

文章编号: 0253-2239(2004)02-260-4

应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统

周 杰 邱胜根 刘 旭 李海峰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 调制传递函数是评价光学成像系统成像质量的重要方法,因而测量光学系统的调制传递函数在各种成像光学系统生产实践中具有相当重要的作用。但是长期以来,投影显示设备的生产中缺少能够定量的检测投影物镜性能的标准化方法。根据线性系统和傅里叶变换的理论,结合液晶投影机投影物镜生产、检测的实际需要,提出了应用 CCD 图像采集系统的投影物镜调制传递函数测量方法,为生产实践提供了可行的定量判断投影物镜性能的手段。给出了实际物镜的检测结果,并与物镜的设计参量进行了比较,同时对影响系统测量精度的一些因素进行了分析。

关键词: 应用光学; 液晶投影显示; 调制传递函数; 傅里叶变换; 卷积; CCD

中图分类号: TH741.5 文献标识码: A

Measurement System of Projection Lens Based on CCD Modulation Transfer Function

Zhou Jie Qiu Shenggen Liu Xu Li Haifeng

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 20 November 2002; revised 31 March 2003)

Abstract: Modulation transfer function is a common method for evaluating the performance of optical imaging system. The measurement of MTF is very important in production and testing. But there is no standard quantitative method for the measurement of projection lens in the production of projection display system. A new method of measuring LCD projection lens' MTF with CCD imaging system placed on the image plane is introduced. The method is based on the theory of Fourier transform and linear system, and can provide a quantified standard for lens measurement. At the end, the testing results of some practical objective lenses are presented and compared with the designed MTF. Factors that will affect system accuracy are also analyzed here.

Key words: applied optics; liquid crystal projection display; modulation transfer function (MTF); Fourier transform; convolution; CCD

1 引 言

评价光学系统成像质量的方法通常可以分为两类。一类方法以物点所发出的光能在像空间的分布状况作为检验像质的依据,如瑞利判据、斯特雷尔(Strehl)判据、分辨率以及点列图等^[1]。这些评价方法的缺点是适用范围比较狭窄。另一类方法从频域的角度分析,将光学系统的特性表现为对各种频率的正弦波的传递能力,从而建立了以调制传递函

数(Modulation transfer function, MTF)为基础的像质评价指标。调制传递函数适用于各种成像光学系统,是一种有效、客观和全面的像质评价方法。

投影物镜是液晶投影显示系统中的成像部件,其性能直接影响投影图像的质量,因而通过测量投影物镜的调制传递函数检验镜头质量在生产过程中具有相当重要的意义。然而常见的测量光学系统传递函数的方法,如扫描法、自相关法、互相关法等^[2],其测量系统结构复杂,需要专门的测试仪器,而且通常只能在物距无穷大的条件下测量光学系统,无法满足物距和像距有限的液晶投影机投影物镜的测量要求。本文结合生产实践,创新性地提出了基于

E-mail: jiezhou@cise.zju.edu.cn

收稿日期: 2002-11-20; 收到修改稿日期: 2003-03-31

CCD 图像采集的调制传递函数测量系统,以傅里叶变换理论为基本原理,依靠 CCD 探测器直接在投影像面上检测光强分布进而计算出物镜的调制传递函数,大大简化了测量系统的结构,并为投影显示系统的生产、检验提供适当的评价标准。

$$i(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x_0, y_0) \cdot h(x, y; x_0, y_0) dx_0 dy_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x_0, y_0) \cdot h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (1)$$

其中 $h(x, y; x_0, y_0)$ 称为点扩展函数,表示物面上的发光点 $\delta(x, y)$ 经过光学系统后在像面上形成的光强分布。由(1)式可以看出,像的光强分布是物光强分布与点扩展函数的卷积,根据傅里叶变换理论可得

$$I(u, v) = H(u, v) \cdot O(u, v), \quad (2)$$

其中 $I(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 和 $O(u, v)$ 分别为 $i(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $o(x, y)$ 的傅里叶变换。 $H(u, v)$ 反映了光学系统对各种频率分量的传递能力,称之为光学传递函数,记为

$$F_{OT} = H(u, v) = T(u, v) \cdot \exp[-i(u, v)], \quad (3)$$

其中 $T(u, v)$ 表示光学系统对正弦信号对比度的传递能力,即为调制传递函数。

3 基于 CCD 图像采集的调制传递函数检测系统

由前面的讨论可知,只要能测量出投影物镜的点扩展函数,就可以通过傅里叶变换得到系统的调制传递函数。本系统将面阵 CCD 传感器安置在投影屏幕上,由 CCD 器件直接获取液晶板经投影物镜放大后的图像,得到像面上的光强分布。同时由液晶板上的图像可得物面上的光强分布,因此可以从(2)式计算出 $H(u, v)$,进而得到物镜的调制传递函数。系统原理如图 1 所示。

投影物镜在设计中经过严格的像差矫正,可以认为在待测视场附近满足空间不变性的要求,因此在投影屏幕的不同位置上放置 CCD,测量投影物镜不同视场的调制传递函数。

由(2)式可知,若液晶板上的图像为一个理想点,即物面的光强分布为单位冲激函数

$$o(x, y) = \delta(x, y), \quad (4)$$

物面的频谱分布为常数 1,此时,像面上的光强分布 $i(x, y)$ 就是系统的点扩展函数。但实际的液晶板所

2 光学系统的调制传递函数

液晶投影光学成像系统可以被视为空间线性不变系统^[3],像面上的光强分布 $i(x, y)$ 与物面的光强分布 $o(x_0, y_0)$ 存在以下关系^[4]:

能显示的最小图像为一个像素,具有一定的大小和形状,不满足理想点物的要求。实验中使用 0.9 英寸(每英寸等于 25.4 mm)的液晶板,分辨率为 1024×768 ,一个像素的大小约为 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,因此液晶板可以视为周期分布的矩形函数,而单个亮像素的物函数为单个矩形函数。

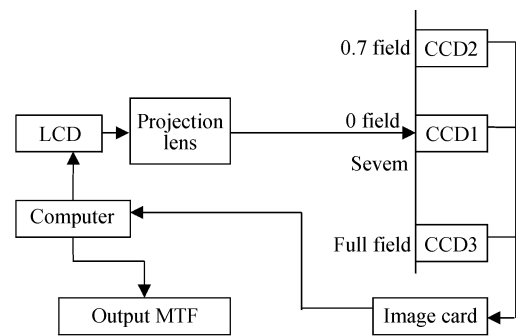


Fig. 1 Schematic of MTF measuring system

CCD 器件也具有一定的大小,实验中使用的是 1/3 英寸 CCD,只能测量像面上一定区域内的光强分布,相当于在像函数上乘上了一个窗口函数 $w(x, y)$,即

$$i'(x, y) = i(x, y) \cdot w(x, y), \quad (5)$$

其中

$$w(x, y) = \begin{cases} 1, & a_1 < x < a_2, b_1 < y < b_2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

因此,由(1)式、(5)式、(6)式可得

$$i'(x, y) = w(x, y) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x_0, y_0) \cdot h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0, \quad (7)$$

对上式进行傅里叶变换,可得

$$I'(u, v) = W(u, v) * [O(u, v) \cdot H(u, v)], \quad (8)$$

即 CCD 所采图像的频谱为窗口函数频谱与物频谱乘以光学传递函数(OTF)之积的卷积。卷积的引入,使得由(8)式计算光学传递函数变得相当复杂。在实际投影成像系统中,一个亮像素的理想像大小

约为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 远小于 CCD 的实际测量面积, 因此可以认为 $i'(x, y) = i(x, y)$, 从而由 (2) 式方便地计算调制传递函数。

计算出的点扩展函数 $H(u, v)$ 归一化后即可得到投影物镜的调制传递函数。

本系统在生产实践的基础上, 利用 CCD 器件获取液晶板经投影系统后所成的像, 相当于同时记录了各种经过光学系统调制后的频率分量, 因而省略了传统的调制传递函数测量系统中常见的正弦光栅、机械扫描等部件, 大大简化了系统结构。面阵 CCD 作为系统中的光电转换器件, 将光信号转变为电信号, 经图像采集卡后由计算机软件处理, 有效地缩短了系统的测量时间, 并为投影系统的生产提供

了合适的测量方法。

4 测量数据

利用基于 CCD 图像采集的调制传递函数检测系统对实际的液晶背投投影机物镜进行测量, 镜头焦距为 17.5 mm , 投影画面尺寸为 132 cm 。实验中对投影物镜的不同视场进行了测量。由 CCD 器件所采集的各视场图像如图 2 所示。投影物镜的设计调制传递函数曲线与测量调制传递函数曲线分别如图 3、图 4 所示。图中 T 和 S 分别表示光学系统的子午和弧矢方向, 例如 TS330.2 mm 表示视场高度为 330.2 mm 的子午视场和弧矢视场处。

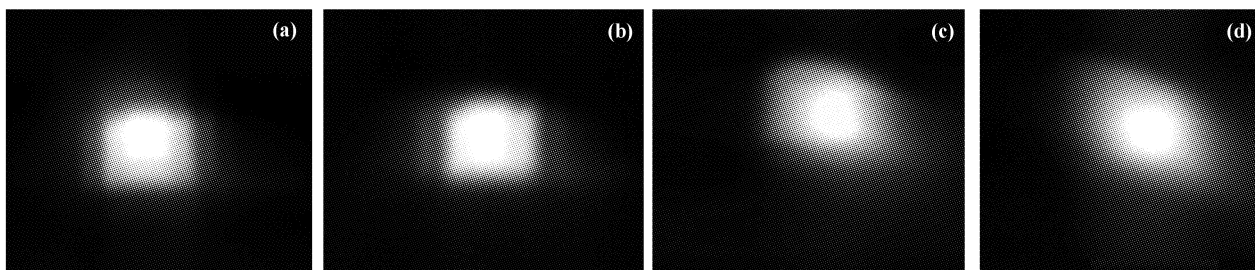


Fig. 2 Pictures captured by CCD at different field. (a) Central field, (b) 0.5 field, (c) 0.7 field, (d) full field

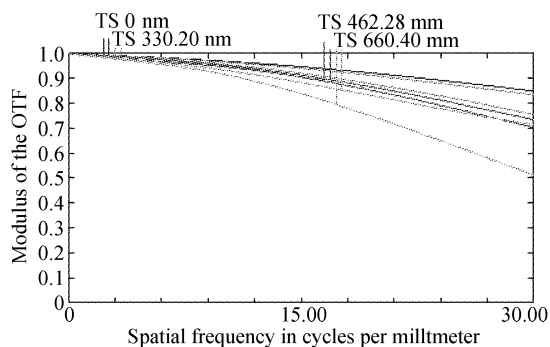


Fig. 3 The designed MTF of projection lens.
OTF: optical transfer function

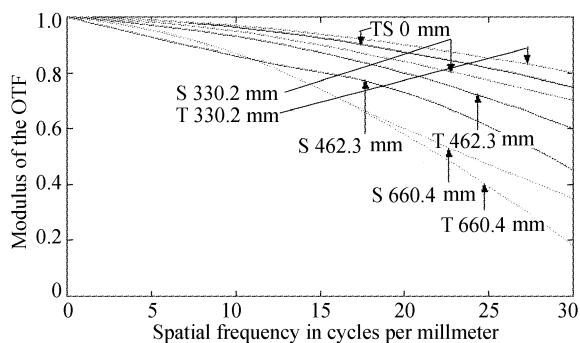


Fig. 4 The measured MTF of projection lens
图中给出了中心视场、0.5 视场、0.7 视场和全

视场的调制传递函数曲线。从以上数据比较可见实际生产出的投影物镜的调制传递函数低于镜头设计时的调制传递函数。引起调制传递函数降低的主要原因是镜片、镜筒的加工误差和装配误差, 包括镜片的偏心、倾斜、曲率误差等^[6]。另外, 检测系统的误差也会影响调制传递函数的测量精度。产生误差的主要因素有:

1) CCD 本身引起的误差。由于使用 CCD 测量像的光强分布, 实际测量的调制传递函数应为投影系统的调制传递函数与 CCD 自身的调制传递函数之积, 因而使测量结果产生系统误差^[7]。对于测试系统中使用的高性能 CCD 摄像器件, 其截止频率^[5]远高于测量调制传递函数的最高频率, 引起的相对系统误差小于 5%。另外, CCD 自身的噪声会引起抓取图像的亮度分布上形成无规律的微小起伏, 导致频谱中高频分量的增多, 对所测调制传递函数的高频部分产生影响。

2) 环境光引起的像面亮度变化。环境光会在像面上形成均匀的背景照明, 相当于增加了一个零频分量, 计算时应注意滤除均匀背景的影响。

3) 理想状态下, 暗态时液晶板的透过率应为零。而实际中, 暗像素也具有一定的透过率, 引起像

面上暗处也有周期性的光强分布。做精确计算时需要考虑暗态透过率的影响。

4) 像素形状引起的误差。实际液晶板像素的形状不满足矩形函数。对于薄膜晶体管液晶板,由于集成晶体管和电容的影响,会在像素上形成左下和右下的两个暗角。

总结 传统的调制传递函数测量设备需要满足无限远共轭距的测试条件,因而不适用于物距和像距都有限的液晶投影机投影物镜的检测。本文提出的基于 CCD 图像采集的投影物镜调制传递函数检测系统,基于傅里叶变换的基本理论,具有结构简单,操作方便的优点,避免了机械扫描式测量系统中制作正弦光栅等困难,所有的数据计算都由计算机软件完成。该系统可以为投影物镜的检验提供明确的指标,减少了检验者主观因素对产品质量的影响。同时,该检测系统建立在实际的投影平台上,可以与投影机其它性能,如亮度、色均匀性、 γ 指数(显示器的亮度与电压的 γ 次方成正比)等的检测结合在一起,降低了生产设备的成本,简化了生产、检验的程序,在液晶投影机等的实际生产、检验中具有广泛的应

用领域。

参 考 文 献

- 1 Li Xiaotong. *Geometry Optics and Optical Design* (几何光学和光学设计). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 231~238 (in Chinese)
- 2 Zhang Yimo. *Applied Optics* (应用光学). Beijing: China Machine Press, 1988. 618~630 (in Chinese)
- 3 Su Datu. *Optical Measurement and Image Quality Identification* (光学测量与像质鉴定). Beijing: Beijing Industry Institute Press, 1988. 342~344 (in Chinese)
- 4 Jiang Zhuqing. *Optical Transfer Function Measurement. Corpus of Optical System Image Quality Evaluation and Test* (光学传递函数的测量·光学系统成像质量评价及检验文集). Beijing: Chinese Metrology Press, 1988. 9~21 (in Chinese)
- 5 Yang Hua, Jiao Wenchun *et al.*. Modulation transfer function of CCD camera at nyquist frequency. *Acta Optica Sinia* (光学学报), 2002, **22**(3):313~316 (in Chinese)
- 6 Fang Min, Su Yi, Zhang Wei *et al.*. Influence of the surface error of optical elements on beam quality. *Acta Optica Sinia* (光学学报), 2002, **22**(4): 495~500 (in Chinese)
- 7 Chen Lixue. Transfer performance analysis for sampled image system. *Acta Optica Sinia* (光学学报), 1995, **15**(11):1547~1551 (in Chinese)

《光学学报》重要通告

为了加快稿件的处理速度,促进期刊的电子化、网络化,本刊从 2003 年 5 月 1 日起一律采用电子邮件(E-mail)方式投稿。单位证明原件通过传统邮件方式寄过来。

未曾给《光学学报》编辑部留过电子邮件地址的《光学学报》审稿专家,请尽快把你们的电子邮件地址发给本刊编辑部,以便实行电子邮件方式审稿。

本刊的主网站是 <http://gxxb.chinajournal.net.cn>。网站上的“本刊动态”栏有以下内容,敬请广大作者、读者、审稿专家等各方面人士留意:

本刊最新的征稿简则——《光学学报》征稿简则(2003 年 7 月 1 日版);

《版权转让协议》

《光学学报》清样发送预告(每月刊登一次);

《光学学报》2002 年 22 卷第 6~12 期,2003 年 23 卷第 1 期~近期的目录(这对查找、阅读、引用《光学学报》近期的文章时是很方便的);

科技论文写作方面的信息;

以及其他紧急信息都可从本刊动态及时获得。

电 话:021-69918011, 69918428

E-mail:gxxb@mail.shcnc.ac.cn

传 真:021-69918011

《光学学报》编辑部

2004 年 2 月 1 日