

基于广义预测的双电机同步控制

盛 华, 方 强

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:为减小多电机运动过程中的同步误差,提出了基于广义预测控制的两轴同步控制算法,其基本思想是在二次性能指标中加入同步误差的影响,使得该性能指标对单轴的跟踪误差、控制增量以及两轴之间的同步误差同时进行有限时段内的在线滚动优化,所得到的控制规律包含了两轴之间的交叉耦合作用,克服了单个电机受到扰动时两轴不能精确同步的问题,且该算法对系统的建模精度要求较低,在线滚动优化对负载扰动、随机噪声有很好的抑制作用。Matlab 仿真实验结果表明,该控制算法能获得良好的单轴跟踪精度、两轴同步精度以及抗干扰能力。

关键词:凝胶渗透色谱仪;交叉耦合;同步;二次性能指标

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)03-0107-05

Biaxial synchronization based on generalized predictive control

SHENG Hua, FANG Qiang

(Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To eliminate the synchronization error of multi-axis motion, an algorithm of biaxial synchronization based on generalized predictive control was advanced. The key point was to add the influence of synchronization error to the quadratic performance index. The tracking error, control input and synchronization error were optimized in the limited time field on-line. Control law was included cross coupling between the two axes and the discrepancy was overcome when one was disturbed. Besides, lower model accuracy was required and effectively load disturbance was restrained. The experiment results in Matlab demonstrate the algorithm can acquire good tracking, accuracy synchronization accuracy and a strong anti-disturbance ability.

Key words: gel permeation chromatograph(GPC); cross coupling; synchronization; quadratic performance index

0 引 言

在航空航天、船舶工程等制造领域,为实现大部件的对接装配,通常需要对部件进行位姿调整。为了减少调姿过程中所需控制轴的数量,通常将调姿过程分解为沿 X, Y, Z 轴的平移和绕 X, Y, Z 轴的旋转。目前多轴同步控制广泛采用非耦合的单轴独立^[1],通过改善各运动轴位置环的性能,减小各轴的跟踪误差,从而提高系统的同步精度。由于各电机的动态性能不可能完全一样,且受到负载干扰和噪声干扰等诸多因素的影响,单轴独立控制无法共享误差反馈信息,当某一轴受到干扰后,其反馈信号只对该轴进行补偿,其他轴输出不受其影响,因而造成较大的同步误差。交叉耦合

控制通过共享各轴反馈信息,产生相应的控制信号,以减小同步误差。文献[2-3]将交叉耦合控制用于减小数控机床多轴协调运动时的轮廓误差。文献[4]将变增益交叉耦合控制应用于两自由度任意轨迹的轮廓控制。这种交叉耦合算法采用了近似的轮廓误差向量,当系统受扰动后,估计的轮廓误差向量误差较大,难以保证同步性能。文献[5]将交叉耦合控制应用于移动式机器人驱动两轮同步运动,通过补偿方向误差以达到精确的运动轨迹。

笔者以大型刚体调姿系统中多轴协调同步控制为背景,考虑到运动分解后,在实际旋转过程中单个三坐标定位器使用两轴同步,故提出基于广义预测控制的两轴同步控制算法,建立包含两轴同步误差的性能指

收稿日期:2009-11-05

作者简介:盛 华(1984-),男,江苏苏州人,主要从事飞机数字化对接技术及同步控制等方面的研究. E-mail: walt_sheng@yahoo.cn

通信联系人:方 强,男,副教授. E-mail: fangqiang@zju.edu.cn

标函数,并在此基础上导出两轴同步的交叉耦合控制规律。

1 机电模型差分方程

一般来说,电机模型可以描述为^[6]:

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a(t) \quad (1)$$

$$M_m(t) = C_m i_a(t) \quad (2)$$

$$J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} = M_m(t) \quad (3)$$

$$E_a(t) = C_e \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (4)$$

式中 $J_m, f_m, M_m(t)$ —折算到电机轴的负载转动惯量,阻尼系数,电磁转矩; $u_a(t), i_a(t), L_a, R_a, E_a(t), C_e, C_m$ —电枢电压、电枢电流、电枢电感、电枢电阻、电枢反电势,反电势系数、转矩系数。

忽略电感 L_a 的影响,由式(1)~式(4)可得电机微分方程:

$$\frac{d^2\theta_m(t)}{dt} + a \frac{d\theta_m(t)}{dt} = bu_a(t) \quad (5)$$

$$\text{其中, } a = \frac{R_a f_m + C_m C_e}{R_a J_m}; b = \frac{C_m}{R_a J_m}。$$

式(5)经拉氏变换后可得电机模型的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{b}{s(s+a)} \quad (6)$$

机械传动部分由精密齿轮减速器(减速比 Z_1/Z_2)、滚珠丝杠(导程 P)和导轨滑块副组成,不考虑机械系统传动误差的影响,电机输出转角 θ 与终端位移输出 y 之间的传递函数 $G_2(s) = \frac{Y(s)}{\theta(s)} = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{P}{2\pi}$,故电机模型传递函数为:

$$G = \frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) \cdot G_2(s) = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{b}{s(s+a)} = \frac{b'}{s(s+a)} \quad (7)$$

$$\text{式中 } b' \text{—常数, } b' = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{P}{2\pi}。$$

由于广义预测控制是一种计算机控制策略,它依赖于系统的离散数学模型,因此需要对模型对象进行离散化处理。以 T 为采样周期,进行离散化可得差分方程为:

$$(1 - (1 + e^{-Ta})z^{-1} + e^{-Ta}z^{-2})y(k) = \left(\frac{b'}{a^2}(aT + e^{-Ta} - 1) - \frac{b'}{a^2}(aTe^{-Ta} + e^{-Ta} - 1)z^{-1} \right)u(k-1) \quad (8)$$

式中 k —采样时刻。

2 控制器设计

本研究采用线性时间离散 CARIMA 模型(受控自回归积分滑动平均模型)来描述两电机运动过程:

$$A_i(z^{-1})y_i(k) = B_i(z^{-1})u_i(k-1) + C_i(z^{-1})\xi_i(k)/\Delta \quad (9)$$

式中 $y_i(k), u_i(k-1)$ —被控对象输出量和输入量; $C_i(z^{-1})\xi_i(k)$ —系统干扰; Δ —差分算子, $\Delta = 1 - z^{-1}$; $i = 1, 2$ 。

由式(8)可知:

$$A_i(z^{-1}) = 1 - (1 + e^{-Ta})z^{-1} + e^{-Ta}z^{-2};$$

$$B_i(z^{-1}) = \frac{b'}{a^2}(aT + e^{-Ta} - 1) - \frac{b'}{a^2}(aTe^{-Ta} + e^{-Ta} - 1)z^{-1}。$$

本研究针对式(9)求解增量型闭环控制规律 $\Delta u_i(k)$,使得在保证单轴跟踪精度的同时,对控制量进行优化,并使两轴之间的同步误差趋于零。

根据预测控制的原理^[8-10],要得到第 j 步的预测输出,引入 Diophantine 方程:

$$\left. \begin{aligned} E_{ij}(z^{-1})A_i(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_{ij}(z^{-1}) &= 1 \\ B_i(z^{-1})E_{ij}(z^{-1}) &= G_{ij}(z^{-1}) + z^{-j}H_{ij}(z^{-1}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 i —第 i 个电机, $i = 1, 2$; j —预测时域, $j = 1, 2, \dots, N_p$; 以下未特别说明, i, j 定义不变。

式中:

$$E_{ij}(z^{-1}) = e_{i0} + e_{i1}z^{-1} + \dots + e_{i,j-1}z^{-j+1};$$

$$e_{i0} = 1; F_{ij}(z^{-1}) = f_{i0}^j + f_{i1}^jz^{-1} + \dots + f_{i,na}^jz^{-na};$$

$$G_{ij}(z^{-1}) = g_{i0} + g_{i1}z^{-1} + \dots + g_{i,j-1}z^{-j+1};$$

$$H_{ij}(z^{-1}) = h_{i0}^j + h_{i1}^jz^{-1} + \dots + h_{i,nb-1}^jz^{-nb+1}。$$

根据式(9)、式(10),可以得到第 j 步预测输出为:

$$y_i(k+j) = G_{ij}\Delta u_i(k+j-1) + F_{ij}y_i(k) + H_{ij}\Delta u_i(k-1) \quad (11)$$

当预测时域长度为 N_p ,控制时域长度为 N_u ,并假设 $\Delta u_i(k+j-1) = 0$ (当 $j > N_u$),即可导出 $j = 1$ 到 $j = N_p$ 的矢量形式的多步预测输出,写成矩阵形式为:

$$Y_i = G_i U_i + P_i \quad (12)$$

其中:

$$Y_i = [y_i(k+1) \quad y_i(k+2) \quad \dots \quad y_i(k+N_p)]^T;$$

$$G_i = \begin{bmatrix} g_{i0} & 0 & \dots & 0 \\ g_{i1} & g_{i0} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{i(N_u-1)} & g_{i(N_u-2)} & \dots & g_{i0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{i(N_p-1)} & g_{i(N_p-2)} & \dots & g_{i(N_p-N_u)} \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} U_i &= [\Delta u_i(k) \quad \Delta u_i(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u_i(k+N_u-1)]^T; \\ P_i &= [p_{i1}(k) \quad p_{i2}(k) \quad \cdots \quad p_{iN_p}(k)]^T; \\ p_{ij}(k) &= F_{ij}y_i(k) + H_{ij}\Delta u_i(k-1)。 \end{aligned}$$

定义两电机间的同步误差为:

$$\varphi(k) = \alpha(y_1(k) - \beta y_2(k)) \quad (13)$$

式中 β —电机跟随不同轨迹时引入的同步因子, $\beta = r_1(k)/r_2(k)$; α —耦合因子^[7]。

理论上当系统在每一个采样时刻都有 $\varphi(k) = 0$ 时,那么系统的同步误差为零,这时笔者认为系统可以获得很好的跟踪精度和同步误差。

N_p 步预测的同步误差矩阵为:

$$\begin{aligned} \Phi &= [\varphi(k+1) \quad \varphi(k+2) \quad \cdots \quad \varphi(k+N_p)]^T = \\ &= (\alpha Y_1 - \alpha \beta Y_2)^T \end{aligned} \quad (14)$$

为了进行柔化控制,控制的目的是输出直接跟踪设定值,而是跟踪参考轨迹,参考轨迹为:

$$r_i(k+j) = \gamma^j y_i(k) + (1-\gamma^j) y_{ri}(k) \quad (15)$$

式中 γ —柔化因子, $0 < \gamma < 1$; $y_{ri}(k)$ 、 $y_i(k)$ 和 $r_i(k+j)$ — k 时刻设定轨迹、输出值和 $k+j$ 时刻参考轨迹。

由此可得参考轨迹为:

$$R_i = Q y_i(k) + M y_{ri}(k) \quad (16)$$

其中:

$$R_i = [r_i(t+1) \quad r_i(t+2) \quad \cdots \quad r_i(t+j)]^T;$$

$$Q = [\gamma \quad \gamma^2 \quad \cdots \quad \gamma^j]^T;$$

$$M = [1-\gamma \quad 1-\gamma^2 \quad \cdots \quad 1-\gamma^j]^T。$$

用参考轨迹替设定轨迹,并引入包含同步误差的二次型性能指标泛函:

$$\begin{aligned} J &= E \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{j=1}^{N_p} (y_i(k+j) - r_i(k+j))^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_i (\Delta u_i^2(k+j-1)) + \right. \\ &\quad \left. \eta \sum_{j=1}^{N_p} [\alpha(y_1(k+j) - \beta y_2(k+j))]^2 \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(17)写成矩阵形式为:

$$J = E \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[(Y_i - R_i)^T (Y_i - R_i) + \lambda_i U_i^T U_i \right] + \eta \Phi^T \Phi \right\} \quad (18)$$

式中 λ_i —控制加权系数; η —同步误差影响系数; Y_i 、 R_i 、 U_i 、 Φ 定义同上。

由式(12)、式(14)及式(18),并取 J 最小化,可得控制规律为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (1+\eta\alpha^2)G_1^T G_1 + \lambda_1 I & -\eta\alpha^2\beta G_1^T G_2 \\ -\eta\alpha^2\beta G_2^T G_1 & (1+\alpha^2\beta^2\eta)G_2^T G_2 + \lambda_2 I \end{bmatrix}^{-1} \\ &\quad \begin{bmatrix} G_1^T & 0 \\ 0 & G_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 - (1+\eta\alpha^2)P_1 + \eta\alpha^2\beta P_2 \\ R_2 - (1+\eta\alpha^2\beta)P_2 + \eta\alpha^2\beta P_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

可见,该控制策略是在实施了控制增量之后,再采集 $k+1$ 时刻的输出数据,进行新的预测、校正、优化,从而避免在输入完毕期间因受干扰等而造成失控。因此优化过程不是一次离线进行,而是反复在线进行的,即在每一时刻都提出一个立足于该时刻的局部优化目标,而不是采用不变的全局优化目标。当模型失配或有时变、非线性及干扰影响时,该控制策略能及时进行弥补,减小误差,并保持实际上的最优。

取式(19)中 $[U_1 \quad U_2]^T$ 的第 1 行和第 N_u+1 行,即为 t 时刻的控制输入 $[\Delta u_1(k) \quad \Delta u_2(k)]^T$,记:

$$\begin{bmatrix} (1+\eta\alpha^2)G_1^T G_1 + \lambda_1 I & -\eta\alpha^2\beta G_1^T G_2 \\ -\eta\alpha^2\beta G_2^T G_1 & G_2^T (1+\alpha^2\beta^2\eta)G_2 + \lambda_2 I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} G_1^T & 0 \\ 0 & G_2^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中,第 1 行和第 N_u+1 行为 $\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}$,其中

d_{11} 、 d_{12} 、 d_{21} 、 d_{22} 均为 $1 \times N_p$ 的向量。

式(19)可简化为:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta u_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 - (1+\eta\alpha^2)P_1 + \eta\alpha^2\beta P_2 \\ R_2 - (1+\eta\alpha^2\beta)P_2 + \eta\alpha^2\beta P_1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

根据式(21),可以得到控制系统的方框图,如图 1 所示。

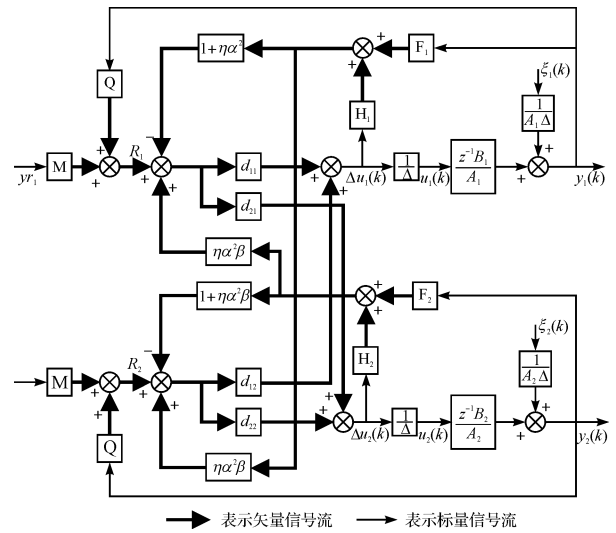


图 1 控制系统框图

3 仿真实验

本研究采用两台同型号的电机进行仿真,其参数如表 1 所示,仿真实验考虑了两电机实际内阻的不同。

表 1 电机主要参数

参数符号	含义	数值
R_{a1}, R_{a2}	电枢电阻/ Ω	8.36、8.68
f_m	阻尼系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	3.82×10^{-5}
C_m	转矩系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	1.1
C_e	反电势系数/ $(\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.674 5
J_m	电机轴转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.85×10^{-4}
J_e	等效转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.37×10^{-4}
i	减速比	1 : 25
P	丝杠导程/mm	5

采样周期 $T = 0.01 \text{ s}$, 离散后得到: $A_1 = 1 - 1.339 5z^{-1} + 0.339 5z^{-2}$, $B_1 = 0.366 8 + 0.256 7z^{-1}$; $A_2 = 1 - 1.353 3z^{-1} + 0.353 3z^{-2}$, $B_2 = 0.357 2 + 0.252 3z^{-1}$ 。

根据控制器参数确定原则^[9], 并通过多次仿真实验, 本研究选取的控制器参数如下: $\lambda_i = 10, \eta = 20, \alpha = 1, \beta = 0.5, \gamma = 0.3, N_p = 3, N_u = 2$ 。设定轨迹 y_{r1}, y_{r2} 分别是幅值为 100 mm 和 200 mm, 周期为 2 s 的正弦输入, 采样时间 $T = 0.01 \text{ s}$ 。在无系统干扰情况下, 稳定运行时, 单轴跟踪误差如图 2、图 3 所示。

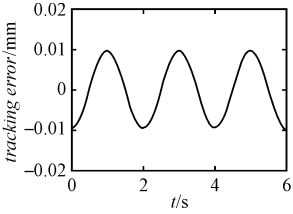


图 2 电机 1 输出跟踪误差

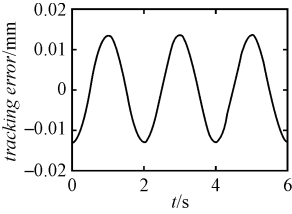


图 3 电机 2 输出跟踪误差

在 $t = 2 \text{ s}$ 时, 由于电机 1 受系统扰动, 产生相对与输入信号 y_{r1} 幅值 20% 的阶跃信号; 在 $t = 5 \text{ s}$ 时由于电机 2 受系统扰动, 产生相对与输入信号 y_{r2} 幅值 20% 的阶跃信号。

电机 1 控制量 u_1 和电机 2 控制量 u_2 如图 4、图 5 所示。

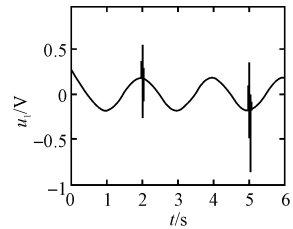


图 4 电机 1 控制量 u_1

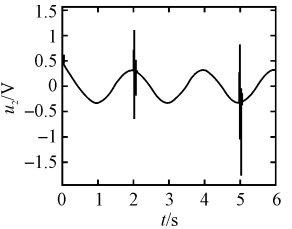


图 5 电机 2 控制量 u_2

电机 1 和电机 2 在 $t = 2 \text{ s}$ 时输出量和输入量如图 6、图 7 所示; 在 $t = 5 \text{ s}$ 时输出量和输出量如图 8、图 9 所示。

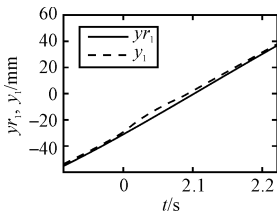


图 6 $t = 2 \text{ s}$ 时输入 y_{r1} 与输出 y_1

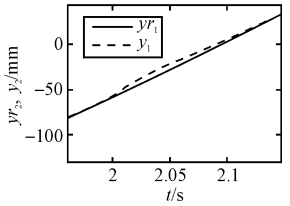


图 7 $t = 2 \text{ s}$ 时输入 y_{r2} 与输出 y_2

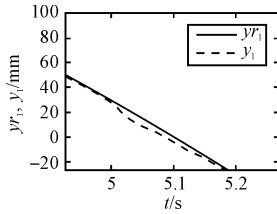


图 8 $t = 5 \text{ s}$ 时输入 y_{r1} 与输出 y_1

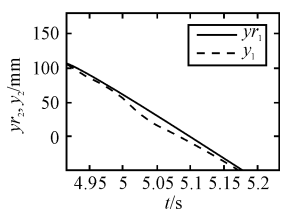


图 9 $t = 5 \text{ s}$ 时输入 y_{r2} 与输出 y_2

在 $t = 2 \text{ s}$ 时, 电机 1 受到阶跃扰动, 输出量 y_1 与输入量 y_{r1} 的跟踪误差变大 (如图 6 所示), 控制量 u_1 增大 (如图 4 所示)。通过两电机之间的交叉耦合作用, 电机 1 受到干扰后, 跟踪误差同时反馈到两轴上, 在 $t = 2 \text{ s}$ 时, 控制量 u_2 增大 (如图 5 所示), 输出量 y_2 与 y_{r2} 之间跟踪误差变大 (如图 7 所示), 保持两轴在位置上趋于同步; 同样, 在 $t = 5 \text{ s}$ 时, 电机 2 受到阶跃扰动, 输出量 y_2 与输入量 y_{r2} 跟踪误差变大 (如图 9 所示), u_2 增大 (如图 5 所示)。同时电机 2 受干扰后, 跟踪误差同时反馈到两轴上, 使控制量 u_1 增大, 输出量 y_1 与 y_{r1} 跟踪误差也变大 (如图 8 所示)。这样, 单个电机受到扰动后, 将跟踪误差同时分配到两轴上, 在保证单轴性能的同时, 使得同步误差大大减小。有系统干扰下, $\eta = 200$ 时两电机同步误差曲线如图 10 所示。

令式 (14) 中 $\eta = 0$, 即:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1^T G_1 + \lambda_1 I & 0 \\ 0 & G_2^T G_2 + \lambda_2 I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} G_1^T & 0 \\ 0 & G_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 - P_1 \\ R_2 - P_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

上式表明, 当 $\eta = 0$ 时, 相当于对两轴进行独立控制。采用相同参数, 仿真得无交叉耦合时两电机同步误差如图 11 所示。

从仿真结果可知, 系统能保证良好的单轴跟踪精度, 鲁棒性强, 在受到干扰后, 响应速度快, 系统输出迅速 (下转第 116 页)

合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化的应用。使用正确的软件工具并通过设计或调用特定的程序模块,可以高效地创建友好的人机交互界面。NI 公司提供的行业标准图形化编程软件——LabVIEW, 不仅能轻松方便地完成与各种软硬件的连接,更能提供强大的后续数据处理能力,设置数据处理、转换、存储的方式,并将结果显示给用户^[7-8]。

本研究所描述的中空纤维复合膜涂敷设备控制系统软件基于 LabVIEW 软件编程环境开发,主要包含加热控制软件模块以及电机调速及张力反馈控制模块,另外还包含 2 个小模块,即风扇控制和磁粉离合器控制。在系统整体控制过程中,采用人与计算机实时交互的形式,控制参数可以实时进行修改。另外,在涂敷过程中,必须保证反应釜中的液体达到一定的温度,因此开发的软件采用顺序循环的方式,首先达到温度恒定,然后保证张力恒定的情况下进行中空纤维复合膜的涂敷。

3 结束语

中空纤维膜通过涂敷可以形成纳滤膜和反渗透膜,目前纳滤膜和反渗透膜的研究与发展非常迅猛。因而,

本研究研制了中空纤维复合膜涂敷设备并实现了基于虚拟仪器技术的自动控制系统设计。它的研究不仅具有较高的学术价值,而且具有非常好的经济效益。

参考文献 (References):

- [1] 王 薇,杜启云. 中空纤维复合膜[J]. 高分子通报,2007(5):54-59.
- [2] 马世虎,吕晓龙,李先锋. PVDF 中空纤维复合膜的制备及其性能研究[J]. 天津工业大学学报,2005,24(3):5-8.
- [3] 环国兰,张宇峰,杜启云. 纳滤复合膜的研制[J]. 水处理技术,2006,32(11):12-15.
- [4] 王 薇,李国东,杜启云. 纳滤膜的离子选择性[J]. 天津工业大学学报,2007,26(4):5-7.
- [5] 王学松,孙胜梅. 气体分离用聚砜中空纤维膜的活化涂敷技术[J]. 化工进展,2001,20(4):35-36.
- [6] 俞丽芸,李健生,黄西腊,等. 中空纤维担载 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 复合膜的研制[J]. 膜科学与技术,2007,27(2):11-14.
- [7] 乔印虎,陈杰平,易 勇. 虚拟仪器技术在磁流变振动实验台中的应用[J]. 机电工程,2007,24(10):26-27.
- [8] 贫今天,桑宏强,张建业. 基于虚拟仪器技术的机电一体化教学实验平台[J]. 机电工程,2008,25(8):111-113.

[编辑:柴福莉]

(上接第 110 页)

速,恢复稳定,无振荡出现。同时,该系统具有良好的同步精度,在某一个轴受到干扰作用时,通过误差反馈,使得另一个轴同时产生相应的控制量,以减小同步误差。两轴之间的交叉耦合作用使单轴所受的干扰同时影响两轴的输出,从而保证了两轴的同步精度。而在无交叉耦合时,当某一轴受到干扰作用,由于两轴之间没有相互联系,因而必然会造成较大的同步误差。

4 结束语

本研究采用 CARIMA 模型,通过广义预测控制算法,提出了包含了同步误差的二次性能指标泛函,采用对系统进行多步预测、滚动优化、反馈校正等策略,在保证单轴跟踪精度的同时对两轴进行了交叉耦合控制,使得两轴输出能保持精确的同步。仿真结果表明,系统对干扰具有很强的抑制作用,两轴均能取得良好的跟踪性能和同步性能。

参考文献 (References):

- [1] NA Li-ju, CHOI Chong-ho, JANG Tae-jeong, et al. Contour

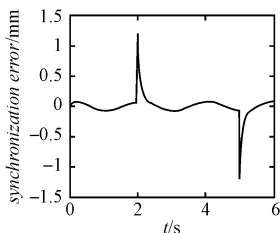


图 11 两电机同步误差(有系统干扰, $\eta=0$)

Error Analysis and Gain Tuning for CNC Machining Center [C]//AMC'96-MIE Japan: Mie,1996:197-202.

- [2] KOREN Y, LO C C. Variable-gain cross-coupling controller for contouring[J]. **CIRP Manufacturing Technology Annals**,1991,40(1):371-374.
- [3] YEH S S, HSU P L. Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems[J]. **IEEE Transaction on Control System Technology**,2003,11(3):375-382.
- [4] YANG Jiang-zhao, XV Ji-jie, LI Ze-xiang. Two-Degree-of-Freedom Based Cross-Coupled Control for High-Accuracy Tracking Systems[C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Az: Scottsdale,2007:950-955.
- [5] FENG L, KOREN Y, BORENSTEIN J. Cross-coupling motion controller for mobile robots[J]. **IEEE Control Systems**,1993,13(6):35-43.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理简明教程[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [7] XIAO Y, ZHU K Y. Optimal synchronization control of high precision motion systems[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2006,53(4):1160-1169.
- [8] CLARKE D W. Application of generalized predictive control to industrial processes[J]. **IEEE Control Systems Magazine**,1988,8(2):49-55.
- [9] 王 伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [10] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [11] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

[编辑:柴福莉]