

# 某转台伺服系统方案设计

孙晓光

北京理工大学机电工程学院 14 教研室 100081  
联系电话: 010-68912419 E-mail: sun-xg@263.net

摘要: 本文讨论了针对某陀螺测试而设计的实验转台系统。根据系统的设计指标, 给出伺服驱动系统的总体结构和设计方案。并介绍了该系统软件的主要功能。

关键词: 转台; 控制系统; PID 控制

## The design of a turntable's servo system

Sun Xiaoguang

Department of mechatronics Engineering  
Beijing Institute of Technology 100081  
E-mail:sun-xg@263.net

Abstract: The design of the turntable system for testing a gyro is discussed in this paper. Basing on design aim, the structure and project of the servo system are given. The important function of the software for the system is also introduced.

Key words: Turntable; Control system; PID Controller

### 引言

测试转台是一类复杂的精密机电设备, 主要用于惯性平台及惯性仪表的研制、测试和鉴定, 是保证惯性导航系统精度的重要设备之一。转台的核心部分是控制系统, 计算机技术的发展使得复杂控制算法的实现成为可能, 数字式控制器逐渐取代原有的模拟网络控制器, 实现高的位置精度和跟踪速度。

### 1 转台总体方案设计

#### 1.1 性能要求

该转台是根据某陀螺的测试需要而研制、开发的产品。该转台是单轴电动转台, 能够实现 360° 回转; 给定幅值和频率正弦摆动。主要性能指标: 最大角速度 30°/s; 最低平滑角速度 0.1°/s; 最大角角加速度 400°/s<sup>2</sup>; 位置精度 ±0.1°; ±3°, 3Hz 正弦摆动时,  $\Delta A/A < 3\%$   $\Delta \Phi < 10''$ 。典型负载: 质量 2kg; 转动惯量 0.02kgm<sup>2</sup>

#### 1.2 总体方案

转台的驱动元件通常有电动机和液压马达, 由于该转台的负载转动惯量相对较小, 所以选择了电动机作为驱动元件。转台的低速运行性能要求较高, 如果选择高速电动机, 则需要连接减速器, 这样减速器齿轮的间隙会影响系统的线性度。而直流力矩电机是一种低转速、大力矩的直流电机, 可以在堵转状态下长期工作, 可以直接驱动低速负载, 具有转速和转矩

波动小,调节特性和机械特性的线性度好等优点,适合于高精度的位置伺服和低速控制系统。所以该转台根据设计指标选择了某型号稀土永磁直流力矩电机作为驱动元件。

控制回路的实现方式可以是模拟方式或数字方式,本转台采用数-模混合控制方式,其中内反馈是连续式的速度控制回路,采用模拟方式实现,这样有利于系统刚度的提高和频带的拓宽,起到了抑制干扰的作用。外回路是用数字方式实现的位置回路,保证转台的位置精度。速度回路选用测速电机作为反馈元件,由于速度回路的频带、精度很难靠其回路本身实现,所以测速元件可以选择精度不太高而可靠性高的直流测速电机。位置传感器选用精度为14位的光电编码器。这样,既降低成本,又可保证易于工程实现。控制回路的结构图:

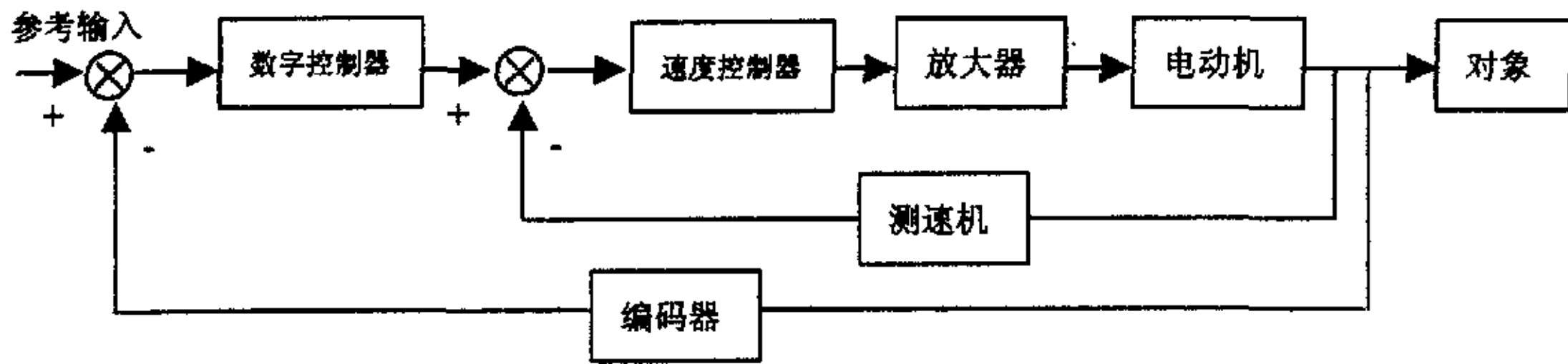


图1 双反馈计算机伺服系统

数字控制器选用标准的、功能强大的、可靠性高的PC/104嵌入式可编程控制器。它具有尺寸小、功耗低、宽温特性,以及一系列针对嵌入式应用的功能扩展,其功能的模块化也为系统以后的维护和升级带来方便。可采用高级语言编程,只需再配备输入/输出接口板,即可组成数字控制器。

### 1.3 直流电动机转矩、转速控制

该系统采用PWM功放的直流电动机调速系统。它由两个环路组成:电流环和速度环。内环为电流环,由电流控制器、PWM功放(包括三角波发生器、脉冲调制电路、PWM信号延迟电路和H桥式功率电路)、直流电动机和电流负反馈电路组成。其主要作用是通过调节电枢电流来控制电动机的转矩。外环为速度环,由速度控制器、电流环、永磁直流测速发电机组成。直流测速发电机与电动机同轴连接,它的直流反馈电压与参考输入的速度电压比较后,差值送给速度控制器。

## 2 系统性能分析

在合适的控制条件下,速度环的传递函数可表示如下:

$$\theta_o(s) = \frac{1/K_f}{s(T'_m s + 1)} \left[ U_v(s) - \frac{R_a}{K_v K_t} T_d(s) \right] \quad (1)$$

式中符号定义如下:

- $\theta_o$ ——电动机输出转角;
- $U_v$ ——速度控制电压;
- $T_d$ ——负载阻转矩与电动机摩擦阻转矩之和;

$T'_m = T_m / K_{vo}$ , 其中,  $T_m = \frac{R_a J}{K_e K_t}$  为电动机的机电时间常数,  $K_{vo} = \frac{K_v K_f}{K_e}$  为速度环开

环增益;

$R_a$ ——电动机电枢回路电阻；  
 $J$ ——折合到电动机轴上的转动惯量；  
 $K_e$ ——电动机的反电动势系数；  
 $K_t$ ——电动机电磁转矩系数；  
 $K_v$ ——速度控制器增益；  
 $K_f$ ——速度负反馈系数。

设参考输入  $\theta_i(s)$ ，位置控制器的传递函数  $G_c(s)$ ，则位置环的传递函数方框图如下：

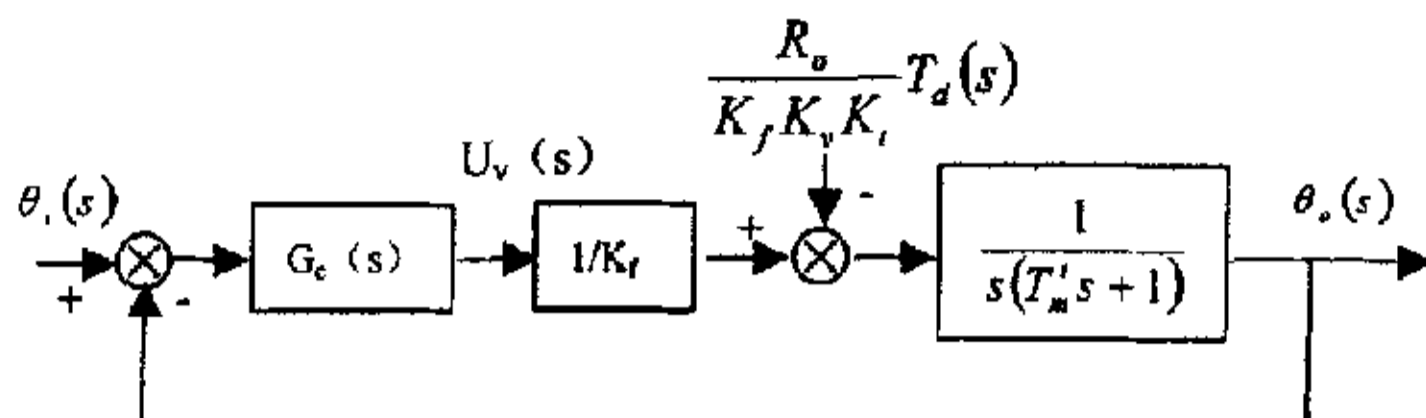


图2 伺服系统位置环传递函数方框图

位置环的输入输出关系：

$$\theta_o(s) = \frac{G_c(s)/K_f}{s(T'_m s + 1) + G_c(s)/K_f} \left[ \theta_i(s) - \frac{R_a}{K_v K_t G_c(s)} T_d(s) \right] \quad (2)$$

式中方括号前面的式子为系统的闭环传递函数  $T(s)$ ，即

$$T(s) = \frac{G_c(s)/K_f}{s(T'_m s + 1) + G_c(s)/K_f} \quad (3)$$

最简单的位置控制器是比例控制器，即  $G_c(s) = K_p$ ，这时系统是一个二阶系统，只要  $K_p$  大于零，系统总是稳定的。

对于稳定的单位反馈系统，此时系统的静态误差为：

$$\theta_{\text{ess}} = \lim_{s \rightarrow 0} s \theta_e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [1 - T(s)] s \theta_i(s) \quad (4)$$

代入(3)式和  $G_c(s) = K_p$ ，得

$$\theta_{\text{ess}} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(T'_m s + 1)s}{T'_m s^2 + s + K_p/K_f} s \theta_i(s) \quad (5)$$

当输入为单位阶跃  $\theta_i(s) = 1/s$  时，静态误差  $\theta_{\text{ess}} = 0$ ；当输入为单位斜坡  $\theta_i(s) = 1/s^2$  时，静态误差  $\theta_{\text{ess}} = K_f/K_p$ ；当输入为单位抛物线  $\theta_i(s) = 1/s^3$  时，静态误差  $\theta_{\text{ess}} = \infty$ 。由此可以看出伺服系统的位置控制器采用 P 控制器存在速度跟踪误差，为克服这个问题，考虑采用 PI 控制器。此时整个伺服系统实际上已经采用了 PI-D 控制器，因为 D 控制是由速度负反

馈实现的。此时将纯增益  $K_p$  改为  $K_p \left( 1 + \frac{1}{Ts} \right)$ 。这样，系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{(K_p / K_f)(\tau s + 1)}{\tau s^2 (T_m' s + 1)} \quad (6)$$

显然，这是一个 II 型系统。它对参考输入做到二阶无静态误差，对负载转矩做到一阶无静态误差，系统的静态精度得到明显改善。但是因为积分校正只改变低频特性，对于中频和高频基本不起作用，所以积分校正不会改变系统的动态特性。

### 3 系统软件主要功能

按系统的工作要求，软件工程应能实现以下主要功能：

(1) 自检功能：对系统进行自检，并显示自检结果。自检完成后，为防止误操作，锁定部分键盘。

(2) 工作状态设置：工作状态（位置/速度）选择，位置值、速率值的设定、限位数值的设定。

(3) 数据采集：转台位置的实时采集。

(4) 信号发生器：产生正弦、三角波和方波，幅值、频率可调。

(5) 台体位置超过软限位数值时，声音报警。

(6) 台体回零：选择“回零”后，台体能以低速回转至零位。

### 4 结论

按该方案构建的转台系统，具有如下特点：1 控制采用模拟、数字混合调节；2 采用速度和位置双反馈回路形式；3 采用直流力矩电机直接驱动；4 系统有故障自动检测和保护功能。该系统既能充分利用模拟环路扩展带宽、提高系统抗干扰能力，又能利用计算机控制实现各种复杂算法。实践检验该方案能满足设计要求。

### 参考文献

- [1] 高钟毓. 机电控制工程. 清华大学出版社, 2002
- [2] 李裕山等. 大负载电动仿真转台的总体技术分析. 哈尔滨工业大学学报. 1997.6. 94~96
- [3] 曾鸣等. 伺服转台高精度控制系统带宽设计的探讨. 中国惯性技术学报. 2001.6. 55~59
- [4] 吴云洁等. 三轴电动飞行转台控制系统工程设计与实现. 系统仿真学报. 2001.1. 97~99