

基于惯量辨识的测试转台自适应内模控制

朱海荣^{1,2†}, 李奇¹, 顾菊平², 方仕雄¹

(1. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096; 2. 南通大学电气工程学院, 江苏南通 226019)

摘要: 为了降低系统模型参数变化对测试转台控制系统的影响, 提出了基于惯量辨识技术的自适应内模控制方案. 首先建立了某型号测试转台数学模型, 设计了测试转台内模控制器, 在此基础上采用基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法来辨识测试转台转动惯量的变化情况, 然后通过模糊控制器根据转动惯量的变化自动调整内模控制器的参数, 从而确保了控制器的控制性能. 仿真和实验结果表明, 该控制方案对惯量的变化有着很强的自适应性, 提高了测试转台控制系统的抗干扰性能和系统的鲁棒性, 取得了较好的控制效果.

关键词: 测试转台; 内模控制; 惯量辨识; 模糊控制; 自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive internal model control of a test turntable based on inertia identification

ZHU Hai-rong^{1,2†}, LI Qi¹, GU Ju-ping², FANG Shi-xiong¹

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;
2. Electrical Engineering School, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: An adaptive internal model controller based on the inertia identification technology is presented to reduce the effect on the test turntable from variations in model parameters. Firstly, an IMC control scheme is designed based on the mathematical model of a type of test turntable. Meanwhile, the inertia identification method using disturbance observer is proposed to identify the inertia variations of the test turntable. Then, a fuzzy logic controller is introduced to adjust the parameters of the IMC controller online according to the inertia variations to ensure the desired performances of the system. Results in simulation and real experiment show that the proposed scheme has a strong adaptation to the inertia variations in enhancing the disturbance rejection ability and improving the robustness of the system.

Key words: test turntable; internal mode control; inertia identification; fuzzy controller; adaptive control

1 引言(Introduction)

惯性导航与制导技术的发展水平是决定一个国家航空、航天和航海技术发展的重要因素, 作为惯导器件的性能测试设备, 高精度、高性能的测试转台是惯导技术发展的有力保障^[1]. 测试转台受轴系摩擦、轴系耦合、轴系垂直度和正交度、台体刚度、框架对称性以及其它机械和电气方面非线性因素的影响, 目前测试转台大多基于传统的频域设计理论, 经典控制很难对系统中的各种非线性因素进行有效的抑制, 难以获得较好的控制效果^[2].

内模控制(internal model controll, IMC)原理简单, 能消除未知干扰, 具有跟踪性能好、鲁棒性强等优点^[3-6], IMC已经在机器人控制、过程控制、机组控制等工业现场得到了大量应用^[7-11]. 在测试转台

此类机电系统中, 内模控制也取得了较多的研究成果: 文献[12]采用自适应内模控制方法进行遥操作机器人控制, 仿真和实验结果证明了其有效性; 文献[13]采用内模控制设计了永磁同步电机调速系统, 仿真结果表明该控制器能自适应调节控制参数, 使电机调速系统具有良好的动态和稳态性能; 文献[14]针对扰动设计了内模控制滤波器, 取得了较好的效果.

测试转台系统在高、低速运行过程中由于轴系间的耦合会造成转动惯量的变化; 同时, 为了降低测试成本, 测试转台往往用来对多种惯性器件或惯性设备进行性能测试, 不同的测试对象也会造成测试转台转动惯量的变化. 当系统模型参数变化较大时, 如果控制器参数保持不变, 会使系统性能变差, 甚至

收稿日期: 2011-10-25; 收修稿日期: 2012-04-23.

†通信作者. Tel.: +86 13515201840.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60975064, 61005054); 江苏省高校自然科学基金资助项目(11KJD510004); 江苏省科技服务平台资助项目(BM2011089); 江苏省重点实验室资助项目(HGDML-0908); 南通市应用研究计划资助项目(K2010057); 南通市重点实验室资助项目(DC2010002).

导致系统不稳定^[1]. 如何使控制系统自动识别变化的工况, 并据此对控制器参数进行自动调整, 以增强系统对变化工况的自适应性和智能性, 从而提高测试转台系统的控制性能, 具有重要的理论价值和实际意义.

文献[12-14]没有对由惯量变化造成的系统参数变化提出合适的处理方法, 在此基础上, 本文提出了基于扰动转矩观测器的惯量辨识算法, 并设计了模糊控制器用于自动调整内模控制器参数, 以适应不同工况变化带来的系统参数变化的影响.

2 测试转台数学模型(Test turntable model)

测试转台控制系统调速范围宽, 特别有低速要求, 一般采用直流力矩电机直接驱动. 根据力矩电机原理可得电压平衡方程和转矩方程分别如下:

力矩电机电压平衡方程:

$$u(t) = K_e \frac{d\theta(t)}{dt} + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1)$$

力矩电机转矩方程:

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + b \frac{d\theta(t)}{dt} + T_\Sigma = K_m i(t), \quad (2)$$

其中: $u(t)$ 为电枢控制电压; $i(t)$ 为电枢电流; L 和 R 分别为回路总电感和总电阻; J 为等效到转轴上的转动惯量, $J = J_m + J_L$, J_m 和 J_L 分别为电机和负载折算的转动惯量; $\theta(t)$ 为力矩电机的角位移; b 为粘性阻尼系数, $b = b_m + b_L$, b_m 和 b_L 分别为电机和负载的粘性阻尼系数; K_e 和 K_m 分别为电机反电势系数和力矩系数; T_Σ 为加在电机转轴上各种外部扰动力矩的总和.

3 测试转台内模控制器设计(IMC design of test turntable)

转台控制系统将电流环、速度环和位置环组合, 采用多闭环串级控制方案. 电流环采用PI控制器, 电流环集成在电机功率放大器内, 经过校正后的电流环可以提高力矩电机的响应时间、拓展系统的频率带宽, 抑制由于电网电压波动所带来的不利影响.

3.1 速度环控制器设计(Design of speed loop controller)

速度环结构框图如图1所示, 其中: IMC是速度环内模控制器, $G_i(s)$ 是电流环调节器, i_r 和 i 分别是电流给定和输出, ω_r 和 ω 分别是力矩电机的参考角速度和输出角速度, T_M 为电磁转矩. 从控制系统结构图可以看出, 转台系统电机轴系所受到的各种干扰力矩位于电流环之外、速度环之内, 下面通过设计速度环自适应内模控制器, 用于克服干扰力矩和系统转动惯量变化带来的影响, 提高系统抗干扰能力.

通过变化电机转矩方程(2)可以得到

$$\dot{\omega} = \frac{K_m}{J} i - \frac{b}{J} \omega - \frac{T_\Sigma}{J}, \quad (3)$$

其中 ω 为电机角速度($\omega = \dot{\theta}$), 经过进一步变化可得

$$\dot{\omega} = \frac{K_m}{J} i_r - \frac{b}{J} \omega + \frac{K_m}{J} (i - i_r) - \frac{T_\Sigma}{J}, \quad (4)$$

其中 i_r 为内模控制器IMC的输出, 把上式整理可得

$$\dot{\omega} = \frac{K_m}{J} i_r - \frac{b}{J} \omega - \frac{K_m}{J} d(t), \quad (5)$$

其中 $d(t) = (i_r - i) + \frac{T_\Sigma}{K_m}$, 可以看成系统总的扰动, 由式(5)可知, 系统速度环模型可简化表示为

$$G_p(s) = \frac{1}{a_p s + b_p}, \quad (6)$$

其中: $a_p = \frac{J}{K_m}$, $b_p = \frac{b}{K_m}$.

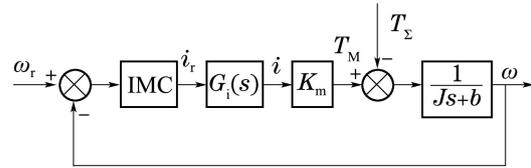


图1 速度环结构框图

Fig. 1 Structure of speed control

定义系统内部模型如下:

$$G_m(s) = \frac{1}{a_m s + b_m}, \quad (7)$$

其中 a_m 和 b_m 为系统内部模型的参数, 由此可以得到速度环内模控制结构图如图2所示.

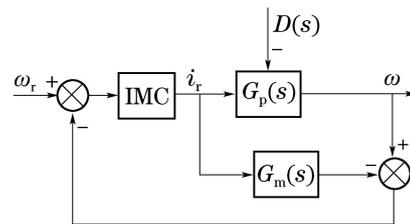


图2 速度环内模控制原理图

Fig. 2 Scheme of speed control based on IMC

速度环内模控制器(IMC) $C(s)$ 的形式如下:

$$C(s) = G_m^{-1}(s)Q(s) = G_m^{-1}(s) \frac{1}{\lambda s + 1}, \quad (8)$$

其中: $Q(s)$ 为一低通滤波器, λ 为低通滤波器的时间常数. 当模型匹配(即 $G_p(s) = G_m(s)$)时, 由原理图2可得

$$\omega(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \omega_r(s) - \frac{\lambda s \cdot D(s)}{(a_p s + b_p)(\lambda s + 1)}. \quad (9)$$

从上式可以看出: 低通滤波器 $Q(s)$ 的带宽决定了闭环系统的带宽, 滤波器时间常数 λ 决定了闭环系统的响应速度, 可以通过调整滤波器结构和滤波器参数获得所期望的动态品质: 当滤波器参数 λ 取足

够小时, 速度输出可以快速跟踪所给定的速度指令, 此时系统的外部扰动对速度输出几乎没有影响。

在测试特定的惯性设备时, 按照上述方法设计的速度环内模控制器可以使测试转台很好的跟踪给定指令. 当更换被测设备或者测试条件发生较大变化时, 由于负载转动惯量的变化会导致系统模型参数的变化, 如果控制器参数仍保持不变的话, 会降低系统性能. 下面利用惯量辨识的方法, 同时设计模糊控制器根据转动惯量的变化情况自适应的调整内模控制器的参数, 从而提高测试转台系统的动态性能。

3.2 惯量辨识算法设计(Design of inertia identification)

目前常见的转动惯量辨识方法有模型参考自适应法辨识方法、利用加速度法测试转动惯量的方法和基于扰动转矩观测器的转动惯量辨识方法等^[15], 下面设计扰动转矩观测器来估计扰动转矩的大小。

由直流力矩电机的转矩方程(2)变化可得

$$J\dot{\omega} = T_M - T_\Sigma - b\omega, \quad (10)$$

其中 T_M 为电磁转矩, 定义扰动转矩 T_d 为电磁转矩之外的所有转矩之和, 即

$$T_d = -b\omega - T_\Sigma. \quad (11)$$

在实际系统中, 由于采样频率一般远高于系统扰动力矩变化的频率, 设计中可近似认为 T_d 在一个采样周期中是一常值, 于是有

$$\dot{T}_d = 0. \quad (12)$$

联立式(10)–(11)可得如下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (13)$$

其中: $x = \begin{pmatrix} \omega \\ T_d \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/J \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1/J \\ 0 \end{pmatrix}$, $u = T_M$, $y = \omega$, $C = [1 \ 0]$.

设计如下观测器来估计扰动转矩 T_d 的大小:

$$\begin{cases} \dot{z} = -\alpha z + \alpha J_n \omega + u, \\ \hat{T}_d = -\alpha z + \alpha J_n \omega, \end{cases} \quad (14)$$

其中: J_n 为惯量标定值, \hat{T}_d 为扰动转矩的估计值, $-\alpha$ 为观测器的极点($\alpha > 0$). 引入变量 $q_0(t)$, $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$, 它们分别满足如下条件:

$$\begin{cases} \dot{q}_0(t) = -\alpha q_0 + \alpha u, \quad q_0(0) = 0, \\ \dot{q}_1(t) = -\alpha q_1 + \alpha \omega, \quad q_1(0) = 0, \\ \dot{q}_2(t) = -\alpha q_2 + \alpha, \quad q_2(0) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

则扰动转矩的估计值 \hat{T}_d 可表示为

$$\hat{T}_d(t) = -\Delta J \hat{q}_1(t) - b q_1(t) - T_\Sigma q_2(t). \quad (16)$$

最后可以得到惯量估计的表达式为

$$\begin{cases} \Delta J(k) = -\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\int_{(k-1)T}^{kT} \hat{T}_d(t) \times \hat{q}_1(t) dt}{\int_{(k-1)T}^{kT} \hat{q}_1^2(t) dt}, \\ \hat{J}(k) = J_n + \Delta J(k), \end{cases} \quad (17)$$

其中: $\Delta J(k)$ 为 k 时刻惯量变化量的估计值, $\hat{J}(k)$ 为 k 时刻惯量的估计值。

3.3 自适应内模控制器设计(Design of adaptive IMC controller)

由模型(6)可得 $a_p = \frac{J}{K_m}$, $b_p = \frac{b}{K_m}$, 而内模控制要求模型越匹配越好, 即 $a_m \approx a_p$, $b_m \approx b_p$; 当负载惯量 J 发生变化时, 内部模型参数 b_m 基本保持不变, 而 a_m 会随 J 的变化而变化, 且 a_m 可由

$$\hat{a}_m = \frac{\hat{J}}{K_m} = \frac{J_n}{K_m} \cdot \frac{\hat{J}}{J_n} = a_m \cdot \frac{\hat{J}}{J_n}$$

进行调整. 由于在实际系统中这种线性自适应律不能恰当地反映 \hat{a}_m 和系统辨识惯量 \hat{J} 之间的关系, 下面基于模糊控制设计内模控制器用以自适应调整模型参数 a_m 的值, 控制器结构如图3所示, $G_m(s)$ 为内部模型:

$$G_m(s) = \frac{1}{\hat{a}_m s + b_m}. \quad (18)$$

$C_1(s)$ 为内模控制器:

$$C_1(s) = G_m^{-1}(s)Q(s) = \frac{\hat{a}_m s + b_m}{\lambda s + 1}. \quad (19)$$

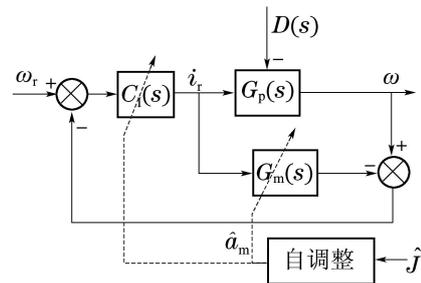


图 3 自适应内模控制器结构图

Fig. 3 Structure of self-tune IMC

首先通过实验测试得到不同惯量下 \hat{a}_m 的值, 建立 \hat{a}_m 和系统辨识惯量 \hat{J} 之间的关系, 当惯量发生变化时, 采用模糊控制器自动调整参数 \hat{a}_m 以确保控制器的控制性能. 模糊控制器的输入 δ 为惯量比:

$$\delta = \hat{J} / J_m, \quad (20)$$

式中 \hat{J} 和 J_m 分别是转动惯量的估计值和电机的额定转动惯量. a_m 按以下公式进行调整:

$$\hat{a}_m = a_m + \gamma \Delta a_m, \quad (21)$$

其中: γ 为比例系数, Δa_m 为模糊控制器的输出. δ 和 Δa_m 的隶属度函数分别如图4(a)–4(b)所示。

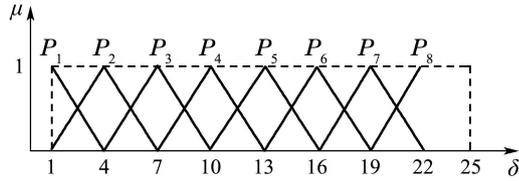
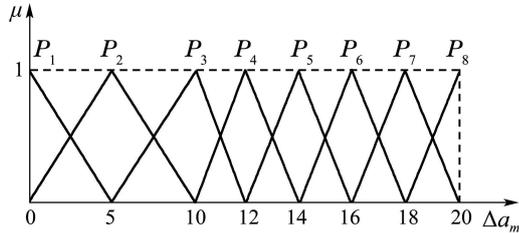
(a) 模糊输入 δ 的隶属度函数(b) 模糊输出 Δa_m 的隶属度函数

图4 模糊控制隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of fuzzy control

模糊控制规则为

if δ is P_i , then Δb is P_i ; $i = 0, 1, 2, \dots$,

文中采用Mamdani模糊推理方法,采用Mamdani重心法去模糊^[16].

4 仿真与实验研究(Study of simulation and experiment)

测试转台实物图如图5所示,外围U-O两个轴系为测试转台,内部轴系用于安装被测惯性器件. U-O型测试转台能提供方位和俯仰两个轴系不同频率、不同幅值的摇摆测试信号,用于模拟载体运行姿态,对惯导设备进行性能测试. 整个系统主要由伺服控制单元、驱动单元、轴系运动测量反馈单元和显示单元构成. 伺服控制单元由工控机和DSP组成,工控机完成测试转台的各种人机界面管理功能:例如测试转台的控制操作、用户数据输入、测试转台实时数据显示、各功能模板的管理及转台故障监测和安全保护等控制; TMS320F2812型DSP可以为各轴系的轴角位置提供闭环控制,用以接受工控机发送的指令、运动参数以及接受工控机通过DPRAM高速转发的伺服信息,根据接收到的指令、参数或信息完成运动轨迹的计算,控制各轴系进行相关的伺服运动,同时通过DPRAM向工控机传送各轴系的实时数据及状态信息.

测试转台系统采用直流力矩电机直接驱动负载框架、无中间传动链,这样可以减小传动间隙、齿隙死区和弹性变形的影响,增强了转台机械耦合刚度,同时也减小了电机的折算惯量. 以方位摇摆轴为例,选取J160LYX105型直流力矩电机,其空载转速为180 r/m,电气时间为5 ms,其他参数如表1所示.

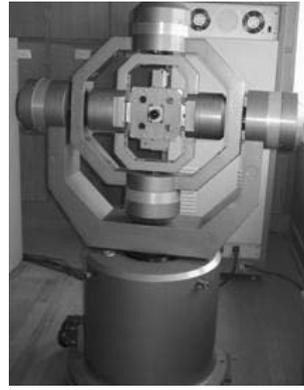


图5 某测试转台实物图

Fig. 5 Photo of a test turntable

表1 J160LYX105型电机参数

Table 1 Motor parameters of J160LYX105

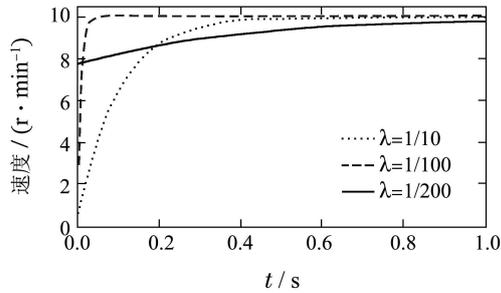
	转矩/(N·m)	电流/A	电压/V
峰值堵转参数	36	15	60
连续堵转参数	15	6.3	25

根据系统定位精度的要求,并考虑轴系结构尺寸,选用海德汉ERN180/5000线/Φ50型旋转编码器,配备细分倍数为10的IBV610型细分盒,角分辨率达到26",能够满足系统设计的要求.

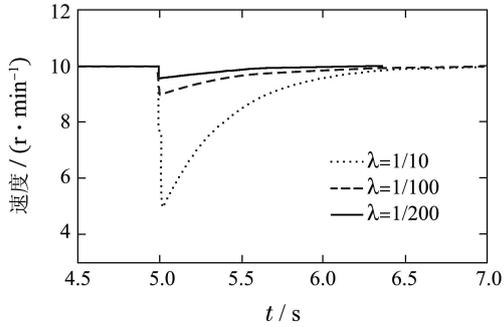
4.1 仿真结果(Simulation results)

以方位摇摆轴为例,为了验证上述控制器设计的正确性,在MATLAB7.04 Simulink环境下进行仿真,仿真中采用的电机参数如表1所示. 采用式(8)设计内模控制器时需要设定的参数有 a_m , b_m 和 λ . 首先计算方位摇摆轴的转动惯量,在计算转动惯量时,需要包含如下零部件:主轴、框架、轴承、直流力矩电机转子、测速机转子、旋转编码器转子和光电码盘,采用SolidEdgeV99对其进行建模后可以得到空载时(此时不加入被测试对象)方位摇摆轴转动惯量为 $7.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;下面计算电机力矩系数 K_m , $K_m = T_{fd}/I_{fd}$,其中: T_{fd} 为峰值堵转转矩, I_{fd} 为峰值堵转电流. 查表1后带入计算得 $K_m = 2.4 \text{ N} \cdot \text{m/A}$;电机粘性阻尼系数 $b = 5.4 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s})$,把 K_m , b 分别带入 $a_p = J/K_m$, $b_p = b/K_m$ 计算后得到: $a_p = 2.975$, $b_p = 2.25 \times 10^{-5}$,为了使系统内部模型参数 a_m 和 b_m 尽量接近对象模型参数,取 $a_m = 3$, $b_m = 2.26 \times 10^{-5}$.

下面首先分析滤波器时间常数 λ 对系统性能的影响. 给定转速为10 r/min, λ 分别取1/10, 1/100, 1/200时的速度阶跃响应如图6(a)所示; λ 仍取上述参数,当转速稳定在10 r/min时突加扰动力矩 $T_L = 18 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时的速度曲线如图6(b)所示,分析得出: λ 越小,系统速度响应越快,系统抗干扰能力较强,但系统回到稳态所需的恢复时间也较长,经过大量实验最后确定 $\lambda = 1/120$ 时系统综合性能最佳.



(a) 不同 λ 下的速度阶跃响应曲线



(b) 负载扰动下的速度曲线

图 6 参数 λ 对系统性能的影响

Fig. 6 Affect of λ to system performance

接下来把内模控制器和PID控制器的参数都调节到最佳,对两种控制器的控制效果进行相比,结果如图7所示.由图可知内模控制可以使测试转台更好的跟踪给定指令,控制效果优于传统的PID控制.

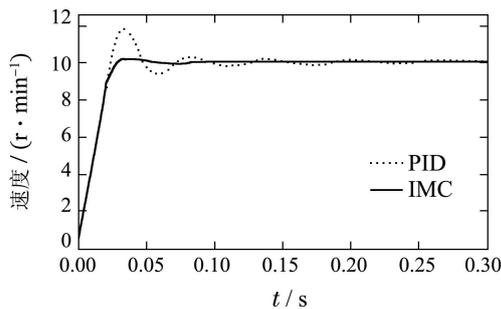
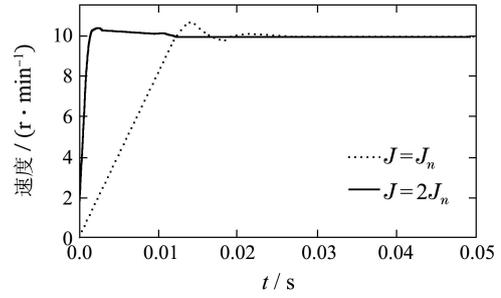


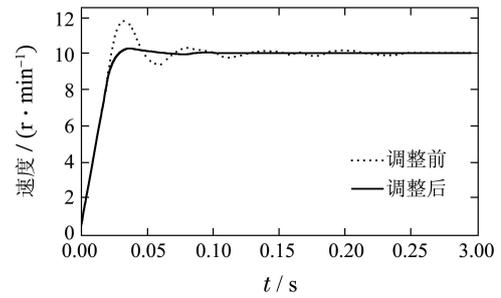
图 7 速度响应曲线对比

Fig. 7 Comparison of speed responses

更换测试对象时,系统转动惯量会发生相应的变化(仿真时将电机的转动惯量增加为原来的2倍),如果内模控制器的参数保持不变,速度输出曲线如图8(a)所示,从图中可以看出,此时速度响应会出现较大的超调和震荡,调节时间也很长.下面利用文中提出的转动惯量辨识方法,采用模糊控制器自适应调整内模控制器的参数:在电机惯量增加到2倍后,模糊控制器输出为 $\Delta a_m = 2.13$,比例系数 γ 取为 1.1×10^{-4} ,经过模糊自调整后的内模控制器的参数为 $a_m = 6.554 \times 10^{-4}$,其余参数不变.速度输出曲线如图8(b)所示,比较发现:在惯量辨识基础上通过模糊控制自适应调整内模控制器参数后,系统性能得到了很大的改善.



(a) 转动惯量变化后速度响应对比曲线



(b) 参数调整前后速度响应对比曲线

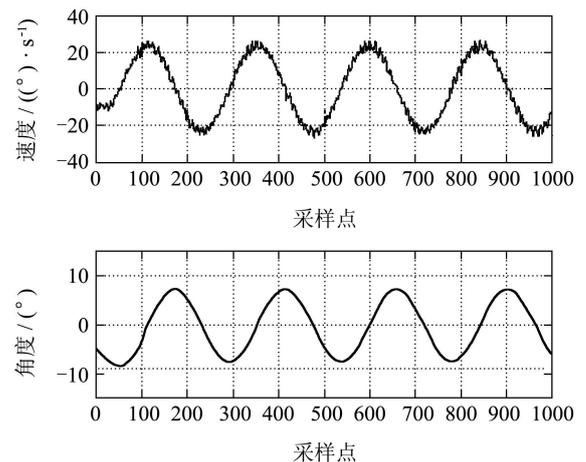
图 8 参数自调整后系统性能对比

Fig. 8 Performance comparison of parameter self-tuning

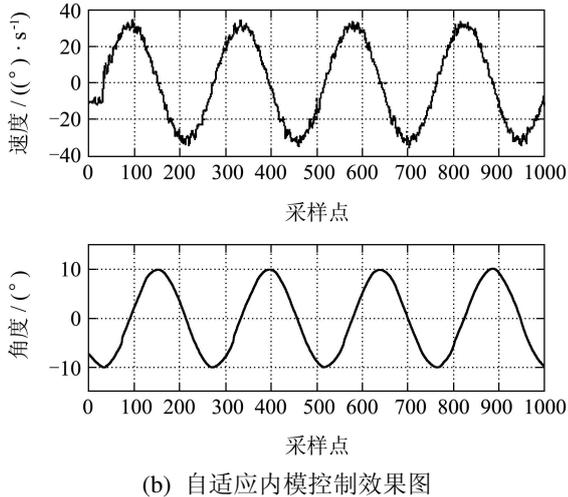
4.2 实验结果(Experiment results)

在某型号测试转台上,给定 $10(^{\circ})/0.5\text{ Hz}$ 正弦位置信号,分别采用内模控制和自适应内模控制进行实验对比.在测试某特定对象时把两组控制器的参数都调到最佳,两种方案的控制效果都比较好.接下来更换为大型测试对象,两种方案的控制效果分别如图9(a)、图9(b)所示(包括速度输出和位置输出曲线).

经过对比发现:测试对象变化后电机对应的转动惯量也发生了变化,如果内模控制器参数保持不变,控制输出不能很好的跟踪给定指令,控制效果较差;而自适应内模控制器可以根据电机转动惯量的变化情况自动调整控制器参数,具有很好的自适应性与鲁棒性,系统控制性能较好.



(a) 内模控制效果图

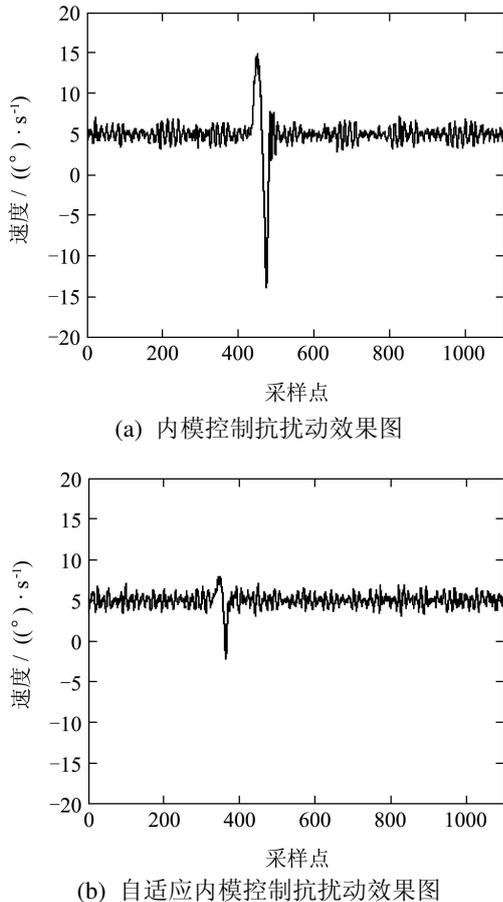


(b) 自适应内模控制效果图

图9 位置跟踪效果对比

Fig. 9 Comparison of position tracking effects

下面分别采用内模控制和自适应内模控制进行抗扰动性能对比: 转台在 $5(^{\circ})/s$ 稳定运行速度下突加干扰力矩, 实验结果分别如图10(a)、图10(b)所示, 对比两组曲线可看出, 本文提出的自适应内模控制在外部干扰作用下转速降落较少, 系统有较强的抗干扰性能。



(a) 内模控制抗扰动效果图

(b) 自适应内模控制抗扰动效果图

图10 抗扰动效果对比

Fig. 10 Comparison of disturbance rejection results

上述实验结果表明, 自适应内模控制可以根据工

况自适应修改控制器参数, 提高了测试转台系统的鲁棒性, 同时获得了较好的抗干扰性能。

5 结论(Conclusions)

本文介绍了测试转台自适应内模控制器的设计过程, 针对由于测试条件变化或测试对象变化带来的系统转动惯量变化的影响, 提出了采用扰动转矩观测器来辨识惯量的方法, 在此基础上, 设计了基于模糊控制的自适应内模控制策略, 并在某型号测试转台上得到了很好的工程应用。仿真和实验结果均表明, 该控制方法对系统参数变化具有较好的自适应性, 提高了系统的跟踪性能和抗干扰性能, 具有很高的推广价值和应用前景。

参考文献(References):

- [1] 刘延斌, 金光, 何惠阳. 三轴仿真转台系统模型建立及解耦控制研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 35(3): 323 – 328.
(LIU Yanbin, JIN Guang, HE Huiyang. Modeling of three axis simulator and decoupling control [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 35(3): 323 – 328.)
- [2] 刘春芳, 吴盛林, 曹健. 三轴飞行模拟仿真转台的设计及控制问题研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(1): 62 – 66.
(LIU Chunfang, WU Shenglin, CAO Jian. Design and research on control strategy of three-axis motion simulator [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(1): 62 – 66.)
- [3] WANG Q G, HANG C C, YANG X P. Single loop controller design via IMC principles [J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 2041 – 2048.
- [4] KAY A I. IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(3): 281 – 290.
- [5] CANALE, FAGIANO M, FERRARA L. Comparing internal model control and sliding-mode approaches for vehicle yaw control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(1): 31 – 41.
- [6] GUN R C, PYUNG H C, SANG H P, et al. Robust tracking under nonlinear friction using time-delay control with internal model control [J]. *IEEE Transactions on Systems Technology*, 2009, 17(6): 1406 – 1414.
- [7] 潘登, 郑应平. 基于模型参考和内模原理的线性系统鲁棒控制设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 651 – 657.
(PAN Deng, ZHENG Yingping. Robust control design of linear systems based on model reference and internal model principle [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 651 – 657.)
- [8] 黄宇, 韩璞, 李永玲. 主汽温系统模糊自适应内模控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 93 – 98.
(HUANG Yu, HAN Pu, LI Yongling. Fuzzy adaptive internal model control in main steam temperature system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28 (23): 93 – 98.)
- [9] 楼冠男, 谭文. 部分分散控制及其在单元机组协调控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 91 – 95.
(LOU Guannan, TAN Wen. Partially decentralized control and its application in the coordinated control of boiler-turbine units [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(2): 91 – 95.)
- [10] RUPP D, GUZZELLA L. Iterative tuning of internal model controllers with application to air/fuel ratio control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(1): 177 – 184.

- [11] YU S L. Internal model control of lightly damped systems subject to periodic exogenous signals [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 56(8): 3050 – 3059.
- [12] 鉴萍, 李歧强. 变时延力反馈遥操作机器人系统的内模控制 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(1): 13 – 18.
(JIAN Ping, LI Qiqiang. Internal model control for force-reflecting teleoperation systems with varying time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 13 – 18.)
- [13] LI S H, LIU Z G. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 18(3): 699 – 704.
- [14] LIU T, GAO F. New insight into internal model control filter design for load disturbance rejection [J]. *IET Control Theory Applications*, 2010, 4(3): 448 – 460.
- [15] 郭宇婕, 黄立培, 邱阳. 交流伺服系统的转动惯量辨识及调节器参数自调整 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(9): 1180 – 1183.
(GUO Yujie, HUANG Lippei, QIU Yang. Inertia and auto-tuning of speed controllers for AC servo systems [J]. *Journal of Tsinghua university (Science And Technology)*, 2002, 42(9): 1180 – 1183.)
- [16] GOLEA N, GOLEA A, BENMAHAMMED K. Fuzzy reference adaptive control [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 2002, 10(4): 436 – 444.

作者简介:

朱海荣 (1979-), 男, 博士研究生, 目前研究方向为精密伺服控制、智能控制技术, E-mail: hairongzhu@163.com;

李奇 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为系统优化、智能控制、综合自动化技术应用, E-mail: liqikj@hotmail.com;

顾菊平 (1971-), 女, 博士, 教授, 目前研究方向为电气检测、电机及与控制、电子信息、信号处理等, E-mail: gu.jp@ntu.edu.cn;

方仕雄 (1976-), 男, 博士, 目前研究方向为工业综合自动化与信息化、工业物联网及应用和高可靠分布式实时系统等, E-mail: sxfang@seu.edu.cn.