

蒙艳玫,谢延鹏,郑康元,等. 煮糖结晶过程数据驱动控制方法[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):405-408.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.118

# 煮糖结晶过程数据驱动控制方法

蒙艳玫, 谢延鹏, 郑康元, 余弦, 陆冠成

(广西大学机械工程学院,广西南宁 530004)

**摘要:**煮糖结晶过程是蔗糖生产行业唯一没有实现全自动化的工序,由于该过程存在大时滞、非线性的特点,目前的研究尚难以从机理模型方向对煮糖结晶过程进行控制。针对煮糖结晶过程尚未实现全自动化的问题,研究基于紧格式动态线性化的无模型自适应数据驱动控制方法。结合煮糖结晶过程控制的实际要求,对数据驱动控制系统框架进行设计与实现。利用紧格式动态线性化方法构建动态线性化模型,将非线性系统线性化。实现无模型自适应控制和预测控制的融合,既保留了无模型自适应控制单调收敛性和有界输入输出稳定性的显著特点,又加入预测控制方法控制效果好、鲁棒性强的优点。与比例-积分-导数(proportion-integral-derivate,简称PID)控制方法的仿真对比分析表明,所用方法取得了更好的控制效果,验证了基于紧格式动态线性化的无模型自适应数据驱动方法的有效性和优越性。

**关键词:**煮糖结晶;过程数据;紧格式动态线性化;无模型自适应控制;预测控制;仿真

**中图分类号:**S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)11-0405-03

煮糖结晶过程的数据驱动控制是指仅根据煮糖系统结晶过程中产生的离线或在线输入输出数据(输入数据主要为物料流量或物料阀门开度,输出数据主要为糖膏锤度、液位、温度或糖液过饱和度)设计控制器,设计的控制器不显含或隐藏煮糖结晶系统的机理模型信息,而且能够保障系统的收敛性、稳定性和鲁棒性。由此可见,基于数据驱动的煮糖结晶过程控制方法摆脱了传统控制器设计对煮糖结晶过程机理模型的依赖,避免了传统控制器在机理模型复杂的情况下存在的鲁棒性、可靠性等问题。

公开文献报道的数据驱动控制方法主要有侯忠生于1994年提出的无模型自适应控制(model free adaptive control,简称MFAC)法<sup>[1-4]</sup>、Spall于1992年提出的同步扰动随机逼近(simultaneous perturbation stochastic approximation,简称SP-SA)法<sup>[5]</sup>、Uchiyama于1978年提出的迭代学习控制(iterative learning control,简称ILC)法<sup>[6]</sup>、George等于1995年提出的去伪控制(unfalsified control,简称UC)法<sup>[7]</sup>、Hjarnarsson等于1994年提出的迭代反馈整定(iterative feedback tuning,简称IFT)法<sup>[8]</sup>、应用于控制领域的懒惰学习(lazy learning,简称LL)控制方法<sup>[9]</sup>以及广泛应用于工业过程中的PID控制方法<sup>[10]</sup>。其中,SPSA方法虽然能够实现自适应调节,但其适应性易受系统结构或参数变化的影响,而且与UC、IFT、比例-积分-导数(proportion-integral-derivate,简称PID)法一样,这些方法都需要提前确定控制器结构,而MFAC、ILC、LL则不需要事前确定。虽然MFAC、LL方法采用相同的动态线性化原理,但是LL没有系统化的控制理论分析体系。MFAC法

和ILC法类似,有一套完善的系统分析框架,但MFAC方法由于计算负担小、易于实现和鲁棒性较强的特点,特别是它可保证闭环系统跟踪误差的单调收敛性和有界输入输出稳定性,使得这种基于数据驱动的控制方法在煮糖结晶过程领域具有巨大的发展潜力。因此,基于MFAC单调收敛性和有界输入输出稳定性的显著特点,本研究应用MFAC这种数据驱动的控制方法研究煮糖结晶过程的控制。

## 1 总体方案设计

煮糖结晶过程数据驱动控制系统框架如图1所示,其实现的基本思想主要分为离线部分、在线部分。关于总体方案的具体介绍如下。

(1)离线部分。包括参数设置模块、新型NSGA-II多目标优化算法模块、软测量技术模块、数据存储模块、输出转化模块和种子晶体优化特征模块。首先,软测量技术模块从数据存储模块中获取存储的有关煮糖结晶过程的历史数据,再计算出不可测量变量,即糖液过饱和度、糖液纯度和晶体体积;然后,新型NSGA-II多目标优化算法模块从软测量技术模块获取所需有关参数,再进行优化,将过程优化变量传输给种子晶体优化特征模块,为煮糖结晶过程实施在线操作部分作准备。

(2)在线部分。包括数据驱动控制模块、煮糖结晶过程模块、信号反馈模块和数据存储模块。在线过程实施的第1步为根据获取的种子晶体优化特征指导投种或抽种过程的优化操作;随后,数据驱动控制模块根据输出转化模块的参考目标信号、信号反馈模块的反馈信号实施控制策略,并将产生的输入信号作用于煮糖结晶过程模块,再通过信号反馈实现煮糖结晶过程的闭环自适应控制。

## 2 煮糖结晶过程无模型自适应预测控制方法

### 2.1 紧格式动态线性化方法

煮糖结晶过程是个大时滞、强耦合、非线性的系统。线性

收稿日期:2015-09-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:51465003);广西研究生教育创新计划(编号:YCSZ2014029);广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目(编号:14-045-15S08)。

作者简介:蒙艳玫(1963—),女,广西南宁人,博士,教授,主要从事智能控制系统研究。E-mail:gxu\_mengyun@163.com。

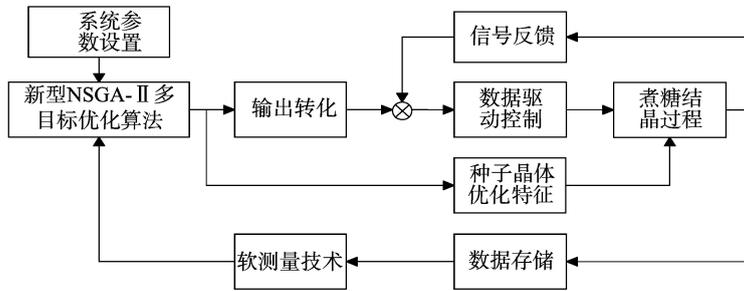


图1 煮糖结晶过程多目标优化与数据驱动控制系统框架

化方法是处理非线性系统的常见做法,其主要目的是为了简化控制器的设计过程。紧格式动态线性化方法(compact form dynamic linearization,简称CFDL)具有结构简单、输入输出数据可直接利用的特点<sup>[11-13]</sup>,本研究选择该方法构建煮糖结晶过程的动态线性化模型。

由文献[11]可知,对于单输入单输出离线非线性系统,紧格式动态线性化模型建立的条件如下:

$$y(k+1) = f[y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)]。$$

(1)

式中: $u(k) \in R, y(k) \in R$ ,分别为系统在 $k$ 时刻的输入信号、输出信号; $n_y, n_u$ 为正整数,分别表示输出、输入时间窗口长度值。当 $|Vu(k)| \neq 0$ 时,则一定存在1个时变参数 $\phi_c(k) \in R$ ,使得系统转化为CFDL模型:

$$Vy(k+1) = \phi_c(k) Vu(k)。$$

(2)

式中: $Vy(k+1) = y(k+1) - y(k); Vu(k) = u(k) - u(k-1); \phi_c(k)$ 为伪偏导数(pseudo partial derivative,简称PPD),其对任意时刻 $k$ 有界。

## 2.2 基于CFDL的无模型自适应预测控制方法

无模型自适应预测控制(model free adaptive predictive control,简称MFAPC)为MFAC和预测控制的综合,它吸收了预测控制方法控制效果好、鲁棒性强等优点。CFDL-MFAPC的实现过程如下。

第1步:计算公式(2),且当 $|\hat{\phi}_c(k)| \leq \varepsilon$ 或 $|Vu(k-1)| \leq \varepsilon$ 或 $\text{sign}(\hat{\phi}_c(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_c(1)), \hat{\phi}_c(k) = \hat{\phi}_c(1)$ ;

第2步:当 $\|q(k)\| \geq M, q(k) = q(1), q(1)$ 表示系数 $q(k)$ 的初始值;

第3步:当 $|\hat{\phi}_c(k+j)| \leq \varepsilon$ ,则 $\hat{\phi}_c(k+j) = \hat{\phi}_c(1)$ ;

第4步:执行公式:

$$VU_{N_u}(k) = [\hat{A}_1^T(k)\hat{A}_1(k) + \lambda I]^{-1} \times \hat{A}_1^T(k) [Y_N^*(k+1) - E(k)y(k)]。$$

(3)

式中: $\varepsilon, M$ 为正的常数; $\hat{A}_1(k), \hat{\phi}_c(k+j)$ 分别为 $A_1(k), \phi_c(k+j)$ 的估计值; $VU_{N_u}(k)$ 为在控制时域常数为 $N_u$ 时的输入变化量; $N$ 为步数, $\lambda$ 为权重因子; $I$ 为单位矩阵; $Y_N^*(k+1)$ 为 $N$ 步预测的期望输出值。

## 2.3 煮糖结晶过程数据驱动控制方法的实现

煮糖结晶过程的控制输入信号为入料阀门开度,控制输出信号为糖液锤度、糖膏液位,其中糖液锤度、糖膏液位的期望输出信号可由以下表达式进行转化:

$$Bx_{\text{sat}}^* = 64.4 + 8.2^{-2} T_m^* + 1.6 \times 10^{-3} (T_m^*)^2 - 1.5 \times 10^{-6} (T_m^*)^3 - 4.6 \times 10^{-8} (T_m^*)^4; \quad (4)$$

$$C_{\text{sat}}^* = 0.1 \times \frac{Bx^*}{100 - Bx^*} (1 - Pur^*) + 0.4 + 0.6 \exp$$

$$\left[ -0.24 \frac{Bx^*}{100 - Bx^*} (1 - Pur^*) \right]; \quad (5)$$

$$S^* = \frac{Bx^* / (100 - Bx^*)}{Bx_{\text{sat}}^* / (100 - Bx_{\text{sat}}^*) C_{\text{sat}}^*}; \quad (6)$$

$$L_m^* = \frac{4(V_m^* - V_o)}{\rho D^2} + L_o。 \quad (7)$$

式中: $S^*$ 为糖液过饱和度的期望输出信号,%; $C_{\text{sat}}^*$ 为期望糖液过饱和度,%; $Bx_{\text{sat}}^*$ 为期望糖液饱和锤度,%; $T_m^*$ 为期望糖膏温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $Pur^*$ 为期望糖液纯度,%; $Bx^*$ 为糖液锤度的期望输出信号,%; $L_m^*$ 为糖膏液位的期望输出信号,m; $V_m^*$ 为期望糖膏体积, $\text{m}^3$ ; $D$ 为煮糖结晶罐罐体内壁直径,m; $V_o$ 为糖膏初始体积, $\text{m}^3$ ; $L_o$ 为糖膏初始液位,m。

由于选择的控制输出目标为糖液锤度、糖膏体积2个变量,而控制输入只有入料阀门开度,为了实现这种单输入双输出控制,本研究采用线性加权的方式将糖液锤度、糖膏体积2个目标变为单目标,即:

$$y^* = w_1 Bx^* + w_2 L_m^*。 \quad (8)$$

式中: $y^*$ 为加权期望输出信号; $w_1$ 为糖液锤度期望输出信号的权重; $w_2$ 为糖膏液位期望输出信号的权重,且 $w_1 + w_2 = 1$ 。

煮糖结晶过程数据驱动控制方法的步骤如下。

(1)设置煮糖结晶过程 $T_m, S, Pur, V_m$ 、晶体体积( $v, \text{m}^3$ )、积子晶体数量-尺寸分布前四阶距( $m_0, m_1, m_2, m_3$ )和种子晶体质量( $M_s, \text{kg}$ )的优化范围以及动力学常数 $K_g, K_n, K_{gs}, r_c, k_v, R$ ,设置优化种群数(pop)、种群代数(gen)、交叉概率(pc)、变异概率(pm)、迭代次数(mum)参数,设置CFDL-MFAPC控制器参数,包括 $\varepsilon, M, n_p, d, h, \mu$ 、预测步数( $N$ )、 $N_u, \lambda, \hat{\phi}_c(1), q(1)$ 。

(2)从软测量模块获取1批次煮糖结晶过程 $T_m, S, Pur, V_m$ 和 $v$ 的历史数据。

(3)执行新型NSGA-II多目标优化算法模块,输出过程优化变量 $T_m, S, Pur, V_m, v$ 和种子晶体优化特征 $m_0, m_1, m_2, m_3, M_s$ 。

(4)执行当前煮糖结晶过程,以种子晶体优化特征为参考,指导抽种操作。

(5)将过程优化变量 $T_m, S, Pur, V_m$ 分别作为 $T_m^*, S^*, Pur^*, V_m^*$ ,并根据公式(4)至(7)将它们转化为加权期望输出信号 $y^*$ 。

(6)执行CFDL-MFAPC控制器,将产生的控制输入信号 $u(k)$ 作用于入料阀门。

### 3 仿真结果分析

选择 CFDL - MFAPC 与传统的 PID 控制方法进行对比,为便于进行对比仿真分析,统一选择如下离散非线性系统模型:

$$y(k+1) = \frac{[y(k) + y(k-1)]}{y(k)} + u(k)^{1.2} + 61. \quad (9)$$

式中: $u(k)$ 为当前时刻的阀门开度控制输入信号; $y(k)$ 为当前时刻加权输出信号, $y(k-1)$ 则为上一时刻的加权输出信号, $y(k+1)$ 为下一时刻的加权输出信号。

2种控制方法的期望输出信号,由公式(4)至(7)计算转化得来,转化过程中使用的结晶罐和煮糖结晶工艺的相关参数: $V_0 = 20 \text{ m}^3$ ,  $V_{\text{end}} = 55 \text{ m}^3$ ,  $L_0 = 1.3 \text{ m}$ ,  $L_{\text{end}} = 3.5 \text{ m}$ ,  $D = 4.5 \text{ m}$ 。  $V_0$ 、 $V_{\text{end}}$ 分别为实际煮糖结晶过程开始、结束的体积,  $\text{m}^3$ ;  $L_0$ 、 $L_{\text{end}}$ 分别为开始、结束时的液位,  $\text{m}$ ;  $D$ 为煮糖结晶罐罐体内壁直径,  $\text{m}$ 。

图2、图3显示采用 CFDL - MFAPC 控制算法的控制效果,而所设计的 CFDL - MFAPC 控制器的相关参数: $N = 10$ ,  $N_{\mu} = 3$ ,  $n_p = 4$ ,  $\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$ 。

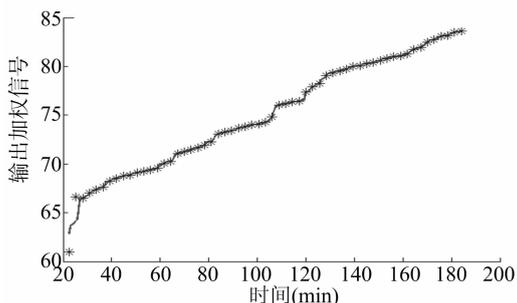


图2 CFDL-MFAPC 算法的控制效果

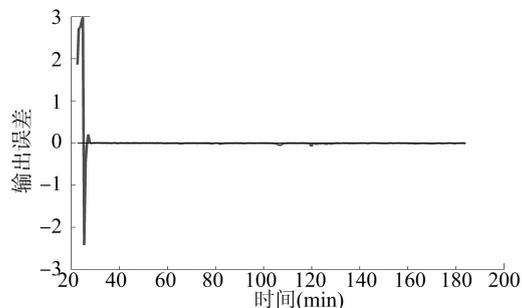


图3 CFDL-MFAPC 算法的输出误差

图4、图5显示采用 PID 控制算法,同样以优化后的过程变量经加权作为期望输出信号后所获得的控制效果,所采用的 PID 控制器的相关参数: $K_p = 0.1$ ,  $T_1 = 0.28$ ,  $T_D = 0.1$ 。

通过对 CFDL - MFAPC 和传统的 PID 控制方法的仿真结果分析可知:2种控制方法在跟踪期望输出信号的控制过程中,都表现了良好的跟踪性能(图2~图5);但是根据其对应的控制输出误差变化情况可知,CFDL - MFAPC 控制方法的控制误差最小,而且趋近零误差的速度比 PID 控制方法都要快。此外,其控制过程的误差跳变也很小,这充分说明 CFDL - MFAPC 相对 PID 具有更好的快速反应能力和收敛性,显示其具有更好的优越性。同时, PID 算法的控制效果对参数变化非常敏感,很容易出现失调,参数调整过程非常不方便。而 CFDL - MFAPC 的参数调整过程比 PID 控制算法更加

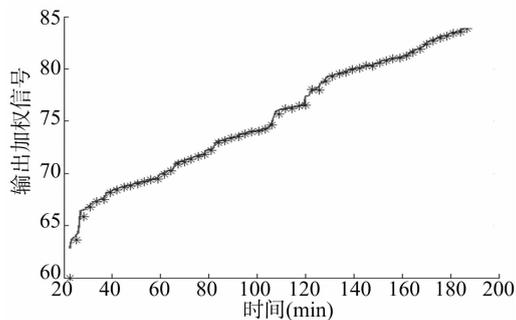


图4 PID 算法的控制效果

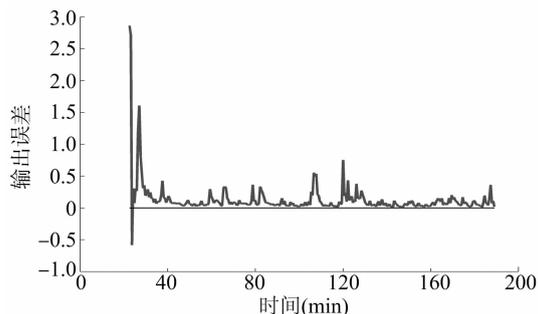


图5 PID 算法的输出误差

方便,在其可调参数中,基本上只需要调节  $\lambda$  参数,  $\lambda$  参数的调节变化对最后的控制效果影响没有 PID 算法敏感。因此, CFDL - MFAPC 控制算法具有更宽、更灵活的参数可调性。

综上所述,采用基于 CFDL - MFAPC 的煮糖结晶过程优化与控制方法在仿真过程中,相对传统 PID 控制方法控制效果更好,说明 CFDL - MFAPC 控制方法的有效性、优越性。

### 4 结论

针对目前尚无解决煮糖过程多目标优化和协同控制的有效算法的问题,本研究采用基于 CFDL - MFAPC 的数据驱动控制方法,构建煮糖结晶过程的数据驱动控制系统,设计总体方案,并详细研究基于数据驱动的 CFDL - MFAPC 控制方法。利用紧格式动态线性化模型实现线性化处理,结合无模型自适应控制与预测控制,完成煮糖结晶过程多目标优化与控制方法的融合实现。通过仿真对比分析,验证了基于 CFDL - MFAPC 的数据驱动控制方法的有效性、优越性。

### 参考文献:

- [1]侯忠生. 非线性系统参数辨识、自适应控制和无模型学习自适应控制[D]. 沈阳:东北大学,1994.
- [2]侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [3]Hou Z S, Jin S T. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6):1549-1558.
- [4]Hou Z, Jin S T. Data-driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(12):2173-2188.
- [5]Spall J C. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(3):332-341.
- [6]Uchiyama M. Formulation of high-speed motion pattern of a

郝婧,刘桂礼,李响. 基于近红外光谱和 LabVIEW 技术的番茄抗灰霉病检测系统[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):408-410.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.119

# 基于近红外光谱和 LabVIEW 技术的 番茄抗灰霉病检测系统

郝婧,刘桂礼,李响

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

**摘要:**为了准确、快速、无损地检测番茄灰霉病的抗病性,根据番茄的近红外光谱特性,设计了一种基于近红外光谱与 LabVIEW 技术的番茄灰霉病抗病检测系统。该系统主要包括初始化模块、参数读取模块、光谱数据实时采集模块和算法模块。利用该检测系统对番茄叶片进行抗病性检测实时分类试验,以验证系统性能。利用支持向量机算法,对收集的番茄叶片样本进行实时处理。结果表明,基于近红外光谱与 LabVIEW 技术的近红外光谱番茄抗病检测系统能够较好地完成对番茄叶片样本的分类。

**关键词:**番茄灰霉病;抗病性;近红外光谱;支持向量机;LabVIEW;检测系统

**中图分类号:** TP391;S436.412.1<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0408-03

番茄具有品种多、营养丰富、产量高等特点,受到广大消费者喜爱,是中国种植面积最大的蔬菜作物之一。目前,灰霉病毒是番茄常见的疾病,危害十分严重<sup>[1]</sup>。选用抗病毒的番茄品种是比较经济、有效、安全的病毒防控途径。由于外界环境等因素,培养的番茄植株并不都具有抗病特性。为降低农业生产成本,需要从培养的番茄植株中高效准确地挑选抗病植株,进行培育。人工识别、图像处理、人工接种等传统检测方法有着耗时长、污染环境、损害样本和易受环境影响的缺点<sup>[2]</sup>,而近红外光谱分析技术弥补了这些缺点,推进了在农业领域检测中的发展<sup>[3]</sup>。本研究利用近红外光谱分析技术对番茄种类进行定性分析,并在 LabVIEW 平台搭建实时检测系统完成番茄抗病品种的分类,以期对番茄抗病性检测提供一种快速、简便、有效的检测方法。

## 1 检测原理及方法

近红外光谱分析技术是利用近红外光谱包含的物质信

息,用于有机物质定性和定量分析的一种技术。近红外光谱属于红外光谱,该谱区内的信息主要由若干个不同基频的倍频和合频谱带组成。近红外光谱的常规分析技术有透射光谱(NITS)和漫反射光谱(NIRDRS)两大类。其中,漫反射光谱是根据反射与入射光强的比例关系获得物质在近红外区的吸收光谱。近红外光谱分析具有测试简单、速度快、效率高、过程无污染、适用范围广及对样品无损伤等优势。

光谱定量算法分析过程大致包括光谱测量数据预处理、波长选择以提高模型预测精度和简化模型、建立校正模型、评价建模及预测效果<sup>[4]</sup>。本研究采取支持向量机为基础的定量分析方法,与传统的人工神经网络相比,支持向量机具有结构简单的特点,并且它能够较好地解决非线性、小样本、局部极小点和高维数等实际问题,各项技术性能特别是泛化能力有明显的提高<sup>[5]</sup>。但是 SVM 参数的选择对其预测能力有非常重要的影响,目前在 SVM 参数选择方面,国际上还没有统一的模式<sup>[6]</sup>。

通过在 LabVIEW 中调用 DLL,并选择所需函数进行读取数据或控制参数,达到计算机与光谱仪的实时连接,在此基础上对光谱数据进行运算,从而达到对光谱数据的实时处理,实现番茄叶片近红外光谱实时分类的检测。

收稿日期:2015-09-21

基金项目:北京市自然科学基金(编号:4154071)

作者简介:郝婧(1990—),女,辽宁朝阳人,硕士,主要从事电子测量技术方面的研究。E-mail:jinghao626@126.com。

通信作者:刘桂礼,硕士,教授,主要从事电子测量技术方面的研究。E-mail:liuguili@bistu.edu.cn。

mechanical arm by trial[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers,1978,14(6):706-712.

[7] George Z, Bruce A F, Allen T. Feedback control, nonlinear systems and complexity[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 196-214.

[8] Hjammarsson H, Gunnarsson S, Gervers M. A convergent iterative restricted complexity control design scheme[C]. Lake Buena Vista: Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control, 1994: 1735-1740.

[9] Schaal S, Atkeson C G. Robot juggling: implementation of memory-based learning[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1994, 14(1):

57-71.

[10] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P. New results on the synthesis of PID controllers[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(2): 241-252.

[11] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[12] 侯忠生, 徐建新. 数据驱动控制理论及方法的回归和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.

[13] Xu J X, Hou Z S. Note on data-driven system approaches[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 668-675.