

文章编号: 1000-8152(2006)04-0586-07

无模型自适应控制的现状与展望

侯忠生

(北京交通大学 电子信息工程学院 先进控制系统研究所, 北京 100044)

摘要: 给出了无模型控制的定义, 并对已存在的无模型控制方法进行了分类. 综述了无模型自适应控制理论和方法的现状和进展. 讨论了无模型自适应控制与其他控制方法的主要区别, 提出了两种无模型自适应控制方法与已有基于模型的控制方法优势互补的模块化设计方案, 提出了有待于进一步研究的问题.

关键词: 非线性系统; 非参数模型; 伪偏导数; 无模型自适应控制; 无模型控制; 模块化设计; 综述

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

On model-free adaptive control: the state of the art and perspective

HOU Zhong-sheng

(Advanced Control Systems Laboratory, School of Electronics and Information Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The definition and classification are given for the several existing model-free control (MFC) methods. A brief review on the state of the art for the model-free adaptive control (MFAC) is presented and the difference between MFAC and other mainstream control methods is discussed in this paper. Two practical modularized control system design schemes are proposed by adding MFAC into the existing model-based control schemes for enjoying the extra performance improvement from MFAC. Some prospective research topics are also listed in this work.

Key words: nonlinear systems; nonparametric model; pseudo-partial-derivative; model-free adaptive control; model-free control; modularized design; survey

1 引言(Introduction)

建立受控系统的数学模型是现代控制理论应用的基础, 没有受控系统的数学模型, 现代控制理论与技术就很难有用武之地. 建立受控系统的数学模型不是一件容易的事情, 尤其是针对非线性系统的建模问题, 到目前为止仍然是一个非常困难的问题. 有时, 建立受控系统的数学模型, 花费的成本或时间太大, 因而, 有时不得不放弃. 即使建立了受控系统的数学模型, 该模型也是对受控系统作了很多的简化, 因此基于数学模型设计的控制器, 在实际应用中就可能会出现, 即受未建模动态和鲁棒性的影响, 它们是所有的基于模型的控制理论和技术不可避免的本质问题. 因此, 要想解决这对“孪生”问题, 就必须开辟另外的研究路线, 避免所设计的控制器依赖于受控系统的数学模型. 无模型控制方法就是为了解决现代控制理论这种本质问题而产生和发展起来的控制理论与方法.

2 无模型控制方法(MFC)的定义和已存在MFC方法的简要综述(Definition and brief survey on the existing model free control(MFC))

2.1 MFC 的定义(Definition of MFC)

无模型控制理论与方法是指: “控制器的设计仅利用受控系统的I/O数据, 控制器中不包含受控过程数学模型的任何信息的控制理论与方法”.

目前, 有关无模型控制方法国内外已有一些标志性的成果. 应该指出, 应用神经网络的控制方法, 尽管很多文章作者宣称也是无模型控制方法^[1~4], 但严格意义上讲, 它们不是无模型控制方法, 因为网络的节点、隐层的确定需要受控对象的部分信息. 而且, 广义上讲, 神经网络就是系统的模型, 系统变化时网络需要重新训练. 另外, 模糊控制方法也不属于无模型控制方法, 因为, 广义上讲, IF-THEN 规则也是一种模型, 需要对受控系统有非常深的了解, 同

时,当系统较大的变化发生时,规则需要重新给出。因此,按照无模型控制方法的定义,学术上讲,它们不属于无模型控制方法。

2.2 典型无模型控制方法的简要综述(Brief survey on some typical MFC)

按此文给出的无模型控制理论与方法的定义,目前国内已存在的典型无模型控制方法有:

PID类控制技术及相关的方法。PID控制和基于PID的控制方法的文献非常多,并且已经在实际中得到了最广泛的应用。到目前为止,工业过程控制中95%以上的仍然是PID控制^[5],该方法是标准的无模型方法。然而该类方法的多年理论分析和实际应用都表明,PID控制技术在处理具有强非线性、时变性和具有周期性扰动的系统控制问题时其控制效果不甚理想,不具有学习功能,不具备对系统结构变化的适应性。针对PID控制利用误差的过去、现在和变化趋势的线性加权和控制策略的缺点,1994年韩京清教授提出了非线性PID的概念,并且进而发展出了一系列理论成果,如跟踪微分器、扩展状态观测器、自抗扰技术^[6~9]等,使得传统的PID无模型控制技术又有了本质的改进和丰富,并且在实际中已经得到了成功的应用。

学习控制理论,包括迭代学习控制(iterative learning control)和重复控制(repetitive control)。迭代学习控制自1984年由Arimoto等人^[10]提出以来,已经发展成一门独立的理论与方法^[11~13],并在很多领域中得到了成功的应用。迭代学习控制在设计时不需要事先已知受控系统的数学模型。但系统的收敛性分析,以及对控制器增益的选取则需要知道受控系统输出关于控制变量偏导数的上下界,并要求系统严格满足全局Lipschitz条件、系统可重复性两个条件,所得的结论是关于迭代轴的收敛性和时间轴上有限区间的完全跟踪。理论证明和实际应用都已表明迭代学习控制能够处理具有强非线性、时变性的控制问题,尤其是处理具有周期性扰动系统的控制问题更具有其他控制方法不能比拟的优点。重复控制自1981年由Inoue等人^[14]提出以来已经受到很多的学者的关注,并且也获得了许多的实际应用^[14,15]。尽管迭代学习控制与重复控制在文献中被视为是不同的方法,但是本质上它们都是处理具有周期性系统控制问题的方法,没有本质的差别。

无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)是侯忠生于1993~1994年在其博士论文^[16]中提出的(导师为韩志刚教授),其基本思想是利用一个新引入的伪梯度向量(或伪Jacobi矩阵)和伪阶数的概念,在受控系统轨线附近用一系列的动态线性时变模型(紧格式、偏格式、全格式线性化

模型)来替代一般离散时间非线性系统,并仅用受控系统的I/O数据来在线估计系统的伪梯度向量,从而实现非线性系统的MFAC^[16~22]。该方法控制器设计仅用受控系统的I/O数据,不包括任何受控系统的模型信息,能够实现受控系统的参数自适应控制和结构自适应控制。该方法已经在一些假设条件下就其中的基于紧格式线性化和偏格式线性化的MFAC方案给出了收敛性和稳定性的理论证明^[18,22,23]。目前,此类无模型自适应控制方法已经在铸模、电机^[23,24]、化工、温度、压力等领域^[25,26]、城市快速路交通控制^[27]、工程结构减震^[28]、板材成形^[29]中得到成功的应用,而且已经获得了中国技术发明专利。实际应用、仿真研究和理论证明表明MFAC技术能够处理具有强非线性和时变性系统的控制问题。

瑞典的H. Hjalmarsson和Jonas Sjöberg于1995年给出了一种无模型控制方法,也称为迭代无模型控制优化方法(iterative model-free control optimization method)或称为迭代反馈自校正方法(iterative feedback tuning, IFT),其基本思想是利用一个在受控系统工作点附近的线性时变模型的辨识来替代整个非线性系统模型的辨识,然后此时变线性模型被用来计算系统输出关于控制器参数的梯度信息,该梯度信息是由迭代算法来实现其估计,以此来实现非线性系统的无模型控制。但该方法在每一次迭代中需要(控制器参数个数+1)次实验,具体见文献^[30~32],但该方法需要已知受控系统阶数的估计值。

美国的Michael G. Safonov在1995年提出一种称为是去伪控制(unfalsified control)的无模型控制方法,该方法的基本思想是首先构造一个满足性能规格(performance specifications)的可行控制器参数集合,然后基于量测到的新数据迭代地判别是否满足此性能规格。当新量测到的数据否定掉目前使用的控制器之后,则控制器便会自动地切换到新的控制器。当所使用控制器的满足性能规格未被所量测到的数据否定掉,则设计一个优化算法缩小可行控制器的可行区域。此种无模型控制方法本质上是一种切换控制,因此具有很多有待理论研究的问题。具体参见文献^[33,34]。

2.3 为什么需要无模型控制方法(Why we need MFC)

为什么需要无模型控制方法?从实际应用角度讲,工业过程控制中需要可靠的低成本的控制技术来提高工业制成品的质量,并且需要有能替代PID控制技术的控制质量好的、可调参数调整少的、即能实现参数自适应控制、也能实现结构自适应控制的、应用范围更广泛的控制理论与控制技术。从理

论角度讲,需要探索新的控制理论与技术,来摆脱现代控制理论与方法对受控系统数学模型的依赖,从而能避开基于数学模型的控制理论和方法所面临的鲁棒性和未建模动态这对难以解决的问题.从控制理论的历史上看,控制理论的历史就是从简单的不需要数学模型的调节器、PID控制、基于传递函数模型的经典控制理论、基于状态空间模型是现代控制理论、到现在的为了摆脱对受控系统数学模型依赖的智能控制理论的发展过程.因此,探索能摆脱对受控系统数学模型的依赖的控制理论与技术符合控制理论发展的螺旋型前进的趋势.

2.4 什么时候应用无模型控制方法(When we use MFC)

什么时候应用无模型控制方法?当受控制系统的数学模型完全未知时,或者是受控制系统的模型的不确定性很大时,或者是受控过程结构变化很大时,很难用一个数学模型来表述时,或建模成本与控制效益不好时,笔者认为应该考虑应用无模型控制方法.值得强调的是,当受控制系统的精确数学模型完全已知时,就没有必要应用无模型控制方法.因为,当受控制系统的数学模型完全已知时,笔者不仅仅知道了受控制系统的动力学行为,而且还知道了受控系统状态和输出的变化规律,为了实现控制目标,有很多现有的控制理论与方法可供选择,比如自适应控制、鲁棒控制、变结构控制、非线性控制方法等等.而且,还有很多的成熟的分析和设计手段可供利用,比如,强有力的Lyapunov分析和设计方法、各种精确线性化方法等等.进一步,有了状态变化的动力学方程,不仅仅能对系统实现控制,甚至最优控制,而且还可设计状态观测器、能实施对受控制系统的状态反馈、状态监控,以及实现对系统的预报和评估,也就是说,有了系统精确的数学模型,本文就能实现比控制本身更多的任务.总之,无模型控制方法和基于模型的控制理论与方法不能互相取代,基于模型的控制理论与方法有基于模型方法的无法替代的优点,无模型控制理论与方法也有无模型控制理论与方法的长处,没有万能的控制理论与方法.

3 MFAC 控制与其他控制方法的区别(Difference between MFAC and other mainstream control methods)

与PID控制的区别:PID类控制技术到目前仍然是应用最为广泛的控制技术.PID控制技术的优点在于简单易懂,使用中不需要受控制系统的数学模型.但存在的主要问题有:当过程发生变化时,控制器参数需要重新整定,且调整很不方便,3个可调参数相互耦合;PID对于具有强非线性、时变、及结构及参

数不确定性的系统控制效果不好;没有理论分析结果保证其稳定性.

与自适应控制的区别:自适应控制是现代控制理论中除了线性系统、最优控制等之外的理论最成熟的控制理论和方法.但自适应控制的基本原理是在受控系统数学模型的结构(包括阶数)已知,模型参数未知或慢时变的情况下如何设计控制器,并在该控制器的控制下使得该系统的输出跟踪期望的输出.到目前为止,自适应控制主要研究成果是针对线性系统得出的.自适应控制系统由估计器和控制器两部分组成.因此,自适应控制:需要参数辨识过程以估计过程模型的参数或控制器的参数;需要假设系统结构已知;在实际应用中控制器稳定性和模型参数辨识的收敛性存在矛盾等问题.自适应控制在处理非线性、模型结构变化的对象时比较困难.

与鲁棒控制的区别:鲁棒控制是已知扰动在一定范围内,基于受控系统标称模型设计的能够在扰动范围内稳定工作并能保证控制品质的一种控制器设计方法.其标称模型必须已知,当控制器设计好以后,系统不能再变化,否则需要重新设计.

与神经网络控制技术的区别:在非线性系统的控制中应用神经网络控制已获得了很大的成功,但在应用中,必须首先已知受控制系统的阶数及其一些先验的知识,计算量较大,需要训练样本信号,节点、隐层难于确定.不宜处理时变系统,尤其是结构、阶数时变系统,等等.

与迭代学习控制的区别:迭代学习控制是针对有限区间上、可重复的线性或非线性系统,基于前次和前次以前此时此刻的输入信号,和前次和前次以前不同时刻的控制误差信号,运用比较简单的学习算法,修正当前次迭代的当前时刻的控制输入信号,以使被控系统多次重复迭代后其输出在整个有限区间上完全跟踪期望信号.迭代学习控制系统包括两个轴,一个是时间轴,一个是迭代轴.收敛性是指迭代轴方向的收敛,不是按时间轴的渐进跟踪.它与MFAC的共同特点是控制器中不包含任何的受控系统数学模型信息,一个是在时间轴上的积分器,一个是在迭代轴上的积分器,都是无模型控制方法.

4 MFAC控制与基于模型控制方法的模块化设计(Modularized design by adding MFAC into existing model based control schemes)

MFAC控制方案的原型实现^[16~22]及其在实际中的应用可以参见文献[23~29].下面给出两种新的实用的,与基于模型的控制理论与方法相结合的控制系统模块化设计方案,该类方案能够实现MFAC

与其他控制系统优势互补, 协同工作, 发挥各自长处.

在实际控制系统设计时, 控制工程师经常采用的方法就是尽可能采用低阶的线性模型来进行控制系统设计. 比如针对如下一般离散时间单输入单输出非线性系统:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)). \quad (1)$$

其中 $y(k), u(k), n_y, n_u$ 分别为系统的输出、输入和阶数.

自适应控制律的设计, 采用如下的一阶或者二阶线性模型来设计, 即系统建模时, 将系统的数学模型建模成一阶或二阶线性系统:

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 u(k) = \phi^T(k)\theta, \quad (2a)$$

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 y(k-1) + \theta_3 u(k) + \theta_4 u(k-1) = \phi^T(k)\theta, \quad (2b)$$

其中 $\theta_i (i = 1, 2 \text{ 或 } 1, 2, 3, 4)$ 是系统的未知参数.

应用投影算法或最小二乘算法设计估计器, 按确定性等价原理, 控制律算法为

$$u(k) = \frac{1}{\hat{\theta}_2(k)} [y^*(k+1) - \hat{\theta}_1(k)y(k)] \quad (3a)$$

或

$$u(t) = \frac{1}{\hat{\theta}_3(k)} [y^*(k+1) - \hat{\theta}_1(k)y(k) - \hat{\theta}_2(k)y(k-1) - \hat{\theta}_4(k)u(k-1)]. \quad (3b)$$

显然, 上述的自适应控制方案没有考虑未建模动态部分, 因此有理由说, 上述的自适应控制系统的控制品质不会很好. 实际上, 系统模型(2)精确形式应该为实际的受控系统模型(1), 而写成式(2)之后就有未建模动态问题, 也即

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 u(k) + NL = \phi^T(k)\theta + NL, \quad (4a)$$

$$y(k+1) = \theta_1 y(k) + \theta_2 y(k-1) + \theta_3 u(k) + \theta_4 u(k-1) + NL = \phi^T(k)\theta + NL. \quad (4b)$$

其中非线性未建模部分为

$$NL = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)) - \phi^T(k)\theta.$$

因此, 如知道 NL 部分, 其控制律设计应该为

$$u(k) = \frac{1}{\hat{\theta}_2(k)} [y^*(k+1) - \hat{\theta}_1(k)y(k) - NL] \quad (5a)$$

或

$$u(t) = \frac{1}{\hat{\theta}_3(k)} [y^*(k+1) - \hat{\theta}_1(k)y(k) - \hat{\theta}_2(k)y(k-1) - \hat{\theta}_4(k)u(k-1) - NL]. \quad (5b)$$

控制律(3)与控制律(5)的差别是明显的. 理论上讲, 基于控制律(5)的控制效果、稳定性和鲁棒性一定比基于控制律(3)的要好. 事实上, 在实际应用自适应控制方案(2)(3)中, NL 部分不仅仅包括未建模动态部分, 同时也包括参数估计误差, 因此, 其结构和动态非常复杂. 到目前为止, 通过设计某种机制补偿此未建模动态和参数估计误差对控制系统的影响还没有很好的方法.

4.1 基于MFAC估计型控制系统设计方案(MFAC based estimation-type control system design)

基于以上的分析和讨论, 可以给出如下基于MFAC的估计型控制系统设计方案: 自适应控制系统设计的控制律算法采用式(5), 参数估计算法采用投影算法或最小二乘算法. 未建模部分估计算法采用式(6). 具体的结构见图1.

$$\begin{cases} \hat{\psi}(k) = \\ \hat{\psi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + (\Delta u(k-1))^2} (\Delta e(k) - \\ \hat{\psi}(k-1) \Delta u(k-1)), \\ NL(k+1) = e(k) + \hat{\psi}(k) \Delta u(k). \end{cases} \quad (6)$$

MFAC的外环的作用就是克服未建模动态和参数估计误差的综合影响, 从而提高控制系统的品质. 从图1可以看出控制系统设计的模块化设计思想, 即: 外回路的加入不影响原来的系统设计, 断开无模型外回路后, 系统就是原来的自适应控制系统.

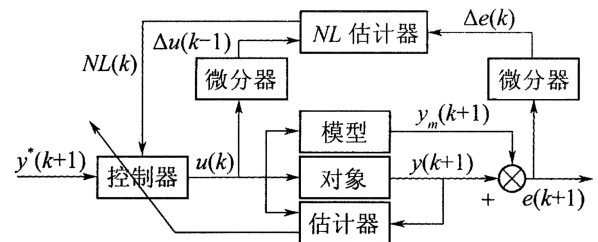


图 1 基于MFAC的估计型控制系统设计框图

Fig. 1 Block diagram of MFAC based estimation-type control system

4.2 基于MFAC嵌入型控制系统设计方案(MFAC based embedded-type control system design)

针对未建模动态的影响,还可以给出如下结构的基于MFAC的嵌入型控制系统设计方案:

$$u(k) = u_{AC}(k) + u_{MFAC}(k). \quad (7)$$

其中:自适应控制系统设计的控制律 u_{AC} 采用式(3),参数估计算法采用基于式(2)的最小二乘算法,无模型控制律 u_{MFAC} 及伪偏导数估计算法,以基于紧格式线性化的情形为例,如下:

$$\hat{\psi}(k) = \hat{\psi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + (\Delta u(k-1))^2} (\Delta y(k) - \hat{\psi}(k-1) \Delta u(k-1)), \quad (8a)$$

$$\hat{\psi}(k) = \hat{\psi}(1), \text{ 如果 } \hat{\psi}(k) \leq \varepsilon, \text{ 或者 } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon, \quad (8b)$$

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \hat{\psi}(k)}{\lambda + |\hat{\psi}(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)]. \quad (8c)$$

其中: $\eta_k, \rho_k \in (0, 2), \mu, \lambda$ 是权重因子, ε 是一个充分小的正数, $\hat{\psi}(1)$ 是 $\hat{\psi}(k)$ 的初值.

具体的结构见图2. 从图2可以看出控制系统设计的模块化设计思想,即:外回路的加入不影响原来的系统设计,断开MFAC外回路后,系统就是原来的自适应控制系统;反过来,断开内回路, MFAC 就起作用,这与传统的控制系统设计有非常明显的不同.

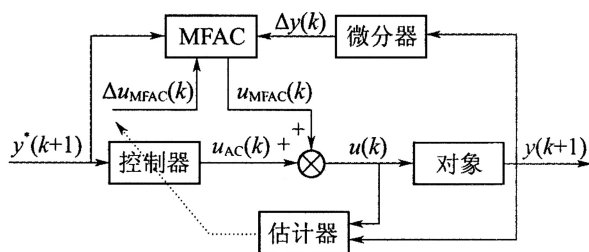


图2 基于MFAC的嵌入型控制系统设计框图

Fig. 2 Block diagram of MFAC based embedded-type control system

上述控制系统设计的思想也可以理解为MFAC控制将整个的基于自适应控制方法所设计的系统看成一个新的被控对象加以控制,这正是MFAC控制的主要特点.

如果自适应控制控制效果已经达到理想的状态,则受控对象的输出就已经跟踪了期望信号, MFAC的输出控制信号也就不变化,此时相当于MFAC外环已经断开.

基于MFAC估计型、嵌入型的控制系统设计方案的详细仿真研究结果,由于版面限制,略去,感兴趣

的读者请参看文献[35, 36].

5 结论与进一步需要研究的问题(Conclusion and further topics to be researched)

本文给出了无模型控制理论与方法的定义,简要综述了国内外有关MFAC控制理论与方法的研究现状,阐明了MFAC控制方法与其他控制理论与方法的区别和联系,给出了两个实用的MFAC与其他控制方法优势互补的模块化设计方案.

MFAC控制理论还有许多的问题有待于进一步研究,如: 1)各种线性化格式中的时变参数变化速度的数量刻画,以及它与非线性系统非线性程度的关系; 2)伪偏导数或伪梯度或伪Jacobi矩阵的符号特征及保号的条件; 3)此类线性化模型的可控性与伪偏导数或伪梯度的时变速度的关系; 4)控制输入线性化水平常数 L 及伪阶数的选取问题; 5)一般情况下的稳定性理论证明; 6)如果受控系统的某些信息可获得,如何利用这些信息来提高MFAC控制的控制效果? 如何建立MFAC与基于模型的控制理论与方法之间的桥梁? 7)如何将基于模型的控制理论与分析工具引入到MFAC控制中; 8)如何从理论上说明将无模型控制理论与方法嵌入到基于模型的控制理论与方法中的好处,等等.

MFAC控制在实际系统中的应用也是非常有意义的研究工作.

参考文献(References):

- [1] SPALL J C, CRISTION J A. Method for model-free control of general discrete-time systems: United States Patent, 5513098[P]. April 30, 1996. Washington: United States Patent and Trademark Office of the United States Department of Commerce.
- [2] CHENG Shuxing G. Model-free adaptive process control: United States Patent, 6055524[P]. April 25, 2000. Washington: United States Patent and Trademark Office of the United States Department of Commerce.
- [3] SPALL J C. Model-free control of nonlinear stochastic systems with discrete-time measurements [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(9): 1198 - 1210.
- [4] SPALL J C, CHIN D. Traffic responsive signal timing for system-wide traffic control [J]. *Transportation Research C5*, 1997, 5(3/4): 153 - 163.
- [5] SILVA G J, DATTA A, BHATTACHARYYA S P. New results on the synthesis of PID controllers [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47 (2): 241 - 252.

- [6] 韩京清. 控制理论——模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学, 1989, 9(4): 328 – 335.
(HAN Jingqing. Control theory: model theory or control theory [J]. *Systems Science and Mathematics*, 1989, 9(4): 328 – 335.)
- [7] 韩京清. 非线性PID控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487 – 490.
(HAN Jingqing. Nonlinear PID controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(4): 487 – 490.)
- [8] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 4(2): 177 – 183.
(HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking differential[J]. *Systems Science and Mathematics*, 1994, 4(2): 177 – 183.)
- [9] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3), 13 – 18
(HAN Jingqing. From PID to ADRC [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13 – 18.)
- [10] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning [J]. *J of Robotic Systems*, 1984, 1(2): 123 – 140.
- [11] CHEN Yangquan, WEN Changyun. Iterative learning control: convergence, robustness and applications [M]//*Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin: Springer-Verlag, 1999, Vol. 248.
- [12] XU Jian-Xin, TAN Ying. Linear and nonlinear iterative learning control [M]//*Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin: Springer-Verlag, 2003, Vol.146.
- [13] 谢胜利, 田森平, 谢振东. 迭代学习控制理论的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
(XIE Shengli, TIAN Shenping, XIE Zhendong. *Iterative Learning Control Theory and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [14] INOUE T, NAKANO M, IWAI S. High accuracy control of a proton synchrotron magnet power supply [C]//*Proc of the 8th World Congress of IFAC*. [s.l.]: [s.n.], 1981: 216 – 221.
- [15] LONGMAN R W. Iterative learning control and repetitive control for engineering practice [J]. *Int J Control*, 2000, 73(10): 930 – 954.
- [16] 侯忠生. 非线性系统参数辨识、自适应控制及无模型学习自适应控制[D]. 沈阳: 东北大学, 1994.
(HOU Zhongsheng. *The parameter identification, adaptive control and model free learning adaptive control for nonlinear systems*[D]. Shenyang: Northeastern University, 1994.)
- [17] 侯忠生, 韩志刚. 鲁棒的非线性系统无模型学习自适应控制[J]. 控制与决策, 1995, 10(2): 137 – 142.
(HOU Zhongsheng, HAN Zhigang. Robust model free learning adaptive control for nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 1985, 10(2): 137 – 142.)
- [18] 侯忠生. 无模型学习自适应控制理论[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.
(HOU Zhongsheng. *Model free learning adaptive control theory*[R]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997.)
- [19] HOU Zhongsheng, HUANG Wenhui. Model-free learning adaptive control of a class of SISO nonlinear systems [C]//*Proc of American Control Conference*. New Mexico: [s.n.], 1997: 343 – 344.
- [20] 侯忠生, 黄文虎. 一类离散时间非线性系统不依赖受控系统数学模型的学习自适应控制[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 893 – 899.
(HOU Zhongsheng, HUANG Wenhui. The model-free learning adaptive control for a class of nonlinear discrete-time systems [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(6): 893 – 899.)
- [21] HOU Zhongsheng, HAN Cunwu, HUANG Wenhui. The model-free learning adaptive control for a class of MISO nonlinear discrete-time systems [C]//*Proc of the 5th IFAC Symp on Low Cost Automation*. Shenyang: [s.n.], 1998: 13 – 26.
- [22] 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.
(HOU Zhongsheng. *Nonparametric Models and Its Adaptive Control Theory* [M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [23] TAN K K. Adaptive predictive PI control of a class of SISO systems [C]//*Proc of American Control Conference*. California: [s.n.], 1999: 3848 – 3852.
- [24] TAN K K, LEET H, HUANG S N, et al. Adaptive predictive control of a class of SISO nonlinear systems[J]. *Dynamics and Control*, 2001, 11(2): 151 – 174.
- [25] 韩志刚. 无模型控制器的应用[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 22 – 25.
(HAN Zhigang. The application of model free controller [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(4): 22 – 25.)
- [26] 韩志刚. 无模型控制方法在化肥生产中的应用[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 858 – 863.
(HAN Zhigang. Model free control law in the production of chemical fertilizer [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 858 – 863.)
- [27] 王春蔚. 基于无模型自适应控制理论的局部入口匝道控制系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
(WANG Chunwei. *Studies on the model-free adaptive control based local ramp metering strategies*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.)
- [28] 周强, 瞿伟廉. 安装MR阻尼器工程结构的非参数模型自适应控制[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(4): 127 – 132.
(ZHOU Qiang, QU Weilian. Model-free learning adaptive semi-active control of structure with MR dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(4): 127 – 132.)
- [29] 刘纯国, 隋振, 付文智, 等. 板材多点成形过程的非参数模型及自适应控制[J]. 控制工程, 2004, 11(4): 306 – 308.
(LIU Chunguo, SUI Zhen, FU Wenzhi, et al. Nonparametric model and adaptive control for multi-point forming process [J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(4): 306 – 308.)
- [30] HJALMARSSON H, GUNNARSSON S, GEVERS M. Model-free tuning of a robust regulator for a flexible transmission system [J]. *Europe J of Control*, 1995, 1(2): 148 – 156.

- [31] HJALMARSSON H, GEVERS M, GUNNARSON S, et al. Iterative feedback tuning: theory and applications [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1998, 18(4): 26 – 41.
- [32] HJALMARSSON H. Iterative feedback tuning: an overview [J]. *Int J of Adaptive Control Signal Process*, 2002, 16(5): 373 – 395.
- [33] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept and learning [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(6): 843 – 847
- [34] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept: A direct path from experiment to controller[M]// FRANCIS B A, TANNENBAUM A R. *Feedback Control, Nonlinear Systems and Complexity*. New York: Springer-Verlag, 1995: 196 – 214.
- [35] 侯忠生, 熊丹. 带有无模型控制外环补偿的自适应控制系统设计[C]//第五届全球智能控制与智能化大会. 杭州: IEEE出版社, 2004, 6(1): 444 – 448.
(HOU Zhongsheng, XIONG Dan. The adaptive control system design with a model-free external loop as a compensator [C]//*Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou, China: IEEE Press, 2004, 6(1): 444 – 448.)
- [36] 熊丹. 基于无模型控制外环补偿的控制系统模块化设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004.
(XIONG Dan. *The modularized control system design with a model-free controller external loop as a compensator*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2004.)

作者简介:

侯忠生 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 分别于1983年、1988年在吉林工业大学应用数学系获学士和硕士学位, 1994年在东北大学自动控制系获博士学位, 1995年至1997年在哈尔滨工业大学航天学院作博士后研究, 2002年至2003年在美国耶鲁大学做访问学者, 研究领域包括无模型自适应控制理论、学习控制、智能交通系统、智能信息处理等, E-mail: houzhongsheng@china.com; zhongshenghou@hotmail.com.

下期要目

- 复杂系统可靠性估计的模糊神经网络Petri网方法 原菊梅, 侯朝桢, 王小艺, 吴勤
- 基于灭绝机制的交互式遗传算法 郝国生, 史有群, 张勇, 石明辉, 张建华
- 非线性时间序列预报的隐多分辨ARMA模型 高伟, 田铮
- SLAM问题中的模糊几何地图与顶点自定位法 陈东岳, 张立明
- 稀土串级萃取分离过程的双线性模型及其参数辨识 贾文君, 柴天佑
- 2-D奇异系统Roesser模型的鲁棒 H_∞ 控制 徐慧玲, 盛梅, 邹云
- 具有未建模动态的时变关联系统的鲁棒分散自适应镇定 田洁, 解学军
- 采用逐维定位的多模型自适应解耦控制器 王昕, 王中杰, 杨辉, 李少远
- 自适应变异差分进化算法估计软测量参数 颜学峰, 余娟, 钱锋
- 机组短期负荷环境/经济调度多目标混合优化 王欣, 秦斌, 阳春华, 吴敏
- 区间时变细胞神经网络的全局鲁棒指数稳定性 吴立刚, 王常虹, 曾庆双
- 线性时滞关联大系统的分散 α -镇定 彭达洲, 胥布工
- 基于事件的设计与控制技术及其在机器人系统中的应用 路飞, 宋沐民, 田国会, 席宁, 康伟
- 基于线性集结的预测控制器 张群亮, 席裕庚
- 一类不确定模糊模型的输出反馈鲁棒预测控制 苏成利, 王树青
- 电动汽车感应电机驱动系统效率优化控制 张承慧, 崔纳新, 李珂, 张承进
- 基于观测器跟踪非一致轨迹的迭代学习控制器设计 张冬梅, 孙明轩, 俞立
- 一类改进的输入时滞的线性时滞系统的 H_∞ 控制 柴琳, 费树岷
- 高频增益未知的受扰非线性系统输出反馈控制 陈刚, 王树青