

光纤陀螺温度漂移建模与预测

王超, 吴刚, 凌青, 石春, 秦琳琳, 余柏科

(中国科学技术大学, 合肥 230027)

摘要: 温度漂移是光纤陀螺的主要误差之一, 它可分为两部分: 与系统相关的误差源及环境的随机扰动产生的随机误差项; 由温度变化引起的趋势项。提出了一种光纤陀螺温度漂移的改进 AR 模型和建模方法, 先建立随机误差项的 AR 模型, 再在 AR 模型中引入趋势项。使用实测的光纤陀螺温度漂移数据建模, 并验证模型有效性。结果表明, 该模型能准确预测不同温度变化情况下陀螺漂移输出, 并能用预测值有效补偿漂移误差, 补偿后温度漂移减小到补偿前的 20% 以下。基于 Labview 开发了可视化软件, 该软件在陀螺温度特性的评价与预测方面具有实用价值。

关键词: 光纤陀螺; 温度漂移; 改进 AR 模型; 预测

中图分类号: V241.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0040-05

Modeling and Prediction of Fiber Optic Gyro Temperature Drift

WANG Chao, WU Gang, LING Qing, SHI Chun, QIN Lin-lin, SHE Bai-ke

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Temperature drift is one of main errors in Fiber Optic Gyro (FOG), which can be divided into two terms: a random error term associated with system error and environmental disturbance, and a trend term caused by temperature change. An improved AR model of FOG temperature drift and its modeling method were proposed. Firstly, AR model of the random error term was established, and then the trend term was introduced in the AR model. The measured FOG temperature drift data was used for modeling and verifying the validity of model. Results show that: 1) The proposed model can accurately predict the gyro drift output under different temperature variations, and the predicted value can effectively compensate for the drift error; and 2) The FOG temperature drift after compensation is reduced to less than 20% of that before compensation. Visual software was developed based on Labview, which is of practical value in assessment and prediction of the gyro temperature characteristics.

Key words: fiber optic gyro; temperature drift; improved AR model; prediction

0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应工作的环形干涉仪, 是一种自主测量载体相对于惯性空间旋转的角速率传感器, 具有全固态、体积小、质量小、启动快、动态范围大、寿命长、成本低、可靠性高等突出特点, 广泛应用于惯性导航领域, 成为新一代惯性导航系统的首选惯性测量元件^[1]。

然而光纤陀螺中的光学器件, 如光纤环圈、宽带光

源等, 易受周围温度变化的影响, 导致陀螺输出产生较大漂移, 严重影响测量精度。目前, 工程上通过改进陀螺结构及组成部件, 改善光纤绕环技术, 对光纤陀螺进行温度控制等来抑制陀螺温度漂移^[2], 但是剩余的温度漂移依然不能忽视。因此需要对光纤陀螺温度漂移建立数学模型, 该模型能在不同温度变化情况下预测陀螺漂移输出, 有助于快速判断和评价陀螺的温度特性, 为陀螺生产提供帮助; 并且根据模型预测值补偿陀螺输出以提高测量精度。

本文根据 Shupe 效应分析了影响陀螺温度漂移的因素; 提出一种光纤陀螺温度漂移的改进 AR 模型和建模方法, 试验验证了模型有效性; 基于 Labview 开发了光纤陀螺温度特性评测软件, 服务于陀螺生产。

收稿日期: 2015-01-09

修回日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(31000672)

作者简介: 王超(1989—), 男, 江苏南京人, 硕士生, 研究方向为光纤陀螺建模、控制与优化。

1 光纤陀螺的 Shupe 效应

温度漂移是光纤陀螺的主要误差之一。当陀螺周围温度变化时,光纤折射率、光纤环圈热膨胀系数、环圈形状和尺寸等参数均发生改变,导致陀螺输出发生漂移。文献[3]中指出,当光纤环圈中存在位置不对称的温度扰动时,两束反向传播的光波经过这段光纤后将产生非互易性相移,称为 Shupe 效应。该非互易性相移与旋转引起的 Sagnac 相移无法区分,因此大大降低了陀螺的测量精度。在光纤长度为 L 的环圈中,两束干涉光分别沿顺时针和逆时针方向传播,因位置不对称的温度扰动所引起的非互易性相位差为^[3]

$$\Delta\Phi(t) = \frac{\beta_0 n}{c} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \int_0^L T'(z,t)(L-2z) dz \quad (1)$$

式中: $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为自由空间的传播常数, λ_0 为真空中光波长; n 为光纤折射率; c 为真空中光速; $\partial n/\partial T$ 为折射率随温度的变化率; z 为光纤上某点坐标; $T'(z,t)$ 为 t 时刻光纤 z 点上的温度变化率。

由式(1)可知,Shupe 效应与光纤环圈的温度变化率有关。由于热传导效应,温度变化率将对光纤环圈形成一个自内向外或自外向内的温度梯度。因此,Shupe 效应还反映出温度梯度对陀螺输出的影响。

2 光纤陀螺温度漂移建模

光纤陀螺中各种光学元件和电子元件自身的不稳定性会形成复杂的噪声源;同时,光纤陀螺对外界环境较为敏感,温度变化、微小振动、磁场扰动以及其他随机干扰都会影响陀螺输出。因此,光纤陀螺温度漂移可分为两部分:与系统相关的误差源以及环境的随机扰动产生的随机误差项;由温度变化引起的趋势项^[4]。根据 Shupe 效应,该趋势项主要与环圈温度变化率和环圈内外温度梯度有关。本文先建立随机误差项模型,再建立趋势项模型,修正随机误差项模型。

2.1 随机误差项建模

2.1.1 数据预处理及 AR 模型

为了建立随机误差项模型,要求光纤陀螺在试验中保持一段时间的恒温。先预处理静态、恒温条件下测量的陀螺数据,保证建模的准确性。

本文采用拉依达准则^[5]剔除陀螺数据中的野值,具体步骤如下:

- 1) 对 n 次测量值 y_1, \dots, y_n , 求算术平均值 \bar{y} ;
- 2) 求各测量值相对于均值的偏差 V_i , 即

$$V_i = y_i - \bar{y} \quad i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

- 3) 计算标准差 σ , 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n V_i^2}; \quad (3)$$

4) 判断并剔除野值,当 $|V_i| > 3\sigma$, 则认为对应的 y_i 为野值,予以剔除。

以上步骤可以去掉明显的异常值。

剔除野值后重新编组序列 $\{y(t)\}$, 求平均值 μ , 去除平均值后得到零平均值序列 $\{Y(t)\}$, 即为陀螺随机误差。再进行平稳化检验^[6], 将整个序列 $\{Y(t)\}$ 按时间顺序分成 m 个等数据量的子序列。设序列 $\{Y(t)\}$ 有 N 个值, 则每个子序列有 N/m 个值, 依次计算每个子序列的平均值 μ_i 和方差 $\sigma_i^2, i = 1, 2, \dots, m$, 求出每个子序列的 γ_i 值, 即

$$\gamma_i = \mu_i + \sigma_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

计算所有 γ_i 值的平均值 $\bar{\gamma}$ 为

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_i \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)的结果, 当 $\gamma_i > \bar{\gamma}$ 的子序列个数 m_1 和 $\gamma_i \leq \bar{\gamma}$ 的子序列个数 m_2 大致相等时, 则该序列为平稳随机序列。

经检验 $\{Y(t)\}$ 为平稳随机序列, 考虑到当前时刻陀螺输出值与系统、测量噪声和之前时刻的输出值均可能相关^[7], 建立 AR(2) 模型如下

$$Y(t) = k_1 Y(t-1) + k_2 Y(t-2) + a_t \quad (6)$$

式中: k_1, k_2 为随机误差项模型系数; a_t 是均值为 0、方差为 σ_a^2 的白噪声; $Y(t) = y(t) - \mu$ 。该模型另一种表示形式为

$$(1 - k_1 q^{-1} - k_2 q^{-2})(y(t) - \mu) = a_t \quad (7)$$

式中: q^{-1} 为滞后算子; μ 为剔除野值后的序列均值。

2.1.2 模型参数估计

采用最小二乘法估计 AR(2) 模型中参数 k_1, k_2, θ 。最小二乘估计 $\hat{\theta}$ 为^[8]

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

式中:

$$\theta = (k_1 \quad k_2)^T; \quad (9)$$

$$\hat{\theta} = (\hat{k}_1 \quad \hat{k}_2)^T; \quad (10)$$

$$Y = (Y(3) \quad Y(4) \quad \dots \quad Y(N))^T; \quad (11)$$

$$X = \begin{pmatrix} Y(2) & Y(1) \\ \vdots & \vdots \\ Y(N-1) & Y(N-2) \end{pmatrix} \quad (12)$$

在式(8)中序列长度 N 需 $N \gg 2$ 以满足矩阵 $X^T X$ 是非奇异的要求。

计算序列 $\{y(t)\}$ 的平均值估计均值 μ ; 残差方差 σ_a^2 的无偏估计由式(13)给出^[8]

$$\hat{\sigma}_a^2 = \frac{1}{N} (Y^T Y - Y^T X \hat{\theta}) \quad (13)$$

通过提取试验中恒温时段内的陀螺输出数据建立随机误差项 AR(2) 模型。

2.1.3 模型诊断检验

完成模型参数估计后, 检验模型适用性。本文通过检查模型是否满足假定进行检验。AR(p) 模型的假定是: 残差 a_i 为零均值、常值方差的白噪声。设已拟合出 AR(2) 模型, \hat{k}_1, \hat{k}_2 为模型参数估计值, 则残差 a_i 的估计值为

$$\hat{a}_i = Y(t) - \hat{k}_1 Y(t-1) - \hat{k}_2 Y(t-2) \quad (14)$$

若经检验 \hat{a}_i 为白噪声, 则表明模型适用; 否则表明模型不适用。当 \hat{a}_i 为白噪声时, 序列 $\{\hat{a}_i\}$ 的理论自相关函数值和理论偏自相关函数值均为零 (原点除外)。因此, 若计算得到的序列样本自相关估计值和样本偏自相关估计值均在零附近波动, 且不显著 (两倍标准差范围内), 则说明 AR(2) 模型适用; 否则可以根据序列 $\{\hat{a}_i\}$ 的样本自相关函数和样本偏自相关函数的结构修正模型^[9]。

2.2 趋势项建模

试验中温度变化使陀螺输出发生漂移。趋势项用于描述陀螺输出漂移的整体变化趋势, 主要受到环圈温度变化率和环圈内外温度梯度的影响。本文对采样序列进行平滑提取趋势项, 它能较好地反映出陀螺温度漂移的整体变化趋势。试验中光纤环圈中心位置和外壁上分别安装两个温度传感器, 感知环圈周围温度变化。使用环圈中心温度变化率项和环圈内外温度梯度项建立该趋势项模型。由于环圈中心温度变化率和环圈内外温度梯度与趋势项呈较强的线性关系, 并且陀螺工装可能导致传感器测量到的温度变化对陀螺输出的影响具有滞后性, 因此趋势项模型为

$$\mu(t) = \mu_0 + \beta_1 T'(t-i) + \beta_2 \Delta T(t-i) \quad (15)$$

式中: μ_0 等于式(7)中 μ 值; $T'(t-i)$ 为环圈中心温度变化率; $\Delta T(t-i)$ 为环圈内外温度梯度; β_1, β_2 为模型系数; i 为滞后步长。采用最小二乘法估计式(15)中参数 β_1, β_2 和 i 建立模型。

2.3 温度漂移建模

绘制并分析某光纤陀螺的温度漂移输出序列, 可以认为该序列具有同质非平稳特性^[9], 即除去局部水平或趋势不同以外, 序列的某一部分和其他任何部分特征相似, 说明温度变化对该陀螺随机误差的影响不大, 因此本文在随机误差项 AR(2) 模型中引入趋势项模型建立光纤陀螺温度漂移模型, 即用式(15)修正式(7)中的 μ , 得到的温度漂移模型为

$$(1 - k_1 q - k_2 q^2)(y(t) - \mu(t)) = a_i \quad (16)$$

即

$$(1 - k_1 q - k_2 q^2)(y(t) - \mu_0 - \beta_1 T'(t-i) - \beta_2 \Delta T(t-i)) = a_i \quad (17)$$

把 2.1 节、2.2 节中所有辨识得到的参数估计值代入式(17)建立温度漂移模型。该模型是一个线性模型, 不仅考虑到了陀螺输出之间的相关性, 而且考虑到了光纤环圈温度的时空变化对陀螺输出的影响。

3 试验过程及结果

3.1 试验说明

试验中使用高精度半导体恒温箱。将温箱静止放置于水平大理石台面上, 把某光纤陀螺固定在温箱底座。该陀螺光纤环圈中心和外壁上分别安装了两个温度传感器用于测量环圈的温度变化情况。

启动温箱和陀螺, 设置温箱温度 20 °C, 待温箱内温度稳定、陀螺输出平稳后, 进行变温试验。试验过程为: 温箱内先保持恒温 10 min, 然后以 1 °C/min 降温至 10 °C 并保持恒温 20 min, 再以 1 °C/min 升温至 30 °C 并保持恒温 20 min, 最后以 1 °C/min 降回 20 °C。试验中陀螺和两个温度传感器每间隔 1 s 输出一组测量数据 $\{G(t), T_1(t), T_2(t)\}$ 。陀螺输出数据 $G(t)$ 如图 1 所示, 环圈中心温度变化率 $T'_1(t)$ 如图 2 所示, 环圈内外温度梯度 $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$ 如图 3 所示。

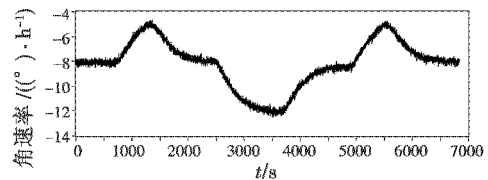


图 1 光纤陀螺输出曲线

Fig. 1 The curve of FOG output

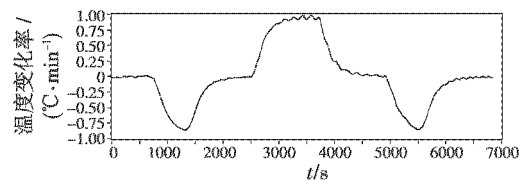


图 2 光纤环圈中心温度变化率

Fig. 2 Temperature change rate of the glass sensor coil center

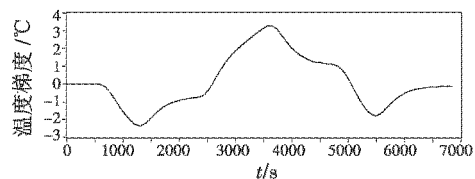


图 3 光纤环圈内外温度梯度

Fig. 3 Temperature gradient of the glass sensor coil

3.2 建立模型

根据本文提出的陀螺温度漂移模型和建模方法, 先截取 $G(t)$ 中前 10 min 数据建立随机误差项模型。在该

步骤中,剔除野值,检验序列是平稳的;并对 AR(2) 模型参数辨识,得 $\hat{\mu} = -8.097 (^{\circ})/h, \hat{\sigma}_a = 0.146 (^{\circ})/h, \hat{k}_1 = -0.005, \hat{k}_2 = -0.04$;经检验 AR(2) 模型适用。再平滑 $G(t)$,得到陀螺温度漂移的趋势项如图 4 所示,根据趋势项模型辨识得到的参数为 $\hat{\beta}_1 = -2.733, \hat{\beta}_2 = -0.387, \hat{i} = 38, \hat{\mu}_0 = -8.097 (^{\circ})/h$ 。最后把所有参数估计值代入式(17)得到该光纤陀螺的温度漂移模型。

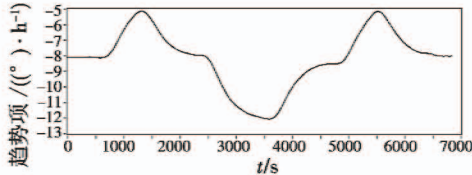


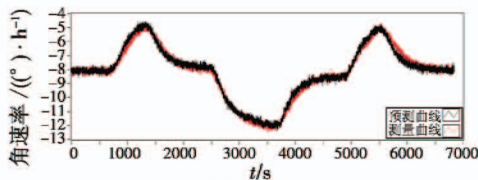
图 4 趋势项曲线

Fig. 4 The curve of the trend part

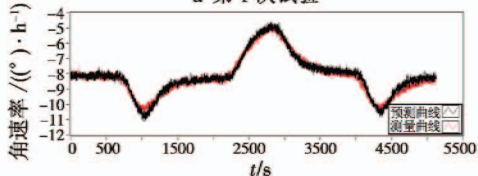
3.3 模型有效性验证

使用 3.2 节中已建立的温度漂移模型和温度传感器测量数据预测第 1 次试验中的陀螺输出,得到的估计值与测量值如图 5a 所示。可以看出,已建立的模型能准确反映本次试验中陀螺的温度漂移。

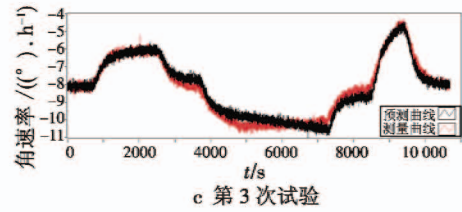
为进一步验证模型有效性,又进行了两次不同的变温试验。第 2 次试验中温箱变温速率不变,改变温度变化范围。试验过程为:温箱内先保持 20 °C 恒温 10 min,然后以 1 °C/min 升温至 25 °C 并保持恒温 20 min,再以 1 °C/min 降温至 15 °C 并保持恒温 20 min,最后以 1 °C/min 升回 20 °C。此次试验应用已有模型和温度传感器测量数据预测陀螺输出,并与实测数据相比较,如图 5b 所示。可以看出,该模型在不同变温范围情况下能有效预测出陀螺温度漂移。第 3 次试验中温箱变温速率和温度变化范围均发生改变。试验过程为:温箱先保持 20 °C 恒温 10 min,然后以 0.5 °C/min 降温至 5 °C 并保持恒温 20 min,再以 0.5 °C/min 升温至 35 °C 并保持恒温 20 min,最后以 1 °C/min 降回 20 °C。本次试验得到的估计值和测量值如图 5c 所示。可以看出,对于不同的变温速率和变温范围,该模型仍能较好地预测出陀螺温度漂移。



a 第 1 次试验



b 第 2 次试验



c 第 3 次试验

图 5 试验估计值与测量值的比较图

Fig. 5 Comparison of predicted values and measured values

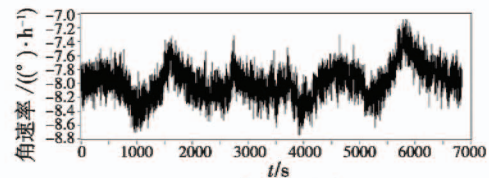
以上 3 次试验得到的估计序列和测量序列的均值及标准差如表 1 所示。本文提出的光纤陀螺温度漂移模型具有统一的结构形式,但陀螺不同,模型参数也不同。

表 1 估计序列和测量序列的均值和标准差

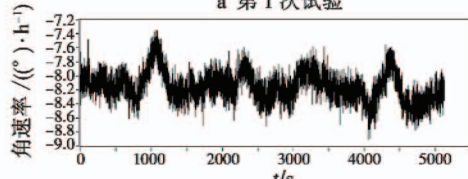
Table 1 Mean and standard deviation of estimation

试验	sequence and measurement sequence				补偿后标准差
	估计序列均值	测量序列均值	估计序列标准差	测量序列标准差	
第 1 次	-8.14	-8.19	1.86	1.88	0.24
第 2 次	-8.09	-8.15	1.30	1.26	0.21
第 3 次	-8.14	-8.16	1.93	1.98	0.32

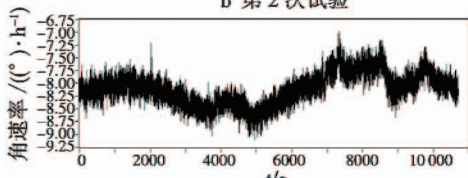
最后根据模型预测值补偿陀螺输出,3 次试验补偿后的结果分别如图 6a、图 6b、图 6c 所示,得到的补偿后序列标准差如表 1 所示,补偿后序列漂移降低至补偿前的 20% 以下。若想进一步减少漂移,可采用卡尔曼滤波^[10]、FLP^[11]等算法。试验结果表明,本文提出的改进 AR 模型和建模方法对光纤陀螺温度漂移的预测、补偿准确有效。



a 第 1 次试验



b 第 2 次试验



c 第 3 次试验

图 6 补偿后结果

Fig. 6 Result after compensation

4 可视化软件设计

本文使用 Labview 软件开发平台开发了光纤陀螺

温度特性评测软件,目的是将光纤陀螺温度漂移建模的研究应用到实际生产中,实现光纤陀螺温度特性的快速评价、预测及补偿。该软件由三大模块组成:第一模块用于测量曲线基本参数的计算;第二模块基于改进 AR 模型,计算模型参数,并根据预测值补偿陀螺输出;第三模块用于预测不同温度变化情况下的陀螺输出,并能验证模型有效性,以上功能服务于陀螺生产,具有应用价值。

5 结束语

温度漂移是影响光纤陀螺测量精度的重要误差源,由系统随机噪声源产生的随机误差项和温度变化引起的趋势项组成。本文提出一种光纤陀螺温度漂移的改进 AR 模型和建模方法,先提取试验中恒温时段内的陀螺输出数据建立随机误差项 AR(2)模型,再使用温度传感器测量数据建立由温度变化率和温度梯度组成的趋势项模型,最后用趋势项模型修正 AR(2)模型,得到陀螺温度漂移模型。本文用试验验证模型有效性,并开发了相关的可视化软件。该模型充分考虑到了温度的时空变化对陀螺输出的影响以及陀螺输出的相关性。该模型线性、易于实现预测和在线补偿,对评价和预测光纤陀螺温度特性以及提高光纤陀螺测量精度具有现实意义。

参 考 文 献

- [1] 党淑雯. 光纤陀螺的信号分析及滤波理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013:1-22. (DANG S W. Theory and technology on signal processing and denoising of fiber optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:1-22.)
- [2] 韩冰,林玉荣,邓正隆. 光纤陀螺温度漂移误差的建模与补偿综述[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(2):218-224. (HAN B, LIN Y R, DENG Z L. Overview on modeling and compensation of FOG temperature drift[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(2): 218-224.)
- [3] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008:55-59. (ZHANG W X. Fiber optic gyro and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:55-59.)
- [4] 周益,李勇,张峰. 基于 AR 模型光纤陀螺温度建模方法研究[J]. 空间控制技术与应用,2011,37(5):55-58. (ZHOU Y, LI Y, ZHANG F. Modeling method of fiber optic gyro based on AR model[J]. Aerospace Control and Application, 2011, 37(5):55-58.)
- [5] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2005:44-51. (FEI Y T. Error theory and data processing[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2005:44-51.)
- [6] 张秋昭,张书毕,侯东阳,等. 基于经验模态分解的光纤陀螺随机序列平稳化处理[J]. 传感技术学报,2011,24(10):1440-1444. (ZHANG Q Z, ZHANG S B, HOU D Y, et al. FOG random sequence pretreatment using empirical mode decomposition[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(10):1440-1444.)
- [7] MIAO L J, ZHANG F S, SHEN J, et al. Data analysis and modeling of fiber optic gyroscope drift[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(1):50-55.
- [8] 夏天昌. 系统辨识——最小二乘法[M]. 北京:国防工业出版社,1984:15-64. (XIA T C. System identification least-squares methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984:15-64.)
- [9] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. Time Analysis: forecasting and control[M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc, 1994.
- [10] 白俊卿,张科,卫育新. 光纤陀螺随机漂移建模与分析[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(5):621-624. (BAI J Q, ZHANG K, WEI Y X. Modeling and analysis of fiber optic gyroscope random drifts[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(5):621-624.)
- [11] SHEN C, CHEN X Y. Improved forward linear prediction algorithm based on AGO for fiber optic gyroscope[J]. The Journal of Grey System, 2012, 3:251-260.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅