

② 7-12

高精度光栅刻划中的综合误差修正技术*

Composition Errors Correction technique
for Manufacture of High Accuracy Grating

陈 骥

Chen Ji

杨世雄

Yang Shixiong

顾庆祥

Gu Qingxiang

余 红

Yu Hong

TH741.6

(重庆大学光电精密仪器系, 重庆, 630044)

A 摘要 在用线性系统和随机过程理论分析光刻机误差传递特性的基础上, 采用时间序列分析法建立误差的数学模型, 提出了综合误差修正的新方法, 介绍了微机综合误差实时修正系统的电路结构与工作原理。其主要特点是, 不仅能修正系统误差, 而且能够根据对随机误差的预报来修正相关的动态误差。实验结果表明, 系统修正精度达到 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

关键词 光栅; 刻划; 综合误差; 修正

中国图书资料分类法分类号 TH741.6

ABSTRACT In this paper, by using the theories of linear system and stochastic process, the transfer characteristics of the errors of a photoengraving machine are analyzed. On the basis of the analysis, the mathematical model of the errors is derived by use of the method of time series analysis. Then, a new approach called composition Error Correction (CEC) is presented. The circuit structure and the working principle of the CEC system adopting microcomputer are described. Its major feature is that the method can not only correct for systematic errors, but also can correct correlated dynamic errors according to forecasting values of random errors. The results of the experiment show that the correction accuracy of the CEC system reaches submicron grade ($\pm 0.1 \mu\text{m}$).

KEYWORDS grating; engrave; ; composition error; correction

0 引 言

在高精度光栅刻划的研究过程中, 为了提高光栅的刻划精度, 人们往往把注意力放在提高光刻机本身及其基础部件的制造精度上, 期望通过提高整个系统的制造精度来刻划出高精度光栅。但这将使光刻机的制造成本成指数曲线上升, 而其实际效果往往达不到理想效果。随着微型计算机在精密制造与测量领域应用的日益普及, 精密制造和测量领域中的误差修正技术也得到迅速发展。误差修正技术以其能大幅度提高仪器精度和具有显著的经济效

* 收文日期 1993-08-26

国家自然科学基金资助项目

益的优点正日益受到人们的重视,应用微机修正误差已成为当代精密机床和测量仪器发展的一种趋势。

我们在完成国家自然科学基金资助项目“高精度长光栅刻划系统及其误差处理技术的研究”的过程中,在引入线性系统理论、随机过程理论以及时间序列分析法研究光刻机误差传递特性与建模的基础上,提出综合误差修正原理,研制成功了综合误差微机实时修正系统,达到了 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 的系统修正精度。

1.1 光刻机误差传递系统

根据线性系统理论,若把光刻机曝光定位控制信息误差、导轨几何误差、温度偏差以及其它一些已知和未知误差因素看作 m 个输入信号 $y_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 光栅尺的刻划误差 $y_0(t)$ 则可看作这 m 个输入信号分别通过个频率响应函数为 $H_i(f)$ 的常参数线性系统产生的输出之和:

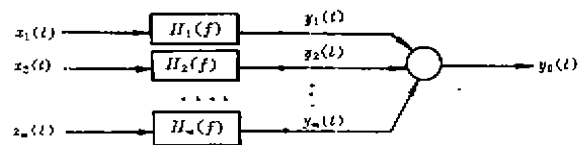


图 1 长光栅动态光刻机误差传递系统

$$y_0(t) = \sum_{i=1}^m H_i(f) \cdot y_i(t)$$

因而可把长光栅动态光刻机看作一个多输入单输出线性系统,如图 1 所示。因这里只讨论各种误差因素作为输入时,光刻机这一系统所产生的光栅刻划误差,所以可把光刻机看作一误差传递系统。由于光刻机是一种复杂的光、机、电一体化的系统,某些误差因素是未知的,各种误差因素如何通过这一系统传递转化为光栅刻划误差也很难用微分方程的形式建立起输入和输出之间的数学模型,因而也无法用拉氏误差变换的方法来求得系统的传递函数。尽管各误差因素 $y_i(t)$ 及其传递函数 H_i 不完全清楚,但它们通过系统所产生的输出——光栅刻划误差 $y_0(t)$ 却是已知的。 $y_0(t)$ 可用高精度激光测量系统检测出。因此,我们可以根据 $y_0(t)$ 建立误差修正的数学模型,根据该模型通过误差修正系统修正光刻机误差来制造高精度光栅。因 $y_0(t)$ 是所有误差因素通过光刻机产生的最终结果,同时还包含了光刻工艺中的误差因素,根据 $y_0(t)$ 建模进行预报补偿控制即可修正各种误差因素对光栅刻划精度产生的综合影响,所以我们把这种误差修正技术称为综合误差修正技术。

1.2 光栅刻划误差的随机误差特性与建模

把光栅刻划误差看作是空间位置的函数,在一次光刻过程中,对于每一空间位置,该函数都有一个确定的数值,但由于随机误差的存在,在多次光刻过程中,在相应的空间位置会得到不完全相同的结果。因此,我们可以用随机函数来描述光栅刻划误差,用随机过程来描述光栅刻划过程,单次光栅刻划过程产生的刻划误差为该随机过程的一个样本函数,经数字离散处理后即得一时间序列。由于光刻机系统误差的存在以及工作环境条件变化,产生的光栅刻划误差 $\delta(t)$ 实际上为非平稳随机过程。设由光刻机系统误差产生的光栅刻划误差为 $D(t)$, $D(t)$ 一般为确定性函数。由光刻过程中各种随机误差产生的光栅刻划误差为 $X(t)$, $X(t)$ 一般为各态历经的平稳随机过程,所以光栅刻划误差 $y(t)$ 这一非平稳随机过程可用加法模型来表示,即:

$$y(t) = D(t) + X(t) \quad (1)$$

因此,我们可取其单个样本记录来建模,首先分离出 $\delta(t)$ 中所包含的确定性函数分量

$D(t)$ 即通常所说的趋势项；

分离确定性函数分量 $D(t)$ 时, 可设:

$$D_t = \sum_{j=1}^n R_j e^{r_j t} + \sum_{k=1}^m B_k e^{b_k t} (C_k \sin k\omega + \sqrt{1 + C_k^2} \cos k\omega t) \quad (2)$$

采用逐步回归分析法来舍选上式中的因子, 确定其中的待定参数 R_j, r_j, B_k, b_k, C_k . 然后对剩下的平稳随机数据按时间序列分析法建立自回归模型(简称 AR 模型).

$$X_t = \sum_{i=1}^n \phi_i X_{t-i} + a_t \quad (3)$$

式中, $\phi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为自回归参数, $a_t \sim NID(0, \sigma_a^2)$ 是均值为零、方差为 σ_a^2 的白噪声序列, 代表非相关的随机误差. 具体的建模步骤可参阅文献[1].

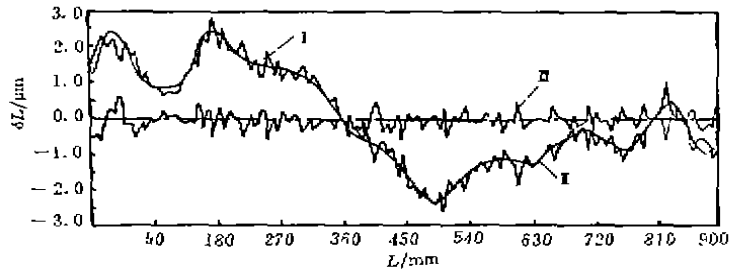


图 2 分离确定性分量 D_t 前后的光栅刻划误差曲线

图 2 中曲线 I 为光栅刻划误差曲线, 曲线 II 为分离出的确定性分量 D_t , 曲线 III 为分离出 D_t 后剩下的平稳时间序列 X_t . 图中 L 为长度, δL 为误差值.

2 综合误差修正原理

通过建模得到光刻机的误差模型后, 可对光刻机增加一顺馈校正环节来修正误差. 该校正环节为一比例环节, 其传递函数为 $K = -1$, 如图 3 所示, 校正后的输出为:

$$\begin{aligned} & \Delta Y_t (D_t + X_t) - (D_t + \hat{X}_t) \\ &= (D_t + \sum_{i=1}^n \phi_i (X_{t-i} + a_t)) - (D_t + \sum_{i=1}^n \phi_i X_{t-i}) = a_t \end{aligned} \quad (4)$$

式中, \hat{X}_t 为 X_t 的预报值, 即经过综合误差修正后只剩下预报误差 a_t .

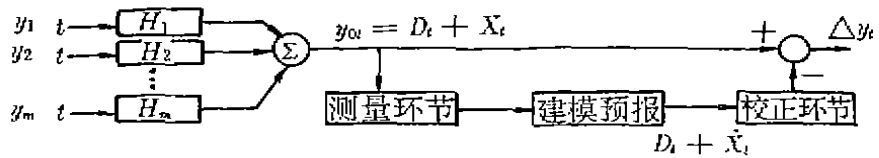


图 3 光刻机综合误差修正模型框图

综合误差修正是通过在光刻机曝光触发控制信号的修正来实现的. 曝光触发控制信号误差是作定位基准的标准光栅尺栅线位置误差、光栅传感器的安装误差、工作台运动误差、

阿贝误差以及温度偏差产生的误差的综合反映。曝光控制信号的定位精度直接影响到被刻光刻尺的精度,所以只要根据曝光触发控制信号误差的大小和正负从曝光步距的定值中减去或加上相应的脉冲数,即使曝光步距不断跟随补偿曝光控制信号误差就可获得修正误差后的准确的曝光控制信号。修正误差前后的曝光控制信号波形如图 4 所示。

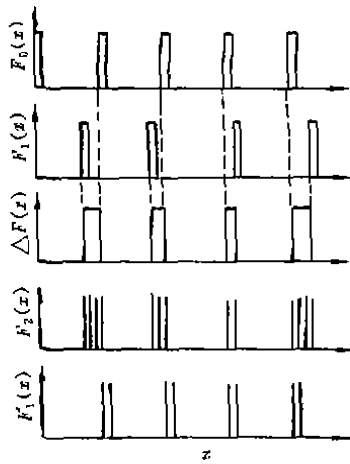


图 4 修正误差前后的曝光控制信号波形

$F_0(x)$ 为原始曝光控制定位信号
 $F_1(x)$ 为修正误差后的曝光控制信号
 设 $F_0(x)$ 为理想曝光控制定位信号
 $F_0(x)$ 可表示为:

$$F_0(x) = \text{rect}(x/a) * \sum_{i=0}^{\infty} \delta(x - is) \quad (5)$$

式中 a —曝光控制定位信号脉冲宽度
 T —曝光控制定位信号周期
 x —空间位移

$\text{rect}(x/a)$ —宽度为 a 的矩形函数
 $*$ —卷积符号

$\sum_{i=0}^{\infty} \delta(x - is)$ —周期为 s , 面积为 1 单位的 δ 函数序列。

则 $F_1(x)$ 也可表示为:

$$F_1(x) = \text{rect}(x/a) * \sum_{i=0}^{\infty} \delta(x - is - \Delta Si) \quad (6)$$

式中, ΔSi —曝光控制定位信号误差

$F_0(x)$ 与 $F_1(x)$ 的相位差为 $\Delta F(x)$, $\Delta F(x)$ 可表示为:

$$\Delta F(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{|\Delta Si|}\right) * \sum_{i=0}^{\infty} \delta\left(x - is - \frac{\Delta Si}{2}\right) = \sum_{i=0}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x - is - \Delta Si/2}{|\Delta Si|}\right) \quad (7)$$

由上式可知,曝光控制信号误差 ΔSi 直接反映了 $F_0(x)$ 和 $F_1(x)$ 相位差的大小和空间位置。若对 $\Delta F(x)$ 填充脉冲当量为 e_0 的空间脉冲序列,则校正脉冲序列为:

$$F_2(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x - is - \Delta Si/2}{|\Delta Si|}\right) * \frac{1}{e_0} \text{comb}\left(\frac{x}{e_0}\right) \quad (8)$$

由上式可知,任一曝光步距处需修正的脉冲数为:

$$M_i = \Delta Si / e_0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

尽管修正曝光控制信号误差后消除了一些主要的系统误差,可获得准确的曝光触发控制信号,但由于光刻过程中温度的波动,其它未知系统误差和随机误差的影响,仍然会产生一定的光栅刻划误差,这也正是“光学优生原理”在实际光刻过程中很难得到体现的原因。要刻划出亚微米级高精度的光栅,仅仅修正曝光控制信号误差 ΔSi 是不够的,还必须考虑其它未知系统误差和随机误差的影响,因此需采用综合误差修正技术。为此应按前述方法求出任一位置处由光刻机系统误差产生的光栅刻划误差的确定性分量 D_i 和随机误差 X_i 的预报值 \hat{X}_i , 然后按下式计算修正量

$$M_i = (D_i + \hat{X}_i) / e_0 \quad (10)$$

3 微机综合误差实时修正系统

光刻机的综合误差实时修正采用误差修正电路和 IBM-PC 微型计算机来实现,其系统模型图如图5所示。作光刻定位控制用的标准光栅和被刻尺坯干板串联或并联安装在工作台上,工作台在直流伺服电机拖动下作单方向直线运动,光栅读数头产生的莫尔条纹信号由光电转换、放大后,经200倍频电路形成与工作台运动的空间位置相对应的计数脉冲,脉冲当量为 $\epsilon_0 = 0.05 \mu\text{m}$ 。

光刻开始前,用复位按钮发出清零信号同时对3个D触发器置零,封锁进入曝光步距计数器 I、II 和误差修正计数器 III 的计数脉冲信号,计数器采用8253可编程计数器。当工作台运动到使光栅读数到达标准光栅尺固定的零位时,发出零位脉冲信号打开与门 Y₁,脉冲当量为 ϵ_0 的计数脉冲进入曝光步距计数器 I,当计数器 I 计数到给定的计数值时,发出 out1 信号,使计数器 I、II 开始计数,同时封锁 Y₁,使计数器 I 停止计数。out1 信号送入8259中断控制器中断请求输入端,由中断控制器向 CPU 发出中断请求信号 INT, CPU 响应中断请求后,即转向执行中断服务程序,在中断服务程序中,计算机根据实测值和误差参数模型计算出 M_i 和预报值 X_i ,并将其换算为下步曝光的修正 M_i ,将 M_i 预置入计数器 III 的计数值寄存器,计数器 III 在下次开始计数时便自动启用该新值计数。计数器 III 计数到给定值时发出 OUT3 信号,该信号即为修正误差后的曝光控制信号,经光电耦合器隔离后关入脉冲氙灯触发电路控制曝光。OUT3 同时封锁进入计数器 III 的脉冲,等待下一个 OUT1 信号到来再重新开始计数,如此循环就可得到进行综合误差修正后的曝光控制信号。

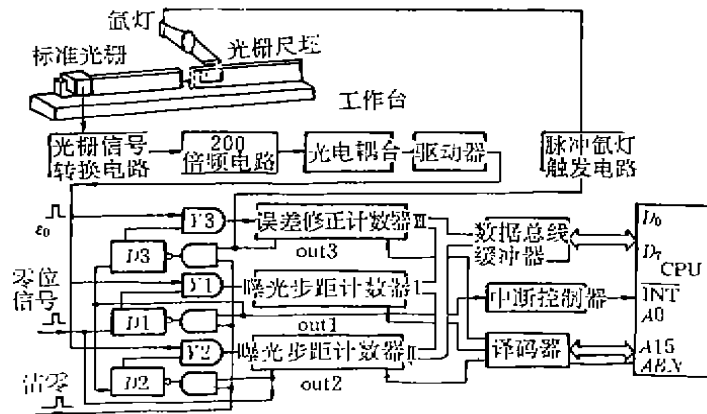


图 5 微机综合误差修正系统框图

计数器 I、II、III 的计数值 C_1, C_2, C_3 可按下式计算:

$$S = C_1 + C_2, \quad C_2 > (M_1)_{\max}, \quad C_3 = C_2 - M_1$$

式中: S —曝光步距, $(M_1)_{\max}$ —误差修正值中的最大值。

通过软件改变 S 即可方便地刻划任意栅距的光栅尺。

4 实验结果与结论

为检验本微机综合误差实时修正系统的校正精度,采用高精度激光干涉测量系统对误差修正前后的曝光控制信号的空间位置精度进行动态检验,测量结果如图 6、图 7 所示, L 为长度, δL 为误差值。图中曲线 ① 为原始曝光控制信号误差,曲线 ② 为误差修正后实测的曝光控制信号误差。图 6 和图 7 中所使用的校正脉冲当量 e_0 分别为 $0.25 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 。

由实验结果可知,误差修正的精度主要取决于校正脉冲当量和原始误差数据的检测精度。当校正脉冲当量提高到 $0.05 \mu\text{m}$,系统的修正精度达到了 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

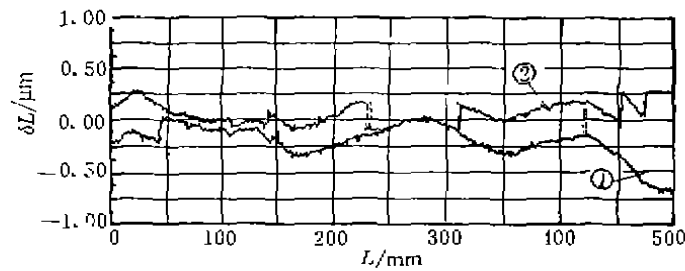


图 6 误差修正前后的曝光控制信号误差曲线($e_0 = 0.25 \mu\text{m}$)

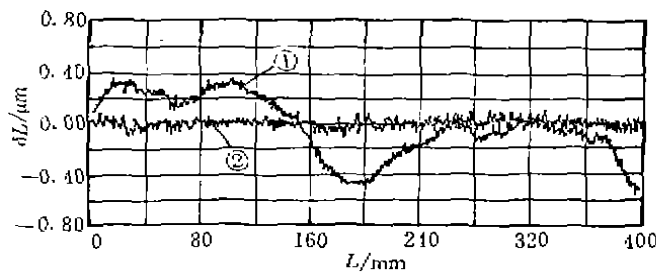


图 7 误差修正前后的曝光控制信号误差曲线($e_0 = 0.05 \mu\text{m}$)

实验结果表明,本文提出的综合误差修正技术和研制的微机综合误差实时修正系统在技术和实践上是可行的。采用综合误差修正技术后,可使系统精度提高一个数量级。综合误差修正技术的提出和实现解决了高精度光栅刻划中的误差补偿问题,为研制高精度光栅提供了一条新的途径。该技术具有广阔的前景,不仅可用于高精度长、圆光栅的动态光刻,还可用于解决超精密加工和测量中的误差动态修正问题。

参 考 文 献

- 1 Pandit A M, Wu SM 著,李昌琪,荣国传译. 时间序列及系统分析与应用. 北京:机械工业出版社,1988
- 2 杨世雄,顾庆祥,陈曦. 高精度长光栅动态光刻机定位误差校正. 传感技术学报,1988,1(1):26~34
- 3 Julius S. Bendat and Allan G. Piersal. Random Data analysis and Measurement Procedures. 1986
- 4 Wu S M, Ni J. Precision Machining without precise Machinery. Annals of the DIRP, 1989, 38(1): 533~536