

柯颖珊, 韦薇. 枢纽机场航线网络优化研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(5): 149-155. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250521

枢纽机场航线网络优化研究

柯颖珊, 韦薇

(上海工程技术大学 航空运输学院(飞行学院), 上海 201620)

摘要: 建设国际航空枢纽作为实施民航强国战略的重要引擎,科学衡量枢纽功能以及优化枢纽机场航线网络成为建设任务的重要抓手。现阶段枢纽机场航线网络整体连通性差,导致运行效率低下、航线网络资源浪费等问题,成为航空枢纽建设进程中亟需解决的关键问题。本文建立枢纽机场航线网络连通性优化模型,该模型综合考虑航空公司经济成本和航班频率的约束,以枢纽机场航线网络连通性最大为目标函数,以吞吐量为依据对连通机场等级进行划分,旨在对不同层级机场的连通性进行优化。以广州白云国际机场为例,对白云机场国内客运航线网络连通性进行优化。结果显示,通过优化不同层级连通机场数量和航班频次,广州白云机场客运航线网络连通性提高了3.94%,总成本降低了1.57%。连通高质量的机场对枢纽机场连通性起关键作用,符合枢纽机场的特征需求,验证了模型的可行性和有效性。

关键词: 航线网络; 枢纽机场; 连通性; 航班频率

中图分类号: V351

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)05-0149-07

Study on route network optimization of hub airports

KE Yingshan, WEI Wei

(School of Air Transportation and School of Flying, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Building an international aviation hub is an important engine for implementing the civil aviation power strategy, and scientifically measuring the hub function and optimizing the hub airport route network have become important drivers for the construction task. At present, the overall connectivity of the hub airport route network is poor, leading to low operational efficiency and waste of route network resources, which has become a key issue that urgently needs to be solved in the construction process of aviation hubs. This article establishes an optimization model for the connectivity of hub airport route networks, which comprehensively considers the constraints of airline economic costs and flight frequencies. The model takes the maximum connectivity of hub airport route networks as the objective function, and evaluates the connectivity level of connected airports based on their throughput. The aim is to optimize the connectivity of airports at different levels. Taking Guangzhou Baiyun International Airport as an example, the connectivity of Baiyun Airport's route network is optimized, and data samples are collected from domestic passenger routes, without considering freight and international routes. The results demonstrate that the connectivity of the route network at Guangzhou Baiyun Airport is increased by 3.94%, and the total cost decreased by 1.57%, verifying the feasibility and effectiveness of the model.

Key words: route network; hub airport; connectivity; flight frequency

0 引言

随着国内经济的高速增长,航空出行需求逐渐强劲,对航线网络运输能力的要求则越来越高。枢纽机场是航线网络结构中重要的节点,其连通性能直接影响整个航线网络运输能力的优劣和效率。其中枢纽机场中转比例是反映航线网络连通性的重要指标,通过分析重要国际枢纽机场的中转旅客比例

可以看出,国内三大国际枢纽机场2019年中转比例与国际重要枢纽机场相比,仍有不足和未来提升空间,究其原因,是枢纽机场的功能定位不明确,航线网络连通性低,航线网络结构不合理。

国内外学者围绕航线网络优化的研究主要集中在枢纽机场航线网络优化方法、聚焦枢纽机场拥堵问题的航线网络优化、枢纽机场连通性等问题上。2014年, Lordan 等学者^[1]将航线网络进行加权,通过改进

作者简介: 柯颖珊(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向:交通运输规划与管理。

通信作者: 韦薇(1983—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:交通运输规划与管理。Email: wwnjnh@163.com。

收稿日期: 2023-10-24

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

最短旅行时间进行网络连通性评价。2021年, Tao等学者^[2]构建了枢纽机场航班时刻表优化模型, 该模型以最大化可行航班连接数, 在航班计划优化模型中引入需求平滑模型, 以减少进出航班的排队延误, 提高了航线网络的连通性。2020年, 徐涛等学者^[3]提出了一种面向拥堵问题的枢纽航线网络优化模型, 设计了能够减少求解运算的复杂变量表示方法, 以及减少陷入局部最优解概率的模拟退火粒子群优化算法, 解决了枢纽机场拥堵问题。2021年, 吕宗磊等学者^[4]运用空铁联运模型, 设计高维多角标变量表示方法和禁忌搜索算法的求解方法, 科学规划线路客流量和运输方式, 减缓了枢纽机场的拥堵, 降低枢纽机场的负荷率, 减少网络成本。2014年, Wittman^[5]提出改进的直观指标模型计算机场连通度, 不仅考虑了直达航班的因素, 还引入了中转航班的因素, 建立了机场连通质量指标(ACQI)模型。2021年, 杨新渥等学者^[6]改进引力模型对城市对间的客流量进行预测, 构建航线网络优化模型, 提高了枢纽机场连通性。目前, 国内对枢纽机场航线网络连通性研究还不够全面, 研究往往侧重求解优化模型的算法研究, 较少从机场功能定位出发, 与经济成本因素相结合对航线网络的连通性进行优化。本文综合航空公司经济成本的因素, 对连

通机场进行层级式分类, 结合枢纽机场航线网络连通性进行优化。

1 航线网络的连通性

航线网络是指某一地域内的航线按一定方式连接而成的构造系统。连通性是评价一个网络完善程度的直观指标, 良好的连通性反映出该航线网络有良好的服务水平。

1.1 连通性概述

网络连通性是复杂性科学中的重要概念, 用于评价网络整体的连接程度。连通性可分为直接连通性和间接连通性。在航线网络结构中, 直接连通性表现为通过直达航班可直接到达通航目的地的特性; 间接连通性是指通过经停或其他交通方式到达目的地的情况, 其中在航线网络结构中通过枢纽机场提供航线扩展, 从而扩大了出发机场连接目的地范围的性质就是间接连通性。

对于航空公司来说, 网络连通性是航线网络中机场间的连接能力的体现, 航线网络连通性越好, 该航空公司的规模经济性则越强。对于旅客来说, 航线网络连通性越高, 旅客出行便捷度就越高。良好的连通性应具有以下属性, 具体见表1。

表1 连通性属性

Table 1 Connectivity properties

属性	内容
现实性	航线是否开通需根据节点的实际情况, 包括客流量、2个节点所在城市的人口、经济发展程度等城市属性, 考虑航线所需要的经济成本, 以及该航线的局限性
紧密性	在独立于节点大小的意义上, 应该是密集的。理想情况下, 机场与机场之间具有相同连接的2个节点, 即使节点的大小不同, 也应具有相同的连接性。
整体性	连通性可以直接或间接地结合了整个航线网络的信息, 而不仅仅是给定节点及其直接邻域(即直接连接到的其他节点)的属性。因此, 节点的连通性应该取决于整个航线网络的连通性
联系性	节点不仅仅是抽象的个体, 节点之间具有0、1联系, 是相互作用的空间对象, 具有不同的活动水平和相互作用的可衡量成本

1.2 连通性的网络特征

以枢纽机场及其连接的通航机场为节点, 连接两机场的航线为边形成枢纽机场航线网络。在枢纽机场网络中, 以枢纽机场为节点, 则节点的度为与该节点连接的边数, 其大小能反映枢纽机场连通机场的数量。将枢纽机场节点*i*的度记为:

$$K_i = \sum_j a_{ij} \quad (1)$$

其中, a_{ij} 表示枢纽机场节点*i*与*j*连接的边数。在加权网络中, 点权通常描述节点的重要性, 点

权 S_i 为所有连接边的权重的总和, 具体可定义为:

$$S_i = \sum_{j \in N_{ij}} W_{ij} \quad (2)$$

其中, N_{ij} 表示与节点*i*相连节点集, W_{ij} 表示节点*i*与*j*之间的边权重, 以*i*与*j*之间的客运量作为*i*与*j*之间的边权重。

利用机场连通质量指标模型(The Airport Connection Quality Index, ACQI) 计算枢纽机场在航线网络中的连通性, 其表达式为:

$$ACQI = NS_i + \alpha OS_i \quad (3)$$

其中, $ACQI$ 表示节点 i 的连通性; NS_i 表示节点 i 的直接连通性; OS_i 表示节点 i 的间接连通性; α 表示间接连接相较于直接连接对网络连通性的贡献度,称为连通性贡献系数。

进一步,求得的直接连通性值为:

$$NS_i = \sum f_{ij} \times \theta_{ij} \times \omega_{ij} \quad (4)$$

间接连通性值为:

$$OS_i = \sum f'_{ij} \times \theta'_{ij} \quad (5)$$

各参数含义见表2。

表2 连通性参数特征及含义

Table 2 Characteristics and meanings of connectivity parameters

参数	特征	含义
f_{ij}	连接密度	节点 i 与 j 直接连接航班频次,反映出两节点的连接紧密程度
f'_{ij}		节点 i 与 j 经过一次经停连接航班频次
$\sum \theta_{ij}$	中心程度	节点 i 与 j 直接连接数量, θ_{ij} 的数值为 0 或 1, 0 为不连接, 1 为连接, 反映节点在网络中连接可能性大小
$\sum \theta'_{ij}$		节点 i 与 j 经过一次经停连接数量, θ'_{ij} 的数值为 0 或 1, 0 为不连接, 1 为连接
$\omega_{ij} = \frac{S_j}{S_i}$	节点重要度	衡量节点 i 与枢纽机场 j 连通的重要性程度

1.3 连通性的分析方法

国内外围绕枢纽机场连通性分析模型可以分为三大类,分别是依赖相对复杂的数学方法构建的网

络理论模型、依据时间变化考虑最小连接次数的时间灵敏模型、较为直观通用的直观指标连通模型,具体见表3。

表3 连通性模型分类

Table 3 Connectivity model classification

模型	特点
网络理论模型	最早的连通性建模方法,一般是基于已定义的网络节点(机场)和弧(航班)构成的航线网络,并使用拓扑和航空运输系统数学图论等方法,对航线网络进行连通性研究
时间灵敏度模型	仅考虑对旅客来说是可行和合理的航班,中转或不合理的低频次航班排除在连通性指标的计算之外
直观指标连通模型	该模型所需相关数据较少,更容易计算出多机场的连通性得分,而且对航空业未来的决策更有战略意义。相比其他模型,该模型能体现航线连接的数量,更重要的是能体现出航线连通的质量

本文采用的是改进后的直观指标连通模型,在直观指标连通模型的基础上增加经停航线的因素建立 $ACQI$ 模型,该模型可以直观地体现出枢纽机场航线网络的辐射范围以及航线的质量和数量。

2 构建基于连通性的枢纽航线网络优化模型

2.1 航线优化模型构建

为简化模型,该模型做出以下假设:

- (1) 每趟航班使用同一机型。
- (2) 每趟航班运量相等。

模型目标函数为:

$$\max ACQI = \sum_{j \in J} f_{ij} \times \theta_{ij} \times \omega_{ij} + \alpha \sum_{j \in J} f'_{ij} \times \theta'_{ij} \quad (6)$$

其中, $ACQI$ 表示枢纽机场的连通性; J 表示与枢纽机场连通的机场集合; j 定义为 J 集合中的元素

(连通机场); ω_{ij} 表示连接机场与枢纽机场之间连接重要度; α 表示连通性贡献系数; θ_{ij} 表示直达航线机场连通状态(1为连通,0为不连通, $j \in J$); θ'_{ij} 表示经停航线机场连通状态(1为连通,0为不连通, $j \in J$); f_{ij} 表示连接机场与枢纽机场的年直达航班频次; f'_{ij} 表示连接机场与枢纽机场的年经停航班频次。

进一步地,研究给出的模型约束函数具体如下。

(1) 航班频次变动约束。对应的数学公式为:

$$f_{lb_ij} - 350 \leq f_{ij} \leq f_{ub_ij} + 350 \quad (7)$$

$$f'_{lb_ij} - 350 \leq f'_{ij} \leq f'_{ub_ij} + 350 \quad (8)$$

$$f_{ij} \geq 0, f'_{ij} \geq 0 \quad (9)$$

$$\theta_{ij}, \theta'_{ij} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

其中, f 表示决策变量; f_{lb_ij} 表示调整航班频次的上界; f_{ub_ij} 表示调整航班频次的下界。航班变动

幅度在 350 次以内,符合现实缓慢增长、减少的范围。

(2)经济条件约束。对应的数学公式为:

$$\sum_{i \in L} C f_{ij} X_i + \sum_{i \in L} C' f'_{ij} X'_i > \sum_{i \in L} C f_{Lij} X_i + \sum_{i \in L} C' f'_{Lij} X'_i \quad (11)$$

其中, C 表示直达航线每小时飞行成本; X_i 表示直达航线航程时间; C' 表示中转航线每小时飞行成本; X'_i 表示经停航线航程时间; f_{Lij} 表示调整后的直达航班频次; f'_{Lij} 表示调整后的经停航班频次。式(11)表示调整后经济成本比调整前经济成本低。

2.2 参数确定

参数 ω_{ij} 衡量连接机场与枢纽机场连通的重要性程度,用枢纽机场点权 S_j 与连接机场点权 S_i 的比值来确定。 ω_{ij} 的取值及重要性程度划分见表 4。

表 4 连通机场重要度分类

Table 4 Classification of the importance of connected airports

ω_{ij}	重要性程度
0~0.2	重要
0.2~0.4	一般重要
0.4~0.8	比较重要
0.8~1.0	很重要

表 5 航线优化前后对比结果

Table 5 Comparison results before and after route optimization

连通 机场 类别	通航机场数量				航班频次				连通性		经济成本/元	
	直达		经停		直达		经停		优化前	优化后	优化前	优化后
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后				
$0.8 < \omega_i \leq 1$	7	7	0	0	87 199	89 649	0	0	80 089	82 364	2 583 579 625	3 312 143 375
$0.6 < \omega_i \leq 0.8$	3	3	0	0	35 611	36 661	0	0	26 007	26 777	499 608 850	545 981 500
$0.4 < \omega_i \leq 0.6$	7	7	0	0	41 184	43 634	0	0	20 592	21 817	578 604 875	602 085 625
$0.2 < \omega_i \leq 0.4$	19	19	0	0	84 975	91 625	0	0	29 072	31 277	3 288 595 020	3 664 123 831
$0.1 < \omega_i \leq 0.2$	8	8	1	1	16 768	19 568	847	1 191	3 459	4 063	580 901 026	635 821 562
$0 < \omega_i \leq 0.1$	109	81	38	15	66 704	63 312	8 707	6 627	7 758	7 160	3 975 145 088	2 565 729 850
总计	153	125	39	16	332 441	344 499	9 554	8 175	166 884	173 458	11 506 434 484	11 325 885 743

(1)策略一。减少与低质量机场的连通。为了提高机场连通性,优化后的方案共减少了 18 个直达

连通性贡献系数 α 的精确值会根据不同的模型而有所不同,但一般变化的范围在 0.03~0.20 之间。近年来,Emrich 等学者^[7]认为直达航班对连通性的贡献是经停航班的 8 倍左右。所以,本文在模型计算中将 α 值定为 0.125。

3 实证分析

3.1 广州白云机场航线网络优化

广州白云国际机场是国家着力打造珠三角世界级机场群及粤港澳大湾区的核心机场,功能定位于中国三大国际枢纽机场之一^[8-10]。预测广州白云机场 2030 年旅客吞吐量将达到 1.2 亿人次、飞机起降 77.5 万架次、货邮吞吐量 380 万吨。面对强劲的需求和机场的快速发展^[11-14],广州白云机场的各项服务能力需实现跨越式提升、硬件设备逐步完善,因而需要进一步优化航线网络。

本文采用 2021 年广州白云国际机场通达航线数据做样本,代入连通性模型(式 6),利用 Matlab 软件进行求解,以航线网络连通性最大为目标,综合考虑航空公司经济成本和航班频率的约束,以调整连通机场和航班频次为抓手,得出不同等级通达机场下航线网络优化前后的连通性和经济成本。分析结果见表 5。同时给出航空优化策略如下。

机场通航点和 23 个经停机场通航点,其机场重要度均为 0.1,具体机场成员见表 6、表 7。

表6 被取消直达航班机场
Table 6 Cancelled direct flights to airports

机场	直达航班频次	旅客吞吐量/人次	机场	直达航班频次	旅客吞吐量/人次
鞍山(AOG)	316	176 907	广元(GYS)	110	459 399
池州(JUH)	292	156 720	秦皇岛(BPE)	106	217 642
巴中(BZX)	280	382 398	营口(YKH)	80	151 526
张掖(YZY)	268	235 274	库车(KCA)	73	437 652
张家口(ZQZ)	237	464 638	白山(NBS)	24	272 168
林芝(LZY)	198	515 780	巴彦淖尔(RLK)	21	249 299
信阳(XAI)	164	654 208	富蕴(FYN)	5	40 928
唐山(TVS)	116	394 365	阿勒泰(AAT)	1	403 690
攀枝花(PZI)	114	336 726	黔江(JIQ)	1	364 059

表7 被取消经停航班机场
Table 7 Airports where stopovers have been cancelled

机场	航班频次	旅客吞吐量/人次	机场	航班频次	旅客吞吐量/人次
稻城(DCY)	313	155 474	朝阳(CHG)	134	69 554
佳木斯(JMU)	284	805 706	牡丹江(MDG)	99	757 451
乌海(WUA)	249	451 485	承德(CDE)	92	294 900
固原(GYU)	237	182 860	白城(DBC)	91	95 691
乌兰浩特(HLH)	233	717 507	吐鲁番(TLQ)	51	39 635
阿克苏(AKU)	226	1 623 187	二连浩特(ERL)	40	91 003
伊春(LDS)	229	127 546	金昌(JIC)	26	180 280
嘉峪关(JGN)	193	622 194	通辽(TGO)	24	938 125
通化(TNH)	172	127 603	扎兰屯(NZL)	18	152 450
鸡西(JXA)	161	252 422	丹东(DDG)	3	243 068
和田(HTN)	153	1 290 889	阿拉善左旗(AXF)	2	66 151
吕梁(LLV)	147	379 659			

(2)策略二。增加与高质量连通机场的航班频次。部分直达航线频次优化前后对比见表8。由表8分析可知,除重要度为0.1及以下的机场外其余重要度机场的直达航班频次都有所增加。对此将展开研究论述如下。

① 直达航线航班频次总体增长了3.63%,其中重要度由高到低的机场航班频次变动率为2.81%、2.99%、5.95%、7.82%、16.70%和-5.22%。

② 经停航线航班频次总体减少14.43%,其中变动率最大的为重要度为0.2的机场,如桂林、丽江等旅游城市的机场,其经停航班频次增加了40%,表明充分挖掘这类机场的市场需求,提升与这类机场连通的直达和经停的航班频次,将有利于提高机场与航空公司的经济收益。

表9为策略一与策略二两种方式相结合下,各

层级机场航班频次变动率、连通变动率、经济成本变动率、连通性贡献度的分析结果。优化后白云机场总体连通性增加了3.94%,经济总成本降低了1.57%。对此将给出阐释分述如下。

(1)按重要度由高到低排序,广州白云机场与每个等级机场的连通性变动率分别为2.84%、2.96%、5.94%、7.58%和-7.70%,各等级对连通性的贡献度分别为47.49%、15.44%、12.58%、18.80%、2.34%、4.13%。可以发现重要度最高的机场连通性仅需提升2.84%,对连通性的贡献度高达47.5%。说明与重要度最高的机场连通与否能够对枢纽机场的总体连通性起关键作用。

(2)重要度由高到低的机场经济成本变动率分别为28.20%、9.28%、4.06%、11.42%、9.45%、-35.46%。

表8 部分直达航线频次优化前后对比

Table 8 Comparison before and after optimization of frequency of direct routes

机场	优化前直达航班频次	优化后直达航班频次	重要度
成都 (CTU)	15 916	16 266	1
深圳 (SZX)	180	530	1
北京首都 (BJS)	18 735	19 085	0.9
上海虹桥 (SHA)	21 217	21 567	0.9
上海浦东 (PVG)	5 737	6 087	0.9
重庆 (CKG)	16 364	16 714	0.9
昆明 (KMG)	9 050	9 400	0.9
西安 (SIA)	10 796	11 146	0.8
杭州 (HGH)	16 032	16 382	0.7
北京大兴 (PKX)	8 783	9 133	0.7
南京 (NKG)	8 199	8 549	0.5
贵阳 (KWE)	3 937	4 287	0.5
郑州 (CGO)	7 365	7 715	0.5
三亚 (SYX)	6 296	6 646	0.5
厦门 (XMN)	3 441	3 791	0.5
长沙 (CSX)	1 884	2 234	0.5
海口 (HAK)	10 062	10 412	0.5
青岛 (TAO)	5 314	5 664	0.4
济南 (TNA)	6 453	6 803	0.4
武汉 (WUH)	7 642	7 992	0.4
哈尔滨 (HRB)	4 481	4 831	0.4
沈阳 (SHE)	5 111	5 461	0.4
天津 (TSN)	6 801	7 151	0.4
长春 (CGQ)	5 587	5 937	0.3
合肥 (HFE)	5 417	5 767	0.3
呼和浩特 (HET)	4 478	4 828	0.3
兰州 (LHW)	3 215	3 565	0.3
南昌 (KHN)	2 743	3 093	0.3
南宁 (NNG)	679	1 029	0.3
宁波 (NGB)	4 535	4 885	0.3
大连 (DLC)	3 550	3 900	0.3
福州 (FOC)	3 012	3 362	0.3
石家庄 (SJW)	2 472	2 822	0.3
太原 (TYN)	4 855	5 205	0.3
温州 (WNZ)	5 901	6 251	0.3
乌鲁木齐 (URC)	2 729	3 079	0.3
淮安 (HIA)	1 338	988	0.1
连云港 (LYG)	972	622	0.1
临汾 (LFQ)	370	20	0.1
临沂 (LYI)	1 728	1 378	0.1
泸州 (LZO)	1 916	1 566	0.1
芒市 (LUM)	415	65	0.1
绵阳 (MIG)	981	631	0.1
南充 (NAO)	973	623	0.1
南阳 (NNY)	1 401	1 051	0.1
日照 (RIZ)	535	185	0.1
十堰 (WDS)	1 102	752	0.1
腾冲 (TCZ)	394	44	0.1
威海 (WEH)	582	232	0.1
潍坊 (WEF)	616	266	0.1
西昌 (XIC)	571	221	0.1
西双版纳 (JHG)	1 597	1 247	0.1
兴义 (ACX)	404	54	0.1
徐州 (XUZ)	1 842	1 492	0.1
烟台 (YNT)	1 596	1 246	0.1
盐城 (YNZ)	963	613	0.1
扬州 (YTY)	1 914	1 564	0.1
宜宾 (YBP)	652	302	0.1
榆林 (UYN)	517	167	0.1

表9 各层级机场航班频次变动率、连通变动率、经济成本变动率、连通性贡献度结果

Table 9 Flight frequency change rate, connectivity change rate, economic cost change rate and connectivity contribution results of airports at each level %

连通机场类别	直达航线航班频次变动率	经停航线航班频次变动率	连通性变动率	经济成本变动率	连通性贡献度
$0.8 < \omega_l \leq 1.0$	2.81	0	2.84	28.20	47.49
$0.6 < \omega_l \leq 0.8$	2.99	0	2.96	9.28	15.44
$0.4 < \omega_l \leq 0.6$	5.95	0	5.94	4.06	12.58
$0.2 < \omega_l \leq 0.4$	7.82	0	7.58	11.42	18.80
$0.1 < \omega_l \leq 0.2$	16.70	40.00	17.46	9.45	2.34
$0 < \omega_l \leq 0.1$	-5.22	-23.80	-7.70	-35.46	4.13
总计	3.63	-14.43	3.94	-1.57	100

综上,将连通低质量机场的航班资源更多地转移到重要度高的机场,改变与低质量机场的连通方式,通过经停或陆空联运等方式实现连通;同时,增加重要度高的机场的航班频次,可以实现总体经济成本下降的同时,提高枢纽机场的连通性。这种布局符合枢纽机场的功能定位,有利于提高整个航空网络的运营效率和服务质量。

3.2 研究结论

根据广州白云国际机场自身发展定位,为提高机场的连通性,提出以下建议:

(1) 提高广州白云机场与其他枢纽机场的连通,持续加密与高质量机场的连通航线航班,如北京首都机场、上海虹桥机场、成都双流机场等国际枢纽和区域枢纽机场。进一步扩大白云机场对外交流能力,增加旅客选择的灵活性。

(2) 取消与低质量机场的连通,如富蕴机场、白山机场等,减少连通低质量的机场,航班资源向高质量的机场倾斜。

(3) 持续增加连通重要度一般的机场航班,如旅游城市机场:桂林机场、丽江机场、泉州机场等,可以采取广告宣传、网络宣传等方式吸引旅客,充分挖掘该类型机场的市场需求。

(4) 加强地面交通的建设,为从白云机场到达其他周边城市机场提供便利,旅客可以通过地面交通到达被取消机场城市或到其他城市搭乘被取消机场的航线,提高广州白云机场的辐射能力。

4 结束语

本文以枢纽机场航线网络连通性最大为目标函

数,综合考虑航空公司经济成本和航班频率的约束,对不同层级机场连通性进行优化。以广州白云国际机场为实例进行分析,通过减少低质量机场的连通和增加与高质量连通机场的航班频次两种策略,提高了广州白云机场的连通性。由于模型分析的采集数据受到了新冠病毒疫情的影响,因此分析结果仅反映当时背景下广州白云国际机场的连通性。未来在实践应用过程中还需根据实际情况进行相应调整。需要强调的是,本研究仅提供了一个理论框架和实证分析,未考虑众多现实影响因素,比如不同飞机机型载客量的不同、中转航班以及二次经停的航班影响。在未来的研究中,将进一步探讨这些影响因素,以便提供更具实践价值的优化模型与解决方案。

参考文献

- [1] LORDAN O, SALLAN J M, SIMO P. Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach: A survey and research agenda[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 37: 112-120.
- [2] TAO Mei, MA Lan, MA Yiming. Flight schedule adjustment for hub airports using multi-objective optimization [J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2021, 30(1): 931-946.
- [3] 徐涛,吴志帅,卢敏,等. 面向拥堵问题的枢纽航线网络优化模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(11): 2553-2559.
- [4] 吕宗磊,吴志帅,徐涛,等. 面向空铁联运的枢纽航线网络优化模型[J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(4): 1188-1194.
- [5] WITTMAN M D. An assessment of air service accessibility in US metropolitan regions, 2007-2012[R]. Cambridge, USA: MIT, 2014.
- [6] 杨新涅,焦慧君. 枢纽机场航线网络优化研究[J]. *综合运输*, 2021, 43(3): 13-18.
- [7] EMRICH R M, HARRIS F H B. Share shift and airport substitution in origin-destination markets with low-cost entrants [J]. *International Journal of Revenue Management*, 2008, 2(2): 109-122.
- [8] 吴昊. 基于 ACQI 模型的枢纽机场航线网络规划模型评估[J]. *科技创新与应用*, 2016(34): 34-37.
- [9] 朱丽纳. 多层航线复杂网络连通性分析与优化[D]. 北京:中国民航大学, 2020.
- [10] 李艳伟,罗洋. 基于 fsQCA 的我国运输机场航线网络连通性驱动机制研究[J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(18): 84-94.
- [11] 杨新涅,徐睿阳. 基于功能定位的区域多机场航线网络优化[J]. *航空计算技术*, 2020, 50(4): 1-4.
- [12] 金嗣博. 我国枢纽机场航线网络连通性研究[J]. *科技创新与应用*, 2016(15): 33-34.
- [13] 王世瑞,吴薇薇. 基于航线网络结构特征的鲁棒性研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(6): 714-722.
- [14] 徐开俊,吴佳益,杨泳,等. 中国航线网络结构的多层性分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2020, 17(2): 39-46.