

## 内模控制研究的新发展

周 涌, 陈庆伟, 胡维礼

(南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 概述了内模控制(IMC)的研究现状和新发展,详细论述了内模控制特别是非线性系统内模控制研究中的主要方面及其研究成果.首先介绍了内模控制中的各种建模方法,指出它们各自的优缺点,并根据内模控制的发展趋势着重分析了内模控制器的设计及其改进结构,内模控制与其他控制方法的结合方式等几个关键性问题.最后指出了内模控制研究中存在的一些混淆,并探讨了这一研究领域的发展方向.

**关键词:** 内模控制; 非线性系统; 线性化; 抗饱和; 稳定性; 鲁棒性

**中图分类号:** TP13      **文献标识码:** A

## New developments of research on internal model control

ZHOU Yong, CHEN Qing-wei, HU Wei-li

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** New developments of research on internal model control (IMC) are mainly described. The research methods and results of IMC, especially in nonlinear internal model control, are summarized and analyzed. The modeling methods in IMC were introduced in detail at first, and the advantages and disadvantages of those methods were pointed out. According to the trends of internal model control development, several key problems such as design of IMC controller, modification of IMC configuration, combination of IMC and other control methods were particularly analyzed. Finally, some misunderstanding in IMC research was pointed out and future research directions related to IMC were discussed.

**Key words:** internal model control(IMC); nonlinear system; linearization; anti-windup; stability; robustness

### 1 引言(Introduction)

内模控制(internal model control,简称IMC)作为一种独特的控制系统结构,最早产生于过程控制并得到了成功应用.其设计思路是将对象模型与实际对象相并联,控制器逼近模型的动态逆,对单变量系统而言内模控制器取为模型最小相位部分的逆,并通过附加低通滤波器以增强系统的鲁棒性.与传统的反馈控制相比,它能够清楚地表明调节参数和闭环响应及鲁棒性的关系,从而兼顾性能和鲁棒性.内模控制的思想可追溯到1957年Smith提出的时滞补偿器,但作为控制系统设计综合的一般概念是由Garcia等建立的<sup>[1]</sup>,在单变量和多变量线性连续系统中得到了研究应用<sup>[2]</sup>,并推广到离散系统<sup>[3]</sup>.Morari等<sup>[4]</sup>给出了线性IMC设计的完整过程,并从理论上分析了线性内模控制的稳定性和鲁棒性.内模控制的思想也推广到非线性系统<sup>[5-7]</sup>,并保留了线性IMC的诸多优点.

内模控制结构如图1所示,其中 $P$ 为控制对象, $M$ 为模型, $C$ 为内模控制器, $F$ 为滤波器, $r, u, y, \hat{y}$ 分别为给定输入、控制量、对象输出和模型输出, $d$ 为外界干扰.内模控制系统具有下述3个基本性质:1)当模型精确时,对象和控制

器同时稳定就意味着闭环系统稳定.2)当闭环系统稳定时,若控制器取为模型逆,则不论有无外界干扰 $d$ ,均可实现理想控制 $y = r$ .3)当闭环系统稳定时,只要控制器和模型的稳态增益乘积为1,则系统对于阶跃输入及阶跃干扰均不存在输出静差.这3条性质不仅适用于线性内模控制,也能够推广到非线性内模控制.

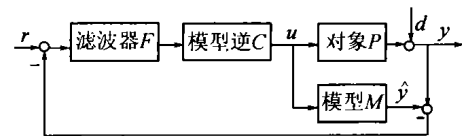


图1 内模控制的一般结构  
Fig. 1 General structure of IMC

为了更好地推动内模控制的发展,下面对内模控制研究的新进展,特别是在非线性系统领域取得的研究成果进行评述.

### 2 内模控制的研究状况(Status of research on IMC)

#### 2.1 内模控制中的建模方法(Modeling methods in IMC)

由于内模控制是一种基于模型逆的控制方法,因此模型的建立是内模控制设计的前提,非线性内模控制中几种常见

的模型如下:

### 2.1.1 传统数学模型(Traditional mathematics model)

传统数学模型在内模控制中应用相当广泛,特别是以传递函数表示的输入输出模型几乎统治了线性内模控制的研究<sup>[1-4]</sup>.在非线性的内模控制中,Henson等研究了微分方程描述的仿射非线性对象和模型<sup>[8-13]</sup>,Kendi等采用可因式分解的非线性算子研究存在可测干扰和输入饱和的仿射非线性系统<sup>[14]</sup>,Patwardhan等采用二次预测模型研究具有奇异点的非线性系统<sup>[15]</sup>.传统数学模型可逆性容易判断,模型可逆时能解析获得模型的逆,能够深入分析闭环系统的稳定性和鲁棒性,但是很多复杂非线性对象是难以用数学模型表示的.

### 2.1.2 神经网络模型(Neural networks model)

神经网络内模控制方法充分利用了神经网络强大的函数逼近能力,在一定程度上克服了非线性系统难以建模的困难,受到人们的青睐.Bhat等<sup>[16]</sup>首先将神经网络用于非线性内模控制,并采用牛顿迭代法求解控制量;Hunt等<sup>[6]</sup>利用高斯基函数网络,Nahas<sup>[7]</sup>利用BP网络进行模型及其模型逆的辨识,研究了非线性系统可逆性条件,真正开创了神经网络内模控制的研究;Hunt等<sup>[17]</sup>还指出基于神经网络的内模控制可看作是一种非线性自适应逆控制;Yildirim等利用回归混合神经网络模型,进行了机器人内模控制的研究<sup>[18]</sup>;刘小河针对由线性动态系统和非线性静态系统串联组合的特殊非线性系统,讨论了存在神经网络逼近误差情况下模型逆的结构和稳定性,得到系统稳态输出的上界<sup>[19]</sup>;Aoyama等提出基于模糊神经网络的非线性内模控制,发挥神经网络和模糊逻辑二者的优点,是解决非线性内模控制中建模问题的一条新途径,现在需要解决的问题是如何优化网络的结构和改进学习算法以利于在线控制,并保证闭环系统的稳定<sup>[20]</sup>;小波网络是集小波分析和神经网络二者优势的一种前馈网络,具有网络参数物理意义明确、学习算法简单、收敛快、无局部极小点等优点,经过吕朝霞等<sup>[21]</sup>的研究表明基于小波网络的非线性内模控制效果明显优于基于前馈网络的方法;Pottmann等还针对离散系统研究了基于RBF网络的内模控制方法<sup>[22]</sup>.

神经网络内模控制一般采用以下两种方法:1)两个神经网络分别逼近模型和模型的逆;2)采用神经网络逼近模型,然后用非线性优化方法数值求取控制量.这两种方法固然可以获得较高精度的模型,但是模型逆的精度却往往得不到保证,这是因为获得的神经网络模型可能是不可逆的.根据内模控制的性质可知,当控制器偏离模型的逆使得控制器和模型的稳态增益乘积不等于1时,会导致控制系统跟踪阶跃输入出现静差,因此基于神经网络的内模控制需要解决以下理论问题:1)以网络拓扑结构表示的神经网络模型如何判断其可逆性;2)如果可逆,求逆的过程能否保证收敛;3)能否求出一个高精度的模型逆?由此可见非线性内模控制中模型可逆性的问题远比线性内模控制中的复杂.神经网络模型求逆的问题已经有一些数值算法,但是目前还缺乏严格的理

论依据,因而在一定程度上限制了神经网络内模控制的应用.

由于模型逆的精度对内模控制效果的影响远大于模型精度所产生的影响,因此通过适当牺牲模型精度以确保模型可逆,并求得高精度的模型逆就成为解决非线性内模控制的一条可行之路.仿射模型的优点是模型逆可以解析获得,从而逐渐吸引了研究者的注意.文献[23]采用仿射形式的Hopfield网络来逼近对象,并利用该网络的稳定性定理判断模型和模型逆的稳定性;Rivals等<sup>[24]</sup>基于双BP网络组成的仿射模型,提出针对非线性离散时滞系统的神经网络内模控制设计方案.这类方法的缺点是对一般非线性系统的建模精度不高,比较适用于仿射非线性对象.某些特殊的网络也可以解析获得模型逆,文献[25]指出在某些限定条件下,B样条网络模型可以解析获得模型的逆.Fache等<sup>[26]</sup>研究了RBF网络模型的可逆性问题,设计出一种能保证可逆性的改进RBF网络模型.

### 2.1.3 模糊系统模型(Fuzzy systems model)

与神经网络相比,模糊系统的非线性函数逼近能力较晚为人们所认识,模糊模型最初应用于内模控制中所起的作用类似于神经网络输入输出模型,因而也无法避免模型求逆的困难<sup>[27,28]</sup>.但在Babuška等<sup>[29,30]</sup>、Edgar等<sup>[31]</sup>、Xie等<sup>[32]</sup>的努力下,模糊模型求逆获得了较好的结果.Babuška针对一类特殊的两输入一输出模糊系统提出了一种解析求逆的方法,并将结论推广到MISO模型.Edgar提出一种特殊的模糊模型,其建模过程可以保证模型总是可逆的,并能够在每个采样时间内获得精确的模型逆.Xie也获得类似结果.

由于B样条网络、模糊系统、RBF网络等模型本质上都属于局部模型,Brown等<sup>[33]</sup>、Fink等<sup>[34]</sup>提出基于局部模型的IMC.Fink指出由于模糊系统建模过程是采用一系列线性模型加权平均来逼近非线性对象,因而模型求逆可以用局部线性模型求逆的加权平均来解析获得,使得求逆过程的计算量大大减少,Brown还分析了存在稳定逆的条件.可以预见,由于模糊神经网络结合了神经网络和模糊逻辑二者的优点,具有自学习和利用知识的能力,在一定情况下还可以解析获得模型逆,因此作为内模控制建模工具的研究潜力很大.

### 2.1.4 Volterra级数模型(Volterra series models)

Volterra级数模型是一种重要的非线性系统模型,可以描述一大类工业对象.作为一种非参数模型,该模型的优点是可以通过系统输入输出数据直接辨识得到,而不需要复杂的结构辨识过程.文献[35~37]提出基于Volterra级数模型的内模控制方案,主要成果是给出了级数模型求逆的理论保证.不过从模型辨识的角度看,Volterra级数需要相当多的被估计参数才能取得满意的精度,这在很大程度上限制了这种方法的应用.

## 2.2 内模控制器的设计(Design of IMC controller)

### 2.2.1 IMC的综合控制结构(Combination of IMC and other control methods)

当前内模控制的发展方向是与各种控制方法互相渗透、

取长补短,组合成综合控制策略,以期更好的发挥内模控制的优势。

#### 1) 内模控制与预测控制的结合。

内模控制与预测控制有着天然的联系,实际应用的各类预测控制算法本质上都属于 IMC 类。文献[38]基于对象脉冲响应序列,提出利用矩阵 QR 分解设计 FIR 型内模逆动态控制器的新方法,引入对预估控制量的二次约束,同时对控制器静态增益约束以保证闭环系统对阶跃输入的无静差特性。这类方法主要是利用模型对输出进行预测,通过优化包含输出预测误差和控制量的二次型加权指标来求取控制器,这样设计的控制器具有预测控制的大部分特点,参数调节也基本相同,并能很好的控制非最小相位系统,缺点是计算比较复杂,尤其是当预测时域较大时。此外席裕庚等通过将预测控制变换到内模控制结构框架下分析闭环系统的稳定性和鲁棒性<sup>[39,40]</sup>,从方法上指导了控制器的参数选择。尽管 IMC 与预测控制存在较密切的联系,但是采用预测控制来实现内模控制并不方便。

#### 2) 基于线性化方法的非线性 IMC。

由于线性 IMC 有着系统的设计方法,因而如果能够将非线性系统线性化,非线性 IMC 就将得到极大简化。Calvet 等<sup>[41]</sup>最早提出基于状态反馈线性化的 IMC,当状态不完全可测时,设计非线性状态观测器的困难限制了该方法的应用。Henson 等<sup>[8]</sup>针对仿射非线性系统,采用输入输出线性化方法设计 IMC,将模型作为开环观测器,去除了以往方案中要求有完全状态反馈的限制。Hu 等<sup>[10,42]</sup>在 Henson 的基础上提出了自适应控制和 anti-windup 方案,文献[13]推广到多变量系统,文献[43]推广到非最小相位系统。

反馈线性化方法和传统逆系统方法的共同缺点是要精确已知对象模型,这是这类方法实际应用中的瓶颈之一。Dai 等<sup>[44]</sup>提出的基于神经网络的逆系统方法突破了传统求逆方法的瓶颈,采用该思路提出的基于小波网络逆方法的内模控制在相当程度上解决了普通非线性 IMC 存在的不足<sup>[45]</sup>,这种方法首先求得对象的小波网络逆模型,然后将其与原系统复合成伪线性系统,再对伪线性对象引入内模控制,这样就把非线性 IMC 基本上转化成线性 IMC(要考虑线性化过程中的建模误差)。这类方法在多变量机械手的控制中得到应用<sup>[46]</sup>。基于逆系统方法的内模控制结构清晰,算法简单,但是实际应用时为获得输入输出的各阶导数而采用的高阶微分会放大高频噪声,尽管可以用滤波的办法近似解决这个问题,但这仍成为逆系统方法真正实用化的一个障碍。

#### 3) 自适应内模控制方法。

在内模控制中,如何保证模型失配始终在容许的范围内是困扰内模控制的一个难题,尤其是在对象逐渐发生变化时,这个问题就显得更加突出了。为了解决这个问题,一个可行的方法就是在线辨识对象模型和调节控制器。Datta 等提出的一整套自适应内模控制方案是目前线性自适应内模控制所取得的最重要成果,最初的工作仅限于在线修正线性模

型参数<sup>[47]</sup>,后又根据跟踪误差的  $H_2$  或  $H_\infty$  范数最小在线调节内模控制器的参数<sup>[48,49]</sup>,并推广到多变量系统和离散系统<sup>[50,51]</sup>。

在非线性自适应 IMC 研究领域,主要的思路是在线性化基础上设计自适应律。Li 等<sup>[46]</sup>将多变量机械手稳定线性化后,设计出一种解耦的自适应神经网络 IMC 方法;Hu 等<sup>[10]</sup>针对多变量仿射非线性系统,在输入输出线性化基础上设计出自适应控制律,所需要解决的问题是如何获得高精度的模型;Xie 等<sup>[32]</sup>采用模糊模型在线辨识非线性对象,由于这种局部模型可以解析获得模型的逆,因而能够保证控制器的精度。

#### 4) 内模控制与其他控制方式的组合。

由于内模控制与 PID 控制存在一定对应关系,因此将 PID 控制器设计转化到内模控制框架下进行,可以得到明确的解析结果,从而降低参数设计的复杂性和随机性。文献[52]将内模控制原理和极大极小优化原则结合起来设计鲁棒 PID 控制器。内模控制与最优控制的结合,通常是在某种最优优化性能指标下设计内模控制器,以实现优化控制的目标。文献[53]针对炼油厂管道汽油自动调合系统建立神经网络模型,并根据优化性能指标采用非线性规划算法求取神经网络的最优逆解,保证对工业过程对象的在线闭环实时控制的稳态最优;文献[48,49]实现了跟踪误差的  $H_2$  和  $H_\infty$  范数最优;文献[54]针对线性定常系统将 IMC 与  $H_\infty$  控制相结合,其控制结构由 IMC 的内环和普通负反馈( $H_\infty$  控制器)的外环组成,能够兼顾性能与鲁棒性;Tayebi 等<sup>[55]</sup>针对线性定常系统,将内模控制与学习控制相结合,IMC 部分保证系统的鲁棒性能,而学习控制部分改善系统的暂态性能和抵制有规律的外界干扰。

### 2.2.2 滤波器的改进(Improvement of filter)

实际应用中如果内模控制器仅取为模型的逆或模型可逆部分的逆,那么一定的模型误差容易使系统失稳。为了提高内模控制系统的鲁棒稳定性,可将原控制器与一个低通滤波器串联得到扩展的内模控制器。文献[56]通过在滤波器中增加一个新的调节参数来增强抑制输入干扰的能力。文献[57]对不稳定线性对象设计了新的滤波器,能够使系统具有更平稳的频率响应和更小的阶跃超调。文献[58]提出滤波器参数在线整定的方法,通过一定的性能指标调节滤波器参数以保证系统性能良好。

当前非线性系统中滤波器的设计主要是沿用线性滤波器的设计方法,经过实践证明对于某些非线性系统这是适用的。文献[8]针对仿射非线性系统提出一类非线性滤波器,理论上已证明它拥有类似于线性滤波器的作用;文献[24]针对离散非线性系统提出一种 RM(rallying model)滤波器的设计,对模型失配的鲁棒性强于普通的线性滤波器。由于非线性系统与线性系统存在较大的差别,完全照搬线性滤波器的设计方法显然不是最优的,如何设计出适合非线性内模控制的滤波器,这方面的工作还有待进一步深入研究。

### 2.3 内模控制结构的改进(Modification of IMC configuration)

#### 2.3.1 Anti-windup 设计(Design for Anti-windup)

实际应用中内模控制的主要困难是对控制量饱和的敏感性<sup>[42]</sup>,会导致 windup 现象的出现.饱和和非线性虽然不会改变 IMC 系统的稳定性,但会使 IMC 系统丧失鲁棒伺服性能,即跟踪出现静差.最早由 Zheng 等<sup>[59]</sup>在传统内模控制基础上,通过将内模控制器分解进行 anti-windup 设计;Sairam 等<sup>[60]</sup>将该方法与微分几何控制方法结合推广到非线性系统,但是文献[61]指出其主要缺点是牺牲了系统的稳定性,而且设计也较为复杂;Yamada 等<sup>[62]</sup>分析了控制量饱和时导致 IMC 产生静差的原因;Eric 等<sup>[63]</sup>提出采用模型状态反馈预测算法的内模控制方案,避免了一般 anti-windup 算法的“短视”现象.在逐步深入的研究过程中,人们发现只有通过改造 IMC 的结构才能从根本上解决 windup 问题.下面介绍3种已成功应用的改进内模控制结构,它们最初并不是针对 windup 问题提出的,但经过实践检验,能很好的解决 windup 问题.

##### 1) 双口控制(Two port control).

文献[64]提出如图2所示的双口控制结构.通过增加跟踪误差反馈回路来获得跟踪误差、外界扰动和控制量输出饱和的信息.由于控制量设计自由度增加为二维,通过对第二个控制器  $C_2$  的适当设计有助于获得更高的伺服跟踪、扰动抑制性能和 anti-windup 的能力.双口控制除了能有效克服控制量饱和影响,并能较容易实现高阶无静差系统,是一种很有实际应用价值的工程控制方法.

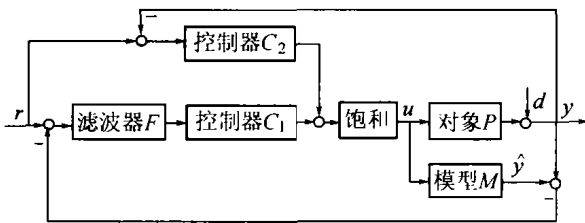


图2 双口控制的结构  
Fig. 2 Structure of two port control

##### 2) MIMC (Modified IMC).

Matausek<sup>[65]</sup>认为在 IMC 中如果能取消模型,将原来的控制器-模型回路直接连通,并用对象逆代替模型逆,就能够简化内模控制的设计和改善性能,所提出的控制结构如图3所示.文献[66]分析指出由于将控制量饱和和特征信息归入实际被控对象中,在反馈回路中包含了控制量输出饱和和非线性的信息,因而 MIMC 能够提高系统的 anti-windup 能力,实验结果验证了以上结论.

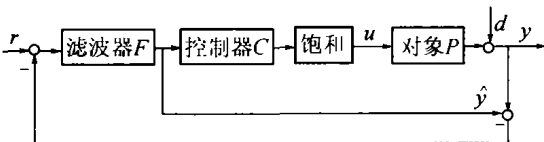


图3 MIMC 的结构  
Fig. 3 Structure of MIMC

##### 3) AIMC (Anti-windup IMC).

Yamada 的一系列文章分析了饱和对 IMC 的影响<sup>[62,67]</sup>,并充分考虑了干扰的影响,这是以往文献所缺乏的. Yamada 指出传统 IMC 中抵消干扰和 anti-windup 补偿是相互冲突的,为此设计了一种两自由度的新型 IMC 结构使二者的设计解耦,如图4所示.

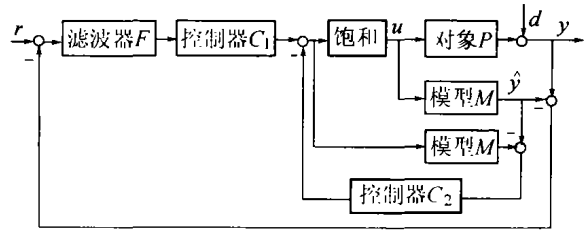


图4 AIMC 的结构  
Fig. 4 Structure of AIMC

#### 2.3.2 增强鲁棒性的改进(Improvement for enhancement of robustness)

文献[68]从线性系统,文献[12]从非线性系统分别提出如图5所示的内模控制结构(EIMC - Enhanced IMC).该结构通过在对象输入中加入对建模误差的反馈补偿,强迫对象的输出跟随模型的输出,这里对象和模型的控制输入是不同的.这种方法的着眼点在于增强内模控制对模型失配和外界干扰的鲁棒性,系统的跟踪性能没有提高.

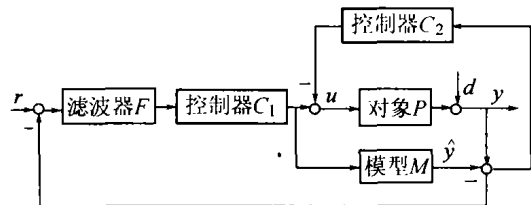


图5 EIMC 的结构  
Fig. 5 Structure of EIMC

#### 2.4 内模控制稳定性和鲁棒性的分析 (Analysis of stability and robustness of IMC)

Malan 等<sup>[69]</sup>采用  $H_\infty$  方法给出了线性内模控制鲁棒性的系统分析,考虑了输入输出数据测量的噪声;Datta 等<sup>[47-51]</sup>采用 Lyapunov 方法严格证明了自适应 IMC 的稳定性;针对时变时滞的线性离散系统,文献[70]应用 Jury 判据分析了闭环系统的稳定性.针对线性离散系统,文献[71]用圆盘定理分析了内模控制系统的鲁棒稳定性,并提出采用吸收原理设计控制器的思路;文献[72]给出了一阶纯滞后模型的不确定性界以及内模控制器的鲁棒性能分析和设计;文献[73]分析了内模控制中模型失配对系统稳定性和鲁棒性的影响.以上文献的不足是忽略了饱和对系统鲁棒性的影响.文献[74]分析了存在饱和和非线性及加性未建模动态情况下,线性内模控制  $L_2$  稳定的充要条件.

在非线形 IMC 领域,文献[75]采用  $H_\infty$  方法对多模型结构分析了存在时变和定常不确定的情况下 IMC 系统的鲁棒稳定性条件;文献[37]采用局部小增益定理,得到 Volterra 级数模型失配情况下闭环系统鲁棒稳定的充分条件;文献[9]

采用 Lyapunov 方法分析了仿射对象、模型失配容许的范围; Xie 等<sup>[32]</sup>提出的模糊自适应内模控制方案中所设计的模型参数自适应律确保了闭环系统 Lyapunov 意义下的稳定. 非线性内模控制领域迄今还没有较完整、系统的结果, 这主要是由于: 1) 缺乏统一的建模方法, 而对神经网络、模糊系统模型还没有系统的分析方法; 2) 状态空间描述有利于系统的稳定性分析, 但内模控制中多研究的是输入输出模型描述的对象; 3) 内模控制结构的特殊性也给分析稳定性和鲁棒性带来困难, 它的反馈信号已由普通负反馈中的输出全反馈变为模型失配和扰动估计量的反馈, 因而从普通负反馈结构中发展出的稳定分析方法不能直接应用于内模控制结构中. 总之, 由于缺乏系统、统一的框架, 非线性内模控制稳定性、鲁棒性的研究面临挑战.

### 2.5 内模控制的实际应用(Applications of IMC)

内模控制最早在化工领域得到成功应用, 后又推广到伺服系统的控制, 陈庆伟等<sup>[76]</sup>针对某伺服系统, 采用双口控制实现了高阶无静差伺服跟踪; 张井岗等<sup>[77]</sup>将 IMC 应用于快响应的电机控制; Harnefors 等<sup>[78]</sup>提出的交流电机电流内模控制方案能较好的处理控制量饱和问题; Xie 等<sup>[32]</sup>对过程控制实验单元采用自适应 IMC; Ge 等<sup>[79]</sup>对多变量的开关磁阻电机进行内模控制. Ho 等<sup>[80]</sup>提出的基于内模控制的 PID 控制器参数整定方法在联结槽的控制中取得成功, 并有商业化的软件产品. 总的说来, 非线性内模控制应用实例较少, 主要还停留在仿真研究阶段, 如果不能从理论上保证系统的稳定性和鲁棒性, 不能很好的解决诸如饱和、时滞、齿隙等典型非线性环节所带来的不利影响, 非线性内模控制方法难以得到广泛的应用.

### 3 存在的问题及研究展望(Some problems and directions of research)

本节将对非线性内模控制存在的几个问题进行讨论, 并指出与这些问题相关的研究方向.

1) 内模控制应用中存在一些混淆. 相当一部分文献将对象逆与模型逆混为一谈, 比如大多数非线性 IMC 文献给出的是对象的可逆性判别定理, 但是对象的可逆并不能保证模型的可逆, 而且内模控制实际上并不要求对象完全可逆, 只要求模型满足部分可逆即可. 实际设计中文献<sup>[18, 28]</sup>用对象的逆代替模型逆来设计控制器, 当模型精度很高时这种方法尚不存在严重问题, 但当有较大的建模误差时, 用这种理论设计出来的控制器不再享有内模控制的诸多优点. 此外文献<sup>[11, 23]</sup>在分析系统稳定性时, 将对象、模型、控制器三者稳定作为闭环系统稳定的充分条件, 忽视了必须满足模型精确的假设, 在存在建模误差的情况下, 仅有以上三者稳定并不能保证闭环系统的稳定性.

2) 模型的可逆性缺乏深入探讨, 尤其是针对神经网络、模糊系统模型. 令人欣慰的是不少研究者已经注意到这个问题, 提出许多可以求得高精度模型逆的方法.

3) 缺乏对建模算法收敛性, 闭环系统稳定性和鲁棒性的严格分析. 比如采用神经网络、模糊系统建模的方案, 一般

仅给出训练算法, 算法的收敛性和系统稳定性分析往往停留在定性分析上, 而且常局限于某一特定的非线性系统.

4) 多变量非线性系统的解耦问题. 对于多变量线性 IMC, Economou<sup>[5]</sup>提出的由 SISO 系统组成多环系统, 并把所有的耦合作用看成为干扰, 基本上解决了多变量线性 IMC 问题, 但文献<sup>[81]</sup>指出在非线性 IMC 中这套设计方法不再适用. 通过神经网络逆系统方法解耦将多变量 IMC 转化为单变量 IMC 可能是一条较好的解决途径.

5) 多数文献停留在仿真阶段, 众多的非线性内模控制方案很少应用于实际. 实际控制时多采用计算机控制, 需要将系统离散化, 而离散化会带来许多意想不到的问题, 比如离散化引起的误差若处理不当会对系统性能造成较大影响. 因此除了要加强稳定性、鲁棒性研究, 保持 IMC 结构简单、调节方便的特点, 更全面的考虑实际中的各种因素也是深化内模控制研究不可缺少的一个环节, 在这方面必须加强理论和实践的结合.

### 4 结论(Conclusions)

从线性系统的研究过渡到非线性系统的研究是科学发展的必然趋势, 作为一种得到广泛应用的控制方法, 尽管内模控制自其诞生开始就表现出强大的生命力和应用潜力, 但是当研究工作从线性系统深入到非线性系统后, 理论分析和实际应用中都遇到了一系列富有挑战性的课题, 要完善地解决这些问题, 真正将非线性内模控制应用于实际, 还要继续深入的展开研究.

### 参考文献(References):

- [1] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control-1: a unifying review and some new results [J]. *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2): 308 - 323.
- [2] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control-2: design procedure for multivariable systems [J]. *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1985, 24(3): 472 - 484.
- [3] ZAFIRIOU E, MORARI M. Internal model control: robust digital controller synthesis for multivariable open-loop stable or unstable processes [J]. *Int J Control*, 1991, 54(3): 665 - 704.
- [4] MORARI M, ZAFIRIOU E. *Robust Process Control* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
- [5] ECONOMOU C G. Internal model control-5: extension to nonlinear systems [J]. *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, 25(3): 403 - 411.
- [6] HUNT K J, SBURBURO D. Neural networks for nonlinear internal model control [J]. *IEE Proc-D*, 1991, 13(8): 431 - 438.
- [7] NAHAS E P. Nonlinear internal model control strategy for neural network models [J]. *Computers Chemical Engineering*, 1992, 16(12): 1039 - 1057.
- [8] HENSON M A, SEBORG D E. An internal model control strategy for nonlinear systems [J]. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 1991, 37(7): 1065 - 1081.
- [9] ALVAREZ J, ZAZUETA S. An internal-model controller for a class

- of single-input single-output nonlinear systems: stability and robustness [J]. *Dynamics and Control*, 1998, 8(2): 123 - 144.
- [10] HU Q, SAHA P, RANGAIAH G P. Adaptive internal model control of nonlinear processes [J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(9): 1205 - 1220.
- [11] HU Q, SAHA P, RANGAIAH G P. Experimental evaluation of an augmented IMC for nonlinear systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(10): 1167 - 1176.
- [12] HU Q, SAHA P, RANGAIAH G P. Internal model control with feedback compensation for uncertain non-linear systems [J]. *Int J Control*, 2001, 74(14): 1456 - 1466.
- [13] ROUX G, DAHOU B. Multivariable nonlinear internal model control applied to a bioreactor [C]// *Proc of the 14th IFAC World Congress*. Beijing: Elsevier Science Press, 1999, vol E: 195 - 200.
- [14] KENDI T A, DOYLE III F J. Nonlinear internal model control for systems with measured disturbances and input constraints [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(2): 489 - 505.
- [15] PATWARDHAN S C, MADHAVAN K P. Nonlinear internal model control using quadratic prediction models [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, 22(4/5): 587 - 601.
- [16] BHAT N, MCVOY T. Use of neural nets for dynamic modeling and control of chemical process systems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1990, 14(4/5): 573 - 583.
- [17] HUNT K J, SBARBARO D. Adaptive filtering and neural networks of realization of internal model control [J]. *Intelligent Systems Engineering*, 1993, 2(2): 67 - 76.
- [18] YILDIRIM S. Internal model control of a robot using new neural networks [C]// *Proc of 1996 IEEE Int Conf on System, Man, and Cybernetics*. Beijing: IEEE Press, 1996: 3095 - 3100.
- [19] 刘小河. 基于神经网络的非线性系统内模控制的渐近完全控制[J]. *纺织高校基础科学学报*, 1998, 11(1): 61 - 65.  
(LIU Xiaohu. The asymptotic full control to internal model control of nonlinear systems using neural networks [J]. *Basis Sciences J of Textile Universities*, 1998, 11(1): 61 - 65.)
- [20] AOYAMA A, DOYLE III F J. A fuzzy neural-network approach for nonlinear process control [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1995, 8(5): 483 - 498.
- [21] 吕朝霞, 吴晓蓓, 郭建, 等. 基于小波网络的非线性内模控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(1): 65 - 68.  
(LU Zhaoxia, WU Xiaobei, GUO Jian, et al. Nonlinear internal model control based on wavelet network [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1): 65 - 68.)
- [22] POTTSMANN M, JORGL H P. Radial basis function networks for internal model control [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 1995, 70(2/3): 283 - 298.
- [23] KAMBHAMPATI C, CRADDOCK R J, THAM M, et al. Inverse model control using recurrent networks [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2000, 51(3/4): 181 - 199.
- [24] RIVALS I, PERSONNAZ L. Nonlinear internal model control using neural networks: application to processes with delay and design issues [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2000, 11(1): 80 - 90.
- [25] MENKEN G J. Modularly structured B-spline networks for internal model control [C]// *Proc of American Control Conference*. Albuquerque: ACCC, 1997: 2001 - 2005.
- [26] FACHE A, DUBOIS O, BILLAT A. On the invertibility of the RBF model in a predictive control strategy [C]// *European Symposium on Artificial Neural Networks*. Bruges: IEEE Press, 1999: 381 - 386.
- [27] NEYER M D, GOREZ R. Fuzzy and quantitative model-based control systems for robotics manipulators [J]. *Int J of Systems Science*, 1993, 24(10): 1863 - 1883.
- [28] 金晓明, 荣冈, 王树青. 基于模糊模型的非线性内模控制策略研究[J]. *控制与决策*, 1997, 12(3): 228 - 232.  
(JIN Xiaoming, RONG Gang, WANG Shuqing. Nonlinear internal model control based on fuzzy model [J]. *Control and Decision*, 1997, 12(3): 228 - 232.)
- [29] BAVELAAR I M, BARANYI P, BABUŠKA R. A method to invert a linguistic fuzzy model [J]. *Int J of Systems Science*, 1998, 29(7): 829 - 839.
- [30] ABONYI J, BABUŠKA R, SZEIFERT F. Fuzzy modeling with multivariate membership functions: gray-box identification and control design [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2001, 31(5): 755 - 766.
- [31] EDGAR C R, POSTLETHWAITE B E. MIMO fuzzy internal model control [J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 867 - 877
- [32] XIE W F, RAD A B. Fuzzy adaptive internal model control [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2000, 47(1): 193 - 202.
- [33] BROWN M D, LIGHTBODY G, IRWIN G W. Nonlinear internal model control using local model networks [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 1997, 144(6): 505 - 514.
- [34] FINK A, NELLES O. Nonlinear internal model control based on local linear neural networks [C]// *Proc of IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conf*. Tucson: IEEE Press, 2001, 1: 117 - 122.
- [35] LING W M, RIVERA D E. Control relevant model reduction of Volterra series models [J]. *J of Process Control*, 1998, 8(2): 79 - 88.
- [36] ZHENG Q, ZAFIRIOU E. A local form of small gain theorem and analysis of feedback Volterra systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(3): 635 - 640.
- [37] 党映农, 韩崇昭. 基于 Volterra 级数模型的内模控制方法[J]. *西安: 西安交通大学学报*, 2001, 35(4): 385 - 389.  
(DANG Yingnong, HAN Chongzhao. Internal model control for uncertain Volterra series system [J]. Xi'an: *J of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35(4): 385 - 389.)
- [38] 华建兴, 席裕庚. 带预估控制量二次约束的无静差 FIR 型内模控制器[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(4): 492 - 495.  
(HUA Jianxing, XI Yugeng. Design of the zero-offset FIR internal model controller with quadratic constraint on the predictive estimation of the control action [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(4): 492 - 495.)
- [39] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.  
(XI Yugeng. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993.)
- [40] 陈悦, 安雯南, 高东杰. 内模统一预测控制的进一步分析[J]. *自动化学报*, 1999, 25(4): 441 - 448.

- (CHEN Yue, An Xienan, GAO Dongjie. Further research on unified predictive control using internal model structure [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(4): 441 – 448.)
- [41] CALVET J, ARKUN Y. Feedforward and feedback linearization of nonlinear systems and its implementation using internal model control (IMC) [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 1988, 27(10): 1822 – 1831.
- [42] HU Q, RANGAIAH G P. Anti-windup schemes for uncertain nonlinear systems [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 2000, 147(3): 321 – 329.
- [43] 袁德成, 韩阳, 王贵成, 等. 非线性辅助内模控制 (NAIMC) 系统研究 [J]. *信息与控制*, 1995, 24(4): 230 – 236.  
(YUAN Decheng, HAN Yang, WANG Guicheng, et al. Auxiliary internal model control strategy for nonlinear systems [J]. *Information and Control*, 1995, 24(4): 230 – 236.)
- [44] DAI X Z, LIU J, FENG C, et al. Neural network  $\alpha$ -th order inverse system method for the control of nonlinear continuous systems [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 1998, 145(6): 519 – 522.
- [45] 陈庆伟, 吕朝霞, 胡维礼, 等. 基于逆系统方法的非线性内模控制 [J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 715 – 721.  
(CHEN Qingwei, LÜ Zhaoxia, HU Weili, et al. Nonlinear internal model control based on inverse system method [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 715 – 721.)
- [46] LI Q, POO A N, LIM C M. Neuro-based adaptive internal model control for robot manipulators [C] // *Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks*. Perth: IEEE Press, 1995, 5: 2353 – 2357.
- [47] DATTA A, OCHOA J. Adaptive internal model control design and stability analysis [J]. *Automatica*, 1996, 32(2): 261 – 266.
- [48] DATTA A, OCHOA J. Adaptive internal model control:  $H_2$  optimization for stable plants [J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 75 – 82.
- [49] DATTA A, XING L. Adaptive internal model control:  $H_\infty$  optimization for stable plants [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(11): 2130 – 2134.
- [50] XING L, DATTA A. Decentralized adaptive internal model control for multi-input multi-output systems [C] // *Proc of American Control Conference*. San Diego: ACCC, 1999: 39 – 46.
- [51] SILVA G J, DATTA A. Adaptive internal model control: the discrete-time case [J]. *Int J of Adaptive Control Signal Process*, 2001, 15(1): 15 – 36.
- [52] 岳红, 高东杰, 刘圣. 面向工业过程的鲁棒 PID 控制器设计 [J]. *自动化学报*, 1999, 25(3): 411 – 416.  
(YUE Hong, GAO Dongjie, LIU Sheng. Robust tuning of PID controllers for industrial processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 25(3): 411 – 416.)
- [53] 陈捷, 王宁, 王树青. 汽油调合过程的神经内模优化控制 [J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(8): 532 – 535.  
(CHEN Jie, WANG Ning, WANG Shuqing. Neuro-internal model based optimal control for gasoline blending processes [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(8): 532 – 535.)
- [54] ZHOU K, REN Z. A new controller architecture for high performance, robust, and fault-tolerant control [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(10): 1613 – 1619.
- [55] TAYEBI A, ZAREMBA M B. Internal model-based robust iterative learning control for uncertain LTI systems [C] // *Proc of IEEE Conf on Decision and Control*. Sydney: IEEE Press, 2000, 4: 3439 – 3444.
- [56] IAN G H, JEFFERY R A, CHRISTOPHER J G. Improved filter design in internal model control [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(10): 3437 – 3441.
- [57] CAMPI M, LEE W S, ANAERSON B D O. Filters for internal model control design for unstable plants [C] // *Proc of the 32nd IEEE Conf on Decision and Control*. San Antonio: IEEE Press, 1993: 1343 – 1348.
- [58] 赵曜, 牛瑞艳. 内模控制系统反馈滤波器的在线智能调节 [C] // *中国智能自动化学术会议*. 北京: 清华大学出版社, 1999: 529 – 533.  
(ZHAO Yao, NIU Ruiyan. Intelligent on-line tuning of IMC feedback filter [C] // *Proc of China Intelligence Automation Conf*. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 529 – 533.)
- [59] ZHENG A, KOTHARE M V, MORARI M. Anti-windup design for internal model control [J]. *Int J Control*, 1994, 60(5): 1015 – 1024.
- [60] SAIRAM V, MASOUD S. Input constraint handling and windup compensation in nonlinear control [C]. *Proc of American Control Conference*. Albuquerque: ACCC, 1997: 1734 – 1738.
- [61] 董锡君, 姚郁, 孙彦军. 一类 anti-windup 系统的稳定性研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, 31(4): 129 – 132.  
(DONG Xijun, YAO Yu, SUN Yanjun. Stability analysis of an anti-windup system [J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 1999, 31(4): 129 – 132.)
- [62] FUNAMI Y, YAMADA K. An anti-windup control design method using modified internal model control structure [C] // *IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*. Tokyo: IEEE Press, 1999, vol V: 74 – 79.
- [63] ERIC C. Internal model predictive control [J]. *Automatica*, 1995, 31(10): 1471 – 1482.
- [64] STEPHANOPOULOS G, HUANG H P. The 2-port control system [J]. *Chemical Engineering Science*, 1986, 41(6): 1611 – 1630.
- [65] MATAUSEK M R, MICIC A D, DACIC D B. Modified internal model control approach to the design and tuning of linear digital controllers [J]. *Int J of Systems Science*, 2001, 33(1): 67 – 79.
- [66] 樊卫华. 高性能交流数字伺服系统的算法研究与工程实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2001.  
(FAN Weihua. *Research and implement of arithmetic of high performance AC servo system* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2001.)
- [67] YAMADA K, FUNAMI Y. A design method of antiwindup control systems with unknown external signal [C] // *Proc of the 6th Int Workshop on Advanced Motion Control* [C]. Nagoya: IEEE Press, 2000: 205 – 210.
- [68] ZHU H A, HONG G S, TEO C L, et al. Internal model control with enhanced robustness [J]. *Int J of Systems Science*, 1995, 26(2): 277 – 293.

- [69] MALAN S, MILANESE A, REGRUTO D, et al. Robust control from data via uncertainty model sets identification [C]// *Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control*. Orlando: IEEE Press, 2001, 3: 2686 – 2691.
- [70] YANG Zhi, JIA Li, LI Erguo. Adaptive internal model control based on the artificial neural network for time-varying delay systems [J]. *J of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2000, 36(4): 38 – 44.
- [71] TSYPKIN Y Z, HOLMBERG U. Robust stochastic control using internal model principle and internal model control [J]. *Int J Control*, 1995, 61(4): 809 – 822.
- [72] 龚剑平. FOPDT 的模型不确定性界和内模控制器鲁棒性能设计[J]. *北京化工大学学报*, 2001, 28(1): 76 – 78.  
(GONG Jianping. Model uncertainty bound of first order lag process with dead time and IMC controller design for robust performance [J]. *J of Beijing University of Chemical Technology*, 2001, 28(1): 76 – 78.)
- [73] LEE T H. Internal model control (IMC) approach for designing disk drive servo-controller [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1995, 42(3): 248 – 256.
- [74] CANALE M, Milanese M. Robust control of linear systems in presence of input saturation and unmodelled dynamics [C]// *Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control*. Orlando: IEEE Press, 2001: 4248 – 4253.
- [75] CHIU M, CUI S. Internal model control design for transition control [J]. *AIChE Journal*, 2000, 46(2): 309 – 320.
- [76] 陈庆伟, 郭毓, 胡维礼. 一种具有高阶无静差特性的内模控制器[J]. *兵工学报*, 2001, 22(2): 210 – 213.  
(CHEN Qingwei, GUO Yu, HU Weili. An internal model controller with high order zero static error characteristics [J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(2): 210 – 213.)
- [77] 张井岗, 曾建潮, 孙志毅. 直流电动机调速系统的内模控制[J]. *电机与控制学报*, 1998, 2(2): 126 – 128.  
(ZHANG Jinggang, ZENG Jiaochao, SUN Zhiyi. Internal model control for DC motor speed regulating system [J]. *Electric Machines and Control*, 1998, 2(2): 126 – 128.)
- [78] HARNEFORS L, NEE H P. Model-based current control of AC machines using the internal model control method [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1998, 34(1): 133 – 141.
- [79] GE Baoming, WANG Xiangheng, SU Pengsheng, et al. Nonlinear internal-model control for switched reluctance drives [J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2002, 17(3): 379 – 388.
- [80] HO W K, LEE T H, HAN H P, et al. Self-tuning IMC-PID control with interval gain and phase margins assignment [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2001, 9(3): 535 – 541.
- [81] DANIEL W C H, MA Z. Multivariable internal model adaptive decoupling controller with neural network for nonlinear plants [C]// *Proc of American Control Conference*. Philadelphia: ACCC, 1998: 532 – 536.

#### 作者简介:

周 涌 (1975 —), 男, 南京理工大学自动化系博士研究生. 研究方向为非线性系统和智能控制. E-mail: imczy@yahoo.com.cn;

陈庆伟 (1963 —), 男, 南京理工大学自动化系教授. 研究方向为智能控制系统及数字交流伺服系统. E-mail: cqwl002@sina.com;

胡维礼 (1941 —), 男, 南京理工大学自动化系教授, 博士生导师. 研究方向为非线性系统, 自适应控制, 智能控制理论及其应用. E-mail: hw11002@sina.com.