

《工程控制论》的意义

黄琳[†]

(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

1 引言

1954年钱学森先生在美国出版了著名的《Engineering Cybernetics》^[1], 这是一本对控制科学影响深远而又持久的著作, 该书是钱先生在遭受麦卡锡主义猖獗而受到政治迫害被强迫滞留美国并部分失去自由的情况下完成的. 1955年10月经过中国政府的努力, 钱先生终于回到了祖国. 1956年初钱先生决定在中科院力学所亲自讲授这一著作, 北京大学数学力学系抓住了这一近在咫尺的机遇, 组织了15名大三的学生前往听讲并借机成立了一般力学专业, 我有幸是其中的一员, 能亲身聆听钱先生讲课是十分幸运的, 这一件事影响了我的一生.

2 经典控制理论的凝练

控制界对于控制科学的发展有一个共识即它经历了经典控制、现代控制和当今信息丰富时代的控制3个时期. 20世纪60年前^[1]的出版刚好是处在经典控制理论相对完善和现代控制理论的萌发时期. Black负反馈放大器的发明和Nyquist频域稳定性分析方法的建立和随后Bode的对数特性的广泛有效的应用与根分布法一起构成了以PID控制方法为核心的经典控制理论. 这些理论与方法是建立在对系统描述采用传递函数与频率特性之上的, Laplace变换和Fourier变换为这类方法提供了理论支持, 同时这类方法具有明显的物理与工程应用的特征, 并已成功地在飞机和导弹自动驾驶仪、火炮跟踪系统和过程控制等中得到应用. 经过近20多年的发展到《工程控制论》出版时经典控制已经相对成熟和充分工程化. 这方面以美国和前苏联为例, 均写出了内容十分庞大的专著. 文献[2]是由首届国际自控联(IFAC)主席H. Chestnut和R. W. Mayer合作完成的, 分上下两册出版, 该书基于Nyquist和Bode的理论与方法对各类随动系统的问题作了详细的阐述, 特别强调从物理与工程的角度进行论证, 例如从回路可形成震荡来解释Nyquist判据的物理意义就十分到位. 与此同时在前苏联也出现了以V. V. Solodovnikov的书^[3]为代表的以频率法为核心方法的巨著, 共分原理、元件和系统三大本著作, 仅

原理部分的中译本(由大连工学院王众托先生等完成)就分了若干册出版. 对于频率法的起源该书不从Nyquist判据出发而是以俄国人Mihailov命名的一个关于虚轴上多项式的辐角变化为依据的判据加以阐述. 因而也引发了频率法的起源是西方还是东方的争论. 作为经典控制理论的另一个基于传递函数之上的根轨迹方法发展则相对较晚但在^[1]出版时其基本框架已经形成^[4], 钱学森先生在这一方向上也做出了成果并巧妙地用二维流体力学对其进行了一种叙述. 科学的发展从来是由萌发经发展到丰富与相对成熟的过程, 而后则需要提炼, 找出最本质最核心的部分以迎接新的质的飞跃和发展. 钱先生在书中用不足50页的篇幅从Laplace变换开始将上述两个方向的工作中最重要的部分进行了叙述. 可谓是对经典控制理论主体内容很好的凝练. 同时钱在这本著作中还在工程允许的假设条件下通过对回路中谐波分析等物理角度的考量, 讨论了也可归于经典控制理论范畴自然扩展的具时滞的系统、采样系统和交流伺服系统.

3 新控制问题的阐述

控制科学是技术科学, 工程问题特别是运动体控制的问题是当时推动其发展的主要动力. 最早的运动体控制是用Watt发明的离心调速器来控制蒸汽机的转速, 这对应经典控制理论中的调节或镇定问题, 二次世界大战出现的雷达和随即出现雷达与火炮系统的联合控制则对应经典控制的跟踪问题. 针对这两个控制问题设计控制器构成了经典控制理论的核心, 并有效地在各类工程控制问题中得到应用. 到了20世纪50年代, 人们对运动体包括各种发动机的要求日益多样, 而使这类系统日益复杂, 并不能将其都纳入到可以用单回路系统刻画与用经典控制理论方法解决. 钱学森的“工程控制论”正是适应这一需求, 突破了经典控制理论的框框, 针对问题采用了新的描述和使用有别于传统理论的方法. 例如作为飞机发动机的涡轮螺旋桨发动机就必须考虑多变量控制, 即多输入多输出控制, 针对发动机的实际情况, 钱先生在书中提出针对这种有交叉控制作用的系统如何实现不互

收稿日期: 2014-07-05; 录用日期: 2014-10-27.

[†]通信作者. E-mail: hl35hj75@pku.edu.cn.

相影响的控制;在二次世界大战中德国首先使用了导弹,战后美国俘虏了德国的导弹专家和设备并大力发展了这类武器,导弹的飞行当然不同于飞机的巡航飞行,对它进行控制的目的既包括对预期轨道的设置特别是关车点的设定也包括对由于存在不确定性与外部扰动使实际轨道偏离预期轨道应采取的控制,钱先生在书中用两章专门对此进行论述而且是建立在时变系统之上并将控制的形成归结为计算机的计算;人们对于系统非线性的认识首先在于系统中出现的本质非线性现象,例如自振. 20世纪30年代人们已经开始研究这个问题,并特别关注由于使用继电器特性的元件引起的麻烦. 钱的“工程控制论”一书中从物理上分析基础谐波在系统中的传播与平衡是一种典型的非线性振动的方法. 而对简单的二阶继电器系统采用相平面和物理上对运动的分析所得继电器的最优开关特性的结果已经是二阶系统最速控制的结论,对这些结果从工程控制的角度进行阐述是很有意义的;对于在平稳随机过程作用下的线性系统,在介绍Wiener-Kolmogoroff的数学理论的同时还针对这类系统中发生的工程问题做了不同的讨论;他在书中阐述的具积分指标的系统的控制,这实际上已是最优控制的框架;此外他还从工程应用的角度阐述了当时刚出现不久的能适应环境的、自镇定和自寻最优工作点系统的控制. 所有这些阐述和研究方法都超出了经典控制理论的范畴.

4 技术科学思想的典范

钱在《工程控制论》一书的写作中充分体现了这一学科作为技术科学或工程科学的特征. 钱学森先生认为,技术科学和自然科学都是科学. 自然科学属于基础科学层次,技术科学属于应用科学层次. 技术科学的目标首先是为工程技术(泛指一切技术和应用领域)服务,为工程技术提供有科学基础的工程理论,进而带动和领导产业的发展,而自然科学的核心是为了理解和认识客观世界的规律^[5]. 而对于《工程控制论》,他在前言中明确指出: The purpose of <Engineering Cybernetics> is then to study those parts of the broad science of cybernetics which have direct engineering applications in designing controlled or guided systems. 技术科学的思想在文献[1]中主要表现在:

1) 该书对各类系统控制问题的阐述几乎均有实际的工程或物理特别是力学系统的支持,这样在阐述控制理论与方法的同时均配合以工程或物理意义的阐明,使得控制是一个与实际系统的工程和物理的实际紧密联系的动态决策的产物而不是一个简单的数学表述. 这样对施加控制后对系统性能的改进就有了实际的而非纯理论的理解.

2) 控制科学的研究十分需要数学特别是应用数学的支撑.《工程控制论》一书涉及的数学包括:微积分、线性代数、微分方程、概率与随机过程、积分变换、超越亚纯函数按极点展开乃至变分法等. 该书只对运用这些数学工具解决相关控制问题作阐述使有关研究者学会利用数学进行分析、推演,结合物理实际解决控制问题而并不关注数学基于逻辑推理的严格证明. 即对研究控制的人说来会用数学工具比完全弄明白数学的严格理论更重要.

基于该书的内容与特色,该书出版后的5年内便先后出现了俄文、德文、中文等的译本.

5 现实的意义

从20世纪50年代中期起,随着工业生产过程的自动化、连续化、自动化;随着人造卫星、导弹和空间探测器的推动,要求控制高速度、高精度的复杂受控对象,使得控制系统更加复杂;这就要求解决多变量、非线性和时变系统的控制器设计问题,因此迫切需要建立新的控制理论和方法. 20世纪60年代兴起的现代控制理论使控制理论的研究不再囿于单输入单输出系统而扩大了其理论研究和实际应用的范围. 这一时期的工作由于系统模式、问题提法以及相应的性能指标的一般化与理论化,使得控制理论的数学研究获得了巨大的发展动力,并迅速成长出一门新的数学分支,并在Mathematic Review这个报道数学进展的文摘性刊物上作为一个独立的数学学科而占有一席之地. 在这大量的理论工作中像Pontryagin最大值原理那样深刻的理论工作和具广泛应用前景的Kalman滤波理论方法毕竟还只是少数. 一方面是控制理论中数学理论的深入与一般化,另一方面是控制工程由于系统、环境与性能要求的复杂化大都依靠计算机的计算和仿真,而且工程师一般也更加喜欢直观的经典控制理论与计算机技术紧密结合的PID方法,以及其他一些原因使得在一定程度上控制理论与应用的发展各自走自己的路,并不密切相关. 这种理论与实际严重分离的现状有其一定的必然性,即数学家在研究控制问题时把着眼点放在数学的兴趣而不是控制工程问题的解决,使追求抽象化、一般化的理论成为时尚. 但数学理论能严格证明的有应用价值的控制问题仅是浩瀚的控制领域数学问题中的个别现象,而且从现实的控制工程中提炼出可操作的理论问题并加以解决本身就是一项十分困难的任务. 这就使得功底不深而体量较大的控制数学工作者转而走向另一个途径,即为已有的理论与方法配上控制系统的例子以利发表科学价值不大的“论文”,并以此造成控制理论虚假的繁荣. 面对这一怪象,重温“工程控制论”的思想与处理问题的方法是十分有益的.

当今的时代特征之一是信息丰富,表现在:廉价的

数字化传感器、发达的通信手段、数据化、网络化和功能强大的计算机。前4个进入系统是当今控制科学面临的新的时代特征,这一特征将带来控制科学崭新的变化,带来新的挑战和问题。解决这些问题当然需要数学,但却不能指望严格的数学理论证明能对问题的解决提供有效的帮助,而新的强大的计算机则是时代赠予当今控制科学家最有力的工具。今天发展控制科学的思想自然应该是:面对新形势下控制科学与控制工程的问题,用计算机与数学结合控制系统的实际信息去加以解决。

6 历史的结论

21世纪初由加州理工学院院长R. M. Murray等著名控制科学家对控制科学在当今信息丰富时代下的发展提出了一个报告,并于2002年6月完成后交美国工业应用数学学会(SIAM)发表^[6],在该报告所列43篇参考文献中,20世纪60年代前发表的仅6篇,其中就有钱的《工程控制论》。随后他们在IEEE Control System Magazine, 2003, April上发表了该报告的简版^[7],其中仅列举了16篇文献,而真正的学术专著仅两本,且都是20世纪60年代前出版的,即钱先生的《工程控制论》和控制论的创始人N. Wiener所写的^[8]。这不仅表明作者们对控制科学发展史的尊重,而且也说明包含在这经典著作中的思想对信息丰富时代的控制科学的发展也具有重要的启示。

参考文献(References):

- [1] TSIEN H S. *Engineering Cybernetics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [2] CHESTNUT H, MAYER R W. *Servomechanism and Regulating System Design* [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 1951, 1955.
- [3] SOLODOVNIKOV V V. *The Basis of Automatical Regulating* [M]. Moscow: Mashgiz, 1954.(in Russian)
- [4] EVANS W R. *Control-System Dynamics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [5] 郑哲敏. 学习钱学森先生技术科学思想的体会 [M] //庄逢甘, 郑哲敏, 主编. 钱学森技术科学思想与力学. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] MURRAY R M. *Control in an Information Rich World: Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics, and Systems* [J]. SIAM 2003 [Online]. Available: <http://www.cds.caltech.edu/murray/cdspanel>.
- [7] MURRAY R M, ASTROM K J, BOYD St P, et al. Future direction in control in an information-rich world [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2003.
- [8] WIENER N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and Machine* [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1948.

作者简介:

黄琳 (1935-), 男, 1961年北京大学数学力学系研究生毕业, 现任北京大学工学院泰普讲习教授, 中国科学院院士, IFAC Fellow. 他是北京大学控制学科的创立者, 长期从事控制理论与稳定性理论的研究, 目前的研究兴趣在有关力学系统的控制特别是飞行器的动力学与控制, E-mail: hl35hj75@pku.edu.cn.