

回路的一部分。这个回路减小力矩电机和轴承摩擦的非线性影响，同时削减转台的机电时间常数。离散环节 $D'(z)$ 和 $B(z)$ 用单板机实现。

图2是图1的简化图。由图可知，转台系统是由单板计算机、D/A转换器、A/D转换器、PI模拟校正回路和被控对象组成的。

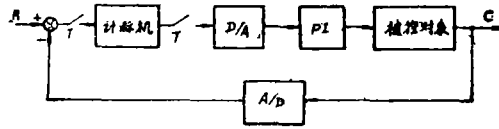


图2 图1的简化图

三、系统设计

1. 技术指标

- ① 定位精度 $\leq 10''$
- ② 输入最大速度 $\Omega_{max} = 50^\circ/s$
- ③ 输入最大加速度 $\epsilon_{max} = 2^\circ/s^2$
- ④ 最大跟踪误差 $\theta_{max} \leq 1.2'$
- ⑤ 速率精度 在 $0.001^\circ/s$ 时，速率波动 $\Delta \leq 10\%$ ，在 $50^\circ/s$ 时，速率波动 $\Delta \leq 4\%$
- ⑥ 低速跟踪精度 在振幅 $A = 1^\circ$ 、周期 $T = 10s$ 的三角波输入时，跟踪误差 $\leq 10''$ 。

2. 所选主要元件的参数

- ① 执行元件—直流力矩电机320LYR3，其峰值堵转力矩为 $5kg \cdot M$ 。
- ② 测速元件—直流测速机225CYD03，其比电势为 $3.5V/rpm$ ，线性度 $\leq 0.4\%$ 。
- ③ 角位置传感器—增量式圆光栅和测角仪JCO5。光栅盘刻了 32400 条刻线，经过电子学40 细分后测角仪的分辨率为 $1''$ 。光栅盘转动一周所对应的角度为 $360^\circ = 3600'' \times 360 = 1296000''$ ，即输出1296000个脉冲，这相当于等效二进制数的位数 $n = 21$ 位。

④ 控制器—TP801单板计算机（8 位机），它有Z80—CPU、PIO、CTC，有4K容量，晶振频率为1.9968MC。

⑤ 输出元件—12位数模转换器DAC1210，它可以与计算机兼容。

3. 系统设计

我们根据上述指标要求和所选主要元件的基础上，进行转台的单板计算机控制系统的的设计。系统按一阶无差系统考虑，采用零阶保持器，并忽略电平量化的影响。

控制系统的工作方式将采用双模控制，如图3所示。当误差 $|E_1|$ 大于线性区时用开关控制算法，使系统以最大速率运转；当 $|E_1|$ 小于线性区时用控制算法，以提高稳态精度。

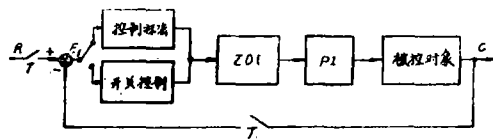


图3 双模控制系统方框图

适当选择线性区则是保证系统正常工作的重要条件。一般，线性区可用下面的方法计算^[3]：

$$\theta_0 = (3 \sim 6) \Omega_{max} T \quad (1)$$

由式(1)可知, 采样周期 T 越短, 则线性区 θ_0 就越窄。设 $\Omega_{max} = 50^\circ/s$, $T = 5ms$, 根据式(1), 取线性区 $\theta_0 = 2048'' = \pm 0.569^\circ$, DAC1210是12位, 参考电压选定为 $+10V$, 一个数码对应的电压 $\delta = \frac{10V}{2^{12}-1} = \frac{1000mV}{2^{11}} = 4.89mV$, DAC 的输入码与输出电压之间的关系如图4所示。

被控对象的等效传递函数为

$$W_0(S) = \frac{K'}{S} \quad (2)$$

其中, $K' = 1.5^\circ/s \cdot V$

数字控制系统的低频区(在剪切频率 ω_0 的左边)的设计方法与连续系统完全一样, 故我们采用古典的频率法进行设计^[2]。假设计算机的传递系数为1, 那么光栅位置回路经过模拟校正后的开环传递函数为

$$W(S) = \frac{K_v(T_2S+1)}{S(T_1S+1)} \quad (3)$$

其对数频率特性如图5所示。

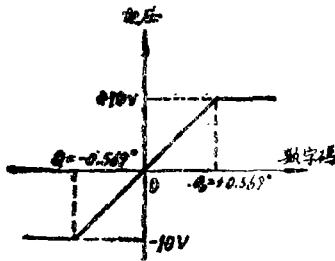


图4 DAC的数字码与输出电压之间的关系

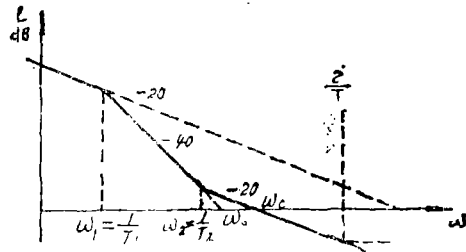


图5 光栅位置回路低频区开环对数频率特性

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} = \frac{\Omega_{max}}{\epsilon_{max}} = \frac{50}{2} = 25 \text{ s} \quad (4)$$

$$K_v = \sqrt{2} \frac{\Omega_{max}}{\theta_{max}} = \frac{1.4 \cdot 50 \cdot 60}{1.2} = 3600 \text{ 1/s} \quad (5)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\sqrt{2} \frac{\epsilon_{max}}{\theta_{max}}} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot 2 \cdot 60}{1.2}} = 12 \text{ 1/s} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{\frac{M-1}{M}} + \frac{1}{T_1}} = \frac{1}{12 \sqrt{1.3-1} + \frac{1}{25}} = 0.17 \text{ s} \quad (7)$$

校正网络的传递函数为

$$W_c(S) = \frac{K_c(T_2S+1)}{T_1S+1} \quad (T_1 > T_2) \quad (8)$$

其中, $K_c = 250$, 开环系统的剪切频率为

$$\omega_o = \frac{K_v \cdot T_2}{T_1} = \frac{3600 \cdot 0.17}{25} = 24 \text{ 1/s} \quad (9)$$

有源比例—积分校正网络如图 6 所示。

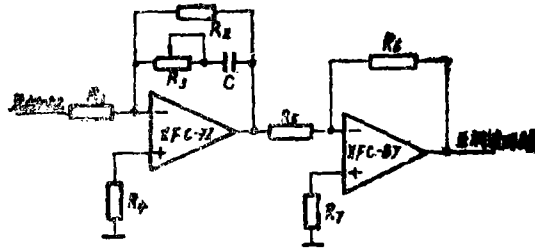


图 6 有源校正网络

其中,

$$K_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_6}{R_5} \quad T_1 = (R_2 + R_3)C \quad T_2 = R_3C$$

经过参数 K_o 、 T_1 和 T_2 调整之后, 应该使系统既满足跟踪精度要求, 又有良好的稳定性。为了减小零漂, 我们采用低漂移运算放大器 XFC—72 和高压运算放大器 XFC—87 组件。

根据上述要求, 调速回路的设计应能保证: 通频带大于 40Hz, 开环增益大于 20000, 阻尼系数 $\zeta \geq 0.8$ 。此外, 调速回路应采用电流负反馈, 以减小力矩波动。

为了防止采样控制系统在采样点之间输出相应的波动 (这种波动对系统的机械部分是不利的, 它造成系统误差, 增加功率损耗和机械磨损), 改善在数字系统中必需的精密机械环节的工作条件, 希望要求系统具有非周期过渡过程, 取系统的振荡指标 $M = 1.1 \sim 1.3$ 。

四、控 制 器

综合和设计一个计算机控制系统, 实际上就是如何按照预定的控制要求进行数字控制器的设计, 也就是求取数字计算机的控制算法或程序, 这种算法可用差分方程或脉冲传递函数的形式表达。

1. 控制器的数学模型

我们用 TTL 组件制作了数字控制器的模型 (用这个模型实现了系统的闭环, 工作正常), 其方框图如图 7 所示, 相应的等效结构图如图 8 所示^[1]。

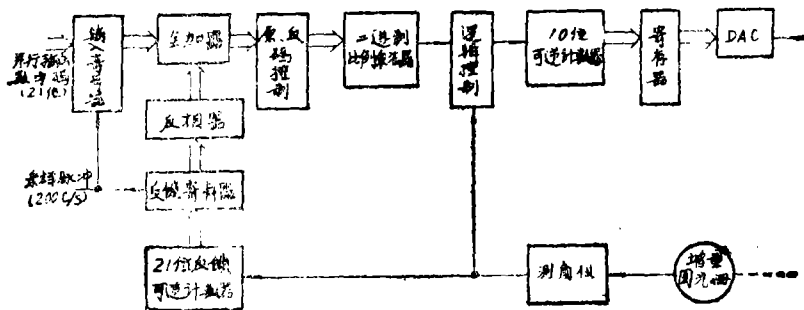


图 7 TTL 数字控制器方框图

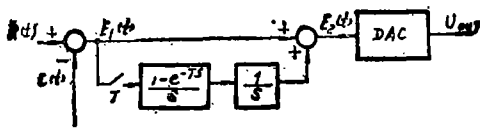


图8 数字控制器的等效结构图

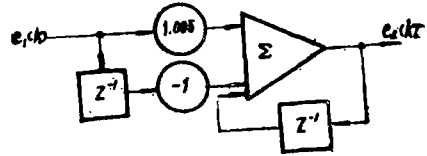


图9 计算机计算流程图

传递函数

$$D(S) = \frac{E_2(S)}{E_1(S)} = 1 + \frac{T}{S} \quad (10)$$

经过Z变换后, 得

$$D(Z) = \left(1 + \frac{T}{1 - Z^{-1}} \right) = \frac{1.005 - Z^{-1}}{1 - Z^{-1}} \quad (11)$$

其中, T 为采样周期。式(11)对应的差分方程为

$$e_2(k) = e_2(k-1) + 1.005e_1(k) - e_1(k-1) \quad (12)$$

由式(12)可得计算机的计算流程图, 如图9所示。在允许误差的条件下, 经过进一步简化后, 最后计算机要完成的控制算法是

$$e_2(k) = e_2(k-1) + e_1(k) - e_1(k-1) \quad (13)$$

$$e_1(k) = R(k) - C(k) \quad (14)$$

显然, 工作前需将 $e_2(k-1)$ 和 $e_1(k-1)$ 的初始值设置为零。

TP801 单板计算机是 8 位字长, 数的运算全部用二进制补码进行的。由于角位置传感器的位数为 $n = 21$ 位, 故在计算机内部都按三字节进行加减法运算。

在计算机控制系统的设计中, 采样周期 T 实际上是作为一个重要的参数影响着系统的特性。采样周期的选择主要受控制器运算时间和系统的动态品质指标的限制。因为我们转台系统中所给定的采样频率比较高 (比 $10\omega_c$ 大得多), 所以系统的特性就很接近于相应的连续系统。

2. 输入—输出接口 (I/O 接口)

单板计算机的输入—输出接口硬件连接方式如图10所示。由两组 21 位三态缓冲寄存器组成输入接口, 而把 DAC1210 作为输出接口, 它们构成并行 I/O 接口。因为转台系统是采样控制系统, 采样周期是固定的, 所以 CPU 与外设数据传送的方式是按采样信号同步工作的, 而且在中断方式 2 下进行工作。在输入时只给出 INIR 指令 (特别是对多字节输入方便), 而在输出时也只给出 OUT 指令就可以。这种工作方式的优点是程序简单, 硬件和软件很省。

单板计算机的中断、输入和输出的控制过程是: 当第一个采样脉冲到来的时候, 一方面在输入和反馈三态缓冲寄存器上分别把输入信号和反馈信号采样之后寄存下来等待输入, 另一方面把这个采样信号还送到 Z80—CTC 中去。CTC 在初始化时已设定为计数器工作方式, 将 CTC 的 ZCO 接到 PIO 的 \overline{ASTB} 端, 当计数器到预定数时, 由 CTC 给出 \overline{ASTB} 脉冲, 使 PIO 发出 \overline{INT} 信号, CPU 就响应中断并转入中断服务工作。CPU 先根据输入指令通过 PIO A 口把六个字节的全部数据采集进来, 且存入指定的内存单元中。在输出时, I_{ow} 控制信号分别与经地址译码器来的输出接口选片控制信号和传送控制信号相“与”之后产生 DAC1210 的选片信号和传送信号, 以控制输出。

衔接和输入输出等控制功能。输入程序和控制算法程序流程图如图13和14所示。

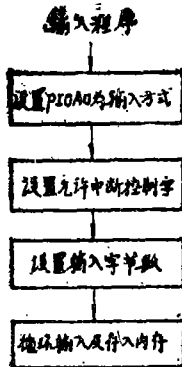


图13 输入程序流程图

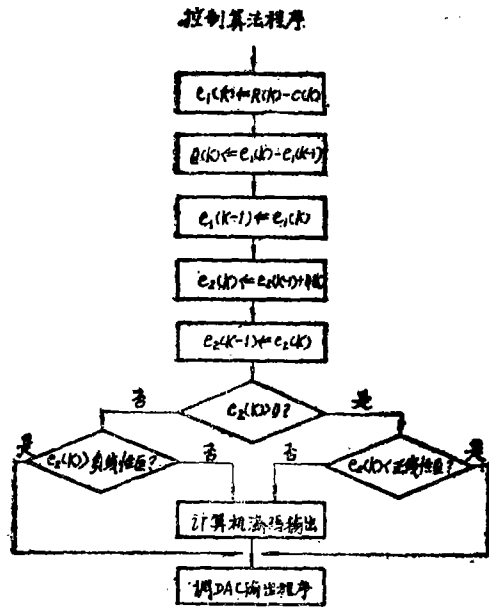


图14 控制算法程序流程图

程序开始运行首先初始化，然后当CTC发出中断请求时，CPU就响应并转入中断服务程序。中断服务程序结束后，通过中断返回，再等待发出中断请求。在一个采样周期中，实现一次输入数据、按算法计算控制量和输出控制量。信号从输入到输出的执行时间大约1ms左右。

六、性能测试

1. 定位精度和重复性：±3"，见表1、图15。

表 1

给定值	0°	0.5°	1°	2°	4°	5°	8°
实际值	0°0'01"	30'	1°	1°59'58"	3°59'59"	5°	8°
误差值	+1"	0	0	-2"	-1"	0	0
10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°
10°0'02"	20°	30°0'01"	40°0'02"	45°	50°	59°59'59"	70°
+2"	0	+1"	+2"	0	0	-1"	0
80°	90°	100°	135°	150°	180°	200°	250°
80°0'02"	90°	100°0'02"	135°0'01"	149°59'59"	180°0'01"	200°0'01"	250°
+2"	0	+2"	+1"	-1"	+1"	+1"	0

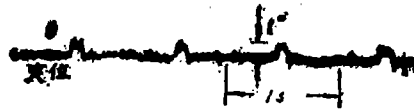


图15

2. 跟踪精度：在不同斜坡信号输入时跟踪误差，见表 2。

表 2

给定速率	0.001°/s	0.005°/s	0.05°/s	0.5°/s	5°/s	50°/s
最大跟踪误差	±1"	±1"	±2"	±2"	±6"	±40"

在 5°/s、2°/s² 的正弦输入时跟踪误差，见图 16。

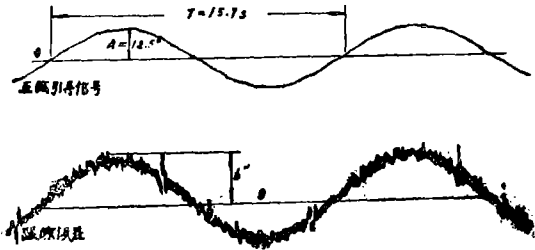


图16

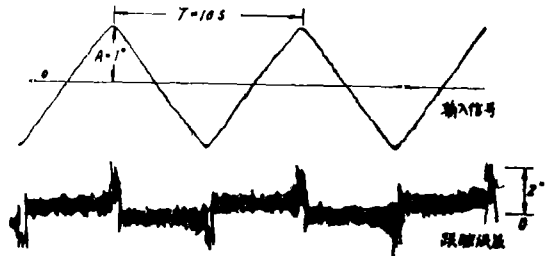


图17

在振幅 $A = 1^\circ$ 、周期 $T = 10s$ 的三角波输入时跟踪误差，见图 17。

3. 速率波动：见图 18 所示， $0.001^\circ/s$ 时速率波动，我们规定为 0.1° 间隔定时测角（取十次算术平均值）的平均速率 $\left(\frac{\theta}{T}\right)$ 的稳定性。利用有限差分法并考虑误差符号之后可得速率稳定性：

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{|\Delta\theta|}{\theta} + \frac{|\Delta T|}{T}$$

上式中等式的右边第一项为相对角度误差，第二项为相对时间误差。代入数据之后可得

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{3''}{360''} + \frac{0.03}{100} = 0.0084 + 0.0003 = 0.864\% < 3\%$$

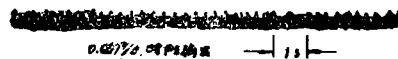


图18

4. 过渡过程：在不同位置阶跃下的误差记录，见图 19。

在不同斜坡信号阶跃下的误差记录，见图 20。

5. 采样频率与误差之间关系，见图 21。

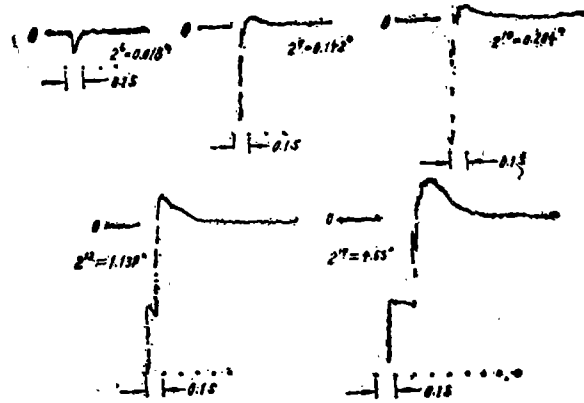


图19

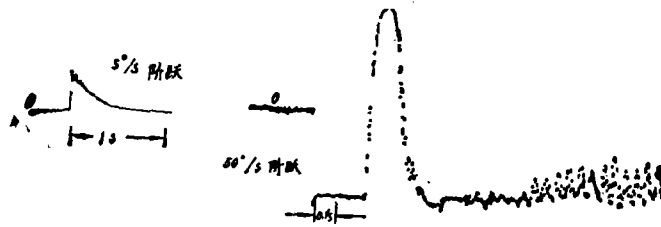


图20

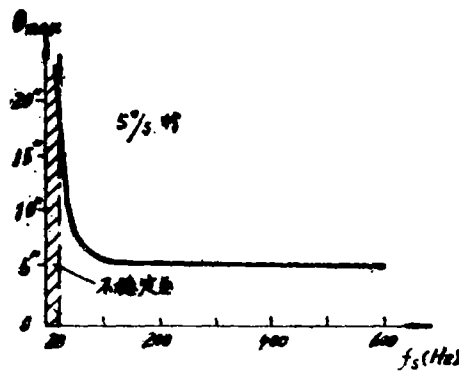


图21 采样频率 f_s 与稳态误差 θ_{max} 之间的关系曲线

七、结 语

高精度伺服转台的计算机控制系统的设计和实际调试过程表明，该系统设计合理，工作正常，所达到的精度高于原设计指标。

在 $0.001^\circ/s$ 低速下工作时，系统内的各种非线性因数明显地起作用。其中比较突出的因数是摩擦力矩的不均匀性和系统模拟部分的零漂。这一方面的详细内容请参看以后另一篇文章。

如果对系统要求更低速下工作，则可以采用空气轴承和高稳定高精度位置传感器，或者

采用其他比较先进的控制方案与结构。

在研制高精度伺服转台的单板计算机控制过程中，得到孙树仁、邢忠宝和李继勋同志的热情帮助，赵周伦同志对本文提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] G.C.Winston, Design of a Precise Servo Control System, Control Eng., 1970, 17, No.3
- [2] С.М.Федоров, Методы коррекции следящих систем с цифровыми вычислительными машинами, Энергетика и Автоматика, 1962, No.3
- [3] 李绍明、赵志卿, 无波纹数字式交流伺服系统的研究, 火控技术, 1981, No.1
- [4] 周明德编著, 微型计算机硬件软件及其应用, 清华大学出版社, 1983

Single Board Computer Control for a High Precision Servo Table

Quan Qilian Wang Caisheng

Abstract

This paper describes the design method of Single Board Computer Control System for a High precision servo table. The tested results of performance of the table are given.