

光盘刻槽机伺服控制系统的研究

刘玉章 凌 砚 张 原

摘要: 本文描述光盘伺服槽及预制格式刻划机的主轴回转、直线微进给、自动调焦、激光控制等精密控制系统,时钟产生方式,光盘刻槽实验及实验结果。刻槽螺距精度达到 $1.6\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 。

一、前 言

光盘伺服槽及预制格式刻划机简称光盘刻槽机是制备光盘的母机。

光盘存贮器是一种新型的激光信号存贮装置,由于半导体性能的提高,激光技术的发展和集成化程度的不断进步,数字信号处理已变得相当容易,因此,人们对光盘的关注就从“能放图像的唱片”转到作为存贮和管理各种数字化信息介质的这一应用领域。时至今日,光盘存贮器正在发展成为一个大型工业门类。

光盘存贮器有三大优点:第一,光盘可进行高密度大容量记录信息,如用直径为30cm的双面光盘,可记录信息40千兆位。这比IBM3380类磁盘的记录容量高一个数量级。第二,光盘可进行快速随机存取,存贮时间一般为0.1秒左右。第三,光盘可靠性高,因光盘是非接触记录和读出,记录介质和读出头均不受磨损,介质寿命可长达10年以上。

光盘现已广泛应用到激光电视唱机,办公室自动化、计算机外存贮等领域。总之,光盘作为一门新兴工业正在崛起,前途无量。

光盘刻槽机就是为制备光盘而研制的一台光机电综合性精密装置。这台装置的研制成功填补了国内空白。刻槽机的结构如下图所示。



图1 刻槽机结构图

(一) 技术指标

1. 主轴回转速度: 120rpm~300rpm
2. 主轴稳速精度: 5×10^{-5}
3. 直线微进给速度: $3.0\mu\text{m/s} \sim 10\mu\text{m/s}$ 。
4. 直线微进给位置精度: $0.1\mu\text{m} \sim 0.05\mu\text{m}$ 。

- 5. 螺旋槽的螺距: $1.5\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 连续可调。
- 6. 调焦范围: $\pm 50\mu\text{m}$ 。
- 7. 调焦精度: $\pm 0.25\mu\text{m}$ 。
- 8. 激光稳定度: 1%
- 9. 调光范围: 2倍
- 10. 长光栅脉冲当量: $0.1\mu\text{m}$ 。
- 11. 圆光栅脉冲数: 14400l/c 。

二、精密伺服控制系统

光盘表面曝光光点很小 ($0.5\mu\text{m}$)，螺旋线螺距 $1.6\mu\text{m}$ ，螺距误差小于 $0.1\mu\text{m}$ ，光盘旋转时，由于光盘偏摆，偏心，表面不光滑等原因产生误差。为保证螺距的均匀性，增加存贮密度，均需精密伺服系统进行控制。这些伺服系统都要求高增益，高带宽，高灵敏度，高稳定度，下边分别对各分伺服系统加以介绍。

(一) 主轴伺服控制系统

主轴回转伺服系统是驱动光盘旋转的闭环系统，闭环控制系统的优点在于使用性能较差的元部件，通过控制电路的作用而得到较好的系统性能。我们采用高精度脉冲伺服系统，其系统的输入量由计算机标准时钟产生，反馈信号由与负载共轴的精密圆光栅产生，稳速精度可达到 5×10^{-8} 。

1. 主轴伺服系统结构

主轴伺服系统由空气静压轴承，圆光栅，挠性联轴节，永磁直流力矩电机组成。其结构框图如图 2 所示。

2. 主轴伺服系统原理

脉冲同步伺服系统是给定参考脉冲 f_r 和反馈脉冲 f_i 同步。系统主回路包含一个纯积分环节，构成一阶无差伺服系统，该系统由数字可逆计数器，D/A 转换器，PD 放大器，功率放大器，力矩电机，圆光栅，机械滤波器组成。其系统方框图如图 3。

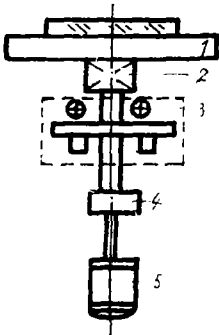


图 2 结构框图

- 1—托盘； 2—空气轴承； 3—圆光栅；
- 4—联轴节； 5—直流电机

下面分别叙述各部分工作原理：

(1) 数字积分器

本系统采用 MCS—51 单片机定时/计数器作为可逆计数器和一片 8 位 D/A 转换器构成

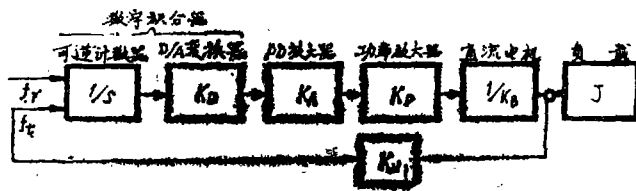


图 3 脉冲同步伺服系统方框图

图中：

- f_r —给定参考脉冲。 f_i —反馈脉冲。 k_D —积分器增益。
- k_A —PD 放大器增益。 k_P —功率放大器增益。
- k_B —直流力矩电机反电势系数。 J —转动惯量。

数字积分器，其框图如图4数字积分器的输出正比参考信号频率和反馈信号频率差对时间的积分，这可做如下说明：给定信号 f_r ，由计数器 T_1 端输入，进行加法计数，反馈信号 f_i ，由 T_2 端输入，进行减法计数，而 T_2 端中断优先 T_1 端中断，故两个信号(f_r, f_i)不能同时输入，保证了计数器正常工作。

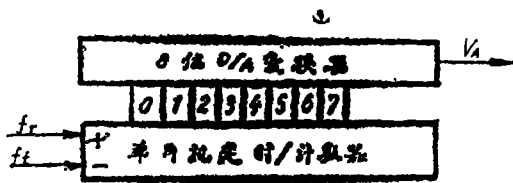


图4 数字积分器

因此，

$$k_D = \frac{V_{Amax}}{n_{max}} \quad (2)$$

其中：

V_{Amax} = 数字积分器最大输出。

n_{max} = 计数器最大容量。

当系统达到同步时， k_D 在一个码之内变化。

当 f_r 和 f_i 不等时，其计数器在不断地变化，随时间变化规律如下：

$$\Delta n = \Delta t (f_r - f_i) \quad (3)$$

由(1)式和(3)式可得：

$$\Delta V_A = k_D (\Delta n) = k_D [\Delta t (f_r - f_i)] \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_A}{\Delta t} = k_D (f_r - f_i) \quad (5)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V_A}{\Delta t} = \frac{dV_A}{dt} = k_D (f_r - f_i) \quad (6)$$

对(6)式两边积分

$$V_A = k_D \int (f_r - f_i) dt + C \quad (7)$$

由(7)式可见：

数字积分器是对频差的纯积分。

假设伺服系统电机由静止开始起动，数字积分器的典型输出波形如下图所示。

再来看看系统稳态时，数字积分器的稳态输出。稳态波形如图6所示，

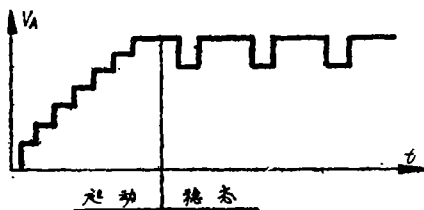


图5 电机起动时数字积分器输出波形

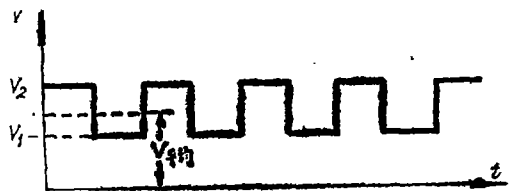


图6 稳态数字积分器输出

f_1 的下降沿使计数器进行加法计数, f_2 的下降沿使计数器进行减法计数。计数器的最低位是在不断地随时间变化。从而使其输出在 V_1 和 V_2 之间变化。模拟输出的平均值如下式所示:

$$V_{AVO} = V_1 + D(V_2 - V_1) \quad (8)$$

其中:

D —占空比

由于 V_1 和 V_2 之间占空比连续变化, 也就是说稳态相差的变化, 产生一个连续变化的模拟输出电压, 驱动电机旋转。

换言之, 计数器计数变化, 不能给电机输出一个准确的直流电压, 在 V_1 和 V_2 之间连续变化的准直流电平, 而波形循环周期是对称的, 弥补了 V_1 和 V_2 间隙, 这样可得到较准确的驱动电机的电平。

(2) PD 放大器

比例微分放大器, 对系统进行超前校正, 提高伺服系统带宽和增益

(3) 功率放大器

功率放大器采用射极跟随器方式, 应用反电势反馈和电流微分反馈, 构成小闭环系统, 既能增强系统的刚度, 又抑制了干扰。

(4) 增量编码器

主轴回转部分的圆光栅是一个增量式编码器作为速度检测元件, 光栅数为 14400 l/c 。

(5) 机械滤波器

低通滤波器和 PID 放大器都具有低通特性, 对于来自系统输入端的高频干扰具有足够的抑制能力。但是, 当高频干扰来自系统的输出端 (如电机本身的力矩扰动等) 时, 这种低通特性反而会起不利作用。这是因为, 此时的干扰输入点在电动机轴上, 滤波器和 PID 放大器处于干扰信号的反馈通路中, 它的低通特性对高频干扰有很大衰减, 于是系统对这种来自输出端的高频干扰抑制能力很差。为了弥补系统对高频干扰抑制的不足, 在负载轴上加飞轮, 作为机械滤波器, 帮助抑制高频力矩扰动。

3. 主轴伺服系统综合

脉冲同步伺服系统的稳态精度越高, 系统直流增益就要求越大, 系统频带要求越宽, 这样系统易产生振荡, 因此, 对该系统就要进行有源 PD 校正。以满足设计指标要求。

由图 3 系统方框图可知, 系统开环传递函数如下:

$$k_v = \frac{k_N k_D k_A k_P / k_B}{S(T_M S + 1)(T_e S + 1)} \quad (9)$$

其中:

k_N —圆光栅系数

T_M —机电时间常数

T_e —电气时间常数

k_B —反电势系数

k_D, k_A, k_P 前边已交待这里不再介绍了。经过 PD 校正后系统开环传递函数为:

$$k_v = \frac{k_N k_D k_A k_P / k_B (\tau_M S + 1)}{S(T_M S + 1)(T_e S + 1)(T_i S + 1)} \quad (10)$$

其中:

τ_M —微分校正拐点

T_i —积分拐点

其余系数含意上文均有介绍。

由 (10) 式可画出系统BODE图

图中:

W_{TM} —机电时间常数拐点角频率

W_{rM} —微分拐点角频率

W_o —系统通频带角频率

W_{Te} —电气时间常数拐点角频率

W_{Ti} —积分拐点角频率

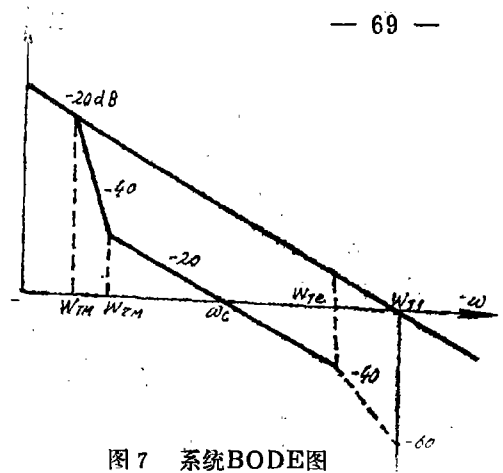


图7 系统BODE图

由上面 BODE 图可见, 伺服系统的直流增益带宽和系统精度有密切的关系。本系统频差检测元件的模拟输出特性是线性的, 因此, 系统校正可按线性系统考虑。系统的频带由扰动力矩频率决定, 系统扰动频率越高, 要求频带就越宽。

(二) 直线微进给伺服控制系统

直线微进给伺服控制是准锁相伺服系统, 其系统输入信号由主轴圆光栅产生的 随机 脉冲, 其信号频率与主轴伺服系统信号频率有严格比例关系。反馈信号由代表直线位移的长光栅经过八细分产生的, 其脉冲当量为 $0.1\mu\text{m}$ 。

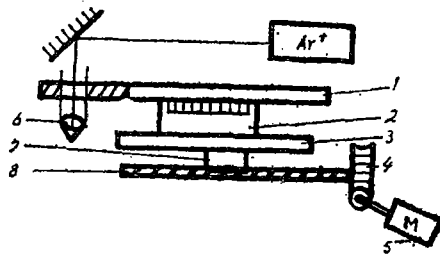


图8 直线微进给结构图

- 1—光学台; 2—长光栅; 3—工作台; 4—蜗轮副; 5—电机; 6—物镜; 7—螺母; 8—丝杆

系统框图如图9

直线微进给装置由高精度蜗轮副, 超高精度丝杆, 精密导轨、平面工作台, 台上安装625条线/mm衍射光栅和直流力矩电机组成。系统的工作原理和系统综合同主轴回转伺服系统类同。这里不再赘述。

(三) 自动调焦系统

自动调焦系统是为补偿盘片偏摆、表面不平等因素, 使激光光斑产生离焦而设置的。

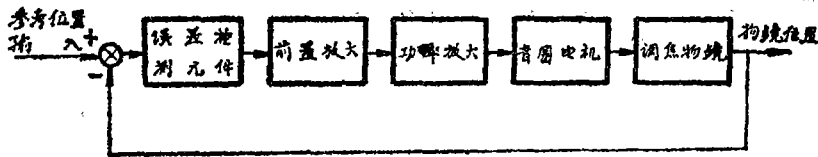


图9 调焦系统框图

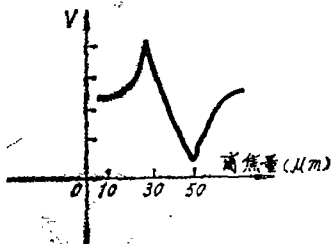


图10 聚焦误差曲线

位置误差检测采用四象限 PIN 光敏二极管, 其误差曲线如下图10所示。

执行元件采用音圈电机, 物镜装在音圈电机上, 为使物镜在圆筒内上下自由移动, 在圆筒内壁上涂一层氟塑料, 以减小磨擦, 在开环时, 物镜因重力处于最低位置。为防止音圈电机共振, 音圈电机的弹簧片有一定刚度要求。

调焦系统是一个宽带、高增益的闭环伺服系统。采用超前校正，功率级加有局部电流反馈，以减小音圈中线圈电感的影响，使幅频特性平直度变好，相频特性也有明鲜改善。系统放大倍数由总的离焦量和调焦精度之比决定，系统带宽由光盘表面不平滑度决定的。

(四) 激光控制

激光光盘曝光采用氩离子激光器，其波长为 4579\AA ，对激光光强的稳定度，光强随光盘半径的增加，按正切速度成比例增加，都需要精密控制，这样才能保证曝光均匀性。

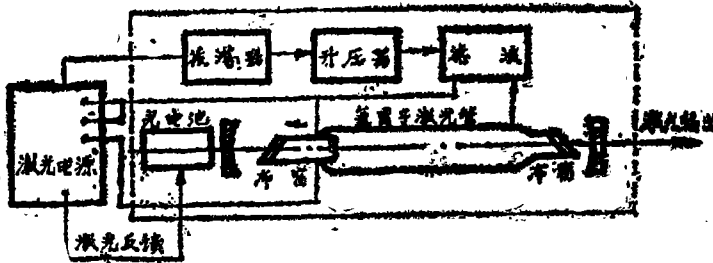


图11 激光电源和激光发生器

激光光源和激光发生器的示意图如图11所示。激光电源对激光进行稳流和光值稳定。氩离子激光器是气体激光发生器，光盘刻槽机所用激光发生器输出功率需大于 300mW 以上，通常刻槽功率为 $1\sim 5\text{mW}$ 左右。用声光调制器对激光进行稳光和调光。声光调制器驱动功率小，结构简单，消光比高，工作稳定。

三、时钟产生方式

时钟信号控制计算机各部分的协调同步，因此，它是十分重要的。对时钟信号的要求是必须与刻槽机旋转保持严格同步。只有这样才能保证得到准确螺旋线的螺距均匀性。保证时钟信号与刻槽机旋转同步的方式有标准时钟方式和随机时钟方式两种。在标准时钟方式中，时钟信号由晶体振荡器产生；在随机时钟方式中，时钟信号由与刻槽机轴上联结的编码器产生。无论采用那一种方式产生的时钟信号，在计算机里都是作为主令信号来使用的。计算机中的所有同步信号都以这个主令信号为基准来产生。对计算机运转来说，两种时钟方式并没有什么原则上区别，我们采用了随机时钟方式。

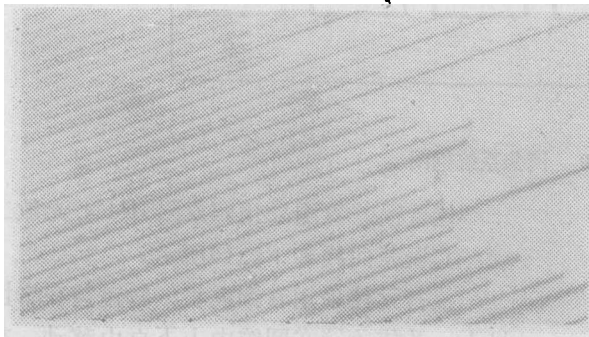


图12 标准时钟刻扇区局部图形

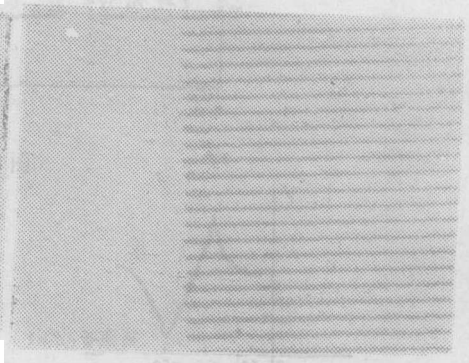


图13 随机时钟刻扇区局部图形

在随机时钟方式中，光栅盘产生的时钟信号，往往频率不够高，(典型值 14.4KC)，不能直用来作为主令时钟，因此，需要对光栅信号倍频，这样便产生一个与光栅信号为常数倍

的，并时刻保持与光栅信号同步的二次频率。

四、光盘刻槽实验

光盘刻槽机可对 $5\frac{1}{4}$ in 光盘和 8in 光盘刻螺旋线沟槽。螺距为 $1.5\mu\text{m}\sim 2.0\mu\text{m}$ ，连续可调。由于采用恒角速度工作状态，当由内圈往外圈刻时，其光盘半径变化一倍（30mm—60mm）。激光曝光光强与光刻头的正切速度成正比。因此激光光强也变化一倍。现把 $5\frac{1}{4}$ in 光盘刻槽实验结果列表如下。主轴转速 3 转/s，直线微进给速度 $4.8\mu\text{m}/\text{s}$ 。刻螺旋线，螺距为 $1.6\mu\text{m}$ 。图14经1500倍放大光盘螺旋线局部图片。

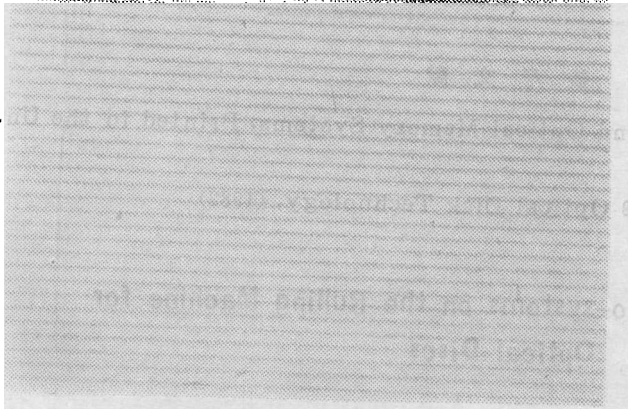


图14 光盘螺旋沟槽局部图片

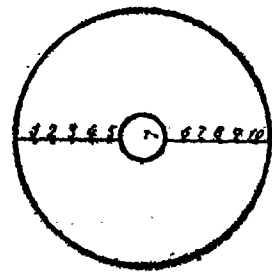


图15 $5\frac{1}{4}$ in 光盘测试图

五、周期测量

1. 样品90—1—2光刻胶厚度 4800Å ，螺旋形沟槽，有 16 个扇区，在样品上共测 10 处，每处测30条刻槽周期，所得周期及其均方根误差见表 1。

表 1

位置序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量位置距盘片中心距离 (μm)	59.5	52.5	45.5	38.5	31.5	31.5	38.5	45.5	52.5	59.5
周期 (μm)	1.61	1.61	1.64	1.62	1.63	1.65	1.64	1.62	1.63	1.64
均方根误差 (μm)	± 0.05	± 0.08	± 0.07	± 0.05	± 0.09	± 0.07	± 0.07	± 0.07	0.10	± 0.11

注：测量显微镜：Qlympus BHA—P型；测量放大倍数：1500 螺旋测微仪分辨率： $0.02\mu\text{m}$ 。

2. 螺旋线台阶及槽底宽度测量（参阅图16）

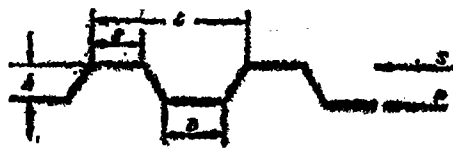


图16 沟槽图形

台阶及槽底宽度在不同的聚焦平面。我们以聚焦 S 面测得 B 值，聚焦 P 面测得 D 值，结果如下表 2。

表 2

盘片位置号	3#	12#
测量位置距 盘中心距离(μm)	46.0	46.5
L 值及均 方根误差(mm)	1.59 ± 0.06	1.67 ± 0.04
β 值及均方 根误差(mm)	0.65 ± 0.05	0.77 ± 0.06
D 值及均方 根误差(μm)	0.62 ± 0.07	0.67 ± 0.07

参 考 文 献

- [1] Jordan Isallovic《Videodisc and Optical Memory Systems》Printed in the United States of America, 1985
- [2] Robert A. Sprague, SPIE, 329 Optical Disk Technology, (1982)

A Study of the Servo-systems on the Rulling Machine for Optical Discs

Liu Yuzhang Ling Yan Zhang Yuan

Abstract

This paper describes several precision control systems of the servo-rulling and pre-formatting machine. They are the spindle servo, the microfeed carriage drive, the focus servo and the laser control. This paper also describes the way of clock operation, the rulling experiments on the optical disc and their results. It is showed that the accuracy of track pitch is $1.6\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$.