

基于碳排放量的机型排班优化

罗 军, 吴 迪

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:绿色低碳是当今的发展要求。航空公司可以从优化机型排班工作作为突破口,实现减少碳排放量的目的。为计算多条航班计划碳排放量,采用国际民用航空组织(ICAO)碳排放量计算公式,针对某航 A320 和 B737 两种机型,以碳排放量最小为约束条件,使用 CPLEX 软件求出某个航段上机型的最优解,最终实现整个航段的碳排放量最小。结果显示,在航段上使用两种混合机型比使用单一机型可节约更多的碳排放量,碳排放的减少区间为 0.6% ~ 2.9%,证明从碳排放量优化航空公司机型具备一定的合理性。

关键词:航空公司排放;起飞着陆循环;机型排班优化

中图分类号:[U-9];[U8] **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0136-04

近年来,我国民航业得到巨大发展,2021 年民航运输总周转量相较于 10 年前增长 48%,机队规模扩大近 1.3 倍。与此同时,民航业燃油消耗和碳排放量与日俱增,涉及民航业的碳排放量占比越来越大。2012—2019 年,国内航空公司碳排放量以年平均 10% 的速度向上递增,至 2019 年,国内的航空公司每年碳排放总量已达到 7 500 万 t^[1]。随着航空运输需求的不断增加,涉及民航业的碳排放量会处于越来越高的态势。因此,涉及民航业的碳排放规划和管理显得愈发重要。

针对民航碳排放量不断攀升的趋势,国内外许多学者开展了民航领域碳排放量的研究。Cui 等^[1]通过构建国内 413 条主要航线的数据库,包括主要机型的碳排放强度、各航空公司和各航线的爬升/巡航/下降碳排放量以及直飞航班的估算排放量,计算了 413 条航线和 40 家航空公司的碳排放量和收入乘客公里数。Wang 等^[2]基于历史航班时刻表和广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)轨迹,结合国际民用航空组织的发动机排放数据库和飞机数据库,建立了完整航班运行的燃油燃烧和碳排放计算方法。Baumeister^[3]计算了短中长 3 类航线市场中特定航班的碳排放量,并分析了机型以及航班经停对碳排放的影响。庄天玺等^[4]基于 kaya 恒等式模型,采用

广义迪氏分解法将中国民航碳排放量分解为 8 个影响因素贡献值之和,将 8 个影响因素分为强度效应、规模效应以及效率效应进行分析,分析结果表明,规模效应有明显的碳排放促进作用,强度效应总体上有明显的碳排放抑制作用,效率效应既有促进作用,也有抑制作用。罗凤娥等^[5]以国内某中等规模航空公司作为研究对象,通过设置不减碳情景、基础减碳、快速减碳和理想减碳 4 个发展情景,使用蒙特卡洛模拟方法,以 2021 年为基准,对该航空公司 2022—2035 年的碳排放进行仿真预测。结果显示,由于公司的发展需求,4 种情况下都无法完成碳排放总量达峰,但其每万架次碳排放量明显降低,表明碳减排措施的有效性。向小军等^[6]基于时间序列的方法建立了传统的差分整合移动平均自回归(auto-regressive integrated moving average, ARIMA)模型以及优化的长短期记忆网络(long short term memory, LSTM)模型,对航空器碳排放量、碳排放强度以及吨公里碳排放量进行了预测。通过鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)对 LSTM 中的学习率和隐藏节点数进行优化。预测结果显示,在当前政策没有较大变动的情况下,未来民航业碳排放将会持续上升,这将对我国在环境保护方面的总体规划造成较大冲击,为我国完成 2030“碳达峰”目标造成一定的困难。许绩辉和王

收稿日期:2023-07-05

基金项目:中国民用航空飞行学院“大学生创新创业”项目(S20210203047)。

作者简介:罗军(1970—),男,湖北黄梅人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,教授,硕士,研究方向为空中交通管理;通信作者吴迪(1994—),男,湖北荆门人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为航班运行控制及绿色民航。

克^[7]基于 LEAP 构建自下而上的中国民航业能源系统模型,设置冻结、现有政策、力度、替代和革命 5 组情景,深入分析民航业的驱动因子和发展趋势,探讨中国民航业中长期低碳发展的技术路径。

综合以上涉及碳排放的研究文献可发现,涉及碳排放的研究大多以机场、航司为研究对象,多为宏观研究层面,而在航空公司运营过程中,基于碳排放量的微观处理并未有所研究。因此,在保障航空公司正常运营的同时,通过选择合适的机型减少碳排放,优化机型配置,最终实现减少碳排放量的目的。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究方法

飞机从起飞机场撤轮档到目的地机场挡轮档视为一个完整的运行周期。整个运行周期可分为滑出、起飞、爬升、上升、巡航、下降、进近、着陆、滑入 9 个阶段。根据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)提出的碳排放计算公式^[8-9],一次起飞降落周期碳排放量近似于起飞着陆阶段(landing and take-off, LTO)、爬升巡航和下降阶段(climb cruise and descend, CCD)之和。根据 LTO 和 CCD 两个阶段的运行条件和计算公式,分别计算两个阶段的碳排放量,最后汇总得出整个航段的碳排放量。

LTO 阶段计算公式为

$$E_{LTO} = \sum_{i=1}^n T_i F_i N C, i = 1, 2, 3, 4; n = 4 \quad (1)$$

式中: E_{LTO} 为 LTO 阶段内的碳排放量, kg; $i = 1, 2, 3, 4$ 分别为起飞、爬升、进近、滑行 4 个运行阶段; T_i 为 i 运行阶段内的时长, s; F_i 为 i 运行阶段内燃油流量, kg/s; N 为发动机数量; C 为航空煤油的碳排放系数, 一般规定为 3.157 kg/kg。

CCD 阶段的计算公式为

$$E_{CCD} = \sum T_{CCD} F_{CCD} N C \quad (2)$$

式中: E_{CCD} 为飞机在 CCD 阶段内的碳排放量, kg; T_{CCD} 为飞机在 CCD 阶段的运行时长, s; F_{CCD} 为航空器在 CCD 阶段的燃油流量, kg/s。

将 LTO 和 CCD 阶段的碳排放量相加, 可得到航空器在一个完整起降周期内的碳排放量, 即

$$E_{TOTAL} = E_{LTO} + E_{CCD} \quad (3)$$

式中: E_{TOTAL} 为航空器一个起降周期内的碳排放量, kg。

1.2 数据来源

研究所使用的数据主要包括发动机排放数据和航空公司的运行数据。

1.2.1 发动机排放数据

发动机排放数据来自 ICAO 发动机排放数据库(Engine Emissions Databank, ESDB)^[10]。ESDB 针对各种发动机型号列出了排放清单, 根据不同的运行阶段, 分别列出推力设置、使用时长和燃油流量等基础数据。ICAO 碳排放算法根据飞行各个阶段计算碳排放量后相加汇总得出。下面分别介绍 LCD 和 CCD 阶段的数据。

1.2.1.1 LTO 阶段

该航空公司的主力机型为 A320 和 B737, 因此以两种机型作为研究对象。由于同一种机型之间发动机型号可以交叉使用, 因此选取占比最大的发动机型号进行计算。该航空公司 A320 机型发动机以国际航空发动机公司(International Aero Engines, IAE)生产的 V2500 型发动机和 CFM 国际公司生产的 CFM56-5 型发动机为主, 数量比例约为 1:1。因此根据发动机排放库数据, 选取两类发动机的排放数据计算算术平均值, 见表 1。

B737 型号飞机主要以 CFM 国际公司生产的 CFM56-7 型发动机。选取 CFM56-7 发动机数据, 得到数据见 2。

根据发动机排放数据库规定, LTO 各个阶段使用时长为固定数值, 如表 2 中起飞时间 42 s、爬升时间 132 s, 但在滑行阶段($i = 4$)的时间可以通过航空公司运行数据的滑行时间进行计算, 从而得到更为精准的碳排放量。计算方式如下: 在起飞机场, 滑行时间为起飞时刻与撤轮档时刻的差值; 在目的地机场, 滑行时间为挡轮档时间与着陆时间的差值。起降机场的滑行时间相加从而得出航班的实际滑行时间。

表 1 两种发动机各个阶段推力设置、使用时长及燃油流量的算术平均值

飞行阶段	推力设置/%	使用时长/s	燃油流量/(kg · s ⁻¹)
起飞阶段	100	42	1.186
爬升阶段	85	132	0.880
进近阶段	30	240	0.333
滑行阶段	7	1 560	0.119

表 2 CFM56-7 发动机各个阶段推力设置、使用时长及燃油流量

飞行阶段	推力设置/%	使用时长/s	燃油流量/(kg · s ⁻¹)
起飞阶段	100	42	1.089
爬升阶段	85	132	0.902
进近阶段	30	240	0.313
滑行阶段	7	1 560	0.109

1.2.1.2 CCD 阶段

CCD 阶段的运行时间无法通过计算多个阶段时间之和得到。但因为总的飞行阶段分为 LTO 和 CCD 两个阶段,因此可以粗略的估计 T_{CCD} 的时长为总飞行时长 T_{TFT} 减去 T_{LTO} 时长,即

$$T_{\text{CCD}} = T_{\text{TFT}} - T_{\text{LTO}} \quad (4)$$

同时,CCD 阶段包含多种运行状态,爬升巡航、下降等阶段会根据运行条件使用不同的推力设置,因此燃油流量无法确定某一固定值。但根据 Gaspar 和 Sousa^[11] 的研究,民航客机在巡航阶段的推力约为 82%,与爬升阶段的推力设置非常接近。因此,为方便研究,设置巡航阶段推力为 85%。A320 和 B737 的燃油流量分别为 0.88 kg/s 和 0.902 kg/s。

1.2.2 航空公司运行数据

根据某航司某月的运行情况获得航班运行数据,包括航线网络数据、起降机场、飞行时间、滑行时间、飞机型号等基础信息。

2 机型碳排放量模型和运算结果

考虑到航空公司的航线正常运营,并且基于各个机场都有足够数量的两种飞机进行选择,且暂不考虑机型座位数、机务、地服等客观因素影响。参考崔如玉^[12]、邱明杰^[13] 提出的飞机排班公式,提出以下计算数学模型和求解算法。

定义 $a = 1, 2$ 分别代表 A320 和 B737 机型。定义 c_{ab} 为两种机型在第 b 条航线上的碳排放量。令 $x_{ab} = 1, 0$ ($b = 1, 2, \dots, m$) ($x_{ab} = 1$, 第 a 类机型执行第 b 段航线; $x_{ab} = 0$, 第 a 类机型不执行第 b 段航线)。

整条航段最小碳排放量 $E_{\min}$ 的计算公式为

$$E_{\min} = \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^m c_{ab} x_{ab}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{b=1}^m x_{ab} = 1, a = 1, 2 \\ x_{ab} = \begin{cases} 1, & b = 1, 2, \dots, m \\ 0, & \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

3 计算数据和优化结果

3.1 样本计算

选取航空公司航线网络。选取航线网络数据量的原则:①航线数据足够大,以当月至少 30 次航班任务作为选取标准;②某条航线上 A320 和 B738 两种机型均有执行航班任务,同时任务数量约等于 1:1 的比例;③选取航班数据后对数据进行处理,计算飞行时长和滑行时长的算术平均值,实现碳排放量的计算。综上,选取以下 5 条航线作为计算样本,见表 3。计算结果见表 4~表 8。

表 3 航空公司航班计划

计划序号	航班计划
1	广州—杭州—深圳—杭州
2	深圳—合肥—沈阳—郑州
3	深圳—常州—深圳—襄阳—深圳
4	广州—南京—成都—无锡—成都
5	济南—广州—济南—深圳—济南

表 4 计划 1 的分段、总和碳排放量

飞机机型	碳排放量/t			
	广州—杭州	杭州—深圳	深圳—杭州	总和
A320	15.418	20.169	15.829	51.416
B737	15.452	20.082	16.229	51.769

表 5 计划 2 的分段、总和碳排放量

飞机机型	碳排放量/t			
	深圳—合肥	合肥—沈阳	沈阳—郑州	总和
A320	17.597	20.817	23.608	62.022
B737	17.756	20.453	23.371	63.581

表 6 计划 3 的分段、总和碳排放量

飞机机型	碳排放量/t				
	深圳—常州	常州—深圳	深圳—襄阳	襄阳—深圳	总和
A320	18.710	22.353	18.188	19.159	78.410
B737	18.598	23.453	18.298	19.911	80.262

表 7 计划 4 的分段、总和碳排放量

飞机机型	碳排放量/t				
	广州—南京	南京—成都	成都—无锡	无锡—成都	总和
A320	17.485	25.432	20.821	27.055	90.794
B737	17.172	26.626	20.518	28.647	92.963

表 8 计划 5 的分段、总和碳排放量

飞机机型	碳排放量/t				
	济南—广州	广州—济南	济南—深圳	深圳—济南	总和
A320	25.845	23.544	27.762	23.707	100.859
B737	26.265	23.417	28.266	23.512	101.160

由表 4~表 8 可知,各个航段两种机型排放量相差较小,但总航段相加后 B737 的碳排放量多于 A320 机型,这与 B737 机型在 CCD 阶段拥有更高耗油率有关。该数据为月平均值,若将计算换算成以月、年为单位,总体上 B737 比 A320 会排放更多的碳。

3.2 机型排班优化

使用 CPLEX 软件对上述计算数据进行优化,得出优化结果,见表 9。

由表 9 可知,在机型选择优化结果上,计算软件在被选择的 5 条航线上都选择了两类机型交叉使用

表 9 航班计划优化后的选取机型和碳排放量

计划 序号	机型选择优化结果	碳排放 量/t	机型	优化比 例/%
1	A320-B737-A320	51.329	A320	0.2
			B737	0.8
2	A320-A320-B737	61.785	A320	0.3
			B737	2.8
3	B737-A320-A320-A320	78.296	A320	0.1
			B737	2.4
4	B737-A320-B737-A320	90.177	A320	0.6
			B737	2.9
5	A320-B737-A320-B737	100.536	A320	0.3
			B737	0.9

的方式,表现出来使用交叉机型的排班模式。例如,航班计划 1,广州—杭州航段选择 A320,杭州—深圳航段选择 B737,深圳—杭州航段选择 A320,优化后整条航段碳排放量为 51.329 t 比全部使用 A320 机型节省约 0.2% 的碳排放量,比全部使用 B737 节省 0.8% 的碳排放量。

4 结论与建议

1) 基于碳排放量角度考虑机型排班优化,分别计算 LTO 和 CCD 两阶段的不同碳排放量,考虑了基于实际滑行时间的 ICAO 碳排放计算式,使用运行公式计算航段最小碳排放量,使用运算软件进行测算,得出最终优化结果。根据最终优化结果,得出航空公司可使用交叉机型的方式,使碳排放优化比例为 0.1%~2.9%,证明从减少碳排放量角度优化机型选择具备一定的现实意义和参考价值。

2) 在实际运行过程中,较少可能出现目的地机场有合适飞机续接下段飞行任务的情况。但这并不妨碍航班运行网络排班过程中对节能的思考。由于该公司在某些航线一直使用单一机型,因此无法通过有效数据计算该航线上两种机型的碳排放量大小。但在减少碳排放的背景下,若航空公司在该航线使用双机型进行验证,则可以计算出更加适应于该航线的机型,这将为航空公司的节约能源和减少碳排放量产生一定的积极作用。

参考文献

- [1] CUI Q, LI X Y, LI Y. Accounting for the carbon emissions from domestic air routes in China[J]. Heliyon, 2022, 8 (1): e08 716.
- [2] WANG B LI J, LI C. A method for computing flight operation fuel burn and emissions based on ADS-B trajectories [J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 2020, 52(2): 183-196.
- [3] BAUMEISTER S. 'Each flight is different': carbon emissions of selected flights in three geographical markets[J]. Transportation Research, Part D. Transport and Environment, 2017, 57: 1-9.
- [4] 庄天玺, 程小慷, 郝芮, 等. 基于 GDIM 法的中国民航运输业碳排放因素探讨[J]. 科技和产业, 2022, 22(3): 271-274.
- [5] 罗凤娥, 杨思瀚, 甘琦, 等. 多情景下中型航空公司碳排放预测研究[J/OL]. 环境保护科学: 1-9[2023-08-22]. DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202211040.
- [6] 向小军, 杨志晗, 赵赶超. 基于时间序列的民用运输航空器碳排放预测研究[J]. 现代计算机, 2023, 29(2): 14-22, 67.
- [7] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412-3424.
- [8] ICAO. ICAO carbon emissions calculator methodology version 11 ICAO[R]. Montreal: ICAO, 2018.
- [9] ICAO. Annex 16 to the convention on international civil aviation-environmental protection-Volume II: aircraft engine emissions[R]. Montreal: ICAO, 2008.
- [10] ICAO. ICAO aircraft engine emissions data bank[DB/OL]. (2021-07-20)[2023-05-15]. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- [11] GASPARD R M P, SOUSA J M M. Impact of alternative fuels on the operational and environmental performance of a small turbofan engine[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 130: 81-90.
- [12] 崔如玉. 飞机排班问题模型及算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [13] 邱明杰. 基于燃油性能数据的一种飞机排班方法研究[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 109-112, 117.

Optimization of Airline Aircraft Scheduling Based on Carbon Emissions

LUO Jun, WU Di

(Air Traffic Management College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: Green and low-carbon is the requirement of today's development. Airlines can take the optimization of aircraft scheduling as a breakthrough to reduce carbon emissions. In order to calculate the planned carbon emissions of multiple flights, International Civil Aviation Organization (ICAO) carbon emission calculation formula is adopted. For two types of aircraft, A320 and B737, with the minimum carbon emissions as the constraint condition, CPLEX software is used to find the optimal solution of the aircraft on a certain flight segment, and ultimately achieve the minimum carbon emissions of the whole flight segment. The results show that the use of two hybrid aircraft types on the leg can save more carbon emissions than the use of a single aircraft type, and reduction range of carbon emissions is between 0.6% and 2.9%, which proved the rationality of optimizing airline models based on carbon emissions.

Keywords: airline emissions; take off and landing cycle; airplane model scheduling optimization