

文章编号:1000-6893(2009)01-0121-06

管制区短期空中交通流量管理的 时隙-航线分配模型及算法

赵焱飞

(中国民航大学 空中交通管理研究基地, 天津 300300)

Time-route Assignment Model and Algorithm for Short-term Area Traffic Flow Management

Zhao Yifei

(Air Traffic Management Research Base, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

摘要: 对管制区短期流量管理问题进行了研究,针对现有模型在约束条件和控制方法中的不足,不仅首次引入了流量控制事件的概念和相应的约束条件,而且在使用动态网络流理论建立了管制区短期空中交通流量管理模型过程中,还新增加了飞行高度层这一决策变量,使本文提出的时隙-航线分配模型与中国管制工作实际更加吻合。算例中采用中国华东空管中心实施的流量控制的真实数据,采用模拟退火遗传算法对其进行求解,求解结论直观、明确、可操作性强。仿真结果验证了模型及其求解方法的有效性和实用性。

关键词: 区域流量管理; 空中交通流量管理; 时隙-航线分配; 动态网络流; 遗传算法

中图分类号: V355 **文献标识码:** A

Abstract: In view of the weaknesses of current short-term area traffic flow management models in constraint conditions and control methods, a new concept and its corresponding constraint conditions of flow control events are established. In addition, based on dynamic network flow theory, a time-route assignment model with flight level decision parameters for short-term area traffic flow management is proposed to meet the need of Chinese air traffic flow management (ATFM) work. Simulated annealing genetic algorithm is applied to seek the solution of the model, which is intuitionistic and explicit for the air traffic controllers. The model is then verified by real operational data from a flow control event that occurred in the East China air traffic control (ATC) center. The computational results indicate that the model and solving method are feasible and effective.

Key words: area traffic flow management; air traffic flow management; time-route assignment; dynamic network flow; genetic algorithms

在中国,流量管理理论算法的研究重点一直集中在以控制飞机时间维为主要手段的全国性的飞机离场时隙分配和单跑道进近排序方法上^[1-3]。由于中国目前还没有一家管制单位能够控制一个大行政区域内(如华北地区)或者全国各机场所有航空器的起飞时间,因此,全国性的流量管理算法很难有机会发挥作用。而国内目前提出的进近排序算法,较多的简化和假设大大影响了其实用性。相比之下,在中国管制系统中,主要承担流量管理工作的区域管制中心的流量管理算法却很少有研究涉及。其结果是,一方面研究人员提出的算法得不到应用;另一方面管制员承担着很大的工作负荷也得不到技术支持。因此,本文流量管理算法研究将从管制区流量管理入手;同时,由于管制

区覆盖的范围有限,不能对长时间的战略流量管理问题做出规划,因此流量管理算法的研究范围进一步限定为管制区短期流量管理问题。

当局部繁忙空域中出现了较为严重的空中拥挤时,负责该空域对空指挥的管制员会实施流量控制,限制相邻区域进入本区域的飞机,以保证区域内的飞行流量小于或等于区域容量。由于缺乏科学的规划,目前管制员实施的流量控制虽然可以缓解本区域的拥挤,但会大大增加飞机的延误。从交通流上游方向各管制区流量控制的整体效果上来看,其结果是将飞机延误逐级放大,进一步恶化了流量控制的影响^[4]。因此,需要提出更加科学和合理的流量控制问题处理算法,在解决空中交通拥挤的同时,将其带来的整体飞机延误减至最少,这就是管制区短期流量管理算法需要解决的核心问题。

由于流量管理问题本身的复杂性,仅仅依靠

单纯的数学方法是很难得出符合实际要求的结论,这就要求流量管理理论方法研究更加贴近中国实际,有效地解决实际工作中的问题,真正做到对管制员的“决策支持”。

本文基于对实际管制工作大范围的调研,建立了符合实际管制工作需求的管制区短期流量管理模型。本模型区别于以前研究^[6]之处在于:一是引入了流量控制事件的概念和相应的约束条件,使模型更符合实际流量管理工作,求解结论能为管制员采纳;二是借鉴国外时隙-航线分配算法的思想^[6-7],将中国实际流量管理工作中经常采用的空中盘旋、绕飞以及使用最多的高度层控制等方法规定为三维飞行航迹,将管制区短期流量管理问题转化为时隙-航线分配模型,当然此处的时隙并非指飞机离场时隙,而是飞机进入区域的时间。本文还设计了模拟退火遗传算法,实现了流量控制问题的优化处理。

1 管制区短期空中交通流量管理问题描述

在对中国流量管理问题的调研中发现,当管制员发现区域内的交通已经饱和,受到或者将要受到限制时(如收到相邻区域发出流量控制事件),通常采取限制飞机进入区域时间和高度等方法实施流量控制,以保证整个区域内容量与流量之间的平衡,同时满足流量控制的要求。下面,对管制区短期流量管理问题从约束条件、控制方法和管理目标等几个方面进行描述。

1.1 约束条件

根据实际调研结果,在与区调有关的流量管理中,通常受到两类约束条件的限制:一是管制区内各空域单元容量的限制;二是流量控制事件的限制。

第1类约束条件在式(1)中定义,它是流量管理工作的核心任务,也是所有流量管理工作都需要实现的目标。

$$h_p(t) \leq q_p(t) \quad (1)$$

式中: p 为空域单元; t 为时间段; $h_p(t)$ 为在 t 时间段内请求通过 p 的飞机数量,即通过 p 的流量; $q_p(t)$ 为在 t 时间段内 p 能够允许的通过飞机的数量,即 p 在 t 时间段内的容量。

对流量控制事件完整的描述可以用以下五元组表示:

$$\text{Control Event: } (U_c, T_c, P_c, F_c, S_c) \quad (2)$$

即流量控制事件可以总地表述为:管制单位

U_c 在时间段 T_c 内,要求所有符合条件的飞机 F_c ,保持间隔 S_c 通过空域单元 P_c 。

对于第2类约束,可以通过引入飞机进入空域单元的时间,对式(2)中的流量控制间隔进一步定义。对于空域单元 $p \in P_c$,任意两架飞机 $(f, g) \in F_c$,飞机 (f, g) 进入空域单元 p 的时刻分别为 $T_{f,p}^a$ 和 $T_{g,p}^a$,离开的时刻分别为 $T_{f,p}^d$ 和 $T_{g,p}^d$,设 $T_{f,p}^a$ 在时间段 $t_f \in T$ 的范围内, $T_{g,p}^a$ 在时间段 $t_g \in T$ 的范围内。当且仅当 $t_f \in T_c$ 且 $t_g \in T_c$ 时,必须满足:

$$|T_{f,p}^a - T_{g,p}^a| \geq \begin{cases} s_c^p(t_f) & t_f \geq t_g \\ s_c^p(t_g) & t_f < t_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s_c^p(t_f), s_c^p(t_g) \in S_c$ 。

两类约束条件区别是:式(1)表示的约束在所有时间段内对所有飞机都有效;式(3)提出的约束仅在流量控制事件出现时,即在时间段 T_c 内,对 F_c 内的飞机才有效。

1.2 控制方法

对管制单位采取的各种流量管理方法进行归纳后,可以得出,管制单位通过调整飞机 $f \in F$ 进入区域时间和区域内的三维飞行航迹来实现对飞机的流量管理。因此引入决策变量

$$(t_f, r_f) \quad (4)$$

式中: r_f 为飞机 f 在区域中使用的三维飞行航迹,实时流量管理中使用的空中盘旋、绕飞等管制方法都可以事先定义成各条 r_f 供飞机使用。调研中发现,由于中国对空域的使用限制严格,飞机可以使用的 r_f 十分有限, r_f 的变化主要体现在飞机沿指定航路飞行高度的变化。管制单位主要使用的管理手段是调整飞机的 t_f ,实时流量管理中使用的调速方法也可以用事先定义的一组飞机可用 t_f 表示。

1.3 管理目标

流量管理问题普遍采用的优化目标是,使飞机地面等待和空中等待的损失成本总和最小。调研表明,在管制区的实际管制工作中,地面等待由机场塔台指挥实施;而由于空域条件的限制,空中等待则很少使用,仅在出现突发情况时才采用。最常用的流量管理手段是限制飞机进入区域的时间,因此,区域流量管理的目标就简化为所有飞机进入区域的时间延误的总和最小,即

$$\min \sum_{f \in F} \Delta t_f \quad (5)$$

式中: Δt_f 为飞机 f 实际进入区域时间段与计划进入区域时间段的差值。

2 数学建模

2.1 空域模型

空域模型可以用“有向图”描述管制区中的空域单元集合为

$$P = (V, E) \quad (6)$$

式中: V 为 P 中的顶点集合。有向图中的顶点代表流量管理空域中航路、航线上的定位点和机场。在所有顶点中,代表机场和管制移交点的顶点是一种特殊的顶点,相当于网络中的源点、汇点。交通流从机场或者管制移交点流入空域中,也通过它们流出空域。 E 为 P 中的连接顶点的有向弧集合。将区域中的航路、航线及走廊上的高度层建模为有向弧(如图 1 所示),即将航路、航线及走廊上位于从定位点 i 到定位点 j 之间的航段上的一个可用高度层 k 建模为一个有向弧 $e_{i,j}^k$ 。

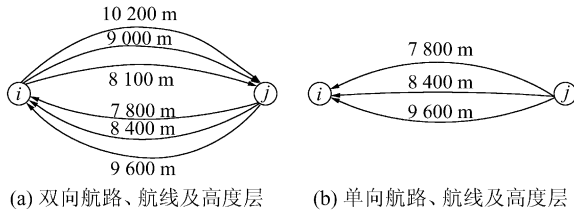


图 1 “有向弧”模型

Fig. 1 “Directed arc” model

2.2 飞机状态模型

根据式(4)和式(6),对于任意一个飞机 $f \in F$,定义两个集合 T_f, R_f 。 $T_f \subset T$ 为飞机 f 进入区域可以使用的时间段集合, $t_f \in T_f$ 。 R_f 为飞机 f 在区域内可以使用的三维飞行航迹集合, $r_f \in R_f$ 。根据实际情况假设,飞机仅在定位点处完成改变高度,即改变高度的飞机在相邻的航段上使用不同的高度层。 t_f 与 R_f 由值班管制员根据该飞机的飞行计划和有关的管制规定确定。对于任意一个飞机 $f \in F$,由空域模型的定义可以得到 $\forall r_f \in R_f, \exists r_f \subset E$,即飞机 f 在区域内飞行的三维航迹可以用空域模型中的一组有向弧来表示。

为了描述飞机 f 在时间段 t 和沿 r_f 的实际飞行情况,定义飞机 f 的状态变量

$$x_{f,p}(t) = \begin{cases} 1 & f \text{ 在 } t \text{ 时间段内,在} \\ & \text{空域单元 } p \text{ 内飞行} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f \in F; p \in r_f; t \in T$ 。对于有向弧 $e \in E$,式(7)改写为

$$x_{f,e}(t) = \begin{cases} 1 & e \in r_f \text{ 且 } (t \cap [T_{f,e}^a, T_{f,e}^d]) \neq \emptyset \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

对于顶点 $j \in V$,式(7)改写为

$$x_{f,j}(t) = \begin{cases} 1 & e_{i,j}^k \in r_f \text{ 且 } T_{f,e}^d \in t \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

由式(7), $h_p(t)$ 可以表示为

$$h_p(t) = \sum_{f \in F} x_{f,p}(t) \quad (8)$$

2.3 流量管理模型

由式(4)得,对任意一个飞机 $f \in F$,其流量管理的决策变量为

$$(t_f, r_f) \quad ((t_f, r_f) \in T_f \times R_f) \quad (9)$$

即管制员可以通过调整飞机进入区域的时间段和飞机在区域内飞行的三维轨迹满足流量管理的要求。目标函数如式(5)所示。

由式(1)和式(8)得流量管理的第 1 类约束条件为

$$\sum_{f \in F} x_{f,p}(t) \leq q_p(t) \quad ((p, t) \in P \times T) \quad (10)$$

在式(6)中将空域定义为顶点和有向弧的集合;式(3)中的 $s_e^p(t)$ 可以分别表述为 F_c 中各飞机进入有向弧 $e \in P_c$ 的间隔和通过顶点 $j \in P_c$ 的间隔。

对于有向弧 $e \in P_c$,任意两个不同的飞机(f, g) $\in F_c$,设 $T_{f,e}^a$ 在时间段 $t_f \in T$ 的范围内,设 $T_{g,e}^a$ 在时间段 $t_g \in T$ 的范围内。当且仅当 $t_f \in T_c$ 且 $t_g \in T_c$ 时,飞机通过有向弧 e 的第 2 类约束条件为

$$|T_{f,e}^a - T_{g,e}^a| \geq \begin{cases} s_e^c(t_f) & t_f \geq t_g \\ s_e^c(t_g) & t_f < t_g \end{cases} \quad (11)$$

式中: $s_e^c(t_f), s_e^c(t_g) \in S_c$ 。

设所有指向顶点 $j \in P_c$ 的有向弧集合为 $E_j \in E$ 。对于有向弧 $e \in E_j$,任意飞机 $f \in F_c$,设 $T_{f,e}^d$ 在时间段 $t'_f \in T$ 的范围内。对于有向弧 $c \in E_j$,任意飞机 $g \in F_c$ 且 $g \neq f$,设 $T_{g,c}^d$ 在时间段 $t'_g \in T$ 的范围内。当且仅当 $t'_f \in T_c$ 且 $t'_g \in T_c$ 时,飞机通过定位点 j 的第 2 类约束条件为

$$|T_{f,e}^d - T_{g,c}^d| \geq \begin{cases} s_e^j(t'_f) & t'_f \geq t'_g \\ s_e^j(t'_g) & t'_f < t'_g \end{cases} \quad (12)$$

式中: $s_e^j(t'_f), s_e^j(t'_g) \in S_c$ 。

除了以上两类约束条件外,对任意一架飞机 $f \in F$, 设 $r_f = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 由飞机依次经过各向弧的特性可知存在以下关系:

$$T_{f, e_i}^d \leq T_{f, e_j}^a \quad (1 \leq i \leq j \leq m) \quad (13)$$

如果飞机没有进行空中盘旋等待,则存在:

$$T_{f, e_i}^d = T_{f, e_{i+1}}^a \quad (1 \leq i \leq m-1) \quad (14)$$

本文中建立的数学模型,将管制区短期空中交通流量管理问题转化为一个典型的优化问题,即在满足各种限制的条件下,通过调整飞机进入区域的时刻和区域内飞行的航迹,使所有飞机的总延误最小。

3 基于模拟退火遗传算法的求解方法

3.1 算法选择

在各种流量管理模型的求解中,如果模型中没有将飞行轨迹作为控制变量,可以用很多方法求解,而使用较多的是用启发式方法与专家系统相结合的方法求解^[2]。在引入飞行航迹控制变量后,如果空域模型是单连通网络,可以作为线性规划松弛问题求解^[5]。但是,求解本文中建立的流量管理模型,使用这两种方法均不能满足要求。因此,本文借鉴遗传算法(Genetic Algorithm, GA)解决航迹优化问题的算例,也采用遗传算法求解流量管理模型^[8]。

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程的搜索最优解的方法。它具有大规模并行随机搜索能力,寻优能力强,收敛速度快,适合解决复杂的全局优化问题,在解决空中交通管理问题中也有成功的应用^[9-10]。但是简单遗传算法存在欺骗问题,即在遗传进化的初期,通常会产生一些超常的个体,按照比例选择法,这些异常个体因竞争力太突出而控制了选择过程,造成早熟;在遗传进化的后期,即算法接近收敛时,由于种群中个体适应度差异较小,优秀个体在产生后代时,优势不明显,从而使整个种群进化停滞不前。本文采用模拟退火算法的思想,对适应度进行变换,在一定程度上可以克服基本遗传算法的一些弊病,提高算法效率^[11]。

3.2 模拟退火遗传算法

(1) 染色体的构造

利用决策变量构造染色体 J , 染色体上的一个基因 G_f 由 $t_f \in T_f, r_f \in R_f$ 两部分组成,分别表示 f 从 T_f 中选定的进入区域的时间段和从 R_f 中选定的在区域内飞行的航线。染色体的长度为

集合 F 中的飞机数。

为了保证染色体是可行的,在构造染色体的过程中必须满足流量管理模型中各项约束条件,其构造算法结构如图2所示。图2中,通过不断地迭代,反复地在集合 T_f (为了防止在迭代中出现死循环,一般将 T_f 集合设得足够大) 和 R_f 中搜索,确定飞机的基因,从而保证最后生成的染色体是可行的。

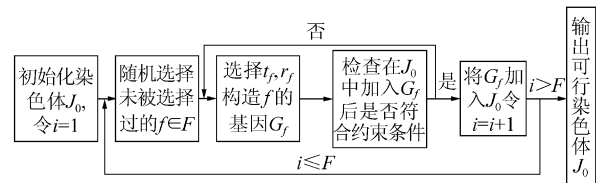


图2 生成可行染色体流程

Fig. 2 Generation of feasible chromosome

(2) 适应度函数

遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息,仅以适应度函数为依据进行搜索。因此适应度函数的选取至关重要,直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。在管制区流量管理模型之中,只有一个优化目标,因此,选择染色体上航空器的总延误作为适应度函数,即染色体 J_i 的适应度为

$$f(J_i) = W_0 - \sum_{f \in J_i} (\Delta t_f) \quad (15)$$

式中: W_0 为某一大数,主要是保证适应度函数为非负。

借鉴模拟退火思想,对适应度进行拉伸^[11]:

$$f_i = \frac{e^{f_i/T}}{\sum_{i=1}^M e^{f_i/T}} \quad (16)$$

$$T = T_0(0.99G^{-1}) \quad (17)$$

式中: f_i 为第 i 个体的适应度; M 为种群大小; G 为遗传代数; T 为温度; T_0 为初始温度。

采用此方法可使遗传算法前期(温度高时),适应度相近的个体产生的后代概率相近;而当温度不断下降后,拉伸作用加强,使适应度相近的个体适应度差异放大,从而使得优秀个体的优势更明显。

(3) 遗传操作流程

遗传算法操作的步骤如图3所示:经过择优复制生成中间一代染色体,然后对这个新的种群分别按照一定的交叉概率和变异概率进行交叉和变异操作,最终生成后代染色体^[10]。

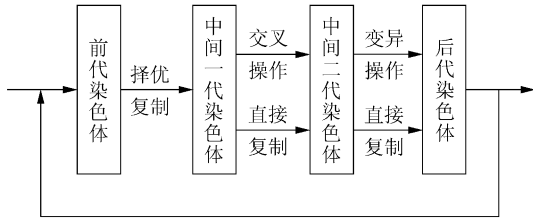


图 3 遗传算法操作流程

Fig. 3 Flow of GA operation

4 算例分析

引用中国华东空管中心在 2003 年 10 月 11 日实施的一次控制上海虹桥机场降落间隔的流量控制活动(流量控制事件)中使用的真实数据,检验本文算法的可行性。

华东空管中心分为区域管制室、进近管制室、虹桥塔台管制室和浦东塔台管制室,区域管制室又分为 01 号~05 号扇区。区域管制室负责上海管制区的管制指挥,进近管制室负责上海终端区的管制指挥。各管制单位之间的管制程序是:来虹桥机场落地的飞机首先由区域管制室指挥;当飞机从无锡、庵东、PINOT 等走廊口进入终端区后,由进近管制室指挥,直至移交给虹桥塔台管制室,后者指挥飞机落地。因此,控制虹桥机场降落间隔的流量控制事件出现后,必然会对区域管制室各扇区、进近管制室和虹桥塔台管制室造成影响。

流量控制事件具体要求是,从 2003 年 10 月 11 日 14:30 起,到 23:30 结束,所有在虹桥机场落地的飞机必须至少保持 5 min 的降落间隔。根据统计,受到该流量控制事件影响的飞机有 140 架。按照先到先服务(FCFS)的原则进行安排,140 架飞机总预计延误时间为 15 082 min。

利用本文提出的模型和求解方法优化该流量控制事件的求解。模拟退火遗传算法的求解过程如图 4 所示。

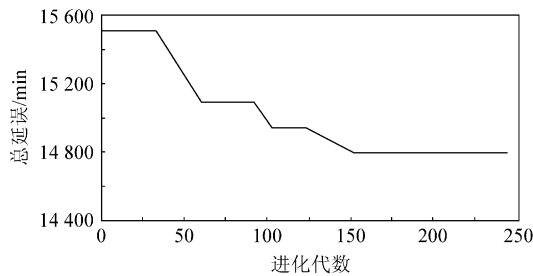


图 4 模拟退火遗传算法求解区域流量控制事件

Fig. 4 Iteration process of simulated annealing genetic algorithm

从图 4 中可以看出,进化到 250 代时,总延误时间已经连续 100 代不发生变化,始终稳定在 14 820 min,优于用 FCFS 方法计算的结果。因此就在 250 代停止进化,将 14 820 min 作为最终优化目标值,将这一代染色体作为最终优化结果。根据这一优化结果,优化前后虹桥机场的降落流量如图 5 所示。从图中可以看出,优化后,在整个优化时间段内,虹桥机场的降落流量已经完全符合降落容量的要求。

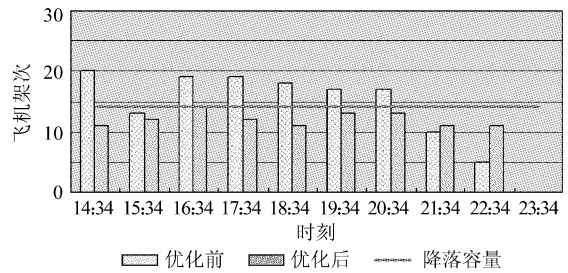


图 5 优化前后虹桥机场降落容量

Fig. 5 Arrival capacity of Hongqiao airport pre/after optimization

计算结果表明:除虹桥机场外,优化前后,整个上海区域内通过各管制扇区、走廊口流量的变化都在容量限制范围内;而优化前一些流量集中的时间段在优化后流量已经有了显著的降低,如图 6 和图 7 所示。这些都证明了本文提出算法的可行性。

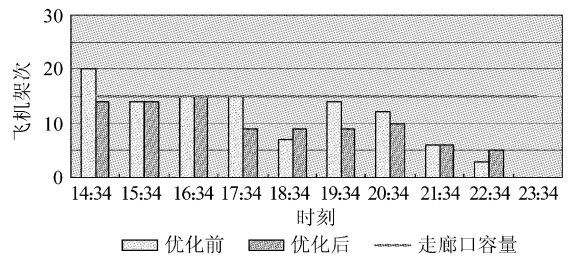


图 6 优化前后通过无锡走廊口流量

Fig. 6 Flow through Wuxi corridor pre/after optimization

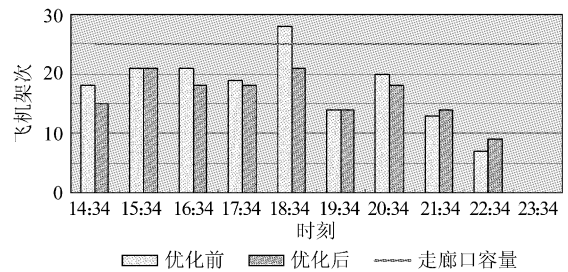


图 7 优化前后通过庵东走廊口流量

Fig. 7 Flow through Andong corridor pre/after optimization

5 结 论

在局部空域出现繁忙拥挤时,仅依靠管制员进行流量控制,将使管制员工作负荷大大增加,同时目前所采用的简单的流量控制方法,即限制飞机进入本区域的时间间隔,将使延误效果也会逐级放大。因此,需要提供有效的流量管理算法,通过科学规划为管制员提供决策支持。对此,本文从实际管制工作中提炼出管制区流量管理的时隙-三维航路分配模型。该模型考虑了管制区流量管理的实际约束条件,控制方法符合中国实际管制工作,求解结论直观、明确、可操作性强,能有效地为管制员提供决策支持。通过对华东空管中心实施的流量控制事件的仿真计算验证了本文模型和求解方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 韩松臣,徐肖豪,贺利强. 航班在机场终端区时延解析计算的新方法[J]. 航空学报, 2000, 21(6): 528-531.
Han Songchen, Xu Xiaohao, He Liqiang. New analytic computation method of flight delay in the airport terminal area[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(6): 528-531. (in Chinese)
- [2] 张颖,胡明华,彭瑛. 多元受限空中交通流量管理决策支持系统[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 44-48.
Zhang Ying, Hu Minghua, Peng Ying. Management decision support system of multiple capacity air traffic flow [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 44-48. (in Chinese)
- [3] 何智,高超,姚凯,等. 终端区空中交通流量管理中的航班动态排序系统研究[J]. 交通与计算机, 2005, 23(2): 119-122.
He Zhi, Gao Chao, Yao Kai, et al. Flights dynamic sequencing system in terminal area air traffic flow management[J]. Computer and Communications, 2005, 23(2): 119-122. (in Chinese)
- [4] 赵焜飞,金长江. 区域空中交通流量控制研究[J]. 飞行力学, 2002, 20(2): 67-70.
Zhao Yifei, Jin Changjiang. An approach to area traffic flow control research[J]. Flight Dynamics, 2002, 20(2): 67-70. (in Chinese)
- [5] 程朋,崔德光,吴澄. 空中交通短期流量管理的动态网络流模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2000, 40(11): 114-118.
Cheng Peng, Cui Deguang, Wu Cheng. Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(11): 114-118. (in Chinese)
- [6] Tosic V, Babic O, Cangalovic M, et al. A model to solve en route air traffic flow management problem: a temporal and spatial case[C]// 1st USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. 1997.
- [7] Oussedik S, Delahaye D, Schoenauer M. Air traffic management by stochastic optimization[C]// 2nd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. 1998.
- [8] 胡小兵,吴树范,江驹. 民航飞机飞行航线动态实时优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2001, 18(3): 80-83.
Hu Xiaobing, Wu Shufan, Jiang Ju. The simulation study on on-line real-time optimization of commercial aircraft's flight paths[J]. Computer Simulation, 2001, 18(3): 80-83. (in Chinese)
- [9] Daniel D, Oussedik S, Stephane P. Airspace congestion smoothing by multi-objective genetic algorithm[C]// ACM Symposium on Applied Computing. 2005: 907-912.
- [10] 刘宝碁,赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
Liu Baoding, Zhao Ruiqing. Random programming and fuzzy programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 李敏强,寇纪淞,林丹,等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.
Li Mingqing, Kou Jisong, Lin Dan, et al. Fundamental theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:

赵焜飞(1971—) 男,博士,副教授。主要研究方向:空中交通管理。

Tel: 022-24092068

E-mail: yifei6666@sina.com

(责任编辑:鲍亚平,张利平)