

文章编号: 1003-501X(2010)01-0043-06

陀螺关键参数的标定及对航空相机 伺服控制系统的影响

王德江^{1,2}, 张 涛¹, 匡海鹏¹, 徐正平^{1,2}, 周 刚¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以某航空相机为试验载体, 以工程中常用的两种陀螺为比较试验对象, 本文完成了陀螺三个关键参数: 输出噪声、分辨率、相位响应的标定。根据数据手册两个陀螺的噪声功率比为 784: 1, 采用一种适合于工程应用的陀螺噪声功率测试方法, 由于系统噪声的影响实测功率比为 74: 1; 其次给出了陀螺分辨率与模数转换器之间的对应关系; 再次针对陀螺数据手册中没有相位响应数据这一事实, 设计了一个简便新颖的测试平台, 完成了陀螺 0~16 Hz 频带内的相位标定, 标定误差小于 5%, 最后结合以上试验数据, 深入分析了陀螺三个参数对伺服控制系统的影响。实践表明陀螺关键参数在具体设备中的准确标定有助于提高系统的整体精度与增强系统的稳定性。

关键词: 陀螺; 输出噪声; 分辨率; 相位响应; 伺服控制

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.01.08

Calibration of Gyro's Key Parameters and Their Effect on Aerial Camera's Servo Control System

WANG De-jiang^{1,2}, ZHANG Tao¹, KUANG Hai-peng¹, XU Zheng-ping^{1,2}, ZHOU Gang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Gyro's three key parameters, output noise, resolution and phase response are calibrated in an aerial camera by using two types of devices which are commonly used in engineering. First, according to datasheet, two gyros' noise power ratio is 784:1. By adopting a new scheme suiting for practical application, calibrated noise power ratio is 74:1 owing to system noise. Second, relationship between gyro's resolution and analog-to-digital converter is presented. Thirdly, since there is seldom discussion about phase response in gyro datasheet, a flexible and novel experiment platform is designed, and then phases response in 0~16Hz is calibrated with error less than 5%. Finally, effects of gyro parameters on servo control system are thoroughly analyzed based on above results. Experiments indicate that the gyro parameters calibrated precisely in actual equipment improves system performance and stabilization greatly.

Key words: gyro; output noise; resolution; phase response; servo control

0 引 言

陀螺作为惯性空间的角速度测量元件, 广泛应用于武器制导、平台稳定等军事民用设备中^[1-2], 高精度的陀螺对于提高武器制导与平台稳定精度具有至关重要的作用。通常由总体单位提出设备的制导精度、稳定精度等要求, 然后伺服分系统根据具体的指标选择满足要求的反馈元件, 从而开始控制系统的设计。

输出噪声、分辨率是陀螺较关键的两个参数, 一般的陀螺数据手册中, 对这两个参数都有明确的说明,

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(ZJ99130B)

作者简介: 王德江(1981-), 男(汉族), 黑龙江双鸭山人。博士研究生, 主要研究作为航空相机设计。E-mail: wangdj04@live.cn.

但在实际应用中,由于恶劣的工作环境以及模数转换器转换精度等限制因素,陀螺的输出噪声与分辨力都发生了变化,如何在实际工作环境中较为准确的得出陀螺噪声与分辨力信息,对伺服控制系统的高精度设计具有重要的意义;另一方面大部分陀螺数据手册中均没有给出陀螺的相位响应信息,而该参数对于控制系统的稳定性设计具有非常重要的影响。针对以上问题,以 QRS14 与 ADIS16251 陀螺为试验对象,以某光电设备为试验载体,本文首先叙述了陀螺在航空相机中的典型应用,然后完成了陀螺输出噪声、分辨力、相位响应在实际系统中的标定,最后分析了三个指标对伺服控制系统的控制精度、稳定程度之间的影响。

1 陀螺在伺服控制系统中的典型应用

与测速机,编码器等速度反馈元件不同,陀螺即能够感知被驱动结构与支撑结构之间的角速度,也能够感知被驱动结构与惯性空间之间的角速度,因此在航天、航空光电设备中有着特殊的作用。

航空相机的光学系统主要包括透射式结构,反射式结构^[3-4],为了使相机整体结构更加紧凑,通常由一个反射镜将光路折转 90°,把目标景物射入照相物镜。一方面为了补偿飞机飞行引起的前向像移,反射镜需按照某一速度相对于相机转动;另一方面为了补偿飞机相对于惯性空间俯仰运动引起的俯仰像移,需要保持反射镜相对惯性空间静止。由于陀螺既能像测速机一样反馈反射镜相对于航空相机的角速度,从而驱使伺服机构补偿飞机飞行引起的前向像移;又能够感知飞机相对于惯性空间的俯仰运动,驱使伺服机构补偿俯仰方向的像移,因此在 KA112, KS146^[5-6]等国外航空相机都得到了应用。

2 陀螺参数的标定

伺服系统中反馈环路中包围的各种放大、执行等元件的误差与环境条件变化而引起的扰动,一般都会得到有效抑制,而测量元件,如陀螺、电位计的误差对系统精度的影响是直接的,因为反馈控制系统利用测量元件与给定输入之间的差值,经放大校正后驱使电机工作,所以测量元件的误差就是系统误差的一部分。引起测量元件误差的因素很多,陀螺噪声与分辨力精度是两个比较重要的原因,本节首先比较测量了 QRS14 与 ADIS16251 的输出噪声,然后分析了在数字伺服系统中 ADC(Analog Digital Converter)量化精度与陀螺分辨力之间的关系。

相位延迟对伺服系统的稳定性设计具有重要的影响,但多数陀螺数据手册均没有给出这一参数,采用一种简便、新颖的测试平台,本节最后给出了 0~16 Hz 内的陀螺相位响应。

2.1 陀螺噪声的测试

陀螺的输出噪声是以功率谱密度形式表示的,如 QRS14 的输出噪声功率谱为 $0.002(^{\circ}/(s/\sqrt{\text{Hz}}))$, ADIS16251 的输出噪声功率谱为 $0.056(^{\circ}/(s/\sqrt{\text{Hz}}))$ 。该参数对于陀螺的性能具有重要影响,如某伺服分系统,采用同一套校正参数,使用 QRS14 作为速度反馈元件,系统刚度很好;而采用 ADIS16251 作为速度反馈元件,系统的刚度较差,且发出嗡嗡的声音。

陀螺数据手册中给出的噪声功率谱密度是陀螺生产厂商在电源噪声、信号互扰、测量设备引起的误差非常小的情况下标定的,目的是给出陀螺输出噪声的最佳性能。然而在实际光电设备中,电源噪声、信号互扰、模拟信号传输过程中带来的干扰不能忽略,有时甚至远大于陀螺本身的噪声,因此在工程应用中需要测量陀螺在实际系统中的噪声。

连续信号时域中的平均功率与频域中的功率谱密度关系如式(1)所示^[7],其中 $S_x(\omega)$ 为功率谱密度。

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega \quad (1)$$

设待测信号在测量频率范围内功率谱密度为常数,则平均功率谱密度如式(2)所示, ω_c 为信号平均功率分布的有效频带。

$$\overline{S_x(\omega)} = \frac{\pi}{T\omega_c} \times \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T x^2(t) dt \quad (2)$$

陀螺内部结构对用户来说类似于黑匣子,因此 ω_c 的选择可能不适当,导致推算的陀螺噪声功率谱密度

不能真实反映陀螺的噪声水平，但噪声功率不受频带选择的限制，可以作为工程应用中评价陀螺输出噪声性能的指标。下面为本次试验的测试环境：

1) 试验载体：某航空相机；2) 供电电源：设备内部电源供电；3) 电磁环境：实际工作电磁环境；4) 温度：零摄氏度；5) 采样频率：300 Hz；6) 采样时间：5 s；7) ADC 量化位数：14 bit；8) 采集显示系统：CCS3.3。

表 1、表 2 为对 QRS14、ADIS16251 采集到的 5 个样本的所做的数理统计，每个样本的采样时间为 5 s。其中 QRS14 每 LSB 代表 0.012 2 (°/s)，ADIS16251 每 LSB 代表 0.018 (°/s)。

表 1 QRS14 样本统计

Table 1 Sample statistics of QRS14

Sample	Mean /LSB	Mean square deviation /LSB	Minimum /LSB	Maximum /LSB
1	11.232 67	4.965 65	1	20
2	11.483 33	4.772 52	1	21
3	11.565 33	4.832 66	1	21
4	11.023 33	4.940 89	1	20
5	11.168 00	4.974 50	1	20

表 2 ADIS16251 陀螺样本统计

Table 2 Sample statistics of ADIS16251

Sample	Mean /LSB	Mean square deviation /LSB	Minimum /LSB	Maximum /LSB
1	115.509 33	29.193 32	26	204
2	112.595 33	28.641 92	22	213
3	115.549 33	27.701 83	25	196
4	114.797 33	27.954 01	30	228
5	112.510 67	27.239 03	25	192

在离散域陀螺噪声功率如式(3)所示， n 为一次试验样本数量， \bar{x} 为样本均值， S 为样本均方差。

$$P = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = S^2$$

(3)

QRS14、ADIS16251 比例因子 L 分别为 81 (LSB/(°/s))、55 (LSB/(°/s))。则连续域内噪声实际功率计算式：

$$P_1 = (S / L)^2$$

(4)

将陀螺的 5 个样本均值与均方值取平均，QRS14、ADIS16251 噪声功率分别为： $0.003\ 5(^\circ/\text{s})^2$ 、 $0.259\ (^\circ/\text{s})^2$ ，ADIS16251 噪声功率为 QRS14 噪声功率的 74 倍，而根据数据手册中给出的输出噪声参数，在相同频带内 ADIS16251 噪声功率为 QRS14 陀螺的 784 倍，这是由于在实际工作环境中，环境噪声叠加到陀螺信号中，导致噪声功率的改变。

2.2 陀螺分辨力的分析

陀螺分辨力是陀螺能够敏感的最小角速度，如 QRS14 分辨力为 0.004 (°/s)，ADIS16251 的分辨力为 0.018 (°/s)。无论是光纤陀螺，还是压电、微机械陀螺，原始的角速度感知量大多为模拟值，在进行数字校正前需要对陀螺输出值进行模数转换，有的陀螺将 ADC 制作在陀螺内部，另一些需要外部 ADC 配合完成模数转换。这里陀螺分辨力定义为 1 LSB 代表的角速度值，与 ADC 的量化精度有直接关系。例如 QRS14 陀螺的比例因子为 100 (mV/(°/s))，分辨力为 0.004 (°/s)，则载体在 0.004 (°/s)转速下，陀螺输出为 0.4 mV，ADC 的分辨力要小于或等于 0.4 mV/LSB 才不至于在模数转换过程中降低陀螺的灵敏度。另一方面 QRS14 陀螺有效线性输出范围为±5 V，最大输出范围为±15 V，一般情况下只有 ADC 的模拟量化范围为±10 V 时，耐压范围才大于 15 V，因此工程中一般选择 ADC 的量化范围为±10 V。表 3 为在量化范围为±10 V 的情况下，不同量化位数的 ADC 对应的分辨力、方差与最大误差(最大误差选择依据为零均值正态随机过程中 99.87%的值分布在±3σ区间内这一事实)。

表 3 量化位数与对应分辨力的关系

Table 3 Relationship of quantization and resolution

	10 bit	12 bit	14 bit	16 bit
ADC resolution (δ) / (mV/LSB)	19.500	4.88	1.22	0.305
Variance ($\sigma=(\delta^2/12)^{1/2}$) / mV	5.629	1.409	0.352	0.088
Max. error($e_{\max}=3\sigma$) / mV	16.887	4.227	1.056	0.264

因此在选定陀螺型号的情况下，陀螺的分辨力仅与 ADC 的量化精度有关。如选定 ADC 量化精度为 14 bit，QRS14 的分辨力为 0.012 2 (°/s)，ADIS16251 的分辨力为 0.018 (°/s)。

2.3 陀螺相位的测试

陀螺的主要技术指标量程、比例因子、温度漂移、时间漂移、线形度误差、分辨力等，在其数据手册

均有详细的说明,但在具体应用中,陀螺是作为速度测量元件存在于设备控制系统中,而相位延迟对控制系统的稳定性具有至关重要的影响,但多数陀螺数据手册对相位延迟这一指标没有具体描述,导致控制系统设计时无法对陀螺引起的相位延迟进行准确的数学建模,从而给控制系统的稳定性设计带来较大的困难。例如一般控制系统速度环剪切频率处的相位裕度小于 90° ,如果陀螺在该频点处的相位延迟为 90° ,无论怎样修改控制系统的校正参数,系统均不会稳定。

一般位置系统的测量元件为电位计,电位计为阻性器件,其电感、电容值非常小,因此电位计的输出对输入的相位延迟可以忽略不计。例如一个转台作频率为 f 的正弦摆动,电位计的输出值与转台所处的位置一一对应,二者在时间上可以认为是同步的。设转台的角度为 φ ,单位为弧度;电位计输出电压为 v ,单位为 V 。二者关系如式(5)所示,其中 k_1 为修正系数,单位为 rad/V 。

$$\varphi = k_1 v \quad (5)$$

对转台的角度在时间上求导数,则可以得到转台的角速度,如式(6)所示:

$$\omega = d\varphi / dt \quad (6)$$

虽然电位计的精度较差,一般仅为 0.1% ,考虑到噪声以及装配的原因,对其求导得到的平台角速度值误差要大于 0.1% ,但该角速度与转台真实角速度在相位上可以认为是无延迟的,且该角速度与陀螺的响应在波形的形状上是相似的,仅相差一个比例系数,二者的相位延迟即是待测陀螺在频率 f 处的相位响应信息。陀螺在控制系统带宽内各频点处的相位延迟是不同的,在测量陀螺相位响应时,对控制系统带宽内每个点均应测量,然后对所得结果进行拟合,即可得到待测陀螺在系统带宽内的相位响应。

陀螺相位测试系统如图 1 所示。

为避免非正交性引起的误差,陀螺敏感角速度的方向应与转台转轴方向平行;转台的转矩要求平衡,保证系统能够做规则的正弦摆动;且电机的驱动力矩要大,转台的阻力矩要小,具体数值以确保转台能够在测量频率范围内进行正弦摆动为设计目标,例如要测量陀螺在 20 Hz 处的相位响应,则转台必须能够在此频率下进行正弦运动,否则是不能够进行测量的;

电位计在装配的过程中要保证转台工作时电位计处在线性范围内,例如电位计两端输入电压分别为 0 V , 15 V ,转台转动时要保证电位计的值在 $0 \sim 15 \text{ V}$ 之间线性变化,避免 0 V 与 15 V 和 15 V 与 0 V 之间的跳变;数据采集系统与处理系统用来实时采集陀螺与电位计的值,采用 TMS320F2812 为处理器,采集频率为 1 kHz ,对采集到的电位计值求导,设电位计值为 $X(n)$,则导数为 $X(n)-X(n-1)$;电机控制与驱动系统负责产生转台正弦摆动的驱动信号,由于控制系统的闭环带宽受限,可以使用 TMS320F2812 芯片产生一个正弦的脉宽调制信号,经功率放大后输入到转台电机,驱动转台做正弦摆动。

利用以上描述的部件与结构,陀螺相位响应的测量步骤为:

1) 选择测试的频率 f ,利用 TMS320F2812(数字信号处理器)处理器产生该频率的正弦脉冲调制信号,通过功率驱动级输入到转台;

2) 实时采集电位计与陀螺的信息,采集频率为 1 kHz ($500 \text{ Hz} \sim 3 \text{ kHz}$),采集时间为 5 s (采集时间 $5 \sim 10 \text{ s}$);

3) 对采集到的电位计值求导数;

4) 通过比较待测陀螺的波形与电位计导数波形时间上的差异,求出待测陀螺在 f 频率处的相位延迟。

5) 重复上述步骤,完成控制系统频带内的陀螺延迟信息的测量。

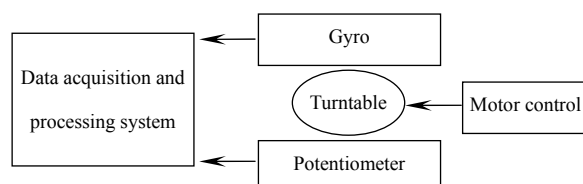


图 1 陀螺相位测试系统

Fig.1 Testing equipment of gyro phase response

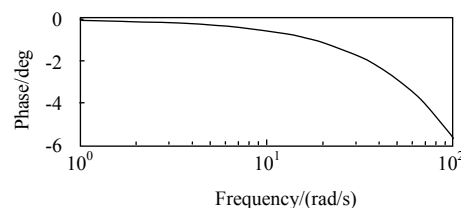


图 2 ADIS16251 的相位响应

Fig.2 Phase response of ADIS16251

图 2 为 ADIS16251 陀螺采用以上方法测试拟合的 $0 \sim 100 \text{ rad/s}$ 频带范围内的相位响应。

3 陀螺参数对控制系统的影响

伺服控制系统在运行过程中,除了必然产生的原理误差外,系统元件尤其是测量元件是导致系统同误差的一个根源。对于稳速系统,陀螺的性能是限制控制系统精度的一个主要瓶颈,其中陀螺噪声直接影响控制系统的刚度与控制精度,分辨率影响控制系统的控制精度,相位影响到控制系统的稳定。在实际光电设备中,总是希望降低陀螺的输出噪声,提高分辨率与减少陀螺带来的相位延迟。

3.1 输出噪声对控制系统的影响

图 3 为基本的伺服控制系统框图^[8],输入 $R(s)$ 与反馈的差值 $E(s)$ 通过校正放大环节后驱电机执行运动。

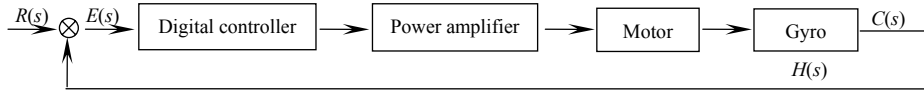


图 3 基本的伺服控制系统框图

Fig.3 Fundamental diagram of servo control system

其中:

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (7)$$

陀螺的有效信号与噪声直接进入控制系统的闭环频带内,严重影响了系统的刚度与控制精度,设陀螺静止时输出 L 服从 $N(0, \sigma)$ 的正态分布^[9],陀螺输出绝对值大于 σ 的概率为

$$P(|L| > \sigma) = 2(1 - \varphi(1)) = 31.74\% \quad (8)$$

即陀螺在静止时输出的绝对值大于样本均方差 σ 的概率为 31.74%。如 2.2 节所述,ADC 量化位数为 14 bit 时,QRS14 的分辨力为 0.012 2 (°/(s/LSB)), ADIS16251 的分辨力为 0.018 (°/(s/LSB)), QRS14 与 ADIS16251 的第一个样本均方差为 4.965 65, 29.193 32。则 QRS14 静止时有 31.74% 的输出绝对值大于 0.012 2 × 4.965 65 = 0.06 (°/s), 而 ADIS16251 静止时有 31.74% 的输出绝对值大于 0.018 × 29.193 32 = 0.53 (°/s)。这些噪声的混入导致控制系统的控制精度降低,刚度下降。

如何降低陀螺的输出噪声得到了广泛的研究,工程中可以采取以下一些措施抑制陀螺的输出噪声。

1) 降低供电电源噪声,可以使用大小电容并联的方式滤除电源噪声;隔离模拟地与数字地,模拟电源与数字电源;

2) 减少模拟信号的传输长度,陀螺输出的模拟信号应与 ADC 采集芯片尽可能近。

3) 对陀螺的输出进行滤波,但要保证在控制系统内引起的相位延迟可以接受。一般可以接受的滤波方式如图 4 所示的一阶模拟滤波器。

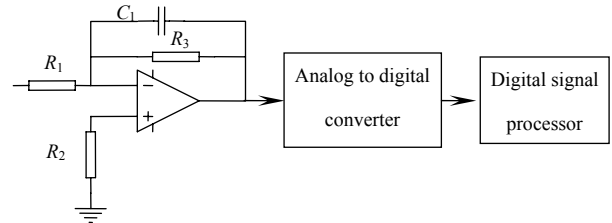


图 4 陀螺滤波器结构

Fig.4 Filter architecture for gyro

3.2 陀螺分辨力对控制系统的影响

在陀螺选定的情况下,其分辨力仅与 ADC 的量化精度有关,工程实际中考虑到器件温度范围的限制,如是军品件还是非军品器件;ADC 外部配合电路的复杂程度,如是否需要外部参考电压芯片,是否需要模拟信号选通芯片,是否需要特殊的电源模块(如 AD677 需要供电电源为 ±12 V、+5 V,通常设备中的电源为 ±15 V,则另需电源模块产生 ±12 V 电源);经济成本约束,如 ADC 是单通道还是多通道等等因素。有时不可能选择量化位数最高的 ADC,只能在器件的温度范围,外部搭配电路的难易性,经济成本与引起的像移之间做出折中,选择合适的量化位数的 ADC 芯片。

下面以航空相机反射镜分系统为例,讨论 ADC 量化位数与控制系统补偿精度之间的关系。前向像移残差如式(9)所示^[10]:

$$\sigma = 2(\omega \times \delta_1) \times \sin \alpha \times f \times t \quad (9)$$

其中: ω 为反射镜根据飞机的速高比应该补偿的角速度, δ_1 为反射镜速度控制系统的补偿误差, α 为扫描角, f 为焦距, t 为曝光时间。其中 $\omega \times \delta_1$ 即为反射镜角速度与给定角速度之间的残差,假设该残差仅由陀

螺 ADC 量化的误差产生, 则不同量化位数对应的像移如表 4 所示。

工程中综合考虑硬件复杂度、成本与允许的像移量可以选择合适的 ADC 量化位数。

表 4 量化位数与像移关系

Table 4 Relationship of quantization and image motion

	10 bit	12 bit	14 bit	16 bit
Motion/ μm	16.968	4.247	1.061	0.265

3.3 滤波放大对控制系统的影响

一种观点认为通过对滤波后的陀螺输出信号进行放大, 可以提高陀螺的信噪比, 从而提高控制系统的精度, 实际陀螺的噪声基本是均匀分布在系统频带内的, 图 4 所示的模拟滤波器仅能滤出高频部分的噪声, 低频部分的噪声与信号混叠在一起, 无法滤除, 而伺服系统的有效带宽一般在 20 Hz 内, 因此在控制系统有效频带内陀螺性能没有提高。如果采用高阶去噪算法或是 Kalman 滤波、小波变化去噪算法, 能够对陀螺控制系统频带内地噪声进行滤除, 但同时带来了较大的相位延迟, 从而直接影响到系统的稳定性设计。例如采用 ADIS16251 陀螺内默认的 4 阶 Bartlett 滤波器在 20 Hz 频点处引起的相位延迟为 42° , 这对控制系统的稳定性设计带来了较大的困难。

4 结 论

本文根据实际光电设备的需求, 对控制系统中的三个关键参数: 输出噪声、分辨力、相位响应进行了测试分析, 这些信息在实际设备中的获得对提高伺服控制系统的精度, 增强控制系统的稳定性具有非常重要的意义。本文虽以某航空相机为试验载体, 但提出的测试方法与分析思路对其它大型光电设备的伺服系统设计仍具有一定的参考与指导价值。

参考文献:

- [1] 毕永利, 刘洵, 葛文奇, 等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计 [J]. 光电工程, 2004, **31**(2): 16-18.
BI Yong-li, LIU Xun, GE Wen-qi, *et al.* Design of Velocity-stabilized Loop for Airborne Multi-frame Gyroscope Stabilized Platform [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(2): 16-18.
- [2] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
WANG Lian-ming. Study on Stabilization and Track Control Techniques of Airborne Opto-Electronic Platform [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [3] Smith W J. **Modern Optical Engineering** [M]. New York: McGraw-Hill, Inc. 2000.
- [4] D Malacara, Z Malacara. **Handbook of Optical Design** [M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [5] 耿立中, 安文化, 车念曾. KA-112A 全景式航空照相机 [M]. 北京: 中国人民解放军空军司令部情报部, 1988.
GENG Li-zhong, AN Wen-hua, CHE Nian-zeng. **KA-112A Panoramic Aerial Camera** [M]. Beijing: The Information Ministry of PLA Air Command, 1988.
- [6] 王光. KS-146 长焦距航空照相机 [M]. 北京: 中国人民解放军空军司令部情报部, 1989.
WANG Guang. **KS-146 A Long Focus Aerial Camera** [M]. Beijing: The Information Ministry of PLA Air Command, 1989.
- [7] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Xian-da. **Modern Signal Processing** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 刘胜, 彭侠夫. 现代伺服系统设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
LIU Sheng, PENG Xia-fu. **Modern Servo Control System** [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.
- [9] 李忠范, 高文森. 数理统计与随机过程 [M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2000.
LI Zhong-fan, GAO Wen-sen. **Mathematical Statistics and Stochastic Process** [M]. Jilin: Jilin University Press, 2000.
- [10] 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**(12): 2465-2472.
WANG De-jiang, KUANG Hai-peng, CAI Xi-chang, *et al.* Research On Forward Motion Compensation In Panoramic Aerial Camera With TDI-CCD Based On Digital Implementation [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(12): 2465-2472.