

文章编号: 1000-8152(2010)07-0827-09

基于多目标动态规划的多跑道进港排序

应圣钢¹, 孙富春¹, 胡来红^{1,2}, 刘华平¹, 张学军³

(1. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025;
3. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 随着航空运输的高速增长, 航班延误日益严重, 而对飞机进行进港排序和跑道调度能有效提高机场吞吐量、减少飞机燃油花费, 从而减轻航班延误, 提升经济效益。由于大量飞机的多跑道进港优化调度问题是一个非确定型多项式完全(NP-C)问题, 该问题一直没有得到有效解决。本文针对已有的基于位置交换束缚的单跑道动态规划算法运算量大、运算效率低的不足, 采用优化解空间的措施并运用贪心策略, 同时将其推广到双跑道调度, 从而解决大量飞机的双跑道、多目标进港排序优化问题。大量仿真实验表明, 该算法复杂度与飞机数量呈近似线性关系, 能在较短时间内对吞吐量和降落花费同时实现优化。

关键词: 进港排序; 多跑道调度; 多目标优化

中图分类号: V355 文献标识码: A

Multi-objective dynamic programming algorithm for aircraft arrival sequencing and runway scheduling

YING Sheng-gang¹, SUN Fu-chun¹, HU Lai-hong^{1,2}, LIU Hua-ping¹, ZHANG Xue-jun³

(1. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China;
3. School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Optimization of runway scheduling for aircraft landings plays an important role in modern air traffic control, by maximizing throughput of an airport and minimizing fuel cost of aircrafts. As a nondeterministic polynomial-complete(NP-C) problem, the runway scheduling of a considerable number of aircrafts in a multirunway airport hasn't been effectively solved. Because of considerable computation required by the traditional dynamic programming algorithm under constrained position shifting(CPS), we can only sequence aircrafts and schedule the time of arrival in a single-runway airport. This paper presents a new dynamic programming algorithm by changing the way of recurrence and combining the traditional one with several other methods including a greedy algorithm. Our algorithm can solve the problem of multi-runway scheduling with multi-object efficiently and effectively. A large number of experiments show that the complexity of the algorithm is almost linearly proportional to the number of aircrafts, and the algorithm can optimize both throughput and landing cost simultaneously in a short period of time.

Key words: aircraft arrival sequencing; multi-runway scheduling; multi-object optimization

1 引言(Introduction)

飞机进港排序、跑道调度能有效提高终端区吞吐量、减少燃油花费、减少飞机航班延误, 在终端区空中管制中有重要的意义。

飞机进港调度问题包括进港飞机降落顺序、降落跑道和降落时间的确定, 是一个NP-C问题。考虑跑道调度和着陆时间的制定, 该问题的解空间十分庞大, 而且对各种参数(如飞机的数目、跑道数目等)十分敏感。所以, 国内外早期的研究主要针对单跑道、单目标。近几年, 随着智能优化算法的发展,

一些学者针对多目标或多跑道问题, 提出了各种算法^[1~6]。

FCFS(first come first serve)算法按飞机的到达顺序, 给飞机分配跑道、确定降落时间。该算法操作简单, 被用作比较基准。

在优化单跑道进港排序问题时, 一般较常使用遗传算法^[7]、滑动窗算法^[8]以及基于位置交换束缚(constrained position shifting, CPS)思想的动态规划算法^[9~13]。

对于多跑道或多目标问题, 现有的算法大多针对

收稿日期: 2009-06-07; 收修改稿日期: 2009-12-20。

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(60625304); 国家自然科学基金面上项目资助项目(60572178)。

多跑道单目标或单跑道多目标^[1~6].

对于多跑道单目标问题,通常遗传算法的一条染色体无法完整描述问题的解.一种改进的方法是采用两条染色体结构,一条表述飞机降落顺序,另外一条表示飞机降落的跑道,并对跑道染色体进行交叉操作,对飞机染色体进行变异操作^[5].也有学者用一个矩阵作为染色体,用矩阵元素表示飞机的降落跑道及降落前后关系^[2].另外,也有学者用蚁群算法解决多跑道问题^[5].这些多跑道单目标算法所针对问题的飞机数量很小,一般不超过20架^[1,2,5],问题规模较小.

对于单跑道多目标问题,有学者利用遗传算法对进港排序问题进行单跑道多目标优化,采用两条染色体分别表示降落顺序与降落时间^[3],也有学者用惩罚函数的方法解决延迟最小目标^[4],还有学者先用一种算法确定飞机降落顺序,再用另一种算法确定飞机降落时间^[6].这些算法存在各自的不足,有的算法^[3,6]问题规模较小,只有20架飞机,后者^[4]虽然针对30架飞机优化,但只给出了一个可行解,并非真正的多目标优化.

因为多跑道多目标优化问题要同时确定飞机的降落顺序、跑道、降落时间,问题十分复杂,飞机数量较多时,解空间较大,一般的算法无法在较短时间内得到较优解,所以现在罕有针对多目标多跑道问题的优化算法.

本文基于已有的单跑道CPS动态规划算法,改进其编码方式,增加贪心策略,提出了高效的CPS动态规划算法.此算法不仅能针对多跑道多目标问题进行优化,而且有效解决了前面所述多跑道或多目标算法所存在的问题规模较小等不足.

CPS的思想是,优化后序列的每一架飞机的位置与原来序列(FCFS序列)中的位置不能超过最大偏移量(maximum position shift, MPS, 一般用k表示).这种思想不仅保证了一定的公平性,还极大地缩小了解空间的范围,是动态规划算法可应用于优化调度.

2 问题描述(Problem description)

本文考虑的问题为在一双跑道机场,给定飞机序列、各飞机降落时间窗与优化目标,在满足一定约束条件下,对飞机的降落顺序、降落跑道、降落时间进行优化调度.以下对各部分进行分别介绍.

2.1 飞机降落时间窗(Arrival time windows)

终端区内的飞机需要满足航线上某些特定点(包括跑道)的速度要求.故根据飞机位置及速度要求,可以得到飞机的最早、最晚、预计降落时间等参数. ET_i : 第*i*架飞机的最早降落时间(earliest time of arrival). LT_i : 第*i*架飞机的最晚降落时间(latest time of arrival). ETA_i : 第*i*架飞机的预计降落时间(estimated time of arrival). STA_i : 第*i*架飞机的调度降落时间(scheduled time of arrival).故飞机的降落时间窗可表示为 $[ET_i, LT_i]$.

rival). LT_i : 第*i*架飞机的最晚降落时间(latest time of arrival). ETA_i : 第*i*架飞机的预计降落时间(estimated time of arrival). STA_i : 第*i*架飞机的调度降落时间(scheduled time of arrival).故飞机的降落时间窗可表示为 $[ET_i, LT_i]$.

2.2 FCFS序列(FCFS sequence)

FCFS序列一般以飞机的ETA为排序基准.不失一般性,以FCFS序列中飞机的位置作为飞机的编号($1, 2, \dots, n$).本文中所用的FCFS序列均按吞吐量最大目标产生.

2.3 最大位置偏移(Maximum position shift)

最大位置偏移量MPS(即k),表示优化后序列中某架飞机的位置与FCFS序列中位置的最大变化值.记优化后的序列为 A_1, A_2, \dots, A_n ,则有 $|A_i - i| \leq k$.

2.4 降落时间间隔(Time separation)

在同一条跑道上降落的前后两架飞机必须满足一定的安全时间间隔要求(一般由前、后飞机类型决定).在国内外论文中比较常用的标准有美国联邦航空管理局(FAA)与国际民航组织(ICAO)的间隔数据.不同的间隔数据对算法性能没有本质影响,本文采用国内论文常用的国际民航组织(ICAO)无风条件下不同类型的飞机之间最小尾流间隔距离标准,如表1所示.其中: H表示飞机类型为重型, L表示飞机类型为大型, S表示飞机类型为小型.

表 1 最小时间间隔标准

Table 1 Minimum time separations s

前机类型	后机类型		
	H	L	S
H	94	114	167
L	74	74	138
S	74	74	98

2.5 平行跑道(Parallel runway)

本文采用的多跑道机场模型为平行跑道模型,即机场跑道平行,距离较近.可以认为,飞机到达两条跑道的时间基本相等.同时,不同跑道上降落的相邻飞机需要保证一定的安全时间间隔(由跑道间距离决定).假设双跑道模型时的跑道间安全间隔为40 s.

2.6 优化目标(Optimization objective)

进港排序常用的优化目标主要有吞吐量最大、延误最小、燃油花费最小等.本文采用的模型为:飞机可以提前ETA降落,即 $ET_i < ETA_i < LT_i$,提前降落会造成额外花费.于是吞吐量最大和花费

最小的目标函数可以按下定义.

吞吐量最大:

$$\max f_1 = n / (\text{STA}_{A_n} - t_0).$$

其中: STA_{A_n} 为最后一架飞机降落的时间, t_0 为算法开始调度的时间, 设定 t_0 为 0, 于是, 吞吐量最大可等效为最后一架飞机降落时间 STA_{A_n} 最小.

降落总花费最小:

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^n c_i(\text{STA}_i).$$

其中: $c_i(\text{STA}_i)$ 为第 i 架飞机在 STA_i 降落时造成的额外花费; $c_i(\cdot)$ 的具体形式和飞机类型、负载等各种因素有关, 且随飞机提前、滞后降落的时间量增长, 即 $c_i(\text{STA}_i)$ 先严格递减至 0($\text{STA}_i = \text{ETA}_i$), 再严格递增. 假设 $c_i(\text{STA}_i) = |\text{STA}_i - \text{ETA}_i|$.

2.7 多目标优化及结果权重(Multi-objective optimization)

多目标优化问题往往有无穷多个 Pareto 最优解^[14], 即多目标优化可以得到一系列 Pareto 曲线上的点, 每个点都互不支配. 而实际选择最优解时, 通常对多个目标函数加权, 以选择一个符合现场情况的最优解. 实际情况不同, 选取的权重也不同. 一般算法研究时, 无法直接指定决策用的权重, 只给出 Pareto 曲线. 近年来, 在某些领域的多目标优化问题研究方面, 出现的一种可行的方法是给出取到各最优解所对应的权重^[15].

而双目标优化时, 只要某个 $(f_1(x_i), f_2(x_i))$ 在 Pareto 曲线上是凸的, 即过此点的切线不与 Pareto 曲线相交, 则存在一个取到此点的权重. 参考文献[16]给出了一种同时求 Pareto 曲线及各点对应权重的方法, 但其方法需要优化函数的解析表达形式, 不适合本文问题. 另外, 本文双目标优化问题的 Pareto 点为离散的, 权重与点的对应关系为多对一映射, 本文只给出一个可行权重. 本文采用的方法如下:

- 1) 对 Pareto 曲线上的点归一化处理;
- 2) 取出 Pareto 曲线上的凸点;
- 3) 以某一凸点与和它相邻的前后两凸点连线斜率的平均值作为该点的切线斜率, 切线斜率的绝对值为 w_1/w_2 , 又 $w_1 + w_2 = 1$, 由此可计算 (w_1, w_2) .

2.8 混合离港排序(Scheduling both landing and departure aircrafts)

实际机场除进港飞机外, 仍有离港飞机. 考虑到进港飞机一般优先于离港飞机使用跑道, 又由于本文主要考虑进港排序, 在混合离港排序时, 将离港飞机看作 $\text{ET}_i = \text{ETA}_i$ 且 $\text{LT}_i = +\infty$ 的进港飞机处理. 设离港飞机的起飞延迟 $c_i(\text{STA}_i) = \text{STA}_i - \text{ETA}_i$, 则可按进港飞机的降落花费处理.

3 算法及优化(Algorithm and optimization)

连续的时间坐标下, 动态规划算法无法实现, 需要根据实际的精度要求设置最小时间单位, 将时间离散化. 一个最小时间单位称为一个时隙, 一般一个时隙表示 1~10 s 是比较合适的^[13], 本文采用单位时隙为 4 s.

实现基于 CPS 的动态规划算法时, 除原有限制外, 还需考虑节点编码方式、递推关系和最小时间单位, 这些对算法复杂度均有明显影响.

3.1 单跑道 CPS 动态规划算法(Single-runway CPS-dynamic algorithm)

动态规划算法存在两种主要的搜索方式, 即深度优先搜索和宽度优先搜索. 深度优先搜索是按每条路径动态规划, 再加上剪枝等优化手段等寻找最优解^[17]. 而宽度优先搜索是按每层节点逐层进行搜索从而寻找最优解^[9]. 因本问题不同路径存在交叉点, 故深度优先方法在求解的过程中存在很高的重复性, 其复杂度比宽度优先方法高, 故本文采用宽度优先的方法.

已有的 CPS 动态规划算法均针对单跑道问题. 单跑道动态规划的基本思想是, 按降落飞机架数 0 到 n 递推, 递推到 m 架时, 需要计算、存储满足条件的所有情况, 即降落的所有 m 架飞机及其可能的所有排列方式. 受 MPS 值 k 的影响, 前 m 架飞机中, 确定降落的有第 $1 \sim m-k$ 架飞机, 已降落的第 $m-k+1 \sim m$ 架飞机为原序列第 $m-k+1 \sim m+k$ 飞机中的 k 架.

Dr Dionyssios A. Trivizas 在参考文献[9] 中, 以 $2k$ 架飞机中未降落的 k 架表示节点, 并且以一个 k 维向量表示节点, 可以得到递推的每层节点数为 C_{2k}^k ($2k$ 架飞机中有 k 架未降落). 由于节点信息未包含已降落的最后一架飞机, 所以只适合单一类型尾流间隔的问题.

Balakrishnan 等学者, 用已降落飞机的最后 $2k+1$ 架(包含顺序)表示每层的节点^[13](相对于他们先前的方法^[10]已有一定改进). 每个飞机节点又要按降落时间细分为 L/ε 个小节点(L 为降落时间窗最大跨度, ε 为最小时间单位), 考虑前后两层节点间的相关关系, 复杂度为 $O(n(2k+1)^{2k+2}L/\varepsilon)$.

对于单跑道单目标问题, Balakrishnan 等学者研究了不同的 k 、飞机数目、吞吐量条件下, 算法的优化性能^[10~12], 也研究了吞吐量、延迟、油耗间的关系^[13]. 同时, Balakrishnan 等学者提出了将算法扩展到多跑道的设想, 以记录节点 $2k+1$ 架飞机的降落跑道的方式记录跑道信息^[12]. 每层的节点变为原来的 r^s 倍(r 为跑道数, s 为每个节点的飞机数), 递推时一架飞机可以降落 r 条跑道, 算法的复杂度变为了

单跑道时 r^{s+1} 倍,另外,多跑道时,一个节点下,一条1维的时间向量无法表示多跑道的降落时间,需要将其扩展为矩阵(原文并没有考虑这一点),总算法复杂度为 $O(n(2k+1)^{2k+2}r^{2k+2}L^r/\varepsilon^r)$.这导致了此方法难以向多跑道推广.

3.2 改进的CPS动态规划算法(Improved CPS-dynamic algorithm)

前面的两种编码方式,因其各自的特点,均难以向多跑道问题扩展.参考文献[9]中的编码方式缺少飞机降落顺序,即使加上飞机降落的跑道信息,仍缺少每条跑道的最后一架飞机信息,从而无法向多跑道扩展.而Balakrishnan等学者提出的多跑道扩展方法,在实现时,算法复杂度大幅度增加,运算效率较低,无法在较短时间内完成多跑道优化,很难推广到实际应用场景.

为得到一种高效的多跑道动态规划算法,递推时的每层飞机节点数量要尽可能少,只包含必要信息即可.考虑到排序时有用的信息只有已降落的飞机和每条跑道最后一架降落飞机类型,本文采用在参考文献[9]的飞机节点编码方式,并将其扩展 N_T^r 倍(N_T 为飞机类型数量, r 为跑道数量),在飞机节点后加上各条跑道最后一架飞机类型信息.而对于降落时间信息(时隙),若采用传统的 r 维矩阵表示,其运算效率仍很低下,需要进一步优化.因此,本文将 r 维时间矩阵离散化,使之能添加贪心策略(见3.3节),在基本不影响优化效果的前提下,大大提高运算效率.在此,本小节将以双跑道为例,阐述本文的多跑道动态规划算法,以及各优化目标、多目标优化的实现方式.

若不考虑降落顺序,已降落飞机中只有最后 k 架不确定,所以可以用一个 k 维向量 (a_1, \dots, a_k) 来表示已降落飞机,其中 $0 \leq a_1 < a_2 < \dots < a_k \leq 2k - 1$,表示已降落的 m 架飞机的最后 k 架为 $m + a_i - k + 1, i = 1, \dots, k$.图1显示了 $k = 2$ 时某相邻两层节点及其递推关系.将这 C_{2k}^k 个向量编号为 $0 \sim C_{2k}^k - 1$.

再根据跑道信息将每个节点进一步细分,用 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$ 表示一个节点,其中 m 表示已降落的飞机数, type_i 表示最后降落在 i 跑道的飞机类型, s 表示已降落飞机中最后 k 架的集合,即向量编号.每一个节点所储存的数据,是一个矩阵 $B = (b_{ij})$,每一个元素 b_{ij} 表示1跑道的最后一架飞机在 $T_{1,0} + i$ 时隙降落、2跑道的最后一架飞机在 $T_{2,0} + j$ 时隙降落时的目标函数最优值,其中 $T_{1,0}, T_{2,0}$ 表示 $b_{0,0}$ 对应的两条跑道降落最后一架飞机降落时间.

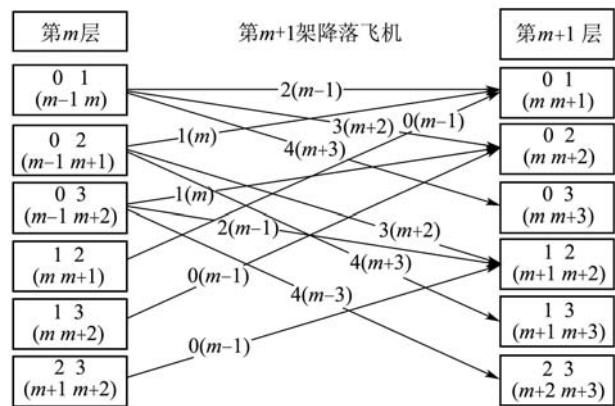


图1 飞机节点递推关系($k = 2$)

Fig. 1 Recurrence relation of aircraft nodes ($k = 2$)

递推时,对于某一个节点 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$,下一架降落飞机 a_{m+1} 可以降落在1跑道或2跑道,由此可得到递推的下一层节点为 $f[m][s'][\text{type}'_1][\text{type}'_2], f[m][s'][\text{type}_1][\text{type}'_2]$.由已降落飞机的集合 s ,可以得到 a_{m+1} 的所有可能性,由此可以得到与 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$ 相关的所有下一层节点.

对吞吐量最大目标进行优化, b_{ij} 仅取0或1,表示是否有满足下标时隙的飞机降落.由于飞机均尽早降落,矩阵 B 是一个稀疏矩阵,可以对其进行常用的离散化处理,用若干个2元组表示其中 $b_{ij} = 1$ 的元.于是,每个 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$ 下有若干个2元组,一个2元组 $(t_{1,i}, t_{2,i})$ 表示1跑道的最后一架飞机在 $t_{1,i}$ 时隙降落、2跑道的最后一架飞机在 $t_{2,i}$ 时隙降落.同一个 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$ 下,去除较劣解,只保留较优解,即 w 个2元组应满足 $t_{1,0} \leq t_{1,1} \leq \dots \leq t_{1,w}$ 且 $t_{2,0} \geq t_{2,1} \geq \dots \geq t_{2,w}$.另外,还需去除多余解,如由平行跑道对称性造成的 (a, b) 与 (b, a) 等价,由飞机安全间隔造成的 $(t, t + \delta_r - \delta_{\max})$ 与 $(t, t + \delta_r - \delta_{\max} - a)$ 等价(δ_r 为两跑道间的降落安全间隔, δ_{\max} 为前置飞机类型确定时,两飞机最小安全间隔的最大值, $a > 0$).

对降落总花费进行最小优化, b_{ij} 的值表示降落花费.这时,仍采用上面的处理方法,改用三元组 $(t_{1,i}, t_{2,i}, c_i)$ 表示.只有当某一个三元组的所有元素均劣于同一节点下的另一个三元组时(这种情况,称作后者支配前者),才将其去除.

进行多目标优化时,只须将各优化目标值均添加到2元组 $(t_{1,i}, t_{2,i})$ 中,形成 $2+m$ 元组 $(t_{1,i}, t_{2,i}, a_i, b_i, c_i, \dots)$ (m 为目标数, a_i, b_i, c_i 等为各目标值).递推时仅舍去所有元素都被同节点下某一多元组完全优势覆盖(称为被支配)的多元组即可.如进行吞吐量最大与降落花费最小优化时,以 $(t_{1,i}, t_{2,i}, c_i, T_i)$ 表示(其中 T_i 为吞吐量),但考虑 $T_i = n / (\max\{t_{1,i}, t_{2,i}\} -$

t_0 (t_0 为起始时间), 可以将 T_i 舍去, 多元组化为和降落花费最小优化时相同, 为 $(t_{1,i}, t_{2,i}, c_i)$. 由于降落花费最小优化计算时, 中间过程仅舍去那些被同一节点下另一三元组支配的三元组, 与多目标优化时相同, 所以此时的双目标(吞吐量、降落花费)优化和降落花费最小优化时, 计算过程相同, 仅对数据的处理不同. 对最后的结果数据, 取出其中在最后整一层节点范围内不被支配的三元组 $(t_{1,i}, t_{2,i}, c_i)$, 计算得到 T_i , 由各 (c_i, T_i) 得到最后的多目标优化曲线.

3.3 贪心策略(Greedy method)

在后面的仿真数据中, 可以看到前述算法对降落花费最小优化的运算速度不是很理想, 需要进一步优化运算速度.

算法中, 递推矩阵的三元组化, 方便了三元组的选取, 可以依此进行贪心操作. 贪心处理的具体思想是, 对于每一个 $f[m][s][\text{type}_1][\text{type}_2]$ 下的某个三元

组 $(t_{i,1}, t_{i,2}, \text{Cost}_i)$, 某架飞机 x 降落在1跑道时, 最早降落时间为 t'_1 , 如果有 $\text{ETA}_x > t'_1$, 则飞机 x 在 $t'_1 \sim \text{ETA}_x$ 的每个时隙降落, 都将产生1个新的 $m+1$ 层的三元组(飞机 x 降落在 ETA_x 后的时隙产生的三元组必定劣于 ETA_x 降落时产生的三元组, 无论是吞吐量还是降落花费). 对于 $t'_1 \sim \text{ETA}_x$ 中的这些时隙, 可以只产生两端和中间共3个三元组, 即仅以 t'_1 , ETA_x 和 $(\text{ETA}_x + t'_1)/2$ 3个时隙产生新状态, 这3个时隙产生的状态分别为侧重未排序飞机最优化的状态、当前最优化状态、折中状态. 而 $\text{ETA}_x \leq t'_1$ 时, 无需产生 t'_1 后降落的三元组. 同时, 为了保证计算所需要的信息量, 在 $m=1$ (即第1层节点)时, 不采用贪心, 产生所有三元组. 图2显示了添加贪心策略后, 某三元组的部分递推关系. 图2中第2层第1个三元组为 $(149, 100, 11)_{(\text{L}, \text{L})}$, ETA 为170的S型飞机降落在第2条跑道时, 原先可以在159~170共11个时隙降落, 但贪心策略只产生在159, 164, 170这3个时隙降落的三元组.

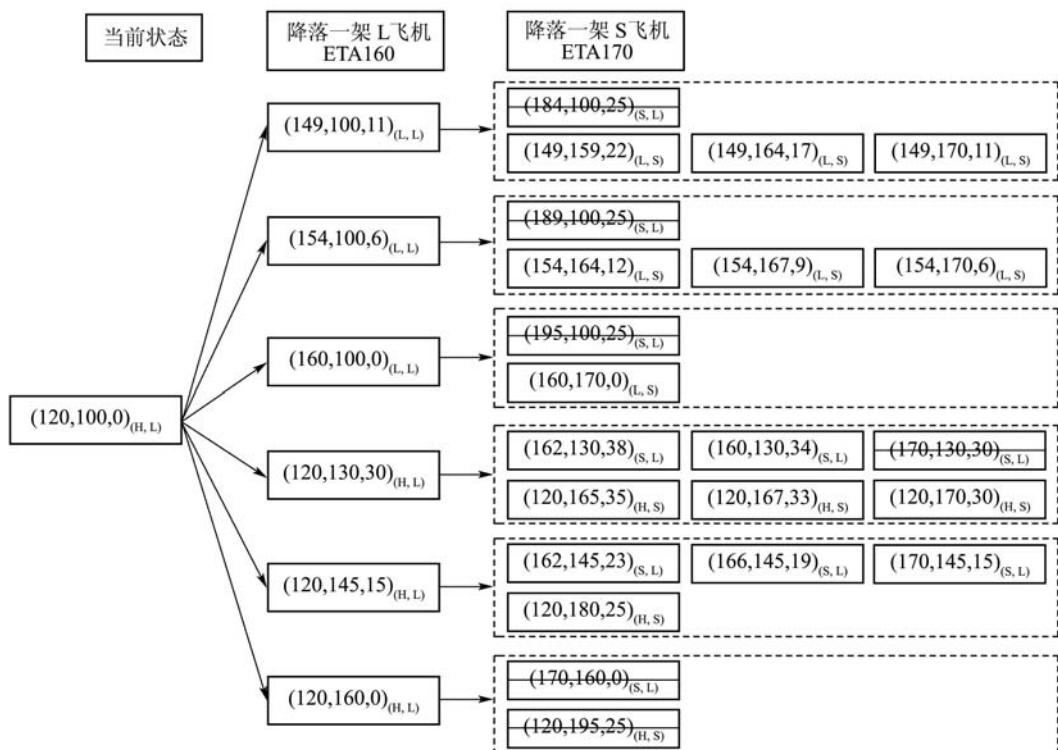


图2 某三元组递推关系示意图(单位时隙: 4 s)

Fig. 2 Schematic of recurrence relation of a tree-element set (time unit: 4 s)

图中, 某些三元组根据对称等因素变化等效后, 被判定劣于(即3个元素均较劣)其他某个三元组, 或出现重复, 故将其删除, 从而可以减小解空间, 提高运算速度(如果考虑所有三元组产生情况, 解空间减小比率会更加明显).

3.4 优化后算法复杂度(Complexity of the final algorithm)

对降落花费最小优化, 未加贪心处理前的算法每层共有 $3^r C_{2k}^k$ 个节点(r 为跑道数), 每个节点至多有 $\frac{L}{\varepsilon} \left(\frac{167-2 \times 40}{\varepsilon} \right)^{r-1}$ 个多元组, 每个多元组在递推

时, 至多产生 $r\frac{L}{\varepsilon}$ 个多元组, 考虑三元组的比较, 算法复杂度为 $O(n22707^r rC_{2k}^k L^3/\varepsilon^{2r})$, 较Balakrishnan等学者的算法复杂度 $O(n(2k+1)^{2k+2} r^{2k+2} L^r/\varepsilon^r)$, 并没有优势(两种算法的实际运算复杂度远小于其最大值). 加入了贪心策略后, 算法的三元组数目、比较次数大幅减小, 运算速度在双跑道时提高了近100倍, 运算时间基本与飞机数量成线性关系.

4 仿真数据及分析(Simulation and analysis)

为减弱具体的输入数据对算法的优化结果、运算时间的影响, 在仿真过程中, 随机产生100个类型比例、时间窗跨度、飞机密度等参数一样的FCFS飞机序列, 取这100个优化结果的统计平均值作为算法在这组参数下的性能指标.

仿真时, 几个基本的参数设置为: 单位时隙为4 s, 时间窗跨度为150或100个时隙, 飞机类型比例(H, L, S)为(0.3, 0.4, 0.3)或(0.4, 0.5, 0.1). 为方便阐述, 记

$$P_1 = (0.3, 0.4, 0.3), P_2 = (0.4, 0.5, 0.1),$$

当选择(0.3, 0.4, 0.3)作为类型比例时, 仅简记 P_1 .

4.1 贪心效果分析(Efficiency of greedy method)

不同参数下, 单、双跑道降落花费优化的统计结果见表2、表3. 可以看到未加贪心前动态规划算法的运算时间对各种参数敏感, 运算速度不高.

表2 单跑道时DP、贪心效果对比

Table 2 Results of single-runway scheduling between DP and DP/Greedy

飞机架数	方法	降落花费 平均减小	平均运行 时间/ms
30	DP	37.42%	1046.88
30	DP+贪心	37.33%	64.38
50	DP	50.14%	1732.5
50	DP+贪心	50.12%	84.53
70	DP	58.24%	3094.53
70	DP+贪心	58.19%	105.78

加了贪心处理后, 算法基本保持了原有的优化效果, 而且运算时间大幅减少.

由此可以认为, 在本文后面的所有例子中(双跑道飞机较多情形), 采用贪心处理后的动态规划算法优化效果基本可以达到原动态规划算法的效果. 这是因为, 在保证了初始信息量后, 随着飞机数目增多与递推进行, 贪心处理所丢失的信

息量被弥补, 所有三元组 $(t_{i,1}, t_{i,2}, \text{Cost}_i)$ 按降落花费 Cost_i 较平均地分布.

表3 双跑道时DP、贪心效果对比

Table 3 Results of double-runway scheduling between DP and DP/Greedy

飞机架数	方法	降落花费 平均减小	平均运行 时间/ms
10	DP	56.30%	10674.84
10	DP+贪心	55.69%	144.22
20	DP	58.43%	39004.06
20	DP+贪心	57.72%	492.03

4.2 吞吐量最大优化(Scheduling for maximizing throughput)

降落时间窗跨度100个时隙、吞吐量约70架/小时、不同飞机比例下, 双跑道时吞吐量优化的结果见图3. 70架飞机、 $k = 3$ 时的双跑道吞吐量优化的平均运行时间约0.1 s.

可以看到, 在飞机数量较多时, 不同的飞机比例对优化效果有影响. 同一概率下, $k = 1, 2, 3$ 时的效果相差不大, 这是因为双跑道时, 可以通过跑道的调整与小的位移来达到较好效果.

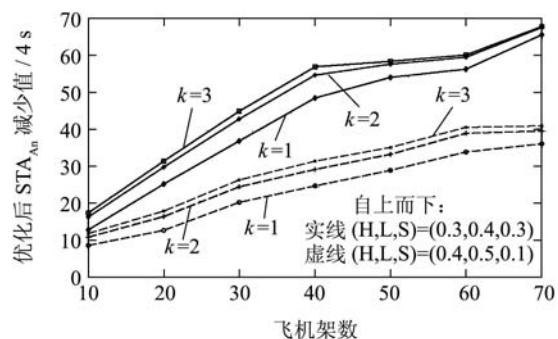


图3 双跑道吞吐量优化的结果

Fig. 3 Results of double-runway scheduling for maximizing throughput

4.3 双跑道降落花费最小优化(Double-runway scheduling for minimizing landing cost)

双跑道降落花费最小优化的数据见表4. 表中飞机的降落时间窗跨度为100个时隙, 吞吐量约70架/h, $P_1 = (0.3, 0.4, 0.3)$. 表中, 优化效果随飞机架数增多而更加明显, 原因是飞机架数少时, FCFS序列的花费相对不大, 故优化空间相对较小. 可以看到 $k = 1, 3$ 时的优化效果差别不大, 这也是跑道调度的结果.

表4 双跑道降落花费最小优化数据

Table 4 Results of double-runway scheduling for minimizing landing cost

飞机 数量	$k = 1$		$k = 3$	
	降落花费	平均运行	降落花费	平均运行
	平均减少	时间/ms	平均减少	时间/ms
10	54.77%	33.28	55.69%	106.88
20	56.20%	37.03	57.72%	455
30	58.54%	43.43	60.86%	781.25
40	62.71%	58.12	65.75%	1086.72
50	66.78%	93.75	68.75%	1658.28
60	69.15%	117.35	70.62%	2090.47
70	69.49%	147.81	71.27%	2541.41

4.4 双跑道双目标优化(Double-objective and double-runway optimization)

图4显示了双跑道 $k = 3$ 、吞吐量约70架/h、飞机总量70、降落时间窗跨度100个时隙、飞机比例取 $P_1 = (0.3, 0.4, 0.3)$ 时的双跑道优化结果。图中，所有点为双目标优化最优解，“*”点为曲线上的凸点，对应的凸点权重见表5(因非凸点无对应权重，所以仅给出凸点)。图4中的点，按 Cost_i 较均匀分布，与前面4.1节的论述相符。

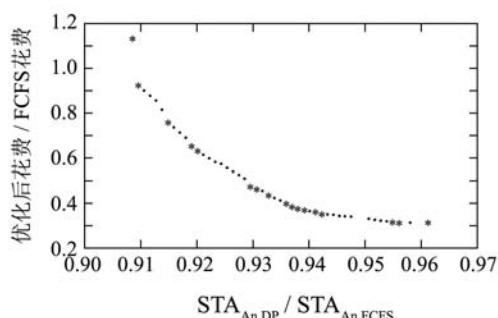


图4 $k = 3$ 时某FCFS序列双跑道双目标优化结果
Fig. 4 Results of double-objective optimization of a FCFS sequence ($k = 3$)

此条件下，最后一架飞机的降落时间至多提前100个时隙， $\text{STA}_{An,DP}/\text{STA}_{An,FCFS}$ 的理论最小值在0.9左右。可以看到优化后的动态规划算法的双目标优化效果较好。

表5 图4中凸点对应权重

Table 5 Weights of convex points in Fig. 4

原始点	归一化	权重				
0.961	0.310	1.000	0.274	0.000	1.000	
0.956	0.313	0.995	0.277	0.438	0.562	
0.955	0.314	0.993	0.278	0.634	0.366	
0.942	0.350	0.980	0.309	0.780	0.220	
0.941	0.356	0.979	0.315	0.828	0.172	
0.939	0.368	0.977	0.325	0.835	0.165	
0.938	0.374	0.976	0.331	0.862	0.138	
0.937	0.383	0.975	0.339	0.890	0.110	
0.936	0.394	0.974	0.349	0.904	0.096	
0.933	0.432	0.970	0.382	0.913	0.087	
0.931	0.459	0.968	0.405	0.918	0.082	
0.930	0.473	0.967	0.418	0.927	0.073	
0.920	0.629	0.957	0.557	0.937	0.063	
0.919	0.649	0.956	0.574	0.949	0.051	
0.915	0.754	0.952	0.667	0.960	0.040	
0.910	0.922	0.946	0.815	0.990	0.010	
0.909	1.131	0.945	1.000	1.000	0.000	

4.5 不同优化目标结果比较分析(Comparison between different objects)

同一FCFS序列不同优化结果具体形式见图5。图中：横轴为时间坐标，单位为时隙(4 s)；从下至上的6条虚线依次表示ETA, FCFS排序结果、本文算法 $k = 1$ 时吞吐量优化结果、 $k = 3$ 时吞吐量优化结果、 $k = 1$ 时降落花费优化结果、 $k = 3$ 时降落花费优化结果；实线、划线、点划线分别代表H,L,S型飞机，同一实线上的不同节点表示某架飞机在不同结果中的STA；除ETA序列外，每一结果的虚线表示0跑道，即节点在虚线上表示飞机降落在0跑道，节点偏移在虚线上方则表示飞机降落在1跑道。

可以看到，由于花费最小优化时，飞机的STA尽可能靠近ETA，所以飞机的降落顺序相较FCFS变化很小，但降落跑道有明显变化。另外，吞吐量最大优化时， $k = 1, 3$ 的最后一架飞机降落时间基本相同；花费最小优化时， $k = 1, 3$ 的优化结果基本相同。这与前面4.3节的论述相符。

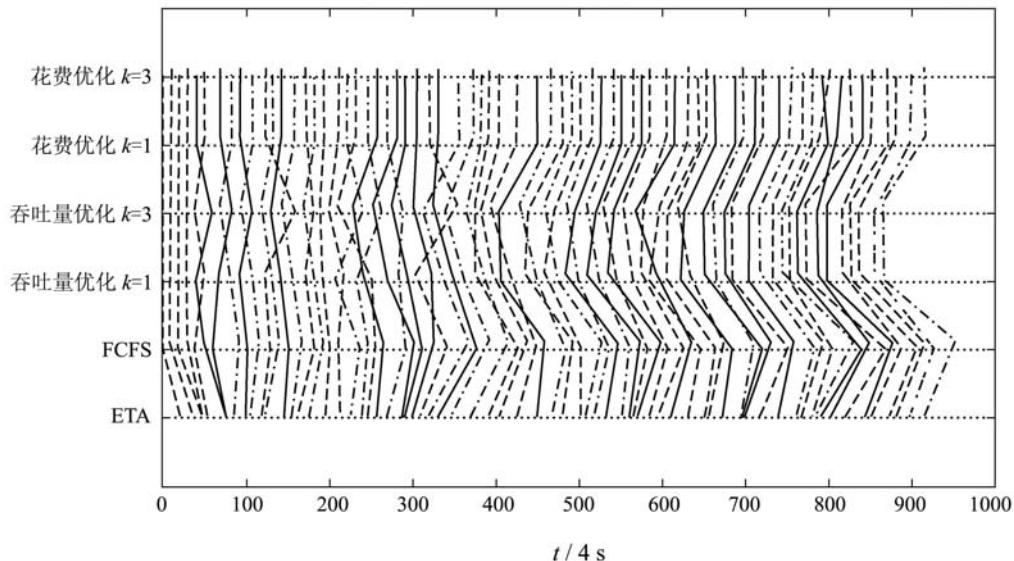


图 5 某FCFS序列(同图4)的具体优化结果

Fig. 5 Optimization results of a FCFS sequence (the same as Fig.4)

4.6 进离港混合排序(Scheduling both landing and departure aircrafts)

表6显示了双跑道 $k = 3$ 、吞吐量约70架/h、飞机总量70、降落时间窗跨度100个时隙、飞机比例取 $P_1 = (0.3, 0.4, 0.3)$ 、进离港飞机各占50%时的优化结果。与进港排序吞吐量优化结果(图3)与降落花费最小优化结果(图4)进行比较,此时的优化效果和进港排序时,相差不大,但降落花费最小优化的平均运行时间大幅减小,这是本文贪心策略与离港飞机等效的 $STA_i \geq ET_i = ETA_i$ 共同作用的结果。

表 6 双跑道进离港混合排序优化结果($k = 3$)

Table 6 Results of double-runway scheduling of landing and departure aircrafts

飞机数量	降落花费最小优化		吞吐量最大优化	
	降落花费平均减少	平均运行时间/ms	优化后 STA_{An}	平均运行减少值/4 s
	平均减少	时间/ms	时间/ms	时间/ms
10	41.40%	16.88	17.04	3.91
20	51.21%	35.16	29.43	10.62
30	57.18%	56.88	34.38	17.82
40	62.92%	87.66	42.59	25.00
50	67.33%	104.69	37.79	31.72
60	69.91%	126.25	39.02	42.19
70	74.48%	158.28	43.15	46.25

5 结论(Conclusion)

综上所述,改进后的基于CPS的动态规划算法能对吞吐量、降落花费分别或同时进行优化并

得到较好的结果,同时,运行速度较快,运算时间基本与飞机数量成线性关系。而对比所有数据, k 值对优化效果影响不大,可以认为,在本模型中, $k = 1$ 的算法与 $k = 2, 3$ 的算法优化效果接近,但运算时间具有明显优势,最多不超过0.2 s,完全可以满足实际要求。

随着航空业的迅速发展,我国一些大型机场已开始使用3条跑道或正在修建第3条跑道甚至规划第4条跑道。本文提出的算法在进一步向多跑道(≥ 3)推广时,算法理论可基本不变,但因解空间急剧膨胀,降落花费优化的运算量将大幅上升,需要加入其他优化策略以提升运算速度,这需要后续进一步研究努力解决。

致谢 文中双跑道动态编码及规划递推矩阵离散化的工作是基于普林斯顿大学(Princeton University)博士研究生栗师的部分工作,在此特别表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 徐肖豪, 姚源. 遗传算法在终端区飞机排序中的应用[J]. 交通运输工程学报. 2004, 4(3): 121 – 126.
(XU Xiaohao, YAO Yuan. Application of genetic algorithm to aircraft sequencing in terminal area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 121 – 126.)
- [2] HU X, PAOLO E D. An efficient genetic algorithm with uniform crossover for air traffic control[J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(1): 245 – 259.
- [3] GUO Y, CAO X, ZHANG J. Multiobjective evolutionary algorithm

- with constraint handling for aircraft landing scheduling[C] //*Proceedings of 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Hong Kong: IEEE, 2008: 3657 – 3662.
- [4] ZHANG X, ZHANG X J, ZHANG J, et al. Optimization of sequencing for aircraft arrival based on approach routes[C] //*Proceedings of the 10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Seattle: IEEE, 2007: 592 – 596.
- [5] ZHANG Z, WANG L. Sequencing to multi-runway approach landing flights based on ACS[C] //*Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Chongqing: IEEE, 2008: 3920 – 3924.
- [6] TANG K, WANG Z, CAO X, et al. A multi-objective evolutionary approach to aircraft landing scheduling problems[C] //*Proceedings of 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Hong Kong: IEEE, 2008: 3650 – 3656.
- [7] HU X, PAOLO E D. Binary-representation-based genetic algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(2): 301 – 310.
- [8] 王莉莉, 史忠科, 张兆宁. 机场着陆排序的一种滑动窗优化算法[J]. 中国民航学院学报, 2004, 22(6): 18 – 21。
(WANG Lili, SHI Zhongke, ZHANG Zhaoning. Optimizing slip window algorithm for sequencing of scheduled arriving aircrafts[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2004, 22(6): 18 – 21.)
- [9] TRIVIZAS D A. Optimal scheduling with maximum position shift (mps) constraints: a runway scheduling application[J]. *Journal of Navigation*, 1998, 51(2): 250 – 266.
- [10] BALAKRISHNAN H, CHANDRAN B. Scheduling aircraft landings under constrained position shifting[C] //*AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 2006*. Keystone: AIAA Press, 2006: 2175 – 2197.
- [11] CHANDRAN B, BALAKRISHNAN H. A dynamic programming algorithm for robust runway scheduling[C] //*Proceedings of the 2007 American Control Conference*. New York: IEEE, 2007: 1161 – 1166.
- [12] BALAKRISHNAN H, CHANDRAN B. Efficient and equitable departure scheduling in real-time: new approaches to old problems[C] //*7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2007.
- [13] LEE H, BALAKRISHNAN H. Fuel cost, delay and throughput trade-offs in runway scheduling[C] //*Proceedings of the American Control Conference*. Seattle: IEEE, 2008: 2449 – 2454.
- [14] 魏静萱, 王宇平. 基于新模型的多目标Memetic算法及收敛分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 389 – 392.
(WEI Jingxuan, WANG Yuping. A new model-based multi-objective Memetic algorithm and its convergence analysis[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 389 – 392.)
- [15] JILKOV V P, LI X R, DELBALZO D. Best combination of multiple objectives for UAV search and track path optimization[C] //*10th Conference of the International Society of Information Fusion*. New York: IEEE, 2007: 1767 – 1774.
- [16] DAS I, DENNIS J E. Normal-boundary intersection: a new method for generating the pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1998, 8(3): 631 – 687.
- [17] 尹增山, 高春华, 李平. 混杂系统优化控制的动态规划方法研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 29 – 33.
(YIN Zengshan, GAO Chunhua, LI Ping. Optimal control for hybrid systems based on dynamical programming[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 29 – 33.)

作者简介:

- 应圣钢** (1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为空管优化, E-mail: yingsg@yahoo.com.cn;
- 孙富春** (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制, E-mail: fcsun@tsinghua.edu.cn;
- 胡来红** (1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能优化算法, E-mail: hulh06@mails.tsinghua.edu.cn;
- 刘华平** (1976—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为滤波算法、遥操作, E-mail: hpliu@tsinghua.edu.cn;
- 张学军** (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为空中交通管理技术, E-mail: zhxj@buaa.edu.cn.