

关于控制理论发展的某些思考^{*}

郭 雷

(中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190)

今年适逢中国自动化学会控制理论专业委员会成立 50 周年, 作为一名控制理论领域的科研工作者, 我想与大家分享一下个人对控制理论发展的一些感悟和思考. 我将从其学科特点、发展现状、发展前景及面临问题等几方面谈几点个人粗浅看法, 算是抛砖引玉.

首先, 控制理论是一门特色突出、内涵丰富、应用广泛的学科.

控制理论的特点, 首先表现在它的一些基本概念既是普适的又是独特的. 在控制论所有概念中, 有两个概念尤其关键和核心. 第一个是“系统”的概念, 系统问题如今变得越来越突出和重要, 特别是当今世界范围内对复杂系统科学或复杂性科学研究热潮的兴起, 这是现代科学技术发展的必然趋势, 其根本原因在于世界在本质上的统一性. 控制理论不仅要分析系统的结构和性质, 更要调控系统的运动状态; 第二个是“反馈”的概念, 它是控制论中最核心的, 也是控制理论有别于其它学科的关键概念. “反馈”概念使得控制系统具有人类“智能”行为的一些关键特征, 可以对付各种 (参数、结构、扰动等) 不确定性对被控系统的影响. 历史上, “反馈”的有效利用常常对工程技术领域产生革命性影响, 例如, 瓦特蒸汽机、远距离通讯、扫描隧道显微镜等^[1].

正是因为“系统”与“反馈”这两个基本而普适概念的重要性, 决定了控制理论的两个特点: 一是控制理论有极其广泛的实际背景、其科学命题有丰富的实际来源 (或者说有产生科学问题的不竭驱动力); 二是控制理论十分强调定量研究, 而数学是定量研究的关键工具, 这与实验性学科不一样. 大家知道, 目前在控制理论研究中所涉及的数学理论与方法, 既广泛又深入. 在科学技术所有领域中, 似乎很少有学科能像控制理论有这么广泛的应用, 同时涉及几乎所有的现代数学分支.

除此之外, 作为控制理论工作者, 我们不仅像自然科学与数学一样侧重于认识世界规律与理解现象本质, 更重要的还在于我们主要研究改造世界的规律和方法; 我们不仅研究静态的结构与性能问题, 更重要的是主要研究系统的动态变化这样一个普遍问题; 我们不仅研究开环系统, 更重要的是研究闭环系统; 不仅仅是定性研究, 更重要的是定量研究; 不仅研究简化的线性模型, 更要研究复杂非线性系统; 不仅研究具有精确数学模型系统的控制, 更重要的是研究具有不确定性数学模型系统的控制等. 这些特色是控制理论学科的显著标志.

^{*} 本文根据作者于 2011 年 5 月 6 日在西安召开的“中国自动化学会控制理论专业委员会成立 50 周年纪念大会”上的大会发言整理修改而成.

收稿日期: 2011-05-31.

正因为有突出特色, 控制论的思想方法已经在众多科学技术领域中起到关键作用, 有的甚至产生了革命性影响, 取得不胜枚举的历史成就, 并且将在更多领域发挥越来越大的作用. Åström 和 Murray 教授的书 “Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers”^[1] 就部分介绍了控制思想与方法在科学与工程中的广泛应用, 该书最近获得国际自动控制联合会颁发的最佳教科书奖. 作为一名控制理论工作者, 应该为这一学科的重要性感到自豪.

第二点, 从控制理论当前的发展来讲, 它的自身还存在不少根本性局限.

比如, 从本质上来讲, 我们现在的控制理论主要还是关于数学模型的控制理论, 而不是关于实际系统的控制理论, 尽管我们也一直研究系统模型中的不确定性, 并且在鲁棒控制与自适应控制等领域取得大量深刻的理论结果. 为什么这么说呢? 因为我们目前所有的理论结果, 其严格证明都是在某些条件下针对数学模型的证明, 这当然无可厚非. 进一步, 你还可以辩解, 虽然数学模型一般是经过简化、抽象和假设得来的 (与实际系统往往差别较大), 但是根据其设计的控制器的实际适用范围可能会比理论上所加的条件要宽松, 这也是可信的. 这就引出了进一步的理论问题: 我们根据数学模型所设计的滤波算法和控制规律究竟在实际中适用的临界边界是什么? 或者问他们所能适用的最大系统类到底有多大? 这是一个十分自然但却相当困难的理论问题, 作为指导实践的一门科学理论应该, 但目前却很少, 给出答案.

我们以控制理论中两个标志性的方法为例, 一个是 PID 控制器, 另一个是 Kalman 滤波器, 他们都被广泛而成功地应用在众多实际系统中. 那么我们从理论上能说些什么? 我们所证明的稳定性也好、最优性也好, 基本上还是对线性模型的. 但实际应用中, 大家都知道, 无论是 PID 控制器, 还是 Kalman 滤波器, 都可以对付相当一大类的非线性系统. 换一个角度讲, 我们依据线性模型所设计和证明的估计和控制方法, 实际上可以应用到一大类复杂非线性系统. 一个自然的问题, 你能不能从理论严格说明, 比如著名的 PID 控制器或 Kalman 滤波器, 他们到底能被有效地应用到多么大的一类非线性系统? 能否从理论上严格刻画出这类系统的最大范围? 这显然是一个根本的理论问题, 当然具有挑战性. 我们还可以继续追问: 面对不确定非线性系统, 如果我们不局限于某一个或某一类给定控制器, 那么, 在所有 (线性与非线性) 反馈控制规律中, 哪一个能力最大或对付的不确定性系统范围最大? 对这个最大不确定性系统类的精确 “边界” 能否从理论上刻画出来? 这就更有挑战性了, 不但理论意义重大, 而且实际意义也重要. 近些年来, 我们关于反馈机制最大能力的一系列定量研究就试图回答这类问题^[2-3].

当然, 迄今现代控制理论研究成果自身的局限远不止这些. 再例如, 采样控制问题. 目前对非线性连续时间系统的控制理论虽然有很大进展, 但是从本质上讲, 都是在理论上设计研究连续时间的控制器, 虽然当今实际的控制系统大多都是采样控制. 当采样频率可以任意快时 (快到满足理论证明的需要), 可以证明相应的采样控制在较广的条件下照样有效. 但是, 如果考虑到实际的通讯、传感、计算和执行机构不允许有任意快的采样控制频率, 那么, 对于给定的采样控制频率, 由连续时间非线性系统自身与采样控制器所组成的闭环动态系统, 在本质上就是一个连续与离散时间的混杂系统. 在这种情况下, 现有的理论结果基本都不能说明问题了, 实际上也几乎没有现成的数学方法可以作为理论研究的一般有效工具,

因此相应的理论结果很少^[4]. 这是一个典型问题, 说明我们的理论与实际还有较大差距.

最后, 也是最重要的一个局限, 我认为在目前控制理论框架的局限, 这一点下面还会谈到. 面对现实世界中大量复杂系统, 比如工程、社会、经济、生物、环境等领域的复杂系统中, 对其中很多重大的调控问题, 我们现有的控制理论发挥的作用还很有限. 其中一个重要的原因, 就是我们目前的控制理论框架与实际调控问题还有较大差别, 许多是本质性差别. 所以说当前的控制理论远没有成熟, 还有相当大的发展空间.

第三点, 控制理论当前具有巨大的机遇和广阔的发展前景.

这涉及到控制理论的未来发展方向, 大家知道, 就国外来讲, 特别在美国, 经常有一些学科发展展望的研究报告. 对控制理论来讲, 我认为近些年来有两个报告比较好, 影响比较大. 第一个是“Future Directions in Control Theory: A Mathematical Perspective”^[5]. 这个报告主要是从数学的角度来谈控制理论发展, 介绍了众多实际问题对控制理论的需求. 第二个报告就是“Future Directions in Control in an Information-rich World”^[6], 该报告强调的是 information-rich world 对控制的大量需求. 报告的一个观点是, 控制研究在未来的机遇比过去更多. 另一个观点是随着通信、计算、传感的普遍应用, 将带来控制理论许多新的应用, 但是理论方法和我们的框架需要进一步扩展. 我认同这些观点.

实际上, 控制理论正面临着从传统意义上以牛顿力学体系为基本出发点的研究, 向更复杂、更微观或者更广泛的领域的拓展与转变. 比如在微观层面上, 关于量子系统调控的控制理论, 我想是非常重要的. 无论是量子信息、量子通讯、量子计算, 还是新材料设计, 都与量子调控有关. 从控制理论角度看, 在引入“量子反馈”以后, 有意思的事情就出现了^[7]. 控制论, 特别是反馈控制理论, 往往需要测量, 但是在量子这个层次上, 测量对量子系统的结构会产生较大的扰动或者说“破坏”作用. 简单说来, 反馈本来是用于消除系统的结构或信息的不确定性, 但是对量子系统进行测量却带来了新的不确定性, 这是与我们通常研究的经典(非量子)系统反馈的一个关键区别. 此外, 现在大家都关注的生物学领域, 特别是系统生物学领域, 更有非常广阔而又重要的研究需求. 无论是微观层次的复杂基因和蛋白网络, 还是宏观层次生物体内各类复杂子系统的调控规律; 无论从网络的角度, 从系统分析的角度, 还是从调控的角度, 都有许多重要问题需要解决.

当然, 我们知道, 社会经济、复杂工程、航空航天等许多领域中很多重大问题也都超出控制理论目前的研究范围. 总的来讲, 目前的控制理论主要还是以控制一个“装置”为重点, 这个“装置”一般没有自己的“利益”追求和“自由”, 在结构能控的条件下它是可以被任意控制的. 但当我们面对社会与经济中由“人”所组成的系统时, 或今后面对真正的智能机器和智能网络等“智能”对象时, 现在的控制理论就不能套用了, 因为被控者与控制者往往存在“博弈”关系, 比如说“上有政策、下有对策”等现象. 这些问题一般也都超出了传统博弈论和微分博弈的研究范围. 我们目前这么多调控难题, 比如物价调控、交通拥堵治理、房价调控、医疗改革、生态环境等, 也都与“博弈”结构有关. 我认为, 把“博弈”因素恰当地放到控制理论框架中, 是一个非常重要的研究问题, 也是社会经济等领域问题中不可避免的, 将会大大拓展控制理论的研究与应用范围^[8]. 总之, 控制理论面临很多重要发展机遇, 具有很大发展空间和广阔发展前景.

第四点, 对中国控制理论发展与研究的个人看法.

过去半个多世纪以来, 中国控制理论研究确实取得了长足发展. 1999 年 7 月, 在北京举行的国际自动控制联合会 (IFAC) 世界大会上, 我代表合作者作过一个大会报告, 题目就是“自动控制在我国的某些近期发展”^[9], 对中国控制的理论和应用中一些有代表性的成果做了介绍. 最近十多年来, 我国控制理论工作者又做出了不少出色成果, 国际学术地位和影响力又有了进一步提高. 这不仅表现在国际顶尖控制刊物发表的论文不断增长, 也不仅表现在我国有很多控制学人在重要国际组织和学术期刊任职, 甚至也不仅表现在获得国际性奖励和荣誉上, 因为有许多重要成果和实际影响是很难量化的, 也无法用某些流行的指标来准确评价. 就 IFAC 世界大会来讲, 1978 年在赫尔辛基举行的 IFAC 世界大会上, 中国大陆只有一篇论文被会议录用, 而在 20 年后的 1999 年, 我国在北京承办了 IFAC 世界大会, 得到普遍好评. 又过了十年后 2009 年, 我国在上海承办了 IEEE-CDC 会议^[10], 并且与我们的“中国控制会议”(CCC) 合办, 使 IEEE-CDC 在多方面创造了新的纪录, 得到广泛赞誉, 同时使控制理论委员会工作和“中国控制会议”达到一个新的历史阶段. 这些发展变化都是非常可喜的.

但是, 另一方面, 我们应该清醒的认识到目前存在的不足和差距. 我们还需要进一步从整体上提高科研工作的质量, 做出更多有重要影响的原创性工作, 开辟有独立特色的道路. 这主要表现在, 或提出有生命力的重要科学概念, 或者解决国际上公认的重要难题, 或者引进新的有影响的理论框架与分析方法, 或者与其它学科交叉融合提出新问题乃至开辟新方向, 或者发现并建立意想不到的重要结果等. 如果我们回顾一下过去几年获得 IEEE Trans. on Automatic Control 最佳论文奖的论文, 就不难看出他们并不仅仅局限于对传统理论和传统方法的某些改进、推广或深化. 类似地, 我想 Automatica 的最佳论文奖也应具有类似品味. 最近, 我国学者程代展等利用他们自己创造的半张量积来研究布尔控制网络, 获得 Automatica 理论 / 方法类最佳论文奖^[11], 值得称赞.

最后, 我们相信, 随着我国综合国力、经济基础和科技水平的不断提升, 随着国家科技体制和学术环境的进一步改善, 中国控制理论研究必将取得更大进步, 为国家、为人类做出更多更大贡献.

参 考 文 献

- [1] Åström K J and Murray R. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, Princeton, 2008.
- [2] Xie L L and Guo L. How much uncertainty can be dealt with by feedback? *IEEE Trans. Automatic Control*, 2000, **45**(12): 2203–2217.
- [3] Guo L. Exploring the capability and limits of the feedback mechanism. Proc. of the International Congress of Mathematicians, Vol.III (Invited Lecture), 785–794, Beijing 2002, August 20–28.
- [4] Xue F and Guo L. On limitations of the sampled-data feedback for nonparametric dynamical systems. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2002, **15**(3): 225–250.
- [5] Fleming W H, et al. Future Directions in Control Theory: A Mathematical Perspective. SIAM, Philadelphia, 1988.

- [6] Murry R, Astrom K J, et al. Future Direction in Control in an Information-rich World. *IEEE Control Systems Magazine*, 2003, **23**(2): 20–33.
- [7] Qi B and Guo L. Is Measurement-based feedback still better for quantum control systems? *Systems and Control Letters*, 2010, **59**(1): 333–339.
- [8] Mu Y F and Guo L. A new class of control systems based on non-equilibrium games. Three Decades of Progress in Control Sciences, (Editors, X. M. Hu, U. Jonsson, B. Wahlberg, and B. K. Ghosh), 2010, Springer-Verlag.
- [9] Guo L, Huang L and Jin Y H. Some recent advances of automatic control in China. Preprints of the 14th World Congress of IFAC, July 5–9, 1999, Beijing; See also, *Control Theory and Applications*, 1999, **16**(1): 105–117.
- [10] Baillieul J. CDC-CCC 2009. *IEEE Control Systems Magazine*, December, 2010.
- [11] Cheng D Z and Qi H S. Controllability and observability of Boolean control networks. *Automatica*, 2009, **45**: 1659–1665.