时隙分配算法在 CDM GDP 程序中的应用

周 茜 张学军

(北京航空航天大学 理学院, 北京 100083) (北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

柳重堪

(北京航空航天大学 理学院, 北京 100083)

摘 要: 机场容量由于恶劣天气等突发原因受到限制导致大面积航班的延误,带来了巨大的经济损失. CDM(Collaborative Decision Making) GDP(Ground Delay Procedure)就是解决这类突发情况的空中交通流量管理程序. 就其核心问题——时隙分配,在现有的时隙分配算法基础上,引入航班延误损失系数,使得算法以延误损失替代延误时间,提出了 2 种基于该系数的时隙分配算法. 最后,用 java 语言进行了仿真实验,引入了评判函数来选择在总延误损失和延误损失分配的公平性上最佳满足决策者要求的分配结果.

关 键 词: 协同决策; 地面延误程序; 时隙分配

中图分类号: U 8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1043-03

Slots allocation in CDM GDP

Zhou Qian

(School of Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhang Xuejun

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Liu Zhongkan

(School of Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: When encounters bad weather, airport capacity is far exceeded by the demand and the resulting delays are a financial and psychological burden for airlines and passengers. CDM(collaborative decision making) GDP(ground delay procedure) is the right Air Traffic Flow Management procedure to settle such special problems. To its main problem-slots allocation, a delay cost coefficient was introduced to current two algorithms. Then two new method had been put forward to handling this problem. In the end, an experimental simulation was done in java language. By using a evaluation function, one can easily find out the best result which meet the decision maker's request both in total delay cost and equity.

Key words: collaborative decision making; ground delay procedure; slots allocation

自 20 世纪 90 年代以来,民航可用空域资源与空中交通密度快速增长的矛盾日益突出,日趋严重的航班延误加重了经济损失和不良社会影响,空中交通拥塞特别是机场容量由于恶劣天气等原因受到限制导致的大面积飞行延误已经成为我国当前最突出的空中交通问题. 为了适应未来的空中交通需求,特别是 2008 年奥运会的空中交通需求,机场拥塞已经成为我国当前亟待解决的问题[1].

协同式地面延误程序(CDM GDP)是一种安全高效的机场流量优化管理措施,它是对一般地面等待延误程序 GDP 的加强与升级,它通过与协

收稿日期: 2005-11-01

作者简介: 周 茜(1981-),女,四川成都人,硕士生, allyjoel@ hotmail. com.

同决策(CDM)技术的融合,使得地面等待延误程序分配的时隙更趋向合理化[2]. CDM GDP针对某个降落机场,当该机场由于降落容量降低而出现机场的容量和降落航班的需求不平衡时,通过一定的时隙分配算法为延误的航班分配降落时隙,使之在起飞机场等待,避免了改航、备降和空中等待等问题,提高了安全性,降低了费用,减小了航班的总延误.

1 CDM GDP中的时隙分配问题

时隙实际上是根据相应的规定,某天某个机场可以提供给航班的可用预定起飞或降落时间. 机场在某个时间段时隙的多少取决于机场跑道的个数、当时天气以及能见度情况、机场终端区容量等条件[3]. CDM GDP程序的核心问题是如何有效地分配时隙资源从而达到最优化利用的问题. 它可以描述为:某机场某时间段内有 n 个时隙资源,并且在该时间段有 m 架航班等待降落,每个航班只可以分配一个时隙并且必须得到一个时隙,每架航班分配给不同的时隙带来的延误损失不同,CDM GDP需要在众多的时隙分配方案中找出决策者认为最佳的一种分配方式. 显然,对于该问题,根据决策者不同的评判标准将呈现出不同的解决方案. 下面规定2个评判标准.

1) 尽量减小航班总延误损失. 总延误损失越小表示分配结果越好,反之分配结果越不可取.

2) 使得延误损失分配尽量平均. 用延误损失标准差表示:标准差越大表明延误损失分配越不平均;反之,延误损失分配越平均.

2 时隙分配算法设计

在CDM GDP程序中,时隙的划分主要依据当时机场的容量,例如13:00到14:00期间,某机场容量为6架/h,则创建出10 min为一间隔的时隙:13:00,13:10,13:20,…. 在程序执行时间内不能安排降落的航班依次堆积在此后的时段中,直到所有航班都能降落为止. 具体描述时隙分配算法之前,首先有下面的符号规定:

F——所有包含在CDM GDP程序中的航班集合;

T_f——表示航班 f 的计划降落时间;

$S=\{s_1,s_2,\cdots,s_n\}$——时隙集合,其中 $s_i=t_i$,t_i 表示时隙 s_i 代表的实际时间;

$\phi:F\to S$——映射 $\phi(f)=s_i$ 表示将航班 f 分配给时隙 s_i.

由于机型的不同以及各航班的重要程度不同,相同的延误时间会造成不同的延误损失,传统的RBS(Ration By Schedule)算法得出的总延误时间最小的分配方法不一定是总延误损失最小的分配方法. 本文引入了延误损失系数 α_f 来表征单位时间内航班 f 的地面以及空中费用. 下面给出2种基于延误损失系数的时隙分配算法.

2.1 延误损失系数优先级RBS算法

延误损失系数优先级RBS算法对航班的分组基于其延误损失系数:在航班集合 F 上定义一个等价关系R. 如果 $\alpha_i=\alpha_j$,则航班 i 与航班 j 具有关系R,记作 i R j. 由等价关系R将集合 F 分组. 同一组的航班其航班延误损失系数相同. 航班延误损失系数越高其优先级越高. 延误损失系数优先级RBS算法描述如下:

步骤1 所有包括在调度程序中的航班集合 F 按照延误损失系数优先级分组 $F=F_1\cup F_2\cdots\cup F_i\cdots\cup F_n$($i$ 越大表示延误损失系数越高,其优先级也越高),$\bar{S}:=S$ 表示未分配的时隙集合.

步骤2 对每一个 F_i 按照 T_f 排升序,令 $j=n$. 转到步骤3.

步骤3 如果 $F_j\neq\Phi$,令 $f:=\arg\min_{f\in F_j}T_f$,$s_i:=\arg\min_{s_i\in\bar{S},T_f\leqslant t_i}t_i$,$\phi(f)=s_i$,$\bar{S}=\bar{S}/\{s_i\}$,$F_j=F_j/\{f\}$,重复执行步骤3. 如果 $F_j=\Phi$,则执行步骤4.

步骤4 令 $j=j-1$. 如果 $j=0$ 则算法结束,否则重复执行步骤3.

2.2 二次自然增长延误算法

2000年Howard提出了一种不同于RBS思想的航班时隙分配标准,基于此标准的时隙分配算法就是自然增长延误法(Accrute-Delay-Based Slot Allocation). 它的时隙分配思想是:如果2个航班同时竞争1个时隙,那么将时隙分配给积累延误损失最大的那个航班.

可证明自然增长延误算法得到的分配字典式地使最大延误时间达到最小[4]. 也就是说,如果2个航班总延误为100 min,则在该分配方法下总是倾向于分别分配50 min给2个航班,而不是一个分配40 min的延误,另一个分配60 min的延误.

由于航班延误损失系数 α_f 的引入,通过自然增长延误算法得到的分配结果不一定是最大延误损失最小的分配:对于第 i 个时隙 s,设航班 f 是所有可以满足时隙 s 的航班中使得延误损失最大的一个,即 $f:=\arg\max_{T_f\leqslant t_s}\alpha_f(t_s-T_f)$. 又设时隙间隔时间为 T,则 f 分配给 s 下个时隙 c 的延误损失为 $\alpha_f(t_s+T-T_f)$,航班 g 是所有可以满足时隙 c 的航

班中使得延误损失最大的一个,即 $g:=\arg\max_{T_g\leqslant t_s+T}\alpha_g(t_s+T-T_g)$,则有 $\alpha_f(t_s-T_f)>\alpha_g(t_s-T_g)$ 且 $\alpha_f(t_s+T-T_f)<\alpha_g(t_s+T-T_g)$,由自然增长延误法得到 $\phi(f)=s,\phi(g)=c$. 如果交换它们的分配结果令 $\phi(f)=c,\phi(g)=s$. 显然有下式成立:

$$\alpha_g(t_s+T-T_g)>\alpha_f(t_s+T-T_f)>\alpha_f(t_s-T_f)>\alpha_g(t_s-T_g)$$

即后者分配结果得到的最大延误损失更小. 因此这里提出了二次自然增长延误法.

设已经分配了前 $i-1$ 个时隙,对第 i 个时隙 s_i 执行下列步骤,直到 $i=n+1$ 时程序结束:

步骤 1　计算所有可以满足时隙 s_i 且未分配时隙的航班(设该航班集合为 $F'=\{f_1,f_2,\cdots,f_k\}$)分配给该时隙以及分配给它下一个时隙 s_{i+1} 的延误损失:$c_{ig},g\in F'$ 以及 $c_{i+1,g},g\in F'$.

步骤 2　令 $p:=\arg\max_{p\in F'}c_{ip}$,$q:=\arg\max_{q\in F'}c_{i+1,q}$(即 p,q 分别是使得 c_{ip} 及 $c_{i+1,q}$ 最大的 p 和 q),当 c_{ij} 最大值有 2 个以上时,选择相应 c_{i+1} 较大的航班作为 p,同理有 q 在这种情况下的取值.

步骤 3　如果 $p=q$,则 $\phi(p)=s_i$,即把 p 分配给 s_i. 否则 $\phi(q)=s_i$,即把 q 分配给 s_i.

注:当分配完第 $n-1$ 个时隙时,则第 n 个时隙就分配给最后一个未分配时隙的航班.

3　实验仿真

本实验使用 java 语言进行编程,数据样本来自中国国际航空票务网. 实验中,堆积的航班按照同样的时隙划分标准被安排在后面的时段降落. 总延误损失以及延误损失标准差分别用 $C=\sum_{f\in F}\alpha_f(\phi(f)-T_f)$ 和 $\sigma=\sqrt{\sum_{f\in F}(d_f-\bar{C})^2/n}$ 计算,其中 $d_f=\alpha_f(\phi(f)-T_f)$ 表示航班 f 的延误损失,$\bar{C}=C/n$ 表示平均延误损失. 分别使用前文所述的 2 种时隙分配算法以及现行算法对此数据进行时隙分配,结果见表 1.

表 1　3 种算法时隙分配结果

算法	总延误损失	延误损失标准差
延误损失 RBS	412.5	89.5
二次自然增长延误	452.5	70.2
现行算法	557.5	119.1

从实验结果可知,对于总延误损失来说:$C_1<C_2<C_3$,即延误损失优先级 RBS 算法得到总延误损失在 3 种算法中是最小的,而对于航班的延误损失标准差来说:$\sigma_2<\sigma_1<\sigma_3$,即二次自然增长延误算法得到的结果在 3 种算法中是最优的. 显然,现行的算法无论是从总延误损失还是延误损失标准差来说都不如延误损失优先级 RBS 算法和二次自然增长延误算法,而后 2 种算法的优劣,则需要进一步的判定. 由前文的叙述中知道,根据决策者对 2 个评判标准的不同重视程度,将呈现不同的解决方案,为了描述决策者不同的重视程度,本文引入评价函数:$f=\omega C+(1-\omega)\sigma$,其中$0<\omega<1$,由评判函数得到的结果可以选出对于决策者最优的分配方案:若 $\omega=0.7$,则有 $f_1=315.6$,$f_2=337.8$,$f_3=425.99$. 由此可见,在这种决策条件下,由 RBS 算法得到的分配结果对于决策者来说更优. 取 $\omega=0.3$,则有 $f_1=186.4$,$f_2=184.9$,$f_3=250.6$. 在这种决策条件下二次自然增长延误算法得到的分配结果对于决策者来所更优.

4　结束语

综上所述,一般情况下,延误损失优先级 RBS 算法和二次自然增长延误算法得到的分配结果之一是对于决策者来说最优的分配方法,这两种分配方法得到的结果在总延误损失和延误损失分配的公平性上各有优劣. 本文通过引入评判函数 $f=\omega C+(1-\omega)\sigma$ 来表征决策者对 2 个评判标准的不同重视程度,将决策者的喜好量化,就可以从这 2 个较优的分配方案中选出决策者在该喜好下的较优解. 通过评判函数评价延误损失系数优先级 RBS 算法和二次自然增长延误算法得到的分配结果最终得到决策者最满意的最优解,这种方法比起传统的决策方法在总延误损失和延误损失分配的公平性的取舍上更加的灵活、有效.

参考文献(References)

[1] Tan Guang, Zhang Jun, Zhang Xuejun, et al. Concepts in constructing CDM system[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Electronics in the Air Transport Industry, 2003

[2] 周沁,张军,张学军. 机场流量管理模型的公平性与有效性研究[J]. 中国科技信息,2005(4):126
Zhou Qin, Zhang Jun, Zhang Xuejun. Equity & effectiveness study of airport flow management mode[J]. China Technology Information, 2005(4):126(in Chinese)

[3] DotEcon Ltd. Auction airport slots[R]. Report for HM Treasury and the Department of the Environment, Transport and the Regions, 2001

[4] Michael Ball, Robert Hoffman, Thomas Vossen. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs[C], 2002

(责任编辑:朱丽萍)