

全货运航空公司单分配严格枢纽航线网络优化设计

山秋月, 吴永强

(中国民用航空飞行学院 机场工程与运输管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:针对全货运航空公司,研究其货运航线网络的构建问题。基于单分配严格枢纽航线网络,对传统模型进行改进。以各航线上货物的委托运输成本和自有机队的运输成本,取代传统的单位运输成本和折扣因子,考虑枢纽点的中转成本和载运率对路径选择的影响。结合航空货运夜航的特征考虑各机队夜间可用时间的限制,以总成本最小为目标,构建数学模型,采用LINGO优化软件求解,验证模型的有效性,为全货运航空公司构建货运航线网络提供参考。

关键词:航空货运;枢纽航线网络;中转成本;机队夜间可用时间

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)14-0223-05

近年来随着经济的发展,产业结构的调整,特别是电商行业的快速发展,极大地推动了我国航空货运业的发展,出现了越来越多的全货运航空公司,而在全货运航空公司的发展中,航线网络的构建具有十分重要的意义。不合理的航线网络会造成资源浪费,服务质量下降,成本大幅提高等一系列问题;反之,合理有效的航线网络能够帮助企业提高运营效率,降低运营成本、提升服务质量,是航空公司生存和发展的关键。因此,对于全货运航空公司而言构建合理有效的货运航线网络十分必要。

1 研究现状

国内外学者对航线网络的研究颇为丰富,按照研究对象可分为客运航线网络和货运航线网络两大类,目前研究更多集中于客运航线网络,对货运航线网络的研究相对较少,研究内容主要集中在航线网络的结构演变和优化设计这两个方面^[1-5]。在航线网络优化设计方面,枢纽航线网络是研究的重点和热点,相关研究从定性分析和定量分析两个角度着手,对当前主要的三大航线网络结构进行分析比较,指出点对点式网络结构具有高效快速,抗风险能力强的优势。但该网络只考虑了城市对间的运量,未关注航线间的衔接问题,无法对航线资源进行有效的整合,运营成本高,易造成运力资源的

浪费,是一种简单原始的航线网络结构,适用于客源充足、客户对时间敏感度高的客运航空公司^[6]。蛛网式航线网络结构具有较高的网络连通性和可靠性,但航线运营成本较高,更适合客源充足、客户对时间敏感度较高、运营中短途航线的中小型客运航空公司^[7]。枢纽航线网络与上述两种航线网络结构相比,最大的优势就是具有规模经济,通过枢纽机场将旅客和货物集中,然后利用枢纽间的干线进行运输,降低整个航线网络的运输成本,但运输效率会相对低一些,适合于客户对时间敏感度较低、运量较大、服务范围广的航空公司^[6]。对于航空货运业而言,由于其运输规模和运输量都较大,与客运相比,客户对时间的敏感程度更低,航空公司对货物路径安排的主动权更大,更有利于发挥枢纽机场的集散功能,获得规模经济和密度经济,降低整个航线网络的运营成本,以此来提高航空公司的竞争力^[8]。因此,从航空货运业的实际和各航线网络结构的特点来看,枢纽航线网络结构更适合于货运航线网络的构建。

枢纽航线网络通过汇运、转运和分运的方式来产生规模效应,从而获得规模经济,因此规模效应是枢纽航线网络设计时需要考虑的一个重点。在传统的研究之中通常是以枢纽点间的折扣系数来表示运输的规模效应。假定运输的折扣系数与枢

收稿日期:2023-03-22

作者简介:山秋月(1997—),女,四川德阳人,中国民用航空飞行学院机场工程与运输管理学院,硕士研究生,研究方向为民航运输管理;通信作者吴永强(1987—),男,四川峨眉人,中国民用航空飞行学院机场工程与运输管理学院,副教授,博士,研究方向为民航运输管理。

纽干线间流量的大小无关,为一个固定的常数^[9-10],虽然考虑到了枢纽网络的规模效应,但是忽略了实际中各航段的规模效应取决于流经该路段的客货流量的大小,这样计算可能会导致某些流量较小的枢纽航段上的运输成本被低估。陈晓欣^[11]考虑了流量大小对航线选择的影响,提出用分段线性函数替代折扣系数,当枢纽干线上的流量汇集到一定程度时才具有运输折扣且需支付额外的附加费用,使得成本的计算和航线的选择更为符合实际。上述研究都对航线网络设计进行了优化,但在计算运输成本时仅考虑运量的大小和单位客货的运输成本,忽略了在实际运营过程之中运输成本更多地取决于各航段所选用的运输工具。

张培文等^[12]在客运航线网络设计之中,以各机型的航班运营成本来表示运输成本,指出机队规划与航线规划二者密切相关,构建机队与航线网络的联合优化模型,实现二者间的平衡。Canrong等^[13]在货运航线网络设计之中考虑自营和外包两种运输方式,指出随着航空货运量的增加,单纯的外包运输已不能完全满足需求,越来越多的快递公司开始使用自有飞机来进行运输服务,因此在航线网络设计之中需要结合实际的需求考虑利用自有飞机运输和外包运输这两种方式,研究航空网络枢纽选址和自有飞机分配问题。何湘妮^[14]等提出在航线网络中的枢纽机场大多隶属于不同的机场集团,各枢纽之前存在着竞争关系,因此考虑这一因素的影响,以双枢纽机场为研究对象,从机场的角度出发,对竞争模式下的双枢纽航线网络进行优化设计。刘璐等^[15]在航线网络设计之中同时考虑经济性和环保性,以二氧化碳排放量、有害气体和运输成本为目标,构建多目标规划模型求解分析,实现了经济成本和环境成本较好的平衡。汪瑜等^[16]从机场和航空公司两个角度出发进行航线网络优化,建立双层规划模型,上层模型从机场视角出发以旅客吞吐量最大为目标,下层以航空公司总成本最低为目标,考虑二者之间的相互影响,以及机场市场运营补贴对运输路线选择的影响,使得实际的运输路线更贴合实际,并能有效提高机场吞吐量。

综合来看,目前针对货运航线网络的研究相对较少,很少考虑货物在枢纽点的中转成本,大多以枢纽折扣系数来表示运输的规模效应,忽略了实际运输工具所产生的成本,并假定任意的 O-D 流(Origin-destination,起始城市到目的城市的客货流量)

相互独立按照最小成本原则选择运输路径,忽略实际运输中载运率对路径选择的影响。因此,在参考已有研究的基础上,计划以货运航线网络为研究对象,结合航空货运业的特点以及当前全货运航空公司发展程度较低、管理能力不足、自有全货机数量相对不足等因素,基于对管理水平和机队规模要求相对较低的单分配严格枢纽航线网络结构来构建货运网络,考虑货物的中转运输成本及载运率对路径选择的影响,设定每个 O-D 货流不一定沿着成本最低的一条航线运输,以各航节上航空公司自有机队的运输成本和委托其他航司的运输成本来取代传统的单位运输成本和折扣系数,并结合航空货运业夜航的特征,考虑自有机队夜间可用时间的限制建立数学模型,采用算例验证模型的可行性,更加贴合全货运航空公司的实际,为其构建货运航线提供参考,以符合航空货运业的发展实际和全货运航空公司的发展需求。

2 问题描述

在全货运航空公司规划服务范围内,已知 n 个城市, $n(n-1)$ 个 O-D 货流,可用机型 u 及其数量 q_u 、各机型 u 在各航节上的运输成本 c_{ij}^u 和夜间可用时间 t_u 、各航线上其他航司的公布运价 β_{ij} 等相关参数,然后在此基础上基于单分配严格枢纽航线网络来构建货运航线网络。考虑载运率对路径选择的影响及全货运航空公司自身机队实力的限制,以枢纽建设成本、运输成本和中转成本最低为目标来构建货运航线网络,从 n 个城市中选取 p 个城市作为枢纽,并确定各城市间的连接方式。

3 模型提出

3.1 假设条件

1)假设在整个航线网络中从始发城市 i 到目的城市 j 的运输过程中经过的中转枢纽点不超过 2 个,因为相关研究指出,转运次数限制在 1 次或 2 次的效果是最好的^[17]。

2)假设机场和航路容量能力充分,因此在建模中不考虑机场和航路容量限制。根据各大机场相关数据显示国内货物运输采用夜航模式,基本都是在夜间进行,与一天中的航空运输高峰时期相错开,机场和航路的容量相对充足。

3)假设飞机的折旧、维修、保险、管理等费用不计入航班运输成本。在建模时,用航班的起降费用和燃油费用来表示其运输成本,因为折旧、维修等费用难以计算获取,且在货运航班的运营过程中起降费用和燃油费用占比高于其他费用^[18]。

4)假设载重率、飞行高度等因素对燃油消耗量无影响。在建模时仅考虑机型和飞行距离对燃油消耗量的影响,选取各机型在整个飞行阶段的平均油耗进行计算。孙宏等^[19]指出飞行过程中的燃油消耗量主要取决于飞机的机型和飞行距离。

5)假设各机场间的起降费用无差异,起降费用仅取决于各机型的最大起飞全重。根据《民航机场收费改革实施方案》中的起降费用收费标准,目前我国各类机场在相同机型下收取的起降费用差距较小,收费差距主要表现在不同机型的最大起飞全重上,在不同起飞全重区间下机场收取的起降费用差别较大。

6)假设在计算委托运输所产生的成本时采用公布运价,按照航线价格×重量来计算。因为货物托运费用的计算主要为协议运价运费计算和公布运价运费计算,而协议运价由公司间内部协商谈判而定,难以获取,因此采用公布运价计算。在公布运价中为了便于计算,采用各重量下的平均单位运价进行计算,按照航线运输单价×重量的方式来计算该部分的运输成本。

3.2 符号说明

1)集合。

$N=(1,2,\dots,n)$:航线网络中所有拟运营城市节点集合;

$U=(1,2,3)$:飞机类型的集合。

2)参数。

w_{ij} :从始发城市 i 到目的城市 j 某一日的货运需求量(kg),当 $i=j$ 时, $w_{ij}=0$;

d_{ij} :城市两点间的直达飞行距离(km),当 $i=j$ 时, $d_{ij}=0$;

F_k :将城市 k 设置为枢纽城市时所产生的建设费用(元);

c_{ij}^u :机型 u 在 i 到 j 航节上单次执飞的航班运输成本(元/班);

β_{ij} : i 到 j 航节上利用其他航司运力托运货物的单位运价(元/kg);

b_k :货物在枢纽点 k 中转时的单位中转费用(元/kg);

h_{ij}^u :机型 u 飞机从城市 i 到城市 j 的单次飞行时间(h);

t_u :机型 u 机队的可用时间(h);

θ_{ij} : i 到 j 航节上所需运送的货物需求量(kg);

q_u :机型 u 总的飞机架数(架);

ϵ :飞机在枢纽点的中转衔接时间(h);

r_u :机型 u 飞机的最大载重量(kg);

z_{ij} : i 到 j 航节上全货运航空公司自有运力无法满足运输需求,需利用其他航司运力来运输的货物量(kg);

v_{ij} : i 到 j 航节上全货运航空公司自有全货机过剩的运力(kg)。

3)变量。

y_{ikmj} :始发城市为 i 依次经过枢纽城市 k 和 m 进行中转最终到达目的城市 j 的货运量占 w_{ij} 的比例;

f_{ij}^u :机型 u 在 i 到 j 航节上的飞行航班频次(班);

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{表示节点 } k \text{ 被选为枢纽点} \\ 0, & \text{表示节点 } k \text{ 未被选中为枢纽点} \end{cases}, i=k, i, k \in N;$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{表示节点 } i \text{ 和 } k \text{ 相连} \\ 0, & \text{表示节点 } i \text{ 和 } k \text{ 不相连} \end{cases}, i \neq k, i, k \in N$$

3.3 模型构建

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{k \in N} F_k x_{kk} + \sum_{u \in U} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}^u f_{ij}^u + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \beta_{ij}^u z_{ij}^u + \\ & \sum_{k \in N} b_k \left[\sum_{i \in N, i \neq k} \sum_{m \in N, m \neq k} \sum_{j \in N, j \neq k} w_{ij} (y_{ikmj} + y_{imkj}) - \right. \\ & \left. \sum_{i \in N, i \neq k} \sum_{j \in N, j \neq k} w_{ij} y_{ikkj} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{k \in N} x_{kk} = p \quad (2)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} y_{ikmj} = 1, \quad \forall i, j \in N \quad (3)$$

$$1 \leq \sum_{i \in N} x_{ik} \leq (n-1)x_{kk} + 1, \quad \forall k \in N \quad (4)$$

$$x_{ii} + x_{kk} \leq x_{ik} + 1, \quad \forall i, k \in N \quad (5)$$

$$x_{ik} \leq x_{ii} + x_{kk}, \quad \forall i, k \in N \quad (6)$$

$$y_{ikmj} \leq x_{kk}, \quad \forall i, k, m, j \in N \quad (7)$$

$$y_{ikmj} \leq x_{mm}, \quad \forall i, k, m, j \in N \quad (8)$$

$$y_{ikmj} \leq x_{ik}, \quad \forall i, k, m, j \in N \quad (9)$$

$$y_{ikmj} \leq x_{mj}, \quad \forall i, k, m, j \in N \quad (10)$$

$$\theta_{ij} = 0, \quad i = j, \forall i, j \in N \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} (\omega_{im} y_{ijkm} + \omega_{km} y_{ikjm} + \omega_{kj} y_{kmi j}) = \theta_{ij}, \\ i \neq j, \forall i, j \in N \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{u \in U} r_u f_{ij}^u + z_{ij} - v_{ij} = \theta_{ij}, \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} h_{ij}^u f_{ij}^u + \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} f_{ij}^u - q_u \right) \epsilon \leq t_u, \quad \forall u \in N \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} y_{ikmj} = 0, & i = j \text{ 或者 } i \neq k, i = m \text{ 或者} \\ & k \neq m, k = j, \quad \forall i, k, m, j \in N \end{aligned} \quad (15)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, y_{ikmj} \in [0,1], z_{ij}, v_{ij}, \theta_{ij} \geq 0,$$

$$f_{ij}^n \geq 0, \text{且为整数}, \forall i, k, m, j \in N \quad (16)$$

上述模型中,式(1)为目标函数,表示航线网络的总成本最低,即枢纽城市的机场建设费用、航空公司自有机队的运输成本、委托其他航司的运输成本及货物在枢纽点的中转成本之和最小;式(2)表示选择 p 个枢纽点;式(3)保证所有城市间的货物需求都能得到运输;式(4)~式(6)为单分配严格枢纽航线网络的特点,确保任意一个节点至少有一个点与其相连,至多有 n 个点与其连接,枢纽点间互通,非枢纽点不能直连,且非枢纽点只能于一个枢纽点连接;式(7)~式(10)确保任意的 O-D 货流只能经过枢纽点进行中转,且该路径必须存在才可向其分配流量;式(11)和式(12)是对任意 i 到 j 航节上所需载运的货物量进行计算;式(13)保证任意 i 到 j 航节上的运力都能满足运输需求,当全货运航空公司在该航节上自有运力不足时,加上其他航司的运力等于该航节所需运送的货物量,当运力过剩时减去过剩的运力等于该航节所需载运的货物量;式(14)是对航空公司自有机队可用时间的限制,各机队的夜间飞行时间加上其在枢纽点的中转停留时间不能超过其夜间可用时间的限制;式(15)是为了避免迂回运输,不向迂回路线分配货流量;式(16)是对变量的限制。

4 算例分析

闫妍^[17]以顺丰航空公司 2018 年某一日在北京、广州、上海、深圳、杭州、沈阳、长沙、武汉、成都、西安、重庆、南京这 12 个城市节点间的 O-D 流和航距为基础,公布运价从中国货运航空和南航物流官网上查询获得,枢纽建设成本和各点的中转费用根据唐国有^[18]并结合各地区的经济发展水平进行设置,各机型的起降费用根据《民航机场收费改革实施方案》设置,各机型在各航节上的运输成本为起降费用和燃油费用之和,燃油费用根据孙宏等^[19]各机型燃油消耗的相关数据及当前航空燃油的单价进行设置,单次中转衔接时间设定为 1 h,机队夜间可用时间根据各大机场货机运营时间设置。因篇幅限制,略去相关数据,通过表 1 展示各机队相关数据。

表 1 机队相关数据

机型 u	$u=1$	$u=2$	$u=3$
q_u /架	5	10	2
t_u /h	45	90	18
r_u /kg	19 731	39 000	52 700

使用 LINGO 优化软件中的分支定界法求解模型,当枢纽个数设定为 $p=4$ 时,枢纽点依次为北京、广州、上海、重庆 4 个城市,航线网络的总成本为 1 140 000 元,各节点的指派情况如表 2 所示。

通过计算可知,在该算例中自有机队能够满足运输需求,所以需要委托运输的货物量为 0,各机型的执飞航班频次如表 3 所示。由表 3 可知,机型 1 的利用率最高,机型 2 的利用率最小。此外在运量较小的非枢纽点到枢纽点的支线上主要采用载运量较小的机型 1 来运输,在运量较大的枢纽干线间主要采用载运量更大的机型 2 和机型 3 来完成运输。

当可用飞机数量减少时,具体如表 4 所示。此时枢纽点和各点的连接情况没有改变,但出现自有运力不足的情况,需要利用其他航司运力完成运输任务,各航节需要委托运输的情况如表 5 所示。

由表 5 可知,在运力不足的情况下,将自有运力优先安排在载运量更大的枢纽间的干线上,非枢纽点到枢纽点的支线上通过其他航司的运力来运输更优。

最后,由于本文对传统模型进行了改进,考虑实际运输中各机型载运率对货物运输路径的影响,根据最后的计算结果显示每个 O-D 货流并不总是沿着成本最低的一条路径来运输,有时由于载运率的影响,分流运输或者选择其他运输路径的成本可能

表 2 枢纽城市及其指派情况

枢纽城市	与其连接的非枢纽城市
北京	沈阳、西安
广州	长沙
上海	杭州、武汉、南京
重庆	深圳、成都

表 3 各机型的执飞航班频次

机型	执飞航班频次/班
1	23
2	13
3	19

表 4 机队相关数据

机型 u	$u=1$	$u=2$	$u=3$
q_u /架	2	3	1
t_u /h	18	27	9
r_u /kg	19 731	39 000	52 700

表 5 各航节需要委托运输的货物量

航节	需要委托运输的货物量/kg
北京→沈阳	1 308
上海→南京	3 295
成都→重庆	2 521

会更低。例如,北京到上海的这条 O-D 流成本最低的路径就是北京—上海的直航运输,在传统的模型计算中,由于限制了只能选择成本最低的一条路径运输,所以就会将货物全部分配给北京到上海这条路径。但由于考虑了载运率的影响,在最后的计算结果中是将约 20% 的流量通过北京—深圳—上海这条路径来运输的。因此,对于货运航空公司而言,在构建货运航线网络时要从实际出发考虑自有机型载运率对航线网络布局的影响。

5 结语

针对全货运航空公司研究其货运航线网络的设计问题,考虑了全货运航空公司自营和托运两种运输方式,以更贴合实际的各机型在各航节上的航班运营成本和委托运输成本替代单位运输成本和折扣因子,并加入了货物的枢纽中转成本和机队夜间可用时间的限制,以总成本最小为目标构建数学模型,运用算例数据,使用 LINGO 软件求解,验证了模型的可行性,为全货运航空构建货运航线网络提供的参考。但在模型构建中假定了任意 O-D 货流需求,自有机队运输成本和委托运输成本等因素都是确定的,实际这些因素是不断变化的,因此在今后的研究中需要进一步的研究相关因素变动下的货运航线网络鲁棒优化设计问题。

参考文献

- [1] 徐顺志. 航线网络结构演化相变及其网络优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [2] 莫辉辉,彭峥,高超,等. 上海“一市两场”航线网络结构演变格局研究[J]. 民航学报,2022,6(5):1-5.
- [3] 杨新涅,焦慧君. 枢纽机场航线网络优化研究[J]. 综合运输,2021(3):13-18.
- [4] 杨忠振,于述南,陈刚. 混合式航空货运网络优化[J]. 交通运输工程学报,2016,16(1):103-114.
- [5] WANG S,TAO F,SHI Y. Optimization of air freight network considering the time window of customer[C]//7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). Oxford UK:IEEE,2018:304-308.
- [6] 刘雷. 不确定环境下的航线网络规划与设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [7] 王婷. 蛛网式航线网络优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [8] 刘明. 轴辐式货运航线网络构建方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [9] 冯乾,乐美龙,韩晓龙. 机场容量限制下的多重分派枢纽航线网络设计[J]. 工业工程,2015,18(4):146-151.
- [10] 樊玮,宁俊文. 航线网络中枢纽城市选择的多目标优化模型[J]. 中国民航大学学报,2021,39(2):31-36.
- [11] 陈晓欣. 轴辐式运输网络中的选址优化问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [12] 张培文,汪瑜,王旻珂. 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,2021,39(6):99-107.
- [13] CANRONG Z,FANRUI,et al. MIP models and a hybrid method for the Capacitated air-cargo network planning and scheduling problems[J]. Transportation Research Part E,2017,103:158-173.
- [14] 何湘妮,李艳华,阳杰. 基于竞争情景的双枢纽航线网络优化模型[J]. 北京航空航天大学学报,2023,6(5):1-13.
- [15] 刘璐,田勇,李超,等. 非严格枢纽航线网络绿色优化[C]. // 中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府. 2022 世界交通运输大会论文集. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2022:659-666.
- [16] 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,2023,25(2):24-31.
- [17] 闫妍. 航线联营下货运航空公司物流网络优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [18] 唐国友. 基于成本考虑的 S 公司航空快递网络优化研究[D]. 厦门:厦门大学,2019.
- [19] 孙宏,黄赶祥,王晓东. 一种民用客机航线平均油耗评估模型[J]. 工业工程,2014,17(5):41-45.
- [20] CHAO C C. Assessment of carbon emission costs for air cargo transportation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment,2014,33:186-195.

Optimal Design of Single Distribution Strict Hub Route Network for Cargo Airline

SHAN Qiuyue, WU Yongqiang

(School of Airport Engineering and Aviation Transportation Management,Civil Aviation Flight University of China,
Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: Research the construction of rute network for cargo airlines. Improve the traditional model based on a single allocation strict hub route network. Replace the traditional unit transportation cost and discount factor with the commissioned transportation cost of goods on each route and the transportation cost of its own fleet, and consider the impact of the transit cost and loading rate of hub points on route selection. Considering the characteristics of air cargo night flights and the limitations of available time for each fleet at night, with the goal of minimizing total cost, a mathematical model is constructed and solved using LINGO optimization software to verify the effectiveness of the model, providing reference for freight airlines to build a freight route network.

Keywords: air transport; hub network design; transit cost; fleet available time at night