

# 红外共形整流罩热噪声分析与修正

王超<sup>1,2</sup> 陈娟<sup>1</sup> 魏群<sup>1</sup> 贾宏光<sup>1</sup> 虞林瑶<sup>1,2</sup> 张天翼<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; <sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 飞行器在大气层中超音速飞行时,被气动加热的光学整流罩产生强的红外辐射,降低了红外目标的跟踪识别能力。分析了共形光学系统整流罩热噪声的产生机理,利用红外黑体,对320 K~460 K的整流罩热噪声进行了测试。利用二元非线性回归分析法确定了二次曲面作为噪声修正模型,其曲面拟合的决定系数均值达到0.8683。在整流罩温度从460 K下降至320 K的过程中,对1 K温差的靶条成像,图像信噪比均值为7.2 dB。利用噪声修正模型对图像进行噪声修正后,图像信噪比均值提高至13.7 dB,使红外图像信噪比提高了6.5 dB。该结果为导引头目标识别跟踪系统的设计和光学系统的优化提供了部分依据。

**关键词** 光学设计;共形光学;热辐射;光学头罩;红外噪声;曲面拟合

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1022001

## Thermal Noise Analysis and Correction of Infrared Conformal Dome

Wang Chao<sup>1,2</sup> Chen Juan<sup>1</sup> Wei Qun<sup>1</sup> Jia Hongguang<sup>1</sup> Yu Linyao<sup>1,2</sup> Zhang Tianyi<sup>1,2</sup>

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)*  
*<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** When the optical dome of aerobat is initially subjected to aerodynamic flight conditions, the temperature of front surface rises rapidly. The thermal optical dome produces a sharp increase in background radiance on the focal plane detector, which can mask the target signal and decrease the ability of target tracking. Infrared conformal dome has demonstrated its capabilities as a prominent technique for supersonic aero thermal radiation effect. Aero thermal radiation effect of conformal infrared dome is described. The thermal noises of conformal dome are measured by infrared blackbody when dome temperature decreases from 460 K to 320 K. Quadratic surface as noise correction model decided by dualistic nonlinear regression analysis is introduced, and the coefficient of determination of quadratic surface fitting is 0.8683. The mean signal noise ratio of the image is increased to 13.7 dB after noise correction by noise correction model. The signal noise ratio of infrared image increases 6.5 dB after noise correction. The result can meet the precision requirement of target tracking system and provide partial evidence for optics system optimization.

**Key words** optical design; conformal optics; thermal radiation; optical dome; infrared noise; surface fitting

**OCIS codes** 010.5620; 040.2480; 110.4280; 120.6810

## 1 引言

当飞行器在稠密的大气层中以超音速或高超音速飞行时,其光学头罩与大气相互作用,光学头罩周围的高温激波和被气动加热的光学窗口产生强的红外辐射,形成辐射干扰,称为飞行器光学探测系统的气动热辐射效应<sup>[1]</sup>。气动热辐射效应降低了光电探测系统对目标探测的信噪比,使目标跟踪精度下降,

甚至造成红外探测器饱和,产生所谓的热障问题<sup>[2]</sup>。目前国外针对再入弹头平板侧窗的气动热环境已经有了深入的探索,并通过风洞实验对模拟的激波流场和加热窗口的红外光谱辐射进行测试,分析了自然背景和窗口辐射背景对红外成像系统灵敏度影响的特点,提出了内冷和外冷两种窗口温度控制的方案<sup>[3-6]</sup>。但是光学窗口制冷系统增加了导引头结构

收稿日期: 2013-12-03; 收到修改稿日期: 2013-12-31

基金项目: 装备预研基金(51301060207)

作者简介: 王超(1984-),男,博士研究生,助理研究员,主要从事仪器仪表技术方面的研究。E-mail: wc100714@163.com

导师简介: 陈娟(1962-),女博士,教授,主要从事光电跟踪与计算机控制方面的研究。E-mail: stjanzh@yahoo.com

的复杂度,降低了导引头的可靠性,在工程应用中具有一定的实现难度。

共形光学系统是指满足导弹空气动力学最佳表面面型的光学系统,与传统半球型整流罩不同,共形整流罩能够更好地满足导弹外轮廓与形状需求。美国雷声公司和精密共形光学技术团队对共形整流罩的研究结果进行了总结<sup>[7-8]</sup>:1)减少导弹阻力,以获得更远射程和更快速度,缩短导弹命中目标时间;2)提高导弹气动性能,改善整流罩附近的热流特性;3)减小雷达散射截面,提高导弹的隐身性能。因此,采用共形光学导引头能够降低气动热辐射效应对目标检测识别的影响,降低导引头的瞄视误差,减少导引头对制冷系统的依赖。

本文介绍了共形光学导引头的光机结构设计,分析了头罩热辐射效应的产生机理,对头罩热噪声进行了测试。通过回归分析,确定了噪声修正模型,并采用二次曲面噪声修正的方法,对共形光学系统的头罩热噪声进行修正。经实验验证,噪声修正过程能够有效降低热噪声对红外成像的影响,提高成像信噪比。

## 2 共形导引头光机系统设计

### 2.1 光学系统设计

椭球型整流罩具有良好的空气动力学性能与光学性能<sup>[9-10]</sup>。目前,普遍使用的万向支架式导引头通常采用折反式光学系统。万向支架式结构的导引头需要以一定的扫描方式锁定目标,通过视轴与弹轴的偏差来确定导弹与目标的相对位置。由于共形整流罩在非零度视场时失去了旋转对称性,从而引入随视场变化的动态像差,需要额外的像差补偿结构。

典型的折反式共形光学系统的结构如图1所示<sup>[11]</sup>,光线经共形整流罩和主反射镜进入导引头镜

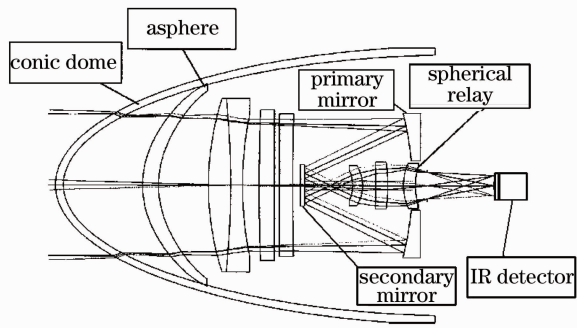


图1 共形光学系统结构图

Fig.1 Conformal optical system

片组,在焦平面阵列(FPA)上成像。

共形光学整流罩面型为高陡度非球面,其二次曲面的表达式为<sup>[12]</sup>

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (1)$$

式中  $r$  为径向坐标,  $c=1/R$ ,  $R$  为二次曲面顶点曲率半径,  $k$  为圆锥系数。

焦平面阵列选用国内外同类系统常用的HgCdTe 制冷型中波红外探测器,在探测器前方设置冷光阑阻挡杂散热辐射。导引头的光学系统采用俯仰偏航双框架结构,用于导引头搜索跟踪目标。光学系统瞬时视场为 $3^\circ$ ,目标视场为 $0^\circ \sim 20^\circ$ ,光学系统设计参数如表1所示。

表1 共形光学系统参数

Table 1 Parameters of conformal optical system

Parameter	Specification
Field of view /( $^\circ$ )	3
Field of regard /( $^\circ$ )	0~20
Fineness ratio	1
Work wavelength / $\mu\text{m}$	3~5
Effective focal /mm	90
Resolution /pixel	320×256
Pixel size / $\mu\text{m}$	30
MTF	>0.5@17 lp/mm
RMS spot diagram / $\mu\text{m}$	<30

## 3 共形整流罩热噪声测量实验

### 3.1 整流罩热辐射数学模型

飞行器在大气中超音速飞行时,光学头罩被气动加热而处于严重的气动热环境中,激波层和光学窗口将产生热辐射噪声,图2为红外共形导引头在超音速状态下的气动热辐射效应示意图。利用Fluent和Ansys软件,采用热力结构耦合分析方

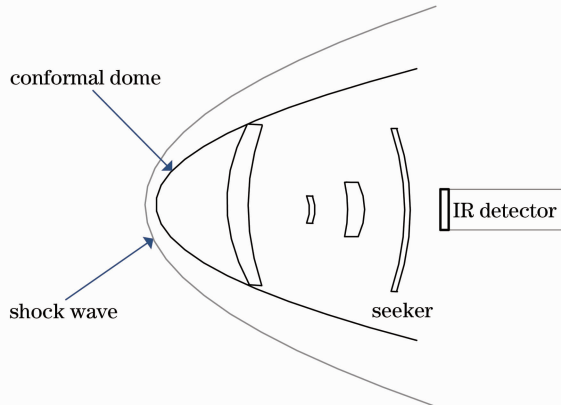


图2 气动热辐射效应示意图

Fig.2 Schematic diagram of aero thermal radiation effect

法,对高度为 10000 m,飞行速度为 2 Ma,飞行时间为 10 s 的共形光学整流罩进行仿真分析,得到整流罩的温度场峰值为 500 K。

对于绝对黑体,其光谱辐射出射度  $R_{\lambda T}$  遵从普朗克辐射定律,绝对黑体是指在任意温度下能够吸收所有波长的全部辐射能量的物体。为了工程计算方便,将光学整流罩等效为一个灰体辐射源,设其温度为  $T$ ,发射率为  $\epsilon_\lambda$ ,等效面积为  $A_T$ ,通过普朗克公式可以得到目标的光谱辐射出射度  $R_{\lambda T}$  为<sup>[13-14]</sup>

$$R_{\lambda T} = \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2)$$

式中  $c_1$  为第一辐射系数,  $c_2$  为第二辐射系数,  $\lambda$  为波长,  $T$  为黑体温度,  $\epsilon_\lambda$  为发射率。

通过辐射出射度可以得到目标的光谱辐射强度和光谱辐射亮度。目标的光谱辐射强度  $J_{\lambda T}$  和光谱辐射亮度  $I_{\lambda T}$  为

$$J_{\lambda T} = \frac{R_{\lambda T} A_T}{\pi} = \frac{\epsilon_\lambda c_1 A_T}{\pi \lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3)$$

$$I_{\lambda T} = \frac{R_{\lambda T}}{\pi} = \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\pi \lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (4)$$

式中  $A_T$  为窗口的等效面积。

设探测器的接收系统置于目标辐射轴的垂面上,距目标的距离为  $R$ ,按照距离平方反比定律,则该探测器接收系统上的辐射照度  $E$  为

$$E = \frac{R_{\lambda T} A_T}{\pi} \frac{1}{R^2} \tau_a \tau_w = \frac{A_T}{\pi R^2} \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\pi \lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \tau_a \tau_w \quad (5)$$

因为  $E$  为入射到单位接收表面积上的辐射功率,所以接收面积  $A_0$  上的光谱辐射功率  $P_{\lambda T}$  为

$$P_{\lambda T} = E A_0 = \frac{A_0 A_T}{\pi R^2} \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\pi \lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \tau_a \tau_w \quad (6)$$

由于一个光子能量为  $\epsilon$ ,所以可以得到光学窗口在探测器上产生的光子数  $N_T$  为

$$N_T = \frac{P_T}{\epsilon} = \frac{A_0 A_T}{\pi R^2} \tau_a \tau_w \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\pi \lambda^4 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] h c} d\lambda \quad (7)$$

式中  $A_T$  为窗口的有效面积,  $A_0$  为红外探测器的光学系统的光学孔径面积,  $R$  为目标到探测器的距离,  $\tau_0$  为光学系统的透过率,  $\tau_a$  为大气的透过率,  $\tau_w$  光学

窗口的透过率,  $\lambda_1$  为探测器相应的波段的下限,  $\lambda_2$  为探测器相应的波段的上限,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常数。

由此,根据探测器接收光子数的上限值,可以估算出光学整流罩热辐射在探测器上形成的噪声强度。此系统中的中波红外探测器的饱和电荷数为  $3.7 \times 10^7$ ,考虑到系统对远距离目标探测的需求,应该使窗口热噪声产生的光电子数控制在探测器饱和电荷数的三分之一以下。

### 3.2 热噪声测试实验原理

在共形光学系统中,由于存在各种光学镜片的加工误差、红外材料发射率误差、各部件的装调误差以及红外探测器的光电转换误差,所以由理论模型计算得到的整流罩热噪声模型误差较大,需要对热辐射噪声模型进行测量和验证。根据上节中热噪声的数学模型,使探测器饱和电荷数达到三分之一的共形整流罩平均温度为 450 K。以此温度条件为依据,设计了热噪声测试实验,图 3 为实验的设计框图。整流罩热噪声测试实验中使用了气浮平台、标准红外黑体、加热温箱、中波红外探测器、红外共形光学系统、红外测温仪以及图像采集系统。

由实验示意图所示,测试过程如下:

1) 如图 4(a)所示,利用导引头伺服控制系统,使导引头俯仰方向和偏航方向的目标视场均保持在  $0^\circ$ ,即导引头的视轴与整流罩的旋转对称轴重合。调整红外黑体的位置,使红外黑体充满视场,如图 4(i)所示。

2) 将共形整流罩置入温箱中,将共形整流罩加热至 500 K 后再置入光学系统中,调整光学系统,恢复成像质量。

3) 在整流罩降温的过程中,利用红外测温仪对共形整流罩进行连续无接触测温,同时利用图像采集系统存储光学系统对红外黑体成像。

## 4 热噪声数据处理

### 4.1 实验结果

由于调整光学系统期间,整流罩温度下降了 40 K,因此测试的最高温度为 460 K。热噪声测试实验的结果如图 4 所示,其中图 4(i)为常温状态下共形光学系统对红外黑体的成像。图 4(a)~(h)为共形头罩从 460 K 下降到 320 K 过程中,对红外黑体的成像,每下降 20 K 记录一次图像。

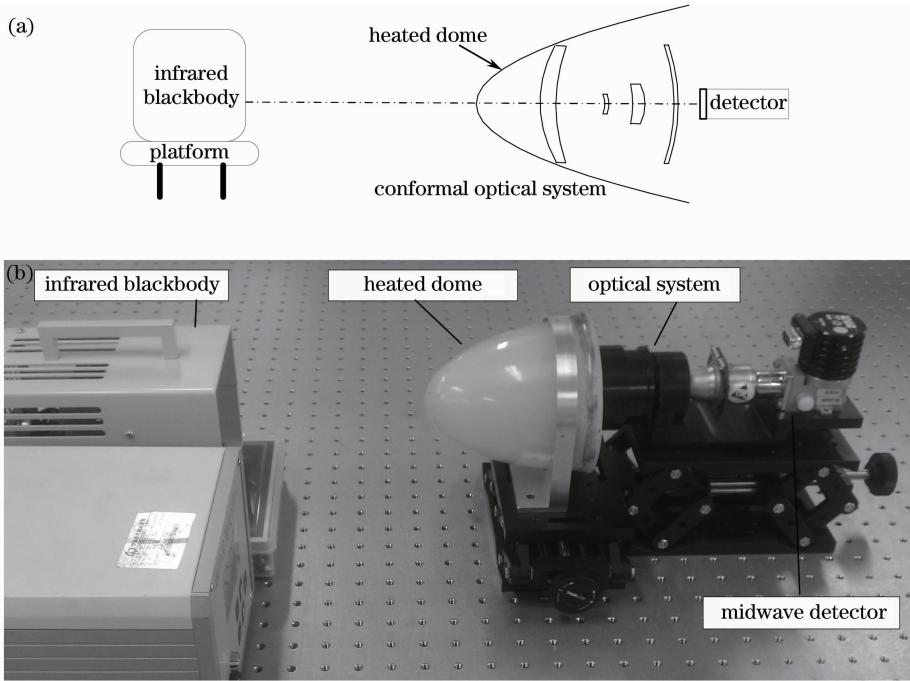


图 3 头罩热噪声测试原理图。(a)示意图；(b)实物图

Fig. 3 Schematic of thermal noise measurement. (a) Sketch map; (b) experiment entity

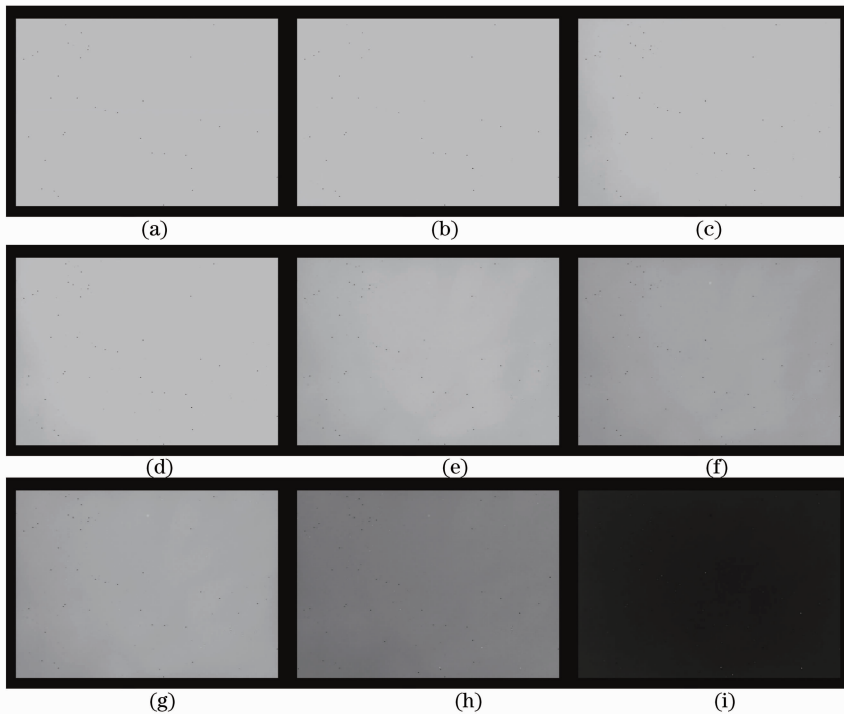


图 4 热噪声测试结果。(a) 460 K; (b) 440 K; (c) 420 K; (d) 400 K; (e) 380 K; (f) 360 K;  
(g) 340 K; (h) 320 K; (i) 室温

Fig. 4 Results of thermal noise measurement. (a) 460 K; (b) 440 K; (c) 420 K; (d) 400 K; (e) 380 K; (f) 360 K;  
(g) 340 K; (h) 320 K; (i) room temperature

## 4.2 曲面拟合

观察常温状态下共形光学系统对红外黑体的成像特性,除一些脉冲噪声外,在有效视场内红外黑体的成像较为均匀。当光学整流罩温度为 460 K 时,探测器并未饱和,随着光学整流罩温度下降,探测器上的噪声强度也随之降低。因此可以利用图 4(a)~(h) 进行回归分析,拟合出在不同温度条件下光学头罩热噪声的曲面模型。分别用线性模型、二次模型、三次模型、四次模型和高斯模型进行拟合,利用决定系数

表 2 曲面拟合效果

Table 2 Surface fitting results

Surface model /K	Polynomial linear	Polynomial quadratic	Polynomial triple	Polynomial biquadratic	Guass	
460	0.3968	0.8149	0.8567	0.8318	0.3812	
440	0.521	0.8595	0.8567	0.855	0.8661	
420	0.7268	0.8852	0.8887	0.9284	0.4607	
400	0.6877	0.8531	0.8867	0.9239	0.3956	
380	0.4708	0.8905	0.8619	0.8844	0.7838	
360	0.521	0.8595	0.8567	0.855	0.7959	
340	0.1293	0.8744	0.8397	0.9407	0.2911	
320	0.7104	0.9094	0.9178	0.9478	0.1616	
			340	103.2	0.0452	$-2.346 \times 10^{-5}$
			320	86.8	0.03237	$-5.937 \times 10^{-5}$

按几何光学理论,共形头罩的热噪声模型应按光学系统的几何中心对称,故二次曲面的数学表达式为

$$f(x, y) = P_0 + P_1 \times (x + y) + P_2 \times (x^2 + y^2), \quad (8)$$

曲面模型参数与头罩温度的对应关系如表 3 所示。

表 3 二次曲面参数表

Table 3 Parameters of quadratic surface

Dome temperature /K	$P_0$	$P_1$	$P_2$
460	167.0	0.02383	$6.702 \times 10^{-6}$
440	164.6	0.02671	$2.227 \times 10^{-5}$
420	160.9	0.0254	$2.015 \times 10^{-5}$
400	150.6	0.06314	$-1.358 \times 10^{-4}$
380	135.1	0.05695	$-1.257 \times 10^{-4}$
360	131.7	0.05761	$-1.259 \times 10^{-4}$

对拟合结果进行评价。当决定系数越接近 1 时,曲面拟合的效果越好,拟合效果如表 2 所示。通过对结果的统计分析,得到一次曲面、二次曲面、三次曲面、四次曲面和高斯曲面的决定系数均值分别为 0.5205、0.8683、0.8706、0.8959 和 0.5170<sup>[15]</sup>。可见二次曲面、三次曲面和四次曲面模型与实验数据的吻合程度明显高于另外两项,考虑到三次曲面和四次曲面的计算量较大,不适合实际应用,所以选取二次曲面作为曲面拟合的数学模型。

## 5 整流罩热噪声修正

通过对热噪声图像的回归分析,得到了不同温度条件下光学头罩热噪声的修正模型。利用最小可分辨温差(MRTD)测试仪代替红外黑体,将测试仪靶条与背景的温差设置为 1 K,重新进行光学整流罩热噪声测试,测试框图如图 5 所示。

290 K 的常温状态下,共形光学系统对 MRTD 测试仪的成像如图 6(h)所示。光学整流罩温度从 460 K 降至 340 K 过程中,对 MRTD 测试仪的成像如图 6(a)~(g)的左侧图所示,从图中明显发现热噪声随温度变化的过程。利用回归分析得到的二次曲面修正模型对 MRTD 测试仪有效视场内的成像

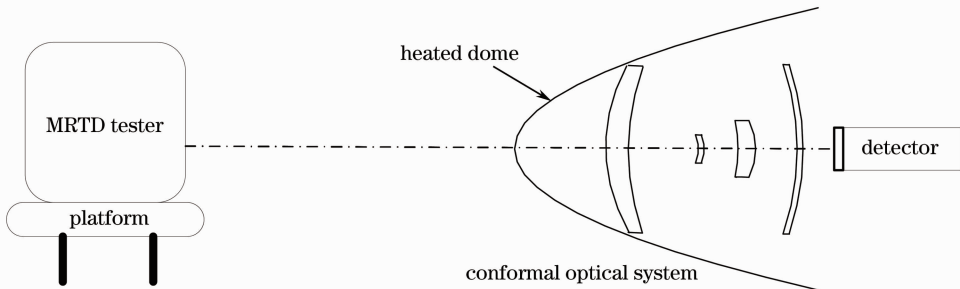


图 5 MRTD 测试实验框图

Fig. 5 Schematic of MRTD measurement

进行修正,其修正效果如图 6(a)~(g)的右侧图所示,通过对比发现成像效果有了明显的改善。

利用室温状态下共形光学系统对 MRTD 测试

仪的成像作为基准,分别计算噪声修正前和噪声修正后的图像信噪比,峰值信噪比  $f_{\text{PSNR}}$  为

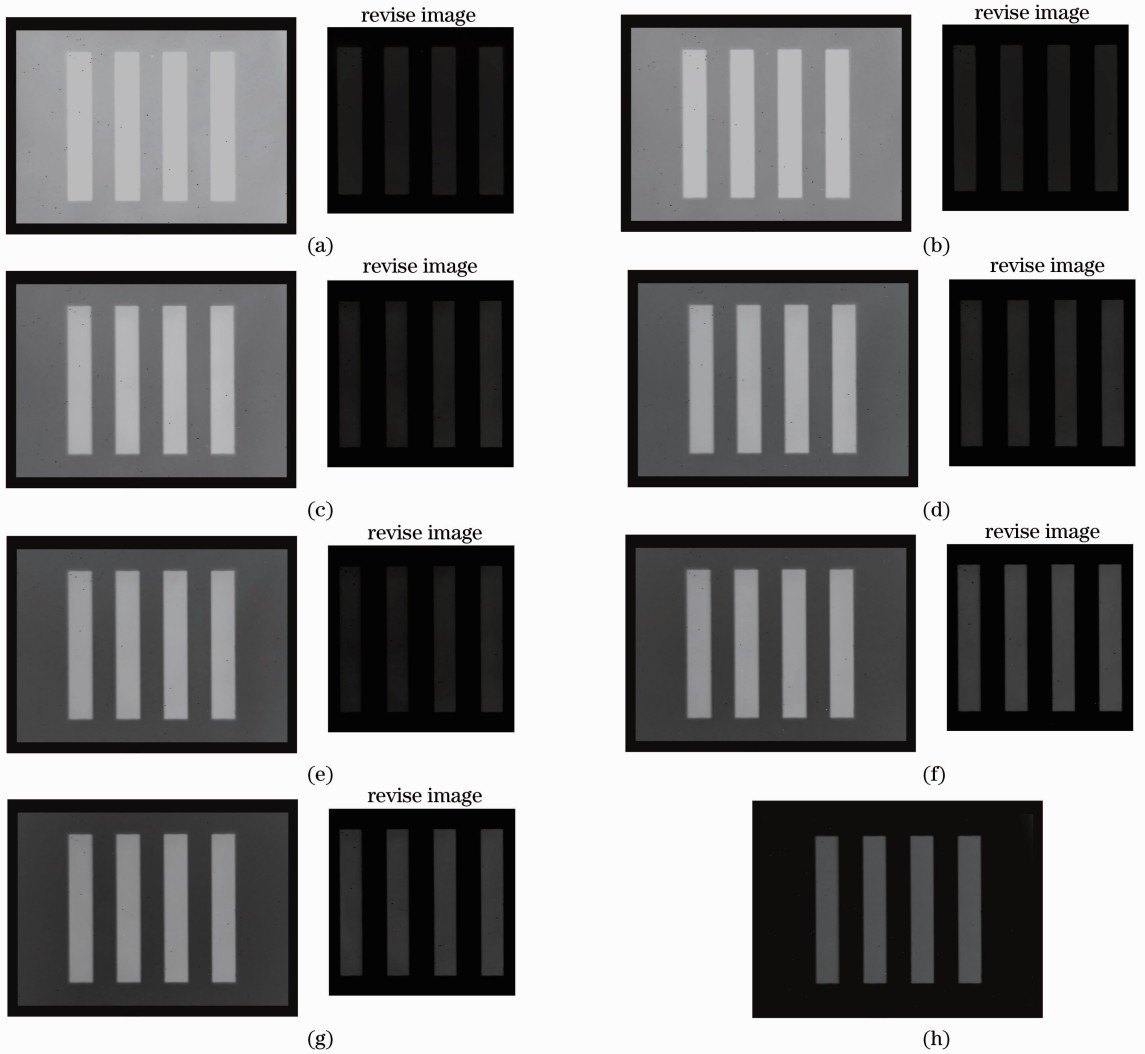


图 6 热噪声修正结果。(a) 460 K; (b) 440 K; (c) 420 K; (d) 400 K; (e) 380 K; (f) 360 K; (g) 340 K; (h)室温

Fig. 6 Results of thermal noise correction. (a) 460 K; (b) 440 K; (c) 420 K; (d) 400 K; (e) 380 K; (f) 360 K;

(g) 340 K; (h) room temperature

$$f_{\text{PSNR}} = 10 \log_{10} \left[ \frac{mmP_{\max}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i,j) - K(i,j) \|^2} \right], \quad (9)$$

式中  $m$  和  $n$  是图像两个维度的像素数量,  $P_{\max}$  为像素的最大灰度值,  $I(i,j)$  为带有噪声的图像,  $K(i,j)$  为基准图像<sup>[16]</sup>。在不同温度条件下,噪声修正前后的信噪比计算结果如图 7 所示,发现整流罩温度越高,成像信噪比越低。经过噪声修正后,没有发现图像信噪比随温度变化的规律,说明在测试范围内温度变化对修正图像的信噪比影响不大。通过统计分析,存在光学头罩热噪声的 MRTD 测试仪成像的信

噪比均值为 7.2 dB,经过噪声修正后的信噪比均值为 13.7 dB,可见头罩热噪声修正使系统信噪比提高了 6.5 dB<sup>[17]</sup>。

## 5 结 论

对共形红外导引头的光学整流罩热噪声进行了分析,利用红外黑体对 320 K~460 K 的整流罩热噪声进行了测试,并通过对比决定系数确定了二次曲面作为噪声修正模型。维持热噪声测试的实验状态,使共形光学系统对 1 K 温差的红外 MRTD 测试仪成像,计算得到成像的信噪比均值为 7.2 dB。利用二元非线性回归分析法得到误差修正模型,对图像进行噪声修正,得到图像信噪比均值为 13.7 dB,

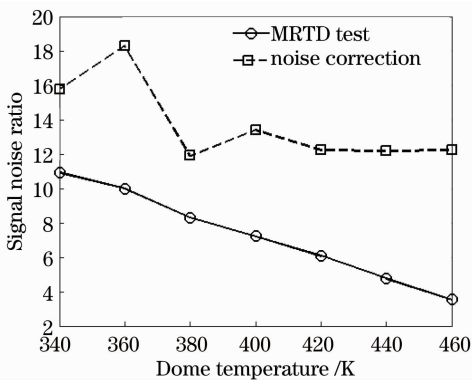


图7 头罩热噪声修正结果实验结果

Fig.7 Results of dome thermal noise correction

可见整流罩热噪声修正使系统成像信噪比提高了6.5 dB。该结果为导引头目标识别跟踪系统的设计和光学系统的优化提供了部分依据。

### 参 考 文 献

- 1 J K David. Fundamentals of conformal dome design [C]. SPIE, 2002, 4832: 394-409.
- 2 Haosu Xiao, Baojun Zuo, Yi Tian, *et al.*. Joint influences of aerodynamic flow field and aerodynamic heating of the dome on imaging quality degradation of airborne optical systems [J]. Appl Opt, 2012, 51(36): 8625-8636.
- 3 E F Cross. Analytical method to calculate window heating effects on IR seeker performance [C]. SPIE, 1999, 2286: 493-499.
- 4 Zhenjun Zhang, Zhiguo Cao, Wenwu Wang. Effects of hypersonic vehicle's optical dome on infrared imaging [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 093201.
- 5 E F Cross. Window heating effects on airborne infrared system calibration [C]. SPIE, 1992, 1760: 576-583.
- 6 J E Pond, C T Welch, G W Sutton. Side mounted IR window aero-optic and aero thermal analysis [C]. SPIE, 1999, 3705: 266-275.
- 7 Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Xin, *et al.*. Design of compact integral structure of two-mirror system [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 561-566.  
虞林瑶, 魏群, 张鑫, 等. 一体式紧凑型折反光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 561-566.
- 8 Yu Linyao, Jia Hongguang, Wei Qun, *et al.*. A design of mid-wave infrared integral catadioptric optical system with FOV [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(2): 142-147.
- 9 Wang Chao, Jiang Huhai, Zhu Ruifei, *et al.*. Boresight error analysis and correction of conformal infrared seeker [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912001.  
王超, 姜湖海, 朱瑞飞, 等. 共形光学导引头瞄视误差分析与修正 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912001.
- 10 Jiang Zhenhai, Wang Chao, Wei Qun, *et al.*. Wind tunnel experiment of supersonic conformal dome and its optical and structure characteristics [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1999-2005.  
姜振海, 王超, 魏群, 等. 超音速共形整流罩风洞试验及其光机特性 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1999-2005.
- 11 S W Sparrold, J P Mills, *et al.*. Conformal dome correction with counter rotating phase plates [J]. Optical Engineering, 2000, 39(7): 1822-1829.
- 12 Q Wei, H G Jia, M Xuan. Equivalent lenses of supersonic

seeker's outflow refractive index field obtained by simulation and experiment [C]. SPIE, 2009, 71561Q: 1-4.

- 13 Mu Zhiya, Wei Zhonghui, He Xin, *et al.*. Adaptive clutter suppression of infrared images by using sparse representation [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1850-1857.  
穆治亚, 魏仲慧, 何昕, 等. 采用稀疏表示的红外图像自适应杂波抑制 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1850-1857.
- 14 Ma Yifei, Zhao Wenping. Effects of window radiation on infrared imaging detection [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(3): 427-430.  
马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 427-430.
- 15 Xia Liangping, Li Huadong, Yin Shaoyun, *et al.*. Eliminating complex background noise of Raman spectrum based on configuration similarity comparing method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530003.  
夏良平, 李华栋, 尹韶云, 等. 基于形状相似性比较法消除拉曼光谱的复杂背景噪声 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0530003.
- 16 Liu Yucui, Tang Chunming. Suppressing methods for oblique stripe noise in the image of marine microorganism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0809001.  
刘玉翠, 汤春明. 海洋生物全息图斜条纹噪声的抑制 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0809001.
- 17 Huhai Jiang, Hongguang Jia, *et al.*. Analysis of zenith pass problem and tracking strategy design for roll-pitch seeker [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 23(1): 345-351.

栏目编辑: 韩峰