

doi: 10.7690/bgzdh.2015.02.022

基于 DSP 的光机扫描控制技术

刘晓玮¹, 江婷婷¹, 李扬¹, 郭新胜², 韩瑞²

(1. 西安应用光学研究所科研试制生产部, 西安 710065; 2. 西安应用光学研究所第五研究室, 西安 710065)

摘要: 针对传统模拟控制技术所设计的光机扫描控制系统, 存在控制精度低、线性度差的问题, 介绍一种基于 DSP 的光机扫描控制系统。通过分析该系统的组成选择了合适的电机和位置传感器部件, 并采用电流反馈和位置反馈相结合的数字控制策略, 实现高精度、高线性的光机扫描控制。实验结果表明: 扫描系统的精度满足使用要求, 环境适应性好, 能够适用于各种扫描成像类的光电产品。

关键词: 光机扫描; 有限转角直流力矩电机; 数字信号处理器 (DSP)

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Technique of Scanning Control Based on DSP

Liu Xiaowei¹, Jiang Tingting¹, Li Yang¹, Guo Xinsheng², Han Rui²

(1. Department of Scientific Research & Trial Production, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. No. 7 Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: According to these problems of low control precision, linearity difference about the scanning control system of the traditional analog control technology design, introduces a kind of scanning control system based on DSP. optimal motor and position sensor have been selected through the analysis of validity of the system. Current feedback and position feedback digital control strategy has been applied to achieve a ray machine scanning and control system of high-precision and accurate linearity. Experimental results show that the scanning and control system proposed in this paper possesses high accuracy to satisfy the using requirements and is robust to different environmental conditions. Therefore, it is promising in applications in varies types of photoelectric scanning imaging products.

Keywords: optical mechanical scanning; limited angle brushless DC torque motor; digital signal processor (DSP)

0 引言

在激光电视、线阵 CCD 成像系统、一维焦平面热像仪等扫描成像系统中, 为了用一维探测器产生二维图像, 通常利用光机扫描的方式, 依次把垂直方向的整个视场, 按水平从左到右的顺序成像在红外探测器线列上^[1]。扫描电机的工作模式分为慢速正程扫描和快速回扫 2 个过程, 结合成像显示要求, 因此由扫描正程和回扫时间决定的扫描效率一般都要求在 80% 以上, 同时对扫描正程的线性度要求较高, 在成像系统中, 非线性度要求控制在 2% 以下才可以保证图像的正确还原, 因此扫描效率、扫描线性度就成了扫描电机控制系统设计中关键所在^[2]。扫描控制系统的线性度、重复性、稳定性对整个系统的性能有很大的影响。主要原因多方面的, 如系统所选择的扫描电机的性能、角位置传感器及检测电路的精度、伺服控制电路采用的控制算法等方面。

以往的光机扫描控制系统采用模拟技术控制系统, 具有控制精度差、线性度差、调试难度大的缺

点, 而采用 DSP 控制的小型光机扫描控制系统, 满足了高精度、高线性度扫描的要求。

1 光机扫描控制系统的组成

光机扫描控制系统由扫描电机、扫描反射镜、扫描控制电路、角位置传感器及其检测电路等部件组成。扫描控制系统工作时, 利用扫描控制电路驱动扫描电机运动, 由于标准电视视频信号要求为 50 场/s, 这就要求扫描反射镜每秒要往复运动 50 次。工作时, 在扫描电机周期性扭矩的驱动下, 扫描反射镜在一定角度范围内高速摆动, 从而达对整个视场进行扫描的目的, 将景象成像在探测器线列上。探测器完成光电转换后, 输出标准视频信号。

1.1 电机的选择

对于光机扫描系统来讲, 电机要求要在一定范围的角度内往复高频摆动, 频率 50 Hz, 摆动时要求速度恒定^[2]。在正程 16.4 ms 内扫描镜匀速摆动 10°。计算得知, 其扫描镜的摆动速度为 609.75 (°)/s, 在回扫期间其工作过程分为匀加速阶段、匀速阶段、

收稿日期: 2014-08-27; 修回日期: 2014-10-20

作者简介: 刘晓玮(1979—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事光电仪器电气系统研究。

匀减速阶段 3 个阶段，其中匀加速和匀减速阶段均大约为 0.5 ms，匀速阶段为 3.2 ms。在 3.2 ms 内扫描镜匀速摆动 10°，在匀速阶段的扫描镜速度为 3 125 (°)/s,在回扫的起始阶段扫描反射镜的速度由 +609.75 (°)/s 在 0.5 ms 内变为-3 125 (°)/s，由此可知其加速度为 7 469 500 (°)/s²。同理在回扫最后阶段扫描镜的速度由-3 125 (°)/s 在 0.5 ms 内变为 +609.75 (°)/s，其加速度也为 7 469 500 (°)/s²。通过对电机的运动性能分析，选择一种法国进口电机 SD165 作为本系统工作电机。

1.2 位置传感器部件的选择

在闭环光机扫描控制系统中，扫描位置的精度和准确性主要取决于扫描位置的检测和反馈，位置检测感知和报告闭环控制系统控制器的实际位置。位置传感器的精度是决定控制系统精度的关键。

针对光机扫描控制系统中对传感器的要求，选用一种型号为 SKYH、供电电压+5 V、输出 TTL 电平、脉冲分辨率为 2 700/转的增量式光栅编码器^[4]作为角度反馈元件。通过电路细分在原一个信号周期内，可得到 4 个计数脉冲，则光电编码器转动一周的脉冲计数为 $N=4P$ ， P 为光电编码器输出脉冲数。转台转动角度 $\omega=360(°)/4Pn$ ， n 为输出个数。脉冲细分后其分辨率 $\alpha=360(°)/4P$ ，笔者提到的每圈脉冲数为 2 700 的编码器，则有 2'。

2 光机扫描控制系统的机理建模

经过数学运算可得扫描控制电机的开环传递函数为：

$$G = \frac{\theta(t)}{U_{do}(t)} = \frac{K_i}{L_T J_m S^3 + (R_T + B_m L_T) S^2 + (K_b K_i + B_m R_T) S} \quad (1)$$

式中： $\theta(t)$ 为电机轴转角位移； $U_{do}(t)$ 为电机两端电压； K_b 为反电动势系数； K_i 为电机转矩灵敏度； J_m 为电机轴总转动惯量； B_m 为粘摩擦系数； L_T 为电枢电感； R_T 为电枢回路电阻。

带入所选用的电机指标 $K_i = N \cdot M / A$ ； $J_m = 4 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}$ ； $L_T = 45 \text{ MH}$ ； $R_T = 20 \text{ } \Omega$ 。得到本系统的传递函数为：

$$G = \frac{\theta(t)}{U_{do}(t)} = \frac{3.6}{S(0.45 \times 10^{-6} S^2 + 1.33 \times 10^{-3} S + 1)} \quad (2)$$

通过对开环传递函数的分析，可以得到此系统

的动态响应特性以及零极点分布。

3 控制系统的控制策略及电路设计

3.1 控制策略

光机扫描控制系统是一个双闭环控制系统，采用位置环和电流环双闭环反馈结构控制扫描系统，位置环用来控制扫描系统的定位精度和重复精度，如图 1 所示。固定在扫描电机轴上的反射镜片即为被控对象，在执行机构—扫描电机的驱动下按输入指令旋转，光电编码器实时检测电机轴的角位移变化，将角位移信号反馈到校正输入端，通过与从信号产生电路输入的位置指令信号比较，经过 1 个 PID 调节器^[5]后，作为电流环的输入指令信号。经过 1 个 PI 控制器调节以后，得到相应的电流参考信号。电流参考信号与实际的电机相电流信号进行了比较，变换为 PWM 信号加到电机的功率驱动电路上，通过控制功率管开通关断顺序和时间，可改变电机定子绕组中电流的大小，从而实现对有限转角力矩电机转速的控制。

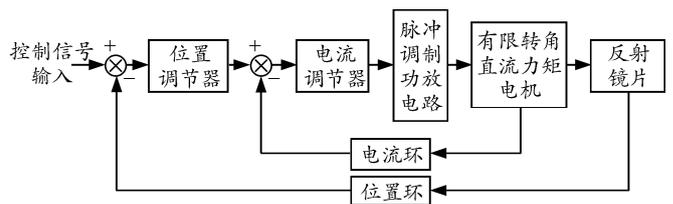


图 1 控制系统环路

3.2 电路设计

扫描控制电路硬件连接如图 2，主要包括主控电路、驱动电路、位置检测电路 3 部分。主控电路以 DSP 电路为核心，外部接口电路主要有仿真接口电路、外部存储器扩展电路、串口电路、数字模拟转换电路和输入输出接口等；驱动电路则是对控制信号进行功率放大以驱动电机转动。位置检测电路主要以光电编码器来实时检测光学镜片的位置。

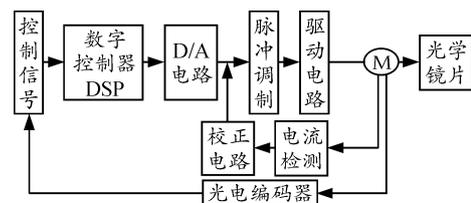


图 2 电路系统原理框图

主控电路核心器件是 TMS320F2812 数字信号处理芯片，TMS320F2812 的最高运行频率可达 150 MHz，片上存储器最长达 128K×16 位的 Flash 存储

器, 最长达 128K×16 位的 ROM, 1K×16 位的 OPT ROM^[6-7]。

驱动电路采用脉冲宽度调制放大电路, 配合使用双极性开关功放电路, 可提高电机的快速性, 减少死区电压, 同时可使电机过零性能良好; 脉冲宽度调制放大电路的开关频率选择得越高, 可获得优良的动态硬度, 极快的跟踪速度和很高的跟踪精度; 选择了很高的开关频率, 相应的功率管的开关速度也要选择得很快。最佳工作开关频率为

$$f = 0.3323 \sqrt{A_s / T_e (T_r + T_f)} \quad (3)$$

式中: A_s 为电机启动电流与额定电流之比; T_e 为电机电磁时间常数; T_r 为功率管电流上升时间; T_f 为功率管的电流下降时间。

从电机的频率特性上可以看出: 很高的开关频率将使电机无法响应, 因此, 在整个控制系统中设计电流负反馈环节以减少电机电气时间常数。

PWM 功放设计部分, 采用了苏州微电子公司的专用数字功放 HG3111 集成电路实现脉冲调宽电路, 电路原理如图 3 所示。

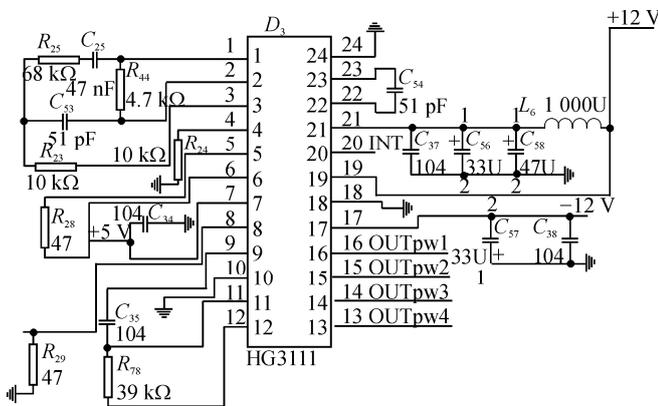


图 3 脉冲调宽电路工作原理

4 控制系统的软件设计

整个控制系统软件由主程序和位置环子程序组成。主程序主要完成芯片的初始化、变量的初始化等, 流程图如图 4 所示。

位置环子程序根据光电编码器输出的扫描镜的角度反馈值实现对电机的调节, DSP 控制读取扫描镜目前的角度值, 判断扫描镜处于正扫阶段还是回扫阶段, 根据所处的不同阶段, 输出不同的参考值, 进行 PID 调节, 控制 PWM 输出信号。位置环子程序流程图如图 5 所示。

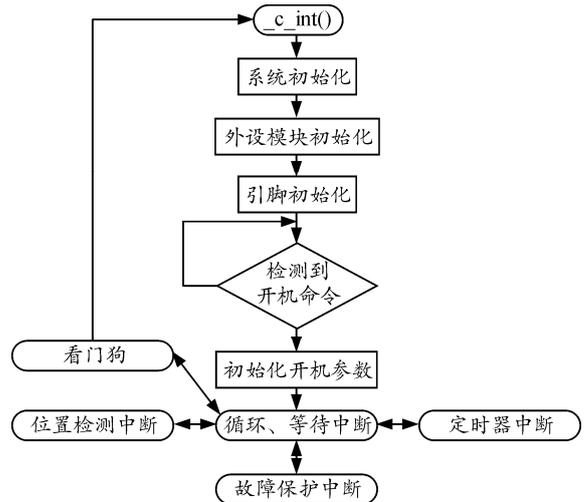


图 4 DSP 主程序流程

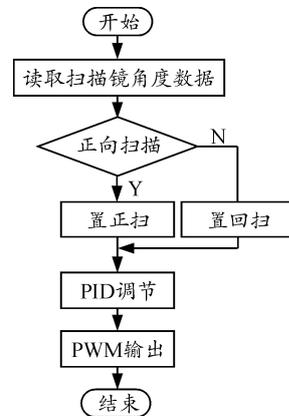


图 5 位置环子程序流程

5 实验结果及分析

5.1 控制系统动态测试

为扫描控制系统加入阶跃信号, 用示波器测量得到阶跃响应曲线如图 6 所示。图中上方标记 1 号的曲线为给定阶跃信号曲线, 图中下方标记 2 号曲线为给定阶跃信号曲线。可以看出: 上升时间约为 20 ms, 峰值时间约为 40 ms, 调节时间约为 100 ms, 超调量约为 37%。

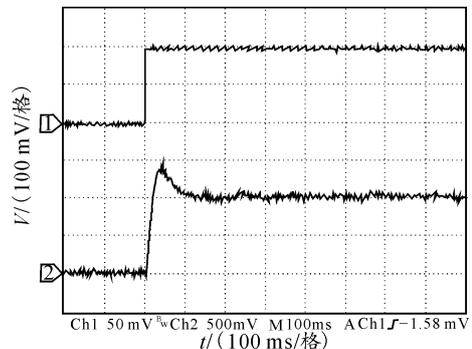


图 8 系统阶跃响应曲线

5.2 扫描性能评估：

由于输出的标准视频信号为 CCIR 标准电视体制，图像帧频为 50 Hz，因此，整个扫描工作周期设定为 20 ms。信号上升阶段为扫描电机的正程扫描阶段，设定为 16.4 ms。信号的斜率决定了扫描反射镜的转速，信号的峰值决定了扫描反射镜的最大摆角。信号的下降阶段为扫描电机的回程 3.6 ms，即执行恢复到初始位置的翻转运动。

用示波器测得扫描控制系统的位置反馈信号如图 7 所示，反馈周期：(20±0.05) ms，其中正程 16.4 ms，回程 4.6 ms，幅度±(5±0.2) V。

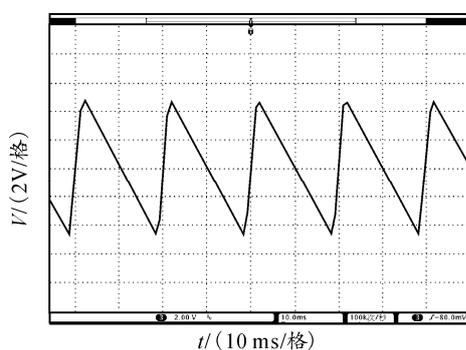


图 7 位置反馈波形

光机扫描系统中的扫描效率等于扫描能起作用的角度时间/扫描周期。带入数值计算：

$$\eta = \frac{16.4}{20} = 82\% \quad (4)$$

由上述数据可见，本系统的扫描效率大于光机扫描系统所要求的扫描效率 80% 的要求。

对位置反馈波形，从正程期间起点起，每隔 1 ms 测量一点，一直测到波形正程期间的终点 16.4 ms 处，共测得波形正程期间若干个点的的时间值和电压值，测得 2 组平均数据，采用最小二乘法拟合曲线，计算出扫描线性度公差范围数据，与采用模拟电路

控制的数据对比，如表 1 所示。可以看出，采用 DSP 的数字控制系统的性能得到提高。

表 1 线性度对比 %

周期范围/ms	模拟控制线性范围	数字控制线性范围
0~0.512	4.0	3.0
0.512~1.024	1.6	1.2
1.024~2.560	0.9	0.6
2.560~15.872	0.7	0.4
15.872~16.400	1.2	0.8

6 结语

针对光机扫描成像控制系统的特殊要求，通过采用有限转角直流力矩电机和 DSP 的数字控制系统完成了光机扫描的控制，系统电路简单，可靠性高，同时零位误差小，精度高，频响快。实验结果表明，对于光机扫描成像控制系统，采用该方法可以满足高精度、高线性摆动扫描的要求，获得较好的控制效果。

参考文献：

- [1] 张卫国, 冯卓祥, 陶忠, 等. 扫描镜动态面形变化和模态分析[J]. 应用光学, 2006, 27(1): 58-61.
- [2] 范宏波, 唐麟, 潘顺臣. 288×4 热像仪扫描速度与系统积分时间的匹配研究[J]. 红外技术, 2007, 29(1): 4-7.
- [3] 秦和平, 王萍. 高精度摆动扫描电机与控制系统研究[C]//全国第十二届空间及运动体控制技术学术会议论文集, 2006: 511-516.
- [4] 杨磊, 周伯昭. 高精度摆动扫描技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [5] 郭新胜, 鱼云岐, 陈洪彩, 等. 光学消像旋高精度位置控制[J]. 兵工自动化, 2011, 30(7): 67-72.
- [6] 王敏. 扫描摆镜控制的数字 PID 实现[J]. 现代电子技术, 2005, 28(4): 82-84.
- [7] Texas Instruments. TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide-System and Peripherals[G]. Literature Number: SPRU357C, 2006.
- [8] 苏奎峰, 吕强, 耿庆锋, 等. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 215-284.