

文章编号: 1003-501X(2011)03-0014-05

高精度转台速度稳定性研究

杜璧秀, 张淑梅, 高慧斌, 张玉良

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 针对摩擦力矩对高精度转台速度稳定性的影响, 考虑到转台系统的实际工作情况, 本文提出了一种基于变结构的双闭环控制方法。该方法根据变结构控制的不变性特点, 采用指数趋近律规则, 构造了基于变结构的双闭环控制方式。通过对比传统双闭环控制和基于变结构的双闭环控制在转台系统低速转动时的仿真分析及实验结果, 表明本文提出的基于变结构的双闭环控制比传统双闭环控制可以更有效的克服摩擦力矩对高精度转台速度稳定性的影响, 提高转台的速度稳定性能。

关键词: 高精度转台; 速度稳定性; 双闭环控制; 变结构控制

中图分类号: TP273.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.03.003

The Speed Stability for the High Precision Turntable

DU Bi-xiu, ZHANG Shu-mei, GAO Hui-bin, ZHANG Yu-liang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In consideration of the requirement and structure of the practical turntable, the indispensable research on the force of friction is analyzed, which impacts the speed stability performance. A kind of control strategy based on the Variable Structure Control (VSC) is introduced. According to the invariant features and the exponentially approaching rule of the VSC, the new control strategy is designed by the application of traditional double closed loop control system and VSC system. According to the simulating results and the debugging results of the control strategy on the practical turntable system, we can validate that it agrees to the simulating results, which demonstrate the effectiveness of the control strategy based on VSC in improving the speed stability performance.

Key words: high precision turntable; stable speed; double closed loop control system; variable structure control

0 引言

近年来, 随着航空、航天技术的迅猛发展, 各种高精度的飞行器竞相研制。同时, 高精度转台作为其仿真及性能测试与分析试验的支撑平台, 相应的性能要求也越来越高。其中, 速度平稳性就是反映高精度转台系统性能好坏的重要评定依据之一。特别是当转台系统需要在低速以及超低速运行时的速度平稳性更是广大研究人员争相研究的重点和方向^[1-2]。

目前国际上, 美国 CGC 公司推出的高精度三轴测试台 ITATT(Improved Three Axis Test Table), 采用了许多新技术, 速率平稳性在 $0.001\text{ }^\circ/\text{s} \sim 200\text{ }^\circ/\text{s}$ 的速度范围内转动时达 10^{-6} , 轴的定位精度为 $0.03''$, 综合技术指标达到了较高的一个数量级。与发达国家相比较, 我国的转台研制工作晚了很多, 但是也已经取得了不小的成就, 特别是近年来, 以哈尔滨工业大学、303 所、南京航空航天大学、成都光电所等为代表的研究机构 and 高校在转台的研制上取得了很大的发展, 甚至在某些方面可以和国际水平相媲美。比如长春光机所生产的大型望远镜, 实现了设备以 $20\text{ }^\circ/\text{s}$ 的速度运行时的最大稳态误差为 $0.0167\text{ }^\circ/\text{s}$, 以 $10\text{ }^\circ/\text{s}$ 的速度运行时的最大稳态误差为 $0.7\text{ }^\circ/\text{s}$, 低速运行时速度平稳性达到了 7%。

收稿日期: 2010-10-15; 收到修改稿日期: 2011-01-24

作者简介: 杜璧秀(1980-), 男(汉族), 山西霍州人。助理研究员, 硕士, 主要研究工作是光电伺服控制。E-mail:dubixiu@hotmail.com。

通过比对国内外高精度转台的发展趋势和现状, 结合实际工作的需求, 高精度转台提出在 5 "/s 的低速运行时, 速度稳定性不能大于 3% 的技术指标要求。考虑到高精度转台在低速运行所受到的摩擦力矩影响, 采用传统的双闭环控制方法已经不能满足其控制要求了。为此, 根据变结构控制理论的不变性特点^[3], 本文采用指数趋近律规则, 构造了一种基于变结构的双闭环控制方式, 以达到高精度转台在低速运行时的速度稳定性要求^[4]。

1 摩擦力矩对高精度转台低速稳定性的影响分析

几乎所有具有相对运动的机械系统都不可避免的存在摩擦或摩擦力矩, 而摩擦力矩总是阻碍系统运动及运动趋势的。

因为静摩擦力矩总比动摩擦力矩大, 所以当高精度转台转轴开始转动时系统必须有较大的失调角, 才能产生足以克服静摩擦力矩的转矩。当转台转轴开始转动后, 静摩擦变为动摩擦, 摩擦力矩突然下降, 由于惯性, 转台产生一个角加速度运动, 失调角迅速减小, 使转台电机力矩下降。于是转台又开始减速, 当转速减小到零时, 摩擦力矩再次变为静摩擦, 阻转力矩突然加大迫使转台停止转动。此时输入指令仍继续给出, 而由于系统停转, 输出为零, 则系统失调角愈来愈大, 当其超过足以克服静摩擦力矩的数值时, 电机转矩再次克服摩擦力矩开始新一轮的转动, 过程和前一次相同。这样周而复始, 转台时转时停, 造成转台的“抖动”或“爬行”。也就是说, 转台摩擦力矩低速时的负阻特性是使转台低速产生抖动的重要原因, 相当于在低速时给控制系统加入了局部正反馈, 从而引起了转台的低速抖动^[5]。

目前, 工程中经常采用的有图 1 所示的(a)库仑摩擦模型, (b)库仑+粘滞摩擦模型, (c)静摩擦+库仑摩擦+粘滞摩擦模型和(d)Stribeck 摩擦模型^[6-7]。

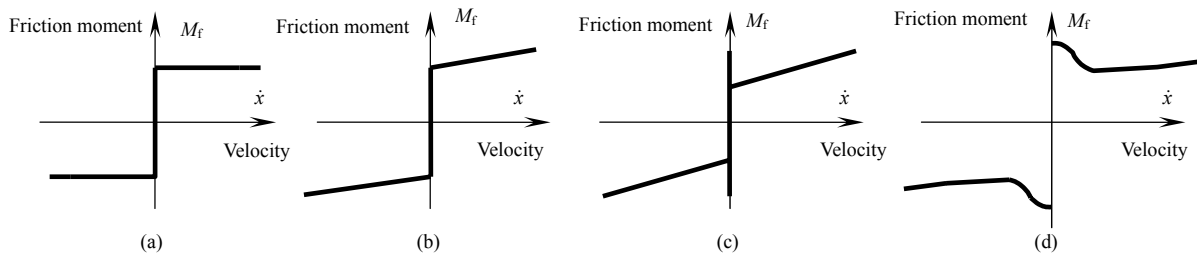


图 1 摩擦模型

(a) 库仑摩擦模型; (b) 库仑+粘滞摩擦模型; (c) 静摩擦+库仑摩擦+粘滞摩擦模型; (d) Stribeck 摩擦模型

Fig.1 Friction model

(a) Coulomb model; (b) Coulomb+Stick model; (c) Static friction + Coulomb + Stick model; (d) Stribeck model

考虑到转台系统的实际情况, 采用库仑+粘滞的摩擦模型 $M_f(\dot{\theta})$ 来代替系统中的摩擦干扰力矩, 其数学表达式如下式所示

$$M_f(\dot{\theta}) = M_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + k_v \dot{\theta} \tag{1}$$

其中: M_c 为库仑摩擦模型系数, k_v 为粘滞摩擦模型系数, $\dot{\theta}$ 为电机以及负载轴的角速度信号。

2 基于变结构的双闭环控制在高精度转台中的应用

2.1 高精度转台数学模型的建立

本文的转台研究对象选用的电机型号是: JJ160LYX10G 永磁直流力矩电机。其电机-负载模型示意图如图 2 所示。由于实际伺服系统一般比较复杂, 含有很多非线性因素, 例如摩擦力矩的干扰, 以及各种电磁干扰等等, 很难精确建立反映系统特性的模型。为了便于实际系统的调试以及控制算法的改进, 故通常将控制对象简化^[8]。由图 2 可得到高精度转台系统的简化数学模型为

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{U_d(s)} = \frac{K_i}{(Ls + R)Js + K_i K_c} \tag{2}$$

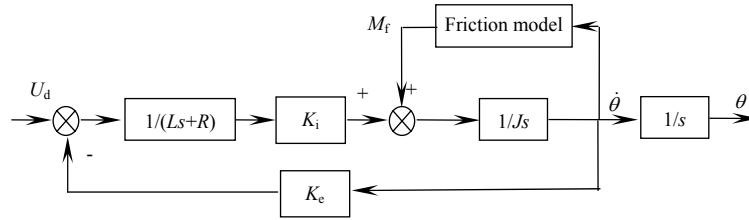


图2 电机-负载理想模型结构图

Fig.2 Ideal model structure of the motor-load

2.2 基于变结构控制的双闭环控制在高精度转台中的应用

通过上节摩擦力矩对高精度转台低速稳定性的影响分析,本文采用基于变结构控制的双闭环控制策略。通常所说的变结构控制是指滑模变结构控制,这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的振动,即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关。这样,具有滑动模态的控制系统保持很好的鲁棒性。这称之为滑动模态控制系统的“不变性”^[3]。

本文利用变结构控制的这种“不变性”特点,将其与双闭环控制相结合,提出基于变结构的双闭环控制,并将其应用于高精度转台系统当中,得出其模拟仿真框图如图3所示。

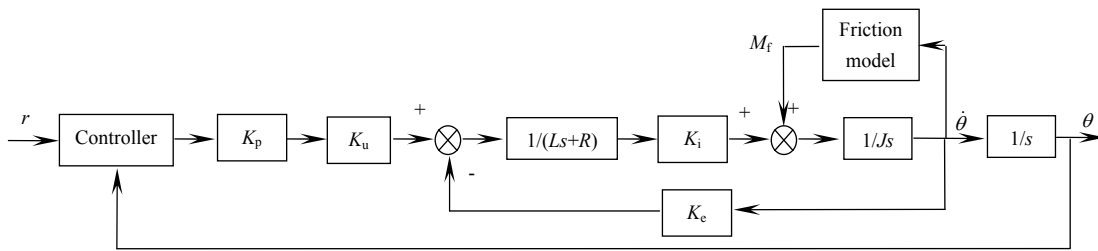


图3 转台系统采用基于变结构的双闭环控制仿真框图

Fig.3 Simulation block of double closed loop control based on the variable structure

图3中, \$K_p\$ 为位置环增益大小, \$K_u\$ 为功率级的功放增益, \$L\$、\$R\$ 分别为电机的等效电感值和阻抗值(电机电感 \$L\$ 通常较小,故通常忽略不计), \$K_i\$ 为电机的电磁系数, \$M_f\$ 为转台系统中简化了的摩擦力矩模型, \$K_e\$ 为电机的电压反馈系数, \$J\$ 为电机以及负载轴的转动惯量大小。\$\dot{\theta}\$ 为电机以及负载轴的角速度信号, \$\theta\$ 为电机以及负载轴的位置输出信号, \$r\$ 为转台系统的输入指令信号。

令 \$x_1 = \theta\$ 表示转台的转角, \$x_2 = \dot{\theta}\$ 表示转台的角速度。由此通过图3得出:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = -\frac{K_i K_e}{JR} x_2 + \frac{K_i K_p K_u}{JR} u + \frac{M_f}{f} \tag{3}$$

由此得出系统的状态方程为^[5]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_i K_e}{JR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_i K_p K_u}{JR} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{M_f}{f} \tag{4}$$

设 \$r\$ 为输入,即系统期望的转角, \$e\$ 为系统误差,则有:

$$e = r - x_1, \quad \dot{e} = \dot{r} - \dot{x}_1 = \dot{r} - x_2 \tag{5}$$

设计切换函数:

$$s = ce + \dot{e} \tag{6}$$

采用指数趋近律规则^[3]

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \dot{r} - \dot{x}_2 = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \tag{7}$$

将式(3)中的 \$\dot{x}_2 = -\frac{K_i K_e}{JR} x_2 + \frac{K_i K_p K_u}{JR} u + \frac{M_f}{f}\$ 代入上式中得到:

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{e} + \frac{K_i K_e}{JR} x_2 - \frac{K_i K_p K_u}{JR} u - \frac{M_f}{f} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (8)$$

由此得出控制函数:

$$u = \frac{1}{K_p K_u} \left(K_e x_2 + \frac{JRC}{K_i} \dot{e} + \frac{JR}{K_i} \ddot{e} + \frac{JR}{K_i} \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + \frac{JR}{K_i} ks + \frac{M_f R}{K_i} \right) \quad (9)$$

将模拟低速的频率 2 Hz、幅值 0.000 1°的正弦信号作为输入信号时, 仿真得出基于指数趋近律的变结构控制器的系统位置跟踪曲线和速度响应曲线图 4 以及变结构控制相轨迹曲线图 5。图 4(a)为位置跟踪曲线, 图 4(b)为速度跟踪曲线, 图 6 为图 5 相轨迹曲线的末端放大。

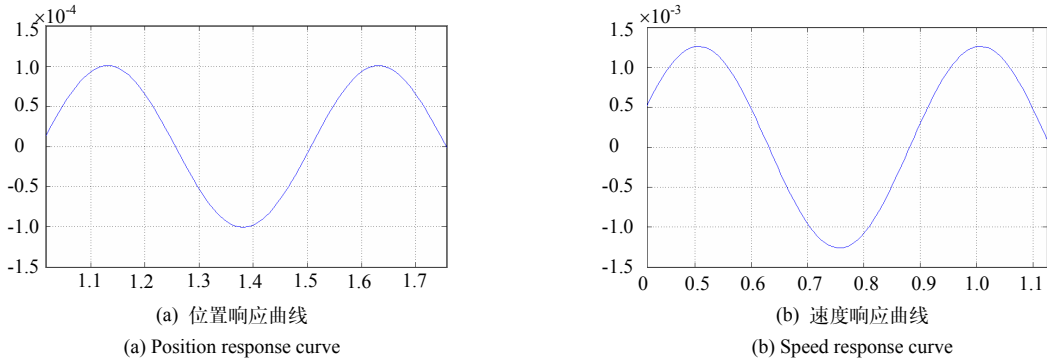


图 4 输入信号为频率 2 Hz、幅值 0.000 1°的正弦跟踪曲线

Fig.4 The 2 Hz response curve with 0.000 1° magnitude

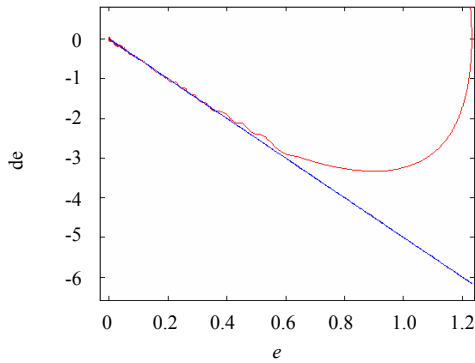


图 5 变结构控制相轨迹曲线图

Fig.5 Phase track curve based on the variable structure control

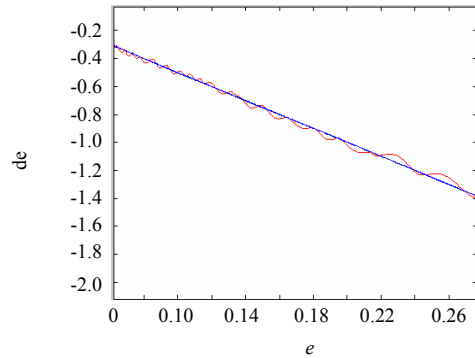


图 6 变结构控制相轨迹末梢放大曲线

Fig.6 Enlarged endings curve of phase track curve based on the variable structure control

从基于指数趋近律的变结构控制仿真曲线, 即图 4 ~ 图 6, 可以很明显的看出, 系统的位置跟踪以及速度跟踪都有着比较好的效果。变结构控制显著的特点体现在图 6 上, 可以看到, 在变结构控制下, 系统的状态在切换面 $s=0$ 上来回切换, 符合变结构控制的理论分析, 正是由于这种切换, 使得系统状态沿着 $s=0$ 渐进至原点, 保证了系统的稳定性。

3 高精度转台低速稳定性实验结果与分析

根据实际转台系统的调试, 实测出转台系统的结构参数和控制参数为: $R=6.1 \Omega$, $K_i=3.98$, $K_e=5.8 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, $J=0.28 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $K_p=3$, $K_u=4.9$, $M_c=17 \text{ N}$, $k_v=1.8 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $c=70$, $\varepsilon=10$, $k=4$ 。

根据上述的仿真结果, 采用国军标 GJB-1801-93 的定时测角法, 通过给定输入信号: $r(t)=0.000 1 \sin(4\pi t)$, 分别采用传统的双闭环控制和基于变结构的双闭环控制, 可以测量出转台转动的角度并计算出转台的实际速度值与给定低速输入信号值之间的百分比误差, 得出其速度误差百分比曲线分别如图 7(a)、图 7(b)。

由图 7(a)、(b)可以看出, 转台系统采用传统的双闭环控制方案可以将转台的稳速精度控制在 6%以内,

而采用基于变结构的双闭环控制方案可以将转台的稳速精度控制在 3%以内, 将转台整体的低速稳速精度提高了一倍之多。

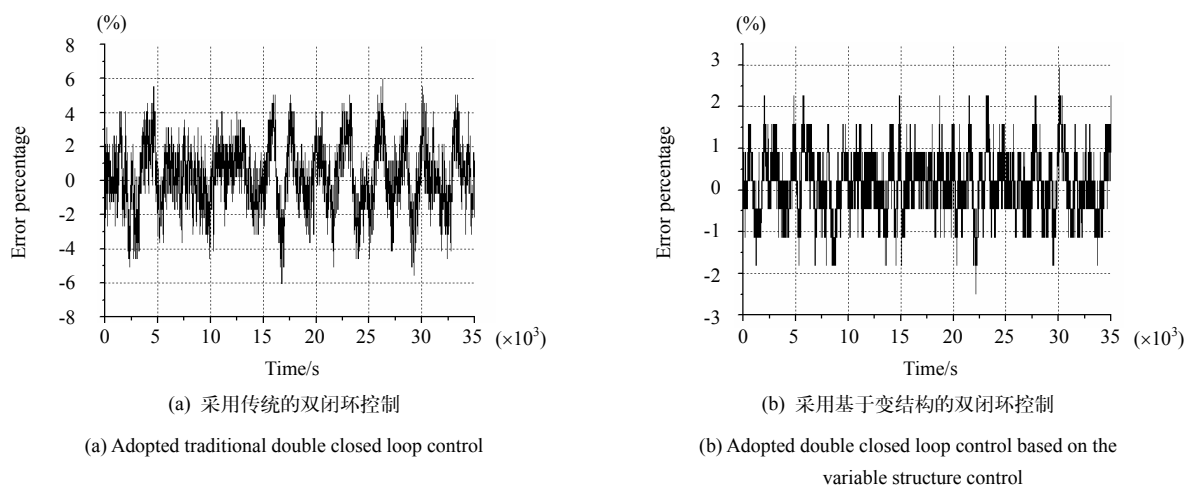


图7 实际转台速度误差百分比曲线图

Fig.7 Error percentage of the practical turntable

4 结 论

本文针对摩擦力矩对高精度转台低速稳定性能的影响, 根据转台系统的实际工作情况, 提出了基于变结构的双闭环控制方案, 通过仿真分析对比以及实验结果表明, 基于变结构控制的双闭环控制方案比传统的双闭环控制可以更有效的减轻摩擦力矩对转台速度稳定性能影响, 提高转台的速度稳定性能。

参考文献:

- [1] 刘洪玉. 转台伺服系统低速性能分析与摩擦补偿研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
LIU Hong-yu. Low Velocities Performance Analysis and Friction Compensation in Table Servo Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [2] 王绍举, 金光, 徐开. 高精度小卫星星座激光通信仿真平台设计 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8): 1554-1559.
WANG Shao-ju, JIN Guang, XU Kai. Design of Simulation Platform for High Precision Laser Communication Small Satellite Constellation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1554-1559.
- [3] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
LIU Jin-kun. *Matlab Simulation for Sliding Mode Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [4] SHAHNAZI R, SHANECHI H M, PARIZ N. Position control of induction and DC servomotors: a novel adaptive fuzzy pi sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(1): 138-147.
- [5] Barambones O, Garrido A J, MASEDA F J. Integral sliding-mode controller for induction motor based on field-oriented control theory [J]. *IET Control Theory and Applications*(S1751-8644), 2007, 1(3): 786-794.
- [6] 李拥军, 杨文淑, 范永坤, 等. 高精度转台摩擦力矩补偿控制器设计与仿真 [J]. 光电工程, 2008, 35(12): 126-130.
LI Yong-jun, YANG Wen-shu, FAN Yong-kun, et al. Controller Design and Simulation for Friction Moment Compensation on High-precision Turntable [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(12): 126-130.
- [7] Fei Li, Hua-Long Xie. Sliding Mode Variable Structure Control for Visual Servoing System [J]. *International Journal of Automation and Computing*(S1476-8186), 2010, 7(3): 317-323.
- [8] 胡浩军, 毛耀, 马佳光, 等. 稳定转台摩擦参数的测量及其对稳定精度的影响 [J]. 光电工程, 2007, 34(5): 5-9.
HU Hao-jun, MAO Yao, MA Jia-guang, et al. Stabilized Turntable Friction Parameters Measurement and The Effect on The Stabilized Accuracy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 5-9.