

文章编号 1004-924X(2013)05-1265-07

基于单帘快门的数字相机调光系统

张 雷^{1*}, 丁亚林¹, 张洪文¹, 张继超¹, 刘 波^{1,2}

(1. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室
中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:采用单帘式快门配合 CCD 增益控制曝光量的调光方法,设计了面阵 CCD 相机的调光系统,以使面阵 CCD 相机在宽照度视场范围和较短的拍照周期内获得正确的曝光量。分析了航空成像传输过程中的影响因素,结合单帘式快门的曝光原理推导出曝光量的数学表达式。通过确定 CCD 的最佳曝光量,建立了快门狭缝速度、CCD 增益和目标照度之间的对应关系。然后,由光电池采集地面目标的照度信号,根据采集的信号控制狭缝速度和 CCD 增益。最后,测试了快门辊轴的稳速精度。结果表明,对系统分别输入 6 300、4 170 和 1 200 r/min 的阶跃输入信号时,快门的稳速精度达到 0.033。根据得到的稳速精度并考虑快门的曝光量误差,得到快门的曝光精度为 0.091。在实验室进行了地面照相试验,测试系统获得的曝光量为 1 833 DN,计算得到的系统曝光精度为 0.066。结果显示利用单帘式快门和 CCD 增益相结合的方法能够使 CCD 获得正确的曝光量,捕获的图像满足使用要求。

关 键 词:数字相机;调光;单帘式快门;CCD 增益;最佳曝光量

中图分类号:V447.3;TH761.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1265

Adjustable exposure system for digital camera based on single curtain type shutter

ZHANG Lei^{1*}, DING Ya-lin¹, ZHANG Hong-wen¹, ZHANG Ji-Chao¹, LIU Bo^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China*)
** Corresponding author, E-mail: zhangl_1982@163.com*

Abstract: To obtain the perfect exposure in a wide illuminance range at a short period, an adjustable exposure system was designed for an area CCD camera in combination of a single curtain type shutter with controlling exposure by CCD gain. The effect factor on aero photographing process was analyzed, and a exposure expression was work out according to exposure principle of the single curtain type shutter. After confirming the optimized exposure amount of a CCD, the relationship among the slip rate, CCD gain and the illuminance of the ground target was established according to the exposure expression. Furthermore, the signal of a ground target illuminance was collected by a photosensitive resistance, then the signals were used to control the slip rate and the CCD gain. Finally, the rate ac-

收稿日期:2012-08-27;修订日期:2012-09-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA06A208)

curacy of shutter roll shaft was tested at the input rates of 6 300, 4 170 and 1 200 r/min, respectively. The result shows that the rate accuracy of shutter is 0.033, and the exposure accuracy is 0.091 according to combination of the computation results and exposure errors. A ground test on photographing was performed in a laboratory, and the results indicate that the exposure amount obtained is 1 833 DN and the exposure accuracy is 0.066. These results demonstrate that the method proposed can allow the CCD to obtain a proper exposure and captured images can meet the demands of CCD cameras.

Key words: digital camera; adjustable exposure; single curtain type shutter; CCD gain; fine exposure

1 引言

航空摄影用于捕获高分辨率的图像信息,从而准确反映被拍摄物体的形状、大小以及位置,为目标判别提供参考依据。但是由于目标景物信息的传输受诸多环节因素的影响,如大气传输、太阳高度角、镜头、感光元件等,因此为了获得高分辨率图像,需要综合分析各影响因素,并对各因素产生的影响进行有效补偿。除此之外,由于航空摄影的目标照度范围较大,无论过曝光还是欠曝光都会造成影像信息的缺失。因此要获得高分辨率的图像信息,就需要对进入感光介质的光能量即曝光量进行控制,简称调光^[1]。通常的调光方法主要有 3 种,分别是机械快门控制,电子快门设置和 CCD 增益调节。前两种方法为自动曝光控制,后一种方法为自动增益控制^[2-5]。由于使用的面阵 CCD 器件没有电子快门,因此无法用电子快门控制曝光量。综合考虑大气环境、光学系统和感光元件对曝光量的影响,本文根据相机要求,使用自行研制的新型单帘式焦面快门,基于机械快门和 CCD 增益调节相结合的方法进行了面阵 CCD 相机的自动调光技术研究。

2 调光影响因素的分析及计算

2.1 快门曝光原理

本文采用的调光机构为帘幕式快门,帘幕上开有狭缝,通过狭缝的移动使感光元件曝光,快门示意图如图 1 所示。

快门的有效曝光时间计算如下^[6]

$$t_{\text{eff}} = \frac{Z}{v}. \quad (1)$$

其中, v 为狭缝速度, Z 为狭缝宽度。由式(1)知,

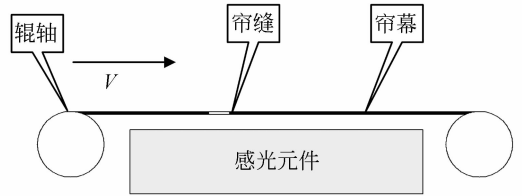


图 1 快门曝光原理图

Fig. 1 Schematic diagram of exposure

快门可以通过调节狭缝宽度控制曝光时间,如双帘式快门;也可以通过调节帘缝速度控制曝光时间,如单帘式快门。现有的航空相机多采用双帘式快门,但是双帘式快门的调节结构比较复杂,为缩小空间体积,简化机构,本文设计了单帘式快门,如图 2 所示。

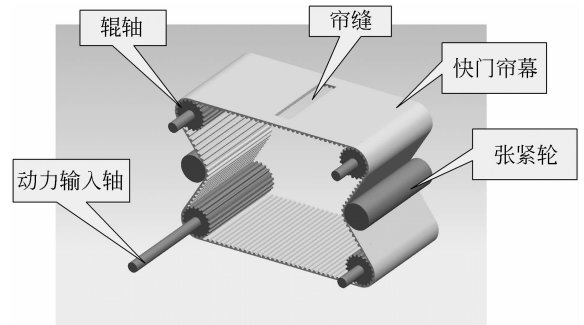


图 2 单帘式快门结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of single curtain type shutter

快门狭缝的运动基于正时带传动,帘幕和辊轴分别由正时带和正时带轮构成,动力通过输入轴将运动传给正时带使狭缝运动,从而使感光元件曝光。

2.2 影响光能量传输的因素分析

航空成像过程中地面目标信息受到诸多因素影响,如大气传输过程能量的衰减、相机自身光学

透过率导致的光学传递函数下降,以及感光介质对能量的吸收效率等。在传输过程中,地面目标景物信息的传递环节如下所示。

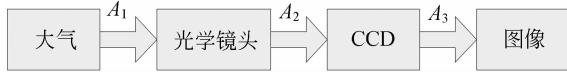


图 3 光能量传输过程

Fig. 3 Process of light energy transmission

由图 3 知,目标景物发出的光在被接收之前,首先要经过大气,其目标景物的光亮度表达式为:

$$L_0 = \frac{E_0 \cdot \rho_A}{\pi}, \quad (2)$$

其中 E_0 为目标景物的光照度, ρ_A 为地面反射率。

衰减程度与大气厚度和大气层有关,其水平路径上的大气传输特性用 Bouguer 定律描述,则其大气透射比为:

$$L = L_0 \exp(-\sigma R), \quad (3)$$

其中, σ 为大气衰减系数, R 为目标景物与相机间的大气厚度(km),大气衰减系数 σ 为:

$$\sigma = \frac{3.91}{v}, \quad (4)$$

其中, v 为大气能见度(km)。

像面处的光照度为:

$$E_c = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{F^2} \cdot \tau_g \cdot L \cdot \cos^4 \omega, \quad (5)$$

其中 F 为镜头相对孔径的倒数, τ_g 为镜头的透过率, L 为镜头前的光亮度, ω 为像面上任一点所在位置的半视场角。由于视场角较小,故忽略其影响,则镜头总的衰减系数为:

$$E_c = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{F^2} \cdot \tau_g \cdot L. \quad (6)$$

进入光学系统后的光能量被 CCD 器件吸收,其吸收率由 CCD 的光谱感应常数和明视觉光视效率决定。

曝光量的基本表达式为:

$$H = E_c \cdot t_{\text{eff}}. \quad (7)$$

由于 CCD 的灰度级为数字量,将式(7)像面处的曝光量转化为 CCD 的灰度级为:

$$H_{DN} = E_c \cdot t_{\text{eff}} \cdot R_{DN} \cdot 10^5 / (683 \cdot \eta). \quad (8)$$

将式(2)、式(3)、式(4)和式(6)代入式(8),得到像面处数字量化后的曝光量表达式:

$$H_{DN} = \frac{10^5 \cdot \tau_g \cdot E_0 \cdot \rho_A \cdot t_{\text{eff}} \cdot R_{DN}}{4F^2 \cdot 483\eta} \cdot \exp\left(-\frac{3.91}{v} \cdot R\right). \quad (9)$$

2.3 调光参数的计算

在胶片型航空相机中,通常是将曝光量控制在感光特性曲线的中点处^[7],这样会最大限度收集地面景物的照度信息。和胶片式的感光介质类似,根据 CCD 的动态特性曲线,将 CCD 的曝光量控制在其动态特性曲线的中点处,便能将不同照度的影像信息尽量多的反映在图像上。由供应方提供的 CCD 响应曲线知,最佳曝光量为:

$$H_{DN} = 1\ 720. \quad (10)$$

根据相机的环境条件,式(9)所需的参数如表 1 所示。

表 1 计算曝光时间的参数表

Tab. 1 Parameters for calculating exposure time

物理量	数值	物理量	数值
E_0 (lx)	8 000~100 000	τ_g	0.70
ρ_A	0.18	F	5.6
R (km)	10	η	0.426
v (km)	30	R_{DN} (DN/nJ/cm ²)	20

由上表各物理量数据,将各参量的具体数值带入表达式(9),计算得到合适的曝光时间 t_{eff} 范围:

$$0.032\ \text{s} < t_{\text{eff}} < 0.39\ \text{s}. \quad (11)$$

由于 CCD 的帧频和拍照周期的限制,不允许快门的曝光时间大于 0.02 s,但如果曝光时间低于 0.002 s 曝光量便不能达到最佳,从而影响成像质量。综合考虑上述原因,本相机采用调节 CCD 增益和调节快门曝光时间相结合的方法解决上述问题。设 CCD 的增益为 N_g ,则由式(9)引入增益后的表达式为:

$$H_{DN} = \frac{10^5 \cdot \tau_g \cdot E_0 \cdot \rho_A \cdot t_{\text{eff}} \cdot R_{DN} \cdot N_g}{4F^2 \cdot 683\eta} \cdot \exp\left(-\frac{3.91}{v} \cdot R\right). \quad (12)$$

根据式(12)对地面照度和 CCD 增益所对应的曝光时间进行计算,得到地面照度、CCD 增益

和曝光时间之间的参数对应表,如表 2。

表 2 不同照度下的 CCD 增益和曝光时间

Tab.2 CCD gain and exposure time at different illuminances

地面照度/lx	CCD 增益	曝光时间/s
8 000-10 000	5.98	1/50~1/60
10 000-15 000	6.32	1/60~1/70
15 000-20 000	4.91	1/70~1/80
20 000-30 000	4.21	1/80~1/90
30 000-50 000	3.16	1/90~1/130
50 000-70 000	2.74	1/130~1/175
70 000-100 000	2.63	1/175~1/250

调光系统根据目标景物的亮度通过控制快门速度和对应的 CCD 增益来控制曝光量,因此需要对快门电机的转速进行计算,快门电机转速和狭缝速度的转换关系为:

$$\omega = \frac{i_1 \cdot i_2 \cdot V}{R_m} \quad (13)$$

其中, R_m 为正时带轮的公称半径, i_1 为电机到离合器的传动比, i_2 为离合器到输入轴的传动比^[9]。

根据式(13),快门电机的转速表达式为:

$$\omega = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{10^5 \cdot \tau_g \cdot E_0 \cdot \rho_A \cdot Z \cdot R_{DN} N_g}{R_m \cdot 4F^2 \cdot 683\eta \cdot DN} \cdot \exp\left(-\frac{3.91}{v} \cdot R\right) \quad (14)$$

3 调光伺服系统的设计

3.1 调光控制系统原理

调光伺服系统的光信息采集由光敏电阻来完成,其安放位置如图 4 所示。

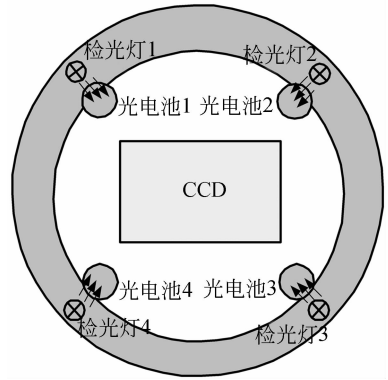


图 4 光敏元件安放位置

Fig.4 Arrangement of photosensitive resistance

调光伺服系统的控制原理如图 5 所示。调光控制器对四路光电池检测照度值取均值,利用式(14)计算出快门电机转速给定值如表 3 所示,与快门辑轴编码器检测出的实际速度相比,比较值经过校正放大后控制快门电机转动,快门电机带动传动机构,使狭缝运动速度达到理想值。

表 3 不同照度下的快门电机转速

Tab.3 Motor rates of different illuminances

电机转速 r/min	光照度/lx	电信号 V	曝光时间/s
1 167	8 000	2.6	1/50
1 400	10 000	3.3	1/60
1 633	15 000	4.9	1/70
1 867	20 000	6.5	1/80
2 100	30 000	9.8	1/90
3 033	50 000	16.3	1/130
4 083	70 000	22.8	1/175
5 833	100 000	32.5	1/250

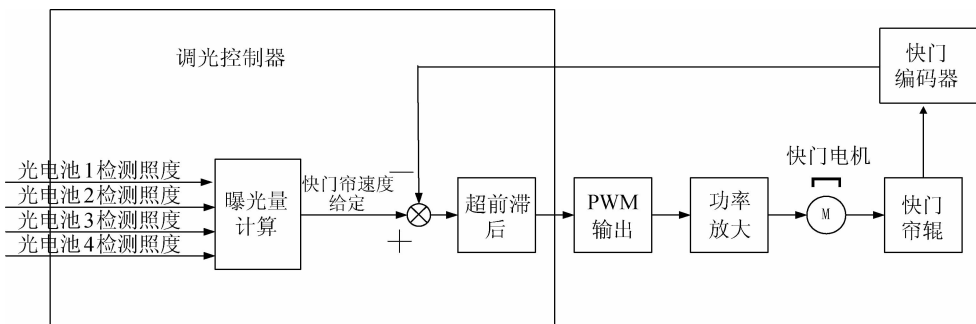


图 5 调光伺服系统控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of dimming servosystem

3.2 快门稳速精度测试

快门通过调节狭缝速度控制曝光量,因此,对快门电机的稳速精度要求较高。为提高稳速精度,同时能够达到一定的曝光精度,采用速度闭环控制的方法,由辊轴处的编码器得到反馈

信号,在 1 ms 的采样周期内,将编码器测得的前后 2 个角度值进行差分运算得到的速度值作为实际帘幕速度的反馈,和给定的帘幕速度进行比较,构成速度闭环。调光控制系统的模型如图 6 所示。

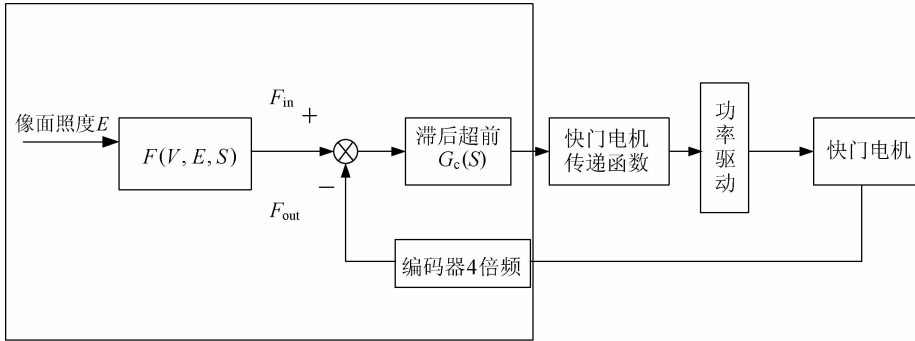


图 6 调光控制系统的模型

Fig. 6 Model of dimming control system

为测试系统的稳速精度,分别对系统输入 6 300、4 170 和 1 200 r/min 的阶跃输入信号,对应的曝光时间分别为 0.003 3、0.004 9 和 0.017 s,并在电机稳速运行情况下通过离合器加入快门负载

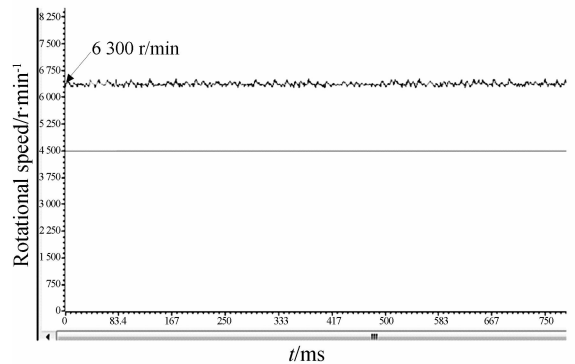
起的快门曝光量的误差为 5.8%。将以上误差合成,得到快门的曝光精度为 0.091。



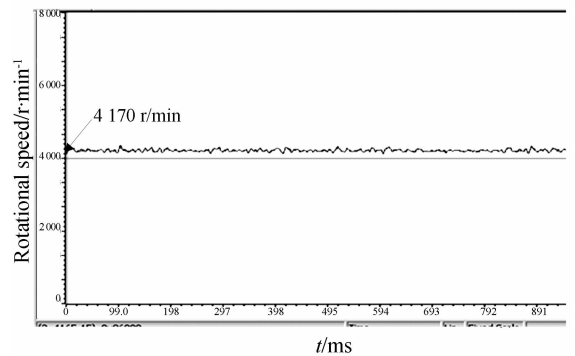
图 7 快门稳速精度测试

Fig. 7 Test of steady speed accuracy for shutter

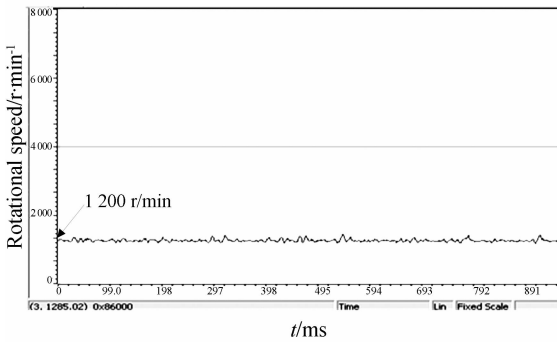
分别得到系统的阶跃响应曲线如图 8 所示,其中,横轴为采样时间,纵轴为电机转速。实验结果表明:在 6 300、4 170 和 1 200 r/min 的阶跃信号下,电机稳速精度分别为 3.3%、2.8%和 3%,并且系统在超出曝光时间范围的情况下仍能保证 3.3%的稳速精度。由于曝光时间与速度呈线性关系,根据曝光时间和曝光量的线性关系^[8-9],由电机稳速误差引起的快门曝光量的误差为 3.3%。快门结构传动同样使曝光精度下降,其计算较为复杂,在此不予以赘述,计算得到由结构传递误差引



(a) R=6 300 r/min系统的阶跃响应曲线图
(a) Step response curve for R=6 300 r/min



(b) R=4 170 r/min系统的稳态输出曲线
(b) Steady-state output for R=of 4 170 r/min



(c) $R=1\ 200\ \text{r/min}$ 系统的稳态输出曲线
(c) Steady-state output for $R=1\ 200\ \text{r/min}$

图 8 系统的速度响应曲线

Fig. 8 Response curve of system speed

为检验照相机调光系统功能,常温环境下在实验室对相机进行了照相试验,相机通过窗口对外景进行了实际拍摄,拍摄过程中调光系统输出的参数如表 4 所示。

表 4 调光系统的输出参数

Tab. 4 Output parameters of adjustment

输出参数	数值
光电池输出/V	5.6
CCD 增益	14.74
快门电机转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 736

参考文献:

- [1] 李威,李朝晖,颜昌翔,等. 胶片型航空相机的快门设计和研究 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(增刊): 9-14.
LI W, LI ZH H, YAN CH X, et al.. Design and study on the shutter in a film-space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (supp): 9-14. (in Chinese)
- [2] 关澈,王延杰. CCD 相机实时自动调光系统 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 358-365.
GUAN CH, WANG Y J. Real-time auto light control system of CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 358-365.
- [3] KEHTARNAVAZ N, OH H J, SHIDATE I, et al.. New approach to auto-white-balancing and auto-exposure for digital still cameras [J]. *SPIE*, 2002, 4669: 268-276.

由表 4 中数据计算得到 CCD 像面处的曝光量为 1 833 DN, 相比要求的曝光量 1 720 ND, 曝光精度为 6.6%, 在计算精度 9.1% 范围内。



图 9 外景实拍照片

Fig. 9 Real photograph of outdoor scene

实际拍摄得到的图像如图 9 所示,从所拍摄的图像中可以清晰辨别距离较远处的目标景物,幅面各处曝光量控制均匀,调光系统能够有效控制并校正曝光量,曝光精度满足要求。

4 结 论

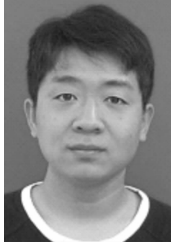
通过采用 CCD 增益和新型单帘式机械快门配合的方法对面阵 CCD 相机的自动曝光系统进行设计,通过试验验证了快门辊轴的转速精度,利用面阵 CCD 相机对实际景物进行了拍摄,试验验证快门调光系统的曝光精度为 0.066,并得到清晰图像,满足使用要求。

- [4] KUNO T, SUGIURA H. A new automatic exposure system for digital still cameras [J]. *IEEE Trans. On Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 192-199.
- [5] [苏] H. n. 扎卡兹诺夫. 航空摄影机的快门 [M]. 北京: 科学出版社, 1974. 38-50.
[Rus] H. n. *Shutter of Aerial Camera* [M]. Beijing: Science Press, 1974: 38-50. (in Chinese)
- [6] 王庆有. CCD 应用技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 8.
WANG Q Y. *Technology of CCD Application* [M]. Tianjin: Tianjin Press. (in Chinese)
- [7] 张雷,丁亚林,蒋贵德,等. 一种航摄快门帘缝宽度的优化 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 197-199.
ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. The optimization of breath of sew on shutter for aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 197-199.

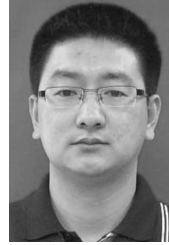
- [8] 张雷,丁亚林,蒋贵德. 帘幕式快门曝光精度数学建模及计算 [J]. 光学精密工程,2009,17(9):2098-2104.
ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. The accuracy analysis on exposure time of a curtain-type shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2098-2104.
- [9] 张洪文,冷雪,张继超,等. 单帘正交组合式焦平面

快门的设计与性能测试 [J]. 光学精密工程,2011,19(3):587-592.
ZHANG H W, LENG X, ZHANG J CH, *et al.*. Design of focal plane-curtain shutter and its performance test [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(3):587-592.

作者简介:



张雷(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2005年于吉林大学机械工程及自动化专业获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空遥感仪器光机结构优化设计及精度分析的研究。E-mail:zhangl_1982@163.com



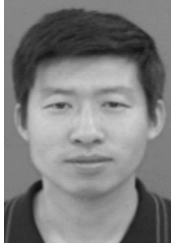
张继超(1981—),男,辽宁清原人,助理研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事航空遥感器结构设计。E-mail:zhangjichao@sohu.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学机械学院获得学士学位,1994年于东北大学获得硕士学位,主要从事航空遥感仪器光机结构总体技术及载机动态条件下稳定成像技术方面的研究。E-mail:dingyl1964@sohu.com.



刘波(1985—),男,江西抚州人,博士研究生,助理研究员,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。E-mail:liubo1985@gmail.com



张洪文(1974—),男,吉林长春人,研究员,1995年于吉林工业大学机械学院获得学士学位,2003年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,主要从事航空航天相机的研制工作。E-mail:zhw_sohu@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)