

民用飞机燃油消耗与节油综述



李海萍, 王永虎*, 郑冉, 宋开运

重庆交通大学航空学院, 重庆 400041

摘要: 航空运输业是全球十大温室气体排放来源之一, 航空燃油作为不可再生的一次性能源, 其燃油成本较高, 燃烧过程中会排放大量污染性气体, 如何减少飞行过程中油耗是航空业界的重要研究内容。要践行航空业的节油减排, 一方面是对燃油消耗的精准预测, 估算航路飞行所需燃油量, 从而减少不必要的航线耗油; 另一方面是从飞机自身性能、外界环境因素的角度出发, 根据飞机不同飞行阶段的燃油流量变化特点, 研究各影响因素对油耗的影响, 从而有针对性地提出降低油耗和排放的策略。该文以飞机节油为目的, 通过对燃油消耗模型现状分析, 得出现有的一些燃油消耗预测方法, 总结未来燃油消耗模型发展趋势, 通过对飞行各阶段的燃油消耗策略进行概述, 总结不同飞行阶段的节油措施, 为航空业节油减碳提供学术支持。

关键词: 民用飞机; 碳排放; 燃油消耗; 节油策略

DOI: [10.57237/j.wjese.2024.01.003](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2024.01.003)

Review of Civil Aircraft Fuel Consumption and Fuel Savings

Li Haiping, Wang Yonghu*, Zheng Ran, Song Kaiyun

College of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400041, China

Abstract: The aviation industry is one of the top ten greenhouse gas emitters worldwide. Aviation fuel, as a non-renewable disposable energy source, is costly and emits a large amount of pollutants during the combustion process. Reducing fuel consumption during flights is an important research focus in the aviation industry. To achieve fuel efficiency and emission reduction in the aviation industry, one aspect is the accurate prediction of fuel consumption, estimating the required fuel for route flights to minimize unnecessary fuel consumption. Another aspect is to study the impact of various factors on fuel consumption based on the aircraft's performance and external environmental factors during different flight phases. This allows for the development of targeted strategies to reduce fuel consumption and emissions. This article aims to achieve fuel efficiency in aircraft by analyzing the current status of fuel consumption models, summarizing existing fuel consumption prediction methods, and identifying future trends in fuel consumption model development. It provides an overview of fuel consumption strategies for different flight phases and summarizes fuel-saving measures for each phase, offering academic support for fuel efficiency and carbon reduction in the aviation industry.

Keywords: Civil Aircraft; Pollutant Emissions; Fuel Consumption; Fuel Saving Strategy

基金项目: 重庆市科技创新与应用发展专项重点项目 (No. cstc2019jscx-fxydX0036); 重庆市研究生科研创新项目 (No. 2022S0085).

*通信作者: 王永虎, wangyonghu@cqjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-31; 接受日期: 2024-02-27; 在线出版日期: 2024-03-11

<http://www.wjese.com>

1 引言

“碳达峰、碳中和”成为当前和未来中国绿色低碳发展工作的核心内容。航空运输业是全球十大温室气体排放行业之一，飞机在运行过程由于燃油燃烧会排放大量的温室气体如二氧化碳(CO_2)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)等。在“十四五”民航绿色发展专项规划中也明确规定了航空公司和机场的绿色发展主要指标。国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)于2023年7月审议通过了新的关于飞机碳排放的国际标准—附件16第四卷[1],规定了飞机碳排放适航标准,在2022年环境报告中针对国际民用航空二氧化碳减排长期理想目标(LTAG)三种情景的减少二氧化碳的进展进行了阐述。在“十四五”规划纲要中也提出了民航绿色发展指标,助力“双碳”目标的实现,航空业也刻不容缓。

传统的航空煤油在燃烧过程中会产生大量的污染性气体,在研究碳排放的同时,如何降低燃油消耗也成为一个问题。燃油成本及其可用性是飞机和整个航空业关注的范围,航空运输业属于高耗能产业,飞机在飞行过程中需要消耗大量的航空燃油,据IATA[2]报道,飞机的燃油成本已经占到航空公司运营成本的35%以上,占据航空公司成本中的重要地位,因此各航空公司纷纷把目光集中在油耗的精确预测上,避免“油烧油”的现象,从而减少航线耗油量,提高运营利润。

“油烧油”的现象会导致估计飞机的燃油消耗不够准确,以此建立的燃油消耗模型并不能很好地反映实际的运行情况,更加准确估计航线油耗、提高燃油利用率是航空公司降低油耗的关键环节[3]。Emma Nygren等[4]预测到2026年,每年的交通运输量将逐年递增5%,燃料需求每年递增3%,根据Schlumberger[5]的数据,预计到2035年,航空运输业对喷气燃料和航空煤油的需求将达到运输燃料需求的14%,而2009年仅为12%。航空燃料是航空运输业主要直接运营成本参数之一,一个国家的经济在很大程度上取决于燃料价格。Majka A等[6]通过分析得出燃料开采成本和供应情况对航空运输业发展几乎没有影响,此外,飞机燃料燃烧与二氧化碳排放成正比,故随着燃料消耗的增加,航空排放也将增加,会影响环境;Chang等[7]指出,飞机燃料消耗较高是航空公司效率低下的主要原因之一,所以为了降低直接运营成本,研究飞机的燃油消耗模型是必不可少的。因此,分析飞机燃油消耗

特性,并建立燃油消耗模型是节油的理论基础。

就目前的研究动态而言,建立燃油消耗模型的方法大多立足于飞机设计与性能优化,涉及飞机性能指标等,某些方面对于飞机燃油消耗和节油工作缺乏基础理论的支撑。传统的计算燃油消耗方法产生的误差较大,目前采用的一些基于模型的方法和通过实时运行数据的方式能得出更为准确的结果。虽然目前已有很多航空燃油消耗领域的研究,但其油耗模型、预测方法和节油研究方面缺乏系统的归纳和总结。

该文综述了飞机燃油消耗及节油研究的方法和最新进展,通过对飞机燃油消耗模型研究进行概述,明确节油减排工作未来的发展趋势,为航司的运营管理优化和节能减排目标提供理论支持。

2 飞机燃油消耗估算

建立精确的燃油消耗模型是节油的基础,目前许多研究都集中在燃油流量的计算和预测上。航空器燃油消耗预测方法主要分为四类:基于飞机性能的研究方法,其研究思路是通过飞机性能手册,分析航空器的受力情况并进行燃油消耗建模;基于数学建模方法,最常见的是利用多元线性回归的统计分析方法,对油耗及其影响因素进行回归建模;基于BADA(Base of Aircraft Data)飞机性能数据库构建燃油消耗估算模型;基于人工智能的方法,深度学习的出现为处理大量非线性特征耦合数据提供了一个新的方向,其中神经网络算法能够表示非线性关系,特别对多个相关参数有良好的非线性映射能力,是当前的研究热点。

2.1 基于飞机性能的研究方法

基于飞机性能的研究主要以飞机性能手册为依据,查询油耗数值,建立燃油消耗原始模型,或通过对航空器进行受力分析来计算燃油量的变化。

通过查询飞机性能手册,曹力等[8]提出一种燃油消耗模型及其动态修正方法,根据飞机性能手册的参数和各个航段的飞行特点,建立了神经网络模型来计算燃油消耗,并利用历史飞行数据进行动态修正,作为飞机性能手册中飞行气象条件样本量的补充,并利用一趟航班作为数据源进行了验证测试。Poll D I A等[9]使用基本的空气动力学理论和数据相关性开发了一个估算方案,该基本方法还扩展到估算巡航升阻比、

发动机推力和发动机总效率, 误差估计和灵敏度分析表明, 在飞机的正常工作范围内, 燃油消耗率的估计误差不超过 5%。Wasiuk D K 等[10]开发了飞机性能模型实现软件 (APMI), 用于更新全球商用航空燃油消耗和排放的估算, 并将其值与联邦航空管理局评估航空全球排放系统 (SAGE) 进行比较。

2.2 基于数学建模的研究方法

数学建模方法主要是建立多元线性回归模型, 基于已有数据, 分析与燃油消耗有关参数, 构建多影响因素与燃油流量之间的数学模型, 从而分析油耗。

Stolzer A J 等[11]使用飞行品质监控 (FOQR) 衍生的数据, 基于多元回归分析建立了波音 757 飞机的燃油消耗模型, 能够识别与燃油消耗相关的异常值, 航空公司可以通过该值来调查燃油消耗过量的原因并及时补救, FOQA 的可用性为航空公司监控燃油消耗提供了新的支持。Bartel 和 Youn [12]以双轴涡扇发动机为研究对象, 提出一种推力油耗模型 (TSFC), 将起飞和爬升期间的推力变化描述为马赫数和高度的函数, 并进行了修正, 将爬升路径分为三段计算最大爬升推力, 其结果有助于对发动机性能进行更真实的预测, 以用于初步飞机设计或初始性能分析。Hassan T H 等[13]对总油耗相关的几个参数如起飞重量、空中距离等进行了研究, 对总燃油消耗、额外燃油和影响参数之间的相关性进行分析, 利用广义线性模型和多元线性回归的方法, 证实了各参数对燃油消耗的影响。Khadilkar H [14]利用运行数据建立了一个估算滑行飞机燃油消耗的模型。将滑行阶段燃油消耗建模为几个潜在解释变量的线性函数, 包括滑行时间、停车次数、转弯次数和加速次数, 并使用最小二乘回归估计系数, 提供了更精确的燃料消耗估计。FV Sanmartin 等[15]提出了一个喷气式飞机起飞性能的数学模型, 可以获得飞机起飞期间的燃油消耗量, 并在给定的气动条件下对特定喷气发动机飞机模型进行了测试。Wu 等[16]通过 QAR 中与飞行、航空发动机、环境相关参数采集来构造特征向量, 建立了燃油流量的回归模型, 以此探究影响飞机燃油流量的主要因素。

2.3 基于 BADA 的研究方法

BADA [17] 是由欧洲航行安全组织 (EUROCONTROL) 开发的航空器基本性能参数数据库, 是目前应用较广的燃油消耗模型, 与真实油耗的

误差估算较小, 具有一定的准确性。

Akinori H 等[18]通过将计算出的燃油流量和总燃油消耗量与飞机快速存取记录器中的数据进行比较, 定量评估了 BADA 模型的准确性, 以单机队的双引擎宽体喷气式客机来进行比较, 计算所得燃油流量与飞行数据吻合良好, 结果显示 BADA 模型与飞行数据之间的误差在 5% 上下波动, 表明 BADA 具有足够的精度来研究燃油消耗。张朋等[19]提出面向航路燃油预测的航迹聚类方法。基于 BADA 数据库, 应用模糊聚类方法对机型进行聚类, 并根据机型聚类结果对航迹进行分类, 并证明了聚类方法的有效性。

2.4 基于人工智能的研究方法

由于航空器燃油消耗问题是多变量, 多影响因素相互耦合的复杂问题, 使用人工智能方法对燃油进行估计是当前研究热点。Abid K [20]采用人工智能的方法开发了一种原始工具, 创建了一个可以更新飞行管理系统 (FMS) 数据库的算法, 利用飞行试验中收集的飞机气动参数来估算气动系数, 侧重于巡航期间的燃油流量预测和优化, 能够帮助机长对飞机的机动行为做出更好的决策。S. Baumann [21]为了改进实际的性能分析, 借助飞行数据记录器, 采用人工智能领域的机器学习方法, 根据全飞行数据构建燃油流量模型, 利用神经网络和决策树两种方法计算燃油消耗量, 并对其应用前景进行了展望。Chang [22]等使用基于模型的方法和飞行数据来提高民用运输机的燃油效率, 采用模糊逻辑建模技术建立参考升阻比, 分析了慢变和快变影响变量的灵敏度导数, 评估了操作中导致气动效率下降的因素, 以提高燃油效率。Oruc R 等[23]基于实际飞行数据 (FDR), 使用粒子群优化算法, 为 B737 飞机的下降阶段开发了一个新的燃油流量模型, 将其应用于模型的误差分析表明, 两个模型都以高精度预测真实的燃料流量值。

在人工智能算法中, 神经网络具有强大的非线性关系表示能力, 对于多影响因素的情况表现出良好的建模和测算能力。人工神经网络能够描述复杂的相互关系, 其性能由网络结构决定, 如隐含层的数量和每层中的感知器的数量、互连的类型、训练方法和激活函数。在训练期间, 改变权重以将初始值的误差减小到最小。

Cui 等[24]提出了一种基于卷积神经网络预测技术的发动机清洗后节油模型的推导方法, 通过与发动机

油耗相关的参数建立巡航阶段的节油模型,挖掘整个飞行过程中 QAR 数据的变化趋势,有效避免了在神经网络模型输入前对离散时间序列数据进行平滑处理造成的拟合精度损失,提高了离散时间序列数据的预测精度。Khan W A 等[25]提出了一种新的自组织神经网络(CNN),通过分析确定连接权重来估计航班的行程燃料,该方法通过操作参数的正交线性变换产生非冗余和线性独立的隐单元,以获得最佳最小二乘解,为控制航空公司过度油耗提供了支持。Li 等[26]以中国东方航空公司为例,通过记录的飞行燃油实验数据,找出影响燃油消耗的相关参数,并通过参数和收集的数据建立了 LSTM 神经网络,且通过建立的神经网络模型得出不同影响因素下航空公司所需的应急燃料。Mevlüt Uzun 等[27]提出了一个物理引导的深度神经网络模型,旨在提高数据驱动模型预测的准确性,结果表明,与利用相同训练数据集的其它监督学习技术相比,模型的燃油消耗预测误差更低。

2.5 小节

目前关于民用飞机燃油消耗的研究多基于现有模型和仿真分析上,随着深度学习和机器学习的发展,结合大数据分析的方法展示出了强大的建模特性,基于已有飞行数据,利用人工智能算法可以得出更为准确的预测结果。如 Vehbi Emrah Atasoy [28]结合机载飞行数据记录器比较了利用深度学习(DL)、随机森林(RF)、广义线性模型(GLM)和飞机性能数据库(BADA)模型预测燃油流量的准确度,以及检查燃油流量(FF)与不同飞机性能参数之间的联系,其结果表明,深度学习模型在所有统计测试中的预测结果更为精准。Chatterji G B [29]利用实际飞行数据,根据飞行轨迹数据、阻力和燃油流量模型估算了燃油消耗过程,喷气式飞机的燃油流量是由飞机数据燃油流量模型的基础规定的推力、真空速和高度来确定的,为利用实际飞行数据的信息计算燃油流量提供了理论基础。利用真实飞行数据,结合数据挖掘算法是燃油消耗建模的发展趋势。

3 飞行各阶段节油策略研究

航空公司在指定航班飞行计划时,应该按照民航规章 121 部(CCAR-121)的要求加注中国定期载客运行时所需的燃油量,所有的飞行阶段节油策略都应在

该规定下进行[30-31]。飞机性能、运动轨迹和气象因素等都会对燃油消耗造成一定影响,在飞机的不同飞行阶段,其飞行特征和燃油消耗规律不同:在飞机的起飞阶段,发动机处于最大工作状态,燃油流量波动明显,此时发动机耗油最多,开始爬升时,随着高度的升高,燃油流量逐渐减小,当飞机爬升到一定高度进入巡航阶段时,外界环境基本平稳,参数变化范围很小,燃油流量保持稳定,且值最小,在下降阶段,飞机的势能转化为动能,燃油流量减小。因此需要根据飞机不同飞行阶段的燃油消耗特性进行分析。

每个航班的起飞燃油中包含了四个部分:航程燃油、不可预期燃油、备降燃油、最后储备燃油。飞行运行可分为地面滑行、起飞、爬升、巡航、下降、进近和着陆七个飞行阶段,其中爬升、巡航和下降阶段构成了燃油消耗的主要讨论范围,而巡航阶段的运行时间和航程最长,是燃油消耗的主要阶段。

3.1 地面运行阶段节油策略

飞机在地面运行时,其供电来源是发动机和 APU 消耗燃油,飞机在地面时的节油工作主要依靠减少辅助动力装置(APU)的使用[32]。张伟[33]等将不同机型 APU 油耗进行对比分析,提出可以通过减少 APU 的工作时间来降低油耗,或采取一些替代设施如地面电源车和气源车等,在不需要 APU 引气时,将启动 APU 到飞机推出的时间尽量减少,考虑单发运行达到节省燃油和运行成本的目的。张恒[34]基于运行数据对 ARJ21 飞机进行节油策略研究,建立燃油消耗模型后,针对 APU 的优化使用从飞机维修、运行保障和飞行三个方面提出了具体措施。

此外,处于地面运行状态时,机组应当使发动机处于最小推力工作状态下,减少不必要的刹车次数,按照预先制定的最短路线滑行,还可以通过合理控制开车时间和滑行路径等方式进行节油。

3.2 爬升阶段节油策略

在飞机的起飞阶段,外界环境条件变化迅速,飞行情况复杂,燃油流量值基本保持不变,除了飞机自身重量和发动机性能外,机场所处海拔高度、外界环境因素也会影响到燃油消耗,在起飞结束后,爬升到规定的巡航高度期间,环境参数变化更大,爬升速度、俯仰角和外部环境都会影响油耗。

在起飞时,尽量采用较小襟翼起飞,可以减小飞

机阻力,使飞机具有更好的爬升性能,波音公司针对起飞襟翼设置对燃油消耗影响进行了分析,其结果表明,襟翼越低,则燃油消耗越少,飞机具有更好的爬升性能,但襟翼设置必须与实际情况相符合,减少低高度飞行时间。

减噪音离场程序(NADP)是国际民航组织(ICAO)提出的关于两种起飞减噪音离场程序。NADP1用于减轻距离跑道离场端较近的噪声敏感区的噪声,是从离地 800 英尺以上开始实施,根据减噪音推力设置调整并保持推力,从离地 3000 英尺(914 米)保持正上升率,开始加速爬升和襟翼收起;NADP2用于减轻距离跑道离场端较远的噪声敏感区的噪声,到达至少 800 英尺高度时,减少飞机仰角保持正上升率,从 1000 英尺(305 米)开始加速爬升至襟翼收起速度,在 3000 英尺离地高度增速到正常的航路爬升速度。NADP2 比 NADP1 少消耗 3%到 4%的燃料,与较高的起飞襟翼设置和 NADP1 相比,将较低起飞襟翼设置与 NADP2 结合可以节省约 4%-5%的燃油。爬升阶段中,爬升速度越大,则油耗更多,尽可能使用最优速度进行爬升。

此外,襟翼构型也会对油耗产生一定的影响,曾丽辉等[35]根据空客公司各机型全推力情况下,将构型 2 或构型 3 与构型 1+F 所消耗的燃油进行对比,认为大襟翼构型具有更大的延展面积,比小构型需要消耗更多燃油,且灵活推力起飞延长了飞机处于低高空的时间,增加了燃油消耗。

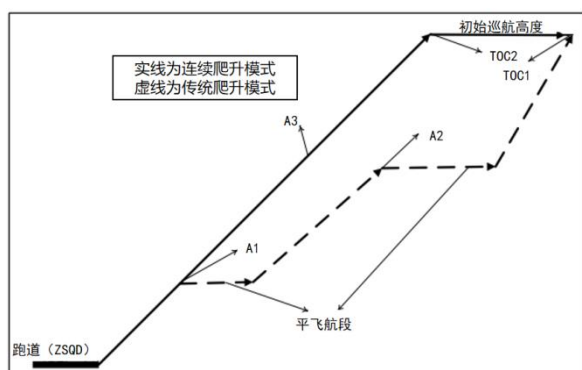


图 1 爬升与传统爬升方式示意图

连续爬升运行 CCO 是在优化空域管理和飞行程序设计的基础上,结合空中交通管制措施、飞行操作方式实现航空器连续爬升的一种运行方式,作为一种新的航行技术,能够节油减排,提高经济性。Zhang 等[36]通过拟合 QAR 实际飞行数据提取气动参数之间的关系,考虑侧风影响下提出一种新的燃油消耗模型,如图 1 所示,以青岛-虹桥飞行计划为例,结合飞行剖面图和

航路点信息验证了理论模型,并基于该模型量化了连续爬升运行(CCO)相对于传统爬升运行的燃油节省。王楠等[37]以中国某机场为例,利用数据模型对连续爬升运行和传统爬升进行了对比分析,结果表明 CCO 能提高机场和航空器运行效率。徐冬蕾等[38]根据飞行性能模型结合实际航线对连续爬升运行进行仿真分析,结果如图 2 所示,表明连续爬升可以缩短爬升时间,从而降低油耗。

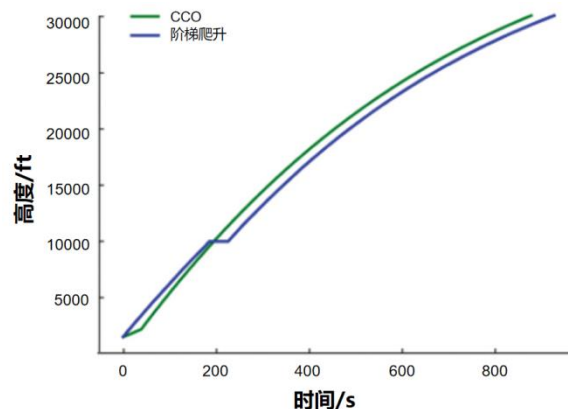


图 2 阶梯爬升和 CCO 垂直剖面图

3.3 巡航阶段节油策略

巡航阶段是油耗的主要阶段,此时飞机性能参数变化很小,外界环境相对波动较小,燃油流量平稳,此时的油耗主要与巡航时间、巡航速度和飞行高度有关。

速度因素。成本指数 CI 是指时间与燃油成本的比值,经济巡航速度取决于成本指数,较低的成本指数耗油量较少,但成本指数并非越低越好,飞机在繁忙航路如果因速度稍慢而降低高度,由于低成本指数速度变慢,则可能造成时间延误。巡航速度分为经济巡航(ECON)、远程巡航(LRC)和最大航程(MRC)速度,ECON 速度是整个航段成本最低的速度,飞行过程中巡航速度和高度都会发生变化,MRC 速度表示成本指数输入为 0 时对应的 ECON 速度,具有最小航程耗油和最长巡航里程的特点,LRC 速度是以 1%的燃油里程作为代价,速度交 MRC 是飞行高度保持不变的远程巡航方式,其对应的曲线随速度变化平缓,图 3 展示了波音商用飞机 MRC 和 LRC 的比较。在飞行过程中,需要根据不同的情景选择合适的飞行速度,以改善燃油管理。

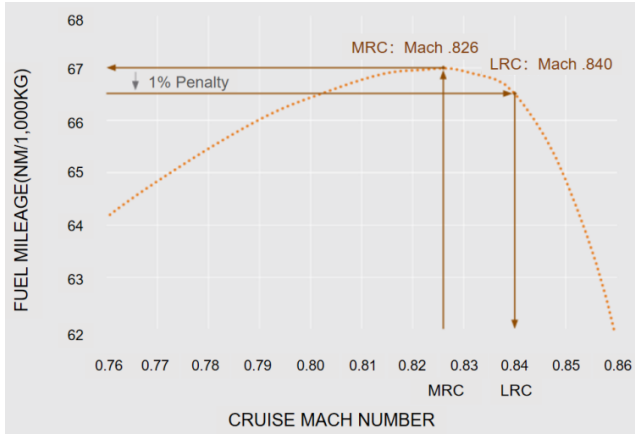


图3 典型的 MRC 与 LRC 比较

高度影响。最佳巡航高度是使目标值最优的高度，随着燃油消耗，飞机重量减轻从而可以改变巡航高度，巡航过程中满足空管对飞行高度层限制的条件下，需要使高度尽可能接近最佳高度。

风的影响。LRC 仅适用于静风条件下的巡航，MRC 速度和 LRC 速度基本不受风的影响，而 ECON 速度需要考虑风的影响，在顺风 and 逆风条件下，ECON 的速度会产生变化，减少滞空时间。

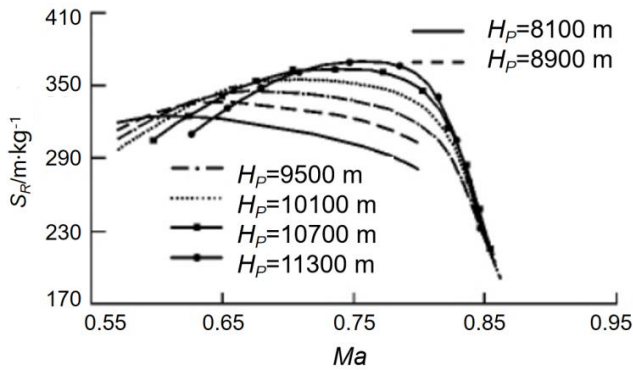


图4 不同巡航高度时的燃油里程曲线

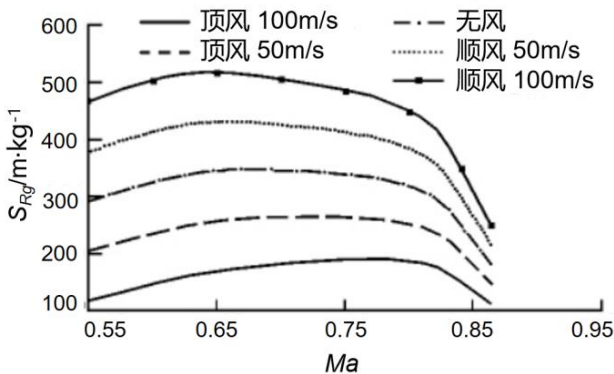


图5 地面燃油里程随大气风速的变化曲线

温瑞英等[39]对巡航性能进行相关研究，提出一种相对准确的方法对巡航性能优化问题进行分析，求得 MRC 速度、LRC 速度等情况下的航程和航时，结果如图 4 和图 5 所示，其中，根据马赫数和燃油里程的关系，结合质量等数据得出最佳巡航高度的数值。此外，采用地速和燃油流量确定地面燃油里程模型研究风对巡航性能的影响，得出顺风时减小马赫数、顶风时增加马赫数可以减小油耗。

此外，巡航阶段的质量、大气温度等参数都会影响到飞机油耗。

3.4 下降阶段节油策略

飞机在下降过程中，燃油流量会出现较大的波动，在此阶段中，燃油消耗主要受飞机下降速度、高度和外界环境变化的影响，不同的下降进近方式如阶梯进近或持续进近也会影响飞机油耗。

在一般情况下，都会选择更节油的低速下降的方式，高速下降时间较短，不利于建立稳定的进近和着陆飞行状态，如果由于空中交通管制等原因，机场距离较短时可以采取高速下降的方式。

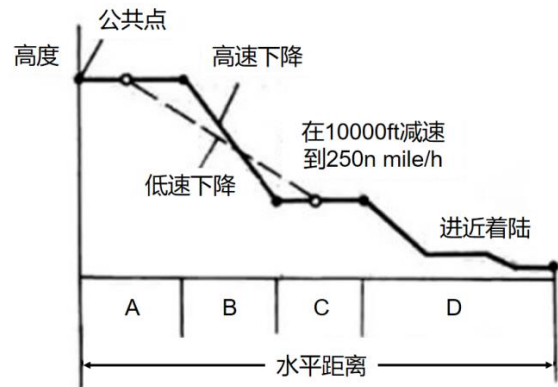


图6 典型下降剖面

延迟襟翼进近。波音公司曾对襟翼的放下时间的节油情况进行对比分析，襟翼选择可能会推迟到距机场海拔 1000 英尺之前，以节省燃料、减少噪声和排放，或满足空中交通管制的速度要求。进近时，晚放襟翼和起落架可以减小阻力，降低油耗。着陆时，少使用反推可以降低油耗。

连续下降运行 (CDO)。连续下降运行与连续爬升类似，CDO 程序在研究早期主要体现为连续下降进近 CDA，也称固定下滑角进近。在航空器到达最后进近点之前，尽量延长高高度飞行时间，在下降定点之后

利用最小发动机推力,以一种低阻力构型连续下降,CDO可以降低燃油消耗和噪音。

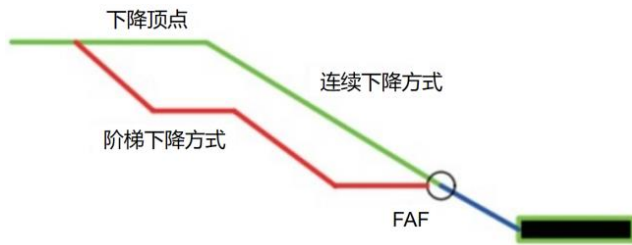


图7 航空器连续下降与传统下降方式示意图

Ma 等[40]考虑了连续下降的轨迹优化问题,设计了 CDO 过程的最佳轨迹,通过多阶段最优控制问题,得出 CDO 轨迹优化结构,并考虑仿真结果和分析结果来验证方法的有效性。Daichi Toratani 等[41]探究了在拥挤空域条件下实现 CDO 的最大化效益,通过模拟器实验和蒙特卡罗模拟评估操作的可行性,并演示了固定 FPA 下降的能力。Ye 等[42]利用历史飞行数据,通过拟合快速存储器 (QAR) 数据中的飞行条件来预测燃油流量,经预测传统下降计算偏差后,对 CDA 程序进行了案例分析,估计了基本情景中的燃油消耗。Wu 等[43]结合飞行性能数据,基于 BADA 仿真模型建立了燃油消耗和污染物排放模型,通过案例分析连续下降较传统下降方式的节油量,以及对各气态污染物的减排效果。

3.5 小节

基于前文对各阶段节油策略的分析,现总结如下:

表 1 各阶段节油策略总结

| 飞行阶段 | 节油策略 |
|------|---------------------------|
| 地面运行 | APU 使用、发动机工作状态、刹车次数、滑行路径等 |
| 爬升 | 襟翼状态、减噪音离场程序、襟翼构型、CCO 等 |
| 巡航 | 速度、高度、风、质量、大气温度等 |
| 下降 | 速度、延迟襟翼进近、CDO 等 |

在实际飞行中,还可以结合相应的具体环节和节油可控点,采取对应的措施,除了各阶段的节油策略外,航空公司还可以通过加强运行控制能力,做好地面维修和保障工作,制定科学的决策,为节油减排贡献一份力量。

4 结论与展望

节油是评估民用航空技术的重要方面,燃油消耗

模型的发展展现出了与大数据结合的趋势,基于实际运行数据,采用智能算法构建燃油消耗模型,可以实现燃油消耗的精准预测,帮助航空公司制定相关燃油计划,避免产生“油耗油”现象。节油需要从多个角度出发,结合各阶段飞行特点与环境影响,制定合适的飞行计划。节油不仅依赖于飞机本身气动构型,如安装翼梢小翼可以降低阻力从而节油,还与一些新的航行技术相关,如 CCO 和 CDO 等,节油工作还需航空公司多个方面协作,采取相应措施,不断提高油耗模型的精确性,加快节能减排工作的步伐。

参考文献

- [1] ICAO. Environmental Protection, Volume 4: Aircraft Engine Emissions [C] // International Standards and Recommended Practices, 2nd ed., July 2023.
- [2] 刘凯, 张明, 孔祥鲁. 基于 BADA 燃油消耗率的进场航班延误成本预测 [J]. 航空计算技术, 2017, 6(47): 84-89.
- [3] 刘婧. 基于飞行数据分析的飞机燃油估计模型 [D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [4] Nygren E, Aleklett K, Höök M. Aviation fuel and future oil production scenarios. Energy Policy. 2009, 37(10): 4003–4010 5.
- [5] Schlumberger CE, Wang D. Air transport and energy efficiency. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2012, Transport papers TP-38.
- [6] Majka A, Brusow V, Klepack Z. Fuel Consumption and transportation energy effective analysis. Eur Personal Air Transp Syst Stud, 2007, EP- D4.3, SFC-V0, 1–23.
- [7] Chang YT, Park HS, Jeong JB, Lee JW. Evaluating economic and environmental efficiency of global airlines: a SBMDEA approach. Transp Res Part D: Transp Environ, 2014, 27: 46–50.
- [8] 曹力, 贾倩茜, 舒平等. 面向签派的飞行燃油消耗估计方法 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2015, 26(01): 24-28.
- [9] Poll D I A, Schumann U. An estimation method for the fuel burn and other performance characteristics of civil transport aircraft during cruise: part 2, determining the aircraft's characteristic parameters [J]. Aeronautical Journal -New Series-, 2020, 125(1284): 1-45.
- [10] Wasiuk D K, Lowenberg M H, Shallcross D E. An aircraft performance model implementation for the estimation of global and regional commercial aviation fuel burn and emissions [J]. Transportation Research Part D, 2015, 35: 142-159.

- [11] Stolzer A J. FUEL CONSUMPTION MODELING OF A TRANSPORT CATEGORY AIRCRAFT: AF LIGHT OPERATIONS QUALITY ASSURANCE (FOQA) ANALYSIS [J]. Journal of Air Transportation, 2003, 8(2): 3.
- [12] Bartel M, Young T M. Simplified Thrust and Fuel Consumption Models for Modern Two-Shaft Turbofan Engines [J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(4): 1450-1456.
- [13] Hassan T H, Sobaih A E E, Salem A E. Factors affecting the rate of fuel consumption in aircrafts [J]. Sustainability, 2021, 13(14): 8066.
- [14] Khadilkar H, Balakrishnan H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2012, 17(7): 532-537.
- [15] Sanmartin F V, Insausti X, Rodriguez M Z, et al. A Mathematical Model for the Analysis of Jet Engine Fuel Consumption during Aircraft Cruise [J]. IEEE, 2021.
- [16] Zixuan W, Weizhen L, Cong C, et al. Research on Influencing Factors of Fuel Flow Based on QAR Data [C]//2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). IEEE, 2020: 800-804.
- [17] Eurocontrol Experimental Center. User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) [OL/DB]. http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/ACE_bada_documents_36.html. 2008.
- [18] Akinori H, Yuto M, Yoshikazu M, et al. Accuracy Evaluation of an Aircraft Performance Model with Airliner Flight Data [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences Space Technology Japan, 2013, 11: 79-85.
- [19] 张朋, 李杰, 赵志奇等. 面向航路燃油预测的航迹聚类 [J]. 航空计算技术, 2019, 49(06): 44-47.
- [20] Abid K, Ghazi G, Thioulouse L, et al. New Algorithm for Fuel Flow Prediction and its Correction during the Cruise - Application on the Cessna Citation X Business Aircraft [C] // AIAA Scitech 2019 Forum. 2019.
- [21] Baumann S, Klingauf U. Modeling of aircraft fuel consumption using machine learning algorithms [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11(1): 277-287.
- [22] Chang, Ray C. Examination of excessive fuel consumption for transport jet aircraft based on fuzzy-logic models of flight data [J]. Fuzzy Sets & Systems, 2015, 269: 115-134.
- [23] Oruc R, Baklacioglu T. Modeling of fuel flow-rate of commercial aircraft for the descent flight using particle swarm optimization [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2021, ahead-of-print (ahead-of-print).
- [24] Cui Z, Zhong S, Yan Z. Fuel savings model after aero-engine washing based on convolutional neural network prediction [J]. Measurement, 2020, 151: 107180.
- [25] Khan W A, Chung S H, Ma H L, et al. A novel self-organizing constructive neural network for estimating aircraft trip fuel consumption [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 132: 72-96.
- [26] Li L, Yuan S, Teng Y, et al. A Study on Sustainable Consumption of Fuel—An Estimation Method of Aircraft [J]. Energies, 2021, 14.
- [27] Mevlüt Uzun, Demirezen M U, Inalhan G. Physics Guided Deep Learning for Data-Driven Aircraft Fuel Consumption Modeling [J]. 2021.
- [28] Atasoy, V. E. Detailed Analysis of Aircraft Fuel Flow Using Data from Flight Data Recorder. Transportation Research Record, 2023, 2677(6), 759-772.
- [29] Chatterji G B. Fuel Burn Estimation Using Real Track Data [C] // 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO). American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [30] 中国民航总局 CCAR-121-R2: 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则 [Z]. 2005.
- [31] FAA. FAR PART121 [S]. US: FAA.
- [32] 王晓宇. 基于 QAR 的飞机燃油消耗特性及节油飞行研究 [D]. 中国民航大学, 2015.
- [33] 张伟. 民航节油策略研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2016(02): 23-27+68.
- [34] 张恒. 基于运行数据的 ARJ21 飞机节油策略研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [35] 曾丽辉, 赵赶超. 基于 QAR 的飞机燃油监控及节油管理研究 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2022, 33(4): 5.
- [36] Zhang M, Huang Q, Liu S, et al. Fuel Consumption Model of the Climbing Phase of Departure Aircraft Based on Flight Data Analysis [J]. Sustainability, 2019, 11.
- [37] 王楠, 白雪莲. 机场 CCO/CDO 飞行程序运行对比分析 [J]. 民航学报, 2022, 6(05): 56-58.
- [38] 徐冬蕾, 丁冬进, 肖刚等. 基于飞机性能的连续爬升程序建模和油耗分析 [J]. 民用飞机设计与研究, 2021, (04): 15-21.
- [39] 温瑞英, 魏志强, 王红勇等. 民用飞机巡航性能计算研究 [J]. 飞行力学, 2015, 33(04): 289-292+296.
- [40] Ma L, Tian Y, Zhang Y, et al. Trajectory Optimization of Aircraft for A Continuous Descent Continuous Procedure [C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). 2020.

- [41] Toratani D, Wickramasinghe N K, Westphal J, et al. Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace with speed control functionality: Fixed flight-path angle descent [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107.
- [42] Ye L, Cao L, Wang X. Evaluating Fuel Consumption for Continuous Descent Approach Based on QAR Data [J]. Promet - Traffic - Traffico, 2019, 31(4): 407-421.
- [43] Wu W, Hu R, Zhang J, et al. Research on Aircraft Energy-saving and Emission-reduction of Continuous Descent Approach Based on BADA model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017.