

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.07

单轴测试转台控制系统设计

任海燕¹, 金挺², 董青华¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310013)

摘要: 以单轴测试转台系统为研究对象, 依据系统功能和性能的技术指标要求, 确定系统的总体控制方案, 并进行关键元部件的选配, 建立相关的数学模型; 同时针对系统动态测试要求, 采用频域特性法对系统进行校正, 设计 PID 控制器。经过 MATLAB 仿真, 证明了控制算法的有效性, 同时通过在实际工程中的调试, 系统位置定位误差范围在 $-2'' \sim 2''$ 之间, 速率准确度及平稳性不低于 5×10^{-3} , 工作频带 10 Hz 且幅值误差小于 $\pm 10\%$, 使系统满足指标要求, 达到预期的控制效果。

关键词: 单轴测试转台; 数学模型; PID 控制器**中图分类号:** TB93; TP273**文献标识码:** A**文章编号:** 1674-5795(2019)02-0030-05

Design of Single Axis Testing Turntable Control System

REN Haiyan¹, JIN Ting², DONG Qinghua¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Measurement Science Research Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: In this paper, taking the single-axis test turntable system as the research object, the overall control scheme of the system is determined according to the technical requirements of the system function and performance, the key components are selected and matched, and the relevant mathematical model is established. At the same time, according to the dynamic test requirements of the system, the frequency domain characteristic method is used to correct the system and design the PID controller. The effectiveness of the control algorithm is proved by MATLAB simulation. At the same time, through the debugging in practical engineering, the positioning accuracy is not more than $2''$, and the speed accuracy and stability are not more than 5×10^{-3} . The operating frequency band is 10Hz and the amplitude error is less than 10%. This makes the system meet the requirements of the index and achieve the desired control effect.

Key words: single-axis test turntable; mathematical model; PID controller

0 引言

惯性测试设备的发展制约着惯性制导的准确度, 为满足更复杂的测试要求, 惯性测试设备在不断提高准确度的同时, 也应适应不同的测试需求。单轴测试转台系统主要用于飞控系统模拟飞行试验, 包括速率传感器的速率标定及惯性产品的摇摆测试, 本系统对位置准确度、速率准确度及平稳性以及动态性能都有着较高要求, 因此该转台的控制系统设计方案尤为重要。本文针对项目要求, 确定总体控制方案, 并通过关键元部件的选配, 建立转台模型, 完成系统控制器的设计与仿真, 进而满足单轴测试转台的指标要求。

1 单轴测试转台控制系统总体设计方案

1.1 主要技术指标

主要技术指标有以下六个: 台面直径为 450 mm;

可驱动的负载重量大于 12 kg; 角位置定位误差范围在 $-2'' \sim 2''$ 之间; 角速率准确度及平稳性, 当 $\omega < 1^\circ/\text{s}$ 时, 不低于 5×10^{-3} , 当 $1^\circ/\text{s} \leq \omega < 10^\circ/\text{s}$ 时, 不低于 5×10^{-4} , 当 $\omega \geq 10^\circ/\text{s}$ 时, 不低于 5×10^{-5} ; 转台系统工作频带为 10 Hz, 输入正弦信号, 幅值 $\pm 0.2^\circ$, 其中幅频误差 $|\Delta A/A|$ 小于 10%; 最大角加速度为 $800^\circ/\text{s}^2$ 。

1.2 控制系统总体设计方案

单轴测试转台主要包括机械台体、控制柜、计算机系统。机械台体采用立轴台面式结构, 负责用来安装负载及进行回转运动。控制柜包括控制系统、计算机接口电路等, 计算机系统则由工控机、显示器等组成, 根据给定的位置、速度指令, 由计算机生成实时控制作用于功率放大器, 并产生相应的控制信号, 经功率驱动后控制电机旋转, 编码器反馈位置信号, 实现单轴测试转台位置或速率的闭环控制。控制系统组

成如图 1 所示。

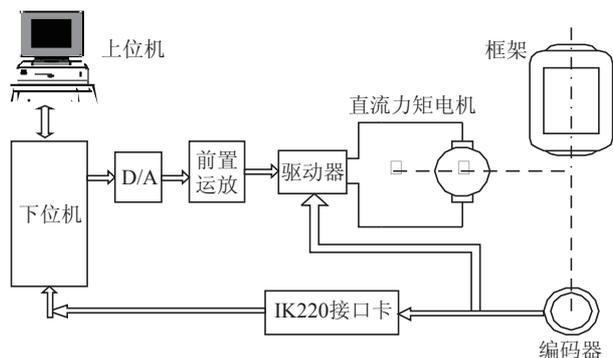


图 1 控制系统组成框图

单轴测试转台控制系统采用基于集散式控制系统 (DCS) 机制的上、下位机计算机控制系统。上位机主要实现用户操作指令的输入, 并根据输入指令与下位机进行实时通讯, 从而对单轴测试转台系统进行操作, 同时将采集的位置等数据降采样实时显示, 并绘制位置及速率曲线。下位机是单轴测试转台系统的直接控制级, 构成单轴测试转台独立的伺服控制回路, 完成系统控制律的计算和控制量的输出, 并完成与上位机的基于共享内存的实时通讯机制。控制系统原理结构如图 2 所示。

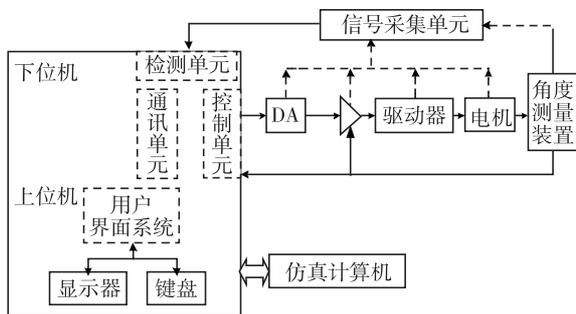


图 2 控制系统原理结构图

1.3 控制系统主要元部件选配

1) 驱动电机

经过综合考虑本单轴测试转台准确度、控制系统、负载、环境因素、安装条件等方面的要求, 采用直流力矩电机驱动, 将电机与轴系同轴连接。该连接方式由于不使用齿轮传动啮合, 不会受到齿轮传动的啮合间隙对系统稳定性的影响, 可以提高其控制准确度和动态性能, 同时不需要在电控设置时添加控制算法予以补偿。根据单轴测试转台结构设计, 估算最大负载下整个轴系的转动惯量, 按最大角加速度 $800^{\circ}/s^2$ 选择电机参数, 如表 1 所示。

表 1 直流力矩电机主要技术参数

序号	规格	参数	序号	规格	参数
1	供电电压	130 V	6	连续堵转电流	3.6 A
2	连续堵转力矩	$\geq 25 \text{ N}\cdot\text{m}$	7	峰值堵转电流	9.5 A
3	峰值堵转力矩	$\geq 65 \text{ N}\cdot\text{m}$	8	电枢电阻	9.3 Ω
4	最高空载转速	180 r/min	9	电枢电感	23 mH
5	转子重量	6.5 kg	10	定子重量	7.5 kg

2) 测角元件

单轴测试转台控制系统为闭环系统, 通过角位置反馈对系统误差进行修正, 因此反馈元件的测量准确度对系统的准确度有着很大的影响。角位置检测是单轴测试转台系统设计的关键环节之一, 决定了整个系统检测部分的准确度。常用的测角元件有感应同步器、光栅编码器和旋转变压器。由技术指标角位置准确度、速率准确度、最低平稳角速度等要求, 同时考虑确定选用德国某公司的某型绝对对式光栅编码器, 该码盘性能优良且可靠性高, 系统准确度误差范围在 $-2'' \sim 2''$ 之间。

3) 功率放大器

由于单轴测试转台系统采用直流力矩电机作为驱动元件, 并且频带宽且功率低, 所以功率放大器选用线性直流放大器, 该类放大器线性度好、频带宽, 抗干扰能力强。

2 单轴测试转台系统模型建立

该单轴转台要求定位准确度高且频带宽, 且在实现控制的前提下为简化控制器的设计, 因此采用位置环和速率环双闭环控制结构^[1]。光电编码器得到的位置信号与计算机产生的指令信号进行比较后, 经过数字化处理后由 D/A 产生模拟信号进入功率驱动回路, 驱动电机带动转台运动, 从而构成整个系统的位置闭环, 控制系统实时采集的位置信号通过微分得到速率信号, 构成速率闭环。

单轴测试转台系统中控制对象包含 D/A、功率放大器、电机、负载、位置传感器及测量装置等, 其中简化的开环控制对象模型如图 3 所示, 系统闭环传递函数框图如图 4 所示, 其中, $G(s)$ 为控制对象传递函数, $G_1(s)$, $G_2(s)$ 分别代表位置环控制器和速率环控制器的传递函数, $H(s)$ 为速率反馈传递函数。

本转台采用的直流力矩电机数学模型与直流电机相同^[2], 由直流电机电势平衡方程^[3]得

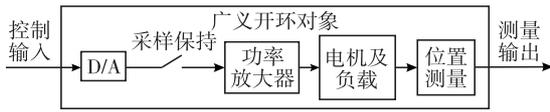


图3 转台开环控制对象模型

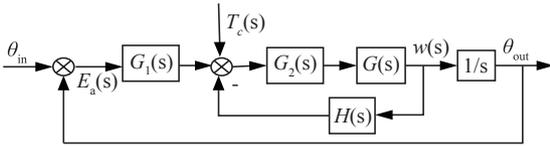


图4 转台系统闭环传递函数框图

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

$$E_a = k_e w \quad (2)$$

式中: U_a 为电机控制电压; R_a 为电枢电阻; L_a 为电枢电感; I_a 为电枢电流; E_a 为感应电动势; k_e 为反电势系数; w 为负载角速率。

由直流电机转矩平衡方程^[3]得

$$T_e = J \frac{dw}{dt} + T_c \quad (3)$$

$$T_e = k_i I_a \quad (4)$$

式中: T_e 为电机输出力矩; J 为电机转动惯量; T_c 为干扰转矩; k_i 为电机力矩系数。

将式(1)~式(4)分别进行拉普拉斯变换,得

$$\begin{cases} I_a(s) = \frac{1}{L_a(s) + R_a} (U_a(s) - E_a(s)) \\ E_a(s) = k_e w(s) \\ w(s) = \frac{1}{Js} (T_e(s) - T_c(s)) \\ T_e(s) = k_i I_a(s) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)得到电机及负载的模型如图5所示。

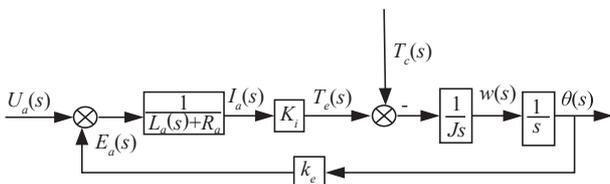


图5 直流电机及负载模型方框图

令 $T_c = 0$, 则直流电机及负载的传递函数为

$$\frac{W(s)}{U_a(s)} = \frac{k_e^{-1}}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (6)$$

通常 $\tau_m > 10 \tau_e$, 所以

$$\frac{W(s)}{U_a(s)} = \frac{k_e^{-1}}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)} \quad (7)$$

式中: $\tau_m = \frac{R_a J}{k_e k_i}$; $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$ 。

电机参数得到电机及负载的模型为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{W(s)}{U_a(s)} = \frac{k_e^{-1}}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)} \\ &= \frac{0.2882}{(0.0127 s + 1)(0.0025 s + 1)} \end{aligned} \quad (8)$$

由于系统的频率带宽远远小于系统采样频率, 因而同系统时间常数相比, D/A 环节和功放环节的时间常数非常小, 可以忽略其影响, 传感器测量电路的动态过程一般很快, 也可以忽略其影响。

3 单轴测试转台控制算法设计及仿真

单轴测试转台采用速率位置双闭环控制系统, 将速率环校正为期望特性后, 根据性能要求设计位置环控制器, 实现速率位置双闭环控制系统。

由式(8)得速率环被控对象模型为

$$\begin{aligned} \frac{W(s)}{U_a(s)} &= \frac{k_e^{-1}}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)} \\ &= \frac{0.2882}{(0.0127 s + 1)(0.0025 s + 1)} \end{aligned}$$

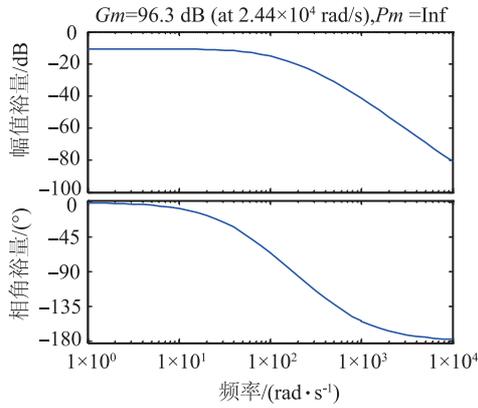
系统工作频带为 10 Hz, 则角频率为 62.8 rad/s, 故校正后系统的带宽频率应大于 62.8 rad/s。由于通常具有一对主导复数极点的系统, 其开环剪切频率大于带宽频率, 故设计校正后系统的开环剪切频率为 65 rad/s。为保证速率环的响应速度, 应使速率环的开环剪切频率远大于位置环的开环剪切频率^[4], 即速率环开环剪切频率设计为 350 rad/s, 相角裕量为 50°, 幅值裕量大于 10 dB, 最大超调为 10%。

速率环校正前, 单轴测试转台开环传递函数的伯德图如图6(a)所示, 其闭环阶跃响应曲线如图6(b)所示^[5]。从图中可看出, 速率环开环频带宽度不符合要求, 阶跃响应误差大, 且调整时间长。

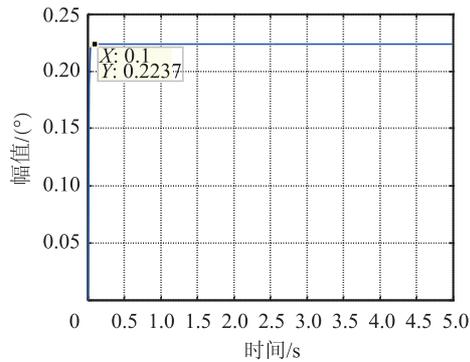
为提高稳态误差, 增强抗干扰能力, 需要提高速率环的开环增益; 同时为减小幅值误差, 需得到较高的相角裕量, 速率环设计采用串联滞后校正环节校正^[6], 得到速率环校正环节为

$$G_2(s) = \frac{115(0.0239 s + 1)}{(0.1228 s + 1)} \quad (9)$$

校正后的速率环开环传递函数的伯德图如图7(a)所示, 其闭环阶跃响应曲线如图7(b)所示。由图7可知, 速率环开环相角裕量为 54.4°, 开环剪切频率为

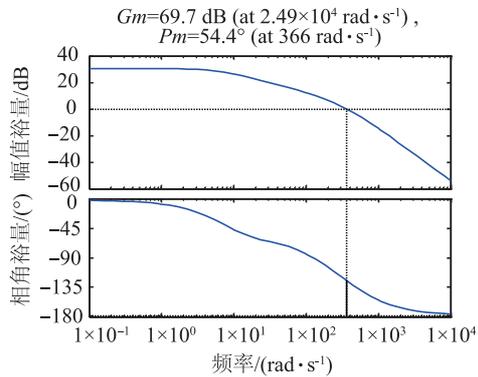


(a) 开环传递函数的伯德图

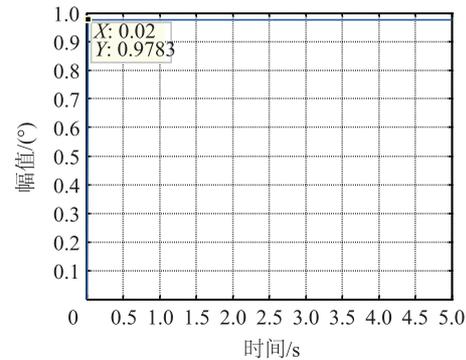


(b) 闭环阶跃响应曲线

图6 校正前速率环图



(a) 开环传递函数的伯德图



(b) 闭环阶跃响应曲线

图7 校正后速率环图

366 rad/s, 速率环闭环阶跃响应最终幅值误差为 0.023, 响应时间为 0.02 s, 仿真结果满足设计要求。

由系统性能指标要求设计位置闭环控制器, 位置闭环采用 PID 控制器控制^[7-9]。由位置定位准确度要求得到稳态准确度为 5×10^{-4} 。由式(8)和式(9)得, 系统速率闭环传递函数为

$$G'(s) = \frac{0.7921s + 33.143}{0.0000039s^3 + 0.0019s^2 + 0.9301s + 34.143} \quad (10)$$

由于位置环采用 PID 控制器, 故系统开环传递函数为

$$G_k(s) = G_1(s) * G'(s) * \frac{1}{s} \quad (11)$$

其中 PID 控制器为

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (12)$$

设计 PID 控制器采用试凑法, 利用 MATLAB 的 SIMULINK 工具进行参数整定, 选取 PID 控制器参数 $K_p = 150$, $K_i = 200$, $K_d = 0.1$, 仿真模型如图 8 所示。输入幅值 0.2° , 频率为 10 Hz 的正弦信号, 此时对应角加速度为 $800^\circ/s^2$, 系统输出如图 9 所示, 幅值误差为 6%。系统闭环阶跃响应曲线如图 10 所示, 阶跃响应时间约为 0.03 s, 误差终值小于 5×10^{-4} 。

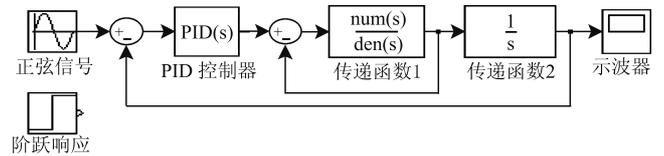


图8 系统闭环仿真模型图

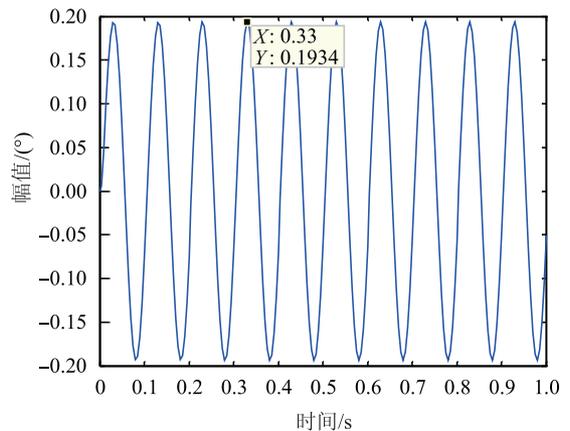


图9 系统的正弦信号输出图

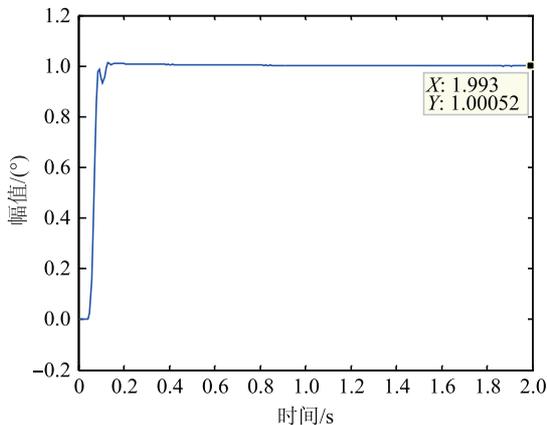


图 10 系统闭环阶跃响应曲线

4 单轴测试转台控制系统测试结果

表 2 所示为速率准确度及平稳性测试结果，表 3 所示为输入幅值 0.2° ，频带为 10 Hz 正弦信号的频率响应。

表 2 速率准确度及平稳性测试结果

速率/ $(^\circ)\cdot s^{-1}$	准确度	平稳性
200	1.19×10^{-5}	1.74×10^{-7}
100	1.22×10^{-5}	2.98×10^{-7}
10	1.21×10^{-5}	2.64×10^{-7}
1	2.00×10^{-5}	3.70×10^{-4}
0.1	6.30×10^{-4}	2.20×10^{-3}

从表 2 结果可知，速率准确度及平稳性均能满足 5×10^{-3} 要求。由于幅值误差要求小于 10%，即要求 dB 值大于 -0.9，小于 0.8。从表 3 中可知，频带 10 Hz 内均能满足要求，且当输入幅值 0.2° ，频率为 10 Hz 的正弦信号，实现了最大角加速度 $800^\circ/s^2$ 的要求。

表 3 系统工作频带频率响应

频率/Hz	幅值误差/dB	频率/Hz	幅值误差/dB
1	-0.0243	6	0.0325
2	-0.0179	7	0.0532
3	-0.0093	8	0.0777
4	0.0018	9	0.1056
5	0.0157	10	0.1367

5 结语

针对项目提出的位置、速率性能要求，以及较高的动态测试指标，确定总体控制方案，并通过关键元件的选配，建立转台模型。本系统采用频域特性法校正，并设计 PID 控制器满足测试转台的指标要求，该单轴测试转台控制系统的研制，实现了速率传感器的速率标定及惯性产品的摇摆测试，为飞控系统模拟飞行试验提供了有力的保障。

参考文献

- [1] Sato K, Nakamoto K, Shimokohbe A. Practical Control of Precision Positioning Mechanism with Friction [J]. Precision Engineering, 2004, 28(4): 426 - 434.
- [2] 梅晓榕, 柏桂珍, 张卯瑞. 自动控制元件及线路 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 255 - 261.
- [3] 张晓江, 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 李醇铤. 三轴电控转台的自适应控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算与仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 夏德铃, 翁贻方. 自动控制原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 李子超. 单轴测试转台控制系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [8] 蔡刚刚. 单轴转台伺服控制系统电路设计 [J]. 电子设计工程, 2011, 19(18): 145 - 147.
- [9] 熊霞元, 程亚静, 李杨, 等. 大型单轴转台两种轴系结构的有限元分析 [J]. 航空精密制造技术, 2012, 48(4): 48 - 50.

收稿日期: 2018 - 11 - 20

作者简介

任海燕 (1991 -), 女, 助理工程师, 主要研究方向为惯性测试设备开发。

