

灵活使用空域中的空中交通流量分配方法研究

唐志星, 黄山, 潘卫军

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

摘要:建立预战术阶段的临时空域中的空中交通流量分配模型;基于飞行任务之间的差异提出面向我国空域运行机制的流量分配模型求解算法;结果显示:该算法不仅可平衡军民航的空域使用需求,还可在一定程度上降低飞行任务延后时间,压缩空域使用时间,提高空域利用率。

关键词:军用和民用航空;灵活使用空域;空中交通流量分配;社会效益;空域利用率

本文引用格式:唐志星,黄山,潘卫军.灵活使用空域中的空中交通流量分配方法研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(12):90-94.

Citation format:TANG Zhixing, HUANG Shan, PAN Weijun. Research on Scheduling Method for Air Traffic Flow Allocation in FUA[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 90-94.

中图分类号:TJ02;U8

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)12-0090-05

Research on Scheduling Method for Air Traffic Flow Allocation in FUA

TANG Zhixing, HUANG Shan, PAN Weijun

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The pre-tactical air traffic flow allocation model in temporary airspace was built. The scheduling algorithm was proposed based on the differences between military and civil. The simulation results validate the feasibility in balancing the conflicts in airspace usage of the algorithm as well as the efficiency in reducing the delay time and raising the utilization rate of airspace.

Key words: military & civil aviation; FUA; air traffic flow allocation; social benefit; utilization rate of airspace

随着军民航飞行量的急剧增长,现行条块分割、固定使用的静态计划管理模式已严重制约军民航的发展,军民融合发展的国家战略则使得划设临时性空域并灵活使用此类空域的方法逐渐提上日程。空域灵活使用较传统的空域使用方式有较大的差异,它的核心观点是^[1-2]:空域不应再被指定为民用或军用空域,而应看作是一个连续的整体,而且在逐日分配的基础上灵活使用,任何必要的空域限制和隔离都只是临时性的。

王伟等^[3]和张明等^[4]针对空域灵活使用的管理机制及

其指导下的空域规划设计方法开展了深入研究。Xudong Diao等^[5]、刘方勤等^[6]和樊宪标^[7]基于4D航迹、利用0~1整数规划模型,兼顾时隙分配的效率性和公平性,分别研究了空中交通流量和侦察目标的分配问题。这些研究或专注于军民航之间沟通协调机制的建立和民航所辖空域的规划调整,或专注于军民航内部空域的使用效率的提升,鲜有站在第三方角度,根据军民航的空域使用效率,结合国内实际,研究如何合理、公平地满足军民航对临时性空域的使用需求。

收稿日期:2019-03-24;修回日期:2019-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(71874081;U1733105)

作者简介:唐志星(1989—),男,硕士,讲师,主要从事民航安全管理和空中交通管理研究。

1 问题描述

本文所涉及的临时性空域指的是空域灵活使用中的条件航线(Conditional Route, CDR)、临时隔离区(Temporary Segregated Area, TSA)和临时保留区(Temporary Reserved Area, TRA)等。

TSA是具有确定尺寸的块状空域,为供特定用户在确定时间内单独使用而临时隔离或分配的空域,该区域内限制其他任何形式的空中活动。TRA是具有确定尺寸的块状空域,为满足特定用户在确定时间内的特殊空域使用需求而临时地保留或分配的空域,其他空中活动在这期间可在空管允许的条件下通过该区域。CDR为空中交通服务航路网络的一部分,通常与TSA或TRA关联运行,CDR与TSA/TRA关联运行的案例如图1所示。

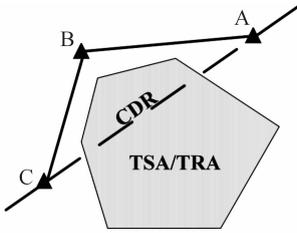


图1 CDR和TSA/TRA关联运行示意图

阴影区域为临时隔离区TSA或临时保留区TRA,穿越阴影区的虚线为连接A、C两点的条件航线CDR。按照军民航运行实际,某一空域同时只能允许军航或民航使用:当军航不使用TSA/TRA时,CDR可供民航使用;当军航使用TSA/TRA时,CDR不可供民航使用,民航飞行需改用CDR(A—C)的备份航路(A—B—C)以绕开该TSA/TRA。

本文旨在研究临时性空域中飞行前一日的空中交通流量分配问题。传统的空域使用中,空中交通流量分配基于预先确定的、固定使用的空域结构,大部分军民航的空域使用需求因空域划分被限定在各自空域内,而在临时性空域所属的空域灵活使用中,空域不再被指定为民用或军用空域,军民航针对同一空域的使用需求冲突可能急剧增加,此类需求的平衡是本文研究的重点。

2 空中交通流量分配模型

国内外空中交通流量分配中,通常以先到先服务(First Come First Served, FCFS)的原则对空中交通流量进行排序,但未考虑飞行任务的不同所带来的社会效益的差异,例如,军航的日常训练飞行和民航的抢险救灾飞行,民航的定期货运飞行和因大面积航班延误而造成的客运加班补班飞行。因此,经过广泛调研,结合国外先进的空域管理现状和理论以及国内空域管理以军方为主的现状,分配临时空域中的空中交通流量时,需要考虑飞行任务之间的差异,以平衡军民

航的空域使用需求。

2.1 基本参数定义

飞行任务集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, t_m 表示某飞行任务的类型。

临时空域集合 $S = \{s^1, s^2, \dots, s^n\}$, s^n 表示某临时空域, $s^n = \{name^n, type^n, capacity^n, openT^n, closeT^n\}$, $name^n$ 、 $type^n$ 、 $capacity^n$ 、 $openT^n$ 和 $closeT^n$ 分别表示该临时空域的名称、类型、单位小时容量、开放时刻和关闭时刻。

$T(type)$:临时空域所接受的飞行任务集合, $T(type) = \{t | \forall t \in T\}$ 。

ea^{s^n} :航空器申报的预计进入临时空域 s^n 的时刻。

sa^{s^n} :航空器被调整的进入临时空域 s^n 的时刻。

ed^{s^n} :航空器申报的预计离开临时空域 s^n 的时刻。

sd^{s^n} :航空器被调整的离开临时空域 s^n 的时刻。

飞行计划集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$, f_i 表示第 i 个飞行计划,其中 $f = (acftN, t, ot^1, ot^2, \dots, ot^n)$, 飞行计划需提供执飞航空器的注册号($acftN$), 飞行任务的类型 t 和对各临时空域的预计占用情况(ot^n)等信息, $ot^n = \{s^n, ea^{s^n}, ed^{s^n}, sa^{s^n}, sd^{s^n}\}$ 。

$Adt_i^{s^n}$:调整后的飞行计划 f_i 进入临时空域 s^n 时的延后量。

$$Adt_i^{s^n} = \max(sa_i^{s^n} - ea_i^{s^n}, 0)$$

$Ddt_i^{s^n}$:调整后的飞行计划 f_i 离开临时空域 s^n 时的延后量。

$$Ddt_i^{s^n} = \max(sd_i^{s^n} - ed_i^{s^n}, 0)$$

Tdt_i :飞行计划 f_i 的批准使用时间相对于申请使用时间的延后量。

$$Tdt_i = \max(\max(Adt_i^{s^n}, Ddt_i^{s^n}))$$

2.2 军民航空域使用需求平衡依据

平衡临时空域中的军民航空域使用需求时,依据飞行任务的社会效益和空域利用率。从空间和时间两个维度^[8-10],计算与飞行计划 f_i 相同类型的飞行对临时空域 n 的利用率 RU_i^n ,以此作为飞行计划 f_i 的空域利用率。

$$RU_i^n = \sum_{f_j \in F_m} (ot_j^n / ot_j^e \times w_t + os_j^n / os_j^e \times w_s) / m$$

其中: F_m 为与飞行计划 f_i 相同类型的飞行集合,该集合中共有 m 个已执行的飞行计划; ot_j^n 为某次飞行对空域的实际占用时间, ot_j^e 为某次飞行对空域的预计占用时间, w_t 为时间维度的空域利用率占总的空域利用率的比重; os_j^n 为某次飞行对空域的实际占用空间, os_j^e 为该次飞行申请的临时空域的体积, w_s 为空间维度的空域利用率占总的空域利用率的比重。

同时,考虑国内空域管理现状中军航的主导地位、军民航飞行任务的差异性、各飞行任务的社会效益缺乏统一的量化标准,平衡军民航空域使用需求时考虑各飞行任务的社会效益之间的相对大小而非数值高低,用 $p_i^{s^n}$ 表示: $p_i^{s^n}$ 数值越小,飞行任务 t 在临时空域 s^n 内社会效益越大;该数值由空域管理部门预先对各飞行任务 t 在临时空域 s^n 内社会效益

的大小进行排序。

2.3 模型设计

分配临时空域中的空中交通流量时,不仅要满足各用户对临时空域的使用需求,意即批准的使用时间相较于申请的使用时间延后量最小,还面临空域类型、空域开放时间和空域容量等方面的约束,此外,允许航空器的进入临时空域的时刻不早于申请的进入时刻,允许航空器使用临时空域的时间不小于申请的使用时间。

1) 目标函数:

$$\min \sum_{f_i \in F} Td_i$$

2) 约束条件:

a) 空域类型约束

$$f.t \in T(f.ot.s.type), \forall f \in F, \forall ot$$

b) 空域开放时间约束

$$f.ot.ea \geq f.ot.s.openT, \forall f \in F, \forall ot$$

$$f.ot.ed \leq f.ot.s.closeT, \forall f \in F, \forall ot$$

c) 单位小时内的空域容量约束

$$\sum_{f \in F} countIf(f.ot^n.s^n.name =$$

$$s.name \wedge !(f.ot^n.sa > time + 60 \vee f.ot^n.sd < time)) \leq s.capacity, \forall s, \forall time$$

其中, $time$ 的单位为分钟,“60”表示“60分钟”。

d) 批准的进入时刻不早于申请的进入时刻

$$f.ot.sa \geq f.ot.ea, \forall f \in F, \forall ot$$

e) 批准的使用时间不小于申请的使用时间

$$f.ot.sd - f.ot.sa \geq + f.ot.ed - f.ot.ea, \forall f \in F, \forall ot$$

3 空中交通流量分配算法

临时空域中的空中交通流量分配问题是一种典型的排序问题,排序理论对此类问题已提出不少解决方法,但是,一些方法单纯的从数学角度出发,从总延误时间或最大延误最小为目标函数建模,没有考虑不同飞行任务间的差异性,得出的排序结果中部分计划的位序交换范围很大,并不适合此类空中交通流量的分配。

因此,基于飞行任务的社会效益和其对空域的利用率大小,结合先到先服务的原则和飞行计划的申报情况,在各实际情况的约束下,以时间调整量最小为目标函数,为各飞行计划分配临时空域的使用时间。算法的基本流程如图2所示。

具体步骤如下:

步骤1 按约束 a) 和约束 b) 遍历所有飞行计划,将同时满足约束 a) 和约束 b) 的飞行计划组成待分配使用时间的集合 F_{to} ,已分配使用时间的集合 $F_{ed} = \emptyset$ 。

步骤2 $\forall f \in F_{to}$,在 f 所申报的临时空域中,根据 f 申报的飞行任务种类,分别提取各飞行任务的社会效益排名 p 和空域利用率 RU 。

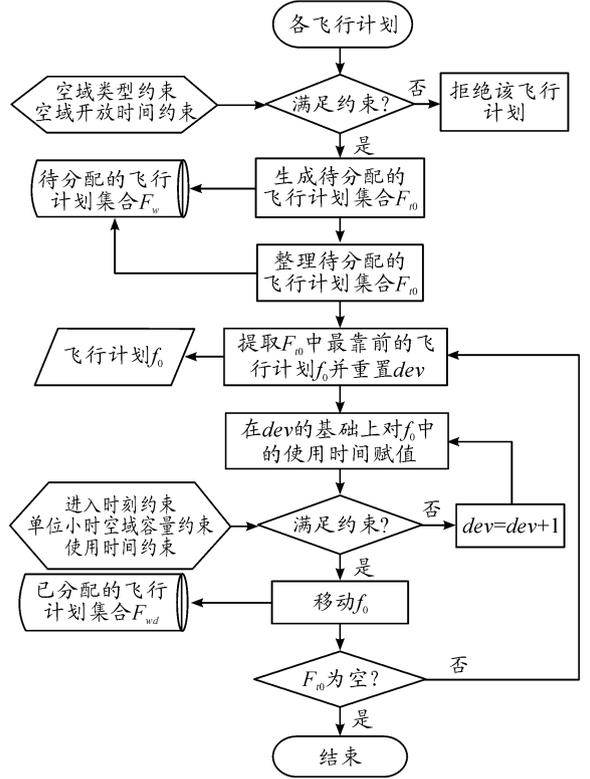


图2 算法流程框图

步骤3 按 RU 从大到小,计算各飞行任务的空域利用率排名 $RU_{序}$ 。

步骤4 令 $pr = p + RU_{序}$,计算各飞行任务的 pr ,并按 pr 大小,升序排列 F_{to} 。

步骤5 取 F_{to} 中排序最靠前的飞行计划 f_o 。

步骤6 若 F_{ed} 为空,遍历 f_o 中的 ot^n , $f_o.ot^n.sa = f_o.ot^n.ea$, $f_o.ot^n.sd = f_o.ot^n.ed$,转至步骤11。

步骤7 若 F_{ed} 不为空,取 $dev = 0$, dev 用于记录飞行计划被延后的时间,单位为分钟。

步骤8 遍历 f_o 中的 ot^n ,令 $f_o.ot^n.sa = f_o.ot^n.ea + dev$, $f_o.ot^n.sd = f_o.ot^n.ed + dev$ 。

步骤9 遍历 f_o 中的 ot^n ,针对 F_{ed} 中所有申报过 s^n 的使用时间 ot^{ed} ,取 $time = ot^{ed}.sa \vee time = ot^{ed}.sd$,运用约束 c)、约束 d) 和约束 e),判断中 f_o 中所有 ot^n 的 sa 和 sd 是否同时通过 F_{ed} 中所有计划的相关 ot^{ed} 的要求。

步骤10 若不通过, $dev = dev + 1$,转至步骤8,将飞行计划延后1分钟并验证是否满足约束;否则,转至步骤11。

步骤11 将 f_o 从 F_{to} 中移除,加入 F_{ed} 的末端。

步骤12 若 F_{to} 不为空,转至步骤5,否则,算法结束。

4 算例分析

针对某 TSA 及相关的 CDR,选取某地区的1h的飞行计划,提取相应空域用户在该地区的历史飞行数据,统计各空

域用户的空域利用率,并将各飞行计划的社会效益大小进行排序,如表1所示。

在第2节的空中交通流量分配模型中,分别依据第3节

的空中交通流量分配算法(简称“本算法”)和FCFS,为表1中各飞行计划分配临时性空域的使用时间,计算结果如表2所示。

表1 申请的飞行计划

飞行计划	申请空域	进入时刻/min	使用时间/min	飞行种类	社会效益排名	空域利用率	飞行计划	申请空域	进入时刻/min	使用时间/min	飞行种类	社会效益排名	空域利用率
计划1	CDR	40	6	客货运输	4	0.67	计划16	CDR	9	6	客货运输	4	0.55
计划2	CDR	6	6	客货运输	4	0.63	计划17	CDR	24	7	客货运输	4	0.60
计划3	CDR	30	8	客货运输	4	0.61	计划18	CDR	2	6	客货运输	4	0.69
计划4	CDR	16	5	客货运输	4	0.57	计划19	CDR	14	5	客货运输	4	0.55
计划5	CDR	20	8	客货运输	4	0.63	计划20	CDR	13	6	客货运输	4	0.57
计划6	CDR	37	6	客货运输	4	0.71	计划21	CDR	10	8	客货运输	4	0.72
计划7	CDR	14	6	客货运输	4	0.6	计划22	TSA	38	15	军事训练	3	0.52
计划8	CDR	31	7	客货运输	4	0.68	计划23	CDR	21	7	客货运输	4	0.58
计划9	CDR	40	6	客货运输	4	0.7	计划24	CDR	6	8	客货运输	4	0.67
计划10	CDR	43	7	客货运输	4	0.67	计划25	CDR	22	5	客货运输	4	0.64
计划11	TSA	33	8	旅游观光	9	0.52	计划26	CDR	21	5	客货运输	4	0.63
计划12	CDR	16	5	客货运输	4	0.60	计划27	CDR	35	5	应急救援	2	0.56
计划13	CDR	32	5	客货运输	4	0.56	计划28	CDR	30	7	客货运输	4	0.70
计划14	CDR	43	6	客货运输	4	0.65	计划29	CDR	13	5	客货运输	4	0.55
计划15	TSA	10	5	军事训练	3	0.64	计划30	CDR	21	7	客货运输	4	0.66

表2 本算法和FCFS的计算结果

飞行计划	本算法/min		FCFS/min		飞行计划	本算法/min		FCFS/min	
	进入时刻	使用时间	进入时刻	使用时间		进入时刻	使用时间	进入时刻	使用时间
计划1	57	6	77	6	计划16	16	6	9	6
计划2	16	6	6	6	计划17	29	7	34	7
计划3	57	8	35	8	计划18	2	6	2	6
计划4	23	5	28	5	计划19	23	5	22	5
计划5	25	8	28	8	计划20	16	6	22	6
计划6	57	6	54	6	计划21	16	8	22	8
计划7	22	6	22	6	计划22	41	15	61	15
计划8	57	7	37	7	计划23	29	7	28	7
计划9	57	6	77	6	计划24	16	8	6	8
计划10	64	7	77	7	计划25	29	5	31	5
计划11	72	8	45	8	计划26	29	5	29	5
计划12	23	5	22	5	计划27	35	5	54	5
计划13	34	5	37	5	计划28	57	7	36	7
计划14	64	6	77	6	计划29	16	5	22	5
计划15	10	5	16	5	计划30	25	7	29	7

两种算法的延后时间(计算的进入时刻与申请的进入时刻之间的延后值)均值、延后时间方差、最大延后时间和结束时刻对比如表3所示。

表3 本算法和FCFS的性能

	延后时间/min			结束时刻
	均值	方差	最大值	
FCFS	11.8	10.6	37	84
本算法	10.9	9.58	39	80

需要指出的是,相较于FCFS,本算法的延后时间的降低是通过将社会效益较小的飞行计划延后、将其申请的时间充分利用而实现的。

5 结论

不同于现行的军民航在各自所辖空域内活动的方式,针对临时空域被军民航共同使用的问题,结合现阶段国内空域用户的诉求,以各飞行任务的社会效益和空域利用率为依据,建立此类临时空域中军民航空中交通流量的分配模型,并提出相应的求解算法,不仅能够平衡各空域用户间的使用冲突,保障对军航飞行的优先满足,提高空域的使用效益,还可在一定程度上降低各飞行任务延后时间,压缩总的空域使用时间,提高空域利用率。

参考文献:

[1] EUROCONTROL. Eurocontrol Specification for the Applica-

tion of the Flexible Use of Airspace [R]. Bruxelles: Eurocontrol, 2009.

- [2] EUROCONTROL. European Route Network Improvement Plan, PART 3: Airspace Management Handbook Guidelines for Airspace Management [R]. Bruxelles: Eurocontrol, 2014.
- [3] 王伟,刘鲁江. 关于建立国家空域资源灵活使用机制的研究[J]. 中国民用航空, 2010(6): 13-15.
- [4] 张明,韩松臣. 基于空域灵活使用的终端空域规划设计方法[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(5): 5-9.
- [5] DIAO X, CHEN C. A Sequence Model for Air Traffic Flow Management Rerouting Problem [J]. Transportation Research Part E, 2018, 110(2): 37-42.
- [6] 刘方勤,胡明华,杨高文. 基于航班到达时间窗约束的空域资源分配问题[J]. 系统工程学报, 2011, 26(4): 485-491.
- [7] 樊宪标. 机场时隙资源协同动态配置研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [8] MIHETEC T, STEINER S, DENIS O. Utilization of Flexible Airspace Structure in Flight Efficiency Optimization [J]. Promet-Traffic-Traffico, 2013, 25(2): 109-118.
- [9] 李印凤,胡明华,谢华,彭璜. 基于可拓多层次状态分类的终端区利用率评价[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2533-2539.
- [10] 张波,陈金良,王三强. 空域利用率概念模型及算法研究[J]. 空中交通管理, 2011(2): 4-7.

(责任编辑 唐定国)