

文章编号: 1000-8152(2001)02-0304-03

基于 Hopfield 网络的多变量动态矩阵控制 及其在精馏塔系统中的应用*

李树荣 李 峰

(石油大学自动化系·山东东营, 257062)

摘要: 利用 Hopfield 网络的优化计算功能求解有约束多变量动态矩阵控制问题, 算法简单, 收敛性好, 既可以用硬件实时实现, 也可用数值积分求解. 对 Wood-Berry 精馏塔的仿真表明了算法的有效性.

关键词: 神经网络; 优化计算; 动态矩阵控制; 精馏塔

文献标识码: A

The Dynamic Matrix Control Based on Hopfield Neural Network and Its Application in a Distillation Column

LI Shurong and LI Feng

(Department of Automation, University of Petroleum of China · Shandong Dongying, 257062, P. R. China)

Abstract: In this paper, we solve the constrained multivariable dynamic matrix control problem by using the Hopfield neural network. The optimization neural network designed is guaranteed to be globally convergent to solutions of the corresponding quadratic optimization problems and has a simple structure that can be easily realized using electric circuit. The solutions can be obtained by hardware circuit or numerical algorithm. The simulation on the Wood-Berry distillation column demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: neural networks; optimization; dynamic matrix control; distillation column

1 引言(Introduction)

预测控制因为具有模型预估、滚动优化、反馈校正等特点, 非常适合具有纯滞后、慢时变的工业对象, 在过程控制中的应用愈来愈广. 动态矩阵算法(DMC)是产生最早、影响最大、应用最广的预估算法之一^[1,2]. 在实际的工业过程中, 物理变量均具有约束, 往往需要求解具有约束的预估控制问题. 目前一般采用非线性规划的数值方法求解, 存在着计算量大、收敛慢、甚至不收敛等缺点.

神经网络由于具有分布存储、并行计算等特点, 为优化计算提供了广阔的前景. Hopfield 网络是在优化计算中应用最广的网络. 用神经网络求解优化问题, 算法简单规范, 可用硬件实现, 计算迅速且收敛性好^[3,4]. 文献[5]用神经网络求解预估控制问题, 获得了成功, 但文中采用的算法需要设定较大的罚因子, 且只是在一定程度上逼近最优解. 本文讲述了有约束的多变量动态矩阵控制的神经网络求解方法, 采用文献[6,7]提出的设计方法设计网络, 网络

结构简单, 并保证了全局稳定性和收敛性. 将算法应用在 Wood-Berry 精馏塔^[8]的控制中, 仿真表明了其有效性.

2 基于神经网络的多变量动态矩阵控制 (Hopfield neural network based DMC)

2.1 多变量动态矩阵控制 (Multivariable dynamic matrix control)

动态矩阵控制是基于对象阶跃响应的预估控制算法, 适用于渐进稳定的对象^[2]. 设对象有 m 个控制输入、 p 个输出. 设预估时域为 P 、控制时域为 M . 记 $\bar{y}_{p0}(k)$ 表示 k 时刻控制作用保持不变时, P 个时刻的系统输出的预测. $\bar{y}_{pM}(k)$ 为在未来 M 个时刻的控制输入 $\Delta u_M(k)$ 作用下对未来 P 个时刻输出的预测.

则一般的线性多变量系统预测模型为:

$$\bar{y}_{pM}(k) = \bar{y}_{p0}(k) + A\Delta u_M(k), \quad (1)$$

其中 A 为相应的由阶跃响应向量构成的动态矩阵.

* 基金项目: 国家基础研究发展规划项目(G1998030200)及山东省自然科学基金(Q96G02150)资助项目.

收稿日期: 1999-06-15; 收修改稿日期: 2000-03-21.

动态矩阵控制的即时控制增量,由对给定的性能指标进行滚动优化获得.其一般形式为

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u_M(k)} J(k) = & \\ & \|w(k) - \bar{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta u_M(k)\|_R^2, \quad (2) \\ & K\Delta u_M(k) \leq b, \end{aligned}$$

其中的不等式约束由实际对输入输出量的约束转化而来, K, b 均为在 k 时刻已知的量. $w(k)$ 为期望值的柔化序列. Q, R 为相应正定加权矩阵.

(2)式可以转化为以下二次规划的标准形

$$\begin{aligned} \min \Psi(x) = & \frac{1}{2} x^T T x + I^T x, \quad (3) \\ \text{s.t. } & Kx \leq b, \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} x = & \Delta u_M(k), \quad T = 2(A^T Q A + R), \\ I = & -2A^T Q(w(k) - \bar{y}_{p0}(k)), \quad b \in \mathbb{R}^l, \end{aligned}$$

T 为正定阵.

2.2 利用神经网络求解二次规划问题 (Solve the quadratic optimization using neural network)

由库恩·图克条件^[9],二次规划(3)式可化为以下等效规划:

$$\min_{\lambda \geq 0} (C^T \lambda + \frac{1}{2} \lambda^T D \lambda), \quad (4)$$

其中 $C = b + KT^{-1}I, D = KT^{-1}K^T$.

对任意矩阵 K , 因 T 正定, D 为半正定矩阵, 显然, 当 K 行满秩时, D 正定.

若 λ^* 为等效规划(4)的解, 则原问题的解为 $x^* = -T^{-1}(K^T \lambda^* + I)$. 与原问题相比, 等效规划所对应的网络结构简单, 算法易于实现, 当约束条件少于变量个数时, 其网络规模小于原问题的网络规模.

由库恩·图克条件, λ^* 为二次规划(4)的解必须满足以下条件:

$$(\lambda^*)^T (D\lambda^* + C) = 0, \quad \lambda^* \geq 0, \quad D\lambda^* \geq 0. \quad (5)$$

由[6, 10], λ^* 为(5)的解当且仅当其满足:

$$(\lambda - D\lambda - C)^+ = \lambda, \quad (6)$$

令 $Z = \lambda - D\lambda - C$, 则

$$(Z)^+ = [(Z_1)^+, \dots, (Z_l)^+]^T, \quad (Z_i)^+ = \max(0, Z_i).$$

因此, λ^* 为二次凸规划(4)的解当且仅当其满足(6)式.

求解二次规划(4)的网络可设计为

$$\frac{d\lambda}{dt} = (E + D)((\lambda - D\lambda - C)^+ - \lambda). \quad (7)$$

其中 E 为单位阵. 该网络全局稳定并收敛到问题的最优解^[6].

定理 当 D 正定时, 神经网络(7)全局稳定于系统(5)的唯一平衡点 λ^* .

证 参见文献[6].

D 半正定时, 最优解不唯一, 系统仍是 Lyapunov 意义稳定的, 网络全局收敛到最优解.

3 控制算法在精馏塔系统中的应用 (Application to a distillation column)

为了验证上述方法的可行性, 本文对 Wood-Berry 精馏塔进行了仿真研究. 精馏塔模型为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21.0s+1} \\ \frac{6.60e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s+1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s+1} \end{bmatrix} d(s). \quad (8) \end{aligned}$$

其相应变量的物理意义及稳态值如下表:

表1 精馏塔各变量的物理意义

Table 1 Definitions of variables for the distillation column

变量	物理意义	稳态值
y_1	塔顶轻组份	96.25(mol%)
y_2	塔底轻组份	0.50(mol%)
u_1	顶回流量	1.95(1b/min)
u_2	上升蒸汽量	1.71(1b/min)
d	进料量	2.45(1b/min)

从(8)式可以看出, 精馏塔是具有多重时滞、耦合严重的多变量系统.

我们对其施加基于 Hopfield 网络的动态矩阵控制, 并检验算法的约束处理能力、伺服性和鲁棒性.

现欲使 y_1 稳定在 97.25%, 即 y_1 的阶跃响应, 同时使 y_2 的波动不超过 $\pm 0.1\%$, 对控制量约束为 $1.7 \leq u_1(k) \leq 2.2, 1.65 \leq u_2(k) \leq 1.85$. 采用基于 Hopfield 网络的有约束多变量动态矩阵控制, 得到输出 y_1 和 y_2 的偏离平衡点的增量曲线图 1, 曲线的纵坐标为摩尔百分含量, 横坐标为时间 (min). u_1 和 u_2 的曲线如图 2, 曲线的纵坐标为流量 (1b/min). 从仿真结果可以看出, 利用 Hopfield 网络的优化计算功能可以有效地处理有约束的预估控制问题, 且输出超调小.

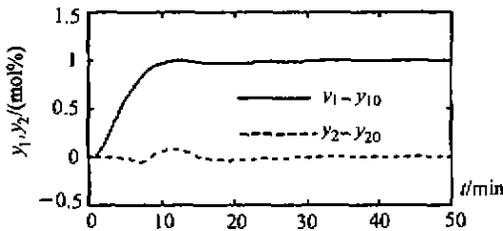


图1 输出 y_1 和 y_2 的增量曲线

Fig. 1 Curves of augmentation of outputs y_1 and y_2

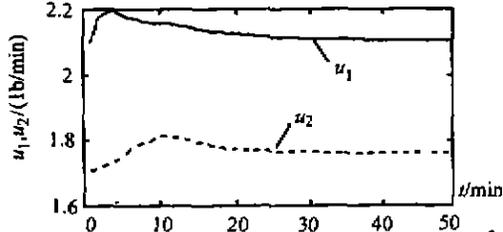


图2 控制量 u_1 和 u_2 曲线图

Fig. 2 Curves of control inputs u_1 and u_2

为检验算法对模型失配的鲁棒性,设对象的传递函数模型改变为:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{14e^{-2s}}{18s + 1} & \frac{-17e^{-4s}}{19s + 1} \\ \frac{7e^{-8s}}{11s + 1} & \frac{-19e^{-4s}}{14s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s + 1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s + 1} \end{bmatrix} d(s).$$

$y_1 - y_{10}$ 和 $y_2 - y_{20}$ 的响应曲线分别如图3,控制变量曲线如图4.从图中可以看出,由于具有反馈校正,控制算法具有较强的鲁棒性.

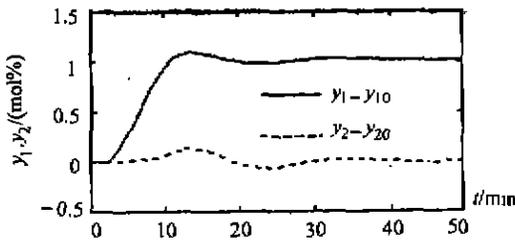


图3 输出 y_1 和 y_2 的增量曲线

Fig. 3 Curves of augmentation of outputs y_1 and y_2

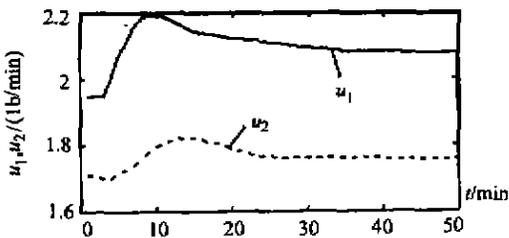


图4 控制量 u_1 和 u_2 曲线图

Fig. 4 Curves of control inputs u_1 and u_2

在精馏塔控制中,由于经常发生进料流量的波动,控制策略必须具备抗干扰能力.图5则显示了进料的阶跃变化.图6为进料改变为2.5(lb/min)时输出 $y_1 - y_{10}$ 和 $y_2 - y_{20}$ 的响应.

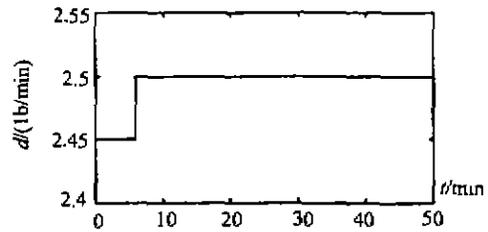


图5 进料 d 的阶跃变化

Fig. 5 The step change of feed rate

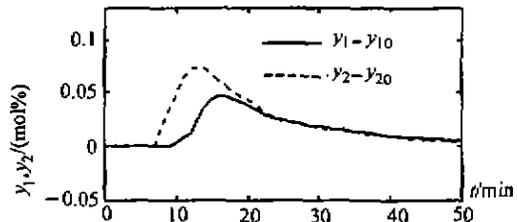


图6 输出 y_1 和 y_2 的增量曲线

Fig. 6 Curves of augmentation of outputs y_1 and y_2

从仿真结果可以看出,基于Hopfield网络的动态矩阵控制具有较好的伺服性和鲁棒性.

4 结论(Conclusion)

Hopfield神经网络的并行计算能力,使其进行大规模非线性规划求解时具有收敛速度快、稳定性好等优点.本文详述了有约束的多变量动态矩阵控制的神经网络求解算法,并设计了具有全局稳定性和收敛性的优化网络.将算法应用在Wood-Berry精馏塔的控制中,仿真表明了算法的有效性,若用硬件电路实现,则可使计算负担大大减小.

参考文献(References)

- [1] Cutler C R and Ramaker B L. Dynamic matrix control - a computer control algorithm [A]. Proceedings of the 1980 Joint Automatic Control Council [C], San Francisco, California, 1980
- [2] Xi Yugeng. Predicative Control [M]. Beijing: Defense Press, 1993
- [3] Tank D W and Hopfield J J. Simple neural optimization network: an A/D convert signal decision circuit and a linear programming circuit [J]. IEEE Trans. Circuits & Systems, 1986, 33(5): 533 - 541
- [4] Kennedy M P and Chua L O. Neural networks for nonlinear programming [J]. IEEE Trans. Circuits & Systems, 1988, 35(5): 554 - 563
- [5] Chen Zengqiang, Zhao Tianhang and Yuan Zhuzhi. The constrained multivariable predicative controller based on Tank-Hopfield neural network [J]. Control Theory & Applications, 1998, 15(6): 847 - 852 (in Chinese)

参考轨迹的选取。

在本实验系统中,目的是要尽快到达系统的设定温度,因而参考轨迹直接选为设定温度值,即参考轨迹公式中的 $a = 0$ 。 a 不等于零的情况一般用于随动系统控制。

3 结论(Conclusion)

温度是各种过程控制中一个最常见和最重要的受控变量。本文给出了一个快速高精度温度控制系统的结构、特点及其实现方法。通过改进已有的 GPC 控制方法,与已有 GPC 算法以及传统的 PID 控制相比,改进后的预测控制方法提高了系统的控制精度,缩短了其响应时间。此外,通过基于 Windows 环境下的用户界面的实时显示,可以在线监测整个实验过程中受控量的变化情况。实验结果表明,所采用的系统结构与控制方法可以满足设计任务的要求,并具有一定的普遍意义。

参考文献(References)

- [1] Xi Yugeng. Predictive Control [M]. Beijing: National Defense Press, 1993 (in Chinese)
- [2] Zhang Youwei. Mathematic Methods of Prediction [M]. Beijing: National Defense Press, 1991 (in Chinese)
- [3] Deng Zixin and Guo Yixin. Modern Analysis and Applications of Time Series [M]. Beijing: Zhishi Press, 1989 (in Chinese)
- [4] He Limin. Applications of Single Chip Processor [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991 (in Chinese)

本文作者简介

郭巧 1957年生,博士,教授,博士生导师。主要研究领域为控制理论与控制工程,生物动力学,数字信号处理,计算机网络及其应用等。

曹海鹏 1970年生,硕士。主要研究领域为过程控制等。

(上接第 306 页)

- [6] Xia Youshen and Wang Jun. A general methodology for designing globally convergent optimization neural networks [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1998, 9(6): 1331 - 1343
- [7] Xia Yousheng and Wang Jun. A dual neural network for solving a class of quadratic programming problems [A]. Proceedings of 1999 Conf. Decision and Control [C], Shenyang: Dongbei University Press, 1999, 609 - 611
- [8] Wood R K and Berry M W. Terminal composition control of a binary distillation column [J]. Chem. Engng. Sci., 1973, 28(9): 1707 - 1717
- [9] Cai Xuansan. Optimization and Optimal Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1982, 165 - 167

- [10] Mangasarian O L. Solution of symmetric linear complementarity problems by iterative methods [J]. J. Optimization Theory Appl., 1979, 22(2): 465 - 485

本文作者简介

李树荣 1966年生,教授。1987年毕业于山东大学,1990年与1993年毕业于中国科学院系统科学研究所,分别获硕士和博士学位,1993年9月于清华大学电机工程与应用电子技术系从事博士后研究工作。主要研究方向为非线性控制理论与应用,数学机械化等。

李峰 1975年生,助教。1997年与2000年毕业于石油大学(华东)自动化系,分别获学士和硕士学位。主要研究方向为非线性控制理论与应用,神经控制及其应用等。

(上接第 309 页)

- lized coprime factor plant description [A]. Lecture Notes in Control and Information Sciences [M], Berlin Germany: Springer Verlag, 1990
- [2] Yang C D, Tai H C and Lee C C. Experimental approach to selecting H_∞ weighting functions for DC servos [J]. J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119(1): 101 - 105
- [3] Skogestad S. Robust control of ill-conditioned plants: high-purity distillation [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1998, 33(12): 1092 - 1105

- [4] Skogestad S and Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control [M]. England: John Wiley & Sons, 1996

本文作者简介

张显群 1968年生,博士,副教授,硕士生导师。在国际会议及17种国内重要学术刊物共发表论文40多篇,计算机应用专著2部,获交通部科技进步三等奖1项、大连市技术开发一等奖1项。目前研究方向:鲁棒控制,计算机软件开发,轮机工程。

贾欣乐 见本刊2001年第2期第292页。