

1-4-2019

Application of Compound Control for Flight Simulator with EID Estimator

Ren Yan

1. *College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;*

Guanhua Zhao

1. *College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;*

Wenbo Tan

1. *College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;*

Xiaodong Liu

2. *Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100039, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Compound Control for Flight Simulator with EID Estimator

Abstract

Abstract: In view of the problem that the interference and nonlinear friction sensitively effect on flight simulators, *an improved approximation differential compound control strategy with Equivalent Input Disturbance (EID) estimator is presented. Moreover, the setting conditions based on given parameters was proposed.* In the presented strategy, the EID estimator can compensate the equivalent input disturbance of the system. Furthermore, owing to the construction of the digital feedforward via the improved differentiator, *the improved approximation differentiator is able to acquire accurately the velocity and the acceleration of the signal, and has an ability to inhibit the partial noise by use of the improved. It avoids the disadvantage of the traditional differential method, which causes the amplification of the noise. Thus, the presented compound control strategy can improve the tracking precision and robustness of the system effectively.* The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords

compound control, digital feed forward, equivalent input disturbance, flight simulator

Recommended Citation

Ren Yan, Zhao Guanhua, Tan Wenbo, Liu Xiaodong. Application of Compound Control for Flight Simulator with EID Estimator[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3724-3731.

基于 EID 估计的复合控制在转台中的应用

任彦¹, 赵冠华¹, 谭文博¹, 刘晓东²

(1. 内蒙古科技大学信息工程学院, 包头 014010; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100039)

摘要: 针对飞行仿真转台系统在实际运行中易受到外界干扰和非线性摩擦等的影响, 提出了一种带有等价输入干扰(Equivalent Input Disturbance, EID)估计器的改进型近似微分复合控制策略, 并给出了给定参数整定条件。采用等价输入干扰估计器对系统等效输入干扰进行补偿; 利用改进型近似微分器构建数字前馈, 改进型近似微分器可以精确地获取信号的速度信号与加速度信号, 且对噪声具有一定的抑制能力, 避免了传统差分法放大噪声的弊端。该复合控制策略提高了系统的跟踪精度和鲁棒性, 仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 复合控制; 数字前馈; 等价输入干扰; 飞行仿真转台

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)10-3724-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810016

Application of Compound Control for Flight Simulator with EID Estimator

Ren Yan¹, Zhao Guanhua¹, Tan Wenbo¹, Liu Xiaodong²

(1. College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100039, China)

Abstract: In view of the problem that the interference and nonlinear friction sensitively effect on flight simulators, an improved approximation differential compound control strategy with Equivalent Input Disturbance (EID) estimator is presented. Moreover, the setting conditions based on given parameters was proposed. In the presented strategy, the EID estimator can compensate the equivalent input disturbance of the system. Furthermore, owing to the construction of the digital feedforward via the improved differentiator, the improved approximation differentiator is able to acquire accurately the velocity and the acceleration of the signal, and has an ability to inhibit the partial noise by use of the improved. It avoids the disadvantage of the traditional differential method, which causes the amplification of the noise. Thus, the presented compound control strategy can improve the tracking precision and robustness of the system effectively. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: compound control; digital feed forward; equivalent input disturbance; flight simulator

引言

飞行仿真转台是一种典型的高精度跟踪伺服

控制系统, 是进行飞行器地面半物理仿真实验的关键设备。系统的性能通常受参数摄动、负载惯性力矩和外部干扰等影响^[1-2]。

近年来, She 等提出了等价输入干扰(Equivalent Input Disturbance, EID)的估计方法^[3], 这种方法根据扰动对系统输出的影响效果, 定义了一个与外界扰动等价的输入端干扰, 通过状态观测器获取扰动



收稿日期: 2016-09-05 修回日期: 2016-12-31;
基金项目: 国家自然科学基金(61563041), 内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0603);
作者简介: 任彦(1977-), 女, 辽宁鞍山, 博士, 副教授, 研究方向为先进运动控制的研究与应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 3724 •

信息, 并映射到系统的输入通道, 再对输入端扰动进行估计和反向补偿, 从而提高整个控制系统的扰动抑制性能。该方法被应用于广泛的实践中^[4-6]。

目前在前馈设计中广泛使用的是加入零相差跟踪控制器(Zero Phase Error Tracking Controller, ZPETC)的控制方法^[7], 它的零极点相消的方法虽然消除了相位误差但是增益误差仍然存在, 并且这种控制方法需要知道超前值, 而超前值的获取又难以实现。

在数字前馈的研究中, 有一些学者提出了基于 Pade 近似的数字前馈控制器以及频域迭代设计等方法。这些算法^[8-9]都提高了跟踪精度, 并且无需指令超前, 但是其在工程上较难以实现。为了得到简单而有效的跟踪方法, 一般工程实现上采用传统的差分方法, 但是它有放大噪声的弊端。基于此, 本文采用一种基于等价输入干扰估计的改进型近似微分复合控制策略, 并给出了参数整定条件。其拥有较强的抑制噪声能力以及很好的鲁棒性, 使得该复合控制方法具有良好的跟踪效果。

1 飞行仿真转台的数学模型

1.1 等价输入干扰 (equivalent input disturbance, EID)

考虑如图 1(a)的线性时不变系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = Ax_0(t) + Bu(t) + B_d d(t) \\ y_0 = Cx_0(t) \end{cases} \quad (1)$$

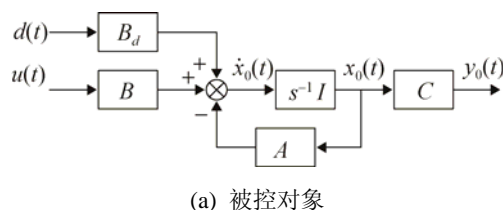
式中: $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times n_u}$, $C \in R^{n_y \times n}$ 和 $B_d \in R^{n \times n_d}$ 均为系数矩阵; $x_0(t) \in R^n$ 为状态变量; $u(t) \in R^{n_u}$ 和 $y_0(t) \in R^{n_y}$ 分别为控制输入和输出; $d(t) \in R^{n_d}$ 为外部扰动。

假设被控对象是能控和能观的, 且在虚轴上没有零点。

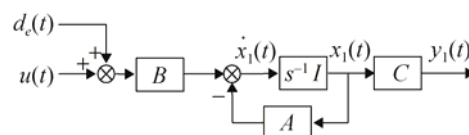
当矩阵 B 和 B_d 的维数不同时, 扰动便会通过不同的渠道加在被控对象上, 扰动等价到输入端后的对象, 如图 1(b)所示, 等价后的系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = Ax_1(t) + B[u(t) + d_e(t)] \\ y_1 = Cx_1(t) \end{cases} \quad (2)$$

令控制输入 $u(t)$ 为零, 如果对于所有的 $t \geq 0$, 系统(1)和(2)的输出都满足 $y_1(t) \equiv y_0(t)$, 那么, 扰动 $d_e(t)$ 就叫做扰动 $d(t)$ 的 EID^[10]。



(a) 被控对象



(b) 带 EID 的被控对象

图 1 EID 原理图

Fig. 1 The principle of EID

1.2 飞行仿真转台数学模型描述

飞行仿真转台控制系统由功放、执行电机、台体、测速机以及位置测角装置等许多设备组成。一般说来, 电机电枢、电感及电机和负载的粘性阻尼都非常小, 可以近似为零。在不考虑各种干扰的情况下, 被控对象名义模型的传递函数可以表示为:

$$G_n = \frac{1}{J_n s^2 + B_n s} \quad (3)$$

式中: J_n 表示等效转动惯量; B_n 表示等效阻尼比系数。

考虑实际系统中存在摩擦干扰、不平衡力矩及高频未建模动态等干扰, 系统的状态空间描述可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + B[u(t) + d_e(t)] \\ y = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$; y 表示电机的转角;

$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B_n / J_n \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 / J_n \end{bmatrix}$, $C = [1 \ 0]$; $d_e(t)$ 为系统的 EID。

2 基于 EID 估计的复合控制策略

本文针对实际系统首先设计 EID 估计器, 然后再此基础上引入基于改进型近似微分的数字前

馈控制器以及闭环反馈环节。其基本设计思路如图2所示。

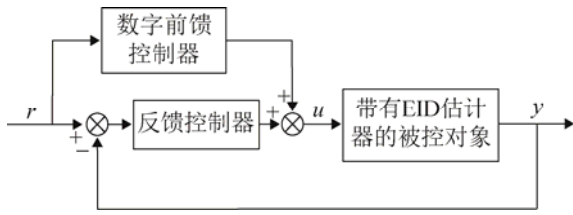


图2 控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram

2.1 EID 估计器的设计^[3]

基于 EID 的控制结构如图 3 所示。

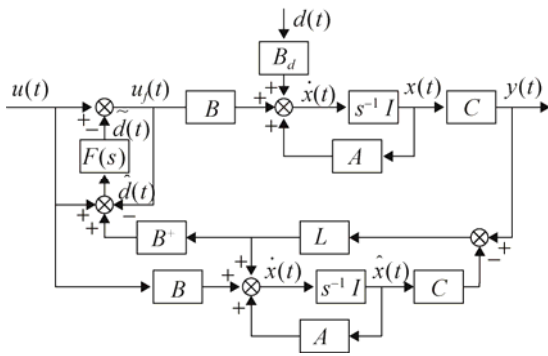


图3 EID 控制结构图

Fig. 3 The structure diagram of EID control

图 3 中： $B^+ := \frac{B^T}{B^T B}$ ； $F(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$ 为低通滤波器； L 为观测器增益。

对系统(4)设计状态观测器：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \quad (5)$$

令 $\Delta x(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ ，并代入到式(3)，得到：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + Bu(t) + \{Bd_e(t) + [\Delta\dot{x}(t) - A\Delta x(t)]\} \quad (6)$$

如果存在 $\Delta d(t)$ 满足：

$$\Delta\dot{x}(t) - A\Delta x(t) = B\Delta d(t) \quad (7)$$

把式(7)代入式(6)，并令 EID 的估计值为：

$$\hat{d}(t) = d_e(t) + \Delta d(t) \quad (8)$$

则可得：

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x}(t) + B[u(t) + \hat{d}(t)] \quad (9)$$

由式(5)和式(9)可得：

$$\hat{d}(t) = B^+ LC[x(t) - \hat{x}(t)] + u_f(t) - u(t) \quad (10)$$

由于干扰估计值 $\hat{d}(t)$ 中存在高频噪声干扰，故加入低通滤波器 $F(s)$ ，使得：

$$\tilde{D}(s) = F(s)\hat{D}(s) \quad (11)$$

其中， $\tilde{D}(s)$ 与 $\hat{D}(s)$ 分别是 $\tilde{d}(t)$ 与 $\hat{d}(t)$ 的 Laplace 变换。把 $\tilde{d}(t)$ 直接叠加到控制输入通道，来实现对系统未知干扰的抑制。

2.2 复合控制策略

2.2.1 改进型近似微分器的设计

传统差分法是采用如式(12)和(13)的差分方式来近似求取输入信号的微分信号。

$$\hat{v}(t) \approx \frac{v(t) - v(t - T)}{T} \quad (12)$$

$$\hat{v}(t) \approx \frac{v(t + T) - v(t)}{T} \quad (13)$$

式中： T 为时间常数一般取较小值。这种微分器几乎对外界的干扰噪声完全没有抑制效果，而且会受噪声的影响导致对信号的微分不稳定。

改进型近似微分器是对输入信号采用如式(14)的算法来近似求取其微分信号。

$$\hat{v}(t) \approx \frac{v(t - \tau_1) - v(t - \tau_2)}{\tau_1 - \tau_2}, 0 < \tau_1 < \tau_2 \quad (14)$$

其中，延迟信号 $v(t - \tau_1)$ 和 $v(t - \tau_2)$ 分别是通过惯性环节 $\frac{1}{(\tau_1 s + 1)}$ 和 $\frac{1}{(\tau_2 s + 1)}$ 来获取，即改进型近似

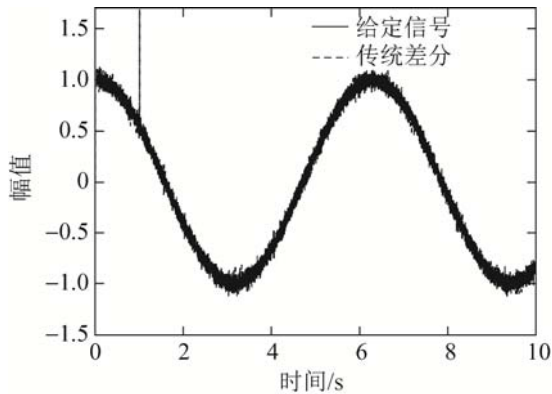
微分器是加入 $\frac{s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ 环节来实现。

传统差分与改进型近似微分器对微分信号的估计效果如图 4(a)、(b)所示，其中输入信号为带有标准差为 3×10^{-5} 白噪声的正弦信号 $\sin(t)$ 。

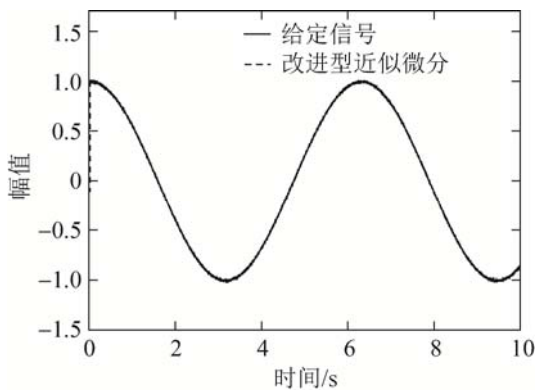
改进型近似微分器包含了滤波环节，合理的选取参数，可以有效地实现对高频信号的衰减。从仿真结果图 4 中可以看出，在加入相同噪声的情况下，改进型近似微分器对噪声有很好的抑制能力。

2.2.2 基于近似微分器的复合控制器的设计

数字前馈和闭环反馈构成的复合控制策略简单而有效地提高了信号跟踪的精度，复合控制策略结构如图 5 所示^[11]。



(a) 传统差分



(b) 改进型近似微分

图 4 微分信号的曲线图

Fig. 4 Curve of differential signal

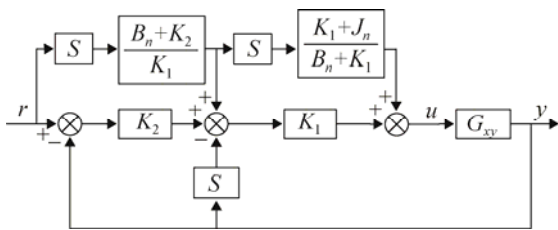


图 5 复合控制结构图 1

Fig. 5 The compound control structure diagram 1

本文在图 5 所示的控制结构基础上, 引入改进型近似微分器来获得较为准确的速度与加速度信号, 控制结构图如图 6 所示。

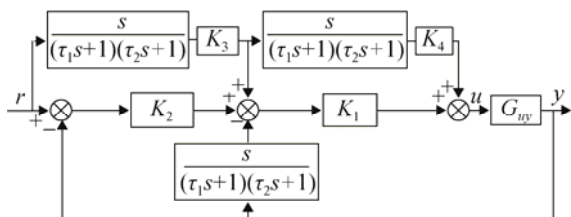


图 6 复合控制结构图 2

Fig. 6 The compound control structure diagram 2

在图 6 中, G_{uv} 为带 EID 估计器的被控对象。通过实践调试可获得 k_1 和 k_2 的系数, 而 k_3 和 k_4 是未知的, 从系统中可以得到传递函数如下:

$$G_{ry}(s) = \frac{k_3 k_3 \left[\frac{s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right]^2 G_{uy} + \left[\frac{s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right] G_{uy} + k_1 k_3 \left[\frac{s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \right] G_{uy} + k_1 k_2 G_{uy}}{k k_1 k_2 G_{uy} + 1} \quad (15)$$

式中: $G_{uy} \approx G_n = \frac{1}{J_n s^2 + B_n s} = \frac{k_n}{s(s + p_n)}$ 。

则得到:

$$G_{uy} \approx \frac{\{k_1 k_2 k_n s^4 + [\frac{k_1 k_3 k_n}{\tau_1 \tau_2} + \frac{k_1 k_2 k_n}{\tau_1^2 \tau_2^2} (2\tau_1^2 \tau_2 + 2\tau_1 \tau_2^2)] s^3 + \frac{1}{\tau_1^2 \tau_2^2} [k_3 k_4 k_n + k_1 k_3 k_n (\tau_1 + \tau_2) + k_1 k_2 k_n (\tau_1^2 + \tau_2^2 + 4\tau_1 \tau_2)] s^2 + \frac{1}{\tau_1^2 \tau_2^2} [k_1 k_3 k_n + k_1 k_2 k_n (2\tau_1 + 2\tau_2)] s + \frac{k_1 k_2 k_n}{\tau_1^2 \tau_2^2}\} / \{s^6 + (p_n + 2\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2}) s^5 + [k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + 2\frac{1}{\tau_1 \tau_2} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} (p_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2})] s^4 + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} [k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n + (\tau_1 + \tau_2) \cdot (k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}) + (p_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2})] s^3 + \frac{1}{\tau_1 \tau_2} [k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} (k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n) + k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}] s^2 + \frac{1}{\tau_1^2 \tau_2^2} [k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n] s + \frac{k_1 k_2 k_n}{\tau_1^2 \tau_2^2}}$$

定理 1: 当满足如下方程(17)时, 图 6 系统是稳的。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i > 0, i = 0, 1, 2 \dots 6 \\ \Delta_1 = a_1 > 0 \\ \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \\ \Delta_5 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 \end{vmatrix} > 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

式中:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 1 \\ a_1 = p_n + 2 \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \\ a_2 = k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + 2 \frac{1}{\tau_1 \tau_2} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} (p_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2}) \\ a_3 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} [k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n + (\tau_1 + \tau_2) \cdot (k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}) + (p_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2})] \\ a_4 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} [k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} (k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n) + k_1 k_2 k_n + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} p_n + \frac{1}{\tau_1 \tau_2}] \\ a_5 = \frac{1}{\tau_1^2 \tau_2^2} [k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n] \\ a_6 = \frac{k_1 k_2 k_n}{\tau_1^2 \tau_2^2} \end{array} \right.$$

定理 1 由李纳德-威帕特稳定判据得到证明^[12]。

推论 1: 如果 k_1, k_2, k_3, k_4 均正定, 则如图 6 的系统是稳定的。

即, 如果 k_1, k_2, k_3, k_4 均大于 0, 则式(17)满足, 因此, 定理 1 是有效的。

定理 2: 当同时满足公式(18)~(19)时在低频段 $G_{ry}(s) \approx 1$ 。

$$K_3 = 1 - K_2(\tau_1 + \tau_2) + \frac{P_N}{K_1 K_n} \quad (18)$$

$$K_4 = \frac{1}{K_3 K_n} - \frac{K_1}{K_3} (\tau_1 + \tau_2) - \frac{K_1 K_2}{K_3} \tau_1 \tau_2 \quad (19)$$

证明:

由公式(16)得到如下 $G_{ry}(s)$ 。

$$G_{ry}(s) \approx 1 / [(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)] \cdot \{k_1 k_2 k_n \tau_1^2 \tau_2^2 s^4 + [k_1 k_3 k_n \tau_1 \tau_2 + k_1 k_2 k_n (2\tau_1^2 \tau_2 + 2\tau_1 \tau_2^2)] s^3 + [k_3 k_4 k_n + k_1 k_3 k_n (\tau_1 + \tau_2) + k_1 k_2 k_n (\tau_1^2 + \tau_2^2 + 4\tau_1 \tau_2)] s^2 + [k_1 k_3 k_n + k_1 k_2 k_n (2\tau_1 + 2\tau_2)] s + k_1 k_2 k_n \} / \{ \tau_1 \tau_2 s^4 + [\tau_1 \tau_2 p_n + \tau_1 + \tau_2] s^3 + [k_1 k_2 k_n \tau_1 \tau_2 + (\tau_1 + \tau_2) p_n + 1] s^2 + [k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n] s + k_1 k_2 k_n \}$$

为得到较好的跟踪性能, 应满足式(20)~(23)。

$$k_1 k_2 k_n \tau_1^2 \tau_2^2 = \tau_1 \tau_2 \quad (20)$$

$$k_1 k_3 k_n \tau_1 \tau_2 + k_1 k_2 k_n (2\tau_1^2 \tau_2 + 2\tau_1 \tau_2^2) = \tau_1 \tau_2 p_n + \tau_1 + \tau_2 \quad (21)$$

$$k_3 k_4 k_n + k_1 k_3 k_n (\tau_1 + \tau_2) + k_1 k_2 k_n (\tau_1^2 + \tau_2^2 + 4\tau_1 \tau_2) = k_1 k_2 k_n \tau_1 \tau_2 + (\tau_1 + \tau_2) p_n + 1 \quad (22)$$

$$k_1 k_3 k_n + k_1 k_2 k_n (2\tau_1 + 2\tau_2) = k_1 k_n + k_1 k_2 k_n (\tau_1 + \tau_2) + p_n \quad (23)$$

当式(20)~(23)均成立时, 得到式(18)~(19)。同时, 得到如下式

$$G_{ry}(s) \approx \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (24)$$

做变换得

$$G_{ry}(j\omega) \approx \frac{1}{(\tau_1 j\omega + 1)(\tau_2 j\omega + 1)} \quad (25)$$

当 $\tau_1 < \tau_2 \ll \omega$ 时, $G_{ry}(j\omega) \approx 1$, 并且 $\angle G_{ry}(j\omega) \approx 0$ 。因此定理 2 得证。

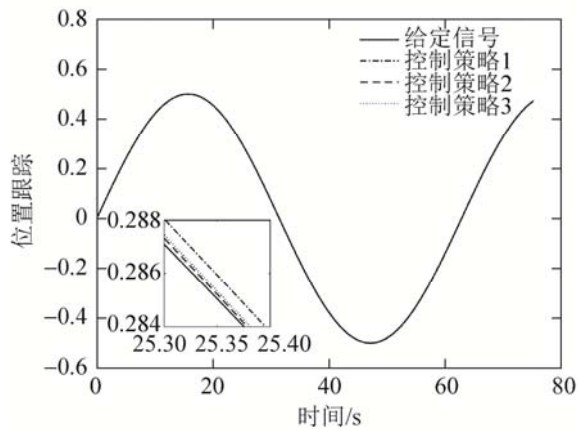
3 仿真实验结果分析

为了验证本文所提方法的有效性, 本文针对某三轴飞行仿真转台的滚转轴进行仿真。仿真中, 取 $J_n = \frac{1}{800}$, $B_n = \frac{65}{800}$ 。并设置滤波器的时间常数 $\tau = 0.01$, $L = \begin{bmatrix} 200 \\ 12000 \end{bmatrix}$ 。

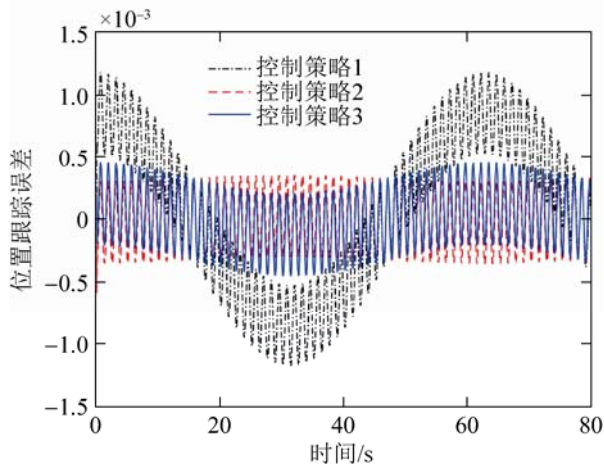
参数调整的原则是根据保证较好的位置跟踪性能及速度跟踪性能, 最终得到 $k_1 = 0.1$, $k_2 = 80$,

并设置 $\tau_1 = 0.001$, $\tau_2 = 0.002$, 则根据式(18)和(19)计算得 $k_3 = 1.16625$, $k_4 = 0.000529903$ 。

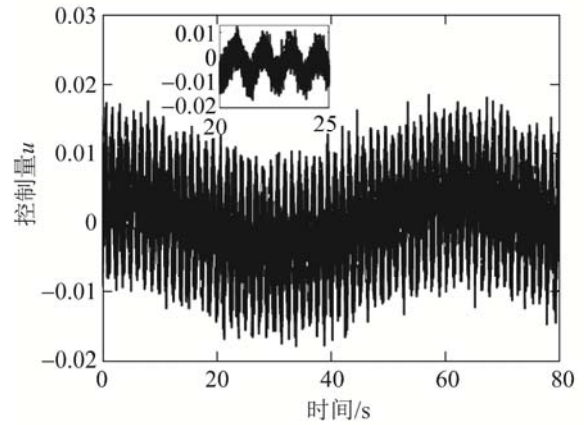
进行正弦信号的跟踪仿真实验, 输入正弦信号设置为 $0.5\sin(0.1t)$, 为了更好的模拟实际环境, 在系统中加 $0.05\sin(5t)$ 的干扰, 采用 LuGre 摩擦模型来表示系统中的摩擦力矩^[13-15], 输出信号中加入标准差为 1×10^{-5} 的白噪声, 系统仿真采样时间为 0.001 s。为了验证本文所提方法的有效性, 在仿真试验中, 将对比 3 种控制策略: 控制策略 1 为基于 EID 补偿的 PD 闭环控制; 控制策略 2 为如图 5 所示的基于 EID 补偿的传统差分复合控制; 控制策略 3 为如图 6 所示的基于 EID 补偿的改进型近似微分复合控制。3 种控制策略相关仿真实验结果如图 7 所示。



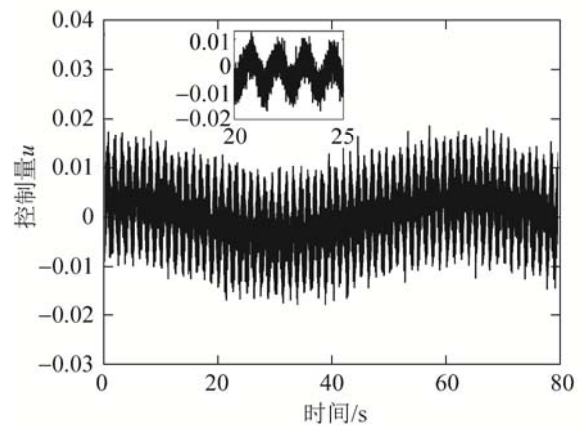
(a) 跟踪曲线 1



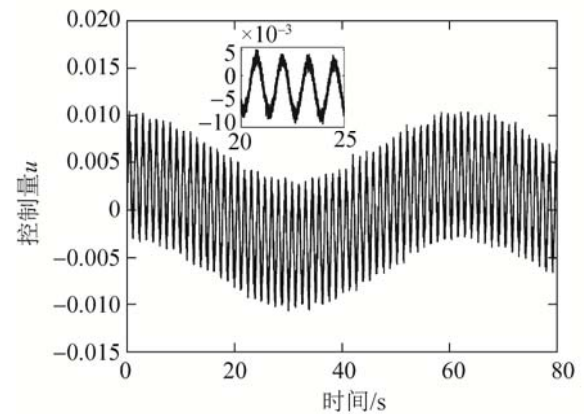
(b) 跟踪误差曲线 1



(c) 控制策略 1 的控制量 u 曲线



(d) 控制策略 2 的控制量 u 曲线



(e) 控制策略 3 的控制量 u 曲线

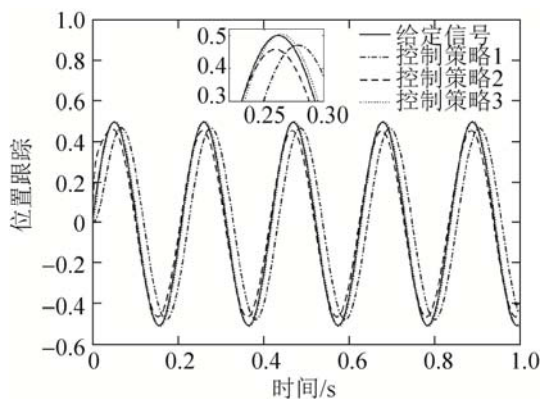
图 7 三种控制策略正弦跟踪曲线比较图 1
Fig. 7 Comparison curves under three scheme with sinusoidal input 1

从图 7(a)~(b)的仿真曲线中可以看出, 引入前馈后, 其跟踪误差从 0.0012 降到 0.0005 以内。在低频跟踪时, 前馈的引入可以明显地提高跟踪精

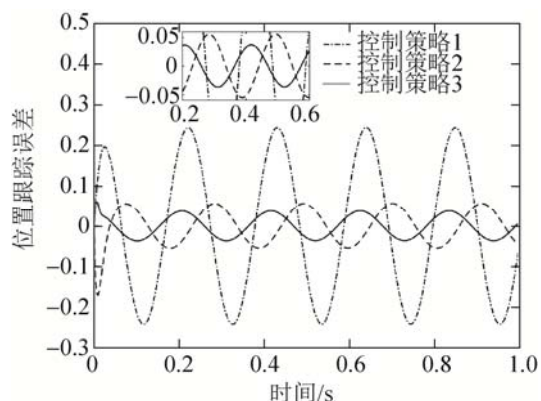
度。从图 7(c)~(e)中可以看出, 基于 EID 的闭环控制输出和基于传统差分复合控制输出存在抖振问题, 而控制率的高频抖振会激发系统的高频未建模动态, 降低系统的稳定性, 同时也降低了驱动器及执行机构的使用寿命。然而本文所提方法的控制输出明显要光滑于其他 2 种方法, 有效地保护了飞行转台设备, 具有一定的工程应用价值。

当输入正弦信号设置为 $0.5\sin(30t)$ 时, 3 种控制策略相关仿真实验结果如图 8 所示。

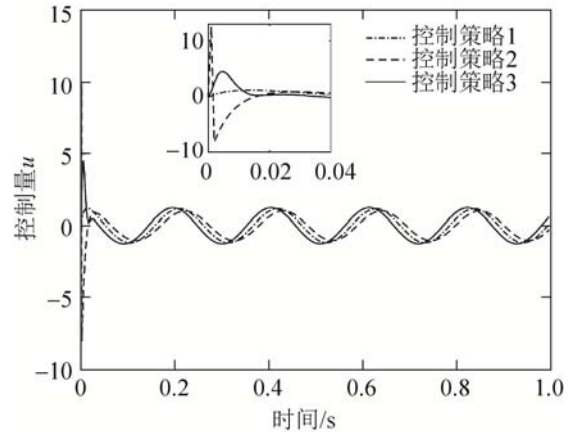
从图 8(a)~(b)的仿真曲线中可以看出, 引入前馈后, 其跟踪误差约从 0.243 降到 0.055 0 以内; 而采用改进型近似微分复合控制与传统差分复合控制的跟踪误差相比大约从 0.055 0 降到 0.037 3 以内。可以看出, 在高频跟踪时, 引入前馈可以明显地提高跟踪精度。



(a) 跟踪曲线 2



(b) 跟踪误差曲线 2



(c) 控制量 u 曲线

图 8 三种控制策略正弦跟踪曲线比较图 2

Fig. 8 Comparison curves under three scheme with sinusoidal input 2

综上所述, 本文所提的改进型近似微分复合控制策略具有良好的跟踪控制效果和较强的鲁棒性, 拓宽了系统的频带, 也保护了飞行仿真转台的执行机构。该方法结构简单, 便于工程实现, 具有一定的应用价值。

4 结论

本文所提出的一种带有 EID 估的改进型近似微分器的复合控制策略, 并将其应用于飞行仿真转台的控制中。其中, EID 估计器对包括摩擦在内的等效输入干扰进行估计并补偿, 有效地提高了系统的鲁棒性; 改进型近似微分器可以获取较为准确的微分信号, 由此构建的数字前馈控制器有效地提高了系统的跟踪精度, 拓宽了系统的跟踪频带。同时, 其控制输出较为平滑, 延长飞行仿真转台的使用寿命。因此, 本文所提出的控制策略在提高了系统的跟踪精度以及鲁棒性的同时, 也保护了飞行仿真转台设备, 且设计方式简单, 易于工程实现。

参考文献:

- [1] 吴云洁, 华岳阳, 肖松. 基于扩张状态观测器的飞行仿真转台鲁棒控制 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2663-2667.

Wu Yunjie, Hua Yueyang, Xiao Song. Robust Control Based on Extended State Observer for Flight Simulator

- [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(11): 2663-2667.
- [2] 陈松林, 单梅林, 王丽斌. 基于干扰观测器的飞行仿真转台完全跟踪控制 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1): 113-118.
Chen Songlin, Shan Meilin, Wang Libin. Disturbance observer-based robust perfect tracking control for flight simulator [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(1): 113-118.
- [3] She Jinhua, Fang Mingxing, Ohyama Yasuhiro. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2008, 55(1): 380-389.
- [4] Fang Gao, Min Wu, Jinhua She, et al. Delay-dependent guaranteed-cost control based on combination of Smith predictor and equivalent-input-disturbance approach [J]. ISA Transactions (S0019-0578), 2016, 62: 215-221
- [5] She Jinhua, Xin Xin, Pan Yaodong. Equivalent input disturbance approach Analysis and application to disturbance rejection in dual stage feed drive control system [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2011, 16(2): 330-340.
- [6] 张超, 马小平, 张义君, 等. 间谐波环境下并联有源电力滤波器系统设计 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 118-127.
Zhang Chao, Ma Xiaoping, Zhang Yijun, et al. System Design of Shunt Active Power Filter for Inter-Harmonics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 118-127.
- [7] Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (S0022-0434), 1987, 109(1): 65-68.
- [8] 刘强, 尔联洁. 高精度伺服系统基于 Pade 近似的数字前馈控制器 [J]. 机床与液压, 2004, 11: 31-62.
Liu Qiang, Er Lian-jie. Digital Feedforward Control Based on Pade Approximation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 11: 31-62.
- [9] 刘强. 数字前馈跟踪控制器的频域迭代设计方法 [J]. 工程设计学报, 2008, 15(6): 426-430.
Liu Qiang. Frequency domain iterative design method for digital feedforward tracking controllers [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2008, 15(6): 426-430.
- [10] 方明星, 吴敏, 余锦华. 基于等价输入干扰方法的结构主动控制及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7320-7329.
Fang Mingxing, Wu Min, She Jin-hua. Structural Active Control Based on Method of Equivalent-input-disturbance and Its Simulations [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(22): 7320-7329.
- [11] 田大鹏, 吴云洁, 刘晓东. 高精度电机伺服系统控制综合方法 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(7): 66-74.
Tian Dapeng, Wu Yunjie, Liu Xiaodong. Synthesis methods of high precision motor servo system control [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(7): 66-74.
- [12] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 第六版. 北京: 科学出版社, 2013: 95-96.
Hu shousong. Automatic Control Theory [M]. Sixth edition. Beijing, China: Science Press, 2013: 95-96.
- [13] Piatkowski T. Dahl and LuGre dynamic friction models-The analysis of selected properties [J]. Mechanism and machine theory (S0094-114X), 2014, 73: 91-100.
- [14] Ashesh Sahaa, Pankaj Wahib, Marian Wiercigrohc. A modified LuGre friction model for an accurate prediction of friction force in the pure sliding regime [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics (S0020-7462), 2016, 80: 122-131.
- [15] 李永林, 沈燕良, 李小涛, 等. 基于 LuGre 模型的飞机助力器极限环振荡仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5529-5532.
Li Yonglin, Shen Yanliang, Li Xiaotao, et al. Study on limit cycles oscillations of aircraft hydraulic booster based on LuGre model [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(23): 5529-5532.