

基于航线失效的流量重分配策略

张豫翔, 吴明功, 王肖戎, 温祥西

(空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

摘要 针对航空网络航线失效情况,基于枢纽航线网络和复杂网络理论,提出了流量重分配优化模型。模型将成本分成航线成本和节点成本,以重分配总成本最小为目标,考虑了非枢纽机场的影响和节点容量,构建了考虑拥堵效应的成本函数,并利用粒子群算法进行求解。最后,以杭州-咸阳航线失效为例进行仿真实验。实验结果表明:提出的模型具有较好的可靠性和有效性,并可以通过调节不同参数影响流量分配成本,提高了模型的可操作性和实践前景。

关键词 航线网络;容量限制;流量重分配;加权网络;枢纽机场;粒子群算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.002

中图分类号 V32:U8 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0006-07

An Optimization Model for Traffic Redistribution under Condition of the Failure of Airline

ZHANG Yuxiang, WU Minggong, WANG Xiaorong, WEN Xiangxi

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To solve the problem of airlines failure, an optimization model for traffic redistribution based on the theories of hub airline network and complex network is proposea. In the model, the cost is divided into airline cost and node cost. Taking the smallest in the total cost of traffic redistribution as a target in consideration of the effect from non-hub airport on cost and capacitated constraint, the paper works out a cost function based on congestion. The model is solved by particle swarm optimization (PSO). At last, a simulation is made taking the airline between Hangzhou and Xianyang as an example. The results of the experiment show that the proposed model is good in reliability and in validity. And the operability and practicality can be improved by adjusting these parameters.

Key words: airline network; capacitated constraint; traffic redistribution; weighted network; hub airport; particle swarm algorithm (PSO)

航线网络是指机场之间基于经济或政治考虑连接而成的网络系统。近些年来,航空运输业快速发展,促进我国经济与运输业的发展,利国又便民。然而,在发展中也出现了一个无法避免的问题:因为军

事训练、天气因素影响而导致航路航线中断的情况时有发生,导致航空公司经济损失严重,给有关军事部门带来负面影响,给航空公司以及有关军事部门带来很大压力。而且随着航空运输业大发展,客流

收稿日期: 2016-09-28

基金项目: 国家空管科研课题(GKG201410001)

作者简介: 张豫翔(1991-),男,浙江金华人,硕士生,主要从事航空飞行管理研究. E-mail: 18691307145@163.com

引用格式: 张豫翔,吴明功,王肖戎,等. 基于航线失效的流量重分配策略研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):6-12. ZHANG Yuxiang, WU Minggong, WANG Xiaorong, et al. An Optimization Model for Traffic Redistribution under Condition of the Failure of Airline[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2017,18(2):6-12.

量大有快速增加趋势,如果不能有效解决这个矛盾,将导致更严重的不良影响。网络抗毁性是指网络系统在遭受攻击、故障和意外事故时仍能够完成一定任务的能力。因此通过修复航线失效下航空网络功能提高网络抗毁性,具有重要现实意义。对失效航线上的流量进行重新分配是修复网络功能、提高抗毁性的一个重要途径。

然而目前这方面的研究很少,与此相关的研究主要有两方面:基于复杂网络理论的航空网络特性^[1-2]和抗毁性^[3-5]研究和枢纽航线网络构建研究。复杂网络理论主要研究网络特性以及基于此的航空网络生存能力,但并未对网络遭击后的恢复或应受攻击策略进行研究。在枢纽航线网络构建方面,已有很多学者对不同限制条件下的航线网络进行了设计。文献[6]针对设计中存在的参数不确定问题,提出了一个基于区间情景集的绝对鲁棒优化模型。文献[7~8]在确定一些网络参数的情形下,探讨了无容量限制的航线网络的设计问题,分别研究了单分配和多分配问题,建立不同模型,并利用不同算法进行求解。文献[9]针对无容量限制的多重分派枢纽中位问题,构建了0-1混合整数规划模型,并用贪婪交换法求解,文献[10]则利用LP松弛法求解混合整数规划模型。文献[11]针对有容量限制的多分配枢纽选址问题进行研究,提出了一个新的混合整数线性规划模型,也构建了一个有效的基于最短路径启发式算法。文献[12]探讨了枢纽选址和客运需求不确定性问题,分析了成本折扣因子对总运输成本的影响。这些研究基本都是根据现有机场布局进行航线的完全重新设计,是航线网络运行前的研究工作,网络设计的可塑性较强,受到现有网络的限制少;在枢纽选择和容量约束方面比较主观和固定,以及没有考虑容量限制下因拥堵带来的成本,限制了模型的灵活性和现实可操作性。因此,枢纽航线网络构建与航线流量重分配是不同阶段的设计问题,具有较大差异,但前者仍为后者提供了科学的理论参考。

现阶段航线备份路径的选择主要基于相关人员的经验,缺乏数学模型研究,而且流量重分配的决策主体是单个航空公司,实施中容易陷入局部最优。为此,本文基于枢纽网络构建方面的现状,从民航管理局的角度出发,结合复杂网络的相关理论,基于现有固定的机场航线网络,将节点度和节点强度分别作为枢纽选择和节点容量的依据,构建流量重分配模型。

1 问题描述

航路航线失效后流量重分配的本质是:如何将原来航线上的流量进行科学合理的规划,通过不同机场中转,来满足该航线两端机场之间的客流需求。其中需要考虑的问题有:是多重分派还是单机场分派,选择哪个或者哪些机场进行中转;如果是多个机场中转,如何合理分配这些流量;在比较不同的重分配策略时,以什么参数作为比较的依据,需要考虑哪些因素。如何将这些问题用数学语言进行描述是我们建模的关键。航线流量重分配与枢纽航线网络构建可以说是局部与全局的关系,他们之间有相同也有不同,因此重分配模型的建立将参考枢纽航线网络构建模型,结合自身特点进行。本文的重分配以单个飞行班次为对象。

2 模型分析与建立

2.1 模型分析

在枢纽航线网络构建中,研究的对象是整个未成形的网络,枢纽机场未确定,或者通过主观经验确定,在完成O-D流中转时几乎不需要考虑单个机场内的拥堵效应,很多研究也没有将节点的容量限制考虑进去。将航线上的流量进行重分配设计,是在已有网络的基础上进行的,会因为机场流量的增加造成拥堵。在客流量小的机场中转过程中,会因为规模效应的弱化导致客流量的流失。因此,建模过程中需要考虑不同于枢纽航线网络构建的环节,建立科学合理的数学模型。为了合理简化模型,根据我国实际情况,在此做以下假设:

1)一条航线中2个机场往来的飞行流量基本相同,因此可以视网络为无向网络,并且航线流量为2个方向之和;

2)我国目前的枢纽网络还没正式形成,因此采取非严格的连接方式,即可以通过任何可行的既有航线进行中转,在枢纽机场中转不存在客流量流失,在非枢纽机场中转存在客流量流失;

3)由于旅客运输的特殊性,任意O-D流运输的路径至多包含2条边,即任意O-D流运输路径仅经过一次中转;

4)闲暇航线由于航班少,航线失效后相对来说调配简单,影响也较小,因此研究针对繁忙航线。

2.2 模型建立

本文通过建立目标函数和约束函数求解流量重分配策略,目标函数是在所有可行解中求重分配成

本最小的解。本文将从非枢纽的影响、节点容量以及节点容量限制下的拥堵来考虑模型构建。

首先,考虑非枢纽机场的影响。在非枢纽机场中转过程中,会导致流量流失,从而减少了航空公司的收益。因此,本文将损失的流量转换成航线额外增加成本。文献[13]采用重力模型来表现距离对旅客流量的影响。在参考文献[13]基础上,结合本文实际,将非枢纽机场的影响通过距离的形式给出:

$$\omega_{ij} = \omega_{ij}^0 \left(\frac{d_{ij}}{d_{ik} + d_{kj}} \right)^\theta \quad (1)$$

式中: ω_{ij}^0 为失效航线上分到该航线流量; d_{ij} 为原航线长度; ω_{ij} 为最后分到该航线流量; $d_{ik} + d_{kj}$ 为*i*城市经*k*城市中转到达*j*城市飞行距离总和,称 θ 为距离因素控制系数,表示航线长度对于旅客流量的影响程度, θ 越大,旅客流量受航线长度影响越大。流量的损失率,即该航线要增加的成本比率为:

$$\eta = \frac{\omega_{ij}^0 - \omega_{ij}}{\omega_{ij}^0} = 1 - \left(\frac{d_{ij}}{d_{ik} + d_{kj}} \right)^\theta \quad (2)$$

式中: $\eta \in [0, 1]$, η 越大,客流量就损失就越多,由此导致的成本也越多。

第2个考虑的因素是机场容量。如何设定机场容量是目前研究的一个问题。复杂网络级联失效理论的研究中,通常视节点容量与其网络负载成线性函数关系^[14],这里假设节点容量与节点强度成线性函数关系即:

$$C_i = (1 + \alpha)S_i \quad (3)$$

式中: C_i 为节点容量; S_i 为节点强度(机场吞吐量),表示为与节点*i*直接相连的边权重之和,即 $S_i = \sum_{j \in G^*} \omega_{ij}$, G^* 是相邻节点集, $\alpha \in (0, 1)$ 为容限系数, $\alpha = 1/k_i^\omega$, k_i 是节点度, ω 是容量调节系数,根据实际情况一般取 $\omega \in [0, \infty)$,根据实际情况可知,一般机场越繁忙(可以理解为节点度大),机场的可增加容量越小,容限系数 α 能起到这样的调节作用。

第3个考虑的是因容量限制而带来的拥堵。流量重分配,会导致机场越来越拥堵,使得成本上升。而且本身流量就很大的机场则更容易拥堵,成本增加也越快。因此,构造一个函数来刻画:

$$\rho = \sqrt{k_i} (s_i + x_i)^2 / C_i^2 \quad (4)$$

式中: ρ 是拥堵导致航线成本增加比率; C_i 是节点容量; k_i 是节点度; x_i 是分到该节点流量。

针对不同的节点,航线成本增加比率 ρ 与节点度正相关,节点度越大成本增加越快,但为了使 ρ 控制在较合适的区间范围内,对节点度进行了开方的处理,较好的考虑了不同节点的影响。而对同一个节点, ρ 与分配的容量是非线性关系,流量越多, ρ 增加的越快,较好的符合现实中“越堵越贵”的事实。

因此,该函数能够较好的反映拥堵带来的成本。

为了区别对待航线和非航线成本(本文称之为节点成本),本文将对2类成本赋权。也就是说某条航线上的成本为:

$$B_{ipj} = [1 - \beta + \beta(\eta m_p + \sqrt{k_p} x_p^2 / Cp^2)] f_0 \quad (5)$$

式中: P 是中转节点; f_0 是单位距离单个航班的运输成本; m_p 是对流量损失的重视因子,如果经过非枢纽城市进行中转,则 $m_p = m$,否则 $m_p = 0$, m 越大说明越重视。

我国的枢纽航线网络未成熟定型,目前认可的枢纽城市仅有北京、上海和广州。但很多机场也扮演着枢纽作用,如西安、乌鲁木齐等。本文以节点度作为衡量枢纽城市指标,使得重分配策略在可行的情况下更灵活。我们假设:取两城市间跳数等于1的节点构成子网络*G*,则在该网络中枢纽城市满足 $k_i \geq \delta \bar{k}$,其中 k_i 为该城市的在全国网络中的度值, \bar{k} 是该网络平均度, δ 是枢纽调节系数。

基于以上分析和假设,建立如下模型。

$$\min \sum_{k \in N} W_{ikj} B_{ikj} X_{ikj} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in N} X_{ik} = \sum_{k \in N} X_{kj} = W_0 \quad (7)$$

$$X_{ik} = X_{kj}, k \notin i, j \quad (8)$$

$$S_k \leq C_k, k \notin i, j \quad (9)$$

$$W \in Z^+, k, l \in N \quad (10)$$

式中: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 为子网络*G*中所有机场的编号; i, j 分别为起始、目的地城市; k 是中转城市; W_0 为失效航线上原有流量; W 为任意节点之间流量; X_{ij} 表示从*i*到*j*的流量; X_{ikj} 表示从*i*到*j*经过*k*的流量。

式(6)表示流量重分配总成本最低,式(7)、(8)表示对失效航线上的所有流量进行分配,并且进入和流出中转城市的流量守恒(由于本文基于无向网络,因此可以随意指定流量流向),式(9)保证中转城市的容量限制,式(10)保证分配飞行班次是整数。

3 算法分析

建立的模型为非线性整数规划问题。粒子群优化算法是优化算法中的一种,该方法具有群体智能、迭代过程相对简单和收敛速度较快等优点,目前在非线性、整数规划领域已得到广泛应用^[15-17],本文采用该算法对流量重分配问题进行求解。

用粒子群算法求解非线性整数规划问题的设计中,对约束问题的处理既是难点,也是重点,是算法设计的关键环节。本文处理约束条件方法如下:

1)通过 matlab 中的取整函数来保证解的整数约束,保证粒子中的所有位置值为整数。

2)通过两方面的设计来保证流量总和为固定

值。一是增加惩罚函数,将目标函数变为:

$$(\min \sum_{k \in N} W_{ikj} B_{ikj} X_{ikj}) + \lambda (\text{sum}(p) - y)^2 \quad (11)$$

式中: p 为可行解; λ 是惩罚系数; $\text{sum}(p)$ 对可行解进行求和; y 为失效航线上的流量,或者为网络可分配流量的最大值。二是将最大值按粒子值的大小进行按权分配。

3)通过不断选择、改变过大或过小位置值来保证容量约束^[17]。对于粒子中位置值小于零的情况处理如下:

$$\begin{cases} p(i,j) = 0 \\ v(i,j) = -v(i,j) \end{cases} \quad (12)$$

对粒子中位置值大于约束值情况处理如下:

$$\begin{cases} p(i,j) = \max \\ v(i,j) = -v(i,j) \end{cases} \quad (13)$$

然后进行判断是否满足和为定值的条件,如果小于则对该粒子其他位置进行按权分配,这样既能保证同时满足不等式和等式约束,也能保证粒子朝着有利的方向搜索。本文选择较大的惯性权重,尽

可能保证全局最优本文的求解过程为:

1)构建中国航空网络模型,求得无权网络邻接矩阵,基于流量以及基于距离的加权网络邻接矩阵;

2)应用 Floyd 算法求得所有边的重分配可行节点,并以此建立一个子网络,求得节点在全国航空网络中各节点的节点度、点强和各可行路径长度;

3)根据 3 个邻接矩阵、重分配模型的目标函数和约束条件,应用粒子群算法求解。

4 实例分析

为了验证模型的有效性,运用 excel、pajek、matlab 等软件,以杭州至咸阳航线(日均飞行班次为 24)失效为例,进行流量重分配的仿真实验,数据来源主要是 2013 版的《从统计看民航》。建立的网络以机场为节点,机场之间有直飞航线则表明节点之间有连边,分别以流量(日平均飞行班次)和航线距离为权重。见表 1。

表 1 节点参数

Tab. 1 Node parameter

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(°)	14	41	30	20	43	21	22	16	20	10	15	24
点强	81	469	424	165	554	144	166	98	149	68	79	164
距离/km	2 459	2 103	3 357	3 497	2 346	2 034	1 750	2 434	4 119	3 915	1 772	2 007
节点	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
(°)	23	27	23	31	23	41	23	52	27	67	28	41
点强	163	273	194	288	182	566	134	782	294	1 179	379	497
距离/km	2 126	1 391	4 017	1 795	3 466	2 814	1 717	2 773	2 649	2 234	/	/

4.1 算法验证

根据建立的网络,应用 Floyd 算法我们可以求得可选路径,即杭州到咸阳只需经过一次的中转城市有呼和浩特、重庆、昆明、沈阳、成都、福州、济南、桂林、哈尔滨、丽江、石家庄、青岛、天津、武汉、三亚、长沙、海口、深圳、太原、广州、厦门、北京,分别用 1-22 表示,23、24 分别代表杭州、咸阳。各节点的相关参数见表 1。在此基础上,利用粒子群算法验证模型,本文将对所有的成本做除以 1 000 的处理。在粒子群算法求解中,学习因子均取 2,粒子种群数 $N=30$,迭代次数 $M=100$,为防止算法局部收敛,我们取惯性因子为 0.9,取惩罚系数 $\lambda=1\ 000$, $f_0=1$ 。该算法的时间复杂度为 $O(M \times N \times m)$, m 为算法中为保证容量约束的一个参数,运行中取 $m=15$,算法的总运行时间为 0.6 s,上下不超过 0.05 s,因而可以实时处置判断。

首先验证算法的有效性。本文提出模型中的成本产生分为 2 种类型:航线成本和节点成本,其中航线成本是与距离成线性关系。在容量允许条件下距

离越短成本越低。当所有节点容量都大于 24 时,流量将从最短路径即经武汉完成。随着节点容量减少,流量选择将变得多样,成本也会增加,直到整个子网络的节点可增加总容量小于 24,成本才可能又下降。这里设置 2 组实验来进行验证。第 1 组实验参数设置如下: $\omega \in [0, 2]$, $\delta=1$, $\theta=1$, $\beta=0$, $m=1$ 。 $\beta=0$ 的情况下 δ, θ 并不影响曲线变化。第 2 组实验 $\omega=0.5$, $\delta=1$, $\theta=1$, $\beta=0$, $m=1$,进行 100 次试验,对算法的稳定性进行考察。实验结果见图 1。

由图 1(a)可知 ω 在 0~0.7 区间内,重分配成本为一固定值,通过计算得知该情况下流量全部从最短路径武汉经过,此后随着节点容量的下降流量开始分散中转,成本也相应增加,当 $\omega=1.5$ 时成本最大,之后开始下降。经计算 $\omega=1.6$ 时整个子网络的可增容量为 21,也就是成本下降是由重分配能力不足引起的。当 $\omega=1.9$ 时网络已饱和,容量不能再增加,成本也就变成 0。图 1(b)、(c)表明算法具有较好的鲁棒性和收敛能力。

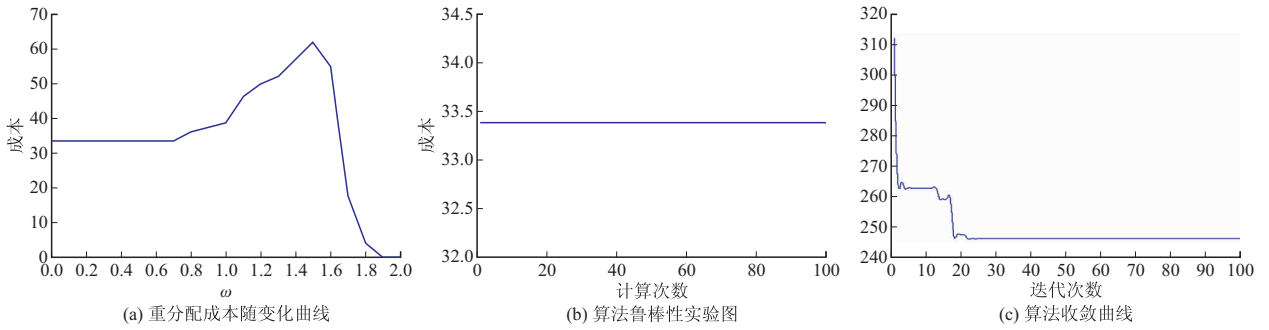


图1 算法精确度和鲁棒性实验

Fig. 1 Experiment of algorithm accuracy and robustness

4.2 容量影响分析

由于不同机场的保障能力不同,机场的容量也必然会有差异,导致拥堵的程度不同,从而影响分配成本。因此需要考察节点容量对重分配成本的影响,即 ω 对总成本影响。取 $\omega \in [0, 2]$, $\delta = 1, \theta = 1, \beta = 0.5, m = 1$, 求得图 2。与图 1(a) 相比,由于考虑了节点的作用,总体成本增加,在前阶段随着 ω 增大总成本一直在增加,直至网络可增加总流量小于 24 为止;在区间 $[1, 1.5]$,由于节点可增加容量与实际增加容量相当,导致拥堵成本存在突变现象。这都说明节点的容量对重分配成本有显著影响。再取 $\omega = 0.5, \omega = 1.2$,其他参数不变,得重分配具体情况如表 2(只列出分配流量的节点,下同)。在这组实验里我们可以看出,节点拥堵成本的增加导致流量分布更加分散,成本也大幅提高。

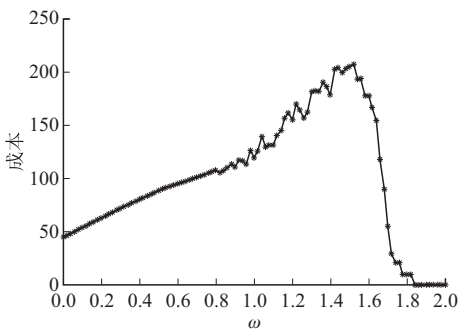


图2 重分配成本随容量调节系数变化曲线

Fig. 2 Changing curve of redistribution cost based on capacity adjustment coefficient

表2 不同 ω 下的流量分配结果

Tab. 2 Traffic distribution result of different ω

节点	1	6	7	8	11	12	13	14	16	19	成本
$\omega = 1.2$	2	2	3	2	2	2	2	4	3	2	133
$\omega = 0.5$	0	0	1	0	6	0	0	17	0	0	88

4.3 机场类型影响分析

同样,不同机场在整个航空网络中发挥的作用不同,对客流量的需求就会不同,导致机场在流量方

面的弥补效应存在差异,从而影响重分配的成本。这里首先考察枢纽数量对重分配成本的影响,即 δ 对总成本影响。选取参数 $\omega = 0.5, \delta \in [0, 3], \theta = 1, \beta = 0.5, m = 1$ 结果见图 3、图 4。图 3 是枢纽节点总数随 δ 变化曲线图。经计算可以知道, $\delta \in [0, 0.35]$ 的大致区间,所有节点是枢纽,当 $\delta = 1.9$ 时枢纽节点只剩北京,当 $\delta = 2.5$ 时不存在枢纽节点。由图 4 可知,当 $\delta \in [0, 0.5]$ 时,成本一直不变,这说明 $\delta \in [0.35, 0.5]$ 区间所有流量仍从枢纽中转;大概在 $\delta = 1$ 的位置,所有流量都从非枢纽机场中转,成本也不再随 δ 增加;图中我们还可以看到 $\delta = 0.9$ 的位置成本急剧变化,这是因为个别具有距离优势的机场由枢纽机场转为了非枢纽机场。

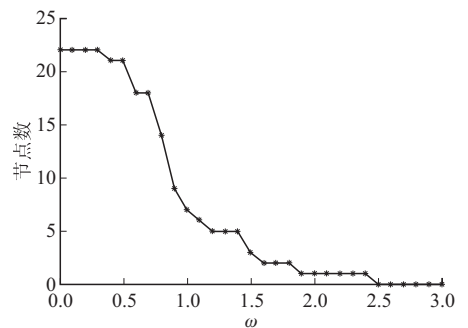


图3 节点数变化曲线

Fig. 3 Changing curve of node quantity

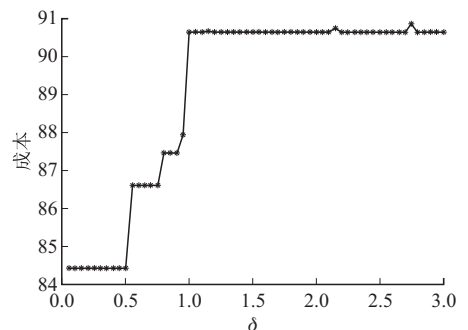


图4 重分配成本随枢纽调节系数变化曲线

Fig. 4 Changing curve of redistribution cost based on hub adjustment coefficient

对由非枢纽的客流量损失带来的成本进行分析,即 θ 和 m 对总成本的影响。选取 $\omega=0.5, \delta=1, \theta \in [0, 4]$ 和 $\beta=0.5, m=1, m=3$ 实验结果见图 5。

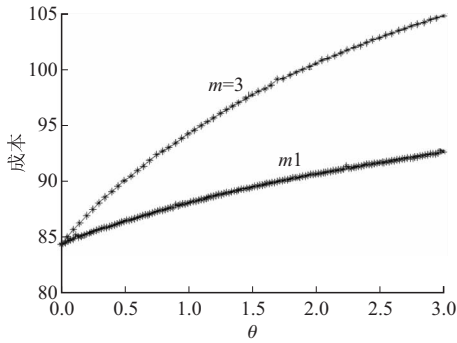


图 5 重分配成本随距离因素控制系数变化曲线
Fig. 5 Changing curve of redistribution cost based on distance adjustment coefficient

取 $\theta, +X2 \in 1, m \in [0, 35]$, 实验结果见图 6。

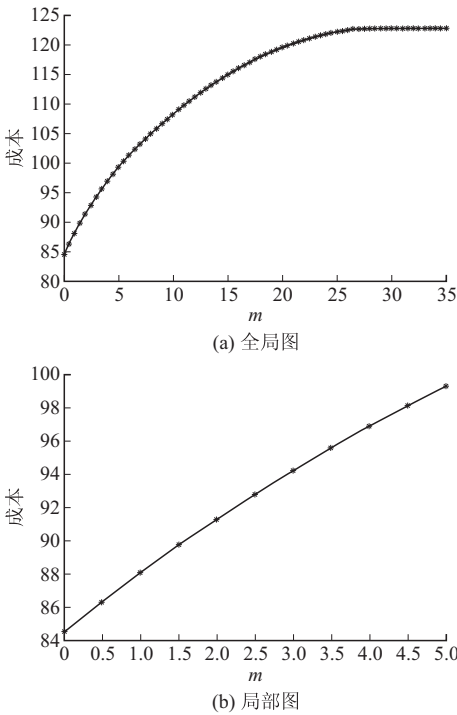


图 6 重分配成本随重视因子变化曲线
Fig. 6 Changing curve of redistribution cost based on importance factor

根据三角关系的性质可得, θ 越大, 距离的影响越大, 流量损失也越大, 因此成本就增加; $m=1$ 时对节点容量相对不重视, 流量损失对总成本影响较小, 随着 θ 的增加, 流量分配方法并未明显变化, 重分配总成本与系数 θ 呈指数关系。图 6 可以看出, 总成本与 m 基本呈线性关系, 但存在个别“拐点”, 使得流量分配方案变化, 导致直线斜率变化; 当 m 足够大时, 所有流量从枢纽中转, 成本不变。对 $\theta=1, m=1, m=5$ 分别进行实验, 求得结果表 3。随着 m 的增加, 非枢纽中转的成本越来越高, 导致更多流量选

择距离较远的枢纽进行中转。

表 3 不同 m 下的流量分配结果

Tab. 3 Traffic distribution results of different m

节点	7	11	14	16	成本
$m=1$	1	6	17	1	99
$m=10$	0	0	18	6	108

4.4 权重影响分析

对节点和航线成本的不同重视程度会影响流量分配结果, 比如由于节点拥堵可能会大大增加机场的运行风险, 决策者由此可能会更加在意节点成本的增加, 这必然导致不同的重分配结果和成本。选取 $\omega=0.5, \delta=1, \theta=1, \beta \in [0, 1], m=1$, 实验结果见图 7。由图可知节点对总成本的影响较明显, 可以通过调节 β 来准确的衡量节点成本和航线成本的比重, 使得模型更加可靠科学。取 $\beta=0.2, \beta=0.8$, 实验结果见表 4。随着 β 变大, 节点成本影响增加, 流量过分集中将导致节点的拥堵成本过大, 分散流量可以使流量成本相对降低; β 较小时, 由于节点成本相对较小, 所以流量会选择距离较近的航线。

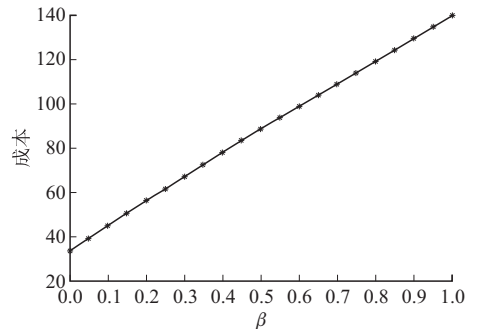


图 7 重分配成本随权重系数变化曲线
Fig. 7 Changing curve of redistribution cost based on weight coefficient

表 4 不同 β 下的流量分配结果

Tab. 4 Traffic distribution result of different β

节点	7	11	14	19	成本
$\beta=0.8$	2	6	15	1	119
$\beta=0.2$	0	2	22	0	56

通过以上分析可知, 5 个参数均可以对重分配成本造成一定的影响, 模型可以较全面有效地对重分配的各个影响因素进行研究分析, 具有较好的科学性和较强的应用性。在实际应用中, 我们可以根据机场实际情况和决策者的需求来确定参数大小, 在此基础上我们再去寻求最优分配策略。

5 结论

1) 以节点度为度量, 对机场枢纽属性进行分类,

不仅与实际情况能较好的吻合,而且能够提高模型的灵活性,避免了人为给定带来的主观片面。

2)以距离作为非枢纽机场的影响因子,符合现实,距离因素控制系数则可以调节距离影响的程度。

3)根据机场的网络特性对节点容量进行定量计算,在理论上具有一定的可行性;拥堵成本函数也在计算拥堵导致的成本增加上起到较好的效果;重视因子可以有效调节拥堵效应带来的负面影响。

4)本文提出的模型具有很好的可操作性,由于可调变量多,可以根据实际进行灵活调整,为航线失效后航班航线的重规划问题提供了理论上的方法,具有较好的现实应用潜力。

参考文献(References):

- [1] 刘宏鲲,周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析[J]. 物理学报,2007,56(1):106-111.
LIU H K,ZHOU T. Empirical Study on Chinese City Airline Network[J]. Acta Physics Sinica,2007,56(1):106-111. (in Chinese)
- [2] ZENG X, TANG X, JIANG K. Empirical Study of Chinese Airline Network Structure Based on Complex Network Theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6):175-181.
- [3] DANG Y, DING F, GAO F. Empirical Analysis on Flight Flow Network Survivability of China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(6):177-185.
- [4] 姚红光 朱丽萍. 基于仿真分析的中国航空网络鲁棒性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012,36(1):42-46.
YAO H G, ZHU L P. Research on Robustness of China's Aviation Network Based on Simulation Analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(1):42-46. (in Chinese)
- [5] LORDAN O, SALLAN J M, SIMO P, et al. Robustness of the Air Transport Network[J]. Transportation Research Part E 2014, 68:155 - 163.
- [6] 吴小欢,朱金福,吴薇薇,等. 航线网络区间鲁棒优化设计[J]. 西南交通大学学报,2013,48(3):559-564.
WU X H,ZHU J F, WU W W, et al. Interval Robust Optimization of Airline Network Designing [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3):559-564. (in Chinese)
- [7] SOHN J, PARK S. Efficient Solution Procedure and Reduced Size Formulations for P-Hub Location Problems[J]. European Journal of Operational Research, 1998(108):118 - 126.
- [8] CHEN J F. A Hybrid Heuristic for the Uncapacitated Single Allocation Hub Location Problem [J]. Omega, 2007,35(2): 211-220.
- [9] CAMPBELL J F. Hub Location and the P-Hub Median Problem [J]. Operations Research, 1996, 44(6) : 923-935.
- [10] SKORIN-KAPOV D, SKORIN-KAPOV J, O'KELLY M E. Tight Linear Programming Relaxations of Uncapacitated P- Hub Median Problems[J]. European Journal of Operational Research, 1996,94(3) : 582- 593.
- [11] CAMPBELL J F. Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems [J]. European Journal of Operational Research, 1994,72(2): 387-405.
- [12] ALUMUR S A, NICKEL S, SALDANHA-DA-GAMA F. Hub Location under Uncertainty[J]. Transportation Research Part B,2012, 46(4):529-543.
- [13] 韩烈,张宁,陈阿茹娜. 基于重力模型的枢纽辐射航空网络构建方法及应用[J]. 工业工程, 2013, 16(2): 122-133.
HAN L, ZHANG N, CHEN A R N. Hub and Spoke Airline Network Design and Application by Incorporating Gravity Model [J]. Industrial Engineering Journal, 2013, 16(2):122-133. (in Chinese)
- [14] LAI Y C, MOTTER A E, NISHIKAWA T. Attacks and Cascade in Complex Networks[M]. Lect Berlin Heidelberg:Springer, 2004.
- [15] 傅继阳,钟亮,黄友钦,等. 基于量子粒子群算法的 Portal 钢架结构抗风优化[J]. 西南交通大学学报,2013, 48(5):846-850.
FU J Y,ZHONG L, HUANG Y Q, et al. Wind-Resistant Optimization of Portal Frames Based on Quantum-Behaved Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5):846-850. (in Chinese)
- [16] TAN Y, TAN G Z, DENG S G. Hybrid Particle Swarm Optimization with Chaotic Search for Solving Integer and Mixed Integer Programming [J]. Journal of Central South University, 2014,21(7):2731-2742.
- [17] YANG K, LIU Y K, YANG G Q. An Improved Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm for Fuzzy P-Hub Center Problem [J]. Computers and Industrial Engineering, 2013,64(1):133-142.

(编辑:姚树峰)