

红外光学系统成像质量检验的技术研究

安连生 张诚平* 余旭彬 王涌天 李士贤

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘 要 研究了可见光系统星点检验方法在红外光学系统中的应用。以 486DX2/66 计算机为控制主宿机, 完成对红外光学系统星点图像的数据采集、存储及处理, 并在监视器上以不同的颜色或灰度显示像点形状, 实现了对各种红外光学系统像点能量分布的测试, 建立了一种红外光学系统成像质量的检验装置。

关键词 红外光学系统, 能量分布, 成像质量。

1 引 言

在红外系统中, 光学系统是一个重要的组成部分, 它决定着整个系统的工作精度和工作距离, 因此, 设计和生产高质量的光学系统是获得高性能红外光学系统的基础。而目前在红外光学系统的加工、装配和检验过程中, 缺乏有效的检测设备和手段; 有些对可见光系统已视为常规的测试方法, 却无法实施到红外光学系统上; 在系统装校时, 只能用提高制造精度的机械方法, 或凭经验进行装配和调试, 而不能直接用光学方法来检测; 在对整个系统进行像质评价时, 国内主要采用红外传递函数仪, 但对热像仪这类用光电元件进行信息接收的设备, 应采用探测器元件所能接收到的像点能量的百分比来进行评价, 测量实际像点的能量分布。正是由于星点像包含了除畸变、透过率和杂光外的被检光学系统的全部像质信息, 与光学传递函数具有等价的信息量, 国际上已广泛应用像点能量的百分比作为这类系统的评价指标, 而国内目前尚无对这种重要像质指标的测试手段。因此有必要研制一套红外光学系统星点像检验装置, 以类似于可见光系统星点检验的方式, 指导红外光学系统的装调过程。

2 检验原理

在可见光波段内, 评价一个光学系统的成像质量一般是根据物空间的一点发出的光能量在像空间的分布状况来进行的^[1]。光学系统对非相干照明物体或自发光物体成像时, 可以把任意的物分布看成是无数个具有不同强度的独立发光点的集合。每一个发光物点通过光学系统后, 由于衍射和像差以及其它工艺疵病的影响, 像平面上获得的像点并不是一个几何点而是一个弥散光斑, 即星点像。根据夫琅和费(Fraunhofer)衍射理论, 光学系统对一个无限远

* 中国计量科学研究院量子部, 北京 100013。

收稿日期: 1996-10-19; 收到修改稿日期: 1997-10-10

的点光源所成的像, 实质是光波在光学系统出瞳面上衍射的结果, 焦平面上衍射像点的光强分布就是出瞳面上光振幅分布函数(即光瞳函数)傅里叶变换的模的平方。对一个无像差衍射受限系统来说, 其光瞳函数是一个实函数, 而且在光瞳范围内是一个常数, 衍射像的光强分布仅仅取决于光瞳的形状。在圆形光瞳的情况下, 衍射受限系统星点像的光强分布函数就是圆孔函数的傅里叶变换的模的平方, 即:

$$\frac{I}{I'} = \left| \frac{2J_1(\psi)}{\psi} \right|^2 \quad (1)$$

当光学系统的光瞳形状改变时, 其星点像也随之改变。对于圆环形光瞳, 其焦平面上星点像的光强分布公式为:

$$\frac{I}{I'} = \frac{1}{(1 - \epsilon^2)^2} \left| \frac{2J_1(\psi)}{\psi} - \epsilon^2 \frac{2J_1(\epsilon\psi)}{\epsilon\psi} \right|^2 \quad (2)$$

式中, $\psi = (2\pi/\lambda)h\theta = (\pi D/\lambda f')r$, D 和 f' 分别为光学系统的入瞳直径和焦距; λ 为光波的波长; θ 为第一级衍射光斑对光学系统的半张角; r 为第一级衍射光斑的半径; ϵ 为环形孔的内外两个同心圆的半径之比。其所代表的几何图形及各个量的物理意义如图 1 所示。

由于星点像光强分布规律决定了光学系统所成像的清晰程度, 因此考察光学系统对一个物点的成像质量就可以了解和评定光学系统对任意物分布的成像质量。目前, 星点检验仍然是可见光波段内光学系统像质检验的重要手段, 但是由于技术上的原因, 星点检验尚未普

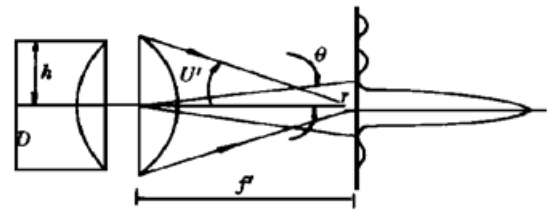


Fig. 1 Fraunhofer diffraction pattern

遍用于定量分析。本文所讨论的红外光学系统的像质检验装置, 就是基于星点检验法的原理, 将红外光学系统所产生的不可见的红外星点像, 通过 InSb 探测器进行光电转换, 再经由 A/D 变换板连到计算机上, 由计算机完成星点像数据的采集、存储和处理, 从而实现对红外光学系统成像质量的定量分析, 并可在显示器上直接观察和分析其星点形状。

3 检验装置

根据设计要求, 被检红外光学系统的最大相对孔径要能达到 1·1, 如果按照常规的星点检验方法, 用平行光照射被检系统, 则后续光路中起光学放大作用的透镜组也要有较大的相对孔径, 这势必给光学放大镜组和扫描机构的设计带来困难, 同时也给系统引进了较大的误差。为此采用与常规方法相反的逆向光路, 将星孔置于被检系统的后焦点处, 光线经被检系统后平行射出, 再用离轴抛物镜聚焦。由于所使用的离轴抛物镜的相对孔径很小(焦距为 2000 mm, 有效口径 150 mm), 所以后续光学系统的设计就比较容易实现。整个装置的原理框图如图 2 所示。图 3 是检验装置的光学系统结构原理图。

3.1 探测器的选择

该装置拟对工作波段为 3~ 5 μm 的红外光学系统进行测试, 因此选用对 3~ 5 μm 波段有峰值响应的 InSb 探测器, 其峰值探测率不低于 3×10^{10} , 同时响应度不低于 10^5 V/W 。从理论上说, 探测器的探测率越高, 其灵敏度也越高^[2]。为了提高探测器的探测率及温度分辨率, 有效地抑制背景噪声, 以获得较高的信噪比, 需要对探测器进行制冷, 实际采用的是杜瓦瓶液氮制冷的方^[3]。探测器的光敏面积决定着系统成像的分辨率和系统的瞬时视场, 光敏面

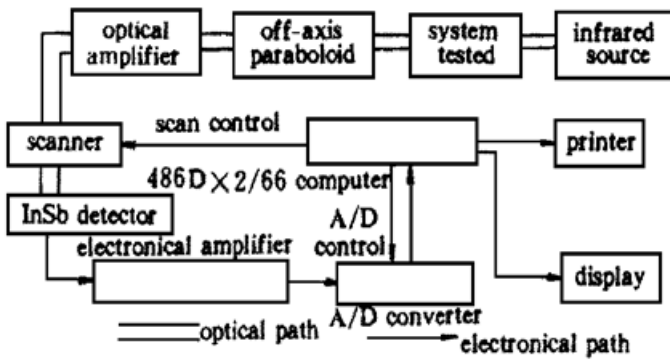


Fig. 2 Block diagram of the testing system

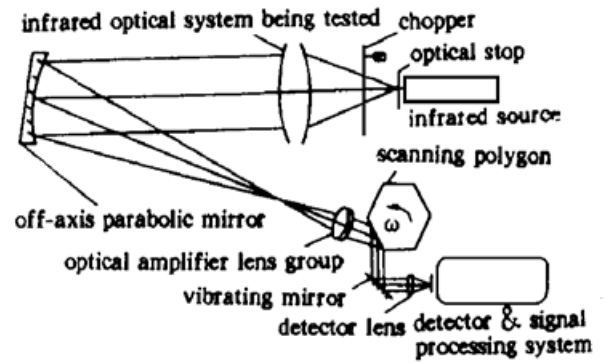


Fig. 3 Optical system structure of the testing equipment

积越小, 成像分辨率越高, 且较小的光敏面可获得较高的探测率, 但为了使响应率不致于因为光敏面的减小而过低, 选定光敏面为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 。考虑到扫描成像中如果采用多元并扫, 不仅可以降低扫描频率, 还可以将信噪比提高到相同探测率下单元器件的 \sqrt{n} 倍。根据目前的条件, 选用 8 单元线阵 InSb 探测器。

3.2 前置放大器和主放大器技术参数的确定

探测器输出的电信号非常微弱, 必须经过多级信号放大和处理才能获得所需要的信息。而放大器特性与探测器一起决定着红外系统的探测能力。不同类型的探测器, 其探测机理不一样, 即使是同一类型的探测器, 由于半导体材料的不同, 也会导致器件在性能上的差异。为了充分发挥探测器的探测能力, 需要有与之相应的前置放大器。

前置放大器输出的信号电压经过主放大器的作用而进一步放大, 并把调制信号解调为所需的电压信号, 供给后续的数据采集电路。主放大器由电压放大、有源带通滤波器、信号解调器、直流放大器和双向齐纳限幅器等五个部分组成。由于 InSb 探测器中各单元的响应均匀性不一致, 因此对于相同的红外辐射能量, 各路前置放大器输出的电压信号并不相等。为了克服这一弊端, 在前置放大器后面设置一级放大倍数从 1~ 11 倍可调的线性电压放大器。红外光源通过星孔后被调制成频率为 1000 Hz 的辐射, 探测器接收后将其转换成同频率的电信号。为了抑制背景杂光信号, 提高信噪比, 在电路中插入一级二阶无限增益多重负反馈带通滤波器。由带通滤波器输出的信号, 其理想波形应为载波频率为 1000 Hz 的调幅信号波。为了获得调制信号所携带的星点像的能量分布信息, 加入一级由集成运算放大器 LF412 构成的平均值包络检波电路和无限增益多重负反馈低通滤波器所组成的解调电路, 从调幅信号中不失真地检出调制信号以供 A/D 板进行数据采集。为了让数据采集板得到适量的输入电压而又不因输入信号过载而损坏, 在主放大器的最后还设计了一级 1~ 11 倍可调直流放大器和一级 $\pm 4.5 \text{ V}$ 的齐纳双向限幅器。

3.3 数据采集、A/D 转换、计算机接口及相关控制软件分析

由探测器输出的含有被测红外光学系统星点图像信息的电信号经前置放大器和主放大器放大后, 送至 A/D 转换电路中, 然后将转换后的数字信号存入计算机内存, 数据的采集和量化过程由计算机控制。同时, 在显示器上以不同的颜色(或灰度)来模拟星点图像信号的强弱, 并绘出三维能量分布曲线^[4, 5]。实际对一个红外光学系统进行测试的结果如图 4 所示。

选择“Layer”按钮, 还可以对星点图像 X 方向和 Y 方向上不同位置的能量进行检查, 图 5 是沿 Y 方向扫描时所得到的一个截面的能量分布曲线。

每一个测试结果都自动保存在一个后缀为 DAT 的文件中, 可供以后分析、显示或打印。

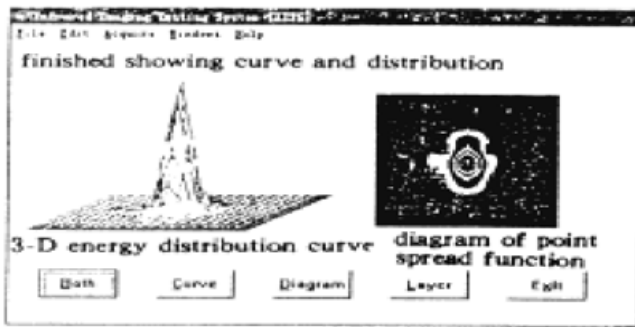


Fig. 4 Display of PSF diagram and 3D energy distribution curve

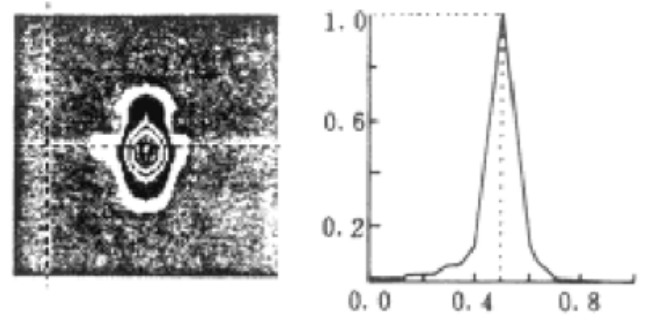


Fig. 5 Energy distribution of a certain cross section

结束语 本文所研究的红外光学系统的像质检验装置, 克服了由于红外光线不可见而给检测带来的不便。由于计算机的参与, 使得大容量的数据存储成为可能; 通过显示器显示出像点形状, 可以直观地看出系统的像差; 根据像点灰度分布的情况, 可以分析加工疵病之所在; 借助计算机进行一系列相关计算及处理, 可以输出各点的能量分布, 从而全面地考察被检红外光学系统的像质。这种装置的研制成功, 可以大大减小红外光学系统加工、装配和检验过程中存在的盲目性, 对于提高产品质量, 发展我国的红外热成像技术, 有着极其重要的学术价值和广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 苏大图, 沈海龙, 陈进榜等, 光学测量与像质鉴定, 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [2] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其, 微光和红外热成像技术, 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [3] (乌克兰)B. T. 科洛勃罗多夫、(德)N. 舒斯特, 红外热成像, 航天工业总公司第三研究院、三部、八三五八所联合翻译出版, 1994
- [4] Zee. M. Ryu, Measurement of point spread function of thermal imager. *Proc. SPIE*, (Thermosense xiii), 1991, **1467**: 469~ 473
- [5] Kjell Lindstrom, Bo. Wallin, Advanced real-time scanning concept for full dynamics recording, high image quality and superior measurement accuracy. *Proc. SPIE*, (Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing ii), 1991, **1488**: 389~ 398

Imaging Quality Testing of Infrared Optical Systems

An Lianseng Zhang Chengping* Yu Xubin Wang Yongtian Li Shixian

(Beijing Institute of Technology, Optoelectronic Department, Beijing 100081

* National Institute of Metrology, Quantum Division, Beijing 100013)

(Received 19 October 1996; revised 20 October 1997)

Abstract The testing method for imaging quality of visible light systems has been applied in infrared optical systems. A device for testing the imaging quality of infrared optical systems has been developed. With the control of 486DX2/66 computer, the device can implement data acquiring, storing and processing of images produced by an infrared optical system. The imaging pictures in different colors or gray levels can be shown on the display screen. It can also test the energy distribution of imaging pictures of various infrared optical systems.

Key words infrared optical system, energy distribution, imaging quality.