

一种高精度机械传动链传动 误差的检测系统

王一凡 王立鼎

摘要: 介绍一种从回转运动到直线运动的高精度机械传动链传动误差的检测系统, 包括系统的组成、检测原理、检测系统的误差分析和计算机接口电路的设计及软件设计。

一、引 言

随着时代的发展, 对精密机械加工的要求越来越高。随之而来, 对金属切削加工机床和测试仪器的精度要求也在提高。

做为精密机床, 传动链的精度是非常重要的。从传动链的输入端和输出端的运动方式来看, 传动链可分为圆到圆的传动和圆到长的传动两种方式。

1. 圆到圆的运动

圆到圆的传动最典型的是滚齿机。西德 Pfauter 公司生产的高精度滚齿机, 滚切齿轮的精度可达3~4级, 滚齿机分度传动链的精度在 $10''$ 左右。

对于圆回传的机床传动链、齿轮变速器等动态传动精度的测试仪器发展很快, 品种比较多。六十年代捷克的电磁分度技术传播到中国, 在上海机床厂开发了HYQ010型电磁分度传动链测试仪, 精度约 $\pm 1''$ 。随后, 一机部工具研究所从西德 Keingelnberg 公司引进了地震仪, 研制了两个地震头组成的传动链测试仪, 组装在齿轮单啮仪上应用。由于电磁式传感器输出信号弱、抗磁干扰能力差, 地震头传感器受自身固有频率的限制, 不能测量低频传动链。因此, 在欧洲首先采用光栅传感器组成了两个光栅头的传测仪。西德 Opton 公司商品传测仪中的单个传感器的精度是 $\pm 2''$, 分辨率为 $1''$, 自动记录传动链误差曲线。长春光机所与北京量具刃具厂仿制了 Opton 公司的传测仪, 并有商品出售。后来, 西德 Hedinhein 公司制造出更小巧的光栅式传测仪, 单个传感器的精度是 $\pm 1.5''$ 。上述这些动态测试仪器, 可以满足常规的圆到圆的传动链精度测试。

2. 圆到直线的传动

圆到直线的传动, 最典型的是丝杠车床和丝杠磨床。丝杠车床车削出的丝杠精度为6-7级, 而瑞士 Reishauer 和英国 Matrix 的丝杠磨床磨削的丝杠精度为5-6级。通常情况下, 机床上的母丝杠的精度比被加工丝杠的精度高一级。5级精度丝杠, 在1m长度上螺距的累积误差为 $9\mu\text{m}$, 周期误差为 $2.5\mu\text{m}$ 。

圆到长的测试仪器生产产品类型并不多。在七十年代, 由一机部北京机床研究所和国家计量院联合设计了激光光栅式丝杠动态精度检查仪, 圆编码器的精度 $20''$ — $30''$, 长度计量用双频激光干涉仪。后来, 这种仪器由汉江机床厂投产, 它只能测量5级或低于5级精度的丝杠。这类丝杠动态精度测试仪, 只能测量丝杠零件精度, 不能用于测量圆到长的传动链精度。

对于丝杠的周期误差为 $1\mu\text{m}$ 的光盘刻槽机,要求其刻划的螺旋线轨迹误差 $\leq \pm 0.04\mu\text{m}$ 来说,适于这样精度的圆到长传动链测试仪是没有现成的。为构成这样一个测量系统,又要满足高精度、高分辨率的要求,显然是个难题。

二、光盘刻槽机检测系统

光盘刻槽机是国家“七·五”重点攻关项目之一,是用作制备光盘的母机。它是由精密机械、光电检测系统、电子计算机、氩离子激光器为光源的光路等组成的高技术装备。其作用是用来刻划螺距为 1.5 、 1.6 和 $2.0\mu\text{m}$ 光盘母板。要求刻制的螺旋线线距误差在 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 之内。该机械传动系统的运动可分为圆回转运动和直线运动,由回转运动和直线运动复合成阿基米德螺旋线。

光盘刻槽机检测系统是由圆编码器、直线光栅干涉仪组成的光栅式光电检测系统,其数据采集及处理由计算机完成。检测系统如图 1 所示。

圆编码器与圆回转工作合同装在主轴上,并力求与光盘有较高精度的同轴度,光栅干涉仪的衍射光栅装在直线进给工作台上,并且使尺面与直线进给工作台运动方向保持平行。

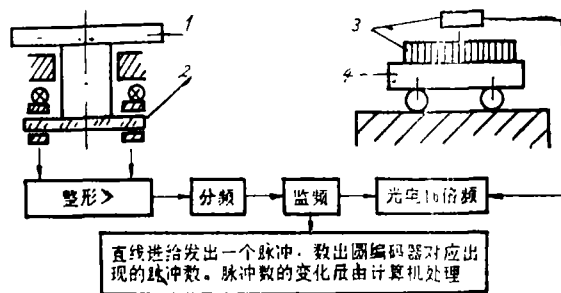


图 1 光栅式光电检测系统

- 1-圆回转工作台；2-圆编码器；
3-光栅干涉仪；4-直线进给工作台。

圆编码器刻线数为 14400 条线,经 2 分频每转可发 7200 脉冲,则脉冲周期 180 弧秒,直线光栅干涉仪光栅的刻线数为 625 线/mm,并且经光电 16 倍频,脉冲单元为 $0.1\mu\text{m}$ 。刻划线距与直线进给和圆编码器发出脉冲的关系如表 1 所示。

表 1

线距 S (μm)	直线进给一个脉冲,对应圆编码器发出的脉冲 N	7200 线可分割份数 $K = 7200/N$
1.5	480	15
1.6	450	16
2.0	360	20

检测系统的作用是检测刻槽机直线运动和圆回转运动所复合成的阿基米德螺旋线轨迹形成的螺距误差。当要求刻制的光盘阿基米德螺距为 $1.6\mu\text{m}$ 时,从表 1 中可以看出,直线光栅干涉仪每发出一个脉冲,对应圆编码器发出脉冲数为 450。由于刻制光盘阿基米德螺距存在着误差,那么,每差一个圆编码器发出的脉冲,在螺距方向上产生的误差量为:

$$\frac{180 \times 16}{360 \times 3600} = 2.2 \times 10^{-4} (\mu\text{m})$$

这样，通过测量两组脉冲之间的比例关系，就能测量出计入的误差量的大小。

三、检测系统的误差分析

1. 圆光栅测角系统

使用昆明机床厂研制的 $\pm 1''$ 精度的数显转台，对光栅编码器进行精度测试。将编码器每一转分36点，测试间隔 10° ，重复测试三次，编码器极限误差为 $\pm 2''$ 。

由于圆光栅编码器每两条线间的夹角为 $180''$ ， $2''$ 误差只占 $180''$ 的 1.1×10^{-2} ，可见精度是很高的。圆编码器偏差一个脉冲，对工作线距的影响为 $2.2 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ，那么，圆编码器 $2''$ 误差对工作线距的影响量 Δ_1 为

$$\Delta_1 = \frac{2 \times 2.2 \times 10^{-4}}{180} = 2.5 \times 10^{-6} (\mu\text{m})$$

2. 直线光栅干涉仪

直线光栅干涉仪的基本误差有：

(1) 线距偏差

实际线距的距离与理论值之差称之为线距偏差。根据检定刻线均匀性误差为 $\leq 0.01 \mu\text{m}$ 。经过均化后，线距偏差为：

$$\Delta_2 = \frac{\delta}{\sqrt{N}} = \frac{0.01}{\sqrt{4}} = 0.005 (\mu\text{m})$$

δ ——单个栅距误差；

N ——形成干涉条纹区域内刻线数。

(2) 累积线距误差

在一定长度上线距的距离与理论值之差称为累积线距误差。一般在 100mm 长度上，最大累积差 $< 5 \mu\text{m}$ 。考虑到我们只计被测物的线距均匀性。所以在测量系统中不应考虑该项误差。

(3) 由于光栅摆角引起的线性计量误差

由于光栅摆角引起的线性计量误差为

$$\Delta x = \frac{i}{\gamma + i} \times \frac{a}{2m}$$

式中： γ ——为分光束面与半波相位差面差夹角；

i ——为光栅摆角误差（或工作台摆角误差）；

a ——为光栅线距；

m ——为衍射级次。

在自准情况下，光栅方程式为：

$$2a = \sin \alpha = m\lambda$$

λ 为所用光的波长，刻槽机干涉仪所用中心波长约为 $\lambda = 900\text{nm}$ 。

从上式中可得出

$$\sin \alpha = 0.28125$$

γ 角可以从干涉条纹宽度公式中求出，取干涉条纹宽 $b = 8\text{mm}$ 。

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{a}{2m} \times \frac{\sin \alpha}{b}$$

$$\gamma = 5.8''$$

根据导轨综合检验最终结果, 工作段直线性误差为 $0.53''$, 而光栅干涉仪工作时只是在很微小的一段上, 所以其误差是非常小的, 刻线间距为 $1.6\mu\text{m}$, 估计导轨的非线性误差量为 $0.05''$, 由此误差影响的线性测量误差为:

$$\begin{aligned} \Delta_3 = \Delta x &= \frac{i}{\gamma + i} \times \frac{a}{2m} \\ &= \frac{0.05}{5.8 \times 0.05} \times \frac{1}{625 \times 2} \\ &= 6.8 \times 10^{-6} (\text{mm}) = 6.8 \times 10^{-3} (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

(4) 由于光栅安装时引起的误差

直线光栅在安装时, 首先用电感测微仪测量一下刻划平面与导轨的不平行度, 其误差控制在 $10\mu\text{m}/100\text{mm}$ 。由于直线光栅表面和导轨平面不平行会带来余弦误差, 在 $1.6\mu\text{m}$ 长度上引起的误差量为:

$$\begin{aligned} \Delta_4 &= 1.6 \times \left(\frac{1}{\cos \operatorname{tg}^{-1} \frac{10}{100000}} - 1 \right) \\ &= 8 \times 10^{-9} (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

3. 测量系统误差对测量精度的影响

测量系统的总误差 (即不确定度) 按均方值相加结果

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} \\ &= 8.4 \times 10^{-3} (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

对于光盘刻槽机实际检测结果的线距轨迹不均匀性 $< \pm 0.02\mu\text{m}$ 来说, 检测系统的精度系数为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{8.4 \times 10^{-3}}{0.02} \times 100\% \\ &= 42\% < 50\% \end{aligned}$$

所以认为该检测系统能满足测量要求。

四、计算机数据采集及数据处理

1. 数据采集系统框图

在光盘刻槽机的系统中, 检测系统的圆光栅编码器和衍射光栅干涉仪, 经过电路处理使其发出脉冲信号, 该信号既用于电控的锁相信号, 也作为计算机检测传动链精度的信号, 硬件接口电路框图如图 2 所示, 系统由 IBM-PC 计算机及数据采集接口板组成。



图 2 数据采集系统框图

2. 数据采集接口电路的设计

数据采集接口电路主要有译码电路、滤波电路、计数电路和 I/O 接口等组成, 接口电路

见图 3。

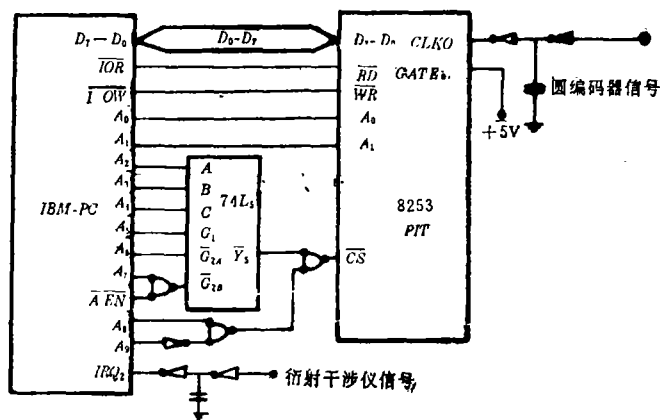


图 3 计算机采集接口电路

3. 数据采集程序和数据处理程序的设计

程序软件设计采用了混合编程方法，采集程序选用8088汇编语言编制，控制及数据处理过程用 BASIC高级语言编制。这种混合编程方法是数据采集与处理系统较理想的方法，它发挥了汇编语言执行速度快的特点，也发挥了高级语言控制及计算能力强的特长。框图见图 4、图 5。

五、结 论

1. 通过对光盘刻槽机机械传动链结果分析看出，系统刻线轨迹线距的最大误差 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ (3σ)，取 2σ 时则为 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ ，它仅为刻槽机设计指标 $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 之半，这对刻划光盘有足够的保险系数。与国外同类刻槽机相比，其传动链精度具有国际先进水平。诚然，这样高的精度却给机械传动链检测带来了难题。

2. 光盘刻槽机机械传动链动态检测系统，在没有国内外现成仪器又缺乏参考资料 的条件下，自行设计的高精度、高分辨率的动态测试系统。通过检测系统精度分析，该检测系统的不确定度为 $\pm 0.0084 \mu\text{m}$ (3σ)，它能够满足被测传动链对检测系统的精度要求，组成这样高精度的圆到长传动的动态测量系统。

3. 计算机接口电路本着实用、简单的设计原则，利用IBM-PC系统计算机使用方便、监视直观、软件多样化的特点，设计出高效、实用的应用软件。在检测方法的确定中，充分地利用检测元件的设计参数，避免了由于电细分等而带来误差的影响，顺利地完成了光盘刻槽机的动态检测任务。

参 考 文 献

- [1] Joseph L. Cinilli, SPIE, 899, 1988, 2~7
- [2] Yoshihiro Okino, Kazuhiko Sano, SPIE, 329 1982, 235~241
- [3] 匙彦斌等,《IBM-PC高级BASIC程序设计》,天津大学出版社,1988年8月
- [4] 周明德等,《微型计算机接口电路及应用》,清华大学出版社,1987年9月

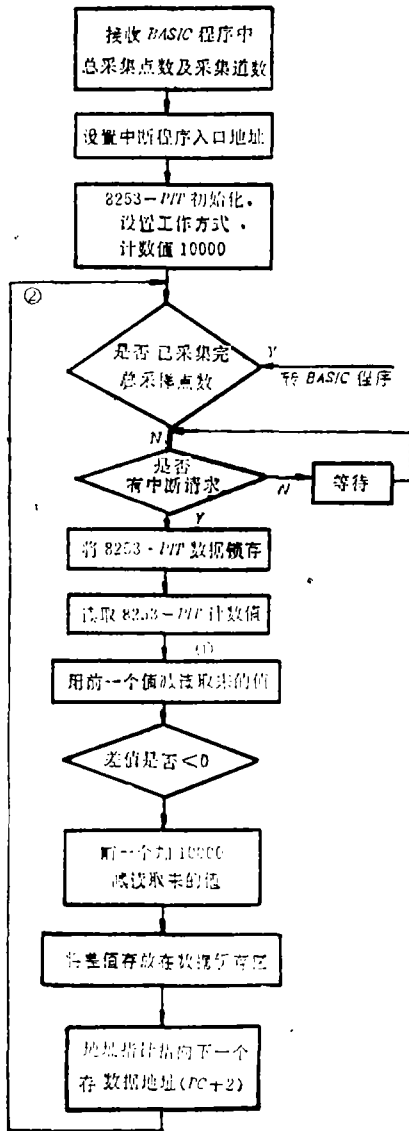


图 4 数据采集程序框图

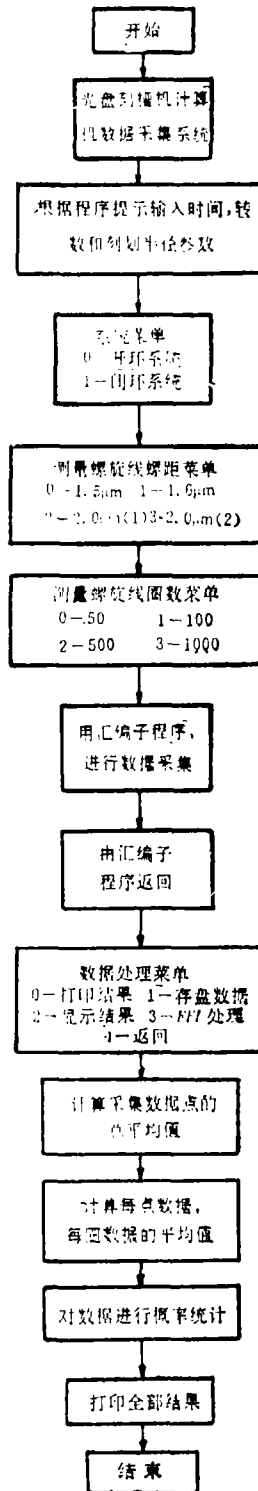


图 5 数据处理程序框图

A Measuring SyStem for Measuring Transmission Error of High Precision Mechanical Transmission Link

Wang Yifan Wang Liding

Abstract

In this paper a measuring system for measuring transmission error of high precision mechanical transmission link is introduced. The construction, the working principle and the error analysis of the measure system, the design of the computer interface and the computer software are described in detail.