

协同决策起飞排序系统^①

刘馨阳, 李 毅

(四川大学 计算机学院, 成都 610065)

(四川大学 国家空管自动化系统技术重点实验室, 成都 610065)

摘 要: 为弥补目前国内民航空中交通运输自动化系统相对缺失的状态, 实现空中交通运输参与部门协同决策航班数据, 完成自动化航班起飞排序, 协助管制员进行起飞调度决策, 提出了协同决策起飞排序系统的总体框架. 阐述了该系统的工作流程、核心模块结构设计、航班起飞约束条件和自动化起飞排序调度算法. 根据用户角色职责制定用户权限, 参与信息共享和航班数据协同决策. 设计基于滚动时域方法的航班起飞协调调度算法, 加以尾流和空中流量控制等安全约束, 得到优化的待起飞航班序列, 并采用时隙表方式直观的将航班序列展示给用户. 最后, 介绍了该系统的实际运行状况, 结果表明, 系统可以完成多用户协同决策、实现航班起飞管理自动化、为管制员决策提供依据.

关键词: 协同决策; 协同放行; 起飞排序; 滚动时域; 时隙表

Collaborative Decision for Departure Sequencing

LIU Xin-Yang, LI Yi

(School of Computer Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(National Key Laboratory of Air Traffic Control Automation System Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes a collaborative decision framework for departure sequencing, which can remedy the defect of air transportation automation system and make it come true that scheduling departure aircraft automatically under air transportation departments' collaborative decision-making of flight data, assisting controllers for take-off scheduling decision. A general framework of collaborative decision taking off scheduling system is proposed. The details of framework that include the flow work of system, core module structure design, the constraint conditions of flight departure and the scheduling algorithm of the automatic take-off are described. User permissions are determined by their roles and responsibilities, who can participate in information sharing and flight data collaborative decision making. In addition, the framework adopts automatical departure scheduling algorithm with wake stream and air flow constrains which is designed by rolling horizon procedure, getting the optimized flight sequence to take off, the time slot table being used to display the flight sequence to the user directly. Finally, the actual operation situation of the system shows that the system can complete the multi-user cooperative decision-making, realize the automation of flight management and provide the basis for ATC decision.

Key words: collaborative decision; collaborative release; departure sequencing; rolling horizon procedure; time slot table

航空交通作为拥有持续增长点的社会经济领域目前正面临着全新的挑战. 据国际民航组织统计, 在1997-2012 年的15年内, 全球航空交通总量增加一倍,

而在之后的15年内会再翻一番, 到2032年, 全球公里乘客利润量将达到14万亿美元^[1-3]如此庞大的航班、旅客数量以及迅猛增长的经济效益, 使得由于航班延

^① 基金项目: 国家空管委科研课题(GKG201403004)

收稿时间: 2016-03-28; 收到修改稿时间: 2016-05-08 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005494]

误而造成的经济等方面的影响日益显著。单独由空管局控制、管制员协调终端区内所有航班起降的传统模式已无法适应当前庞大的航班数量,这不仅给管制员带来了相当大的工作压力,同时单方面的协调也很难保证各方利益损失最小化。

协同决策(Collaborative Decision Making, CDM)技术的提出几乎完美的解决了由于管制员、运管部门、航空公司、机场等方面无法及时沟通导致的信息不对等状况。本文针对该技术介绍了协同决策起飞排序系统的具体实现过程,并引入了航班状态显示、协同放行航班起飞排序、终端区资源时隙分配表显示等功能。采用了分布式数据库概念,对重要数据及模块设备设计了冗余,以达到高稳定性、可靠性和高安全性的特点。

1 协同决策及协同放行

1.1 协同决策

协同决策是一种实施在管制、运管、机场、航空公司等组织之间,以及各组织内部的,实现信息交流、数据资源共享的联合协作运行理念。它提高控制交通管理效率,同时确保了参与空中交通流量管理及实施的各部门获得实时、准确的信息,以减小延误损耗,实现航空公司利益最大化^[4]。

1.2 协同放行

协同放行是基于协同决策机制下的离场航空器放行排序工作,通过协同决策机制保证航空段流量最佳,且通过相应区域的航空器不超过限制,尽可能的提高机场跑道和空域资源的利用率。其主要特点是:通过多主体联合运行和协同决策机制,减小离港航空器在关舱门后的等待时间,并能在空中交通流量出现限制时,有效的在终端机场控制航空器的离港时间,将经济代价和安全代价相对较高的空中等待转化为地面等待,降低了由于突发情况或天气状况影响带来的延误代价^[5]。

1.3 国内外现状

美国是最早提出并使用协同决策机制的国家,该决策机制是美国实施“自由飞行”项目第一阶段的五个核心成果之一。协同决策系统由 CDMnet, CDM Message(协同决策报文), Flight Schedule Monitor(航班计划监视)和 Aggregate Demand List(时隙需求传输队列表)四个组件构成^[6-8]。在该套系统的协助下,改变了传统中由指挥中心下达命令,航空公司被动接受的局面,

使航空公司等更多地参与到决策过程中,大大提高了他们的主动性和运作的灵活性,并在满足各方利益需求、减少航班延误率等方面都有了大幅度的改善。

目前我国对协同决策系统的设计和研发,往往只集中在实现民航领域工作流程中各参与者之间的数据共享上,然而在实际中仅实现数据共享的协同决策系统并不能真正达到减小管制员压力、保证各方利益最大化等的目的^[9,10]。

因此,本文针对目前国内协同决策系统的不足,借鉴美国较为成熟的决策概念结合我国民航航空系统的实际情况,设计并实现了 CDM 协同决策起飞排序系统。该系统在完成航空管制部门、航空公司等方面的数据共享的基础上,加入了各部门对预关时间、协关时间、任务性质、实关时间等的协调调整,并实现了对待离港航班的实时排序,给出满足航班尾流影响、航空流量控制等安全约束因素的起飞序列。

2 系统总体框架及工作流程

CDM 协同决策起飞排序系统包含信息共享、协同决策、流量控制、时隙显示和起飞排序五个功能模块,并根据各部门职能为其分配了相应的权限,通过权限设制实现协同决策不同角色的参与。

2.1 系统框架设计

本系统采用 QT 和 C++语言设计开发,系统架构包含协同决策平台、航班计划接收及航班排序系统以及数据平台,如图 1 所示。

其中,协同决策平台为各部门系统用户提供界面显示、操作窗口,包含信息共享、协同决策、流量控制、时隙显示四个功能模块。用户通过该平台可直观的观查到航班各项信息及实时动态,实现用户之间的数据信息共享。并可根据自身职能权限参与协同决策,申请、审批或录入相关航班数据信息。运管部门通过流量控制模块发布流量信息,为航班排序提供相关约束条件。时隙显示模块是对完成排序的离场航班序列的图像信息显示。

CDM 协同决策起飞排序系统的航班计划数据来源为领航计划报文(FPL)和 ACARS 报文。航班计划接收及排序平台的其中一个功能便是接收和处理来自发报终端发送过来的 FPL 和 ACARS 报文,并将处理好的数据存放到数据平台中以备后续使用。航班计划接收及航班排序平台的另一个功能是为待离港航班进行

排序. 根据原有航班计划及各部门参与协调产生的协调时间为待离场航班计算相应的离场时间序列, 管制员依据该航班序列安排航班离港. 航班计划接受及航班排序平台的另一个功能是为待离港航班进行排序. 根据原有航班计划及各部门参与协调好的协调时间为待离场航班计算相应的离场时间序列, 管制员依据该航班序列安排航班离港.

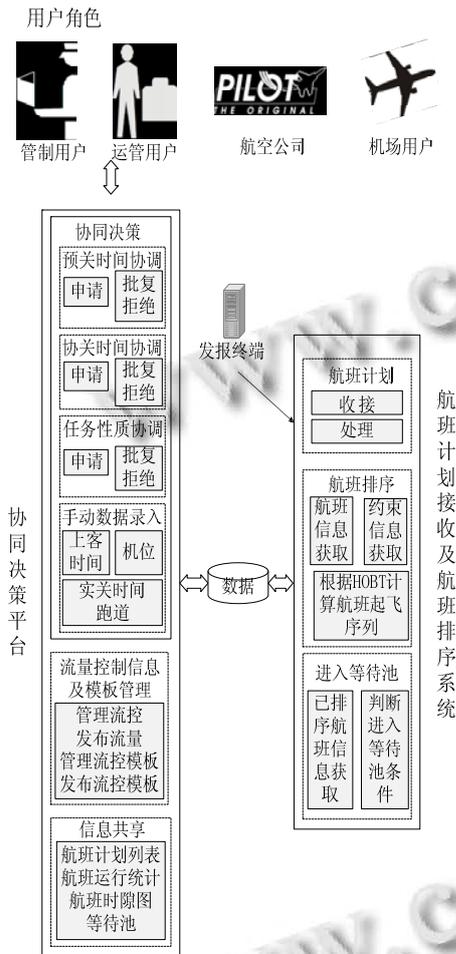


图1 CDM 协同决策起飞排序系统总体框架

数据平台则负责存储相应航班计划、变化等数据. 除本系统包含的模块外, CDM 协同决策起飞排序系统还涉及使用了发报终端、报文解析系统, 负责航空报文的发送和解析.

2.2 用户权限设计

CDM 协同决策起飞排序系统为其用户设置了如表 1 所示的权限.

表 1 CDM 协同决策起飞排序系统用户权限

	管制	运管	航空公司	机场
预关时间协调				
申请			√	
批复	√			
拒绝	√			
协关时间协调				
申请			√	
批复	√			
拒绝	√			
任务协调				
申请			√	
批复		√		
拒绝		√		
手动录入数据				
上客时间			√	
实关时间	√	√	√	√
跑道	√	√	√	√
机位				√
流量控制信息及模板管理				
发布管理流控		√		

在系统用户权限设置中, 航空公司用户有申请更改预关时间、协关时间和任务性质的权限, 并可手动录入上客时间、实关时间和跑道信息数据; 管制用户负责对航空公司申请更改的预关时间和协关时间进行审批, 并可手动录入实关时间和跑道信息数据; 运管用户负责批复航空公司申请的任务性质更改, 手动录入实关时间和跑道信息数据, 并可发布和管理流量控制信息及流量控制模板; 机场用户仅有对实关时间、跑道信息和机位信息录入的权限.

2.3 系统工作流程

CDM 协同决策起飞排序系统工作流程如图 2 所示.

系统接收到来自发报终端发送的航空计划报后提取相应信息, 显示在协同决策数据共享界面上. 系统在当前时间距离预起时间 50 分钟内发布航班的协调关门时间(HOBT). 航空公司根据航班实际状况申请调整协关时间. 管制员在结合全局航班状况下批复或拒绝航空公司对协关时间的调整申请. 系统根据更改的协关时间计算协调起飞时间. 航班起飞排序系统定时读取计算好的距当前时间 40 分钟内的待起飞航班和尾流、当前时段流量控制等约束条件, 对待起飞航班

进行排序,为其指定合适的起飞时隙.按时接收到实际关门时间(AGCT)后,根据实关时间和约束条件计算推出时间,重新对航班序列进行排序并将航班状态置为已关门;若未按时收到实关时间,将航班放入等待池,对航班序列重新排序.若系统按时收到航班起飞报,将航班显示状态置为起飞;若未按时收到起飞报,则将航班放入等待池.管制员根据等待池中航班的实际状况重新填写协关时间,航班移出等待池重新加入起飞排序队列.

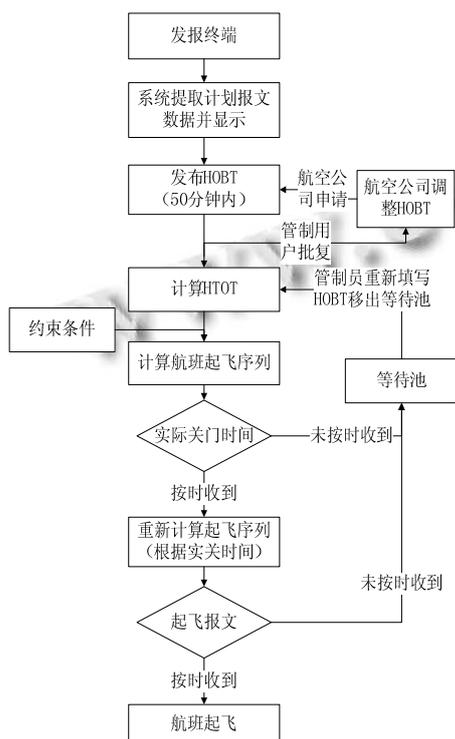


图2 CDM协同决策起飞排序系统工作流程图

3 起飞排序设计与实现

起飞排序功能是 CDM 协同决策起飞排序系统中的一个实现重点.为待起飞航班分配满足约束条件的时隙序列,避免航班飞行冲突的发生,并尽量减小航班的延误率.

3.1 约束条件

1) 尾流约束

在民用航空运输飞行中规定,禁止航空器使用同一跑道对头、并排、编队和跟踪起飞,即连续起飞的航空器间必须留有一定的间隔.该间隔主要受航空器尾流影响,国际民航组织 ICAO 规定了进场飞机之间的安全间隔^[11],如表 2 所示.

表 2 尾流间隔标准

前机类型	后机间隔时间/s		
	重型(H)	中型(M)	轻型(S)
重型(H)	113	135	170
中型(M)	89	89	110
轻型(S)	83	83	94

2) 流量控制约束

在实际情况下,空域段和终端机场区域的容量往往会因为天气、航空管制等因素而改变.而当即将进入该空域段或终端区的航班数量大于其容纳量时,航班需要在区域外等待,直至区域中有接纳其空间时才可驶入.航班在空中等待由于燃油消耗等产生的代价远大于地面等待,且航班长时间在空中盘旋易引发交通事故,因此,为了减少航班等待时产生的代价、保证航班飞行安全,设计将航班可能产生的空中等待转化为地面等待.根据运管部门发布流量控制信息,为受影响的航班设定等待时间,并延后相应时间起飞.流量控制信息显示如表 3 所示.

表 3 流量控制信息

序号	开始时间	截止时间	受限降落机场	受限间隔(min/架)
1	15:30	16:30	ZBAA	10
2	11:20	13:00	ZSHC	5
3	14:00	16:00	ZBHD	20

3.2 航班起飞调度算法

为满足航班排序的实时性和高效性,航班起飞排序模块采用一种基于滚动时域方法的航班起飞调度算法.该算法在传统的先来先服务(FCFS)算法的基础上加入了尾流约束和航空流量控制约束限制,并采用滚动时域的方法来控制计算时间和资源上的消耗.

3.2.1 问题描述

航班起飞调度算法的主要目的是为航班分配满足尾流约束(见表 2)控制和流量约束(见表 3)控制条件的起飞时间,并给出相应的离场顺序.

根据民航运输飞行规定,相邻航班必须满足相应尾流间隔,所以:

$$t_i - t_{i-1} \geq w_{i-1,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 N 表示目前正在等待起飞的航班总数, t_i 表示为航班 i 分配的离场时间, $w_{i-1,i}$ 为连续航班 $i-1$ 和 i 之间的尾流约束间隔.

由于天气、航空管制等因素,终端区或航路点上的容量会随时发生改变,因此待离场的航班需要满

足如下流量约束:

$$t_i - t_b \geq +f_{b,i}, \quad b = 1, 2, \dots, N-1; \\ i = b, b+1, \dots, N \quad (2)$$

其中航班 b, i 受相同流量控制约束(即经过相同航路点或拥有相同目的地), $f_{b,i}$ 表示流量控制约束间隔.

则根据尾流和流量控制约束计算得到的航班 i 的计算起飞时间 d_i 如下:

$$d_i = t_{i-1} + w_{i-1,i} + f_{b,i}, \quad b = 1, \dots, N-1; \\ i = b, \dots, N \quad (3)$$

其中, t_{i-1} 表示分配给前序航班的起飞时间.

因此, 根据航班不得早于预计离场时间起飞的原则, 分配给航班 i 的离场时间 t_i 为:

$$t_i = \max\{d_i, T_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, T_i 表示航班 i 的预计离场时间(Estimate Time Departure, ETD).

3.2.2 滚动时域方法

为了降低由于数据量大带来的计算时间和计算资源消耗过大的问题, 设计实现了如下图 4 所示的滚动时域方法^[12]. 将连续的离港航班计划起飞时间分为若干时间长度相等的时域段, 并指定滚动时隙间隔长度. 对每一个时域段进行一次航班起飞调度, 然后等待相应的滚动时隙后为下一时域段进行航班起飞调度. 如此往复至所有航班离场.

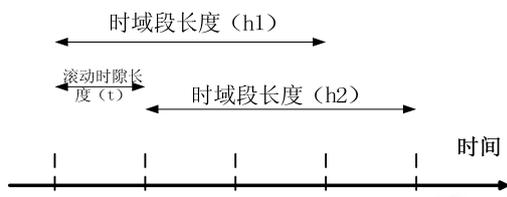


图 4 滚动时域方法

基于滚动时域方法的航班动态起飞调度算法流程图如图 5 所示.

第一步, 获取时域段时间长度 h 和滚动时隙时间长度 t .

第二步, 准备处在当前 T 到 $T+h$ (T 为初始时间) 时域段内的航班数据及约束条件数据.

第三步, 判断航班数据是否为空, 若是则结束; 否则执行第四步.

第四步, 调用航班起飞调度算法为处在当前时域段内的航班分配起飞时间.

第五步, 等待接收协调关门时间(HOBT)更改或实

际关门(AGCT)时间录入, 若收到相关数据, 重复第四步.

第六步, 等待滚动时隙时间长度 t , 重复第二步.

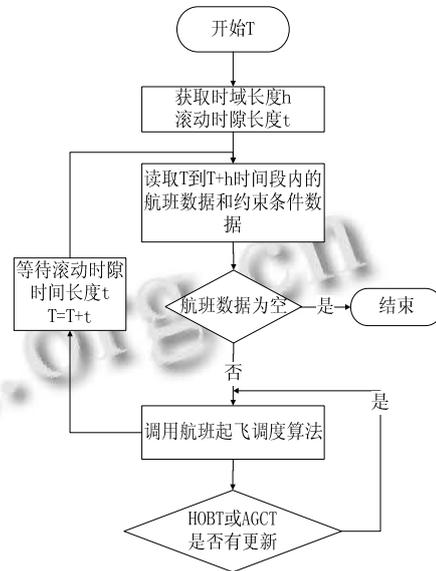


图 5 基于滚动时域方法的航班动态起飞调度算法流程

4 时隙表的设计与实现

航班时隙表显示了动态航班排序后产生的航班队列信息, 其格式如图 6 所示.

3U6891	ZBAA	02L	未关舱门
1540	CZ6162	ZBAA	02L
1535			
1530	CZ6136	ZBAA	02L
1530	MU7648	ZBAA	02L
1500	8L9615	ZSHC	02L
1500	3U6877	ZYHB	02L
			已起飞

图 6 航班时隙表

每条航班都记录了偏离值、航班号、目的机场和跑道信息. 其中, 已起飞的航班偏离值=实际起飞实际 - 预计起飞时间; 已关舱门航班的偏离值=最终起飞时间-预计起飞时间; 未关舱门的航班偏离值=计算起飞

时间-预计起飞时间。

航班记录颜色用来表示航班当前状态。其中，蓝色表示已起飞航班，紫色表示航班为准备状态，绿色代表已关舱门的航班。

5 运行效果验证

测试航班数据来源于 2015 年 10 月 5 日当天 15:30-16:00 间成都离港航班。

5.1 运行界面

各用户根据自己的角色登录后可看到航班资源数据信息共享界面，如图 7 所示。

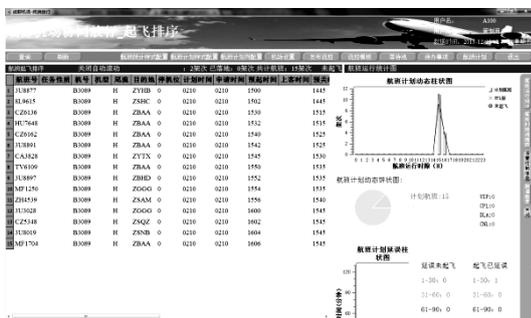


图 7 协同决策起飞排序系统界面

其中功能导航栏含有样式设置、等待池信息查看、待办事项、航班计划等基础信息设置；航班计划协调表格显示的为航班计划的具体信息，包含航班号、任务性质、机号、机型、尾流、目的地、停机位、计划时间、申请时间、预起时间、上客时间、预关时间、协关时间、预推时间、跑道、应答机、实起时间、前段航班号、航班状态信息，供用户查看和协调操作使用；功能切换侧边栏用于切换复合功能显示区显示的信息，包含航班运行统计、航班时段间隔图、流量控制信息等功能。

5.2 航班排序结果

首先接收到由发报终端发送过来的航班计划数据，通过整理后得到计划的初始航班信息数据如表 4 所示。其中航班 1、2 为已起飞航班。

表 4 计划航班数据

序号	航班号	目的机场	尾流	预计起飞时间
1	3U8877	ZYBH	M	1500
2	8L9615	ZSJM	S	1502
3	CZ6136	ZBAA	M	1530
4	HU7648	ZBAA	M	1530

5	CZ6162	ZBAA	M	1530
6	3U8891	ZBAA	M	1540
7	CA3828	ZYTX	M	1545
8	TV6109	ZBAA	S	1550
9	3U8897	ZBDH	M	1550
10	MF1250	ZGGG	H	1550
11	ZH4539	ZSAM	M	1550
12	3U3028	ZGGG	M	1550
13	CZ5348	ZSQZ	M	1600
14	3U8019	ZSNB	M	1600
15	MF1704	ZBAA	M	1600

假定该时段流量控制条件约束如表 5 所示。

表 5 流量控制约束

受限条件 (min/架)	起始时间	截止时间	受限降落机场
5	1430	1700	ZGGG
5	1500	1600	ZSAM

系统根据设定的排序算法和约束条件对航班进行初始排序，排序结果如表 6 所示。

表 6 初始航班排序

序号	航班号	目的机场	尾流	计算起飞时间
1	3U8877	ZYBH	M	1500
2	8L9615	ZSJM	S	1502
3	CZ6136	ZBAA	M	1530
4	HU7648	ZBAA	M	1532
5	CZ6162	ZBAA	M	1534
6	3U8891	ZBAA	M	1540
7	CA3828	ZYTX	M	1545
8	TV6109	ZBAA	S	1550
9	3U8897	ZBDH	M	1552
10	MF1250	ZGGG	H	1554
11	ZH4539	ZSAM	M	1557
12	3U3028	ZGGG	M	1559
13	CZ5348	ZSQZ	M	1601
14	3U8019	ZSNB	M	1602
15	MF1704	ZBAA	M	1604

航空公司申请 TV6109 次航班的协调关门时间调整，由 15:35 调整至 15:30，在管制员批复该请求后，触发航班队列重新排序，序列结果如下表 7 所示。航班 TV6109 次航班的计算起飞时间由原来的 15:50 提前至 15:45。而由于与航班 CA3828 产生尾流冲突，则最后计算起飞时间为 15:47。

表 7 更改协关时间后序列

序号	航班号	目的机场	尾流	计算起飞时间
1	3U8877	ZYBH	M	1500

2	8L9615	ZSJM	S	1502
3	CZ6136	ZBAA	M	1530
4	HU7648	ZBAA	M	1532
5	CZ6162	ZBAA	M	1534
6	3U8891	ZBAA	M	1540
7	CA3828	ZYTX	M	1545
8	TV6109	ZBAA	S	1547
9	3U8897	ZBDH	M	1552
10	MF1250	ZGGG	H	1554
11	ZH4539	ZSAM	M	1557
12	3U3028	ZGGG	M	1559
13	CZ5348	ZSQZ	M	1601
14	3U8019	ZSNB	M	1602
15	MF1704	ZBAA	M	1604

在航班 HU7648 实际关门操作完成后航空公司或管制、运管部门为该航班手动录入实际上客时间,并触发航班序列重新排序。由关门航班优先安排起飞原则,可看出航班 HU7648 的计算起飞时间更改为 15:30,原定由 15:30 起飞的航班 CZ6136 由于未完成关门操作计算起飞时间延后至 15:32,如表 8 所示。

表 8 实关时间录入后序列

序号	航班号	目的机场	尾流	计算起飞时间
1	3U8877	ZYBH	M	1500
2	8L9615	ZSJM	S	1502
3	HU7648	ZBAA	M	1530
4	CZ6136	ZBAA	M	1532
5	CZ6162	ZBAA	M	1534
6	3U8891	ZBAA	M	1540
7	CA3828	ZYTX	M	1545
8	TV6109	ZBAA	S	1547
9	3U8897	ZBDH	M	1552
10	MF1250	ZGGG	H	1554
11	ZH4539	ZSAM	M	1557
12	3U3028	ZGGG	M	1559
13	CZ5348	ZSQZ	M	1601
14	3U8019	ZSNB	M	1602
15	MF1704	ZBAA	M	1604

6 结语

CDM 协同决策起飞排序系统利用航班运行协同决策技术,建立协同决策平台,整合民用航空各参与单位有关航班运行的信息资源,实现航班离港排序等功能。对离港航班进行排序,优化航班离港序列及时处理与发布相关流量控制信息,并将排序结果及运行环境信息发布在时隙显示表和数据信息共享界面上,

使管制、运管、航空公司、机场对本场航班的运行态势有相同的认识,从而促进机场运行更加有序、正常、高效。

本系统的航班排序模块采用简单高效的排序算法,并考虑到了实际环境中产生的航班安全约束条件和限制约束条件,使计算所得序列具有真实性、可靠性和安全性。

随着协同决策功能的不断拓展和深入研究,自动化的航班运行会给航空部门带来越来越大的优势。在此过程中各航空公司间的利益均衡性也应作为一个条件纳入系统功能完善性的考验,因此,下一步的工作可以考虑设计和实现航空公司内部的时隙交换功能,已提高航空公司在决策上的积极性并尽可能的保证航空公司间的利益均衡。

参考文献

- 1 李伟钢,唐朝生,刘鹏,等.航空交通协同决策方法研究.复杂系统与复杂性科学,2015,12(2):46-52.
- 2 Airbus. Airbus global market forecast journeys 2013-2032. <http://www.airbus.com/company/market/gmf2013>. [2014-6-9].
- 3 Goldman R. A-CDM in New York JFK runway construction and impact on operations. Advanced ATM Techniques Symposium and Workshops. Montreal, 2013.
- 4 王亚平.运用 CDM 系统保障航班正常率.电子制作,2014,20:239.
- 5 朱媛,李洁.航班运行协同决策技术及系统实现.信息技术与信息化,2014,(11):180-182.
- 6 闫然.民航协同决策(CDM)概念及分析.中国科技术语,2012,14(6):50-53.
- 7 颜晓东,朱道娴,马辉.美国空中交通流量管理体系及其对我国流量管理建设的启示(二).中国民用航空,2007,(2):42-45.
- 8 Vossen T, Ball M. Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. Naval Research Logistics, 2006, 53(1): 75-90.
- 9 何林,张晶.从空管角度谈协同决策系统运行——华北空管局 CDM 系统建设介绍.中国民用航空,2013,(10):40-41.
- 10 吴峰.西南地区飞行计划统一管理模式的探讨.中国民航飞行学院学报,2013,11(6):24-26.
- 11 陈兴,隋东,张军峰,等.基于动态规划的航班着陆调度算法.航空计算技术,2012,11(6):45-53.
- 12 Samà M, D'Ariano A, Pacciarelli D. Rolling horizon approach for aircraft scheduling in the terminal control area of busy airports. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2013, 60: 140-155.