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

黄 琳 [1]

由于控制科学在当今社会发展中起着至关重要的作用, 中国科学院信息技术科学学部作为我国信息科学技术的最高咨询机构, 在 2012 年连续召开两次常委会, 最终确定依托北京大学并由我组织 "控制科学学科发展战略研究" 工作. 项目拟根据控制学科的发展历程, 剖析学科发展规律, 梳理发展趋势、前沿科学技术和潜在重大应用, 凝练科学研究方向和问题等方面, 从战略角度形成控制相关学科的发展建议.

北京大学在控制科学研究上有很深的历史渊源, 早在 1956 年钱学森先生回国讲授工程控制论时, 就曾组织过师生前往听课. 1957 年, 邀请苏联的控制理论专家在数学力学系工作了两年, 并且较早介入飞机安定性、潜艇惯性导航等科研任务, 并做出一些成果. 但不可否认的是北京大学长期定位在缺乏工科的综合性大学, 而控制又只是在力学的环境中发展, 具有明显的不足之处, 即研究面窄且只集中在控制理论与运动体控制相关的应用上. 虽有自己的特色, 但独立承担整个控制科学学科的发展战略研究工作是力不从心的, 更谈不上要对控制科学与工程的发展战略进行研究. 因此必须集中全国控制界的力量, 共同承担才能胜任.

为了做好这一工作, 我们分别于 2011 年 9 月 24 日至 25 日在北京大学和 2012 年 4 月 7 日至 8 日在中南大学举行了两次研讨会. 国内外学者和专家在两次会议上共做了 34 个综述报告, 会议从控制理论、过程控制、航空航天与运动体、网络、交叉学科与其他以及特邀报告六个方面对控制科学所涉及的研究领域进行了深入交流与讨论. 《自动化学报》主编王飞跃教授在第一次研讨会上建议: 研讨会的综述报告可陆续在《自动化学报》上刊出. 根据报告人的意愿, 我们已收到一批稿件. 本期先发表两篇论文, 包括: 包括清华大学游科友等的《网络控制系统的最新研究综述》和清华大学梅生伟等的《智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望》. 其余将陆续发表.

下面就大家关心的三个问题, 即为什么做、做什么和发展战略谈一些看法.

1 为什么做

信息技术科学学部之所以选定 "控制科学" 作为发展战略研究的选题是有其深刻考虑的. 下面通过列举一些事实表明我们必须从战略的角度来研究控制科学的发展, 方能使这一学科无论是在科学层面还是在应用层面都得到健康的发展, 并在国家需求上起到其应有的重要作用.

控制科学在中国的发展始于上世纪 50 年代, 虽然也有一些具有国际水平的研究成果, 但真正获得大的发展则是在从本世纪开始的十多年. 现今从较广的意义上讲, 华人已是国际控制杂志作者群的主力群体之一. 但真正在理论上深刻或便于应用的原创性成果仍然较少, 基于控制的具有自主知识产权的成果也很鲜见, 而这与我国处于世界第二大经 济体的地位和用先进科技支撑的科技强国的目标是不匹配的. 我国的工业与科技以前均相对落后, 近年来取得了重大发展, 但一些高级精密的装备仍依赖进口. 而其关键之一在于包括建模在内的控制技术不能自主研发而成为发展的瓶颈. 我国的空间探测事业还刚刚起步, 距离能制造出类似哈勃望远镜实现观测宇宙, 从控制的水平考虑差距还相当大. 我国已在原乌克兰瓦良格舰基础上成功地改造成一艘可供教学、训练和试验的航母, 但距离具有以航母战斗群为主的综合海上作战平台仅从控制的角度考虑差距也很大. 目前我国控制理论已有不少研究成果处于国际前沿, 但中国控制科学若能实现从大国到强国的转变, 还必须从战略层面上进行思考.

美国在 2010 年发射了三个新型飞行器 X37B, X51 和 HTV2, 其共同特点是兼顾航空与航天两个领域, 其中 HTV2 连续遭遇两次失败. 这种飞行器是用运载工具先发射到太空, 然后做下压, 变轨到临近空间作滑翔飞行, 其横向机动可望达近千公里. 美国的想法是利用 HTV2 达到对全球的快速精确打击, 即保证在一小时内到达任何地域的上空. 2010 年在发射失败后公布的材料显示是由于其在大攻角下进入滑翔时引起过大的偏航角而自毁. 失败后美方声称, 只要在重心配置等方面作技术上的改动, 成功应无问题. 2012 年 HTV2 再次发射失败, 据报道失败原因是采用了控制上更为稳妥的小攻角飞行, 造成了极高马赫数下的显著气动热, 高热以及引起的热弹性效应不仅造成机体表面揭层并大面积剥离,

收稿日期 2012-07-19 录用日期 2012-08-31
Manuscript received July 19, 2012; accepted August 31, 2012
1. 北京大学工学院力学与空天技术系 北京 100871
1. Department of Mechanics and Aerospace Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871
引用格式: 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**(2): 97−100
Citation: Lin HUANG. Future development in control science: why, what and strategy. *Acta Automatica Sinica, 2013*, **39**(2): 97−100
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2013.00097
该文的英文版同时发表在 *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 2, pp. 97−100, 2013.

也使得飞控失效. 有人将问题归结为材料问题, 但也有人认为如果能解决大攻角飞行控制问题将不会导致这一失败.

近年来兴起的网络控制和多智能体控制, 由于其需求的推动, 其发展方兴未艾, 这类问题的控制也难以纳入以前的控制理论范畴. 控制科学的概念、思想、理论和方法当然可以从宏观尺度的系统延拓至微观尺度, 无论是基因调控还是量子控制都对控制科学家有很大的吸引力. 也有人希望用控制的思想方法来控制更大尺度的天气系统, 因为这些很可能催生出具崭新特征且充满活力的新学科.

这些情况均表明控制科学的发展正面临着一些具本质性的问题, 必须从战略的角度去思考, 在过去二十多年中, 控制科学应如何发展这一问题一直吸引着世界各大国的关注并组织了相应的研究.

过去对中国控制界产生重要影响的相关国际研究报告主要有三个.

第一个报告是 1986 年由 52 位世界知名控制教授开会讨论后起草的报告 "Challenge to Control — A Collective View" (报告发表在 *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2(32), 271−285, 1987). 这一报告发表正值里根提出主动防御计划 (即星球大战计划) 之时. 此时在美国控制正被十分看好, 而这些教授明确地提出控制正面临挑战的论断是有深远意义的.

第二个报告起源于 1988 年底由美国工业与应用数学学会、美国科学基金会和三军研究部门共同组织的一个准备了两年的研讨会, 会后提出了 "Report of the Panel on Future Direction in Control Theory: A Mathematic Perspective, SIAM Reports on Issue in the Mathematic Sciences, 1988". 这是一个针对将控制理论视为数学的一个分支的研究报告, 报告中指出控制理论是数学、工程学与计算机结合的科学. 报告在分析了大量事实后指出: 1) 控制理论的任何重大突破都是由重要的应用课题推动的; 2) 计算机在控制中起着十分重要的作用, 应将控制规律转化成计算机算法与软件; 3) 数学不仅体现在控制系统的核心控制律和系统的有效分析上, 而且是控制方法和对应算法软件的基础.

第三个报告是 2002 年由几位国际控制界知名教授撰写的, 题目为 "Control in an Information Rich World: Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics, and Systems". 这一报告同样经历了两年的讨论才得以完成. 报告的题目告诉人们当今控制科学发展的时代特征是信息丰富. 同时, 报告也明确指出当今控制器的设计本质上就是关于计算机算法的设计, 这样的结论正是分析了各领域中控制科学应用与发展的状况而得出的.

现在又过去了十年, 联系前面所论述的网络、临近空间飞行器等事例, 我们现在有条件也必须从战略层次上研究现存控制科学的合理性与不足, 做出对未来发展的研究预期. 这应是中国控制界大家都关注的问题.

2 做什么

控制科学学科的发展战略研究究竟要做些什么? 从战略研究的角度需要回答以下几个基本问题.

2.1 控制与控制科学的定位

控制科学只是自动化科学的一部分, 而且是实现自动化的核心. 控制科学的定位是在信息科学的意义下, 研究与控制器 (或控制平台) 设计和实现有关的科学问题. 控制器是针对给定系统和对系统的性能要求, 使其接入后系统能自动满足性能要求的装置. 这种装置的核心在信息丰富时代应为执行一些算法的计算装置.

2.2 控制科学学科

这一学科应该包括一个基本的和共性的领域, 三种应用领域和与其他学科的交叉.

1) 基本的和共性的领域 (建模、控制、计算、仿真和实验)

a) 建模

控制科学的研究首先是关于模型的研究, 从方法论上讲, 控制的建模与物理或力学上的建模有相当大的差异. 后者常常立足于分析, 这样就需要将大分小并进而考虑一些细节, 例如用有限元研究弹性体受力后应力分布情况时, 网格的剖分很细, 对应动力学的结构其振动系统阶次很高. 而控制则首先立足于综合, 从整体上掌握对象的主要动态特征, 并寻找最能代表系统不良特性的信息以便用控制器来控制它. 对于控制器设计来说, 模型阶次过高无疑是一种灾难.

模型的取舍还必须符合在现有条件下可操作的要求. 抽象的数学只能解决其理论框架中的问题, 一般化的模型下只能得到一般化的结论, 只有从具有工程特点的模型出发才能满足对应的工程需求. 控制科学作为技术科学, 在建立模型时必须针对其要解决的控制问题选择可操作的模型. 模型的建立还应考虑系统实际所受的限制, 即约束条件, 约束条件应看成模型的一部分.

在实际问题中模型是一种抽象. 模型的建立总要忽略一些可能起作用的因素. 因而模型常常需要有不确定性模型或误差模型作为补充, 与之一起方能反映实际的情况. 设计控制器一般是针对抓住主要特征的简化模型和误差模型进行的, 在控制器设计好以后应与用于分析的能比较全面反映系统特性的对象模型连接形成闭环系统, 然后分析闭环系统真实的运行情况. 因此对控制来说, 简化的和能较全面反映系统特性的模型都是必需的.

传统的系统模型常归结为一组反应系统动态特性的方程, 但在信息丰富时代, 信息与模型的表述均表现出多样性, 图表、规则、逻辑关系和数据库也都可以是模型的一部分. 十分复杂的系统有时能得到的仅仅是采集的数据, 对这类基于数据信息的系统即便不能得到模型也同样需要讨论对它的控制.

b) 控制理论方法

控制理论的问题可以归结为两类问题, 即在给定受控系统和针对系统的要求能否用控制和怎样用控制来达到要求、能否做和怎样做这两大问题始终贯穿在控制科学发展的进程之中.

控制理论在其发展的进程中有两个明显的阶段. 首先是经典控制理论, 这是基于线性系统假定发展起来的频域法与根分布法, 是基于单回路之上的起始于伺服机构的研究. 这类单回路通常指其主回路是单回路, 而其部件本身也可以具有一定回路特征, 经久不衰的 PID 正是这种理论与计算机芯片的巧妙结合.

第二个阶段即所谓现代控制理论阶段. 其特点是系统模式在数学描述上具有一般性特征. 而讨论的问题也是比较一般性的理论提法, 例如稳定性、镇定、解耦、最优特别对线性系统而言的二次最优、最速控制乃至后来发展起来的 H_∞ 控制等. 但一种数学模式的系统有其对应的数学理论支撑, 而一门数学理论支撑下只能解决与之相适应的理论提法, 这与控制在实践中所碰到的困难常常是南辕北辙的. 这就造成了一种沟隙的现象, 即理论的进一步深化常常并不能给控制工程带来帮助. 原因之一是人们并未将控制工程中提炼出的本质问题的相对具体的信息与知识附加到一般数学形式上去进行研究. 而进一步的发展恰恰需要克服这个瓶颈.

在信息丰富时代, 控制系统常常与信息采集、信息传输、信息融合与信息加工处理密不可分, 控制理论的发展应充分考虑这一特点, 并充分考虑与利用信息科学在这方面的进展.

c) 控制计算

控制器 (平台) 的核心问题是控制算法及其软件实现, 现今的复杂系统的模型根据控制对象的物理特性与采集的数据通常是算法软件提供的. 当前我国对于具有自主知识产权的控制算法与对应算法的软件仍十分缺乏, 主要依赖进口, 这成为我国产品具有完全自主知识产权的瓶颈之一.

控制系统的复杂性和控制系统工作精度要求的提高, 均需要优秀的算法和软件的支撑. 在算法及软件的自主研发上, 我们已与先进国家有相当大的差距. 过去在基金资助下从基础层面做起的做法实际上无法赶上先进国家的水平, 也并不为国内控制界所采用. 因此必须选择合适的切入点, 在某些问题上首先突破, 做出具有自主知识产权的算法及软件, 形成在特定领域的优势, 以此作为基础, 逐步扩展. 这方面国防科研部门由于国外技术封锁而做得较好.

d) 仿真与实验

控制系统的实验要利用原工程装置进行, 一般费用过于昂贵. 因此控制方法是否有效必须经过仿真、半物理仿真和最后利用现场运行 (如试飞) 进行实验. 在任何实验阶段, 信息获取、数据采集与分析以及计算机的运用都是关键所在. 计算机仿真并不等同于用计算机进行计算, 它首先要保证实时性, 即具实时分析系统性能和设计控制器并使之不断改进完善的能力. 针对控制对象建立合用的仿真体系使其同时能进行计算机和半物理仿真的任务, 并能有效地对仿真结果进行评估是提升控制系统性能的关键.

2) 航空航天与运动体控制

飞机、火箭、卫星、船舶、车辆、机器人以及各种以机械运动为其特征的装置统称为运动体. 运动体的控制是推动控制科学发展的一个主要推动力. 这类物体在运行过程中必须遵循牛顿定律, 描述其动力学的方程既可采用牛顿定律的方式也可以采用从系统总体出发的拉格朗日方程形式. 虽然机械运动是物质运动形式中最为初级的运动方式, 但要真正实现期望的控制仍然是十分复杂的. 运动体所处环境的多样性与不确定性和所受客观存在的约束的复杂性; 在特殊条件下物体的机械运动可能伴生着其他的物理乃至化学的运动; 对运动体动作快速而出现的高动态特征和精度要求的提高; 对运动体本身状态的了解所需的测量上的客观限制; 一些运动体所表现出的具强非线性、强时变与强耦合和高不确定性的特征等等, 这些都使得问题变得特别困难. 例如临近空间高超声速飞行器的强耦合效应、导弹入水与出水的姿态控制问题、汽车自动驾驶的非线性非完整约束、机器人的欠驱动问题、大批量生产的运动控制器的低成本控制、航母武器系统的控制平台、飞机异类多作动器动态配合问题等.

3) 过程控制

过程控制泛指一切工业过程控制, 包括冶金、化工、造纸及其他工业过程的控制. 由于工业过程中任何改进都可能造成巨大的经济效益, 因而控制的作用就特别明显. 控制对象中状态的变化由于不再是机械运动, 而是可能集中其他物理与化学过程, 甚至有时是生物过程, 因而控制对象模型的建立是首要问题. 当前对象建模的问题仍然是过程控制的难点.

廉价的大量的传感器的使用以及出现的大量数据, 催生了现场总线技术的出现, 这使得数据处理技术与控制技术必须进行一体化处理.

工厂乃至车间的一体化管理与控制要求处理一类新型的系统. 这类系统具有分层递阶的结构. 下层的动态系统的控制与上层近于运筹调度的系统相结合, 这类复杂的大规模优化与控制, 不仅有广阔的应用领域而且其理论至今基本上没有解决.

上述表明过程控制的问题已不再是简单回路意义下的控制问题.

4) 网络与多智能体

“网” 与 “络” 这两个字在中国古来有之, 而 “网络” 一词在我国的出现则是近二十多年的事, 这反映了一类具物理特征的对象的出现. 例如交通网、电网以及互联网等等. 这些事物的出现无疑是人类社会进步的表现, 它们不只是一个简单的系统, 而是由很多独立的子系统通过信息相互联系而组成的, 于是网络的性质必然取决于两个因素, 即子系统的性质与相互联系的结构. 而网络的性能也必须既考虑子系统的需求也要考虑整体的性能. 与网络控制相联系的是有关多智能体的控制, 此时同样对于每一

个智能体和由智能体通过信息相联系的总体也都可以提出控制的要求. 网络与多智能体的共同点在于都是系统群, 即具一定相互信息联系和作用的系统集合, 此时是否可以将控制的传统作法平行地移植到这类对系统群的控制上是值得商榷的.

网络当前的研究态势强劲, 已经成为控制和相关领域的热门话题. 但如何解决理论上的网络与实际存在的网络之间的关系是值得深思的, 真实的网络并不能随意给出假定, 为了理论上的研究从一些假定出发而得到的结果是否符合实际需求, 都是值得研究的. 出路理应是如何从实际存在的网络中提炼模型、问题、概念并寻求解决的方法与建立相关理论, 这才是最有价值的.

网络的另一个问题是如何刻画网络的崩溃并找出预估和应急的方法, 其中自动控制的作用是十分明显的.

未来的城市、家庭均会走向数字化, 这样才便于执行低碳与智能化的高质量的生活. 在这一过程中, 智能化控制系统将进入家庭与城市管理以形成多层结构的复杂网络化的混合系统.

网络的出现也使控制跳出了地域的局限, 即产生了通过网络来实现异地的远程控制, 此时网络拥堵、信息传输能力和由于传输过程产生的信息缺失, 这些信息传输问题对控制的影响是必须考虑的.

5) 交叉问题和其他

控制科学本身是一门具普适性的科学, 即它不专属于任何一种工业或运动体, 但任何一个现代工程几乎都离不开控制, 因此任何一个具体控制系统的实现都是控制与具体工程结合或交叉的产物. 以下我们讨论的交叉问题更多是指一些具新特征的尚未与控制有效结合的领域.

在混沌分析中一个典型的例子是关于气象的蝴蝶效应. 这是指气候这一非线性系统有可能在微小能量的激励下产生巨大的后果. 而对于人类来说, 为了避免气候灾害, 能否采用控制手段改变局部气候是可以研究的.

控制还应该向微观世界拓展, 对于基因和基于量子层面的控制均已提上日程. 此时我们研究的系统已不再是宏观意义下物理化学等规律支配下的系统, 此时无论是系统的状态、系统的特性还是控制的方式都具有了新的含义.

既然当今处于信息丰富时代, 对控制人才的培养就必须把控制的教育放在日新月异的信息科学大环境中考虑. 在这个时代背景下控制器的核心是计算机的算法, 这表明控制的相关算法及软件的研究都处于十分重要的地位.

3 发展战略

任何事物的发生与发展都有其必然性, 但何时以什么形式发生则具有一定的偶然性, 作为技术科学的控制科学也不例外. 战略研究正是研究控制科学发展中的必然性和及时抓住由于偶然性因素产生的可能对本学科发展起重要作用而出现的苗头.

为了比较精确地把握控制科学中一些新分支出现的必然性, 就必须对控制科学的历史与现状进行系统的分析. 发展战略研究取得成功的标志在于能大致预见一些新的推动学科发展的问题、理论、方法与事件. 这就必须从过去历史分析中寻找规律, 从现状分析中分析需求和相邻学科发展对其的影响. 控制科学是技术科学, 还应特别关注技术进步可能对学科发展的影响.

在分析学科发展现状时, 应关注各分支的瓶颈问题. 1900 年, 法国数学家 Hilbert 在国际数学家大会上提出了 23 个著名的 Hilbert 问题. 实际上 20 世纪数学的发展有相当一部分是在回答这些问题上展开的. 控制界在上世纪 50 年代曾经解决了两个重要问题, 这大大推动了现代控制理论的发展, 一个是 Kalman 关于系统的描述和结构性质, 这推动了整个线性系统状态空间理论的建立并影响到非线性控制理论. 另一个是自变量函数取值在闭集上的变分, Pontragin 给出了最大值原理从而推动了最优控制的发展. 当前控制有哪些关键问题, 解决了这些问题就可能带动一个分支发展, 这是需要分析的. 但由于今天我们处在计算机大发展的时期, 而控制中的瓶颈问题一般并不单纯, 在解决这类问题时需要强调的是充分发挥计算机的作用.

作为发展战略的研究, 理应不同于一般科学问题的研究, 同时也不是作明确的研究规划. 它应该具有以下特征:

1) 方向性. 即不是做具体的问题, 而是指出方向.

2) 前瞻性. 分析可能是未来十分重要而且有可能解决的问题.

3) 可行性. 这是前瞻性可实现的基础. 虽然未来的事一般不能精确把握, 但在可行性分析中可能提出构造性的思维, 即探索可能行之有效的途径.

4) 粗线条. 这是指控制科学覆盖面很宽, 战略将不是一些具体的问题.

在我国用这样的规模和力度对控制科学的发展战略进行研究还是第一次, 肯定困难很多, 相信经过控制界的通力合作, 我们是可以交出一份比较完美的答卷的.

致谢

在此对中国科学院信息技术科学部, 以及广大控制界的专家学者给予的大力支持表示衷心的感谢!

黄 琳 中国科学院院士, 北京大学工学院教授. 主要研究方向为稳定性理论及应用, 鲁棒控制和复杂系统控制理论.
E-mail: hl35hj75@pku.edu.cn
(**HUANG Lin** Academician of Chinese Academy of Sciences, professor at the College of Engineering, Peking University. His research interest covers stability theory and its application, robust control, and complex system control theories.)