

全驱系统理论的提出

段广仁

1. 状态空间方法

1.1. 两个多世纪的统治

早在 1724 年和 1727 年, Riccati 和 Euler 就通过将二阶微分方程转化成一阶微分方程分别给出了二阶微分方程的求解方法。之后于 1750 年 Euler 再一次使用降阶法建立了 n 阶非齐次常系数线性微分方程求解的一般方法。由于任何一个高阶系统都可以化成一个增广的一阶系统, 这种一阶的状态空间系统描述被看成是万能的, 而这种降阶法或变量增广法的思想也为人们广泛接受, 并被自然地引入到控制系统分析与设计中来。

1892 年, 俄国著名科学家 Lyapunov 完成了他的博士论文:《论运动稳定性的一般问题》, 奠定了控制系统的稳定性理论基础。这一理论就是建立在一阶系统的状态空间框架之上的。

上世纪中叶是现代控制理论蓬勃发展的时期。这一时期出现了 Kalman 滤波和状态空间方法、Bellman 动态规划、Pontryagin 极大值原理等一大批里程碑式的结果, 所有这些结果也都是建立在一阶系统框架之上的。乃至近期出现的诸多理论方法, 如 H_∞ 控制和预测控制、线性矩阵不等式方法、状态依赖的 Riccati 方程方法等, 也无一不是在一阶系统的状态空间框架下展开的。

状态空间方法在控制系统科学史上占有绝对的统治地位。虽然现在也偶见定常线性系统的多项式方法和一些研究二阶系统的直接控制方法, 但与状态空间方法的广泛程度相比, 只是凤毛麟角、沧海一粟。

1.2. 正视状态空间方法

R. E. Kalman 于 1960 年发表的开创性论文——《控制系统的一般理论》, 首次正式提出了基于一阶系统描述的状态空间方法, 为现代控制理论的发展奠定了基础。然而, 一甲子漫长的研究实践证明状态空间方法是远远不能令人满意的。

1) 非线性问题

1982 年, 美国数学家、著名的动态规划创始人 Richard Bellman 的学生 John Casti 在其题为“Recent Developments and Future Perspectives in Nonlinear System Theory”的综述论文中对非线性控制有一段评价, 后来被高为炳院士在自动化学报上正式给出了翻译:“目前所有的迹象都指向这样一个结果: 寻找一个完全通用的非线性系统理论有点类似于寻找圣杯, 是相对无害的活动, 充满了许多愉快的意外和轻微的失望, 而最终则是白费力气。”

1995 年欧洲控制杂志第一期的第一篇论文, 综述了当时国际控制界 27 位最顶尖科学家的看法。加拿大工程院院士 E. Davison 认为非线性系统领域中的几乎所有的问题都没有解决:“Nonlinear systems theory, almost everything is open”。

2010 年, 国际上还出现了“控制死亡论”(Control is dead)。

2017 年 9 月, 欧洲控制联合会前主席、国际自动控制联合会前主席、非线性控制领域著名科学家 Isidori 在一次公开讲演中说:“从 1990 年中期开始, 关于多变量非线性系统反馈设计问题的研究就出现了完全的停滞”。以至于这位大科学家发出了这样的质疑:“Why was this the case? 是我们的研究方法不对路, 还是问题太难?”

关于非线性控制的状态空间方法, 现有的成果还远不令人满意。

2) 时变性问题

时变系统广泛存在, 其控制问题具有很强的挑战性。

即便是线性时变系统, 其稳定性也是一个难题。状态空间方法创始人 Rudolf Kalman 说, 对于时变系统, 要拿出像定常系统那样的判据, 在短时期是不可能的(There is little hope that the state of affairs will change soon)。这是他 1960 年的预言。老先生也已仙逝, 但其预言至今尚未被打破。

控制界有一本关于公开难题的书, 题目是《Open Problems in Mathematical Systems and Control Theory》, 出版于 1999 年。三位作者全是控制界著名人士。这本书列举了 53 个控制界的公开难题, 其中的第一个难题就是线性时变系统的一致渐近稳定性!

线性时变系统尚且如此之难, 更何况非线性时变系统呢? 在现今非线性系统领域中的几大重要著作中, 至少 90% 的内容都集中在定常系统。如果我们把时间 t 加进系统中会怎样? ——所建立的非线性体系近乎崩塌! 加了时间 t 之后所涉及的微分操作将变得异常复杂, 常用的微分同胚基本无法应用, 微分几何方法将没有多少理论尚存。

3) 时间滞后问题

时滞系统在物理和工程上无处不在，其控制问题一直是个悬而未决的挑战性问题。客观上说，无论在普遍性和挑战性方面，时滞系统绝不亚于时变系统。

在状态空间方法框架下研究时滞系统很难。即使对于带有定常时滞的线性系统的稳定性，人们都给不出一般的实用的充要条件，关于非线性时滞系统，特别是时变时滞的情形其难度便可想而知了。

需要及时指出的是，上述提及的三个方面的问题很难，一方面难在问题本身，另一方面当然也源于所依赖的状态空间方法这一方法的局限性！

4) “控制将死论” (Control Is Dead)

2010年，国际上出现的“控制将死论”(Control is dead)在控制界引起了轩然大波。“Control is dead”的字样曾出现在许多重要的学术场合。澳大利亚科学院院士、瑞典皇家科学院外籍院士、国际控制理论界著名学者 G. Goodwin 在一个国际会议的大会报告讲演中就曾谈及这一观点。

清华大学的兼职教授、哈佛大学终身教授、美国工程院院士、中国科学院和工程院两院外籍院士、控制理论著名专家何毓琦先生站出来对此作了解读，大意是控制理论的研究已经到了成熟阶段，很难再有大的突破。他说：“控制已死，要重生就要等待类似于耶稣使拉萨路复活的那种奇迹发生。从这一意义上讲，我们可以说控制还没有死，它或许只是在等待另一个黄金时代的再次出现。但这种机会不会来自对现有成熟理论的拓展”(本文作者译)。

2. 全驱系统方法的提出

非线性控制理论方面的成果不尽人意，人们常将问题归结为非线性问题的难度。但是，我们可曾思考过，我们的大方向正确吗？

从本质上来说，状态空间方法以状态变量为主角，以控制变量为配角。它最早的提出是用于求解微分方程的，却被勉强用于控制系统设计。利用状态空间方法求解系统的状态及其估计问题是顺畅的，但是利用它来求解控制问题则是扭曲的。控制问题需要求取的是控制变量，不再是系统状态。而我们提出的全驱系统方法允许解析地求出其控制变量，是以控制变量为主角，以状态变量为配角，用来求解控制问题自然是简单、方便的。

2.1. 全驱系统引发的思考

全驱系统的基本物理特征是其每一个自由度都受有直接的控制作用。例如，机械臂的每个关节都安装了一个驱动电机；卫星的俯仰、偏航和滚动方向上都有驱动飞轮或者是控制力矩陀螺；……。由于牛顿定律、动量(矩)定理等物理定律的存在，这个世界上存在许多全驱系统。

全驱系统具有其他系统无与伦比的控制特性：它的全驱特性允许我们对消掉开环系统的所有动态特性，同时建立全新的希望的闭环动态特性。即使在非线性系统的情况下，也能获得一个希望的定常线性闭环系统。

不幸的是，这一巨大优势在过去的一个世纪里没有得到足够的重视。其背后的一个重要原因是：受物理概念的影响，全驱系统被认为是控制系统的一个很小的部分，不值得广泛研究，因为这个世界上还存在着更多的欠驱系统，如柔性机械臂和挠性卫星等。

如何才能改变这种局面呢？

当几乎所有人都在将描述一个物理系统的数学方程化成一阶状态空间模型的时候，当几乎所有人都沉浸在状态空间方法的深入研究的时候，我们破天荒地提出了下述两个问题。

问题 1. 全驱系统这一物理概念是否可以在数学层面进行推广，且推广后的全驱系统仍然具有与物理全驱系统同样的控制特性？

问题 2. 欠驱系统是否可以转化为一个数学意义下的全驱系统，从而可以方便地实现全局镇定？

幸运的是，我们得到了上述问题的答案。更重要的是，我们获得的答案居然是肯定的(见所发表的论文)。这就引发了一种颠覆性的控制系统分析和设计方法——全驱系统方法，为控制理论研究开辟了一条“阳光大道”！

2.2. 全驱系统方法的建立

在过去的几年中，段广仁课题组在他们前期工作的基础上，进一步提出了一般的全驱系统理论的核心思想、基本概念和方法。全驱系统理论的开创性和奠基性工作是其发表在自动化学报和 *International Journal of System Sciences* 上的两个系列论文。

研究工作表明，全驱系统方法能够很方便地同时处理非线性、时变性和时滞特性。这是状态空间方法所无法并论的优越性。

平行于状态空间方法，全驱系统方法也是一种普适性的方法，其研究内容几乎覆盖了整个控制学

科各个层面的内容:

- 问题层面: 大部分控制系统分析与设计问题都可以从全驱系统的角度重新考虑, 并且大多可以获得更好的结果, 如能控能观性分析、状态反馈、输出反馈、动态补偿器和观测器设计等;
- 领域层面: 全驱系统理论的研究包括全驱系统的鲁棒控制、自适应控制、信号跟踪与干扰抑制、最优控制与受限控制等;
- 系统层面: 全驱系统理论的研究可以推广到连续和离散线性系统、连续和离散非线性系统、复杂非线性系统等;
- 应用层面: 全驱系统理论可以应用于众多实际系统的控制, 特别是航天器和机器人的自主、智能控制和协同优化控制。