

引用格式:陈晓梅,刘长江,杜保林.大型高精度转台控制系统研究[J].电光与控制,2019,26(5):90-94. CHEN X M, LIU C J, DU B L. On control system of a high-precision large-size turntable[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5):90-94.

大型高精度转台控制系统研究

陈晓梅¹, 刘长江², 杜保林¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所,河南 洛阳 471000;

2. 中国人民解放军装甲兵学院,安徽 蚌埠 233050)

摘要:大型高精度目标跟踪转台主要用来模拟导引头、雷达等探测设备的目标运动特性,测试探测设备的跟随特性,是航空、航天领域重要的半实物仿真设备。首先介绍了转台的工作原理、控制系统硬件组成,然后将永磁直流力矩电机的数学模型和转台的动力学方程结合,建立了转台的数学模型,在此基础上提出了基于PID控制器的三环控制系统,实验研究表明该系统在技术要求范围内满足双十指标。

关键词:高精度转台; 伺服控制; 数学模型; 半实物仿真; 探测设备模拟

中图分类号: V271.4; TH13 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.018

On Control System of a High-Precision Large-Size Turntable

CHEN Xiao-mei¹, LIU Chang-jiang², DU Bao-lin¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Armored Force Institute of PLA, Bengbu 233050, China)

Abstract: The large-size and high-precision target tracking turntable is mainly used for simulating the target motion characteristics of seeker, radar and other detection equipment, and testing the following performance of the detection equipment. It is an important facility for semi-physical simulation in the field of aeronautics and astronautics. In this paper, the working principle of the turntable and the hardware composition of the control system are introduced. Then, the mathematical model of the turntable is established by combining the mathematical model of the permanent magnet DC torque motor with the dynamic equation of the turntable. On this basis, a three-loop control system based on the PID controller is proposed. Simulation experiments show that the system meets the specifications within the technical requirement range.

Key words: high-precision turntable; servo control; mathematical model; semi-physical simulation; detection equipment simulation

0 引言

转台作为航空、航天领域重要的半实物仿真设备,在航空、航天飞行器的研制过程中起着重要的作用^[1]。转台能够在实验室里模拟导弹的目标运动特性,并对其制导系统进行测试实验^[2]。随着武器制造业的不断发展,各种型号的高精度重型导弹层出不穷,这就对大型高精度转台的研究提出了更高的要求,而控制系统作为转台中重要组成部分,对于提高转台的控制精度

也具有重要的作用^[3]。目标跟踪转台作为一种典型的伺服控制系统,其控制方法是转台控制系统的核心,也是影响转台控制性能的关键因素之一。经过多年研究与实验,从经典PID控制策略到现代控制理论(如自适应控制、变结构控制和鲁棒控制)再到智能控制策略,逐步形成了许多行之有效的控制方法^[4],对于提高转台的控制精度起到了至关重要的作用。

本文所设计的大型目标跟踪转台,与传统转台相比具有载荷大、旋转半径长、定位精度高等优点。对转台控制系统模型进行深入的分析、研究之后,本文在PID控制的基础上,采取一种从内而外分别为电流环、速度环、位置环的三闭环控制策略,从而使转台达到快速、稳定、准确的伺服控制效果。

收稿日期:2018-03-14

修回日期:2019-04-14

作者简介:陈晓梅(1968—),女,江苏徐州人,学士,工程师,研究方向为光电探测系统仿真与测试技术。

1 转台控制系统总体方案

1.1 转台工作原理

目标跟踪转台的结构设计是整个实验平台的基础,转台的机械机构装配误差、固有频率等都直接影响整个系统的准确性和稳定性^[5]。转台采用力矩电机直接带动轴系旋转和高精度编码器对转动角度实时采集反馈的方式,保证了机械传动精度,有利于提高系统的控制精度,如图1所示。

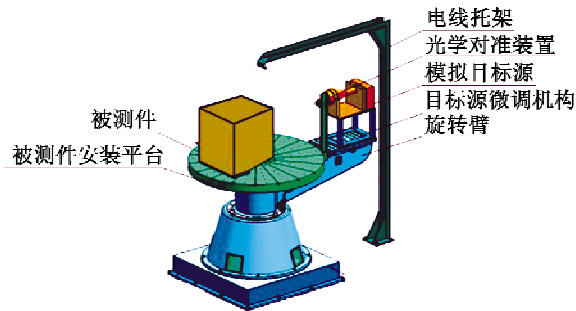


图1 转台整体结构

Fig.1 Structure of turntable

1.2 控制系统方案

控制系统采用基于工控机的上、下位机控制方式,上位机采用 LabWindows,下位机是在 Windows 平台下嵌入 RTX(Real-Time Extension)实时操作系统,控制系统组成原理如图2所示。

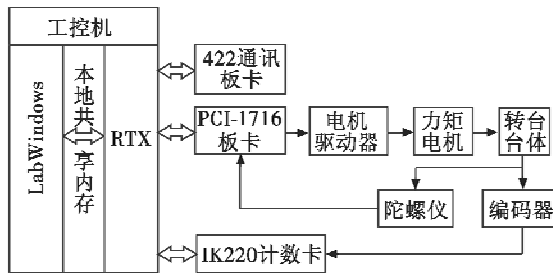


图2 转台测控系统组成原理

Fig.2 Composition principle of measurement and control system for turntable

工控机通过 IK220 和 PCI 板卡采集转台的角位置和角速度等信息,与转台的信息设定值进行比较,经伺服控制算法计算伺服输出,通过伺服驱动器驱动力矩电机进而带动转台运动。

2 控制系统模型

为了提高转台的频响带宽、保证转台位置控制精度和减小由减速器带来的回程误差,本文设计转台时采用低转速、大力矩的永磁直流力矩电机直驱的方式,根据力矩电机的数学模型和转台的动力学方程,建立整个转台的数学模型。

2.1 永磁直流电机数学模型

根据永磁直流力矩电机简化的数学模型和基尔霍夫电压定律可以得出电枢回路的微分方程为

$$U_a(t) = I_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \quad (1)$$

式中: U_a 为电枢电压; I_a 为电枢电流; R_a 为电枢电阻; L_a 为电枢电感; E_a 为电枢反电动势。

电枢反电动势 E_a 与旋转角速度成正比,其关系可以表示为

$$E_a(t) = K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

式中, K_e 为直流力矩电机的反电动势系数。

加入负载后,力矩电机电磁转矩表达式为

$$M_m(t) = K_T I_a(t) = J_m \ddot{\theta} + f_m \dot{\theta} + M_L \quad (3)$$

式中: $M_m(t)$ 为力矩电机电磁转矩; K_T 为力矩电机力矩系数; J_m 为电枢转动惯量; f_m 为力矩电机粘性摩擦系数; M_L 为负载转矩。

联立式(1)和式(3)可得

$$\begin{cases} U_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \\ E_a(t) = K_e \frac{d\theta}{dt} \\ M_m(t) = C_m i_a(t) \\ M_{mL}(t) = J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_m \frac{d\theta}{dt} + M_L(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $M_m(t)$ 为电流力矩; $M_{mL}(t)$ 为负载力矩。

将式(4)进行拉普拉斯变换得直流力矩电机的控制系统数学模型为

$$\begin{cases} U_a(s) = i_a(s)R_a + L_a i_a(s)s + E_a(s) \\ E_a(s) = K_e \theta(s)s \\ M_m(s) = C_m i_a(s) \\ M_m(s) = J_m \theta(s)s^2 + f_m \theta(s)s + M_L(s) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 转台位置控制系统数学模型

目标跟踪转台的动力学方程为

$$T_{em} + T_d = J\ddot{\theta} + G\dot{\theta} + K\theta \quad (6)$$

式中: T_{em} 为力矩电机作用在转台驱动轴上的主动力矩; T_d 为作用在转台驱动轴上的干扰力矩; J 为转台驱动轴上总的转动惯量; G 为转台阻尼系数; K 为弹性系数; $\ddot{\theta}$ 为转台轴系角加速度; $\dot{\theta}$ 为转台轴系角速度; θ 为转台轴系角位置信号。

由于本文将转台作为刚体,不考虑其弹性变形,取 $K=0$,另外,由于阻尼系数很小,取 $G=0$,得到简化后的转台动力学模型为

$$T_{em} + T_d = J\ddot{\theta} \quad (7)$$

其传递函数表示为

$$\frac{\theta(s)}{T_{em}(s) + T_d(s)} = \frac{1}{Js^2} \quad (8)$$

电机输出到转台驱动轴上的力矩即为电机的负载转矩

$$M_L = T_{em} \quad (9)$$

通过式(9)可以将转台的动力学方程与直流力矩电机数学模型联立,得

$$\begin{cases} U_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \\ E_a(t) = K_e \frac{d\theta}{dt} \\ M_{ml}(t) = C_m i_a(t) \\ M_{mL}(t) = J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_m \frac{d\theta}{dt} + M_L(t) \\ M_L(t) = T_{em} \\ T_{em} + T_d = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \end{cases} \quad (10)$$

忽略电机的粘性摩擦,令 $f_m = 0$,另外将电机电枢的转动惯量折合到负载端,得到式(10)的简化形式为

$$\begin{cases} U_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \\ E_a(t) = K_e \cdot d\theta/dt \\ M_{ml}(t) = C_m i_a(t) \\ M_{mL}(t) = T_{em} \\ T_{em} + T_d = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)进行拉普拉斯变换可得力矩电机-转台的数学模型为

$$\begin{cases} U_a(s) = i_a(s)R_a + L_a i_a(s)s + E_a(s) \\ E_a(s) = K_e \theta(s)s \\ M_m(s) = C_m i_a(s) \\ M_m(t) = T_{em}(s) \\ T_{em}(s) + T_d(s) = J\theta(s)s^2 \end{cases} \quad (12)$$

在力矩电机-转台的数学模型中引入电流反馈、速度反馈和位置反馈,可以确定目标跟踪转台三环控制系统,如图3所示。

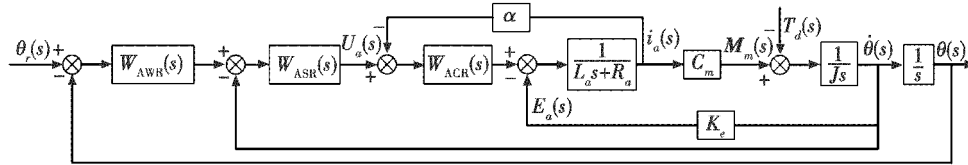


图3 三环控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of three-loop control system

图3中: $W_{AWR}(s)$ 为位置环控制器; $W_{ASR}(s)$ 为速度环控制器; $W_{ACR}(s)$ 为电流环控制器; α 为电流反馈系数。从图中可以看出,目标跟踪转台控制系统为三闭环控制系统,包含了电流环、速度环和位置环,该设计方法有利于缩短系统响应时间、提高系统频响带宽、增强系统抗干扰能力。

3 控制系统仿真研究

本文设计的转台控制系统为三闭环控制系统,即位置环、速度环和电流环。位置环是控制系统的最外环,要求控制精度高、频响带宽高、无超调、无稳态误差^[6];速度环在位置环之内,其设计目的旨在提高位置环响应的快速性,拓宽位置环的频响带宽,限制电机最大输出电流;电流环为控制系统最内环,通常在伺服驱动器内完成,其设计是为了保证电机的恒转矩输出,提高控制系统的抗干扰能力,其存在实现了电机在启动和停止过程中保持最大转矩工作,提高了电机响应的快速性。

在确定各环控制器参数时应遵循“由外向内确定各环控制系统指标,由内向外确定控制器参数”的原则,即分析转台控制系统性能指标,依次确定位置环、

速度环和电流环的控制系统指标和选择的控制器类型,再一次确定电流环、速度环和位置环的控制参数。

3.1 电流环设计与仿真

电流环是转台控制系统的内环,起到保证电机恒转矩输出的作用。由于电流环的存在,电机在启动和停止过程中可保证以最大的允许电流运行,提高了控制系统响应速度。在电机运转过程中,可以保证以设定的电流保持恒电流工作,增强了控制系统抑制电网电压波动和外界干扰负载的能力。

图3为目标跟踪转台三环控制系统框图,从图中可以看出,控制系统电流环与电机的反电动势之间存在交叉。事实上,电机电动势的存在增加了电机的速度阻尼,减小了电机转速的突变。但是,由于本转台旋转臂长、负载大,对应于该力矩电机的机械时间常数远大于其电气时间常数,因此在设计电流环时可以先不考虑反电动势变化对电流环的影响。

从图3中还可看出电流环为一阶惯性环节,为提高电流环响应的快速性,本文采用比例-积分控制器对其进行校正。

电流环控制器的传递函数为

$$W_{ACR}(s) = K_P + K_I/s \quad (13)$$

根据直流力矩电动机选型手册可知,电流反馈系数 $\alpha = 0.2$,电枢电感 $L_a = 18.56 \text{ mH}$,电枢电阻 $R_a = 3.51 \Omega$ 。

在 Simulink 中搭建电流环控制系统仿真模型,对电流环控制系统进行仿真验证。

经试凑法分别得到电流环控制器的控制参数 $K_p = 12, K_i = 461$,电流环控制系统在单位阶跃下的响应曲线如图 4 所示。

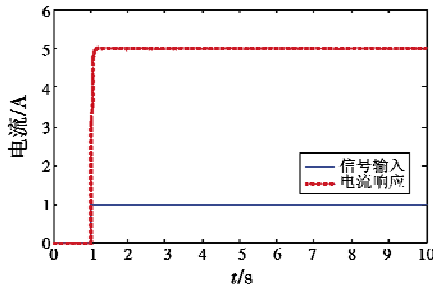


图 4 电流环阶跃响应曲线

Fig.4 Step response curve of current loop

图 4 中,电流响应曲线对信号输入曲线进行了很好的跟随和放大,加入积分控制器的电流环系统响应快、无超调、无稳态误差。

3.2 速度环设计与仿真

速度环是控制系统的中间环,其设计目的是为了提提高位置环的响应速度,增加系统的频响带宽^[7]。根据多闭环系统的设计原则,由外向内确定各环控制系统指标,由内向外确定控制器参数,在确定了电流环控制器参数之后,将电流环等效为速度环的一个控制对象,再整定速度环的控制参数。

速度环采用比例-积分控制器对其进行校正,电流环控制器的传递函数见式(13)。

由直流力矩电动机选型手册可知,转矩系数 $C_m = 16.16 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$,反电动势系数 $K_e = 1.69 \text{ V}/\text{rpm} = 16.1 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ 。通过试凑法发现,当取 $K_p = 35, K_i = 0.2$ 时,速度环阶跃响应效果较好,如图 5 所示。

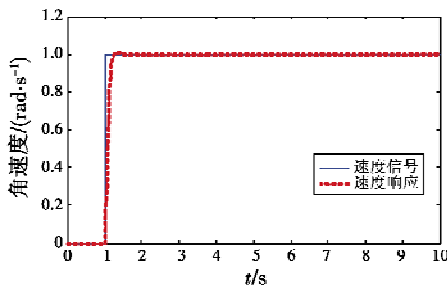


图 5 速度环阶跃响应曲线

Fig.5 Step response curve of velocity loop

3.3 位置环设计与仿真

位置环是控制系统的最后外环,由于对转台定位精

度要求较高($10''$),在设计位置环时要求位置环无超调、无稳态误差、瞬态响应平滑。选择 PID 控制器作为位置环的调节器,在 Simulink 中搭建转台位置环控制系统模型,通过试凑法发现,当 $K_p = 100, K_i = 0.2, K_D = 2.4$ 时,得到如图 6 所示响应结果。

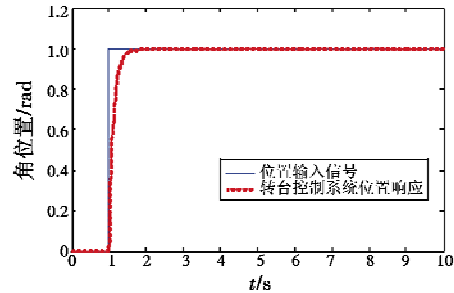


图 6 位置环阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curve of position loop

为了研究控制系统的频响,对控制系统施加幅值为 0.5° 、频率为 2 Hz 的正弦信号,其响应曲线如图 7 所示。

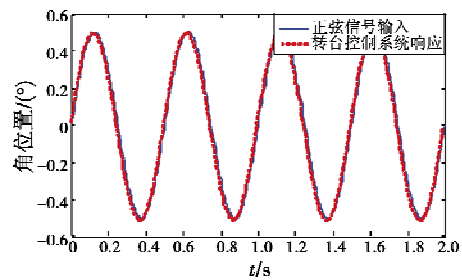


图 7 位置环 2 Hz 正弦信号阶跃响应曲线

Fig.7 Step response curve of position loop under 2 Hz sinusoidal signal

由图 7 可看出,在 $2 \text{ Hz}, \pm 0.5^\circ$ 正弦信号情况下,目标跟踪转台位置控制系统对正弦信号的跟踪过程中,幅值衰减了 3.1% ,相位滞后了 2.4° ,满足转台双十指标。

4 控制系统实验研究

目标跟踪转台实验研究是其研制过程中最复杂、不确定因素最多,也是难度最大的一步。转台实验研究一方面是为了验证理论研究是否正确,所设计的转台是否满足技术指标要求;另一方面也在实验调试过程中不断发现问题,改进方案,针对问题做更进一步的研究,为转台的研制积累宝贵的经验。

4.1 定位精度实验

定位精度是转台的一项重要静态指标,根据 GJB 1801-1993 中相关要求,本文采用分项实验法进行角位

置测量实验。在转台的驱动轴安装一个 24 面棱镜,使棱镜的中心与驱动轴的旋转中心重合,在同一基础上安装光管,调整光管位置直到在光管视野内可以看到棱镜返回的光束。在转台安装好棱镜和光管,将转台角位置和光管数字显示表都调零,控制转台依次旋转 15°,记录光管数字显示表的度数 a_0, a_1, \dots, a_{24} 。

按照上述方法对转台在 360° 内往返进行测量 2 圈,得到数据如表 1 所示。

表 1 转台位置精度测试数据

Table 1 Test data of position accuracy

角度 / (°)	负向误差 / (″)	正向误差 / (″)	角度 / (°)	负向误差 / (″)	正向误差 / (″)
0	0	-0.3	195	-2.6	-3.4
15	1.3	0.4	210	-1.1	0.5
30	0.7	0.4	225	0.4	0.5
45	1.6	1.2	240	1.1	1.3
60	1.5	1.3	255	3.8	3.9
75	3.8	2.3	270	4.2	4.2
90	-0.4	-1.9	285	4.5	4.4
105	-1.8	-1.9	300	4.6	4.5
120	-2.1	-1.5	315	4.5	3.7
135	-4.8	-4.4	330	3.2	1.6
150	-4.6	-3.9	345	2.6	1.9
165	-3.6	-1.7	360	1.1	1.1
180	-2.6	-1.7			

从表 1 可以看出,在往返 360° 的范围内,转台的最大正角度误差 $e^+ = 4.6''$,最大负角度误差 $e^- = -4.8''$,因此整个转台系统的定位精度在 $10''$ 以内。

4.2 频响特性实验

为了验证转台的动态性能和频响带宽满足技术指标要求,需要研究转台对不同频率的正弦信号的跟随情况。在 $\pm 0.5^\circ$ 的范围内对转台施加 3 Hz 的正弦信号,观察转台的跟随响应情况和位置误差大小,得到如图 8 所示跟随曲线。

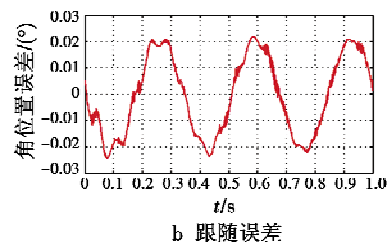
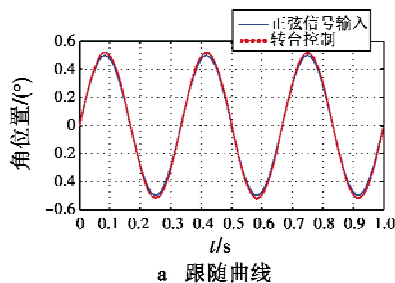


图 8 频响特性实验

Fig. 8 Frequency response experiment

由图 8 可知,转台在跟随 3 Hz 正弦信号 $\theta(t) = 0.5\sin(6\pi t)$ 时,相位滞后了 3.24° ,幅值衰减了 4.2%,满足转台双十技术指标,具有很高的频响带宽。

5 结论

本文结合永磁直流力矩电机的数学模型和转台动力学方程,建立了转台的数学模型,在对大型高精度目标转台的常见控制系统进行深入了解、分析后,提出了一种从内向外依次是电流环、速度环和位置环的三闭环控制策略,并在仿真和实验中对此进行了仿真验证,满足双十指标,最后通过实物进行验证,发现高精度目标转台能够满足各项性能指标,完成目标要求。

参考文献

- [1] 曾龙,莫波,元贺. 滚摆式导引头稳定平台控制器设计[J]. 导航定位与授时,2016,3(6):40-44.
- [2] 赵建亚. 基于 DSP 的转台伺服控制的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [3] 孙国岐. 电液仿真转台的控制系統研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [4] LIU Y G, ZHANG H Z, HU H, et al. Design and finite element analysis of large target tracking turntable[C]//IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016. doi:10.1109/CGNCC.2016.7829105.
- [5] 杨磊. 高精度摆动扫描技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [6] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4):559-576.
- [7] 航空航天部 303 所. GJB1801-1993 惯性技术测试设备主要性能试验方法[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,1993.