

从一到多： 的活跃机器人数量大小如何影响人类的认知过程

Julian Kaduk,¹ Müge Cavdan,² Knut Drewing² and Heiko Hamann¹

Abstract—在机器人技术中，了解人类与自主系统的交互对于增强协作技术至关重要。我们专注于人互（HSI），探索不同大小的主动机器人数量如何在不同持续时间内影响操作员的认知和感知反应。我们分析了 15 个机器人数量中不同数量的活动机器人对操作员时间感知、情绪状态、心流体验和任务难度感知的影响。我们的研究表明，与一个主动机器人相比，管理多个主动机器人会显著改变时间感知和流动体验，从而加快时间流逝和增加流动。更活跃的机器人和更长的持续时间会导致情绪唤醒和感知任务难度的增加，突出了机器人之间的相互作用，活跃机器人的数量与人类的认知过程。这些见解为创建直观的人群界面提供了信息，并有助于开发与人类认知结构一致的群体机器人系统，从而增强人机协作。

I. 介绍

人互（HSI）是一个新兴领域，它专注于人类操作员和机器人代理群之间的动态 [?] 超越了人机交互（HRI）。随着技术进步使得部署越来越大和越来越复杂的蜂群成为可能，了解人类如何感知、解释和管理这些系统变得至关重要。人类认知和集体机器人在行为之间的相互作用带来了独特的挑战和机遇，特别是在人类操作员必须保持态势感知和对群体行为控制的情况下。

机器人数量由许多简单的机器人组成，这些机器人通过本地交互自主运行，无需中央控制。这允许从简单的个人行为中产生复杂的集体行为，并具有可扩展性、灵活性和可靠性等额外好处 [?]。尽管大多数关于群体机器人的文献都集中在完全自主系统 [?]，但引入人为因素并实现部分半自主是一项重要的研究冒险。A 人类主管应该管理潜在的大量单个机器人，这可能很难同时监督。研究表明，应该有效地限制操作员影响的量，以提高群体 [?] 的整体性能，甚至用户输入的时机对于避免中断新出现的行为 [?] 至关重要。因此，HSI 的 a 主要重点是设计不同的用户界面，允许人类控制集群，而不会消除集群的特征或影响任务性能。

我们的重点是 HSI 的一个次要且未被充分探索的方面，该方面着眼于群体在交互式环境中对人类感知的影响。我们专门研究了群体配置对人类情感和认知处理控制任务的方式的影响。一般来说，我们希望通过研究群体中活跃机器人数量的变化如何影响人类的感知、认知和任务绩效来探索 HSI 的细微差别。在这里，我们研究了对时间感知、情绪反应、心流体验和感知任务难度的

影响。这些是人类处理的核心方面，不仅调节由此产生的任务性能，而且调节对机器人协作和幸福感的长期满意度。

在之前的一项研究中，我们发现，在用户控制的群体中，机器人数量越多，就会产生时间流逝得更快的感觉，同时对参与者的流动体验产生影响 [?]。我们看到了设计 HSI 的机会，通过自适应和动态地禁用和重新激活群体中的机器人来对人类的需求做出反应，从而可能利用这种感知调节效应。为了研究这种方法，我们设计了一个实验，将一群 $N = 15$ 机器人分成两个移动（主动）和不动（被动）机器人的子群，每个试验的群体划分不同。通过这种精心的实验设计，我们有助于更精确地了解主动机器人的定量变化如何影响人类体验的定性方面。

通过一系列实验，我们研究了参与者在不同持续时间内管理不同大小的子群体的能力，评估了他们的时间感知、情绪状态、心流体验和认知负荷。基于我们的研究结果，我们希望改进更有效的人群界面的未来发展，并为优化人群行为提供指南，以便在与主动和被动机器人的配置交互时与人类的认知过程保持一致。通过加深我们对 HSI 的理解，我们为更直观、更高效的协作系统铺平了道路，在这个系统中，人类和机器人数量可以通过增强协同作用和相互理解来实现共同目标。HSI 的

II. 相关工作

研究主要集中在优化接口和控制机制，以促进有效的人类监督，同时利用群体智能的先进功能。这种平衡旨在确保虫群的自主性不会受到人为干预的破坏，但该系统受益于人类优越的认知能力，可以进行战略监督 [?]。例如，通过热图表示为操作员提供群体状态的全局概述，而不是呈现来自每个智能体的数据 [?]，这被证明是有利的。增强现实 [?] 和虚拟现实 [?] 的使用也被证明是 HSI 的有效工具。

除了交互方式之外，考虑群体控制如何影响用户对任务的情感和认知处理也很重要。特别是，HSI 背景下的信任被认为是影响人群协作有效性的关键因素。增强操作员的信任度包括向他们提供有关集群状态的准确和及时的反馈，从而改善决策过程和任务绩效 [?]。挑战在于设计界面，为操作员提供简化但信息丰富的反馈，使他们能够做出明智的决策，而不会被群体的复杂性所淹没 [?]。A 可能的整体视觉是一个“人群联合循环”，其中人类成为群体的一部分，机器人成为人类的延伸 [?]。

将人类完全整合到群体中需要了解群体行为中的不同特征如何影响人类操作员的情感和认知处理。研究表明，在人类保持被动（只看一群人）的互动场景中，机器人数量越多，自我报告的唤醒水平就越高 [?]。更高的机器人速度会导致报告的唤醒水平增加，而更平滑的机器人运动会导致更高水平的报告的情绪效价 [?]。在我们之前的工作中，我们在人类参与者与机器人群的主动交互

*This work was supported by European Union's Horizon 2020 FET Open research program, grant no 964464, project ChronoPilot and by Deutsche Forschungsgemeinschaft, Germany's Excellence Strategy EXC 2117-422037984.

¹Julian Kaduk and Heiko Hamann are with the Department of Computer and Information Science, University of Konstanz, 78457 Konstanz, Germany julian.kaduk@uni-konstanz.de, heiko.hamann@uni-konstanz.de

²Müge Cavdan and Knut Drewing are with the Experimental Psychology Department, Justus Liebig University, 35390 Giessen, Germany muege.cavdan@psychol.uni-giessen.de, knut.drewing@psychol.uni-giessen.de

场景中发现了类似的效果，并专注于如何影响时间感知和流动体验的附加变量，表明群体中更多的机器人和速度的增加会导致流动体验的增加并加快时间感知 [?]。

在这里，我们重点关注时间感知、情绪状态、心流体验和认知负荷如何通过改变群体内活跃机器人的数量而受到影响，同时保持集群总大小与 $N = 15$ 机器人不变。这些人为因素是我们情感和认知过程的基本方面，据我们所知，没有研究在给定的背景下考虑过它们。在下文中，我们将更详细地解释上述方面及其相关性。

时间是无处不在的——任何感官体验，无论其形式如何，都包含时间成分。因此，在执行日常任务时，我们经常依靠我们对时间的感知来毫不费力地指导我们的行动。然而，时间感知是一种主观体验，容易失真。这种主观体验会根据各种认知、知觉和情感因素而变化 [?]。例如，地铁车厢内的拥挤程度会影响旅程的时间感知，乘客越多，时间就越长 [?]。

影响我们对时间知觉的客观因素各不相同，比如大小 [?]、数量 [?]、运动 [?]，或者刺激的情感价值 [?]，[?]。例如，与较慢或静止的刺激相比，快速移动的刺激延长了对时间的感知。在我们的日常经验中，我们很少遇到一个只包含静态或动态物体的视觉场景，而是由两者混合而成。在主动机器人监督任务中，这带来了额外的认知复杂性，因为所有机器人在视觉上都非常相似。为了区分哪些目标与监督任务相关，首先必须在心理上将它们与其他目标区分开来。视觉研究表明，移动目标比静止目标更容易被人类发现 [?]。然而，对于多个相关目标，如果参与者无法同时跟踪所有移动的智能体，则可能必须连续重复视觉搜索。

情绪状态不仅与我们对时间的感知 [?] 高度相关，而且描述了我们的幸福感，甚至可以和认知负荷 [?] 密切相关。因此，当我们在与机器人的互动中努力追求高水平的幸福感时，考虑这些因素至关重要，感知到的任务难度是我们衡量认知负荷的指标。此外，心流代表了认知参与的最佳状态，介于无聊和焦虑之间，其特征是个人技能与手头任务的要求之间的和谐平衡 [?]。心流的体验也经常与对时间 [?] 的感知改变有关，并被认为是一种理想的高幸福状态。

III. 方法

A. 场景

我们参与者的任务是防止一小群小型移动机器人离开一个 $2.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 的机器人竞技场，在地面上用黑色胶带划定。当机器人表现出随机行走行为时，在 Sec. ?? 中详细描述，参与者坐在竞技场旁边，并提供了一个单按钮界面来试图监督机器人的运动。参与者的视角如图 ?? 所示。

我们测试了八个不同的子群体大小 $N_a \in \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15\}$ ，其中 N_a 是群体中总共 $N = 15$ 个活跃机器人的数量。在整个试验过程中， $N_p = N - N_a$ 被动机器人被放置在竞技场内的随机位置并保持静止。该实验进行了三个不同的持续时间 $t \in \{1, 3, 5\}$ 以分钟为单位，总共有 24 个独特的试验条件。这些被随机呈现给参与者，以尽量减少两个会话的顺序效应，每个会话持续约 1.5 小时，选择这种结构是为了减少参与者的疲劳。

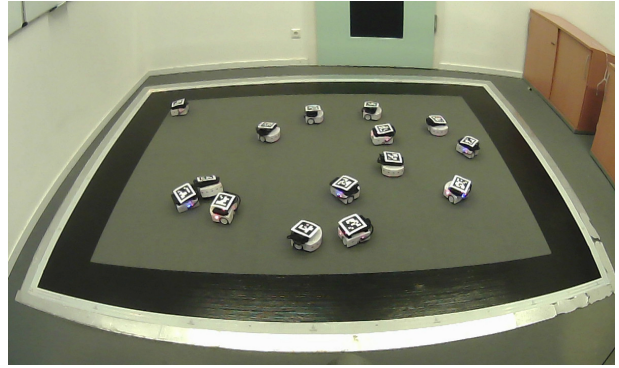


Fig. 1. 从参与者的角度看竞技场。

B. 实验程序

最初的会议以关于实验和整个研究项目的简报开始，然后参与者签署知情同意书并完成匿名人口统计问卷。随后，参与者参与了几项随机试验。每次试验前，他们观看了两分钟的放松水生视频，以建立基线条件 [?]。这是在主要试验之前进行的，该试验涉及与机器人互动一分钟、三分钟或五分钟，最后参与者填写一份包含六项的试验后问卷，以评估他们的时间感知和体验。在第一次试验之前，受试者被介绍给问卷，以避免最初的偏倚。

本研究的伦理批准已获得康斯坦茨大学伦理委员会¹，并符合赫尔辛基 [?] 宣言，无需预先注册。

C. 机器人硬件和行为

我们使用了 Thymio II 机器人 [?]，它们增强了 Raspberry Pi 3B，通过 Python 接口实现无线连接和控制，从而提高了它们的功能。Thymio II 机器人尺寸为 $110 \text{ mm} \times 112 \text{ mm}$ ，采用两个电机的差速驱动系统，最大线速度可达 $0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 。它配备了七个水平安装的红外传感器，五个在前部，两个在后部，每个检测范围约为 100 mm 。

机器人行为被编程为将随机行走与避障和用户输入相结合。在随机游走过过程中，机器人以 $v = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ 的恒定速度直线前进，随机选择的持续时间在 1 到 10 秒之间，基于均匀分布。如果其传感器检测到障碍物或在随机持续时间过后，机器人会以恒定的角速度在随机方向上原地旋转 0.5 到 3 秒之间的随机周期，由均匀分布决定。随后，它继续直线移动，选择新的随机持续时间。

通过按下按钮促进用户交互，触发所有机器人原地旋转并通过反转一个轮子的速度来改变方向，直到按钮被释放或按钮超时三秒钟。这种控制机制允许参与者在指定区域内管理机器人的运动。为了防止过度使用按钮，实施了三秒钟的超时，每次松开按钮或超时期限后都会重置，从而允许机器人继续其编程行为。

D. 自我报告的措施

每次试验后，参与者被要求完成一项调查，该调查由分布在三个类别中的六个问题组成。第一类旨在评估他们的时间感知，包括估计交互持续时间和评估时间流逝速度的问题。参与者估计了从 0:00 到 10:00 分钟的视觉时间轴上的交互长度，并以 5 点李克特量表对感知

¹参考编号: 24/2023

TABLE I

LMM 中时间估计、时间流逝、流程、任务难度、唤醒和效价的固定效应（机器人数量、实验持续时间、交互），以平方和 (SS)、均方 (MS)、自由度 (df)、F 值 (F) 和 p 值 (p) 报告。

Fixed effect	SS	MS	df	F	p
Passage of time					
Number of Robots	56.98	8.14	7, 414	12.31	< 0.001
Duration	136.06	68.03	2, 414	102.90	< 0.001
NoR × Duration	8.79	0.63	14, 414	0.95	0.5
Time Estimation					
Number of Robots	1.37	0.20	7, 414	0.32	0.98
Duration	698.20	349.10	2, 414	403.16	< 0.001
NoR × Duration	3.47	0.25	14, 414	0.29	1.00
Flow					
Number of Robots	68.88	9.84	7, 414	3.90	< 0.001
Duration	3.67	1.84	2, 414	0.73	0.48
NoR × Duration	21.77	1.56	14, 414	0.62	0.85
Perceived task difficulty					
Number of Robots	209.15	29.88	7, 414	57.38	< 0.001
Duration	10.29	5.15	2, 414	9.88	< 0.001
NoR × Duration	10.26	0.73	14, 414	1.41	0.15
Emotional arousal					
Number of Robots	577.80	82.55	7, 414	32.40	< 0.01
Duration	26.48	13.24	2, 414	5.20	< 0.001
NoR × Duration	36.34	2.60	14, 414	1.02	0.43
Emotional valence					
Number of Robots	18.98	2.71	7, 414	1.77	0.09
Duration	14.69	7.34	2, 414	4.78	< 0.01
NoR × Duration	33.72	2.42	14, 414	1.57	0.08

时间的速度进行评分，范围从“非常慢”到“非常快”。第二类使用自我评估模型 [?] 的 9 点李克特量表，通过关于情绪效价和唤醒的两个问题评估参与者的情感状态。最后一个类别分别使用 9 分和 5 分李克特量表，分别使用 9 分和 5 分李克特量表，询问参与者对心流状态和任务难度的体验，以衡量他们对任务的参与程度和挑战。

E. 参与者

我们为这项研究招募了 18 名参与者，其中 50 名% 为男性，50 名% 为女性。5 名受试者年龄在 18 至 20 岁之间，13 名受试者年龄在 21 至 29 岁之间。资格标准包括最低年龄为 18 岁，对问卷的德语有熟练的书面理解，并且没有任何已知的当前或先前的心理障碍或心脏病。没有为参与这项研究提供经济补偿。

IV. 结果

在 R Studio 2023 版本 4.3.0 中使用线性混合模型 (LMM) 进行统计分析。LMM 通过最大似然估计与 lmer 库拟合。对于每个因变量（即时间估计、时间流逝、流量、唤醒、效价和难度），每个参与者都作为随机截距输入模型，以适应个体之间的差异，从而可以更准确地估计固定效应。对于每个模型，固定效应是活动机器人的数量、持续时间以及机器人数量与持续时间之间的交互。使用方差分析函数估计固定效应结果，该函数使用 Satterthwaite 近似计算固定效应的 F 检验。使用 emmeans 库估计后续事后成对比较和均值。如果需要，Bonferroni 调整方法用于多次成对比较。

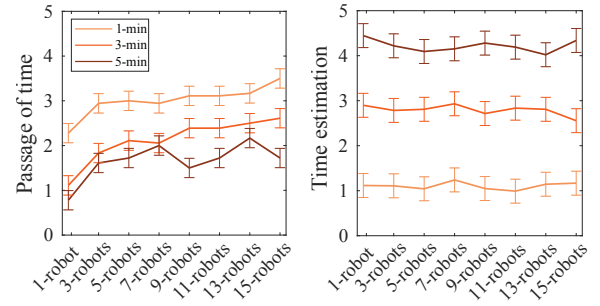


Fig. 2. 估计的平均时间流逝（左）和时间估计（右）作为活动机器人数量的函数，用于自我报告的测量值，从 0 到 4 的等级，用于时间的流逝和以分钟为单位的绝对持续时间估计。误差线对应于均值的标准误差。

A. 时间的流逝

LMM 对机器人持续时间和数量对时间流逝的影响分析表明，在没有交互效应的情况下，活动机器人数量和持续时间对时间流逝的主要影响（见表 ??）。事后成对比较显示，1 分钟比 3 分钟更快，5 分钟和 3 分钟比 5 分钟更快。此外，成对比较表明，与其他活动机器人条件相比，1 个机器人条件导致时间流逝较慢，而其他比较之间没有显著差异（28 测试的 p 值调整）。该测量的数据如图 ?? 所示。

B. 时间估算

LMM 对活动机器人持续时间和数量对时间估计的影响的分析表明，持续时间是主要影响，而不是活动机器人数量或活动机器人数量与持续时间之间的交互作用（详细结果见表 ??）。对持续时间的随访，预期，5 分钟和 3 分钟估计更长，而 1 分钟和 3 分钟估计短于 5 分钟（均 $p < .001$ ）。该测量的数据如图 ?? 所示。

C. 流

LMM 分析了持续时间和机器人数量对流量的影响，仅显示了主动机器人数量的显著主效应，而没有显示持续时间及其相互作用的影响（见表 ??）。事后成对比较显示，1-机器人与 5-机器人、7-机器人、9-机器人、13-机器人和 15 机器人相比，流量较低，而其他比较之间没有其他显著差异（28 tests 的 p 值调整）。该测量的数据如图 ?? 所示。

D. 困难

LMM 对机器人持续时间和数量对难度的影响分析揭示了主动机器人数量和持续时间的主要影响，而它们的交互作用并不显著（见表 ??）。持续时间随访显示，5 分钟感觉比 1 分钟和 3 分钟（三次测试的校正）更难。此外，除了少数例外（3 机器人与 5 机器人和 7 机器人、5 机器人与 7 机器人、9 机器人与 11 机器人、11 机器人与 13 机器人、13 机器人与 15 机器人），机器人数量的增加被认为更加困难（28 tests 的 p 值校正）。该测量的数据如图 ?? 所示。

E. 觉醒

LMM 对持续时间、机器人数量及其交互作用对唤醒的影响的分析揭示了机器人数量和持续时间的显著主效应，而它们的交互作用不显著（见表 ??）。持续时间的成对

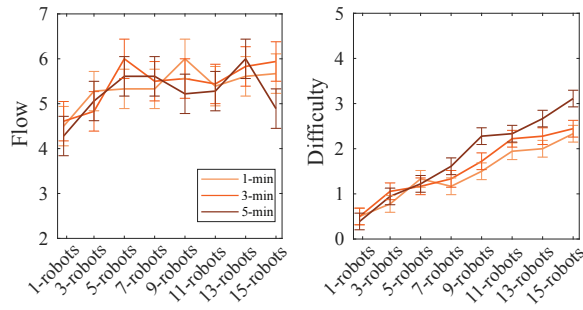


Fig. 3. 估计的平均流量(左)和难度(右)作为主动机器人数量的函数,用于自我报告的测量,流量从0到8,难度从0到4。误差线对应于均值的标准误。

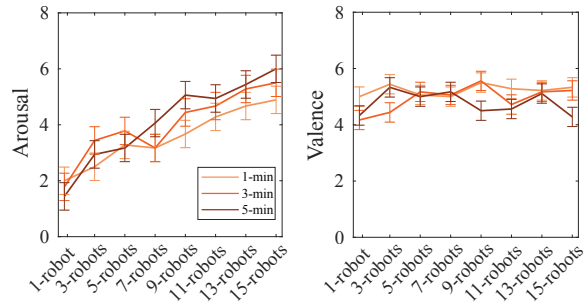


Fig. 4. 估计的平均唤醒率(左)和效价(右)作为主动机器人数量的函数,用于从0到8的自我报告措施。误差线对应于均值的标准误。

比较表明,与1分钟相比,3分钟和5分钟更令人兴奋(3次测试校正了p值)。对机器人数量的跟踪结果显示,随着机器人数量的增加,唤醒程度更高:15-机器人比其他机器人(11-机器人和13-机器人除外)感觉更兴奋,其次是13-机器人(9-机器人和11-机器人除外)。9-robot感觉比1-robot和3-robot更令人兴奋,7-机器人、5机器人和3-robot感觉比1-robot更令人兴奋(28 tests的p值调整)。该测量的数据如图??所示。

F. 原子价

LMM对持续时间、活跃机器人数量及其交互作用的影响结果显示,持续时间的主效应显著(见表??),而机器人数量和交互作用没有统计学意义。随访结果显示,1分钟感觉比5分钟更愉快(3次测试校正了p值)。该测量的数据如图??所示。

V. 讨论

在我们的调查中,我们重点研究了不同亚群大小对时间感知的影响。我们之前的[?]研究表明,当更多的机器人仅与一群活跃的机器人交互时,会加快感知时间并缩短持续时间判断。在这里,人类操作员仅与一部分活跃的机器人进行交互,我们观察到不同的效果。

我们的研究表明,在所有多机器人条件下,不同数量的活动机器人的时间感知相对稳定。然而,相比之下,单机器人条件导致感知时间流逝明显变慢,这表明仅仅视觉上存在额外的不活动机器人会影响人类的时间感知。这是一个关键的区别,表明人们不能简单地停用机器人来自适应地调节HSI中的时间感知。我们怀疑,在1个机器人条件下,参与者可以很容易地关注机器人,而多

机器人条件需要额外的步骤,即必须识别相关的移动机器人,然后才能决定是否需要用户输入。

关于实验的持续时间,我们观察到参与者倾向于低估5分钟实验的持续时间并高估1分钟的实验。这与时间知觉中“维罗特定律”的基本理论相一致,即较短的持续时间往往被高估,而较长的持续时间则被低估[?]。虽然这种现象在亚秒范围内的持续时间(例如,[?])被理解,但我们的数据强调,在我们的实验中,它也可以观察到更长的持续时间,在一到三分钟之间有一个“无差异点”。

关于心流体验的数据与在时间感知中观察到的模式一致。参与者报告说,与多机器人条件下相比,单机器人条件下的流动状态更低,这强化了对处于流动状态的增强感知和对时间的更快感知是相互关联的观念。然而,实验的持续时间并没有影响流动状态,这表明主要是活跃机器人的数量推动了用户体验的这一方面,而不是交互的长度。增加的流动感和更大的活跃子群之间的这种相关性凸显了让操作员有效参与任务的重要性,这似乎得益于管理多个机器人的复杂性和需求。

我们的结果表明,活跃机器人的数量与感知的任务难度之间存在明显的相关性,尤其是在较长的交互中。较大的活跃子群与认知负荷增加有关,这可能是由于管理多个机器人所需的注意力和控制需求更高。这种影响在持续时间最长的条件下尤为明显,这表明操作员疲劳和相关的认知负荷可能是设计群体交互任务的重要因素,尤其是在长时间的情况下。

考虑到不同子群体规模的情绪影响,我们发现平均评分为中性,对参与者的情绪效价没有影响。只有1分钟的条件总体上被评为比5分钟的条件更令人愉快。然而,随着活跃机器人数量的增加和交互时间的延长,情绪唤醒显著增强。这种高度的唤醒可归因于这些场景中所需的参与度和认知需求的增加,这表明群体机器人系统的设计需要考虑在人类操作员中引起压力或过度刺激的可能性。

这些结果表明,时间感知和流动体验不能通过停用群体的某些部分来主动控制,从而将交互限制在机器人的活跃子集上。然而,感知到的任务难度和唤醒可以通过这种方式进行自适应调节。由于这两个因素也受到持续时间延长、唤醒水平增加和感知任务难度增加的负面影响,因此随着时间的推移,机器人的减少也可用于平衡对操作员的认知需求。这些见解对人群界面的设计和群体机器人系统的整体管理具有若干意义。设计人员必须仔细管理操作员与主动机器人的互动,因为这对于创建有效、高效和用户友好的群体机器人系统至关重要。

VI. 结论

我们的研究为HSI提供了重要的见解,强调了活跃的亚群大小的变化如何影响人类的认知和感知反应。我们发现,不同数量的主动机器人会明显影响时间感知、心流体验、情绪唤醒和感知任务难度。我们的结果在单个和多个活动机器人的场景之间的对比突出了人类对群体动态反应的复杂性。虽然活动亚群大小的调整并不能统一地改变所有人类的感知,但它们可以战略性地影响任务难度和情绪唤醒等因素。这些发现对于设计直观的人群界面至关重要,这表明需要符合人类认知需求的自适应系统,以提高协作效率和用户满意度。我们的研究有望为更多关于个性化和自适应群体行为的研究奠定基础,

目标是人机协作的无缝集成。它揭示了将人类认知和感知因素纳入群体机器人设计中的关键需求，从而提高了协作效率。