

全驱系统控制理论：背景、现状与展望

段广仁

中国科学院院士

CAA Fellow, IET Fellow, IEEE Fellow

今天控制工程界的繁荣不代表控制理论正在蓬勃发展，因为早期提出的一些理论方法，如 PID 调节、线性系统设计方法等，还有很大的应用空间。但只靠已有的这些理论方法显然无法满足日益复杂的控制工程发展需求。

今天的控制理论境况究竟如何呢？众多的事实说明，经过百年的辉煌今天的控制理论体系已经光辉不在，已经陷入了困境：“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几乎出现了完全的停滞”；“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。”

重生的机会何在？——“不会来自对现有成熟理论的拓展！”控制理论走出困境需要建立一个全新的理论体系。

一、现代控制理论已陷入困境

今天的整个现代控制理论体系有一个共同的基石，那就是状态空间方法。从 1750 年 Euler 的系统响应分析（微分方程求解）到 1892 年 Lyapunov 的运动稳定性理论，再到上世纪 60 年代的卡尔曼滤波和庞特里亚金极大值原理，以至于后来的许多成果都是建立在状态空间模型的基础之上的。

上世纪 60 年代，状态空间方法在处理线性问题上发挥了重要作用。然而，进入上世纪 80 年代，当人们开始处理非线性问题时，这种方法便显得无能为力了：

- John Casti 在其 1982 年的综述论文中说（高为炳院士译）：“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。”
- 德国人 Thomas Rid 的一部著作的中译本《机器崛起：遗失的控制论历史》中说：“这一新领域在科学界的流行度于 1969 年左右达到巅峰。20 世纪 80 年代，控制论开始失去其学术地位。正如《连线》杂志的凯文·凯利令人难忘的话语所言，它‘就此枯萎消亡’。”
- 欧洲控制杂志 1995 年第一卷第一期的第一篇综述论文引用了加拿大工程院院士、国际著名控制学者 Edward Davison 的说法：“非线性控制领域中几乎所有的问题都还没有解决。”
- 非线性控制领域权威 Alberto 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几乎出现了完全的停滞。”他为此发出呐喊：“Where are MIMO systems gone?” “Why was this the case?”

- 2010 年，国际上还出现了“控制死亡论”（Control is dead）。哈佛大学教授、美国工程院院士、中国两院院士何毓琦先生说：“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。”

正因为如此，控制理论学者大都回避了核心控制理论的研究而转向了应用性控制理论。今天，网络化控制、多智能体控制以及机器人和航天器控制等应用方向已经成为控制理论的焦点。但这些都是基础控制理论的扩展。和控制工程问题一样，这些扩展性理论最终都要受到基础控制理论水平的制约。

二、全驱系统控制理论的诞生

众所周知，物理的全驱系统具有其他系统无与伦比的控制特性。但不幸的是，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. 欠驱系统是否可以在一定意义下等价地转化成数学意义下的全驱系统，从而可以方便地实现镇定？

幸运的是，我们得到了关于上述问题的肯定答案。就在现代控制理论前景渺茫的时候，受物理上全驱系统的启发，我们于 2020 年提出了一种颠覆性的新理论，即全驱系统控制理论[1-10]。这种理论方法以全驱系统模型为基础，彻底摆脱了状态空间模型的束缚，在处理非线性、时变性、滞后特性、非完整性、非光滑性等一系列复杂问题上显示了极其强大的优越性。

在仅两年左右的时间里，这些开创性工作便得到了控制界的广泛关注。以《国际系统科学杂志》系列论文[2]的首篇论文为例，该文已经得到他引 92 次，引用者包括中国工程院院士曹喜滨、IEEE Fellow 周东华和刘国平、国家杰青华长春、张焕水、刘腾飞等众多国内控制界知名学者，也包括加拿大、土耳其、丹麦以及美国 Louisiana 州立大学、Arizona 州立大学、Alabama 大学的学者。引用论文涉及自适应控制、容错控制、航天器控制、最优控制、分数阶系统控制等多个研究方向。引文期刊包括 Automatica, IEEE/CAA J. Automatica Sinica 和多个 IEEE 汇刊。

多篇公开文献通过“originally proposed”、“constructively proposed”、“originally established”、“first introduced”、“creatively proposed”等评语确立了我们在这一方向的开创性和原创性；通过“the most notable work”、“prominent works”、“substantial works”、“his holistic approach”、“lightening a new direction for control theory”等评语表明了我们工作的重要性。另外，文献称我们提出的方法

- “is a model oriented for control design, it is convenient to perfect the complete expression of the control law”;
- “provides a systematic method and structure to solve nonlinear system control problems”;
- “gained wide attention rapidly”;
- “has been proven to be very effective and simple”;
- “has more universality, simplicity and flexibility for nonlinear system design and analysis”;
- “has a wide range of application prospects for

engineering control”。

三、全驱系统控制理论发展迅猛

继段广仁提出全驱系统控制理论的短短两年时间里，全驱系统控制理论便得到了众多控制界学者的密切关注。自 2022 年开始，除段广仁团队之外的许多以全驱系统为主题的学术论文也相继问世。全球已有至少 38 个大学和机构中的至少 56 个研究团队在全驱系统理论方向上发表了论文。

特别指出的是，下述几个国内的学术团队都在全驱系统控制理论方面做出了非常深入的开创性工作。

■ **南方科技大学刘国平教授团队** 在基于全驱系统方法的预测控制和多智能体协同控制等方面开展了深入研究，在 IEEE TMech、IEEE TSG、IEEE TSMCA、IEEE JAS 等刊物上已发表论文多达 25 篇。

■ **清华大学周东华教授团队** 针对高阶全驱系统方法的故障诊断等问题开展了深入研究，在 Automatica 上发表了长文，同时在 IEEE Cybernetics、IEEE TSMCA 等刊物上发表论文 11 篇。

■ **燕山大学华长春教授团队** 围绕基于高阶全驱系统方法的自适应控制、事件触发及预设时间控制等问题开展了深入的研究，在 IEEE TCAS II、Nonlinear Dynamics、IJRNC 等刊物上发表论文 7 篇。

■ **南京航空航天大学姜斌教授团队** 在 IEEE TAES、IEEE TC 等刊物上围绕故障诊断的全驱系统方法发表论文 4 篇。

除上述团队外，国内的许多其他团队也都开展了全驱系统控制理论与应用方面的研究，其中在这方面已经公开发表论文的团队包括：

- ✓ 哈尔滨工业大学曹喜滨院士团队以及刘明、郑雪梅、邱剑彬、刘健行和高会军教授团队；
- ✓ 哈尔滨工业大学深圳分校吴爱国、张颖和张宏伟教授团队；
- ✓ 中科院自动化所乔红院士团队；
- ✓ 东北大学张化光、刘腾飞和马丹教授团队；
- ✓ 山东大学张焕水、冯俊娥和张大伟教授团队；
- ✓ 南方科技大学刘德荣和徐翔教授团队；
- ✓ 南京航空航天大学齐瑞云和吴云华教授团队；
- ✓ 中山大学刘万泉教授团队；
- ✓ 西北工业大学贺亮教授团队；
- ✓ 四川大学李彬教授团队；
- ✓ 上海交通大学杨林教授团队；

- ✓ 西南交大陈春峻教授团队；
- ✓ 杭州电子科大王茜教授团队；
- ✓ 哈尔滨理工大学黄玲教授团队；
- ✓ 清华大学李东海教授团队；
- ✓ 北京航空航天大学刘杨教授团队；
- ✓ 华北水力水电大学吕玲玲教授团队；
- ✓ 华北电力大学房方教授团队；
- ✓ 吉林大学张刘教授团队；
- ✓ 中国石油大学（华东）盛立教授团队；
- ✓ 火箭军工程大学蔡光斌教授团队；
- ✓ 中南大学魏才盛教授团队；
- ✓ 北京信息科技大学范军芳教授团队；
- ✓ 聊城大学庄光明和孙伟教授团队；
- ✓ 同济大学孙继涛教授团队；
- ✓ 上海民航职业学院团队；
- ✓ 上海大学陈立群教授团队；
- ✓ 中国科学技术大学研究生院（科学岛）分院团队；
- ✓ 中国运载火箭研究院张烽研究员团队；
- ✓ 中国航天科工三院郝明瑞研究员团队；
- ✓

更可喜的是，一些国外大学的团队也深入地介入到全驱系统控制理论的研究领域。

- **加拿大 Lakehead University 刘晓平教授团队** 在基于高阶全驱系统方法的故障诊断、自适应控制和干扰解耦方面做出了出色的工作，在 *Int. J. Fuzzy Systems*、*Int. J. Robust and Nonlinear Control*、*J. Systems Science and Complexity*、*Int. J. Adaptive Control and Signal Processing* 等刊物上发表了论文。
- **美国 Arizona State University 团队** Lu, Tsakalis & Chen 在 IEEE CSL 和美国控制会议上发表了论文，基于全驱系统方法研究了六自由度四旋翼控制问题。
- **美国 Louisiana State University 团队** Yan & Gu 在 *Science China Information Sciences* 和国际工业智能大会上发表了论文，基于全驱系统方法研究了不确定非线性系统的自适应控制问题。
- **美国 Alabama University 伯明翰分校团队** C. Zhang 及其合作者在 IEEE 电路与系统汇刊上发表的论文提出了脉冲系统鲁棒控制的全驱系统方法。
- **丹麦 Aalborg University 团队** IEEE Fellow Josep M. Guerrero 及其合作者在 IEEE *Transactions on Smart Grid* 上发表的论文基于全驱系统方法研究了微电网的预测控制

问题。

- **土耳其 Istanbul University 团队** Adiguzel & Yalcin 在 *International Journal of Systems Science* 上发表的论文研究了全驱机械系统的控制问题。
- **英国 University of West England 团队** Q. M. Zhu 借助于我们的全驱系统结构考虑了无模型控制问题，结果发表在 *International Journal of Systems Science* 上。

长期以来，我们的很多理论创新工作上都是对已有学术框架的完善，或是对别人已有成果的修补（包括本人获得的两个国家自然科学奖）。形象地说，我们的这些成果就是“在别人的园子里种几棵果树”。如今提出的全驱系统理论是一个体系，是根本上的创新，是在“开垦一个巨大的果园”，吸引了很多学者前来种树，也会让外国人“在我们的园子里种树”。现在这种理论体系已经有了很好的工作基础，已经有了一大批研究团队，后期发展将更加迅猛，前景可期。

四、其他进展

围绕全驱系统控制理论研究，我们还开展了下述其他方面的工作：

1、于 2021 年获得基金委基础科学中心项目的资助（项目名称：高阶全驱系统理论与航天器控制技术；核心参研单位：哈尔滨工业大学、南方科技大学、航天科技集团）。

2、鉴于全驱系统理论的飞速发展和研究队伍的不断发展壮大，在中国自动化学会的大力支持下，我们成立了中国自动化学会全驱系统理论与应用专业委员会。在 2022 年 8 月 4 日于哈尔滨召开的基础科学中心启动仪式暨专委会首届学术年会上，中国自动化学会副理事长桂卫华院士在讲话中说：“该专委会应该是自动化学会诸多专委会中唯一一个以中国学者原创性方法命名的专委会。”

3、在国家自然科学基金委员会和中国自动化学会的大力支持下，我们还创办了“Annual Conference on Fully Actuated System Theory and Applications”国际学术年会：

- ✓ 第一届（FASTA 2022）于 2022 年 8 月 5 日在哈尔滨召开（150 余人）。
- ✓ 第二届（FASTA 2023），见 <https://cfasta2023.sdust.edu.cn>，于 2023 年 7 月 14-16 日在青岛召开（430 余人），参会代表和论文来自世界 9 个国家和地区，包括中国台湾和香港、美国、加拿大、澳大利亚、土耳其、比利时、

新加坡和英国。

- ✓ 第三届和第四届，即 FASTA 2024 和 FASTA 2025，将分别在深圳和南京召开。
- ✓ 自第二届 FASTA 2023 起，该会由 IEEE 协办，会议论文集已经进入 IEEE Xplore 数据库。

4、近年来段广仁院士在国际重要学术会议上做关于全驱系统控制理论的大会报告 30 余次，包括

- ✓ IEEE 工业电子学会的顶级会议 IECON2023;
- ✓ 国际机器人领域顶级会议 IEEE ICRA 2021;
- ✓ 国际自动控制联合会时滞系统领域顶级会议 IFAC TDS 2021;
- ✓ 机器人与自动化领域重要会议 IEEE CYBER 2023;
- ✓ 国际先进机器人与机电一体化领域重要会议 IEEE ARM 2020;
- ✓ 我国控制理论界顶级国际会议 CCC 2021;
- ✓ 我国控制与决策领域顶级国际会议 CCDC 2021;
- ✓ 我国导航制导与控制领域顶级国际会议 ICGNC2022;
- ✓ 我国全驱系统理论与应用领域国际会议 FASTA 2023;
- ✓

五、开启控制理论的另一个黄金时代

全驱系统控制理论彻底颠覆了现代控制理论的基石——状态空间模型。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。1750 年 Euler 的微分方程求解是状态的定量分析，1892 年 Lyapunov 的稳定性是状态的定性分析。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却是扭曲的（处理线性问题还可以，处理非线性问题便无能为力了）。控制问题需要取的是控制变量，不再是系统状态。而我们提出的全驱系统方法则以控制变量为主角，以状态变量为配角，允许在可行集上解析地求解出其控制变量，用来求解控制问题自然是简单、方便的。

针对控制死亡论，何毓琦先生还说：“我们也可以说控制没死，而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。”

全驱系统理论解除了对于现代控制理论底层的状态空间模型的依赖，不再是状态空间方法的拓展，是一种全新的方法论。它将从此

开启控制理论界的另一个黄金时代，进而引发自动化和人工智能领域的一次新的技术进步。

参考文献

- [1] 段广仁. 高阶系统方法. 自动化学报, 2020.
 - I. 全驱系统与参数化设计. 46(7): 1333-1345.
 - II. 能控性与全驱性. 46(8): 1571-1581.
 - III. 能观性与观测器设计. 46(9): 1885-1895.
- [2] Duan G R., High-order fully actuated system approaches, *International Journal of Systems Science*.
 - Part I. Models and basic procedure. 2020, 52(2): 422-435.
 - Part II. Generalized strict-feedback systems. 2020, 52(3): 437-454.
 - Part III. Robust control and high-order backstepping. 2020, 52(5): 952-971.
 - Part IV. Adaptive control and high-order backstepping. 2020, 52(5): 972-989.
 - Part V. Robust adaptive control. 2021, 52(10): 2129-2143.
 - Part VI. Disturbance attenuation and decoupling. 2021, 52(10): 2161-2181.
 - Part VII. Controllability, stabilizability and parametric design. 2021, 52(14): 3091-3114.
 - Part VIII. Optimal control with application in spacecraft attitude stabilization. 2022, 53(1): 54-73.
 - Part IX. Generalized PID control and model reference tracking. 2022, 53(3): 652-674.
 - Part X. Basics of discrete-time systems. 2022, 53(4): 810-832.
- [3] Duan G R., Discrete-time delay systems: *Science China-Information Sciences*, 2022.
 - Part 1. Global fully actuated case. 65: 182201:1-182201:18.
 - Part 2. Sub-fully actuated case. 65: 192201:1-192201:15.
- [4] Duan G R., Fully actuated system approaches for continuous-time delay systems: *Science China-Information Sciences*, 2023.
 - Part 1. Systems with state delays only. 66(1): 112201:1-112201:30.
 - Part 2. Systems with input delays. 66(2): 122101, 122201:1-122201:18.
- [5] Duan G R., Stabilization via fully actuated system approach: A case study. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2022, 35(3): 731-747.
- [6] Duan G R., Brockett's first example: An FAS approach treatment. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2022, 35(2): 441-456.
- [7] Duan G R., Brockett's second example: An FAS approach treatment. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2023, 36(5):1789-1808.
- [8] Duan G R., Robust stabilization of time-varying nonlinear systems with time-varying delays: A fully actuated system approach, *IEEE Transactions on Cybernetics*, DOI: 10.1109/TCYB.2022.3217317.
- [9] Duan G R., Substability and substabilization: Control of subfully actuated systems, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023,53(11):7309-7322.
- [10] Duan G. R., "A FAS approach for stabilization of generalized chained forms: Part I. Discontinuous Control Laws," *Science China-Information Sciences*, 2023, doi: 10.1007/s11432-022-3730-8.

