科技创新

不确定需求下国际航空联盟航线网络与机队联合优化

胡浩浩[1]，王旻轲[1,2]，武雪杰[1]

(1. 中国民用航空飞行学院机场学院，广汉 618307；2. 民航机场智慧运营与运维四川省工程研究中心，广汉 618307)

摘要：聚焦国际航空联盟背景下的航空公司成本最小化问题，在需求不确定条件下整合航线网络与机队进行联合优化。构建一个两阶段随机混合整数规划模型，并以中美两家航空公司的实际运营数据进行案例分析。结果表明：机队与航线网络存在紧密联系，不同的运力投放策略会直接改变最优的网络方案，忽略机队将导致次优决策；洲际航班频率限制以及需求不确定性对门户枢纽决策有重要影响，同时也验证了随机模型的优越性。

关键词：国际航空联盟；枢纽航线网络；机队；联合优化；需求不确定

中图分类号：V351 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)01－0001－07

国际航空运输因其跨国运营特性导致面临航权管制挑战，这显著限制了国际航空运输的无缝连接服务与市场拓展。而航空联盟则成为应对此限制的主要方式[1]。航空联盟是多家航空公司组成的合作伙伴关系，通过航空联盟，航司不仅可以突破航权限制拓展国际市场，还可以将合作延伸至常旅客计划、国际客票销售、联合采购等多方面来降低运营成本[2]。建立高效的国际联盟航线网络则是实现合作优势的关键。

目前，对于国际航空联盟的研究主要围绕航空联盟的分类[3]、航空联盟对航空公司的影响[4]、航空联盟伙伴选择[5]等方面展开，而针对国际航空联盟的航线网络设计及优化的研究较少，并且集中于航线网络单方面优化研究。王苗苗和杨文东[6]在经典轮辐式网络基础上，以最小化国内流量以及国际流量运输成本为目标建立混合整数规划模型以优化航空联盟网络；陈娴[7]则在此基础上，通过设置流量阈值，建立了允许直飞的包含目标航空公司自身网络与合作网络优化的国际联盟航线网络模型。杨文东等[8-9]分别考虑航空联盟需求以及单位运输成本不确定情况，建立联盟航线网络的三下标不确定优化模型来确定国际门户枢纽。而根据张宝山等[10]对中国绿色航线网络与机队规划联合优化的研究、张培文等[11]对枢纽网络与机队规划联合优化研究，以及 Mohri 等[12]在考虑机队规模和多样性的情况下为航司设计全球航线网络研究均证实机队与航线网络之间存在直接或间接的影响，忽视机队影响可能导致航线网络设计方案不合理甚至不可行。此外，国际航空运输面临政治政策、公共卫生等多种不确定性因素，这些因素的变化可能导致国际旅客需求的波动。根据张越等[13]对货物需求约束下航空货运网络调度优化研究以及 Li 等[14]对不确定需求下货运网络扩张枢纽定位问题研究均得出如果不考虑需求的不确定性，可能会导致次优决策的出现。

因此，以国际航线联盟为背景，在旅客需求不确定下整合航线网络与机队进行联合优化，以期为航空公司提供更具鲁棒性和经济性的运营决策支持。

1 模型提出

1.1 问题描述与假设

为完成国际旅客的运输，假设在不同地区的两家航空公司 A 与 B 通过航空联盟来规避航权管制，其中，国际旅客在各自区域的运输由其独立运营，洲际航线则由 A 与 B 共同承运。为实现规模经济，航司 A 与 B 共同建立洲际枢纽航线网络。通过建模优化旨在确定各自区域最优门户枢纽位置、非枢纽与枢纽连接方式、不同航段类型所分配机型和数量以及各航线航班频率。建模基本假设如下：①不同区域之间门户枢纽全连接，且非枢纽城市之间不

收稿日期：2025-07-26

基金项目：中央高校基本科研业务费(25CAFUC04040)

作者简介：胡浩浩(1998—)，男，甘肃天水人，硕士研究生，研究方向为航空交通运输；通信作者王旻轲(1986—)，男，四川成都人，博士，副教授，研究方向为系统工程与决策科学、物流系统优化；武雪杰(1999—)，女，安徽阜阳人，硕士研究生，研究方向为航空交通运输。

允许直接连接；②非枢纽与枢纽之间采用多分配的连接方式，且非枢纽只能连接本区域的门户枢纽；③任一 OD 流（起终点间交通出行量）运输的路径至多包含 3 条边；④所有 OD 流必须从起始城市运送至目的地城市；⑤由于国际航线的往返需求是不对称的，因此往返旅客流量不等；⑥洲际航线上的最大航班频率总是有限的。

1.2　符号说明

为清晰阐述本文构建的数学模型，首先定义模型的集合、参数和决策变量，见表 1。

表 1　符号说明

分类	符号	含义
集合	D^1	航司 A 的节点集合
	D^2	航司 B 的节点集合
	D	所有节点集合
	H^1	航司 A 的候选枢纽集合
	H^2	航司 B 的候选枢纽集合
	H	所有候选枢纽集合
	A	航司 A 的备选机型集合
	B	航司 B 的备选机型集合
	T	航段距离分类集合
	Ω	需求情景集合
参数	f_{ij}^a	航司 A 的 a 机型执飞航段 ij 的固定成本
	f_{ij}^b	航司 B 的 b 机型执飞航段 ij 的固定成本
	c_{ij}^a	航司 A 的 a 机型执飞航段 ij 的可变成本
	c_{ij}^b	航司 B 的 b 机型执飞航段 ij 的可变成本
	$w_{ij}(\omega)$	需求情景 ω 下节点 i 到节点 j 的旅客需求
	$P(\omega)$	需求情景 ω 的发生概率
	d_{ij}	节点 i 到节点 j 的距离
	h_k	枢纽节点 k 的建设成本
	F_{ij}	航段 ij 上的最大航班频率
	S_a	a 机型的平均座位数
	L_{ij}^a	a 机型在航段 ij 的预期客座率
	t_{ij}^a	a 机型执飞航段 ij 的单次轮挡飞行时间
	E_{ij}^t	当节点 i 到节点 j 的飞行距离属于 t 航段时为 1，否则为 0
	η_a	a 机型在规划期内的最大利用小时
	μ_a	a 机型在规划期内的最小利用小时
	N_a	航司 A 的 a 机型可用数量
	N_b	航司 B 的 b 机型可用数量
决策变量	$x_{ikmj}^1(\omega)$	需求情景 ω 下从节点 i 到节点 j 经由枢纽 k 与 m 运输的流量占比，其中 km 航段由航司 A 运输
	$x_{ikmj}^2(\omega)$	需求情景 ω 下从节点 i 到节点 j 经由枢纽 k 与 m 运输的流量占比，其中 km 航段由航司 B 运输
	y_k	0～1 决策变量，$y_k=1$ 表示节点 k 为枢纽；否则 $y_k=0$
	$V_{ij}^a(\omega)$	需求情景 ω 下由航司 A 的 a 机型执飞航段 ij 的航班频率
	$V_{ij}^b(\omega)$	需求情景 ω 下由航司 B 的 b 机型执飞航段 ij 的航班频率
	$n_t^a(\omega)$	需求情景 ω 下航司 A 的 a 机型分配到 t 航段的数量
	$n_t^b(\omega)$	需求情景 ω 下航司 B 的 b 机型分配到 t 航段的数量

1.3　构建模型

以联盟整体成本最小为目标，构建国际航空联盟下航线网络与机队联合两阶段随机优化模型。模型的第 1 阶段决策变量为门户枢纽选址决策 y_k、y_m，不受需求不确定性的影响。第 2 阶段决策变量则取决于不同需求情景 ω，具体包括：运输路径上的流量 $x_{ikmj}^1(\omega)$ 和 $x_{ikmj}^2(\omega)$、不同航段类型所分配机型的数量 $n_t^a(\omega)$ 和 $n_t^b(\omega)$，以及航班频率 $V_{ij}^a(\omega)$ 和 $V_{ij}^b(\omega)$。两阶段随机优化模型的第 1 阶段如下：

$$\min E[Q(y,\omega)]+\sum_{k\in D^1}y_k h_k+\sum_{m\in D^2}y_m h_m \tag{1}$$

s. t.

$$\sum_{k\in H^1}y_k=p_1 \tag{2}$$

$$\sum_{m\in H^2}y_m=p_2 \tag{3}$$

$$y_k,y_m\in\{0,1\} \tag{4}$$

目标函数(1)最小化枢纽网络运营的总成本，其中第 1 项表示基于门户枢纽选址决策 y_k、y_m，以及需求情景 ω 的旅客运输成本期望值，第 2、第 3 项分别表示航司 A 与 B 的枢纽建设成本。求解时，根据需求的离散概率分布，通过计算需求情景集合 Ω 下的期望成本 $\sum P(\omega)Q(y,\omega)$，来表示旅客运输成本的期望值 $E[Q(y,\omega)]$。约束(2)与约束(3)确定航司 A 与 B 建设的门户枢纽个数分别为 p_1 与 p_2。约束(4)为对枢纽决策变量的限制。

第 2 阶段基于需求情景的旅客运输成本 $Q(y,\omega)$ 公式如下：

$$\begin{aligned}Q(y,\omega)=\min&\sum_{i\in D}\sum_{j\in D,j\neq i}\sum_{a\in A}f_{ij}^aV_{ij}^a(\omega)+\\&\sum_{i\in D}\sum_{j\in D,j\neq i}\sum_{b\in B}f_{ij}^bV_{ij}^b(\omega)+\\&\sum_{i\in D}\sum_{j\in D}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B}c_{ij}^aw_{ij}(\omega)x_{ikmj}(\omega)+\\&c_{ij}^bw_{ij}(\omega)x_{ikmj}(\omega)+\\&\sum_{k\in D}\sum_{m\in D}\sum_{a\in A}\sum_{b\in B}c_{km}^aw_{ij}(\omega)x_{ikmj}^1(\omega)+\\&c_{km}^bw_{ij}(\omega)x_{ikmj}^2(\omega)\end{aligned} \tag{5}$$

s. t.

$$\sum_{k\in D}\sum_{m\in D}x_{ikmj}^1(\omega)+x_{ikmj}^2(\omega)=1\ \forall i,\ j\in D,i\neq j,\omega\in\Omega \tag{6}$$

$$x_{ikmj}(\omega)\leqslant y_k\ \forall i,j,k,m\in D,\ i\neq j,\omega\in\Omega \tag{7}$$

$$x_{ikmj}(\omega)\leqslant y_m\ \forall i,j,k,m\in D,\ i\neq j,\omega\in\Omega \tag{8}$$

$$x_{kkmm}(\omega)\geqslant y_k+y_m-1\ \forall k,m\in D,\omega\in\Omega \tag{9}$$

$$\sum_{k\in D^2}\sum_{m\in D^2}w_{im}(\omega)x_{ijkm}(\omega)+\sum_{k\in D}\sum_{m\in D}w_{km}(\omega)x^1_{kijm}(\omega)+\sum_{k\in D^2}\sum_{m\in D^2}w_{kj}(\omega)x_{kmij}(\omega)\leqslant\sum_{a\in A}S_aL^a_{ij}V^a_{ij}(\omega)\ \forall i,j\in D,i\neq j,\omega\in\Omega \tag{10}$$

$$\sum_{k\in D^1}\sum_{m\in D^1}w_{im}(\omega)x_{ijkm}(\omega)+\sum_{k\in D}\sum_{m\in D}w_{km}(\omega)x^2_{kijm}(\omega)+\sum_{k\in D^1}\sum_{m\in D^1}w_{kj}(\omega)x_{kmij}(\omega)\leqslant\sum_{b\in B}S_bL^b_{ij}V^b_{ij}(\omega)\ \forall i,j\in D,i\neq j,\omega\in\Omega \tag{11}$$

$$\sum_{a\in A}\sum_{b\in B}V^a_{km}(\omega)+V^b_{km}(\omega)\leqslant F_{km}\ \forall k,m\in D,k\neq m,\omega\in\Omega \tag{12}$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in D}V^a_{ij}(\omega)t^a_{ij}E^t_{ij}\leqslant\sum_{a\in A}n^a_t(\omega)\eta_a\ \forall t\in T,\omega\in\Omega \tag{13}$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in D}V^b_{ij}(\omega)t^b_{ij}E^t_{ij}\leqslant\sum_{b\in B}n^b_t(\omega)\eta_b\ \forall t\in T,\omega\in\Omega \tag{14}$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in D}V^a_{ij}(\omega)t^a_{ij}E^t_{ij}\geqslant\sum_{a\in A}n^a_t(\omega)\mu_b\ \forall t\in T,\omega\in\Omega \tag{15}$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in D}V^b_{ij}(\omega)t^b_{ij}E^t_{ij}\geqslant\sum_{b\in B}n^b_t(\omega)\mu_b\ \forall t\in T,\omega\in\Omega \tag{16}$$

$$\sum_{t\in T\mid t\leqslant a}n^a_t(\omega)\leqslant N_a\ \forall a\in A,\omega\in\Omega \tag{17}$$

$$\sum_{t\in T\mid t\leqslant b}n^b_t(\omega)\leqslant N_b\ \forall b\in B,\omega\in\Omega \tag{18}$$

$$x^1_{ikmj}(\omega),x^2_{ikmj}(\omega)\geqslant 0\ \forall i,j\in D,k,m\in H,i\neq j,\omega\in\Omega \tag{19}$$

$$n^a_t(\omega),n^b_t(\omega)\in\mathbf{N}\ \forall a\in A,b\in B,t\in T,t\leqslant a,t\leqslant b,\omega\in\Omega \tag{20}$$

$$V^a_{ij}(\omega),V^b_{ij}(\omega)\in\mathbf{N}\ \forall a\in A,b\in B,i,j\in D,i\neq j,\omega\in\Omega \tag{21}$$

其中,目标函数(5)最小化联盟枢纽网络运营的总成本,其中包括航空公司 A 与 B 的运输固定成本、运输可变成本以及门户枢纽建设成本。约束(6)确保所有旅客流量都经枢纽网络并由航司 A 与 B 共同运输。约束(7)与约束(8)确保流量只能经过门户枢纽进行运输。约束(9)表示门户枢纽间全连接,确保门户枢纽间流量只能直接运输。约束(10)与约束(11)分别表示航司 A 与 B 各条航线上提供的座位容量能够满足该条航线的流量需求。约束(12)限制了门户枢纽间的最大航班频率。约束(13)与约束(14)分别表示航司 A 与 B 分配到 t 航段的每种机型的运行小时小于该机型最大飞机利用小时。约束(15)与约束(16)分别表示航司 A 与 B 分配到 t 航段的每种机型的运行小时大于该机型最小飞机利用小时。确保飞机使用的经济性。约束(17)与约束(18)分别表示航司 A 与 B 分配到 t 航段的每种机型数量不能大于该机型的可用数量。约束(19)~约束(21)为决策变量取值约束。

2 算例分析

2.1 数据设定

假设来自中国和美国的两家航空公司在中美航线展开联盟合作,选取中国的 10 个城市和美国的 10 个城市来构建国际联盟航线网络,城市及机场代码见表 2。

模型中的基本数据包括国际旅客需求、城市距离以及枢纽建设成本,分别来自 OAG 数据库 Great Circle Mapper 以及 2018 年民航业发展统计公报,机队以及成本数据获取自航空公司官网以及 ICAO 等网站,见表 3。

根据以往文献与现实情况的考量,根据航程范围将机型分为短、中、长程飞机,其中 0~800 km 为短程,800~5 000 km 为中程,大于 5 000 km 为长程,同样,根据城市距离按相同划分依据将航段分为短、中、长航段。轮挡时间按照城市距离/平均巡航速度的方式计算。

考虑需求的不确定性,以历史需求数据为基准,生成 5 种需求等级的情景及其概率,见表 4。

为验证需求情景概率的灵敏度,生成 7 种情景概率组合,情景概率取值见表 5。

表 2 城市与机场代码

序号	城市/机场代码	序号	城市/机场代码
1	北京/PEK	11	纽约/JFK
2	大连/DLC	12	底特律/DTW
3	青岛/TAO	13	洛杉矶/LAX
4	上海/SHA	14	明尼阿波利斯/MSP
5	南京/NKG	15	旧金山/SFO
6	武汉/WUH	16	西雅图/SEA
7	西安/XIY	17	芝加哥/ORD
8	成都/CTU	18	波士顿/BOS
9	昆明/KMG	19	奥斯汀/AUS
10	广州/CAN	20	盐湖城/SLC

表 3 机队数据

参数	取值		
	$a(b)=1$	$a(b)=2$	$a(b)=3$
平均巡航速度/(km·h^{-1})	850	870	900
最大座位数	90	160	300
固定成本/(美元·h^{-1})	532.7	612.9	1 742.8
可变成本/(美元·人$^{-1}$·km^{-1})	0.018 83	0.014 96	0.012 70

表 4　需求情景参数

情景	需求占比/%	概率
1(SL)	60	0.091
2(L)	80	0.171
3(B)	100	0.358
4(H)	120	0.211
5(SH)	140	0.169

表 5　需求情景概率设定

情景概率组合	概率				
	SL	L	B	H	SH
1	0.60	0.25	0.05	0.05	0.05
2	0.30	0.25	0.15	0.15	0.15
3	0.10	0.10	0.60	0.10	0.10
4	0.15	0.15	0.40	0.15	0.15
5	0.05	0.05	0.05	0.25	0.60
6	0.15	0.15	0.15	0.25	0.30
7	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

2.2　计算结果

所有实验均使用 Python 以及 12.0.0 版本的 gurobi 求解器对模型进行求解，运行环境为 CPU AMD Ryzen 9 7940H，RAM16G。

2.2.1　洲际航班频率限制以及门户枢纽数的影响

为验证洲际航班频率限制以及门数枢纽数对门户枢纽位置以及运营成本的影响，分别将洲际航班频率 F_{km} 限制为 400、450、500、550、600，并在每个频率限制下设置门户枢纽数（p_1、p_2）分别为（2、2）、（2、3）、（3、2）、（3、3）。计算结果见表 6。可以看出，在洲际航班频率 F_{km} 为 400、450 以及 500 的情况下，（p_1、p_2）为（2、2）时，模型无可行解，这是由当前洲际航班频率不足以保证承运所有旅客而导致。在航班频率足够的情况下，观察（p_1、p_2）为（2、3）时的结果可知，航班频率的变化也会引起门户枢纽位置的改变，从而使得成本发生较大变化。整体来说，随着洲际航班频率管制的放松，航司的运营成本也会下降。所以建议：对于政府层面，为了国际民航市场的长远发展，可以适当放松洲际航线航班频率的限制；而航司层面，在洲际枢纽航线网络设计时，需要考虑洲际航班频率限制，才能使设计的航线网络更利于未来实际的运营，从而为公司带来更好的效益。

2.2.2　投放运力对网络方案的影响

通过改变航司 A 与 B 在洲际航线上的投放运力，可以发现会导致航线网络方案的改变。当投放运力较小时，即航司 A 与 B 的投放运力分别为（30%、30%）、（30%、50%）、（50%、30%）时，无可行方案，这是由于投放运力不足以运输所有旅客而造成。当投放运力富裕时，即当航司 A 与 B 的投放运力分别为（30%、80%）、（50%、80%）、（80%、50%）、（80%、80%）时，门户枢纽位置为 PEK、SHA、SFO、DTW，此时联盟航线网络方案如图 1 所示。

而当投放运力可以运输全部旅客需求，但又无富裕时，为保证运输门户枢纽位置会发生改变，当航司 A 与 B 的投放运力分别为（50%、50%）时，网络方案如图 2 所示，门户枢纽位置为 PEK、DLC、SFO、SEA，此时航线网络发生较大变化。

当航司 A 与 B 的投放运力分别为（80%、30%）时，网络方案如图 3 所示，门户枢纽位置为 PEK、TAO、SFO、SEA。因此，在与合作航司构建联盟航线网络前，需综合考虑合作双方可提供的运力来确定网络方案。

表 6　不同洲际航班频率下优化结果

F_{km}	p_1	p_2	门户枢纽	目标值
400	2	2	—	—
	2	3	1,4,12,13,20	610 152 772.640 5
	3	2	1,4,10,12,15	595 527 565.133 9
	3	3	1,4,10,11,15,17	595 850 300.779 6
450	2	2	—	—
	2	3	1,4,12,13,20	606 810 782.860 2
	3	2	1,4,10,12,15	594 935 956.480 8
	3	3	1,4,10,11,15,17	595 727 565.133 9
500	2	2	—	—
	2	3	1,4,11,14,15	604 988 559.866 4
	3	2	1,4,10,12,15	594 800 853.055 3
	3	3	1,4,10,11,15,17	595 694 332.762 1
550	2	2	1,4,15,17	598 827 969.107 0
	2	3	1,4,11,15,17	598 942 732.079 2
	3	2	1,4,10,12,15	594 786 639.615 1
	3	3	1,4,10,11,15,17	595 639 498.649 4
600	2	2	1,4,12,15	594 426 793.598 6
	2	3	1,4,11,15,17	595 324 391.430 2
	3	2	1,4,10,12,15	594 786 130.494 8
	3	3	1,4,10,11,15,17	595 633 956.409 2

2.2.3　随机模型的结果

在门户枢纽数组合（p_1、p_2）为（2、2）、（2、3）、（3、2）、（3、3）的设置下，分别求解 5 种需求情景的确定型模型以及随机模型（SP），并引入指标随机解价值（VSS）和完全信息期望值（EVPI）来对随机模型进行评估。其中，假设航空公司对国际旅客需求信息完全掌握，并求得每个需求情景的确定型模型解，根据每种情形发生的概率求数学期望得到 WS 值（假设能完全预知各情景并分别优化后，求得的期望最优值），在最大化问题中，用 WS 值减去随机优化模型的解值 SP 值（综合考虑 5 种情景的随机

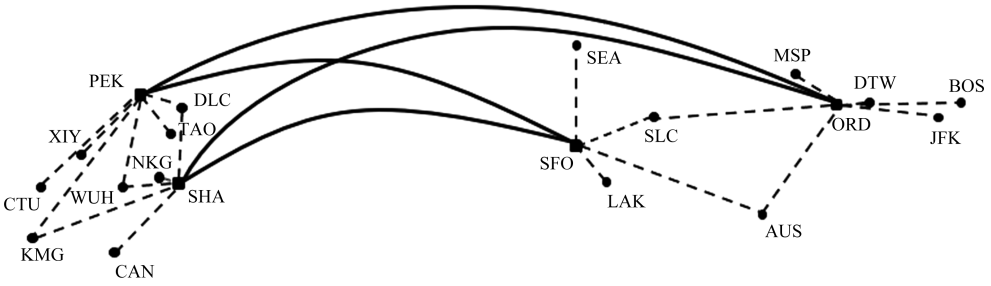


图 1　国际航空联盟枢纽航线网络方案 1

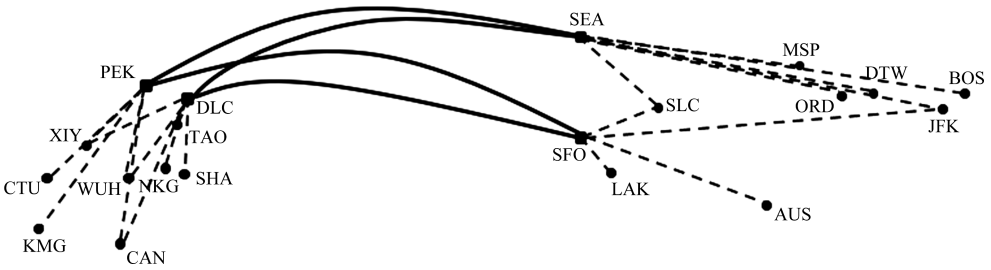


图 2　国际航空联盟枢纽航线网络方案 2

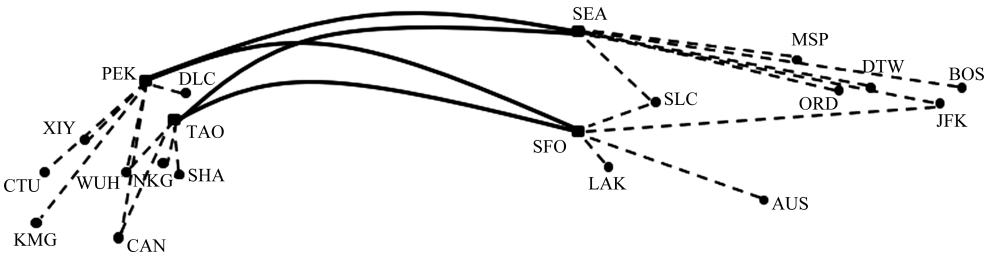


图 3　国际航空联盟枢纽航线网络方案 3

模型最优解),得到 EVPI 值。EVPI 值越小代表随机解越接近于信息完全已知情况下的最优解。当使用需求情景的期望值并带入确定型模型进行求解得到 EV 值(将 5 种情景的期望需求作为确定值,求解模型得到的结果),将 EV 值的枢纽解分别代入 5 种需求情景并结合情形发生概率计算的期望得到 EEV 值(将 EV 的求解结果置于 5 种不确定情景下,得到的期望值),用 SP 值减去 EEV 值则得到 VSS 值(随机解的价值,即考虑不确定性带来的收益)。VSS 值越大代表随机解越优于期望值解。计算结果见表 7。

在(p_1、p_2)为(2、2)、(2、3)时,随机模型的门户枢纽解与最大需求情景相一致,而(p_1、p_2)为(3、2)时,随机模型的门户枢纽解则与前 4 种需求情景相同,当(p_1、p_2)为(3、3)时,门户枢纽解与 5 种需求情景的确定型枢纽解都不同,所以,在确定门户枢纽位置时,直接参考最大需求情景下的确定型决策或者在所有需求情景中出现次数较多的确定型决策可能会出现次优决策。所有门户枢纽数组合下,EVPI>0,这说明在考虑不确定需求时,采用随机优化模型均会增加成本,同样,VSS>0 说明随机解较期望值解更有价值。

综上,建议航司在建立国际联营网络时,直接根据以往需求而确定的门户枢纽决策可能并不是最优,需要采用随机模型来确定综合每种需求情景下的最优门户枢纽决策。

2.2.4　需求情景概率的影响

为衡量不同情景的概率取值对随机模型的影响,在门户枢纽数(p_1、p_2)为(2、2)情形下,绘制不同情景概率组合下 VSS 的变化曲线,如图 4 所示,在情景概率组合为 3 时,VSS 值最小,这表明当与实际的中等需求数据偏差较小时,随机模型没有表现出较明显的优越性,情景概率组合为 1、2、4、5、7 的 VSS 值均大于情景概率组合为 3 的 VSS 值,这表明当需求水平与现阶段实际水平相比出现波动时,随机模型的优势会更加明显。所以建议航司在规划联

表 7　随机模型优化结果

p_1	p_2	模型	门户枢纽	目标值	指标	数值
2	2	SL	1,4,12,15	401 653 708.7	WS	616 391 077
		L	1,4,12,15	497 855 236.4	EEV	618 476 968.4
		B	1,4,12,15	594 485 902.7	EVPI	1 718 923
		H	1,4,12,15	690 859 927.9	VVS	366 968.38
		SH	1,4,14,15	805 384 296.9		
		SP	1,4,14,15	618 110 000		
		EV	1,4,12,15	612 213 653.7		
2	3	SL	1,4,11,15,17	413 311 223.2	WS	617 056 780.7
		L	1,4,11,15,17	504 000 037.5	EEV	621 776 523.8
		B	1,4,11,15,17	595 139 010.7	EVPI	1 978 685.4
		H	1,4,11,15,17	686 328 065.3	VVS	2 741 057.7
		SH	1,4,11,14,15	801 103 345.7		
		SP	1,4,11,14,15	619 035 466.1		
		EV	1,4,11,15,17	612 188 391.2		
3	2	SL	1,4,10,12,15	412 654 264	WS	620 673 378
		L	1,4,10,12,15	503 744 564.6	EEV	624 748 836
		B	1,4,10,12,15	594 808 388.1	EVPI	3 893 799.6
		H	1,4,10,12,15	686 492 910.8	VVS	181 658.34
		SH	1,4,7,14,15	823 610 132.3		
		SP	1,4,10,12,15	624 567 177.7		
		EV	1,4,10,12,15	611 747 534.8		
3	3	SL	1,4,10,11,15,17	424 282 765.6	WS	620 867 709.1
		L	1,4,10,11,15,17	509 987 424.8	EEV	633 325 668.5
		B	1,4,10,11,15,17	595 658 628.3	EVPI	6 824 338
		H	1,4,10,11,15,17	681 888 181.5	VVS	5 633 621.5
		SH	1,4,10,11,14,16	816 129 778.4		
		SP	1,4,10,11,14,15	627 692 047		
		EV	1,4,10,11,15,17	611 983 402.7		

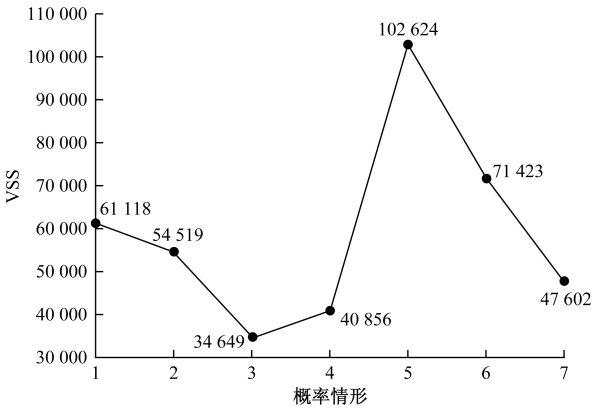


图 4　不同概率组合下的 VSS 值变化

营航线网络时，尤其是需求具有较强不确定性的国际旅客运输，采用随机模型得出的决策会更具经济性和抗干扰性。

3　结论

在轮辐式网络基础上，以国际航空联盟为背景构建航线网络，并整合机队进行联合优化，进一步考虑需求的不确定性，构建两阶段随机优化模型。目前为止，已有文献中尚未提到这一点。所构建的模型在中国以及美国的两家航司的真实数据集中得到测试，通过结果比较并结合敏感性分析得出：航司在规划国际联盟航线网络时需考虑机队运力以及多样性，防止设计的航线网络出现与机队不匹配情况。政府层面为助力国际民航运输的快速发展，可以适当放松国际航班频率的管制。而航司在规划时需考虑国际航班频率的限制，以设计的国际联营航线网络更具可行性以及经济性。鉴于国际运输需求的不确定性较强，而不同需求情景下门户枢纽决策不一致，并且随机模型在不同需求概率组合下都具有优越性，所以建议航司在决策时采用随机模型的解，而不是采用特定情形下的解。

参考文献

[1] 解梦鸽. 国际航空自由化的困境与出路[D]. 长春：吉林大学，2023.

[2] SHARMA A，KOHAR A，JAKHAR S K. Profit maximizing hub location problem in the airline industry under coopetition[J]. Computers & Industrial Engineering，2021，160：107563.

[3] GROSCHE T，KLOPHAUS R. Codesharing and airline partnerships within，between and outside global alliances [J]. Journal of Air Transport Management，2024，

117: 102591.

[4] NERJA A. Can parallel airline alliances be welfare improving? the case of airline-airport vertical agreement[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 167: 103559.

[5] 朱迪. "双边合作"趋势下航空公司合作伙伴的选择研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2021.

[6] 王苗苗, 杨文东. 联盟环境下航空公司航线网络优化[J]. 航空计算技术, 2016, 46(3): 67-71.

[7] 陈娴. 联盟背景下国际航线网络与航班计划优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

[8] 杨文东, 邵佳佳, 郑文娟. 不确定需求下航空公司国际联盟航线网络优化[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(3): 34-39.

[9] YANG W, SHAO J, JIANG Y, et al. International airline alliance network design with uncertainty[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3065.

[10] 张宝山, 王旻轲, 张昊彤, 等. 中国绿色航线网络与机队规划联合优化模型研制及效果[J]. 科技和产业, 2025, 25(10): 61-68.

[11] 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, 39(6): 99-107.

[12] MOHRI S S, NASROLLAHI M, PIRAYESH A, et al. An integrated global airline hub network design with fleet planning[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 164: 107883.

[13] 张越, 史晓红, 任轩禾, 等. 基于货物需求约束的航空货运网络调度优化模型[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(35): 15293-15302.

[14] LI H, TAHERKHANI G, ALUMUR S A, et al. Strategic expansion of freight transportation hub networks under demand uncertainty[J]. Omega, 2025, 131: 103196.

Joint Optimization of Hub Network and Fleet for International Airline Alliance under Uncertain Demand

HU Haohao[1], WANG Minke[1,2], WU Xuejie[1]

(1. College of Airport, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of Smart Operation and Maintenance of Civil Aviation Airports, Guanghan 618307, China)

Abstract: Focusing on the cost minimization problem of airlines in the context of international airline alliances, and integrates hub networks and fleets for joint optimization under demand uncertainty. A two-stage stochastic mixed integer programming model is constructed, and a case study is conducted using actual operating data from two airlines in China and the United States. The results show that there is a close connection between the fleet and the hub network. Different capacity deployment strategies directly change the optimal network plan, and ignoring the fleet will lead to suboptimal decisions. Intercontinental flight frequency restrictions and demand uncertainty have an important impact on gateway hub decisions, and the results also verify the superiority of stochastic models.

Keywords: international airline alliance; hub network; fleet; joint optimization; demand uncertainty