

l 个相同维数子过程在同一输入下的输出协调控制

田彦涛 韦子枝

(吉林工业大学电子工程系, 长春 130022)

摘要 本文提出了一种多变量系统协调控制新方案. 对于由多个子系统构成的过程控制问题, 通过引入一个参考模型, 并利用各子系统构成参考模型的状态观测器, 实现各子系统输出之间的鲁棒协调控制. 分析可知该系统具有结构稳定性及渐近协调性. 文中给出了多电机转速协调控制的实验研究结果及冷连轧机速度协调控制应用实例. 结果表明, 本文提出的鲁棒协调控制系统具有强抗扰性及对系统的参数和结构变化的不变性.

关键词: 多变量系统 协调控制 鲁棒性 极点配置

1 引言

许多实时过程控制问题都可以分解为多个子过程. 工艺上往往要求各子过程之间能够按给定的比例关系协调运行. 这就是多变量系统的协调控制问题. 这一问题很早就已引起人们的重视⁽¹⁻⁴⁾.

本文在文献[5]的基础上, 提出了多变量系统模型参考协调控制, 其结构如图1. 其中, 协调控制器利用观测器原理进行设计.

对于图1给出的协调控制系统, 我们针对系统的抗扰性、协调性和鲁棒性, 进行了大量的转速协调控制的实验研究及冷连轧机速度协调控制的应用研究, 得到了满意的结果.

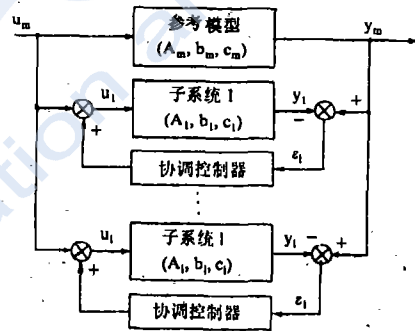


图1 模型参考协调控制系统结构图

2 模型参考协调控制

假设某一过程控制问题可以分解为 l 个相同维数的子过程, 且以如下的状态方程描述

$$P_i: \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + b_i u_i \\ y_i = c_i x_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

其中, $x_i \in R^n$, $u_i \in R$, $y_i \in R$, $A_i \in R^{n \times n}$, $b_i \in R^{n \times 1}$, $c_i \in R^{1 \times n}$.

构造参考模型如下

$$P_m: \begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + b_m u_m \\ y_m = c_m x_m \end{cases} \quad (2)$$

其中, (A_m, b_m, c_m) 的维数与 (A_i, b_i, c_i) 相同.

一般地, 为了使各个子过程的输出之间相互协调, 必须加入一定的动态协调控制.

定义 1

$$\begin{cases} \bar{x}_i(t) = x_m(t) - x_i(t) \\ e_i(t) = y_m(t) - y_i(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, l$$

称为系统(1)和(2)的广义状态误差和广义输出误差.

定义 2 若对任意的 $|e_i(0)| < \infty$, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_i(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

则称系统 P_i 对于参考模型 P_m 具有渐近协调性.

定理 1 考虑过程模型(1)及参考模型(2), 若

① (A_m, b_m, c_m) 能控能观, 且 A_m 为 Hurwitz 矩阵;

② $A_i = A_m, b_i = b_m, c_i = c_m, i = 1, 2, \dots, l$, 则以观测器形式

$$\dot{x}_i = (A_i - M c_i)x_i + b_i u_m + M y_m, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

构成的协调控制系统结构稳定, 且具有渐近协调性. 其中, $M \in R^{n \times 1}$ 为观测器反馈阵.

证明 根据条件 2 及定义 1, 可得

$$\dot{\bar{x}}_i = (A_m - M c_m)\bar{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

又由①可知, 可以任意配置 $(A_m - M c_m)$ 的谱特性, 使得 $\text{Re}[\lambda_j(A_m - M c_m)] < 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$). 因而(3)成立.

考虑增广系统

$$P_s: \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{\bar{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ 0 & \bar{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \bar{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_m \\ 0 \end{bmatrix} u_m \quad (6)$$

$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_l]^T, \bar{A} = \text{diag}\{(A_m - M c_m), \dots, (A_m - M c_m)\}$. 显然, $\sigma \begin{bmatrix} A_m & 0 \\ 0 & \bar{A} \end{bmatrix} = \{\sigma(A_m), \sigma(A_m - M c_m)\}$. 故 P_s 结构稳定.

显然, 矩阵 M 直接影响系统的稳定性和协调性. 为此, 利用极点配置的方法确定 M 阵, 并使之满足

$$\text{Re}[\lambda_j(A_m - M c_m)] < \text{Re}[\lambda_j(A_m)] \quad (7)$$

3 多电机协调控制系统

3.1 实验研究

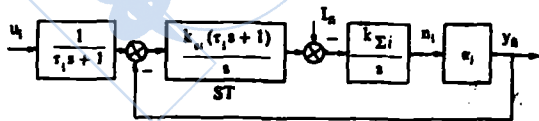


图 2 双闭环调速系统的简化结构图

考虑多电机拖动的过程控制问题. 设各台电机都采用可控硅双闭环直流调速系统. 按照中频特性等效的原则⁽⁶⁾, 可对各单机调速系统的动态模型进行简化, 结果如图 2. 图 2 对应的系统闭环传递函数为

$$\Phi_i(s) = \frac{Y_f(s)}{U_i(s)} = \frac{\omega_{n_i}^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{n_i} s + \omega_{n_i}^2} \quad (8)$$

其中, $\omega_{n_i} = \sqrt{k_i}, k_i = k_1 k_2 \alpha_i, \zeta_i = \sqrt{k_i} \tau_i / 2$. 从(8)得各单机调速系统的状态方程

$$P_l: \begin{cases} \dot{x}_l = A_l x_l + b_l u_l \\ y_{f_l} = c_l x_l \end{cases} \quad l = 1, 2, \dots, l$$

其中

$$A_l = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{n_l}^2 & -2\zeta_l \omega_{n_l} \end{bmatrix}, \quad b_l = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{n_l}^2 \end{bmatrix}$$

$$c_l = [1, 0], \quad x_l^T = [y_{f_l}, \dot{y}_{f_l}]$$

y_{f_l} 为测速电机输出, 且 $y_{f_l} = \alpha_l n_l$, n_l 为电机转速, α_l 为转速反馈系数。

根据系统动态性能要求, 选择参考模型, 使得

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta \omega_n \end{bmatrix}, \quad b_m = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix}, \quad c_m = [1, 0]$$

其中, ζ 和 ω_n 按最优性原则选择。

一般地, 对于多电机拖动的系统, 各单机容量和运行转速并不相同。但是, 只要在转速反馈系数 α_l 确定的条件下, 选择调节器的参数, 就能保证 $A_l = A_m$, $b_l = b_m$ 。因而, 可以按照定理 1 构造转速协调系统, 其结构如图 3。其中, $T = m_1 / (m_2 + 2\zeta \omega_n m_1)$, $k = m_2 + 2\zeta \omega_n m_1 / \omega_n^2$ 为协调控制器的微分时间常数和比例系数, T_{nc} 为滤波时间常数, 按 $T_{nc} = 0.05T$ 选择。 m_1 和 m_2 按极点配置方法选择。设观测器希望特征多项式为 $\Delta(s) = s^2 + a_1 s + a_0$, 则 m_1 和 m_2 按下式计算

$$\begin{cases} m_1 = a_1 - 2\zeta \omega_n \\ m_2 = a_0 - 2\zeta \omega_n m_1 - \omega_n^2 \end{cases} \quad (9)$$

为了验证本文提出的协调控制系统的抗扰性、协调性和鲁棒性, 且不失一般性, 我们以两台直流他激电动机构成协调控制系统, 进行了大量的实验研究。下面给出一些典型的实验结果。

3.1.1 抗扰协调性(高速)

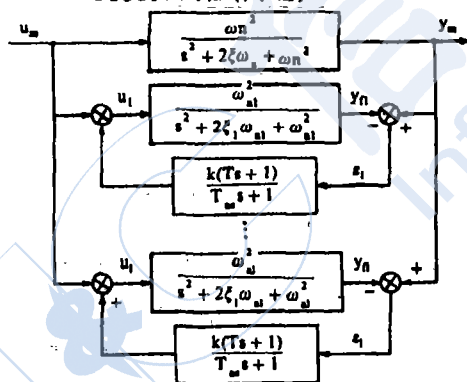


图 3 多电机转速协调系统

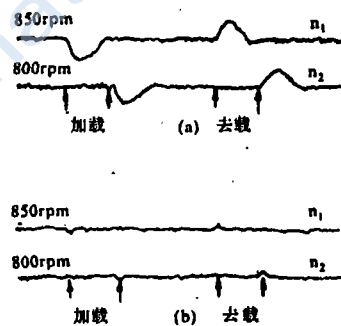


图 4 各电机受 6A 负载扰动的波形(高速)

(a) 无协调控制 (b) 有协调控制

按照工程二阶最优选择参考模型参数 ζ 和 ω_n , 并通过调整 ST-PI 调节器的参数 k_s 和 τ_i , 使得 $\zeta_l = \zeta$, $\omega_{n_l} = \omega_n$ 。设 $n_1 = 850 \text{ r/min}$, $n_2 = 800 \text{ r/min}$ 。此时, 各电机分别受 6A 的负载扰动作用, 其实验结果如图 4。结果表明, 加入协调控制环节后的动态速降减少到原来的五分之一。

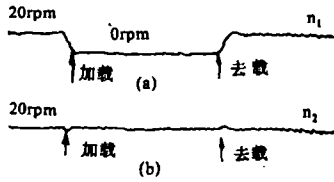


图5 第一台电机受6A负载扰动波形(低速)
(a)无协调控制 (b)有协调控制

3.1.2 抗扰协调性(低速)

系统参数设置同 3.1.1. 设 $n_1 = 20r/min$. 此时, 使该电机负载增加 6A, 实验结果见图 5. 当无协调控制时, 因加载使电机停转; 当有协调控制时, 可以抑制负载扰动, 使电机迅速恢复给定转速.

3.1.3 对参数变化的鲁棒性

参考模型参数不变. 调整各子系统的 ST-PI 调节器的比例放大系数 k_{p_i} , 使得子系统的参数偏离最优整定值. 在这一条件下, 使系统的给定输入 u_m 从 5V 跃变到 7V, 实验结果如图 6. 调整 k_{p_i} 为不同的值, 重复上述实验. 结果表明, 只要参数变化不超出协调控制器补偿范围, 协调控制器都可以保证各子系统的输出最优性基本不变.

3.1.4 对结构变化的鲁棒性

在 3.1.1 的参数整定下, 设 $n_1 = 850r/min$. 此时, 改变第一台电机 ST-PI 调节器的结构, 使其为积分调节器, 即设置 $\tau_1 = 0$, 实验结果如图 7. 由于协调控制器的加入, 抑制了结构变化造成的系统不稳定性, 增加了系统的鲁棒稳定性.

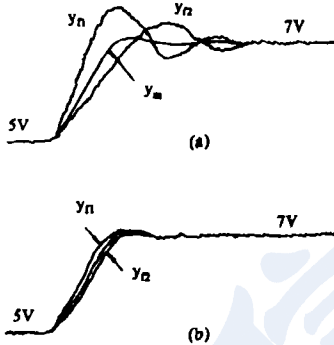


图6 各电机参数变化时的阶跃响应波形
(a)无协调控制 (b)有协调控制

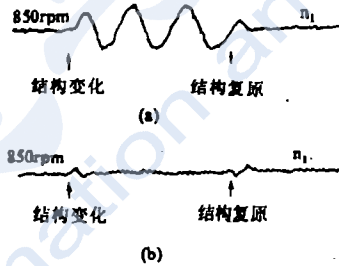


图7 第一台电机调节器结构变化的响应波形
(a)无协调控制 (b)有协调控制

3.2 冷连轧机速度协调控制

速度控制系统在冷连轧机电气控制系统中具有十分重要的作用. 其特性的好坏, 直接影响到张力调节和轧制力控制的性能, 从而最终影响带钢的产量和质量. 以往的中、小型冷连轧机各机架的速度控制通常采用单机独立控制. 由于各机架的负载分布不均匀性及系统特性的时变性, 因而很难保证各机架速度的协调同步性, 结果产生“断钢”和“堆钢”, 造成废品. 针对这一问题, 我们采用本文提出的鲁棒协调控制器, 在双机架冷连轧机上进行了现场实验. 系统实验结果如图 8.

4 结论

本文提出的多变量系统鲁棒协调控制, 是一种新型的大系统协调控制结构. 分析及实验结果表明, 该协调系统具有结构稳定性. 和对参数、结构变化的鲁棒性. 增强了系统的抗扰能力, 特别是低速抗扰能力. 这种协调控制器具有结构简单、现场调试方便的特点,

可以在工程中推广应用.

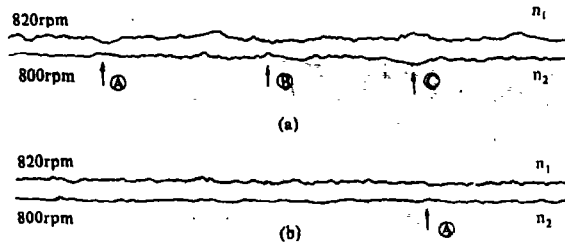


图8 双机架冷连轧机速度波形
(a) 无协调控制 (b) 有协调控制

参 考 文 献

- 1 涂序彦. 多变量协调控制. 第一届国际自动化学术会议论文集, 上海: 上海科学技术出版社, 1963: 1-16
- 2 Morse A S. Structure and Design of Linear Model Following Control Systems. IEEE Trans on AC, 1973; 18: 346-354
- 3 钱学森, 宋健. 工程控制论. 北京: 科学出版社, 1980
- 4 韦子枝, 田彦涛. 关键. 具有鲁棒结构的多变量协调控制系统. 控制理论与应用, 1988; 5(3): 77-84
- 5 韦子枝, 田彦涛. 基于状态观测器理论构成的直流自动协调系统. 电气自动化, 1985; (5): 14-17
- 6 陈伯时. 自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1981

OUTPUT COORDINATE CONTROL OF 1/HOMO-DIMENSIONAL SUB-PROCESSES UNDER THE SAME INPUT

TIAN Yantao WEI Zizhi

(Department of Electrical Engng, Jilin Univ of Technology, Changchun)

Abstract

The paper puts forward a new scheme for the coordinate control of multi-variable systems. For the process control problems composed of multi-subsystems, the robust coordinate controller is realized via introducing a reference model to systems and making each subsystem become a state-observer of the reference model. By analyzing we know the system has structure stability and asymptotical coordination. Experimental results and application of the coordinate control to a tandem cold mill are given. The results show that the system is anti-disturbanced and robust.

Key words: multivariable system coordinate control robustness pole placement