



李明，加拿大皇家学会院士。美国康奈尔大学博士，哈佛大学博士后。曾执教俄亥俄州立大学、哈佛大学、约克大学、滑铁卢大学、加州大学圣巴巴拉分校。2024年获得IEEE Computer Society Wallace McDowell Award。2010年获得加拿大国家科学奖 Killiam Prize。ACM Fellow，IEEE Fellow，Killiam Fellowship 和 E. W. R. Steacie Fellowship。研究领域是Kolmogorov 复杂性的世界权威和生物信息学。

序言：信息与行动的度量衡 ——智能时代的语用信息论

李明

（滑铁卢大学计算机学院，滑铁卢 N2L 3G1）

信息论正站在一个新的历史门槛上。70多年来，香农理论回答了“符号如何被可靠传输”，控制论回答了“系统如何稳定运行”，决策论回答了“行动如何被理性选择”。这3条河流各自奔涌，深刻塑造了现代通信、计算与控制技术，却很少真正汇合。今天，当大语言模型、自动驾驶、具身智能和任务导向通信同时逼近一个共同问题——信息究竟如何转化为有效行动——我们比任何时候都更需要一种统一的数学语言。牛凯教授与张平院士的《语用信息的数学理论》，正是这样一部应运而生的著作。它不是对经典信息论的修补，而是把信息论从“符号世界”推进到“行动世界”的一次跃迁。换言之，它试图为智能时代建立一套“信息与行动的度量衡”。

这篇论文最核心的思想创新是提出“同效映射”，用以刻画“殊途同归”这一深刻原则：不同的语义路径，只要导向同一最优行动，就在语用层面等价。它与语义信息论中的“同义映射”构成自然层级：同义映射处理“同一意义可有多种表达”，同效映射则处理“同一行动可由多种意义支撑”。二者复合为“具象映射”，直接贯通语用目的与语法信号。由此，论文建立起语法、语义、语用三层级的信息框架。经典信息论与语义信息论不再是彼此分离的学说，而成为这一框架在映射退化为恒等时的特例。这个框架的优美之处在于，它没有否定香农，而是把香农安放在一个更宏大的坐标中：语法层保证信号可传，语义层保证意义可通，语用层

保证行动有效。信息论由此从“描述世界”走向“指导行动”。

值得注意的是，这一思想触及了信息论中很少正面处理的一个根本问题：信息价值依赖目标。柯尔莫哥洛夫复杂度关注最短描述，香农熵关注概率不确定性，而语用信息关注对行动的影响。同一对象对不同任务具有不同描述长度和价值。本文用等价类商结构把这种目标相关性数学化，是对信息度量的一次重要扩展。它不再追问“信息是什么”，而是追问“信息为了什么”。这一转向，使信息论第一次能够以严格方式处理目的、效用与行动，为智能系统的信息处理提供了基础数学框架。

在基础理论层面，论文建立了一套完整的语用信息度量体系，并证明了3个基本编码定理：无损信源编码定理、信道编码定理与率失真编码定理。它们分别以语用熵、语用信道容量和语用率失真为极限，构成对香农三大定理在语用层面的推广。论文进一步引入语用信息价值与语用信息成本，作为率失真与信道容量的对偶，通过拉格朗日框架把功率、带宽、时延等物理资源换算为效用单位，并得到“行为容量”这一核心概念：资源受限智能体通过行动从环境中提取的最大净效用。如果说香农容量刻画了物理信道的极限，那么行为容量刻画了智能体在资源约束下通过行动“有所作为”的极限。这是语用信息框架下通信、控制与决策的首次统一，其理论意义远超单一学科。

论文还进一步扩展到连续消息与动态场景。对

基金项目：国家重点研发计划项目(No.2025YFF0514400, No.2025YFF0514404)；教育部基础学科和交叉学科突破计划项目(No.JYB2025XDXM119)；国家自然科学基金重大项目(No.62293481, No.62471054)

于高斯信源通过高斯信道的情况，论文给出闭式表达，说明语用等价类能够带来“等效信噪比放大”，从而显著降低达到目标任务所需的功率。对于动态决策，论文用贝尔曼方程刻画信念状态下的联合优化，把通信速率视为资源，把信念更新视为决策依据，形成感知通信决策执行闭环的严格模型。这使理论不仅适用于静态编码，也适用于自动驾驶、具身智能、网络控制系统等序列决策场景。尤其可贵的是，论文始终没有停留在抽象定义，而是努力给出可计算、可优化、可验证的结构，这使它在工程上具有真实的落地潜力。

从多学科交叉融合的视角看，这篇论文的意义更为深远。它天然连接通信、控制、决策、人工智能、认知科学。在通信领域，它为任务导向通信和 6G 智能网络提供了理论基础；在人工智能领域，它为具身智能、智能体决策和人机协作提供了统一语言；在认知科学领域，它回应了“信息如何影响行动”这一根本问题。长期以来，这些学科各自发

展出关于信息、意义和行动的理论，却缺乏共同的数学基础。本文所建立的语用信息框架，正是朝这一方向迈出的关键一步。它让我们看到，信息论不仅可以描述信道，也可以描述智能；不仅可以计算比特，也可以计算行动的价值。这正是智能时代构建“信息与行动度量衡”的努力方向。

当然，这一理论仍需继续发展。非平稳过程、有限块长、多智能体博弈、高维信念计算，以及由深度学习得到的同效映射的误差与泛化，都是未来值得研究的方向。但方向已经清楚：未来智能系统不应只是符号管道，而应是有目标、有资源约束、能从信息中提取行动价值的智能体。论文为这样的系统提供了严格而优美的数学起点。它不仅是一部理论著作，更是一种新的信息观：信息的终极意义，不在于被传输，而在于指导行动。

我期待这篇论文在未来 10 年引发更多跨学科研究，并成为从香农信息论走向智能信息论的重要里程碑。谨以此为序。

