

社会尺度挑战下的控制：

2030 路线图

(简体中文版翻译：第一版)



IEEE 控制系统学会

2023 年 5 月

译者说明

以下为 IEEE 控制系统学会等联合发布的报告——《社会尺度挑战下的控制：2030 路线图》(Control for Societal-scale Challenges: Road Map 2030, Eds. A. M. Annaswamy, K. H. Johansson, and G. J. Pappas, IEEE Control Systems Society Publication, 2023, <https://ieeecss.org/control-societal-scale-challenges-roadmap-2030>) 第二章的简体中文版翻译。

现已：

1. 由该翻译项目的组织者知乎用户 @[系统与amp;控制 - 知乎 \(zhihu.com\)](#) 发布于知乎 ([zhihu.com](#)) 平台：
[【翻译】走向 2030 年的控制理论 \(上\) - https://zhuanlan.zhihu.com/p/638398929](#)
2. 陆续刊发于《中国自动化学会通讯》2023 年第 6 期 (总第 237 期) 至 2023 年第 8 期 (总第 239 期)。
由多人共同完成的翻译全文见 2023 年第 6 期 (总第 237 期) 至 2023 年第 12 期 (总第 243 期)。
可于 [学会通讯-中国自动化学会 \(caa.org.cn\) - https://www.caa.org.cn/Lists/56.html](#) 在线阅读与下载。

(本文档在上述平台发布后略有修改)

报告的前言中提到主要受众群体之一是处于职业生涯初级阶段的年轻研究人员。我认为还不止于此，对于只是刚刚接触控制这门学科的自动化专业学生来说，这份报告也具有重要意义，有助于初步了解这个学科是如何影响并继续影响这个世界的。即使将来不从事本专业的研究，其中的许多内容也能对职业生涯规划有所启发。

我所翻译的第二章，占报告全文的约三分之一，是报告中相当重要的部分。在翻译的过程中，我从中收获许多，也祝愿读者能从中有所收获。

由于本人的专业知识与翻译水平有限，译文难免有纰漏、生硬与词不达意之处，欢迎指正，也欢迎在此基础上进行润色改进，促进传播。

仅供学习交流使用，请勿用于商业用途。

Hye

2024 年 1 月 12 日

目录

译者说明	1
第二章 社会驱动因素	1
2.1 节 减缓和适应气候变化	1
2.1.1 引言	2
2.1.2 气候变化：在 2022 年的回顾	2
2.1.3 控制系统科学家和工程师的机会目标	4
2.1.4 更广泛的视角	9
2.2 节 医疗保健和确保生活质量	12
2.2.1 引言	12
2.2.2 当前对医疗保健和生活质量的展望	13
2.2.3 控制系统科学家和工程师的机会和目标	15
2.3 节 智能基础设施系统	20
2.3.1 引言	20
2.3.2 驱动因素：基础设施系统正在进行数字化转型	21
2.3.3 控制的机会	22
2.3.4 建议	23
2.4 节 共享经济	24
2.4.1 引言	24
2.4.2 共享经济和共享经济中的控制	26
2.4.3 控制在哪里可以发挥作用？	27
2.4.4 长期挑战	30
2.5 节 社会规模系统的弹性	31
2.5.1 导言	31
2.5.2 挑战和机遇	32
2.5.3 建议	35

第二章 社会驱动因素

社会面临着一系列重大的全球性挑战。研究界需要更加重视分析和评估这些全球挑战，并开发科学工具和工程解决方案来减轻其影响。

本章重点介绍了控制系统社区如何为五个社会驱动因素提供工具和技术。本章以减缓和适应气候变化一节开始。本节强调了气候变化对人类构成的生存威胁，以及控制界在开发减少温室气体排放及其负面后果方面的方法和关键技术发挥的关键作用。第二节介绍了医疗保健和生活质量方面的挑战，包括公平获得高质量医疗保健的问题并讨论了与新的医疗技术和能力相关的几个研究机会。第三节介绍了智能基础设施系统，重点关注交通、水、能源、食品和其他基础设施的数字化转型如何由于通信、传感和数据分析的进步而为控制带来新的能力和机会。第四节介绍了共享经济的颠覆性范式。此处认为，所有权和市场互动的新概念将受益于新的控制理论概念。

本章以关于社会规模系统的弹性的第五节结束，讨论了对供应链和网络等全球系统进行更好的规划、管理和控制的必要性。本节还强调了本章中社会驱动因素之间的相互依赖性，例如气候变化和极端事件导致的基础设施故障，这会导致复杂的脆弱性。

2.1 节 减缓和适应气候变化

本节作者：

Pramod Khargonekar, Tariq Samad, Saurabh Amin, Aranya Chakraborty,

Fabrizio Dabbene, Amritam Das, Masayuki Fujita, Mario Garcia-Sanz, Dennice Gayme, Gabriela Hug, Marija Ilić, Iven Mareels, Kevin Moore, Lucy Y. Pao, Akshay Rajhans, Jakob Stoustrup, Junaid Zafar, Margret Bauer

本节重点讨论减缓、适应和恢复气候变化的问题，讨论了控制系统社区的全面和多样化的研究机会，以及为本研究提供更广泛框架的考虑因素。

摘要

在本节中，我们探讨了气候变化和全球变暖带来的巨大的社会尺度挑战，并讨论了控制系统界可能的研究机会。我们首先简要介绍了目前对气候变化过程及其影响的理解，包括与化石燃料替代和能源系统脱碳以及农业和土地使用管理有关的主要挑战。我们也认识到，全球变暖的影响已经显现出来。这推动了在适应和恢复气候变化方面的努力。我们介绍了以下主题的研究机会：基础设施和社区；电能系统；发电；交通、住宅、建筑和设施；工业和制造业；氢、氨和可再生燃料；粮食和农业；水；人工智能计算；负排放技术；地质工程；以及环境监测。在每一个主题领域，我们都从众多机会中分别选取了控制系统可以在其中发挥重要作用的三个具体研究方向为代表。然后，我们讨论了几个背景问题，这些问题为寻求这些研究机会提供了更广泛的框架。我们讨论了可持续经济增长的考虑因素。由于气候变化的紧迫性和时间敏感性，我们讨论了从研究到大规模部署的必要性，以及如何实现这一点。我们讨论了教育和意识在学生和更广泛的社区中的作用。我们强调需要考虑与公平和正义有关的首要问题（经济、区域、全球和代际）。然后，我们设想控制系统社区需要与来自科学、工程、卫生、社会科学、法律、人文和艺术等其他领域的专家进行跨学科合作，以进行有意义的研究，产生预期的积极影响。

2.1.1 引言

气候变化对人类的生存构成威胁。现在无可争议的是，这种威胁的主要原因是人类活动导致温室气体排放量高，这种排放始于工业革命，并继续迅速加速。几十年前，当政府和政府间政策制定者有足够的时间实施必要的变革，以避免我们今天所处的可怕境地时，人们就发出了即将发生和不可逆转的气候变化的第一次警告。全球变暖（超过 1.5°C）似乎是不可避免的，其不利影响已经在世界各地感受到。

国际社会现在必须专注于采取行动，使地球生态系统免受最严重的潜在后果。科学家们日渐从避免气候变化的单一目标转向这一对目标上：

- (a) 减少超出 1.5°C 阈值的额外的全球变暖；
- (b) 减缓和适应气候变化的影响。

在过去的几十年里，随着强大的新技术的出现和融合，控制系统界处于有利地位，可以在全球应对人为气候变化带来的挑战的努力中发挥关键作用。

在信息方面，这些有前景的技术包括先进通信、工业物联网、人工智能、机器学习、数据分析和嵌入边缘设备的智能计算能力。通过与这些及其他领域的专家合作，控制系统界可以为气候韧性做出重要贡献，包括将关键的气候变量纳入关键基础设施系统的规划和运营；利用反馈来管理资源受限环境中的多尺度过程；以及调查社会系统中跨部门的相互依存关系。

成功还将取决于方法的重大变革，特别是超越传统孤立的控制研究。为了获得更好、更快的解决方案，控制设计必须与整体系统设计相结合，而不是被降级到开发的后期阶段。我们也不能忽视人的因素——用户和利益相关者需要通过适当的机制设计和行为激励参与进来。

在本章中，我们将首先审查关于气候变化及其人为基础的当前数据和预测，特别是政府间气候变化专门委员会（IPCC）最近的评估。接下来，我们将讨论控制界研究和创新的几个不同目标，包括基础设施系统、发电和电网、工业过程、运输和物流以及食品和农业。气候危机的紧迫性意味着必须避免像往常一样进行研究。为此，我们讨论了与可持续性、社会正义、大规模部署、教育和跨学科合作有关的几个重要考虑因素。我们在本章中所依赖的一般来源包括（IPCC, 2021, [1]）和（IEA, 2021, [2]）。除非另有说明，排放信息来自（Our World in Data, 2020[3]；见图 2.1）。在适当的情况下，还包括其他参考文献。

2.1.2 气候变化：在 2022 年的回顾

地球气候系统正在经历至少在过去 2000 年中从未见过的快速变化。有证据表明，现在的全球平均气温高于过去 10 万年中最热的时期（6500 年前）。控制气候系统的基本物理原理已经确立。值得注意的是，气候系统是一个日益耦合的自然-人类系统。人类行为在基础气候物理学中发挥着重要作用。地球系统的气候模型正在得到改进，并用于预测（带有预测中的不确定性）其未来走向。

人类活动导致全球变暖的主要原因包括 CO₂、CH₄、N₂O、挥发性有机化合物、CO 以及黑碳（black carbon）的增加。强有力的证据表明，2019 年，大气中的 CO₂ 浓度高于至少 200 万年来的任何时候，CH₄ 的浓度和 N₂O 比至少 80 万年来的任何时候都要高。据估计，CO₂ 浓度已从工业化前的 280 ppm 增加到 2020 年的 412 ppm。

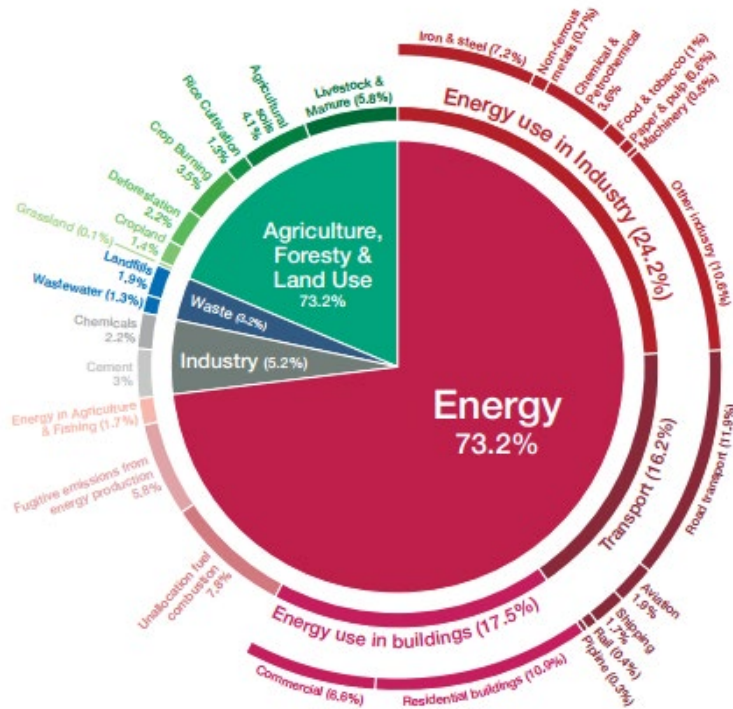


图 2.1: 按部门分列的全球温室气体排放量[3]; 2016 年数据

全球平均温度的预期上升定义了气候敏感性的概念，以应对大气中 CO₂ 含量从工业化前的水平上的翻倍。IPCC 最近的第六次评估报告 ([1]) 得出结论，(平衡) 气候敏感性在“2°C (高置信度) 和 5°C (中置信度)” 的范围内。这提供了随着未来温室气体浓度的增加，全球变暖的可能范围。

第六次评估报告提供了非常有力的证据，证明 2011–2020 十年的全球平均地表温度比 1850–1900 年的基线高 1.09°C (置信区间为 0.95–1.2)。事实上，过去四十年中的每个十年都比 1850 年以来的此前任何一个十年都要温暖。该报告充分利用了对气候变化自然驱动因素的广泛研究，如入射太阳辐射的变化、火山活动和全球生物地球化学循环等驱动因素。它还分享了地球气候系统变量的观测数据，以找到明确的证据，证明人类活动导致的温室气体增加“使大气、海洋和陆地变暖。大气、海洋、冰冻圈和生物圈发生了广泛而迅速的变化。”

全球变暖已经产生了重大后果。气候变化归因科学的新兴技术使我们能够对全球变暖与特定的观测事件进行因果联系。例如，该报告得出结论，自 1950 年以来，全球陆地平均降水量有所增加，人类的影响是造成这一现象的原因之一。洪水事件的频率和强度都有所增加。在世界某些地区，农业和生态干旱也有所增加，包括西非、中非和南非，西欧和中欧，地中海，以及北美西部。

几乎可以肯定的是，人类引发的气候变化是极端高温 (包括热浪) 的主要驱动因素，自 20 世纪 50 年代以来，极端高温变得更加频繁和强烈。人类活动也很可能导致海洋变暖、冰川退缩和北极冰层减少。这继而又使 1901 年至 2018 年间的全球平均海平面上升了 0.2 米。

人类活动导致的温室气体水平上升也导致海洋酸化和海洋氧气水平下降，改变了大型鱼类和海洋哺乳动物的迁徙模式。

气候变化正在世界各地发生，极端天气事件的频率和规模都在增加。(包括寒潮在内的

极端寒冷天气已经变得不那么频繁和严重。)气候系统的未来演变将取决于人类行为和政策将如何影响自然系统。目前的人口为 80 亿,预计到 2050 年将增至 97 亿。其中大部分增长将发生在亚洲和非洲,美洲的增长幅度不大。亚洲、非洲和世界其他地区的欠发达经济体和社会将理所当然地渴望更高的生活水平和粮食、能源与水的安全。因此,对能源、水、粮食、水泥、金属和其他自然资源的需求预计将增加。因此,迫切需要满足这些需求,同时避免气候变化造成的进一步损害。

关于社会经济技术系统将如何演变以影响气候,有许多设想。2016 年正式通过的《巴黎气候协定》承诺,世界“将全球变暖限制在工业化前的水平之上低于 2 摄氏度内,最好是 1.5 摄氏度内。”然而,1.5 摄氏度的目标似乎极有可能被超过,因此,即使利用全球协调来限制进一步的温室气体排放和全球变暖,也需要调整战略。为了确保一个宜居、可持续的地球,战略和全球协调是同样需要的。

2.1.3 控制系统科学家和工程师的机会目标

气候变化问题的紧迫性和规模应该立即呼吁科学家、政策制定者和来自许多学科的专家进行合作。而控制科学家和工程师发挥着至关重要的作用。

在本节中,我们讨论了一些需要研究和创新的课题,以及控制学界可以发挥领导作用的课题。图 2.2 提供了一个总体示意图,说明了这些课题与一些相关技术促成因素以及适用的控制方法和工具之间的相互联系。

在每种主题下,我们都会提供机会目标的简要概括,随后是控制科学家和工程师的三个研究重点。(数量限制为三个完全是因为篇幅限制,而不是因为缺乏具有高影响潜力的其他研究领域。)我们还指出了每一个机会可能产生广泛社会影响的时间表,这意味着该技术将完全成熟,并正在进行大规模部署,具体如下:

- 短期:到 2030 年的社会影响
- 中期:2030 年至 2040 年的社会影响
- 长期:2040 年后的社会影响

本部分报告的作者计划编写一份更全面的文件,其中将详细讨论以下机会和其他机会。

基础设施和社区

气候变化的结果是,极端天气正在对电网、交通(公路、铁路和航空)系统、水处理和分配、通信网络和公共安全等关键基础设施构成越来越严重的威胁。其中一些基础设施本身就是关键的机会目标,下文将对此进行讨论。然而,许多基础设施具有动态的相互依赖性。例如,飓风过后修复电网需要运输系统能够运送设备和人员。类似地,交通和供水系统可能取决于电力的可用性。这种部门耦合和相互依存关系需要仔细建模和处理。一般来说,控制理论家或工程师关于不确定性决策的工具包可以帮助更好地整合天气和气候数据,以评估和管理关键基础设施的气候风险。

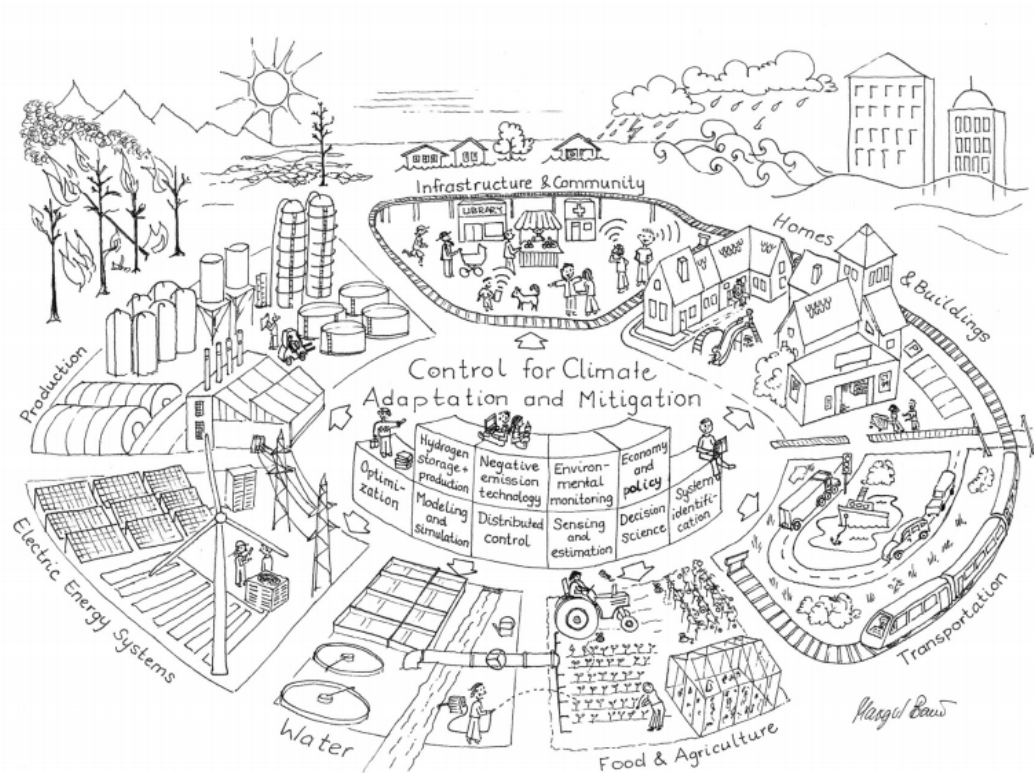


图 2.2: 控制技术和工具可以在应对同适应和缓解气候变化相关的一系列挑战方面发挥核心作用。其中一些挑战涉及直接影响人类及其与自然环境相互作用的基础设施和社区（粮食和农业、水、交通、能源系统、生产、家庭和建筑）。

本节还包括社区绿化和土木工程。

示例机会：

- 战略性地分配分布式资源，用于基础设施和基础设施网络的恢复能力、故障识别、适应和修复（中期）
- 设计具有包括多个垂直功能的整体模型的净零（或净正）智能城市（中期）
- 设计能够承受预期海平面上升的弹性海岸结构和管理系统（长期）

另见本报告第 2.3 节，以进一步讨论与控制相关的基础设施机会。

电力能源系统

电网的巨大变革正在进行中。世界正在从基于化石燃料的集中式、可调度发电的历史模式，转变为大部分发电来自可再生能源的分布式系统。我们的愿景是创建一个自主、连续、安全和脱碳的电网，既高效又经济。今天的电网技术和运营不太适合可再生能源发电的大规模渗透。控制技术和架构的新进展从传统的集中式控制过渡到更分布式和分层的控制，对于确保未来的电网稳定、可靠、可扩展和具有成本效益将至关重要。这些挑战和机遇跨越了输电和配电网，这一划分本身可能需要重新审视。示例机会包括：

- 利用新的电力电子技术开发控制，以实现可再生能源整合（短期）
- 创建不同时间段动态电价的新经济模型（中期）

- 创建分布式优化和控制，以深度整合可再生能源发电、储能和需求管理（中期）

发电

一个主要的优先事项是用风能、太阳能和地热能等可再生能源取代化石燃料发电。许多地区和国家的风能和太阳能成本大幅下降，能源成本水平与化石燃料发电持平或更好。其他可再生能源，如海洋和河流水电，也是加强无碳发电的有希望的途径。从涡轮机到发电机组再到电网接口，控制界的机会存在于多个层面。示例机会包括：

- 动态管理和优化大型可再生能源发电机（短期）
- 开发漂浮式海上风电、潮汐能和波浪能发电机的控制联合设计（中期）
- 优化耦合跨部门发电，包括氢气和生物燃料（长期）

运输

在公路、铁路、航空和海洋运输，这些约占全球温室气体排放量的 16% 的领域上进行脱碳，是缓解和适应气候变化的另一个高度优先事项。在过去的几年里，电动汽车取得了巨大的进步，但还需要更进一步：国际能源署预计，如果要在 2050 年前实现净零排放，全球运输部门的石油份额需要降至略高于 10% [2]。空运和海运的脱碳工作正处于探索阶段。除了电气化，还需要开发其他能源战略，如氢气和氨。这为控制界开拓了一系列研究机会，不仅在单个车辆层面，而且在物流和货运网络方面。示例机会包括：

- 为电池、燃料电池和新兴动力系统（如氢气和氨）创建传感和控制（短期）
- 开发节能智能移动的新型 CPHS 设计，包括车辆到设施/电网的电力流（中期）
- 控制多尺度交通网络的脱碳（长期）

住宅、建筑物和设施

住宅和建筑物约占全球温室气体排放量的 18%。随着可再生能源发电的扩大，一定程度的脱碳将自动发生，但建筑环境中也存在其他机会。关注点不应局限于单个建筑，无论是住宅还是商业建筑；更大规模的居住也是有希望的目标。我们需要记住，这些地方是人们生活和工作的地方，因此必须考虑人类的行为。这里的一个主要机会是以灵活的方式，即使用需求管理，将社区所需的能源与可再生能源相匹配。示例机会包括：

- 为数据中心开发具有温室气体排放意识的能源管理（短期）
- 自动化和控制智能微电网和需求响应（短期）
- 用于供暖和制冷的节能地热热泵的控制联合设计和运行（中期）

工业和制造业

工业和制造过程的碳影响源于电力和供暖的广泛使用，两者都必须得到处理。此外，设施的多样性意味着一些机会是针对特定行业的。然而，一些行业的碳排放量足够大（如钢铁、化学品和石化产品、水泥），需要专门关注。在某些情况下，可能需要开发新的工业工艺，作为能源密集型和难脱碳型工艺的替代品。全球近 30% 的温室气体排放来自工业。强调资源效率、减少浪费和再利用的循环经济也有助于制造业的可持续性，所涉及的固有反馈回路意味着强有力的控制联系。示例机会包括：

- 确保工业流程和设备的能源效率，实现热电一体化（短期）
- 优化和控制“绿色化”能源密集型制造业（中期）
- 优化并控制 CO₂捕获、利用和储存（长期）

氢、氨和可再生燃料

需要低碳足迹的高能量密度燃料来取代传统的石油、天然气和煤炭，用于超出当前或近期电能储存技术性能限制的应用。清洁氢气和氢基清洁燃烧液体燃料，如氨和低碳生物燃料，是此类应用的潜在能源载体。到 2050 年，氢气及其衍生物预计将以最低成本贡献总减排量的 10% [4]，相当于 80 GT 的 CO₂。由于该行业处于起步阶段，因此在设计、创新和技术开发方面存在许多机遇和挑战。示例机会包括：

- 设计和实施具有广泛扩展性的电解槽控制系统，以进行大规模氢气生产（短期）
- 从天然气中生产氢气，并进行碳捕获和封存（蓝氢），包括先进的过程控制、专用 SCADA，和储层建模 [5]（中期）
- 氨、甲醇、电子乙烷和电子煤油等合成氢基燃料生产的控制协同设计，特别是运输部门的控制协同（长期）

粮食和农业

农业、林业和土地利用活动占全球温室气体排放量的 18% 以上。此外，预计气候变化对作物种植的影响将是巨大的。这一部门需要迅速发展，以获得对环境变化的灵活性和适应性，并优化生产。最近，农业 4.0 范式的发展——传感器、致动器、算法和数字化的集成——为控制系统在可持续农业中发挥关键作用提供了一个平台。整个食品供应链也为控制提供了机会。示例机会包括：

- 协调无人驾驶的空中和地面车辆用于农业和其他土地使用（短期）
- 管理粮食供应链以实现可持续的产品分配，整合温室气体足迹（中期）
- 控制农业光伏以实现农业和发电一体化（中期）

水

气候变化对水的有害影响数量众多且显而易见。尽管海洋中的海平面正在上升，但河流、溪流、含水层和淡水湖的水位已经在下降。饮用水的供应和需求需要更好的管理。缺水也影响着全世界的农业。如果不加以解决，对全球不断增长的人口的粮食供应是否充足将成为问题。洪水和风暴潮频率的增加引起了另一种与适应和缓解气候变化有关的严重关切。示例机会包括：

- 管理和优化农业灌溉及其相关基础设施（短期）
- 创建社区节水动态模型和控制策略，包括行为变化（中期）
- 控制和优化水处理，包括弹性和自主移动设施（中期）

人工智能计算

2012 年至 2017 年间，用于训练深度学习神经网络模型的估计计算量增加了 300000 倍 [6]。人工智能和数字转型的计算工作量预计将增长 100 倍，超过 GPU 缩放和摩尔定律 [7]。

大规模信息和计算技术，特别是机器学习对气候的影响不容忽视。追求高效的计算和通信仍是一个迫切的需求，即使我们已经日益依赖于可再生能源发电。示例机会包括：

- 为训练算法开发能量优化，涵盖模型架构和硬件执行控制（短期）
- 优化计算基础设施和硬件，包括数据存储、并行化和重用（中期）
- 开发分布式学习算法，利用大规模边缘和云计算，并基于温室气体考虑优化资源分配（中期）

负排放技术

在短期内完全减少碳排放几乎是不可能的——某些形式的交通、工业活动以及农业和畜牧业还不能实现温室气体中和。必须采取其他行动来抵消这些排放，即负碳技术是必不可少的。机会从景观美化遍及 CO₂ 捕获、利用和存储。示例机会包括：

- 测量、跟踪和优化新兴碳市场（中期）
- 设计和控制直接从空气中捕获 CO₂ 的系统（中期）
- 设计和操作人工光合作用系统（长期）

地球工程

地球工程是一个有争议的话题，但它为控制研究提供了机会。通过对地球生态系统（包括海洋和大气）进行大规模干预，温室气体可能会被吸收，到达地球表面的太阳辐射可能会减少。这种干预措施可能包括在大气中大量释放气溶胶，在太空中发射和展开大型反射镜，以及通过大量化学掺杂增强海洋对 CO₂ 的吸收能力。正如这些例子所表明的那样，即使只是考虑一些地球工程项目时也需要相当谨慎——控制科学家可以在需要的地方帮助敲响警钟。另一方面，今天关于发电和储存的大规模项目也具有地球工程的影响，需要更好地评估。示例机会包括：

- 规划大规模可再生能源发电站，以最大限度地减少对当地生态系统和气候的不利影响（中期）
- 模拟超大规模时空生态系统，考虑陆地、海洋和大气动力学之间的相互联系（长期）
- 开发在高度长期不确定性下风险敏感的优化和控制，意识到潜在的灾难性未建模影响（长期）

环境监测

无法测量就无法控制，这一事实与减缓和适应气候变化也是有关的。为了评估持续的温室气体排放以及减少温室气体排放的控制策略的有效性，有必要进行传感、估计和监测。地面、水上和水下、天空和太空中的仪器，以及结合时空动态模型的综合分析都是需要的。为了有效，环境监测必须作为一项国际合作来进行。示例机会包括：

- 开发在大型仪器网络中的故障检测和警报管理（短期）
- 进行区域和行星尺度的时空估计和过滤（中期）
- 使用固定和移动传感器合作监测环境（中期）

2.1.4 更广泛的视角

减缓和适应气候变化是一个复杂的问题，而不仅仅是一个工程或技术问题。这需要工程师、技术人员、经济学家以及制定社会、监管和公共政策的人之间的合作。在我们为有影响力的研究、教育和现实世界的转变制定框架时，我们需要意识到这一更广泛的背景。

可持续经济增长

可持续发展需要社会、经济和环境之间的平衡相互作用。需要解决的关键问题是，我们如何才能创造和维持一个繁荣的社会，让所有人都享有高质量的生活，而不会产生历史上以发展的名义损害我们的环境和社区的负面影响。经济增长是解决方案的一部分，尤其是对于那些需要提高生活水平、改善数十亿人的健康、营养和教育的发展中国家来说。在实现经济增长的同时，必须有效管理自然资源，并为后世保护这些资源。我们的愿景需要从消费和浪费转向再生和再循环——这一转变将使子孙后代茁壮成长。

从减缓气候变化的角度来看，我们必须在实现经济增长目标的同时，最大限度地减少对化石燃料能源的需求。这是一个重大挑战，需要迅速降低技术成本。然而，鉴于目前还不存在这种具有成本竞争力的技术，我们可以预计，至少在未来十年内，化石燃料能源还将被使用。

引导经济增长走向可持续的未来，即绿色增长，也很重要。对可持续发展、消除各部门的化石燃料、创建循环经济以及适应气候变化和增强韧性的投资可以促进经济增长和长期可持续性。

从研究到大规模部署

减缓和适应气候变化需要能够大规模实施的解决方案。通常，能源产生和能源消耗系统是大型系统，例如电网、交通、建筑和城市以及制造业。因为我们在竞相在全球变暖超过2°C或者更甚之前使能源系统脱碳，所以从研究到大规模部署的过渡是一个重大挑战。因此，风能和太阳能发电成本的大幅降低是鼓舞人心的发展。

幸运的是，人们对基于研究的创新有了越来越多的理解。此外，政府资助机构正专注于高影响力创新的需求。控制学界应该系统地、创造性地、积极地思考研究向现实世界的过渡。这需要国家规模的测试和实验基础设施，还需要了解投资新技术的商业案例。

学术研究人员和工业界之间的紧密协调与合作尤其有帮助。开发具有共享目标、数据集和相互加强的活动的协作网络，也可以是确保研究结果具有现实世界影响的有力方法。此外，还需要与政策制定者和监管机构建立更密切的联系，以加快采用和扩大解决方案。

教育和意识

年轻一代学生对气候变化的缓解和适应非常感兴趣，并备受激励。他们中的许多人将这些视为他们这一代人必须解决的“他们的问题”。毫无疑问，许多对控制系统感兴趣的学生也对气候变化带来的挑战感兴趣。因此，有机会在本科生和研究生水平的控制教育中纳入与气候变化相关的主题。这些可以是在本科课程中使用气候变化影响的实例和预测，也可以是在硕士和博士级别的多学科高级课程中。一个具体的机会是关于可持续性控制方法的课程。

需要向更广泛的公众灌输对生态系统，特别是气候作为一个动态系统的认识，以及控制科学和工程对其管理的相关性，这是该学科的教育工作者很少接触到的受众。

本报告第6章也讨论了这一主题，它超出了缓解和适应气候变化的具体社会挑战。

公平与能源正义

从历史上看,气候变化和环境退化极大地影响了世界各地社会的弱势和贫困阶层。例如,化石燃料工厂对空气质量的影响不成比例地由穷人和少数民族社区承担。同样,洪水、干旱和野火等气候变化影响对这些社区的影响也不成比例。热浪影响到没有足够空调的贫困家庭,导致生命损失。预计海平面上升将影响较贫穷的国家,导致大规模移民。发展中国家对全球变暖的贡献(指温室气体排放量)相对较小,却在气候变化中首当其冲。这些国家需要更好的能源基础设施来发展经济。

与气候有关的新技术的发展可能会进一步加剧这些问题。例如,政府在研究、开发和商业化方面的投资增加会进一步扩大经济不平等。减缓和适应气候变化的花费增加反而可能会加重弱势社区的负担。

控制界在从事与减缓和适应气候变化有关的工作时,必须充分认识到能源正义、代际公平和全球经济发展等问题(另见第7章的更多讨论)。

跨学科合作

需要注意的是,气候变化缓解和适应问题超出了任何一个学科的范围。在气候变化问题上取得进展需要工程、商业、社会经济行为科学和人文学科之间的合作。控制社区不一定有正确的模型来处理这些更广泛的观点,特别是在发生社会经济技术交叉的情况下。

因此,将这些问题视为控制问题是没有帮助的。相反,控制界应该与其他领域的专家合作,组建协作团队,以应对大规模、紧迫和艰巨的挑战。考虑到开发有效且功能性的团队所需的额外时间和资源。幸运的是,有大量的文献、工具和技术用于融合的跨学科研究和创新。控制学界还应积极奖励和表彰从事此类合作的成员,因为他们的工作不容易融入出版物、演示和专业发展的传统框架。

结论性意见

气候变化的缓解和人类对其影响的可持续适应所带来的巨大挑战为系统和控制科学家和工程师提供了标志性的机会。从本节可以明显看出,控制学界的机会范围和规模是广泛而深入的,涵盖了许多技术和行业部门。这些领域的多重具体挑战为系统、设计、建模、控制、决策、优化和相关主题的专家提供了检验的机会。需要认识到本章探讨的机会只是控制社区展示其帮助应对气候变化和缓解能力的大量机会的一个子集,其摘要见图2.3。

气候变化挑战具有紧迫而关乎生存的重要性。它使得以控制为中心的研究、转化和发展的历史范式显得不足。跨学科合作伙伴关系是必要的,这些合作伙伴关系必须超越科学和工程学科,涵盖人文科学和社会科学。尽早与行业和政府接触也至关重要,这样才能尽快大规模部署。争取人类的未来,时不我待。

建议

对年轻研究人员：

气候变化，如果不是人类最重要的挑战，那也可以说是其中之一。它将在未来几十年影响我们的生活和社区。它包含了一系列非常庞大和多样化的技术主题。由于其内在的跨学科性质，它将促进持续的智力增长和不断扩展的视角。你将有机会与其他知识领域的同事就集体目标进行合作。你还将有机会在各种组织工作，包括学术、私营行业、非营利组织、政策和政府。

对资助机构：

气候变化的重要性再怎么强调也不为过。为了应对这一挑战并制定紧急有效的解决方案，政府、私营和慈善组织提供强有力的财政和方案支持至关重要。在这一总体主题中有各种各样的研究主题。因此，这些主题中的一个或多个可能与任何给定的资助机构的目标相一致。非常重要的一点是，请记住，气候变化研究本质上是跨学科的。控制系统专家可以做出重要和必要的贡献。但为了发挥这一潜力，应谨慎设计研究资助计划，鼓励跨学科合作，并在适当的情况下集成控制系统。

（原文中有图 2.3，整理了以上提到的机会，但考虑到图片翻译问题，这里不做重复展示）

2.2 节 医疗保健和确保生活质量

本节作者：

Marcia K. O' Malley, Philip E. Paré, Sri Sarma, Tommaso Menara, Fabio Pasqualetti, Timothy O' Leary, Rodolphe Sepulchre, Francis J. Doyle III, Eyal Dassau, Sarah Fay, Anette Hosoi, Dalton Jones

医疗保健和生活质量是重要的社会层面挑战，随着人口的增长和老龄化而变得越来越重要。控制系统界在技术和系统的开发中发挥了重要作用，甚至可以发挥更大的关键作用，以应对这些挑战并提高医疗保健效果。

摘要

生活质量对全人类来说至关重要。随着年龄的增长和健康状况的下降，以及经历疾病和伤害，我们所感知的生活质量与医疗保健问题交织在一起。在全球范围内实现公平获得高质量医疗保健面临重大挑战。这些挑战包括全球老年人口数量的增加，医疗成本增加，对科学和公共卫生顾问的信任度下降，以及心理健康问题的日益出现、被意识和关注到。尽管存在这些挑战，但新技术和能力能够而且将对人类健康和生活方式产生重大而积极的影响。当前人们对于医疗保健和生活质量的看法，是在多年缓慢而又代价昂贵的进展中形成的，最近又因新冠肺炎疫情而发生了转变。在本节中，我们将讨论流行病和传染病如何在历史上、在当前并持续影响世界和我们的领域。我们还提供了一些医疗器械开发的背景以及必须理解的监管方面。然后，我们继续阐述控制系统社区在系统级医疗技术、调节中枢和外周神经系统的神经工程解决方案以及结合闭环控制来调节和治疗疾病的医疗设备等领域的目标机会。本节最后为年轻研究人员和相关资助机构提出了建议，以帮助控制学界应对医疗保健和生活质量方面的社会规模挑战。

2.2.1 引言

生活质量对所有人来说都至关重要，随着我们年龄的增长和健康状况的下降，以及经历疾病和伤害，我们感知的生活质量与医疗保健问题交织在一起。德勤 (Deloitte) 最近的一份报告研究了影响全球医疗保健的重要驱动因素，包括全球范围的新冠肺炎疫情、医学科学的快速发展以及数字技术和数据分析的指数级增长 (见图 2.4)。与这些驱动因素相伴的是，越来越多的知情而自主的医疗保健消费者，以及从只考虑疾病护理到更广泛地解决预防和福祉的重大转变 [8]。

在全球范围内实现公平获得高质量医疗保健面临重大挑战。在美国，预计到 2060 年，65 岁及以上的美国人数将翻一番 [9]，而这一趋势在其他国家更为明显。医药费用正在上涨。对科学、医护人员和公共卫生倡议的信任度下降导致了对疫苗的犹豫。由于新冠肺炎疫情的持续压力，医疗专业人员短缺。心理健康问题也在增多，人们越来越关注与疫情和年龄相关的隔离，以及社交媒体对心理健康和幸福的影响。



图 2.4：全球医疗保健部门的六个主要问题[8]

但一切并不可怕。新技术和新能力有可能在重大方面对人类健康和生活方式产生积极影响。例如，人们越来越重视使用可穿戴技术和健身追踪器进行疾病预防和健康监测。与其他国家相比，美国在流感疫苗接种和乳腺癌筛查等常见预防措施方面表现出色[10]。新冠肺炎大流行显示了新的 mRNA 技术用以实现快速疫苗开发的潜力。新的治疗技术有望为个体提供基于基因的治疗。政府采取了扩大医疗保健服务范围的举措，预期寿命在全球范围内呈上升趋势。数据分析、新型传感器和先进成像技术等赋能技术的出现为进一步提高医疗保健质量和健康相关的生活质量创造了机会。控制界有能力应对这些挑战，并进一步提高我们的能力和技术。

2.2.2 当前对医疗保健和生活质量的展望

有许多压力因素影响医疗保健和生命质量。一些压力因素与医疗保健没有直接关系，但会对其产生影响，尤其是在公平方面。例如，全球极端贫困（因疫情而加剧）、气候变化和新出现的地缘政治冲突影响了医疗服务的获取和质量[8]。许多国家难以为本国人民提供全民医疗保险，导致那些寻求医疗保健、疾病治疗和预防的人面临巨额自费支出。世界各地在医疗保健的质量和获取方面也存在很大差异，包括获得设施、最先进的技术，乃至技术熟练的临床医生。用于疾病诊断和咨询的远程医疗已成为接触农村和缺医少药人群的一种方式，但数据隐私和保密问题尚未得到充分解决[8]。此外，存在基于年龄、种族、性别、种姓、性取向、残疾、精神疾病等的无意但系统性的偏见，导致不同人群的医疗体验不一致[8]。临床试验往往无法真实而有意义地代表人群的异质性。人工智能和机器学习技术在改变医疗保健方面具有巨大潜力，为治疗决策和疾病检测提供了新的见解和能力。然而，这些系统中的算法存在根深蒂固的偏见，有可能导致误诊或漏诊，导致不理想的临床结果和患者的不良体验[8]。最后，对医疗保健提供者的信任也因种族、文化和民族而异，这可能会影响人们是否利用疫苗等预防性医疗保健干预措施。

本章的前一节重点讨论了气候变化，世界各地的主要组织都认为气候变化是一种突发卫生事件[11]。2021 年，美国每年与气候变化和污染相关的医疗成本超过 8200 亿美元[12]。与气候变化和污染相关的医疗保健影响包括与高温相关的死亡人数增加，极端洪水和干旱导

致营养不良，以及气候越来越适合传染病的传播[8]。自然灾害的频率、强度和可变性正在增大，导致一系列负面的后续影响，对医疗基础设施、供应链和劳动力构成挑战[8]。

心理健康和幸福越来越被认为是医疗保健和生活质量的首要任务。有人说，四分之一到一半的人口会在一生中的某个时候应对心理健康问题。据估计，精神疾病的直接和间接成本占全球 GDP 的 4%以上，超过了癌症、糖尿病和慢性呼吸道疾病的总成本[8]。世界经济论坛确定了改善心理健康的五个优先事项，包括改善获得心理保健的机会和鼓励开发治疗心理健康状况的新疗法[13]。数字技术在改变全球心理和行为健康系统、提高可访问性和可负担性，同时实现可扩展和适用的解决方案方面有很大的前景[8]。

医学的进步为控制工程和科学界的贡献提供了许多机会。数字疗法越来越多地被用于正念和疼痛管理。这些技术集成了虚拟现实、游戏化和新型传感技术，以改善患者的预后。数字伴侣可以通过鼓励遵守家庭中使用的医疗干预措施，如吸入器的使用或胰岛素的输送，来改善医疗保健、生活质量和医疗结果。在本节的剩余部分中，我们将重点介绍当今特别相关的两个主题，这两个主题塑造了我们思考如何利用我们的专业知识来改善世界的医疗保健供应和生活质量。首先，我们更详细地讨论流行病和地方病。然后，我们为医疗器械的发展及其监管方面提供了一些背景。

流行病和地方病

正如 SARS-CoV-2 型疫情所表明的那样，传染病对公众健康构成严重风险。减轻这种风险是必要但很困难的，原因有几个，包括疾病动力学的不确定性和人类行为的细微差别。社会领导人必须利用现有信息做出决策，将流行病的成本降至最低。这些成本包括疾病对健康的直接影响和次要的社会影响，如失业、失去教育机会和心理健康问题。威胁人类的传染病种类繁多，每一种都需要不同的干预措施来控制。6 英尺的社交距离规定虽然能有效减缓空气传播疾病的传播，但对阻止通过供水传播的霍乱的传播几乎没有作用。在制定预防未来流行病的政策时，必须理解各种干预措施，并根据其对特定疾病的有效性及其可能对个人和社会造成的任何外部影响进行权衡。

对 SARS-CoV-2 大流行来说，实施减缓疾病传播的政策并不是什么新鲜事。16 世纪末撒丁岛的医生 Quinto Tiberio Angelerio 主张封锁、保持社交距离和隔离，以阻止瘟疫的传播[14]。即使没有充分了解疾病传播的性质（直到 1675 年列文虎克开发出一种足够强大的显微镜，疾病传播的细菌理论才得到证实），Angelerio 凭直觉认为，通过采取预防措施，瘟疫的传播可以减缓。Angelerio 的成功再次证明了控制理论中最强大的格言之一：粗糙模型可以用来开发有效和鲁棒的反馈控制。

从现代的角度来看，了解如何应用系统和控制理论来使用测量、综合模型和得出有效的政策建议，将有助于预防未来的流行病。预测表明，尽管流行病随着时间的推移定期发生，但数据表明，它们现在比过去更频繁地发生[15]。此外，由于全球化和旅行方式的变化，一旦疫情开始，它在人群中传播的风险就更大。可用于限制疾病传播的现代技术包括检测、接触者追踪、疫苗接种、保持社交距离、口罩佩戴等。了解这些方法是如何协同工作的，以及如何现实世界中实施这些方法至关重要。有关流行病的更多详细信息和讨论，请参阅附录 2. A。

医疗器械和监管注意事项

医疗器械与其他器械一样，包含硬件和软件元素，但可能有不同的产品生命周期，并且根据其分类需要获得监管部门的批准。从早期设计到制造，消费电子设备的设计和开发过程

可能短至几个月。相比之下，医疗器械从概念设计到最终产品可能需要几年时间。安全性、可靠性和安全性是医疗器械设计、测试和临床评估以及器械临床有效性的基本原则。

在美国，食品和药物管理局（FDA）是负责保护公众健康的机构。它通过确保医疗设备的安全性（该设备不会使用户或其他人因其使用而面临不必要的风险）、功效（该设备能够有效地与其预期用途的声明相符）和安全性（设计该设备是为了保护用户和其他人免受无意伤害和滥用）来实现这一点[16,17]。作为医疗器械的软件(SaMD)、医疗器械中的软件(SiMD)以及用于制造或维护医疗器械的软件是与医疗器械相关的三种类型的软件，需要遵循监管指南并接受监管审查[17, 18]。美国食品药品监督管理局发布了与医疗设备开发和测试相关的医疗软件和医疗设备控制算法指南，例如：

1. Software as a Medical Device (SaMD): Clinical Evaluation Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff [19]

2. The Content of Investigational Device Exemption (IDE) and Premarket Approval (PMA) Applications for Artificial Pancreas Device Systems Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff [20]

3. Investigational Device Exemptions (IDEs) for Early Feasibility Medical Device Clinical Studies, Including Certain First in Human (FIH) Studies Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff [21]

4. Policy for Device Software Functions and Mobile Medical Applications Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff [22]

2.2.3 控制系统科学家和工程师的机会和目标

确保公平获得高质量的医疗保健、先进的诊断、预防方法和基础设施对于老龄化后实现持续的长寿和优质生活至关重要。这项工作依赖于包括科学家、政策制定者和临床医生在内的广泛专家团队的贡献，而控制系统科学家和工程师在提高医疗保健和生活质量方面发挥着关键作用。

我们已经确定了一些与医疗保健和生活质量相关的具体机会目标。这些机会分为三个高级别类别：a) 在系统层面工作的医疗技术，b) 用于调节中枢和外周神经系统活动的神经工程解决方案，以及 c) 包含闭环控制以调节或治疗疾病的医疗设备。我们对机会进行了总结，并为每个类别指出了高度优先的研究机会。

医疗技术

医疗物联网 (IoT): 医疗物联网是一个不断增长的传感器、执行器、临床和个人决策支持系统的集合，能够共享信息，提供相连接的基础设施和一个总的系统，包含了可监测、诊断并为个人提供临床见解或治疗的各系统。物联网领域庞大且不断发展，包括连续血糖监测仪 (CGM)、可穿戴活动跟踪器或健康设备等传感器，以及作为移动智能手机一部分的 GPS 和日历应用程序（见图 2.5）。这些物联网设备的信息融合为医疗诊断带来了新的机会。它还提供了新的四声道模式，其中控制和监测策略可以促进数据创建、分析引擎和治疗控制。这种系统的一个例子是用于 1 型糖尿病 (T1D) 患者的自动胰岛素递送 (AID) 或人工胰腺。CGM 向嵌入医疗设备（如胰岛素泵或手机中的医疗应用程序）中的控制算法提供信息，控制胰岛素从泵中输送。这种 AID 可以通过来自活动跟踪器、睡眠监视器或另一可穿戴设备的信息来增强，以提高系统的自动化程度，超越单输入单输出 (SISO) 控制。这可能包括额外的预测

能力、干扰估计和抑制，以及行为控制机会，如对用户的定向指导[23, 24, 25]。

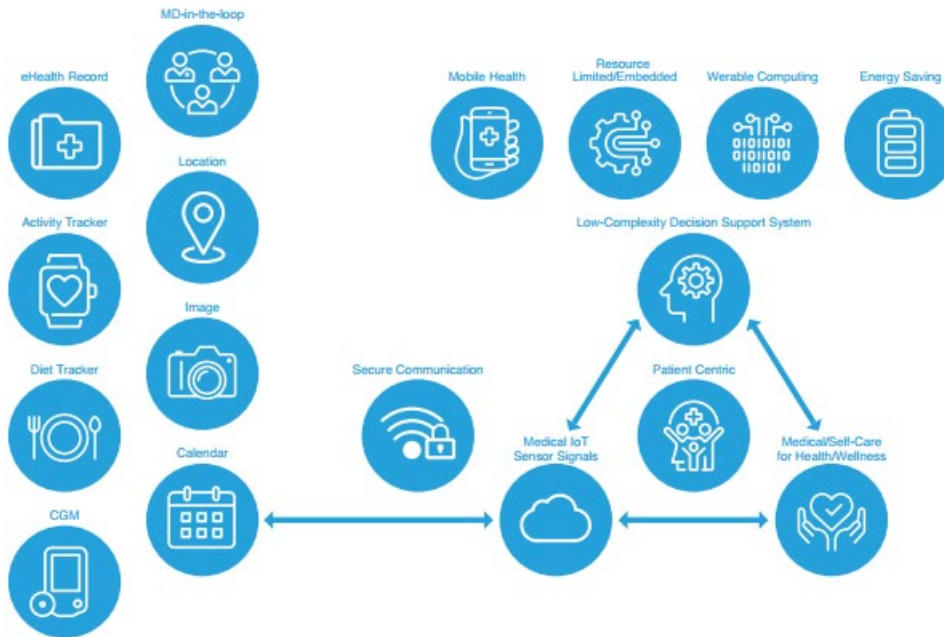


图 2.5：医疗物联网临床系统示意图[23]

决策支持系统 (DSS)：决策支持系统可以以独立的方式运行，也可以嵌入闭环系统中，以提供增强的临床结果。例如，虽然商业闭环系统越来越多地被 1 型糖尿病患者所接受，但绝大多数管理血糖水平的人都没有闭环自动化[26]。这些人中有很很大一部分使用的设备以智能笔、连续血糖传感器、先进的胰岛素泵和门户网站的形式为血糖管理提供指导和支持[27]。这些技术可以以警告和警报、血糖预测、胰岛素剂量指导等形式增强人类决策能力。与自动调整胰岛素给药的闭环系统不同，这些系统可以在微调个体的胰岛素方案（例如，调整基础概况或更新碳水化合物比例）方面提供有价值的指导。这些技术可以嵌入集成电子健康和远程监测程序的门户网站中。通常，在以全自动模式进行测试之前，工程研究系统将在决策支持框架中进行评估。这些系统已经证明在临床结果方面有了明显的改善[28]。

神经工程

脑科学和脑技术之间的新桥梁提供了新的控制科学机会。大脑信号是动态且多尺度的。处理大脑数据和建模大脑功能必须承认这些特性。大脑回路是可塑的、可变的和不确定的。设计与大脑回路相互作用的机器必须承认这些特性。在任何时间和空间尺度上，反馈都是大脑操作的核心，因此控制大脑回路必须承认这些特性。大脑传感和执行器技术正在蓬勃发展，但与大脑交互的机器的控制理论仍处于初级阶段。

脑医学和脑启发技术有望取得进展，但由于缺乏脑机交互控制理论，进展将越来越有限。例如，脑深部刺激（DBS）是一种通过植入电极刺激大脑中的神经元来治疗神经和精神疾病（如帕金森病）的方法。概括地说，神经刺激依赖于患者状态的测量（例如肢体加速度计、脑电图、单神经元记录）和致动刺激（例如 DBS、药理学试剂）[29]。目前的临床方法依赖于开环刺激协议（脉冲串的持续时间、振幅、频率）。然而，最近的短期临床研究表明，闭环策略有望使治疗自动化[30, 31]。

多年来，人们对各种算法进行了研究，从比例积分微分（PID）到几何控制再到自适应

控制器[30]。正在研究的大多数算法的核心是一种学习和调整算法的方法，以应对患者在几天、几个月或几年内不断变化的特征[31]。来自多家公司（包括美敦力、NeuroPace 和波士顿科学）的商业 DBS 系统已获得美国食品药品监督管理局的批准。其中一些用于开环治疗，至少一种用于帕金森病、肌张力障碍和强迫症的闭环治疗。在开发安全闭环 DBS 系统方面仍然存在许多挑战，包括确定可靠的生物标志物（测量指标）、电池设计、决策支持系统和控制算法优化。

控制系统科学家和工程师的机会存在于不仅限于 DBS 应用的神经工程领域。我们将其分为三个方面。

1. **神经科学：**新的测量设备为神经科学家提供了前所未有的丰富数据，涵盖了广泛的空间和时间尺度。需要新的建模和分析方法来认识大脑功能的多尺度和动态性质。

2. **神经工程：**新的驱动装置增加了机器和大脑之间的相互作用，为恢复受损的大脑功能提供了新的机会。需要控制理论来认识脑机交互的闭环性质，需要新的方法来解释大脑信号的尖峰性质。

3. **神经形态工程：**受大脑启发的传感器、致动器和计算设备，在使人工机器在能量效率和注意力方面更像动物机器这一点上，提供了新的机会。减少数字人工智能的碳足迹将是未来几十年的一项重大挑战。

有关神经工程的更多细节和进一步讨论，请参见附录 2.B。

医疗器械的闭环控制

医疗器械闭环控制的机会比这里总结的应用范围要广泛得多，而且还在继续增长。研究人员正继续探索新的药物剂量控制策略，用于从艾滋病毒到癌症的各种应用。由于新冠肺炎疫情的挑战，新的方向也被揭示出来，比如 Sri Sarma 和约翰斯·霍普金斯大学同事的工作。他们提出了一种自动化呼吸机控制的解决方案，以优化外周毛细血管氧饱和度水平。该团队使用数据驱动的线性变参数（LPV）动态系统模型，将患者的临床状态和呼吸机输入与输出氧气水平联系起来，提出了使用基于线性矩阵不等式（LMI）的方法设计控制器[32]。以下是一些场景，这些场景为我们的社区提供了独特的机会，并可能影响广大人群的医疗保健和生活质量。

自动化麻醉：闭环麻醉系统已经在临床环境中进行了 20 多年的研究、设计和评估。手术室的环境相当复杂，需要实时监测许多关键变量。然而，这种设置的一个明显优点是，可以使用非便携式传感器，这种传感器对于移动应用来说太麻烦或不切实际。必须监测的生理变量包括麻醉深度（DOA）、代谢状态、血液动力学状态和其他生理条件。在过去的二十年里，DOA 一直是深入研究的主题，传感器可以通过相关性来确定麻醉深度。这些传感器本质上是推理性的。他们不直接测量麻醉的医学状态，这些是通过患者的催眠、健忘症、镇痛和肌肉放松等反应来表征的。相反，他们测量的是患者大脑中的电活动状态。一种很有前途的方法是从脑电图（EEG）的信号分析中得出的双谱指数[33, 34]。有一种商业工具可用于使用小波将 EEG 信号转换为闭环麻醉控制的指标（NeuroSENSE 的 WAVCNS）[35]。

还可以使用各种可控输入，从而导致本质上的多变量控制问题。一些候选可控变量包括血管活性药物，如多巴胺和硝普钠，以及麻醉剂（异氟醚、丙泊酚、异氟烷、瑞芬太尼等）。与人工胰腺的发展一样，各种控制算法已经得到研究，主要类别为 PID 控制、模型预测控制（MPC）和基于规则的控制[33]。药代动力学/药效学（PK/PD）模型已直接用于基于模型的方案，并间接用于 PID 和基于规则的设计，这些设计采用了药物水平的预测并使用超控安全

系统[35]。已经对多个同时 PID 控制器进行了临床评估，与手动控制相比（由术后认知测量确定）有了明显的改善，尽管一个控制回路与另一个回路的差异效益无法量化[34]。认识到需要跨人群提供具有鲁棒性的解决方案，最近的工作也开始探索使用缩放原理来创建个性化 PID 算法，从而降低患者间的可变性[36]。

心脏辅助设备：心脏辅助设备是一种机械泵，可在适当的压力下提供心输出量，使血液能够在患者体内正常循环，根据患者状态（如运动水平、情绪、姿势等）对心输出量的变化需求。这些设备对充血性心力衰竭末期患者的支持至关重要[37]。理想的设备将模仿人体自身的机制，将心输出量维持在目标水平。然而，第一代设备在自动化方面相当原始，需要患者调整设置点。就心室辅助装置的控制设计问题而言，一个更具挑战性的方面是为个体患者正确地放置传感器和致动器，并以此限制感染易感性。当前一代的设备涵盖了基于导管的短期循环支持，一直到长期植入式泵的介入治疗[37]。目前市场上的大多数设备都采用了专有的泵和流量控制算法，而控制器的细节很少。然而，最近的结果表明，越来越多的患者数据可用于使用基于人工智能的方法和其他方法建立血液动力学变量的预测模型（例如，参见 Abiomed 的设备[38]）。

糖尿病设备连接和自动化：胰岛素管理或输送可分为两大类。自动胰岛素输送系统（AIDs）结合了胰岛素泵、CGM 和算法（参见图 2.6 中的自动胰岛素输送体系分类）。智能胰岛素笔或帽会向临床决策支持系统（CDS）报告所调节和/或输送的胰岛素量。AID 系统和智能笔旨在改善糖尿病患者的血糖控制，减少日常负担和胰岛素用量的决策。美国食品药品监督管理局已经批准了几个系统的使用，商业实体和个人或社区正在开发其他系统，如 DIY 运动。使用不同的反馈控制策略，从 PID 和模糊逻辑到基于模型的最优控制，并将其嵌入胰岛素泵或作为智能手机中的移动医疗设备运行[39]。

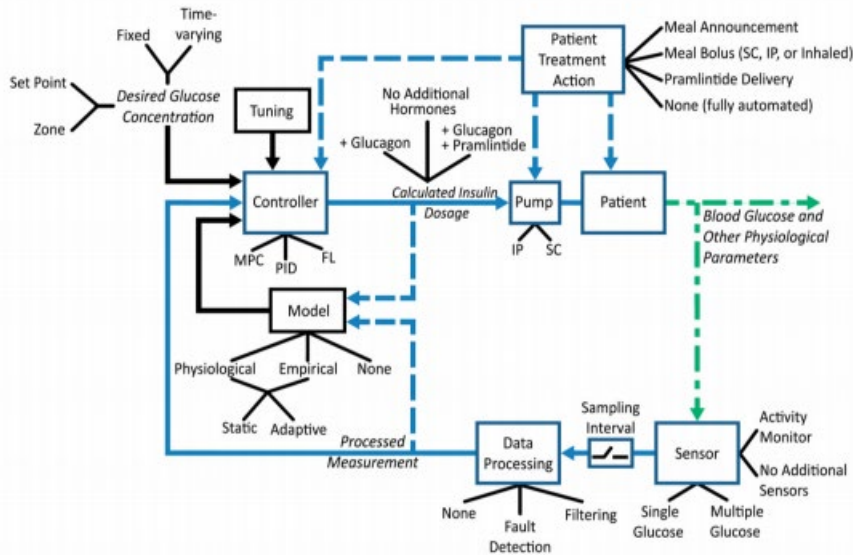


图 2.6: 自动胰岛素递送核心设计和选项的分类[39]。

尽管人工胰腺已经取得了巨大进展，但仍有许多悬而未决的挑战需要继续研究和开发。目前所有的产品都是“混合”系统。他们要求糖尿病患者估计和规划与膳食相关的推注量。可以公平地说，目前的设备设计用于补偿夜间偏移（即避免低血糖）以及膳食补偿（在混合模型中）。然而，它们并没有经过优化来处理运动和剧烈活动。

在运动期间设计给药策略面临着无数挑战,包括合适传感器的可用性以及如何根据个人的健康状况定制策略。另一个主要挑战是区分低压力训练模式下的锻炼和紧张比赛中的锻炼。前者往往会消耗和降低血糖水平,而后者可能导致血糖水平升高,从而阻断胰岛素受体[40]。因此,在这两种情况下,基于活动的传感器中的相同特征可能需要完全相反的补偿策略。

体外设备的功能是有限的,但像 DiaPort 这样的设备已经取得了有希望的结果,这表明了完全自动化的前景[41]。关于人工胰腺的另一个引人注目的观察结果是,它本质上是一个单输入(胰岛素)、单输出(葡萄糖)的控制系统。在开发相关生理变量(胰岛素、酮、皮质醇、乳酸等)的传感器方面需要进一步的进展,这些传感器在生理水平上是敏感的,可以实时报告,并且可以设计用于体内使用[42]。在输入方面,胰高血糖素作为一种可能与胰岛素同时给药的反调节激素,已经取得了有希望的早期结果。在闭环系统中也有关于胰淀素的研究,其中胰淀素调节膳食(即干扰)反应,并允许胰岛素更充分地补偿膳食偏移[43, 44]。

建议

对年轻研究人员:

为了帮助改善医疗保健和生活质量,年轻研究人员必须做的不仅仅是获得强大的分析、定量和定性技能。我们鼓励您寻求并接受跨学科合作,继续学习公平和社会正义,并始终保持好奇心。仅仅因为你能制定和解决一个优化问题,并不意味着你有正确或最佳的成本函数。此外,与具有领域专业知识的专业人士携手合作至关重要,尤其是在医疗保健领域。最后,虽然本节探讨了许多与医疗保健和生活质量相关的研究方向,但不要限制自己。要有创造力,寻找其他重要、有趣的问题,这些问题将改善个人、社区和/或社会的生活。

对于资助机构:

在过去的几十年里,控制社区在无数领域发挥了重要作用,并将继续做出贡献,特别是在医疗保健和生活质量方面。至关重要的是,资助机制应具有必要的规模和范围,以支持能够培养完整、全面解决方案的跨学科团队。

2.3 节 智能基础设施系统

本节作者：

Dan Work, Carlos Canudas de Wit, Masayuki Fujita, Hideaki Ishii, Karl H. Johansson, Anuradha M. Annaswamy

交通和能源等基础设施系统已做好数字化转型的准备，这将通过通信、传感和数据解释方法的进步实现新的能力。我们讨论了由于社会规模问题的复杂性而在建设智能基础设施方面面临的新挑战，以及通过跨学科研究为解决方案做出贡献的机会。

摘要

基础设施系统是社会或企业运营所需的基本物理和组织结构及设施。它们支持规划、运营和安全。在本节中，我们将重点介绍通信、传感和数据解释方法的进步如何为此类系统带来新的功能。已建成的基础设施系统越来越多地相互连接，并得到启动，为提高弹性、可持续性和性能提供了机会。数字化转型将使未来的基础设施系统更加交互、动态和集成化。通过在以前无法实现的规模上结合传感、通信和驱动，新的高性能基础设施将出现，能够适应和响应环境和社会需求的变化。这种巨大的变革为许多社会规模的基础设施系统做好了准备。我们简要概述了几个部门的前景和未来挑战，包括交通、能源、水、粮食和农业。我们进一步讨论了用智能基础设施解决这些社会规模的问题，为什么需要在控制系统之外的多个领域进行跨学科合作。这可能包括从其他工程学科到公共政策和行政管理。

2.3.1 引言

基础设施系统是社会或企业运营所需的基本物理和组织结构和设施（如建筑物、道路和发电设施）。基础设施系统一直存在于城市中心，支持社会对其规划、运营和安全的需求。通信、传感和数据解释方法的进步为设计、管理和操作基础设施系统提供了新的能力。已建成的基础设施系统越来越多地相互连接并被启动，为提高支持社会的关键系统的弹性、可持续性和性能提供了机会。促进这一转变，同时认识到每个社区的独特需求，对于满足未来基础设施系统日益增长的复杂性和需求至关重要。

虽然今天的基础设施系统基本上是静态的，但未来的基础设施体系需要是交互式的、动态的和集成的。虽然今天的系统是物理耦合的，但它们通常是独立管理的，这阻碍了对相互依赖性的利用。未来的基础设施系统将在以前无法实现的规模上结合传感、通信和驱动，从而实现新的高性能基础设施，能够适应和响应不断变化的环境和不断变化的社会需求。



图 2.7：多式联运系统正在经历重大的技术转型，以满足社会对移动系统性能的需求。图片来源：USDOT 战略计划。

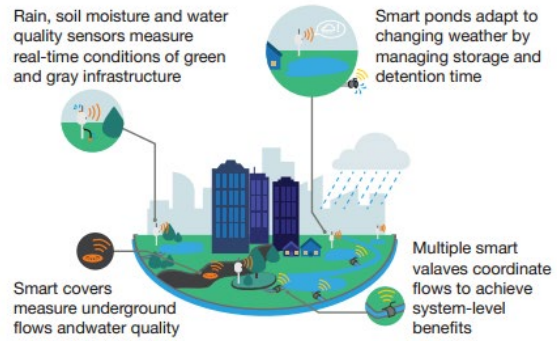


图 2.8：供水网络开始包括传感和驱动，以便可持续地改善。图片来源：USDOT 水实验室，密歇根大学战略计划

2.3.2 驱动因素：基础设施系统正在进行数字化转型

许多社会规模的基础设施系统已经做好了数字化转型的准备，包括交通、能源、水、食品和农业（几个例子见图 2.7 和 2.8）。用于推进智能基础设施的相同技术也将有助于发展智能社会。

交通

智能交通系统在性能上取得重大突破方面处于有利地位。智能手机的广泛采用始于大约 15 年前，有助于解锁个人导航、实时交通监控、新的拼车服务等。虽然通勤者通过智能手机技术的进步实现了连接，但车辆本身和基础设施（如交通信号灯）的复杂程度并不相同。具有汽车工程师协会 1 级和 2 级自动化功能的商用车在全球范围销售，但真正的“脑力激荡”驾驶尚未成熟为商业技术。简单易用并提供正确模式的自动化技术与能够实现变革性性能但往往引入脆性故障模式的先进机器学习方法之间存在很大差距。此外，如今商用的自动化车辆独立于基础设施和其他车辆运行。新兴的 5G 技术将很快打破当前的范式，开辟新的可能性，协同驾驶和协同基础设施可以提高安全性、减少排放并提高整体运输效率。创建估计和控制技术来管理社会规模的移动基础设施是未来十年的核心挑战。

水

人口增长、城市化和气候变化正大幅增加对水系统的需求，并推动了对管理水基础设施的整体智能决策框架的需求。与此同时，新型、廉价、精确的传感和驱动设备的可用性为我们显著提高对当今供水网络需求和运营限制的理解开辟了可能性。通过提高描述供水网络的数据的可用性，可以创建新的数据驱动工具，用于城市供水系统设计、监测、控制和安全的自动化决策。智能供水系统监测和控制方法的多学科设计和分析将为提取当今供水网络无法实现的效率开辟新的可能性。可能的使能技术包括水力状态估计的新方法、漏水的检测和隔离、水压控制、水质状态估计、水质控制、水污染故障诊断、水污染事件应急响应以及供水系统的网络物理安全。

能源

满足全球能源需求，同时解决能源生产基础设施对环境的影响，是我们这个时代的一个关键挑战。电力系统在太阳能和风能可再生能源的使用方面的创新始于 21 世纪末，有可能

导致向更智能的基础设施转型。

由于供应商众多，电力网络越来越难以管理。这使得计划、调度和平衡供需变得困难。动态定价等需求管理解决方案可以帮助影响消费者的用电，以应对可再生能源的间歇性发电。虽然电动汽车可以为系统带来更多电池以做出贡献，但电网必须为世界做好准备，在这个世界上，大部分地面交通基础设施将从内燃机转向插电式电动技术——这将在未来十年发生巨大转变。需要更好的建模、连接、传感和通信，以解决电网复杂性的显著扩展，同时满足更广泛的性能目标。

农业和粮食

农业和粮食面临的主要挑战源于需要提高作物产量和提高粮食供应链的可靠性，以减少从农田到餐桌的粮食损失。粮食生产必须大幅增加，以满足持续增长的全球人口的需求。

认识到农业在联合国通过的 17 项可持续发展目标中的许多目标中发挥着重要作用，就很容易确定粮食供应链的重要性[45]。值得注意的是，目标 2 是“消除饥饿，实现粮食安全和改善营养，促进可持续农业。”实现这一目标的一个主要挑战是，目前的资源密集型农业模式已被证明是不可扩展的，因为它们对环境造成了巨大影响，导致森林砍伐、缺水和温室气体排放。因此，需要新的方法来彻底改变目前的农业实践。这可能会产生全新的农业形式，如农林、间作和垂直农业。或者，它可能需要通过转向技术增强的精准农业来提高农业效率，以便在对环境影响最小的情况下增加高营养食品的产量。这些改进应该与提高粮食生产链的可持续性和效率齐头并进。控制技术可以在先进机械、数据收集和处理基础设施、自动化决策方案和精准农业的发展中为这些目标做出贡献。

超越基础设施：迈向智能社会

智能社会是一个以人为中心的社会，旨在通过整合网络和物理资源的系统来解决社会问题。它是由许多促进智能基础设施的驱动技术实现的，但它的范围和潜在影响更广。智能社会通过信息网络连接所有人、物和系统，共享各种知识和信息，使社会能够克服各种挑战。在智能社会中，先进的方法将在需要时为人们提供信息，自动化技术有望解决各种问题。例如，自动化技术将执行人类已经完成的任务并进行调整。创新创造的新价值将消除基于地区、年龄、性别、语言和其他因素差异，从而能够对个人的多样性和潜在需求做出精细调整。通过促进公平、包容和信任，每个人的社会福利都将得到改善。当使用数据时，个人的隐私受到尊重。在设计服务时，它们支持所有公民的需求，而不是加剧数字鸿沟。尽管智能社会举措正在开始，但大多数举措仍处于各个城市/地区的验证阶段。此外，许多机会尚未被发掘。

2.3.3 控制的机会

弹性和鲁棒性

尽管这些和其他社会基础设施系统面临着推动所需创新的极端挑战，但重要的是要认识到它们并非独立运行。例如，未来的货运系统将实现电气化，对电网提出新的要求。这些运输系统负责运送货物和人员，包括食品供应链中的重要资产。对电网需求的增加将增加对冷却所需水的需求。供水网络需要更多的能源来向受气候变化影响的人口中心供水。建立方法来推进耦合基础设施系统的管理，同时又不产生不稳定的反馈回路，这将需要新的设计和控制方法来管理未来的关键基础设施系统。

融合

控制的关键机会之一是研究智能基础设施系统或其集成等社会驱动因素如何影响个人、群体或社会。这些系统具有高度的交互性，影响着人们的日常生活，需要新的技术来构建不同保真度水平的人类行为算法模型（如个人或社会规模的模型）。这也为控制理论与行为经济学、认知科学或人类计算建模的其他领域之间的跨学科研究创造了机会。捕捉人类有限理性、理性疏忽或决策模型的技术，以及模仿学习或基于偏好的学习等数据驱动方法，可以建立人类行为的计算模型。尽管这些模型对于预测而言是有效的，但通常不足以进行交互，因为它们没有捕捉到人类（或人类群体）与智能基础设施系统之间交互的闭环动态。控制理论可以潜在地提供以闭环方式利用和改进人类行为模型的方法，以及分析在闭环、连续和重复交互过程中人类与这些智能系统之间的交互可能产生的平衡的正式方法。

多尺度建模与控制

智能基础设施的开发和运行通常需要协调和控制大型实体或个体集合（例如，电力网络中的源和汇，或交通网络中的交叉口和自动驾驶车辆）在复杂图形上以非平凡的方式相互作用的涌现集体行为。控制这些大型复杂系统的行为可以通过控制网络的节点、赋予边缘一些动力学或通信协议，或者操纵网络本身的结构来实现。然后问题就变成了理解如何在不同的尺度上闭合反馈回路。通常，问题是在宏观尺度上控制感兴趣的网络系统或基础设施的涌现行为，同时在微观尺度上作用于节点、边缘或网络结构。需要在感测或估计的系综的宏观行为与需要在微观水平上采取的行动（或致动）之间建立反馈连接，以将所产生的集体动力学引导到期望的方向。从控制的角度来看，这种复杂的网络系统是由许多连续或离散时间单元组成的大规模动态系统的例子，这些单元在复杂的互连网络上相互作用，静态的或是时变的。

控制的一个关键机会是应对理解如何在不同规模上闭合环路的公开挑战。这可以通过开发新的分散和分布式估计、控制和优化策略来实现，以赋予微观层面的主体感知和控制源自其集体动力学的突发宏观行为的能力。这需要从经典控制理论（如可控性、可观性）扩展到这类系统分析和综合策略，而不忽视智能体动力学的非线性、不确定性，以及感兴趣的底层网络的时变、演化性质。另一个基本问题是分析和证明受控网络系统的收敛性，以证明其稳定性和鲁棒性。控制的另一个机会是使用数据驱动型和基于学习的控制策略（例如，多智能体强化学习）。这些可能成为解决这些类型问题的基础，因为基于模型的方法可能无法应对感兴趣问题的多尺度、不确定和复杂性质。

2.3.4 建议

- 促进趋同研究。解决智能基础设施问题需要在控制系统之外的多个领域进行协作。这些合作将包括其他工程学科、公共政策和行政管理。承认人类在发展这些系统中的需求和作用也将扩大跨学科的前沿。

- 扩大研发资金和实验场地。许多智能基础设施系统对社会福祉至关重要，在不降低日常运营性能的情况下，不可能轻松地在这些系统上进行实验。需要研发资金来扩大现实的试验台和试验设施，以生产关键的数据集并验证新的方法。

- 扩大与行业和政府合作伙伴的合作。许多关键基础设施系统由政府机构出于公共利益运营，但依赖于工业合作伙伴的可扩展技术。学术界、政府和行业组织的合作可以利用互补的专业领域，帮助加快这些系统的设计和部署新创新的步伐。

2.4 节 共享经济

本节作者：

Christos G. Cassandras, Robert Shorten, Anuradha M. Annaswamy

共享经济是一种颠覆性的范式，其基础是用基于共享/按需访问的机制取代传统的所有权概念。这门新兴学科的核心思想类似于许多系统论概念。因此，系统和控制概念和方法在管理共享资源和有效的市场设计方面发挥着重要作用。

摘要

共享经济是一种经济模式，它将当前经济从拥有（唯一拥有）资源转变为只有在需要时才能获得资源（共享）。虽然好处很多，但这种转变也带来了多重挑战和考虑，包括隐私、安全、保障、公平、风险、市场扭曲和战略行为。控制理论方法非常适合解决其中的许多挑战，特别是那些涉及在总体（社会）和个人用户层面有效管理受限资源的挑战。我们认为，共享经济可以被视为一个反馈控制问题，在这个问题中，个体主体组成了工厂，控制则在主体之间分配受约束的资源。在这样的框架下，市场可以经过设计以便消费者可以使用交易控制等机制在对等环境中交换商品和服务。系统和组件级决策将通过系统组件之间协商的经济交易来做出。与保护隐私同时进行的共享服务的管理和设计，也是控制工程师熟悉的一个领域，其目标是开发基础设施和算法，以支持在社区中共享对象池。共享经济的一个独特特征是，通过使用新的合作控制工具和闭环系统中建模人类行为，来设计社会契约，从而促进合规性的这一重要性。博弈论在开发合规机制方面发挥着明显的作用，包括访问控制和对抗性环境等方面。

2.4.1 引言

共享经济是一种经济模式，它从拥有资源转变为只有在需要时才能获得资源。这种转变是资源减少和这些资源成本上升的结果。这反过来又使得有必要接受循环性，将未被充分利用的资产货币化。它需要在商业运作方式、基础设施设计如何支持协同消费以及用户行为如何在个人和整体层面上适应等方面做出大量相应的改变（见图 2.9）。共享经济的例子在经济的各个部门都有：交通网络公司（如优步、Lyft）和车辆共享（如 Zipcar），服务业的点对点住宿平台（如 Airbnb、Vrbo）、小额金融机构（如 Sardex、Prosper）、合作共享办公室或产品存储空间，以及转售/交易平台（如 eBay、Craigslist）。

在能源部门，通过灵活消费这一相当于负向载荷的概念，共享经济在电网基础设施和建筑基础设施之间产生，尽管是间接的。对等交易机制也出现在电能和热能网络之间，以确保供暖和电力资源充足。在电力与火车网络之间引入这种交易机制，以利用灵活消费的这同一概念，是有潜力的。这些新的经济范式吸引了人们对工业应用和更广泛的社会采用的兴趣，这是有充分证据的[46, 47, 48, 49, 50, 51]。

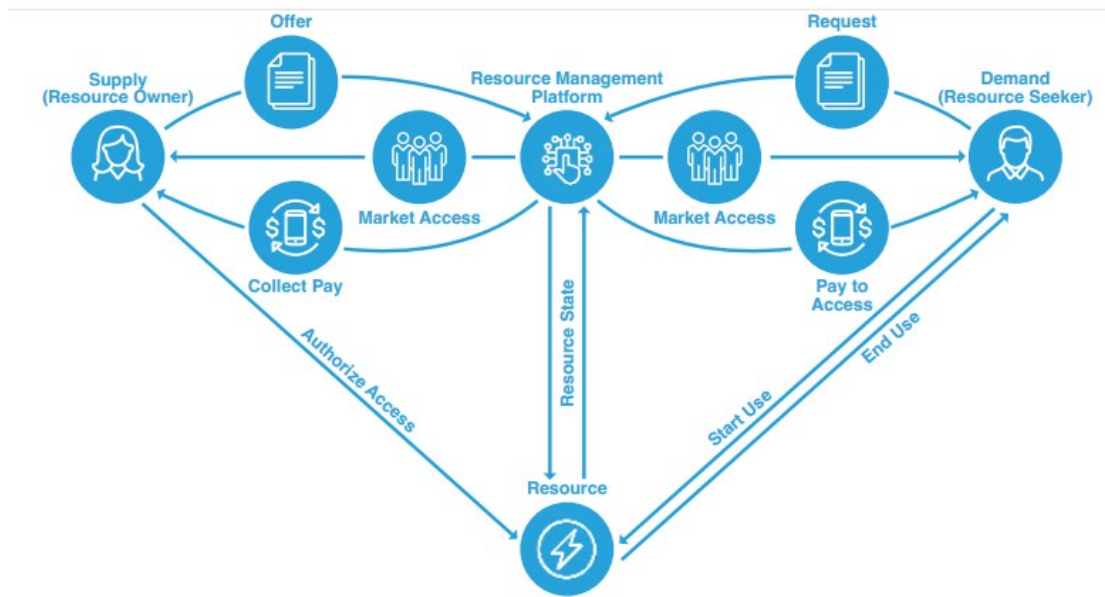


图 2.9: 共享经济系统概述

共享经济的动机是多方面的。首先，许多消费者资源的使用率极低（例如，平均汽车使用率约为 4%）。共享此资源以供按需使用可以显著降低持有成本，包括保险和维护成本。在全球范围内，由于不断扩大的灰色社区和中产阶级，资源竞争十分激烈。面对这种压力，共享资源似乎是一种工具，可以在资源有限的情况下维持甚至提高生活水平。

从社会角度来看，减少某些资源的数量，如产生污染的车辆，可以有益于环境。值得注意的是，管理对共享资源的获取，而不是建造更高效设备，将是对抗全球变暖的核心支柱。William Jevons 在 19 世纪注意到，开发新的、更高效的技术往往会刺激更多的总需求，抵消新技术的影响。我们城市的污染和对能源永不满足的需求很容易成为这一效应的例子，至少在一定程度上是这样，这一效应被称为杰文斯悖论。例如，汽车是根据每台设备的排放系数进行评级的，这一现实忽略了这一效应的影响，使得主要技术提供商忽略其设备的总体影响。使用控制理论来管理共享资产的访问是对抗杰文斯悖论影响的基本工具。

共享经济还提供了在不承担过高风险的情况下拥有（如汽车）或获得（如银行贷款）可能不可行或不实用的资源。同时，共享平台所固有的特征，例如评级和评论，有助于建立更强大的用户社区。这可以保持供应商和消费者的诚信，促进人际协作，甚至利用平台的影响力来帮助那些需要帮助的人（例如，Airbnb 为受自然灾害影响的人协调免费住宿）。此外，技术发展极大地促进了共享经济，使无处不在的网络以及轻松访问协调资源共享和建立全新建设性关系的平台成为可能。

重要的是要认识到并明确共享经济（也称为合作消费）的运作与当前实践之间的根本差异。其中一个区别是，许多资源和服务不是集中创建的，而是通常由消费者生产的，这导致了生产消费者的出现 [52, 53, 48]。一个例子是停车位的使用：一个人把自己的车停放在停车位上，便是在消费；随后，这个人把车开走，便是在生产供其他人使用的资源。尽管联合生产和消费本身并不是什么新鲜事，但从交易量、参与人数以及共享资源的空间和时间粒度来看，目前的规模都是前所未有的。

共享经济带来好处的同时也带来了许多挑战，其中许多问题可以通过控制系统社区非常熟悉的方法直接解决。这些挑战包括：

隐私、安全和安全：在信息共享所需的网络环境中，隐私和安全问题与 CPS 中已经广泛研究的问题类似。这些问题在共享经济的背景下占据了中心位置，由于多个所有者的存在，它们变得更加复杂。

市场扭曲：多重所有权的引入，以及对等市场等新机制，是一个复杂的系统问题。当对等市场在现有的传统市场中建立时，后者通常会经历新的短期干扰（即不稳定），如一些住房市场（由于 Airbnb）或城市交通（由于优步和 Lyft）所示。这种短期不稳定性可能需要分析和理解。

公平：由于共享经济在很大程度上依赖于通过网络技术获取信息，这可能会导致对各社会群体获得这项技术的公平性以及这项技术可能被操纵的方式的担忧。这一点以及能源正义等相关概念正变得越来越重要，可以通过系统和控制视角进行分析。此外，公平还包括在分配资源时尊重个体或群体的偏好。

风险：在许多方面，以共享取代所有权会带来更高风险。作为生产消费者，一个人面临着无法得到适当补偿的风险，或者资源被消费者损坏的风险。风险的有效管理是共享经济中的一个关键问题。这包括个人和集体行为的风险，这些行为有可能将风险分散到生产消费者群体中。

博弈、共谋、合作和其他战略行为考虑：合作是共享的同义词，是构成有效共享经济支柱的多主体动态系统的基石。与此同时，多个所有者和生产消费者的存在带来了一些挑战，包括博弈、共谋和整体战略行为。所有这些方面都是多智能体动态系统的重要特征，必须进行研究。此外，必须在认识到所涉及的决策过程的时变性质的情况下进行研究。

尽管存在这些挑战，但很明显，推动共享经济出现的市场力量是不可抗拒的，许多大公司正在迅速采取行动，抓住机会开发新的共享服务。一个引人注目的例子是汽车制造商 Riversimple，其汽车零部件可能由不同的实体所有。

许多控制界熟悉的想法是这些市场力量的核心。控制理论方法非常适合解决共享经济应用和商业模式中出现的许多挑战，特别是那些涉及在总体（社会）和个人用户层面有效管理受限资源的挑战。例如，反馈的使用是一种可以用来处理杰文斯悖论的工具。杰文斯悖论指的是，由于对某些资源的总需求增加，技术创新可能会导致意想不到的后果，从而抵消共享这些资源的影响[54]（有时也称为反弹效应）。

2.4.2 共享经济和共享经济中的控制

对共享经济的兴趣伴随着三个广泛领域的创新：新的商业模式、赋能技术和分析。随着新思想在这三个领域的出现，系统和控制理论将发挥作用。在非常基本的层面上，控制是共享经济系统设计的重要组成部分。共享受约束的资源涉及监管，其中可能存在额外的复杂性，例如确定设定点。有时，这些问题会引出全新的经典控制问题或者已有的经典问题但伴随着新的以人为中心的约束条件，这些约束条件对从业者来说可能不熟悉。

从根本上讲，控制的必要性有两个原因。首先，杰文斯悖论（新技术可以刺激需求以提高效率）表现在我们感兴趣解决的许多重要问题（如城市污染、温室气体排放，甚至贫困）上。在其他领域也可以很容易地找到这样的例子，解决杰文斯悖论的一种方法是将人类行为的综合效应作为正在设计的系统的一部分来管理。这涉及到承认这样一个事实，即资源总是受到限制且应该共享的，并且可以通过将共享视为一个组合的多级优化和控制问题来管理。例如，在车辆污染的情况下，总排放的安全水平可以被视为城市驾驶员之间共享的资源[55, 56]。

从控制的角度来看，就新颖点而言，反馈回路的设计必须考虑到受控整体的以人为中心的约束，例如对资源的公平访问和个人用户的服务质量保障。一般来说，共享经济中出现的大多数问题都可以在这样一个框架中解决：在这个框架中，大量的个体，如人、汽车或机器，通常具有未知的目标，争夺有限的资源。挑战在于以不浪费的方式分配资源，为社会提供资源使用的最佳回报，并为争夺该资源的每个个体提供有保障的服务水平。该框架的主要问题是供需匹配，并以提供足够稳定性和弹性的方式进行匹配。

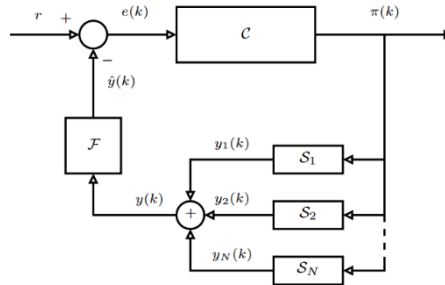


图 2.10：作为反馈控制问题的共享经济系统。个体构成工厂，控制在个体之间分配受约束的资源[57]。

这就产生了一系列问题，原则上，这些问题最好用控制理论的方式来解决。首先，我们希望充分利用资源，这是一个监管问题。第二，我们希望资源得到最佳利用。虽然这两个目标都与个体群体的聚合行为有关，但它们并不试图控制个体如何单独协调其行为以实现这种聚合效果。因此，第三个目标必须关注控制对智能体集群微观特性的影响。最终，第三个目标可以用捕获分配给单个个体的资源份额的（通常是随机的）过程的属性来表述。例如，我们可能希望每个个体在一段时间内平均获得公平的资源份额。在更基本的层面上，我们希望随着时间的推移，资源对每个个体的平均分配是一个稳定的量，它是完全可预测的，不依赖于初始条件，并且对进入系统的噪声不敏感。从控制的角度来看，挑战在于设计反馈机制，使得随机系统具有遍历性，并且不变测度可被成形以具有理想性质（整体反馈控制问题的示意图见图 2.10）。

关于反馈控制系统的设计，后一个问题与控制个体之间资源分布的唯一不变测度（假设个体行为随机）有关。因此，用于部署在多智能体应用中的反馈系统的设计不仅必须考虑传统的调节和优化概念，还必须考虑关于该唯一不变测度存在的保证。这不是一项微不足道的任务，许多熟悉的控制策略，即使在非常简单的情况下，也不一定会产生具有所有三个特征的反馈系统[57]。当考虑到双边市场的设计时，情况尤其如此。

最后，重要的是，非共享经济主体往往寻求优化其个人（自私）性能，而不考虑总体（社会）系统性能。换句话说，个体之间竞争资源，而不是像共享经济中那样合作。众所周知，合作最优解（最大化社会福利函数）比通过个人最优实现的均衡要好。这种差异通过所谓的无政府状态代价（Price of Anarchy）反映出来，在数据易于获得的情况下可以明确量化，例如在交通系统中[58]。

2.4.3 控制在哪里可以发挥作用？

共享经济引发了许多系统和控制界非常感兴趣的问题。毕竟，共享既是对资源的监管，也是让社区（或代理池）公平地访问这种共享资源。在数学系统建设方面，已经出现了共享经济系统的几个不同方向，这些方向与控制 and 系统社区直接相关。我们列出了其中一些从系统和控制的角度来看可能不那么传统的。

对等市场设计：这种类型的共享经济系统出现在生产消费者市场的背景下，消费者可以在对等环境中交换商品和服务。对等市场的设计是应用机制设计、博弈论、分布式账本技术、共识、分布式优化算法、最优传输和稳定婚姻问题等思想的沃土。大多数控制工程师都熟悉此类市场的设计工作，许多人正在进行这项工作，特别是考虑到当代对共识问题的兴趣。[59, 60]。对等市场设计中的一个关键问题和前沿话题涉及数据的交换和共享。数据不同于其他共享资源，因为它很容易被复制和同步。尽管一些著名研究人员[61, 62]最近的工作试图设计这样的市场，但仍有许多工作要做。这种数据共享和共享估值问题引起了业界的极大兴趣，也许是目前最紧迫的问题之一。它汇集了对等市场设计[60]、分布式账本和经济学的思想，如 Shapley 价值[63]。

交易控制：这种分布式控制策略是另一种新兴的工具，可以用来设计共享经济。因为消费者发挥着积极的作用，可以做出影响整个共享经济系统的决策，所以问题是消费者对基础设施的实际信号做出反应。交易控制被广泛定义为一种机制，通过该机制，系统和组件级别的决策是通过系统组件之间协商的经济交易做出的[64]。它正在智能电网[65, 66]和智能城市基础设施[67, 68]的背景下进行深入探索。考虑到交易控制提供了设计闭环系统的机会，需要适当设计底层交易的特定反馈机制。它还需要兼顾消费者的行为模式和基础设施管理者的经济目标。因此，在多个消费者和组织的合作与协调、动态流量设计、对参与底层交易的所有实体的约束以及与问题相关的多个时间尺度的动态建模和适应方面，仍有大量挑战需要解决。无论用于设计整体共享经济的市场结构（对等、双边、拍卖或其他）如何，多个利益相关者之间的潜在协调都可能通过经济交易进行，因此也可能通过交易控制进行。

共享服务的管理和设计：控制工程师非常熟悉的第二个新兴领域涉及旨在共享的产品和服务。在这里，基本思想是开发基础设施和算法，以支持社区中对象池的共享。设计共享服务的最基本元素是其规模和管理。在非常高的层面上，这里的关键问题涉及需要多少共享项目来向社区提供一定的服务质量（QoS）和/或哪些用户应该合作创建共享系统。

一方面，这种性质的问题通常会归结为排队论中的经典问题，这是控制理论界所熟悉的，但有额外的约束[69, 70]。首先，维度问题通常与供需统计数据相关联，在某些情况下，甚至会影响它们。当共享系统本身相耦合时，会出现额外的复杂性。

进一步的复杂性是共享的本质所固有的。例如，一个基本问题是确保所有代理在一段时间内平均接收到相等的 QoS。这种性质的公平问题在网络和人工智能社区中很常见，但很少在控制中讨论，尽管它们与共识和优化有着明显的联系。随着开发算法来管理对共享资源的访问，特别是当对该资源的请求在其用户上同步时，会出现进一步的复杂性。用以管理这种情况的定价策略，特别是在污染者付费（个性化定价）式模型的背景下，对控制学界来说是一个有趣的机会，尤其是在考虑到个性化干预的必要性时[71]。

社会合同的管理和设计：合规问题和使用数字账本、数字伴侣和数字孪生等新技术砖块设计社会合同是共享经济系统设计的核心。合规性是指我们试图鼓励（而不是完全控制）代理商如何与其环境互动的情况。例如，在共享经济应用程序中，可能希望确保共享车辆在特定时间返回共享池。社会契约的另一个例子是要求塑料瓶在使用后返回销售点。在德国和其他国家，瓶子存款被用来鼓励消费者遵守这一社会契约。然而，最低存款额不足以鼓励良好的行为，塑料瓶最终会被扔进垃圾箱。这有效地为任何愿意在公共垃圾箱中分类寻找被丢弃的瓶子的人创造了赏金。因此，执行这种社会契约并没有激励负责任的行为，而是激励其他人（他们往往属于社会中最弱势的群体）分类垃圾。通常，他们必须收集许多瓶子才能获得最低工资，而分拣生态系统成为了一种现代的剥削形式。在瓶子存放的例子中，执行机制是脆弱的。它创造了一种事实上的货币，任何人都可以兑换。它没有为存款设定足够高的价格

来激励合规性。它也没有根据个人遵守程度对违规者实施差别处罚。

这种系统的另一个问题是，它们可能会受到资源丰富的邪恶行为者的攻击。任何有足够资源和不良意图的人都可以简单地通过将许多塑料瓶倾倒在海洋中来攻击整个系统，从而增加每个人的存款。博弈论在开发合规机制方面发挥着重要作用，其中需要考虑参与者偏好的不确定性和变化、通过观察其他参与者的行为而做出的决策的变化以及参与者的集体行动。最终，通过使用具体的激励措施来实施这种遵守机制，以实现良好的平衡。最近，控制理论的思想已经成为这些经典机制的替代方案，并为控制界提供了非常有趣的方向[71]。

隐私保护：解决上述问题的主要障碍是无法将存款分配给个人。如果能够以保护隐私的方式做到这一点，我们就可以创建只有购买商品的人才能兑换存款的系统。我们还可以在差别处罚的基础上制定个性化干预措施，并能够相应地对不当行为的风险进行定价。然而，执行社会契约并促使人们为了更大的利益而遵守规则是一项微妙而复杂的任务。特别是，使用侵犯隐私的机制对行为进行微观管理是不可接受的，并可能导致中央权力机构侵犯个人权利的危险情况。那么，如何在保持社区优势的同时减轻风险呢？在这种情况下，一种具有巨大潜力的技术是分布式账本技术，尤其是当与控制理论相结合来管理群体行为时。在这些新的颠覆性技术的基础上实现安全的个性化控制策略，对于控制界来说，在几个非传统的应用领域可能具有巨大的价值。

闭环中的人类行为建模：在共享经济背景下，控制理论的一个重要机会是建模人类行为的集合，并设计用户推荐平台和用以协调他们的行为的算法[57]。对人类行为集合的适当微观和宏观模型的需求对于控制设计至关重要。在这种情况下，会出现有趣的挑战，因为这种集合的规模通常很大（比控制界通常解决的规模大得多），但通常不够大，无法作为流体处理。在许多情况下，这些系统还涉及大量人类在算法系统的帮助下进行交互。在此背景下出现的基本问题包括如何对此类系统进行建模，理解其均衡行为，并设计鲁棒的策略来优化其公平性和效率。

由于这些系统通常具有内在的随机性，因此确保它们产生“良好”的不变分布是很重要的。这需要合理公平的分配（例如，当给定地点供应短缺时，同一用户并不总是被拒绝使用自行车）。了解如何为这样的系统设计控制算法也是很重要的。此外，在共享系统中，消费者和生产者通常在预测的基础上并在软件代理的影响下做出决定。

然而，这种预测必须考虑到人们将根据这些预测采取行动这一事实，因为这些行动本身会影响预测[72]。

这里值得一提的是人类行为的两种具体建模方法：效用理论[73]和前景理论[74, 75, 76]。人类的决策通常被认为是基于效用的内在函数的优化。当潜在问题（如随机冲击）存在重大不确定性时，建模框架需要是随机的，并采用对潜在结果和概率的扭曲感知。这些是前景理论[74]中提出的原则，用于建模电力网络和共享出行中的赋权消费者[75, 76]。

将人类纳入闭环控制系统的挑战超出了共享经济的范畴，并出现在本报告的几个章节中，其中讨论了社会驱动因素和具体方法。是否应该开发人类行为的显式模型，而不是在不需要详细模型的情况下用于设计控制器的习得人类行为特征，还有待确定。

访问控制和对抗性设置：控制工程师的最后一个机会，也许是最大的机会，是与实现共享经济的技术平台相关的。区块链或其他分布式账本等技术使平台能够以可靠的方式进行点对点共享和资源交换，而无需集中式授权。它们还能够实现一系列个性化的信号策略，以实现对大规模人类群体的调节。无论是在使用还是设计此类技术方面，控制学界都有巨大的机

会。分布式账本在控制环境中的使用尚处于起步阶段，而且该技术本身大多基于控制理论概念（访问控制）。在这样的系统中实现访问控制的事实机制被称为工作证明（PoW）。这一机制现在正在让位于 FPGA 的进步。从控制的角度重新审视 PoW 类型的机制和此类账本的安全性可能会对此类系统的设计大有裨益。从系统理论的角度分析这些系统可以为控制设计提供保证[77, 78, 79]。

2.4.4 长期挑战

在现代背景下，共享对许多领域的企业来说是一种极具破坏性的模式。共享经济在对等移动和住宿市场的影响，以及专注于协作消费的初创公司的激增，证明了共享对我们日常生活的潜在影响。然而，尽管取得了成功，但随着共享经济的成熟，许多挑战仍有待解决。共享经济的一个备受讨论的副作用是，由于所谓的零工经济而出现的工人剥削和不良道德标准的可能性[80]。虽然这无疑是一些共享经济企业主不良行为的结果，但这也是由于技术、分析和商业模式的进步速度比为共享经济系统提供监督的法律模式快得多。在这些新的经营方法的背景下，法律学者正在努力处理所有权、联邦和集体风险和责任、保险、税收以及个人权利的新概念。共享经济的另一个不利方面来自可能出现的意外后果。例如，对等住宿模式提高了世界各地大城市的房地产价格和租金，以及中产阶级化。其他挑战包括共享网络物理对象（具有物理和数字足迹的设备），实现机器对机器的共享经济，以及实现人和机器都参与的共享经济。最后，值得注意的是，共享经济和循环经济[81]有很多共同点。开发这些协同效应也可能是控制工程界的一项富有成效的努力。

建议

对年轻研究人员：

工程师通常处于制造更高效设备的最前沿，但可能会忽视这些设备对经济消费的刺激。未来的商业模式将越来越多地寻求将经济增长与消费增长脱钩。在这种情况下，控制理论可以通过设计以有效和公正的方式控制资源访问的系统来提供很多东西。新一代的控制工程师必须扩展网络化多智能体系统设置，以捕捉动态资源共享环境中的智能体交互和协作。共享经济系统提出了一个反馈控制问题，其中控制器充当个体之间有限资源的智能分配器，这些个体努力将目前的竞争动态游戏转变为动态合作博弈，尊重所有参与者。在这种背景下，需要进行新的研究来探索共享经济系统，以解决共同设计技术和人类行为的问题。

对于资助机构：

资助机构应该认识到，有着精心设计的资源管理系统的共享经济至少是解决我们资源有限的社会可持续性问题 and 不受控制的资源利用对环境的影响的一种有希望的方式。总体研究目标应侧重于将已证明的动态系统反馈控制能力转化为有效资源管理的工具，并将资源使用方面的竞争转化为合作。这需要更好地理解如何在闭环系统环境中对人类行为进行建模，研究如何在这种环境中实现平衡，并设计鲁棒的策略来优化公平和效率，而这两者往往存在冲突。

2.5 节 社会规模系统的弹性

本节作者：

Saurabh Amin、Henrik Sandberg、Jacqueliën Scherpen、Dawn Tilbury、Andrew Alleyne、Giacomo Como、Johan Eker、Frederick Leve、Nikolai Matni、George J. Pappas、Thomas Parisini、Emma Teling

在本节中，我们将解释控制系统社区如何准备在建立社会规模系统的弹性方面发挥关键作用。我们可以通过开发监测和决策工具来更好地规划、管理和控制关键基础设施，并促进可以从这些工具中受益的各个实体之间的协调，从而为这一使命做出贡献。

摘要

今天的社会规模系统面临着几个风险。其中包括疫情后不均衡的经济复苏、环境风险（气候行动失败、极端天气、自然资源危机）、技术风险（战略基础设施受到攻击、对数字系统失去信任）和社会风险（生计危机和公共卫生问题）。控制系统科学和工程界可以引导政府和私营部门实体并与其合作，将弹性纳入社会规模的系统。我们有能力为供应链、制造业、运输和能源基础设施等各个部门的中断提供有效和及时的管理工具。通过这样做，我们可以利用新兴的监管杠杆和原则性的数据驱动方法来限制干扰的负面影响。我们还可以考虑战略决策者的激励因素和影响网络系统中控制回路性能的相互依赖性。具体建议包括将气候科学的预测方法与适应和缓解气候变化的控制理论工具相结合；开发安全可靠的技术，实现关键供应链的自动化和监控；利用物联网、人工智能和云计算的进步，提高各个行业的效率和灵活性；通过开发结合技术防御和机构/监管要求的风险管理工具，提高对随机和对抗性干扰的抵御能力。

2.5.1 引言

随着政府、私营部门和社区在新冠肺炎疫情之后努力恢复，我们被提醒注意跨越人类文明的社会、经济、环境和技术层面的全球风险（五类 30 种全球风险的示例见图 2.11）。在近期（两三年），我们预计不同经济部门的复苏轨迹将不均衡，大宗商品价格波动、通货膨胀上升和债务水平变化就是明证。从中期来看（三到五年），这种分歧预计将与极端天气事件、地缘政治紧张局势和贸易国之间的经济对抗相吻合。然而，从中长期（5 至 10 年）来看，最重大的风险被认为是环境风险，如气候行动失败、极端天气、生物多样性丧失和自然资源危机，以及社会风险，如社会凝聚力侵蚀、非自愿移民和生计危机。此外，诸如数字化造成的网络安全故障和不平等可能具有潜在的重大意义。

一方面，疫情的后果使应对气候行动、数字安全和关键系统恢复力等长期挑战所需的协调变得复杂。另一方面，对公共卫生危机的各种反应揭示了对管理此类风险的弹性改善因素的一些有价值的见解。风险管理应从政府平衡关键的权衡因素（例如，公共卫生与经济）开始，通过做出基于数据的决策来展示准备和响应能力，并促进公共和私营部门之间的有效沟通。然后，私营部门应在多个层面（包括地方和国家层面）为有效和及时的应对措施做出重大贡献。这可以通过增强供应链弹性、重新配置制造业以满足关键需求以及在行业内实施负责任的行为准则来实现。之后，社区将发挥关键作用，帮助基层地方政府，提高对系统脆弱性的认识，并鼓励公众为建立韧性做出贡献。

在本章中，我们将解释控制系统社区如何准备在应对全球风险方面发挥关键作用。其中包括开发弹性，改进技术解决方案，以更好地规划和运营管理关键系统，并促进实施新政策和法规所需的协调和数据共享安排。

在过去的十年里，控制系统科学家和工程师在设计和运行社会规模的 CPHS 方面做出了重大努力。这有利于新兴的服务模式，并在几个领域创造了新的商业机会，包括数据访问和分析、能源管理（如建筑系统控制、需求响应）、汽车安全、大都市交通管理、环境和基础设施监测、可再生能源集成以及电网的弹性运行。然而，从全社会的角度来看，无处不在的连接性、可扩展性、可靠性、安全性、适应性和操作灵活性等总体目标仍然难以实现。

为了应对这些挑战，控制系统建模和分析方法需要以量化关键服务需求为基础。我们建立和设计控制的方法必须明确认识到我们的社会规模网络面临的系统性漏洞，并有效利用新兴的监管杠杆以及原则性的数据共享和分析原则。

一个重要的交叉挑战是，传统上，控制系统设计被认为在很大程度上与系统操作者、管理者和用户等战略实体的经济激励脱节。在遗留系统（legacy systems）的背景下，控制工程师受益于明确的所有权结构，最多只能与监管机构和政策制定者进行有限的接触。然而，在数字化、数据驱动分析和人机交互的主流趋势下，这种控制和激励方案的松散耦合是无法持续的。值得注意的是，新的控制应用程序将需要更快的操作时间尺度、更大的空间互联性（通常跨越多个边界和管辖区）、许多混合的主动交互和异构组件。如果没有控制和激励的紧密耦合，我们的关键系统很可能会继续面临关键操作指标之间的冲突，如性能效率与稳健性以及故障与入侵。他们还将面临个人最优策略和社会最优策略之间的持续错位。重要的是要了解战略决策者的激励和机制如何影响激励的形成，这些激励解释了控制回路的保证（限制）和潜在的网络相互依赖性。我们认为，这一领域的进步将大大有助于在全球风险面前限制社会损失。

2.5.2 挑战和机遇

我们现在讨论控制系统社区面临的关键挑战和机遇。围绕四个具有代表性的领域和相关风险，我们讨论了以下问题：控制系统技术如何有助于缓解和适应重大的全球风险？需要哪些具体的建模、分析和设计进步？在 5 到 10 年的时间范围内应该设定什么目标？在适当的时候，我们还提出了一个问题：控制系统技术当前/正在进行的部署是否会产生意想不到的后果，从而加剧这些风险？

气候变化和极端事件导致的基础设施故障

温度波动、飓风和热带风暴以及沿海洪水等极端事件正在日益威胁能源和交通系统等关键基础设施。由于全球气候变化，其破坏性潜力预计将在未来几十年进一步增加（见图 2.12，了解可能导致全球系统性危机的协同风险示例）。例如，当许多能源公用事业公司难以处理 2017 年飓风“哈维”、“伊尔玛”和“玛丽亚”的后果时，飓风导致关键基础设施受损的风险变得显而易见。基础设施系统天生对天气和气候变化很敏感，但是我们目前对这些关键系统面临的气候风险的了解非常有限。我们需要基础建模和控制设计工具来更好地规划、监控、响应以及适应这些风险。

了解几十年来气候变化对复杂的相互依存的基础设施系统的影响尤为重要。整合可再生能源和分布式能源正在增加能源系统供应方的可变性。随着政府和行业追求雄心勃勃的脱碳目标，能源构成预计将进一步变化，尽管目前的输电和配电基础设施仍然压力过大（而且往往管理不善）。此外，新的电动汽车和低碳替代燃料（如生物柴油、氢气、非化石天然气）的持续部署预计将增加能源、交通和制造系统之间的相互依赖性。预计人为活动也会改变直接影响能源需求和供应的气象变量的分布和可变性。这些趋势导致的时空变异预计将随着季节和几十年的推移而演变，从而在能源系统规划和运营方面产生新的权衡。

控制系统界可以通过将气象学家和气候科学家开发的先进预测方法与不确定性下决策的控制理论工具相结合，领导气候-基础设施关系的跨学科工作。这些努力可以建立在设计电网等复杂网络运营的经验基础上，并有助于推进天气和气候数据的整合，以评估和管理气候风险。值得注意的是，传统的风险评估方法只考虑相对较小的一组（平均）天气数据。这限制了制定具有风险意识的长期基础设施更新规划（如输电扩建和发电容量扩建）和运营战略（如机组承诺和经济调度模型）的能力。面对不确定性，我们需要以建模和决策为基础的基础设施-气候风险评估和管理的系统理论基础。

上述目标的实现可以通过开发一种数据驱动的方法来评估大规模网络中天气造成的损害，设计事前资源分配和事后响应/控制策略以快速恢复。特别是，控制理论工具可用于估计极端事件强迫的时空变异性，并预测其对基础设施的影响。我们还必须使用异构、多模态的数据，通过控制工具来检测和识别故障事件和主动响应。这将需要推进优化资源分配和响应操作的建模和计算工具，并开发用于资源分配、网络加固、微电网运行和快速恢复的系统工具。

还需要做更多的工作，将气候模型和模拟的高维时间序列数据系统地添加到耦合的基础设施-气候系统动力学中，并为关键产出和风险指标提供合理的不确定性界限。此外，我们需要为决策者开发有用的工具，说明气候风险的概率性质以及它们如何影响各种利益相关者（发电机、输电运营商、公用事业和客户）。这需要使用随机建模、动态优化和网络控制的思想来限制气候风险对基础设施系统的影响。最后，我们需要认识到政府和私营部门实体之间管理跨部门/组织数据共享的不同所有权结构和战略互动，以及实施提高弹性行动所需的个人激励措施。

全球网络的安全威胁

网络攻击一直被列为全球长期风险之首。由于嵌入式物联网和计算设备在我们的电网、车辆、医疗设备、建筑和许多其他我们经常互动的系统中的数字化和部署，它们尤其受到控制系统界的关注。众所周知，这种 CPS 具有巨大的积极影响：它们提高了安全性、效率和适应性，并增强了新兴服务模型的可靠性、可用性和自主权。

量化和管理 CPHS 的风险仍然是一个独特的挑战，尤其是在处理由同时攻击（安全故障）和同时故障（可靠性故障）引起的相关故障方面。由于与多个决策者的紧密网络物理交互和互动，使用可用的诊断信息来隔离任何特定故障的原因是极其困难的，或者至少是非常耗时的，而这些诊断信息通常是不完美和不完整的。本质上，CPHS 中的安全性和可靠性故障本质上是相互交织的。控制系统界处于有利地位，可以利用技术防御和制度手段来限制由于相互依赖的可靠性和安全故障而产生的风险。

降低安全和可靠性风险的技术手段包括 IT 安全工具，如身份验证和访问控制机制、网络入侵检测系统、补丁管理和安全认证。它还包括控制理论工具，如基于模型和数据驱动的检测和隔离，在一类攻击下保持闭环稳定性和性能保证的鲁棒控制策略，以及限制相关故障影响的可重构控制策略。控制界已经认识到，安全工具的有效性可能受到速度、成本和可用性考虑的限制。例如，安全补丁更新的频率受到实时约束的限制，通用标准认证受到安全资源的限制。控制研究人员与政府和行业组织合作，制定了安全标准和建议，将特定于 IT 的安全防御与控制理论工具相结合。

实施安全和可靠性风险评估框架的一个重大挑战是开发数据驱动的随机 CPHS 模型，该模型考虑了相互依赖的可靠性和安全故障下的动力学。这里的关键挑战是将关注特定场景下动态的基本模型扩展到捕捉各种相关故障场景的复合模型，包括同时攻击、共模故障和级联

故障。原则上，统计估计、基于模型的诊断、随机模拟和预测控制等技术可用于根据实时数据生成新的故障场景，综合作战安全策略，并在故障高度相关且信息不完善的环境中提供剩余风险的估计。

需要注意的是，仅基于技术的防御不足以确保对相关故障的恢复能力。特别是，私人方面缺乏对安全改进的激励，严重阻碍了实现社会期望的 CPHS 安全改进。由于个体参与者的利益冲突而导致的信息不足加剧了这一问题，他们的选择影响了 CPHS 风险。在信息不完整和不对称的环境中，相关故障的社会成本通常超过单个参与者的损失，这些参与者的产品和服务影响系统运行，风险取决于他们的行动。相对于社会最优基准，个体参与者可能会在安全方面投资不足，这需要设计制度手段来重新调整个人激励措施，以进行足够的投资。尽管如此，我们对于统计上罕见事件（如极为相关的故障）的风险获取存在限制，这意味着即使在最好的技术防御和制度结构下，我们的关键社会基础设施也面临残余风险。面对这些残余风险，控制系统社区将需要设计和运行系统。这一点从有组织的能入侵关键控制系统的网络犯罪集团的出现，以及参与武装冲突的国家积极采用的网络战中可见一斑。

供应链中断

今天的供应链是复杂、相互关联且全球性的网络。它们包括生产商、运输和物流公司，以及储存、组装和分销大量产品以及提供差异化服务的实体。近年来，供应链已经全球化。这提高了生产国（特别是低收入国家）的生产力和收入水平。正在进行的供应链数字化转型大大提高了自动化、成本控制和服务质量水平。它还提高了交易的效率和及时性，同时改变了人类在制造厂、仓库和物流运营中的角色。

然而，同样显而易见的是，许多供应链已经变得更容易受到干扰。全球疫情揭示了关键零部件和原材料的反复短缺（例如，半导体芯片短缺影响了许多行业的制造业）以及快速演变的消费者购买模式等问题。

值得注意的是，走向脆弱结构的运动已经酝酿了几十年。例如，许多公司减少了产能缓冲和经验丰富的人员，以满足消费者对低价的期望。为了降低成本并在艰难的市场中获得竞争优势，我们看到了大量的外包和离岸业务。这大大增加了对发展中经济体的依赖，与此同时中国正在成为一个主要的制造业中心。这些只是 2011 年日本海啸、2008 年金融危机和 2003 年 SARS 疫情等带来众所周知的混乱背后的一些原因。

控制系统界在应对自然灾害和天气紧急情况（预计会随着气候变化而增加）、网络攻击、劳动力短缺/罢工和金融危机等事件时，处于提高全球供应链抵御能力的有利地位。以下是一些机会：

多样化供应链网络中的端到端可见性：控制工程师已经为物联网、机器人和自动化在各种生产和物流过程中的部署做出了贡献。通过借鉴设计大型监控系统的经验，我们的社区可以提供解决方案，以确保在不同的供应链网络中实现端到端的可见性，从垂直整合的行业到具有不同程度的离岸、外包和协作关系的行业。这里的挑战是，我们是否可以设计监控系统，为不可预见的延迟或质量不合规等问题提供细粒度的警报。

识别干扰传播和薄弱环节：控制系统思维还可以为干扰如何在这些复杂网络中传播提供新的见解，并帮助利益相关者及时识别薄弱环节。这一点尤为重要，因为与气候相关的事件的规模和频率都在持续上升，其中许多事件正在造成供应链冲击。一个重要的步骤是利用供应链结构可见性的提高来确定供应商是否能够满足其当前生产计划和库存水平的需求。例如，David Simchi Levi 的研究表明，“生存时间”和“恢复时间”等指标在评估韧性方面

非常有用。

建立冗余措施：来自分布式系统控制、随机优化和控制学习的最新发展的工具可以为在何处以及如何建立冗余措施（如备份容量和战略持有额外库存）提供有用的见解。需要注意的是，建立冗余通常成本高昂，但在供应链紧张时期，它可能会提供竞争优势并增加利润。控制系统界在设计和实施电网中的冗余措施方面有着悠久的历史。有一些有趣的相似之处和经验教训可以应用于供应链。

提高供应链敏捷性：保持供应链的敏捷性将使他们能够快速响应，并在输入之间进行替代，以应对中断。企业可以通过各种方式提高灵活性，包括识别瓶颈并迅速解决，投资灵活的生产流程和通用制造线，以及与供应商保持长期合作关系。所有这些解决方案都需要在不确定性下做出决策，并有能力量化关键的潜在权衡。

与政府和公共部门接触：控制系统界可能会围绕政府和公共行业在促进韧性方面的作用进行对话。重要的是，公共部门在维持能源生产、气候安全、人员运输、关键原材料以及国家和国际供应等部门的投资水平方面发挥着至关重要的作用。在新冠肺炎大流行期间，世界各地政府在收集和传播信息以及确保关键商品供应方面的应对措施多种多样，凸显了及时协调干预的重要性。类似的机会在于提供关键的汇总信息，以帮助运营全球供应链的各个实体之间进行有效的规划和协调。

2.5.3 建议

网络分析——面对风险时的结构和动态

- 对网络物理网络中干扰的动态传播进行建模，并使用多模态数据来学习网络结构和动态（近期）
- 开发风险评估的定量方法，量化风险指标，并利用数据和模型。开发通用方法和特定于基础设施的分析，说明共模故障和基础设施之间的相互作用（近期）
- 了解罕见事件及其风险，以及建模和阻止级联风险和故障的方法（中期）
- 根据预算、激励和基础设施相互作用的限制，最大限度地降低网络结构设计的风险。这可能涉及新设备和服务的分配以及部分基础设施升级（中期）
- 通过多个相互作用的子系统之间的协调来发展弹性控制，这些子系统可能由有自己目标和不完善信息的决策者操作（中期），包括完整性、可追溯性，以及对中断的恢复能力（中期）
- 开发基础理论，将大型复杂网络的分析方法与面对全球风险的战略规划和运营响应设计方法相结合（长期）
- 开发计算方法的基础知识，以解决全球供应链（包括能源系统）与不断变化的极端天气和气候（长期）

了解网络中的所有权结构和形成激励

- 在分布式控制和动态机制设计之间建立联系（近期）
- 了解如何共同设计激励和控制，以利用博弈论建模和控制学习与网络（例如，具有不确定参数的网络中的战略网络形成、学习和适应，以及网络的相互依赖性）（近中期）

- 考虑监管制度的差异，并以有助于部署技术的规模和鲁棒性的方式推动它们（中期）
- 学习如何建立网络和控制回路，以减轻意外后果。（中期）
- 了解如何仅控制网络的某些组件以及如何集成不同的组件（中期）
- 定义组件之间的接口，并了解可信设计需要什么样的监管（中期）
- 分析替代信息和激励结构下 CPHS 风险管理的安全 IT 和控制理论防御和政策机制（长期）

• 在负责运营和管理关键系统的实体之间建立正式的互动渠道，即使他们位于不同的司法管辖区，也要协调对破坏性事件的有效应对（长期）

• 了解机构如何为恢复能力提供新的商业案例和新的风险分担方式，如保持安全的 CPHS 的最低法律责任水平，并激励漏洞发现、事件披露和保险工具，以改进有关风险的信息（长期）

监控、中断的早期评估和量化预测

- 了解潜在的网络状态，并基于异构数据快速识别相关事件（近期）
- 采用数据驱动的方法来利用和创建新的数据集以及与模型驱动框架的交叉点（近期）
- 了解执行器、控制的作用以及行为模型分析的机会（近期）
- 预测全球网络/供应链的大规模中断，并了解这些预测的局限性和不可能性。利用统计机器学习和最坏情况下确定性建模以及对开始和失败触发事件的检测的混合（中期）
- 成功部署计算工具，用于基于中断的异构多源数据的分析驱动诊断模型（中期）
- 了解诊断和共享安排所需数据的所有权结构确保用于生成警报的数据的可信度所需的（中期）

• 探索数字商品、信息和货物的流动、计算和通信需求的安全监控、无人机机队之间的合作，以及依赖单一国家托管的云服务的风险（中期）

• 将利用过去网络中断数据和预警指标的诊断工具与最佳资源分配和网络控制策略的设计相集成（长期）

• 在中断事件之前和期间积极学习，并准确预测其对关键网络和服务的影响（长期）

网络上的非法、犯罪、对抗性行动

- 建立在网络安全和弹性控制方面的重要工作之上，并将范围扩大到相互依赖的系统（近期）
- 利用安全分配（博弈论）来破坏非法活动（近期）
- 在 CPHS 中设计蜜罐（近期）
- 纳入关键供应链以提高可信度（中期）
- 破坏非法供应链（人口贩运、自然资源、稀有矿物等），并了解监控和检查技术和供应链网络控制，以消除非法流动（中期）

- 应用基础知识和工具，了解人类在 CPHS 中发起非法、犯罪和对抗行为的作用（长期）
- 评估 AI/ML 技术在创建新的攻击载体中的作用，以及如何创建监管和激励框架来限制其有效性。此外利用国家政策和国际承诺，负责任地使用部署在关键系统中的数字技术（长期）
- 了解控制系统设计者和操作员需要在多大程度上接受培训，以识别此类行为（长期）

重新配置和调整，以建立弹性

- 确定将缓冲区放回系统和内存的位置，谁来买单，代价是什么，以及如何将失败本地化（例如，如果一家银行破产，世界其他地方不会跟着破产）（近期）
- 思考效率和韧性之间的权衡：是否存在帕累托曲线？供应商、消费者还是政府应该为韧性买单？（近期）
- 了解最近的例子如何影响制造业和供应链。例如，全球芯片短缺如何影响新车和二手车市场，这些市场如何适应，以及需求如何变化（近期）
- 考虑缓冲或重组，以及私营企业拥有缓冲的动机。当一家公司提供缓冲时，精益或准时制（JIT）公司必须在中断发生时支付大量费用（中期）
- 定义有关调整制造和物流以实施再利用和回收（循环经济）的问题，如工具、处置成本和体制结构，以及激励制造商将安全可靠的产品推向市场或在需要时召回/修复这些产品（中期）
- 评估和规划对涉及民族国家的网络冲突的全球应对措施，包括网络能力被部署为颠覆手段和造成人道主义困境的情况（长期）
- 理解为什么规模是一个挑战。确定如何在机制/激励设计和监管中使用电网等工程系统（例如，在可再生能源密集型电网中部署存储和多矢量能源系统规划中的脱碳战略），以实现规模（长期）
- 确定控制技术的方向，为风险管理创建商业案例（长期）
- 了解何时召开缩减全球经济的临时战略会议或等待崩溃（长期）

建议

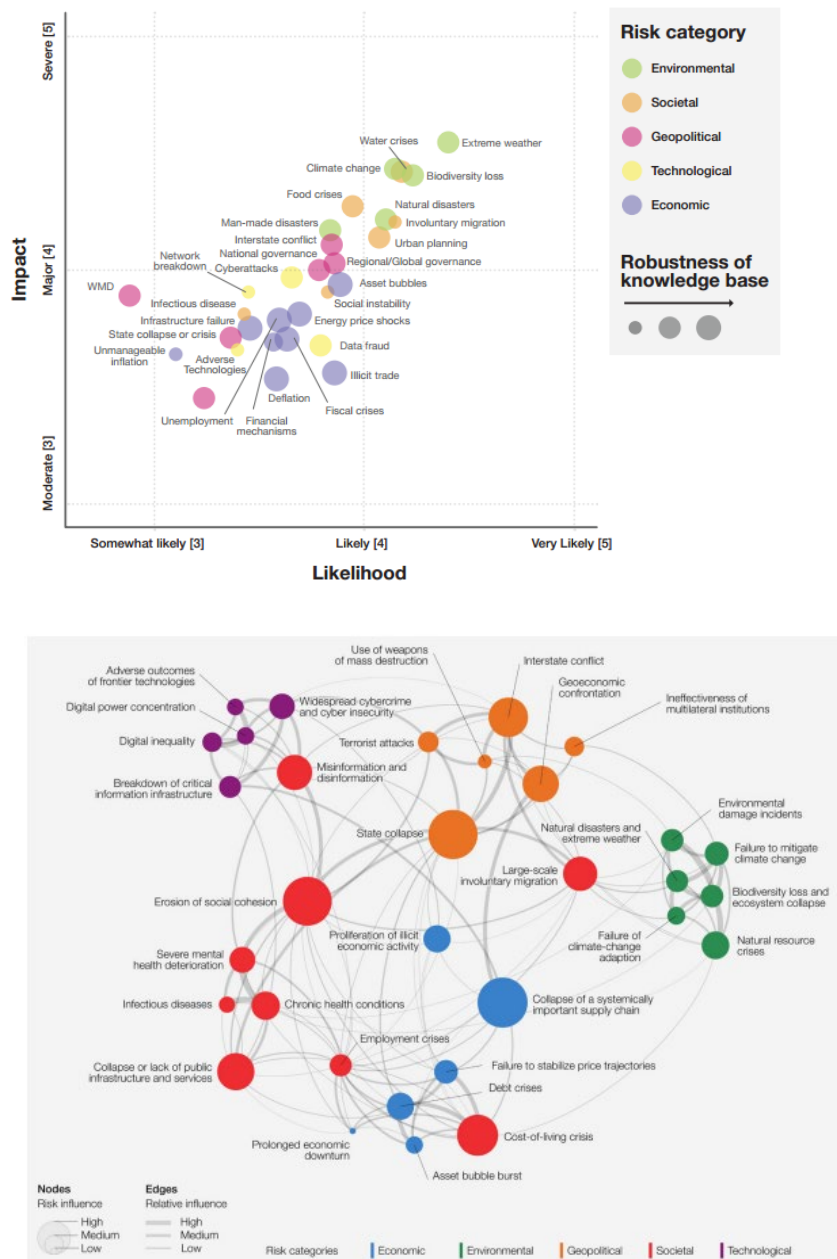
对年轻研究人员：

为了在下一代社会基础设施中建立弹性，我们需要基础工具来了解中断下的网络动态，并检测/识别故障；设计控制和激励机制，以提高战略环境中的闭环性能；并实施最佳资源分配和动态响应策略。

对于资助机构：

刚刚起步或需要更多探索的领域包括全面和情境设计方法，以确保关键系统在面临新出现的风险（特别是技术、环境和社会风险）时的安全、信任和保障，以及强大的数据驱动机制，以在网络系统的各种中断中保持功能。

图 2.11-2.12



参考文献见英文报告 P59-70, 这里不再重复。附录 (英文报告 P71-84) 进一步介绍了具体的技术实现, 供有兴趣的读者自行阅读。