

光刻机运动控制与网络监控技术研究

黄沿江, 郭隐彪*, 薛波

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 光刻机是 IC 器件制造的关键设备之一, 其工件台的高速度和高定位精度是获得高质量光刻和高效率的重要条件. 本文通过对光刻机工件台运动速度模式、运动轨迹和定位误差补偿以及现代运动控制技术和网络监控技术的研究, 应用运动控制器强大的计算能力, 实现优化的速度模式和运动轨迹; 应用电机编码器和直尺光栅作为反馈器件, 实现全闭环控制; 应用基于 TCP/UDP 协议的远程控制和视频监控技术, 实现交互式的远程监控. 在 Windows 操作系统下, 用 Visual C++ 开发工具完成了控制系统的软件开发. 实验结果表明, 该系统能使工件台的定位精度达到 $\pm 1 \mu\text{m}$, 并具有较高的工作效率, 体现了较高的应用价值.

关键词: 运动控制技术; 定位精度; 网络监控; 工件台

中图分类号: TH 741

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)03-0365-05

随着光刻器件图形朝线宽缩小化、高密度化、高集成化的方向发展, 光刻机的整机性能已经成为影响集成电路工业发展的主要因素, 光刻机工件台的高速度和高定位精度是整机获得高质量光刻和高效率的重要条件, 如何控制工件台的运动方式和定位精度成为国内外研究的热点^[1]. 目前国内外高精度光刻机工件台的控制方法主要采用主从式控制器控制、多系统化控制、加减速控制, 其优点是控制精度高, 但控制方式较为复杂, 控制成本高, 可移植性不高^[2-4].

现代运动控制技术(即 PC+ 运动控制卡技术)和网络监控技术是近年来飞速发展的新技术, 以其控制方式简单、成本低、开放程度高等特点广泛应用于各种工业控制中^[5]. 本文结合现代运动控制和网络监控技术, 提出了一种新的光刻机工件台控制系统, 以上位计算机和多轴运动控制器实现对工件台的全闭环控制, 保证了工件台的定位精度; 同时研究了工件台的运动速度模式及远程交互式控制技术, 提高了工件台的工作效率.

1 系统硬件设计

运动控制系统是决定光刻器件定位精度的重要内容. 本文采用 IBM-PC 及其兼容机作为主机, 多轴运动控制卡作为控制核心, 交流伺服系统及高精度丝杠作为驱动装置. 服务器 PC 控制多轴运动控制器, 运动控

制器发送控制信号(包括位移、速度、加速度等)给伺服驱动器, 控制信号在伺服中处理后控制相应的伺服电机, 电机驱动高精度丝杠, 从而带动 X Y 二轴光刻工件台, 工件台运动过程中直尺光栅实时采集相对位置信号到服务器 PC, 将实际位置与理论位置比较获得位置误差, 根据误差大小进行位置补偿, 从而实现全闭环控制. 控制系统硬件结构如图 1 所示.

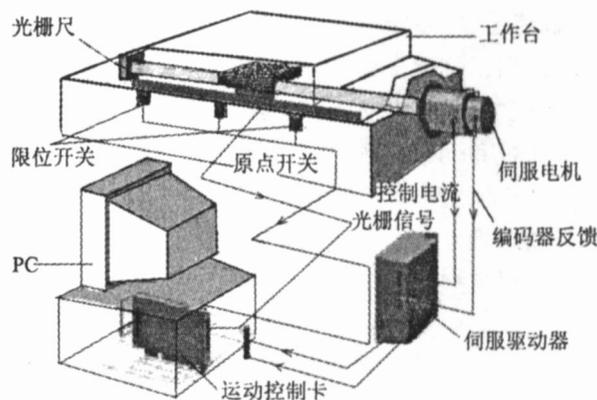


图 1 运动控制系统硬件结构图

Fig. 1 Structure of motion controller

网络监控系统可以提高工件台控制的灵活性, 实现远程的控制和工作状态的实时显示. 本文采用红外 CCD 摄像头作为图像采集器, VC401P PCI 视频卡作为图像处理核心, 开发相应的软件实现远程的交互控制和图像的实时显示.

1.1 运动控制模式

系统使用高性能的伺服运动控制卡, 可以同步控制 4 个运动轴, 实现复杂的多轴协调运动. 运动控制卡采用 PCI 总线与 PC 相连, 数据通过双端口 RAM 在

上下位机间传送. 双端口 RAM 是一种特殊的随机存储器, 它具有两组数据总线和地址总线, 在地址不冲突的情况下两组总线可以在同一时间并行地访问不同的存储器单元, 双端口 RAM 的这种特殊结构使得上下位机可以快速地大规模数据交换, 大大提高了主机与 DSP 运动控制卡的并行处理能力, 解除了以往主从式系统 CPU 间通讯的瓶颈. 运动控制卡与 PC 机结合, 实现了优势互补.

1.2 伺服控制系统

采用交流伺服系统, 该系统具有控制精度高、运转平稳、速度响应好、可靠性高等特点, 通过电机编码器的反馈信息, 构成内部的速度环和位置环, 提高了控制的精度和可靠性; 可以根据不同的机械结构更改相应的补偿参数, 具有较高的柔性. 采用位置控制模式, 输出指令信号为差动脉冲控制信号和差动方向控制信号, 有利于位置精度控制. 系统的逻辑电路包括限位、报警信号的输入及处理, 通用输入输出信号的处理, 其主要功能是控制状态显示面板的指示灯及错误报警, 包括运行、曝光、错误、限位信号指示灯以及控制曝光快门的通断和错误时蜂鸣器的报警.

2 系统软件设计

稳定、可靠的控制软件是控制系统实现高精度、高效率、高稳定性的基础. 本文在分析了影响运动控制系统精度的因素及硬件设计完成后, 充分考虑工件台的工作效率和使用的方便性, 在 VC++ 6.0、固高运动控制卡库函数和天敏视频采集卡库函数的基础上, 基于 C/S 结构开发出一套可靠性高、通用性强的运动控制及网络监控软件.

为了保证控制系统软件的通用性和可移植性, 设计了分层次的软件结构, 如图 2 所示. 最高层是用户操作界面, 显示当前控制系统的运行状态信息并提供用户下达任务的接口. 上层主控程序对通用控制系统做了抽象, 运用面向对象程序设计技术实现了主控系统软件(独立于控制系统硬件), 使其具有较好的通用性和可移植性, 程序使用 C++ 面向对象程序设计语言编制, 可以使用继承和派生等技术添加新功能. 用户操作界面和上层主控程序运行于 PC 上. 上层主控程序通过控制器驱动库函数和控制器交互, 控制器库函数提供了在操作系统环境下, 使用控制器的各种功能函数调用并且使主控程序独立于具体的控制硬件. 这样, 当控制系统使用提供了相同驱动库函数接口的不同的控制器时, 不用修改主控程序. 底层控制器程序也就是写在控制板卡 EPROM 中的程序, 集成了用于控

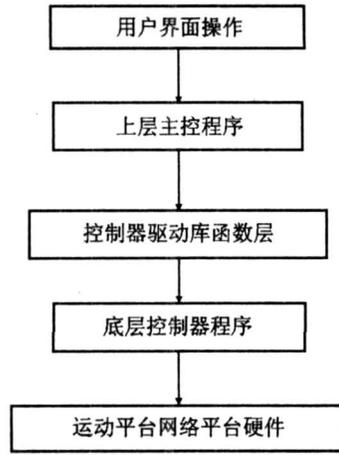


图 2 系统软件的层次结构
Fig. 2 Structure of software system

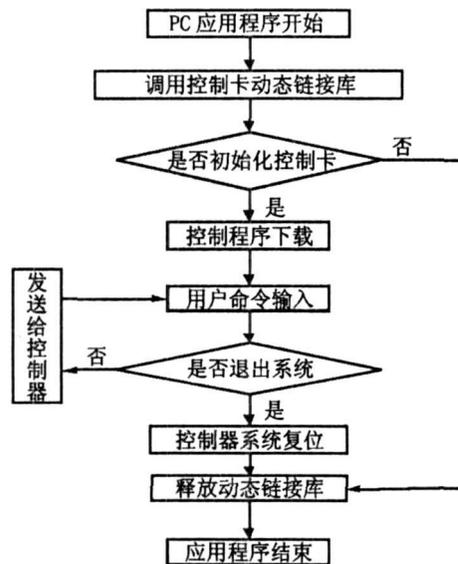


图 3 系统软件流程
Fig. 3 Flow chart of software system

制运动平台控制轴及采集卡的控制策略, 控制器输出的控制信号经过驱动器放大后驱动运动平台运动, 其运行流程如图 3 所示.

控制系统软件的设计采用模块化设计, 由轨迹规划, 误差补偿, 远程网络监控三大模块组成. 软件界面布局合理, 重点突出, 层次分明.

2.1 轨迹规划

高速、高精度是当前运动控制技术追求的目标, 但这两者却是互相制约的, 高速就会产生大的惯性, 从而影响定位精度. 本文充分利用运动控制器的计算能力, 在运动学、动力学基础上进行精确的轨迹规划, 从而满足高速、高精度的要求. 这部分包括速度模式的设计和运动方式的设计.

2.1.1 速度模式的设计

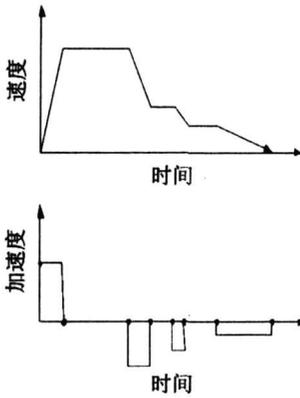


图 4 速度, 加速度曲线

Fig. 4 Graph of speed and acceleration

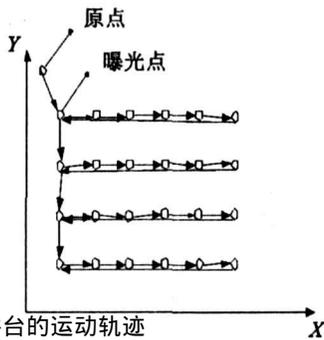


图 5 工件台的运动轨迹

Fig. 5 Motion track of workplace

在进行轨迹规划算法设计时, 要求被控对象尽可能以最大速度、加速度去运动来满足快速性的要求; 其次要求能量最省, 即电机的耗散功率最小. 在 PTP(点对点) 控制中, 通过求解能量最优可以获得最佳速度轮廓是抛物线型, 但是在实际应用中, 抛物线轮廓曲线的产生比较复杂. 从实用、简单性和易获性角度出发, 常使用其它次优轮廓来代替, 如梯形速度曲线、S 形速度曲线等^[6]. 速度曲线越平滑, 加速度就越小, 惯性也就越小, 但是运动效率就会变低, 本系统在运动开始时以较大的加速度加速, 待速度达到最大时就匀速运动, 在减速阶段采用多级减速, 这样就能达到高效率低惯性的目的, 其速度、加速度曲线图如图 4 所示. 在软件实现中, 通过调用运动控制卡库函数实现对速度、加速度、加加速度的设置.

2.1.2 运动方式设计

驱动工件台运动的丝杠是影响工件台定位精度的一项重要因素. 丝杠的螺牙间都会存在反向间隙, 而且这个间隙的大小是随机的, 如果没考虑, 将会给软件设计带来额外的负担, 所以在工件台的运动方式设计中, 要尽量避免反向间隙. 本系统在设定运动原点后, X 轴、Y 轴分别运行一段距离以消除反向间隙, 待 X 轴、Y 轴电机停稳后, 快门打开, 第 1 个图形曝光, 然后

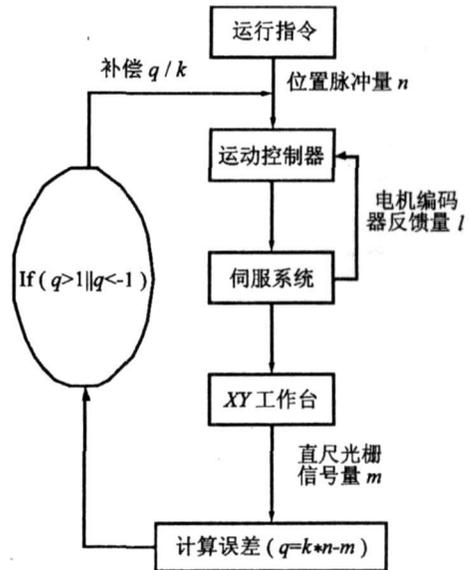


图 6 误差补偿流程

Fig. 6 Flow chart of error compensation

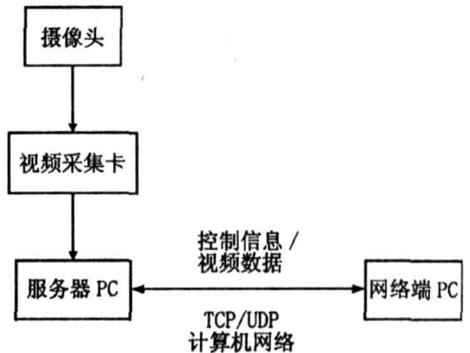


图 7 网络监控结构

Fig. 7 Structure of net control

根据设定的图形间距, 以上述的速度方式运行到第 2 个曝光点, 电机停稳后进行曝光, 第 1 行的曝光点全部曝光结束后, 工件台沿 X 轴反向运动到第 1 个曝光点, 待电机停稳后, 工件台沿 Y 轴方向运动一个间距, 待电机停稳后, 快门打开进行曝光, 这就是第 2 行的第一个曝光点, 工件台以这种方式工作至所有图形曝光结束, 并返回到运动原点, 保证了所有版的原点重合, 从而提高了套刻精度, 运动简图如图 5 所示.

2.2 误差补偿

影响工件台定位精度的因素有工件台的机械结构精度、伺服电机的控制精度、运动速度的设定以及外部环境的干扰等等. 本系统采用解析度为 $1 \mu\text{m}$ 的直尺光栅实时采样工件台的绝对位置信号, 用上位机软件进行闭环补偿, 主要流程如图 6 所示.

其中 n 为指定位移的脉冲量, l 为电机编码器反馈值, m 为工作台光栅反馈值, k 为光栅信号值和控制脉冲值的比例(根据脉冲当量和机械结构确定), q 为

表 1 实验系统参数设置

Tab. 1 Data setup for experiment system

实验次数	初始坐标/ μm	个数	间距/ μm	掩膜版数量	曝光时间/ms
1	(1000, 1000)	20 × 20	1000	3	3000
2	(1000, 1000)	15 × 15	1500	3	3000
3	(1000, 1000)	8 × 8	2000	3	3000

表 2 实验数据

Tab. 2 Experiment data

(μm)

掩膜版标记	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点
实验 1: 掩膜版 1 第 3 行	(2000, 4000)	(3001, 4000)	(4000, 4000)	(5000, 4000)	(5999, 4000)
实验 2: 掩膜版 2 第 8 行	(2500, 13000)	(4000, 13000)	(5499, 13000)	(7000, 13000)	(8501, 13000)
实验 3: 掩膜版 3 第 5 列	(11000, 3000)	(11000, 5001)	(11000, 7000)	(11000, 9000)	(11000, 11000)

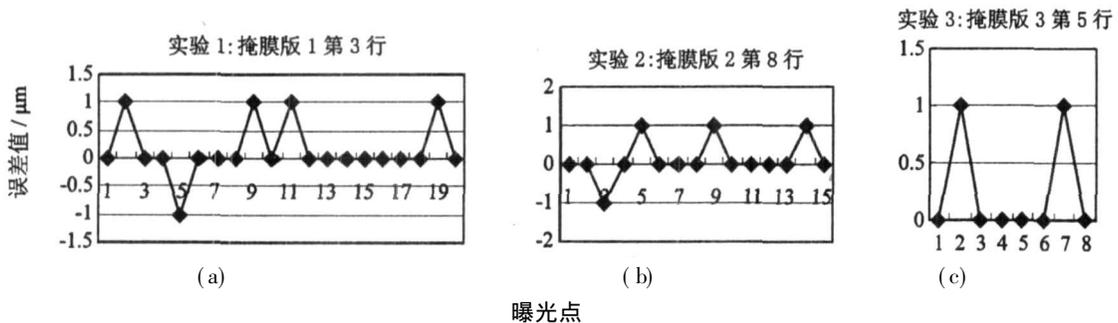


图 8 误差数据分布图

Fig. 8 Chart of error data

误差(单位为 μm)。伺服系统和运动控制器构成半闭环结构,由运动控制器采集电机编码器的反馈值进行补偿控制。同时,上位机采集直尺光栅信号与命令指定的位置脉冲量比较,当误差大于 $1 \mu\text{m}$ 或者小于 $-1 \mu\text{m}$ 的时候,对系统进行补偿,直到误差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 之间。在采用双闭环方式进行补偿控制后,本系统的精度要求达到了设计要求。

2.3 远程网络监控

为了提高控制系统使用的方便性及减少人为对光刻机工作环境的影响,控制系统基于先进的多媒体、网络通信技术和数字图像压缩技术,开发了远程网络监控子系统,其控制结构如图 7 所示。软件由基于 TCP 协议的控制数据传输子模块和基于 UDP 协议的视频数据处理子模块组成。

工作时首先开启服务器,建立网络端与服务器的连接,在网络端输入相应的控制参数,通过网络传输至服务器,经校验后,工件台就会按照网络端设置的参数运动,完成工作。当有出错时,服务器立即反馈给网络端,进行出错处理。视频数据的处理在服务器里完成,然后由发送模块将处理后的数据通过网络发送给网络端,网络端的接收模块接收视频数据后进行实时播放

显示。

3 系统实验

3.1 实验设备及参数设置

在原 H93-6/YL 光刻机保留原机械结构和工作环境的基础上更新控制系统后的平台上进行掩膜版制作实验,每组实验在相同条件下制作 3 块掩膜版,通过光栅数据分析检验其重复定位精度,并通过高倍光学显微镜检验其套刻精度,实验系统参数设置如表 1 所示。原系统以步进电机通过齿轮减速箱驱动滚珠丝杠,从而带动工件台运动,反馈光栅尺的解析度为 $1 \mu\text{m}$,受光刻机工件台机械结构精度和光栅尺精度的制约,该工件台的最高定位精度只能达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

3.2 实验结果

处理上述实验的所有曝光点数据,获得其定位误差 $\Delta \leq 1 \mu\text{m}$,表 2 为部分曝光点的坐标值,图 8 为误差分布图,通过高倍显微镜观察掩膜版的套刻情况,满足套刻精度要求。该控制系统经过多次实验,其准确性和可靠性都得到验证,目前已投入正常的使用。

4 结 论

本文以现代运动控制技术和网络监控技术为核心构建了光刻机工件台的控制系统,优化了工件台的运动模式和运动轨迹,并开发了相应的运动控制软件和网络监控软件.与传统控制系统相比,拓展了远程服务功能;控制方式更加灵活、简便;升级和拓展性能好;硬件简单,经济性好.今后通过采用高精度的机械传动结构和高精度的反馈传感器将进一步提高光刻机工件台的定位精度.实验结果表明,该系统可以满足光刻机工件台定位精度和工作效率的要求,体现了较高的应用价值.

参考文献:

[1] Wagner Christian. Advance technology for extending opti-

cal lithographg[J]. Proc SPIE, 2000(4000): 344- 357.

[2] Choia B J, Sreenivasana S V. Design of orientation stages for step and flash imprint lithography[J]. Precision Engineering, 2001(25): 192- 197.

[3] Fan K C, Chen M J. A 6 degree of freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages[J]. Precision Engineering, 2000(24): 15- 23.

[4] 刘丹,程兆谷,高海军,等.步进扫描投影光刻机工件台和掩模台的进展[J].激光与光电子学进展,2003(40): 14- 20.

[5] 赵春红,秦现生,唐虹.基于PC的开放式数控系统研究[J].机械科学与技术,2005,9(24): 1108- 1113.

[6] Meckl P H, Arestides P B, Woods M C. Optimized S-curve motion profiles for minimum residual vibration[C]// Proc of the American Control Conference. New York: CRC Press, 1998: 2627- 2631.

Research on the Technology of Motion control and Network Monitoring in Wafer Stepper

HUANG Yan-jiang, GUO Yir-biao^{*}, XU E Bo

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Lithography is one of the key equipments to produce IC. The high speed and positioning precision of stage is important to get high quality and efficiency. The speed mode, track, position error compensation of stage, the technology of modern motion control and network monitoring are researched in this paper. An optimized speed mode and track is realized by using the motion controller. The closed loop system is realized by using the coder and raster. And the long distance monitoring is realized based on the technology of TCP/UDP and video monitoring. With the windows operating system and Visual C++, system software is finished. The result shows that the positioning precision of stage has relised $\pm 1 \mu\text{m}$, the system has high efficiency and practical value.

Key words: motion control technology; orientation accuracy; network monitoring; stage