控制论环境：关于系统、设计与机器智能的历史反思

Zihao Zhang，弗吉尼亚大学，弗吉尼亚州/美国 ·
zz3ub@virginia.edu

摘要： 本文从历史视角出发，追溯控制论与系统思维自20世纪50年代以来的发展。当时，一群跨学科学者汇聚一堂，借助机器与系统构建新的理论模型，以理解意义、信息、意识与生命等问题。通过梳理景观建筑学科的研究谱系，本文指出，景观建筑师通过基于生态学的景观设计，将基于控制论原理的系统落实于环境之中，在控制论的发展过程中发挥了重要作用。景观学科发展出一种设计框架，为理解机器智能提供了变革性的见解。本文呼吁采用新的环境介入范式，以理解设计与机器智能相关的问题。

关键词： 控制论、系统、景观设计、机器智能

1 引言

过去几年，环境管理领域涌现出大量研究与实践，依托传感网络、机器人学、人工智能（AI）和机器学习（ML）等技术来调节、控制和管理环境过程。控制论原理被引入，用以将环境设想为一个系统，从而部署基于“感知—预测—控制”反馈回路的不同策略，以影响环境。首先，引入传感网络来收集各种环境数据。然后，将这些数据集输入机器学习算法，用于训练人工智能系统或模型，以预测未来情景并设计可由信息物理基础设施执行的控制策略。最后，再次收集更新后环境的数据，感知—预测—控制机制由此形成完整循环。这些努力催生了一种新的环境介入范式——控制论环境。然而，在许多情况下，系统思维和控制论控制在理论与实践中都被先验地视为理所当然。如果从历史视角审视控制论的起源与发展，我们能获得哪些见解？与此同时，这些努力也启发景观设计师以新的维度介入环境。响应式景观和“第三智能”等理念已被提出，用以在景观设计中构想机器智能。这些理念如何为更广泛的控制论环境范式作出贡献？

为回答这两个问题，本文首先借用凯瑟琳·海尔斯提出的“控制论三波浪潮”框架，简要梳理控制论运动的历史，并概述每一波浪潮中的主要发展。通过历史反思，本文指出，尽管景观学科并未得到充分认可，但它始终通过在物质环境中实现控制论系统而参与控制论领域。景观建筑学科借助生态学和系统思维构建景观，并发展出一套系统的设计框架，用以构想机器智能如何参与环境建构。这一研究路径有别于其他版本的控制论想象，例如“智慧城市”和“智慧环境”；后者将控制论技术设想为一种新型数字基础设施，用于优化环境与城市进程。相较之下，

《数字景观建筑学杂志》2020年第5期，第33-40页。© Wichmann出版社，VDE出版社有限责任公司 · 柏林 · 奥芬巴赫。ISBN 978-3-87907-690-1，ISSN 2367-4253，电子版 ISSN 2511-624X，doi:10.14627/537690004。本文为开放获取文章，依据知识共享署名许可协议 (http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) 的条款和条件发布。

本文追溯了一种研究与实践谱系，其观点认为机器智能深植于环境之中，应被视为现实的一部分。这一思路值得进一步研究，并有望成为推动整个控制论环境话语转型的力量。

2 控制论环境的兴起：一种新范式

RangerBot 是一种水下机器人，旨在保护大堡礁免受数量过多的食珊瑚棘冠海星（COT）侵害。这种水下设备依靠随机森林分类器——一种用于数据分类的机器学习技术——通过水下影像训练，用于追踪和探测 COT 海星，并通过致命注射将其杀死（DAY-OUB 等，2015）。DroneSeed 是一家总部位于西雅图的公司，利用无人机群在野火等灾害扰动后植树并管理森林。据称，这种基于无人机的重新造林策略非常高效，速度是人工植树者的六倍。无人机的飞行路径可以预先编程和优化，并且能够半自主地种植和管理树木。借助这些无人机群，该公司可以在 8 小时内种植 80 英亩树木，并在 30 天内使一处野火后的土地恢复森林。
在人工智能（AI）和机器学习（ML）领域，Facebook 和 Google 等科技巨头已经取得了令人鼓舞的成果。Google 一直利用人工智能预测各种与环境相关的事件，例如洪水和风能发电量。这些人工智能系统采用机器学习技术构建，通过学习从嵌入各种环境中的传感网络收集的数据来进行预测。深度强化学习（DRL）技术的相关研究带来了更多振奋人心的成果。DeepMind 曾开发出 AlphaGo，并在 2016年 击败了最优秀的人类围棋棋手；最近，它又开发了另一个名为 Alpha- Star 的人工智能系统，在即时战略电子游戏《星际争霸》中达到了宗师级水平（SIL- VER 等，2017；VINYALS 等，2019）。许多人将这项实验视为人工智能研究的一项突破，因为《星际争霸》等即时战略游戏以“组合动作空间、延伸至数千次实时决策的规划视野，以及不完全信息”而闻名（VINYALS 等，2019）。在观看或与 AlphaStar 对战后，许多职业玩家表示，这个人工智能游戏系统设计出了许多他们可以借鉴的新策略；他们认为 AlphaStar 为理解游戏本身提供了新的途径（“DeepMind’s AlphaStar: A Grandmaster Level StarCraft 2 AI – YouTube”，2019）。尽管许多令人振奋的人工智能研究都围绕电子游戏展开，但这些人工智能系统的构建着眼于通用性。这些系统所采用的机器学习技术和架构都是通用模块，并非专用于电子游戏；相反，它们是关于任何智能体如何在任何给定环境中做出决策的通用函数（VINYALS 等，2019）。这使人工智能研究人员能够将这些通用模块整合并重新组合到其他人工智能系统中，以应对超越人类理解能力的更复杂现象，例如气候变化。

然而，当今大多数控制论环境研究中，至少存在两个未经质疑且密切相关的前提。首先，“系统”被先验地假定为既定存在。其次，其底层框架围绕感知—预测—控制协议展开，研究则陷入了通过模型构建实现控制的幻觉之中。换言之，正因为环境被设想为一个系统，我们才能制定反馈策略来管理和控制它。然而，如果我们追溯控制论的发展，就会清楚地看到，“系统”本身是一种

心智模型——一种思维方式或范式——是人类为理解世界而构建的，带有不可避免的局限与盲点，使我们无法对控制论环境形成更深入的理解。

3 控制论的三次浪潮

“控制论”这一术语本身在很大程度上遭到了误解，因为人们很容易将“cyber”与数字技术和互联网联系起来，而忽略了它的原始含义。控制论源自希腊语“kybernetes”，意为掌舵船只的人。WIENER（2000）于1948年在其著作《控制论，或动物与机器中的控制和通信》中重新提出了这一概念，并将控制论发展为一种综合性研究方法，用以探讨不同系统中的组织关系与控制关系。“掌舵”是控制论的核心，因为它研究不同系统如何利用信息、构建模型并实施控制行动，以引导自身朝着目标前进；也研究我们如何将“自我控制”和“反馈回路”工具化，从而推动复杂系统朝着我们期望的方向发展。控制论催生了许多学科，包括计算机科学、机器人学和人工智能（HEY-LIGHEN & JOSLYN，2003）。在70多年的发展历程中，其核心概念和思维模式已在学术界和广大公众中广泛传播并持续发挥影响。然而，控制论并未发展成为一门独立的学科；相反，随着时间的推移，控制论不断在不同领域得到应用。HAYLES在其具有开创性意义的著作《《我们如何成为后人类》》（1999）中，将控制论运动划分为三个浪潮，并梳理了控制论前沿在不同研究领域中的应用与发展。

控制论的第一波指的是 1944 至 1953 年间一系列跨学科会议，即著名的控制论梅西会议。许多重要的战后知识分子参与了这些会议，包括数学家诺伯特·维纳、克劳德·香农和约翰·冯·诺依曼，人类学家格雷戈里·贝特森和玛格丽特·米德，神经生理学家沃伦·麦卡洛克，物理学家兼哲学家海因茨·冯·福斯特，以及精神科医生 W. 罗斯·阿什比。第一波探索的关键概念是稳态和自我调节系 统。稳态可表示为$f(x) = x$，其中函数的输出会反馈到函数本身，作为输入。稳态系统的经典例子之一是控制室温的恒温器。自动机和机器人等控制论机器被制造出来，用以检验这一理论框架。这些机器的设计目的不只是作为工具来完成某些任务，更是作为实体实验，将构想中的系统具象化。由于控制论第一波在控制系统中有直接应用，许多以实践为基础的学者很快便脱离了更偏理论的研究，转而形成了计算机科学、机器人学和人工智能等更为专门的学科（HEYLIGHEN & JOSLYN 2003）。

第二波聚焦于二阶控制论，即将控制论递归地应用于自身。在梅西会议时期，学者们研究了自调节系统如何构建内部模型来引导自身行动。然而，学者们很快意识到，他们作为观察者，也在构建关于控制论系统的模型：$f(x) = x$是观察者为描述自调节系统而构建的心智模型。他们迫切需要一种不同的框架，将观察者及其在系统建模中的作用纳入考量。通过将观察者转变为“观察系统”，并将其视为所研究系统的一部分，这一问题得以解决（图1）。沿着这一研究路径，这一波理论中的关键概念之一是由智利生物学家提出的自创生（自我生产）

MATURANA 与 VARELA（1980）。自创生系统（如人类）利用输入来再生产其组织结构或各组成部分之间的关系。在一篇具有奠基意义的论文《青蛙的眼睛告诉青蛙大脑什么》（LETTVIN 等，1959）中，生物学家和神经科学家证明，青蛙的眼睛并不会捕捉图像，再将其完美复制并传送给大脑进行解读。相反，四组神经纤维会先对图像进行处理，然后再将高度组织化的信息传送给大脑。每组纤维负责对视觉数据进行一种类型的处理，并以物体运动而非光照强度的形式表达图像。这一发现的结果颠覆了人们通常对眼睛这一感觉器官的理解：人们原以为眼睛捕捉现实的图像，并将整套数据发送给大脑进行解读。实际上，大脑是根据眼睛有选择地传递给它的信息，重构出一个“现实”。这种对现实的重构对于青蛙的生存至关重要；青蛙捕食的并不是苍蝇，而是眼睛帮助大脑看见的、苍蝇大小的运动物体。自创生带来了一种高度建构主义的认识论：包括人类在内的自创生系统，并不直接与外部现实互动，而只能接触到由自身系统运作所建构的现实。从某种意义上说，“系统”是人类大脑为了阐释我们周围环境中的因果关系、确保自身生存而建构出的概念。

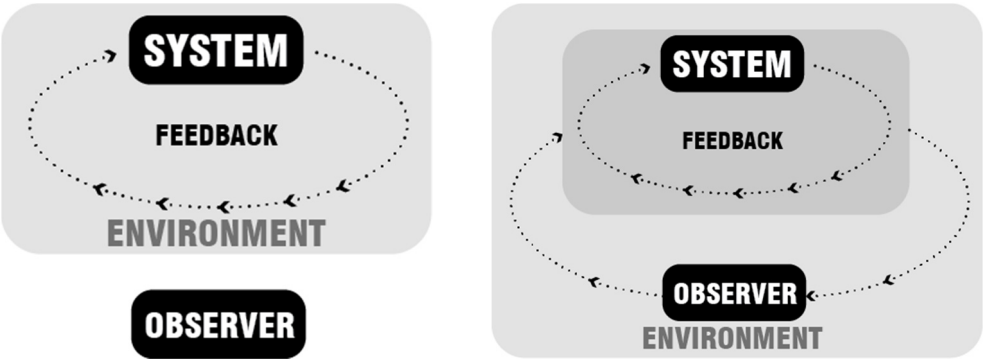


图1：一阶控制论（左）与二阶控制论（右），插图由 Zihao Zhang 绘制

第三波研究是对二阶控制论在生命、智能与意识方面的拓展与发展。如果控制论本身是人类为理解任何系统而构建的一种模型，那么系统行为就不再那么线性，而是更难以预测。HAYLES 将控制论的第三波归因于 20 世纪 90 年代圣菲研究所开展的人工生命研究。研究探讨的关键概念是涌现。通过多智能体模拟应用简单规则，可以实现复杂性。研究人员开发了一种计算机程序，能够依据简单规则自我复制。这些规则还允许不同世代之间发生变异。经过数百万次模拟运行后，计算机程序形成了一个物种生态系统。每次重新开始模拟，都会涌现出一个截然不同的程序生态系统：有时由一个物种占据主导地位，有时则是多个物种达到平衡（NMCS4ALL 2013）。这项研究为进化与生态学提供了不同的见解，也对线性生态模型提出了挑战；该模型假定自然生态系统会达到顶峰或稳定状态。

当前关于控制论环境的论述大多围绕一阶控制论框架展开；其目标是将环境设想为一个稳态系统，从而开发技术，通过反馈回路影响环境。换言之，当前研究可归纳为三个方面的进展：1）开发更完善的传感网络和协议，以收集更多数据并加深对环境的理解；2）开发更完善的机器学习算法和架构来训练模型，从而更准确地预测环境；3）开发更完善的信息物理系统，以制定控制策略和控制行动。然而，这些努力缺乏一种批判性认识：作为系统的环境，不过是为解释控制与人类能动性而构建的概念。若不引入二阶控制论的批判性概念，也不将人类纳入系统之中，机器智能就只能被设想为扩展人类控制力的手段，而无法被视为需要经过审慎设计的现实组成部分。

4 景观设计与控制论

20世纪的控制论发展与景观理论和实践并非两条平行谱系。相反，我们可以识别出控制论中的许多概念，这些概念体现在景观设计之中。学者们一直对建立控制论与景观设计之间的联系表现出浓厚兴趣。有观点认为，Ian McHarg的设计框架属于一阶控制论，其将生态系统视为一个稳态系统，而景观建筑师的工作则是对抗威胁这一稳定状态的熵；而Lawrance Halprin的评分系统则是对二阶控制论（第三次浪潮）的一种探索，其关注不确定性、偶然性和涌现（LYSTRA 2014）。此外，20世纪90年代末，多伦多的Downsville城市公园竞赛标志着控制论和系统理论在景观设计话语中的全面体现（CZERNIAK 2001）。几乎所有参赛方案都将城市公园设想为一个独立的系统，并制定了系统性策略，通过引入不同尺度的未确定因素来引导景观系统的发展，以应对随时间推移而产生的不确定性（BERRIZBEITIA 2001）。时间成为一个重要因素，景观也被视为一种过程，而非最终结果。例如，James Corner、Stan Allen和Nina Mari Lister的参赛方案采用了一种理念，即复杂性可以通过生态过程创造出来（REED & LISTER 2014a, 2014b）。CHARLES WALDHEIM（2006）使用“不确定性策略”来构想适应性管理框架，并设计了一种能够不断演化的景观系统，从而推动20世纪90年代至21世纪初的景观实践。在过去三十年中，景观学科发展出了一种侧重于涌现、非确定性和不确定性的设计框架。

植根于这一景观设计框架，景观建筑师开始构想机器智能，并探索设计的新维度。在这一研究脉络中，CANTRELL 与 HOLTZMAN（2016年）重点提出了响应式景观框架，并阐述了用于开展设计的感知—处理—执行反馈回路。响应式技术并非被视为附加于环境之上的一层，而是深深嵌入环境中的网络。景观蕴含智能，能够随时间演变、响应各种输入，并适应不同情境。ZHANG & BOWES（2019年）提供了实证证据，表明机器智能已深度参与环境过程，并成为环境管理决策过程中的重要参与者。引入后人类主义以构想机器智能；设计师在理论化和应用机器学习与人工智能时，应超越人类中心主义，在景观——

设计学科中（ZHANG & BOWES 2019），秉持类似的观点，CANTRELL 与 ZHANG（2018年）提出“第三智能”这一概念，并据此认为，机器是众多智能主体之一，与人类等共同演化、共同塑造共享环境。“第三智能”并不将机器视为另一种控制机制，认为它通过这种机制被引入环境、从而让人类行使更多能动性；相反，它认为机器智能能够深深融入环境。为了与不同类型的主体／智能共同开展设计，ROBINSON 与 DAVIS（2018年）主张在设计师与景观之间建立新型界面。

这些实践仍属推测，但值得进一步探索。在一项思想实验中，学者设想了一种基于深度强化学习的机器“野性创造者”，它像 AlphaGo 和 AlphaStar 一样，能够制定环境管理策略，并创造出超越人类理解的场所（CANTRELL 等，2017）。他们并未将基于深度强化学习的人工智能系统设想为能够以人类话语预测环境的“超人”，而是将“野性创造者”构想为一种不同类型的智能：它以有别于人类的方式理解环境。

在研究设计工作室中，学生在现场设计并建造了一座感知站。感知站被构想为场地系统的界面，可持续向设计师提供情境信息，设计师随后据此逐步制定策略（OSBORN 2018）。感知站并非试图提供“客观”数据以制定控制策略的感知网络，而是演变为设计师必须回应的现实的一部分。

此外，设计师 LEIF ESTRADA（2018）提出在河流环境中部署传感网络、数据处理和驱动系统；通过在地貌实验台上进行严格实验，技术—自然耦合系统展现出超越人类能力的实时响应水平。

在类似的框架下，为了在微观尺度上与遥远的冰冻圈环境互动，设计师 GONZALEZ RAMIREZ（2016）设计了一个系统，其中包含一个中央大脑，以及深深嵌入冰冻圈环境中的分布式执行器（身体）。大脑能够向这些身体下达大量驱动策略，并根据预测情景与环境实际响应之间的差异来评估这些策略。经过一系列评估后，系统能够随时间调整策略，并与冰冻圈环境共同演化。

5 结论：控制论的第四次浪潮

控制论完全不是关于技术的学问，而是研究包括人类、机器和其他非人类实体在内的不同实体之间的通信与控制。换言之，在控制论框架中，技术和机器并不是实现某种目的的手段，也不是帮助优化流程的工具。相反，机器只是用于理解系统如何运作的一种模型，也是考察不同实体如何互动的一种视角。技术的应用和科学研究并非控制论领域的核心关注点；相反，它们为学者提供了经验证据，使其能够就信息、生命、进化和意识提出更深层的问题。因此，在环境设计与管理的语境下考虑人工智能和机器学习等新兴技术时，我们需要绕过急于在这些工具中寻找有用应用的冲动。相反，研究控制论发展历程所得到的一项非常重要的启示是，控制论环-

境范式能够为我们提供另一种理论框架，以从不同角度考察环-境。某种程度上，设计师如今必须介入的环境，与数十年前设计师所面对的环境有着本质差异。环境中充斥着由人类引入、却尚未被我们完全理解的机器智能。我们应当认识到，机器智能并不是被添加到环境中的一层薄薄介质，用来扩展人类控制的范围。相反，机器智能深深植根于环境之中，成为我们必须理解并据此开展设计的现实的一部分。我们必须发展并接受一种新的理论框架，以理解机器智能与景观设计相关的问题。

景观建筑始终是控制论的一部分，它通过物化系统并构建控制论原理的物理体现来实现这一点。景观学科深深植根于生态学和系统思维，已发展出一种设计框架，改变了人们对智能的构想方式，以及在构建环境时对机器的设想方式。因此，本文呼吁开启控制论的第四次浪潮，其根基在于对控制论环境的研究。此外，更重要的是，景观建筑师具备相关知识与敏锐感知力，能够思考并设计不同实体如何共同演化、共同塑造共享环境。

参考文献

BERRIZBEITIA, A.（2001），不可判定性尺度。载于：CZERNIAK, J.（编），《多伦多唐斯维公园》。Prestel，慕尼黑/伦敦，第117—125页。https://search.lib.virginia.edu/catalog/u3881073。CANTRELL, B. & HOLTZMAN, J.（2016），响应式景观：景观建筑中的响应式技术策略。Routledge，纽约。CANTRELL, B.、MARTIN, L. J. & ELLIS, E. C.（2017），设计自主性：人类世中新荒野的机遇。《生态学与进化趋势》，32（3），156—166。https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.12.004。CANTRELL, B. & ZHANG, Z.（2018），第三种智能。《景观建筑学前沿》，6（2），42—51。CZERNIAK, J.（2001），《多伦多唐斯维公园》。Prestel，慕尼黑、伦敦。https://search.lib.virginia.edu/catalog/u3881073。DAYOUB, F.、DUNBABIN, M. & CORKE, P.（2015），棘冠海星的机器人探测与跟踪。ARC机器人视觉卓越中心，科学与技术学院，未来环境研究所，汉堡。https://eprints.qut.edu.au/85974/。ESTRADA, L.（2018），迈向感知能力。载于：CANTRELL, B. & MEKIES, A.（编），《Codify：景观建筑中的参数化与计算设计》，第279—288页。Routledge，米尔顿公园、阿宾登、牛津郡、纽约州纽约市。http://search.lib.virginia.edu/catalog/u7552559。GONZALEZ RAMIREZ, R. J.（2016），为多重身体的心智而设计：冰冻圈中的控制论微观干预（论文），麻省理工学院。https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/106370。HAYLES, K.（1999），《我们如何成为后人类：控制论、文学与信息学中的虚拟身体》，芝加哥。芝加哥大学出版社，美国。

HEYLIGHEN, F. & JOSLYN, C.（2003），控制论与二阶控制论。《物理科学与技术百科全书》，第3版。爱思唯尔，第155—169页。https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00161-7。LETTVIN, J.、MATURANA, H.、MCCULLOCH, W. & PITTS, W.（1959），《青蛙的眼睛告诉青蛙大脑什么》。《IRE会刊》，47（11），1940—1951。https://doi.org/10.1109/JRPROC.1959.287207。LYSTRA, M.（2014），麦克哈格的熵，哈尔普林的偶然性：20世纪60年代景观建筑中控制论变化的表征。《花园与设计景观史研究》，34（1），71—84。https://doi.org/10.1080/14601176.2013.850313。MATURANA, H. R. & VARELA, F. J.（1980），自创生与认知：生命的实现。施普林格，荷兰。https://doi.org/10.1007/978-94-009-8947-4。NMCS4ALL（2013），人工生命（完整版）。https://www.youtube.com/watch?v=YJRRu4dJnTI。OSBORN, B.（2018），编码行为。载于：CANTRELL, B. & Mekies, A.（编），《Codify：景观建筑中的参数化与计算设计》。Routledge，米尔顿公园、阿宾登、牛津郡、纽约州纽约市，第180—195页。http://search.lib.virginia.edu/catalog/u7552559。REED, C. & LISTER, N. M.（2014a），《投射生态学》。Actar D。REED, C. & LISTER, N.-M.（2014b），生态学与设计：平行谱系。《Places》杂志。https://doi.org/10.22269/140414。ROBINSON, A. & DAVIS, B.（2018），从解空间到界面。载于：CANTRELL, B. & MEKIES, A.（编），《Codify：景观建筑中的参数化与计算设计》。米尔顿公园、阿宾登、牛津郡、纽约州纽约市，Routledge，第155—168页。http://search.lib.virginia.edu/catalog/u7552559。SILVER, D.、SCHRITTWIESER, J.、SIMONYAN, K. 等（2017），在无人类知识的情况下掌握围棋。《自然》，550（7676），354—359。https://doi.org/10.1038/nature24270。TWO MINUTE PAPERS（2019），DeepMind的AlphaStar：特级大师水平的《星际争霸II》人工智能。https://www.youtube.com/watch?v=jtlrWblOyP4（2019年12月29日）。VINYALS, O.、BABUSCHKIN, I.、CZARNECKI, W. M. 等（2019），运用多智能体强化学习达到《星际争霸II》特级大师水平。《自然》，575（7782），350—354。https://doi.org/10.1038/s41586-019-1724-z。WALDHEIM, C.（2006，33，81—86），近期景观实践中的不确定性策略。《Public》。WIENER, N.（2000），《控制论，或动物与机器中的控制和通信》。第2版，第10次印刷。麻省理工学院出版社，剑桥。ZHANG, Z. & BOWES, B.（2019），景观设计中人工智能（AI）与机器学习（ML）的未来：弗吉尼亚沿海地区、美国案例研究。《数字景观建筑学杂志》，4-2019，2—9。https://doi.org/doi:10.14627/537663001。