

中国绿色航线网络与机队规划联合优化模型研制及效果

张宝山, 王旻轲, 张昊彤, 钱田

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 为了应对传统航空网络和机队规划中对碳排放的忽视, 提出了一种在规划过程中纳入碳排放的集成优化方法。该模型采用多分配的枢纽辐射网络结构, 考虑了航线、需求、容量和机队规模的约束。使用环境保护局(EPA)方法计算巡航阶段的排放量, 并通过碳税机制将碳排放转化为成本要素, 最终形成一个旨在最小化航空公司运营成本的联合优化数学模型。模型通过 Gurobi 商业求解器进行求解。结果表明, 航空公司应优先租赁低排放短途航班以满足市场需求, 而政策制定者应逐步提高碳税水平以促进航空业的可持续性发展。

关键词: 航线网络; 机队规划; 可持续性

中图分类号: V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)10-0061-08

航空运输的可持续发展使得枢纽选址问题(hub location problems, HLPs)受到越来越多的关注。这一问题在其他交通系统中也被广泛研究, 如班轮航运网络设计^[1-2]、物流网络设计^[3-4]和多式联运系统^[5]。在民航领域, 国际航空公司选择全球范围内的机场枢纽具有重要意义, 有助于实现广泛的枢纽辐射网络, 方便各目的地旅客的高效连接, 提升服务能力, 同时降低运营成本^[6]。航空网络的决策包括确定枢纽位置并将辐射节点分配到这些枢纽, 主要通过单一分配(single allocation, SA)和多重分配(multiple allocation, MA)结构实现^[7], 如图 1 所示。在 SA 模型中, 每个非枢纽节点仅能连接一个枢纽, 不允许非枢纽节点之间的直接连接; 而在 MA 模型中, 每个非枢纽节点可以连接多个枢纽, 也没有非枢纽节点间的直接连接。多重分配特别适用于大规模和动态市场, 通过多个枢纽优化连接以提高运营效率^[8]。在航空业务环境下, 多分配的枢纽辐射网络帮助航空公司在不断变化的全球市场环境中保持竞争优势, 通过高效的资源配置和成本控制促进长期的可持续发展^[9]。聚焦于多分配枢纽辐射航空网络的优化。除了对枢纽辐射网络的长期配置决策, 航空公司还需要在中期做出机队配置的战略决策, 将不同航程和座位数的飞机分配

到各航线, 以满足枢纽辐射网络中的客流需求, 从而可持续地实现最高的市场份额。许多研究探讨了航空网络与机队规划的最佳方案, 这是航空公司战略决策的关键部分, 并且相互关联^[10]。具体而言, 航空公司的航线网络布局决定了其机队规模和构成, 因为并非所有飞机都适合飞行特定的航线。同时, 航空公司的可用机队也决定了其枢纽辐射网络的扩展和市场竞争能力^[11]。大量研究表明, 航空网络与机队规划的集成优化可实现航空公司战略决策的全球最优, 从而降低运营成本并提升航空公司利润。

在当前背景下, 航空运输业的快速发展对碳排放带来显著的环境挑战^[12-14]。国际民航组织的航空与环境报告显示^[15], 飞机技术创新和替代燃料的

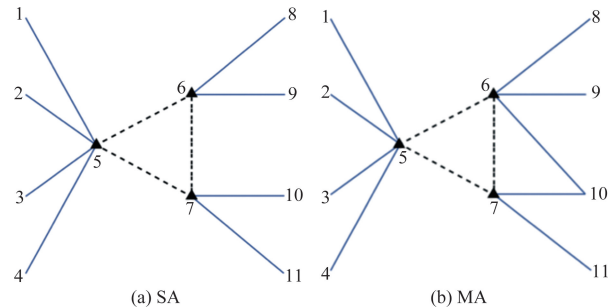


图 1 SA 和 MA 枢纽网络拓扑图

收稿日期: 2024-11-15

作者简介: 张宝山(1997—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为航线网络与机队规划; 通信作者王旻轲(1986—), 男, 四川成都人, 博士, 讲师, 研究方向为航线网络与机队规划; 张昊彤(1999—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为航材与供应链管理; 钱田(1998—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为航空多式联运。

持续应用是实现碳中和方面具有更大潜力,相较之下,运营改善的效果较为有限。然而,运筹学方法在航空决策中的应用(如优化飞行路径规划和空中交通管理)已被证明是减少碳排放最具成本效益的方式。因此,探讨了可持续航空网络与机队规划的集成优化,考虑了不同航程飞机在巡航阶段的碳排放。

在航空网络与机队规划的可持续优化领域,国内外学者进行了广泛的研究。王超峰和王宵琪^[16]研究了考虑碳排放的航空货运网络优化,提出在航线网络设计中考虑碳排放因素,以实现环境效益与经济效益的双重优化。山秋月和吴永强^[17]提出全货运航空公司单分配严格枢纽航线网络优化设计,专注于通过合理选择枢纽机场来降低运营成本和碳排放。杨晨凯和黄建伟^[18]基于利润最大化的航班排班规划方法,旨在优化航班时刻安排,以提高航空公司整体盈利能力。张培文等^[19]研究了枢纽航空公司机队与航线网络的联合规划方法,强调通过枢纽选址和机队配置的协同优化来实现成本最小化和服务最大化。闫妍等^[20]研究了航空联盟下航空货运网络的枢纽点选址问题(HLP),基于枢纽点的数量及位置随机与容量的限制。近年来,国内学者对碳排放、枢纽网络优化以及机队规划的综合优化逐渐加深了理解,但仍存在一定的局限性,尤其是在碳排放成本的全面纳入和多场景优化模型的应用上^[21-23]。因此,国内在该领域的研究虽已取得一定进展,但与国际先进水平相比,仍需在多目标优化、动态决策以及实际应用的深度与广度上进行进一步提升。

为了精确地整合碳排放,基于飞机的发动机类型和在巡航阶段的操作模式来计算碳排放,在碳税政策背景下,本文所提出的航空网络和机队规划优化模型旨在最小化总运输成本、不合理航线分配的成本、新飞机租赁成本及碳排放成本。在中国国际航空公司的业务背景下,研究确定了最佳枢纽数量、枢纽位置、机队分配等,涵盖不同的客流需求和碳税情境,以实现经济和环境的可持续性。这些研究结果为可持续的航空网络和机队规划决策提供宝贵的管理启示。

本文的创新点总结为以下四点:

(1)巡航阶段全面碳排放计算的引入与意义:创新性地将在巡航阶段的碳排放计算全面融入航空网络与机队规划的集成优化中,通过采用环境保护局(EPA)方法精确计算飞机在巡航阶段的加权平

均排放指数,从而动态捕捉不同机型在实际运营中的碳排放特性。与传统方法相比,这种计算方式显著提升了碳排放估算的科学性和精确性,为航空公司提供了更具可操作性的排放评估工具,使其在优化航线布局与机队配置时能够更好地权衡环境与经济效益。

(2)不合理航线分配惩罚成本的设置与优化作用:首次提出将不合理航线分配所产生的额外成本作为惩罚成本纳入优化模型,解决了传统研究中忽视资源浪费问题的不足。具体而言,该方法将远程飞机用于中短途航线等情景下的资源浪费显性化,并以经济成本量化,使航空公司在机队配置时能够避免运力过剩或不足的现象。这一惩罚机制不仅提高模型的约束力,还显著优化了机队资源的利用效率,为实现可持续的航空运营提供了有效策略。

(3)新优化模型的开发及其综合效益:开发的新优化模型以成本最小化为目标,将运输成本、惩罚成本、飞机租赁成本以及碳排放成本关键因素有机整合,形成一个兼顾经济与环境效益的综合优化框架。通过多情景模拟,研究结果表明,在碳税逐步提高和需求波动的情况下,航空公司可以通过优先租赁低排放短程飞机实现经济与环保的双赢。模型的设计为应对复杂市场环境提供科学指导,同时为行业政策制定和战略决策提供理论依据。

(4)对航空业可持续发展的总体贡献:为航空公司在面临更严格环保政策的背景下提供科学的决策工具,尤其是在枢纽辐射网络优化方面,通过集中航班至枢纽机场,不仅有效减少单位乘客碳排放,还显著优化了航线资源配置,从而实现经济与环境效益的平衡。这一研究的成果不仅具有理论价值,也在实际操作中为绿色航空发展提供指导性建议。

1 问题定义与数学模型

1.1 问题定义与假设

在全球航空业日益增加的环境影响背景下,聚焦于多分配航空网络和机队规划的低碳可持续优化。为了精确量化航空机队的碳排放,计算了航班在巡航阶段的碳排放。然后,在碳税政策的背景下,将碳排放量转化为成本。提出的优化模型旨在最小化总成本,包括航班运营费用、枢纽位置固定成本、机队碳排放成本、新飞机租赁成本及不合理的航线分配惩罚成本。其主要目标是通过优化航空网络和可持续的机队配置,减少包括碳排放成本在内的总成本。

基于 UMAHLP 问题的特性,提出了以下关于枢纽辐射航空网络运营的假设。

(1)在枢纽辐射网络中,非枢纽点只能通过枢纽进行连接,并且最多可使用两个枢纽进行中转。枢纽点之间的运输是直接连接的。

(2)假设节点 i 和 j 之间的客流量是相等的。这有助于建立一个基本框架,以验证联合优化方法的有效性和可行性。

(3)不同类型的飞机(如短程、中程、长程)在巡航阶段会产生不同的碳排放。例如,大型飞机(如宽体机)较重,通常携带更多的燃料,因此比小型飞机(如涡桨和支线喷气机)排放更多的碳。发动机推力不同,因此碳排放也有所不同。

(4)当远程飞机被不合理地分配到中短途航段,或者中程飞机被不合理地分配到短途航段时,会产生不合理的航线分配惩罚成本。

1.2 巡航阶段碳排放模型公式

根据国际民航组织(ICAO)的规定,3 000 ft. (1 ft. \approx 0.304 8 m)是划分飞行阶段的界限高度。在 3 000 ft. 以上属于巡航阶段,本文采用 EPA 方法来计算飞机的碳排放。

在巡航阶段,首先计算巡航阶段的加权平均排放指数,然后计算巡航阶段的总碳排放量。巡航阶段的加权平均排放指数为

$$\overline{EI}_s^{\text{cruise}} = \sum_{v \in U} (X_{vs} EI_v^{\text{cruise}}) \quad (1)$$

式中: $\overline{EI}_s^{\text{cruise}}$ 为 s 型飞机在巡航阶段的加权平均排放指数; EI_v^{cruise} 为在巡航阶段配备 v 型发动机的飞机的排放系数。

用式(2)计算巡航阶段的碳排放量。

$$E_{ij}^{s, \text{cruise}} = \sum_{k \in U} \left[T_{s, \text{cruise}} \left(\frac{FF_{s, \text{cruise}}}{1\ 000} \right) \overline{EI}_s^{\text{cruise}} k \right] \quad (2)$$

式中: $T_{s, \text{cruise}}$ 为 s 型飞机在巡航阶段的飞行时间,可以从节点之间的距离和飞机的巡航速度计算出来; $FF_{s, \text{cruise}}$ 为 s 型飞机在巡航阶段的燃料消耗率。

巡航阶段总的碳排放量 E_m 的计算公式为

$$E_m = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} (E_{ij}^{s, \text{cruise}} V_{ij}^s) \quad (3)$$

1.3 综合航线网络和机队规划优化模型

基于 UMAHLP 模型,在考虑航空公司碳排放的情况下,对航空网络和机队规划进行联合优化。目标是确定枢纽的适当位置、在 HS 网络中分配非枢纽节点与枢纽节点之间的连接、为航线分配合适的机型、计算在巡航阶段的碳排放量。表 1 列出了模型中使用的符号。

表 1 符号释义

集合	描述
N	城市节点集合, $i, j, k, m \in N$
S	飞机分类集合, $s \in S$
T	航程距离分类, $t \in T$
E	飞机发动机数量分类, $k \in E$
U	发动机类型集合, $v \in U$
变量	描述
X_k	0~1 决策变量,当 k 被选为枢纽时为 1,否则为 0
z_{ikmj}	从节点 i 到节点 j 的需求首先通过枢纽 k, m 中转, $(i-k-m-j)$
n_t^s	分配到 t 航段的 s 型航程飞机数量
V_{ij}^s	s 型飞机在 i 到 j 上的航班频率
\hat{n}^s	租赁 s 型飞机的数量
参数	描述
h_{ij}	从起始点 i 到终点 j 的乘客需求
L_s	s 型飞机最大航程
L_t	t 航段最大距离
A_s	可用于运营的 s 型飞机数量
C_{ij}^s	s 型飞机在 i 到 j 上可变成本
T_i^s	在 t 航程上使用 s 型飞机运营的平均飞行时间, $t \leq s$
d_{ij}	从 i 到 j 的飞行距离, km
τ_i^s	s 型飞机不当的分配给 t 航段所产生的单位乘客惩罚成本
C^s	租赁一架 s 型飞机的年度成本
C^{new}	租赁 s 型新飞机的年度成本总和
F_{ij}^t	如果 i 到 j 飞行距离在 t 航程范围内则为 1,否则为 0
A	枢纽点个数
L_{ij}^s	s 型飞机在 i 到 j 上的平均装载系数
μ_s	一个时期内, s 型飞机期望利用(h/月)
t_{ij}^s	s 型飞机在 i 到 j 上单次飞行时间
λ	碳税
Q_i^s	s 型飞机分配到 t 航段上的最大年度飞行小时数

目标函数构建如下:

$$\text{MinCosts} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} C_{ij}^s V_{ij}^s + \sum_{s \in S, s > t} C_t^s + C^{\text{new}} + \lambda E_m \quad (4)$$

s. t.

$$\sum_{k \in N} X_k \leq A \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} z_{ikm} = 1, \forall i, j \in N, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{m \in N} z_{ikm} + \sum_{m \in N, m \neq k} z_{ikm} \leq X_k, \forall i, j, k \in N, i \neq j \quad (7)$$

$$z_{kkmm} \geq X_k + X_m - 1, \forall k, m \in N \quad (8)$$

$$\sum_{m \in N} \sum_{k \in N} (h_{im} z_{ijkm} + h_{km} z_{kijm} + h_{mj} z_{kmij}) \leq \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} S_s L_{ij}^s, V_{ij}^s, \forall i, j \in N, i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \leq \sum_{s \in S} n_t^s \mu_s, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T, j \in N} n_t^s \leq A_s + \hat{n}^s, \forall s \in S \quad (11)$$

$$C_t^s = n_t^s \frac{Q_t^s}{T_t^s} L_t^s \tau_t^s, \forall s \in S, t \in T, t \leq s \quad (12)$$

$$z_{ijkm} \geq 0, \forall i, j, k, m \in N, i \neq j \quad (13)$$

$$\hat{n}^s \in \mathbb{N}, \forall s \in S \quad (14)$$

$$n_t^s \in N, \forall s \in S, t \in T, t \leq s \quad (15)$$

$$V_{ij}^s \in N, \forall s \in S, i, j \in N, i \neq j \quad (16)$$

式(4)是计算 HS 网络中的最小运营成本,包括总运输成本、因飞机分配不当而产生的罚款成本、租赁新飞机的年度总成本及碳排放成本。式(5)强制在整个航空网络中有枢纽,将 A 设置为 4。式(6)是对航空网络特征的多分配约束,确保来自 $i-j$ 的乘客需求必须通过整个 HS 网络中的一些枢纽城市。式(7)表示,每个起点和目的地之间的流量必须经过至少一个枢纽城市。式(8)限制流量仅仅能通过枢纽点转运。式(9)确保整个 HS 网络中的座位容量配置必须满足所有起点-目的地(OD)对的流量需求,并且所有路线必须满足所有 OD 流量的运输要求,这一约束实现了 HS 网络设计和车队规划的集成。式(10)限制飞行能力,确保 s 型飞机的预计块小时不超过该模型的可用飞行能力限制。式(11)确保分配给 t 段的 s 型飞机的数量小于 s 型飞机的机队规模。式(13)~式(16)为域约束。

2 数值试验

数据来源包括 ICAO 飞机发动机排放数据库、China High-Resolution Emissions Grid Databank 和 Air Miles Calculator。这些数据涵盖机队特征、航线网络及相关环境参数,为模型的输入提供可靠依据。实验参数如表 2 所示,包含飞机的平均巡航速度、最大座位数、飞机价格及预期利用率等,这些数据基于 Statista 研究部门、权威专家观点和相关文献统计得出,实验中保持初始参数不变。根据飞机最大航程,将飞机分为短程、中程和长程三种类型,其中航程小于 1 500 km 的为短程飞机,航程在 1 500~4 000 km 的为中程飞机,航程超过 4 000 km 的为长程飞机。同样,根据节点间距离,将航段分为短程航段(1 500 km 以下)、中程航段(1 500~4 000 km)和长程航段(4 000 km 以上)。在实验中,为确保模型输入的全面性和实验场景的代表性,数据处理包括整理机场节点的距离矩阵、需求分布和航线网络结构等信息。选取的机场节点涵盖国内主要枢纽机场(如北京、上海、广州、成都)及部分中小机场,以反映国内航线网络的多层次特性。对于机队参数,依据飞机分类标准,整理了短程、中程和长程飞

表 2 飞机相关数据

变量	平均巡航速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大座位数	飞机价格/ 10^6 美元	飞机期望利用率/ ($\text{h} \cdot \text{月}^{-1}$)
飞机类型($s=1$)	780	90	3.97	300
飞机类型($s=2$)	840	200	14.18	350
飞机类型($s=3$)	890	350	28.91	270

表 3 机场网络

机场 ID	城市	IATA 代码	机场名称	国别
1	成都	CTU	成都双流国际机场	中国
2	北京	PEK	北京首都国际机场	中国
3	上海	PVG	上海浦东国际机场	中国
4	深圳	SZX	深圳宝安国际机场	中国
5	杭州	HGH	杭州萧山国际机场	中国
6	广州	CAN	广州白云国际机场	中国
7	武汉	WUH	武汉天河国际机场	中国
8	昆明	KMG	昆明长水国际机场	中国
9	南昌	KHN	南昌昌北国际机场	中国
10	青岛	TAO	青岛胶东国际机场	中国
11	西安	XIY	西安咸阳国际机场	中国
12	乌鲁木齐	URC	乌鲁木齐地窝堡国际机场	中国
13	雅典	ATH	Athens Eleftherios Venizelos International Airport	希腊
14	斯德哥尔摩	ARN	Stockholm Arlanda Airport	瑞典
15	东京	HND	Tokyo Haneda International Airport	日本
16	首尔	ICN	Incheon International Airport	韩国
17	柏林	BER	Berlin Brandenburg Airport	德国
18	伦敦	LHR	London Heathrow Airport	英国
19	巴黎	CDG	Charles de Gaulle Airport	法国
20	罗马	FCO	Leonardo da Vinci-Fiumicino Airport	意大利
21	阿姆斯特丹	AMS	Amsterdam Airport Schiphol	荷兰
22	新德里	EDL	Indira Gandhi International Airport	印度
23	维也纳	VIE	Vienna International Airport	奥地利
24	马德里	MAD	Adolfo Suarez Madrid-Barajas Airport	西班牙
25	布达佩斯	BUD	Budapest Ferenc Liszt International Airport	匈牙利

机的巡航速度、燃料消耗率和碳排放系数,并结合需求矩阵,作为模型求解的基础输入。实验中采用 Gurobi 求解器进行模型优化求解。设置在不同场景,

包括碳税变化(如 0 美元/t、30 美元/t、80 美元/t)和需求增长(如 0%、10%、20%)等情境,分别设定优化目标函数,涵盖总运输成本、碳排放成本和飞机租赁成本。在求解过程中,通过设置枢纽数量限制、机队容量约束和航班需求满足等条件,优化枢纽分布和机队配置方案。

表 2 显示每种类型的飞机在分配至各航程段时的单次飞行时间,基于每种类型飞机的最大航程和平均巡航速度。此外,图 2 给出 s 型飞机在不同航段的飞行时间。图 3 列出了惩罚成本系数,即由于飞机分配不当而产生的每客公里的惩罚成本。不同机型在航线上运营的可变成本的计算方法来源于将每次航班的燃油、人工和维护费用按飞行时间划分。图 4 显示 s 型飞机最大年度飞行小时数。图 5 显示整个航线网络节点对之间的距离,并用距离矩阵热力图形式反馈出来。上述给出的初始值在整个实验过程中保持不变,并用于真实场景的数值实验。

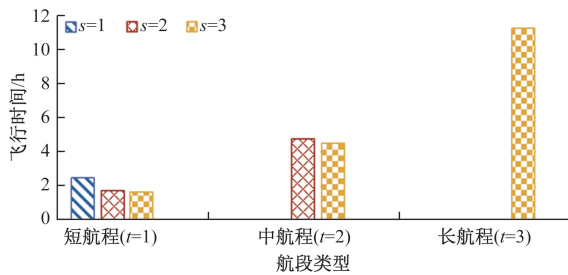


图 2 s 型飞机在不同航段飞行时间

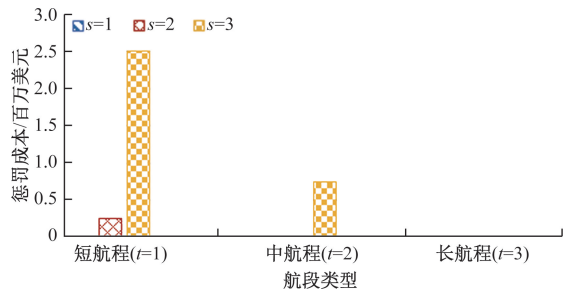


图 3 不同机型不当分配的惩罚成本

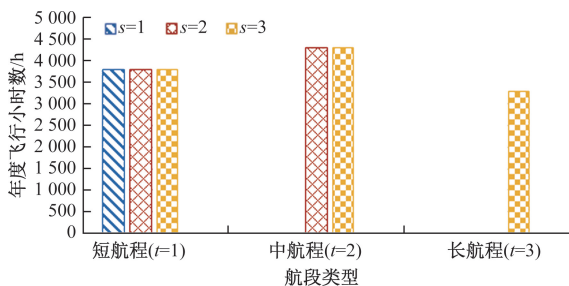


图 4 s 型飞机最大年度飞行小时数

针对中国国际航空公司的运营网络进行数值实验,以测试文中所提模型在不同需求场景和碳税场景下的实际应用可行性。

该情景的设定依据源自对航空网络和机队规划中碳排放因素的全面考虑,以便在不同碳税政策和需求变化条件下评估航空公司运营策略的可持续性。在优化模型中,通过引入多场景的碳税(λ_1 、 λ_2 、 λ_3)和需求矩阵(D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4),以及枢纽点数量。

(1)碳税场景设定:碳税的场景(λ_1 为 0 美元/t、 λ_2 为 30 美元/t、 λ_3 为 80 美元/t)体现了不同政策环境下的运营成本差异,旨在模拟政策变化对碳排放成本的影响,使航空公司能够预估并优化应对不同碳排放成本的措施。通过碳税机制,模型将排放量转化为成本要素,使得碳排在决策中成为关键的经济因素,从而鼓励低排放操作。

(2)需求矩阵场景设定:需求矩阵场景($D_1 \sim D_4$)通过模拟航空网络中的需求变化,来反映市场需求增加对航空公司资源配置和枢纽选址决策的影响。需求增加的情境分别为(0%、5%、12%、18%)使航空公司能够评估在不同市场需求下的机队及枢纽布局策略,确保在市场扩展条件下的服务效率和经济效益。

(3)枢纽数量设定:根据表 3 可知国内有 12 个地方机场。在这些机场中确定 2~4 个机场作为航线网络的最佳枢纽机场。因此,在模型中参数 A 的取值为 4。

这些情景设置旨在为航空公司提供多样化的战略选项,帮助其在应对市场需求和环保政策变化时做出适应性决策,从而在运营成本与环境可持续性之间实现平衡。这种方法为决策者提供直观的情景分析框架,有助于有效应对未来可能的政策调整和市场波动。上述场景基于需求和碳税及枢纽点数量维度进行设计。这些场景为航空公司提供多种战略选择,旨在帮助它们根据市场需求和碳税政策的变化,做出最适合的机队配置和航线网络运营决策。为确保实验的清晰易懂,选择其中 12 个具有代表性的案例进行分析。

3 计算结果

实验在配备 macOS Ventura 13.0 系统、Apple M2 芯片和 16GB 内存的设备上使用 Python 进行,采用 Gurobi 求解器。对于每个案例,精确计算目标函数的值,并对每个案例的航空网络和机队规划进行详细分析。这些案例研究的结果展示在表 4 中。

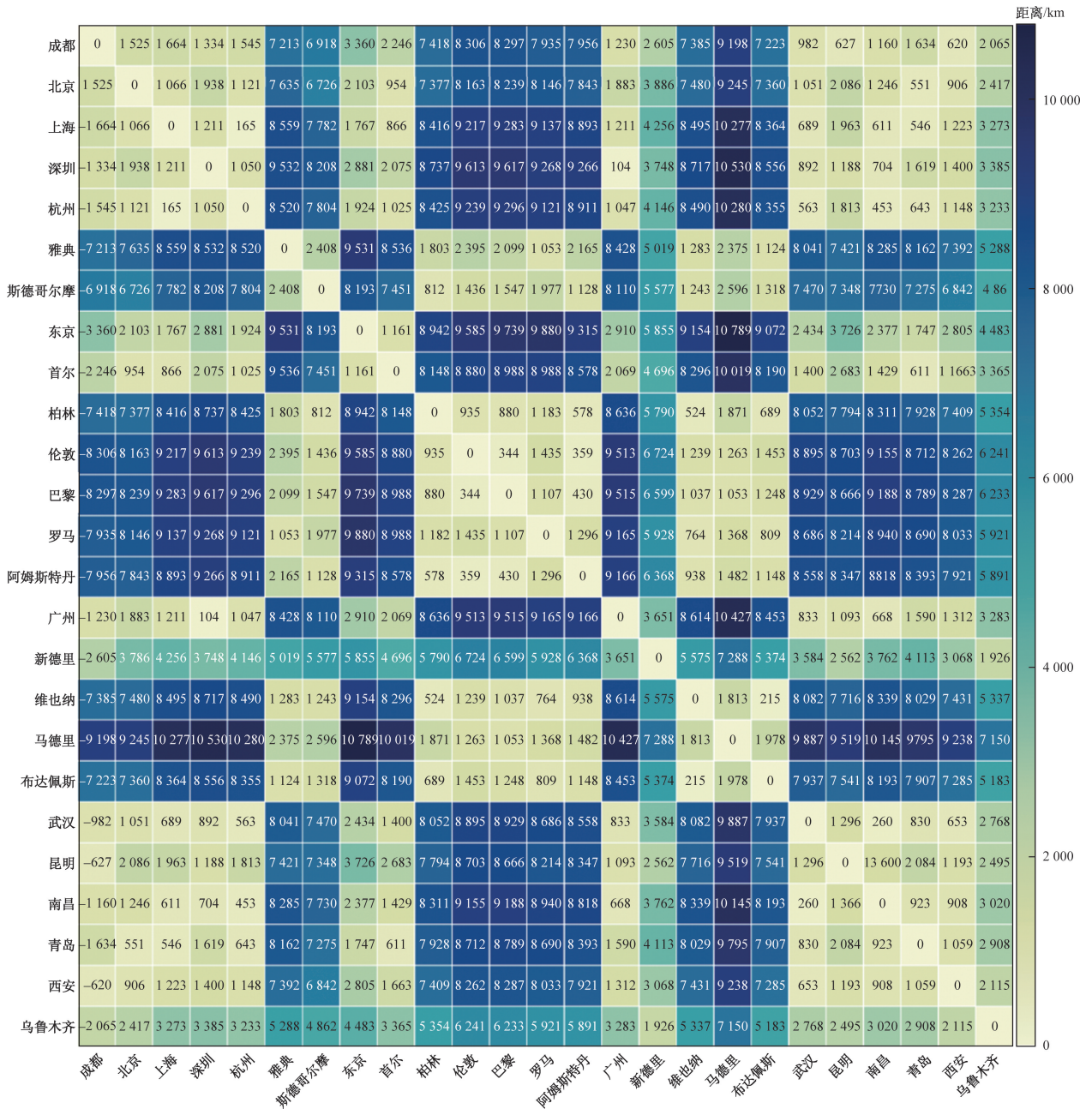


图 5 城市节点对距离矩阵热力

表 4 数值试验结果

序号	案例	A_s			$n_i^s(\hat{n}^s)$			碳排放量/ 10^8 t	目标函数值/ 10^9 美元	枢纽点
		$s=1$	$s=2$	$s=3$	$s=1$	$s=2$	$s=3$			
1	λ_1-D_1	80	85	60	90(10)	119(34)	81(21)	47.9	13.51	1,2
2	λ_2-D_1	80	85	60	92(12)	100(15)	78(18)	48.5	15.11	1,2
3	λ_3-D_1	80	85	60	107(27)	105(20)	72(12)	49.5	15.99	1,3
4	λ_1-D_2	80	85	60	99(17)	103(18)	77(17)	48.9	15.30	1,2,3
5	λ_2-D_2	80	85	60	113(33)	100(15)	99(29)	50.1	15.83	1,2,4
6	λ_3-D_2	80	85	60	125(45)	120(35)	76(16)	52.9	18.32	1,2,3
7	λ_1-D_3	80	85	60	92(12)	97(12)	99(33)	55.3	17.66	1,2,3
8	λ_2-D_3	80	85	60	102(22)	109(24)	73(13)	54.8	17.70	1,2,3
9	λ_3-D_3	80	85	60	116(36)	110(25)	77(17)	53.3	19.10	1,2,3,6
10	λ_1-D_4	80	85	60	102(22)	105(20)	90(30)	60.5	21.23	1,2,3,6
11	λ_2-D_4	80	85	60	115(35)	115(30)	75(15)	59.5	20.36	1,2,3,4
12	λ_3-D_4	80	85	60	118(38)	111(26)	75(15)	59.1	20.18	1,2,3,6

通过对上述选择的 12 组案例进行分析可以得出,在四个场景 ($D_1-\lambda_1$ 、 $D_2-\lambda_1$ 、 $D_3-\lambda_1$ 、 $D_4-\lambda_1$) 中可以观察到,当碳税设为零且需求不断增长时,碳排放量、目标函数值和飞机租赁成本总体呈现上升趋势。特别地,在($D_4-\lambda_1$) 场景中,碳排放、目标函数值达到最高值。此时航空公司拥有的 s 型飞机机队包括短程机型 102 架、中程机型 105 架和长程机型 90 架。在这些场景中,航空网络中的最优枢纽点始终包括节点 1(成都)和节点 2(北京)。此外,随着需求的增加,航空公司租赁的长程飞机数量从 ($D_1-\lambda_1$) 中的 21 架增长到 ($D_4-\lambda_1$) 中的 30 架,增长了 42.8%。在碳税为零 (λ_1) 情况下,碳排放量从 ($D_1-\lambda_1$) 的 47.9 亿 t 增加到 ($D_4-\lambda_1$) 的 60.5 亿 t ,增幅为 26.3%。目标函数成本从 ($D_1-\lambda_1$) 的 135.1 亿美元上升至 ($D_4-\lambda_1$) 的 212.3 亿美元,增幅为 57.1%。因此,当需求扩展且不征收碳税时,航空公司在降低运营成本方面面临挑战,同时大量租赁高排放的长程飞机对环境带来了显著的压力,这使得在航空网络运营中平衡生态影响变得困难。

分析了三个案例组,以进一步探索在高需求和不断增加的碳税情境下航空网络的特征和机队配置 ($D_4-\lambda_1$ 、 $D_4-\lambda_2$ 、 $D_4-\lambda_3$)。由于需求旺盛,每个案例中航空网络均确定 4 个最佳枢纽点以提升中转效率。在 ($D_4-\lambda_1$) 案例中,最佳枢纽点为节点 1(成都)、2(北京)、3(上海)和 6(广州),而在 ($D_4-\lambda_2$) 和 ($D_4-\lambda_3$) 案例中,最佳枢纽点则始终为节点 1(成都)、2(北京)、3(上海)和 4(深圳)。从 ($D_4-\lambda_1$) 到 ($D_4-\lambda_3$),目标函数值从 212.3 亿美元减少到 201.8 亿美元,下降了 5.2%;为满足市场需求,从 ($D_4-\lambda_1$) 到 ($D_4-\lambda_3$),航空公司租赁的短程飞机数量从 20 架增长至 40 架,增幅高达一倍;与此同时,租赁长程飞机数量则从 30 架减少至 15 架,降幅为 50%。因此,碳排放量从 60.5 亿 t 减少至 59.1 亿 t ,下降了 2.33%。由此可见,在高需求和不断增加的碳税压力下,国航采用租赁更多低排放的短程飞机的策略,尽管新租飞机的总成本和目标函数值均有所增加,但此举旨在提升航班频次和市场份额,同时减少碳排放,实现运营需求与碳税之间的平衡。同时,在高需求和不断增加的碳税压力下,最佳枢纽点分别是 1(成都)、2(北京)、3(上海)和 6(广州)。

4 结论

经过深入分析,提出了一个考虑碳排放的航线网络与机队规划联合优化模型。该模型将环境因素与经济效益相结合,为航空公司在全球日益严格

的环保政策下提供了有效工具,以优化运营成本并减少环境影响。主要结论如下:

(1)通过在航线网络和机队规划中融入碳税机制,揭示了政策变化对航空公司战略的直接影响。在碳税上升和需求增长的情况下,航空公司更倾向于选择低排放的短途航班,以降低碳排放和控制成本。这一结果强调了在决策时应提前考虑环保政策的未来趋势。

(2)在市场需求不断增长的背景下,研究表明航空公司可能需要增设枢纽以提升网络效率。随着枢纽数量的增加,其空间布局更加分散,扩大了枢纽机场的服务覆盖范围。枢纽间航线的增加显著增强了网络的边缘效应,提高了整体经济效益,使航空公司具备更强的竞争优势。

(3)与点对点网络相比,枢纽辐射网络的碳排放更低。构建枢纽网络带来了多重环境和经济效益。将航班集中至枢纽机场能够提升运行效率和客座率,从而降低每位乘客的碳排放。此外,枢纽网络可以有效缓解空中交通拥堵,减少地面等待时间,进而降低燃料消耗和相关排放。在经济方面,通过提高航班的载客率和优化调度,枢纽网络显著降低了单位运输成本。因此,建议航空公司采用枢纽网络模式,不仅能降低运营成本,还能有效减少环境影响,助力实现绿色运输。

研究结果对航空公司管理实践具有重要的指导价值。首先,在制定机队和网络优化策略时,航空公司应全面考虑碳排放成本,特别是在高碳税政策环境下。优先租赁低排放短途飞机,可以在满足市场需求、增加航班频次的同时,有效降低运营碳排放,实现经济与环保的双重收益。此外,政策制定者应逐步提高碳税,以鼓励航空公司采用更环保的运营模式,推动航空业实现可持续发展。

然而,此模型也存在一定局限性,例如在预测期间假设市场需求和政策环境保持稳定。未来的研究可以进一步探讨该模型在动态市场和政策环境中的应用和调整。未来的研究还可以探讨在应用该模型时,不同类型航空公司(如低成本航空和传统航空)的差异化表现,以及该模型在其他地区航空市场的适用性。

参考文献

- [1] TEYMOURIAN E, SADEGHI A, TAGHIPOURIAN F. A dynamic virtual hub location problem in airline networks-formulation and metaheuristic solution approaches [C]//Proceeding of the First International Technology

- Management Conference. Doha: IEEE, 2011: 1061-1068.
- [2] TORKESTANI S S, SEYEDHOSSEINI S M, MAKUI A, et al. The reliable design of a hierarchical multi-modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network disruption(DND)[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122(1): 39-86.
- [3] BRUECKNER J K, SPILLER P T. Economies of traffic density in the deregulated airline industry[J]. The Journal of Law and Economics, 1994, 37(2): 379-415.
- [4] BARAHIMI P, VERGARA A. Reliable p-hub network design under multiple disruptions[J]. Networks and Spatial Economics, 2020, 20(1): 301-327.
- [5] MOHRI S, NASROLLAHI M, PIRAYESH A, et al. An integrated global airline hub network design with fleet Planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 164: 107883.
- [6] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC) for SBSTA 48 [R]. London: Submission by the International Civil Aviation Organization, 2018.
- [7] SENDER J, CLAUSEN U. Hub location problems with choice of different hub capacities and vehicle types[C]// International Conference on Network Optimization. Berlin: Springer, 2011: 535-546.
- [8] O'KELLY M E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities[J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32(3): 393-404.
- [9] CASAS P, CASANOVAS J, FERRAN X. Passenger flow simulation in a hub airport: an application to the Barcelona international airport[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 44: 78-94.
- [10] BUTTON K S, LALL R S, TRICE M. High-technology employment and hub airports[J]. Journal of Air Transport Management, 1999, 5(1): 53-59.
- [11] YANG T H, HUANG Y. Hub-and-spoke airline network design under competitive market[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2015, 32(3): 186-195.
- [12] BUTTON K. Transport economics[M]. London: Edward Elgar Publishing, 2010.
- [13] POURGHADER C, ADIBI M, KAZEMI A. A novel-multi-objective model for hub location problem considering dynamic demand and environmental issues[J]. Journal of Industrial Engineering and Management Studies, 2021, 8(1): 1-31.
- [14] YIN F, LIU Y, CHEN Y. Distributionally robust optimisation model for multi-objective hub location problem via considering ambiguousness[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2023, 19(3): 2094494.
- [15] LOO B P, LI L, PSARAKI V, et al. CO₂ emissions associated with hubbing activities in air transport: an international comparison[J]. Journal of Transport Geography 2014, 34: 185-193.
- [16] 王超峰, 王宵琪. 考虑碳排放的航空货运网络优化[J]. 科技和产业, 2023, 23(21): 79-82.
- [17] 山秋月, 吴永强. 全货运航空公司单分配严格枢纽航线网络优化设计[J]. 科技和产业, 2023, 23(14): 224-226.
- [18] 杨晨凯, 黄建伟. 基于利润最大化的航班排班规划方法[J]. 物流科技, 2023(13): 61-62.
- [19] 张培文, 汪瑜, 王旻轲. 枢纽航空公司机队与航线网络的联合规划方法[J]. 系统工程, 2021(6): 100-105.
- [20] 闫妍, 张锦, 唐秋宇, 等. 航线联盟下航空货运网络枢纽点选址问题研究[J]. 运筹与管理, 2021(9): 65-68.
- [21] 姜雨, 李绍嘉, 戴焱宇, 等. 航线网络连接驱动因素分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12283-12287.
- [22] 汪瑜, 温国兵, 雷迪, 等. 双层规划模型下的机场航线网络优化设计[J]. 交通科技与经济, 2023(2): 25-29.
- [23] 张培文, 杜福民, 赵文科. 中小机场航线网络结构及连接特性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 766-771.

Development and Effect of Joint Optimization Model of Green Route Network and Fleet Planning in China

ZHANG Baoshan, WANG Mingke, ZHANG Haotong, QIAN Tian

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: To address the lack of emphasis on carbon emissions in traditional airline network and fleet planning, an integrated optimization approach that incorporates carbon emissions into the planning process was proposed. The model was based on a multi-allocation hub-and-spoke network structure, taking into account route selection, demand distribution, capacity constraints and fleet size. Emissions were calculated using Environmental Protection Agency (EPA) standards, cruise phases, and a carbon tax mechanism was applied to convert emissions into cost elements, resulting in a joint optimization mathematical model aimed at minimizing airline operating costs. The model was solved using the Gurobi commercial solver. Results indicate that airlines should prioritize low-emission short-haul flights to meet market demand, and policymakers should consider gradually raising carbon tax levels to foster sustainable development in the aviation industry.

Keywords: airline network; fleet planning; sustainability