

非球面光栅读数头及数显装置

周长新

摘要: 本文介绍一种采用非球面准直镜的小型光栅读数头及与其配套使用的数显装置的工作原理、电路原理, 并叙述了该光栅读数头的光学系统、机械结构设计以及系统的装调方法。最后还进行了整个系统测量误差的分析。这种读数头结构简单, 实用可靠, 已获得推广应用, 效果良好。

一、前 言

计量光栅系统主要用于机械位移的测量, 同时也可用来测量与位移直接有关的物理量: 速度、加速度、机械振动和变形等。光栅的莫尔条纹现象是这种位移测量方法的基础。自五十年代开始, 这种技术在国内外获得了广泛应用。目前应用的领域主要是静态和动态的座标测量, 如用于跟踪仪器、光电计量仪器, 特别是在数控机床上, 获得了越来越普遍的应用。随着电子学技术的发展和光栅尺复制技术的日益完善, 目前莫尔条纹技术定型产品的数字分辨率在长度方面达到 $0.1\mu\text{m}$, 角度方面达到 $0.2''$ 。

我们应用光栅读数头测量偏心差, 研制成功高精度数字光电定心仪并通过国家鉴定, 达到国外同类仪器先进水平。为该仪器设计的光栅读数头, 由于采用非球面准直镜照明, 光学零件少, 尺寸小, 结构紧凑, 条纹对比度好, 调整简单, 深受欢迎, 在国内推广应用于不同用途的精密计量上, 如数控机床、三座标测量机、一米光栅测长仪等。本文对它作一简单介绍。

二、莫尔条纹的光学原理

用二块光栅常数相同的光栅以微小倾角重迭时, 在与栅线大致垂直的方向上, 将看到明暗相间的粗条纹, 这就是所谓莫尔条纹。

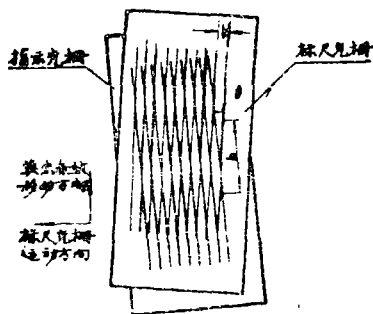


图1 莫尔条纹原理示意图

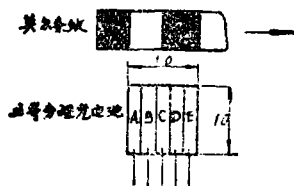


图2 莫尔条纹测量示意图

图1为横向莫尔条纹形成原理示意图。由于栅距 k 远大于照明光源波长 λ , 因此可不考

虑光的波动效应而只注意其几何光学效应，即不考虑衍射现象。通常用遮光效应来解释条纹的形成：在刻线与刻线交点的联线上透光面积最大，形成条纹亮带；而在刻槽与刻线交点的连线上光线相互被挡住了，形成条纹的黑带。条纹宽度 b ，倾角 θ ，栅距 k 三者的关系如下：

$$b = \frac{k}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

因 θ 角很小，可近似认为：

$$b = \frac{k}{\theta}$$

当一片光栅固定（如指示光栅），另一片光栅（标尺光栅）沿着垂直于刻线方向移动时，则莫尔条纹就沿着刻线的方向移动，光栅移动一个栅距 k ，条纹相应移动一个间隔 b ，即条纹亮度产生一次明暗交替的变化，亮度变化近似于正弦规律。用光电元件接收莫尔条纹亮度的变化就可测定光栅微小的位移值。

因为 $b \gg k$ ，所以光栅传感器有“位移放大器”的作用，可以将微小的位移放大数百倍乃至上千倍，并获得信噪比很大的稳定输出。光电元件接收的光信号，是进入指示光栅视场的许多线纹数的综合平均效果，因而误差的平均效应又大大降低了光栅的局部与周期误差对测量位移的影响。由于以上优点，用莫尔条纹技术可测量微小的长度与角度，近十几年来，这种技术获得了愈来愈广泛的应用。

三、光栅读数头的设计

1. 光学系统

光栅读数头的光学系统如图 3 所示。光源为 5W6.3V 白炽灯泡，为延长使用寿命，可以降压使用，工作电压 4.5V。照明物镜采用一块非球面准直镜，口径 $\phi 16\text{mm}$ 。非球面方程为：

$$X = 0.0714285Y^2 + 0.0001503Y^4 + 0.0000015Y^6$$

对面形加工要求弥散圆直径小于 0.1mm。光源灯丝位于准直镜焦点，非球面镜的像差计算应保证照明系统出射严格的平行光束，均匀照明光栅。如果光束有发散角（平行性不好），会造成条纹畸变，从而使反差下降并可能引入计量误差。光源照度要稳定，灯泡由稳压电源供电，否则因背景变化引起信号的直流漂移也会造成计量误差。

指示光栅与标尺光栅的栅距 $k = 0.01\text{mm}$ ，即：100 条线/mm。栅距误差 $\pm 1\mu\text{m}$ 。光栅副的间隙为 0.1mm，以保证条纹获得较高的对比度。

光电元件为五等分硅光电池，尺寸 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，它位于标尺光栅后有限距离处，不加透镜直接接收莫尔条纹，因此，该光学系统为费涅尔衍射系统或垂直入射系统。

2. 结构设计

光栅传感器的机械结构如图 4 所示。由于采用了非球面准直镜，光学系统简化，轮廓尺寸小，结构紧

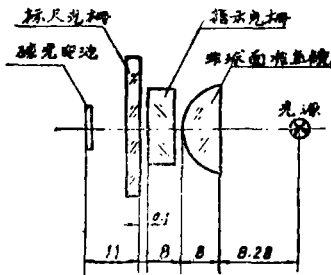


图 3 光栅读数头光学系统图

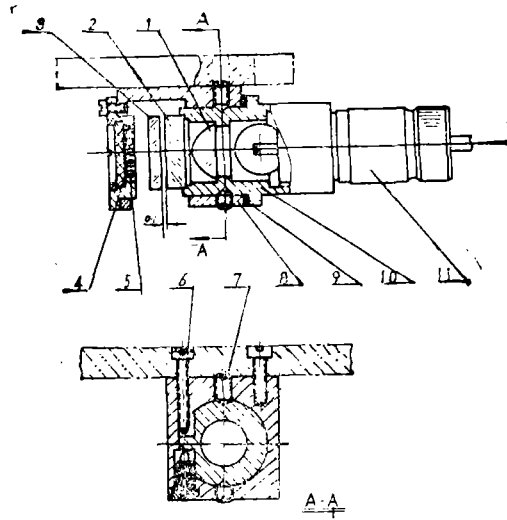


图4 光栅读数头结构图

1—非球面准直镜 2—指示光栅 3—标尺光栅 4—硅光电池 5—遮光螺钉 6—微调螺钉 7—锁紧螺钉 8—支座 9—调整垫 10—主体 11—光源组件

凑，使得机械结构外形尺寸也小（长×宽×高=93mm×33mm×30mm），适合于结构空间小的仪器上使用。

图4中支座8由2个圆柱头螺钉固结于一块固定底板上，标尺光栅与活动部件固结并随其平行移动。非球面镜1与指示光栅2与主体10胶结，通过微调钉6调整二块光栅的夹角 θ ，以保证所需的条纹宽度。通过修整垫的厚度来保证光栅副间隙0.1mm，遮光螺钉5的作用是用机械法调节硅光电池五路输出的直流电平大小（在电路上还有补偿电位计调节各路直流电平相等）。光源组件可调节灯丝位于非球面镜焦点上并使灯丝方向与光栅刻线平行。

四、光栅数显装置电路原理简介

和上述光栅读数头配套用的光栅莫尔条纹数字显示装置的电路原理方框图如图5所示。

因为光栅栅距为0.01mm，欲获得0.001mm的脉冲当量（即可测量 $1\mu\text{m}$ 的位移），需在电路上实现十倍频，这里采用的是一种较为简单的电细分方法。原理如下：

五等分硅光电池相当于五个 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的光电元件A、B、C、D、E，条纹宽度调整到宽10mm，正好和光电池对应（图2）。五路光电信号在相位上依次差 72° ，将它们按一定运算关系接到五个固体组件差分运算放大器，进行差分运算：

$$\text{第一路 } A - C: \sin \omega t - \sin(\omega t + 144^\circ) = K \sin(\omega t + 342^\circ)$$

$$\text{第二路 } A - D: \sin \omega t - \sin(\omega t + 216^\circ) = K \sin(\omega t + 18^\circ)$$

$$\text{第三路 } B - D: \sin(\omega t + 72^\circ) - \sin(\omega t + 216^\circ) = K \sin(\omega t + 54^\circ)$$

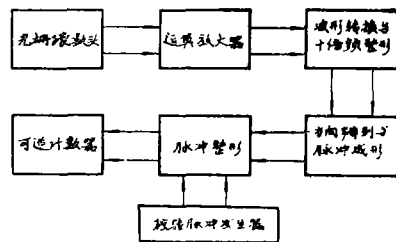


图5 光栅莫尔条纹数字显示装置电路方框图

第四路 $B - E: \sin(\omega t + 72^\circ) - \sin(\omega t + 288^\circ) = K \sin(\omega t + 90^\circ)$

第五路 $C - E: \sin(\omega t + 144^\circ) - \sin(\omega t + 288^\circ) = K \sin(\omega t + 126^\circ)$

其中 $K = 2 \sin 72^\circ$ 。

由运算放大器输出五路相位依次差 36° 的正弦信号，用它们去推动五个施密特触发器，使正弦波整形为方波，其后带有两级反相器，能获得相位依次差 36° 的十列方波，由此实现了波形转换和十倍频。方向辨别与脉冲成形是由一套阻塞微分门组成，按二与十或的逻辑关系组成的门电路。脉冲整形是二个单稳电路，作用是对门电路（或脉冲发生器）输出的脉冲加以整形，保证负脉冲有合适的宽度和幅度，以适应计数器对计数脉冲的要求。校验脉冲发生器供计数器自校用，它用单晶体管振荡产生脉冲，输出二种频率的脉冲，分别用作校验时慢减慢加或快减快加。可逆计数器采用中规模集成电路，集成度高、体积小、耗电小、抗干扰力强、工作可靠。

五、光栅读数头及电路的调试

1. 粗调相位：用微调螺钉使指示光栅转动一个微小角度（约 $3'26''$ ），使莫尔条纹宽度约为 10mm ，并且条纹方向和标尺光栅移动方向一致。

2. 精调相位：通过在示波器上观察李沙育图形的方法来调整五路信号的相位，使其依次相差 72° 。方法是把硅光电池输出的 A 路接到示波器的 X 轴，依次把 $A、B、C、D、E$ 接入 Y 轴，拉动标尺光栅，并调节光栅交角 θ ，使示波图形呈现如图 6 所示波形时，就表明精调好了相位。



图 6 表示五路信号相位差的李沙育图形

3. 调节各路输出的直流电平与交流电平：

缓慢移动标尺光栅，用直流毫伏表依次测量硅光电池各路输出的最大最小直流电压（对应于亮条纹与暗条纹的输出）之差约为 60mV 左右，可调节各路输出补偿电位计，使各路直流电平相等。拉动标尺光栅快速往复运动，用真空管毫伏表测量各路交流电平应大于 10mV 。

4. 示波器观察波形：不停地拉动标尺光栅并用多线示波器观测运算放大器五路输出信号的波形，应为幅度不大于 10V 的削顶波，调节电位计使各路信号前后半周期相等。波形上不许有大的高频毛刺，否则应更换固体组件。

至此，光栅读数头与数显装置就全调好了，可以进行精密位移测量的读数与检测。

六、误差分析及示值误差检定

应用光栅莫尔条纹测量位移时，可能引进误差的因素有以下几个方面：

1. 光栅刻线误差 Δ_1

这是误差主要来源，它决定于选用的光栅尺的刻线精度。在我们的应用实例中，要求光栅尺全长范围内为负差不大于 $2\mu\text{m}$ ，此误差直接反映到测量结果上。

$$\Delta_1 = -2\mu\text{m}$$

2. 光栅刻线安装位置不垂直于导轨运动方向而引起的误差 Δ_2

设光栅刻线安装位置与导轨运动方向成夹角 $90^\circ \pm \varphi$ ，在测量位移的工作行程为 L 时的测量误差

$$\Delta_2 = L(1 - \cos\varphi)$$

设计要求 φ 控制在 $10'$ 之内。 $\Delta_2 = 10^{-6} \times L$ 。本应用实例 $L = 10\text{mm}$ 。 $\Delta_2 = 0.1\mu\text{m}$ ，可以忽略不计。

3. 标尺光栅运动时导轨在垂直与水平方向的偏摆引起的误差 Δ_3

在本应用实例中，采用弹簧导轨，垂直方向偏摆 $\beta \leq 2'$ ，水平方向偏摆近似为0。

$$\Delta_3 = L(1 - \cos\beta) \approx 0$$

显然， Δ_3 也可忽略不计。由于 β 直接影响光栅副的刻线交角 θ 变化，从而改变莫尔条纹的宽度，改变五路信号的相位关系，因此在设计时要保证导轨的平直性和平稳性。水平方向偏摆将改变光栅副的间隙，也将引起条纹附加位移，引入计量误差。

4. 电路上模—数转换误差 Δ_4

(1) 由于光栅透明度的不均匀性，标尺光栅运动过程中光栅副间隙的变化，灯泡老化及灯泡电源波动等因素影响，往往在光电池输出中混有干扰信号，这是一种慢变化的共式干扰。由于在电子线路第一级采用了差分运算放大器，五等分硅光电池中每二个光电池的干扰信号大小是相近的，因此能有效地抵消这种共式干扰。

(2) 由于光栅刻线的不均匀性，二块光栅片在安装时的间隙不均等因素，会造成条纹的歪扭，五等分硅光电池等分不均能引起五路信号平均相角不均，造成相位差的误差，从而引进模—数转换误差。但这些在光栅的装调时通过仔细调整后可尽量减少其影响。

总之，所有以上在电路上出现的相位误差，不允许超过一个脉冲当量值，即 $1\mu\text{m}$ 。因此我们可以给出

$$\Delta_4 = \pm 1\mu\text{m}$$

因此光栅测量位移部件的总误差

$$\Delta_{\text{总}} = \Delta_1 + \Delta_4 = -2 \pm 1\mu\text{m}$$

示值误差检定：我们用一根经过标定过的精密差动测微丝杆，移动标尺光栅运动部件，丝杆每转一圈为 $100\mu\text{m}$ ，与数显装置显示值比较，全行程内数显与丝杆读数之差不大于 $3\mu\text{m}$ ，实测与上述误差分析结果一致。

A Grating Read Head with an Aspherical Lens and Digital Display

Zhou Changxin

Abstract

This paper relates the principles of a grating read head of small size, in which an aspherical lens is adopted, and of the digital display device matching with the read head. The principles of the circuit and optical system, mechanical construction design of the grating read head and adjusting method of the system are described. The measuring error of the whole system is analysed.

The read head is simple in structure and reliable in use. It has been used widely in a variety of areas of production, the efficiency is good.