

文章编号: 0258-7025(2010)12-2980-06

光纤陀螺静态温度漂移的小波网络建模

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 中国人民解放军 96411 部队 23 分队, 陕西 宝鸡 721013)

摘要 温度是影响光纤陀螺测试精度的重要因素,通过理论分析和实验研究了光纤陀螺的静态温度特性,提出采用经典小波网络进行零偏温度建模的方案,并与多项式拟合结果进行比较,其拟合精度得到大幅度提高。在此基础上,对经典小波网络进行改进,研究了一种新的参数初始化方法,并提出了基于动量变步长梯度下降法的参数更新算法。实验结果表明,改进的小波网络算法能够进一步提高网络的收敛速度和模型拟合的精度,从而能够更好地描述光纤陀螺零偏的温度特性。为了验证小波网络算法的普适性,利用多个惯性器件的温度实验数据,进行零偏温度建模和精度分析,结果表明,该方法能够较好地适用于对温度敏感的惯性器件的静态温度建模。

关键词 光纤陀螺;温度建模;多项式拟合;小波网络

中图分类号 V241.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.2980

Modeling of Static Temperature Drift for Fiber Optic Gyroscope Based on Wavelet Network

Li Jialei¹ Xu Hualong¹ He Jing²

(¹ The Second Artillery Engineering College Staff Room 302, Xi'an, Shaanxi, 710025, China)
² Unit 23 of Army 96411 of People's Liberation Army, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract Temperature is one of the main factors that affect the accuracy of fiber optic gyroscope (FOG), and static temperature characters of FOG are studied through theoretical analysis and experiments. Temperature modeling of zero bias based on typical wavelet network is proposed, which is compared to polynomial fitting, and the accuracy is improved greatly. Further, modification of typical wavelet network is studied, including initialization of parameters and a new momentum adaptive gradient descent method for parameter updating. Through experiments, it is proved that the modified wavelet network can further improve convergence speed and fitting accuracy, which is better in describing the temperature characters of FOG. In order to verify the university of wavelet network algorithms, temperature modeling and accuracy analysis based on testing data of different inertial instruments are carried out, and results indicate that the proposed methods can be used for static temperature modeling of inertial instruments sensitive to temperature.

Key words fiber optic gyroscope; temperature modeling; polynomial fitting; wavelet network

1 引 言

光纤陀螺(FOG)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,逐渐取代机械陀螺和激光陀螺应用于惯导系统中,尤其适用于捷联惯导系统。影响光纤陀螺性能的因素有很多

种,不同类型的光纤陀螺在机理上是不同的^[1,2],而温度对不同的光纤陀螺均具有较大的影响^[3,4]。光纤陀螺的温度补偿分为内部和外部补偿两种,内部补偿是指在陀螺内部加入温控电路,使其对外部温度不敏感,从而弱化温度对陀螺输出的影响,但这种

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-09

作者简介: 李家奎(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤陀螺的误差补偿技术等方面的研究。

E-mail: lijialei20082008@163.com

导师简介: 许化龙(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事导航、制导与控制等方面的研究。

E-mail: xhl1941@163.com

方法会大大增加陀螺的体积和成本;外部补偿是指通过对光纤陀螺进行温度实验,根据实验数据拟合光纤陀螺的温度模型,并进行温度补偿^[5,6]。

光纤陀螺作为光惯导系统的核心器件,由于受外界温度的影响,存在较大的输出漂移,如果不加以补偿,将会给后续的对准和导航解算带来较大的误差。本文以光纤陀螺 VG951 为研究对象,在对其进行温度实验的基础上,研究了该光纤陀螺全温范围内的常值漂移特性,并分别采用多项式拟合^[7]、经典小波网络^[8]及改进小波网络进行零偏的温度建模。实验结果表明,改进小波网络的拟合精度得到大幅度提高,能够更有效地逼近理想输出。同时,结合多个惯性器件的温度实验数据,对小波网络算法的普适性进行了验证。

2 光纤陀螺静态温度实验及数据分析

采用带温箱的单轴转台对光纤陀螺进行静态温度测试,转台轴垂直向上,陀螺敏感轴与转台轴重合,在测试完毕后,根据当地纬度值补偿地球自转角速度的分量。根据光纤陀螺 VG951 的温度范围,取实验的温度范围为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,每间隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 取一个温度点,研究光纤陀螺全温范围内的温度特性。

在测试过程中,首先将温箱调至要求的温度值,将光纤陀螺置于温箱内,启动光纤陀螺,稳定 1 h 后开始采集数据。在每一个温度点采集 10 min 的数据,采样周期为 1 s。为了提高测试的精度及减小噪

表 1 光纤陀螺零偏温度模型的多项式拟合结果

Table 1 Polynomial fitting results between zero bias and temperature

Modeling order	Fitting polynomial	Fitting error (RMSE)
Second-order	$-1.9785(T/T_m)^2 + 4.9316(T/T_m) + 5.1901$	0.5688
Third-order	$-2.3482(T/T_m)^3 - 0.2624(T/T_m)^2 + 5.5431(T/T_m) + 5.0174$	0.5679
Fourth-order	$1.7604(T/T_m)^4 - 4.0160(T/T_m)^3 - 0.7468(T/T_m)^2 + 5.9221(T/T_m) + 5.0525$	0.5656

表 1 中 T_m 为温度的最大值。通过表 1 可以看出,随着模型阶数的增加,拟合残差并没有显著的下降,说明这三种模型的拟合效果是类似的。而且模型阶数越大,结构越复杂,曲线的过拟合越严重。为此,论文采用表 1 中的二阶模型作为零偏的温度模型,其测试与补偿曲线如图 2 所示。该模型能够在一定程度上反映光纤陀螺零偏的温度特性,但仍然存在较大的误差,需要研究更为有效的非线性拟合方法。

声的影响,对于每一组测试数据,取其平均值作为最后的零偏值。零偏的测试结果如图 1 所示。

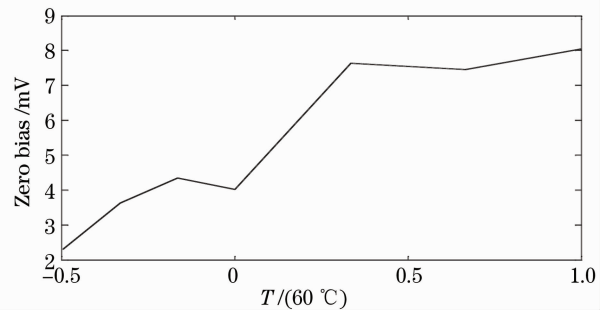


图 1 光纤陀螺的零偏随温度变化的曲线

Fig. 1 Zero bias of FOG at different temperatures

为了更准确地描述温度与光纤陀螺零偏之间的关系,将温度值进行规范化处理,即横坐标为温度,纵坐标为光纤陀螺的零偏值,单位为毫伏。从图 1 可以看出,光纤陀螺的零偏随温度变化有明显的漂移,若不加补偿,将会对光纤陀螺的测试精度造成较大的影响。由于该曲线具有较强的非线性特性,分别采用高阶多项式拟合和小波网络进行零偏的温度建模。

3 基于多项式拟合的零偏温度建模

为了建立光纤陀螺的零偏温度模型及实现温度补偿^[9],采用最小二乘法对图 1 中的曲线进行高阶多项式拟合,分别采用二阶、三阶和四阶模型,拟合表达式及拟合误差如表 1 所示。

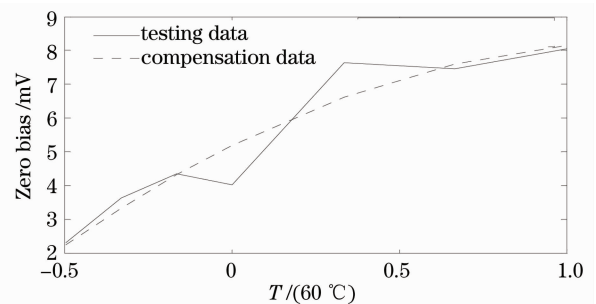


图 2 零偏随温度变化的测试与二次补偿曲线

Fig. 2 Testing data and second-order compensation of zero bias

4 基于经典小波网络的零偏温度建模

4.1 小波网络的基本结构

小波网络是基于小波分析而构成的一种新型前馈网络,包括输入层、隐层和输出层。由于连续参数小波网络^[10]不要求小波基函数的正交性,在非线性和拟合中得到广泛的应用。其函数的表达式通过所选取的小波基叠加来实现,设输入为 t , 单入单出小波网络的输出可以表示为

$$\hat{f}(t) = \sum_{k=1}^N \omega_k h\left(\frac{t-b_k+c}{a_k}\right) + d, \quad (1)$$

式中 ω_k, b_k, a_k 分别为权系数、每一个子波的平移和伸缩系数, c, d 分别为隐层和输出层的阈值。在实际应用中,为了简化算法,也可以略去阈值项。文献^[11]对该小波网络进行了详细的阐述。该小波网络的结构如图 3 所示。

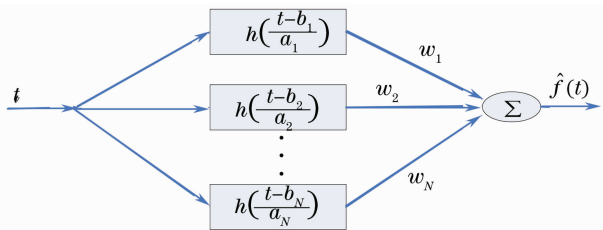


图 3 单入单出小波网络的结构框图

Fig. 3 Diagram of wavelet network with single input and single output

4.2 经典小波网络的算法研究

4.2.1 小波网络的初始化

小波网络在训练之前,需要进行初始化,包括隐层结点个数的确定和参数的初始化,参数的初始化对小波网络的性能具有重要的影响,如果初值选择不当,算法容易陷入局部极小。参数 ω_k, b_k, a_k 通常初始化为 $[0, 1]$ 内的随机数^[12]; 而隐层节点数的确定通常采用实验的方法^[13], 通过不断增加隐层节点,根据拟合残差来选取最优的节点数,但这种算法较为复杂。论文中采用的经验不等式^[14]为

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

式中 N, M, K 分别为隐层、输入层以及输出层节点的个数。

4.2.2 小波网络的梯度下降算法

梯度下降法(GD)^[15]是一种非线性优化方法,参数更新采用最优的负梯度方向,具有逼近任意非线性特性的能力。GD 算法具有简单、易行、计算量小和并行性强等优点,是目前神经网络训练采用最多也是最为成熟的算法之一。

在小波网络的训练过程中,设性能指标为 E , 则小波网络训练的目的就是使性能指标 E 最小化, E 可以表示为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_T} [B_p(T_i) - B(T_i)]^2, \quad (3)$$

式中 N_T 为测试温度点的个数, $B_p(T_i)$ 为 T_i 温度时小波网络的期望输出,即测试零偏值; $B(T_i)$ 为 T_i 温度时小波网络的实际输出, $B(T_i)$ 的表达式为

$$B(T_i) = \sum_{k=1}^N \omega_k h\left(\frac{T_i - b_k}{a_k}\right). \quad (4)$$

设 $\theta = \{W, A, B\}$ 为小波网络参数的集合, 设 θ_k 为当前时刻的参数估计, θ_{k+1} 为更新后的参数估计, 则训练过程中参数更新的表达式为

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \eta(\partial E / \partial \theta_k), \quad (5)$$

式中 $\partial E / \partial \theta_k$ 为性能指标函数的梯度, η 为学习速率, 通常取 $\eta = 0.02$ 。

4.2.3 基于经典小波网络的零偏温度建模

采用经典小波网络对光纤陀螺进行零偏温度建模, 输入为温度值, 期望输出为实际测试零偏值, 采用梯度下降法进行参数训练。参数 ω_k, b_k, a_k 均初始化为 $[0, 1]$ 内的随机数, 隐层节点数选取为 15, 隐层函数采用对称性及紧支性均较好的 Morlet 小波基, 其表达式为 $h(t) = \cos(1.75t) \exp(-t^2/2)$, 模型拟合结果如图 4 所示。

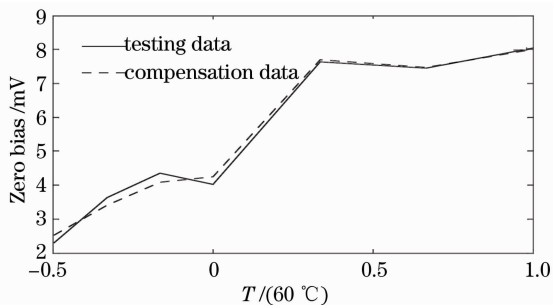


图 4 基于经典小波网络的零偏温度测试与补偿曲线
Fig. 4 Testing and compensation data of zero bias based on typical wavelet network

通过图 4 可以看出, 在低温段, 由于零偏变化比较剧烈, 拟合效果不是很理想, 而在 0°C 以上, 该小波网络具有较好的拟合效果。通过计算, 小波网络的拟合残差为 0.2571, 相比高阶多项式拟合, 拟合精度得到大幅度的提高, 小波网络的迭代次数为 200 次。由于在常温段的拟合效果较为理想, 有可能在实际工程中获得应用。

5 基于改进小波网络的零偏温度建模

5.1 经典小波网络存在的问题

经典小波网络虽然能够较好地拟合零偏的温度模型,但仍然存在一些缺陷。首先,参数的随机初始化容易导致小波网络的不稳定乃至发散;其次,GD算法存在收敛速度慢、易陷入局部极小等问题。为了解决上述问题,分别对参数初始化和网络算法进行改进,在加速网络收敛的同时,提高其逼近精度。

5.2 改进的小波网络参数初始化方法

充分利用小波网络已有的信息,根据实际系统的输出范围来确定网络参数的初值,具体步骤如下:

- 1) 计算单变量系统输出的最大值 y_{max} 及最小值 y_{min} ;
- 2) 取 b_1 为区间 $[y_{min}, y_{max}]$ 内的一点, $b_1 = y_{min} + \zeta(y_{max} - y_{min})$, a_1 为相应的区间收缩, $a_1 = \zeta(y_{max} - y_{min})$, $\zeta > 0$ 为一适当的正数,典型值为 $\zeta = 0.5$;
- 3) 在 2) 中,区间 $[y_{min}, y_{max}]$ 被分成了两个部

分,再在每一个部分重复以上步骤,能够得到 $a_2, b_2; a_3, b_3$ 的初始值;

4) 以此类推,得到系数 $a_k, b_k (k = 1, \dots, N)$ 的初始值。

这种选取平移因子和伸缩因子的方法,使隐层函数的取值覆盖了函数的取值范围,能够保证小波网络的逼近效果。小波网络参数在算法中进行实时更新。

5.3 改进的小波网络算法

为了解决 5.1 节中 GD 算法存在的问题,提出动量变步长 GD 算法 (MAGD),通过在参数更新中加入动量因子,能够有效克服 GD 的振荡特性,从而加速算法收敛的过程;而自适应变步长则有效地解决了 GD 容易陷入局部极小的问题,进一步提高算法逼近的速度和精度。而且通过引入自适应变步长,减小了算法受初值选取的影响,提高了算法的稳健性能。MAGD 算法更新公式为

$$\begin{cases} \eta_k = l \times \eta_{k-1} \\ \theta_k = \theta_{k-1} - \eta_k \times (\partial E / \partial \theta_{k-1}) \end{cases}, e_k > e_{k-1} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \eta_k = g \times \eta_{k-1} \\ \theta_k = m \times \theta_{k-1} - (1 - m) \times \eta_k \times (\partial E / \partial \theta_{k-1}) \end{cases}, e_k \leq e_{k-1} \tag{7}$$

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 $m = 0.2$ 。即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。该算法的流程图如图 5 所示。

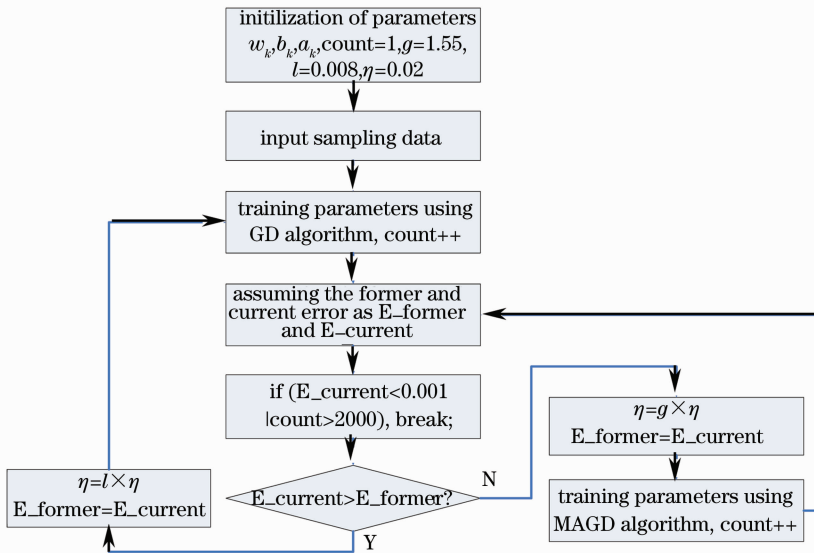


图 5 小波网络的改进学习算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of the modified algorithm of wavelet network

5.4 基于改进小波网络的光纤陀螺零偏温度建模

采用改进的小波网络拟合光纤陀螺的零偏温度模型,首先采用改进的参数初始化方法对小波网络的参数进行初始化,然后采用改进的 MAGD 算法对小波网络进行训练,得到的结果如图 6 所示。

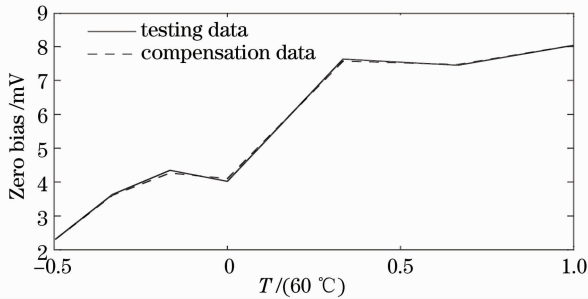


图 6 基于改进小波网络的零偏温度测试与补偿曲线

Fig. 6 Testing and compensation data of zero bias based on modified wavelet network

通过图 6 可以看出,改进的小波网络能够进一步提高曲线的拟合精度,使该模型在全温范围内都能够准确反映光纤陀螺零偏随温度的变化。通过计算,该模型的拟合残差为 0.1032,拟合精度相对于多项式拟合及经典小波网络均有较大幅度的提高,而且小波网络训练迭代的次数仅为 48 次,收敛速度明显高于经典小波网络。因此,改进的小波网络能够更为有效地拟合光纤陀螺零偏与温度之间的非线性关系,从而建立更为准确的零偏温度模型。

为了进一步验证小波网络算法的有效性和普适性,在对惯性器件的温度特性进行分析的基础上,利用实验室现有的光纤陀螺 VG941 和石英加速度计 CHJN-2S 的温度实验数据,分别采用上述 3 种方法进行零偏温度建模,并对模型拟合的精度进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 不同惯性仪器的温度建模及精度分析

Table 2 Temperature modeling and accuracy analysis of different inertial instruments

	Polynomial fitting	Typical wavelet network	Modified wavelet network
VG941	0.6123	0.3028	0.1205
CHJN-2S	0.4211	0.2043	0.0825

通过表 2 可以看出,对不同的光纤陀螺及加速度计进行零偏温度建模,小波网络算法的精度相对于多项式拟合均具有较大程度的提高,而且改进的小波网络比经典小波网络具有更高的逼近精度,能够更准确地描述惯性器件的静态温度特性。因此,小波网络算法能够适用于对温度敏感的惯性器件的

静态温度补偿,具有较好的普适性和工程实用性。

6 结 论

通过分析光纤陀螺的静态温度特性,分别采用二阶多项式拟合、经典小波网络方法和改进的小波网络方法进行光纤陀螺的零偏温度建模,并对不同模型的拟合精度进行比较。实验结果表明,改进的小波网络能够更为有效地拟合光纤陀螺的零偏温度模型,从而能够更好地描述光纤陀螺的零偏随温度的变化情况。通过对多个惯性仪器进行零偏温度建模和精度分析,进一步验证了小波网络算法的普适性和工程实用性。

参 考 文 献

- Zhang Xulin, Zhou Kejiang. Polarization-fluctuation in resonator of resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2083~2088
- 张旭琳, 周柯江. 谐振式光纤陀螺环形谐振腔的偏振问题[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2083~2088
- Pei Jincheng, Yang Xichun, Zhu Rude *et al.*. Stimulated Brillouin optical fiber gyroscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(11): 53~60
- 裴金成, 杨熙春, 朱汝德等. 受激布里渊光纤陀螺[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(11): 53~60
- Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effect 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
- 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): 1053~1057
- 李旭友, 张琛, 何周等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环境温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1053~1057
- Jin Jing, Song Ningfang, Li Lijing. Temperature drift modeling and real-time compensation of interferometric fiber optic gyroscope[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(4): 1449~1454
- 金靖, 宋凝芳, 李立京. 干涉光纤陀螺温度漂移建模与实时补偿[J]. *航空学报*, 2007, **28**(4): 1449~1454
- Meng Zhaokui, Cui Jiatao, Zhang Bo *et al.*. Experiment research of high precision fiber optic gyroscope temperature [J]. *J. Astronautics*, 2007, **28**(3): 580~583
- 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
- Wang Junpu, Jin Zhihua, Tian Weifeng. Multi-variable modeling strategy for the fiber optic gyro temperature-dependent drift[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 66~69
- 王俊璞, 金志华, 田蔚凤. 光纤陀螺温度漂移的多变量模型[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 66~69
- Zhang Guangying, Deng Zhenglong, Fu Zhenxian. Temperature modeling study for gyroscope[J]. *J. System Simulation*, 2003, **15**(3): 369~371
- 张广莹, 邓正隆, 傅振宪. 陀螺仪温度建模研究[J]. *系统仿真学报*, 2003, **15**(3): 369~371
- Yan Fengping, Lan Huijuan, Jian Shuisheng. Investigation of the temperature compensated method for fiber optic gyros[J].

- Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 968~974
- 延凤平, 蓝慧娟, 简水生. 光纤陀螺温度补偿方案研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(7): 968~974
- 10 Wang Xiao. Wavelet network and its application[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009, (27): 20~21
- 王 晓. 小波神经网络及其应用[J]. 科技创新导报, 2009, (27): 20~21
- 11 Zhang Xinhong. The Theory of Wavelet Networks and Application in Economic Modeling [M]. Dalian: Dongbei University of Finance & Economics Press, 2008
- 张新红. 小波网络理论及其在经济建模中的应用[M]. 大连: 东北财经大学出版社, 2008
- 12 Seda Postalcioglu, Yasar Becerikli. Wavelet networks for nonlinear system modeling[J]. *Neural Comput & Applic*, 2007, **16**(4): 433~441
- 13 Chen Yuehui, Dong Jiwen, Yang Bo *et al.*. A Local Linear Wavelet Neural Network[C]. WCICA, 2004, **13**: 1954~1957
- 14 Y. Oysal, Sevcan. An adaptive wavelet network for function learning[J]. *Neural Comput & Applic*, 2010, **19**(3): 383~392
- 15 Xie Qizhan, Pan Yingjun, Ren Chunhua. Temperature drift compensation of quartzose acceleromter based on wavelet network[J]. *Testing & Control Technol.*, 2009, **28**(8): 15~17
- 解启瞻, 潘英俊, 任春华. 石英加速度计温度漂移的小波网络建模[J]. 测控技术, 2009, **28**(8): 15~17