

复杂系统的控制问题 ——试谈控制科学的发展

冯纯伯

(东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

任何一门学科的产生都是由于社会发展的需要,它的发展、演变也都随着时代的变迁而变化. 20 世纪四、五十年代的西方发达国家出现的自动控制学科之所以产生,是由于要用机械设备取代人工操作,以便达到高效、经济、可靠. 雷达和火炮的伺服系统就是一个典型的例子. 由于冷战的需要,20 世纪五、六十年代自动控制理论和技术得到飞速发展. 经过上一世纪的努力,线性控制系统理论可以说已经相当成熟. 然而时代在不断前进,人们的智力活动遍及世界的所有领域. 世界上“系统”无处不在,不论是在自然存在的还是人造的,凡是有“系统”之处,人们都希望用系统学的观点来加以分析和处理. 因此自动控制的领域就大大扩展了,而所面向的处理对象和过去比较就大大的复杂了,这就产生了一个复杂系统的控制问题.

何谓复杂系统? 大型电力系统、综合工业生产系统、社会经济系统、生物系统、人体系统等都是复杂系统. 对于诸多性态差别很大的各类复杂系统恐怕很难给出一个关于复杂系统的统一定义. 近年来国内外学术界对复杂系统和复杂性科学颇为关注,此一领域所涉及的问题实在太大、太广、太多,非本文所能企及. 本文只涉及人造系统,将传统的较为单一的工程系统扩展一步,得到复杂的工业系统. 其“复杂”在于现有的控制理论已不能充分满足有效分析和综合设计的要求,在控制理论和技术方面提出了许多新的课题有待于探讨解决,提出这方面的新课题供大家讨论是本文的目的. 为此我们将“复杂系统”局限在以下范围之内:

1) 多系统的组合.

它们是系统的系统(System of systems),系统之间相互组合且并不固定不变. 这有别于 20 世纪 60 年代提出的大系统理论的概念,后者结构不变. 这类系统很多,网络控制系统(Networked control system)就是一个当前热门研究对象. 现代战斗机上有许多相对独立的控制系统,在战斗中它们之间可能有不

同的协调配合,这显然形成了一个复杂系统.

2) 复杂的时变非线性系统.

一个连续变化的复杂时变和非线性函数理论上要用一个无穷维的级数才能逼近. 若一个时变非线性系统中含有多个不确定的时变、非线性特性,则对这样的系统进行建模、分析和控制都是非常困难的,具有很强的挑战性. 虽然这类系统可能仍只是单输入单输出的,我们仍将它归于复杂系统之列.

以上两类系统共同的主要特征是在于非线性,因为多系统的组合关系也是非线性的,即使各子系统可能都是线性的,非线性仍是复杂之源.

对于上述复杂系统的控制有待解决的新课题很多. 我们仅就以下几个方面提出一些粗浅看法.

1) 系统建模.

和一个线性系统根本不同的是一个时变非线性系统极难精确建模,只有极少数的非线性特性才能用初等函数来描述. 因此,对于复杂时变、非线性系统的分析和控制不能建立在充分精确建模的基础上. 和线性系统不同,以确切模型为依据的分析设计常常并不实际,也常常无法做到,在数学上也有无法克服的困难.

业已证明,一个多结点、多层的反馈神经网络可以逼近任意连续变化的非线性函数,因此人们一度对神经网络用于非线性系统全局建模寄予很大希望. 深入的研究表明这并不现实,这里有两个层次的问题. ①若系统中有多个非线性函数,即使用无穷多元的神经网络可以逼近其中一个非线性函数,当有多个非线性函数存在时应采用什么样的多神经网络集团,如何组成统一的动态系统将是一个很难设想的难题;②即使上列第一个问题有肯定的答案,接着的问题是如何寻找各种神经元的加权系数,这涉及到十分复杂的优化算法问题. 以上所谈,归根结底是一个时变非线性系统的可辨识问题,虽然有些学者作过不少研究,但至今仍是一个大难题.

以上所说表明精确全局建模对于时变非线性系

统是非常困难的,但在局部小范围内建模仍然是可行的,因此分段建模(Piecewise identification)是一种可行办法。

建模的目的是为了分析和控制,而控制也不一定非要有精确的全局模型不可.与线性系统一样,这里也可提出一个 Identification for control 的问题,不过对于非线性应更有自身的问题.事实上从镇定的要求来看,小范围建模也就可以满足要求的了。

许多组合的复杂系统,各子系统通过一定的关系(Relation)结合在一起,这种关系可能是已知逻辑关系,也可能是只能用语言表述的关系.现在 Linguistics computing 已是现实,因此可以想象这类复杂系统也是可用计算机进行分析设计的。

2) 系统分析.

与常规的动态系统相比,复杂系统的动态特征更为复杂、多样,因此有待研究的问题也较多,这里仅就稳定性问题作一些讨论。

稳定性问题是动态系统的基本问题,特别显得重要.研究动态系统稳定性的基本工具是 Lyapunov 函数法,此法提出已有一百多年了.当时提出此法时机械力学处于蓬勃发展时期.机械力学系统一般都有较确切的数学模型,因此 Lyapunov 函数法的应用都与数学模型密切相关. Lyapunov 函数法提出之初讨论的是所谓“未扰动系统”的稳定性,它研究输入为零时系统的初始状态是否能衰减到原点.显然,对于非线性动态系统输入将对系统的动态品质产生本质性的影响,尤其对于非仿射非线性系统,系统输入的影响更是根本性的,因此此时系统的参量和结构都是输入的函数,于是就提出了如何结合系统输入研究系统稳定性的问题. Sontag 和旅美学者王沅教授提出 Input-to-state stability (ISS) 的新概念. ISS 提出之后便引起广泛的注意,并不断有新的发展.复杂动态系统中可能有多个输入,这些输入的分别或同时输入将会产生十分复杂的动态特征.今以模型参考自适应控制为例说明其复杂性.线性系统模型参考自适应控制的原理框图如图 1 所示。

图中 $M(s)$ 为参考模型, $P(s)$ 为被控对象,通过 Observer 型网络提供的信号与误差信号 $x - y$ 组成参数自适应回路,它是非线性的.若 $u \mapsto x$ 因此为严格无源的,则在 $v = 0$ 的情况下此系统是渐近稳定的.当 $v \neq 0$ 时系统特性将受 v 的影响, Athans 通过仿真和分析说明存在某种 v , 使此系统发散.此例充分说明输入对系统稳定性的严重影响.复杂动态系统中常有多个输入存在,这些输入将有相互影

响,这就提出一个输入轨线对系统动态品质的影响问题,因此有必要将稳定性问题和输入函数结合在一起进行研究.耗散理论中虽然直接引入了输入的作用,但只说明原理,尚缺乏具体结果。

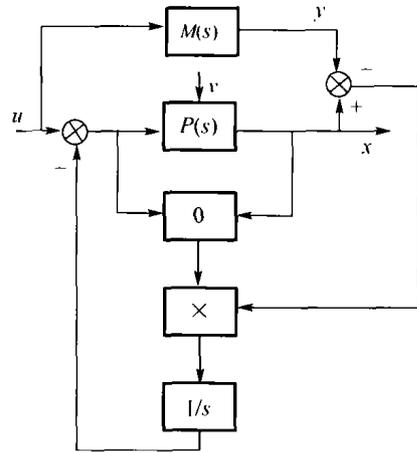


图 1 模型参考自适应控制系统原理框图

复杂系统的稳定性问题还有另一种有工程实际意义的问题:有时暂时失去稳定性并非就导致灾难,仍有可能通过控制得到挽救.例如电力系统因为事故暂时失去同步,但若能通过某种控制使它迅速恢复同步,仍可正常运行,这可能比强制性的切机或解列更为有利.现代战斗机在大机动时其攻角可能很大,在一般情况下可能导致机毁人亡,但若控制得当,则仍可能回复常态飞行.以上所述表明失稳并不等同于灾难,什么情况下才导致不可复原,这是一个新的课题。

综上所述,对复杂系统提出了一个 Input-dependent stability 的问题,值得研究.稳定性概念需要大大丰富,看来稳定性和可控性结合在一起进行研究也是必要的,而当需要结合输入来研究稳定形式问题就大为复杂了。

3) 系统综合.

复杂系统的综合设计当然应该充分继承现有的控制理论成果.但考虑到复杂系统的种类繁多,彼此间有相当大的差别,因此充分考虑各类复杂系统的个性是必要的,宜对不同类型的问题研究对应的方法.这里仅提出以下两个问题,供讨论。

① 多系统组合的优化设计.

设有以下系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1(x) + B_1(x)u_1 + B_2(x)u_2, \\ \dot{x}_2 = A_2(x) + C_1(x)u_1 + C_2(x)u_2, \\ x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}, x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}, u_1 \in \mathbb{R}^{l_1}, u_2 \in \mathbb{R}^{l_2}. \end{cases}$$

设要求研究此系统在以下二次型支付函数

$$J_1(u_1, u_2) = \frac{1}{2} x^T(t_f) K_1 x(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^T Q_1 x + u^T R_1 u) dt,$$

$$J_2(u_1, u_2) = \frac{1}{2} x^T(t_f) K_2 x(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^T Q_2 x + u^T R_2 u) dt,$$

$$x = [x_1^T \quad x_2^T], \quad u = [u_1^T \quad u_2^T]$$

的优化设计问题. 如果 A_1 和 A_2 是一个系统, 同时输入两个不同的信号, 这就形成了微分对策 (Differential game) 问题, 对此以最优控制理论为基础取得了许多成果. 如果 A_1 和 A_2 不是一个系统, 则必须考虑两个不同动态系统的动态特性. 这就形成了一类不同于微分对策的新问题, 不妨称之为动态对策 (Dynamic game). 这一问题有很强的应用背景, 战斗机空中格斗就是一例. 如果不考虑双方战机的动态特性, 只考虑相对的运动轨迹, 即只考虑 Kinematics, 不考虑 Dynamics, 这样来决定追踪轨线就有所谓的前置点法、比例导引法等的导引规律. 这样得到的结果是十分粗糙的. 显然两系统的动态特性将产生很大的影响. 无论是两机协调 (零和) 或对抗 (非零和) 都必须充分考虑两系统各自的动态. 因此 Dynamic game theory 将含有许多有待解决的问题.

② 智能控制.

复杂系统很难精确建模, 对此类系统的设计因此不能过多地建立在严密解析的基础之上. 因此用智能方法进行控制系统的设计就显得尤为重要.

智能控制并没有类似于最优控制那样严密、确切的理论, 它常由基于经验、推理、直观等一些规则 (Rule) 所组成. 对这些规则的建立当然也需要有科学的推理. 如何在控制过程中不断完善控制, 即学习控制, 可成为解决问题的一种有力的方法.

智能控制的设想很多, 若能结合具体系统的特点加以发展当可有许多创造.

复杂系统控制有待解决的新问题很多, 本文不能详述, 以上所列挂一漏万, 只是个人的管见, 仅供参考.

后记:

《控制理论与应用》创刊以来已经走过了 20 个年头, 在全国同行的共同努力下为发展我国的自动控制学科、赶超世界水平做出了重要贡献, 愿本刊与时俱进, 为进一步发展我国特色工作而做出更大贡献. 借机仅以此文提供同行讨论, 若能起到抛砖引玉的作用, 本人将深感荣幸.