

全景式航空相机图像拖影与扭曲补偿系统研究

陈 黎¹ 刘志明^{1,2} 汪龙祺¹ 黄 浦¹ 修吉宏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重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 在全景式航空相机摆扫成像过程中, 由于机载环境振动隔离不彻底, 造成扫描反射镜位置波动, 引起视轴的抖动, 使图像沿摆扫方向产生扭曲及拖影现象。针对上述问题, 建立了飞行速度、高度及目标水平倾角与俯仰轴补偿速度之间的几何模型, 分析了外界扰动造成图像扭曲的成因以及俯仰轴补偿精度对图像拖影程度的影响; 通过模型建立和参数分析, 得出了俯仰轴控制系统的动态和稳态性能指标及稳健性要求; 利用实验室动态目标发生器、平行光管模拟相机与景物间的相对运动, 对控制系统的精度进行试验验证; 振动环境下对外景成像, 验证控制系统的抗扰性能。试验结果表明: 俯仰轴控制系统的稳速误差小于 $0.005^\circ/\text{s}$, 几乎可以完全抑制图像拖影现象; 系统对 7 Hz 以下的干扰信号速度补偿残差小于 $0.1^\circ/\text{s}$, 可以有效补偿干扰造成的图像扭曲现象。

关键词 成像系统; 航空相机; 图像拖影与扭曲; 伺服系统; 干扰抑制

中图分类号 TN942.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0128004

Research on Image Smear and Distortion Compensation in Panoramic Aerial Camera

Chen Li¹ Liu Zhiming^{1,2} Wang Longqi¹ Huang Pu¹ Xiu Jihong¹

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In panoramic aerial camera pendulum sweep imaging process, the dithery scanning mirror position caused by the incomplete isolation of airborne vibration environment, causes a shaking of the visual axis, which makes the image in the sweep direction produce distortion and smear. Aiming at the above problem, the geometric model is established among flight speed, altitude, target level angle and pitching axis speed compensation, with which the causes of the disturbances of image distortion and the influence of compensation precision on image smear pitching axis degree are analyzed. Through the model establishment and parameter analysis, the pitching axis control system dynamics and steady-state performance and robustness requirements are obtained. Laboratory dynamic target generator and parallel light pipe model are used to simulate the relative movement between camera and objects so as to test the precision of the control system. The exterior image in the vibration surroundings is used to test the disturbance compensation performance of the control system. Experiment results show that the steady speed error of pitching axis control system is less than $0.005^\circ/\text{s}$, that almost completely suppresses the image smear phenomenon; the speed compensation residual error under 7 Hz disturbance signal is less than $0.1^\circ/\text{s}$, and the system can effectively compensate the disturbance caused by the image distortions.

Key words imaging systems; aerial camera; image smear and distortion; servo system; disturbance rejection

OCIS codes 280.1100; 350.5730; 110.4850

1 引言

航空成像与测量技术是 20 世纪发展起来的一

个新学科, 主要是利用航空机载光学遥感系统来采集地面景物信息。航空相机按成像原理分为推扫

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2013-06-19

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7010102)

作者简介: 陈 黎(1981—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事航空成像与测量技术方面的研究。

E-mail: qwwz0000@sina.com

式、全景式及画幅式相机。全景式航空相机与推扫式和画幅式航空相机相比,具有收容宽度大、侦查区域广、可大角度倾斜成像以远离战区等优点。全景式侦查相机在国内外应用比较广泛,例如美国的KA-112,CA-95,KS-116相机^[1-2]。

全景式时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)航空相机具有两轴控制系统:俯仰轴和摆扫轴。通过摆扫轴运动实现图像生成,利用俯仰轴(扫描反射镜)运动完成前向飞行造成的图像拖影。由于飞行时的姿态变化和振动环境很难估计,有多频段的随机扰动和噪声干扰^[3-4],导致俯仰轴控制系统在稳速补偿过程中出现速度波动,使相机主光轴指向沿俯仰方向出现晃动,在摆扫成像时,图像出现扭曲现象。

为了抑制姿态扰动与振动冲击造成的俯仰轴速度波动,在设计中引入了 H_∞ 控制,通过干扰模型的建模和模型误差分析,抑制了动态扰动与参数扰动,通过设计解决了系统在振动环境下的稳健镇定和稳健干扰抑制问题^[5]。利用实验室动态目标发生器和

长焦距精密平行光管模拟相机与景物间的相对运动,对控制系统的精度进行试验验证;利用振动平台对外景成像,对控制系统的抗扰性能进行试验验证。

2 拖影与扭曲建模分析

如图1所示,相机作为飞机载荷吊挂在飞机机腹处,TDICCD的水平维与飞行方向一致,垂直维与飞行方向正交,水平维是TDICCD的非积分方向,垂直维是其积分方向。TDICCD水平维的长度与相机焦距决定了相机的纵向视场角,由纵向视场角与物距的几何关系得出水平维的地面覆盖宽度。同理,TDICCD的横向视场角由垂直维的长度与相机焦距确定^[1]。TDICCD水平维的像元数远远多于垂直维的像元数,所以,TDICCD一次曝光只能对地面狭长的矩形区域成像,通过驱动摆扫轴沿TDICCD垂直维转动,增加了相机的横向视场角,利用TDICCD行扫描的成像特性,对数万个地面狭长的矩形区域曝光,最后形成宽视场航拍图像。

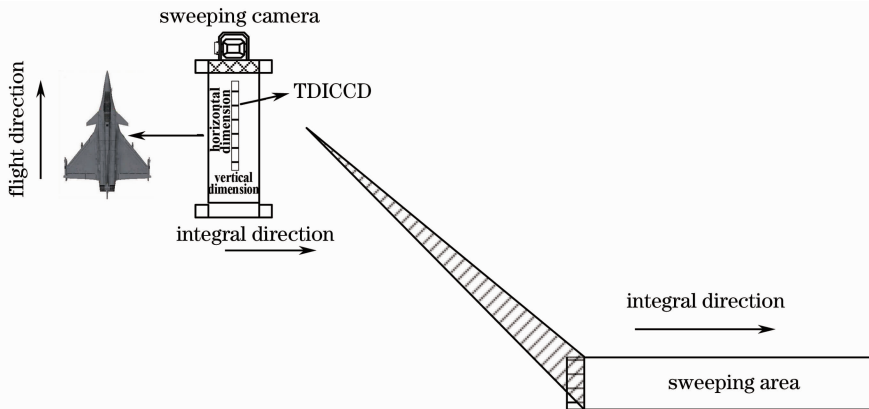


图1 摆扫相机补偿结构图

Fig. 1 Drawing of sweeping camera compensation structure

2.1 图像拖影模型分析

TDICCD垂直维可实现多个像元的累积积分,实现低照度成像^[6]。当摆扫成像时,根据空间物像对应关系,TDICCD垂直维的 n 个像素先后对地面同一景物点曝光,最后将这 n 个像素的灰度值叠加,获得高信噪比图像。然而该方法实现的约束条件是:在积分时间内,像点不能在水平维发生运动,必须保证地面同一景物点在同列的垂直维 n 个像素上曝光。

当飞机高速飞行时在机载振动环境下,像点沿TDICCD水平维方向移动。

飞机高速飞行造成像点在水平维单方向移动,其移动速度 v_{CCD} 利用几何关系可近似地表示为

$$v_{\text{CCD}} = \frac{v}{H} \cdot f, \quad (1)$$

式中 v 为飞机瞬时飞行速度, H 为飞机瞬时飞行高度, f 为相机焦距。TDICCD对景物点的曝光时间取决于TDICCD的级数,当确定了级数后,其曝光时间 T 可以确定,则物点沿TDICCD水平维的位移量 L 为

$$L = \int_0^T v_{\text{CCD}} dt. \quad (2)$$

物点沿TDICCD水平维产生了位移,导致像由点变成了线,造成图像上的任一像点被拉成具有一定长度的线,使图像水平维的分辨率严重下降,图像视觉效果变差^[1]。

在机载振动环境下,视轴在水平维双方向移动,由于TDICCD是一种离散的成像器件,它没有快门

等机构,所以一直处于曝光状态,所有视轴指向的地面景物点在积分时间内均在该像素上成像,造成图像拖影。所以 TDICCD 积分的每一级对应的水平维位移量 L_{xi} 为

$$L_{xi} = \theta \cdot f \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

式中 θ 为相机俯仰方向上的角位移, ω 为振动角频率, φ 为相位。

经过 n 级曝光叠加后物点沿 TDICCD 水平维的位移量为

$$L_v = \|L_{xi}\|_{\infty}. \quad (4)$$

与飞机高速飞行引起的水平维的位移相叠加,造成图像上的任一像点被拖影成具有一定长度的线,使图像水平维的分辨率下降。

2.2 图像扭曲模型分析

水平维的运动导致了垂直维上的线目标出现图像扭曲。在一个相机摆扫成像周期,如果 TDICCD 相对于地面景物区无任何水平维的运动,则图像将为规则的矩形条带景物在像面上的投影,当飞机高速飞行时,图像不再是规则的矩形景物条带投影,而变成平行四边形景物带投影,当振动叠加在相机上,引起水平维上的正弦振动角位移时,图像上的景物就会出现相同频率的扭曲现象。其光轴在水平维位移的轨迹 L_D 为

$$L_D = \int_0^{2\pi/\omega} \omega_v dt \cdot f \sin(\omega t + \varphi) + \int_0^{T_n} v_{CCD} dt, \quad (5)$$

式中 ω_v 为振动引起的相机俯仰方向上的角速度, T_n 为一个相机摆扫成像周期时间。

3 补偿系统精度分析

根据模型分析,图像拖影与图像扭曲现象都可以靠驱动扫描反射镜以一定角速度旋转得以抑制,且二者的模型在形式上一致,所以二者的精度分析其一即可。

由(1)式可知,高速飞行的像移速度与飞机飞行速度、物距和相机焦距有关,通过飞机惯导获得飞行速度、飞行高度以及横滚角等参数。飞机惯导的数据精度在 2% 左右,则飞行速度 v 表示成 $v \pm \delta v$,摆扫相机的物距 H 为飞行高度除以目标倾角。物距的表达式为

$$H = \frac{H_a}{\sin \psi} + \delta H = \frac{H_a \pm \delta H_a}{\sin(\psi \pm \delta \psi)}, \quad (6)$$

式中 H_a 表示飞行高度, ψ 表示目标倾角。 δ 的范数 $\|\delta\| < 1$ 。

则(1)式写成

$$v_{CCD} = v_{CCD,n} + \delta v_{CCD,n} = \frac{(v \pm \delta v)}{\left[\frac{H_a \pm \delta H_a}{\sin(\psi \pm \delta \psi)} \right]} \cdot f = \frac{v \pm \delta v}{H_a \pm \delta H_a} \cdot f \sin(\psi \pm \delta \psi). \quad (7)$$

通过驱动俯仰轴的扫描反射镜旋转,令其旋转补偿速度 $\bar{\omega}$,可以将(7)中 $\bar{\omega} = \frac{v}{H_a} \sin(\psi - \varphi)$ 部分基本补偿,但是摄动部分无法补偿。

残余误差表达式为

$$\frac{\sigma}{\bar{\omega}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial v}\right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial H}\right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \psi}\right)^2 \sigma_\psi^2} = \sqrt{\frac{\sigma_v^2}{v^2} + \frac{\sigma_H^2}{H^2} + \frac{\sigma_\psi^2}{\tan^2 \psi}}. \quad (8)$$

将各个变量的相对误差带入(8)式,可得摄动部分相对误差为 3.464%,控制系统的补偿相对误差为 1% 左右,所以补偿系统对飞机高速飞行导致的像拖影相对误差不大于 4.5%。

相机与飞机间靠减振器连接,以消除频率大于 7 Hz 的振动。水平维的振动引起的线位移量如(3)式所示,若想抑制每个像素曝光时间内由 7 Hz 以下的振动引起的线位移,则需要扫描反射镜控制系统具有振动主动补偿的能力,将低频振动引起的线位移的幅值抑制到最小。由于振动输入为正弦函数,控制系统应输出与其输入幅值相同,相位相差 180° 的正弦输出,以抵消正弦输入。如图 2 所示,如果该控制系统的输出与输入的相位差不为 180°,则二者叠加后的波形即为补偿误差,所以控制系统的带宽设计对振动主动补偿精度起着至关重要的作用。

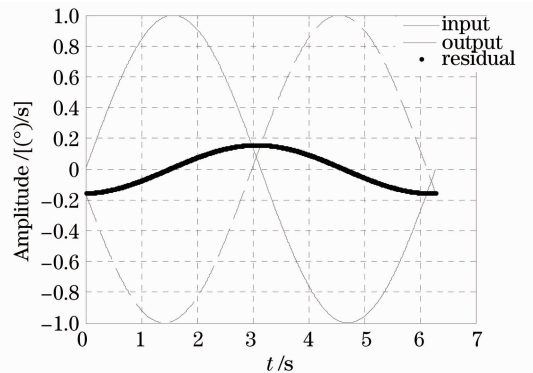


图 2 振动补偿残差示意图

Fig. 2 Drawing of vibration compensation residual

4 补偿系统设计

全景式 TDICCD 航空相机的补偿系统由两部

分组成,分别为俯仰轴补偿系统和摆扫轴补偿系统。在飞行运动时,为保证物像不发生相对运动,必须确保遥感器的主光轴对准目标,控制俯仰轴补偿系统的扫描反射镜的转速可以实现飞行方向上的运动分量补偿。控制摆扫轴补偿系统运动,完成扫描成像

及扫描像移补偿。如图 3 所示,俯仰轴由扫描电机驱动,控制扫描反射镜绕 x 轴转动,进行飞行运动补偿和相机俯仰角运动。摆扫轴由摆扫电机驱动,控制扫描反射镜、光学镜头、调焦反射镜和 TDICCD 绕 y 轴同时转动,实现 TDICCD 相机摆扫成像。

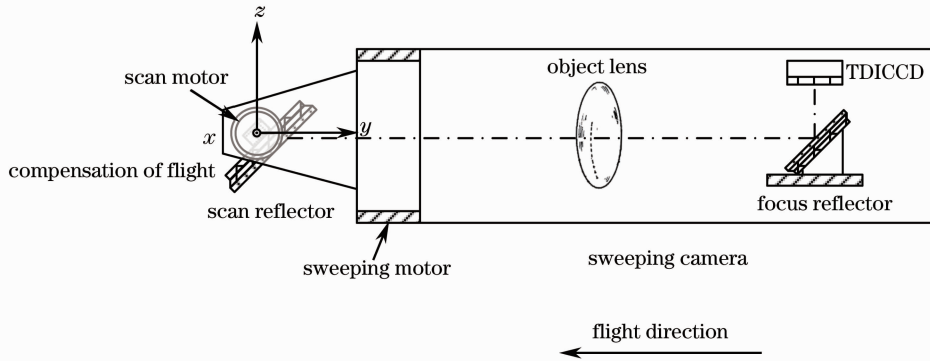


图 3 摆扫相机补偿结构图

Fig. 3 Drawing of sweeping camera compensation structure

俯仰轴补偿系统为机电系统,采用力矩电机作为驱动元件,扫描反射镜作为机械负载,二者的数学模型即为补偿系统被控对象的数学模型。在控制系统的分析和设计中,经常利用被识别对象的频率特性作为模型的表达式。利用周期测试信号可以识别出被测对象的频率特性。在进行系统模型识别时,测试信号通常采用多频正弦信号,即将一组幅值、相位相同,频率不同的正弦信号作为输入信号,用双采集通道同时观测开环系统输入及输出,记录每个频点的输出信号与输入信号的幅值比和相位差,绘制出开

环系统的对数幅频特性和相频特性曲线,根据对数幅频、相频曲线判断开环系统所包含的典型环节。

被控对象系统辨识如图 4 所示,对被控对象输入不同频率的正弦驱动电压信号,驱动直流力矩电动机以正弦转速转动,速度信号通过数字光纤陀螺采集到 CPU 内部,显示在调试界面内^[7]。

在输入信号频率为 0.0625~150 Hz 中选取 50 个频点,通过采样获得输出信号的幅值和相位角差,绘制出图 5 所示的被控对象的幅频特性和相频特性曲线。

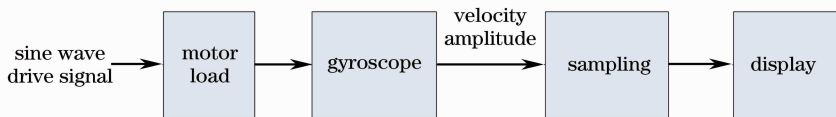


图 4 被控对象系统辨识示意图

Fig. 4 Drawing of under control object system identification

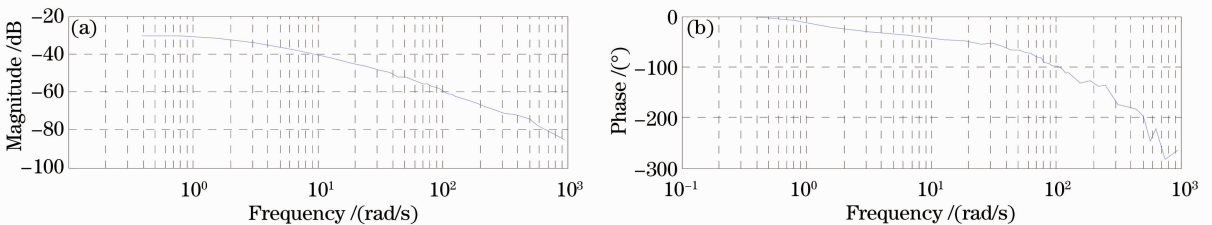


图 5 被控对象幅频特性和相频特性

Fig. 5 Magnitude and phase characteristics of under control object

被控对象的数学模型为 $P_o(s) = \frac{0.028}{(0.33s+1)(0.003s+1)}$ 。速度系统的精度取决于

系统的开环放大倍数,系统欲获得较高精度,则必须尽量提高系统的开环放大倍数,为了留有一定的裕度,系统倍数设定为 15000 倍,速度回路的开环截止

频率为 144 rad/s。根据控制对象的模型设计出速度回路的开环传递函数为： $G(s) = \frac{15000(0.04s+1)^2}{(0.33s+1)(0.003s+1)(s+1)^2}$ 。速度开环系统的频域响应的幅值裕度与相角裕度曲线如图 6 所示，从图中可知幅值稳定裕度 $L_h = -34$ dB，相角稳定裕度 $\gamma = 51.1^\circ$ ， $-\pi$ 穿越频率 $\omega_g = 11$ rad/s，剪切频率 $\omega_c = 135$ rad/s。从这些指标可以得出，该开环系统的单位反馈闭环系统是稳定的。

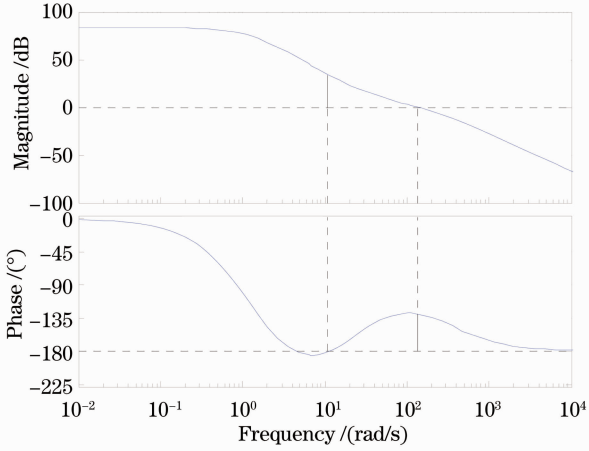


图 6 速度开环系统的 Bode 图

Fig. 6 Bode diagram of velocity open-loop system

随机振动和干扰条件下，振动信号的值是跳变的，且相互独立，跳变的时刻也是随机的，振动信号的相关函数为相邻 τ 时间的两个时刻信号的值 $x(t)$ ， $x(t+\tau)$ 乘积的数学期望。若 $x(t)$ 与 $x(t+\tau)$ 处于相同的幅值区域，设该信号区域的强度为 α_n ，则 $\alpha_n^2 = x(t) \cdot x(t+\tau)$ ，若 $x(t)$ 与 $x(t+\tau)$ 处于不同的信号区，则 $\alpha_n \alpha_{n+k} = x(t) \cdot x(t+\tau)$ 。设 t 与 $t+\tau$ 在相同区域的概率为 $Q(\tau)$ ，且振动为均值为零的噪声信号 $E(\alpha) = 0$ ，则相关函数为 $R(\tau) = E[x(t) \cdot x(t+\tau)] = E(\alpha^2)Q(\tau) + E^2(\alpha)[1-Q(\tau)] = E(\alpha^2)Q(\tau)$ 。令 β 为信号在单位时间内变化的次数，在 Δt 时间内变化的概率为 $\beta\Delta t$ ，不变的概率为 $1-\beta\Delta t$ ，则在 τ 时间内不变的概率

$$Q(\tau) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (1 - \beta\Delta t)^{\frac{\tau}{\Delta t}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[1 - \beta\Delta t + \frac{1}{2!} \frac{\tau}{\Delta t} \left(\frac{\tau - \Delta t}{\Delta t} \right) \beta^2 \Delta t^2 + \dots \right] = \exp(-\beta\tau).$$

则 $R(\tau) = E(\alpha^2)\exp(-\beta\tau)$ ，其功率谱密度函数 $S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau)\exp(-j\omega\tau) d\tau = \frac{E(\alpha^2)}{\pi} \frac{\beta}{\omega^2 + \beta^2}$ 。利

用德国 LMS 公司的振动软件测量获取相关函数如图 7(a) 所示，傅里叶变换后的功率谱密度函数如图 7(b) 所示。

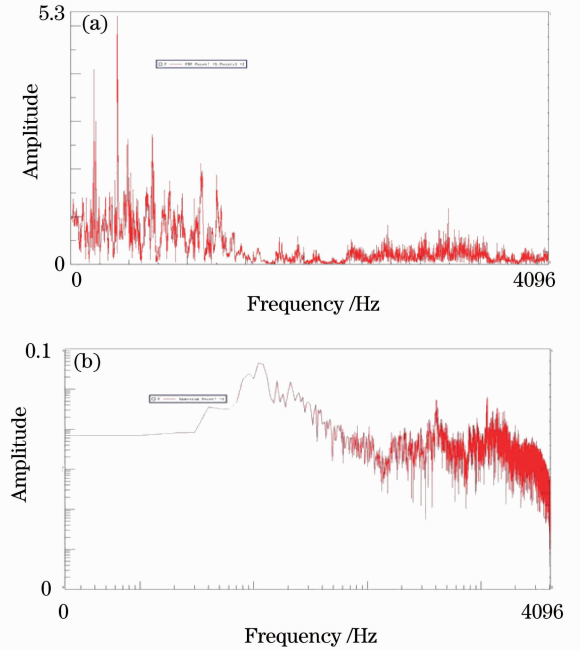


图 7 俯仰轴的振动干扰模型

Fig. 7 Vibration disturbance model of yaw axis

根据图 7 可以获得干扰环节的传递函数 $W_d(s) = \frac{2809}{\pi} \frac{10.3}{s^2 + 106.09^2}$ ，被控系统的稳健模型如图 8 所示， z 为评价控制性能及模型摄动的输出向量， y 为误差信号， ω 为模型摄动的外部输入， u 为控制输入。

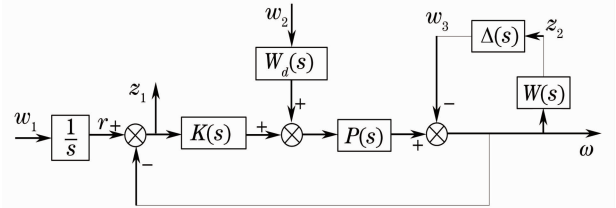


图 8 系统的稳健模型

Fig. 8 Robust model of system

系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/s & -P(s)W_d(s) & 1 & -P(s) \\ 0 & W(s)P(s)W_d(s) & -W(s) & W(s)P(s) \\ 1/s & -P(s)W_d(s) & 1 & -P(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ u \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $W_d(s) = \frac{2809}{\pi} \frac{10.3}{s^2 + 106.09^2}$ ， $P_0(s) = \frac{0.028}{(0.33s+1)(0.003s+1)}$ ， $|W(s)| > \left| 1 - \frac{P(s)}{P_0(s)} \right|$ 。

由 ω 到 z 的闭环传递函数矩阵 $H_{zw}(s) = G_{12}(s)K(s)[I - G_{22}(s)K(s)]^{-1}G_{21}(s) + G_{11}(s)$, 稳健的性能指标表示为 $\|H_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma$, γ 为充分小的正数, 表示控制误差^[9]。

5 试验结果与分析

按照系统稳态设计驱动俯仰轴稳速旋转, 当给定 $0.5^\circ/\text{s}$ 的阶跃信号时, 俯仰轴转速反馈波形如图 9(a)所示, 系统超调量小于 10% , 调节时间小于 50

ms, 稳态控制误差的均方根小于 1% , 满足设计补偿精度。当给定转速为 0 的阶跃信号时, 在振动试验台上, 俯仰轴转速反馈波形如图 9(b)所示, 在俯仰轴上的速度存在 7 Hz , $0.3^\circ/\text{s}$ 及 50 Hz , $0.17^\circ/\text{s}$ 的附加波动, 稳态控制误差的均方根大于 50% , 靠稳态设计的参数无法满足设计补偿精度。采用系统稳健控制器设计后, 俯仰轴转速反馈波形如图 9(c)所示, 振动环境下在俯仰轴上的速度波动小于 $0.02^\circ/\text{s}$, 稳态控制误差的均方根小于 1% , 满足设计补偿精度。

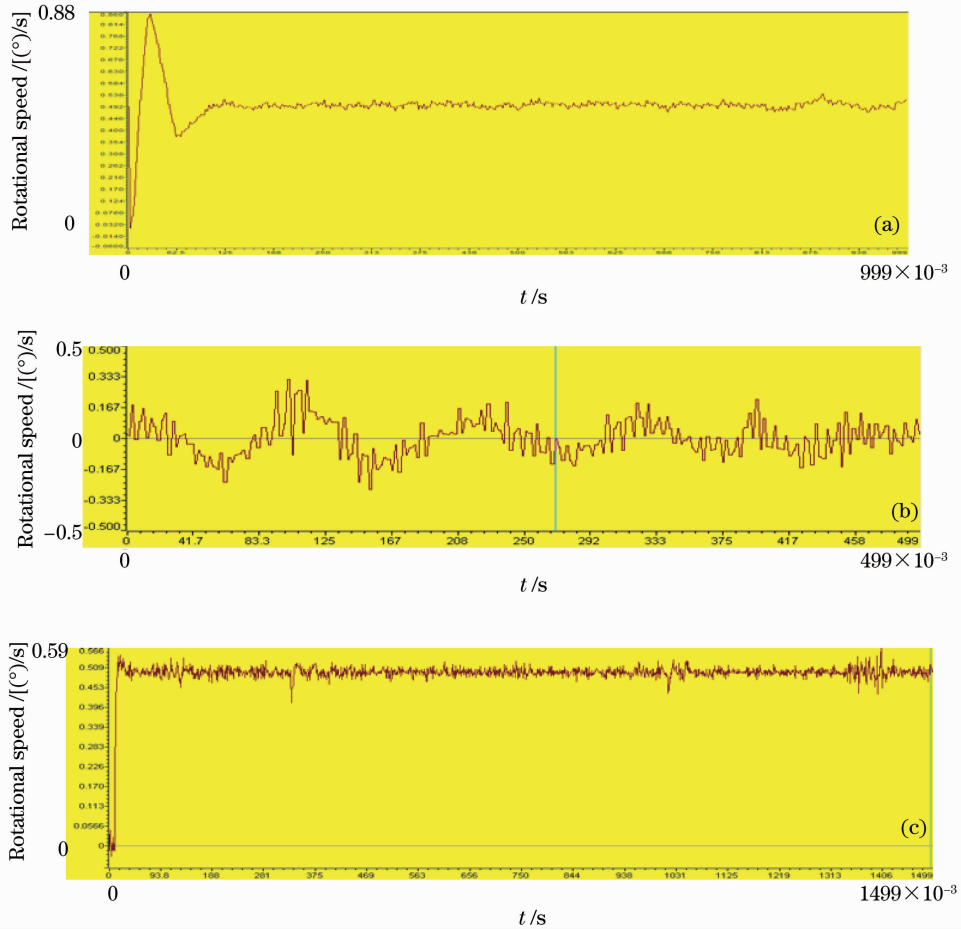


图 9 系统的阶跃响应曲线

Fig. 9 Step response curve of system

通过实验室动态分辨率成像试验与外景成像试验比较了振动环境下, 采用稳健控制器前后成像像质的变化。图 10(a)为无振动条件下的静态图像, 图 10(b)为振动条件下采用非稳健控制策略对平行光管进行成像, 与静态图像相比, 其图像有严重的拖影和像倾斜, 分辨率明显下降。图 10(c)为采用稳健控制策略对平行光管进行成像, 与静态图像相比, 其图像基本无拖影和像倾斜。图 10(d)为振动条件下外景图像拖影和弯曲。图 10(e)为采用稳健控制

策略的外景图像, 其图像基本无拖影和像倾斜。

6 结 论

为了保证全景式相机在机载振动环境下具有较高的分辨率, 克服飞行与振动造成的拖影与扭曲现象, 建立了图像拖影与扭曲模型, 根据模型对俯仰轴的补偿精度进行了分析和误差分配。控制系统的设计兼顾了稳态精度和稳健性能, 而且考虑其工程可实现性。在系统设计时, 先对系统的模型进行辨识,

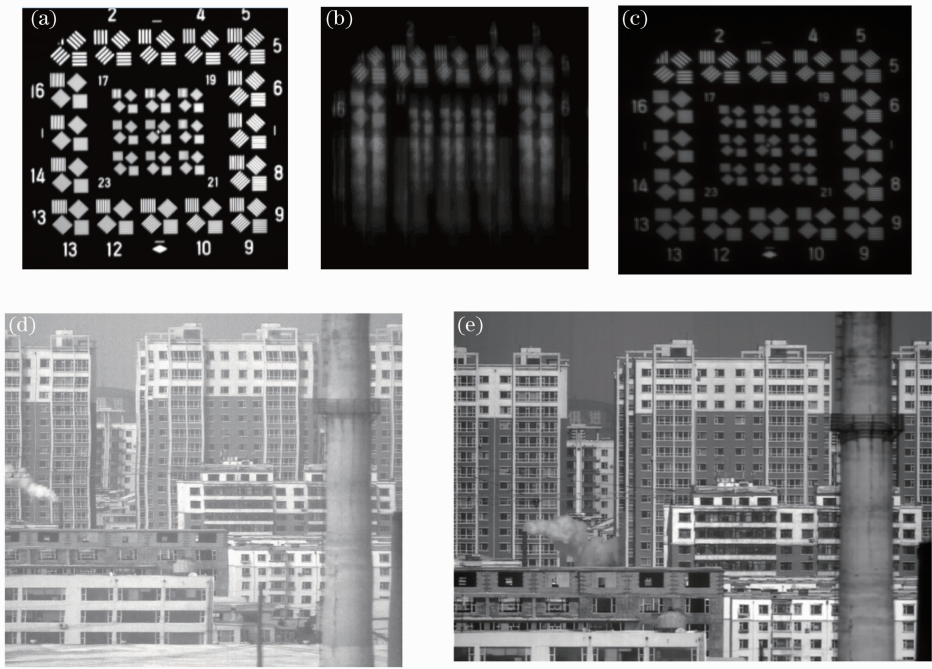


图 10 (a)无振动条件下的静态分辨率图像;(b)振动条件下图像;(c) 振动条件下采用稳健控制策略图像;
(d)振动条件下外景图像;(e)采用稳健控制策略外景图像

Fig. 10 (a) Static resolving power figure without vibration; (b) figure under vibration; (c) figure under vibration with robust control; (d) outside figure under vibration; (e) outside figure under vibration with robust control

根据系统动态指标和稳态精度合理选择校正算法及参数,充分估计系统的摄动量及扰动信号的幅频特性,使系统具有较好的稳健性。利用实验室动态目标发生设备和长焦距精密平行光管模拟相机与景物间的相对运动,对控制系统的精度进行试验验证;利用振动平台对外景成像,对控制系统的抗扰性能进行试验验证。试验结果表明:俯仰轴控制系统的稳速精度较高,几乎可以完全抑制图像拖影现象;系统稳健性强,可以有效抑制干扰造成的图像扭曲现象。

参 考 文 献

- 1 Geng Lizhong, An Wenhua, Che Nianzeng. KA-112A Panoramic Aerial Camera [M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Air Command Intelligence Agency, 1988. 10.
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. 10.
- 2 Andre G Lareau. Electro-optical imaging array with motion compensation [C]. SPIE, 1993, 2023: 65-79.
- 3 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0128001.
远国勤, 丁亚林, 惠守文, 等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0128001.
- 4 Shi Junxia, Guo Yongfei, Xue Xucheng, *et al.*. Motion blurred image restoration of spaceborne TDICCD camera [J]. J Optoelectronics • Laser, 2012, 23(3): 573-577.

- 石俊霞, 郭永飞, 薛旭成, 等. 航天时间延迟积分 CCD 相机振动模糊图像的恢复[J]. 光电子·激光, 2012, 23(3): 573-577.
- 5 Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, *et al.*. Analysis of vibration effect to surface figure measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112001.
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 振动对面形测量误差的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112001.
- 6 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112002.
郑丽娜, 张涛, 匡海鹏, 等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112002.
- 7 Wang Xi Xiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, *et al.*. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205002.
王夏霄, 张猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205002.
- 8 Wei Tong, Guo Rui. Application of adaptive Kalman filtering to system identification of brushless DC motor [J]. Optics Precision Engineering, 2012, 20(10): 2309-2314.
魏彤, 郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辨识中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2309-2314.
- 9 Stefan F Campbell, John T Kaneshige. A nonlinear dynamic inversion L1 adaptive controller for a generic transport model [C]. 2010 American Control Conf Marriott Waterfont, 2010. 862-867.

栏目编辑: 张 腾