

文章编号: 1005-5630(2015)05-0381-06

## 航空相机纵向像移补偿性能检测

李英杰, 李开端

(海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 像移补偿机构是航空相机的关键组件。通过建立航空相机纵向像移量、像移速度模型, 分析研究纵向像移补偿机构对像移补偿残差的影响特征, 提出了运用像移补偿残差做为纵向像移补偿机构故障检测的新方法。经过对实际图像像移残差的实验分析, 验证了该方法的有效性, 可以实现工作状态下对航空相机的便捷随检。

**关键词:** 航空相机; 像移补偿; 像移残差

**中图分类号:** V 556 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.002

### Measurement on longitudinal image motion compensation of aerial camera

LI Yingjie, LI Kaiduan

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** The image motion compensation mechanism was the key groupware of aerial camera. The models of the amount and the velocity about image motion were set up, and the effect of image motion compensation by longitudinal image motion compensation mechanism was researched. The measurement method of the longitudinal image motion compensation mechanism was presented which was based on the residue of image motion. The test results showed that the method was feasible, and the method was convenient to use for testing aerial camera.

**Keywords:** aerial camera; image motion compensation; residual error of image motion

### 引 言

航空相机在成像过程中, 会受到各种外部环境的影响, 如: 温度、气压、载机平台运动、气流扰动等, 这些因素严重影响相机动态分辨率的提高。特别是由于飞行运动、俯仰、横滚和偏流等姿态运动, 这种造成图像像点运动模糊的现象称为像移。为消除像移, 相机系统有各种像移补偿措施, 如旋转双光楔补偿、移动焦面补偿、摆动反光镜补偿、TDI-CCD 电子补偿、稳定平台等<sup>[1-3]</sup>。相机像移补偿机构的性能严重影响成像质量, 因此在设计、验收和使用的各个阶段对这类机构性能的检测尤为重要。目前的检测方法多应用在研制设计、验收阶段, 在实验室采用特定仪器或靶标进行测试。如王智儒等研究设计了航空相机像移补偿板的检测仪器<sup>[4]</sup>; 李岷等提出了一种动态靶标方案对机载光电稳定平台的静态、动态参数进行测试<sup>[5]</sup>。本文通过对成像图像中像移残差的分析, 提出利用像移残差估计做为相机纵向像移补偿机构性能检测的新方法。

收稿日期: 2014-12-22

作者简介: 李英杰(1972—), 男, 副教授, 主要从事航空光电成像技术、航空装备保障方面的研究。E-mail: lyj\_@126.com

# 1 航空相机纵向像移分析

## 1.1 相机像移模型

航空相机成像是将地面目标经中心投影到像面像点的过程,因此成像分析时存在地物坐标系、相机坐标系、像面坐标系的变换问题。采用直角坐标系下,通过研究将地物坐标系中的目标位置对应变换成像面坐标系中的像点坐标,可以建立相机成像模型。如图 1 所示,建立地物坐标系  $G(G_x, G_y, G_z)$ ,  $G_x$  轴指向平行于飞机飞行方向,  $G_y$  轴在地平面内与  $G_x$  垂直,  $G_z$  轴指向天顶; 建立相机坐标系  $C(C_x, C_y, C_z)$ , 相机坐标系是由地物坐标系沿  $G_z$  轴平移飞行高度  $H$  得到, 随着飞机姿态的变化, 相机的三轴姿态角分别为俯仰角  $\theta$ 、横滚角  $\varphi$ 、偏流角  $\psi$ ; 建立像面坐标系  $P(P_x, P_y, P_z)$ , 相机坐标系沿  $C_z$  轴平移相机焦距  $f$ , 各轴同时缩小  $f/H$  倍得到像面坐标系  $P$ 。

相机扫描成像时扫描角为  $\alpha$ , 主光轴目标点物距  $L = H/\cos\alpha$ , 机下点地面坐标为  $(m_1, m_2)$ , 则有:

$$m_1 = -H \tan\alpha \sin\psi \tag{1}$$

$$m_2 = -H \tan\alpha \cos\psi \tag{2}$$

假设相机初始三轴姿态角均为 0, 在曝光时间  $t$  内, 飞机飞行速度  $v$ , 三轴姿态角速度为俯仰角速度  $\theta'$ 、横滚角速度  $\varphi'$ 、偏流角速度  $\psi'$ 。根据相机中心投影原理, 地面目标点  $g(g_x, g_y)$  从地物坐标系  $G$  中位置中心投影到像面坐标系  $P$  的像点  $p(p_x, p_y)$ , 经过坐标系的转换, 得到像点在  $P_x$  轴上的坐标为<sup>[6-7]</sup>:

$$p_x = -f/L [\cos\theta't \cdot \cos\psi't \cdot (g_x + m_1 - vt) - (m_2 + g_y) \sin\psi't \cdot \cos\theta't - H \sin\theta't] \tag{3}$$

## 1.2 纵向像移量

若相机初始三轴姿态角不为 0, 扫描角为 0, 即垂直摄影  $L=H$ 。相机采用的 TDICCD 纵向放置, 边缘处像点条件:  $g_y/H = b/f, g_x/H = \tan\beta_{\max}$ , 其中  $b$  为像元尺寸、 $\beta_{\max}$  为相机纵向半视场角。在曝光时间内, 地面目标点对应的像点位置由初始时刻 0 的  $P_0$  点移动到  $t$  时刻的  $P_t$  点, 产生的像移量  $S_p = P_t - P_0$ , 在  $P_x$  轴的像移量称为纵向像移量  $S_{P_x}$ , 由式(3)可求得:

$$S_{P_x} = [\cos\theta_0 \cos\psi_0 - \cos(\theta_0 + \theta't) \cdot \cos(\psi_0 + \psi't)] \cdot f \cdot \tan\beta_{\max} + \cos(\theta_0 + \theta't) \cdot \cos(\psi_0 + \psi't) \cdot f \cdot t \cdot v/H + [\sin(\psi_0 + \psi't) \cdot \cos(\theta_0 + \theta't) - \sin\psi_0 \cdot \cos\theta_0] \cdot b + [\sin(\theta_0 + \theta't) - \sin\theta_0] \cdot f \tag{4}$$

根据式(4)可以看出纵向像移量由相机半视场角、速高比、像元尺寸、焦距四项分量构成, 若曝光时间  $t$  为 0.01 s, 焦距  $f$  为 450 mm, 像元尺寸  $b$  为 13  $\mu\text{m}$ , 半视场角为 6.6°, 在两种飞行条件下的纵向像移量见表 1。

表 1 纵向像移量

Tab. 1 Longitudinal image motion value

飞行条件 (其他条件为 0)	像移量			
	第一项	第二项	第三项	第四项
$\theta' = 5^\circ/\text{s}$	$2.70 \times 10^{-5} \text{ mm}$	0.603 mm	$6.807 \times 10^{-6} \text{ mm}$	0.393 mm
$\psi' = 3^\circ/\text{s}$	$2.07 \times 10^{-3} \text{ 像元}$	46.4 像元	$5.24 \times 10^{-4} \text{ 像元}$	30 像元
$v/H = 0.13 \text{ s}^{-1}$				
$\theta = 5^\circ, \theta' = 5^\circ/\text{s}$	$3.99 \times 10^{-3} \text{ mm}$	0.603 mm	$6.78 \times 10^{-6} \text{ mm}$	0.391 mm
$\psi' = 3^\circ/\text{s}$	0.31 像元	46.4 像元	$5.2 \times 10^{-4} \text{ 像元}$	30 像元
$v/H = 0.13 \text{ s}^{-1}$				

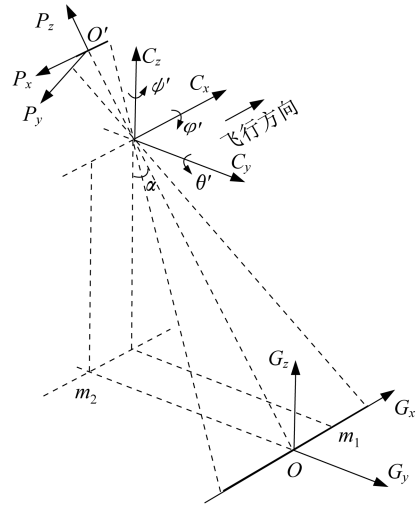


图 1 成像坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system of imaging

分析表1中数据,表明速高比、俯仰角速度、偏流角速度严重影响纵向像移,其中式(4)中第一项( $g_x$ )、第三项( $g_y$ )对像移量影响很小,可以忽略,因此为研究的方便可以只考虑主光轴像点的情况。

### 1.3 行间纵向像移量差

若考虑相机摆扫成像过程,初始扫描角为 $\alpha_0$ ,每帧图像对应的扫描角 $\Delta\alpha = nb/f$ ,其中 $n$ 为每帧图像行数、 $b$ 为TDI-CCD像元尺寸、 $f$ 为相机焦距,此时最大行间纵向像移量差为:

$$\begin{aligned} \Delta S_{P_x} = & f \cdot v/H \cdot t \cdot [\cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) - \cos\alpha_0] + \\ & f \cdot \theta' \cdot t \cdot [\cos(\alpha_0 + \Delta\alpha) - \cos\alpha_0] + \\ & f \cdot \psi' \cdot t \cdot [\sin(\alpha_0 + \Delta\alpha) - \sin\alpha_0] \end{aligned} \quad (5)$$

当相机每帧图像行数 $n=3\ 072$ 时, $\Delta\alpha$ 约为 $5.09^\circ$ ,图2给出初始扫描角为 $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 时,行间最大像移量随着速高比、俯仰角速度、偏流角速度的变化曲线。由图中曲线可以得出在初始扫描角和姿态角速度较小时,行间纵向像移量差值小于一个像元尺寸,因此可以在一定范围内认为每帧图像中纵向像移量是相同的。

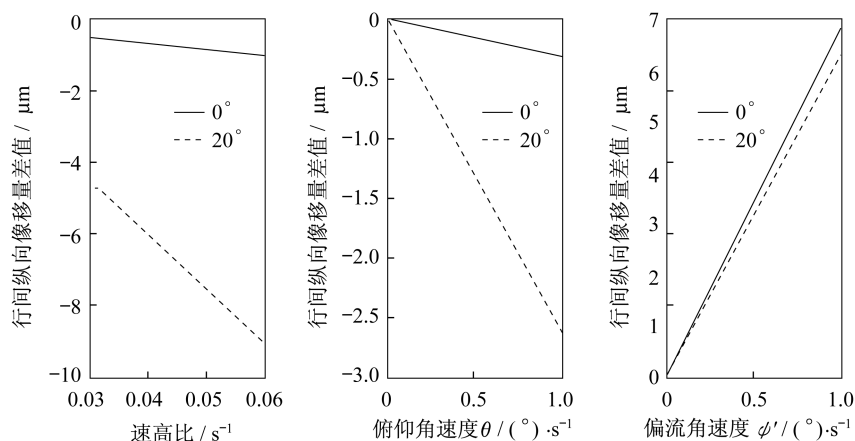


图2 行间纵向像移量差值曲线

Fig. 2 Curves of longitudinal image motion amount between lines

### 1.4 纵向像移速度

根据像点纵向位置坐标公式(3),可以得到纵向像移速度:

$$\begin{aligned} v_{P_x} = & \partial p_x / \partial t = f/L [(\theta' \sin\theta' t \cdot \cos\psi' t + \psi' \cos\theta' t \cdot \sin\psi' t) \cdot \\ & (g_x + m_1 - vt) + v \cdot \cos\theta' t \cdot \cos\psi' t + (g_y + m_2) \cdot \\ & (\psi' \cos\psi' t \cdot \cos\theta' t - \theta' \sin\psi' t \cdot \sin\theta' t) + H\theta' \cos\theta' t] \end{aligned} \quad (6)$$

其中俯仰角速度 $\theta'$ 、横滚角速度 $\varphi'$ 、偏流角速度 $\psi'$ 在实际飞行条件下不大于 $5^\circ/s$ ,在小角度条件下,三轴姿态角速度对纵向像移速度的影响可以近似看做线性关系。在考虑小角度、主光轴物点时纵向像移速度近似为:

$$v_{P_x} = f \cdot v/H \cdot \cos\alpha + f \cdot \theta' \cdot \cos\alpha + f \cdot \psi' \cdot \sin\alpha \quad (7)$$

## 2 纵向像移补偿原理

### 2.1 补偿原理

相机光学系统由扫描反射镜、镜头、TDI-CCD像面等组成。TDI-CCD纵向放置,即列向平行于相机坐标系 $C_x$ 轴(相机纵轴),光学系统绕 $C_x$ 轴摆扫成像。纵向像移补偿采用反射镜摆动补偿的方式,为消除式(7)的纵向像移速度 $v_{P_x}$ ,使反射镜摆动角速度 $\theta'_m$ 产生的像移速度 $v_{\text{补}} = -v_{P_x}$ 。根据反射镜转动角度为反射光线转角一半的光学特点, $v_{\text{补}} = f\theta'_m/2$ ,则相机补偿机构反射镜补偿角速度 $\theta'_m$ 应为:

$$\theta'_m = (v/H \cdot \cos\alpha + \theta' \cdot \cos\alpha + \psi' \cdot \sin\alpha)/2 \tag{8}$$

### 2.2 补偿控制机构

航空相机纵向像移补偿机构由补偿电机、PWM 驱动电路、PID 控制器、余弦电位计、反射镜角速度陀螺、相机姿态角速度陀螺、主控计算机等组成。反射镜摆动补偿运动由补偿电机 M 驱动，补偿电机的控制构成速度负反馈闭环控制，控制框图如图 3 所示。反射镜补偿角速度检测元件为安装在反射镜上的角速度陀螺，其输入轴与反射镜转轴平行，形成反射镜补偿角速度负反馈信号。主控计算机根据载机平台飞行状态为余弦电位计提供与  $v/H$  成正比的输入电压，余弦电位计电刷受到相机扫描运动的控制，这样其输出电压与  $(v/H) \cdot \cos\alpha$  成正比例。载机姿态参数中俯仰角速度  $\theta'$ 、偏流角速度  $\psi'$  的测量由姿态角速度陀螺完成。陀螺安装在相机机体上，陀螺输入轴与相机横轴  $C_y$  平行，其输出电压代表的角速度信号  $\beta'$  为俯仰角速度、偏流角速度随相机扫描角  $\alpha$  的合成量，即：

$$\beta' = \theta' \cdot \cos\alpha + \psi' \cdot \sin\alpha \tag{9}$$

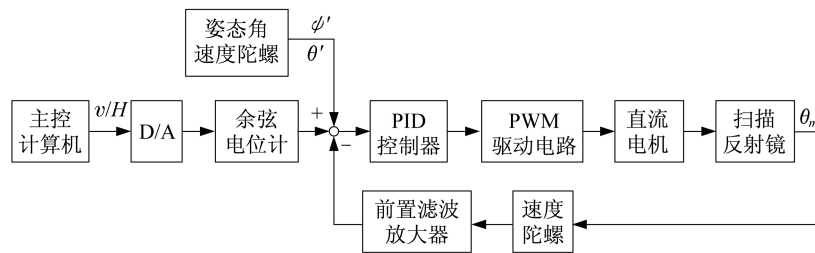


图 3 纵向像移补偿控制框图

Fig. 3 Control diagram of longitudinal image motion compensation

### 3 纵向像移补偿机构性能检测分析

由纵向像移速度公式(7)可以看出，像移速度由三项叠加组成，第一项为速高比影响，所占比重较大，第二、三项分别为俯仰角速度、偏流角速度引起的纵向像移，各项像移速度的方向分别与飞行方向、角速度方向相同。表 2 给出了几种飞行状态下的像移量。

表 2 各项像移分量

Tab. 2 Each image motion value

飞行条件	$\alpha=0^\circ$ 像移量/ $\mu\text{m}$		$\alpha=30^\circ$ 像移量/ $\mu\text{m}$	
	$v/H$ 项	$\theta'/\psi'$ 项	$v/H$ 项	$\theta'/\psi'$ 项
$\theta'=0(^{\circ})/s, \theta=4.3^\circ;$ $\psi'=0(^{\circ})/s, \psi=1.5^\circ;$ $\varphi'=0.2(^{\circ})/s, \varphi=0.6^\circ;$ $v=913 \text{ km/h}, H=7434 \text{ m};$	153.5	0/0	132.9	0/0
$\theta'=-0.1(^{\circ})/s, \theta=5.7^\circ;$ $\psi'=0(^{\circ})/s, \psi=3.4^\circ;$ $\varphi'=0(^{\circ})/s, \varphi=0.6^\circ;$ $v=910 \text{ km/h}, H=7441 \text{ m};$	152.9	7.9/0	132.4	6.8/0
$\theta'=-0.1(^{\circ})/s, \theta=5.8^\circ;$ $\psi'=0(^{\circ})/s, \psi=0.8^\circ;$ $\varphi'=0(^{\circ})/s, \varphi=0.1^\circ;$ $v=889 \text{ km/h}, H=7495 \text{ m};$	148.3	-7.9/0	128.4	-6.8/0
$\theta'=-0.2(^{\circ})/s, \theta=6^\circ;$ $\psi'=-0.1(^{\circ})/s, \psi=0.1^\circ;$ $\varphi'=-0.1(^{\circ})/s, \varphi=0.3^\circ;$ $v=908 \text{ km/h}, H=7468 \text{ m};$	152.0	-15.7/0	131.6	-13.6/-3.9
$\theta'=-1(^{\circ})/s, \theta=7.2^\circ;$ $\psi'=-1.2(^{\circ})/s, \psi=-0.3^\circ;$ $\varphi'=-1.4(^{\circ})/s, \varphi=-0.4^\circ;$ $v=871 \text{ km/h}, H=7516 \text{ m};$	144.9	-78.5/0	125.5	-68.0/-47.1

相机纵向像移补偿机构的性能要求像移补偿残差  $\Delta S$  应满足不大于  $1/3$  像元的要求。像移残差过大将造成成像质量下降。表 2 中的数据给出了不同飞行状态下的像移量情况，综合分析表 2 中数据，可以看出像移补偿残差能准确反映反射镜像移补偿机构的工作情况。下面从反馈通道、姿态角速度陀螺、余弦电位计、速高比 DA 转换、前向控制通道 5 种情况进行分析。

#### (1) 反馈通道

当补偿电机负反馈通道出现故障，如反射镜速度陀螺故障，引起控制系统

的负反馈信号缺失,造成较大的过度补偿,使得剩余像移量较大,且像移方向与原有像移方向相反,一般情况下与飞行方向相反。同时由于受到扰动的影响,补偿的稳定性很差,造成多帧图像对比分析时像移残差的一致性很差。因此根据此类特点,可以判定速度反馈通道故障。

#### (2) 姿态角速度陀螺

姿态角速度陀螺是感测载机平台的俯仰角速度、偏流角速度以及扫描角速度数据,消除俯仰角速度、偏流角速度引起的纵向像移。对不同扫描角的多帧图像对比,一般随着扫描角增加纵向像移量减小。但当载机平台的偏流角速度  $\psi'$  较大时,根据表 2 第 5 行数据分析可知,姿态角速度引起的纵向像移量随着扫描角增加而增加。因此当缺少姿态角速度陀螺信号时,像移残差大小取决于  $\theta'$ 、 $\psi'$  造成的像移量,当偏流角速度  $\psi'$  较大时,具有纵向像移量随着扫描角增大的特点。

#### (3) 余弦电位计

相机摆扫成像时,余弦电位计随动旋转提供  $(v/H) \cdot \cos\alpha$  的补偿信号。当余弦电位计故障时,会出现给定的速高比补偿数据固定不变的问题,表现为不同扫描角下的图像像移残差不同。因此通过分析同次照相的不同帧图像,如果出现纵向像移残差不同的现象,可以判定余弦电位计故障。另外根据像移残差数值大小还可进一步分析,若残差过大且接近  $v/H$  引起的纵向像移量,这是由于电位计上端引入  $v/H$  的电压信号断路引起;若扫描角为  $0^\circ$  时残差很小,而大扫描角的帧图像像移残差略大,是由于电位计下端出现断路引起。

#### (4) $v/H$ 信号 DA 转换

相机反射镜补偿控制器输出  $v/H$  数字信号,经 DA 转换后做为余弦电位计供电电压,从而产生包含扫描角信息的  $v/H$  补偿控制信号。当 DA 转换模块故障时,使得反射镜补偿控制不能随飞行速度、高度的变化准确补偿,反映在成像图像中,会出现较大的图像纵向补偿残差,且残差值不随  $v/H$  条件改变而改变。

#### (5) 前向控制通道

反射镜补偿控制系统的前向控制通道包括直流电机、PWM 功率放大环节、以及超前-滞后校正控制环节等组成,与补偿速度给定环节( $v/H$ 、 $\theta'$ 、 $\psi'$  信号)以及反馈通道一起构成纵向像移补偿的速度闭环控制系统。如果前向控制通道性能出现问题,使得反射镜补偿角速度不能准确反映补偿速度的给定值,出现图像的像移残差超标。因此,当载机平台在不同  $v/H$ 、俯仰角速度  $\theta'$  及偏流角速度  $\psi'$  时,都会出现较大的像移残差问题,可以作为前向控制通道性能故障的判断依据。

## 4 实验分析

当纵向像移补偿机构不正常时,航空成像时的像移补偿残差会造成图像运动模糊,运用图像运动模糊估计技术可以检测到像移残差的大小,从而

实现对相机补偿机构性能参数、故障点的确定。图 4 中(a)、(b)、(c)的三帧图像为某次航空摄影中同次摆扫成像所得,对应的扫描角分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $35^\circ$ ,通过相机工作条件数据可以理论分析出三帧图像的理论纵向像移量(见表 3)。对图 4 中三帧图像在频域内进行 Radon 变换<sup>[8-9]</sup>,求得沿运动模糊方向上的 Radon 变换曲线,分别为图 4 中的(d)、(e)、(f)所示,可以计算出三帧图像的像移残差分别为

74.1  $\mu\text{m}$ 、97.5  $\mu\text{m}$ 、118.3  $\mu\text{m}$ 。检测值与像移量理论值的  $\theta'$ 、 $\psi'$  合计项相近,且随扫描角增加而增加,因此可以判断相机的纵向像移补偿机构中姿态速度陀螺出现故障。

表 3 像移量

Tab. 3 Image motion value

扫描角 $\alpha/(\circ)$	理论像移量/ $\mu\text{m}$				像移残差检测 值/ $\mu\text{m}$
	$v/H$ 项	$\theta'$ 项	$\psi'$ 项	$\theta'$ 、 $\psi'$ 合计项	
0	95.4	67.0	0	67.0	74.2
20	89.7	62.8	27.5	90.3	97.4
35	78.2	54.8	46.4	101.2	117.3

备注: $\theta' = -1.0(\circ)/\text{s}$ ,  $\theta = 4.5^\circ$ ,  $\psi' = 1.2(\circ)/\text{s}$ ,  $\psi = 1.4^\circ$ ,  $f = 600 \text{ mm}$ ,  
 $\psi' = 1.4(\circ)/\text{s}$ ,  $\varphi = 0.6^\circ$ ,  $v = 896 \text{ km/h}$ ,  $H = 7490 \text{ m}$ ,  $t = 0.0064 \text{ s}$ 。

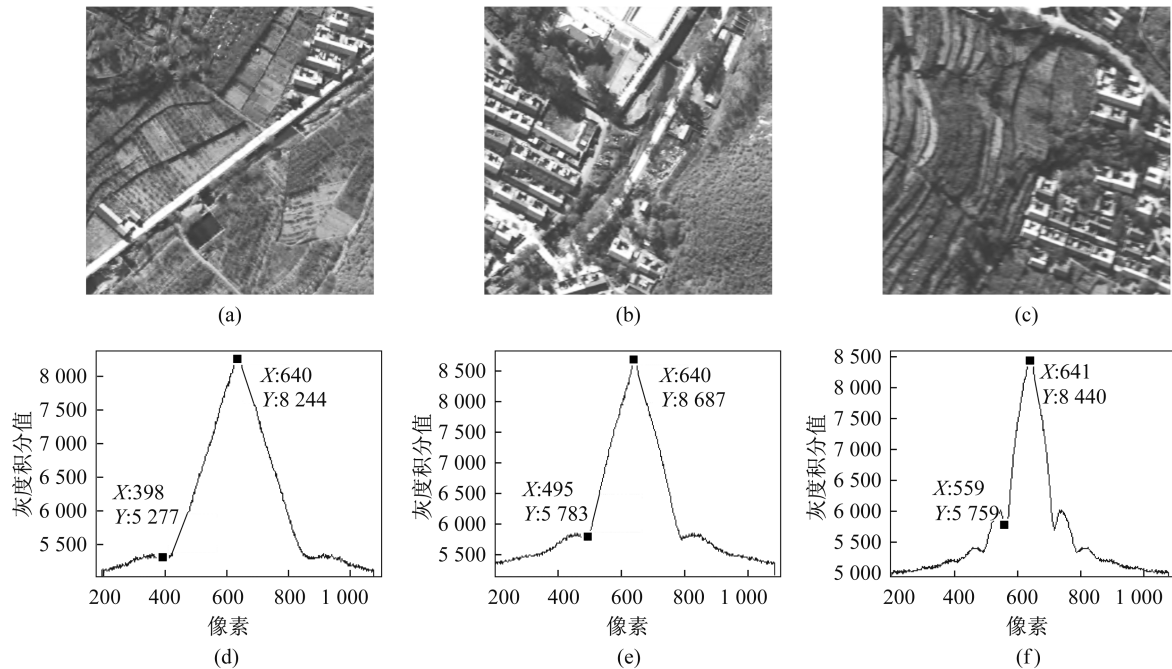


图 4 航空图像及其 Radon 变换曲线

Fig. 4 Aerial images and Radon transformation curves

## 5 结 语

像移是影响航空相机成像的重要因素,像移补偿机构是航空相机工作的关键组件,在设备使用中是定期检修的重要部分。纵向像移补偿机构各组成部件的工作性能影响了补偿精度,最终成像图像会产生不同的像移补偿残差。本文提出了利用图像补偿残差检测纵向像移补偿机构性能的新方法,避免了常规检测时对检测仪器的依赖和设备拆解等繁琐操作,实现了在工作状态下的随检,具有好的推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] DOYLE K B, CERRATI V J, FORMAN S E, et al. Optimal Structural design of the airborne infrared imager[J]. SPIE, 1995, 2542: 11-22.
- [2] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation[J]. SPIE, 1993, 2023: 65-79.
- [3] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 推扫式航空遥感器像移补偿精度的分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 453-457.
- [4] 王智儒, 杨成禹, 安志勇, 等. 航空相机补偿板的检测[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2010, 33(4): 20-22.
- [5] 李岷, 马军, 周兴义, 等. 机载光电稳定平台检测技术的研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 847-852.
- [6] 刘立国. 姿态变化对推扫式相机成像质量影响分析与补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012: 22-28.
- [7] 吴宏圣. TDICCD 全景航空相机像移补偿研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2003: 31-61.
- [8] MOGHADDAM M E, JAMZAD M. Finding point spread function of motion blur using radon transform and modeling the motion length[C]//Proceedings of the Fourth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Rome: IEEE, 2004: 314-317.
- [9] TANAKA M, YONEJI K, OKUTOMI M. Motion blur parameter identification from a linearly blurred image[C]//International Conference on Consumer Electronics Digest of Technical Papers. Las Vegas: IEEE, 2007: 1-2.

(编辑:张 磊)