

【交通运输与经济】

中国航空枢纽港选址与中枢航线网络设计

翁克瑞, 杨超, 屈波

(华中科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过中枢网络特征分析, 评估中枢航线网络的规模效益与建站数量, 利用多分配枢纽站中位模型计算中国航空枢纽港选址城市, 说明中枢网络设计中的路线选择问题。从计算结果中发现, 北京、上海、广州、深圳、昆明等城市的枢纽港地位十分明显, 而重庆、武汉、西安、大连、沈阳、乌鲁木齐、海口等城市也在不同情形下频繁地出现在选择方案中。由此得出中枢航线网络每年可为国内航空客运节约至少几十亿元运营费用的结论。

关键词: 航空运输经济; 航空枢纽港选址; 中枢航线网络; 航空运输

中图分类号: U8022

文献标识码: A

文章编号: 1671-6248(2006)04-0037-05

Location for China's hub airports and design for hub and spoke airline network

WENG Ke rui, YANG Chao, QU Bo

(School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: This article first elaborates on the characteristics of hub and spoke network, and then evaluates the scale merits and the number of hubs for China's hub and spoke airline network. At last, the paper optimizes hub location and route choosing for China airline network by the median model of multiple allocation hub. In conclusion, it is found that Beijing, Shanghai, Guangzhou, Shenzhen and Kunming have the obvious priorities, and Chongqing, Wuhan, Xi'an, Dalian, Shenyang, Urumqi and Haikou also have their priorities. The paper finally concludes that the hub and spoke airline network can decrease billions of yuan for China in the transportation cost.

Key words: air transportation economics; hub airport location; hub and spoke airline network; airline transportation

0 引言

航空枢纽港的中枢航线网络在航空运输业有着广泛的应用, 这种航线网络的主要特征是将不同直通航线上的客、货流流(origin destination, O-D)在少数几个枢纽站之间集中后运输, 网络中的每条O-D流按照起点站—枢纽港—终点站(单点中转)或起点站—枢纽港—枢纽港—终点站(两点中转)的运输路线运动。随着现代物流技术和运筹优化理论的发展, 为节约运营费用, 中枢航线网络已成为国内外航

空运输业的重要竞争手段, 集约化经营成为中国物流的发展趋势^[1]。目前, 中枢网络成为发达国家航空公司普遍采用的一种航线结构, 位居世界前20位的航空公司几乎都采用这种航线结构。为积极推动中枢网络建设, 中国民航业在“十五”期间启动了一场航线结构布局上的革命: 全国布点多个枢纽机场, 缩减城市间直通航线, 客流小的机场全部通过枢纽机场进行连接。在这一重大战略中, 民航总局把北京、上海、广州的机场定位为国际国内航线枢纽门户, 而把武汉、沈阳、成都、西安、昆明等城市被定位

收稿日期: 2006-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70471042)

作者简介: 翁克瑞(1979-), 男, 浙江温州人, 管理学博士研究生。

为区域性航线枢纽。同时,深圳、天津、杭州等城市也纷纷提出打造地区航空枢纽港的构想。在这场“航空枢纽争抢”中,全面认识中枢航线网络特征、科学选择航空枢纽港和设计中枢航线网络,成为迫在眉睫的研究课题。

1 中枢航线网络特点

1.1 中枢网络的主要优点

1.1.1 产生枢纽港之间飞行的规模效益

依靠中小城市的客货流量汇集,枢纽港之间的干线运输可以尽可能地用大型飞机载运,以维持较高水平的载运率,提高干线运输的规模效益。目前,国内航线网络发展存在的一个重要问题就是干线运输资源利用率不高。长期以来,中国干线资源投入多,竞争激烈,在没有形成中枢辐射式网络的情况下,造成干线运输的载运率普遍不高,运输资源利用率低。同时,在机队结构方面,国内的现状是“大飞机多、小飞机少”,大飞机飞短线的情况较为普遍。因此,中枢航线网络可以在很大程度上提高大型飞机和干线资源的利用率。

1.1.2 促进中国航空运输业的战略整合

在中枢航线网络中,枢纽港之间的干线运输能否获得规模效益取决于是否有足够的支线流量汇集到干线运输。而目前,国内没有一家航空公司具有足够的支线资源支撑其干线运输,只有通过航线资源的整合才有可能形成中枢网络。同时,中枢航线网络的运作涉及到航班安排、飞机调度、管理资源整合等问题,这些条件和条件将促进中国航空运输业的战略整合。

1.1.3 减少基本飞机配置

假设一个由 6 个城市组成的航线网络,完全直通的网络是一个如图 1 的六边星形图。如果让每条航线安排一架飞机,则图 1 的航线网络需要 15 架飞机。同时,如果将图 1 改建成一个由 6 点钟和 12 点钟方位的两个

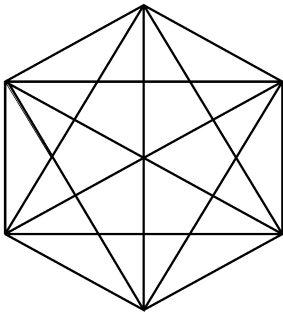


图 1 完全直通网络

枢纽机场组成的航线网络(图 2),则在理想情况下只需要 5 架飞机就可以满足需要。

1.2 中枢网络的主要缺点

1.2.1 产生绕道运输

由于网络中每条 O-D 流必须经过一个或两个

枢纽,因此飞行时增加了绕道成本。如图 2 中,从 8 点钟到 10 点钟的运输现在必须经过 6 点钟和 12 点钟两个枢纽机场,显然它们的运输距离远远大于 8 点钟到 10 点钟之间的直通距离。同时,绕道运输也意味着旅客必须接受更长的旅行时间和更多的起降次数,货物运输也需要接受更长的达到期限和更多的搬运次数,因此会降低总体服务水平和质量。所以,只有科学地选择航空枢纽港和设计中枢航线网络,使规模效益带来的节约成本大于增加的绕道成本和其他负面作用,才能发挥中枢航线网络的效用。

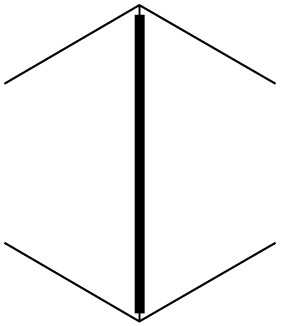


图 2 中枢航线网络

1.2.2 增加起降次数与运营管理难度

中枢航线系统本身比直通航线系统要复杂的多,而系统的复杂性与脆弱性是并存的。一般情况下,中枢网络需要涉及多家航空公司的运营整合,给系统运行带来诸多难度,而利益的分配也会产生中枢系统隐患。同时,经过中转之后,原来直通的航线被迫增加起降次数与成本。

2 中枢航线网络设计

中枢航线网络设计的主要工作包括规模效益评估、航空枢纽港建站数量确定、航空枢纽港选址、路线选择 4 个内容。本文这一部分主要介绍前 2 个内容,后 2 个内容放在第三部分介绍。

2.1 规模效益评估

规模效益的评估是指当中枢航线网络建成以后,依托支线流量的充实,干线运输费用将具有一定的折扣能力,本文假定其为 α ($0 < \alpha < 1$)。形成 α 的最直接源泉是干线运输载运率的提高。规模效益的评估是确定航空枢纽港建站数量和选址的前提,不同的规模效益水平将产生不同的建站数量和选址方案。一般情况下,折扣能力越强,规模效益带来的节约成本大于绕道成本的概率就越大,较少的建站数量就可以发挥中枢航线网络的优势。同时,不同的航空枢纽港建站数量反过来也会产生不同的规模效益水平。这是因为建站数量越多,形成的中枢干线数量也就越多,这意味着网络中的支线流量将被更多的干线中枢分流,导致干线飞行密度的提高能力有限。

由于规模效益、建站数量、选址方案之间的复杂

影响关系,所以目前还缺乏有效的模型和算法来同时寻求这3个问题的最优解决方案。但可以根据现有的载运率及其可能的提高率来估计 α 的大致区间。根据《中国交通年鉴(2003)》,2002年中国三大潜在枢纽城市北京、上海、广州的航线载运率平均在65%左右。同时,如果观察一些以这些城市为枢纽的多区间航线,如郑州—北京—大连、海口—广州—西安、郑州—广州—三亚等,其航线载运率普遍在75%以上。这说明,在北京、广州这两个城市即使只加入一条支线,如郑州—大连、海口—西安、郑州—三亚,就可以使载运率提高10%以上。而当建成中枢航线网络以后,所有的支线航线和中小城市都将在网络辐射范围之内,大量的支线客运加入干线运输,因此最终的干线载运率到达85%~95%是一个可信的范围。如果载运率从65%提高到85%~95%,则相当于每位旅客的运输成本下降23.5%~31.6%。因此,可以估计 α 的范围为0.684~0.765。

2.2 建站数量设定

建站数量(用 p 表示)的设定也是一个难以决策的问题。建站数量过多,会导致分流过多而影响干线运输的折扣能力;建站数量过少,则意味着每条OD流可选择的枢纽港路线有限,导致产生更多的绕道成本。在某些情况下,如果建站数量与规模效益水平都不高,则即使最优的选址方案也不能带来赢利,就是说巨额的绕道成本始终大于节约成本。同样,由于缺乏有效模型和算法来解决建站数量的优化问题,也只能估计 p 的大小。在这个问题上,可以参照美国航空运输业的发展经验。美国作为航空业最发达的国家,2000年有定期航班运输机场651个,其中大型枢纽机场26个,中型枢纽机场42个,其中航空枢纽港的比例占10.4%。同时,由于美国的中枢航线网络有强大的干线和支线客货流量支撑,较多的枢纽数量对干线运输折扣能力的负面影响可能较小。可见中国的航空枢纽港比例应该在10.4%以下,因此5%~10%是一个较为合理的比例。2003年中国民用航班飞行机场123个,按照这个比例,可以估计 p 应该是一个比较确定的数值。

3 中国航空枢纽港选址

在评估 α 和 p 的大小之后,就可以对航空枢纽港选址问题进行优化决策。航空枢纽港选址问题是枢纽站选址问题的具体实例,并且目前的研究以枢纽站中位选址问题为主。枢纽站中位选址问题是枢纽站选址问题的一个子系列,它研究如何选址以使

中枢航线网络的总运输成本最小化。另外,根据一个机场(起点或终点)的多条航线是否可以选路过不同的枢纽站,可以将枢纽站中位问题分为单分配枢纽站中位问题和多分配枢纽站中位问题。前者是指每个机场的OD流只能由同一个枢纽站集中和分配;后者是指一个机场的OD流可以选择不同的枢纽站作为中转路线。枢纽站选址问题由O'Kelly于1987年首次提出,他设计了一个关于单分配枢纽站中位问题的二次规划模型和两个启发式算法,并以美国民航管理委员会的一个关于1970年美国25个城市航空客运交通流的数据包作为该模型的应用与计算过程^[2]。此后,关于枢纽站中位选址的研究已经从单分配枢纽站中位问题扩展到多分配枢纽站中位问题^[3,4]。他们在模型改进、问题扩展、算法研究等领域做了大量工作,同时其大部分研究仍然以O'Kelly的数据包为实例进行算法比较。此外,也有一些文献开始有针对性地研究航空枢纽站选址和中枢航线网络设计。Jaillet等讨论了不同航空运输工具条件下的星形网络设计问题, Jaillet将该问题分为单点中转、两点中转、多点中转3个内容逐步讨论^[5]。Sasaki等分析了单点中转的多分配枢纽站问题^[6]。国内一些专家也介绍了国外在研究中枢航线网络结构设计的主要理论与观点,考虑到不确定性条件,提出枢纽机场选址的鲁棒优化方法,探讨了昆明在区域性航空港选址中的地位,以及航空快速运输的特点及其网络组织方式^[7,9]。

由于多分配枢纽站中位问题(multiple allocation hub median location problem, MAHMLP)在航空枢纽站选址问题中的应用较为普遍,本文以Campbell于1994年提出的MAHMLP模型为基础,考察中国航空枢纽港的特点。Campbell的MAHMLP整数规划模型可以用文字表述为:在保证每对OD流都能经过一个或两个枢纽站的前提下,如何选择 p 个枢纽站以使中枢网络的总运输费用最小。在给定的航线网络 $G(N, A)$ 中, A 为所有已开通直通航线集合, $N=\{1, \dots, n\}$ 为所有城市机场的集合。令 $d_{ij}=d_{ji}$ 表示机场 i 和机场 j 之间的最短路线距离; h_{ij} 表示从机场 i 到机场 j 的客运流量; $J=\{(i, j) | h_{ij} > 0, i, j \in N\}$ 表示所有OD点对应的集合; X_{ij}^{km} 表示 h_{ij} 的比例,当 $k=m$ 时表示单点中转; $Y_k=1$ 表示在 k 点选址,否则 $Y_k=0$ 。再令 $C_{ij}^{km}=c_k d_{ik}+a c_{km} d_{km}+c_m d_{mj}$ 表示 i, j 流经过枢纽港 k, m 的单位流量运输费用。其中, c_k 表示单位流量、单位距离上的运输费用; $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 表示客流在枢

纽港之间运输所产生的规模效益。于是, MAHMLP 可以构建成如下的模型(Campbell) P1:

(P1) $\min \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} X_{ij}^{km} C_j^{km}$ (1)

s. t. $\sum_k \sum_m X_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j$ (2)

$0 \leq X_{ij}^{km} \leq Y_m \quad \forall i, j, k, m$ (3)

$\sum_k Y_k = p$ (4)

$Y_k = 0, 1 \quad \forall k$ (5)

在 P1 中, 目标函数(1)表示总运输费用最小化; 约束式(2)表示所有航线上的客运流都被枢纽港服务; 约束式(3)、式(4)确保只有当点 k, m 被选址建站时流 ij 才能看作被它们服务; 约束式(5)表示枢纽港的设置总数限制。因为, 每条流 ij 会自动选择运输成本最小的一个或一对枢纽港作为中转站, 所以 P1 模型的最优解将会自动使 X_{ij}^{km} 取值为 0 或 1。

根据 MAHMLP 模型, 一个城市的机场能否被选为航空枢纽港主要取决于 2 个因素: 流量与位置。如果某个城市机场的客运吞吐量很大, 且位置接近城市分布的中心, 则这个城市机场被选址的可能性就比较大, 北京就属于这一类城市。如果某个城市机场尽管客运吞吐量很大, 但在位置上处于中国版图边缘, 那么如果以它作为枢纽港就会增加绕道运输成本, 因此需要权衡二者因素, 上海、厦门、珠海就属于这一类城市。而另外一些客运吞吐量少且位置偏远的城市则难以出现在模型的最优解中。针对

MAHMLP 模型, 分别以《中国交通年鉴(2003)》87 个城市间的航空旅客运输量和国内航线距离作为流量和距离数据; 同时, 以每客公里收费指标代表费用数据。根据前面的评估, 分别考虑 α 为 0.6、0.7、0.8 以及 p 为 7、8、9、10、11、12 几种情况。然后, 对这个复杂的大规模问题设计了基于禁忌搜索的智能启发式算法, 并编译成 matlab 程序, 运行后得到表 1 的结果。表 1 中第四列表示选址后的中枢航线网络总运输费用; 表 1 中第五列表示选址后的中枢航线网络相比传统直航网络的年运输费用节约数量。根据前述的距离、流量、费用数据, 可以算得该 87 个主要城市直航网络的年运输费用为 598.15 亿元。表 1 中, 北京、上海、广州、深圳、昆明始终出现在最优解中, 因此, 可以无可争议地处于中国航空枢纽港的地位。值得注意的是尽管上海、广州、深圳、海口处于中国版图边缘, 但流量因素带来的规模效益明显大于位置因素产生的绕道成本; 而重庆、武汉、西安、大连、沈阳则依靠位置与流量双方面的优势也频繁地出现在最优选址方案中。最后, 可以看出, 由于中枢网络每年可以节约至少几十亿的运营费用, 而这正是中枢航线网络的诱人之处。完成选址工作以后, ΘD 流的路线选择是一个相对简单的问题。一般情况下, 只需要让每条 ΘD 流选择经过一个或两个枢纽港, 且总运输费用最小的一条网络路线就可以了。但在不影响总体规模效益的情况下, 如果绕道运输过于明显, 则 ΘD 流应该执行原来的直通航

表 1 中国航空枢纽港选址

α	p	选址	运输费用 /亿元	节约费用 /亿元
0.8	7	北京、上海、广州、重庆、深圳、昆明、大连	585.92	12.23
	8	北京、上海、广州、重庆、深圳、昆明、大连、乌鲁木齐	573.75	24.40
	9	北京、上海、广州、重庆、深圳、昆明、大连、乌鲁木齐、海口	561.67	36.48
0.7	10	北京、上海、广州、成都、深圳、昆明、大连、乌鲁木齐、海口、武汉	550.00	48.15
	11	北京、上海、广州、成都、深圳、昆明、大连、乌鲁木齐、海口、武汉、西安	541.43	56.72
	12	北京、上海、广州、成都、深圳、昆明、大连、乌鲁木齐、海口、武汉、西安、厦门	534.68	63.47
0.6	7	北京、上海、广州、合肥、昆明、深圳、重庆	561.15	37.00
	8	北京、上海、广州、合肥、昆明、深圳、重庆、海口	545.81	52.34
	9	北京、上海、广州、昆明、深圳、海口、武汉、成都、大连	531.10	67.05
	10	北京、上海、广州、昆明、深圳、海口、武汉、大连、乌鲁木齐、重庆	518.04	80.11
	11	北京、上海、广州、昆明、深圳、海口、成都、武汉、大连、乌鲁木齐、西安	507.39	90.76
	12	北京、上海、广州、昆明、深圳、海口、成都、大连、乌鲁木齐、西安、合肥、长沙	498.59	99.56
	7	北京、上海、广州、重庆、深圳、昆明、合肥	531.57	66.58
	8	北京、上海、广州、海口、昆明、深圳、成都、武汉	512.52	85.63
	9	北京、上海、广州、海口、昆明、深圳、成都、武汉、沈阳	494.86	103.29
	10	北京、上海、广州、海口、昆明、深圳、成都、武汉、沈阳、乌鲁木齐	480.70	117.44
	11	北京、上海、广州、海口、昆明、深圳、成都、武汉、沈阳、乌鲁木齐、西安	467.80	130.34
	12	北京、上海、广州、海口、昆明、深圳、成都、武汉、沈阳、乌鲁木齐、西安、厦门	457.54	140.61

线方案。比如,强迫拉萨到西宁的直通航线绕到西安显然是得不偿失的做法。

4 结 语

随着现代物流技术的发展,中枢航线网络成为国内外航空运输业的重要竞争手段。本文在研究中枢网络主要特点的基础上,评估中国中枢航线网络的规模效益与建站数量,然后通过多分配枢纽站中位模型计算中国航空枢纽港选址问题,最后文章说明了中枢网络设计中的路线选择问题。从计算结果中可以发现,北京、上海、广州、深圳、昆明的枢纽港地位十分明显,而重庆、武汉、西安、大连、沈阳、乌鲁木齐、海口等城市也在不同情形下频繁地出现在选择方案中。最后,得出中枢航线网络每年可以为国内航空客运节约至少几十亿运营费用的结论。然而,由于本文只能对规模效益与建站数量做大致估计,未来的研究方向应该关注包括规模效益、建站数量、枢纽港选址3个问题的整合优化设计模型。

参考文献:

[1] 袁玉玲. 中国物流的现状与发展趋势[J]. 长安大学学

报: 社会科学版, 2006, 8(2): 6-13.

- [2] O'Kelly M. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities[J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32(3): 393-404.
- [3] Campbell J F. Integer programming formulations of discrete hub location problems[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 72(2): 387-405.
- [4] Jaillet P, Gao S, Gang Y. Airline network design and hub location problems[J]. Location Science, 1996, 4(3): 195-212.
- [5] Sasaki M, Suzuki M, Drezner Z. On the selection of hub airports for an airline hub and spoke system[J]. Computers and Operations Research, 1999, 26(4): 1411-1422.
- [6] 张孟坤, 李婷婷. 中枢辐射航线网络结构设计[J]. 中国民用航空, 2006, 23(3): 42-44.
- [7] 姜涛, 朱金福. 航空公司选址枢纽机场的鲁棒优化方法[J]. 系统工程, 2006, 24(6): 13-17.
- [8] 段生虎. 云南枢纽辐射式航空网络的构建[J]. 航空制造技术, 2005, 23(2): 53-55.
- [9] 秦岩, 马天山, 吴群琪. 航空快递性分析及其在中国发展的设想[J]. 长安大学学报: 社会科学版, 2005, 7(3): 26-29.

(上接第36页)

- [18] Pattic Nierat. Market area of rail truck terminals: Pertinence of the spatial theory[J]. Transportation Research: Part A, 1997, 31(2): 109-127.
- [19] Zlatoper T J, Austrian A. Freight transportation demand: A survey of recent economic studies[J]. Transportation Journal, 1989, 16(1): 27-46.
- [20] Harper D V, Evers P T. Competitive issues in intermodal railroad truck services[J]. Transportation Journal, 1993, 32(3): 31-45.
- [21] Kjetil K, Haugen, Arild Hervik. A game theoretic "mode choice" model for freight transportation[J]. Transportation Research: Part E, 2002, 38(2): 1-15.
- [22] Evers P T, Harper D V, Needham P M. The determinants of shipper perceptions of modes[J]. Transportation Journal, 1996, 36(2): 13-25.
- [23] Beier F J, Frick S W. The limits of piggyback: Light at the end of the tunnel[J]. Transportation Journal, 1978, 18(2): 12-18.
- [24] Taylor J C, Jackson G C. Conflict, power, and evolution in the intermodal transportation industry's channel of distribution[J]. Transportation Journal, 2000, 39(3): 5-17.

freight terminals: An analysis of the terminal market[J]. Transportation Planning and Technology, 1999, 23(9): 105-128.

- [26] Horn K. Pricing of rail intermodal service: A case study of institutional myopia[J]. Transportation Journal, 1981, 21(1): 63-78.
- [27] Spasovic L N, Morlok E K. Using marginal costs to evaluate drayage rates in rail truck intermodal service[J]. Transportation Research: Part E, 1983, 38(3): 8-16.
- [28] Tsai J F. Models for optimal price and level of service positioning of intermodal service in competition with truck service[D]. Pennsylvania: University of Pennsylvania, 1994.
- [29] Southworth F, Peterson B E. Intermodal and international freight network modeling[J]. Transportation Research: Part C, 2000, 8(2): 147-166.
- [30] Boile Baria. Intermodal commuter network planning[D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1995.
- [31] Loureiro, Carlos Felipe, Grangeiro. Modeling investment options for multimodal transportation networks[D]. New Jersey: Tennessee University of Technology, 1994.

[25] Wiegman B W, Masurel E, Nijkamp P. Intermodal