

新型航空镜间快门对光学传递函数的影响分析

于春风 丁亚林 惠守文 于帅北 汪龙祺 施 龙 远国勤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 光学传递函数是评价光学系统成像质量的重要指标。基于为数字航空摄影相机设计的一种新型航空镜间快门的工作特性, 镜间快门在控制曝光过程中改变了相机光学系统的光瞳形状, 意味着点扩展函数的改变, 从而改变了光学系统的传递函数。将光学系统视为一个空间频率的滤波器, 以傅里叶积分变换和光的标量衍射理论为基础, 将孔径光阑的变化过程与光瞳函数建立关系, 应用二次傅里叶变换法得到光学传递函数, 分析快门在工作周期内对光学传递函数的影响。通过对计算结果与测量结果的对比分析可知, 传递函数的最大绝对误差为 0.196, 最大相对误差为 -0.274, 有较好的准确度和重复性, 并且缩小镜间快门开始和关闭阶段所用时间占整个曝光时间的比例, 可以提高系统的综合传递函数, 为中心快门的优化设计提供理论依据。

关键词 傅里叶光学; 新型镜间快门; 光学传递函数; 光瞳函数; 傅里叶变换法; 点扩展函数

中图分类号 TP73 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1112005

Analysis of Influence on the New Type Aviation Lens Shutter to the Optical Transfer Function

Yu Chunfeng Ding Yalin Hui Shouwen Yu Shuaibei Wang Longqi
Shi Long Yuan Guoqin

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The optical transfer function is the important parameter to evaluate the image quality of optical system. Based on the working property of one new type aviation lens shutter designed for the digital aerial photograph camera, the analysis of influence on the optical transfer function is presented. The lens shutter can change the optical pupil shape of the camera's optical system in the processing of control exposure, which means the point spread function is changed. Thus the optical transfer function is also changed. The relationship between the variety of aperture stop and the optical pupil function is built up by taking the optical system as the spatial frequency filter and adopting the Fourier transfer method and scalar diffraction theory as the theoretical foundation to analysis the influence of the shutter in the working period on the optical transfer function. Through the comparing analysis of the calculation and measurement results, they show that the maximum absolute error is 0.196 and the maximum relative repetitiveness. Furthermore, the design decreases the time ratio occupying whole error is -0.274 for the optical transfer function, which has better accuracy and exposure time for the beginning stage of shutter and the closing stage of shutter. It improves the comprehensive transfer function of system, which provides the theoretical reference for the optimization design of center shutter.

Key words Fourier optics; new lens shutter; optical transfer function; pupil function; Fourier transform method; point spread function

OCIS codes 120.0280; 080.1753; 100.2000

收稿日期: 2014-05-12; **收到修改稿日期:** 2014-08-14

基金项目: 国家高分重大专项(民用部分)航空系统项目(30-H32A01-9005-12/12)、国家 973 计划(2009CB724001)

作者简介: 于春风(1979—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事航空成像与测量技术方面的研究。

E-mail: zhanglan3000@sina.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,博士生导师,研究员,主要从事空间遥感相机稳定成像技术方面的研究。

E-mail: 2581876@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

航空摄影相机快门的种类很多,根据快门在相机中安装的位置不同,可以分为物镜快门和焦面快门两类。物镜快门又分为镜前快门、镜间快门和镜后快门三种,镜前快门和镜后快门由于易受垢损、变形等发生故障,现已很少使用,所以通常物镜快门主要是指镜间快门。镜间快门位于物镜的几个光组之间或紧靠物镜前后,属于镜间快门的主要有中心式快门和百叶窗式快门两类^[1]。百叶窗式快门的薄片一般位于物镜的光组之间,可分成单向和反复运动两类。这种快门的主要特点是,每片叶片的尺寸较小,而总加起来又可遮断较大面积的通光孔径,多用在物镜通光孔径较大的航空摄影相机中,但通光效率不高^[2]。中心式快门安装于透镜组中间,叶片的旋转轴平行于物镜的光轴,叶片从中心对称地向外打开物镜通光孔径。这种快门的主要特点是,只要快门打开一点,像面上所有的像点都同时被曝光,并

且不会影响主点、主距等内方位元素的标定精度,但快门的运动形式为机械式往复运动,缩短曝光时间将引起剧烈的撞击,此外增加叶片数量可以提高快门效率,但需要较大的光学系统空气间隔。

为了适应数字航空摄影相机光学系统前、后镜组之间很小的空气间隔,根据相机分配的空间尺寸,设计了一种新型航空镜间快门,快门是相机的重要组成部分,对图像的质量和精度有着重要的影响,光学传递函数是评价成像系统成像质量的综合指标,因此分析快门对光学传递函数的影响是很有必要的,并为工程实践提供参考。

2 镜间快门结构及工作原理

新型镜间快门安装于前、后透镜组之间。主要由叶片、轴系、框架、快门驱动电机及离合器等组成,结构剖视图如图 1 所示。

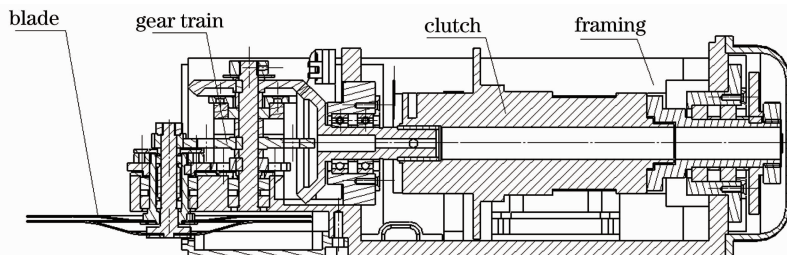


图 1 镜间快门结构剖视图

Fig. 1 Cross-sectional view of lens shutter structure

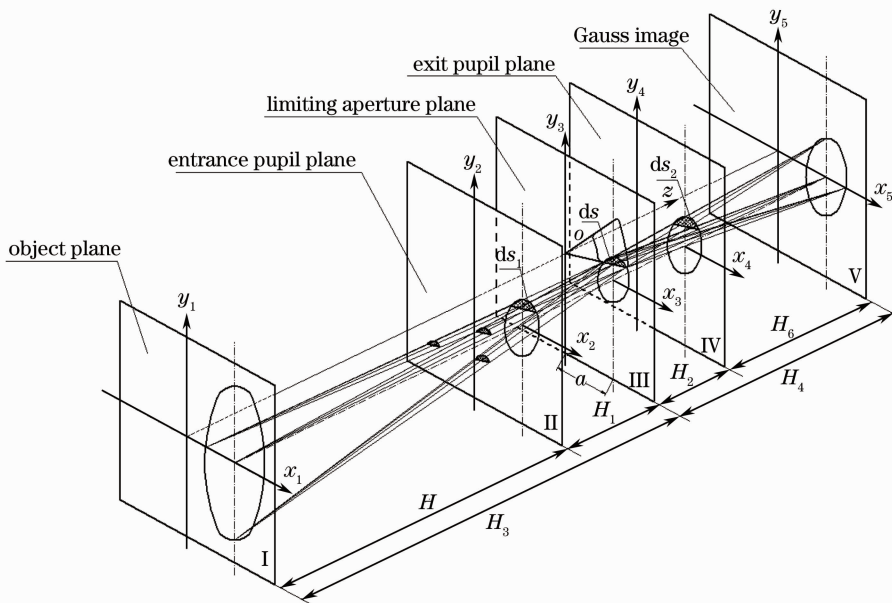


图 2 镜间快门控制曝光原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lens shutter control exposure

新型镜间快门机构利用高速电机通过一周离合器和轴系驱动两片叶片(快叶片和慢叶片)单向高速旋转,慢叶片相当于光闸,快叶片控制曝光时间。改变高速电机的转速可以调节曝光周期。快叶片和慢叶片分别通过精密轴承安装在各自的转轴一端,且两转轴同心,两转轴的另一端分别安装了传动齿轮,与离合器输出端的锥齿轮啮合,当电机带动离合器转动时,离合器输出端的齿轮同时带动两片叶片转动。相机拍照一次,离合器旋转一圈,快叶片和慢叶片上的扇形切口同时通过光学系统的孔径光阑时相机曝光成像一次。

快门叶片在扫描孔径光阑的过程实际就是滤波的过程,其过程如图 2 所示。快叶片扫描孔径光阑的过程中,慢叶片始终处于扫描状态,所以分析快门对光学传递函数的影响只考虑快叶片的工作状态就可以了。图示为快叶片切口扫描孔径光阑通光面积为 ds 时刻的状态,其中阴影部分为通光面积。

3 快门影响光学系统传递函数的分析

应用傅里叶二次积分变换的方法对成像系统进行分析就得到了光学系统传递函数,用物像之间的频谱之比来表示光学系统的成像特性并对像质进行评价。光学系统传递函数反映了光学系统对物体不同频率成分的传递能力,把物体看作是由各种频率的谱组成,将光场分布函数展开成傅里叶级数(周期函数)或傅里叶积分(非周期函数)的形式。一般来说,高频部分反映物体的细节传递能力,中频部分反映物体的层次传递能力,低频部分反映物体的轮廓传递能力^[3]。对于已知的光学系统指定共轭面上的传递函数其成像性质是确定的,只要将物面图形分解成不同空间频率的余弦基元,然后根据系统的光学传递函数,即可求出它们相应的像面余弦基元,把这些基元合成后就得到像面图形。实际上光学系统可以有效地看做一种空间频率的线性滤波器。

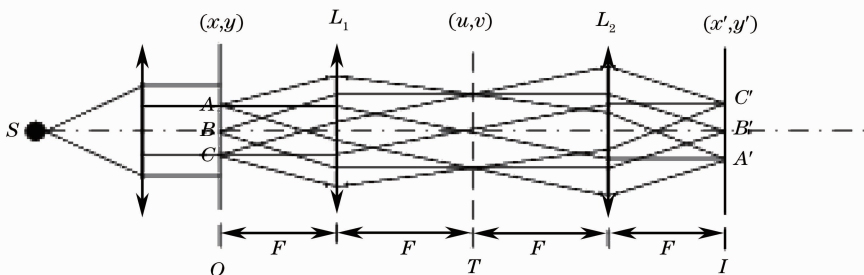


图 4 4f 光学系统光路结构

Fig. 4 Beam path structure of 4f optical system

3.1 光学传递函数计算方法介绍

光学传递函数的计算有几何光学近似及波动光学计算两种,几何光学近似法从光线追迹所得的点列图出发,并不考虑积分域光瞳的交错位移,对低频区有足够的精度。波动光学计算则从追迹描模像空间波面形状出发进行计算。现在大多数采用自相关法和快速傅氏变换法。在数学上,这两种方法是等价的。由图 3 可知,在不满足夫琅禾费条件或非涅耳条件下,用基尔霍夫衍射积分计算点扩展函数,然后经过傅里叶变换得到光学传递函数。这是一种精确算法,但计算量巨大并不实用。自相关法计算复杂,不用通过点扩展函数可得到光学传递函数(OTF),但也会丢失点扩展函数提供的信息,比如艾里斑的信息,此外对有复杂光阑的系统处理不方便。快速傅氏变换法就是第一次由光瞳函数的傅里叶变换得到点振幅分布函数,第二次变换是由点扩展函数的傅里叶变换得到光学传递函数。应用该方法的优点是计算速度快、可得到点扩展函数、对复杂光瞳处理方便等^[4]。

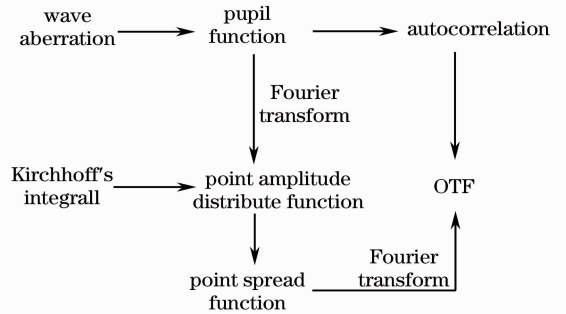


图 3 光学传递函数的计算途径

Fig. 3 Schematic diagram of OTF calculation methods

3.2 快门与光学系统综合传递函数计算

通过透镜的光学傅里叶变换性质^[5],详细地分析成像系统在空域和频率中的物像关系,对带动态滤波器的 4f 系统的光学传递函数进行推导计算,最后给出此系统光学传递函数的变化规律。应用傅

里叶光学对成像系统进行频谱分析^[6]可得到光学传递函数,可进行光学信息的处理,其光路结构如图4所示。

设物场函数为 $U_1(x_1, y_1)$, 经过透镜 L_1 实现了第一次傅里叶变换, 得其频谱为

$$U_2(u, v) = \mathcal{F}\{U_1(x, y)\}. \quad (1)$$

频谱面 T 上的坐标 (u, v) 与物平面上空间频率 (f_x, f_y) 的关系为

$$(u, v) = (\mathcal{R}\lambda f_x, \mathcal{R}\lambda f_y). \quad (2)$$

在频谱面上加入一个透射率随时间变换的光阑, 用 $H(u, v)$ 表示, 在光学信息处理系统中, 也称其为滤波函数, 通过这个滤波函数, 在频谱面上出现了一个新的频谱:

$$U_3(u, v) = H(u, v) \cdot U_2(u, v). \quad (3)$$

对透镜 L_2 而言, 频谱面上的新函数 U_3 经透镜会进行第二次傅里叶变换, 所得频谱正是系统输出的像场函数为

$$U_4(x', y') = \mathcal{F}\{U_3(u, v)\}. \quad (4)$$

像平面上的坐标及其空间频谱的关系同样如(2)式所示。将(3)式和(4)式联立, 最终像场输出可以表示为

$$U_4(x', y') = \mathcal{F}\{U_3\} = \mathcal{F}\{H \cdot U_2\} = \mathcal{F}\{H \cdot \mathcal{F}\{U_1\}\}. \quad (5)$$

当滤波函数 $H(u, v) = 1$, 不加任何滤波器件, 即快门不遮拦孔径光阑, 则输出像场为

$$U_4 = \mathcal{F}\{U_1\}, \quad (6)$$

当一个函数连续作两次傅里叶变换时, 运算结果就还原为原函数, 只是坐标反号, 即:

$$U_4(x', y') = U_1(-x, -y), \quad (7)$$

$$(x', y') = (-x, -y). \quad (8)$$

对于一个光学系统而言, 这就表示横向放大率 $V = -1$, 说明 $4f$ 系统是一个像、物一样且互相倒置的系统。对于 $4f$ 光学系统的相干光学传递函数, 通过之前的定义, 像场频谱与物场频谱之比为

$$f_{\text{OTF}} = \frac{\mathcal{F}\{U_4\}}{\mathcal{F}\{U_1\}}. \quad (9)$$

忽略坐标反转问题, 于是通过上述公式推导可得相干光学传递函数为

$$f_{\text{OTF}} = \frac{\mathcal{F}\{U_4\}}{\mathcal{F}\{U_1\}} = \frac{\mathcal{F}\{\mathcal{F}\{U_3\}\}}{\mathcal{F}\{U_1\}} = \frac{\mathcal{F}\{\mathcal{F}\{H \cdot \mathcal{F}\{U_1\}\}\}}{\mathcal{F}\{U_1\}} = \frac{H \cdot \mathcal{F}\{U_1\}}{\mathcal{F}\{U_1\}} = H. \quad (10)$$

由上式可以得出, 滤波函数 $H(u, v)$ 就是这个系统的 f_{OTF} , 因此只要在给出频谱面上构建相应光阑的透射率函数就可以得到此系统的相干光学传递函数, 其综合调制传递函数 (MTF) 就是镜头的 MTF 与快门的 MTF 的乘积^[7]。

针对数字航空摄影相机来说, 快门叶片位于光学系统光束最细处, 叶片以 ω 的角速度顺时针旋转, 回转中心及回转半径等参数如图5所示, 阴影部分为叶片切口打开孔径部分。

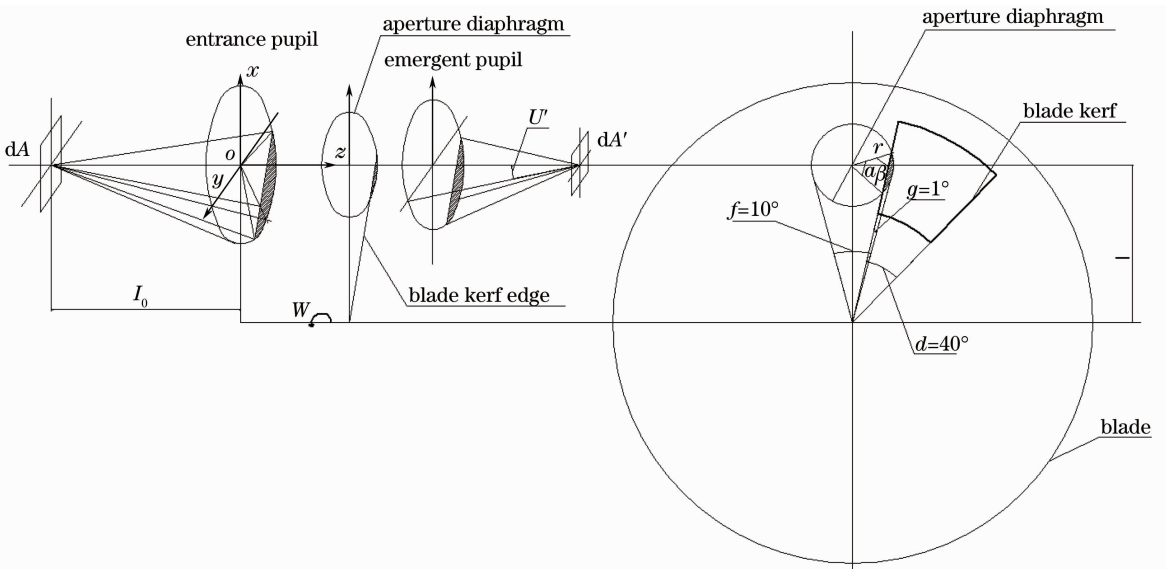


图5 镜间快门扫描过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lens shutter scanning process

计算快门与光学系统的综合传递函数,就是构建此系统频谱面上的光阑透射率函数,而光阑的透射率函数随时间发生变化。假设叶片扫过的区域透射率为 1,由图 5 可知综合传递函数主要是计算叶片扫过区域的重叠面积。

阴影部分的面积表示为下式:

$$S = \frac{1}{2}r^2(\alpha - \sin \alpha), \quad (11)$$

式中 r 为孔径光阑的半径, α 为扇形所对应的弧度。

可以看出 $\alpha = \pi - 2\beta$, 因此(11)式可表示为

$$S = \frac{1}{2}r^2(\pi - 2\beta - \sin 2\beta). \quad (12)$$

根据正弦定理可得 β 。当叶片扫描光学系统中中心孔径光阑时,透射率函数就可以表示为

$$T = \begin{cases} S, & \omega t \leq 5^\circ \\ \pi r^2 - S, & 5^\circ \leq \omega t \leq 10^\circ \end{cases} \quad (13)$$

光学系统在设计以后本身具有确定的光学传递函数,再乘以(13)式的透射率 T 函数就可以得到整个系统的综合传递函数^[8],透射率 T 函数本身就是一种滤波函数。除上述叶片切口扫过孔径光阑的其他时刻,系统传递函数均为 0。

4 快门工作过程中光学传递函数的仿真分析

数字航空摄影相机采用 Russar 型光学系统,对光学传递函数的计算波段为 450~650 nm,权重为1:2:1,特征频率为 42 lp/mm。MTF 曲线如图 6 所示。

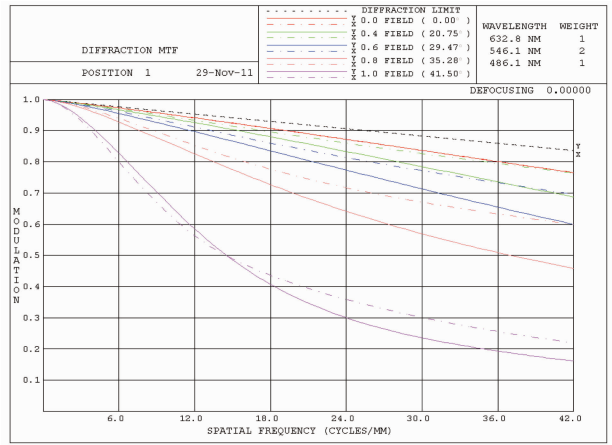


图 6 光学系统的传递函数曲线

Fig. 6 MTF curve of optical system

应用 CODEV 软件对光学系统进行光线追迹,对镜间快门叶片遮拦光线的周期变化过程进行模拟仿真分析,将孔径光阑相对于叶片回转轴的角度等分成 10 等份,对每个位置的通光面积进行函数编辑^[9],与叶片切口扫描孔径光阑通光面积的变化情况一致,如图 7 所示。

针对叶片切口打开孔径光阑的每个位置获得的传递函数曲线如图 8 所示,图中叶片以 1°递减的旋转过程中传递函数的变化情况,图 8(a)为孔径光阑被全打开时的系统传递函数曲线,与光学系统本身的光学传递函数曲线相同,图 8(b)为孔径光阑被打开 50%时的系统传递函数曲线。

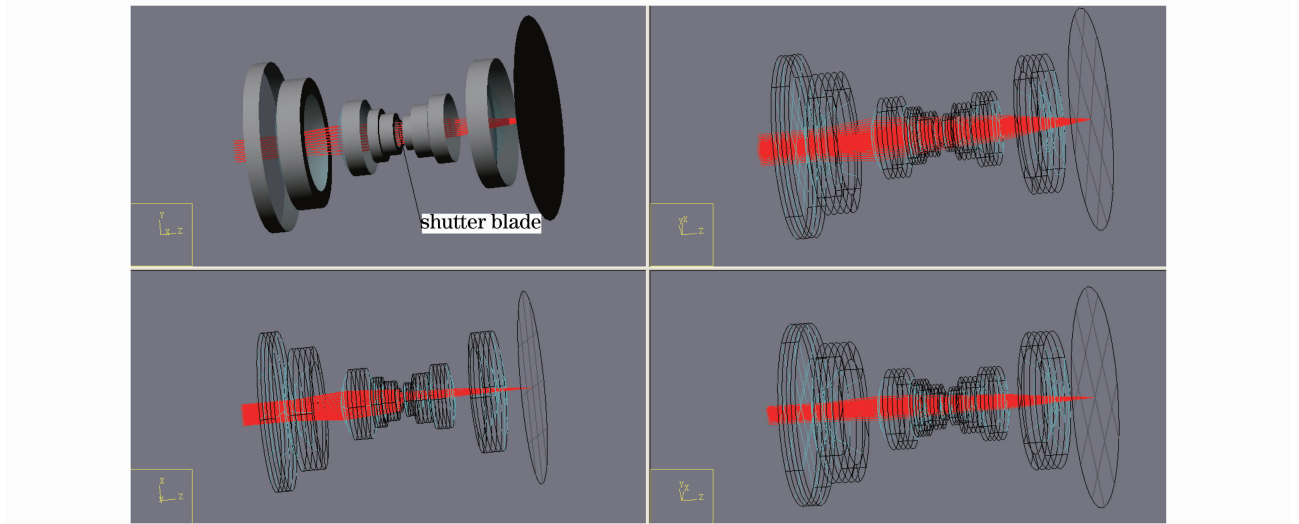


图 7 叶片扫描孔径光阑三维模型

Fig. 7 Three-dimensional model of blade scanning aperture diaphragm

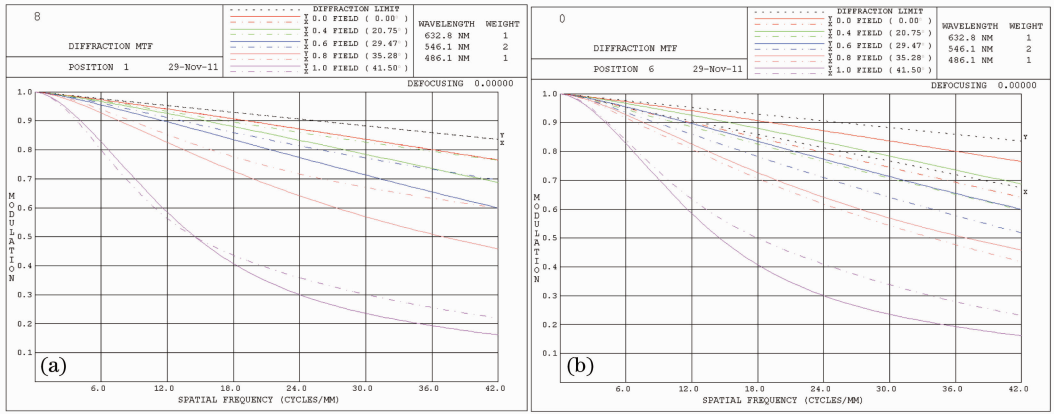


图 8 叶片扫描孔径光阑时的传递函数变化曲线。(a)叶片旋转 10°时；(b)叶片旋转 5°
 Fig. 8 MTF curve in blade scanning aperture diaphragm. (a) When blade circumrotate angle is 10°；
 (b) when blade circumrotate angle is 5°

随着叶片切口扫描孔径光阑的通光面积的增加,系统传递函数不断下降,可见镜间快门在曝光的每一个周期内都会使传递函数的数值由小变大,然

后再由大变小,同样呈现周期性变化。针对叶片切口打开孔径光阑的每个位置获得的传递函数曲线,在奈奎斯特频率为 42 lp/mm 时的数值见表 1。

表 1 光学系统 MTF 计算值

Table 1 MTF result of optical system

Field of view		0ω	0.4ω	0.6ω	0.8ω	1ω
10°	x	0.765	0.764	0.696	0.599	0.321
	y	0.765	0.687	0.6	0.459	0.253
9°	x	0.768	0.765	0.701	0.621	0.278
	y	0.767	0.688	0.601	0.438	0.251
8°	x	0.757	0.752	0.692	0.623	0.288
	y	0.766	0.684	0.598	0.481	0.177
7°	x	0.74	0.725	0.667	0.596	0.323
	y	0.764	0.68	0.59	0.482	0.18
6°	x	0.705	0.677	0.612	0.528	0.305
	y	0.764	0.68	0.508	0.443	0.197
5°	x	0.641	0.597	0.518	0.318	0.232
	y	0.765	0.687	0.6	0.459	0.181
4°	x	0.548	0.494	0.401	0.291	0.134
	y	0.759	0.688	0.607	0.423	0.174
3°	x	0.412	0.353	0.262	0.167	0.158
	y	0.744	0.676	0.596	0.354	0.164
2°	x	0.297	0.245	0.204	0.182	0.164
	y	0.699	0.633	0.528	0.258	0.203
1°	x	0.245	0.232	0.189	0.165	0.141
	y	0.576	0.48	0.362	0.169	0.153

从上表可以看出,随着视场的增加,x 和 y 方向的传递函数都在下降,当叶片打开孔径光阑的通光面积增加时,各个视场上 x 方向上传递函数逐渐增加,y 方向变化缓慢,这与叶片切口扫描通过孔径的切入方向有关。

5 光学传递函数测量及实验验证

传递函数的测量方法采用光电傅里叶分析法^[10],测量设备是美国 Optikos 公司的测试仪,测试仪结构组成包括形成无限远目标的准直系统、目标发生器(星孔或狭缝)、精密转台、图像分析器、计算机及电控系统等^[11],如图 9 所示。

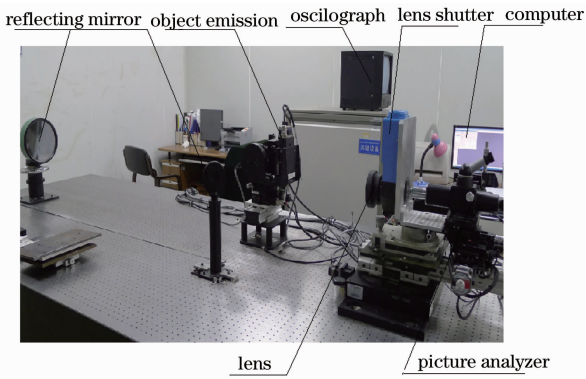


图 9 光学传递函数测试实验

Fig. 9 MTF test experimentation

传递函数的测量过程首先是将镜间快门和物镜一起安装在精密转台上,并将快门叶片旋转到某一待测角度,调整物镜参考轴与平行光管光轴同轴,其

次设置系统参数,选择适宜的星孔或狭缝目标板,将图像分析器调整到像面处。目标发生器发出的光线经平行光管后通过镜头成像在像面上,通过图像分析器瞄准并采集图像,经计算机快速傅里叶变换获得所要求空间频率下的传递函数值,对传递函数值进行提取并绘制传递函数曲线,然后旋转精密转台,将图像分析器、镜间快门和物镜瞄准其他视场在进行测量,最后调整叶片旋转角度进行下一个循环测量。

5.1 光学传递函数数据分析

当快门旋转叶片的角度为 10° 时,孔径光阑全部打开,计算机提取对应不同空间频率的传递函数值及曲线如图 10 所示,此时图像分析器瞄准轴上。当快门旋转叶片的角度为 5° 时,孔径光阑被遮拦一半,此时光瞳形状为半圆形,传递函数值及曲线如图 11 所示。

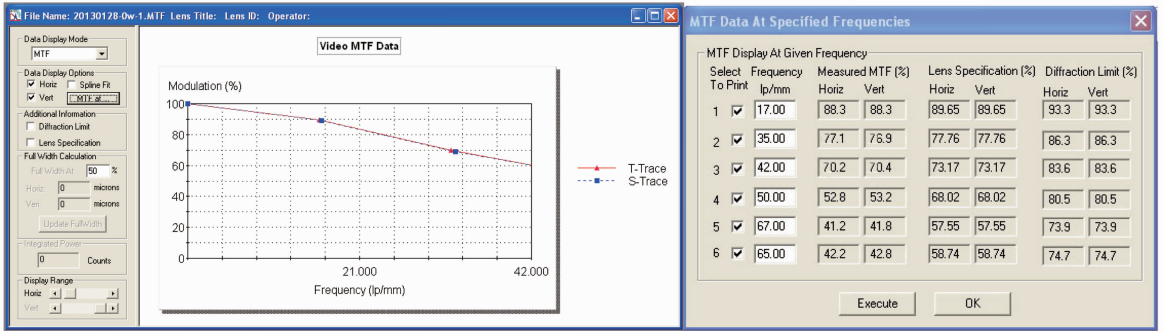


图 10 孔径光阑全开时 0 视场传递函数值及曲线

Fig. 10 MTF value at 0 field of view of aperture diaphragm opened entirely

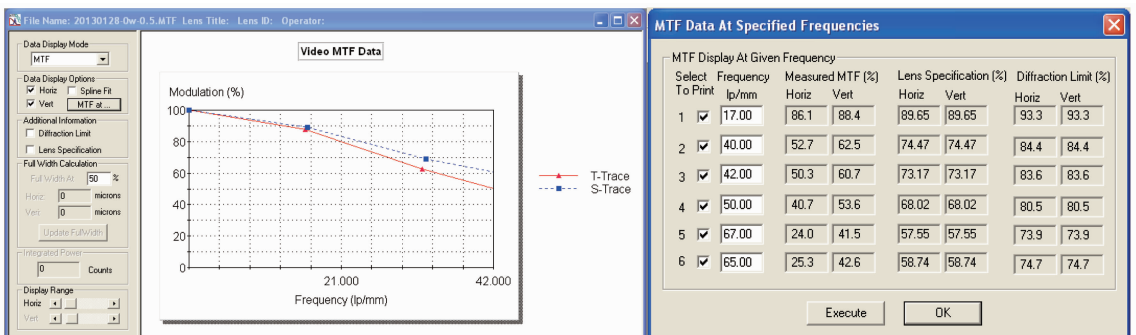


图 11 孔径光阑打开一半时 0 视场传递函数值及曲线

Fig. 11 MTF value at 0 field of view of half aperture diaphragm opened

在整个传递函数测量过程中,获得不同叶片旋转角度及不同视场角的传递函数值如表 2 所示。

测量得到的传递函数与分析得到的传递函数的变化趋势验证了分析结果的正确性。对各视场角的传递函数值进行误差分析,当叶片旋转角度为 $1^\circ \sim$

10° 时,即孔径光阑全部打开和部分打开时的相对误差随视场的变化情况如图 12 所示。

针对不同叶片旋转角度传递函数的误差数据见表 3。

表 2 传递函数测量数据

Table 2 Value measured of MTF optical system

Field of view		0ω	0.4ω	0.6ω	0.8ω	1ω	
Blade circumrotate angle	10°	x	0.702	0.582	0.454	0.419	0.226
		y	0.704	0.676	0.647	0.595	0.313
	9°	x	0.584	0.495	0.434	0.383	0.198
		y	0.586	0.515	0.543	0.485	0.238
	8°	x	0.57	0.499	0.474	0.356	0.187
		y	0.572	0.554	0.539	0.474	0.288
	7°	x	0.598	0.484	0.428	0.381	0.19
		y	0.573	0.571	0.535	0.45	0.253
	6°	x	0.59	0.494	0.38	0.35	0.177
		y	0.58	0.588	0.558	0.451	0.245
	5°	x	0.503	0.452	0.392	0.298	0.161
		y	0.607	0.592	0.574	0.482	0.232
	4°	x	0.457	0.359	0.336	0.283	0.124
		y	0.607	0.602	0.603	0.515	0.184
	3°	x	0.324	0.341	0.204	0.153	0.124
		y	0.627	0.622	0.634	0.529	0.158
	2°	x	0.234	0.183	0.156	0.156	0.153
		y	0.664	0.596	0.614	0.509	0.154
	1°	x	0.234	0.197	0.162	0.139	0.123
		y	0.615	0.591	0.558	0.52	0.111

表 3 光学系统传递函数误差数据

Table 3 Error value measured of MTF optical system

Error	Maximum absolute error	Maximum relative error	Average relative error
10°	0.146	-0.243	-0.134
9°	0.192	-0.281	-0.227
8°	0.187	-0.270	-0.231
7°	0.196	-0.288	-0.188
6°	0.186	-0.274	-0.202
5°	0.145	-0.242	-0.174
4°	0.135	-0.273	-0.141
3°	0.088	-0.215	-0.154
2°	0.063	-0.253	-0.182
1°	0.035	-0.151	-0.125

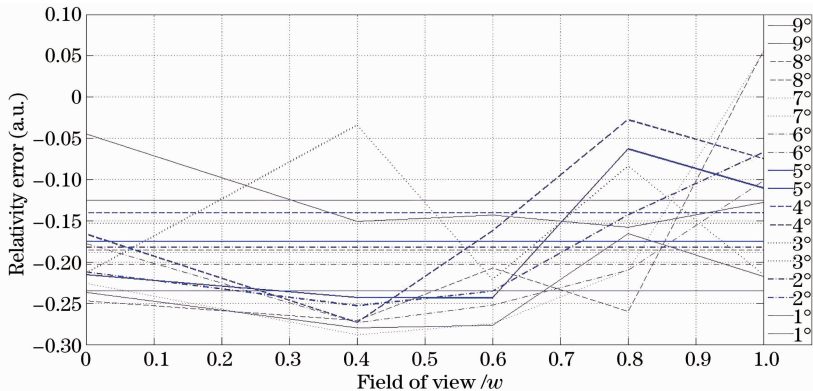


图 12 孔径光阑全打开和部分打开时的相对误差

Fig. 12 Relativity error at aperture diaphragm opened entirely and partially

通过对计算结果与测量结果的对比分析,由表3可知,传递函数的最大绝对误差为0.196;最大相对误差为-0.274;平均相对误差为-0.231,有较好的准确度和重复性。

5.2 飞行成像实验

数字航空摄影相机进行了多次飞行成像实验,验证成像系统的功能和性能。通过飞行测试,相机共获得4000多张图像,图13是相机在飞行测试中拍摄的辐射状靶标图像。



图13 辐射状靶标图像

Fig.13 Image of radial drone

飞行测试中获得的图像清晰,表明相机具有很高的分辨率,证明了快门长时间工作稳定可靠,满足各项性能指标要求。

6 结 论

对镜间快门扫描光学系统孔径光阑的整个过程建立了数学模型,分析了镜间快门对光学传递函数的影响,采用光电傅里叶分析法测量镜间快门改变光学系统光瞳内的透射率函数的实际情况,并通过飞行实验对快门的功能及性能进行验证,通过分析及实验证明,镜间快门在控制曝光过程中改变系统传递函数的变化规律,缩小叶片切口打开和关闭孔径光阑所用时间占整个曝光时间的比例,可以提高系统的综合传递函数,完善了航空相机快门理论,对航空相机的研制具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Sierbakov. Design and Calculation of Aerial Camera [M]. Sun Zhengzhou, Zhou Guiqin. Jilin: The Association of Science and Technology Translation in Jilin, 1985.
谢尔巴科夫. 航空照相机的设计与计算[M]. 孙振洲, 周桂琴. 吉林: 吉林省科技翻译协会, 1985.

- 2 Li Dexiong. Photographic Instrument [M]. Beijing: Ordnance Department Textbook Editor Chaber, 1986.
李德熊. 摄影仪器 [M]. 北京: 兵器工业部教材编审室, 1986.
- 3 Zhuang Songlin, Qian Zhenbang. Optical Transfer Function [M]. Beijing: Engineering Industry Publishing House, 1981, 12.
庄松林, 钱振邦. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981, 12.
- 4 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Engineering Industry Publishing House, 1987.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- 5 Zhang Jingjing, Jiang Yuesong, He Yuntao, *et al.*. Performance analysis of fractional Fourier transform optical imaging based on fractional Fourier-domain filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111003.
张静静, 江月松, 何云涛, 等. 分数域滤波的分数傅里叶变换光学成像性能分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1111003.
- 6 Zhu Yong, Wang Zhenchong. Measurement of soil resistivity based on FFT DC component [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 115-122.
朱勇, 王振翀. 基于快速傅里叶变换直流分量的土壤电阻率测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 115-122.
- 7 Zhang Lei, Ding Yalin, Zhang Hongwen, *et al.*. Adjustable exposure system for digital camera based on single curtain type shutter [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1266-1271.
张雷, 丁亚林, 张洪文, 等. 基于单帘快门的数字相机调光系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1266-1271.
- 8 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high resolution aerial camera [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 192-196.
钱义先, 梁伟, 高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 192-196.
- 9 Yan Feng. Optimization technique of wave front coded system based on modulation transfer function invariance [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411004.
闫锋. 基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411004.
- 10 Zhang Lei, Ding Yalin, Zhang Hongwen, *et al.*. Design and precision and analysis of curtain type shutter based on timing belt [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 380-387.
张雷, 丁亚林, 张洪文, 等. 基于正时带的帘幕式快门设计与精度分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 380-387.
- 11 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111004.
徐保树, 史泽林, 冯斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1111004.

栏目编辑: 张浩佳