

基于动态温控的光纤陀螺高温工作控制方案

王刚 万洵 崔志超 谢良平

Control scheme of high working temperature based on dynamic temperature control in FOG

WANG Gang, WAN Xun, CUI Zhichao, XIE Liangping

引用本文:

王刚, 万洵, 崔志超, 等. 基于动态温控的光纤陀螺高温工作控制方案[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1153–1156. DOI: 10.5768/JAO202344.0508004

WANG Gang, WAN Xun, CUI Zhichao, et al. Control scheme of high working temperature based on dynamic temperature control in FOG[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1153–1156. DOI: 10.5768/JAO202344.0508004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0508004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

应用光学. 2020, 41(1): 220–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108001>

谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制研究

Research on backscatter noise suppression for resonator fiber optic gyro

应用光学. 2018, 39(2): 290–294 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0208002>

基于联合编码调制的调光控制方案实现

Implementation of dimming control scheme based on joint coding and modulation

应用光学. 2018, 39(4): 470–475 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401005>

星载激光雷达F-P标准具高效温控算法的设计与实现

Design and implementation of efficient temperature control algorithm for Fabry–Perot etalon of spaceborne lidar

应用光学. 2018, 39(1): 130–134 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107003>

滑模动态面控制在快速反射镜系统中的应用

Application of sliding mode dynamic surface control in fast steering mirror

应用光学. 2018, 39(5): 714–721 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0505003>

Y波导调制器残余强度调制研究

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974–978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-1153-04

基于动态温控的光纤陀螺高温工作控制方案

王 刚, 万 洵, 崔志超, 谢良平

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 光纤陀螺工作温度的提升主要受制于光路系统, 通过控制方案的优化可以提高光纤陀螺的工作温度。通过对光纤陀螺光路系统进行理论分析, 提出了基于动态温控的光纤陀螺控制方案, 通过试验验证了该方案的改进效果。光纤陀螺采用动态温度控制方案, 一方面能够降低高温工作时的功耗, 提高高温工作温度; 另一方面可以降低光纤陀螺标度因数由于温度波动而引起的变化。

关键词: 光纤陀螺; 高温工作; 动态温度控制; 标度因数

中图分类号: TN253

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0508004

Control scheme of high working temperature based on dynamic temperature control in FOG

WANG Gang, WAN Xun, CUI Zhichao, XIE Liangping

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The increase of working temperature of fiber-optic gyroscope (FOG) is mainly limited by the optical path system, which can be improved by optimizing the control scheme. Through the theoretical analysis of FOG optical system, the FOG control scheme based on dynamic temperature control was proposed. The improved effect of the was verified by experiments. On the one hand, the dynamic temperature control scheme of FOG can reduce the power consumption at high temperature and improve the high-temperature working temperature. On the other hand, it can reduce the change of FOG scale factor caused by the temperature fluctuations.

Key words: fiber-optic gyroscope; high temperature work; dynamic temperature control; scale factor

引言

光纤陀螺以其全固态、高可靠、长寿命的特点在导航、制导、控制、勘探、采掘等领域得到了广泛应用^[1-3]。随着光纤陀螺技术的不断突破^[4-10], 光纤陀螺产品应用范围的不断扩展和配套系统环境适应性要求的提升, 光纤陀螺工作温度范围要求也随之提高。光纤陀螺工作温度的提升主要受制于光路系统, 光源作为光路系统中的有源器件, 其高温工作时的可靠性和性能稳定是制约光纤陀螺工作温度提高的主要因素。

国内外学者针对光源的高温工作进行了大量研究, 研究重点包括: 结构优化(如密封)、器件改进(如提高热电控制器的效率)等, 这些研究在提

高光源工作温度方面起到了重要作用。然而光源高温工作还受到其他方面的影响, 包括光源的控制方案、光源在光纤陀螺中的散热环境等。本文研究了光纤陀螺光源控制方案, 通过优化控制方案提升了光纤陀螺工作温度。

1 光纤陀螺温度控制型光源工作特性

1.1 工作原理

光纤陀螺主要采用温度控制型超辐射发光二极管作为光源。温度控制型超辐射发光二极管具有输出光功率和波长稳定的优点, 其结构如图 1 所示。通过热敏电阻检测超辐射发光二极管管芯组件的温度, 利用制冷器(热电控制器 TEC)进行闭

收稿日期: 2022-11-29; 修回日期: 2023-04-12

作者简介: 王刚 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学陀螺技术研究。E-mail: wangg100@avic.com

环控制,使超辐射发光二极管管芯组件工作在恒定的温度下。图1中P表示电极。

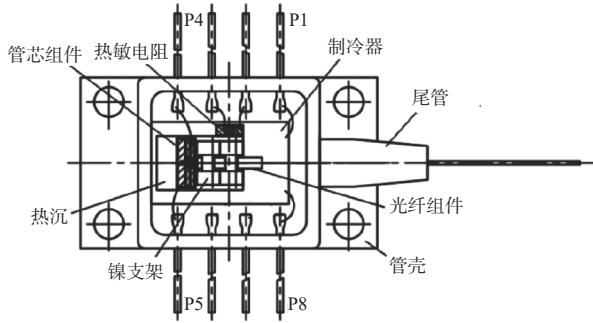


图1 温度控制型超辐射发光二极管产品结构图

Fig. 1 Structure diagram of temperature-controlled SLD

制冷器对超辐射发光二极管管芯组件的温度进行闭环控制时,一旦管芯温度大于或低于预设温度,制冷器产生电流,利用帕尔贴效应,对管芯组件致冷或者加热。但是,该方法在环境温度与预设温度之差超过制冷器容差极限^[11](通常为60℃)时,会导致温控系统失效。在工程应用中,通常将光纤陀螺中超辐射发光二极管管芯组件的预设温度设置为25℃,因此,光纤陀螺产品的高温工作温度通常不超过85℃。

1.2 光源输出平均波长和预设温度之间的关系

光源发光芯片发光波长 λ 可表达为

$$\lambda(T) = \frac{hc}{E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}} \quad (1)$$

式中: h 为常量; c 为光速; $E_g(0)$ 为温度0 K时禁带宽度; α 为温度系数; β 为常数; T 为光源发光芯片的温度。

通过式(1)可以计算出理想情况下光源的发光波长和预设温度间的关系,如图2所示。

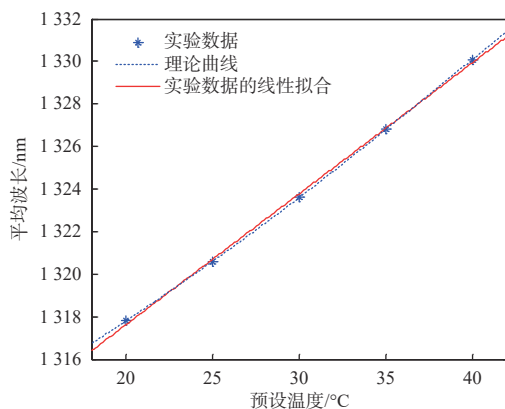


图2 输出光平均波长与预设温度

Fig. 2 Average wavelength versus preset temperature

使用某型光源,超辐射发光二极管恒流驱动电流为100 mA,设定不同的预设温度,测试超辐射发光二极管输出光的平均波长^[12]。

由图2可知,在一定的温度范围(20℃~40℃)内,光源输出光的平均波长随着预设温度的升高而变大,两者基本呈线性关系,可表达为

$$\lambda = aT_s + b \quad (2)$$

式中: λ 为平均波长; T_s 为预设温度; a 、 b 为拟合系数。

2 高温工作控制方案

2.1 控制方案

根据1.1节的分析,光纤陀螺的工作温度范围为 $[T_L, T_H]$,建立温度区间为 $[25^\circ\text{C} - T_b, 25^\circ\text{C} + T_b]$,设计基于动态温度控制的光纤陀螺高温工作控制方案:光纤陀螺环境温度 T_E 低于 T_L 时,设定预设温度 T_s 为 $25 - T_b$ (相对25℃偏低),光纤陀螺环境温度 T_E 高于 T_H 时,设定预设温度 T_s 为 $25 + T_b$ (相对25℃偏高);中间温度点的预设温度 T_s 按照式(3)进行设定:

$$\begin{cases} T_s = T_b + (T_E - T_L) \frac{T_i + T_b}{T_H - T_L}, & T_L \leq T_E \leq T_H \\ T_s = 25 + T_b, & T_E < T_L \\ T_s = 25 - T_b, & T_E > T_H \end{cases} \quad (3)$$

基于动态温度控制的光纤陀螺高温工作控制方案,降低了环境温度和预设温度之间的差值,可以提高光纤陀螺产品高温工作温度,降低高温、低温工作时用于温度控制的产品功耗。

2.2 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响分析

光纤陀螺标度因数 K 可表示^[13-14]为

$$K = H \frac{2\pi S}{\lambda c} \quad (4)$$

式中: H 为光纤陀螺增益系数; S 为光纤环包围的等效面积; λ 为平均波长; c 为光速。

对式(4)进行微分得到:

$$dK = H \frac{2\pi}{\lambda c} dS \quad (5)$$

$$dK = -H \frac{2\pi S}{\lambda^2 c} d\lambda \quad (6)$$

当光纤陀螺的环境温度升高时:

1) 光纤环包围的等效面积变大,由式(5)可知光纤陀螺标度因数增大,标度因数和光纤环包围等效面积成正相关关系;

2) 由式(3)可知预设温度升高,由式(1)可知光源输出光平均波长变大,由式(6)可知刻度系数

变小, 标度因数和光源输出光平均波长成负相关关系。

因此, 根据基于式(3)的基于动态温控的高温工作控制方案, 能够抵消光纤环等效包围面积随温度变化对标度因数的影响。

3 试验研究与分析

3.1 试验说明

试验样品: 某型单轴闭环光纤陀螺;

试验样品工作温度范围: $-45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$;

常规温度控制方案: 采用 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒定温度点进行温度控制;

动态温度控制方案: 按照 2.1 节的方法进行温度控制, 取 $T_{\text{H}} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{L}} = -45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{f}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{b}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

高温工作测试方法: 单轴闭环光纤陀螺放置在温箱内, 温箱设置为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率, 温箱升温时开始测试, 输出数据出现异常的大数后产品断电, 停止试验;

标度因数的测试方法: 将单轴闭环光纤陀螺通过工装固定在温箱内的转台上, 温箱温度到达设定温度并保温 2 h 后, 进行按照 GJB2426A-2004 的方法进行标度因数的测试^[15]。

3.2 高温工作

常规温控方案高温工作测试结果如图 3 所示。

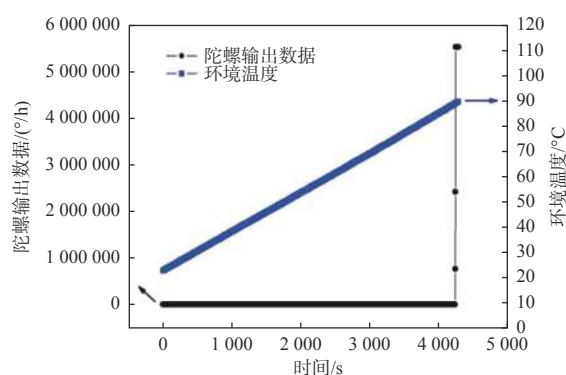


图 3 常规温控方案时升温条件下产品输出数据

Fig. 3 Output data of gyro under conventional temperature control at rising temperature

温箱温度为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 光纤陀螺功耗为 2.7 W 。

温箱温度为 $90.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 光纤陀螺输出数据出现异常大数, 检查产品输出故障信息为光源失控, 表明光纤陀螺到达了高温工作的温度极限。

动态温控方案的高温试验结果如图 4 所示。

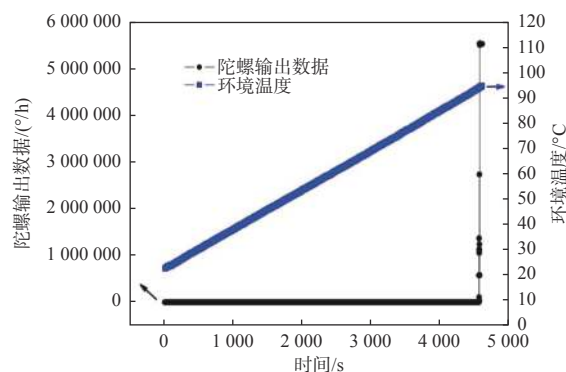


图 4 动态温控方案时升温条件下产品输出数据

Fig. 4 Output data of gyro under dynamic temperature control at rising temperature

温箱温度为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 光纤陀螺功耗为 2.4 W 。温箱温度为 $94.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 光纤陀螺输出数据出现异常大数, 检查产品输出故障信息为光源失控, 表明光纤陀螺到达了高温工作的温度极限。

3.3 标度因数

采用常规温控方案和动态温控方案, 分别测试同一只单轴闭环光纤陀螺在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 5 个温度点的标度因数, 产品的测试结果如图 5 所示。

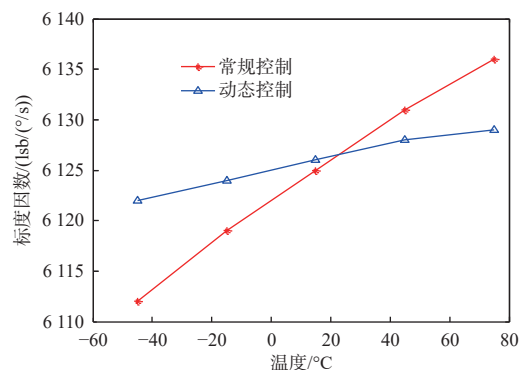


图 5 不同控制方案下标度因数随温度变化

Fig. 5 Scale factor varies with temperature under different control schemes

3.4 试验分析

对比试验的结果汇总如表 1 所示。

表 1 常规温控方案和动态温控方案试验结果对比

Table 1 Comparison of test results between conventional temperature control scheme and dynamic temperature control scheme

对比项目	高温 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 功耗/W	高温工作温度 耐受极值/ $^{\circ}\text{C}$	未经补偿时标度 因数变化量
常规温度控制	2.7	90.0	$3\ 919 \times 10^{-6}$
动态温度控制	2.4	94.8	$1\ 143 \times 10^{-6}$
改善	降低 0.3	提高 4.8	降低 71%

由表 1 可知,采用动态温控方案,光纤陀螺的工作温度高温极限相比常规的温控方案提高约 5 ℃,高温 75 ℃ 工作时产品的功耗降低了 0.3 W;光纤陀螺在动态温控方案下未经补偿标度因数随温度的最大变化量相比常规温控方案降低 71%。

4 结 论

本文研究了影响光纤陀螺工作温度提升的主要限制因素,提出了动态温度控制的方案。通过理论分析和试验研究证明光纤陀螺采用动态温度控制方案能够提高产品高温工作时的温度,降低产品高温工作时的功耗,还可以降低产品标度因数随温度的变化量,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] JIN J, HE J L, SONG N F, et al. A compact four-axis interferometric fiber optic gyroscope based on multiplexing for space application[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(23): 6655-6663.
- [2] HAN S L, LUO S L, LU J Z, et al. A unified modeling approach of stochastic error in fiber optic gyro and application in INS initial alignment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7241-7252.
- [3] ZAKIROV R, UMAROV A. Fiber optic gyroscope and accelerometer application in aircraft inertial system[C]//2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). Tashkent, Uzbekistan: IEEE, 2021: 1-3.
- [4] 梁霄, 魏天啸, 谢良平, 等. 闭环光纤陀螺精度性能提升方法研究[J]. *红外技术*, 2019, 41(9): 819-823.
LIANG Xiao, WEI Tianxiao, XIE Liangping, et al. Research on precision enhancement of closed-loop FOGs[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(9): 819-823.
- [5] 李彬, 谢良平, 刘卓, 等. 光纤陀螺启动过程标度因数补偿方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2018, 26(4): 495-498.
LI Bin, XIE Liangping, LIU Zhuo, et al. Compensation technique of scale factor during FOG start-up[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(4): 495-498.
- [6] 万洵, 谢良平. 光纤陀螺温度场仿真分析与陀螺外罩结构优化设计[J]. *应用光学*, 2016, 37(3): 353-358.
WAN Xun, XIE Liangping. Temperature field analysis and structure redesign of fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 353-358.
- [7] 周闻青, 费宇明, 洪桂杰, 等. 高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 220-227.
ZHOU Wenqing, FEI Yuming, HONG Guijie, et al. Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 220-227.
- [8] 王夏霄, 冯志芳, 秦祎, 等. 光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 163-168.
WANG Xiaoxiao, FENG Zhifang, QIN Yi, et al. Study on the axial magnetic field sensitivity in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 163-168.
- [9] KORKISHKO Y N, FEDOROV V A, PRILUTSKIY V E, et al. Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000[C]//2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). Karlsruhe, Germany: IEEE, 2017: 1-23.
- [10] LI H Z, LIN Y, LIU L, et al. Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18103.
- [11] 张文帅, 申利梅, 涂志龙, 等. 微型层式热电模块制冷特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(3): 526-532.
ZHANG Wenshuai, SHEN Limei, TU Zhilong, et al. Study on refrigeration characteristics of layered micro-thermoelectric module[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(3): 526-532.
- [12] 谢良平, 宫晓宇, 张春熹. 使用滤波器和探测器阵列的光纤陀螺光源平均波长漂移监测[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(6): 799-803.
XIE Liangping, GONG Xiaoyu, ZHANG Chunxi. Light source mean wavelength shift monitoring in fiber optic gyroscope with filter-detector array[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(6): 799-803.
- [13] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope [M]. 3rd ed. Norwood: Artech House, 2022: 23-24.
- [14] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 197-198.
ZHANG Guicai. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 197-198.
- [15] 国防科学技术工业委员会. 光纤陀螺仪测试方法: GJB 2426A-2004[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Test method for fiber optic gyroscope. GJB 2426A-2004[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2004.