

# 调制传递函数在光学相机支撑设计中的应用

吴萌源 李英才 胡永明 易红伟 韩娟

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要** 为指导遥感相机主次镜支撑桁架的设计, 以满足整系统调制传递函数(MTF)为目标, 分析系统各环节 MTF 对整机的影响, 确定以光学衍射限传递函数为约束设计系统主体支撑结构。由在轨产品的实测 MTF 及装调、电子学的传递函数因子推出杆支撑条件下的光学衍射限传递函数最小值, 指出光学软件不能全面评价遮拦对光学衍射限传递函数的影响, 确定以光瞳函数计算不同遮拦时光学系统衍射限传递函数, 得出三杆时杆直径最大为 38 mm, 四杆时杆直径最大为 26 mm 的遮拦分布。通过有限元计算两种结构布局下杆不同壁厚的系统静载变形及模态频率, 认为直径 26 mm、壁厚 4 mm 的四杆结构, 支撑结构质量从现有 40 kg 减至 4 kg, 静载变形水平放置 25  $\mu\text{m}$ 、竖直放置 0.85  $\mu\text{m}$ , 系统基频 98.9 Hz, 一阶扭转频率 183 Hz, 满足卫星载荷设计 requirements。

**关键词** 遥感; 调制传递函数; 遮拦; 光瞳函数; 支撑; 有限元分析

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0816001

## Application of MTF in Frame Design for Optical Camera

Wu Mengyuan Li Yingcai Hu Yongming Yi Hongwei Han Juan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

**Abstract** In order to direct the truss design of remote sensing camera, the influence of various modulation transfer function (MTF) on camera system is analyzed to satisfy the requirement of system MTF, thus the main support structure is designed by the limit of optical diffraction MTF. The minimum optical diffraction MTF under the situation of truss structure is calculated from the actual MTF, assembly and electronic factor of on-orbit production. Then the MTF is analyzed only by employing the pupil function under various kinds of obstruction because the optical software cannot evaluate the optical diffraction MTF entirely. It is concluded that the max diameter of tri-truss is 38 mm, the max diameter of four-truss is 26 mm. The truss structure of 26 mm diameter and 4 mm thickness is satisfied the specifications of satellite design by analyzing the static deformation and modal frequency of various wall thickness through finite element analysis (FEA).

**Key words** remote sensing; modulation transfer function; obstruction; pupil function; support; finite element analysis

**OCIS codes** 110.4100; 110.6770; 110.4850; 120.4880

## 1 引 言

共轴三镜消像散光学系统是空间天文及对地遥感观测中常见的光学形式<sup>[1,2]</sup>, 随着地面分辨率指标的不断提升, 空间光学遥感器的口径也随之增大<sup>[3,4]</sup>。对于共轴三反射光学系统, 在通光口径小于 500 mm 的情况下, 多使用薄壁筒式主次镜支撑结构。当口径大于 500 mm 时, 随着口径的增大, 空

间杆式支撑结构越来越体现出更高的效率、更小的质量。

本文研究偏视场使用的共轴三镜消像散系统(TMA)<sup>[5]</sup>, 作为主次镜间的支撑, 首先杆系要求具有高稳定性及小静载位移以满足光学元件之间的位置关系, 再者要求系统的一阶固有频率(基频)高于发射条件下飞船的固有频率(一般指标要求基频高

收稿日期: 2012-02-24; 收到修改稿日期: 2012-04-05

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 吴萌源(1980—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事空间光学结构方面的研究。E-mail: wmy@opt.ac.cn

导师简介: 李英才(1945—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学和遥感技术等方面的研究。

E-mail: lyc@opt.ac.cn

于 75 Hz)。而整个光学系统的最终评价指标则是系统调制传递函数(MTF)<sup>[6,7]</sup>,通过 MTF 数值的高低来衡量光学系统的性能。

## 2 研究内容与结果

### 2.1 光学系统像质评价

光学系统的结构形式如图 1 所示。由于相机包含光学部件、探测器、信号处理电路等,因此相机的  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}$  可表示为

$$f_{\text{MTF}_{\text{sys}}} = f_{\text{MTF}_{\text{motion}}} f_{\text{MTF}_{\text{opt}}} f_{\text{MTF}_{\text{detector}}} f_{\text{MTF}_{\text{signal}}}, \quad (1)$$

式中  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}$  表示相机整系统 MTF,  $f_{\text{MTF}_{\text{motion}}}$  表示因相机在轨运动成像引入的 MTF 分量,  $f_{\text{MTF}_{\text{opt}}}$  表示光学系统 MTF 分量,  $f_{\text{MTF}_{\text{detector}}}$  表示探测器的 MTF 分量,  $f_{\text{MTF}_{\text{signal}}}$  为电子学信号处理电路的 MTF 分量。

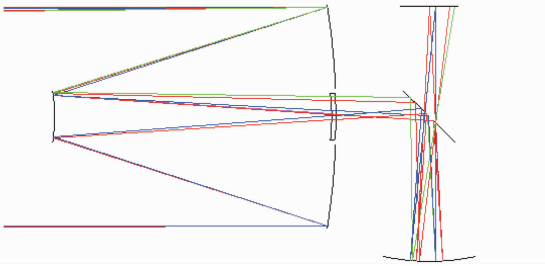


图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Diagram of optical system

为了便于分析,将有像差的光学系统的 MTF 表示为两项 MTF 的乘积:

$$f_{\text{MTF}_{\text{opt}}} \approx f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}}$  是理想衍射限光学系统的 MTF,  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$  是装调产生的像差代入的 MTF 分量。

Shannon 经过分析计算总结了一个较通用的包含多数像差的经验公式<sup>[8]</sup>:

$$f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}} \approx 1 - \left(\frac{W_{\text{rms}}}{A}\right)^2 \left[1 - 4\left(\frac{u_i}{u_{\text{ic}}} - \frac{1}{2}\right)^2\right], \quad (3)$$

$u_i < u_{\text{ic}}$

式中  $W_{\text{rms}}$  为波前差的均方值,  $A=0.18$ 。  $u_{\text{ic}}$  为像方空间的光学截止频率;  $u_i = u/(fl)$ , 表示每毫米线对数,这里按照 50 lp/mm 计算。

Maréchal 在文献中提到波前差的均方值与波前差的峰峰值  $W_{\text{pp}}$  的关系为<sup>[8]</sup>

$$W_{\text{rms}} = \frac{W_{\text{pp}}}{3.5}. \quad (4)$$

虽然  $W_{\text{pp}}=0$  用于衍射极限光学系统,但经常性地认为  $W_{\text{pp}}=0.25$ , 于是  $W_{\text{rms}}=1/14$ 。在加工制造过程中经常出现这样的波前误差。

像方空间的光学截止频率为

$$u_{\text{ic}} = \frac{1}{F\lambda}, \quad (5)$$

式中  $F=10$  表示光学系统的相对孔径,  $\lambda=635 \text{ nm}$ , 则  $u_{\text{ic}}=158.23$ 。

当  $W_{\text{rms}}$  取值从  $0.01\lambda \sim 0.10\lambda$  时, 则有因高阶像差带来的  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$  如图 2 所示。

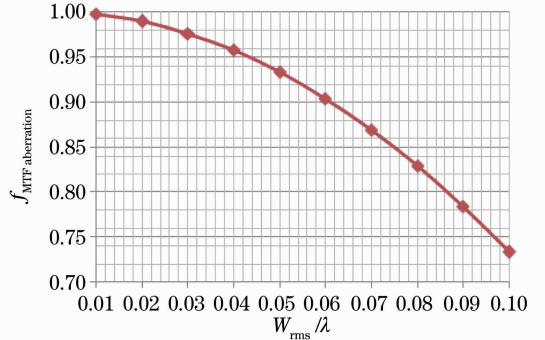


图 2 波前差与  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$  的关系

Fig. 2 Relationship of  $W_{\text{rms}}$  and  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$

对于相同的光学系统、一致的电子学设计,由于结构设计不同、光学装配情况不同,则总系统的  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}$  就会不同。变主次镜连接的筒式方案为杆式,由于杆的直径增加,势必增加光学系统的遮拦,使光学设计方案的  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$  降低。因此,为了满足支撑组件的刚度及稳定性,必须合适地选择杆的直径。

### 2.2 MTF 测试结果及问题解析

现有产品采用薄壁筒直接支撑方式,通过 4 条筋连接次镜部件。连接件及次镜支撑质量逾 40 kg。其结构形式如图 3 所示。

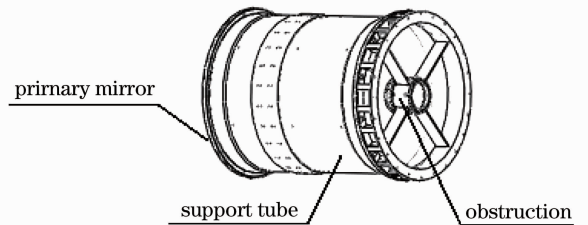


图 3 筒式支撑结构图

Fig. 3 Structure diagram of main support

按照次镜中心遮拦  $\Phi 128 \text{ mm}$ 、筋厚 5 mm 计算光学系统遮拦的影响。在像面上 12 个采样点中最小  $f_{\text{MTF}_{\text{opt}}}$  值为 0.4952、最大  $f_{\text{MTF}_{\text{opt}}}$  值为 0.5052。

在整机实验室测试中,测试得到像面上各点的  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}$  如图 4 所示。按照航天光学遥感仪器的研制经验,当光学遥感器整系统的  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}} > 0.18$  时,遥感相机在轨可获得较好的成像性能。在电子学、装配条件及使用环境不变的情况下,认为  $f_{\text{MTF}_{\text{motion}}}$ ,

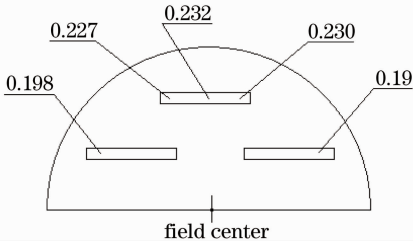


图4 实验室测试数据

Fig. 4 Laboratory test data

$f_{\text{MTF}_{\text{detector}}}$ ,  $f_{\text{MTF}_{\text{signal}}}$  保持不变。按照现有产品的实验室测试平均值  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}=0.21$ 、 $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}}=0.4952$ ，光机装调后系统波相差 RMS 值为  $0.07\lambda$  计算（由此代入的  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}$  值为  $0.8692$ ），有

$$\frac{f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}}{f_{\text{MTF}_{\text{opt}}}} = f_{\text{MTF}_{\text{motion}}} f_{\text{MTF}_{\text{detector}}} f_{\text{MTF}_{\text{signal}}} = \frac{0.21}{0.8692 \times 0.4952} = 0.48789. \quad (6)$$

对于杆式构型设计，同样按照装配后光学系统 RMS 值为  $0.07\lambda$  计算。为保证遥感器像质，应满足：

$$0.48789 f_{\text{MTF}_{\text{opt}}} = f_{\text{MTF}_{\text{sys}}} > 0.18. \quad (7)$$

将(2)式代入(7)式得

$$f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}} > \frac{0.18}{0.48789} = 0.3689, \quad (8)$$

式中  $f_{\text{MTF}_{\text{aberration}}}=0.8692$ ，代入可得  $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} > 0.4245$ 。

结果表明，因结构件遮拦造成光学系统 MTF 下降，但只要最终态的理想衍射限光学系统 MTF 能满足  $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} > 0.4245$ ，即可认为装配完成的光学系统其结构遮拦不会对成像产生影响，能够达到总系统  $f_{\text{MTF}} > 0.18$  的指标要求。

### 2.3 支撑遮拦的衍射影响分析

以单层的三杆、四杆结构，对主次镜系统进行分析。从遮拦造成 MTF 的影响入手，以全视场  $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} > 0.4245$  为设计输入，反推光学对于三杆或四杆支撑结构的遮拦要求。

当入瞳处有遮拦的时候，由于遮拦造成的衍射会对光学系统不同视场的 MTF 产生影响。虽然可以通过在光学设计软件 CodeV 中设置遮拦的形状和排布进行光学 MTF 的分析，但软件仅提供光学系统视场内在于午和弧矢两个方向的 MTF 数据，并未反映其余视场 MTF 的数据。于是决定通过光瞳函数来进行全视场 MTF 的计算。

衍射受限系统的光学传递函数(OTF)计算公式可表示为<sup>[9]</sup>

$$f_{\text{OTF}}(u, v) = \frac{H(u, v)}{H(0, 0)} = \frac{P(\lambda f u, \lambda f v) \otimes P(\lambda f u, \lambda f v)}{\iint_{-\infty}^{\infty} P^2(x, y) dx dy}, \quad (9)$$

其物理意义可以表示为两个错开出射光瞳的重叠面积与出射光瞳的总面积之比。式中  $\otimes$  为相关运算符， $\lambda$  为波长， $f$  为光学系统焦距， $u$  和  $v$  为两个方向的空间频率， $P(x, y)$  代表光瞳函数，可表示为

$$P(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{effective pupil} \\ 0, & \text{other region} \end{cases} \quad (10)$$

$x, y$  表示光瞳面的空间坐标。

为了得到遮拦对光学系统视场中任意角度  $\alpha$  的 MTF，只需将瞳函数沿着  $\alpha$  角度方向连续错开，计算该方向上自相关的结果。若要明确遮拦对光学系统全视场的影响，则需将瞳函数在任意方向做自相关运算。

对于光瞳为圆形、矩形等规则形状，其光瞳函数可以简单地描述，但对于有遮拦的圆形光瞳，其函数表达式非常复杂，难以简单地解析和计算。于是通过制作若干光瞳图像（不同尺寸、不同分布形式的支撑杆形成的光瞳。见图 5），将其转化为由数字 0, 1 描述的矩阵，对光瞳图像的数值矩阵进行自相关运算，可以得到 MTF 矩阵并以三维图像显示，如图 6 所示。

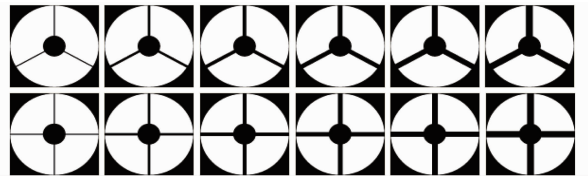


图5 不同遮拦的瞳图像

Fig. 5 Various figures of pupil obstruction

图 6 中  $x, y$  可以确定不同的视场位置，作为圆形对称的光瞳，MTF 图中的非零数值构成了一个圆域，圆半径  $r$  处表示归一化的截止频率为 1。CCD 探测器的探测极限为  $f=1/(2D)$ ，其中  $D$  为探测器的像素尺寸  $10 \mu\text{m}$ ，所以  $f=50 \text{ lp/mm}$ 。因此，只要考虑在  $50 \text{ lp/mm}$  处光学系统的 OTF 即可。(5)式像方空间的光学截止频率为  $u_{\text{ic}}=158.23$ ，将探测器的探测极限归一化得  $50/158.23=0.316$ 。在图中，以 MTF 中心最大值处坐标为圆心画  $0.316r$  的圆，圆内包围的区域的最小数值点即为有遮拦光学系统的最小 MTF 值，从四杆遮拦的 MTF 数值图中可以看出，在大于  $50 \text{ lp/mm}$  的区域，光学系统沿  $x, y$  方向的视场具有较高的 MTF 数值；在  $50 \text{ lp/mm}$  圆周

上,MTF 最大值集中在  $x, y$  轴上,这与 CodeV 计算结果一致,而圆域中 MTF 最小值点位于约  $30^\circ$  位置,这一情况正好解释了现有产品在实验室测试时

的  $f_{\text{MTF}_{\text{sys}}}$  数据的大小分布现象,如图 4 所示。

在分析了图 5 所示的多种布局结构后,总结数据见表 1。

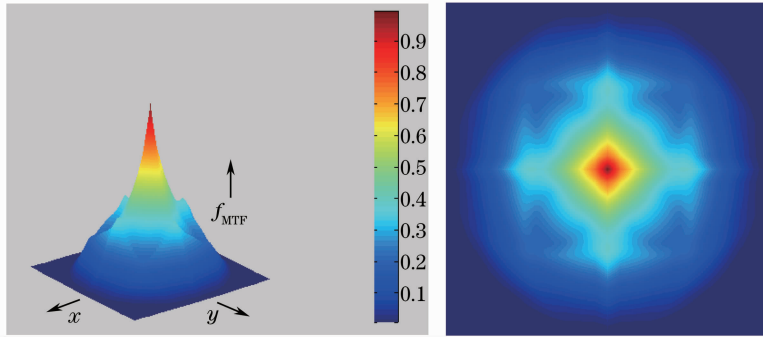


图 6 MTF 数值图(四杆,杆径 39 mm)

Fig. 6 Diagram of emulated MTF (four-truss configure with 39 mm diameter)

表 1 遮拦与 MTF 的关系

Table 1 Relationship of obstruction and MTF

Truss diameter /mm		3	5	7	15	21	27	33	39
Tri-truss MTF	$30^\circ$	0.5087	0.5056	0.5024	0.4892	0.4789	0.468	0.4566	0.4444
	$0^\circ$	0.5066	0.5020	0.4973	0.4784	0.4641	0.4497	0.4357	0.4217
	$-30^\circ$	0.5111	0.5080	0.5043	0.4915	0.4809	0.4698	0.4583	0.4459
Four-truss MTF	Min	0.4963	0.4952	0.4834	0.4594	0.4397	0.4207	0.4014	0.3818
	$0^\circ$	0.5082	0.5052	0.4968	0.4862	0.4764	0.4668	0.4565	0.4460

对表 1 数据进行多项式拟合,以光学系统  $f_{\text{MTF}_{\text{diffraction}}} = 0.4245$  为限,对应的在三杆支撑条件下杆直径上限为 38 mm,四杆支撑条件下杆直径上限为 26 mm。

## 2.4 支撑结构设计及分析

由于杆件安装在主镜基座上,主次镜间距以及对准问题取决于次镜的稳定度,因此这里只关心杆件和次镜,于是将主次镜光学系统的模型进行如下简化:支撑杆采用 bar2 单元,次镜座采用实体单元,在次镜座下加载质量 1 kg 的 0mass 单元用以模拟次镜;对杆安装在主镜座侧的节点进行 6 自由度约束,杆的另一端与次镜座进行全约束。加载沿光轴方向及垂直于光轴方向的重力载荷。结构网格如图 7 所示。

在上述边界条件下对不同杆直径(三杆支撑 38 mm 及四杆支撑 26 mm)、不同壁厚的配置进行了静力学分析及模态分析,数据如表 2 所示。

从表 2 数据可以看出,对于三杆结构,随着壁厚的不断增大,基频提高的幅度趋于平缓,却无法超过卫星主体 75 Hz 的基频,不能满足使用要求。对于四杆机构,当壁厚大于 2 mm 时,基频在 86 Hz 以上且随壁厚的增加而提高,提高幅度趋于平缓。由于支撑杆壁厚的增加提高了杆本身的刚度,次镜部件



图 7 支撑部件的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of support assembly

的静载位移逐渐减小,光学零件间的位置关系更加稳定。综览表 2,壁厚 4 mm 的四杆设计,很好地满足了光机系统的力学性能。

## 3 结 论

以光瞳遮拦对整系统 MTF 的影响入手进行主次镜间支撑结构的设计,设计结果满足使用要求,并取得显著的轻量化效果。对于不同的光学设计构型,由于其支撑结构的复杂化和遮拦的多样化,在进行结构方案设计时,该方法对遥感相机的光机总体设计具有工程化的指导意义,对偏视场使用的、大像面的光学系统特别是天文光学相机则更为重要。

表 2 各种支撑结构布局的力学性能

Table 2 Mechanics performance of different support layout

Wall thickness /mm	1	2	3	4	5	6
Static deformation (optical-axis horizontal) /( $10^{-4}$ mm)	6.02	3.50	2.69	2.31	2.11	1.99
Tri-truss $\Phi 38$ mm						
Static deformation (optical-axis vertical) /( $10^{-7}$ mm)	6.65	3.92	3.02	2.57	2.30	2.13
Natural frequency/torsion 1st frequency /Hz	21.2/39.5	28.14/49.8	32.4/55	35.3/58	37.3/59.5	38.6/60.3
Static deformation (optical-axis horizontal) /( $10^{-5}$ mm)	5.37	3.41	2.82	2.57	2.47	2.43
Cross-truss $\Phi 26$ mm						
Static deformation (optical-axis vertical) /( $10^{-7}$ mm)	7.03	4.04	3.04	2.53	2.23	2.03
Natural frequency/torsion 1st frequency /Hz	68.8/161	86.2/180.3	94.7/184.3	99/183.4	100.8/180	101.4/176.8

参 考 文 献

1 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optica and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2164~2172  
 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2164~2172

2 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large  $F$  number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097  
 李旭阳, 李英才, 马 臻等. 大  $F$  数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097

3 Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 19~24  
 陈晓丽, 傅丹鹰. 大口径甚高分辨率空间光学遥感器技术途径探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2003, **24**(4): 19~24

4 Jin Guang, Zhang Liang, Hu Fusheng. Investigation on space optical system of high  $F$  number and high resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 155~159  
 金 光, 张 亮, 胡福生. 大  $F$  数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 155~159

5 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen. Coaxial three-mirror-

anastigmat system of high-resolution space camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(5): 717~723  
 李旭阳, 李英才, 马 臻. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 717~723

6 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

7 Xu Zhonghua, Fang Jiexiong. Crosstalk calculation from modulation transfer function curves of infrared focal plane arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 041101  
 许中华, 方家熊. 利用红外焦平面调制传递函数曲线计算串音值[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 041101

8 Gerald C. Holst, Terrence S. Lomheim. *COMS/CCD Sensors and Camera Systems* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007. 227~229

9 Zhao Jianlin. *Advanced Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 171~176  
 赵建林. *高等光学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 171~176

栏目编辑:何卓铭