

文章编号 1004-924X(2012)11-2416-08

## 衍射光栅刻划机的闭环控制系统

蔡锦达<sup>1</sup>, 王 英<sup>1\*</sup>, 颜廷萌<sup>2</sup>, 秦绪祥<sup>1</sup>, 王 亮<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093;

2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**以 S3C2440A 为控制核心, 设计了衍射光栅刻划机的高精度运动控制系统, 实现了现场显示、实时控制等功能。用 S3C2440A 微控制器控制伺服电机和步进电机完成光栅刻划的分度运动和刻划运动, 通过 SiGNUM™ RELM 直线光栅尺反馈和 PD 加前馈控制算法补偿由于惯性等原因造成的分度误差, 并用 MATLAB 对使用 PD 加前馈控制算法的分度运动进行仿真。采用 RON225 增量式角度编码器反馈以补偿执行刻划运动的步进电机因失步造成的误差, 通过分析和处理实验数据获得分度运动最佳速度和伺服电机在此分度运动速度下停止时的过冲距离。最后, 对可能产生控制误差的原因进行了初步分析, 并提出了需要进一步改进和完善之处。

**关键词:**衍射光栅; 刻划机; 运动控制; S3C2440A; 刻划光栅; PD 加前馈控制

**中图分类号:** TG63; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2416

## Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine

CAI Jin-da<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1\*</sup>, YAN Ting-meng<sup>2</sup>, QIN Xu-xiang<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangying19870317@163.com

**Abstract:** The high accurate control system for a diffraction grating ruling machine was designed by taking the S3C2440A as a control core to implement the real-time shows, real-time control and other functions. The S3C2440A micro controller was used to control a servo motor and a stepping motor to complete the indexing movement and the ruling movement of the grating ruling, the SiGNUM™ RELM straight line grating feedback and PD plus feedforward control algorithm were taken to compensate the index error caused by the inertia and other reasons, then the indexing movement using PD plus feedforward control algorithm was simulated by MATLAB. Furthermore, the error caused by the out-of-step of stepping motor was compensated by the feedback of a RON225 incremental angle encoder, and the best speed of the indexing movement and the overshoot distance of the servo motor when it stopped were collected by the analysis and the process of the experimental data. Finally, the analysis on the controlling error was introduced, and how to improve the system in further was put forward.

收稿日期: 2012-05-21; 修订日期: 2012-07-02.

基金项目: 2012 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ150040); 2011 年上海市重大技术装备研制专项资助项目 2B-ZB (No. ZB-ZBYZ-03-11-1709); 上海市教委重点学科资助项目 (No. J50503)

**Key words:** diffraction grating; ruling machine; motion control; S3C2440A; ruled grating; PD plus feedforward

## 1 引言

衍射光栅是光谱仪的主要色散元件,其性能决定了光谱仪的光谱解析能力,而其衍射效率则影响光谱仪的可用光谱范围和光通率<sup>[1]</sup>。作为光谱学、光谱分析技术中的重要元件,衍射光栅常被称作“为科学研究各领域提供最重要实验信息的元件”,目前广泛应用于天文学、光通信、国防等诸多重要领域。20 世纪 50 年代,Harrison 将干涉光电技术用于控制光栅刻划过程,这使得刻制更高质量的衍射光栅成为可能<sup>[2]</sup>。机械刻划式光栅的优点是可以比较灵活地调整光栅的刻线密度。刻划机分度机构普遍采用干涉反馈控制系统,用激光的波长或光栅刻槽的空间周期作为基准,它的刻划精度比纯机械式分度刻划机有了大幅度提高。日本的 HITACHI 公司、美国的 RICHARDSON 光栅实验室等都已研制出可以刻制不同面形(如平面、球面、非球面)光栅的光栅刻划机<sup>[3]</sup>。虽然全息法制作光栅得到了广泛应用,但全息光栅很难做成倾斜刻槽以实现闪耀,这使它的效率大为降低<sup>[4]</sup>。因此,采用光栅刻划机依然是制作母光栅的主要手段。目前,国外光栅的刻划密度高达 10 000 g/mm,而国内母光栅刻线的最大密度为 2 400 g/mm<sup>[5]</sup>,因此,研究高精度光栅刻划机具有重要的现实意义。高精度运动控制是获得高精度的光栅的必要条件。本文就衍射光栅刻划机运动控制进行了分析,提出了一种高精度运动控制方法。

## 2 光栅刻划机的运动控制系统

机械刻划衍射光栅的基本设计思想是提供光栅毛坯与金刚石刻刀之间的相对运动。其基本设计形式如图 1 所示:(a)为 Rowland 研制的牛头刨式,其固定式刀桥做往复式刻划运动,工作台在下面做栅距分度运动;(b)为龙门刨式,与 Rowland 式相反,其刀桥做栅距分度运动,工作台做往复运动;(c)为工做台固定,刀桥做往复和分度运动;(d)为刀桥固定,工作台做往复和

分度运动。本系统运动形式选用牛头刨式,复合刀架做往复刻划运动,工作台在下面做分度运动。

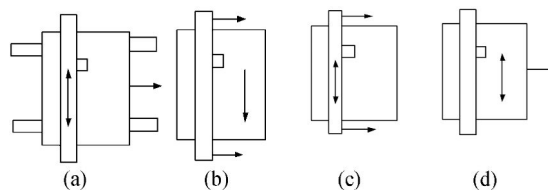


图 1 光栅刻划系统的几种形式<sup>[6]</sup>: (a)牛头刨式;(b)龙门刨式;(c)工作台固定;(d)刀桥固定

Fig. 1 Several forms of grating ruling system<sup>[6]</sup>: (a)Ox-head shape; (b) Planer type; (c)Fixed table; (d) Fixed tool bridge

光栅刻划机按其刻划方式可分为连续式和间歇式两种。连续式刻划机是在工件台运动中进行刻划,刻刀与毛坯接触易产生振动,导致刻槽质量降低;而间歇式刻划机在刻划时工作台保持静止,刻槽质量高。所以系统选用间歇式刻划方式。

### 2.1 分度运动控制

分度系统用于实现光栅毛坯刻划的定位操作,高精度的分度运动是保证控制精度的前提<sup>[7]</sup>。本系统采用伺服电机驱动,涡轮蜗杆副降速和精密滚珠丝杠螺母副将圆周运动转换为直线运动,完成高精度工作台的分度运动,其中伺服电机的控制为双闭环控制。整体分度运动控制流程如图 2 所示。

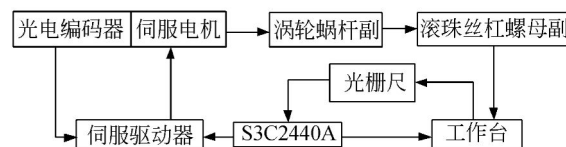


图 2 分度运动结构图

Fig. 2 Flow chart of indexing movement

### 2.2 刻划运动控制

刻划运动主要实现复合刀桥做往复式刻划运动,在刻线过程中,如果刻刀通过刻线上各点的速度不同,光栅毛坯的被切割程度和被挤压程度都不相同,会影响光栅刻槽的质量。因此,刻线过程

采用 S3C2440A 微控制器,它可以一直发相同频率的脉冲,使刻刀在刻线过程中保持匀速运动,以确保刻槽质量。

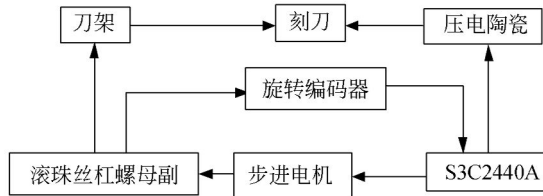


图 3 刻划运动控制结构图

Fig. 3 Flow chart of ruling movement

刻划运动控制系统采用步进电机驱动精密滚珠丝杠螺母副带动复合刀架做往复运动,经 RON225 增量式角度编码器检测获得丝杠的转动角度,反馈给 S3C2440A 微控制器,计算出复合刀架运动的实际位移,并和预定值相比较,对步进电机的运动进行调整,从而完成刻槽运动,实现对刻划运动的闭环控制。由 S3C2440A 通过压电陶瓷控制金刚石刀具的抬落,在光栅毛坯上进行刻划。压电陶瓷落下的深度决定槽深,槽深是衍射光栅的一个重要参数,它决定了光栅的闪耀波长,即优化最大衍射效率所对应的波长<sup>[8]</sup>。整体控制流程如图 3 所示。

### 3 衍射光栅运动控制系统检测装置

衍射光栅刻划的分度运动由 SiGNUM<sup>TM</sup> RELM 高精度直线光栅尺进行定位控制, SiGN-UM<sup>TM</sup> RELM 高精度直线光栅尺由 SR 读数头、

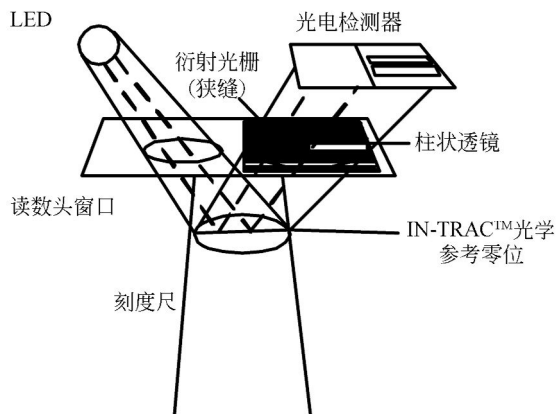


图 4 SiGNUM<sup>TM</sup> 光学系统原理图

Fig. 4 Block diagram of SiGNUM<sup>TM</sup> optical system

Si 细分盒和 RELM 栅尺组成。工作原理如图 4 所示,红外发光二极管把光发射到光栅尺的刻划面,然后通过透明的衍射光栅(狭缝)刻划面将光反射到读数头中,这样就在读数头的检测面产生了正弦干扰条纹。RELM 的测量基准是一个 20  $\mu\text{m}$  栅距的平面反射“栅尺”。

实际使用中是将 RELM 栅尺固定在工作台上,通过读数头对干涉条纹信号进行计数,反馈给 S3C2440A 微控制器,通过测量值和预定值比较,补偿控制刻划机的分度运动。光电检测器将光信号转换为电信号(电流)输出,输出电压信号的幅值表示为光栅位移量  $x$  的正弦函数,即:

$$u = u_0 + u_m \sin\left[\frac{2\pi x}{d}\right]^{[9]}, \quad (1)$$

式中:  $u_0$  为输出信号中的直流分量;  $u_m$  为输出正弦信号的幅值;  $x$  为 RELM 栅尺位移量。在 SiGN-UM<sup>TM</sup> 接口内通过 CORDIC 算法细分,分辨率可达 10 nm,精度达  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。SiGNUM<sup>TM</sup> RELM 高精度直线光栅具有高速、可靠、非接触的性能。与激光干涉仪相比,具有结构简单、精度高、分辨率高和对环境要求低等特点。

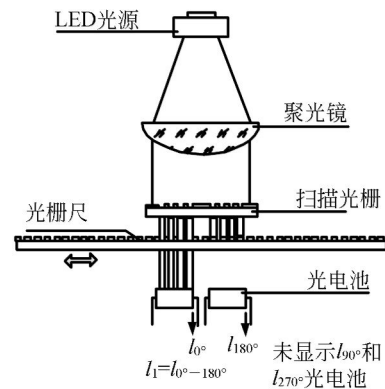


图 5 干涉扫描原理图

Fig. 5 Block diagram of interference scanning

在刻划运动控制中,为了检测步进电机是否失步,采用 RON225 增量式角度编码器,其每圈的信号周期数为 18 000,编码器的系统精度为  $\pm 5''$ ,测量步距为 0.005°,RON225 采用成像扫描原理<sup>[10]</sup>。简单地说,光电成像扫描是用透射光产生信号;两个具有相同栅距的光栅和扫描光栅彼此相对运动。扫描光栅基体是透明的,而作为测量基准的光栅尺可以是透明的也可以是非透明的,如图 5 所示。

### 4 触摸屏控制与显示界面

S3C2440A 芯片带有的 10 位 CMOS ADC (模/数转换器)是一个 8 通道模拟输入的再循环类型设备。此数/模转换器可直接和触摸屏接口连接,系统在触摸屏的基础上建立了基于组态软件的图形用户界面,用来显示和控制刻划和分度运动,并且在显示了一定周期的图像以后,将数据自动保存在 S3C2440A 微控制器中,方便刻划完成后做误差分析。S3C2440A 对 RON225 增量式

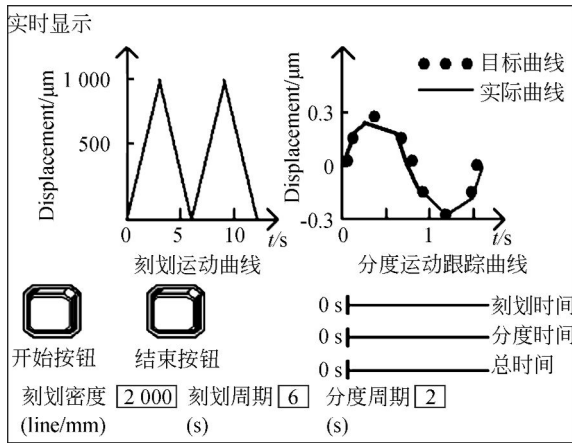


图 6 触摸屏显示控制画面

Fig. 6 Touch screen display and its control picture

角度编码器和 SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅的脉冲信号进行计数,并对信号进行处理,通过触摸屏显示刻划运动曲线和分度运动跟踪曲线,如图 6 所示。通过触摸屏可以远距离控制刻划的启停,从而避免对刻划系统环境的干扰。这样优化了人机交互环境,给用户带来了很大的方便。

### 5 硬件电路图和程序框图

#### 5.1 硬件电路图

系统的刻划运动由步进电机来实现,选用功率足够大、细分数足够多的驱动器 3ND2283,最高细分能达到 25 600 步/转;选择与之配套的步进电机 863S68H。分度运动由伺服电机实现,根据功率选用伺服放大器 MR-J2S-60A,根据伺服放大器与伺服电机的配合表和分度运动的速度,选择伺服电机 HC-SFS53。由于步进电机驱动器和伺服放大器的信号电压是 5 V,而 S3C2440A 的输出信号电压是 3.3 V,所以选用 74LVC4245A 进行电压转换,将 S3C2440A 输出的 3.3 V 转换为 5 V。同理,光栅反馈的信号电压是 5 V,也需要通过 74LVC4245A 把电压转换为 S3C2440A 所需要的电压 3.3 V。图 7 为运动控制硬件电路图。

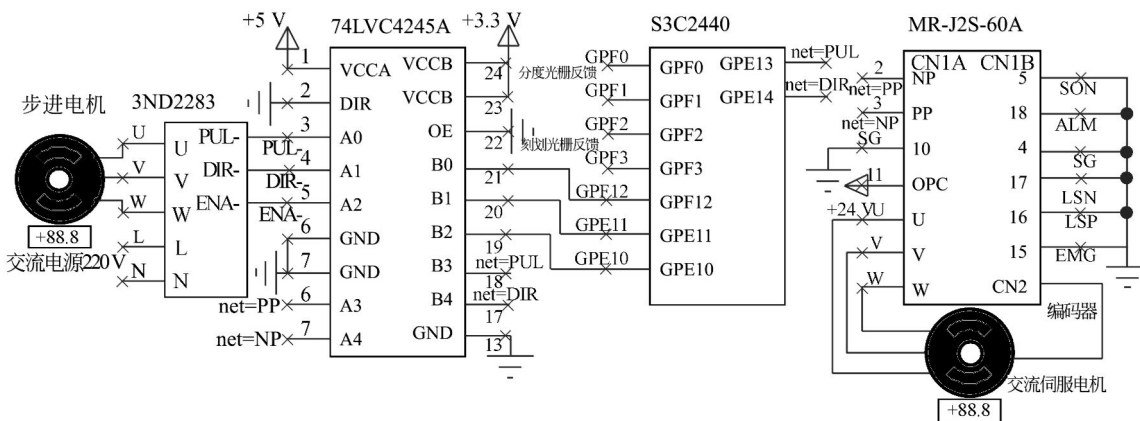


图 7 运动控制硬件电路图

Fig. 7 Hardware circuit diagram of motion control

#### 5.2 软件设计

系统的软件包括在线模拟控制程序、外部中断处理程序以及实现 PD 加前馈控制算法的功能模

块程序。在线模拟控制程序包括初始化、显示刻划运动曲线和分度运动跟踪曲线、刻划时间、分度时间和总时间、控制系统的启停等等;外部中断处理

程序包括对 SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅尺和 RON225 增量式角度编码器的反馈脉冲信号进行计数,控制伺服电机和步进电机完成目标运动。

SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅尺选用 Si-HN-2000 细分盒,其分辨率为 10 nm,输出脉冲频率最高为 1 MHz,能够检测到的最高线速度为 0.8 mm/s。由于 S3C2440A 噪声滤波必须保持 EXTINTn 引脚上有效电平至少在 40 ns 才能触发中断,所以 S3C2440A 能接收脉冲频率为 12.5 MHz,光栅尺的输出脉冲频率为 1 MHz,小于 S3C2440A 能接收脉冲频率;另外,74LVC4245A 所能响应的最低典型频率为 170 MHz,即 74LVC4245A 不影响光栅脉冲计数;所以,S3C2440A 能对光栅尺的输出进行计数。计数方法如下:把光栅尺产生的 A 脉冲接到 S3C2440A 的外部中断 GPF0 上,B 脉冲接到 S3C2440A 的输入 GPF1 上,利用 A 相的边沿产生中断,上升沿时若 B 相为低电平(代表正转)则加计数,下降沿时若 B 相为低电平(代表反转)则减计数。

功能模块程序包括通过 SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅尺反馈得出刀架的实际位移,将伺服电机的实际位移和预定位移比较得出误差值,利用 PD 加前馈控制算法对误差值进行校正,由 S3C2440A 把校正值转换成对应的输出脉冲个数控制伺服电机运动<sup>[11]</sup>,从而形成伺服系统的闭环控制,实现了伺服电机位移的精确跟踪。程序框图如图 8 所示。

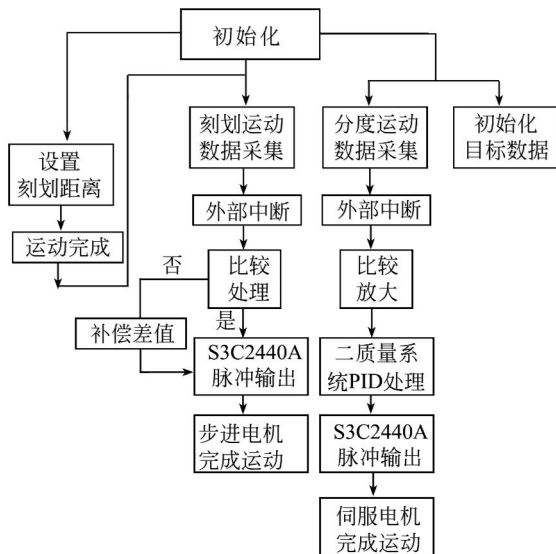


图 8 程序框图

Fig. 8 Program chart

### 5.3 PD 加前馈控制及其仿真

由于此伺服系统执行机构为典型的交流电动驱动机构,通过编码器作为分度运动的速度反馈,直接构成速度回路。由 SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅反馈构成位置伺服回路。选用 PD 加前馈控制方式<sup>[12]</sup>控制光栅刻划运动的分度运动。图 9 所示为简化后的伺服系统结构图。

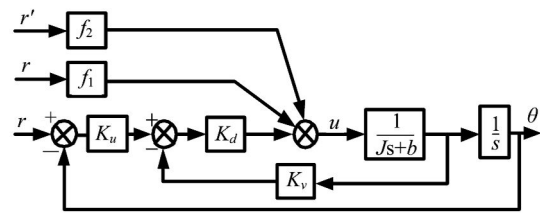


图 9 伺服系统结构图

Fig. 9 Chart of servo system

图中  $u$  为控制输入,  $r$  为位置指令,  $\theta$  为转轴转角;  $K_u$  为 PWM 功率放大倍数,  $K_d$  为速度环放大倍数;  $K_v$  为速度环反馈系数;  $J$  为等效到转轴上的转动惯量,  $b$  为黏性阻尼系数, 其中  $J = J_m + J_L$ ,  $b = b_m + b_L$ ,  $J_m$  和  $J_L$  分别为电机和负载的转动惯量,  $b_m$  和  $b_L$  分别为电机和负载的黏性阻尼系数。

PD 加前馈控制方式的控制律如下:

$$u = K_d [K_p (r - \theta) - K_v \theta'] + f_2 r'' = K_1 e - K_2 \theta' + f_1 r' + f_2 r'' \quad (2)$$

式中:  $K_1 = K_d K_p$ ,  $K_2 = K_d K_v$ ,  $e = r - \theta$ 。

由图 9 中可知:

$$\frac{1}{(Js^2 + bs)} = \frac{\theta}{u} \quad (3)$$

即:

$$J\theta'' + b\theta' = u \quad (4)$$

将控制律  $u$  带入上式,得:

$$f_1 r' + f_2 r'' - J\theta'' - (K_2 + b)\theta' + K_1 e = 0 \quad (5)$$

取:  $f_1 = K_2 + b$ ,  $f_2 = J$ ; 得到系统的误差状态方程如下:

$$J e'' + (K_2 + b) e' + K_1 e = 0 \quad (6)$$

由于  $J > 0$ ,  $K_2 + b > 0$ ,  $K_1 > 0$ ; 则根据代数稳定性判据, 得出系统稳定, 系统的跟踪误差  $e(t)$  收敛于零。

系统输入信号的采样时间为 1 ms, 输入指令为正弦叠加信号:  $r(t) = A \sin(2\pi Ft)$ , 其中  $A = 1.0$ ,  $F = 1.0$ 。则  $f_1 = K_2 + b$ ,  $f_2 = J$ 。MATLAB

仿真结果如图 10 所示,由图可知控制系统的精度高、稳定性好。

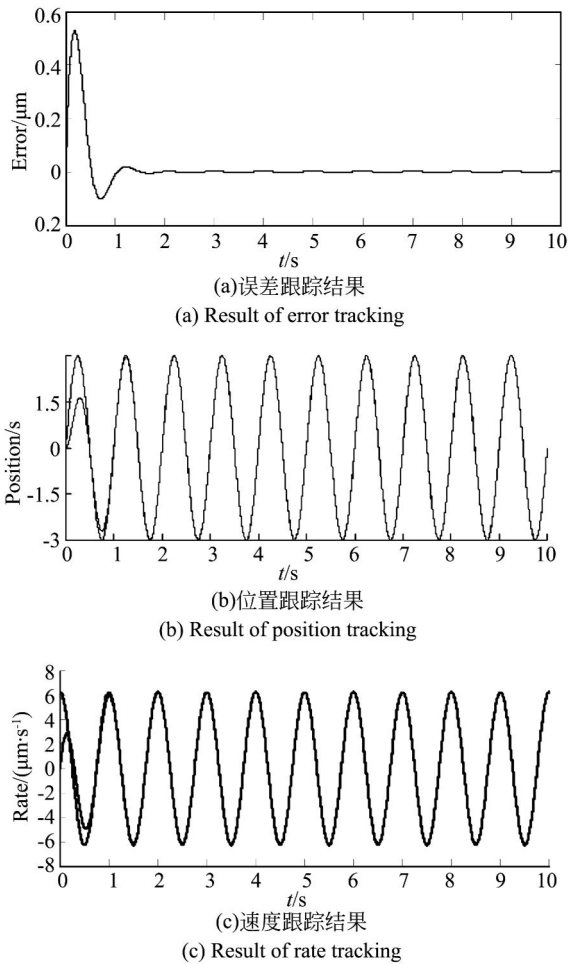


图 10 伺服系统的 PD 加数字前馈控制

Fig. 10 PD plus digital feedforward control of servo system

## 6 实验结果与分析

通过实验,获得分度运动最佳速度和伺服电机在此分度运动速度下停止时的平均过冲距离。由于分度运动速度不同,造成步进电机运动停止时产生的过冲距离不同,以刻划 1 000 g/mm 为例,通过调整分度运动速度,多次试验得出分度运动速度为 0.001 mm/s 时误差最小,又经多次实验得出过冲距离的平均值为 40 nm。试验部分结果如表 1 所示,通过对比得出脉冲数  $a$  一定要比理论分度值小。其中,测量单位为 10 nm(即为光栅尺的分辨率,也是分度方向的分辨率),脉冲数  $a$  表示分度一

次发送到伺服电机的脉冲个数。因为伺服电机运动停止时产生过冲,所以脉冲数  $a$  要小于理论分度值,经过多次实验找出此速度的最佳脉冲数  $a$  ( $a=96$ )。由于本实验温度控制精度不高,没有专门的防振系统,温度、振动等对机械结构的影响不能忽略,所以可以通过提高温度的控制精度和添加防振系统来提高分度运动的控制精度。

表 1 实际分度值与理论分度值对比

Tab. 1 Comparison between practical indexing value and theoretical indexing value (nm)

序号	实际分度值	理论分度值	相对误差 1	脉冲数 $a$	相对误差 2
1	-94	-100	6	-96	2.08
2	-120	-100	-20	-96	-25
3	-104	-100	-4	-96	-8.33
4	-100	-100	0	-96	-4.16
5	-106	-100	-6	-96	-10.41
6	-116	-100	-16	-96	-20.83
7	-110	-100	-10	-96	-14.58
8	-94	-100	6	-96	2.08
9	-78	-100	22	-96	18.75
10	-102	-100	-2	-96	-6.25
累计误差 1:		24	累计误差 2:		64

### 6.1 减小误差的几点措施

刻划控制系统每次分度结束之后,由于受惯性影响,工作台不会马上停止,有向前的过冲过程<sup>[13]</sup>,在机械结构上采取了一系列措施,并采用 SiGNUM™ RELM 光栅尺对实际位移反馈,由 S3C2440A 处理并补偿实际位移和预定位移的差值,注意要把预定位移比理想位移变小一些,以减小过冲的影响。

系统刻划一块光栅需要连续工作 5~6 天,其中只要有一次干扰影响了工作,则整个刻划过程即告失败,因而系统的抗干扰能力是刻划成败的关键<sup>[7]</sup>。本系统除采用常规的抗干扰措施外,在软件方面,S3C2440A 程序存储器有些未被占用的空间用来写入停止和报警指令,一旦有干扰窜入这些未被占用的空间,控制系统停止刻划并报警,以便检查刻划系统,而不影响所刻光栅的质量。另外,

SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅尺和 RON225 增量式角度编码器使用独立的电源,以及避免读数的不稳定。

## 7 结 论

本文采用 16/32 位 ARM920T 的 RISC 处理器作 S3C2440A 微控制器对工作台的位置误差进行 PD 加前馈控制;刻划衍射光栅的运动控制系统采用 SiGNUM™ RELM 高精度直线光栅尺控制系统分度运动、RON225 增量式角度编码器控制系统刻划运动,系统所刻划光栅面的尺寸能达到 105

mm×300 mm,分度运动的分辨率可达到 10 nm,1 mm 可刻划 2 400 根线。通过实验获得了分度运动的最佳速度以及伺服电机在此分度运动速度下停止时的平均过冲距离。为了满足更高精度的要求,下一步要确定刻划方向的最佳速度等参数,以进一步提高温度和振动的控制精度。该运动控制系统的整体结构新颖,配合专门的硬件使整个系统简洁、实用;基于 S3C2440A 微控制器,可以根据系统需要修改控制方法和控制参数,有利于先进控制方法的应用;而更高分辨率的定位检测光栅的应用可以提高系统的位移分辨率和精度,为进一步制作超高密度衍射光栅奠定了基础。

## 参考文献:

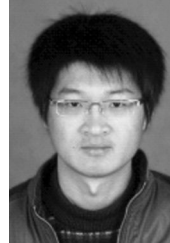
- [1] 谢品,倪争技,黄元申,等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. 激光杂志,2009,30(2): 4-6.  
XIE P, NI ZH J, HUANG Y SH, *et al.*. Application research progress in the echelle grating [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 4-6. (in Chinese)
- [2] 赵博,郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅[J]. 光学精密工程,2000,8(5):503-507.  
ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5): 503-507. (in Chinese)
- [3] 赵博,齐向东. 高效平面全息衍射光栅的获取方法[J]. 光学精密工程,2001,9(2):109-114.  
ZHAO B, QI X D. Manufacturing of high efficient holographic diffraction gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 109-114. (in Chinese)
- [4] 赵复垣. 刻划阶梯光栅的原理和应用特性[J]. 光谱学与光谱分析,1993,13(3): 101-107.  
ZHAO F Y. The principle and characters for applying of echelle [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1993, 13(3): 101-107. (in Chinese)
- [5] 时轮,郝德阜,齐向东. 高精度的光电式衍射光栅刻划机[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4): 103-104.  
SHI L, HAO D F, QI X D. High precision photoelectric diffraction grating ruling engine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(4): 103-104. (in Chinese)
- [6] 刘栋材,申远,钟俊,等. 大型衍射光栅刻划机控制系统研究[J]. 中国科学技术大学学报,2011,41(6): 560-564.  
LIU D C, SHEN Y, ZHONG J, *et al.*. Research on the controlling system of a grating ruling engine [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(6): 560-564. (in Chinese)
- [7] 王晓琳,杨厚民,郭杜,等. 衍射光栅刻划机的高精度开环定位系统[J]. 仪器仪表学报,1999,20(1): 63-67.  
WANG X L, YANG H M, GUO D, *et al.*. A high precision open-loop control positioning system for a diffraction grating ruling machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999,20(1): 63-67. (in Chinese)
- [8] 徐向东,刘正坤,邱克强,等. 用于 1 m Seya-Namioka 单色仪的 1200lp/mm Lamina 光栅[J]. 光学精密工程,2012,20(1):1-8.  
XU X D, LIU ZH K, QIU K Q, *et al.*. Fabrication of 1 200 lp/mm Lamina gratings for 1 m Seya-Namioka monochromator at NSRL [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 1-8. (in Chinese)
- [9] 冯其波,谢芳,张斌,等. 光学测量技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.  
FENG Q B, XIE F, ZHANG B, *et al.*. *Optical Measurement Techniques and Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 方涌奎. 旋转型编码器的应用[J]. 精密制造与自动化,2009,2: 35-59.  
FANG Y K. Application of rotary encoder [J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 2009, 2: 35-59. (in Chinese)

- [11] 杨原青,刘卫东,李乐. 基于自适应模糊 PID 算法的切纸机伺服控制器设计[J]. 微特电机, 2010, 3: 55-58.  
YANG Y Q, LIU W D, LI L. Design of guillotine servo controller based on fuzzy PID algorithm [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2010, 3: 55-58. (in Chinese)
- [12] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
LIU J K. *Advanced PID Control MATLAB* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)
- [13] 时轮, 马春翔, 胡德金, 等. 制作高密度衍射光栅的光电式刻划控制的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(3): 340-342.  
SHI L, MA CH X, HU D J, *et al.*. Study of the photoelectric ruling control on the fabricating of the high density diffraction grating [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(3): 340-342. (in Chinese)

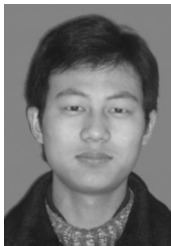
## 作者简介:



王 英(1987—),女,山东泰安人,硕士研究生,2010 年于济南大学获得学士学位,主要从事光机电一体化、运动控制、嵌入式技术等方面的研究。E-mail: wangying19870317@163.com

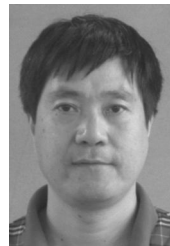


王 亮(1986—),男,山东烟台人,硕士研究生,2010 年于菏泽学院获得学士学位,主要从事嵌入式技术、组态软件、光机电一体化等方面的研究。E-mail: eyob@163.com



颜廷萌(1987—),男,山东德州人,硕士研究生,2010 年于济南大学获得学士学位,主要从事嵌入式技术等方面的研究。E-mail: yantingmeng1987@163.com

## 导师简介:



蔡锦达(1963—),男,上海人,硕士,教授,1988 年于上海机械学院获得硕士学位,现任上海理工大学机械工程学院教师和出版印刷学院副院长,主要从事光机电一体化方面的研究。E-mail: cjd6309@126.com



秦绪祥(1986—),男,山东日照人,硕士研究生,2010 年于上海理工大学获得学士学位,主要从事运动控制、嵌入式技术、光机电一体化等方面的研究。E-mail: qinx021@163.com