

动力调谐陀螺仪系统辨识方法

田凌子^{1,2*}, 李醒飞^{1,2}, 赵建远^{1,2}, 王亚辉^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学), 天津 300072)

(*通信作者电子邮箱 tianlingzi126@126.com)

摘要:针对动力调谐陀螺仪(DTG)系统辨识中,传统辨识方法(最小二乘类辨识法和频域辨识法)辨识拟合度不高的问题,提出去离群点频域辨识法。该方法结合 DTG 模型结构特征和固有有色噪声特点,将去离群点思想应用于 DTG 模型的频域辨识。实验结果表明,去离群点频域辨识法的辨识效果优于最小二乘类辨识法和传统频域辨识法,辨识拟合度在 90% 以上,并且辨识结果重复性好,辨识算法稳定。在 DTG 系统辨识中,去离群点频域辨识法能够提高辨识拟合度。

关键词:动力调谐陀螺仪;系统辨识;强有色噪声;频域辨识法;最小二乘类辨识法

中图分类号: TP273;U666.12 **文献标志码:** A

Dynamically tuned gyroscope system identification method

TIAN Lingzi^{1,2*}, LI Xingfei^{1,2}, ZHAO Jianyuan^{1,2}, Wang Yahui^{1,2}

(1. College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: In Dynamically Tuned Gyroscope (DTG) system, traditional identification methods, including least square identification method and traditional frequency domain identification method, could not achieve acceptable identification fitness degree. To deal with this problem, outlier-eliminated frequency identification method was proposed. In consideration of the characteristics of DTG model structure and intrinsic colored noise, outlier-eliminated method was applied to DTG frequency domain identification. The experimental results indicate that outlier-eliminated frequency identification method, with a fitness degree above 90%, compared with both least square identification method and traditional frequency domain identification method, has a better performance. In addition, outlier-eliminated frequency identification method possesses of good repeatability and stability. Outlier-eliminated frequency identification method could improve the identification fitness degree of DTG system.

Key words: Dynamically Tuned Gyroscope (DTG); system identification; strong colored noise; frequency domain identification method; least square identification method

0 引言

陀螺仪作为惯性导航系统的核心部件,能够为载体提供精确的空间角位置信息^[1-2]。目前,能达到惯性级的中高精度陀螺仪仍多为工作在闭环条件下的机械式陀螺仪^[3],如液浮陀螺仪、动力调谐陀螺仪(Dynamically Tuned Gyroscope, DTG)等。陀螺仪闭环系统在建立过程中,需要可靠的陀螺模型,以便调整控制器参数,保证整个闭环系统的性能。传统的陀螺仪建模方法主要是机理建模^[4],然而由于陀螺仪系统结构复杂,机理建模需要忽略掉诸多因素,建模精度不高,也难以针对某个陀螺仪的实际情况进行具体分析,建模不具有普适性^[4]。本文将系统辨识的方法应用于动力调谐陀螺仪系统建模,并重点分析陀螺仪固有有色噪声对辨识的影响。

与机理建模不同,系统辨识不需要获得系统运行规律的

具体情况,可直接通过实验数据建立模型。杨光等^[5]针对动力调谐陀螺仪,提出基于渐进理论的模型辨识;王佳等^[6]将参数辨识方法应用于动力调谐陀螺仪的性能分析;范世珣^[7]将频域辨识法应用于动力调谐陀螺仪的系统建模;于旭东等^[8]提出了陀螺仪径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络辨识法。然而,这些研究都仅是将一些成熟的辨识方法直接应用于陀螺仪建模,并没有结合陀螺仪的模型结构和噪声特点进行具体分析。受陀螺仪机械结构、电磁环境以及信号器自身误差特性等因素的影响,陀螺仪输出信号中会含有强有色噪声干扰,直接采用传统的辨识方法对动力调谐陀螺仪模型参数进行辨识时,辨识结果往往是有偏的。

针对输出信号受强有色噪声干扰这一问题,国内外众多学者进行了大量研究,并逐渐形成了一类以最小二乘格式为基础的系統辨识方法^[9-11]。这些辨识方法虽然各有差异,但

收稿日期:2014-05-28;修回日期:2014-07-31。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60972129);国家重点实验室开放基金资助项目(pil1006)。

作者简介:田凌子(1990-),女,天津人,硕士研究生,主要研究方向:惯性元件、嵌入式系统;李醒飞(1966-),男,湖北天门人,教授,博士生导师,主要研究方向:高精度几何量测量、多传感器信息融合、惯性元件与系统;赵建远(1986-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向:机电惯性元件制造与测试;王亚辉(1989-),男,河南开封人,硕士研究生,主要研究方向:惯性元件、嵌入式系统。

都需要形式明确的噪声模型。然而,在动力调谐陀螺仪实际辨识过程中,由于测试环境的复杂性和干扰源的不确定性,难以用一个确定模型对噪声进行表征。在采用最小二乘法时,噪声模型的选择比较困难。本文结合动力调谐陀螺仪的模型和结构,分析其固有有色噪声产生的原因和特点,指出最小二乘法有偏性的原因,并对传统频域辨识法作出改进,提出去离群点频域辨识法。

1 动力调谐陀螺仪系统模型及有色噪声分析

1.1 动力调谐陀螺仪系统模型

动力调谐陀螺仪的陀螺转子主要受到两种力矩成分的作用:一种是挠性支撑力矩,包括正弹性力矩、扭杆阻尼力矩和平衡环的惯性力矩;另一种是壳体传递来的作用力矩,包括正交阻尼力矩、控制力矩和其他干扰力矩等。在这些力矩成分的综合作用下,忽略二次谐波力矩、三阶微量项以及微小阻尼力矩,并假定陀螺仪处于完全调谐状态,则动力调谐陀螺仪的运动方程^[2]为:

$$\begin{cases} J\ddot{\beta} + H\dot{\alpha} = M_x - J\ddot{\Phi}_x - H\ddot{\Phi}_y \\ J\ddot{\alpha} - H\dot{\beta} = M_y - J\ddot{\Phi}_y + H\ddot{\Phi}_x \end{cases} \quad (1)$$

其中: β 、 α 分别为转子沿 x 轴正向和 y 轴正向相对驱动轴的转角, Φ_x 、 Φ_y 分别为壳体相对惯性空间的运动转角, M_x 、 M_y 分别为作用于转子上的外力矩, H 为输入角动量。对式(1)做Laplace变换,得到动力调谐陀螺仪的频域模型,如图1所示。

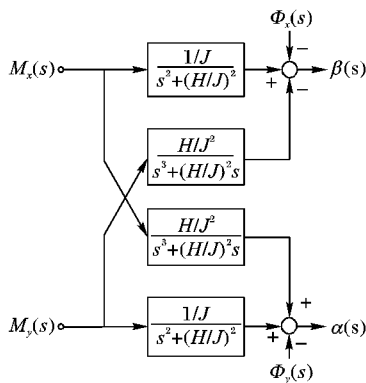


图1 动力调谐陀螺仪系统模型

1.2 动力调谐陀螺仪固有有色噪声

受机械结构、电磁环境以及信号器自身误差特性等因素影响,动力调谐陀螺仪输出信号中包含多个低频强有色噪声,其中以转频干扰能量最强。转频干扰由陀螺转子端面跳动引起,主要有以下三种情况^[2,12]:

1) 机械加工、装配以及扭杆的残余变形造成陀螺转子几何轴线与驱动轴线不重合,如图2所示。

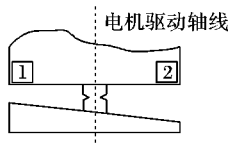


图2 陀螺转子端面与驱动轴线不垂直

2) 转子加工和装配过程中,陀螺转子端面偏离,如受动

不平衡和静不平衡的影响,如图3所示。

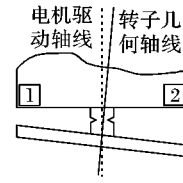


图3 陀螺转子几何轴线与驱动轴线不重合

3) 转子内部质量分布不均匀等因素使得陀螺转子惯性主轴与驱动轴形成一定偏角,如力偶不平衡引起的漂移,如图4所示。



图4 陀螺转子惯性主轴与驱动轴线不重合

受机械加工和修配能力的限制,这三种端面跳动形式是同时存在的,造成陀螺转子的动量矩方向与驱动轴方向形成一个锥形夹角,产生正交阻尼力矩,使得陀螺仪输出信号中含有一个哑铃状的转频干扰^[2]。由于其频率较低,且接近陀螺仪的章动频率,在动力调谐陀螺仪的系统辨识过程中很难处理。

除此之外,陀螺仪信号器输出信号中还包含二倍频干扰、工频干扰及其他一些机理不清的固有强有色噪声^[13]。这些有色噪声多为窄频或单频信号,在对动力调谐陀螺仪系统模型进行辨识时,会使辨识结果产生较大的偏差。

1.3 有色噪声对最小二乘类辨识法的影响

受固有有色噪声影响,动力调谐陀螺仪的离散模型会含有有色噪声成分:

$$A(z^{-1})z(k) = B(z^{-1})u(k) + e(k) \quad (2)$$

其中: $u(k)$ 和 $z(k)$ 分别表示系统的输入和输出; $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 表示系统模型; $e(k)$ 为有色噪声,其自相关序列为:

$$R_x(\tau) = E[e(k)e(k+\tau)] \neq 0 \quad (3)$$

将式(2)转化为最小二乘格式:

$$z_L = H_L \theta + e_L$$

$$\begin{cases} h(k) = [-z(k), u(k)]^T \\ z(k) = [-z(k-1), -z(k-2), \dots, -z(k-n_a)]^T \\ u(k) = [u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b)]^T \\ z_L = [z(1), z(2), \dots, z(L)]^T \\ e_L = [e(1), e(2), \dots, e(L)]^T \\ H_L = [h^T(1), h^T(2), \dots, h^T(L)]^T \end{cases} \quad (4)$$

其中: z_L 是系统的可测输出, H_L 是由输入输出构成的信息向量, θ 是系统参数向量或参数矩阵, e_L 是干扰噪声, n_a 、 n_b 分别为 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 阶数。

由Frechet定理,

$$\hat{\theta}_{LS} \xrightarrow[L \rightarrow \infty]{W. P. 1} \theta_0 + [E\{H_L H_L^T\}]^{-1} E\{H_L e_L\} \quad (5)$$

根据式(2)~(4):

$$E\{\mathbf{h}(k)e(k+\tau)\} = E\left\{\begin{bmatrix} -\mathbf{z}(k) \\ \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} e(k+\tau)\right\} \quad (6)$$

取 $-\mathbf{z}(k)$ 中任一元素 $z(l)$,

$$E\{z(l)e(l+\tau)\} =$$

$$E\left\{\left[-\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(l-1) - \frac{1}{A(z^{-1})}e(l-1)\right]e(l+\tau)\right\}$$

当 $e(k)$ 是有色噪声时,根据式(3), $E[z(l)e(l+\tau)] \neq 0$, 即 $E\{\mathbf{h}(k)e(k+\tau)\} \neq 0$ 。

而根据式(4)~(6), \mathbf{H}_L 中包含 $\mathbf{h}(k)$, 所以 $E\{\mathbf{H}_L \mathbf{e}_L\} \neq 0$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS} \xrightarrow{W.P.1}{L \rightarrow \infty} \boldsymbol{\theta}_0$ 不成立,最小二乘估计为有偏性估计。对于偏差补偿最小二乘法、广义最小二乘法等最小二乘类辨识算法,辨识过程将设定的噪声模型当作系统模型的一部分。由于动力调谐陀螺仪固有有色噪声难以精确建模,因此上述分析过程仍然成立,有色噪声残差依然存在,最小二乘类辨识方法有偏。

2 去离群点频域辨识法

根据前文分析,受动力调谐陀螺仪固有有色噪声的影响,最小二乘类辨识方法难以对其模型参数进行无偏性估计。从频域角度出发,这些有色噪声多为窄频或单频噪声。在频域上,这些噪声表现为一些孤立的离群点,直接采用频域辨识法对陀螺仪模型进行辨识,辨识结果是有偏的。因此,可采用去离群点的方法在频域上对噪声数据进行剔除,然后再进行频域辨识。

2.1 频域去离群点

假定动力调谐陀螺仪受固有有色噪声的干扰,其频率响应为:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{Y_d(j\omega)}{U(j\omega)} + \frac{Y^*(j\omega)}{U(j\omega)} = G_d(j\omega) + G^*(j\omega) \quad (7)$$

其中: $U(j\omega)$ 、 $Y(j\omega)$ 分别为系统输入输出的 Fourier 变换, $Y^*(j\omega)$ 为输出信号中的固有有色噪声成分, $Y_d(j\omega)$ 为输出信号中的陀螺仪响应。

假定参与 Fourier 变换的频率点为 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i^*, \omega_{i+1}, \dots, \omega_j^*, \omega_{j+1}, \dots, \omega_s\}$, 其中 ω_i^* 、 ω_j^* 为动力调谐陀螺仪固有有色噪声频率。取 $G(j\omega)$ 中的幅频成分 $|G(j\omega)|$, 并按频率顺序将 $|G(j\omega)|$ 分为 N 组, 每组 n 个频率点, 对每组数据作如下处理。计算

$$v_k = |G(j\omega_k)| - \left(\sum_{k=1}^n |G(j\omega_k)| \right) / n$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^n v_k^2 / (n-1)}$$

当 $v_k > 3\sigma$ 时, 则判定相应 ω_k 为强有色噪声频率点 ω_k^* , 予以剔除。由于动力调谐陀螺仪固有有色噪声多为窄频或单频噪声, 在对 N 和 n 进行的合理选择后, 可保证在保留大部分频率成分的同时消除掉有色噪声成分。

2.2 频域模型辨识方法

在剔除频域离群点后, 根据式(7)将待求的传递函数

$G(j\omega)$ 写为以频率 ω 为自变量的多项式:

$$G(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{b_0 + b_1(j\omega) + \dots + b_{n_b}(j\omega)^{n_b}}{1 + a_1(j\omega) + \dots + a_{n_a}(j\omega)^{n_a}}$$

$G(j\omega)$ 与所估计模型之间的偏差为:

$$\varepsilon_k = G(j\omega_k) - \frac{B(j\omega_k)}{A(j\omega_k)}$$

定义广义误差 e_k 为:

$$e_k = \varepsilon_k A(j\omega_k) = R(\omega_k) + jI(\omega_k)$$

则误差准则为:

$$J = \sum_{k=1}^N e_k^2$$

极小化误差准则 J , 即对 a_i 和 b_j 分别求偏导^[14] 可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a_i} = \sum_{k=1}^N \left[2e_{ik} \left(\frac{\partial e_{ik}}{\partial a_i} \right) + 2e_{jk} \left(\frac{\partial e_{jk}}{\partial a_i} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial b_j} = \sum_{k=1}^N \left[2e_{ik} \left(\frac{\partial e_{ik}}{\partial b_j} \right) + 2e_{jk} \left(\frac{\partial e_{jk}}{\partial b_j} \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n_a$, $j = 0, 1, 2, \dots, n_b$ 。将式(8)用矩阵表示为:

$$\mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{Q} \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{P} =$$

$$\begin{bmatrix} V_0 & 0 & -V_2 & 0 & \dots & T_1 & S_2 & -T_3 & -S_4 & \dots \\ 0 & V_2 & 0 & -V_4 & \dots & -S_2 & T_3 & S_4 & T_5 & \dots \\ V_2 & 0 & -V_4 & 0 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & -S_6 & \dots \\ 0 & V_4 & 0 & -V_6 & \dots & -S_4 & T_5 & S_6 & T_7 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ T_1 & -S_2 & -T_3 & S_4 & \dots & U_2 & 0 & -U_4 & 0 & \dots \\ S_2 & T_3 & -S_4 & -T_5 & \dots & 0 & U_4 & 0 & -U_6 & \dots \\ T_3 & -S_4 & -T_5 & S_6 & \dots & U_4 & 0 & -U_6 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = [S_0, T_1, S_2, T_3, \dots, 0, U_2, 0, \dots]^T$$

$$\mathbf{X} = [b_0, b_1, \dots, b_{n_b}, a_1, \dots, a_{n_a}]^T$$

$$\begin{cases} V_t = \sum_{k=0}^N \omega_k^t \\ T_t = \sum_{k=0}^N \omega_k^t I(\omega_k) \\ S_t = \sum_{k=0}^N \omega_k^t R(\omega_k) \\ U_t = \sum_{k=0}^N \omega_k^t [R(\omega_k)^2 + I(\omega_k)^2] \end{cases}$$

在确定频率点后, 求解式(9), 可直接求得频域模型参数 a_i 和 b_j 。

3 辨识实验

3.1 数据采集与数据分析

将动力调谐陀螺仪置于高精度三轴测试转台上, 使其测试轴不受地球自转角速率及重力的影响。待陀螺仪工作稳定后,

对其力矩器施加激励,激励信号选用多谐差相信号,设定频率范围为 0~600 Hz,频率间隔为 0.5 Hz,最大幅值为 100 mV。采用数据采集卡 NI PCI-6289 对激励信号和陀螺仪的输出信号进行采集,设定采样率为 50 kS/s,采样时间为 10 s。

对采集到的陀螺仪输出信号进行 Fourier 变换,获取其频谱,如图 5 所示。由图 5 可知,频域离群点主要表现为一些与频谱曲线变化趋势脱离的单一谱线。其中,50 Hz 为工频干扰,250 Hz 为转频干扰,100 Hz 和 500 Hz 为乘法器解调过程中生成的倍频成分,455 Hz 为陀螺仪的章动频率信号。采用 2.1 节频域去离群点方法,可在不影响陀螺仪辨识模型结构^[4]的同时,抑制主要有色噪声,从而提高辨识精度。

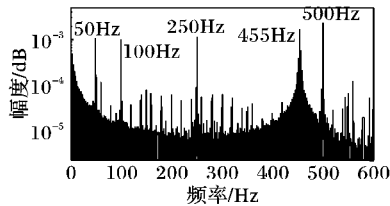


图 5 输出信号频谱

3.2 对比实验

为检验改进算法在实际应用中的辨识效果,本文进行对比实验。在陀螺仪模型分析中,重点研究其交轴陀螺特性^[4],为此对其交轴模型进行辨识。首先,根据图 1,设定交轴模型阶数为 3。然后,依据 3.1 节采集得到的数据,分别采用去离群点频域辨识法、最小二乘法 and 频率响应法对陀螺仪模型进行辨识。为直观地比较辨识效果,分别将应用三种辨识方法辨识得到的拟合值与 3.1 节采集得到的实测值进行比较,如图 6 所示。

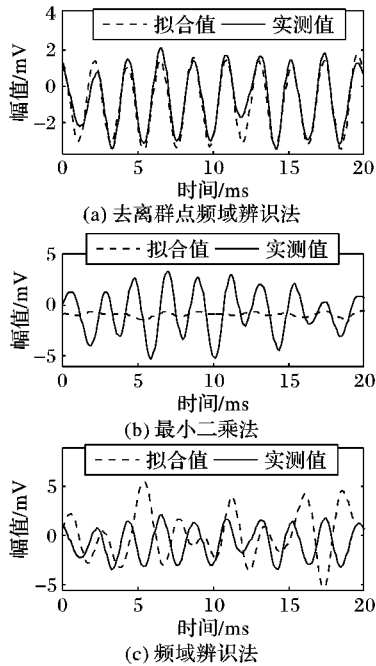


图 6 辨识模型拟合值与实测值的比较

根据图 6,实测值中有一清晰的单频信号,为陀螺仪章动频率信号(即图 5 中 455 Hz 信号),是动力调谐陀螺仪输出信号的主要特点。然而受强有色噪声的影响,最小二乘法 and 频域辨识法的拟合值均不能体现这一特点,而去离群点频域辨识法的拟合效果良好。

3.3 一致性实验

为检验辨识精度,在相同条件下,对同一陀螺仪重复进行 10 次辨识实验。采用去离群点频率响应法对模型参数进行估计,将 10 次实验的数据按式(10)计算辨识拟合度^[7],如表 1 所示。

$$R = \sqrt{1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t) - \hat{y}(t|t-1)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2}} \quad (10)$$

由表 1 可看出,10 次实验辨识拟合度均在 90% 以上,这表明去离群点频域辨识法的辨识拟合效果良好。为检验改进算法的可靠度,对 10 次实验绘制辨识模型的幅频特性曲线,如图 7 所示。

表 1 辨识实验拟合度

实验序号	拟合度/%	实验序号	拟合度/%
1	96.40	6	98.01
2	94.94	7	96.25
3	96.40	8	93.08
4	94.70	9	95.57
5	96.49	10	92.85

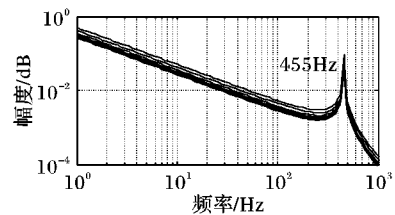


图 7 辨识模型幅频特性曲线

图 7 表明,10 次辨识实验得到的辨识模型幅频特性曲线基本重合。并且,在幅频特性曲线中,有一清晰的谐振峰,与图 6 实测值中的单频信号(即章动频率信号)相对应。谐振峰越陡峭,说明陀螺仪的阻尼越小,辨识越充分,得到的模型也越能准确表征系统特性。

4 结语

由于忽略了动力调谐陀螺仪的模型结构特征和噪声特点,最小二乘法和传统频域辨识法辨识结果有偏。本文在分析动力调谐陀螺仪辨识系统模型的基础上,结合结构特点,指出其固有强有色噪声的产生原因和对最小二乘辨识法造成的影响。基于噪声特点,对频域辨识法作出改进,提出去离群点频域辨识法,并与最小二乘法和传统频域辨识法进行对比实验。实验结果表明,去离群点频域辨识法的辨识拟合度明显优于最小二乘法及传统频域辨识法,辨识精度在 90% 以上。去离群点频域辨识法具有良好一致性,更适用于动力调谐陀螺仪系统辨识。

参考文献:

- [1] KARTHIK K P, RANGABABU P, SABAT S L, et al. System on chip implementation of adaptive moving average based multiple-model Kalman filter for denoising fiber optic gyroscope signal[C]// Proceedings of the 2011 International Symposium on Electronic System Design. Piscataway: IEEE, 2011: 170-175.
- [2] ZHOU B. Dynamically tuned gyroscope design and manufacturing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002. (周百令. 动力调

- 谐陀螺仪设计与制造[M].南京:东南大学出版社,2002.)
- [3] JIANG H, JIA H, WEI Q. Parameters identification and mathematical modeling of MEMS gyroscope[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Information Science and Technology. Piscataway: IEEE, 2013: 1285 – 1287.
- [4] ZHANG L. Study on modeling and digital control of dynamically tuned gyroscope[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (张连超. 动力调谐陀螺建模与数字化控制问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.)
- [5] YANG G, LI X, SUN J, *et al.* Fast open loop identification of dynamically tuned gyroscope[J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(2): 181 – 185. (杨光, 李醒飞, 孙建, 等. 动力调谐陀螺仪模型快速开环辨识[J]. 天津大学学报, 2013, 46(2): 181 – 185.)
- [6] WANG J, LI X, ZHAO J, *et al.* Performance analysis of gyroscope using parameter identification[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(3): 817 – 819. (王佳, 李醒飞, 赵建远, 等. 参数辨识在陀螺仪性能分析中的应用[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(3): 817 – 819.)
- [7] FAN S. A study on digital control technology of dynamically tuned gyroscope[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (范世珣. 动力调谐陀螺仪数字控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.)
- [8] YU X, WEI X, LI Y, *et al.* Application of radial basis function network for identification of axial RLG drifts in single-axis rotation inertial navigation system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 48 – 52. (于旭东, 魏学通, 李莹, 等. RBF神经网络在单轴旋转惯导系统轴向陀螺漂移辨识中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 48 – 52.)
- [9] ZHAO N, WANG H, OUYANG X. Parametric CARMA model identification based on WTLMS algorithm[C]// Proceedings of the 2009 Chinese Control and Decision Conference. Shenyang: Editor Board of Control and Decision, 2009: 1169 – 1172. (赵楠楠, 王海
- 华, 欧阳鑫玉. 基于 WTLMS 算法的 CARMA 模型参数辨识[C]// 2009 中国控制与决策会议论文集. 沈阳:《控制与决策》编辑部, 2009: 1169 – 1172.)
- [10] FATTAH S A, ZHU W P, AHMAD M O. A novel technique for the identification of ARMA systems under very low levels of SNR[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2008, 55(7): 1988 – 2001.
- [11] ZHAO Y, ZHENG D. A new parameter estimation algorithm for CARMA models[C]// Proceedings of the 2009 6th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Piscataway: IEEE, 2009: 402 – 404.
- [12] BAO G. Research on the measurement and control of the attitude of the spacecraft by gyrowheel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (鲍国亮. 陀螺飞轮实现航天器姿态测量与控制的机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.)
- [13] HAO Y. Study of crucial technologies of dynamically tuned gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (郝颖. 动力调谐陀螺仪的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.)
- [14] FANG C, XIAO D. Process identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 84 – 183. (方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 84 – 183.)
- [15] DING S. Parameter estimation methods for pseudo-linear regressive systems based on auxiliary model and data filtering[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(1): 236 – 238. (丁盛. 基于辅助模型和数据滤波的伪线性回归系统参数估计方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(1): 236 – 238.)
- [16] ZHONG Q, HUANG X, TAN L. Application of maximum classes square error to deleting noises in gyroscope signal[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(S2): 184 – 186. (仲启媛, 黄先祥, 谭立龙. 最大类间方差法在寻北仪信号降噪中的应用[J]. 计算机应用, 2011, 31(S2): 184 – 186.)

(上接第 3640 页)

- [5] CAI G, TENG Y, HONG J. Active control of rotation motion of a flexible hub-beam system[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 487 – 490. (蔡国平, 滕悠优, 洪嘉振. 中心刚体-柔性梁系统的旋转运动控制[J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 487 – 490.)
- [6] CHEN G. Experimental modeling and active control of vibration of the flexible beam[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2003. (陈光. 挠性梁的实验建模及其振动主动控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.)
- [7] DONG Z. Experimental modeling and active control of flexible structures[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (董卓敏. 柔性结构的实验建模与主动控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.)
- [8] ZHANG G, WANG Y, ZHANG Y. Experimental modeling of semi-physical simulation platform for tracking control of flexible multibody systems[C]// Proceedings of the 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. Piscataway: IEEE, 2008: 1007 – 1011.
- [9] ZHAN J, HU J, ZHANG X. Discrete sliding mode control with reaching law of flexible beam vibration suppression[J]. Journal of Vibration Measurement and Diagnosis, 2012, 32(2): 186 – 191. (占金青, 胡俊峰, 张宪民. 基于趋近律离散滑模控制的柔性梁振动抑制[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 186 – 191.)
- [10] LI J, YANG L. Adaptive PI-based sliding mode control for nanopositioning of piezoelectric actuators[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: Article 357864.
- [11] PENG J, CHEN X. Integrated PID - based sliding mode state estimation and control for piezoelectric actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 19(1): 88 – 99.
- [12] ZHANG G. Modeling and control of flexible multibody systems[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (张国庆. 柔性多体系统建模与控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.)
- [13] CHEN H, WANG Y, ZHOU J, *et al.* System model identification of permanent magnet synchronous motor[J]. Small and Special Electrical Machines, 2013(1): 7 – 10. (陈昊, 王永, 周建亮, 等. 永磁同步电动机系统模型辨识[J]. 微特电机, 2013(1): 7 – 10.)
- [14] JIANG J, CHEN Q, GUO J, *et al.* Sliding mode stable tracking control for mobile satellite communication system based on a new reaching law[J]. Control and Decision, 2011, 26(12): 1904 – 1908. (姜君, 陈庆伟, 郭健, 等. 基于新型趋近律的动中通系统滑模稳定跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1904 – 1908.)
- [15] EDWARDS C, FRIDMAN L, LWVANT A. Sliding mode control and observation[M]. Boston: Birkhauser Boston Inc, 2014.