

光纤环应力分布测试对光纤陀螺性能的影响

韩正英¹, 高 涵², 高业胜¹, 赵 耀¹

- (1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;
2. 中国计量学院 光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 通过对光纤环进行应力分布测试和筛选, 实现了改善光纤陀螺性能的目的。分析研究了由应力作用产生的光纤环非互易性对陀螺输出特性的影响, 采用光纤应力分析仪对光纤环进行应力测试和筛选。并将经过光纤环在线测试和热应力测试筛选后的光纤环组装成陀螺进行零偏实验。实验结果表明: 采用应力分析仪能够有效对光纤环进行应力测试和筛选, 经过筛选后组装的光纤陀螺精度有了明显改善, 全温范围内零偏稳定性可达 0.08 (°)/h。对后续高精度光纤陀螺研制有一定的借鉴意义。

关键词: 光纤环; 光纤陀螺; 光纤环应力分布测试; 零偏稳定性

中图分类号: V241.5; TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-4128-05

Effect of strain distribution measurement of fiber coil on FOG performance

Han Zhengying¹, Gao Han², Gao Yesheng¹, Zhao Yao¹

- (1. The 41th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China;
2. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the performance of the FOG, the suitable fiber coil were chosen through the fiber coil strain distribution measurement. In this article, the impact of fiber coil non-reciprocal on the gyro output which generated by strain were studied. Based on the analysis, the strain of fiber coil was tested and the appropriate samples for FOG were selected using the fiber strain analyzer to assemble and install the selected fiber coil for bias experiment. The results show that, strain tests are effectively carried out and the appropriate samples were selected using the strain analyzer. Performance of FOG has been significantly improved with the measurement and select of fiber coil strain distribution, bias stability over the full temperature range is up to 0.08 (°)/h, which has important guiding significance for the development of high precision FOG.

Key words: fiber coil; fiber optic gyroscope; strain distribution measurement of fiber coil; bias stability

收稿日期: 2014-04-07; 修订日期: 2014-05-18

作者简介: 韩正英(1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电子器件参数计量及光纤传感方面的研究。

Email: hanzhengying2003@163.com

0 引言

光纤环是光纤陀螺的敏感核心元件,其自身性能(温度特性、应力特性等)直接影响光纤陀螺的传感精度和性能。光纤环受自身结构、绕环工艺及固胶工艺的限制,当周围环境发生改变,会引起光纤内的应力分布的改变,造成光纤折射率的变化,最终给陀螺带来非互易性相差,降低陀螺精度。正是由于光纤环的应力特性影响甚至制约了光纤陀螺的精度,国内外光纤陀螺研制和生产厂家均对光纤环的性能进行测试筛选,并处于保密状态。就目前已公开的材料可知,在光纤环的生产测试中,对光纤环的应力分布进行测试筛选,在线评价其绕制质量可以在生产出成品陀螺前就有效地监测和控制光纤环的绕制质量,对于提高成品陀螺的精度和生产效率有着重要意义^[1-5]。

目前关于应力分布对光纤陀螺性能影响方面的文章不多,就现有的资料来分析,大多采用传统的 BOTDR 对光纤环的绕制张力进行分析,难以定性对光纤环的质量进行检测评估。为此,文中从分析光纤应力特性对陀螺性能影响出发,提出采用 BOTDA 光纤应力分析仪对光纤环的应力分布进行检测筛选。BOTDA 光纤应力分析仪具有空间分辨率和测试灵敏度高,测量长度(km 级别)满足光纤陀螺光纤环要求的特点,有效地实现了光纤环的在线检测、热应力检测和筛选。

1 理论分析

1.1 应力对光纤陀螺性能的影响

光纤是一种应力敏感的材料,应力的存在会造成光纤环偏振特性的降低。应力对光纤环性能的影响主要可分为两部分:外部应力(振动应力、热应力)及光纤自身应力(光纤爬升的扭转应力、弯曲应力等)。应力的作用会改变光纤内部结构的应力分布,引起光纤折射率的变化,导致光纤传输常数和强度发生改变,使光纤环的输出产生非互易相移,从而降低陀螺的整体精度。研究表明,光纤环在绕制过程和受外界环境影响引起的应力对光纤陀螺的相位误差可用公式(1)表示^[6-7]:

$$\Delta\phi_s(t) = \frac{\beta_0}{C_m} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon} + C_n \right) \int_0^{L/2} \varepsilon(z, t)(L-2z)dz \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon}$ 为有效折射率的应力系数; $\varepsilon(z, t)$ 为光纤环的应力分布变化率; $(L-2z)$ 为与位置有关的权因子; L 为光纤环的绕制长度; C 为光纤压缩系数。可以看出:应力分布的变化率越大,距离光纤中点越远,由应力所引起的相位误差就越大。因此,想要保证应力造成的非互易性相移非常小的话,必须要使得光纤环应力分布函数变化幅度不大,最好可以保证一个恒定的值。因此,在光纤环的前期筛选中,需要对光纤中点对称、光纤环应力分布均匀性进行测试和筛选。

1.2 光纤环应力分布测试技术

文中采用光纤应力分析仪(BOTDA)对光纤陀螺光纤环的应力分布进行测试和筛选,主要原理是基于光在光纤传输过程中的布里渊散射效应。光纤中的光学光子与光纤中声学声子发生非弹性碰撞,产生的布里渊散射频移 Δu_B 受热光效应和弹光效应调制,可描述为温度 T 和应变 ε 的函数。研究表明:布里渊频移与光纤的温度和应变成正比^[8-9],可表示成:

$$\Delta u_B = C_{11}\Delta T + C_{12}\Delta \varepsilon \quad (2)$$

因此,只要测得后向布里渊散射光的频移差,就可得到光纤某点处的应变。布里渊散射式光纤应力分析仪空间分辨率和测试灵敏度高,测量长度满足光纤陀螺光纤环要求,能有效实现光纤应力分布的在线检测、热应力检测等前期筛选。光纤环应力分布测试平台如图 1 所示,主要由光纤应力分析仪、高低温箱、计算机控制系统、配套光学器件及被测光纤环组成。光纤应力分析仪由 Neubrex 公司生产提供,基本功能是通过预泵浦技术激发光纤材质中光学声子,后向探测器探测受激布里渊散射谱线,进行光纤环的布里渊散射频率测试,完成光纤环的应力分布测试筛选。



图 1 基于 BOTDA 的光纤环应力分布测试平台

Fig.1 Strain distribution measurement platform of fiber coil based on BOTDA

2 光纤环的应力分布测试和筛选

在光纤环应力分布测试和筛选中,BOTDA 光纤

应力分析仪测试功能主要体现在两个方面:

(1) 对光纤环质量进行在线检测,避免绕环机绕环张力施加的不均匀。

(2) 对成环后光纤环的热应力性能进行测试,验证光纤环的温度性能。

2.1 光纤环在线检测

光纤环的绕制过程中需要确保绕制后环圈光学性能稳定,因此对光纤环固有缺陷的检测和绕制张力的在线检测是极其必要的。此外,光纤环采用特殊的绕制工艺来消除 shupe 效应,需要保证环圈在绕制过程中关于光程中点对称。因此光纤环的在线检测主要包括光纤环圈的绕制对称性检测、光纤环固有缺陷检测及绕制张力检测三个方面。

在保偏光纤环的绕制过程中,如何控制作用于保偏光纤上的外力是个难题,到目前为止还不能实现零张力情况下绕制保偏光纤环,所以在绕制过程中要控制作用于保偏光纤上的张力,一般不宜过大,应控制在适当的范围以内。光纤布里渊散射应力分析仪通过检测光纤环的应力分布来反映出绕制张力。如果施加应力不均匀,会出现应力尖峰的现象。也可以通过检测应力分布曲线的整体分布,反映光纤环关于光程中点对称分布情况及光纤固有缺陷的检测。以此设定合理的绕制张力及后期工艺改进。

如图 2 所示,通过分析绕环过程可知,这些尖峰主要出现在换层点处,但并不是所有的换层点处都有尖峰产生,产生尖峰的换向点处应力大小也不一

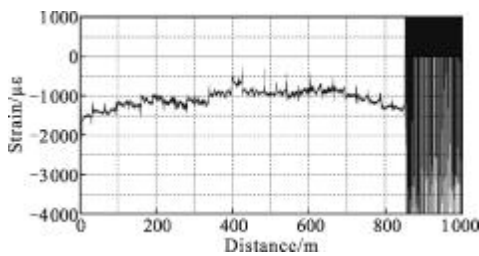


图 2 早期光纤环应力分布曲线上明显的换层尖峰

Fig.2 Apparent layer spike appearance of early fiber coil strain distribution

定相同。这些奇点产生的原因主要是在换向点保偏光纤有微弯产生,这些应力尖峰幅度大小有时还随着温度的不同,幅度大小出现不同变化,这使得光纤环的结构互易性变差,在陀螺上表现为陀螺零偏稳定性变大;另外在绕环过程中由于人为干扰因素较

大,出现较大尖峰也不排除人的因素。这些在换向时引入的应力尖峰,造成了保偏光纤环在结构上产生非互易性,从而对保偏光纤环的性能造成较大的影响,通过用陀螺实际验证会发现光纤陀螺零偏稳定性差。为此需要对绕环工艺进行控制,保证成环后光纤环应力分布均匀、无应力尖峰。

此外,光纤环的应力分布整体对称性较好(如图 2、图 3 所示),表明光纤环绕制过程中,光程中点控制良好。应力分布曲线末端有轻微上扬的趋势主要是泵浦光能量在传输过程中有所衰减,可以通过后期的理论补偿进行修正。通过光纤环在线检测,能够及时发现应力尖峰及换层现象,对光纤重新退绕。经过工艺改进,重新绕制并改善了绕制质量,如图 3 所示,已没有明显的应力尖峰现象。由图 2、图 3 可以看出,通过对光纤环在线检测,可以发现绕环过程中的固有缺陷,通过及时改进绕环工艺和张力控制,能够有效消除光纤环存在的换层和应力尖峰效应。

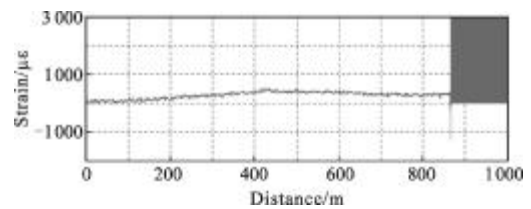


图 3 改进绕环工艺后的光纤环应力分布曲线

Fig.3 Strain distribution of fiber coil with improved circling process

2.2 光纤环的热应力检测

温度变化造成的热应力也会造成陀螺非互易性相差。光纤成环以后,由于胶层、光纤和骨架的物理特性差异,当温度变化时光纤之间会发生相互挤压或收缩,会造成光纤环乃至陀螺整体性能的下降。为了更好地模拟陀螺测试条件,项目组设计温度激励实验,对全温范围内的恒温点(-40℃、0℃、20℃、60℃)及变温过程中光纤环的应力分布进行测试。根据应力分布曲线的变化对整个光纤环热应力分布做出相应的测试评估。

理论分析表明:当环内温度上升时,胶层和光纤之间相对膨胀,物理意义上对光纤产生拉伸,反映在图中就是应力分布曲线整体抬升。当环内温度下降时,胶层和光纤之间相对收缩,导致光纤之间相对收缩拉紧,应力分布曲线整体下降。此外,由于温度梯度,光纤环圈外层最先感知温度的变化,里层也即光

学中心处是最后感知温度变化, 反映在应力分布曲线上就是当温度上升时, 两端的应变首先感知温度场的变化, 应力上扬, 整体应力分布呈现“V”字型。当温度下降时, 光纤环两端应力下滑, 整体应力分布曲线呈现“Λ”字型。这些由温度变化引起光纤环应力分布的不一致性将会给后期陀螺零偏补偿带来难度。因此, 在高精度光纤陀螺的研制过程中, 要求光纤环的热温度性能尽可能保持一致, 反映在应力上要求光纤环的应力分布随温度变化趋势一致。以图4为例经过工艺改进后绕制的光纤环的应力倒转现象已经得到消除, 仅在低温阶段光纤环应力分布还呈现“Λ”字型现象, 这表明该光纤环的低温性能还有待改善。

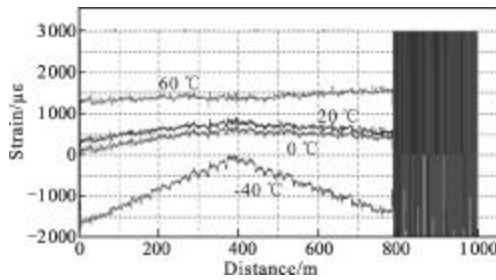


图 4 温度梯度变化下光纤环应力分布曲线

Fig.4 Strain distribution of fiber coil with different temperatures

此外, 光纤陀螺光纤环绕制中采用了特殊的四级对称绕法, 光纤环两端的应力分布理论上沿光学中点呈现对称性。因此在光纤环的热应力分布测试过程中, 既要分析温度变化造成应力分布曲线的变化, 也要分析不同温度点下应力分布曲线的对称性。以图4为例, 常温状态下光纤环的整体应力分布曲线整体对称, 互易性较好。随着温度的变化各换层间的应力变化较大, 但整体关于光学中点对称, 整个温度变化过程中光纤环的应力分布曲线整体对称, 说明光纤环的热应力性能较为良好。通过对光纤环的热应力分布测试, 能够对整个光纤环圈的温度性能进行测试评估, 也能对后续胶层的性能进行定性分析。

3 光纤陀螺的零偏实验

为了验证光纤环应力筛选的有效性, 将经过应力筛选后的某型号光纤环组装成光纤陀螺, 设计温度激励实验进行零偏测试。实验中, 将组装好的光纤陀螺放置于温箱内, 依据均匀设计法的相关原则^[10],

在陀螺内部选择温度采样点、粘贴热敏电阻传感器(探头 1、探头 2)。环境温度激励曲线如图 5 所示, 变温速率为 2 °C/min, 恒温稳定 2 h, 完整温度循环过程 8 h。测试不同环境温度激励下陀螺输出。热敏电阻传感器在陀螺内部示意图如图 6 所示。全温范围内(-40~60 °C)光纤陀螺的零偏实验结果如图 7 所示。

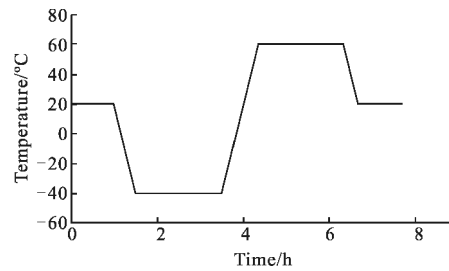


图 5 温箱温度激励曲线图

Fig.5 Temperature excitation graph of incubator

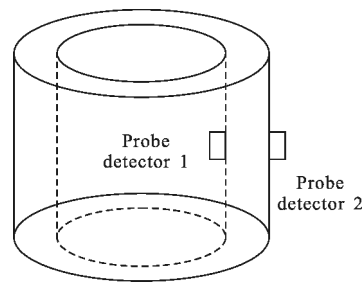


图 6 热敏电阻传感器在陀螺内部示意图

Fig.6 Paste thermistor sensor inside gyroscope

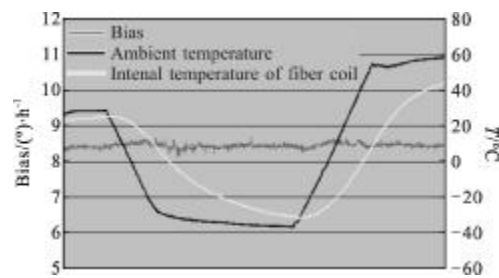


图 7 全温范围内某型号光纤陀螺零偏实验

Fig.7 Bias experiments of FOG with different temperatures

实验结果表明: 经过光纤环筛选组装的光纤陀螺, 其零偏特性有了显著的改善。整个温度循环过程中, 零偏稳定性较好, 没有较大的波动。恒温条件下的零偏稳定性甚至可达惯导级别, 全温范围内零偏稳定性也达到了 0.08 (°)/h。变温过程中, 零偏有细微的震荡现象, 主要是陀螺内部还处于热瞬态过程, 温度相关的热应力引起的非互易性相移造成零偏示值

震荡。零偏曲线存在些许毛刺现象表明光纤陀螺的温度性能仍有较大的改进空间,需要更深入的研究。

4 结 论

由应力作用产生的光纤环非互易性相移是研制高精度光纤陀螺所必须解决的难题,文章在分析了光纤应力对陀螺相位误差影响的基础上,采用光纤应力分析仪对影响光纤环质量和光纤陀螺精度的应力分布进行了测试和筛选。并将筛选后的光纤环组装陀螺实验,实验结果表明:经过光纤环筛选后组装的光纤陀螺精度有了明显改善,全温范围内的零偏稳定性可达 $0.08 (^{\circ})/h$,对后续高精度光纤陀螺的研制具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Yang Yuanhong, Yi Xiaosu, Meng Zhaokui, et al. Experimental study on strain distribution in fiber coil used in fiber optic gyroscope [J]. *Piezoelectric & Acousto-optics*, 2005, 27(2): 98-101. (in Chinese)
杨远洪, 伊小素, 孟照魁, 等. 光纤陀螺用光纤环的应力分布实验研究[J]. *压电与声光*, 2005, 27(2): 98-101.
- [2] Xiang Qiang, Wu Yanji, Xu Guanghai, et al. Application of BOTDR in the measurement of FOG sensing coil [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 260-262. (in Chinese)
向强, 吴衍记, 徐广海, 等. 应力分析仪在光纤陀螺传感环测量中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 260-262.
- [3] Yu Qiang, Zhang Chen, Li Xuyou, et al. Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber coil[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, 38(2): 1-5. (in Chinese)
于强, 张琛, 李绪友, 等. 固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 1-5.
- [4] Chen Yingli, Xie Liangping, Chen Ping, et al. Nonreciprocal effect and compensation technique of fiber coil in fiber optic gyroscopes [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(11): 3059-3063. (in Chinese)
陈迎丽, 谢良平, 陈平, 等. 光纤陀螺中光纤环非互易效应及其补偿技术[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(11): 3059-3063.
- [5] Zhu Hui, Cen Songyuan, Wang Dongyun, et al. Measurement and analysis about the strain of fiber optical loop[J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(4): 3-6. (in Chinese)
朱辉, 岑松原, 王冬云, 等. 光纤环的应力测试分析[J]. *光学仪器*, 2004, 26(4): 3-6.
- [6] Feng Wenshuai, Wang Xuefeng, Wang Wei, et al. Effect of turns' difference in each layer on temperature performance of fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(4): 487-493. (in Chinese)
冯文帅, 王学峰, 王巍, 等. 光纤环的每层匝数不同对光纤陀螺温度性能影响 [J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(4): 487-493.
- [7] Wang Wei, Xiang Zheng, Xing Hui, et al. Three-dimensional transient thermal modeling of FOG fiber coil [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(5): 605-610. (in Chinese)
王巍, 向政, 邢辉, 等. 光纤陀螺光纤敏感线圈三维温度瞬态响应模型[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(5): 605-610.
- [8] Ou Zhonghua. Research on the back brillouin scattering sensing technology in optical fiber [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009: 36-42. (in Chinese)
欧中华. 光纤中后向布里渊散射传感技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 36-42.
- [9] Zou L F, Bao X Y, et al. Effect of brillouin slow light on distributed brillouin fiber sensors [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(18): 1698-2700.
- [10] Meng Zhaokui, Cui Jiatao, Zhang Bo, et al. Experiment research of the high precision optical fiber gyroscope temperature[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 580-583. (in Chinese)
孟照魁, 崔佳涛, 章博, 等. 高精度光纤陀螺温度实验研究 [J]. *宇航学报*, 2007, 28(3): 580-583.