用于训练和评估空中交通管制人工智能智能体的英国航路空域概率数字孪生

Nick Pepper*, Adam Keane†, Amy Hodgkin‡, Dewi Gould§, Edward Henderson¶, Lynge Lauritsen‖ 和 Christos Vlahos**艾伦·图灵研究所，英国伦敦 *NW1 2DB*

GeorgeDe Ath†† 和 Richard Everson ‡‡
埃克塞特大学

Richard Cannon§§，Alvaro Sierra Castro ¶¶，John Korna***，Ben Carvell ††† 和 Marc Thomas ‡‡‡*NATS*，英国费勒姆 *PO15 7FL*

arXiv:2601.03113v1 [cs.CE] 6 Jan 2026

本文介绍了首个面向运行中的航路空域的概率数字孪生，该系统为伦敦区域管制中心开发。该数字孪生旨在支持空中交通管制（ATC）人工智能智能体的开发和严格的人在回路评估，并提供现实世界空域的虚拟表征，从而能够安全地探索更高级别的空中交通管制自动化。

本文作出了三项重要贡献：首先，我们展示了如何将历史和实时运行数据与基于概率物理信息机器学习的航空器性能模型相结合，以重现真实世界交通场景，同时准确反映空中交通管制中固有的不确定性。其次，我们依循可信与伦理保证框架，构建了结构化保证论证，为数字孪生的准确性与保真度提供定量证据。这对于在这一安全关键领域建立对这项新技术的信任至关重要。第三，我们阐述了数字孪生如何构建一个统一环境，用于智能体测试与评估。这包括快速仿真运行（最高可达实时速度的 200 倍）、基于 Python 的标准化"gym"接口（支持多种人工智能智能体设计），以及一套用于评估性能的定量指标。尤为重要的是，该框架支持由具备资质的空中交通管制员通过人机界面对人工智能智能体进行基于能力的评估。我们还概述了数字孪生架构的进一步应用和未来扩展方向。

*高级研究助理，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
†研究助理，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
‡研究助理，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB §研究助理，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
¶研究助理，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
‖研究软件工程师，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
**研究软件工程师，艾伦·图灵研究所，英国英格兰伦敦 NW1 2DB
††埃克塞特大学计算机科学系讲师；
‡‡埃克塞特大学计算机科学系教授；§§NATS研发部高级研究员

¶¶NATS研发部研究与开发毕业生
***NATS研发部研究员
†††NATS研发部研究员
‡‡‡NATS研发部研究员；同时担任伦敦玛丽女王大学客座教授

I. 引言

Growing 航空旅行需求不断增长，航班数量逐年稳步上升 [1], ，这给空中交通管理（ATM）系统带来了巨大压力，要求其在维持严格安全标准的同时提高容量。无人机和电动垂直起降（eVTOL）航空器等新型空域用户的出现，以及政府提出的提高空域效率、减少排放的要求（例如，参见 [2]），使这一挑战更加严峻。为此，各项空中交通管理现代化计划 [3, 4] 旨在改进工作负荷预测、轨迹预测准确性、战略规划、航路优化和整体系统韧性 [5]。这些挑战的规模和紧迫性意味着，对传统工具和流程进行渐进式改进可能不足以应对，而战术空中交通管制需要在自动化方面实现重大变革。

在此背景下，基于人工智能的空中交通管制（ATC）决策支持技术日益受到关注。本文中，我们使用“人工智能代理”一词，指代任何用于战术空中交通管制的基于人工智能的决策支持技术，无论其预期自主程度如何。此类代理的范围从突出显示潜在冲突并提出解决方案的工具，到控制权限更大的高级系统 [6, 7]。空中交通管制是一项安全关键任务，要求管制员在高度依赖具体情境的情况下，兼顾效率、有序性及其他因素，同时严格遵守安全标准。因此，人工智能智能体在投入运行前必须经过广泛而严格的验证。仅靠自动化方法，无论是形式化方法 [8] ，还是通过场景生成进行验证这一近期兴起的范式，都不足以胜任；后者已应用于自动驾驶 [9, 10] ，但这些方法无法捕捉受过训练的管制员所作的情境判断。因此，在回路（HITL）评估 [11]至关重要，它使具备资质的管制员能够在真实条件下，并依据适当的能力框架，对代理行为进行检验。

人在回路评估必须忠实呈现空中交通管理运行中固有的不确定性。在系统层面，不确定性源于时刻偏差 [12–15]，对流天气 [16, 17]，以及通信中断、军事活动或劫持等意外事件 [18]。在航空器层面，质量 [19]，运营人程序 [20]，飞行员意图和局地大气条件 [21] 方面的不确定性，导致预测轨迹与观测轨迹之间存在显著差异 [22, 23]。因此，确定性仿真不足以作为评估人工智能代理在真实运行条件下行为的依据，尤其是在代理本身必须在不确定条件下进行推理时。

因此，适用于人工智能代理开发和人在回路评估的仿真环境必须满足以下若干要求：

- **对空域的高保真数字化表示** 应涵盖扇区划分、航路结构、程序以及构成空中交通样本运行背景的其他因素。
- 具备**对航空器性能** 和交通演化进行概率仿真的能力，以呈现偶然变异以及空中交通管理运行中固有的认知不确定性水平。
- 一种供人工智能代理在不确定性条件下执行战术控制的**接口**，使其能够在仿真环境中感知、决策并采取行动。
- 用于评估人工智能智能体的**定量指标**，以及**人机界面（HMI）**，使教员能够开展基于能力的评估。
- 一种**与实时或记录的现实世界运行环境连接的接口**，可根据现实世界交通样本和场景评估人工智能代理的行为。
- 具备**显著快于实时运行**的能力，为采用机器学习方法（如强化学习）的人工智能代理提供支持。这些技术需要数千小时的仿真，才能训练出有效策略。

现有的空中交通管制仿真器和开源系统提供了有价值的功能，但无法同时实现概率性飞机性能建模、与运行数据流集成，以及专为AI智能体控制和人在回路评估设计的接口 [24–32]。这些局限促使人们开发概率数字孪生。

数字孪生为物理系统提供高保真、数据驱动的虚拟表征，并日益广泛地应用于医疗保健 [33], 能源 [34] 和交通运输 [35–37]等安全关键领域。概率数字孪生通过显式建模系统的不确定性，已在《航空航天》中用于结构与部件建模，包括机翼 [38], 无人驾驶航空器 [39], 和旋翼航空器系统 [40]。在空域层面，Souanef等人 [41] 探讨了面向未来空域概念的数字孪生，重点关注400英尺以下的无人驾驶与城市空中交通运行。然而，据作者所知，目前尚无专为支持人工智能代理开发、基准测试集和人在回路评估而设计的运行中的航路空域概率数字孪生。本研究的贡献如下：

- **运行中的航路空域概率数字孪生**，整合多个运行数据源与一个概率化、物理信息驱动的飞机性能模型。
- **对数字孪生进行定量验证**，证明其轨迹准确性、不确定性保真度，以及对人工空中交通管制员培训演练的复现能力。
- **用于人工智能代理开发、训练和评估的统一框架**，包括自动化指标，以及用于人工智能代理对飞机进行控制和开展人在回路评估的接口。

本文介绍了一个用于伦敦区域管制中心（LACC）环境的概率数字孪生。该数字孪生将现实世界监视数据、飞行计划、扇区划分、协调程序和气象数据，与一个基于概率物理信息机器学习（PIML）的航空器性能模型相结合，以复现真实的交通流模式和运行不确定性。该环境支持在真实条件下开展人工智能代理开发与评估，并通过人在回路演练实现定量评估和基于能力的评估。本文其余部分安排如下：第二节介绍概率数字孪生的核心组成部分。第三节概述用于评估该孪生体是否适合作为代理训练与评估平台的保证框架，并给出有关其准确性与保真度的定量结果。第四节介绍数字孪生的其他用例和未来计划，第五节则总结全文。

II. 方法论

本节介绍引言中概述的三项主要贡献如何在实践中实现。首先，我们详细说明 LACC 环境概率数字孪生的构建过程，该孪生将多个运行数据源与概率型 PIML 飞机性能模型相结合。其次，我们介绍该孪生所提供的统一框架，用于人工智能代理的开发、训练和评估，其中包括面向自动化代理和人在回路评估的接口。第三项贡献，即对数字孪生进行定量验证，将在第 III 节讨论；届时我们将在保证框架下展示其准确性与保真度方面的证据。

数字孪生通过整合 NATS 系统中的历史和实时运行数据，再现运行配置、程序和交通流模式。航空器运动既可依据记录的飞行轨迹建模，也可通过概率轨迹预测（TP）引擎建模，该引擎能够生成逼真的航空器行为。这种结合观测轨迹与仿真轨迹的方法，既支持受控实验，也能再现现实世界的交通流模式和飞行动力学。系统包含一个交互式人机界面，其设计旨在与当前管制员显示界面高度相似；此外还提供一套自动生成的性能指标，用于衡量安全性、效率以及对运行程序的遵循情况。上述功能共同支持对代理决策进行系统评估。图 1 为数字孪生系统各组成部分的示意图。下文各小节将更详细地介绍关键组成部分。

A. 数据来源

该数字孪生整合了来自 NATS 运行系统的监视数据、飞行计划、管制员许可、飞机通信状态、空域配置和气象信息。现有一个包含超过 2,000 万个航班的综合数据集，提供自 2016年 起高保真、近乎连续的历史数据。此外，实时数据流使孪生能够以极低延迟复现当前交通状况。

航空器监视数据由 ARTAS [42], 提供。ARTAS 是一种数据融合与跟踪系统，整合了来自 PSR（一次监视雷达）、SSR Mode A/C/S（二次监视雷达）、广播式自动相关监视和广域多点定位（WAM）的数据。该系统约每 6 秒提供一次航空器位置、高度、航向和速度数据，并在可用时提供其他信息，例如所选飞行高度层（FL）。飞行计划、管制员发布的许可、扇区配置信息和扇区协调记录均来自 NATS 的 NERC 航路空中交通管理系统，该系统提供带时间戳的事件级更新。

历史和当前的空域结构及航路点信息取自航空资料汇编（AIP）和 NATS 的内部系统，从而能够根据日期准确界定航空器与管制员进行交互的运行环境。为复现管制员在实时运行系统中可获取的气象信息，数字孪生框架纳入了英国气象局提供的运行预报，预报间隔为三小时。此外，为了在历史场景中准确模拟航空器性能和相对于风的运动，数字孪生采用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）第五代再分析数据集（ERA5） [43] 气象数据集。该数据集通过结合观测结果与数值预报模型，提供天气与气候的逐小时高分辨率估算。

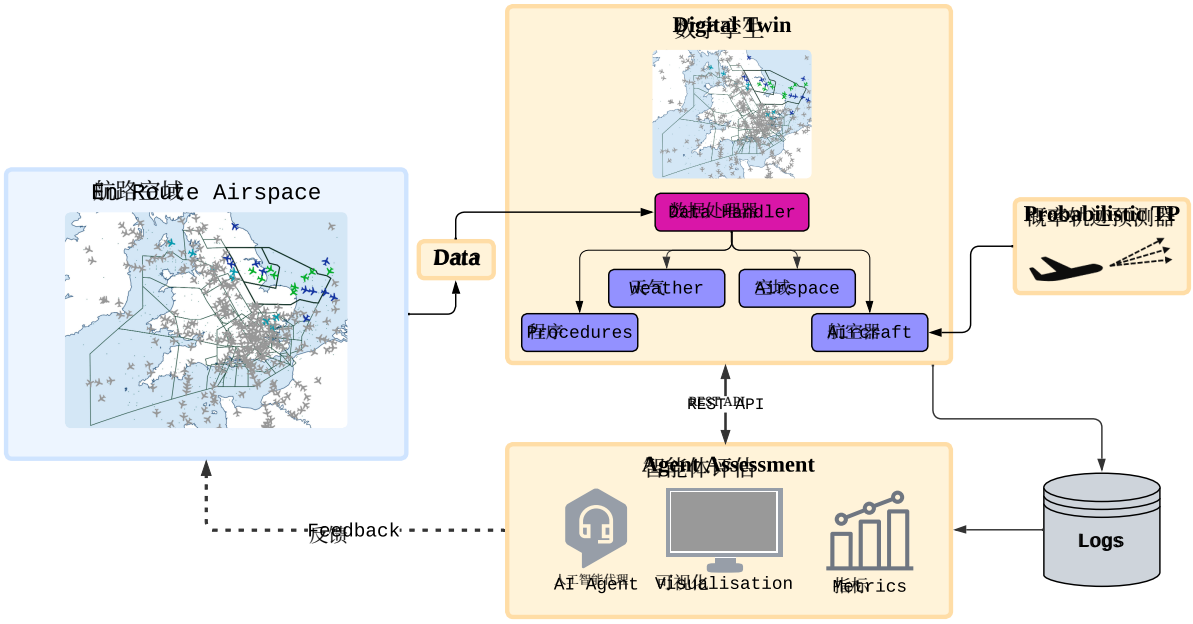


图 1 数字孪生、概率轨迹预测器和智能体评估框架的主要组成部分示意图。

B. 数字孪生

数字孪生为 LACC 的航路管制空域提供了数字化表示。其目的是以足够逼真的方式重现运行环境，以支持人工智能智能体在真实的交通流模式和约束条件下进行开发、测试和评估。通过与航空情报规章与管制（AIRAC）同步的空域定义、基于数据的轨迹回放和向扇区呈现航空器信息、逼真的管制程序，以及航空器动力学的概率性 PIML 模型，实现了高保真度。

空域划分为相互嵌合的多面体区域，称为扇区 [22]。这些区域构成管制员职责的基本单元。在日常运行中，32 个基础扇区可以动态组合成更大的带框扇区配置，以平衡工作负荷。每个启用的带框扇区组通常由一名战术管制员负责管理，并经常由一名计划管制员协助。根据交通需求，通常在任何时刻会启用 5 至 15 个带框扇区。空域表示包含所有英国机场及相关导航点（航路点、定位点和导航设施）。这些要素界定了已提交飞行计划中的计划航线和实际航线，以及程序限制（例如，要求航空器在指定定位点前下降至规定高度）。对于历史场景，空域中的扇区会按照日期与相应的 AIRAC 定义对齐。

每架航空器均表示为一个对象，包含物理状态变量（高度、位置、航向和空速）以及运行属性（呼号、当前管制许可、意图和管制扇区）。其中还包括飞行计划信息，说明航空器的机型、请求的飞行高度层和速度、起飞机场与目的地机场，以及计划航路。管制员（AI 或人工）通过表 1 所列的一组管制许可与航空器交互，这些许可反映了 LACC 中的常用做法。简单的飞行员智能体负责在已发布的管制许可与航空器的意图状态之间进行协调。这样既能实现真实的指令延迟，也可以通过参数化设置，制造因误解而导致管制许可修改等极端或异常事件。

扇区间移交由协调管理，其中规定了商定的移交高度、移交点和预计移交时间。协调可以通过自动化规则或依航路而定的规则预先设定，也可以通过战术协商达成。数字孪生会表示这些协议，并允许对其进行修改。航空器在扇区间的通信移交由相关指令触发，这些指令模拟现实世界中的频率变更，可通过数据驱动事件或人工指令实现。

风矢量在可配置的三维网格上建模。智能体通过应用程序接口访问预报风场，而航空器动力学中使用的“真实”风则保持隐藏。预报风和实际风均可来源于

表1 数字孪生的动作空间。

许可	属性	描述
直接航线飞往	航路点	直接飞往指定航路点并继续沿航路飞行从该点
按航向飞行	航向	按指定航向飞行
按角度向左/右转弯	Δ航向	按指定度数向左或向右转
保持当前航向	-	沿当前航空器航向飞行
立即爬升/下降	飞行高度层	立即爬升或下降至指定的飞行高度层
准备好后下降，以便在某个航路点达到平飞	飞行高度层和航路点	在最佳下降顶点开始下降，使给定的在指定航路点处或正横该点时达到飞行高度层
立即下降，以便在某个航路点	飞行高度层和航路点	立即下降，以便在指定航路点处或正横该点时达到指定高度层
将校准空速更改为	校准空速（节）	更改速度转换高度以下使用的校准空速速度转换高度
将马赫速度更改为	马赫速度	更改速度转换高度以上使用的马赫速度
更改爬升/下降率to	垂直速度（英尺/分钟）	对于已经处于爬升或下降状态的航空器，调整其爬升/下降率
联系其他频率	下一个频率或扇区	切换至指定的新扇区频率

数据或人工生成。

数字孪生旨在建立一个安全的高保真环境，专用于人工智能智能体的开发和严格测试，尤其是在面对真实的交通流模式和运行约束时。系统通过在单一框架中整合数据回放与仿真来实现这一目标，从而能够复现现实世界的边界条件，同时允许人工智能智能体在空域内选定的扇区中进行全面控制。用户可随时定义一个或多个仿真扇区，在这些扇区内，航空器可由用户控制，其动力学由孪生系统生成。扇区外的航空器则直接根据历史数据或实时数据进行回放，其位置和运行属性会更新，以匹配真实世界轨迹。当航空器的控制权移交至仿真扇区时，其动力学将切换为概率仿真器（第二节C），并持续仿真，直至其离开空域。

数字孪生还支持对相邻扇区进行同步人工控制，从而能够开展人机协同研究。全面的日志记录会捕获所有系统状态，便于完整回放场景并进行详细的场景后分析。支撑这些功能的系统架构如图1所示。全数据驱动、全仿真或混合模式（例如，仿真轨迹与数据驱动的管制许可）等其他运行模式，拓展了孪生系统在本文所考察用例之外的应用范围，并在第四节中作简要讨论。图2展示了数字孪生中回放的历史交通流样本，其中呈现了航空器位置和32个LACC扇区。

C. 概率航空器轨迹

数字孪生的主要目的是支持人工智能智能体的开发与评估，使其所处条件能够忠实反映现实世界。在实际运行中，航空器轨迹会受到偶然性与认知性不确定性来源的影响，包括局部天气、航空器质量和运行程序的变化，以及飞行员意图与时机的差异。仅根据监视数据和空中交通管制数据推断时，这些因素使未来的航空器轨迹本质上难以预测。

对于智能体开发而言，在数字孪生中复现这种不确定行为，出于两个与泛化能力密切相关的原因至关重要。首先，确定性仿真会导致许多机器学习方法隐式学习训练期间观察到的精确、无噪声轨迹；当智能体接触真实交通时，这可能导致较差的泛化能力。其次，由于空中交通管制属于安全关键领域，对智能体安全性能的任何评估都必须考虑现实航空器性能的完整范围，包括不太可能但

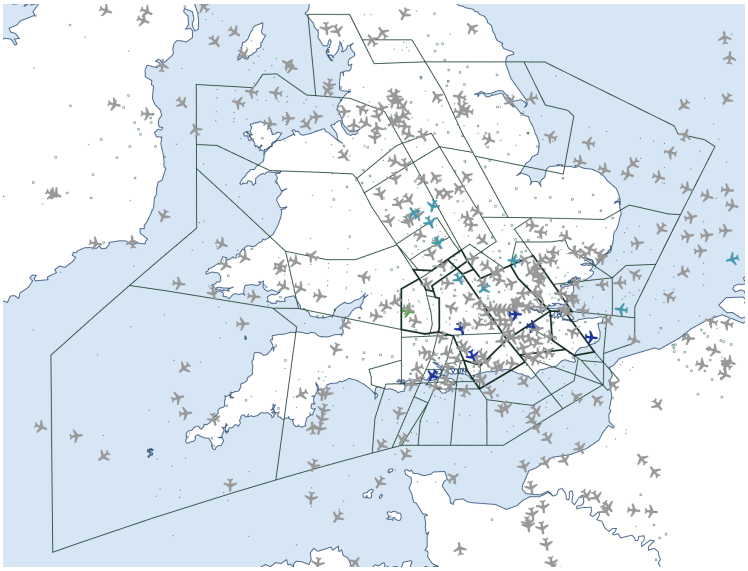


图 2 伦敦区域管制扇区，以及在数字孪生中回放的交通样本。

合理的爬升率、速度和响应延迟，而不仅是名义条件。全面的安全评估还应考虑无线电故障或空域侵入等罕见或异常事件。未来工作部分第四节对此进行了简要讨论。

为模拟不确定性的影响，数字孪生使用基于历史数据训练的概率 PIML 模型生成轨迹。飞机数据基础库（BADA）模型 [44], 是由欧洲航空安全组织开发并维护的性能模型，可为每种飞机类型提供依赖于高度的参数，以及一组通过数值求解来生成确定性爬升和下降剖面的能量平衡方程。我们的方法扩展了 BADA，将其校准空速（CAS）、推力和阻力参数（这些参数是飞行高度层的函数）替换为一个生成模型；该模型利用函数主成分分析和基于历史轨迹训练的高斯混合模型构建。这种物理信息方法使数字孪生能够以概率方式生成合理的轨迹，同时由 BADA 模型的能量约束确保其符合物理规律。将生成模型组件拟合到本地历史数据，还能使模型适应特定空域的特征，从而生成与观测轨迹更为相似的轨迹。完整的技术说明见 Pepper 和 Thomas [45] 以及 Hodgkin 等人 [46]。通过将 BADA 定义的巡航校准空速和马赫数替换为从历史数据概率质量函数中采样的值，以概率方式生成巡航速度。

D. 人工智能智能体评估框架

本节介绍为航路空中交通管制领域的人工智能智能体训练、基准测试和评估而开发的评估框架。该框架在基线数字孪生环境的基础上，扩展了快速仿真运行能力、量化性能指标、人在回路（HITL）评估接口以及可扩展的场景生成工具。这些组件共同支持对多种智能体设计进行系统且可复现的分析，包括基于规则的方法 [47, 48], 强化学习 [49] 和基于优化的方法（详情请参阅 Carvell 等人 [11] ）。

用于智能体训练的快速仿真运行：对于交互密集型智能体训练，尤其是通过试错进行学习的强化学习，能够以快速仿真模式运行仿真是一项关键要求。该数字孪生在完整的 LACC 仿真中可达到约 $\times 10$ 实时速度，在单个扇区仿真中可达到 $\times 50$ ，而在最简单的场景中最高可达到 $\times 200$ ，具体取决于交通密度。快速仿真运行在保留与实时模式相同的动态和程序保真度的同时，也支持大规模探索，而不影响运行一致性。

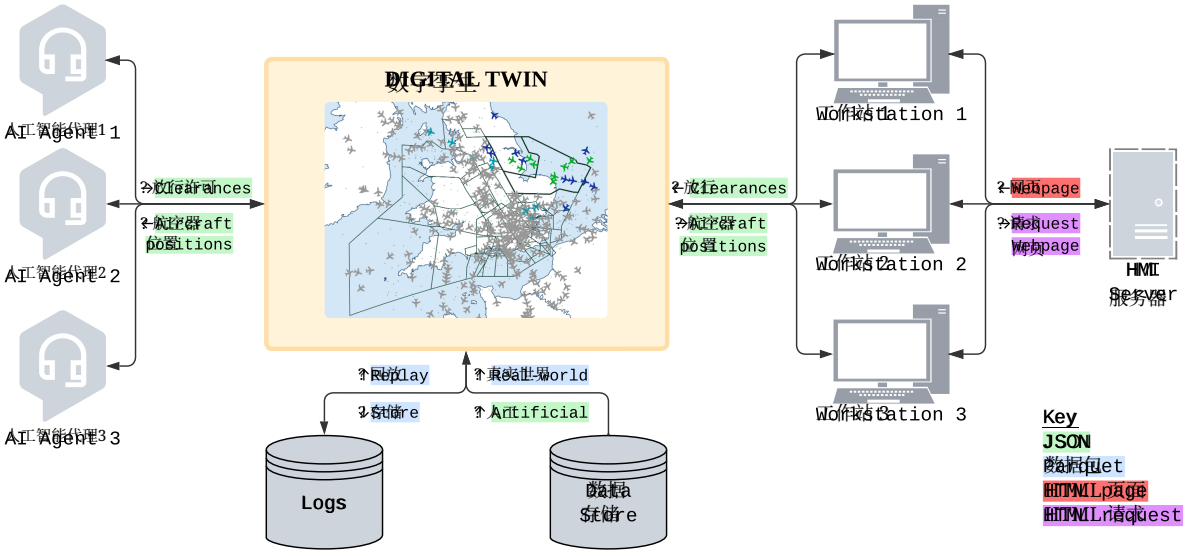


图 3 智能体评估应用程序接口框架示意图。

用于自动评估的定量指标：通过运行时计算的定量指标评估智能体性能，以支持自动评估。这些指标包括安全指标（间隔丧失次数、安全保障指标）、效率指标 （燃油消耗率、英国三维低效评分（3Di） [50]）以及程序性指标（是否遵守协调条件、发布的管制许可数量）。此外，还纳入了支持特定类别人工智能代理开发的指标。例如，为强化学习代理提供了一系列目标，将领域驱动的性能度量与设计梯度及抗利用鲁棒性相结合。尽管这些指标能对战术性能进行客观度量，但无法充分体现运行决策的复杂性，也无法全面衡量智能体意图是否恰当。因此，还通过专门的人在回路评估框架对其进行补充。

人在回路（HITL）运行评估：该人在回路框架使具备资质的空中交通管制员能够观察、查询、干预并回放智能体驱动的仿真。它提供实时可视化工具，包括运行风格雷达显示器、数字飞行进程单，以及仿照实时运行中所用面板设计的操作面板。底层的基于服务器的架构使空中交通管制员和人工智能智能体能够同时与同一仿真实例交互。管制员可以接管单架航空器，查看智能体公开的意图，包括其计划机动和轨迹（若智能体提供），并对代理决策提供定性反馈。图 3 展示了示意图。

可扩展实验的场景生成：为实现受控且可重复的实验，我们实现了一个场景生成模块。该工具能够创建任意数量的参数化场景，这些场景既可基于现实世界的扇区数据，也可基于简化的人工几何结构。参数包括交通密度、冲突几何结构、天气条件和边界配置。所有场景均可通过带种子的随机化复现。

用于训练和基准测试的智能体“健身房”接口：为简化智能体与数字孪生的交互，我们开发了一个专用的、基于 Python 的智能体健身房接口 [51]，支持强化学习，以及基于规则、基于优化和混合式智能体设计。该模块提供了用于逐步环境交互的规范化应用程序接口，定义允许的动作、抽象仿真状态，并公开一组通用的奖励信号和运行时指标。通过将智能体逻辑与模拟器内部机制解耦，并强制采用一致的接口，该健身房降低了智能体开发的门槛，支持快速原型开发，并支持针对异构智能体类型开展可扩展基准测试。这个统一接口还便于建立受控的训练流程、可复现的测试方案，并系统比较智能体在各种场景下的性能。

通过复现 NATS 空中交通管制员评估课程进行结构化评估：除了数据驱动和用户定义的场景外，我们还在数字孪生中复现了 NATS 内部面向受训空中交通管制员的评估课程，以此构建结构化的智能体评估环境。该环境包含一个人工扇区，以及

由 NATS 培训专家设计的手工制作的形成性和总结性训练场景，用于评估核心战术管制能力。轨迹生成子系统复现了 NATS 内部模拟器中的航空器动力学，确保每个场景都能呈现预期的运行挑战和难度特征。在人工培训中，通常需要经过五个月的全日制教学并成功完成该课程，方可进入高级培训阶段。对于人工智能研究而言，这套经监管机构认证的场景集提供了一个受控且经过教学设计的基准测试集，可用于分析智能体的优势、弱点和失效模式，并补充基于现实世界交通数据开展的更广泛测试。Carvell 等人 [11] 对这一智能体评估框架进行了详细讨论。

III. 确保数字孪生的准确性与保真度

数字孪生技术为实现人工智能系统的安全集成提供了一种有前景的方法。然而，其能力也带来了新的挑战。尽管针对某些底层技术已有监管指南，例如在合成训练设备中使用仿真 [52], 但目前尚无专门针对空中交通管理领域数字孪生保证工作的综合框架。当数字孪生能够通过人工智能智能体的决策影响现实世界运行时，这一缺口尤为突出。在这种情况下，鉴于二者交互可能产生涌现行为，目前尚不清楚数字孪生和人工智能智能体应分别还是联合进行保证。

数字孪生中采用机器学习组件（例如第二节C中所述的概率轨迹生成器），使保证问题变得更加复杂。尽管监管机构已开始发布有关在空中交通管理工作流中使用机器学习的高层原则， [53, 54], 但目前尚无针对该领域中机器学习模型或数字孪生的详细公开标准。现有关于数字孪生体验证的学术研究主要提出通用的领域无关框架 [55–57], ，而现有领域专用标准仍然侧重于确定性方法。因此，当前的指导尚不足以支持对本文所述这类概率型机器学习赋能数字孪生体开展稳健的保证活动。

为弥补这些不足，研究者提出了可信与伦理保证（TEA）平台，用于构建针对数字孪生的结构化论证式保证案例 [58]。该平台采用目标结构化表示法（GSN），使用户能够定义顶层目标主张，并将其分解为策略。这些策略由属性主张、背景信息和证据要素提供支持，证据要素可以是定量的，也可以是定性的。证据要素和属性主张本身则基于与其实施相关的假设要素和论证要素构建。值得注意的是，Keane 等人已针对本文讨论的数字孪生的准确性与保真度构建了一个保证案例 [59]。

在本项目中，数字孪生充当人工智能智能体的训练与开发平台。因此，Keane 等人 [59] 提出的保证案例侧重于确立数字孪生本身的准确性与保真度，这是开展运营部署所需安全保证活动的必要前提。因此，本文将数字孪生作为独立系统进行评估，为未来围绕其与人工智能智能体交互的保证工作奠定基础。本文并不复现完整的保证案例，而是提供定量证据，以支持两项核心属性主张：(i) 现实世界扇区的概率仿真准确性；以及 (ii) 对 NATS 的 ATCO评估课程中的形成性练习进行复现时的保真度。这两项主张对于验证数字孪生作为训练与测试环境的适用性都至关重要。

A. 现实世界扇区概率仿真的准确性

本节讨论 Keane 等人 [59] 提出的若干关键属性主张，这些主张涉及数字孪生中概率轨迹预测器的保证。图4展示了 GSN 的一部分，内容从顶层策略开始，该策略将相关属性主张归为一组；在本例中，这些主张涉及孪生体的准确性与保真度。与概率轨迹预测器准确性相关的 P8 属性主张已突出显示*。P8 下的完整树结构十分庞大，其中包含针对每种常见飞机类型和飞行阶段的子属性主张、证据、假设和论证。为便于阅读，图中对树结构进行了精简，仅展示与波音737-800（B738）相关的子属性主张。同样，在下降阶段的子属性主张中，仅展示了 B738 对应的证据、假设和论证。以下各节将介绍可用于支持图4中子属性主张的证据。

*每项属性主张 都有唯一的数字标识符；编号较小的属性主张涉及其他策略 S1 和 S2，例如围绕数据 a 流程。请参阅 Keane 等人 [59]详情请见。

捕捉现实世界的不确定性

属性主张 8.1.1 涉及从概率轨迹预测器中抽取的采样轨迹，在多大程度上能够反映下降中的 B738 飞机真实世界轨迹的变化情况。为支持这一属性主张，我们从概率轨迹预测器中抽取轨迹，并将其分布与由留出轨迹构成的测试数据集进行比较。

图 5 展示了生成的 B738 下降轨迹，右侧面板展示由概率轨迹生成器生成的轨迹。右上面板显示生成轨迹的飞行高度层随时间的变化，右下面板显示生成轨迹的真空速（TAS）随飞行高度层的变化。相比之下，左侧面板展示的是留出的 B738 飞机数据测试数据集。选择这种飞机类型和飞行阶段作为示例，是因为 B738 是 LACC 中最常见的航空器，而下降是最难准确建模的飞行阶段。这是由于航空器性能存在差异，而这些差异主要源于空域和航空公司程序 [22, 46]。目视检查显示，模型均值与数据均值吻合良好；尤其是与 BADA 生成的轨迹（绿色）相比，后者在下降阶段可能存在明显的模型设定错误，原因如上所述。上方图表显示飞行高度层随时间的变化，其中下降轨迹整体上看起来匹配良好。生成轨迹的真空速（TAS）整体分布看起来也匹配良好，不过，由于采用函数主成分分析来降低数据维度，表示各条轨迹的曲线往往较为平滑。

随后，可以通过计算两组轨迹的分布之间的统计距离，生成用于证明概率轨迹预测器准确性的证据。在 Pepper 和 Thomas [45] 以及 Hodgkin 等人 [46] 的研究中，分别针对爬升和下降过程中的爬升顶点（或下降底点），以及指定飞行高度层上的 ROCD 和校准空速（CAS）等量，对概率轨迹生成器的准确性进行了基准测试。这些量的概率分布是根据轨迹集合推断得到的。作为这类证据的示例，图 6 左图展示了 B738 下降至底部所需时间的概率密度函数，右图则展示了相应的累积分布函数。从视觉上看，两种分布具有较好的一致性；这种一致性可以使用柯尔莫哥洛夫–斯米尔诺夫（KS）距离和 Wasserstein 距离等指标进行量化（A8.1.1b 和 J8.1.1b）。图 6 所示分布之间的 KS距离为 0.158，Wasserstein 距离为 31.8 秒。这对应于证据 E8.1.1c。尽管使用这些指标计算出的统计距离较难解释，但未来可以据此证明符合监管机构规定的阈值。读者可参考 Hodgkin 等人 [46]关于 E8.1.1a 和 E8.1.1b（即校准空速（CAS）和下降率）的数据。

改进的轨迹预测的一个

在数字孪生中使用，该预测器可在确定性模式下运行，返回经过历史数据校准的最可能轨迹预测。这称为“均值模式”预测。因为模型中加入 BADA 的推力、阻力和速度项所采用的是数据驱动校正的均值。在均值模式下，智能体和人工管制员可使用该预测器代替 BADA 执行轨迹预测。均值模式预测的优势在于，其轨迹预测模型是使用针对所选空域的特定数据训练的。因此，它能够捕捉因当地空域或运营人程序而产生的航空器性能差异。这与 BADA 等行业标准模型形成对比；在此类模型中，航空器特定参数是根据参考航空器性能参数进行校准的 [60]。

属性主张7涉及这些均值模式预测的准确性。支持子属性主张7.1.1（图4中未显示）的证据，具体涉及这些预测对下降中的 B738 飞机的准确性，其通过以下实验设计生成：

1）使用从数据中获取的航空器位置、高度、管制许可和航线初始化概率数字孪生；2）使用概率轨迹预测器的均值模式，生成场景中每架航空器的仿真轨迹；3）使用 BADA 生成场景中每架航空器的仿真轨迹；4）计算这两组轨迹与真实世界交通样本中航空器未来状态之间的误差，并按飞机类型和飞行阶段进行细分

证据基于一周的数据生成，分别使用 NATS 的 ARTAS 和 NERC 系统获取雷达信息和许可信息。风场取自同一时间段最新的 ECMWF ERA5 数据集。表 2 展示了两组仿真生成的轨迹样本与下降中的航空器的现实世界数据之间的平均绝对误差（MAE）。绿色框表示均值模式下的预测器

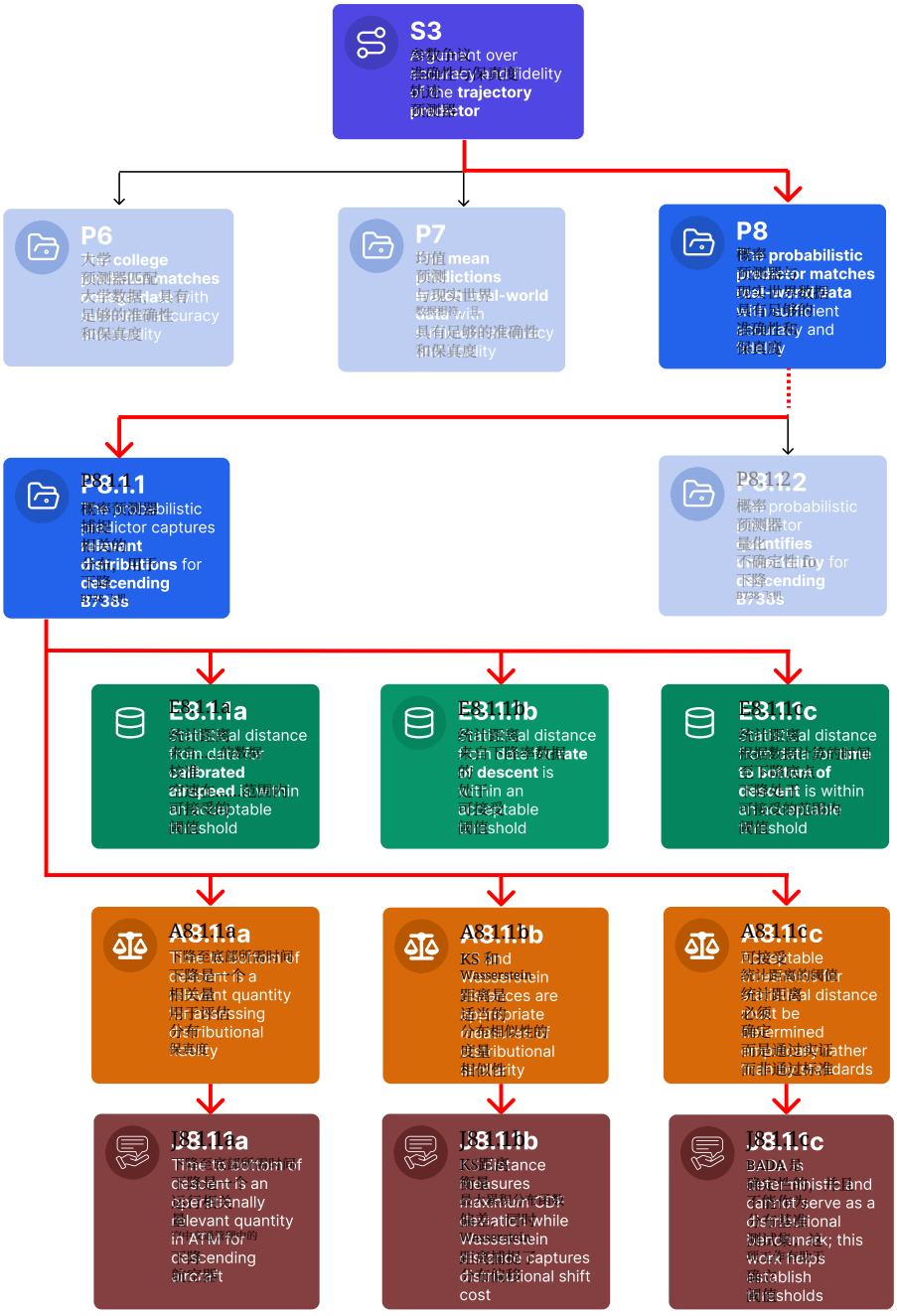


图 4 为 Keane 等人 [59] 提出的保证案例所构建的 GSN 树的一个子集。图中展示了相关策略，并突出显示了与概率轨迹生成器保证任务相关的一些属性主张。

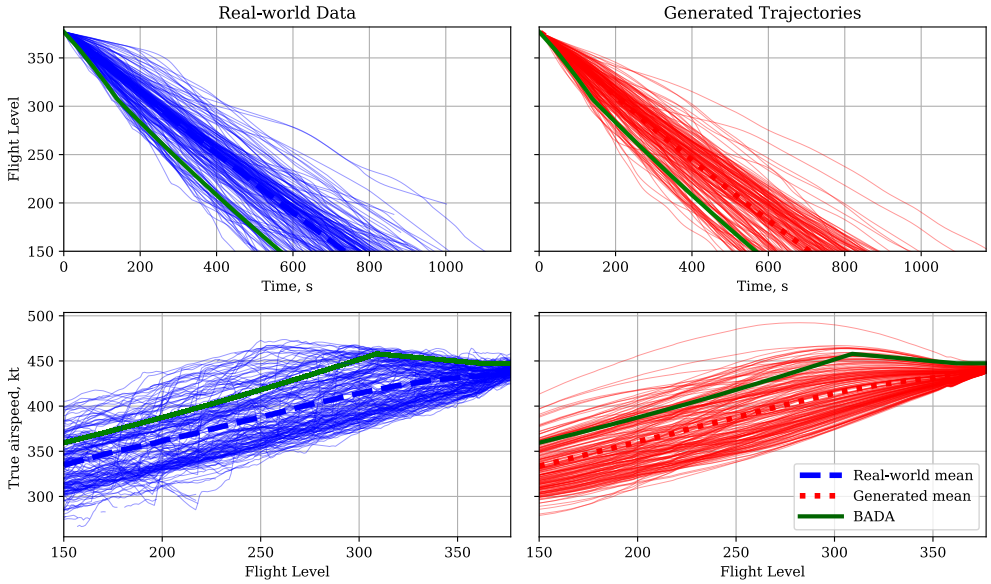
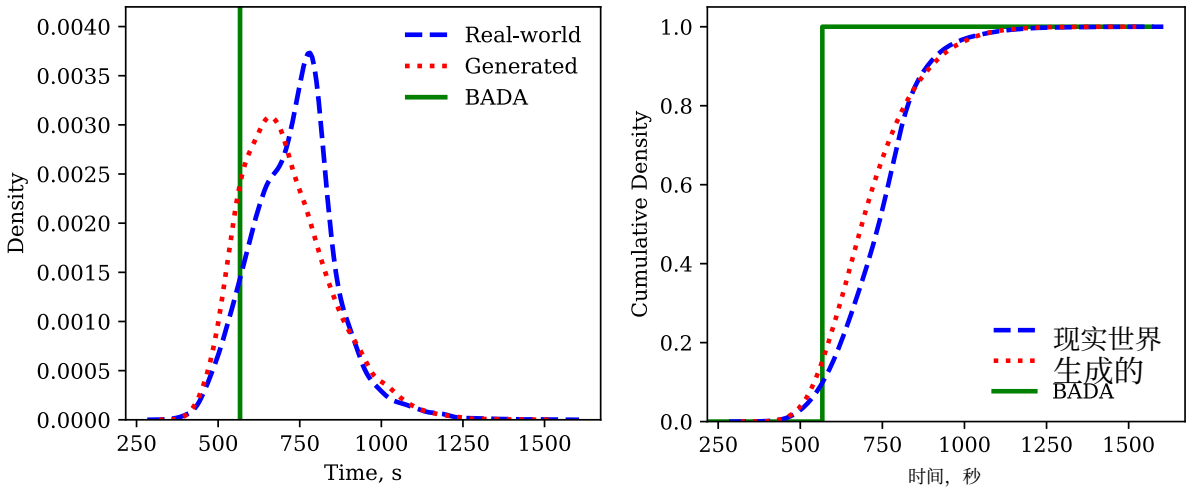


图 5 留出的 B738 飞机数据测试数据集（左）与使用概率轨迹预测器生成的轨迹（右）。



(a) 概率密度函数

(b) 累积分布函数

图 6 B738 现实世界和生成的轨迹下降至底部所需时间的分布。

取得了较低的平均绝对误差 在校准空速和下降率两项指标上均优于 BADA，分别降低了 27% 和 44%，改进显著 t.

表 2 2019年7月1日当周下降的 B738 飞机的平均绝对误差。

飞行阶段	量	数字孪生	BADA	比率
下降	校准空速（节）	16.77	22.95	0.73
下降	下降率（英尺/分钟）	566.05	1009.22	0.56

B. 复现 NATS 的 ATCO评估课程

除仿真现实世界的运行空域外，数字孪生还模拟NATS的ATCO评估课程中的31项形成性练习，这些练习属于Carvell 等人 [11]所述基于能力的框架的一部分。因此，在数字孪生中复现这些练习的保真度，直接影响其作为开发和评估空中交通管制人工智能智能体的平台的适用性。

复现ATCO评估课程中的形成性练习，是支持属性主张6的依据，该主张用于论证轨迹预测器的准确性与保真度（图4）：“轨迹预测器与大学数据相符，且具有足够的准确性与保真度”。保证案例中的子属性主张涉及在数字孪生中复现各项练习的保真度。本节将给出支持这些主张的证据。

运行NATS的ATCO培训学院中的场景时，数字孪生会使用专门调校过的预测器子系统生成航空器动力学，以模拟NATS的内部模拟器。每个场景都使用大学评估所用的内部模拟器运行32次，航空器由受训空中交通管制员操控。因此，每个场景都有多次运行结果可供使用，且每次运行中发出的管制许可各不相同。采用以下实验设计来生成证据：

1) 对大学数据中的每次运行，使用原始日志文件中的航空器位置、高度、管制许可和航线初始化数字孪生；2) 使用数字孪生仿真该练习，并在与大学仿真相同的仿真时间，发出大学日志文件中的管制许可；3) 每次雷达刷新后（每 6 秒一次），计算数字孪生仿真中的航空器与大学数据中同一时刻的相同航空器之间的距离

图 7 是一张散点图，展示了 ATCO评估课程中每项形成性练习的平均误差。每个点表示某项特定练习的误差，该误差是对仿真中的所有航空器、雷达回波点以及大学数据中的所有运行取平均后得出的。大学的教员建议将垂直方向 5 个飞行高度层和水平方向 2.5 海里（NMI）作为阈值；低于这些阈值时，大学数据与数字孪生仿真之间的不匹配对场景中航空器之间的冲突影响可忽略不计，因此可以忽略。如图 7 所示，全部 31 项形成性练习的水平和垂直平均误差均远低于这些阈值，表明数字孪生忠实地再现了训练场景预期的动力学特征和难度特征。

IV. 未来工作与潜在应用

本文聚焦于开发一种概率数字孪生框架，用于训练和评估在航路空域中执行战术控制的人工智能智能体。在实时运行中部署此类智能体，需要进行大量技术验证并投入监管工作，这超出了本文的当前研究范围。相反，我们旨在评估这些技术的成熟度和局限性，为迈向更高水平的空中交通管制自动化制定路线图提供参考。尽管如此，该数字孪生已能复现现实世界运行系统的许多特征，因此可支持多种能在较短期内带来益处的应用。本节将概述这些近期机遇和未来发展路径。

投入运行使用的最大障碍是空中交通管制具有安全关键性，因此理应要求达到极高的保障水平。然而，在直接运行控制之外，仍存在许多近期即可产生重大影响的应用。

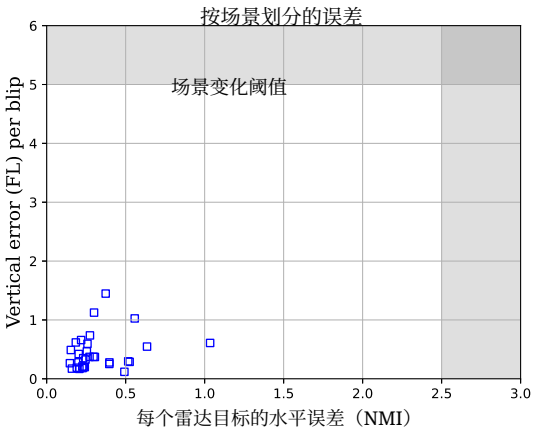


图7 在数字孪生中复现ATCO评估课程的31项形成性练习所得的平均误差，阴影部分表示超过基于教师意见的阈值的区域。

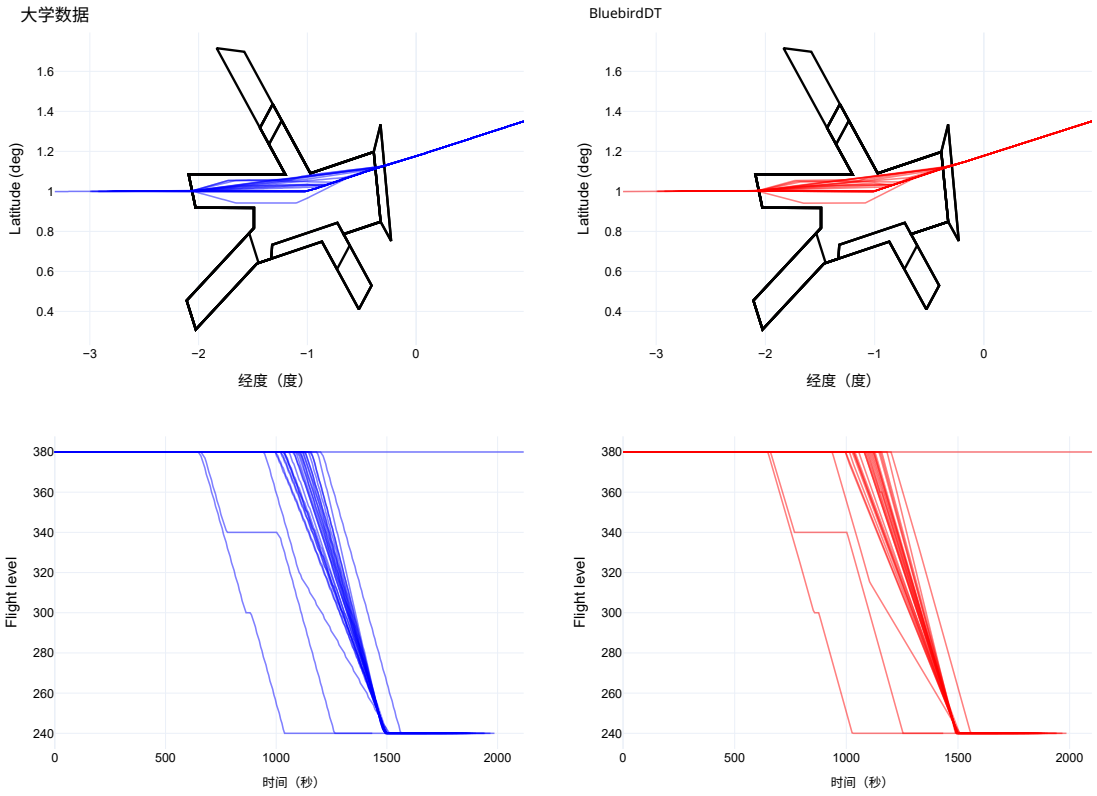


图8 某架航空器在一项练习中经过28次运行的示例。左侧（蓝色）轨迹为大学数据中的轨迹，右侧（红色）轨迹为数字孪生中由轨迹预测器模拟的轨迹。

人工智能智能体开发与正式评估

概率数字孪生为一系列试验奠定了基础。这些试验采用 Carvell 等人所述的基础训练（MBT）课程开展 [11], , 评估多种人工智能智能体是否达到空中交通管制绩效的规范标准。迄今为止，研究人员已利用概率数字孪生开发出五种成熟的人工智能智能体，探索了从基于规则、搜索和基于优化的智能体，到强化学习等黑箱机器学习方法在内的多种方案 [47–49]。

2025年1月和8月开展了两轮MBT试验，对基于规则和基于优化的智能体进行评估。试验遵循MBT评估框架，力求与现实世界中对受训空中交通管制员进行首次模拟器考试的评估流程高度一致。每种智能体均进行了三次30分钟的评估轮次，结果由另一名评估员审议并进行校准，以形成最终判断。数字孪生提供的高保真环境是促成因素之一，使这些试验能够收集有效证据，为智能体开发提供指导。这一点从基于规则的智能体的进步中可见一斑：它在四项评估能力项中最初均被评为“不满意”，而在第二轮试验中，四项中有三项被评为“满意”，接近及格等级。

原型开发与评估

数字孪生提供了运行环境的高保真复现，因此在保留现实世界保真度的同时，成为原型开发和新工具演示的理想平台。例如，Henderson等人 [61]开发了一个图神经网络模型，用于预测扇区内近期的空中交通管制员任务负荷。图9展示了该工具输出的示例：左侧为扇区内航空器的位置，右侧为每架航空器对空中交通管制员造成的估计认知负荷。工具标记为彼此具有直接关联的航空器之间以蓝线相连。此外，该平台还被用于探索天气叠加系统，该系统将实时交通数据与降水率、云量、含水量和对流有效位能等气象测量数据进行融合。这些集成的数据流支持开发数据驱动模型，用于估算天气导致的延误或计算航空器改航的概率。图11展示了该降水叠加的示例。

培训与场景生成

数字孪生的场景生成、自动化指标和回放功能为空中交通管制员培训提供了宝贵支持。为进一步提升灵活性，近期研究已利用大语言模型将文本提示直接转换为可执行场景，详见Gould等人 [62]。

与公众和监管机构的沟通

该系统的简化游戏化版本采用基于键盘的航空器控制，已在公众推广活动中部署，用于向非专业受众展示空中交通管制概念（见图10）。除促进公众参与外，数字孪生还提供了具体实现，有助于与监管机构开展有意义的讨论，从而帮助制定和完善这些新兴系统的监管框架。

空中交通管制数字孪生

尽管人工智能智能体的经认证运行部署仍是一项重大的长期挑战，但开发能够在常规场景中近似人工管制员表现的智能体要容易得多，目前的智能体已经接近这一水平 [11]。当与空域数字孪生结合时，该复合系统构成“空中交通管制数字孪生”，能够对完整的空中交通管制任务进行快速时间尺度的虚拟表征，而不只是呈现物理环境。该平台支持快速并行探索新的程序、空域设计和路径规划策略，并在投入昂贵的人在回路试验之前筛选出有前景的概念。此外，通过联合建模航空器动力学与管制员行为之间的交互作用，该系统还能够提升流量与容量管理能力。

未来发展

尽管数字孪生能够高保真地复现运行环境，但仍存在一些具体限制，制约了其当前的适用范围。目前，详细建模仅限于LACC航路空域，而更具动态性的下层

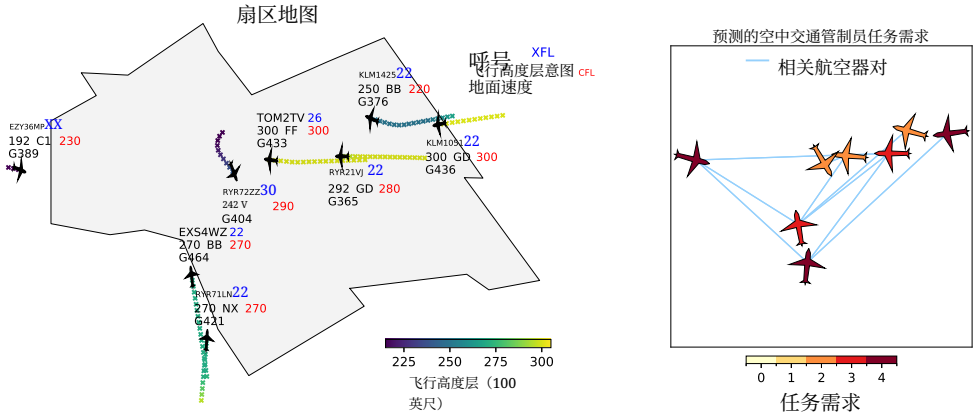


图 9 使用数字孪生开发的基于图神经网络的复杂度分析工具的输出。

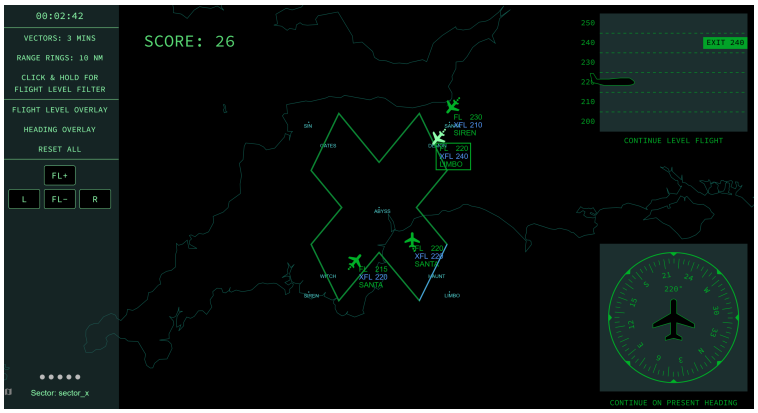


图 10 数字孪生托管的公众参与游戏截图

伦敦终端管制中心（LTCC）空域则采用简化形式表示。此外，概率轨迹预测模型依赖历史数据，尚未捕捉到根据实时雷达航迹推断出的航空器个体性能差异，因此限制了对单架航班进行短期预测的准确性。最后，现有保证案例关注的是数字孪生的保真度，而非完整的运行安全论证，也未涵盖人工智能智能体与系统交互所带来的联合保证挑战。这些限制促使我们提出下文所述的发展方向。

未来的工作将提升数字孪生的保真度并扩大其地理覆盖范围。首要改进是纳入 LTCC 和简化的机场模型，从而实现对全球最复杂、容量最受限的空域之一的端到端呈现。这也意味着要扩展数字孪生支持的管制许可种类，以便准确模拟该运行区域所使用的更庞大的指令集。后续阶段将覆盖英国空域其余部分以及英国管制的北大西洋东部空域。此外，还将扩展场景生成能力，以自动创建侵入事件、无线电故障和客舱失压等异常或紧急事件；目前这些事件仍需手动配置。

概率轨迹预测器方面的进展构成了另一条并行发展路线。尽管现有的特定机型模型在保真度方面优于 BADA，但它未考虑不同航空器的个体性能差异。目前的研究旨在整合单架航空器的数据，以提高短期预测的准确性，并采用我们近期工作 [63] 中所述的方法。

最后，计划于2026年4月开源发布该数字孪生。此公开版本将提供完整系统部分功能，不包含专有或需授权的组件，同时仍将为更广泛的社群提供一个高价值平台，用于研究、实验和创新。

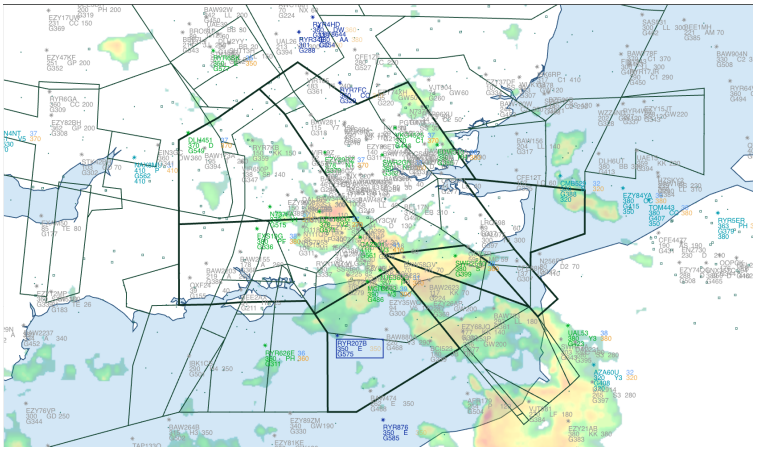


图 11 数字孪生中的降水叠加层。

V. 结论

据作者所知，本文首次提出了一个覆盖伦敦区域管制环境、旨在支持空中交通管制人工智能智能体开发与评估的运行中航路空域概率数字孪生。该系统将高保真、与 AIRAC 对齐的空域结构和扇区划分模型，与历史和实时运行数据源相结合，其中包括监视、飞行计划、管制许可、扇区配置和气象信息。航空器运动既可通过直接轨迹回放建模，也可借助概率物理信息机器学习生成器建模；该生成器能够有效捕捉现实世界运行中固有的不确定性。这构成了本项工作的首要贡献：基于现实世界数据和物理约束构建的运行中航路空域概率数字孪生。

除了复现物理过程外，该系统还为人工智能代理的开发、训练与评估提供了全面的框架。其关键能力包括用于快速实验的快速仿真运行、一套量化性能指标，以及用于基准测试的标准化“gym”接口。人在回路功能允许具备资质的管制员观察、查询并干预由智能体主导的场景；同时，集成 NATS 学员评估课程中的形成性练习，可在受控条件下对人工智能智能体开展结构化的基于能力的评估。这些要素共同构成了第二项贡献：一个统一框架，支持人工智能代理从原型开发到系统化评估的完整生命周期。

鉴于空中交通管制的安全关键特性，以及机器学习赋能的概率数字孪生的新颖性，保证是本研究的核心关注点。我们使用可信与伦理保证平台，构建了一个目标结构化表示法保证案例，以论证孪生体的准确性与保真度。在此框架下，我们提供了量化证据，表明概率轨迹预测器对现实世界航空器行为的复现准确性高于基准 BADA 模型；同时，复现的练习能够充分保留运行意图，足以支持严谨的训练与评估。这构成本研究的第三项贡献：在结构化保证论证中，对数字孪生进行量化验证。

该数字孪生已支持人工智能代理开发、原型评估、人机协同研究以及空中交通管制员培训等应用。它展示了数字孪生技术在空中交通管理中的应用实例，可用于在该技术的运营实施指南不断完善的过程中，为与监管机构的沟通提供参考。正在开展及未来的工作将扩展系统范围，使其涵盖终端区管制和更广泛的英国空域；通过实时数据同化增强轨迹模型；并通过开源发布扩大社区访问。

总而言之，本文提出的概率数字孪生提供了一个逼真、以数据为驱动且经过定量验证的环境，可用于探索空中交通管制领域更高水平的自动化。通过支持人工智能智能体在逼真的不确定性条件下接受训练和评估，并提供符合实际运行情况的交通流量以及可交互的人类监督，该环境为理解此类智能体何时、何地以及如何才能安全有效地助力未来空中交通管理系统奠定了实践基础。

资金来源

本文所述工作由资助项目“EP/V056522/1：推进概率机器学习，以实现更安全、更高效且更可预测的空中交通管制”（又称 Project Bluebird）提供资金支持。该项目是 NATS、艾伦·图灵研究所和埃克塞特大学之间的英国工程与物理科学研究委员会繁荣合作伙伴关系项目。

致谢

我们谨向艾伦·图灵研究所的研究工程组、埃克塞特大学的研究软件工程师组，以及 NATS 的软件工程师们表示感谢。他们是 Project Bluebird 团队的重要成员，为数字孪生代码库的交付作出了贡献。

参考文献

[1] 欧盟航空安全局（EASA），《*2022*年欧洲航空环境报告》，2022年。网址：https: // www.easa.europa.eu/eco/eaer.[2] 英国交通部，《喷气式航空净零战略：实现*2050*年航空净零排放》，2022年。网址：https://www.gov.uk/ government/publications/jet-zero-strategy-delivering-net-zero-aviation-by-2050.[3] 美国联邦航空管理局，下一代航空运输系统（*NextGen*），2023年。网址：https://www.faa.gov/ nextgen.[4] SESAR联合事业，《实现数字欧洲天空》，2021年。网址：https://www.sesarju.eu/.[5] SESAR联合事业，《*SESAR*解决方案目录（第四版）》，2021年。网址：https://www.sesarju.eu/activities- solutions.[6] 欧洲航空安全组织，《*ARGOS* 概况介绍》，2023年。网址：https://www.eurocontrol.int/publication/argos-factsheet.[7] 欧盟航空安全局，《*EASA*人工智能（*AI*）概念文件：*1*级和*2*级机器学习应用指南》，2024年。网址：https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/ easa-artificial-intelligence-concept-paper-issue-2.[8] Munoz, C. A.，“空中交通管理中的形式化方法：无人驾驶航空器系统案例（特邀演讲）”，国际计算理论方面专题讨论会，施普林格，2015年，第58–62页。[9] Cai, J., Deng, W., Guang, H., Wang, Y., Li, J. 和 Ding, J.，“自动驾驶车辆测试的数据驱动场景生成综述”，《*Machines*》，第10卷，第11期，2022年。网址：https://doi.org/10.3390/machines10111101.[10] Ding, W., Xu, C., Arief, M., Lin, H., Li, B. 和 Zhao, D.，“安全关键驾驶场景生成综述——方法论视角”，*IEEE*智能交通系统汇刊，第24卷，第7期，2023年，第6971–6988页。网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/10089194.[11] Carvell, B., Thomas, M., De Ath, G., Everson, R., Pepper, N., Keane, A. 和 Cannon, R.，“基于受监管评估框架的人在回路测试：用于空中交通管制的人工智能智能体”，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[12] Pyrgiotis, N., Malone, K. M. 和 Odoni, A.，“机场网络内的延误传播建模”，《交通研究*C*辑：新兴技术》，第27卷，2013年，第60–75页。网址：https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.05.017.[13] Sridhar, B., Wang, Y., Klein, A. 和 Jehlen, R.，“美国全国、区域和机场层面的航班延误与取消建模”，第八届美欧空中交通管理研发研讨会，纳帕，加利福尼亚州（美国），2009年。网址：https://api.semanticscholar.org/CorpusID:33815016.[14] Sandamali, G. G. N., Su, R., Zhang, Y. 和 Li, Q.，“空中交通流量管理中考虑起飞时间不确定性的航班路径规划与排班”，*2017*年第*13*届*IEEE*国际控制与自动化会议（*ICCA*），2017年，第301–306页。网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/8003077.[15] Wanke, C., Callaham, M., Greenbaum, D. 和 Masalonis, A.，《衡量交通流量管理应用中空域需求预测的不确定性》，2012年。网址：https://doi.org/10.2514/6.2003-5708.[16] Pfeil, D. M. 和 Balakrishnan, H.，“对流天气下稳健终端区航路的识别”，交通科学，第46卷，第1期，2012年，第56–73页。网址：http://www.jstor.org/stable/41432825。

[17] Matthews, M. 和 DeLaura, R.，“对流天气规避模型中航路天气规避场的评估与解释”，第*10*届*AIAA*航空技术、集成与运行（*ATIO*）会议，2010年，第9160页。[18] 欧洲航空安全组织，《异常/紧急情况下管制员培训指南》，2003年。网址：https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/15.pdf.[19] Sun, J., Ellerbroek, J. 和 Hoekstra, J. M.，“基于贝叶斯推断方法的飞机初始质量估算”，《交通研究*C*辑：新兴技术》，第90卷，2018年，第59–73页。网址：https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.022.[20] Hodgkin, A., Pepper, N. 和 Thomas, M.，“采用物理信息机器学习方法，将飞机轨迹预测与气象数据相结合”，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[21] Jackson, M. R., Zhao, Y. J. 和 Slattery, R. A.，“空中交通管理中轨迹预测的敏感性”，《制导、控制与动力学杂志》，第22卷，第2期，1999年，第219–228页。网址：https://doi.org/10.2514/2.4398.[22] Pepper, N., De Ath, G., Carvell, B., Hodgkin, A., Dodwell, T., Thomas, M. 和 Everson, R.，“用于四维飞机轨迹生成的扇区特定概率方法”，《交通研究*C*辑：新兴技术》，第179卷，2025年，第105291页。网址：https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105291.[23] Zeng, W., Chu, X., Xu, Z., Liu, Y. 和 Quan, Z.，“民用航空飞机四维轨迹预测综述”，《航空航天》，第9卷，第2期，2022年。网址：https://doi.org/10.3390/aerospace9020091.[24] Hoekstra, J. M. 和 Ellerbroek, J.，“Bluesky空中交通管制模拟器项目：开放数据与开源方法”，第七届航空运输研究国际会议论文集，第131卷，美国联邦航空管理局/欧洲航空安全组织，美国华盛顿特区，2016年，第132页。网址：https://pure.tudelft.nl/ws/files/10083831/Hoekstra_BlueSky_project.pdf.[25] Loft, S., Hill, A., Neal, A., Humphreys, M. 和 Yeo, G.，“ATC-lab：用于实验室的空中交通管制模拟器”，《行为研究方法、仪器与计算机》，第36卷，第2期，2004年，第331–338页。网址：https://doi.org/10. 3758/BF03195579.[26] Bilimoria, K. D., Sridhar, B., Grabbe, S. R., Chatterji, G. B. 和 Sheth, K. S.，“FACET：未来空中交通管理概念评估工具”，《空中交通管制季刊》，第9卷，第1期，2001年，第1–20页。网址：https://doi.org/10.2514/atcq.9.1.1.[27] 欧洲航空安全组织，《欧洲航空安全组织仿真能力与实验平台》，无日期。网址：https://www.eurocontrol.int/simulator/escape.[28] 欧洲航空安全组织，《早期演示与评估平台》，无日期。网址：https://www.eurocontrol.int/simulator/ edep.[29] Molina, M., Carrasco, S. 和 Martin, J.，“用于设计未来欧洲空中交通管理系统的基于智能体的建模与仿真：Cassiopeia的实践经验”，智能体与多智能体系统实际应用国际会议，施普林格，2014年，第22–33页。网址：https://doi.org/10.1007/978-3-319-07767-3_3.[30] VATSIM，《国际在线航空网络》，无日期。网址：https://vatsim.net/.[31] ATC-SIM，《基于浏览器的空中交通管制模拟游戏》，无日期。网址：https://atc-sim.com/.[32] openScope，《空中交通管制模拟器》，2022年。网址：www.openscope.io.[33] Katsoulakis, E., Wang, Q., Wu, H., Shahriyari, L., Fletcher, R., Liu, J., Achenie, L., Liu, H., Jackson, P., Xiao, Y. 等，“健康领域的数字孪生：范围综述”，《*NPJ*数字医学》，第7卷，第1期，2024年，第77页。网址：https: // doi.org/10.1038/s41746-024-01073-0.[34] Yu, W., Patros, P., Young, B., Klinac, E. 和 Walmsley, T. G.，“用于工业能源管理的能源数字孪生技术：分类、挑战与未来”，《可再生与可持续能源评论》，第161卷，2022年，第112407页。网址：https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407.[35] Wu, J., Wang, X., Dang, Y. 和 Lv, Z.，“交通基础设施中的数字孪生与人工智能：分类、应用及未来研究方向”，《计算机与电气工程》，第101卷，2022年，第107983页。[36] Kušić, K., Schumann, R. 和 Ivanjko, E.，“交通数字孪生：交通数据流与仿真的实时协同，实现高速公路动态的虚拟化”，《先进工程信息学》，第55卷，2023年，第101858页。网址：https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101858。

[37] Kim, M. U.,《新太空时代航空航天领域数字孪生综述》，*2022*年第*13*届信息与通信技术融合国际会议（*ICTC*），2022年。网址：https://doi.org/10.1109/ICTC55196. 2022.9952929.[38] Li, C., Mahadevan, S., Ling, Y., Choze, S., and Wang, L.，《用于飞机机翼健康监测数字孪生的动态贝叶斯网络》，*AIAA*期刊，第55卷，第3期，2017年，第930–941页。网址：https://doi.org/10.2514/1.J055201.[39] Kapteyn, M. G., Pretorius, J. V., and Willcox, K. E.，《支持大规模预测性数字孪生的概率图模型基础》，《自然计算科学》，第1卷，第5期，2021年，第337–347页。网址：https://doi.org/10.1038/s43588- 021-00069-0.[40] Mahadevan, S., Sisson, W., and Karve, P.，《用于损伤感知旋翼机机动的概率数字孪生》，*AIAA SCITECH 2025* 论坛，2025年。网址：https://doi.org/10.2514/6.2025-2817.[41] Souanef, T., Al-Rubaye, S., Tsourdos, A., Ayo, S., and Panagiotakopoulos, D.，《面向未来空域的数字孪生开发》，《无人机》，第7卷，第7期，2023年。网址：https://doi.org/10.3390/drones7070484.[42] 欧洲航空安全组织，*ARTAS*：空中交通管理监视跟踪器和服务器，无日期。网址：https://www.eurocontrol. int/product/artas.[43] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N.，《ERA5全球再分析》，《皇家气象学会季刊》，第146卷，第730期，2020年，第1999–2049页。网址：https://doi.org/10.1002/qj.3803.[44] Nuic, A.，《飞机数据基础库（BADA）3.10版用户手册》，《大气》，第2010卷，2010年，第001页。网址：http://maartenuijtdehaag.com/bada310-user-manual.pdf.[45] Pepper, N., and Thomas, M.，《基于雷达数据学习爬升飞机的生成模型》，《航空航天信息系统杂志》，第21卷，第6期，2024年，第474–481页。网址：https://doi.org/10.2514/1.I011359.[46] Hodgkin, A., Pepper, N., and Thomas, M.，《基于物理信息机器学习方法的飞机下降概率仿真》，*arXiv*，2025年。网址：https://arxiv.org/abs/2504.02529.[47] Mohamed, E., Carvell, B., Procter, R., De Ath, G., and Everson, R.，《迈向空中交通管制的透明人工智能》，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[48] Kent, P., De Ath, G., Carvell, B., Everson, R., Layton, M., and Hart, A.，《面向战术空中交通管制的未来能力代理》，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[49] Carvell, B., De Ath, G., Benjamin, E., and Everson, R.，《在线动作堆叠提升空中交通管制强化学习的性能》，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[50] Nutt, C.，《NATS燃油效率指标》，技术报告，NATS，2012年。网址：https://www.nats.aero/wp-content/uploads/2012/03/fuelEfficiencyMetric.pdf.[51] Brockman, G., Cheung, V., Pettersson, L., Schneider, J., Schulman, J., Tang, J., and Zaremba, W.，《OpenAI Gym》，arXiv，2016年。网址：https://arxiv.org/abs/1606.01540.[52] 欧盟航空安全局，*ATCO.OR*部分的可接受的符合性方式（*AMC*）与指导材料（*GM*）：空中交通管制员培训机构及航空医学中心的要求，2015年。网址：https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/annex_iii_to_ed_decision_2015-010-r.pdf.[53] CAA，*CAP2970*：建立对人工智能的信任，2024年。网址：https://www.caa.co.uk/publication/download/21120.[54] 美国联邦航空管理局，《人工智能安全保障路线图》，2024年。网址：https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/step/roadmap_for_AI_safety_assurance.[55] Hua, E. Y., Lazarova-Molnar, S., and Francis, D. P.，《数字孪生验证：挑战与机遇》，*2022*年冬季仿真会议（*WSC*），2022年，第2900–2911页。网址：https://doi.org/10.1109/WSC57314.2022.10015420.

[56] Wagg, D., Worden, K., Barthorpe, R., and Gardner, P., 《数字孪生：工程动力学应用中建模与仿真的最新进展及未来方向》，*ASCE-ASME*《工程系统风险与不确定性杂志》*B*辑：机械工程，第6卷，第3期，2020年，第030901页。网址：https://doi.org/10.1115/1.4046739.[57] 美国国家科学、工程与医学科学院，《数字孪生基础研究缺口与未来方向》，美国国家科学院出版社，华盛顿特区，2024年。[58] Burr, C., Anderson, J., Arana, S., Block, D., Byrne, J., Goodman, R., Gavidia-Calderon, C., Habli, I., Moreira, N., Niederer, S., Polo, N., and Wagg, D., 《数字孪生的可信与伦理保证：将双子原则付诸实践》，技术报告，艾伦·图灵研究所，2024年12月。网址：https://zenodo.org/records/14259252.[59] Keane, A., Pepper, N., Burr, C., Hodgkin, A., Korna, J., and Thomas, M., 《确保英国航路空域人工智能赋能数字孪生准确性与保真度的框架》，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。[60] Nuic, A., Poles, D., and Mouillet, V., 《BADA：面向当前及未来空中交通管理系统的先进飞机性能模型》，《自适应控制与信号处理国际期刊》，第24卷，第10期，2010年，第850–866页。网址：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acs.1176.[61] Henderson, E., Gould, D., De Ath, G., Everson, R., and Pepper, N., 《基于图神经网络的空中交通管制员任务负荷：一种空域复杂度可解释方法》，*AIAA*航空论坛与*ASCEND 2025*，2025年，第3590页。网址：https://doi.org/10.2514/6.2025-3590.[62] Gould, D. S. W., De Ath, G., Carvell, B., and Pepper, N., 《AirTrafficGen：利用大语言模型生成可配置的空中交通场景》，*arXiv*，2025年。网址：https://arxiv.org/abs/2508.02269.[63] Pepper, N., Thomas, M., and Conti, Z. X., 《用于航路空域自适应飞机轨迹预测的快速代理模型》，*AIAA SCITECH 2026* 论坛，2026年。