

精确测量长凹球面曲率半径的差分干涉微机系统

史秀荣

(长春光机学院计算机系, 长春 130022)

张星晔

(长春师范学院数学系, 长春 130032)

摘要 给出了一种在比较短的工作长度上精确测量长凹球面镜曲率半径的单片微机测试系统, 介绍了该微机系统的基本原理、计算方法、硬件电路设计、误差分析及在应用中必须详细资料。

关键词: 曲率半径; 半径测量; 单片机; 接口; 光栅

1 引言

光学车间生产的球面镜, 曲率半径多在一米以内, 测量方法也比较多。其测量方法可分为两个主要类别, 直接测量法: 曲率中心固定, 测量表面和曲率中心之间的距离; 间接测量法: 通过测量表面矢高计算曲率半径。但是, 实践中常常遇到一些曲率半径较长的球面镜, 其曲率半径测量方法比较少, 如果用上述两种方法测量都会出现较大问题, 用直接测量法测量需要有较长的工作距离和相应长的测量传感器, 用间接测量法测量, 矢高测量的小误差会产生半径计算值的大误差。本文给出的长凹球面曲率半径的微机测试系统, 利用测量由被测面和参考平面形成的连续级共焦腔之间的腔长之差, 提供了一种在比较短的工作长度上精确测量长凹球面曲率半径的方法。

2 测试原理及计算方法

如图1所示, 参考平面和被测凹球面间形成一供光束折回反射的空腔, 移动滑板改变两表面之间的间隔, 记录对应共焦腔结构(即准直光通过平面聚焦于一个或另一个表面时的腔结构)的间隔, 通过测量任两个连续共焦结构之间移动的距离计算凹球面半径。由于在较高

级共焦结构中两表面之间的间隔大大减小,两连续级结构之间移动的距离较小,这样就能做到在比较短的工作空间内用相当短的测量滑板 and 传感器测出很长的凹球面曲率半径。

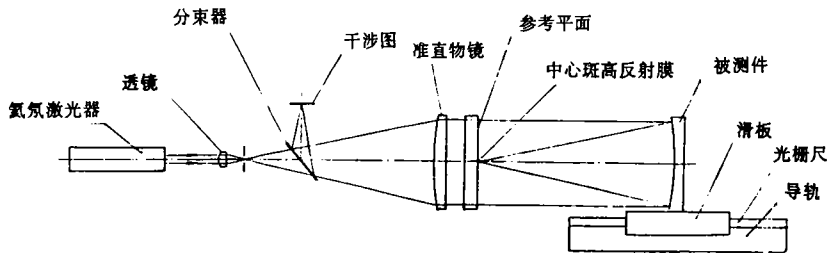


图 1 测试原理图

设经折反射 n 次后,聚焦于任一表面,腔长为 Z_n 。如图 2,当 $n = 1$ 时结构为标准的平凹腔,这里所有光线从平表面垂直入射,经凹面反射,再聚焦于平面。 $n = 2$ 结构缩短了平凹表面之间的距离,致使全部光线从平面垂直入射,经凹面反射,折离平表面,聚焦于凹表面。 $n = 3$ 的结构进一步缩短了平凹表面之间的距离,致使全部光线从平面垂直入射,经凹面反射,折离平表面,又经凹面反射。聚焦于平表面。类似分析可知更高级的共焦结构平凹表面之间的距离进一步缩短。

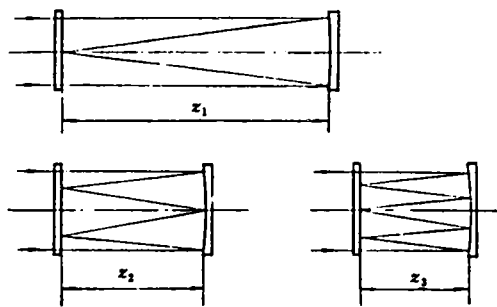


图 2 腔长 Z_n 。

设凹球面曲率半径为 R , 由 Gaussian 方程有

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{S_m} + \frac{1}{S'_m}$$

由转面公式得:

$$S_m = 2Z_n - S'_{m-1}$$

式中 $m = k, k - 1, k - 2, \dots, 0$

当 n 为奇数时, $Z_n = S'_k$; n 为偶数时, $Z_n = S'_k/2$ 。

以 $n = 5$ 为例, 求 R 与 Z_5 之间的关系

式。如图 3 所示, 由 Gaussian 方程及转面公式得:

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'_0}$$

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S'_1}$$

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S'_2}$$

$$S_1 = 2Z_5 - S'_0$$

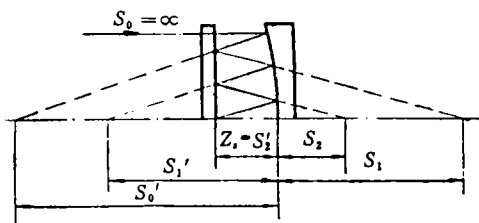


图 3 求 R 与 $Z_n (n = 5)$ 的关系图

$$S_2 = 2Z_5 - S'_1$$

$$S'_2 = Z_5$$

解之得 $Z_5 = 0.0669873R$

一般有 $Z_n = C_n R$

类似上面计算方法可得如下表 I:

n	C _n
1	0.5
2	0.25
3	0.1464466
4	0.0954915
5	0.0669873
6	0.0495156
7	0.0380603
8	0.0301537
9	0.0244717

R 由下式给出:

$$R = (Z_{n-1} - Z_n) / (C_{n-1} - C_n)$$

由上式, 当 n 是够大时, 测出较短的 $Z_{n-1} - Z_n$ 就可算出很长的半径 R 。

3 计算机测试系统硬件原理

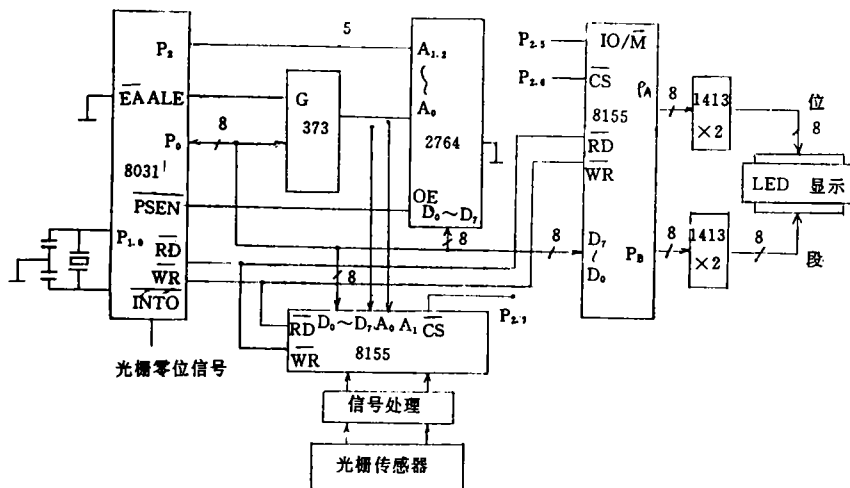
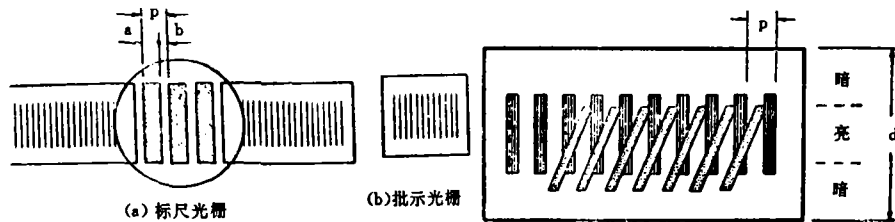


图 4 计算机测试系统硬件原理图

3.1 光栅测量原理

光栅传感器作为系统测量 Z_n 值的测长单元。光栅, 即是在透明或不透明的平面基底上, 刻划密集的等间距的平行线条。光栅传感器由标尺光栅和指示光栅组成, 两者光刻密度相同, 但体长相差很多, 其结构见图 5。把指示光栅平行地放在标尺光栅上面, 并使它们的刻线相互倾

斜一个很小的角度 θ ，这时在指示光栅就可以看到明暗交替的莫尔条纹，见图 6。



(a) 条纹宽度；(b) 刻线间距；(c) 光栅节距
图 5 光栅传感器结构图

图 6 莫尔条纹

光栅测量的特点：

(1) 当光栅副中任意一块光栅沿垂直于刻线方向移动时，莫尔条纹就沿垂直于交角平分线的方向移动。当光栅移过一个栅距 P 时，莫尔条纹也相应移动一个条纹宽度 a ，若改变光栅的移动方向，则莫尔条纹也跟着改变移动方向，因此可通过测量莫尔条纹的运动，即对莫尔条纹计数来测量光栅的位移量。

(2) 位移的放大作用

莫尔条纹的宽度 a 和栅距 p 的比值称为莫尔条纹的放大倍数 k ，有：

$$k = \frac{a}{p} = \frac{1}{\theta}$$

为了得到较大的放大倍数，可将 θ 取得很小，因此光栅可用作高灵敏度的位移传感器。

(3) 误差的平均效应

由于光电器件所接收的光信号是进入指示光栅视伤的刻线数 n 的综合平均效果，因此若光栅有局部或短周期误差 δ_0 时，则由平均效应光电器件输出的总误差为：

$$\Delta = \pm \frac{\delta_0}{\sqrt{n}}$$

因此计量光栅比较容易实现高精度测量。电路中选用每毫米 50 刻线的光栅尺，并径 20 细分，其分辨率可达到 $1\mu\text{m}$ 。

3.2 计算机硬件电路说明

系统的主机采用 8031 单片机作为总体控制，扩展了一片 2764 作为程序存储器。

显示器接口选用 8155 芯片。8155 芯片是一种多功能的可编程的常用外围接口芯片，它具有三个可编程 I/O 端口 (A 口, B 口和 C 口)，一个可编程 14 位定时计数器和 256 字节的 RAM。芯片中 $\text{IO}/\overline{\text{M}}$ 端是片内 RAM 或 I/O 口的选择线。当 $\text{IO}/\overline{\text{M}}=0$ 时，选中 8155 片内 RAM，若 $\text{IO}/\overline{\text{M}}=1$ 时，选中 8155 内三个 I/O 端口，电路中 $\text{IO}/\overline{\text{M}}$ 端由 $\text{P}_{2.3}$ 控制。系统中 8155 的 PA 口作为 LED 显示的位选口，PB 口作为 LED 显示的段选口，并径大电流驱动器 1413 驱动 LED 显示。

系统采用 INTEL 公司生产的 8253 芯片作为光栅脉冲信号的计数器。由于光栅、莫尔条

纹信号移动的方向不同,可出现两路光栅信号 C_{p+} 和 C_{p-} ,因此必须用二路计数器。8253 内部有三个 16 位减计数器,每个计数器有三根 I/O 线: CLK 时钟输入线, OUT 计数器输出线, GATE 门控信号线。电路中将 C_{p+} 脉冲接至 8253 的 CLK_0 端, C_{p-} 接至 8253 的 CLK_1 端,并同时启动 8253 计数。

3.3 微机测试过程

根据被测凹球面镜的名义曲率半径、工作空间长度及表 I 确定合适的腔结构 $n = N$ 。测量时被测凹球面镜固定在滑板上,移动滑板,安装在滑板上的指示光栅也随之移动。观察干涉条纹,当呈现 N 级共焦腔结构时停止移动,按零位键,此时微机系统产生中断,系统软件将光栅计数单元清 0,显示器显示为 0。再向前移动滑板,观察干涉条纹,计算机不断从 8253 计数器中取数,当呈 $N+1$ 级共焦腔结构时停止移动,这时 LED 显示出被测凹球面曲率半径的数值。

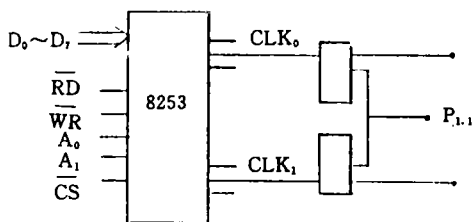


图 7 计算机硬件电路说明图

4 误差分析

由矢高方程,有:

$$W = R_w - (R_w^2 - a^2)^{1/2}$$

其中 R_w 为返回波前的半径, a 为系统极限孔径的半径。由 $R_w \gg a$, 矢高表达式简化为:

$$W = a^2/2R_w$$

又由 $f^2 = xx'$, 其中焦长 $f = \frac{R}{2}$, 物距 x 为 R_w , 象距 x' 为 dS'_0 , 有:

$$\begin{aligned} dS'_0 &= R^2/4R_w \\ dS'_0 &= WR^2/2a^2 \end{aligned}$$

定义有效数 f 数 $F = R/4a$, 有

$$dS'_0 = 8WF^2$$

又由

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{S_m} + \frac{1}{S'_m} \Rightarrow \frac{1}{S_m} = \frac{2}{R} - \frac{1}{S'_m} = \frac{2S'_m - R}{RS'_m}$$

$S_m = 2Z_n - S'_{m-1}$ 有:

$$\begin{aligned} S'_{m-1} &= 2Z_n - \frac{S'_m R}{2S'_m - R} \\ dS'_{m-1} &= 2dZ_n + \frac{R^2}{(2S'_m - R)^2} dS'_m \\ dZ_n &= \frac{8WF^2}{(N'_0)_n} \quad \text{当 } n \text{ 为奇数时;} \\ dZ_n &= \frac{4WF^2}{(N'_0)_n} \quad \text{当 } n \text{ 为偶数时。} \end{aligned}$$

常数 $(N'_0)_n$ 由下递推式给出

$$\begin{aligned} N_{m-1} &= 2 - N_m/(2C_n N_m - 1) \\ N'_{m-1} &= 2 + N'_m/(2C_n N_m - 1)^2 \quad \text{当 } n \text{ 为奇数时;} \end{aligned}$$

$$N_{m-1} = 1 - N_m/(4C_n N_m - 1)$$

$$N'_{m-1} = 1 + N'_m/(4C_n N_m - 1)^2 \quad \text{当 } n \text{ 为偶数时。}$$

其中 $N_K = N'_K = 1, C_n$ 值由表 I 给出。

有: $dZ_n = C'_n W F^2$

其中: 当 n 为奇数时 $C'_n = 8/(N'_o)_n, n$ 为偶数时 $C'_n = 4/(N'_o)_n$

由 $Z_n = C_n R \Rightarrow dZ_n = C_n dR$

有: $dR = dZ_n / C_n$

$$dR = (C'_n / C_n) W F^2$$

由上分析可知系统测量的精度决定于: (1) 调整被测件时的离焦误差, (2) 测量 Z_n 的长度误差。在离差误差为 $\lambda/20$, 测长误差为 0.01mm 时, 测量精度优于 0.01%。

5 结束语

系统提供了测量长凹球面曲率半径的一种方便方法, 利用这种方法, 能测量到 175 米的半径精度优于 0.01%, 只要求 1 米的滑板和传感器。这种方法可以推广到测量凸球面和更长曲率半径的凹表面。

参 考 文 献

- [1] J. D. Evans, Appl. Opt., 1971, 10 (4): 995
- [2] Mark C. Gerchman, Gecrge C. Hunter, Opt. Eng., 1980
- [3] 周明德, 微型计算机硬件软件及其应用. 清华大学出版社, 1983
- [4] 潘新民, 王燕芳, 微型计算机与传感器技术. 人民邮电出版社, 1994
- [5] 周航慈, 单片机应用程序设计技术. 北京航空航天大学出版社, 1994

Differential Interferential Microprocessor-based Measurement System for Precision Measuring the Radius of Curvature of Long Radius Concave Optical Surfaces

Shi Xiurong Zhang Xingye*

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

(* Depa. of mathetics, Changchun Normal Institute, Changchun 130022)

Abstract

A microprocessor-based measurement system for precision measuring the radius of curvature of very long radius concave optical surfaces in a relatively short working length is described. Its basic theory, hardware circuit design, error analysis and the detailed information necessary to provide for its practical application is presented.

Key Words: Radius of curvature, Radius measurement, Single chip processor, Interface, Raster