

· 光电系统 ·

长焦距航空相机光学系统设计

王宇, 牟达, 李静芳, 张黎黎

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 航空相机是装载在飞机上用以拍摄地表景物来获取地面目标的光学仪器。为满足远距离摄影的要求, 需要物镜有较长的焦距, 以使远处的物体在像面上有较大的像。因此, 设计了长焦距航空相机。设计焦距为 550 mm, F 数为 6, 视场 $2\omega=9^\circ$ 的长焦距航空相机光学系统。在对长焦距航空相机的物镜进行设计时, 首先, 选取双高斯物镜作为初始结构。为了提高系统的像质, 可使用 ZEMAX 对系统进行优化。对优化后的系统进行标准化及公差分析, 最后得到符合要求的光学系统。该系统在每毫米 80 对线空间频率下, MTF 大于 0.15, 具有良好的像质。

关键词: 长焦距; 航空相机; 光学设计; 调制传递函数

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-06-0001-06

Design of Long Focal Length Aviation Camera Optical System

WANG Yu, MU Da, LI Jing-fang, ZHANG Li-li

(Department of Electro-optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aviation camera is a kind of airborne optical instrument, which acquire the targets on ground through shooting ground sceneries. For meeting the requirements of long range shooting, long focal length object lens is needed to obtain bigger size images of the objects far away in image plane. A long focal length aviation camera optical system is designed at focal length 550 mm, F number 6 with field $2\omega=9^\circ$. Double Gauss object lens is selected as an initial structure in the design of the object lens of the long focal length aviation camera. The system is optimized by ZEMAX to improve image quality. The optimized system is standardized and performed tolerance analysis to obtain the needed optical system. The system has good image quality under 80 pairs per millimeter spatial frequency and MTF is more than 0.15.

Key words: long focal length; aviation camera; optical design; modulation transfer function (MTF)

利用航空相机对地球空间信息进行搜集已成为太空探索获取信息来源的重要手段, 为探索地球提供了有力的帮助^[1-9]。光学系统的设计是航空相机设计最关键的技术, 直接关系到相机的成像质量。基于对长焦距航空相机结构原理的深入研究, 创造性地设计了一种长焦距航空相机的光学系统^[10-14]。

1 航空相机的物镜设计

1.1 航空相机的参数

航空相机参数分别为: 焦距: $f^* = 550$ mm; F 数: 6; 视场: $2\omega=9^\circ$; 工作波长范围: 0.48~0.56 μm ; 畸变: 小于 1%; 成像质量: 在每毫米 80 对线空间频率下, MTF 大于 0.15。

1.2 航空相机的外形尺寸

在对航空相机的整体结构尺寸进行设计时, 要根据所给要求对航空相机的结构进行设计, 这对光学设计是很重要的^[15-19]。

$$\text{入瞳直径: } D = \frac{f^*}{F} \quad (1)$$

式中, F 为光学系统的 F 数, $F=f/D$, 即相对孔径的倒数。

由已知条件可知, 长焦距航空相机的焦距 $f=550\text{ mm}$, F 数为 6, 因此可计算出航空相机物镜的入瞳直径为 $D=91.67\text{ mm}$ 。

$$\text{线视场: } \tan \omega = \frac{y'}{f} \Rightarrow 2y' = 2f \tan \omega \quad (2)$$

由已知条件可知, 航空相机的视场角 $2\omega=9^\circ$, 焦距为 $f=550\text{ mm}$, 则可以计算出航空相机接收器的对角线尺寸为 $2y'=86.57\text{ mm}$ 。

1.3 初始结构的选取

在对航空相机的物镜进行初始结构的设计时, 通常可采用代数法和缩放法这两种方法进行设计^[20-21]。这两种方法根据不同的原理对航空相机的物镜进行选定。根据初级像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构的方法称为代数法, 亦称为 PW 法。而根据已有的光学技术资料 and 专利文献, 选择与所要求的光学特性相接近的结构为初始结构的方法称之为缩放法。由于我国在光学设计方面已从事多年的研究, 在这个过程中, 人们已经积累了许多高性能的光学系统物镜初始结构。因此可以借鉴于前人的优秀成果, 采用缩放法对物镜进行选取。

由于物镜的接收器件是大面阵 CCD, 视场角 $2\omega=9^\circ$, 焦距为 $f=550\text{ mm}$, 入瞳直径 $D=91.67\text{ mm}$, 因此, 轴上点像差与轴外点像差都是影响航空相机物镜成像质量的重要因素。整个系统分为前、后个透镜组, 而光阑位置对轴上像差无影响, 所以为了校正轴外像差先将光阑放置在两透镜组中间, 即采用双高斯的结构^[22]。其初始结构如图 1 所示。

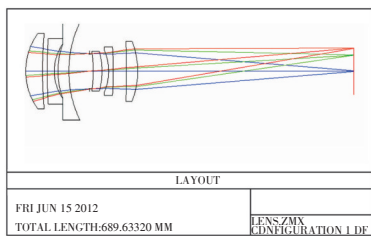


图1 航空相机物镜设计的初始结构二维图

光学系统的传递函数如图 2 所示。

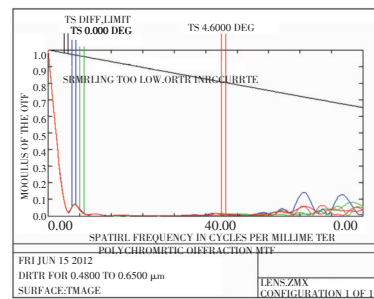


图2 初始的调制传递函数

1.4 材料的确定

经过人类不断的探索, 所生产的光学元件的材料性能越来越好。由于采取的是缩放法的方法, 所提供选取的材料在性能上不如近期使用的新型材料, 所以, 根据物镜材料的折射率以及阿贝常数将其替换成与之相近的比较新型的成都光明公司所生产的材料。将 LAKN22 替换成 H-LAK10, LF5 替换成 QF50, SK4 替换成 H-ZK6, LF7 替换成 QF3。

其中, H-LAK10 是冕冕玻璃, 它是近年来生产出的新材料, 具有折射率高, 色散率低的优良特性, 为创造大口径的高级镜头提供了条件。QF50 和 QF3 都属于轻火石玻璃, 它们的折射率 $n>1.6$, $\nu<50$ 。H-ZK6 是重冕玻璃, 折射率 $n<1.6$, $\nu>50$ 。此时航空相机的调制传递函数如图 3 所示。

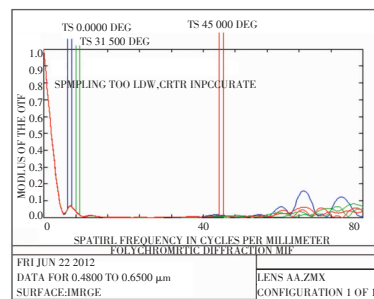


图3 换材料后的调制传递函数

如图 3 所示, 调制传递函数的变化不是很明显, 接着可通过修改半径和厚度的方法使系统的调制传递函数得到优化。

1.5 系统优化过程

在对系统进行优化时, 首先将光阑附近的几个物镜的半径设为变量, 对它进行自动优化, 使调制传递函数得到了一定的改善^[13-24]。然后在选对调制

传递函数影响较大的半径设为变量,再进行自动优化,直至将所有的半径都设为变量,进而进行优化。然后,再对系统的半径进行手动的优化。从第一片物镜的半径进行手动的修改,一片一片的修改,直至达到最好的状态。此时系统的调制传递函数仍未达到要求。系统半径优化后的二维图如图4所示,半径优化后的调制传递函数如图5所示。

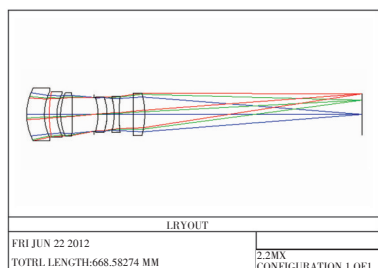


图4 半径优化后的二维图

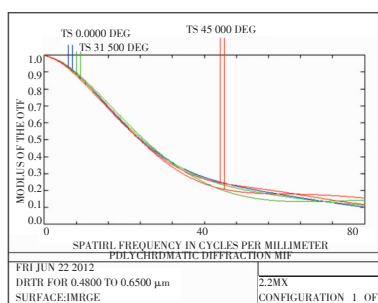


图5 半径优化后的调制传递函数

从图5中可以看出,经过对半径的修改,使得MTF曲线有了很大程度的提升,此时系统的半径已经达到最优的状态了,为了使MTF曲线可以进一步的上升,可接着对系统的厚度进行修改。

在对物镜的厚度进行修改时,由于物镜的厚度有一定的要求,所以对厚度不采取自动优化,而采取手动修改的方法对厚度进行修改。首先还是对光阑附近的几个物镜的厚度进行修改,然后逐个进行修改,直至传递函数达到要求为止。优化后结构的二维图如图6所示。

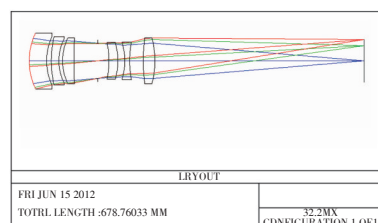


图6 厚度优化后的二维图

光学系统厚度优化后的传递函数如图7所示。

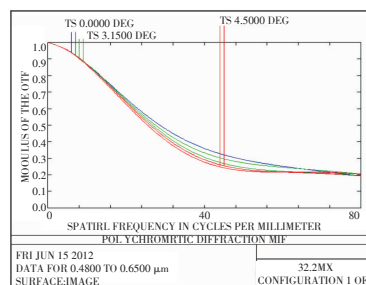


图7 厚度优化后的调制传递函数

光学传递函数评价光学系统的成像质量,是基于把物体看做是由各种频率的谱组成的,也就是把物体的光场分布函数展开成傅里叶级数或傅里叶积分的形式^[25-26]。若把光学系统看成是线性不变的系统,那么物体经过光学系统成像,可视为物体经过光学系统传递后,其传递效率不变,但对比度下降,相位发生推移,并在某一频率截至,即对比度为零。这种对比度的降低和相位推移是随频率不同而不同的,其函数关系称之为光学传递函数。

对厚度优化后,光学系统的MTF大于0.15,达到了系统的要求,满足系统的成像质量。

由于该系统的焦距为固定的,因此,为保证航空相机的焦距不变,设置EFFL函数,使得 $f' = 550$ mm。通过不断的优化,使得MTF曲线向着好的方向变化,进一步提高系统的成像质量。

光学系统厚度优化后的点列图如图8所示。

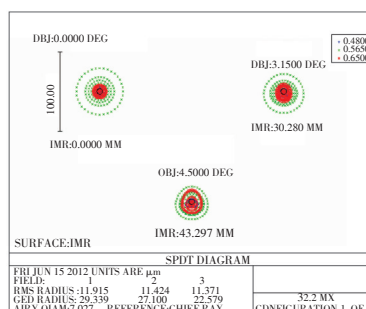


图8 厚度优化后的点列图

航空相机是大像差、大孔径的系统,因此,可以用点列图对航空相机进行评价。用点列图来评价大像差系统的像质是一种比较方便易行的方法。从图8中可看出,弥散斑的半径不是很大,基本上满足系统的要求以及成像质量。

畸变是指主光线和高斯像面交点的高度不等

于理想像高,其差别叫做畸变。系统优化后的畸变如图9所示。畸变是主光线的像差由于光阑球差的影响,不同视场的主光线通过光学系统后与高斯像面的焦点高度 y'_z 不等于理想像高 y' ,其差别就是系统的畸变,用 $\delta y'_z$ 表示

$$\delta y'_z = y'_z - y' \quad (3)$$

由畸变的定义可知,畸变是垂轴像差,它只改变轴外物点在理想像面上的成像位置,使像的形状产生失真,但不影响像的清晰度。畸变是仅与视场有关的函数。当 $\delta y'_z = y'_z - y' < 0$ 时,产生负畸变,也称桶形畸变。当 $\delta y'_z = y'_z - y' > 0$ 时,产生正畸变,也称枕形畸变。相对畸变的定义为

$$q = \frac{y'_z}{y'} = \frac{Y'_z - y'}{y'} \times 100\% = \frac{Y'_z/y' - y'/y'}{y'/y'} \times 100\% = \frac{\bar{\beta} - \beta}{\beta} \quad (4)$$

式中, $\bar{\beta}$ 代表某一视场实际放大率; β 代表某一视场理想放大率。对于不做测量用的光学系统,如照相物镜,电影和电视物镜,相对畸变通常在 3%~5% 以内,对于畸变要求最严格的是测量仪器和航摄设备,通常控制在 1% 以内,甚至更高。长焦距航空相机不是专门进行测量用的光学系统,相对畸变一般在 3%~5% 之内就可达到系统要求,而该航空相机的相对畸变在 1% 以内,使得系统具有很高的成像质量。由图9可看出,相对畸变远远满足要求^[27]。像相对物几乎不失真。

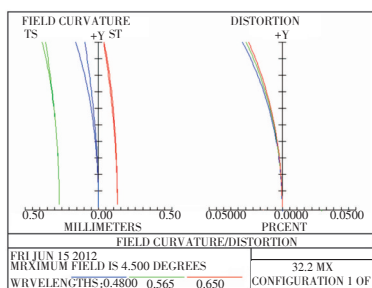


图9 优化后的畸变

2 航空相机的像质评价

2.1 系统的标准化

由于对系统进行加工时,所使用的是规定的样板,因此,所涉及的透镜尺寸需要跟相应的样板值对应。在 ZEMAX 软件中调出样本数据库,是系统自

动所设计的结构配对合适的样板值,此时系统的调制传递函数如图10所示。从图10中可以看出,MTF曲线没有发生特别大的变化。

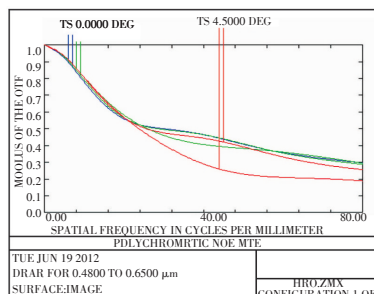


图10 标准化后的 MTF 曲线

2.2 航空相机像质评价

(1) 点列图分析

在对系统进行设计时,除了采取调制传递函数的方法外,还可以采用点列图的方法进行像质评价。点列图忽略了衍射效应,用光线光路计算得到的点列图中的点的分布能近似的代表点像的能量分布。因此,可以用点列图中这些光线交点的密集程度来衡量其成像质量的优劣。对系统进行标准化前的点列图如图11所示。对系统进行标准化后的点列图如图12所示。

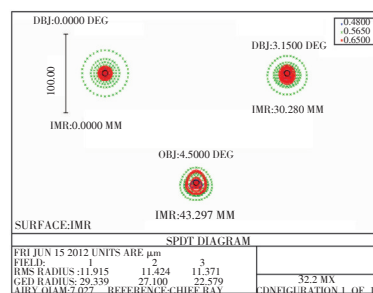


图11 标准化前的点列图

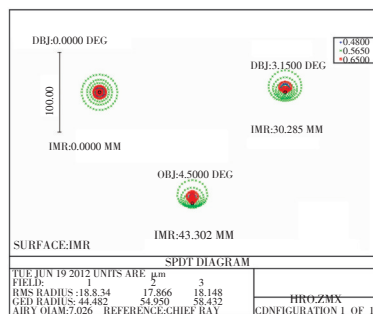


图12 标准化后的点列图

从图12中可以看出,对系统进行标准化后,弥散斑的半径较标准化变大了,虽然艾里斑的半径较标准化前也相应的变大了,但对比起来,成像质量稍差了一点,但仍满足成像要求。

(2)畸变分析

畸变是由于主光线的球差随视场角的变化而不同,因而,一对共轭的物像平面上,像的放大倍率要随视场而变,不再是常数。畸变不影响成像清晰度,它会改变轴外物点在理想像面的位置。对系统进行标准化前的畸变曲线如图13所示。对系统进行标准化后的畸变曲线如图14所示。

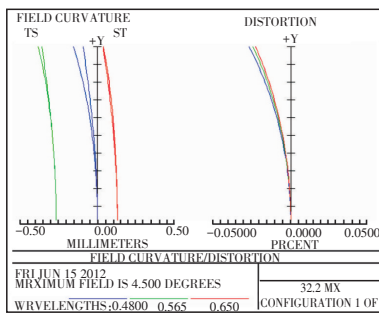


图13 标准化前的畸变曲线

由图14可知,对系统进行了标准化后,畸变减小了,系统只产生较小的失真,有效提高了系统的成像质量。

2.3 系统的公差分析

在对系统进行评价时,除了对系统的像质和其

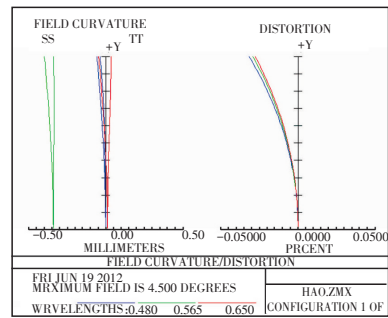


图14 标准化后的畸变曲线

他指标是否达到要求的标准进行评价,还应考虑一个重要的因素——公差,公差的大小直接导致了将来产品是否能够装配成功^[28]。对于一般的装置,要求公差大的结构装配起来比较容易,而对要求比较精密的仪器,要求的公差比较小,往往超出了当前工艺加工的能力,很难将其加工和装配成功。

由于所设计的是长焦距航空相机的物镜,经过对系统的分析,对系统定义了一组适当的公差。设透镜光圈曲率半径的精度为1 mm,元件厚度和空气间隔为0.01 mm,元件偏心为0.02 mm,元件装配倾斜为0.02 mm。在默认公差函数进行修改,在工具菜单下的公差设置里选择敏感度分析方法,最后执行公差分析。

表1显示了由ZEMAX自动输出的部分公差列表。从表1中可以看出,厚度值的改变量均在允许值的范围内。其中最大的厚度改变值为0.000 429 335,这样大小的改变量对于光学系统是可以接受的。

表1 厚度公差

Type	Minimum			maximum			
	Value	Criteria	Change	Value	Criteria	Change	
TTHI	1 2	-0.010 000 00	0.015 009 555	-0.000 195 487	0.010 000 00	0.015 404 290	0.000 199 249
TTHI	2 4	-0.010 000 00	0.015 617 792	0.000 412 751	0.010 000 00	0.014 817 138	-0.000 387 904
TTHI	3 4	-0.010 000 00	0.015 615 017	0.000 409 976	0.010 000 00	0.014 819 507	-0.000 385 535
TTHI	4 6	-0.010 000 00	0.014 801 180	-0.000 403 861	0.010 000 00	0.015 634 377	0.000 429 335
TTHI	5 6	-0.010 000 00	0.015 201 289	-3.752 5E-006	0.010 000 00	0.015 208 796	3.754 4E-006
TTHI	6 7	-0.010 000 00	0.015 204 803	-2.384 4E-007	0.010 000 00	0.015 205 280	2.384 9E-007
TTHI	7 9	-0.010 000 00	0.015 370 070	0.000 165 029	0.010 000 00	0.015 042 300	-0.000 162 741
TTHI	8 9	-0.010 000 00	0.015 362 339	0.000 157 297	0.010 000 00	0.015 049 924	-0.000 155 117
TTHI	9 11	-0.010 000 00	0.015 128 438	-7.660 4E-005	0.010 000 00	0.015 282 786	7.774 5E-005
TTHI	10 11	-0.010 000 00	0.015 286 751	8.171 0E-005	0.010 000 00	0.015 125 499	-7.954 3E-005
TTHI	11 13	-0.010 000 00	0.015 131 497	-7.354 4E-005	0.010 000 00	0.015 280 786	7.574 5E-005
TTHI	12 13	-0.010 000 00	0.015 195 318	-9.723 7E-006	0.010 000 00	0.015 214 853	9.811 7E-006
TEDX	1 2	-0.020 000 00	0.015 206 167	1.125 4E-006	0.020 000 00	0.015 206 167	1.125 4E-006
TEDY	1 2	-0.020 000 00	0.015 207 581	2.539 5E-006	0.020 000 00	0.015 207 581	2.539 5E-006

表2显示的是元件偏心的公差列表。从表2可以看出,MTF数值的改变量大多是在小数点后第两位。这种微小的改变并不影响系统整体的成像性

能。其中,最大数值的改变量为0.000 651 661,这种改变是允许的。

表2 元件偏心公差

Type	Minimum			maximum		
	Value	Criteria	Change	Value	Criteria	Change
TEDX 1 2	-0.020 000 000	0.015 206 167	1.125 4E-006	0.020 000 000	0.015 206 167	1.125 4E-006
TEDY 1 2	-0.020 000 000	0.015 207 581	2.539 5E-006	0.020 000 000	0.015 207 581	2.539 5E-006
TETX 1 2	-0.020 000 000	0.015 221 583	1.654 2E-005	0.020 000 000	0.015 221 583	1.654 2E-005
TETY 1 2	-0.020 000 000	0.015 209 119	4.077 1E-006	0.020 000 000	0.015 209 119	4.077 1E-006
TEDX 3 4	-0.020 000 000	0.015 886 159	0.000 681 118	0.020 000 000	0.015 886 159	0.000 681 118
TEDY 3 4	-0.020 000 000	0.015 886 068	0.000 681 026	0.020 000 000	0.015 886 068	0.000 681 026
TETX 3 4	-0.020 000 000	0.017 583 818	0.002 378 777	0.020 000 000	0.017 583 818	0.002 378 777
TETY 3 4	-0.020 000 000	0.017 569 211	0.002 364 169	0.020 000 000	0.017 569 211	0.002 364 169
TEDX 5 6	-0.020 000 000	0.015 856 702	0.000 651 661	0.020 000 000	0.015 856 702	0.000 651 661
TEDY 5 6	-0.020 000 000	0.015 855 429	0.000 650 387	0.020 000 000	0.015 855 429	0.000 650 387
TETX 5 6	-0.020 000 000	0.017 118 133	0.001 913 092	0.020 000 000	0.017 118 133	0.001 913 092
TETY 5 6	-0.020 000 000	0.017 122 237	0.001 917 196	0.020 000 000	0.017 122 237	0.001 917 196
TEDX 8 9	-0.020 000 000	0.015 271 794	6.675 2E-005	0.020 000 000	0.015 271 794	6.675 2E-005
TEDY 8 9	-0.020 000 000	0.015 275 013	6.997 2E-005	0.020 000 000	0.015 275 013	6.997 2E-005
TETX 8 9	-0.020 000 000	0.015 303 264	9.822 2E-005	0.020 000 000	0.015 303 264	9.822 2E-005
TETY 8 9	-0.020 000 000	0.015 303 502	9.846 0E-005	0.020 000 000	0.015 303 502	9.846 0E-005

3 结 论

详细介绍了航空相机物镜的设计,根据长焦距航空相机的技术指标,利用ZEMAX对系统进行优化,从而满足了光学设计的要求。对系统进行了像质评价,分别对系统进行了标准化和公差分析,确保该系统实际加工装配的可行性^[29]。该系统对航空相机的设计具有很好的参考和实际应用价值,具有广泛的前景。

参考文献

- [1] Lareau A G, Partynski A J. Dual-band framing cameras: technology and status[J]. SPIE, 2000, 41(27):148-156.
- [2] 贾平,张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.
- [3] 李波,孙崇尚,田大鹏,等. 国外航空侦察相机的发展情况[J]. 现代科学仪器, 2013, 10(3):66-70.
- [4] 黄文彬. 航空摄影的走向与变化[J]. 西北测息, 2000(1):6-

8.

- [5] 刘明,修吉宏,刘刚,等. 国外航空侦察相机的发展[J]. 电光与控制, 2004, 11(1): 56-59.
- [6] 何新年. 航空遥感CCD数字图像潜力分析[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(3):66-70.
- [7] 吴欣. 国外航空侦察设备的发展现状和趋势[J]. 电光与控制, 2005(1).
- [8] Light D L. Film cameras or digital sensors? The challenge ahead for aerial imaging[J]. PE&RS, 1996, 3.
- [9] 许兆林,付战平. 航空 CCD 侦察相机系统研究[J]. 航空计测技术理论与实践.
- [10] 杨琪. 某型航空相机性能检测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 刘钧,高明. 光学设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006:75-90.
- [12] Recon/Optical INC.KS-87E Frame Camera. 美国:RIO 公司, 2002.
- [13] 赵梅,马中洲,唐海燕,等. 基于 CCD 的航空相机自动检焦系统[J]. 光电工程, 2008, 35(11):77-81.

(下转第 76 页)

- [5] 周琰, 靳世久. 干涉型分布式光纤管道泄漏实时监测方法及装置[P]. 中国专利, 200410020046.6, 2007-3-7.
- [6] 周琰, 靳世久. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 121-124.
- [7] 陈志刚, 张来斌, 王朝晖. 基于分布式光纤传感器的输气管道泄漏检测方法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(7): 108-110.
- [8] Thomas G Giallorenzi, Joseph Abucaro, Anthony Dan-
dridge. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 626-664.
- [9] Nye J F. Physical properties of crystals[M]. Oxford, England: Oxford Univ. Press, 1976.
- [10] Ferrier G A, Bao X. A new fitting method for spectral characterization of Brillouin-based distributed sensors[J]. Proc. SPIE, 2003, 5260: 512-514.

(上接第6页)

- [14] 李林, 安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 214-228.
- [15] 李玉瑶. 航空相机物镜的设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [16] 王效才. 星体测量相机光学总体分析与系统设计[J]. 光学工程, 1979(5): 1-17.
- [17] 谢尔巴科夫. 航空照相机的设计与计算[M]. 孙振洲, 译. 长春: 吉林省科技翻译协会, 1985.
- [18] 李兴, 安志勇. 航空相机分辨率检测系统的总体方案[J]. 长春理工大学光电工程学院, 2009(9).
- [19] 赵梅, 周脉鱼, 王芳荣, 等. 航空相机焦距 CCD 精密测量系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2004, 22(6): 541-544.
- [20] 刘明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述[J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 46-49.
- [21] 李兴华. 高分辨率空间摄影相机像移补偿控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
- [22] 梁宜勇. 基准离焦偏差控制技术[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 43-45.
- [23] 刘志明, 戴明, 陈黎, 等. 基于自动检焦信号梯度信息的自适应平滑算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(5): 977-979.
- [24] Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses[J]. Appl Opt, 2006, 45(21): 5167-6164.
- [25] 杨守旺, 龙科慧, 周磊, 等. 航空相机调焦单元仿真系统的实时显示方法研究[J]. 液晶与显示, 2009, 24(5): 740-745.
- [26] 王家骅, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度失计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [27] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999, 7(1): 16-20.
- [28] 李兴, 安志勇. 航空相机分辨率检测系统的总体方案[J]. 长春理工大学光电工程学院, 2009(9).
- [29] 刘明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述[J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 46-49.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊, 并加入中国光学期刊网, 建立了《光电技术应用》期刊网站, 所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时, 不再征求作者意见。稿件刊登后用作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给, 并赠送当期样刊两份。