

基于自适应灰色预测和干扰观测器的伺服干扰抑制方法

孟红波 王昌明 张爱军 包建东 何博侠

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为提高稳定平台伺服系统的响应和抗干扰能力,提出了一种基于自适应灰色预测(AGPC)——分数阶改进干扰观测器(FIDOB)的稳定平台伺服干扰抑制方法。GM(1,1)幂模型对系统输出进行建模并设计了自调节模块,将预测误差和实际误差加权合成一个综合误差,分别根据实际误差和预测误差的大小同时调节预测步长和预测误差的权值,提高系统的响应性,减小预测误差对系统的输出影响;构造了分数阶改进干扰观测器,并详细推导了分数阶改进干扰观测器的鲁棒稳定性。最后通过数值仿真实验表明,该方法不仅可以有效抑制稳定平台外界干扰和测量噪声,而且提高了系统响应能力。仿真实验中,在摩擦和测量噪声干扰情况下,稳定平台系统速度环的跟踪误差可以达到不超过0.1 rad/s。在静态和动态实验中,稳定平台的调节时间缩短了0.258 s,稳定精度提高了约1.5°~2.5°。

关键词: 稳定平台; GM(1,1)幂模型; 综合误差; 分数阶改进干扰观测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0333-10

Method of Servo Interference Suppression Based on Adaptive Grey Predictive Controller and Disturbance Observer

Meng Hongbo Wang Changming Zhang Aijun Bao Jiandong He Boxia

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the response and vibration suppression abilities of stabilized platform servo system, a novel vibration suppression strategy was proposed by using an integration of fractional-order improved disturbance observer (FIDOB) based on adaptive grey predictive controller (AGPC) in stabilized platform system. A method of system modeling output module was established based on GM(1,1) power module and an adaptive adjust module was designed. The predicted error and actual error were combined together to form an integrate error, according to the values of the actual control system error and the predicted error, the prediction step and predicted error weight were adjusted to improve the response ability of system and decrease the influence of predicted error on the system output. The fractional-order improved DOB was established, and the robust stability was derived in detail. FIDOB was used to obtain disturbance estimate and generate compensation signal, and as the order of Q-filter was expanded to real-number domain, FIDOB had a wide range to select a suitable tradeoff between robustness and vibration suppression. Finally, numerical simulation results illustrated that the method can suppress external disturbances and measurement noise well, and it can also improve the response ability of system. The proposed control strategy was simple in control-law derivation, and its effectiveness was validated by numerical simulations. In numerical simulation experiments, with the interference of friction and measurement noise, the tracking error of stabilized platform system was no more than 0.1 rad/s. In the static and dynamic experiments, the regulating time of the stabilized platform was decreased by 0.258 s, and the stable precision was increased by 1.5°~2.5°.

Key words: stabilized platform; GM(1,1) power module; integrate error; fractional-order improved DOB

收稿日期: 2015-12-11 修回日期: 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175267, 51475243)

作者简介: 孟红波(1989—),男,博士生,主要从事稳定平台智能控制研究, E-mail: ayzyrs@163.com

通信作者: 包建东(1979—),男,讲师,博士,主要从事智能控制和测试研究, E-mail: baojd025@163.com

引言

稳定平台是惯性导航、制导和测量系统的核心设备,通过传感单元的反馈构成伺服闭环回路来隔离扰动,维持工作界面的稳定,在伺服控制系统、视轴稳定、车辆舰船和电子望远镜等领域广泛应用^[1-4]。影响稳定平台精度的因素有很多,包括外部干扰、测量噪声、惯性测姿设备(主要指陀螺)的漂移等,其中外部干扰和测量噪声占据较大的比重。UMENO等^[5]提出的经典干扰观测器(DOB)具有较好干扰抑制效果,而且基于经典DOB的控制技术已经广泛应用于很多控制领域^[6-9]。文献[10]指出任何干扰观测器的设计都不可能完全消除系统干扰,经典DOB能很好地消除外部干扰力矩,但对测量噪声的抑制效果不是很明显。针对这个问题,有人提出了多种改进的干扰观测器和对低通滤波器进行了优化^[11-13]。

由于时滞特性普遍存在实际控制系统中,而稳定平台具有控制精度高和实时性高的要求,必须采取一定的办法来克服时滞环节对系统性能的影响。文献[14-15]提出了基于灰色预测控制的PID方法进行控制,取得了较好的效果。但预测时难免存在预测误差,当误差较大时会对系统产生不利的影响,文献[16]针对预测模型存在预测误差的弊端提出了一种自调节灰色预控制器,根据预测精度来调节预测误差的权值,取得了较好的控制效果。

本文在分析经典干扰观测器测量噪声抑制不足和稳定平台实际伺服控制系统存在的时滞特性,在前人的研究工作基础上,提出一种基于自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器的控制方法。通过对稳定平台伺服系统速度环的输出进行GM(1,1)幂模型预测建模,并设计自调节模块,同时调整预测步长和预测误差的权值,从而使控制系统具有较好的学习性和适应性;针对外界干扰和测量噪声,设计基于分数阶低通滤波器的改进干扰观测器,分数阶干扰观测器可以在实数范围内调整阶次,可使选择的调整范围大大增加,对低通滤波器的设计也要比经典干扰观测器灵活得多,通过选取合适的方法对其进行离散化近似处理。

1 基于经典DOB+反馈的稳定平台速度环控制结构

稳定平台伺服控制系统容易受到外界扰动和测量噪声的干扰影响,将外界扰动和测量噪声分别等效为 d 和 ζ 。则基于经典DOB+反馈的稳定平台速度环控制结构如图1所示。

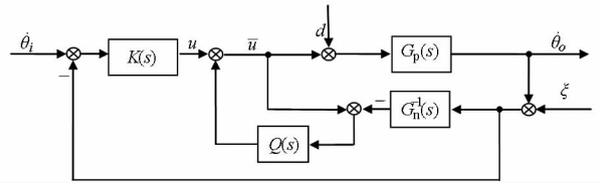


图1 经典DOB+反馈的稳定平台控制结构

Fig.1 Stabilized platform control structure of classical DOB + feedback

图1中, $K(s)$ 是速度控制器, $G_p(s)$ 为稳定平台速度环控制对象, $G_n^{-1}(s)$ 为名义模型的逆, $Q(s)$ 为分数阶低通滤波器, $\dot{\theta}_i$ 和 $\dot{\theta}_o$ 分别为稳定平台系统输入角速度和输出角速度。经典DOB通过估计干扰的大小并将其补偿到控制量中进行抑制。 $G_n^{-1}(s)$ 通常都是非正则的,因此需要引入分数阶低通滤波器 $Q(s)$ 使得 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 物理可实现。根据图1可知,控制对象输出 $\dot{\theta}_o$ 对参考输入 $\dot{\theta}_i$ 、外界扰动 d 和测量噪声 ζ 的传递函数为

$$\dot{\theta}_o(s) = \frac{KG_p G_n}{(1 + KG_p)G_n + (G_p - G_n)Q} \dot{\theta}_i(s) + \frac{G_p G_n (1 - Q)}{(1 + KG_p)G_n + (G_p - G_n)Q} d(s) - \frac{G_p (Q + KG_n)}{(1 + KG_p)G_n + (G_p - G_n)Q} \zeta(s) \quad (1)$$

作如下几个假设:

- (1) $K(s)$ 调节满足闭环稳定,并且扰动 d 为一有界平稳值,满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} d(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sD(s) < \infty$ 。
- (2) 分数阶低通滤波器 Q 为理想低通滤波器,存在截止频率 ω_q ,在低频段 $\omega < \omega_q$ 时, $Q(s) \approx 1$;在高频段 $\omega > \omega_q$ 时, $Q(s) \approx 0$ 。
- (3) 系统输入 $\dot{\theta}_i$ 和外界干扰 d 处于低频段 $[0, \omega_q]$,测量噪声 ζ 处于高频段 $[\omega_q, \infty]$ 。

通常扰动信号与噪声信号处于不同频率范围,扰动一般处于低频段,而测量噪声一般在高频段。根据假设(1)~(3),式(1)简化为

$$\dot{\theta}_o(s) \approx \frac{KG_p}{1 + KG_p} \dot{\theta}_i(s) - \frac{KG_p}{1 + KG_p} \zeta(s) \quad (2)$$

由式(2)可知,基于经典DOB+反馈的控制方法基本可以消除低频段的扰动干扰,但是高频段的测量噪声并没有得到较好的抑制功能,并且传统反馈控制方式通常属于事后调节,存在一定的滞后性,对于稳定平台要求实时性较高的伺服控制系统来说,提高系统的响应性和实时性是非常必要的。下节主要针对上述问题,对基于自适应灰色预测的改进分数阶DOB的控制方法进行推导,包括GM(1,1)幂模型建模、自调节模块设计和分数阶改进DOB的设计。

2 基于自适应灰色预测的改进分数阶 DOB 控制结构

针对传统反馈控制存在滞后的缺点^[13],设计了一种自适应灰色预测模块,包括 GM(1,1) 幂模型建模和参数自调节模块 MAM。GM(1,1) 幂模型对稳定平台速度环的系统输出进行预测建模,并通过参数自调节 MAM 模块来同时调节预测步长和预测误差的权值,从而使系统具有较好的适应性与学习性。基于自适应灰色预测的改进分数阶 DOB 控制结构如图 2 所示。

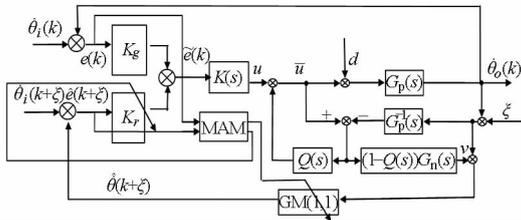


图2 自适应灰色预测的改进分数阶 DOB 控制结构
Fig. 2 Control structure of fractional-order improved DOB based adaptive grey predictive controller

2.1 GM(1,1) 幂模型建模

假设稳定平台伺服系统速度环跟踪回路 k 时刻系统输出数据为 $\dot{\theta}_o(k)$, 满足 $\dot{\theta}_o^{(0)}(k) = \{\dot{\theta}_o^{(0)}(1), \dot{\theta}_o^{(0)}(2), \dots, \dot{\theta}_o^{(0)}(n)\}$, 在灰色预测之前先经过数据预处理变换, 可得到一组非负数列 $\mathbf{X}^{(0)}$, 以满足 GM(1,1) 幂模型^[17] 的建模条件, $\mathbf{X}^{(1)}$ 为 $\mathbf{X}^{(0)}$ 的 1-AGO 序列, $\mathbf{Z}^{(1)}$ 为 $\mathbf{X}^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, 满足 $\mathbf{X}^{(1)} = \{x^{(1)}(k) | x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k \dot{\theta}_o^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n\}$ 。

GM(1,1) 幂模型背景插入值 $\mathbf{Z}^{(1)}$ 为 $\mathbf{X}^{(1)}$ 紧邻均值生成序列, 传统背景值满足 $\mathbf{Z}^{(1)} = \{z^{(1)}(k) | z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], k=2, 3, \dots, n\}$ 。背景值的构造很大程度上影响着预测模型的预测精度, 此处采用文献^[18]方法对 $\mathbf{Z}^{(1)}$ 进行改进, 可得

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\ln(x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)) - \ln(x^{(1)}(k-1))} - \frac{x^{(1)}(k)x^{(1)}(k-1)}{x^{(0)}(k) - x^{(1)}(1)} \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

经过背景值改进的 GM(1,1) 幂模型的灰色微分方程为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^\gamma \quad (4)$$

其中
$$\gamma = \frac{1}{n-2} \sum_{k=2}^{n-1} \gamma(k)^{[19]} \quad (5)$$

$$\gamma(k) = [(x^{(0)}(k+1) - x^{(0)}(k))z^{(1)}(k+1)z^{(1)}(k)x^{(0)}(k) - (x^{(0)}(k) - x^{(0)}(k-1))z^{(1)}(k+1)z^{(1)}(k)x^{(0)}(k+1)] / [x^{(0)}(k+1)^2z^{(1)}(k)x^{(0)}(k) - (x^{(0)}(k)^2z^{(1)}(k+1)x^{(0)}(k+1))] \quad (6)$$

设 $\hat{\mathbf{a}} = [a \ b]^T$ 为参数列, 则 GM(1,1) 幂模型的最小二乘估计参数列满足

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

其中

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^\gamma \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^\gamma \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

依据 GM(1,1) 幂模型的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b(x^{(1)}(t))^\gamma \quad (9)$$

传统 GM(1,1) 幂模型通常选取初始条件 $x^{(1)}(0) = x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 但是初值 $x^{(1)}(0) = x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$ 是最旧的数据, 往往利用不了最新的数据信息且与未来关系不密切, 从而预测效果达不到目标需求和精度要求, 甚至出现较大的拟合误差。为此, 初始值的选取对于 GM(1,1) 幂模型的预测精度显得至关重要。基于上述问题, 此处以最新数据 $x^{(0)}(n)$ 为初始条件代替 $x^{(1)}(0) = x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 可得到改进 GM(1,1) 幂模型的时间响应式为

$$\hat{x}^{(1)}(k+\xi) = \left\{ \frac{b}{a} + \left[(x^{(0)}(n))^{1-\lambda} - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k+\xi-n)(1-\gamma)} \right\}^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (10)$$

具体推导证明过程详见文献^[20], 此处不再赘述。最后对 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 作一阶累减还原, 求得预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+\xi) = \hat{x}^{(1)}(k+\xi) - \hat{x}^{(1)}(k+\xi-1) \quad (11)$$

2.2 自适应调节机制 MAM

常规固定步长灰色预测控制器的预测步长为负或较小的正数时, 系统的响应时间较短且超调量较大; 预测步长为较大的正数时, 系统的响应时间较长且超调量较小。通常预测模型都会存在预测误差, 预测误差会通过稳定平台控制回路传递到系统输出中, 从而影响稳定平台的跟踪精度, 因此有必要对预测误差进行一定的处理。鉴于上述弊端, 自适应调节机制 MAM 根据实际误差和预测误差同时调节预测步长和预测误差的权值, 具体如下^[16,21]

$$\xi = \begin{cases} \xi_1 & (e > e_l) \\ \xi_2 & (e_s < e \leq e_l \text{ 且 } \xi_3 > \xi_2 > 0 > \xi_1) \\ \xi_3 & (0 < e \leq e_s) \end{cases} \quad (12)$$

式中, ξ_1 、 ξ_2 和 ξ_3 分别为实际误差为较大误差、中等误差和较小误差对应的预测步长,其大小根据稳定平台控制系统的动态响应要求进行设定。 e_s 和 e_l 分别为步长调节的判别值。

$$e(k) = \dot{\theta}_i(k) - \dot{\theta}_o(k) \quad (13)$$

$$\hat{e}(k + \xi) = \dot{\theta}_i(k + \xi) - \hat{\theta}_o(k + \xi) \quad (14)$$

$$\tilde{e}(k) = K_g e(k) + K_r \hat{e}(k + \xi) \quad (15)$$

$$K_r = 1 - K_g \quad (16)$$

$$K_r = \begin{cases} K_{r1} & (\hat{e} > e_b) \\ K_{r2} & (e_d \leq \hat{e} \leq e_b) \\ K_{r3} & (\hat{e} < e_d) \end{cases} \quad (17)$$

式中,假设 $\dot{\theta}_i(k)$ 和 $\dot{\theta}_i(k + \xi)$ 分别为系统 k 和 $k + \xi$ 时刻的输入, $\dot{\theta}_o(k)$ 为输出, $e(k)$ 为系统的实际误差, $\hat{e}(k + \xi)$ 为 $k + \xi$ 时刻的预测误差, $\tilde{e}(k)$ 为 k 时刻的综合误差, K_r 和 K_g 分别为预测误差和实际误差的权值,满足以上关系。

当系统预测误差较大($\hat{e} > e_b$)时,可选用较小的 K_r ,减小预测误差的影响;当系统输出误差较小($\hat{e} < e_d$)时,可选用较大的 K_r ,来增大预测误差的影响;当系统输出误差处于两者之间($e_d \leq \hat{e} \leq e_b$)时,可选用适当的 K_r 。

其中, e_b 和 e_d 分别为 K_r 调节的判别值,由系统实际需求精度决定,可依据控制精度来设定。 $K_{r1} > K_{r2} > K_{r3} > 0$,且预测误差的权值 K_{r1} 、 K_{r2} 、 K_{r3} 根据稳定平台控制系统需求的控制精度进行直接赋值设定,可灵活调节,根据预测的平均相对误差设定权值^[21],不需要 GM(1,1) 幂模型预测结束后每次进行重复计算,算法计算量减少。直接赋值不仅可使计算量减少,另外可以灵活调节稳定平台控制的精度敏感度。

2.3 改进分数阶干扰观测器设计

由图 3 可得分数阶改进型干扰观测器的输出 $\dot{\theta}_o$ 。对参考输入 $\dot{\theta}_i$ 、外界干扰 d 和测量噪声 ζ 的传递函数为

$$\dot{\theta}_o(s) = \frac{KG_p G_n}{(1 + KG_n) [G_n + (G_p - G_n) Q]} \dot{\theta}_i(s) + \frac{G_p G_n (1 - Q)}{G_n + (G_p - G_n) Q} d(s) - \frac{G_p Q}{G_n + (G_p - G_n) Q} \zeta(s) \quad (18)$$

由假设(1)~(3)可知,式(18)可简化为

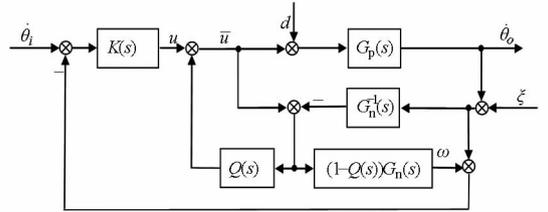


图 3 分数阶改进干扰观测器

Fig. 3 Control structure of fractional-order improved DOB

$$\dot{\theta}_o(s) \approx \frac{KG_n}{1 + KG_n} \dot{\theta}_i(s) \quad (19)$$

式(19)表明了分数阶改进干扰观测器比经典干扰观测器对干扰抑制,模型摄动和测量噪声有着更优良的性能。为了进一步分析分数阶改进干扰观测器的鲁棒稳定性,假设控制系统存在一个可容的加性模型摄动,实际模型与名义模型对的关系可表述为

$$G_p(s) = G_n(s) + M(s)\Delta(s) \quad (\|\Delta(s)\|_\infty < 1) \quad (20)$$

式中 $\Delta(s)$ ——摄动函数

$M(s)$ ——有界加权函数

如果有 v 到 q 的传递函数是 $N(s)$,根据小增益定理,则系统鲁棒稳定的充分条件为 $\|N(s)\|_\infty \leq 1$ 。将图 4 嵌入到图 3 中,可得

$$z = M(s)\bar{u} \quad (21)$$

$$\dot{\theta}_o = v + G_n(s)\bar{u} \quad (22)$$

$$\bar{u} = u + Q(s)(\bar{u} - G_n^{-1}(s)\dot{\theta}_o) \quad (23)$$

$$u = -K(s) [\dot{\theta}_o + G_n(s)(1 - Q(s))(\bar{u} - G_n^{-1}(s)\dot{\theta}_o)] \quad (24)$$

由式(21)~(24)可得

$$N(s) = -\frac{Q(s)M(s)}{G_n(s)} \quad (25)$$

因此,系统的鲁棒稳定性条件为

$$\left\| -\frac{M(s)Q(s)}{G_n(s)} \right\|_\infty \leq 1 \quad (26)$$

若存在 $Q(s)$ 满足式(26),则图 2 所示的控制系统就能鲁棒稳定。

2.4 分数阶 $Q(s)$ 滤波器的设计及数字实现

由式(26)可以看出, $Q(s)$ 滤波器的设计尤为重要。滤波器 $Q(s)$ 不仅决定着鲁棒性和干扰抑制性能,而且需保证使 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 正则,所以是干扰观测器设计中的关键所在。分数阶滤波器 $Q_\alpha(s)$ 干扰

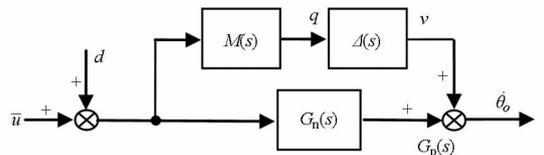


图 4 带有模型摄动的实际传递函数

Fig. 4 Actual plant with perturbation

观测器的结构类似于经典干扰观测器,是基于经典干扰观测器的结构,将整数阶低通滤波器替换为分数阶滤波器得到的。它比传统整数阶的干扰观测器在对干扰抑制时更加灵活,因为分数阶 $Q_\alpha(s)$ 滤波器可以在实数域内选择合适的相对阶次来折中鲁棒稳定性和干扰抑制的矛盾^[22],而传统干扰观测器的滤波器只能在整数域内做选择。分数阶滤波器通常采用的结构为

$$Q_\alpha(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^\alpha} \quad (\alpha \in R) \quad (27)$$

式中 τ ——滤波器时间常数 α ——分数阶次

在对分数阶滤波器的数字实现和实际控制系统应用中,需选取合适的方法对其离散化近似处理,目前已有多种不同的离散化方法,应用中常采用 Oustaloup 曲线拟合算法^[23-24]近似实现分数阶滤波器。设计低通滤波器 $Q(s)$ 时,首先需保证 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 正则, $Q(s)$ 的相对阶次 α 必须不小于 1;文献[25]对逼近阶次的选择进行了详细的论述,设在逼近频段 $[\omega_b, \omega_h]$ 上, $\omega_b = 100 \text{ rad/s}$ 和 $\omega_h = 10\,000 \text{ rad/s}$, 用一个 4 阶的整数阶滤波器来近似分数阶滤波器,且保证了系统鲁棒性稳定,则分数阶滤波器可写为

$$Q_\alpha(s) \approx \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (28)$$

3 数值仿真

以某型号稳定平台为实际研究对象来验证所提方法的有效性 with 实用性。其中稳定平台伺服系统的速度环的传递函数简化为

$$G_{\text{vob}}(s) = \frac{\frac{R}{k_{cf} C_e}}{T_m s (2T_{\Sigma i} s + 1)} G_{\text{pm}}(s) = \frac{0.3957}{1.14844 \times 10^{-6} s + 3.1954 \times 10^{-3} s} \quad (29)$$

其中 $T_{\Sigma i} = T_{cf} + T_{\text{PWM}}$
 式中 C_e ——反电势系数 T_m ——机械时间常数
 R ——电枢绕组电阻 R_{U-V} 的一半
 G_{pm} ——稳定平台机械运动结构的简化线性化模型
 k_{cf} ——电流反馈放大倍数
 T_{PWM} ——逆变器的时间常数
 T_{cf} ——放大系数

式中 $C_e = 120.0 \text{ V}$, $T_m = 2.39 \times 10^{-3} \text{ s}$, $T_{cf} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ s}$, $T_{\text{PWM}} = 6.97 \times 10^{-5} \text{ s}$, $R = 9.05 \text{ } \Omega$, $G_{\text{pm}} = 0.025$, $k_{cf} = 0.667$ 。

根据稳定平台的系统动态响应和控制精度需求,自调节模块中的预测步长 ξ 和预测误差权值 K_r

分别为

$$\xi = \begin{cases} -3 & (e > 0.7\dot{\theta}_i(k)) \\ 1 & (0.1\dot{\theta}_i(k) < e \leq 0.7\dot{\theta}_i(k)) \\ 4 & (0 < e \leq 0.1\dot{\theta}_i(k)) \end{cases} \quad (30)$$

$$K_r = \begin{cases} 0.3 & (\hat{e} > 0.7\hat{\theta}(k + \xi)) \\ 0.6 & (0.2\hat{\theta}(k + \xi) \leq \hat{e} \leq 0.7\hat{\theta}(k + \xi)) \\ 0.9 & (\hat{e} < 0.2\hat{\theta}(k + \xi)) \end{cases} \quad (31)$$

3.1 阶跃信号跟踪

分别采用比例控制器、比例控制器 + 经典干扰观测器和基于自适应灰色预测的分数阶改进干扰观测器 3 种控制器来比较系统的阶跃响应能力和干扰抑制能力,假设系统中存在干扰 $d = 2 + 0.5 \sin(0.1\pi t)$ 和测量噪声 $\zeta = 0.2 \sin(80\pi t)$, 结果如图 5、6 所示。

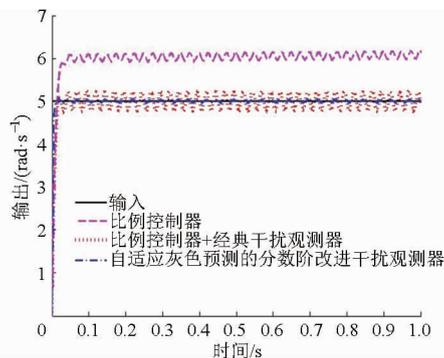


图 5 阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curves

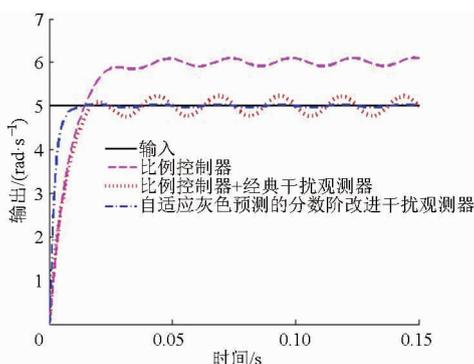


图 6 局部放大曲线

Fig. 6 Partial enlarged curves

由图 5 和 6 分析可知,采用比例控制器对稳定平台速度环伺服系统进行控制,外界干扰和测量噪声不仅没有得到抑制,而且存在较大的时滞,系统的响应能力较差;经过比例控制器 + 经典干扰观测器进行控制,外界干扰得到了较好的抑制,但是测量噪

声却没有较好的抑制效果,同样也存在较大的时滞特性,难以满足稳定平台实时性的要求;从图6中可以看出,基于自适应灰色预测的分数阶改进干扰观测器不仅很好的抑制了外界干扰和测量噪声,也明显提高了系统的响应能力,表明了该方法的有效性与实用性。为了进一步验证本方法的性能,系统输入信号采用复杂的连续梯形信号和连续正弦信号来进行验证。

3.2 连续信号跟踪

3.2.1 正弦信号跟踪

在存在同样的外界干扰 $d = 2 + 0.5 \sin(0.1\pi t)$ 和测量噪声 $\zeta = 0.2 \sin(80\pi t)$ 条件下,为了更加实用和接近实际系统的工作状态,假设系统存在一可容许的模型摄动 $G_p(s) = G_n(s) + \Delta P(s)$, $\Delta P(s) = -0.1G_n(s)$ 。输入信号为 $r_t = 20 \sin(2\pi t)$ 。采用比例控制器、比例控制器+经典干扰观测器和基于自适应灰色预测的分数阶改进干扰观测器3种控制器进行性能比较,结果如图7、8所示。

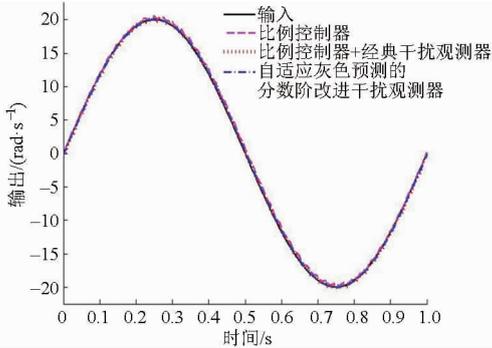


图7 稳定平台系统跟踪曲线

Fig. 7 Tracking curves of stabilized platform system

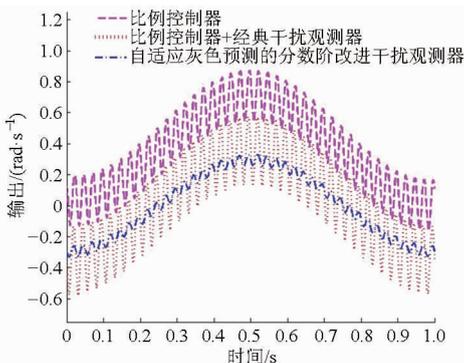


图8 稳定平台系统跟踪误差曲线

Fig. 8 Tracking error curves of stabilized platform system

由图7、8可以看出,在存在外界干扰、测量噪声和模型摄动的影响下,3种控制器均受到一定程度的影响,由图8可以看出,比例控制器和比例控制器+经典干扰观测器跟踪误差均超过了0.5 rad/s,而自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器的最大跟踪误差不超过0.36 rad/s。结果表明,自适应灰色

预测-分数阶改进干扰观测器具有较强的系统跟踪能力和抗干扰能力。

3.2.2 梯形信号跟踪

稳定平台系统精度容易受到以摩擦力矩为主的扰动力矩影响^[10],摩擦不仅会使系统产生稳态误差,而且还会导致爬行现象或极限环振荡。本文采用同时考虑静摩擦、库仑摩擦、粘滞摩擦及Stribeck摩擦的集合摩擦模型^[2],摩擦力矩表示为

$$M_f = \delta(\dot{\theta}) M_{\text{static}} + (1 - \delta(\dot{\theta})) M_{\text{slide}} \quad (32)$$

其中

$$M_{\text{static}} = \begin{cases} M_m & (M(t) \geq M_m) \\ M(t) & (-M_m < M(t) < M_m) \\ -M_m & (M(t) \leq -M_m) \end{cases} \quad (33)$$

$$M_{\text{slide}} = [M_c + (M_m - M_c) e^{-\alpha_1 |\dot{\theta}|}] \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_v \dot{\theta} \quad (34)$$

$$\delta(\dot{\theta}) = \begin{cases} 0 & (|\dot{\theta}| > \alpha) \\ 1 & (|\dot{\theta}| \leq \alpha) \end{cases} \quad (35)$$

式中 M_{static} ——静摩擦力矩

M_{slide} ——滑动摩擦力矩

$\delta(\dot{\theta})$ ——切换函数 $M(t)$ ——驱动力矩

M_m ——最大静摩擦力矩

M_c ——库仑摩擦力矩

k_v ——粘滞摩擦力矩比例系数

α_1, α ——非常小的常数

存在测量噪声 $\zeta = 0.2 \sin(80\pi t)$ 和型摄动 $G_p(s) = G_n(s) + \Delta P(s)$ 条件下, $\Delta P(s) = -0.1G_n(s)$ 。同样分别用比例控制器、比例控制器+经典干扰观测器和基于自适应灰色预测的分数阶改进干扰观测器3种控制器进行性能比较。结果如图9~14所示。

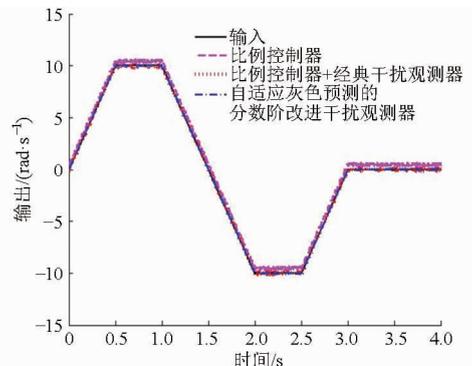


图9 稳定平台系统跟踪曲线

Fig. 9 Tracking curves of stabilized platform system

由图9~12分析可得,在加速-平稳阶段、减速阶段和减速-平台阶段,比例控制器由于没有干扰观测器抑制外界干扰的原因均存在一定的平稳误差,并且测量噪声没有得到抑制,控制效果最差;而经过

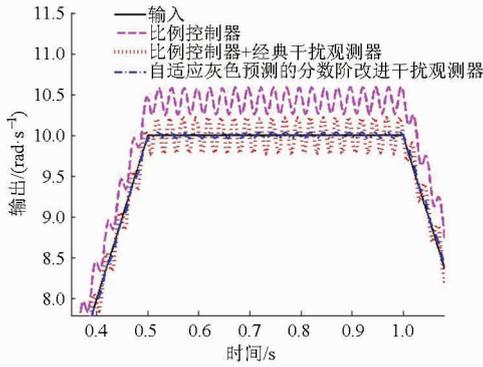


图 10 加速-平稳阶段放大曲线

Fig. 10 Enlarged curves of acceleration-uniform process

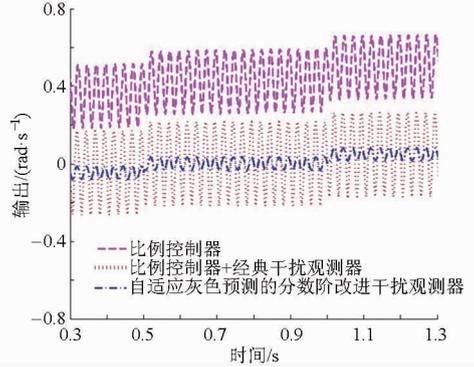


图 14 跟踪误差局部放大曲线

Fig. 14 Partial enlarged curves of tracking error

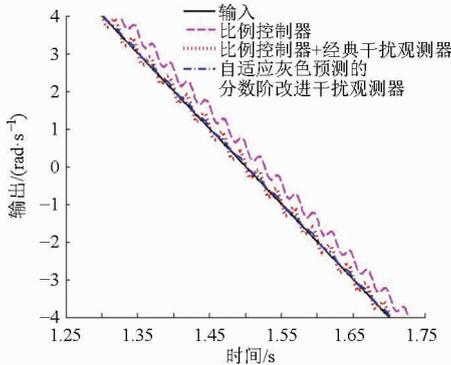


图 11 减速跟踪曲线

Fig. 11 Tracking curves of deceleration process

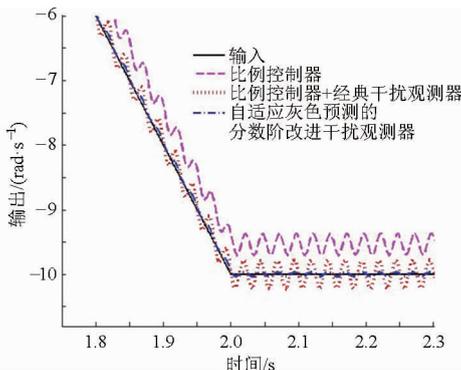


图 12 减速-平稳放大曲线

Fig. 12 Enlarged curves of deceleration-uniform process

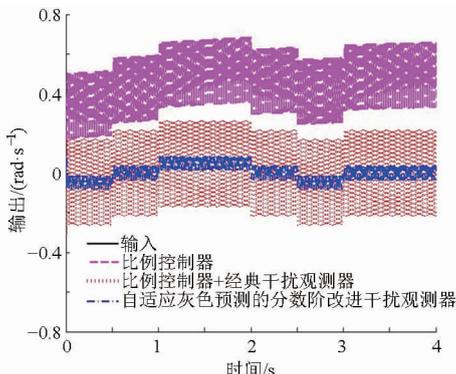


图 13 稳定平台系统跟踪误差曲线

Fig. 13 Tracking error curves of stabilized platform system

比例控制器 + 经典干扰观测器控制后, 稳态误差得到抑制, 表明干扰观测器的干扰抑制的有效性, 但是

对于测量噪声影响的抑制却效果欠佳; 对于自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器来说, 在整个过程中均表现出优良的跟踪性能, 自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器不仅较好地抑制了外界干扰, 也对测量噪声进行了很好的抑制。

从图 13、14 中可以看出, 比例控制器和比例控制器 + 经典干扰观测器的跟踪误差均大于自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器的跟踪误差, 经过自适应灰色预测-分数阶改进干扰观测器的控制后, 系统的跟踪误差不超过 0.1 rad/s。

4 实验验证

为了验证算法的有效性和实用性, 以某型号稳定平台为实际研究背景, 稳定平台负载 $m \approx 30 \text{ kg}$, 平台直径 $d = 450 \text{ mm}$, 调节轴 (俯仰轴和横滚轴) 轴心距离平台中心距离 $l = 200 \text{ mm}$, 稳定平台频率 $f = 1 \text{ Hz}$, 稳定平台调节范围: $-20^\circ \sim 20^\circ$, 电动缸推杆量程 $h = 200 \text{ mm}$, 并在稳定平台上进行实验验证。其中, 图 15 为稳定平台系统。针对稳定平台伺服系统的坐标系和运动自由度方面研究, 课题组已经做过相关研究, 对稳定平台伺服系统进行了详细的运动学和自由度分析^[26], 此处不再赘述。



图 15 稳定平台系统示意图

Fig. 15 Picture of stabilized platform system

4.1 静态实验

首先进行稳定平台静态实验, 目的是考核本文

方法提高稳定平台工作的实时性和响应能力。将稳定平台系统放置于实验摇摆台上,稳定平台底座与摇摆台机械固连,以稳定平台横滚轴为例,实验摇摆台底座调节范围为 $-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$,每 5° 为一个调节单位,伺服电机转速设置为 720 r/min ,然后稳定平台进行调平工作,并记录调平稳定平台工作结束后的时间和惯性测姿传感器的测量值。最后采用普通PID算法和本文算法进行对比实验,实验结果如表1所示。

由表1可知,随着稳定平台调节角度的增大,两种方法调节时间和误差都会有一定程度的增大,这是因为伺服电动缸的行程变大和稳定平台机械调节轴间隙误差累积,而伺服电机转速不变,故调节时间和误差变大。但是在时间调节的对比中,可以发现本文算法的调节时间均短于PID算法,其中最大可以提高 0.258 s ;由误差分析可知,本文算法将误差控制在 0.8° 之内,而PID算法误差普遍较大,最大达到 5.02° ,本文算法最大误差仅为 0.79° 。试验结果表明,本文方法在一定程度上提高了稳定平台调节的实时性和响应能力,并且稳定平台精度得到了一定程度的提高。

4.2 动态实验

在验证本文方法的实时性和响应能力之后,进一步验证算法的干扰抑制性能。将稳定平台系统放

表1 静态实验结果

Tab.1 Result of static experiment

调节值/ ($^{\circ}$)	PID 算法			本文算法		
	测量值/ ($^{\circ}$)	调节 时间/s	误差/ ($^{\circ}$)	测量值/ ($^{\circ}$)	调节 时间/s	误差/ ($^{\circ}$)
-20	-4.75	0.981	4.75	-0.72	0.732	0.72
-15	-3.24	0.746	3.24	-0.51	0.537	0.51
-10	-2.07	0.523	2.07	-0.34	0.314	0.34
-5	-1.32	0.395	1.32	-0.27	0.159	0.27
5	1.26	0.416	1.26	0.23	0.163	0.23
10	2.54	0.543	2.54	0.43	0.306	0.43
15	3.78	0.784	3.78	0.54	0.544	0.54
20	5.02	1.023	5.02	0.82	0.765	0.79

置于实验摇摆台上,通过人工摇摆,以频率约为 1 Hz 和幅值 10° 的干扰进行分析。采用普通PID算法和本文算法进行对比实验,稳定平台在 10° 幅值干扰条件下的稳定能力如图16、17所示,其中图16为PID算法调节结果,图17为本文算法调节结果。

由图16可知,当干扰幅值为 10° 时,补偿前稳定平台的俯仰角和横滚角基本控制在 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,由于稳定平台系统负载惯性较大和时滞原因,稳定平台调节具有一定的滞后,在反向调节时出现一定的抖动,曲线毛刺较多。而经过本文算法补偿后,图17结果表明,稳定平台的稳定精度得到明显提高,除个别尖峰外,基本控制在 0.6° 范围内,并且曲线结果毛刺较小,表明了算法提高了稳定平台调节的实时

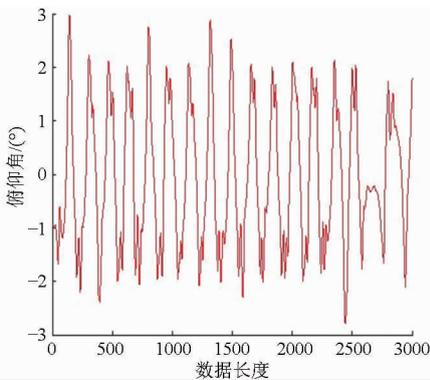


图16 PID算法结果

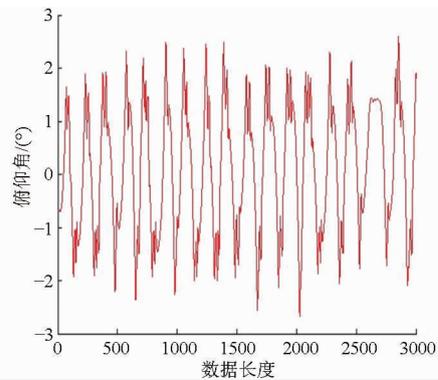


Fig.16 Results of PID algorithm

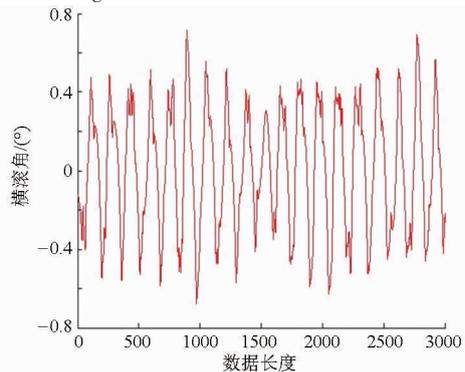
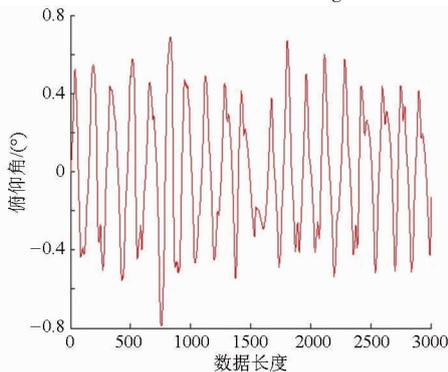


图17 本文算法调节结果

Fig.17 Results of the proposed algorithm

性和稳定精度,横滚和俯仰的均方根误差约为 0.526° 和 0.485° ,稳定精度提高了约 $1.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 。实验结果表明,本文算法具有一定的有效性和实用性。

5 结论

通过分析稳定平台伺服速度环受到外界干扰和测量噪声的影响,并针对经典干扰观测器的测量噪声抑制不足和伺服控制系统响应存在时滞的弊端,提出了一种基于自适应灰色预测的分数阶改进干扰观测器的控制方法,具体如下:

(1) GM(1,1) 幂模型建模,并对 GM(1,1) 幂模型进行了改进优化,提高了 GM(1,1) 幂模型预测精度。

(2) 自调节模块自调节模块根据实际误差和预测误差来同时调节预测步长和预测误差在综合误差

中的权值,进而减小预测误差的影响。

(3) 设计了分数阶改进干扰观测器,分数阶改进干扰观测器通过合理算法逼近,从而选择合适的阶次。相比于经典干扰观测器,分数阶改进干扰观测器不仅很好地抑制了外界干扰、测量噪声和模型摄动的影响,而且较好地调节干扰抑制和系统鲁棒稳定性之间的矛盾。

(4) 最后通过数值仿真和动静态实验验证,结果表明了该方法的有效性与实用性,不仅可以有效抑制稳定平台外界干扰和测量噪声,而且提高了系统响应能力。其中在考虑摩擦模型和测量噪声的情况下,稳定平台系统速度环的精度可以达到不超过 0.1 rad/s 。在稳定平台静态实验和动态实验中,稳定平台调节时间缩短了 0.258 s ,稳定精度提高了 $1.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 。

参 考 文 献

- 1 杨蒲,李奇. 陀螺稳定平台自适应分层滑模速度控制[J]. 兵工学报,2008,29(7):864-869.
YANG Pu, LI Qi. Adaptive hierarchical sliding mode speed control of gyro stabilized platform [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(7):864-869. (in Chinese)
- 2 陆建山,王昌明,何云峰,等. 改进型干扰观测器在稳定平台中的应用[J]. 振动与冲击,2013,32(8):96-99.
LU Jianshan, WANG Changming, HE Yunfeng, et al. Application of improved disturbance observer in a stable platform servo system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8):96-99. (in Chinese)
- 3 MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems-tracking dynamic targets with mobile sensors[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1):47-64.
- 4 HURAK Z, REAAC M. Image-based pointing and tracking for inertially stabilized airborne camera platform [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5):1146-1159.
- 5 TAKAJI Umeno, YOICHI Hori. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 38(5):363-368.
- 6 WU Yunjie, LIU Xiaodong, TIAN Dapeng. Research of compound controller for flight simulator with disturbance observer[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5):613-621.
- 7 FAN Shixun, FAN Dapeng, HONG Huajie, et al. Robust tracking control for micro machine tools with load uncertainties [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(1):117-127.
- 8 LI Zhiqiang, ZHANG Zhiyong, ZHOU Qinghun, et al. Parameter identification of inertially stabilized platforms using current command design[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(2):342-353.
- 9 SUN Haibin, LI Shihua. Composite control method for stabilizing spacecraft attitude in terms of Rodrigues parameters[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(3):687-696.
- 10 于爽,付庄,闰维新,等. 基于干扰观测器的惯性平台摩擦补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1830-1833.
YU Shuang, FU Zhuang, YAN Weixin, et al. Method of friction compensation based on disturbance observer in inertial platform [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11):1830-1833. (in Chinese)
- 11 CHEN Y, BLAS M, IGOR P. On fractional order disturbance observer[C]//ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2003,5:617-624.
- 12 MA Chengbin, HORI Yoichi. Backlash vibration suppression in torsional system based on the fractional order Q-filter of disturbance observer[C]//AMC'04, 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004:577-582.
- 13 LU Jianshan, XIE Weidong, ZHOU Hongbo, et al. Vibration suppression using fractional-order disturbance observer based adaptive grey predictive controller[J]. Journal of Vibroengineering, 2014, 16(5):2204-2215.
- 14 张岩,邵富群,王军生,等. 灰色预测模型在冷轧动态张力系统控制中的应用[J]. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(5):614-617.
ZHANG Y, SHAO F Q, WANG J S, et al. Using a gray predictive model for controlling dynamic tension during cold rolling[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32(5):614-617. (in Chinese)

- 15 王学林,姬长英,周俊,等. 基于灰色预测控制的果蔬抓去系统设计与实验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):112-117.
WANG X L, JI C Y, ZHOU J, et al. Design and experiment of fruit and vegetable grasping system based on grey prediction control[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 112-117. (in Chinese)
- 16 张广立,付莹,杨汝清. 一种新型自调节灰色预测控制器[J]. 控制与决策,2004,19(2):212-215.
ZHANG Guangli, FU Ying, YANG Ruqing. Novel self-adjustable grey prediction controller[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 212-215. (in Chinese)
- 17 WANG Z X, DANG Y G, ZHAO J J. Optimized GM(1,1) power model and its application[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(9): 1973-1978.
- 18 WANG Z X, DANG Y G, LIU S F, et al. Solution of GM(1,1) power model and its properties[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(10): 2380-2383.
- 19 ZHANG B, XI G Q. GM(1,1) model optimization based on the background value and boundary value correction[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(3): 682-688.
- 20 LU Jianshan, XIE Weidong, ZHANG Aijun, et al. Chaos-based modified GM(1,1) power model in time series prediction[J]. The Journal of Grey System, 2014, 26(4): 32-43.
- 21 WEI L S, FEI M R. Research on stability and simulation of adaptive grey predictive control[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 3009-3013.
- 22 李秋影,李文. 分数阶干扰观测器在电机调速系统中的应用[J]. 大连交通大学学报,2009,30(3):79-82.
LI Qiuying, LI Wen. Application of fractional-order disturbance observer in motor timing system [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2009, 30(3): 79-82. (in Chinese)
- 23 ALAIN Oustaloup, FRANÇOIS Levron, BENOÎT Mathieu, et al. Nanot. frequency-band complex noninteger differentiator; characterization and synthesis [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(1): 25-39.
- 24 齐乃明,秦昌茂,王威. 分数阶系统的最优 Oustaloup 数字实现算法[J]. 控制与决策,2010,25(10):1588-1600.
QI Naiming, QIN Changmao, WANG Wei. Optimal Oustaloup digital realization of fractional order systems[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1588-1600. (in Chinese)
- 25 赵慧敏,李文,邓武. 一类分数阶滤波器逼近阶次的选择[J]. 电机与控制学报,2010,14(1):90-94.
ZHAO Huimin, LI Wen, DENG Wu. Approximation degree selection for one kind of fractional-order filter[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(1): 90-94. (in Chinese)
- 26 韩萌. 并联式稳定平台技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
HAN Meng. Research on the parallel stabilized platform technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 332 页)

- 20 RAHNAMAYAN S, TIZHOOSH H R, SALAMA M M A. Opposition-based differential evolution [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2008, 12(1):64-79.
- 21 RAHNAMAYAN S, WANG G, VENTRESCA M. An intuitive distance-based explanation of opposition-based sampling [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(9):2828-2839.
- 22 ZITZLER E, THIELE L. Multi-objective evolutionary algorithms; a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4):257-271.
- 23 BOSMAN T, THIERENS D. The balance between proximity and diversity in multi-objective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2):174-188.
- 24 KUKKONEN S. GDE3: the third evolution step of generalized differential evolution[C]//2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005:443-450.
- 25 DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- 26 ZITZLER E, LAUMANN S, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multi-objective optimization[C]//Proceedings of the Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control, 2002:95-100.
- 27 安伟刚. 多目标优化方法研究及其工程应用[D]. 西安:西北工业大学,2005.  
AN Weigang. Research on multi-objective optimization method and its engineering application [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)