

文章编号 1004-924X(2008)08-1436-04

摇摆台负载自适应技术研究

陈洪立^{1,2}, 翟林培¹, 肖占全^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了对不同型号的航空相机进行地面试验,需要设计一套具有负载自适应功能的摇摆台系统,为此研究了摇摆台负载自适应技术。根据相机的重量变化范围,结合已设计好的摇摆台机电结构,通过理论分析及仿真试验研究了负载(航空相机)大小与电位计(位置反馈器件)反馈信号幅值间的关系,结合数值算法首次提出了一种易于实现的自动测量负载大小的新方法。对于大部分现有的数字控制系统不需要添加任何器件,只需加段程序即可使用。研究结果表明四次多项式拟合的相关系数 R^2 为0.997 3,均方差RMS为0.171 6;五次多项式拟合的相关系数 R^2 为0.99 96,均方差RMS为0.063 8。进一步分析认为,五次多项式拟合可满足研究的负载自适应摇摆台精度要求。

关键词:自适应能力;摇摆台;转动惯量;自动测量

中图分类号:TH703;V475.3 **文献标识码:**A

Study on adaptive capacity of stewart platform

CHEN Hong-li^{1,2}, ZHAI Lin-pei¹, XIAO Zhan-quan^{1,2}(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: It is necessary for processing the ground tests from different types of aerial cameras to design a stewart platform with load adaptive capacity. Considering the range of cameras' weight and the electrical-mechanical structure of designed stewart platform, the relationship between the load (aerial camera) and the potentiometer (position feedback device) signal amplitude was studied. A measuring method for the inertia moment of the load automatically was presented using numerical calculation method. The method is simple and does not need to add any device to most digital control systems. The simulation experimental results show that R^2 is 0.997 3, RMS is 0.171 6 by 4th degree polynomial, while R^2 is 0.999 6, RMS is 0.063 78 by 5th degree polynomial. It comes out that the precision of 5th degree polynomial is coincident with the stewart platform.

Key words: adaptive capacity; stewart platform; inertia moment; automation measurement

1 引言

运动工作台是机电设备中常用的机构,运用广泛,如高加速、超精密的数控机床^[1],航拍设备^[2]等。现代设备对精度要求越来越高,出现了一些高定位精度的运动平台^[3-6]。摇摆台是运动工作台的一种,以摇摆运动为主。三自由度的摇摆台使用、研究得最多^[7-10],六自由度的摇摆台^[11]也有研究。

在作者的研究项目中,航空相机的地面实验需要设计一个摇摆台。该摇摆台为三自由度,不同于传统摇摆台的主要之处是负载变化范围大,从15~260 kg,且要求摇摆台在负载范围内系统的通带宽度、精度相同,摇摆频率和摆幅基本不变,定位精度为3'(1 mrad)。这就要求摇摆台必需有负载自适应能力。

在确定不同负载方面,传统做法是在控制面板上加开关用于指定负载大小。本研究要求系统能够自动识别负载大小,并据此自动确定摇摆台的控制程序使得满足摇摆实验性能要求。对于伺服系统,不同的负载也就是不同的转动惯量。要求有负载自适应能力也就是要求有自动确定系统转动惯量的能力。

传统的测量转动惯量的方法有加速度法和自由溜弛法^[12]。由于该摇摆台的摆动范围是±40°所以自由溜弛法不能使用。加速度法由于需要测量电流和示波照相,一方面需要对现有摇摆台增添传感器,且由于需示波照相而无法进行实时自动测量,所以也不能采用。因此,本课题研究设计了一种自动测量负载转动惯量的方法,该方法不需要对摇摆台增添任何部件即可完成自动测量。

2 转动惯量与 T_m 的关系^[12]

摇摆台机电传动系统的传递函数如式(1)所示,式中 T_m 是机电时间常数,它与系统转动惯量 J_M 的关系如式(2)所示:

$$\frac{\omega_M(s)}{u_a(s)} = \frac{K_m}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} = \frac{1/K_b}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}, \quad (1)$$

$$T_m = \frac{R_a J_M}{K_b K_i}, \quad (2)$$

式中: $\omega_M(s)$ 为输出角速度的拉氏变换; $u_a(s)$ 为输

入电压的拉氏变换; K_m 为系统增益常数; K_b 为电机反电动势系数; K_i 为电机的力矩常数; T_m 为系数机电时间常数; T_e 为系统电磁时间常数; R_a 为电枢电阻(欧姆); J_M 为电机转子及负载的转动惯量(kg·m²)。

从式(1)、(2)可以看出负载不同时只会影响系统的机电时间常数 T_m (其余参数都已知且不被影响),从而影响系统的性能。从式(2)还可以看出,对于确定的伺服系统 T_m 与 J_M 成正比关系。为了满足前面所述的性能要求,需要针对不同的 T_m 自动更正控制器参数。

3 同一正弦信号 T_m 与 P_v 的关系

为了自动测量系统的 T_m ,先来研究它对系统响应的影响。在 MATLAB 的 SIMULINK 仿真系统下建立图 1 所示的仿真模型。根据该摇摆台

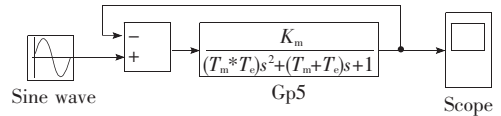


图1 仿真试验图

Fig. 1 Principle diagram for simulation study

伺服系统所用电机确定参数 K_m 、 T_e 的值如式(3)所示:

$$\begin{cases} K_m = 2.47 \\ T_e = 0.002 \end{cases} \quad (3)$$

输入正弦信号选为频率是 5 rad/s,幅值是 1 的正弦信号。在该输入信号下,不同 T_m 时输出信号结果见图 2。

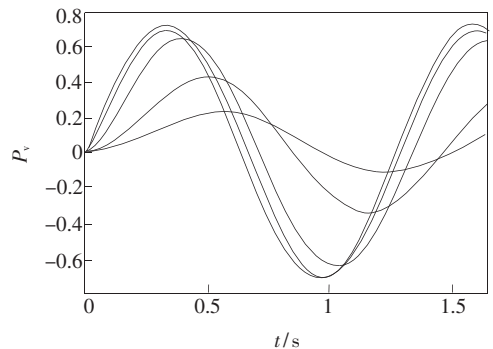


图2 仿真试验的结果(从上到下对应 T_m 值分别为0.03, 0.1, 0.3, 1.0, 3.0)

Fig. 2 Simulation results (T_m is 0.03, 0.1, 0.3, 1.0, 3.0 from up to down)

从图 2 可以看出,相同输入信号下不同 T_m 时,输出信号的幅值 P_v (表示正弦信号下摇摆台的摆动幅度,可由电位计测出)和相位都不同。所以只要建立了 T_m 与输出信号的幅值 P_v 或相位间的关系,便可根据输出信号的幅值 P_v 或相位来确定 T_m ,也便是确定不同的负载。考虑到相位不宜测量,决定建立 T_m 与输出幅值 P_v 间的关系。即在摇摆台的输入端给定已知的正弦信号让摇摆台摇摆,用电位计测量摆动输出的幅值,根据建立好的 T_m 与幅值间的关系计算出 T_m (对应于负载的转动惯量,见式(2))。该方法不需要对现有摇摆台进行任何改动,只需开发相应的程序即可。

4 T_m 与输出幅值 P_v 间的拟合关系

T_m 与输出幅值 P_v 间的关系可通过数值试验进行拟合,有本研究用的 MATLAB 的拟合工

表 1 一组仿真试验数据

Tab.1 Data for simulation study

序号	T_m	输出信号幅值 P_v
1	0.03	0.711 3
2	0.1	0.702 4
3	0.3	0.652 0
4	1.0	0.427 6
5	1.5	0.379 3
6	2.0	0.318 9
7	2.5	0.274 9
8	3.0	0.230 3
9	3.5	0.215 2
10	4.0	0.194 1
11	4.5	0.176 8
12	5.0	0.162 3
13	5.5	0.150 0
14	6.0	0.139 4
15	6.5	0.130 2
16	7.0	0.122 2
17	7.5	0.115 1
18	8.0	0.108 7
19	8.5	0.103 1
20	9.0	0.097 9

具箱 cftool 和 plot 绘图下的 Basic Fitting 工具。当输入正弦信号的频率是 5 rad/s,幅值是 1 时的一组仿真试验数据见表 1,根据表 1 中的数据二者的五次线性拟合曲线如图 3 所示,拟合结果为

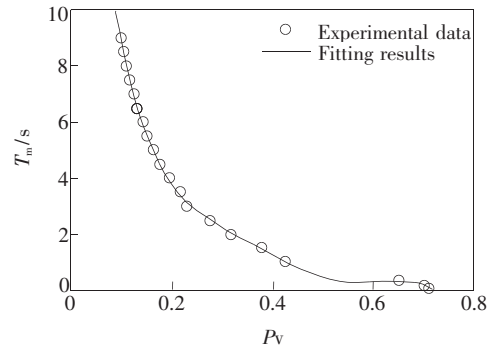


图 3 曲线拟合结果

Fig.3 Fitting results

式(4)所示。

$$T_m = P_1 P_v^5 + p_2 P_v^4 + p_3 P_v^3 + p_4 P_v^2 + p_5 P_v + p_6, \quad (4)$$

式中: $p_1 = -1\ 399.6$, $p_2 = 3\ 126.5$, $p_3 = -2\ 692.8$, $p_4 = 1\ 131.4$, $p_5 = -243.16$, $p_6 = 24.131$

拟合结果的相关系数 R_2^1 和均方差 RMSE1 见式(5):

$$\begin{cases} R_2^1 = 0.999\ 6 \\ \text{RMS}_1 = 0.063\ 78 \end{cases}, \quad (5)$$

如果进行四次多项式拟合,则拟合结果的相关系数 R_2^2 和均方差 RMS₂ 见式(6):

$$\begin{cases} R_2^2 = 0.997\ 3 \\ \text{RMS}_2 = 0.171\ 6 \end{cases}. \quad (6)$$

对比这两个拟合结果,结合该摇摆台性能需要决定采用五次多项式拟合结果。

5 结 论

为了满足不同负载情况下对摇摆台性能的严格要求,需要使摇摆台控制系统具有负载自适应能力。本文研究了负载、转动惯量、 T_m 间的关系,提出了用给定相同的正弦摆动信号,根据摇摆幅度的不同确定系统负载大小的方法,从而使摇摆台系统具有了负载自适应能力。用五次多项式拟合的方法建立了 T_m 与 P_v 间的关系,相关系数为 0.999 6,均方差为 0.063 78。该拟合精度满足摇摆台的精度要求。

本文还提出了一种测量转动惯量的新方法,该方法适合于大部分数字伺服系统,且无需对系统进行任何改动。只需在控制系统中增加一些确

定 P_v 的程序即可获得负载情况的足够信息,该研究为运动工作台,尤其是摇摆台类似现有设备的改进提供了参考。

参考文献:

- [1] 李群名,万梁,段吉安,等. 磁悬浮平台系统的机电耦合动力学模型及稳定性分析[J]. 光学精密工程,2007,15(4):535-542.
LI Q M, WAN L, DUAN J A, *et al.*. Coupled electromechanical dynamic model of magnetically suspended table system and its stability analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):535-542. (in Chinese)
- [2] 李岷,马军,周兴义. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(5):847-851.
LI M, MA J, ZHOU X Y. Study of measurement technique on airborne photoelectric stabilized platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 847-851. (in Chinese)
- [3] 田延龄,张大卫,闫兵. 二自由度微定位平台的研制[J]. 光学精密工程,2006,14(1):94-99.
TIAN Y L, ZHANG D W, YAN B. Development of a 2-DOF micropositioning stable[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):94-99. (in Chinese)
- [4] 孙立宁,马立,荣伟彬,等. 一种纳米级二维微定位工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程,2006,14(3):406-411.
SUN L N, MA L, RONG W B, *et al.*. Design and analysis on a 2-DOF nanopositioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3): 406-411. (in Chinese)
- [5] 马立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1017-1024.
MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nanopositioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6): 1017-1024. (in Chinese)
- [6] 戴蓉,谢铁邦. 新型一维位移工作台的设计与特性分析[J]. 光学精密工程,2006,14(3):428-433.
DAI R, XIE T B. Design and analysis of 1-DOF nano-positioning stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 428-433. (in Chinese)
- [7] 韩俊伟,鲁凯. 基于神经网络的三自由度摇摆台运动学反解[J]. 中国机械工程,2006,17(2):137-141.
HAN J W, LU K. Inverse kinematics solution of 3-DOF platform based on neural networks[J]. *Chin. Mechanical Eng.*, 2006,17(2):137-141. (in Chinese)
- [8] 李钦彦,李勇,周兆英,等. 小型三轴摇摆台及其控制[J]. 仪器与仪表,2002(4):9-11.
LI Q Y, LI Y, ZHOU ZH Y, *et al.*. Small rotate table with three axes and its control[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2002(4):9-11. (in Chinese)
- [9] 梁利华,张松涛,梁燕华. 基于PMAC的三轴海浪模拟摇摆台设计[J]. 机床与液压,2005(9):117-119.
LIANG L H, ZHANG S T, LIANG Y H. Research on PMAC-based three-axis ocean wave simulation turntable [J]. *Machine Tool and Hydraulic*, 2005(9):117-119. (in Chinese)
- [10] 李学忠,倪建和,张国胜. 摇摆试验台台体机构设计与分析计算[J]. 工程机械,2006(8):24-29.
LI X ZH, NI J H, ZHANG G SH. Structure design and analysis of stewart platform[J]. *Engineering Machine*, 2006(8):24-29. (in Chinese)
- [11] 郝扶宁,王军政,汪首坤,等. 基于神经网络的六自由度摇摆台位置正解[J]. 北京理工大学学报,2003,23(6):736-739.
HAO Y N, WANG J ZH, WANG SH K, *et al.*. Forward kinematics solution of stewart platform based on neural networks[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003,23(6):736-739. (in Chinese)
- [12] 刘胜. 现代伺服系统设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
LIU SH. *Modern Servo System Design*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:陈洪立(1980-),男,山东曲阜人,博士,主要研究方向为机电一体化和伺服自动化在航空相机中的应用技术;
E-mail:huntre_c@163.com

翟林培(1945-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为航空相机技术。