

· 光电系统 ·

基于 ZEMAX 的红外光学系统设计与优化

吴彦卓, 马洪霞

(92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 阐述了该光学系统研究的意义, 确定了基本设计原则。然后进行了平行光管和望远镜的高斯光学结构模型及设计, 建立了具体的数学模型并进行求解。最后根据目标耦合光路结构, 利用 ZEMAX 软件对该光学系统进行了优化设计, 对优化结果进行了像质评价, 得出了结论。该系统解决了红外光学精确制导系统动态跟踪特性的内场测试的一系列问题, 促进了红外黑体跟踪目标地面等效测试的发展, 对提升仿真试验技术能力提供了重要的硬件支撑。

关键词: ZEMAX; 红外; 光学系统; 设计; 优化

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0005-06

Design and Optimization for Infrared Optical System Based on ZEMAX

WU Yan-zhuo, MA Hong-xia

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

Abstract: The research significance of the optical system is described, and the basic design principle is determined. Gaussian optical structure model and design of a collimator and a telescope are performed. The detailed mathematical models are established and calculated. Based on target coupling optical path structure, ZEMAX software is used to design the optimum optical system. The result is evaluated and the conclusion is drawn. The field test issues of infrared precision guided system dynamic tracking characteristic are solved through the system. The development of infrared blackbody tracking target ground equivalent testing is promoted to provide a very important hardware support to the improvement of simulation technology performance.

Key words: ZEMAX; infrared; optical system; design; optimization

高速导弹的红外末制导过程伴随着强烈的湍流扰动, 也就是气动光学效应, 它严重地影响了像的质量。通常成像的特性用瞄视误差、Strehl 比、图像模糊度和图像抖动等参数来描述。由于气动光学效应使亮度极低的图像因各种因素在焦平面上扩散而变得模糊起来, 而且发生了畸变和高频抖动, 严重影响了目标的捕获、目标质心轨道和目标形状, 从而无法捕捉和跟踪目标。为了能提高拦截弹的跟踪瞄准精度, 需要对拦截弹导引头在高速真实气体流动的气动光学效应进行定性分析和定量测量, 建立一套能满足进行气动光学效应与校正机理试验的光学系

统, 用来转换红外黑体目标的信号, 以此生成适合导引头生成图像的信号, 实现模拟系统与导引头间的光瞳匹配。

1 系统设计原则

红外光学系统有反射式、折射式和折反式三类。反射式镜头具有无色差、元件数量少、工作波段没有限制、对材料要求不高等优点; 但反射式镜头视场小、能量损失大、对杂散辐射敏感、成本高; 折射式镜头具有视场大、能量透过率高、成本低等优点, 但

收稿日期: 2015-05-20

作者简介: 吴彦卓(1986-), 男, 本科, 助理工程师, 现从事自动化测试专业; 马洪霞, 女, 硕士研究生, 高级工程师, 从事系统鉴定领域工作。

折射式镜头色差难以校正、热稳定性差;折反式镜头具有成本低、成像质量好,但折反式镜头对杂散辐射较敏感、能量损失较大。综合分析这三类系统的特点,系统选用折射型式镜头作为系统结构类型。

红外材料具有种类少、色散特性差异大、透过率低等特点,因而多采用P.W法和缩放法设计红外系统的初始结构。系统采用P.W法设计红外平行光管物镜与望远物镜初始结构,因红外望远目镜设计难度较大而选用缩放法设计初始结构。

用P.W法设计初始结构,须按着技术要求,建立初级像差系数与结构参数之间的像差方程式,这些像差方程式分为两组,分别如下。

$$\begin{cases} \phi = \sum h\varphi \\ C_I = h^2\varphi \sum C_I \\ C_{II} = hh_p\varphi \sum C_{II} \\ S_{IV} = J^2 \sum \frac{\varphi}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)分别为光焦度分配、校正位置色差、校正倍率色差和校正Petzval场曲的方程。可求解出系统各光组的光焦度、间隔、光线的高度和光学材料等外部参数。

$$\begin{cases} S_I = \sum h^4\varphi^3 P \\ S_{II} = \sum h^3 h_p \varphi^3 P + J \sum h^2 \varphi^2 W \\ S_{III} = \sum h^2 h_p^2 \varphi^3 P + 2J \sum h h_p \varphi^2 W + J^2 \sum \varphi \\ S_V = \sum h h_p^3 \varphi^3 P + 3J \sum h_p^2 \varphi^2 W + J^2 \sum \frac{h_p}{h} \varphi \left(3 + \frac{1}{n} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Φ 为系统光焦度(屈光度); h 为第一近轴光线在各光组上的高度(mm); h_p 为第二近轴光线在各光组上的高度(mm); φ 为各光组的光焦度(屈光度); n 为各光学材料的折射率; J 为系统的拉赫不变量。

式(2)分别为校正球差、校正慧差、校正像散和校正畸变的方程,可求出系统内部参数 P_i 和 W_i ,从而确定系统的结构参数 R 、 d 、 n 。

1.1 平行光管初始结构设计

平行光管物镜采用三光组结构,高斯光路如图1所示。

它由彼此分离一定间隔的单透镜组成,最合理的结构是把负透镜放在中间,孔径光阑在负透镜附近,正负透镜分离使这种结构能够校正Petzval场曲。两个正透镜的放置方法有两种。第一种是将近似对称的两正透镜对称置于负透镜的两侧,这种近

似对称结构可对垂轴像差很容易校正,但高级像差较大,无色光学玻璃易实现这种双凸对称结构;第二种是将两正透镜以弯月形式非对称放置于负透镜两侧,如图2所示。这种非对称结构偏角小,因而高级像差较小,红外材料易实现这种弯月非对称结构。

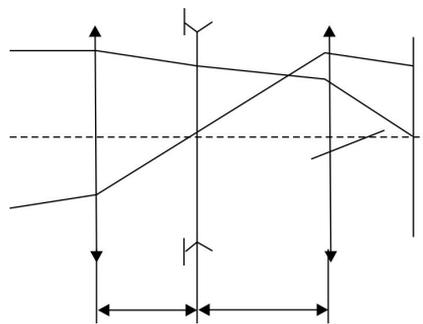


图1 三光组高斯光路图

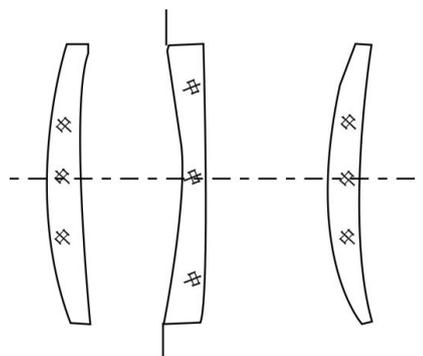


图2 三光组高斯光路图及结构示意图

1.1.1 镜头外部参数求解

取规范化条件: $f'=1, h_1=1, u_1=0, u_4=1, u_{p1}=-1, J=1$ 。将光阑与负透镜重合, $h_{p2}=0$ 。为减小高级像差,使偏角较小,取 $h_2=0.8, h_3=0.7$;为补偿高级像差取 $S_{IV}=0.2$ 。取 $\varphi_1=0.7$ 。三片透镜的材料分别取Ge、ZnSe和Ge,得下式

$$\begin{cases} \varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 = 1 \\ \frac{\varphi_1}{n_1} + \frac{\varphi_2}{n_2} + \frac{\varphi_3}{n_3} = S_{IV} \end{cases} \quad (3)$$

解之得: $\varphi_2 = -0.59, \varphi_3 = 1.1$;透镜之间的间隔

$$\text{为:} \begin{cases} d_{01} = \frac{1-h_2}{\varphi_1} \\ d_{02} = \frac{1-d_1\varphi_1-h_3}{\varphi_1+\varphi_2-d_1\varphi_1\varphi_2} \end{cases}$$

解之得: $d_{01}=0.286, d_{02}=0.437$; 第二近轴光线在

$$\text{各光组上的高度为: } \begin{cases} h_{p1} = -\frac{d_1}{h_2} \\ h_{p3} = \frac{d_2}{h_2} \end{cases}$$

解之得: $h_{p1}=-0.3575, h_{p3}=0.546$; 各个面上的角度为: $u_{i+1}=u_i+h_i\varphi_i$

解之得: $u_2=0.7, u_3=0.228, u_4=1$ 。

1.1.2 像差方程组求解

对于三光组结构, 首先应计算单透镜像差, 选择由透镜三开始求解。为使式(2)有解, 给透镜三以一定的弯曲形状, 这样可使计算简化。现给一个曲率, 使透镜三的球差接近最小, 取 $\rho_{32}=0.7$ 。透镜弯曲系数 Q_3 由 $\rho_{32}=1+Q_3$ 公式解之得: $Q_3=-0.3$, 透镜三前表面规化曲率可由公式 $\rho_{31}=\frac{n_3}{n_3-1}+Q_3$ 解之得: $\rho_{31}=1.0333$ 。

将 P_3, W_3 化成 P_3^∞, W_3^∞ , 为此将 u_3 进行规化

$$\begin{aligned} u_3 &= \frac{u_3}{h_3\varphi_3} = 0.2961; W_3^\infty = \frac{n_3+1}{n_3}Q_3 + \frac{1}{n_3-1} = \\ & -0.0417; W_3 = W_3^\infty - u_3\left(2 + \frac{1}{n_3}\right) = 0.7079; P_0 = \\ & \frac{n_3}{(n_3-1)^2}\left[1 - \frac{9}{4(n_3+2)}\right] = \frac{5}{18}; P_{\min} = P_0 - \frac{n_3}{n_3+2}(u_3+u_3^2) \\ & = 0.0911; P_3 = P_{\min} + \left[1 - \frac{1}{(n_3+1)^2}\right]\left[W_3 + \frac{1}{2(n_3+2)}\right. \\ & \left.(1+2u_3)\right]^2 = 0.7512。 \end{aligned}$$

由式(2)得到透镜三的像差为

$$\begin{cases} S_I^{(3)} = h_3^4\varphi_3^3P_3 = 0.2401 \\ S_{II}^{(3)} = h_3^3h_{p3}\varphi_3^3P_3 + h_3^2\varphi_3^2W_3 = 0.607 \\ S_{III}^{(3)} = h_3^2h_{p3}^2\varphi_3^3P_3 + 2h_3h_{p3}\varphi_3^2W_3 + \varphi_3 = 2.0108 \end{cases} \quad (4)$$

得到透镜三的像差之后, 再利用其他两透镜的像差来补偿它, 将已知数据代入式(4)后化简为

$$\begin{cases} S_I = 0.343P_1^\infty - 0.0841P_2 + 0.2401 \\ S_{II} = -0.1226P_1^\infty + 0.49W_1^\infty + 0.2228W_2 + 0.607 \\ S_{III} = 0.0438P_1^\infty - 0.3504W_1^\infty + 2.0108 \end{cases} \quad (5)$$

将 P_2, W_2 化成 P_2^∞, W_2^∞ , 为此将 u_2 进行规化

$$u_2 = \frac{u_2}{h_2\varphi_2} = -1.4831; W_2 = W_2^\infty - 2u_2\left(2 + \frac{1}{n_2}\right) =$$

$$\begin{aligned} & W_2^\infty + 7.1631; P_2 = P_2^\infty - 2u_2(4W_2^\infty + 1) + u_2^2\left(3 + \frac{2}{n_2}\right) = \\ & P_2^\infty + 5.9324W_2^\infty + 9.9071。 \end{aligned}$$

将 P_2, W_2 化成 P_2^∞, W_2^∞ 之间的关系式代入式(4), 并取 $S_I=2, S_{II}=1.5, S_{III}=2.2$, 化简后得

$$\begin{cases} 0.343P_1^\infty - 0.0841P_2^\infty - 0.4989W_2^\infty = 2.5931 \\ -0.1226P_1^\infty + 0.49W_1^\infty + 0.2228W_2^\infty = -0.8255 \\ 0.0438P_1^\infty - 0.3504W_1^\infty = 0.1892 \end{cases} \quad (6)$$

取 $W_1^\infty=0.5$, 解之得: $P_1^\infty=8.3196, P_2^\infty=4.4429, W_3^\infty=-0.2267$

1.1.3 高斯结构参数求解

正透镜一的结构参数可用下式计算

$$W_1^\infty = \frac{n_1+1}{n_1}Q_1 + \frac{1}{n_1-1} = 0.5 \quad (7)$$

解之得: $Q_1=2/15$

因此可求得透镜一的规化曲率得: $\rho_{11}=1.4667,$

$$\rho_{12}=1.1333, f'_1 = \frac{f'}{\varphi_1} = 300, r_{11} = \frac{f'_1}{\rho_{11}} = 204.54,$$

$$r_{12} = \frac{f'_1}{\rho_{12}} = 264.71。$$

用相同的方法计算其余透镜的高斯结构参数为

$$\begin{aligned} f'_2 &= -355.93, Q_2 = -0.6615, \rho_{21}=1.0477, \rho_{22}=0.3385, \\ r_{21} &= -339.72, r_{22} = -1051.49, f'_3=190.9, Q_3 = -0.3, \rho_{31} = \\ & 1.0333, \rho_{32}=0.7, r_{31}=184.76, r_{32}=272.7。 \end{aligned}$$

1.1.4 实际结构参数求解

首先要确定各透镜的厚度, 根据国标取 $d_1=6$ mm, $d_3=6$ mm, $d_5=4$ mm, $d_{10}=f'd_{01}=60.06, d_{20}=f'd_{02}=91.77。$

由下式计算各透镜的主面位置

$$\begin{cases} l_{H_i} = -f'_i \frac{n_i-1}{n_i} d_i \rho_{i2} \\ l'_{H_i} = -f'_i \frac{n_i-1}{n_i} d_i \rho_{i1} \end{cases} \quad (8)$$

解之得: $l'_{H1}=-6.60, l_{H2}=-1.19, l'_{H2}=-3.68, l'_{H3}=-2.10, d_2=d_{10}+l'_{H1}-l_{H2}=54.65, d_4=d_{20}+l'_{H2}-l_{H3}=90.12。$

表1汇总了平行光管物镜初始结构的设计结果。

表1 由P.W法设计的平行光管物镜初始结构

| 半径 r/mm | 间隔 d/mm | 材料 |
|------------------|------------------|------|
| | 6 | Ge |
| 264.71 | 54.65 | — |
| -339.72(stop) | 6 | ZnSe |
| -1 051.49 | 90.12 | — |
| 184.76 | 4 | Ge |
| 272.7 | — | — |

1.2 望远镜初始结构设计

望远物镜选择Petzval型结构,高斯光路如图3a所示。对于红外光学系统而言,Petzval物镜多为彼此分离一定间隔的两个弯月形正光组组成,如图3b所示。Petzval物镜必须校正球差、慧差,由于双正透镜光组SIV不能校正,必须用像散来平衡Petzval场曲,所以像散一般为负。

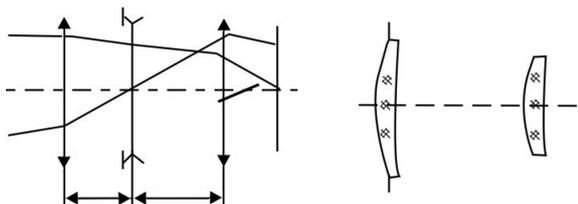


图3 Petzval光组高斯光路图 (a) Petzval光组高斯光路图 (b) Petzval光组结构示意图

图3 Petzval光组高斯光路图及结构示意图

1.2.1 镜头外部参数求解

取规范化条件: $f'=1, h_1=1, u_1=0, u'_2=1, u_p=-1, J=1$ 。为求解方便,将光阑与正透镜一重合,则 $h_{p1}=0$ 。取 $u_1=0.71, h_2=0.342$ 。两片透镜的材料均为Ge。可得: $\varphi_2 = \frac{1-\varphi_1}{h_2} = 0.848, d_{01} = \frac{1-h_2}{\varphi_1} = 0.9268$ 。

由于 $h_{p1}=0$, 则: $h_{p2} = h_{p1} - d_{01}u_{p1} = 0.9268$

像差方程组求解:

由式(2)得

$$\begin{cases} S_I = \varphi_1^3 P_1^\infty + h_2^4 \varphi_2^3 P_2 \\ S_{II} = \varphi_1^2 W_1^\infty + h_2^3 h_{p2} \varphi_2^3 P_2 + h_2^2 W_2 \\ S_{III} = h_2^2 h_{p2}^2 P_2 + 2h_2 h_{p2} \varphi_2^2 W_2 + \varphi_1 + \varphi_2 \end{cases} \quad (9)$$

将 $\varphi_1, \varphi_2, h_1, h_2$ 代入式(9)化简得

$$\begin{cases} S_I = 0.358 P_1^\infty + 0.00834 P_2 \\ S_{II} = 0.5041 W_1^\infty + 0.0226 P_2 + 0.0841 W_2 \\ S_{III} = 0.0613 P_2 + 0.456 W_2 + 1.558 \end{cases} \quad (10)$$

将 P_2, W_2 化成 P_2^∞, W_2^∞ , 为此将 u_2 进行规化, $u_2 = \frac{u_2}{h_2 \varphi_2} = 2.45, W_2 = W_2^\infty - 2u_2 \left(2 + \frac{1}{n_2}\right) = W_2^\infty - 5.5125,$

$$P_2 = P_2^\infty - 2u_2 \left(4W_2^\infty + 1\right) + u_2^2 \left(3 + \frac{2}{n_2}\right) = P_2^\infty - 9.8W_2^\infty + 18.56$$

将 P_2, W_2 和 P_2^∞, W_2^∞ 之间的关系式代入式(10), 取 $S_I=0.25, S_{II}=0, S_{III}=-0.1$, 化简后得

$$\begin{cases} 0.358 P_1^\infty + 0.00834 P_2^\infty - 0.0817 W_2^\infty = 0.085 \\ 0.0226 P_1^\infty + 0.5041 W_1^\infty - 0.1374 W_2^\infty = 0.04415 \\ 0.0613 P_1^\infty - 0.145 W_2^\infty = -0.282 \end{cases} \quad (11)$$

取 $W_1^\infty=0.2$, 解之得: $P_1^\infty=0.2471, P_2^\infty=-5.933, W_2^\infty=-0.5635$

1.2.2 高斯结构参数求解

正透镜一得结构参数可用下式计算

$$W_1^\infty = \frac{n_1+1}{n_1} Q_1 + \frac{1}{n_1-1} = 0.2 \quad (12)$$

解之得: $Q_1=0.36$

由式(6)、式(8)可求得透镜一的规化曲率得

$$\rho_{11}=1.69, \rho_{12}=1.36, f'_1 = \frac{f'}{\varphi_1} = 298.76, r_{11} = \frac{f'_1}{\rho_{11}} = 176.78,$$

$$r_{12} = \frac{f'_1}{\rho_{12}} = 219.68。$$

用相同的计算方法可求解透镜二的高斯结构为: $f'_2=249.46, Q_2=-0.184, \rho_{21}=1.149, \rho_{22}=0.816, r_{21}=217.11, r_{22}=305.71。$

1.2.3 实际结构参数求解

首先要确定各透镜的厚度,根据国标取 $d_1=6\text{mm}, d_3=6\text{mm}, d_{10}=f'd_{01}=196.06。$

按式(9)计算各透镜的主面位置。

$$l'_{H1}=-6.12, l_{H2}=-5.17, d_2 = d_{10} + l'_{H1} - l_{H2} = 195.11。$$

表2汇总了望远物镜的初始结构设计结果。

表2 由P.W法设计的望远物镜初始结构

| 半径 r/mm | 间隔 d/mm | 材料 |
|------------------|------------------|------|
| 176.78(stop) | 6 | Ge |
| 219.68 | 195.11 | — |
| 217.11 | 6 | ZnSe |
| 305.71 | — | — |

1.3 望远目镜初始结构设计

根据前面对目镜特点的分析可知,大出瞳距使

得目镜设计较为困难,而受到红外材料透过率低和材料昂贵的限制,使得红外目镜的设计难度最大。在这种情况下,可选择像质较好,且具备特殊面型的镜头作为初始结构,以提高镜头的设计成功率。在镜头库中选择近似满足要求的 $F-\theta$ 型目镜作为初始结构设计结构,见表3。

表3 望远目镜初始结构

| 半径 r/mm | 间隔 d/mm | 材料 |
|------------------|------------------|------|
| | 145.06 | --- |
| -50(asphere) | 12 | ZnSe |
| -57.77 | 0.5 | --- |
| 1 204.82 | 12 | ZnSe |
| -190.48 | 121.80 | --- |

表中的镜头焦距为107.32 mm,不符合设计要求,根据几何光学原理,可求解出缩放焦距后的光学系统结构参数,见表4。红外光学材料不涉及玻璃牌号的问题,因此缩放焦距后的结果即可作为红外目镜的最终初始结构。

表4 缩放焦距的望远目镜初始结构

| 半径 r/mm | 间隔 d/mm | 材料 |
|------------------|------------------|------|
| Stop | 145.06 | --- |
| -84.47 (asphere) | 20.27 | ZnSe |
| -97.61 | 0.84 | --- |
| 2 035.64 | 20.27 | ZnSe |
| -321.82 | 205.80 | --- |

2 光学系统优化与像质评价

2.1 光学系统优化设计

红外光学系统的优化原则与可见光系统基本一致,但由于红外光学系统自身的特点,使其系统优化与可见光系统相比有所差别。适用于长波红外的晶体材料透过率普遍较高,因此其对单色像差校正较容易,但色差校正较困难;红外材料种类少,限制了利用材料特性之间的差异校正像差的手段。由于红外较为昂贵、透过率较低、晶体光学均匀性较差,使得设计红外光学系统时应尽量避免镜头裂化等复杂化方法。必要时,可以将透镜球面面型改为非球面面型,使得红外光学系统达到成本与综合成像质量之间的平衡。

图4~图6给出了目标耦合光学系统的设计

结果。

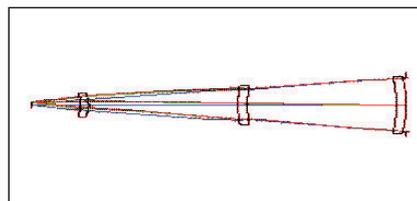


图4 平行光管物镜优化设计结果光路图

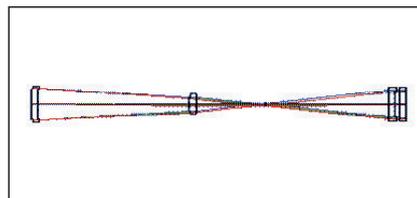


图5 望远镜优化设计结果光路图

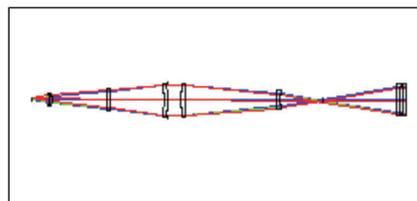


图6 目标耦合光学系统优化设计结果光路图

红外系统结构的优化设计借助ZEMAX光学设计软件完成。优化过程中,将平行光管物镜的孔径光阑调整到第一个光学元件位置,以减少望远物镜的轴上及轴外像差;将望远物镜的第一个透镜前表面和望远目镜的第一个透镜后表面设为抛物面以减少轴外像差;将目镜第一个透镜的材料改换为Ge以校正轴向色差和轴外像差。另外,将平行光管物镜的孔径光阑位置移动,不但有助于系统完善成像,而且在抑制红外系统杂散辐射的工程实际问题中也有积极意义。

2.2 优化结果的像质评价

图7、图8给出了目标耦合光学系统的基本像差曲线。可以看出,其球差值为0.014 7 mm,轴向色差值为0.012 3 mm,场曲最大值为0.013 5 mm,畸变最大值为0.16%。

根据分析,红外目标耦合光学系统为小像差系统,应利用小像差系统相应的评价标准计算出系统的像差容限。表5为红外目标耦合光学系统像差容

限与实际像差比较。

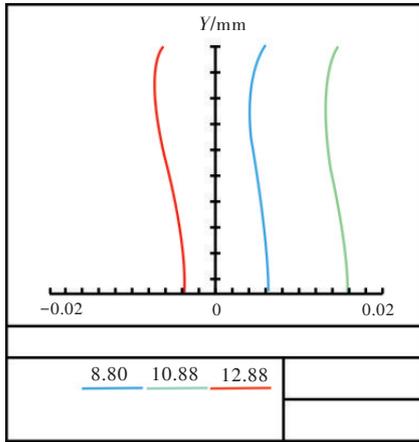


图7 目标耦合光学系统球差曲线

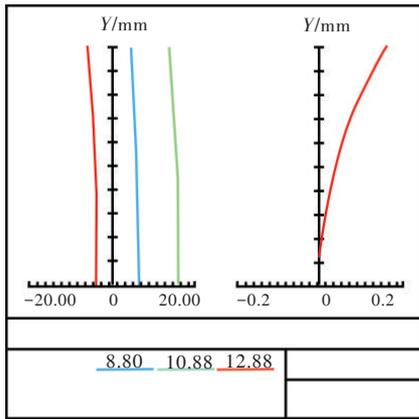


图8 目标耦合光学系统场曲与畸变曲线

表5 红外目标耦合光学系统像差容限与实际像差比较

| 像差类型 | 像差容限 | 实际像差 |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| $\delta L_m/\text{mm}$ | $\pm 0.263\ 5$ | 0.014 7 |
| $\delta T_m/\text{mm}$ | $\pm 0.102\ 6$ | 0.009 8 |
| $\delta L_s/\text{mm}$ | $\pm 0.395\ 3$ | 0.013 3 |
| $\delta T_s/\text{mm}$ | $\pm 0.107\ 8$ | 0.007 8 |
| $Coma_l/\text{mm}$ | $\pm 0.038\ 5$ | -0.012 5 |
| $Coma_s/\text{mm}$ | $\pm 0.012\ 8$ | -0.006 8 |
| x'_{1s}/mm | $\pm 0.046\ 1$ | -0.004 1 |
| DT(百分率) | $\pm 2\%$ | 0.16% |
| L'_{cd}/mm | $\pm 0.065\ 9$ | 0.012 3 |
| T'_{cd}/mm | $\pm 0.025\ 7$ | 0.004 5 |
| W/λ | $0.25\ \lambda$ | $0.17\ \lambda$ |

分析表5可以看出,红外目标耦合光学系统的各项公差均在像差容限范围内,并且绝大部分像差远小于小像差光学系统的像差容限,可以认为整个系统的成像质量良好。图9是目标耦合光学系统

MTF曲线。图10是目标耦合光学系统衍射圆包围能量图。

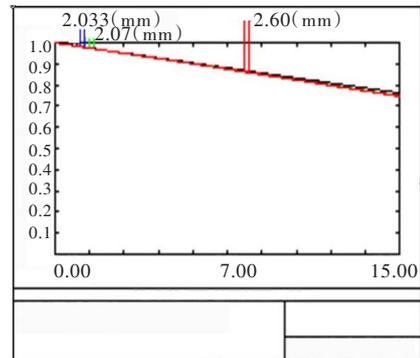


图9 目标耦合光学系统 MTF 曲线

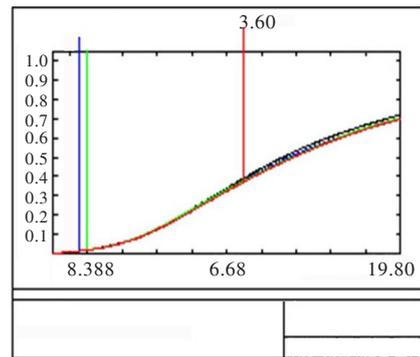


图10 目标耦合光学系统衍射圆包围能量图

从图9所示的目标耦合光学系统 MTF 曲线可以看出,目标耦合光学系统各个视场像质的均匀性和一致性好,且均接近衍射极限,MTF@15lp/mm 值优于0.75。从图10可以看出,系统的单个像元内的衍射能量集中度为68%。从像差容限和MTF的综合分析分析可以看出,红外目标耦合光学系统综合成像质量很好,已接近理想成像条件,可以认为能满足动像传递函数测试的需要。

3 结 论

通过计算该光学系统的各项参数,得出了设计的模型。通过ZEMAX软件优化和像质评测,共有14个空气与光学材料界面,设计增透膜透过率95%,则系统的透过率 $\tau_1=0.95^{14}=0.49$ 。假设待测寻的器为三片式镜头则其透过率近似为 $\tau_2=0.95^6=0.74$,则两个系统级联在一起的透过率为 $\tau=\tau_1\tau_2=0.358$ 。考虑系统传播途径中空气的吸收、散射问

(下转第44页)

轮转速、喷嘴前压力等重要数据,由于频率较高,一般处理时间坐标轴选取刻度较大,细节数据大多被噪声信号掩盖,仅能判断各个信号的大致趋势,因此要对其故障进行准确分析定位存在很大困难。在飞行试验中对涡喷发动机遥测数据的直接获取,利用小波变换对遥测数据进行去噪提取、找出奇异点,并经系统去噪筛选,结合BP神经网络的模式分类功能,可实现对涡喷发动机的故障识别,为飞行试验中涡喷发动机遥测数据处理和故障分析提供了有效的方法。实际应用也证明此方法实用有效,可进一步推广到其他系统或部件的故障分析定位工作中。

参考文献

- [1] 赵圣占,王琮南,樊孝春.小波、小波包分析在遥测数据处理中的应用[J].强度与环境,2011(4):54-59.
- [2] 孙延奎.小波分析及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,2002:1-51.
- [4] 任国恒,朱变,朱海.马特拉算法在遥测数据短期预测中的应用[J].武汉工程大学学报,2014(2):73-78.
- [5] 刘涛,徐卫昌.小波变换在热波检测图像增强中的应用[J].激光与红外,2012(6):709-712.
- [6] 杨莘元.小波变换在遥测信号检测中的应用[J].宇航学报,2002(2),77-79.
- [7] 林敏,周兆经.基于小波包的瞬时信号去噪与频谱分析[J].电子测量与仪器学报,2000(6):1-5.
- [8] 潘泉.小波滤波方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2005:1-30.
- [9] 谢锋,谢寿生.基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法[J].航空动力学报,2006,21(4):754-758.
- [10] 陈逢时.子波变换理论及其在信号处理中的应用[M].北京:国防工业出版社,1998:150-161.
- [11] 陈彬强,张周锁,何正嘉.双密度双树复小波变换及其在机械故障微弱特征提取中的应用[J].机械工程学报,2012(5):56-63.
- [12] 徐小军,王友仁.基于离散分数阶正交小波变换图像降噪新方法[J].电子学报,2014(2):280-287.
- [13] 闫阳.基于小波变换的图像压缩编码方法研究[J].科学技术与工程,2012(11):2737-2740.
- [14] 徐湛.基于稀疏小波变换的超宽带低信噪比信号检测算法[J].仪器仪表学报,2013(4):825-830.
- [15] 冯斌.液体火箭发动机试验数据处理方法研究[C]//哈尔滨工程大学,2012.
- [16] 盛海娟,马卫东,龙昱程.平移不变小波变换在遥测数据去噪中的应用[J].现代电子技术,2014(1):8-10.

(上接第10页)

题,总体透过率取0.3,能够满足设计要求。

参考文献

- [1] 江萍,田雏坚,扬小君,等.一种新型离轴三反式光学系统的设计[J].光子学报,2006,35(4):608.
- [2] 韩昌元.高分辨率空间相机的光学系统研究[J].光学精密工程,2008(11):2164-2171.
- [3] 刘吉,赵辉,王小燕,等.光电探测技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 林涛,李阔.分布式面源型红外诱饵建模研究[J].光电技术应用,2007,22(1):72-74.
- [5] 李凡,刘上乾,张峰,等.点源目标的红外搜索与跟踪系统的作用距离估算[J].红外技术,2008,30(9):502-504.
- [6] 邢强林,黄惠明,熊仁生.红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J].光子学报,2004,33(7):893-896.
- [7] 牟达,王建立,陈涛.红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J].仪器仪表学报,2006,27(6):93-95.
- [8] 吴晗平.红外点目标探测系统作用距离方程理论研究—基于探测率温度特性与背景影响[J].红外技术,2007,29(6):341-344.
- [9] 黄静,刘朝晖,邓书颖.点源目标的红外成像系统作用距离分析[J].科学技术与工程,2007,18(7):4587-4590.
- [10] 王兵学,张启衡,王敬儒,等.凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J].红外技术,2004,26(4):6-10.
- [11] 吴军辉,朱景成.红外成像系统对点目标动态探测概率分析[J].红外技术,2000,22(1):40-44.
- [12] 陈玻若.红外系统[M].北京:国防工业出版社,1988.
- [13] 周学艳.目标与背景光谱辐射特性测量方法的研究[D].长春:长春理工大学,2006.
- [14] 严世华,祝世杰.红外搜索跟踪系统作用距离分析与计算[J].光电技术应用,2011,26(2):39-41.