

控制科学——与需俱进的科学

黄琳, 彭中兴, 王金枝

北京大学工学院, 北京 100871

摘要 通过介绍控制科学早期及其诸多分支的发展历史,说明了控制科学是一门技术科学,它研究的内容应该是由需求推动的。然后,结合当前的工程需求提出了一些新的理论问题,其中包括解耦问题、冗余控制问题以及系统群的控制问题。

关键词 控制科学;解耦控制;输入冗余;系统群控制

中图分类号 O231

文献标识码 A

doi 10.3984/j.issn.1000-7857.2011.17.011

Control Science: Inspired by Applications

HUANG Lin, PENG Zhongxing, WANG Jinzhi

College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Based on a review about the historical development of control science, it is explained that control science ought to be a technical science, and is inspired by engineering applications. Then, several new theoretical topics including decoupled control, input redundancy, and multi-system control are presented to illustrate the demands generated from engineering.

Keywords control science; decoupled control; input redundancy; multi-system control

0 引言

了解控制科学进步的主要推动力是所有从事控制科学研究的学者们需要关心的一个问题。纯理论研究可以作为学科发展的一个推动力,但是,控制科学本身属于技术科学,推动其发展的主要动力应该是国家或人类发展的需求。中国目前正处于一个非常好的发展时期,需要立足于国家需求提炼科学技术问题来做,这也是大多数控制科学工作者的责任。

本文主要涉及以下3个方面:控制科学形成前的简史;以过去控制科学诸分支的发展历史谈决定控制领域发展的需求;最后结合当前需求提出几个新问题。

1 控制理论形成之前的漫长历史时期

在工业革命之前的漫长时期里,控制的思想是否已经存在?答案虽是肯定的,但不争的事实是当时它还并未形成一门科学。控制成为一门科学的出现需要具备一定的条件,所以在20世纪之前的漫长历史时期里,虽然部分控制思想以及一些初级的控制技术已经形成并得到应用,但当时的控制仍不能被称为一门科学。

中国古代的一种计时机构——铜壶滴漏应该是在中国

最早体现控制思想的机构。传说这一计时装置出现在轩辕黄帝之时,西汉的出土文物中就包括了单壶,并且有文字记载描述了东汉张衡制作的复壶,而后又出现了将秤与漏壶结合而成的水秤(图1^[1]),这些装置体现了两个基本的控制思想:反馈与补偿,可以说具有现代控制观念的萌芽。对于计时工具,当时的生产力水平只要求每个刻度大致相当于现在的7min,但是在每个刻度内指针是否运动均匀却没有要求。如果要求指针以每刻度7min作匀速运动的话,那在当时会是一项很难实现的技术。然而,当时只是要求每个小刻度近似地代表7min,因而不涉及运动本身核心问题的讨论,也就没有必要考虑动态,所以这种具备初等要求的装置还不可能呼唤控制科学的出现。古代人有很多想法,但并不代表这些想法就已经可以形成一门科学。一门科学是指在一个领域内经过推演、实证或归纳形成具有一定系统性的学问,需要经受时间与实际的考验。否则,只能称之为一种想法,经验或知识。

1868年,英国物理学家Maxwell发表的论文——《论调节器》^[2]讨论了蒸汽机的离心调速器(图2)和机械钟表的擒纵机构,虽然它被认为是第一篇有关具有控制器系统的文章,但也还不代表控制科学的形成。蒸汽机最早由Newcomen发明,

收稿日期:2011-04-21;修回日期:2011-05-03

作者简介:黄琳(中国科协所属全国学会个人会员登记号:S030000051H,S030102006M),中国科学院院士,教授,研究方向为系统稳定性与控制理论,电子邮箱:hl35hj75@pku.edu.cn

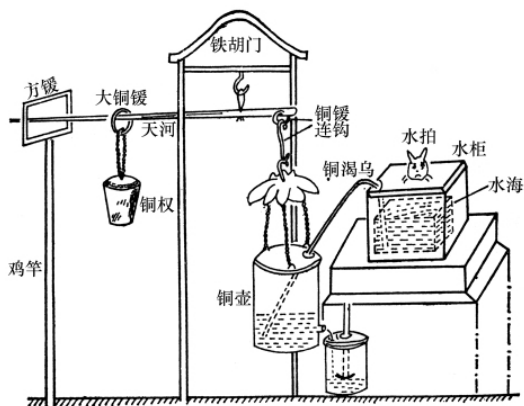


图 1 水秤推想图

Fig. 1 Imagined illustration of an ancient Chinese timing system

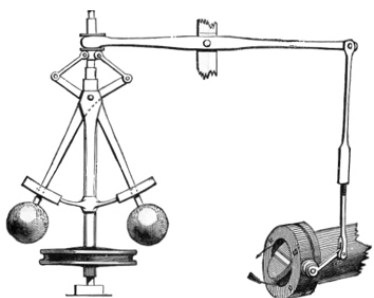


图 2 蒸汽机离心调速器

Fig. 2 Centrifugal "fly ball" governor of steam engine

并被用于矿井抽水, 由于对抽水过程的均匀性没有什么要求, 所以不需要精确控制蒸汽机转速。后来, 瓦特发明了离心调节器并将其应用于蒸汽机的转速调节, 使输出转速能够跟随给定转速并保持稳定。Maxwell 的文章正是分析了这种调速装置, 但当时这只是一个孤立事件并未形成气候, 自然也不能说是已形成控制科学。

控制科学是研究一个系统在安装了控制器之后是否能够自动地按人们的要求运行的科学, 比如控制汽轮机以 3000r/min 的转速转动, 以保证发电质量。另外, 旋转机械都必须被严格控制在一个临界转速之下, 以防止旋转轴出现断裂等危险情况。要保持恒速转动就要想到偏离了恒速怎么办, 离开和回到恒速本身就是一个动态过程, 因此微积分作为研究变化或动态的基本工具, 在控制科学中不可或缺。控制科学是建立在输入输出信息传递的基础之上的, 所以需要信息处理的学问, Fourier 分析和 Laplace 变换的发展为信号的描述和在系统中的传输提供了研究工具, 这些是控制科学得以产生的知识条件。同时, 工业界强大的需求, 特别是机电工业的发展, 使机电设备在众多工业部门得到广泛应用, 需要进行自动控制的设备得到了空前发展。一方面有大的需求, 另一方面又有了一个坚实的知识基础, 在这种情况下就产生了经典控制理论。

2 需求推动的近现代控制科学的发展

2.1 简单控制系统时期

下面讨论控制科学在简单控制系统时期的情况。所谓简单控制系统就是指单输入单输出系统, 也就是系统的被控制变量和控制作用输入都只有一个。控制科学的研究必须考虑以下几个问题。

(1) 控制对象, 告诉你控制什么东西, 控制哪些变量, 比如一个飞机, 人们希望它不要颠簸, 这要控制俯仰角, 保持航向要控制偏航角等。

(2) 任何实际控制系统的控制对象都是一个真实的系统, 必须遵守客观存在的实际约束条件, 如飞行器使用的舵机, 其偏转范围有限; 飞行器的高速转弯需要大的拐弯半径, 否则过载就会非常大, 过载一大, 一些结构就受不了, 所以必须要有过载限制。

(3) 给定一个要求, 即究竟想干什么, 是要被控变量追踪一个东西, 还是保持恒值, 或者是满足其他要求。

给定一个控制对象、一些约束条件和一些要求, 这就产生能不能做和怎么做两个问题。能做只是从理论上回答了问题, 不一定代表真的能够做出来, 特别在数学上, 好多问题存在性的证明并不意味着解已经找出来了。翻开现代控制理论的书, 会发现大量概念: 可控的、可观的、可解耦的、可镇定的等, 前面都有个“可”字, 有些书用“能”字。这都是关于能不能做这个概念, 至于具体控制器是怎么实现的, 则是怎么做的问题。

图 3 是控制系统的框架, 描述的是输入与输出以及它们之间的关系。输入是指进来的信息, 但是进来的信息并不都是想要的, 一个是期望进来的, 如控制作用; 另一个是干扰, 干扰是不可避免的, 这是客观实际和纯粹化、理想化之间的区别。按马克思的说法, 物理学的研究是纯化了的, 但控制不能纯粹, 因为它总是需要面对实际系统。再看输出, 测量的输出是指人们通过测量手段可以得到的输出信息, 而且是混有测量噪声的, 未必是期望的输出, 根据测量输出决定输入如何加入使控制效果更好是需要做的。这就构成了控制的框架。

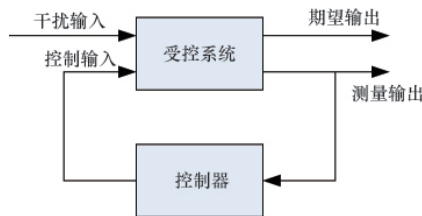


图 3 控制系统的组成

Fig. 3 Description of a control system

描述一个定常线性控制系统的数学模型有两种形式, 首先是建立在复数域上的传递函数模型, 它最直接地描述了系统输入与输出的关系, 有明确的物理意义。控制系统中的信号可以表示为不同频率谐波信号的合成, 控制系统的频率特性反映谐波信号作用下系统响应的性质, 它可以通过实验得

到。应用频率特性研究线性系统的经典方法称为频域分析法,这是一种比较有生命力的方法。基于频域方法的调节原理在工程上得到了广泛应用,它考虑单个控制变量,根据开环系统的频率特性曲线进行控制器设计,目的是使闭环系统稳定,并使期望输出 y_e 满足过渡过程时间 T 和超调量 ε 的要求(图4),过去多是建立在很多图表之上的比较工程化的方法,现在均借助于计算机实现。由于工程上给出的超调量和过渡过程时间均十分具体,这样在数学上就不可能推导出严格的理论结果。这实际上反映了一般化意义下严格的数学理论与工程上具体的要求,从知识结构到研究方法上都存在本质差异。经典控制理论的代表人物 Nyquist 于 20 世纪 30 年代在 Bell 实验室研究了反馈放大器,建立了 Nyquist 频率域稳定性判据^[3-5],即用开环系统的频率特性曲线判定闭环系统的稳定性,后来经 Bode 将其对数化并成功应用于控制器设计。另外,Evans 基于开环到闭环传递函数极点的变化创立了基于图形的根轨迹方法,简单情况是指当开环系统某一参数(通常用开环增益)从 0 变化到 $+\infty$ 时,闭环系统传递函数极点在复平面上变化的轨迹^[6-8]。根轨迹方法不仅可以用于进行线性定常系统的稳定性分析,还可以用于控制器设计,它在工程实践中获得了广泛应用。值得一提的是,钱学森先生对根轨迹方法的发展也做出了贡献。除了与 Evans 共同发表的论文之外,钱先生还发展了“根轨迹的流体力学比拟”^[9],使得根轨迹图有了非常明确的物理意义,他把表示根轨迹的方程看作是完全可以压缩流体的一个二维无旋运动的复势函数,其流动由 n 个单位强度的源点(即系统的极点)和 m 个单位强度的汇点(即系统的零点)构成。流体力学比拟有助于进行系统的改进以获得更好的性能。

频率特性方法与根轨迹方法都是基于传递函数的方法,它们之所以有很强生命力就在于其物理或工程的概念清楚且便于应用。在这两种方法的基础上建立起来的关于控制系统的校正理论一直是控制器设计的主导方法,后来借助于计算机技术发展,便成为了现代 PID (Proportional-Integral-Derivative) 方法。直至今日,在各类工程应用中,该方法仍然是最主要的控制器设计方法。

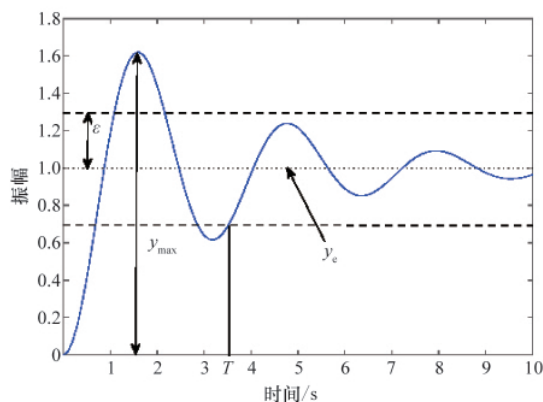


图4 单输入单输出系统响应

Fig. 4 Response of a single-input single-output system

另一种描述定常线性控制系统的数学模型为建立在时间域基础上的状态空间模型,其对应的是状态空间方法,并以现代数学特别是线性代数为主要研究手段。由于有严格的、成套的数学理论支撑,这一方法的特点是概念的抽象化、描述与推演的数学化、结论的一般化,因此吸引了大量数学家的兴趣,但是也失去了与工程实际的直接联系。状态空间方法是现代控制理论形成的标志之一,然而只有在数值线性代数及其软件包迅速发展之后,状态空间方法才得以在设计控制器方面发挥其应有的作用。

2.2 滤波及预测理论

信号真实性的要求推动了滤波和预测的理论和方法的建立与发展,滤波最早由世界知名数学家 Wiener^[10]提出,他原来是研究调和分析的,受雷达追踪需求的推动研究这个问题。滤波是将进来的带有噪声的信号,从概率统计的角度,挑选其中有用的信号,过滤噪声。预测则是根据现有的混有噪声的信号预测以后某时间有用的信号值。Wiener 假定信号是平稳和各态历经的,系统是线性时不变的,他的方法是将时域的信号转化到频域,利用系统的频域描述得到数学上漂亮的结果。由于这是建立在满足一些假定条件基础上得出的理论结果,而实际过程中却未必能满足这些条件,为了解决这个问题,Kalman^[11]提出了 Kalman 滤波,这一方法不仅在一定假定条件下理论上是严格的,从方法上可以直接进行数值计算,而且便于扩展到不满足严格理论条件下进行数值计算,从而更有生命力。在 20 世纪 60 年代美国的阿波罗登月计划中,Kalman 滤波器起到了非常重要的作用^[12]。一方面,它是麻省理工学院设计的阿波罗飞船机载导航制导系统不可或缺的一部分,用于路径预测与控制;另一方面,在前期仿真过程中,Kalman 滤波器被用来确定惯性导航系统需要多少精度才能够满足登月计划的要求等。Kalman 在这个领域做出了很大贡献,并推动了滤波的发展,难怪当他 1981 年来访中国时,就讲“现在大家都知道有牛顿力学,我想将来大家也都会知道有 Kalman 滤波”。

2.3 非线性系统

1944 年,苏联科学家 Lur'e 和 Postnikov^[13]从许多实际的控制系统出发,其中包括飞机自动驾驶仪的稳定性问题,提出了处理一类非线性控制系统稳定性的方法,或被称为非线性孤立方法。其思想是将系统的非线性部分孤立出来,将其看成反馈部分使系统具有闭环的形式,这类系统可统称为 Lur'e 系统。针对这类系统,Lur'e 和 Postnikov 提出了绝对稳定性的概念^[13],指出在对非线性的具体特性不甚了解的情况下,整个系统的绝对稳定性仍然可以通过线性部分的特性和非线性函数约束条件的参数确定,从而将稳定性理论应用到 Lur'e 系统上。实际中的许多系统可以表示成 Lur'e 这种典型的非线性系统形式,如蔡氏电路、受控系统旋转机械、同步电机以及具有类摆性质的装置等。在研究绝对稳定性方面,一个里程碑式的结果是 Popov^[14]给出的频域方法,至此时域和频域两类方法的研究互相争论与促进,有力地推动了控

制科学的进展。除了系统的绝对稳定性理论外, Leonov 等对 Lur'e 型多平衡点非线性系统的整体性质, 包括 Lagrange 稳定性、双态性、类梯度性质、第一和第二类周期解、同宿轨及异宿轨等做了分析研究, 得到了一系列用频域不等式刻画的分析结果^[15]。近年来这类系统的鲁棒性分析和控制问题得到了进一步发展, 可见文献[16]及其参考文献。

20 世纪 70 年代后期开始的非线性控制的微分几何方法, 经过 30 多年的发展已经形成了系统的理论, 并在卫星姿态控制、卫星编队及机器人控制等方面获得了成功应用。其基本思想是利用微分同胚变换与反馈将非线性系统变换成线性时不变系统, 然后用已有的线性系统的理论与方法进行研究。哈佛大学 Brockett^[17]给出了可以进行微分同胚变换、存在连续可微镇定器的 3 个必要条件, 然而一些重要的非线性系统如某些具非完整约束的系统和欠驱动系统都被证明并不能满足这些条件。而这些系统又是运动体控制中常碰到的, 因此对这类系统控制研究的突破是当务之急。系统的本质非线性现象, 例如自振与混沌, 是线性时不变系统中不可能出现的物理过程, 因而用微分几何方法研究这类本质非线性特征就遇到了很大困难。而且有些非线性特性本身并不解析, 例如干摩擦, 继电器特性, 磁滞回线(图 5)等, 这些非线性特性一方面常常是自振产生的根源, 另一方面它们并不可微, 无法建立微分同胚变换, 研究含有这类非线性特性的系统中出现的自振现象就必须寻求新的方法。从物理上分析可以设想在系统中存在一个周期过程, 考虑它的主谐波为一个简谐振动, 并且在通过系统线性部分时其幅值与相位的变化可以通过线性部分的频率特性 $G(j\omega)$ 刻画, 它是实变量频率 ω 的复数值函数, 可以在复数平面上用一条曲线表示, 当这一谐波经过非线性元件时其对应的变化可用实变量振幅的复增益刻画, 如果用其逆 $N^{-1}(a)$ 刻画, 则为复数平面上的另一条曲线(图 6)^[18]。在线性系统具有低通滤波特性时, 这两条曲线的交点处所对应的振幅与频率刚好对应系统自振的振幅与频率, 其自振的稳定性也可以通过类似 Nyquist 判据判断。这是一个物理概念十分清晰的方法, 在实际应用上很方便也比较有效, 常称为谐波平衡法或描述函数法, 目前只有当非线性函数充分可微时才有数学证明, 而这又常不能满足工程的需要。这也表明数学上能严格证明的常常与复杂的工程实际需求相距甚远。与这一方法类似的是非线性振动中的渐近方法, 苏联的科学家们运用这一方法成功地研究了包括核工程在内的很多工程装置中出现的自振现象。

2.4 分布参数系统控制

无论是美国还是中国, 在研究导弹的初期都曾经出现过因忽略弹体弹性而导致发射失败事故。由于导弹是一个细长而中空的非刚性圆柱体, 如果研究时只是将其当作一个刚体对待, 则其发射后产生的弹性振动极有可能导致导弹失稳乃至断裂而使发射失败。为了解决这个问题, 1962 年, 在颐和园龙王庙召开的一次会议上, 钱学森先生就此问题讨论了怎样将导弹看成一个弹性梁, 并研究了弹性梁如何控制, 从此

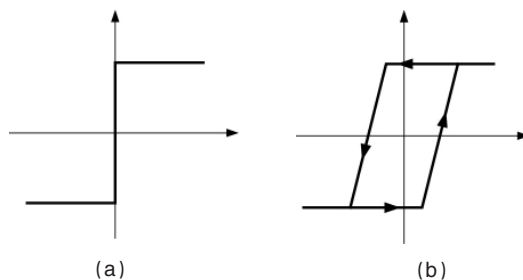


图 5 继电器特性(a)与磁滞回线(b)

Fig. 5 Relay characteristics (a) and hysteresis loop (b)

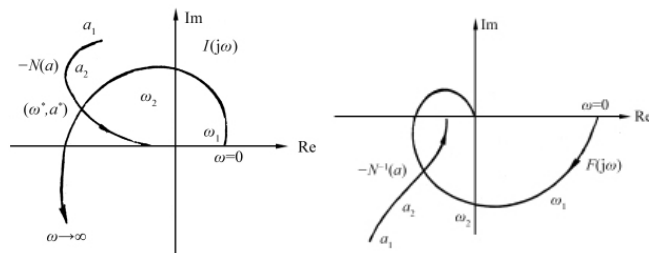


图 6 非线性谐波平衡法

Fig. 6 Nonlinear harmonic method

开始了国内在弹性体控制继而在分布参数系统控制理论方面的研究。现在弹性梁控制研究得比较多, 用得最多的方法是振型分析方法, 弹性梁振动时理论上应有无穷多个频率, 但是因为弹性体高频振动对应的振幅都很小, 因此只有最低的几个频率才是研究者最关心的, 例如工程上可选前 3 个振型所对应的系统近似代替本质上无穷维的弹性体系统。根据低阶系统设计的控制器实际上是安装在了本质上是无穷维的弹性体上, 于是传感器测量到的信息除前 3 个振型对应的信息外还有高频信息, 类似地, 作动器对梁的作用除影响前 3 个振型外也必然激励高频振型, 这类问题常被称为输入与输出的溢出问题, 且至今仍未得到解决。

弹性体系统由于描述其状态的不是有限维空间的点, 而是无穷维空间的“点”, 即函数, 这是一种具分布特征的“点”, 这一类系统统称为分布参数系统, 有很多实际问题都用这种系统刻画, 除弹性体外, 例如系统具有时滞和后效的问题, 飞行器结构隐身问题, 计算机芯片散热问题等, 这些问题解决起来都很难, 难点在于解决的答案应该利于对应控制器的设计。分布参数系统研究中的高深理论与解决现有工程问题的方法之间几乎没什么关系, 而真正解决问题却需要数学、控制工程、计算机和物理特别是力学诸方面合作才能奏效。

20 世纪 80 年代发展起来的智能材料与智能结构在宇航、国防、建筑、交通及医学等方面获得了广泛应用。它是以仿生学、人工智能以及控制系统为指导, 将传感器、驱动器以及有关信号处理和控制电路集成在材料结构中, 通过热、光、电、磁等激励和控制, 使其不仅具有承受载荷的能力, 还具有传感、信息处理和执行等多种功能的材料结构系统, 它能够实现自检测、自诊断、自监测、自校正、部分自修复以及自适应等多种功能。磁流变弹性体就是一种刚度、阻尼可控的新

型智能材料,它的力学性能可由外加磁场控制。现在智能材料与智能结构的研究催生出一些具新性能的材料与结构,而如何用分布参数理论阐明反而显得不足。

2.5 最优控制

在研究导弹、航空、航天和航海等的导航、制导及控制问题中归纳和提炼出一类按某种性能指标取最优的控制问题,如飞行器拦截问题要求整个拦截时间尽量短,燃料消耗尽量少,这个控制问题归纳为设计发动机的推力和推力方向矢量使过渡时间和燃料消耗的混合指标最小的最优控制问题^[9]。类似的许多工程问题推动了最优控制理论的产生和发展,也使最优控制成为现代控制理论的一个重要分支。最优控制在数学上可归结为求解一类带有约束条件的泛函极值问题,属于变分学的范畴。工程中所遇到的控制约束多为闭集,这正是现代变分学理论所要解决的问题,其中最常用的方法就是苏联科学家 Pontryagin 等^[20]于 1958 年创立的极大值原理和美国学者 Bellman^[21]于 1957 年创立的动态规划方法。动态规划是基于 Bellman 的最优性原理而建立起来的一类特殊的非线性偏微分方程,即 Bellman 方程。最优性原理可归结为一个基本的递推关系式,从而使决策过程连续转移,将一个多级决策过程化为多个单级决策过程。必须指出,电子计算机在最优控制的发展中起到了巨大的作用,它使得应用递归算法求解最优控制问题成为现实。最优控制与计算机的结合,不仅在空天领域发挥了有效作用,在许多民用工业,如汽车、化工等领域也有广泛的应用。

工程实践中的一些问题常可归结为线性二次型最优调节器问题^[14-5&19],它是针对线性系统,设计一个控制律,使二次型性能指标 $J(u) = \frac{1}{2} x^T(t_f) F x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) \cdot Ru(t)] dt$ 最小。使系统的输出尽量跟踪上一个已知信号的跟踪问题就可转化为上述二次型最优问题求解,此时性能指标中的状态 $x(t)$ 可用跟踪误差 $e(t)$ 代替,要求二次指标小,反映了跟踪误差小和能量省的要求^[19]。

2.6 时变及不确定性系统

将一个受控对象在时间进程中看作不变,是一种理想化的假设。系统随时间变化,一类是确定的,而另一类是不确定的。即使对于确定的线性时变系统的控制问题,也不存在有效解决方法。工程上常借用常系数线性系统的做法,认为对应的状态矩阵 $A(t)$ 的特征值都具负实部,系统就能稳定,并称之为冻结系数法,但很容易举出反例说明这并不正确,只有当 $A(t)$ 具备一些特殊条件时,这一方法才正确。对时变系统的稳定性问题,由于系统的时变特点在稳定性的概念上出现了各种反映不同性质的定义,虽然 Lyapunov 方法在理论上是严谨的,并可以证明用以判断不同稳定性的 Lyapunov 函数几乎都是存在的,但这种存在却依赖于系统的基本解矩阵,而这很难求解的。对于高速飞行器的机动飞行来说,强时变性是摆脱不了的问题,用什么方法解决至今仍是严重问题。

对于具不确定性的系统,有两类解决办法,即鲁棒控制

与自适应控制。前者考虑的不确定性有两类:非结构不确定性主要推动了 H_∞ 控制,一开始 H_∞ 控制是建立在 Hardy 空间上,尽管原始提法有很好的工程意义,但由于缺乏合适的算法解决控制器设计问题,在 20 世纪 80 年代中期几乎停滞不前,自从 Doyle 等^[22]将该问题的求解归结为两个 Riccati 方程的求解,由于有成熟的算法及软件支持而取得新的发展,并成为鲁棒控制的主流。与之同时发展起来的以讨论多项式族根为基础的参数不确定性系统理论,其开创性工作是 1978 年 Kharitonov 提出的稳定多项式族的四顶点检验定理^[23]和 1987 年由 Bartlett, Hollot 和 Huang 给出的棱边定理^[24],尽管有这些漂亮的结果,但从解决控制器设计考虑,其前景却不太幸运,即使讨论一个区间对象同时镇定的控制器设计问题,在存在性的判断上就有可能是非有理判断,而在设计计算上也常碰到难办的非凸规划。由于有效计算工具的缺乏而显得进展乏力。这也表明当今一个好的理论若能有计算机的算法支撑就一定会有生命力,因为只有这样才能满足实际需求。无论是 H_∞ 理论还是多项式族的方法,究其适用范围,在讨论系统的不确定性时,一般也都假定它未知但不是时变的。

处理不确定性的第二个办法是自适应控制。自适应控制主要有两类,一类是基于随机过程和数理统计的随机控制,包括参数估计,系统辨识和控制。另一类是设定一个模型参考系统,设计控制器的目的是使受控的系统仿照参考系统运作。这两类自适应控制均取得了很好应用。但认识系统和参数的时间尺度和系统变化的时间尺度在什么条件下可以使该方法在理论上一定奏效,仍然是一个开问题。这是因为例如参数估计的结果等往往建立在时间趋于无穷的基础上。

2.7 离散事件动态系统

20 世纪 80 年代前后,随着计算机技术、信息技术的发展和应用,在通信、制造、军事指挥系统等领域出现了一些复杂的人为系统,如大规模计算机网络、制造系统中的计划调度等,它们没有统一的模型,不能用微分方程描述。离散事件动态系统 (DEDS) 理论正是基于这样的需求而形成和发展起来的控制科学中的一个重要研究分支。DEDS 最初由哈佛大学的何毓琦教授提出^[25],是指由离散事件按照一定的运行规则相互作用而导致系统状态演化的一类动态系统。离散事件的建模研究可分为逻辑层次、时间层次和统计性能层次 3 大类。具体的建模与分析的方法多种多样,如有限递归过程、极大极小代数、排队网络、Petri 网、自动机语言、摄动分析、马氏链方法等。方法众多表现出问题重要而又困难,同控制科学的其他分支类似,凡是有实际需求且能紧密结合现代计算机的就会有生命力。例如摄动法,由于这种方法本质上是仿照时间域上对时间求导数的思想对离散事件过程求摄动,其与大规模使用计算机相联系,随着计算机能力的飞速提高而具有很强的生命力。又由于求导数和计算摄动一直是优化计算的核心,这一方法就自然地发展为一种非传统的优化方法并与随机学习过程联系起来^[26]。

DEDS 的控制问题的研究还很少见,远未达到对通常动

力学系统进行控制的水平,目前只能做到通过禁止某些事件的出现,使系统按所期望的方式运行,其原则类似于通常的控制系统。DEDS 相关的理论可参见文献[27]—[30]。

在实际系统中,DEDS 经常与通常的动力学系统组合在一起成为一类混杂系统(hybrid system)。这类系统的分析目前还缺少有效的理论工具,更不用说控制,其常为一种分层结构,即下层是一些通常的动力学系统而上层由一个 DEDS 进行统管。这类系统虽还无法建立严格的理论,但却可以借助计算机进行研究。

3 控制科学发展的几个新问题

控制科学发展的新问题来自两个方面:一方面是原有框架下的新问题,即原有研究问题的思想、理论与方法已不再适用,需要提出新的思想、理论与方法;另一方面是完全新的对象和需要建立新的理论框架的问题。

3.1 复杂对象的解耦问题

19—20 世纪自然科学(特别是物理学)取得的巨大进展从哲学思想上看应归功于还原论哲学,所谓还原论,通俗一点讲就是大事化小,复杂化简单。这种思想在控制领域也有应用,如在 20 世纪五六十年代,飞机的驾驶仪设计总是把航向、纵向和侧滚分开,这是一种简化的考虑,因为飞机在大气层中飞行,上述 3 通道的运动实际上是互相影响的,即存在耦合,这种分开设计控制器的做法是基于互相影响很小的假定,是一种简单化,这种做法常称为分散控制。理论上讲,需要研究这种简化做法的合理性,Wang 与 Davison 在 20 世纪 70 年代初就指出:对于常系数线性系统来说,分散控制的固定模是存在的,即不管采用任何的分散控制反馈,闭环系统的一些特征值是无法改变的。以由两个子系统组成的系统为例,其动态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = Ax + Bu$$

如果系统可控,则可以用全状态反馈任意配置闭环系统的极点,即

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

而对于分散控制的系统,其反馈矩阵只能是块对角矩阵,即

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 x_1 \\ K_2 x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

显然,这只是全状态反馈矩阵的特殊情形,因此系统虽然可控但不能保证能按需要任意改变闭环特征值。设全状态反馈和分散控制反馈的集合分别记为

$$\kappa = \left\{ \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \right\}, \hat{\kappa} = \left\{ \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \right\} \subset \kappa$$

容易看出,在集合 κ 中可实现的事就未必能在集合 $\hat{\kappa}$ 中实现。 A 的特征值中不能用 $\hat{\kappa}$ 中的元改变的叫分散控制固定模。

上述耦合效应体现了系统状态之间的耦合,而一些特殊运动体的耦合效应则表现在控制作用上,例如高超声速飞行器,还以上述飞机的 3 个控制通道为例,则会发现通道甲的控制器在通道乙上的作用比通道乙的控制器在自身通道上的作用更强,这种耦合效应在方程上主要体现为控制矩阵 B 的非对角块元的大小。

解决上述两类耦合效应带来的问题主要有两种途径:能解耦应该解耦,但必须研究一个系统可解耦的条件以减少盲目性;不能解耦则必须采用协调控制,为了有效地设计协调控制器必须弄清楚耦合的结构特征以提高针对性,例如高超声速飞行器控制作用的耦合效应就常常是不对称的。

上述解耦基本上是方法论范畴的,还有一种解耦则是目的性的。例如钱学森先生在《工程控制论》^[9]第 5 章中讨论的“不互相影响的控制”就是这样一个问题,当时研究的是喷气涡轮发动机,除了主燃烧室以外还有辅助燃烧室,他希望转速和两个燃烧室喷油速率能互不影响,因此设计了一个控制器,加上控制器后闭环系统变成对角型的,闭合后就不再互相影响了。这从发动机来讲是有用的。

3.2 冗余控制与控制分配

20 世纪 70 年代加拿大的 Wonham 教授有一个著名的定理^[31]:

定理 给定 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, 则存在反馈 $F \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 与 $b \in \mathbb{R}(B) \subset \mathbb{R}^n$, 使得

$$\langle A | \mathbb{R}(B) \rangle = \langle A + BF | \mathbb{R}(b) \rangle$$

其中, $\langle A | \mathbb{R}(B) \rangle = \mathbb{R}(B, AB, \dots, A^{n-1}B)$ 。

这个定理说明,对于多输入系统一定可用一个反馈,和在系统控制矩阵所张成的空间里挑出一维向量构造一个新的单输入系统,使新的单输入系统的可控子空间和原来多输入系统的可控子空间一致,从而在系统可镇定与可极点配置上,一个多输入系统和由它构造的一个单输入系统在一定意义下是等价的。由于控制器设计的目的首先是保证系统的稳定性,所以在该结果出来之后,控制理论的研究就特别关注单输入系统。

以两级倒立摆为例,控制界感兴趣的是只允许摆的最下端有一个作动器,例如小车或一个电机,而中间的关节不允许有作动器,实际上这样的系统的控制能力是十分虚弱的,稍有一点不大的干扰就足以使其倒立的平衡状态被破坏。而对于实际的工程应用,只要有可能就应该在中间关节安装上诸如电动机等的作动器,以实现更好的控制效果(图 7)。人的行走中,在脚落地后腿的运动相当于两节倒立摆,难以想象膝关节完全没有力的腿能实现走路。

现代飞行器为了获得好的飞行品质,作动器的个数已远超过其自由度的个数,因此成为一种过驱动控制,例如,返回式飞船的作动器就有几十个,再例如,近空间飞行器考虑到兼顾大气层内和近于真空飞行环境的需求,作动器更是多种多样,有气动舵面、推力矢量以及喷管等,即不仅是过驱动而且是异类的作动器组合。新近出现的 W 型飞行器(图 8)^[32],隐

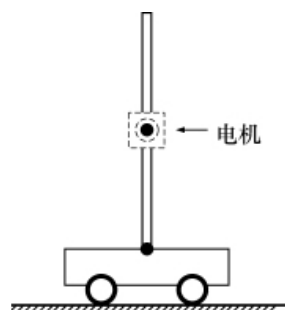


图 7 中间关节安装了作动器的两级倒立摆
Fig. 7 Double inverted pendulum with an extra actuator

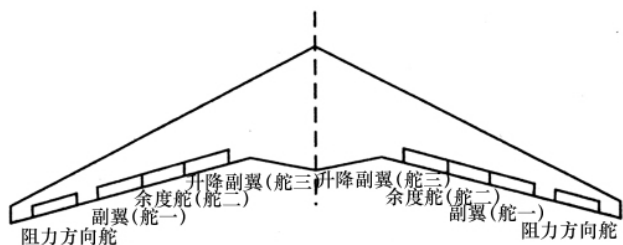


图 8 单“W”型飞翼式飞行器
Fig. 8 Flying wing with W-shape

身与滑翔性能均很好,但却难以控制,因为其作动器仅为边缘安装的可动翼片。

目前在多作动器的研究上,主要结果还是离线的根据飞行要求进行的静态分配,在线的动态分配还比较少,理论研究有一些进展,在控制不受约束时已经得到了增加控制通道使二次型性能指标 LQR (Linear Quadratic Regulator) 及 H_2 指标严格下降的充要条件^[33],在控制输入幅值受限的时间最优控制问题中也已给出了等时区严格扩张的充要条件^[34]。

人们有理由相信多作动器控制系统结合了故障诊断之后,可以建立起一个计算机控制平台,从而更有效、更鲁棒地运用作动器,以实现高质量的安全飞行。

3.3 关于系统群的控制

复杂对象的解耦问题、冗余控制及控制分配问题都是在已有控制科学框架下的新问题,而网络与多智能体控制问题着眼于控制存在一定相互联系的系统群,这在理论框架上讲已具有了新的特征。进入 21 世纪,能源及环境问题越来越受到人们的关注,如何减少温室气体排放已经提上了日程,世界主要国家都计划或已经开展了清洁能源的研究和发展。随着越来越多的太阳能发电机和风能发电机接入电网,智能电网的控制问题也会显得愈发重要。在智能电网中存在着不同物理特性的结点和信息结构,如何控制好这些异类的智能体将会是一项巨大的挑战。可以预见,计算机也将在智能电网的控制中起到关键作用。

控制科学近年来一个大的变化是从控制一个系统到控制多个系统,令其按要求协调工作,从而使得控制研究进入一个多体控制的新领域。人类从科学的角度讨论多体是从天

体力学中的三体问题开始的——考虑 3 个天体在牛顿万有引力的相互作用下的运动求解问题,在一般情况下该问题得不到解析解,这是针对自然界的,即除万有引力形成的复杂的有心力场外,在 3 体上既不存在其他约束,也没有任何控制作用。20 世纪 70 年代起,由于航天与机器人研究的需要,人们开始关心力学意义下的多体问题,例如空间站,它由几个舱通过一些通道联结在一起,从力学角度它可以被看作是一些具有一定质量分布的刚体通过具较小刚度的柔性体相互联结的多体问题,这类多体问题既讨论动力学也讨论控制,在 20 世纪 70 年代后期曾吸引了不少力学家的研究兴趣。

多智能体是 20 世纪末才兴起的一类崭新的研究对象,它由一些具有传感器和作动器的子系统构成,这些子系统之间通过信息互相联系,子系统之间的联系的方式可以是局部的,即只能获取自己周围一定范围内的信息,也可以在子系统间分出等级,然后再确定信息联系的方式及其结构。由于子系统的运动是根据所获取的信息独立地决定自己的行动因而称为多智能体系统。近 10 年间,网络成为一个热门的研究领域,它的结构与多智能体系统类似,因此这两类相近系统的控制常被放在一起讨论,与传统控制理论有所不同的是它不仅将对象从一个拓宽到多个甚至很多个,而且特别看重内部的信息联系和整个系统总体上的性能。无论是多智能体还是网络,都有大量工程实际需求推动其研究,例如卫星编队,多机器人配合工作,都属于智能体数较少的问题,也有数量很大的多智能体问题,例如鱼群运动等,其研究方法会有较大区别。至于网络一般既指实际存在的物理网络也指在其上建立的信息网,从系统或控制的角度看,主要研究对象是信息网,这与控制科学家从信息的角度研究多智能体类似。

无论是多智能体还是网络,要对其进行控制必须首先解决两个问题。

(1) 控制对象的建模。既包括对子系统的建模也包括对子系统间相互联系和作用的刻画。

(2) 控制目的的描述。应该从系统全局的角度确定一个系统的性能或一个指标,控制的目的是使系统具有该性能或使该指标符合要求。

对上述两点,要求它们既能够反映客观的实际又便于人们对其进行研究,具有好的可操作性。但由于实际系统存在的复杂性,目前这方面的研究很多还是偏重于理论,例如子系统的模型利用积分器,联系采用一种简单的协议方式,研究的性能偏重于原来控制科学中已有办法进行处理的,例如渐近性、稳定性、一致性与同步等。

20 世纪 50 年代,北京大学一个研究力学的讲师向钱学森先生提出各向同性的弹性体该研究哪些问题,钱先生听后说了这样一句话:“你不要专注于研究那些世界上不存在的的东西”。这句话对现在研究网络控制也很有启迪作用。比如说研究交通网络,需要深入了解交通网络的实际与存在的问题,然后从中提炼出新的理论问题进行研究。这样的理论研究会比虚拟地做网络课题有用得多。

4 结论

总的来讲,可以有以下 3 点结论。

(1) 控制科学是一门技术科学,它研究的主要内容应该由需求推动。特别是中国现在的形势,推动研究的需求很多。

(2) 需求的多样性决定了控制科学一定是丰富多彩的。

(3) 工程问题变成控制问题要经过提炼,从实际中提炼科学问题是很难的一件事,它一方面要符合实际需求,即不是泛泛、空洞的,另一方面又具有一定的概括性而且是可操作的。这个科学问题的解决,不仅在理论上有价值,而且确能推动一批实际问题得到解决或者提供解决的思路与方法。

注:本论文源自 2010 年中国控制与决策年会的同名大会报告,该报告系由黄琳、王金枝和彭中兴合作完成。

参考文献(References)

- [1] 戴念祖. 中国力学史[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2001.
Dai Nianzu. A history of mechanics [M]. Changsha: Hunan Educational Publishing House, 2001.
- [2] Maxwell J C. On governors [J]. *Proceeding of the royal society of London*, 1868, 16: 270-283.
- [3] Nyquist H. Regeneration theory [J]. *Bell System Technical Journal*, 1932, 11: 126-147.
- [4] 黄琳. 稳定性理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992.
Huang Lin. Theory on stability [M]. Beijing: Peking University Press, 1992.
- [5] 黄琳. 稳定性和鲁棒性的理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Huang Lin. Fundamental theory on stability and robustness [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] Truxal J G. Automatic feedback control system synthesis [M]. New York: McGraw-Hill, 1955.
- [7] Evans W R. Control system dynamics [M]. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [8] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
Hu Shousong. Principle of automation control [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2001
- [9] 钱学森. 工程控制论 [M]. 戴汝为, 何善培, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Tsien H S. Engineering cybernetics [M]. Dai Ruwei, He Shanyu, trans. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [10] Wiener N. Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series[M]. New York: Wiley, 1949.
- [11] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35-45.
- [12] Grewal M S, Andrews A P. Applications of kalman filtering in aerospace 1960 to the present [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2010, 30(3): 69-78.
- [13] Lur'e A I, Postnikov V N. On the stability theory of control systems[J]. *Prikl Matem i Mekh*, 1944, 8(3): 22-25.
- [14] Popov V M. Absolute stability of nonlinear system of automatic control [J]. *Automation and Remote Control*, 1961, 22: 961-979.
- [15] Leonov G A, Ponomarenko D V, Smirnova V B. Frequency-domain methods for nonlinear analysis: Theory and applications [M]. Singapore: World Scientific, 1996.
- [16] Wang J Z, Duan Z S, Yang Y, et al. Analysis and control of nonlinear

- systems with stationary sets: Time-domain and frequency-domain methods[M]. Singapore: World Scientific, 2009.
- [17] Brockett R W. Asymptotic stability and feedback stabilization [M]// Brockett R W, Millman R S, Sussmann H J, eds. *Differential Geometric Control Theory*. Boston: Birkhauser, 1983.
- [18] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Gao Weibing. Introduction to nonlinear control system [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [19] 王朝珠, 秦化淑. 最优控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Wang Chaozhu, Qin Huashu. Theory of optimal control [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [20] 庞特里雅金, 等. 最优过程的数学理论 [M]. 陈祖浩, 贺建勋, 黄光远, 等, 译. 上海: 上海科技出版社, 1965.
Pontryagin, et al. The mathematical theory of optimal processes [M]. Chen Zuhao, He Jianxun, Huang Guangyuan, et al, trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1965.
- [21] Bellman R. An introduction to the theory of dynamic programming[R]. RAND Corporation, 1953.
- [22] Glover K, Doyle J C. State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy a H_∞ norm bound and relations to risk sensitivity[J]. *Systems and Control Letters*, 1988, 11: 167-172.
- [23] Kharitonov V L. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equation [J]. *Differentsial'nye Uravnenia*, 1978, 14: 2086-2088.
- [24] Bartlett A C, Hollot C V, Huang L. Root locations of an entire polytope of polynomials: It suffices to check the edges[J]. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 1988, 1(1): 61-71.
- [25] Ho Y C, Cao X R. Discrete event dynamic systems and perturbation analysis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [26] Cao X R. Stochastic learning and optimization: A sensitivity-based approach[M]. New York: Springer, 2008.
- [27] Ho Y C. Dynamics of discrete event systems[J]. *Proceeding of the IEEE*, 1989, 77(1): 3-6.
- [28] Ho Y C. Discrete event dynamic systems: Analyzing complexity and performance in the modern world [M]. Washington DC: IEEE Press, 1992.
- [29] 郑应平. 离散事件系统理论研究和应用进展 [J]. 控制与决策, 1996, 11(2): 233-241.
Zheng Yingping. *Control and Decision*, 1996, 11(2): 233-241.
- [30] 郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Zheng Dazhong, Zhao Qianchuan. Discrete event dynamic systems [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [31] 旺纳姆 W M. 线性多变量控制: 一种几何方法 [M]. 姚景尹, 王恩平, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
Wonham W M. Linear multivariable control: A geometric approach[M]. Yao Jingyi, Wang Enping, trans. Beijing: Science Press, 1984.
- [32] 宋磊, 陈钰宁, 张友安. 分布估计算法在飞翼飞行器控制分配中的应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(1): 31-35.
Song Lei, Chen Yuning, Zhang Youan. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(1): 31-35.
- [33] Duan Z S, Huang L, Yang Y. The effects of redundant control inputs in optimal control[J]. *Science in China Series F*, 2009, 52(11): 1973-1981.
- [34] Peng Z X, Yang Y, Huang L. Cost analysis with input extension in time optimal control [C]. 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, July 29-31, 2010.

(责任编辑 刘志远)