

基于小波网络的光纤陀螺启动漂移温度补偿

李家奎¹ 许化龙¹ 何 婧²

(¹ 第二炮兵工程学院 302 教研室, 陕西 西安 710025)
(² 解放军 96411 部队 23 分队, 陕西 宝鸡 721013)

摘要 将小波网络理论及其改进方法应用于光纤陀螺的启动漂移温度补偿, 在进行全温范围启动漂移试验的基础上, 综合考虑温度、温度梯度和温变率对启动漂移的影响, 建立了光纤陀螺的启动漂移模型, 并根据模型进行补偿, 以提高光纤陀螺启动条件下的测试精度。试验结果表明, 采用小波网络能够有效地补偿光纤陀螺的温度启动漂移, 从而满足实时应用的要求。

关键词 光纤陀螺; 启动漂移; 温度补偿; 小波网络

中图分类号 V241.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0506005

Temperature Compensation of Start-up Drift for Fiber Optic Gyroscope Based on Wavelet Network

Li Jialei¹ Xu Hualong¹ He Jing²

(¹ Staff room 302 of Xi'an High-Tech Institute, Xi'an, Shaanxi 710025, China)
(² 23rd Element of PLA 96411 Unit, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract The wavelet network and its improvement version are applied to the temperature compensation of start-up drift of fiber optic gyro (FOG). Based on experiments in the entire temperature range of FOG, influences of inner temperature, temperature gradient and temperature variation rate on start-up drift are analyzed, and the start-up drift model consisting of the above three temperature factors is built. Then compensation based on the model can be carried out to improve the start-up accuracy of FOG. The experimental results indicate that the start-up drift of FOG can be compensated effectively by using wavelet network, and the problem of real-time applications can be settled.

Key words fiber optic gyroscope; start-up drift; temperature compensation; wavelet network

OCIS codes 060.2370; 060.2800; 060.4256

1 引 言

光纤陀螺^[1~3]由于具有精度高、启动时间短、耐冲击和动态范围大等一系列优点逐渐得到广泛的应用, 而光纤捷联惯导系统更是成为研究的热点问题。光纤陀螺的离线测试通常用于参数标定和性能验证, 实时性要求较低, 可在陀螺启动一段时间后开始采集数据, 以保证数据的稳定性; 而在光纤捷联惯导的对准与导航中, 为了缩短对准和导航的准备时间, 对光纤陀螺的启动性能提出了较高的要求, 然而光

纤陀螺的启动漂移会导致对准与导航的误差, 对其精度和实时性能造成较大的影响。为了解决这一问题, 需要研究光纤陀螺的启动漂移温度补偿技术。通过研究发现, 光纤陀螺的启动漂移同温度特性之间存在较强的非线性关系^[4], 采用基于最小二乘的多项式拟合方法难以精确描述。而小波网络^[5]则较好地解决了这一问题, 后者不仅具有较强的非线性建模和逼近能力, 而且充分利用了小波基函数良好的时频局部分析能力, 具有比径向基神经网络^[6]更

收稿日期: 2010-11-25; **收到修改稿日期**: 2010-12-20

作者简介: 李家奎(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤陀螺误差补偿及光纤捷联惯导初始对准技术等方面的研究。
E-mail: lijialei20082008@163.com

导师简介: 许化龙(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事惯性仪器测试及计量技术等方面的研究。
E-mail: xhl1941@163.com

为优异的性能。

本文以某型闭环光纤陀螺为研究对象,研究了其启动漂移的温度特性,在对漂移信号进行重复性验证的基础上,分析了温度、温度梯度和温变率对启动漂移的影响;然后,采用小波网络建立了启动漂移与三个温度变量之间的非线性模型,并根据模型进行启动漂移补偿。为了提高小波网络的性能,研究了LM+MAGD的混合学习算法。最后,对光纤陀螺进行启动漂移试验,并利用测试数据进行小波网络建模及补偿。

2 光纤陀螺的启动漂移温度特性分析

光纤陀螺的核心器件包括光源、光纤环、光电探测器和相位调制器等^[7],这些器件都不同程度地受到温度的影响,主要包括三个方面的因素:温度、温度梯度和温变率。光纤环受温度的影响尤为严重^[8],当温度发生变化时,在光纤环内部容易产生温度变化率,导致输出漂移的变化。选择弱相干光源和四级对称绕制^[9]的光纤环能够在一定程度上解决

这一问题。

在启动过程中,光纤陀螺内部光电器件和光纤环均存在一个缓变的升温过程,使得光纤陀螺不仅受到温度的影响,而且受到温变率的影响,导致漂移信号发生变化。另外,启动过程中的内外温度差又会导致温度梯度的产生。因此,温度、温度梯度和温度变化率是造成光纤陀螺启动漂移的主要因素。

2.1 光纤陀螺启动漂移重复性研究

为了对光纤陀螺进行启动漂移建模及补偿,首先需要研究启动漂移的重复性能,这一部分是进行漂移分析和建模的基础。对某型闭环光纤陀螺进行多次启动漂移测试,选取20℃条件下的重复测试结果和多个温度点下的测试结果进行分析,图1(a)为20℃不同时间的重复测试结果,图1(b)为三个温度点下(-20℃, 5℃, 35℃)不同时间的测试结果。由于光纤陀螺的测试噪声比较大,甚至会覆盖有效信号,对测试数据进行了滤波^[10]和提取趋势项处理,得到的结果如下。

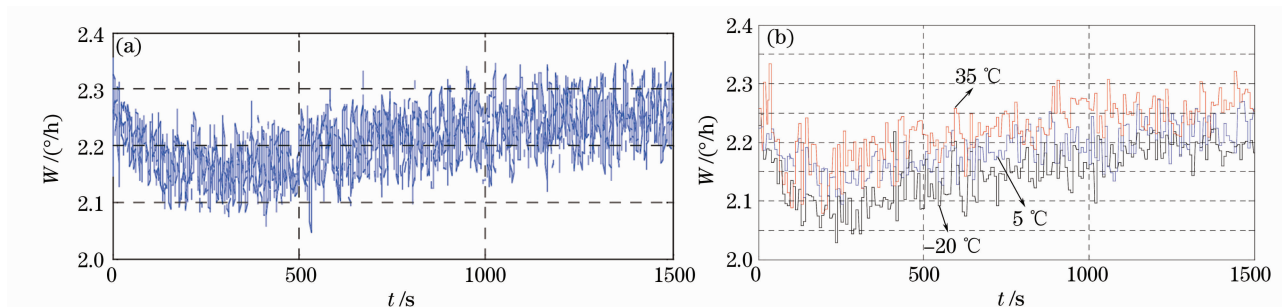


图1 恒温条件(a)和不同温度点(b)的光纤陀螺启动漂移重复测试曲线

Fig. 1 Repeatability curves of fiber gyro start-up drift at constant temperature (a) and among different temperatures (b)

根据图1(a),20℃条件下的启动漂移重复性为 $0.0027^\circ/\text{h}$,而光纤陀螺的零偏稳定性为 $0.03^\circ/\text{h}$,因此,光纤陀螺在恒定温度下具有较好的启动漂移重复性能。在图1(b)中,由于三条曲线温度差异较大,而且不同的温度值将导致不同的常值漂移,故曲线之间存在一定的偏差,但启动漂移的趋势是相同的,从而进一步说明了启动漂移建模的可行性。

2.2 光纤陀螺的启动漂移与温度特性之间的相关性分析

在对光纤陀螺进行大量温度试验的基础上,分析启动漂移与温度、温度梯度和温变率之间的相关性。选取20℃条件下的静态测试结果进行分析,图2中的四条曲线分别为启动漂移、内部温度 t_1 、温度梯度 t_2 和温度变化率 t_3 。其中温度梯度为内外温

度差,温度变化率则是在对内部温度进行高阶多项式拟合的基础上,通过求解曲线的斜率得到。根据时间序列相关性分析方法^[11],分析光纤陀螺的启动漂移同温度、温变率和温度梯度之间的关系。

通过拟合启动漂移同温度变量之间的曲线关系,表明光纤陀螺的启动漂移同温度、温度梯度和温变率之间均存在较强的非线性关系,而且启动漂移仅存在于启动后的1000s内,故只对这一部分数据进行建模和补偿。1000s之后的数据为稳态输出,只需补偿常值漂移即可。在启动漂移建模过程中,首先需要去掉地球自转角速度和陀螺常值零偏误差的影响,得到包含启动漂移和均值近似为零的稳态数据,然后利用这一部分数据进行启动漂移建模。

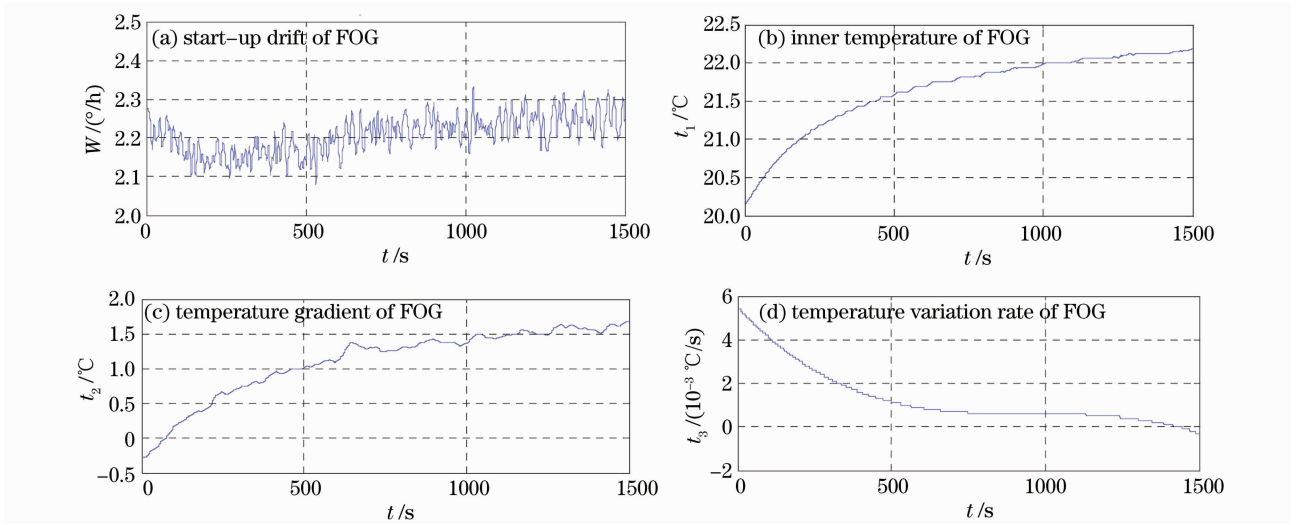


图2 光纤陀螺在 20 °C 条件下的启动漂移与温度特性曲线

Fig. 2 Start-up drift and temperature characteristics curves of FOG at 20 °C

3 多入单出小波网络的基本结构及算法研究

3.1 小波网络的结构

小波网络是非线性逼近和建模的理想工具,能够实现多维输入与输出之间的非线性精确建模。文献[12]对小波网络的基本理论进行了阐述,文献[13]研究了一种小波网络的改进方案。本文采用三维输入、单维输出的小波网络结构,输入为温度、温度梯度及温变率,输出为启动漂移,其结构如图3所示。

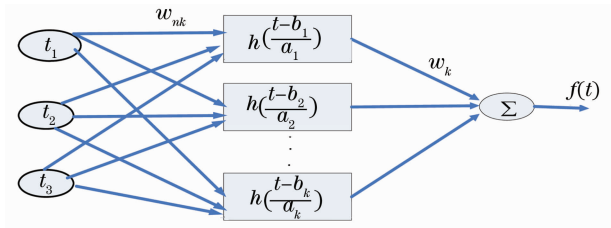


图3 多入单出小波网络的结构框图

Fig. 3 Diagram of wavelet network with multiple inputs and single output

图中 t_1, t_2, t_3 分别对应温度、温度梯度及温变率,输出 $f(t)$ 为光纤陀螺的启动漂移, h 为隐含层小波基函数, w_{nk} 和 w_k ($n = 1, 2, 3; k = 1, 2, \dots, K$) 分别为输入层至隐含层及隐含层至输出层的权值变量,设小波网络输入层、隐层和输出层的节点个数分别为 N, K 和 M ,则 $N = 3, M = 1$ 。该小波网络对应于第 p 个样本的输出可以表示为如下的形式:

$$f(p) = \sum_{k=1}^K w_k h \left(\frac{\sum_{n=1}^3 w_{nk} t_{pn} + c - b_k}{a_k} \right) + d, \quad (1)$$

式中 c, d 分别为小波网络隐层与输出层的阈值变量, b_k 和 a_k 分别为平移和伸缩参数。隐层节点的个数 K 通常根据输入输出节点的个数进行选取,其依据的经验公式^[14]为

$$K \geq \sqrt{N+M} + q, \quad 1 < q < 10 \quad (2)$$

在小波网络的初始化中,经典的方法是将参数初始化为 $[0, 1]$ 内的随机数,但这种初始化方法易导致小波网络陷入局部极小,影响其收敛速度和收敛精度。为了解决这一问题,文献[15]提出利用样本数据的实际输出范围实现平移和伸缩参数的初始化,而权值参数的初始化对系统影响较小,可直接将其取为 $[0, 1]$ 内的随机数。

3.2 小波网络的目标函数及梯度向量推导

小波网络训练的目的就是通过不断调整各个参数向量,使得目标函数取得最小值,从而完成网络参数的最优估计。通常选取小波网络的期望输出与实际输出的均方误差作为目标函数,设 $\hat{f}(p)$ 为小波网络对应第 p 个样本的期望输出,则目标函数的表达式如下:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P [f(p) - \hat{f}(p)]^2, \quad (3)$$

式中 $f(p)$ 中为小波网络的实际输出,根据(1)式进行计算。在小波网络的学习过程中,需要用到目标函数关于各个参数的梯度向量,并将其作为参数更新的方向。设 $\tau_{pk} = \left(\sum_{n=1}^3 w_{nk} t_{pn} + c - b_k \right) / a_k$, $e(p) = f(p) - \hat{f}(p)$, 经过推导,得到目标函数关于各个参数的梯度向量分别如下:

$$\frac{\partial E}{\partial w_k} = \sum_{p=1}^P e(p)h(\tau_{pk}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{nk}} = \sum_{p=1}^P e(p)\omega_k h'(\tau_{pk}) \frac{t_{pn}}{a_k}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_k} = - \sum_{p=1}^P e(p)\omega_k h'(\tau_{pk})(1/a_k), \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = - \sum_{p=1}^P e(p)\omega_k h'(\tau_{pk})\tau_{pk}(1/a_k), \quad (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c} = \sum_{p=1}^P e(p)\omega_k h'(\tau_{pk})(1/a_k), \quad (8)$$

$$\frac{\partial E}{\partial d} = \sum_{p=1}^P e(p). \quad (9)$$

3.3 小波网络算法研究及改进

常用的小波网络算法为 GD 算法^[16],即梯度下降法,其根据每一次计算的梯度向量实现参数的迭代更新,GD 算法的参数更新公式为

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \eta(\partial E/\partial \theta_k), \quad (10)$$

式中 θ_k 为小波网络的参数向量,包括权值参数 w_{nk} 和 w_k 、平移和伸缩参数 b_k 和 a_k 、隐层和输出层的阈值 c 和 d , η 为步长因子,通常根据经验取为尽量小的正数。

虽然 GD 算法能够实现最小均方意义的参数最优估计,但存在计算量大、收敛速度慢以及易陷入局部极小等问题。为了解决上述问题,提出了一系列改进算法,包括牛顿法、拟牛顿法、共轭梯度法以及 LM 算法等^[16]。LM 算法在拟牛顿法的基础上引入常值因子,以改善 Hessian 矩阵的正定性。LM 算法相对于其他的二阶算法具有更短的收敛时间和更好的收敛性能,尤其适合于性能指标为均方误差的网络训练。LM 算法的表达式如下所示:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - [\mathbf{J}^T(\theta_k)\mathbf{J}(\theta_k) + \mu_k \mathbf{I}_n]^{-1} \mathbf{J}^T(\theta_k) e(\theta_k), \quad (11)$$

式中 $\mathbf{J}(\theta_k)$ 为网络训练误差 $e(\theta_k)$ 的雅可比矩阵, μ_k 为 Hessian 矩阵调节因子,为一正数。LM 算法克服了拟牛顿法中 Hessian 矩阵的非正定问题,且具有二阶收敛速度。但 LM 算法易受初值选取的影响,如果初值选择不当,则在最小点附近收敛较慢。而文献[17]提出的动量变步长 GD 算法(MAGD)在最小点附近具有较好的收敛性能,而且受初值的影响较小,加入的动量因子有效克服了 GD 的震荡特性,而变步长则解决了 GD 容易陷入局部极小的问题,从而提高算法逼近的精度。MAGD 算法的更新公式如下:

$$\begin{cases} \eta_k = l\eta_{k-1} \\ \theta_k = \theta_{k-1} - \eta_k(\partial E/\partial \theta_{k-1}) \end{cases}, e_k > e_{k-1} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \eta_k = g\eta_{k-1} \\ \theta_k = m\theta_{k-1} - (1-m)\eta_k(\partial E/\partial \theta_{k-1}) \end{cases}, e_k \leq e_{k-1} \quad (13)$$

式中 e_{k-1}, e_k 分别为前一时刻与当前时刻的训练误差, g, l 分别为调节因子,选取 $g = 1.55, l = 0.008$, m 为动量系数,取 $m = 0.2$ 。如果当前误差大于前一次的误差,则说明下降过快,步长太大,需要减小步长,并设动量系数为 0;反之,则应该增大步长,并恢复动量系数。

为此,考虑将 LM 算法与 MAGD 算法有机结合,充分发挥两种算法的优势,实现小波网络的快速精确收敛。具体为:在训练开始时,采用 LM 算法进行网络参数的训练,使网络快速收敛于最小点附近;然后采用 MAGD 算法进行参数的训练,以提高系统在最小点附近的收敛性能和逼近精度。采用更新算法的判断条件为:如果 $e_k > 0.1e_1$,采用 LM 算法;如果 $e_k \leq 0.1e_1$,采用 MAGD 算法,其中 $k > 1$ 。 e_1 为算法第一次训练结果与期望输出的均方误差, e_k 为当前训练结果与期望输出的均方误差。改进后的混合学习算法如图 4 所示。

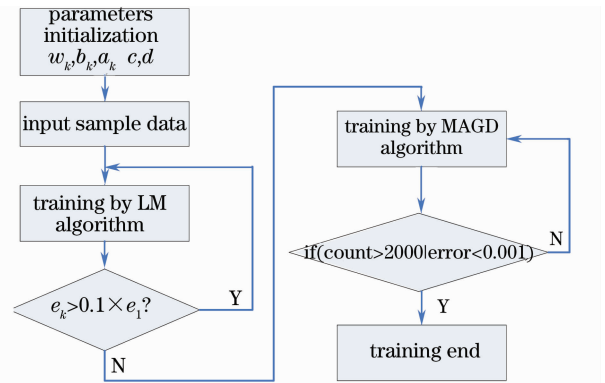


图 4 LM+MAGD 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the hybrid algorithm of wavelet network

4 试验及结果分析

选取北京航空航天大学生产的某闭环光纤陀螺进行全温范围的静态启动漂移试验,将光纤陀螺置于带转台的温箱内,温度范围设定为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 取一个温度点,在每一个温度点下进行启动漂移试验。利用计算机软件采集光纤陀螺的漂移信号、内部及壳体的温度数据,并将漂移信号的单位转换为 $(^{\circ}/\text{h})$,温度的单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。利用不同温度点下 1000 s

的启动漂移数据进行小波网络的训练和建模,实现全温范围的启动漂移补偿。首先采用 GD 算法进行参

数训练,在 20 °C 条件下小波网络输出和学习误差曲线如图 5 所示。

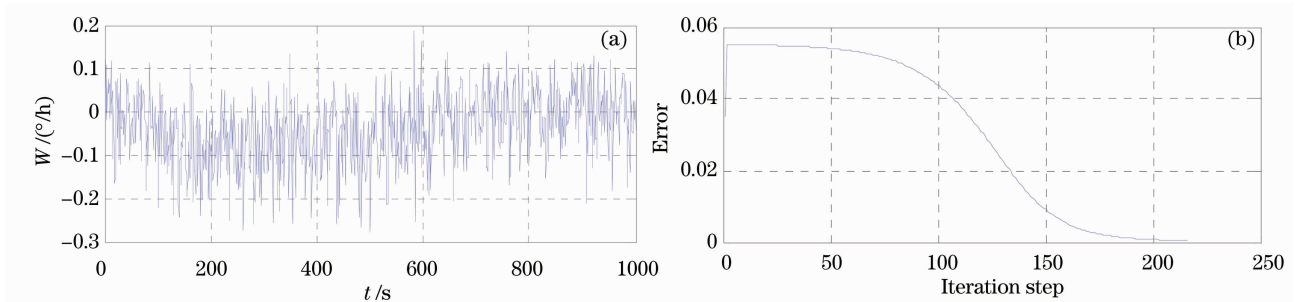


图 5 基于经典 GD 算法的启动漂移学习曲线(a)及误差曲线(b)

Fig. 5 Output (a) and error (b) curves of start-up temperature drift based on GD algorithm

通过图 5(a)可以看出, GD 算法是一种较为理想的小波网络训练算法,经过训练后小波网络的实际输出与期望输出的拟合残差为 0.8231,具有较高的拟合精度;但 GD 算法存在收敛速度慢的问题,图 5(b)中参数收敛的迭代次数为 210 次,而且在训练初始阶段由于受参数初值的影响,存在较大的误差波动。

另外,由于受到原始信号噪声和小波网络结构

的影响,图 5(a)的输出含有较大的噪声信号,对小波网络模型的应用和泛化能力造成了较大的影响。为此,本文提出在网络的输出端加入小波软阈值滤波器,使得在去除噪声信号的同时,较好地保留有效的漂移信号,阈值的选取根据期望输出信号的噪声标准差确定。采用 LM+MAGD 对小波网络进行训练,结合小波阈值去噪,得到小波网络输出和学习误差曲线如图 6 所示。

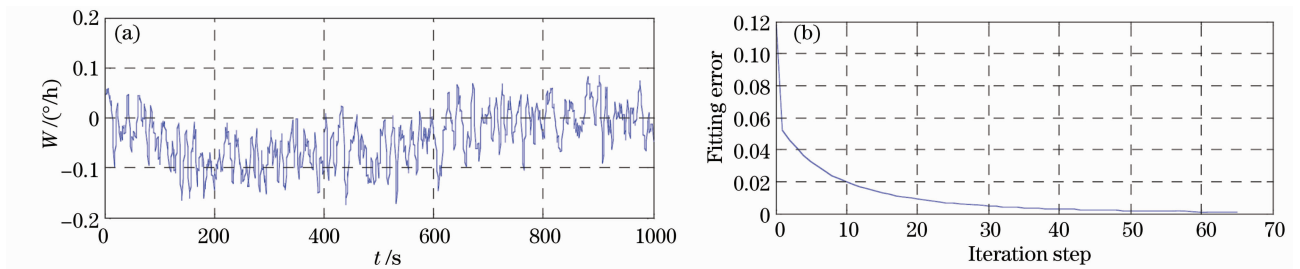


图 6 采用改进算法的学习曲线(a)和误差曲线(b)

Fig. 6 Output (a) and error (b) curves of start-up temperature drift based on improved method

对图 6(a)进行分析表明,改进小波网络学习曲线的噪声特性得到较好的改善,经过训练后小波网络的实际输出与期望输出的拟合残差为 0.5631,而且图 6(b)中参数收敛的迭代次数仅为 55 次。可

见,改进小波网络在收敛速度和精度上均优于经典小波网络,而收敛速度的提高尤为显著。

为了进一步验证混合小波网络算法的普适性,采用建立的小波网络模型进行全温范围内的启动漂

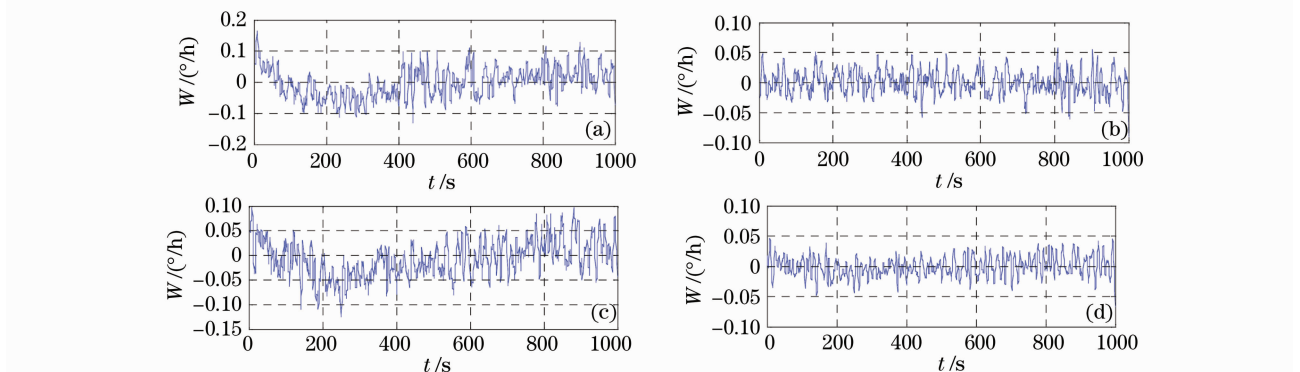


图 7 -20 °C (a), (b) 和 35 °C (c), (d) 条件下启动漂移测试与补偿后的曲线

Fig. 7 Testing and compensation curves of start-up drift at -20 °C (a), (b) and 35 °C (c), (d)

移补偿, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的测试与补偿结果如图 7 所示。

通过光纤陀螺的启动漂移温度补偿试验可以看出,改进的小波网络能够更好地拟合启动漂移同内部温度、温度梯度和温变率之间的非线性关系,从而能够更为准确地描述光纤陀螺在全温范围内的启动漂移特性。由于小波网络模型是根据 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间多个温度点的试验数据得到的,因此具有较好的泛化能力,能够适用于不同温度条件下的启动漂移建模和补偿;而且这一温度范围能够满足实际工程应用的要求。目前国内研制的闭环光纤陀螺普遍存在启动温度漂移的问题,本文提出的方法同样适用于不同型号的闭环光纤陀螺,通过建立启动漂移的小波网络模型,对于实现光纤陀螺的启动漂移误差补偿和在惯导系统中的应用具有重要的意义。

5 结 论

以光纤陀螺启动漂移建模及补偿为研究对象,分析了温度、温度梯度和温变率同启动漂移之间的非线性相关性,并在对启动漂移进行重复性验证的基础上,采用小波网络建立了光纤陀螺的启动漂移温度模型。在小波网络的算法中,研究了经典的 GD 算法及其存在的问题,并提出了基于 LM 和 MAGD 的混合算法。通过对光纤陀螺进行全温范围的启动漂移试验和结果分析,表明改进的小波网络算法具有比经典算法更快的收敛速度和更高的收敛精度,能够更为精确地描述光纤陀螺的启动漂移同温度特性之间的关系,进而通过补偿解决光纤陀螺的启动温度漂移对其实时性能造成的影响。最后,分析了本文方法的普适性,表明提出的方法能够适用于不同型号闭环光纤陀螺的启动漂移温度补偿。

参 考 文 献

- 1 H. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. London: Artech House, 1993, 91~94
- 2 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144
米 剑, 张春熹, 李 铮等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1140~1144
- 3 Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effects in a Brillouin fiber-optic gyroscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):

- 162~165
万生鹏, 何兴道. 温度对布里渊光纤陀螺的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 162~165
- 4 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1053~1056
李旭友, 张 琛, 何 周等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1053~1056
- 5 S. Postalcioğlu, Y. Becerikli. Wavelet networks for nonlinear system modeling [J]. *Neural Comput Appl.*, 2007, **16**: 433~441
- 6 R. Sharaf, A. Noureldin. A neural network model of optical gyros drift errors with application to vehicular navigation[C]. *SPIE*, 2002, **5558**: 13~20
- 7 A. P. George. Challenges in the development of the IFOG[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, 2003, 11~14
- 8 Li Maochun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Transient characteristic testing of fiber optic gyro fiber coil based on temperature excitation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 435~441
李茂春, 刘铁根, 江俊峰等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 435~441
- 9 Song Youshan, Zhou Shiqin, Lu Zheng. Technical ways to improve the temperature stability of fiber optic gyros[C]. *SPIE*, 2001, **4540**: 420~423
- 10 Dang Shuwen, Tian Weifeng, Qian Feng. De-noising fractional noise in fiber optic gyroscopes based on wavelet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 625~629
党淑雯, 田蔚风, 钱 峰. 基于提升小波的光纤陀螺分形噪声滤波方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 625~629
- 11 D. S. G. Pollock. A Handbook of Time Series Analysis, Signal Processing and Dynamics[M]. London: Academic Press, 1999. 430~439
- 12 Zhang Xinhong. The Theory of Wavelet Network and Applications in Economic Modeling [M]. Dalian: Dongbei University of Finance & Economics Press, 2008. 95~110
张新红. 小波网络理论及在经济建模中的应用[M]. 大连: 东北财经大学出版社, 2008. 95~100
- 13 Y. Oysal, S. Yilmaz. An adaptive wavelet network for function learning[J]. *Neural Comput. Appl.*, 2010, **19**(3): 383~392
- 14 Liu Di, Bo Yuming, Wu Panlong *et al.*. Application of wavelet neural network to initial alignment of inertial strapdown navigation system [C]. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Sanya, 2008. 346~350
- 15 Zhao Xuezhi, Zou Chunhua, Chen Tongjian. A research on the initialization of parameters of wavelet network [J]. *J. South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2003, **31**(2): 77~84
赵学智, 邹春华, 陈统坚. 小波神经网络的参数初始化研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2003, **31**(2): 77~84
- 16 Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. Optimal Theory and Methods[M]. Beijing: Science Press, 2005. 373~391
袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 373~391
- 17 Dong Xuemei, Zhou Dingxuan. Learning gradients by a gradient descent algorithm[J]. *J. Math. Anal. Appl.*, 2008, **341**(2): 1018~1027