

航线网络规划中的时刻配置优化方法

张 宁

(厦门航空有限公司, 福建 厦门 361006)

✉zhangning@xiamenair.com



摘 要: 时刻和航权资源是航空公司的重要资源, 其中繁忙机场的时刻和航权资源最为宝贵, 属于需要重点优化的部分。针对繁忙机场航线网络优化的问题, 提出了一种基于0—1整数规划的时刻配置优化算法。该算法可以量化繁忙机场时刻价值, 运用运筹优化理论, 搭建0—1整数规划模型, 优化繁忙机场航线网络布局。以境内最繁忙的11个机场为优化机场或固定机场, 以整体贡献最大化为目标, 优化其航线网络布局。实验结果表明, 多优化机场方案实现平均28.6%的提升, 为航空公司编制航季航班计划提供优化建议。

关键词: 航线网络; 时刻配置; 运筹优化; 整数规划

中图分类号: TP31 **文献标识码:** A

Time Configuration Optimization Algorithm in Flight Route Network Planning

ZHANG Ning

(Xiamen Airlines Co., Ltd. Xiamen 361006, China)

✉zhangning@xiamenair.com

Abstract: Time and flight rights are important resources for airlines, among which time and flight rights of busy airports are the most valuable resources and they are the focus parts that need to be optimized. Aiming at the problem of route network optimization in busy airports, this paper proposes a time configuration optimization algorithm based on 0-1 integer programming. The algorithm quantifies the time value of busy airports, and uses the operational research optimization theory to build a 0-1 integer programming model to optimize the route network layout of busy airports. The route network layout of the 11 busiest airports in China is optimized or fixed with the goal of maximizing the overall contribution. Experimental results show that the multiple airport optimization method achieves an average increase of 28.6%, providing optimization suggestions for airlines to prepare seasonal flight plans.

Keywords: flight route network; time configuration; operational research; integer programming

1 引言(Introduction)

航线网络是航空公司赖以生存和发展的基础。构建布局合理、符合市场需求的航线网络会增强航空公司的竞争力, 提升航空公司的经营效益, 也将对后续运营产生有利且深远的影响。

关于航空公司的航线网络规划研究, 国外研究开展较早且较为深入, 这与国外发达国家较早开放民航市场

和航线网络模型研究发展历程有较大的关系。YAN等^[1]以O&D(Original and Destination, 始发地和目的地)为基础对需求建立模型, 从零开始构建完整的航季航班计划, 并采用拉格朗日松弛法、次梯度法、网络单纯形法等算法求解算法模型。CADARSOA等^[2]将航线网络规划各个阶段的工作整合到一个单一的模型中, 加强其鲁棒性, 降低决策之间的不兼容性, 尽量避免错失旅客, 模型使用Cplex软件求解算法模

型。CADARSOA等^[3]扩展了自己在2011年提出的算法模型,将指定必须包含的航班列表和最低平均飞机利用率的因素考虑在内,模型使用Cplex软件求解算法模型。PITA等^[4]考虑机场拥堵的实际问题,提出了一个混合整数线性优化模型,该模型将飞机和乘客延误成本考虑在内并使用Xpress软件求解算法模型。

近年来,国内航空管制水平显著提升,航空公司业务快速发展。张伯生等^[5]设计了一个在一定的时间范围、航线班次前提下,含有随机变量的航线贡献最大化的动态规划模型,首先使用MonteCarlo(蒙特卡罗)方法仿真确定随机变量的值,将模型转化为非线性的整数规划,然后使用动态规划中资源分配算法求解模型最优解。邓亚娟等^[6]提出一种需求不确定且有容量限制的枢纽辐射式航线网络模型,并使用基于随机模拟的遗传算法求解模型。牟德一等^[7]设计了一种航线决策方法,首先求解出可选航线集合,然后使用多属性决策方法筛选被选航线,进而获得在资源有限的情况下最优的航线网络。于焯等^[8]在满足飞机检修维护计划、最小飞机数、航班覆盖等约束的基础上,以飞机运营成本最小化和飞机使用均衡为目标,建立一个多目标的0—1整数线性规划模型,并使用Lingo软件求解算法模型。杨新涅等^[9]设计了航线网络和航班时刻的双层优化模型,确定航班频率、执飞机型和航班时刻,并使用Matlab软件仿真求解。樊玮等^[10]针对不同城市的特性,使用改进的淘汰选择算法筛选候选枢纽城市集,提出一种基于优先级无容量限制多分配p枢纽定位的多目标优化模型,然后使用Cplex软件对模型分步求解。

上述文献为航线网络规划研究打下基础,但存在国内外民航业差异较大且算法模型复杂,研究成果无法较好应用的局限性,鉴于无法有效地在当下航空公司的实际业务场景中应用,提出航线网络规划中的时刻配置优化方法。

2 问题分析与建模优化(Problem analysis and modeling optimization)

2.1 问题求解框架

本文研究的繁忙机场航线网络优化问题属于航线网络规划领域的问题。对于繁忙机场,时刻和航权资源相对固定,不容易新增资源数量。在时刻和航权资源不变的情况下,可以通过交换和调整航班时间对航线网络进行优化。例如,航班A为北京大兴T1—上海虹桥T2,可以将北京大兴T1的时刻交换给航班B北京大兴—武汉使用。在符合局方规定的航段标准飞行时长及其浮动区间的情况下,可以适当调整航班的计划飞行时长。

本文算法将以运筹学中的最优化理论为基础,以贡献最大化为目标,使用0—1整数规划构建问题模型,以求解优化航线网络。具体建模求解框架如图1所示。

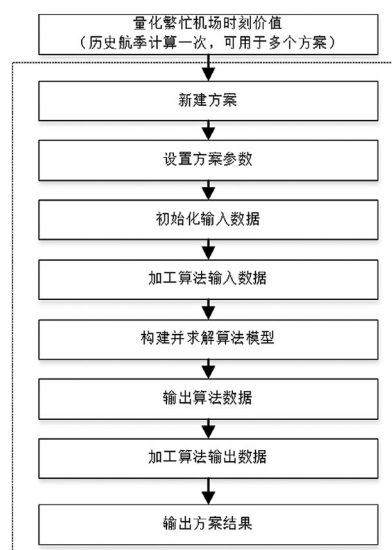


图1 时刻优化问题求解框架

Fig.1 Time optimization problem solving framework

2.2 方案与参数初始化

2.2.1 繁忙机场时刻价值量化

对于历史航季的成行航班,可计算出航班的收入,再扣除成本,加上补贴、机场优惠等金额,缴纳一定的税额,即可计算出航班的贡献;然后用航班的贡献除以执飞飞机的座位数和飞行小时,就能得出航班的座小时贡献。

按照供需关系,机场可分为主协调机场、辅协调机场和非协调机场。由于主协调机场的市场流量大且运力投放多,这类机场的航班时刻和航权资源供不应求,成为各大航空公司竞相争抢的优质资源。在量化繁忙机场时刻价值时,可以将航班贡献全部分摊到主协调机场时刻上。对于某个航班多个时刻属于主协调机场时刻,比如北京首都机场至广州白云机场的航班,则要按照一定的规则分摊。

以各整点时刻前后半小时的区间范围,将一天24 h分为24个时刻区间,如某机场8:00的时刻,对应区间为[7:30, 8:30)。同样的时刻,可用做航班起飞和航班降落,或者将其用于不同的航线,其价值可能是不一样的。冬航季和夏航季运行环境有较大差异,因此也要进行区分,可以根据时刻区间、时刻起飞/降落性质及航线对机场时刻进行分类。在计算新航季的繁忙机场航班计划时,使用上同航季或上同多个航季的时刻价值作为计算航班贡献的基础数据。

2.2.2 繁忙机场航班计划优化

经过多年的运行,每个航空公司都形成一定的战略布局和相对稳定的航线网络,通常使用上同航季的航班计划作为基础,对航班编排进行优化,进而形成新航季的航班计划。

境外航班相对固定,因此优化的空间有限。主协调机场中的前十大机场的时刻紧缺且时刻价值高,属于航班计划的优化重点。对于前十大机场的相关航线,经营许可证很难有较大的改变,航班频率相对固定,因此以优化航班的时刻为主。

以时刻、航权为基础,按照航段标准飞行时长、航段浮动区间、机型过站时间、往返航班为一组的原则组建新的航班往返组合。按照量化时刻价值的规则,使用量化后的主协调机场时刻价值,反向计算新航班往返组合的贡献。将这些新航班往返组合作为算法模型的备选航班集合。

以方案的形式使用算法,不同方案间互不影响。算法使用步骤如下。一是新建方案。二是设置方案参数:①优化航季;②优化机场,这些机场的时刻是优化的对象,将重新编排到航班计划中;③固定机场,这些机场的时刻只能使用提供的时刻资源;④基础航班计划,使用上同航季(2022年冬航季的上同航季为2021年冬航季)的红头航班计划作为基础航班计划,抽取基础航班计划的航班时刻作为基础时刻资源,可根据实际情况修改时刻资源,增加时刻起飞/降落限制;⑤航权,可根据实际情况修改航权资源,设置每条航线的班次上限、下限;⑥航段运行时长,每个航段在不同航季、不同机型条件下的标准飞行时长;⑦航段浮动区间,不同标准飞行时长可设置上浮和下浮时间,比如航段飞行时长为125—180 min,可上浮15 min或下浮10 min;⑧机型过站时间,每个机场可设置过站时间下限和上限;⑨起飞时间间隔,每条航线可设置起飞时间间隔,比如同一天的厦门—上海的航班,需要间隔60 min以上,避免优势航线航班过密,浪费资源。三是初始化输入数据。四是输入加工算法数据。五是构建并求解算法模型,以贡献最大化为目标,使用0—1整数规划构建模型,并求解算法模型。六是输出算法数据,得到优化机场相关的往返航班计划。七是输出加工算法数据,计算指标。八是输出方案结果,至此算法结束。

2.3 构建0—1整数规划模型

2.3.1 模型变量和数据集合

T 为固定时刻集合,用 t 索引; R 为航权集合,用 r 索引; F 为航班集合,用 f 索引; FRT 为往返航班集合,用 i 索引; G 为航段起飞时刻间隔小于对应航段的最小间隔时间的集合,用 g 索引; FT_{it} 为往返航班组合 i —时刻矩阵, $FT_{it}=1$ 表示往返航班组合 i 使用了 t 时刻,否则 $FT_{it}=0$; FR_{ir} 为往返航班组合 i —航权矩阵, $FR_{ir}=1$ 表示往返航班组合 i 使用了 r 航权,否则 $FR_{ir}=0$; FF_{if} 为往返航班组合 i —航班矩阵, $FF_{if}=1$ 表示往返航班组合 i 使用了 f 航班,否则 $FF_{if}=0$; FG_{ig} 为往返航班组合 i —同航段起飞间隔矩阵, $FG_{ig}=1$ 表示往返航班组合 i 使用了 g 航段起飞间隔,否则 $FG_{ig}=0$ 。

2.3.2 模型参数

P_i 为往返航班组合 i 的航班贡献; TN_t 为固定时刻 t 的可用数量; RU_r 为航权 r 的可用数量上限; RL_r 为航权 r 的可用数量下限; C_{nm} 为航班不属于上同航季的红头航班的惩罚成本; NM_i 为往返航班组合 i 与上同航季的红头航班的匹配度, $NM_i=2$ 表示去程与返程航班均不是上同航季的红头航班; $NM_i=1$ 表示去程与返程航班有一个是上同航季的红头航班;

$NM_i=0$ 表示去程与返程航班均是上同航季的红头航班。

2.3.3 决策变量

X_i 为往返航班组合 i 是否被选中, $X_i=1$ 表示选中,否则 $X_i=0$ 。

2.3.4 问题模型

模型以繁忙机场时刻相关航班的总航班贡献最大化为优化目标(1),并对不属于上同航季的红头航班的航班组合进行惩罚,使得当航班贡献不变且满足各类限制条件时,倾向于使用上同航季红头航班对应的组合。约束(2)对应固定时刻用全约束。固定时刻属于繁忙机场时刻,对应的价值高,要求全部使用;约束(3)对应航权资源数量约束,保证选中的航班组合使用的航权资源满足数量上下限要求;约束(4)对应可行航班唯一约束,保证每一个可行航班最多只被使用一次;约束(5)对应航段起飞间隔约束,保证每个航段的航班起飞时刻间隔满足对应航段的最小间隔时间的要求;约束(6)为变量取值。

$$\text{Max} \sum_{i \in FRT} (X_i \times P_i - X_i \times NM_i \times C_{nm}) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in FRT} X_i \times FT_{it} = TN_t, \forall t \in T \quad (2)$$

$$RL_r \leq \sum_{i \in FRT} X_i \times FR_{ir} \leq RU_r, \forall r \in R \quad (3)$$

$$\sum_{i \in FRT} X_i \times FF_{if} \leq 1, \forall f \in F \quad (4)$$

$$\sum_{i \in FRT} X_i \times FG_{ig} \leq 1, \forall g \in G \quad (5)$$

$$X_i \in \{0,1\}, \forall i \in FRT \quad (6)$$

3 数据实验(Data experiment)

3.1 实验设计

本文模型既可用于单机场航线网络优化,也可用于多机场航线网络优化。为了检验模型在求解本文问题上的有效性,基于某航空公司的数据设计了实验。使用同样的量化后的主协调机场时刻价值、同样的航权和繁忙机场时刻资源,将上同航季的红头航班计划和优化后的航班计划作对比。

选择旅客吞吐量在3,000万(含)人次以上的境内机场,包含北京首都(PEK)、北京大兴(PKX)、上海浦东(PVG)、广州白云(CAN)、成都双流(CTU)、深圳宝安(SZX)、昆明长水(KMG)、西安咸阳(XIY)、上海虹桥(SHA)、重庆江北(CKG)、杭州萧山(HGH),将这些最繁忙的国内机场纳入优化机场和固定机场的范围。

以某夏航季为例,将以对应上同航季的红头航班计划和航权作为优化的基础数据。因为某航空公司在北京首都和北京大兴都是单场运行,所以将这两个机场设为一组。以不同的优化机场和固定机场作为实验参数,分为单优化机场和多优化机场两类。单优化机场是指只有一个机场设置为优化机场,其余机场设置为固定机场。多优化机场是指有2个或更多机场设置为优化机场,其余机场设置为固定机场。一共设计了19组实验方案如表1所示。

表1 实验方案

Tab.1 Experimental scheme		
方案编号	优化机场	固定机场
1	PEK、PKX	SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、HGH、CTU
2	HGH	SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、CTU、PEK、PKX
3	CKG	SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、HGH、CTU、PEK、PKX
4	XIY	SZX、CAN、KMG、CKG、PVG、SHA、HGH、CTU、PEK、PKX
5	KMG	SZX、CAN、XIY、CKG、PVG、SHA、HGH、CTU、PEK、PKX
6	SZX	KMG、CAN、XIY、CKG、PVG、SHA、HGH、CTU、PEK、PKX
7	CAN	KMG、SZX、XIY、CKG、PVG、SHA、HGH、CTU、PEK、PKX
8	SHA	KMG、SZX、XIY、CKG、PVG、CAN、HGH、CTU、PEK、PKX
9	PVG	KMG、SZX、XIY、CKG、SHA、CAN、HGH、CTU、PEK、PKX
10	CTU	SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
11	CTU、SZX	CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
12	CTU、SZX、CAN	KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
13	CTU、SZX、CAN、KMG	XIY、PVG、SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
14	CTU、SZX、CAN、KMG、XIY	PVG、SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
15	CTU、SZX、CAN、KMG、XIY、PVG	SHA、CKG、PEK、PKX、HGH
16	CTU、SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA	CKG、PEK、PKX、HGH
17	CTU、SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG	PEK、PKX、HGH
18	CTU、SZX、CAN、KMG、XIY、PVG、SHA、CKG、PEK、PKX	HGH
19	PEK、PKX、PVG、SHA、CAN、CTU、SZX、KMG、XIY、CKG、HGH	无

在本文“2.3 部分”的0—1整数规划模型使用C++语言和Cplex软件编码，使用Visual Studio 2015工具编译，在硬件环境为Intel Core i5-7200U CPU/2.50 GHz/8 GB/Windows 10的计算机上实现。

3.2 实验结果与分析

针对19 组实验方案，使用本文方法建模、初始化参数，输入Cplex数据规划求解器求解。首先，对比单优化机场实验方案结果，即编号为1—10的实验方案，对应的实验结果如表

2所示。

表2 单优化机场实验结果

Tab.2 Experimental results of single optimized airport		
实验方案编号	优化后航班贡献/优化前航班贡献	优化提升比率/%
1	1.424	42.4
2	1.888	88.8
3	2.156	115.6
4	1.617	61.7
5	1.488	48.8
6	1.038	3.8
7	1.174	17.4
8	1.301	30.1
9	1.133	13.3
10	1.137	13.7
平均值	1.436	43.6

通过柱形图可更直观地对比不同实验方案的优化提升比率结果，单优化机场实验结果如图2所示。

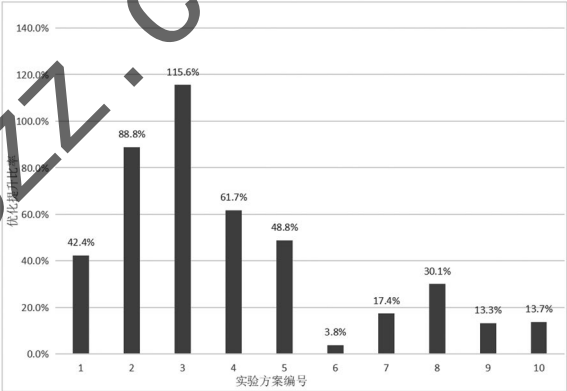


图2 单优化机场优化提升比例

Fig.2 Optimized proportion of single optimized airport

接下来，对比多优化机场实验方案结果，即编号为11—19的实验方案，并将同样包含成都双流(CTU)的实验方案10也进行对比，对应的实验结果如表3所示。

表3 多优化机场实验结果

Tab.3 Experimental results of multiple optimized airports		
实验方案编号	优化后航班贡献/优化前航班贡献	优化提升比率/%
10	1.137	13.7
11	1.09	9.0
12	1.116	11.6
13	1.146	14.6
14	1.196	19.6
15	1.218	21.8
16	1.275	27.5
17	1.426	42.6
18	1.559	55.9
19	1.7	70.0
平均值	1.286	28.6

同样通过柱形图直观展示对比实验结果,多优化机场的优化提升比率如图3所示。

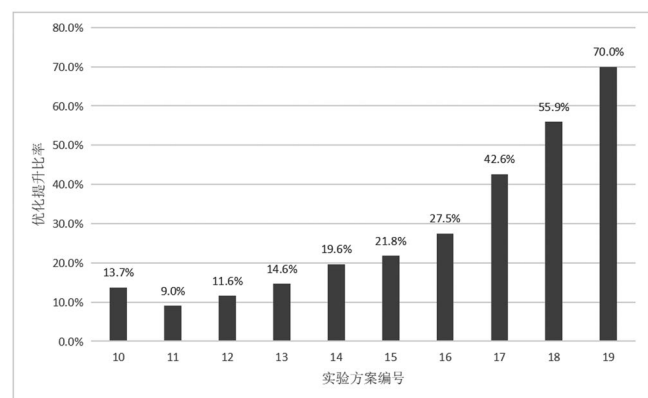


图3 多优化机场优化提升比率

Fig.3 Optimized proportion of multi optimized airports

综合上述实验结果可知:(1)不同机场的优化提升比率差别较大,最小为3.8%(深圳宝安机场),最大为115.6%(重庆江北机场);(2)本文所提优化方法可在一定程度上提升整体的航班贡献,多优化机场实验方案的平均优化提升比率为28.6%。

航空公司根据其战略规划,一般会以一个或若干个机场为主基地,多个机场为过夜机场,以此为基础,考虑可用飞机数和时刻、航权资源等因素,随航线网络进行布局。在不同的机场,航空公司可获得的时刻、航权资源质量和数据存在较大差异。对于繁忙机场,供小于或接近于求,时刻、航权资源紧张,只有在新增机场跑道数量或开放更多空域等情况下,才能提供更多的时刻、航权资源。对于非繁忙机场,时刻和航权资源相对充足,供大于求,可选空间大,则可根据实际需求灵活申请匹配的资源。因此,对于繁忙机场,航空公司每个航季可获得的时刻、航权资源相对固定,资源数量一般不会出现较大波动。在航权资源数量变化不大的情况下,可通过调整航班的时刻,建立新的航班,从中选择更优的航班计划。

对于单优化机场的场景,如果航空公司拥有该机场的时刻、航权资源较多,则可组合出更多的新航班,拥有更多调整空间,则可优化的空间较大;如果航空公司拥有该机场的时刻、航权资源较少,则只能组合出较少的新航班,拥有的调整空间较小,则可优化的空间有限。对于多优化机场的场景,将综合各个优化机场的资源,组合出新航班集合,在满足约束条件的情况下,可以根据目标函数从整体上提升航班总贡献。

4 结论(Conclusion)

时刻、航权资源是航空公司的重要资源,也是构建航线

网络的基础。由于市场需求大且供求关系紧张,繁忙机场的时刻和航权资源更为宝贵。本文算法可以量化繁忙机场时刻价值,运用运筹优化理论,满足时刻、航权、航段标准运行时长、航段浮动区间、机场过站时间、航段起飞间隔等限制条件,使用0—1整数规划算法优化繁忙机场时刻配置,进一步优化繁忙机场航线网络布局,以此为基础,搭建完整的新航季航班计划。单优化机场和多优化机场实验结果表明,本文算法能提升繁忙机场时刻相关航班的整体贡献,能够为航空公司的航线网络规划提供指导。未来将深入研究,不断优化算法并推广至所有机场使用,以周为单位构建完整的航季航线网络。

参考文献(References)

- [1] YAN S Y, TSENG C H. A passenger demand model for airline flight scheduling and fleet routing[J]. Computers & Operations Research, 2002, 29(11):1559-1581.
- [2] CADARSOA L, MARÍN A. Integrated robust airline schedule development[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 20:1041-1050.
- [3] CADARSOA L, MARÍN A. Robust passenger oriented timetable and fleet assignment integration in airline planning[J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 26(1):44-49.
- [4] PITA J P, BARNHART C, BARNHART C P. Integrated flight scheduling and fleet assignment under airport congestion[J]. Transportation Science, 2012, 47(4):477-492.
- [5] 张伯生,刘飞.实现航班计划优化的动态规划模型[J].上海工程技术大学学报,2004(02):135-140.
- [6] 邓亚娟,陈小鸿,杨超.需求不确定的枢纽辐射式航线网络设计[J].交通运输工程学报,2009,9(06):69-74,79.
- [7] 牟德一,王攀宇.中枢辐射式航线网络分阶段航线决策研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2011,27(04):594-597.
- [8] 于焯,樊玮.基于均衡条件的成本最小化航线调配问题研究[J].计算机技术与发展,2017,27(8):145-148.
- [9] 杨新渥,裴一麟.基于双层规划的航空公司航线航班优化研究[J].航空计算技术,2018,48(03):1-7.
- [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.

作者简介:

张 宁(1965-),男,硕士,高级工程师.研究领域:企业数字化。