

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.05.014

仿真转台控制系统变结构自适应控制技术研究

李亚楠, 胡吉昌, 王胜利, 赵庆, 王媛媛

(北京航天控制仪器研究所, 北京 100039)

摘要: 仿真转台是航空航天及工业领域重要的仿真设备。为了使仿真转台控制系统适应负载转动惯量变化, 并增强其对控制系统数学模型参数摄动、外界干扰等的鲁棒性, 现将自适应理论应用于仿真转台的伺服控制系统, 并使用变结构滑模控制设计控制律, 添加全程滑动模态因子, 设计了一种基于现代控制的复合自适应控制器。使用 Simulink 和 Matlab 搭建仿真环境, 在 20 Hz 的正弦信号下得到负载变化前后的仿真结果。PID 控制系统和自适应控制系统的响应幅值误差分别增大了 3.6% 和 1.3%, 证明了自适应控制有效地降低了系统的误差。当输入阶跃信号时, 自适应控制系统将稳态误差由 3.2% 减小到 0.3%。最后在仿真转台上进行了实物实验。在幅值 0.1° 频率 20 Hz 的正弦信号下, 添加负载及干扰后, PID 控制系统的响应幅值误差增大了 6.6%, 而自适应控制系统的幅值误差仅增大 2.4%, 比 PID 控制系统误差变化小。实验结果表明, 自适应控制器的控制效果优于 PID 控制器, 所设计的自适应控制器提高了控制系统对负载变化和干扰的鲁棒性。

关键词: 仿真转台; 自适应控制; 变结构控制; 全程滑动模态因子; 伺服控制系统; 半实物仿真平台

中图分类号: V355

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)05-0153-10

Research on variable structure adaptive control technology for simulation turntable control system

LI Yanan, HU Jichang, WANG Shengli, ZHAO Qing, WANG Yuanyuan

(Beijing Institute of Aerospace Control Device, Beijing 100039, China)

Abstract: The simulation turntable is a critical piece of simulation equipment in the aerospace and industrial sectors. In order to improve the robustness of the simulation turntable control system against changes in the load moment of inertia, as well as variations in the mathematical model parameters and external disturbances, the adaptive theory is used in the servo control system of the simulation turntable. The control law is designed by using variable structure sliding mode control, and a composite controller based on modern control is developed by incorporating a full sliding mode factor. The simulation experimental environment is established by using Simulink and Matlab platforms to compare the simulation results before and after the load change under a unit sinusoidal signal of 20 Hz. The response amplitude error of the PID control system increases by 3.6%, while that of the adaptive control system increases by only 1.3%, demonstrating the effectiveness of adaptive control in reducing system error. When a step signal is input, the steady-state error is reduced from 3.2% to 0.3% by the adaptive control system. Finally, a real experiment is performed on the simulation turntable. Under the sinusoidal signal with an amplitude of 0.1° and a

收稿日期: 2024-05-22; 修订日期: 2024-06-27

作者简介: 李亚楠(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事仪器科学与技术方面的研究。

通信作者: 胡吉昌(1971—), 男, 研究员, 主要从事转台控制技术方面的研究。

frequency of 20 Hz, after adding load and disturbance, the response amplitude error of the PID control system increases by 6.6%, while the amplitude error of the adaptive control system increases by only 2.4%. This indicates that the change in error of the adaptive control system is less than that of the PID control system. The experimental results show that the adaptive controller outperforms the PID controller in terms of control effectiveness. The designed adaptive controller improves the robustness of the control system against load changes and disturbances.

Key words: Simulation turntable; Adaptive control; Variable structure control; Full sliding mode factor; Servo control system; Semi-physical simulation platform

0 引言

导航与制导技术是航空航天领域中的一项核心技术,其研发与创新离不开大量的仿真实验。但受到实际环境的制约与限制,以及在实验中存在的危险因素,直接进行实验是十分困难的,这时就需要借助转台等半实物仿真平台^[1]。转台能够对惯导设备的使用条件进行模拟,从而对惯导设备参数进行仿真标定^[2]。

飞行仿真转台是一种造价低、安全性高及可重复使用的半实物仿真平台,是惯导仿真领域关键的硬件设备,在飞行器惯性导航元件的研制中起着重要作用,广泛应用于航空航天领域^[3]。飞行仿真转台可以模拟飞行器飞行过程中的运动,复现其姿态角的变化和动力学特性,为惯性导航元件的评价提供一个安全的环境^[4]。

目前,影响仿真转台控制系统性能进一步提高的主要因素大致分为3类^[4]:1)负载质量变化,会引起控制系统数学模型的变化,进而影响控制效果;2)参数的不确定性,主要由测量误差导致,表现为数学模型中的参数摄动;3)干扰的存在,包括外界干扰和系统内部的摩擦干扰力矩。

针对负载质量变化带来的问题,学者们有以下研究成果。赵小刚等^[5]为了解决受控对象发生变化时系统不能得到满意结果的问题,设计了 Narendra 模型参考自适应控制器,能够很好地补偿系统特性的变化。王树波等^[6]针对含参数未知和非线性摩擦动态的转台伺服系统,将预设性能函数的参数估计和自适应控制相结合,设计了自适应控制器。利用一种连续的摩擦模型表示转台伺服系统的摩擦动态,引入高阶神经网络对其进行逼近。通过构造一种滤波辅助变量获取参数估计误差信息,并将其作为参数自适应律的遗漏因子,保证估计值能够快速收敛到真实值,以实现期望轨迹的精确跟踪。黄

培等^[7]设计了自适应模糊滑模逼近控制器,解决了抗负载扰动性能差、鲁棒性弱的缺点,其滑动模态对加给系统的干扰具有完全的自适应性。Wang 等^[8]针对参数不确定性和慢时变问题,提出了将经典反馈校正与自适应前馈补偿相结合的模型参考自适应控制算法,保证转台系统获得良好的输出跟踪输入的性能,并可抑制干扰。

对于参数不确定和外界干扰,学者们也提出了不同的解决办法。Gdoura 等^[9]设计了自适应积分滑模面,通过消除高增益带来的不必要的抖振现象,自适应地估计滑动增益,获得对外界扰动的鲁棒性。杜青洲等^[10]通过改进传统滑模中的继电器函数为饱和函数,引入低通滤波器,设计了改进型的自适应滑模观测器,从而解决转台电机由于干扰、摩擦力矩等非线性因素带来的问题。唐苗等^[11]针对转台伺服系统在跟踪控制过程中存在的参数不确定性、非线性摩擦等问题,提出了一种基于微分观测器的飞行模拟转台伺服系统非线性控制方法,使得系统可以收敛到期望位置转角信号。郭肇等^[12]使用摩擦反馈并将速度环滑模控制与跟踪环 PID 控制相结合,可以得到一种滑模变结构控制策略,提升了光电稳定平台的稳定精度,同时具有一定的鲁棒性,能使运行中的系统在外界环境变化时具有一定的适应能力。Shen 等^[13]为了提高单轴转台抵抗外界干扰的能力,保证转台平稳运行,设计了双闭环控制器,将模糊自适应与比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 控制结合使转台运动平稳而无超调,实现了系统的鲁棒性和更好的稳定裕度。姜云翔等^[14]设计了基于模型参考模糊自适应的摩擦补偿控制方法,采用 Matlab 进行仿真试验分析,结果表明,该摩擦补偿方法能够有效抑制摩擦干扰的不利影响,提升转台低速跟踪的平稳性。

综上所述,自适应控制理论广泛用于解决参数

不确定、外界干扰及负载变化等问题,但是模型参考自适应系统具有无法定量地设计误差的瞬态过程的缺陷。而变结构滑模控制可以有效地解决这一问题,不仅如此,其还可以设计与对象参数摄动及扰动无关的滑动模态域,具有响应速度快、无需系统在线辨识及物理实现简单的优点。因此,将变结构滑模和模型参考自适应控制相结合,设计了复合自适应控制器,应用于仿真转台伺服控制系统,从而解决前文提到的问题。

1 仿真转台控制系统工作原理

要想建立转台控制系统的数学模型,首先要清楚仿真转台的控制系统的组成。以单轴转台的控制系统的研究对象,其组成包括以下几个部分:控制计算机、伺服电机及高精度编码器等^[15]。仿真转台机械系统主要由高精度回转轴系、负载安装台、底座和支脚等结构组成。仿真转台控制系统的工作原理简述如下:

- 1)控制计算机接收期望的位置命令和编码器反馈信息,二者比较产生偏差信号作为其输入信号,控制计算机按所求的控制规律输出控制指令;
- 2)控制计算机发出的控制指令,经过信号调理后传给伺服电机,伺服电机驱动机械系统运动;
- 3)高精度编码器作为反馈器件,实时反馈机械系统中轴系的位置转角信息给控制计算机,实时测量转台的位置。

2 控制系统建模

依据物理原理建立仿真转台的数学模型。依据控制系统的电枢电路电压平衡方程、电磁转矩方程以及电机转矩平衡方程获得控制系统状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

式中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix}$; $C = [1 \ 0]$;
 $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}$; $u = [u_a]$ 。其中, $a_1 = 0$; $a_2 = \frac{C_c C_m + f_c R}{JR + f_c L}$;
 $b_1 = \frac{C_m}{JR + f_c L}$; θ 表示转动角度; ω 为转动角速度;
 u_a 为电压; R 是电枢电路的电阻; L 是电枢电路的电感; C_c 是反电势系数; C_m 是电动机转矩系数; f_c 是电机黏滞摩擦系数; J 为折合到电机轴上的总转动

惯量。

至此,建立了仿真转台控制系统的状态空间模型,式(1)称为控制系统的标称方程。在此基础上,考虑模型参数摄动和外界干扰。在进行数学建模时,由于测量误差以及高阶无穷小量的存在,得到的数学模型往往和实际系统不一样。其次,转台的工作环境中存在干扰,这些外在干扰对转台控制产生了不可预测的影响,可以通过确定干扰信号的范围进行建模。

考虑模型参数摄动和外界干扰后,设状态方程为

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Df \quad (2)$$

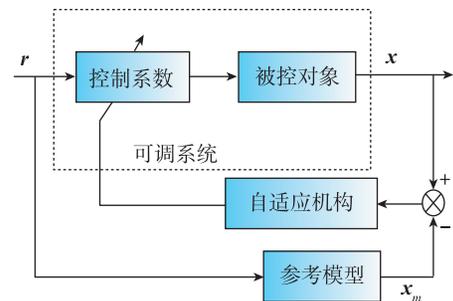
其中, A 和 B 称为标称矩阵; ΔA 和 ΔB 分别为矩阵 A 和 B 的摄动矩阵; D 为干扰矩阵; f 为随机干扰力矩,并且

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\Delta a_1 & -\Delta a_2 \end{bmatrix}, \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta b_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

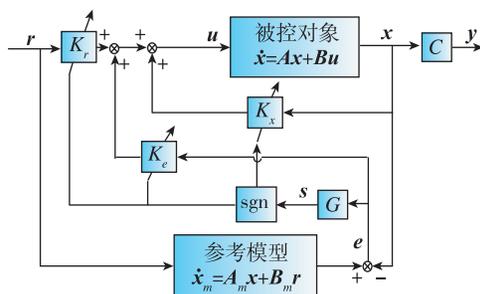
其中,参数 $\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta b_1$ 在一定的范围内不断摄动。

3 复合自适应控制器设计

模型参考自适应控制系统的原理如图 1 所示。系统中有一个理想模型作为参考,它被设计成具有优良的动态性能。如果保证被控系统的状态与参



(a) 模型参考自适应控制原理



(b) 复合控制器原理

图 1 自适应控制器原理

Fig. 1 Schematic of adaptive controller

考模型的状态在运动过程中始终保持一致,那么被控系统也将获得与参考模型一样的动态品质。

图1(a)中,被控对象的状态 x 与参考模型的状态 x_m 的差值为误差向量 e 。 e 是自适应机构的输入信号,当系统的参数变化或受到干扰时 $e \neq 0$ 。自适应机构作用于可调系统,改变它们的调节器的参数,使误差 e 趋近于零值,以保持 x 与 x_m 始终一致,从而保持系统具有优良的控制效果。

在以前的研究中,往往使用李雅普诺夫定理或波波夫超稳定性理论设计模型参考自适应控制律,这些方法计算复杂且无法定量地设计误差的动态性能。下面将使用变结构滑模原理设计模型参考自适应机构中的控制律,得到一种新的复合自适应控制器,该控制器的原理如图1(b)所示。

设参考模型的数学描述为

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r \quad (4)$$

式中, $A_m \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B_m \in \mathbf{R}^{n \times l}$ 分别为参考模型的系统矩阵和控制矩阵; $x_m \in \mathbf{R}^n$ 是控制器参考模型的状态变量; $r \in \mathbf{R}^l$ 是整个控制系统的输入向量,是期望的输出信号。

参考模型式应满足的条件:

- 1) A_m, B_m 均为Lebesgue可测,且有界;
- 2) (A_m, B_m) 为完全可控对,且 B_m 的秩满足 $\text{rank} B_m = l \leq m, m$ 为输入向量 u 的阶数。

选取 A_m 为正实矩阵,则参考模型形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_{m1} & -a_{m2} \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} r \quad (5)$$

设误差状态方程式为

$$e(t) = x_m(t) - x(t) \quad (6)$$

则模型参考自适应控制系统实现完全跟踪的条件为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (7)$$

以误差 $e(t)$ 为研究对象,使用变结构原理设计模型参考自适应控制中的控制律。

滑模控制系统的运动分为两个阶段:能达阶段和滑动阶段^[16-17],分别对应滑模控制律设计和滑动模态域设计。

滑模面设计,又叫滑动模态设计,决定了系统的最终控制效果。它的设计要遵循以下两点:1)保证滑动阶段的运动稳定;2)系统状态在滑模面上的运动具有良好的动态品质^[18]。设计滑模面时,为提高收敛速度,添加全程滑动模态因子,使系统状态在初始时刻就位于滑模面上,改善系统的瞬态性

能。据此设滑动模态域方程为

$$S(e, t) = Ge - W(t) \quad (8)$$

式中, $W(t)$ 为全程滑动模态因子; G 为需要设计的滑动模态矩阵。

全程滑动模态因子的设计要满足以下3个条件。

1)初值条件

$$W(0) = Ge(0) \quad (9)$$

2)终值条件

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = 0 \quad (10)$$

3)可导条件:全程滑动模态因子 $W(t)$ 存在一阶微分且有界。

依据上述3个条件,选取 $W(t)$ 的形式为

$$W(t) = GE(t)e(0) \quad (11)$$

式中, $E(t) = \begin{bmatrix} \exp(-\alpha_1 t) & 0 \\ 0 & \exp(-\alpha_2 t) \end{bmatrix}, \alpha_1 \in \mathbf{R}, \alpha_2 \in \mathbf{R}$ 。

使用极点配置方法设计转台控制系统的滑动模态,极点配置法原理如下。

已知误差状态变量为式(6),结合式(1)和式(4)得误差系统的标称模型为

$$\dot{e}(t) = A_m e(t) + [A_m - A]x + B_m r - Bu \quad (12)$$

将矩阵 G 、矩阵 E 、矩阵 A_m 和 $e(t)$ 写为如下形式

$$G = [G_1 \quad G_2], E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, A_m = \begin{bmatrix} A_{m11} & A_{m12} \\ A_{m21} & A_{m22} \end{bmatrix}, e(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(8)和式(12),得

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{m11} e_1(t) + A_{m12} e_2(t) \\ S = G_1 e_1 + G_2 e_2 - G_1 E_1 e_1(0) - G_2 E_2 e_2(0) \end{cases} \quad (14)$$

令 $S = 0$,解出

$$e_2 = -Ke_1 + KE_1(t)e_1(0) - E_2(t)e_2(0), K = G_2^{-1}G_1 \quad (15)$$

代入式(14),可得

$$\dot{e}_1 = (A_{m11} - A_{m12}K)e_1 + A_{m12}KE_1 e_1(0) - A_{m12}E_2(t)e_2(0) \quad (16)$$

引理1:实数矩阵 $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}$,

若 (A, B) 为完全可控对,则 (A_{11}, A_{12}) 也为完全可控对^[19]。

依据引理1,可知 (A_{m11}, A_{m12}) 为完全可控对,选择 K 使 $(A_{m11} - A_{m12}K)$ 的特征根为期望的特征根,特征根的选取要让系统在滑动阶段的运动具有

良好的动态品质。则有

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_2 [\mathbf{K} \quad \mathbf{I}_m] \quad (17)$$

其中, \mathbf{G} 即为所求滑动模态矩阵。至此, 变结构滑动模态域设计完成。

仿真转台负载改变或者受到干扰时, 系统状态变量发生变化, 导致变量 e 离开滑动模态域, 这时就需要设计控制律使其回到滑动模态域中, 该控制律的设计对应图 2 中的能达阶段^[20-21]。图 2 是二阶系统在变结构控制器下的运动示意图, 其中 $e(0)$ 表示误差变量受干扰离开滑模面后的位置, 直线为滑动模态域 $\mathbf{S} = 0$ 。

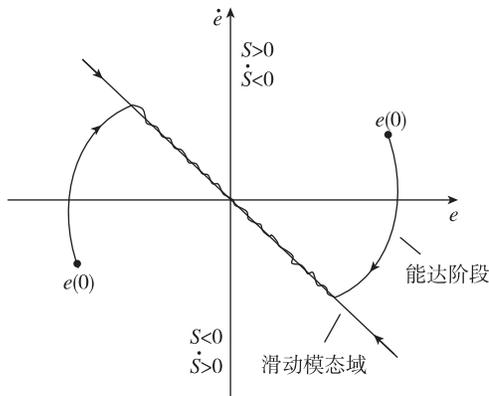


图 2 变结构控制系统的运动示意图

Fig. 2 Motion diagram of the variable structure control system

由图 2 可知, 二阶被控系统最终能到达滑动模态域的条件就是

$$\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} \leq 0 \quad (18)$$

该式称为变结构系统的能达条件。

控制器控制律的设计分为两步, 首先满足模型参考自适应控制系统实现完全跟踪条件; 然后再满足滑动模态的能达条件。故设控制律方程为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_m + \mathbf{u}_v \quad (19)$$

式中, \mathbf{u}_m 为模型参考匹配控制律; \mathbf{u}_v 为变结构控制律。

模型参考自适应控制的完全跟踪条件为 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 据此可求出模型参考完全跟踪的匹配律 \mathbf{u}_m 为

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] [\mathbf{A}_m - \mathbf{A}] \mathbf{x} + \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] \mathbf{B}_m \mathbf{r} \quad (20)$$

考虑参数摄动和干扰的误差系统模型式为

$$\dot{e} = \mathbf{A}_m e + [\mathbf{A}_m - \mathbf{A}] \mathbf{x} + \mathbf{B}_m \mathbf{r} - \mathbf{B} \mathbf{u} - \Delta \mathbf{A} \mathbf{x} - \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} - \mathbf{D} \mathbf{f} \quad (21)$$

将式(19)和式(20)代入式(21)中, 得

$$\dot{e} = \mathbf{A}_m e - \mathbf{B} \mathbf{u}_v - \Delta \mathbf{A} \mathbf{x} - \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} - \mathbf{D} \mathbf{f} \quad (22)$$

设滑模控制律结构为

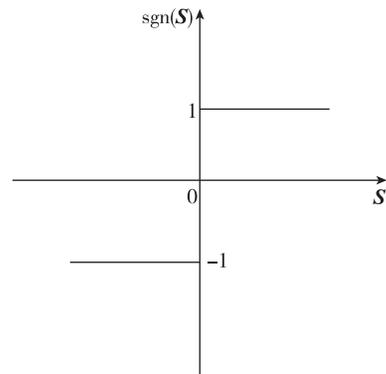
$$\mathbf{u}_v = \mathbf{g}(t) (\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1} \text{sgn}(\mathbf{S}) \quad (23)$$

式中, $\mathbf{g}(t) > 0$ 为待求的控制系数; $\text{sgn}(\mathbf{S}) = \begin{cases} 1, \mathbf{S} \geq 0 \\ -1, \mathbf{S} < 0 \end{cases}$ 为开关函数。为了消除系统运动过程中

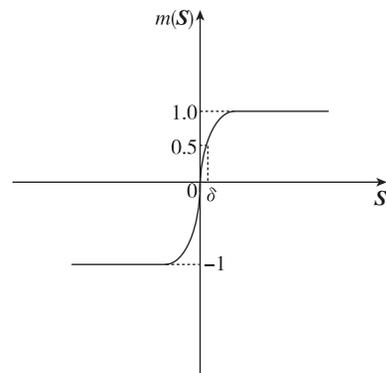
的高频振颤, 用 $m(\mathbf{S}) = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}| + \delta}$ 代替 $\text{sgn}(\mathbf{S})$, 得

$$\mathbf{u}_v = \mathbf{g}(t) (\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1} m(\mathbf{S}) \quad (24)$$

式中, δ 取值 0.1。如图 3 所示, 这样可将不连续控制转化为连续控制, 从而消除系统运动中的高频振颤。



(a) $\text{sgn}(\mathbf{S})$ 函数曲线



(b) $m(\mathbf{S})$ 函数曲线

图 3 变结构控制的非线性控制分量函数曲线

Fig. 3 Nonlinear control component function curve of variable structure control

设计变结构控制律 \mathbf{u}_v , 使 $\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} \leq 0$, 这样才能保证误差向量 e 在滑模面上运动, 即保证误差向量 e 满足能达条件。

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} &= \mathbf{S}^T [\mathbf{G}\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{G}\dot{\mathbf{E}}\mathbf{e}(0)] \xrightarrow{\text{代入 } \mathbf{e} \text{ 的导数}} \mathbf{S}^T \mathbf{G} [\mathbf{A}_m \mathbf{e} - \mathbf{B} \mathbf{u}_v - \Delta \mathbf{A} \mathbf{x} - \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} - \mathbf{D} \mathbf{f} - \dot{\mathbf{E}} \mathbf{e}(0)] \\
&\xrightarrow{\text{代入 } \mathbf{u}_v} \mathbf{g}(t) \mathbf{S}^T \mathbf{m}(\mathbf{S}) - \mathbf{g}(t) \mathbf{S}^T \mathbf{G} \Delta \mathbf{B} (\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{m}(\mathbf{S}) - \\
&\quad \mathbf{S}^T \mathbf{G} \Delta \mathbf{B} [\mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] [\mathbf{A}_m - \mathbf{A}] \mathbf{x} + \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] \mathbf{B}_m \mathbf{r}] + \\
&\quad \mathbf{S}^T \mathbf{G} [\mathbf{A}_m \mathbf{e} - \Delta \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{D} \mathbf{f} - \dot{\mathbf{E}} \mathbf{e}(0)] \\
&\xrightarrow{\text{整理得}} \mathbf{g}(t) \mathbf{S}^T \mathbf{m}(\mathbf{S}) [1 - \mathbf{G} \Delta \mathbf{B} (\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1}] - \mathbf{S}^T \mathbf{G} \Delta \mathbf{B} \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] \mathbf{B}_m \mathbf{r} + \\
&\quad \mathbf{S}^T \mathbf{G} [\mathbf{A}_m \mathbf{e} - [\Delta \mathbf{B} \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] [\mathbf{A}_m - \mathbf{A}] + \Delta \mathbf{A}] \mathbf{x} - \mathbf{D} \mathbf{f} - \dot{\mathbf{E}} \mathbf{e}(0)] \\
&\leq -\mathbf{g}(t) \|\mathbf{S}^T\| [1 - \|\Delta \mathbf{B}\| \|\mathbf{G}\| \|(\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1}\|] + \|\mathbf{S}^T\| \psi_b \|\mathbf{G}\| \|\mathbf{r}\| + \\
&\quad \|\mathbf{S}^T\| [\|\mathbf{G} \mathbf{A}_m\| \|\mathbf{e}\| + \psi_a \|\mathbf{G}\| \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{G} \mathbf{D}\| \|\mathbf{f}\| - \|\mathbf{G} \mathbf{e}(0)\| \|\dot{\mathbf{E}}\|] = 0
\end{aligned} \tag{25}$$

式中, $\|\ast\|$ 表示矩阵的诱导范数, 且有

$$\dot{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 \exp(-\alpha_1 t) & 0 \\ 0 & -\alpha_2 \exp(-\alpha_2 t) \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\begin{cases} \psi_b = \|\Delta \mathbf{B} \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] \mathbf{B}_m\| \\ \psi_a = \|\mathbf{A}_m \mathbf{e} - [\Delta \mathbf{B} \mathbf{B}_2^{-1} [0 \quad \mathbf{I}_m] \cdot \\ [\mathbf{A}_m - \mathbf{A}] + \Delta \mathbf{A}]\| \end{cases} \tag{27}$$

解得控制系数为

$$\mathbf{g}(t) = (1 - a_5)^{-1} [a_1 \|\mathbf{e}\| + a_2 \|\mathbf{x}\| + a_3 \|\mathbf{r}\| + a_4] \tag{28}$$

式中, 各系数为

$$\begin{cases} a_1 = \|\mathbf{G} \mathbf{A}_m\| \\ a_2 = \psi_a \|\mathbf{G}\| \\ a_3 = \psi_b \|\mathbf{G}\| \\ a_4 = \|\mathbf{G} \mathbf{D}\| \|\mathbf{f}\| - \|\mathbf{G} \mathbf{e}(0)\| \|\dot{\mathbf{E}}\| \\ a_5 = \|\Delta \mathbf{B}\| \|\mathbf{G}\| \|(\mathbf{G} \mathbf{B})^{-1}\| \end{cases} \tag{29}$$

4 仿真结果

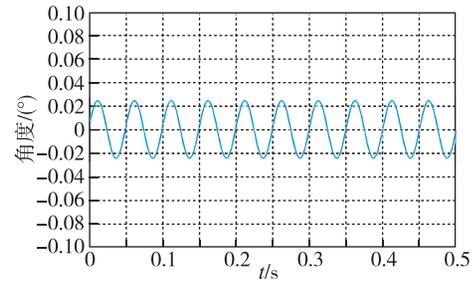
首先, 依据第 3 章建立的复合控制器数学模型, 使用 Simulink 工具进行仿真分析。分别用 PID 控制原理和变结构模型参考自适应控制原理搭建控制器进行仿真, 获得两种控制方法的仿真结果, 并进行对比分析。

本文研究对象为仿真转台, 需要模拟飞行器运动过程中的角运动。因此, 转台要想实现优良的控制功能, 不仅要满足控制的稳定性要求, 还需要在模拟正弦信号时具有高频带、高测量精度的特点。

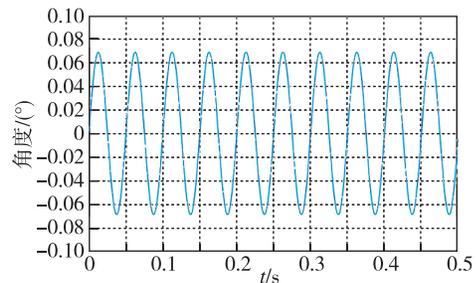
为了检验所设计的复合自适应控制器对负载变化的鲁棒性, 输入 20 Hz 单位正弦信号, 在无负载和有负载两种情况下进行仿真, 得到 PID 控制器和自适应控制器的仿真结果误差, 如图 4 所示。

图 4 中, 横坐标为仿真时间, 单位为 s, 纵坐标为角位置, 单位为 ($^\circ$)。当输入 20 Hz 的单位正弦信

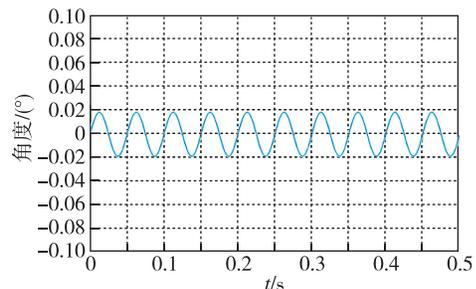
号时, 由图 4(a) 和图 4(b) 可知, PID 控制系统响应幅值误差从 2.3% 变为 6.9%; 由图 4(c) 和图 4(d) 可知, 自适应控制系统响应幅值误差从 1.9% 变为 3.2%。可以看出, 两种控制器的幅值误差都变大, 但自适应控制器的误差变化明显小于 PID 控制器的误差变化, 这说明所设计的自适应控制器的鲁棒性强于传统的 PID 控制。



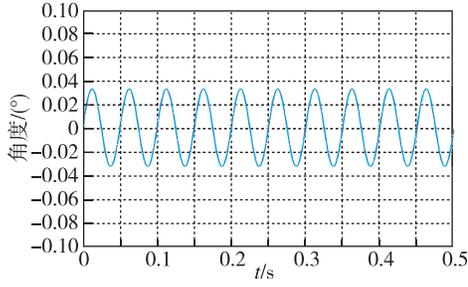
(a) PID 无负载时仿真结果误差



(b) PID 有负载时仿真结果误差



(c) 自适应无负载时仿真结果误差



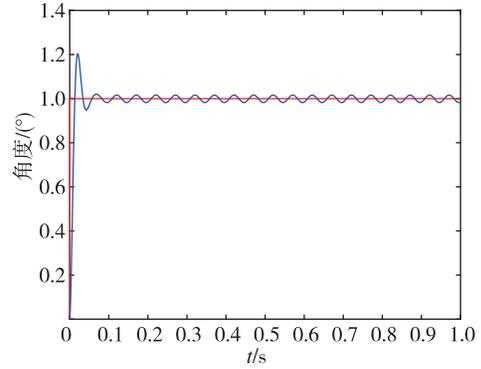
(d) 自适应有负载时仿真结果误差

图 4 负载变化前后 PID 控制与自适应控制 Simulink 仿真结果误差

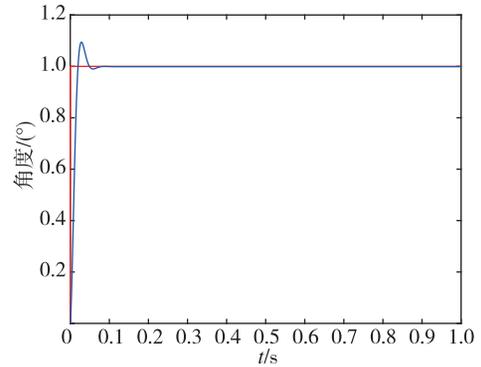
Fig. 4 Error of Simulink simulation results of PID control and adaptive control before and after load change

使用 Matlab 编写仿真程序,添加参数摄动信号和干扰信号。使用 $c2d(A, B, t)$ 函数,对连续模型进行离散化,编写离散模型仿真程序并加入摄动矩阵和外界干扰,与无摄动和干扰情况下的仿真结果进行对比分析。伺服控制系统的数学模型往往由于建模不准确或者安装等因素导致参数不确定性,表现为其状态空间模型的参数在标称模型参数值附近小范围摄动,所以通常选正弦信号模拟这一摄动现象。取外界干扰 f 为 10 以内的随机数,令 $\Delta a_2 = \alpha \cdot \sin(\omega_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot t)$, $\Delta b_2 = \beta \cdot \sin(\omega_b \cdot 2 \cdot \pi \cdot t)$ 。其中, α, β 为任意实数,表示摄动范围; ω_a, ω_b 表示摄动频率。仿真结果如图 5 所示。

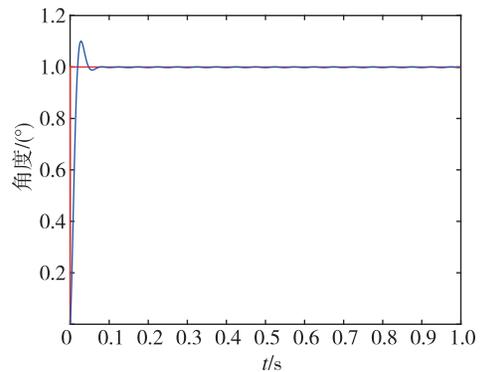
由图 5(a)和图 5(b)可以看出,加入摄动和干扰前后, PID 控制阶跃响应超调量从 14.2% 增大至 21%,且稳态输出结果在目标值附近摄动,摄动误差为 3.2%;由图 5(c)和图 5(d)可以看出,加入摄动和干扰前后,自适应控制阶跃响应超调量从 10.2% 增大至 13.4%,且稳态输出结果在目标值附近摄动,摄动误差为 0.3%。这说明在有参数摄动和外界干扰的情况下,所设计的变结构模型参考自适应



(b) 有摄动和干扰 PID 仿真结果



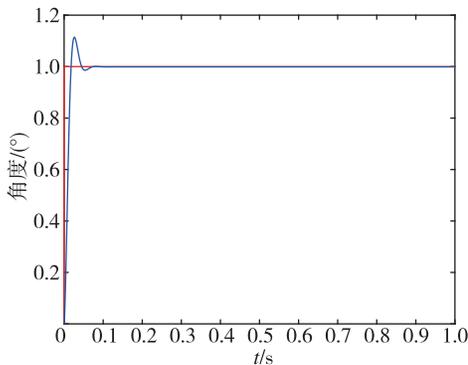
(c) 无摄动和干扰自适应仿真结果



(d) 有摄动和干扰自适应仿真结果

图 5 Matlab 仿真结果

Fig. 5 Matlab simulation results



(a) 无摄动和干扰 PID 仿真结果

应控制器增强了系统的鲁棒性。

在单轴仿真转台上进行实验,实验系统的下位机为 Labview-RT 实时系统,用于完成具体的运动控制功能。所用单轴转台无负载时的转台台面折合到电机上的转动惯量为 $J = 0.0527 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,加入负载后的转动惯量为 $J = 0.2940 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电机绕组等效电阻 $R = 2.28 \Omega$,电枢电感 $L = 17.7 \text{ mH}$,电机转矩系数 $C_m = 14 \text{ Nm/A}$ 。安装偏心负载,模拟外界干扰力矩 f ,这个干扰力矩是其转过的角位

置 θ 的正弦函数 $f = M \sin \theta$, 其中 M 是最大偏心干扰力矩。将这些参数代入式(1)中, 得到转台的状态方程表达式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -139.8 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 116.5 \end{bmatrix} \mathbf{u} + \mathbf{D}f \\ \mathbf{y} = [1 \ 0] \mathbf{x} \end{cases} \quad (30)$$

所研究的仿真转台控制系统模型为二阶系统, 所以参考模型的阶数应该选择为二阶。本文将参考模型设计为最优二阶系统。选取参考模型为

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -25 & -120 \end{bmatrix} \mathbf{x}_m + \begin{bmatrix} 5 \ 600 \\ 4 \ 000 \ 000 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (31)$$

依据第3章的理论, 求得

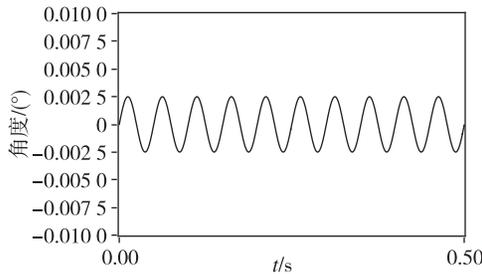
$$\mathbf{g}(t) = (0.5)^{-1} [22 \|\mathbf{e}\| + 15 \|\mathbf{x}\| + 2 \ 700 \|\mathbf{r}\| + 0.5] \quad (32)$$

代入自适应控制律方程, 得

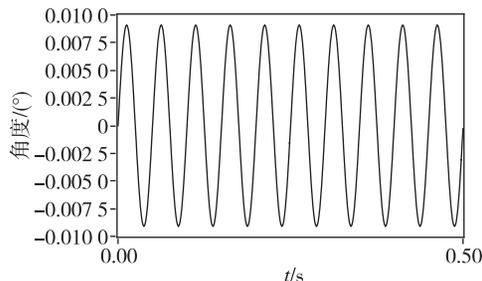
$$\mathbf{u} = \mathbf{g}(t) (\mathbf{G}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{m}(\mathbf{S}) \quad (33)$$

输入幅值 0.1° , 频率 20 Hz 的正弦信号, 得到两种控制系统的实验结果误差如图6所示。

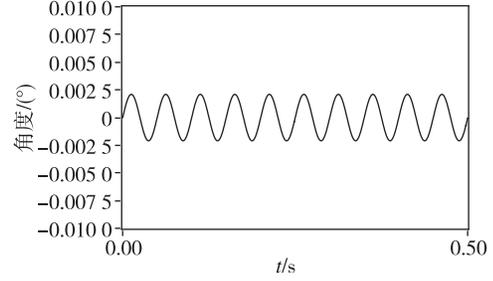
由图6(a)和图6(b)可知, PID控制响应幅值误差从2.5%变为9.1%, 误差增大6.6%; 由图6(c)和图6(d)可知, 自适应控制响应幅值误差从2.1%变为4.5%, 误差增大2.4%。自适应控制的响应幅值误差变化较小, 说明自适应控制器针对负载改变和干扰问题的鲁棒性比PID控制器要好。



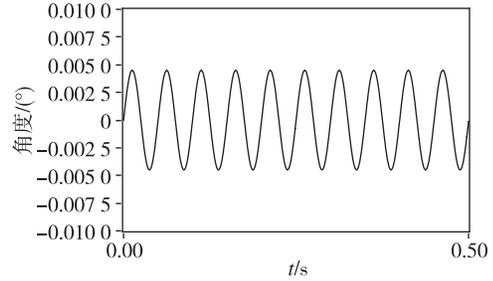
(a) 无负载和干扰时 PID 控制器实验结果误差



(b) 有负载和干扰时 PID 控制器实验结果误差



(c) 无负载和干扰时自适应控制器实验结果误差



(d) 有负载和干扰时自适应控制器实验结果误差

图6 20 Hz时负载变化PID控制与自适应控制仿真结果

Fig. 6 Simulation results of PID control and adaptive control for load change at 20 Hz

5 结论

本文以仿真转台为研究对象, 针对转台负载变化、参数摄动以及干扰导致转台控制效果下降的问题进行了详细研究。主要内容是明确转台控制系统的工作原理, 建立仿真转台控制系统状态空间数学模型, 介绍变结构模型参考自适应控制算法的原理并设计控制器。最终经过仿真和实物实验验证了自适应控制方法的有效性。

通过本文的研究以及实验, 得出以下结果:

1) 在仿真环境下, 比较了负载变化对两种控制系统的影响。以 20 Hz 的单位正弦信号为例, 负载变化后, PID 控制系统的响应幅值误差增大 3.6%, 自适应控制系统的响应幅值误差变化比 PID 控制系统小, 仅增大 1.3%, 增强了转台控制系统对负载变化的适应性。

2) 在仿真环境下, 研究控制器对参数摄动和干扰问题的鲁棒性。输入单位阶跃信号, 有摄动和干扰时的响应结果在 1° 附近摄动, PID 控制系统稳态误差约为 3.2%, 自适应控制器改善了控制系统对参数摄动和干扰的鲁棒性, 使得误差降低至 0.3%。

3) 完成 PID 控制器和变结构模型参考自适应控制器的软件实现, 在转台实物上进行实验。输入

幅值 0.1° , 频率 20 Hz 的正弦信号, PID 控制系统和自适应控制系统响应幅值误差分别增大 6.6% 和 2.4%, 自适应控制系统的响应幅值误差变化比 PID 控制系统小, 控制系统鲁棒性增强。

综上所述, 所设计的变结构模型参考自适应控制器针对转台控制系统负载变化、参数摄动及干扰的存在等问题具有良好的适应性; 在阶跃信号下能达到稳定, 并具有较高的稳态精度和良好的动态品质; 正弦信号下都能实现快速跟踪, 表现出很强的鲁棒性, 有效地增强了系统的抗干扰性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 黎典. 高精度三轴仿真转台控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
LI Dian. Research on high-precision three-axis simulation turntable control strategy[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022(in Chinese).
- [2] 常欢, 刘海涛, 杨海龙. 三轴模拟转台正弦运动控制系统设计[J]. 机电技术, 2023(2): 16-19.
CHANG Huan, LIU Haitao, YANG Hailong. Design of sinusoidal motion control system for three axis simulation turntable[J]. Electromechanical Technology, 2023(2): 16-19(in Chinese).
- [3] 王彦君. 单轴高精度转台控制系统设计与控制算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
WANG Yanjun. Design and control algorithm research of single axis high precision turntable control system[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2020(in Chinese).
- [4] 孙培栋. 单轴高精度转台控制系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
SUN Peidong. Design of single axis high precision turntable control system[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [5] 赵小刚, 郭永凤. 基于模型参考自适应控制的三轴转台系统控制研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(3): 33-37.
ZHAO Xiaogang, GUO Yongfeng. Research on three axis turntable system control based on model reference adaptive control[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(3): 33-37(in Chinese).
- [6] 王树波, 任雪梅, 李斯琪, 等. 基于预设性能转台伺服系统的参数估计和自适应控制[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 193-197.
WANG Shubo, REN Xuemei, LI Siqi, et al. Parameter estimation and adaptive control of turntable servo systems based on preset performance[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 193-197(in Chinese).
- [7] 黄培, 王欣源. 转台伺服系统的自适应模糊滑模逼近控制[J]. 机械强度, 2016, 38(4): 749-753.
HUANG Pei, WANG Xinyuan. Adaptive fuzzy sliding mode approximation control for turntable servo systems[J]. Mechanical Strength, 2016, 38(4): 749-753(in Chinese).
- [8] WANG M, WEI Y, SHEN L. Adaptive compound control for test turntable[C]// Proceedings of 2011 International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP). Hangzhou: IEEE, 2011: 580-584.
- [9] GDOURA E K, FEKI M, DERBEL N. Sliding mode control of a hydraulic servo system position using adaptive sliding surface and adaptive gain[J]. International Journal of Modeling, Identification and Control, 2015, 23(3): 248-259.
- [10] 杜青洲. 基于改进自适应滑模的转台电机控制研究[J]. 科技风, 2020(5): 152.
DU Qingzhou. Research on rotary motor control based on improved adaptive sliding mode[J]. Science and Technology Wind, 2020(5): 152(in Chinese).
- [11] 唐苗, 王海林, 赵慧, 等. 基于微分观测器的飞行模拟转台伺服系统非线性控制[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 150-155.
TANG Miao, WANG Hailin, ZHAO Hui, et al. Nonlinear control of flight simulation turntable servo system based on differential observer[J]. Computer Measurement and Control, 2023, 31(7): 150-155(in Chinese).
- [12] 郭肇, 柯芳, 余潇, 等. 基于滑模变结构控制的光电稳定平台控制策略研究[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1874-1880.
GUO Bo, KE Fang, YU Xiao et al. Research on control strategy of optoelectronic stable platform based on sliding mode variable structure control[J]. Journal of Ordnance Industry, 2022, 43(8): 1874-1880(in Chinese).
- [13] SHEN J, XIN B, CUI H, et al. Control of single-axis rotation INS by tracking differentiator based fuzzy PID[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2976-2986.
- [14] 姜云翔, 王春喜, 马玲, 等. 基于模型参考模糊自适应的转台摩擦力矩补偿研究[J]. 宇航计测技术,

- 2018, 38(4): 43-48.
- JIANG Yunxiang, WANG Chunxi, MA Ling, et al. Research on friction torque compensation of rotary table based on model reference fuzzy adaptation[J]. Aerospace Measurement Technology, 2018, 38(4): 43-48(in Chinese).
- [15] LI Y K, TIAN Q F, WANG J. Adaptive backstepping sliding mode control of electro-optical tracking servo turntable[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3227(945-949): 1597-1600.
- [16] 邓晗, 张鹏, 肖宏. 基于综合转台的复合控制方法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(6): 132-136.
- DENG Han, ZHANG Peng, XIAO Hong. Research on composite control method based on integrated turntable[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2022(6): 132-136(in Chinese).
- [17] POLYAKOVA A, FRIDMAN L. Stability notions and Lyapunov functions for sliding mode control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(4): 1831-1865.
- [18] 史心怡, 朱姝姝, 潘志伟. 基于改进滑模自抗扰结构的永磁同步电机伺服控制[J]. 飞控与探测, 2023, 6(6): 68-74.
- SHI Xinyi, ZHU Shushu, PAN Zhiwei. Inertial and servo technology PMSM servo control based on improved sliding mode active disturbance rejection structure[J]. Flight Control & Detection, 2023, 6(6): 68-74(in Chinese).
- [19] 李言俊, 吕梅柏. 自适应控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2021: 159-160.
- LI Yanjun, LYU Meibai. Adaptive control theory and application[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2021: 159-160(in Chinese).
- [20] LI J, XIA Y, QI X, et al. On the necessity, scheme, and basis of the linear-nonlinear switching in active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1425-1435.
- [21] 叶超, 崔宁豪. 转台伺服系统的滑模控制研究[J]. 科技风, 2019(24): 220.
- YE Chao, CUI Ninghao. Research on sliding mode control of turntable servo system[J]. Science and Technology Wind, 2019(24): 220(in Chinese).

(编辑:孟彬)