

分子量分布的广义状态反馈跟踪控制

王 晶, 黄颖华, 曹柳林, 吴海燕, 靳其兵

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 针对化工过程中分子量分布的跟踪控制问题, 提出了一种简单的广义状态反馈控制方法, 实现给定分子量分布的跟踪. 该方法充分利用复合动态支持向量机模型, 实现分子量分布函数在时间域和空间域上的分离, 从而将分布函数的跟踪问题转化为动态权值向量的时间域跟踪问题, 并设计了状态反馈与积分器相结合的控制结构, 采用线性矩阵不等式技术对闭环系统稳定性和跟踪性能进行分析. 仿真结果表明该方法的可行性.

关键词: 分子量分布; 复合动态支持向量机模型; 广义状态反馈控制; 稳定性; 跟踪性能

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Generalized state-feedback tracking control of molecular weight distribution

WANG Jing, HUANG Ying-hua, CAO Liu-lin, WU Hai-yan, JIN Qi-bing

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: To track the molecular weight distribution in three-dimensional space, we propose a new method employing a generalized state-feedback controller. By the hybrid dynamic recurrent support-vector-machine model, the distribution function is effectively separated into aspects of time and space. Thus, the tracking of three-dimensional distribution will be transformed into a state-vector tracking in the time domain; and the control difficulty will be greatly reduced. A combination configuration of the state-feedback controller and the integrator is proposed, the linear matrix inequality techniques are employed to design the parameters; and the stability and tracking performances can be guaranteed simultaneously. Simulation results of a polymerization reaction process show the efficacy of the proposed method.

Key words: molecular weight distribution; hybrid dynamic recurrent support-vector-machine model; generalized state feedback control; stability; tracking performance

1 引言(Introduction)

分子量分布对化工产品的机械和加工性能有着显著的影响, 是实现产品柔性化生产的决定环节. 然而由于缺乏在线测量的仪器和手段, 目前还没有真正实现对微观质量的在线控制. 通常的做法是采用粘度、重均或数均分子量等平均分子量类的质量指标, 文献[1]对基于这类指标的各种优化、控制方法研究和进展作了详细的综述.

对微观质量在线控制的研究尚属探索性的课题, 直到最近几年, 欧美等国家的研究报道才开始增加. Clacke等^[2]利用工程的简化模型和统计过程控制方法探索间歇聚合过程分子量分布控制的途径. Timothy等^[3]采用广义Kalman滤波器和离线分子量分析相结合的方法, 对聚合物分子链长分布进行估计, 并利用非线性规划方法对最优操作曲线进行计算, 从而控制聚合过程的分子量分布. Vicente等^[4-5]通过改变单体和链转移剂的浓度来控制聚合物组分与分子量分布, 并给出了单体和链转移剂的最优加料曲线

计算. Alhamad等^[6-7]给出了自由基悬浮聚合物的详细动态模型, 完成对转化率、分子量分布、粒径分布以及重均、数均分子量的有效预测, 并基于该模型提出了基于反应物流量和反应器温度等操作变量的多变量模型预测控制方案, 实现对分子量分布和粒径分布的调节和目标跟踪控制. 文献[8-9]采用混合神经网络结构完成了对分子量分布的建模, 并基于该模型采用优化方法实现跟踪控制. 文献[10]采用复合支持向量机模型对连续聚合反应分子量分布的建模工作做了初步探索.

与分子量分布输出形式类似, Wang H^[11]等研究了利用神经网络建立随机系统输出的概率密度分布函数模型, 并应用在造纸过程的优化控制中. 此后, Guo^[12]针对这类模型, 提出新的研究思路采用经典控制方法实现输出概率密度函数的跟踪控制. 概率密度分布函数的控制目标是使随机变量的方差尽可能小, 这与必须保持一定的高分子、低分子比例, 获取适当分子量分布的聚合过程是不同的.

本文利用文献[13]提出的复合动态支持向量机模型,在 B 样条网络阶次和划分数确定的情况下,把三维空间分布函数的跟踪问题转化为时间域上权值状态向量的跟踪问题,实现了分布函数在时间和空间上的有效分离,大大降低控制难度.基于这种等价转化方法,可采用各种成熟的反馈控制策略实现对给定分布的跟踪控制.针对转化后的非线性动态权值模型,采用广义的状态反馈+积分器的跟踪控制策略,实现对输出分子量分布的控制.控制目标是找到合适的控制器增益参数,使得非线性闭环系统在保证渐近稳定的同时,能够达到输出跟踪的要求.

文章安排如下:首先根据复合动态支持向量机模型结构导出对应的非线性权值动态系统,将分子量分布的跟踪问题转化为对动态权值向量的跟踪,接着给出广义的状态反馈与积分器相结合的控制结构,并对闭环系统稳定性和跟踪性能进行分析,采用基于线性矩阵不定式的凸优化方法对控制器参数进行设计.最后将上述方法应用到连续聚酯过程分子量分布的控制中,说明该方法的有效性.

2 问题提出(Propose problem)

根据动态递归支持向量机(dynamic recurrent support-vector-machine, DRSVM)与 B 样条网络相结合的复合模型结构^[13],分子量分布随输入变量 $\mathbf{u}(k)$ 和链长 z 的变化可以表示为

$$Y = \mathbf{f}(\mathbf{u}(k), z(m)) = (B \cdot \bar{W})_{M \times l} = \begin{bmatrix} B_1(z(1)) & \cdots & B_n(z(1)) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ B_1(z(M)) & \cdots & B_n(z(M)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1l} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nl} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $m = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, l$ 分别是分子链长和数据集时间长度, n 为 B 样条基函数的个数,即DRSVM模型的输出个数.在上述复合模型中,静态基函数变换(B 样条函数)用来描述链长 $z(m)$ 对分布的函数关系(空间域),动态DRSVM网络的输入为操作变量 $\mathbf{u}(k)$,输出 $\bar{W} \triangleq [\mathbf{W}(1) \cdots \mathbf{W}(k)]$ 作为静态 B 样条函数的权值系数,体现操作变量 $\mathbf{u}(k)$ 对分布输出的影响(时间域),遵循下述动态方程:

$$\mathbf{x}(k+1) \triangleq W^I K(\mathbf{U}, \mathbf{u}(k)) + W^D K(\mathbf{X}, \mathbf{x}(k)) = \sum_{i=1}^l [\alpha_i^I - \alpha_i^{I*} \quad \alpha_i^D - \alpha_i^{D*}] \begin{bmatrix} K(\mathbf{u}(k), \mathbf{U}(i)) \\ K(\mathbf{x}(k), \mathbf{X}(i)) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{W}(k) = \mathbf{x}(k) + b,$$

其中 $\{\mathbf{U}(i), w(i)\}$ 和 $\{\mathbf{X}(i)\}$ 分别为DRSVM的输入输出训练数据集和结构单元数据集,即 W^I, W^D 是

DRSVM模型输入数据、结构单元到输出的权值系数, b 为常值偏差, $K(\cdot)$ 为核函数.当模型确定后(即 B 样条函数阶次和划分数固定),对于确定的链长变量 z , B 样条函数值均为确定值,即 B 矩阵为定常矩阵.因此,对于某期望分子量分布 Y_{set} ,必有确定的权值向量 \mathbf{W}_{set} 与之对应,可描述为

$$Y_{\text{set}} = B \cdot \mathbf{W}_{\text{set}} \Rightarrow \mathbf{W}_{\text{set}} = B^{-1} Y_{\text{set}},$$

其中 B^{-1} 为定常矩阵 B 的广义逆矩阵.对于给定的期望分布 Y_{set} ,聚合物分子量分布控制目标为:设计合适的调节器输入 $\mathbf{u}(k)$,使得下述条件满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{z=1}^M [Y_{\text{set}} - Y] dz \rightarrow 0.$$

由分子量分布的数学模型(1)可以看出,分子量分布是操作变量 $\mathbf{u}(k)$ 和链长 k 的函数,其中 B 样条网络代表了空间上分子链长 z 对分布的影响,而在时间域上操作变量 $\mathbf{u}(k)$ 对分布的作用通过动态权值向量 $\mathbf{W}(k)$ 体现.在DRSVM和 B 样条网络的复合结构模型中,位置变量 z 和输入时间变量 $\mathbf{u}(k)$ 有效地被分解为两个各自独立的部分.一旦模型训练结束后,静态空间关系可以完全确定,不再发生变化,而操作变量 $\mathbf{u}(k)$ 对分子量分布的影响就完全等效于它对动态权值向量 $\mathbf{W}(k)$ 的影响.因此,只要调整控制变量 $\mathbf{u}(k)$,使得 $\mathbf{W}(k)$ 跟踪权值期望 \mathbf{W}_{set} ,就可实现跟踪期望分子量分布的目标.此时,分子量分布的跟踪控制问题转换为状态向量的跟踪问题,即非线性系统(2)的输出跟踪控制问题: $\lim_{k \rightarrow \infty} \{\mathbf{W}(k) - \mathbf{W}_{\text{set}}\} \rightarrow 0$.

3 广义状态反馈控制器设计(Design of general state feedback controller)

为了简化讨论,首先将非线性系统(2)进行线性化处理,可写作:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) + F\mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)), \\ \mathbf{W}(k) = \mathbf{x}(k) + D, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{x}(k)$ 是不可测量的状态变量, A, B, F, D 是已知的参数矩阵,代表了非线性动态,通常假设其满足Lipschitz条件.

针对上述非线性系统的输出跟踪控制,采用带有积分器的状态反馈控制方案,如图1所示.由于此类分布变量是以链长为自变量的一组高关联性的函数,目前缺乏有效的在线检测手段,即使是凝胶色谱仪可以离线检测,但其大滞后(10~30 min),仍难以满足在线控制要求.为此提出了基于模型在线计算的权值向量作为反馈状态变量的控制策略.此外考虑到,单纯的模型权值状态反馈本质上是个开环控制,很难达到精确的跟踪效果,特别是在建模不够准确

或现场存在强烈扰动时, 余差非常大, 为此引入闭环积分作用来消除扰动因素和模型不准造成的影响。

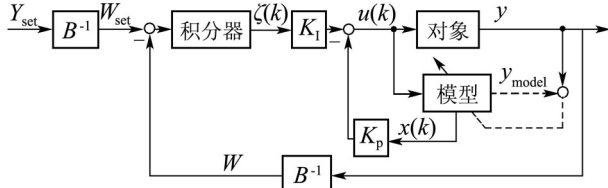


图 1 广义状态反馈控制结构

Fig. 1 Structure of general state feedback control

带有积分器的反馈控制为

$$\begin{cases} \mathbf{u}(k) = K_p \mathbf{x}(k) + K_I \zeta(k), \\ \zeta(k) = \zeta(k-1) + T_0 \mathbf{E}(k-1), \end{cases} \quad (4)$$

其中: T_0 为已知积分器参数, $\zeta(k)$ 为传统积分器的随机动态变量, $\mathbf{E}(k) = \mathbf{W}(k) - \mathbf{W}_{set}$ 为系统的跟踪误差。将控制器(4)代入到系统(3)中, 得

$$\begin{cases} \mathbf{S}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{S}(k) + \bar{\mathbf{F}}\mathbf{f}(\mathbf{S}(k)) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{W}_{set}, \\ \mathbf{E}(k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{S}(k) - \mathbf{W}_{set} + D, \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \zeta(k) \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} A + BK_p & BK_I \\ T_0 & I \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -T_0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = [I \ 0].$$

假设 1 非线性环节满足Lipschitz条件, 即

$$\begin{aligned} \|\mathbf{f}(x_1, \zeta) - \mathbf{f}(x_2, \zeta)\| &\leq \|\varepsilon_1(x_1 - x_2)\|, \\ \|\mathbf{f}(x, \zeta_1) - \mathbf{f}(x, \zeta_2)\| &\leq \|\varepsilon_2(\zeta_1 - \zeta_2)\|. \end{aligned}$$

如果反馈控制系统(5)在保证渐近稳定的同时, 保持跟踪性能, 即 $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E}(k) = 0$, 那么权值动态系统的输出跟踪给定的权值, 也就是说, 分子量分布能够渐近跟踪给定的分子量分布形态。

首先引入两个符号定义,

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ T_0 & I \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

下面给出带有积分器的状态反馈控制主定理。

定理 1 若对给定常数 λ_1, λ_2 , 线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & P\tilde{\mathbf{A}}^T + R^T\tilde{\mathbf{B}}^T P(\varepsilon\lambda)^T \\ 0 & -\lambda^T\lambda I & \tilde{\mathbf{F}}^T & 0 \\ \tilde{\mathbf{A}}P + \tilde{\mathbf{B}}R & \tilde{\mathbf{F}} & -P & 0 \\ \varepsilon\lambda P & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

有可行解 P 和 R 存在, 那么

- 1) 闭环控制系统(5)是渐近稳定的;
- 2) $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E}(k) = 0$.

此时, 状态反馈增益 K_p 和 K_I 可通过等式

$$[K_p \ K_I] = RP^{-1}$$

求解。

证 由假设1知, 对任意 $\mathbf{x}(k), \zeta(k)$ 有不等式

$$\begin{aligned} \|\varepsilon_1 \mathbf{x}(k)\| &\geq \|\mathbf{f}(\mathbf{S}(k))\|, \\ \|\varepsilon_2 \zeta(k)\| &\geq \|\mathbf{f}(\mathbf{S}(k))\| \end{aligned}$$

成立, 因此可选取Lyapunov函数 $V(\mathbf{S}(k), k)$ 为

$$\begin{aligned} V = & \mathbf{S}^T P^{-1} \mathbf{S} + \\ & \sum_{i=1}^{k-1} [\|\lambda_1 \varepsilon_1 \mathbf{x}(i)\|^2 - \|\lambda_1 \mathbf{f}(\mathbf{S}(i))\|^2] + \\ & \sum_{i=1}^{k-1} [\|\lambda_2 \varepsilon_2 \zeta(i)\|^2 - \|\lambda_2 \mathbf{f}(\mathbf{S}(i))\|^2], \end{aligned} \quad (7)$$

其中: P 为实对称正定矩阵, 则

$$\begin{aligned} \Delta V = & \mathbf{S}^T(k+1)P^{-1}\mathbf{S}(k+1) - \\ & \mathbf{S}^T(k)P^{-1}\mathbf{S}(k) + \\ & \|\lambda_1 \varepsilon_1 \mathbf{x}(k)\|^2 - \|\lambda_1 \mathbf{f}(\mathbf{S}(k))\|^2 + \\ & \|\lambda_2 \varepsilon_2 \zeta(k)\|^2 - \|\lambda_2 \mathbf{f}(\mathbf{S}(k))\|^2. \end{aligned} \quad (8)$$

定义

$$\bar{\mathbf{S}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}(k) \\ \mathbf{f}(\mathbf{S}(k)) \end{bmatrix},$$

根据系统方程(5), 可将方程(8)整理得

$$\begin{aligned} \Delta V = & \bar{\mathbf{S}}^T(k)\Phi\bar{\mathbf{S}}(k) + 2\mathbf{S}^T(k)\bar{\mathbf{A}}^T P^{-1}\bar{\mathbf{B}}\mathbf{W}_{set} + \\ & 2\mathbf{f}^T \bar{\mathbf{F}}^T P^{-1}\bar{\mathbf{B}}\mathbf{W}_{set} + \mathbf{W}_{set}^T \bar{\mathbf{B}}^T P^{-1}\bar{\mathbf{B}}\mathbf{W}_{set}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Phi = & \begin{bmatrix} \mathcal{A} & \bar{\mathbf{A}}^T P^{-1} \bar{\mathbf{F}} \\ \bar{\mathbf{F}}^T P^{-1} \bar{\mathbf{A}} & \bar{\mathbf{F}}^T P^{-1} \bar{\mathbf{F}} - \lambda^T \lambda I \end{bmatrix}, \\ \mathcal{A} = & \bar{\mathbf{A}}^T P^{-1} \bar{\mathbf{A}} - P^{-1} + \lambda^T \varepsilon^T \varepsilon \lambda, \\ \lambda = & \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

首先考虑等式(9)右边第1项, 若使非线性矩阵不等式 $\Phi < 0$, 根据Schur补定理有

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} + (\varepsilon\lambda)^T \varepsilon \lambda & 0 & \bar{\mathbf{A}}^T \\ 0 & -\lambda^T \lambda I & \bar{\mathbf{F}}^T \\ \bar{\mathbf{A}} & \bar{\mathbf{F}} & -P \end{bmatrix} < 0. \quad (10)$$

针对上式, 利用Schur补定理后, 左乘、右乘 $\text{diag}\{P, 0, 0, 0\}$, 得

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & P\bar{\mathbf{A}}^T & P(\varepsilon\lambda)^T \\ 0 & -\lambda^T \lambda I & \bar{\mathbf{F}}^T & 0 \\ \bar{\mathbf{A}}P & \bar{\mathbf{F}} & -P & 0 \\ \varepsilon\lambda P & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

根据定义式(6), 可知系统矩阵可以写作:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A + BK_p & BK_I \\ T_0 & I \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ T_0 & I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} [K_p \ K_I] = \\ &= \bar{A} + \bar{B} [K_p \ K_I]. \end{aligned}$$

将其带入不等式(11), 重新整理得

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & P\bar{A}^T + R^T\bar{B}^T P(\varepsilon\lambda)^T \\ 0 & -\lambda^T\lambda I & \bar{F}^T & 0 \\ \bar{A}P + \bar{B}R & \bar{F} & -P & 0 \\ \varepsilon\lambda P & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0,$$

且满足 $[K_p \ K_I] = RP^{-1}$. 可以看出, 若 $\Phi < 0$, 则必存在一充分小的正实数 δ 满足 $\Phi < -\delta I$, 则式(9)改写为

$$\begin{aligned} \Delta V &\leq -\delta\bar{S}^T\bar{S} + 2\bar{S}^T[\bar{A}\bar{F}]^T P^{-1}\bar{B}W_{set} + \\ &W_{set}^T\bar{B}^T P^{-1}\bar{B}W_{set} \leq \\ &-\delta\|\bar{S}\|^2 + 2\|[\bar{A}\bar{F}]^T P^{-1}\bar{B}W_{set}\|\|\bar{S}\| + \\ &\|W_{set}^T\bar{B}^T P^{-1}\bar{B}W_{set}\|. \end{aligned} \quad (12)$$

不等式(12)的右边可以看做是关于 $\|\bar{S}(k)\|$ 的二次多项式, 欲使 $\Delta V(k) < 0$, 则有

$$\begin{aligned} \|\bar{S}(k)\| &\leq \\ &\delta^{-1} \left\| \begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{F} \end{bmatrix} P^{-1}\bar{B}W_{set} \right\| + \\ &\delta^{-1} \sqrt{\left\| \begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{F} \end{bmatrix} P^{-1}\bar{B}W_{set} \right\|^2 + \delta\|W_{set}^T\bar{B}^T P^{-1}\bar{B}W_{set}\|}, \end{aligned} \quad (13)$$

即意味着

$$\begin{aligned} \|S\| &\leq \|\bar{S}\| \leq \\ &\delta^{-1} \left\| \begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{F} \end{bmatrix} P^{-1}\bar{B}W_{set} \right\| + \\ &\delta^{-1} \sqrt{\left\| \begin{bmatrix} \bar{A} \\ \bar{F} \end{bmatrix} P^{-1}\bar{B}W_{set} \right\|^2 + \delta\|W_{set}^T\bar{B}^T P^{-1}\bar{B}W_{set}\|}. \end{aligned} \quad (14)$$

此时, 反馈控制系统(5)是渐近稳定的.

下面讨论系统的跟踪性能. 根据上述分析可知, 闭环控制系统(5)是渐近稳定的, 即存在唯一的稳定平衡点, 记作 (x^*, ζ^*) . 因此, 可以得到

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \zeta(k+1) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \{\zeta(k) + T_0 E(k)\} \Rightarrow \\ \zeta^* &= \zeta^* + T_0 \lim_{k \rightarrow \infty} E(k) \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} E(k) = 0, \end{aligned}$$

即意味着系统的跟踪性能满足.

注1 另外在上述控制方案的具体实施过程中, 因为实际的分子量分布函数并不能实时在线测量, 所以闭环回路的实测值采用机理方程计算值替代. 一定时间间隔内获取实验室分析数据后, 与DRSVM-B模型计算的输出数据相比较, 对模型进行校正, 从而确保模型与真实数据的接近, 如图1虚线部分所示. 由于存在上述模型校正环节, 以机理方程计算值代替实测输出并不会对整体控制效果造成重大影响.

4 控制系统仿真研究(Simulation research of control system)

以实验室规模的连续搅拌釜式反应器中进行的苯乙烯聚合反应为仿真对象^[9], 实验数据及模型如文献[13]所述, DRSVM-B混合模型采用RBF核函数, 动态权值系统如式(2)所示, 且满足假设1.

由文献[13]可知, 聚合物分子量分布控制系统的输入是单体和引发剂的物流比率, 是一个单变量. 而根据本文分析结果, 通过DRSVM-B混合模型可以将分子量分布的控制转化为模型权值 W 的跟踪控制. 而文献[13]中模型 B 样条的划分数为8, 即权值 W 是一个8维向量. 显然这是一个单输入八输出的控制系统. 根据现代控制理论知, 对于常规的单入多出系统, 设计状态反馈控制器使每个状态均精确跟踪相应的设定值是不可能的. 但是对于苯乙烯聚合反应来说, 分子量分布是一组高度关联的参数集合, 完全可以由分布函数的分散指数指标决定. 因此模型中各权值状态之间也存在着高度的关联性, 只需对其中某个状态或是其平均值进行跟踪控制即可. 这里选择期望状态 W_{set} 的范数 $\|W_{set}\|$ 作为参考输入进行控制实验.

首先在建模准确的情况下, 选择初始分布和期望分布如图2(a), 横坐标为分子链长, 纵坐标为分子量分布(不同链长聚合体的浓度), 并分别求出初始权值和期望权值. 状态反馈增益 $K_p = \{0.2, 0.5, 0.35, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2\}$, 进行控制实验, 控制时长为20 min, 控制周期为1 min. 具体建模参数如下: DRSVM选取径向基核函数, $k(x, x_i) = \exp(-\|x_i - x\|^2/\sigma^2)$, 其中: $C = 50$, $\varepsilon = 0.01$, $\sigma = 0.5$. B 样条阶次为5, 划分数为8(即权值向量的阶次), 学习速率 β 为0.7. 稳态控制效果如图2(b), 输出归一化后的稳态误差为: 2.3543×10^{-4} . 图3(a)和3(b)分别为动态过程中分子量分布及其误差指标

$$J = \sqrt{\int_0^M (f(u(k), z) - g(z))^2 dz}$$

的变化过程. 输出可以快速跟踪给定分布, 各状态的动态过程也都无超调或微超调, 稳态误差很小. 从实验结果可以看出基于模型权值向量反馈控制的可行性, 在模型较为准确的情况下, 单纯采用状态反馈即可达到较好的跟踪结果.

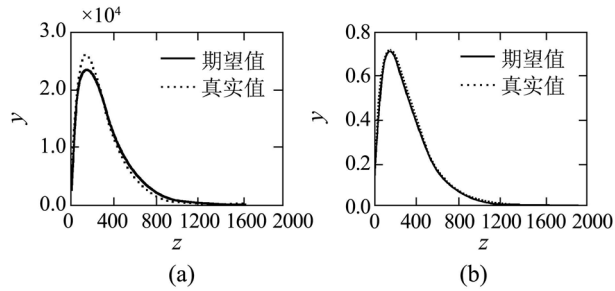


图 2 初始分布、输出分布与期望分布的比较

Fig. 2 Comparison of initial, output and desired distributions

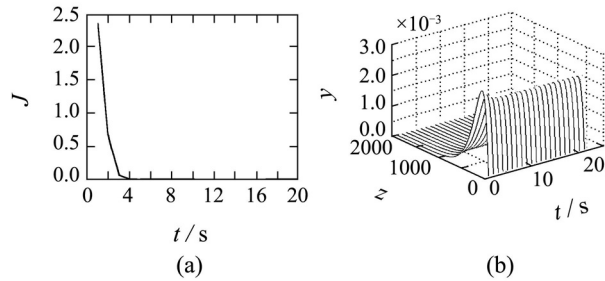


图 3 分子量分布输出及误差平方和变化曲线

Fig. 3 Output distribution and sum of squares of errors

为验证控制器的鲁棒性, 选择如下实验方案: 假设DRSVM-B模型与实际分子量分布存在一定差异, 单纯基于模型的开环状态反馈并不能很好地实现跟踪, 为此引入闭环积分器控制部分, 提高整体跟踪效果. 实验结果如下: 选择不精确的模型参数进行实验: B 样条阶次为4, 划分数为6, 学习速率为0.8, 首先离线得到网络训练输出如图4所示: 图4(a)为模型拟合输出, 图4(b)为模型误差. 显然, 采用上述参数得到的DRSVM-B模型误差较大. 此时模型权值阶次为6,

单纯采用状态反馈 $K = \{0.2, 0.5, 0.35, 0.2, 0.2, 0.2\}$, 可得稳态控制结果和输入变量变化趋势如图5(a)和5(b), 输出归一化后的稳态误差为0.042328. 状态跟踪曲线存在明显的余差, 如图6所示. 从图5(a)中可以看出, 分子量分布并没有完全跟踪上给定值, 其主要原因在于模型不够准确, 单纯基于模型的状态反馈只能使输出趋于期望值, 但并不能达到所要求的精度, 有余差存在.

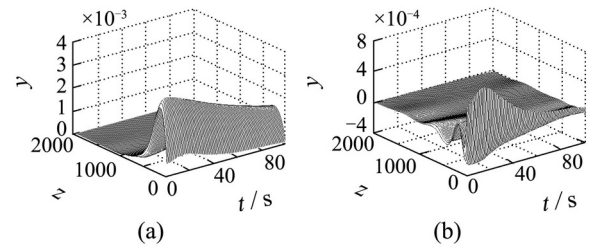


图 4 建模不准确时离线模型输出和建模误差变化曲线

Fig. 4 Estimation and error of output when modeling is inaccurate

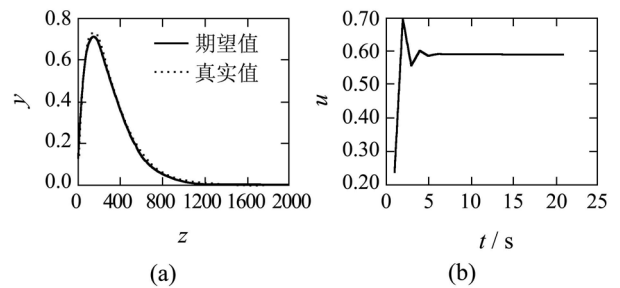


图 5 无积分控制下的稳态输出和输入变化

Fig. 5 Static output and input variable without integrator when modeling is inaccurate

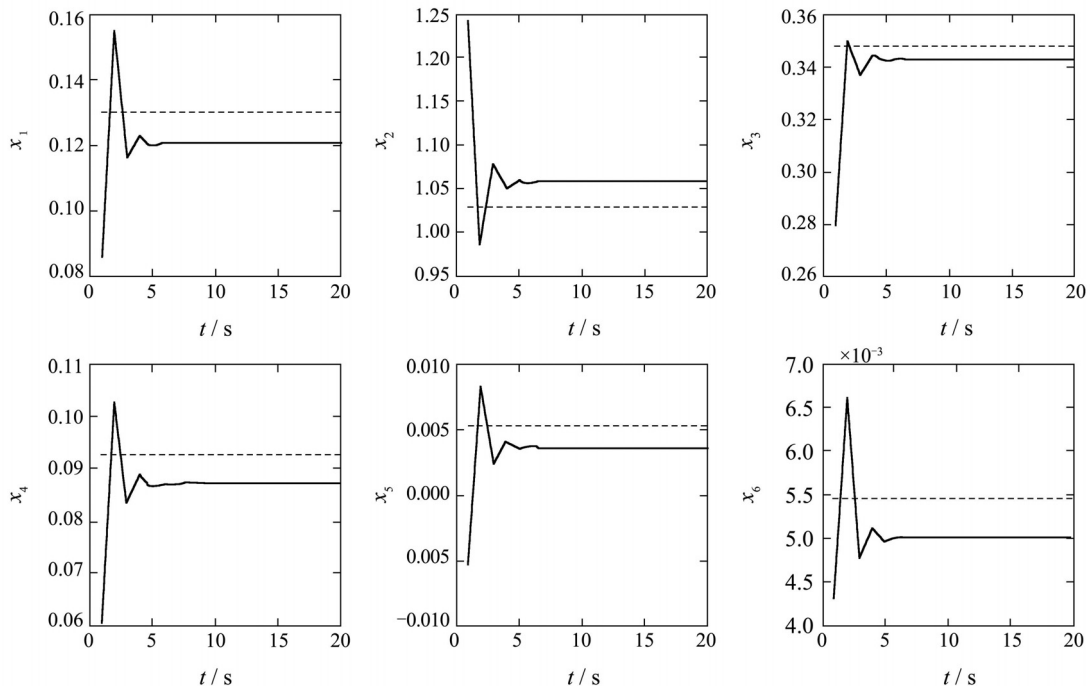


图 6 建模不准确、无积分控制下的状态跟踪曲线图

Fig. 6 State tracking without integrator when modeling is inaccurate

为提高控制精度,加入积分作用后,其中

$$K_I = \{0.5, 0.7, 1, 1.2, 0.1, 0.1\},$$

得到稳态输出跟踪和动态控制效果如图7(a)和(b),

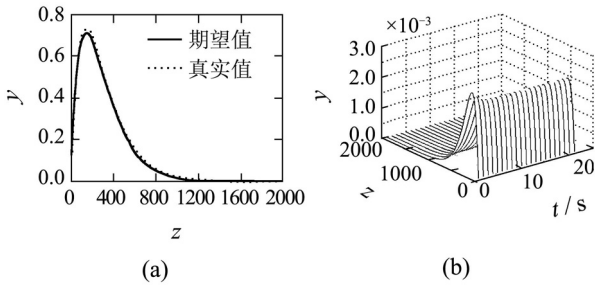


图7 加入积分后稳态输出跟踪比较和动态控制结果
Fig. 7 Static and dynamic output with integrator control when modeling is inaccurate

输出归一化后的稳态误差为: 7.4356×10^{-4} . 较之前没有积分器作用下的跟踪精度有了很大提高. 输入变量和输出误差平方和变化趋势如图8(a)和图8(b). 状态跟踪曲线如图9, 几乎不存在余差.

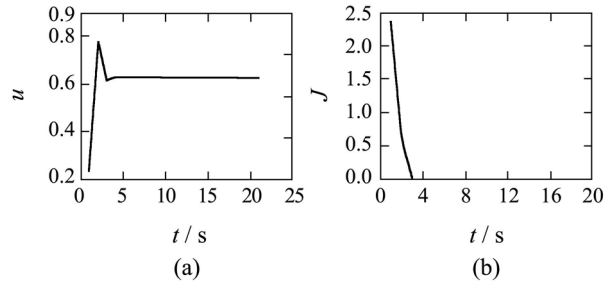


图8 加入积分后输入作用和输出分布误差平方和
Fig. 8 Input and sum square of output error with integrator control when modeling is inaccurate

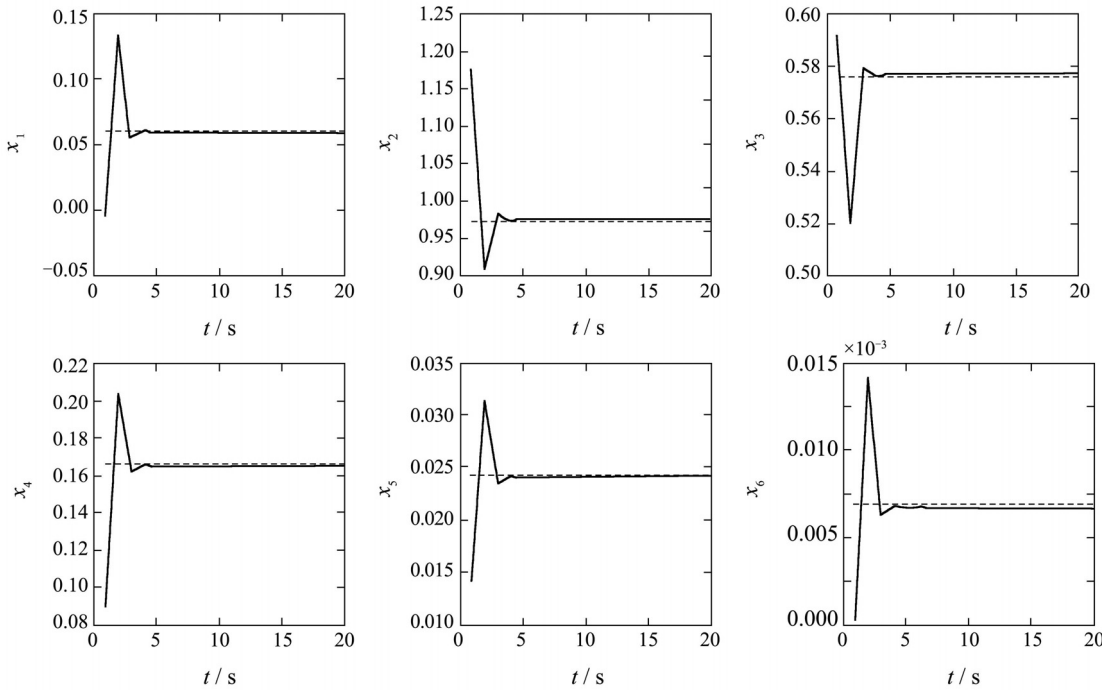


图9 建模不准确,加入积分控制作用后状态跟踪曲线图
Fig. 9 State tracking with integrator when modeling is inaccurate

可以看出,引入积分作用的本质上是输出偏差作为反馈信号,形成反馈控制策略,与单纯基于模型状态反馈的开环控制作用相比,肯定会使系统稳态误差得到大大改善. 不仅是在建模不够精确的情况下,而且在大扰动作用下,带有积分器的广义状态反馈控制都有较好的鲁棒性.

5 结论(Conclusions)

采用DSVRM-B混合网络对聚合反应物的分子量分布系统进行建模,其中B样条函数模型部分表征空间域特性,动态权值向量部分表征时间域特

性. 一旦B样条的阶次和划分数确定后,对给定分子量分布的跟踪问题就转化为动态权值向量的跟踪问题,采用常规的状态空间控制方法均可对其求解,大大简化了控制的难度. 此类模型能够将时间和空间有效地分离,将各种成熟的反馈控制策略在分布函数的控制领域进行推广,为分布参数系统的控制提供一种简化的研究思路.

针对非线性动态权值系统的跟踪问题,提出了广义的状态反馈控制结构(即状态反馈与积分器结合的控制结构),对闭环系统稳定性和跟踪性能

进行分析, 采用基于线性矩阵不定式的凸优化方法对控制器参数进行设计. 通过仿真可以看出, 选用状态反馈控制方法对分子量分布进行控制, 得到良好控制效果, 收敛快, 精度高, 并针对干扰和建模精度不高等问题, 引入闭环积分作用能够大大提高控制器的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] SMETS I Y, CLAES J E, NOVEMBER E J, et al. Optimal adaptive control of (bio) chemical reactor: past, present and future[J]. *Journal of Process Control*, 2004, 14(7): 795 – 805.
- [2] CLARKE P T L, MACGREGOR J F. Optimization of molecular weight distribution using batch-to-batch adjustments[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(12): 3660 – 3669.
- [3] TIMOTHY J, CROWLEY, KYU Y C. Experimental studies on optimal molecular weight distribution control in a batch free-radical polymerization process[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(15): 2769 – 2790.
- [4] VICENTE M, LEIZA J R, ASUA J M. Maximizing production and polymer quality (MWD and composition) in emulsion polymerization reactors with limited capacity of heat removal[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(1): 215 – 222.
- [5] VICENTE M, SAYER C, LEIZA J R, et al. Dynamic optimization of non-linear emulsion copolymerization systems: open-loop control of composition and molecular weight distribution[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002, 85(1): 339 – 349.
- [6] ALHAMAD B, ROMAGNOLI J A, GOMES V G. Advanced modeling and optimal operating strategy in emulsion copolymerization: application to styrene/MMA system[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(10): 2795 – 2813.
- [7] ALHAMAD B, ROMAGNOLI J A, GOMES V G. On-line multi-variable predictive control of molar mass and particle size distributions in free-radical emulsion copolymerization[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(23): 6596 – 6606.
- [8] CAO L L, LI X G, JIANG P, et al. Intelligent modeling of a batch reactor with partially un-measurable states based upon a structure approximating hybrid neural networks[J]. *Proceedings IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2009, 223(12): 161 – 173.
- [9] 吴海燕. 利用神经网络实现聚合反应分子量分布的建模与控制[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
(WU Haiyan. *Modeling and controlling molecular weight distribution for polymerization processer via neural networks*[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004.)
- [10] 黄颖华, 王晶. 基于支持向量机和B样条的分子量分布建模[C] //第19届中国过程控制会议论文集. 北京: 化工出版社, 2008, 7: 214 – 217.
(HUANG Yinghua, WANG Jing. The molecular weight distribution modeling based on support vector machine and B-spline[C] //Proceedings of the 19th China Process Control Conference. Beijing: Chemical Industry Press, 2008, 7: 214 – 217.)
- [11] WANG H. *Bounded Dynamic Stochastic Systems: Modeling and Control*[M]. London: Springer-Verlag, 2000.
- [12] GUO L, WANG H. Applying constrained nonlinear generalized PI strategy to PDF tracking control through square root B-Spline models[J]. *International Journal of Control*, 2004, 77(17): 1481 – 1492.
- [13] 黄颖华. 基于递归策略的动态支持向量机及其应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
(HUANG Yinghua. *Dynamic support vector machine regression based on recurrent strategy and its applications*[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.)

作者简介:

王晶 (1972—), 女, 教授, 博士, 目前研究方向为复杂工业过程的建模与控制, E-mail: jwang@mail.buct.edu.cn;

黄颖华 (1984—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为间歇聚合反应的建模与控制, E-mail: huangyh@sina.com;

曹柳林 (1951—), 女, 教授, 硕士, 目前研究方向为智能控制、优化控制, E-mail: caoll@mail.buct.edu.cn;

吴海燕 (1981—), 女, 讲师, 在读博士研究生, 目前研究方向为聚合反应分子量分布的建模与控制, E-mail: wuhy@mail.buct.edu.cn;

靳其兵 (1971—), 男, 教授, 博士, 目前研究方向复杂工业过程的先进控制, E-mail: jinqb@mail.buct.edu.cn.