



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Views & Comments

美国的下一代航空运输系统——发展愿景、成就与未来方向

Joseph Post

Acting Director, Systems Engineering and Integration, Federal Aviation Administration, USA

1. 引言

美国联邦航空管理局（FAA）掌握着全世界最大的空中交通管制系统。该系统每天管控近5万次航班，覆盖面积接近 $7.61 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，相当于地表面积的15%。如何在保证这些航班安全的情况下，同时保持高效率 and 低延误，始终是一项挑战。

为了解决空中交通流量增长产生的问题，并运用新技术提高服务质量、适应各类新的空域用户（如商业空间和无人机运营商），FAA及其合作伙伴启动了一个名为“下一代航空运输系统”（NextGen）的现代化项目。NextGen项目包括各种改进通信、导航、监控和空中交通管理（ATM）自动化系统的工作，也包含大量利用新技术和先进的空中交通管理科学的程序性改进工作。

2. NextGen 项目的发展愿景和计划

为了解决交通拥堵及延误问题，FAA于2004年提出了发展NextGen项目[1]。NextGen项目旨在增大空域系统的交通容量，提高飞行效率，增强系统可预测性，增强通航能力，提高系统复原力并保持或提高航空运输的安全性。该项目最关键的特点在基于卫星的监控和导航、数字通信、信息交流、空中交通管理决策支持辅助工具（如基于时间的管理工具）以及新的尾流分离标准等方面。

FAA的NextGen计划在国家空域系统（NAS）的企

业架构（EA）中进行了详细描述。我们的架构模型是在美国国防部架构框架（DODAF）1.5版的基础上改良得到的[2]。根据国际标准化组织的要求，“架构描述由创建、使用和管理现代系统的各方使用，以改进通信和合作，使他们能够以集成且一致的方式工作”[3]。NAS EA是组成国家空域系统的各种服务、运营活动和系统的一种分级表示，并由一组描述国家空域系统各要素之间关系的图来说明。我们的规划过程描述了这个架构将如何从当前状态发展到理想的“未来”状态，即我们在这里所说的NextGen。这些计划的出发点是FAA的服务等级制度。该制度描述了FAA的核心服务及其组成能力。这些服务在时间上是不变的（尽管随着FAA任务的发展，可能会有定期变化），并且与解决方案无关。管理者绘制了一系列服务路线图来描绘国家空域系统从当前状态发展到未来NextGen状态的战略。这些服务路线图描述了NextGen发展愿景中的“运营改进”，即能使整个行业和飞行公众受益的新的空中交通管制能力。

目前，NextGen包含了65个运营改进项目。国家空域系统部门实施计划（归纳在NextGen实施计划中）将这些业务改进项目分解为关于开发、集成和实施新的管制能力所需的步骤或增量，并确定了相关的资本投资[4]。最后，企业架构基本建设路线图说明了系统部署、投资和重大收购中关键决策点的进展情况[5]。

NextGen中很多的项目改进在功能上都是独立的。例如，最小尾流间隔的改变在功能上不同于帮助航线管制员的自动化工具。因此，很多改进都可以独立设计和

实施。不过，虽然功能是独立的，但其运行效果可能是相关的。例如，由于交通容量与延误之间的非线性关系，多个与交通容量有关的改进将对系统的性能产生非线性影响。为此，我们使用了能够覆盖整个系统的模型分析，同时改进对交通容量的影响，并据此决定投资的顺序。

对于一些非独立的功能，如不同的交通流控制手段（或基于时间的管理），利用模型和人机回圈（HITL）模拟来验证整个开发生命周期中的新理念。例如，FAA的William J. Hughes技术中心可利用现行的自动化系统硬件和软件对新理念进行跨域HITL模拟。目前正在进行的终端空域计量评估实验可以包含6名航路管制员和8名终端管制员以及两名交通管理员和飞行员同时工作。

3. 商业案例

2010年，我们完成了NextGen的首个商业案例并于2017年更新了该案例[6]。这一商业案例反映了与NextGen投资成本和效益相关的现金流，针对这些投资，已按照政府标准（根据行政管理和预算的规定）进行了适当的贴现。费用包括FAA主要基础建设投资的资金成本、维持投资以及程序性改进的运营成本以及运营商成本（如为飞机配备新的航空电子设备）。FAA必须在成本或效益计算中考虑所有的利益主体，即运营商、乘客、政府和整个社会。在该商业案例中，将效益具体分为以下几类：

- FAA内部成本节省
- 乘客旅行时间缩短
- 飞机运营成本降低
- 避免航班取消
- 增加计划航班次数
- 减少二氧化碳排放
- 减少事故导致的受伤、死亡和飞机损失/损坏

如前文所述，国家空域系统具有耦合关联性和非线性特征，这说明必须针对整个项目来计算效益而不是分别计算项目各个组成部分的效益再求和。FAA的NextGen商业案例符合上述要求，并采取了集成方法对全系统效益进行了建模。NextGen利用了NAS的系统级数学模型来评估整个项目的效益，体现了系统内的相互依赖性和非线性。虽然近年来FAA的建模能力得到了很大的提高，但其建模仍存在着局限性，例如，许多运营上的

改进无法在模型中相应地体现。为此，在必要时FAA项目办公室需要开展详尽的离散研究来增强模型的效益预测能力。

据我们估计，从2007年至2030年期间，NextGen的总成本为350亿美元，其中FAA为220亿美元，运营商为130亿美元。从2007年至2019年，FAA已经花费了82亿美元。

据我们估计，到2030年，总效益约为1000亿美元。到目前为止，共计20多种能力已经为整个行业和社会累计创造了73亿美元的效益，具体如下：

- 燃油节省12亿美元
- 其他飞机运营成本节省15亿美元
- 乘客旅行时间节省42亿美元
- 安全方面节省4亿美元

一般情况下，成本是前期投入的，而大部分效益是在生命周期后期产生的。随着交通数量的增加，空中交通延误往往呈几何级数增加。同样，交通容量的提升会减少延误，因此NextGen相关效益也会随着时间的推移而呈几何级数增长。

4. 迄今为止的实施情况

下文举例说明迄今为止已经实施的部分NextGen功能。

监视 FAA全面部署了一个由大约630个地面广播式自动监视（ADS-B）收发器组成的网络。这些收发器接收来自飞机全球定位系统（GPS）的定位广播（被称为“ADS-B OUT”），为空中交通管制员提供更精确、及时的信息。这些收发器也用于向飞机传输天气、空域和交通信息，这些信息将显示在驾驶舱内，飞行员可以从显示器上看到邻近的其他飞机（被称为“ADS-B IN”），从而大大提高了安全性，特别是在通用航空运营中。自2020年1月1日起，在美国大部分管制空域中飞行的飞机都必须使用ADS-B收发器。

导航 GPS导航改善了飞行操作并极大地提高了飞行安全性、机场准入和飞行效率。FAA已经公布了超过17 000个区域导航（RNAV）仪表进近程序最小值（一个程序可包括多个最小值，每个最小值适用于不同的飞机能力），其中约有4500个程序利用了天基增强系统来实现类似仪表着陆系统的性能。此外，还有685个所需导航性能（RNP）进近程序。RNP将驾驶舱内的监控和警报功能整合并进行特殊飞行人员培训，确保了飞机符

合极其严格的精度要求。FAA公布了大约1000个区域导航起飞或降落程序和大约270条区域导航路线。最后，FAA完成了8项“大都会”实施工作，其中的每项工作都为涵盖多个城市的主要大都市地区重新设计了程序和空域。

通信 FAA目前正在使用甚高频数据链路（VDL）模式2实施管制员与飞行员间的数据链路通信（CP-DLC）。目前有62个机场使用该系统执行离场许可。最近，印第安纳波利斯、堪萨斯城和华盛顿地区的控制中心也开始投入使用这些功能，还有8个中心将在2020年开始使用该功能。航途服务包括频率和海拔分配、改变线路和测高仪设置等。

信息管理 FAA建设了一个数字数据和信息共享系统，称为“广域信息管理”（SWIM）。在广域信息管理中，FAA内部和外部的用户可订阅所需的数据并以标准化、文件化的形式使用信息。广域信息管理降低了整合信息系统的成本，并大大增加了获取信息的机会。

自动化 NextGen项目还包括加强一些自动化和决策支持系统。值得一提的是，该项目对计量繁忙机场交通能力的时间流量管理系统（TBFM）进行了若干改进。利用“航班起飞容量”，可将外围机场的出港时间安排到枢纽机场的航班到达流中。利用“综合起飞/降落容量”，塔台管制员能够以电子方式请求放行时间。

机场交通容量 FAA一直在努力利用程序手段和技术手段提高机场的有效交通容量。我们与美国国家航空航天局（NASA）、国际民用航空组织和其他机构合作制定了新的跑道尾流间隔，从而增加了很多机场的吞吐量。FAA也修改了平行跑道的间隔标准。最后，FAA通过程序性修改、增加跑道能见度传感器、增强飞行视觉系统和平视显示系统等一系列措施，降低了飞机最低着陆标准中的云底高和能见度要求。

运营者花费了数年的时间向基于卫星的技术过渡。美国共有20多万架飞机，其中约有4400架飞机由定期航班运营[7]。2008年，FAA公布了一项规定，要求在大部分管制空域中运行的飞机在2020年1月1日前必须配备ADS-B航空电子设备，这就给了制造商和运营者足够的时间来开发和安装设备。现在，FAA所有的自动化系统都可以以ADS-B数据为主、雷达信号为辅进行监视。如今，几乎全部的航空公司飞机都装备了区域导航系统，但有多少通用航空飞机可以使用GPS仍是未知。

5. 挑战

在NextGen项目下实施新的改进能力时也会遇到各种挑战。其中最重大的挑战就是公众是否接受新的区域导航降落、进近和起飞程序。目前，鉴于公众对噪声问题的关注（无论是现实的还是预想的），对于发布新程序，FAA能做的十分有限。在某些情况下，FAA甚至不得不在法庭作出对公众有利的判决后放弃新实施的程序。新程序可在不同的区域上空之间切换飞行路径。这一过程虽然可能不会增加噪声暴露的大小，但“新的噪声”可能被认为比“旧的噪声”更糟糕。还有人担心，区域导航程序比使用地面导航辅助设备的传统程序让噪声更加集中。目前运营者仍不断对飞行技术改进以减少噪声，在过去的43年里，受严重噪声影响（即在65 dB昼夜噪声水平等量线内）的人数减少了94%。然而，对飞行技术进行改进需要很长的时间。根据波音公司的商业市场展望，每年大约有3%的飞机退役，平均退役年龄超过20年[8]。最近，FAA制定了新的公众参与战略，希望能在所有利益相关者之间达成进一步的相互理解和有益的结果。

运营商能够在何种程度上采用与NextGen相关的新型航空电子设备仍然是一个问题。2020年1月1日强制要求使用ADS-B设备的规则开始生效，在这一规则提出的初期还不能保证运营商会遵守，后来航空公司作出了积极的回应并按期完成了任务，但一些其他飞机（特别是军用飞机和公共服务飞机）仍未遵守该规则。飞机和机组人员没有能力执行RNP程序，飞行管理系统在处理转弯、垂直导航和预计着陆时间（RTA）功能时的方式也不一致。最近，机载航空电子设备组件无法处理管制员和飞行员间的数据链路通信信息也成为了一个重要问题。设备的混杂和航电性能的不一致，导致了空中交通管制设备无法具备新的功能。

为了解决设备问题，NextGen顾问委员会（NAC）（专门负责就空管现代化问题向FAA提供建议的行业组织）提出了飞机航电设备最低能力列表（MCL）。核心列表包括：

- ADS-B OUT
- 采用VDL模式2的管制员和飞行员间的数据链路通信，推动加载装置
- RNP 0.3，具有固定半径和垂直耦合导航能力
- 一个用于弹性操作的惯性测量装置（IRU）

还有一份包括了另外12个项目的补充列表。FAA要求NextGen顾问委员会与其他利益相关团体（包括飞机和设备制造商以及区域航空公司）讨论这些列表并提出建议以鼓励采用最低能力列表。

最后，尽管自动化改进已成为NextGen的一个关键要素，但仍有一些功能由于缺乏自动化支持而无法正常使用。例如，没有进一步采用RNP进近程序的原因之一就是缺乏能够帮助管制员管理综合机队的终端自动化能力。此外，时间流量管理系统未能得到进一步采用的原因在于能够帮助管制员操纵飞机以遵守计量进度表的工具尚未得到部署。

6. 未来方向

FAA还有几项尚未实施的NextGen功能有待充分开发和部署，其中一些功能将解决上述挑战。FAA与NextGen顾问委员会展开合作，共同确定近期工作的优先级。这些优先事项每年都会公布在联合执行计划中[9]。目前分为5个方案组合：多跑道运行（MRO）、数据通信、地面和数据共享、基于性能的导航（PBN）和东北走廊线改进。

任何能够直接增加机场吞吐量的改进措施都会带来最高的回报，因为机场跑道基础设施的拥挤问题往往是制约整个系统性能的最大因素。在这些机场修建新的跑道无法增加交通容量，因此必须改变流程和改进管理工具。多跑道运行侧重于统一尾流间隔标准（CWT），目的是统一所有机场的跑道标准。迄今为止，FAA已在5个机场实施了统一的尾流间隔标准。在未来的两年中，FAA希望在另外12个机场实施这些标准。

目前，已有62个机场和3个在途中心的数据通信项目实施了管制员和飞行员间的数据链路通信。在剩余的17个在途中心实施管制员和飞行员间的数据链路通信就成为了亟待完成的任务。

2020年，FAA将开始部署一个新塔台（地面）自动化平台，即终端飞行数据管理器（TFDM）。TFDM将为空中交通管制塔台实施电子飞行进程单，从而将地面运行与时间流量管理系统完全整合，并实现起飞队列管理能力，以减少地面拥堵。

在基于性能的导航方面，FAA的工作重点在于完成大都会区项目和空间再设计。丹佛、拉斯维加斯和佛罗里达大都会项目将在未来两年内完成。此外，FAA还正在实施“基于所需导航性能”（EoR）的概念。EoR可让

采用RNP进近程序的飞机减少在终端空域中的雷达最小间隔，这可缩短起落航线下风边、节省燃料和时间并减少噪声暴露。

美国东北部有着全美最拥挤的机场和空域，包括纽约大都会区。运营者计划在该区域进行各种改进，包括最初的基于轨迹的运行（TBO）。TBO是NextGen的一个重要概念，它是基于轨迹运行的空中交通管理方法。该方法利用基于时间的管理、航空系统与地面系统之间的信息交换以及飞机在时间和空间上按照精确行驶路径的能力对航班进行战略规划、管理和优化。FAA希望通过对时间流量管理系统以及途中和终端自动化平台进行一系列升级，在未来十年内全面实施基于轨迹的运行。第一个阶段即初步基于轨迹的运行，目前正在东北部开发。未来，FAA将实施下列改进[9]：

改进计量参数和扩大范围，纳入更多的区域控制中心，从而改进和评估抵达费城国际机场（PHL）的机载计量；

对来自8个区域管制中心的PHL到港航班实施起飞前调度；

增强起飞前改道或空中改道能力，对不同飞机实现有针对性的改道。

基于轨迹的运行工作经验说明了以下重要方面：

为了成功运行，管制员必须充分了解基于轨迹的运行的目标，这是因为基于轨迹的运行影响着管制员的工作量和执行的功能；

对于多跑道机场（如PHL），算法必须考虑所有主要机场的结构；

自动化算法必须能在非正常情况下工作，例如，在对流天气条件下；

必须考虑到需求的不确定性，特别是接近起飞时（仪表确定到港时间难以预测）。

除了近期的NextGen顾问委员会的优先工作外，FAA继续研究ADS-B在航班间隔管理（FIM）等方面的应用。航班间隔管理是保证准确遵守时间流量管理系统计划时间的另一个办法。系统完全部署后，FAA将增强航班飞行途中飞行员与管制员间的数据链路通信能力，例如，增加新的信息以更好地控制飞机轨迹。

早在20年前管理者就开始设想NextGen项目，而人工智能和机器学习直到最近才取得了突破。因此，NextGen项目并没有在任何方面纳入人工智能和机器学习的技术。尽管如此，NextGen和FAA在数据共享（即SWIM）、企业信息管理和大数据分析方面的相关举措

已经为人工智能和机器学习在空中交通管理中的应用奠定了基础。FAA和NASA多年来也一直在研究人工智能和机器学习在交通流管理方面的应用。近来，各界对利用人工智能和机器学习将无人机系统（UAS）和城市空中交通（UAM）纳入空域产生了浓厚的兴趣。FAA也正在研究人工智能和机器学习在网络安全领域的应用。人工智能和机器学习能够进一步提高空中交通管理的安全性、效率和成本效益，以及减少对环境的影响。

References

- [1] Joint Planning and Development Office. Next generation air transportation system integrated plan. Washington, DC: Joint Planning and Development Office; 2004.
- [2] Department of Defense. DoD architecture framework version 1.5, volume 1: definitions and guidelines. Architecture 2007;l(Apr):1–46.
- [3] ISO/IEC/IEEE 42010: Systems and software engineering—architecture description. International organization. Geneva: International Organization for Standardization; 2011.
- [4] Federal Aviation Administration. NextGen Implementation Plan 2018–19 [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2019 [cited 2020 Feb 12]. Available from: https://www.faa.gov/nextgen/media/NextGen_Implementation_Plan-2018-19.pdf.
- [5] Federal Aviation Administration. NAS enterprise architecture: infrastructure roadmaps version 14.0 [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2020 Jan [cited 2020 Feb 12]. Available from: https://www.faa.gov/nextgen/media/NAS_Infrastructure_Roadmaps_v14.pdf.
- [6] Federal Aviation Administration. Update to the business case for the next generation air transportation system based on the future of the NAS report [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2016 Jul [cited 2020 Feb 12]. Available from: <https://www.faa.gov/nextgen/media/BusinessCaseForNextGen-2016.pdf>.
- [7] Federal Aviation Administration. FAA aerospace forecast: fiscal years 2020–2040 [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2020 Mar [cited 2020 Feb 12]. Available from: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/.
- [8] Boeing. Commercial market outlook 2019–2038 [Internet]. Chicago: Boeing; 2019 Sep [cited 2020 Feb 12]. Available from: <http://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>.
- [9] Federal Aviation Administration. NextGen advisory committee NextGen Priorities Joint Implementation Plan CY2019–2021 [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2019 Jun [cited 2020 Mar 29]. Available from: <https://www.faa.gov/nextgen/library/media/NACNextGenPrioritiesJoint-ImplementationPlanCY2019-2021.pdf>.