

工程实际中的控制理论和方法的研究与展望

吴宏鑫[†]

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 首先分析了控制理论的研究现状, 然后围绕工程实际中的控制理论和方法, 提出了创立新的建模理论, 引入人的智能的控制方法, 建立以计算机为平台的系统设计、分析和稳定性证明的3个新的研究课题。

关键词: 特征模型理论; 引入人的智能; 基于计算机平台的设计和证明

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research and prospect on the control theory and method in the engineering

WU Hong-xin[†]

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: The research status of the control theory is analyzed firstly. Then it is presented to construct three new research subjects, i.e., new modeling theory construction, man's intelligence-introduced control method, and computer-based system design, analysis and stability proof with the control theory and method in the engineering.

Key words: characteristic model; man's intelligence-introduced; computer-based design and proof

1 引言(Introduction)

从自动控制的发展历史和现状可以看出, 其控制理论的研究基本上有两种方法: 精确数学解析方法和机理构造试验方法。

所谓精确数学解析方法(简称数学方法)就是从工程或社会问题为背景进行抽象, 从数学角度来研究控制问题, 就是根据被控对象动力学分析建立精确的数学模型, 按控制性能指标要求, 通过数学解析的方法获得控制解, 并在此基础上建立稳定性分析理论, 它对控制理论的发展起了很大作用。但是它不关心具体被控对象的物理属性, 只考虑系统各部分之间的数学关系和整个系统运动状态, 由于它追求数学上的完美解, 很多数学假设条件在工程上难以获得, 特别是随着生产与科技发展, 被控对象很难用精确数学描述时, 实际工程中应用甚少。

所谓机理构造试验方法(简称直观方法或机理方法)就是从工程实际控制中遇到的问题和实际情况出发, 以物理机理、一般数学分析和工程实际的条件, 包括人的经验进行控制理论研究与控制器构造设计, 并以实际工程应用为验证目标。这种方法就像钱学森在他的《工程控制论》原序中所说“只要比较直观的讲法能够达到目的, 我们就不用严密精巧的数学方法来

讨论”^[1]。这种方法历史悠久, 实际应用广泛, 但这种方法的缺点是控制性能分析、稳定性证明等都很困难。特别是不允许在线反复调试和动、静态性能要求很高时, 该方法就遇到很大麻烦。

随着生产与科研发展的需要, 被控对象越来越复杂, 控制性能要求越来越高, 上述两种方法都遇到了困难。经过20多年的理论研究与实际应用, 我们找到了一种新的控制理论发展的思路。本文的目的和研究内容就是从实际出发在吸收上述两种方法优点的基础上, 把以前分散的研究成果(包括已发表的和未发表的), 从建模、控制器设计和系统性能分析3个方面进行系统地总结和提炼, 以形成一套能更好地在工程实际中应用的新控制理论和方法。

为叙述方便, 首先把被控对象能否用动力学方程描述进行建模作为突破口, 以说明研究这种工程实际中的控制理论和方法的必要性, 紧接着讨论工程实际中的控制理论和方法研究的具体内容。

• 必要性.

① 有明确动力学方程的对象.

这类对象数学模型结构基本清楚, 数学模型方程复杂, 参数不确定或时变。例如复杂航天器, 它不仅具有大挠性附件或本身就是挠性结构, 而且有液体晃动

和消耗,有活动部件,有振动源,数学方程很复杂,具有非线性、高阶、时变特性;另一方面,对控制能力的要求又很高,即要求高精度、高稳定、高灵敏度控制性能,以及鲁棒适应性和长寿命可靠性等。已有的基于数学的控制理论,它对数学的完美性要求多,而这些理论成立的条件在工程上是否存在却研究得少,所以难以在实际工程中有效应用,到目前为止航天器控制主要是PID和相平面法。从基于数学的控制理论研究到工程实际应用,还需要有一个工程实现的控制理论和方法研究,而这一点很多人忽视。这就造成一种现象:新控制理论研究很多,被实际应用的结果却很少。

② 无法写出明确动力学方程的对象。

对于这种情况,单纯的基于数学方法更难应用,只能采用机理构造实验方法(直观方法),然而对于不能在线反复调试和复杂时变对象的高性能控制也就成了问题,因此,更要研究这种工程实际中的理论和方法。

• 主要研究内容。

本文将从3个方面对工程实际中的控制理论和方法进行研究:① 创立新的建模理论;② 引入人的智能的控制方法;③ 建立以计算机为平台的系统设计、分析和稳定性证明的新的控制理论和方法。

2 创立新的建模理论和方法——特征建模的理论和方法(Construct a new modeling theory and method—characteristic modeling theory and method)^[2]

2.1 特征建模的必要性(Necessary of characteristic modeling)

一个好的控制器设计,第1步要解决建模问题,现有以动力学分析精确建模的方法有如下不足和需改进之处:① 复杂对象难以建立精确的动力学模型,有的到目前为止也无法建立动力学方程;② 对象模型很复杂,阶次很高,参数未知,难以进行低阶控制和智能控制器设计;③ 控制科学是以技术科学为主,自然科学与技术科学交叉学科,以前的控制理论不涉及以实际对象进行建模研究,而今天的控制理论和方法必须从认识世界,对客观对象科学描述即建模开始,这就是自然科学研究的范畴,进行控制器设计即改造世界为人类服务,对实际对象进行控制这就是技术科学应完成的任务,这就要求开辟新的动力学特征与控制要求交叉结合的建模理论和方法。经过20多年研究实践,从技术科学与自然科学相结合的观点,我们找到了一种特征建模理论和方法。所谓特征建模就是从系统综合观点出发,根据被控对象动力学特征、环境特征和控制目标和性能要求相结合,克服只考虑动力学分析建模的不足,建立以利于控制器设计的模型。

2.2 特征模型的四大特点(Four key features of characteristic model)

① 在同样允许输入控制作用下,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 特征模型建立形式应比原对象的动力学方程简单,易于控制器设计,工程实现容易、方便。

④ 特征模型与高阶系统的降阶模型不同,它是把高阶模型有关信息都压缩到几个特征参数之中,并不丢失信息,一般情况下,特征模型用低阶慢时变差分方程描述。

2.3 特征建模的机理(Mechanism of characteristic modeling)

1) 从系统结构看。

线性系统动力学基本结构是由一系列小于等于二阶的环节串联并联组成的,这些环节输出的符号基本可以分为两类,(其输出量为大于等于零和小于零两种)利用同号相加的原理,可分为两组,按控制性能要求综合组成低阶时变微分或差分方程形式。

2) 从能量转换形式上看。

控制作用是一种能量转换,能量转换的基本形式是动能和势能两种,所有位置和速度是势能和动能的关系。

3) 从数学上看。

在数学上可利用低阶时变形式的微分(差分)方程能与高阶定常微分(差分)方程等价(逼近)基本原理。

4) 复杂事物存在主要矛盾。

根据动力学特征和控制性能要求相结合的和抓住复杂事物中主要矛盾的原则,建立以利于控制器设计的控制输入与系统输出变量之间的低阶时变(变参数)形式的差分方程(微分方程与各种不等式组合)即特征模型。

在计算机技术发展的今天用慢时变形式描述是很容易实现的,其实在日常生活中人们很早就用特征模型的思想进行控制,如顶竹竿的杂技演员、骑自行车的人们都是抓住对象动力学特征和控制要求而进行的。特征模型的思想和方法早就在人们日常生活中运用,无非是未作为一种建模理论进行研究而已。

2.4 特征建模的分类及基本形式(Types and basic forms of characteristic modeling)

特征模型大致可分为两大类:确定性特征模型和智能特征模型。

确定性特征模型主要是针对那些能用明确的数学方程(其方程系数可未知或已知)描述的,或物理机理非常明确的高阶复杂对象。

智能特征模型主要是针对那些目前无法用明确的数学方程描述且有不稳定性因素的复杂对象。

根据上述分类,特征模型的建立基本上有两种方法,即数学推导或变换方法和人为构造方法两种。

数学推导或变换方法目前又有两种方法

第1种方法 按定常系统基本构造推导特征模型,详细内容见文献[2-3],本文只介绍其基本结论。

定理1 对于如式(1)所示的一般线性定常高阶对象,在满足一定采样周期 Δt 的条件,要实现位置保持或位置跟踪控制时,其特征模型可用一个二阶时变差分方程形式(3)描述或一阶特征模型(4)描述。

工程上常见的线性定常方程对象

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

可分解成如下形式:

$$G(s) = \frac{k_v}{s^2} + \sum_{i=1}^{m_1} \frac{k_i}{s + \lambda_i} + \sum_{i=1}^h \left(\frac{k_{p+i}}{s + \lambda_{p+i}} + \frac{\bar{k}_{p+i}}{s + \bar{\lambda}_{p+i}} \right) + \sum_{i=1}^{p_1} \frac{k_{\omega_i}}{(s + \omega_i)^2} \quad (2)$$

把原方程所有信息都压缩到几个特征模型的几个系数之中,可以证明相应的特征模型为

$$y(k+1) = f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1). \quad (3)$$

式(3)比原对象差分方程少一项未建模误差 $\varepsilon(k)$,而在控制进入稳态后 $\varepsilon(k) \rightarrow 0$. 有时也可用一阶形式

$$y(k+1) = f(k)y(k) + g_0(k)u(k). \quad (4)$$

1) 当对象方程(1)是稳定时,特征模型系数有如下特点:

① 方程(3)的系数 $f_i(k), g_{i-1}(k), i = 1, 2$ 是慢时变的;

② 系数 $f_i(k), g_0(k), g_1(k)$ 的范围可事先确定;

③ 动态过程中,在同样输入控制情况下,特征模型的输出与实际对象输出是等价的(适当选择采样周期可保证输出误差在允许范围之内),在稳态情况下,方程(3)的静态增益 D_0 与方程(1)的静态增益($D = b_0/a_0$)是相等的,即位置保持控制稳态情况下输出是相等的;

④ 当静态增益 $D = 1$ 时,在稳态情况下,系数之和等于1,即

$$f_1(\infty) + f_2(\infty) + g_0(\infty) + g_1(\infty) = 1; \quad (5)$$

⑤ 当系统是有积分环节时

$$f_1(\infty) + f_2(\infty) = 1. \quad (6)$$

2) 当对象方程(1)是开环不稳定,分子是稳定多项式,当分子分母相对阶为 γ ,且 $\gamma > 2$,则在分子多项式

上补 $(\gamma - 2)$ 阶稳定多项式,则特征模型仍为二阶形式,如式(3),其方程系数在一个已知闭凸集中。

第2种方法 改变数学方程形式推导特征模型。

钱学森在他的《工程控制论》序言中提出“任何一个问题在数学上的困难常常带有很大的为人性质,只要把问题的提法稍微加以改变,往往就可以使问题的数学困难减轻到进行研究工作工程师能处理的程度”^[1],根据这个思想可以把一个复杂的微分方程变成一个工程极易处理的形式。

设对象方程为

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \cdots + a_2y^{(2)} + a_1y^{(1)} + a_0y = b_mu^{(m)} + \cdots + b_2u^{(2)} + b_1u^{(1)} + b_0u \quad (7)$$

可以改写成如下形式:

$$y^{(2)} + a_1y^{(1)} + a_0y = b_0u + b_1u^{(1)} + F(t), \quad (8)$$

其中

$$F(t) = -[y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \cdots + (a_2 - 1)y^{(2)}] + [b_mu^{(m)} + b_{m-1}u^{(m-1)} + \cdots + b_2u^{(2)}].$$

式(8)与式(7)完全相等. 对式(8)离散化处理,则离散化方程为

$$y(k+1) = f'_1(k)y(k) + f'_2(k)y(k-1) + g'_0(k)u(k) + g'_1(k)u(k-1) + \Delta t^2 F(k), \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} f'_1(k) = [2 - \Delta ta_1 - \Delta t^2 a_0], \\ f'_2(k) = -[1 - \Delta ta_1], \\ g'_0(k) = [\Delta t^2 b_0 + \Delta tb_1], \\ g'_1(k) = -\Delta tb_1. \end{cases}$$

进一步,将式(9)改写:

首先,令

$$\Delta_1 = \frac{\Delta t^2 F}{y^2(k) + y^2(k-1) + u^2(k) + u^2(k-1)},$$

则

$$y(k+1) = [f'_1(k) + \Delta_1 y(k)]y(k) + [f'_2(k) + \Delta_1 y(k-1)]y(k-1) + [g'_0(k) + \Delta_1 u(k)]u(k) + [g'_1(k) + \Delta_1 u(k-1)]u(k-1). \quad (10)$$

式(10)与式(9)完全相等。

由于 Δ_1 的分母有可能出现零或小于1之值,为工程实现方便,则取 Δ_1 为 $\bar{\Delta}_1$:

$$\bar{\Delta}_1 = \frac{\Delta t^2 F}{y^2(k) + y^2(k-1) + u^2(k) + u^2(k-1) + 1},$$

则

$$\begin{aligned} y(k+1) = & [f'_1(k) + \bar{\Delta}_1 y(k)]y(k) + \\ & [f'_2(k) + \bar{\Delta}_1 y(k-1)]y(k-1) + \\ & [g'_0(k) + \bar{\Delta}_1 u(k)]u(k) + \\ & [g'_0(k) + \bar{\Delta}_1 u(k-1)]u(k-1) + \bar{\Delta}_1. \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)与式(10)完全相等.

令

$$\begin{cases} f'_1(k) + \bar{\Delta}_1 y(k) = f_1(k), \\ f'_2(k) + \bar{\Delta}_1 y(k-1) = f_2(k), \\ g'_0(k) + \bar{\Delta}_1 u(k) = g_0(k), \\ g'_1(k) + \bar{\Delta}_1 u(k-1) = g_1(k), \\ \bar{\Delta}_1 = \varepsilon(k), \end{cases}$$

则对象差分方程的模型为

$$\begin{aligned} y(k+1) = & f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + \\ & g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) + \varepsilon(k), \end{aligned} \quad (12)$$

其特征模型为

$$\begin{aligned} y(k+1) = & f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + \\ & g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1). \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)之特征模型比原方程(12)少 $\varepsilon(k)$, 即存在一个未建模误差 $\varepsilon(k)$, 对 $\varepsilon(k)$ 进行分析可知当控制进入稳态后 $\varepsilon(k) \rightarrow 0$.

1) 当被控对象开环稳定, 则 $F(k)$ 有界, 取采样周期足够小, 即可使 $|\Delta t^2 F(k)| \ll 1$, 则 $\varepsilon(k) \ll 1$;

2) 当被控对象开环不稳定, 系统发散需要一个过程时间, 由于参数估计与黄金分割自适应控制可保证在此系统发散前即可使系统闭环稳定, 而在线参数估计通过正交投影又可保证参数收敛到一个已知闭凸集之内, 只要参数在此闭凸集内可以证明黄金分割自适应控制就可保证闭环稳定.

经过20多年的研究现已证明, 只要证明基于特征模型的自适应控制律能与特征模型组成的闭环系统稳定, 则一定也能保证此控制律与原系统组成闭环系统稳定. 具体证明见另文.

根据特征模型进行控制器设计很方便, 尤其是对参数未知的高阶对象的控制器设计比其他方法具有简单实用的优越性.

3 引入人的智能的智能自适应控制 (Man's intelligence-introduced intelligent adaptive control)^[2]

由于对智能认识不同, 智能控制至今无确切的统

一定义. 本文提出引入人的智能的智能自适应控制, 就是把人类主要智能特征通过计算机软硬件方法引入到控制系统中, 利用计算机本身具有大存储和快速计算能力, 将智能与自适应控制相结合, 形成新型实用控制方法以解决已有控制理论和方法难以解决的控制难题, 特别要引起注意的, 本文提出的引入人的智能使机器具有人的某些智能, 而不提机器本身产生智能, 机器自身能否产生智能, 目前还看不清楚.

• 引入人的智能主要内容是:

1) 人的思维能力.

人的思维能力, 包括: ① 人的学习、认知、记忆和自适应等能力, 已有数学、物理等理论知识, 工程实际和经验知识; ② 组织规划、分析推理和决策的能力; ③ 对数据定性和定量、模糊和精确的处理能力; ④ 对系统故障诊断处理和系统重构能力.

2) 人类的视觉、感知与识别能力.

3) 人类听觉对声音的识别能力.

4) 人类味觉对口感好坏的识别能力.

5) 人类嗅觉对气味的分辨能力.

6) 人类皮肤对触觉和环境温湿度等感知能力.

• 研究上述人类智能的描述和表达方式及如何引入计算机中.

研究如何描述表达人类上述智能特征, 又如何将上述智能特征引入到计算机中, 使计算机具有人的智能特征.

• 把人类的智能引入计算机中, 又如何将这些智能应用于控制中实现高水平控制.

这个问题很复杂有待进一步研究. 本文仅想通过一个实际的智能控制方法来说明上述问题.

从数学角度研究自适应控制理论和方法可为工程实际中的控制理论和方法提供一定的参考, 从数学角度研究的自适应控制, 其条件是参数估计收敛, 然而工程实际中, 系统开环可能不稳定、对象参数未知, 通过在线参数估计就需要有一个过程, 在未收敛之前系统就会因不稳定而发散, 无法在实际中应用, 要解决这个矛盾, 一种办法是人为离线多次仿真试凑, 如不允许试凑这种自适应控制就无法应用, 这就是外国人提出飞船返回自适应控制不能用的结论, 为解决这个矛盾, 必须从实际对象物理机理出发, 从工程条件出发进行分析, 作者提出的全系数自适应控制方法就是针对上述矛盾, 发现了一个线性连续定常微分方程在采样离散为差分方程过程中的几个客观规律: ① 不管微分方程系数如何, 只要静态增益等于1, 则相应差分方程系数之和等于1; ② 只要采样周期足够小, 对输入进行变换也可使差分方程系数之和趋近于1; ③ 差分方程的系数随其阶次呈杨辉三角形分布, 即每个系数都在一定范围内, 特别是3阶以下, 低阶系统参数范围

更准确. 上述3条为在线参数估计在工程中应用提供了保障. 在上述规律基础上利用特征建模理论又可使高阶对象变为二阶形式, 根据梯度法进行参数估计并在已知参数范围的闭凸集正交投影, 保证参数估计在不满足数学上参数估计收敛的条件下可得到一个近似结果.

又从实际工程控制问题出发对于二阶系统找到了参数估计不收敛, 但只要在一定范围内, 就能保证闭环稳定的一种控制器设计方法, 即黄金分割自适应控制方法. 为提高控制的动、静态性能, 又提出了逻辑积分和逻辑微分等一系列工程实用的控制理论和方法.

上述结果是吸收数学自适应控制思想, 根据工程条件和人的经验, 提出的一种新型控制器设计方法, 从而保证了自适应控制在工程中的成功应用. 如我国飞船返回再入与交会对接自适应控制的成功应用.

保证实际工程控制任务成功是硬道理, 对于复杂对象的控制一般情况下仅有数学算法是不可能完成任务的, 必须引入人的智能(经验), 在飞船交会对接控制中, 在某些情况下人工手动控制比自动控制有更平稳更高精度的控制, 除了人在操作之前学习自动控制全过程并反复操练之外, 还有一个原因, 由于引入了人的视觉系统和大脑的分析判断能力, 克服了机器自动控制测量信息不完全, 真假现象难以判断的困难, 即人的智能引入就可提高系统的控制性能.

在工程实际中的控制理论和方法是以工程实现成功为目标的, 因此其理论除数学算法外必须研究物理机理、客观物理规律、人的智能和一定工程条件下能用的控制理论和方法.

智能控制目前尚没有完整的理论及设计工具, 但从一些工程应用看, 如探月控制中的自主避障、交会对接中人工控制在某些情况下比自动控制精度更高、更平稳等, 尤其目前大量有关智能控制的文章, 可以看出智能控制是控制发展的必然趋势, 它能解决传统控制理论无法解决的问题. 为正确地研究引入人的智能的智能控制, 首先要端正对智能控制的认识, 既不能太理想化, 又不能太随意, 应从实际情况出发按智能化程度、控制对象和控制要求分3个步骤(初级智能控制、中级智能控制和高级智能控制)进行研究. 具体内容见后续文章.

4 建立以计算机为平台的控制理论和方法 (Construct a control theory and method with computer as a platform)

4.1 为什么要建立以计算机为平台的控制理论和方法 (Why it is necessary to construct a control theory and method with computer as a platform)

20世纪60年代形成的控制理论(自动控制原理和现代控制理论)是根据当时控制任务需求和已有物质

基础及其他相关科学技术的发展而提出的.

1) 在当时控制任务主要是针对线性定常、结构和参数已知的被控对象进行简单性能要求的控制, 当时的物质基础是电子和机电部件, 在没有计算机情况下设计控制器, 对于线性定常已知阶次和参数的系统是可以实现有效控制.

2) 随着科学技术和生产的发展, 对控制任务的要求越来越高, 被控对象为时变非线性, 参数未知和强耦合且不确定性情况下, 要求实现高性能及多目标优化的控制. 在现有控制理论的框架下控制器设计和分析遇到了困难, 如劳斯稳定性判据, 李雅普诺夫稳定性判据等, 在工程实际应用中就很难, 计算机技术的发展尚未从根本上改变和促进控制理论的发展尤其是在工程实际中产生新的控制理论和方法的发展, 仅仅把计算机当作一个计算工具, 这也是现在很多控制理论在工程实际中很少应用的一个原因.

3) 计算机技术发展以来, 计算机具有快速运算、逻辑判断、存储记忆和在线仿真的能力, 因此要以计算机作为控制器的物质基础和平台, 就必须重新考虑基于计算机的建模, 参数在线估计, 控制器设计, 系统性能和闭环稳定分析证明等理论和方法.

4.2 以计算机为平台的控制理论和方法研究的主要内容 (Main research subjects of the control theory and method with computer as a platform)

现在已有的计算机控制理论和方法^[4]主要是将原连续信息的控制理论变为数字信息控制理论, 为数字计算机控制系统的实现提供理论依据和支撑, 但尚未从实质上解决基于数学的控制理论在工程应用中的困难.

本文提出的以计算机为平台的控制理论和方法, 除了继续研究和应用现有计算机控制理论和方法之外, 还必须研究如下内容:

1) 工程应用型建模——特征建模.

在第2节中特征建模的理论离开计算机技术和平台是不行的, 特征建模是一种时变形式的模型, 是一种计算机在线实时工程建模方法.

2) 控制律(控制器)设计.

第3节中智能自适应控制方法, 除数学推导外, 必须借助计算机能力引入人的智能, 包括人的经验、逻辑推理、判断、模式识别、仿人的学习与适应性功能.

3) 通过计算机进行控制能力的仿真.

在控制工程实现之前, 必须进行系统结构设计、建模与控制律设计, 其中很重要的是通过仿真首先验证控制要求与控制能力, 复杂的控制系统不能仅靠数学上分析控制量的大小, 在工程上还必须对测量、执行部件及控制能力进行仿真验证.

4) 用计算机仿真进行稳定性证明.

实际复杂控制系统的稳定性问题是一个大问题,但已有的控制理论中关于稳定性证明方法已无能为力,如劳斯判据、李雅普诺夫稳定性证明方法,因为实际工程的情况,满足不了已有稳定性证明的假设条件,现有的稳定性证明理论只是从数学角度来证明,而实际系统是各个物理环节组成,是离散、连续组合,动力学方程不清楚,且有不稳定因素,因此仅靠基于数学的稳定性理论在工程上有很大困难,必须寻找新的办法。

为此,首先要对计算机仿真的稳定性进行定义:在有限输入控制量作用下,经过工作所需的有限时间 t ,系统输出误差 $|\Delta| < \varepsilon_1$,则系统稳定,如果在有限时间内,系统输出误差 $|\Delta| \rightarrow 0$ 称渐近稳定。

计算机仿真方法一般按如下步骤进行:

1) 标称情况下在工作点范围内,用随机打靶方法看整个过程输出是否满足稳定条件;

2) 结合对象物理特性进行“最坏允差组合”仿真,一般情况下人们对于被控对象物理特征基本清楚,影响系统稳定的内部与外部主要因素清楚,包括不同工作点、不同系统结构和参数偏差、不同外界干扰等系统可能出现的最坏情况,进行若干组仿真,如任一种情况满足不了上述稳定性定义,则系统就不能进入工程应用,属不稳定状态,如各次仿真和各次打靶实验均在定义的误差范围内即可应用。

例如 航天航空工程实际控制系统的稳定性证明,现在基本上多用上述方法进行。问题的难点是对时变非线性系统“最坏允差组合”的具体确定,则不是简单的问题,需要对被控对象、控制方法和控制性能情况的具体了解,这一点对于具体工程对象和工程师仍是可以做到的,例如飞船返回再入自适应控制,交会对接控制和整星瞬态热流的控制等,其闭环稳定性证明、控制性能设计和优化等基本就是利用上述方法,仿真通过后,即可“上天”。

当然,关于用计算机仿真证明稳定性的一般理论和方法正在进行深入研究,有关情况今后将发表。

5 小结(Conclusions)

本文的内容是在已发表的论著和未发表的研究成

果基础上,把分散的研究成果从建模、控制器设计和系统性能分析3个方面系统地总结,形成一种能更好地在工程实际控制中应用的新控制理论和方法。本文提出的观点和研究内容是作为学习和纪念钱学森《工程控制论》发表60周年的一些思考,是作者一家之见,还不成熟,大量问题还有待进一步研究。

感谢 本文在写作过程中得到胡军、解永春和孟斌等的帮助,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] TSIENTS H S. *Engineering Cybernetics* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1954.
- [2] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 基于特征模型的智能自适应控制 [M]. 中国科学技术出版社, 2009.
(WU Hongxin, HU Jun, XIE Yongchun. *Characteristic Model Based Intelligent and Adaptive Control* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009.)
- [3] 孟斌, 吴宏鑫. 线性定常系统特征模型的证明 [J]. 中国科学(E辑), 2007, 37(10): 1258 – 1271.
(MENG Bin, WU Hongxin. Proof of the characteristic model for the linear time-invariant systems [J]. Science in China (Series E), 2007, 37(10): 1258 – 1271.)
- [4] 孙增圻. 计算机控制理论及应用 [M]. 清华大学出版社, 2004.
(SUN Zengqi. *Computer Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)

作者简介:

吴宏鑫 (1939–), 男, 中国科学院院士, 1939年生于江苏丹徒, 1965年毕业于清华大学自动控制系。现任北京控制工程研究所研究员, 博士生导师。北京控制工程研究所、中国空间技术研究院和中国航天科技集团公司科技委顾问。

他主要从事航天和工业领域的自适应控制和智能控制理论与应用研究。提出了“全系数自适应控制理论和方法”, 这是一套完整的系统性和实用性很强的自适应控制理论和方法, 对于一类对象在参数估计未收敛到“真值”的过渡过程阶段, 能保证系统闭环稳定且具有良好的性能。在智能控制方面提出了“特征建模”和“黄金分割自适应控制方法”, 为降阶控制器和智能控制器的设计开拓了新的道路, 对航天器控制和工业控制的发展具有重要理论意义和实用价值。到目前为止, 上述理论和方法已在航天控制和工业过程控制等多项实际对象中取得了成功的应用。发表论文70余篇, 专著2部。获国家发明奖二等和三等奖各1项, 部级科技进步奖一等奖1项、二等奖5项。目前研究方向为航天器智能自主控制, E-mail: whx.bice@hotmail.com。