

引用格式:马捷, 刘晓东, 陈建发, 等. 拼接光窗对机载光学成像系统的影响[J]. 电光与控制, 2019, 26(7): 85-88. MA J, LIU X D, CHEN J F, et al. Effect of splicing light window on airborne optical imaging system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7): 85-88.

## 拼接光窗对机载光学成像系统的影响

马捷<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>2</sup>, 陈建发<sup>3</sup>, 潘枝峰<sup>3</sup>, 王合龙<sup>3</sup>

(1. 海军装备部装备项目管理中心, 北京 100071; 2. 空军装备部, 北京 100843;

3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 拼接光窗在气动保形、电磁隐身、大尺寸等方面均具有较好的性能, 但由于子光窗间状态不一致, 导致各区域入射波前分离并产生附加光程差, 系统点扩散函数(PSF)随之退化, 从而使得成像图像模糊, 因此, 分析拼接光窗对成像质量的影响对于高性能机载光电探测系统的开发十分必要。通过图像数值仿真, 对拼接光窗影响光学成像的因素逐一进行分析并确定图像特征和形成原因。同时给出了一个设计实例, 对合理确定子光窗加工精度和面形精度的方法进行说明。

**关键词:** 光学成像系统; 拼接光窗; 调制传递函数

中图分类号: TN216 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.017

## Effect of Splicing Light Window on Airborne Optical Imaging System

MA Jie<sup>1</sup>, LIU Xiao-dong<sup>2</sup>, CHEN Jian-fa<sup>3</sup>, PAN Zhi-feng<sup>3</sup>, WANG He-long<sup>3</sup>

(1. Project Management Center of Naval Equipment Department, Beijing 100071, China; 2. PLA Air Force Equipment

Department, Beijing 100843, China; 3. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The splicing light window has good performance in terms of pneumatic conformality, electromagnetic stealth and large size. However, due to the inconsistent state between the sub-optical windows, the incident wavefronts from the different areas are separated and an additional optical path difference is introduced. Thereby the system Point Spread Function (PSF) is degraded, and the obtained image is blurred. Therefore, analyzing the effect of splicing light window on imaging quality is necessary for the development of high-performance airborne photodetection system. Through the numerical simulation of the image, the factors affecting the optical imaging by the splicing light window are analyzed one by one and the image features and formation causes are determined. At the same time, a design example is given to illustrate the method of reasonably determining the processing precision and surface accuracy of the sub-window.

**Key words:** optical imaging system; splicing light window; modulation transfer function

### 0 引言

光窗是机载光学系统的重要部件, 它的主要作用是保护内部光学元件免受外界环境如温度冲击、气动扰流等的直接影响, 增强光学系统的环境适应性, 国内外已对其做了很多研究<sup>[1-4]</sup>。目前机载光学系统使用的光窗大致分为平板光窗和球罩光窗两类: 平板光窗存在气动阻力大、随尺寸增大其电磁隐身能力越来越

差、尺寸限制等缺点; 球罩光窗存在电磁隐身能力差、尺寸限制的缺点。

随着载机对光电产品在气动保形、电磁隐身等方面的需求越来越高, 目前拼接光窗逐渐成为大口径光学窗口的主要应用形式, 这源于拼接光窗通过优化设计后在气动保形、电磁隐身、大尺寸等方面均具有较好的性能。典型拼接光窗机载应用为美国洛马公司的 Sniper 先进瞄准吊舱及 EOTS 系统<sup>[5]</sup>。

拼接光窗光焦度为零, 可以说是机载光学系统中较为简单的光学元件, 但由于它的主要作用是保护内部光学系统, 因此要承受多变的各种环境条件, 如温度冲击、气动变形等。加载环境条件的多变性、光窗静态

收稿日期: 2018-04-23

修回日期: 2018-08-01

作者简介: 马捷(1978—), 男, 湖南常德人, 本科, 工程师, 研究方向为航空电子。

加工精度等都会对光学系统成像产生影响,这就使“简单”元件的设计变得复杂。当入射光束通过拼接光窗时,入射波前被分割为几块,由于拼接光窗的子光窗状态(如厚度、入射光线与光窗夹角、子光窗平行差、面形精度等)不一致,入射波前各区域存在一定的光程差,进而系统点扩散函数(Point Spread Function, PSF)退化,从而使得成像图像模糊。

不同于其他研究利用 CODEV/ZEMAX 的分析方法<sup>[3-4]</sup>,本文通过图像数值仿真对拼接光窗影响光学成像的因素逐一分析,给出了每类因素典型的退化图像特征,对形成机理进行分析,并结合实际工程应用给出了一个设计实例,对合理确定子光窗加工精度和面形精度的方法进行说明。

### 1 拼接光窗对光学成像的影响

拼接光窗对光学成像的影响主要是由于各子光窗的物理状态无法保持一致,这主要体现在厚度、平行差、面形精度等方面。

#### 1.1 厚度的影响

成像光束通过两块及以上子光窗时,不同子光窗之间厚度不一致,会造成通过子光窗后的子光束间光程差存在不同,如图 1a 所示;子光束间光程差的不同,使得入射的理想平面波波前在通过拼接光窗后发生分离,图 1b 给出了拼接光窗子光窗厚度不同引起的理想平面波波前变化情况。

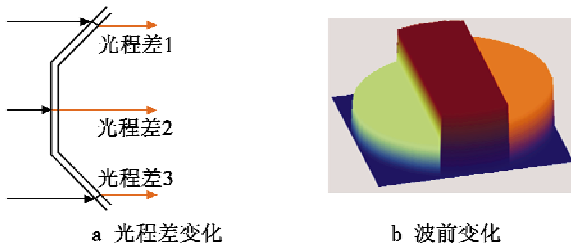


图 1 子光窗厚度不同引起的光程差变化和波前变化  
Fig. 1 Changes of optical path difference and wavefront caused by different thickness of sub-windows

在上述拼接光窗后放置“理想无像差光学系统”(以无像差光学系统为例,更便于说明拼接光窗对光学系统成像的影响),针对子光窗厚度不同对光学系统成像的影响进行仿真。图 2 给出了子光窗厚度不同导致的成像模糊仿真。

仿真结果表明,子光窗厚度不同导致了图像“一维方向上”出现轻微的“重影现象”;为更准确说明上述图像的退化原因,图 2c 给出了子光窗厚度不同导致的系统调制传递函数(MTF)退化情况,由图可知,MTF 在弧矢方向无变化,而子午方向在低频和中频均有不同程度的退化;图 2d 给出了此时入射光束会聚到像面时的光

斑形状,光斑出现了“一维方向上”的散斑和光轴偏离。

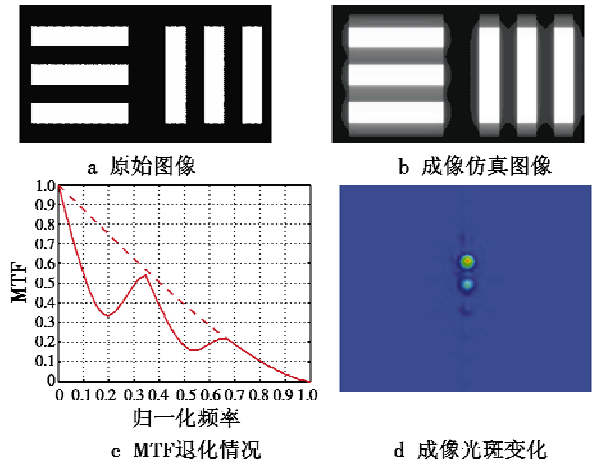


图 2 子光窗厚度不同导致的成像模糊  
Fig. 2 Image blurring caused by different thickness of sub-windows

#### 1.2 平行差的影响

成像光束通过两块及以上子光窗时,不同子光窗之间平行差取向不一致,会造成通过子光窗后的子光束间存在不同的偏转角,如图 3a 所示;图 3b 给出了子光窗平行差不同导致的理想平面波波前变化情况。

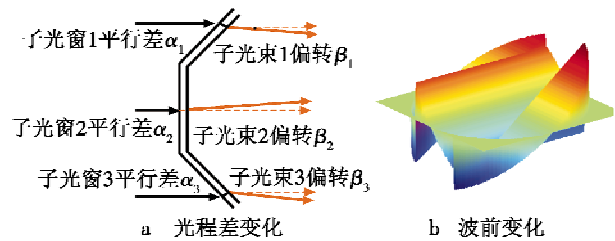
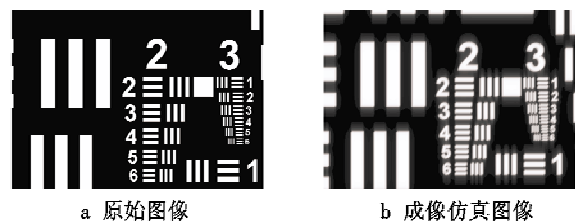


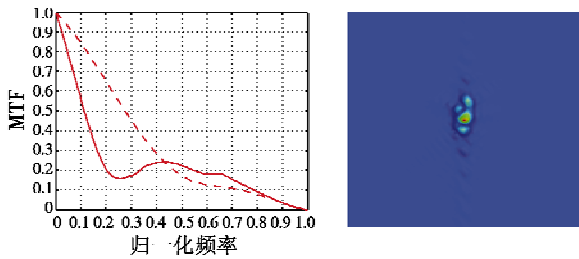
图 3 子光窗平行差不同引起的子光束光程差不同及波前变化

Fig. 3 Changes of optical path difference and wavefront caused by different parallelism of sub-windows

图 4 给出了子光窗平行差不同导致的成像模糊仿真。由仿真结果可知,子光窗平行差不同导致了图像存在严重的“重影现象”,且该重影的方向不仅限于一维方向。图 4c 给出了子光窗厚度不同导致的系统 MTF 退化情况,在中低频退化严重;图 4d 给出了此时入射光束会聚到像面时的光斑形状,光斑出现了散斑,且光轴偏离。



a 原始图像 b 成像仿真图像



c MTF退化情况 d 成像光斑变化  
图4 子光窗平行差不同导致的光学成像模糊  
Fig.4 Optical image blurring caused by different parallelism of sub-windows

### 1.3 面形精度影响

引起平板光窗面形变化的因素有很多,如加工精度、安装应力、自重变形、温度导致的热应力、内外压差等。单块光窗面形变化引起的波前像差通常具有较好的对称性,通过装配或调焦可以给予补偿,而两块及以上子光窗面形变化的情况就会非常复杂,且几乎没有手段可以消除,因此必须通过合理的分析、仿真,在各个环节提出解决措施,从而保证光电系统成像的最终性能。

图5给出了拼接光窗子光窗面形精度不同引起的理想平面波前变化情况。

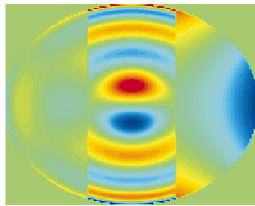
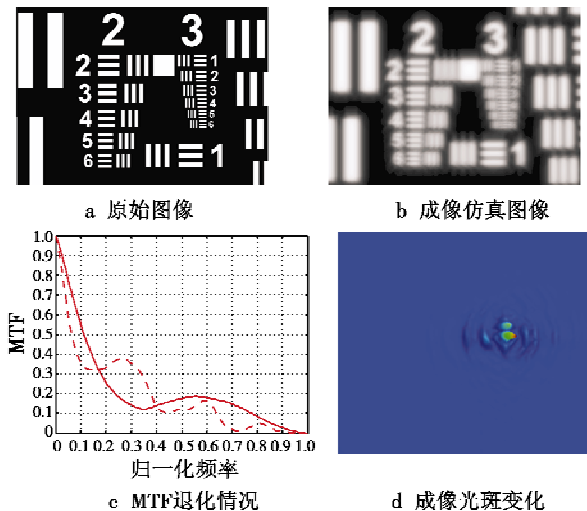


图5 子光窗面形精度不同引起的波前变化  
Fig.5 Wavefront change caused by different surface accuracy of sub-windows

子光窗面形精度不一致导致成像模糊仿真见图6。



a 原始图像 b 成像仿真图像  
c MTF退化情况 d 成像光斑变化  
图6 子光窗面形精度不同导致的光学成像模糊  
Fig.6 Optical image blurring caused by different profile accuracy of sub-windows

由仿真结果可知,由于子光窗面形精度不一致导致的成像图像出现了较为严重的“模糊”,无明显对称性。图6c给出了子光窗面形精度不一致导致的系统MTF退化情况,MTF退化十分严重;图6d给出了此时入射光束会聚到像面时的光斑形状,光斑出现了“环”散斑,且光轴偏离很大。

由以上分析可知,子光窗的厚度、平行差、面形精度不一致,对光学成像产生不同程度的影响,且具有典型的成像特征。

## 2 实例计算

下面通过一个设计实例对拼接光窗性能要求的合理提出进行说明。

### 2.1 设计参数

1) 系统设计参数如下:波段为3700~4800 nm;通光口径为150 mm;焦距为825 mm;探测器像元尺寸为15 μm;光窗材料为蓝宝石,厚度为6 mm;通光口径内子光窗数量为3;子光窗间夹角为120°。

2) 拼接光窗MTF性能满足97.7%概率下优于以下指标:MTF@10 lp/mm ≥ 0.4;MTF@25 lp/mm ≥ 0.2;MTF@33 lp/mm ≥ 0.1。

### 2.2 仿真计算

依据上述参数对系统进行建模,光路如图7a所示,通光口径在子午方向均匀通过3块子光窗,入射光束与子光窗的夹角分别为60°,0°, -60°。利用蒙特卡罗方法<sup>[1]</sup>确定拼接光窗子光窗的厚度、平行差和面形精度的公差范围,计算流程如图7b所示,其中厚度、平行差和面形精度的公差取值概率密度为高斯分布<sup>[2]</sup>,面形误差类型在泽尼克条纹多项式前25项中随机选取<sup>[3]</sup>。

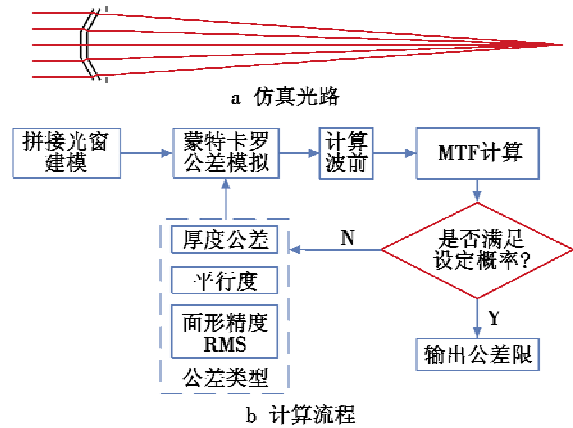


图7 仿真光路及公差计算流程

Fig.7 Simulation of optical path and calculation process of tolerance

采用图7b计算流程,通过循环迭代逐步“收紧”各类公差限,每个子循环内进行10000次统计分析,满

足概率要求时,输出相应公差限,公差限具体计算步骤如下:

- 1) 按真实光路进行拼接光窗建模;
- 2) 按加工经验生成一组“宽松”的厚度公差、平行度和面形精度均方根误差(RMS)公差限;
- 3) 按各类公差概率密度函数进行蒙特卡罗公差模拟;
- 4) 计算波前;
- 5) 计算不同空间频率时的 MTF;
- 6) 判断是否满足设定概率;
- 7) 若不满足,返回2)并逐步“收紧”各类公差要求;
- 8) 若满足则输出此时的各类公差限。

最终的蒙特卡罗公差分析结果如图 8 所示,其中 MTF@10 lp/mm 在弧矢方向上大于等于 0.4 的概率为 100%,在子午方向上大于等于 0.4 的概率为 98.7%; MTF@20 lp/mm 在弧矢方向上大于等于 0.2 的概率为 100%,在子午方向上大于等于 0.2 的概率为 97.7%; MTF@33 lp/mm 在弧矢方向上大于等于 0.15 的概率为 99.9%,在子午方向上大于等于 0.15 的概率为 97.7%。图 8 中 MTF 的下标 S 表示弧矢方向,下标 T 表示子午方向。

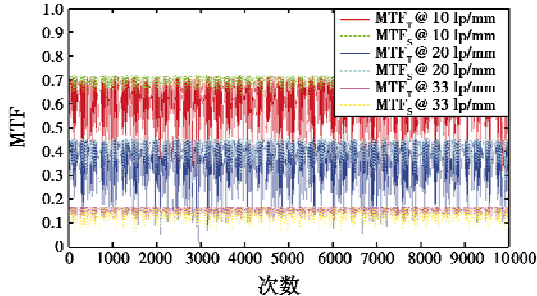


图 8 蒙特卡罗公差分析结果

Fig. 8 Monte Carlo tolerance analysis results

最终计算满足性能要求的拼接光窗加工精度:厚度变化为 $0.8 \mu\text{m}$ ;平行度为 $2.4''$ ;面形精度 RMS 为

$0.2 \mu\text{m}$ 。需要注意的是,其中,厚度、平行度为静态精度,而面形精度为动态精度。面形精度需要继续分解为静态的加工精度和实际使用过程中应力变形两部分。为保证子光窗平行度、面形精度 RMS 以及厚度变化满足上述加工精度的要求,可以首先加工一块较大尺寸的平板光窗,面形加工完毕后再切割出子光窗形状,这样就保证了子光窗平行度、面形精度 RMS 和厚度具有较高的一致性。

### 3 总结

随着载机对光电产品在气动保形、电磁隐身等方面的需求越来越高,目前拼接光窗逐渐成为大口径光学窗口的主要应用形式。本文通过图像数值仿真的方法对拼接光窗影响光学成像的因素进行逐一分析,给出了每类因素典型的退化图像特征,这对于图像排故具有重要参考价值。同时,结合实际工程应用给出了一个设计实例,对合理确定子光窗加工精度和面形精度的方法进行说明,为工程人员设计拼接光窗提供了一个简便可行的方法。

### 参考文献

- [1] 方煜,相里斌,吕群波,等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报,2013,33(4):220-225.
- [2] 张鹏,赵春竹,崔庆丰. 航空共形光学窗口的设计方法[J]. 光学学报,2013,33(6):293-298.
- [3] 邢振冲,张葆,洪永丰. 拼接式光学窗口对光学系统影响的分析方法[J]. 光学学报,2015,35(10):210-219.
- [4] FREIMAN D, NADLER M, GRONAU Y. Effect of segmented windows on the MTF of optical systems[C]//International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1995: 399-408.
- [5] 王合龙. 机载光电系统及其控制技术[M]. 北京:航空工业出版社,2016.