arXiv:2303.00192v1 [cs.HC] 1 Mar 2023

探索如何支持设计师学习与基于人工智能的制造设计工具协同创作的挑战与机遇

Frederic Gmeiner 人机交互研究所 卡内基梅隆大学 美国宾夕法尼亚州匹兹堡
gmeiner@cmu.edu

Humphrey Yang 人机交互研究所 卡内基梅隆大学 美国宾夕法尼亚州匹兹堡
hanliny@cs.cmu.edu

Lining Yao 人机交互研究所 卡内基梅隆大学 美国宾夕法尼亚州匹兹堡
liningy@andrew.cmu.edu

Kenneth Holstein 人机交互研究所 卡内基梅隆大学 美国宾夕法尼亚州匹兹堡
kjholste@cs.cmu.edu

Nikolas Martelaro 人机交互研究所 卡内基梅隆大学 美国宾夕法尼亚州匹兹堡
nikmart@cmu.edu

摘要

基于人工智能的设计工具正迅速融入专业软件，以协助工程设计师和工业设计师完成复杂的制造与设计任务。这些工具比传统的计算机辅助设计工具承担了更多代理式角色，并常被视为“共同创作者”。然而，要有效地使用这类系统，需要掌握不同于仅使用复杂 CAD 工具的技能。迄今为止，我们对工程设计师如何学习使用基于人工智能的设计工具知之甚少。在本研究中，我们观察了受过培训的设计师如何学习使用两种基于人工智能的工具完成一项贴近实际的设计任务。我们发现，设计师在学习如何与当前系统有效协同创作时面临诸多挑战，包括理解和调整 AI 输出，以及沟通设计目标方面的挑战。基于研究发现，我们提出了若干设计机会，以更好地支持设计师与人工智能协同创作。

CCS 概念

• 以人为本的计算 → 人机交互实证研究；•应用计算 → 计算机辅助设计。

关键词

计算协同创作、生成式人工智能、人机协作、出声思考研究、群体认知、团队学习

ACM 引用格式：

Frederic Gmeiner、Humphrey Yang、Lining Yao、Kenneth Holstein 和 Nikolas Martelaro。2023年。《探索支持设计师学习与基于人工智能的制造设计工具协同创作的挑战与机遇》。载于《*2023*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集》（*CHI '23*），*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡。ACM，美国纽约州纽约，20页。https://doi.org/10.1145/3544548.3580999

允许免费制作本作品的部分或全部内容的数字或纸质副本，供个人或课堂使用，但前提是不得为营利或商业利益制作或分发副本，且副本必须包含本声明及首页上的完整引文。必须尊重本作品中第三方组件的版权。其他用途请联系所有者/作者。*CHI '23*，*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡© 2023年版权归所有者/作者所有。ACM ISBN 978-1-4503-9421-5/23/04。
https://doi.org/10.1145/3544548.3580999

1 引言

现代制造工艺使设计师能够生产复杂的零部件，优化强度重量比，或利用形状可变塑料等新型材料，但设计师往往难以凭借自身的认知能力完成这些设计。近年来，计算机辅助设计（CAD）工具开始整合基于人工智能的功能，根据设计师的诸多优化目标生成零部件设计方案[54]。例如，日本电动汽车制造商WHILL使用Autodesk Fusion 360生成式设计，对电动轮椅部件的材料经济性、强度和可持续性进行优化 [27]。人工智能工具还帮助设计师利用形状可变智能材料结构等新兴制造工艺生成零部件 [80]。在这两个例子中，借助人工智能，设计师能够完成一些若非有人工智能支持便极其繁琐或无法实现的设计方案。

这些生成式人工智能工具在人机协同设计流程的部分环节中拥有更大的主动权和自主性，因此常被称为“共同创作者” [18]。然而，要实现有效且实用的共同创造，设计师仍面临显著的学习曲线，因为他们需要与人工智能代理协作工作和思考，而这些代理的运作方式不同于人类协作者或复杂的 CAD 工具。

研究表明，要有效使用功能丰富的专业非人工智能设计软件，仍需投入大量时间持续学习，因为这类软件的功能日益强大 [38, 49]。因此，人机交互领域的研究重点并非简化软件界面，而是探讨如何通过交互式界面更好地支持人们学习使用这类复杂的软件系统[24, 44, 51]。然而，与人工智能“共同创作者”协作，与使用传统 CAD 工具并不相同。设计师并不直接操控三维几何体，而是为人工智能系统设定设计目标，由其据此进行构建。然而，对于如何支持设计师学习使用承担更积极、协作角色的人工智能工具，人们仍知之甚少。

在本研究中，我们探讨如何更好地支持设计师学习与人工智能设计工具进行协同创作。我们的研究以近期的人机交互文献为指导，这些文献旨在基于促成人与人之间协作有效的机制，为人机协作的设计提供参考——例如沟通中的共同基础或共享心智模型 [5, 6, 10, 31, 40, 77, 85]。

此外，我们还从团队学习 [79] 中寻求灵感。团队学习对人们应采取哪些行动才能学习彼此有效协作进行了建模。

为了深入了解如何改进人机设计协作，我们研究了没有人工智能共创经验的工程师和工业设计师，如何在先进制造设计任务的情境下学习使用AI CAD工具。我们选择这一领域，是因为其设计任务的复杂性日益增加，设计师往往需要人工智能辅助。通过研究，我们旨在获得相关洞见，为未来人工智能设计工具的支持界面提供依据。具体而言，我们探讨以下研究问题：

RQ1a 设计师在学习使用计算型人工智能工具进行协同创作时面临哪些挑战？

RQ1b 设计师如何克服这些挑战？

为回答这些问题，我们开展了一系列出声思维研究，观察受过培训的工程设计师和建筑设计师如何（尝试）在复杂制造设计任务中学习使用两种不同的计算型人工智能工具进行协同创作（研究1）。通过分析他们与系统的交互以及回顾性访谈，我们发现，他们通常认可人工智能辅助的价值，但在学习如何有效地与这些工具进行协同创作以及解读设计输出方面面临挑战。那些能够产出可行且令人满意的设计方案的人，通过在早期系统地测试工具能力的边界、自我解释所观察到的人工智能行为，以及绘制草图并反思设计问题，学会了与工具进行协同创作。

在了解这些挑战后，我们接着探讨如何更好地支持设计师进行协同创作，提出了以下问题：

研究问题二 支持设计师学习如何与计算型人工智能工具协同创作的有效策略是什么？

为回答这一问题，我们借鉴了以往关于人际协作的研究 [9, 53, 68]。我们开展了一项人际协作研究，考察人工引导者如何帮助人工智能工具的新用户学习协同创作，以及新用户如何在人工协助下进行学习（研究2）。我们观察到的有效支持策略包括提供分步说明、引导设计反思，以及为设计任务提出替代策略和目标。我们还发现，人工引导者高度依赖多模态沟通（例如屏幕批注和鼠标手势），以便与设计师进行更有效的沟通。

最后，为了明确新支持工具的设计机会，我们提出了以下问题：

研究问题3 设计师在与人工智能协同创作方面有哪些需求和期望？

综合两项研究的结果，我们了解到，许多参与者觉得自己无法向人工智能表达设计目标，并希望工具能提供更多对话式交互和情境感知。我们将根据这些需求和期望，探讨潜在的支持启示与未来工作。

简而言之，本研究有三项主要贡献：

(1) 提出一系列观察到的挑战，说明在先进制造设计背景下，工程和建筑设计师在学习与人工智能协作以完成复杂共创任务时所面临的挑战；

(2) 加深我们对设计师对人机共创工具的需求和期望的理解；

(3) 强调设计机会，以更好地支持设计师学习协同创作。

2 相关工作

2.1 面向制造业的基于人工智能的设计工具

基于人工智能的设计支持工具运用多种计算方法，根据设计师设定的约束和目标生成二维和三维设计方案 [1, 72]。在三维建筑、工业和机械设计领域，新的生成式设计工具帮助设计师创建消费品 [43], 建筑布局 [60], 以及轻量化的汽车和飞机零部件 [59, 61]。在新兴先进材料领域，人工智能设计工具协助设计师使用形状可变或弹性可变的材料创建结构 [29, 80]。这类人工智能工具运用多种技术，根据一系列目标和要求生成设计方案，包括基于约束的求解器 [73], 、风格迁移 [2, 28], 、仿真与优化 [80], 以及遗传算法 [59]。这些技术已应用于 Siemens NX、Solidworks 和 Autodesk Fusion 等三维计算机辅助设计工具中，并开始投入商业使用360 [3, 17, 69]。许多此类工具以黑箱方式运行：设计师先设定目标，再审查生成的设计方案。然而，这种交互方式可能导致设计师难以迅速建立对工具工作原理的心智模型，从而限制其创造性使用。

近期研究开发了生成式设计界面，以便通过实时设计生成和评估，交互式地探索多种设计选项 [39, 52, 83] ，或促进设计师与工具之间开展更多迭代式互动 [14, 19, 37]。然而，鲜有实证研究评估工程师和设计师如何学习使用人工智能设计工具完成实际任务。一些现有研究测量了人工智能代理对人类工程团队表现的影响 [84] ，另一些研究则探讨了专业创客期望人工智能在数字制造工作流程中发挥何种作用 [81]。本研究通过实证观察，探讨工程师、工业设计师和建筑设计师如何学习使用基于计算的人工智能设计工具开展工作并进行协同创作。

2.2 学习复杂软件

以往的人机交互研究着眼于评估和提升复杂软件系统的可学习性。过去的研究探讨了不同年龄的人如何学习功能丰富的笔记工具 [49], 、专业工程师如何学习三维设计软件 [38], ，以及业余设计师如何学习专业动态图形软件 [33]。人们往往通过搜索网络论坛或向熟悉相关知识的同事求助来学习 [38]。针对帮助人们学习复杂软件的界面，研究提出了动态前馈工具提示 [44], 、引导式教程系统 [24], ，以及支持自主试错学习的小部件 [51]。

尽管先前的研究已经探讨了诸如自主学习等用于处理复杂软件的视角 [13], 但如何最好地支持用户与在设计过程中发挥积极作用的人工智能系统进行共同创造的自主学习，仍是一个有待解决的问题。例如，先前关于人机人工智能协作的研究表明，人工智能系统的黑箱本质带来了新的挑战，用户需要应对不透明且不直观的

系统行为，这在完成"协作"任务时妨碍了协调与沟通 [10]。为应对这些问题，可解释人工智能或可理解性等各种策略旨在帮助用户完善其对人工智能系统的心智模型 [55, 70]。

然而，即使人工智能模型对用户而言变得更加直观，我们仍认为，用户始终需要学习如何与人工智能系统有效协作，例如建立共享心智模型 [35, 40]。因此，正如我们将在下一节讨论的那样，要支持人类学习如何与人工智能有效地协同创作，就需要引入其他理论视角。

2.3 将人际协作作为研究共同创作系统的视角

为设计有效的人机协作，研究人员建议借鉴对有效人际协作要素的研究 [5, 6, 10, 31, 40, 77, 78, 85]。人机协作的支持框架在多大程度上应当仿照人际协作支持方案的设计，仍是一个尚无定论的问题 [77, 85], ；人机交互研究人员指出，心理学、教育学和学习科学中的理论与研究发现目前尚未得到充分利用。例如，Koch 和 Oulasvirta [40] 指出，群体认知——研究智能体如何看待其他智能体的决策、能力、信念、共同目标与理解——为人机协作研究提供了有力的概念，但在相关文献中鲜少被提及。群体认知涵盖多种现象，例如沟通中的共同基础 [16]（通过语言和非语言沟通建立相互理解），以及心智理论 [22]（智能体意识到自身及他人的信念、意图、知识或观点的能力）。同样，Kaur 等人 [35] 认为，与人际协作类似，人类与人工智能之间的有效协作可能需要人和人工智能之间建立共享心智模型，以实现团队成员之间行动的自适应协调等机制 [16, 56]。这些模型可能包括对待完成任务、彼此能力与局限，或彼此目标与策略的共享表征[20, 25, 66, 74]。已有研究开始探索如何支持人类建立并维持对人工智能协作者能力与局限更准确的心智模型，以应对这些机遇 [5, 6, 41]。然而，与人际协作的相关概念相比，仅完善用户的心智模型并不足以实现有效协作；有效协作还需要用户与系统之间形成共享心智模型 [35]。

迄今为止，尽管人们日益认识到此类支持的必要性，但鲜有研究探讨如何最好地支持人类学习与人工智能协作完成真实任务，例如设计任务 [10, 45, 50, 85]。设计任务为人机协作带来了引人入胜的挑战，因为设计问题往往定义不清，需要团队通过创意生成、构建原型和测试等迭代过程，在问题与解决方案空间中探索并协商 [21] [32]。

在本研究中，我们探讨了新兴制造设计任务中的人机协作——在这一领域，成功完成任务有时需要人机协作，但若缺乏有力的支持，人们可能难以实现有效协作 [45, 85]。

2.4 团队学习

虽然沟通中的共同基础、心智理论和共享心智模型等现象提供了有用的概念，有助于解释哪些认知和社会现象能够促成一组智能体之间的协作 [35, 40], ，但这些理论并未解释由个体智能体组成的群体如何学习有效协作。为弥补这一不足，团队学习应运而生，旨在研究哪些行动和条件有助于人类群体学习如何有效协作 [79]。例如，团队学习研究表明，有效共享心智模型的形成得益于团队成员之间积极的协商过程，其中包括"建设性"的冲突形式、论证和解决[30, 34, 74]。然而，迄今为止，团队学习尚未充分用于研究人机共创。在本研究中，我们借鉴团队学习中的概念，例如积极的沟通过程、联合信息处理和行动协调 [53], ，以探究哪些行动和支持策略能够帮助设计师学习如何与基于人工智能的设计工具协同创作。

3 研究1：出声思考设计环节

我们开展了一系列出声思考研究 [75] ，邀请受过培训、但缺乏人工智能协作经验的设计师使用人工智能设计工具，完成一项真实的先进制造设计挑战。出声思考研究要求参与者在执行任务时说出自己的想法，以便研究人员了解其认知过程（例如，形成心智模型 [15], 、学习 [82]）。在本研究中，我们采用出声思维法，观察人工智能新手如何学习与人工智能工具协同创作；他们面临真实的学习挑战，且不像专家那样容易受到偏见影响。参与者首先完成一场由研究人员主持、时长30分钟的出声思考环节；研究团队成员在一旁观察他们的操作，并聆听他们讲述自己正在思考和进行的事情。一半参与者具有机械工程背景，他们使用 Autodesk 的 Fusion360 生成式设计（基于拓扑优化，可生成多个选项） [52], 设计了一个轻质且坚固的船舶发动机安装支架，同时考虑最优的制造方法与材料组合。另一半参与者具有建筑学或工业设计背景，他们设计了一个采用形状变化材料制作的自行车水壶架——这是一项复杂的设计任务，若没有计算支持，完成起来颇具挑战。负责瓶架任务的设计师使用 SimuLearn [80], ，这是一款基于机器学习的研究工具，构建于 Rhino3D 之上，可帮助设计师利用形状变化材料创建结构。

完成设计任务后，参与者提交了自己的设计方案，并参加了半结构化访谈，回顾与设计工具合作的经历。在整个研究过程中，我们收集了以下数据：

- 开放式出声思考设计环节的视频和音频录制，以及机器生成的转录文本
- 任务后访谈的音频录音和机器生成的转录文本
- 3D 出声思维环节中创建的设计方案

表1：研究1参与者概览。P-F11* 和 P-S11* 是同一位参与者，该参与者具有使用 Fusion360 和 SimuLearn 的经验。参与者编号出现缺漏的解释：部分参与者在第一次设计环节后退出，或被分配至研究2（见第6节）。

ID	组别	Age 年	性别	领域	职业	CAD经验 年	行业经验 年
P-F01	Fusion360	27	M	土木与环境工程	学生 / 文学硕士	>5	2 – 5
P-F02	Fusion360	27	M	机械工程	学生／博士生	>5	2 – 5
P-F03	Fusion360	25	M	机械工程	学生／博士生	>5	2 – 5
P-F04	Fusion360	26	M	机械工程	学生 / 文学硕士	>5	1–2
P-F05	Fusion360	19	M	建筑学，数学	学生 / 文学学士	2 – 4	0
P-F11*	Fusion360	64	M	机械工程	承包商	>10	>30
P-F12	Fusion360	59	M	机械工程	设计师	>10	>30
P-S01	SimuLearn	21	F	建筑学	学生 / 文学学士	2 – 4	0
P-S03	SimuLearn	23	F	计算设计	学生 / 文学硕士	2 – 4	0
P-S04	SimuLearn	21	M	建筑学	学生 / 文学学士	>5	1–2
P-S06	SimuLearn	23	F	建筑学	学生 / 文学硕士	>5	<1
P-S07	SimuLearn	23	M	建筑学	学生 / 文学硕士	>5	0
P-S10	SimuLearn	33	F	工业设计	研究人员	>5	6 – 10
P-S11*	SimuLearn	64	M	机械工程	承包商	>10	>30

3.1 参与者

我们招募了14名设计师（4名女性／10名男性，年龄为19至64岁（$M = 32.5$，$SD = 16.6$），其背景涉及建筑学、工业设计或机械工程（表1）。大多数参与者来自本机构的学生群体，此外，我们还通过一个面向使用 Fusion360 [64] 的设计师的在线论坛招募了三名专业设计师。参与者至少有两年使用 CAD（Fusion360 或 Rhino 3D）的经验，但根据筛选问卷，他们均没有使用过本研究所考察的人工智能设计工具。参与者主要是本科生和博士生，另有三名工程师，具有 > 30 年行业经验（表1）。我们招募了熟悉 Fusion360 或 Rhino3d 的参与者，以便他们能够专注于学习使用人工智能共创功能，而非学习 CAD 工具的用户界面。研究开始前，所有参与者均签署了经本机构 IRB（*STUDY2021_00000202*）批准的同意书。参与者的报酬为每小时20美元。

3.2 研究背景：基于人工智能的设计工具与任务

为了深入了解设计师在设计师与人工智能协同创作中的挑战、需求和期望，并获得可推广的见解，我们观察了设计师如何尝试学习使用两种不同的计算型人工智能工具协同完成数字化制造任务。研究期间，参与者需要完成一项具有一定难度且贴近现实的设计任务。我们选取了一项涉及多维优化的机械工程设计任务，以及一项探索形状变化材料应用场景的工业设计任务。这两项任务都过于复杂，无法在没有人工智能的情况下完成，而且已有功能完善的人工智能工具可供使用。我们与工程师和先进制造专家合作，确定并试行这些任务，以确保其复杂程度适中，既能满足研究对象的能力水平，又不会令他们不堪重负。这些任务要求参与者在多个环节中，利用数小时生成设计方案。

3.2.1 机械设计支持工具。机械设计师使用了Autodesk Fusion360[3], 的“生成式设计”特征，该特征通过拓扑优化和遗传算法帮助设计师创建轻质且坚固的零件。在这项任务中（图1A-D），设计师需要设计一个节省材料且结构稳固的发动机安装支架，并从大量可能方案中选出最佳制造方法与材料组合。虽然设计安装支架是机械工程师的常见工作，但若没有仿真和人工智能支持，要针对不同制造方法和材料优化设计十分困难。传统上，工程师会先制造零件，再根据结构分析逐步去除或添加材料，以得出经过重量优化的零件。对于每种材料与制造方法的组合，都需要探索不同的制造选项，这既耗时又繁琐。相比之下，生成式设计可以根据指定的高层要求自动生成多种不同的设计选项，供设计师探索和选择。

参与者获得了一个初始文件，其中包含几何约束，并需要指定机械设计标准（例如载荷、螺栓连接间隙、边界条件）。随后，参与者运行求解器，并评估人工智能生成的解，从中选出三个可行的设计方案提交（图 1E）。如果参与者认为所有结果都不令人满意，用户可以通过调整输入标准来迭代设计。

3.2.2 工业设计支持工具。 工业设计师和建筑设计师使用 SimuLearn [80], ——一个基于 Rhino3D 构建的研究系统，该系统运用机器学习驱动的仿真和优化，使设计师能够快速创建由形状变化材料制成的物体。这一制造工艺使用 PLA塑料制作 3D打印平面网格，加热后，网格可变形成立体形状。通过调整网格几何形状以及梁中主动变形元件所占的比例（即致动器比例），可以控制变形过程及最终形状。这种

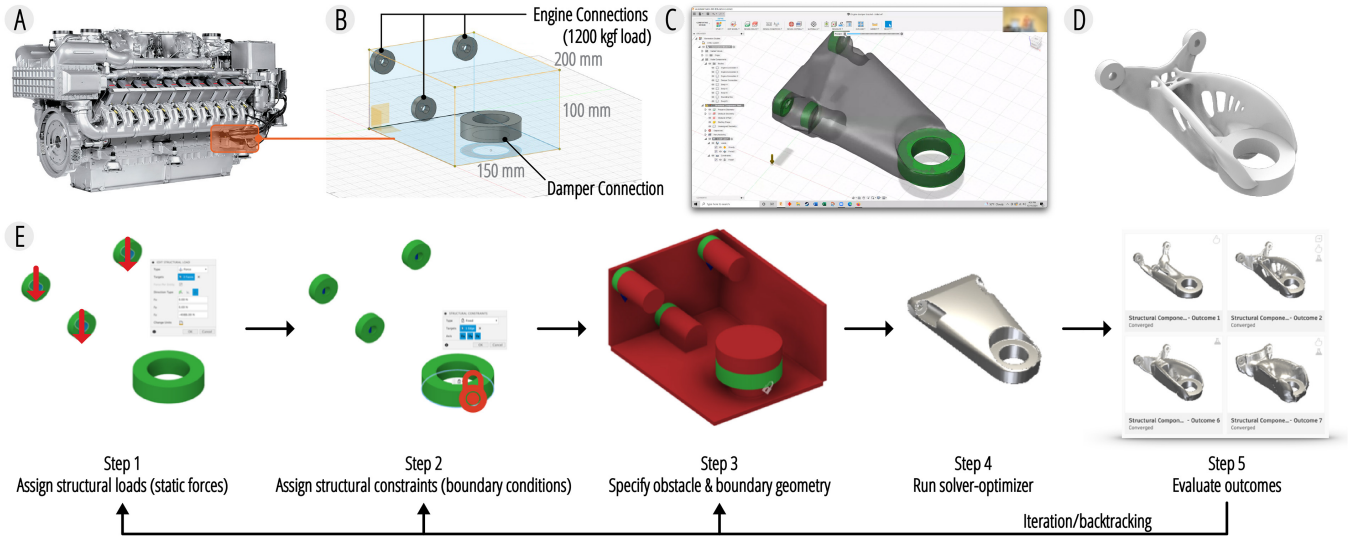

图1：Fusion 360 设计任务与工作流程。任务内容包括：(A) 设计一个将发动机与阻尼器连接起来的发动机支架。(B) 向用户提供一个包含连接孔和边界尺寸的初始文件，以便用户在 (C) Fusion 360 中开始设计。系统提示用户创建 (D) 一个可行的设计，同时尽量减轻重量。(E) 工作流程包含五个步骤；根据人工智能系统提供的解，用户可以通过调整设计约束和标准来迭代设计，从而生成新的解。（图A：© Rolls-Royce Solutions America Inc.）

技术有望减少生产废料和运输成本（例如，采用扁平包装、减少支撑材料）。

尽管新材料不断涌现，可用于制造形状变化结构，但设计形状变换组件仍面临独特挑战，而设计师尚未具备应对这些挑战的充分准备。与二维和三维设计不同，使用形状变化材料进行设计时，最终目标（三维形状）与设计输入（通常为二维）之间存在不易直观理解的错位。要有效地为形状变化材料进行设计，需要理解其（通常十分复杂的）时空行为及自组装材料行为，而这些行为可能超出人类的心智模拟能力。在较低层面上，设计这类材料需要逐体素修改体积；若手动操作，这对于复杂结构而言并不可行。人工智能驱动工具使设计师能够创建复杂制品，否则这些制品无法通过手工制作。SimuLearn 通过提供实时仿真和优化，协助设计过程不断迭代设计，使其逐步达到期望的形变行为。

在这项任务中（图 2A–E），参与者使用形变网格设计自行车水壶架。提供的初始文件包含水壶和自行车车架的几何形状，以便为设计提供背景。与机械工程任务相比，这项任务的开放性更强，因为每位设计师都可以用不同方式组装形变后的网格来制作瓶架。使用该工具（图 2F）时，设计师需要创建网格几何形状，并指定弯曲致动器比率。接下来，参与者模拟设计、观察预测的变形，并通过更改网格模型和致动器分配来迭代改进设计。或者，参与者也可以选择使用相关功能，对网格进行优化，使其趋近目标变换后的形状。优化过程可以是自主的，也可以是交互式的（即由工具提出修改建议，供用户选择）。为了有效地使用该工具，用户需要学会运用不同程度的人工智能辅助，逐步迭代以产出令人满意的设计。

3.3 选择设计工具

我们之所以专门研究这两种系统，主要有两个原因。首先，尽管这两种工具都支持先进制造任务，但它们代表着目的和交互范式各不相同的计算系统。Fusion360 生成式设计模块可协助工程设计师完成一项通常较为熟悉的任务：创建轻质结构实体零件。人工智能系统帮助设计师在遵循指定要求和约束的同时，探索广阔的设计空间和各种可能性。另一方面，SimuLearn 支持设计师使用一种新兴的材料和制造工艺，而大多数设计师对此并不熟悉。SimuLearn 的人工智能工具可对形状变化材料进行快速仿真，并提供不同程度的设计辅助——从手动辅助、交互式辅助到自主优化／迭代。

其次，每种工具都代表着不同的交互方式和同步性。在 Fusion360 中，用户按照结构化的步骤设置参数并获取解。生成新的解可能需要数小时，设计师可以随时导出生成模型，也可以通过调整参数并重新运行求解器来迭代设计。相比之下，SimuLearn 的求解器运行速度快了两个到三个数量级（5—180 秒），用户无需遵循预定义的工作流程即可与系统交互。参与者还可以在任何时刻自由切换三种不同级别的 AI支持。

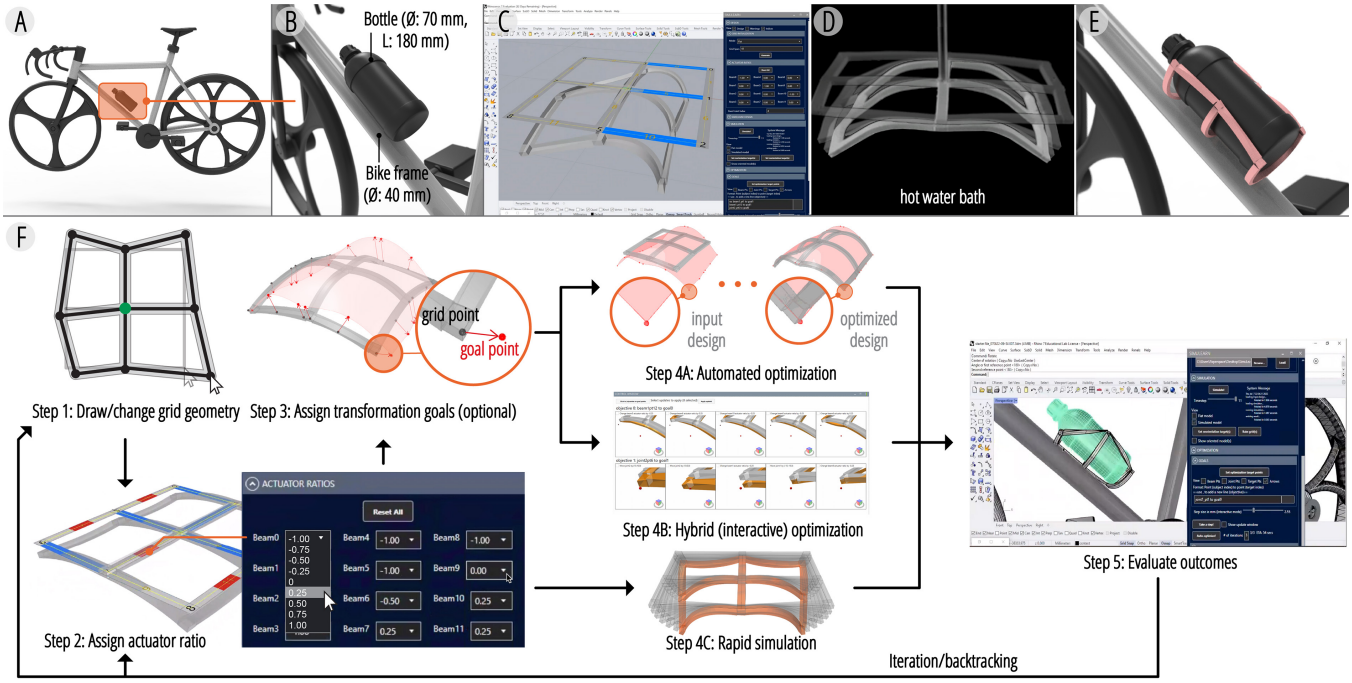

图2：SimuLearn 设计任务。(A) 用户需要使用提供的 (B) 初始文件和 (C) SimuLearn 工具，设计一个自行车水壶架，并创建 (D) 变形网格结构。(E) 变形后的网格应组装成瓶架，并能适配水壶和自行车车架。(F) SimuLearn 工具提供三种设计工作流程。初始化变形网格设计后，用户可以选择使用人工智能辅助优化功能或快速仿真来迭代设计。

4 研究设计

4.1 研究流程

该研究分为四个阶段（见图3）：

1) 入门培训： 在第一次课程开始前，参与者通过电子邮件收到了有关如何访问运行于专用远程计算机上的设计工具的说明。他们还观看了一段时长为 25 分钟的视频教程，通过一个逐步演示的示例介绍这些工具的核心功能。

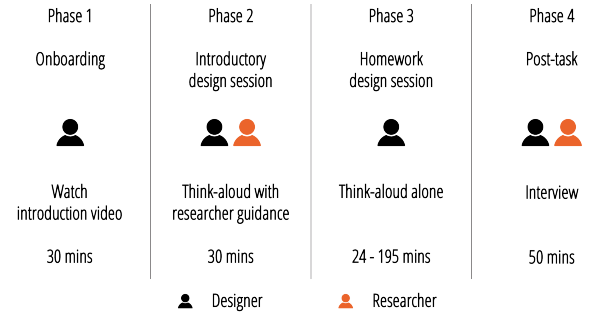

图3：研究1出声思考设计环节流程概览。参与者首先了解设计工具和任务，随后在多个环节中一边工作一边出声思考。提交设计后，他们接受了访谈。

2) 设计入门环节： 在第一次环节开始时，一名研究团队成员向参与者介绍了本研究、设计简述、任务和初始文件。环节通过视频会议（Zoom）进行，并录制音频和视频。随后，参与者一边共享屏幕并大声思考，一边开展工作。参与者可以使用所有可用的支持资源，例如内部帮助文件、外部视频教程或用户论坛。研究人员静静地观察参与者设置计算设计系统的参数，并记下笔记。由于任务复杂且具有开放性，研究团队在 30 分钟后中断任务，并要求参与者以获得报酬的 " 课后作业环节"形式自行继续工作，且不设时间限制。

3) 课后作业环节： 在最初的环节之后，参与者继续独立工作，直到完成所需的迭代并产出最终设计提交成果。参与者使用同一台远程计算机，并加入个性化的视频会议，会议会自动录制，以记录他们在大声思考时的工作过程。我们还部署了一个简单的网络应用程序，提示用户将自己的想法 verbalize。该应用程序分析来自麦克风的语音输入，并在用户沉默二十秒后提醒其"继续说话"。设计师对结果感到满意后，便将三维文件提交给我们的团队。

4) 任务后访谈： 参与者提交成果后两天内，与研究团队的一名成员完成了一小时的半结构化访谈。参与者被要求回顾

他们与人工智能工具合作的经历。访谈通过视频会议远程进行。访谈者做了笔记，并对访谈音频和视频进行了录制。访谈提纲包含 36 个问题，分为三个主题：与工具协作、设计过程和学习过程 （访谈提纲见附录）。与工具协作 主题及其下的问题参考了团队学习文献中的相关测量指标，用于评估人类团队的协作质量和有效性 [9, 34, 53, 74]。这些指标包括对团队角色和协调、用户与工具之间的沟通、冲突解决、时机以及（共享）心智模型的感知。

4.2 分析

为深入了解研究问题 **RQ1a** 设计师在学习使用计算型人工智能工具进行协同创作时面临哪些挑战？以及 **RQ1b**设计师如何克服这些挑战？我们（1）评估了设计成果，并使用（2）对出声思维视频进行视频交互分析，以及（3）对出声思维环节（视频、转录稿）和访谈转录稿进行反思性主题分析，分析了40多个小时的出声思维视频和17个小时的访谈录音。

4.2.1 设计成果评估。我们通过测量完成任务所需的时间，以及在任务后访谈中使用三点李克特量表（满意、中立、不满意）评价设计师对其结果的满意度，评估设计师与人工智能协作的有效性。对于机械工程任务，我们通过根据设计任务说明中的要求检查所设计的发动机支架，来评估产品可行性。我们使用有限元分析（FEA）验证结构健全性，并通过测量零件体积检查所使用的材料。我们还检查了模型是否符合形状要求（即螺栓孔清晰、主体位于包围盒内）。由于瓶架是一项更为自由且注重美感的设计任务，我们只检查用户是否提交了设计，主要依据用户自述的结果满意度。

4.2.2 视频交互分析。我们对出声思考录音进行了视频交互分析 [7]，以了解参与者在使用人工智能功能时的学习过程。为了了解参与者随着时间推移掌握有效使用人工智能功能的程度，我们追踪了他们与设计任务相关的人工智能功能交互，并记录这些操作能否产生令人满意的结果。对于 Fusion360，我们追踪了参与者如何指定结构载荷、机械约束和障碍物几何特征，以控制支架的螺栓间隙和整体尺寸。对于 SimuLearn，我们追踪了参与者在出声思维环节中如何使用不同的人工智能辅助功能（混合优化和自动化优化）。

4.2.3 反思性主题分析。 为了了解参与者在学习与人工智能系统协同创作时面临的挑战、需求和期望，我们对访谈数据（转录文本）和出声思维环节（视频、转录文本）进行了反思性主题分析 [8] 。我们采用迭代式归纳编码流程，并通过亲和图法生成主题。我们使用 ATLAS.ti 分析转录文本、音频和视频。

在初始编码阶段，两位研究人员平均分配出声思维环节和访谈转录数据，并采用兼顾语义层面（参与者所说的内容）和潜在层面（我们对数据的解读）的编码策略生成初步编码。随后，研究团队共同确定初始编码和主题。我们以自下而上的方式生成主题。不过，我们以设计师与工具协作的视角审视数据，这一视角受到此前关于人际协作、共同创造和团队学习的研究启发 [9, 53]。我们也尽力从编码和主题中识别并分离可用性问题，以避免混淆。

随后，两位研究人员对出声思考录音进行了编码，记录设计师指定系统参数或评估设计成果的位置。这些时刻帮助我们发现了设计师遇到的许多问题。我们还对非语言表达进行了编码，例如鼠标手势或屏幕批注，以展示设计师尝试沟通的方式。

最后，我们制作了总结视频，突出展示与使用该工具进行共同创造相关的具体情境（例如，设计师对人工智能生成的成果感到困惑）。视频片段附有时间码、参与者编号和情境描述，以便与整个研究团队分享和讨论（示例请参见补充材料中的视频图）。

研究团队在半天的会议中共同分析了出声思维总结视频，并讨论了各个主题。我们通过反复审查和修订编码与主题，完成了定性分析，最终确定了一套稳定、连贯且内容丰富的主题体系。

表2：发动机支架设计任务（左）和瓶托设计任务（右）的设计成果评估。设计师对成果的满意度以绿色=满意、黄色=中立、红色=不满意表示。对于发动机支架任务，是否满足结构和形状要求以 X=未通过、勾号=通过表示。

ID	时长 Min.	Num. 迭代次数	Des. 满足度	结构 Req.	形状 Req.
P-F01	61	3	😞	X	✓
P-F02	85	2	🙂	X	X
P-F03	54	2	😞	X	X
P-F04	105	9	😞	X	X
P-F05	140	6	🙂	✓	✓
P-F11	122	6	😐	X	X
P-F12	160	5	😐	X	X

发动机支架任务

ID	时长 Min.	Des. 满足度
P-S01	97	😞
P-S03	190	😐
P-S04	225	😞
P-S06	166	😐
P-S07	63	😞
P-S10	189	🙂
P-S11	151	😞

瓶架任务

5 结果

总体而言，参与者认为人工智能系统有望为他们的设计流程提供帮助——尤其是这些工具能够让他们（至少在理论上）比不使用人工智能时更快地创作并探索更复杂的设计方案。然而，大多数人在学习如何有效地与这些工具协同创作时，都遇到了无法克服的挑战。在以下小节中，我们将简要概述参与者完成设计任务的表现，然后探讨

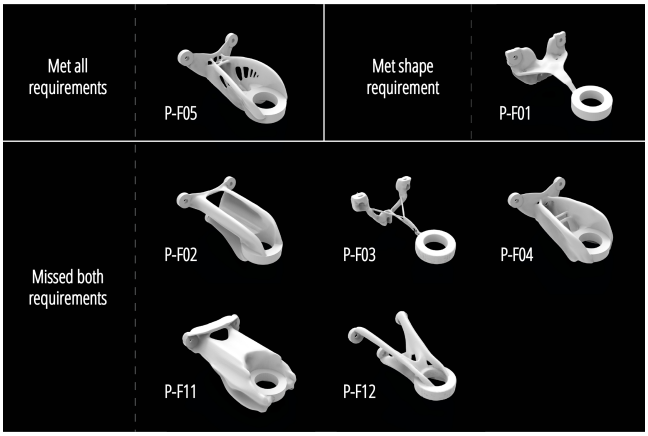

图 4：参与者创作的发动机支架设计概览。P-F05 同时满足形状和结构要求。P-F01 仅满足形状要求（支架上有供螺栓穿过且间隙充足的孔洞，也符合规定尺寸，但结构强度不足）。其他支架均未满足这两项要求，存在过重、强度不足、尺寸超出规定范围或螺栓间隙不足等问题。为简洁起见，每位参与者仅展示一个设计选项。所有提交的设计选项请参见附录。

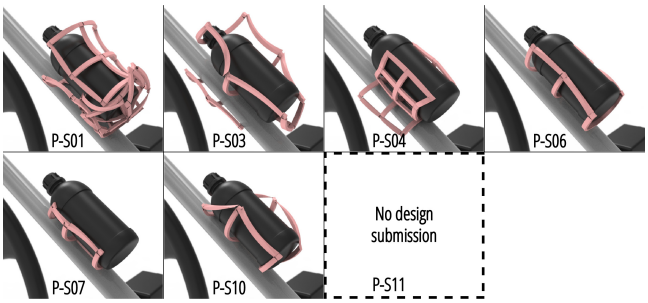

图 5：参与者创作的瓶托设计概览。参与者以不同方式使用变形网格材料，构思出各种设计。参与者 P-S01 未能按预期控制形状，便通过将网格叠放在一起应急处理。有些设计（P-S06、P-S07）无法支撑水壶，而有些设计者（P-S04、P-S10）则利用变形网格结构创作出了颇有前景的瓶托设计。参与者 P-S11 因感到沮丧而停止了任务，也没有提交设计。

他们在与这些工具共同创作时遇到的挑战（RQ1a）。随后，我们将重点介绍一些成功的学习策略（RQ1b）。

5.1 设计任务结果总结

在发动机支架任务中，所有参与者都熟悉如何通过考虑力来设计类似的机械部件，并考虑约束。通常，这类任务是工程教育中的标准练习，而我们的任务与参与者观看的介绍视频中 Autodesk 提供的示例相似。参与者完成该任务所需的时间在54至160分钟之间（*M=104, SD=39.7*）（见左侧表2）。在后续访谈中，没有参与者提到任务本身对他们来说过于困难。然而，只有参与者 P-F05 成功完成了一个令自己满意、同时符合形状和结构要求的设计（见图4；其他设计见附录）。P-F02 也对自己的设计感到满意，但选择手动改进未达到要求的生成几何体（即使用了过量材料并存在被堵塞的螺栓孔）。令我们意外的是，尽管工程参与者熟悉这种设计任务，但最终产出满意结果的人却很少。当设计师尝试借助人工智能辅助完成这一原本熟悉的设计任务时，他们遇到了困难。

对于我们的工业设计师或建筑设计师来说，在三维空间中设计瓶架并不困难。然而，变形材料结构对他们来说是全新的；在访后访谈中，所有参与者都表示，使用变形材料“并不直观”且“具有挑战性”。参与者完成任务的总时长为63至255分钟（*M=154，SD=56.6*）。除一位参与者外，所有人都提交了瓶架设计方案（图5）。这位参与者工作了151分钟后便停止了项目，因为他觉得即使有人工智能的帮助，也无法很好地控制材料。最终，几乎所有设计师都对自己的最终设计不满意，或持中立态度（见表2）。

表3显示，在两项设计任务中，只有少数设计师理解如何设置相关参数，才能在首次尝试时获得满意的结果。在Fusion360中，大多数设计师逐渐学会了如何成功设定结构约束，以及用于螺栓间隙的障碍物几何体。然而，许多设计师未能正确设定结构载荷和边界框。因此，有些提交的设计方案过重、强度不足，或超出指定尺寸。尤其是，一位设计师（P-F02）决定在第一次迭代后手动完善设计，因为他们觉得这样更能掌控设计过程。对于SimuLearn，所有参与者都很快学会了如何通过手动调整和快速模拟来控制网格形状（表3右侧）。然而，许多人在首次尝试未成功后，便避免使用另外两项AI辅助功能，转而继续手动操作（更多说明见第5.2.2节）。

5.2 设计师学习与人工智能协同创作时面临的挑战（RQ1a）

我们将设计师学习协同创作时面临的挑战归纳为三个主题：理解并修正人工智能输出、与工具进行“协作”，以及向人工智能传达设计目标。

*5.2.1*理解和调整人工智能输出时面临的挑战。设计师常常对生成结果感到困惑，也难以理解这些“奇怪”结果的成因及解决方法。当生成的解存在轻微的美观缺陷时，例如表面凸起、孔洞或轻微扭曲的几何形状，这种情况尤为常见。设计师会疑惑人工智能背后的设计原理，也无法判断这些设计特征是有意为之，还是由算法故障导致的。

表3：各参与者学习人工智能系统设计任务相关特征的过程示意图。左：发动机支架任务。右：瓶架任务。正确使用输入参数或人工智能工具以勾号标示。从第一次迭代到最后一次迭代，勾号数量逐渐增加，这表明参与者逐渐学会了如何使用人工智能系统。

	第一次迭代				最后一次迭代			
P-F01	X	X	X	X	✓	X	✓	✓
P-F02	X	✓	X	•	未借助人工智能辅助完成任务			
P-F03	X	X	•	X	X	X	X	X
P-F04	X	✓	•	•	X	✓	✓	X
P-F05	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓
P-F11	X	✓	•	•	X	✓	✓	•
P-F12	X	X	•	•	X	✓	•	•

发动机支架任务

	首次功能使用			最后一次功能使用		
P-S01	X	✓	X	✓	•	•
P-S03	✓	•	•	✓	•	•
P-S04	✓	✓	✓	✓	✓	✓
P-S06	X	X	X	✓	✓	•
P-S07	X	✓	X	✓	•	•
P-S10	✓	X	✓	✓	✓	✓
P-S11	✓	✓	•	✓	•	•

瓶架任务

• 未使用特征
X 错误使用特征
✓ 正确使用特征

此外，设计师不确定如何修正生成的设计（例如，找出导致问题的参数）。有些设计师不愿手动优化生成的几何体，因为他们觉得改动优化结构会让自己感到不自在：

> "……我还意识到，如果我对网格做了任何改动，也许就会改变该区域承受的应力。所以我不太敢改动，因为我知道它是针对我的载荷和材料优化过的。" P-F04

设计师也无法理解生成的设计中显而易见的结构问题，例如生成的部件过薄或过厚、间隙过小，或网格变换令人困惑。以下是这位设计师评估生成的发动机支架时的描述：

> "这说不通啊，比如这里这个区域，显然很厚……好吧，我想它其实并不厚。我只是不觉得它能承受住重量。安全系数显示为五。这在我看来简直荒谬。" P-F01 出声思考

在其他时候，设计师不确定究竟该由人工智能还是用户来解决问题。有些情况下，设计师接受了不完美的结果，并将缺陷归因于系统。有一次，一位设计师在评估一个螺栓孔间隙不足的生成式发动机支架时，表达了自己的担忧：

> "这是个看起来有点滑稽的支架。我绝不会那样设计，但这东西却觉得自己能那样做 *[。 ..]*它似乎 *[认为]* 必须有螺栓头之类的东西，所以我就是觉得那个螺栓装不进这个区域。但这是它给我的结果，所以我对此没意见。"P-F13 出声思考

5.2.2 协作过程中面临的挑战。设计师经常表示，与基于人工智能的设计工具分享控制权颇具挑战，并指出这些工具往往仿佛主导了设计过程。在这种情况下，设计师要么放弃并接受不尽如人意的结果，要么临时想出一些"凑合"的策略来绕开人工智能，要么彻底放弃人工智能辅助，转而手动操作。例如，一位使用 SimuLearn 的设计师表达了对自己无法充分掌控设计过程的沮丧，并决定接受不完美的结果：

> "我觉得这个协作过程 *[……]* 似乎有点难以掌控。我觉得 *SimuLearn* 对它的掌控程度比我更高。" P-S01 访谈

同样，另一位参与者指出，在整个设计过程中缺乏参与机会和交流：

> "我会说不是，这并非共同创作。整个程序根据我的限制生成了这个东西。 *[……]* 我觉得自己没有参与形状的创作。我只在一开始做了些工作，之后就让程序完成剩下的部分。我遗憾的是，一旦出现一个选项，我就无法做任何修改，也无法与程序给出的解进行互动。" P-F04 访谈

在其他情况下，设计师自行摸索出一些"临时拼凑式"的变通方法，以获得可行的结果。在 Fusion360 中，当设计师试图使用简单的方盒作为障碍几何体，将材料生长限制在指定周界内时，就会出现这种情况。然而，算法常常能找到办法，从障碍几何体之间的缝隙中"挤入"额外的、不需要的材料。一位 Fusion360 用户表示，当他们未能阻止材料生成时，感觉自己像是在欺骗系统：

> "我觉得软件在某种程度上确实有点主导了设计过程，因为我做东西时是在迎合软件，而不是让它适应我的需求。

> *[...]* 我觉得，既然它应该这么智能、易用，我希望它能提供更多选项，而不是让我 *[自己]* 去找这些小窍门。所以我不想耍小聪明，也不想暗中想着'我要骗过软件，让它以为这样是对的。'"
> P-F05 访谈

最后，当设计师无法学会有效地与人工智能协同创作时，往往会避免使用人工智能辅助。在使用 SimuLearn 时，这一问题尤为常见，因为该工具明确允许设计师在不同级别的人工智能辅助之间切换。比较设计师使用哪些 SimuLearn 功能来完成任务时发现，随着时间推移，所有设计师都学会了手动调整、仿真并迭代设计（见表3右侧）。然而，只有两位设计师（S04、S10）第一次尝试就能使用人工智能辅助功能（即自动优化器和混合优化器）。其他人都表示，即使正确使用了该功能，他们也无法理解 AI 输出。因此，这些参与者随后避免使用人工智能功能，继续通过快速仿真手动完成工作。

5.2.3 难以向人工智能传达设计目标。设计师往往难以向人工智能系统传达设计目标。例如，设计师不确定某些参数的用途及其影响。此外，许多设计师意识到自己对定义制造工艺或材料的参数存在知识缺口。例如，一位设计师不熟悉某种制造方法的具体要求，因此一直使用默认参数值：

> "我得看看他们有没有五轴铣削……最小刀具直径 *10* 毫米……呃，我不知道，我不太懂刀具……刀具肩长…… *[笑]* 最小刀具直径……好吧，我想我不知道……我就直接点了确定。" P-F12 出声思考

设计师不确定参数含义时，往往会依赖人工智能系统的默认设置，或自行假设这些设置会产生什么影响。他们通常不会向有帮助的资源寻求解释，而是尝试独立判断某个参数对最终结果的影响。然而，往往很难甚至无法从最终结果中察觉并追溯参数影响。

在出声思维环节中，我们还观察到几次设计师对参数有不同解读的情况。例如，在 Fusion360 任务中，有一半用户在将载荷换算为系统要求的正确单位时出错。同样，在向多个目标（即螺栓孔）施加载荷时，系统会将相同的载荷施加到每个目标上，而不是像设计师预期的那样将载荷平均分配给各个目标 [1]。这种不匹配导致载荷分配偏高，并使支架设计不必要地坚固、笨重。有趣的是，大多数设计师在设定参数时都口头表达了对载荷分布的不确定性，以下这段出声思考评论便是一个例子：

> "所有载荷……我记得当时有点不太确定……所以……我说三个……我们看看……这里会是什么情况？我不知道这三个力是不是都一样……问题就在这儿。我不知道这是否适用于每一个尤其是一个……比如这里、这里和这里各有 *12,000*……还是平均分配？我希望是平均分配的……我就是这么认为的。" P-F03 出声思考

尽管参与者知道系统可能会以不同方式解读载荷分配，但实际上只有少数人能够发现并纠正这个错误。

5.3 成功设计师的学习策略（RQ1b）

在此，我们介绍与设计师如何克服先前报告的学习挑战（**RQ1b**）相关的研究发现。我们观察到，所有设计师（在观看入门教程视频后）都尝试通过迭代试错过程来学习如何使用这些工具。我们还观察到，参与者偶尔会查阅不同的支持资源，包括软件工具提示和帮助文件，以及视频教程、在线用户论坛等外部资源；有时也会向同事求助。设计师主要在遇到界面或可用性问题后，才会利用这些支持资源寻求帮助，而这些问题通常都得到了解决。然而，尽管有这些支持资源，大多数设计师仍难以有效地学习如何使用这些工具进行协同创作。尽管如此，一些设计师采用了成功的策略，帮助他们学习如何更好地使用人工智能系统：

5.3.1 系统性探索人工智能的局限性与能力。我们观察到，在互动初期，两位设计师（P-F11、P-S10）有意且系统地试用人工智能工具，以更好地形成对人工智能行为、能力和局限性的直觉。这些设计师进行了测试，以了解不同参数值会对最终结果产生何种影响，并记录数值—结果对应关系，从而建立心智模型。例如，P-S10 意识到，他们最初的设计草图无法通过 SimuLearn 和形状变化材料实现，因此决定系统地测试不同的极端网格形状，以完善其对人工智能行为的心智模型：

> "尽管我尝试画了一些东西，但我觉得就是行不通。所以我想，最好还是直接进入工具，看看我能不能实现它。我尝试了诸如将一个角向上折、另一个角向下折之类的操作。我截了很多屏幕截图，这些截图确实帮助我理解了'如果我这样做，它就会那样运行'，所以我认为，最初我花了很多时间尝试建立一个心智模型，了解这个工具具备什么能力。"
> P-S10 访谈

5.3.2 草图绘制、解释与反思设计问题。另一种帮助设计师克服缺陷结果的策略，是主动抽象并解释问题。在出声思维环节中，我们观察到，面对类似的根本性挑战（例如过度约束发动机支架，导致载荷不起作用）时，一些设计师能够通过绘制支架的自由体图，并向自己解释作用力和约束，从而理解并克服问题。我们在 SimuLearn 中也观察到了类似策略：参与者通过向自己解释变形过程，理解了重力在其中的重要影响：

[1]这是 Fusion360 中一个已知的问题，许多用户都在用户论坛中讨论过。请参见 [4]。

表4：研究2：在同伴指导下学习的参与者概览。另有六名参与者（3名使用Fusion360，3名使用SimuLearn）与在研究1中成功使用人工智能设计工具的同伴指导者配对。

ID	组别	Age 年	性别	领域	职业	CAD经验 年	行业经验 年	指导者 参与者
P-F07	Fusion360	27	M	机械工程	学生／博士生	>5	1–2	P-F05
P-F08	Fusion360	27	M	机械工程	学生／博士生	>5	1–2	P-F05
P-F13	Fusion360	19	M	机械工程	学生 / 文学学士	2–4	0	P-F11
P-S05	SimuLearn	26	F	建筑学	学生 / 文学硕士	>5	2 – 5	P-S04
P-S08	SimuLearn	20	F	建筑学	学生 / 文学学士	2 – 4	0	P-S04
P-S09	SimuLearn	23	F	建筑学	学生 / 文学学士	2 – 4	2 – 5	P-S04

> “哇，我完全没料到会这样……呃……这只是因为重力吗？这里好像出了什么奇怪的问题……重力也太大了……哦，是因为我把这个东西做得太大了吗？天哪，这完全不是我预想的那样。”P-S11 出声思考

6 研究2：与同伴指导者共同学习（研究问题二）

为深入了解如何更好地支持设计师学习使用计算型人工智能工具进行协同创作（**研究问题二**），我们开展了额外的出声思考环节，让设计师与经验丰富的同伴配对，由同伴在任务过程中提供支持（即引导式环节）。指导者此前使用过人工智能工具，并会根据需要提供支持，帮助参与者更有效地利用人工智能驱动的功能进行协同创作。受人际协作的启发，我们通过观察人类指导者的支持策略、教学举措和沟通模式，旨在深入了解如何在何时有效支持用户学习使用人工智能进行协同创作。

6.1 方法

我们按照第3.1节所述的相同标准，另外招募了六名参与者（表4）。引导者来自已完成研究1且表现出对领域、工具和任务有全面理解的参与者群体（P-F05、P-F11、P-S04）。我们请这些引导者支持设计师学习如何与工具协同创作。我们没有为引导者提供脚本，因为我们希望从他们自然的互动中发现可能的支持策略。

所有引导式会议均遵循与无引导会议相同的流程，唯一不同的是，课后作业环节限时50分钟，且引导者会在场协助设计师。设计师与引导者通过音频、屏幕共享和屏幕批注进行交流。一名研究人员在一旁静静观察并做笔记。设计环节结束后，我们分别与引导者和设计师进行了15分钟的半结构化访谈。所有会议和访谈均进行了录制（视频和音频），并自动转录。

我们开展了反思性主题分析，以识别同伴指导者如何支持设计师克服学习使用人工智能工具过程中所面临的挑战，以及其中涉及的情境和主题。我们特别关注协作和知识转移的相关方面，例如沟通、联合信息处理以及行动协调 of actions [53]。我们对视频、出声思考转录稿和访谈转录稿进行编码，随后通过分析指导者的行动和支持策略，围绕沟通与学习生成主题；这些行动和策略帮助设计师克服了此前在研究1中观察到的挑战。

6.2 结果——引导式会议

引导者支持设计师使用工具、理解人工智能的行为、能力和局限性，有时还会提出并讨论替代设计目标或策略。设计师寻求帮助、表达不确定性，或引导者观察到常见错误时，引导者主要会根据设计师的言语表达和行动作出回应。若想了解对话动态，请参阅补充材料中的视频图示。我们呈现了五种最常见的同伴支持策略，它们有助于设计师更好地学习如何与人工智能系统协同创作：

6.2.1 引导者提供分步操作指导。引导者经常为设计师提供分步说明，指导其设置特定参数。这类指导通常是对设计师行为的回应，例如设计师表现出困惑或遇到困难；有时设计师也会明确请求此类帮助。

6.2.2 引导者回应设计师表达的不确定性。我们观察到，当设计师表示不确定，或使用“我不知道”“也许”或“我猜”等模糊表达，表明存在知识缺口时，引导者对此尤为敏感。在这些情况下，引导者往往会介入，提供支持或建议替代设计策略。在这里，设计师想知道如何使部件保持在规定尺寸范围内，引导者便建议在Fusion360中创建一个障碍几何体，以防止材料在部件底部堆积。

> 设计师：“……但因为螺栓不在这里，我不知道它应该在哪里……”同伴指导者：“我是说，也许在底面上，对吧？实际上，船体就是靠这个面支撑着的。”设计师：好，那我们就选这个底面吧。”（设计师 P-F13，同伴指导者 P-F11）

6.2.3 同伴指导者引导设计师反思生成的设计。 我们经常观察到这样的情况：每当 SimuLearn 的仿真或 Fusion360 的求解器完成后，同伴指导者都会引导设计师给出反馈。这时，同伴指导者常会问设计师"这符合你的设想吗？"或"这是你想要的吗？"，甚至会问"对，就是这样！你希望它这样弯曲吗？"。这些提问促使设计师反思生成的设计，帮助同伴指导者更好地了解如何提供支持。

6.2.4 指南建议采用替代方法和目标。除了支持工具操作和技术故障排除外，指南还经常向设计师建议替代方法和目标，如以下对话所示：

> 设计师："它正朝着绿色部件移动，但似乎无法找到一种完美的路径，在不碰到这个障碍几何体的情况下到达那里。"指南："没错，不过我的意思是，只要把你的障碍几何体做得足够长，比如一直延伸到船体连接处的后方，这样你就是在说'这里不允许有任何材料'，这样就能确保你始终可以装上螺栓。明白我的意思吗？"设计师："嗯，明白。"(设计师 P-F13，指南 P-F11)

这里，指南通过扩大现有的障碍几何体，建议了一种实现设计师目标的替代方法。这一策略帮助设计师更好地向人工智能系统传达设计目标，并培养运用人工智能能力的直觉。

6.2.5 同伴指导者和设计师利用屏幕批注和鼠标手势讨论设计策略。 设计师与同伴指导者建立共识，一个重要的环节是通过屏幕批注、草图或鼠标手势等非语言沟通方式。指导者经常使用 Zoom 内置的屏幕批注功能，通过圈出或绘制箭头来突出他们谈到的元素。我们还观察到，所有设计师在向指导者解释时，都会自然而然地使用鼠标光标，通过圈选或指点来强调设计特征。以下情境展示了这两种行为：指导者和设计师讨论如何实现特定瓶架形状的策略：

> 指导者："所以在这种情况下，我建议你把这两个点，尤其是这两个点，往中心移动一些。"[指导者从点向网格中心画箭头]设计师："这个点似乎往下移了。这里的这个点也是……梁好像在往下走。"[设计师用鼠标指向不同的梁]指导者："哦，你是指这里这根梁吗？"[指导者画箭头指向梁]设计师："是的。"(设计师：P-S08，指导者：P-S04)

许多设计师和同伴指导者还会在生成的设计上做标注并绘制草图，以阐明或展示自己的想法。总而言之，不同形式的非语言沟通帮助设计师和同伴指导者更好地建立对任务的共享心智模型，并共同克服设计问题。

7 设计师对与基于人工智能的设计工具共同创作的需求与期望（问题3）

根据我们在非引导式和引导式会议中的观察与访谈，我们提炼出四个主题，以概括设计师围绕与基于人工智能的设计工具共同创作所表达的需求与期望（**问题3**）。

7.1 设计师期望人工智能系统对当前设计问题具备更强的情境感知能力

在这两种系统中，参与者都觉得系统缺乏人类协作者对设计任务所具备的情境感知能力，例如了解某个部件的功能，或了解该部件如何与环境中的其他元素连接。情境感知能力的缺失，是人们认为使用该工具缺乏协作性的主要原因之一。缺少情境信息也意味着，该工具无法像人类伙伴那样更主动地支持设计师，正如这位参与者所述：

> "当然，如果一开始软件就说'哦，我看到这些是你的连接点。你能在那儿装进一颗螺栓吗？'那肯定能帮我节省一些时间。*[...]*诸如此类的功能会让人觉得协作性强得多，也更有帮助。" P-F11 访谈

其他人希望工具能提供更智能的制造业和材料建议，或帮助他们预见现实世界中的设计问题，正如这位参与者所说：

> "我希望看到一种设计工具，能够展示水瓶实际使用时的仿真效果，比如'摩擦力够不够'，或者'骑车人骑行时它是否真的能稳稳地待在原位'，然后提供如何解决这些问题的建议。" P-S04 访谈

7.2 设计师希望与工具进行更具对话性的互动

大多数参与者都抱怨他们与工具之间缺乏双向互动。参与者将使用人工智能系统进行设计比作"编程"，或"与一位不听你说话的熟练队友合作。" 参与者希望与工具进行更多对话式互动，正如这位设计师所期望的那样：

> "更像是一种我可以与之交谈的工具，同时我始终能确定，我所做的一切都符合这个部件的预期，并满足载荷、材料等各方面要求。" P-F04 访谈

7.3 设计师需要支持来思考设计问题

在所有引导式会议中，设计师都很赞赏同伴指导者不仅帮助他们学习操作该工具，还帮助他们思考设计问题——而这也是他们最终会期待

共创式人工智能工具具备的一项特征。正如这位设计师在回顾与其同伴指导者合作时所概括的：

> “我认为与同伴指导者合作确实很有帮助，因为他见解丰富。有几件事我之前确实没有想到，尤其是从基本的工程角度来看，这个东西实际上该如何制造。我觉得这非常有益。” P-F13 访谈

7.4 设计师期望人工智能工具提供与项目相关的工作示例

设计师经常建议，共创式工具应推荐其他用户创建的类似任务和项目示例。这些示例可以帮助设计师了解系统的能力，并提供创意灵感，正如这位 SimuLearn 用户所说：

> “比如说，我正在对某种形状进行建模，这时工具实时搜索某个数据库，展示其他人之前做过的一些可能方案，仅根据形状的相似性来推荐，然后我就会想：‘对，这个形状可以放在那里，也可以放在那里。’所以，这实际上是一种创意输入，能提供一些帮助——感觉更像是你在和某个人一起设计。它不一定非得生成内容，也可以从其他人那里调取内容，告诉你：‘其他一些设计师是这样做的。’” P-S10 访谈

8 讨论

协同创作人工智能设计工具有望提升工程师和工业设计师的能力。然而，我们发现，设计师在（学习）通过理解和调整系统输出、传达设计目标以及与人工智能“协作”来有效地共同创造时，面临着重大挑战。克服挑战的设计师，是通过系统地探索人工智能的局限性与能力，并解释和反思自己的设计问题来做到这一点的。同伴指导者采用的支持策略包括分步操作指导、回应设计师表达的不确定性、引导设计师反思生成的设计、建议替代方法和目标，以及利用屏幕批注和鼠标手势讨论设计策略。总体而言，设计师希望人工智能系统能更好地感知当前设计问题的情境，希望与工具进行更具对话性的互动形式，要求获得更多支持以深入思考设计问题，并希望工具提供与项目相关的工作示例。

我们结合先前关于用户如何学习使用复杂软件工具的研究来讨论研究发现，并将这些发现与人类协作研究中的概念和实证结果联系起来。我们强调了若干设计机会（表 5），以便更好地支持设计师与人工智能协同创作：通过搭建脚手架，帮助设计师主动探索人工智能能力与局限性的边界；促使设计师主动反思设计问题和观察到的人工智能行为；增强人工智能系统对设计师任务和目标的情境感知；并支持设计师与人工智能系统之间更加对话式的多模态沟通。

8.1 人机共创中的新学习挑战

根据我们的研究发现，我们认为，设计师在学习与这些工具协同创作时面临的挑战，超出了学习工具界面的范畴。首先，所有参与者都是经验丰富的设计师，熟悉 CAD 软件的界面，并观看过逐步讲解人工智能功能操作的教学视频。此外，设计师还使用了各种支持资源来克服遇到的界面问题，包括工具提示、帮助文件、视频教程、在线用户论坛以及向同事求助。然而，即使借助这些资源，大多数设计师仍无法在人工智能辅助下产出可行且令人满意的结果。虽然这一结果在一定程度上可能源于人工智能工具本身的局限性，但显然，事情并非如此简单。事实上，我们有少数参与者成功克服了挑战，并学会了有效地与人工智能功能协同创作。因此，我们认为，参与者在使用人工智能系统时面临的挑战（例如沟通设计目标或理解人工智能输出）部分源于工具在设计过程中扮演了更主动的角色所带来的新学习挑战 。这些学习挑战超出了学习工具界面的范畴。例如，我们发现的一项主要挑战是，设计师需要预先指定所有必需参数，而不是逐步建模和测试部件。这种工作流程要求设计师提前理清设计问题，这既有难度，也不同于通常的迭代设计过程。我们的研究发现表明，这些新学习挑战需要新的支持策略，例如，在设计师表达不确定性时提示其进行反思，或建议与人工智能能力相符的替代设计目标。

8.2 以人类协作模型为视角，研究和设计共同创作系统

参与者难以学会预测人工智能在面对指定参数时可能会如何表现。他们难以理解人工智能系统的推理，也难以纠正不理想的设计问题。关于群体认知的既有文献指出，要实现有效协作，群体成员应当能够理解彼此的推理，并大致预测伙伴对自身行为会作何反应 [40]。同样，从团队学习的角度来看，我们的发现表明，尽早系统地探索人工智能的局限性与能力的设计师，更善于预测工具对自身行为的反应，也能产出更令人满意的结果。这一结果与有关决策中人机协作的研究一致，后者指出，相较于通过有关内部过程的一般性、陈述性信息，用户通过归纳机制（即借助具体示例和动手测试）能够更好地学会预测机器的行为 [11]。可解释人工智能研究主要侧重于直接向用户传达有关人工智能系统的信息，而近期研究指出，更具参与感、持续时间更长的学习和刻意练习或许能够改善人机协作 [36]。然而，除了帮助用户完善对人工智能能力与局限性的心智模型之外，人工智能系统同样需要了解用户的能力、局限性和任务情境，从而促进更有效的人机

表 5：与群体认知和团队学习相关的设计机会及示例应用概述。

支持机会	示例应用	与人际协作模型的关系
逐步引导学习人工智能的能力与局限性		
Off者引导式交互迷你用于探索人工智能的实验行为 见 *5.3.1* 和 *6.2.2*	系统为设计师提供探索性的小型实验，以培养对人工智能针对特定（极端）参数组合的响应的直觉。	完善对人工智能行为的心智模型，并通过体验式、动手学习获得能力学习；学习预测工具针对自身操作所作出的响应。
呈现类似作品由人工智能设计工具生成 见第 *7.4* 节	系统主动推荐与任务相关的设计师创作的项目示例，将人工智能系统作为学习资源和灵感来源。	通过示例学习，完善对人工智能能力及其局限性的心智模型；使……保持一致设计师的期望与工具的能力；从共同创作人工智能的建议中获得启发。
促使设计师进行规划与反思		
支持设计师思考设计问题 见第 *6.2.4* 节和第 *7.3* 节	系统向设计师提问以帮助他们重新构建或进一步探索问题与解决方案空间，例如："你考虑过其他方案吗？""瓶架是否也可以放在也可以放置在其他位置，位于...的不同位置自行车？"系统还可以建议替代策略和目标。	帮助设计师在与人工智能共同创作的设计过程中保持认知投入。
提示设计师反馈与反思 见 *5.3.2* 和 *6.2.3*	在评估生成的设计时，征求设计师的反馈例如："这是你构想的设计吗？"根据这些反馈，系统可以提供支持指导说明如何修正生成的设计。 说明如何修正生成的设计。	帮助设计师识别自己的心理状态并向人工智能系统传达目标；信息汇集。
提升协同创作人工智能工具对设计师任务和目标的情境感知能力		
增强人工智能的情境感知能力设计师、任务和项目 见 *7.1*	系统会询问设计师并邀请他们分享信息例如他们的背景、技能和项目，如高层次的设计目标和制造考量。	通过征求明确反馈或隐性社会推断，促进形成对任务和目标的共享心智模型。 通过隐性社会推断。
回应设计师的不确定性和知识缺口 见 *6.2.2*	让设计师能够传达对参数的不确定性以及自身的知识缺口，以便系统通过"标记"参数。系统可以追踪设计师的"确定性水平"。	促进彼此形成关于对方的共享心智模型、知识与目标。增强设计师对与人工智能系统。
用于人机共创的多模态交互式沟通		
允许进行更具互动性且对话式交互设计师与人工智能之间系统 见第 *7.2* 节	利用对话式智能体界面进行设计师与人工智能协同创作	通过以下方式促进沟通中的共同基础：轮流发言、确认反馈、伴随反馈、错误纠正；相互确认目标的接收与解读。
促进非语言沟通设计师与人工智能系统 见 *6.2.5*	设计师向人工智能系统提供反馈通过绘制草图表达设计目标或添加注释对生成的设计进行优化（例如在设计评审中）	通过选择合适的领域和任务，促进沟通中的共同基础以及适合任务的沟通媒介。

协作。因此，人工智能系统需要更好地感知用户及当前任务情境。我们将在第 8.3.3 节进一步讨论由此产生的设计机会。

大多数设计师认为这些工具缺乏协作性，并且对设计过程的掌控程度超出了他们的期望。因此，他们接受了不完美的结果，开发了临时变通方案，或完全避免使用人工智能辅助。以往的研究关于群体认知和团队学习的研究表明，当群体成员通过彼此解读对方的心理状态 [57]，学会协调参与者的认知能力时，他们会对共同活动产生更强的所有权。群体可以通过积极的沟通、联合信息处理和行动协调 [53]，实现这种程度的协作。

我们对引导式会议的研究结果表明，引导者积极采用沟通支持策略，例如回应设计师的不确定之处并提供分步说明，有助于设计师学会自信地与人工智能协作。此外，同伴指导者促使设计师对生成的设计提供反馈并进行反思时，设计师必须明确阐述自己的意图。因此，引导者和设计师都能够讨论并更好地协调后续行动，以改善成果。

8.3 设计机会与未来工作

以下部分重点介绍了我们在研究发现中识别出的若干设计机会，以支持设计师学习如何使用计算型人工智能工具进行协同创作。

8.3.1 为人工智能的能力与局限性提供归纳式学习支架 。 如前所述，一些设计师通过测试并记录各种参数与生成结果之间的有效对应关系，学习人工智能系统的能力与局限性（见 5.3.1）。在引导式会议中，同伴指导者也经常提供设置参数的分步说明，或带领设计师逐步完成操作（见 6.2.2）。这些归纳式学习策略帮助设计师更好地预测人工智能的行为，并理解其能力。关于新手与人工智能音乐共创的先前研究也发现，用户会系统地测试人工智能的局限性，以完善自己对系统行为的心智模型 [48]。进一步而言，为了更好地支持用户开展这类学习活动，未来的协同创作系统可以为设计师提供一系列动手实践的小型引导式“实验”，帮助他们更好地了解系统针对特定（极端）参数输入所作出的响应 [42]。系统还可以提供查看多组输入-输出对示例的机会，帮助设计师建立关于人工智能工具生成能力与局限性的实用心智模型（参见 [58]）。共创式工具还可以主动推荐其他人机团队创建的类似任务和项目相关示例（见 7.4），帮助设计师了解系统的能力并获得创意灵感。

8.3.2 促进设计师的规划与反思 。在与人工智能工具共同创作时表现更出色的参与者，会通过抽象和解释问题来达成这一点——他们要么在出声思维环节中向自己解释，要么向同伴指导者解释（见 5.3.2 和 6.2.3）。学习科学领域的文献表明，自我解释有助于提升理解能力和解决问题的能力 [76]。此外，参加引导式会议的参与者也很赞赏指导者促使他们反思人工智能行为，并就替代设计目标或策略提出建议（见 6.2.4 和 7.3）。这些做法帮助设计师深入思考任务，并规划如何借助人工智能工具采取行动。相反，没有反思设计问题的设计师无法充分理解系统的行为、能力和局限性，因此未能产出令人满意的结果。这种情况在 Fusion360 中比在 SimuLearn 中更为常见，因为 Fusion360 的仿真时间较长，无法像 SimuLearn 那样支持快速交互式调整，因此用户需要提前规划行动策略。因此，对于处理时间较长的人工智能工具而言，支持用户深入思考设计问题、预先设定参数，将尤其有益。

参与者未能产出令人满意结果的另一个可能原因是，人工智能系统可能使设计师过度依赖其支持，从而产生“成功幻觉”，降低他们解决设计问题的投入 [84], ; 当设计师接受明显不可行的结果时，我们就观察到了这一现象（见第 5.2.1 节）。为了弥补这种倾向，协同创作系统可以帮助设计师重新界定问题，或通过提出替代目标或询问生成式设计问题 [23] 来进一步探索解决方案空间，例如“其他方案可能是什么样的？”此外，主动反思设计过程是专业设计实践的重要组成部分 [67]。与指导者类似，协同创作系统可以通过提出需要深入推理的问题，促使用户针对观察到的人工智能行为或生成的设计提供反馈并积极反思结果，例如“这个生成的设计符合你的设想吗？”（参见 [12]）。系统随后可根据反馈提供支持，并帮助协调后续行动。这一策略可补充上一节（8.3.1）所述的归纳式学习支持。

8.3.3 提升协同创作人工智能工具对设计师任务与目标的情境感知能力。我们的结果表明，设计师认为工具缺乏对设计情境的感知，因此未能获得人工协作伙伴可能提供的主动支持（见 7.1）。尽管在人机交互研究中，将情境感知融入人工智能系统由来已久，但这也带来了许多技术挑战。不过，在协同创作设计工具领域，人们正在探索颇具前景的方向。例如，系统可以通过显性和隐性的机制构建用户模型，通过向用户询问具体设计任务的信息（即解析书面的设计任务说明，以提取情境和目标 [71]）来形成对情境的共享心智模型，或根据用户行为推断设计目标 [46]。

从群体认知和团队学习的角度来看，情境感知还包括了解其他团队成员对设计任务已有或欠缺的知识。根据我们的研究结果（见 6.2.2），共创式工具可以通过回应口头表达的知识缺口（例如“我不知道”），或回应“也许”、“我想”这类模糊表达，来了解设计师的知识状况。这一观察与相关研究的结论一致：人工导师对学生不确定性表达的回应会对学生学习产生积极影响 [26]。基于这一现象，已有文献探讨智能辅导系统如何检测并回应学生的模糊表达 [26, 62]。协同创作系统还可以让设计师表达对参数的不确定性以及自身的知识缺口。例如，设计师可以在参数输入框旁勾选“???”复选框，以表示不确定。随后，人工智能系统可以跟踪设计师对每个参数的“确定性水平”，并提供针对性帮助，或在设计过程中重新呈现这些参数，以找出意外结果可能产生的原因。

8.3.4 面向人类与人工智能共同创作的多模态交互式沟通。我们的研究结果表明，设计师觉得与人工智能沟通就像是在下达指令，却收不到多少反馈（见 7.2）。引导式会议的结果显示，同伴指导者会运用一些对话策略，例如确认彼此是否接收到了对方的目标，或在不确定对方意图时请求澄清。鉴于对话被广泛

视为设计的重要方式 [67]，且实证研究表明，设计工作很大一部分发生在协作者与利益相关者之间的对话中 [47],，共同创作系统应考虑将更多来回对话作为交互界面。此外，关于团队学习的研究表明，通过团队成员之间积极开展迭代协商，形成有效的共享心智模型，而这一过程涉及"建设性"的冲突、论证与解决 [30, 34, 74]。这种策略也可能有助于协商设计目标。

引导式会议的研究发现还表明，非语言沟通可能有助于设计合作伙伴建立更完善的设计目标共享心智模型（见 6.2.5）。设计师和引导者通过用鼠标光标指向特征，或使用屏幕批注功能绘制草图，来讨论目标和策略；这类似于 Schön 所描述的"空间动作语言"[67]，即在传统设计评审会议中，手势和绘图与语言表达一样，都是典型的沟通方式。在人机共创中，这种非语言交互仍未得到充分利用。允许设计师在生成结果上进行草图绘制、批注或手势操作，或许能帮助他们向人工智能系统传达设计目标。

8.4 制造业以外的人机共创

尽管我们发现，在制造业领域有机会支持人们学习与人工智能系统协同创作，但我们的许多发现也适用于其他人机共创领域，例如图像、音乐或文本生成。鉴于生成式图像人工智能模型（如 DALL-E [63] 和 Stable Diffusion [65]）近期不断取得进展，工具和能力也快速迭代，支持创意专业人士学习如何有效地使用这类工具进行共创，可能会变得愈发重要。此外，许多基于提示词的人工智能模型（如 DALL-E）要求用户通过文本提示词表达目标，而这对当今大多数视觉设计师而言是一种陌生的交互方式。因此，我们的研究发现表明，在许多领域中，可以通过搭建脚手架来引导用户归纳学习人工智能的能力，促进用户进行规划和反思，提升工具对任务和目标的情境感知，并促进工具与用户之间的多模态交互式沟通，从而支持人工智能工具用户学习如何更好地与人工智能系统协同创作。未来的研究还可以进一步探索如何设计界面，以支持人们在制造业以外的其他领域学习使用计算型人工智能工具进行协同创作。

8.5 研究局限性

我们指出本研究存在三项局限性：首先，参与者仅代表工程、建筑和工业设计领域设计师中的一部分。尽管所有参与者都接受过相关设计领域的培训，并使用过三维 CAD 软件，但大多数人的行业经验有限。我们还纳入了三位行业经验丰富的专业人士，以弥补这一失衡；然而，即便是这些参与者也面临困难。此外，参与者是自行选择加入本研究的，他们很可能对与人工智能系统协同创作这一理念感兴趣且持开放态度。因此，我们的一些发现可能反映了他们对共同创作工作的开放态度。其次，这两种人工智能工具仍处于开发早期，我们注意到一些用户体验问题可以通过改进用户界面来解决。我们尽可能将用户界面问题与学习如何与人工智能系统协同创作时遇到的更根本挑战区分开来。尽管这些工具相对较新，我们相信本研究的发现有助于探索协同创意设计系统的新机遇。最后，尽管我们努力确保设计任务贴近现实，但设计师知道自己参与的是一项研究，也知道这些设计方案不会投入生产。在专业情境中，参与者或许会花更多时间学习工具，以完成可行的设计方案。

9 结论

本文开展了一项实证研究，旨在了解工程和建筑设计师如何学习使用基于人工智能的制造设计工具，记录他们在与人工智能协作时遇到的挑战，并探究他们与人工智能系统共同创作时的需求和期望。我们借鉴高效人类团队的经验，找出了若干支持机会，以改进未来设计师与人工智能的协同创作。总的来说，我们希望启发其他人探索尚未开发的支持机会，并推动未来共创式工具的发展，使其结合人类系统与人工智能系统各自的优势，从而实现任何一方单独都无法完成的复杂设计方案。

致谢

我们感谢所有研究参与者、同伴指导者，以及研究助理 Anita Sun、Linda Xue 和 Sophia Timko 对本研究的支持。

本材料基于美国国家科学基金会资助的研究成果，资助编号为 2118924，项目名称为"支持设计师学习使用人工智能进行复杂计算设计任务的协同创作"。本材料中表达的任何观点、研究发现、结论或建议均属于作者本人，并不一定反映美国国家科学基金会的观点。

参考文献

[1] Grégoire Allaire、François Jouve 和 Anca-Maria Toader。2002年。用于形状优化的水平集方法。数学报告 334, 12（2002年1月），1125 1130 10 1016 1631 073 02 02412 3 – 。https://doi.org/ 。/S - X( ) -

[2] Gantugs Atarsaikhan、Brian Kenji Iwana 和 Seiichi Uchida。2020年。用于形状风格化的引导式神经风格迁移。《公共科学图书馆·综合》15，6（2020年6月），e0233489。https://doi.org/ 10 1371 0233489 。/journal.pone。Autodesk。 。Fusion 生成式设计扩展。[3] 2020 360 https://www.autodesk.com/products/fusion-360/generative-design-extension [4] Autodesk。2021年。生成式设计——结构载荷——每个实体的力? https://forums.autodesk.com/t5/fusion-360-design-validate/generative-design-structural-load-force-per-entity/td-p/10380547 栏目：Fusion 360 设计、验证与文档。[5] Gagan Bansal、Besmira Nushi、Ece Kamar、Walter S. Lasecki、Daniel S. Weld 和 Eric Horvitz。2019年。超越准确性：心智模型在人机团队绩效中的作用。*AAAI*人类计算与众包会议论文集 7，1（2019 年 10 月），2–11。https://ojs.aaai.org/index.php/HCOMP/article/view/ 5239 [6] Gagan Bansal、Besmira Nushi、Ece Kamar、Daniel S. Weld、Walter S. Lasecki 和 Eric Horvitz。2019年。人机团队的最新进展：理解并应对绩效与兼容性权衡。*AAAI*人工智能会议论文集 33（2019年7月），2429–2437。https://doi.org/ 10 1609 33 01 33012429 。/ aaai.v i 。Eric P.S. Baumer 和 Bill Tomlinson。 。比较活动理论与分布式认知的视频分析：不止于"走马观花"。载于 *SIGCHI*计算系统中的人为因素会议论文集（*CHI '11*）。美国计算机协会，纽约，NY，美国，133–142。https://doi.org/10.1145/1978942.1978962 举办地：加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华。[7] 2011

[8] Virginia Braun 和 Victoria Clarke。2019年。反思反思性主题分析。《体育、运动与健康定性研究》 11，4（2019年8月），589–597。https://doi.org/ 10 1080 2159676 2019 1628806 。/ X。 。Jean-Marie Burkhardt、[9] Françoise Détienne、Anne-Marie Hébert、Laurence Perron、Stéphane safin 和 Pierre Leclercq。2009年。评估技术中介设计情境中协作质量的方法。载于欧洲认知工效学会议：超越产品的设计——理解普适环境中的活动与用户体验（*ECCE '09*）。芬兰VTT技术研究中心，FI-02044 VTT，芬兰。举办地：芬兰赫尔辛基。[10] Carrie J. Cai、Samantha Winter、David Steiner、Lauren Wilcox 和 Michael Terry。2019年。“你好，人工智能”：揭示医疗从业者在人机协作决策中的入门引导需求。*ACM*人机交互论文集 3，CSCW（2019年11月），1–24。https://doi.org/10.1145/3359206[11] Arjun Chandrasekaran、Deshraj Yadav、Prithvijit Chattopadhyay、Viraj Prabhu 和 Devi Parikh。2017年。探戈需要两个人：迈向人工智能心智理论。http://arxiv.org/abs/1704.00717 arXiv:1704.00717 [cs]。[12] Catherine C. Chase、Jenna Marks、Laura J. Malkiewich 和 Helena Connolly。2019年。发明活动中的教师话语指导如何塑造学生的认知参与和迁移。《国际*STEM*教育期刊》 6，1（2019年12月）， 14 10 1186 40594 019 0170 7 。https://doi.org/ 。/s - - - Rimika Chaudhury、[13] Philip J. Guo 和 Parmit K. Chilana。2022年。“根本跟不上！”：机器学习非正式学习者面临的多样动机与挑战。载于*2022*年*IEEE*可视化语言与以人为中心的计算研讨会（*VL/HCC*）。1–11。https://doi.org/10.1109/VL/HCC53370.2022.9833100 ISSN：1943-6106。[14] Xiang ' Anthony' Chen、Ye Tao、Guanyun Wang、Runchang Kang、Tovi Grossman、Stelian Coros 和 Scott E. Hudson。2018年。Forte：用户驱动的生成式设计。载于*2018*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，加拿大魁北克省蒙特利尔， 1 12 10 1145 3173574 3174070 – 。[15] https://doi.org/ 。/ 。Michelene T. H. Chi。 。评估专家与新手知识的实验室方法。载于《剑桥专业知识与专家绩效手册》，K. Anders Ericsson、Neil Charness、Paul J. Feltovich 和 Robert R. Hoffman（编）。剑桥大学出版社，剑桥，167–184。https://doi.org/ 10 1017 9780511816796 010 。/CBO 。Herbert H. Clark 和 Susan E. Brennan。[16] 。沟通中的共同基础。载于《社会共享认知视角》。，Lauren B. Resnick、John M. Levine 和 Stephanie D. Teasley（编）。美国心理学会，华盛顿， 127 149 10 1037 10096 006 – 。https://doi.org/ 。/ - 达索系统。 。Solidworks：通过生成式设计增强您的设计工作流程。[17] h tt ps://www.solidworks.com/media/enhance-your-design-workflow-generative-design [18] Nicholas Davis、Chih-Pin Hsiao、Yanna Popova 和 Brian Magerko。2015年。面向计算协作与共同创造的生成式创造力模型。载于《数字时代的创造力》，Nelson Zagalo 和 Pedro Branco（编）。施普林格伦敦，伦敦，109–133。https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6681-8_7 丛书名称：施普林格文化计算系列。[19] Nicholas Davis、Chih-PIn Hsiao、Kunwar Yashraj Singh、Lisa Li、Sanat Moningi 和 Brian Magerko。2015年。Drawing Apprentice：用于艺术协作的生成式共创代理。载于*2015*年*ACM SIGCHI*创造力与认知会议论文集。ACM，英国格拉斯哥，185–186。https://doi.org/ 10 1145 2757226 2764555 。/ 。Leslie A. DeChurch 和 Jessica R. Mesmer-Magnus。2010年。测量团队共享心智模型：荟萃分析。《群体动力学：理论、研究与实践》 14, 1 2010 1 14 10 1037 0017455 ( ), – 。https://doi.org/ 。/a [20] Kees Dorst 和 Nigel Cross。 。设计过程中的创造力：问题与解决方案的共同演化。《设计研究》 22，5（2001年9月），425–437。https://doi.org/ 10 1016 0142 694 01 00009 6 。/S - X( ) - David Engel、Anita Woolley、Lisa Jing、Christopher Chabris 和 Thomas Malone。2014年。读懂眼神还是读懂言外之意？心智理论在线上和面对面情境中同样能有效预测集体智慧。《公共科学图书馆·综合》 9 2014 115212 10 1371 0115212（12月），[21] 2001 2003 e 。https://doi.org/ 。/journal.pone。Ozgur Eris。 。提出生成式设计问题：设计思维中的一种基本认知机制。载于国际工程设计会议论文集。[22] [23] Jennifer Fernquist、Tovi Grossman 和 George Fitzmaurice。2011年。Sketch-Sketch Revolution：一套寓教于乐的引导式绘图与应用学习教程系统。载于第*24*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '11*）。美国计算机协会，纽约，NY，美国，373–382。https://doi.org/10.1145/2047196.2047245 举办地：美国加利福尼亚州圣巴巴拉。[25] Stephen M. Fiore 和 Travis J. Wiltshire。2016年。技术作为团队成员：探究外部认知在支持团队认知过程中的作用。《心理学前沿》 7 2016 10 3389 2016 01531（10月）。[26] https://doi.org/ 。/fpsyg。 。Kate Forbes-Riley 和 Diane J. Litman。 。适应学生的不确定性能够改善辅导对话。（2009年7月），33–40。MAG ID：1568422853。[27] formlabs。2020年。生成式设计入门。https://formlabs.com/blog/generative-design/ 2009 [28] Leon A. Gatys、Alexander S. Ecker 和 Matthias Bethge。2016年。使用卷积神经网络进行图像风格迁移。载于*2016*年*IEEE*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）。IEEE，美国内华达州拉斯维加斯， 2414 2423 10 1109 2016 265 –。https://doi.org/。/CVPR。[29] Aldair E. Gongora、Siddharth Mysore、Beichen Li、Wan Shou、Wojciech Matusik、Elise F. Morgan、Keith A. Brown 和 Emily Whiting。2021年。使用强化学习设计具有目标有效杨氏模量的复合材料。载于计算制造研讨会。ACM，美国线上活动，1–11。https://doi.org/ 10 1145 3485114 3485123 。/。George Head。[30] 。有效协作：深度协作是学习过程的基本要素。教育探究期刊4，2（2003年）。2003 [31] Kenneth Holstein、Vincent Aleven 和 Nikol Rummel。2020年。教育中的人机混合适应性概念框架。载于教育中的人工智能，Ig Ibert Bittencourt、Mutlu Cukurova、Kasia Muldner、Rose Luckin 和 Eva Millán（编）。第12163卷。Springer International Publishing，尚佩，240–254。https://doi.org/10.1007/978-3-030-52237-7_20 丛书名称：《计算机科学讲义》。[32] Ivan Hybs 和 JohnS. Gero。1992年。设计的进化过程模型。《设计研究》13，3（1992年7月），273–290。https://doi.org/10.1016/0142-694X(92)90216-W [33] Amir Jahanlou、William Odom 和 Parmit Chilana。2021年。开始进行动态图形设计时面临的挑战：来自业余和专业动态图形设计师的观点。载于*Graphics Interface 2021*（*GI 2021*）论文集。加拿大信息处理学会，35–45。https://doi.org/10.20380/GI2021.06 ISSN：0713-5424 活动地点：虚拟活动。[34] Heisawn Jeong 和 Michelene T. H. Chi。2007年。知识趋同与协作学习。《教学科学》35，4（2007年5月），287–315。https://doi.org/10.1007/s11251-006-9008-z [35] Harmanpreet Kaur、Alex C Williams 和 Walter S Lasecki。2019年。构建人类与人工智能之间的共享心智模型以实现有效协作。（2019年），7。[36] Anna Kawakami、Nikos Arechiga、Luke Guerdan、Matthew Lee、Yang Cheng、Scott Carter、Anita Sun、Haiyi Zhu 和 Alison Hu。2022年。迈向以学习者为中心的可解释人工智能。*ACM*计算系统中的人为因素会议（*CHI 2022*）上的以人为中心的可解释人工智能研讨会（*HCXAI*）（2022年），7。[37] Rubaiat Habib Kazi、Tovi Grossman、Hyunmin Cheong、Ali Hashemi 和 George Fitzmaurice。2017年。DreamSketch：通过草图绘制和生成式设计进行早期三维设计探索。载于第*30*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集。ACM，加拿大魁北克省魁北克市， 401 414 10 1145 3126594 3126662 –。[38] https://doi.org/。/。Kimia Kiani、Parmit K. Chilana、Andrea Bunt、Tovi Grossman 和 George Fitzmaurice。2020 年。“ 我会直接问别人 ”：在现代工作场所学习功能丰富的设计软件。载于*2020*年*IEEE*可视化语言与以人为中心的计算研讨会（*VL/HCC*）。1–10。https://doi.org/10.1109/VL/HCC50065.2020.9127288 ISSN：1943-6106。[39] Hannah Kim、Jaegul Choo、Haesun Park 和 Alex Endert。2016年。InterAxis：通过观测级交互引导散点图坐标轴。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊22，1（2016年1月），131–140。https://doi.org/ 10 1109 2015 2467615 。/TVCG。Janin Koch 和 Antti Oulasvirta。[40] 。群体认知与协作式人工智能。载于人类与机器学习，Jianlong Zhou 和 Fang Chen（编）。Springer International Publishing，尚佩，293–312。https://doi.org/10.1007/978-3-319-90403-0_15 丛书名称：人机交互系列。[41] Rafal Kocielnik、Saleema Amershi 和 Paul N. Bennett。2019年。你会接受不完美的人工智能吗？探索调整终端用户对人工智能系统期望的设计。载于*2019*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，英国苏格兰格拉斯哥， 1 14 10 1145 3290605 3300641 –。[42] 2018 2012 https://doi.org/。/。Kenneth R. Koedinger、Albert T. Corbett 和 Charles Perfetti。。知识—学习—教学框架：弥合科学—实践鸿沟，促进稳健的学生学习。《认知科学》36，5（2012年），757–798。https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x _电子版：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x。[43] Siva m Krish。2011年。一种实用的生成式设计方法。计算机辅助设计 43, 1 2011 88 100 10 1016 2010 09 009（1月），–。[44] https://doi.org/。/j.cad。。Benjamin Lafreniere、Parmit K. Chilana、Adam Fourney 和 Michael A. Terry。2015年。这些不是你要找的命令：解决功能丰富的软件中的错误前馈问题。载于第*28*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集。ACM，美国北卡罗来纳州夏洛特， 619 628 10 1145 2807442 2807482 –。https://doi.org/。/。Matthew V. Law、Nikhil Dhawan、Hyunseung Bang、So-Yeon Yoon、Daniel Selva 和 Guy Hoffman。2019 年。使用有形用户界面进行并行人机协同设计。载于设计计算与认知 ' *18*，John S. Gero（编）。Springer International Publishing，尚佩，155–173。https://doi.org/ 10 1007 978 3 030 05363 5_9 。/---- Matthew V. Law、Amritansh Kwatra、Nikhil Dhawan、Matthew Einhorn、Amit Rajesh 和 Guy Hoffman。2020年。虚拟协同设计智能体的设计意图推断。载于第*20*届*ACM*智能虚拟智能体国际会议论文集。ACM，英国苏格兰虚拟活动，1–8。https://doi.org/10.1145/3383652.3423861 [45] [46]

[47] Bryan Lawson 和 Shee Ming Loke。1997年。计算机、文字和图像。《设计研究》 18, 2 1997 171 183 10 1016 0142 694 97 85459 2（4月），–。https://doi.org/。/S-X()- [48] Ryan Louie、Andy Coenen、Cheng Zhi Huang、Michael Terry 和 Carrie J. Cai。2020年。通过人工智能引导工具实现新手与人工智能音乐共创：面向深度生成模型。载于2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，美国夏威夷州檀香山， 1 13 10 1145 3313831 3376739–。https://doi.org/。/。[49] Shareen Mahmud、Jessalyn Alvina、Parmit K. Chilana、Andrea Bunt 和 Joanna McGrenere。2020年。通过探索学习：儿童、成年人和老年人与全新功能丰富的应用程序进行交互。载于2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，美国夏威夷州檀香山， 1 14 10 1145 3313831 3376414–。https://doi.org/。/。[50] Mary Lou Maher、Brian Magerko、Dan Venura、Douglas Fisher、Rogelio E. Cardona-Rivera、Nancy Fulda、John Gero、Minwoo Lee、David Wilson、James C. Kaufman、Maithilee Kunda、Michael Muller、Rachel K.E. Bellamy、Maya Ackerman 和 Evangelia Chrysikou。2022年。整合生成式人工智能与认知人工智能，构建以人为中心、可解释的协同创作人工智能的研究计划。载于CHI 2022生成式人工智能与人机交互研讨会。https://generativeaiandhci.github.io/ [51] Damien Masson、Jo Vermeulen、George Fitzmaurice 和 Justin Matejka。2022年。为复杂软件应用程序的学习强化试错。载于2022年CHI计算系统中的人为因素会议论文集（CHI '22）。美国计算机协会，美国纽约州纽约市，https://doi.org/10.1145/3491102.3501895 活动地点：美国路易斯安那州新奥尔良。[52] Justin Matejka、Michael Glueck、Erin Bradner、Ali Hashemi、Tovi Grossman 和 George Fitzmaurice。2018年。Dream Lens：大规模生成式设计数据集的探索与可视化。载于2018年CHI计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，加拿大魁北克省蒙特利尔，1–12。https://doi.org/ 10 1145 3173574 3173943 。/。Anne Meier、Hans Spada 和 Nikol Rummel。2007年。评估计算机支持的协作过程质量的评分方案。《国际计算机支持的协作学习期刊》2，1（2007年4月），63–86。https://doi.org/10.1007/s11412-006-9005-x [53] Achim Menges 和 Sean Ahlquist（编）。2011年。计算设计思维（第1版）。Wiley，奇切斯特。[54] Tim Miller。2019年。人工智能中的解释：来自社会科学的洞见。《人工智能》267（2019年2月），1–38。https://doi.org/ 10 1016 2018 07 007 。/j.artint。。Susan Mohammed 和 Brad C. Dumville。2001年。团队知识框架中的团队心智模型：跨学科边界扩展理论与测量。《组织行为学期刊》22，2（2001年3月），89–106。https://doi.org/ 10 1002 86 。/job。Susan Mohammed 和 Erika Ringseis。2001年。[56] 群体决策中的认知多样性与共识：输入、过程和结果的作用。《组织行为与人类决策过程》85，2（2001年7月），310–335。https://doi.org/ 10 1006 2000 2943 。/obhd。。Hussein Mozannar、Arvind Satyanarayan 和 David Sontag。2021年。通过示例教会人类何时应将决策交由分类器处理。arXiv:2111.*11297 [cs]*（2021年12月）。http://arxiv.org/abs/2111.11297 arXiv：2111.11297。[59] Danil Nagy、Dale Zhao 和 David Benjamin。2018年。基于自然的混合计算几何系统：优化组件结构。载于《人性化数字现实》，Klaas De Rycke、Christoph Gengnagel、Olivier Baverel、Jane Burry、Caitlin Mueller、Minh Man Nguyen、Philippe Rahm 和 Mette Ramsgaard Thomsen（编）。Springer Singapore，新加坡，167–176。https://doi.org/ 10 1007 978 981 10 6611 5_15 。/---- Nelson Nauata、Kai-Hung Chang、Chin-Yi Cheng、Greg Mori 和 Yasutaka Furukawa。2020年。House-GAN：用于图约束房屋布局生成的关系生成对抗网络。载于《计算机视觉——ECCV 2020》，Andrea Vedaldi、Horst Bischof、Thomas Brox 和 Jan-Michael Frahm（编）。第12346卷。Springer International Publishing，尚佩，162–177。https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_10 丛书名称：《计算机科学讲义》。[61] Ahmed K. Noor。2017年。人工智能与机器设计的未来。《机械工程》 139, 10 2017 38 43 10 1115 1 2017 2（10月），–。https://doi.org/。/。-10月- Heather Pon-barry、Karl Schultz、Elizabeth Owen Bratt、Brady Clark 和 Stanley Peters。2006年。应对口语教程对话系统中的学生不确定性。《国际教育人工智能期刊》16（2006年），171–194。[63] Aditya Ramesh、Mikhail Pavlov、Gabriel Goh、Scott Gray、Chelsea Voss、Alec Radford、Mark Chen 和 Ilya Sutskever。2021年。零样本文本到图像生成。http://arxiv.org/abs/2102.12092 arXiv:2102.*12092* [cs]。[64] reddit.com。2022年。r/Fusion360。https://www.reddit.com/r/Fusion360/[65] Robin Rombach、Andreas Blattmann、Dominik Lorenz、Patrick Esser 和 Björn Ommer。2022年。使用潜在扩散模型进行高分辨率图像合成。https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.10752 arXiv:2112.*10752* [cs]。[66] Matthias Scheutz、Scott A. DeLoach 和 Julie A. Adams。2017年。在人类—智能体团队中开发和使用共享心智模型的框架。《认知工程与决策制定期刊》11，3（2017年9月），203–224。https://doi.org/10.1177/1555343416682891 出版商：SAGE出版公司。[67] Donald A. Schön。1983年。反思型实践者：专业人士如何在行动中思考。Basic Books，纽约。[68] Donghoon Shin、Sachin Grover、Kenneth Holstein 和 Adam Perer。2021年。《刻画人类解释策略，以指导建筑损坏评估中可解释人工智能的设计》。（2021年）。https://doi.org/10.48550/ARXIV.2111.02626 发布者：arXiv 版本号：1。[69] Siemens Software。2021年。《生成式工程：即时创建满足或超越要求的多种设计方案》。h t t p s:// w w w.plm.automation.siemens.com/global/en/products/mechanical-design/generative-design.html [70] Jiao Sun、Q. Vera Liao、Michael Muller、Mayank Agarwal、Stephanie Houde、Kartik Talamadupula 和 Justin D. Weisz。2022年。《通过基于场景的设计探究生成式人工智能在代码领域的可解释性》。载于第*27*届智能用户界面国际会议。ACM，芬兰赫尔辛基，212–228。https://doi.org/ 10 1145 3490099 3511119 . / . Fuwen Tan、Song Feng 和 Vicente Ordonez。2019年。[71] 《Text2scene：根据文本描述生成组合场景》。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议论文集。6710–6719。[72] Nurcan Gecer Ulu 和 Levent Burak Kara。2015年。《DMS2015-33：支持现有物体的生成式界面结构设计》。《可视语言与计算杂志》 31 2015 171 183 10 1016 2015 10 016（12月），–。https://doi.org/。/j.jvlc.。。Nobuyuki Umetani、Takeo Igarashi 和 Niloy J. Mitra。。《引导探索适用于家具设计的物理有效形状》。《*ACM*图形学汇刊》31，4（2012年8月），1–11。https://doi.org/10.1145/2185520.2185582[74] Piet Van den Bossche、Wim Gijselaers、Mien Segers、Geert Woltjer 和 Paul Kirschner。2011年。《团队学习：构建共享心智模型》。《教学科学》 39, 3 2011 283 301 10 1007 11251 010 9128 3（5月），–。https://doi.org/。/s - - - Maarten van Someren。《出声思维法：认知过程建模实用指南》。《信息处理与管理》31，6（11月 1995 906 907 10 1016 0306 4573 95 90031 4），–。https://doi.org/。/ - ( ) - Kurt VanLehn、Randolph M. Jones 和 Michelene T.H. Chi。1992年。《自我解释效应模型》。《学习科学杂志》2，1（1992年1月），1–59。https://doi.org/ 10 1207 15327809 0201_1 . / s jls Dakuo Wang、Elizabeth Churchill、Pattie Maes、Xiangmin Fan、Ben Shneiderman、Yuanchun Shi 和 Qianying Wang。2020年。《从人际协作到人机协作：设计能够与人共同工作的人工智能系统》。载于*2020*年*CHI*计算系统中的人为因素会议扩展摘要。ACM，美国夏威夷州檀香山，1–6。https://doi.org/ 10 1145 3334480 3381069 . / . Qiaosi Wang、Koustuv Saha、Eric Gregori、David Joyner 和 Ashok Goel。2021年。《迈向人机交互中的相互心智理论：语言如何反映学生对虚拟教学助理的认知》。载于*2021*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，日本横滨， 1 14 10 1145 3411764 3445645–。https://doi.org/。/。Christopher W. Wiese 和 C. Shawn Burke。《理解团队学习动态随时间的变化》。《心理学前沿》10（2019年6月），1417。https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01417[80] Humphrey Yang、Kuanren Qian、Haolin Liu、Yuxuan Yu、Jianzhe Gu、Matthew McGehee、Yongjie Jessica Zhang 和 Lining Yao。2020年。《SimuLearn：支持形变材料设计与工作流程的快速、准确模拟器》。载于第*33*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集。ACM，美国线上活动， 71 84 10 1145 3379337 3415867–。https://doi.org/。/。Nur Yildirim、James McCann 和 John Zimmerman。《数字制造工具的实际应用：探究专业人士当前的需求与期望的未来》。载于*2020*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，美国夏威夷州檀香山， 1 13 10 1145 3313831 3376621–。https://doi.org/。/。Kirsty Young。《直接来自源头：出声思考数据在理解学习方面的价值》。教育探究期刊6（2009年）。[83] Loutfouz Zaman、Wolfgang Stuerzlinger、Christian Neugebauer、Rob Woodbury、Maher Elkhaldi、Naghmi Shireen 和 Michael Terry。2015年。*GEM-NI*：用于创建和管理生成式设计备选方案的系统。载于第*33*届*ACM*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，韩国首尔， 1201 1210 10 1145 2702123 2702398–。https://doi.org/。/。Guanglu Zhang、Ayush Raina、Jonathan Cagan 和 Christopher McComb。2021年。《关于人工智能对人类设计团队影响的警示故事》。《设计研究》 72 2021 100990 10 1016 2021 100990（1月），。https://doi.org/。/j.destud.。Rui Zhang、Nathan J. McNeese、Guo Freeman 和 Geoff Musick。2021年。《"理想的人类"：人们对人机团队协作中人工智能队友的期望》。《*ACM*人机交互论文集》4，CSCW3（2021年1月），1–25。https://doi.org/10.1145/3432945

A 附加材料

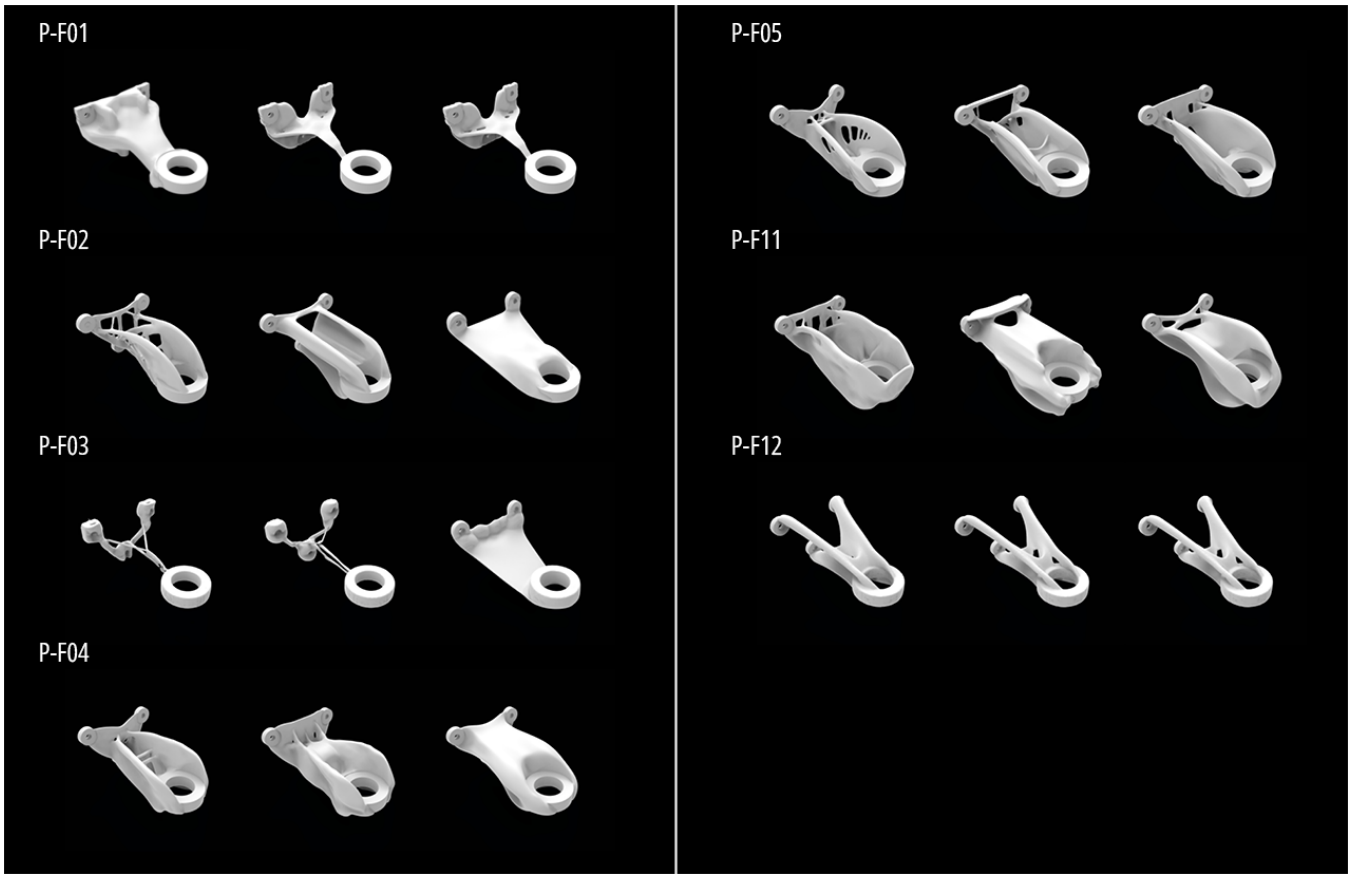

图6：Fusion360任务中创建的所有发动机安装支架概览。每位参与者提交了三个设计选项。由于人工智能系统基于相同的参数值生成这三个选项，因此每组三个选项要么全部满足相同的标准，要么全部未满足。

表6：半结构式任务后访谈的问题访谈提纲。

主题	话题		问题
与工具协作	总体体验	Q3	能否告诉我，您总体上使用这个设计工具的体验如何？
	总体期望	Q4	在开始这个项目之前，您期望这个设计工具扮演什么角色？
			那么，它在设计过程中实际上扮演了什么角色？它是否设计工具符合您的期望吗？
	角色 – 协调	Q5	您觉得您与设计工具之间存在协作互动吗以及设计工具之间？
			您能给我们一些具体的例子吗？
		Q6	请用您自己的话，您会用哪些隐喻或类比来描述如何描述这个工具以及与它的协作？
		Q7	您是否认为使用设计工具开展工作的过程具有共同创作性？为什么？
		Q8	使用设计工具的工作流程与您和人类队友协作的工作流程有何不同？
	角色 – 期望	Q9	在你的工作过程中，你希望人工智能扮演什么角色？
		Q10	你会如何描述适用于该任务的理想协作式设计工具？
		Q11	设计工具需要具备哪些功能，才能让你认为它是“协作”和“共同创作”的？
	心智模型	Q12	你还记得有哪些情况下，你觉得设计工具的行为令人困惑或恼火吗？
	共享心智模型	Q13	你认为 AI 功能是否成功理解了你的设计意图和设计实践？
		Q14	你认为设计工具是否收集了足够的信息来支持最有效地帮助您？为什么？
	共享心智模型 – 期望	Q15	在您的设计过程中，是否有任何方面是您希望这类设计工具能更多地向您学习，从而更好地支持您？ you?
	沟通	Q16	你会如何描述你与设计工具之间的对话？
		Q17	你能否描述一下沟通顺畅和不太顺畅的情形？
		Q18	你觉得这个界面是否有助于引导你完成整个入门过程？
	冲突解决	Q19	你还记得与设计工具发生冲突的情况吗？你是如何解决冲突的？
	时间安排／流程	Q20	仿真时间如何影响了你的设计过程？
设计过程	对设计成果的满意度 结果	Q21	总体而言，你对最终设计满意吗？它与设计任务说明的契合度如何？ 它与设计任务说明的契合度如何？
	意外	Q22	你是否记得设计建议中的某些情形 工具有没有让你感到意外？
			如果有，可以举个例子吗？你觉得这些意外是有成效的，还是没有成效？
	设计协商	Q23	你觉得设计工具是如何改变你的设计方式的？ 你是否曾根据工具的……调整过设计目标/策略？ 能力？
	探索	Q24	你是否因为这个设计工具而探索了更多设计选项？
	生产力	Q25	你认为不借助人工智能功能，自己也能达到同样的产出水平（质量和数量）吗？
			考虑到时间约束？为什么？
	信任／安心感	Q26	你对设计工具生成的结果有多信任？
		Q27	你希望该软件进行其他类型的分析吗？ 它却没有进行？为什么？
学习过程	学习过程	Q28	你会如何描述使用该工具并与之协作的学习过程？ 你会如何描述使用该工具并与之协作的学习过程？
		Q29	设计过程中的哪些环节最需要指导？
		Q30	你是如何了解该设计工具的能力的？
		Q31	设计工具的哪些方面难以理解或学习？
	学习资源	Q32	你觉得哪些学习资源最有用？为什么？
	学习期望	Q33	工具如何才能更好地引导一位经验丰富的设计师开始使用该工具？
		Q34	在您看来，理想的协作学习过程应该是什么样的，呢？
总体期望		Q35	您希望设计工具在哪些方面做得更多？
		Q36	你希望设计工具在哪些方面有所不同？