

采用线阵 CCD 测量扫描镜步进角度的系统设计

陈秋霞，陈桂林

(中科院上海技术物理研究所，上海 200083)

摘要：介绍了采用线阵 CCD 测量扫描镜步进角度的方法，并给出了详细的实现方案，包括光学系统设计、硬件电路设计以及 CCD 数字化信号处理方法。解决了一般情况下无法做到的高精度非接触式动态测量问题，并为系统的工程化打下了坚实的基础。

关键词：线阵 CCD；角度测量；FPGA；重心算法

中图分类号：TN214 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2006)03-0150-04

Design of Measuring the Stepped-Angle of Scanning Mirror with Linear CCD

CHEN Qiu-xia, CHEN Gui-lin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: This paper introduces a method for measuring the stepped - angle of scanning mirror with linear CCD, along with a detailed implementation strategy, which includes the design of optical system and hardware circuit and the processing algorithm of the digital signals. This method resolves the high accuracy and real - time problems which the normal systems can not do and it is fundamental for further practical applications.

Key words: linear CCD; angle measurement; FPGA; centroid algorithm

引言

在光机扫描系统中，扫描镜的扫描精度是整个系统中最重要的指标，因而检测扫描镜的步进角度是扫描机构研制中的一个重要的环节。

测量角度的方法有：机械测量方法、电磁测量方法、光学测量方法以及光电测量方法等。机械测量方法早期应用较多，优点是简单，成本低，但是其设备体积庞大，测量延时大，不能实施非接触式测量。电磁测量方法利用电磁感应的原理测量角度，测量精度高，测量速度快，但是实现电路复杂，并且需要磁屏蔽。几何光学测量方法的精度高，但实现较为复杂，需要设计精密的光路，而且往往需要人工干预才能完成测量。随着光电技术的发展，以 CCD 技术为基础的光电测量方法在众多领域中得到了广泛的应用，并日益成为工业上测量技术的一个主要发展趋势^[1]。

CCD 按光敏阵列的排列不同可分为线阵 CCD 和

面阵 CCD 两种。线阵 CCD 具有像元素多、速度高、应用较为灵活和价格低等优点，广泛应用于高精度一维尺寸测量和定位系统。采用以线阵 CCD 技术为基础的光电测角方法来测量扫描镜的步进角度是一种理想的选择方案。

1 测角原理

由于扫描镜并无光能辐射功能，所以测角系统的探测方式为主动照明反射式。如图 1 所示，平行光管发出的平行光入射到扫描镜上，扫描镜转动到不同位置对应不同的反射光线，反射光线被柱面透镜聚焦到线阵 CCD 光敏面上，在这里，线阵 CCD 是放

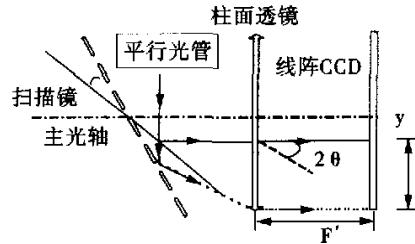


图 1 测角原理示意图

Fig.1 Diagram for principle of angle measuring

收稿日期：2005-07-27

作者简介：陈秋霞（1979-），女，福建省莆田市，现为中科院上海技术物理研究所在读硕士研究生。主要研究方向：电路与系统设计、信号处理。

在柱面透镜的象方焦平面上。扫描镜的转轴与 CCD 光敏元阵列方向垂直,当扫描镜转过一个微小角度 θ 时,扫描镜反射回来的光线将转过 2θ 的角度,聚焦在 CCD 光敏元阵列上的光点也有相应的位移 y ,根据几何光学知识可得的关系式如式(1)所示。

$$y = f' \tan 2\theta \quad (1)$$

式中: f' 为柱面透镜的焦距。

由于反射回来的平行光通过柱面透镜呈带状成像于线阵 CCD 的光敏面上,CCD 的输出为与光强分布形状类似的一串电压序列,其中每一脉冲的幅度就代表着对应光敏元所接收的辐射照度。所以,通过对线阵 CCD 输出信号的处理,确定 CCD 视频信号的重心,获得前后两次重心在线阵 CCD 上的位置偏

移 y 的值,就可以求得扫描镜转过的角度 θ ,即:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{y}{f'} \right) \quad (2)$$

2 线阵 CCD 的工作原理^[2]

线阵 CCD 器件是一种微型化直线式图像传感器。沿直线方向排列着微型光电器件点阵,每一个光电器件都可以独立地检测该点的光强度。数千个光电器件的组合,即可检测外界被测物体的光照图像。图 2 所示为日本 TOSHIBA 公司 TCD1209D 型线阵 CCD 器件的原理图。

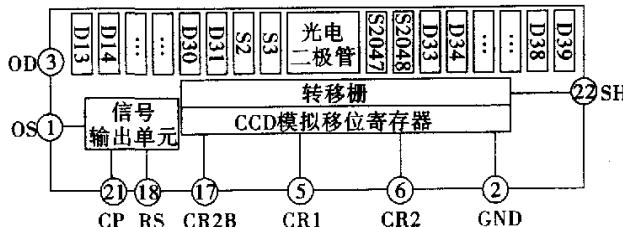


图 2 TCD1209D 的结构图

Fig. 2 Configuration of TCD1209D

TCD1209D 的光敏阵列共有 2075 个光电二极管,其中有 27 个光电二极管被遮蔽(前边的 D13 ~ D31 和后边的 D32 ~ D39),中间的 2048 个光电二极管为有效的光敏单元。每个光敏单元的尺寸为 $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$,相邻两个光敏单元的中心距为 $14\mu\text{m}$ 。光敏单元的总长度为 28.672 mm。

当光学图像经过物镜成像在 CCD 传感器上时,在 CCD 器件上将生成与投射光强相对的光电荷,这些光电荷存储在光电二极管的势阱中,经过一定时间的积累,在转移脉冲 SH 的作用下,各光敏元的电荷包同时并行地向 CCD 模拟移位寄存器各单元转移。在光敏元进行下一次光电荷积累的同时,移位寄存器内的电荷包在驱动脉冲 CR1 和 CR2 的作用下开始做定向转移(向左转移),在 CR2B 电极的作用下,信号电荷将从 CR2B 电极下的势阱通过输出栅转移到信号输出单元的检测二极管中。

信号输出单元包括检测二极管、复位场效应管与输出放大器等电路。在每一个读出周期中,复位场效应管在复位脉冲 RS 的作用下对检测二极管的深势阱进行复位,为接收新的信号电荷做好准备。信号经缓冲控制(CP 电极)后由输出放大器场效应管的开路源极 OS 端输出。

3 系统的实现方案

系统的实现需要光学系统设计和电子学系统设计以及信号处理算法设计 3 大部分,下面将一一详细介绍。系统的总体框图如图 3 所示。

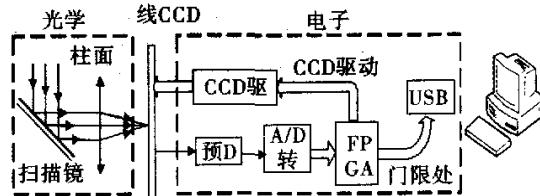


图 3 系统总体框架图
Fig. 3 System structure diagram

3.1 光学系统设计

光学系统是采用柱面透镜使目标成带状于 CCD 光敏面上:首先假设扫描镜为一平面镜,入射光为平行光,则反射平行光经柱面透镜汇聚成一条直线在 CCD 上成像。CCD 放置在柱面透镜的焦平面上,过光轴与柱面透镜的圆柱轴线垂直。这样由线阵 CCD 可以探测到平面镜的转动角度轨迹。

之所以采用柱面透镜,是因为柱面透镜将平行光汇聚成的光点比一般透镜汇聚成的光点更容易让 CCD 捕获。

3.2 硬件电路设计

硬件电路的主要功能是将光信号经线阵 CCD 转换成电信号，经预处理、A/D 转换后通过现场可编程逻辑器件 FPGA 门限处理，再经 USB 接口传送到计算机进行进一步处理。硬件处理电路由 CCD 驱动电路、预处理电路、A/D 转换电路、FPGA 以及 USB 接口电路等模块组成。

线阵 CCD 采用的是 TCD1209D，它工作需要的 6 路驱动脉冲 SH、CR1、CR2、CR2B、CP、RS 由 FPGA 芯片产生。由于 TCD1209D 器件是用 5 V 的脉冲驱动的，所以这里采用 74HC14D 作驱动器。FPGA 芯片不仅提供了 CCD 的驱动脉冲并对 A/D 转换后的数字信号进行门限处理，同时还提供了电路所需的时钟信号和采样逻辑控制时序。

对 CCD 输出信号的预处理主要是减去它的直流偏置并对它进行反相放大，预处理电路如图 4 所示，其中放大器的工作方式为反相放大方式。CCD 的模拟输出信号连接到放大器的反相输入端，正相输入端接的是偏置电平。当 CCD 被遮住（没有光信号输入）时，偏置电平（放大器的正相输入端）应比 CCD 的输出信号低 0.2 V 左右，可根据需要适当调节 R7。图中的可调电阻 R6 是放大器的反馈电阻，调节它可以改变放大器的放大倍数。

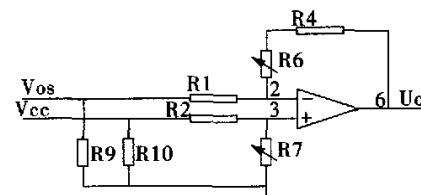


图 4 预处理电路示意图

Fig. 4 Circuit diagram for preprocess

CCD 输出信号经预处理后的结果如图 5 所示，其中上面的信号为 CCD 的原始输出信号，下面的信号是经过预处理后的信号。

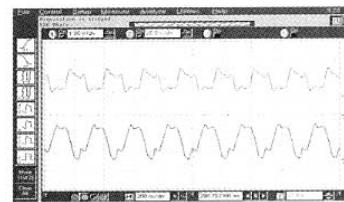


图 5 预处理结果

Fig. 5 Results of preprocess

预处理后的信号经简单的 RC 滤波器滤波后送 A/D 转换器进行 A/D 转换，转换后的数字信号通过 FPGA 进行门限处理，再经 USB 接口传送至计算机。

3.3 CCD 数字化信号处理方法^[3]

图 6 所示为平行光经柱面透镜后打在线阵 CCD 光敏面上时计算机接收到的视频信号。

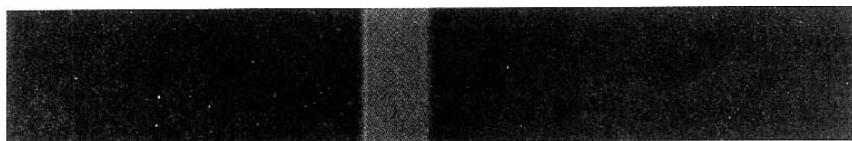


图 6 CCD 视频信号

Fig. 6 Video signals of CCD

从图 6 的视频信号上可以看出，在 CCD 上的像点有一定的尺度，一般覆盖几个至几百个光敏元，因而如何得到这种像点的精确光敏元位置便成为应用的关键。

目前比较常用的 CCD 像点位置提取算法有最大值保持法、二值化方法和数字化求重心法。最大值保持法的优点是电路简单，处理速度快，缺点是受噪声影响大，分辨率低，一般很少采用。二值化求重心法电路简单，采样率高，响应速度快，精度比最大值保持法高，可达到像元间距的一半，但它的测量精度直接依赖于输出信号的形状，它要求信号是对称的，并且不存在震荡。数字化求重心法的优点是精度高，可达到亚像元分辨率。

数字化求重心法是基于平面几何中积分求重心

的原理。它的具体做法是：将 CCD 的输出逐元进行采样，经 A/D 转换后得到一组对应于辐射强度的输出数值 u_1, u_2, \dots, u_n 。对这一组数值进行门限处理，即设定一个门限电压值 u_g ，将上述输出值逐一减去门限值： $(u_1 - u_g), (u_2 - u_g), \dots, (u_n - u_g)$ 。不超过门限的去除不参加运算。门限处理后得到一组新值： u'_1, u'_2, \dots, u'_n 。对这些值求重心：

$$x'_c = d \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot u'_i}{\sum_{i=1}^n u'_i} \quad (3)$$

式中： d 是光敏元中心距。

将输出值的重心 x'_c 加上第一个参加运算的光敏元位置 x_1 ，即得目标重心的测量结果：

$$x_c = x_1 + x'_c \quad (4)$$

这里门限的作用是去掉因噪声和干扰等原因造成的非目标信号。采用上述门限处理使参加运算的像元数不致过多。

4 讨论

采用柱面透镜使目标成带状于 CCD 光敏面上。但是柱面透镜的焦平面是一曲面，并不在同一平面内，所以 CCD 安装时并不完全在焦平面上，这样在视场范围内，CCD 光敏面上不同位置的像质不一样，给系统带来误差。不过这属于系统的固定误差，可以先通过定标工作，建立像点位置与转角关系的数据，再由软件的方法进行校正。

5 结束语

采用以线阵 CCD 技术为基础的光电测角方法来测量扫描镜的步进角度，具有精度高、可靠性高、

实现简单、体积小、重量轻、可维护性好等一系列优点，可以实现动态的非接触式角度测量；采用 A/D 转换器对 CCD 的输出信号数字化，并采用重心算法来确定 CCD 像点的位置，这可以大大提高系统的测量精度。

这种方法的研究为系统的工程化打下了坚实的基础，而且具有很好的通用性，可推广应用到其他非接触式高精度动态测量系统中去，达到同样的效果。

参考文献：

- [1] 韩军海,陈家斌,于家成.CCD 技术在非接触式角度测量中的应用[J].中国造船,2003,44(4):97.
- [2] 王庆有.图像传感器应用技术[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 闻路红,童卫旗,陈桂林.重心算法确定 CCD 像点位置的硬件实现[J].仪表技术与传感器,2004,(5):42~43.