

文章编号: 1001-0920(2011)09-1281-07

时变系统控制方法综述

于霞^a, 刘建昌^{a,b}, 李鸿儒^{a,b}

(东北大学 a. 流程工业综合自动化国家重点实验室, b. 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 近年来, 被控系统的时变问题越来越引起控制领域的广泛关注, 新的控制方法也随之不断被提出. 首先, 在分析时变系统分类方法的基础上, 总结了研究时变系统的几个关键问题; 随后给出了两种不同的时变系统模型描述方法, 同时根据系统的时变特征, 分析讨论了不同的时变系统控制方法, 并总结出各自的研究现状及性能特点; 最后, 就时变系统研究趋势及核心问题探讨了时变系统控制问题的研究方向.

关键词: 时变系统; 动态模型; 自适应控制; 迭代学习

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Survey on control of time-varying systems

YU Xia^a, LIU Jian-chang^{a,b}, LI Hong-ru^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, b. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: YU Xia, E-mail: yuxia.neu@gmail.com)

Abstract: In recent years, there is a hot problem on time-varying of the plant which becomes more and more increasingly concerned by control areas. Thus, a series of new control methods are proposed continuously. Firstly, the classification methods of the time-varying plants are analyzed and several key issues on such plants are summarized. Then two different methods on model description are proposed. Based on these, according to the differences on the time-varying characteristics, different control approaches are analyzed and the status and performance characteristics of time-varying system are surveyed. Finally, the perspective of time-varying control theory and associated research topics are briefly explored and discussed.

Key words: time-varying systems; dynamic model; adaptive control; iterative learning

1 引言

实际工程应用中, 被控系统的时变现象普遍存在. 例如复杂系统过程控制、机器人运动控制以及航空航天等领域, 都或多或少的需要解决系统的时变问题. 因此, 近些年来, 针对这些时变系统控制问题的研究越来越被控制界所关注, 成为被广泛讨论的热点问题之一.

因为不同领域对时变系统研究的侧重点有所不同, 所以时变系统有以下几种分类方法: 首先, 根据系统本身的实际运行情况, 可将时变系统分为参数时变、结构时变以及扰动不确定 3 类; 从时变因素的来源不同, 也可分为以下两类: 一类时变因素表现在系统内部, 即系统本身的模型是时变的(包括参数时变和结构时变); 另一类时变因素表现在系统外部, 即系

统存在不确定扰动(包括扰动时间不确定以及一些各种来源的随机噪声). 另外, 从控制角度出发, 也常常将时变系统分为线性时变系统和非线性时变系统两种. 从时变本身的特性出发, 时变系统也可分为: 快时变系统、慢时变系统及周期时变系统等等. 因此对于时变系统的控制, 在选择控制算法之前一定要对时变系统的特性及类型有所了解. 而整个控制系统的性能好坏也不仅取决于所采取的控制算法, 同时与时变系统本身的特征密切相关.

时变系统的动态特性非常复杂, 时变特性的种类也多种多样, 因此从不同的几个方面对其进行研究. 主要包括: 时变系统的辨识方法研究, 时变系统的控制方法研究, 时变系统的稳定性分析.

时变系统的辨识^[1-6]是根据系统的输入输出数

收稿日期: 2010-10-20; 修回日期: 2011-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金与宝山钢铁股份有限公司联合基金项目(50974145); 辽宁省自然科学基金项目(20092012).

作者简介: 于霞(1982-), 女, 博士生, 从事自适应信号处理、智能控制的研究; 刘建昌(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、复杂过程建模等研究.

据,建立能够与时变系统实现最优匹配的理论和方法. 整个过程可分为在线辨识与离线辨识两种,分别对输入的辨识信号和被控系统有着不同的要求. 对于系统的时变特性而言,往往要求辨识过程是在线进行的,因为对于模型和扰动的先验知识掌握的不够全面,需要在系统的运行过程中不断提取相关信息使模型不断完善. 另外,在线辨识的模型会随着系统的运行而不断改进,由该模型综合得出的控制作用也不断变化,所以此过程常作为时变系统控制的一部分在系统中被实现.

时变系统的稳定性^[7-12]是指系统的状态、输入输出和参数等变量,在时变因素(或干扰)的影响下总是有界的,它是对控制系统的最基本要求. 但是,时变系统结构复杂,不确定因素众多,常会导致整个控制系统的不稳定. 因此,为了在追求控制效果的同时保证稳定性,在设计控制器时需要附加很强的假设条件,同时对时变特性的先验信息也要尽可能全面的了解. 可以这样说,时变系统的稳定性分析,往往伴随着对系统及环境的种种假设和限制进行的.

本文主要讨论时变系统的控制方法. 首先对时变控制系统中常用的两种动态模型描述方法进行了介绍;随后针对现有的研究成果做一阶段性的分类和概括,总结其核心控制思想;最后总结出时变控制系统中具备进一步深入研究意义的若干问题,并为后续时变系统控制方法的研究理出思路.

2 时变系统模型描述方法

在讨论现有的时变系统控制方法之前,先介绍一种时变系统的模型描述方法,即针对未知时变系统辨识采用的 Markov 模型. 该模型可以对未知系统待辨识的动态权向量进行描述,通过 Markov 模型,可以了解动态权向量的时变特性构成. 另外,从控制的角度出发,给出了时变系统的离散化数学模型. 值得一提的是,非线性系统微分方程的解析解一般情况下不存在,所以对于非线性时变系统而言,精确的数学模型往往不可得,以下的模型描述主要是针对线性时变系统而言. 在处理非线性时变系统控制问题时,也常常会用到这些模型.

2.1 辨识用 Markov 模型

辨识用 Markov 模型是研究离散时变条件下的通用动态模型. 这个模型由两个基本过程支配,分别是一阶 Markov 过程和多重回归过程^[13].

设用自适应滤波器建模一个未知环境的动态系统,其权向量(即脉冲响应)的变化过程可用一个一阶 Markov 过程来描述,向量形式为

$$w_o(k+1) = aw_o(k) + \omega(k). \quad (1)$$

式中: a 为模型的一个固定参数, k 为离散时间, $\omega(k)$ 为均值为零的过程噪声向量. 权向量 $w_o(k)$ 可看作过程噪声 $\omega(k)$ 的来源,其各个分量被加到一组单极点低通滤波器. 每个这样的低通滤波器转移的函数为 $1/(1 - az^{-1})$, z^{-1} 是单位延迟算子. 假设参数 a 的值接近于 1. 这一假设的意义是低通滤波器的带宽远小于输入数据的速率,也就是说 Markov 模型要经过多次迭代才能产生抽头权向量的显著变化(即系统在原则上可以通过在线辨识过程被建模).

下面讨论多重回归过程,时变系统的期望响应用 $d(k)$ 表示,它由多重线性回归模型控制,即

$$d(k) = w_o^H(k)u(k) + v(k), \quad (2)$$

式中 $v(k)$ 为测量噪声,假设它是均值为零、方差为 σ_v^2 的白噪声. 因此,即使输入向量 $u(k)$ 与噪声 $v(k)$ 都是平稳过程,但由于 $w_o(k)$ 是时变的,模型的输出 $d(k)$ 仍然是一个非平稳随机过程. 时变模型的框图描述如图 1 所示.

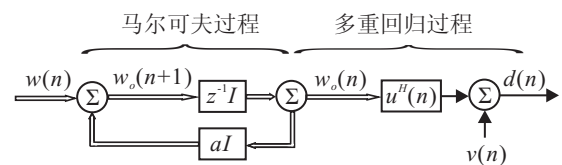


图 1 辨识用时变系统模型

2.2 时变系统控制用模型描述

设时变被控对象可用如下的非线性微分方程来描述:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f_1[x(t), u(t), \theta(t), t], \\ y(t) = f_2[x(t), u(t), \theta(t), t]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x(t)$ 为系统的 n 维状态变量, $u(t)$ 为系统的 m 维输入向量, $y(t)$ 为系统的输出 r 维向量, $\theta(t)$ 为系统的 s 维时变参数向量.

假设式(3)能够线性化和离散化,考虑扰动和噪声的影响即可得如下方程组:

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ \Phi(\theta(k), k)x(k) + \Gamma(\theta(k), k)u(k) + \omega(k), \\ y(k) = H(\theta(k), k)x(k) + v(k). \end{cases} \quad (4)$$

其中: k 为离散时间, $\omega(k)$ 为 n 维随机扰动, $v(k)$ 为 r 维测量噪声; $\Phi(\theta(k), k)$, $\Gamma(\theta(k), k)$, $H(\theta(k), k)$ 分别为 $n \times n$, $n \times m$, $r \times n$ 矩阵. 被控对象模型结构如图 2 所示.

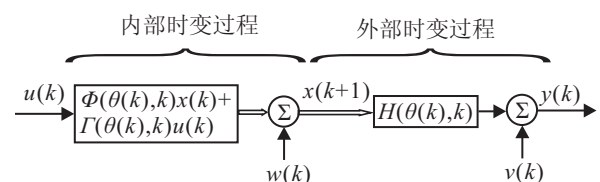


图 2 控制用时变系统模型

3 时变系统的控制方法分析

下面针对不同时变特性来分别介绍和分析时变系统的控制方法. 由于时变系统的复杂性和多样性, 系统很可能会同时具备多种特性, 比如同时具备快时变和非线性这两个双重特性, 而常会依照主要特性来选择分析控制方法, 或者采取多种方法相结合的方式. 所以下面的分析也会按照这一原则, 具备多种特性的控制方法将不会重复介绍.

3.1 针对“慢”时变系统的自适应控制方法

早期的控制领域, 人们为解决不确定系统的时变问题, 于20世纪50年代率先提出了“自适应控制”方法. 这种方法经过随后几十年的不断发展与完善, 现已成为各领域解决时变问题最常采用的方法之一. 它与常规的反馈控制和最优控制一样, 是一种基于模型的控制方法. 有所不同的是, 为了处理系统模型与扰动的不确定甚至时变特性, 需要实现系统的在线辨识并以此来不断修正和完善预先设定的系统模型.

由于体现出对系统的“自适应”能力, 自适应控制方法被广泛用于时变系统并得到了进一步的发展. 20世纪70年代末, 一些关于自适应系统稳定性的证明被提出, 同时这些基础研究也对时变系统的鲁棒性提出了更高的要求. 于是在随后的近20年中, Tsakalis, Ioannou^[14-15], Middleton 和 Goodwin^[16]等人相继提出了新的自适应算法, 并将线性定常系统的模型参考自适应控制(MRAC)引入线性时变系统中, 取得了一些成果. 例如文献[16]研究了带有建模误差的参数线性化系统的自适应控制方法, 采用带投影的梯度算法估计时变参数, 得到了很好的控制效果. 但是这些算法都要求系统的时变是“足够慢”的, 且需要已知时变范围. 虽然这样可以简化系统稳定性分析, 但对被控对象参数变化的速度有较强限制.

随后 Estrada^[17]在一定假设条件下, 对一类参数未知、有界、慢时变的非线性系统提出了能够实现状态渐近跟踪的模型参考自适应控制算法. Manino^[18]对参数时变和扰动界未知的SISO系统, 设计了自适应输出反馈控制算法, 在一定条件下可以使跟踪误差渐近收敛到零. 这些自适应及相关改进算法的提出, 都为时变系统提供了实用可行的控制方案, 唯一的遗憾是对时变特性或其他参数的要求较高.

3.2 针对扰动不确定时变系统的鲁棒自适应控制方法

传统的自适应控制方法对于系统慢时变的情况具有较好的稳定性和收敛性, 但当时变特性不确定时, 系统性能可能发生很大变化. 为解决此类问题, 人们提出了具有鲁棒性的自适应控制方法.

Marino, Tomei^[19]针对自适应控制的局限性, 对未知时变和未知有界干扰设计了鲁棒自适应前置滤波器, 通过对参考信号进行调节来改善系统的动态性能. 这类算法对参数足够慢这一限制条件作了进一步的放松甚至去掉了该限制, 但对系统的其他特征却分别做了严格限定和假设. Qu等人^[20]将基于模型参考的鲁棒自适应控制应用于线性时变系统, 并取得了一定的效果. 武玉强等人^[21]对带有干扰的线性时变系统, 在没有假设系统参数是慢时变或参数的界已知的条件下, 利用Backstepping递推方法来设计非线性鲁棒控制器. 控制器的设计中, 不需要辨识系统的时变参数, 所设计的非线性鲁棒控制器在保证闭环系统所有信号有界性的同时放宽了对系统参数的要求. Wang等人^[22]针对一类具有极小参数的非线性时变系统, 提出了一种新的鲁棒自适应神经网络控制方法, 该方法被证明在闭环系统中可以保证半全局的一致有界性; 同时结合鲁棒自适应与神经网络的优势, 拓展了控制系统的适用范围.

3.3 针对具有特殊时变特性的控制方法

为摆脱控制器对于时变特性的高敏感性, 进一步解决复杂时变系统的控制问题, 研究人员开始考虑利用尽可能多的已知时变参数性质, 加之对实际应用背景的深入分析, 有针对性地设计控制器和在线控制策略. 由此, 根据不同时变特性以及实际应用的需要所设计出的一系列控制方法在近年来先后被提出.

3.3.1 重复学习控制

重复控制首先由Inoue等人于1981年提出, 它将人类的学习机制引入控制系统中, 使其具有自学习能力; 同时, 通过将周期信号的动态模型植入系统的控制器内, 实现对周期性输入或干扰信号进行高精度的跟踪或抑制^[23]. 这种控制方法能够实现其他控制方法难以达到的高精度跟踪, 所以一经提出便获得了广泛关注, 在电源控制、超高精度机械加工、伺服控制系统高精度跟踪控制等各个领域得到了成功的应用. 例如: 重复控制可针对一类线性时不变系统, 利用小增益定理在频率域上对它进行收敛性分析, 可有效地处理重复跟踪控制问题, 并广泛应用于电动液压材料检测系统^[24].

3.3.2 周期自适应控制

当预先知道系统不确定性参数的周期时, Xu, Abidi等人^[25-27]通过逐点积分机制, 构造了自适应控制器的参数周期自适应律, 可以适应快时变的对象, 使跟踪误差在 L_2 范数意义下实现渐近收敛, 解决了一阶混合线性参数化不确定性系统的周期自适应控制问题. 同时, Bayard^[28], Dimogianopoulos等人^[29]提

出直接自适应周期控制方法,用于非最小相位系统的自适应控制.该方法仅需要预先知道被控对象的阶次信息,即可取得令人满意的控制效果. Chi 等人^[30]在周期自适应理论的基础上,提出了一种无模型周期自适应控制方法,并将其用于高速路的交通控制.该方法仅需要知道期望轨迹的周期和系统的 I/O 数据,而不需要系统的任何其他先验知识,克服了模型的不确定性以及未建模动态对系统造成的限制和影响,且该方法具有周期学习能力.

3.3.3 模型预测控制

在实际工业过程中,被控系统的时变性普遍存在,往往很难建立起被控对象的精确数学模型,即使能得到较为精确的近似数学模型,也常常因为阶次过高而很难设计一个合适的控制器.针对这一实际应用背景的需要,模型预测控制于 20 世纪 70 年代直接从工业实践过程中发展起来,并通过几十年的发展,现已有许多不同种类的模型预测控制算法先后被提出.

具有代表性的有 Richalet 等人^[31]提出的模型预测启发式控制,它是较早应用于实际工业过程的预测控制算法.其核心思想是:基于在线优化的控制策略,在每一个采样时刻将系统的当前状态作为初始条件,利用过程的动态模型,预测有限时域内系统的响应,再根据该模型优化对象的未来性能指标,求解一个开环最优化问题,并得到一个控制序列,然后将该控制序列的第一个控制量作用于被控对象.基于这一思想,Clarke 等人^[32-33]为克服模型参数失配对输出误差的不良影响,将自适应机制与预测控制相结合,提出了基于受控自回归积分滑动平均模型的广义预测控制.近年来,不同类型的模型预测控制方法不断涌现,其中具代表性的有 Mayne 等人^[34]针对一类具有时变扰动的线性确定系统,提出的鲁棒输出反馈模型预测控制方法,避免了传统模型预测控制方法易受到系统不确定因素的影响而变得复杂难以实现的缺点,给出了当系统的输入输出端扰动具有较强的不确定因素时的反馈控制方案. Zheng 等人^[35]分析了当权值参数时变时,模型预测控制系统的稳定性,给出了时变参数模型预测系统稳定的充分条件,并指出系统在状态估计条件下将保持全局渐近稳定.

3.4 针对非线性时变系统的控制方法

非线性时变系统的精确离散化模型所对应的微分方程一般不存在解析解,所以在计算机控制系统中非线性时变系统的精确离散化模型往往是不可得的.常用的非线性时变系统控制器设计方法主要有以下两种: 1) 先根据被控对象的连续时间模型设计连续控制器,再将所设计的控制器离散化.这种设计方法为使离散化的控制器与原连续控制器的性能差异非

常小,往往要选取尽可能小的采样周期. 2) 设计采样控制器的方法是先得到被控对象的近似离散化模型,再基于该模型设计离散控制器^[36].这种设计方法的优势在于可以增大闭环系统的吸引域.

下面简要介绍几种可有效用于非线性时变系统的控制方法.

3.4.1 Backstepping 自适应学习控制

非线性系统的 Backstepping 自适应学习控制是一种构造性方法^[37],它利用系统的结构特性将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统;然后为每个子系统构造稳定化函数或部分 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,并一直“后退”到整个系统,完成整个控制律的设计.其基本设计方法是从高阶系统的内核开始(通常是系统输出所满足的动态方程),设计虚拟控制律以保证内核系统的某种性能(如稳定性等);然后对得到的虚拟控制律逐步修正,进而设计出真正的镇定控制器,以实现系统的全局跟踪或调节,使系统达到期望的性能指标^[38].

Yeh 和 Kokotovic^[39-40]采用系统化 Backstepping 方法分别对参数化输出反馈和严格反馈的离散非线性系统设计自适应控制器,从而避免使用 Lyapunov 函数,绕过了在离散时间系统中难以构造 Lyapunov 函数的障碍.与连续时间情形相比,该方案只能在严格的线性增长条件下保证全局稳定性,而且没有考虑时变参数、未建模动态和外部干扰等对系统的影响,这在实际中是难以避免的.因此, Zhang 等人^[41]在其基础上提出了鲁棒自适应设计方案,对包含外部干扰或未建模动态的不确定离散非线性系统结合 Backstepping 方法和参数投影估计器,设计鲁棒自适应控制器.文献[41]采用自适应界化的方法给出了参数的范围和外部干扰上界的相关假定,从而证明该系统的所有信号有界,并可保证跟踪误差有界.该方案是一种直接自适应 Backstepping 方法,每一步都采用一种自适应律,导致了过参数化问题的产生.为解决此类问题, Zhang 等人^[42-45]将自适应 Backstepping 方法推广到时变参数系统,并提出避免过参数化的方法,在其构造中利用每一步实际状态和虚拟控制变量之间的误差信息,得到自适应系统较小的跟踪误差.

3.4.2 迭代学习控制

迭代学习控制的基本思想最初由 Uchiyama^[46]提出,并随着 Arimoto^[47]提出新的迭代学习控制算法而引起控制界的关注,为具有非线性、建模复杂、时变特性的对象提供了很好的控制方法.它利用先前控制过程中的信息来提高当前控制过程的执行效果,经过若干次迭代,以期在给定的时间区间上,使被控对象

以尽可能高的精度跟踪给定的期望轨迹. 它是通过记忆学习实现的^[48].

许建新等人^[49]分析并总结了包括迭代学习在内的学习控制方法的发展历程以及研究现状. 王晔等人^[50]提出了一种在不同次迭代运行过程中期望轨迹可变的迭代学习控制算法. 为避免期望轨迹变化带来的系统状态变化, 采取从系统逆获得最优控制输入的思想, 首先求动态系统的逆系统, 通过小波网络逼近逆系统的未知参数, 当小波网络的逼近值接近理想值时, 得到的控制输入越来越理想, 从而解决了常规迭代学习控制对期望轨迹的严格要求, 新的迭代算法很好地实现了对任意变轨迹的跟踪. 朱胜等人^[51]给出一类严格反馈非线性系统的迭代学习控制算法, 对时变参数进行 Taylor 展开, 回避了 Backstepping 方法无法在学习控制中应用的难点, 在控制器的设计中充分考虑了余项对系统性能的影响. 为了防止系统发散, 引入了级数收敛序列, 从而实现在给定时间区间上的完全跟踪.

3.4.3 全系数自适应控制

全系数自适应控制方法是在实际工程应用中总结提出的. 自1981年首次提出至今, 经多年的研究和应用, 以及逐步完善和提高, 形成了一套完整的实用性很强的自适应控制方法. 该方法具有估计参数少、鲁棒性强以及简单易实现等特点, 目前已在众多控制系统中得到了成功应用.

解永春等人^[52]研究了全系数自适应控制方法对未建模动态、参数慢时变、非线性和有界干扰的鲁棒稳定性, 证明了在有未建模动态及扰动情况下, 自适应控制器仍能通过梯度算法估计标称对象使系统稳定; 同时对两种慢时变对象分别给出了系统鲁棒稳定的充分条件. 齐春子等人^[53]从线性时变离散系统的 Lyapunov 稳定性分析方法入手, 分析了多变量全系数黄金分割反馈控制系统的稳定性问题, 给出了系统渐近稳定情况下对各回路时变参数变化速度的约束条件, 以及对耦合状态变量的约束条件. 张国琪等人^[54]给出了一类非线性时变系统的离散化建模方法, 推导给出了离散化模型参数的表达式, 并在此基础上给出了一种由带参数投影的投影算法与特征多项式配置控制算法组成的全系数自适应控制算法, 在一定假设下证明了闭环系统的有界稳定性. 该方法可以不依赖于被控对象的精确模型结构, 因此可以更符合工程应用的特点. 另外, 该方法属于输入输出型的方法, 因此也适用于实际状态不可测或很难得到的情形.

总之, 对一类参数未知的对象而言, 全系数自适应控制方法可以保证闭环控制时系统的稳定性, 特别是无需人们到现场试凑调试便可保证在控制启动阶

段具有良好的稳定性和过渡过程品质. 这些优点是目前其他自适应控制方法难以做到的^[55].

4 研究展望

由于时变系统本身的复杂性, 以及时变特性的多元性和叠加性, 致使这一研究领域中仍有大量的空白和难题没有涉及和解决. 结合目前该领域的研究现状, 理论方法需要进一步完善的有:

1) “快”时变问题. 针对更为一般的快时变系统(如高阶线性快时变系统、非线性快时变系统等), 如何放宽现有方法对时变时间的要求, 应用这些控制策略及算法进行实时的系统辨识与控制, 或在此基础上作进一步的改进与更新等, 尚有待更全面深入的研究.

2) 系统的条件稳定问题. 一般情况下, 控制算法对于某一类时变系统而言都需要附加或多或少的稳定性条件或假设. 针对此类问题, 如何能够使这些为了保证系统稳定而提出的条件或假设不影响系统性能、产生尽可能少的限制, 是将控制算法应用到实际控制过程的关键, 因而具有非常重要的研究意义.

3) 实时建模问题. 建模的精确性与快速性通常对控制系统的性能具有直接影响, 同时也关系到控制方法的可操作性. 因此, 若能够在时变系统的实时建模问题上进行深入研究, 必将有利于时变系统控制方法的进一步应用与发展.

4) 非线性问题. 在非线性的情况下, 时变系统的微分方程的解析解往往不存在, 甚至时变模型也不可求. 如何利用现有的线性模型与时变系统控制方法, 将其进一步推广至非线性系统, 或者如何将非线性时变系统分段线性化, 找出可与某些线性特性相替换的非线性特性, 值得进行更加深入的讨论.

另一方面, 从实际应用的角度, 有以下几个问题需作进一步的探讨:

1) 数据处理问题. 对于实际过程中的动态数据需要进行适当的信号处理与分析, 突出数据中的系统性信息, 降低不相关的干扰噪声, 在能够表征实际系统时变特性的基础上尽量降低系统复杂性.

2) 适用条件问题. 在将理论方案付诸实践时, 需要事先对实际的时变对象作出准确判断, 根据具体情况选择适用的解决方案, 必要时还要对理论方法作些灵活的调整甚至改进.

3) 时变因素的不确定问题. 由于实际系统往往复杂多变, 存在大量的不确定因素, 为节省研究成本并提高工作效率, 可以采取仿真实验与实际相结合的方法. 必要时甚至需要设定多种控制方案, 同时对实际系统的时变环境也要有足够的了解, 在仿真实验时需对控制方法进行尽可能全面的可行性讨论, 在实际应

用时再进行准确快速的调整。

5 结 论

时变系统的研究经过了几十年的发展和完善, 相关理论方法不断涌现、成熟和普及, 已经成为一个独具特色的研究课题, 具有非常广阔的发展及应用前景. 针对时变过程的不同性能特点, 进一步丰富基于自适应、鲁棒控制、迭代学习等理论的时变控制方法, 逐步完善稳定性条件, 建立切实可行的实施方案, 将会极大地保证时变系统的控制效率, 提升其稳定性, 具有重要的理论研究意义与实际应用价值. 因此, 有理由相信在今后相当长的一段时期内, 针对该领域的深入探讨仍将是广大研究者关注的重点, 并将会迈向一个新的台阶.

参考文献(References)

- [1] Shi Z Y, Law S S. Identification of linear time-varying dynamical systems using hilbert transform and empirical mode decomposition method[J]. *J of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*, 2007, 74(2): 223-230.
- [2] 舒怀林. 基于PID神经网络的非线性时变系统辨识[J]. *自动化学报*, 2002, 28(3): 474-476.
(Shu H L. Identification of nonlinear systems based on PID neural networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3): 474-476.)
- [3] 邹高峰, 王正欧. 基于回归神经网络的非线性时变系统辨识[J]. *控制与决策*, 2002, 17(5): 517-521.
(Zou G F, Wang Z O. Identification of nonlinear time varying systems based on recurrent neural networks[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(5): 517-521.)
- [4] Pillonetto G. Identification of time-varying systems in reproducing kernel hilbert spaces[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2202-2209.
- [5] Bermudez J C M, Bershah N J. Transient and tracking performance analysis of the quantized lms algorithm for time-varying system identification[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1996, 44(8): 1990-1997.
- [6] Hsiao T. Identification of time-varying autoregressive systems using maximum a posteriori estimation[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3497-3509.
- [7] 董亚丽, 程代展, 秦化淑. 非线性时变系统的稳定性[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 453-459.
(Dong Y L, Cheng D Z, Qin H S. Stability of nonlinear time-varying systems[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 453-459.)
- [8] Xiao D M, Deng Z Q. Absolute stability of time-varying nonlinear control system[J]. *Acta Mathematica Scientia*, 1999, 19(4): 442-448.
- [9] Amato F, Ariola M, Cosentino C. Finite-time stability of linear time-varying systems: Analysis and controller design[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2010, 55(4): 1003-1008.
- [10] Oliveira R C L F, Peres P L D. Time-varying discrete-time linear systems with bounded rates of variation: Stability analysis and control design[J]. *Automatica*, 2009, 45(11): 2620-2626.
- [11] Aguilar J L M, Garcia R A. Stability analysis of a certain class of time-varying hybrid dynamical systems[J]. *Latin American Applied Research*, 2003, 33(4): 463-468.
- [12] Pun D, Lau S L, Cao D Q. Stability analysis for linear time-varying systems with uncertain parameters: Application to steady-state solutions of nonlinear systems[J]. *J of Vibration and Control*, 1999, 5(6): 925-939.
- [13] Simon C, Haykin S. *Adaptive filter theory*[M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2004.
- [14] Tsakalis K S, Ioannou P A. Adaptive control of linear time-varying plants[J]. *Automatica*, 1987, 23(4): 459-468.
- [15] Tsakalis K S, Ioannou P A. A new indirect adaptive control scheme for time-varying plants[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(6): 697-705.
- [16] Middleton R H, Goodwin G C. Adaptive control of time-varying linear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(2): 150-155.
- [17] Estrada J L, Duarte-Mermoud M A, Travieso-Torres J C, et al. Simplified robust adaptive control of a class of time-varying chaotic systems[J]. *Int J for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2008, 27(2): 511-519.
- [18] Marino R, Tomei P. Adaptive control of linear time-varying systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 651-659.
- [19] Marino R, Tomei P. Robust adaptive regulation of linear time-varying systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(7): 1301-1311.
- [20] Qu Z, Dorsey J F, Dawson D M. Model reference robust control of a class of siso systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(11): 2219-2234.
- [21] 武玉强, 顾建忠, 冯纯伯. 带有干扰的线性时变系统的非线性鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(1): 103-107.
(Wu Y Q, Gu J Z, Feng C B. Nonlinear robust control for linear time-varying systems with disturbances[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 103-107.)
- [22] Wang J, Qu Z. Robust adaptive control of a class of nonlinearly parameterised time-varying uncertain systems[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2009, 3(6): 617-630.

- [23] Inoue T, Iwai S, Nakano M. High accuracy control of a proton synchrotron magnet power supply[C]. Proc of the 8th IFAC World Congress. Kyoto: Pergamon Press, 1981: 3137-3142.
- [24] Lee S J, Tsao T C. Repetitive learning of backstepping controlled nonlinear electro-hydraulic material testing systems[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(7): 1393-1048.
- [25] Xu J X. A new periodic adaptive control approach for time-varying parameters with known periodicity[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(4): 579-583.
- [26] Abidi K, Jian-Xin X. A discrete-time periodic adaptive control approach for time-varying parameters with known periodicity[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(2): 575-581.
- [27] Xu J X, Huang D Q. Spatial periodic adaptive control for rotary machine systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(10): 2402-2408.
- [28] Bayard D S. Stable direct adaptive periodic control using only plant order knowledge[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 1996, 10(6): 551-570.
- [29] Dimogianopoulos D, Lozano R, Ailon A. Indirect adaptive periodic control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(12): 2308-2312.
- [30] Chi R T, Hou Z S. A model-free periodic adaptive control for freeway traffic density via ramp metering[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(7): 1029-1032.
- [31] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(2): 413-428.
- [32] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part I: The basic algorithm[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-148.
- [33] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part II: Extensions and interpretations[J]. Automatica, 1987, 23(2): 149-160.
- [34] Mayne D Q, Rakovic S V, Findeisen R, et al. Robust output feedback model predictive control of constrained linear systems: Time varying case[J]. Automatica, 2009, 45(9): 2082-2087.
- [35] Zheng A. Stability of model predictive control with time-varying weights[J]. Computers & Chemical Engineering, 1997, 21(12): 1389-1393.
- [36] Nesic D, Teel A R. A framework for stabilization of nonlinear sampled-data systems based on their approximate discrete-time models[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(7): 1103-1122.
- [37] Sanner R M, Slotine J J E. Gaussian networks for direct adaptive control[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(6): 837-863.
- [38] 李靖. 离散非线性系统的自适应Backstepping控制[D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2004. (Li J. Adaptive control of discrete-time nonlinear systems via backstepping[D]. Xian: School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, 2004.)
- [39] Yeh P C, Kokotovic P V. Adaptive output-feedback design for a class of nonlinear discrete-time-systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(9): 1663-1668.
- [40] Yeh P C, Kokotovic P V. Adaptive control of a class of nonlinear discrete time systems[J]. Int J of Control, 1995, 62(2): 303-324.
- [41] Zhang Y, Wen C Y, Soh Y C. Robust adaptive control of uncertain discrete-time systems[J]. Automatica, 1999, 35(2): 321-329.
- [42] Zhang Y, Wen C Y, Soh Y C. Discrete-time robust backstepping adaptive control for nonlinear time-varying systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(9): 1749-1755.
- [43] Zhang Y, Fidan B, Ioannou P A. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(11): 1908-1925.
- [44] Zhang Y, Wen C Y, Soh Y C. Robust adaptive control of nonlinear discrete-time systems by backstepping without overparameterization[J]. Automatica, 2001, 37(4): 551-558.
- [45] Zhang Y, Chen W H, Soh Y C. Improved robust backstepping adaptive control for nonlinear discrete-time systems without overparameterization[J]. Automatica, 2008, 44(3): 864-867.
- [46] Uchiyama M. Formulation of high-speed motion pattern of a mechanical arm by trial[J]. Trans on the Society for Instrumentation and Control Engineering, 1978, 14(6): 706-712.
- [47] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Better operation of robots by learning[J]. J of Robotic Systems, 1984, 1(2): 123-140.
- [48] 郭毓. 一类时变系统的自适应迭代学习辨识与控制[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2007. (Guo Y. Adaptive iterative learning identification and control for a class of time-varying systems[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 2007.)
- [49] 许建新, 侯忠生. 学习控制的现状与展望[J]. 自动化学报, 2005, 31(6): 943-955. (Xu J X, Hou Z S. On learning control: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6): 943-955.)