

全驱系统理论研究进展

段广仁

1. 全驱系统理论研究进展

全驱系统理论是段广仁院士近年来提出的关于控制系统分析和设计的颠覆性理论方法，目前已经初步形成了一个体系（见自动化学报、*Int. J. System Sciences* 和 *Science in China-Information Sciences* 上的四个系列的论文）。在 2022 年度，通过执行本项目取得一系列的研究成果，并发表了 71 篇 SCI 期刊论文，所发表的期刊包括 *IEEE 汇刊*、*Automatica* 等国际期刊以及 *SCIENCE CHINA Information Science* 等中国著名期刊。2022 年度的研究成果主要体现在以下几个方面。

1.1 非线性时滞系统控制的全驱系统方法

对含有定常输入时滞和时变状态时滞的一般动力学系统提出了离散时间全驱系统 (FAS) 模型。对这类 FAS 提出出了一类控制设计方法使得闭环系统是定常线性系统，而且闭环系统的特征结构可以任意配置。需要指出的是，与仅含状态时滞的 FAS 情形不同，含有输入时滞的离散时间全驱系统的控制律涉及基于开环系统构造的预估策略。另外，对非线性离散时滞系统还提出亚全驱系统模型。类似于全局全驱系统情形，也对这类系统给出了使闭环系统具有任意可配置特征结构的线性系统的控制律。不同于全局全驱系统情形，所得到的控制律需要满足一定的约束。这些约束通过系统的可行点集表达，保证了所设计的控制律的可实现性。这部分的开创性成果是发表在 *SCIENCE CHINA Information Sciences* 上的两篇论文[*Sci China Inf Sci*, 2022, 65(8):182201]和[*Sci China Inf Sci*, 2022, 65(9):192201]。这些结果将为离散时间时滞系统的全驱系统方法奠定根本性的基础。

考虑了采用全驱系统方法对一类具有严反馈结构的非线性时滞系统的镇定控制律设计。首先采用段前期提出的方法将所考虑的非线性时滞系统转化为全驱系统，再根据转化后系统的结构给出与原系统中不确定性的等价表达。进一步，基于该含有未知参数的全驱系统，利用其全驱特性设计了自适应控制镇定控制律。该结果发表在[*J Syst Sci Complex*, 2022, 35: 522-534]上。

1.2 非光滑可镇定非线性系统控制律设计的全驱系统方法

对两类非光滑可镇定的非线性系统采用全驱系统方法设计了镇定控制律。在文[*J Syst Sci Complex* (2022) 35: 731-747]研究了一类基准非线性系统的镇定控制律设计。该系统由状态空间模型表达，包含系统状态的一次幂和三次幂，其线性化模型有一个不可控的正极点。以往的结果已经证明，该系统不存在全局光滑镇定控制律。在文[*J Syst Sci Complex*, 2022, 35: 731-747]中对该类系统采用全驱系统方法设计了一个光滑镇定控制器，它可以在很大范围内将系统的初值驱动到原点。采用全驱系统方法得到的吸引域不包含原点的无界区域，这一区域比任何局部镇定律获得的吸引域都要大。基于此事实，我们提出了全局指数亚稳定性的概念。该文还提出了两种获得全局渐近镇定控制律的方案：一是与已经存在的全局镇定控制律联合，另一种是通过使用预控制器将系统不在吸

引域中的装态转移到吸引域中。在文[J Syst Sci Complex, 2022, 35: 441-456]也采用全驱系统方法研究了 Brockett 第一系统的镇定控制律设计。该系统能通过一个光滑控制器被指数亚镇定, 即除了在 z 轴上的初始状态, 闭环系统的所有轨迹和控制信号都指数衰减到 0。

1.3 非线性系统的高阶全驱预测控制策略

预测控制是一种在实际中得到广泛应用的控制策略。我们将全驱系统方法与预测控制策略相结合, 对一些非线性控制系统提出了高阶全驱预测控制策略。

研究了一类网络非线性多智能体系统的协调控制。为处理该问题, 采用 HOFA 模型描述非线性多智能体。基于该模型, 提出了 HOFA 预测协调方法主动补偿通信时滞进而使闭环系统达到同时稳定和趋同。

对一类带有通信时滞的高阶全驱线性网络多智能体系统, 提出了一类比例积分(PI)预测控制策略来有效地实现多智能体系统之间的协同并主动补偿通信时滞。在该控制策略中, 局部 PI 反馈控制器用来镇定闭环名义 HOFA 多智能体系统。

这部分的代表性成果主要发表在文 [IEEE/CAA J. of Automatica Sinica, 2022, 4(9): 615]、[IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2022, 27(6): 4362-4372] 和 [IEEE Trans. Cyber.,doi:10.1109/TSMC.2022.3188504]上。

1.4 全驱系统的自适应容错控制

对一类高阶全驱系统提出了自适应容错控制策略。为获得该控制策略, 提出了一个预闭环处理方法简化带有执行器故障的非线性系统的观测器设计。这种处理存在一个弊端, 即故障有可能不再满足观测匹配条件。为此, 我们引入一个中间变量观测器来自适应地同时估计系统状态和执行器故障。另外, 我们采用矩阵奇异值摄动分析方法研究了观测误差对系统稳定性的影响。通过利用 Lyapunov 方法显示, 所提出的故障容错控制能保证闭环系统的全局一致最终有界稳定性。这部分的代表性成果发表在 [Neurocomputing, 2022, 495: 75-85]上。

1.5 亚全驱系统的预设时间镇定

针对一类具有内部不确定性和外部干扰的二阶亚全驱系统, 结合滑模控制技术和平底引入李雅普诺夫函数技术, 提出了一种基于预设轨迹的指定时间自适应镇定控制方法。该方法具有几个重要特征: 1) 系统状态可以在预先指定的时间内收敛到接近零的预定义区域, 并且可以被限制在预先指定的“安全”区域, 这可以使控制系数矩阵总是满秩的, 以保持所提出控制器的可实现性; 2) 利用平底 Lyapunov 函数技术, 不仅消除了抖振现象, 而且避免了自适应律潜在的持续增长问题; 以及 3) 仅当必要时, 即当前控制增益不足以抑制不确定性或干扰时, 控制增益才会随着自适应估计值的增加而增加。该结果发表于[J Syst Sci Complex, 2022, 35: 703-713]上。

1.6 高阶严反馈系统设计的全驱系统方法

针对一类高阶严格反馈非线性系统, 利用高阶全驱系统方法, 提出了一种具有精确参数估计的自适应动态面控制方法。整个控制设计基于反步方法完成, 每一步都将相应的高阶子系统作为一个整体进行处理, 而不是将其转换为一组一阶微分方程, 并引入一

组一阶低通滤波器生成下一步的命令信号，避免了将高阶系统转换为一阶系统。该成果发表于[Sci China Inf Sci, 2023, 66: 159203]和[IJRNC, doi: 10.1002/rnc.6389]。

1.7 航天器控制的全驱系统方法

将全驱系统方法应用于具有非线性时变转动惯量的挠性航天器姿态系统的控制律设计。为采用全驱系统方法，通过使用状态变换和变量消去方法推导了姿态系统的HOFA模型。在该模型的基础上，通过利用其全驱特性设计姿态控制律。

基于全驱系统方法和扩展状态观测器，研究了刚体航天器的位置和姿态联合跟踪控制问题。通过变量消除由状态空间模型推导得到六自由度航天器运动的二阶全驱系统模型。结合观测器结果，基于全驱系统方法设计了一种位姿轨迹跟踪控制器，使闭环系统的稳定问题转换为矩阵的特征结构配置问题。

代表性成果发表在[Sci China Inf Sci, 2022, 65(11): 212201]和[J Syst Sci Complex, 2022, 35(2): 604-622]上。

2. 全驱系统方法的学术影响

全驱系统理论提出的时间虽然不长，但其基本理论框架和具体结果已经得到了学者的正面评价和引用。

- IEEE Fellow、国家杰青年周东华在【IJSS, 2022, 53(16): 3408-3425】指出段广仁在[IJSS, 52(2): 422-435]和[IJSS, 52(3): 437-454]创造性地提出了高阶全驱系统这一控制系统的新描述形式，这一新理论能导出优秀的控制性能。该文还利用这一非线性全驱系统模型获得了故障容错控制的全局稳定性。

- 周东华还在【J Frank. Inst., 2023, 360(1): 136-153】中引用了段广仁院士的8篇论文。该文采用HOFA模型研究故障容错跟踪控制问题。该文指出HOFA系统理论是由段广仁院士原创性地提出来的，为控制理论指明了新方向(lightening a new direction for control theory)。

- IEEE Fellow、美国路易斯安那州立大学的Guoxiang Gu在文【4th Int. Conf. Industrial Artificial Intelligence, 2022, pp.1-6】引用了段广仁院士的6篇HOFA理论方面的论文，指出段已经全驱控制方面提出了全面的方法(holistic approach)。该文明确指出，HOFA模型是由段首先提出的；当这一概念从数学上形式化后，HOFA模型就成为控制系统的一般模型。

- 国家杰青华长春在【IJRNC, 2022, doi:10.1002/rnc.6531】上引用了段广仁院士的6篇论文。该文指出，HOFA方法的一个重要优势是可以获得具有任意可配特征结构的线性定常闭环系统。

- 俄罗斯科学院院士Zhiyun Lin教授在【IEEE/CAA J. Automatica Sinica, 2022, 9(8): 1464-1475】中，受文[Acta. Autom. Sinica, 2020, 46(7): 1333-1345]的启发基于全驱系统理论设计了控制律。