

转自《中国科学报》海外版 1997年4月25日 第5版

控制理论与技术、社会进步

北京 中国科学院系统科学研究所 郭雷

人类一切实践活动的目的在于认识世界和改造世界，而客观世界是由大大小小、各式各样的系统所组成的。控制理论是研究各种系统的一般性共同控制规律的科学，它的应用已遍及当今技术社会的方方面面，成为人们认识和改造世界进程中不可或缺的基本手段。

控制理论是自动化的基础，而自动化又是将人类从繁重的（甚至危险的）体力劳动中解放出来，提高劳动生产率和产品质量的关键技术。对于一个具体的实际系统，由于其内部非线性机理的复杂性和外部环境的不确定性，使得人们仅凭自己的感觉或经验无法达到高精度的控制要求，而必须依靠强有力的理论指导。这种理论又必须能给出最优（或满意）的控制策略使系统达到定量的精确（或理想）指标。这就决定了控制理论与数学方法的必然联系。对于一个被控系统，控制理论必须回答下列三个基本问题：1. 系统能否被控制？可控性有多大？2. 如何克服系统结构的不确定性及干扰带来的影响？3. 如何具体找到和实现满足要求的控制策略？

为了回答上述问题，首先必须建立系统的数学模型。由于实际系统的复杂性，往往不能从基本的物理、化学和生物学定律直接推导出准确的数学模型，而必须利用系统的输入和输出数据做“反演”，这就形成了系统辨识理论。由于系统的许多状态变量无法直接测量且系统中常有随机噪声的干扰，这就发展了信号滤波理论。又由于许多系统的结构参数无法事先确定且随时间不断变化，这就产生了鲁棒和自适应控制理论。对于具有更大不确定性和复杂性的系统，还需要发展能更好地模仿人类智能的智能控制理论。为了得到具体的控制策略，需要动态全局优

化的数学理论和方法，而为了真正实现这种策略，还必须借助于先进的计算手段和各种仪表与执行部件。最后我们关心，在反馈控制下整个闭环系统究竟是否稳定？能否达到预期控制目标？从理论上回答这类问题往往涉及对高度非线性随机动力学方程组的深入研究。

本世纪 50 年代末，自动控制经历了从古典控制理论到现代控制理论的转变。古典控制理论主要讨论单输入单输出线性系统，代表性的理论和方法包括 Routh-Hurwitz 稳定性判据，Nyquist 分析、Bode 图、Ziegler-Nichols 调节律和 Wiener 滤波等。单复变函数论和平稳过程理论等是古典时期重要的数学工具。进入现代时期后，随着研究范围及深度的扩大，控制理论几乎涉及到所有的数学分支，以至作为自动控制技术基础的控制理论，也被普遍认为是应用数学的分支之一。现代控制理论诞生的标志包括前苏联著名数学家 Pontryagin 的极大值原理，美国著名数学家 Bellman 的动态规划和 Kalman 的递推滤波以及状态空间模型的能控性、能观测性、反馈镇定等代数理论的出现等。近 40 年来，现代控制理论在工程技术需求和计算机发展的有力推动下得到了蓬勃发展，特别在非线性控制、分布参数控制、随机控制、稳健控制、自适应控制、辨识与滤波、离散事件动态系统等若干主要方向上取得了重要进展。

近年来，随着计算机和其他高技术的急剧发展以及世界范围内日益加剧的经济竞争，人类一方面面临处理越来越复杂的大量动态系统，另一方面保持技术和经济竞争的优势不断地刺激着追求系统控制的精确性、有效性和可靠性。航天技术、生命科学、工业过程，以至社会经济和生态环境等领域出现了大量的复杂系统控制问题，对控制理论提出了前所未有的挑战。复杂系统的主要特征表现在如下几方面：动力学模型的不确定性；测量信息的粗糙性和不完整性；动态行为或扰动的随机性；离散层次和连续层次的混杂性；系统动力学的高度非线性；状态变量的

高维性和分布性；各子系统间的强耦合性。复杂系统控制在规模上、复杂性及灵活性上将大大突破传统的自动控制在概念和方法上的局限性。它要求控制系统对被控对象的动力学模型要有“学习”和“识别”能力，对环境和扰动变化要有“适应”和“稳健”能力，等等。可以认为，研究智能化程度越来越高的控制方法以处理日益复杂的实际动力系统是控制理论的发展趋势。

控制理论是一门高度综合的交叉学科，处于数学、计算机科学和工程技术科学相互作用的前沿，并且与自然科学和管理科学的各门分支也有密切的联系。控制理论所提供的一般性理论和方法在众多方面对技术进步和社会发展起着至关重要的作用，例如：

1. 在工业过程方面，通过更有效的控制和管理，充分发挥设备和原材料的作用，提高劳动生产率、产品质量和市场竞争能力，增加生产过程的灵活性和可靠性。
2. 在国防高技术、航天探索、核反应过程及危险与恶劣环境中，用自动化控制的机器代替人类自身难以完成(或不可能完成)的复杂、灵活及高精度的工作已成为必然的发展趋势。
3. 在生物医学工程中，对生物体内部生理动力学非线性作用和自适应反馈控制机理的深入认识，将有助于设计出医学上各种激素、药物及放射性疗法的更好方案，并促进先进医疗器械的研制。
4. 在能源环境方面，先进的控制方法可以大大减少能源的浪费，并降低对环境的污染，同时还可以促进新型能源的开发（如人工受控热核聚变）。进一步，对于如何合理调控自然环境并协调人类与自然的关系这样一个关系到人类生存与可持续发展的大问题，也涉及到复杂开放系统的控制问题。
5. 在组织和管理方面，小到生产过程、企业及交通，大到社会、经济、人口及生态的管理调控，无论在概念还是方法上都与控制理论有密切关系。

6. 在日常生活中，从交通工具与通讯手段到衣食住与家用电器等许多方面，自动化控制已大大改变了人们的生活习惯和生活方式。

总之，控制理论这门充满生机和活力的年轻交叉学科，将控制方法建立在现代数学理论与先进计算技术之上，具有鲜明的“改造世界”的特征和目的，在技术进步和社会发展中起着至关重要的作用。