

转台伺服系统被控对象的频率特性测试

张敏^{1,2}, 陈涛¹, 李洪文¹, 巩明德³, 杨飞¹

- (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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 吉林大学, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了提高转台伺服系统的响应速度, 降低系统响应时间, 采取的方法是辨识系统开环结构响应, 并结合系统结构动态性能指标, 对转台控制系统进行设计, 达到改善提高系统性能的目的。文中提出了一种模型辨识的新方法, 通过正弦扫频信号激励转台被控对象速度开环系统的动态特性, 实时采集编码器位置反馈信息, 通过对系统每一频率点的动态频率特性分析, 辨识系统传递函数。文中首先分析了该测试方法的测试原理, 以及正弦扫频激励信号的产生, 并最终通过搭建实验平台, 选用单片机 C8051F120 与 CPLD 配合设计的控制器, 输出脉宽调制信号, 经驱动器驱动方位转台进行方法测试, 完成系统频率响应测试以及被控对象传递函数辨识, 验证了该方法的可行性。

关键词: 伺服系统; 辨识; 频率特性; 传递函数

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0531003

Frequency characteristic test for the plant of rotator servo system

Zhang Min^{1,2}, Chen Tao¹, Li Hongwen¹, Gong Mingde³, Yang Fei¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to improve response and decrease the settling time, the structure response of the open loop system will be identified. According to the requirements of the structural dynamics performance of the control system, the design of the rotator control system is significant to improve the system performance. In this paper, a new method was proposed for the system model identification, the sin sweep signal was applied at the input of the open rate loop to excite the plant dynamic, the real time position feedback signal of the rotator was measured at the encoder, each frequency component of the rotator dynamics was analyzed to identify and obtain a meaningful transfer function, and in this article, the theory of the method was analyzed first, and the time series input is a sinusoidal sweep signal. The test of the system frequency response and the transfer function identification were realized through the testing experiment platform using this new method, the experiment chooses a controller designed by C8051F120 and CPLD, the output signal drives the rotator through the driver to verify this approach, and proving its feasibility.

Key words: servo system; identification; frequency characteristic; transfer function

收稿日期: 2015-09-14; 修订日期: 2015-10-14

基金项目: 国家自然科学基金: 大空间尺度可控科学反射镜能动光学技术研究(11403022)

作者简介: 张敏(1986-), 女, 博士生, 主要从事光学望远镜精密跟踪与伺服控制技术方面的研究。Email: zm_kobe2012@126.com

导师简介: 陈涛(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密跟踪测量技术方面的研究。Email: chent@ciomp.ac.cn

0 引言

随着人类空间活动的发展,使得对空间目标探测技术以及天文研究工作的需求大大增加,而国内外针对地基大口径望远镜的研制也取得了突破性的进展。目前国际上针对大口径望远镜采用先进的光学、机械、控制等技术,成功突破口径局限并投入工作,具有代表性的大型望远镜包括 KECK 望远镜、VLT 望远镜、Gemini 望远镜、SOAR 望远镜,以及正在研制的 TMT 望远镜。而风阻、电机转矩波动等干扰因素的存在,包括望远镜在安全性能方面具有较高的指标要求,均对控制系统在系统建模,控制器设计,抗干扰能力上都提出挑战,文中针对系统建模,提出一种新的系统频率特性测试方法,分析系统频带范围内每一频率点的动态特性,建立被控对象模型^[1-3]。

参考文献[4]提出一种光电经纬仪频率特性测试方法,该方法通过人为确定待扫描的频率点,并分别将各个频率的激励信号作用于被控对象,采集输出信号,并采用相关分析法,计算每一个测试频率点的幅值比与相位差,最终给出系统开环频率特性测试结果^[4]。参考文献[5]提出一种采用白噪声作为激励信号,对望远镜系统进行系统辨识的方法。白噪声作为一种随机信号,其频谱在望远镜控制带宽范围内,将其作为速度环给定信号,能够实现均衡激励望远镜系统每一个频率点的动态频率特性。辨识过程中,将离散白噪声作为给定输入信号,同时以相同的采样频率同步采集编码器输出信号。根据白噪声的优点,当将其应用在望远镜系统建模过程中,能够获得有意义的系统传递函数和可靠的速度环模型,建立精确的系统模型对于设计一个稳定而精确的基于模型的控制器也具有重要意义^[5]。参考文献[6]介绍了一种望远镜转台控制系统控制器部分的硬件设计,该控制器采用单片机 C8051F120 与复杂可编程逻辑器件 CPLD,是一种包含多种功能模块的伺服控制器,设计了包括编码器计数、PWM 电机控制信号产生以及 LCD 显示等功能,其中,单片机负责速度控制器、位置控制器响应控制算法的实现,CPLD 负责逻辑电路的实现,如编码器计数、分频电路、PWM 脉宽调制波的产生等^[6-7]。该控制系统成本较

低、功能全,并且在实际望远镜转台控制系统中得到成功应用,验证了其可行性。

1 频率特性测试

1.1 控制原理

如图 1 所示为控制系统原理框图,在控制系统速度开环条件下,正弦信号直接作用于被控对象,上位机同时以相同的采样频率采集编码器位置反馈信息与正弦激励信号,采集的输入电压信号与输出角度位置信号,用于确定系统频率特性分布,以及系统传递函数辨识^[8-12]。

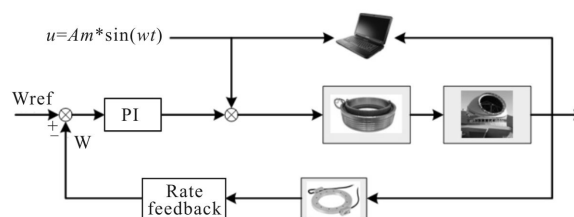


图 1 控制系统原理图

Fig.1 Block diagram of the control system

1.2 正弦激励信号

生成激励信号的公式:

$$u(t) = A(t) \sin(2\pi \times c(t)) \quad (1)$$

$$c(t) = f_0(1 + at^n)t \quad (2)$$

$$a = \frac{f_t/f_0 - 1}{(n+1)T^n} \quad (3)$$

式中: $u(t)$ 为正弦扫频信号; $A(t)$ 为幅值; f_0 和 f_t 分别为频率范围的起点和终点; T 为控制系统完成相应频率范围内扫频所需的周期; n 为辨识的被控对象传递函数多项式阶次。

转台控制系统结构设计的第一步往往是对系统结构的辨识,该实验测试计划首先产生激励信号,如图 2 所示,该激励信号中具体的参数选择为 $f_0=0.1 \text{ Hz}$, $f_t=40 \text{ Hz}$, $T=10 \text{ s}$, $n=8$, $A(t)=6 \text{ V}$,在公式(1)~(3)中具体的参数选择原则包括:根据系统设计所需要的频段的特性确定初始频率 f_0 和终止频率 f_t ,根据实际的系统期望的激励时间确定 T ,根据系统需要的传递函数阶次选择 n ,根据系统电源的限制及电机的驱动电压限制选择 $A(t)$ 。此信号为正弦扫频时域内连续输入信号,该激励信号将在 10 s 内完成转台被控对象在 0.1~40 Hz 频率范围内的频率特性估计,信号幅值可变,激励信号阶次选择为三阶,目

的是将更多的时间和能量注入到低频范围,实验过程中采集系统编码器位置输出信号,同时要同步测量系统的输入信号。

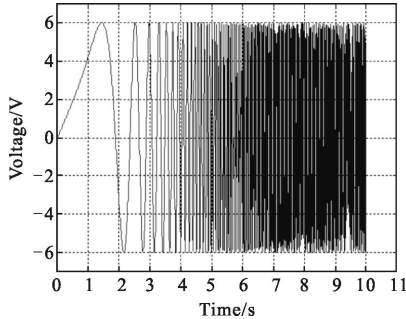


图 2 正弦激励信号

Fig.2 Sin exciting signal

传递函数估计公式:

$$g(f) = \frac{S_{vy}(f)}{S_{in}(f)} \quad (4)$$

频率响应估计采用基于傅里叶变换的功率谱与基于傅里叶变换的输入输出的交叉功率谱,如公式(4)中 $S_{in}(f)$ 为输入功率谱, $S_{vy}(f)$ 为输入输出交叉功率谱。

2 实验测试

如图3所示为实验平台的搭建,为了验证该频率特性测试方法的可行性,实验选用一维转台作为被控对象,执行机构采用有刷直流电机驱动转台绕方位轴旋转,转台安装了 24 位增量式编码器,用于实时反馈转台旋转过程中的角度位置信息。

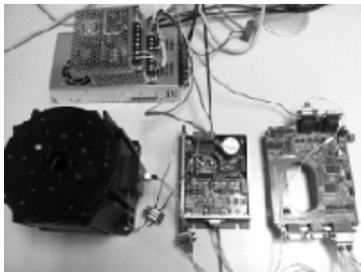


图 3 实验平台

Fig.3 Experiment platform

实验控制系统包括伺服控制器与驱动器,其中,控制器由单片机 C8051F120 与 EPM570T100I5N 芯片配合使用,单片机作为主控制器的主要作用是用于与上位机通信及控制算法的实现,通信部分包括

向上位机实时传送角度信息与驱动信号数据,单片机串口接收编码器反馈的 RS422 位置差分数据,并实时通过单片机串口发送端口将位置信号传输到 RS232 串口,上位机通过串口助手接收数据。CPLD 将 100 MHz 外部晶振时钟提供给内部 PWM 处理模块,同时,将此时钟分频,并将生成的 500 Hz 时钟信号用于系统控制周期同步以及作为编码器触发信号,CPLD 负责电机驱动信号的产生,电机驱动信号采用 PWM 脉宽调制信号,通过调整信号占空比来实现电机调速,CPLD 负责最终将高分辨率并带有死区的四路 PWM 信号输出到驱动器,驱动器采用了双极性 H 桥功率放大器,驱动有刷直流电机。

首先将主控制器单片机初始化,包括关闭看门狗,系统时钟初始化,并将端口分配、自定义变量、UART0、Timer1 以及中断等各模块分别初始化。根据上述正弦信号生成原理,在控制程序中将该原理实现,生成图 2 中所示的正弦激励信号,信号幅值为 6 V,能够在 10 s 内实现对转台被控对象在 0.1~40 Hz 频率范围内的频率特性估计,将生成的激励信号输出到 CPLD,并通过 CPLD 中的 PWM 生成模块产生脉宽调制信号,输出到驱动功率级,驱动被控对象。

实验过程中,上位机通过串口助手采集激励信号与角度位置信号。实验在正弦信号激励下,测得的位置响应数据,经差分同步画出的速度输出曲线与输入激励信号如图 4 所示。

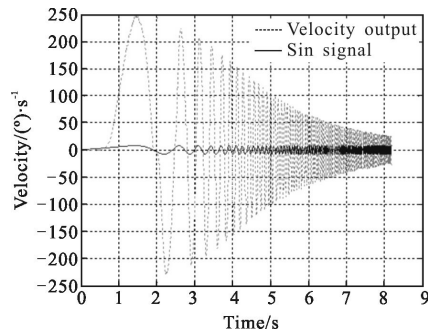


图 4 速度输出曲线

Fig.4 Rate output curve

根据同步测得正弦激励、位置输出响应数据,分析数据的相关性,并基于傅里叶变换的功率谱与交叉功率谱估计系统频率响应特性,绘制系统开环频率特性曲线,如图 5 中所示测试曲线为转台开环频率特性测试结果。

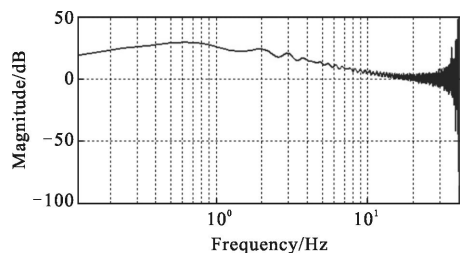


图 5 频率响应曲线

Fig.5 Frequency response curve

根据系统开环频率特性, 辨识系统开环传递函

$$G(s) = \frac{2.0s^7 - 1.8s^6 + 0.14s^5 - 0.03s^4 - 0.29s^3 + 1.33s^2 - 2.14s + 0.77}{s^8 - 2.0s^7 + 1.7s^6 - 0.88s^5 - 0.17s^4 + 0.96s^3 - 1.14s^2 + 0.72s - 0.14}$$

数, 当系统选择基于模型的 LQG 控制器或 H^∞ 控制器时, 可以根据该模型进行控制器设计, 根据系统设计需要与性能指标的要求, 选择建立不同阶次的系统模型, 文中由于所采用的正弦激励信号中将阶次 n 选为 8, 即实验将以八阶系统为例, 给出实验所用转台的八阶传递函数, 具体采用该辨识方法时可根据系统设计需要选择激励信号中的阶次值, 并最终得到需要的传递函数, 该实验获得的传递函数为:

(1): 79–84. (in Chinese)

3 结论

通过搭建实验平台, 采用正弦扫频信号对一维转台被控对象进行系统开环频率特性测试及结构辨识。不同于传统的扫频方法, 文中所提出的方法能够通过生成一种特殊的正弦激励信号, 并且只需要通过一次开环控制实验, 即可实现对被控对象在设定频段内的每一个频率点的频率特性进行估计, 克服了常用的传统扫频方法需要对特定频率点一一进行频率特性估计的缺点, 并最终通过实验绘制出系统伯德图, 系统描述了转台系统在频域内的结构动态特性, 并成功实现了被控对象的传递函数辨识, 验证了此方法的可行性。

参考文献:

[1] Wodek Gawronski, Mimi A Gudim. Design and performance of the monopulse control system [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1999, 41(6): 40–50.

[2] Wodek Gawronski. Antenna control systems: from PI to H-infinity [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2001, 43(1): 52–60.

[3] Peter M Tompson, Macmynowski D G, Mark J Sirota. Analysis of the TMT mount control system[C]//SPIE Ground-based and Airborne Telescope II, 2008, 7012(1): 1–14.

[4] Wang Suai, Cheng Tao, Li Hongwen. Frequency characteristic test and model identification for O-E tracking servo system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17

[5] Gawronski W. Modeling and control of antennas and telescopes[C]//Springer Mechanical Engineering Series, 2008: 1–222.

[6] Li Hongwen, Yin Yumei, Liu Jinxing. Design of multifunction telescope control system based on C8051F120 and CPLD[J]. *Embedded Technology*, 2010, 36(9): 36–42. (in Chinese)

[7] Li Hongwen. Servo system of large telescope based on internal model PID control method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 328–332. (in Chinese)

[8] Xiao Qianjin, Jia Hongguang, Zhang Jiabao, et al. Identification and compensation of nonlinearity for electromechanical actuator servo system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2038–2046. (in Chinese)

[9] Li Jun, Xiu Jihong, Huang Pu, et al. Identification of linear approximation for scanning mirror system of aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (7): 1771–1779. (in Chinese)

[10] Zhao Jianyuan, Li Xingfei, Tian Lingzi. Closed-loop Identification of dynamically tuned gyro based on BJIV method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 3029–3037. (in Chinese)

[11] Hei Mo, Fan Shixun, Liao Hongbo, et al. Modeling of precision harmonic drive system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1843–1848. (in Chinese)

[12] Shi Jingjing, Yao Baidong, Lu Jiaguo. Modeling and transfer function identification of FSM system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42: 2749–2753. (in Chinese)