

智能特征模型和智能控制¹⁾

吴宏鑫

(北京控制工程研究所 北京 100080)

(E-mail: whx-bice@hotmail.com)

摘要 首先论述了控制理论的发展应走“实践-理论-实践”之路,接着分析了现有智能控制存在的问题,提出突破复杂系统的特征建模问题是建立智能控制理论体系的前提,简单阐述了智能特征建模的思想、方法和必要的物质基础,并提出了三类智能控制的设想和框架,最后讨论了为发展智能控制理论需研究的一些基本理论和工具。

关键词 实践-理论-实践,复杂系统,智能特征模型,智能控制理论

中图分类号 TP18

INTELLIGENT CHARACTERISTIC MODEL AND INTELLIGENT CONTROL

WU Hong-Xin

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080)

(E-mail: whx-bice@hotmail.com)

Abstract Firstly, this paper presents that the route of the control theory's development should be from practice to theory, and back to practice. Secondly, based on analysis of the current problem of intelligent control, this paper presents that the resolution of characteristic modeling of complicated systems should be the key to the establishment of intelligent control theory system. Thirdly, it briefly introduces the thought, method and necessary matter condition of intelligent characteristic modeling. Accordingly, this paper presents the plan and structure of three kinds of intelligent control. At last, the essential theory and tool for developing intelligent control theory are discussed.

Key words Practice-theory-practice, complicated systems, intelligent characteristic model, intelligent control theory

1 引言

控制技术和控制理论的发展方向是什么?应走什么样的路?这是控制界及有关人士一

1) 国家自然科学基金(60034010, 69984007)资助

收稿日期 2002-04-10 收修改稿日期 2002-07-09

直非常关心的问题. 本文想就此问题进行一些研究. 其基本点是从实际需求和实际工程中存在的问题寻找发展方向, 走实践-理论-实践之路. 从实际控制工程中的一些现象、规律发现其本质的东西, 从而产生真正的原创性理论和方法, 再将此理论应用于实际工程考验和修正.

回顾自动控制的发展历史, 可以清楚地看到, 它不仅产生于生产实践和科学实验, 而且随着生产和科学技术的发展而发展. 其水平与当时生产和科学技术发展水平及要求紧密相关. 20 世纪 40 年代产生的经典控制理论和 20 世纪 60 年代产生的现代控制理论(本文暂称传统控制理论), 其基本点是利用微分方程(传递函数)或状态空间法等数学解析方法描述被控对象(数学模型), 根据简单的控制性能要求, 按反馈理论和稳定性判据, 采用频域法或时域法工具设计控制器, 按数学解析方法求解控制量. 传统控制理论所研究和适用的对象一般属于可线性化的、定常对象或用数学解析方法精确描述的、结构和参数已知的对象. 当然对一些简单非线性和慢时变对象也可应用. 传统控制理论对生产、科学实验和国防事业发展起了很大作用.

然而, 随着生产、科学技术和国防事业进一步发展的需要, 所需控制的对象越来越复杂, 且有时变和不确定性, 难以(甚至不可能)用已有的数学解析方法描述被控对象, 即使能用数学描述的, 也非常复杂; 另一方面, 控制性能要求却很高, 控制目标呈多层次、多样化的特点. 这一切都使传统控制理论遇到了严重挑战, 必须发展新的控制理论. 为更具体说明这个问题, 下面举三个例子. 1) 电解铝的工业生产过程控制, 就是一类复杂控制系统, 具有非线性和不确定性, 被控变量不能直接连续测量, 只能靠长时间间隔的化验. 因此很难为这类系统建立输入输出的解析数学模型. 另一方面, 对电解铝过程中的氧化铝浓度控制和阳极效应预报准确度的要求都很高. 不仅如此, 还要求尽可能节能降耗. 对于这类控制对象和控制要求, 传统控制理论显得无能为力, 成为国内外该行业的普遍性难题. 2) 航天器的控制问题. 随着航天任务的新需要, 航天器及其控制技术正向两个方向发展: 一个方向是航天器结构上的轻质、挠性和大型复杂的变结构变参数特点, 以及航天控制高精度、高可靠性和自主运行的要求; 另一个方向是航天器小型微型结构及多星组成的星座、星网以及航天器在轨自主协调飞行(或编队飞行)要求. 对于上述特点和要求, 传统控制同样遇到了困难. 所以杨嘉墀院士在 1995 年就指出“由于传统控制技术在空间飞行器姿态和轨道控制方面存在的问题, 各空间国家 10 多年前就发展智能自主控制技术, 对中国来说, 发展这项技术更有其必要性”^[1].

20 世纪 60 年代提出的智能控制, 是一种拟人的智能的控制, 它应具备如下功能^[2]: 1) 对获取各种信息进行定性与定量、模糊与精确的处理能力; 2) 在线学习、修改和生成新知识和记忆的能力; 3) 把已有理论与人们的经验相结合, 归纳、演绎, 进行推理决策的能力; 4) 对系统故障及运行中遇到突发事故临场处理的能力. 总之, 作为智能控制的最基本特点是自学习、自组织和自适应能力. 这正是上述复杂对象及其控制要求所希望的控制理论和方法. 对这种智能控制, 尽管目前还没有统一的定义和控制器设计的完整理论. 但它的出现, 如分层递阶智能控制、专家控制、模糊控制、神经网络控制、某些自适应控制和各种拟人的智能控制方法^[3,4]确实解决了一些传统控制技术难以解决的问题, 所以深受人们的欢迎和关注.

作为控制科学和技术的理论, 它必须经历一个过程才能产生, 必须在大量实践基础上才能完成. 已有的传统控制理论正是经历了这样的过程. 在两千年前, 我国就发明了开环自动调节系统——指南车. 一千年前的北宋年间, 就发明了闭环自动调节系统——水运仪象

台^[5],而作为控制理论只是到了现代工业和科学技术发展的 20 世纪 40 年代以后,在总结吸收历史上控制技术的成果和实际工程成果,以及数学等其它相关科学成果的基础上,才发展成了今天的传统控制理论.而目前需要研究的智能控制理论更是一门综合性很强的控制理论,它不仅要包括吸取已有控制理论和控制技术成果,还必须包括计算技术、人工智能技术、信息论成果,必须有新的数学科学的发展,所以本人认为一个完整的智能控制理论形成和完善必须有一个控制技术发展过程.

现在出现的一些智能控制方法或技术,之所以尚不能称完整的理论,就是这些智能控制方法,大都是构造一种智能控制器形式,在现场试凑控制系统,是人们的经验规则和一些新的控制技术.尤其是控制器设计的依据是什么,控制器进入实际运行前预知的其运行后的理论结果如何,控制系统的能控性、稳定性判据准则等,都还不能从理论上得到回答.

在几十年从事航天控制与工业控制的实际工作中,本人深感为发展控制技术和控制理论,还应抓住控制的三要素,即对象的情况和特点、控制性能要求、控制器设计的工具(包括数学工具).

现在文献上介绍一些智能控制方法,如模糊控制等主要从控制器结构上考虑问题,未从被控对象上研究.其原因是传统控制的建模思想满足不了模糊控制器的要求.这样就不可避免地要靠在具体对象上试凑控制器结构和参数,这种做法在一些情况下是可行的,但在另一些情况下是不行的,如航天控制.所以本文认为智能控制理论一个突破口是要提出新的建模理论和方法.经过研究与多年实际工程应用,本文将提出一个智能建模的理论——智能特征建模的理论和方法,有了这一条,控制器的设计就有了设计基础.

2 智能特征模型

2.1 智能特征模型

所谓特征模型^[6],就是根据对象的动力学特征、环境特征和控制性能要求所建的模型,而不仅仅是以对象精确的动力学方程来建模,特征模型的特点如下:

- 1) 在同样输入控制作用下,对象特征模型和实际对象在输出上是等价的(即在动态过程中能保持在允许的输出误差内),在稳态情况下,输出是相等的;
- 2) 特征模型的形式和阶次除考虑对象特征外,主要取决于控制性能要求;
- 3) 特征建模的形式应比原动力学方程简单,工程实现容易、方便;
- 4) 特征模型与一般高阶系统的降阶模型不同,它是把高阶模型的有关信息都压缩在几个特征参量之中,一般情况下,特征模型可用慢时变差分方程描述,一般的降阶模型可看作特征模型的特例.

所谓智能特征建模,就是利用智能的方法或用人工智能技术建立特征模型.特征模型又随对象复杂性分为确定性特征模型和特征估计型特征模型.一般高阶线性定常、阶次和参数未知的对象,简单的非线性系统和简单慢时变系统,控制性能要求为恒值控制或位置跟踪等简单要求,均可建立确定性特征模型^[6].对于具有严重非线性、强烈不确定性特点的对象以及控制要求复杂的情况,其特征模型也具有不确定性,不唯一解.这方面必须依靠专家经验规则、在线学习、逻辑推理方法.所以也称这种模型为特征估计型特征模型.智能特征模型是一系列子特征模型的集合和集成.经综合分析、推理决策获得可作为控制器设计依据的输入

输出的对应关系,并能在线不断修正特征模型,这种特征建模的具体形式将另文发表.

2.2 智能特征模型已在实际中应用

特征模型的思想和方法,早已被人们不自觉地应用.由于一些对象,其数学模型不清楚而控制性能简单.传统控制理论完整方法设计控制器有困难,而工程实际又必须解决问题.人们从工程实践的经验和基本理论,提出的 PID 控制、模糊控制、专家控制等,表面上看这些控制器都是不考虑对象模型的,实际上这些控制器之所以能应用,根本点在于它们是以对象特征模型为依据.下面以 PID 调节器为例(工业控制包括航天控制 80%仍用此控制方法),从两方面入手分析此问题.

1) 从特征建模的观点分析问题

i) 在文献[6]中已分析的一般线性定常高阶参数未知的对象,其特征模型均可用一个二阶慢时变差分形式的特征模型描述(1a).在工作点附近一般又可按二阶定常形式的特征模型描述对象(1b),即

$$y(k+1) = f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) \quad (1a)$$

$$y(k+1) = f_1y(k) + f_2y(k-1) + g_0u(k) + g_1u(k-1) \quad (1b)$$

或用连续微分方程描述

$$\frac{d^2y}{dt^2} + a_1(t) \frac{dy}{dt} + a_2(t)y(t) = b_0(t)u(t) + b_1(t) \frac{du}{dt} \quad (2a)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2y(t) = b_0u(t) + b_1\dot{u} \quad (2b)$$

ii) 一般简单的非线性系统也可写成式(1a)(1b)或(2a)(2b)形式.根据式(1)或式(2)设计线性控制器.从工程角度看,为满足恒值控制要求的控制器,都可归为误差的比例、误差的积分、误差的微分.控制器的表达式可写成 PID 形式

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=1}^k e(i) + k_d (e(k) - e(k-1)) \quad (3a)$$

或

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (3b)$$

实际工业对象 80%都可用此特征模型建模,所以也就出现了 80%的工业对象均可用 PID 调节器的情况.

2) 从模糊控制器结构形式分析问题

一般双输入单输出($e, \Delta e, u$)的模糊控制器,实际上也是根据对象的特征,即特征模型,将 PID 调节器设计思想与人的经验相结合,利用模糊数学这个工具,而建立模糊控制器.

当在 PID 或模糊控制中进一步增加人的智能、人的逻辑推理等手段则可形成高级的 PID 或智能 PID,以及高级模糊控制,如自适应模糊控制等.

综观现有的某些智能控制器,表面上看不依赖对象模型,实际上都是以对象特征模型为基础设计的.对于这类对象及智能控制方法.本文称基于确定性特征模型的智能控制.

2.3 特征估计的特征模型

对于一些很难用数学方程描述的非线性、不确定性,尤其是输出被控变量也无法直接连续测量的对象,需要建立两类特征估计型的特征模型.

1) 对输出变量估计的特征模型

对于不能直接测量输出被控变量的对象,可由其它可连续测量的变量,建立一个与输出变量非唯一关系的估计型的特征模型.如电解铝过程中氧化铝浓度与表观电阻是一个非线性且具有不确定性的关系.根据这个关系不能由表观电阻唯一确定氧化铝浓度.但可得一个估计值.有了这个估计,再根据物料平衡对其不确定性因素的分析,利用专家经验规则,进行逻辑推理与长时间间隔校验修正,即可确定氧化铝浓度.

2) 输入控制量与输出被控变量特征估计的特征模型

该特征模型由四种形式组成:i)对象动力学方程的确定性特征模型;ii)输入输出物理机理关系的准确的或估计型的特征模型;iii)根据开放式专家经验规则,在线学习、逻辑推理等定性或定量相结合的特征估计的特征模型;iv)由信息数据或在线辨识所建立的与控制要求相结合的特征模型.其建模的具体方法,根据有关文献有模糊建模、神经网络建模等.

上述四种子特征模型根据对象复杂性与控制要求不同可选用其i)~iv)类不同数量的子特征模型组成一个特征模型集合.再利用人工智能技术在线学习、分析、推理、判断决策和在线校验方式相结合,确立一个总特征模型.

2.4 智能特征模型的物质基础

任何一门技术学科,其产生、存在和发展的条件必然与当时的物质基础相适应.传统控制理论建模的最基本点是静中建模,尽可能用一种固定结构和固定参数来描述对象模型.这与当时的条件有关.在那个时代,主要靠机电部件等“硬件”结构组成控制器,实现闭环控制.如果控制器结构和参数在控制过程中变化、变动,则在无计算机时代是不可能实现控制的.因此,人们在建模与控制器设计上必须符合这个特定条件.而今天,计算机技术如此发达,人工智能技术和信息论如此之发展,控制技术和控制理论应在新条件进行变革性发展.所以本文提出智能特征建模则是一种动中建模,即在控制过程中,对象模型和控制器模型从结构到参数均可变动,按需求在可能允许范围内变动.这种变化的特点在今天是可以实现的.这为提高控制性能,实现目标多样化控制要求提供条件.这一切说明了特征建模不但必要,而且可能实现.

3 智能控制器设计问题

智能控制随其智能化程度不同可分为三类:初级智能控制、中级智能控制和高级智能控制.

3.1 初级智能控制

所谓初级智能控制,就是基于确定性特征模型.根据反馈控制理论,利用人的经验与已有的或创新的一些控制方法,构造一种控制器结构形式.如专家系统、模糊控制、智能PID控制等.然后,通过在线辨识和人在现场试凑控制器的某些参数.这类智能控制器,从表面上似乎不靠对象模型,实际上是按照对象特征模型来设计控制器结构的.产生这种现象的原因在于传统控制理论建模过于数学化,对象建模不能适应控制器需要.如航天器控制按动力学建模,阶次甚高,非常复杂,然而控制器设计却很简单,如PID控制.实际上航天器所建动力学模型的作用,作为仿真对象是很有用的,而作为控制器设计依据,作用似乎不明显.又如石化系统中,一些复杂过程控制,按精确建模也很复杂,而实际上用一个PID也解决问题.这说明原先的思想有不足之处,即原先建模不适应为控制器设计需要,而过分强调对象本身的动力学方程.所以本文提出特征建模,可解决建模与控制器设计的不协调问题.

基于特征模型设计控制器方法很多. 下面就本文作者亲自参与的五类对象(航天器控制、冶金工业过程控制、石化过程控制、造纸工业控制、啤酒和发酵控制)300多个实际系统所遇到的问题及20多年的经验总结,并在吸取前人成果的基础上,提出一种非线性黄金分割智能控制方法. 这个方法的基本点是:1) 根据慢变或定常二阶特征模型对象,构造基本的非线性黄金分割控制器;2) 按控制性能要求(如过度过程时间、超调、稳态误差等),由专家经验规则、逻辑推理在线自动调节该控制器有关参数,通过智能手段保证系统控制性能要求进行工作;3) 在参数未知情况下,根据特征模型,利用李亚普诺夫稳定判据可以证明系统的稳定性^[7,8];4) 这种智能控制器能适用于一般高阶线性定常、阶次和参数未知对象的控制,能适用一般不复杂的非线性系统和一些慢时变对象的控制,并且已在一些工程对象上有成功应用^[9];5) 这种基于特征模型的非线性黄金分割智能控制器具体表达式、稳定性证明及实际应用将另文发表.

3.2 中级智能控制

所谓中级智能控制,就是基于智能特征模型(或者说是基于不确定性特征模型或特征估计的特征模型),利用智能的方法建立特征模型之交集. 根据反馈与预测控制的原理,按不同控制周期组成内外不同的多个控制环节. 利用专家经验规则、知识库、在线学习、逻辑推理综合决策等智能技术,以实现多个控制目标的控制要求. 这种智能控制方法,主要针对的被控对象是难以写出输入输出确定性特征关系的、不确定的复杂系统. 不仅如此,这类对象的输出控制变量也无法在线测量,只能间断的离线测量. 而其它变量与此输出值又无唯一对应关系. 只能有一个模糊的不唯一的估计关系. 很多冶金工业、化工过程中浓度、能耗和质量等控制都属于此类控制系统. 所以对此类复杂系统的智能控制,系统设计应分三步进行.

第一步应建两类特征模型:1) 输出被控变量的特征估计模型;2) 输入输出关系特征估计的特征模型.

第二步是根据多目标、多样性的控制要求,按预测和反馈相结合的理论,设计多层次不同控制周期的多个子开环和闭环系统. 例如,输出被控变量无法实时获得,只能根据估计特征模型、专家经验规则,利用知识库、数据库信息,按预测理论进行开环控制. 一般说开环控制周期短,当进行一定时间预测开环控制后,应反馈闭环修正预测控制律和特征模型. 对于要长时间才能获取的控制目标,如电解铝中的阳极效应预报和控制,质量和能耗控制都必须运行一定时间才能确定其效果的好坏. 对于这样的目标,除局部最优考虑外,必须在大周期情况下才有结果. 根据大周期结果的好坏决策修改控制律和参数.

第三步具体控制器设计,目前出现的一些智能控制方法,如模糊控制、自适应控制、神经网络控制等都可以作为其子控制器. 但作为本智能控制器设计,首先应对各控制目标和控制性能进行分析、分解. 其次是根据特征模型设计具体子智能控制器. 最后按总的要求,协调、调用各种控制策略. 这类控制器结构框图如图1所示,其中智能控制器由7部分组成:1) 被控对象;2) 测量及特征输出模型;3) 输入输出关系的特征模型;4) 子控制器;5) 智能决策机构;6) 智能化管理机构;7) 控制要求部分(这里未考虑故障处理机构).

各个子控制器设计方法有多种,本文想介绍一种:智能决策自适应模糊控制器. 该控制器已成功应用于电解铝过程控制,取得了氧化铝浓度低、阳极效应预报准确率高和节省能耗的效果. 这种智能决策的自适应模糊控制器,由三个环路组成,每一环路都针对一个控制目标要求,具体形式和设计可参见文献[10].

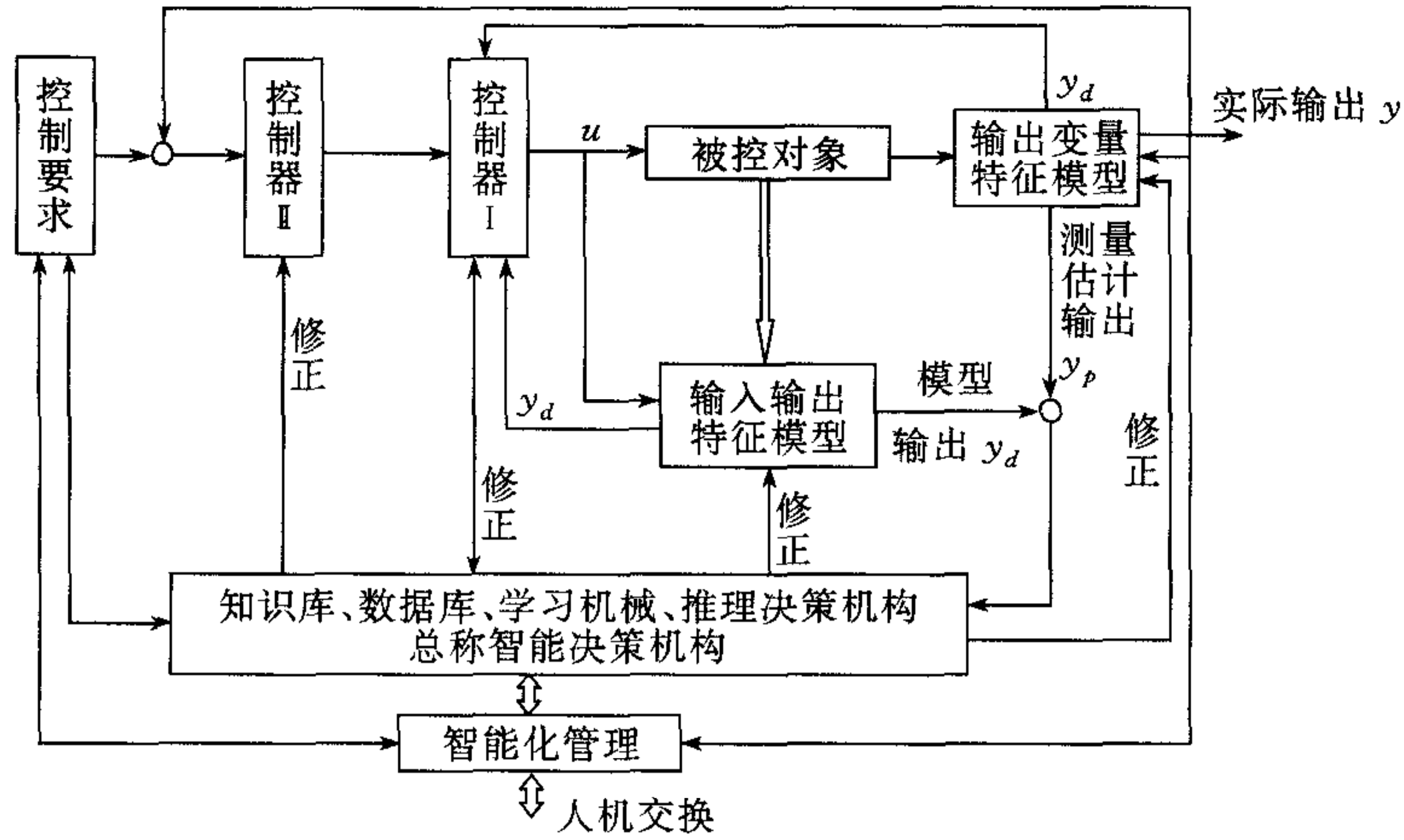


图 1 基于智能特征模型的智能控制框图

3.3 高级智能控制

关于高级智能控制,应具有更高智能化,但研究与应用不够,暂不叙述。

4 关于智能控制的一些基本理论与工具

针对不确定复杂系统设计智能控制器,其特点是以构造型结构为主,以专家经验规律、知识库和在线学习修改知识为主要手段,按反馈与预测理论设计控制器. 整个系统闭环后能否保证稳定,控制目标能否达到,传统控制理论由于其局限性回答不了上述问题. 已有的可控性和稳定性判据难以回答上述问题. 因此需要研究新的稳定性判据理论和系统的能观性、控制目标能达性理论. 为解决上述问题需要做以下工作.

1) 必须研究这些理论和智能控制器设计所用的新的数学工具——控制数学. 从工程实践需求和存在的问题出发,总结已有控制数学之不足,提出新的数学工具,尤其要从不断出现的一些智能技术中总结和研究控制数学问题. 数学在控制理论中具有极其重要的作用. 因此,作为控制数学的研究,首先要围绕控制问题进行研究,而不能让控制技术围绕数学去研究. 在控制中数学是工具,数学并不等于控制. 那种单纯的以数学标准去看控制问题是片面的. 中国过去有一位控制理论和数学家曾说过如下大意的话:对一个控制专家来说,越是复杂对象,能用最简单的数学来解决控制问题,其水平越高. 反之一个简单对象的控制问题用复杂的数学方法去解决,只能说明其水平很低. 按照这个思路来考虑问题,研究智能控制出现和发展中需要的新的数学工具,是控制工程师们所希望的.

2) 研究新的计算机问题. 新的计算机是智能控制理论和技术能存在和起作用的载体,是基本条件. 由于智能控制的需求,对计算机提出了新的要求,如速度、存储量、智能化水平等,当然也就推动了计算机技术的发展.

3) 研究人工智能及信息论与智能控制的关系. 人工智能技术及信息论为智能控制开阔了眼界,提供了最有力的武器和解决复杂控制问题实用的工具. 如何实现人机结合,如何把人的智能与计算机结合起来,是智能控制中必须解决的大问题. 在这方面文献[11]已做了可喜的工作. 当然尚待进一步研究.

总之,以智能控制理论为主体,结合计算技术、人工智能技术和信息论,正确使用控制数学,认真总结和研究工程实际中的控制问题,新的智能控制理论必将出现,新一代的控制科学和控制技术必将为人类做出更加辉煌的贡献.

5 小结

本文是作者多年从事航天控制和工业控制的一些体会和想法.所提出的智能特征模型和智能控制已在航天和工业过程的复杂控制中取得了成功应用,但很多基本理论问题尚未解决,有待进一步研究.

致谢 本文得到杨嘉墀院士、屠善澄院士指导,在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 杨嘉墀.中国空间计划中智能自主控制技术的发展. In:IFAC/IACA'95, Beijing, 1995
- 2 Song Jian. Control and automatic beyond the Century. In:14th world congress of IFAC, Beijing, 1999
- 3 孙增圻等.智能控制理论与技术.北京:清华大学出版社,1997
- 4 涂序彦.人工智能及其应用.北京:电子工业出版社,1988
- 5 钱学森,宋 健.工程控制论(修订版).北京:科学出版社,1960
- 6 吴宏鑫等.特征建模与挠性结构的控制.中国科学(E辑),2001,31(2):137~149
- 7 解永春,吴宏鑫.黄金分割在自适应鲁棒控制器设计中的应用.自动化学报,1992,18(2):177~185
- 8 齐春子,吴宏鑫,吕振铎.多变量全系数自适应控制系统稳定性的研究.控制理论与应用,2000,17(4):489~494
- 9 吴宏鑫等.基于对象特征模型描述的智能控制.自动化学报,1999,25(1):9~17
- 10 王迎春,耿长福,吴宏鑫.一种自适应模糊控制器及其在电解铝过程控制中的应用.航天控制,2001,19(4):22~28
- 11 戴汝为,王 珏,田 捷.智能系统的综合集成.杭州:浙江科学技术出版社,1995

吴宏鑫 简介见本刊第 28 卷第 3 期.