

## 《高分辨力空间光学遥感器》专题文章导读

徐抒岩

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

提高空间光学遥感器光学成像分辨力一直是该领域研究者探索的课题之一。在研究高分辨力空间光学遥感器的诸多方向中,涉及到光学、精密机械、控制软件、精密热控制、精密机构控制以及精确像移补偿等方面的内容。本专栏精选了6篇展示最新研究成果的论文,主要论述了高分辨力空间相机的光学系统、碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性、量化软件故障树分析技术、大功率焦平面器件热控制、用于调焦的步进电机高频斩波控制、飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响等,希望对读者在高分辨力空间光学遥感器的研究方面有一定指导和帮助作用。

《高分辨力空间相机的光学系统研究》一文,针对在太阳同步轨道上用TDI CCD推扫方式成像的高分辨力可见光相机,比较全面地分析研究了6种可能的相机光学系统结构,得到了不同相对孔径和不同视场角的光学设计结果,并给出了可供参考的6种光学系统设计结果数据,对于在高分辨力相机总体设计中确定光学系统结构形式具有重要参考价值。

《空间光学遥感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性》一文,研究由碳纤维复合材料(CFRP)制成的高分辨力空间光学遥感器主、次镜间的连接筒。对于了解将CFRP构成的筒状结构用于精密支撑光学元件的设计思想,以及建立等效力学模型、计算相关参数和确定铺层的合理形式、设计连接筒、实验验证连接筒的结构稳定性等具有重要参考价值。

《量化故障树分析技术在空间相机软件开发中的应用》一文,采用量化故障树方法对空间相机软件系统进行了可靠性分析。给出一种采用Vague集方法对底事件进行建模,从而计算底事件相对重要度和顶事件发生概率的定量分析方法。对于研究软件空间工程可靠性尤其是量化可靠性分析方法具有一定参考价值。

《大功率焦平面器件的热控制》一文,研究用于高分辨力空间光学遥感器的50 W大功率焦平面组件(FPA)的热控制。说明了大功率焦平面器件热控制难点、特点以及应该考虑和注意的问题。讨论了包括导热铝块、导热铝板、热管、冷板、导热填料以及热控涂层等热控措施在大功率焦平面组件热控制中的具体应用,对大功率焦平面热控制设计有参考和借鉴作用。

《基于ICL7667实现步进电机高频斩波控制》一文,研究在高分辨力空间光学遥感器的调焦系统中,采用ICL7667作为驱动器,提高小内阻步进电机驱动功率MOSFET的开关速度,从而实现步进电机的高频斩波控制。在研究采用功率MOSFET作为驱动电路的开关特性,以及如何提高开关特性等方面具有参考价值。

《飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响》一文,通过分析飞行器姿态对像移补偿结果的影响,提出高分辨力空间光学遥感器对飞行器姿态精度的要求。对于如何在高分辨力空间光学遥感器的总体设计中提出对飞行器姿态精度的要求,以及利用蒙特卡洛法(即统计试验法)对像移速度误差进行分析和计算等具有参考价值。

文章编号 1004-924X(2008)11-2164-09

# 高分辨力空间相机的光学系统研究

韩昌元

(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:**高分辨力空间相机的光学系统决定相机的外形尺寸和布局,为了相机的小型化、轻量化和结构稳定,针对某一种光学设计指标要求,分析比较多种光学系统结构是有必要的。本文针对在太阳同步轨道上用TDI CCD推扫方式成像的高分辨力可见光相机,在设轨道高度为500 km,地面像元分辨力达到0.5 m的情况下,用CODE V软件分析研究了6种可能的相机光学系统结构,得到了不同相对孔径和不同视场角的光学设计结果,并给出了可供参考的6种光学系统设计数据。指出在实际工程应用时,应根据不同的地面覆盖宽度的需求确定光学系统视场角,然后根据不同的视场角选定能满足这个视场角要求且尺寸最小的光学系统结构形式。

**关键词:**空间相机;高分辨力可见光相机;光学系统设计;光学传递函数

**中图分类号:**V475.3;TH703 **文献标识码:**A

收稿日期:2008-08-12;修订日期:2008-10-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

# Study on optical system of high resolution space camera

HAN Chang-yuan

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

**Abstract:** The dimension and configuration of space camera is mainly determined by the optical system of the camera. For certain optical design specifications, it is necessary for realizing miniaturization, lightening and high reliability of camera to study several optical system constructions. This paper describes the high resolution visible space camera in sun synchronous orbit using TDI CCD push-bloom imaging method. In assuming the orbit height of 500 km, the ground pixel resolution of 0.5 m, six kinds of optical system configurations are analysed using the CODE V optical design software, the different  $F$  numbers and Fields of View (FOVs) are obtained, and useful optical design data are presented. The conclusions reported here suggest that the FOV should be determined by different widths of the ground covered, then the optical system configurations are chosen by need of FOV and small dimension.

**Key words:** space camera; high resolution visible camera; optical system design; optical transfer function

## 1 引言

现代的太阳同步轨道高分辨率可见光空间相机一般指具有地面像元分辨力优于 1 m 的全色相机和地面像元分辨力优于 4 m 的多光谱相机。其中多光谱是红、绿、蓝和近红外 4 个谱段。在像面上平行地放置全色、红、绿、蓝和近红外这 5 条线阵 TDI CCD, 采用推扫成像形式获得地面的图像。多光谱相机的分光谱是靠 TDI CCD 前分别放置相应的滤光片来实现的。

在可见光空间侦察相机中, 全色相机达到地面像元分辨力优于 0.5 m 的称为可见光详查相机, 这里定义地面像元分辨力为像面上 CCD 像元尺寸对应的物面尺寸, 等于 CCD 采样的地面采样间距 GSD (Ground Sample Distance)。这种相机一般视场角不大, 但指向精度要求比较高。

设卫星轨道高度  $H=500$  km, 相机用的 CCD 像元尺寸  $a=0.012$  mm, 要求地面像元分辨力  $GSD=0.5$  m, 则相机焦距  $f=Ha/GSD=12$  m。Nyquist 频率  $f_N=1/2a=41.67$  lp/mm, 按全视场平均调制传递函数  $MTF_1(f_N)\geq 0.5$  要求设计光学系统, 全色通道波长取  $\lambda=0.5\sim 0.8$   $\mu\text{m}$ 。这

时如果光学加工和装调引起的传递函数达到  $MTF_2(f_N)=0.85$ , TDI CCD 的传递函数  $MTF_3(f_N)=0.5$ , 则相机实验室静态传递函数  $MTF_s(f_N)=0.21$ , 相机在轨动态传递函数达到  $MTF_d(f_N)=0.1$ , 满足空间频率对应于  $f_N$  的地面目标分辨要求。以下给出几种满足上述要求的光学系统设计结果。本文采用的光学系统结构形式参考了参考文献[1-5]。

为了尺寸的比较, 文中的光学系统图都取相同的比例尺。

## 2 卡塞格林系统(R-C 系统)

这种系统是轴对称系统, 像面是圆的, 主、次镜是二次曲面, 像面前有 4 块球面透镜, 孔径光阑在主镜上。为了消除一次杂光, 次镜的边和主镜中孔边缘处都要放置消杂光镜筒。光学系统口径  $D=1.2$  m, 焦距  $f=12$  m,  $f/10$ , 视场角  $FOV=1^\circ$ ,  $MTF(42\text{ lp/mm})=0.55$ 。图 1 表示光学系统图, 图 2 表示传递函数曲线, 表 1 列出光学系统参数。

公式(1)表示光学设计软件 Code-V 中用的非球面表达式。

$$z = \frac{(\text{CURV})y^2}{1 + (1 - (1 + K)(\text{CURV})^2 y^2)^{1/2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + Dy^{10}, \quad (1)$$

式中,  $\text{CURV}=1/R$ ;  $R$  为非球面顶点半径;  $K, A,$

$B, C, D$  分别为不同级次的非球面系数。  $x, y, z$  为直角坐标系, 坐标原在非球面的顶点;  $x$  方向: 垂直于纸面, 往里方向;  $y$  方向: 纸面内, 向上方向;  $z$  方向: 沿光轴的方向, 纸面内, 向右方向。

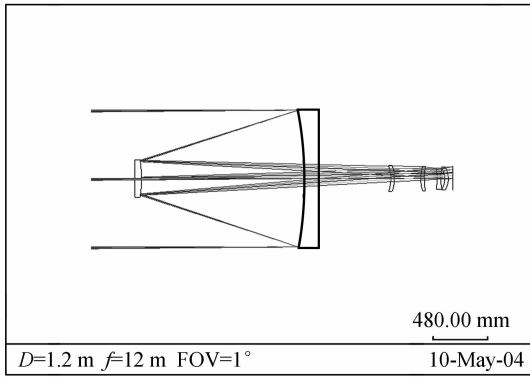


图 1 卡塞格林光学系统图

Fig. 1 Cassegrain optical system

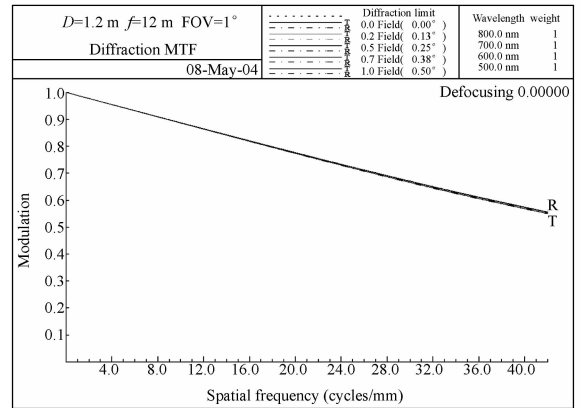


图 2 传递函数曲线

Fig. 2 MTF curves

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Optical system data

	半径 $R$ (mm)	厚度 (mm)	材料	$K$	$A$	$B$	$C$	$D$
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	1 579.0						
stop	-3 779.471 7	-1 426.839 3	反射面	-1.035 246				
3	-1 117.136 8	1 426.839 2	反射面	-2.253 412				
4	$1 \times 10^{18}$	767.605 4						
5	-334.825 3	31.58	K9_CHINA					
6	-337.737 8	232.076 8						
7	366.988 4	31.58	K9_CHINA					
8	752.582 3	111.972 1						
9	-554.696 4	31.58	K9_CHINA					
10	376.348 3	36.0						
11	-172.810 5	31.58	K9_CHINA					
12	-187.997 1	39.1835						
像面	$1 \times 10^{18}$	0						

### 3 同轴三反射镜消像散系统 A (TMC-A 系统)

同轴三反射镜系统也称为三反射镜卡塞格林 TMC 系统 (Three Mirror Cassegrain)。根据线阵 CCD 推扫成像的特点, 像面上只用一条窄长的成像面, 所以可以用轴外的一条窄长的像面, 以便

使同轴三反射镜光学系统避免二次遮拦。利用 3 个反射镜的 3 个二次曲面系数  $K$  校正球差、彗差和像散, 合理分配 3 个反射镜的曲率半径校正像面弯曲。这个系统由主次镜成像的中间像面像质不好, 通过第三镜第二次成像的最终像面像质好。但只是在轴外的一条窄长的像面上得到好的成像质量, 故在这个位置上放置线阵 TDI CCD 探测器使用。本系统孔径光阑放在主镜上, 可以在第一次成像面放视场光阑用于消杂光。第三镜后面

的平面折叠反射镜可作为像面调焦的调焦镜。另外由于系统的出射光瞳在这个调焦镜上,而入瞳与出瞳的缩小比很大,所以调焦镜的尺寸小,并且有利于消杂光。

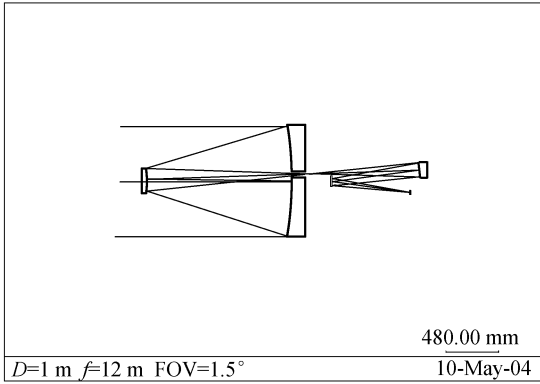


图 3 TMC-A 光学系统  
Fig. 3 TMC-A optical system

图 3 表示光学系统。D = 1 m, f = 12 m, f/12, FOV = 1.5°。y 方向为沿轨方向,入射光沿 y 轴方向有偏斜角,与光轴的偏斜角  $T_y = 0.5^\circ$ 。

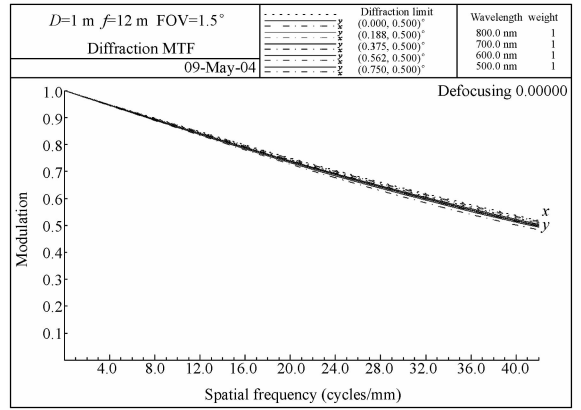


图 4 传递函数曲线  
Fig. 4 MTF curves

x 方向为穿轨方向,穿轨方向全视场角  $2T_x = FOV = 1.5^\circ$ 。图 4 表示传递函数曲线,全视场平均传函  $MTF(42 \text{ lp/mm}) = 0.5$ 。表 2 列出光学系统参数。比较表 1 和表 2 可以看出,与卡塞格林系统相比同轴三反系统视场大,中心遮拦小,可以取更小的相对孔径,而且总的光学系统尺寸小,在这方面同轴三反系统有明显优势。

表 2 光学系统参数  
Tab. 2 Optical system data

	半径 R(mm)	厚度 (mm)	材料	K	A	B	C	D
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	1 307.073 8						
stop	-3 285.498 6	-1 307.073 7	反射面	-0.969 841				
3	-859.307 2	1 307.073 7	反射面	-2.151 366				
4	$1 \times 10^{18}$	120.000 0						
5	$1 \times 10^{18}$	77.142 8						
6	$1 \times 10^{18}$	971.415 4						
7	-1 157.504 2	-800	反射面	-0.525 255				
8	$1 \times 10^{18}$	703.460 2	反射面					
像面	$1 \times 10^{18}$	0						

#### 4 同轴三反射镜消像散系统 B (TMC-B 系统)

这个系统与前面的 TMC-A 系统类似,但没有采用偏轴的轴外视场,而采用了轴上和轴对称的轴外视场,因此成像面是圆的。这种光学系统

有很好的像质,并尺寸小,杂光好控制。但光路交叉,调整难,而且由于第三镜二次成像时第一像面反射镜及支撑结构产生二次遮拦,次镜的非球面系数较大,加工难度大,这是缺点。图 5 表示光学系统,  $D = 1 \text{ m}, f = 12 \text{ m}, f/12, FOV = 1.5^\circ$ 。图 6 表示传递函数曲线,  $MTF(42 \text{ lp/mm}) = 0.5$ 。表 3 列出光学系统参数。

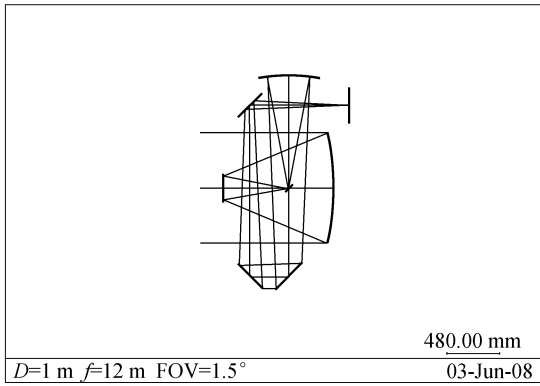


图 5 TMC-B 光学系统  
Fig. 5 TMC-B optical system

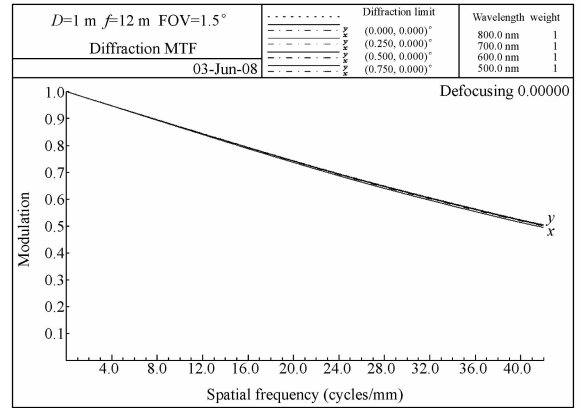


图 6 传递函数曲线  
Fig. 6 MTF curves

表 3 光学系统参数  
Tab. 3 Optical system data

	半径 $R(\text{mm})$	厚度 (mm)	材料	$K$	$A$	$B$	$C$	$D$
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	992.707 9						
stop	-2 519.341 6	-992.707 9	反射面	-0.967 578				
3	-1 003.584 6	558.000 0	反射面	-6.887 716				
4	$1 \times 10^{18}$	0						
5	$1 \times 10^{18}$	-1 016.795 6	反射面					
6	1 689.669 2	1 019.795 6	反射面	-0.527 952				
7	$1 \times 10^{18}$	399.9						
8	$1 \times 10^{18}$	400						
9	$1 \times 10^{18}$	-350	反射面					
10	$1 \times 10^{18}$	1550	反射面					
11	$1 \times 10^{18}$	-894.474 1	反射面					
像面		0.041 2						

## 5 同轴三反射镜消像散系统 C (TMC-C 系统)

这个系统与前面的 TMC-A 系统类似,但用轴对称的环形视场,为此在第一像面附近放置带有中心孔的  $45^\circ$  平面反射镜,经过第三镜反射的光束透过这块  $45^\circ$  反射镜中心孔成像,这个  $45^\circ$  反射镜中心孔的位置刚好在系统的出射光瞳位置,

这样不产生轴外光束的渐晕。

图 7 表示了光学系统图,  $D=1 \text{ m}$ ,  $f=12 \text{ m}$ ,  $f/12$ ,  $\text{FOV}=1.5^\circ$  环形。图 8 表示传递函数曲线,  $\text{MTF}(42 \text{ lp/mm})=0.5$ 。表 4 列出光学系统参数。

这种结构形式的优点是结构紧凑,尺寸小,在环形有效像面内可放置多个探测器。缺点是  $45^\circ$  反射镜尺寸大,像面上的线阵 CCD 要在环形像面内拼接成弧形。

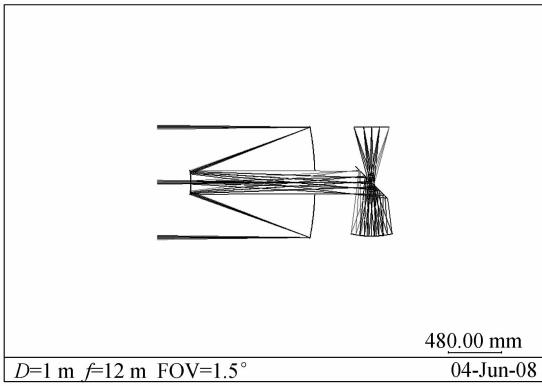


图 7 TMC-C 光学系统  
Fig. 7 TMC-C optical system

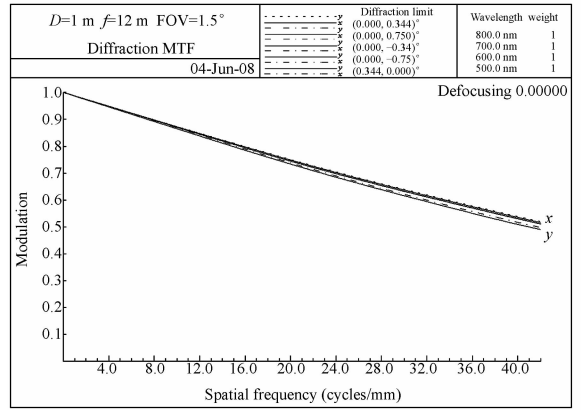


图 8 传递函数曲线  
Fig. 8 MTF curves

表 4 光学系统参数  
Tab. 4 Optical system data

	半径 R(mm)	厚度 (mm)	材料	K	A	B	C	D
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	1 200						
stop	-2 746.759 0	-1 119.285 6	反射面	-0.981 128				
3	-615.018 6	1 119.285 6	反射面	-1.847 493				
4	$1 \times 10^{18}$	509.274 9						
5	$1 \times 10^{18}$	-486.889 2	反射面					
6	786.856 4	990.567 8	反射面	-0.527 952				
像面	$1 \times 10^{18}$	-0.009 6						

## 6 二次成像离轴三反射镜系统 (Cook TMA 系统)

前述的 4 种形式光学系统是同轴系统, 结构简单尺寸小, 但视场角不能做大, 并且都有中心遮拦, 降低了理想衍射极限传递函数, 所以发展了离轴三反射镜光学系统 TMA 系统 (Three Mirror Anastigmat)。

图 9 表示光学系统,  $D=0.9 \text{ m}$ ,  $f=12 \text{ m}$ ,  $f/13.3$ ,  $\text{FOV}=2.3^\circ$ 。孔径光阑设在主镜上, 主镜位置与入瞳位置重合, 但入瞳中心偏离光轴  $AD_y=-700 \text{ mm}$ , 入射光沿飞行方向 ( $y$  轴方向)

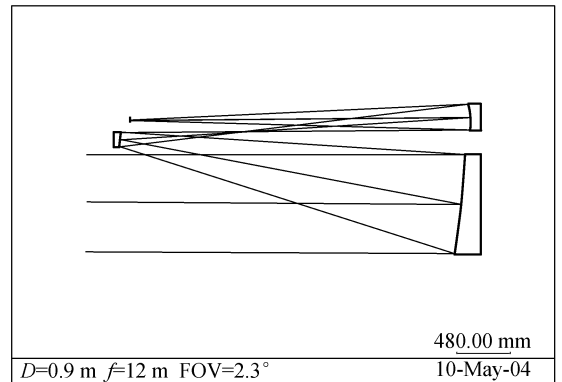


图 9 Cook TMA 光学系统  
Fig. 9 Cook TMA optical system

有偏斜角, 与光轴的偏斜角  $T_y = -0.3^\circ$ , 穿轨方

向的全视场角  $2T_x = 2.3^\circ$ 。图 10 表示传递函数曲线,全视场平均 MTF(42 lp/mm)=0.53。表 5 列出光学系统参数。这个系统是二次成像系统,可以在第一像面放视场光阑消杂光,另外出射光瞳在三镜和像面之间,入瞳与出瞳的缩小比很大,可放小的孔径光阑用于消杂光,或类似于同轴三反系统,可放置小的平面折叠镜用于像面调焦。与同轴系统相比这个系统无中心遮拦,可以用较小的光学系统相对孔径达到相同的传递函数值,并视场角大,这些是优点。缺点是总的尺寸比同轴系统大,另外次镜的二次曲面系数较大,所以加工难度也比较大。

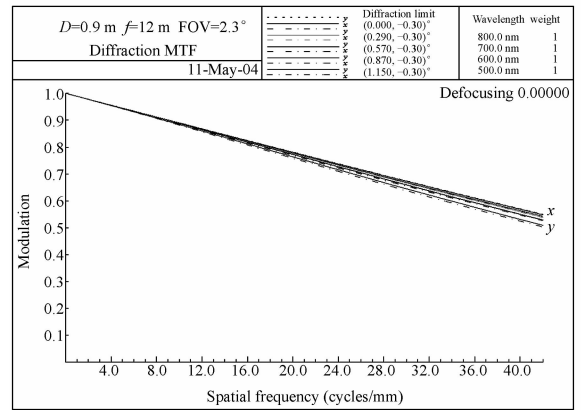


图 10 传递函数曲线

Fig. 10 MTF curves

表 5 光学系统参数

Tab. 5 Optical system data

	半径 $R(\text{mm})$	厚度 (mm)	材料	$K$	$A$	$B$	$C$	$D$
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	3 096.352 2						
stop	$1 \times 10^{18}$	0						
3	-7 203.651 4	-3 102.238 9	反射面	-0.920 801				
4	-1 818.925 0	1 117.681 5	反射面	-4.717 054				
5	$1 \times 10^{18}$	2 024.353 4						
6	-2 441.200 3	-3 053.255 2	反射面	-0.293 373				
像面	$1 \times 10^{18}$	0						

## 7 一次成像离轴三反射镜系统 (Wetherell TMA 系统)

上面介绍的二次成像离轴三反射镜系统由于孔径光阑在主镜上,光学系统很不对称,所以视场角不能做太大。为了进一步扩大视场角,把孔径光阑放在次镜上,使光学系统比较对称,这样就形成了一次成像的离轴三反射镜系统。这个系统可以设计成很大的视场角,但由于孔径光阑放在次镜上,视场角大时主镜和三镜的沿穿轨方向( $x$  方向)尺寸变得很大,这是一次成像离轴三反射镜系统的主要缺点。另外消杂光能力也不如二次成像系统。优点是视场角大,成像质量好,并且容易

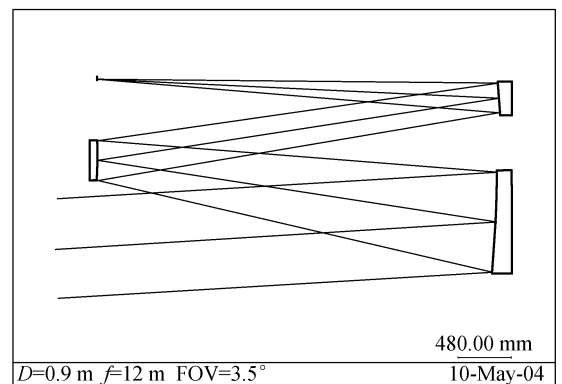


图 11 Wetherell TMA 光学系统图

Fig. 11 Wetherell TMA optical system

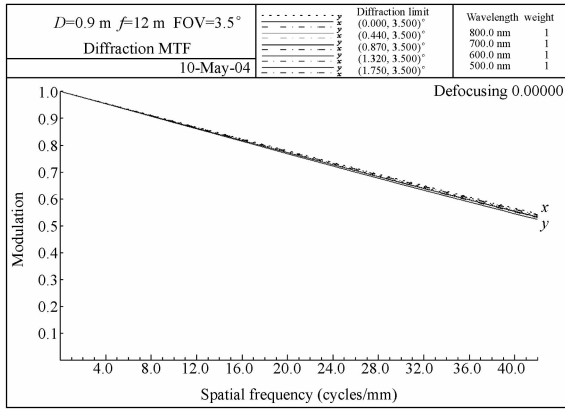


图 12 传递函数曲线  
Fig. 12 MTF curves

设计成像方远心光路,这对用于测绘的相机以及有后续光路的望远物镜(如作为成像光谱仪物镜)来说是很重要的优点。

图 11 表示光学系统图。 $D = 0.9\text{ m}$ ,  $f = 12\text{ m}$ ,  $f/13.3$ ,  $\text{FOV} = 3.5^\circ$ 。入射光沿飞行方向( $y$ 轴方向)有偏斜角,与光轴的偏斜角  $T_y = 3.5^\circ$ ,穿轨方向的全视场角  $2T_x = 3.5^\circ$ 。图 12 表示传递函数曲线,  $\text{MTF}(42\text{ lp/mm}) = 0.53$ 。表 6 列出光学系统参数。主镜和三镜都有 6 次项非球面系数,并主镜在穿轨方向( $x$ 方向)最大尺寸为  $1.46\text{ m}$ ,三镜在  $x$ 方向最大尺寸为  $0.83\text{ m}$ ,因此加工难度比较大。

表 6 光学系统参数

Tab. 6 Optical system data

	半径 $R(\text{mm})$	厚度 (mm)	材料	$K$	$A$	$B$	$C$	$D$
物面	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$						
1	$1 \times 10^{18}$	3 599.998 5						
2	-11 942.493 9	-3 599.998 5	反射面	-1.406 845		$-2.680\ 889 \times 10^{-22}$		
stop	-5 604.678 7	3 636.362 1	反射面	-3.655 568				
4	-10 541.054 4	-3 640.919 4	反射面	-5.470 109		$4.118\ 592 \times 10^{-20}$		
像面	$1 \times 10^{18}$	0						

## 8 结 论

分析研究了 6 种光学系统结构,都能满足  $0.5\text{ m}$ 分辨力要求,但不同的结构形式有不同的相对孔径和不同的视场角大小,设计时应根据不同视场角(地面覆盖宽度)的要求选择不同的光学系统结构形式。

不改变上述光学系统,只改变探测器像元尺

寸,可以改变相机的地面像元分辨力,例如用像元尺寸更小的 TDICCD 就可提高地面像元分辨力,这时  $f_N$  变高,对应的传递函数降低,因此必要时还要事后图像处理技术来达到分辨力要求。这时相机的信噪比要求很高,因为这种图像处理要降低信噪比。但用这种方法在一定条件下,可以在满足相机的分辨力要求的同时减小相机的尺寸和质量。

## 参考文献:

[1] MICHAEL B. *Handbook of Optics*[M]. McGRAW-HILL, INC.,1995.  
 [2] ZEBASE. Optical Design Database User Guide Version 4.0, N 019, N 062, N 065, O 014, O 015[OL]. ZEMAX @focus-software.com.,1999.  
 [3] 禹秉熙,郑玉权,胡辛,等. 光学遥感成像[M]. 北京:科学出版社,2001.  
 YU B X,ZHENG Y Q,HU X,et al.. *Optical Remote Sensing Imaging*[M]. Beijing:Science Publishing Company, 2001. (in Chinese)  
 [4] 常军,翁志成,姜会林,等. 长焦距空间三反射镜光学系统的设计[J]. 光学精密工程,2001,9(4):315-318.

CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):315-318. (in Chinese)

[5] 薛鸣球, 沈为民. 轻小型高分辨率 TDI CCD 相机的光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

XUE M Q, SHEN W M. *Optical Design of Light Weight and Compact High Resolution TDI CCD Camera*[M]. Beijing: Science Publishing Company, 2005. (in Chinese)

作者简介: 韩昌元(1940—), 男, 吉林延吉人, 副总工程师, 研究员, 主要从事光学遥感仪器的研制工作, 研究方向为光学设计与光学测试技术。E-mail: hancy962@sohu.com

## ● 下期预告

# “Y”形流管无阀压电泵驱动器的动态研究

叶 芳, 黎毅力, 张建辉

(南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016)

“Y”形流管无阀压电泵是满足医疗、卫生、保健领域中进行输血或输液工作而特别设计的一种新型压电泵, 因此其驱动器——压电驱动器应当满足其医用环境的要求。首先, 对驱动器动态特性进行理论分析, 并推导出其固有频率和最大振幅的计算公式。然后, 验证了理论分析的正确性。最后, 基于理论模型, 对驱动器的几何参数和材料特性对其动态性能的影响进行分析讨论。分析结果表明压电陶瓷层与基底层的半径比应当在 0.75 左右, 厚度比应当小于 1.0。本研究亦为其他类型压电泵的优化设计和制作提供了实用性的参考。