

文章编号 1004-924X(2013)05-1282-09

动态扫描拼接成像系统的多模控制

徐正平*, 匡海鹏, 许永森

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了凸轮驱动的线阵 CCD 像面动态扫描拼接方法以扩大遥感仪器的覆盖宽度,并对系统负载非平衡特性及其多模控制算法进行了分析。讨论了现有拼接方法的优缺点,进而引入凸轮驱动的动态扫描拼接方法。该方法采用电机和凸轮作执行机构,电机做匀速旋转运动,通过凸轮带动多个线阵 CCD 做往复直线运动,实现动态扫描拼接。为了提高 CCD 成像质量,从理论上对凸轮结构的特殊性、平台姿态角及相机方位角造成的系统负载非平衡特性进行了分析,结果表明:平台俯仰角对负载非平衡特性影响较小,可以忽略;当平台横滚角和相机位角之和非零时,负载力矩在凸轮升程段和回程段表现出不同的特性。针对凸轮升程段和回程段采用相同控制器时凸轮转速在两阶段存在转速降的情况,提出了变输入的多模控制方法,并进行了相关实验。结果表明:变输入的多模控制方法可有效消除凸轮转速在升程段和回程段存在的转速降,且在从动件匀速段的凸轮稳速精度达到 0.48%。该方法简单、方便,易于工程实现。

关键词:CCD 成像;动态扫描拼接;非平衡负载;变输入信号;多模控制

中图分类号:TP73;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1282

Multi-model control of dynamic scanning assembly imaging system

XU Zheng-ping*, KUANG Hai-peng, XU Yong-sen

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzp090@163.com

Abstract: Linear CCD dynamic scanning assembly actuated by a cam was proposed to extend the coverage of the remote sensing instruments, and the non-equilibrium load feature of the system and related multi-model control arithmetic were analyzed in detail. After discussing the strongpoint and shortcoming of existing methods, the dynamic scanning assembly actuated by a cam was introduced. In this method, a motor and a cam were used as the acting devices. The motor rotated at a constant speed and the linear CCDs were driven by the cam to reciprocate on the focal plane. The non-equilibrium load feature of the system was introduced by the special structure of the cam, platform attitude angles and the camera azimuth. As the non-equilibrium load feature could effect the CCD image, it was analyzed in theory. Analysis results show that the platform pitch angle affects slightly the non-equilibrium load feature, so it could be ignored. When the sums of platform roll angle and camera azimuth are not ze-

收稿日期:2012-09-09;修订日期:2012-10-12.

基金项目:国家林业公益性行业科研专项资助项目(No. 201204515)吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001)

ro, the load torque shows different features in the lift section and return section of the cam. In consideration of that the cam speed was different in the lift section and return section of the cam when the same controller was used, one multi-model controlling method with varying input signals was imported. The relative experiments were performed and the results show that the difference between cam-speeds in the lift section and return section can be eliminated effectively by the multi-model controlling method with varying inputs. The rotate speed precision of the cam is 0.48% in the uniform section of the follower. It concludes that this method is simple and convenient to be realized.

Key words: CCD imaging; dynamic scanning assembly; non-equilibrium load; varying input signal; multi-model control

1 引言

遥感仪器的覆盖宽度要求越来越大,当现有单片 CCD 长度不能满足像面覆盖宽度要求时,必须采用 CCD 拼接技术。

常用的 CCD 拼接方法分为机械拼接和光学拼接^[1-3]。机械拼接又分为机械直接拼接和机械交错拼接。机械直接拼接将相邻 CCD 首尾相接,拼接处存在漏洞,会造成拍摄盲区;机械交错拼接将相邻 CCD 在扫描方向上错开一定距离以保证相邻 CCD 有效像素首尾相接,但该方法所得图像存在锯齿效应,需通过后续图像处理加以解决,且当拍摄过程中平台偏航角非零时,需要使部分有效像元重叠来确保拍摄区域的完整性,重叠像元数目由像元尺寸、相邻 CCD 垂直方向间距及最大偏航角决定。光学拼接则是采用分光棱镜形成光程相等的共轭对称面,CCD 分别放置在透射面和反射面上。光学拼接中,采用全反全透棱镜光能利用率高,但在拼接处由于相对照度的变化,将存在渐晕效应。为解决该问题,需重叠部分有效像元,重叠像元数目由最大孔径角、棱镜尺寸及棱镜折射率决定;若采用半反半透棱镜,其安装方便,但光能利用率低,需采用 TDI CCD 解决该问题。

线阵 CCD 像面动态扫描拼接是实现大覆盖宽度的一种有效方法,其有效克服了机械直接拼接时拍摄区域存在盲区的缺点,同时不存在采用全反全透棱镜进行光学拼接时的渐晕效应。在该方法中,焦平面上均匀分布若干只线阵 CCD,相邻 CCD 在扫描方向上间距相等。执行机构为电机和凸轮:电机做匀速旋转运动,与电机同轴安装的凸轮带动各线阵 CCD 作往复直线运动,实现动

态扫描拼接。凸轮结构的特殊性、相机俯角、位角和平台姿态角均会造成负载的非平衡特性。非平衡负载像面扫描系统的稳速精度是影响 CCD 成像质量的关键因素之一:像面扫描精度越高,CCD 曝光越均匀,得到的图像质量越高^[4-5]。为此,本文从理论上分析了凸轮结构的特殊性以及相机俯角、位角及平台姿态角对系统负载特性的影响,研究了负载变化规律,并依据系统工作条件简化负载数学模型,为控制系统的设计提供依据。在控制算法选取上考虑了负载结构的特殊性^[6-7],从理论上分析了变输入多模控制方法消除 CCD 成像阶段像面扫描速度转速降的可行性,并通过试验验证了该方法的有效性。

2 凸轮机械结构分析

依据凸轮设计结果,在凸轮旋转角速度一定的情况下,从动件位移与凸轮转角的关系如下:

$$s(\varphi) = \begin{cases} \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\varphi)) & (0 < \varphi \leq \frac{\pi}{8}) \\ \frac{h}{4+6\pi}(8\varphi - \pi + 2) & (\frac{\pi}{8} < \varphi \leq \frac{7\pi}{8}) \\ h - \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\varphi)) & (\frac{7\pi}{8} < \varphi \leq \frac{9\pi}{8}) \\ h - \frac{h}{4+6\pi}(8\varphi - 9\pi + 2) & (\frac{9\pi}{8} < \varphi \leq \frac{15\pi}{8}) \\ \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\varphi)) & (\frac{15\pi}{8} < \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s(\varphi)$ 为凸轮从动件位移; φ 为凸轮转角; h 为凸轮升程,且 $h=109.10$ mm。

从动件位移对凸轮转角的一次导数、二次导数分别为从动件类速度 v 、类加速度 a 。凸轮从动

件位移、类速度、类加速度与凸轮转角之间的关系曲线如图 1 所示。

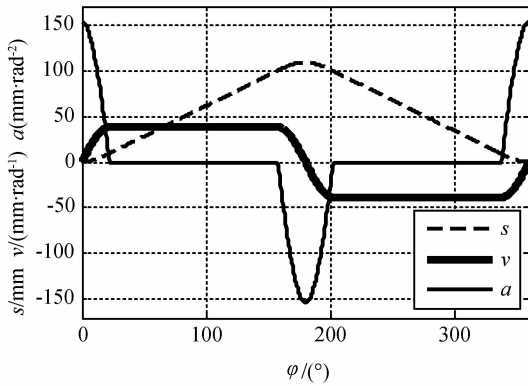


图 1 凸轮从动件位移、类速度、类加速度与凸轮转角的关系曲线

Fig. 1 Relationship between follower displacement, analogue-velocities, analogue-accelerations and cam angle

设凸轮旋转角速度为 ω , 凸轮从动件速度、加速度与其类速度、类加速度的关系如下:

$$\frac{ds}{dt} = v \cdot \omega, \frac{d^2s}{dt^2} = a \cdot \omega^2. \quad (2)$$

从图 1 中可以看出: 在凸轮旋转角速度一定的情况下, 凸轮从动件在一个运动周期内的运动规律可以分为 6 个阶段: 正向加速段、正向匀速段、正向减速段和反向加速段、反向匀速段、反向减速段。为便于问题讨论, 将正向加速段、正向减速段、反向加速段、反向减速段称为从动件变速段; 将正向匀速段和反向匀速段称为从动件匀速段; 凸轮转角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 对应凸轮升程段, 凸轮转角 $180^\circ \sim 360^\circ$ 对应凸轮回程段。系统采用双向 TDI CCD, 只在从动件匀速段成像。为确保 CCD 在凸轮升程段和回程段曝光的均匀性, 需保证在上述两阶段扫描速度相等。同时, 为避免系统工作过程中的冲击, 还需确保从动件变速段凸轮转速的平滑过渡。对系

统负载特性的分析是选取控制算法的依据。为分析系统负载特性, 首先给出平台姿态角和相机俯角、位角的定义。

3 平台姿态角和相机俯角、位角定义

平台姿态角和相机俯角、位角的定义与 3 个坐标系相关: 平台铅垂地面坐标系 ($O X_c Y_c Z_c$)、平台坐标系 ($O X_p Y_p Z_p$) 和相机坐标系 ($O X_e Y_e Z_e$)。平台铅垂地面坐标系采用“东北天 (ENU)”坐标系: 原点与平台质心重合, X_c 为地球自转的切线方向, Y_c 为地理指北针方向, Z_c 沿当地铅垂线向上; 平台坐标系原点也为平台质心, X_p 轴沿载体横轴向右, Y_p 轴沿载体纵轴向前, Z_p 轴沿载体竖轴向上。平台铅垂地面坐标系与平台坐标系关系图如图 2 所示。

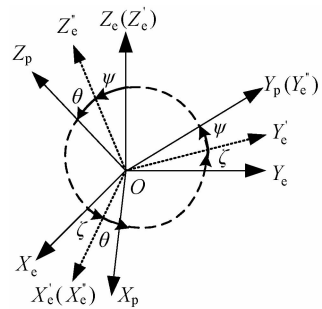


图 2 平台铅垂地面坐标系与平台坐标系关系图
Fig. 2 Relationship between platform plumb ground coordinate system and platform coordinate system

从平台铅垂地面坐标系到平台坐标系的变换步骤如下: 平台铅垂地面坐标系首先绕 Z_c 轴逆时针旋转 ζ ; 再绕 X'_c 逆时针旋转 ψ , 最后绕 Y_p 逆时针旋转 θ 。 ζ 、 ψ 、 θ 分别为平台偏流角、俯仰角和横滚角。平台铅垂地面坐标系到平台坐标系的姿态转换矩阵 C_E^p 为:

$$C_E^p = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \zeta - \sin \theta \sin \psi \sin \zeta & \cos \theta \sin \zeta + \sin \theta \sin \psi \cos \zeta & -\sin \theta \cos \psi \\ -\cos \psi \sin \zeta & \cos \psi \cos \zeta & \sin \psi \\ \sin \theta \cos \zeta + \cos \theta \sin \psi \sin \zeta & \sin \theta \sin \zeta - \cos \theta \sin \psi \cos \zeta & \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

平台坐标系经以下旋转过程变换到相机坐标系: 平台坐标系先绕 X_p 轴逆时针旋转 α , 再绕 Y'_p

逆时针旋转 β 。 α 、 β 分别为相机俯角、位角。整个变换过程如图 3 所示。

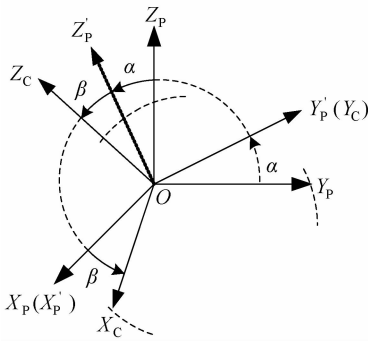


图 3 平台坐标系与相机坐标系关系图

Fig. 3 Relationship between platform coordinate system and camera coordinate system

平台坐标系到相机坐标系姿态转换矩阵 C_P^C

为:

$$C_P^C = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (4)$$

4 系统负载特性分析

由于凸轮结构的特殊性,在一个运动周期内,像面扫描系统各部件在像面上的分量相对于凸轮转轴的力臂将随凸轮转角的不同而变化,从而对凸轮电机轴上负载力矩产生影响,在系统负载特性分析时必须予以考虑。

依据上述姿态角定义及机构安装形式,CCD 像面为 $O X_c Y_c$ 平面,且 CCD 扫描方向与 $O X_c$ 轴平行。设像面扫描系统某部件重力为 mg ,则其在平台铅垂地面坐标系 $O X_c Y_c Z_c$ 中的坐标为 $(0, 0, -mg)^T$,对应相机坐标系 $O X_c Y_c Z_c$ 中的坐标 $(x_c, y_c, z_c)^T$ 可依据式(3)、(4)求出,即:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = C_P^C \cdot C_E^P \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix} = mg \begin{pmatrix} \cos \beta \sin \theta \cos \psi + \sin \beta \cos \theta \cos \psi \\ -\sin \psi \\ \sin \beta \sin \theta \cos \psi - \cos \beta \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix}$$

像面扫描系统部件重力在像面扫描方向上的分量 G_x 及与扫描方向垂直方向上的分量 G_y 可由下式求出:

$$\begin{aligned} G_x &= mg \cos \psi \sin(\theta + \beta) \\ G_y &= -mg \sin \psi \end{aligned} \quad (5)$$

对凸轮及从动件进行受力分析^[8-10],示意图如图 4 所示。

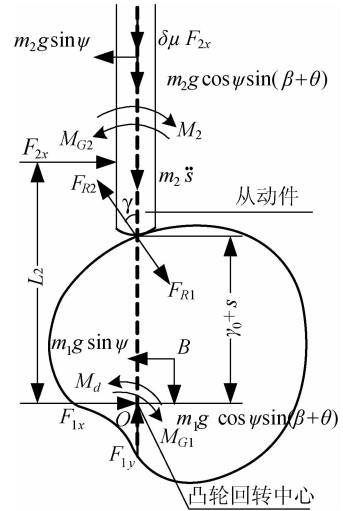


图 4 凸轮及从动件受力分析示意图

Fig. 4 Force sketch of cam and follower

作用于凸轮上维持其等速回转的平衡力矩(该值等于电机轴上的负载力矩)为 M_d 。从动件的重力 $G = m_2 g$,在加速度较大的情况下,从动件质量产生的惯性力 $m_2 (d^2 s / dt^2)$ 不容忽视。机座通过移动副作用于从动件上的约束反力为距离凸轮回转中心 L_2 处的法向作用力 F_{2x} 、力偶 M_2 。移动副中的摩擦力为 $\delta \mu F_{2x}$ ($\mu, \delta = \text{sign}(ds/dt)$ 分别为摩擦系数和表征摩擦力方向)。机座通过回转副作用于凸轮的约束反力为 F_{1x} 、 F_{1y} 。凸轮作用于从动件的法向推力为 F_{R2} ,从动件对凸轮的反作用力为 F_{R1} 。 F_{R2} 与从动件导路之间的夹角 γ 即为凸轮压力角。凸轮及从动件重力在像面上的分量相对于凸轮回转中心的力矩分别为 M_{G1} 、 M_{G2} 。

分别对凸轮和从动件建立力平衡方程及力矩平衡方程,如式(6)、(7)所示:

$$\begin{cases} F_{1y} - F_{R1} \cdot \cos \gamma - m_1 g \cos \psi \sin(\beta + \theta) = 0 \\ F_{1x} + F_{R1} \cdot \sin \gamma - m_1 g \sin \psi = 0 \\ M_d - F_{R1} \cdot (r_0 + s) \cdot \sin \gamma - M_{G1} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{R2} \cdot \cos \gamma - m_2 \ddot{s} - m_2 g \cos \psi \sin(\beta + \theta) - \delta \mu F_{2x} = 0 \\ F_{2x} - F_{R2} \cdot \sin \gamma - m_2 g \sin \psi = 0 \\ F_{R2} \cdot (r_0 + s) \cdot \sin \gamma - F_{2x} \cdot L_2 - M_2 + M_{G2} = 0 \end{cases}. \quad (7)$$

根据牛顿第三定律:

$$F_{R1} = F_{R2}. \quad (8)$$

联立求解方程(6)、(7)、(8)可得:

$$M_d = (r_0 + s) \cdot \tan \gamma \cdot$$

$$m_2 \frac{g \cdot \cos \psi \sin(\beta + \theta) + \ddot{s} + \delta \mu g \sin \psi}{1 - \delta \mu \cdot \tan \gamma} + M_{G1}. \quad (9)$$

为计算凸轮重力在像面上的分量相对于凸轮转轴的力矩,给出图 5 所示示意图。

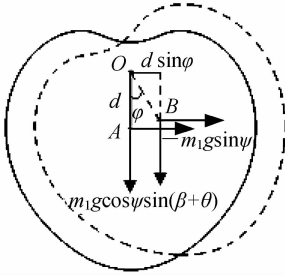


图 5 凸轮重力分量相对于凸轮转轴力矩分析示意图

Fig. 5 Torque analysis of cam inertial force relative to center of cam rotation

图 5 中,实线和虚线分别表示凸轮转角为 0° 和

φ 时所对应的位置。 O 为凸轮转轴; A 、 B 为凸轮在两位置的重心位置; d 为凸轮重心与转轴之间的距离,为一常量; $m_1 g \cos \psi \sin(\beta + \theta)$ 、 $-m_1 g \sin \psi$ 分别为考虑平台姿态角和相机位角时,凸轮重力在像面扫描方向及其垂直方向上的分量。

依据图 5 所示几何关系可得:

$$M_{G1} = m_1 g \cdot d \cos \psi \sin(\beta + \theta) \sin \varphi + m_1 g \cdot d \sin \psi \cos \varphi. \quad (10)$$

凸轮压力角计算公式由下式给出:

$$\tan \gamma = \frac{ds}{(r_0 + s) \cdot d\varphi} = \frac{\dot{s}}{(r_0 + s) \cdot \omega}. \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(9)可得:

$$M_d = \frac{m_2 \dot{s} \cdot [\ddot{s} + g \cos \psi \sin(\beta + \theta) + \delta \mu g \sin \psi]}{\omega \cdot (1 - \delta \mu \cdot \tan \gamma)} + m_1 g \cdot d \cos \psi \sin(\beta + \theta) \sin \varphi + m_1 g \cdot d \sin \psi \cos \varphi. \quad (12)$$

为便于后续叙述问题方便,定义 ϵ 为浮空平台横滚角 θ 与相机位角 β 的代数和。如果忽略摩擦,并将式(12)中从动件速度、加速度用从动件类速度、类加速度表示,则式(12)可表示为式(13)。

$$\begin{cases} M_d(\varphi, \psi, \epsilon) = M_{d1}(\varphi) + M_{d21}(\varphi, \psi, \epsilon) + M_{d22}(\varphi, \epsilon) \\ M_{d1}(\varphi) = m_2 v \cdot a \cdot \omega^2 \\ M_{d21}(\varphi, \psi, \epsilon) = (m_2 v + m_1 d \sin \varphi)(\cos \psi - 1) g \sin \epsilon + m_1 g d \sin \psi \cos \varphi \\ M_{d22}(\varphi, \epsilon) = (m_2 v + m_1 d \sin \varphi) g \sin \epsilon \end{cases} \quad (13)$$

依据设计结果,凸轮质量 $m_1 = 0.8711 \text{ kg}$,从动件质量 $m_2 = 3.624 \text{ kg}$, $d = 36.7 \text{ mm}$ 。系统工作时,俯仰角和横滚角变化范围为 $[-5^\circ, +5^\circ]$,相机位角变化范围为 $[-45^\circ, +45^\circ]$ 。

以下对 M_{d1} 、 M_{d21} 、 M_{d22} 分别进行讨论。

(1) M_{d1} 与凸轮转角、电机旋转角速度相关。依据图 1 可知:从动件在匀速段的类加速度为零。因此, M_{d1} 在从动件匀速段为零,在从动件变速段非零,即 M_{d1} 只在从动件变速段对凸轮转速产生影响。

(2) M_{d21} 与凸轮转角、相机位角、平台俯仰角、平台横滚角相关,取值范围为 $[-30.05 \text{ N} \cdot \text{mm}, +30.05 \text{ N} \cdot \text{mm}]$ 。可见, M_{d21} 只在很小范围内变化,在控制系统设计时可等效为系统扰动,不再单独考虑。

(3) M_{d22} 与凸轮转角、相机位角、平台横滚角相

关,取值范围为 $[-1.280 \text{ N} \cdot \text{m}, +1.280 \text{ N} \cdot \text{m}]$ 。 M_{d22} 与凸轮转角、 ϵ 角的关系曲线如图 6 所示。

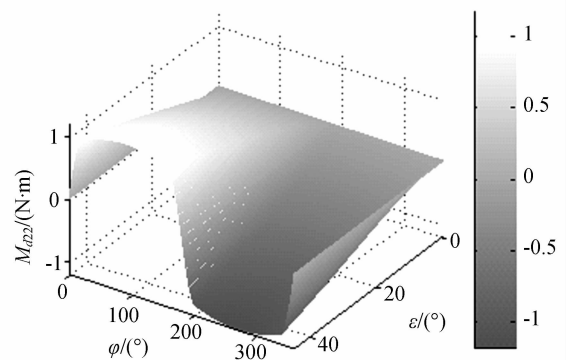


图 6 M_{d22} 与凸轮转角、 ϵ 角的关系曲线

Fig. 6 Relationship between M_{d22} and cam angle, ϵ angle

可见, M_{d22} 变化范围较大,设计控制器时须加以考虑。

忽略平台俯仰角对电机轴上负载力矩的影响,式(13)可简化为:

$$M_d = m_2 v \alpha \cdot \omega^2 + (m_2 v + m_1 d \sin \varphi) g \sin \epsilon. \quad (14)$$

后续分析均在式(14)所示简化数学模型的基础上进行。

当凸轮角速度 ω 为 $300^\circ/\text{s}$, ϵ 角分别取 10° 、 30° 、 45° 时,作用于电机轴上的负载力矩与凸轮转角 φ 之间的关系曲线如图 7 所示。

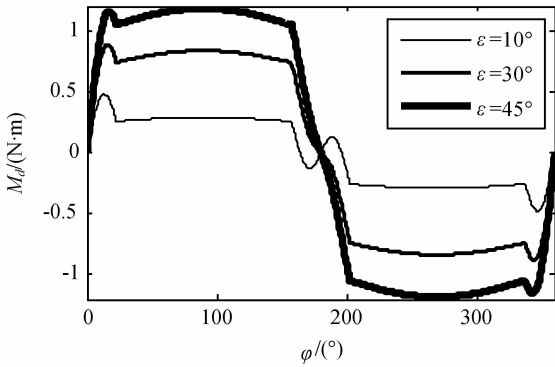


图 7 凸轮转速为 $300^\circ/\text{s}$, ϵ 取不同值时,负载力矩与凸轮转角关系曲线

Fig. 7 Relationship between load torque and cam angle with cam rotate-speed of $300^\circ/\text{s}$ and varied ϵ

5 非平衡负载的多模控制

系统简化数学模型如图 8 所示。

在 ϵ 角非零时,摩擦力矩与负载力矩相比很小,在下述分析中,只考虑负载力矩对凸轮转速的影响。在图 8 中,将电机轴上的负载力矩等效为电枢两端的扰动电压。

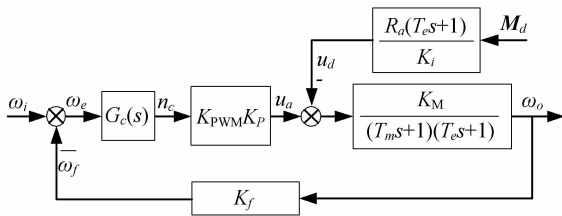


图 8 系统简化数学模型

Fig. 8 Simplified mathematical model for system

凸轮转速与系统给定转速及负载力矩之间的关系如式(15)所示。由于电机电气时间常数很小,

忽略不计。同时,系统校正环节及电机传递函数均只取直流分量,即:

$$G_c(s) = K_c, G_M(s) = K_M, \omega_o(s) = \frac{K_P K_{PWM} G_c(s) G_M(s) \cdot \omega_i - G_M(s) \frac{R_a(T_c s + 1)}{K_i} \cdot M_d}{1 + K_P K_{PWM} K_f G_c(s) G_M(s)}. \quad (15)$$

因此,式(15)可表示为:

$$\omega_o(s) = \frac{K_P K_{PWM} K_c K_M \cdot \omega_i - K_M \cdot M_d \cdot \frac{R_a}{K_i}}{1 + K_P K_{PWM} K_f K_c K_M}. \quad (16)$$

从图 7 可以看出:在凸轮升程段,负载力矩为阻力矩,在凸轮回程段,负载力矩为动力矩。由上述分析可知:在从动件匀速段,负载力矩与 ϵ 角相关,而与凸轮转速无关,其中凸轮重力产生的负载力矩相比于整个负载力矩很小,为便于分析,从动件匀速段负载力矩视为恒定,取从动件匀速段负载力矩绝对值为 M_{da} ,依据式(14)可得:

$$M_{da} = (m_2 v + m_1 d) g \sin \epsilon. \quad (17)$$

定义 ω_{up} 、 ω_{down} 分别为升程段、回程段凸轮转速,将式(17)代入式(16)可得:

$$\omega_{up}(s) = \frac{K_P K_{PWM} K_c K_M \cdot \omega_i - K_M \cdot (m_2 v + m_1 d) g \sin \epsilon \cdot \frac{R_a}{K_i}}{1 + K_P K_{PWM} K_f K_c K_M}, \quad (18)$$

$$\omega_{down}(s) = \frac{K_P K_{PWM} K_c K_M \cdot \omega_i + K_M \cdot (m_2 v + m_1 d) g \sin \epsilon \cdot \frac{R_a}{K_i}}{1 + K_P K_{PWM} K_f K_c K_M}. \quad (19)$$

由式(18)、(19)可知:在凸轮升程段和回程段,凸轮稳定转速的差值 $\Delta\omega_o$ 为:

$$\Delta\omega_o = \frac{2K_M \cdot (m_2 v + m_1 d) g \sin \epsilon \cdot \frac{R_a}{K_i}}{1 + K_P K_{PWM} K_f K_c K_M}. \quad (20)$$

在凸轮升程段和回程段,凸轮转速不同,将会造成 CCD 扫描速度不同,且两者差值随着 ϵ 角的增大而增大。扫描速度的差异会造成两个阶段曝光量不同,影响成像质量。为此,必须消除两个扫描阶段的速度差值。

为此,可以考虑多模控制方法。多模控制方法是一种仿人的智能控制方式,其依据系统所处的不

同状态及在不同时刻对控制系能要求的不同,采用不同的控制策略及模式。针对本系统的特点,采取变输入的多模控制方法,设在凸轮升程段和回程段,系统输入信号分别为 ω_{upi} 、 ω_{downi} ,校正环节放大倍数分别为 K_{upc} 、 K_{downc} ,在控制器设计时,在所需频带内,以下两式能够满足:

$$\begin{cases} |K_P K_{\text{PWM}} K_f K_{\text{upc}} K_M| \gg 1 \\ |K_P K_{\text{PWM}} K_f K_{\text{downc}} K_M| \gg 1 \end{cases} \quad (21)$$

将 ω_{upi} 、 K_{upc} 和 ω_{downi} 、 K_{downc} 分别代入式(18)、(19),并令 $\omega_{\text{upo}}(s) = \omega_{\text{downo}}(s)$,在式(21)条件下进行化简,可得式(22)。

$$\omega_{\text{upi}} = \omega_{\text{downi}} + \frac{(m_2 v + m_1 d) g \sin \epsilon \cdot \frac{R_a}{K_i}}{K_P K_{\text{PWM}}} \left(\frac{1}{K_{\text{upc}}} + \frac{1}{K_{\text{downc}}} \right) \quad (22)$$

即在 ω_{downi} 、 ϵ 角及控制器参数确定后,按照式(22)求取 ω_{upi} ,最终可使凸轮升程段和回程段转速保持一致。

由于系统采用数字控制方式,应用变输入多模控制时,需在不同控制器之间相互切换,如果切换过程中边界条件不相等,可能会造成系统扰动。可在系统切换过程中,令新的控制器边界条件为零,以使切换过程平滑过渡。该方法无需增加任何硬件电路,实现简单、方便,适合工程应用。

$$G_{45c}(s) = \begin{cases} \frac{2\ 750(0.015s+1)(0.002s+1)}{(0.084s+1)(0.000\ 357s+1)} & (0^\circ \leq \varphi < 157.5^\circ) \\ 650 & (157.5^\circ \leq \varphi < 180^\circ) \\ \frac{1\ 150(0.019s+1)(0.003s+1)}{(0.106\ 4s+1)(0.000\ 536s+1)} & (180^\circ \leq \varphi < 337.5^\circ) \\ 260 & (337.5^\circ \leq \varphi < 360^\circ) \end{cases} \quad (23)$$

依据式(23)可知: $K_{\text{upc}} = 2\ 750$, $K_{\text{downc}} = 1\ 150$ 。设定凸轮回程段系统输入信号 $\omega_{\text{downi}} = 230^\circ/\text{s}$,依据式(22)计算可知: $\omega_{\text{upi}} = 240.95^\circ/\text{s}$ 。系统输入信号与凸轮转角之间的关系如下:

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\text{upi}} & (0^\circ \leq \varphi < 180^\circ) \\ \omega_{\text{downi}} & (180^\circ \leq \varphi < 360^\circ) \end{cases} \quad (24)$$

将式(23)、(24)应用于凸轮稳速控制,得到凸轮转速曲线如图 10 所示。此时,从动件匀速段凸轮稳速精度达到 0.48%(均方根值)。

6 系统实验结果

从上述理论分析可知:若凸轮升程段和回程段系统控制器传递函数相同时,凸轮转速将存在差值。为验证理论分析的正确性,以 ϵ 角等于 45° 时为例进行说明。为不失一般性,系统控制器选用纯比例控制,测试凸轮转速曲线如图 9 所示。

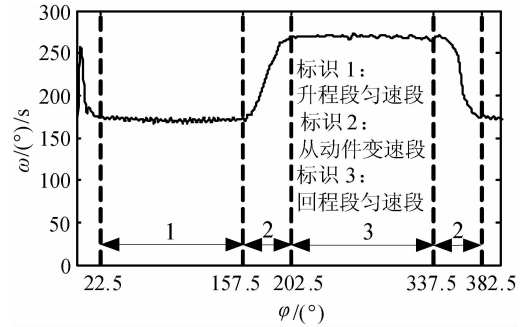


图 9 ϵ 角为 45° 、凸轮升程段和回程段采用相同控制器时的凸轮转速曲线

Fig. 9 Cam rate curve with ϵ of 45° and the same controller for cam lift-section and return-section

当采用变输入多模控制方法,且 ϵ 角为 45° 时,设计校正环节传递函数与凸轮转角之间的关系如下:

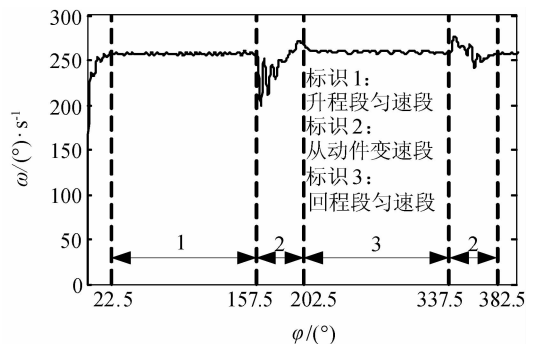


图 10 ϵ 角为 45° 、用变输入多模控制时凸轮转速曲线
Fig. 10 Cam rate curve with ϵ of 45° and the multi-model controller with various inputs

7 结 论

线阵 CCD 像面动态扫描拼接是实现大覆盖宽度的一种有效方法,其有效克服了机械直接拼接时拍摄区域存在盲区的缺点,同时不存在采用全反全透棱镜进行光学拼接时的渐晕效应。凸轮驱动的动态扫描拼接方法使得凸轮从动件的周期运动规律分为匀速段和变速段,双向 TDI CCD 可在升程匀速段和回程匀速段成像。凸轮结构的特殊性、平台姿态角和相机位角造成了系统负载非平衡特性。本文从理论上对系统负载力矩特性进行了分析,分析结果表明:当平台横滚角和相机位角之和非零时,在凸轮升程段和回程段,负载力矩表现为不同的特性。若两阶段采用相同的控制器,会造成凸轮转速在上述两阶段存在转速差。为消除该差值,提出了变输入的多模控制方法。

实验结果表明:采用变输入多模控制方法后,从动件匀速段凸轮稳速精度达到 0.48%,满足工程需要。该方法简单、方便,便于工程应用。

虽然凸轮在从动件匀速段保持匀速转动,但在从动件变速段速度波动较大,这将给位角系统带来较大扰动。为解决该问题,可以考虑两种方法:一是从控制策略上尽可能减小从动件变速段凸轮转速的波动,但由于凸轮本身固有的非平衡特性,要达到该目的比较困难;另外,可考虑从结构上加以解决:电机带动 2 个相同结构的凸轮,2 个凸轮相差 180° 相对安装,其中一个带动 CCD 组件,另外一个带动与 CCD 组件结构相同的假负载,根据系统负载力矩分析结果,该结构在某种程度可以消除电机轴上负载力矩,从而能减小凸轮转速在从动件变速段的波动,但该方法将增加结构的复杂度。这也将是下一步研究重点。

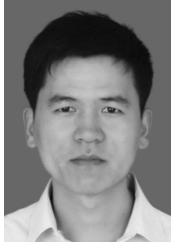
参考文献:

- [1] 李朝辉,王肇勳,武克用. 空间相机 CCD 焦平面的光学拼接 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 213-216.
LI C H, WANG Z X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 213-216. (in Chinese)
- [2] 张星祥,任建岳. TDI CCD 焦平面的机械交错拼接 [J]. 光学学报, 2006, 26(5): 740-745.
ZHANG X X, REN J Y. Mechanical interleaving assembly of TDI CCD focal plane image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [3] 耿文豹,翟林培,丁亚林. 光电成像系统的像面覆盖方法分析 [J]. 半导体光电, 2009, 30(3): 448-450.
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of focal plane coverage for E-O imaging systems [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(3): 448-450. (in Chinese)
- [4] 黄浦,葛文奇,李友一,等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 812-819.
HUANG P, GE W Q, LI Y Y, et al.. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 812-819. (in Chinese)
- [5] 王德江,董斌,李文明,等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2500-2506.
WANG D J, DONG B, LI W M, et al.. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)
- [6] 李焱,曹立华,王弟男. 惯导平台下舰载光电搜索跟踪系统的控制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1126-1133.
LI Y, CAO L H, WANG D N. Controlling of shipborne optoelectronic searching and tracking system based on inertial navigation platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1126-1133. (in Chinese)
- [7] 张斌,李洪文,郭立红,等. 变结构 PID 在大型望远镜速度控制中的应用 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1613-1619.
ZHANG B, LI H W, GUO L H, et al.. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1613-1619. (in Chinese)
- [8] 李兴华,翟林培. 含有凸轮机械的机电系统建模与仿真 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 49-55.
LI X H, ZHAI L P. Modeling and simulation of electromechanical system with cam mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 49-55. (in Chinese)

- [9] 徐正平,葛文奇,杨守旺,等. 像面扫描系统负载非平衡特性分析 [J]. 工程设计学报, 2010, 17(2): 102-106.
- XU ZH P, GE W Q, YANG SH W, *et al.*. Analysis on non-equilibrium load feature of image scanning system [J]. *Journal of Engineering Design.*, 2010, 17(2): 102-106. (in Chinese)

- [10] 徐正平,李友一,葛文奇. 非平衡宽覆盖像面扫描系统的神经网络控制 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2680-2687.
- XU ZH P, LI Y Y, GE W Q. Neural network control to image scanning system with non-equilibrium load and wide coverage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2680-2687. (in Chinese)

作者简介:



徐正平(1983—),男,河南许昌人,助理研究员,博士,2006年于东北师范大学获得学士学位,2011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,主要从事航空遥感器电子学设计。E-mail: xuzp090@163.com



许永森(1981—),男,河南信阳人,助理研究员,博士,2003年于吉林大学获得学士学位,2009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,主要从事航空遥感器研究。E-mail: pm131@sina.com



匡海鹏(1971—),男,吉林长春人,研究员,博士,1994年于吉林工业大学获得硕士学位,2008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,主要从事航空遥感器技术研究。E-mail: kuanghp@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)