

文章编号: 0253-2239(2003)05-0552-04

# 交叉子光纤环的理论及实验研究\*

毛彩虹 胡慧珠 刘 承 杨国光

(浙江大学现代光学仪器重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 光纤环是光纤陀螺中的核心部件。光纤环所处的环境因素,如温度、应力引起的非互易性相位噪声,制约了光纤陀螺向高精度、实用化的发展。通过有限差分法,对光纤环的 Shupe 效应作了研究,对四极子光纤环在非稳态传热的过程中的温度场进行数值求解,分析了光纤环在试验提供的温度环境下的温度零漂。提出了光纤环交叉子绕制方案。

**关键词:** 光纤光学;有限差分法;光纤陀螺;温度场;交叉子绕线

中图分类号: TN965 文献标识码: A

## 1 引 言

光纤陀螺具有结构简单、无运动部件、启动快、寿命长、体积小、重量轻、耐冲击、抗电磁干扰、无加速度引起的漂移、精度高、动态范围大、成本低等优越的性能,是航天、航空、航海等各种民用和工业领域中的应用发展方向。对导航来说,漂移是个基本参量,在速率积分陀螺中,要对旋转速率信号进行积分得到载体的旋转角度,这个积分过程产生对白噪声的平均,导致长期项中以漂移效应为主,由于光纤折射率、光波长对温度很敏感,温度漂移成为光纤陀螺工程化面临的必须解决的难题之一。光纤环产生的温度漂移尤其引起大家关注<sup>[1]</sup>。

Shupe<sup>[2]</sup>在 1980 年撰文指出,光纤萨尼亚克效应干涉仪中,与时间有关的光纤环上的温度变化引起的非互易性会给光纤陀螺带来不可忽视的漂移并限制其应用。这种非互易性相移称为 Shupe 效应,与温度变化的关系为

$$\Delta\phi_E(l,t) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_{\text{eff}}}{c} \left( \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}}\alpha \right) \times \frac{dT(l,t)}{dt} (L - 2l) dl, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光纤的折射率,  $\alpha$  为光纤的温度膨胀系数,  $L$  为光纤环的总长度,  $l$  为光纤环上某一点到端点的距离,  $T(l,t)$  为光纤环上距离端点  $l$  的点在时刻  $t$  的温度。举一个例子<sup>[3]</sup>: 一个 200 m 的线圈,共 40 层,每层

50 匝,假定以 0.1 °C/s 的中等速率给线圈的最外一层光纤加热,产生的相位误差高达  $5 \times 10^{-5}$  rad。

四极子绕法<sup>[4]</sup>已经被证明可以较好地降低非互易性影响,而且实现比较容易,我们使用的光纤环大都属于这种结构,它的特点是以四层光纤线圈为周期,光纤上中点对称的部分在结构上处于接近的位置,也就是这些中点对称的部分在同一时刻所经历的温度时间梯度相当接近。

事实上,光纤环非常敏感,要想造就完美的光纤陀螺,现阶段仍旧停留在小概率的状况。经验说明光纤环本体受到温度场、应力场、线圈之间使用的介质的导热系数、杨氏模量等等的影 响,理解物性参量在环体内部的分布对于完善光纤陀螺仪有着举足轻重的意义。作为基础研究,我们借助计算机的计算能力,通过有限差分法分析得到温度场分布,展开了对光纤的研究,提出了交叉子绕线方法。

## 2 理 论

光纤环所处的温度环境比较复杂,建立简化的温度模型有利于研究。本文的温度试验简化模型如图 1 所示,温室稳定在 50 °C,光纤环初始环境为 20 °C 的大气,  $\tau > 0$  时,光纤环被放置在温室内。光纤环相对温度环境圆周对称,温度场模型选择圆柱坐标系,问题转化为二维非稳态导热的数值求解:探讨  $T(r,z,\tau)$  的数值解。

物体在圆柱坐标形式下的导热微分方程<sup>[5]</sup>为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi, \quad (2)$$

\* 国家 863 高科技计划重点资助项目。

E-mail: mch@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-04-27; 收到修改稿日期: 2002-06-24

式中  $\rho$  为微元体的密度,  $C$  为微元体的比热容,  $\phi$  为微元体在单位时间单位体积中的内热源的生成热,  $\tau$  为时间,  $\lambda$  为微元体的导热系数,  $t$  为微元体的温度。

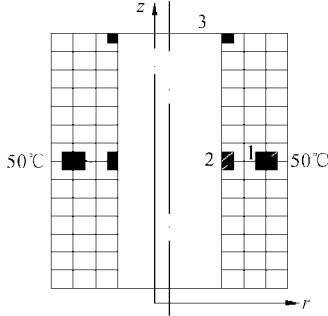


Fig. 1 Node map

如果物理量与角坐标无关, 导热方程简化成

$$\rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \phi. \quad (3)$$

用一系列与坐标轴平行的网格线将区域划分出许多子区域(图 1), 网格线的交点成为节点, 相邻节点间的距离称为步长。每一个节点代表以它为中心的一个小区域, 如图 1 中的黑影部分。图中 1 代表内部的节点, 2 代表边界上的节点, 3 代表角点。根据微分方程, 典型节点 1 的离散方程为

$$\begin{aligned} \rho_{i,j} C_{ij} \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta \tau} = & \frac{\lambda_{ij}}{r_{ij}} \frac{T_{i(j+1)}^{n+1} - T_{i(j-1)}^{n+1}}{2\Delta r} + \\ & \lambda_{ij} \frac{T_{i(j-1)}^{n+1} - 2T_{ij}^{n+1} + T_{i(j+1)}^{n+1}}{(\Delta r)^2} + \\ & \lambda_{ij} \frac{T_{(i-1)j}^n - 2T_{ij}^n + T_{(i+1)j}^n}{(\Delta z)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $i, j$  分别为坐标  $z, r$  的数值表示, 上标  $n$  表示时间,  $T_{i,j}^n$  表示节点  $(i, j)$  在时刻  $n$  的温度。光纤环的边界与周围的流体间进行对流换热, 属于第三类边界条件。

非稳态导热的求解因为增加了时间因素, 给差分方程的建立增添了能否收敛的问题。关于非稳态的有限差分法<sup>[6]</sup>。具体实现有完全显示、完全隐式、交替方向法等等差分格式, 前两种方法的稳定性与步长的选择关系密切, 后者对于任何步长, 算法绝对收敛。本文选择交替方向法, 对步长的选择不作严格限制。首先对  $r$  方向作隐式运算:

$$\begin{aligned} \rho_{i,j} C_{ij} \frac{V_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta \tau} = & \frac{\lambda_{ij}}{r_{ij}} \frac{V_{i(j+1)}^{n+1} - V_{i(j-1)}^{n+1}}{2\Delta r} + \\ & \lambda_{ij} \frac{V_{i(j-1)}^{n+1} - 2V_{ij}^{n+1} + V_{i(j+1)}^{n+1}}{(\Delta r)^2} + \\ & \lambda_{ij} \frac{T_{(i-1)j}^n - 2T_{ij}^n + T_{(i+1)j}^n}{(\Delta z)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

得到中间变量  $V(i, j)$ , 借助  $V(i, j)$ , 对  $z$  向作隐式运

算, 得到  $T^{n+1}$ :

$$\begin{aligned} \rho_{i,j} C_{ij} \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta \tau} = & \frac{\lambda_{ij}}{r_{ij}} \frac{V_{i(j+1)}^{n+1} - V_{i(j-1)}^{n+1}}{2\Delta r} + \\ & \lambda_{ij} \left[ (V_{i(j-1)}^{n+1} - 2V_{ij}^{n+1} + V_{i(j+1)}^{n+1}) / (\Delta r)^2 \right] + \\ & \lambda_{ij} \left[ (T_{(i-1)j}^{n+1} - 2T_{ij}^{n+1} + T_{(i+1)j}^{n+1}) / (\Delta z)^2 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 数值模拟结果

相关的物性参量如表 1。本文分析单模光纤环, 光纤总长 1 km。沿  $r$  向共 32 层,  $z$  向 103 (或 104) 匝。划分网格使用的空间步长为 1 mm, 时间步长为 5 s。从 0 时刻开始, 分析了 2 h 的温度场及其梯度场。图 2 是 20 min 时温度梯度场的仿真结果。图 3(a) 为仿真得到的非互易性相移随时间的变化曲线。图 3(b) 是光纤环的实际测试的温度效应所导致的零漂曲线, 图 3(b) 的稳态为地球转速。

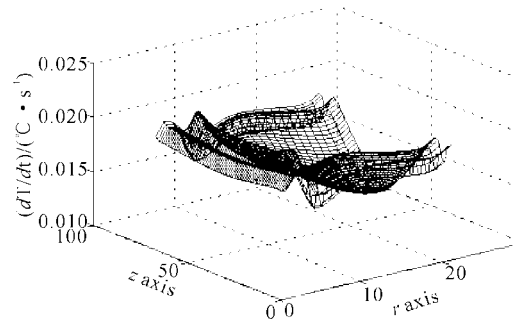


Fig. 2 Temperature gradient at 20 min

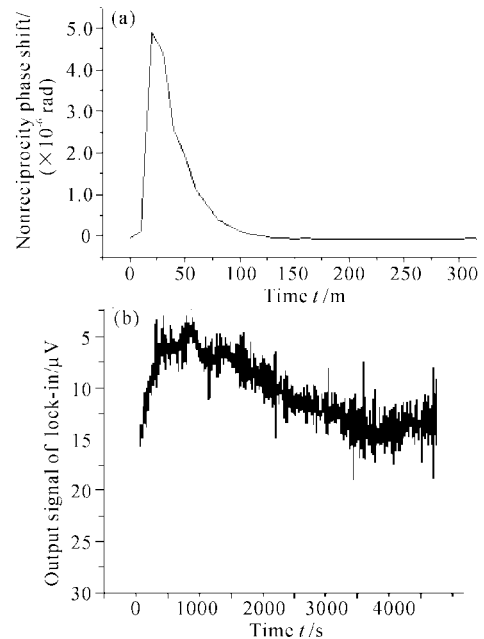


Fig. 3 (a) Theoretic result of nonreciprocity phase shift reduced by temperature; (b) Real null drift induced by temperature

Table 1. Materials parameters

	Coil	Air	Al
$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1200	1.165	2610
$C_p / [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	1320	1.005	840
$\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.13	0.0267	107

### 4 交叉子绕线方案

有限差分法提供了理论研究 Shupe 效应的平台,在这样的平台上,比较了对 Shupe 效应的改善作用明显的绕线方法<sup>[7]</sup>:四极子和交叉子绕法。

四极子光纤环以四层为一个空间周期,表 2 为光纤环的 8 个空间周期的 Shupe 效应,由表 2 可见,仍旧产生残余的瞬态温度零漂。

Table 2. Phase nonreciprocity ( $\times 10^{-5}$  rad)

Quadrupolar order	Layer			
	1	2	3	4
1	0.5444	0.5711	0.5794	0.5950
2	0.6431	0.6723	0.6832	0.7011
3	0.6740	0.7078	0.7230	0.7453
4	0.6175	0.6491	0.6625	0.6829
5	0.6058	0.6337	0.6427	0.6584
6	0.5180	0.5326	0.5283	0.5304
7	0.2035	0.2020	0.1823	0.1700
8	0.0079	0.0165	0.0082	0.0083

Miroslav Chomát 提出的双层绕线<sup>[8]</sup>法对四极子环的残余温度零漂有一定改善。对绕法与 Shupe 效应的关系作了研究和尝试后发现,采用一种新的交叉子绕线方法,零漂有很大改善。图 4 是交叉子绕线方法示意图。

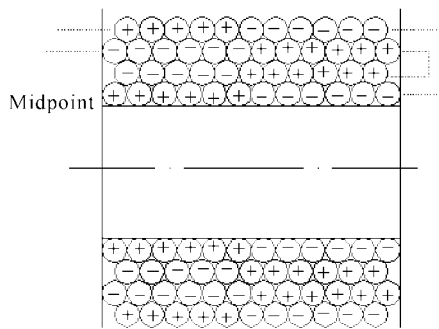


Fig. 4 Section view of cross windings (one-half coil length is represented by + and the other by -)

对有限差分法的分析发现,交叉子比四极子优化。理论分析的环境模型简化为:光纤环相对地静止, $t=0$ 时,光纤环的温度场分布均匀,处处为室温  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t>0$ ,光纤环被放置于  $50\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温大环境,与环境发生热交换,重新建立稳态温度场。在此环境模型中,理论分析得到图 5 所示四极子和交叉子绕线方

法下的光纤环温度零漂曲线的对比。后者较之前者的温度零漂减弱了约 4 倍,稳定时间缩短了约 1 倍。图中  $5 \times 10^{-6}$  rad 为最小分辨率(相当于  $0.05^\circ/\text{h}$ )。

为了验证理论的有效意义,我们提供接近模型的温度环境: $t \leq 0$ ,光纤环放在  $(20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$  的封闭实验室; $t > 0$ ,光纤环放入温箱  $(50 \pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$ 。光纤环水平放置,锁相放大器的输出零位稳定在  $20\text{ }\mu\text{V}$ (相当于地球自转速度)。测量五组四极子和交叉子光纤环,结果的重复性较好。图 6 为实验测得的四极子光纤环的零漂曲线,零漂幅度  $5.5\text{ }\mu\text{V}$ ,稳定时间  $20\text{ min}$ ;图 7 为实验测得的交叉子光纤环的零漂曲线,零漂幅度  $2.5\text{ }\mu\text{V}$ ,稳定时间  $10\text{ min}$ 。

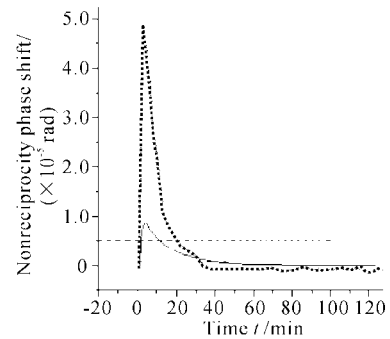


Fig. 5 Contrast of the result of quadrupolar and cross windings (quadrupolar is represented by ..... and cross by ——)

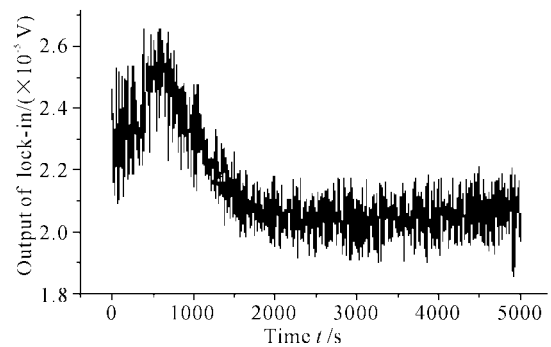


Fig. 6 Curve of heating the quadrupolar windings coil

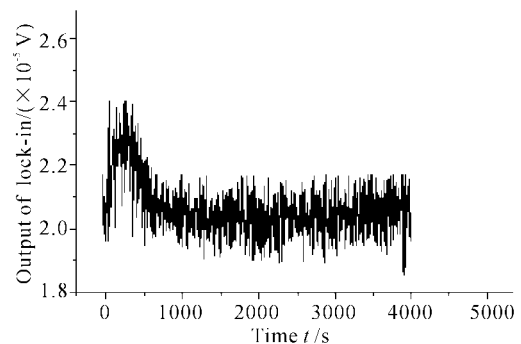


Fig. 7 Curve of heating the cross windings coil

**结论** 本文通过有限差分法分析了光纤陀螺的核心部件“光纤环”的温度场及其温度梯度场分布,从微观的角度研究光纤环的 Shupe 效应。本文所作的探索性研究提供了许多有价值的信息:温度梯度场在不同的热源条件下的分布,非互易性相移与空间位置的关系等等,它们是优化光纤环的结构和绕制工艺的重要依据。实际测试的结果与仿真结论的趋势一致。该方法不仅适于研究温度场,对应力场的研究同样适用。本文提出了交叉子绕线方法,通过实验,证明温度零漂和稳定时间均较四极子的表现成倍数下降,具有实际应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Guicai, Yang Qingsheng *et al.*, Study on temperature characteristics of interferometric fiber-optic gyroscope. *Optoelectronic Technol. Commun.* (光电子技术与信息), 2001, **14**(1):17~22 (in Chinese)
- 2 Shupe D M. Thermally induced non reciprocity in the fiber optic interferometer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5):654~655
- 3 Hervé Lefèvre. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston · London: Artech House, 1993. 93~96
- 4 Li Ruilin. Winding technique for fiber-optic rings of I-FOG. *Inertial Navigation and Appliance* (惯导与仪表), 1995, (3):36~43
- 5 Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat Transfer*(传热学). Beijing: Higher Education Press, 1998. 26
- 6 Yu Changming. *Heat Exchange and Numerical Analyses* (热传导及数值分析). Beijing: Tsinghua University Press, 1982. 392~454
- 7 Yan Fengping, Lan Huijuan, Jian Shuisheng. Investigation of the temperature compensated method for fiber optical gyros. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(7):968~974
- 8 Miroslav Chomát. Efficient suppression of thermally induced nonreciprocity in fiber-optical Sagnac interferometers with novel double-layer winding. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(13):2289~2291

## A Theoretical and Experimental Study of Cross-Winding Fiber Optical Coil

Mao Caihong Hu Huizhu Liu Cheng Yang Guoguang

(State Key Lab. of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 27 April 2002; revised 24 June 2002)

**Abstract:** Fiber optical ring is the core parts of the interferometric fiber optical gyro. The external circumstance such as temperature and stress can induce nonreciprocal phase noise, which restricts the developing of high precision gyro. The quadrupolar ring's temperature field is studied numerically by finite difference method, its null drift is analyzed at given temperature circumstance. The cross winding technique is proposed, which is good for weakening the null drift induced by temperature.

**Key words:** fiber optics; finite difference method; fiber optical gyro; temperature field; cross winding