

使用CCD进行动态高精度角度测量

金 春 水

摘要: 本文讨论了使用线阵CCD作为光电接收器的高精度动态测角系统的原理, 结构及系统的精度, 最后对衍射及滤波对测量精度的影响也进行了分析。

一、引 言

在大型光电跟踪系统中, 跟踪精度要求很高, 需采用复合轴伺服系统的形式。在复合轴伺服系统中, 母系统在较大的视场内对目标进行粗跟踪。这就决定了它的精度不高, 需要由子系统进行补偿。这样要求子系统不仅有比母系统更高的跟踪精度, 而且有更好的动态响应性能。子系统由速度控制回路与位置控制回路组成。这两个回路的角速度信息与角速度信息, 以往是由测角系统和测速电机提供, 而测速发电机的体积大, 其转动惯量将会影响子系统的动态特性, 同时现有的测速电机产品的灵敏度偏低。本论文的任务就是脱离原有测角与测速分离的模式, 采用新的测角系统, 使它不仅能对子系统反射镜的转角进行动态测量而且通过对角位移进行微分测出反射镜的角速度。从减小系统的动态误差和提高角速度的准确性有两方面考虑, 测角系统必须具有很高的采样频率。线阵电荷耦合器件 (CCD) 由于具有很高的采样频率、噪声小、体积小、牢固可靠、低电压工作等特性, 成为解决上述问题的一个有效手段。

二、测角系统的工作原理

自准直仪是一种应用光学自准直成像原理工作的高精度测试仪器。它是用光学自准直法把物场的角量变换成像场的线量, 然后在像场测出其线量而间接地测出物场反射面微小的角度变化。

本测角系统就是利用自准直原理测量反射镜的转角, 如果在CCD采样周期 Δt 内, 由于反射镜的转动使狭缝像的中心由图1的A点移动到图2的B点, 其间扫过的CCD象元数为 n , CCD线阵的象元尺寸为 p , 则狭缝像移动的线位移为 $s = np$, 反射镜的转角为:

$$\varphi = s/2f' = np/2f'。$$

反射镜的角速度为:

$$\omega = \varphi/\Delta t。$$

如果采样频率足够高, 即采样周期 Δt 很短则 ω 完全可以代替测速电机提供的速度信息。

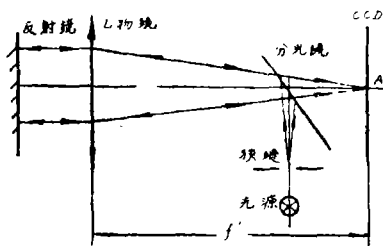


图 1

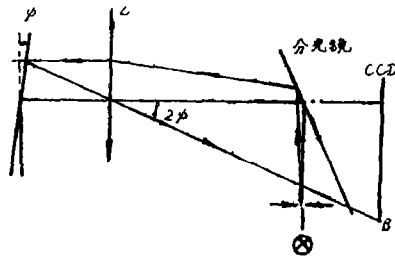


图 2

三、系统的误差分析

1. 原理误差

根据自准直原理 $\alpha = f' \operatorname{tg} 2\varphi$ ，表示线量 α 与角量 φ 成正切关系，但在小角度范围内近似为 α 与 φ 成线性关系即 $\alpha = 2\varphi f'$ 。由此给测角带来了误差，在本系统工作范围内最大误差 $M_1 = 0.32''$ 。

2. 焦距误差

在制造过程中由于光学系统元件曲率半径的误差、折射率误差及中心厚度误差等，引起准直系统的实际焦距与名义焦距不符。本系统焦距可采用检测标定的方法，使焦距的相对误差为 0.1%，它给测角带来的误差为： $M_2 = 1.75''$ 。

3. CCD的量化误差

CCD不是连续测量元件，而是断续测量元件，因此量化误差是一个必须要考虑的因素。

求取狭缝像几何中心的量化误差为： $\sigma_0 = \frac{p}{2\sqrt{6}}$ 则狭缝像的线位移的均方根误差为： $\sigma = \frac{p}{2\sqrt{2}}$ 。此项误差为均匀分布的随机误差，最终反映为测角误差为： $M_3 = 0.43''$

4. 反射镜不平度误差

反射面的不平度会破坏反射光束的平行性，这会影响到测角精度。在本系统中，它给测角带来的误差甚小可忽略。

5. CCD安装带来的误差

(1) 如图 3。假定 zox 面为系统的焦面。若 CCD 绕 z 轴有一个转角，此时相当于 CCD 象元尺寸发生变化，由 $p \rightarrow p/\cos\theta$ ，此时所测 α 值由 $\alpha \rightarrow \alpha/\cos\theta$ 但此次误差对测角精度的影响甚小可忽略。

(2) CCD 安装没有与狭缝像垂直时给测角带来的误差。

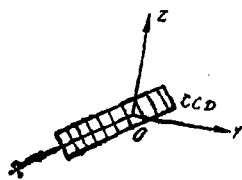


图 3

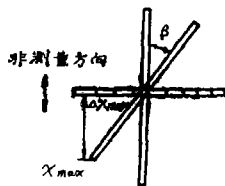


图 4

如图4情况。由于采用二套系统对反射镜进行二维测量，狭缝像也会沿非测量方向平移，因此对于其中任一维的CCD测量情况，如果狭缝像与CCD不垂直，这种平移会给测量带来误差。设不垂直度 β 取 $2'$ ，则测角的极限误差为 $M_4 = 1''$ 。

7. 动态误差

由于所测角是动态的，在CCD的光积分时间内，狭缝像将移动一定的位移，这样给测量带来动态误差。设反射镜的角速度为 $1^\circ/s$ ，光积分时间 $t = 0.8ms$ ，则带来的误差为： $M_5 = 1.44''$ 。

采用高斯方法对未定系差和随机误差进行合成，其对应的置信概率为95%。系统的动态误差为：

$$M_{0.95} \approx \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2 + M_5^2} = 2.5''$$

四、实验装置

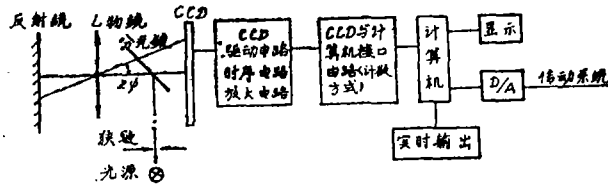
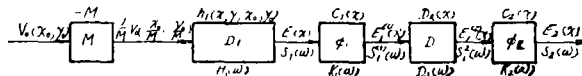


图 5

本实验实现了对CCD高的采样频率，完全可以满足对角位移进行微分求速度代替测速机的要求，说明从原理上采用此种方案是可行的。

五、像面能量分布的讨论

均匀照明的狭缝最终由CCD形成电子图像的过程如下：



$V_0(x_0, y_0)$ — 物函数；

$V_1 = \frac{1}{M} V_0 \left(-\frac{x_0}{M}, -\frac{y_0}{M} \right)$ — 几何光学理想像； M 表示几何光学的放大率并成倒像；

D_1 表示了衍射效应的作用；

$h_1(x, y; x_0, y_0)$ — 光学系统的线扩散函数； $F_1(\omega)$ 为频谱

$E(x)$ — 光学系统像面的照度分布函数，其频谱为 $S_1(\omega)$

ϕ_1 表示空间滤波过程

$C_1(x)$ — 空间滤波函数其频谱为 $K_1(\omega)$

$E_1^{(1)}(x)$ — 空间滤波后的信号，其频谱为 $S_1^{(1)}(\omega)$

D CCD离散化过程

$D_R(x)$ — 离散函数，其频谱为 $D_S(\omega)$

$E_1^{(2)}(\omega)$ — 离散化信号，其频谱为 $S_1^{(2)}(\omega)$

ϕ_2 表示转移中的损耗滤波

$C_2(x)$ — 滤波函数，其频谱为 $K_2(\omega)$

$E_2(x)$ 一为所求的电子图像信号, 其频谱为 $S_2(\omega)$

目标函数经光学系统及 CCD 器件的一系列变换过程可用目标函数与各相应环节的权重函数进行卷积并与离散函数相乘之乘积来描述。

$$E_2(x) = \left\{ \frac{1}{M} [n_1(x) \cdot \text{Reet}\left(\frac{x}{Mb}\right)] \cdot [\text{Reet}\left(\frac{x}{p}\right) \cdot \frac{e^{-\alpha x} a L_n}{\pi} \int_0^{\cos K_n} \frac{\cos K_n}{\sqrt{1 + K^2 L_n^2 + a L_n}} dK] \cdot R^p \right\} \cdot p \sum_{n=0}^N \delta(x - np) \cdot \sum_{n=0}^N \frac{N!}{(N-n)! n!} \cdot (1-\epsilon)^n \cdot \epsilon^{N-n} \cdot \delta(x - np)$$

i —吸收系数 n —耗尽区深度

L_n —扩散长度 (CCD 内部)

N —电荷包的转移次数

p —CCD 象元尺寸 ϵ —转移损耗

采用快速傅氏变换方法计算, 如果使运算中的离散间距或采样间距与 CCD 各单元中心距相等则可将运算中的离散化代替上式中的离散函数的作用, 最终 $E_2(x)$ 可表示中:

$$E_2(x) = F^{-1} \left\{ R^p \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \text{sinc}(Mbf_s) \left[\arccos \frac{x f_s}{2A} - \frac{x f_s}{2A} \sqrt{1 - \left(\frac{x f_s}{2A}\right)^2} \right] \cdot \frac{\sin\left(\omega \frac{R}{2}\right)}{\omega \frac{R}{2}} \cdot e^{-N\epsilon} (1 - \cos 2\pi f_s p) \right\}$$

$f_{s,i} = \frac{i}{N DP}$ f_s —空间频率 N —采样点数

i —采样点序号 $i = 0, 1, 2, \dots, n$

DP —采样间隔, $DP = P$

b —输入目标函数方波的宽度。

选取几组典型参数代入上式, 进行 FFT 变换, 得出如下结论:

输出信号边缘的信号幅值变化梯度随入射光波长的增大, 光学系统数值孔径 (A) 的减小, CCD 器件转移损耗率的增大而减小。从减小信号边缘变化对测角精度的影响这一角度出发应增大信号变化的梯度, 也就是说应采用短波波长的光源照明、大数值孔径的光学系统、转移损耗小的 CCD 器件, 同时狭缝的宽度也应尽可能窄些。

参 考 文 献

- [1] 梁治平, 电子技术, 1980年1期, p27-31
- [2] 大岛光雄, イメージセンサの選び方・使いる, 日刊工業新聞社, 1980年。
- [3] J. W. 顾德门, 傅立叶光学导论, 科学出版社, 1965年。
- [4] 杨渝钦, 控制电机, 机械工业出版社, 1980年。
- [5] 毛英泰, 误差理论与精度分析, 国防工业出版社。
- [6] 肖明耀, 误差理论与应用 计量出版社 1985年。
- [7] 陈大华, 现代光源基础 学林出版社 1982年。
- [8] 张春华, 光学工程, 1983年3期, p29-39。

A High-accurate Dynamic Angle Measuring System Using CCD as a Detector

Jin Chunshui

Abstract

This paper describes the design of a high-accurate dynamic angle measuring system using CCD as a detector, including the principle of the operation, structure and the error analysis.