

协同决策机制下的时隙二次指派

严俊^{1,2} 吴桐水^{1,3} 高强¹ 唐小卫¹

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

摘要:随着中国民航的快速发展,航班不正常变得越来越严重。由空管、航空公司与机场三方构建的协同决策机制成为应对该局面的重要手段。本文研究航空公司在协同决策机制下,当时隙资源发生严重不足时,对时隙进行二次指派的方法。文中建立了一种基于航班波运行方式的航班时隙指派模型,针对模型的特点与实时决策要求采用模拟退火算法求解。最后通过实例证明了采用本文的方法可以大幅度减少旅客总延误时间。

关键词:时隙缺乏;航班指派;协同决策;航班波;启发式算法

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)01-0140-07

Re-assignment of Slot in Collaborative Decision-Making Mechanism

Yan Jun^{1,2}, Wu Tongshui^{1,3}, Gao Qiang¹, Tang Xiaowei¹

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

Abstract: With the rapid development of Chinese civil aviation, irregular flights become more and more serious. Collaborative decision-making mechanism (CDM), involving air traffic control (ATC), airlines, and airport, becomes an important means to deal with the situation. A method for slot-reassigning by airline during seriously insufficiency in CDM is proposed. A slot assignment model is established based on flight bank operation and a simulated annealing arithmetic is designed in accordance with the characteristics of model and real-time decision requirements. An empirical case proves this method can greatly reduce the passengers' total delay time.

Key words: slot insufficiency; flight assignment; collaborative decision-making mechanism; flight bank; heuristic arithmetic

中国民用航空局发布民航行业发展统计公报,2010 年国内航班不正常率为 24.2%,相比 2009 年上升了 5 个百分点。造成航班不正常的原因很多,其中天气原因和流量控制原因占比分别达到 19.5%和 27.6%。这两个原因反映出航空运输生产中时隙资源的短缺。虽然时隙资源不像航空公司的飞机资源、机组资源可以人为控制,但是如果能够充分合理地应用,仍然可以大量减少航班延

误,从而提高经济与社会效益。本世纪初,美国国家航空航天局(The United States national aeronautics and space administration, NASA)提出了协同决策的理念,在协同决策机制(Collaborative decision-making mechanism, CDM)下,空管与航空公司共同决策以达到最大程度地减少航班延误。由于民航更加注重安全性,当天气恶劣及流量控制时,往往采用飞行器地面等待程序(Ground hold-

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(61079014)资助项目;国家软科学研究计划(2011GXQ4B023)资助项目。

收稿日期:2012-04-10;**修订日期:**2012-09-25

通信作者:严俊,男,博士研究生,高级工程师,1977 年出生,E-mail:yanj@mail.castc.org.cn。

ing programming, GHP)。这就产生如何对计划航班及时隙资源进行重新分配的问题。时隙资源的数量由空管部门根据天气状况进行估算,从而时隙资源的分配也由空管部门决定。因此学术界关于地面等待策略的研究,主要是从空管角度,对时隙进行合理分配实现延误成本最小。由于时隙资源的公共性,对空管而言还需要考虑分配的公平性。张荣等^[1]研究了协同决策机制下地面等待程序中(CDM ground delay programming, CDM GDP)机场时隙资源的公平分配问题,提出了基于延误成本公平分配的协同地面等待优化模型。模型中以航空公司航班平均成本与所有参与地面等待航班的平均延误成本的差值最小作为公平的度量,采用分段函数的方法将航班延误时间近似转化为延误成本。该模型采用遗传算法求解,研究结果显示其算法比 RBS 算法不仅可以减少延误成本,而且可以使各航空公司的延误成本均衡分配。周茜等^[2]研究了 CDMGDP 时隙分配算法,引入航班延误损失系数,以延误损失系数替代延误时间,其延误损失系数为航班的地面与空中费用。提出了两种基于该系数的时隙分配算法,一种是延误损失系数优先级 RBS 算法,一种是二次自然增长延误算法。研究表明:这两种分配算法在总延误损失与延误损失标准差方面都小于 RBS 算法。而这两种算法的优劣需要引入反映决策者偏好的评判函数,通过其在总延误损失与延误损失标准差之间进行权衡以获得最优分配。徐肖豪等^[3]研究了单元受限航班地面等待的延误成本,主要分析了航班延误成本的构成,给出了航班延误显性成本的计算方法,并将其用于数学模型中目标函数的计算。通过采用模拟的方法对地面等待航班进行排序。采用了分段排序与定步长排序两种排序模拟方法对比与先到先服务排序方法,分析了这 3 种方法在各航班的延误成本、延误时间、全部航班的总延误成本、航班位置变化标准偏差和航班最长延误时间这些指标上的差异。胡明华等^[4]研究了多元受限地面等待问题的数学模型。该模型中不仅包含了地面等待成本还包含了空中等待成本。文中利用启发式方法与专家系统相结合,通过启发式函数和规则对解空间进行广度寻优求解。张洪海、胡明华^[5]建立了协同决策下地面等待的多目标时隙分配模型。模型将功效性与公平性作为目标以有效性作为约束,提出了多目标之间的帕累托最优解概念,采用遗传算法获得帕累托最优解。Vossen 和 Ball^[6]在 OPTIFLOW 模型基础上,提出了航空公

司之间可以通过交换时隙来体现满足自身特性的决策。航空公司通过提出时隙的最大与最小需要集合与其他航空公司进行时隙交换。文中揭示这种时隙交换方式与空管目前使用的时隙分配方式在目标上具有一致性。Rassenti 等^[7]首先提出了采用拍卖方式分配各航空公司的可以获得的时隙。虽然他们所提出的时隙分配主要是针对于航空公司获得初始航班起降权的时隙,但对减少航班延误的时隙拍卖具有重大的引导作用。Hamsa^[8]提出了对无补偿与有补偿的两种拍卖机制,分析了无补偿拍卖获得稳定解的性质及有补偿拍卖对美国联邦航空局(Federal aviation administration, FAA)的影响,进而提出了一种近似维克瑞拍卖方式并证明其理论上可获得最优的时隙交换效果。王飞等^[9]针对 2-2 的时隙交易问题,以第一价格密封拍卖方式为背景,研究了时隙分配问题的组合拍卖竞标模型,设计人工鱼群算法求解模型。

在上述文献中,除文献[6,8]以外,多数都是从空中流量管理部门的角度论述了时隙分配。航空公司在 CDM 机制下的决策作用几乎是微乎其微,即使文献[6,8]也没有充分考虑航空公司航班运行的方式。而 CDM 最为突出的一点就在于发挥决策各参与方的优势,采用分散决策的方式,在保持决策目标一致的情况下,取得最优决策结果。空中流量管理部门与航空公司在协同决策机制下的焦点是时隙的分配。空管的优势在于可以精确地确定时隙的数量,可以根据时隙总量按照进港航班计划表对时隙进行初始分配。但是空管决策时无法充分考虑航空公司的航班运行控制,实际上会造成时隙分配的结果并不满足航空公司的要求。由于航班是一种纵横交叉的复杂网络结构。一个航班的延误将会带来一系列的延误。从纵向来说,一个飞机一天由多个航班任务构成,当一个航班发生延误时会影响后继航班。从横向来说,多架飞机存在枢纽机场的互相衔接以实现旅客的转机,当任一个航班发生延误时就可能影响到这些飞机的航班任务的执行。而航空公司可以从整个航班计划运行的角度精确地估计出每个时隙的价值,因而航空公司对时隙的二次指派就至关重要。

本文立足于国内实际情况,研究在极端恶劣天气影响下机场时隙严重不足情景下,航空公司如何进行时隙的二次指派以减少航班延误的方法。在研究中充分考虑航空公司航班波的运作特性,建立

基于航班波的时隙分配模型,并对相应算法进行分析与设计。

1 优化模型

1.1 问题假设

由于天气原因和流量控制所造成的时隙资源短缺主要出现在大型枢纽机场,因此本研究主要考虑枢纽机场的时隙安排。在枢纽机场,航空公司的航班运行方式具有航班波特点。所谓航班波指在一个时间段内到达(或出发)的一组航班,这些航班将进行机组、旅客的相互转移。航班波的运行方式使得航空公司可以充分利用航线网络优势,降低运行成本。由于航班波的存在,旅客延误将不只是针对所乘航班到达的延误,还包括转机的延误。

定义 1 旅客到达延误总时间为旅客所乘航班实际到达时刻与计划到达时刻的差值乘以航班到达人数。

定义 2 旅客转机延误总时间为航班波最后航班实际到达时刻与计划到达时刻的差值乘以航班波内转机人数。

由于枢纽机场的进离港航班数量很大,初始航班计划安排非常紧密。当恶劣天气或严重流量控制出现时,机场时隙将会出现严重不足。因此空管分配给航空公司的可用时隙将大量减少。航空公司不得不取消一定数量的航班。这就势必打破原先的航班波。因此建立一个新的定义——航班波闭包。

定义 3 航班波闭包是由初始航班波所包含的航班子集而构成的航班波的集合。例如初始航班波 1 由航班 A、B 与 C 构成,则航班波 1 的闭包为 $\{\emptyset, \{\text{航班 A}\}, \{\text{航班 B}\}, \{\text{航班 C}\}, \{\text{航班 A, 航班 B}\}, \{\text{航班 A, 航班 C}\}, \{\text{航班 B, 航班 C}\}, \{\text{航班 A, 航班 B, 航班 C}\}\}$ 。航班波闭包中的元素称之为航班波的派生波。

根据实际情况,抽象出模型的假设:

(1)当恶劣天气和流量控制时,空管部门分配给航空公司的时隙总数量小于原计划可获得数量;

(2)航空公司可自由分配空管给予的时隙,但是航班所用时隙不能早于航班计划到达时刻;

(3)航空公司充分利用所获得的时隙数量,但每个时隙只能为一个航班所用;

(4)航空公司不对航班波进行重新组织。所谓航班波的重新组织,指的是将不同航班波中的航班重新编排得到新的航班波。

为了分析的方便,本文中时将时隙视作一个时间

点。该时间点为时隙的结束时刻。

1.2 变量定义

针对上述问题进行数学抽象建模。模型中所涉及的变量作如下定义。

(1)集合定义

I :航班集合, $i \in I$;

J :时隙集合, $j \in J$;

K :航班波集合, $k \in K$;

k^φ :基于航班波 k 上的航班波闭包, $k' \in k^\varphi$, k' 为派生波;

Γ :基于航班波集合 K 上的航班波闭包集合。

(2)参数定义

N :航班的数量;

M :时隙的数量;

s_j :时隙 j 的时刻

r_i :航班 i 的计划到达时刻;

d_k :航班波 k 的计划到达时刻;

$e_{k'}$:派生波 k' 的实际到达时刻;

p'_i :航班 i 的到达旅客数量;

f_i :航班 i 的旅客数量;

$\omega_{k'}$:派生波 k' 中包含的转机旅客数量;

c_i :航班 i 取消所造成的旅客延误成本。

(3)变量定义

x_{ij} :航班 i 使用时隙 j , 当 $x_{ij} = 1$ 表示使用, $x_{ij} = 0$ 表示不使用;

$y_{k'}$:航班波 k 的闭包 k^φ 中派生波 k' 在指派方案的取值, 当 $y_{k'} = 1$ 表示派生波 k' 出现在指派方案中, $y_{k'} = 0$ 表示派生波 k' 未出现在指派方案中。

1.3 指派模型

由于航班与时隙的指派,在时隙数量远小于航班数量时,是一个非平衡指派问题。

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} p_i (s_j - r_i) + \sum_{k \in K} \sum_{k' \in K} y_{k'} \omega_{k'} (e_{k'} - d_k)^+ + \sum_{i \in I} c_i (1 - \sum_j x_{ij}) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1 \quad i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} = M < N \quad i \in I, j \in J \quad (4)$$

$$x_{ij} (s_j - r_i) \geq 0 \quad i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$e_{k'} = \max_{i \in k} \{x_{ij} s_j\} \quad j \in J, k' \in K' \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = 1 \quad K \in \Gamma \quad (7)$$

$$x_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, i \in I, \forall j, j \in J \quad (8)$$

上述模型中,式(1)表示旅客总延误时间。由 3 部分组成:(1)到达旅客延误,(2)转机旅客延误,(3)取消航班所带来的旅客延误。民航业一般将航班取消也作为一种严重的延误,国际通行认为延误是 480 min;但是由于取消航班并不意味着该航班上所有旅客及中转到该航班的旅客都会被取消行程,存在一部分旅客可以通过签转到其他航班完成行程,但是签转也会产生延误,国际通行认为延误是 120 min。因此每个航班参数 c_i 可以表达为

$$c_i = C \times (f_i + t_i) \times (1 - \text{transfer_ratio}) + T \times (f_i + t_i) \times \text{transfer_ratio} \quad (9)$$

式中: C 为取消延误时间; T 为签转延误时间; t_i 为中转到航班 i 的人数; transfer_ratio 为航班的签转率。

式(2)表示每个航班最多使用一个时隙;式(3)表示每个时隙只能安排一个航班;式(4)表示所有时隙都得到使用,但时隙数量少于航班数量;式(5)表示航班所使用的时隙必须晚于航班计划到达时刻。

式(6)表示航班波实际到达时刻为航班波尾航班所用时隙。由于一个航班波可以取消一些或全部航班,因此指派方案的某个派生波的实际到达时刻 e_k 可能早于航班波计划到达时刻 d_k , 在这种情况下航班波延误时间取零值。

式(7)航班波 k 的闭包 k^ϕ 中只存在一个派生波 k' 出现在指派方案。

式(8)表示变量取值。

2 模型算法

第 1.3 节中的指派模型是一个不平衡指派。一般情况而言,将不平衡指派先转化为平衡指派,即假设虚拟时隙(时隙时刻设在无穷远的一个时间点),将航班指派到该虚拟时隙意味着航班取消。但由于航班波的存在,虚拟时隙不利于确定航班波的中转旅客与航班波的实际到达时刻,因此通过设置虚拟时隙转化为平衡指派的方法并不可行。同时本问题也不能视作背包问题,因为航班指派到时隙的差别影响目标函数值。由于本问题的特殊,它实际包含了航班选择与时隙指派两方面问题,因此采用模拟退火算法框架解决该问题,模拟退火算法在作业排序方面的应用很多,且取得了较好的效果^[10]。该算法分为二个部分:(1)通过模拟退火算

法确定指派时隙的航班;(2)对选定的航班确定优化的时隙指派。

2.1 模拟退火算法

采用贪婪方法确定一个较好的解 s , 作为模拟退火算法的初始解。从式(1)目标函数可知,总延误由航班延误,航班波延误与航班取消 3 部分构成。其中航班波延误既取决于航班波的最后到达时刻,也取决于航班波的航班构成。如果先不考虑时刻对延误的影响,那么 3 部分延误都取决于航班是否分配时隙。因此将运送旅客数多的航班优先分配时隙有助于减少延误。但是在航班旅客中的中转旅客是一个特殊的旅客,其是否作为取消旅客不仅取决于所在航班是否取消,还取决于转入航班是否取消。因此以运输人数作为选择变量确定初始解中的航班。(运输人数 = 每个航班的到达人数 + 实际中转人数,实际中转人数为转移到分配了时隙的航班上的人数。)

贪婪选择过程具体步骤如下:

(1)依据当前指派情况确定各航班的运输人数,对待指派航班按照运输人数降序排列;

(2)将运输人数最多的航班指派到其可用的最早时隙,在待指派航班中去掉该航班;如果所有时隙都已经指派了航班则退出,否则转步骤(1);

在模拟退火算法中新解 s' 的产生,通过随机的选择取消航班与非取消航班的交换获得一个新的解。

初始解:

指派时隙的航班

F12	F11	F18	F20	F17	F22	F27	F26	F13	F16	F21	F14
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

取消的航班

F15	F19	F23	F24	F25
-----	-----	-----	-----	-----

新解的产生:

在指派时隙航班与取消航班随机选择一个进行交换。

指派时隙的航班

F12	F11	F18	F20	F15	F22	F27	F26	F13	F16	F21	F14
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

取消的航班

F17	F19	F23	F24	F25
-----	-----	-----	-----	-----

解的选择按照 Metropolis 分布定义。初始温度采用初始解与先到先服务解目标值的差值。温度的下降比例采用 10%。终止条件设置为温度小于初始温度的 0.1%。

2.2 压缩算法

在模拟退火算法中通过贪婪选择算法及随机产生新解过程确定了应指派时隙的航班,但是并不能确定各航班应分配的最优时隙。通过压缩算法,可以确定各航班的指派方案。在论述压缩算法之前,需要先引出一个定理。

定理 1 如果一个航班波所用的全部时隙对航班波中任一航班都可使用,则使得到达延误最小的航班排列顺序与航班时隙无关,而只与各航班的到达旅客人数有关。

证明:假设存在任意一个航班波,其原航班到达序列为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$,航班的到达人数为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$,原所对应的时隙为 $T = (t_1, t_2, \dots, t_l)$,现所对应的时隙为 $T' = (t'_1, t'_2, \dots, t'_l)$,根据现在时隙 T' 排列的最优航班序列中前后任意两个航班 1 与 2,如果航班 1 与 2 所使用的时隙可以交换,则必有下式成立

$$p_1(t'_1 - t_{(1)}) + p_2(t'_2 - t_{(2)}) \leq p_2(t'_1 - t_{(2)}) + p_1(t'_2 - t_{(1)}) \quad (10)$$

式中: $t_{(1)}$ 与 $t_{(2)}$ 为航班 1 与 2 在原航班序列中所使用的时隙,当且仅当 $p_1 = p_2$ 时等式成立。

由式(10)可得

$$p_1 t'_1 - p_1 t'_2 \leq p_2 t'_1 - p_2 t'_2 \Rightarrow p_1(t'_1 - t'_2) \leq p_2(t'_1 - t'_2) \quad (11)$$

由于 $(t'_1 - t'_2) < 0$,因此得

$$p_1 \geq p_2 \quad (12)$$

得证。

对于航班波 k 而言,如果所使用的时隙都已经确定,则航班波中转旅客延误将是一个常量。因为 e_k 是航班波所使用的最晚时隙,其与航班到达序列无关,而 d_k 对于航班波 k 而言是一个常量,同样航班波中转人数 w_k 也是一个常量,因此 $w_k(e_k - d_k)$ 为一个定值。

由定理 1 可以建立起压缩算法,具体步骤如下:

(1)将所有航班视作一个虚拟航班波中的航班,按照参数 $p_i, i \in I$ 确定航班序列,将航班指派到其最早可用的时隙中;

(2)在存在多个航班波时,以各航班波的尾航班的实际到达时刻的先后次序确定航班波压缩顺序;

(3)对指派序列进行部分修正。算法过程示意图如图 1 所示。

对排序中的每个真实航班波的最后一个航班尽量向前逐步移动,移动的长度不超过该航班波的前一个航班或不可使用的时隙,向前移动时比较移

动后的方案是否比原指派方案更优,如果更优,则移动,否则不移动。

对于移动中所涉及的非该航班波的航班保持其顺序不变;对于航班波的其他航班也采用步骤(3)的方法尽量向先移动。

对于首航班则移动的长度以不超过最早时隙或不可使用的时隙为限。

(4)如果压缩过程改变了航班序列,则转步骤(2);否则取航班波序列的后一个航班波作为压缩对象,转步骤(3);如果航班波序列已经没有航班波时就得到一个优化的指派方案。

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
航班	F12	F11	F18	F20	F17	F22	F27	F26	F13	F16	F21	F14
航班波	2	1	4	3	3	4	5	5	1	2	4	1

↓

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
航班	F12	F11	F18	F20	F17	F22	F27	F26	F13	F14	F16	F21
航班波	2	1	4	3	3	4	5	5	1	1	2	4

↓

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
航班	F12	F11	F13	F14	F18	F20	F17	F22	F27	F26	F16	F21
航班波	2	1	1	1	4	3	3	4	5	5	2	4

↓

时隙	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
航班	F11	F13	F14	F12	F18	F20	F17	F22	F27	F26	F16	F21
航班波	1	1	1	2	4	3	3	4	5	5	2	4

图 1 航班波 1 的压缩过程

3 算例分析

某家航空公司某日在枢纽机场在 9:00~13:40 时段内计划到达 17 个航班,航班及航班波信息见表 1,由于机场受到天气影响造成流量大幅度下降,空管部门重新分配了航空公司可以使用的时隙为 11 个,其时隙资源具体情况见表 2。从表 2 可看出时隙数量少于表 1 中的航班数量。各航班之间旅客中转人数见表 3。假定所有航班的签转率为 40%。取消航班可以视作航班延误 480 min,旅客签转延误为 120 min。

依据本文所建模型与算法,在 VC++ 平台上开发程序可以在 3.11 s 内得到优化的航班时隙指派方案见表 4。如果采用传统的先到先服务方式

表 1 航班与航班波信息表

航班	航班人数	计划到达时刻	航班波	航班	航班人数	计划到达时刻	航班波
F11	150	9:00	1	F20	218	11:55	3
F12	165	9:30	2	F21	156	12:00	4
F13	145	9:55	1	F22	140	12:15	4
F14	130	10:15	1	F23	100	12:30	4
F15	120	10:45	2	F24	95	12:40	5
F16	117	10:55	2	F25	88	13:10	5
F17	163	11:00	3	F26	170	13:30	5
F18	186	11:20	4	F27	210	13:40	5
F19	118	11:40	3				

表 2 时隙信息表

时隙号	初始时刻	变更时刻	时隙号	初始时刻	变更时刻
1	9:00	10:20	7	11:00	15:30
2	9:30	12:20	8	11:20	15:50
3	9:55	13:40	9	11:40	16:10
4	10:15	14:20	10	11:55	16:40
5	10:45	14:40	11	12:00	17:00
6	10:55	15:10			

表 3 航班波中转信息表

转出航班	转入航班	转出人数	转出航班	转入航班	转出人数	转出航班	转入航班	转出人数
F11	F13	14	F18	F21	11	F23	F21	7
F11	F14	20	F18	F22	14	F23	F22	14
F12	F15	18	F18	F23	8	F24	F25	15
F12	F16	25	F19	F17	21	F24	F26	10
F13	F11	18	F19	F20	16	F24	F27	16
F13	F14	32	F20	F17	19	F25	F24	22
F14	F11	26	F20	F19	22	F25	F26	7
F14	F13	19	F21	F18	31	F25	F27	13
F15	F12	22	F21	F22	27	F26	F24	20
F15	F16	33	F21	F23	12	F26	F25	11
F16	F12	12	F22	F18	11	F26	F27	9
F16	F15	18	F22	F21	14	F27	F24	18
F17	F19	36	F22	F23	16	F27	F25	14
F17	F20	14	F23	F18	13	F27	F26	12

表 4 优化的航班时隙指派方案

时隙号	FCFS		SA	
	航班号	航班波	航班号	航班波
1	F11	1	F12	2
2	F12	2	F20	3
3	F13	1	F17	3
4	F14	1	F19	3
5	F15	2	F27	5
6	F16	2	F18	4
7	F17	3	F22	4
8	F18	4	F21	4
9	F19	3	F23	4
10	F20	3	F26	5
11	F21	4	F24	5
目标值/min	681 984		533 668	

(FCFS)安排航班时隙,那么旅客总延误时间为 681 984 min。通过航空公司二次指派旅客总延误时间 533 668 min,可以减少总延误时间 21.7%。

4 结束语

本文研究了在 CDM 机制下,由于机场遭受恶劣天气及严重的流量控制造成时隙资源受到大幅度的削减情况下,航空公司对时隙进行二次指派的问题。由于航空公司的运作过程采用航班波运行方式,所以本文从实际出发建立了基于航班波的指派模型。由于问题求解涉及了航班选择与时隙指派两个方面,从实时决策的要求出发设计了一种基于模拟退火的启发式算法,该算法效率较高,可以在很短的时间内取得满意的优化效果。

参考文献:

[1] 张荣,周小数. CDM 时隙初始分配公平性研究[J]. 指挥信息系统与技术,2010,1(2):51-55.
Zhang R, Zhou X S. Study on equity of initial slot allocation in CDM[J]. Command Information System and Technology, 2010,1(2):51-55.

[2] 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 Q, Zhang X J, Liu Z K, et al. Slots allocation in CDM GDP[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1043-1045.

- [3] 徐肖豪,李雄. 航班地面等待模型中的延误成本分析与仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 115-120.
Xu X H, Li X. Cost analysis of flight delays and simulation in ground-holding model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(1): 115-120.
- [4] 胡明华,徐肖豪,陈爱民,等. 空中交通流量管理中的多元受限的地面等待策略问题研究[J]. 航空学报, 1998, 19(1): 78-82.
Hu M H, Xu X H, et al. Multiple unit ground holding strategy problem research in air traffic flow management[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(1): 78-82.
- [5] 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 H H, Hu M H. Multi-objection optimization allocation of aircraft landing slot in CDM GDP[J]. Journal of Systems & Management, 2009, 18(3): 302-308.
- [6] Vossen T, Ball M. Slot trading opportunities in collaborative ground delay programs[J]. Transportation Science, 2006, 40(1): 29-43.
- [7] Rassenti S J, Smith V L, Bulfin R L. A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation[J]. Journal of Economics, 1982, 13(2): 402-417.
- [8] Hamsa B. Techniques for reallocating airport resources during adverse weather[C]//Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans LA, USA: IEEE, 2007: 2949-2956.
- [9] 王飞, 徐肖豪. 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.
Wan G Fei, Xu Xiao hao. Combinatorial auction winner determination model and algorithm in GHP slot allocation problem[J]. Systems Engineering, 2010, 28(2): 30-35.
- [10] 范晔,周泓. 作业排序模拟退火算法影响因素分析和一种多次淬火模拟退火法[J]. 系统工程理论方法应用, 2003, 11(1): 72-76.
Fan Ye, Zhou Hong. On effective factors of simulated annealing algorithm on job-shop scheduling and an lgorithm with repetitious quenching[J]. Systems Engineering & Theory Methodology Applications, 2003, 11(1): 72-76.

