

# 【神经符号 AI 讲座】机器人控制技术的演进与发展

**编者按：**机器人控制技术正沿着显式模型、隐式模型和混合模式三条路径不断演进。早期的显式模型控制，以高精度和稳定性广泛应用于工业自动化；随着机器人走出工厂、面向更复杂的现实世界，神经网络驱动的隐式模型控制逐渐兴起，展现出更强的适应能力。为同时满足精度、安全性与泛化能力，混合模式控制应运而生。特别是近年来发展的神经符号具身智能，融合规则推理与深度学习的优势，成为机器人控制智能化、自主化发展的重要方向。

在当今科技飞速发展的时代，机器人技术正以前所未有的速度改变着我们的生产和生活方式。作为机器人系统的核心，控制技术的性能和智能化水平直接决定了机器人的应用范围和工作效率。当前，机器人控制技术主要通过**显式模型控制**、**隐式模型控制**以及**混合模式控制**三条路径发展，它们在不同场景中各有适配性，并形成了技术演进的主线。本文将从机器人控制技术的演进脉络出发，对比三条路径的优势与局限，并展望未来的发展趋势。

## 1、技术演进：从显式模型走向混合智能

机器人控制技术的发展历程，生动反映了人类在不同阶段应对“复杂性”挑战的思维演变。早期，机器人控制主要依赖显式模型，通过精确的运动学和动力学建模，利用数学公式和算法精确规划机器人的动作。这种模型在高度结构化的工业环境中取得了巨大成功，推动了工业机器人在汽车制造、电子产品装配等领域的广泛应用。然而，当机器人被引入非结构化、动态且不可预测的现实场景，如家庭、医院、户外等，显式建模的局限性逐渐显现。这些环境难以精确建模，规则不稳定，任务需求也更加多样化，显式模型难以适应这种复杂多变的场景。

为了解决这一问题，科学家们开始探索隐式模型控制。与显式模型不同，隐式模型不依赖全局可解释的数学模型，而是通过神经网络从大量数据中学习行为策略。这种方法使机器人在复杂环境中具备更强的适应性，能够自主调整行为以应对环境变化。然而，隐式模型也带来了新的挑战，如可解释性差、训练成本高、运行稳定性不足等。在此背景下，混合控制模式逐渐成为主流研究方向。这种模式结合了显式模型的可控性与隐式模型的灵活性，构建出稳定、安全、通用的控

制系统。近年来，神经符号具身智能的兴起为混合控制模式的发展提供了新范式。它融合了符号推理的逻辑能力和神经网络的感知与学习能力，使机器人能够在复杂环境中更好地理解、决策和行动。这种混合智能的探索，为机器人技术的未来发展开辟了新的道路，也为人类在复杂环境中的智能化应用带来了更多可能性。

## 2、显式模型控制

显式模型控制就像中学解物理题：从已知条件出发，列出方程，求出精确解。比如，击球时，只要知道球的重量、目标距离和重力加速度，就能算出施力的方向和大小。这一方法严谨且清晰，但前提是所有变量必须符合预设假设。工业机器人正是依赖这种精确建模的方法，它们需要与生产线高度协同，确保环境稳定、路径明确。这种控制方式追求零误差执行预设动作，在汽车装配、半导体制造等工业场景中表现出色。在这些高度受控的环境中，机器人需要精准、高效、可靠地完成任 务，而显式模型控制完美契合了这一需求。

然而，显式模型控制也有其短板。它对环境的高度依赖使其在面对动态变化或未知干扰时，灵活性不足，难以应对。这种局限性限制了它在非结构化或复杂动态环境中的应用，如家庭服务、灾难救援等场景。

## 3、隐式模型控制

与解题时的精确计算不同，人类打球通常凭感觉。球的重量和目标位置可能并不明确，但通过不断练习，我们逐渐学会如何出手才能命中目标。隐式模型控制正是如此，它不依赖显式公式，而是借助神经网络，结合感知（如视觉、力觉等）实时反馈来持续调整动作，以逼近目标。这种方法通常基于学习算法（如模仿学习、强化学习）或模糊控制逻辑，能够适应动态环境，具有较强的抗干扰能力。隐式模型适用于控制非结构化场景，为机器人在复杂环境中的应用开辟了新的可能性。

尽管隐式模型控制在适应性和灵活性方面表现出色，但它也面临诸多挑战。首先，其决策过程常呈现“黑箱化”特征，难以解释和理解。其次，为达到稳定性和安全性，需要海量训练数据，导致训练过程耗时长且资源密集。此外，推理过程需要大量算力，实时部署难度较大；隐式模型控制中的“幻觉”问题（即模型产生不真实的输出）尚未得到有效解决，这对可靠性提出了挑战。

#### 4、混合模式控制

混合模式控制的目的在于融合显式模型和隐式模型控制的优势，以寻求在安全性、稳定性、实时性、泛化性上的最优解。这种模式借鉴了丹尼尔·卡尼曼（Daniel Kahneman）《思考，快与慢》关于系统 1 和系统 2 思维的概念。其中，系统 1 是快速、直觉、并行的；而系统 2 则是缓慢、谨慎、顺序性的思维。目前主要有两种混合模式：

##### (1) System 1（神经网络）+System 2（神经网络）：

这种模式是双系统理论的直接体现，将“场景识别”和“动作控制”分别交给两个独立的神经网络来处理，分别训练后再进行融合，类似大小脑的协同工作。它借鉴了脑科学的原理，从网络结构设计入手，有效弥补了完全依赖“端到端”网络的不足——既能显著减少训练所需的数据量，又能使动作网络更加轻量化，以满足实时性要求。此外，通过两个网络之间的嵌入（embedding）操作，还能提升系统的可解释性。不过，这种模式仍需大量数据进行训练，例如 VLM 与动作网络至少需要万亿级别的数据量。同时，幻觉问题仍未解决，其在特定领域之外的泛化能力也较为有限。

##### (2) System 1（预定义+神经网络）+System 2（符号+LLM）

我们仍然以打球为例，这种模式不仅实现了双系统，还配备了一位“懂原理”的优秀教练。教练先教你基本动作，再告诉你在什么情况下用哪种动作。训练时，他不断纠正你的错误，并从原理上解释为什么这样不对，该如何调整。最终，通过实战和总结，你不仅能“会打球”，还能“懂为什么这么打”，举一反三，在球场上应对自如。

该模式即**神经符号具身智能**——基于对领域知识的深入理解，在系统 1 与系统 2 中进一步拆分出神经谓词和动作原语，并通过动作原语组合完成任务。它不仅能最小化训练所需的数据量，还能满足实时性要求，同时遵循可信规划标准 PDDL，确保了安全性。然而，这种方法依然需要大量数据进行训练，且在特定领域外的泛化能力仍有待提高。

现阶段，混合模式控制是机器人控制技术的研究热点之一。尽管尚未有大规模的实际部署成功案例，但学术界已经对其进行了大量验证。尤其是神经符号具身智能技术已经相对成熟，目前正在进行退役电池的拆解示范线建设，以推动其

实际应用。

#### 4、技术路线比较与发展趋势

将上述机器人控制技术路径的特点、优势、局限性以及产业化/商业化现状等信息进行系统梳理，并以图表形式呈现于附图中。

附图：机器人控制技术路径的比较

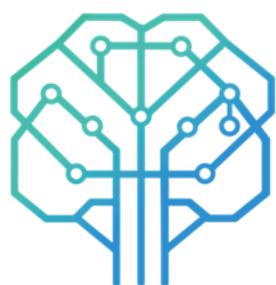
	显式模型控制	隐式模型 (神经网络) 控制	混合模式控制	
			System1 (神经网络) + System2 (神经网络)	System1 (预定义+神经网络) + System2 (符号+LLM)
<b>特点</b>	基于精确的数学模型(运动学/动力学)、环境完全结构化、任务高度重复、路径严格规划。目标是零误差执行预设动作。	通过感知(视觉、力觉、触觉等)实时反馈,持续调整动作逼近目标。依赖学习(模仿学习/强化学习)、行为主义逻辑,或模糊控制。	通过融合显式模型与隐式模型控制,寻求安全性、稳健性、实时性、泛化性上的最优解。 将完全的“端到端”网络分成两层,一层负责识别与决策,一层负责控制。两层分开训练,再融合。	基于对领域知识的深入理解,在 system1 与 system2 中进一步拆分出神经谓词和动作原语,通过动作原语组合完成任务。
<b>典型代表</b>	工业机器人	OpenVLA, RT-2	Helix(Figure AI), Pi0	神经符号具身智能
<b>优势</b>	超高精度(微米级)、高速、可靠,适用于汽车装配、半导体制造等。	适应动态环境(如行走、抓取变形物体),抗干扰能力强,适用于非结构化场景(家庭服务、灾难救援)。	通过拆分,减少了训练所需的数据量;同时,运动网络变小,可以满足实时性要求。通过两层中间的嵌入,提升了系统的可解性。	最小化训练所需的数据量,同时运动网络变小,满足实时性要求。同时,系统遵从可信的规划标准 PDDL,确保了安全性。
<b>局限</b>	环境需高度控制,灵活性差,无法应对动态变化或未知干扰。	精度可能较低,决策可能“黑箱化”、安全性低,稳定性需大量数据训练,推理需要大量算力,很难实时部署。“幻觉”问题无解。	依然需要大量数据训练,VLM+动作网络至少需要万亿数据量;“幻觉”问题依然无解。现有的 VLA 模型参数量远小于 LLM,原因就在于没有数据支撑更好的训练。	在特定领域之外无法泛化。
<b>产业化的现状</b>	广泛应用于工业流水线中。	研究逐步变冷,无实际部署成功案例,只有名义上的泛化性。	目前的研究热点,但无实际部署成功案例。	学术层面经过大量验证,已成熟。已进入工程示范阶段。

从技术特点和应用现状来看,显式模型控制在工业领域的应用已经非常成熟,但在面对复杂动态环境时显得力不从心。隐式模型控制在适应性和灵活性方面具有明显优势,但其“黑箱化”特性和对大量数据及算力的依赖限制了其进一步发展。混合模式控制则试图结合两者的优势,以克服各自的局限性,尽管仍处于研究和示范阶段,但其发展潜力巨大。

展望未来,随着人工智能技术的不断进步,尤其是深度学习和强化学习算法

的优化，混合模式控制有望在数据效率和模型可解释性方面取得突破。同时，硬件技术的发展，如更强大的计算芯片和更高效的传感器，将为这些技术的实际部署提供有力支持。此外，机器人控制技术的标准化和规范化也将推动不同技术路线之间的融合与协同发展。

**神经符号AI，赋能绿色制造的人工智能引擎**  
**<https://www.nsaihome.org.cn>**



**NSAiHome**  
**神经符号人工智能社区**

（撰文 王志刚 英特尔中国研究院，责任编辑 曹晓舟，审核 刘永光）