

# 精密数控分度转台的控制系统设计

杨继森, 王文略, 郑方燕, 张天恒

(重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400050)

**摘要:** 融合了时栅传感器测量技术的高精度时栅分度转台, 在实际应用过程中出现了因定位精度高, 人工很难一次性准确分度定位。针对该问题, 利用高性价比的 ARM 嵌入式处理器, 设计开发了一套基于时栅分度转台的自动分度定位控制系统。该系统采用步进电机作为驱动装置, 利用转台中嵌入的高精度时栅角位移传感器的角位移测量数据作为反馈, 构成闭环控制, 采用分段控制、逐步逼近的控制算法, 达到高速、高精度分度定位的目的。实际应用表明: 该控制系统的分度定位精度达到  $\pm 2''$ 。

**关键词:** 时栅; ARM; 分度转台; 嵌入式; 闭环控制

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2010)07-0095-04

## Design of Control System for High Precision Time Grating NC Rotary Table

YANG Ji sen, WAN Wen lue, ZHENG Fang yan, ZHANG Tian heng

(Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment

Ministry of Education, Chongqing University of Technology Chongqing 400050, China)

**Abstract** The high precision time grating rotary table was used in the machining indexing. But it is generally difficult to use the time grating worktable to index accurately by turning the handwheel of rotary table in second scale, and it is necessary to adjust and index in the process. It has great influence on the work efficiency. For solving the problem, one time grating NC rotary table system was designed and developed with the high advanced embedded processor ARM. The step motor is the driving equipment, and the angular measuring data from the high precision time grating sensor embedded in the rotary table was used as the feed control information to construct one closed-loop control system. The control algorithm of segmentation control and successive approximation was used to index high precision and high speed in the closed-loop control system. The application confirms that the indexing precision of the control system reaches  $\pm 2''$ .

**Key words** time grating; ARM; index table; embedded; closed-loop control

### 0 引言

时栅位移传感器作为一种新型的绝对式角位移传感器, 采用了“用时间测空间”的时栅测量理论<sup>[1]</sup>, 成本低、测量精度高, 达到  $\pm 0.8''$ , 具有广泛应用前景。融合时栅角位移传感器为一体的时栅分度转台, 可以实现高精度分度定位。时栅分度转台在实际应用的过程中发现: 虽然时栅分度转台实现了数字化显示, 但是转动还是依靠转台本身的手轮进行转动定位, 工作效率不高。而且由于时栅分度转台的定位精度高(分辨率为  $0.2''$ , 精度达到  $\pm 1.2''$ ), 在人工定位过程中很不容易实现一次性精确地定位, 经常要反复多次, 严重影响了时栅分度转台的工作性能。因此, 研制一套时栅分度转台的自动分度定位控制系统具有十分重要的意义, 不仅可以提高时栅分度转台的工作性能, 而且可以进一步扩大其市场应用范围。

### 1 系统结构与控制模型

根据设计目标要求, 该控制系统的主要能够通过键盘输入运动方向、定位精度和转动角位移等控制指令, 使分度转台按照指令运动。分度转台中嵌入的时栅角位移传感器实时地检

测分度转台的绝对角位移, 并反馈给控制系统, 从而构成一个全闭环控制系统, 保证分度转台能够精确定位到指定的目标位置, 其控制原理与控制模型如图 1 所示。

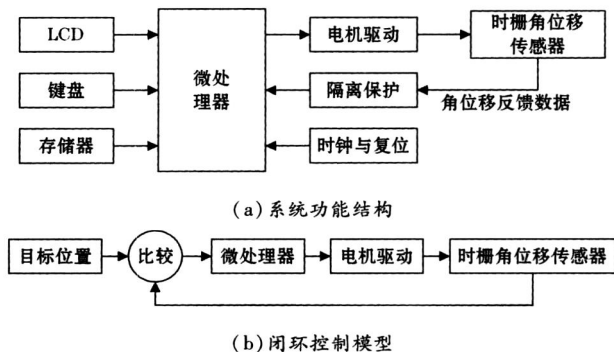


图 1 系统结构与控制模型

### 2 硬件电路设计

为了满足低功耗、智能化的设计要求, 整个系统以高性能 32 位嵌入式 ARM 处理器 LPC2138 为核心<sup>[2-3]</sup>, 设计了 LCD 驱动模块、电机驱动模块、键盘驱动模块、存储器模块和一个带光电隔离的 RS-232 串行接口模块, 如图 2 所示。

#### 2.1 LCD

显示选用 6.4 寸的真彩液晶产品, 分辨率为  $640 \times 480$  显

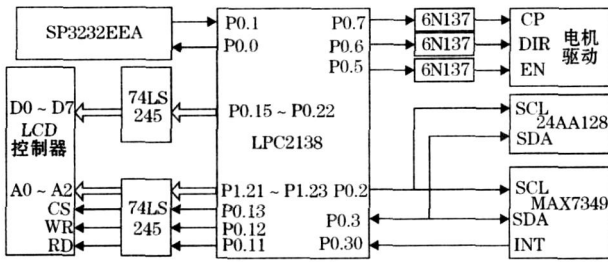


图 2 驱动电路

示颜色达到 256 色。微处理器通过 I/O 接口方式与液晶控制器相连, P0.15~ P0.22 作为数据线, P0.13 作为选通控制线, P0.11 和 P0.12 分别作为写信号与读信号控制线, P1.21~ P1.23 作为控制寄存器地址线。由于 LCD 控制器的工作电压为 +5V, 而微处理器的 I/O 引脚输出电平为 +3.3V, 因此用总线驱动芯片 74LS245 进行电平转换。显示缓存采用 SRAM, 将显示缓存配置为双层叠加显示模式。将不需要经常更新的背景内容放到底层, 而将需要实时更新的显示内容放到顶层。简化控制方式, 提高显示效率。

2.2 电机驱动

电机控制部分主要选择 34H S300DZ 二相混合步进电机和 SH-2H090M 二相混合驱动器。最大静转矩 6.0 N·m, 最大空载启动转速 240 r/min 电机控制方式有 2 种可选, 一种是 CP/DIR 方式, 另一种是 CW/CCW 方式。系统选用 CP/DIR 控制方式, 选用微处理器的单边沿脉宽调制输出 PWM2(P0.7) 作为驱动脉冲信号。P0.5 作为电机使能控制信号, P0.6 作为电机转动方向控制信号。由于电机驱动器为大功率输出器件, 为了减少其对主控元件的影响, 在微处理器与电机控制器之间采用高速光电隔离器 6N137 进行光电隔离。

2.3 其他电路模块

2.3.1 键盘

为了能够有效地抵抗工作现场的油污、水渍和灰尘等, 选用薄膜键盘作为输入装置。键盘主要分为数字键区、字母键区和特殊功能键区, 总共 34 个按键。采用行列式键盘的布局 (5 行 × 8 列)。为了减少微处理器扫描键盘的工作负担, 选用专用键盘扫描芯片 MAX7349, 微处理器的外部中断引脚 ENT3(P0.30) 与 MAX7349 的按键中断信号相连, 微处理器通过 I<sup>2</sup>C 接口读取键盘扫描值。

2.3.2 存储器

存储器主要用来保存控制系统的指令参数, 如电机转速、控制精度和分度参数等。考虑到微处理器自带 I<sup>2</sup>C 总线接口, 选用 I<sup>2</sup>C 总线接口的 EEPROM 芯片 24AA128 其存储容量为 128 KB 能够较好地满足系统的存储要求。微处理器通过 I<sup>2</sup>C 接收与之相连。

2.3.3 数据接收

微处理器通过串行接口 (UART0) 与分度转台进行数据传送, 采用 SP3232EEA 作为串行接口电平转换芯片, 连接微处理器的串行接口引脚 P0.0 和 P0.1。采用迈威科技的 RS-232 全信号串口无源隔离保护器作为隔离保护器, 提高系统的抗干扰

能力。

3 电机控制

由于步进电机的转动角位移与控制脉冲数成线性比例关系, 电机的转速与脉冲频率也成正比。因此, 可以利用微控制器的脉宽调制器 (PWM) 产生变频的驱动脉冲进行电机位移和速度的驱动控制。

3.1 脉冲当量与驱动脉冲数

所选步进电机的步距角为 1.8°, 经过驱动器 200 倍细分之后, 每个驱动器脉冲当量为  $P_D = 0.009°$ , 分度转台的蜗轮与蜗杆传动比  $Z = 180$ , 因此, 每个驱动脉冲当量  $\Delta P$  为:

$$\Delta P = P_D / Z = 0.00005° (0.18'')$$

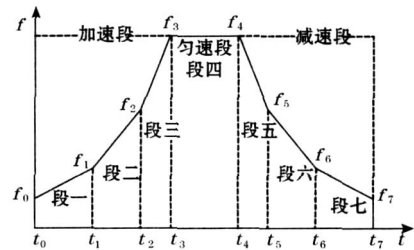
足够满足系统  $\pm 2''$  的分度精度要求。一次分度定位所输出的脉冲总数为

$$N = S / \Delta P$$

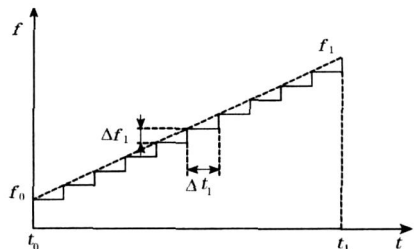
式中 S 为该次分度定位的驱动位移量。

3.2 分段式速度控制

由于步进电机具有启动转速较低, 随着转动速度的增加输出转矩下降的特点, 而且分度转台的启动转矩较大, 因此为了避免高速启动时发生堵转和高速突然停机发生惯性过冲的情况。对电机的驱动采用分段式速度控制, 主要分为加速段、匀速段和减速段 [4-5], 为了使电机快速而平稳地达到设定的最大工作转速, 对其中的加速段和减速段又采用三段式进行控制, 总共分为 7 个速度分段, 控制模型如图 3 所示。



(a) 分段式速度控制



(b) 局部放大

图 3 电机速度控制模型

图 3(a) 中,  $f_0$  为电机驱动脉冲的起始频率, 也是速度分段一的起始频率,  $f_1$  为速度分段一的结束频率, 也是速度分段二的起始频率。微处理器的脉宽调制器产生的驱动脉冲, 其宽度和占空比可以分别通过寄存器配置进行任意控制。对于三段式加速段或者减速段中的每一个速度分段都可以非常方便地采用阶梯式变频加速减速的控制方案。图 3(b) 是加速分段一的放大效果图,  $\Delta t_1$  是频率变换的周期,  $\Delta f_1$  是频率变化的增量。同理其他 6 个速度分段的参数如表 1 所示。

表 1 速度分段参数表

| 分段  | 起始频率  | 结束频率  | $\Delta t / \text{ms}$ | $\Delta f / \text{Hz}$ |
|-----|-------|-------|------------------------|------------------------|
|     | /Hz   | /Hz   |                        |                        |
| 分段一 | $f_0$ | $f_1$ | $\Delta t_1$           | $\Delta f_1$           |
| 分段二 | $f_1$ | $f_2$ | $\Delta t_2$           | $\Delta f_2$           |
| 分段三 | $f_2$ | $f_3$ | $\Delta t_3$           | $\Delta f_3$           |
| 分段四 | $f_3$ | $f_4$ | $\Delta t_4$           | $\Delta f_4$           |
| 分段五 | $f_4$ | $f_5$ | $\Delta t_5$           | $\Delta f_5$           |
| 分段六 | $f_5$ | $f_6$ | $\Delta t_6$           | $\Delta f_6$           |
| 分段七 | $f_6$ | $f_7$ | $\Delta t_7$           | $\Delta f_7$           |

3.3 脉冲计数与变速控制

步进电机转动的角位移与驱动脉冲数成线性比例关系, 准确地对驱动脉冲进行计数是精确分度定位的关键点, 利用微处理器自带的定时器定时对驱动脉冲累加计数是一种较为可行而实用的方法。

3.3.1 速度分段脉冲计数

为了简化控制方案, 加快计算速度, 采用对称式控制方案, 可以选取:

$$\begin{cases} f_0 = f_7, f_1 = f_6, f_2 = f_5, f_3 = f_4 \\ \Delta t_1 = \Delta t_7 = \Delta t_2 = \Delta t_6 = \Delta t_3 = \Delta t_5 = \Delta t \\ \Delta f_1 = -\Delta f_7, \Delta f_2 = -\Delta f_6, \Delta f_3 = -\Delta f_5 \end{cases} \quad (3)$$

结合驱动器技术手册和现场调试经验, 控制参数为

$$\begin{cases} f_0 = 50 \text{ Hz} \\ \Delta t = 20 \text{ ms} \\ \Delta f_1 = 50 \text{ Hz}, \Delta f_2 = 100 \text{ Hz} \\ \Delta f_3 = 200 \text{ Hz}, \Delta f_4 = 0 \text{ Hz} \end{cases} \quad (4)$$

而电机驱动脉冲的最大工作频率为

$$f_3 = \frac{n_{\max}}{60 \times \Delta P} \times 360 \quad (5)$$

式中  $n_{\max}$  为用户设定的电机最大工作转速。

为了兼顾电机驱动时间, 将分段驱动频率按 1: 2: 3 的原则进行分配, 则有

$$\begin{cases} f_1 = f_0 + \frac{f_3 - f_0}{6} \\ f_2 = f_0 + \frac{f_3 - f_0}{3} \end{cases} \quad (6)$$

根据式 (3) ~ 式 (6), 可以计算出完成速度分段一的加速过程所需要输出的驱动脉冲数为

$$N_1 = \sum_{i=0}^{n-1} (f_0 + i \times \Delta f_1) \times \Delta t_1 \quad (7)$$

式中  $n = \frac{f_1 - f_0}{\Delta f_1}$

同理可以计算出其他各速度分段的驱动脉冲数  $N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$  和  $N_7$  而匀速段的脉冲数为

$$N_4 = N - N_1 - N_2 - N_3 - N_5 - N_6 - N_7 \quad (8)$$

式中  $N$  为本次分度定位所需输出的脉冲总数, 由式 (2) 决定。

有了各速度分段的驱动脉冲数之后, 可以计算出各分段判断点的脉冲数为

$$M = \sum_{i=1}^n N_i \quad (n = 1, 2, \dots, 7) \quad (9)$$

3.3.2 变速控制

在定时器的中断服务程序中对所输出的脉冲进行总的累加计数, 并和各分段判断点进行比较, 以此来判断当前处于哪一个速度分段, 从而进行相应的频率控制, 控制方案如图 4 所示。

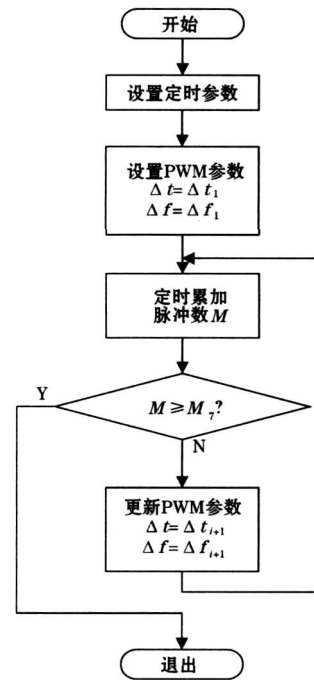


图 4 变速控制原理

4 软件设计

控制系统主要是实现时栅分度转台的自动分度定位功能, 结合客户的反馈意见, 设计了 2 种控制模式: 绝对模式与相对模式。在绝对模式下, 以所用户所输入的角位移指令参数为分度定位目标值, 直接驱动分度转台转动到目标值。在相对模式下, 用户输入的角位移指令参数为相对角位移值, 分度定位目标值为当前分度转台的角位移与输入的相对角位移值之和。

4.1 数据接收

微处理器通过串行接口接收分度转台的反馈角位移数据, 串口通信的波特率为 57 600 bps 为了提高数据传输的抗干扰性, 每帧数据都以连续的 2 个 0xFF 作为头部, 该头部也作为数据帧之间的定界符, 后面紧接着分度转台的当前角位移数据, 格式为 XXX°XX'XX"X, 占用 5 个字节, 这样每个数据帧的长度为 7 个字节。接收完成后对接收到的数据的有效性进行判断: 代表度的 2 个字节值不能大于 360, 代表分的字节值不能大于 59, 代表秒的字节值也不能大于 59, 最后一个字节值不能大于 9。程序流程图如图 5 所示。

4.2 电机控制

电机控制主要采用闭环控制, 根据反馈角位移数据单方向逐步逼近的控制策略。对于长距离的驱动控制采用加减速的控制方式, 对短距离的驱动控制采用低频匀速的控制方式。对于一次步进驱动控制没有能够准确地分度定位的情况, 将根据

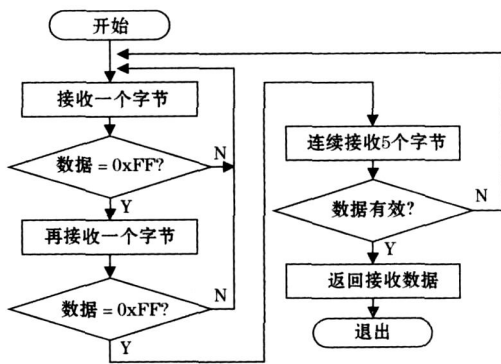


图 5 数据接收流程图

反馈角位移数据采用“二分法”逼近,即每次只走剩余步进位移的 50%,驱动完成后,再读取当前反馈角位移值,计算下一次的步进位移,重复进行“二分法”逼近,直至准确地分度定位为止。对于超过分度定位目标位置的情况,采用单方向逼近的原则:先反方向回转  $10'$ ,以消除工作转台蜗轮与蜗杆之间的转动间隙,再按原来控制方向单方向定位到目标位置。控制流程如图 6 所示。

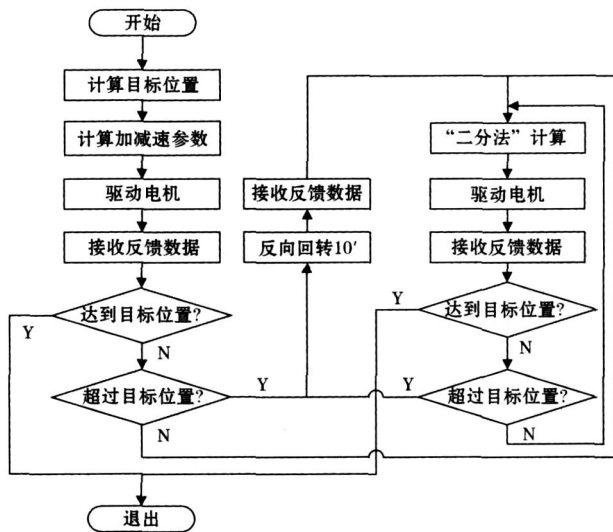


图 6 电机控制流程

## 5 应用实例

图 7 为控制系统的现场调试,经过现场工作测试,分度转台定位精度达到  $\pm 2''$  的设计要求,定位速度快,转台转动一圈约 35 s 一般的定位控制(几十度以内)在 10 s 以内完成,远高于原来的手摇式时栅转台的定位速度。目前数控转台已经交付给多家用户使用,用户反应良好。

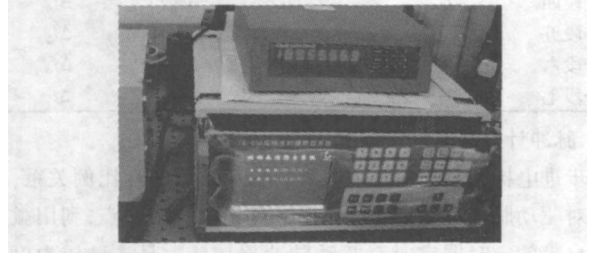


图 7 分度转台控制箱

## 6 结束语

时栅技术经过多年的发展,已经进入产品化阶段。时栅分度转台作为重要产品之一已经得到市场应用,原来的数显转台虽然避免了读机械刻度的问题,但通过手工来转动分度转台,很难准确地进行角秒级和更高精度的角度定位。而数控转台可以实现快速而准确的分度定位,降低了工作强度,提高了工作效率。高精度时栅数控转台将更加丰富时栅产品的多样化,进一步推进时栅技术的产业化。

### 参考文献:

- [1] 彭东林,刘成康,谭为民.时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究.仪器仪表学报,2002,21(4):338-342
- [2] 周立功.ARM 嵌入式系统基础教程.北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] 田泽.嵌入式系统开发与应用.北京:北京航空航天大学出版社,2005
- [4] 周忠辉.步进电机驱动的实现方法.仪表技术与传感器,2004(11):61-62
- [5] 王勇,王伟,杨文涛.步进电机升降速曲线控制系统设计及其应用.控制工程,2008,15(5):576-579

作者简介:杨继森(1977-),博士,讲师,主要从事智能仪器与嵌入式系统研究。E-mail yw@cqut.edu.cn

(上接第 94 页)

## 3 结束语

设计了电化学传感器的自动智能批量测试系统,通过放大电路、NI-DAQ 采集卡和基于 LabWindows/CVI 编写的采集分析软件,能够采集到电化学传感器  $12\mu\text{A}$  左右的电流信号,并进行处理、显示、画图、保存和自动判断。在实验过程中,所有测量的传感器,均能准确求得各项指标且正确判断传感器质量,选出合格传感器。该系统目前一次能够对 24 个电化学气体传感器同时进行批量测试,运行稳定,实时性好,参数可调,大大提高了电化学气体传感器生产过程中的出厂检测和指标计算效率,节省人工成本。采用 LabWindows/CVI 编写的程序,兼容 C/C++ 语言,与其他 Windows 平台的程序有良好的通用性。

### 参考文献:

- [1] 洪吉.常温半导体氧传感器:[学位论文].浙江:浙江大学,2001.

- [2] 罗勇,毛晓波,黄俊杰.红外检测瓦斯传感器的设计与实现.仪表技术与传感器,2007(8):4-6.
- [3] CHOLN J Optical fire detection Chemical Engineering Progress 1989 62-68
- [4] 薛晨阳,谭秋林,马游春,等.红外传感器的信号提取和数据采集的设计.仪表技术与传感器,2007(2):45-26
- [5] 孙晓云,郭立炜,孙会琴.基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用.北京:电子工业出版社,2005 61-102.
- [6] 史君成,张淑伟,律淑珍. LabWindows 虚拟仪器设计.北京:国防工业出版社,2007:70-156
- [7] 刘君华.虚拟仪器编程语言 LabWindows/CVI 教程.北京:电子工业出版社,2001:52-151.

作者简介:郑晓明(1984-),硕士,主要研究方向为模式识别、虚拟仪器开发,脑机接口技术,信号检测与处理。

E-mail anoxm@126.com