

文章编号:1671-1637(2012)05-0085-06

## 航空公司合作博弈下的时隙交换模型

严俊<sup>1,2</sup>, 吴桐水<sup>1,3</sup>, 高强<sup>1</sup>, 朱金福<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028;  
3. 中国民航大学 经济与管理学院, 天津 300300)

**摘要:**针对航班波运行方式下的地面等待问题,提出了时隙交换策略。以参与交换各方的最小旅客延误为目标函数,以 Pareto 改进解为约束条件,运用合作博弈理论建立了 2 个航空公司间的时隙交换模型。将时隙交换模型分解成时隙指派模型与时隙组合模型,使用时隙指派模型求给定时隙状况下的最优指派方案与目标函数值,使用时隙组合模型求 2 个航空公司的最优时隙分配方案。计算结果表明:在无时隙交换下,航空公司 1 的旅客总延误为 238 955 min,航空公司 2 的旅客总延误为 145 170 min;当 2 个航空公司相互交换 6 个时隙后,航空公司 1 的旅客总延误为 232 945 min,航空公司 2 的旅客总延误为 142 130 min,分别下降 2.5% 与 2.1%;当航班信息完全时,时隙交换能够使航空公司获得最优 Pareto 改进解;当航班信息不完全时,航空公司可以通过讨价还价的方法获得较好的时隙交换方案。

**关键词:**航空运输;时隙分配;时隙交换;协同决策;航班波;合作博弈;Pareto 改进解

**中图分类号:**F560.6 **文献标志码:**A

## Slot switching model of airlines under cooperative game

YAN Jun<sup>1,2</sup>, WU Tong-shui<sup>1,3</sup>, GAO Qiang<sup>1</sup>, ZHU Jin-fu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China;  
3. School of Economic and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aiming at the ground holding problem under the operation mode of flight bank, slot switching strategy was proposed. The minimum passenger delays of all airlines involved in slot switching were taken as objective functions, the Pareto improved solution was taken as constraint condition, and the slot switching model between two airlines was established by using cooperative game theory. The model was decomposed into slot assignment model and slot combination model. By using slot assignment model, the optimal assignment scheme and objective function value under determined slot condition were obtained. By using slot combination model, the optimal slot allocation schemes of two airlines were obtained. Computation result shows that without slot switching, the total passenger delays of airlines 1 and 2 are 238 955, 145 170 min respectively. After switching six slots between two airlines, the total passenger delays of airlines 1 and 2 are 232 945, 142 130 min respectively, and reduce by 2.5% and 2.1% respectively. When flight information is complete, slot switching can make airlines get optimal Pareto improved solutions.

收稿日期:2012-05-23

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(61079014);国家软科学研究计划项目(2011GXQ4B023)

作者简介:严俊(1977-),男,江苏镇江人,中国民航科学技术研究院高级工程师,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中交通运输系统研究。

导师简介:吴桐水(1955-),男,天津人,南京航空航天大学教授,工学博士。

When flight information is incomplete, airlines can obtain better slot switching schemes by using bargaining method. 9 tabs, 1 fig, 19 refs.

**Key words:** air transportation; slot allocation; slot switching; collaborative decision-making; flight bank; cooperative game; Pareto improved solution

**Author resumes:** YAN Jun(1977-), male, senior engineer, doctoral student, +86-10-64473816, yanj@mail.castc.org.cn; WU Tong-shui(1955-), male, professor, PhD, +86-25-84895388, wutongshui@126.com.

## 0 引 言

中国航空运输在“十一五”期间获得了巨大的发展,已经成为仅次于美国的第二大航空运输国。但是不正常航班数量与旅客延误也大量增长,严重制约着航空运输的持续健康发展。随着航空器技术的不断完善,航空器发生故障的概率大幅降低,造成航班延误主要因素转变为恶劣天气、流量控制等。由于时隙与流量控制存在密切关系,当在天气恶劣下采用流量控制时,空管部门出于飞行安全的考虑会扩大飞行器之间的飞行间隔,这样就造成大型机场时隙资源进一步紧张,从而引发大面积的航班延误。为了减少航班延误,空管部门需对机场流量进行重新评估,确定时隙数量再分配航班。这种以空管部门为主导的决策体制,产生了一定的问题。首先,空管部门在进行时隙分配时要面对所有航空公司,因而其决策不仅需要考虑效率性更要兼顾公平性;其次,空管部门分配时隙时缺少充分信息,在分配时隙时难以获得航班人数、航班重要性等各方面信息,因而其指派并不满足于航空公司的要求;第三,空管部门分配时隙时不能考虑航空公司航班运行的实际要求,而航空公司的航班计划是一个复杂的时空运行网络,航班之间具有复杂的纵横关系,一个航班的延误会波及许多航班。二十世纪初,美国国家航空航天局(NASA)提出了协同决策的概念,主要强调航空公司要参与到时隙分配决策中<sup>[1-2]</sup>。目前国内外关于时隙分配的研究开展得较多,包括了静态与动态地面等待策略<sup>[3-4]</sup>,单机场与多机场地面等待策略<sup>[5-6]</sup>,以延误成本为最小单目标以及以公平性、功效性与有效性为多目标的地面等待优化策略<sup>[7-8]</sup>,以时隙资源数量确定或不确定下的地面等待优化策略等<sup>[9]</sup>。但是这些研究都还是以空管部门为主导的中心型决策方式,航空公司未参与时隙分配的决策。当时隙变化之后,航空公司存在依据航班运行情况合理使用时隙的主动性,但是鉴于时隙的私有性,如果航空公司的决策空间只能在自有时隙中进行最优

化决策,那么就会大大限制减少旅客延误的能力与程度,因此,航空公司希望通过时隙的交易扩大决策空间,最大程度减少延误。

协同决策机制的精神在于各参与者在决策过程中围绕共同目标,发挥在各领域的优势,采用分散决策的方式达到最优决策效果。当不正常航班逐渐恢复时,时隙是空管部门与航空公司的决策焦点。在时隙总量的估计方面,空管部门具有绝对优势,但是在时隙对航班的价值方面不具有优势,而在这方面,航空公司具有优势。在以航空公司为主导,由航空公司自由选择时隙,进而分派时隙达到减少航班延误是一个新研究领域。由于时隙具有先天的私有性,因此,航空公司的自由选择必然离不开时隙交易。时隙交易在北美与欧洲航空业应用较多<sup>[10-12]</sup>,由于上述地区市场化程度较高,航空公司可以通过市场定价方式获得时隙定价。但是时隙的交易出发点是控制拥挤机场航班的数量,通过时隙所有权的交易提高时隙的使用效率<sup>[13-14]</sup>,时隙交换的思想很快被引入到在不正常航班的恢复决策过程中。Vossen等首先提出了以航空公司为主导的时隙交换分配方式<sup>[15]</sup>,提出了航空公司之间可以通过交换时隙来满足自身航班的运行特性。航空公司通过提出最大与最小需求时隙,并与其他航空公司进行时隙交换,反映了航空公司最希望获得的时隙的上下界。这种时隙交换方式与空管部门目前使用的时隙分配方式在目标上具有一致性并且可以获得更好的分配结果。

虽然 Vossen 等的研究建立了以航空公司为主导的时隙分配模型,但模型只考虑了航班重要程度这一特性,却没有考虑航空公司航班复杂的时空运行特性,模型中航班之间是相互孤立的,而现实中航班之间存在密切联系。本文延续时隙交换的思想,在时隙分配中以航空公司为主导,充分考虑航空公司航班的航班波运行特性,提出了航空公司间采用合作博弈方式进行时隙交换的模型,并给出航空公司时隙交换的优化求解算法。

## 1 模型描述

在航班飞行过程中,由于航空公司存在航班波,给决策带来复杂性。所谓航班波是指一组相关联的航班,这些航班之间存在旅客的中转或机组成员的转换。航班波的存在使得旅客延误分为两部分,一种是到达延误,一种是中转延误。到达延误取决于航班到达旅客人数与航班延误时间,而中转延误却非常复杂,取决于航班波的中转旅客人数与航班波延误。航班波延误为航班波最后一个到达航班的时刻与航班波计划到达时刻的差值,由于决策时航班波最后到达航班可能不同于计划中的航班波最后到达航班,因此,航班波的延误只能在指派方案确定后才能获得。

根据上述要求,可以抽象出下列假设条件:航空公司无航班取消;航空公司可以自由安排航班使用获得的时隙;每个航班只能使用一个时隙且只能使用等于或晚于航班计划到达时刻的时隙;航空公司进行时隙交换后的延误小于交换前的延误;航空公司之间自愿交换各自航班除票价外的其他信息。

在本文模型中,令  $A$  为航空公司集合,  $a \in A$ ;  $F$  为航班集合,  $i \in F$ ;  $F_a$  为航空公司  $a$  的航班集合;  $S$  为时隙组合集合,  $j \in S$ ;  $B$  为航班波集合,  $b \in B$ ;  $B_a$  为航空公司  $a$  的航班波集合;  $d_{ia1}$  为航空公司  $a$  的航班  $i$  的计划到达时刻;  $t_{ba1}$  为航空公司  $a$  的航班波  $b$  的计划到达时刻;  $t_{ba2}$  为航空公司  $a$  的航班波  $b$  的实际到达时刻;  $t_{j2}$  为时隙  $j$  的变更时刻;  $p_{ia}$  为航空公司  $a$  的航班  $i$  上的旅客人数;  $r_{ia}$  为航空公司  $a$  的航班  $i$  上的中转旅客人数;  $r_{ba}$  为航空公司  $a$  的航班波  $b$  上的中转旅客人数;  $c_a$  为航空公司  $a$  时隙交换前的旅客总延误。本文假定航空公司追求通过时隙交换达到各方的旅客总延误之和最小,但是必须满足每个时隙只能为一个航班使用,并且所有时隙都有一个航班使用,交换后各航空公司都可以从交换中获得利益,即交换后的旅客总延误小于不交换前的旅客总延误。由以上分析,则有

$$\min Z_1 = \sum_{a \in A} \left[ \sum_{j \in S} \sum_{i \in F_a} x_{iaj} (p_{ia} - r_{ia}) (t_{j2} - d_{ia1}) + \sum_{b \in B_a} r_{ba} (t_{ba2} - t_{ba1}) \right] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{a \in A} \sum_{j \in S} x_{iaj} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{i \in F_a} x_{iaj} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in F_a} x_{iaj} (p_{ia} - r_{ia}) (t_{j2} - d_{ia1}) +$$

$$\sum_{b \in B_a} \sum_{i \in F_a} r_{ia} (t_{ba2} - t_{ba1}) \leq c_a \quad (4)$$

$$x_{iaj} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$t_{ba2} = \max(x_{iaj} t_{j2}) \quad (6)$$

式中:  $Z_1$  为目标函数;  $x_{iaj}$  为 0-1 决策变量, 当航空公司  $a$  的航班  $i$  使用时隙  $j$  时,  $x_{iaj}$  为 1, 否则为 0。

## 2 算法描述

上述模型包含了 2 个决策过程, 即航空公司的时隙选择与时隙分配。由于不同的时隙产生的时隙分配结果不同, 并且航空公司可行的交换方案必须是一种 Pareto 改进解。本文将上述模型拆分为 2 个子模型: 子模型 1 (时隙指派模型), 假定航空公司交换后的时隙组合已经确定, 通过子模型 1 可确定各航空公司在该时隙组合下的最优时隙指派方案, 并求解该时隙组合下的目标函数值; 子模型 2 (时隙组合模型), 假定各个航空公司每种交换后的时隙组合的目标函数值均优于交换前的时隙组合且目标函数值已知的前提下, 通过子模型 2 可确定各个航空公司的最优时隙组合, 使得各个航空公司目标函数值之和最小。

### 2.1 时隙指派模型

在给定的时隙组合下, 航空公司可确定一个最优的航班指派使得旅客总延误最小。令  $S_a$  为航空公司  $a$  交换后获得的时隙组合集合, 则有

$$\min Z_2 = \sum_{j \in S_a} \left[ \sum_{i \in F_a} x_{iaj1} (p_{ia} - r_{ia}) (t_{j2} - d_{ia1}) + \sum_{b \in B_a} r_{ba} (t_{ba2} - t_{ba1}) \right] \quad (7)$$

$$\sum_{j \in S_a} x_{iaj1} = 1 \quad (8)$$

$$x_{iaj1} \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式中:  $Z_2$  为航空公司  $a$  在时隙组合  $S_a$  下指派方案的目标函数值;  $x_{iaj1}$  为 0-1 决策变量, 当航空公司  $a$  的航班  $i$  使用时隙  $j$  时,  $x_{iaj1}$  为 1, 否则为 0。

### 2.2 时隙组合模型

从各个航空公司交换后目标函数值小于交换前的时隙组合中, 确定使各个航空公司旅客总延误之和最小的时隙组合, 令  $\Omega$  为所有航空公司交换后目标函数值小于交换前的时隙组合集合,  $S_1$  为航空公司  $a$  交换后目标函数值小于交换前的时隙组合,  $Z_{S_1}$  为在时隙组合为  $S_1$  时的航空公司  $a$  的目标函数值,  $\Omega_a$  为航空公司  $a$  交换后目标函数值小于交换前的时隙组合集合,  $S_1 \in \Omega_a$ , 则有

$$\min Z_3 = \sum_{a \in A} \sum_{S_1 \in \Omega_a} Z_{S_1} x_{S_1} \quad (10)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{S_1 \in \Omega_a} x_{S_1} y_{jS_1} = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{S_1 \in \Omega_a} x_{S_1} = 1 \quad (12)$$

$$x_{S_1} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

式中:  $Z_3$  为航空公司  $a$  在时隙组合集合  $\Omega$  中的目标函数值;  $x_{S_1}$  为 0-1 决策变量, 当  $S_1$  为航空公司  $a$  交换后获得的时隙组合时,  $x_{S_1}$  为 1, 否则为 0,  $y_{jS_1}$  为 0-1 决策变量, 当时隙  $j$  包含在  $S_1$  时,  $y_{jS_1}$  为 1, 否则为 0。

通过将模型分解为 2 个子模型之后, 相应的求解分为 2 个阶段, 第 1 阶段确定每个航空公司所选定的时隙, 然后确定在该时隙下的最优指派方案, 如果该方案的目标函数值小于交换前的目标函数值, 则获得一个可行时隙交换方案, 并确定可行方案的集合。第 2 阶段就转化为求解一个使得所有航空公司所用时隙交集为空而且并集等于时隙集合的所有航空公司的时隙组合。

参考文献[16]中的算法, 可以求解在第 1 阶段中每个航空公司在给定时隙下的最优指派方案, 参考文献[17]中的算法, 可以求解第 2 阶段航空公司的最优时隙交换方案。

### 3 计算结果分析

本文假设航空公司 1、2 在某机场原计划分别到港 10 个航班与 7 个航班, 航空公司 1 的航班计划(航班波与航班人数情况)见表 1。航空公司 2 的航班计划(航班波与航班人数情况)见表 2。由于机场受到恶劣天气影响, 空管部门对航空公司所获得的时隙的初始时刻进行了变更, 航空公司 1、2 时隙变更情况分别见表 3、4, 航空公司航班波的中转人数

表 1 航空公司 1 的航班计划

Tab. 1 Flight planning of airline 1

航班号	计划到达时刻	所属航班波	航班人数
11	9:00:00	1	150
13	9:55:00	1	145
14	10:15:00	1	130
17	11:00:00	3	163
18	11:20:00	4	186
19	11:40:00	3	118
20	11:55:00	3	218
21	12:00:00	4	156
22	12:15:00	4	140
23	12:30:00	4	100

表 2 航空公司 2 航班计划

Tab. 2 Flight planning of airline 2

航班号	计划到达时刻	所属航班波	航班人数
12	9:30:00	2	165
15	10:45:00	2	120
16	10:55:00	2	117
24	12:40:00	5	95
25	13:10:00	5	88
26	13:30:00	5	170
27	13:40:00	5	210

表 3 航空公司 1 时隙变更方案

Tab. 3 Slot alteration scheme of airline 1

时隙号	初始时刻	变更时刻
1	9:00:00	9:40:00
3	9:55:00	11:20:00
4	10:15:00	11:55:00
7	11:00:00	13:40:00
8	11:20:00	14:20:00
9	11:40:00	14:40:00
10	11:55:00	15:10:00
11	12:00:00	15:30:00
12	12:15:00	15:50:00
13	12:30:00	16:10:00

表 4 航空公司 2 时隙变更方案

Tab. 4 Slot alteration scheme of airline 2

时隙号	初始时刻	变更时刻
2	9:30:00	10:20:00
5	10:45:00	12:20:00
6	10:55:00	13:00:00
14	12:40:00	16:20:00
15	13:10:00	16:30:00
16	13:30:00	16:40:00
17	13:40:00	17:00:00

见表 5。在无时隙交换下, 航空公司 1、2 最优的时隙指派方案分别见表 6、7。在无时隙交换下, 航空公司 1 的旅客总延误为 238 955 min, 航空公司 2 的旅客总延误为 145 170 min。

表 5 中转旅客人数

Tab. 5 Transfer passenger numbers

航班波	航空公司	中转人数
1	1	129
2	2	128
3	1	128
4	1	178
5	2	167

表 6 航空公司 1 在时无隙交换下的时隙指派方案  
Tab. 6 Slot assignment scheme of airline 1 without slot switching

时隙号	航班号	所属航班波
1	11	1
3	13	1
4	14	1
7	20	3
8	17	3
9	19	3
10	18	4
11	22	4
12	21	4
13	23	4

表 7 航空公司 2 在时无隙交换下的时隙指派方案  
Tab. 7 Slot assignment scheme of airline 2 without slot switching

时隙号	航班号	所属航班波
2	12	2
5	16	2
6	15	2
14	27	5
15	26	5
16	24	5
17	25	5

如果航空公司 1、2 相互交换 6 个时隙,可得到航空公司 1、2 的时隙指派方案,分别见表 8、9。在相互交换 6 个时隙后,航空公司 1 的旅客总延误为 232 945 min,航空公司 2 的旅客总延误为 142 130 min。

表 8 航空公司 1 在时隙交换下的时隙指派方案  
Tab. 8 Slot assignment scheme of airline 1 with slot switching

时隙号	航班号	所属航班波
2	11	1
3	13	1
4	14	1
5	18	4
6	20	3
8	17	3
9	19	3
15	22	4
16	21	4
17	23	4

对比表 6、8 与表 7、9,当相互交换 6 个时隙后,航空公司 1、2 都可以得到比时隙不交换下更好的指派结果,航空公司 1 减少了 2.5% 的总延误,航空公司 2 减少了 2.1% 的总延误。由于在时隙交换时,航空公司是以航班波运行方式,因此,这种时隙交换

表 9 航空公司 2 在时隙交换下的时隙指派方案  
Tab. 9 Slot assignment scheme of airline 2 with slot switching

时隙号	航班号	所属航班波
1	12	2
7	27	5
10	16	2
11	15	2
12	26	5
13	24	5
14	25	5

不是简单的一对一或二对二的交换<sup>[18]</sup>。在本文中,航空公司 1 与 2 互相交换 6 个时隙,反映出航空公司之间的时隙交换是一组时隙与另一组时隙的交换时,无法区分出时隙交换的对应关系,这就造成无法对每个时隙进行精确的定价。尤其当交换涉及多个航空公司时,如果一个航空公司交换后的时隙包含多个航空公司的时隙时,将造成无法完成利益分割,从而导致时隙组合的分配规则与支付规则成为一个难以解决的问题<sup>[19]</sup>。

如果时隙交换是在 2 个航空公司之间且信息不完全情况下,即交换双方不知道对方航空公司的航班情况,那么是无法获得最小总延误的时隙交换方案。此时,可采用由一方提出一种时隙交换方案而另一方决策是否接受交换的方式,此方式类似 Vossen 等提出的时隙交换集。本文有 204 种可行的交换方案,见图 1,图中每个点代表航空公司 1、2 的时隙交换后的 Pareto 改进解。任何一个 Pareto 改进解对于航空公司都是有利的,但是航空公司之间获益的程度存在较大差别。越靠近图 1 的右下部的点,表示航空公司 1 获益越少而航空公司 2 获益越多,反之越靠近图的左上部的点,表示航空公司 2

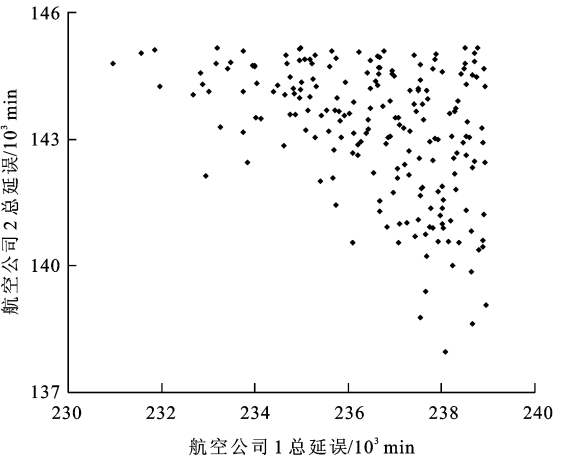


图 1 两个航空公司时隙交换方案  
Fig. 1 Slot switching scheme between two airlines

获益越少而航空公司 1 获益越多,这也反映了 Vossen 等提出的在信息不完备下,对时隙交换集的范围进行限制的原因。众多的交换方案对于各个航空公司延误的减少存在很大的差异,各个航空公司可以采用讨价还价的方式获得一个相对公平的时隙交换方案。

## 4 结 语

本文研究了在协同机制下航空公司通过时隙交换最大程度上减少不正常航班延误的问题。航空公司间的时隙交换转化为航空公司从原自有时隙的决策空间扩展到所有时隙的决策空间,在扩大后的时隙决策空间中,分别确定各个航空公司各种时隙组合情况下的最优时隙指派与目标函数值,然后确定所有航空公司最优的时隙组合。通过将最优时隙组合问题转化为集合覆盖问题,可以利用现有的算法很好解决该问题,从实例分析可以看出,通过交换可以有效地减少航空公司的旅客总延误。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] ANDREATTA G, BRUNETTA L, GUASTALLA G. From ground holding to free flight: an exact approach[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(4): 394-401.
- [2] SHERALI H D, STAATS R W, TRANI A A. An airspace planning and collaborative decision-making model: part I—probabilistic conflicts, workload, and equity considerations[J]. *Transportation Science*, 2003, 37(4): 434-456.
- [3] RICHETTA O, ODONI A R. Solving optimally the static ground-holding policy problem in air traffic control [J]. *Transportation Science*, 1993, 27(3): 228-238.
- [4] VRANAS P B M, BERTSIMAS D, ODONI A R. Dynamic ground-holding policies for a network of airports[J]. *Transportation Science*, 1994, 28(4): 275-291.
- [5] CHANG K, HOWARD K, OIESEN R, et al. Enhancements to the FAA ground-delay program under collaborative decision making[J]. *Interfaces*, 2001, 31(1): 57-76.
- [6] 胡明华, 钱爱东, 苏兰根. 基于地面等待策略的航班时刻规划方法[J]. *航空学报*, 2001, 23(3): 262-264.  
HU Ming-hua, QIAN Ai-dong, SU Lan-gen. Airlines timetable programming method based on ground holding strategy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 23(3): 262-264. (in Chinese)
- [7] VOSSEN T, BALL M, HOFFMAN R, et al. A general approach to equity in traffic flow management and its application to mitigating exemption bias in ground delay programs[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2004, 11(4): 277-292.
- [8] 周 茜, 张学军, 柳重堪. 时隙分配算法在 CDM GDP 程序中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(9): 1043-1045.  
ZHOU Qian, ZHANG Xue-jun, LIU Zhong-kan. Slots allocation in CDM GDP[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(9): 1043-1045. (in Chinese)
- [9] 张洪海, 胡明华. CDM GDP 飞机着陆时隙多目标优化分配[J]. *系统管理学报*, 2009, 18(3): 302-308.  
ZHANG Hong-hai, HU Ming-hua. Multi-objection optimization allocation of aircraft landing slot in CDM GDP [J]. *Journal of Systems and Management*, 2009, 18(3): 302-308. (in Chinese)
- [10] KLEIT A N, KOBAYASHI B H. Market failure or market efficiency? evidence on airport slot usage [J]. *Research in Transportation Economics*, 1996, 4(1): 1-32.
- [11] VAHQUEZ-MARQUEZ A. American airlines arrival slot allocation system (ASAS)[J]. *Interfaces*, 1991, 21(1): 42-61.
- [12] STARKIE D. Allocating airport slots: a role for the market? [J]. *Journal of Air Transport Management*, 1998, 4(2): 111-116.
- [13] VERHOEF E T. Congestion pricing, slot sales and slot trading in aviation [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, 44(3): 320-329.
- [14] ZHANG Ai-ming, ZHANG Yi-min. Airport capacity and congestion when carriers have marketpower[J]. *Journal of Urban Economics*, 2006, 60(2): 229-247.
- [15] VOSSEN T, BALL M. Slot trading opportunities in collaborative ground delay programs [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(1): 29-43.
- [16] 高 强, 严 俊, 朱金福. 协同决策机制下航空公司时隙分配优化决策[J]. *交通信息与安全*, 2012, 30(1): 24-28.  
GAO Qiang, YAN Jun, ZHU Jin-fu. Airlines' optimization model of slot allocation through collaborative decision-making mechanism[J]. *Journal of Transportation Information and Safety*, 2012, 30(1): 24-28. (in Chinese)
- [17] 陈端兵, 黄文奇. 一种求解集合覆盖问题的启发式算法[J]. *计算机科学*, 2007, 34(4): 133-136.  
CHEN Duan-bing, HUANG Wen-qi. A heuristic algorithm for set covering problem[J]. *Computer Science*, 2007, 34(4): 133-136. (in Chinese)
- [18] VOSSEN T, BALL M. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs[J]. *Naval Research Logistics*, 2005, 53(1): 75-90.
- [19] 王 飞, 徐肖豪, 张 静, 等. GHP 时隙分配问题的组合拍卖竞标模型与算法[J]. *系统工程*, 2010, 28(2): 30-35.  
WANG Fei, XU Xiao-hao, ZHANG Jing, et al. Combinatorial auction winner determination model and algorithm in GHP slot allocation problem [J]. *Systems Engineering*, 2010, 28(2): 30-35. (in Chinese)