

共形光学导引头瞄视误差分析与修正

王 超¹ 姜湖海¹ 朱瑞飞^{1,2} 虞林瑶¹ 张天翼¹ 魏 群¹ 贾宏光¹

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

摘要 共形光学导引头中采用了大量的二次曲面和非球面,共形光学系统不具备点对称特性,导致导引头随目标视场的变化而产生瞄视误差。分析了共形光学系统瞄视误差的产生机理,利用光线追迹法,得到了 $0^\circ\sim 20^\circ$ 的目标视场中瞄视误差的仿真结果,计算出瞄视误差与目标视场的相关系数为0.9932。利用模板相关匹配法测试了共形红外导引头的瞄视误差,拟合了导引头瞄视误差的二次曲线,对比得到仿真数据的相对误差为5.02%。利用一元非线性回归分析法建立了误差修正公式,误差修正后的导引头的瞄视误差小于 $30\ \mu\text{m}$,跟踪精度提高至 $\pm 1\ \text{pixel}$,可以满足导引头伺服控制系统的精度要求。实验结果为共形光学系统的设计和优化提供了部分依据。

关键词 测量;共形光学;误差分析;误差修正;瞄视误差;目标视场

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0912001

Boresight Error Analysis and Correction of Conformal Infrared Seeker

Wang Chao¹ Jiang Huhai¹ Zhu Ruifei^{1,2} Yu Linyao¹ Zhang Tianyi¹
Wei Qun¹ Jia Hongguang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Infrared conformal seeker has demonstrated its capabilities as a prominent technique for the supersonic characteristic. To achieve the potential accuracy of target tracing, boresight error should be corrected as a result of using aspheric and quadric surfaces in conformal optics system. This paper describes boresight error measurement and correction in conformal infrared seeker. Expression and correlation coefficient of boresight error along with field of regard (FOR) ranging from 0° to 20° are obtained using ray tracing simulation. Boresight error measurement has been accomplished by correlation matching method, and results illuminate that the relative error is 5.02%. Error correction model by unitary nonlinear regression analysis is introduced. The experimental results have demonstrated that boresight error is reduced to lower than $30\ \mu\text{m}$ and tracking accuracy is improved to $\pm 1\ \text{pixel}$. The results can meet the precision requirement of servo control system and provide part of the basis for optics system optimization.

Key words measurement; conformal optics; error analysis; error correction; boresight error; field of regard

OCIS codes 120.1680; 120.4800; 110.2960; 480.4228

1 引 言

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^[1]。美国雷声公司精密共形光学技术(PCOT)团队对共

形整流罩的研究结果进行了总结^[2]:1)减少导弹阻力,以使导弹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。共形光学系统首先满足导弹飞行性能的需

收稿日期: 2013-01-14; 收到修改稿日期: 2013-02-19

基金项目: 装备预研基金资助课题。

作者简介: 王 超(1984—),男,硕士,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

要,其次才考虑导引头的光学性能。因此共形光学系统中采用了大量的二次曲面和非球面镜片,使共形整流罩表面不具备点对称特性,导致系统随不同的搜索区域引入不同的像差,最终产生导引头的瞄视误差^[3~6]。瞄视误差的产生将影响目标脱靶量的精度,降低了导引头的跟踪精度,增加了视线角速率的误差。目前国外在光学系统中加入反转累斯莱光楔,通过控制光楔旋转的角度,可以减小像差,但是反转光楔大大增加了导引头结构的复杂度和伺服控制的难度,在工程应用中较大的实现难度^[7~9]。

本文分析了共形光学系统中瞄视误差的产生机理,利用光线追迹法建立了光学系统瞄视误差模型,并对共形红外(IR)导引头的瞄视误差进行了测试。分析仿真结果和实验结果,并采用线性系统误差补偿的方法对导引头的瞄视误差进行修正,经实验验证,能够有效提高导引头的跟踪精度。

2 光学系统的误差模型

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^[10,11]。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^[12],光线经共形整流罩进入导引头镜片组,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^[13]

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

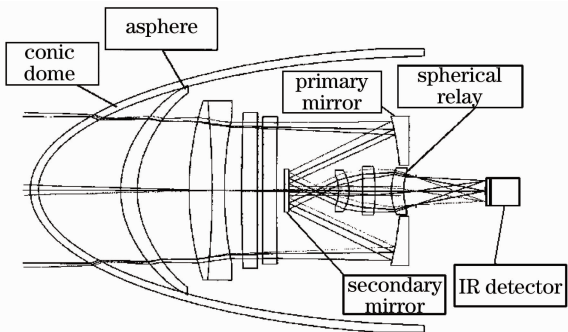


图1 共形光学系统结构图

Fig.1 Conformal optical system

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。

整流罩外表面各点曲率半径方向和大小随着矢高的不同而发生变化,入射光束透过整流罩时会具有轴外像差特性。当共形整流罩的旋转对称轴和成像系统光轴之间出现一个夹角时,光学系统丧失共轴特性,引入目标视场和瞬时视场两个视场参量。因此共形光学系统随目标视场的变化出现光轴偏心 and 倾斜特性,由此产生瞄视误差。

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的结构,用于导引头搜索跟踪目标。光学系统瞬时视场为 3° ,目标视场为 $0^\circ \sim 20^\circ$,光学系统具体设计参数如表1所示,RMS表示均方根。

表1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Specification
Field of view (FOV) /($^\circ$)	3
Field of regard (FOR) /($^\circ$)	0~20
Fineness ratio	1
Work wavelength / μm	3~5
Effective focal length /mm	90
Resolution /pixel	320×256
Pixel size / μm	30
Modulation transfer function	>0.5 (at 17 lp/mm)
RMS spot diagram / μm	<30

2.2 瞄视误差模型建立

根据几何光学原理,可以采用光线追迹法,通过模拟光线的传输过程,来描述随目标视场变化而产生的光学系统视轴偏心现象^[14]。由于光线追迹主要通过不断的求解光线通过光学系统的准确路径,所以需要先确定整流罩和光学系统中所有的镜片面型和材料,然后才能使光线追迹结果准确。

光线追迹过程可以利用商用光学设计软件Zemax仿真完成,图2所示为导引头目标视场为 0° 、 10° 和 20° 的光线追迹仿真示意图。一个在光学系统中心轴向的物体发出的光线通过各层镜片的透射和反射后,在焦平面的成像位置与中心轴线的法向距离,即为该视场角的瞄视误差:

$$L(\alpha) = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2}, \quad (2)$$

式中 α 为目标视场, $L(\alpha)$ 为瞄视误差, $O(x_o, y_o)$ 为中心轴线与探测器的交点位置, $I(x_i, y_i)$ 为成像位置。

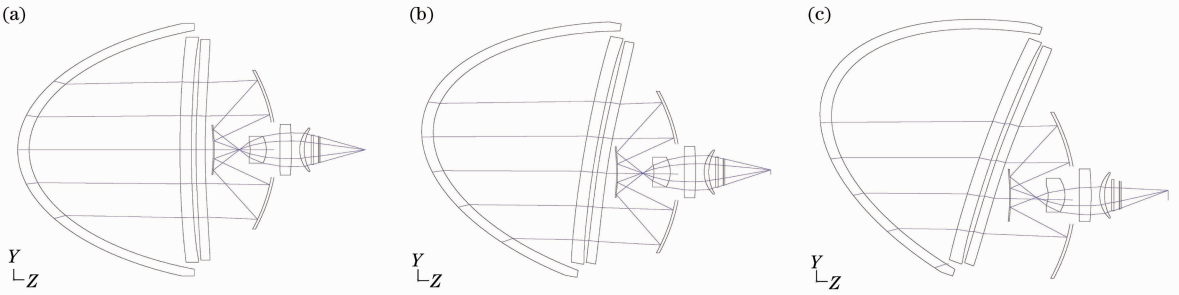


图2 光线追迹仿真图。(a) 0°目标视场；(b) 10°目标视场；(c) 20°目标视场

Fig.2 Ray tracing simulation. (a) FOR is 0°; (b) FOR is 10°; (c) FOR is 20°

通过追迹一系列实际光线做出数据列表，建立目标视场与瞄视误差之间的关系表达式。目标视场在 0°~20° 的范围内，共取 10 个目标视场值，得出瞄视误差结果，如表 2 所示。

表 2 光线追迹数据

Table 2 Boresight error in ray tracing

FOR / (°)	Error / mm	FOR / (°)	Error / mm
0	0.0191	14	0.6421
3	0.1272	15	0.7030
7	0.2825	16	0.7658
10	0.4212	18	0.8949
12	0.5266	20	1.0270

对仿真结果进行相关性分析，得到瞄视误差与目标视场的相关系数为 0.9932，对数据进行一元线性回归分析得到瞄视误差随目标视场的变化斜率为 0.04775，表示瞄视误差随目标视场的变化速率。对仿真数据进行线性拟合，统计指标如下：和方差 (SSE) 0.0129，确定系数 (R-square) 0.9867，标准差 (RMSE) 0.04016。二次多项式拟合的统计指标如下：和方差 8.066×10^{-5} ，确定系数 0.9999，标准差 0.0034。数据表明线性拟合的和方差是二次拟合的 160 倍，标准差是二次拟合的 11 倍，因此选用二次曲线作为瞄视误差数学模型。

光学系统瞄视误差的二次拟合曲线如图 3 所示，二次拟合公式为

$$L(\alpha) = 0.001012\alpha^2 + 0.03014\alpha + 0.02203, \quad (3)$$

式中 α 为导引头俯仰方向的目标视场，单位°， $L(\alpha)$ 为视轴在焦平面上的偏移量，单位 mm。

3 瞄视误差测量实验

3.1 测量原理

在导引头中，由于存在各种光学镜片的加工误差、各部件的装调误差以及红外探测器的光电转换误差，需要对光线追迹得到的瞄视误差模型进行校准。因此设计了瞄视误差测试实验，图 4 为实验的

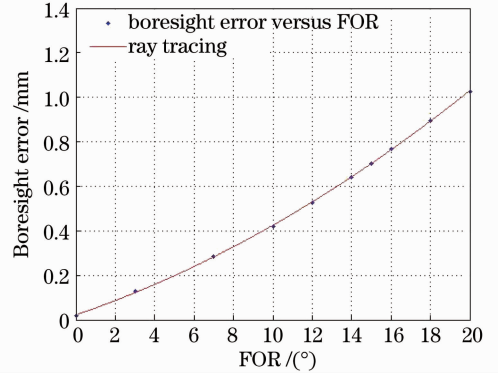


图 3 瞄视误差仿真曲线

Fig.3 Boresight error curve in ray tracing

设计框图。误差测试实验中使用了气浮平台、标准红外点光源、0.02 mm 精度的升降平台、高度尺等仪器设备。

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°，即导引头的视轴与整流罩的旋转对称轴重合。

2) 将升降平台升高一定的高度，并利用高度尺测量出具体的高度值，通过三角函数计算得到视场角

$$\alpha = \arctan \frac{h}{l}, \quad (4)$$

式中 h 为红外点光源升高的高度， l 为红外点光源与导引头俯仰框旋转中心的水平距离， α 为导引头视轴与水平轴的夹角。

3) 导引头中的光电编码器可以精确测量目标视场，通过伺服控制系统驱动电机使导引头俯仰框架转动，直至导引头目标视场达到 α ，如图 4(b) 所示。

4) 利用图像采集卡记录存储红外图像，分析红外点光源的位置，其目标位置与图像中心的纵向距离就是瞄视误差 e 。

5) 逐渐提到红外点光源的高度，记录点光源的红外图像，当目标视场到达 20° 时，高度不再增加。

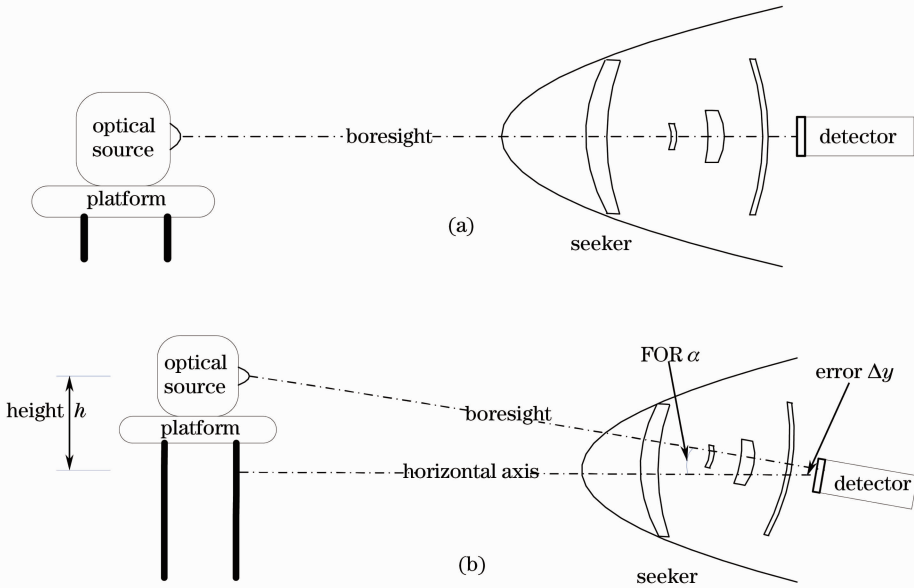


图 4 误差测试实验示意图。(a)目标视场为 0°；(b)目标视场非 0°

Fig. 4 Schematic of boresight error measurement. (a) FOR is 0°; (b) FOR is not 0°

实验中,高度测量精度为 0.02 mm,可推导出目标纵向位置误差,利用(5)式换算得到探测器靶面上的测量误差为 0.514 μm,与探测器像元相差一个数量级,不会影响实验结果:

$$\Delta y = f \cdot \frac{h + \Delta h}{l} - y, \quad (5)$$

式中 Δh 为红外点光源高度的测量误差, y 为目标纵向位置, Δy 为目标位置的测量误差。

3.2 瞄视误差提取

在瞄视误差测试实验中,当视场角为 0°时,红外点光源的成像位置在图像中心。发现目标与背景有较好的对比度和边缘特征,所以通过计算目标与红外图像匹配相关峰,对图像中的光源进行定位,下式为相关系数的计算方法,在相关系数矩阵元素中

取最大值,即为求解相关峰的过程^[15,16]:

$$C(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^{M_a-1} \sum_{n=0}^{N_a-1} A(m, n) \times B(m+i, n+j)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M_a-1} \sum_{n=0}^{N_a-1} [A(m, n)]^2} \times \sqrt{\sum_{m=0}^{M_a-1} \sum_{n=0}^{N_a-1} [B(m+i, n+j)]^2}}, \quad (6)$$

式中 A(m, n) 为具有 (M_a, N_a) 像元尺寸的目标图像; B(m, n) 为采集到的 (320 pixel, 256 pixel) 的红外图像; C(m, n) 是维数为 (321 - M_a, 257 - N_a) 的相关系数矩阵。

为了减小红外探测器的光电转换误差对瞄视误差的影响,在相关匹配之前对红外图像进行 3×3 的中值滤波处理,去掉中波红外探测器产生的噪声和

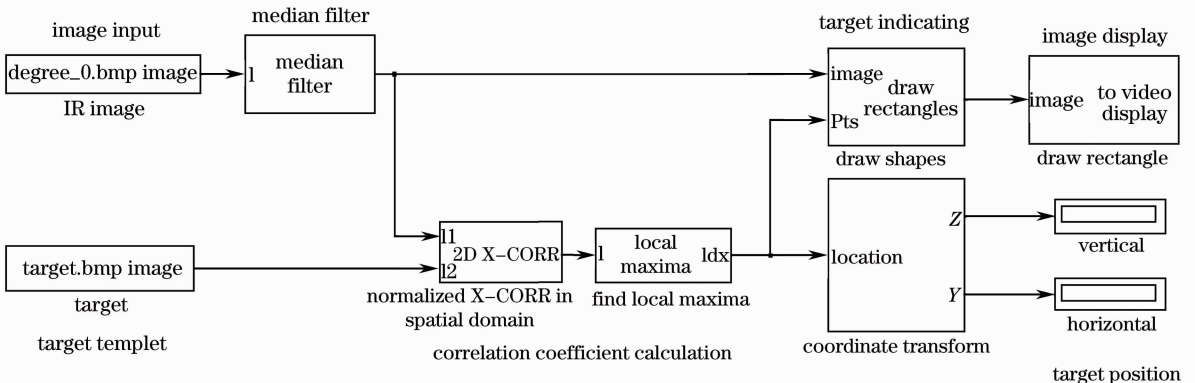


图 5 相关匹配计算框图

Fig. 5 Scheme of correlation matching calculation

盲元。当红外点光源在某高度时,利用 Matlab 软件对目标的序列图像进行相关峰的计算,目标位置经过均值处理后得到瞄视误差,图 5 为目标定位过程的模块框图。图中,median filter 模块的 l 代表实验图像输入,target 模块中的 Pts 表示目标位置,correlation coefficient calculation 模块中的 l_1 代表

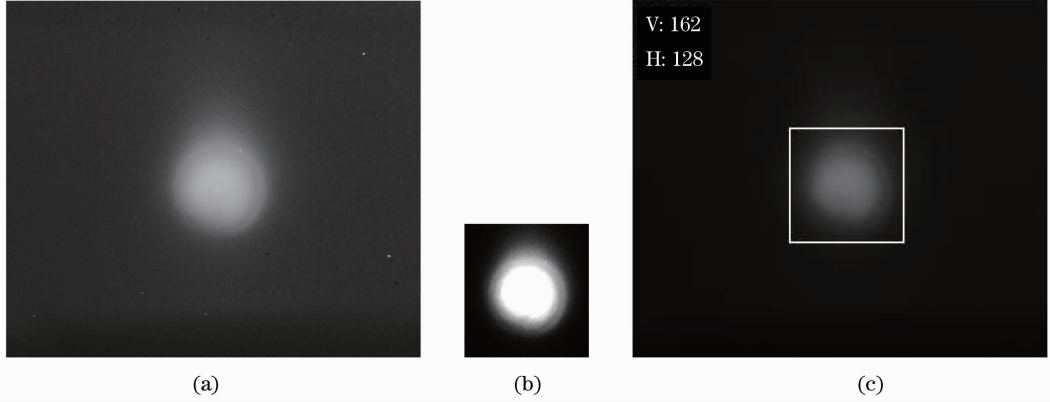


图 6 点光源红外图像。(a)原始图像;(b)光源模板;(c)目标定位图像

Fig. 6 Infrared images of optical source (FOR is 0°). (a) Original image; (b) target templet; (c) target location

3.3 实验结果

在实验中,依次提高红外点光源的高度,计算出俯仰框架需要转动的角度。通过上述的相关匹配的方法确定红外光源的位置,实验结果如表 3 所示,二次多项式拟合的公式为

$$L(\alpha) = 0.001167\alpha^2 + 0.03538\alpha + 0.002368, \quad (7)$$

式中 α 为导引头俯仰方向的目标视场,单位 $^\circ$, $L(\alpha)$ 为目标位置与图像中心的纵向偏移量,单位 mm。

拟合二次曲线统计指标如下:和方差 0.004573,确定系数 0.9973,标准差 0.02138。

表 3 误差测试实验数据表

Table 3 Boresight error in measurement

Target height /m	FOR /($^\circ$)	Error /mm
0	0	0
0.1	1.637	0.06
0.2	3.270	0.15
0.28	4.574	0.18
0.38	6.169	0.24
0.445	7.246	0.36
0.6	9.696	0.42
0.72	11.624	0.57
0.82	13.186	0.69
0.9	14.421	0.75
1.02	16.248	0.90
1.12	17.745	0.99
1.245	19.581	1.14

滤波后的实验图像, l_2 代表目标模板,X-CORR 表示相关匹配算法。

瞄视误差测试实验中,在视场角为 0° 时采集的图像如图 6(a)所示、红外点光源的图像模板如图 6(b)所示,经过滤波处理、相关定位并提取目标位置后的合成图像如图 6(c)所示。

实验中统计得到的瞄视误差斜率为 0.04793,与光线追迹仿真计算中的斜率结果相差 0.377%。与实验结果对比,仿真数据的相对误差为 5.02%,表明仿真结果与实验数据的数据变化趋势基本一致。仿真数据和实验数据的对比如图 7 所示。实验结果和仿真结果的差异主要由成像系统安装误差、成像系统轴系误差、光学系统像差和光学系统焦距误差造成^[17]。实验数据的相关系数为 0.9903,因此瞄视误差与导引头目标视场的相关程度很大。

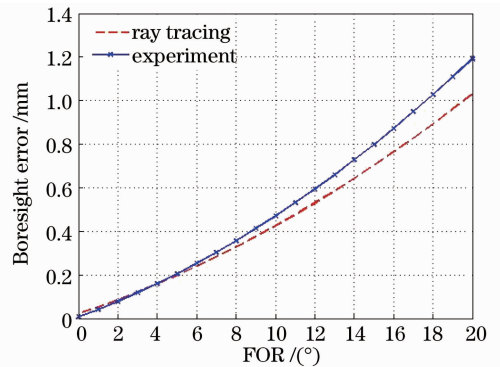


图 7 仿真结果与实验结果对比图

Fig. 7 Comparison between simulation and measurement

4 瞄视误差修正

通过分析光线追迹法的仿真数据和误差测试实验数据,发现瞄视误差的符号不变,并且瞄视误差的绝对值随着目标视场的增大而成比例的增大,所以

采用线性系统误差加修正值的方法来减小共形光学系统的瞄视误差。误差修正的系统框图如图 8 所示,对实验数据进行一元非线性回归分析得到二次修正函数,在图 8 中用 MD_Cor 表示:

$$L(\alpha) = 0.001232\alpha^2 + 0.03503\alpha, \quad (8)$$

式中 α 为导引头俯仰方向的目标视场,单位 $^\circ$, $L(\alpha)$ 为目标位置与图像中心的纵向偏移量,单位 mm。

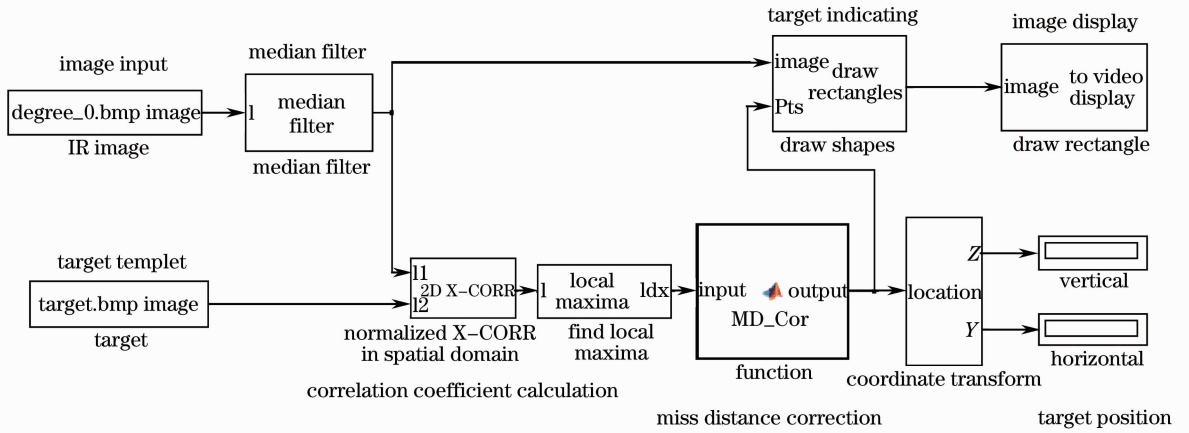


图 8 瞄视误差修正框图

Fig. 8 Scheme of error correction

由于测量修正值中也存在误差,因此修正公式并不能完全消除掉瞄视误差,对于残留的系统误差归为随机误差处理。误差修正实验结果如表 4 所示。

表 4 误差修正实验数据表

Table 4 Boresight error in correction experiment

Target height /m	FOR /($^\circ$)	Error /mm
0	0	0
0.1	1.637	0
0.2	3.270	0.03
0.28	4.574	0
0.38	6.169	-0.03
0.445	7.246	0.03
0.6	9.696	-0.03
0.72	11.624	0
0.82	13.186	0
0.9	14.421	0.03
1.02	16.248	0.03
1.12	17.745	0
1.245	19.581	-0.03

对误差修正实验的结果进行统计得到的瞄视误差的均值为 $2.3 \mu\text{m}$, 标准差为 $22.8 \mu\text{m}$, 最大值为 $30 \mu\text{m}$, 极差为 $60 \mu\text{m}$ 。图 9 为光线追迹的仿真曲线、瞄视误差测试数据的拟合曲线以及误差修正后的测试结果对比图。实验结果表明瞄视误差修正后导引头的瞄视误差小于 $30 \mu\text{m}$, 跟踪精度提高到 $\pm 1 \text{ pixel}$ 。

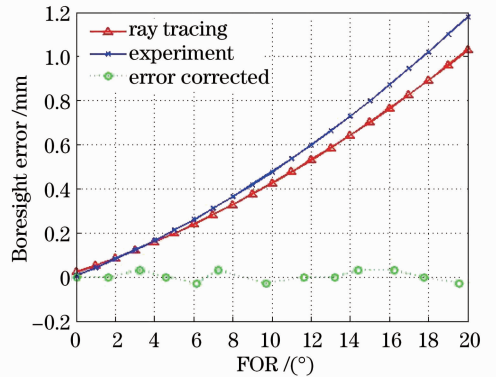


图 9 瞄视误差修正实验结果

Fig. 9 Results of boresight error correction

5 结 论

对共形红外导引头的瞄视误差进行了分析、仿真和测试,并采用系统误差加修正值的方法对瞄视误差进行了修正。利用光线追迹法对共形光学系统进行仿真,得到 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内的目标视场与瞄视误差的相关系数为 0.9932,表明瞄视误差主要由目标视场的变化引起。针对长径比为 1 的共形红外导引头,利用模板匹配法测试了瞄视误差,得到仿真数据的相对误差为 5.02%,结果表明实验结果与仿真结果基本一致。利用一元非线性回归分析法得到误差修正函数,修正后的导引头的瞄视误差小于 $30 \mu\text{m}$,跟踪精度提高到 $\pm 1 \text{ pixel}$,可以满足目标跟踪的要

求^[18]。该结果为导引头控制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 A. T. Partric. Precision conformal optics technology program [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 96~107
- 2 P. S. John, A. E. Richard, S. Frank. Fabrication challenges associated with conformal optics [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 128~137
- 3 J. K. David. Fundamentals of conformal dome design [C]. *SPIE*, 2002, **4832**: 394~409
- 4 S. W. Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 189~200
- 5 S. W. Sparrold. Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes [C]. *SPIE*, 1999, **3779**: 434~444
- 6 R. R. Shannon. Overview of conformal optics [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 180~188
- 7 T. A. Michell, J. M. Sasian. Variable aberration correction using axially translating phase plates [C]. *SPIE*, 1999, **3705**: 209~220
- 8 V. Lavigne, B. Ricard. Fast Risley prisms camera steering system; calibration and image distortions correction through the use of a three-dimensional refraction model [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(4): 043201
- 9 S. A. Lerner, A. Gupta, J. M. Sasian *et al.*. The use of implicitly defined aspheric null correctors for the testing of conformal optical elements [C]. *Optical Fabricaiton and Testing*, 2000. OTuC
- 10 Wei Qun, Ai Xingqiao, Jiang Huhai *et al.*. Optimizing design of dome figure for supersonic seekers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 384~389
魏群, 艾兴乔, 姜湖海等. 超音速光学导引头整流罩的形状优化[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(2): 384~389
- 11 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
- 12 S. W. Sparrold, J. P. Mills, D. J. Knapp *et al.*. Conformal dome correction with counter rotating phase plates [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1822~1829
- 13 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, **7156**: 71561Q
- 14 Jiang Tao, Ding Mingsong, Gao Tiesuo *et al.*. Numerical simulation of IR seeker high-speed flow field and its influence on ray transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0801002
江涛, 丁明松, 高铁锁等. 红外导引头高速流场及其对光线传输影响的数值模拟[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0801002
- 15 Tang Zhengzong, Liang Jin, Guo Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112007
唐正宗, 梁晋, 郭成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112007
- 16 Wang Wei, Xiao Jianqiang, He Xiaoyuan. Real-strain measurement of low-dimensional materials based on digital image tracking [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 526~530
王伟, 肖建强, 何小元. 基于图像跟踪的低维材料实时应变测量方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 526~530
- 17 Zhang Zhenjiu, Hu Hong. Measurement of geometric error of rotary stage system based on laser tracker [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1108016
张振久, 胡泓. 基于激光跟踪仪的转台系统几何误差检测[J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1108016
- 18 H. Jiang, H. Jia, Q. Wei *et al.*. Analysis of zenith pass problem and tracking strategy design for roll-pitch seeker [J]. *Aerospace Sci. & Technol.*, 2012, **23**(1): 345~351

栏目编辑: 何卓铭