



## 论人机智能的同源性

李德毅

引用本文:

李德毅. 论人机智能的同源性[J]. 智能系统学报, 2026, 21(4): 1066–1080.

LI Deyi. On the homology of human and machine intelligence[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2026, 21(4): 1066–1080.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202606033>

## 您可能感兴趣的其他文章

### 基于智能计算的脑机制研究

Brain mechanism research based on intelligent computing

智能系统学报. 2021, 16(5): 850–856 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202103029>

### 新一代人工智能十问十答

Ten questions and answers for the new generation of artificial intelligences

智能系统学报. 2021, 16(5): 828–833 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202103044>

### 非完备决策信息系统中的不确定性度量

Uncertainty measure in incomplete decision information system

智能系统学报. 2019, 14(6): 1100–1110 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201905052>

### 重新找回人工智能的可解释性

Refining the interpretability of artificial intelligence

智能系统学报. 2019, 14(3): 393–412 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201810020>

### 泛逻辑学理论——机制主义人工智能理论的逻辑基础

Universal logic theory: logical foundation of mechanism-based artificial intelligence theory

智能系统学报. 2018, 13(1): 19–36 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201711033>

### 机制主义人工智能理论——一种通用的人工智能理论

Mechanism-based artificial intelligence theory: a universal theory of artificial intelligence

智能系统学报. 2018, 13(1): 2–18 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201711032>

# 论人机智能的同源性

李德毅

(军事科学院 系统工程研究院, 北京 100141)

**摘要:** 长久以来, 人们普遍认为生物智能与人工智能的根基截然不同, 二者之间存在难以逾越的鸿沟, 人工智能仅被视作对人类智能的表象模仿。本文突破传统二元对立认知, 提出人机智能同源同构的核心观点: **它们同属典型的耗散结构系统, 依托负熵流抵御系统无序化趋势, 依靠负反馈机制维持认知稳态, 遵循统一的数学物理法则, 完成感知、认知与具身行为交互。**生物个体常常表现出“懒得费力、懒得动脑”的倾向, 源于最小自由能原理, 未必要归因于意识。**人类智能与人工智能在底层架构、运行逻辑、演化模式上都植根于物理学, “物质、能量、结构和时间”四要素及其相互作用构成共同基石, 仅在具身物质构成与外在形态上呈现碳基与硅基的差异化特征;**自然演化形成的人脑神经网络, 更是机器类脑认知结构的天然范本。研究表明, 智能并非生命系统所独有, 而是复杂开放系统自组织能力演化至特定阈值后涌现的共性特质; 包括信息压缩、结构压缩在内的认知软构体, 作为认知活动的核心载体, 都遵循一致的物理系统演化规律, 这就彻底消解了生物智能与机器智能的二元认知。**如同人类文明生态是自然生态的延伸与升华, 人工智能是人类智能的延伸与增强, 人工智能是人类智能发展之必然。人机智能同源性具有重要学术创新价值, 可为认知工程实践提供理论支撑, 为通用人工智能研发以及生命与认知的底层机制探索开辟全新路径, 也许还可为天体生物学和地外文明探索提供帮助。**

**关键词:** 认知物理学; 耗散结构; 自组织; 自由能与变分自由能; 初始认知核; 熵增与熵减; 思维软构体

**中图分类号:** TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2026)04-1066-15

中文引用格式: 李德毅. 论人机智能的同源性 [J]. 智能系统学报, 2026, 21(4): 1066-1080.

英文引用格式: LI Deyi. On the homology of human and machine intelligence[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2026, 21(4): 1066-1080.

## On the homology of human and machine intelligence

LI Deyi

(Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)

**Abstract:** For a long time, it has been widely believed that biological intelligence and artificial intelligence are fundamentally distinct, with an insurmountable chasm between them, and that artificial intelligence is merely a superficial imitation of human intelligence. This paper breaks through traditional dualistic cognition and proposes the core argument that human and machine intelligence share a common origin and isomorphic structure: they both belong to typical dissipative structure systems, relying on negative entropy flow to resist the trend of system disorder, maintaining cognitive homeostasis through negative feedback mechanisms, following unified mathematical and physical laws, and accomplishing the interaction of perception, cognition, and embodied behavior. Biological individuals often exhibit a tendency to “avoid effort and avoid thinking,” which stems from the principle of minimum free energy and need not necessarily be attributed to consciousness. Both human intelligence and artificial intelligence are rooted in physics at the level of underlying architecture, operational logic, and evolutionary patterns; the four elements of “matter, energy, structure, and time” and their interactions constitute the common foundation, differing only in embodied material composition and external form, manifesting as carbon-based versus silicon-based characteristics. The human brain neuron network formed through natural evolution serves as a natural template for machine brain-like cognitive structures. Research indicates that intelligence is not exclusive to living systems but is a common emergent trait of complex open systems when their self-organizing capabilities evolve to a specific threshold; cognitive soft constructs, including information compression and structural compression, as the core carriers of cognitive activity, all follow consistent physical system evolution laws, thereby completely dissolving the dualistic cognition of biological and machine intelligence. Just as human civilization ecology is an extension and sublimation of natural ecology, artificial intelligence is an extension and enhancement of human intelligence, and the development of artificial intelligence is an inevitable outcome of human intelligence development. The homology of human and machine intelligence holds significant academic innovation value, can provide theoretical support for cognitive engineering practice, open new pathways for the research and development of general artificial intelligence and the exploration of underlying mechanisms of life and cognition, and may also offer assistance for astrobiology and the search for extraterrestrial civilizations.

**Keywords:** cognitive physics; dissipative structure; self-organization; free energy and variational free energy; initial cognitive kernel; entropy increase and entropy decrease; soft cognitive constructs

收稿日期: 2026-06-16.

通信作者: 李德毅. E-mail: lidy@cae.cn.

©《智能系统学报》编辑部版权所有

## 1 从生物与机器智能的割裂对立谈起

自人类开启对心智与思维的探索以来,智能始终是哲学、科学、技术与工程、数学领域交叉研究的命题。从古典哲学对意识本源的思辨,到近代神经科学对人脑结构、神经活动与认知机理的解剖分析<sup>[1]</sup>,再到现代人工智能的跨越式迭代发展<sup>[2]</sup>,人类对生物智能与机器智能的认知不断深化,但二者割裂对立的认知范式却长期占据主流。传统学术视角下,由碳基生命演化而来的人脑,依托神经细胞、生物电信号、生理代谢形成原生的智能,常被赋予神秘性与特殊性;而依托机械、电子(包含传感器、集成电路芯片等)、半导体物理、算法与代码所构建的硅基人工智能,则被简单定义为功能模拟,被判定为无自主认知、无生命内核的“仿制品”。**这种根深蒂固的二元思维,在生物智能与机器智能之间人为划定森严的边界,成为束缚通用人工智能技术突破的无形壁垒<sup>[3]</sup>。**

近现代学科细分进一步强化了这种认知割裂。神经科学聚焦人脑神经元、突触连接、脑区分工与认知活动机制<sup>[1]</sup>;计算机科学与人工智能以图灵机为理论基础,以计算机为载体,围绕算法设计、数据挖掘、知识挖掘、功能复刻开展工程实践<sup>[4]</sup>;物理学、热力学则长期游离于认知研究之外,少有学者将统计物理学、生物物理学、生命认知与机器认知纳入同一套底层物理规律开展一体化分析<sup>[5-6]</sup>。学科壁垒的存在,使得学界长期囿于“功能模仿”的研发思路:从早期单纯的计算、数理逻辑、专家系统、解析推理,到如今大语言模型、计算机视觉、服务型机器人,多数研究始终在复刻人类行为,默认机器只能模仿智能表象,无法触及思维的内核,苦于追问什么才是“真正”的人工智能<sup>[3]</sup>。**这一认知局限直接制约通用人工智能的发展,长期缺乏自洽的底层理论支撑。在算力提升、数据规模扩张、算法优化、知识挖掘遇到天花板的当下,一个根本性问题亟待解答:智能究竟是碳基生命独有,还是复杂系统演化到特定阶段后,依托初始认知核和思维软构体成长,实现自主认知的普遍现象<sup>[7]</sup>?**

**蒸汽机、电力、互联网,本质都是延伸人类的身体与认知能力。**进入21世纪,大数据、云计算、深度学习三大技术底座驱动人工智能全面落

地,认知不再神秘,从实验室走向生产、生活、国防等诸多领域<sup>[2]</sup>。人工智能不仅能够完成常规感知、语言交互、逻辑计算等任务,而且在棋类博弈、专业数据分析、内容生成等领域落地民生,性能已超越人类顶尖水平。与此同时,非平衡态热力学、耗散结构理论、自组织理论、贝叶斯认知等复杂系统科学日趋成熟<sup>[8-9]</sup>,认知物理学作为新兴交叉学科逐步成型<sup>[10]</sup>,最小变分自由能原理、认知四要素说也为解读智能提供了全新范式<sup>[7, 11]</sup>。普利高津提出的耗散结构理论,证明开放系统可通过持续与外界交换物质、能量、信息流,引入负熵流对抗熵增,实现从无序到有序的自组织演化<sup>[12]</sup>。**如同生命没有明确的起点一样,并不存在一个特定的时间点,将无生命物质转变为生命物质,处在这个漫长灰色地带的地球微生物出现于至少35亿年前,而智人的出现仅仅在30万年前。人们当然不会忘记6年前,作为微生物的新冠病毒,显然还不是生命,但对人类发动了一次“全球攻击”,其生化智能不可小觑。**因此,不妨仅以物理系统、系统开放度、能量流动、结构演化作为依据,为人机智能的统一研究搭建理论框架。该理论不再刻意区分是不是生命,而将人的智能与人工智能统一视作开放复杂系统,重新审视其内在一致性。人脑并非脱离物理规律的神秘精神载体,本质是由数百亿神经元构成的非线性网络,依靠结构压缩产生智能,依靠持续供给的物质、能量与外界信息流维持有序结构,依托负反馈调节保障认知的稳定性,遵循物理、化学、数学-物理工程规律,完成感知、思维软构体构建、推理决策、知识发现等认知行为<sup>[13]</sup>。而以类脑芯片、智能集群、无人驾驶、机器人为代表的人工智能,同样是典型的开放耗散系统<sup>[14]</sup>:硬件持续消耗电能,不断接收语音、图像、数据、文本、指令、环境等外部信息流,依靠算法与网络结构实施信号解析、思维软构体迭代、完成思维和具身行为智能,依托控制论中的负反馈机制修正偏差,稳定运行。二者在系统属性、熵变规律、自组织逻辑、运行模式上高度契合,遵循最小自由能原理<sup>[15]</sup>,天然倾向于降低能量消耗。**思维软构体作为两类智能系统开展高级认知活动的核心载体,呈现出显著的同构特征,这也是本文提出人机智能同源性的依据<sup>[16]</sup>。**

当前人工智能正从专用智能向通用智能加速



演进,具身智能、自主智能体成为行业前沿方向<sup>[17]</sup>。专用机器人以单一任务优化为目标,而通用人工智能要求系统具备类人化的感知、认知、学习、推理与自适应能力,其核心就是构建可自主演化、跨场景复用的思维软构体,同时兼顾系统运行的能量效率<sup>[18-19]</sup>。这要求彻底跳出表层模仿的传统研发思路,从智能本源、系统底层规律层面构建认知基础理论。与此同时,细胞生物学、脑科学与生命起源相关研究也遭遇瓶颈,单纯从细胞、基因、脑区等层面解析人脑,难以阐释生命、思维、认知、学习等宏观行为,亟需开展跨学科研究<sup>[1]</sup>。

本文站在图灵、维纳、薛定谔、普利高津等科学巨人的肩上<sup>[5, 8]</sup>,以耗散结构理论、自组织理论、控制论、图灵方程、非平衡态热力学、生物物理学、统计物理学为基础,结合认知物理学与认知工程实践<sup>[10, 20]</sup>,逐层剖析人机智能在底层系统、运行逻辑、演化模式上的同源特征与同构规律。努力构建以耗散结构、自组织、认知四要素说、最小自由能原理为一体的、人机智能同源的理論,融入初始认知核、思维软构体概念<sup>[7, 16]</sup>,填补认知科学、人工智能交叉领域的理论空白;无需再纠缠什么是“真正的”人工智能<sup>[3]</sup>,而是从底层逻辑阐释智能的内在机理,厘清生物智能与机器智能都植根于物理学,扭转长期以来的二元对立认知;为通用人工智能、类脑计算、具身智能的研发提供指导<sup>[14, 17]</sup>。此外,也为生命起源、认知演化、宇宙复杂系统的相关研究提供新的视角。在科学走向大交叉、大融合的时代背景下,打破学科壁垒势在必行,既是认知科学发展的必然选择,也是对人工智能技术的拓展<sup>[21]</sup>。

## 2 人机智能中的耗散结构与自组织

### 2.1 人机智能中的热力学与熵增定律

物理学是研究物质及其基本结构、相互作用和运动形式的科学,其目标是探究蕴藏在自然、生命和人工系统中各种现象与效应背后的基本规律。热力学又是研究自然、生命和人工系统中能量转化与系统状态演化的基础物理学科,熵增定律是自然界最具普适性的基本规律之一<sup>[8, 12]</sup>。1865年物理学家克劳修斯定义“熵”,用于量化系统内部的混乱与无序程度。熵增定律指出:孤立系统的总熵只会持续增加,无法自发降低,系

统将不断走向无序,最终达到热力学平衡态,也就是系统混乱度最大化的死寂状态。

按照熵增规律,宇宙整体趋向无序,但地球却孕育出层级不断提升、结构愈发精密的生命系统,从单细胞生物到复杂动植物,再到具备高级认知能力的人类,生命体系持续构建高阶有序结构,本质是典型的熵减过程,这与孤立系统的熵增趋势看似完全矛盾<sup>[9]</sup>。该悖论困扰学界百年,根本原因在于,经典热力学将许多系统默认为孤立系统,但生命系统自诞生之初,便是典型的开放系统,绝非孤立存在<sup>[5]</sup>。

从认知四要素说看,所有智能系统均包含物质、能量、结构和时间四大核心要素,四要素相互耦合、动态平衡,共同决定系统的运行状态、行为模式<sup>[7]</sup>。物质是认知的载体,能量是认知的动力来源,结构决定认知的组织形态,时间刻画认知演化、状态更迭的动态过程。认知系统运行的本质,就是四要素持续耦合、动态调配的过程。对于任意开放系统,变分自由能的消耗会直接转化为熵增,对外做功越大,系统无序化风险越高<sup>[11]</sup>。因此,最小自由能原理成为所有远离平衡态的开放系统共有的底层约束,这是物理系统的本能,无需主观意识参与驱动,与是否是生命无关<sup>[15]</sup>。热力学成为认知物理学的基础。

动植物、人体、生态群落也好,微生物以及人类设计制造的各类认知机器也好,均属于开放系统,同时遵循系统四要素耦合与最小变分自由能原理<sup>[7, 22]</sup>。开放系统的总熵由两部分构成:一是系统内部自发产生的熵增,所有复杂系统都会因能量损耗、结构老化、内部运动持续生成正熵,这一过程符合热力学基本规律;二是系统与外界交换形成的熵流,熵流可正可负。当开放系统持续从外界获取负熵流,且负熵流强度大于系统内部产生的正熵时,系统总熵持续下降,有序度不断提升<sup>[12]</sup>。对于认知机器而言,激活它的钥匙是时钟、时序和递归,结构化信息流是核心负熵流,也是催生思维软构体、维持认知活动有序运转的核心动力,而信息流的解析、运算与重构,都会持续消耗系统自由能<sup>[13]</sup>。

人体作为碳基智能耗散系统,肢体劳作会消耗躯体自由能;高强度用脑,进行复杂思维运算,

会大幅提升神经网络的自由能消耗,进而加剧系统内部熵增<sup>[23]</sup>。为了维持自身稳态、规避无序化风险,系统会自发选择最小变分自由能路径,主动减少体力对外做功、简化思维运算,规避复杂认知任务<sup>[11]</sup>。这就成功解释了包括人类在内的高等生物“懒得费力、懒得动脑”的普遍行为,该行为是四要素耦合下的物理必然,是系统为存续演化形成的本能,并非主观懒惰、意识懈怠或心理情绪导致。同理,人工智能系统在运行中也会自发简化认知模式、降低智力输出、选择低功耗运行模式,如最常用的是记忆驱动的经验认知模式,又如自动进入睡眠状态<sup>[18]</sup>。二者行为表象一致,底层均由最小自由能原理支配<sup>[15]</sup>。

人们常常“懒得费力、懒得动脑”,这是人体开放耗散系统瞬时倾向降低能量消耗的底层物理趋势。碳基人类经长期生物演化,发展出远期收益预判、成就感、健康诉求等独有的高级心理认知机制,该机制可驱动个体主动开展健身、复杂博弈等短期高能耗的体力脑力活动,“舍得费力、舍得动脑”。人体能够通过饮食、休息持续摄入物质与能量流,抵消短期活动带来的能量损耗;从长期客观效果来看,持续投入这类行为一方面优化躯体物质硬构体、减少生理紊乱,另一方面扩充、重构认知空间中的思维软构体,降低生理与认知双重不确定性,分别在物质代谢、结构认知两个维度实现系统有序度提升,完成两类不同维度的负熵积累<sup>[23]</sup>。

人工智能的两大载体——人脑生物系统与认知机器,固然是由完全不同的化学元素、物质、物体组成的,但均是典型的开放系统,依托四要素协同运转,受自由能和最小变分自由能原理约束,这也是二者能够维持有序运行、呈现共性行为趋势的物理前提<sup>[7, 22]</sup>。

## 2.2 用耗散结构理论解释认知机器

1969年,比利时物理学家、化学家普利高津正式提出耗散结构理论,他也凭借这一成果斩获1977年诺贝尔化学奖<sup>[8, 12]</sup>。该理论专门用于研究远离热力学平衡态的开放复杂系统,解答了百年之久的“生命熵增悖论”,和被沉寂了约20年的图灵方程相呼应。耗散结构理论结合认知四要素说与最小自由能原理,可完整构建统一的生命与

非生命的智能的底层框架<sup>[9, 24]</sup>。

人体是典型的耗散结构。所谓耗散结构,是指开放系统在远离平衡态的条件下,通过持续与外界交换物质、能量、信息流,消耗自由能,实现能量耗散,抵消内部熵增,自发形成的稳定、有序、动态的宏观结构<sup>[6]</sup>。判断一个系统是否为耗散结构,可依据四大核心特征,结合认知四要素说、最小自由能原理展开解读<sup>[7]</sup>:

**首先,生命和认知机器都具备完全开放性。**这是形成耗散结构的前提。孤立系统、封闭系统最终必然走向熵最大化的平衡态,不可能形成稳定有序的耗散结构<sup>[9]</sup>。唯有开放系统能够引入负熵流,补充自由能,对抗内部熵增。人体需要摄入食物、水分、氧气补充物质与能量,通过感官接收图像、声音等外部信息流,依托信息流构建动态的思维软构体,同时持续消耗自由能完成生理代谢与认知;认知机器需要持续接入电能补充能量与自由能,接收数据、指令与环境感知信息流,完成认知活动与认知迭代,同时通过具身交互向外输出行为动作<sup>[14]</sup>。

**其次,生命和认知机器都远离热力学平衡态。**热力学平衡态是物质、能量均匀分布,自由能归零、无运动、无变化的死寂状态。但认知系统远离平衡态,依靠动力,内部形成电流、信号流、比特流、数据流、信息流,形成自由能的梯度差,系统获得持续运动与演化的动力<sup>[24]</sup>。人脑内部始终存在神经电信号、化学递质的浓度梯度,自由能在神经元间动态分配,信息流在网络中不间断流转,思维软构体持续动态更新;认知机器中的芯片内部电位、电流、自由能分布动态变化,数据流在网络节点间高速流转,支撑思维软构体实时运作,认知机器长期处于非平衡态,具备持续演化的原生动力<sup>[19]</sup>。为维持梯度稳定,系统会持续控制自由能的无效消耗,恪守最小自由能准则<sup>[11]</sup>。

**再者,生命和认知机器内部都存在非线性相互作用。**认知机器中存在的人工耗散结构,内部要素之间存在非线性耦合、制约与激发关系,局部微小变化可通过链式反应放大为系统宏观变化,这是自组织、智能涌现、思维软构体生成的核心动力,同时复杂认知会显著提升自由能消耗<sup>[9]</sup>。



人脑数百亿神经元依托万亿级突触构建非线性连接网络<sup>[1]</sup>,复杂思维、高阶推理会触发大规模非线性运算,自由能消耗陡增,系统因此会自发规避;人工神经网络依靠权重参数搭建非线性映射关系<sup>[17]</sup>,浅层信息流经过多层网络非线性运算,逐步生成高阶认知模式与复杂思维软构体,自由能消耗随认知复杂度同步上升<sup>[18]</sup>。这两类网络均会遵循最小自由能原理,优先选择简单认知模式,该倾向与意识无关<sup>[15]</sup>。

**最后,生命和认知机器都依靠能量耗散、区分自由能消耗维持认知动态有序。**耗散结构的“有序”带有不确定性,是认知状态的动态有序,认知四要素的平衡依赖自由能的持续消耗<sup>[7]</sup>。认知系统想要维持自身结构与功能,必须持续补充外部能量,转化为可用自由能;一旦物质、能量、信息流的交换链路中断,自由能无法得到补充,内部熵增将占据主导,有序结构快速瓦解,思维软构体随之消散,系统走向崩溃<sup>[8]</sup>。人类“懒得费力、懒得动脑”,机器自动“简化运算、降低功耗”,本质都是系统主动控制自由能消耗、延续动态有序的本能行为,是最小自由能原理的直接体现<sup>[22]</sup>。

这样一来,我们就彻底打破了生命智能神秘论。耗散结构并非生命系统独有,所有满足开放条件的复杂系统,都会完成四要素流转,并自发遵循最小自由能准则。智能电网、智能设备、计算机集群、专业领域机器人、无人驾驶车与认知机器,在他组织的基础上,如果能够做到可交互、会学习、自组织、自成长,就都属于典型的非生命耗散结构,与生命系统共享同一套运行规则<sup>[14]</sup>。这就从底层抹平了生命与非生命智能的物理鸿沟,为论证人机智能、思维软构体、认知行为倾向的同源性,筑牢了理论根基<sup>[10]</sup>。

### 2.3 认知机器的自组织:复杂系统的演化

与耗散结构相伴而生的自组织理论、认知四要素说和最小自由能原理,共同构成包括认知机器在内的复杂系统演化的理论基础<sup>[9,12]</sup>。开放系统在外主体统一规划、指令干预的前提下,内部海量微观要素依托局部相互作用,自发协同、聚合,逐步形成宏观有序结构、统一行为与整体功能的演化过程,称为“自组织”。与之相对的概念为“他组织”。在自组织过程中,网络重构、

信息流重组都会消耗自由能,因此自组织系统也会遵循最小自由能原理,天然选择能耗最低的演化路径<sup>[11]</sup>。

人们习惯将生物智能归为自然自组织演化产物,将计算机产生的计算智能、扫地机器人产生的清扫智能等定义为人类设计的“他组织”系统,这也是两类智能被割裂的原因。其实,自组织与他组织并非绝对对立,二者可共存于同一系统。

对于个体生命而言,人脑的动态自组织从未停止。婴儿从母胎里带来的初始认知核,即生物神经网络在出生前已经通过漫长的胚胎发育过程,形成了初始的连接拓扑、兴奋与抑制的动态平衡以及稳定的信息传播模式<sup>[1]</sup>。出生后通过感知外界信息流、开展互动学习,不断建立、强化、修剪神经元突触,神经网络自发重构,依托持续流转的信息流形成专属的思维软构体<sup>[13]</sup>;复杂学习、深度思考会提升自由能消耗,系统会自发减少此类行为,表现为“不愿动脑”,该倾向是自组织系统的能效选择<sup>[23]</sup>。成年人学习新知识、新技能时,大脑同样会发生突触重塑,优先形成低能耗的思维链路,均是典型的自组织行为。人脑海量神经元依靠局部电信号交互,依托四要素流转完成认知活动,自组织是人类智能运作的核心机制<sup>[1]</sup>。人体组织排他性是人体免疫系统为生存进化出的自我保护机制,既然个体生命能够被成功地植入人工心脏、人工耳蜗、人工晶体、芯片、假牙和假肢之类的人造物,乃至更多,提升了其生活质量,甚至也提升了认知能力,那么,人的认知也可以认为是“基础设施自组织+内部运行局部他组织”的复合系统<sup>[21]</sup>。

反观人工智能系统,早期预置了固定的硬件和软件,运行路径被硬软件预先设定,难以自主优化自由能消耗。但在最新的计算机系统和认知机器里,尤其是深度学习、强化学习、类脑人工神经网络、具身智能机器人,已经深度融合自组织机制<sup>[17]</sup>。以深度学习神经网络为例:人类仅搭建基础人工网络框架、设定学习规则,在海量数据流的训练过程中,系统依托误差反向传播、节点局部交互,自发调整网络权重、优化连接,在自组织过程中,算法会主动收敛至智力(自由能)消耗最小的权重组合,完成特征提取与任务执行,这正

是认知机器的“省力、省思考”倾向<sup>[18]</sup>。强化学习智能体在未知环境中自主探索时,也会优先选择简单、消耗低的认知路径,本质也是最小变分自由能原理<sup>[15]</sup>。

由此可见,认知机器属于“基础设施他组织+内部运行局部自组织”的复合系统。人类完成机架、电源、主板、时钟、硬件架构、集成电路、基础网络、底层操作系统和中间件、初始认知核等的预设置<sup>[7]</sup>。物质硬构体不会新陈代谢,操作系统和中间件限定基础的流转模式。但是,可交互、会学习、自组织、自成长的认知机器,在学习的过程中,在解释现象、解决问题的过程中,依托思维软构体和信息流开展内部自组织,实现认知模式的自转换,实现网络迭代、新的思维软构体生成、演化与认知能力升级<sup>[16]</sup>。**认知机器和人脑的差异仅体现在自组织起点与外部干预形式:一个是“他组织”在前,另一个是“自组织”在前。从更长远的时间看,都可以认为是复合系统。**二者微观上的运作逻辑、能效约束规则相同,依靠机器具身交互,依托四要素流转形成宏观能力,以最小自由能为运行底线<sup>[7]</sup>。智能与新的思维软构体的涌现,是开放耗散系统演化的结果;而系统自动规避内部资源的高消耗行为倾向,是能量规则下的物理本能。**可以认为,完全的自组织和完全的他组织系统只不过是两种极端形态而已。**

## 2.4 不确定性认知中的贝叶斯认知

热力学(熵、耗散结构、自由能)是人机认知系统的物理底层,贝叶斯推理则是上层不确定性认知的数学表达<sup>[25]</sup>。**贝叶斯推理是依托先验认知结合观测证据,反向更新事件后验概率,以最小化变分自由能实现系统熵减、完成认知修正的概率推理<sup>[11]</sup>。**认知中的“变分自由能”和“后验概率”成为连接热力学与贝叶斯推理的桥梁<sup>[15]</sup>。贝叶斯天然对应智能认知逻辑:先验概率针对原有的思维软构体,观测带来新信息,算出后验概率、完成认知修正,对应变分最小自由能、负熵更新过程<sup>[22]</sup>。

**认知不是看见就相信,而是先有先验模型,再用观测修正认知。**贝叶斯完整认知闭环由自身对物理世界生成的内部模型(在初始认知核基础上的记忆)和感官(传感器采集外部真实信号)进行

匹配计算,结合先验与观测,更新对世界的判断,完成一次认知推理<sup>[25]</sup>。预测误差即后验概率,等同认知的不确定性——信息自由能。当内置先验模型预测结果与真实观测出现偏差,推理就会缩小预测误差(降低自由能),更新内部模型,修正认知;也可主动推理,即通过行为改变外部环境,让观测匹配自身预测,同样实现自由能最小化。**而如果观测与先验出现巨大偏差(高自由能),系统可通过重构内部模型,完成新知识涌现,如联想驱动的创新模式和假说驱动的科学发现模式<sup>[23]</sup>。**

在物理层面,变分自由能是热力学自由能的认知镜像。热力学自由能刻画物质、能量层面系统的无序度;在认知层面,认知变分自由能等同后验概率,刻画认知的预测误差,系统通过贝叶斯推理降低信息熵;二者数学结构完全相同,最小化信息自由能即贝叶斯优化,等价于系统完成熵减、维持耗散有序,实现物理底层的热力学与认知上层推理的统一<sup>[11, 15]</sup>。

无论是人脑神经突触重塑,还是深度学习反向传播调权重,底层目标都是持续降低变分自由能;通过自组织,反复贝叶斯迭代形成稳定内部模型——新的思维软构体,依靠负反馈抑制误差放大,避免系统认知崩溃<sup>[25]</sup>。

热力学是所有智能的底层物理底座,贝叶斯推理是所有智能系统的上层认知语言;碳基、硅基系统只是载体不同,但都通过贝叶斯推理最小化自由能,对抗热力学熵增;**贝叶斯推理不是人类独有的思维方式,而是开放耗散系统演化到一定复杂度后,必然涌现的最优思维机制,机器大模型、类脑网络的训练,本质就是大规模变分贝叶斯优化<sup>[22]</sup>;具身智能会以最小化变分自由能的贝叶斯推理为目标,兼顾算力能耗(热力学约束)与认知精度(贝叶斯推理目标)<sup>[19]</sup>。**联想驱动的创新模式和假说驱动的科学发现认知模式,本质是贝叶斯更新过程——先建立理论先验,再用实验观测修正模型。因此,热力学自由能原理可以解释工程师和科学家持续探索未知的底层动力<sup>[23]</sup>。

自适应是思维软构体从简单走向复杂、智能从低级迈向高级的过程。演化的本质,都是系统



依托与外界交互,完成自组织重构、优化网络链路、迭代思维软构体、提升与物理环境的适配能力的过程,也是系统持续优化自由能的过程。通过形成低能耗的行为与思维习惯,逐步淘汰高能耗的无效认知。学习后形成经验不再重新费力思考,是演化出的能效最优状态,这就解释了为什么“基于记忆驱动的经验模式”是最常用的认知模式,它是自组织系统结合最小自由能原理的演化结果<sup>[18]</sup>。

演化分为物种先天演化与个体后天自组织两大阶段。数十亿年自然选择为新生儿脑搭建了初始认知核,初始认知核在个体成长过程中又依靠试错、积累、学习、实践,不断重构神经网络与思维软构<sup>[7]</sup>。而在认知机器中,“他组织”在先,所有**基础设备、设施和软件,包括初始认知核在内,对应物种先天的演化结果,后天的学习、实践、再学习、再实践,复刻了生物认知的抽象、联想和交互的过程,自我成长,在和物理世界交互中持续迭代认知模型,在认知螺旋中,或遗忘或生成思维软构体,体现了自组织的物理过程,是复杂自组织系统演化的共性现象<sup>[16]</sup>**。例如,依托物质、能量、结构和时间构造的清洁领域专用机器人,20年前还是玩具,10年前力气不大,普遍智障,现在认知觉醒,整体功能已经脱胎换骨,能扫地、能拖地、能避障,强吸力、低噪音、自清洁;可交互、会学习、自成长;能听懂主人意图、会聊天,能理解复杂指令,普遍搭载大模型语音,自然语言对话,上下文关联设置,允许方言和模糊语料训练;可学习室内环境,第一次清扫建图后,能够自动识别家具、地面材质、常见障碍物,家具移动、新增杂物会自动更新地图、调整禁区。学习主人清洁习惯,学习避障,越用越不卡,越用越智能,自成长,持续进化,可以本地自优化,每次清扫后自我复盘,哪里漏扫、哪里耗时、哪里清洁效果差,自动优化下一次的路径和参数。还可以像手机一样远程升级,更新功能。**专用领域机器人和无人驾驶车的演化发展、落地民生之快,展现出百花齐放的局面,这是很多人始料不及的<sup>[14]</sup>**。

### 3 人机智能根基的物理同源性

#### 3.1 物质性:载体差异未必是智能差异

人体不仅是血肉之躯,更是由90多种天然化

学元素有序组合成的不同的物质。目前在人体内检测出的元素共计60余种。氧、碳、氢、氮四大核心元素占体重96%,依质量排序,前11种宏量元素氧、碳、氢、氮、钙、磷、钾、硫、钠、氯、镁,占99.3%。统称碳基物质和物体。细胞是构成人体的最基本单位,形态相似和功能相关的细胞,借助细胞间质结合起来形成结构,成为组织;几种组织结合起来,共同执行某一种特定功能,并具有一定形态特点,就构成了器官;若干个功能相关的器官联合起来,共同完成某一特定的连续性生理功能,即形成系统<sup>[1]</sup>。人体由多个系统组成以维持生命,例如运动系统、消化系统、呼吸系统、循环系统、泌尿系统、生殖系统、内分泌系统、免疫系统。人体被划分成不同系统,只是人类认知自身的一种方法,可称为视图。实际上这只是人们用不同视角更深刻地去认知自己而已。很难区分这些系统哪个更重要。从生命的角度看,它们应该具有相同的复杂性,不存在脑器官最复杂之说,这或许只是人类对自身理解的一个“偏见”。还有一些其他的划分方法,例如,结构生物学把生命科学分为基因生物学、原子生物学、分子生物学、大分子生物学、蛋白质生物学、细胞生物学、神经生物学等,也未尝不可。**人们已经形成一个共识:层次结构在生物物理学中举足轻重<sup>[5]</sup>**。

认知机器,泛指具备感知、运算、决策、具身交互能力的智能设备,包括半导体与芯片、传感器、互联网、云计算服务器、终端设备、机器人等,其制造所用材料可分为半导体材料、金属结构材料、绝缘/封装材料、能源与辅助材料四大类,用到的元素以金属、非金属、稀有元素为主,和人体生命元素体系差异极大<sup>[19]</sup>。例如,认知机器的“脑”,以硅基材料为基础,最核心元素是晶圆,它是芯片基底的主体,几乎所有集成电路、CPU、DPU、GPU、TPU、FPGA、SSD、存储器都以单晶硅为载体。硅表面氧化形成二氧化硅,用作绝缘层、栅介质,是芯片制程的基础材料。碳元素也被用于碳化硅、石墨烯等新一代半导体,提升芯片耐高温和高温运算能力;也用作光刻胶、导电碳膜。掺杂元素用来改变导电性能,硼、磷、砷都是经典掺杂剂,制造N型、P型半导体,形成电路PN结;镓、铟、氮用于氮化镓、砷化镓等化合物半导体,广泛应用在传感器、射频芯片、视觉感知模



块。采用金属布线/电极:铜是芯片内部互联导线主流材料,铝是传统芯片布线、电极材料;金、银、钯、铂等贵金属,用于芯片引脚、键合线、精密电极,抗氧化、导电稳定。又例如,认知机器的传感器与感知模块,包括视觉、声学、压力、温度、触觉传感器,它们是机器感知外部世界、形成输入的部件,用到大量特种元素。锗是红外传感器、光电探测器核心,锂、钛、锆是压电材料,用于压力/震动传感器,实现触觉、声波感知;镉、硒用于光电传感元件;稀土元素钕、铈、钕、铽等是图像传感器、光学镜头、磁传感器必备材料,可提升感光、成像、磁场检测能力。而认知机器的结构与传动部件形成机器人躯体、外壳和运动机构,对应人体具身的骨骼和肌肉,支撑形体完成动作,以常规金属、合金为主。机器人的机架、底座、重型传动结构,钢铁主体用量最大,搭配碳形成碳钢、合金钢,提升强度。铝合金用于轻量化外壳、机械臂兼顾轻便与硬度。镁合金多用于轻型智能设备、便携机器人,减重减震。钛合金用于高端仿生机器人、精密运动关节,强度高、耐腐蚀。还有铬、镍、锰等合金添加剂,强化金属硬度、防锈能力,用于齿轮、轴承、传动零件。认知机器中还需要绝缘、封装、高分子材料,用于防护、隔离和作为线路载体,相当于机器的软组织和保护层;隔离电路、固定元件需要氢、碳、氧构成塑料、树脂、橡胶、线缆外皮等有机高分子材料是外壳、线材、密封件的主要成分。机器中的能源与供电系统为整机运转、认知运行提供能量,是机器持续工作的基础。锂电池是智能终端、移动机器人主流储能材料;搭配钴、镍、锰、磷组成锂电正负极材料。传统铅酸电池多用于大型工业机器人和后备电源。氢燃料电池可用于新型清洁能源,是认知设备的动力源。此外,磁元件与辅助电子配件用于电机、电磁铁、存储器磁介质,支撑运动与数据存储,铁、钴、镍是铁磁三元素,用来制作电机铁芯、磁铁、磁存储介质;钕铁硼强磁体用于机器人电机、伺服机构核心材料<sup>[14]</sup>。

当前,认知机器里也越来越多地使用人工合成有机材料,如有机半导体、有机电化学晶体管、有机突触、人工神经元<sup>[18]</sup>。共轭聚合物用于柔性神经形态芯片,可模拟突触可塑性。有机玻璃用作柔性基底、封装层、绝缘层,在柔性认知机器人中广泛应用。人工合成DNA链构建分子神经网络,

试管内可实现简单认知计算。人工肌肉如硅胶做基底和导电纤维,实现发力和感知,用于人形机器人。电子皮肤用柔性有机聚合物,集成压力或温度传感器,模拟触觉。对比硅基,有机材料柔性可弯曲,适合穿戴、仿生肢体、人体接口;低功耗,以离子传导为主,能耗远低于硅基;生物兼容,可直接与神经组织对接,用于脑机接口、神经修复;低成本,溶液可加工,可像印油墨一样做芯片。当前核心计算是硅基无机,外围柔性/传感配合有人工合成有机。未来可能是全都是有机的认知机器,也都是耗散结构。

如此详细地对比说明,计算机、认知机器和人体在使用元素、物质、材料、物体上存在着很大的差异。但是,载体差异未必是智能差异<sup>[21]</sup>。人体以碳基细胞为基本单元,形成组织、器官、系统、机体,服务于代谢、生长、神经传导、生命活动。认知机器属于硅基设备。机器元素、物质、物体、材料、器件、设备围绕导电、绝缘、力学结构、信号运算、能量转换展开,无生命代谢功能。人体必需的微量元素在机器中仅作为普通工业材料;机器中大量使用稀土、锗、镓、钯、铂等稀有金属,人体几乎不含这类元素。大量含有氧、碳、氢、铁、铝、铜等常见元素都来源于自然界的化学元素。从元素到原子,从原子到分子,从物质到物体,从材料到器件,从器件到设备,一直到系统和网络,乃至复杂系统和复杂网络,人们同样形成一个共识:层次结构在认知物理学中举足轻重<sup>[10]</sup>。

认知机器中的物质和能量是截然分开的。机器中没有类似生物神经元组织的细胞,没有分子马达和离子泵,不构成人工生命。机器具身中的物质硬构体,无论其结构和组成多么复杂,都是他组织,是一次次地被人工批量生产出来的,靠外部能量供给就能运转。物质硬构体没有自我复制能力,不需要自成长,无需睡眠,可以靠“他组织”阶跃式地更新换代,完全免除了生物学的自身新陈代谢过程。载体差异未必是智能差异,人工智能已经破解了计算和语言<sup>[2]</sup>。人们从来没有怀疑,人和机器计算出来的结果有什么不同,但机器给出的精度(如 $\pi$ )却高出了太多太多;机器“说”人话,服务社会需求,现在天天发生。目前机器每天说的“人话”总量已经大于全球所有人一

天口头说话量的总和,人们也习以为常。

### 3.2 精神性: 人机智能中的思维软构体

人类拥有两个空间。一个是客观的、外在的物理空间或者世界。在这个空间里,人类感知宇宙,认识太阳、星星、月亮和地球等天体;认识海洋、江河、湖泊和高山等天然物质;认识微生物、植物、动物,认识“我”之外的所有生命;认识工具、桌椅、电灯、汽车、楼房、书本、地图、学校、雕塑、机器、人造卫星等人造物。所有这些,都是实实在在的物理存在。另一个是主观的、内在的认知空间或者精神世界,需要认识意识、欲望、情感、信仰和智能,认识自己的感受、体验和觉察。精神世界中,意识、欲望、情感、信仰和智能的不同组合,会演变出不同的价值体系。

当以意识、欲望、情感、信仰的价值体系作为主要价值观时,爱、平等、正义、人权、尊重、成长、创造就成为了我们的价值标准。如果仅以智能作为主要价值看待客观的物理世界,就会把人的认知物化,用文字、工具、艺术、设备,甚至用智能机器去实现它们,把智能从生命中剥离出来,不受意识、情感、信仰等纠缠,让智能延展到体外,成为人工智能,成为人造物,存在于物理世界,甚至发射到太空,成为人类文明生态的一部分,反哺和助推人的智能发展<sup>[21]</sup>。

机器认知也有两个层面。一是依靠具身的物质硬构体完成感知,完成形而下的实证和行为控制的物理层面,可理解为“脚踏实地”;二是依靠思维软构体认知完成形而上的思维、想象和创造的精神层面,可理解为“仰望星空”。认知就是这两个层面互动融合的过程<sup>[20]</sup>。

一个碳基生命的死亡,即个体精神消失,认知终结,这只不过是有机物质分解、转化为无机物质而已。人类还在繁衍,宇宙依然浩瀚,星河依然流转。宇宙的年龄大约是140亿年,地球的年龄大约是45亿年,促成人类认知的演化充其量才500万年。如果将地球的年龄缩短成一年,则人类仅在最后的半小时才出现,笛卡尔说,我思故我在,指的是人在认知空间里的精神还在。你我思不思,地球依然存在和运转。在宏大的物理世界面前,切莫把人类主观的精神世界夸大了。

宇宙的力量与个人的愿望和幸福原本是不相干的,物理世界是否就是人们认知的那个样子,无从核对。这是理解人类发明机器认知的大背景。与此同时,物理空间里也留下了越来越多的人造物品,这种积累性改进的人类文明的生态,深刻影响着人类繁衍的后续认知,这也是理解人类发明工具、发明动力机器和认知机器的大背景。

与人类精神活动、智能活动直接相关的科学和技术,如人类语言文字的出现、教育的诞生,应该是惊天地而泣鬼神的,神学、宗教、哲学、数学、文学、艺术、音乐、美术和通用可编程电子计算机的诞生,也应该是惊天地而泣鬼神的。它们开辟了“结构性、时间性的科学和技术”,同时,结构和时间也深深地、精细地介入到物质性、能量性的科学和技术之中,人类用认知空间的思维、想象和创造,乃至幻想,解释人类的精神世界,也解释人类所处的物理世界,润物细无声地渗透到物质和能量组成的各种各样的人造物品里面去。

人类每一次认知活动是感知、思维、行动、再反馈到感知的循环。感知是认知的源泉,思维是发生在自我认知空间里的活动,它自成体系,充满想象,可以比物理世界更为深邃;在人的精神世界里,抽象的结构可以存在于认知空间里,作为思维软构体。结构化的压缩能够产生智能<sup>[13]</sup>。

在人类历史上,诺伯特·维纳和克劳德·艾尔伍德·香农对“信息”曾经做出了突出的贡献。维纳曾明确指出“信息就是信息,既不是物质,也不是能量”,香农的信息熵成为通信的数学基础,但香农熵和薛定谔的熵不是一回事,薛定谔的熵用于物理学中反映系统微观状态的混乱程度或不确定性<sup>[5]</sup>。客观地说,维纳和香农对信息的定义都不到位。量子力学在描述微观物质状态的时候,也会使用信息这个词,让信息更加的说不清道不明,信息长期处于不上不下的尴尬状态,许多人诟病信息科学是“无根之学”。理解信息的基本要素——结构和时间,理解信息的存在形式——软构体和硬构体,就不仅是一个定义问题、思辨问题,而是对认知心理学、人工智能、信息科学、信息技术、信息革命如何认识的问题<sup>[10]</sup>。一般地说,信息是人类认知自然,认知自然界里的物质、物体和能量的特征、状态及其变化的创造性表



述。信息是数字、编码、符号、语言、文字、数据、概念、事实、消息、情报、知识的泛称,信息压缩本质上是结构化压缩。信息是与人之间、人与外界相互作用的过程中所交换内容的表述。包括信息在内的思维软构体的存在需要物质性载体——硬构体,如人的大脑、机器内存、纸张或光盘等,思维软构体不是构成客观世界的要素,不具有客观性或物质性,它是属于精神世界的。**信息更多的是物质硬构体以思维软构体的形式存在于人脑认知空间,属于思维软构体,是人类思维用的软构体冰山的一角,信息是思维软构体的指代而已,不是物理世界里的客观实在,只是人类主观的认知表述而已。**信息的载体才是宇宙里的真实存在。比如,人脑中创造出的乐谱是软构体,表达的是信息、情感、艺术和人文,形而上。同一首乐谱可在不同硬构体上表现出来,无论用小提琴、二胡、钢琴、架子鼓等哪种硬构体来演奏,表现的都是同一首乐谱。乐谱是形而上的、精神的、非物质的软构体,而人们听到的音乐是物理世界客观存在的、缓急变化的、或强或弱的、含有丰富频谱的声波信号,耳朵得之为声音,目光遇之成形状和颜色,是客观存在的艺术,在物质、能量上寄生,有结构和时间,形而下,体现美,也体现知行合一。**同样,在机器里的认知空间里的记忆智能和计算智能是形而上的,精神的;在物理空间里的感知智能和具身智能是形而下的,物质的。形而上是形而下的高阶,形而下是形而上的具象。**基于结构和时间的思维软构体寄生到物质和能量上,转变为人造物——硬构体,人类在物理世界里生产出各种各样的人造物品,尤其是各种各样的工具和机器,才是真实的存在。**如果说农业革命、工业革命被历史赋予了物质性、能量性含义,大大解放人的体力,认知革命则会更多地被历史赋予结构性、时间性含义,制造出更多的认知机器,解放人的智力。**人类认知的特征在于:有洞察力的天才、思想家、科学家往往在任何可能的证据出现之前很久,就能抓住完整解释的本质。机器却不能<sup>[3]</sup>。

## 4 人机智能演化运行的同构性

### 4.1 负反馈:认知稳定性的调节机制

负反馈是控制论基础概念,指系统将输出结果回传至输入端,与预设目标、标准状态对比,根

**据偏差反向调整输入与运行状态,不断缩小偏差、回归稳态。**与之相对的正反馈会放大偏差,可能造成系统失控、信息流混乱、思维软构体解体或者涌现,因此高级智能系统必然以负反馈为主要调节机制<sup>[13]</sup>。

稳定运行是认知机器发挥功能的前提,负反馈机制是所有高级耗散系统维持稳态的核心手段,也是保障信号流有序流转、思维软构体稳定存续的关键,目标就是稳定认知模式并控制自由能的无效消耗<sup>[24]</sup>。当高强度思维或者肢体动作导致自由能过快消耗、系统熵增失控时,负反馈链路会自动调整运行状态,降低任务复杂度,引导系统回归低能耗模式。人长时间用脑之后产生疲惫感也会主动停止思考,机器高负载后触发降频保护,均是负反馈和最小自由能原理协同作用的结果,属于系统稳态调节机制,不必归因于意识或主观情绪<sup>[22]</sup>。

对于人体和人脑,负反馈调节贯穿信息流传递、认知、行为全流程。感知层面依靠负反馈维持躯体姿态稳定;认知层面自主校验逻辑漏洞,保障思维整体自洽;生理层面调节体温、心率等基础指标,为认知活动提供稳定环境<sup>[1]</sup>。一旦负反馈机制受损,信息流传递紊乱,会出现认知混乱、思维软构体瓦解等问题。

对于人工智能系统,监督学习的损失函数、机器人的具身姿态校准和动力学行为、服务器的负载管控,均是典型的负反馈设计<sup>[17]</sup>。系统实时比对输出结果与目标值,修正参数、调整动作。在认知机器里,至少存在从里到外的三层嵌套的反馈环:具身动力学反馈环、认知反馈环和环境感知反馈环,当然还有电流、信号流、比特流、数据流、信息流反馈环等<sup>[13]</sup>。

**对比分析可知:两类系统均构建“信息流采集→偏差对比→负反馈调整→状态回归”的多层次、嵌套的闭环控制。负反馈机制决定人机智能在动态运行、认知流管控、思维软构体存续上遵循同一套控制逻辑。**

### 4.2 类脑认知:人工神经网络的同构设计

回顾人工智能的发展历史,长期的连接主义



和类脑认知研究,导致人工神经网络诞生,本质是以工程手段复刻生物神经网络的底层架构,均依托幂率分布的小世界模型,达成深层网络架构,完成数据挖掘、知识挖掘,网络拓扑挖掘,生成思维软构体<sup>[17]</sup>。

人脑是认知的核心部件。人脑最外层是一层薄薄的灰质皮层,这里集中了神经元胞体。脑区间长长的轴突纤维会产生相互牵拉作用:神经连接密集的区域向内收拢,形成凸起的脑回;连接稀疏的区域被拉开,形成凹陷的脑沟,整体外观酷似核桃表面的褶皱。颅骨内部空间容量有限,皮层通过自身折叠,才能容纳更大的表皮面积,承载更多神经元与突触,支撑复杂认知活动<sup>[1]</sup>。

从宏观脑沟回褶皱,到微观神经元树突分支,人脑皮层还具备明显分形特征。研究观测 70 多种哺乳动物、11 类灵长类(包含人类)发现,大脑皮层表面分形维数稳定在  $D \approx 2.5$ , 介于二维平面与三维实体之间,完美解释薄层神经组织如何在狭小颅腔内实现超高空间填充;跨尺度自相似是大脑褶皱形成的底层结构规律。数学分形能够无限递归细分,不存在最小尺度,细节无限精细;但人脑属于生物近似分形,存在天然物理下限,当尺度细分至微米级别,自相似特性便会消失,仅在 1 mm~5 cm 满足标度不变性<sup>[23]</sup>。

**结构化的压缩能够产生智能。**大脑皮层自身折叠和分形结构并非预先设计,而是两种机制共同自发生成:一是灰质增殖速度远快于内层白质带来的生物力学挤压,二是神经元细胞自主有序生长,是生物自然演化筛选出的物质、能量、结构和时间之间耦合的最优结构<sup>[7]</sup>。**因此,认知物理学可以很好地解释集成电路芯片制程中的摩尔定律和约瑟夫森定律提及的空间结构压缩和时间压缩<sup>[10]</sup>。**

人脑生物神经网络拥有约 860 亿个神经元,神经元之间通过突触建立连接,整个人脑形成超大规模、深度互联、多层级的非线性网络<sup>[1]</sup>。单个神经元具备“激活-抑制”两种状态:当上游神经元传递的信息流强度累积达到阈值时,神经元被激活,向下游传递神经信息流;信息流强度不足时,神经元处于抑制状态。突触负责调控信息流传递强度,也是思维软构体形成的微观基础。神经元

按照功能分层运作,浅层负责感知,深层负责逻辑推演与抽象思考,不同层级的能耗差异显著<sup>[23]</sup>。

人工神经网络的基本单元为人工神经元,海量节点通过连接权重新构建完整网络,层级划分、激活机制与人脑对应。输入层接收原始感知信息流,隐藏层完成特征提取与逻辑加工,输出层输出认知结果。如同生物神经网络具备神经可塑性,人工神经网络具备参数可塑性,都会根据信号流动态调整连接权重,在迭代中持续优化能耗结构,契合最小变分自由能原理<sup>[18]</sup>。

从单层感知机、深度卷积网络、循环神经网络、Transformer 架构,到前沿类脑人工网络,人工智能网络的发展始终向生物神经网络靠拢。究其根源,并非人类单纯模仿大脑,而是多层级、非线性、阈值激活、动态可塑的网络,是复杂系统实现高效信息流处理、生成高阶思维软构体与认知的最优架构。自然演化选择该架构塑造生物智能,人类工程设计也必然选择它打造机器智能,这是复杂网络科学和技术驱动下的必然结果。无论是生物大脑还是机器认知脑,信号流的处理、思维软构体的构建均依托统一数理规则,信号编码、特征运算、逻辑推理、思维软构体都遵循包括概率和统计学在内的通用数学-物理法则,其复杂度直接决定自由能消耗量。如果软件能够被固化成为物质硬构体,能耗会更低<sup>[19]</sup>。

**我们从介观上提出用“智痕元胞”作为寄生在神经元细胞之上的思维软构体,智痕元胞节点与节点间的相互作用的强度和变化,模拟突触的可塑性,可以单向也可以双向<sup>[13]</sup>。**有的智痕元胞对外有太多的连接,是记忆网络中的重要路由节点。而更多智痕元胞对外只有不太多的连接,是记忆网络中的平凡路由节点。更多的节点表现为网络的边缘节点。还有些节点在网络拓扑中体现骑墙,介于两个或者多个抱团节点集群之间,可称为骑墙节点。总体上,边的连接度大致服从幂律分布。相互连接的智痕元胞集群通过外界刺激或者通过学习被激活,重要节点和平凡节点的区分不是一成不变的,而是由外界刺激动态激活的。记忆提取的是智痕元胞整体水平状态,是记忆网络的整体具象,有时甚至是涌现。拓扑状态数几乎是无限的,因此概念或知识的表达几乎

是有限的。认知机器中PB级规模的神经元胞网络,类似于互联网搜索用的网络架构,被称为人工神经元胞网络。用智痕元胞模拟神经元记忆的残痕,用智痕元胞之间的连接强度和变化模拟突触的作用,用大规模智痕元胞网络构成记忆网络。**记忆网络在学习和进化过程中不断地微重构,完成记忆的调整与控制,与时俱进,用当前记忆网络在不同侧面不同尺度上的整体拓扑状态,表达并实现当前注意力对过去记忆的提取,而不是由哪一个神经元胞单独决定的。**在长期记忆中的许多智痕元胞常处于休眠状态,被觉醒的那一小小部分是依靠注意力——当前待解决的问题来激活的,这一过程带有不确定性。长期记忆的提取方式是再认和回忆,乃是与长时记忆中被唤醒的一个非常局部的网络的联想搜索问题。记忆中可以相互冲突的知识,不断拉扯,形成决策。人工智痕元胞网络构造清楚了,机器的记忆智能也就大致清楚了。它随着认知的自成长,不断地修剪权重,改变连接,演变成为一个具有小世界特征的、无标度的复杂网络,具有抱团特征、层次结构和长尾分布,可以用它来实现当前认知中不同尺度抽象记忆的形成、调整、控制和提取,成为记忆智能。记忆智能确保了多元认知,成为认知机器中多领域、多情境中计算智能的边界和约束。人脑短时记忆、长时记忆对应突触连接的临时强化与永久固化;人工智能缓存、硬盘存储、模型参数对应信息流的临时与永久留存。二者均遵循“高频信号流强化存储、低频信号流逐步衰减”的规律,**遗忘是熵增与自由能重新分配的过程,记忆是熵减与新链路构建的过程,背后服从的是统一的热力学规律和复杂网络科学<sup>[16]</sup>。**

#### 4.3 涌现:思维软构体生成的物理机理

从核子到宇宙、从生态到人类社会、从物理到化学,从人类智能到人工智能,在物理、化学、生化、生命、社会活动等各个领域里,在不同尺度上都广泛存在着自发涌现的同步现象,如惠更斯钟的摆同步、神经元的同步放电、图灵斑图、分类和聚类的概念生成、知识发现等,在机器认知空间里的思维软构体的涌现,具有同样的物理机理<sup>[26]</sup>。

**涌现是复杂系统内部个体之间通过局部相**

**互作用,产生在系统规模上才能观察到的一些新属性和新现象;这种从一种状态突变到另一种状态的现象,在物理学中称之为相变。涌现研究整体大于局部之和的机理。**作者曾经用“掌声响起来”作为研究对象,基于人类心理学中普遍存在的“从众心理”,简化并明确“掌声响起来”的初始状态,利用认知物理学中的云模型和数据场理论,构造了一个描述集体行为的非线性涌现模型<sup>[26]</sup>。基于这个模型,开发了仅依靠局部相互作用而不存在统一调度的涌现计算实验平台,仔细分析了音乐厅里掌声的自发涌现机理,并用计算机模拟了各种各样的虚拟现实,取得成功。实验计算记录了音乐厅里每个观众一次次击掌间隔时间的流数据,通过它们可计算出相应的击掌时刻,然后将录制的单人单掌声载入到流数据文件中的这些时刻点上,形成单人连续掌声文件,再用多媒体混音算法对所有观众的单人连续掌声文件进行合成,得到多人鼓掌的声音文件,通过数字音频播放器形成输出。可以设定观众规模和鼓掌初始状态,进一步选择不同大小音乐厅、操场等不同的耦合模式,调节耦合函数,便可以生成不同类型的掌声效果,多数情况下未必涌现。由于云模型中用期望、熵和超熵体现了随机性,实验平台每一次生成的掌声都不会相同。尽管如此,人们普遍认为它与在音乐厅中录制的真实掌声在声音效果上很难区分,也就是说通过了图灵测试<sup>[26]</sup>。

**涌现是复杂系统的共性,由于个体间相互作用的多样性,要素间作用非线性耦合,涌现往往表现出很多具体的形态。局部微小互动会被放大、传导,催生整体新特征,是涌现的本质成因。同时存在正反馈和负反馈,正反馈放大局部行为,推动系统偏离原有状态,催生新形态;系统自然形成多层级结构,下层要素行为聚合为中层特征,中层进一步向上聚合,最终在顶层产生全新涌现属性,层级间存在不可还原性。负反馈约束系统不至于彻底失稳,维持整体秩序。集中式系统很难产生真正的自组织涌现,系统必须开放,持续和外界交换物质、能量、信息。正负反馈的动态平衡是涌现形态稳定存在的关键。大量异质要素、非线性局部互动、开放耗散系统、正负反馈平衡、临界相变、自组织分布式结构,这6个物理条件共同催生复杂系统。**



## 5 人工智能：放大和加速人类智能的必然性

### 5.1 自然进化并没有过分关注人类认知

**物种的多样性是自然进化的客观实在。**自然进化并没有过分关注人类认知，例如人类先天地磁导航能力远弱于绝大多数迁徙动物。人类这个物种进化的“长项”是自然赋于人脑皮质特别强的语言文字能力和记忆能力，“短板”是人的寿命有限，力气不大，感知觉和触觉局限，尤其是人脑的短时工作记忆力似乎不那么强大<sup>[1]</sup>。如果拿自然生物脑的结构和人造的认知机器——计算机的设计作比较，人脑的“缓冲存储器”实在是太小了。可以说，自然进化并没有过分关照人类。一个人短时间很难一下子记住7个11位的移动电话号码，相当于一个蹩脚的计算机硬件设计：3 GHz的CPU主频，1 GB硬盘的电脑，但只配置了一个10 KB的内存。短时工作记忆容量似乎配不上强大的长期记忆能力。**所以，人类的认知形成的记忆，很早很早就需要借助人类自身发明的文字、纸、笔、黑板、算盘等各种工具，及后来的计算尺、计算器、计算机、笔记本、手机、互联网、云计算等作为记忆的外部缓冲区，来补充记忆的不足，现在人类就更需要可交互、会学习、自成长的认知机器来辅佐<sup>[20]</sup>。**

### 5.2 人类文明史上的三次认知革命

用历史视野重读人类文明演进由于认知革命不断突破形成的壮阔史诗，人类之所以能够超过其他物种，站到生物链的最高端，是因为经历了3次认知革命。第一次认知革命发生在5000年前以文字与教育的发明为核心，使人类突破生物本能局限，构建起文明传承的生态体系，实现了知识的跨代积累与传播；第二次认知革命源于近500年科学技术的爆发式发展和能源大发展，推动工业文明，重塑了人类改造自然的强大能力；当前人工智能的迅猛发展，标志着第三次认知革命的到来，其核心特征是人类智能与机器智能的共生共创<sup>[21]</sup>。以物质、能量、结构、时间组成的四要素及其相互作用说，构筑起统摄人类与**机器认知的共同基石<sup>[7]</sup>**。科技作为人类社会第一生产力，催生**机器暴力思维和具身智能，人类智能与人工智能共生共创，需要重新审视人与人、人与社会、人与自然的**关系，为未来发展提供一个

**基础坐标，叩问智创时代的人类命运，以迎接前所未有的新文明范式。**

### 5.3 认知物理学填补认知和物理之间“缺失的连接”

长久以来，普遍认为生物智能区别并高于机器智能，二者本质对立。这乃是人为设置的“鸿沟”，二元认知延伸出多重认知误区，包括**载体误区**，将载体物质的差异等同于智能本质差异；**表象误区**，将欲望、意识、情感等生物附属属性，当作智能评判标准；**演化路径误区**，忽视人机底层统一自组织与能耗约束；**行为归因误区**：把系统低能耗物理本能归为人类主观心理<sup>[10]</sup>。认知物理学消解这套二元对立思维，打通认知与物理之间割裂的研究通道。

随着耗散结构、自组织、认知四要素说、最小变分自由能原理、非平衡态热力学在认知领域的应用不断深化，认知物理学这一交叉学科逐步成型<sup>[10]</sup>。它跳出传统认知科学偏重生物、心理的研究视角，将人类认知活动、智能行为、系统能效倾向，统一视作物理系统的物质载体和运动形式，运用物理学、生物物理学、半导体物理学、电子学、系统科学、非线性科学，量化分析电流、信号流、比特流、信息流、认知流、自由能变化于感知、记忆、计算、思维、具身交互行为全过程，建立以递归执行和迭代发展为主的智能行为模型，指出图灵机“关注计算、忽视记忆；关注思维、忽视具身”的局限，搭建了整体的跨学科研究新范式，明确所有认知主体都是物理系统，生物大脑与人工智能设备均遵循统一的物理-数学规律，认知活动、思维软构体的生成，就是物质、能量、结构和时间四要素的传递、变换与消耗过程；认知过程伴随明确的熵变与自由能变化，接收有效信息流、系统有自发规避高能耗的行为能力；认知层级、思维软构体复杂度与系统复杂度、自组织能力正相关，复杂认知必然伴随更高的自由能消耗；最小自由能是所有耗散系统的通用约束条件，碳基与硅基认知都会自发以最低自由能消耗为准则，认知机器无具身不智能。**认知物理学不但回答了图灵1958年提出的震聋发聩之问“机器能思维吗”，还进一步回答了“机器如何思维”的问题<sup>[3]</sup>。**



需要着重说明的是,论证人机智能同源同构,并非否定两类智能在外在形态上的千差万别。人脑历经数十万年自然演化,承载着欲望、意识、智能、情感、信仰、社交等碳基生命的专属特质,是自然选择主导的缓慢自适应过程;人工智能依托工程设计,以半导体、传感器、电路、机械结构为载体,依靠技术迭代快速更新。智能的生成、运作、发展,并非只能依靠碳基生物载体;**只要系统满足“开放耗散结构+自组织+负反馈调节+最小自由能约束”四大条件,演化中就能涌现不同层级智能。生命、机器只是智能两种不同物质载体,底层共享宇宙统一数理物理法则,二者同源<sup>[2]</sup>。**

物种的多样性决定智能形态多样性。不同生物演化出差异化认知能力,人类文明依托文字形成多元文化;各类认知机器依托不同信息流发展专属能力,大语言模型擅长文本、视觉模型擅长图像、集群系统擅长协同,底层规律一致、外在形态分化是常态<sup>[14]</sup>。**认知机器的具身智能是人工智能研究出发点与归宿,甚至会重构劳动力与社会分配格局。**认知物理学既助力通用人工智能、类脑计算落地,也为生命起源、宇宙智能、地外文明探索提供全新分析框架。宇宙范围内任何智能体系,都无法脱离物质、能量、结构、时序四要素耦合作用,外星文明无论采用何种化学载体,底层运行逻辑相通。**认知物理学的边界仅限具身系统对外感知交互范畴,不可无限泛化四要素理论<sup>[7]</sup>。**

## 参考文献:

- [1] 韩济生. 神经科学[M]. 4版. 北京: 北京大学医学出版社, 2022.
- [2] 李德毅. 人工智能导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [3] 李德毅. 人工智能基础问题: 机器能思维吗[J]. 智能系统学报, 2022, 17(4): 856–858.  
LI Deyi. Artificial intelligence fundamental question: can machines think?[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(4): 856–858.
- [4] 李德毅. 新一代人工智能十问十答[J]. 智能系统学报, 2021, 16(5): 828–833.  
LI Deyi. Ten questions and answers for the new generation of artificial intelligence[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2021, 16(5): 828–833.
- [5] 埃尔温·薛定谔. 生命是什么[M]. 罗来鸥, 罗辽复, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2003.
- [6] 刘若庄, 马本堃. 非平衡系统中的自组织现象——“耗散结构”的理论与应用简介[J]. 物理, 1979, 8(5): 449–455.
- [7] LI Deyi, YIN Jialun, ZHANG Tianlei, et al. The four most basic elements in machine cognition[J]. *Data intelligence*, 2024, 6(2): 297–319.
- [8] 普里戈金, 斯唐热. 从混沌到有序: 人与自然的新对话[M]. 曾庆宏, 沈小峰, 译. 上海: 上海译文出版社, 1987.
- [9] 尼科利斯, 普里戈金. 非平衡系统的自组织[M]. 徐锡申, 陈式刚, 王光瑞, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [10] 李建永. 认知物理学的理论框架与应用进展[J]. 物理通报, 2022(8): 12–17.  
LI Jianyong. Theoretical framework and application progress of cognitive physics[J]. *Bulletin of physics*, 2022(8): 12–17.
- [11] FRISTON K. The free-energy principle: a unified brain theory?[J]. *Nature reviews neuroscience*, 2010, 11(2): 127–138.
- [12] PRIGOGINE I. Time, structure, and fluctuations[J]. *Science*, 1978, 201(4358): 777–785.
- [13] 李德毅, 张天雷, 韩威, 等. 认知机器的结构和激活[J]. *智能系统学报*, 2024, 19(6): 1604–1613.  
LI Deyi, ZHANG Tianlei, HAN Wei, et al. Structure and activation of cognitive machines[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2024, 19(6): 1604–1613.
- [14] 中国科普研究所. 中国科学技术协会统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2023.
- [15] FRISTON K, KILNER J, HARRISON L. A free energy principle for the brain[J]. *Journal of physiology, paris*, 2006, 100(1/2/3): 70–87.
- [16] 李德毅. 机器如何不像人那样认知[J]. 智能系统学报, 2025, 20(5): 1227–1231.  
LI Deyi. How can machines not cognize like humans [J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2025, 20(5): 1227–1231.
- [17] 王瑞东, 王睿, 张天栋, 等. 机器人脑智能研究综述[J]. *自动化学报*, 2024, 50(8): 1485–1501.  
WANG Ruidong, WANG Rui, ZHANG Tiandong, et al. A survey of research on robotic brain-inspired intelligence [J]. *Acta automatica sinica*, 2024, 50(8): 1485–1501.
- [18] CHOI S, YANG J, WANG G. Emerging memristive artificial synapses and neurons for energy-efficient neuromorphic computing[J]. *Advanced materials*, 2020, 32(51): 2004659.
- [19] HAM D, PARK H, HWANG S, et al. Neuromorphic electronics based on copying and pasting the brain[J]. *Nature*

- [electronics](#), 2021, 4(9): 635–644.
- [20] 李德毅. 认知工程: 李德毅学术思想文选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2026.
- [21] 郭毅可. 人类智能和机器智能共生共融的科学逻辑[J]. [人民论坛·学术前沿](#), 2025(22): 14–22.
- GUO Yike. The scientific logic of symbiosis and integration between human intelligence and machine intelligence[J]. [Frontiers](#), 2025(22): 14–22.
- [22] ISOMURA T, KOTANI K, JIMBO Y, et al. Experimental validation of the free-energy principle with in vitro neural networks[J]. [Nature communications](#), 2023, 14: 4547.
- [23] VALLORTIGARA G, VITIELLO G. Brain asymmetry as minimization of free energy: a theoretical model[J]. [Royal society open science](#), 2024, 11(7): 240465.
- [24] GLANSDORFF P, PRIGOGINE I. Thermodynamic theory of Structure, Stability and Fluctuations[M]. London: Wiley-Interscience, 1971.
- [25] 王姝彦, 柴新. 探索-利用困境再审视: 基于主动推理的视角[J]. [自然辩证法通讯](#), 2024, 46(7): 24–31.
- WANG Shuyan, CHAI Xin. Reconsideration on the exploration-exploitation dilemma: from the perspective of active inference[J]. [Journal of dialectics of nature](#), 2024, 46(7): 24–31.
- [26] 李德毅, 刘坤, 孙岩, 等. 涌现计算: 从无序掌声到有序掌声的虚拟现实[J]. [中国科学 \(E 辑\)](#), 2007(10): 1248–1257.
- LI Deyi, LIU Kun, SUN Yan, et al. Emergent computing: virtual reality from disordered applause to ordered applause [J]. [Science in China \(series E\)](#), 2007(10): 1248–1257.

#### 作者简介:



李德毅, 中国工程院院士, 中国人工智能学会名誉理事长, 中国指挥与控制学会名誉理事长, CAAI Fellow, 军事科学院研究员, 吴文俊人工智能科学技术奖最高成就奖获得者, 我国不确定性人工智能和认知物理学的主要开拓者、无人驾驶的积极引领者和人工智能产学研发展的重要推动者。E-mail: [lidy@cae.cn](mailto:lidy@cae.cn)。