光纤环绕制过程中的张力分析

孟照魁 张春熹 杨远洪 续永刚

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083) (石家庄职业学院, 石家庄 050081)

摘 要: 结合实际绕制光纤环经验,从绕制方法——四极对称绕法和绕制过程中既是重点又是难点的张力控制角度阐述了对光纤环绕制的几点看法,这些看法是在实际工作经验中总结出来的,希望对提高光纤环绕制的质量有所帮助,并利用一种 BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)对保偏光纤环的应力分布进行了测试和分析. 测试和分析结果表明,BOTDR 可用作光纤和光纤环的应力分析和筛选. 研究、试验以及实际应用表明,绕环过程中张力控制是绕环质量的关键,精确控制作用于光纤上的外力在适当范围内.

关 键 词: 应力分析; 光纤陀螺; 四级结构; 张力控制; 光纤环

中图分类号: TN 06

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0307-04

Analysis of stress in winding fiber-optic ring

Meng Zhaokui Zhang Chunxi Yang Yuanhong

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Xu Yonggang

(Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Some opinions to coiling the optic fiber ring were expatiated from two facets that quadrupole symmetry winding method and stress control which was emphasis and nodus during winding. These views were concluded from the practical winding experiments, and it should be useful to improve the winding quality. The strain distributing in the polarization-maintaining-fiber was measured and analyzed by BOTDR(brillouin optical time domain reflectometer). It shows from the results of the measurement and analysis that BOTDR can be used to filtrate and analyze the optic fiber and optic fiber ring strain. It shows from the research, experiment and application, the stress control during winding a coil is the key fact, it should be remained in a proper range.

Key words: stress analysis; fiber-optic gyroscope; quaternary structure; tension control; fiber-optic ring

光纤陀螺 FOG(Fiber-Optic Gyroscope)[1] 诞生于 1976 年,是利用光纤传感技术测量空间惯性转动率的一种新型传感器,目前已发展成为惯性技术领域具有划时代特征的新型主流仪表. 它与通常使用的机械陀螺和近年来开发的激光陀螺相比,具有更高的精度,且成本低、体积小、重量轻. 光纤陀螺的应用前景十分广阔,在 21 世纪军民两用惯性设备中将占据重要地位. 它不仅用于飞机、船舶的导航,导弹制导,宇宙飞船的高精度位置控制,而且在民用上还可应用于高级轿车的导向,以及机器人和自动化控制系统等等. 为此,近年来,随着光纤技术的迅速发展,美、日、英、法、德等国家均在大力研究开发. 我国已将光纤陀螺列为惯性技术领域重点发展的关键技术之一,经过十年的攻关,已取得明显进展.

光纤环是光纤陀螺的传感核心,如何绕制高

收稿日期: 2003-09-18

作者简介: 孟照魁(1973-),男,山东单县人,博士生, mybuaa@buaa.edu.cn.

质量的光纤环,对光纤陀螺的研制十分重要. 光纤环的缠绕方法有多种[2], 四级对称绕法是国际通用的一种方法. 目前,国内光纤环的绕制大都采用人工绕制. 而四级对称光纤环的制造工艺复杂,制作周期长,人工绕制不能保证质量. 本文就是探讨设计绕制该类型光纤环的绕制系统的几个关键部分,以期实现光纤绕制的自动化.

四级绕纤即从一根光纤的中点开始绕起,分别向光纤的2个端点对称地缠绕光纤. 光纤具有弹性同时又很脆,极易折断. 光纤具有弹性意味着在绕纤过程中需要有一定的张力作用,即零张力的情况下绕纤非常困难;在绕纤过程中,如果一个线轴上的光纤受伤,则整个绕纤失败. 光纤的易碎性要求在绕纤过程中,不能仅仅控制光纤的张力,同时还要控制光纤与机械部位的接触面保证光纤不屈曲.

绕环的质量非常重要. 底层排纤出现一条缝隙可能造成上层光纤的排列混乱,最终导致对光纤屈曲的失控. 既然绕环如此重要,因此需要不停探索更高的绕环技术和绕环工艺. 光纤环绕制过程中,张力控制和排纤又是绕环质量的关键,在此主要对绕环过程中的张力控制进行分析.

1 四级绕环

1.1 方法简介

光纤环的绕制有很多方法,如两级绕法和单级绕法,但在绕制过程中都需要施加一定的张力,目前,就绕环时究竟施加多大张力为最佳,或每一种方法的具体控制算法,还没有一个较为理想的结论,但从试验中可以有个定性结论,即张力过大,环的最终测试结果肯定不理想. 因为影响光纤环的因素较多,譬如温度、振动等,采用不同的绕法可以对这些因素的影响降低到最小.

光纤环采用四级对称绕法与其它绕法相比有一个突出的优点,就是所有的外界干扰(如温度、声音、振动等影响)对称地发生于光纤中点的两边. 由于该绕法的完全对称,可以使这些干扰相互抵消,从而减少这些干扰因素对测量结果的影响. 图1为一个四级对称光纤陀螺线圈的剖面图. 这是最理想的四级对称陀螺线圈,光纤全部是理想的圆,排纤是理想的密排[3],但实际上这种情况在现实中是无法实现的,因为光纤的线径并不是理想的圆,一根光纤的直径也不是一成不变的,总是存在一个误差范围,大约为±10 μm. 图2是实际绕出的光纤环,从图2中可以看出,光纤并不是如图1所示的理想光纤环.

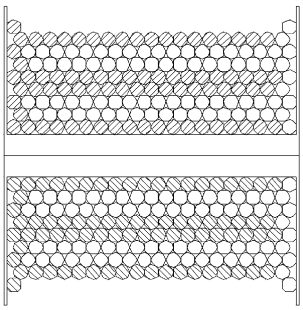

图1 理想四级对称光纤陀螺线圈

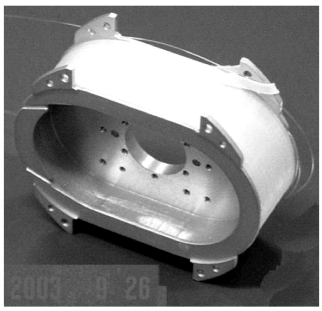

图2 实际光纤环照片

在绕纤时,每层绕纤的开始和结束都是关键,即在骨架的两端是绕纤的难点. 由于机械加工精度及其它因素,每层绕纤开始时光纤与骨架的内壁的对齐较困难;在每层的结束时,由于绕纤时光纤之间存有不确定的微缝隙,骨架的宽度不能满足一层的排纤做到光纤的整数倍,即在排纤结束一端剩余宽度可能小于光纤直径,这样就会造成两端的光纤高于其他部位的光纤,这为下层的排纤造成了困难.

1.2 应 用

四级绕法在实际应用中却常常被扭曲,认为只要是从给定长度的光纤的中点绕起向两端绕制即为四级绕法,但常常是预先确定所绕制光纤环的长度,这样一来,在给定光纤长度的情况下所绕制光纤环的层数就不是4的倍数了,而且2个端头都会余出不足层的现象.

基于四级绕法提出长度应与四级绕法的层数相结合. 从4(n-1)层到4n层间有3层,即第4n-1层、第4n-2层、第4n-3层,绕制预定长度的光纤环,经计算,如果所绕层数大于4n-2层,则绕制4n层,如果计算层数小于4n-2层,则绕4n-1层. 这样可能与预绕长度有一定长度的出入,但保证了四级绕法.

2 光纤环绕制过程中张力分析

2.1 实际绕环中的张力分析

在光纤环的绕制过程中,如何控制光纤上的张力是个难点,但又是非常重要的事情. 目前还不

能实现零张力情况下绕制光纤环,由于光纤及光纤环的特性及绕制过程中作用于光纤上外力不宜过大[4],一般应控制在适当的范围以内,实验中曾绕制过试验光纤环,作用于光纤上的外力为远大于上述适当范围,然后进行了测试,结果极不理想,偏振串音为 11 dB,远远低于给定值;之后,将光纤环完全放松,再进行测试,结果偏振串音为 30 dB. 这就是说,作用于光纤上的外力过大,会严重影响光纤环的性能. 大量实验证明,作用于光纤上的外力是影响成环后性能的重要因素. 另外,光纤环还有其他形状,譬如类跑道型,这种光纤环由于绕纤半径是变化的,这就对光纤环的绕制提出了更高的要求,尤其是对作用于光纤上的张力的控制,将更加困难,目前对该类光纤环的绕制研究还只是处于初研阶段.

绕环过程中将张力控制在适当范围内,这是光纤本身和光纤环自身的性能要求,并经过大量的试验绕环所得结论. 就光纤本身而言,特别是保偏光纤,在拉制过程中就已经将应力加了进去,因此,再对光纤进行附加操作如绕制光纤环时,须力求不再对其增加额外应力或破坏已有应力状态,这样就要求小张力控制下绕环. 另外,光纤环是很敏感的光学器件,绕制过程操作状态或在后期的操作过程中存有不当动作,都有可能对最终的结果有影响.

在此所用的绕环机张力控制采用的是通过传感器控制供纤轴转速达到控制张力的目的,经过实际绕环所测得的数据来看,这种张力控制装置虽然还存在有一定的问题,但已基本可以满足生产的需要. 其原理也很简单,就是传感器实时感测作用于光纤上的外力,并将信号实时传输给供纤轴,根据作用于光纤上的外力实时调整供纤轴的供纤速率.

2.2　AQ8603 型 BOTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)

1) 基本原理

受激布里渊散射是一种能在光纤中发生的非线性过程,它在光纤中的作用可经典地描述为泵浦波、斯托可斯波和声波之间的参量互作用. 泵浦波通过电致伸缩产生声波,然后引起折射率的周期性调制. 泵浦引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射泵浦光,由于多谱勒位移与以声速 v_A(在光纤中典型值为 6 km/s)移动的光栅有关,散射光产生了频率下移. 在光纤中,其后向散射光相对入射光的频移 v_B 为

$$v_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2nv_A}{\lambda_p} \tag{1}$$

其中,n 为光纤的等效折射率;λ_p 入射(泵浦)光波长;v_B 与光纤的应变(应变为光纤长度的相对变化,定义为 $\varepsilon = \Delta L/L$,L 为光纤长度,ΔL 为长度变化,其单位有% 和 $\mu\varepsilon$ 2 种,1 $\mu\varepsilon$ = 0.000 1%)和温度成正比例,可用下式表示

$$v_B(x) = v_B(0)(1 + C \cdot x) \tag{2}$$

其中,$v_B(0)$ 为没有应变或常温下的布里渊频移;C 为频移的应变系数(493 MHz/%)或温度系数(1 MHz/℃);x 为应变 ε 或温度 T.

(2)式表明:测出不同应变或温度下的频移便可计算出相应的应变和温度值. 当将连续的光源改为脉冲光源后,利用与光时域反射计(OTDR)相同的技术,便可实现应变和温度的分布测量.

AQ8603 是日本 ANDO 公司生产的光纤应力分析仪. 它结合了布里渊散射技术和 OTDR 技术,实现了光纤的分布应力测量. 其系统框图如图 3 所示. 分布反馈激光器发出的光经调制和放大后形成大功率脉冲光源,注入被测光纤中,产生后向布里渊散射光,散射光的频移由光纤中各点的应变确定,经过分光镜 $B_1 \sim B_4$ 的作用,输入光与散射光相拍,再经探测器、频率转换器变成可处理的电信号,经处理得到光纤中的应力分布. 当频移是由温度引起时,得到的是沿光纤的温度分布. 在进行应力测量时,其性能指标如表 1 所示. 在进行温

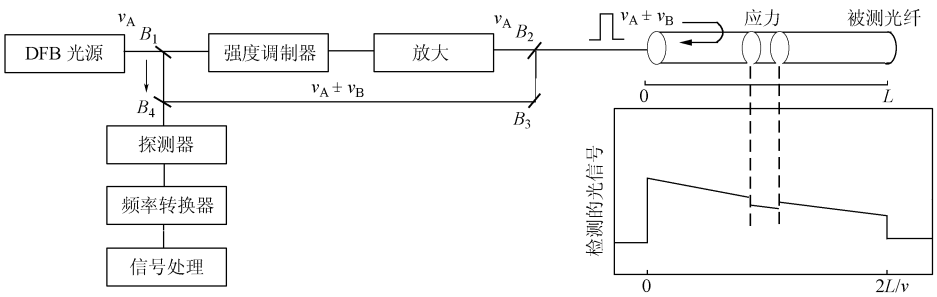

图 3　BOTDR 框图

度测量时,其温度不确定性为 0.002%/℃.

表 1 AQ8603 性能指标

性能指标	测试距离/km	脉宽/10^{-9}s	动态范围/dB		长度分辨率/m	应变测试精度	应变测试重复性/%
			±0.004%2σ	±0.003%2σ			
数值	1,2,5, 10,20, 40,80	10	2		1	±0.004%(2σ) (±0.01%)	<0.04
		20	6		2		<0.02
		50	10	8	5	±0.003%(2σ) (±0.005%)	
		100	13	11	11		
		200	15	13	22		

2) 绕环分析

应用这种张力控制装置进行了实验绕环,并利用 AQ8603-OTDR 光纤应变分析仪对绕制的环进行了测试,测试结果如图 4 所示.

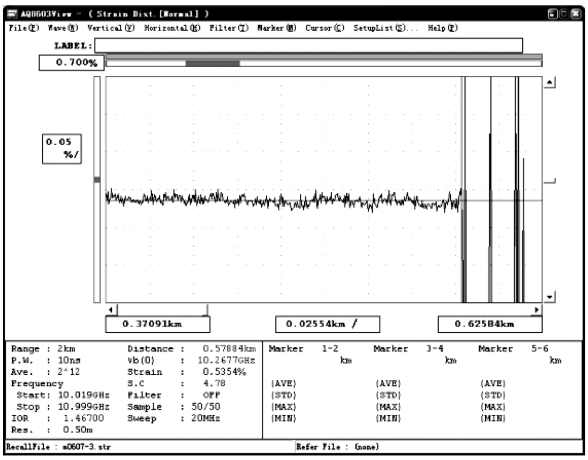

图 4 光纤成环前的应力分布

光纤在成环前和成环后的特性变化是非常重要的,它直接反映了绕环过程是否导致光纤的性能下降. 图 4 为一根光纤在成环前的应力分布的情况,比较均匀;图 5 为该光纤成环后的应力分布,明显存在关于光纤中点对称的应力奇点. 这些奇点与绕制过程中的两组换向点相对应. 但是并不是所有的换向点处都有奇点产生,产生奇点处的换向点处的应力大小也不相同. 分析这些奇点产生的原因,主要是在换向点光纤有微弯产生,如果对微弯处理不好,则会产生奇点. 另外在绕环过程中由于人的干扰因素较大,出现较大奇点也不排除人的因素.

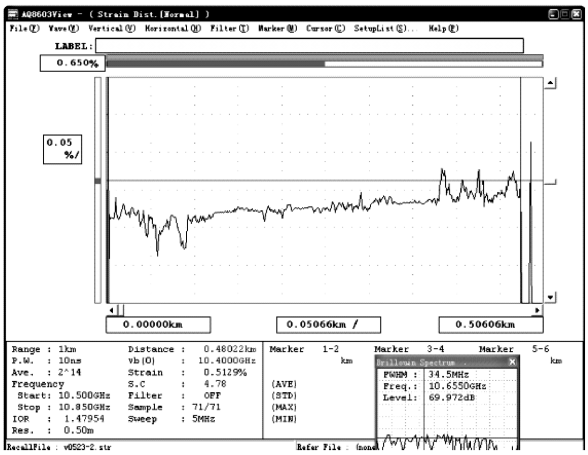

图 5 光纤成环后的应力分布

这些在换向时引入的应力奇点,对光纤环的性能会有较大的影响,随后的损耗和偏振串音测试都表明光纤环的性能有较明显的下降. 另外,其损耗测试曲线还能独立地反映绕环引入的损耗奇点,这 2 个曲线能全面地反映绕环的质量.

3 结束语

研究、试验以及实际应用表明,光纤环在光纤陀螺的光路中是一个重要的光学器件,其性能直接影响着光纤陀螺的精度,因此,光纤环的绕制是非常重要的一个工艺环节. 绕环过程中张力控制是绕环质量的关键,精确控制作用于光纤上的外力在适当范围内. 另外,应增加绕环的自动化,尽量降低人的不确定因素对绕环的干扰.

参考文献 (**References**)

[1] Hervé C Lefèvre. 光纤陀螺仪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
Hervé C Lefèvre. The fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defence Press, 2002(in Chinese)

[2] Andre Sharon, Stephen Lin. Development of an automated fiber optic winding machinefor gyroscope production[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001,17:223~231

[3] 张万成. 四级对称光纤陀螺线圈复绕机及电控设计[J]. 光纤光缆传输技术,1999,3:40~43
Zhang Wancheng. The fiber-optic gyroscope coiling winder with quaternary symmetry and the electrical control design[J]. Journal of Fiber-Optic and Optical Fiber Cable Transmission Technique,1999,3:40~43(in Chinese)

[4] Thomas L Fazio, Kendall L Belsley. Development issues for automating quadrupole-pattern optical-fiber coil-winding for fiber gyro manufacture[J]. IEEE, 1994:202~207