文章编号 2095-1531(2014)06-0996-07

全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调必要性分析及实现方法

张 健[1,2*],张玲花[3],刘立国[1],张景国[1],陈 伟[1],张 雷[1]
(1. 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中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要: 为保证全景式航空遥感器的成像质量,对其 TDI CCD 精密装调展开了研究。首先介绍了全景式航空遥感器及 TDI CCD 的工作原理;然后对 TDI CCD 时间延迟积分方向与摆扫像移方向夹角引起的 TDI CCD 调制传递函数的下降展开理论研究,计算结果表明全景式航空遥感器 TDI CCD 必须进行精密装调;最后给出了全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调的实现方法。装调结果表明,该方法可达到很高的装调精度,当级数为 200 级时,装调误差引起 TDI CCD 在乃奎斯特频率处的调制传递函数下降为 0.999 9,完全满足全景式航空遥感器的使用要求。

关 键 词: 全景式航空遥感器;TDI CCD;装调误差;调制传递函数;积分级数
中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A doi:10.3788/CO.20140706.0996

Necessity and implement method of precise assembling of TDI CCD in sweep aerial remote sensor

ZHANG Jian[1,2*], ZHANG Ling-hua[3], LIU Li-guo[1], ZHANG Jing-guo[1], CHEN Wei[1], ZHANG Lei[1]
(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* 100049, *China*;
3. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zjian*000@163.*com*

Abstract: In order to ensure the imaging quality of sweep aerial remote sensor, the precise assembling of TDI CCD is researched. Firstly, the working principle of sweep aerial remote sensor and TDI CCD is introduced. Secondly, degradation in the Modulation Transfer Function(MTF) of TDI CCD caused by the angle between TDI direction of TDI CCD and image motion in the direction of pendulum swing is discussed. And the calculat-

收稿日期:2014-09-11;修订日期:2014-11-13
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AA010102)

ed results demonstrate that precise assembling is indispensable to TDI CCD in sweep aerial remote sensor. Finally, the method of precise assembling of TDI CCD in sweep aerial remote sensor is provided. The assembling and adjusting results show that the assembled method of TDI CCD can give very high precision, and the MTF at Nyquist frequency of TDI CCD caused by the assembling error is 0.999 9, when the stages of TDI CCD are 200.

Key words: sweep aerial remote sensor; TDI CCD; assembling error; modulation transfer function; integration stage

1　引　言

航空遥感是获取地面信息的重要技术手段,广泛应用于资源普查、地形测绘和军事侦察等许多领域。航空遥感器按成像方式可以分为推扫式、画幅式和全景式(摆扫式)航空遥感器[1-2]。全景式航空遥感器垂直于飞行方向摆扫成像,探测器一般选用时间延迟积分电荷耦合元件(Time Delay and Integration Charge-Coupled Devices,TDI CCD)。TDI CCD 是一种特殊的线阵 CCD 器件,它利用时间延迟积分技术,通过 TDI CCD 的多级光敏元对运动的同一目标多次积分,可在低照度条件下获得高灵敏度、高分辨率的图像[3-4]。在全景式航空遥感器摆扫成像过程中,要求 TDI CCD 的光生电荷包在各级之间的转移速度与靶面上的像移速度相同(包括大小和方向),任何误匹配都将导致图像模糊[5-7]。

文献[8]给出了 TDI CCD 全景式航空遥感器摆扫像移的补偿方法,该方法实现摆扫像移正确补偿的前提是 TDI CCD 时间延迟积分方向与摆扫像移方向一致。文献[9]分析了光学拼接误差对 TDI CCD 相机的影响,给出了 TDI CCD 在焦平面上的光学拼接的精度要求。而焦平面组件在航空遥感器整机装调过程中难免产生装调误差,使 TDI CCD 的时间延迟积分方向与摆扫像移方向存在夹角,影响全景式航空遥感器成像质量。未见文献对全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调进行研究。本文对装调误差导致的 TDI CCD 调制传递函数(MTF)的下降进行了理论计算,对全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调的必要性进行了分析。最后给出了一种可行的全景式航空遥感器 TDI CCD 高精度装调方法。

2　全景式航空遥感器及 TDI CCD 工作原理

2.1　全景式航空遥感器工作原理

全景式航空遥感器通过镜筒摆扫对地面景物进行成像,地面景物通过扫描反射镜、镜头、调焦反射镜成像在 TDI CCD 上,如图1所示。全景式航空遥感器镜筒转轴与航向平行,摆扫方向与航向垂直,扫描反射镜、镜头、调焦反射镜和 TDI CCD 同时绕镜筒转轴旋转,从而使 TDI CCD 对地面景物扫描成像[10]。

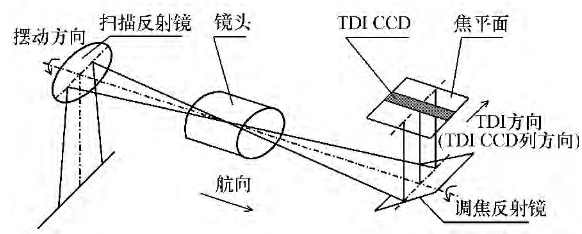


图1　全景式航空遥感器工作示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sweep aerial remote sensor

2.2　TDI CCD 工作原理

TDI CCD 是一种时间延迟积分 CCD 器件,它的结构像一个长方形面阵器件,从功能上讲,它是一个线阵器件。它的行数为延迟积分的级数(M),它的列数为 CCD 器件一行的像元数[11]。TDI CCD 工作原理如图2所示,TDI CCD 沿级数方向摆扫成像,假设在第一个积分周期 T 内,某列第一个像元对目标进行曝光积分,得到的光生电荷包不读出而是下移到该列第二个像元中;在第二个积分周期,恰好该列的第二个像元对该目

标曝光积分，得到的光生电荷包与上一个像元移来的电荷包相加，再转移到该列第三个像元……，直到第 M 个积分周期，该列第 M 个像元将其对目标曝光积分产生的电荷包和前面 $(M-1)$ 个像元转移过来的电荷包相加后，移入读出寄存器。由此可见，必须保证 TDI CCD 像元的每一级依次对同一物点成像，故要使 TDI CCD 时间延迟积分方向与靶面上的摆扫像移方向一致，且 TDI CCD 积分方向电荷转移速度也要与摆扫像移速度大小相同。

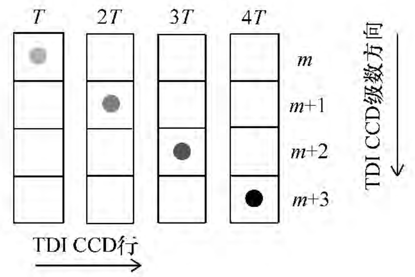


图2 TDI CCD 工作原理图

Fig. 2 Working principle of TDI CCD

在全景式航空遥感器装调过程中势必存在装调误差，导致 TDI CCD 时间延迟积分方向与摆扫像移方向存在夹角。下文将结合 TDI CCD 调制传递函数理论对全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调必要性展开分析。

3 全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调必要性分析

根据 2.2 节分析，假设装调完成后，TDI CCD 时间延迟积分方向与摆扫像移方向夹角为 θ，即装调误差，如图3所示。此时虽然 TDI CCD 电荷包转移速度 V_{TDI} 与靶面上像移速度 V_i 夹角为 θ，但二者大小相等[8]。将 V_i 分解为 V_{ix} 和 V_{iy}，其中 V_{iy} 与 V_{TDI} 方向相同，V_{ix} 与 TDI CCD 行方向平行。

对 TDI CCD 探测器，通过计算得到其调制传递函数为[12]：

$$MTF(f) = \frac{\sin(\pi f L)}{\pi f L}, \tag{1}$$

式中，f 为空间频率，L 为有效采样间隔。对于

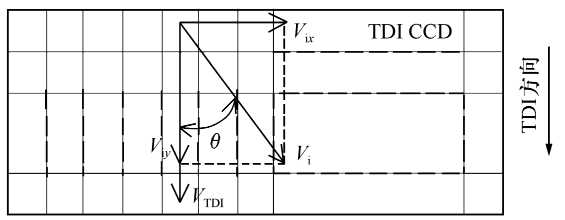


图3 装调误差示意图

Fig. 3 Sketch map of assemble error

TDI CCD，其像元尺寸为 $b\times b$，级数为 M，则 TDI CCD 的奈奎斯特频率为 $f_N=1/(2b)$。下面通过计算 TDI CCD 的调制传递函数分析装调误差 θ 对 TDI CCD 成像质量的影响。

由于 $V_{iy}=V_i\cos\theta<V_{TDI}$，故 TDI CCD 积分方向上电荷包转移速度与摆扫像移速度不匹配，速度差为 $\Delta V_1=V_i(1-\cos\theta)$，这将导致 TDI CCD 在时间延迟积分方向的调制传递函数产生退化。经过 M 级积分后，与同步条件下应处的位置相比，电荷包的位移为：

$$s_1=\frac{Mb\Delta V_1}{V_{iy}}=\frac{Mb(1-\cos\theta)}{\cos\theta}. \tag{2}$$

有效采样间隔即为 s_1，用 s_1 代替式(1)中的 L，得到由于 TDI CCD 积分方向上 V_{TDI} 与 V_i 不匹配引起的 MTF 退化为：

$$MTF_1(f)=\frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}\frac{f}{f_N}\frac{M(1-\cos\theta)}{\cos\theta}\right]}{\frac{\pi}{2}\frac{f}{f_N}\frac{M(1-\cos\theta)}{\cos\theta}}. \tag{3}$$

同理，装调误差 θ 也导致了 TDI CCD 行方向上 MTF 的下降。通过计算得，此时采样间隔为 $Mb\tan\theta$，代入式(1)，得到由 θ 引起 TDI CCD 行方向上的 MTF 退化为：

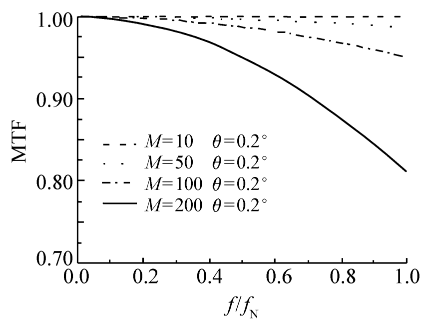
$$MTF_2(f)=\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{f}{f_N}M\tan\theta\right)}{\frac{\pi}{2}\frac{f}{f_N}M\tan\theta}, \tag{4}$$

因此，装调误差 θ 引起的 TDI CCD 探测器总的 MTF 为[13]：

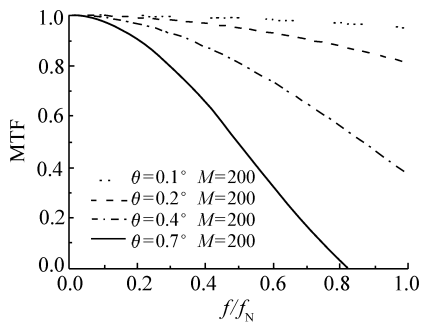
$$MTF(f)=MTF_1(f)\,MTF_2(f). \tag{5}$$

图4 给出了不同级数及装调误差 θ 情况下得到的 TDI CCD 的 MTF 曲线。由曲线可知，在角度

θ 一定的情况下，随着级数 M 增大，TDI CCD 的调制传递函数退化愈加严重；当级数 M 一定时，随着角度 θ 增大，TDI CCD 的调制传递函数退化越来越严重。当 TDI 级数 $M=200$ 级，装调误差 $\theta=0.7°$ 时，TDI CCD 的调制传递函数未达到奈奎斯特极限频率 f_N 就已经衰减到 0，导致全景式遥感器失效。因此，全景式航空遥感器 TDI CCD 必须进行精密装调，保证 TDI CCD 时间延迟积分方向与摆扫像移方向同向，否则将严重影响其成像质量。经计算，当 $M=200$，$\theta=0.03°$ 时，$MTF(f_N)=0.995$，因此，要求消像旋装调误差 $\theta \leqslant 0.03°$。



(a) 不同级数、相同装调误差下TDI CCD调制传递函数曲线
(a) Calculated modulation transfer function associated with different stages under the same assemble error



(b) 相同级数、不同装调误差下TDI CCD调制传递函数曲线
(b) Calculated modulation transfer function associated with different assemble errors under the same stage

图 4　不同级数及角度 θ 下 TDI CCD 传递函数曲线

Fig. 4　Calculated modulation transfer function associated with different stages and different assemble errors

4　全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调实现方法

为了方便 TDI CCD 装调，许多厂家的线阵 TDI CCD 具有面阵模式功能，可以利用 TDI CCD 的面阵模式对平行光管成像，实现全景式航空遥感器 TDI CCD 的精密装调，装调试验平台如图 5 所示。具体装调过程如下：将平行光管和全景式航空遥感器（安装在支架上）放置在隔振平台上，扫描反射镜处于 45° 位置，旋转全景式航空遥感器机身，使扫描反射镜对准平行光管，利用限位销钉锁住机身，在平行光管焦平面处安装十字线分划板，调整全景式航空遥感器镜头光轴大致与平行光管光轴垂直，在平行光管焦平面上安装星点板；将全景式航空遥感器的 TDI CCD 设置为面阵模式，利用数据采集卡实时采集 TDI CCD 的输出图像，并在计算机中实时显示；调节全景式航空遥感器支架上的 3 个调节地脚，使星点成像在全景式航空遥感器中心视场附近；在 45° 附近摆动扫描反射镜，星点像将在 TDI CCD 靶面上直线移

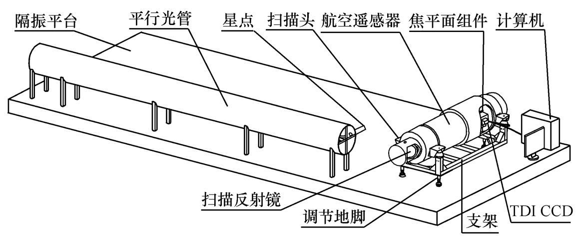
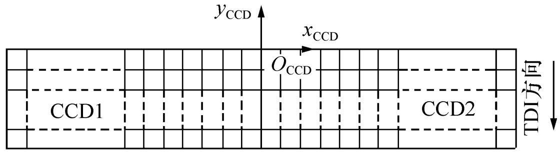


图 5　全景式航空遥感器 TDI CCD 精密装调示意图

Fig. 5　Schematic diagram of precise assembling of TDI CCD in sweep aerial remote sensing

(a) TDI CCD面阵模式下采集到的星点像
(a) Pinhole image acquired by TDI CCD at area model



(b) 以像素元为单位的TDI CCD靶面坐标系
(b) TDI CCD image plane coordinate system

图 6　星点像与 TDI CCD 靶面坐标系示意图

Fig. 6　Pinhole image and TDI CCD image plane coordinate system

动，采集扫描反射镜不同位置时TDI CCD输出的星点像，如图6(a)所示；在CCD靶面上以像元为单位建立坐标系$O_{CCD}-x_{CCD}y_{CCD}$，坐标原点位于两个TDI CCD拼接后靶面的最上端中心处，$O_{CCD}-x_{CCD}$为线阵CCD行方向，$O_{CCD}-y_{CCD}$为线阵CCD探测器TDI方向的反方向，如图6(b)所示，利用软件读取扫描反射镜不同位置时采集到的星点像中心像素坐标，观察星点像的纵坐标是否基本一致。如果此时各星点像的纵坐标相差较多，星点像在坐标系$O_{CCD}-x_{CCD}y_{CCD}$中运动轨迹为一条斜线，可以利用微调机构通过旋转扫描头和焦平面组件进行调整，直至星点像的纵坐标基本一致，然后对采集数据进行处理，给出最后结果。由于试验中采用的隔振平台隔振效果不理想，星点像在TDI CCD靶面上并非静止不动，无法将各星点像的纵坐标调整到完全相等。试验最终得到的不同扫描反射镜位置处星点像坐标值如表1所示。

表1 不同扫描反射镜位置处星点像坐标

Tab. 1 Coordinates for pinhole image at different scan reflector positions

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x_{CCD}	−7 498.6	−5 799	−4 469.7	−29 712	−1 487	11.7	−10.7	1 484.8	3 016.4	4 459.2	5 983.9	7 524
y_{CCD}	−10.8	−10.0	−10.5	−10.2	−10.6	−11.1	−11.1	−11.1	−11.4	−11.3	−11.2	−11.4

在坐标系$O_{CCD}-x_{CCD}y_{CCD}$中，利用最小二乘法拟合星点像运动方程为：

$$y_{CCD}=-10.89-0.0000794x_{CCD}, \tag{6}$$

如图7所示。由此可计算出装调误差θ：

$$\theta=A\tan(-0.0000794)=-16.4''=-0.0045°. \tag{7}$$

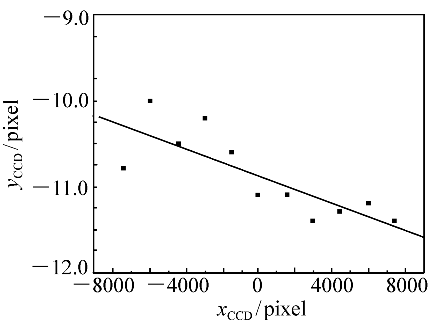


图7 最小二乘拟合曲线

Fig. 7 Curve fitting with the principle of least-squares

将$\theta=-0.0045°$，$M=200$代入式(5)得$MTF(f_N)=0.999\ 9$。由此可见，装调误差θ对TDI CCD调制传递函数的影响几乎可以忽略不计，故该方法可实现全景式航空遥感器TDI CCD高精度装调。

5 结 论

全景式航空遥感器采用TDI CCD摆扫成像，要求TDI CCD的电荷包在各级之间的转移速度与摆扫引起的像移速度相等(包括大小和方向)。在全景式航空遥感器TDI CCD装调过程中，由于装调误差的存在导致TDI CCD时间延迟积分方向与摆扫像移方向存在夹角θ。通过计算装调误差θ引起的TDI CCD调制传递函数的下降，提出TDI CCD必须进行高精度装调，从而保证全景式航空遥感器成像质量。最后给出了全景式航空遥感器TDI CCD精密装调的实现方法(针对具有面阵模式的TDI CCD探测器)。装调结果表明，该装调方法精度非常高，几乎对TDI CCD的调制传递函数没有影响，完全满足全景式航空遥感器的使用要求。

参考文献：

[1] 张树青，丁亚林，李友一，等. 应用数学坐标变换方法计算航空相机像面旋转[J]. 光学仪器，2007，29(1)：22-26. ZHANG S Q，DING Y L，LI Y Y，*et al*.. Computing aerial camera's image plane revolution by coordinate conversion [J].

Optical Instruments,2007,29(1):22-26.(in Chinese)

[2] 陈伟,丁亚林,惠守文,等.**推扫式航空遥感器像面调焦机构设计**[J].中国光学,2012,5(1):30-34. CHEN W,DING Y L,HUI SH W,*et al*.. Design of image plane focusing structure for push-scan aerial remote sensing instrument[J]. *Chinese Optics*,2012,5(1):30-34.(in Chinese)

[3] 王德江,匡海鹏,蔡希昌,等.TDI-CCD**全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法**[J].光学 精密工程,2008,16(2):2465-2472.
WANG D J,KUANG H P,CAI X C,*et al*.. Digital implementation of forward motion compensation in TDI CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(7):2465-2472.(in Chinese)

[4] 薛旭成,傅瑶,韩城山.TDI CCD**相机的卫星姿态稳定度确定**[J].中国光学,2013,6(5):767-772.
XUE X CH,FU Y,HANC SH. Confirmation of satellite attitude stabilization for TDI CCD camera[J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):767-772.(in Chinese)

[5] 杨秀彬,贺小军,张刘,等.**偏流角误差对**TDI CCD**相机成像的影响与仿真**[J].光电工程,2008,35(11):45-50.
YANG X B,HE X J,Z L,*et al*.. Effect and simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2008,35(11): 45-50.(in Chinese)

[6] TAO SH P,JIN G,ZHANG X Y,*et al*.. Wavelet power spectrum-based autofocusing algorithm for time delayed and integration charge coupled device space camera[J]. *Applied Optics*,2012,51(21):5216-5223.

[7] HORST SCHWARZER,ANKO BOERNER,KARL-HEINZ DEGEN,*et al*.. Dynamic PSF and MTF measurements on a 9k TDI CCD[J]. *SPIE*,2008,7106:71061F.

[8] 吴宏圣,潘凝,翟林培.TDI CCD**全景式航空相机的像移补偿误差分析**[J].光学 精密工程,2003,11(6):545-549.
WU H SH,PAN N,ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,11(6):545-549.(in Chinese)

[9] 肖占全,翟林培,丁亚林,等.**光学拼接误差对**TDI CCD**相机的影响**[J].半导体光电,2008,29(5):795-798.
XIAO ZH Q,ZHAI L P,DING Y L,*et al*.. Research of optical assembly errors effects on TDI-CCD camera[J]. *Semiconductor Optoelectronics*,29(5):795-798.(in Chinese)

[10] 田海英,惠守文,李友一,等.**用作图法判定航空相机**TDI CCD**积分方向**[J].光学 精密工程,2007,15(11):1784-1788.
TIAN H Y,HUI SH W,LI Y Y,*et al*. Estimation of TDI direction of CCD sensor in aerial camera by graphing method[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(11):1784-1788.(in Chinese)

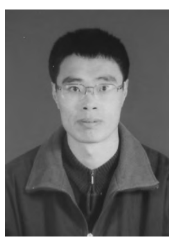
[11] 刘亚侠.TDI CCD**遥感相机标定技术的研究**[D].**北京:中国科学院研究生院**,2005:13-18.
LIU Y X. Research on the calibration technique of the TDI CCD remote sensing camera[D]. Beijing: Graduation School of Chinese Academy of Sciences,2005:13-18.(in Chinese)

[12] WONG H S,YAO Y L,SCHLIG E S. TDI charge-coupled devices: design and applications[J]. *IBM J. Research and Development*,1992,36(1):83-106.

[13] HOLST G C,LOMHEIM T S. *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*[M]. Washington: SPIE PRESS,2007:244.

作者简介:

张　健(1986—),男,山东济南人,博士研究生,助理研究员,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航空光学遥感器结构设计方面的研究。E-mail: zjian000@163.com



张景国(1972—),男,黑龙江双鸭山市人,副研究员,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事航空光学遥感器光机结构设计方面的研究。E-mail: hitzjg@126.com


张玲花(1984—),女,山西朔州人,助理研究员,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事超精密光学加工与检测方面的研究。E-mail: zhanglinghuahit@163.com


陈　伟(1984—),男,河南浙川人,助理研究员,主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。E-mail: chenw2001@126.com


刘立国(1978—),男,黑龙江七台河人,副研究员,2001年于北京理工大学获得学士学位,主要从事航空光学遥感器光机结构设计方面的研究。E-mail: 952892203@qq.com


张　雷(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,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,主要从事航空相机帘幕式快门小型化技术方面的研究。E-mail: zhangl_1982@163.com