

doi:10.3788/gzxb20184706.0612001

基于新陈代谢双时序模型的激光多普勒测速仪漂移数据滤波

王琦,高春峰,周健,魏国,聂晓明,龙兴武

(国防科技大学 前沿交叉学科学院,长沙 410073)

摘 要:为了有效抑制激光多普勒测速仪输出数据的随机漂移,提高其测量精度,在传统时序模型的基础上采用新陈代谢双时序模型进行激光多普勒测速仪漂移数据滤波.该模型由两级新陈代谢时序模型级联而成,每一级新陈代谢时序模型均依次对 13 个数据点时序建模.依据此模型分别对激光多普勒测速仪静态及动态漂移数据进行建模和滤波.利用方差分析法及 Allan 方差法对滤波前后的测速仪静态漂移数据进行分析并利用频谱分析法对比了滤波前后的测速仪动态漂移数据.结果表明:新陈代谢双时序模型将静态漂移数据标准差减小为原始数据的 44%,将角度随机游走降为原始数据的 41%;该方法不仅能实时降低激光多普勒测速仪的静态随机漂移误差,而且能够实时有效抑制其动态输出噪声.

关键词:应用光学;时序分析;新陈代谢双时序模型;激光多普勒测速仪;静态数据;动态数据;方差分析法;Allan 方差;频谱分析

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0612001-6

Filtering for Drift Data of Laser Doppler Velocimeter Based on Metabolic Double Time Series Model

WANG Qi, GAO Chun-feng, ZHOU Jian, WEI Guo, NIE Xiao-ming, LONG Xing-wu
(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: To reduce the random drift of a laser Doppler velocimeter effectively and improve its measurement accuracy, a metabolic double time series model based on the traditional time series model is put forward for filtering drift data of a laser Doppler velocimeter. The model consists of a cascade of two metabolic time series models, each of which models 13 data points using a time series model in turn. The static and dynamic drift data of a laser Doppler velocimeter are modeled and filtered based on the model respectively. The variance analysis method and the Allan variance method are used to analyze the static drift data before and after being modeled and filtered. The dynamic drift data is also compared by the spectrum analysis method. The results show that this method reduces the standard deviation of the static drift data to 44% of the original data, and reduces the angular random walk to 41%. This method can not only reduce the static random drift error in real time, but can also suppress the dynamic output noise effectively.

Key words: Applied optics; Time series analysis; Metabolic double time series model; Laser Doppler velocimeters; Static data; Dynamic data; Variance analysis ; Allan variance; Spectrum analysis

OCIS Codes: 120.7250; 280.3340; 280.7250; 280.3420

基金项目:国家自然科学基金(No.61308060)资助

第一作者:王琦(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为激光多普勒测速及与激光惯性导航系统组合应用.Email:tianmawangqi@hotmail.com

导师(通讯作者):龙兴武(1958-),男,教授,博士,主要研究方向为激光陀螺及惯性技术.Email:xwlong110@sina.com

收稿日期:2017-12-24;录用日期:2018-03-26

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

自从 1964 年 YEH Y 等证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体速度以来^[1],激光多普勒测速技术就以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大及非接触测量等特点在航空、航天、机械、医学等领域得到快速发展^[2-4].目前,对于激光多普勒测速技术的研究多集中于信号处理及应用领域的拓展^[5-8].由于受系统结构、测量机理及外界环境等因素的影响,激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDV)输出信号中包含随机漂移误差.随机漂移误差是影响 LDV 精度的因素之一,目前对 LDV 误差因素已有深入研究^[9-10],但有关如何减小 LDV 输出信号的随机误差的研究还很少.分析随机误差的常用方法之一是时间序列分析法,其用线性自回归 AR(n)模型或线性自回归滑动平均 ARMA(m, n)模型来描述随机误差,并在此基础上设计 Kalman 滤波器以减小其随机性^[11-12].传统时序模型的参数是由全部采样数据或部分采样数据通过最小二乘法估计得到^[13],既不能实现实时滤波,也无法实现动态数据滤波.文献[14-15]提出采用灰色时序模型对激光陀螺漂移数据滤波,但其中的时序模型仍为传统时序模型.

为此,本文改进传统时序模型,提出新陈代谢时序建模方法,在此基础上由两级级联的新陈代谢时序模型组成新陈代谢双时序模型对 LDV 漂移数据建模和滤波,并对建模与滤波前后的 LDV 漂移数据进行分析对比.

1 新陈代谢双时序模型

1.1 AR(2)模型

课题组实验和统计检验表明,LDV 静态输出数据可以看作是平稳、正态的时间序列.由于实验数据是由 LDV 测量高精度转台得到,不满足零均值的条件,所以本文利用原始数据 $x^{(0)}(k)$ 的一阶差分信号建立时间序列分析中常用的二阶自回归模型—AR(2)模型.

设原始数据序列为 $\mathbf{X}^{(0)} = [x^{(0)}(1) \ x^{(0)}(2) \ \cdots \ x^{(0)}(n)]$,其一阶差分信号表示为

$$\Delta(k+1) = x^{(0)}(k+1) - x^{(0)}(k) \quad (1)$$

差分信号的 AR(2)模型为

$$\Delta(k+1) = \varphi_1 \Delta(k) + \varphi_2 \Delta(k-1) + \omega(k) \quad (2)$$

式中, $\omega(k)$ 为白噪声; φ_1 和 φ_2 为模型参数,可按照式(3)由最小二乘法估计得到,从而确定该模型.

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{a}} = [\varphi_1 \ \varphi_2]^T$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta(2) & \Delta(3) & \cdots & \Delta(n-1) \\ \Delta(1) & \Delta(2) & \cdots & \Delta(n-2) \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{Y} = [\Delta(3) \ \Delta(4) \ \cdots \ \Delta(n)]^T$.

将式(2)展开,由原始数据 $x^{(0)}(k)$ 表示为

$$x^{(0)}(k+1) = (1 + \varphi_1)x^{(0)}(k) + (\varphi_2 - \varphi_1)x^{(0)}(k-1) - \varphi_2 x^{(0)}(k-2) + \omega(k) \quad (4)$$

从系统的观点出发,认为漂移是由以白噪声为输入的系统输出.基于式(4)信号模型,以 $\mathbf{X}^{(0)}$ 作为输入信号,可以建立如式(5)所示的 Kalman 滤波模型,对 LDV 随机漂移进行滤波,得到 AR(2)模型估计序列 $\hat{\mathbf{X}}^{(0)}$.

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \Phi \mathbf{X}(k) + \Gamma \omega(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{H} \mathbf{X}(k) + v(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{X}(k) = [x^{(0)}(k) \ x^{(0)}(k-1) \ x^{(0)}(k-2)]^T$ 为状态量; $\Phi = \begin{bmatrix} 1 + \varphi_1 & \varphi_2 - \varphi_1 & -\varphi_2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$; $\Gamma =$

$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$.噪声 $\omega(k)$ 、 $v(k)$ 的统计特性为:均值 $E[\omega(k)] = 0$, $E[v(k)] = 0$;自相关函数 $\gamma_{\omega\omega}(k, j) = Q\delta_{kj}$, $\gamma_{vv}(k, j) = R\delta_{kj}$;互相关函数 $\gamma_{\omega v}(k, j) = 0$.

1.2 新陈代谢双时序模型

随着时间推移,LDV 漂移数据长度增加,计算机内存及建模运算量将不断增大.为了避免此问题,可采用新陈代谢时序模型对 LDV 漂移数据进行实时建模和滤波.从 1.1 节分析可以看出,AR(2)模型由 6 个数据点就可以估计出模型参数.为了兼顾估计精度和实时性,对 LDV 输出的每 13 个数据点进行一次 AR(2)建模

和估计,然后进行输入数据新陈代谢,不断地建模与估计.同时可以看出,多个新陈代谢时序模型可以形成级联新陈代谢时序模型,但由于下一级新陈代谢时序模型的滤波效率往往会低于上一级新陈代谢时序模型,所以兼顾滤波效率和实时性,采用新陈代谢双时序模型建模与估计,其过程如图1.

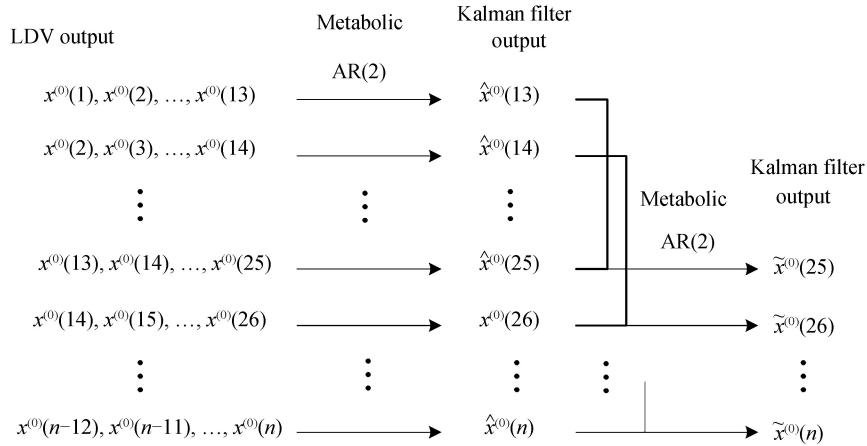


图1 新陈代谢双时序模型建模与估计过程

Fig.1 Modeling and estimation process of metabolic double time series model

图1中, $x^{(0)}(k)$ 为 LDV 实时输出, $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为原始数据经 AR(2) 模型建模后的 Kalman 滤波输出值, $\tilde{x}^{(0)}(k)$ 为 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 经第二级模型建模滤波后的输出值. 在 LDV 不断输出新数据的同时, 及时去掉老数据, 所建立模型能够实时地对漂移数据进行滤波.

2 实验结果与分析

在室温条件下, 用课题组自行研制的 LDV 测量高精度转台恒速转动下边缘的速度, 图2为 LDV 测速示意图. 激光光源为单模固体绿光激光器, 功率为 50 mW, 波长为 532 nm. 激光束经准直补偿透镜组准直后由反射率为 50% 的分束镜 BS 分束. 反射光束经衰减片后入射到全反镜 M 上, 然后沿反方向传输, 经分束镜、偏振片、滤光片及小孔光阑后入射到雪崩光电二极管探测器, 此为参考光. 透射光束直接照射到转台表面, 沿反方向传播的散射光经分束镜 BS 部分反射后, 经偏振片、滤光片及小孔光阑后

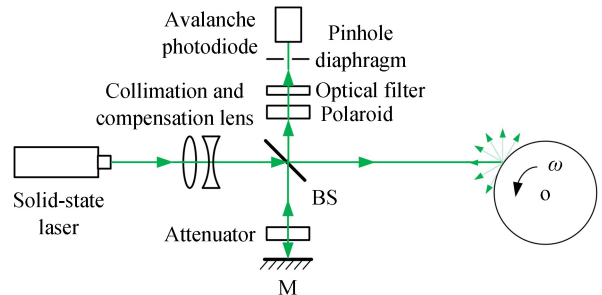


图2 LDV 测速示意图

Fig.2 Measurement diagram of a LDV

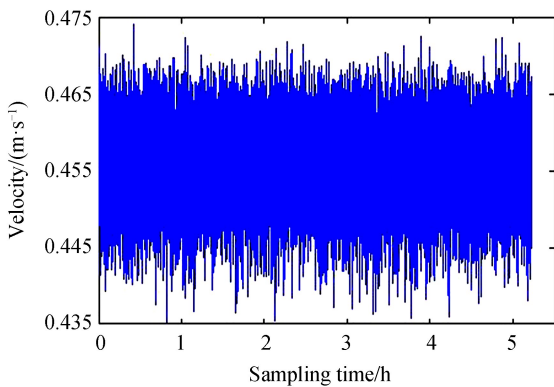


图3 LDV 原始采样数据

Fig.3 Original sampling data of LDV

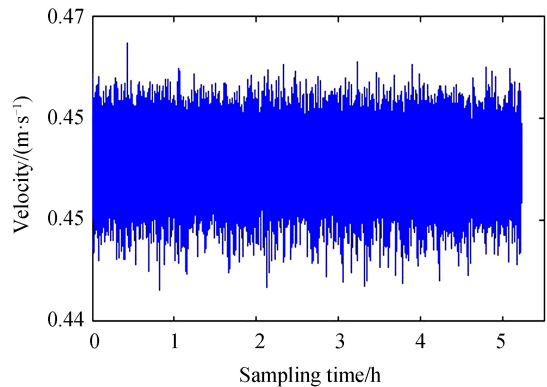


图4 新陈代谢 AR(2) 建模后的滤波结果

Fig.4 Filtering result of metabolic AR(2) model

也入射到雪崩光电二极管探测器,此为信号光.参考光与信号光间的干涉在探测器光敏面上形成多普勒拍频信号.实验所用的高精度单轴转台为瑞士 Motion Dynamic 公司所生产,转速稳定度优于 0.001%.转台转速设置为 300°/s.LDV 通电工作至输出稳定后开始采样,采样频率为 50 Hz,采样时间为 5.2 h.图 3 为 LDV 原始采样数据,图 4 为原始采样数据经过新陈代谢 AR(2)模型建模滤波后的输出值.可以看出,经过新陈代谢 AR(2)模型建模估计后,LDV 漂移数据的随机性被弱化,噪声明显减小.

将新陈代谢 AR(2)模型建模后的估计值再次进行新陈代谢 AR(2)模型建模,组成新陈代谢双时序模型,并进行滤波,滤波结果如图 5.可以看出,虽然新陈代谢 AR(2)模型及新陈代谢双时序模型对 LDV 漂移数据的滤波效果均较为显著,但后者明显优于前者.

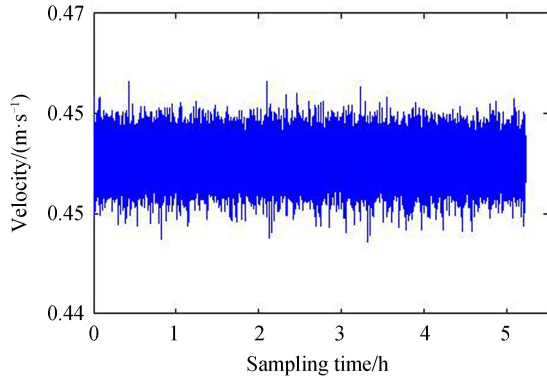


图 5 新陈代谢双时序模型的滤波结果

Fig.5 Filtering result of metabolic double time series model

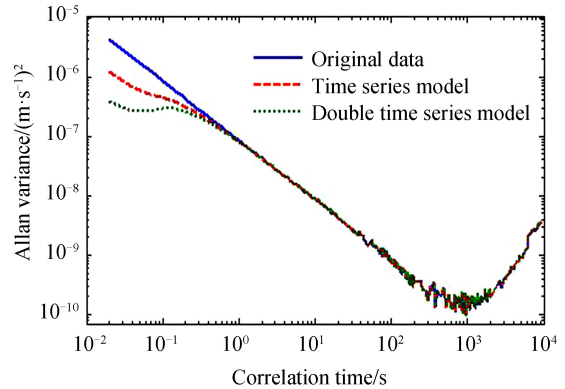


图 6 LDV 随机漂移的 Allan 方差分析双对数曲线

Fig.6 Double logarithmic curve of Allan variance of LDV random drift

为了定量分析新陈代谢双时序模型的滤波效果,分别计算原始采样数据、经新陈代谢时序 AR(2)模型滤波后的数据及经新陈代谢双时序模型滤波后的数据的均值、标准差及信噪比,结果见表 1.可以看出,在没有改变均值的情况下,新陈代谢双时序模型将标准差减小为原数据的 44%,信噪比由原始数据的 46.9 dB 增大为 54 dB.

表 1 LDV 随机漂移的方差分析结果

Table 1 Variance analysis results of LDV random drift

	Original data	Time series model	Double time series model
Mean value/(m · s ⁻¹)	0.455 26	0.455 26	0.455 26
Standard deviation/(m · s ⁻¹)	0.002 06	0.001 26	0.000 91
Signal-to-noise ratio/dB	46.9	51.1	54

采用 Allan 方差法对漂移数据进行分析,计算这两种模型对 LDV 漂移数据随机误差项的滤波效果,结果如图 6.从图中可以看出,这两种模型主要影响 LDV 漂移数据的短相关时间的 Allan 方差.LDV 漂移数据主要随机误差项为角度随机游走和速率斜坡,其系数分别用 N 和 R 表示,结果见表 2.可以看出,这两模型主要影响角度随机游走系数的大小,对速率斜坡的影响均较小.经过新陈代谢时序模型建模和滤波后,角度随机游走系数降为原始数据的 60%,而经过新陈代谢双时序模型建模和滤波后,角度随机游走系数降为原始数据的 41%.因此,新陈代谢双时序模型对 LDV 随机误差的滤波效果更好.同时可以看出,对于新陈代谢双时序模型,第一级时序模型的滤波效果要优于第二级.

表 2 LDV 随机漂移的 Allan 方差分析结果

Table 2 Allan variance analysis results of LDV random drift

	Original data	Time series model	Double time series model
$N/(m \cdot s^{-1/2})$	$2.906 1 \times 10^{-4}$	$1.734 1 \times 10^{-4}$	$1.199 6 \times 10^{-4}$
$R/(m \cdot s^{-2})$	$9.209 2 \times 10^{-9}$	$9.313 8 \times 10^{-9}$	$9.337 1 \times 10^{-9}$

为了验证新陈代谢双时序模型的动态滤波性能,利用该模型对动态数据进行建模和滤波.转台转速设置为 $[300 + 25 \cdot \sin(0.2\pi t)]^\circ/\text{s}$,采样时间为 1 min,其动态原始数据及滤波后数据分别如图 7 和 8 所示,滤波前后频谱如图 9 所示.可以看出在动态情况下,新陈代谢双时序模型同样能够实现对 LDV 输出噪声的有

效抑制.

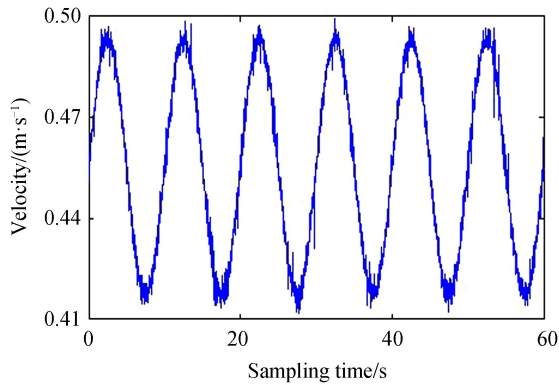


图7 LDV 动态采样数据
Fig.7 Dynamic sampling data of LDV

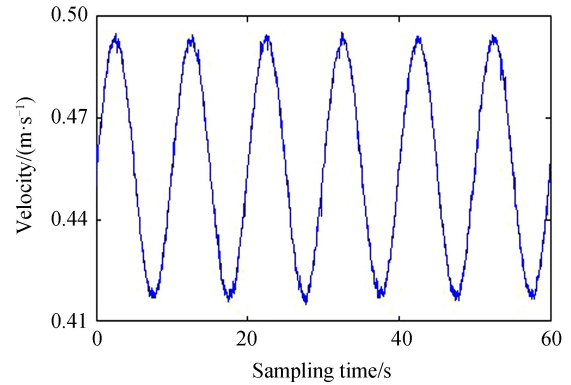


图8 动态下新陈代谢双时序模型的估计值
Fig.8 Estimated values of metabolic double time series model under dynamic conditions

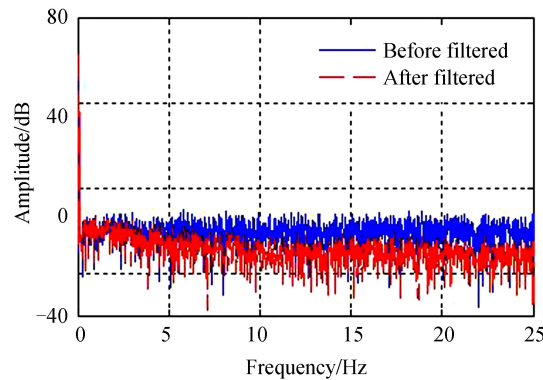


图9 滤波前后信号的频谱
Fig.9 Spectrum of the signal before and after being filtered

3 结论

本文探讨了一种由时间序列 AR(2)模型改进而成的新陈代谢双时序建模滤波方法,用于减小 LDV 输出数据的随机漂移.此方法由两级新陈代谢时序模型级联而成.实验结果表明:该方法不仅能够实时滤除 LDV 的静态随机误差,而且能够实时有效地抑制 LDV 动态输出噪声.

参考文献

- [1] YEH Y, CUMMINS H S. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, **4**(10): 176-178.
- [2] HANSEN R S, PEDERSEN C. All semiconductor laser Doppler anemometer at 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 18288-18295.
- [3] SIMON L, RICHOUX O, DEGROOT A, *et al.* Laser Doppler velocimetry for joint measurements of acoustic and mean flow velocities: LMS-based algorithm and CRB calculation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, **57**(7): 1455-1464.
- [4] NIE Yan-ju, MENG Zhao-kui, HU Shu-ling, *et al.* Frequency domain adaptive threshold detection for laser Doppler velocimetry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(4): 0406002.
聂延举, 孟照魁, 胡姝玲, 等. 激光多普勒测速仪的频域自适应阈值检测[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(4): 0406002.
- [5] QU Yan-chen, DU Jun, ZHAO Wei-jiang, *et al.* A kind of phase modulation laser Doppler shift measuring method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1112001.
曲彦臣, 杜军, 赵卫疆, 等. 一种相位调制激光多普勒频移测量方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11): 1112001.
- [6] SHANG Jian-hua, REN Li-hong, XU Hai-qin, *et al.* Heterodyne laser Doppler vibrometer based on double acousto-optic frequency shifters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1149-1155.
尚建华, 任立红, 徐海芹, 等. 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1149-1155.
- [7] ZHOU Jin-nan, WU Zhan-jun, FAN Zhe, *et al.* Research on Kalman filter algorithm for vehicle laser Doppler velocimeter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(11): 1102006.

- 周金男, 邹战军, 范哲, 等. 车载激光多普勒测速仪的卡尔曼滤波算法研究[J]. 中国激光, 2014, **41**(11): 1102006.
- [8] YING Zhi-hui, GAO Chun-feng, WANG Qi, *et al.* Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system. [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(12): 1204003.
应智慧, 高春峰, 王琦, 等. 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用[J]. 中国激光, 2017, **44**(12): 1204003.
- [9] ZOU Hong, ZHAO Yang. Error analysis in laser Doppler measurement[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3): 235-240.
邹泓, 赵洋. 激光多普勒测量中信号的误差分析[J]. 光学技术, 2000, **26**(3): 235-240.
- [10] ZHOU Jian, FENG Qing-qi, MA Shu-guang, *et al.* Error analysis of reference-beam laser Doppler velocimeter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2581-2587.
周健, 冯庆奇, 马曙光, 等. 参考光束型激光多普勒测速仪的误差分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(11): 2581-2587.
- [11] HOU Qing-jian, MIAO Dong, PENG Yun-hui. Modeling and filtering of laser gyro drift data[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, **13**(4): 39-42.
侯青剑, 缪栋, 彭云辉. 激光陀螺随机漂移数据建模与滤波[J]. 中国惯性技术学报, 2005, **13**(4): 39-42.
- [12] GEORGY J, NOURELDIN A, KORENBERG M J, *et al.* Modeling the stochastic drift of a MEMS-based gyroscope in gyro/odometer/GPS integrated navigation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(4): c856-872.
- [13] ZENG Qing-hua, HUANG Lei, LIU Jian-ye, *et al.* Real-time filtering methods of FOG random noise based on ARMA model[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, **23**(1): 120-124.
曾庆化, 黄磊, 刘建业, 等. 基于 ARMA 模型的光纤陀螺随机噪声滤波方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, **23**(1): 120-124.
- [14] WEI G, XUN J, WANG Y, *et al.* A novel hybrid grey-time series filtering model of RLG's drift data [J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, **234**: 252-259.
- [15] WEIGuo, TANG Jian-xun, WANG Yu, *et al.* Filtering of RLG's drift data based on grey-time series model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(4): 747-751.
魏国, 汤建勋, 王宇, 等. 基于灰色时序模型的激光陀螺漂移数据滤波[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(4): 747-751.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.61308060)

引用格式: WANG Qi, GAO Chun-feng, ZHOU Jian, *et al.* Filtering for Drift Data of Laser Doppler Velocimeter Based on Metabolic Double Time Series Model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0612001

王琦, 高春峰, 周健, 等. 基于新陈代谢双时序模型的激光多普勒测速仪漂移数据滤波[J]. 光子学报, 2018, **47**(6): 0612001