



# 信息时代的控制科学

黄琳, 杨莹\*, 王金枝

北京大学工学院力学与工程科学系, 北京 100871

\* 通信作者. E-mail: yy@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-08-22; 接受日期: 2013-08-29

**摘要** 通过回顾控制科学的发展历程, 总结其成功经验, 阐述了控制科学的定位以及当前控制科学面临的新局面, 并结合信息时代控制科学的新特点提出了促进我国该学科发展的一些建议.

**关键词** 控制科学 信息时代 网络化环境 计算机算法 一体化方法

## 1 控制科学的定位与问题

控制科学属于技术科学的范畴, 是实现自动化的核心. 控制科学有别于一般的自然科学之处在于它更侧重于在认识世界的基础上改造世界, 因此它更多地具有“使能科学”的特征. 控制科学的定位应是在信息科学层面上, 主要研究与控制器设计和实现有关的科学问题. 控制器是针对给定系统及系统的性能要求, 使其接入后的系统能自动满足性能要求的装置. 在当今信息时代, 控制器设计的核心应该是计算机算法<sup>[1~4]</sup>.

基于在信息时代下对控制科学的定位, 以下将讨论三个方面的问题, 包括: 控制科学的现状分析, 信息时代控制的新局面以及新时代带来的机遇与挑战.

## 2 控制科学的现状

### 2.1 控制科学的发展与现状

控制科学的发展可以分为两个阶段: 经典控制和现代控制.

上个世纪 60 年代以前, 以包括工业化、机械化和电气化推动的工业控制和各种运动体控制为主的需求推动了经典控制理论的发展. 由于当时的被控系统相对简单, 需控制的常为单个物理变量, 控制理论就可以把一些相对简单的工程品质要求, 如过渡时间、超调量等直接借助工程的或简单的理论方法通过设计手段来实现, 因此, 经典控制有较强的实用性. 这一优势在单变量控制系统中表现得尤为突出. 这一时期经典控制的特点可以概括为两点, 即: 理论不完整, 工程甚有效.

控制科学发展的第二个阶段是现代控制时期, 其理论的特点是系统模型在数学描述上具有一般性, 性能要求也一般化. 此时, 按数学模式发展出有严格数学支撑的各种控制理论, 如线性系统、非线性系统、分布参数系统、随机系统等. 由于大量数学家的参与, 控制理论得到了空前规模的发展, 其中一些由于有计算机算法与软件的支持而获得一定的应用. 但总的说来在一门数学理论的支撑下只能解决

**引用格式:** 黄琳, 杨莹, 王金枝. 信息时代的控制科学. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1511–1516, doi: 10.1360/N112013-00145

与之相适应的理论问题, 这导致从理论特别是数学兴趣出发所做的深化研究常常并不给控制工程带来帮助.

在工业过程中, 由于大型化、连续化、自动化, 加上现在的节能减排, 低耗, 高效等要求, 都已经使仅采用单变量控制的方法不能奏效了. 类似的情况在运动体控制上同样存在. 这些控制系统的建立和发展是人类社会发展的巨大需求, 它不可能等理论先建立起来才可以发展, 而是更适合于在已有的控制方法上加进先进的计算机手段, 通过实际的应用性试验将其投入应用. 比如 PID 控制, 工程师可以根据经验, 将控制策略封装在芯片里面, 再用一套软件支撑以形成有计算机支撑的新型 PID, 这就可以用于很多工程场合以满足工程需求. 在这种情况下无论是工业控制还是运动体控制也都得到了空前的发展.

理论与应用同时大发展而又彼此不紧密相关是这一时期的重要特征. 这一特征导致有重要工程价值的问题在理论上进展不大. 例如, 在有软件支持的现代控制理论中, 用线性二次控制和  $H_\infty$  控制设计控制器时, 其加权矩阵的选取对控制系统工程品质的好坏起着关键的作用, 然而时至今日, 工程品质效果与加权矩阵选取之间的对应关系在理论上依然没有明确的答案. 又如某些具非完整约束的系统 and 欠驱动系统, 已经证明并不满足光滑镇定的必要条件而使微分几何方法失效. 再如在实际的非线性系统中常碰到的一些重要的非线性特性并不解析, 用描述函数法讨论其中的自振, 物理直观且常有效, 但其理论的数学证明却要求非线性解析. 这些均表明控制理论与控制工程基本各自发展, 二者可谓合少离多.

## 2.2 理论与工程实际分离发展的原因与转机

从事控制工程设计与控制理论研究的人在培养与成长过程、思想方法、工作性质、研究兴趣和评价标准等方面的巨大差异是造成两方面合少离多的主要原因.

从事控制工程设计的人其首要出发点是工程实现, 他们并不拘泥一定要用什么理论和方法来解决工程问题. 工程问题首先是具体的, 在解决这些问题时人们一般并不关心问题是否具有重要的科学意义和其中蕴含着什么一般性的理论问题, 从具体工程问题中抽象出科学问题需要凝炼, 但这并非易事. 另一方面, 从事控制理论研究的人往往易于忽略控制系统在实际运行中所受到的各种约束, 例如上世纪七十年代兴起的以微分几何作为工具的非线性控制理论对具有非完整约束的系统基本束手无策, 原因是实际系统有时并不服从数学理论所必需的条件. 如果仅停留在一些缺乏实际工程需求牵引的数学问题, 部分人有可能做出符合控制逻辑发展或者在数学上有价值的结果, 却很难在工程实际中发挥作用.

控制理论的研究所涉及的数学领域在技术科学中几乎是最多的, 数学经过数千年特别是近几百年的发展已经形成一个庞大的科学体系, 在数学辞海上类似常微方程这样的学科数目竟高达八十有余, 当今困难的数学理论问题也常需用几种学科的方法集成解决. 控制科学中的理论问题则更不单纯, 真正能用数学理论严格证明的只是少数, 而这些又都必须经过理想化, 其结论也就难以直接应用于控制实际.

长期以来控制理论的研究以数学理论为支撑, 不可否认数学对于控制科学的发展作出了非常卓越的贡献, 这个贡献包含几个层面, 一个是基础的层面, 比如最大值原理为控制受限的最优控制问题指明了道路, 但是应该说这样的机遇和这样的问题并不是太多; 数学贡献的第二个层面应是作为研究工具的层面, 它包括演绎, 推导和一些具体控制问题的数学证明; 第三个层面是指数学理论与方法可以帮助构造控制所需的优秀算法. 控制器设计与控制工程日益依靠计算机的强大功能, 计算机软件的基础是算法, 优秀的算法常需要数学理论的支持. 在当今信息时代背景下, 研究针对控制问题的计算机

算法, 可能是理论与工程结合的新契机.

当今控制科学的理论不应只是表现为一种单纯的数学方法和理论, 而更应体现为一种以数学、工程学和信息科学为基础的计算机算法相结合的方式. 计算机不再仅仅是仿真和计算手段, 而成为控制本身的一个关键组成. 控制科技发展的现实表明计算机软件系统开始与物理系统正以日益一体化的方式结合在一起. 一体化的控制将成为未来控制系统设计的一种重要方式. 仪表与控制的智能化、电子式控制的一体化、网络化环境、管理与控制一体化, 现场总线技术等均表明计算机的核心作用.

综上所述可以看出控制与通讯、计算的融合将是今后控制科学发展的主要方面.

### 3 信息时代控制的新局面

计算机、数据处理、通信和传感技术的迅速发展是信息时代的主要特征. 这些为控制科学的发展提供了良好的机遇, 也使控制科学呈现出了一些新的特点, 这些特点揭示了必须进行研究的新的方向.

#### 3.1 控制的新环境 —— 网络化环境

数字化传感器的普及, 通讯技术和互联网的发展使大量信息的获取与传输越来越容易, 这营造了一些控制系统必须面对的新环境, 即网络化环境. 网络化环境下需要处理的信息形式多样, 数量巨大, 这促使控制与信息的采集、传输和加工相结合, 使信息融合、信息挖掘和信息隐藏等技术成为构成控制系统所需技术的一部分. 不同于传统环境的是, 在网络化环境下, 信息传输受带宽限制等影响, 且在该过程中存在着丢包、拥堵以及延迟等现象. 同时, 网络环境下的信息还有可能被黑客攻击. 这些都使得网络环境下的控制面临不少新的问题, 诸如: 考虑网络环境下的不确定性, 需要建立易于处理的模型; 面向控制的信息采集、信息融合与控制的一体化; 传输信息能力受限和方式对控制的影响; 面向控制的信息处理问题及其新特征等, 这些都是值得深入研究的问题<sup>[5~8]</sup>.

网络环境对控制理论也提出了新的挑战, 如针对系统辨识理论<sup>[9]</sup>, 就必须考虑通讯约束和网络拓扑结构变化下的系统辨识的可靠性问题, 需要研究如何适应大数据的信息结构, 把数据挖掘技术与辨识理论相结合.

#### 3.2 控制的新对象 —— 控制网络、多自主体系统

在信息时代的背景下, 控制有时面对的不再是单个的对象或系统, 而是一个相互有信息联系的系统群 —— 控制网络和多自主体系统.

控制网络即是带有网络特征的控制系统, 如智能电网、交通网等. 目前对控制网络的研究主要集中于稳态下的控制如同步问题等. 控制网络的困难在于其暂态性与网崩, 其理性研究比较困难, 而非理性管理的代价比较大. 多自主体系统是一组自主的个体为达到某种目标, 以信息通信等方式相互作用耦合而成的系统群. 协调控制是多自主体系统研究的重要内容, 在卫星编队飞行、传感器网络、多机器人的合作、分布式侦查和智能交通等领域都有很好的应用前景.

#### 3.3 控制的新扩展

任何一个具体控制系统的实现都是控制与具体工程相结合或交叉的产物. 当今信息时代下, 强大的计算与分析能力, 先进的探测与实验设备, 适时的信息获取等, 这些信息技术的革命性变化都为控

制向其他领域的扩展创造了条件, 扩大了科学“使能”的范围. 例如, 物理学、控制理论和数学交叉形成的研究方向——量子控制<sup>[10]</sup>; 基于人的意念和思维的控制系统——脑控系统<sup>[11]</sup>, 都是当前发展迅速的交叉学科. 这些研究都是在多学科交叉中产生和发展起来的, 其进一步发展必将在新兴科学思想的引领下, 继续在多学科交叉中取得新的进展.

### 3.4 控制的核心工具是计算机

当前计算机科学技术迅猛发展, 在现代控制器设计上必然面对大量数据的采集与处理等问题. 这表明计算机算法、软件的研究和应用将成为控制研究的主要工具. 信息时代下的数据处理具有不确定、多模态、高冲突、强相关、网络化、非线性、冗余以及低价值等特点. 在这种形势下, 将控制理论与数据处理相结合会产生多元信息融合、信息挖掘、信息加工等方法. 只有将与控制相关的科学问题提炼清楚, 深入解读, 才能促使这些技术得到更好的应用.

计算机与控制理论结合产生了各种智能算法和数据驱动控制, 其中受自然规律启迪、按其原理模仿建立的算法包括神经网络、遗传算法、自适应迭代算法、模拟退火、蚁群算法以及模糊理论的各种算法等. 认真研究将智能算法用于控制的适用条件, 有助于改进算法并着重解决一些复杂的控制问题. 研究数据驱动控制中工程数据的结构信息的作用, 有助于建立新的理论, 从而让控制理论从根本上实现突破.

基于系统的复杂程度越来越高, 而数学理论又只能解决其理论框架内的问题, 这就需要充分发挥计算机的作用, 形成以计算机为特征的新理论, 并针对实际问题建立以计算机为主的研究平台<sup>[12~15]</sup>.

## 4 抓住机遇, 迎接挑战, 实现从控制科学大国到控制科学强国的改变

当前我国已是控制论文大国, 参加控制研究的人员众多, 但原创性成果依然不足. 另外, 重大装备控制器的研发仍处于瓶颈期. 总体而言, 虽然我国的控制科学有了很大的发展, 为社会做出了很多贡献, 但我们距离控制强国依然有很大的差距<sup>[16]</sup>.

信息科学对人类说来是一门历史不长但发展速度很快的学科, 我国与国际的研究差距相对较小, 一些领域的研究已处于国际前沿. 我们只要沉下心来, 抓准问题, 立志创新, 不拘泥留恋于现有研究中的已有模式、已有问题和已有的理论与方法, 勇敢迎接信息时代所带来的新局面、新问题和新的挑战; 密切关注科学特别是信息科学技术提供的新条件、新手段和新机遇; 充分发挥计算机在研究工作中的作用; 敢于探索新的理论与方法走自己的路, 尽快实现向控制强国的转变是完全可能的. 为此建议:

### (1) 切实做好控制理论中关键问题的研究

影响控制理论当前健康发展的一个重要因素是与控制工程和新技术的脱节. 我们应当认真反思现有控制理论与工程实践的差距, 提炼在新的工程背景下具有重要意义的控制科学问题; 同时也要分析学科各分支的现状与发展中的瓶颈, 提出重要的学术问题, 沉下心来进行研究, 力戒浮躁以求有实质性进展. 逐步形成拒绝无创意但受利益驱动简单论文计数式的科研氛围, 放弃将已有方法简单地用于不同系统以发表不具什么科学价值论文的做法, 真正解决控制领域迫切需要解决的问题, 使控制理论的研究真正进入可持续高水平的发展轨道. 此外, 还要坚持走自己的路, 做好甘于寂寞的长期打算, 在科研中做出特色, 多出系统性的原创性的成果, 建立我们自己的自主知识产权. 在有条件的情况下, 应尽量将理论成果与计算机技术相联系, 以便于解决工程问题把科技成果实实在在地转化到重大应用中.

### (2) 组织力量解决重大装备控制器设计中的瓶颈问题

急重大装备之所急, 切实克服瓶颈. 首先要重视对系统模型的研究, 有了能反映系统可便于操作的模型就为设计控制器创造了很好的条件: 要大力开展基于系统数据之上进行控制的理论和方法的研究, 以适应控制复杂而又难于建模的系统的需求. 其次, 要特别重视针对特定需求的控制算法的研究. 因为每一个实际系统的实现都有一定的工程背景. 在信息时代的背景下, 算法的改进将有助于提高工程效益. 而目前控制科学的队伍里, 对算法方面的研究所占比例较小, 因此, 有必要加强.

### (3) 抓好三个“一体化”

所谓三个“一体化”, 即导航、制导、控制一体化, 管理、决策、控制一体化和计算、通信、控制一体化. 在信息时代, “一体化”问题是一项有难度的研究课题, 也将是控制发展的必然趋势. 要抓好三个“一体化”, 重点是要跳出具体的条条框框, 从战略角度出发, 提炼好一体化中的科学问题. 只有这样才能促进一体化问题更好地发展.

### (4) 重视多学科交叉

真正要在工程中实现的控制系统都必须进行学科交叉, 因而都应是控制与其他领域相结合的产物. 一方面, 现代的控制任务综合性要求高而系统本身又十分复杂, 需要相关学科交叉配合才能满足现代化控制的需求, 如高超声速飞行器控制<sup>[17,18]</sup>就要求控制、气动、材料与结构等学科交叉配合. 另一方面, 人们也需要将控制领域的思想、理论与方法应用到非传统控制领域, 如脑控、医疗、量子、生物、大气、环境、金融和社会安全等. 因此, 我们有必要与其他领域的研究人员相互学习、相互渗透, 培养共同语言, 通过学科交叉产生更多更好的研究成果.

总之, 信息时代控制科学在我国的发展, 既带来了挑战更充满了机遇.

## 参考文献

- 1 Wiener N. Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine. Massachusetts: MIT Press, 1948
- 2 Tsien H S. Engineering Cybernetics. New York: McGraw-Hill, 1954
- 3 Huang L. Future development in control science: why, what and strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 97–100 [黄琳. 为什么做, 做什么和发展战略 — 控制科学学科发展战略研讨会约稿前言. *自动化学报*, 2013, 39: 97–100]
- 4 Huang L, Peng Z X, Wang J Z. Control science: inspired by applications. *Sci Technol Rev*, 2011, 29: 72–79 [黄琳, 彭中兴, 王金枝. 控制科学 — 与需俱进的科学. *科技导报*, 2011, 29: 72–79]
- 5 Chai T Y, Li S Y, Wang H. Modeling and control for complex industrial processes in networked information. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 469–470 [柴天佑, 李少远, 王宏. 网络信息模式下复杂工业过程建模与控制. *自动化学报*, 2013, 39: 469–470]
- 6 Chen G R. Problems and challenges in control theory under complex dynamical network environments. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 312–321 [陈关荣. 复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战. *自动化学报*, 2013, 39: 312–321]
- 7 Mei S W, Zhu J Q. Mathematical and control scientific issues of smart grid and its prospects. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 119–131 [梅生伟, 朱建全. 智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望. *自动化学报*, 2013, 39: 119–131]
- 8 You K Y, Xie L H. Survey of recent progress in networked control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 101–118 [游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述. *自动化学报*, 2013, 39: 101–118]
- 9 Wang L Y, Zhao W X. System identification: new paradigms, challenges, and opportunities. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 933–942 [王乐一, 赵文斌. 系统辨识: 新的模式、挑战及机遇. *自动化学报*, 2013, 39: 933–942]
- 10 Cong S. Introduction to Quantum Mechanical System Control. Beijing: Science Press, 2006 [丛爽. 量子力学系统控制导论. 北京: 科学出版社, 2006]
- 11 Wang X Y, Jin J, Zhang Y, et al. Brain control: human-computer integration control based on brain-computer interface. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39: 208–221 [王行愚, 金晶, 张宇, 等. 脑控: 基于脑 — 机接口的人机融合控制. *自动化学报*, 2013, 39: 208–221]

- 12 Levis A. Challenge to control — a collective view. IEEE Tran Autom Control, 1987, 32: 275–285
- 13 Fleming W H. Report of the Panel on Future Direction in Control Theory: A Mathematic Perspective. Philadelphia: SIAM press, 1988
- 14 Murray R M. Control in an Information Rich World: Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics, and Systems. Philadelphia: SIAM Press, 2003
- 15 Guo L, Huang L, Jin Y H. Some recent advances of automatic control in China. In: Proceedings of the 14th World Congress of IFAC, Beijing, 1999. 105–117
- 16 中华人民共和国. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006-2020). 2006
- 17 Bao W M. Present situation and development tendency of aerospace control techniques. Acta Automatica Sinica, 2013, 39: 697–702 [包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势. 自动化学报, 2013, 39: 697–702]
- 18 Chen Z J, Zhang R L, Zhang P, et al. Flight control: challenges and opportunities. Acta Automatica Sinica, 2013, 39: 703–710 [陈宗基, 张汝麟, 张平, 等. 飞行器控制面临的机遇与挑战. 自动化学报, 2013, 39: 703–710]

## Control science in the information age

HUANG Lin, YANG Ying\* & WANG JinZhi

*Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China*

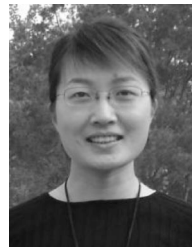
\*E-mail: yy@pku.edu.cn

**Abstract** By reviewing the development of the control science, this paper summarizes the successful experience in the past decades and elaborates the scientific position of control science. With the current situation and new characteristics of control science in the information age, some suggestions for promoting the further development of control science are proposed.

**Keywords** control science, information age, networked environment, computer algorithm, integrated approach



**HUANG Lin** was born in 1935. He is currently a professor at the Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University. His research interest includes stability theory and its application, robust control, and complex system control theories. He is an academican of the Chinese Academy of Sciences and a Fellow of IFAC.



**YANG Ying** was born in 1973. She received her Ph.D. degree in control theory from Peking University, Beijing in 2002. Currently, she is an associate professor in the Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University. Her research interest includes robust and optimal control, nonlinear systems control, numerical analysis, fault detection and fault tolerant systems.



**WANG JinZhi** was born in 1963. She is currently a professor in the Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University. Her research interest includes control of nonlinear systems, co-operative control of multi-agent systems and complex motion control in aeronautics and astronautics.