

基于列生成算法的停机位指派的鲁棒性研究^{*}

王笑天 田 勇 万莉莉 杨 晔

(南京航空航天大学民航学院 南京 210016)

摘要:引入停机位计划的概念来描述指派到同一机位上的一系列的航班,将停机位指派问题转化为选择符合相应的停机位类型的最佳停机位计划,建立增大停机位指派鲁棒性的数学模型.应用列生成算法求解该模型.算例分析表明,该停机位指派模型和算法在计算时间和指派结果上具有一定的优势,在实际操作中是有效可行的.

关键词:停机位指派;鲁棒性;停机位计划;列生成算法

中图分类号:U8

doi:10.3963/j.issn.2095-3844.2015.01.039

0 引 言

停机位指派的鲁棒性是指机位预指派自身具有一定的“抗干扰能力”.目前机场停机位资源紧缺,当进出机位的航班发生随机延误时,会影响到其他航班,重新指派耗时耗力.因此,建立增大停机位指派鲁棒性的模型并采用高效的算法快速生成指派方案势在必行.国内外学者对停机位指派的鲁棒性进行了一定的研究. Hassounah 等^[1]首次对停机位指派的鲁棒性进行了研究. A Bolat 等^[2]研究了以最小化机位空闲时间段的方差为目标的机位指派问题,用分支定界法进行求解.尔后又对该问题进行了进一步的研究,并设计启发式算法求解^[3].田晨等^[4]采用遗传算法对停机位指派的鲁棒性问题进行了研究.卫东选等^[5]以最小化停机位各空闲时间段的离差为优化目标,采用贪婪算法结合动态时间窗法对模型进行优化求解.杨双双等^[6]基于客户评价体系,对停机位分配优化技术进行了研究.本文将具有相同特性的停机位划分为一种停机位类型,从而将停机位指派问题转化为选择符合相应的停机位类型的最佳停机位计划,在此基础上建立了增大停机位指派鲁棒性的数学模型,并应用列生成算法求解该模型.

1 停机位指派的数学模型

1.1 鲁棒性评价函数的设计

鲁棒性评价函数应具有 2 个特点:(1)它应该指派给较小的空闲时间间隔以较高的成本来作为惩罚,而对于较大的空闲时间间隔则设置适当的成本进行略微的惩罚;(2)函数在较小的空闲时间间隔时应非常陡峭,后趋于平缓,以反映在小的时间间隔范围内时间间隔的增加是有利且明显的.相关参数是由我国机场航班历史统计数据拟合得到的.基于以上特点,设计评价函数如下.

$$c(t) = \begin{cases} 1\,000(\arctan(0.21(5-t)) + \frac{\pi}{2}) & t \geq 20 \\ \infty & 0 < t < 20 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为指派到同一机位上相邻 2 架航班之间的时间间隔,即机位缓冲时间,根据机位指派人员经验,最小取值为 20 min.

1.2 停机位类型划分

本文提出一种比较细致地划分停机位类型的方法,具体分类标准参见表 1,那么根据停机位所能停放机型的大小,最多可将停机位划分成 A,

收稿日期:2014-00-00

王笑天(1988-);硕士生,主要研究领域为空中交通管理

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助(项目编号:NJ20140017)

B,C,D,E,F6 种类型.

表 1 飞机分类标准

机型	最大起飞重量/t	着陆速度/kn
A	≤7	70~90
B	Dornier,Cessna	91~120
C	7~136	121~140
D	ATR42,B737,757,A320	141~165
E	>136(B767,747,A340)	>165
F	A380	170~180

1.3 停机位计划的概念

将研究时间段内可以指派到同一机位上的一系列的航班定义为一个停机位计划,因而可能的停机位计划有无数种.在列生成算法中,停机位计划起着联系主问题和子问题的重要作用,它在主问题中是决策变量,同时子问题产生的结果是一个新的停机位计划.

1.4 整数线性规划模型

定义航班集合 V , 停机位类型集合 A , 停机位计划集合 N , 并引入以下符号.

1) 下标号记号 i , 停机位计划下标; v , 航班下标; a , 停机位类型下标.

2) 参数 c_i , 停机位计划 i 的成本, 可通过停机位计划 i 中相邻 2 架航班之间的空闲时间间隔成本求和得到; Q_v , 一个非常大的成本系数, 本文取 1 000 000; g_{vi} , 当航班 v 包含在停机位计划 i 中时等于 1, 否则等于 0; e_{ai} , 当停机位计划 i 可指派到 a 类型的停机位上时等于 1, 否则等于 0; S_a , a 类型的停机位数量.

3) 决策变量 x_i , 执行停机位计划 i 时等于 1, 否则等于 0; UAF_v , 存在未指派的航班 v 时等于 1, 否则等于 0. 若存在未指派航班, 则将其指派至远机位.

应用以上符号, 建立如下增大停机位指派鲁棒性的数学模型.

$$\min = \sum_{i=1}^N c_i x_i + Q_v UAF_v \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N g_{vi} x_i + UAF_v = 1, v = 1, 2, \dots, V \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N e_{ai} x_i = S_a, a = 1, 2, \dots, A \quad (4)$$

$$x_i = 0, 1; i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$UAF_v = 0, 1; v = 1, 2, \dots, V \quad (6)$$

式(2)为目标函数, 要求停机位指派成本最低; 式(3)为航班指派约束, 表示每个航班仅且仅能被指派到一个停机位计划中; 式(4)为停机位类型个数约束, 表示指派到 a 类型停机位上的停机位计划数必须等于 a 类型停机位数; 式(5)和(6)为变量

取值约束.

2 列生成算法求解过程

具体求解步骤如下.

步骤 1 初始化. 由指派人员根据经验给定初始解, 生成限制主问题.

步骤 2 求解限制主问题.

步骤 3 计算航班约束和停机位类型约束的对偶变量的值, 分别用 $\pi_v (v = 1, 2, \dots, V)$ 和 $\lambda_a (a = 1, 2, \dots, A)$ 表示.

步骤 4 利用上述对偶变量值对子问题网络图中边的权值进行调整.

步骤 5 对子问题进行求解(求得主问题非基变量的最小简约成本).

步骤 6 若最小简约成本小于 0, 则将其所对应的停机位计划作为新的列加入到初始解中, 转至步骤 2; 否则, 转至步骤 7.

步骤 7 若限制主问题的解为非整数, 则利用分支定界法求得整数解; 否则, 当前解即为最优解.

2.1 限制主问题

将式(5)和(6)表示成约束松弛便得到松弛线性规划问题, 可作为列生成算法的主问题. 从所有停机位计划中选择符合各类停机位类型且与其数目相等的停机位计划构建停机位指派模型的限制主问题.

2.2 子问题的构造

列生成算法的关键是构造子问题. 为求得所有实际可行的停机位计划的最小简约成本, 本文构建这样一个网络, 在该网络中, 每个可行的停机位计划等价于网络中的一条路径, 反之亦然. 并且, 路径的长度等于相应的停机位计划的简约成本, 从而将求解最小简约成本的问题转化为求解网络中的最短路径问题.

对应每一种停机位类型, 分别求该类型下所有停机位计划的最小简约成本. 对于每种停机位类型 a , 本文引入有向网络图 $G_a = (V_a, E_a)$ 来表示各种停机位计划. 其中: V_a 为节点集合, 表示允许指派到 a 类型停机位上的所有航班 v , 此外, 还包括源节点 s 和汇节点 t ; E_a 为边的集合, 如果航班 v 和航班 w 均可被指派到 a 类型停机位上, 并且航班 w 的进场时间 T_w^{arr} 大于等于航班 v 的离场时间 T_v^{dep} 加上航班之间的最小空闲时间 T_v^{min} (本文取 20 min), 那么就存在一条从节点 v 指向

节点 w 的有向边. 此外,还存在从源节点 s 指向所有航班节点 v 和汇节点 t 的有向边,以及从所有航班节点 v 指向汇节点 t 的有向边. 因此,

$$E_a = \{(v,w) \mid T_w^{arr} \geq T_v^{dep} + T_v^{min}\} \cup \{(s,v), (v,t), (s,t) \mid \text{对于所有 } v\}$$

通过以上描述可知,有向网络图中的每一条路径对应 a 类型停机位上的一种停机位计划.

为使路径的长度等于相应的停机位计划的简约成本,需给有向网络图 G_a 中的每一条边设置一个权值. 从航班节点 v 指向航班节点 w 的边 (v,w) 的权值为 $c(T_w^{arr} - T_v^{dep}) - \pi_v$,从源节点 s 指向航班节点 v 的边 (s,v) 和从源节点 s 指向汇节

点 t 的边 (s,t) 的权值为 $-\lambda_a$,从航班节点 v 指向汇节点 t 的边 (v,t) 的权值为 $-\pi_v$. 从而,从源节点 s 到汇节点 t 的每一条路径 i 的长度为: $c_i - \sum_{v=1}^V g_{iv} \pi_v - \lambda_a$,即对应 a 类型停机位上的停机位计划 i 的简约成本. 如图 1 所示是以 3 架航班为例的有向网络图.

最后,对每种停机位类型下的最小简约成本再求最小,即得最终的停机位计划 i 的最小简约成本.

3 算例分析

本文对国内某机场一个航站楼 20 个停机位 1 d 内的 110 架航班进行指派. 根据航班和机位信息,将停机位划分为 E 类国内航班停机位、D 类国内航班停机位、C 类国内航班停机位、E 类国际航班停机位、D 类国际航班停机位和 C 类国际航班停机位 6 种类型,对应的个数分别为 4,2,6,2,2,4. 航班信息见表 2. 表中 No 为航班序号;Arr 为进场时刻;Dep 为离场时刻;S 为机型;Cat 为航班类型. 航班从早上 08:00(表中以 08:00 为 0 时刻)开始到晚上 22:35 结束.

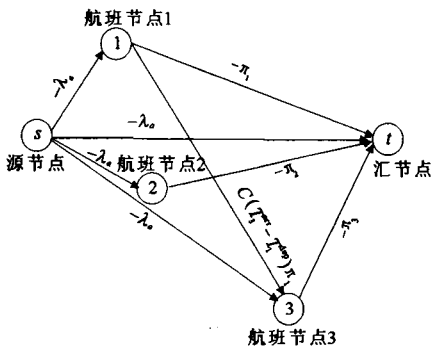


图 1 有向网络图

表 2 航班信息

No	Arr	Dep	S	Cat	No	Arr	Dep	S	Cat	No	Arr	Dep	S	Cat
1	0	60	C	国内	38	250	310	C	国内	75	570	645	D	国际
2	0	140	E	国内	39	250	340	E	国际	76	570	670	E	国内
3	15	60	C	国内	40	255	300	C	国内	77	575	650	D	国内
4	15	65	C	国内	41	265	325	C	国内	78	575	670	D	国内
5	20	75	C	国际	42	270	340	C	国内	79	575	660	D	国内
6	20	90	C	国际	43	270	325	C	国内	80	580	650	E	国际
7	20	95	D	国际	44	275	410	D	国内	81	590	675	E	国际
8	25	70	C	国际	45	295	365	C	国内	82	590	660	C	国内
9	40	155	E	国际	46	315	395	E	国内	83	600	690	D	国内
10	50	95	C	国内	47	325	400	D	国际	84	605	670	C	国内
11	60	120	D	国内	48	335	415	E	国际	85	605	665	C	国际
12	65	125	C	国内	49	335	415	E	国内	86	610	660	C	国内
13	70	170	D	国际	50	335	430	D	国内	87	615	680	C	国内
14	75	190	D	国际	51	335	380	C	国内	88	650	735	D	国际
15	75	125	C	国际	52	340	430	D	国内	89	670	750	E	国际
16	75	190	E	国内	53	340	385	C	国内	90	670	755	D	国内
17	75	200	E	国内	54	350	395	C	国内	91	680	745	C	国内
18	85	140	C	国内	55	355	445	D	国际	92	685	750	E	国内
19	90	150	C	国内	56	365	420	C	国内	93	685	820	C	国际
20	115	165	C	国内	57	375	480	E	国内	94	695	745	C	国内
21	140	210	C	国内	58	380	435	C	国内	95	705	805	E	国内
22	145	295	D	国际	59	385	460	D	国际	96	715	875	E	国内
23	145	195	C	国内	60	400	460	C	国内	97	720	795	D	国内
24	145	210	C	国内	61	465	580	C	国内	98	725	875	D	国际
25	145	195	C	国内	62	480	550	C	国际	99	725	785	C	国内
26	150	215	C	国内	63	480	575	D	国际	100	735	850	E	国内
27	160	220	D	国内	64	485	560	E	国内	101	740	820	C	国际
28	165	215	C	国际	65	490	540	C	国内	102	765	835	C	国内
29	170	215	C	国内	66	490	550	C	国内	103	770	835	C	国内
30	170	225	C	国内	67	495	545	C	国内	104	775	850	E	国际
31	180	230	C	国际	68	505	550	C	国内	105	780	845	D	国际
32	180	240	C	国内	69	505	575	C	国际	106	780	850	D	国内
33	225	295	C	国内	70	510	555	C	国际	107	785	845	C	国际
34	235	295	C	国际	71	545	650	C	国际	108	790	865	E	国内
35	240	310	C	国内	72	560	665	C	国际	109	795	835	C	国际
36	240	290	C	国内	73	565	665	E	国内	110	805	870	C	国内
37	245	290	C	国际	74	570	640	C	国际					

运用 AIMMS 软件进行求解,得到如图 2 所示的最优指派方案.其中,Gate type1 对应 E 类国内航班停机位, Gate type2 对应 D 类国内航班停机位, Gate type3 对应 C 类国内航班停机位, Gate

type4 对应 E 类国际航班停机位, Gate type5 对应 D 类国际航班停机位, Gate type6 对应 C 类国际航班停机位.

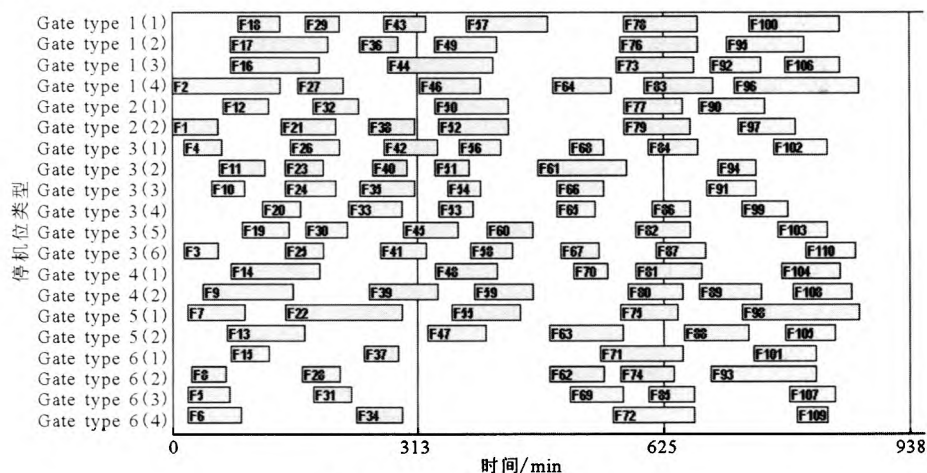


图 2 最终指派方案甘特图

在所有相邻 2 架航班之间的空闲时间中,最长空闲时间为 275 min,最短空闲时间为 20 min,平均空闲时间为 81.833 min.由于航班进离场存在高峰时段和相对空闲时段,因而机位空闲时间段的跨度比较大.对各个机位上相邻 2 架航班之间的空闲时间段及个数进行统计,得到如图 3 所示的空闲时间段分布图.由图 3 可见,空闲时间段集中在 55~95 min 内,这是由于空闲时间段较小时不利于增大停机位指派的鲁棒性,而空闲时间段较大时则会导致一些航班无法指派到机位上.

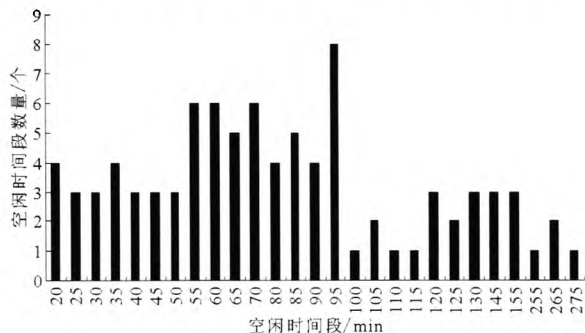


图 3 空闲时间段分布图

采用本文设计的算法对文献[5]中的算例进行求解,得到的优化目标值,即所有机位空闲时间段的平方和为 773 024 min²,而禁忌搜索算法得到的优化目标值为 798 485 min²,遗传算法得到的优化目标值为 776 210 min²,可见本文设计的算法较启发式算法能够得到更为优越的解.同时,本文算法的求解时间为 204.4 s,而经典算法一般无法在多项式时间内求解出该 NP 难问题,所以该算法的求解速度明显快于经典算法.

4 结 束 语

在机场实际运行过程中,航班的随机延误普遍发生,因此,提高停机位预指派方式的鲁棒性对保障航班计划执行率尤为重要.未来还可进一步考虑不同类型航班对应不同的单位时间延误成本,从而根据航班类型合理分配缓冲时间,使停机位指派的鲁棒性研究更具现实意义.

参 考 文 献

- [1] HASSOUNAH M, STEUART G. Demand for aircraft gates [J]. Transportation Research Record, 1993, 1423: 26-33.
- [2] BOLAT A, AS-SAIFAN K. Procedures for aircraft-gate assignment[J], Mathematical & Computational Applications, 1996, 1(1): 9-14.
- [3] BOLAT A. Assigning procedures for providing robust gate assignments for arriving aircrafts [J], European Journal of Operational Research, 2000, 120(1): 63-80.
- [4] 田 晨,熊桂喜.基于遗传算法的机场机位指派策略[J].计算机工程,2005,31(3):186-189.
- [5] 卫东选,刘长有.机场停机位指派问题研究[J].交通运输工程与信息学报,2009,7(1):57-63.
- [6] 杨双双,田 勇,万莉莉,等.基于客户评价体系的停机位分配优化研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013,37(1):167-171.
- [7] 白 凤,朱金福,高 强.基于列生成算法的不正常航班调度[J].系统工程理论与实践,2010,30(11): 2036-2045.

(下转第 179 页)

- [11] 詹 昊,李万平,方秦汉,等.不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J].武汉理工大学学报,2008,30(12):129-132.
- [12] WILLIAMSON C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake [J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1996,28:477-539.

Numerical Simulation on the Effectiveness of the Pitch of Helical Strakes in Suppressing VIV

WANG Yafei¹⁾ SUN Liping¹⁾ WU Zixin²⁾

(Deepwater Engineering Technology Research Center ,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)¹⁾

(College of Navel Architecture and Marine Engineering ,
Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)²⁾

Abstract: Due to the serious fatigue damage of VIV (vortex-induced vibration) to the riser, it is very likely to failure soon. Much corresponding research has been done to deal with how to suppress the effect recently, and the helical strakes is widely used in engineering now. Many parameters have certain effects on its design in practice, including the height, pitch and coverage scale. The main aim of this paper is to study the wake field of a riser with different pitch by numerical simulation based on the Fluent software. In conclusion, the VIV can be obviously suppressed by the helical strakes, and the effectiveness of inhibiting vortex shedding is better with increasing the pitch of helical strakes. Besides, the numerical simulation has a good agreement with the experiment result of reference, which demonstrates the accuracy of research approach.

Key words: helical strakes; pitch; VIV; numerical simulation

.....

(上接第 174 页)

Research on Robustness of Gate Assignment Based on Column Generation Methods

WANG Xiaotian TIAN Yong WAN Lili YANG Ye

(School of Civil Aviation, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: It is very significant to study the robustness of gate assignment scheme in the process of airport operation. The concept of gate plan is introduced to describe a series of flights which are assigned to the same gate, then the gate assignment problem boils down to selecting the best subset of gate plans which conform to the corresponding gate type, so a mathematical model of increasing gate assignment robustness is established. Column generation methods are introduced to solve this model. Finally, a given instance shows that the model and algorithm of gate assignment have certain advantages in computation time and assignment result, which are effective and feasible in practice.

Key words: gate assignment; robustness; gate plan; column generation methods