

文章编号 1004-924X(2010)12-2680-08

非平衡宽覆盖像面扫描系统的神经网络控制

徐正平^{1,2},李友一¹,葛文奇¹

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

摘要:为扩大遥感仪器像面覆盖宽度,从现有的 CCD 拼接方法入手,提出了凸轮驱动的动态扫描拼接方法。将电机与凸轮同轴安装,两者做等速旋转运动,带动 4 片线阵 TDI CCD 在像面上做往复直线运动,相邻线阵 CCD 在扫描方向上的成像区域保持一定重叠率,从而实现了动态扫描拼接。分析了由凸轮结构的特殊性造成的系统负载力矩的非平衡特性进行了分析,针对采用常规稳速方法时,凸轮转速在负载变化阶段产生较强波动的情况,提出了常规稳速控制和神经网络相结合的自适应控制方法,并进行了实验分析。分析表明:作用于凸轮轴上的负载力矩与相机位角、凸轮转速成正比。与常规稳速方法相比,应用神经网络自适应控制方法后,系统稳速精度提高了 41%,非平衡负载引起的速度波动降低了 20%,满足工程需要。

关键词:像面扫描系统;非平衡负载;宽覆盖;神经网络控制

中图分类号:TP183 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101812.2680

Neural network control to image scanning system with nonequilibrium load and wide coverage

XU Zheng-ping^{1,2}, LI You-yi¹, GE Wen-qi¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To extend the imaging coverage of a remote sensing instrument, a dynamic scanning assembly actuated by a cam is proposed based on the existing CCD assembly methods. A motor and a cam were coaxially installed and were rotated at a constant speed. Four pieces of linear TDI CCDs were driven by the cam to reciprocate on the focal plane. The imaging areas of the two neighbor piece of CCDs in the scanning direction were overlapped to realize the scanning assembly. The nonequilibrium load feature of the system caused by the special structure of the cam was analyzed in detail. In consideration of that the cam speed would be fluctuated greatly due to the load variation by using the conventional speed control method, a neural network controller combined with the conventional speed control method was put forward. The proposed method was analyzed, and the analysis indicates that the load torque on the cam axis is directly proportional to the camera azimuth and cam speed, respectively. Fur-

收稿日期:2010-03-10;修订日期:2010-06-17.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA701203)

thermore, compared with that of conventional speed control method, the speed precision is enhanced by 41% when the neural network controller is used, meanwhile, the speed-fluctuation is reduced by 20%. The whole design could satisfy project requirements.

Key words: image scanning system; nonequilibrium load; wide coverage; neural network control

1 引言

随着遥感技术的不断发展,遥感仪器向着更高分辨率及更大覆盖宽度的方向发展,从而引入了 CCD 有限长度与宽覆盖像面之间的矛盾。当现有单片 CCD 长度不能满足像面覆盖宽度需要时,需采用 CCD 拼接技术,即将多个 CCD 组合成具有宽覆盖像面的 CCD 阵列。

常用的 CCD 拼接方法分为机械拼接和光学拼接。机械拼接又分为机械直接拼接和机械交错拼接^[1-2];机械直接拼接是将多片 CCD 首尾直接相连,并保证拼接 CCD 在一条直线上;若 CCD 两端存在哑像元,将造成拼接处存在漏洞,即拍摄区域存在盲区。机械交错拼接则是将相邻 CCD 在扫描方向上错开一定距离,使相邻 CCD 有效像素首尾相接;由于该拼接方法中相邻 CCD 在同一时刻所成像不在一条直线上,从而造成图像锯齿效应,该缺陷可通过后续电子学处理方法解决。但若在拍摄过程中偏航角非零,相邻 CCD 需重叠一定数量的有效像元,重叠像元数目与最大偏航角、相邻 CCD 垂直方向间距及单个像元尺寸有关。光学拼接则是利用分光棱镜形成一对光程相等的共轭对称面,将分布于透射面和反射面的 CCD 有效像素首尾相接^[3-5]。光学拼接中的分光棱镜,需采用全反全透棱镜,也可采用半反半透棱镜。全反全透式光能利用率高,但要求拼接 CCD 有效像素边界与相应的全反全透界面边界对齐,且从一个阵列向相邻阵列跨越时,相对照度减小,像元将受到渐晕效应的影响。为消除这种影响,拼接过程中可重叠部分有效像元,重叠像元数目与棱镜尺寸、最大孔径角及棱镜折射率相关。半反半透式安装方便,但光能利用率低,需采用 TDI(Time Delay Integrate)CCD 来解决能量不足的问题。

为弥补上述拼接方法存在的不足,本文提出了动态扫描拼接方法。在焦平面上均匀分布 4 片 TDI CCD,4 片 TDI CCD 在扫描方向上错开相等

距离;执行机构选用电机和凸轮,电机带动凸轮做等速旋转运动,从而带动 TDI CCD 做往复直线运动,最终完成扫描成像。由于凸轮的引入会造成控制系统负载非平衡,如何提高非平衡负载的稳速精度成为保证成像质量的关键问题之一。为此,分析了系统负载非平衡特性,并提出了基于神经网络的负载非平衡系统稳速控制方法。

2 凸轮设计

动态扫描拼接执行机构选用盘形等径凸轮。如果凸轮等速旋转,其单位时间内转过的角度将是一恒值。此时,从动件的位移、速度、加速度可以看作是凸轮转角的函数。依据凸轮设计结果,可以得到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:

$$s(\phi) = \begin{cases} \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\phi)) & (0^\circ < \phi \leq 22.5^\circ) \\ \frac{h}{4+6\pi}(8\phi - \pi + 2) & (22.5^\circ < \phi \leq 157.5^\circ) \\ h - \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\phi)) & (157.5^\circ < \phi \leq 202.5^\circ), \\ h - \frac{h}{4+6\pi}(8\phi - 9\pi + 2) & (202.5^\circ < \phi \leq 337.5^\circ) \\ \frac{h}{2+3\pi}(1-\cos(4\phi)) & (337.5^\circ < \phi \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s(\phi)$ 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、二次导数分别对应凸轮从动件类速度 v_1 、类加速度 a_1 。设凸轮旋转角速度为 ω ,则凸轮从动件速度 v ,加速度 a 与类速度 v_1 ,加速度 a_1 的关系如下:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} = v_1 \omega, \quad (2)$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{d^2s}{d\phi^2} \frac{d\phi}{dt} = a_1 \omega^2. \quad (3)$$

3 凸轮负载非平衡特性分析

对凸轮及从动件进行受力分析^[6-7],示意图如图 1 所示。

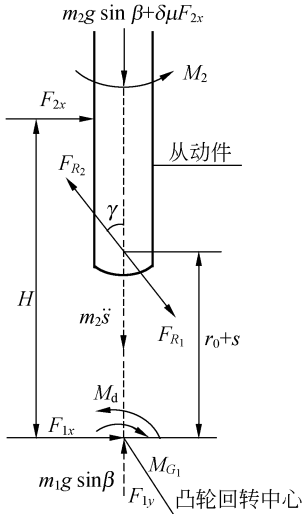


图 1 像面扫描系统受力分析图

Fig. 1 Force sketch of image scanning system

设作用于凸轮轴上维持其等速回传的平衡力矩为 M_d , 凸轮及从动件质量分别为 m_1, m_2 。在从动件速度较高的情况下, 从动件质量 m_2 产生的惯性力不容忽视。设机座通过直线导轨作用于从动件上的约束反力为作用于 H 处的法向作用力 F_{2x} 及力偶 M_2 。直线导轨中的摩擦力为 $\delta\mu F_{2x}$ (μ 为摩擦系数, δ 表征摩擦力方向)。电机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_{R_2} , 从动件对凸轮的反作用力为 F_{R_1} 。凸轮重力对凸轮旋转中心的力矩为 M_{G_1} , F_{R_2} 与从动件导路之间的夹角 γ 即为凸轮压力角。 β 为相机位角, $m_1 g \sin \beta, m_2 g \sin \beta$ 分别为相机位角非零时, 凸轮重力及从动件重力在凸轮转动平面所产生的重力分量。

分别对凸轮和从动件建立力及力矩平衡方程如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} F_{1y} - F_{R_1} \cdot \cos \gamma - m_1 g \sin \beta = 0 \\ F_{1x} + F_{R_1} \cdot \sin \gamma = 0 \\ M_d - F_{R_1} \cdot (r_0 + s) \cdot \sin \gamma - M_{G_1} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{R_2} \cdot \cos \gamma - m_2 \ddot{s} - m_2 g \sin \beta - \delta\mu F_{2x} = 0 \\ F_{2x} - F_{R_2} \cdot \sin \gamma = 0 \\ F_{R_2} \cdot \sin \gamma (r_0 + s) - F_{2x} \cdot H + M_2 = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

根据牛顿第三定律:

$$F_{R_1} = F_{R_2}, \quad (6)$$

联立求解方程(4)~(6)可得:

$$M_d = (r_0 + s) \cdot \tan \gamma \cdot m_2 \frac{g \cdot \sin \beta + \ddot{s}}{1 - \delta\mu \cdot \tan \gamma} + M_{G_1}, \quad (7)$$

为计算凸轮重力分量对负载力矩的影响, 给出图 2 示意图。

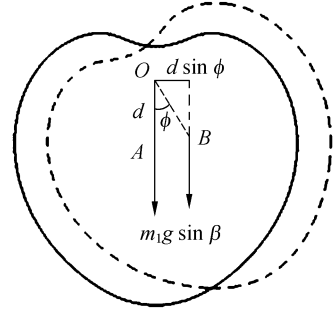


图 2 凸轮重力对凸轮转轴力矩的影响

Fig. 2 Torque analysis of cam inertial force according to the center of cam rotation

图 2 中, 实线对应凸轮转角为 0° 时的位置, 当凸轮逆时针转过 ϕ 角, 达到虚线位置。 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。依据图 3 所示几何关系, 可以得到:

$$M_{G_1} = m_1 g \cdot d \sin \beta \sin \phi. \quad (8)$$

为计算凸轮压力角, 给出图 3 示意图。

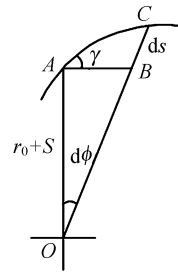


图 3 求解凸轮压力角示意图

Fig. 3 Sketch of pressure-angle of computing cam

从图 3 可以得到:

$$\tan \gamma = \frac{ds}{(r_0 + s) \cdot d\phi} = \frac{\dot{s}}{(r_0 + s) \cdot \omega}, \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7)可得:

$$M_d = \frac{m_2 \dot{s} \cdot (\ddot{s} + g \sin \beta)}{\omega \cdot (1 - \delta\mu \cdot \tan \gamma)} + m_1 g \cdot d \sin \beta \sin \phi, \quad (10)$$

式(10)为作用于凸轮轴上的平衡力矩。如果忽略摩擦,则式(10)简化为:

$$M_d = \frac{m_2 \dot{s}}{\omega} \cdot (\ddot{s} + g \sin \beta) + m_1 g \cdot d \sin \beta \sin \phi \quad (11)$$

式中给出了作用于凸轮轴上平衡力矩与相机位角、凸轮转角之间的关系。如果将式(11)中速度、加速度用从动件的类速度 v_1 、类加速度 a_1 表示,则得到:

$$M_d = m_2 v_1 a_1 \cdot \omega^2 + (m_2 v_1 + m_1 d \sin \phi) g \sin \beta \quad (12)$$

依据设计结果,凸轮质量 $m_1 = 0.8711 \text{ kg}$,从动件质量 $m_2 = 3.624 \text{ kg}$, $d = 36.7 \text{ mm}$ 。

当相机位角为 0° 、凸轮转速变化时,作用于电机轴上的负载力矩与凸轮转角之间的关系曲线如图 4 所示。

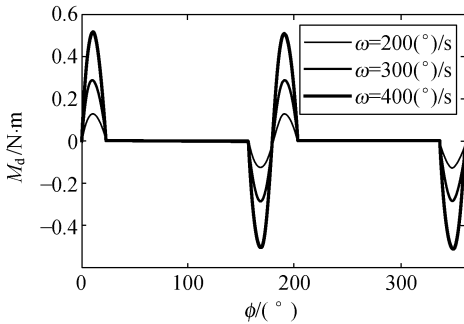


图 4 当相机位角为 0° 、凸轮转速变化时,作用于电机轴上的负载力矩与凸轮转角之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship between cam load torque and angle with camera azimuth of zero as cam rotate-speed varies

当凸轮转速为 $300^\circ/\text{s}$ 、相机位角变化时,作用于电机轴上的负载力矩与凸轮转角之间的关系曲线如图 5 所示。

从图 4、5 可知,作用于凸轮上的负载力矩与凸轮转速、相机位角成正比。当相机位角为 0° 、凸轮转速为 $300^\circ/\text{s}$ 时,作用于凸轮上的负载力矩波动为 $-0.290 \sim +0.290 \text{ Nm}$;当相机位角为 30° 、凸轮转速为 $300^\circ/\text{s}$ 时,力矩波动为 $-0.881 \sim +0.881 \text{ Nm}$ 。为保证系统稳速精度及系统平稳性,必须尽量降低负载力矩波动引起的不良影响。

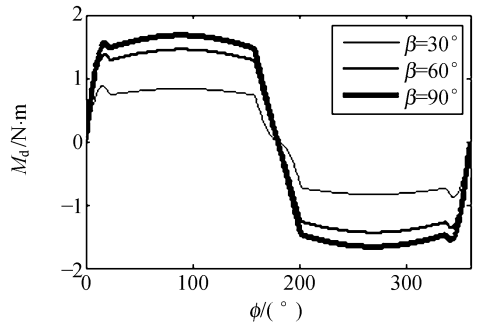


图 5 当凸轮转速为 $300^\circ/\text{s}$ 、相机位角变化时,作用于电机轴上的负载力矩与凸轮转角之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship between cam load torque and angle with cam rotate-speed of $300^\circ/\text{s}$ as camera azimuth varies

4 非平衡负载的神经网络自适应控制

对于常规数字控制系统的设计,如果采样频率远远大于系统截止频率,则可采用模拟系统设计方法设计校正环节传递函数,然后采用双线性变换方法得到数字系统。常规稳速控制系统采用超前滞后校正,数学表达式为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j \cdot s^j}{1 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot s^i} \quad (13)$$

式中, m, n 为分别为校正环节分子和分母阶次。在应用中可令 $m = n$,具体数值依据实验调试确定。

为得到式(13)对应数字控制表达式,对式(13)进行双线性变换,得到其 Z 域模型,进而转化为差分方程形式。双线性变换公式及最终得到的数字控制表达式分别如式(14)、(15)所示。

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (14)$$

$$u(k) = \sum_{i=1}^n \omega_{a_i} \cdot u(k - i) + \sum_{j=0}^m \omega_{b_j} \cdot e(k - j) \quad (15)$$

式(14)中, T_s 为系统采样周期;式(15)中, $u(k - i), e(k - j)$ 分别为前 i, j 时刻系统控制信号及偏差信号,且 $\omega_{a_i}, \omega_{b_j}$ 与 a_i, b_j 存在一一对应关系。

常规稳速控制系统是对原有系统及期望系统

进行综合的结果,设计基础是被控对象的精确数学模型。在实际工程中,通常不易得到被控对象的精确数学模型,且上述控制器参数一旦确定,在系统运行过程中不能更改,缺乏自适应功能。由于神经网络具有自适应、自学习的能力,具有逼近任意非线性函数的能力,因此科研人员对它进行了深入研究,并将其应用于图像处理、误差补偿、运动控制等领域,取得了不错的效果^[8-13]。将神经网络与传统控制方法相结合,依据系统输出实时改变控制参数,最终可使系统输出达到最优。基于这种设计思想,同时为满足控制系统实时性的要求,这里采用了 Adaline 线性神经网络^[14]。

采用 Adaline 神经网络自适应控制就是采用最小均方(LMS)学习算法,实时调整式(15)中权系数 $\omega_{a_i}, \omega_{b_j}$ ($1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m$),以使系统输出达到最优。Adaline 递归式直接自适应控制原理如图 6 所示。

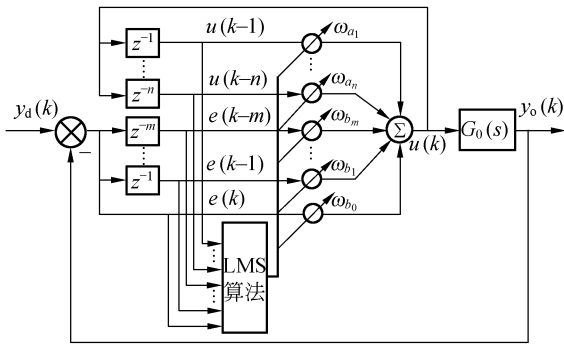


图 6 Adaline 递归式直接自适应控制原理图

Fig. 6 Principle of Adaline recuperate direct adaptive control

图 6 中, $y_d(k), y_o(k)$ 分别为系统当前时刻的预期输出和实际输出; z^{-1} 为单位延时环节; $u(k)$ 为当前时刻控制器输出; $G_0(s)$ 为被控对象的数学模型。

将神经网络控制器输入向量及权值向量分别记为 \mathbf{X}, \mathbf{W} , 即:

$$\mathbf{X}(k) = [u(k-1), \dots, u(k-n), e(k), \dots, e(k-m)]^T.$$

$$\mathbf{W}(k) = [\omega_{a_1}(k), \dots, \omega_{a_n}(k), \omega_{b_0}(k), \dots, \omega_{b_m}(k)]^T.$$

则依据式(15)及图 6 可知,控制器的输出为:

$$u(k) = \mathbf{X}^T(k) \cdot \mathbf{W}(k). \quad (16)$$

网络权值调整算法为:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \eta \cdot \Delta \mathbf{W}(k), \quad (17)$$

$$\Delta \mathbf{W}(k) = -\frac{\partial e^2(k)}{\partial \mathbf{W}(k)} = -\frac{\partial [y_d(k) - y_o(k)]^2}{\partial \mathbf{W}(k)} =$$

$$2e(k) \frac{\partial y_o(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial \mathbf{W}(k)}.$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial \mathbf{W}(k)} = \left[\frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{a_1}(k)}, \dots, \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{a_n}(k)}, \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{b_0}(k)}, \dots, \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{b_m}(k)} \right]^T.$$

选择 $\frac{\partial y_o(k)}{\partial u(k)} \approx 1$, 其带来的误差通过神经网络

自学习能力进行补偿。

若记

$$\alpha_i(k) = \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{a_i}(k)} \quad (1 \leq i \leq n)$$

$$\beta_j(k) = \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_{b_j}(k)} \quad (0 \leq j \leq m)$$

则有:

$$\frac{\partial u(k)}{\partial \mathbf{W}(k)} = [\alpha_1(k), \dots, \alpha_n(k), \beta_0(k), \dots, \beta_m(k)]^T, \quad (18)$$

$$\alpha_i(k) = \frac{\partial \left[\sum_{l=1}^n \omega_{a_l}(k) \cdot u(k-l) + \sum_{j=0}^m \omega_{b_j}(k) \cdot e(k-j) \right]}{\partial \omega_{a_i}(k)} = u(k-i) + \sum_{l=1}^n \omega_{a_l}(k) \cdot \alpha_i(k-l), \quad (19)$$

$$\beta_j(k) = \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^n \omega_{a_i}(k) \cdot u(k-i) + \sum_{l=0}^m \omega_{b_l}(k) \cdot e(k-l) \right]}{\partial \omega_{b_j}(k)} = e(k-j) + \sum_{i=1}^n \omega_{a_i}(k) \cdot \beta_j(k-i), \quad (20)$$

式(16)~(20)给出了 Adaline 递归式直接自适应控制算法。由于 ω_{a_i} 与系统开环极点相关,如果在

自适应学习过程中将开环极点转移到单位圆外部,则系统将不稳定。系统稳定是系统工作的前

提。为此,在实际工作中,保持 ω_{a_i} 为常数,只对 ω_{b_j} 进行调整,学习算法修正如下:

$$\begin{cases} W_1(k) = [\omega_{a_1}(k), \dots, \omega_{a_n}(k)]^T \\ W_2(k) = [\omega_{b_0}(k), \dots, \omega_{b_m}(k)]^T \\ W(k) = [W_1^T(k), W_2^T(k)]^T \\ \Delta W_2(k) = -\frac{\partial e^2(k)}{\partial W_2(k)} = 2e(k) \frac{\partial y_o(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial W_2(k)}, \\ \frac{\partial u(k)}{\partial W_2(k)} = [\beta_0(k), \dots, \beta_m(k)]^T \\ W_1(k+1) = W_1(k) \\ W_2(k+1) = W_2(k) + \eta \Delta W_2(k) \end{cases} \quad (21)$$

式(16), (20), (21)即为实际应用控制算法。

$\omega_{a_i} (1 \leq i \leq n), \omega_{b_j} (0 \leq j \leq m)$ 的初始值选取会对系统收敛速度及稳定性产生影响。可以证明,如果上述选取初值接近理想值,则系统稳定。因此,在实际工程中,采用如下方法保证系统稳定性:先采用传统设计方法设计控制器,通过双线性变换得到数字控制器系数,并将该系数作为神经网络权值。神经网络控制器在系统偏差大时,收敛速度也将降低。因此,实际系统设定偏差阈值,只有在偏差小于设定阈值时,才采用神经网络控制器,否则采用常规控制器。实际采用的神经网络控制原理图如图 7 所示。

图 7 中, $\omega_{e_{th}}$ 为设定的偏差阈值; $\omega_{a_{i0}}, \omega_{b_{j0}}$ 分别为 $\omega_{a_i}, \omega_{b_j} (1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m)$ 设定的初始值。

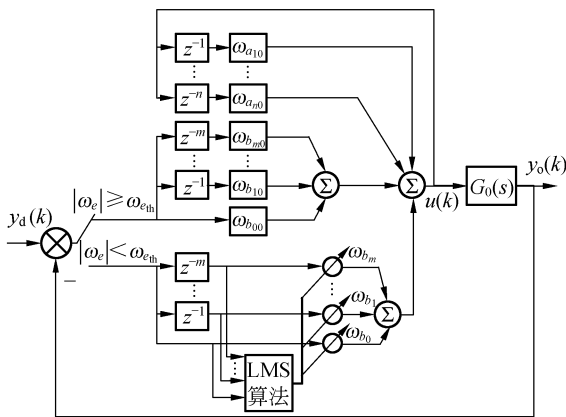


图 7 实际采用的神经网络控制原理图

Fig. 7 Principle of neural network control used in fact

5 稳速控制实验结果

经实验调试,常规稳速控制器采用超前滞后

校正,传递函数如下:

$$G_c(s) = \frac{3\ 000(0.69s+1)(0.01s+1)}{(3.71s+1)(0.0018s+1)},$$

即式(13)中, $m=n=2$, 系统采样频率为 800 Hz。经双线性变换得到数字控制表达式如下:

$$u(k) = 1.484u(k-1) - 0.484u(k-2) + 2446.435e(k) - 4600.626e(k-1) + 2154.712e(k-2)$$

综上所述,采用神经网络控制器时,神经网络权值初始值选取如下:

$$\omega_{a_{10}} = 1.484; \omega_{a_{20}} = -0.484; \omega_{b_{00}} = 2446.435; \omega_{b_{10}} = -4600.626; \omega_{b_{20}} = 2154.712.$$

神经网络自适应学习速率 $\eta=0.001$, 传统控制器与神经网络自适应控制器切换的偏差阈值 $\omega_{e_{th}} = 10$ 。

采用传统控制器和加入神经网络控制器后得到的凸轮转速曲线分别如图 8, 9 所示。

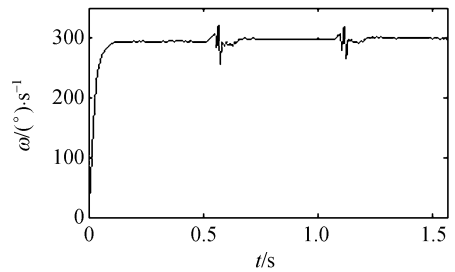


图 8 应用传统控制器时凸轮转速曲线

Fig. 8 Cam rate curve with traditional controller

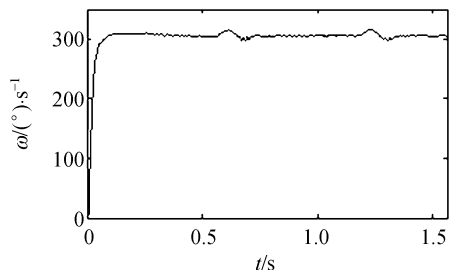


图 9 加入神经网络控制器后的凸轮转速曲线

Fig. 9 Cam rate curve with neural network added to the system

通过计算,单一传统控制方法和加入神经网络控制方法的稳速精度分别为 0.22%, 0.13%, 非平衡负载引起的速度波动分别为 6.661 5%, 5.351 5%, 且神经网络控制方法使速度变化过程

平稳。

6 结 论

动态扫描拼接方法不存在机械直接拼接时拍摄区域存在盲区的缺点,同时克服了光学拼接时的渐晕效应,但凸轮的引入导致了控制系统负载的非平衡特性。分析表明,作用于凸轮轴上的负载力矩与相机位角、凸轮转速成正比。当采用常规超前滞后校正控制时,负载力矩变化导致凸轮转速产生较强烈的抖振。为了解决上述问题,提

出利用神经网络自学习、自适应特性,动态改变控制器参数,以使系统输出达到最优。考虑到工程可实现性,将神经网络与传统稳速方法相结合,利用传统稳速方法系数作为神经网络初值来解决自适应控制系统稳定性问题,并设定偏差阈值以实现常规控制器和神经网络控制器之间的切换,克服了系统偏差较大时神经网络控制器收敛速度较慢的缺点。实验结果表明,较常规稳速方法,神经网络复合控制方法稳速精度提高了 41%,非平衡负载引起的速度波动降低了 20%,且速度变化过程平稳。

参考文献:

- [1] 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)
- [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 TDICCD focal plane image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 740-745. (in Chinese)
- [3] 孙东岩,张云. 线阵 CCD 遥感侦察系统中 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光子学报,1993,22(2):161-166.
SUN D Y, ZHANG Y. Optical focal plane assembly of linear CCD remote reconnaissance systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1993, 22 (2): 161-166. (in Chinese)
- [4] 李朝辉,王肇勋,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 CH H, WANG ZH X, WU K Y. Optical assembly of CCD focal plane for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 213-216. (in Chinese)
- [5] 沈忙作,陈旭南,王晋,等. 线阵 CCD 图象传感器的焦平面光学拼接[J]. 光电工程,1991,18(2):1-7.
SHEN M Z, CHEN X N, WANG J, *et al.* . Optical focal plane assembly of linear CCD image sensors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1991, 18 (2): 1-7. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 张策. 机械动力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2005:13-15.
ZHANG C. *Mechinery Dynamics* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 13-15. (in Chinese)
- [8] 王自强,李银妹,楼立人,等. BP神经网络用于光镊力的非线性修正[J]. 光学精密工程,2008,16(1):6-10.
WANG Z Q, LI Y M, LOU L R, *et al.* . Application of BP neural network to nonlinearity correction of optical tweezer force [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 6-10. (in Chinese)
- [9] 金靖,张忠钢,王峰,等. 基于 RBF 神经网络的数字闭环光纤陀螺温度误差补偿[J]. 光学精密工程,2008,16(2):235-240.
JIN J, ZHANG ZH G, WANG F, *et al.* . Temperature error compensation for digital closed-loop fiber optic gyroscope based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (2): 235-240. (in Chinese)
- [10] 洪喜,续志军,杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程,2008,16(4):598-604.
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (4): 598-604. (in Chinese)
- [11] 马立,于瀛洁,程维明,等. BP神经网络补偿并联机器人定位误差[J]. 光学精密工程,2008,16(5):878-883.
MA L, YU Y J, CHENG W M, *et al.* . Positioning error compensation for a parallel robot based

on BP neural networks[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):878-883. (in Chinese)

- [12] 赵章荣, 邹义杰, 顾新建, 等. 用神经网络实现超磁致伸缩智能构件[J]. *光学精密工程*, 2009,17(4):778-786.

ZHAO ZH R, WU Y J, GU X J, *et al.*... Implementation of sliding mode control of giant magnetostrictive smart component by neural network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):778-786. (in Chinese)

- [13] 沈铖武, 王志乾, 刘畅, 等. BP 神经网络在多位置捷联寻北系统中的应用[J]. *光学精密工程*,

2009,17(8):1890-1895.

SHEN CH W, WANG ZH Q, LIU CH, *et al.*... Application of BP neural network to multi-position strap-down north seeking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):1890-1895. (in Chinese)

- [14] 王连明, 葛文奇, 谢慕君. 陀螺稳定平台速度环的一种神经网络自适应控制方法[J]. *光电工程*, 2001,28(4):9-12.

WANG L M, GE W Q, XIE M J. A neural network adaptive control method for speed ring of gyroscope stabilized platform [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001,28(4):9-12. (in Chinese)

作者简介:



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士研究生,2006年于东北师范大学获学士学位,主要从事 CCD 几何超分辨成像方法研究及基于 DSP、FPGA 的航空相机像面扫描控制系统设计。E-mail: xuzp090@163.com



李友一(1968—),男,辽宁抚顺人,研究员,硕士生导师,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事航空成像技术的研究。E-mail:lyy_980205@yahoo.com.cn

导师简介:



葛文奇(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事机载光电设备稳定与跟踪控制技术的研究。