

文章编号 1004-924X(2014)04-0829-08

共形导引头角增量误差分析及其前馈补偿

姜湖海*, 魏 群, 贾宏光, 虞林瑶, 王 超, 张天翼

(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:针对共形光学导引头角增量非线性误差的补偿问题,设计了一款红外共形光学导引头。研究了共形导引头的焦距非线性和脱靶量非线性产生的原因及它们对控制系统的影响,并给出了相应的前馈补偿方法。根据共形导引头的特点,介绍了焦距以及脱靶量的非线性误差现象;基于提取控制角增量的方法,分析了共形导引头的非线性变量对跟踪回路跟踪误差的影响。最后,设计了基于角增量非线性模型的前馈补偿器,测试了系统的跟踪误差。结果表明:当共形光学系统的焦距为 90~91.125 mm,像移变化为 0~1.109°时,所提出的前馈补偿器能够有效地校正跟踪误差,补偿后的跟踪误差为 0.038°,满足共形光学导引头对位置回路跟踪误差 $\leq 0.1^\circ$ 的要求。

关键词:共形光学;共形导引头;红外导引头;非线性误差;角增量误差;前馈补偿

中图分类号:TJ765.331 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0829

Analysis of angle increment error in conformal seeker and its feedforward compensation

JIANG Hu-hai*, WEI Qun, JIA Hong-guang, YU Lin-yao, WANG Chao, ZHANG Tian-yi

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

* Corresponding author, E-mail: jhhqgj@163.com

Abstract: A conformal infrared optical seeker was designed to compensate its angle increment nonlinear errors. The reasons to generate the nonlinearity of focal length and nonlinearity of deviation were analyzed, the effect of these nonlinearities on the seeker control system was discussed and a feedforward compensation method for the nonlinearity was given. On the basis of conformal optics characteristics, the principles of nonlinear errors of focal length and deviation were present in detail by data and charts. Then, according to the angle increment algorithm in a seeker control system, the effect of nonlinearity of conformal infrared seeker on the tracking error was analyzed and a feedforward compensator based on an angle increment nonlinear model was proposed for the correcting angle increment error. Finally, simulation work was performed to get the tracking error in the compensated seeker control system. Experimental results show when the focal length of the conformal optical system varies from 90 mm to 91.125 mm and its deviation varies from 0° to 1.109°, the tracking error can be controlled under 0.038°, which meets the requirement of conformal optical seeker for the precision of

收稿日期:2013-01-03;修订日期:2013-01-29.

基金项目:中国科学院三期创新工程资助项目;国家装备部预研基金资助项目(No. 51301060207)

nonlinear tracking error less than 0.1° .

Key words: conformal optics; conformal seeker; infrared seeker; nonlinear error; angle increment error; feedforward compensation

1 引言

自 1996 年美国国防部高级研究计划局开展“共形光学计划”以来,共形光学日益受到各科研机构的重视^[1]。相对于传统的结构设计方案,共形整流罩不仅气动阻力小,还具有雷达散射截面小,可以获得大于 90° 的无渐晕视场以及有利于改善飞行器头部附近的热流特性等特点。共形光学系统的设计对于未来导弹系统作战性能的提高有着深远的影响,但整流罩的非球面特性以及非零观察视场的非轴对称特性给该系统的设计、加工及检测带来了很大的难度^[2-7]。

为了将共形光学从理论阶段发展到应用层面,国内外相关科研机构设计了具有相位板^[1]、固定校正板^[8]、弧形校正板^[9-10]、泽尼克楔和可变形反射镜等结构的多种系统像差校正方案^[11-14]。上述几种校正方案都能在很大程度上改善共形整流罩的成像质量,但每种方案的像差校正能力仍有些许差别,其结构设计的难易程度也有所不同。其中,除了固定校正板结构外,其它的校正器能够在不同的观察视场中提供不同的像差补偿量,从而动态校正像差,减轻实际成像系统的变焦补偿压力。但是无论哪种校正方法,都很难在全视场内完全校正由非球面整流罩引起的成像误差^[15]。因此,本文分析和标定了共形导引头的角增量误差,并依据标定数据在控制回路中设计补偿环节,以修正该项误差,使跟踪精度满足系统要求。

2 非线性角增量误差

共形光学导引头采用非球面整流罩,其每个子观察视场中用于实际成像的曲面不相同。当反向追迹 0° 瞬时视场的主光线时,在罩外该主光线将不再与光轴重合,而且二者间的夹角随着观察视场的变化而变化。这种现象主要由相对倾斜的整流罩结构的折射作用造成,被称之为脱靶量非

线性^[2]。另外,共形光学系统的焦距随离轴角度变化呈非线性变化^[15]。将上述的两个变量用于求解导引头控制角增量,所求解的角增量具有非线性特征,从而导致共形导引头系统产生跟踪误差,这是共形导引头工程应用中必须要面对和予以解决的基础问题。

应用相对旋转相位盘对共形光学整流罩进行光学校正,可以在 $0 \sim 33^\circ$ 离轴角,将焦距的最大变化量由补偿前的 1.8 mm 降低至补偿后的 0.4 mm,从而部分补偿共形导引头的焦距非线性问题^[1,9]。但单纯从光学校正的角度补偿共形导引头的成像误差不仅会导致元件及系统成本的增加,也会增加其结构加工及装调的复杂度。因此,本文从控制系统的角度,提出了一种综合补偿共形导引头焦距及脱靶量非线性误差的方法。

为了研究共形光学技术以及共形导引头成像误差的补偿问题,本文设计了一款共形光学导引头。该系统的整流罩面型为椭球面,采用两片固定式校正片,系统光路如图 1 所示。

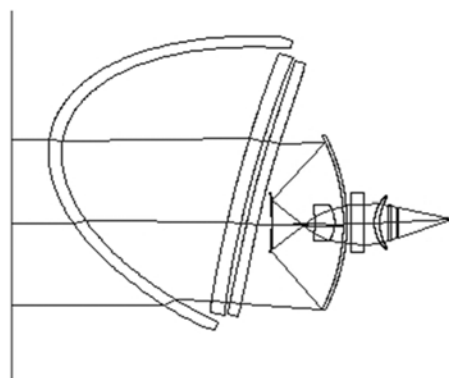


图 1 采用两片固定式校正片的共形光学系统

Fig. 1 Conformal optics with two fixed correctors

在图 1 中,光学系统的离轴角为 15° ,若采用球形整流罩,通过瞬时视场的主光线应该成像在靶面中心位置;但在该共形光学系统中,目标的成像位置发生了偏移,并且偏移量随离轴角呈非线性变化特征;而焦距随离轴角也呈现同样的特征,这种非线性特征被简化后示于图 2。图中,由目

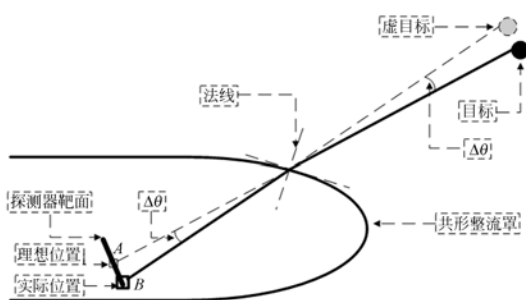


图2 共形导引头角增量系统误差

Fig. 2 Angle increment system error in a conformal seeker

标发出的光线经过共形导引头的光学系统成像在探测器靶面上。在一个采用常规球形整流罩的光学系统中,目标的成像位置如图2中A所示;而在一个共形光学导引头中,目标经过非球面整流罩及校正片后,光线发生了折射,成像位置改变,最终目标在靶面上的成像位置在B处。导引头控制系统跟踪回路的功能是保持目标的脱靶量在允许误差内,反映在角度误差上就是要保证 $\Delta\theta$ 在精度范围内。显然,共形光学导引头会产生随离轴角变化的系统跟踪误差。这种现象表现在像空间上是跟踪误差;表现在物空间内就是导引头的指向误差,如图2中的虚目标所示。采用共形整流罩的导引头时要量化研究角增量误差随离轴角的变化情况,并结合系统的指标要求补偿角增量误差。

导引头控制系统通常是以跟踪回路为外回路,速度回路为内回路,位置回路的控制指令以角增量 $\Delta\theta$ 的方式给定。如图3所示,以导引头内框架为例,解算位置回路控制角增量 $\Delta\theta$ 时,在角度

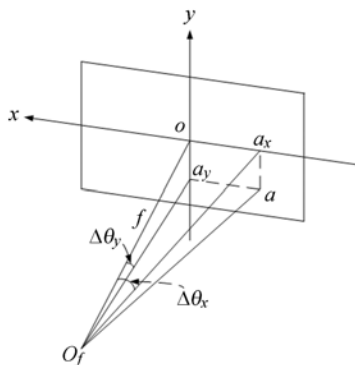


图3 目标角增量求解示意图

Fig. 3 Angle increment calculation for targets

较小的条件下,角增量的求解公式为:

$$\Delta\theta_y = \arctan(\Delta y / f) = \arctan(\mu \cdot oa_y / f), \quad (1)$$

式中: μ 为探测器的像元尺寸, oa_x 和 oa_y 分别为目标在像面 x 轴和 y 轴上的脱靶量, f 为光学系统的焦距。导引头系统的主要参数见表1。

表1 共形导引头系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of conformal system

参数	数值
焦距 f	90 mm
探测器像元数 N	320 pixel $\times$ 256 pixel
探测器像元尺寸 μ	30 μ m
最大离轴角度 θ	$\pm 30^\circ$

导引头控制系统在解算位置回路控制角增量 $\Delta\theta$ 时,光学系统的焦距和脱靶量为变量。如前文所述,在共形导引头中,焦距和脱靶量是随离轴角呈非线性变化的,所以需要对它们的变化特性进行描述。

通过光学设计软件仿真得到了脱靶量和焦距的变化数据。其中,导引头内框即俯仰框架的脱靶量的变化数据,如图4所示。

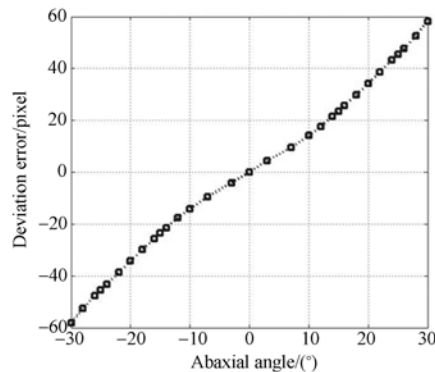


图4 脱靶量误差随离轴角变化曲线

Fig. 4 Variation of deviation error with abaxial angle

在图4中,随着离轴角从 0° 变化到 30° ,脱靶量从0像元(靶心)增加到58.07个像元。按照图3的定义,当离轴角向相反方向变化时,脱靶量的偏移方向也是相反的。为了便于补偿该误差,拟合图中的数据,得到的曲线公式为:

$$\Delta y = \begin{cases} 0.0248\theta_y^2 + 1.197\theta_y - 0.00737, & \theta_y \in [0, 30] \\ -0.0248\theta_y^2 + 1.197\theta_y + 0.00737, & \theta_y \in [-30, 0] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: Δy 表示目标在探测器靶面上沿 y 方向的脱

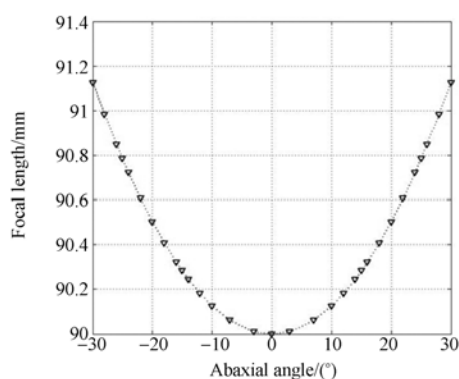


图 5 焦距随离轴角变化曲线

Fig. 5 Variation of focal length with abaxial angle

靶量, θ_y 表示框架在 y 方向的离轴角。

同样地, 焦距随离轴角的变化也可以通过仿真获得, 所获得的数据如图 5 所示。可以看出, 当离轴角从 0° 变化到 30° 时, 共形导引头的焦距从 90 mm 变化到 91.125 mm。很显然, 与脱靶量误差不同, 焦距误差的变化特性为偶函数。拟合后得到:

$$f = 0.00125\theta_y^2 + 90, \theta_y \in [-30, 30]. \quad (3)$$

由式(1)计算得到不同离轴角情况下, 目标在中心视场的成像情况, 得到的数据及拟合曲线如图 6 所示。

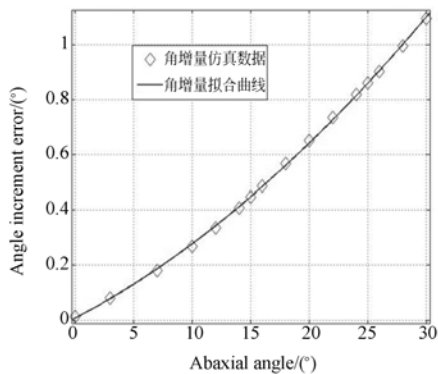


图 6 角增量误差随离轴角变化曲线

Fig. 6 Variation of angle increment error with abaxial angle

图 6 中, 拟合曲线表示为:

$$\Delta\theta_y = 0.000470\theta_y^2 + 0.0224\theta_y + 0.00634. \quad (4)$$

由式(4)可以实时计算出角增量误差, 并在控制系统位置回路中对它进行补偿校正。

实际系统中共形导引头的角增量误差的测试平台如图 7 所示。在图 7 中, 目标由精确温控的电阻型红外热源生成, 目标与背景之间的温差为 1 K。通过调整目标竖直位置来改变导引头与目

标之间的夹角。目标与导引头之间的距离可以通过计量光学平台的安装孔间距获得, 相邻安装孔间距为 25 mm。使用上述信息计算得到的弹目夹角作为导引头的位置指令, 调整导引头的俯仰离轴角, 使得光轴指向目标。通过工控机中的图像采集卡获得红外探测器的图像信号, 图像采集卡为 SDK-G0, 支持 Camera-link 接口, 探测器敏感材料为碲镉汞, 数据输出帧频为 50 Hz, 系统运行环境为 Matlab-xpc 实时交互平台。将采集获得的图像数据进行增强后输入到目标识别跟踪算法中, 读出图像处理器的脱靶量, 用实测脱靶量减去靶心位置, 再结合当前离轴角下的实际焦距计算出角增量误差。

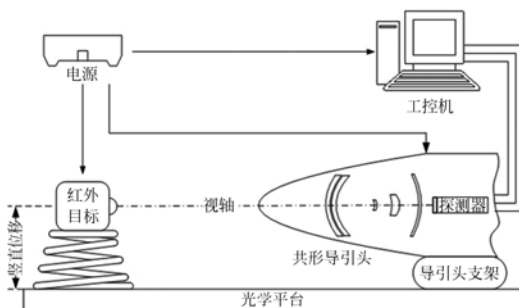


图 7 共形导引头角增量误差测试平台示意图

Fig. 7 Platform for angle increment error test

按照图 7 的测试平台建设方案, 搭建了图 8 所示的共形光学导引头角增量误差测试系统。其中, 通过调整支架的数量或旋转支架的手柄控制竖直位置, 并用高度尺测量校准; 通过改变红外目标在平台上的位置实现水平位移。导引头控制器安装在光学舱后部的电子舱中, 用于控制导引头的速度和位置。该测试平台能够标定共形导引头俯仰和方位两个方向的角增量误差。

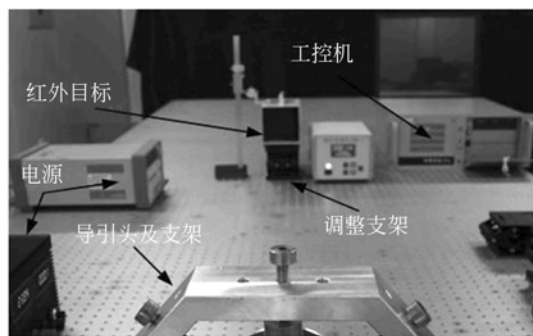
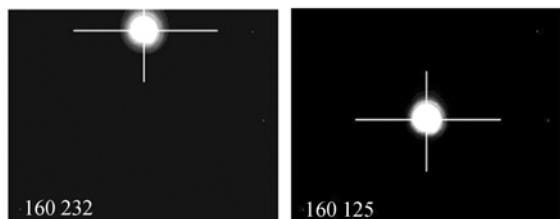


图 8 共形导引头角增量误差测试系统

Fig. 8 Test platform for angle increment error

图6的仿真数据和测试结果列于表2中。其中,导引头与目标的夹角数值以测试中的使用值为基准,角增量误差的仿真数据为带入夹角值的计算结果。

图9给出了当共形导引头处于系统零位,弹目夹角为 2° 时,标定目标角增量误差的成像情况。其中,图像处理器的坐标原点定义在靶面的左下角,由此得到探测器靶心的坐标为(160,128)。



(a) 2° 弹目夹角成像情况 (b) 2° 离轴角目标成像
(a) Image of 2° angle between seeker and target (b) Image of 2° abaxial angle for inner gimbals

图9 角增量误差标定实验目标成像图

Fig. 9 Images in angle increment error calibration

图9(a)显示了导引头俯仰轴和方位轴的离轴角均为 0° 时的目标成像位置,其坐标为(160, 232)。俯仰轴执行 2° 角增量指令后的成像如图9(b)所示,其坐标为(160, 125)。

表2 角增量误差仿真及测试结果

Tab. 2 Results of angle increment error for simulation and test ($^\circ$)

角度	仿真误差	测试误差
0	0.006 34	0
3.270	0.084 6	0.085 6
6.196	0.163	0.152
7.246	0.193	0.219
9.696	0.268	0.266
11.624	0.330	0.362
13.186	0.383	0.428

由表2可以看出,随着离轴角的增大,共形导引头的角增量误差也逐渐增大。结合本系统的参数条件,计算得到离轴角为 30° 时,角增量误差可达 1.12° ,目标在探测器靶面的位置处于视场的二分之一,导引头非常容易丢失目标。针对这样的情况,需要进行前馈补偿以校正共形导引头的角增量误差。

3 前馈补偿方法

本文以导引头内框架的控制系统为例分析焦距及脱靶量误差对跟踪回路的影响。

如图10所示, $G_{cp}(s)$ 表示内框架位置回路补偿器, $G_{vp}(s)$ 表示内框架速度回路补偿器, $G_{op}(s)$ 表示内框负载数学模型, ω_{dp} 表示内框速度回路扰动信号, ω_{fp} 表示反馈角速度, θ_{dp} 表示角增量的非线性误差。

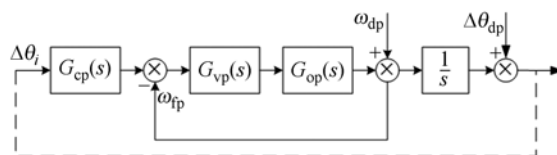


图10 内框架控制系统原理框图

Fig. 10 Block diagram of inner gimbal control system

由图10可以计算出角增量误差环节到输出的传递函数为:

$$\Phi_n(s) = \frac{1}{1 + \frac{G_{cp}(s)G_{vp}(s)G_{op}(s)}{s(1 + G_{vp}(s)G_{op}(s))}} = \frac{1}{1 + G_{kp}(s)}, \quad (5)$$

其中,各环节的具体传递函数表达式为:

$$\begin{cases} G_{op}(s) = \frac{628.744}{0.0028s^2 + 0.2084s + 1} \\ G_{vp}(s) = \frac{0.001581s^2 + 0.1793s + 1}{0.0076s^2 + s} \\ G_{cp}(s) = \frac{29.45s + 15.5}{s} \end{cases} \quad (6)$$

由此可知,导引头控制系统对角增量误差有抑制作用,通过调整位置回路的开环增益,可以减少误差,并且可以将扰动对位置回路的影响控制在精度允许的范围内。公式(5)所示的角增量误差传递函数的频率特性曲线如图11所示。

由图11可以看出,角增量误差对角度精度的影响非常小。通过数据仿真也可以看出,正如前文所述,共形导引头的角增量误差影响的是导引头的指向精度,即实际导弹与目标的夹角,所形成的导引头跟踪回路的弹目夹角误差如图2所示。

在实际的数字跟踪系统中,采样存在滞后问题^[22-24],即在单个图像跟踪周期内,若不同时补偿角增量误差,则总是存在一个与离轴角相关的脱靶量误差;当偏差与下一个采样时刻的目标脱靶

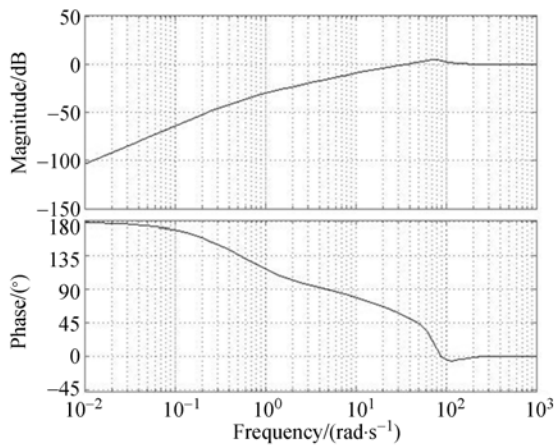


图 11 位置回路扰动传递函数伯德图

Fig. 11 Bode diagram of disturbance in position loop

量方向一致时,有可能会造成目标逃逸出瞬时视场,跟踪目标丢失的情况。

为补偿跟踪误差,可以按照式(2)和式(3)分别对焦距和脱靶量进行补偿,也可以使用式(4)标定的角增量测试误差的拟合模型设计前馈补偿。为了简化计算过程,提高程序执行的实时性,本文着重研究了基于角增量测试模型的补偿方法。

导引头控制系统通常以速度回路为内回路,以位置回路为外回路。速度回路使用陀螺测量导引头框架的惯性角速度作为反馈量,位置回路为跟踪回路,图像处理器的脱靶量作为位置回路的反馈形成外回路的闭环控制。本文提出了一种基于系统离轴角度的前馈补偿方案,如图 12 所示。

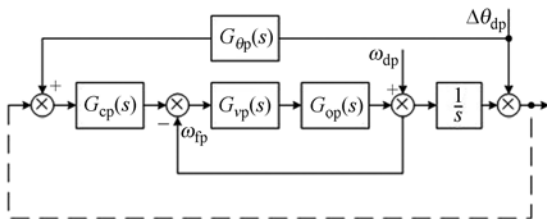


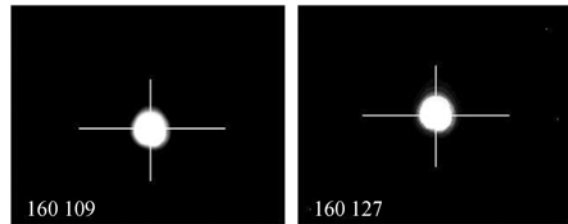
图 12 角增量前馈补偿

Fig. 12 Block diagram for angle increment feedforward compensation

在图 12 中, $G_{dp}(s)$ 表示角增量的前馈补偿器。角增量误差 $\Delta\theta_{dp}$ 属于可量测扰动信号,前馈补偿并不改变反馈系统的特性,可以按照公式(4)的补偿条件或者将补偿量计算出来存储在控制器的记忆单元中,用查表的方法设计前馈补偿器。

4 实验

在图 8 所示的共形导引头角增量误差测试平台中,加入前馈补偿环节,以验证补偿算法的正确性及补偿精度。以 11.624° 离轴角的补偿效果为例,测试结果如图 13 所示。



(a) 补偿前跟踪图像

(b) 补偿后跟踪图像

(a) Image before compensation (b) Image after compensation

图 13 前馈补偿前后目标成像误差对比图

Fig. 13 Comparison of deviations without and with feedforward compensations

图 13(a)表示离轴角为 11.624° 时目标的偏差,图 13(b)表示添加前馈补偿后目标在探测器靶面的成像情况。通过对比可以看出,目标在靶面竖直方向的成像位置由补偿前的 109 pixel 变为补偿后的 127 pixel。前馈补偿器能够完全补偿系统的指向误差,补偿后的跟踪误差为 1 pixel。不同角度下测试所得的指向误差数据列于表 3 中。

由表 3 可知,离轴角在 $0 \sim 13.186^\circ$ 时,所设计的前馈补偿器能很好地补偿导引头的指向误差,最大跟踪误差可以控制在 0.038° 以内,即 2 个像元以内。补偿结果可以满足系统跟踪误差的要求。

表 3 角增量误差前馈补偿结果

Tab. 3 Results of feedforward compensation for angle increment error in conformal seeker ($^\circ$)

角度	补偿前跟踪误差	补偿后跟踪误差
0	0	0.019
3.270	0.085 6	0.019
6.196	0.152 0	-0.019
7.246	0.219 0	-0.038
9.696	0.266 0	0.019
11.624	0.362 0	-0.019
13.186	0.428 0	0.038

5 结 论

本文根据共形导引头的技术特点及其像差校正方法,分析了共形导引头的焦距和脱靶量非线性误差,并结合某共形系统的具体参数,给出了焦距和脱靶量误差随离轴角的变化曲线。按照导引头控制系统提取跟踪回路角增量的方法,计算了共形导引头在跟踪目标时的角增量误差,说明了

角增量误差对导引头指向误差的影响。搭建了角增量误差标定与测试平台,对导引头的指向误差进行了测试。设计了前馈控制器,根据当前角位置实时地补偿导引头的指向误差。测试结果显示:通过前馈补偿,共形导引头在 13.186° 离轴角以内的指向误差由补偿前的 0.428° 降低至 0.038° ,满足了导引头控制系统对目标跟踪精度的要求。由此表明,前馈补偿算法有效,且具有数据计算少、易于操作和实测性强的特点。

参考文献:

- [1] SPARROLD S W, MILLS J P, ELLIS K S, *et al.*. Conformal dome correction with counterrotating phase plates[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7):1822-1829.
- [2] 孙金霞,刘建卓,孙强,等.折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 792-797.
SUN J X, LIU J ZH, SUN Q, *et al.*. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):792-797. (in Chinese)
- [3] 孙金霞. 椭球整流罩光学系统像差校正设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
SUN J X. *Ellipsoidal Dome Aberration Correction System Design*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [4] 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): 2000-2005.
JIANG ZH H, WANG CH, WEI Q, *et al.*. Wind tunnel experiment of supersonic conformal dome and its optical and structure characteristic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):2000-2005. (in Chinese)
- [5] 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.
WEI Q, AI X Q, JIANG H H, *et al.*. Optimizing design of dome figure for supersonic seekers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 384-389. (in Chinese)
- [6] JOSEPH R I, THOMAS M E. Ray path deviation in a non-hemispherical dome[J]. *SPIE*, 2001, 4375: 160-170.
- [7] CROWTHER B G, MCKENNEY D B, MILLS J P. Aberrations of optical domes [J]. *SPIE*, 1998, 3482:48-61.
- [8] SONG D L, CHANG J, WANG Q F. Conformal optical system design with a single fixed conic corrector[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(7):1-5.
- [9] SPARROLD S W. Arch corrector for conformal optical systems[J]. *SPIE*, 1999, 3705:189-200.
- [10] SPARROLD S W, KNAPP D J, MANHART P K. Capabilities of an arch element for correcting conformal optical domes[J]. *SPIE*, 1999, 3779: 434-444.
- [11] KNAPP D J. *Conformal Optical Design*[D]. Arizona: The University of Arizona, 2002.
- [12] TROTTA P A. Precision conformal optics technology program[J]. *SPIE*, 2001, 4375:96-107.
- [13] LERNER S A, SASIAN J M. Optical design with parametrically defined aspheric surfaces[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(28):5205-5213.
- [14] SHANNON R R. Overview of conformal optics [J]. *SPIE*, 1999, 3705:180-188.
- [15] KNAPP D. Fundamentals of conformal missile dome design[C]. *OSA/IODC*, 2002:168-169.
- [16] 李东熙,卢振武,孙强,等. 基于实际光线追迹的共形光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5):834-838.
LI D X, LU ZH W, SUN Q, *et al.*. Design of conformal optical system based on real ray tracking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5):834-838. (in Chinese)
- [17] 孙金霞,孙强,方伟. 利用后置式固定校正板进行共形光学系统像差校正[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4):1005-1009.
SUN J X, SUN Q, FANG W. Conformal optical

- system aberration correction with later[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1005-1009. (in Chinese)
- [18] 孙金霞, 孙强. 共形光学系统瞬时视场外杂散光的分析及处理[J]. *应用光学*, 2010, 31(2): 225-228. SUN J X, SUN Q. Stray light out of IFOV in conformal optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(2): 225-228. (in Chinese)
- [19] 姜洋, 孙强, 孙金霞, 等. 大视场凝视型红外共形光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1575-1580. JIANG Y, SUN Q, SUN J X, et al.. Design of infrared staring conformal optical system with wide field of view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1575-1580. (in Chinese)
- [20] 贾立德. 高陡度保形光学镜面的坐标测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 18(9): 1981-1988. JIA L D. Coordinate measurement of steep conformal optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 18(9): 1981-1988. (in Chinese)
- [21] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 258-265.
- HU SH S. *Principle of Automation Control*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 258-265. (in Chinese)
- [22] 吕俊伟, 何友金, 韩艳丽. 光电跟踪测量原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 105-107. (in Chinese)
- LU J W, HE Y J, HAN Y L. *Principle of Optical-Electrical Tracking Systems*[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2010: 105-107. (in Chinese)
- [23] 张秉华, 张守辉. 光电成像跟踪系统[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2003: 8-12. ZHANG B H, ZHANG SH H. *Optical-Electrical Image Tracking Systems*[M]. Chengdu: University of Electric Science and Technology of China Press, 2003: 8-12. (in Chinese)
- [24] 李生良, 曾峦. 跟踪系统[M]. 总装备部指挥技术学院, 1999: 130-133. LI SH L, ZENG L. *Tracking Systems*[M]. Equipment Guide and Technology Academy, 1999: 130-133. (in Chinese)

作者简介:



姜湖海(1984—), 男, 山东烟台人, 博士, 助理研究员, 2007 年于中国地质大学(武汉)获得学士学位, 2012 年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 主要从事导引头稳定平台控制策略的研究。E-mail: jhhqgj@163.com



魏 群(1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副研究员, 2005 年于浙江大学获得学士学位, 2010 年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 主要从事共形光学及气动光学方面的研究。E-mail: wei.q@hotmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)