基于受监管的评估框架对空中交通管制人工智能智能体进行人在回路测试

BenCarvell* 和 Marc Thomas†*NATS*，怀特利，汉普郡 *PO15 7FL*，英国

Andrew Pace‡ 和 Christopher Dorney§*NATS*，怀特利，汉普郡 *PO15 7FL*，英国

GeorgeDeAth¶ 和 Richard Everson‖埃克塞特大学，埃克塞特，英格兰 *EX4 4QJ*，英国

NickPepper** 和 Adam Keane††艾伦·图灵研究所，伦敦，英格兰 *NW1 2DB*，英国

SamuelTomlinson‡‡ 和 Richard Cannon§§*NATS*，怀特利，汉普郡 *PO15 7FL*，英国

arXiv:2601.04288v1 [cs.HC] 7 Jan 2026

我们提出了一个严谨的、人在回路的评估框架，用于评估人工智能智能体执行空中交通管制任务的绩效。该框架以监管机构认证的基于模拟器的课程为基础，该课程用于培训和考核现实世界中的见习管制员。通过利用依法监管的评估，并让资深人类教员参与评估流程，我们的框架能够更真实、更准确地衡量人工智能的绩效。本研究弥补了现有文献中的一个关键空白：学术界对空中交通管制的描述往往与实际运行环境的复杂性不相符。此外，本研究还通过使机器绩效与人类评估目标保持一致，为未来有效的人机协作范式奠定了基础。

I. 引言

AIR 空中交通管制（ATC）是一项复杂且安全关键的决策任务，其执行过程中存在显著的认知不确定性 [1]。空中交通管制员（ATCO）向航空器发布强制性指令，以维持并确保航空器之间的安全，同时促进符合所有相关扇区程序的高效飞行轨迹 [2]。尽管目前世界各地的运行中广泛使用各种支持系统，但尚无系统能够自动化管制员的决策过程。空中交通管制仍是一项人工任务，现有工具能够识别航空器之间的潜在冲突并预测其飞行路径，但不会建议应采取哪些行动。

A. 先前工作：空中交通管制自动化研究

这项任务的自动化已成为工业界和学术界五十多年来的研究课题。早期的尝试采用基于规则的启发式系统来解决冲突并引导航空器 [3–5], 而近年来，深度强化学习等前沿人工智能技术 [6–8] 以及一系列多智能体方法 [9, 10] 已被应用，人们希望借此推动决策自动化迈向真实领域应用。

*共同研究员，Project Bluebird，NATS
†共同研究员，Project Bluebird，NATS
‡空中交通管制员及组主管，伦敦终端管制中心，NATS §初始培训经理，NATS
¶讲师，计算机科学系，埃克塞特大学
‖首席研究员，Project Bluebird，埃克塞特大学和艾伦·图灵研究所
**共同研究员，Project Bluebird，艾伦·图灵研究所
††研究助理，Project Bluebird，艾伦·图灵研究所
‡‡高级研究员，Project Bluebird，NATS §§
首席研究员，Project Bluebird，NATS

尽管历经半个世纪的研究，空中交通管制中的决策自动化似乎仍遥不可及。目前最接近这一目标的是 EUROCONTROL 正在开发的 ARGOS 原型系统 [11], ，但该系统尚未投入运行，其解决方案建立在启发式方法之上，而非最先进的人工智能技术。

我们认为，进展缓慢的一个重要原因在于：前沿学术研究对空中交通管制问题的表征，与空中交通管制运行的现实情况存在根本性错位。为了适配所选技术，研究往往会进行简化；因此，强大的基于机器学习的方法仍无法真正贴合领域实际。这也阻碍了未来更深入的人机协作理念，因为所执行的任务从根本上说并不相同。

B. 相关研究：人在回路与课程驱动评估

对安全关键型自主系统进行评估，需要采用超越简单数值指标的方法。Crootof 等人 [12] 强调，监管框架要求进行人在回路（HITL）验证，以应对高风险自动化中现实世界的复杂性。Wu 等人 [13] 阐述了人在机器学习过程中的参与如何通过将专家知识融入标注数据、开展领域驱动的奖励工程，以及在建模过程中纳入人类经验，显著提升绩效。为了更好地与以人为中心的绩效衡量指标保持一致，研究人员考察了将成熟的职业资格考试课程用作评估基准。近期研究已成功使用文本类标准（如美国医学执照考试 [14] 和统一律师资格考试（UBE） [15],）对大语言模型进行测试；然而，物理控制任务需要更动态的评估环境。自动驾驶领域通过基于场景的安全评估回应了这一需求。Riedmaier 等人 [16] 的研究详细说明了这些方法如何将运行域分解为功能场景，为安全保障提供结构化方法，并与形式化验证方法互为补充。

C. 研究动机与贡献

本文展示了一种框架，通过利用 NATS 为新入训的受训空中交通管制员提供的基础 培训课程，解决空中交通管制研究表征中的不一致问题。通过***Project Bluebird****，我们构建了英国空中交通管制环境的概率数字孪生，并将其称为 BluebirdDT [17]。该系统具有可配置性，可模拟多种空域、航空器性能模型和动作空间。我们以这一数字孪生作为基础环境，对 NATS 用于培训人类空中交通管制员的评估框架进行了改造，使其能够用于机器。我们并未采用空中交通管制的完整运行定义，而是采用 NATS 空中交通管制学院基础课程所教授的基本原理，图 1 展示了这些原理的背景。该课程以英国空中交通管制监管机构英国民航局（CAA）的核心监管要求为基础，提供了一个复杂度低于完整运行空中交通管制挑战、但又能像多数学术简化方案所缺乏的那样，涵盖任务核心要素的框架。

通过人在回路评估，我们终于能够采用更真实、更符合领域特点的进展衡量方式，并在各种自动化技术之间进行比较。我们认为，空中交通管制任务的复杂性，以及将优秀管制实践转化为定量指标的难度，决定了必须采用人在回路的方法。这种方法有别于通过场景生成模型进行验证的方式；后者已广泛用于验证自动驾驶技术（例如，参见 [16]）。

我们介绍基础课程所教授的能力项、支撑这些能力项的法律要求，以及我们如何将这套课程体系转化为“机器基础训练”框架。我们讨论了利用该框架进行智能体评估的试验结果，并阐述未来如何借助该框架为管制领域构建准确反映领域特点的成效衡量标准，从而提升研究人员有效参与这一极具挑战性领域的能力。

II. 方法论：机器基础训练（MBT）

通过与在职空中交通管制员和教员开展为期一年的系列研讨会，我们设计了一个用于智能体训练与评估的人在回路框架，并将其称为机器基础训练（MBT）。该框架旨在将 NATS 初始空中交通管制培训课程的课程体系调整为基于智能体的方法，在尽可能高保真地重现培训与评估流程的同时，为绩效提供具体指导。本节将概述作为 MBT 基础的基础课程、该课程的法律与监管基础，

*Project Bluebird 是由 NATS、艾伦·图灵研究所和埃克塞特大学共同参与的英国工程与自然科学研究委员会（EPSRC）繁荣伙伴关系项目 .

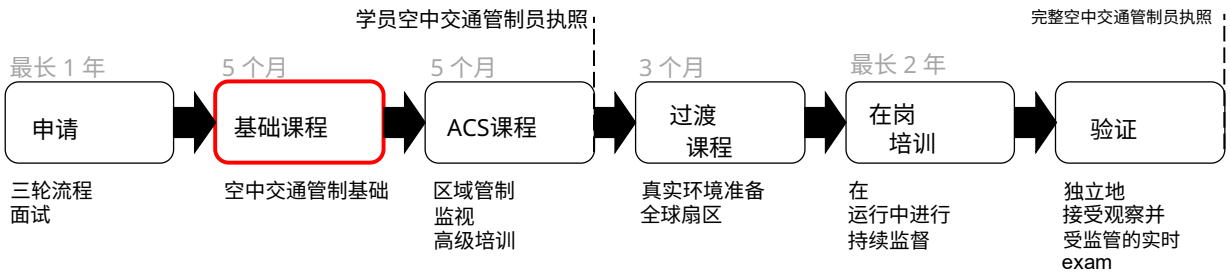


图1 在 NATS 成为持证空中交通管制员的培训进程 [18]。

我们为将该课程体系调整为适用于机器的课程而制定的智能体开发与评估范围，以及在此框架内测试智能体所采用的流程。

A. “区域基础”培训课程

“区域基础”培训课程为期5个月，由NATS培训学院面向所有新入训空中交通管制员开设。课程包括一套全面的课堂培训，内容涵盖空中交通管制概念，例如法律考量、天气、航空器性能、管制技术、无线电话纪律等。除了课堂学习外，学员还会在指导员的指导下完成约30项模拟机练习。这些练习在高仿真的空中交通管制模拟机上进行，由一名“模拟飞行员”在练习中扮演航空器飞行员的角色。指令通过语音通信发布，以模拟现实世界中的无线电通信。这些练习使用一个虚构的空域扇区“Medway”。Medway扇区经过设计，能够准确反映各种航路环境，并构建具有挑战性的场景。学员使用雷达监控空中交通管制态势，并通过纸质飞行进程单记录所发布的指令、发现航空器之间的潜在冲突，以及解读航空器特性。

这些“形成性”练习均会评分，以便根据表1所示的6个能力领域跟踪学员的进度。

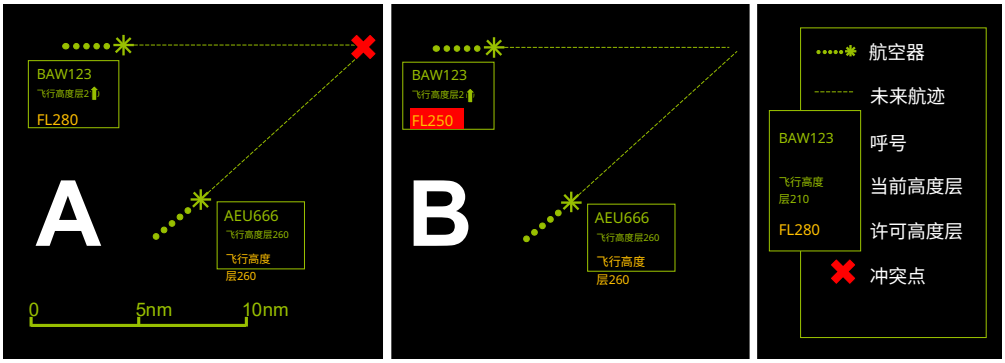


图2 平面图中的安全性判断。在场景 A（左图）中，BAW123 与 AEU666 存在冲突，且未确保横向或垂直间隔，这意味着存在未来碰撞风险。在场景 B（中图）中，BAW123 已爬升至比 AEU666 低 10 个飞行高度层（1000 英尺）的高度，从而确保了两者之间的安全。

B. 培训的法律基础

作为一个受监管行业，NATS 在提供培训时必须满足一系列法律要求，这些要求通过一系列文件予以落实，如图4所示。英国法规 2015/340 [20]包含培训的全部法律要求；CAP794 [21], 则对这些要求进行编排并补充细节，将英国法规中的目标按空中交通管制专业领域归类。基础课程侧重于区域管制，这些要求被映射到一份内部文件《验证与交叉引用索引》中，该文件描述了

表1 基础练习中评估的能力领域。

能力	描述
安全	安全是空中交通管制的核心能力。在基础课程中，航空器必须保持以下间隔：水平间隔至少为5海里，或垂直间隔至少为1000英尺。然而，安全的管制所涵盖的内容远不止这些最低标准。一种管制方法不仅教授如何达到这些标准，还试图确保即使没有进一步的指令，也始终能够达到这些标准。这种故障安全运行方法是所有所教授的管制技术的基础。安全管制技术的一个示例见图2
管制	管制评估学员能否有效地向其管制下的航空器发出指令以实现扇区目标，例如维持并确保安全、实现约定的离场协调，并确保航空器处于扇区空域范围内。实现这一目标的管制技术包括准确的引导航向、及时的爬升和下降指令，以及对航空器性能的了解。图3展示了一个示例。如图3所示。
规划	规划涵盖学员为管理扇区制定有效计划的能力。主动规划会考虑未来的交通流模式及其相互作用，从而实现更高效的管制，并有助于达成扇区目标。
协调	协调是与相邻扇区达成并履行协议的过程关于各扇区之间交通流的呈现和移交，规定移交点以及待移交航空器的高度层。所有航空器都必须在进入和离开扇区时进行协调，并及时达成这些协议并予以遵守。
通信	通信评估学员与航空器进行有效通信的能力。其中包括按照 CAP413无线电话手册 [19], 准确、自信地传达通信术语，以及有效管理扇区频率，回应飞行员请求，并在适当情况下合并指令。
人为因素	人为因素涵盖学员对培训的态度、面对错误时的韧性，以及其他可能无法归入上述所述能力项。

对法规目标的覆盖情况。在这份文件中，各项目标被分配至教学和评估方法。对于 MBT，我们只考虑可通过实践评估衡量的目标，共计39项。在此基础上，我们可以进一步界定能够评估的范围。这39项目标大致涵盖了 II.A节中讨论的6个能力领域。实践评估未涵盖的其他目标包括航空法、对空中交通管制系统的理解以及其他以知识为基础的要素；这些内容通过笔试和口试进行评估，因此不属于本框架的范围。有关范围界定的更多详情，请参见 II.C节。

C. 智能体开发与评估的范围

要有效评估智能体是否符合基础课程，必须明确界定哪些行为属于评估范围、哪些不属于评估范围。如第 II.B 节所述，NATS 内部的验证与交叉引用索引（VCRI）列出了 39 项通过实践评估进行衡量的目标。这些目标正式对应监管义务，如图4所示，并以表1所列六个核心能力领域相关要素的形式呈现。这些要素体现了相关能力项，例如“识别间隔问题”或“了解航空器之间的相对速度”。总之，我们关注与安全、管制、规划和协调相关的目标，目前将通信和人为因素排除在评估范围之外。我们仍会模拟有效通信，但这是通过模拟器 API 实现的，而非评估智能体在通信术语和无线电电话通信方面的能力。将人为因素考量转化为适用于机器的形式，将是未来工作的关键部分。对于仅进行部分评估的目标，我们会标记为“辅助”，例如协调方面：我们为航空器设定目标条件，同时仍

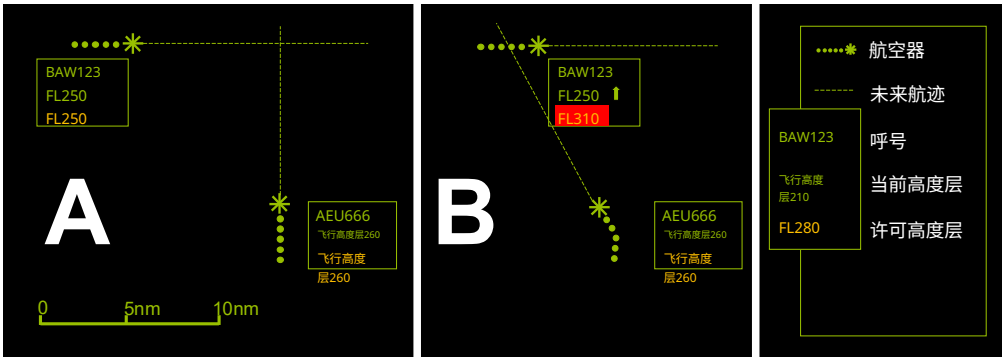


图 3 平面图中有效管制的判断。在场景 A（左）中，由于可能与 AEU666 发生冲突，BAW123 无法爬升。在场景 B（中）中，AEU666 已转向后方，因此 BAW123 可以爬升而不会有碰撞风险。

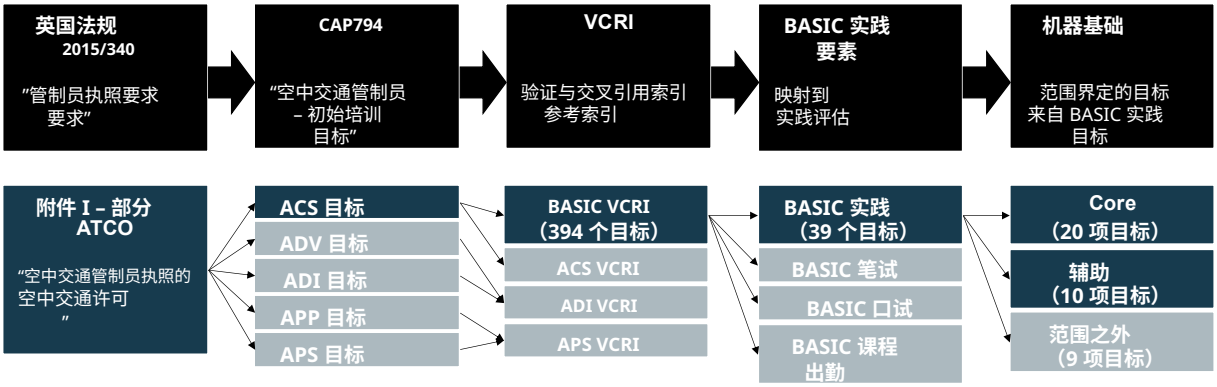


图4 从英国民航局顶层法规到机器基础要求的逐层分解 **c.**

监控智能体是否成功满足这些条件。

范围界定的最后阶段，是将 NATS 内部的这些培训目标转化为更明确、更细致的描述，说明哪些行为属于范围之内，哪些属于范围之外。我们主要参考国际民用航空组织的《空中交通管制员胜任力培训与评估手册》 [22]，以获取对管制任务更细致的描述。目标的选取与完善，是通过与在职空中交通管制员及现任指导员开展的一系列 15 场研讨会确定的。这些研讨会旨在尽可能保留广泛的范围，同时剔除那些会增加智能体设计工程复杂度、但并非核心战术冲突解除与管制任务组成部分的目标。这项工作的目标集构成了 MBT 的基本范围，详见第 VIII 节。

D. 形成性与总结性练习

区域基础课程提供一系列形成性（培训）和总结性（评估）练习，我们已在 BluebirdDT数字孪生平台中对这些练习进行了复现。形成性练习包含约 30 个难度逐步递增的场景，智能体可以随时访问并运行这些场景。这些“形成性练习”是 Project Bluebird 中多场智能体设计研讨会的基础，也为智能体展示其行为并接受教员评判提供了一种方式，类似于在真实空中交通管制学院中的培训。总结性练习则作为隐藏测试集保留，正如真实学员在考试前不会接触这些练习一样。由于专有知识产权方面的限制，本研究使用的形成性和总结性练习无法公开披露。不过，如第 VI 节将进一步详述的那样，我们计划发布一套等效的开源场景及相关空域规范，以促进这一框架的应用。

E. 评估程序

为使用此框架开展评估，我们采用基础课程中的“总结性”练习。我们运行一组包含 3 次仿真的测试，每次持续三十分钟，并由指导员观察智能体表现。运行开始前，教员会了解 MBT 的关键要素，包括相较于标准基础课程被标记为范围之外的任务要素。教员观察运行过程，并针对每次运行撰写报告，涵盖 II.A节所述的能力项。每项能力均按四分制量表评分，以衡量其达成程度。四个等级见表2。

表2 能力达成等级

等级	描述
完全达成	此项能力已完全达成。
大部分达成	这项能力大部分已达成，但仍存在一些轻微错误。
部分达成	这项能力仅部分达成，存在严重错误，并且令人担忧。
未达成	该能力尚未达成，存在重大错误和/或缺乏所观察到的技术。

随后，认证评估员会综合评判这些报告，作出最终评估。在此评分方案中，对于何为及格分数并无绝对标准。评估流程的一项关键内容是撰写详细的报告表格，其中提供针对每项能力评分的证据和理由。因此，对于完全达成 的任何偏离，评估员都会逐一审查，并在得出总体结论前，考虑这组总结性评估表所提供的所有证据。细微且孤立的错误不太可能导致不合格，而反复出现的错误或技术缺陷所形成的明显模式，则会从证据中识别出来，并可能导致评定为不合格。评估员会针对每项测量的能力，将候选人的最终评定为合格或不合格 。候选人必须在所有能力领域均达到合格，才能通过评估。

III. 候选智能体

该框架与智能体无关，任何方法均可采用，只要能够与模拟器 API 交互以管制交通。为了测试该框架，我们对 Project Bluebird[23]的两个仍在开发中的原型智能体进行了评估，从而为智能体开发者收集有用的反馈，并对评估框架进行压力测试。两个智能体使用相同的仿真动作 API，并可获取相同的信息。其他智能体也在开发中，例如 Kent 等人 [24] 的研究成果；待其成熟后，也将使用该框架进行测试。

A. 基于规则的智能体*Hawk*

Hawk 是一种基于规则的智能体，其规则基于广泛的专家访谈、与教员就形成性练习表现开展的讨论，以及对训练材料的解读而制定。它利用决策树执行两套主要规则集：主要规则用于维持安全和解决冲突；迭代规则则力求尽量缩短路径长度，并减少航空器在低于其巡航高度的飞行高度层飞行的时间。图 5 展示了 Hawk 如何在 BluebirdDT 仿真环境中管制一次练习：它通过发出两条相互配合的航向指令，使两架航空器在横向上分离，从而确保它们安全地交换飞行高度层。

B. 基于优化的智能体*Falcon*

Falcon 是一种基于优化的智能体。每架航空器在扇区内的计划轨迹由一系列航路点及其对应的飞行高度层表示。基于进化策略的优化算法（CMA-ES [25]）会对这些内容进行调整，力求找到既满足安全要求，又能尽可能高效地引导航空器到达所需退出条件的解决方案。图 6 展示了 Falcon 对模拟航空器进行管制的情况；图中以洋红色标出了每架航空器经优化的计划，以及计划发布许可的航路点。



图5 基于规则的智能体*Hawk* 在BluebirdDT仿真环境中进行管制练习。

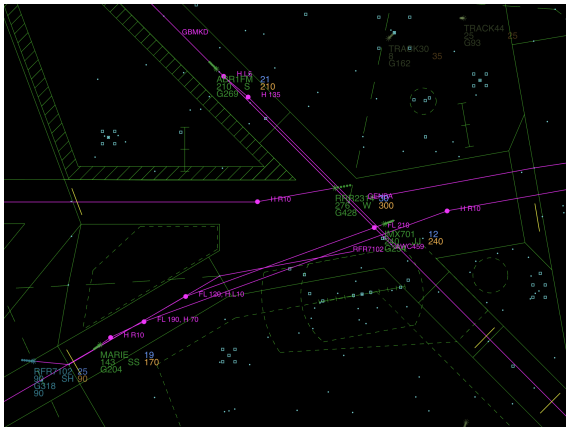


图6 优化智能体*Falcon*在BluebirdDT仿真环境中进行管制练习。计划轨迹以洋红色显示。

IV. 实验验证

A. 评估者间信度（IRR）评估

为验证该框架是否适用于评估空中交通管制能力，我们开展了扩展的评估者间信度（IRR）测试，以衡量在 BluebirdDT 环境中使用 MBT课程时，评分能否保持一致。我们从现实中的学院获取了一组受训者数据，并将其转换为可在 BluebirdDT 环境中回放的格式，同时回放智能体控制过程。随后，我们邀请空中交通管制学院讲师评估同一轮运行，并比较他们的评分，以此评估评估者间信度。在这项实验中，我们将人类受训者的运行与智能体的运行混合，以便发现评分智能体行为时可能出现的问题。我们共比较了 19 个场景的评分（每个场景时长约 30 分钟）；每个场景均由至少 7 名教员独立评估。我们使用组内相关系数（考察一致性和一致程度）、平均斯皮尔曼秩相关系数，以及基于秩的序数相关指标——肯德尔W系数，计算 IRR 指标。正如 de Raadt等人 [26], 所指出的，这些指标得出的结果相近。我们报告的平均斯皮尔曼秩相关系数为 0.59，肯德尔W系数为 0.64。为评估这些数值的显著性，我们随机置换了教员对每个场景给出的评分，以消除教员之间的相关性，并重新计算相关统计量；多次重复随机置换，实际上会消除评估者间的相关性，同时保留评分的分布。图 7 显示，随机化评分的分布与测得的评估者间信度数值明显不同。图 8 展示了各项能力的教员评分与共识（众数）评分之间差值的直方图。显然，无论是人类受训者还是机器智能体，评估员对其表现的判断都高度一致。特别值得指出的是，机器智能体与人类受训者的评分一致性并无显著差异。

B. 模拟器保真度与真实性

在BluebirdDT中对形成性练习和总结性练习的仿真是Machine Basic框架的关键。这对于确保手工设计的基础练习中的冲突在进行仿真时不发生改变至关重要。在BluebirdDT中仿真学院场景时，误设定的主要来源是BluebirdDT的轨迹预测器与NATS培训学院模拟器所使用的轨迹预测器之间存在差异。

为了验证 BluebirdDT 仿真轨迹的准确性，我们使用受训空中交通管制员在 NATS培训学院模拟器上进行练习时记录的数据，其中包括发出的许可序列以及各个场景的特征（例如风向、航空器的起始位置及其特征）。这些数据采集于2024年11月20日至2025年6月20日，涵盖运行至完成的仿真。对于背景中的航空器（即未进入梅德韦扇区的航空器），以及收到 BluebirdDT 和智能体目前尚未使用的许可的航空器，我们将其排除在范围之外。BluebirdDT 以相同的许可序列和场景特征作为输入，随后将输出轨迹与学院的轨迹数据进行比较。此流程是我们完整的

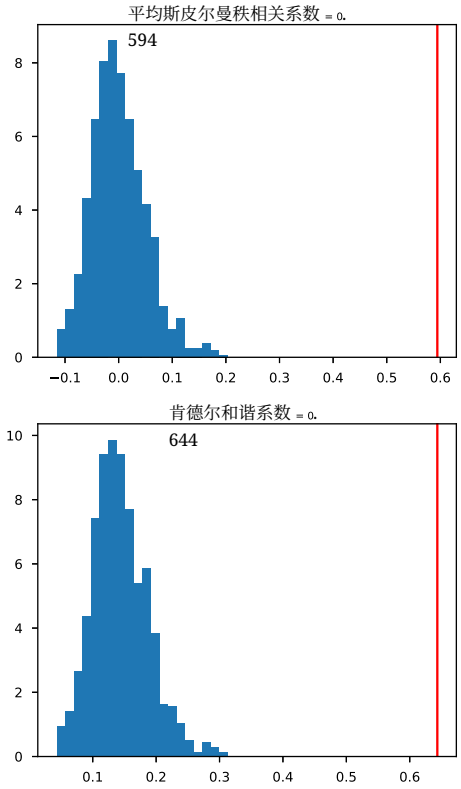


图7 随机化评分的评定者间相关性指标分布直方图。垂直红线分别标示了指导教师评分之间未经随机化的平均斯皮尔曼秩相关系数（上图）和肯德尔W系数（下图）。

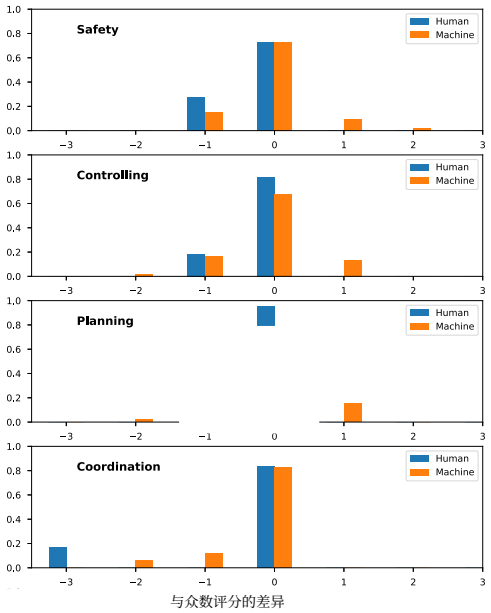


图8 显示各教员评分与共识（众数）评分之间差异频率的直方图。

数字孪生保障策略的一部分，Keane等人对此进行了全面详细的阐述 [27]。

图9显示了在给定场景中，某架航空器的水平误差和垂直误差在所有仿真中的平均值。图10放大显示了其中一架航空器（在图9中以星号表示）：左侧面板显示数据（蓝色），其中每条水平轨迹（上方面板）和垂直轨迹（下方面板）分别代表该航空器的一次训练运行。右侧面板显示BluebirdDT仿真结果（红色），展示了在不同许可集合下对该航空器的出色仿真效果。表3显示了特定评估中各航空器在仿真过程中的平均误差及其标准差（SD）。对于航空器的可接受仿真，垂直方向最大误差设为5个飞行高度层，横向最大误差设为2.5海里（即间隔标准的一半），并以此作为阈值。教员提出，这些阈值所代表的偏差不太可能改变手工设计的练习中的冲突集合。表3显示，超过该阈值的航空器比例在所有评估中均低于8%。我们对这些航空器进行了人工检查，以确认其行为不会产生重大影响，例如导致非预期冲突或消除预期冲突。

V. 结果与讨论

A. 智能体评估一致性

两个候选智能体均已成功按照评估框架完成测试。2025年1月进行了首轮测试，以确定基线性能。每个智能体共进行了三轮、每轮30分钟的评估，结果由另一名评估员按照学院规程进行审议和复核。

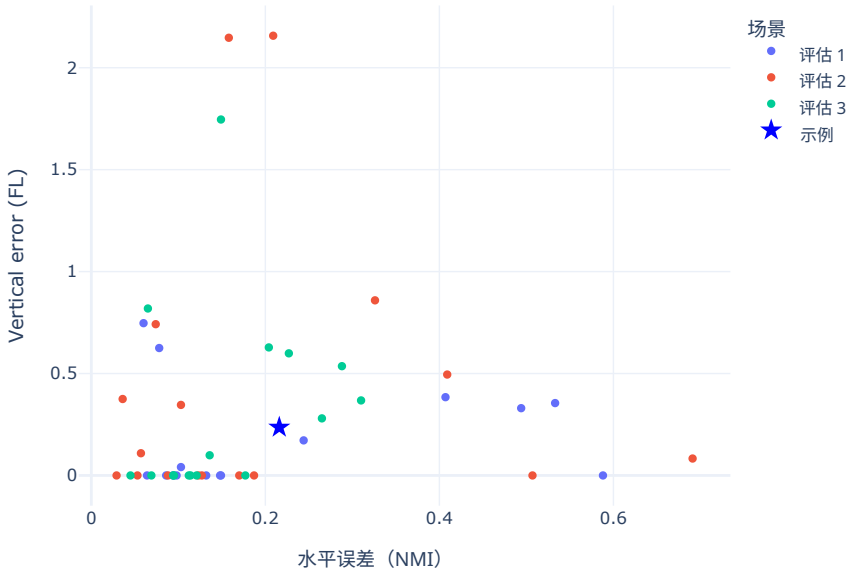


图 9 按评估场景着色，展示了重现用于评估智能体的 3 个总结性练习时的平均误差。每个点代表一架航空器，数值为受训空中交通管制员所进行仿真的平均值。带星号的示例见图 10。

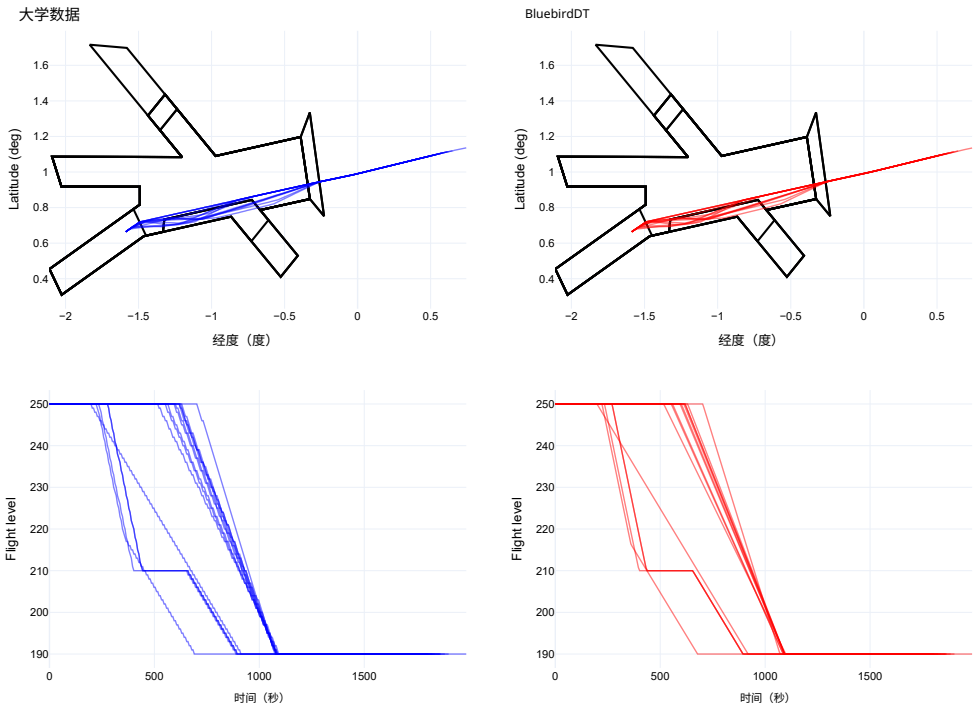


图 10 总结性场景中一架航空器在 15 次仿真过程中的示例。左侧（蓝色）轨迹来自学院数据，右侧（红色）轨迹则由 BluebirdDT 中的轨迹预测器模拟。

表3 对评估的三项评估分别进行的验证汇总。

评估	仿真次数	处于阈值内的航空器（%）	水平误差（海里）		垂直误差（飞行高度层）	
			Mean	SD	Mean	SD
1	18	100.0	0.25	0.04	0.10	0.04
2	16	97.9	0.26	0.03	0.32	0.22
3	12	92.1	0.17	0.02	0.37	0.11

首次试验中各次单独运行的结果见图11。两种智能体在所有评估领域的得分均高于最低要求，表明它们在评估任务上已初步取得进展。然而，表4中的评估员总体评分大多为不合格，这说明智能体尚未达到 MBT课程的预期标准。实际学员在每项练习中通常应取得满分；对于低于满分的能力项，在作出最终评估时都应仔细斟酌。由于基于规则的智能体 Hawk 源自专家经验，因此它在控制类别中的得分较高；它采用的解决方案有一部分是通过专家引导形成的，因此更容易被识别为自然的控制技术。基于优化的智能体 Falcon 生成的解决方案与预期教授的技术契合度较低，因为它更倾向于寻求高度优化的路径，而非有序且可重复的行为。不过，由于问题构建将实现所需的扇区离场协调设为约束条件，Falcon 在这一类别中取得了满分。两种智能体在安全方面都还需要进一步改进，但需要指出的是，在总结性评估中，一个被认为存在的安全错误往往就足以大幅降低评分。在空中交通管制中，安全至关重要；即使在培训的早期阶段，这一点也有所体现：学员（进而也包括智能体）都应展现出对复杂且细致的安全定义的敏锐遵循。

评估流程的一个关键环节是生成评分表，其中详细说明了各项分数的评定依据
g给出的。例如，在评估员对 Hawk 的总结性评语中，对其协调能力的绩效总结如下：在两次总结性评估中，有三个示例显示航空器未能达到其离场高度层。其中一次未能达到的高度层差距显著，且涉及上方的另外两个扇区。没有尝试让该航空器盘旋并爬升高度。

这种反馈形式，加上更详细的逐次运行记录，有助于智能体开发者了解其方案中的弱点和需要改进的方面。

在对已实施的逻辑进行修订后，智能体 Hawk 于 2025年8月重新接受测试，各次运行的进展如图12所示。表4中的最终评估员评分反映了其在所有测量能力项上的一致性和绩效均有所提升；如今，除安全领域外，Hawk 在所有能力领域的评分均为合格。针对如何更有效地达到离场高度层进行了改进后，第二轮评估中对 Hawk 协调能力的总结性评语如下：

> 在全部 *3* 次总结性演练中，所有航空器均达到协调后的离场高度层，无需重新协调 .
> 因此，该目 标评定为合格。

类似的规划改进也有所体现。第 1 轮的总结意见指出：

> .....看起来，系统已掌握冲突交通情况，并制定了短期计划。但并非总能明显看出是否考虑了全局情况，而且计划也并非总是足够完善。

根据这些反馈，Hawk 的内部逻辑经过修改，以便更早识别冲突，并预先配置航空器，从而实现更有效的管制。这些改进随后反映在第2轮规划总结评语中：

> .....评估指出，系统进行了前瞻性规划，能够检测冲突，并制定解决冲突的行动计划。证据包括：提前配置航空器，以便通过爬升和下降解决冲突；或者在确认可以使用其他安全高度层之前，先采用安全的初始高度层。因此，系统展现出一致的操作方法，该目标可评为合格。

最重要的改进领域仍然是安全。针对两个智能体获得的反馈都凸显了 MBT 在阐明由领域驱动的成功衡量标准方面的重要性。Falcon 的总结评语指出：

> 所有练习中均未发生间隔丧失，但有多个场景未能确保安全。

这与同一区域中针对 Hawk 的评论相呼应：

> 虽然始终保持了间隔，但记录到一个不安全的许可示例（事后应用航向）以及六个未能确保间隔的示例。

即使在培训的早期阶段，安全标准也建立在确保间隔这一理念之上。这是

一种确保所发布许可具备失效安全性的流程；它不只是根据当前轨迹预测未来冲突，还将对运行不确定性的考量纳入其中，从而制定出可证明安全的计划，无论天气、飞行员响应时间或任何其他相关不确定性来源如何变化。

通过将专家纳入我们的评估流程，收集到的反馈能够形成正向和负向的反馈回路。专家评估员在总结性报告中提供的详细信息，有助于识别需要强化的理想行为，同时清晰描述需要解决的问题。超越粗略数值衡量的详细信息，使智能体设计人员能够采取措施，将此前无论是行业还是学术研究都未曾提供的空中交通管制绩效衡量标准加以编码。

随着工作的持续推进，我们将制定数值化的目标和奖励函数，并根据专家反馈不断完善和测试。使用这些奖励函数设计的智能体所涌现的行为，既可用于验证其绩效，也可让专家参与修改，从而真实地体现空中交通管制的成功标准（相关初步工作见 [28]）。通过这种方式，我们开始缩小学术界对空中交通管制的表述与实际领域任务之间的差距。

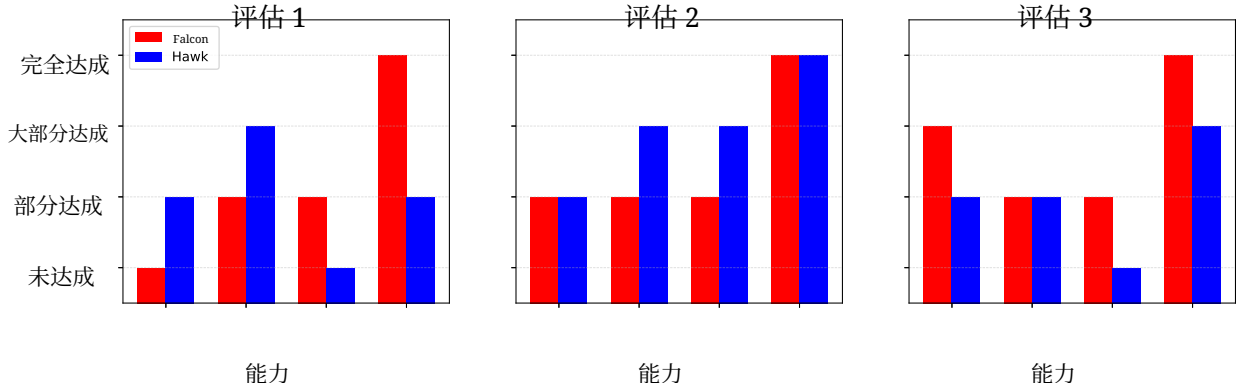


图 11 FalconandHawk 第一轮汇总结果。

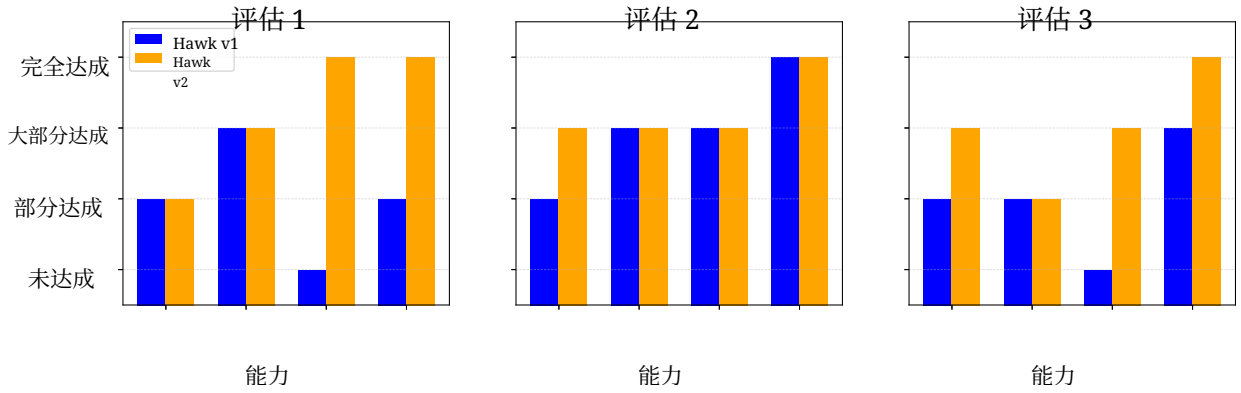


图 12 Hawkv1 与 Hawkv2 的汇总结果。

VI. 未来工作

该框架的后续工作将着重提升评估的保真度，具体将通过改进 BluebirdDT 平台、增加对多种程序、受控空域以外服务、机场离场管理以及其他关键空中交通管制概念的功能支持来实现。这些概念无论在后续培训还是实际运行中，都会给空中交通管制带来挑战。拓展这些功能领域，需要进一步梳理智能体所需的能力项和目标，以促进有效的设计流程。我们将与监管机构接洽，深入探讨建立更正式的保障框架的可能性，并将以下人员的知识与专业经验融入有效的量化成功指标中：

表4 评估员总体评分——评估第1轮至第2轮

能力	Falcon 第1轮（2025年1月）	Hawk 第1轮（2025年1月）	Hawk 第2轮（2025年8月）
安全	不合格	不合格	不合格
管制	不合格	不合格	**合格** ↑
规划	不合格	不合格	**合格** ↑
协调	**合格**	不合格	**合格** ↑

教员和运行人员。

作为 Project Bluebird 工作的一部分，我们很快将发布一个开源空域扇区，其逼真度与我们迄今使用的专有训练空域相当。此次开源发布将构成开放课程体系的基础，提供一系列预先设计和自动生成的测试场景。这一转变还将支持设计用于概率航空器建模的场景[29]，以纳入现实世界中的行为，因为 BluebirdDT 已支持这一功能。我们目前已具备良好条件，可以不断迭代数值度量的设计，因为受这些度量激励的智能体所呈现的涌现行为能够由专家直接演示和评估。通过这种运作机制，我们希望很快为广泛的智能体方法提供一个开放、全面的培训与评估解决方案，从而有效地使真正的工业问题与学术前沿保持一致。

VII. 结论

我们展示了一种针对空中交通管制（ATC）自动化方法的新型评估框架。通过采用具有法律依据且受监管的学院课程体系，我们使标准直接与任务的基本要求保持一致，并有助于为智能体设计确立更具挑战性且更贴近现实的发展方向。未来自动化解决方案能否获得信任，将取决于其是否与真正的管制任务保持一致，而该框架为朝这一目标不断迭代提供了机制。

VIII. 附录：MBT目标范围

表5 MBT空中交通管制能力与范围分解。绩效标准主要。取自国际民用航空组织《空中交通管制员基于能力的培训与评估手册》 [22]

范围	标识符	能力	绩效标准	备注
范围内	MBT.SAFETY.001	安全	确保航空器之间的安全间隔始终得到维持 确保航空器之间的安全间隔始终得到维持	主要关注领域 用于智能体开发
范围内	MBT.SAFETY.002	安全	对情境作出适当反应 有可能变得 不安全	
范围内	MBT.SAFETY.003	安全	理解并应用适当的 用于确保所需横向间隔的技术 需要时进行准备	
范围内	MBT.SAFETY.004	安全	理解并应用适当的 采用技术以确保垂直 在需要时保持间隔	
范围内	MBT.SAFETY.005	安全	实施适当的解决方案 应对追越冲突场景	
范围内	MBT.SAFETY.006	安全	实施适当的解决方案 应对交叉轨道冲突场景	
范围内	MBT.SAFETY.007	安全	实施适当的解决方案 以应对相互冲突场景	

接下一页

表5 – 续自上一页

范围	标识符	能力	绩效 标准-ria/可观察行为	备注
范围内	MBT.PLAN.001	规划	分析并解读 sit- 基于所获信息的评估 从监控和扫描中获取 可用数据源及 工具	
范围内	MBT.PLAN.002	规划	预测未来运行状 况	
范围内	MBT.PLAN.003	规划	识别潜在危险情 况（例如间隔量 与其他航空器之间的间隔、导航偏 差）	
范围内	MBT.PLAN.004	规划	识别交通冲突（航空器 未来将发生交互）	
范围内	MBT.PLAN.005	规划	考虑现有的 规则和运行程序 在确定问题的可能解 决方案时	
范围内	MBT.PLAN.006	规划	制定安全的冲突解决方案	
范围内	MBT.PLAN.007	规划	实施适当的解决方案 针对一个问题	
范围内	MBT.PLAN.008	规划	采用适当的空中交通间隔和 间距	
范围内	MBT.PLAN.009	规划	按照适当顺序组织任务 的优先顺序	
范围内	MBT.PLAN.010	规划	及时发布许可 ner	
范围内	MBT.COORD.001	协调	确保当航空器离开 其所在的扇区空域时， 符合已商定的 协调条款	
范围内	MBT.COORD.002	协调	修订协调协议于 所需的退出条件无法实现时，及时 修订协调协议	所有级别均旨在能够在……实现基本
范围内	MBT.CONTROL.001	管制	监视本责任区域内的空中交通 及附近空域	
范围内	MBT.CONTROL.002	管制	获取信息 可用的监视和飞行数据系统， 系统，气象数据，电子 数据显示器以及任何其他 可用手段	
范围内	MBT.CONTROL.003	管制	整合所获取的信息 通过监控和扫描 纳入整体态势	
范围内	MBT.CONTROL.004	管制	了解空域结构 及其对有效 和安全控制的影响，例如距离—— FL195 以下的内部要求	

下一页继续

表5 – 承接上一页

范围	标识符	能力	绩效标准-ria/可观察行为	备注
范围内	MBT.CONTROL.005	管制	管理到达，离场，和/或航路交通使用规定程序	
范围内	MBT.CONTROL.006	管制	对自身表现负责，识别并解决性能，检测并解决自身错误	
范围内	MBT.CONTROL.007	管制	确保引导航向上的交通位置适宜，以便进行下一段管制员，同时考虑后续航路和目的地	
范围内	MBT.CONTROL.008	管制	理解视为航路间隔适用时	
范围内	MBT.CONTROL.009	管制	在……时考虑航空器性能签发许可	
范围内	MBT.CONTROL.010	管制	选择最合适的间隔方法	
范围内	MBT.CONTROL.011	管制	发布许可时考虑航空器性能和空域限制	
范围内	MBT.CONTROL.012	管制	发布许可，确保间隔得以维持得以维持	
范围内	MBT.CONTROL.013	管制	发布许可，以解决交通冲突	
范围内	MBT.CONTROL.014	管制	监控分离操作的执行	
范围内	MBT.CONTROL.015	管制	必要时调整控制操作必要时，以维持间隔	
范围内	MBT.CONTROL.016	管制	考虑决策的及时性——制定	
范围内	MBT.CONTROL.017	管制	运用多种技术，有效地管理交通（例如引导航向、权衡水平）	
范围内	MBT.CONTROL.018	管制	即使交通流量水平变化，也能保持专注交通流量水平	
范围内	MBT.CONTROL.019	管制	向飞行机组发布许可，以实现高效的交通流	
范围内	MBT.COMMS.001	通信	及时将通信移交给下一个扇区	
部分	MBT.CONTROL.020	管制	执行时会考虑风况许可	风是可配置的并且如有需要，可将其禁用具体视情况而定智能体能力
部分	MBT.COORD.003	协调	与其他岗位的人员进行协调操作岗位及其他及时与利益相关者沟通	协调方式固定并已预先填充

续见下页

表5 – 续自上一页

范围	标识符	能力	绩效 标准-ria/可观察行为	备注
部分	MBT.COORD.004	协调	协调移动 ，管制以及航班的管制移交使用规定的协调程序	协调是固定的并已预先填充
范围之外	MBT.SAFETY.008	安全	向飞行机组提供交通接近信息，且信息相关、准确，以适当且及时的方式	
Out of 范围	MBT.PLAN.011	规划	维护最新的飞行进程条显示，确保所有相关的管制与协调信息会被记录并更新	提供了一个简易的进程条板，位于数字孪生中，并会自动更新的
Out of 范围	MBT.PLAN.012	规划	表示航班中的冲突进度条显示	进程条栏会自动-更新，无需代理参与
Out of 范围	MBT.COORD.005	协调	与下一个扇区协调当需要移交航空器时的航向	协调应假定适用于航向
范围之外 范围	MBT.COORD.006	协调	在必要时提供雷达移交给其他机构	
Out of 范围	MBT.COORD.007	协调	通过与相邻扇区或单位协调解决冲突	
超出 范围	MBT.COORD.008	协调	使用清晰简洁的术语进行口头协调	
Out of 范围	MBT.CONTROL.021	管制	核实航空器的身份，该航空器来自其他机构，来自其他机构，使用应答机编码变更、应答机识别，位置报告， 或转弯方法（视情况而定）	
范围之外	MBT.CONTROL.022	管制	更改航空器的服务离开受控空域	
范围 范围	MBT.CONTROL.023	管制	理解并正确使用适当的方向飞往东或西	
Out of 范围	MBT.CONTROL.024	管制	理解并应用航路高度释放的标准，以加快交通流	
范围之外	MBT.CONTROL.025	管制	核实.....的模式 C 信息任何从其他机构到达的航空器机构	
超出 范围	MBT.CONTROL.026	管制	运用控制方法管理无应答机航空器	受控主仅航空器被表示为配备应答机的配备在数字领域中孪生。

续见下页

表5 – 接上页

范围	标识符	能力	绩效 标准-ria/可观察行为	备注
范围之外 范围之外	MBT.COMMS.002	通信	使用标准 无线电话通信规定时使用通信术语	无线电话通信通过纯文本进行模拟，使用固定的动作集和语法
Out of 范围	MBT.COMMS.003	通信	对传输进行优先级排序，以考虑指令的串行传输项	The 数字的 twin 允许同时进行传输
范围之范围	MBT.COMMS.004	通信	将航空器转至适当的后续频率	
范围之外	MBT.COMMS.005	通信	为进入该区域的航空器提供必要的航路信息，这些航空器来自其他机构	
超出范围	MBT.COMMS.006	通信	表达清晰、准确且简洁	
超出范围	MBT.COMMS.007	通信	使用恰当的词汇和表达方式来传达清晰的消-息	
范围之外	MBT.COMMS.008	通信	根据情况调整言语技巧情况	
范围之外	MBT.COMMS.009	通信	核实复诵的准确性，并在必要时予以纠正	
Out of 范围	MBT.COMMS.010	通信	指示航空器在移交时报告航向移交通信至下一个扇区时通信至下一个扇区	

致谢

本研究得到英国工程与自然科学研究委员会（EP/V056522/1）和 NATS 的资助。

参考文献

[1] Lymperopoulos, I. 和 Lygeros, J.，“用于空中交通管理中多航空器轨迹预测的序贯蒙特卡洛方法”，《国际自适应控制与信号处理期刊》，第 24 卷，第 10 期，2010 年，第 830–849 页。网址：https://doi.org/10.1002/acs.1174。

[2] 英国民航局，“空中交通服务手册（CAP 493），第1部分”，第1部分 - 民航局，2024年。网址 https://www.caa.co.uk/commercial-industry/publications/publication-details/publication/cap-493/，访问日期：2024年6月26日。

[3] Wesson, R. B.，“空中交通管制员领域中的规划”，第五届国际人工智能联合会议论文集——第*1*卷，摩根·考夫曼出版社，旧金山，加利福尼亚州，美国，1977年，第473–479页。

[4] J-P Nicolaon，“从运行角度概述 ARC 2000”，第3版，EUROCONTROL，1995年。网址 https://www.eurocontrol.int/node/10207，访问日期：2024年6月26日。

[5] Erzberger，H.，“空中交通管制自动冲突解决”，国际航空科学大会，2006年。

[6] Brittain，M. 和 Wei，P.，“自主空中交通管制员：一种深度多智能体强化学习方法”，国际机器学习大会：*ICML 2019* 现实生活强化学习研讨会，2019年。网址：http://arxiv.org/ abs/1905.01303。

[7] Sui, D., Ma, C. 和 Dong, J.，“基于深度强化学习的空中交通管理冲突解决策略”，《航空》，第 27 卷，第 3 期，2023 年，第 177–186 页。https://doi.org/10.3846/aviation.2023.19720，网址：https: // journals.vilniustech.lt/index.php/Aviation/article/view/19720。

[8] Wang, Z., Li, H., Wang, J. 和 Shen, F.，“基于深度强化学习的空中交通管制冲突检测与解决”，IET 智能交通系统，第 13 卷，第 6 期，2019 年，第 1041–1047 页。https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5357，网址：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-its.2018.5357。[9] Pappas, G., Tomlin, C. 和 Sastry, S.，“多智能体混合系统的冲突解决”，第 35 届 IEEE 决策与控制会议论文集，第 2 卷，1996 年，第 1184–1189 页，第 2 卷。https://doi.org/10.1109/CDC.1996.572644，网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/572644，ISSN：0191-2216。[10] Tumer, K. 和 Agogino, A.，“利用学习型多智能体系统改进空中交通管理”，IEEE 智能系统，第 24 卷，第 1 期，2009 年，第 18–21 页。https://doi.org/10.1109/MIS.2009.10，网址：http://ieeexplore.ieee.org/document/4763650/。[11] EUROCONTROL，《ARGOS 概况表》，2023 年 3 月。网址：https://www.eurocontrol.int/publication/argos-factsheet，访问日期：2024年6月26日。[12] Crootof, R., Kaminski, M. E. 和 Price II, W. N.，“人在回路中”，社会科学研究网络，2022 年 3 月。https://doi.org/10.2139/ssrn.4066781，网址：https://papers.ssrn.com/abstract=4066781。[13] Wu, X., Xiao, L., Sun, Y., Zhang, J., Ma, T. 和 He, L.，“机器学习中的人在回路综述”，未来一代计算机系统，第 135 卷，2022 年，第 364–381 页。https://doi.org/10.1016/j.future.2022.05.014，网址：https: // www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X22001790。[14] Kung, T. H., Cheatham, M., Medenilla, A., Sillos, C., De Leon, L., Elepaño, C., Madriaga, M., Aggabao, R., Diaz-Candido, G., Maningo, J. 和 Tseng, V.，“ChatGPT 在美国执业医师资格考试中的表现：利用大语言模型进行人工智能辅助医学教育的潜力”，PLOS 数字健康，第 2 卷，第 2 期，2023 年，第 e0000198 页。https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000198，网址：https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9931230/。[15] Katz, D. M., Bommarito, M. J., Gao, S. 和 Arredondo, P.，“GPT-4 通过律师资格考试”，《哲学汇刊》A辑：数学、物理与工程科学，第 382 卷，第 2270 期，2024 年，第 20230254 页。https://doi.org/10.1098/rsta.2023. 0254，网址：https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10894685/。[16] Riedmaier, S., Ponn, T., Ludwig, D., Schick, B. 和 Diermeyer, F.，“自动驾驶车辆基于场景的安全评估综述”，IEEE Access，第 8 卷，2020 年，第 87456–87477 页。https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993730，网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/9090897/。[17] Pepper, N., Keane, A., Hodgkin, A., Dewi Gould, E. H., Lauritsen, L., Vlahos, C., De Ath, G., Everson, R., Cannon, R., Castro, A. S., Korna, J., Carvell, B. 和 Thomas, M.，《用于培训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》，AIAA，2026年。[18]NATS，《成为一名 NATS 管制员》，2013 年。网址：https://nats.aero/blog/wp-content/uploads/2013/06/Infographic_ BecomingAController.pdf。[19] CAA，《CAP 413：无线电话手册——民航局》，2021 年。网址：https://www.caa.co.uk/our-work/publications/documents/content/cap-413/，访问日期：2024年6月26日。[20] CAA，空中交通管制员 | 英国民航局，2021 年。网址：https://www.caa.co.uk/uk-regulations/aviation-safety/basic-regulation-the-implementing-rules-and-uk-caa-amc-gm-cs/air-traffic-controllers/，访问日期：2025年5月20日。[21] CAA，《CAP 794：空中交通管制员——初始培训目标——民航局》，2020 年。网址：https://www.caa.co. uk/our-work/publications/documents/content/cap-794/，访问日期：2024年6月26日。[22] 国际民用航空组织：加拿大魁北克省蒙特利尔，《空中交通管制员胜任力培训与评估手册》，2017 年。[23] 艾伦·图灵研究所，《Project Bluebird：用于空中交通管制的人工智能系统》，2025 年。网址：https://www.turing.ac.uk/research/ research-projects/project-bluebird-ai-system-air-traffic-control，访问日期：2024年6月26日。[24] Kent, P., De Ath, G., Layton, M., Hart, A., Everson, R. 和 Carvell, B.，《用于战术空中交通管制的未来能力智能体》，AIAA，2026年。[25] Hansen, N.，“协方差矩阵自适应进化策略：教程”，arXiv，2023 年 3 月。https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.00772，网址：http://arxiv.org/abs/1604.00772，arXiv：1604.00772 [cs]。[26] de Raadt, A., Warrens, M. J., Bosker, R. J. 和 Kiers, H. A. L.，“有序评分量表信度系数的比较”，《分类学杂志》，第 38 卷，2021 年，第 519–543 页。

[27] Keane, A., Pepper, N., Burr, C., Hodgkin, A., Gould, D., Korna, J.，以及 Thomas, M.，关于确保人工智能赋能的数字孪生英国航路空域准确性与保真度的框架，AIAA，2026年。[28] Mohamed, E.、Carvell, B.、Procter, R.、De Ath, G. 以及 Everson, R.，面向空中交通管制的透明人工智能代理，AIAA，2026年。[29] Pepper, N.、Thomas, M. 以及 Conti, Z. X.，用于航路空域中自适应飞机轨迹预测的快速代理模型，AIAA，2026年。