

美国环境责任航空计划回顾与最新进展

Overview and Development of Environmentally Responsible Aviation Program

朱大明 / 中国轻型燃气轮机开发中心

摘要:减少航空活动对环境的影响已经成为世界航空技术发展主要方向之一。环境责任航空(ERA)研究计划是美国国家航空航天局于2009年开展的主要针对减少噪声、氮氧化物排放和油耗的高技术成熟度等级计划。本文综述了ERA计划的发起、目标和技术方法及实施途径,并介绍了根据该计划设计的飞行器的最新成果。

关键词: 环境; 航空; 环境责任航空计划

Keywords: environmentally; aviation; ERA

0 引言

随着航空技术的持续进步以及全球经济活动的发展,航空客运和货运活动在过去几十年中一直保持增长态势,尤其是进入21世纪以后,世界航空客货运周转量快速上升,并将在未来相当长的时间内保持下去。与此同时,在全球变暖趋势以及环境污染问题日益严重的背景下,人类飞行活动对于环境的影响正在受到越来越多的关注。航空业对于环境的不良影响主要体现在噪声、空气质量、水质量、能源消耗以及温室气体排放等方面,如何减少飞行活动对于环境的影响,已经成为目前以及未来航空技术的主要发展方向之一。

欧盟早在2000年就发布了《2020欧洲航空发展愿景》,提出了非常雄心勃勃的环境目标:到2020年,飞机噪声相对于2000年的水平降低一半,二氧化碳排放量(等价于燃油消耗量)降低一半,氮氧化物排放量降低80%。为了确保这一宏伟愿景的实现,欧盟专门成立了欧洲航空研究咨

询委员会(ACARE)。该委员会通过制订战略性研究议程(SRA),指出各种技术解决方案的战略性方向以及研发工作的路线图,以确保2020年愿景目标的实现。在SRA的指导之下,欧盟已经于2010年发起了一个预算投资16亿欧元的庞大计划——清洁天空(Clean Sky)计划。

美国在这样的世界性的航空发展局势下,也开始陆续开展与环境有关的航空技术研究。美国国家航空航天局(NASA)2006年发起亚声速固定翼(SFW)项目,并在2009年将其升级为技术成熟度水平更高的环境责任航空(ERA)计划。

1 环境责任航空计划的来源

2006年1月,NASA的航空研究任务理事会(ARMD)提出了覆盖从亚声速到高超声速的全部飞行环境下的航空核心能力研究计划,一共是四个,包括基础航空计划、航空安全计划、领空系统计划和航空试验计划。

2006年5月24日,ARMD公布了

航空核心能力研究计划的研究通告,其中基础航空研究计划包括四个子项目:亚声速固定翼项目、亚声速旋转翼项目、超声速项目和高超声速项目。其中,亚声速固定翼项目有两个目标,一是发展减少设计过程中不确定性的预测和分析工具,二是发展在噪声、排放、性能参数方面有显著提高的概念与技术。其发展的概念与技术均应用于亚声速或跨声速飞行器,主要关注技术成熟度1级到3级的领域,少量技术在基础研究情况较好的情况下,也可进行实验室环境下的部件试验,即将技术成熟度等级推进到4级。实际上,亚声速固定翼项目后来成为了ERA计划的基础。

随着研究工作的开展,基础研究领域取得越来越多的研究成果,NASA认为应该将一些较为突出的技术向更高的技术成熟度等级推进,于是在2009年开始实施综合系统研究计划(ISRP)。该计划主要针对一些有前途的概念、技术和探索来组织系统级的研究,要将其发展到可以进行飞行

器整机缩比模型风洞试验的程度, 技术成熟度至少到6级, 同时评估和验证其对环境的优势。ISRP包括两个子计划, 一个是无人飞行器系统(UAS)计划, 另一个就是环境责任航空(ERA)计划。

2 环境责任航空计划的技术目标

2009年5月14日, 美国国家研究委员会航空与空间工程委员会召开了专家论证会议, 在会上确定并发布了ERA计划的技术发展纵览。

ERA计划的总体设想是发展一个或多个可行性和前瞻性好的飞行器设计方案, 使其能同时满足国家对噪声、排放和性能的要求, 最终能够在减少或消除对环境不利影响的同时使航空实现可持续发展。主要任务有两项, 一是通过性能研究, 探索和评估飞行器设计概念以及实现技术在减轻航空对环境影响的潜能方面的可行性、有益性、依赖性和风险性; 二是与其他航空研究机构形成技术交流与反馈, 促进NASA基础航空项目的研究与发展。ERA计划主要针对第二代飞行器概念以及如何实现这些概念的技术进行研究, 还有与环境相关的系统与子系统的研究。由于NASA与美国国防部、军方关系密切, ERA计划也同时具备了两方面的特殊背景需要: 一是要保证该计划在国家安全和国土防御方面都可以使用, 确保在航空运输方面的机动性, 同时必须贯彻安全性与成本效应原则; 二是必须满足能源多样性需要, 即能够使用代替燃料, 而不是需要新制造代替燃料。ERA计划的具体目标如表1所示。

世界各大航空研发机构都于近十年推出了多种机身外形和飞发匹配形式较为新颖的飞行器设计, 但是其对

表1 ERA计划的目标

	技术成熟度4级到6级		
	N+1代 2015年	N+2代 2020年	N+3代 2025年
噪声	-32dB	-42dB	-71dB
NOx排放	-60%	-75%	-80%
飞机燃油消耗	-33%	-50%	-60%

应的技术却不是都能满足ERA计划的要求。由于ERA计划针对的技术成熟度等级已经达到6级, 进入了模型或原型机实际环境验证阶段, 对技术的可行性和可操作性提出了较高的要求, 主要包括: 与传统飞行器特点相比, 改变尽可能要少; 多应用先进的传统结构形式或可替代结构形式; 增加涵道比的同时降低噪声; 低氮氧化物燃烧技术和减少燃油消耗技术; 多使用轻质结构, 通过降低阻力和耗油率来改善燃油经济性。这些要求可以用公式(1)表示。其中, 安装耗油率与发动机耗油率相关, 升阻比与飞行器气动设计相关, 空重与轻质材料及结构使用相关。

$$\text{飞行器航程} = \frac{\text{飞行速度} \left(\frac{\text{升力}}{\text{阻力}} \right)}{\text{安装耗油率}} \times \ln \left(1 + \frac{\text{燃油重量}}{\text{酬载} + \text{空重}} \right) \quad (1)$$

针对上述研究目标和技术要求, ERA技术纵览认为, 有很多概念方案的设计可以满足这些要求, 但是绝大多数还停留在纸面上。其中翼身融合飞行器方案被关注较多, 已经在很多细节上进行了研究。翼身融合飞行器方案始于1989年NASA的先进概念工厂, 1990年代就确定了概念研究和关键技术难点演技, 一直延续至今。翼身融合飞行器比传统的圆柱形机身减少了33%的流动接触面积, 由此可以带来巨大的减小黏性流动阻力的潜能。其典型优点包括更高的燃油效率、更小的环境影响和更好的操纵性。与此对

应的技术难点包括非圆柱体压力舱设计、飞行包线边缘的飞行力学设计和飞机发动机一体化设计。

ERA技术纵览提出了降低燃油消耗和噪声的指标, 并提出了可供参考的实现技术方法和路径。其中, 燃油消耗减少潜能的参考对象是1997年大型双通道飞机波音777-200型所采用的技术和油耗指标。ERA计划从机身、机翼、发动机、发动机短舱、进气道和客/货舱体六个大型部件入手, 在复合材料、结构设计、层流控制、混合层流控制、附面层吸收等技术方面针对传统机身机翼、翼身融合和先进翼身融合式飞行器, 提出了油耗降低总目标和每个主要部件的技术进步应该带来的贡献, 如图1所示。ERA计划对应噪声降低也同样给出了总指标和各项技术进步能带来的参考贡献, 如图2所示。

3 环境责任航空计划的途径与实施

ERA计划聚焦于噪声、能量效率和排放等三方面的技术研发与验证应用, 但同时也考虑到了飞机的设计是多种因素的平衡, 其中最重要的是安全, 还要兼顾成本、航程、可靠性、维修性、酬载、乘客舒适度、起降所需跑道长度、巡航高度、巡航马赫数和着陆速度等众多因素。因此, 按照技术的分类和相互影响与制约, ERA计划分为计划管理、机身技术、推进技术和系统综合技术等四个研究领域。每一个技术领域的研究内容都较为专业, 具有很强的针对性。对于有交互影响的技术内容还专门设置了系统综合技术这一研究领域。其中, 计划管理主要关注实施的步骤、路线图与进度等; 机身技术研究主要

包括轻重量结构、飞行力学与控制、降低阻力和减小噪声，主要关注升阻比、空机重量和机身噪声，发动机的安装位置却不是第一考虑；推进技术研究主要包括燃烧室、推进器和核心机技术，主要关注耗油率、发动机噪声和排放指标，机身系统则不是第一考虑；系统综合研究主要包括系统分析、推进与机身综合、推进与机身气动声学 and 先进的整机概念，主要关注整机升阻比、整机重量、整机耗油

率、整机排放指标和整机噪声，首要考虑推进系统与机身的相互影响。

按照ERA计划的流程，2009年NASA在一些初步研究的基础上，开始进行ERA计划的讨论与建议，除NASA外，政府其他研究机构、大型企业和高校，以及其他国家的一些先进航空研发机构都有参与。第一阶段研究从2010年开始，计划在2012年底结束，主要针对2009年5月NASA发布的研究公告所限内容，并对计划在2012年决

定的下一阶段研究内容的关键研究结果与结论进行研讨。第二阶段的研究工作预计从2013年开始，具体内容尚未最后确定。

整个ERA计划的预算从2010年开始，最初的预算只计划到2014年，五年的投资分别是6240万、6440万、6710万、6440万、6050万美元，五年共计划投入3亿1880万美元。但实际上，在2012年进行第一阶段总结时，前三年的实际投资已经比2009年的计划多了230万美元。

2009年5月，NASA发布的研究公告所限内容主要分为三个研究主题：第一个主题是第二代先进飞行器概念，主要包括飞行器概念的发展与可行的技术路线、为后续阶段所进行的关键系统研究等；第二个主题是低氮氧化物燃烧室，主要包括相关概念的发展与可行的技术路线、一些初始的火焰筒试验等；第三个主题是如何快速启动系统研究的方法，包括第一阶段研究的补充、一些可以为ERA目标服务的早期技术进步与成果的转化等。

ERA计划第一阶段的研究范围包括：对从基础研究项目成果中得到的部分概念和技术进行系统级别的试验，系统综合设计与多学科风险分析。其中包括六个关键技术：1) 低重量和强度许可范围内的复合材料使用；2) 为降低阻力而进行的层流控制；3) 能够对新飞机结构形式进行控制的飞行力学技术；4) 低排放燃烧室技术；5) 油耗和噪声都降低的推进综合技术；6) 为降低噪声而使用的屏蔽翼技术。第一阶段完成以后，当时预期的成果包括从众多研究中挑选和确认一些概念与技术，这些概念与技术应该已经经过可行性、有利性、依赖性和风险性研究与评估，并且能揭

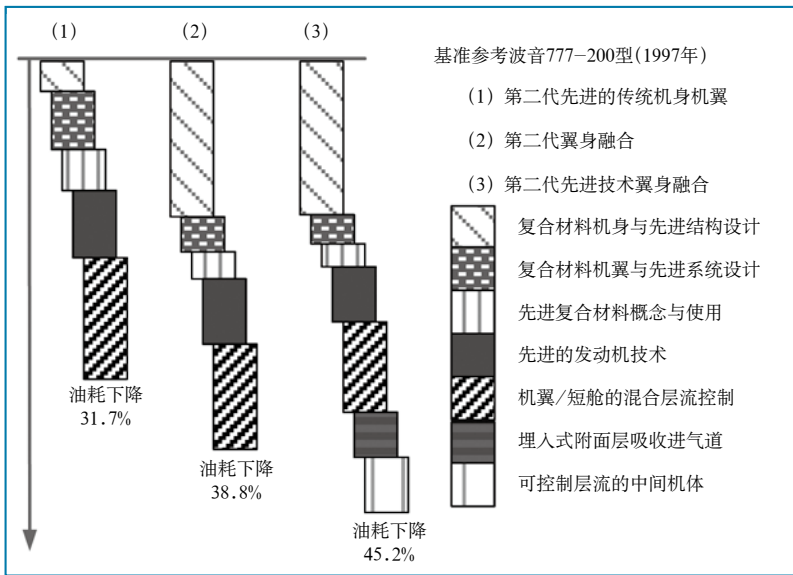


图1 ERA计划的油耗减少指标和参考途径

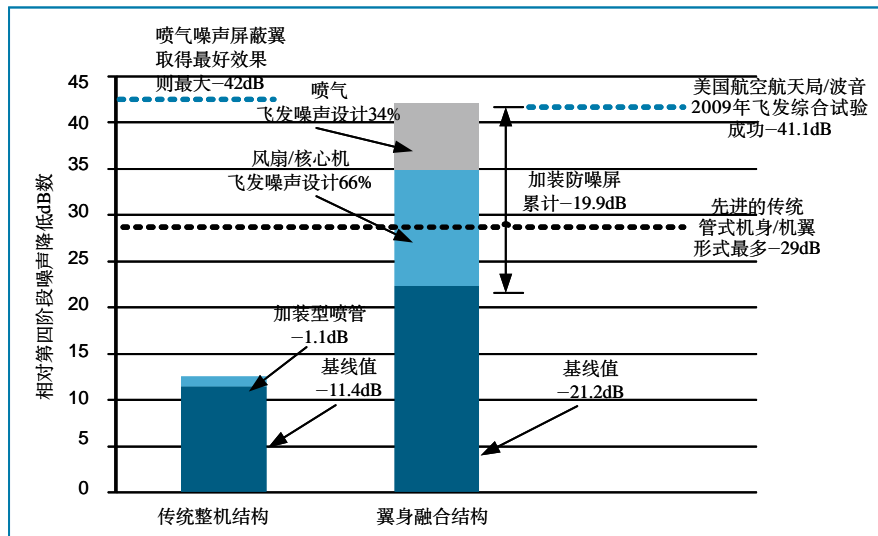


图2 ERA计划的噪声减少指标和参考途径

示一些在多学科交互影响下产生的难以预料的问题和现象；还要形成一些完全创新的或者提炼创新的想法，也可以二者兼而有之，为后续研究做准备。除了这两方面，还计划得到一些详细的成果报告来修正系统研究，以便对第二阶段预计的研究工作进行优先排序和内容取舍。

针对技术成熟度6级的特点，技术纵览要求ERA计划在第一阶段结束时就拿出模型验证机，要求验证机必须保证几何高度逼真，并要求验证机能完成四项任务：1) 验证空气动力学设计，包括最小缩放比例的高雷诺数和高速可压缩效果；2) 验证飞行气动声学试验，主要是噪声源的机理，要求缩放的比例合适，能研究清楚噪声的衰减和屏蔽效果；3) 验证气动弹性和飞行力学技术；4) 能够评估先进的飞行控制概念。

ERA计划在第一阶段就要求这样的模型验证机是有很多好处的。通过在验证机上进行的技术系统综合研究确保满足下两代目标的各种技术进步同时进行，增加对技术相互依赖与相互影响的理解以及硬件的系统综合能力；通过全包线试验可以增加多偏离数据点的有效性，验证真实条件下的飞行雷诺数影响；为技术特性和设计方法的有效性提供数量更多、质量更好的试验数据；收集真实的飞行质量、乘客乘坐质量和客舱噪声数据；作为包括推进技术在内的未来技术概念试验台架进行预先试验技术的储备。

4 环境责任航空计划的最新成果

经过2010~2011两年的正式实施，2012年1月11日，ERA计划借着第50届航空宇航科学会议举行了成果汇报会。三家著名航空企业——波音、

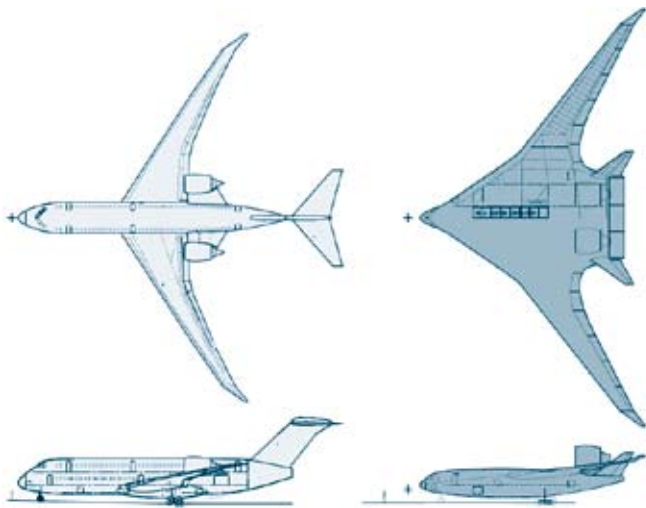


图3 波音公司PSC:双发中部安装传统机身式和翼身融合式飞行器

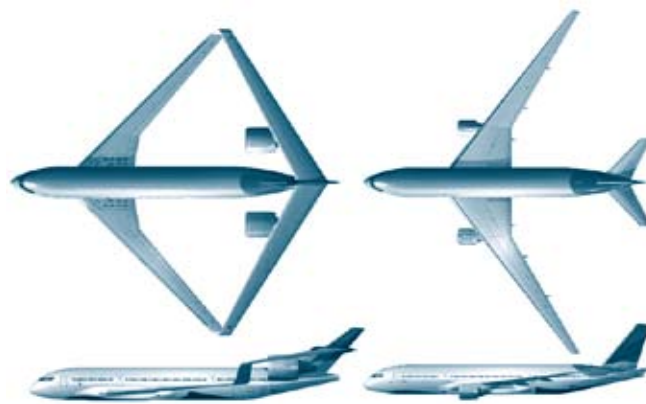


图4 洛克希德·马丁公司PSC:盒式翼型式和传统机身式飞行器

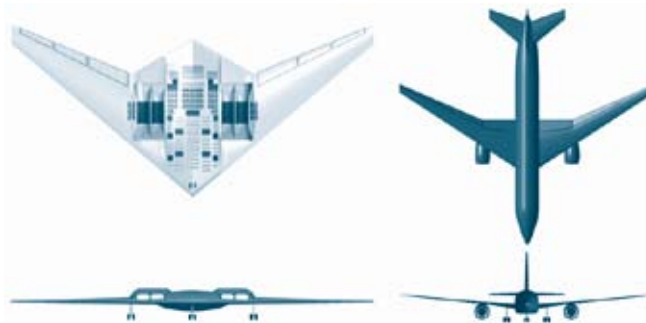


图5 诺斯罗普·格鲁门公司的PSC:飞翼型式和传统机身式飞行器

洛克希德·马丁(洛马)和诺斯罗普·格鲁门(诺格)公司，分别汇报了各自的飞行器研究成果，包括瞄准2025年投入运营的首选系统概念(PSC)设计，分为传统机身和翼身融合两种飞行器，以及翼身融合式飞行器的模型验证机。

波音公司的PSC包括三种飞行器，分别是先进的传统机身、先进的

双发中部安装传统机身以及翼身融合，如图3所示。其中，传统机身飞行器装配的是罗-罗公司的先进三轴涡扇发动机，而翼身融合飞行器则可以装配普惠公司的齿轮驱动风扇发动机(GTF)或者罗-罗公司的开式转子(OR)发动机，翼身融合模型验证机为65%缩比，动力方案采用的是两台普

惠公司的GTF发动机。洛马公司的PSC由著名的臭鼬工厂设计,传统机身式飞行器采用的是罗-罗公司的先进涡扇发动机,非传统机身采用的不是翼身融合,而是盒式翼型(Box Wing),如图4所示。洛马公司认为,盒式翼型可以大幅度减阻,并且与现有翼型相似,减少技术难度,大大提高技术可行性和可操作性。盒式翼型飞行器采用的是罗-罗公司的超高涵道比涡扇发动机,其验证机为50%缩比。诺格公司的PSC都采用的是GE公司的发动机,其非传统机身采用的也不是翼身融合,而是类似B2远程轰炸机的飞翼(Flying Wing),如图5所示。诺格公司认为飞翼飞行器稳定裕度大、业载大,而且噪声低,其验证机为55%缩比,动力方案采用4台GE公司TechX高涵道比涡扇发动机。

5 结束语

综上所述,美国在ERA计划下,对如何减少航空活动对环境的影响展开了深入研究,主要集中在降低噪声、排放和燃油消耗等三个方面。在机身、发动机和飞发一体化设计等领域开展了技术成熟度4级到6级的研究,并于今年完成了模型验证机的制造。其中的层流控制、轻质结构、高效燃烧室、高效推进器、飞发一体化等研究均大范围采用通用技术,其技术与成果完全可以应用于军用航空器上。ERA计划及其相关研究进展是非常值得关注的。

AST

参考文献

[1] Rich Wahls. Environmentally responsible aviation technical overview [C]. Meeting of Experts, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research

Council, 2009.

[2] Tony Strazisar. Environmentally responsible aviation (ERA) project, integrated systems research program [C]. NRC Meeting of Experts, 2009.

[3] Marion C Blakey. Overview of the NASA aeronautics research mission directorate's budget request for fiscal year 2013[R]. Subcommittee on Space and Aeronautics, 2012.

[4] Jean Wolfe. Aeronautics research mission directorate update with emphasis on integrated systems research [C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2010.

[5] Aeronautics Science and Technology Subcommittee. National aeronautics research and development plan[R]. National Science and Technology Council, 2010.

[6] John T Bonet. Boeing ERA N+2 advanced vehicle concept results [C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2012.

[7] Aaron Drake. NASA environmentally responsible aviation (ERA) N+2 advanced vehicle study [C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2012.

[8] Lockheed Martin ERA Team. NASA environmentally responsible aviation [C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2012.

[9] Hernando Jimenez. Probabilistic technology assessment for NASA environmentally responsible aviation (ERA) Vehicle Concepts [R]. AIAA-2011-6967.

[10] William M Kimmel. Systems analysis approach for the NASA environmentally responsible aviation project [R]. AIAA 2011-3528.

[11] Hernando Jimenez, Jeff Schutte, Dimitri Mavris. System readiness and

risk assessment for advanced vehicle concepts—discussion of fundamental concepts [R]. AIAA 2011-423.

[12] Christopher E Hughes. Aircraft engine technology for green aviation to reduce fuel burn[R]. AIAA 2011-3531.

[13] Frank H. Gern. Improved aerodynamic analysis for hybrid wing body conceptual design optimization[R]. AIAA 2012-249.

[14] Alex Velicki, Dawn Jegley. PRSEUS development for the hybrid wing body aircraft[R]. AIAA 2011-7025.

[15] NASA. Restructured aeronautics program[EB/OL]. http://www.aeronautics.nasa.gov/restructured_program.html, 2009-7-23.

[16] NASA. Technical lans[EB/OL]. http://www.aeronautics.nasa.gov/nra_ref_docs.html, 2010-1-22.

[17] NASA. Integrated systems research program [EB/OL]. http://www.aeronautics.nasa.gov/programs_isrp.html, 2011-8-26.

[18] NASA. Fundamental aeronautics program [EB/OL]. <http://www.aeronautics.nasa.gov/fap/index.html>, 2012-1-15.

[19] NASA. Environmentally responsible aviation project[EB/OL]. <http://www.aeronautics.nasa.gov/isrp/era/index.html>, 2011-2-3.

作者简介

朱大明, 博士, 主要从事航空发动机总体性能优化研究。