

# 信息爆炸时代的控制

关于控制、动力学和系统未来方向的专家小组报告

陈虹 马彦 翻译

吉林大学控制科学与工程系

人民大街142号, 长春130025, 中国

email: [chenh@jlu.edu.cn](mailto:chenh@jlu.edu.cn)



# 信息爆炸时代的控制

关于控制、动力学和系统未来方向的专家小组报告

2002年6月30日

陈虹 马彦 翻译

吉林大学控制科学与工程系

人民大街142号, 长春130025, 中国. Email: chenh@jlu.edu.cn

## 摘要

控制领域提供了设计物理系统和信息系统的原理和方法, 使这些系统可以自动地适应环境的变化以保持期望的性能。在过去的40年里, 随着相关理论和数学方面取得的突破性进展, 以及传感技术和计算技术的改善, 控制领域已经取得了巨大进展。如今, 控制系统在许多领域起着重要的作用, 如制造业、电子、通讯、运输、计算机和网络, 以及许多军事系统等。

进入21世纪, 控制原理和方法的应用机遇快速增长。计算、通信和传感器等价格日渐低廉并且无所不在, 拥有嵌入式处理器、传感器和网络硬件的设备越来越多。这使开发具有一定智能和高性能的机器成为可能, 将大大影响我们生活的每一方面, 不但包括各种生活必需品, 而且包括我们生存的环境。

在信息日益丰富的今天, 新的发展将要求控制学科有重大的扩充。例如, 涉及因特网操作、半自主的指挥与控制系统、企业级供给链管理等控制系统的复杂性已经达到了现有方法的处理能力极限。未来控制在航空航天和运输、信息和网络、机器人和智能机器、生物和制药、材料和加工等领域的应用将产生复杂性远远超出当前水平的系统, 在这些领域取得进展需要新的研究。

这篇报告主要阐述了控制领域当前和未来技术发展环境的一些概观, 描述了未来十年中控制在军事、商业和科学应用中的地位, 也为由于控制应用而带来的工程和技术的新突破提供了建议。

## 小组成员名单

Richard M. Murray (主席)

California Institute of Technology

Karl J. Åström  
Lund Institute of Technology

Pramod P. Khargonekar  
University of Florida

Stephen P. Boyd  
Stanford University

P.R. Kumar  
University of Illinois

Siva S. Banda  
Air Force Research Laboratory

P.S. Krishnaprasad  
University of Maryland

Roger W. Brockett  
Harvard University

Greg J. McRae  
Massachusetts Institute of Technology

John A. Burns  
Virginia Tech

Jerrold E. Marsden  
California Institute of Technology

Munzer A. Dahleh  
Massachusetts Institute of Technology

George Meyer  
NASA Ames Research Center

John C. Doyle  
California Institute of Technology

William F. Powers  
Ford Motor Company

John Guckenheimer  
Cornell University

Gunter Stein  
Honeywell International

Charles J. Holland  
Department of Defense

Pravin Varaiya  
University of California, Berkeley

## 其它成员

Richard Albaness, Jim Battersssson, Richard Braatz, Dennis Bernstein, Joel Burdick, Raffaello D'Andrea, Michael Dickinson, Frank Doyle, Martha Gallivan, Jonathan How, Marc Jacobs, Jared Leadbetter, Jesse Leitner, Steven Low, Hideo Mabuchi, Di-  
anne Newman, Shankar Sastry, John Seinfeld, Eduardo Sontag, Anna Stefanopoulou,  
Allen Tannenbaum, Claire Tomlin, Kevin Wise

# 目录

序言	vii
<b>1 概要</b>	<b>1</b>
<b>2 领域纵览</b>	<b>7</b>
2.1 什么是控制	7
2.2 控制系统示例	12
2.3 基于信息系统的作用不断增加	17
2.4 领域面临的机遇与挑战	19
<b>3 应用、机遇和挑战</b>	<b>25</b>
3.1 航空航天和运输	26
3.2 信息和网络	35
3.3 机器人和智能机器	43
3.4 生物和医药	50
3.5 材料和加工	56
3.6 其它应用	62
<b>4 教育及其外延</b>	<b>69</b>
4.1 控制教育的新环境	69
4.2 使控制更易理解	71
4.3 拓宽控制教育	72
4.4 在K-12数学和科学教育中的机遇	73
4.5 其他机遇与趋势	74
<b>5 建议</b>	<b>79</b>
5.1 控制、计算和通信的集成	79
5.2 复杂决策系统的控制	80

---

5.3 高风险、远程控制应用 . . . . .	80
5.4 支持理论研究和与数学的交互作用 . . . . .	82
5.5 教育新方法及外延 . . . . .	82
5.6 结束语 . . . . .	83
<b>A NSF/CSS 关于控制工程教育的未来方向的专题讨论会</b>	<b>85</b>
<b>参考文献</b>	<b>89</b>

## 序言

这篇报告记录了关于控制、动力学和系统的未来发展方向专家小组的调查研究结果和建议。该委员会成立于2000年4月，最初是由AFOSR (Air Force Office of Scientific Research) 发起，目的是为控制领域未来发展所面临的机遇和挑战提供新的视角，为政府机构、学校和科研组织提出一些建议，以推动工业和国防等重要领域的进一步发展。报告为控制研究指明了发展方向，强调了控制在国家利益方面的重要性，指出了那些将保持控制领域活力的关键趋势。

Richard Murray 教授(Caltech) 任该小组主席，委员会成员有Roger Brockett 教授(Harvard), John Burns 教授(VPI), John Doyle 教授(Caltech) 和Gunter Stein 博士(Honeywell)。其余小组成员还有Karl Åström (Lund Institute of Technology), Siva Banda (Air Force Research Lab), Stephen Boyd (Stanford), Munxrt Dahleh (MIT), John Guckenheimer (Cornell), Charles Holland (DDR&E), Pramod Khargonekar (University of Florida), P.R. Kumar (University of Illinois), P.S. Krishnsprasad (University of Maryland), Greg McRae (MIT), Jerrold Marsden (Caltech), George Meyer (NASA), William Powers (Ford) 和Pravin Varaiya (UC Berkeley)。起草委员会由Karl Åström, Stephen Boyd, Roger Brockett, John Doyle, Richard Murray 和Gunter Stein 组成。

该小组于2000年7月16、17两天在马里兰(Maryland)大学举行了会议，会议讨论了控制领域的现状和未来趋势。该小组成员参加了此次会议，还邀请了学术界、工业界和政府机关等各界人士。在接下来的十五个月里，陆续召开了许多会议并进行了讨论，包括由DARPA和AFOSR主办的专题讨论会、政府计划管理人员的会议、起草委员会会议等。综合这些会议讨论结果，以及该小组成员之间和各方团体的讨论，构成了小组研究成果和建议的主体。

该小组的研究成果见如下网页：

<http://www.cds.caltech.edu/murray/cdspanel/>

报告的副本、其它相关的信息源、小组会议及其它会议的材料都能在该网页上找到。

在本报告形成期间，几个关于控制领域未来发展的报告和论文引起了专家小组的注意。大部分小组成员和 2000 年 6 月专题讨论会的与会者都参与撰写了 1988 年 Fleming 报告 [15] 和 1987 年 IEEE Transactions on Automatic Control 的文章 [25]。这两个报告为控制领域近十年的发展指明了方向，并将继续起作用。随后，欧洲委员会就未来控制系统的发展发起了一个专题讨论会 [14]，近几年来，又陆续举行了几个更专业的专题讨论会 [1, 2, 33, 34]。最近的几篇文章和报告强调了控制领域的成就 [35]，并展望其未来 [11, 23]。小组也广泛地利用了新近的 NSF/CSS 关于控制工程教育的未来发展方向的报告 [1]，本报告的第四章部分采用了它。

虽然本报告的大部分完成于 2001 年 9 月 11 日灾难之前，但控制学科必将在世界反恐斗争中扮演更重要的角色。从无人驾驶车辆的指挥与控制新技术，到连接商业、交通系统和能源基础设施的鲁棒网络，再到生物和化学的检测和传感技术的改善，控制技术将提供更新的方法以确保人身安全和保护我们的社会。

小组感谢控制社团对本报告的支持和提供的研究成果、评论和讨论，这些帮助小组完成了本报告的框架和内容。这里，特别感谢 Marc Q. Jacobs 博士为小组的成立和使该项目通过 AFOSR 所做的努力。

Richard M. Murray

Pasadena 2002.06



# 第 1 章

## 概要

计算机、通讯和传感器技术的高速发展为控制领域的扩展提供了空前的机遇，使得控制学科能更广泛地服务于经济和国防需求。本报告介绍了专家小组对这些机遇的研究结果和建议，概括介绍了该领域，回顾了该领域的成就和影响，同时阐述了该领域将遇到的新挑战。本报告并不试图论及整个领域，相反，将主要集中在那些快速变化和需要新方法以迎接新挑战和新机遇的方面。

### 控制纵览

本报告所定义的控制是指在工程系统中所用的算法和反馈。简单地讲，一个控制系统是一种设备，它利用测量值通过计算和执行机构来修正系统的动态。控制系统的起源可以追溯到工业革命时代，如图 1.1所示的离心调速器。这个设备使用飞球测速器来测量蒸汽机的旋转速度，并且通过一系列的连杆调节进入该设备的蒸汽流量。通过调节蒸汽机的速度，提供安全、可靠、连续的操作，促使以蒸汽为动力的工厂迅速普及。

在技术发展过程中，如能源技术、通讯技术、运输和制造业等领域，控制是最基本的部分。这方面的例子如：军用和商用飞机的自动驾驶仪（图1.2a），电力网的调节和控制，以及磁盘驱动器读/写磁头的高精确定位（图1.2b）。在许多应用领域中，反馈是一种使能技术(enabling technology)，并在不同领域中，被多次赋予新的形式。

现代控制把反馈看作是处理不确定性的工具。即使不知道系统准确的动态响应或者外部干扰使系统产生错误响应，通过测量系统的输出，与参考量相比较，调整可用的控制变量，人们就能够使系统有正确的响应。这是工程系统的一个基本特性，因为工程系统必须在各种条件下可靠和高效地运行。控

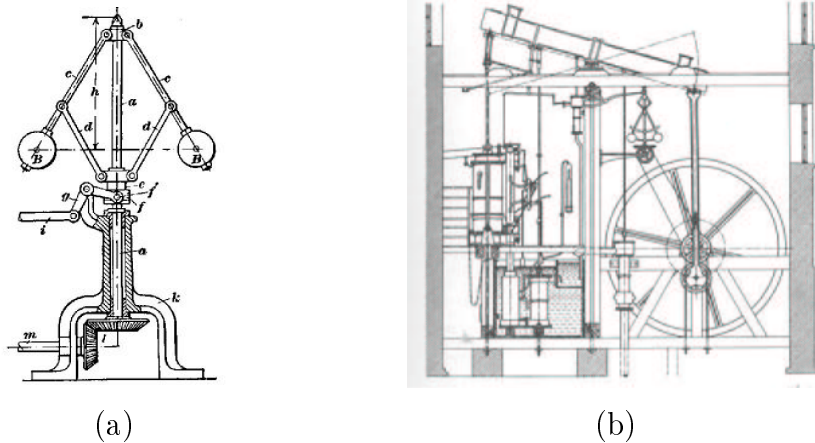


图 1.1: 17世纪80年代制造的离心调速器(a) 使导致工业革命的瓦特蒸汽机(b) 的出现成为可能。

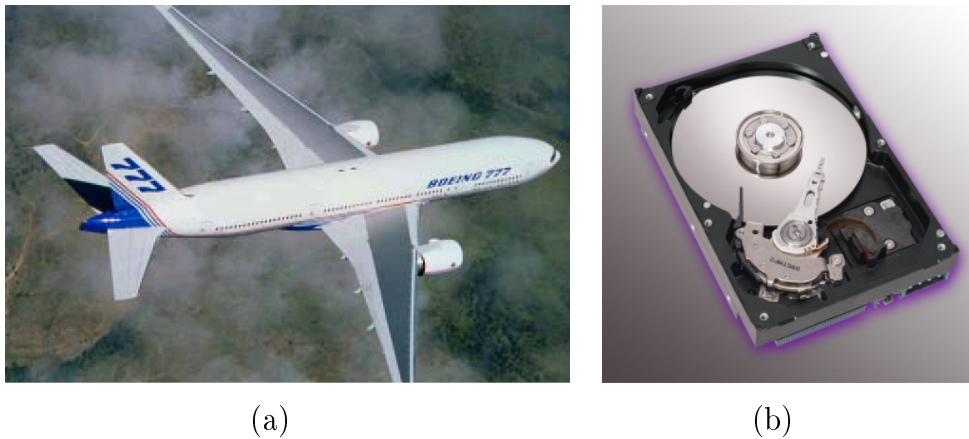


图 1.2: 控制的应用: (a) 波音777 线传操控(fly by wire) 客机和(b) Seagate Barracuda 36ES2 磁盘驱动器

制作为一种手段保证系统存在不确定性时的鲁棒性，这一点正好解释了为什么在现代技术社会里反馈控制系统充斥在人们的周围。反馈控制系统存在于家庭、汽车和家用电器中，存在于工厂和通讯系统中，存在于运输系统、军事装备及太空系统中。

控制的应用是相当广泛的，并涉及大量不同领域的应用。这包括机电系统的控制，其中利用计算机控制的执行器和传感器调节系统的动态；电子系统的控制，其中利用反馈来补偿元件或参数变化，以保证可靠的、可重复的特性；信息和决策系统的控制，其中根据对未来需求的估计完成有限资源的动态分配。在诸如生物、医药和经济学等领域也能发现控制规律的应用，其中随处可见反馈机制。在工程系统中，控制也越来越重要：如果控制系统不工作了，则整个系统将不再工作。

许多学科都为控制领域做出了贡献，包括理论数学和应用数学、航空学、化学、机械学和电子工程学、运筹学和经济学，以及物理和生物科学。与不同领域的交叉是控制领域的传统和特点。

## 成功和影响

过去的40年中，模拟和数字电子学的发展使控制技术的发展远远超出了它最初的应用范围，在许多应用中，控制已成为使能技术(enabling technology)。以往研究的成果包括：

- 空间飞行器的导航和控制系统，包括商用飞机、制导导弹、先进的战斗机、（星球）登陆车和卫星。控制系统提供了稳定性，并且当存在大的环境变化和系统不确定性时系统具有良好的跟踪性能。
- 制造业中的控制系统，如汽车工业和集成电路工业。由计算机控制的机械设备提供了精确定位和生产高质量元器件和产品所需的装配线。
- 工业过程控制系统，特别在碳氢化合物和化学过程工业。通过监控成千上万个传感信号和对成百上千个阀门、加热器、泵和其他执行器进行调节，以保证产品质量。
- 通讯系统的控制，包括电话系统、蜂窝电话和互联网。控制系统调节发送器和转发器的信号功率，管理网络路由设备中的缓冲区，并提供对传输线路变化的自适应噪声抵消。

控制的这些应用对现代社会的生产力产生了巨大的影响。

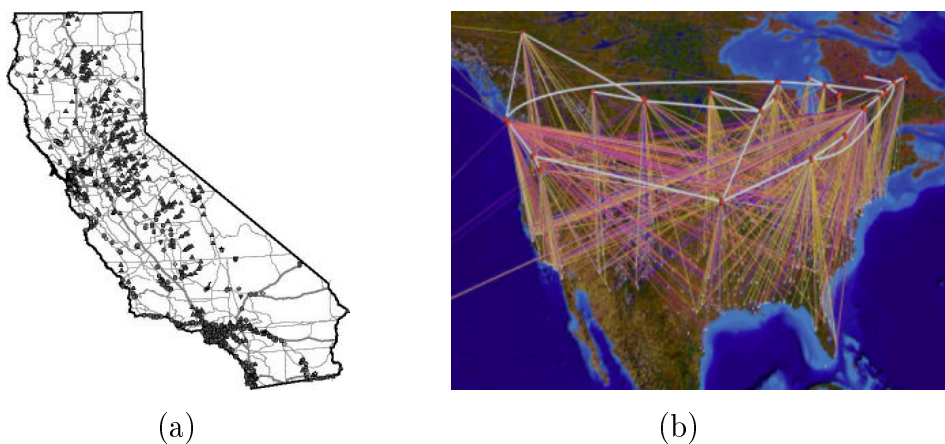


图 1.3: 现代网络化系统: (a) 加利福尼亚能源网, (b) NFSNET 因特网的中枢。

除了在工程应用中的影响，控制学科也做出了重要的学术贡献。控制理论家和工程师为了提供设计反馈系统的正确技术，严格地利用数学知识，并对数学做出了贡献。他们是“系统观点”坚定的提倡者。他们为建模、分析、设计和测试提供了可信的技术，这使那些现今使用的复杂工程系统的设计和实现成为可能。而且，对于信奉系统观点的和那些希望掌握牢固知识和技巧的人，控制社团已经成为主要源泉和训练基地。

## 未来的机遇和挑战

正如期望的，随着控制系统与理论的发展，新的应用机遇将不断涌现。分布式计算、通讯和传感系统的出现，使研究人员可以获得大量的数据，并可以对这些数据进行处理和传输，这在 20 年前是无法想象的。特别是，软件系统与物理系统的结合也越来越紧密，这对军事、商业和科学技术产生了深远的影响。图1.3所示为具有这种发展趋势的两个系统。控制正在成为构造相互关联系统的基本元素，并且当存在不确定性时，控制系统将提供高性能、高可靠性、以及可重置的操作。

在所有这些领域中，共同的特征是系统层面的需求远远超出可得到的单个元件的可靠性。控制（从最一般意义上讲）扮演了一个核心角色，通过测量系统的当前状态来修正系统的运行，以确保系统达到期望的目标。控制领域的挑战在于放弃控制系统是只有单控制器的单过程的传统观点，承认控制系统是对实际的物理和信息系统的各种信息进行收集与处理，并且这些信息的联系和相互作用是十分复杂的。

除了计算、通讯和传感技术的价格日益低廉和应用日益广泛之外，相应的基于信息的系统越来越重要，使得控制从低水平的决策系统向高水平的控制系统发展。例如，提高飞行系统的自主性（最终是为了实现彻底的无人驾驶），将局部反馈回路集成到企业的计划表及资源分配系统中。将控制学科的优势扩展到这些非传统的系统，为提高效率、产量、安全性和可靠性提供了巨大的机遇。

控制是国防系统的关键技术，并且在打击恐怖主义及反对不平等威胁的斗争中越来越重要。控制使人们能够利用自主或半自主系统实施困难和危险的任务，也可以利用先进成熟的指挥和控制系统构成鲁棒的、可重构的决策系统。在微系统和传感器网中，控制技术的应用将大大提高检测威胁的能力，避免造成损失。在通讯系统中，反馈的应用将在动态不确定和敌对的环境中提供可靠、灵活、安全的网络。

为了在新的应用中实现控制，必须发展新的方法和算法。从当前该领域所面临的挑战中，举一些例子来说明将遇到的困难：

- **具有符号和连续动态的系统的控制。** 下一代的系统将把逻辑运算（如符号推理和决策）和连续量（如电压、位置和浓度）结合起来。目前的理论不能有效地处理这样的系统，特别是描述大系统时。
- **在分布式、异步网络环境中的控制。** 为了保证系统的稳定性、性能和鲁棒性，分布在多个计算单元、由信息包连接的控制需要新的形式，特别是当实现控制时，人们不应忽略计算与通讯方面的约束条件对性能的影响。
- **高级协作与自主。** 反馈越来越多地应用于企业的决策系统中，包括供应链的管理和物流，空间管理和空中交通控制，以及 C4ISR 系统<sup>1</sup>。为了使系统在实际环境中能可靠地运行，需要将最近二、三十年来鲁棒控制系统在分析和设计方面所取得的成就扩展到这些更高级的决策系统。
- **控制算法的自动综合，且具有集成的验证和确认。** 未来的工程系统需要能够快速设计、再设计和实现控制的软件。研究人员需要开发功能更强大的设计工具，使得从建模到半实物仿真(hardware-in-the-loop simulation)的整个控制系统设计过程能自动完成，这包括系统级软件验证和确认。
- **从不可靠的部件建立可靠的系统。** 对于大部分的大工程系统，即使个别元件不能工作时，整个系统必须能够连续运行。进一步地，这要求系统的设计允许系统可以自动重构，以便它的功能逐渐下降而非突然停止。

这些挑战中的每一项都需要控制社团的多年努力，才能使研究成果更加严格、实用和可以广泛应用。这也需要基金委员会的资助来保证当前的研究得以继续，并将取得的研究成果付诸应用。

## 建议

为了迎接挑战和预示控制领域的前景，专家小组建议开展以下行动：

1. 全面加强控制、计算机科学、通讯和网络技术的一体化研究。这包括高级的、网络化的、分布式系统建模和控制的原理、方法和工具，以及可靠的、嵌入式的实时软件。

---

<sup>1</sup>C4ISR 是Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, 即指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察的缩写，译者注。

2. 全面加强对更高级别的决策控制的研究，并向企业级系统发展。这包括存在不确定性时的动态资源分配、动态系统的学习、自适应和人工智能。
3. 在新兴领域如纳米技术、量子力学、电磁学、生物学和环境科学，探索控制技术的高风险和远程应用。在这个意义上，双重身份的研究者、各学科间的交叉资助可能是特别有效的机制。
4. 继续支持理论研究和与数学的广泛合作。控制领域的强大之处在于它与严格数学理论间的紧密联系。这也将越来越重要。
5. 投资新的教育方法及其外延，向非传统用户宣传控制概念和工具。控制社团必须更加努力地培养大量的科学家和工程师，使他们掌握反馈原理，并能使用控制方法去改变系统的动态性能及处理不确定性。

控制的影响体现在广泛的应用中，如航空航天和交通运输、信息和网络，机器人和智能机械、材料和加工、生物和医药。它将使人们能够构建更复杂的系统，并保证所构建的系统是可靠、高效和鲁棒的。专家小组的建议建立在控制领域多年严谨工作的基础上，是在信息爆炸时代抓住机遇的关键。

## 第 2 章

# 领域纵览

控制学科与许多工程技术领域有着广泛接触。它对现代社会的影响是深远的，也常常难以理解。本章将通过示例和简评回顾该领域的发展，并描述控制所处的新环境。

### 2.1 什么是控制

术语“控制”有许多解释，经常随着领域的不同而变化。本报告把控制定义为在工程系统中使用的算法和反馈。那么，控制包括诸如电子放大器中的反馈回路、化学和材料加工过程中的定值（set point）控制器、飞行器上的线传操控飞行(fly by wire) 系统，甚至在因特网上控制传输流量的路由协议等。新的应用包括高可靠的软件系统、自主汽车和机器人、战场指挥系统和生物工程系统。控制是一门信息科学，包括模拟和数字信息。

现代控制器可测量系统的运行状态，同期望动态相比较，基于系统对外部输入响应的模型计算出校正值，并作用于系统使其产生期望的变化。测量、计算和执行的基本反馈回路是控制的中心概念。设计控制逻辑的关键问题是要保证闭环系统的动态是稳定的（有界干扰产生有界误差），且具有期望的动态特性（良好的抗干扰性、对操作点的变化具有快速响应性等）。可以通过建模和分析方法描述这些特性。建模和分析技术可以描述系统的基本物理特性，并且当存在不确定性、噪音及元件损坏时，可以估计系统的可能动态。

现代控制系统的典型示例如图2.1所示，图中很清楚地看到测量、计算和执行这三个控制系统的基本组成部分。现代控制系统中，计算是由计算机完成的，该过程需要模/数（A/D）和数/模（D/A）转换器。不确定性包括测

量和执行子系统中的噪音、影响系统物理特性的外部干扰、以及物理系统的不确定动态（参数误差、未建模影响等）等。

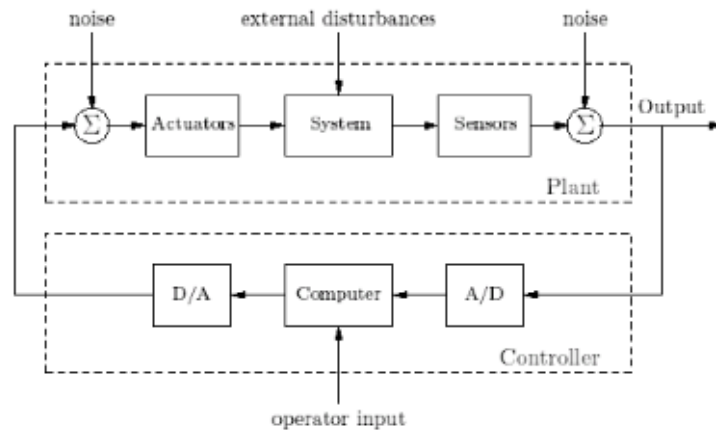


图 2.1: 现代控制系统的组成

基本反馈控制回路经常与前馈控制相结合，其中指令性的执行机构输入是为了获得期望特性而基于系统模型计算的。反馈形成闭环，其动作是基于测量值和期望值之差的，而前馈是开环的，是基于预定的规划。为了获得较高的性能和鲁棒性，人们常常使用带有前馈的反馈。

值得注意的是，反馈是控制的主要要素，同时控制也普遍存在于科学和自然界中。生物系统通过反馈来保持热、化学和生物条件的动态平衡。全球气候的动态取决于大气、海洋、陆地和太阳间的相互反馈。生态学中也充满了反馈的例子，引起动物和植物间的复杂的相互作用。通过市场，以及商品与服务的交换，经济活动是建立在个人与公司间的反馈上的。

控制的思想 and 工具也可应用到这些系统中，但本报告只着重于工程系统中的反馈。因此，这里的讨论仅仅局限于控制诸多方面的一小部分，选择了那些正在发生巨大变化和最需要新思想、新技术的领域。

## 控制理论

控制理论是指用来分析和综合控制系统的数学体系。过去50多年里，控制理论学者始终关注着完整性和正确性问题。这包括证明反馈控制系统的稳定性和鲁棒性的一整套严格的理论基础，数学家和工程师为此做了大量工作。开发的计算工具也保证了当存在不确定性时系统的性能。方法上的严格性是现代控制的一个特点，并且使得控制在许多领域中取得了成功。

因此，下面简单地回顾一下现代控制理论的发展史是十分有用的。



自动控制的起源要追述到工业革命的开始，那时人们用简单的速度调节器在负载、蒸汽供应和设备变化的情况下，自动保持蒸汽发动机的速度。在20世纪初期，控制理论被应用于新兴的电子领域，尽管真空管设备变化很大，这些理论使反馈放大器能自动保持恒定的性能。

随着单输入单输出反馈控制系统方法的发展，20世纪40年代已建立了控制理论的理论基础，这些方法包括用于建立模型和分析频率响应和稳定性的传递函数和Bode图法，以及研究反馈系统稳定性的Nyquist图和增益/幅值裕度[9]。通过设计反馈回路，减少干扰对闭环系统的影响，保证系统的稳定性和具有抗干扰能力。第一阶段的控制技术被定义为古典控制，现在仍是工科学控制课程的基础。

20世纪60年代，是控制理论发展的第二阶段，称为“现代控制”，主要研究针对多变量系统的控制方法与工具，其中必须同时设计众多的强耦合回路。这些方法、工具使用了控制系统的状态空间表示法，并与数值优化和最优控制相结合。这些早期的状态空间方法利用线性常微分方程来研究系统的响应，同时通过配置闭环系统的特征根来保证稳定性。

几乎同一时期，随着Pontryagin极大值原理和Bellman动态规划的建立，最优控制理论也取得了长足进步。最优控制理论给出了使代价函数最小的控制器的精确条件，其解或以开环输入（如计算产生最优轨迹的推力），或以闭环反馈律的形式给出。估计理论也受益于最优控制的研究成果，开发了卡尔曼滤波器，并很快使之成为在许多领域里应用的标准工具。卡尔曼滤波器可以根据（小）部分可测信号估计出系统的内部状态。

最后，在20世纪80年代控制理论进入了第三发展阶段，称为“鲁棒多变量控制”。在系统存在不确定性时，鲁棒多变量控制为保证期望的闭环特性提供了强有力的严格方法。在许多方面，鲁棒控制从早期的控制理论中借鉴了一些关键思想，其中不确定性是设计方法学的重要因素。这里算子理论是相当有用的。无论是已有的技术，还是新的数学方法，控制与数学的结合也更加紧密了。

在过去的20多年，控制理论出现了许多分支，包括自适应、非线性、图论、混沌、模糊和神经网络控制等。所有这些也都建立在将应用、理论和计算联系起来的传统方法之上，用严格的数学方法推导实用的方法。控制与其他学科的联系也更加密切，特别是应用数学、物理学和运筹学。

如今，控制理论提供了丰富的方法论和数学支持，以及为反馈系统提供了分析和设计的工具。控制理论有四个重要概念，即：动态，建模，互联和不确定性。这四个概念既是工程设计系统，也是自然系统的关键。

动态特性对所有控制系统都是十分重要的。控制理论开发了很多用于分析动态系统稳定性和性能的工具。通过反馈，人们可以改变系统的动态以达到应用要求：使不稳定的系统变得稳定，使响应迟缓的系统加快响应速度，使工作点漂移的系统保持恒定。控制理论提供了一整套技术来分析复杂系统的稳定性及动态响应，并通过分析元件的线性和非线性增益给出这种系统的性能约束。当存在干扰、参数不确定性和未建模动态时，（这些概念在传统动力学和动态系统课程中没有详细说明），这些技术是非常有用的。

控制理论也为（面向控制的）系统建模和辨识提供了新技术。由于模型在反馈系统的分析和设计中是十分重要的，已经开发了很多先进实用的工具以建立面向控制的模型。这些技术包括系统的输入/输出描述法（干扰如何通过系统传播）以及数据驱动（data-driven）的系统辨识技术。与反馈无关的“强迫响应”建立模型的实验法在控制领域得以完善，并且在许多学科中都得到了应用。已经建立了有效的建模理论，包括模型精度和与实验数据比较的严格定义。

控制理论的第三个关键概念是子系统间的互联方式。系统的输入/输出描述法允许人们把各部件的动态连接起来以建立复杂系统的模型。所得系统的动态不仅取决于各部件的动态，也与这些部件间的互联结构有关。控制工具为研究这些连接的特性和与之相关的稳定性、鲁棒性和期望性能提供了方法论。

最后，现代控制理论的显著特征之一是它提供了一个可以明确表示不确定性的框架。这样，人们可通过一个系统集来表示随时间变化的系统的可能表现。这种描述不确定性的框架对所有的工程应用都是十分重要的，而且控制社团已经开发了一套功能强大的工具来处理不确定性。这是必须的，因为反馈的作用并不是总是良好的。实际上，如果不确定性得不到妥善处理，将导致灾难性的失误（如通过正反馈）。

## 控制技术

控制技术包括传感、执行和计算三部分内容，它们一起构成了一个工作系统。图2.2a表示在车辆工程中应用传感、执行和计算的一些趋势。和其它许多应用领域一样，传感器、执行器及微处理器的数量正在飞快增长，如防抱死刹车、自适应巡航控制、主动抑制（震动或噪声）（active restraint）系统和增强型发动机控制等一些新特性被引入市场。这些技术的性价比曲线如图2.2b所示。电子技术如传感、计算和通讯等的价格正在大幅下降，使更多的信息处理成为可能。或许，最重要的是通讯技术发展的结果，如今低廉的通讯费用使许多新应用成为可能。

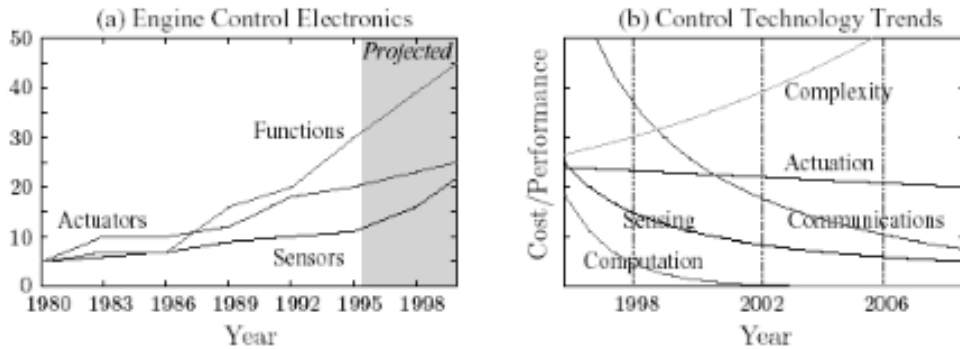


图 2.2: 控制技术的趋势: (a) 发动机控制中传感器、执行机构和控制功能的数目[6], (b) 部件技术的性价比趋势曲线。

控制也与嵌入式软件集成技术密切相关。实际上,所有的现代控制系统都是用数字计算机来实现的。通常它们只是完成各种管理任务的大型计算系统的一小部分。因此,控制软件成为系统设计的主要部分,并使得生产和过程具有许多新特征。在线重构是计算机控制系统的基本特征,本质上,这也是一个控制问题。

控制系统中软件的应用逐渐增多,这对控制学科来讲既是机遇也是挑战。随着嵌入式系统的普及和系统间通讯的普及,人们不仅可能设计出可重构的系统,而且可能设计出能感知其条件、环境,并能与生产者、用户和维护者互动的系统。这些“智能”系统改善了系统的性能,缩短了停工期,并提供了一些新功能。在价格低廉的计算、通讯和传感技术出现以前,这是难以想象的。然而,面对不确定性及其元件损坏,智能系统需要更高级的算法来确保性能指标的实现,也需要新的方法来实时验证软件。人们每天使用商用字处理软件的经验表明实现这一点是十分困难的。

控制技术的新兴领域之一是嵌入式实时软件 [32]。这通常是在计算机科学领域内考虑的,但动力学、建模、互联和不确定性的作用正使嵌入式系统与控制系统具有相同的意义。因此,软件作为控制技术的关键要素,必须把计算机科学原理和方法与控制理论结合起来。这在很多领域已经开始了,例如在混合系统和机器人学,其动力学和控制算法的连续数学表示法正在与逻辑和计算机科学的离散算法结合。

## 与其他学科的比较

控制工程依赖并分享来自物理学(动力学和建模)、计算机科学(信息和软件)和运筹学(优化和博弈理论)的研究成果,但在角度和算法上却存在不同之处。

和其它科学理论的关键区别是，控制基本上是一门工程科学。与理解自然的自然科学不同，工程科学的目的在于理解和发展造福人类的新系统。典型的例子是对人类生活做出重大贡献的交通、电子、通讯和娱乐系统。工程最早以开矿、民用建设、机械、电子和计算等传统学科出现，作为系统学科的控制出现在1950年前后，其发展速度却远远超出了这些传统学科。工程科学的最高成就是发现能够作为分析复杂合成系统新的基础系统理论。反馈就是这样的一种理论，它对工程系统产生了深远的影响。

或许在控制和其它学科之间的最大重叠区就是物理系统的建模，建模是所有工程和科学领域的交叉点。面向控制的建模和基于其它学科的建模之间的基本区别之一就是各子系统间相互作用的表示方式不同。控制依赖于输入输出建模，这允许从许多新的角度考虑系统行为，如抑制干扰和稳定的内部连接。模型降阶，即从高精度模型推导出一个简化的低精度模型，这很自然地需要一个输入/输出模型框架。或许最重要的是，控制意义上的建模允许设计子系统间的鲁棒连接，这是所有大型工程系统正常运行的重要因素。

控制和运筹学领域共享了许多工具。优化和微分博弈在控制和运筹学中都有十分重要的作用。当存在不确定性时，两者都可解决资源分配问题。在控制领域，动力学和互联（反馈）的作用以及稳定性和动态性能的概念是根深蒂固的。

控制也与计算机科学密切相关。实际上，所有的现代控制算法都是用软件来实现的。但控制算法和软件与传统的计算机软件有着极大的区别。系统的物理特性（动态）在分析和设计系统时是十分重要的，（硬的）实时性是实现的核心问题。从软件的角度看，F-16战斗机只是一个外围设备，然而从控制的角度看，计算机只是实现反馈的载体。两者都不是很抽象，这是本报告指出的存在机遇和需要的关键领域之一。

## 2.2 控制系统示例

在当今技术世界中，控制系统无所不在。它们维持着楼宇和工厂的环境、照明和电力；它们管理着汽车、家用电器及生产过程的运转；它们确保交通和通讯的正常运作；它们是国防、航空系统的关键部分。大部分的控制系统并不可见，它们被埋在处理器的代码里，却保证准确可靠地实施其功能。然而，控制系统的存在是一项极其重要的智慧与工程成就，将继续为社会的发展做出更大的贡献。

## 早期实例

控制在工程系统中的广泛应用开始于20世纪后半叶。在这之前也有一些人们熟悉的例子，如前面描述的瓦特调速器和在世纪之交设计的用于调节楼宇温度的自动调温器（图2.3a）。特别是自动调温器，常作为反馈控制的一个易于理解的简单示例。即，该设备测出房间内的温度，并与期望的设定值比较，用这两者之间的反馈偏差来操作加热器，如当温度过低时开始加热，当温度过高时关闭加热器。这种解释反映了反馈控制的核心，但即使对自动调温器这样的简单设备来讲，这种解释也有点太简单了。实际上，加热系统和传感器中存在着滞后和延迟，一个好的自动调温器应该有一定的预见性，如在偏差变号之前就可以关掉加热系统。这样就避免额外的温度波动和加热器的不断开关。

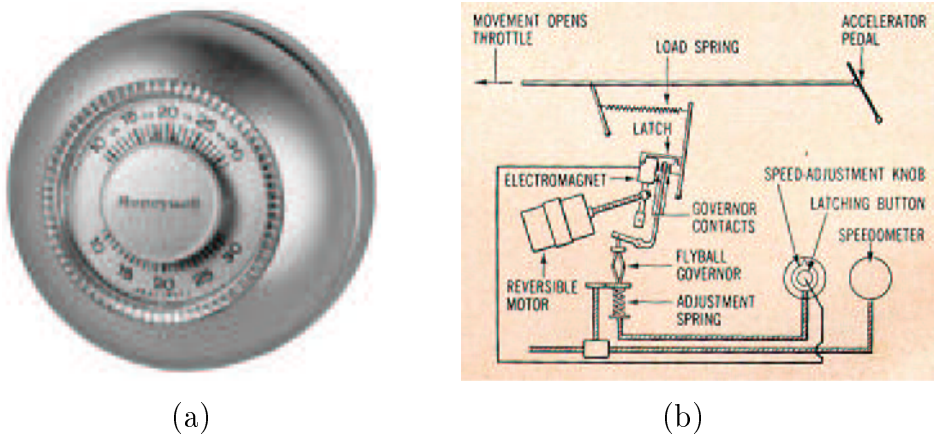


图 2.3: 早期的控制设备: (a) Honeywell T86 自动调温器, 首先出现于1953年, (b) Chrysler 巡航控制系统, 1958年装在Chrysler Imperial车上(注意其离心调速器)[21].

这种修正表明，即使对简单的系统，好的控制系统设计并非是一件易事。为了获得更好的工作效果，就必须考虑受控对象的动态行为。动态过程越复杂，就越需要精心修正。实际上，控制领域最重要的成果是从理论上对动态行为和好的控制器之间的关系进行了彻底的解释，并且把这种解释与功能强大的计算机辅助设计工具相结合，建立了现代控制系统。

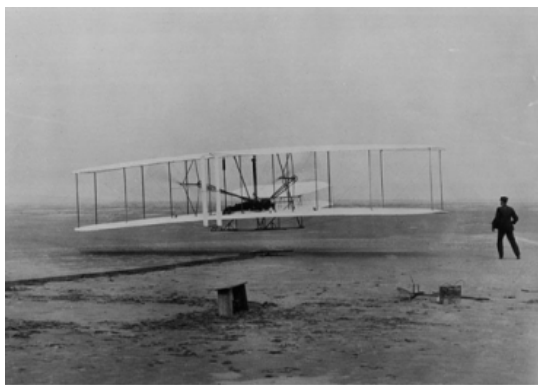
当然还有很多其他控制系统的例子。经过多年发展，这些控制系统越来越复杂，影响越来越大。被广泛熟知的早期系统是1958年用于汽车的“巡航控制”（图2.3b）。借助于巡航控制，普通百姓体验到了闭环反馈系统动态行为的作用——爬坡时的减速误差：由于控制器的积分作用，误差逐渐下降，以及在坡顶时，有小的但不可避免的超调量。更重要的是，体验到了这些系统

的可靠性和鲁棒性，人们开始接受和相信反馈系统，这加速了控制系统的发展。后来，汽车中的控制系统已经有更具体的影响，如排放控制和燃料计量系统的应用减少了污染，增加了燃油经济性。

在工业界，从工厂自动化（以大量数控机床开始），到炼油厂及化工厂的过程控制，到集成电路生产，到发电厂和配电站，控制系统一直是关键的技术。控制系统在因特网（TCP/IP）的信息路由控制和在无线通信系统的功率管理中也起着关键的作用。

## 航空应用

同样地，在航空航天、军事领域中，控制系统也是十分重要的。例如，人们熟悉的二战中的地毯式轰炸：为了炸毁所选中的工业或军事目标，不加选择地在居住区投下无制导的炸弹。现在，这些已经被精确制导的武器所取代。精确制导武器是相当准确的，能够一次只打击一个目标。这是因为有一个由惯性制导传感器、雷达、红外寻的、全球定位的卫星导航以及先进成熟的反馈误差处理技术等组成的精密控制系统，且所有这些都合成在一个扔得起（即低价格的）的软硬件包中。人们也熟悉早期的空间发射过程。细长的



(a)



(b)

图 2.4: 飞行系统: (a) 1903年Wright飞行者(Flyer), (b) 1987年X-29后掠翼飞机

火箭立在发射台上，实际上是一种不稳定的平衡。经常因为失去控制而倒下或在点火后的瞬间烧成火球。由于助推器自身是不稳定的，因此，鲁棒的、可靠的和设计良好的控制系统是必需的。目前，控制系统已经满足了这个挑战。现在为给空间站提供保障和支持、太空探测、通讯、导航、监视、地球观测等大量卫星的发射已经是一种例行的操作了。当然，其载荷依赖于鲁棒

可靠性和设计良好的控制系统，这些系统从高度控制、轨道定位、热量平衡、力矩平衡及通讯等已无所不包。

## 飞行控制

在航空航天领域，另外值得一提的成功控制的示例就是飞行控制。这个例子揭示了控制的学术与技术成就是多么巨大，以及未来控制的进一步发展是多么重要。

从一开始，控制就在飞行器的发展中起着关键性作用。实际上，Wright兄弟的首次有动力飞行的成功只因为飞行器装有可由飞行员连续调节的操纵面（可弯曲的机翼和在前端安装的水平垂直翼）来稳定飞行[19](见图2.4a)。因为Wright的飞行器自身是不稳定的，不能靠自己保持稳定，所以这些调节措施是很关键的。

因为飞行员在驾驶不稳定飞机时的工作量很大，自Wright飞行器以后的早期飞机大多数都被设计成静态稳定的。尽管如此，随着飞机的尺寸和性能的增加，其可操纵性也变差了。后来设计者安装了所谓的“稳定增强系统”——自动控制系统，它们稍微地改变了飞机的动态特性，使飞行更加容易。这些系统首先出现在二战时期。早期，人们使用惯性传感器来测量飞行动态，由模拟电子系统来建立、处理反馈误差，用液压系统来驱动所选择的操纵面（垂直和水平机尾、翼等）。

这些系统的出现立即带来了两个问题：（1）如何系统地设计控制规律（早期系统基本上采用反复试验法）；（2）如何建立能可靠运行的系统。早期系统非常不可靠，通常只是把整个操作面的一小部分交给了自动控制系统，而大部分则留给了人工控制。因此，飞行员常常忽视自动控制部分。

控制理论家为第一个问题提供了解决方法。他们提出了建模和仿真方法（基于微分方程和传递函数），能精确地描述飞机的动态，并且他们又不断地研究出功能强大的控制分析和设计方法来设计控制律。经典控制方法使早期的稳定增强系统的系统化设计成为可能，而现代控制和鲁棒多变量控制已经成为现代飞行系统的关键。

但是仅有分析和设计方法不能解决早期稳定性增强系统的第二个问题，即高可靠的控制实现。随着机载数字计算机和冗余设备的发展，这个问题得到了解决。现在，这些系统已是所有商用和军用飞机的必备部分，其可靠性之高以至于放弃了只将部分任务给自动化处理的旧方法。实际上，对大多数现代飞行器的控制甚至没有了飞行员与控制面的设备接触。所有的传感信号和控制命令都通过数字实现（即线传操控飞行）。

今天，人们甚至把飞机的最终生存机会交给了自动化，如商用运输机的全天候自动着陆。如果在某一重要飞行阶段发生了故障，这些飞机上并没有安全重飞策略可用。另外，例如 F-16、B2 和 X-29 军用飞机（见图 2.4b），其基本动态特性与 Wright 飞行器一样是不稳定的，而且抖动的更加剧烈，以至于人工稳定飞机是不可能的。最后，在现代飞行系统中，一种趋势就是自动地实现越来越多的功能——最终完全不用飞行员。在军事侦察和监视行动中这已经是很常见的，并将很快扩展到有生命危险的任务，如用无人驾驶的飞机躲过敌人的空中防御系统。

下边的插图从成功应用的角度描述了一些进展。

插图：战斗机和导弹（Kevin. A. Wise, 波音公司）

20世纪90年代是航空航天领域成果和变化显著的时代。如不稳定无尾翼飞机、推进受控弹出座、低价且精确GPS制导的武器等新系统得以发展。“线传操控飞行”控制系统已成为标准，使得控制系统的设计和分析成为开发军用飞机和导弹系统的中心。提高飞行员安全和降低成本成为该工业领域发展的关键因素。

应用反馈线性化的飞行控制系统设计方法为新的Gain Scheduled飞行控制系统铺平了道路。这种在X-36无尾翼快速侦查飞机和F-15 Active上应用的方法，允许工程师改善飞机飞行质量，减少设计和开发成本，并使飞行员更容易接受。鲁棒理论的进展提高了分析手段，允许工程师精确预测和拓宽严重不稳定飞机的起降范围。为了进一步提高安全性，人们用神经网络来扩展和加强控制规律以获得可重构的、能自动适应损坏的飞行控制。

导弹系统，如JDAM (Joint Direct Attack Munition)和MMTD (Miniaturized Munition Technology Demonstrator) 系统使用状态反馈最优控制来设计飞行控制，那些不能由传感器测量获得的状态则由估计得到。这种方法节省了传感器硬件设备，减少了重量和成本，且已经证明是完全可自动化的。第4代逃逸系统（GEN4）的弹出座椅也是采用该方法。除了要获得最优性能之外，鲁棒理论使座椅的控制系统可处理飞行小组成员身高与体重的不确定性（95%男，5%女）。实现控制系统的自动编码工具出现在20世纪90年代。这些计算机辅助设计工具为控制系统的设计和分析及软件设计和测试都提供了一个单一的环境。这些都极大地减少了飞行控制系统的实现工作量和测试费用。

控制领域面临的新挑战是开发无人战斗系统（武器及飞机）和这些系统的运作思想，以应对强大狡猾的敌人和快速变化的环境。这些系统必须侦察、识别、定位、确定优先级和执行命令，以永久地摧毁有价值的目标。为了支撑这些系统并使其成为现实，需要发展智能控制、基于视觉的控制、任务规



划、辅助决策、路径规划、通讯结构、物流及保障，最后还有软件的开发、验证和核实。

## 2.3 基于信息系统的作用不断增加

早期的控制应用都集中于被控系统的物理特性，如楼宇的热力学、飞机的飞行机械原理、磁盘驱动头的跟踪特性等。但现在人们面临的情况是计算、传感和通讯的日益普及，人与机器之间和机器与机器之间的交互方式变化迅速。信息的快速增长对控制的影响是很明显的，人们现在面临着大系统和网络控制的挑战，这些系统和网络的规模和复杂度已超出了传统控制应用的范围。

如上所述，变化之一是嵌入式系统和软件在现代技术中所起的作用。现代计算机控制系统能完成大量决策和控制逻辑。这些软件系统正不断地与物理过程相结合，并引入反馈算法来提高性能和鲁棒性。在很多应用中，逻辑运算的代码数量已经远远超出了传统控制算法。大部分的逻辑运算与系统的闭环性能相互交织，但分析、证明和设计的系统化方法还有待于进一步发展。

另一个基于信息系统的控制越来越重要的领域是资源分配系统。这里，控制可定义为存在不确定性时最优动态资源分配的科学和工程。我们通常以数学模型启动一个系统，描述当前的动态和决策如何能影响系统的未来动态，包括整个过程中人的行为不确定性。“资源分配”意味着可以将决策理解为各竞争目标之间的权衡，或从有限的可能动作集合中选择。“不确定性”是关键：系统行为可能会有一些变化，因此作决策时不得不考虑各种不同的情况。不确定性包括决策人得到的信息不完整或受损、数学模型的不确定性和不可预测的影响系统动态的噪声和扰动。尽管经常将这些考虑成一个运筹学问题，但动力学和不稳定性的作用也明确了对控制理论的需求。

向基于信息的系统转变的结果之一就是时代正从以物理特性为瓶颈向以复杂度为瓶颈的系统转变。

已有许多正在采纳这类新系统的例子，如互联网的路由堵塞控制、无线通讯系统的功率控制以及服务和供应链的实时信息使用。所有这些系统中，正是信息流和物理系统的相互作用决定着整个系统的性能。另外一个例子是空中交通控制网络，其中飞行密度、效率和不允许出错的要求形成了一个与大量信息相关联的局面——从飞机定位到单个客户路线的每件事——在任何情况下都必须保持高性能、鲁棒和可靠地运作。图2.5所示的是旧金山湾地区的飞机出入路线，其仅仅展示了这个问题的一小部分。

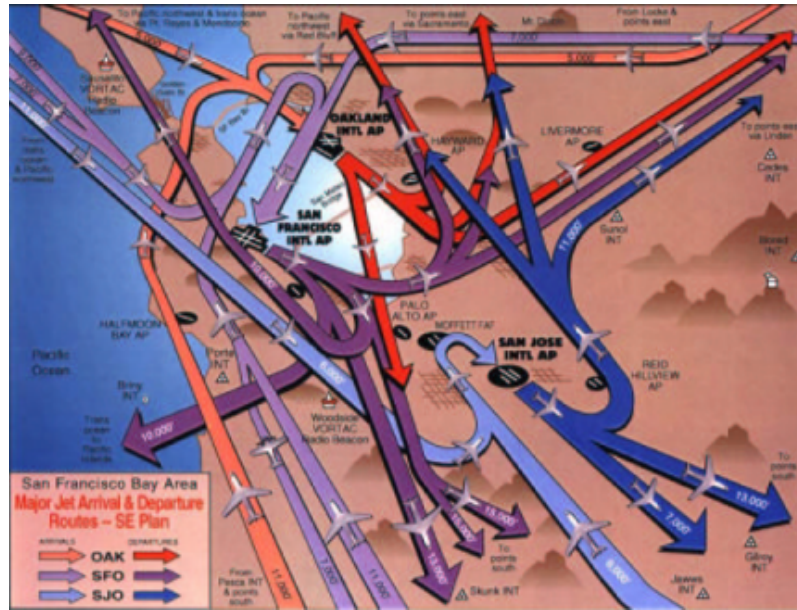


图 2.5: 旧金山湾地区的飞机出入路线

这些应用中，控制是十分重要的。与传统应用领域一样，控制是得到信息，更重要的是输出数据的一种机制。控制理论为分析和设计具有期望稳定性和鲁棒性的互联系统提供了理论基础和工具。

控制应用中的一个基本变化就是通讯和互联网的作用。通讯和互联网使大量信息越来越容易获得，营造了一个控制系统必须面对的新环境，这将彻底改变现代系统中反馈的应用。控制计算必须越来越多地在分布式、部分异步的环境中完成。例如，由于传感、执行和计算节点间的通讯网络是基于包的，建立在定时数据采集和定时计算基础上的紧凑控制技术已不再适用了。在此意义上，很多传统的方法可能不再适用了。因此，在这种信息丰富极大的环境中，为了设计鲁棒的、高性能的反馈系统需建立新的模式。

不确定性的作用在信息极大丰富的系统中也很关键的（基本上未探索）。在大规模互联系统的分析、设计和运作中，源自控制的理念对不确定性的处理将起重要作用。必须考虑不确定性，目的是建立易于处理的模型，以解决那些涉及部件和连接细节的所有可能变化的问题。控制思想作为处理系统复杂性和不确定性的工具，将越来越重要。所以，必须通过教育和设计软件使系统的设计者掌握这些思想。特别重要的一点可能是对性能指标、鲁棒性和稳定性的基本限制的研究，因为他们之间的协调是这一领域设计的首要挑战。

下一章讨论了这一领域需要进一步发展的例子。交通运输的车辆、任务、航空管理系统；网络的资源、功率和路由控制；生物系统的遗传、细胞、综

合反馈网络，只是其中的几个例子。问题的根本在于当前的工具和知识的局限，未来的进步需要更深入地理解控制、通讯、计算、网络的集成及复杂决策系统的建模、分析和控制。

## 2.4 领域面临的机遇与挑战

控制已发展成为一个重要的领域，其工程师能解决许多重要的、实际的和颇具影响的问题。在过去几年里，控制领域的机遇剧增，但同时又面临着许多挑战。本节描述将面临机遇与挑战的领域，并为继续研究推荐一些方法。

### 新环境的特征

控制的未来将受新环境的支配，新环境与过去40年的环境截然不同。新环境的一些特点已经显现，这些特点揭示了必须进行研究的新方向。

**普及的计算、通讯和传感技术。** 工程环境的主要变化是出现了前所未有的功能强大的计算和廉价的通讯。由此带来的新软件和存储设备已经大大改变了许多领域的工程前景。另外，微电子和MEMS<sup>1</sup>已经大大降低了传感器的价格，如图2.6所示的那些传感器，并通过通讯网络得到了新的执行器的概念。这些都不断地丰富着控制系统中传感器和执行器的应用。

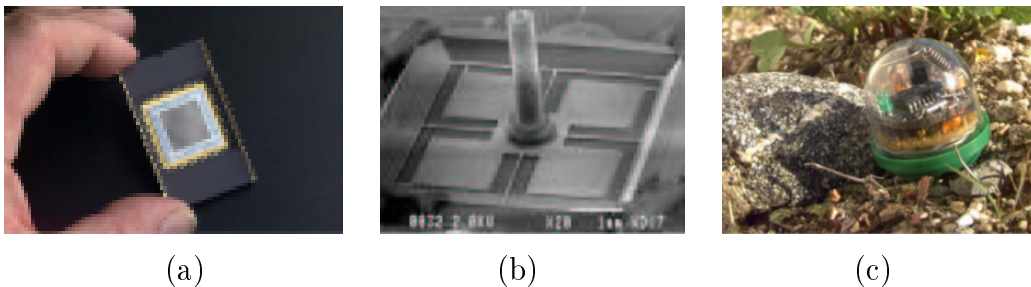


图 2.6: 现代传感器技术的例子，(a) 1024x1024 CCD阵列，(b)基于MEMS的微型陀螺仪，(c) 传感器网络的节点(sensor web pod)

充分利用这些发展带来的优势将需要几十年的时间。一些革新将使某些系统的性能得到显著改善，一些革新将涉及到电话系统、电力网、因特网以及它们的后代产品中的复杂互联类型。这些革新都将依赖于或者可能依赖于控制系统的使用。然而，这两种情况下使用的新思想很可能在本质上有区别，

<sup>1</sup>MEMS 是Micro Electromechanical System，即微机电系统的缩写，译者注。

因为在建立和运行安全、可靠、高度互联的系统方面，人们还没有太多的经验。

**新的应用领域。**除了信息技术的革命性变化外，未来的控制系统将受到物理、化学、生物以及信息科学的影响，并与算法和反馈结合在一起。这将为控制开拓新的应用领域，例如生物工程和量子系统。尽管在控制社团已有人从事这些问题的研究，但是，为了在这些应用领域取得更大的进展，有必要培养控制和其它学科交叉的新一代研究人员。实际上，潜在的控制应用需要有相应的理论知识，下面的插文已表明了这点。

插文：量子测量和控制（Hideo Mabuchi，加州理工(Caltech)）

为了说明控制在新领域的应用情况，看一下 Hideo Mabuchi 的研究，他目前正在探索反馈和控制量子系统中的应用，及控制在统一量子理论和经典物理方面的作用：

20世纪物理学仍未解决的一个重要课题是：由微观量子体系描述的状态和动力学似乎不能很好地解释宏观的经典物理学现象。例如，物理理论认为把确定值同时赋予量子系统的一些可测物理量是不正确的。至今，人们仍然认为量子力学是对微观物理的正确描述。对足够大尺度的宏观体系和多维强关联体系，微观量子学鲁棒地演变为经典动力学。那么，人们如何才能将作为微观理论的量子力学与描述宏观现象的经典物理统一起来呢？

控制理论为理解量子系统提供了一套新工具，其中之一就是系统化的模型简化技术：

从“多尺度”的观点看，阐明从量子到经典的过渡所面临的挑战是证明下面的命题成立：能够将十分复杂的量子系统严谨且鲁棒地近似为有一定自由度的动力学系统，从而可以由量子物理学严格地得到经典物理学。用控制理论的语言，人们可以把经典物理学看作是量子物理学的一个最优模型简化。当这个问题以这种方式提出时，一些基本问题也随之而来。怎样才能使这种模型简化变得如此广义和具有鲁棒性，使其仅仅取决于量子理论的结构而不是任何特定动力学体系的细节？在模型简化过程中用来控制误差范围的参数是什么？如果成功了，对量子力学的基本阐述有什么影响？

此外，控制能为实验提供一些新的技巧，使人们对物理学有更深入的理解：

人们希望反馈控制能提供关键性的实验方法，用来在实际的实验环境中验证量子测量理论的有效性，尤其是在连续观察条件下系统的条件演化方程。如可以用这种方程作为综合控制器的基础，可以通过比较实验观察到的闭环动态与理论期望动态来评估方程的合理性。

Mabuchi的工作说明控制理论作为一种分块技术(disruptive technology)对理解周围世界具有潜在作用。

**不可靠元件组成可靠系统。** 大多数复杂的人工系统并没有因个别元件的失效而导致不可操作。在这点上，生物系统经常表现出非凡的鲁棒性。为解决可靠性问题，常常采用简单的冗余或备用元件法，但是，由于这些方法的不经济性而限制了其有效使用。当元件失效时，允许系统够重构的设计常常更受青睐，即使这降低了系统性能。尽管计算机存储芯片和磁盘驱动控制器常常利用这种策略，但是，自愈系统还没有被好好地研究和分析。

在处理复杂连接的网络系统时，这一问题具有相当重要的意义。这种情况下，系统有几十亿个元件，而这个系统是如此重要，根本不允许停止工作。

**复杂性。** 空中交通控制系统、电力网控制系统和其它的大规模的互联系统是典型的复杂系统，它们的复杂性不但是设计决定的，而且是由经济方面的原因和问题的本身决定的。一个可以接受的解决方案必须能够解决复杂性问题。在决定能否建立一个系统时，正确权衡系统的可行性是重要的，因为对一个产品来说“几乎”能工作是没有价值和意义。

每一学科都有方法来处理某一类复杂性问题。例如在物理学科中，用来研究统计力学的工具已经有很多，对解决一些问题是有用的。然而在讨论复杂性问题时，要找到一些观点阐述一些现象（如密闭系统的熵是只能增加的）是一方面，而有一个“复杂系统的理论”是另一方面。后者使用了一点矛盾修饰法，因为它暗示了系统并不是真的复杂。另一方面，在设计高度互联的系统和研究自然发生的系统时，试图理解和建立方法论是十分有用的。正在研究免疫系统的工程师很可能会提出更好的新方法来自抵抗因特网病毒，同时来自神经科学方面的观点可能会给研究由不可靠元件组成可靠系统带来新的灵感。

## 未来的前景

新环境不但使控制面临着许多挑战，而且也为扩大控制在各应用领域的影响提供了许多机遇。控制、动力学和系统未来的发展方向会继续受到新应用的影响，应致力于解决基本问题。

这个领域所面临的最大挑战之一就是计算、通信和控制的集成。当计算、通信和传感技术更加普及时，控制的应用也越来越普及。但是，学科分离的标准模式将不再有效。例如，当人们看到冗余、断续、有时还带有不可靠计算元件的分布式系统时，计算结构与计算功能分离的技术和方法也就开始瓦解了。不要满足于简单地研究混合系统，需要进一步发展计算机科学与控制相结合的理论。

类似地，互相联接的两个节点之间的通讯具有足够的可靠性和足够的带宽，即信道的特性可以忽略，这种简化将不再满足未来的高度网络化环境。控制与通信协议更加紧密地结合在一起，使反馈回路能够与那些高效、低带宽的信息使用同一通道，且彼此不受干扰。

未来控制的另一方面是能够分析和综合使用更高级决策控制系统。传统的控制已经解决了保持几个变量恒定不变（调节）的问题，或使变量跟随给定时间函数（跟踪）的问题。在机器人学方面，控制曾面临众多的复杂问题，如避障和路径规划（基于任务的控制）。未来的系统要求控制能应用到不是由连续变量描述的而是由符号、语言或基于协议所描述的系统。当人们转向需要高水平决策能力的，更加复杂的，自主或半自主系统时，这是必需的。

同时，当控制向更高水平的决策方向发展时，它也将转向目前也刚刚显现的新领域。这包括生物、量子和环境系统；软件系统；企业级系统；经济和金融系统。在这些新领域，发展严密的控制理论是必要的。这已是这个领域的历史强项而且也为很多系统带来了成功。

最后，可以想象，人们对科学和工程中应用控制思想的认识将不断加强，包括在数学和科学教育中，反馈系统将进一步的简单易懂。

## 方法

这里描述的机遇和挑战应从两方面来讲。一是需要广泛的支持和积极的研究计划，目的是为设计和实施可靠的、高鲁棒性的互动系统研究和建立理论方法。另外，需要是为该领域的学术研究计划预备空间。

研究计划必须与其它学科的研究活动相结合，并且要有一些在软件工程、分子生物、统计力学、系统工程和心理学方面训练有素的科学家参与。控制研究者们应跳出传统的学科界限，积极参与如计算机科学、生物学、经济学、环境科学、材料科学和运筹学等方面的研究。对基于信息的系统，需特别加强控制方面的研究，包括通信、软件、验证与确认以及物流。

为了支持更广泛的科研计划，必须发展全新的学术计划。这些计划应该加强系统观点和超越传统学科界限。因此，有必要为新的控制研究者提供更好

的传播工具，并为工程师和研究员提供更为广泛的教育。这需要努力将目前的知识以更简洁的方式提供给大家，允许加入软件、通信和新兴应用领域的新成果，且要保留这些新结果所依赖的关键控制原理。同时，控制社团必须力求做到在不同层次上，甚至在初高中教育阶段，在数学和科学课程中增加反馈内容。反馈是基本原理，是每个有技术知识的人的知识基础。

控制领域的特征之一是强调所要研究问题的理论和数学描述。这种训练已经产生了一系列可靠和明确的研究成果。这个特征需要有这种能力的大学毕业生，所以保持人才流进这个领域是一个重要因素。然而，这一特点也妨碍了其它领域的科学家和工程师进入这个领域，并且也使其它领域的研究人员在他们自己的领域消化和使用控制成果造成了困难。有时还对不容易转换成数学描述的思想的发展起到了阻碍作用。人们经常需要在可能的极端之间寻找合适的解决途径，但这样做所面临的挑战已经不是新的了。新的挑战是开发方便、实用的仿真工具使探索法更具吸引力、更可靠。特别地，有些问题是如此大和（或）具有如此严重的非凸性，进行严格的分析是不可能的，这类问题的优化现在也可用原则意义上的探索法来解决。根据现有软件和计算能力，这可能是目前最有效的处理方法。在培训学生及在该领域的高级专业会议上，为有效的探索法找一席之地是很重要的。

最后，有代表性系统的实验是控制学科必要的组成部分。无论是在教育界还是在科研领域，应该支持增加实验，且要开发一些反映新环境的新实验。这些实验对于理解随之而来的新应用领域，以及对于应用新的理论开发软件和算法都是重要的。同时，他们也是系统工程师的培训基地，工程师们通过对实际系统的操作、学习、建模、鲁棒性、互联性及数据分析。

将在第5章详细介绍专家小组的建议并为实现这些基本目标提供高水平的方案。这些建议集中于那些需要竭尽全力开拓的新应用领域，特别是那些控制思想对未来的进步相当重要的领域。他们也指出需要保持这个领域强有力的理论基础和历史严密性，同时寻找新的途径向更为广泛的科学家和工程师们展示和拓宽控制的应用。

控制所面临的新环境是诸多新挑战和机遇并存。推动其前进要求加速学科间的交叉，并且超越当前的模式以解决下一代应用问题。下面的章节将更加详细地探讨一些应用领域，并提出一些详细建议。





## 第 3 章

# 应用、机遇和挑战

本章将考虑控制在不同应用领域的机遇和挑战。专家小组决定围绕5个主要方面的应用进行论述，它们是：

- 航空航天和运输
- 信息与网络
- 机器人与智能机器
- 生物和医药
- 材料和加工

此外，专家小组又考虑了几个其它领域，包括环境科学和工程、经济和金融，分子和量子系统。总之，本报告展示了大量的控制应用，表明了控制思想应用的宽广性。

每个应用领域的机遇和挑战都是本报告所提出建议的基础。在每个领域，专家小组不但征求了控制研究者的建议和观点，也请教了那些并不自认为是控制研究者的应用专家们的建议。这样，专家小组希望能确定每个领域中的真正挑战，而不是简单地考虑人们感兴趣但也许影响力不大的控制问题。小组希望研究结果不仅使控制研究人员感兴趣，而且使科学家和工程师有兴趣考虑怎样把控制工具应用到他们的学科中去。

专家小组考虑了控制领域所有方面遇到的一些突出问题。系统而且严密的工具对控制领域未来的成功至关重要，并且是该领域的重要标志。同时，解决这些问题需要改革控制的科研和教育模式。所有应用领域不断增长的信息需要与计算机科学、通信更加紧密的结合，也需要提高复杂决策系统的建

模、分析与综合的工具，这种系统常常包含符号和连续动力学。所有的应用领域都需要继续理论基础的研究，以确保控制的未来优势。

接下来的每一小节将简单介绍每个应用领域的背景和控制历史，然后有选择地介绍将揭示控制未来潜力和技术挑战的内容。报告的其它部分不试图全面地陈述所选择的内容，而是集中阐述专家小组认为最重要的、影响深远的内容。贯穿这些章节，报告把参考文献限制在那些提供历史性内容、未来方向或拓宽所论述领域视野的文章，而不是一些特殊的技术贡献（由于太多，不方便列出）。

### 3.1 航空航天和运输

人类已经知道怎样制造机翼或飞机，当以足够高的速度飞行时，它们不仅能支撑机翼本身的重量，而且还能承载发动机以及驾驶员。人类也知道怎样建造发动机和足够轻的螺旋杆，以及怎样产生驱动飞机持续飞行的动力。飞行学员们却仍旧面临着不能把握平衡驾驶的问题。当这些问题解决之后，飞行时代就到来了，其他困难也就不太重要了。

摘自Wilbur Wright, 1901 给西部工程师协会的讲演[30]。

航空、航天和运输业包含了许多极其重要的应用领域，其中控制是关键性的使能技术(enabling technology)。这些应用领域代表了当代世界技术生产力的主要部分，也是经济力量的主要部分，为人类发展做出了巨大贡献。控制在这些应用领域的历史地位、目前的挑战、以及由此引出的未来需求都有力地证实本报告所提出的建议。

#### 历史地位

控制已是航空、航天领域关键性的技术，这可以追溯到20世纪初。实际上，Wright兄弟著名之处不单是其展示了动力飞行，而是他们展示了可控的动力飞行。他们最早的Wright飞行者(Flyer)组合了可移动的控制面（垂直翼和前置翼）和可弯曲的机翼，允许飞行员调整飞机的飞行状态。实际上，飞机本身是不稳定的，所以必须由飞行员连续修正。这就是早期的受控飞行。接着人们对飞行控制技术进行了不断改进，建造了性能高、可靠性高的自动飞行控制系统，就是人们今天看到的商业和军用飞机。（见16页插图：“战斗机和导弹”）

类似的，控制技术的成功事例也出现在航空航天领域的许多其它应用方面。如第二次世界大战中所用的弹道瞄准器和火力控制伺服系统已发展为今天的高精度雷达制导武器和精确制导武器；早期的容易失败的空间导弹也发展为常规发射器、载人月球登陆设备、载人空间站、探索火星的机器人行走设备、外星球上的轨道运载工具，还有大量商用和军用的监控、通信、导航和地球观察卫星等。

同样的，控制技术对运输（汽车、地铁、火车、船舶、航空运输系统）系统的改进和革新起到了关键作用。主要贡献是大大增加了安全性、可靠性，节约了燃料。汽车已经从手工调整的机械/气动技术发展到了计算机控制，主要功能包括喷油（点火）、排放控制、巡航控制、刹车及车内舒适性等等。实际上，现代汽车都装有许多独立的处理器，使得汽车能长时间地在恶劣环境下可靠、准确地实现这些功能。下面的插文回顾了汽车电子控制的发展历史。

插文：汽车系统的排放要求及电子控制（Mark Barron 和William Powers, 福特汽车公司）

电子控制的主要成功事例之一是减少排放和提高效率的复杂发动机控制系统的开发。Mark Barron 和Bill Powers 发表于1996年IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 的创刊号上的文章描述了一些进展[6]。

文中，Barron和Powers描述了产生汽车发动机电子控制的环境：

除了生产制造技术之外，直到20世纪60年代后期，汽车工业技术相对稳定。后来，两次危机冲击了汽车工业。首先是环境危机。环境问题导致了要大幅度减少汽车排放的规定的出台。第二个危机是20世纪70年代初，石油禁运造成的燃料短缺，这导致美国立法机关要求提高燃油的经济性。

为提高燃料利用率和降低排放，要求寻找新的发动机控制方法。今天人们想当然地认为微处理器使之成为可能，但应该注意微处理器是20世纪70年代初出现的。当1970年第一个计算机化的发动机控制系统原形出现时，所用的小型计算机占满了汽车的行李箱。随后，1971年发明了微处理器，1975年发动机控制装置减小到蓄电池那么大，到了1977年只有烟盒那么大了。

硬件方面的进展允许使用复杂控制规律处理复杂的降低排放和高燃油经济性：

20世纪70年代末，铂催化转化器的引入使排放符合了标准规定。催化转化器是令人印象深刻的被动无源器件，它能在特定条

件下非常有效地运行。发动机控制系统的任务之一就是维持这些条件，即，使进入催化器的废气不含太多的碳氢化合物和氧气。如果空气与进入到发动机的燃油比保持在一定的范围内（如几个百分点），那么催化剂能有效地消除 90% 多的碳氢化合物、一氧化碳和氮氧化物。然而，只有当工作温度大于  $600^{\circ}\text{F}$  ( $315^{\circ}\text{C}$ ) 时，催化才起作用。而且，经验表明在催化剂加热到最大有效工作温度过程中，最初两分钟的排放量达到 80%（这是根据联邦测试规范测试的结果）。另一方面，如果催化剂工作在  $1000^{\circ}\text{F}$  ( $540^{\circ}\text{C}$ ) 以上一段时间，催化作用将被破坏。更多的燃油将用于冷却催化剂，其后果是燃油经济性降低。因此，机电系统不仅要控制空燃比，保证催化过程工作在最佳状态，同时要控制发动机的排放，使得在没有过热时就快速关断催化过程，以保持最大燃油效率。

过去三十年在降低排放量方面所取得的成就见证了控制领域的成就[37]:

美国、欧洲、日本的汽车尾气排放标准持续显著提高。来看一下美国的轿车排放标准，2005年碳氢化合物（HC）的排放标准要小于1970年的2%。到2005年，一氧化碳（CO）的排放标准将只有1970年10%，而氮氧化物也将下降至1970年的7%。

此外，发动机控制为电子控制在其他领域的应用提供了经验[6]:

一旦工业界对单板机控制有了信心，其他的应用很快随之而来，如刹车防抱死系统、计算机控制的悬挂系统、驾驶系统和被动安全气囊系统等。无论消费者是否熟悉发动机控制系统，但是他们可以看到或者感觉到这些系统的存在，至少知道它们在车上。现在，计算机嵌入于车辆的每个主要功能中，而且人们正把两个或者更多的控制系统联合起来完成新的功能。例如发动机控制与防抱死系统的结合构成了牵引控制系统，其控制车辆加速时的性能和减速时的防抱死。

将控制应用于车辆的重要结果就是使车辆能更加安全和可靠地运行。1950年末，巡航控制系统是车辆最初引入的引起广泛注意的伺服系统之一。公众对控制技术的信任可以追溯到这些早期的控制系统的成功。

当然，每一次成功也归功于其他技术领域的成就，如推进器、材料、电子学、计算机、传感器、导航仪器等。然而，这同样离不开几个世纪在控制理论、分析方法以及设计工具方面的成就。例如，飞行控制工程协会的前辈仍



图 3.1: (a) F-18 战斗机, 批量生产的首先使用"线传操控(fly-by-wire)"技术的军用战斗机之一。(b) X-45 无人驾驶飞机(UCAV)

然会提及第二次世界大战时设计控制系统的经历: 手动调节飞行反馈增益, 这本质上是基于实际飞行的试探设计法。那时, 飞行器的动态建模方法刚刚起步, 使单输入单输出(SISO)反馈回路稳定和严格频域设计理论只限于学术研究。这些理论与工程实践结合使这个领域发生了革命性的变化, 即用最小的试验量及合理的工程经验成功地设计了更为复杂的反馈控制系统。

当然, 自从上个世纪中期以来, 上面所描述的严格建模、分析与控制系统设计方法已经取得了显著的进步。作为过去五十年最重要的R&D结果, 今天的技术允许设计者不单可以设计SISO系统。而且, 能够处理多输入多输出系统、动态行为复杂的不确定性系统、具有强干扰和更高的性能指标的系统等。在现代航空器和运输车辆中, 存在多个反馈回路是很常见的。在过程控制中, 反馈回路已达到上百个。人们能设计和实施连续、可靠、低成本的控制系统, 大部分取决于本世纪后半叶对控制领域的投入和取得的成就。

## 目前的挑战和未来的需求

今天, 一些工程系统的控制需求以及对未来控制的要求超越了目前的控制理论与工具的能力范围。这是因为目前的控制工具与理论几乎都是针对动态过程是光滑和连续的那些系统, 其满足基本的物理定律, 并且可以由微分方程组描述(通常是大的微分方程组系统)。现有方法的普遍性和严格性是由动态系统的这些特性决定的。

许多新的控制问题不再满足这些基本特征, 或者部分不满足。控制设计问题已经从控制层次上的所谓"内部回路"(如调整特定的飞行参数)发展到各种不同的"外部回路", 如操作方式的逻辑调整、车辆结构、有效载荷构造、

健康状况等[3]。对于航空器来讲，这些功能总称为"运载管理"。以前，这些功能是由飞行员或者其他的操作人员完成的，处于人工和自动的人-机边界的人的一侧。今天，这种情况正在变化。

许多原因造成了这种变化，包括经济性（目前的两个、一个或者无人驾驶与以前的三人驾驶），安全性（操作者不会暴露于危险或者敌对的环境），以及高级的性能（没有强加于操作者的操作限制）。举例来说，现在，军队发展的趋势是无人驾驶车辆上战场。无人驾驶车辆的良性应用（如侦察和监视）已经非常普遍了，而在更危险场合的应用（如用于抑制敌人防空力量的无人战斗机）也正在加紧开发之中[29]。这种情况下，控制设计必须考虑到全部问题，包括传统的内部回路，运载工具管理功能，甚至是高级的"任务管理"功能，即通过协调一队运载工具以实现特定的任务。

今天，设计这种分层结构的上层部分的工程方法还远远没有严格化和系统化。大体上，这包括以下几个部分：从专家那里收集大量的IF-THEN-ELSE逻辑规则，对这些规则进行编程，在操作环境中模拟这些规则的执行效果。由于逻辑规则并不提供固有的光滑性（任何状态变化都是可能的），因此只有通过仿真来进行验证，而且只有通过彻底的仿真才能保证好的设计品质。很明显，这是不能接受的——具有坚实系统理论背景和严格性传统的控制社团将为此做出巨大的贡献。

人们开始研究非光滑（混合）动态系统研究可能采用的控制理论与工具。如给允许的逻辑操作加上严格的限制条件，这与物理规则具有相同的调整作用。如果能严格满足这些限制条件，就能规范地分析和证明所形成系统的一些期望特性。这种方法类似于计算机语言设计，并支持了这份报告的建议之一，即控制与计算机科学学科需要密切合作。同样，严格性的传统标准也应扩展到计算、算法和试探法。

但是，人们不能忘记控制学科关键的特征，包括严格实时控制规则的实现，以及对所有软硬件控制部分的高可靠性操作。今天，许多控制系统（如商业运输机的自动着陆系统、发射推进器、F-16和B-2飞机、发电站、化工厂等）会因控制的硬件部分失效而带来灾难。未来的控制系统，如前面提到的无人驾驶运载工具，也是同样的。未来的航空航天和运输工具仍将会遇到更复杂的挑战。专家小组已经注意到控制设计问题的基本动力学正在从连续向混合变化。更显著的趋势是动力学系统变成了许多分散实体的大集合，其中每个实体具有局部计算和全球通信的功能，但几乎没有服从物理定理的规则性。因此，使用集中控制几乎是不可能的。例如，国家空中管理问题、自动化高速公路与交通管理问题，以及未来战场的指挥与控制问题（图3.2）等。

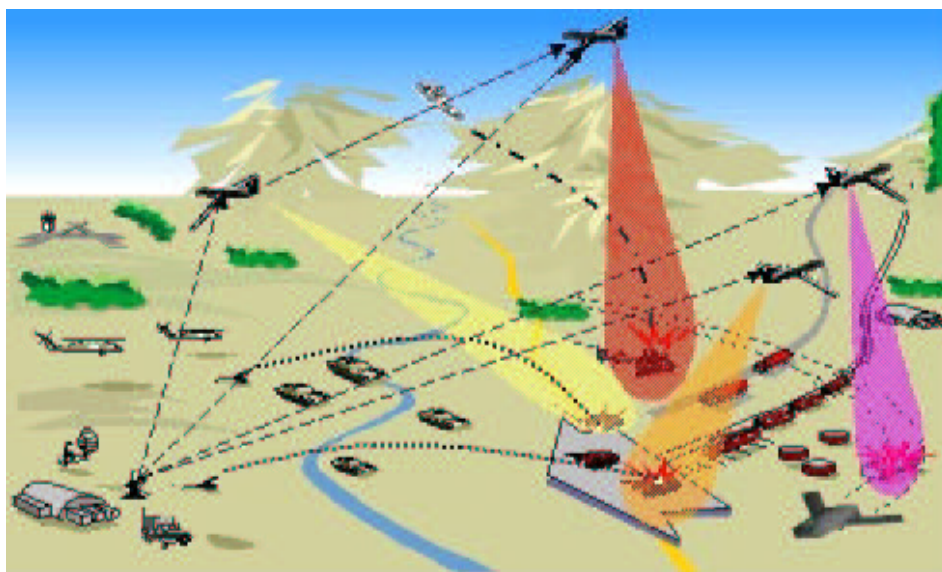


图 3.2: 战场管理示意图, 表示在不同的空间和地面之间的分布式指挥与控制

空中管理在今天非常重要, 任何交通停滞及堵塞都威胁着航空运输系统的完整性。目前, 由于空中堵塞造成的地面停留及飞行的空中延迟已经非常普遍, 航线的飞行时间会自动加上这些延迟。空中交通管制系统(ATC)的结构应为这些延迟负部分责任: 飞行控制分散于各个空中区域, 然而在一个飞行区域内, 控制几乎是完全集中的, 即把飞机的传感器信息传输到地面的空管人员, 应用地面导航和监视设备沿着一组试飞好的航线为飞机人工导航。在今天的系统中, 恶劣的天气, 飞行器失灵以及跑道或机场的关闭都会在全国产生不良影响。人们正在努力开发驾驶员座舱“传感器”, 如扩展GPS导航系统和机—机数据通信链, 来改善目前的系统。利用这些新技术, 新的分层控制方法正在形成, 它可自动完成ATC的一些功能。这带来了一系列新的挑战: 信息共享机制和新的、分布式的、能确保飞机间隔的嵌入式控制系统的设计, 以及空中交通网络的动态拓扑设计。这有助于选择安全的飞行路线以及适应不同的交通流量。这两个方面为控制领域的研究人员提供了巨大的机遇。

最后, 必须注意到未来也许有许多符合传统控制设计模式的应用, 而且由于它们的巨大影响力也是值得进一步研究的。除非常规发电站外, 车辆常规“内回路”就是例子。电动机和小功率内燃机组成的混合汽车, 以及电动机和燃料电池组成的燃料电池汽车都更加依赖于良好的控制系统, 以确保有效和可靠的运行。与此类似, 装有附加仪器和货物跟踪系统的传统运输系统, 如轮船和有轨电车, 其自动化程度的提高将依赖于先进的控制和最优规划,

并将取得最大的经济效益。另一个传统领域就是普通航空业。在那里，使驾驶小型飞机变得容易和安全的控制系统，以及提高其自动化管理程度也是必要的。

## 航空航天和运输的其他趋势

除了前面着重讲述的领域以外，航空航天和运输还有许多发展趋势，而这些将得益于控制，也为控制带来新的成果。下面简要介绍一下。

**汽车控制系统。**全球每年大约生产六千万辆汽车，因此汽车控制系统是控制的主要应用领域。1970年通过的汽车排放标准要求更先进的发动机控制系统，使汽车在不同环境和整个使用期间能干净、有效地运行。同时，微处理器的发展和应用允许使用高级算法使汽车的排放至少降至1970年排放标准的一半。

未来汽车的设计将更加依赖电子控制[37]。图3.3表示了可能会用于下一代汽车的一些部件，其中许多都是基于控制技术，包括基于雷达的速度和车距控制系统，用于提高稳定性和改善悬挂特征的底盘控制，悬挂和刹车的主动控制，以及用于安全的主动刹车系统。此外，先进的网络和通信装置将允许各部件间的有效管理，以及根据用户/经销商协议开展的车辆诊断。

这些新的特征将需要更高的集成化控制系统，将多个子系统结合起来实现总体的稳定性和性能。如底盘控制系统，它结合了转向、刹车、传动装置、悬挂子系统，以及附加的新传感器。人们也可以想象增加车辆与道路基本设施之间的相互作用，如自动化高速公路和从实验室研究阶段进入应用阶段的自主车辆。后者特别具有挑战性，因为这些应用开始把不同类型的车辆通过通信系统联结起来，从而体验变化的带宽和依赖于局部环境的时滞。为这样的系统提供安全、可靠、舒适的操作是控制领域的一个主要挑战，同样也适用于各种民用、工业以及军事用途。

**飞机的推进系统。**随着计算和传感器的性能价格比的不断降低，在推进系统中更有效地利用信息成为可能。类似于已有的或即将出现的汽车系统，智能涡轮增压发动机将大大降低运行及维护费用。通过嵌入操作模型及基于条件和任务的优化，它们会提供更健康、更高性能以及更长使用寿命的管理。它们会更灵活、对器件的失效有更好的容错性，也会集成到业主的资源管理系统中，根据业主的要求使业主了解发动机的状态信息和保证可预测资产的有效性，降低维护和整体管理的费用。

测试故障（诊断）和征兆预测（预兆）是智能发动机的核心。为此，需要对热流体、结构和机械系统，以及操作环境详细建模。为了使已有的方法能



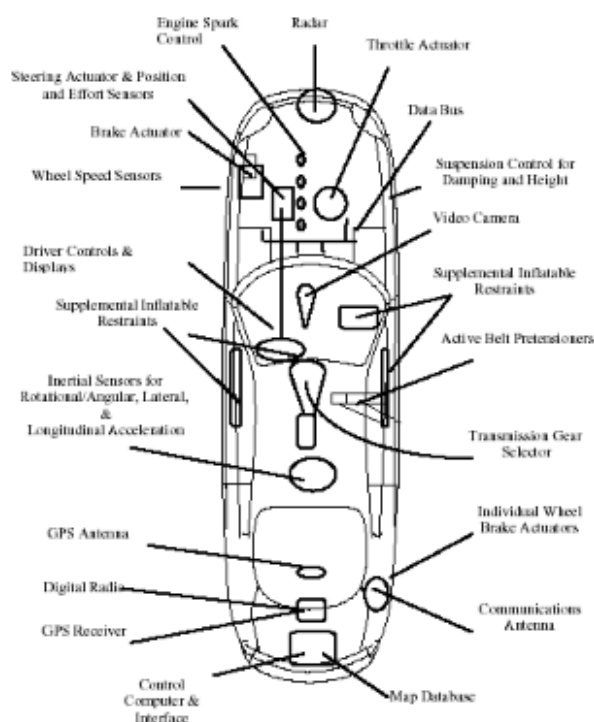


图 3.3: 未来车辆基本功能的主要组成部分[37]

考虑子系统互连，将应用模型降阶的先进技术构建机理模型。这种方法大大扩展了目前的发动机建模。

嵌入式模型同样可用于在线优化和实时控制。优点是能根据操作条件和环境的变化通过刷新代价函数、机载模型和约束条件来定制发动机性能。这样，针对大范围不确定性设计鲁棒控制器所面临的许多挑战可以囊括到在线优化中，通过协调设计来得到鲁棒性，也将总是获得最优的性能。

**流量控制。**流量控制涉及利用感应器件改变流体的流动以提高可操作性。流量控制的应用实例包括：使飞机机翼、发动机舱、压缩机风扇叶、直升机转子扇叶增加提升力和减小后拉力，汽轮机、工业用加热器和冷却器、以及发动机喷嘴的高性能雾化，降低共振和叶片涡流相互作用的尾流管理，增强油气混合以提高燃烧效率和降低噪音。在过去的几十年里，开发了很多装置用于流量领域，如用于控制旋转失速与分离的新型空气喷射技术，增强混合与导引的合成喷嘴，调整边界层和驻点附近流动的MEMS器件等。此外，新的传感技术，如微型风速仪将成为现实。

传感和执行技术的改善正在使新的控制应用成为可能，如控制不稳定的剪切层和分流、热声学的不稳定性、以及压缩系统的不稳定性，如旋转失速和

喘振（最新综述见文[10]）。在高超音速飞行系统，出现了一个引人注意的领域。那里，流量控制技术为设计运载工具提供了一个很大的工具箱，这包括减小阻力、产生控制力的新方法，以及在这种速度下对一些复杂物理现象的深入理解。

**航天系统。**用于民用、商业、防御、科学研究及智能目的的航天系统使控制领域面临着挑战。例如，大多数的太空任务在飞行之前并不能够在地面上进行充分的测试，这对很多动力学和控制问题会产生直接的影响。为了说明这些具有挑战性的太空系统问题，需要从三个方面来解释：（1）详细建模，包括以非常小的尺度描述系统基本物理特征的改进办法。（2）通过飞行演示寻找典型系统的行为特征。（3）在不确定性、失效、动态改变的情况下设计导航和控制算法来保证系统性能(抗干扰及跟踪)。

在未来的航空任务中，能够产生革命性变化的领域主要有两个：柔性结构的分析与控制和空间飞行器的编队飞行。这两个方面同时影响着有效孔径的允许尺寸，而有效孔径无论从光学成像还是大范围波长信号的收集都影响着"成像"性能。单片镜头本身的局限性限制了其进一步发展（可能的例外是可充气的和可折叠的薄膜，这是它们本身面临的极限挑战），各种分割方法提供了唯一的解决方案，如阵列展开和受约束或自由飞行者的组合。然而，这些方法也带来了一些挑战，如实际动力学特性的描述，保持必需的光学误差的传感及控制系统的建立。

20世纪70和80年代，在主动战略防御组织（SDIO）的支持下，柔性动力学和控制领域进行了大量的研究工作。然而，对于未来（纳米）任务所要求的性能来说，仍有许多工作要做，如在微动力学层面上建立模型和开发能适应小尺度系统变化的控制技术。

相似的问题也存在于前面提到的完成成像干涉测量任务的编队控制。这些需要开发控制算法、执行器、计算以及通信网络。传感器能在几百米到上千米的距离测量纳米级的偏差。同样，不同类型的执行系统必须发展到纳米及微米级别的控制范围，且有很低的噪声和高分辨率。在导航和控制算法中，将不再接受由于特定近似而产生的残差。此外，对某些情况而言，用于验证的仿真技术必须通过关键状态与参数的无数次独立实验以保证精度。验证实验不仅是在长时间范围，而且也要在短时间范围，以及在有随机噪声输入的条件下完成。总之，为了实现下一代先进的航空航天系统，必须针对单个元件和集成系统研究微米和纳米级范围内的分析、传感、控制、仿真问题。

## 3.2 信息和网络

一个典型的拥挤的网关就像灭火水管通过一个小漏斗（输出序列）同苏打汽水吸管相连一样。如果数据包到达的速度比数据包离开的速度快，漏斗会装满并最终溢出。随机早期检测（Random Early Detection, RED）是一种简单的调节器，可以监控漏斗的水位，并使输入与输出匹配（通过降低多余的流量）。只要控制规律是单调非递减的，且覆盖了从0到100%的衰减率，RED可以工作于任何联接、任何带宽和任何类型的通信。

摘自 Van Jacobson, North American Network Operator' Group meeting, 1982 [20]。

通信网络的快速增长为控制提供了几个重要的机遇和挑战。尽管存在重叠，可以大致将这些机遇和挑战分为两个主要部分：网络控制(control of networks) 和基于网络的控制(control over networks)。

### 网络控制

网络控制是一个非常大的领域，包括很多方面，这里简要地描述其中的一部分。网络控制的基本问题包括网络连接的堵塞控制，数据包的路由问题，多重位置的数据缓冲与更新，以及无线网络的管理级别。

这些控制问题的许多特征使它们变得非常具有挑战性。突出的特征是这类系统的规模非常大，因特网也许是人类有史以来建造的最大的反馈控制系统。另一个特征是控制问题的分散性：必须快速做出局部决策，并且只基于局部信息。由于相关网络状态信息的观测或传递到控制器有一段时间延迟，以及局部的控制动作也是经相当一段时间后才影响整个网络，所以可变的时间延迟使网络的稳定性变得非常复杂。由于网络拓扑、传播渠道的特征、流量需求、可用资源等的变化，网络的不确定性是变化的，网络的变更也是经常的和无法预测的。另一个复杂的问题是不同的流量特征，如根据数据包和流通时间的统计和对服务质量，如延迟、带宽、损失率的不同需求。网络必须面对这些问题。

这种情况下，必须管理的系统资源包括终端主机和路由器的计算、存储和传输能力。此类系统的性能可以从许多方面来进行评价：吞吐量、延迟、丢失率、公平性、可靠性，以及适应流量模式变化、可用资源变化、网络阻塞变化的速度和质量。

为了阐明这些特征，简要描述一下客户访问文件请求所调用的控制机制：包括网络缓存、阻塞控制、路由和功率控制。图3.4显示了用于处理上述请求的基础设施图。

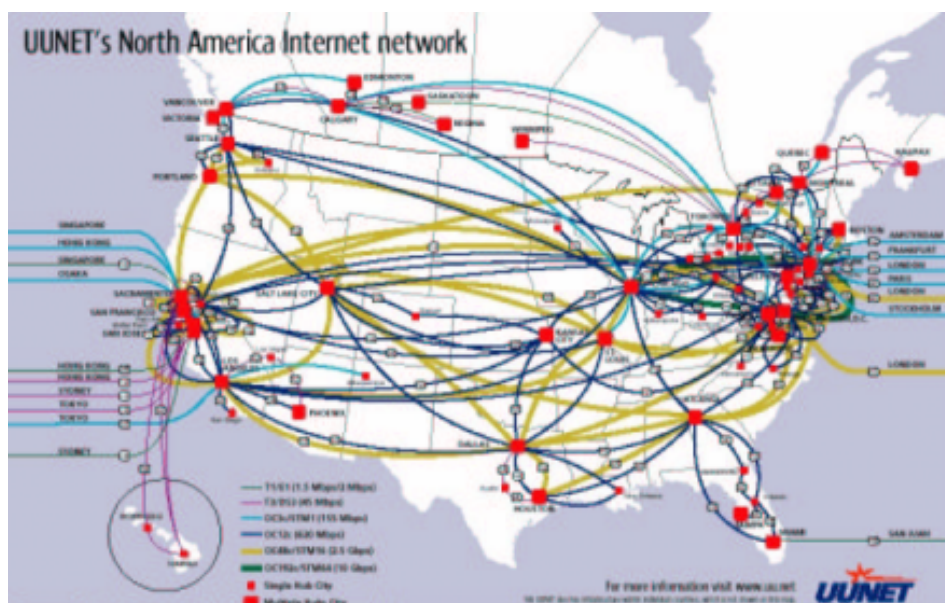


图 3.4: 北美的UUNET网络中枢

网络的缓存优化问题是拷贝那些从不同的地点或在多个服务器上经常被访问的文档（服务）。当需要一个文档时，它会从最近的服务器返回。这里，接近度可以通过地理距离、跳跃点数、网络阻塞、服务器负载或他们的联合来衡量。目的就是为了减少时间延迟，减轻服务器负载，平衡网络流量和提高服务的可靠性。如果源文档发生改变，这些改变至少需要传递到服务器，这取决于网络的带宽。

控制问题就是基于估计和预测的访问形式、网络阻塞以及服务器负载做出分布式的控制方案，以确定更新的频率、储存文档的地方、以及确定哪一个是直接代理服务。显然，当前的决策会影响以后的状态，如未来的连接链上的流量、未来的缓冲等级、延迟和阻塞以及服务器负载。这样，一个高速缓冲存储器网就是一个分散的反馈控制系统，它是立体分布并相互连接的，控制决策是基于局部的延迟的信息而异步做出的。

当需求一个大的文件时，指定的代理服务器将文件拆成数据包流，并采用速率自适应的传输方式把它们传输到代理服务器。传输过程由传输控制协议（TCP）管理。代理服务器将向主服务器通报成功接收每个数据包和阻塞情况的信息。阻塞控制是一种分布式算法，在相互竞争的服务器中分享网络资源，它由两个要素组成：根据路径阻塞信息动态调整服务器速度的源算法和

更新阻塞度，并将其通过路由器送回给源节点的路由算法。阻塞度的例子包括损失概率和队列延迟。通过点对点的数据包丢失度与延迟的观测，直接在路由上更新阻塞度，也直接反馈到源节点。网络的均衡与动态过程取决于源和路由算法。

理解这个系统的一个好方法是把源速率看作主变量，把路由器阻塞度看作从变量，把阻塞控制过程看做一个分布式的主-从算法。这种算法在因特网的源节点与路由器上实时运行，使得在有限的资源中获取最大的资源利用率。不同的协议都要解决这个相同的原型问题，但是使用不同的效率函数，采用不同的迭代规则来优化。如果给出源算法，就可以明确地推导出用于优化的效率函数。

虽然TCP控制了包流量的速率，网络上的路由却由IP控制。其最简单形式就是，每一个路由器必须决定具体给定的包将用那个输出连接发送到目的地。这里，不确定性包括连接的阻塞变化、延迟、速率甚至于网络拓扑的改变（如一个节点断掉，或一个新的连接或节点出现），以及未来流量状况等。运行在路由器上的路由算法是异步分布式的，能够适应节点或连接的失败、平衡网络流量和减小阻塞。它分为几个时间尺度，使用硬件查表快速做出决策，却以较缓的速度更新表中存储的内容。另一方面，人们有最佳的网络规划，它提议增加新节点和连接以满足预测的未来流量需求。

路由问题在无线网络中更难处理。无线调制解调器节点是可移动的，节点的地址既不反映其位置也不反映如何可达。于是网络需要按要求搜索节点，或者必须追踪节点的位置变化情况。而且，由于无线网络连接能力可能不足，路由可能必须考虑负载均衡。这要求分布式异步算法适应节点位置、连接失败、移动和流量变化的需求。

最后，假如客户要求文件经由特定的无线网络访问时，就产生了功率控制问题：每个包的传播功率是多大？这时功率控制是很必要的，因为特定的网络与已有的连接不是一起出现的，个体节点选择传播功率形成了网络的拓扑。这构成了当前网络协议层的原则性问题，因为它影响信号的质量，进而影响了物理层。同时又因为功率级别决定了那个路由可以连接，从而影响了网络层，因为传播功率级别影响了阻塞，从而也影响了传输层。功率控制对多目标控制也是一个挑战，因为涉及到许多代价判据，如增加网络交通运载量，减少传输中继所消耗的电池功率和减少在地理区域内各节点争用公共的共享媒体等。

网络控制超越了数据和通信网络领域。商业飞机（主要是强调保证安全的飞机之间的距离）的最优路径和流量控制将使机场得到最大程度的使用。目前正在建立供应链系统（网络与软件）基础设施，并开始开发简单的自动供

应链管理系统。不久的将来，复杂优化和控制方法能用来指导供应者、装配者、生产者和消费者之间的商品和货币流动。

## 基于网络的控制

发达的信息技术已经使全球用户能够通过因特网交流信息。显然，下一步将更多地涉及到因特网与实际环境的交互。具有计算能力的、通过有线或无线相连的感知和执行节点所构成的网络，能够形成控制物理环境的交响乐团，如汽车、智能化家庭、大的制造系统，智能高速公路、网络化社区服务，企业级供应和物流链。因此，下一阶段信息革命将把通信，计算和控制紧密地结合起来。下面的插文描述了达到这种融合将遇到的主要挑战：

插文：整合通信、计算和控制的结构与概念的重要性（P. K. Kumar, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign）

通信网非常不同，如可运行在铜线、无线电波或光纤上，也包括各种各样的计算机和路由器等。然而，它们有一个基本结构：允许即插即用，而不关心底层。实际上，因特网无序发展的原因之一正是这种结构——分层结构和用于连接不同节点层的对等协议。一方面，节点能连接到因特网上，而不用考虑通讯连接的物理特性，即无论是红外线还是铜导线，这是因特网飞速发展的重要原因之一。另一方面，在所有层上都可以即插即用。这样，可以单独设计每一层，允许随时修改每一层的协议，而不用重新设计整个系统。这使得因特网上的协议可以随时更新。

这就产生了一个问题：融合通信、计算和控制的正确结构是什么？存在与应用和内容无关的结构吗？是否存在一种允许扩散的结构，如同开放的互连系统(OSI)曾经做的？什么是层的正确含义？如何整合信息、计算和控制？如果允许算法与结构分离，那么整合通信、计算和控制将会快速发展起来。

随着已有网络的继续扩建，网络技术比固定的点对点的连接更加廉价和可靠，甚至现在局域网也如此，越来越多的控制系统将基于网络运行。可以预见，传感器、执行器、诊断、指令和协调信号都将经数据网传输。计算与控制功能可以分布在多个由数据网连接的处理器的上，（如智能传感器可在传送重要信息之前完成大量的局部信号处理）。

目前的控制系统几乎都是基于同步时钟计时的，因此要求通讯网络保证传感器、执行器和其它信号以一个已知的固定的延迟来传输信号。虽然当前的控制系统对于设计过程中的变化是鲁棒的（如空气动力学参数、发动机常量和惯性的变化），但它们不允许（未建模的）通信延迟或传感器和执行器数据包丢失。当前控制系统是基于简单的通信结构：所有的信号都在同步专

用连接上传送，已知延迟（或最坏有界）且无丢失包。小的专用通信网能配置成满足控制系统的要求，但一个有趣的问题是：

能否建立一种理论和实践使控制系统能运行在分布的、异步的，  
基于包传输的环境中？

把目前的控制技术与基于包的数据网相比较是很有意思的。数据网对于拓扑（如节点和连接的丢失）的不可预测的变化具有一定的鲁棒性；数据包可以简单地重新发送或选择新路径以到达目的地。数据网络可以自构造：可以加入新的节点和连接，数据包很快就可以通过了。数据网的最令人吃惊的特性是友好的结构与协议设计，数据网比单个节点可靠的多。这与现代控制系统形成了鲜明的对比，控制系统的可靠性最多只能与其最弱的环节一样。对安全性要求高的系统，须人工设计元件失效后的鲁棒性。

可以想像和期望将当前的控制系统与网络结合起来。目标是建立基于包的网络上的分布式控制系统的结构、设计和分析方法。如果做的好，或许能将鲁棒控制系统的一些好的特性（如对参数变化与模型失配的鲁棒性和高精度的性能）与网络的良好特性结合起来（如自构造、对总体拓扑变化与节点失效的鲁棒性、超越元件的可靠性）。

可以想象这样一种系统，它的传感器异步地将信息包传输到网上，控制器进行数据处理，然后将其发送到执行器。数据包的传输可能有时变延迟，甚至丢失。通讯连接可能被断掉或被阻塞。传感器和执行器本身可能变得可用或不可用。新的传感器、执行器和处理器可能被加入到该系统，并自动地进行重新配置以使用新的资源。只要有足够的可用传感器与执行器，可以使足够的包通过，整个系统就能工作（虽然可以想象一切还不如固定的、同步控制系统那样好）。当然，这与目前的高性能控制系统完全不同。

显然，对一些应用，当前的同步时钟系统和保证可达和有界延迟网络的控制方法是最好的选择。没有理由不象现在这样去配置一个喷气发动机的控制器，即保证同步的传感器、处理器和执行器之间相互连接的系统。但是，对于性能不高的民用系统，基于数据包的控制系统的附加鲁棒性与自重构性能弥补民用系统在性能方面的不足。多数情况下，可能出现两种极端情况：完全同步系统和完全异步的基于包的系统。

显然，一些基本的控制概念不能转换到基于包的异步环境中。最明显的是传递函数和所有其它的与线性时不变（LTI）系统相关的概念（脉冲响应、阶跃响应、频率响应、谱、带宽等）失效了。这是一个不小的损失，因为自1930年以来，这些概念一直是控制工程的基础。例如，20世纪30年代，人们用Bode图法理解和设计反馈放大器。在60年代，人们又改进了Bode图法以

处理离散控制系统。在80年代，该方法又应用于鲁棒多变量控制系统（用奇异值图）。即使是60年代出现的最优控制方法，开始时几乎完全不同于频域概念，后来也能用传递函数很好地解释。

那么，什么方法可以完成这个过渡呢？与最优控制和最优动态资源分配相关的一些方法将很可能渐渐地过渡到异步的基于包的环境。可能幸存的相关概念是Lyapunov函数（1890年引入）。下面的插文描述了控制可能发生的一些变化：

插文：网络化环境中的Lyapunov函数（Stephen Boyd, Stanford）

这是一个控制的古老概念被逐渐更新的例子。其思想是Bellman值函数，它是系统初始状态的函数，给出了一些优化问题描述的控制系统的最优值。在50年代，Pontryagin, Bellman和其他几位最优控制的先驱研究了这一问题。近来，它以控制Lyapunov函数的名义再次出现（以通用的形式），它是动态规划的关键概念。

控制Lyapunov函数（或Bellman值函数）的基本思想是：如果知道值函数，最好的方法是在当前时刻，选择使值函数最小的控制动作，而不考虑将来的情况（换句话说，忽略系统的动态）。这样做就能确切地实现问题的最优控制。也就是说，值函数就是代价函数，使其最小化实际上实现了考虑系统动态的原始问题的最优控制。在50、60年代，值函数仅仅是解决最优控制问题的阶段性数学进展。

但是，值函数的思想能巧妙地过渡到异步系统。如果将值函数或一定的近似函数传递给执行器，那么每个执行器可以独立地运行。例如，想方设法减小值函数。若执行器不可用，则什么都不做。通常多执行器必须协同工作。简单的试验表明同时运行两个有自己的传感器和执行器的反馈系统，将导致性能下降，甚至不稳定。但是如果有一个可以分别最小化的值函数或控制Lyapunov函数，则就一切正常了；（依照值函数）控制动作得到了自动协调。

另一个能渐渐过渡到异步的、基于包的控制的思想是模型预测控制（MPC）。基本思想是进行更多的实时计算，通过在线求解优化问题来获得实时反馈控制律。模型预测控制在过程控制和供应链管理中已经发挥了重要作用。但在其它领域则不然。主要是因为控制器的实现需要巨大的计算量。模型预测控制的思想很简单：在每一时间步，对未来有限时域的最优控制问题进行描述，并求解整个最优轨迹（如使用二次规划）。而后将当前的最优输入作为执行器信号。用当前所测量的信息更新模型，然后重复进行同样的过程。在网络化环境中使用MPC的主要问题是怎样对优化问题进行分布式求解。



## 信息与网络的其它趋势

虽然本节主要讨论了通信与网络中控制的作用，但在广泛的信息科学与技术领域，存在许多需用控制思想来解决的问题。这里列举一些，更多的资料可以在最新的National Research Council 关于嵌入式系统的报告中找到[32]。

**警醒的、高可靠的软件系统。** 现代信息系统要求运行于高可靠、高准确性的软件环境中。由于网络化和程序经常运行在恶劣的环境中，做到这一点越来越困难。计算机科学家们正在探索的新方法是通过**警醒**来提供可靠性。警醒是指连续的、普及的、多方位的监视和系统行为修正，即控制。

警醒软件的关键思想是使用快速、精确的传感器监视系统与算法的运行，把算法的性能与嵌入式计算模型的性能相比较，然后（通过可调参数）修正算法的操作，以保持系统的期望性能。

这种感知 - 计算 - 执行的循环是反馈控制的基本形式，提供了在线处理不确定性的一种机制。它的好处在于，在设计时不用考虑到各种可能出现的情况，系统可针对出现的特殊情况作出实时反应。这种策略的基本要素是利用嵌入式模型，以确定合适的控制作用，或者事先定义能保证稳定性、性能指标以及鲁棒性的控制策略。

为了说明如何利用警醒来提高可靠性，我们以分布式排序反馈控制为例，如图3.5所示。假设有一组局部排序算法，它们以反馈结构相连。假设每个排序器都有多个输入，一个输出，由此可以选择一个最好的排序列表，也可确定一个更有序的更新列表。把这些模块以反馈形式连在一起，在有限的时间内，可能会得到完全有序列表。

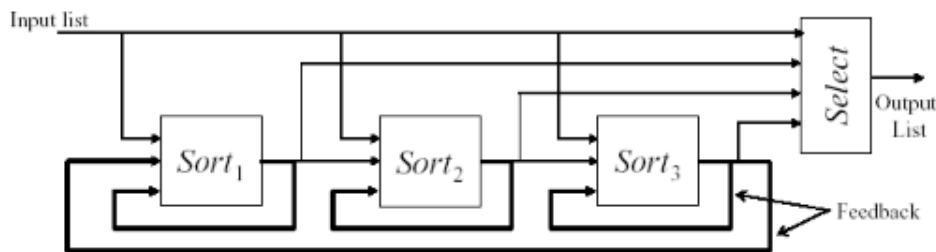


图 3.5: 一个警醒的高可靠软件系统的例子: 采用反馈的分布式排序

虽然从传统的计算机科学角度来讲这种算法是非传统的，但是这种算法对个别排序器的失效具有鲁棒性，也是可自重构的。当单个模块不能排序，这组数据不会作为其他模块的输入，这就有了鲁棒性。而且，如果这些模块有不同的负载（可能由于在给定的处理器中运行其它程序），大部分可用的模

块会自动加载，以完成分布式排序。其它的特性，如抗干扰性、性能指标和稳定性等，也可以使用控制工具来研究。

**协议和软件的验证与确认。** 复杂软件系统的开发日益增多，但设计性能正确而良好的系统的能力却越来越有限。当前，对软件系统的验证和确认方法还需要进行大量的测试，许多错误只能到开发后期甚至产品发行时才能发现。一般的软件验证方法用于中等复杂的系统，对于大型软件系统却无能为力。

控制理论已经开发了许多技术，通过上下界约束有效地突破了计算的复杂性，给出尽可能正确的运行结果。有关半代数凸优化问题的近期研究结果（可以表示为多项式等式和不等式），为连续和组合优化问题提供了新的验证方法[36]。特别地，这些新技术能为连续和离散相混合的问题提供简单的系统化的证明，是计算机科学的常规方法与控制的稳定性和鲁棒性结果相结合的成果。

**实时的供应链管理** 随着网络互连的企业数量的增加，为得到高效、可靠、可预测的操作，可获得资源的企业级动态重组的能力提高了。比如，在单一操作公司的控制下，囊括一个区域的建筑物的HVAC<sup>1</sup>系统网络就是此类应用的例子。为使整个系统的能量消耗最小，该公司同能量经纪人制订了一项为加热和制冷建筑物提供电能的长期协议。为了以最好的价钱购买能源，公司同意购买固定量的建筑物区域所需的能源，且为高于上述用量的电能付额外的费用。这给经纪人带来了固定的收入和固定（最大）的需求，因此，可能以比较低的价格卖出电能（由于在未来税收和系统负载的不确定性较少）。

由于建筑物内的用量、区域内不同地方的气候和建筑物里HVAC子系统的可靠性等不确定性的存在，实施这样安排的关键因素就是分布式实时调度与控制系统，以实现互联资源的分布式优化。电力经纪人和公司必须交换资源信息情况，以及发电控制系统和HVAC系统间的任务，子系统必须对测试到的环境变化做出反应（使用期、天气、设备情况）以优化网络的整体特性。

这种企业级优化的实现需要许多技术领域都取得有重大的进步：如分布式、嵌入式建模工具允许局部系统和企业的每个节点用户的高精度模型与外部系统的低精度模型的相结合；分布式优化算法，利用嵌入式建模结构以产生近似的优化操作；容错、网络化的控制系统，允许控制回路在不可靠的网络连接上运行；低开销、容错、可重构的硬件和软件结构。

---

<sup>1</sup>HVAC指Heating, Ventilation, Air Condition and Refrigeration, 即热、通风和空调的缩写，译者注。

密切相关的问题是军事系统中的C4ISR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, 指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察)。这里,网络化的系统也正在革新连续计划和资源分配的能力。但是,在存在不确定性和敌对的情况下,需要新的研究以提供鲁棒的解决方案。基本问题和技术几乎与企业级资源分配问题完全相同,但是,在军事应用环境中更具挑战性。在动态、不确定和敌对环境中,控制概念是提供鲁棒性能的基本工具。

### 3.3 机器人和智能机器

我的论文曾经讨论过,生命体的物理功能和一些新的通信设备试图通过反馈控制熵变化的行为是十分相似的。在循环操作的某个阶段,他们都有感知器:即,二者都存在特定的设备,以较低的能量收集外界信息,使生命体或机器有效地运行。在这两种情况下,无论是有生命的还是无生命的,外部信息并不是未经任何处理就采用的,而是通过设备内部转化后采用的。将信息转化为新的可用的形式,以备下一阶段所用。动物和机器,都能有效地完成这个功能。二者都将其作用于外界的包括无意识的动作报告给中央控制设备。

摘自Norbert Wiener, *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*, 1950 [42]。

机器人学和智能机器是指一组应用,包括仿人类行为机器的开发。虽然,早期机器人用于制造,现代机器人包括参与机器人比赛和探索星球的轮式和行走机器、用于监测和战斗的无人飞行器,为医生提供新能力的医用器材等。未来的应用将朝着自主化,与人和社会更好的交互方面迈进。在所有这些应用中,控制是关键因素,而且随着下一代智能机器的开发,将愈来愈重要。

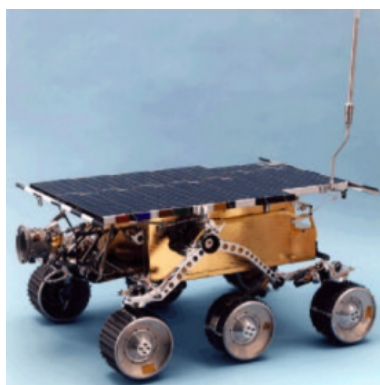
#### 背景和历史

控制工程的目标已经在20世纪40年代甚至更早就提出了,它是指能够实现灵活和"智能"地响应外界环境的系统。1948年,麻省理工(MIT)的数学家Norbert Wiener给出了广泛流传的、完全非数学表达的控制论描述[41]。控制工程的数学化表达方式是由H. S. Tsien在1954年提出的,当时是为了解决

导弹控制问题[40]。这些成果和那个时代的其他成果一起构成了现代机器人学和控制理论的基础。

早期的机器人应用系统开始于二战之后。伴随远程操作器控制系统的开发，当时使用的是主从控制。以计算机数控机床（Computer Numerically Controlled, CNC）为代表的早期工业机器人不久后就出现了。早期的机器人公司之一，Unimation，1961年在通用公司的一个汽车厂安装了第一台机器人。传感器使机器人可以响应外界环境的变化。到20世纪60年代，许多机器人能够抓物、行走、查看（通过视觉系统），甚至响应简单的声音命令。

在70年代和80年代，计算机控制的机器人蓬勃发展起来，使计算机科学和机械科学成了热门研究领域。制造机器人越来越普遍（日本领先），从日常生活到高精密的许多工作都由机器来承担了。人工智能（Artificial Intelligence, AI）也发展起来，允许进行更高水平的推理，包括与人的交互。同时，对工厂或远程环境的移动机器人的研究也开始了。



(a)



(b)

图 3.6: (a) 火星旅行者(Sojourner), (b) Sony AIBO 机器狗

该领域的两个成功标志就是名为火星旅行者(Sojourner)的移动机器人和Sony AIBO 机器狗，如图3.6所示。1997年7月火星旅行者成功地在火星表面行走了83天，发回了大量的现场环境照片。Sony AIBO 在1999年6月初次亮相，它是由一个跨国公司批量投入市场的第一代"娱乐"机器人。值得一提的是它运用了AI技术，能根据外部环境和自己的判断作出反应。

了解机器人的控制历史是很有趣的。IEEE 机器人学和自动化学会(Robotics and Automation Society) 是在20世纪80年代由控制系统学会(Control Systems Society) 和计算机学会(Computer Society) 联合创建的，这也表明了这两个领域对此的兴趣。可惜的是，虽然许多控制研究者对机器人感兴趣，控制社团在80年代和90年代却未起到领导作用。这错过了很多机会，因为机器人学综合了计算机、人工智能和控制学科的内容。（无人驾驶）飞行控制、水下机

机器人、卫星系统，这些新的应用正在成为热点，许多控制研究者对此也越来越感兴趣。

虽然机器人学在上半个世纪取得了巨大的进步，但仍处于初级阶段。今天的机器人与人类相比仍然只实现了一些简单行为。机器人在移动、对复杂传感器输入的解释、执行更高级的推理和团队协作等方面的能力是非常有限的。实际上，Wiener关于机器人学和智能机器的一些想法仍然没有实现。为了实现这些想法，需要在很多研究领域上取得突破，包括在检测、驱动、能量存储等方面的进展。把规划、自适应、学习方面的人工智能的优点与控制领域的建模、分析与反馈系统设计结合起来，也将为机器人学的进步提供崭新的方向。该应用领域与专家小组关于集成计算、通讯和控制，开发更高级的推理和决策工具，以及维护强大的理论基础并与数学交互的建议密切相关。

## 挑战与未来需要

过去的半个世纪中，构建实际机器人系统所必需的机电工程与计算能力已经得到了长足的发展，为实现更高智能化与自主化的发展目标提供了更大的可能性。在普通的硬件上运行一些有规律的、适度复杂的算法已经成为可能，并且将进一步完善。视觉引导汽车高速行驶的成功，制造业中机器人的应用，以及移动机器人的商业化都表明了这个领域的实用性。

机器人领域涉及广泛，它与计算机科学、控制科学、电子工程学、机械工程学、心理学以及神经科学等各学科的发展密切相关。虽然如此，它还是有包括贯穿这些领域的最基本的内容，如对空间关系及其时间演绎的理解和控制。机器人领域的发展为分析和试图复制一些完成任务所需的运动模式提供了机遇。总体上，这是人们已清楚的体验。但如同对实际系统的仔细检验偶尔会遇到不能用词汇与数学知识充分表达的时候一样，机器人学家发现一般所用的句法与语义学很难对有效运动给出精确而简洁的描述。通常情况下，人们关注的是机器人产生的动作，因此把运动控制看作是中心问题是合乎逻辑的。这一研究为控制工程师提出了几个新问题，这些问题与反馈、稳定性、优化以及估计等密切相关。例如，建模精确到何种程度（运动学的或动力学的，线性或非线性，确定性或随机性等），最优化才有意义？有关相互协作、降低灵敏度、稳定性等问题也都出现了。

除了这些问题以外，还必须开发相应的软件来控制机器人的运动。目前，机器人运动控制语言几乎没有可移植性。在机器人领域，独立于计算平台和外围设备的、应用广泛的机器语言的思想还没有成功。在操作系统、语言、网络、磁盘驱动、打印机方面获得成功的概念在机器人领域却成为主要

的障碍。缺少的东西就是关于如何构建与使"运动描述语言"标准化的统一标准。此外,这种语言应该允许以普遍和自然的方式实现柔顺(compliance)控制。

另一个主要方面就是自适应和学习。随着机器人的普及,它们与环境相互影响,推断自己与他人行为的方式变得更加复杂。科幻小说中的机器人能够学习过去的经验,按当前的状况与人交互,并能够对以前未遇到的高级概念进行推断。为了研制出能普遍使用的智能机器,在机器学习与认知系统方面需要有更进一步的发展。机器人学为这些进展提供了理想的实验场:远程监测、搜索与营救、娱乐与个人协助等方面的应用都是非常值得进一步探索的领域。

除了更好地研究单个机器人的行为外,研究多个机器人的协调控制也是十分有趣,且充满了机遇的。美国军方正在考虑使用以协作方式运行的多个监测、后勤支持与战场运载工具,来完成对人来说是脏的、危险的、或无聊的任务。在过去的十年中,为了探索这些概念,展开了一些由机器人团队参加的新竞赛,最著名的就是Robocup,简要介绍如下:

插文: Robocup ——对抗环境下自主协作行为的实验场。(Raffaello D'Andrea, Cornell 大学)

Robocup是机器人学与人工智能竞赛的国际会议。竞赛完全是自主的(没有人参与的)、面对面的游戏,其规则是参照人类足球比赛规则制定的。在允许的规则与限定条件下(例如尺寸限制、避免碰撞等),每个队必须尽可能比对手多进球,有仿真组、F2000组与F180组三种比赛。

F180组的机器人的尺寸是6英寸立方体,场地是2m×3m(参看图3.7),装有全局视觉系统。全局视觉系统的加入将重点由判断目标的位置与计算机视觉转移到团队的协作策略、以及操纵机器人的进攻。下面,将描述Cornell大学队参加1999年在瑞典斯德哥尔摩和2000年在澳大利亚墨尔本比赛的经历。

Cornell大学1999年初次组队参加比赛,并夺得F180组1999年和2000年的冠军。他们的成功直接归功于系统工程方法的运用,以及强调系统的动态过程与控制。完成比赛机器人团队的开发仅用了9个月(为1999年的比赛),系统工程方法起了重要作用。25个学生,包括一年级和高年级的研究生,他们的专业涉及计算机科学、电子工程、机械工程,通过有效的项目管理,在设计早期能够抓住系统要求,能够突破学科的界限相互交流,完成了两套完全可操作的机器人团队,通过把各级的功能分解,使得复杂的问题变得可解。特别地,将系统分解为估计与预测、实时轨迹生成与控制,以及高级策略这几个部分。

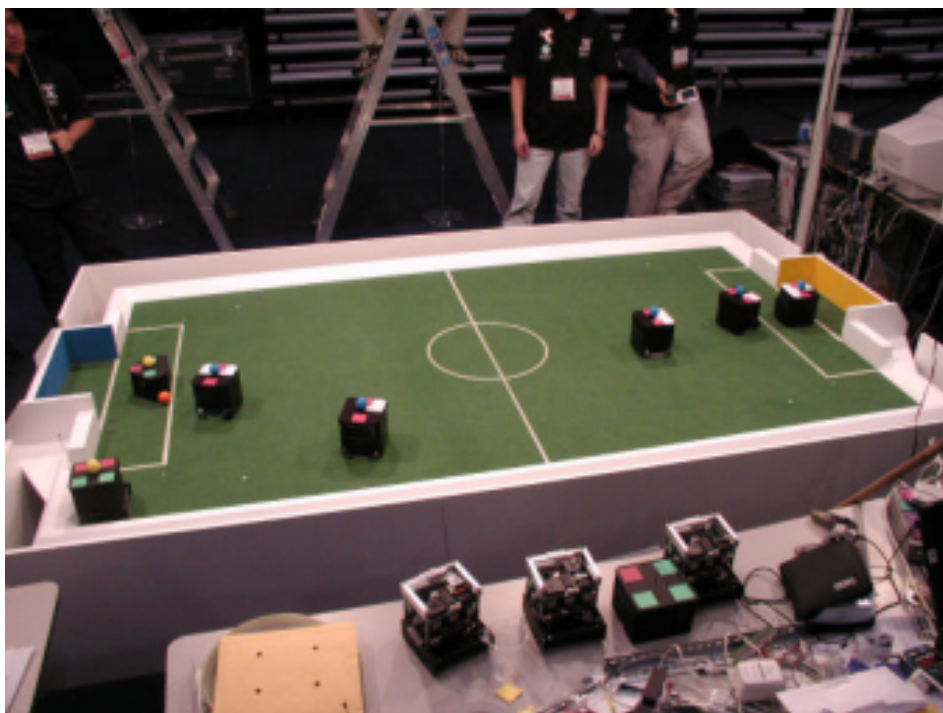


图 3.7: F180 英式机器人足球赛

估计与预测源自于滤波这一相对简单的概念，其工具也是控制专业的研究生所熟悉的。特别地，采用了处理视觉数据的平滑滤波器和处理系统响应滞后后的前馈估计器，使机器人能进入更准确、更具鲁棒性的比赛状态。轨迹生成与控制由生成可行的机器人轨迹的一系列基元组成；采用的各种松弛算法（1）能迅速实时地生成轨迹（少于1000浮点运算），且（2）能充分利用小车的内部动力学。特别地，通过最优控制问题的简化并求解，快速生成可实现的轨迹。这些基元然后为高级策略所用，实际上是完全机器化的。

高级策略是Cornell足球队最特别的、最具启发性的部分。判断过人和拦截是否可能的各种功能取决于可行的有效轨迹和控制。但是，象决定是否应由防守变为进攻，或如何踢球这样的高级策略，在很大程度上还要依靠人的判断与观察。到了2001年3月，Cornell大学的努力方向是如何设计和修正高级策略以充分利用系统的动力学。

现在，特定的机器人应用，例如需要使用视觉系统来指导的机器人，需要将运算、通讯、控制有机结合起来。运算的执行必须要看准机会，也就是说它必须适应所遇特殊环境的需要。将视频信号传送到计算机所需的数据压缩技术必须考虑其结果怎样能够被控制系统所应用。建立完全集中控制方式的

复杂系统在技术上是困难的，也存在潜在的危险。因此，需要决定如何将控制功能分散给通讯系统。通讯协议理论的最新研究已经为设计有效的分布式算法提供了更好的方法。适当的修正可能使其满足机器人应用的需求。

最后，需要开发可在高度未知环境中运行的机器人。这需要在视觉处理与理解，复杂判断与学习，以及动态运动规划与控制等很多方面取得更大的进展。事实上，在这种未知环境中的判断与规划很可能需要把动力学、逻辑与几何结合起来的新的数学概念，而目前还没有形成。一个重要应用就是远程探险（关于地球、其他星球以及太阳系）领域，人类的代理人（机器人）将被用于连续不断的探险行动，从而促进人类对整个宇宙的理解。

## 机器人学与智能机器的其他趋势

除了以上提到的挑战与机遇，还存在其它一些趋势也将对机器人学与智能机器的发展起着重要的作用，它将导致对控制的新探索。

**混合主动系统与人机接口。**显然，无论是用于工厂、车辆或是家庭，如果与自然的人机接口一起使用，计算机控制的应用将会更广泛。有了这样的目标，就需要使接口不仅适用于已知的应用，而且要具有足够的普遍性，即经过很小的改动，就可用于相关的应用。该领域的进步不仅需要视觉信号（如上描述）有更深入的了解，而且还需要对人与机器和计算机控制系统的相互作用有更深入的理解。

美国正在进行的一个研究项目是探索使用“可变自主”（variable autonomy）系统，其中，由人控制的机器随着任务的改变而改变命令权限。这种系统将人和计算机控制系统结合起来，使得人可以接收来自机器的指令并同时发送指令给机器。这种概念的应用就是半自动空中交通控制系统。在这个系统中，指挥与控制的计算机系统、空中交通控制者（人）、飞行导航系统，以及飞行员在控制领空时的责任级别是变化的。这样的系统就可能把机器的快速数据处理能力与人的复杂推理能力结合起来，但这将需要对人机系统的理解取得重大进展。

**采用高速传感器的控制。**不需要花费太多，人们就能够收集和存储比所需要的更多的图片与声音、温度和颗粒数。因为没有正确地解释，或没有合适地处理得到的信息，人们不断看到人机系统偶然的灾难性失败，例如用于运输的人机系统。显然，在很多情况下，采集信息是容易的。反馈控制体现了将测量直接与控制动作相结合以提高性能的思想。生理学提供了很多可证明这种技术的例子。然而，当工程师和科学家将他们的注意力集中在高度自动化，由先进的制造与维修工业建立起来的系统时，常常发现由于多种相互作用的存在，可能会使最小的概念单元变得相当复杂，这样直接应用反馈控



制可能得到令人沮丧的结果。特别地，视觉系统很难设计，对照明条件和环境变化，常常失去了鲁棒性。由此看来，系统的设计和性能评价必须充分利用诸如自适应、自重构及自优化的思想。

这些迹象表明，上面所阐述的问题的解决方法包括感知过程的主动反馈控制，这在生物学里是很常见的。一个引起普遍关注的领域就是主动视觉，其中视觉传感器基于它所产生的数据来控制。另外还包括基于所采集的数据调整视觉处理算法。主要由于发现和使用非线性信号处理技术，在通向一些基本问题的解决之路上取得了重大进展。如，用来解决图象分割问题的变量理论、基于运算复杂性的学习理论、感知问题的基于信息理论的方法。然而，试图将感知模块融入到大系统时，常常会产生通信和分布计算的问题。这些问题目前还未解决。

与此相关的是理解与解释视觉数据的问题。从商业系统的应用来看，语音识别技术现在已经相当成熟。然而，图象数据处理与解释还处于刚刚起步的阶段，很少有系统能够根据视觉数据做出决策和动作。一个特殊的例子就是对人的行为的理解，这在机器人学已有很多应用。机器人能够响应简单的手势，但还没有方法来描述并推断更复杂的动作，如人在街上散步，弯下身去拣一枚硬币，被没有看到他停下来的人撞倒。这种解释需要表达出复杂的空间与符号关系。这超出了目前一些可用的工具，如系统辨识、状态估计、信号与符号的转换等所能解决的范围。

**医疗机器人。**计算机和机器人技术对外科手术正在产生巨大的影响。通过使外科医生能更精确地计划和实施外科手术，并使人体的手术伤口最小，计算机辅助与机器人外科手术系统能减少手术和医疗费用、提高临床效果，以及提高健康护理的效率。其连续实施外科手术、全面记录重要的病人以及手术过程输出数据的能力将使外科领域得到长足的发展。

机器人技术在外科领域是十分有用的。例如，"Robodoc"外科助手利用机器人的准确定位与钻孔能力在髋关节置换时提高了移植的适应度[4]。这大大减少了并发症，使移植更持久。同样，在定向脑部外科手术中，三维图象数据可引导机械臂的准确移动，从而降低了间接的脑损伤的危险。Intuitive Surgical 的Davinci 系统采用遥控与力反射反馈方法能使其冠状动脉手术的切口最小，而通常需要在胸部切一个大大的口子[31]。图3.8 所示为Computer Motion 公司开发的ZEUS 系统，这是改进型。在2001年，纽约的一位外科医生用其原形为法国斯特拉斯堡的一位68岁老妇实施手术[26]。目前，这是为数不多的经批准使用的机器人外科系统，而更多的还在临床实验和实验室的开发阶段。



图 3.8: 由Computer Motion Inc. 开发的机器人外科手术系统ZEUS<sup>TM</sup>, 能完成远程的创口最小的显微手术。

当医疗机器人正在成为现实时, 仍有很多未解决的问题。显然, 医疗机器人将得益于计算、通信、传感和驱动技术的发展, 这些技术也将对控制领域有重大的影响。然而, 系统与软件的可靠性问题对未来医疗机器人是最基本的。对这些高度非线性、混合和不确定的系统, 显然需要严格的系统验证方法, 以及高度容错的策略来确保这些技术快速而广泛的应用。另外, 机器人医疗装置将成为外科医生的得力助手。所以其人/机界面必须能够绝对可靠地处理拥挤的手术室中的复杂情况, 甚至在发生不可预知的外科手术事件时。

### 3.4 生物和医药

反馈是生命的主要特征, 反馈过程控制着人们如何成长, 如何面对压力与挑战, 并调节人体体温、血压以及胆固醇水平等。这种机制, 从细胞内蛋白质的相互作用到复杂生态系统中生物体的相互作用无所不在。

摘自 Mahlon B. Hoagland and B. Dodson, *The Way Life Works*, 1995 [17]

在生物学的各种组织层次上 —— 从分子的到细胞的再到器官的 —— 可以越来越多地采用工程上所使用的方法, 如数学建模、系统理论、计算、综合抽象算法等。反过来, 生物科学的加速发展, 使可用于人造系统且具有重要实际应用价值的新设计原理不断出现。生物学与工程学的相互协作为迎接两

个领域的挑战提供了不可估量的机遇。在生物工程方面，控制理论是许多关键问题的核心，也将在这个领域中有着不可替代的地位。

专家小组强调的主要课题是生物控制网络的逆工程科学，大量的生物现象提供了丰富的控制实例，包括基因调控与信号传递；激素、免疫学、心血管的反馈机理；肌肉运动与控制；主动感知、视觉与本体感受；注意力与意识；人口动态和流行病学等。它们（还有更多）提供了判断什么在起作用，如何起作用和如何影响它发挥作用的机会。

专家小组也强调控制在医药与生物医学研究中的作用。包括从原始数据处理到做出决策的智能手术室与医院；图象辅助外科手术与治疗；硬件和软组织整合；医药与生物学检验的液体流量控制；肢体与神经中枢的发育。这些领域有很多与机器人学的某些方面是相互重叠的，有些已经在 3.3 节作了阐述。

这部分主要讨论生物系统的三个相关方面：分子生物学、综合生物学与医学成像。这些领域代表了一大类生物学系统，也揭示了如何用控制理论去理解自然，与如何建立工程化系统。

## 分子生物学

生命科学正处在从根本上影响生物知识与医药学理论的大变革的中心。基因组学将完成全部 DNA 序列的解码，并将提供所研究的有机体的每一细胞中的蛋白质的“组分名单”。蛋白质组学是研究这些复杂蛋白质的三维结构的学科。蛋白质的构象决定了它的功能：蛋白质间通过“锁和钥匙”式的“搭积木”方式而相互作用，且它们的构象通过有选择的结合DNA来增强或减弱其表达。

人们可以把细胞看作一个蛋白质、DNA 和参与信号传导与能量传递的较小分子之间相互作用的一个巨大的“无线”网络。作为一个大系统，细胞的外部输入包括物理信号（紫外线、温度）与化学信号（药物、激素、营养物质）。它的输出包括影响其他细胞的化学物质。每个细胞又可看作是大量子系统的组成部分。它涉及到细胞生长、维持、分裂和死亡。这种复杂的相互作用可由图 3.9 表示。

细胞网络的研究引出了许多问题，例如，这样的生物网络在信息处理能力或输入/输出行为方面有什么特别之处？能否用熟悉的控制理论来描述这些行为特征（比如传递函数和 Volterra 序列）。细胞信号传导中什么“模块”是重复出现的，它们的系统理论特性是什么？逆或“逆工程”问题包括从输入/输出数据估计系统参数（例如反应常数）与状态变量（蛋白质浓度、RNA

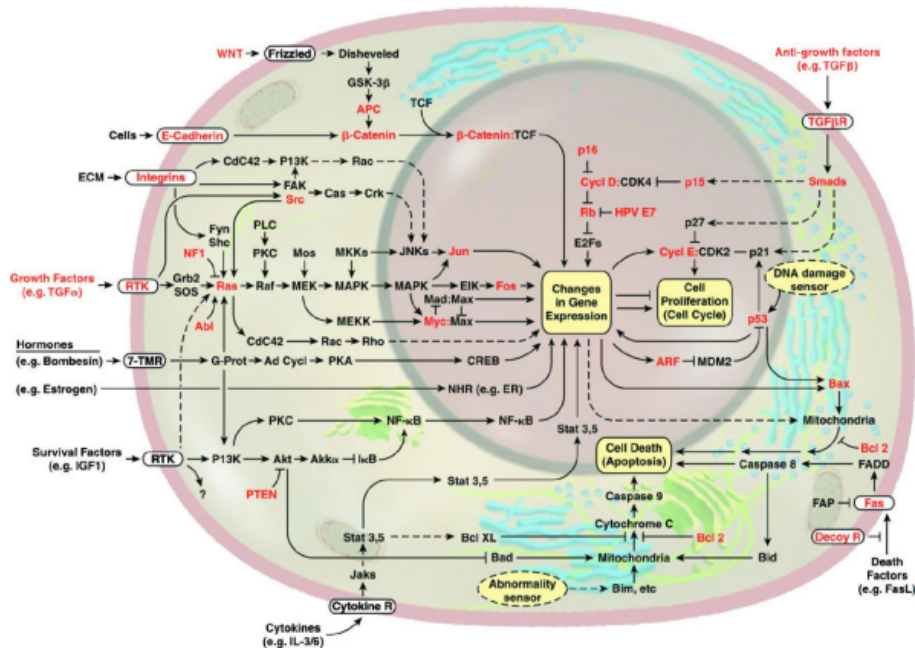


图 3.9: 哺乳动物细胞的生长信号传输线路示意图[16]

以及其他化学成分)。一般来说，这些问题可分别看作是辨识与观测器（或滤波）问题，而这些都是控制理论的核心。

人们也试图更好地理解细胞信号传导网络中各种串联与反馈回路的稳定性。如这种网络的稳定性与振荡性等动力学特性引起了很多人的兴趣。并且，源于控制理论的技术，如鲁棒裕度的计算，在未来的发展中有着重要的地位。也可进一步推测（但将逐渐成为现实），人们希望研究是否可以将控制理论方法（开环与闭环）用于治疗，如药物配置的时序安排。

细胞生物学对数学模型的需要一直是公认的。实际上，前面所提到的许多问题已经研究了二、三十年。现在，特别之处就是可以得到大量数据——由基因组学和蛋白质组学计划和信号传导网络的特性研究所形成的数据——和由基因工程手段（基因敲除与插入，PCR）与检测技术（绿色荧光蛋白基因及其他报告基因和基因芯片）提供实验性设计的可能性。反馈互连系统的面向控制的建模和分析方法是建立生物系统有效模型的不可缺少的组成部分。

**反馈与不确定性。** 从理论上讲，反馈使系统在存在噪声的情况下减小不确定性的影响，提高精度。细胞环境存在着大量不同形式的噪声，而同时，某些化学元素（如转录调控因子）的变异对细胞来说可能是致命的。在

细胞中，反馈回路无处不在，它可以调节适当的变异。例如，据估计，在 *E. coli*（大肠杆菌）中，大约 40% 的转录因子可以自我调节。有人可能要问，这些反馈回路的作用是否象控制理论所期望的那样减小了变异性。最近，利用四环素抑制蛋白质（TetR）验证了这种假设 [7]。实验是这样设计的，TetR 生产过程中的反馈回路是由基因工程技术来修饰的，基因表达变异能力的增大与反馈增益的减小有关，这也证实了反馈在减小不确定性影响方面的作用。现代实验技术为检验其他理论性的预测提供了条件。控制理论与生物学的交叉也有望成为热门的研究领域。

**调节回路中嵌入式结构的必然性。** 另一个反馈理论与现代分子生物学结合的例子是近来在细菌运动趋药性方面的研究。由鞭毛驱动 *E. coli* 的运动对化学引诱剂与排斥物浓度变化的梯度有反应，表现为两种不同的运动形式：蠕动（不规则的转动，位移很小）和跑动。在这一过程中，*E. coli* 采用随机梯度搜索策略：当感觉到浓度增加时，它停止蠕动（保持跑动），但是当浓度降低时，它又重新开始蠕动（就是说，细菌开始进入“搜索模式”）。

趋药性的信号传输系统检测化学物质的变化，并直接产生动作，其过程可简要描述为：因浓度变化而引起的暂短的非零信号后（“停止蠕动，跑向食物”），系统逐渐适应，对于驱动系统的信号也将重新收敛到零（“OK, 变为蠕动”）。这种适应过程可以在任何恒定的培养基内发生，甚至在更大规模和更大范围的系统参数内发生。这可解释为对定常扰动的鲁棒（结构稳定的）抗干扰性。控制理论的内模原理指出（在适当的技术条件下）必须有一个能在任何时候获得鲁棒干扰抑制的嵌入式控制器。的确，近期的模型和实验成功地找到了这种嵌入式结构 [5, 43]。

这项工作只是控制理论在细胞行为的逆工程学中诸多可能应用之一。更深入的理论涉及存在嵌入式控制结构的必然性，如此，人们又希望理论能提出它们的合适机理和验证实验。

**遗传线路。** 生物分子系统提供了混合系统的天然例子，这些系统将一个给定细胞或一个细胞群的离散和逻辑操作（一个基因开始或复制结束），与连续量（例如化学物质的浓度）结合起来。已经描述了基本线路的完全混合模型，如噬菌体  $\lambda$  的溶原/裂解决策线路 [28]。

目前，这方面的研究主要集中在识别其他自然产生的线路，以及为了治疗目的而将“人造”线路融入传输载体（例如细菌）的工程目标上。原则上，后一目标在数学上属于实现理论的范畴，是系统理论的一个分支，涉及完成特定行为的动态系统的综合。

## 综合生物学

控制学科对了解大的有机体如昆虫和动物也是十分重要的。像分子系统一样，这些综合生物系统的成分越来越容易理解，而更深层次的理解显然需要系统理论。当人们建造像自然界中那样高效、鲁棒和多样化的系统时，对自然系统的了解有助于将新的方法应用于工程系统。这里集中讨论运动问题。目前，已经有大量的研究成果（如见综述[13]）。

运动的综合研究表明了一些蕴藏在各种生物体中的普遍原理。这包括腿部运动和游泳运动中能量的存储和交换机制，有利于稳定性和灵活性的非推动性横向力，以及机械反射和多重模态测量反馈和前馈控制相结合的运动控制系统。运动尤其是自然情况下的运动，为说明生物系统中的结构-功能关系提供了丰富的例证。

控制系统和反馈在运动中发挥了重要的作用。肌肉骨骼系统使用神经传感器，贯穿于每个运动循环的始末。而且，肌肉骨骼系统的粘弹性动力学为提供快速反馈路径发挥了重要作用，这样能保证稳定的运动。来自机械和神经的快速反馈综合了眼、耳、鼻和动物用于控制整个运动的其它感官信息，使其在多变的环境中鲁棒地运动。

产生运动的过程很复杂，如图3.10中描述的果蝇的飞行运动。飞行控制系统的每个部分都相当复杂，（简单粗略地表示在图中的）它们之间的相互连接使各种运动成为可能。像果蝇这类昆虫的传感器、执行机构、控制系统是十分复杂的，系统的动力学对整个生物体的性能产生很大的影响。

从控制理论的观点来讲，果蝇飞行控制系统的性能、稳定性和容错性为衡量所有的自主系统提供了黄金标准。即使翅膀被撕坏了，腿折了，眼睛盲了，或者负担了它们体重两重的重物时，果蝇仍能设法停留在空中。实现这种行为的控制算法驻存在果蝇芝麻粒大小的大脑中，这个事实为任何试图达到这种性能的生物仿造制造了障碍。如果能发现形成果蝇的这种鲁棒敏捷性的原理，并且能加以描述，这会使应用更广泛，结果将会促进控制系统在设计、制造和实现方面的革命。

类似地，在理解果蝇的飞行控制系统时，控制工具的使用为生物学研究提供了系统方法，它对了解运动系统的一般原理会非常重要，并且为综合生物学原理提供了新的解释。

生物学和控制昆虫飞行中的协同作用是众多例子中的一个，它们构成了科学和工程的丰富资源。另外，重叠区域包括多分辨率建模和多尺度系统（非基因的、设计的、进化的，异类的）分析，以及整体的通信和计算以实现普遍的、分布嵌入式网络的控制和基于网络的控制。特别地，生物系统也能将原始数据转换成信息和知识，最后变成行为和决策。这些恰恰是人们建

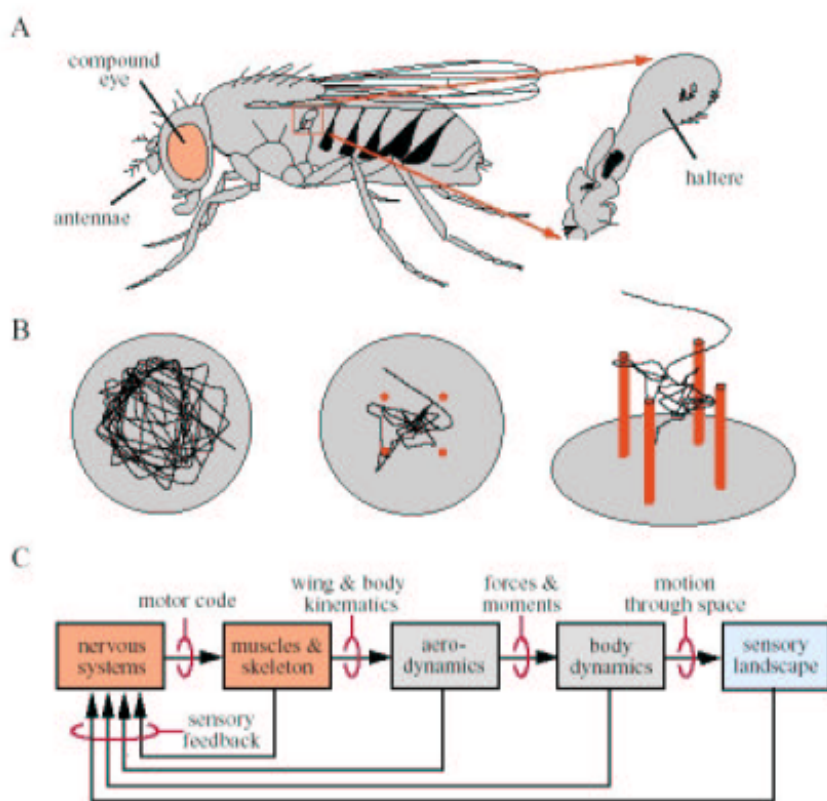


图 3.10: 果蝇的飞行行为。A 成年果蝇飞行的动画显示用于飞行的三个主要传感器: 眼睛, 触角, 平衡器 (检测旋转角度)。B 有和没有内部目标时, 飞过 1 米圆域的飞行轨迹例子。C 飞行系统的控制模型框图。

造工程系统时面临的问题, 因此, 生物学家和控制研究人员的相互合作注定会有很大的收获。

## 医疗成像

在生物医学这个刚刚起步的领域, 自动控制是其中一个重要部分。一些应用, 如机器人外科手术, 已在机器人和智能机器章节讨论了 (见3.3节)。这里, 将讨论另外两个例子: 影像引导治疗 (Image Guided Therapy, IGT) 和影像引导手术 (Image Guided Surgery, IGS)。

影像引导治疗和影像引导手术诠释了怎样利用生物医学工程的基本原理开发出具有通用目的的, 可以与全程治疗系统相结合的软件。此类系统将更有效地支持影像引导治疗, 如活体组织检查、微创手术、放射疗法和其他治疗。其中的重要部分是可控制的主动视觉。要了解这一技术在治疗过程中的地位, 以及图象在治疗前、治疗中和治疗后的应用就必须考虑IGT 和IGS 的四个主要组成部分: 定位、选定目标、监视、控制。

为了应用主动成像技术，首先必须开发用于分割的鲁棒算法，由各种形式的图象自动建立病人详细的解剖模型、注册、以及在各种数据之间和病人与数据之间进行自动排列的方法。必须将这些技术融合进完整的、一致的图象指导治疗传输系统，并通过在特殊应用领域所建立的性能检测手段来验证。这一过程的各个阶段都有控制的介入。例如，为了使治疗和外科手术的主动视觉能成功地使用变形技术或主动轮廓生成技术，控制理论知识必不可少。这些独立的过程都利用图象的一致性，以便在任何时候都能追踪对象的特征。这些特性已经用于图象分割和边缘检测。对于外科手术环境中不断变化的动态图象，如果在给定以前的位置的条件下，就可以在给定时间内估计出实时变化的轮廓位置，Kalman 滤波已经显示了其重要性。这些估计到的数据可以为闭环视觉跟踪器所用。

此外，速度和鲁棒性在介磁学中非常重要，如在外科手术中利用磁共振成像（Magnetic Resonance Imagery, MRI）。这样，外科大夫可面对磁共振设备进行手术，利用图象来指导手术过程。快速分割图象是极其重要的，如果能与估计方法结合起来，就可以非常有效地利用实时轮廓图象提取关键特性（如脑肿瘤或乳腺囊肿）。

图象注册是指根据在不同时间，利用相同或不同成像方式获得的两组或更多组数据建立通用的几何参考结构的过程。各种形式的注册都按以下几步进行：首先，各组用来匹配的数据或图象都应单独校正和修正成像时的误差，以及滤除各种噪声和人为因素的影响。然后，建立区别数组的标准，这样就可以在转换之后量化一幅图象与另一幅图象的相似程度。一旦从每一幅图象中提取了特征，必须将其相互配对。这样，配对特性之间的相似之处就可以表示出来了，并能被描述为控制中经常使用的优化问题。

优化转换方法在此是非常有用的。优化转换方法已经应用于非线性稳定性分析，类似的概念可以用于衡量在图象注册和数据融合之间的相似性。

总之，IGT和IGS将受益于面向系统的思想。这方面，大部分的工作正在由计算机视觉和医学成像研究人员完成。在这些研究团体和控制团体之间建立起强大的纽带，将有可能取得更快的发展和影响其他应用的进展。此外，这类问题的特殊性将为控制理论和技术带来新的发展，并能继而应用于其他领域。

### 3.5 材料和加工

化工工业是美国最成功的工业之一。每年生产价值四千亿美元的产品，并为美国提供一百多万个就业岗位。化工工业连续四十年保持贸易顺差，是



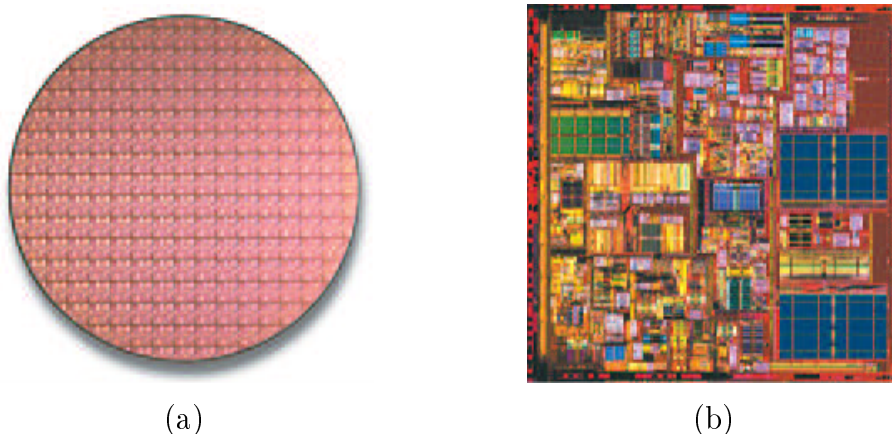


图 3.11: (a) 因特奔腾IV芯片的晶片, (b) 压模

美国的主要出口工业：化工工业在2000年出口总值达725亿美元，占美国总出口额的10%，在1997年创下了贸易顺差额200亿的记录。

如果化工工业想保持它在全球范围的销售实力，就要保持更低的价格和更可靠的服务，生产过程将需要不断融合先进的信息技术和过程控制技术。此外，正在探索的大量新技术领域也需要新的控制方法，以保证其获得成功。这包括电子学、化学、材料生物学的纳米技术，薄膜加工和微集成系统的设计，供应链管理和企业资源配置等。投资于这些领域促进新进展的回报是巨大的。从半导体到制药再到材料，控制的应用对这些工业领域的未来发展至关重要。

## 背景和历史

几乎每件商品的生产过程至少包括一种材料或化学制品，如微处理器，消费品如清洁剂、洗发水、书、磁盘、磁盘驱动器、录像机、食品、药品、粘合剂、汽车仪表板和飞机内饰等。生产这些商品的过程中的反馈控制器提高了产品的质量，降低了材料和能源的消耗，减少了对环境的影响，提高了安全性，降低了成本，使美国工业在全球经济中更具竞争力。

到20世纪60年代后期，过程控制已经被广泛地应用于化学和材料的加工过程，主要以单回路局部反馈控制器的形式出现，各控制器之间几乎没有联系。多变量控制始于20世纪70年代，包括一些规模相当大的过程，如塑料胶片和造纸机的控制。多变量控制的应用在80年代和90年代得到了迅速发展。在过去的25年里，基于模型预测控制的多变量最优控制在存在控制约束和状态约束的工业过程中已经成为一种标准的控制技术。这些约束在化工业和材料加工业相当普遍。模型预测控制在在线计算控制量时明确地

考虑了这些约束。在2000年，控制厂商报道了模型预测控制的 5000 多例应用（例如Adersa、Aspen Fechnology、Honeywell Hi-Spec、Invensys和Shell Global Solution[38]）。据报导，这些应用包括精炼、石油化工、纸浆和造纸、空气分离、食品加工、炼钢、航空和汽车。近几年，模型预测控制算法已经用于处理大规模的过程控制问题。

然而这并不表明所有过程控制的问题已经解决了。还需要新的控制技术以解决最具挑战性的化工和材料加工过程的所有问题。

## 目前的挑战和未来的需要

专家小组确认了材料和加工工业中许多应用的各种普遍特征。建模是十分重要的。将化学、流体力学、热力学和其他学科充分结合的多学科系统明显地需要更好的解决方法。也需要更好的数值方法来详细研究这些复杂和存在不确定性的系统的设计、控制和优化。控制技术必须充分利用更多的现场测量数据来控制日益复杂的过程。

材料和流程工业的进步和发展对各种工业都很重要，其中复杂过程系统的控制使世界经济迅速增长。微电子工业就是一个例子，它平均每年增长20%，2001年销售额达2000亿美元。正如ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) 描绘的，为了实现摩尔定律预言的下一代微电子器件，将需要高精度的反馈控制。

第二个例子是制药业，它以每年10%~20%的速度增加，2000年销售额达1500亿美元。药品规模化生产设备的操作瓶颈与控制复杂结晶过程中晶体的尺寸和形状分布的困难密切相关（见图3.12）。结晶过程通常包括生长、结块、成核和颗粒与颗粒碰撞引起的磨损。对晶体尺寸分布缺乏控制将导致药品生产的完全停止，给经济和医学造成巨大的损失。

除了需要继续提高产品质量外，在过程控制工业中还有一些其它因素驱动着控制的应用。环保条例严格地限制了污染物的产生，因此要采用复杂的污染控制设备。基于环境安全的考虑已设计了更小容量的储存设备以减少化学元素泄露的危险，并需要对上游流程有时甚至供应链进行严格控制。能源费用的大幅度增加也激励工程师们设计一些高度综合的系统，将曾经独立运行的过程耦合到一起。所有这些趋势增加了过程的复杂性和对控制系统性能的要求，使控制系统的设计更具有挑战性。

像许多其它应用领域一样，新的传感器技术正在为控制创造新的机遇。在线传感器，包括激光后向散射的、视频显微镜的、紫外线、红外线和Raman光谱，变得越来越稳定和便宜，也将会越来越多的出现在制造过程中。目前，已有许多这样的传感器用于过程控制系统，但需要更先进的信号

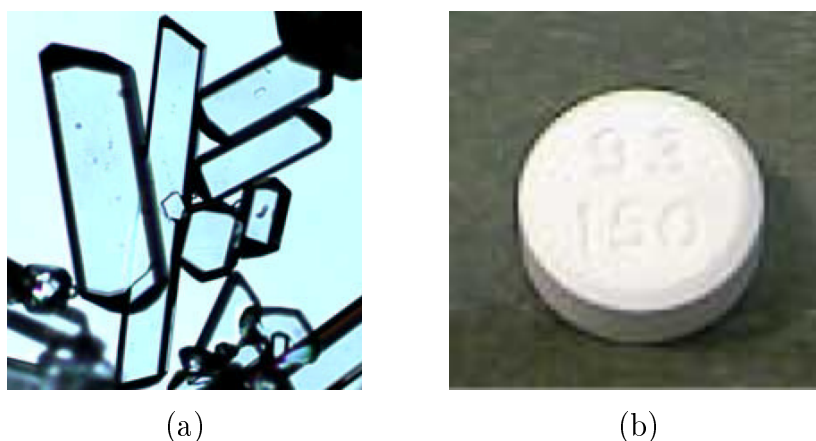


图 3.12: (a) 显微镜下的扑热息痛晶体图象（扑热息痛是Tylenol 片(b) 的一种活性成分），其显示在制药用的结晶器中有时发生的晶体形状的变化。

处理和控制技术，以便有效地利用这些传感器提供的实时信息。控制工程师也可致力于先进传感器的设计，如微电子工业中仍需要大量的传感器。与其他领域一样，面临的挑战是怎样更有效地充分利用这些新型传感器所提供的大量数据。此外，为了确定由传感器数据估计内部状态的可观性，需要有面向控制的方法建立过程的基本物理模型。

材料和过程控制中的另一个特点是物理过程的复杂性。现代过程系统表现出了复杂的非线性动力学特性，其中包括模型不确定性、执行机构和状态的约束，以及高维性（通常无穷维）。这些系统经常需用代数方程和随机偏微积分方程的高度耦合系统才能很好地描述，而且这两类方程都是时变、高维和非线性的。这在微电子工业领域尤其常见，其中需用成千上百的刚性偏微分方程来预测产品质量，例如离子轰击后，快速电子束产生和分解过程的模型。其他过程最好用动力学的Monte Carlo 仿真方法来描述，可以包含或不包含耦合的连续性方程，仿真可在串行或并行计算机上完成。同时需要辨识和控制算法来解决复杂过程系统的高度复杂、高度非线性和高维性问题。而且，即使使用最先进的传感器，许多动力学参数仍有很高的不确定性，因此这些算法要对模型不确定性有鲁棒性。

具有挑战性和未来需要的两个特别领域是颗粒系统和生物技术中的控制。

## 颗粒系统的控制

粒化处理在工业过程中是十分普遍的，包括农业、化学、食品、采矿和制药等行业。据估计，化学工业的60%产品是微粒产品，另外的20%以粉末作

为配料。这些系统的关键特征之一是分布式的物理和化学特性，如大小、形状、形态、多孔性和分子重量等。这些系统发展过程的基本机理是由生长平衡模型描述的，这一模型包括了双曲线偏微分方程和代数方程。

数值求解这些方程还存在着一些困难，尤其当考虑基于模型控制的实时应用时。人们还不能很好地描述生长平衡模型的内核或驱动力等关键因素，（如成核、生长、凝结以及裂变等），常常通过各种辨识技术由过程数据来确定这些参数。当考虑更高维的生长平衡模型（例如尺寸和外形）时，问题的复杂性随之增加，其中内核参数的数目随着附加自由度的增加而迅速增加。同时，随着传感器技术领域的进步，例如颗粒尺寸分布等可以用光散射、超声光谱、水力毛细管分离(Hydrodynamic Capillary Separation)等一系列技术进行实时测量，使得控制问题的描述涉及到分布式测量、高度非线性过程模型、非线性操作约束及复杂的分层操作目标。

为了说明控制领域将面临的主要挑战，专家小组考虑了以下三个应用领域：聚合过程、粒化过程、表面控制。

**乳状物聚合过程。** 用低成本生产出高质量的聚合产品才能提高在国际市场的竞争力，随着美国在该领域新的资本投资走低，如何使现有的聚合物生产设备更高效地运转，并使同种设备生产出不同的聚合物产品，这些给美国的工程师们带来了巨大的压力。在聚合物生产过程中，缺乏足够的可控性是提高产品质量的一个障碍，而且，提高产品质量需要同时最小化或最大化几个产品质量指标。这种多目标的要求导致了过程轨迹只能在比较窄的范围变化，这就增加了对过程的能控性的要求。例如，在涂层过程中，产品的成分、分子重量和颗粒大小分布等方面应该同时被限制在有限的范围内，以保证涂层有较高成型能力、强度和光亮度。

产品质量指标和过程操作变量之间的主要联系往往就是其分布特征，如尺寸分布。以前，间接地用推理控制方法来控制这些特征，但是在线传感器技术使这些特征的实时控制成为可能。这促使要进一步研究分布式参数和质量变量之间的精确定量关系。已有的一些实验技术可在有限的操作条件下建立这些关系，但这些描述还不能用于提高生产或减少变化时的优化。

**粒化过程。** 粒化是很多颗粒形成过程中的关键一步，其中微粒通过液态粘合剂积聚成较大的颗粒。这常用来改善材料的视觉和味觉，提高材料的流动性，提高凝结成型能力以及减少灰尘。粒化过程和其他颗粒过程有许多相同特点，例如结晶、聚合。一般来说，产品质量可以从过程的颗粒尺寸分布(Particle Size Distribution, PSD)来推测。控制PSD的能力决定着最终产品的质量。但是 PSD 控制是十分困难的，因为 PSD 系统具有多变量相互作用

的特性。有些情况下，为了达到预期的产品质量，PSD 的测量值被控制在特定的范围内。

与很多颗粒过程一样，粒化过程各层面上用显微镜、中视镜和肉眼可以看得见的反应机理间有很大的联系。然而，可用于基于模型控制的，连接这些机理的基本知识是相当有限的。特别是，还没有系统地研究各种模型中，模型质量和复杂度之间的折衷方案，这也导致了模型选择的不充分。而且，粒化过程是一个复杂的多维过程，包括多个数量、维数和时间的尺度。粒化过程的研究现状表明在微观研究和系统级建模之间，以及模型的形式和模型的使用之间都存在明显的差距。如果给出这些模型，并利用已有的传感器技术，就可以实现复杂设备的精确调节。

**断面控制。** 尽管这一领域描述的系统不是严格的颗粒过程，但他们也具有分布式变量与产品性能直接相关的特性。因此，控制所需要的基本数学结构在这类问题中是相同的。许多不同的过程工业中都存在断面控制问题，包括注塑、切向控制（纸、铝、玻璃等）、管状化学反应器、先进的材料加工（光伏太阳能电池、微电子等）等。有些情况下，在横切方向上（Cross Direction, CD）测量所关心的特性，这就产生了一维（1-D）断面控制问题。或在其他情况下，在切向（CD）和传送方向（Machine Derrection, MD）同时测量质量特性，这就产生了二维断面控制问题。在反应装置中，空间方向上的反应程度是控制产品质量的关键指标。例如，在纸浆蒸煮装置中，控制沿着反应器轴向的反应程度分布（由Kappa数来衡量）可以精确地调节纤维的关键特性如强度，这取决于反应路径和最终的转化。

如造纸机CD控制的困难是涉及了成百上千的输入输出变量，必须满足时间域和空间域上的复杂的约束条件，实时性又要求将求解时间限定在秒级。由于纸张的收缩、通道的转换、生产级别和速率的改变，这些不理想的因素使CD控制更加复杂，也造成了系统模型的不匹配，因此需要一个鲁棒控制器。与颗粒过程一样，传感器技术正在迅速变化，使得更详细地描述被控过程成为可能。

## 生物技术

在过去的几年，过程控制在生物技术中发挥的作用不大。由于传感器技术的新发展和细胞内行为数学描述的进展，过程控制作为使能技术（enabling technology）在生物技术中的应用迅速发展起来。而且，通过考虑操作问题（例如设计和控制结合）实现有效的过程设计，将缩短设备的开发时间和在专利许可的范围内最大限度地增加产量。

典型的生物反应控制集中在驻存时间，营养供给和反应环境（刺激、温度、PH值等）的调整，需要测量一些常用的参数（氧含量、温度、PH值、有限的代谢物浓度等）。传感技术的进步已经使直接测量和操纵胞内生理反应成为可能。最近在生物工程量化模型上的进展使得人们对基本生物化学过程有了更完整的了解。大量的模型结构都是从系统工程概念建立的，例如，与细胞过程最优控制规则相结合的控制模型，或是从代谢网络得到的凸约束空间的流量平衡分析。生长平衡模型也可以在这个领域找到其应用，例如，描述震荡的生物细胞繁殖的年龄分布情况。同颗粒系统一样，人们可以通过考虑生理学状态空间的各种要素（DNA, RNA, 蛋白质等）来建立高阶的生长平衡模型。相应的，随着结构复杂性的增加，可能达到生物过程的精确控制目标，如代谢的路径控制。

随着对相关知识的深入了解，人们看到了一些机遇，如使用重组细胞产生酶和蛋白质。一般来讲，编码期望产品的基因通过质粒植入到微生物中。外来蛋白质基因给生物体带来了额外的代谢负担，并降低了生长率。产生重组蛋白质的第一阶段包括增加细胞数量（生物量浓度）。一旦达到了足够高的生物数量，就在第二阶段中加入基因的诱导剂(inducer)，促成重组细胞产品的合成。因此，诱导剂的浓度和加入时间是重组蛋白质数量最大化的关键变量。一个具体的例子就是在基因工程重组的大肠杆菌Jm105 (*E. coli Jm105*)中表达氯霉素乙酰转移酶(CAT)的过程，当诱导剂，树胶醛糖，加入到生物反应器时，*E. coli Jm105*同时产生绿色荧光蛋白(GFP)和CAT。（控制系统的）目标是反应结束时，形成的CAT的产量最大。可控制的变量是葡萄糖和诱导剂（树胶醛糖）的供给率。

GFP及其变异体已经使试验生物学发生了革命性变化，使得准确、实时地报告细胞内的位置和相互作用成为可能。这对于确定蛋白质的作用和相互关系是十分有价值的。GFP是1992年从水母(*Aequorea victoria*)克隆的，已经在很多生物体中表达，被用来作为基因表达的报告者以及确定细胞内蛋白的位置。GFP及其变异体已经被成功地用于量化昆虫幼虫、细菌系统和哺乳动物细胞内的基因表达水平。由于其信号的光学特性，开发工业用传感器件是简单的。

### 3.6 其它应用

前一部分描述了专家小组讨论的一些主要应用领域。当然还有更多的正在应用或可能应用控制思想的领域。这节，收集了其中的一部分，这些领域更

加专业化。像前面一样，这些领域不见得热门，却代表着控制领域新的和令人兴奋的发展方向。

## 环境科学和工程

人类活动已经改变了全球环境，这一点是不容置疑的。大量的复杂问题对这个领域的研究者提出了挑战。首先是要理解全球范围内运行的反馈系统。但理解这一问题的挑战之一是这个问题的多尺度性，以及对微观现象动力学的深入理解，例如要理解微生物有机体（如碳循环）是全球现象的必要组成部分。与控制相关的两个特殊领域是大气系统和微生物生态系统。

**大气系统和污染。**近年来，尽管人们不知道物种的来源和演化，“逆建模”在大气科学中已经成为重要的技术。本质的问题是怎样通过全球观察推论出大气样本的最佳源（或陷）分布情况。这相当于下面的控制问题：已知一个由偏微分方程（PDES）描述的系统 and 一组有噪声的观测，选择最优的输入使模型与数据相匹配。这一问题与大气化学物质传输模型有关，目前，二氧化碳或许是最重要的。

目前，大气样本的逆建模仅局限于大气中惰性化合物或简单的过程。希望开发逆建模技术追踪引起非线性大气过程的样本，例如臭氧。逆建模问题在理论上与灵敏度问题息息相关：当输入函数和变量存在不确定性时，寻找在时间和空间上变化的浓度灵敏度。大气逆建模是控制理论的一个重要应用，即在噪声环境和抽样测量条件下，估计出追踪样本的全球源（或者陷）的分布情况。

**微生物生态系统。**下面以微生物膜为例，来阐明控制是怎样在微生物系统中起作用的。人们知道生物膜是广泛存在的、有弹性的和对环境敏感的，而且能够通过化学信号相互交流的。而且，目前对很多种细菌、物种基因、基因产品，以及控制细菌交流的规则网络都已有所描述。目前为止，对生物膜生长过程的研究还仅局限于单纯的细菌培养研究。当生物体从浮游阶段过渡到固定阶段时，研究人员对它所采取的基因路径已经有较好的了解了然而，对这些路径是如何对环境变化作出反应的，却了解很少。目前，研究人员认为，从与大部分细菌相关的角度上看（即微观尺度），对于给定的种类，影响生物膜发育的最重要的环境因素之一是存在其它的有机体。对于生态网络的研究是这个领域的前沿，控制工具在理解复杂的相互作用中将起重要的作用。

另外一个例子是生活在有机体内部的细菌细胞。虽然它们只有有限的常规感知能力和决策能力，但是，通过监控和维持成千上万个胞内阻断剂/中间体的液体含量，细菌细胞能很快对代谢过程中的变化作出估计和反应。这是如

何实现的呢？对这个问题的回答基本上都认为与时相有关。许多生理学的变化是由于酶的一个结合点没有被一个给定的阻断剂所占，由此产生的暂停而引起的反应。如果某个阻断剂耗尽了，可能进入细胞体内的酶就暂停了，即处于“等待”状态。暂停的酶常会做或允许一些在它们忙时不做的事情。一方面，这可能导致所缺的代谢物的增加，培养已耗竭的细胞液达到其它细胞液的大小，以保持物质平衡。另一方面，一些酶暂停是因为许多细胞液同时耗尽了，这个信号将传递给开始消耗其全部资源的细胞，并使它进入饥饿生存期。

为了控制某些细胞液的过量产生，如果某一位置被以后的或最终的产品占有的话，许多在阻断剂合成的早期起作用的酶变得不活跃了，借助于控制理论知识，微生物学家已经能够得到利用反馈技术抑制变异的细菌，大量地生产所需的氨基酸。

在自然界，白蚁的工作为研究反馈和控制微生物生态系统中的作用提供了一个很好的例子。有理由相信白蚁能够控制氧气的传送，以及在肠上皮不同区域的氧气消耗量。这样，白蚁可以保护甚至控制氧气敏感微组织的活动，但是这些组织从肠和周围环境中摄取氧气和处理的反馈形式还不为人知。可以想象肠组织可能对氧气和醋酸盐浓度作出反应以控制氧气的输送和分散到肠道内各段的一些方式。控制可以帮助回答的重要问题是昆虫和肠组织如何创建、控制并维持一个极复杂和易破坏的生态系统。

## 经济和金融

许多控制工具已经应用于经济领域，并且控制与经济共用许多数学方法，如博弈论、随机建模和控制、优化和最优控制。

自70年代初期提出Black-Scholes-Mertan 期权定价规则后，控制理论也成为金融领域的重要工具。本质上，它表明了风险投资的动态控制改变风险度。在极端情况下，风险可以完全被动态贸易策略所排除，这导致公平合理的价格。

期权的定价和保值问题是最优随机控制问题之一，涉及金融资产的动态交易以获得期望的盈利和风险资本。当把这一问题放置在控制理论中时，一组投资中各种资本的数量成为决策变量，（随机的）资产价格变化是系统的动力学，达到期望的风险预测是控制目标。在结构上，它们与物理系统涉及的控制问题有所不同，原因是不确定性在金融系统的动力学中占主导地位。那就是说，价格的变化需用一个高度随机的模型来描述。

金融方面的控制问题，尤其是与衍生证券的定价和保值相关的控制问题，为运筹学和控制提供了许多有意义的挑战。



为金融场所提供的证券变得越来越复杂。这意味着证券的定价和保值也变得越来越复杂了。已有的例子包括允许持有者决定什么时候进行交易的期权、平均价格期权、一揽子证券的期权和期权的期权等，并且这些期权可以涉及股票、期货、利率、天气、地震和大灾难等。期权的保值将成为随机控制理论的一个充满挑战而又令人容易失去信心的任务。

在1987年经济大萧条中，动态规划缺乏鲁棒性是另一个关键因素。因为建模自身就是一个难题，所以模型误差存在时，控制系统仍能很好的工作，这是很重要的。特别是在金融领域，存在大的时变的不确定性。这些不确定性通常可由随机方式处理。例如，在一些金融模型中，假设资产的变化是随机的。这已经用来解释在市场和理论之间存在的偏差。最近，研究人员们一直在开发明确考虑模型误差和不确定性的控制和保值方法，使得在存在模型误差和不确定性时，系统能够很好地运行。在这方面，鲁棒控制理论将做出巨大的贡献。

## 电磁学

自适应光学器件和相位阵列天线的发展为许多应用领域的波阵面控制创造了新的机会。消除大气影响已经应用于科学和军事领域，并且更多先进的控制理论的应用正在考虑之中。一个潜在的领域是为秘密行动所用的主动电磁消除。

为了避免探测和跟踪，在减少军事系统的雷达横穿面方面已经取得了重大的进展。最著名的进展是多角形和雷达吸收材料的使用减小了战斗机被探测到的可能性。秘密战斗机的狭窄前侧面对减少雷达反射是非常有效的。然而，这种方法有许多局限性。当飞行员在执行转弯操作时，雷达横穿面增加了，并且吸收雷达的材料十分昂贵，且对潮湿气体很敏感。此外，价格越来越低廉的多静态雷达系统，能有效地发现秘密战机，而引擎尾气红外信号是系统的一大弱点。

比用多角形使到达的追踪或定位射线偏转（从而减小被探测到的可能性）更好的方法是，人们开发能主动消除到达射线的廉价天线阵列。使用铁素体结构的天线能够非常快地改变它们的辐射和接收属性。因此，这种阵列天线能通过增加反射射线的自吸收和向一个区域辐射以进一步消除到达的射线，从而对周围环境的电磁辐射做出智能反应。

为了达到这个预期的目标，尚需克服一些充满挑战性的问题，包括分布式控制系统理论，目的是计算供给发射天线的电流以消除输入辐射。监测和预测问题对数学和电子工程也是一个巨大的挑战。在这个领域取得的进展也能

用于如蜂窝电话通讯系统、自适应多基地雷达系统，还有其他的一些定向能系统。

红外尾气信号对于主动消除是另一个可能应用的方面。汽轮机引擎的复杂动力学特性造成了一个随机的充满红外线的区域。基本问题是能否用红外传感器和激光二极管的有限阵列来监测、提取特征和控制这个区域的电磁结构。

## 分子、量子 and 纳米系统

随着在检测和激励系统方面的能力的提高，分子、量子 and 纳米系统的控制得到了越来越多的关注。最近，在计算化学和物理学方面的进步已经使人们能预测模拟纳米级材料的行为和过程，这些纳米级材料（系统）包括纳米颗粒、半导体异质结构和具有纳米结构的体材料。运用这些物理知识和数学模型，现在能用数学公式描述纳米级材料和系统的优化和控制问题，这些应用包括纳米材料的设计、精确测量以及量子信息处理。

肉眼可见的材料可由体积特征参数很好地描述出来，但是当结构尺寸缩小到纳米尺度时，体积特征的描述方法就不再实用了。表面效应变得越来越重要，并且其电子学特性发生了改变。这些新特性可用于量子点激光器和超硬涂料这样的工程应用中。在利用这些纳米特性时面对的主要挑战是如何在大批量生产过程中生产这些纳米级材料。在纳米特性的应用方面，新的技术、修正的第一原理模型，大量数据检测和原位诊断的新技术、新执行机构的设计以及微观现象的控制算法都是必需的，控制社团将在纳米特性应用方面发挥重要的作用。

关于纳米级尺度的控制，还有许多未解决的问题，Brown和Rabitz [12] 将其分为三类：控制规律设计、闭环实现、哈密尔顿系统的识别。在此领域要取得进一步的发展需要可控性、优化控制理论、自适应和学习，以及系统辨识技术和理论的新成果。较困难的问题是利用量子波干涉原理实现预期的控制目标，例如多原子分子的选择分解或半导体中波包的操作。最近成功的实验（更多细节参见[12]）包括：分解和重组所选择的化学键、多原子分子的荧光控制以及在高谐波段增强辐射等。

量子系统控制也提供了探索自然的新工具，就像“量子测量与控制”小节中的插文所描述的(见第20页)。

## 能源系统

在设计大型能源系统时，控制已经成为一个中心要素。从带负载的单一发电机开始，动力系统始于大约70年前，到现在已发展成为更广泛的互联系统，可靠性是主要目标（现在，负载已经不是由个别发电机全部承担了）。最近的断电事件引起了普遍关注，可靠性成为更敏感的话题。事实上，整体互联会导致更多的失败。

同时，当前国家对工业经济干预的范围越来越小，这很容易导致整个工业失去控制和缺乏系统信息（甚至是邻近的系统），从而不能掌握导致失败的关键因素。一个大的风险是如果不靠技术努力改善网络的可靠性以应付失败，人们会看到这个基础结构的脆弱性将增加。这种努力的一方面涉及网络的设计和管理措施，包括网络扩展和开发新的工业技术，例如柔性交流电传输系统（Flexible AC Transmission Systems, FATCS），以及对满足客户需要的负载分布做出决策。

基础研究具有重大影响的另一个领域是获得正确动态调整的实时控制和遏制失误的事件管理。电力网与计算机和通信系统包括因特网以及用于广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)的由轨道人造卫星覆盖的通信系统之间的连接增加了。通过连接到提供目前网络状态信息的全球数据网络，提高了每个发电机的局部处理能力。

这样的系统带来的技术挑战是多重的。第一，即使有一个自由的和实时的信息流，如何开发分析潜在的和大规模的连环故障的仿真能力。在主要中断以后能回放检查所有数据，并且获得一些简单解释。然而，超出过去的信息和进行预测将需要基本仿真能力方面的真正革命性的进步。实际上就是需要复杂系统的全新仿真方法，即超越科学计算自顶向下的传统方法和最近的基于代理的自底向上的方法。

第二，分布式软件协议要实现事件流管理和分布式仿真。所面临的挑战是必须保护每个能源公司的自治权利和经济利益。换句话说，分布式软件系统必须这样构造，使在服务公共利益和保护财产以及经济信息之间划清界线。最后要注意的是，通过网络大大地增进了互联，这也成为串联失败的驱动因素。必须小心对待这个过程，因为这会导致通过两个网络间的互联传播失误。特别是，软件系统需要具有鲁棒性以防这类事件的发生。

这个领域的进步需要控制理论和动态系统的研究进展，以及统计物理学和数值方法的新研究成果、分布式软件、计算机网络和能源系统方面的成果。这些领域是相关的，每一个领域的专家都必须拓宽其视野，并同其它领域联系起来。随着人们向着包含能源（电力网、水、石油和燃气管道）、电信、

运输以及电子商务的超大型基础设施迈进，控制的概念将变得更加重要，并且对研究团体提出了重大的挑战。

能源系统还有许多应用可纳入更传统的类型，例如，对产生动力的汽轮机和燃料电池的高级控制，二者代表了复杂化学和流体系统，他们必须保证在各种环境条件下可以可靠和高效地运行。燃料电池面临着更加困难的挑战，因为其热过程、流体和化学过程存在着紧密的耦合。在移动设备中，例如汽车，需要快速使燃料电池达到期望的工作点和在负载改变的情况下仍能维持电池的正常运行。这时，控制是很重要的。

## 第 4 章

# 教育及其外延

围绕控制学科的教育是控制领域研究不可分割的一部分，并且是转换和影响的重要机制之一。在1998年，美国国家科学基金会（NSF）和IEEE国际电气电子工程协会控制系统分会（CSS）共同主办了关于控制工程教育的研讨会，为控制教育提出了许多建议（见[1]和附录A）。本章包括了该研讨会的研究结果和建议，以及专家小组成员和控制学科研究人员的讨论。这里要特别感谢Jim Batterson 为本章所做的贡献。

### 4.1 控制教育的新环境

传统上，我们主要是在与控制相关的工程学科内讲授控制理论的，并且把控制方法和特定领域里的应用紧密结合起来。控制课程几乎都在工程系内讲授，特别是大学本科教育阶段。研究生课程经常是一些系共享的。在一些地方，控制课程也是应用数学和运筹学的一部分内容（特别是最优控制和随机系统）。几十年来，这种教育方式为该领域培养了大量杰出的应用工程师和学术研究人员。

渐渐地，现代控制工程师扮演了系统工程师的角色，负责把复杂的产品或系统内的许多组成部分连接起来。这不仅需要掌握扎实的基础知识和控制工具，而且要能够理解各学科领域的技术细节，包括物理、化学、电子学、计算机科学和运筹学。

另外，控制逐渐地应用到宇航、化学工程、电子工程和机械工程之外的领域。生物学家正在利用控制理论进行细胞和动物的建模和分析；计算机科学家也在把控制用于路由器和嵌入式软件的设计；物理学家正在把控制用于测量和修正量子系统的行为；经济学家正在探讨将反馈用于市场和贸易。

控制应用的变化对控制领域提出了挑战。在美国的学院中，各学科之间的边界十分强，很难保证控制教育者和研究人员跨过这些界限。控制领域庞大且繁杂，任何课程中的控制内容往往只是一小部分。因为这些课程设在各系内部，所以很难获得所需的资料使控制课程发生大的变化。此外，许多新的控制应用是在传统的学科之外。很难判断发展中的课程是否能够吸引广大的研究人员，也很难将这些新的课程融入到其它学科（例如生物、物理、医学）的课表中去。

为了抓住本报告其它章节所描述的机遇，必须调整控制学科的教育体系，使之适应新的环境。一些大学已经开始在教学方式和组织上做出了一些变化，这些努力提供了一些关于如何成功地重建控制教学的思路。

第一步，建立交叉学科研究中心，其中要有决定性数量的控制研究人员。例如，依利诺大学Urbana-Champaign分校的科学协作实验室(the Coordinated Science Laboratory, CSL)，加利福尼亚大学Santa Barbara分校的控制工程和计算中心(the Center for Control Engineering and Computation, CCEC)，马里兰大学的系统研究所(the Institute of systems Research, ISR)。这些中心协调研究活动，组织学术讨论会和研讨班，为保证控制专业的学生和不同系的研究人员之间的交流提供了有效机制。

第二步，在研究生教育阶段建立学科间的公共课程。因为学生有不同的知识背景，这些公共课程有助于扩展学生对控制的认识。公共课程也为大学里更大范围的研究团体提供了开展积极对话的机会，为学生交流和开展共同研究提供了有效的机制。许多美国大学已经采取了这种模式，特别是一些理论性课程。

最后，一些学校已经在控制学科建立了独立的硕士或博士培养计划。在欧洲也是很普遍的，但没有美国那么普遍，部分是因为许多大学的传统学科结构。例如，美国加州理工大学的控制和动力学系统计划(the Control and Dynamical Systems, CDS)和华盛顿大学的系统科学和数学系(the Department of Systems Science and Mathematics, SSM)。独立的研究生培养计划的优点是使教师能较好地安排课程，并且减少以学科为中心的教学方法。

其它的机制在欧洲很流行，但美国仍未建立，即建立地区性控制联盟，将一个地区的多个大学联合起来。这种机制非常有效，比如，荷兰的系统和控制研究所(the Dutch Institute of Systems and Control, DISC)。随着实时音频、视频以及数字连接可能性的增加，甚至可能建立一个虚拟联盟，包括公用课、阅读小组和研讨会，将物理上不相邻的研究站点连接起来。

## 4.2 使控制更易理解

对于控制教育来讲,很明显,想融入新的环境就需要使更多的人了解基本的反馈和控制规律。正如专家小组的建议所阐明的,控制领域未来许多机遇是存在于新领域之中的,控制团体必须制定教育计划,使下一代的研究人员能够迎接这些挑战。

重要的环节是开发注重反馈概念和必要的数学知识的新书籍和新课程,而不要求学生有传统的工程背景。随着愈来愈多的生物学、计算机科学、环境科学、物理学以及其他学科的学生希望学习和应用控制方法,控制学科的全体人员必须探索提供相关知识的新途径,使学生理解基本概念和应用一些高级工具。应该出版面向更广大读者,以及能在生物学和计算机专业的研究生课程中使用的教科书,这些学生对连续数学知识的背景几乎没有超出大二所学的常微分方程和线性代数课程的范围。

下面的插文描述一个设想:使广泛的研究人员和工程师更加容易理解控制。

插文: CDS 110: 控制概念、工具和理论介绍(Kristi Morgansen 和Richard Murray, 加州理工)

加州理工的控制和动力学系统系(CDS)近来承担了对研究生控制课程的修订工作,目的是使那些没有化学工程、机械工程和电子工程等背景知识的学生更容易理解控制课程。目前的CDS 110课程是所有工程领域的高年级本科生和一年级研究生必修的,但由于有严重的工程倾向,使其不易被理科学生所理解。随着理科学生对控制科学的兴趣日渐增加,修改课程势在必行,目的是为生物学、计算机科学、环境科学和物理学的一年级研究生介绍相关的控制概念。

课程的目的是理解反馈原理以及作为工具怎样改变系统的动态过程和处理不确定性。课程的主要内容是反馈系统的建模、动力学、耦合和鲁棒性。课程结束时,学生们应能够建立典型过程系统面向控制的模型,并且说明和描述反馈系统的性能,分析系统的开环和闭环性能。贯穿课程的中心主体包括了输入/输出响应、建模、模型简化、线性和非线性模型、局部的和全局的模型性能。

课程有两个“新线路”:一是概念线路,另一个是分析线路。概念线路是面向这类学生的:他们想对反馈系统有一个基本的理解,并且要了解建模、分析以及设计反馈系统的计算工具。分析线路是面向问题的更为传统的工程解决方法,其中包括线性代数、复变函数和常微分方程等工具的使用。这两种线路有相同的教材体系,但是补充读物和作业就不同了。

除了主要的教材外，还为对控制感兴趣的其他学科的教职工提供可以选择的教材。Hideo Mabuchi 和 Michael Dickinson 是物理学和生物学两门课的主讲教师，他们提供了一些反馈应用于各种学科和工程应用的例子。这些用来强调如何把控制概念和工具运用于具体的实例，诸如航空学、机器人学、通信、生物学、物理学以及计算机科学。

这门课程的首次讲授是2001年2月，成功地建立了概念课的讲稿(每星期的第一次课)，这些讲稿在最低限度的数学背景下阐述了控制的主要思想。基于这些课，学生们能够使用控制工具（例如Matlab和Simulink）并且能够理解结果。每星期两次附加课为这门课提供了传统的数学基础，并且推导出在概念课中讲授的各种结果。

这个课程将于2002年3月再次讲授。按照研究兴趣，我们想再次精炼这门课程讲稿，努力把整个课程分成几个部分，每一部分的目的是提供必须的背景（例如为大学一年级生物学和计算机科学系的学生提供线性代数和常微分方程的知识），或者提供附加的解释（例如以一种更加正式的方式把传递函数与拉普拉斯变换联系起来）。

除了在对控制专业课程做一些变动之外，大学也可把动力学和控制融入本科生的数学和理科课程。线性代数课程可以增加线性系统、特征值、以及他们的物理解释和反馈运算等内容。把机械振动课程扩展到平衡倒立摆的问题，或者骑自行车的稳定性问题，这也会丰富一年级的物理课程。

控制领域也应该继续提供软件工具，以方便控制技术应用。尽管一些控制领域已经出现了这种工具（如经典和现代线性控制理论），可是几乎没有普遍意义上的用于分析和设计非线性、自适应、混合系统的软件包，而且很多也不能用于通用操作平台上（如MATLAB）。这些工具可以使生手也能应用这个领域最先进的技术，而不需要先获得控制方面的博士学位。把建模和仿真组合在一起的软件包，如SIMULINK 和Modelica，在讲授反馈理论时特别有用，因为它们可以在不同的领域探索相关的概念。

### 4.3 拓宽控制教育

课程设置上应拓宽控制的可理解性，控制系的学生也应该广泛掌握工程学、自然科学和数学知识，这也很重要。现代控制理论涉及多种复杂工程系统的建立和应用，控制社团已经成为培养具有系统观点的研究人员的主体。控制课程要为学生提供机会，以培养他们从事现代工程和研究活动所需要的技能。



同时，控制领域的工作量是惊人的，必须努力使现有的知识更加紧凑。这就需要一些新书，它们能够以有效的方式系统地介绍大量的控制技术。这将是主要的任务，也是必须的。如果未来控制系的学生能掌握一些简明而且透彻的控制理论基本知识，他们就能够继续将研究的前沿拓展到现在的界限之外。

在大型的工程项目中，控制工程师越来越多地扮演着一个“系统集成者”的角色。这是因为他们具有成功操纵复杂工程设备所需要的系统观点，此外控制常常是把系统各部件连接在一起的粘合剂（经常采用嵌入式控制软件的方式）。不幸的是，大多数的控制课程都没有强调领导和交流技巧，而它恰恰是在这种环境中取得成功的重要因素。

与此相关的方面是加强团队工作的技巧。所有现代系统设计都是由多学科研究小组来完成的，因此需要有效地与众多领域内的专家相互协调。项目管理课程是培养这种能力的有效途径，而且应该更大胆地将其与大学和研究生控制课程结合起来。另一个有效的途径是参加一些应用控制技术的全国性的竞赛，例如ROBCUP和FIRST。

培养控制系的学生在理论、应用和计算方面的均衡能力也很重要。特别地，控制系的学生也应深入掌握一门或更多门学科的知识，惟有如此才能使他们能够理解这些知识与控制方法论是如何联系起来的。独立于所选的专业领域之外，这种方法还为理解其它工程领域和在应用领域间建立联系的控制应用及工具理清了思路。

实验在控制教育中仍是一个重要的部分。对大学生和研究生来说，课程设计也应该成为他们课程的组成部分。应利用大学或者学院的公共实验室，以及不同大学之间的开放实验室来实现这项工作（建立跨学科和跨校际之间的交流也会带来额外的效益）。开发新的实验以探索控制科学中的前沿问题，包括大量应用诸如计算、通信、网络，以及在一些新的应用领域中进行控制研究。

## 4.4 在K-12数学和科学教育中的机遇

在K-12课程中，计算机文化已经很普及。对控制的要求、限制和能力的理解应该成为每位有科学文化知识的市民的知识组成部分。为什么不用反锁制动闸？为什么在症状消失以后还要通过服用最后的药片来巩固抗生素的作用？对动力学和控制的了解是能否理解这些问题的重要因素。价格低廉的微处理器、高级计算机语言和图形用户接口（GUIs）的发展也使得任何教区能够在其预算范围内资助一些最基本控制实验和演示装置以及小型实验室的

发展。美国国家自然科学基金会已经认识到了所资助项目对公众影响的重要性，具体体现在项目申请表中的“标准2”（社会效益）。由于控制的广泛应用以及对公众利益和生活标准的影响，在大学预科（K-12）教育中设置一门相关课程是非常重要的。

目前，在不同的K-12课程中，大部分包括了数学、科学和计算机技术。与大学里类似，控制的多学科综合特点使其与K-12教育的传统思维方式和体系结构截然不同。然而，有证据表明数学和科学联合起来一起走向应用。数学及应用协会（COMAP）就是一例，其正在开发数学课程资料和实施教师培养计划。确实，COMAP的工作成果是丰硕的，控制社团可以与COMAP协作以提高当前的教材水平和该协会在过去20年里开发的课程。另外的资源是Eisenhower National Clearinghouse，它为K-12数学和科学教育保存了教学模式和资源数据库。

在控制领域，包括速度调节仪、温度调节器、甚至“跷跷板”等一些简单实验可在小学演示以说明控制的基本概念。通过初中和高中的学习，数学知识增加了，就能够进行定量分析和实验验证。一些学校在低年级开始教微积分课程，因此在微积分学后讲授的微分方程和动力系统课程应该把化学、物理学、生物学和数学连接起来。

作为对开发教育材料和实验的补充，为K-12教师们提供学习更多控制知识的机会也很重要。下面是一个如何实现的例子。若干年以前，NASA Langley 研究中心在高性能计算和通信计划(High Performance Computing and Communications Program, HPCCP) 的帮助下为教师赞助了一个计划。在这个计划中，来自六个教区的教师利用8周时间了解工程和科学方面的计算机硬件和软件的现状。上午在报告厅或实验室讲授新的课程，下午则进行家庭作业式的实验。给教师们发放类似于刚入大学的教师出差津贴的奖学金。这种学习环境能令人完全沉浸在课程之中。除了熟悉研究级的硬件、软件和网络以外，参与者相互合作，并能在日后的学术活动中继续保持这种合作。

美国每年都有众多的课程研究和普通的教育会议。特别是，大多数州都有活动频繁的学校联合会，而且还有国家教育联合会。出席这样的会议，能够直接与决策者进行交流。应该让那些非专业人士出席这样的会议，从而促使其能从上述观点出发配合这种发展。

## 4.5 其他机遇与趋势

除了上面所描述的教育及其外延特有的机遇外，还有许多有助于拓展对控制工具的理解和使用的其他可能途径。

## 通俗的书籍和文章

1952年9月,《美国科技》专版论述了自动控制[39]。这本发行物高度称赞了控制的先进性,特别是在制造业中。几年后,巡航控制(最早称为自动飞行员)为反馈的基本原理提供了直接的实例。

从那以后,控制越来越少地为大众所重视,或许部分是因为它的成功。从电子放大器、调节器、电视和收音机的滤波器,到进行平稳网络通信的拥塞控制算法,再到商业航班的飞行控制系统,人们每天都要频繁地与控制系统和反馈打交道。然而大多数人并没有意识到控制是一门学科。其他领域,如人工智能、机器人和计算机科学已经确立了这样的观点:它们均来源于控制领域。

非常有必要告诉公众关于控制的成就和机遇。当需要由政府资助机构支持一些特殊领域的研究时,公众舆论正变得越来越重要。

公共传播媒体有助于实现这个目标。许多当地报纸每周都有科技版或专栏部分,可以为其准备一些关于动力学和控制的系列性的通俗文章。纽约时报每周二都刊登一个科技版,文章可以在该版连续几周刊载。最近几年,美国已经建起了很多科技馆,许多科技馆还与专业协会联盟。开发互动的动力学和控制演示装置不仅为科技馆提供了新的展览,而且能覆盖从孩子到成年人的整个社会年龄段。

为非专业读者而写的书和高中教科书中的某些章节是增加大众对控制理论理解的另一个途径。在这点上,动力学领域已经做的非常成功,可以看到许多关于混沌理论、复杂理论以及相关概念的书籍。目前已有的关于控制的书籍包括控制的历史[8, 9, 27]和一本名为"Out of control" [22],讨论了很多控制概念。

## 多媒体工具

那些用来为理解控制背后的基本思想的各种教育资料的需求量不断增加。一种可能的途径是开发多媒体CD-ROM,它既包含关于控制的历史和概念,又要包含一些关于特殊话题的辅导材料,以及免费的控制分析和设计软件工具。

流体力学领域已经开发了能够作为传统课程补充的多媒体CM-ROM [18]。它包含了关于流体力学的历史,重要概念的图象、动画和对一些基本现象的详细描述。通过大学书店或登陆Amazon.com可以购买。

Johns Hopkins 大学的Wilson J. Rugh 为控制领域的类似工具的开发做了初步工作。他已经制作了一些能在网上运行的关于控制基本概念交互式演

示。这些组件包括傅立叶分析、卷积、采样定理和一些基本的控制系统。最高级的工具之一演示了鲁棒稳定性，其可通过鼠标改变加权传递函数的零极点来确定不确定性权函数。随后通过调整校正补偿器的零、极点来设计控制器，以达到鲁棒闭环稳定性。

## 软件

控制的成功示例之一是控制系统建模、分析、设计和实现商用软件的广泛应用。MATLAB的控制工具箱为古典和现代控制提供了基本工具，其他的工具箱也用于可实现的、更专业的理论。这些工具箱被广泛应用于学术界、政府部门和企业，要引导学生、研究者和实际工作者掌握这些精心设计和测试过的功能强大的工具。

尽管这些现状给人留下了深刻的印象，但这些软件的大部分还仅限于传统控制的很小的范围内，因此，还需要完善以适应前面几章论述到的各种应用。在建模工具方面最近取得了实质性的进展，其中有几个软件包可用于大型复杂系统的建模、仿真和分析。Modelica 就是一例，其为描述复杂物理系统提供了面向对象的语言。Modelica是为代数约束系统的建模而设计的，允许描述更广泛的系统。

还需要另外的可用于非线性和混合系统的面向控制的建模、分析和综合工具，特别是那些与大量信息联系紧密的系统，往往要求好的尺度特性。对于此类系统，还没有标准的描述方法（除了符号描述），与线性系统的同类软件相比，非线性和混合系统分析的软件工具应用并不广泛。主要问题就是要有描述相关动力学系统的可计算体系。分析和综合必须能够处理包含查表、逻辑运算、时延及计算和通信单元的系统。

投资开发这类工具的回报是显而易见的：把先进的理论性技术传递给那些能够充分利用这些结果的人们。

## 工业界和政府的相互作用

与工业界的相互作用是任何工程研究或教育活动的重要部分。控制领域对许多重要问题有着历史性的影响。工业界的参与将对本报告描述的未来方向的最终成功至关重要。所谓工业界的参与可以是联合培养博士计划，其中来自企业的研究者，一半由公司、另一半通过学校的资助完成博士学位（全日）。这样做所带来的益处是把对实际问题更多的理解带到大学，同时也把最新的发展反馈到工业界。此外，来自控制领域的工业界的领袖和主管们应该继续与这个领域保持联系，并且帮助沟通顾客的需求。

NSF/CSS 研讨会也认识到企业参与的重要性，建议教育者和基金会：

鼓励基于互联网的开发计划，把技术信息传播给控制系统的工业用户，鼓励把实际的工作经验带到课堂[1]。

并进一步指出，应该大力扩大学术界和工业界的协同努力，特别是关于教育事宜。

国际自动控制联合会（IFAC）正在收集IFAC专业概要。这些专业概要的读者是普通控制工程师（学术和技术），而不是专业研究者。概要提供某个热门话题的介绍和总览、示例结果、基本理论的纲要；特别注意通过因特网、书、论文等提供一些信息。已经有8个题目被选出来发布专业概要系列：

计算机控制系统

自校正PID

生物过程的控制

控制总线 and 标准

机电系统的机理建模

控制系统工程中的遗传算法

制造业的低成本自动化

可靠的工业实时软件

另一个与工业相互作用的手段是通过国家实验室。在美国，许多政府资助的实验室都有夏季员工培训计划和学生交流计划。大量的参观不仅能够把思想和技术从研究转移到应用，也为理解政府和军事领域中的重要问题提供了有效途径。美国空军研究实验室（The U.S. Air Force Research Laboratory）非常积极组织大学参观访问，是一个成功的相互交流的例子。

最后，对控制研究者来说，有许多机会参与政府工作，如参加评审委员会和咨询委员会，或担任某基金会的计划主管。控制社团的积极参与，对加深和加强控制作用的理解和支持是至关重要的。



## 第 5 章

# 建议

控制仍是一个充满机遇的领域。为了解这些机遇，必须支持下一代控制研究者开发新的工具和技术，探索新的应用领域，建立新的用户。为此，专家小组提出了加强控制影响的5条主要建议。

### 5.1 控制、计算和通信的集成

价格低廉和日益普及的传感、通信和计算技术将使控制应用于大规模复杂系统成为可能。基于网络的控制、网络控制 and 安全第一的大规模互连系统的研究将产生许多新的研究问题和理论挑战。尽管存在弱点,如串联故障导致系统性能的崩溃,但这些系统的关键特性仍是鲁棒性。

重要的挑战将是怎样把控制、计算机科学和通信技术等不同研究领域联合起来，建立一个统一的理论，这是这个领域取得进展所必须的。除了研究者个人项目外，这些领域的联合研究将更加团队化，且需要一批各领域的专家来解决共同的问题。

为了抓住该领域的这些机会，专家小组建议政府机构和控制社团：

**全面加强控制、计算机科学、通信和网络技术的一体化研究。**

在美国，国防部已经通过多学科的大学研究创新计划(Multidisciplinary University Research Initiative, MURI)，对这个领域做了大量投资，而且这种趋势还在继续。创建把控制、计算机科学和通信结合起来的更大的多学科中心，对这些领域的工程师和研究者进行培训将是很重要的。

工业界的介入对一体化研究的最终成功是很重要的。大学应该寻求相关公司作为自己的合作者，如空中交通控制的硬件和软件制造商，以及网络设备制造商。

控制、通信和计算机一体化研究的回报将在运输系统（航空、公路和铁路）、通信网络（有线、无线和蜂窝结构）和企业级管理和供应网络（电力、制造、服务和维修）中显现出来。

## 5.2 复杂决策系统的控制

可以做出推理和决策的控制系统占现代控制系统的比例越来越大。决策不仅包括基于系统条件的传统推理分析，还包括应用高级语言进行的高级抽象推理。这些问题在传统意义上隶属于人工智能（AI）领域。但是在许多应用中，动力学、鲁棒及其互连作用不断增加，要求控制领域的积极参与。

另一个趋势是在大型系统中控制的应用，如整个企业的物流和供应环节。这些系统涉及超大型异类系统的决策，需要有新的协议来决定存在不确定因素时的资源分配。在分析和设计这样的系统时，模型是关键，且这些模型（及后序的控制机制）必须升级以适应超大型系统的需要。这种超大型系统拥有数以万计的与目前操作层面的控制系统复杂度相当的子系统。

为解决这些问题，专家小组建议政府机构和控制社团：

**全面加强对更高级别的决策控制研究，并向企业级系统发展。**

将控制扩展至超出传统的微分方程描述是控制领域已经涉足多年的一个方向，而且很明显，需要一些新观点。分析和设计这类系统的有效理论还没有完全开发出来，控制社团必须加入到这类应用研究的行列，思考如何描述这个问题。

一个有用的措施也许是建立实验台以探讨新观点。在军事领域，这些实验台可以由搭档或对手联合操作的无人运载工具（空中、陆地、海洋和太空）组成。在商业领域，服务机器人和个人助手也许是成果丰硕的开发领域。在大学校园里，机器人竞赛是一个有趣的趋势，控制研究者应该把它作为开发新的范例和工具的平台。所有这些例子中，应加强与人工智能的联系，因为它目前处于应用的最前沿。

在这个领域中开展研究的回报包括用系统技术代替经验设计方法，以开发更加可靠和可维护的决策系统。这将带来更加有效和自主的企业级系统。而且，在军事领域，可以提供伤亡率最低的新防御系统。

## 5.3 高风险、远程控制应用

科技的进展使对反馈的重要性有了新的理解。对控制来说，有潜力的应用领域正在迅速增加，而且新的传感器和执行器允许对以前不敢想象的细节



加以控制。要在这些新领域中发现和抓住这些机遇，控制专家必须积极参加一些传统研究之外的新领域的研究。同时，必须对其他领域的专业人员进行控制技术培训，加强交流，加速控制在可能的应用领域中的应用。

此外，许多应用要求有新的模式去思考控制问题。例如，通过幅相关系对信息进行译码的传统概念也许需要扩展，以适于研究应用脉冲序列或生化学信号追踪信息的系统。

许多这种领域中的机遇之一是提出（或扩展）控制领域的面向系统的模型框架。在许多解释复杂现象的系统中，已有的集中和分层建模工具是重要的。控制是最高级的应用工具，特别是涉及不确定性时。

为抓住这些机遇，专家小组建议政府机构和控制社团：

**在新兴领域如纳米技术、量子力学、电磁学、生物学和环境科学，探索控制的高风险和远程应用。**

探索新领域的一个挑战是两个（或更多）领域的专家必须一起工作，这对基于学科的资助体系常常是困难的。但仍有很多途径可以做到这一点，包括双重身份的研究者，即通过项目资助那些与控制研究者共同解决问题的生物学家、物理学家和其他人。同样地，基金组织应该把对其他学科的资助扩展到控制领域。

另外需要建立“会议场所”，在那里控制研究者们可以接触新的研究社团，增进与其他学科在理论和工具方面的相互理解。可以利用一周或更长时间讨论新领域的控制应用，或者针对某个特定应用领域举办4-6周的短期课程，也包括提供该应用领域的指导材料。

在大学里，需要有新的资料给那些想了解控制的非控制专业的学者。一些科学和工程系已经认识到了控制不只服务于单一学科领域的特点，大学应该考虑设置跨系的双重职位。跨学科的中心（如加里福尼亚大学Santa Barbara分校的CCEC）和控制领域内的一些计划（如加州理工的CDS计划）是设置双重职位的自然场所，并以此吸引传统学科以外的资金和学生，促进在新领域的控制应用。

新领域内越来越多的研究将加速控制的应用，并产生新的进展和见解。在许多新的应用领域，系统方法尽管受到控制社团的推崇，但还需要实际的工程应用。或许更重要的是，控制有机会变革其他领域，特别是那些复杂的、难以理解的系统。当然，这些问题极其困难，以前的许多尝试还没有取得成功，但成功的机会是非常大的，需要不懈努力去追求。

## 5.4 支持理论研究和与数学的交互作用

控制的一个核心是倚重理论并有效地利用理论，同时也对与控制相关的数学研究做出了贡献。严格是这个领域的标志，是成功的关键因素之一。随着控制应用越来越复杂和多样化，继续与数学相结合和支持理论研究变得更加重要。

当务之急是使已有的知识更加紧凑，使该领域能继续发展。综合以前的结论，为理解和应用这些结论提供更加统一的结构体系在任何领域内都是必要的。必须持续不断地追求这个过程，在浓缩控制基础方面还需理论工作者提供稳定的支持。控制专家也需要通过适当的抽象去扩展应用基础，发现现有理论的新的应用。

为了保证该领域健康持久的发展，专家小组建议控制社团和资助机构：

**继续支持理论研究和与数学的广泛合作。**

可能相互作用的领域包括动态系统、图论、数组拓扑学、复杂性理论、排序理论和统计学等。控制和数学相互作用的另外一些观点详见Brockett的最新综述[11]。

关键是为从事核心理论研究的人员寻找和提供资助。跨学科、跨校计划的增加已经支持了许多有价值的项目，但是他们也潜在威胁着长期从事理论研究的个体研究者，但是这对未来的成功也是必要的。在那些面向应用的计划中为理论工作者留下一定的空间以及更明确地表达过去的成功是十分重要的，应该鼓励理论研究。计划主管应该掌握应用、计算和理论之间的平衡，明确持续的理论研究的重要性。

或许可以通过新的研究中心和计划，加强控制和数学之间的联系。基金会应该考虑资助从事控制科学研究的国家研究所参加数学研究，应该鼓励现在的数学研究所开展关于控制、动力学和系统的长期研究计划。

资助理论研究将建立复杂系统的系统设计方法学和为下一代研究者和工程师提供严格的训练。

## 5.5 教育新方法及外延

正如上面指出的许多建议，控制的应用正在扩展，这对控制教育提出了新的要求。该领域必须继续统一和压缩过去40年所积累的资料和体系。重要的是，在传统的工程学科的学生和实际工作者之外，这些资料对广大的潜在使用者应是非常容易理解的。这包括计算机科学家、生物学家、物理学家和医学研究者对控制的新应用。这些使用者的技术背景与传统工程学科相比非常不同，因此，需要新的教育方法。

专家小组相信控制原理是现在任何受过教育的科学家或工程师的知识构成的必要部分，建议控制社团和基金会：

**投资新的教育方法及其外延，向非传统的用户宣传控制概念和工具。**

为实现这个建议，第一应该为专业和非专业人士开发新的课程和教科书。控制也应该成为大学工程和科学学科的必修课，不仅包括机械、电子、化学和航空工程，还要包括计算机科学、应用物理学和生物工程学科。在这些课程中要强调控制原理而不是简单地提供在给定领域内使用的工具。

教育及其外延的一个重要元素是继续充分利用实验，开发新的实验和软件工具。这比以前容易做的多，也更重要。实验和软件工具应该融入到课程中，包括从介绍性控制课程到高级研究生课程。不论是作为一种设计工具（如MATLAB工具箱）还是作为实现（如实时算法），软件的重要性也不可过分强调。

此外，教育要不断加强与工业界的互动。可以联合培养博士，即工业研究者们一半通过公司资助，另一半通过学校的资助来攻读博士学位（全日制）。所带来的益处是把实际问题带到大学，同时把最新的发展反馈到工业界。而且，来自控制领域的工业界领袖和董事们应该继续与这个领域保持联系，并且帮助沟通用户的需求。

另外，开发能够适用于大众化教育的新教材。可以将有关控制的章节纳入生物、数学和物理学科的高中教科书中，或者是讲述控制的历史、原理、成果和工具的多媒体CDROM。解释反馈原理的通俗读本，或是关于控制的“卡通书”也应该考虑在内。关于工业应用的即将出版的IFAC专业简报也是控制教育的重要组成部分。

扩展到更加宽广领域将不断增强对控制作用的认识。通过更加广泛地应用控制原理和工具，也加速了对控制作用的认同。精确的设计原则将使系统更安全，开发时间更短，对关键问题的理解更透彻。

## 5.6 结束语

控制领域历史悠久、成果丰硕、影响着商业、军事和科学技术的应用。对数学的精确使用，同时与实际应用紧密联系的传统使它开发了一系列被各种各样技术所使用的工具。影响未来的机遇要远远大于过去，这个领域现在很好地定位于扩展它的工具以适应新领域的需求。

通信、计算和传感技术的相互渗透将使许多新的控制应用成为可能，但也要求对现有理论和工具进行大规模的扩展。控制社团必须吸收大量新的信息，归纳现有的概念以应用于更高决策水平的系统。与一些新的、长期的、

---

向控制技术开放的领域相结合，未来的几十年中，控制领域的前景将是光明的。

## 附录 A

# NSF/CSS 关于控制工程教育的未来方向的专题讨论会

1998年10月美国国家自然科学基金会（NSF）和IEEE控制系统协会（CSS）召开了一次讨论会以明确控制系统教育的未来需要[1]。下面是报告的概述。整个报告的内容刊载在CDS专家小组的主页上。

### 概述

控制系统科学和工程领域进入了一个史无前例的黄金时代，即使20世纪60年代的空间工程项目所引起的发展与之相比也相形见绌。这些发展机遇伴随着计算机技术、材料科学、传感技术以及动态系统和控制理论基础的发展应运而生。许多未来发展的机遇是在传统学科的边缘，尤其在计算机科学和其它工程学科的边缘。控制技术成为诸如家用电器、电子、汽车和空间系统、大规模制造系统、化学工程、民用与环保系统、运输系统、生物、经济和医药等领域的新的自动化革命的基石。

由于市场的需求和技术的进步，工业界对控制科学家和工程师的要求也发生了改变。未来的工科学生将接受更广泛的教育，以应付学科交叉应用和不断更新的技术。与此同时，学生的背景也在发生变化，许多来自非传统背景，尽管他们的数学和科学知识不足，但能较好地运用现代计算技术。因此，控制和系统工程教育领域进行重大革新的时机已经成熟。

为了应对出现的挑战和机遇，IEEE控制系统分会产生了举办专题讨论会的想法，将众多控制系统研究者召集在一起以明确控制系统领域教育的未来需要。98年10月2日，会议在伊利诺大学Urbana-Champaign分校举行，为期两天，与会者共68人。

本报告总结了那次讨论会的主要结论和建议。99年10月IEEE控制系统杂志刊登了报告主体的修改版。建议涉及了大范围的教育问题，它得到了其中包括NSF、控制系统专业组织、控制系统研究者和教育者的关注。

## 1. 总的建议

1. 在世界范围内，加强不同控制组织和控制学科间的合作以关注控制系统的教育问题，加强社会对控制系统技术重要性的认识。

实现这个目标的机制包括联合资助会议、研讨会和与控制系统教育相关的出版物，以及与控制系统技术有关的书籍、网站、录像带等。

## 2. 附加建议

2. 为初学者提供控制系统工程实践经验，激发他们未来对控制学科的兴趣，介绍如反馈等基本概念和用于工程的系统方法。

实现这个目标可将含有控制系统原理的模块和/或设计结合到大部分工程院校的一年级课程中。

3. 鼓励新课程和教材的建设，这些材料将在很大程度上拓宽本科生的控制系统课程。

这些新课程应对工科三年学生来说是易于理解的，且应涉及系统建模、规划、设计、优化、软硬件实现、计算机辅助控制系统设计和仿真，以及系统性能评估。同等重要地，这些课程应强调基本应用和反馈控制的重要性和局限性。这些课程也应在控制系统工程和从中受益的其它工程分支间架起一座桥梁，如网络通讯、生物工程、计算机科学、经济学等。

4. 在本科层面上建立后续课程，为使学生进入企业工作和继续研究生学习提供必要的广度和深度。

应该让大学本科生了解关于传统的控制方法论（如数字控制）和涉及新控制应用的高级课程，以传递控制系统工程方面令人兴奋的成果和提供实践所必需的基础知识和经验。

5. 促进控制系统实验室开发（尤其是共享实验室），使实验成为所有学生包括研究生控制教育的一个组成部分。

实现这一目标的途径包括进一步支持简易控制系统实验室的建设和通过因特网获得控制系统的典型示例。学院间的共享实验室，以及大学间的共享实验室，将有利于更高效地利用现有资源，增加学生对控制系统多学科特性的理解，促进各学科教职工和学生间的交流。

促进实验室发展也包括连续性支持机制。经常地，实验室建立起来了，若干年后因教职工没有时间和没有基金的持续支持而废弃。因此，为软硬件定期更新、维护和新实验的开发提供连续性支持尤其重要。

NSF/CSS通过召开关于实验室建设和指导的研讨会和开设短期班帮助实现这一目标。促进来自不同大学的教职工交流与共享实验室建设经验。

#### 6. 强调控制系统教育和研究在各层次上的结合。

NSF的本科研究经历计划(Research Experiences for Undergraduates)说明了在本科教育阶段实现这一目标的极好的机制，应当保持下去。资助学生参加控制方面的竞赛是另一机制，应当鼓励。在研究生阶段，控制教育者应当利用某些NSF计划，如研究生教学科研综合培训计划(Integrative Graduate Education and Research Training Program, IGERT) 和课堂、课程和实验室改进计划(Course, Curriculum, and Laboratory Improvement Program, CCII)。

#### 7. 建立完善的集中的教育材料网络资源库，加强信息交换。

这些材料包括：手册、习题、范例研究、示例、历史以及实验练习、软件和操作手册等。IEEE CSS 在这方面处于领先地位。

#### 8. 促进基于因特网的控制系统资料标准的建立，并建立为因特网实验室建立者和教育材料提供者提供资金补偿的价格机制。

实现这一目标的途径可以由NSF发起研讨会，以建立控制类教材和定价标准。

#### 建立严格评审的基于因特网的关于控制教育和实验室发展的电子杂志。

为了实现这个目标，控制系统专业组织起着主导作用，也许应与美国工程教育协会(ASEE)合作。

#### 10. 鼓励将技术信息传播给控制系统工业应用者，同时鼓励把实际工作经验带到课堂。

实现这一目标的途径包括：出版关于控制工业应用的专刊、期刊和杂志，把工业工程师引入到课堂的计划，允许大学教师利用业余时间到工业界去。





## 参考文献

- [1] P. Antsaklis, T. Basar, R. DeCarlo, N. H. McClamroch, M. Spong, and S. Yurkovich, editors. *Report on the NSF/CSS workshop on new directions in control engineering education*. *IEEE Control Systems Magazine*, 19(5):53-57, 1999. Available at <http://robot0.ge.uiuc.edu/~spong/workshop>.
- [2] M. Athans, J. J. S. Sentieiro, and M. A. Dahleh. *Workshop on future directions in systems and control theory*. Cascais, Portugal, June 2000.
- [3] S. Banda, J. C. Doyle, R. M. Murray, J. Paduano, J. Speyer, and G. Stein. *Research needs in dynamics and control for uninhabited aerial vehicles*. Panel Report, November 1997. Available at <http://www.cds.caltech.edu/~murray/notes/uav-nov97.html>.
- [4] W. L. Bargar, A. Bauer, and M. Borner. Primary and revision total hip replacement using the Robodoc (R) system. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (354):82-91, 1998.
- [5] N. Barkai and S. Leibler. Robustness in simple biochemical networks. *Nature*, 387(6636):913-917, 1997.
- [6] M. B. Barron and W. F. Powers. The role of electronic controls for future automotive mechatronic systems. *IEEE Transaction on Mechatronics*, 1(1):80-89, 1996.
- [7] A. Becskei and L. Serrano. Engineering stability in gene networks by autoregulation. *Nature*, 405(6786):590-593, 2000.
- [8] S. Bennett. *A History of Control Engineering: 1800-1930*. Peter Peregrinus, London, 1986.

- 
- [9] S. Bennett. *A History of Control Engineering: 1930-1955*. Peter Peregrinus, London, 1986.
- [10] T. R. Bewley. Flow control: New challenges for a new Renaissance. *Progress in Aerospace Sciences*, 37:21–58, 2001.
- [11] R. W. Brockett. New issues in the mathematics of control. In B. Engquist and W. Schmid, editors, *Mathematics Unlimited-2001 and Beyond*, pages 189–220. Springer Verlag, New York, 2000.
- [12] E. Brown and H. Rabitz. Some mathematical and algorithmic challenges in the control of quantum dynamics phenomena. *Journal of Mathematical Chemistry*, 31:17–63, 2002.
- [13] M. H. Dickinson, C. T. Farley, R. J. Full, M. A. R. Koehl, R. Kram, and S. Lehman. How animals move: An integrative view. *Science*, 288:100–106, 2000.
- [14] European Commission. *Workshop on future and emerging control systems*. November, 2000. Available at [ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ka4/report\\_controlws.pdf](ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/ka4/report_controlws.pdf).
- [15] W. H. Fleming, editor. *Future Directions in Control Theory: A Mathematical Perspective*. SIAM, Philadelphia, 1988.
- [16] D. Hanahan and R. A. Weinberg. The hallmarks of cancer. *Cell*, 100:57–70, 2000.
- [17] M. B. Hoagland and B. Dodson. *The Way Life Works*. Times Books, New York, 1995.
- [18] G. M. Homsy, H. Aref, K. Breuer, S. Hocqreb, and J. R. Koseff. *Multimedia Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [19] T. P. Hughes. *Elmer Sperry Inventor and Engineer*. The John Hopkins University Press, London, 1993.
- [20] V. Jacobson. *Notes on using RED for queue management and congestion avoidance*. Presentation, North American Network Operators’ Group Meeting, June, 1998. Available at <http://www.nanog.org/mtg-9806/ppt/vj-nanog-red.pdf>.

- 
- [21] F. Rowsone Jr. *What it's like to drive an auto-pilot car.* Popular Science Monthly, April 1958. Available at <http://www.imperialclub.com/ImFormativeArticles/1958AutoPilot>.
- [22] K. Kelly. *Out of Control.* Addison-Wesley, Reading, MA, 1994. Available at <http://www.kk.org/outofcontrol>.
- [23] P. R. Kumar. New technological vistas for systems and control: The example of wireless networks. *Control Systems Magazine*, 21(1):24–37, 2001.
- [24] W. S. Levine. *Control System Fundamentals.* CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.
- [25] A. H. Levis, S. I. Marcus, W. R. Perkins, P. Kokotovic, M. Athans, R. W. Brockett, and A. S. Willsky. Challenges to control: A collective view. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-32(4):275–285, 1987.
- [26] J. Marescaux, J. Leroy, M. Gagner, F. Rubino, D. Mutter, M. Vix, S. E. Butner, and M. K. Smith. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413:379–380, 2001.
- [27] O. Mayr. *The Origins Of Feedback Control.* MIT Press, Cambridge, MA, 1970.
- [28] H. H. McAdamsz and L. Shapiro. Circuit simulation of genetic networks. *Science*, 269(5224):650–656, 1995.
- [29] G. H. McCall and J A. Corder. *New World Vistas: Air and Space Power for the 21st Century.* United States Air Force, Washington, D.C., 1996.
- [30] M. W. McFarland, editor. *The Papers of Wilbur and Orville Wright.* McGraw-Hill, New York, 1953.
- [31] F. W. Mohr, V. Falk, A. Diegeler, and R. Autschbach. Computer-enhanced coronary artery bypass surgery. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 117(6):1212–1214, 1999.
- [32] National Research Council. *Embedded, Everywhere: A Research Agenda for Networked Systems of Embedded Computers.* National Academy Press, Washington, D.C., 2001.

- 
- [33] National Science Foundation. *NSF workshop for high school teachers of mathematics and science*. American Control Conference, June, 2000. Available at [http://www.math.ukans.edu/ksacg/nsf\\_hswkshop.html](http://www.math.ukans.edu/ksacg/nsf_hswkshop.html).
- [34] National Science Foundation. *NSF workshop on dynamic data-driven application systems*. March, 2000. Available at <http://www.cise.nsf.gov/eia/ddas>.
- [35] H. Nijmeijer and J. M. Schumacher. Four decades of mathematical system theory. In J. W. Polderman and H. L. Trentelman, editors, *The Mathematics of Systems and Control: From Intelligent Control to Behavioral Systems*, pages 73–83. Univ. of Groningen, The Netherlands, 1999.
- [36] P. Parrilo. *Structured Semidefinite Programs and Semialgebraic Geometry Methods in Robustness and Optimization*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Control and Dynamical System, Pasadena, CA, 2000.
- [37] W. F. Powers and P. R. Nicastrì. Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control Engineering Practice*, 8:605–618, 2000.
- [38] S. J. Qin and T. A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7):733–764, 2003.
- [39] *Scientific American*. Special issue on Automatic Control. September 1952.
- [40] H. S. Tsien. *Engineering Cybernetics*. McGraw-Hill, New York, 1954.
- [41] N. Wiener. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. John Wiley, New York, 1948.
- [42] N. Wiener. *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1950.
- [43] T. M. Yi, Y. Huang, M. I. Simon, and J. C. Doyle. Robust perfect adaptation in bacterial chemotaxis through integral feedback control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9):4649–4653, 2000.