

• 专题：合成生命研究前沿的哲学问题 •

编者按：

人工合成生命，曾是科幻性质的隐喻，如今正成为实验室里的现实。当生物学不再满足于“理解已有的生命”，转而“建构可能的生命”，围绕生命本质与人类责任的追问也变得前所未有的现实和紧迫。本专题以“合成生命研究前沿的哲学问题”为题，汇集三篇力作，尝试以若干视角呈现这一变革的轮廓。

赵斌和杨满的“合成生物学实践中的涌现与还原”从工程实践切入，揭示了合成生物学如何以“建构即理解”的逻辑重塑还原论与涌现的经典之争——当生命被拆解为部件、模块与系统，关于实体的形而上学难题，已悄然转化为关于模式与功能的操作问题。冀朋与雷瑞鹏的“镜像生物学的伦理前沿问题”系统梳理镜像生物学的概念性与安全性伦理问题，认为其难以得到伦理辩护，需审慎权衡科技创新与负责任研究。成家桢的“镜像分子与镜像生命的本体论分野”主张，唯有厘清镜像分子与镜像生命的本体论差异，才能避免伦理失焦与治理错配，进而提出分级监管与差异化治理的框架。三篇文章通过对合成生命前沿实践的深刻哲学剖析，展现了人类追问生命本质的新思维，也探索了如何界定人类在其中所担负的创新责任。

(专题策划：赵斌)

合成生物学实践中的涌现与还原

Emergence and Reduction in the Practice of Synthetic Biology

赵斌 / ZHAO Bin 杨满 / YANG Man

(山西大学科学技术哲学研究中心，山西太原，030006)
(Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006)

摘要：合成生物学的发展不仅继承了系统生物学对生命现象的整体性理解方式，更在实践中展现出对还原论理解的新视角。与传统生物学通过细胞、组织、器官等层级划分生命不同，合成生物学以功能实现为目的构建系统，采用部件、模块、系统的工程层级，实现系统行为的设计与控制。区别于哲学视野下围绕不可还原的高阶实体开展的争论，合成生物学实践更关注模式建构的可供性、行为的可预测性、功能的鲁棒性，其建立在“建构即理解”的逻辑上，将关于实体的涌现问题转变为模式的涌现问题，消解了在存在论意义上围绕实体展开讨论的还原论难题，即通过具有“可控复杂性”特征的还原路径，以

基金项目：2022年度教育部重点研究基地重大项目“系统与合成生物学哲学研究”（项目编号：22JJD720018）。

收稿日期：2025年5月19日

作者简介：赵斌（1981-）男，山西临汾人，山西大学科学技术哲学研究中心教授，研究方向为生物学哲学、科技伦理。
Email: zhaobin@sxu.edu.cn

杨满（1997-）男，江西九江人，山西大学科学技术哲学研究中心博士研究生，研究方向为生物学哲学。
Email: yangman1997@126.com

工程思维从底层构筑对于生命系统的理解。

关键词: 合成生物学 还原论 工程 模式涌现

Abstract: The development of synthetic biology not only inherits the holistic framework for understanding life phenomena in systems biology, but also displays a new perspective on reductionism in its practice. Unlike traditional biology, which organizes life into hierarchical structures such as cells, tissues, and organs, synthetic biology constructs systems with the aim of functional realization, adopting an engineering hierarchy of parts, modules, and systems to achieve goal-directed control of systems' behavior. Distinct from the entity emergence emphasized in philosophical discussions—which stress the irreducibility of higher-order properties—the practice of synthetic biology emphasizes pattern emergence, focusing on the affordance of structural construction, the predictability of system behaviors, and the robustness of functional outputs. Rooted in the logic of “to build is to understand”, this approach marks a significant shift from the traditional understanding of reductionism. Rather than rejecting reduction, it reconfigures it through a pathway characterized by “controllable complexity”, using engineering thought to build a bottom-up understanding of life systems.

Key Words: Synthetic biology; Reductionism; Engineering; Pattern emergence

中图分类号: Q-1; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.11.001 CSTR: 32281.14.jdn.2026.11.001

一、生物学中的还原与涌现

在生物学哲学领域,围绕还原论的讨论经久不衰。随着生命科学技术的不断进步,其涉及的话题也历久弥新,大致可划分为本体论的、方法论的以及认识论的还原论。^[1]本体论的还原是指,每一个特定的生物系统(如有机体)都只不过是分子及其相互作用构成的,即,对于所有 x ,如果 x 是一个生物实体,那么存在物理化学成分 y ,使得 y 构成 x ;方法论的还原是指,在分子与生化层面研究生物系统,旨在通过实验发现底层机制,即,对于任意系统 S ,存在组件 $P_1, P_2, \dots, P_n$,并且 $P_1, P_2, \dots$ 与 P_n 共同说明了 S ;认识论的还原是指,高层级知识(如遗传学)可还原为低层级理论(如分子生物学),即,对于任意的 T_1 和 T_2 ,如果 T_1 和 T_2 都是针对同一特定研究对象的理论,并且 T_1 的物理层级高于 T_2 ,那么 T_1 可以简化为 T_2 。本体论还原目前是科学界与哲学界相对比较能够接受的观点,但这种交集只能接受一种弱的版本;方法论还原具有实践意义,但也要面临不同学科的差异问题;认识论的还原则面临着多重问题。^[2]

20世纪中叶,生物学中的还原论争论主要

在逻辑实证主义的框架下展开,聚焦于所谓的“理论还原”(Theoretical Reduction)。按照内格尔(Ernest Nagel)所提出的经典模型,一个科学理论若能被另一个理论所还原,必须满足两项基本条件:其一,存在明确的桥接法则(Bridge Laws),将高阶理论的术语与低阶理论的术语对应起来;其二,高阶理论的命题能够通过逻辑演绎的方式从低阶理论中导出。这一模型在哲学上具有高度的形式化优势,并在物理学的若干案例中获得一定支持(如热力学还原至统计力学)。^[3]

理论还原面临的核心问题在于,不同理论间往往缺乏稳定的术语对应关系,且高阶理论的结构和说明功能难以被低阶理论以逻辑方式完整导出。加之科学实践中常见的模型建构与多元方法,使得形式化的还原要求在经验层面难以成立。因此,哲学界逐步转向关注实际说明策略的“说明还原”(Explanatory Reduction),以更贴近科学实践本身的方式审视还原关系。说明还原的重点不在于理论的逻辑结构是否封闭一致,而在于高阶现象的说明是否可以被低阶机制所取代或充分说明。这种转向标志着该问题进入了一个更为经验导向与实践敏感的阶段。高阶生物学现象,如发育调控、细胞信号通路、适应性行为等,虽然在某

种意义上依赖于分子机制的实现,但这些机制是否能够构成对现象本身的“完整说明”,则成为争议的焦点。

从理论还原到说明还原的转变,不仅是哲学关注重心的迁移,更是方法论视野的拓展。它意味着还原论已从一个关于科学理论之间演绎关系的逻辑问题,逐渐趋向关注科学实践中如何构建合理说明策略的认识论问题和方法论问题。不论是理论还原还是说明还原,生物学还原论的认识论转向是在一定程度上悬置了物理主义本体论还原的争议,但也依然面临着涌现性问题。

在生命现象中存在各式各样的涌现特征,主要有以下方面:(1)模式形成与形态发生。如胚胎发育中由基因调控网络产生的空间图式;(2)代谢稳态与自调控。如细胞通过反馈环路维持稳态,非单一因果链可说明;(3)意识与神经整体性。即使已识别具体神经元功能,意识现象仍显现出整体不可还原性;(4)种群行为与群体智慧。如蚁群协同、鸟群迁徙等。涌现性的概念强调系统整体具有某些性质,这些性质不能被其组成部分的性质所完全说明或预测。这些涌现现象不仅难以通过线性还原来说明,往往还显示出高层级结构对底层动态的调控作用。传统自下而上的研究模式很难应对这一说明难题。对于这种模式来说,必须预设某种实体性的高层级结构或性质,才能调和“整体大于部分之和”的悖论。例如,减数分裂中染色体的分配必须通过细胞学层级的配对-分离机制进行一种整体性说明,如若坚持还原于分子生物学层级,反而会掩盖关键因果结构。^[4]不同的是,似乎关注实践的生物学家们并不热衷于预设那些不可还原的实体,而是从功能实现的视角自下而上地建造生命系统,并形成了关于涌现性问题的不同理解。

二、两种视野下的涌现论

温宁(Jason Winning)和贝克特尔(William Bechtel)提出,哲学家与科学家各自关注的涌现存在明显差异,前者关注存在论意义上的“实

体涌现”,后者关注行为生成与功能实现意义上的“模式涌现”。^[5]

1. 哲学视野下的“实体涌现”

如第一节所述,“涌现”通常被视为对还原论的一种根本性挑战。特别是在20世纪以来对生命整体性、本质与复杂性的讨论中,“实体涌现”(Being Emergence)被赋予了重要的形而上学地位。其核心观点是:某些高阶生物现象——如意识、代谢整体性、物种稳定性或器官功能——尽管依赖于底层物理与化学结构,但具有不可还原为其组成部分的性质。

在这种理解中,涌现不仅意味着复杂性本身的不可简化,更意味着在整体与部分之间存在一种存在论意义上的断裂。换言之,即便我们完全掌握了细胞层面的物理机制,也不能由此推论出器官发育或意识体验究竟为何。正是在这种语境下,生物学中的涌现现象被认为具有某种“不可简化的实在性”,而不能被传统还原论以线性推理方式彻底说明。例如,雷舍尔(Nicholas Rescher)将涌现定义为“一个系统具有其组成部分所不具备的整体属性”,并认为这种属性不是可分解的和演绎可还原的。^[6]金在权(Jaegwon Kim)虽然尝试将涌现性纳入物理主义框架,但仍承认若存在真正的下行因果关系,则其必然挑战物理还原论的闭合性。^[7]即便是被认为持还原论立场的罗森伯格(Alexander Rosenberg)也承认,整体可以具有单个组成部分所不具备的属性,且生物学说明常常需要在不同层级和语境中展开。^[8]

这种以存在论或“实体”为基础的涌现性说明存在不可还原的边界,也确立了生命科学独立于物理科学的说明地位。在实践层面,这类观点也为整体主义生态学、形态发生理论、生物信息本体论等诸多研究方向提供了理论支撑。然而,“实体涌现”观在合成生物学背景下展现出方法论的贫乏,当合成生物学家通过人工设计的方式重构特定的生命行为时,我们是否能够依旧诉诸“不可还原性”来维系对生命的理解?

2. 实践视野下的“模式涌现”

“模式涌现”(Pattern Emergence)旨在描

述系统中可观察的结构性行为或功能模式,这些模式并不取决于系统构成要素的本体论地位,而是源于要素间特定的动态组织方式。相较于哲学上对“实体涌现”的关注,模式涌现更关注结构与行为的生成机制,强调如何从简单规则或组成单元的相互作用中“涌现”出全局性的、有序的或复杂的模式。模式涌现研究的典型例子包括物理学中的超导和相变、化学中的耗散结构、数学中的分形几何、生物学中的形态发生,以及人工智能中的神经网络等。这些研究关注的不是这些模式是否“真正存在”,而是它们如何通过组织与动态过程产生,并具有跨学科的普遍性。例如,生命系统中的形态、代谢、自我调控等功能性特征,都可视为基于局部相互作用和动态约束所形成的模式。

从理论上讲,模式涌现常常被解释为动力学系统中的分岔现象、非线性响应或系统不稳定性。这意味着,模式涌现并非仅是组成部分行为的简单叠加,而是需要引入新的描述层级或约束机制来捕捉系统的整体行为。例如,在非线性系统中,初始条件的微小变化可能引发显著不同的行为模式,这种敏感性和自组织性体现了模式涌现的复杂性。

此外,帕蒂(Howard Hunt Pattee)提出的“语义闭合”(semantic closure)理论进一步揭示了模式涌现在生命系统中的特殊性。帕蒂认为,具有开放演化潜能的生命组织并非单纯由物质动力学过程构成,而是在物质动力学与符号性约束之间形成一种自主的闭合关系:一方面,符号系统必须以物质结构为载体并服从物理定律;另一方面,遗传编码、分类、控制等符号性约束又通过“读写”和解释过程重新进入动力学过程,参与生命功能的组织与调控。因此,生物功能的说明不能仅还原为底层物理动力学过程,还需要引入物质过程与符号约束之间的互补描述。^[9]也就是说,更高层级形成的是一种新的调控模式而非具体的实体,跨层级的模式涌现并不会在围绕实体的还原论争论中导向一种反还原论立场。

总体而言,模式涌现强调从组织结构、动态过程与信息控制的结合中把握生命系统的行

为模式。这一视角规避了围绕实体的反还原论诘难,不仅拓宽了科学说明的边界,也为生命科学、工程和人工智能等领域的跨层级建模和系统集成提供了理论支撑。合成生物学实践突出体现了模式涌现的思维,以工程学的“建构即理解”(to build is to understand)理念筑基,通过主张具有实践意味的模式涌现摆脱了围绕实体的还原论面临的说明难题。

三、合成生物学实践中的功能还原路径

1. 整合多元论视角下的还原论

无论是本体论的还原论抑或方法论的还原论,其核心在于将复杂现象拆解为更低层级的要素与可控的局部机制,并以线性因果的方式进行说明。这一策略曾经在分子生物学中取得了巨大的成功,尤其体现在对基因表达调控、蛋白质合成路径等的机制性揭示方面更加突出。然而,随着研究对象向更高系统层级扩展,尤其在涉及细胞信号网络、代谢调控回路与多细胞协作行为时,单线性因果链条无法充分说明整体行为的动态表现。

系统生物学在此基础上发展出一种新的还原方法,即以整体建模为目标,将系统视为多组分非线性交互系统,其中功能属性通过跨层级的相互作用涌现。这种从整体结构出发,辅以底层机制分析的策略,正是一种整合多元论^[10]视角下的还原。在这一逻辑下,还原性不再意味着对整体属性的直接演绎,而是转化为对系统中关键变量与反馈路径的识别与整合。通过计算机模拟(如“硅细胞模型”)与非线性方程组的迭代求解,系统生物学能够在给定边界条件与参数值的前提下,对系统行为做出条件性的预测。这类预测并非传统物理学意义上的决定论预言,而是一种建立在复杂因果网络之上的可模拟推导(Simulation-based Derivation)。

在此意义上,对于同层级和跨层级“涌现”的模式整合构成了一种还原的思路,即在不否定实体可还原的前提下,在特定模型结构中,通过非线性叠加模式或规则,实现具有可控边

界的系统的可说明性。桂起权曾指出,“生命的涌现性质是按线性叠加方式不可计算,但按非线性方式则是有条件地可计算”。^[11] 这种思路为还原论开辟了全新的哲学空间。

正是在这种可整合的还原论基础上,合成生物学借助系统生物学方法和工程理念,自下而上地整合生物学部件,构建生物系统,用重构合成的办法寻找系统要素相关性背后的因果关系——如果能够从头构建一个细胞(或者其他层级的生命系统),那么成功构建细胞就是我们理解细胞的组织原理与运行法则的直接证明。^[12]

综上,合成生物学实践中面临的所谓“涌现”实际上是“模式涌现”,即,一种系统行为或动态结构是由多个元件相互作用的结果,虽不必诉诸新实体的诞生,却能够在整体层面呈现出新颖、可识别的行为图式。因此它不必卷入围绕实体的还原论与反还原论争论。

2. 实体的还原与模式的“涌现”

合成生物学的工程属性以功能可实现性(implementability)为目标,其建构过程强调的不是实体性,而是结构性行为模式的可控生成。如图1所示,“双稳态开关”(toggle switch)^①的设计,并不在于模拟自然中具体的基因开关系统,而是构造一种可在人为调控下维持并切换状态的行为模式。同样,“抑制振荡器”(repressilator)并非旨在重构自然界的某一机制,而是验证基因调控网络中如何产生自发的周期性振荡(图2)。无论系统所用部件是否源于自然,它们的部署策略是生成一种系统性行为,即可识别的动态模式,而非某种有机“实体”。从构成要素考量,二者符合实体上的连续性(构成要素重叠),但在模式上呈现出非线性的关系。

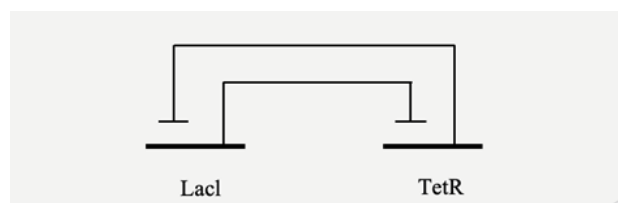


图1 “双稳态开关”示意图

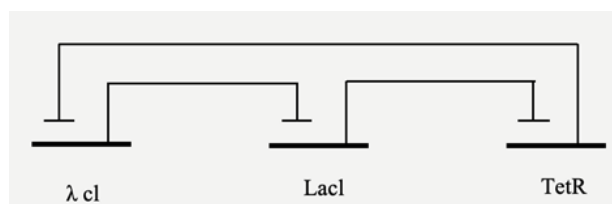


图2 “抑制振荡器”示意图(λ cl是一种转录抑制因子)

同时,合成生物学的研究范式本身也高度契合“模式涌现”的理解路径。它所关注的问题并非某个高阶属性是否为某一“真实实体”的特征,而是系统能否在特定参数与接口结构下运行出稳定的输出模式。其评判标准不是本体论上的真实性,而是模型构建的可供性、行为的可预测性、功能的鲁棒性。

这一点也体现在设计语言与建模逻辑之中。合成生物学采用如合成生物学开放语言(Synthetic Biology Open Language, SBOL)、系统生物学标记语言(Systems Biology Markup Language, SBML)等标准语言来表述元件组合与行为输出(SBOL用于描述合成生物系统中遗传构件及其模块化组合关系,SBML用于表达这些系统在生化反应网络中的动态行为与模拟逻辑),其目标并非描述世界“真实的构成”,而是描述系统“如何表现出可预测行为”。这类标准化建模强调的是“从结构到行为的映射规则”,而非从部分到整体的因果追溯。系统是否具有自然生物的复杂结构并不重要,关键在于它是否展现出预定的行为图式。

由此可见,在合成生物学中,涌现从一个形而上学命题转化为一个工程学问题:我们是否能够构建出某种复杂行为模式,并保持其在不同条件下模式构建的可供性、行为的可预测性、功能的鲁棒性。这也意味着,合成生物学在处理“复杂生命现象”时,并未诉诸预设不可还原的高阶实体,而是将注意力集中在模式的生成机制、反馈结构、网络拓扑与行为表现等可被建构与验证的层面上,也使得围绕实体的还原论依然有效。

3. 追求“可控复杂性”的功能还原

合成生物学以控制复杂性为目的进行系统

① LacI指乳糖操纵子阻遏蛋白, TetR指四环素阻遏蛋白,“T”型线代表生物学中的抑制作用,下同。

建构,关注模式的“涌现”与相应功能的实现,也依赖系统在物理主义层面上的可还原性。在这种实践框架中,复杂性不再被视为不可还原性的哲学依据,而被看作可以被设计、调控与优化的行为层级——合成生物学家们关心的,不是“我们是否真正理解复杂性从何而来”,而是“我们是否能够构建出可控的复杂系统行为”。

合成生物系统中的复杂性主要体现为多个模块之间的非线性交互、反馈耦合以及外部信号依赖行为的生成机制。这种复杂性并不诉诸生物自然进化的历史性说明,而是通过模块组合与系统拓扑优化被人工“制造”出来。例如,复杂的逻辑电路(如AND、NAND、NOR门)在工程细胞中可由一组调控元件构成,通过设计合理的感应器-调控器架构,实现对多个输入信号的联动响应。系统行为的复杂性,不是自然演化赋予的,而是通过设计所构建出的动态图式。代表性案例包括合成细菌群体系统中的“协同模块设计”策略:将多个功能单元分布于不同细胞中,通过群体感应机制(如AHL信号)进行横向耦合,使得整体系统展现出比单元模块更高阶的振荡、分工、反馈等群体行

为。^[13]这类行为的生成,显然不源于某种实体上的“新生”,而是源于结构关系与信息流控制的“模式建构”。系统的复杂性在此被视为一种可分解、可拼接、可调节的行为特征集合,其目标不是重建自然,而是模拟模式、控制输出。

以更为典型的“人工合成智能细菌”为例,^[14]为建造集污染物检测、自动降解与自我销毁能力于一体的工程细菌,开发团队需要使该细菌无需外源诱导,即可按照预设的时间顺序完成一整套复杂的任务逻辑,其中包括从感知输入到功能响应再到系统自毁,实现功能闭环。由于其行为完全由人造模块与调控路径构成,体现出高度可控的系统功能整合能力。功能构造如图3所示。

这种模式体现了合成生物学对“控制”的强烈诉求。其复杂功能并非出自某一基因或通路的“特殊性”,而是三种行为模块在输入-输出关系与时间耦合中的协同展现。从外部观察者角度看,该系统拥有“理解环境-处理目标-自我了断”的类智能行为,似乎具备生命系统中的目的性与情境感知能力。但这一涌现并非本体实体之生成,而是一种通过结构设计实现的行为图式,是合成生物学实践中典型的“模

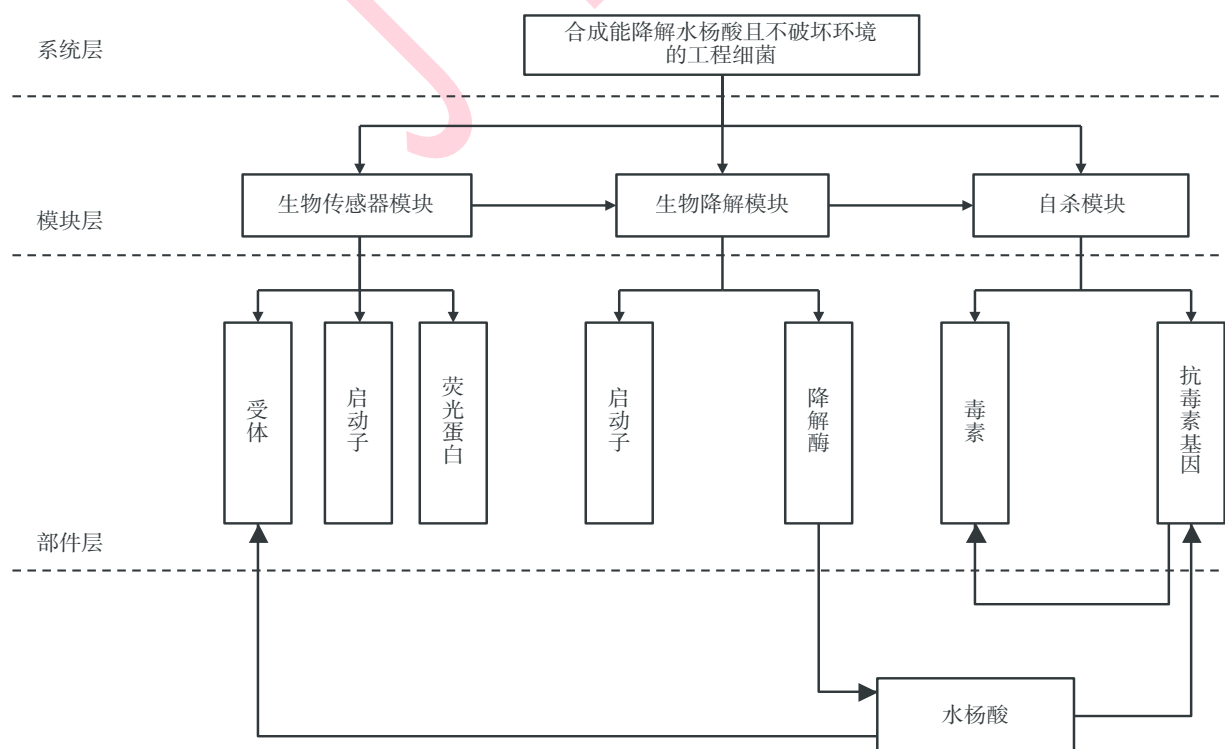


图3 人工合成智能细菌降解水杨酸流程图

式涌现”。系统行为的复杂性不再是不可说明的自然谜题，而是可编程的设计结果，其“智能性”并非演化所得，而是结构逻辑作用的产物。这种将系统复杂性等同于控制性结构的策略，正是合成生物学实践中的主流逻辑：一个系统是否成功，并不取决于它是否忠实还原了自然生命的演化历史，而在于它是否可以在设计约束下表现出特定的行为模式，且该模式在多重扰动条件下具有稳定性、可预测性与功能实现性。

此外，在当前的无细胞系统（Cell-free Systems）、合成群落（Synthetic Consortia）与通过DNA折纸技术（DNA Origami）开发出的纳米机器人等前沿方向中，我们看到“涌现”的使用场景已经彻底转化为构型控制与输出预测的问题。DNA计算结构中的轨道移动、逻辑运算与时间延迟反馈，乃至微尺度药物运输系统中的行为感应与反馈释放，都是在模拟系统层级的行为特征。对新模式“涌现”的探索与功能的还原在这种方式下同时成立。

综上所述，合成生物学实践中的“模式涌现”并不会导向一种物理主义还原论主张，它强调复杂生命行为不再需要诉诸高阶实体的神秘属性来说明，而是通过同层级或跨层级功能模块单元的合理部署，实现特定行为模式的可实现性、可预测性与鲁棒性。在这种实践框架中，涌现性的问题得以从存在论的哲学对抗中抽离，由此规避了对物理主义还原论的直接否定。合成生物学中的“模式涌现”不仅揭示了一种新的工程化认识路径，也标志着一种追求“可控复杂性”的功能还原策略能够有效填补以往还原论在认识生命复杂性方面的不足。

四、工程语境下的合成生物学还原论策略

合成生物学以设计、重构和建造人工生物系统为目标，其核心理念是“设计-建构-测试-学习”（Design-Build-Test-Learn, DBTL）的循环上升。这一方法论显著区别于哲学更注重的观察-说明模式，它以工程意义上的可实现性为认识论前提，强调通过对系统中关键变量、

调控模块与反馈回路的建构性操控，实现功能性生命系统的自下而上生成。

在这一过程中，系统生物学所提供的非线性模型提供了基础方法论框架：科学家并非孤立地操控单一基因，而是在网络层面重构基因表达的动力学模式。这种模式的构建并不依赖于线性因果链条，而是利用反馈调节、信号转换、逻辑门控等机制实现系统功能的“协同涌现”。这种建构性操作正是整合还原论的工程化表达。

合成生物学的特殊性在于，其对某一生物功能的充分说明，往往以是否能够建构出与自然对象同等级、同效力的功能系统为标的。这种思路反映出一种新的说明还原论原则，即，若某种功能或现象可以通过操控关键机制与网络结构被重构出来，则意味着对其形成了模式上的理解。这种“建构即理解”的思想体现了还原论的实践面向，将说明的过程嵌入构建生命系统的行为之中。

1. 从构造简化走向系统整合

在生物学中，生命系统被划分为细胞、组织、器官、个体等层级，这种划分模式不仅体现了生物体在形态与功能上的自然演化顺序，也承载着一种本体论的层级假设，即高阶生命现象以嵌套方式建立在下层结构之上。这是一种基于自然类的构造简化逻辑，一方面为建立还原论的理解提供了方向，另一方面也通过“整体到部分”的路径呈现了生命复杂性图景。

而在合成生物学中，自然层级被基于特定工程目的功能性层级系统所替代。按照“部件-装置-系统”（Part-Device-System）的三层级乃至更多层级结构构建工程蓝图，合成生物学家们按照模块化的设计语言来描述生命系统。具体而言：部件（part）是最小的可标准化单位，常包括启动子、编码区、终止子等DNA序列；装置（device）或模块（module）是由若干部件构成的执行单元，如逻辑门、感应器或代谢通路；系统（system）或回路（circuit）指多个模块之间的互连网络，可完成逻辑计算、信号响应、程序性表达等复杂功能。在这一路径下，生命不再是自然演化所塑造的结构部件集合，

而是一系列可定义、可操作的功能模块的组合。这种分层显然不是对自然层级的简单临摹,而是一种面向设计与实现的工程性还原策略。它关注的核心问题不是生命“如何自然存在”,而是“如何设计与实现等效的功能”。生命在这里被转译为“可实现的工程化系统”,是以功能实现为导向的系统模块整合,而不再是基于自然类的构造简化。正如海内曼(Matthias Heinemann)和潘克(Sven Panke)所指出的,合成生物学通过将系统拆解为零件、模块和网络,建立起一个“自上而下的工程设计流程”,以替代传统自下而上的结构-功能追踪方法。^[15]

如前所述,人工合成智能细菌案例即体现了这种由构造简化向系统整合的转向,该系统由三个独立但逻辑关联的模块组成:污染物感知模块负责启动系统响应;生物降解模块在静止期启动酶表达处理污染物;自毁模块则在污染物被清除后激活杀伤机制终结该系统。每个模块各自独立运行条件明确,行为路径分明,但其组合却形成了具备时序执行能力的复杂系统行为。

从哲学上看,这种方式带有“工具主义”的特征,是一种工具图谱下的系统整合,所要实现的是自然甚至非自然的功能,而非对自然结构的复刻。那些被人为划分为可组合、可交换的功能单元的装置平台,不追求符合本体论意义上的“自然实在”,而是以是否具有“可供性”“可预测性”“鲁棒性”为衡量标准。事实上,合成生物学的核心特征之一正是将生命实体视为可以被抽象化为“标准接口”的工程系统并加以整合,而非被还原为自然分类中的对象集合。

2. 从自然因果还原走向功能可实现性的还原

在以往还原论中,说明通常意味着对自然现象进行拆解、归因与建模,其理想状态是构建一个理论架构,使得某一生命过程可以通过不同实体间的因果机制进行推理。而在合成生物学中,跨自然层级的因果链条显得不那么重要,重点是将生命的功能通过人工合成方式实现出来,以此形成关于“生命何以可能”的说明,即“构建即理解”。在这一逻辑下,特定生命过程是否被“理解”,并不取决于我们是否拥

有完备的理论说明,而在于我们是否能够成功地重构该过程在整体上的功能表现。

这一观点最早由恩迪(Drew Endy)提出,并被广泛接受为合成生物学的基本信条。他认为,若科学家能够以人工方式构建出具备期望行为的生物系统,并实现其预设功能,那么这本身就是一种对该系统的“深度理解”。^[16]这种建构式说明逻辑背后体现的是一种实践可验证的认知标准:真正的理解不是“知道是什么”,而是“知道如何做出”。

在合成生物学中,每一个部件或模块并不需要完全透明的机制化说明,只要其输入-输出特性可以被标准化地描述,即可作为组件参与系统构建。这种部件的“行为描述”替代了传统意义上的“因果描述”,说明的目标也随之由“何以如此”转向“何以实现”。例如,SBOL作为合成生物学标准描述语言,其核心设计逻辑是记录元件的结构、连接关系及行为规范,而并不包含说明性的机制变量。这种“构件-规则-行为”模型显然是从工程设计角度出发的说明体系。又如上文人工合成智能细菌的案例中,系统中的自毁机制并非自然演化所赋,而是通过对毒素-抗毒素表达时序的设定,赋予系统一种“任务完成后退出”的逻辑决策能力。说明其行为的关键不在于追问“为何自然中会出现这种机制”,而是理解“为何这样的设计可有效实现目标”。这种从对自然因果的还原转向对目标行为模式可实现性的还原,标志着合成生物学的认识论重心由自然机制复现迁移至工程操作实现。也就是说,如果能通过某些其他方式再现这些复杂行为,那就意味着科学家对其基本机制具有了“可操作的理解”。这类实践使得我们对生命的说明进一步拓展到了可能世界,将科学的理解活动与技术的实现活动高度耦合。

总的来说,合成生物学更关注工程机理的正向理解:它用“能否构建并运行”来取代“能否逻辑还原并推理”,用“行为模式的可实现性”来取代“自然机制的复现”。

3. 从理想模型走向拼凑迭代

合成生物学的探索表现为拼凑(kludging)

与迭代 (iterativity) 的过程。这一现实使得合成生物学对生命的“还原”，呈现出一种混合了经验修补与迭代调试的循环上升过程。正如阿加帕基斯 (Christina M. Agapakis) 指出的，合成生物学的知识生成往往并非源自预设理论模型，而是通过实践中“构建-观察-调整”的过程逐步形成理论理解。^[17] 这种实践导向的“后理论路径”打破了自然科学中“理论先行-验证后行”的规范图式，其标准是“运行起来”而非“说得通”。

首先，拼凑性是合成生物学不可避免的正常策略。奥马利 (Maureen O'Malley) 借用 kludging 一词，揭示了合成生物系统往往不是出于一套完整而优雅的理论设计被建成的，而是在资源、知识、技术等局限下，通过反复修补与临时拼接实现的工程成品。^[18] 这意味着模块之间往往存在接口不匹配、参数干扰、非线性交互等问题，研究者需要依赖经验性手段调节每个部件的表达强度、耦合方式、反馈机制等。

以青蒿素前体合成通路为例，该通路最初在大肠杆菌中难以高效运行，研究团队不得不通过一系列非标准策略进行修补（如优化启动子序列、调整酶的表达顺序、引入蛋白支架以实现空间共定位等），最终系统能运行，并非因为有完整理论模型支持，而是因为一系列“够用就行”的工程策略在特定条件下奏效了。^[18] 这种实践思维颠覆了传统科学中“精致结构=正确说明”的观念，而更接近“有效性就是合理性”的工程思维。

其次，迭代特征表明合成生物系统的构建很少是一蹴而就的过程，它往往遵循 DBTL 的迭代循环。每一次构建都带来新的数据反馈，这些数据又反过来修正原始设计或理论假设。人工合成智能细菌的开发过程中，三大模块之间的信号传递与表达强度并非天然协调，而是在设计与测试的迭代循环中逐步形成。例如，生物降解模块的表达启动依赖于静止期启动子 P_fic 的使用，其筛选与验证过程就经历了多轮调整，确保其与前一阶段的感知模块在时间上实现适当“交棒”，避免信号过早或过迟。这种通过实验反馈调整设计结构的工程节奏，正

是合成生物学的真实实践逻辑，也体现了“构建即理解”所必须依赖的经验性迭代过程。

这种迭代过程较之以往的科学理论迭代模型有相似之处，但不同在于，后者是一种被动过程，而前者是一种人为驱动的，面向各种可能性的矫正过程。事实上，许多合成系统的成功构建本身并不依赖于已有的理想建模，而是在反复调整-测试过程中形成了对参数、行为与系统调控的“经验性理解”。^[18] 此外，在迭代过程中还伴随着探索性目的，研究者往往不是从一个清晰明确的目标出发，而是通过在模块的不同组合间测试筛选，寻找在特定条件中表现最优的构型，更接近于工程设计中的参数空间搜索与演化优化。

五、结语：走向实践的还原论

合成生物学所带来的不仅是科学方法的技术革新，还有对生命哲学中涌现与还原问题的重新思考。哲学视野下的“实体涌现”强调高阶属性在存在论意义上的不可还原性，主张实体的整体性、层级性、历史性。这一视角在说明生命的生成性、自组织性与意识性等现象时具有不可替代的哲学洞察。而合成生物学实践中还原论探索的关切点是系统行为模式的可供性、行为的可预测性、功能的鲁棒性。这种“构建即理解”的逻辑是对以往还原论的发展。它并不否定存在论意义上围绕实体的还原，进一步以工程思维从底层构筑对生命系统的理解。这也正是奥马利所指出的“合成生物学中的知识不来自理论，而来自构建过程本身的验证”。（[18], p.409）

由此出发，可以提出一种基于合成生物学实践的还原论立场——实践的还原论，即，对于任意自然系统 S，存在某一人工系统按照部署策略模式 T 等效实现 S 在特定情境 C 中的功能，那么 T 提供了 S 在情境 C 下的说明。这种还原论并不关注存在论意义上的“自然实在”，而是以功能实现为导向进行结构搭建；不是以还原为低层级物理化学说明为目标，而是以实现特定系统行为为目标的工程活动。这种还原

论是温和的,因为它并不宣称获得了有关真实自然的终极答案;它也是工具性的,因为它始终服务于系统控制与功能生成的技术目标。

合成生物学在系统构建与功能实现的层面上引入了对整体性行为的多元整合逻辑,并在此基础上对方法论还原与认识论还原的因果机制探索传统进行了拓展。因此,实践的还原论并非取代了其他还原论,而是与其他类型形成了互补性说明,也促使我们重新思考“还原”这一概念本身的内涵,它不仅是理论上的“说明归约”,还是关于某种系统行为模式何以可能的知识探索。在当前生物与信息融合(BT与IT融合)的研发大背景下,合成生物学所体现的信息化生命观、语义闭合逻辑与行为控制策略,也为进一步理解生命本质提供了有效的还原路径。实践的还原论显著拓展了传统还原论的认识论疆界,使“如何理解生命”这个问题具有了实践意蕴。

[参考文献]

- [1] Brigandt, I., Love, A. 'The Stanford Encyclopedia of Philosophy: Reductionism in Biology'[EB/OL]. <https://plato.stanford.edu/entries/reduction-biology>. 2025-05-19.
- [2] 王巍. “还原”概念的哲学分析[J]. 自然辩证法研究, 2011, 27(2): 8-13.
- [3] Nagel, E. *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*[M]. New York: Harcourt, Brace & World, 1961, 351-354.
- [4] Kitcher, P. '1953 and All That. A Tale of Two Sciences'[J]. *The Philosophical Review*, 1984, 93(3): 335-373.
- [5] Winning, J., Bechtel, W. 'Being Emergence vs. Pattern Emergence: Complexity, Control, and Goal-directedness in Biological Systems'[A], Gibb, S. C., Hendry, R. F., Lancaster, T. (Eds.) *Routledge Handbook of Emergence*[C], London: Routledge, 2019, 134-144.
- [6] Rescher, N. *Complexity: A Philosophical Overview*[M]. New Brunswick, NJ: Transaction Publishers, 1998, 1-2.
- [7] Kim, J. 'Making Sense of Emergence'[J]. *Philosophical Studies*, 1999, 95(1-2): 3-36.
- [8] Rosenberg, A. *Darwinian Reductionism: Or, How to Stop Worrying and Love Molecular Biology*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2006, 11-15.
- [9] Pattee, H. H. 'Evolving Self-reference: Matter, Symbols, and Semantic Closure'[A], Pattee, H. H., Rączaszek-Leonardi, J. *LAWS, LANGUAGE and LIFE: Howard Pattee's Classic Papers on the Physics of Symbols with Contemporary Commentary*[C], Dordrecht: Springer, 2012, 211-226.
- [10] Mitchell, S. D. 'Integrative Pluralism'[J]. *Biology and Philosophy*, 2002, 17(1): 55-70.
- [11] 桂起权. 解读系统生物学: 还原论与整体论的综合[J]. 自然辩证法通讯, 2015, 37(5): 1-7.
- [12] “中国学科及前沿领域发展战略研究(2021-2023)”项目组. 中国合成生物学2035发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2023, 112-113.
- [13] Trosset, JY., Carbonell, P. 'Synergistic Synthetic Biology: Units in Concert'[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2013, 1: 11.
- [14] Liu, H., Zhang, L., Wang, W., et al. 'An Intelligent Synthetic Bacterium for Chronological Toxicant Detection, Biodegradation, and Its Subsequent Suicide'[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(20): 2304318.
- [15] Heinemann, M., Panke, S. 'Synthetic Biology—Putting Engineering Into Biology'[J]. *Bioinformatics*, 2006, 22(22): 2790-2799.
- [16] Endy, D. 'Foundations for Engineering Biology'[J]. *Nature*, 2005, 438(7067): 449-453.
- [17] Agapakis, C. M. 'Designing Synthetic Biology'[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2013, 2(9): 431-437.
- [18] O'Malley, M. A. 'Exploration, Iterativity and Kludging in Synthetic Biology'[J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2011, 14(5): 406-412.

[责任编辑 王巍 谭笑]