DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2005.12.012
2005年 12月 北京航空航天大学学报 December 2005
第31卷 第12期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.31 No.12

基于光纤陀螺的保偏光纤热致双折射

李 [illegible] 林 恒 杜新政

（北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100083）

摘 要：针对光纤陀螺在温度变化条件下的性能恶化问题，理论上分析了保偏光纤的热致双折射引起的偏振耦合是局限光纤陀螺精度的主要因素.采用有限元法计算光纤线圈在不同温度下的应力分布，并根据高低温不同的应力状态分别推导了双折射的变化情况.在光纤陀螺工作温度范围内，选取6个典型温度点计算光纤环上热应力和消光比的变化，结果显示，干扰双折射随温度变化的减小而减小，并将理论计算结果用测试消光比的试验验证.研究表明，双涂敷层光纤、胶粘剂、陀螺金属骨架材料的热力学性能的差异，导致光纤线圈在不同温度下折射率改变.在60℃时，光纤折射率差约为1×10^{-4}，与光纤本征折射率差5.5×10^{-4}达到同一个量级，这将严重影响光纤保偏性能及陀螺精度.

关 键 词：陀螺；光纤；双折射；热应力；有限元

中图分类号：V 241.558

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2005)12-1322-05

Thermally-induced birefringence of polarization optical fiber on gyro

Li Jing Lin Heng Du Xinzheng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the performance labefaction problem of fiber-optic gyroscope (FOG) when its temperature changed, modes coupling caused by thermally-induced refractive index of highly birefringent optical fiber was analyzed to be the main reason of limitting the precision of gyro in theory. Finite element method was used to calculate stress distributing. Based on the stress state of high or low temperature, the variational instance of birefringence was conjectured respectively. Six typical temperature points were selected as work condition to calculate thermal stress. The result shows that thermal-induced birefringence variations reduces accordingly based on different temperature, tallying the experimentation well from the extinction ratio. The result indicates double-coated optical fiber loop changes its birefringence at temperature range , for the expanding coefficient of fiber dismatching that of the framework and glue. Thermally-induced birefringence is 1×10^{-4} at 60℃, the same order with its own birefringence of 5.5×10^{-4}, and it deteriorates the polarization in optical fiber and decrease gyro precision furthermore.

Key words: gyroscopes; optical fiber; birefringence; thermal stress; finite element method

光纤陀螺是70年代后期发展起来的以Sagnac效应为理论基础的全固态陀螺仪，光纤环是光纤陀螺的主要敏感元件，它是根据不同精度要求选用几百米到上千米的光纤绕置在直径5～10 cm的圆柱型骨架上.由于光纤很长，容易受到外界各种干扰因素的影响，如时变温度场、时变应变等，这些干扰在光纤长度上积分的效果会对光纤环产生相位调制，产生非互易性相移[1].尤其在实际应用中，光纤陀螺工作在－40～60℃的温度范围内，这种非互易性相移就成为影响光纤陀螺漂移的主要因素之一.本文从理论上和试验上验证了在不同稳态温度条件下热应变对双折射的影响，并为进一步分析温度变化对陀螺零偏的影响创造条件.

收稿日期：2004-09-27

作者简介：李 [illegible]（1980－），女，江苏南京人，硕士生，eviltwin@chinaren.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　基本原理

高、中精度光纤陀螺常用保偏光纤为敏感元件,但截止目前对保偏光纤温度特性缺乏系统理论的研究,尤其是作为保偏光纤陀螺温度特性研究基础的光纤环内温度场定量分析还很缺乏,使温度问题成为阻碍光纤陀螺工程化的难点之一.

按光纤截面应力区形状,普遍使用的有熊猫光纤、领结光纤、椭圆包层光纤等.以图 1 熊猫光纤为例,受应力棒影响,光纤在两正交方向产生应力差,根据弹光原理,单模光纤原本简并的模式在快慢轴方向的传播常数会产生差异,从而导致应力双折射.同样,光纤两正交方向的干扰应力也会导致双折射和相位的变化.本文讨论模型所用光纤为涂敷层外径 $\phi 250\ \mu m$ 的熊猫光纤.光纤模型结构和尺寸如图 1 所示.绕制在金属骨架上的光纤,通过胶粘剂封装,截面结构见图 2.

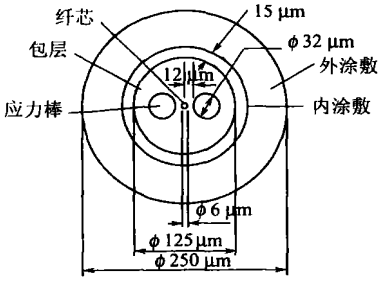


图 1　熊猫光纤结构图

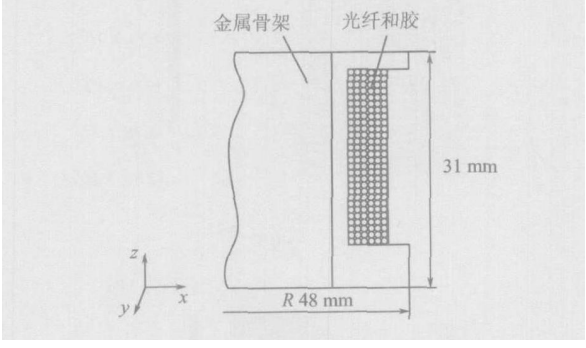


图 2　光纤环截面示意图

骨架、胶粘剂和光纤的热学性能不匹配,使光纤在温度变化时受到来自骨架和胶的 x,y,z 3 个方向的热应力,从而导致光纤双折射变化.陀螺工作温度为−40～60℃,在高温和低温下,影响光纤折射率的因素不完全一样,以图 3 中光纤弯曲为理想状态,下面分别以−40℃和 60℃为例计算:

1) 60℃时,这 3 个方向的应力导致双折射的变化可以从 2 个方面考虑:

① 光纤缠绕时由纯弯曲引起内应力(绕光纤时施加的拉力极小,可以忽略不记)以及 z 方向的应力.

由弹性理论可知,沿轴向的应力为 $\sigma_y = Ex/R$, E 和 R 分别是光纤弹性模量和半径.光纤外层会施加沿半径方向的 σ_y 应力给内层光纤,这种应力在光纤轴上达到最大[2].σ_y 并没有直接产生双折射,它是通过 $\sigma_x(x)$起作用的.由推导可知,x 方向的应力 $\sigma_x(x)$[2] 为

$$\sigma_x(x) = (x^2 - r^2)/(ER^2) \tag{1}$$

式中,r 是包层半径,并取 $\sigma_x = \sigma_x(0)$,此应力改变了光纤的折射率 n.

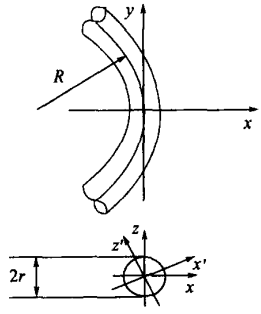


图 3　光纤弯曲

由光弹性理论可知光纤受到应力作用时,其各个方向的折射率变化可表示为

$$\Delta n_i = -(n^3/2)\sum p_{ij}\varepsilon_j \tag{2}$$

式中,p_{ij}是弹光系数;ε_j 是应变分量,根据弹性理论有:$\varepsilon_x - \varepsilon_z = (\sigma_x - \sigma_z)(1+v)/E$, ν 为纤芯的泊松比.将轴向热应力 σ_z 带入式(2),得到 xz 方向上:

$$\Delta n_x = \frac{n^3}{4}\left[(p_{11} - 2\nu p_{12})\frac{r^2}{R^2} + (\nu p_{11} + \nu p_{12} - p_{12})\frac{2\sigma_z}{E}\right] \tag{3}$$

$$\Delta n_z = \frac{n^3}{4}\left[(p_{12} - \nu p_{11} - \nu p_{12})\frac{r^2}{R^2} + (2\nu p_{12} - p_{11})\frac{2\sigma_z}{E}\right] \tag{4}$$

由式(3)、式(4)得到光纤折射率差变化:

$$\Delta n_1 = (n + \Delta n_x) - (n + \Delta n_z) = \frac{n^3}{4}\left[(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{2\sigma_z}{E}\right)\right] \tag{5}$$

② x,y 方向的应力的作用.

骨架热膨胀对光纤环施加了正 x 方向的力,则光纤中会产生张力 σ_x 和 σ_y,这种张力引起的二级应力效应会产生附加双折射,它与光纤轴向应

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变成正比.考虑到应变中还有温度变化引起的热膨胀,减去此项应变,其表达式:

$$\Delta n_2 = \frac{n^3}{2}(p_{12}-p_{11})\frac{(1+\nu)(2-3\nu)}{1-\nu}\cdot \frac{r}{R}(\varepsilon_y-\alpha_l\Delta T) \tag{6}$$

对于石英光纤纤芯膨胀系数 $\alpha=5.5\times10^{-7}$, $n=1.46$, $p_{11}=0.121$, $p_{12}=0.27$, $r=62.5\ \mu m$, $\Delta T=40℃$时,代入式(4)、式(5)并叠加得到:

$$\Delta n_0 = \frac{5.2\times10^{-10}}{R^2}-3.77\times10^{-12}\sigma_z+2.1\times10^{-5}\frac{(\varepsilon_y-1.38\times10^{-4}R)}{R} \tag{7}$$

由式(7)第1项可以看出,绕制光纤时纯弯曲引入的折射率差变化 Δn 与曲率的平方成正比,而与温度带来的变化无关,那么在只考虑温度影响的前提下可以省略第1项:

$$\Delta n = -3.77\times10^{-12}\sigma_z+2.1\times10^{-5}\cdot\frac{\varepsilon_y-1.38\times10^{-4}R}{R} \tag{8}$$

2) −40℃时,由于光纤的热膨胀系数远小于骨架和胶的,不会对光纤产生拉伸,而是会在光纤涂敷层内产生微弯.假设光纤结构理想对称,模式耦合对相位的影响很小[3],则只考虑 xz 截面上的应力差,Δn 为

$$\Delta n = 3.77\times10^{-12}(\sigma_x-\sigma_z) \tag{9}$$

2 仿真设计

双涂敷层光纤在温度变化的情况下,即使不考虑外界其他因素的影响,光纤本身各组成成分之间由于热膨胀系数不匹配也有热应力的作用,利用有限元分析软件 NASTRAN 仿真−40℃时无外力作用于光纤时,纤芯的两方向正应力差在 10^4Pa 量级,对应的 Δn 约为 10^{-7},因此相对于光纤 $\Delta n=5.5\times10^{-4}$ 来说可以忽略不计.因此可将折射率的变化视为与双涂敷光纤结构无关,而完全由骨架和胶粘剂与光纤之间热应力作用引起.将包层及其内应力棒和纤芯看作为一个整体,并引入若干修正系数,把双涂敷层光纤受到的应力折算到纤芯上,建模所需参数由式(10)给出[4]:

$$\left.\begin{aligned} E &= \sum_i E_iA_i \Big\backslash A_i \\ \nu &= \nu_3-\frac{2(\nu_3-\nu_2)(1-\nu_3^2)E_2\xi}{E_3(1-\xi)r_2+[r_2\xi+(1+\nu_3)]E_2} \\ \alpha &= \left(\sum_i \alpha_iE_iA_i\right)\Big\backslash\left(\sum_i E_iA_i\right) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

其中 $r_i=1-\nu_i-2\nu_i^2$ $\xi=\dfrac{A_i}{\sum_i A_i}$

式中,E_i, ν_i, α_i, A_i 分别表示图1所示的光纤各组成成分的弹性模量、泊松比、膨胀系数和截面面积.

考虑到陀螺骨架的对称性,取1/4骨架作为建模3D实体.求解模型在−40℃下的应力状况,结果如图4所示.

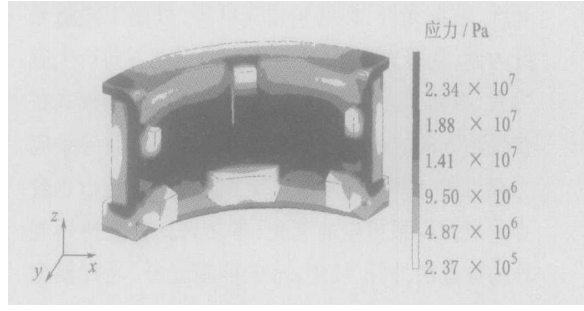
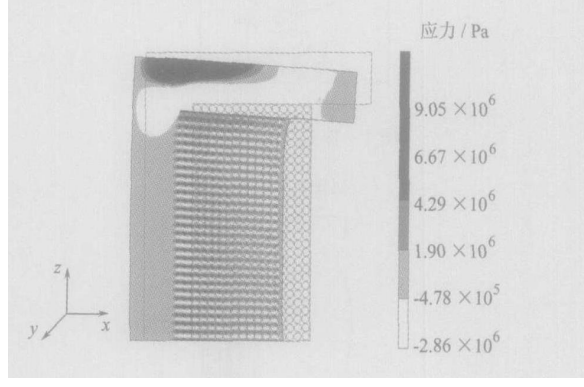
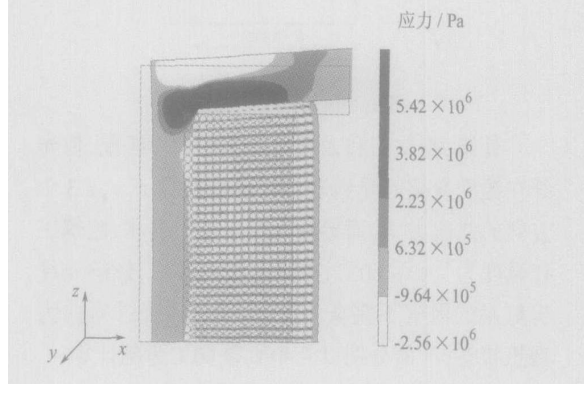


图4 1/4骨架和光纤环体3D模型

可以看出:光纤环体所受应力关于轴线中心对称,因此简化为2D模型(图5)可以大大减少计算量.模型简化后引入修正系数为0.88,这主要包括简化3D结构模型及3D到2D轴对称模型转换引入的误差.



a −40℃



b 60℃

图5 光纤环 x 方向应力分布

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以 x 方向为例,2D 模型在 $-40℃$ 和 $60℃$ 时所受应力及变形情况如图 5 所示.光纤环在 $60℃$ 和 $-40℃$ 时 Δn 利用式(7)和式(8)以及修正系数可求得.如图 2 示,以原点为零点,x,z 轴为正方向,在光纤环 28×15 匝光纤的矩形截面上选取第 2,14,26 行(径向)和 2,8,14 列(轴向)作图观察双折射的分布状况,见图 6.

由图 6 的仿真可以看出,在光纤陀螺工作温度范围内,热应力改变了光纤的折射率,Δn 约为 1×10^{-4},与光纤本征折射率差 5.5×10^{-4} 达到同一个量级.在光纤环截面上折射率呈一定规律分布:在轴向方向上,每一列光纤 Δn 基本相同,边界上光纤层受金属骨架作用而有较大差异;在径向上,Δn 变化随半径为一线性函数.光纤传光过程中 Δn 变化带来的光程差在整段光纤长度上积分将导致热致非互易性相位误差[5]:

$$\Delta\phi_s(t)=\beta_0\left(\frac{\partial n}{\partial\sigma}+Cn\right)\cdot\int_0^L\frac{\delta\sigma(z,t)}{\delta z}(2z-L)\mathrm{d}z=\beta_0\left(1+\frac{n}{E}\cdot\frac{\partial\sigma}{\partial n}\right)\int_0^L\frac{\delta n(z,t)}{\delta z}(2z-L)\mathrm{d}z \quad (11)$$

式中,$C=1/E$ 是光纤压缩系数;$\partial n/\partial\sigma$ 光纤折射率应力变化率;$\sigma(z,t)$ 是应力分布函数.光纤环截面上折射率分布的规律性使该相位误差计算可以以层为单位而大大简化.

当热致双折射和光纤固有双折射的方向不一致时,光在两偏振模式 P_V 和 P_H 之间耦合;当热致双折射和固有双折射相互垂直时,即 $2\phi_k=\pi/2$ 时,耦合最强,两偏振模式间的关系[6]:

$$\frac{P_V}{P_V+P_H}=\frac{(\beta_k\sin2\phi_k)^2}{\beta_t^2}\sin^2(\beta_t l/2) \quad (12)$$

$$\beta_t^2=(\beta+\beta_k\cos2\phi_k)^2+(\beta_k\sin2\phi_k)^2 \quad (13)$$

式中,β,β_k 和 ϕ_k 分别是固有双折射、热致双折射以及两者夹角,其中 $\beta_k=2\pi\cdot\Delta n/\lambda$,$\lambda$ 是光波长,保守估计,当 $\phi_k=\pi/4$ 时,取光纤截面上各光纤干扰双折射的均方根其中 i 表示光纤层数:

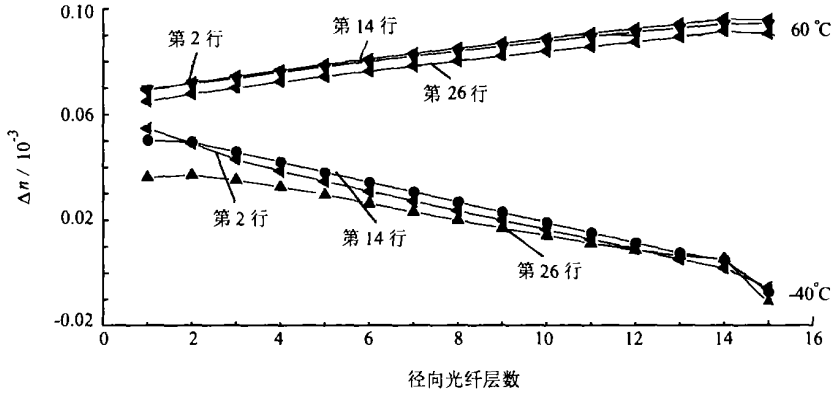
$$\beta_v=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\beta_{ki}^2}\Big/n \quad (14)$$

用 β_v 代替式(12),式(13)中的 β_k,消光比 ε 与两偏振模的关系如下[7]:

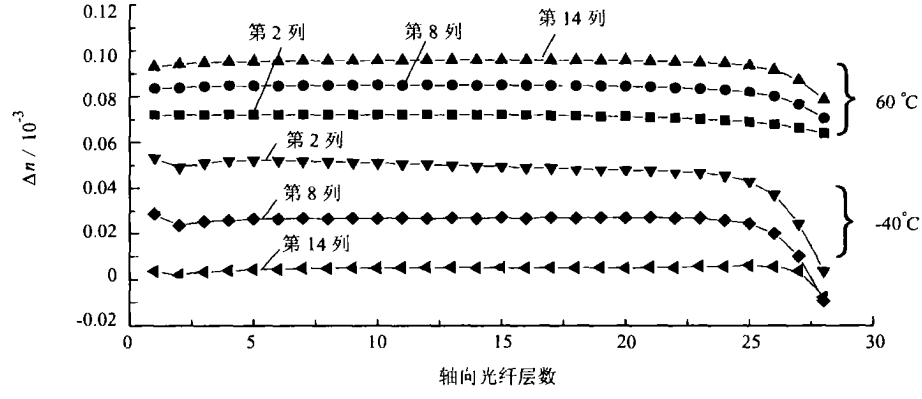
$$\varepsilon=-10\log(P_V/P_H) \quad (15)$$

式(10)~式(14)联立得到 Δn 与 ε 的关系.

取 5 只光纤线圈标号 920~924 测试 ε,选取 6 个典型温度时的 ε 与仿真结果比较见图 7.



a　光纤环径向上的 Δn 分布



b　光纤环轴向上的 Δn 分布

图 6　光纤环截面上 Δn 分布

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

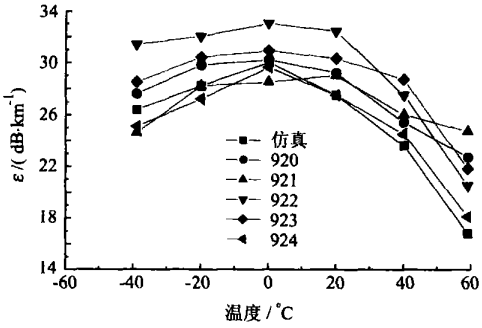


图7 ε变化与温度的关系

光纤环在高温下受到金属骨架热膨胀产生的二级应力作用，此应力是高温时 Δn 变化主要原因，直观上体现为 ε 随温度增加而迅速恶化.因此在高温下，热致双折射引起的模式耦合是相位噪声的重要误差源，陀螺输出也更容易出现奇点.

3 结 论

光纤环对温度很敏感，作用于环上的轻微扰动就能带来折射率变化，从而引起相位误差.在陀螺工作温度范围内，计算光纤线圈折射率变化并得到以下结论：

1) 光纤和骨架、胶粘剂热膨胀系数的差异带来的双折射很大，在温度变化的时候，这种热应力诱导的双折射是陀螺相位误差的主要原因之一；

2) 一般情况下，对温度和应力引起的 Shupe 误差的分析常常简化为以层为单位，只考虑径向温度梯度的影响，而事实上由于骨架结构的关系，在光纤环边界处，轴向也有温度梯度和应力梯度，轴向热致应力分布对相位误差影响很大.

3) 在高温时，光纤受到的热应力主要来自骨架热膨胀时径向拉伸在光纤中产生的二级应力，使消光比恶化更多，陀螺输出更容易出现奇点.

通过以上分析，热应力的产生对光纤双折射、相位误差有很大影响，并最终导致陀螺精度降低.通过改善骨架结构和材料、选取对温度不敏感的光纤以及采取退火特殊处理方法等手段来降低纤芯应力，减少相位误差是很有必要的.

参考文献（References）

[1] Lefevre H C.光纤陀螺仪[M].张桂才，王 巍译.北京：国防工业出版社，2002
Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Translated by Zhang Guicai, Wang Wei. Beijing: National Defence Industry Press, 2002(in Chinese)

[2] 阮迎澜，向 清，黄德修.单模光纤应力诱导双折射及其测试研究[J].中国激光，1996，23(10)：256～260
Ruan Yinglan, Xiang Qing, Huang Dexiu. Bending-induced birefringence in single-mode fiber and its messurement[J]. Chinese Journal of Laser, 1996, 23(10): 256～260(in Chinese)

[3] Katsunari, Okamoto, Yutaka, *et al*. Mode coupling in stress-applied single polarization fibers[J]. IEEE Journal of Electronics, 1982, 18(11): 356～362

[4] Danny Wong. Effect of fiber coating on temperature sensitivity in polarimetric sensors[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(6): 842～846

[5] Olivier F J, Terat J M, Euverte F M. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro[J]. SPIE, 1996, 2837(11): 231～237

[6] Rashleigh S. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(2): 312～331

[7] Ruffin P B. Temperature effect on the performance of polarization-maintaining fibers[J]. Optical Engineering, 1993, 32(3): 476～480

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net