

文章编号: 1672-8785(2014)12-0014-05

一种红外变焦距像面变化量的测量方法

聂真威 蔚素升 唐延甫

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 大变倍比连续变焦红外成像系统能够同时应用于大视场下的目标搜索和小视场下的高精度跟踪测量。由于变倍比很大, 在整个变焦范围内均保持良好的成像质量就成了其设计验证的难点。为了解决这一问题, 本文利用调制传递函数对变焦距像面的变化量进行测量和验证。红外成像系统整机调制传递函数的主要测试方法有斜狭缝法和斜刃边法。在对两者的测试特点和影响要素进行分析比较后, 选取斜刃边法作为红外成像系统整机调制传递函数的测试手段。通过用调制传递函数对现有的大变倍比测试样品在各特征焦距下的离焦曲线进行标定, 得到了最优像面位置。与理论设计值相比较, 最大偏差为 $36\ \mu\text{m}$ 。依据该数据对调焦补偿进行了修正。复测后, 该偏差的最大值降至 $5\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 像面变化量; 红外成像系统; 大变倍比; 连续变焦; 调制传递函数

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.003

A Measurement Method of Variation of Image Plane for Infrared Zoom Imaging System

NIE Zhen-wei, WEI Su-sheng, TANG Yan-fu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A continuous zoom infrared imaging system with a large zoom ratio can be used for target searching in a large field of view and for high precision tracking in a small field of view at the same time. Because of the large zoom ratio, to keep good imaging quality throughout the zoom range becomes the difficulty for design and validation. To solve this problem, the Modulation Transfer Function (MTF) is used to measure and validate the variation of the zoom image plane. There are two main methods for measuring the MTF of an infrared imaging system: a slit method and a sloping edge method. After analysis and comparison of the characteristics and influence factors of both methods, the sloping edge method is chosen. By using the MTF to calibrate the defocus curve of the existing test sample with a large zoom ratio at each focal length, the optimal image plane position is obtained. Compared with the theoretical design value, its maximum deviation is $36\ \mu\text{m}$. The focusing compensation is modified according to the data. Finally, the maximum deviation is reduced to $5\ \mu\text{m}$.

Key words: variation of image plane; infrared imaging system; large zoom ratio; continuous zoom; MTF

收稿日期: 2014-11-24

作者简介: 聂真威 (1982-), 男, 辽宁鞍山人, 助理研究员, 主要从事光学系统的像质评价及检测技术研究。

E-mail: niezhenwei@hotmail.com

0 引言

随着红外技术在侦察测量领域的不断发展, 用户提出了在同一红外成像系统下实现大视场搜索引导和小视场瞄准跟踪的应用方式。为了满足用户的需求, 设计人员对大变倍比连续变焦红外成像系统的设计进行了不断的改进和优化。由于变倍比很大, 且在连续变焦过程中要保证各焦距位置均拥有较好的成像质量, 如何对此类系统调焦补偿的准确性进行验证成为了设计人员和用户共同关注的重点。

调制传递函数是一种拥有严谨理论的像质评价方法。它本身属于定量测量, 内容丰富且信息量大, 可以对成像过程的各个环节进行测试和评价。我们使用它作为评价工具对现有大变倍比连续变焦红外成像系统进行测试。在得到各视场下的最佳成像焦面相关数据后, 将其与设计值进行比对, 并根据比对结果对影响要素进行分析。

1 调制传递函数测试方法简述

调制传递函数是评价红外系统成像质量优劣的重要指标。对于不同类型的红外系统, 可以根据其特点选用不同的测试方法。大变倍比连续变焦红外成像系统一般采用面阵红外探测器作为成像器件。由于面阵红外探测器的像元尺寸通常较大, 其采样间隔相对受限。为了解决调制传递函数测试过程中采样不足的问题, 目前通常采用倾斜目标靶的方式提高测试采样频率, 主要方法分为斜狭缝法和斜刀口法两种。

1.1 斜狭缝法的原理

斜狭缝法所使用的靶板形状为中空处长条矩形。靶板的材料为薄铜板, 通过刻蚀得到长条矩形, 将之贴合在铝制的基底上, 并在一侧表面涂覆吸收率非常高的涂层, 从而最大限度地减小靶板本体辐射对测试的影响(图1)。



图1 测试使用的狭缝靶板

狭缝目标经过准直光路成像在面阵红外探测器上。如果狭缝目标与探测器像元的排列方向相同, 很显然图像采样不够, 得到的数据是欠采样的。而当垂直放置的狭缝目标倾斜一个微小角度时, 每行的信号均在子午方向上间隔一定的距离, 假设狭缝目标上端和下端在子午方向上错开 n 个像元, 子午方向上的图像采样就被细分为原来的 n 倍。通过这种方法, 空间采样频率就被提高了。对斜狭缝目标的像方图像进行采集后, 将每一行的峰值对齐。通过匹配交叠获得线扩散函数, 再对其进行傅里叶变换, 便可得到调制传递函数。

1.2 斜刀边法的原理

刀边靶板一般选用薄铜板为材料, 剪裁成半圆后将之贴合在铝制的基底上, 并在一侧表面涂覆吸收率非常高的涂层, 从而最大限度地减小靶板本体辐射对测试的影响(图2)。



图2 测试使用的刀边靶板

垂直的刃边图像是由阶跃函数和线扩散函数卷积后所得结果的累加,其数学表达式为

$$g(x) = i(x) \times h(x) \quad (1)$$

式中, $i(x)$ 为阶跃函数; $h(x)$ 为点扩散函数的一维分量,通常称为线扩散函数; $g(x)$ 为刃边图像所代表的函数,通常称为刃边扩散函数。对式 (1) 微分后得到:

$$\frac{dg(x)}{dx} = \frac{di(x)}{dx} \times h(x) = \delta(x) \times h(x) = h(x) \quad (2)$$

这样我们通过刃边扩散函数求得了线扩散函数,对得到的线扩散函数进行傅里叶变换,就可得到调制传递函数。与斜狭缝法类似,由垂直的刃边图像得到的数据也是欠采样的,重建后的调制传递函数无法高于系统的奈奎斯特频率。在实际测试过程中使刃边靶板倾斜一个微小的角度,可以提高空间采样频率。这种测试方法就是斜刃边法。

2 测试方法的选择

2.1 斜狭缝法的局限性

在调制传递函数的实际测试过程中,使用的是有一定尺寸的狭缝目标,因此被测系统的调制传递函数 MTF_{sys} 与测试结果 MTF_{test} 需要加入狭缝目标宽度的影响修正 MTF_{slit} 。假设狭缝目标的宽度为 x ,则三者的关系为

$$MTF_{sys} = \frac{MTF_{test}}{MTF_{slit}} = \frac{MTF_{test}}{|\sin(xf)|} \quad (3)$$

如果想得到正确的调制传递函数测试结果,那么就需要使 MTF_{slit} 第一个零点对应的频率大于被测对象的奈奎斯特频率。被测对象的焦距越长,对应的奈奎斯特频率越大,所需狭缝目标的宽度就越小。过小的狭缝目标宽度会造成像目标对比度和信噪比的降低。当被测对象是变倍比很大的连续变焦的红外光电成像系统时,需要根据当前焦距选择不同宽度的狭缝靶板,测试步骤较为繁琐,测试所花费的时间较长。

2.2 斜刃边法的局限性

斜刃边法直接从刃边图像获取刃边扩散函数的数据,这个过程容易受到噪声的影响,其关系为

$$G(j2\pi f) = G_{LSF}(j2\pi f) + j2\pi f G_{noise}(2\pi f) \quad (4)$$

由式 (4) 右侧第 2 项可知,噪声随频率 f 而变化,两者之间成正比。因此为了减小噪声对测试结果的影响,需要在数据采集过程中最大限度地提高系统的信噪比。在实验室条件下,信噪比与面阵红外探测器的积分时间直接相关。积分时间与噪声成正比,因此在测试过程中,需要将面阵红外探测器的积分时间设置到最低,并在图像不饱和的前提下将刃边靶板的目标温差设置到最高,以达到降低噪声并提高整机调制传递函数测试精度的目的。

2.3 测试方法的选择

斜狭缝法采集到的图像数据在交叠处理后仅需要经过一次傅里叶变换即可得到调制传递函数,在理论上可以提供更为精确的测试结果。但对于大变倍比连续变焦红外成像系统而言,不同焦距下所需要的狭缝滤波校正均不相同,因此在测试过程中要不断地更换不同尺寸的狭缝目标。调制传递函数测试过程繁琐而且所需要的时间较长,在数据处理上还要考虑以下两个不确定因素:

(1) 面阵凝视型红外探测器随时间变化所产生的温度漂移;

(2) 测试中更换不同宽度的狭缝靶板会造成图像的对比度发生变化。

对斜刃边法而言,主要的测试误差来源于噪声。只要黑体提供的温差足够大、面阵红外探测器的积分时间足够小,就可以将噪声抑制在一个很低的水平。在变焦距过程中,黑白区域的对比度基本保持不变,像目标的尺寸变化不影响调制传递函数测试。由于不需更换靶板,所以可以很快地完成数据采集并计算出结果,无需考虑上述两个不确定因素。

综上所述,选择斜刃边法作为大变倍比连续变焦红外成像系统整机调制传递函数的测试方法是合理可行的。

3 被测对象与实验条件

3.1 被测对象

被测对象为连续变焦的红外光电成像系统, 工作波段为中波红外波段, 成像器件为面阵中波红外探测器。焦距从 50 mm 至 600 mm 连续可变, 对角线视场从 14° 至 1.17° 连续可变, 变倍比为 12, 相对孔径设计值为 1:4。

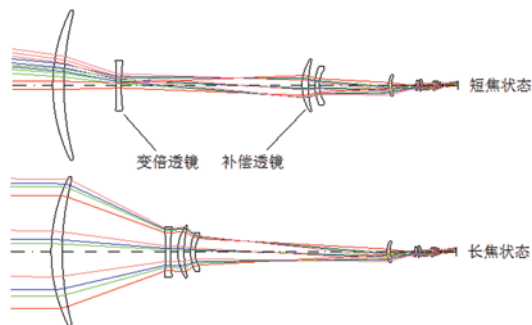


图 3 被测对象的光学系统

光学系统采用二次成像设计, 由在中间像面前的变焦组和中间像面后的二次成像组构成。在各焦距位置均保证相对孔径恒定为 1:4, 使冷光阑获得 100% 的匹配。这种设计可以在减少杂散光的同时平衡轴外像差, 使得整个被测对象在大变倍比的情况下仍可获得较优秀的成像质量。被测对象在改变焦距的过程中, 只有变焦组中的调焦补偿机构产生变化 (图 3)。调焦补偿机构由变倍透镜和补偿透镜组成, 变倍透镜的行程为 70 mm, 补偿透镜的行程为 167 mm。各个焦距位置在 16 l p/mm 空间频率下所对应的平均调制传递函数均不低于 0.6 (图 4 至图 8)。

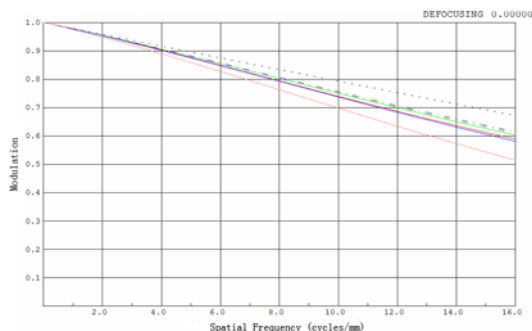


图 4 光学系统在焦距为 50 mm 时的调制传递函数曲线

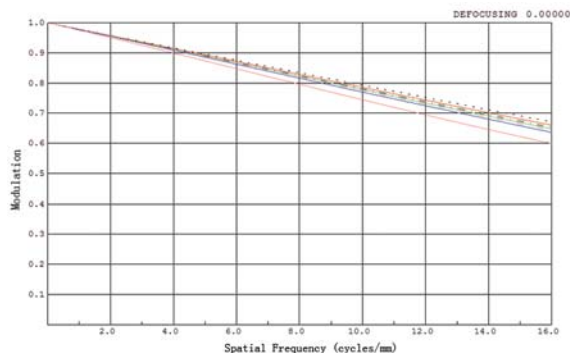


图 5 光学系统在焦距为 120 mm 时的调制传递函数曲线

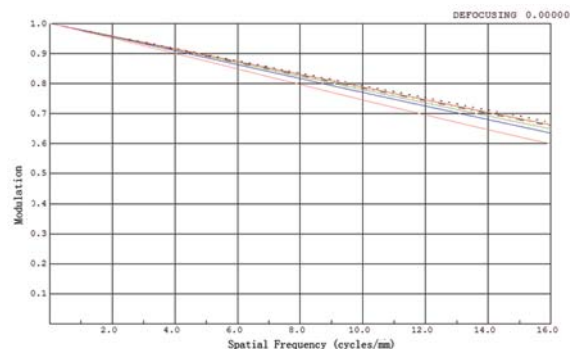


图 6 光学系统在焦距为 270 mm 时的调制传递函数曲线

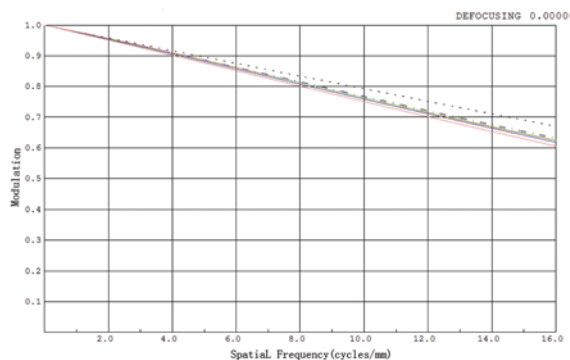


图 7 光学系统在焦距为 450 mm 时的调制传递函数曲线

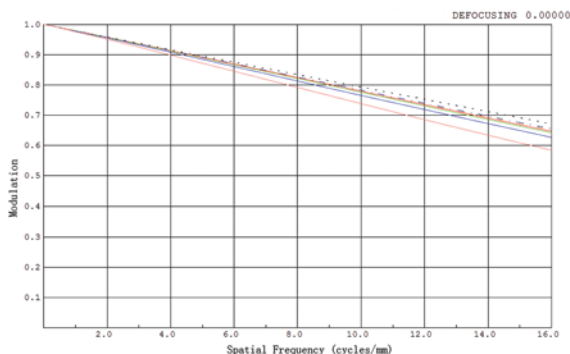


图 8 光学系统在焦距为 600 mm 时的调制传递函数曲线

3.2 实验条件

在恒温下进行实验,环境温度通过空调系统控制在 20 ± 0.5 °C 范围。实验中使用的离轴反射式平行光管的焦距为 3000 mm,成像质量为 $0.03\lambda(\text{RMS})$;黑体的温控精度为 0.05 K,最高可提供高于环境温度 60 K 的温差。面阵中波红外探测器被固定在内置编码器的一维平移台上,整体安装在理论像面位置附近。该一维平移台的重复定位精度为 $0.2\ \mu\text{m}$,行程为 25 mm。位移精度和位移行程能够满足实验过程中像面变化量的测试需求。

被测对象的焦距主要由变倍透镜的位置决定,通过测角法可以标定输出焦距与调焦补偿之间的对应关系。以光学系统调制传递函数的理论设计值与面阵中波红外探测器调制传递函数的乘积作为被测对象整机调制传递函数的理想值。以该值为参照标准,用于判断被测对象的成像质量是否处于比较好的状态。而最优像面的理论位置来源于光学设计系统最后一块镜片到成像面的距离,在实验前通过千分表进行测定。

4 测试流程与数据处理

4.1 测试流程

通过升降机构将被测对象的光轴与平行光管的光轴调整至平行,使平行光管出射的平行光完全充满被测对象口径。控制已完成输出焦距标定的被测对象的焦距从 50 mm 连续变化至 600 mm。对系统设计的 50 mm、120 mm、270 mm、450 mm 和 600 mm 五个特征点位置分别进行像面位置变化量的测试。

在以上五个特征点位置的理论像面位置前后进行等间隔离焦,并在每个等间隔离焦位置上对整机的调制传递函数进行测试,共计 11 个测

试点。记录各测试点在 16l p/mm 空间频率下的整机调制传递函数,采用最小二乘法对该数据进行拟合,最后得到离焦位置与调制传递函数之间的关系曲线。以拟合曲线的峰值作为 16l p/mm 空间频率下整机调制传递函数的测试值,对应的离焦量即为该焦距下最优像面位置相对于理论位置的偏差。

4.2 数据处理

根据得到的像面变化量数据对补偿透镜的控制曲线进行修正,然后重复 4.1 的测试流程。重复测量变焦距过程中五个特征点位置最优像面位置的调制传递函数和最优像面位置相对于理论位置的偏差,整理得到全部的测试数据(见表 1)。

在生产装配过程中,被测对象不可避免地会引入误差,造成成像质量的下降。根据表 1 和图 9 可知,虽然最优像面位置的调制传递函数测试值与调制传递函数理论值相比下降了约 40%,但系统成像质量与焦距之间的变化关系仍与理论设计基本保持一致。

修正前通过调制传递函数测出的最优像面位置与理论位置的最大偏差为 $35.8\ \mu\text{m}$ 。主要原因是被测对象采用了机械凸轮作为调焦补偿机械结构。虽然机械凸轮是较成熟的技术,但它的加工精度要求高,修配困难。在实际应用过程中,其凸轮转角的修正曲线往往与理论设计有一定的偏差。修正后最优像面位置相对于理论位置的最大偏差值为 $4.8\ \mu\text{m}$,该偏差在各焦距位置的成像焦深以内,能够满足使用需求。

5 结论

结合大变倍比连续变焦红外成像系统的特

表 1 测试数据汇总

变焦距过程中五个特征点位置	50 mm	120 mm	270 mm	450 mm	600 mm
整机调制传递函数理论值	0.259	0.294	0.285	0.268	0.276
修正前最优像面位置调制传递函数	0.148	0.179	0.168	0.167	0.174
修正前最优像面位置相对于理论位置偏差	$13.8\ \mu\text{m}$	$23.4\ \mu\text{m}$	$35.8\ \mu\text{m}$	$27.2\ \mu\text{m}$	$19.8\ \mu\text{m}$
修正后最优像面位置调制传递函数	0.147	0.181	0.172	0.166	0.174
修正后最优像面位置相对于理论位置偏差	$3.6\ \mu\text{m}$	$4.8\ \mu\text{m}$	$4.2\ \mu\text{m}$	$4.4\ \mu\text{m}$	$3.8\ \mu\text{m}$

(下转第 40 页)