，其在常温下9个月内的标度因数稳定性优于5 ppm，并且改进后光纤陀螺其他性能参数未见明显劣化，验证了该方法的有效性。

关键词： 光纤陀螺；标度因数；平均波长；光功率控制；光路滤波

中图分类号： TN253；TN929.11 **文章编号：** 1001－5868(2025)02－0342－08

Long-Term Suppression of Scale-Factor Variation in Fiber-Optic Gyroscopes

SONG Jian[1,2], HUANG Jixun[1,2], FENG Wenshuai[2], LIU Yuanyuan[2]

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, CHN;
2. Beijing Aerospace Times Optical Electronics Technology Co., Ltd., Beijing 100094, CHN)

Abstract: Erbium-doped superfluorescent fiber source is widely used in medium- and high-precision fiber-optic gyroscopes. The mean wavelength of the output light drifts as its use time increases. Consequently, the scale-factor stability of fiber-optic gyroscopes is insufficient to satisfy the requirements for long-term application. To solve this problem, this paper proposes a technology to improve the long-term stability of the mean wavelength, which involves incorporating a pump-power control loop to the light source to stabilize the pump power and reduce the pump-power loss and mean-wavelength drift caused by the aging of the pump source. Optical-path filtering technology is adopted to filter the unstable band light in the spectrum to improve the spectral stability and symmetry, and the filter parameters are optimized via simulation. Experimental results show that the mean-wavelength stability of the fiber-optic gyroscope using this method improves by 88%, the scale-factor stability exceeds 5 ppm within 9 months at room temperature, and other parameters of the improved fiber-optic gyroscope are not significantly degraded, thus demonstrating the effectiveness of the method.

Key words: fiber-optic gyroscopes; scale-factor stability; mean wavelength; optical-power control; optical filtering

收稿日期：2024－12－01.

基金项目：国家自然科学基金项目(U2241218).

*通信作者：黄继勋

0　引言

光纤陀螺仪是用于自主测量载体相对于惯性空间旋转运动的仪表，具有无运动部件、高可靠性、长寿命、低成本、快速启动、大动态范围和广泛精度覆盖等显著优势，以光纤陀螺仪为核心的惯性测量系统在海、陆、空、天等领域中都起着至关重要的作用。目前，高精度的光纤陀螺已经成为国内空间惯性仪表的主要选择，该领域对陀螺的连续工作寿命提出了较高的要求。如卫星领域要求光纤陀螺在轨连续寿命在10～15年之间[1]，陀螺工作期间要保证光纤陀螺性能参数，特别是标度因数不发生明显劣化。然而，光纤陀螺在经过长期使用、高温老化或者长期贮存后，其标度因数会发生漂移，严重超出了高精度应用所要求的1 ppm范围[2-4]。目前，标度因数长期漂移已经成为了制约光纤陀螺在高精度导航或测角系统上应用的主要问题之一[5]。

影响数字闭环光纤陀螺标度因数的参数主要包括光纤环尺寸、信号光平均波长以及波导半波电压。其中光纤环尺寸与半波电压的影响已经通过光纤环材料优化、第二闭环技术等抑制在几百万分之一以内[6-7]。因此，光信号平均波长已经成为标度因数误差构成的决定性因素[8]。陈倚竹等[9]使用双程后向抽运、带通滤波等技术减小了温度影响下掺铒光纤光源平均波长的变化量。朱蕊蘋等[10]研究了辐照环境下的掺铒光纤光源有源区损耗特性，并结合多重光褪色和泵浦功率控制技术降低了空间辐照对信号光平均波长的影响。虽然上述研究有效减小了环境因素对光信号平均波长的影响，但光纤陀螺内部有源、无源器自身老化导致的光信号平均波长对标度因数的贡献仍然在10～100 ppm之间，与实际要求还有一定距离。

本文采用泵浦功率控制结合高斯滤波技术，维持泵浦功率长期稳定的同时减小泵浦源老化对平均波长的影响，获得平均波长变化量为0.02 nm，标度因数定温长期变化在5 ppm以内的光纤陀螺系统。

1　光纤陀螺平均波长自发变化机理

1.1　铒离子能级与光谱演化

掺铒光纤光源工作原理基于掺铒光纤放大自发辐射效应（Amplified Spontaneous Emission，ASE）。铒离子Er^{3+}具有非连续的能级，其能级分布如图1所示。其中，基态$^4I_{15/2}$所处能级最低，第一激发态$^4I_{13/2}$处于亚稳态，第二激发态$^4I_{11/2}$所处能级最高。在铒离子被掺杂到石英基质中并被泵浦光抽运后，粒子的能级在激发作用下由$^4I_{15/2}$转移到$^4I_{11/2}$上，之后快速无辐射弛豫到达亚稳态$^4I_{13/2}$。由于Stark裂变效应，$^4I_{15/2}$，$^4I_{13/2}$和$^4I_{11/2}$都分别分裂成若干个彼此相距很近的子能级，其中，$^4I_{13/2}$和$^4I_{15/2}$所有子能级中相对高能级之间跃迁产生了C波段ASE，相对低能级之间跃迁产生L波段ASE[11]。

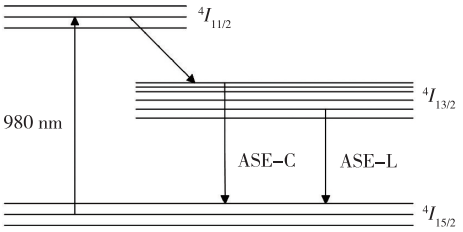


图1　铒离子能级示意图

掺铒光纤中的铒离子在吸收泵浦光后发生放大自发辐射，首先在掺铒光纤近端产生的C波段ASE作为二次泵浦源被掺铒光纤远端的铒离子吸收，从而产生L波段ASE。由于L波段ASE发射系数和吸收系数均比C波段小数倍[12]，掺铒光纤光源输出光谱中存在两个增益峰。随着泵浦源的老化，其量子阱带隙逐渐变宽，导致泵浦输出的波长发生红移。同时，能带不断展宽，使得导带边位置上升，削弱了势垒与势阱对载流子的限制作用，并且随着应变的累积，可能引发有源区内的缺陷发生转移、扩张等变化，这些变化共同导致泵浦输出功率随时间的下降[13]。

泵浦功率衰减对光源输出光谱分布的影响如图2所示。当泵浦功率从120 mW降至80 mW时，掺铒光纤前端对泵浦光的吸收效率显著降低，导致1 530 nm增益峰强度从－32.5 dBm急剧衰减至－70 dBm，降幅为37.5 dBm。而由于二次吸收过

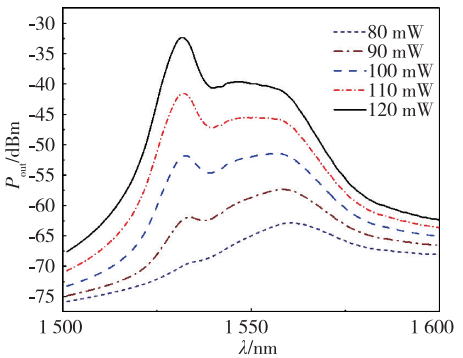


图2　不同泵浦功率下光源输出光谱演化情况

程的存在，1 560 nm增益峰强度从－40 dBm衰减至－62.5 dBm，降幅为22.5 dBm。通过对比1 530与1 560 nm峰强度，可以看出，1 530 nm峰强度衰减幅度更大，这就导致光功率衰减的同时，光谱重心向长波长偏移。

泵浦波长红移对光源输出光谱分布的影响如图3所示。在泵浦波长从960 nm向1 000 nm逐渐红移的过程中，当趋近于掺铒光纤的980 nm吸收峰时，吸收效率显著增强，1 530 nm增益峰强度从－60 dBm跃升至－2.5 dBm，升幅为57.5 dBm。而1 560 nm峰强度从－55 dBm升至－20 dBm，升幅为35 dBm。对比1 530与1 560 nm峰强度，可以看出，1 530 nm峰强度上升幅度更大，光谱重心向短波长偏移，C波段辐射占优；泵浦波长进一步红移后，吸收效率下降，1 530 nm峰强度回落至－35 dBm，降幅为32.5 dBm，1 560 nm峰强度降至－40 dBm，降幅为20 dBm。进一步比较可见，1 530 nm峰强度回落幅度更大，光谱重心向长波长偏移，L波段辐射逐渐占据主导。

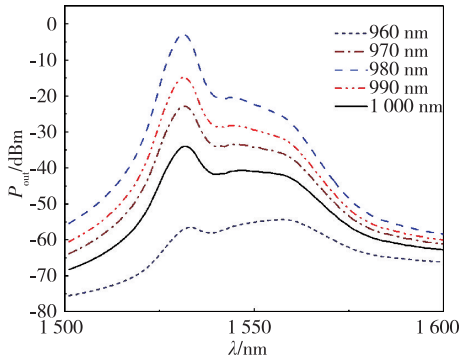


图3 不同泵浦波长下光源输出光谱演化情况

根据图2和图3中光谱的变化，进一步拟合得到平均波长随泵浦功率以及平均波长随泵浦波长变化曲线。平均波长随泵浦功率的变化如图4所示，泵浦功率降低时，光源平均波长呈近似线性增大，在80～120 mW区间内，功率每下降1%，平均波长漂移量可达0.8 nm。平均波长随泵浦波长的变化如图5所示，当泵浦波长接近980 nm时，平均波长变化达到极值，随着泵浦波长偏离980 nm，平均波长随泵浦波长的变化率逐渐增大。值得注意的是，由于泵浦源自身稳定性，其波长典型变化量通常不超过1 nm[14]，由此带来的平均波长变化仅为0.25 nm。因此，对于未采取功率控制的980 nm泵浦源驱动的光纤陀螺光源，平均波长变化主要来源于泵浦功率的下降，而泵浦波长的变化对平均波长的影响相对较小。

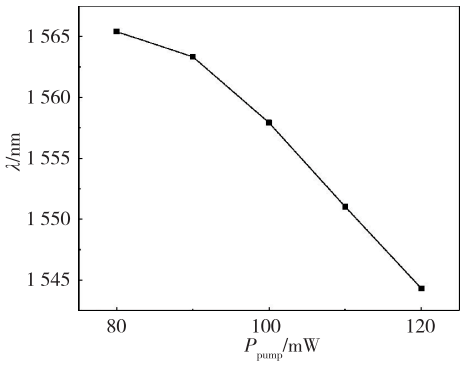


图4 光源平均波长随泵浦功率变化情况

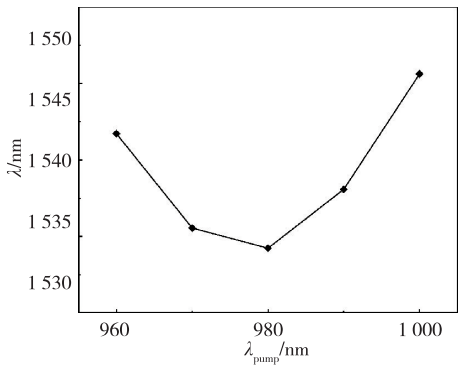


图5 光源平均波长随泵浦波长变化情况

1.2 标度因数与平均波长的理论关系

光源光谱的平均波长定义如下式所示：

$$\bar{\lambda}=\frac{\int \lambda \cdot P(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int P(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{1}$$

式中，λ为光波长，$P(\lambda)$为光谱的功率谱密度。平均波长是整个光谱中不同波长分量的加权平均，泵浦功率与泵浦波长的变化引起的1 530和1 560 nm两个增益峰之间的增益竞争，会使光谱整体谱型发生变化，进而引起光源的平均波长发生变化。而光纤陀螺的标度因数又与平均波长相关：

$$K=\frac{2\pi LD}{\bar{\lambda}c} \tag{2}$$

式中，L为光纤长度，D为光纤环直径，$\bar{\lambda}$为平均波长，c为光速。由公式(2)可知，标度因数K与平均波长$\bar{\lambda}$成反比关系。具体而言，当平均波长发生漂移$\Delta\bar{\lambda}$时，标度因数的相对变化量为：

$$\frac{\Delta K}{K}=-\frac{\Delta\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} \tag{3}$$

若光纤陀螺的初始平均波长$\bar{\lambda}$=1 550 nm，漂移量$\Delta\bar{\lambda}$=0.1 nm，引起的标度因数误差达64.5 ppm，远超高精度应用要求的1 ppm范围。因此，需要通

过控制泵浦参数来降低平均波长的变化，进而抑制标度因数的长期变化。

2　光路平均波长稳定性改进

相较于图 6 所示的光纤陀螺光路结构，基于泵浦功率控制和光路高斯滤波的光纤陀螺光路结构如图 7 所示，主要改进如下：

（1）引入泵浦功率控制回路替代传统恒流驱动方案，实现泵浦功率的闭环稳定输出，从而有效抑制因功率衰减引起的平均波长漂移；

（2）在陀螺光源输出端连接光纤滤波器，通过合理配置滤波器参数，滤除光谱中受泵浦源影响较大的成分，从而减小泵浦参数变化带来的光源平均波长变化。

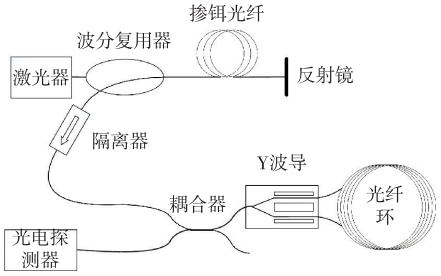


图 6　光纤陀螺光路结构示意图

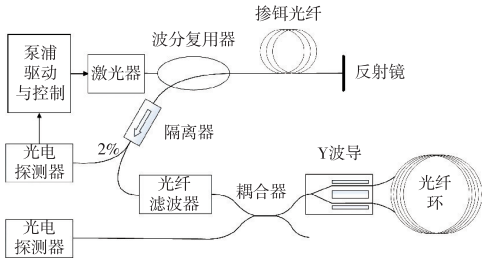


图 7　改进后的光纤陀螺光路结构示意图

2.1　泵浦功率控制设计

泵浦功率控制模块主要包含功率监测模块和功率控制模块，如图 8 所示。光电探测器将分得的小部分光转化为电信号，功率检测模块采用放大电路将这部分电信号放大，形成采样电压 U_{mon}，作为反馈信号与设置的参考电压 U_{ref} 比较形成误差电压 U_e，输入到 PID 控制器，控制器通过比例-积分-微分动态调节系统偏差并形成抽运功率控制电压 U_{ctl}，控制泵浦源输出恒定功率。当泵浦源在工作过程中因老化出现功率下降时，功率监测电路探测到的光功率变化随即被反馈到控制器输入端，PID 控制电路将根据反馈电压与设置电压的差值电压及时调整驱动回路电流，使系统重新达到动态平衡[12]。相较于传统恒流驱动方式，泵浦功率控制技术能够在泵浦源全寿命周期内维持恒定输出功率，有效抑制因功率衰减导致的平均波长漂移。

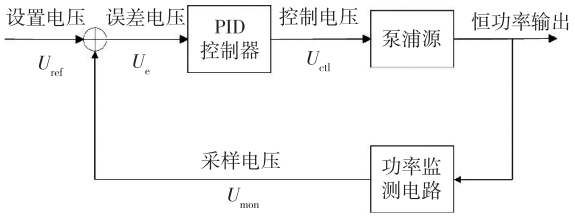


图 8　自动功率控制框图

2.2　光纤滤波器参数设计

由图 3 不同泵浦波长下的光谱演化情况可知，光谱 1 530 nm 峰值处的光功率受泵浦波长影响变化较大。因此，选择中心波长 1 560 nm 的高斯型光纤滤波器作为光谱作为光源的输出光谱，光谱对比如图 9 所示。

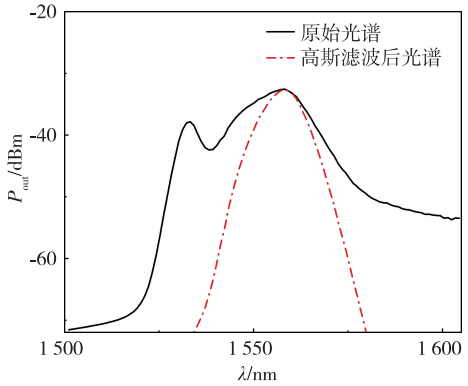


图 9　滤波前后光谱对比图

为选取合适的滤波器带宽，在获得较高平均波长稳定性的同时，使得光谱具有一定的可用带宽，通过 OptiSystem 仿真平台对比研究不同带宽滤波器对平均波长变化的改进效果并计算光谱带宽，分别模拟了滤波器带宽为 5，10，15，20 nm 的平均波长变化随泵浦波长的变化关系，如图 10 所示。加入滤波器后的光源平均波长稳定性得到大幅改善，并且随着滤波器带宽的减小，其稳定性逐渐变好，当泵浦波长产生 ±0.1 nm 的波动时，未加入滤波器的平均波长变化了约 4 ppm，曲线在 0 附近的斜率从带宽 20 nm 时的 9.5 ppm/nm 降低至 5 nm 时的 4.75 ppm/nm，泵浦波长变化 ±0.1 nm 范围内的平均波长变化从 20 nm 时的 1.36 ppm 降低至 5 nm 时的 0.35 ppm。这表明，加入滤波器后泵浦波长波动对平均波长的影响能够被抑制在 1 ppm 以内，显

著降低了由泵浦源波长变化造成的光源平均波长变化。

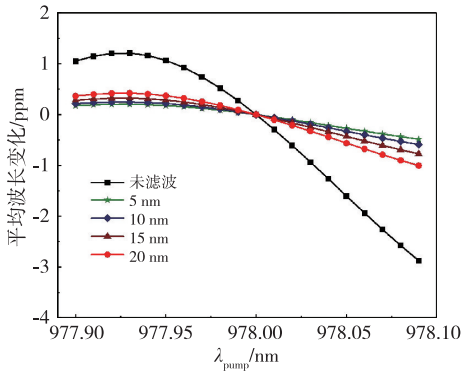


图10 不同滤波器带宽下平均波长随泵浦波长变化对比

随着滤波器带宽减小，平均波长变化量随泵浦波长与泵浦功率的变化逐渐降低，这有利于获得更好的平均波长稳定性，但同时也将带来输出光谱带宽过窄的负面影响。如表1所示，当滤波器带宽为5和10 nm时，输出谱宽分别为4.5和8.3 nm，无法满足高精度光纤陀螺的谱宽要求；带宽为15和20 nm所对应的输出谱宽分别为11.6和14.2 nm，光谱带宽接近使用要求[9]。综合考虑带宽与平均波长稳定性，选取中心波长为1 560 nm，谱宽为15 nm的高斯滤波器作为光路滤波器件。

表1 不同滤波器带宽下的光谱带宽

滤波器带宽/nm	3 dB带宽/nm
20	14.2
15	11.6
10	8.3
5	4.5

3 实验结果与讨论

3.1 光纤陀螺光源平均波长稳定性改进效果

使用两套初装的光纤陀螺光源进行平均波长稳定性对比实验，其中，泵浦源使用Lumentum公司生产的S26系列250 mW激光器，掺铒光纤使用长度为8 m的高浓度掺铒光纤，其中一套按照本研究改进方案加入了泵浦APC控制与光纤滤波器，另一套不采用功率控制与滤波措施。实验系统结构如图11所示，实验样本置于温度实验箱中保持55℃恒温，通过输出端尾纤与光谱仪和光功率计耦合连接。

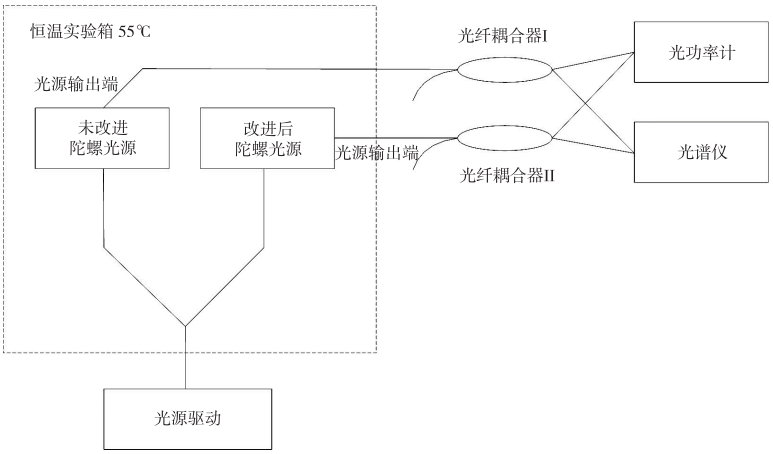


图11 光源对比实验系统示意图

改进后的实测光谱图如图12所示，其中心波长为1 559.91 nm，带宽为10.86 nm，符合设计标准。改进前后的平均波长变化对比实验结果如图13所示，未使用功率控制与滤波技术的光纤陀螺，其平均波长先表现出上升趋势，这是由于光纤陀螺启动后泵浦源在长期通电受热条件下，泵浦源内部发生如有源区缺陷扩张或转移、量子阱带隙持续变化等反应[13]，一段时间后反应逐渐稳定，700 h后平均波长不再有明显变化趋势。在整个实验过程中，未使用泵浦功率控制与滤波技术的光纤陀螺平均波长稳定性仅为20.34 ppm（1σ），900 h内平均波长变化了0.1 nm；应用改进后方案的光纤陀螺平均波长稳定性为2.42 ppm（1σ），900 h内的平均波长变化量不超过0.02 nm。相较于未改进的陀螺，所提方案的平均波长稳定性提升了8倍，平均波长变化量提升了5倍，并且改进后的陀螺光路平均波长没有较为明显的长期变化趋势，这证明了本方案对陀螺光路平均波长变化的抑制作用。

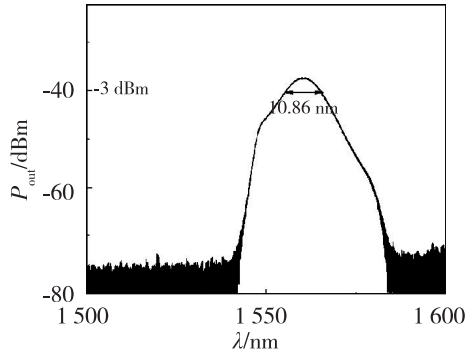


图 12　光谱实测图

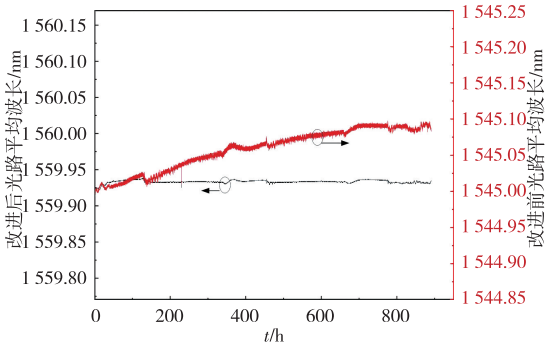


图 13　改进前后平均波长随时间变化对比

3.2　光纤陀螺标度因数长期稳定性改进效果

为验证所提出方案对光纤陀螺标度因数的改进效果，选取四只初装的高精度光纤陀螺 FOG1～4 进行 55 ℃下单次通电的高温度应力寿命加速标定实验。其中，FOG1 和 FOG2 使用与波长稳定性实验一致的未改进光源，FOG3 和 FOG4 使用所设计的改进型光源，其泵浦控制参数与滤波器配置与波长稳定性实验中的改进后光源完全一致。为排除光纤环等无源器件老化对实验结果的干扰，四只陀螺使用的无源光学器件均经过充分的高温时效和筛选保证性能稳定。考虑到陀螺自身发热对温箱内不温度均匀性的影响，每次实验仅放置两只陀螺，分两组实施：第一组为 FOG1 与 FOG3，第二组为 FOG2 与 FOG4，每组实验周期为 20 天。根据阿伦尼斯模型[15]，光纤陀螺在 55 ℃环境下的 20 天加速寿命，可等效为常规工作条件下约 9 个月的实际使用寿命。

实验系统如图 14 所示，陀螺通过六面体工装和夹具紧固在精度为 ±0.001 °/s 的高精度转台表面；陀螺供电电源使用 +5 V 直流电源箱；测试计算机通过 RS232 串口采集陀螺输出数据，并使用 Matlab 对标定数据进行处理，确保长期测试过程中数据采集与处理的可靠性与一致性。

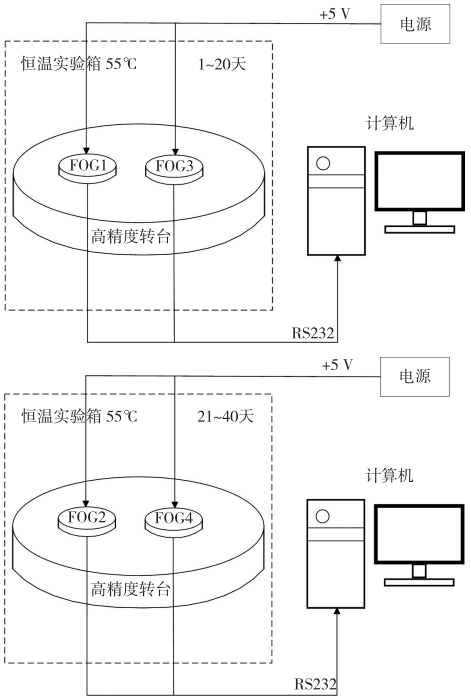


图 14　光纤陀螺标度因数长期测试系统示意图

光纤陀螺寿命加速实验结果如图 15、16 及表 2 所示。第一组实验中，改进型光纤陀螺在等效 9 个月使用寿命周期内，标度因数稳定性为 1.94 ppm（1σ），变化量为 3.23 ppm，较未改进陀螺的 7.62 ppm（1σ）和 24.43 ppm 分别提升了 74.5% 和 86.8%。第二组实验中，改进型陀螺的标度因数稳定性为 1.28 ppm（1σ），变化量降至 2.98 ppm，相较于未改进陀螺的 5.24 ppm（1σ）和 21.13 ppm 分别提升了 75.6% 和 85.9%。两组数据一致表明，改进方案显著抑制了标度因数的长期漂移，且能够有效提升标度因数长期稳定性。

表 2　光纤陀螺的长期标度因数性能比较

陀螺样本	陀螺状态	标度因数变化量/ppm	标度因数稳定性/ppm（1σ）
FOG1	未改进	24.43	7.62
FOG2		21.13	5.24
FOG3	改进	3.23	1.94
FOG4		2.98	1.28

3.3　改进前后光纤陀螺其他性能指标比较

对采用两种方案的光纤陀螺在定温环境下进行了零偏稳定性、标度因数非线性等指标的测试。结果如表 3 所示，采用泵浦功率控制与滤波技术后，陀螺的标度因数非线性、零偏稳定性均与未改进方案保持一致。

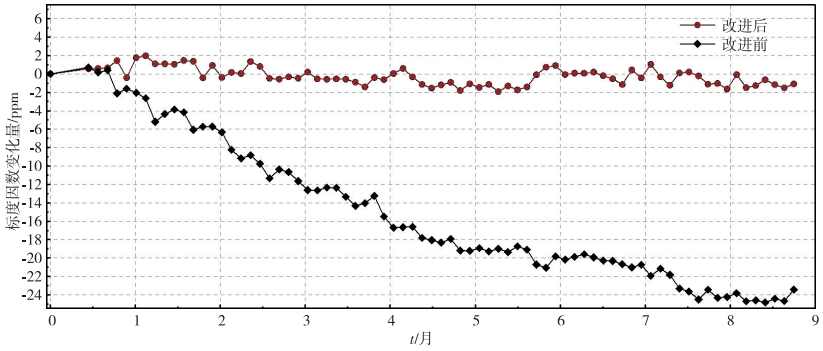


图 15 第一组标度因数随时间变化对比

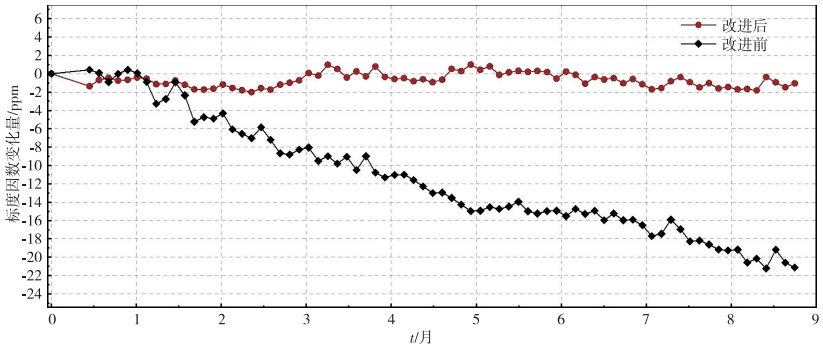


图 16 第二组标度因数随时间变化对比

表 3 改进前后光纤陀螺的性能指标比较

陀螺样本	陀螺状态	标度因数非线性/ppm(1σ)	100 s零偏稳定性/[(°)/h](1σ)
FOG1	未改进	0.629 7	0.001 5
FOG2		0.577 2	0.001 3
FOG3	改进	0.463 3	0.001 4
FOG4		0.391 6	0.001 5

4 结论

本文针对光纤陀螺的标度因数性能长期变化，提出一种采用泵浦功率控制和高斯滤波技术的光纤陀螺标度因数长期稳定性改善方法。该方法能够有效抑制长期使用中泵浦源老化对光纤陀螺平均波长和标度因数产生的影响。实验结果表明，改进后的光纤陀螺平均波长长期变化量由 0.1 nm 减小至 0.02 nm，平均波长长期稳定性优化了 88%，光纤陀螺长期标度因数变化由原来的大于 20 ppm 降低至 5 ppm，减小了 87%，基本满足现阶段大多数领域对光纤陀螺标度因数性能的长期要求[16-19]。该研究对高精度光纤陀螺长期标度因数性能的改善具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 曹 敏，寿 芳，马 超. 光纤陀螺高可靠、长寿命保证技术探讨[J]. 装备环境工程，2013，10(4)：76-79，113.
Cao Min，Shou Fang，Ma Chao. High reliability and long lifetime guarantee technology of fiber-optic gyroscopes [J]. Equipment Environmental Engineering，2013，10(4)：76-79，113.

[2] Mead D，Mosor S. Progress with interferometric fiber optic gyro at Honeywell[J]. Proc. SPIE，2020，11405：1140509.

[3] Carr K，Greer R，May M B，et al. Navy testing of the iXBlue MARINS fiber optic gyroscope (FOG) inertial navigation system (INS)[C]// 2014 IEEE/ION Position，Location and Navigation Symposium，2014：1392-1408.

[4] Korkishko Y N，Fedorov V A，Prilutskiy V E，et al. High-precision inertial measurement unit IMU-5000 [C]// 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)，2018：1-4.

[5] 张桂才，杨 晔. 光纤陀螺工程与技术[M]. 北京：国防工业出版社，2023：340-343.
Zhang Guicai，Yang Ye. Fiber Optic Gyroscope：Engineering and Technology [M]. Beijing：National Defense Industry Press，2023：340-343.

[6] 杨盛林，王晓丹，陈桂红，等. 用于改善光纤陀螺全温标度因数变化的环圈制作工艺[J]. 中国惯性技术学报，2017，25(1)：124-127.
Yang Shenglin，Wang Xiaodan，Chen Guihong，et al. Improvement on FOG's scale factor by the processing technology for fiber coil [J]. Journal of Chinese Inertial Technology，2017，25(1)：124-127.

[7] 刘伯晗，马 林，吴晓乐. 光纤陀螺环圈胶体对陀螺长期可

靠性影响研究[C]// 2016年光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会论文集. 2016：100-103.

[8] 陈和宇，郑　月，王夏霄，等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响[J]. 中国激光，2019，46(3)：0306002.
Chen Heyu，Zheng Yue，Wang Xiaxiao，et al. Influence of mean wavelength on scale factor of fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers，2019，46(3)：0306002.

[9] 陈倚竹，张海涛，巩马理，等. 高平均波长稳定性超荧光光纤光源[J]. 激光技术，2014，38(1)：70.
Chen Yizhu，Zhang Haitao，Gong Mali，et al. A superfluorescent fiber source with high mean wavelength stability[J]. Laser Technology，2014，38(1)：70.

[10] 朱蕊蘋，魏　伟，索鑫鑫. 掺铒光纤光源辐照致有源区损耗研究及其抗辐照设计[J]. 导航与控制，2023，22(4)：51-58.
Zhu Ruipin，Wei Wei，Suo Xinxin. Research on radiation-induced active band attenuation in Er-doped fiber source and its radiation-resistance design[J]. Navigation and Control，2023，22(4)：51-58.

[11] 郝蕴琦，贾若一，丁贝贝，等. 掺铒光纤自发辐射宽带光源的带宽优化研究[J]. 激光技术，2023，47(4)：500-505.
Hao Yunqi，Jia Ruoyi，Ding Beibei，et al. Bandwidth optimization research of wide-band optical source with the Er^{3+}-doped fiber amplified spontaneous emission[J]. Laser Technology，2023，47(4)：500-505.

[12] 姜倩文，徐雅燕，林瑜佳，等. 基于自动功率控制的EDFA泵浦驱动设计[J]. 制导与引信，2021，42(1)：32-36.
Jiang Qianwen，Xu Yayan，Lin Yujia，et al. EDFA pump driver design based on automatic power control[J]. Guidance & Fuze，2021，42(1)：32-36.

[13] 路国光，套格套，尧　舜，等. 808 nm大功率半导体激光器的加速老化实验[J]. 半导体光电，2005，26(2)：97-99.
Lu Guoguang，Tao Getao，Yao Shun，et al. Accelerated aging of 808 nm high-power semiconductor laser diodes[J]. Semiconductor Optoelectronics，2005，26(2)：97-99.

[14] 闫景涛，钟　华，刘一石，等. 激光线宽对干涉式光纤陀螺性能影响分析[J]. 中国惯性技术学报，2022，30(3)：365-371.
Yan Jingtao，Zhong Hua，Liu Yishi，et al. Analysis for effect of laser linewidth on performance of interferometric fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology，2022，30(3)：365-371.

[15] 袁慧铮，陈林华，陆俊清，等. 光纤陀螺加速退化试验方法研究[J]. 导航定位与授时，2015，2(5)：63-69.
Yuan Huizheng，Chen Linhua，Lu Junqing，et al. Research on accelerated degradation method for fiber optic gyro[J]. Navigation Positioning and Timing，2015，2(5)：63-69.

[16] Paveau A，Cros G，Masson S，et al. Robustness of astrix fiber optic gyros in space radiative environment[J]. CEAS Space Journal，2019，11(2)：219-227.

[17] Divakaruni S，Keith G，Narayanan C，et al. Strategic interferometric fiber-optic gyroscope for ballistic missile inertial guidance[C]// AIAA Guidance，Navigation and Control Conference and Exhibit，2008：AIAA2008-7301.

[18] Sanders S，Taranta A，Mosor S，et al. Fiber optic gyros in a high-performance，high-reliability inertial reference unit for commercial satellites[J]. Proc. SPIE，2012，8421：842101.

[19] Savage P G. Blazing gyros：The evolution of strapdown inertial navigation technology for aircraft[J]. Journal of Guidance，Control，and Dynamics，2013，36(3)：637-655.

作者简介：

宋　建(2000—)，男，硕士研究生，主要研究方向为高精度光纤陀螺技术；

黄继勋(1974—)，男，研究员，博士生导师，长期从事新型惯性导航技术研究与产品设计工作。