本文已被《建筑自动化》期刊接收发表。

数字孪生：人类如何融入其中？

Ashwin Agrawal，硕士[1]；Robert Thiel，硕士[2]；Pooja Jain，硕士[3]；Vishal Singh，博士[4]；Martin Fischer，博士[5]

[1]斯坦福大学土木与环境工程系，美国加利福尼亚州斯坦福（通讯作者），电子邮箱：ashwin15@stanford.edu[2]WSP USA 副总裁，美国新泽西州莫里斯敦，电子邮箱：bob.thiel@wsp.com[3]WSP USA 副总裁，美国加利福尼亚州旧金山，电子邮箱：pooja.jain1@wsp.com[4]印度科学研究所产品设计与制造中心副教授，印度班加罗尔，电子邮箱：singhv@iisc.ac.in[5]斯坦福大学土木与环境工程系教授，美国加利福尼亚州斯坦福，电子邮箱：fischer@stanford.edu

摘要

数字孪生（DT）技术尚未完善和成熟，因此在实践中的实施往往零散：部分功能由数字孪生自动化完成，其他功能仍由人类执行。这种零散的数字孪生实施常使从业者困惑于在工作系统中应将哪些角色（或功能）分配给数字孪生，以及这会如何影响人类。缺乏关于人类和数字孪生在工作系统中扮演何种角色的认知，可能导致重大成本、资源错配、对数字孪生抱有不切实际的期望，以及战略失调。为缓解这一挑战，本文针对以下研究问题展开探讨：人类与数字孪生协同工作时，数字孪生可以扮演哪些类型的角色？这些角色可以在多大程度上实现自动化？具体而言，我们提出了一个二维概念框架——数字孪生等级（LoDT）。该框架整合了数字孪生可能扮演的角色类型（主要分为（1）观察者、（2）分析者、（3）决策者和（4）行动执行者），以及各角色的自动化程度；自动化程度分为五个不同等级，从完全手动到完全自动化。特定的数字孪生可以扮演任意数量、自动化程度各异的角色。该框架有助于从业者系统地规划数字孪生部署，清晰地传达目标和交付成果，并制定战略愿景。案例研究展示了该框架的实用性。

关键词： 数字孪生、数字孪生等级、数字战略、人工智能、人在回路中的数字孪生、信息物理系统、工业4.0

© 2023。此稿件版本依据 CC-BY-NC-ND 4.0 许可协议提供
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

1. 引言

毫无疑问，数字孪生（DT）在不同用例中的能力不断提升，尤其是随着人工智能（AI）和机器学习（ML）近期取得的进展。数字孪生正变得更加智能[1]，能够完成过去只有人类才能完成的任务，例如呈现和解读数据（如数字孪生显示工厂设备的健康状态），以及做出决策并执行操作（如数字孪生根据设备的健康状况生成“假设”情境，并在需要时联系维护团队）。

随着能力的增强，数字孪生不再只是以专家为中心的工具，而是会主动做出决策、完成任务并适应不断变化的条件[2],，从而极大地改变人类操作员的角色。人类操作员将需要与数字孪生协作，在数字孪生自主执行某些角色（或功能）时监测其表现，并完成数字孪生无法执行的任何角色（或功能）。这会形成一种零散的（半自主）系统：过去由人类手动执行的一些角色如今由数字孪生自动完成，而其他角色仍由人类手动处理。

由于这种新的工作方式，人类与数字孪生之间将出现新型交互[3],，进而产生新的协调需求[4]，并提高在数字孪生与人类操作员之间进行智能、高效角色分配的重要性[5]。要在实践中成功部署数字孪生，必须确保角色分配能让数字孪生和人类各自承担其擅长的任务。角色分配不当会对人的表现产生负面影响，这一点此前在航空航天和制造业中已有观察[6,7,8]。这可能导致不利的成本效益权衡、人工监控减少、过度依赖数字孪生[9], 以及态势感知能力丧失[10]。因此，严谨地理解这一人类与数字孪生协同系统至关重要[2]。尤其需要明确工作系统中数字孪生的角色（或功能）与人类角色（或功能）的界限[11,12,13,14,15,16]。

然而，当前文献中关于人机数字孪生交互的研究仍然不足 [17,18]。[19] 将其视为制造业的一项主要研究空白，并建议投入大量研究力量来填补这一空白。[2] 指出，有必要探究数字孪生自主性与人类能动性之间的界限，以确保数字孪生尽可能具备自主性，同时不牺牲人类能动性。[20,21] 回顾了数字孪生相关文献，发现关于数字孪生部署中人类集成的研究不足。[15,22] 也指出了类似的发现。[23] 呼吁全面了解在工业4.0中，设计工作和工作系统时人类工作者的角色与职责发生了怎样的变化。因此，为弥补这一知识空白，本文研究数字孪生人机交互，并回答以下研究问题：“人类与数字孪生协同工作时，数字孪生可以扮演哪些类型的角色？这些角色可以在多大程度上实现自动化？”

了解如何将数字孪生与人类整合，是充分发挥数字孪生和人类操作员潜力的先决条件 [17]。不了解人类和数字孪生在工作系统中扮演的角色，可能会造成重大成本 [24], 资源分配不当、对技术抱有不切实际的期望 [9,25], 以及战略失调 [26]。[4] 也

强调系统设计人员了解人类和数字孪生在工作系统中扮演何种角色的重要性，并指出：“审视人类绩效问题尤为重要，因为现代技术能力迫使系统设计人员必须认真抉择哪些工作应实现自动化以及自动化的程度；毕竟，几乎没有什么工作是无法自动化的。”

因此，本文提出了一个二维概念框架——数字孪生等级（LoDT）。该框架整合了数字孪生可能承担的各类角色，大致分为：（1）观察者、（2）分析者、（3）决策者和（4）行动执行者；同时纳入了每种角色的自动化程度，并将其划分为五个不同等级，从完全手动到完全自动化。特定的数字孪生可以承担任意数量的角色，且各角色的自动化程度可能不同。

图1展示了一个真实案例，以便更好地说明研究问题，以及框架需要包含两个维度的原因。该案例讲述了建筑项目经理 Ryan，他负责安装和维护风力涡轮机。为防止因土壤失效或条件不适宜而导致起重机倾覆，Ryan 计划为风力涡轮机安装场地创建一个数字孪生，其中包含有关土壤特性、土壤承载力和地形的实时数据。图1展示了完成项目各项工作所需的角色（即我们框架的第一个维度）。情景1描述了未使用数字孪生的基准情况，所有工作均由人类完成。情景2中，数字孪生对某些类型的角色进行（部分）自动化，因此改变了人类在各角色中原本执行的工作。情景3与情景2的区别在于，数字孪生对不同类型角色的自动化程度不同，这正是我们框架第二个维度所涵盖的内容。有关该案例研究的更多详情，请参见第5节。

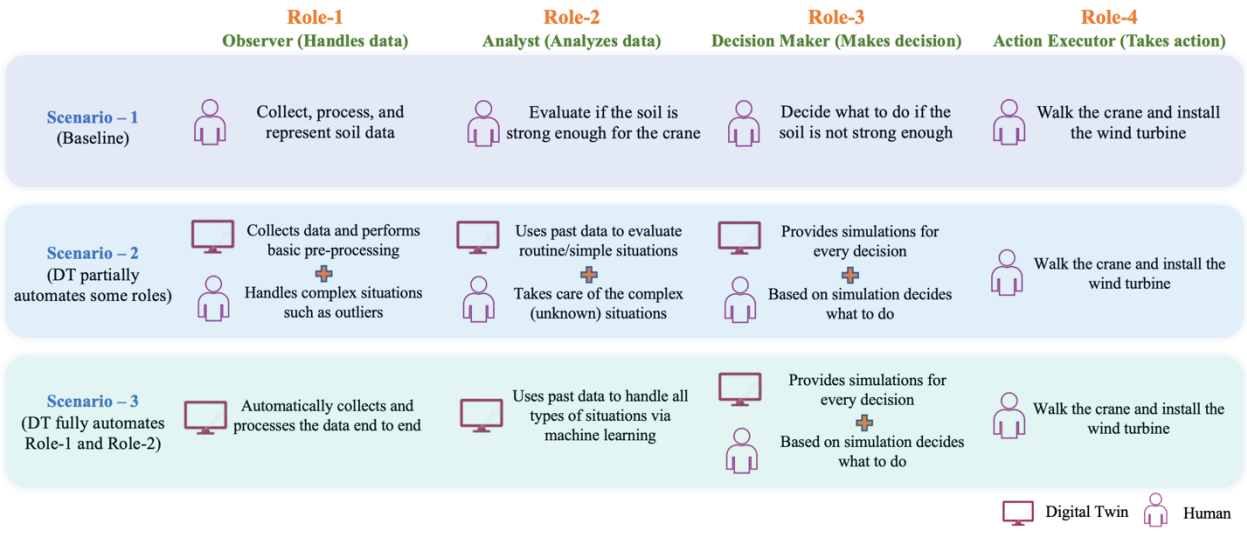

图 *1*：一个真实案例，展示数字孪生如何发挥多种角色、每种角色中的自动化程度，以及其对人类的影响

第2节回顾了数字孪生的背景，第3节详细介绍了研究与验证方法。第4节提出了LoDT框架。接下来，

第5节通过真实案例研究展示了LoDT框架的相关性。第6节总结了本文的贡献及其对工业的影响。

2. 背景

本节首先在第2.1小节回顾数字孪生的研究背景，并介绍制造业、航空航天和建筑施工等行业中围绕数字孪生概念形成的定义、应用和观点。随后，在第2.2和第2.3小节重点讨论与本研究关注领域最相关的研究，即数字孪生人机交互和LoDT。最后，在第2.4小节总结知识空白。

2.1 文献中的数字孪生

本节回顾数字孪生的发展历史、不同定义、应用领域以及数字孪生的创建过程。

2.1.1 数字孪生的历史

美国国家航空航天局的阿波罗计划使用了物理孪生体（数字孪生的前身），以模拟飞行测试的精确条件并训练宇航员 [27]。要为现实世界中的每项资产都构建一个物理孪生体，成本将极其高昂，几乎不可能实现。因此，物理孪生的理念被拓展为创建数字孪生。以数字方式构建资产的孪生体，使其既能反映实际运行条件，又切实可行且成本较低，这正是数字孪生概念的初衷 [12]。

DT一词于2003年首次以“镜像空间模型”的形式提出，作为一门关于产品生命周期管理的大学课程的一部分 [28]。它最初被描述为一种物理系统的数字信息构造体，并与相关物理系统相连接。DT被认为由三个部分组成 [29], , 如图2所示：(1) 物理实体；(2) 数字实体；(3) 它们之间的数据流

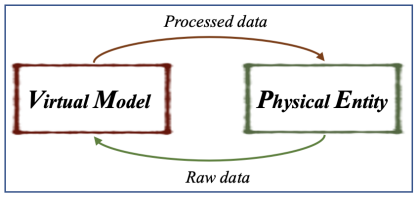

Figure-2: The Digital Twin Paradigm

。物理对象状态的任何变化都会导致数字对象状态发生变化，反之亦然。2011/12年，DT一词尚未正式确立，仅由Vickers和Grieves与上述“镜像空间模型”概念联系在一起 [28]。此后，美国国家航空航天局于2012年首次正式定义了DT [30]：“一种集成的多物理场、多尺度概率仿真，利用现有最佳物理模型、传感器更新、车队历史数据等，对其飞行孪生体的生命周期进行镜像。”

2.1.2 文献中的数字孪生描述

尽管数字孪生这一概念在工业领域存在已久，但其含义仍然模糊不清 [31]。对于某些人而言，它可能指某种高度复杂的预测模型和处方模型 [30,32]；而对另一些人来说，它可能只是一个简单的数字表示 [33,34]。[35] 指出：“文献将数字孪生称为其物理对应实体的

虚拟或数字模型、布局、对应实体、分身、克隆体、足迹、软件对应物、表示、信息构造体或仿真。”

尽管文献中对数字孪生的定义并不一致，但所有定义似乎都共有一些核心特征：数字孪生应具备感知和理解环境的智能（由从物理实体流向虚拟模型的数据流实现），以及改变环境的能动性（由从虚拟模型流向物理实体的数据流实现）[36]。[2,37], 也提出了类似的观察，作者强调了自主性（委派控制）以及数字孪生中双向数据流的重要性。

因此，就本文的研究范围而言，我们采用[38]提出的数字孪生工作定义：“数字孪生是一种数字复制体，它赋予被孪生的实体某种形式的智能和能动性，以实现预期功能。”采用这一定义的原因如下：

1. 它涵盖了数字孪生的核心特征：智能和能动性。此外，在分析数字孪生在工作系统中可能发挥的各种角色时，智能和能动性这一概念直观而自然。本文关注的正是这一问题，因为随着角色的变化，智能和能动性也必须随之变化。

2. 该定义涵盖范围广泛，不受行业领域和应用的限制，遵循了[39,40], 的建议。他指出，良好的数字孪生定义不应包含数字孪生的目标（或应用），因为这些目标和应用总是在不断涌现，且可能无穷无尽。

为回答研究问题，本文给出了数字孪生的这一工作定义。我们也认识到，文献中数量繁多的数字孪生定义，使从业者和研究人员对与数字化相关的不同术语感到困惑 [35]。LoDT框架在一定程度上有助于缓解这种困惑。第6节将对此作进一步讨论，我们认为，已有的数字孪生定义无一错误。不同研究人员在各自的定义中，部分提出了他们设想数字孪生所扮演的不同角色；而当我们考察数字孪生在LoDT框架下能够发挥的全部角色时，这些定义便统一起来。

2.1.3 数字孪生的应用领域

由于实用性强，数字孪生已广泛应用于众多行业，并成为建筑业[41,42,43,44], 制造业[20,45,46], 和航空航天[47,48] 行业数字化转型的关键概念。它在提高生产力、降低运营成本、改善安全状况以及优化这些行业的资产可持续性方面展现出巨大潜力[49]。在制造业中，数字孪生已应用于多种场景，包括产品生命周期管理[50], 生产计划与控制[51], 以及流程再设计[27]。在建筑业中，数字孪生已应用于建筑运营与维护[52], 脆弱性评估[53], 建筑施工安全[54], 基于性能的智能合约[55], 以及建筑能耗仿真[56]。麦肯锡近期的一项调查估计，到2022 [57]，70%的制造商将使用数字孪生。

2.1.4 数字孪生的设计与创建

制造系统领域的现有文献指出，数字孪生可以通过两种方式构建[58]：（1）基于系统；（2）基于数据。

对于基于系统的数字孪生，目标是尽可能贴近实际制造系统进行呈现，使其成为单一事实来源，涵盖组件在逻辑、物理和功能层面上的所有现有关联 [59]。因此，要创建基于系统的数字孪生，需要掌握制造系统各个组件的所有技术细节和数据表。这种数字孪生尤其有助于通过仿真理解物体为何会在特定情况下以特定方式运行，还能了解系统在其尚未经历过的不同环境条件下的行为。总之，基于系统的数字孪生构建难度大且耗费资源，但能全面深入地呈现被孪生实体的情况。[27,60] 在制造与生产工程中使用基于系统的数字孪生来设计产品和服务。[61] 综述了相关文献，发现基于系统的数字孪生已用于设计制造系统的功能、结构、行为、控制、智能和性能。

另一方面，基于数据的数字孪生侧重于通过传感器收集实现特定功能所需的数据来创建数字孪生，因此对制造系统内部的洞察较少。不过，其优势在于更容易创建，而且创建时无需获取系统的所有技术信息。由于易于使用，基于数据的数字孪生越来越受欢迎，并被用于设计许多制造系统，例如预测模型和预测性维护模型 [62]。创建基于数据的数字孪生，第一步是确保通过物联网（IoT）获取所有所需数据。第二步是利用大数据分析和机器学习创建模型、分析结果和功能。最后一步是创建用户专用应用，向用户提供重要信息，为其创造价值 [58]。

数字孪生也可以通过结合这两种方法来创建。将基于数据的方法中的数据模型与基于系统的方法中的系统模型相结合，从而兼具两种方法的优势。

2.2 数字孪生与人类协作

人类与数字孪生协作时，涉及两个步骤：分配工作或任务，明确角色，并清楚了解各自的职责；角色定义明确后，确保人类—数字孪生接口顺畅，使双方能够成功协作并完成各自承担的任务 [63]。

本文关注的角色分配理念，与以下概念相关：（1）人类与计算机（或机器）之间的工作分配；（2）人类与机器人之间的工作分配；（3）人类与信息物理系统（信息物理系统）、人在回路的信息物理系统以及人在回路的工业4.0的集成。因此，这些相关领域所讨论的概念

与我们的研究相关。因此，我们在提出框架之前，先总结这些领域的现有文献。

Fitts 于 1951年发表了最早描述工作/角色分配的研究之一，列出了“人类更擅长的事情”和“机器更擅长的事情”，并将每项任务分配给最擅长承担该任务的实体 [64]。当然，这份清单已不再适用，因为现代技术在若干领域已经超越了人类。此后，人们多次尝试建立分类体系，以识别适合人类与机器（或计算机/机器人）以不同方式协作的情境。一个广受欢迎的此类分类体系范例由 [3] 于 1978年提出，其提出了一个 *10* 级 自动化清单：在第 1 级中，所有工作都由人类完成；在第 10 级中，所有工作都由计算机完成。类似地，多位作者 [37, 38] 提出了自动化等级框架，用于在人类与计算机之间分配工作。尽管这些研究因未能就如何使用该框架提供适当指导而受到批评 [67], ，但正如第 4.1 节所述，它们对数字孪生在人类协作中能够发挥的角色提供了重要见解。

[68,69,70] 提出了人在回路中的信息物理系统（CPS）中人类角色的分类体系。这些分类体系确定了四种角色：数据采集、状态推断、系统影响和执行。这些分类体系有三个主要缺陷：（1）尽管作者确定了这些角色，却没有说明人和数字孪生分别承担了多少角色工作（自动化程度），例如，数据采集这一相同角色可以由双方共同完成；（2）这些分类体系使用了大量技术术语，导致从业者难以理解、使用和交流。[71] 强调了采用不含行业术语的框架以便更好地应用于实践的重要性；（3）这些分类体系对从业者的帮助有限，因为它们没有指出哪些角色或自动化程度在实践中可能更容易实现。这一点在建筑、工程与施工行业尤为重要，因为相关企业在采用新技术方面更加谨慎。因此，数字孪生/信息物理系统/工业4.0中的角色分配和人在回路中仍然是活跃的研究领域[72]。

在人类和数字孪生之间分配角色之后，下一步是确保人类—数字孪生接口顺畅。因此，有必要定义支持与人类交互并实现用户目标的逻辑活动 [73]。当然，人机数字孪生交互的类型和程度（以及支持这种交互的活动）会因双方之间的任务分配而异。例如，人类积极参与数字孪生完成任务的情形，其交互程度会远高于人类仅仅监督数字孪生的情形。

本文聚焦于人类与数字孪生之间的工作/角色分配。因此，人类—数字孪生接口将成为未来研究的一个方向，可在本研究基础上进一步开展。我们简要概述了有关人类—数字孪生接口的现有文献，但全面综述超出了本文的范围。

人类—数字孪生接口的概念与人机交互（HCI）和人机交互（HMI）密切相关，这两者都是计算机科学和制造业中活跃的研究领域。它关注人类与数字孪生之间的接口，并致力于确保双方能够顺畅地进行通信、协作和交互 [74]。主要关注三个方面 [69]：**(1)** 通过自然、易懂且不突兀的接口吸引人类参与，

(2) 执行协作任务所需的注意力资源，以及 (3) 人为因素，例如疲劳、压力、动力不足、对自动化的信任、Ergonomics 和最佳工作负荷水平 [75]。支持人类—数字孪生接口的一些主要技术包括虚拟现实、增强现实、触觉交互、手势识别和语音识别 [76]。通用电气开发了一种图形界面，用于显示、控制和管理多个数字模型 [77]。西门子开发了一种人类编程接口，使数字孪生能够与人类交互并解读其行为 [21]。尽管这些数字孪生交互试点应用颇具启发性，但关于数字孪生交互与协作的研究仍然寥寥无几 [21], ，因此这可能是未来的一个研究方向。

2.3 数字孪生等级（LoDT）

据我们所知，目前尚无研究着眼于全面描述数字孪生与人类协作时可能承担的不同角色，以及这些角色的自动化程度。然而，由于角色分配与数字孪生中不同技术能力类型的分类密切相关，我们总结了这一领域现有的方法和框架。

欧特克 [78] 定义了数字孪生的五个等级：(1) 描述型孪生，即资产的可视化副本；(2) 信息型孪生，即采集并汇总指定数据；(3) 预测型孪生，即利用运行数据获取对未来的洞见；(4) 综合型孪生，即生成“假设情境”；(5) 自主型孪生，即代表用户采取行动。类似地，[79,80] 也提出了数字孪生成熟度等级。尽管这些分类指出了数字孪生能够承担的角色类型，却未能体现这些角色的自动化程度。例如，在不确定环境中进行预测（如“项目能否按时完成？”）的数字孪生，比预测常规任务（如“明天太阳会升起吗？”）的数字孪生更具情境感知能力和自主性，尽管两者执行的都是预测这一相同角色（或功能）。

[81] 根据数字孪生的自动化等级进行分类：前数字孪生、数字孪生、自适应数字孪生和智能数字孪生，但未涵盖不同类型的角色。[37] 根据数据集成程度描述了三种数字孪生类型：(1) 数字模型，即不与物理对象进行任何数据交换的物理对象数字表示；(2) 数字影子，即数据从物理对象单向流向数字对象；(3) 数字孪生，即具有双向数据流。这种分类仅基于数字孪生的数据集成能力，因此无法识别角色类型或自动化程度。

2.4 知识空白

要充分发挥数字孪生和人类操作员的潜力，了解数字孪生能够发挥哪些类型的角色，以及这些角色在多大程度上可以实现自动化，至关重要。对现有文献的回顾表明，目前尚无研究提供这方面的完整信息。此外，现有分类大多由不同的商业公司提出，只能部分回答这一问题，因此缺乏必要的验证，也令人对其严谨性和全面性产生疑问。

为弥补这一知识缺口，本文提出了LoDT框架，将数字孪生能够发挥的角色类型与每种角色的自动化程度结合起来。该框架依据设计科学研究（DSR）方法论开发，并通过一项真实案例研究展示其效用。

3. 研究方法

LoDT框架采用设计科学研究（DSR）方法论，历时 36 个月开发并验证 [82]。DSR 方法论非常适合这一情境，因为它具有以下优势：

1. 有助于解决“棘手”的设计问题：在许多现实情境中（包括我们的案例），用户（或客户）并不确定自己想要什么。因此，在项目开始时很难明确界定问题的具体需求和约束条件，也就难以找到令人满意的解决方案 [83]。为缓解这一挑战，DSR 支持同步制定和完善问题的表述以及解决方案构想，这一过程称为协同演化 [84]。这与我们的研究相关，因为项目启动时，客户的需求尚未得到清晰阐述；随着我们开发解决方案，这些需求也不断演变，具体内容将在研究目标部分进一步说明。

2. 有助于设计实用的解决方案：DSR 具有应用导向，因此不仅描述并解释问题，还能帮助设计解决问题的方案（例如模型、方法或框架）[85]。它兼顾理论层面的影响（现有文献、框架和模型）与实践层面的影响（业务需求和实际部署）[86]，从而使解决方案在概念上严谨，并在实践中具有相关性。调查和问卷等其他研究方法无法做到这一点 [87]。DSR 采用迭代式、建构式和务实的方法 [83] 来构建和评估解决方案，使研究人员能够持续获得框架最终用户的反馈。这也使 DSR 适用于我们的研究，因为我们同样计划创建一个实用框架（参见本文后文所述的框架非功能需求）。

研究方法如图 3 所示。按照 [88]，提出的 DSR 方法，研究人员识别并验证了问题，确定了具体的研究目标。随后，他们设计并开发了该框架。研究人员通过向 11 位专家进行广泛演示（超过 50 小时），以及举办两场公开演示（每场均有超过 40 位专家参与），对该制品进行了迭代演示和评估。以下段落将详细介绍这些步骤。

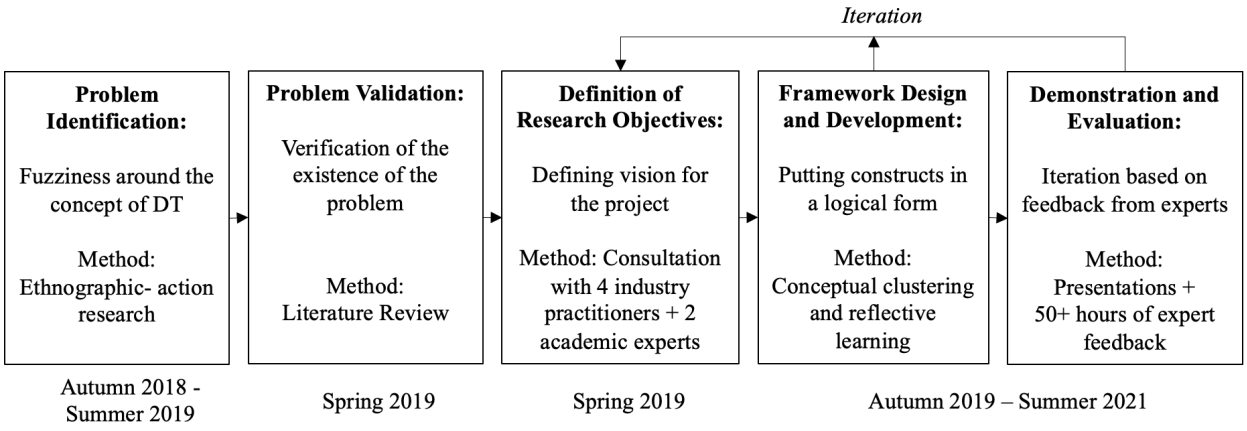

图 *3*：研究方法

问题识别、问题验证和研究目标定义：基于 [11], 开展的一项民族志行动研究，研究人员发现，从业者难以理解数字孪生如何融入工作系统。对数字孪生在各行业中的应用进行文献综述，进一步凸显了人类与数字孪生集成方面的知识空白，详见第2节。

为明确本研究的具体目标和需求，作者与四位行业从业者及两位学术专家进行了交流。在第一轮迭代中，框架的需求被定义为："逻辑地解释现有数字孪生的复杂性及其支持的功能。"在初步原型设计后，受"车辆自动驾驶五个等级"的启发，这一需求转变为："为建筑业开发数字孪生层级结构，类似于自动驾驶等级。"在又进行了几轮框架原型设计后，作者发现数字孪生并非独立运作，而是与人类协同工作。因此，考虑人类视角也变得至关重要。于是，LoDT框架最终的功能需求和非功能需求（遵循 [91]）定义如下：

功能需求：(1) 对工业中现有的各种数字孪生类型和等级进行分类，并说明其对人类的影响；(2) 为从业者概述其公司当前拥有的数字孪生等级，以及未来希望达到的等级；(3) 解释每个等级所能提供的功能，以及实现该等级所需付出的难度和资源。

非功能需求：（1）直观易懂；（2）快速易用；（3）不含行业术语，便于快速回忆和轻松沟通；（4）在实践中具有启发性；（5）具有足够的通用性，便于不同行业采用。

设计与开发： 框架开发遵循了 [86] 所描述的研究过程。根据功能需求，初始设计旨在：(1) 描述并解释通常被称为数字孪生的不同类型、理念和技术；(2) 将它们整理成一种与人类工作方式相关的层级结构。

研究了自动化等级 [4,66], 、自动驾驶等级 [90], 和智能类型 [92] 相关背景下的许多其他分类体系和层级结构，为初始设计提供参考。

通过归纳推理、概念聚类和反思式学习的过程，确定并描述了用于表示层级结构的新构念 [93,94,95]。具体而言，研究旨在回答以下类似问题：数字孪生的基本要素和主题是什么？数字孪生提供哪些具体功能、角色和应用？数字孪生应具备何种智能能力？随后，这些构念被整合为一个逻辑制品（即框架），以直观呈现清晰、简洁的 LoDT 概貌。

随后向专家（见表1）展示了该制品，并进行了多轮设计与开发。面向专家的演示采用半结构化形式：先展示框架的最新迭代版本，并记录具体反馈，然后再展开更广泛的讨论。此步骤旨在确保研究人员能够以不带偏见的方式，直接了解专家的反思意见。具体而言，考虑到非功能需求，研究人员请专家就以下方面发表意见：(1) 框架中哪些要素对他们而言是合理的（以了解框架的优势）；(2) 哪些要素需要进一步研究（以了解框架的薄弱之处）；(3) 他们是否认为该框架有助于实践（以确保从业者认可该框架的价值）；以及 (4) 他们是否愿意在实践中使用当前版本的框架（以确保该框架足够简单，便于实际应用）。

在更广泛的讨论中，研究人员请专家描述他们在各自公司部署数字孪生时经历过的一些成功与失败案例。随后，研究人员采用溯因方法[96,97] ，推测该框架是否涵盖了必要的细节，并能否针对专家所描述的情境提供有用的见解，从而检验该框架是否满足非功能需求。此步骤旨在（1）确保该框架在实践中具有相关性；（2）通过分析具体情境，找出框架中的不足。后者有助于在后续迭代中改进框架。框架开发过程中，专家提出的一些关键意见汇总于表2。

演示与评估：在三年间，研究人员通过两种方式向多位从业者和学术专家展示该框架并进行评估：（1）重大里程碑演示；（2）定期反馈会议。每次演示所收集的反馈都被纳入框架的下一次迭代。

每年（2019年和2020年）都会举行一次重要里程碑演示，并以40+ 工业界与学术界专家为听众。这些演示所使用的框架状态已以数字形式记录，如有需要可以提供，以便了解研究过程的轨迹。这些重要里程碑有助于进行良好的合理性

检查框架的进展情况，并确保专家能够很好地接受整体层面的叙述。

为获得更细致的反馈，2019—2021年期间定期召开反馈会议，邀请了11 位专家（见表1），他们在技术、战略以及工业运作方面具备专业知识。共召开了40+ 次会议，累计超过50 小时，以确保该框架的相关性和严谨性。与专家举行了多次会议，以确保他们有充足的时间理解、思考并评论该框架，并确保其反馈得到妥善采纳。经过多轮迭代，直至达到“理论饱和”[98] ，即演示中不再出现新的或相关的反馈。

	Expert Code	Background/Role	Experience (Years)	Number of Meetings	Total hours of interaction
Technology experts	A	Expert and researcher in use of AI	30	10	10
	B	Expert in deploying new technologies	25	1	1
	C	Researcher and founder of a technology startup	22	2	1
Strategy experts	D	Expert and researcher in innovation management	11	3	3
	E	Researcher in management and technology	4	5	7
	F	Expert and researcher in technology strategy	40	2	2
Industry experts	G	Part of Senior Management in an engineering firm	24	8	8
	H	Project Manager on a $1B+ construction project	28	4	10
	I	CEO of consulting and innovation firm in building construction industry	24	3	3
	J	Part of Senior Management in a multi-national construction firm	18	4	3
	K	Management executive in an engineering consultancy firm	34	1	2
Total of 50-hours of interaction spreading over 36 months with 11 experts (average experience of over 23 years)					

Tab表1：框架的演示与验证，参与者概况 *ts*

Sample quotes from the Experts	Consequential insights gained for the framework
“In the Digital Twin: “What is Digital?”, and “What are we twinning?”	Forced the researchers to think about the functions that DT can aid with, shifting away from taking a technology-centric view. Ultimately led to the formulation of four types of roles a DT can play (first dimension of the framework).
“Form of the DT should follow its function.”	
“The progression of cognitive abilities isn’t linear. Like the decision to predict if the sun would rise tomorrow is easier compared to predicting who will win the football match, even if both are predictions.”	Led to the realization that a second dimension representing the extent of automation is needed.
“Some tasks are easy and always follow a repetitive procedure. On the other hand, some tasks are very dynamic and change every time. These are inherently difficult to automate.”	Played an important role to introduce the concept of Learning (routine v/s non-routine tasks) (see section 4.2 for details).
”We shouldn’t always aim for a DT to complete 100% of the task. Even if the DT completes 80%, and the human completes the rest 20%, it would still be very helpful.”	Led to the introduction the concept of autonomy (see section 4.2 for details).

表2：专家引述摘录，这些引述促成了框架的重大变更

4. 数字孪生框架的等级：简介

本节介绍LoDT框架。如图4所示，该框架以两个维度呈现：（1）数字孪生可以发挥的角色类型（列）；以及（2）自动化程度（行）。这两个维度分别在第4.1节和第4.2节中介绍。第4.3节提出了如何使用该框架的建议，并列出了使用该框架时的常见问题。

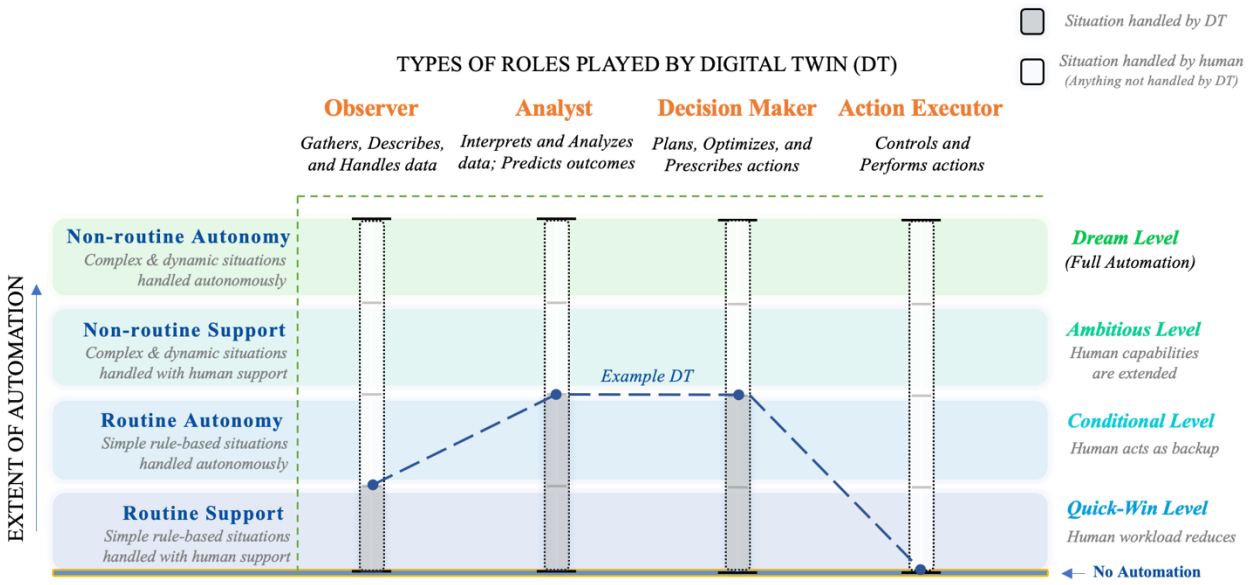

图*4*：数字孪生框架的等级。在虚线所示的示例中，数字孪生会在常规情境下支持数据收集和观测，自主执行常规数据分析和决策，但不执行任何操作。人类会在非常规情境下负责数据收集、分析和决策。所有情境中的操作都由人类执行。

4.1 数字孪生可扮演的角色类型

牛津词典将角色定义为“某事物在特定情境中承担的功能或发挥的作用”。

为了确定数字孪生在与人类协作时可以扮演哪些角色，我们采用了自下而上的两步方法。首先，我们确定了预期（或设想）数字孪生能够执行的功能。然后，我们将这些功能归入更高层级的类别，从而确定相应的角色。

因此，第一步是通过文献综述和专家访谈，汇总数字孪生预期具备的功能清单。在第一次迭代中，共识别出 80+ 项不同的功能。例如，数字孪生可以实现数据表示、仿真、预测或自动化监控等功能。

下一步，我们将这些功能归入负责处理这些功能的角色中。最初，聚类显示，可视化、描述和检索等部分功能与人类的基本认知功能相似，主要在任务开始时用于了解情况。此外，还有预测、仿真和优化等功能，这些功能复杂得多，需要在任务接近尾声时用于制定决策并执行行动。经过多轮聚类并与专家交流后，我们发现了一个共同主题：应根据完成任务所需的顺序对功能进行聚类。

让我们看看最初的例子，以进一步说明这一点。假设 Ryan 可能遇到两项截然不同的任务，例如建造机场和驾驶起重机，完成任务所需的基本角色序列是相同的：收集、表示和处理数据（即观察者的角色）；处理并理解数据中的信息（即分析者的角色）；根据信息做出决策（即决策者的角色）；最后，以行动的形式执行决策（即行动执行者的角色）。

我们的研究结果促使我们采用四阶段视角，来审视人类完成任务时所运用的角色。包括 [4,99] 在内的多位作者都采用了这一视角。这四类角色可以更高层次地抽象概括数字孪生所能扮演的角色：（1）观察者，（2）分析者，（3）决策者，以及（4）行动执行者。

我们将专家总结的一些数字孪生功能归纳为表3中的以下四类（角色）。当然，这四类几乎可以肯定是对数字孪生所能提供的各种角色的过度简化。不过，我们的目标并不是讨论数字孪生的理论能力，而是提供一个在实践中具有相关性的结构。就此而言，表3所示的概念化是一个很好的起点，并且通过第5节中详细介绍的案例研究，证明了其相关性。

Observer	Analyst	Decision Maker	Action Executor
• Sensing • Representation • Description • Visualization • Retrieval • Basic manipulation	• Analyze and Monitor • Pattern recognition • Prediction • Interpretation • Perception • Diagnosis	• Optimization • Simulation • Forecasting • Prescription • Planning	• Physical action • Actuation • Communication • Control

表*3*：不同角色预期执行的示例功能

观察者：这一角色涉及通过感知环境中相关要素的状态、属性和动态，获取、处理并呈现物理世界的数据。因此，感知、采集、表示、数字化并传递从物理世界收集的数据，是这一角色的核心功能，类似于人类通过眼睛、鼻子、耳朵和其他感官感知

环境。例如，Ryan 使用传感器采集土壤状况数据，而数字孪生则帮助人类操作员进行基本的预处理。

分析者： 在这一角色中，会根据目标和操作人员的偏好，对原始数据进行分析和解释，从而判断物理世界的状态。了解什么是好、什么是坏至关重要。

例如，收集到有关土壤状况的所有数据后，Ryan 的数字孪生需要评估土壤是否具有足够的承载力。因此，数字孪生在这一角色中需要执行的关键功能包括模式识别、监测、解释和预测（缺失的信息）。近期人工智能研究着重于提升图像识别、语音检测和自然语言处理等领域的机器感知能力。这使机器能够更有效地理解从周围环境中收集的信息。

决策者： 这一角色 以经过分析的信息为输入，并帮助做出决策。换言之，数字孪生需要表现出“理性或功利主义”的行为，从而规划有助于实现最大效用的行动。有时，“理性”决策可能很简单，例如选择一个或一组行动以获得预期结果；有时则会更加棘手，可能需要搜索和规划。决策需要考虑未来：“世界将如何演变？”“如果我做这样那样的事，会发生什么？”以及“什么能带来最大的幸福？”

因此，仿真、预测和优化成为这一角色的关键功能。近期关于机器学习、自动化决策支持和强化学习的研究，着重提升机器在实际决策方面的能力。例如，假设土壤承载力不足以让起重机通行，数字孪生会帮助 Ryan 决定该怎么做。正如人们所想，这并非一个简单的问题。可能的方案有好几种，例如改变起重机的路径、改用另一台起重机，或加固土壤。数字孪生需要考虑成本最低且速度最快的方案。

行动执行者： 这一角色有时可能会脱离数字孪生的认知领域，转而根据已作出的决策实施实际行动。行动可能包括使用执行器与物理环境交互并对其施加影响。机器人学的进步极大地推动了机器实施行动。例如，数字孪生可以帮助 Ryan 远程操控起重机。

需要注意的是，数字孪生可以承担其中一种或多种角色。以 Ryan 为例，如果 Ryan 的数字孪生只负责处理数据，那么其余任务（分析信息、做出决策和采取行动）就由人类负责。相反，如果 Ryan 的数字孪生只能做出决策并采取行动，那么人类就需要观察和分析数据。本质上，数字孪生无法承担的任何角色都需要由人类来完成。

4.2 自动化程度

为了针对数字孪生的每种角色制定自动化程度层级结构，我们首先要问：“某种角色在多大程度上可以通过数字孪生实现自动化？”答案取决于两方面：（1）自主性（数字孪生在每种角色中的独立程度）；（2）学习能力（数字孪生在每种角色中适应动态环境的能力）。

自然，自动化程度越高，数字孪生就越能通过独立工作并适应不断变化的情况，在特定角色中为人类工作者提供补充。因此，我们确定了两个维度：（1）自主性和（2）学习。通过这两个维度，可以在很大程度上描述并比较数字孪生在各个角色中的自动化程度。[67] 还指出，任务熵（与学习能力相关）和自主性对于识别各类任务自动化程度的长期趋势十分重要。[2] 提到了未来数字孪生的三个重要标准：自主、具备情境感知能力和适应性（例如学习能力），这些标准都与我们的表述一致。

在接下来的段落中，我们将先解释这些维度，然后介绍数字孪生角色自动化程度的层级结构。

自主性： 自主性决定了人类在多大程度上参与数字孪生完成特定角色的一项或多项功能。完全自主的数字孪生无需任何人类参与，即可完成特定角色的所有功能。部分自主的数字孪生则会为人类提供协助，从而减轻手动完成该角色相关工作的负荷。人机自动化领域的多种分类体系[65,100] 都是根据自主性（控制）等级提出的；等级越高，表示计算机对人类行为的控制越强，因此自动化程度也越高。LoDT框架根据自主性，将自动化程度区分为以下两种：有人类支持（部分自主）和完全自主。

学习：学习使数字孪生能够根据过去的表现和对世界的观测，提升其在未来任务中的表现，这与人类随着时间推移不断学习并在智力上成长的方式类似。因此，数字孪生在各个角色中的自动化程度得以提高，因为它们现在能够执行需要认知灵活性和适应性的功能，也能应对事先无法完全理解规则或不存在正确解决方案的情境。基于学习能力，LoDT框架将自动化程度区分如下：常规情境（定义明确、可预测，能够通过明确编程的指令解决）和非常规情境（没有明确指令，或算法必须适应一定程度的动态变化，因而需要学习）。[4,101,102,103] 也强调了学习的重要性，并根据学习能力区分了常规任务和非常规任务。

正如人们所预期的那样，数字孪生最高的自动化等级应是每个角色都能自主工作，处理非常规情境，就像人类一样。尽管人们可能设想以尽可能高的程度实现数字孪生中每个角色的自动化，并将其作为基准，但在大多数情况下，由于缺乏技术能力、从业者的风险偏好、法律要求或财务限制，这样做可能并无必要、不切实际，甚至并非理想之举。在这些情况下，人们可能更倾向于采用中间自动化水平，以最大限度地提升

人类与数字孪生的协同表现。因此，图5提出了一种基于自主性和学习能力、适用于数字孪生各个角色的五级自动化度量。

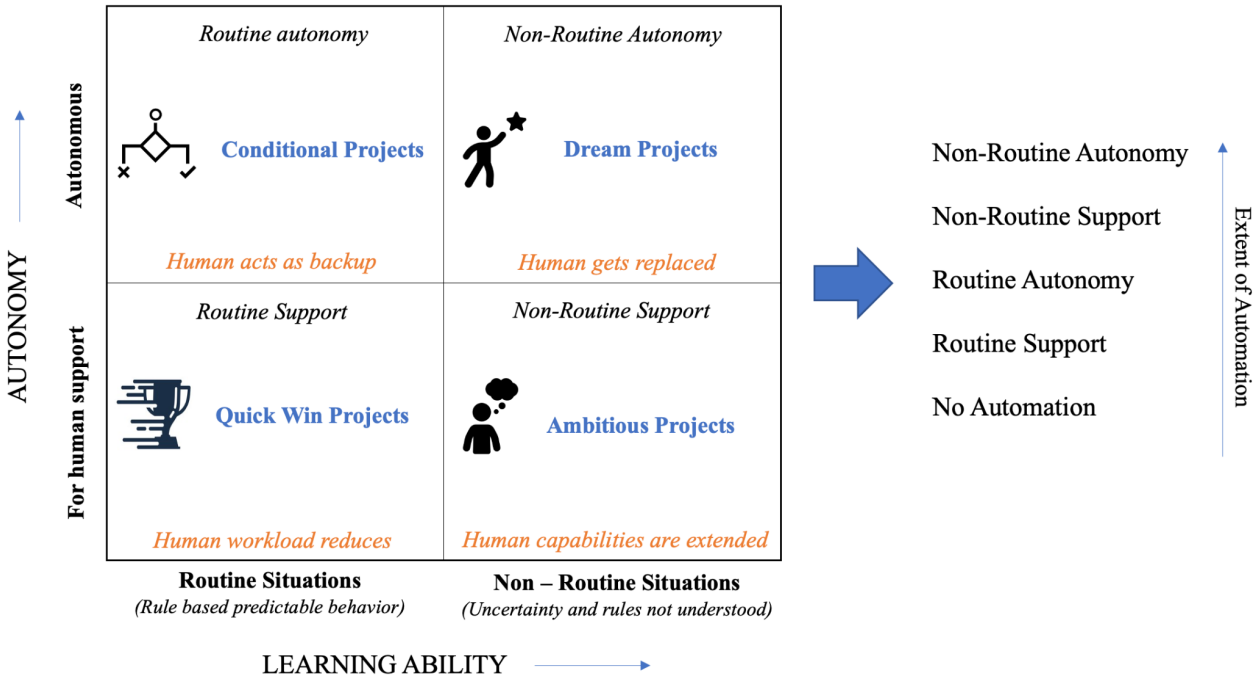

图5：数字孪生各角色的自动化程度

1. 无自动化（手动）：在这一等级下，人类执行所有任务，不获得数字孪生的任何支持。这是数字孪生任何角色中可能存在的最低自动化形式，也是2×2矩阵的默认等级。

2. 常规支持：数字孪生遵循显式编程规则，协助人类完成常规任务。人类仍然拥有完全控制权，并可根据自己的判断绕过数字孪生。根据我们的经验，这些项目往往是“速赢”项目；它们最容易实施，所需的组织变革也最少。通过自动化常规任务，数字孪生减轻了人类的工作负荷[65]，，使他们能够专注于需要更高创造力和智能的更重要任务。

3. 常规自主：数字孪生能够在无人监督的情况下完成常规任务。数字孪生的自主性会带来失效风险（例如在边界情况中），有时反而会背离自主性的初衷，尤其是在常规情境下，人类几乎能够做到尽善尽美。因此，根据我们的经验，这类项目往往是“有条件的”项目。采用常规自主必须以其相较于常规支持所带来的边际收益为依据。如果公司决定实施这一自动化等级，人类将作为数字孪生的备用支持[65]，在情况发生变化或出现问题时接手工作。

4. 非常规支持：借助学习要素，数字孪生能够帮助人类处理非常规任务，也就是动态变化或规则不明确的情境。学习

过程需要数据，因此，高效的数据收集与标注至关重要。这反过来也意味着，项目组织通常的运作方式必须发生重大变化。此外，组织思维也需要动态转向数据驱动决策；有时，这甚至会对惯常实践提出质疑，因为在非常规情境中，正确答案可能无法预先确定。因此，我们将这类项目称为“雄心”项目，因为它们要求工作方式发生重大改变。不过，其益处也十分显著，人类能力因此得以拓展 [65]。

5. 非例行自主性（完全自动化）：这是自动化的最高等级，因此我们将这类项目称为企业的“梦想”项目。数字孪生能够以所需的性能水平自主完成任务，适应任务环境，并随着时间推移不断提升其性能。我们尚未在所有角色中看到许多适用于这一等级的数字孪生案例，但鉴于近期的技术发展，我们对其可能性持乐观态度。

4.3 关于框架的常见问题

本节介绍了我们在验证框架实用性的实证案例研究期间，从不同框架用户那里收集到的常见问题。这些针对最常见问题的解答可以回应读者和框架新用户可能提出的一些疑问，并帮助他们更好地理解如何使用该框架。

1. 数字孪生是否必须承担所有已定义的角色，还是人类也可以承担这些角色？重要的是要认识到，无论是否由数字孪生执行，完成工作都需要履行这些角色。因此，任何未由数字孪生履行的角色，都将由人类履行。图 6 展示了角色分配的两种极端情况。

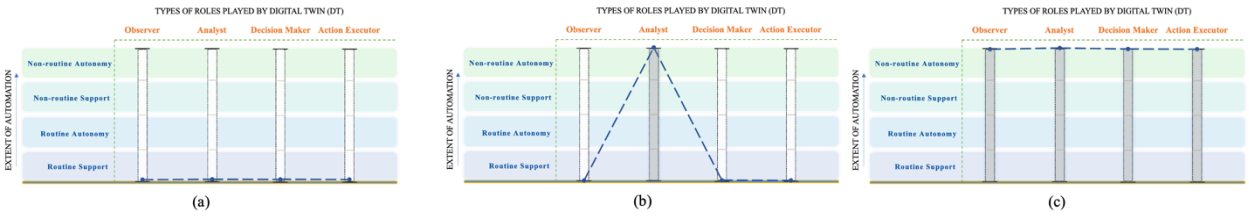

图 *6*：展示数字孪生与人类之间角色分配极端情况的示例。*(a)* 没有任何角色实现自动化的数字孪生，*(b)* 一个角色实现完全自动化的数字孪生，以及 *(c)* 所有角色均实现完全自动化的数字孪生

2. 为什么同一角色在某些情况下由数字孪生承担，而在另一些情况下由人类承担？任何工作角色都涉及简单（常规）和困难（非常规）情况。因此，如果数字孪生因技术或其他限制只能处理简单情况，那么在出现复杂情况时，人类就会介入。这就是“自动化程度”这一维度所代表的含义。

3. 如何判断特定情境中的情况属于常规还是非常规？我们建议针对每个角色考虑常规和非常规情况。对于特定角色，请考虑数字孪生需要执行的功能。如果某项功能可以用一组显式规则或算法来描述，那么它就属于常规情况。需要注意的是，对人类而言属于常规的某些情况，对计算机而言并非常规，反之亦然。例如，识别一只猫对人类来说是常规任务，但要为计算机编写显式规则来完成同样的任务却非常困难，因此这对计算机来说属于非常规任务。另一方面，从一百万个数据点中发现模式对人类来说并非常规，但对计算机来说却是常规任务，因为可以通过聚类等算法对其进行明确描述。在该框架中，我们从数字孪生的视角表示常规和非常规情况。

4. 在某些情况下，为什么数字孪生在执行观察者或分析者等基础角色时的自动化等级，可能低于执行决策者或行动执行者等高级角色时的自动化等级？

正如我们在问题 1 中所述，并非每个角色都必须由数字孪生来执行。因此，只要该角色得到履行，且其最终交付成果令人满意，由谁完成并不重要。例如，数字孪生不必亲自观察并收集数据再进行分析，因为人类可以根据需要收集并整理数据。以下示例说明了数字孪生与人类在这四种角色中所承担的不同功能。

任务：需要观察建筑物的温度并进行分析，判断其是否适合建筑物使用者。然后，需要根据一天中的时段、使用者人数和电力消耗，决定将温度调整多少。最后，执行温度调整操作。图7展示了人类与数字孪生之间以各种方式分配这些功能的情况。

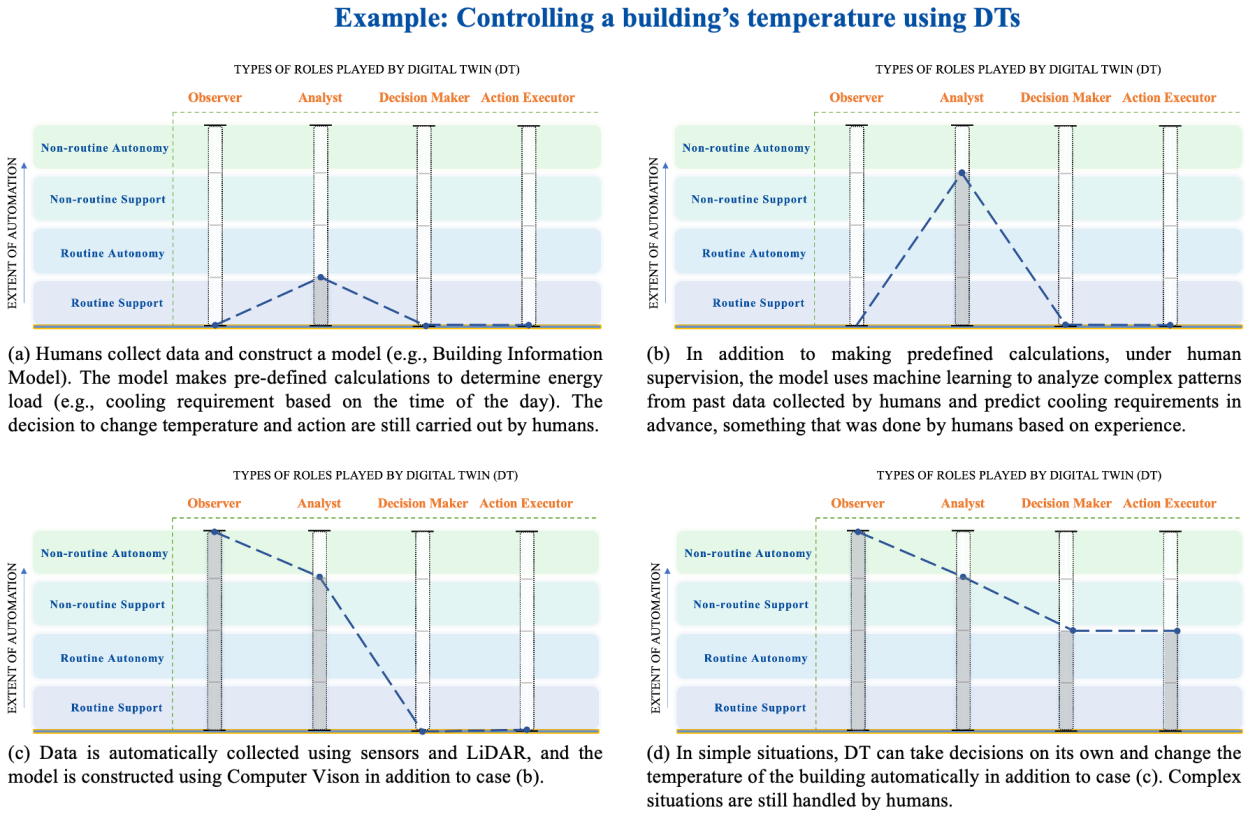

图7：一个示例，展示了在使用数字孪生控制建筑物温度的情境中，数字孪生与人类之间的四种角色分配情境

5. 框架包含这么多要素，该如何使用它？虽然使用框架并没有“正确”的方式，但我们发现，以下方法是一个很好的起点，尤其适合初次使用者：

步骤*1*： 首先定义完成任务所需每个角色的功能，而不论具体由谁执行， 正如问题1中所述。 首先定义行动执行者的功能，因为其他角色会根据所定义的行动发生巨大变化；然后定义决策者、分析者，最后定义观察者的功能。例如，在构建用于维护公路的数字孪生时，最终行动可能是修复道路上的缺陷，也可能只是检测道路上的缺陷，具体取决于工作范围。在修复缺陷的情况下，决策者必须决定是否修复、如何修复以及何时修复。如果是检测缺陷，决策者则需要判断这是否属于缺陷，以及它属于哪种缺陷。因此，在定义每个角色的功能时，用户应问自己：要执行所定义的行动，我需要做出哪些决策？要做出这些决策，我需要进行哪些分析？而要完成所需的分析，我需要观察什么？

步骤*2*：定义每个角色下每项已定义功能对应的常规情境和非常规情境是什么样的。例如，在构建用于维护公路的数字孪生时，决策者的一项功能可能是决定是否修复缺陷。常规情境是数字孪生处理简单情况，例如：如果缺陷大于5英寸，就决定修复该缺陷，因为缺陷非常严重，修复是唯一选择。现在考虑缺陷为1英寸的情况。此时无法明确应修复缺陷，还是留待以后处理。现在可能需要考虑许多因素，例如缺陷恶化的速度、可用预算以及合同要求。这些因素可能使修复决策变成非常规情境。数字孪生可能需要使用机器学习，从历史数据中学习模式，以做出此类决策。

步骤*3*： 现在框架的两个维度都已绘制完成，用户可以构建当前拥有的数字孪生等级，如图5所示。

步骤*4*：绘制出当前的数字孪生等级后，用户可以进一步绘制自己理想中希望达到的数字孪生等级。

步骤*5*：最后，所有利益相关者都可以决定需要采取哪些措施，才能将当前的数字孪生等级提升至预期等级。

5. 案例研究

以我们最初的示例为例，我们将展示 LoDT 框架如何帮助 Ryan 创建数字孪生，以防止因土壤失效或条件不适宜而导致的起重机倾覆。Ryan 主要通过两种方式使用 LoDT 框架：

1. 作为规划数字孪生部署的工具：Ryan 缺乏一种系统的方法，无法全面评估数字孪生的各种角色，以及每种角色能够实现自动化的程度。这使他难以选择合适的数字孪生。因此，Ryan 使用 LoDT 框架开展结构化头脑风暴，并系统地分配数字孪生与人类各自的角色。

2. 制定未来部署数字孪生的战略路线图： 在实践中实施数字孪生是一个持续的过程，因此 Ryan 需要从小处着手，逐步迈向能够承担更多角色、自动化等级更高的数字孪生。Ryan 使用 LoDT框架来了解，鉴于企业现有的技术能力，目前能够创建何种等级的数字孪生，并确立企业未来可能希望实现的长期愿景。

以下段落将详细介绍 Ryan 如何使用 LoDT框架。他首先系统地分析每个角色，确定企业在每个角色中需要达到的自动化程度，以及企业是否具备相应的技术能力。

A. 观察者：获取、处理并呈现来自物理世界的数据的能力

在讨论数字孪生在观察者角色中可以实现的各种自动化程度时，以下选项显得更有希望：（1）无自动化（手动级别），由传感器收集数据，再由人类手动处理；（2）常规自主级别，数字孪生根据简单的预定义规则自主处理数据，而人类负责复杂处理。例如，数字孪生可以依据经验规则，根据土壤组成和含水量识别土壤类型；（3）非常规自主级别，数字孪生能够在非常规情境下独立运行。例如，数字孪生可以从历史土壤数据中学习，并独立生成土壤地形图，因为要明确编写生成土壤地形图的编程指令非常困难。

尽管地形数据很重要，Ryan 认为即使没有这些数据，他们仍然可以作业，尤其是如果不平坦地形导致任何问题，起重机操作员会负责操控起重机。因此，他得出结论：在实践中，数字孪生观察者角色的常规支持级别自动化足以应对大多数常见情形，而其他较少见的情形则可由人类处理。

B. A分析员： 结合目标进行数据综合，以了解何为理想 *e*

由于这项任务的目标是让起重机安全行走（不发生倾覆），因此数字孪生在此角色中应能根据土壤数据和地形图评估起重机行走是否安全。头脑风暴环节中提出的一些方案包括：(1) 常规支持级别：数字孪生综合数据并执行底层计算，然后由人类据此判断土壤是否能够承载起重机；(2) 常规自主级别：数字孪生根据经过明确编程的经验性岩土工程模型计算土壤承载力；(3) 非常规自主级别：数字孪生根据历史数据预测土壤承载力，因此能够应对非常规情境，例如降雨或降雪后出现的情形，或经验模型失效时的情形。

在让起重机行走之前，必须对土壤承载力进行严谨的分析，因为涡轮机及其组件十分沉重，而土壤承载能力估算中的微小误差就可能导致土壤失效。Ryan 指出，手动进行数据预处理并使用有限元分析完成计算，大约需要 8 周；但计算结果的准确性和可靠性都很高，准确率达 99.999%。此外，他强调，尽管需要缩短计算时间（使其接近实时），但保持这些可靠性标准极为重要，因为任何错误都可能导致起重机故障。因此，他选择第三个选项，并设定目标：在数据收集后 1 分钟内计算出土壤承载力，且使用机器学习实现至少 99.99% 的可靠性。

C. 决策者：评估选项并做出理性决策

如果土壤的承载力超过起重机重量，Ryan 就可以让起重机行走。然而，如果土壤不够坚实，他就必须从几个选项中做出决定，包括：更改起重机行走的路径、对土壤进行处理以增强其强度，或推迟几天再行走，让土壤沉实。头脑风暴会议中提出的一些选项包括：(1) 常规支持级别，数字孪生以确定性的方式模拟所有

选项，由 Ryan 选择最佳方案；(2) 常规自主级别，数字孪生评估每个选项，并独立做出“理性”决策；(3) 非常规自主级别，数字孪生根据可能出现的不确定性（例如天气突然变化）模拟各种选项，并独立选择最佳方案。

Ryan 认为，至少在短期内，仿真并非必要。因此，他决定不采用仿真，并解释说，决策仍将由人类作出。

D. 行动执行者：执行操作

最后，Ryan 需要操作起重机并安装风力涡轮机。工作人员可以手动完成这项工作。他也可以使用数字孪生远程控制起重机。最后，数字孪生甚至可以在完全自主的级别上自主控制起重机。短期内，Ryan 认为这种能力并非必要，因此决定不为行动实施任何自动化。

汇总所有决策后，第1次迭代结束时数字孪生的最终级别如图8所示。

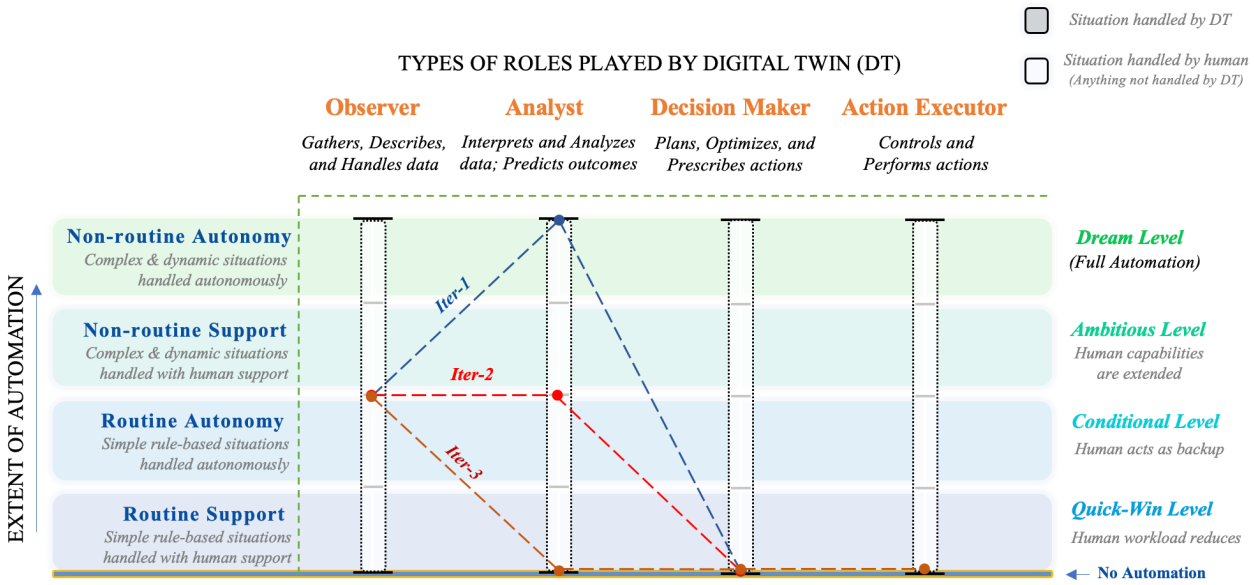

图8：通过多次迭代选择合适的数字孪生级别

第2次迭代：在梳理细节的过程中，团队意识到，他们缺少非常规情境的数据，例如强降雨和降雪后，或地形条件不均匀时的土壤承载力数据。不过，团队发现自己拥有大量常规情境的数据，因此开始考虑是否可以在常规情境下部署机器学习，并由人来处理非常规情境。这一过程如图8中的第2次迭代所示：第1次迭代中的分析师角色和非常规自主级别被取消，改为常规自主级别。

第3次迭代：开发人员告知团队，机器学习模型所能达到的最佳性能也远无法满足99.99%的可靠性要求。由于安全问题，这一目标不可妥协，团队不得不放弃这一想法，最终决定只使用数字孪生来观察和处理常规情境的数据（见图8，第3次迭代）。他们发现，计算土壤承载力所需的时间从约8周大幅缩短至2至3天。尽管这并非Ryan设想的目标，但考虑到现有资源，这是团队能够实现的最佳方案。

总而言之，Ryan 将 LoDT框架作为规划工具，通过开展结构化的头脑风暴会议，全面评估数字孪生与人类之间的角色分配，而不是提出缺乏条理的建议。此外，他还提供了一份路线图，说明如何利用 LoDT框架部署数字孪生。短期内，由于资源不足，数字孪生应仅用于常规数据观测和处理，即使这无法实现他们先前设想的实时计算。他接着指出，未来公司可以利用机器学习模型开发能够分析非常规情境的数字孪生。为此，公司应开始收集不确定条件下的土壤承载力数据，例如降雨和降雪之后的数据，同时也应开始招募能够推动数据驱动型工作、以构建所设想的数字孪生的人才。

6. 结论

尽管人们通常希望打造自主且具有适应能力的数字孪生，但现实是，当前以及可预见的未来中，大多数数字孪生系统仍将依赖人类和计算机。因此，有必要评估数字孪生如何与人类互补并协同工作。然而，由于数字孪生技术仍处于发展阶段，从业者和研究人员尚不了解数字孪生如何与人类融合。他们不禁会问：“人类与数字孪生协同工作时，数字孪生可以扮演哪些角色，这些角色又能在多大程度上实现自动化？”如果不了解人类和数字孪生在工作系统中扮演的角色，就可能造成重大成本、资源错配、对数字孪生抱有不切实际的期望，以及战略失调。

为缓解这一挑战，本文提出了一个二维概念框架——数字孪生等级（LoDT）。该框架整合了数字孪生可承担的各类角色，大致分为：（1）观察者、（2）分析者、（3）决策者和（4）行动执行者；同时涵盖了每种角色的自动化程度，共划分为五个等级，从完全手动到全自动。特定数字孪生可在不同等级上承担任意数量的角色。该框架遵循设计科学研究方法论，历时 36 个月开发并完成验证。设计迭代和验证过程中，研究团队通过多次会议收集了 11 位专家的反馈，会议总时长超过 50 小时，并与 40+ experts 开展了演示交流。此外，研究还将该框架应用于一项真实案例研究，以展示其有用性。

LoDT框架旨在为学术界和实践领域提供助益。教育工作者和研究人员可以从关于数字孪生的新视角中获益，该视角强调工作系统中的

能动性从人类转向数字孪生，因此，数字孪生应被视为履行特定角色与职责的伙伴，而不只是减轻人类工作负荷的工具。这一视角自然引出了许多有待未来研究探讨的问题，例如："如何选择应委派给数字孪生的角色？""数字孪生应处理何种情况？"以及"如果数字孪生出错，谁应对此负责？"此外，这也为未来研究人员带来了许多其他研究机会，包括考察数字孪生以不同角色参与团队工作时的社会动态，开发人类与数字孪生之间工作委派的模型，以及研究数字孪生承担关键角色时的信任、隐私和伦理问题。

此外，LoDT框架缓解了围绕数字孪生概念的一些现有困惑。一些研究人员认为，数字孪生是能够进行预测并具备处方能力的实时、持续更新的数字模型 [30,32], ，而另一些人则认为它只是一种数字表示 [33,34]。我们认为，这些定义都不一定有误。事实上，不同研究人员对数字孪生应发挥的角色提出了各自的看法；有些人更倾向于观察者（因而强调表示），另一些人则更倾向于分析者和决策者（强调预测和处方能力）。当我们根据 LoDT框架考察数字孪生能够发挥的完整角色集合时，所有这些定义便能统一起来并显得合情合理，从而缓解围绕数字孪生概念的困惑。其他领域的文献也充分记录了"等级"对于有效沟通和规划的重要性，例如技术成熟度等级 [104] 和自动驾驶等级 [105]的重要性。

如案例研究所示，从业者可以将 LoDT框架用作工具，以（1）规划数字孪生部署，并（2）为其未来发展制定战略路线图。

如果没有框架，规划数字孪生部署就更像是一门艺术，而非一门科学，因为人们会各自提出缺乏系统性的建议，探讨数字孪生应发挥什么角色，以及自动化程度应达到多高 [4]。由于未能全面评估所有可能的方案，可能会错失机会，并因掌权者的愿景和才智而偏向某项特定技术。借助 LoDT框架，可以开展有条理的头脑风暴，并系统地分配数字孪生与人类之间的角色，从而缓解这一问题。

在实践中实施最智能的数字孪生，并非一蹴而就的任务。事实上，创建数字孪生是一个持续演进的过程 [106]。正如案例研究所示，LoDT框架可以作为制定技术路线图的起点，帮助从业者确定当前数字孪生的发展水平，同时确立长期愿景，明确希望数字孪生最终达到何种水平。

正如前文所述，未来研究的一个潜在方向是探讨人类与数字孪生之间不同的角色分配如何影响人类—数字孪生接口和人为因素。对于这些人类—数字孪生系统的实际部署，探讨可靠性、稳健性和韧性等相关工程因素也可能颇有意义，因为这些因素会对人类的安全、健康和福祉产生重大影响 [107]。最后，未来

研究人员还可以探讨将这一框架应用于其他行业和不同技术时的可推广性。

归根结底，推进数字化和自动化需要持续的技术领导力，以及通过数字战略清晰阐明的愿景。了解数字
发挥哪些不同的角色、实现这些角色需要什么条件，以及这些角色能为企业带来什么价值，对于制定任
至关重要。因此，不应将 LoDT框架视为向从业者规定特定数字孪生水平的方式，而应将其视为讨论、
通并从战略层面确定数字化机遇优先顺序的指南。了解框架中讨论的各项因素，有助于企业制定更有可
功的数字战略。

利益冲突声明

作者声明，他们没有已知的竞争性经济利益或个人关系可能影响本文所报告的研究工作。

致谢

我们谨向所有拨冗并提供宝贵意见的工业界与学术界专家致谢。感谢斯坦福大学综合设施工程中心（CI
本项目提供资金支持。作者还要感谢刘睿、Stephanie Chin、Melody Spradlin、Cynthia Brosque、
Girgin 和 Alberto Tono 对该框架提出的意见。作者也感谢两位匿名审稿人和编辑为完善稿件提出的建
最后，第一作者还特别感谢 Tulika Majumdar、Alissa Cooperman 和 Hesam Hamledari 在框架编制
对期间提供的宝贵意见与帮助。

7. 参考文献

1 Jazdi, N., Ashtari Talkhestani, B., Maschler, B. 和 Weyrich, M. 利用智能数字孪生实现人工智能增强型工业自动化系统。*Procedia CIRP*，2021年，97，257 2 396 400 101016 202005 页。– 。DOI: 。/j.procir. 。 。Hribernik, K., Cabri, G., Mandreoli, F. 和 Mentzas, G. 自主、情境感知、自适应数字孪生——现状与路线图。《工业中的计算机》，2021年，133，第103508页 103508 3 101016 2021。DOI: 。/j.compind. 。Lorenz, M., Rüßmann, M., Strack, R., Lueth, K.L. 和 Bolle, M. 工业*4.0*中的人与机器：技术将如何在*2025*年前改变工业劳动力。2015年，来源：https://www.voced.edu.au/content/ngv%3A73341 [访问日期：11月 2022] 28日 4 Parasuraman, R., Sheridan, T.B. 和 Wickens, C.D. 人类与自动化交互类型和水平模型。*IEEE*系统、人类与控制论汇刊*A*辑：系统与人类，2000年，30 844354 5 3 286 297 101109 3468（），第。– 。DOI: 。/ 。Tsarouchi, P., Makris, S. 和 Chryssolouris, G. 人机交互综述及任务规划与编程方面的挑战。*International Journal of Computer Integrated Manufacturing*，2016年，29（8），第916–931页。DOI: 10.1080/0951192X.2015.1130251 6 Bainbridge, L. 自动化的悖论。载于：人机系统的分析、设计与评估。Pergamon，1983年，第129–135页。DOI: 10.1016/B978-0-08-029348- 6.50026-9。ISBN: 978-0-08-029348-6 7 Wiener, E.L. 和 Curry, R.E. 驾驶舱自动化：前景与问题。*Ergonomics*，1980年，23 00140138008924809 8 10 995 1011 101080（），第。– 。DOI: 。/ Sheridan, T.B. 人类与自动化：系统设计与研究问题。美国加利福尼亚州圣莫尼卡：Human Factors and Ergonomics Society，2002年 9 9 978 0 471 23428。ISBN: - - - - Parasuraman, R., Molloy, R. 和 Singh, I.L. 自动化引发的“自满”所造成的绩效后果。*The International Journal of Aviation Psychology*，1993年，3，第1– 23 10 1207 15327108 0301_1 页。DOI: 。/s ijap 10 Endsley, M.R. 和 Kiris, E.O. 自动化中的脱离控制回路导致的绩效问题与控制水平。*Human Factors*，1995年，37，第381–394页。DOI: 10.1518/001872095779064555 11 Agrawal, A., Singh, V., Thiel, R., Pillsbury, M., Knoll, H., Puckett, J. 和 Fischer, M. 实践中的数字孪生：民族志行动研究的涌现见解。载于：*2022*年建筑研究大会。美国弗吉尼亚州阿灵顿：美国土木工程师学会，2022年，第1253–1260页。DOI: 10.1061/9780784483961.131 12 Agrawal, A., Fischer, M. 和 Singh, V. 数字孪生：从概念到实践。*Journal of Management in Engineering*，2022年，38（3），第06022001页。DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001034 13 Petzoldt, C., Wilhelm, J., Hoppe, N.H., Rolfs, L., Beinke, T. 和 Freitag, M. 新型集装箱卸载系统中基于数字孪生的人机交互控制架构。*Procedia Manufacturing*，2020年，52，第215–220页。DOI: 10 037 14 1016 202011。/j.promfg. 。 。Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J. 和 Fast-Berglund, Å. 操作员4.0：人类信息物理系统与自适应自动化，迈向人类与自动化

共生工作系统。载于：生产管理系统进展：可持续世界倡议。IFIP生产管理系统进展国际会议。巴西伊瓜苏瀑布：施普林格国际出版公司，2016年，第677–686页。DOI：10.1007/978-3-319-51133-7 8015
Wilhelm, J., Beinke, T. 和 Freitag, M. 利用数字孪生改进人机交互。载于：物流动态。物流动态国际会议。德国不来梅：施普林格国际出版公司，2020年，第527–540页。DOI：10.1007/978-3-030-44783-0 4916 Stark, R., Fresemann, C. 和 Lindow, K. 技术系统与服务的数字孪生开发及运行。*CIRP*年刊，2019年，68 (1)，第129–132页。DOI：10 024 17 1016 201904 . /j.cirp. . . Fantini, P., Tavola, G., Taisch, M., Barbosa, J., Leitao, P., Liu, Y., Sayed, M.S. 和 Lohse, N. 探究将人作为柔性因素融入信息物理系统赋能的制造环境：方法与结果。载于：*IECON 2016 - IEEE*工业电子学会第*42*届年会。意大利佛罗伦萨：IEEE，2016年，第5711–5716页。DOI：10.1109/IECON.2016.7793579 18 Liu, M., Fang, S., Dong, H. 和 Xu, C. 数字孪生概念、技术与工业应用综述。《制造系统杂志》，2021年，58，第346–361页。DOI：10 017 19 1016 2020 06 . /j.jmsy. . . Lu, Y., Liu, C., Wang, K.I.-K., Huang, H. 和 Xu, X. 数字孪生驱动的智能制造：内涵、参考模型、应用与研究问题。《机器人与计算机集成制造》，2020年，61，第101837页。DOI：10 101837 20 1016 2019 . /j.rcim. . Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. 和 Dassisti, M. 数字孪生范式：系统性文献综述。《工业中的计算机》，2021年，130，第103469页。DOI：10 103469 21 1016 2021 . /j.compind. . Tao, F., Zhang, H., Liu, A. 和 Nee, A.Y.C. 工业数字孪生：研究现状。《*IEEE*工业信息学汇刊》，2019年，15 (4)，第2405–2415页。DOI：10.1109/TII.2018.2873186 22 Kwok, P.K., Yan, M., Qu, T. 和 Lau, H.Y.K. 用户对用于练习基于数字孪生的危机管理的虚拟现实技术的接受度。*International Journal of Computer Integrated Manufacturing*，2021年，34 (7–8)，第874–887页。DOI：10.1080/0951192X.2020.1803502 23 Kadir, B.A., Broberg, O. 和 Conceição, C.S. da. 工业4.0中的人为因素与人体工程学：当前研究与未来展望。《计算机与工业工程》，2019年，137，106004 24 106004 10 1016 2019 p. . DOI：. /j.cie. . West, T.D. 和 Blackburn, M. 数字线程/数字孪生是否负担得起？对美国国防部最新曼哈顿计划成本的系统评估。《计算机科学程序汇刊》，2017年，114，003 25 47 56 10 1016 2017 09 pp. – . DOI：. /j.procs. . . Love, P.E.D., Matthews, J. 和 Zhou, J. 这会不会好得令人难以置信？发掘颠覆性技术的益处。《国际信息管理杂志》，2020年，52，102096 10 1016 2020 p. . DOI：. /j.ijinfomgt. .102096 26 Hampson, K.D. 和 Tatum, C.B. 建筑自动化技术战略。载于：建筑自动化与机器人技术*X*。第十届自动化国际研讨会

建筑机器人国际研讨会（ISARC）。美国休斯敦：爱思唯尔科学出版社，1993年，第125 0017 27 133 1022260 1993 – 页。DOI：https://doi.org/ . /ISARC / Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. 和 Wartzack, S. 塑造面向设计与生产工程的数字孪生。*CIRP*年刊，2017年，66 (1)，第141–144页。DOI：10 040 28 1016 201704 . /j.cirp. . . Grieves, M. 和 Vickers, J. 数字孪生：缓解复杂系统中不可预测且不期望的涌现行为。载于：复杂系统的跨学科视角：新发现与新方法。施普林格国际出版公司，2017年，第85–113页。DOI：10.1007/978-3-319-38756-7 4。ISBN：978-3-319-38756-729 Grieves, M. 数字孪生：通过虚拟工厂复制实现卓越制造。2015年。获取地址：https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excell ence through Virtual Factory Replication 访问日期：11月[28 2022] 30 Glaessgen, E. 和 Stargel, D. 面向未来美国国家航空航天局和美国空军车辆的数字孪生范式。载于：第*53*届*AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC*结构、结构动力学与材料会议 第*20*届*AIAA/ASME/AHS*自适应结构会议 第*14*届*AIAA*会议。美国夏威夷州檀香山：美国航空航天学会，2012年，第1818页。DOI：10.2514/6.2012-1818 31 Wright, L. 和 Davidson, S. 如何区分模型与数字孪生。《工程科学中的高级建模与仿真》，2020年，7 (1)，第13页。DOI：10.1186/s40323-020-00147-4 32 Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M.T. 和 Neitz, A. 面向智能信息物理系统的基于仿真的架构。载于：*2016*年*IEEE*自主计算国际会议（*ICAC*）。维尔茨堡：IEEE，2016年，第374–379页。DOI：10.1109/ICAC.2016.29 33 Canedo, A. 通过数字孪生实现工业物联网生命周期管理。载于：*2016*年硬件/软件协同设计与系统综合国际会议（*CODES+ISSS*）。美国匹兹堡：IEEE，2016年，2974007 34 1 1 101145 2968456 第 – 页。DOI：. / . Schroeder, G.N., Steinmetz, C., Pereira, C.E. 和 Espindola, D.B. 利用AutomationML进行数字孪生数据建模及数据交换通信方法。*IFAC*在线论文集，2016年，49 115 35 30 12 17 101016 201611 ( )，第–页。DOI：. /j.ifacol. . . Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N. 和 Devine, D. 数字孪生：起源与未来。《应用系统创新》，2021年，4 4020036 36 2 36 103390 ( )，第页。DOI：. /asi Tomko, M. 和 Winter, S. 超越数字孪生——一篇评论。《环境与规划*B*：城市分析与城市科学》，2019年，46 (2)，第395–399页。DOI：10.1177/2399808318816992 37 Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. 和 Sihn, W. 制造业中的数字孪生：分类文献综述与分类。*IFAC*在线论文集，2018年，51 474 38 11 1016 1022 101016 201808 ( )，第–页。DOI：. /j.ifacol. . . Agrawal, A., Singh, V. 和 Fischer, M. 对数字孪生的新视角：赋予实体智能与能动性。2022 05350 39 1048550 2210 . DOI：. /arXiv. . Bianconi, C., Bonci, A., Monteriù, A., Pirani, M., Prist, M. 和 Taccari, L. 数字孪生分析的系统思维方法。载于：*2020*年*IEEE*工程、技术与创新国际会议（*ICE/ITMC*）。英国卡迪夫：IEEE，2020年，第1–7页。DOI：10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198392

40 Bi, Z., Zhang, C.W.J., Wu, C. and Li, L. 面向可持续制造系统生命周期信息集成的新数字三元组（DT-II）概念。《工业信息集成期刊》, 2022, 26, 100316 41 100316 101016 2021 p. . DOI: . /j.jii. . Jiang, F., Ma, L., Broyd, T. and Chen, K. 数字孪生及其在土木工程领域的实施。《建筑自动化》, 2021, 130, p. 103838. DOI: 10 103838 42 1016 2021 . /j.autcon. . Pan, Y. and Zhang, L. 面向高级项目管理的BIM与数据挖掘集成的数字孪生框架。《建筑自动化》, 2021, 124, p. 103564. DOI: 10 103564 43 1016 2021 . /j.autcon. . Lee, D., Lee, S.H., Masoud, N., Krishnan, M.S. and Li, V.C. 支持建筑项目中可追责信息共享的数字孪生与区块链集成框架。《建筑自动化》, 2021, 127, 103688 44 103688 101016 2021 p. . DOI: . /j.autcon. . Lu, Q., Xie, X., Parlikad, A.K. and Schooling, J.M. 数字孪生赋能的运行与维护阶段建成资产监测异常检测。《建筑自动化》, 2020, 118, 103277 101016 2020 p. . DOI: . /j.autcon. .103277 45 Cimino, C., Negri, E. and Fumagalli, L. 制造业中的数字孪生应用综述。《工业中的计算机》, 2019, 113, p. 103130. DOI: 10 103130 46 1016 2019 . /j.compind. . Errandonea, I., Beltrán, S. and Arrizabalaga, S. 用于维护的数字孪生：文献综述。《工业中的计算机》, 2020, 123, p. 103316. DOI: 10 103316 47 1016 2020 . /j.compind. . Li, L., Aslam, S., Wileman, A. and Perinpanayagam, S. 航空航天业中的数字孪生：简明介绍。《IEEE Access》, 2022, 10, pp. 9543–9562. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3136458 48 Phanden, R.K., Sharma, P. and Dubey, A. 关于数字孪生在航空航天、制造业和机器人学中的仿真的综述。《今日材料：论文集》, 2021, 38, pp. 174– 178 446 49 101016 202006 . DOI: . /j.matpr. . . Evans, S., Savian, C., Burns, A. and Cooper, C. 建成环境中的数字孪生。2019年。可访问：https://www.snclavalin.com/~/media/Files/S/SNC-Lavalin/documents/beyond-engineering/digital-twins-for-the-built-environment-iet-atkins.pdf [20 2021] 访问日期：10月。Boschert, S. and 50 Rosen, R. 数字孪生——仿真方面。载于：《机电一体化的未来：机电一体化系统及其设计者面临的挑战与解决方案》。施普林格国际出版公司，2016, pp. 59–74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5. ISBN: 978-3-319-32156-1 51 Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G. and Bettenhausen, K.D. 自主性和数字孪生对于制造业未来的重要性。《IFAC在线论文集》, 2015, 48 3 567 572 101016 201506 ( ), pp. – . DOI: . /j.ifacol. . .141 52 Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribion, A., Werner, L.C. and Holmström, J. 数字孪生：建筑物的愿景、优势、边界与创建。《IEEE Access》, 2019, 7, pp. 147406–147419. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946515 53 Lin, K., Xu, Y.-L., Lu, X., Guan, Z. and Li, J. 基于数字孪生的强震作用下大跨度斜拉桥倒塌易损性评估。《建筑自动化》, 2021, 123, p. 103547. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103547

54 Li, M., Lu, Q., Bai, S., Zhang, M., Tian, H. and Qin, L. 基于数字孪生驱动的虚拟传感器方法，用于耙吸式挖泥船的安全施工操作。《建筑自动化》, 2021, 132, 103961 55 103961 101016 2021 p. . DOI: . /j.autcon. . Hunhevicz, J.J., Motie, M. and Hall, D.M. 用于基于绩效的（智能）合约的数字建筑孪生与区块链。《建筑自动化》, 2022, 133, p. 103981. DOI: 10 103981 56 1016 2021 . /j.autcon. . Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. and Welsh, J. 对既有建筑净零能耗建筑的数字孪生评估。《可持续性》, 2019, 11 (1), p. 159. DOI: 10.3390/su11010159 57 麦肯锡公司。技术深入解析：数字孪生。2021年。可访问：https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digit al/Our%20Insights/The%20top%20trends%20in%20tech%20final/Tech%20Trends%20slid es% 208 209 2010 [7 2022] % % 访问日期：2月。Adamenko, D., Kunnen, S., Pluhnau, R., Loibl, A. and Nagarajah, A. 数字孪生设计方法的回顾与比较。Procedia CIRP, 2020, 91, pp. 27 146 59 32 101016 202002 – . DOI: . /j.procir. . . Segovia, M. and Garcia-Alfaro, J. 数字孪生的设计、建模与实施。《传感器》, 2022, 22 22145396 60 14 5396 103390 ( ), p. . DOI: . /s Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. and Sui, F. 大数据驱动的数字孪生产品设计、制造与服务。《国际先进制造技术杂志》, 2018, 94 (9–12), pp. 3563–3576. DOI: 10.1007/s00170-017- 0233-1 61 Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. and Chen, X. 工业4.0中基于数字孪生的智能制造系统设计：综述。《制造系统杂志》, 2021, 60, 011 62 119 137 101016 202105 pp. – . DOI: . /j.jmsy. . . Miller, S. 使用数字孪生进行预测性维护。2019年。可访问：
h
ttps://
www.mathworks.com/company/newsletters/articles/predictive-maintenance-using-a-digital-twin.html [22 2022] 访问日期：10月。Bücker, I., Hermann, M., Pentek, T. and Otto, B. 迈向工业4.0转型方法论。载于：《商业信息系统》。国际商业信息系统会议。德国莱比锡：施普林格国际出版公司，2016, pp. 209– 221. DOI: 10.1007/978-3-319-39426-8 1764 Fitts, P.M. 《面向高效航空导航与交通管制系统的人因工程》。英格兰牛津：美国国家研究委员会，1951年。可访问：https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADB 815893 [28 2022] .pdf 访问日期：11月。Sheridan, T.B. and Verplank, W.L. 《水下遥操作设备的人机控制》。麻省理工学院剑桥分校人机系统实验室，1978年。可访问：https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA 057655 [25 2021] 访问日期：10月。Endsley, M.R. and Kaber, D.B. 自动化等级对动态控制任务中的绩效、情境意识和工作负荷的影响。Ergonomics, 1999, 42 (3), pp. 462–492. DOI: 10.1080/001401399185595 67 Sheridan, T.B. 《人—系统交互建模：哲学与方法论考量及实例》。约翰·威立父子出版公司，2017年 8 68 978 1 119 27526 . ISBN: - - - - Nunes, D., Silva, J.S. and Boavida, F. 《人在回路中的信息物理系统实用入门》。约翰·威立父子出版公司，2018年。ISBN: 978-1-119-37777-1

69 Gil, M., Albert, M., Fons, J. 和 Pelechano, V. 信息物理系统中人在回路交互的工程设计。《信息与软件技术》，2020年，126，页码 106349。DOI：10 106349 70 1016 2020 . /j.infsof. . Cimini, C., Pirola, F., Pinto, R. 和 Cavalieri, S. 面向新一代生产系统的在人回路制造控制架构。《制造系统杂志》，2020年，54，002 71 258 271 101016 202001 页码 – 。DOI：. /j.jmsy. . . Burgelman, R.A. 和 Siegel, R.E. 剖析高科技创业企业中的战略钻石。《加利福尼亚管理评论》，2008年，50（3），页码 140–167。DOI：10.2307/41166449 72 Munir, S., Stankovic, J.A., Liang, C.-J.M. 和 Lin, S. 人在回路控制的信息物理系统挑战。载于：第八届反馈计算国际研讨会。圣何塞：USENIX 协会，2013年，页码 4。73 Johnson, P. 任务与情境：人机交互中的模型与设计原则考量。载于：第八届人机交互国际会议：人体工程学与用户界面（第一卷）。美国：L. Erlbaum Associates Inc.，1999年，页码 1199–1204。74 Ma, X., Tao, F., Zhang, M., Wang, T. 和 Zuo, Y. 数字孪生增强产品生命周期中的人机交互。*Procedia CIRP*，2019年，83，页码 789–793。DOI：10 330 75 1016 201904 . /j.procir. . . Ogbeyemi, A., Lin, W., Zhang, F. 和 Zhang, W. 小型制造企业员工的人为因素：案例研究。《企业信息系统》，2021年，15（6），页码 888–908。DOI：10.1080/17517575.2020.1829076 76 Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. 和 Zühlke, D. 工业4.0时代的人机交互。载于：*2014*年第*12*届*IEEE*工业信息学国际会议（*INDIN*）。巴西阿雷格里港：IEEE，2014年，页码 289–294。DOI：10.1109/INDIN.2014.6945523 77 Lund, A.M., Mochel, K., Lin, J.-W., Onetto, R., Srinivasan, J., Gregg, P., Bergman, J.E., JR, K.D.H., Ahmed, A. 和 Chotai, S. 用于运行风电场的数字孪生接口。2018年。可查阅：https://patents.google.com/patent/US9995278B2/en [访问日期：10月16日 2022] 欧 78
特克。《建筑、工程与建筑设计中的数字孪生》| 欧特克。2021年。可查阅：https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin/architecture-engineering- construction [30 2021] 访问日期：9月 Verdantix。《数字孪生等级》。可 79 2021
查阅：https://www.verdantix.com/newsroom/press-releases/verdantix-says-that-digital-twins-operate-at-five-different-levels-of-sophistication [24 2021] 访问日期：10月 80
Nhede, N. 数字孪生成熟度连续谱。《国际智能能源》，2018年。可查阅：https://www.smart-energy.com/industry-sectors/policy-regulation/digital-twins-maturity-continuum-david-socha/ [24 2021] 访问日期：10月 Madni, 81
A.M., Madni, C.C. 和 Lucero, S.D. 在基于模型的系统工程中充分利用数字孪生技术。《系统》，2019年，7（1），页码 7。DOI：10 7010007 82 3390. /systems Holmström, J., Ketokivi, M. 和 Hameri, A.-P. 衔接实践与理论：设计科学方法。《决策科学》，2009年，40（1），页码 65–87。DOI：10.1111/j.1540- 5915.2008.00221.x

83 Hevner, A.R., March, S.T., Park, J. 和 Ram, S. 信息系统研究中的设计科学。*MIS Quarterly*，2004年，28 25148625 84 1 75 105 102307 （），页码 – 。DOI：. / Dorst, K. 和 Cross, N. 设计过程中的创造力：问题–解决方案的协同演化。*Design Studies*，2001年，22 6 85 5 425 437 101016 0142 694 01 00009 （），页码 – 。DOI：. /S - X( ) - Van Aken, J.E. 作为设计科学的管理研究：阐明模式2知识生产的管理研究成果。*British Journal of Management*，2005年，16（1），页码 19–36。DOI：10.1111/j.1467-8551.2005.00437.x 86 Succar, B. 和 Poirier, E. 用于交付和管理数字资产与实体资产的生命周期信息转换与交换。《建筑自动化》，2020年，112，页码 103090 103090 87 101016 2020 . DOI：. /j.autcon. . AlSehaimi, A., Koskela, L. 和 Tzortzopoulos, P. 建筑施工管理需要替代研究方法：延误研究案例。*Journal of Management in Engineering*，2013年，29 0000148 88 4 407 413 101061 1943 5479 （），页码 – 。DOI：. /(ASCE)ME. - . Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A. 和 Chatterjee, S. 信息系统研究的设计科学研究方法论。*Journal of Management Information Systems*，2007年，24 1222240302 89 3 45 77 102753 0742 （），页码 – 。DOI：. /MIS - Fan, L. x., Cai, M. y., Lin, Y. 和 Zhang, W. j. 公理化设计理论：补充说明及其应用指南。*International Journal of Materials and Product Technology*，2015年，51 072557 90 4 359 374 101504 2015 3016 （），页码 – 。DOI：. /IJMPT. . SAE International. J B：道路机动车辆驾驶自动化系统相关术语的分类与定义。2021年。可查阅：https://www.sae.org/standards/content/j 3016_201806［ 25 2021］ / 访问日期：91
10月 Braun, R., Benedict, M., Wendler, H. 和 Esswein, W. 需求驱动的设计科学研究提案。载于：设计科学的新视野：拓展研究议程。信息系统设计科学研究国际会议。爱尔兰都柏林：施普林格国际出版公司，2015年，页码 135–151。DOI：10.1007/978- 3-319-18714-3 9
92 – 2020 10 48550 2009 09083 Molina,
93 2
M. 什么是智能系统？DOI：. /arXiv. . Shapiro, S.C. 人工智能百科全书，第 nd 版。美国：John Wiley & Sons, Inc.，1992年 7 94 978 0 471 50305 。ISBN：- - - - Walker, D.H.T., Bourne, L.M. 和 Shelley, A. 影响力、利益相关者映射与可视化。*Construction Management and Economics*，2008年，26（6），页码 645–658。DOI：10.1080/01446190701882390 95 Van Der Heijden, C. 和 Eden, C. 战略制定中反思式学习的理论与实践。载于：管理与组织认知：理论、方法与研究。伦敦：Sage，1998年，7 96 58 76 978 0 7619 5195 页码 – 。ISBN：- - - - Bryant, A. 和 Charmaz, K.《*SAGE* 扎根理论手册》。英国伦敦 EC1Y 1SP，55 City Road，Oliver's Yard：SAGE Publications Ltd，2007年。DOI：10.4135/9781848607941。ISBN：978-1-4129-2346-0 97 Josephson, J.R. 和 Josephson, S.G. 溯因推理：计算、哲学、技术。剑桥大学出版社，1994年 4 98 978 0 521 43461 。ISBN：- - - - Glaser, B.G. 和 Strauss, A.L.《扎根理论的发现：定性研究策略》。Routledge，2017年。ISBN：978-1-351-52216-8

99 Endsley, M.R. 情境意识的理论基础：一项批判性综述。载于：情境意识分析与测量。Lawrence Erlbaum Associates, Inc，2000年，第 3 1 100 32 978 0 429 22813 – 页。ISBN：- - - - Endsley, M.R. 人为因素在高级驾驶舱专家系统开发中的应用。人因学会年会论文集，1987年，31 12 1388 1392 10 1177 ( )，第 – 页。DOI：. /154193128703101219 101 Endsley, M.R. 自动化与情境意识。载于：自动化与情境意识。《交通运输中的人为因素》。美国新泽西州希尔斯代尔：Lawrence Erlbaum Associates, Inc，1996年，7 102 163 181 978 0 8058 1616，第 – 页。ISBN：- - - - Autor, D.H.、Levy, F. 和 Murnane, R.J. 近期技术变革的技能内容：一项实证探索*。《经济学季刊》，2003年，118 (4)，第 1279 003355303322552801 103 1333 10 1162 – 页。DOI：. / Frey, C.B. 和 Osborne, M.A. 就业的未来：工作容易被计算机化取代吗? 《技术预测与社会变革》，2017年，114，第 254–280 页。DOI：10 019 104 1016 2016 08 . /j.techfore. . . Mankins, J.C. 技术成熟度评估：回顾。《航天学报》，2009年，65 9 1216 1223 10 1016 2009 03 ( )，第 – 页。DOI：. /j.actaastro. . .058 105 Christensen, A.、Cunningham, A.、Engelman, J.、Green, C.、Kawashima, C.、Kiger, S.、Prokhorov, D.、Tellis, L.、Wendling, B. 和 Barickman, F. 驾驶自动化系统开发中的关键考量。2015年。获取地址：https://www- esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/ 24 24 000451 [28 2022] / 106

files/ ESV- .PDF 访问日期：11月 Boje, C.、Guerriero, A.、Kubicki, S. 和 Rezgui, Y. 迈向语义化建筑数字孪生：未来研究方向。《建筑自动化》，2020年，114，第 103179 103179 107 页。DOI：. /j.autcon. . Zhang, W.J. 和 Lin, Y. 韧性系统设计原则探讨——应用于企业信息系统。《企业信息系统》，2010年，4 (2)，第 99–110 页。DOI：10.1080/17517571003763380