

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.06.006

## 飞机动态推出控制策略仿真优化模型

廉冠 张亚平 邢志伟 罗谦

(哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨, 150090)

**摘要:**机场离港运行的无序化造成滑行过程中的长时间排队等待及大量燃油浪费。为了减少燃油消耗和废气排放,在已有的动态推出控制策略基础上提出了阶梯函数控制策略(Step function, SPC)和非线性函数动态推出策略(Nonlinear function, NPC)的一般形式,以离港成本为目标,建立了基于停机位等待惩罚的动态推出控制模型,在不延误的前提下提出了一种基于网格参数优化的蒙特卡洛仿真优化算法。通过北京首都机场实际运行数据对推出过程进行仿真计算,并与无控制策略以及传统 N-control 策略的最优可达解进行仿真对比,结果表明:在不延误的前提下,提出的推出策略可以更加有效地降低平均滑行道滑行时间, NPC 策略的离港运行成本和燃油成本可降低 45.52% 和 54.23%, SPC 虽然成本节省劣于 NPC 策略,但是其简单的操作方式可以为离港推出调度方式的改进提供决策支持。

**关键词:**航空运输;推出控制策略;蒙特卡洛仿真;网格寻优;滑行时间;燃油成本

**中图分类号:** U8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2018)06-0776-07

## An Optimal Simulation Model of Aircraft Dynamic Pushback Control Strategies

LIAN Guan, ZHANG Yaping, XING Zhiwei, LUO Qian

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090, China)

**Abstract:** The disorder of departure operation in airports leads to long taxi-out waiting time and waste of fuel burn. In order to reduce the fuel burn cost and pollution, two general forms of aircraft departure dynamic pushback control strategies, step function (SPC) and nonlinear function (NPC), are proposed. These strategies manage to control the aircraft pushback rate with not only the taxiway queue length threshold but also the change of the current taxiway queue length, so that the waiting time on taxiway with engine is transferred into gate-hold time. The pushback control model based on gate-hold penalty is built to reduce of departure operation cost. The strategy is analyzed. A Monte Carlo simulation algorithm based on gridding parameter optimization is designed with the precondition of on-time departure. Departure performance data of Beijing International Airport is used to simulate the departure pushback process and its results of each dynamic strategy are compared with that of static N-control strategy. The results show that reasonable choice of the parameters and taxiway queue length threshold could benefit the efficiency of pushback control strategies and the proposed NPC strategy can curtail the average taxi-out time, and reduce departure operation cost and fuel burn by 45.52% and 54.23%, respectively. Although the cost reduction of SPC is higher than that of NPC, the convenient mode of operation can provide decision support for managers of airports.

**Key words:** air transportation; pushback control strategy; Monte Carlo simulation; gridding optimization; taxi-out time; fuel-burn cost

收稿日期:2018-08-30;修订日期:2018-11-10

通信作者:张亚平,男,教授,博士生导师, E-mail: zxlt0905@163.com。

引用格式:廉冠,张亚平,邢志伟,等.飞机动态推出控制策略仿真优化模型[J].南京航空航天大学学报,2018,50(6):776-782. LIAN Guan, ZHANG Yaping, XING Zhiwei, et al. An optimal simulation model of aircraft dynamic pushback control strategies[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(6): 776-782.

机场离港过程的场面交通拥堵不仅影响场面运行效率,加大调度员的工作负担,也造成大量的燃油浪费以及废气排放。当前飞机的进离港地面运行时间占总航行时间的 10%~30%<sup>[1]</sup>,主要原因是因为调度不流畅导致大量排队等待时间。飞机离港过程主要包括推出、滑行和起飞,适时地进行飞机推出有助于减少滑行排队等待时间,因此合理的飞机推出控制策略是减少机场场面拥堵的有效途径。

离港过程可以抽象为一个排队过程, Idris 等<sup>[2]</sup>分析了影响离港过程的主要因素和离港队列的特点,通过预测离港滑行时间来合理安排推出时隙。Carr 等<sup>[4]</sup>通过对波士顿机场交通流量的研究,在一些特定交通管制约束基础上提出了一种推出序列控制方法。Madas 等<sup>[4]</sup>、Vossen 等<sup>[5]</sup>和高强等<sup>[6]</sup>分别对机型选择、时隙分配以及协同决策机制下自由指派时隙等方面进行了研究。Madas 等<sup>[7]</sup>通过具体的机场结构,用整数规划的方法来选择和分配推出时隙。Liu 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于离散差分进化的推出时隙分配策略来优化推出成本。Pujet 等<sup>[8]</sup>通过分析跑道系统结构和历史运行数据,提出一种混合排队模型使机场在低容量状态下降低离港滑行排队时间。Cheng 等<sup>[9]</sup>针对推出计划的制定用动态规划的方法开发了一种支持工具来减少滑行过程中的停车次数。Roling 等<sup>[10]</sup>用混合整数线性规划的方法对离港过程进行优化来减少地面延误和场面拥堵。Feron 等<sup>[11]</sup>提出了一种队长阈值控制方法(N-control):若滑行道上离港飞机排队数超过一个阈值,其他飞机的推出申请将被拒绝,直到排队数小于阈值,这是一种离港推出率控制策略,策略的推出效果由队长阈值决定。Simaiakis 等<sup>[12-13]</sup>在波士顿机场对 N-control 策略进行测试,并以成本为目标对 N-control 方法进行动态优化,对最优滑行道排队阈值进行研究。Martinez 等<sup>[14]</sup>通过研究登机口等待时间的分配方法对 N-control 策略进行了扩展。在 N-control 策略的基础上,张亚平等<sup>[15]</sup>提出了这一种线性动态推出控制策略(Dynamic pushback control, DPC),即要求策略可以使推出率由队长阈值和当前滑行道排队长度同时决定,更加有效的控制离港过程总成本。

当前 DPC 策略的核心是寻找最优的滑行道队长阈值,这个阈值既要降低离港过程的排队拥堵,又要保证跑道和滑行道利用率,其状态为当滑行道排队长度较小时,保持较大的推出率,但随着排队长度的增加,推出率呈线性降低趋势,直到排队长度达到阈值时降为 0。然而这种动态推出策略并

非最优的动态推出策略,本文提出了动态推出策略的一般形式,并设计了一种基于网格参数搜索的蒙特卡洛仿真方法,探寻最优的动态推出策略,更加有效地将飞机的滑行排队等待时间转化为停机位等待时间,以降低机场离港运营成本,通过与 DPC 策略对比来验证其有效性。

## 1 机离港推出控制策略

### 1.1 飞机离港过程的描述与基本假设

飞机离港主要过程包括推出、滑行和起飞,飞机的推出时刻选择直接影响着机场场面运行状态以及离港成本。飞机经过航食补充、旅客登机过程后关闭舱门,飞行员向塔台提出推出请求,当收到推出指令后,飞机由牵引车牵引,之后进入滑行道滑行进而起飞。飞机处于不同的过程将产生相应的成本:处于登机口或停机位时,若延迟推出会因占用登机口或停机位而会降低滑行道和跑道的利用率,产生资源占用成本及利用率降低成本;飞机推出后处于滑行道时会产生燃油消耗成本,尤其在滑行道有较多飞机进行排队时,长时间等待造成大量燃油消耗成本。为了简化控制策略以及便于不同策略间的对比,在不影响适用性的前提下提出如下假设:

- (1) 忽略天气因素及进港飞机的影响;
- (2) 推出以及起飞过程采取先到先服务规则;
- (3) 为了在同等条件下对比策略效果,采用固定跑道服务时间。

### 1.2 推出率控制策略

当前已有的 DPC 策略的推出率随当前滑行道排队长度的增加而减小,其推出率为

$$\lambda' = \begin{cases} \lambda \left(1 - \frac{n}{N}\right) & n < N \\ 0 & n \geq N \end{cases}$$

式中: $\lambda'$ 为推出率; $\lambda$ 为推出请求率; $n$ 为当前滑行道排队长度; $N$ 为滑行道队长阈值。本文提出两种混合动态推出控制的策略,分别为阶梯函数控制策略(Step function, SPC)和非线性函数控制策略(Nonlinear function, NPC)。两种推出策略的推出率分别为

$$\text{SPC: } \lambda'_2 = \begin{cases} \lambda & n \leq \theta_1 N \\ \alpha\lambda & \theta_1 N < n \leq \theta_2 N \\ \beta\lambda & \theta_2 N < n \leq N \\ 0 & n > N \end{cases}$$

$$\text{NPC: } \lambda'_3 = \begin{cases} \lambda \left[1 - \left(\frac{n}{\tau N}\right)\right] & n < \min\{N, \tau N\} \\ 0 & n \geq \min\{N, \tau N\} \end{cases}$$

式中: $\alpha, \beta, \theta_1, \theta_2, \sigma, \tau$ 表示待确定参数,其中 $\alpha, \beta, \theta_1,$

$\theta_2 \in (0, 1)$ , 且  $\alpha > \beta, \sigma \in (0, 3]$  为非线性参数,  $\tau \in (0, 3]$  为线性系数,  $\tau N$  为 NPC 策略的滑行道排队长度有效阈值, 当  $\tau < 1$  时产生此有效阈值, 原因为需要保证当  $\tau < 1$  时  $\lambda_i$  取值非负。 $\sigma$  和  $\tau$  的取值范围是因为若两者超过 3, 推出率将接近于 1, 达不到控制效果。因此, 待优化的 3 种策略包含最优队长滑行道队长阈值  $N$  及其对应参数。

由推出策略的形式可见, SPC 策略随着当前滑行道排队长度  $n$  逐渐增加, 推出率以阶梯函数形式变化, 这种控制方法的特点是在滑行道排队长度在一定范围内时, 推出频率恒定不变, 很大程度上减少调度者的工作负担; 对于 NPC 策略,  $\sigma = 1$  时, 推出率呈线性变化, 而当  $\tau = 1$  时, 推出率呈非线性变化;  $\sigma$  和  $\tau$  取值越大, 推出率约接近 1, 即转化为 N-control 策略, 这种控制方法和 DPC 策略一样, 推出率根据滑行道排队长度的变化而实时变化, 但 NPC 策略可以通过参数寻优达到最优离港成本。推出策略通过推出率将拒绝一部分申请推出的飞机, 使其停留在登机口以减少滑行道排队长度, 而由于登机口等待的飞机增加, 导致登机口资源的占用及滑行道利用率的降低。因此, 策略对占用登机口的飞机给予一个惩罚因子, 同时也用以弥补滑行道利用率降低带来的损失。

## 2 动态推出控制模型

### 2.1 目标函数

当飞机的推出申请被拒绝时, 需要停留在登机口等待下一次推出申请, 以降低滑行燃油成本。然而, 如果登机口资源占用时间过长, 无疑会降低登机口利用率以及跑道利用率。因此策略对登机口停留时间引入一个惩罚项, 惩罚项要求随着登机口停留时间的增长, 并且停留时间越长, 惩罚系数越高。基于这个特点, 此处选择指数函数  $P = e^{\rho t}$  作为惩罚项。根据中国民航局<sup>[16]</sup>准点率报告中对准点/晚点的定义: 若一架航班在计划起飞时间之后的 30 min 以内完成起飞, 即认为该航班准点放行; 反之即为晚点。因此令燃油成本和惩罚成本在登机口停留时间  $G = 30$  min 处相等, 当登机口停留时间小于 30 min 时, 惩罚成本小于同等时间下的燃油成本, 一旦登机口停留时间超过 30 min, 惩罚成本急剧上升。燃油和惩罚成本如图 1 所示。

图 1 中, 燃油成本的斜率由数据采集日期油价计算得到, 令燃油成本曲线和惩罚成本曲线在停机位等待时间为 30 min 处相交, 惩罚成本系数由式 (1) 得到

$$\rho = \frac{\ln(ct + 1)}{t} \quad (1)$$

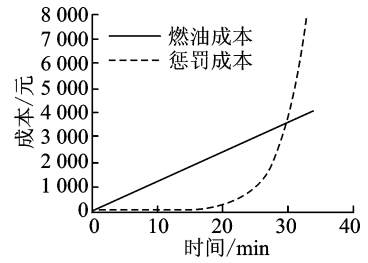


图 1 燃油成本及惩罚成本曲线

Fig. 1 Fuel-burn and gate-hold costs as a function of time

式中:  $\rho$  表示惩罚因子;  $c$  表示每分钟滑行燃油成本;  $t$  表示燃油和惩罚成本平衡点时间。推出策略的目标函数为总成本最小, 记为

$$\min C_T = \sum_{i=1}^M c \cdot W_i + (e^{\rho G_i} - 1) \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \lambda_i = \{\lambda'_{1,i}, \lambda'_{2,i}, \lambda'_{3,i}\} \quad (3)$$

$$0 \leq n \leq N \quad (4)$$

$$G_i \leq 30 \quad (5)$$

式中:  $i$  表示申请推出飞机;  $M$  表示离港飞机总数;  $W$  表示滑行时间;  $G$  表示登机口等待时间。式 (2) 为目标函数, 由滑行燃油成本和停机位等待惩罚两部分组成; 式 (3) 为推出率集, 飞机  $i$  的推出过程由式 (3) 决定; 式 (4) 为滑行道排队长度约束; 式 (5) 为延误约束。

### 2.2 基于网格搜索的蒙特卡洛仿真方法

受飞行计划、机场场面运行状态等众多因素影响, 航班的申请推出时刻为随机变量, 因此采用蒙特卡洛仿真的方法对航班离港过程进行仿真, 由于目标函数是经过一系列航班离港流程仿真后计算得到, 过程比较复杂, 为避免出现重大误差, 这里采用网格搜索法进行参数寻优, 求解流程如图 2 所示。

图 2 中滑行道最大排队允许长度根据滑行道有效长度和滑行飞机间距计算取 30;  $R$  为蒙特卡洛随机数集合且  $R_i \in (0, 1)$ , 用来模拟推出概率,  $R$  服从均匀分布, 例如当  $N = 10, n = 3$  时, 下一架飞机的推出概率为  $(1 - n/N) = 0.7$ 。此时进行判断, 若随机数  $R_i < 0.7$ , 即为“准许推出”; 反之则“拒绝推出”。为方便各策略之间的控制效果对比, 所有推出策略均使用同一随机数据集。算法中的网格为一个参数集, 如 NPC 策略的一个网格为  $\{\tau_i, \sigma_j\}$ , 网格精度为  $0.01^2$ , 则“当前网格”表示参数为  $\{\tau_i, \sigma_j\}$  时的离港过程循环。“全局网格”指能搜索空间内的所有  $\{\tau, \sigma\}$  集。网格总数记为  $l_{\max}$ , 网格搜索步长为搜索精度。利用网格搜索的方法可以遍历整个解空间的所有参数组合, 因此可以得到精确解。当飞机  $i$  的推出申请由于滑行道队长达到阈值或

京首都机场包括 01/19,18L/36R 和 18R/36L3 条跑道,其中 18L/36R 跑道为主起飞跑道,因此仿真数据取 2013 年 11 月 15 日北京首都机场 18L/36R 跑道的推出申请数据集。由于推出控制策略在航班密集时间段的效果明显,因此以 6:00 至 22:00 为仿真时间窗。仿真采用 MATLAB 2015b 软件,滑行耗油成本参数根据数据采集日期油价以及首都机场离港所有机型的当量滑行燃油消耗量计算得  $c=120$  元/min,根据式(1)计算得惩罚因子  $\rho=0.273$ ,为方便不同推出策略之间的结果对比,跑道服务时间(尾流间隔)采取固定值  $v=1.7$  min,时间窗内离港飞机总数  $M=498$  架,由于仿真时间限制,两种策略的参数寻优网格精度分别设定为 0.1 和 0.01。部分高峰期推出申请时间数据如表 1 所示。

表 1 7:00 am 至 7:30 am(高峰期)推出申请时刻

Tab. 1 Pushback requests from 7:00 am to 7:30 am

序号	推出申请时间	序号	推出申请时间	序号	推出申请时间
1	7:00	9	7:15	17	7:27
2	7:03	10	7:16	18	7:27
3	7:04	11	7:18	19	7:28
4	7:07	12	7:20	20	7:29
5	7:08	13	7:21	21	7:29
6	7:10	14	7:23	22	7:29
7	7:11	15	7:25		
8	7:13	16	7:26		

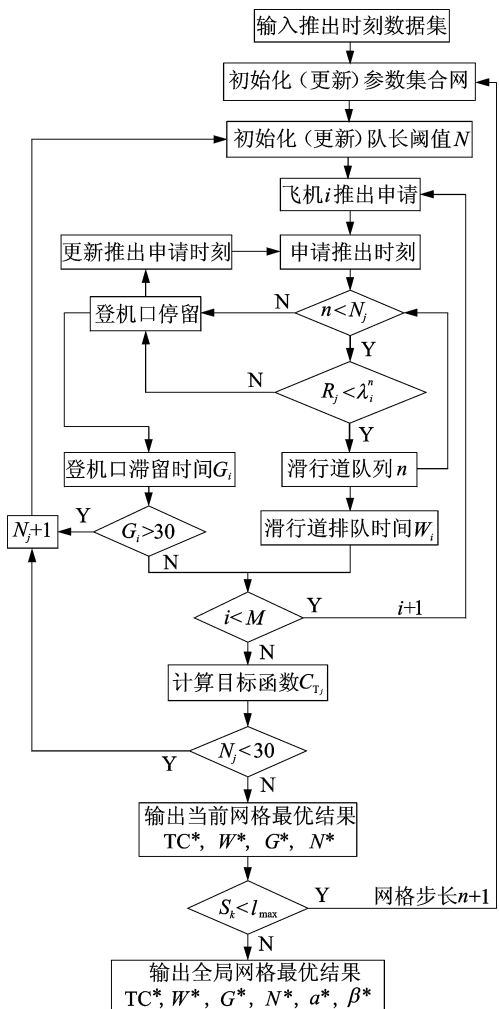


图 2 基于网格寻优的推出控制策略蒙特卡洛仿真流程图  
Fig. 2 Monte Carlo simulation flowchart of pushback control strategy based on gridding optimization

频率控制被拒绝时,它将停留在登机口等待 1 min 后进行下一次申请,直到被推出进入滑行道进而起飞。此期间,登机口的停留时间和滑行道的滑行时间将被输出用于目标函数的计算。当一个滑行道队长阈值  $N$  的循环进行完毕或者系统检测到某架飞机的停机位停留时间  $G_i > 30$  min,将赋予结果一个较大值并立刻对队长阈值更新进行下一个循环。当一个网格的离港过程仿真完毕( $i=M$ )时,输出当前最优结果,开始下一个网格的循环,直到所有网格参数下的离港过程仿真完毕后,输出全局最优成本  $C_T^*$  及其对应的队长阈值  $N^*$ 、停机位停留时间  $G^*$ 、滑行道滑行时间  $W^*$  和网格参数  $\sigma^*$  和  $\tau^*$ 。

### 3 实例分析

#### 3.1 策略仿真

为了探寻最优的动态推出策略,使用蒙特卡洛仿真的方法根据实际离港数据进行仿真寻优。北

使用提出的基于网格搜索的蒙特卡洛仿真方法对两种推出策略下的离港过程进行仿真,为探索不同停机位等待时间阈值对模型的影响,分别将停机位等待时间阈值设定为{15,20,25,30,35} min,两种策略仿真最优结果如表 2 所示。

由表 2 的仿真结果可以看出,离港成本随着停  
表 2 不同停机位等待时间阈值下两种策略仿真结果

Tab. 2 Simulation results of two pushback strategies on each gate-hold time threshold

推出策略	$G_{max}/$ min	$N^*$	$C_T/$ 元	$W/$ min	$G/$ min
SPC	15	21	616 635.1	10.13	3.57
	20	18	567 257.5	9.62	4.09
	25	15	509 470.6	8.15	5.58
	30	14	499 725.3	7.78	5.95
	35	14	499 725.3	7.78	5.95
NPC	15	24	552 306.9	8.94	5.22
	20	18	533 504.7	8.80	5.78
	25	30	456 943.7	6.99	7.16
	30	23	446 168.4	6.28	7.87
	35	23	446 168.4	6.28	7.87

机位等待时间阈值的增大而减小,直到  $G_{max}$  值为 30 min 时达到最优,继续增加  $G_{max}$  值对离港成本没有任何影响。在为 30 min 时,得到 2 种策略的最优形式分别为

$$SPC: \lambda'_2 = \begin{cases} \lambda & n \leq 4 \\ 0.4\lambda & 4 < n \leq 8 \\ 0.2\lambda & 8 < n \leq 14 \\ 0 & n > 14 \end{cases}$$

$$NPC: \lambda'_3 = \begin{cases} \lambda \left[ 1 - \left( \frac{n}{0.44N} \right) \right] & n < 11 \\ 0 & n \geq 11 \end{cases}$$

两种策略的各参数确定以后,仿真得到各滑行道队长阈值下的最优成本如图 3 所示。

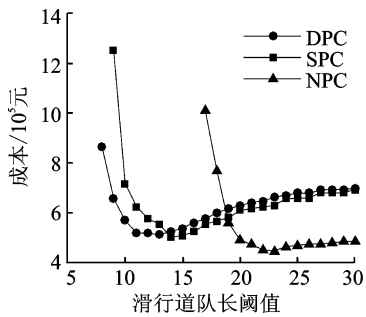


图 3 各推出策略成本随 N 值变化曲线

Fig. 3 Effect of total cost of each pushback strategy on N values

图 3 同时给出了 DPC 策略的成本变化曲线,当队长阈值较小时,由于成本过大在图 3 中并未显示出。可以看出,DPC 策略、SPC 策略和 NPC 策略取得最优成本时,对应的 N 值分别为 13,14 和 23。其中 SPC 策略的最优成本稍好于 DPC 策略,而 NPC 策略的最优成本则明显优于 DPC 策略。图 4 描述了包括 N-control 策略等 4 种策略在最优情形下的控制函数曲线。

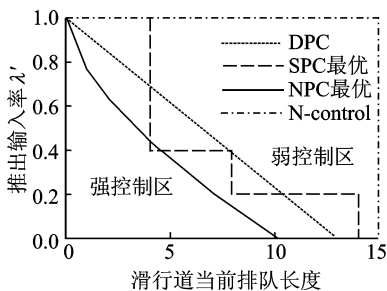


图 4 N-control, DPC 策略, SPC 策略和 NPC 策略曲线

Fig. 4 Curves of N-control, DPC, SPC and NPC strategies

图 4 根据推出策略曲线的位置分布将控制区域分为“弱控制区”和“强控制区”两部分,而图中 SPC 和 NPC 最优曲线分别是 SPC 策略和 NPC 策

略的强弱控制区分界线(以 N-control 控制策略为最弱强度控制策略)。当策略的曲线自弱控制区向强控制区移动时,离港成本逐渐下降,当曲线越过各自策略的分界线(策略最优)时,离港成本开始逐渐增加(控制强度增加导致停机位等待惩罚逐渐升高)。

图 5 描述了在 7:00 am 至 7:30 am 时使用 DPC 策略,SPC 策略和 NPC 策略时的各航班停机位等待时间和滑行道排队时间细节。

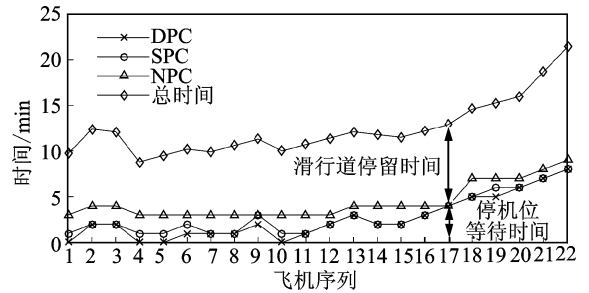


图 5 离港高峰期 DPC, SPC 和 NPC 策略下的停机位等待时间与滑行道停留时间分配

Fig. 5 Time assignment of gate-hold and sojourn on taxiway for DPC, SPC and NPC strategies at departure peak hours

由于推出策略控制的是两者的时间分配,所以 3 种推出控制策略控制下的各航班滑行总时长并未变化。图 5 中,总时间曲线为停机位等待时间和滑行道停留时间之和,各策略曲线以下为停机位等待时间,策略曲线以上至总时间曲线之间为滑行道停留时间。例如飞机 6,在 7:10 进行申请飞机推出,在 3 种推出策略控制下,其停机位等待时间和滑行道停留时间分别为 1 min 和 9.2 min, 2 min 和 8.2 min, 3 min 和 7.2 min。可以看出,DPC 策略,SPC 策略和 NPC 策略对停机位等待控制效果逐渐增强,对应的滑行道停留时间则会逐渐减少,以达到降低离港成本的效果。

### 3.2 控制策略对比

为了更直观地观察参数对策略的影响程度,使用相同的机场运行数据,分别对无控制,DPC,SPC 和 NPC 策略进行仿真,对比结果如表 3 所示。

表 3 推出策略最优仿真结果对比

Tab. 3 Comparison of optimal simulation results for each pushback control strategy

控制策略	$C_T$ /元	N	$V_F$ /kg	G/min	W/min	$R_T$ /kg
无控制	819 008.3	—	122 165.5	—	13.70	—
DPC	512 533.0	13	68 555.2	6.01	7.69	536 84.8
SPC	499 725.3	14	61 524.0	7.25	6.90	60 716.0
NPC	446 168.4	23	55 992.8	7.87	6.28	66 247.2

表3中, $V_F$ 为燃油消耗量, $R_T$ 为燃油节省量,在没有任何控制策略时,离港总成本为819 008.3元,燃油消耗量为122 165.5 kg,平均滑行时间为13.70 min;SPC策略最优滑行道排队阈值为14,其总成本和燃油消耗量分别为499 725.3元和61 524.0 kg,虽然总成本比DPC策略有少量降低,但是燃油消耗量具有明显降低;NPC策略最优滑行道排队阈值为23,虽然此阈值较大,但由于线性参数 $\tau$ 的存在,其有效阈值为 $23 \times 0.44 = 10.12 \approx 10$ ,NPC策略总成本和燃油消耗量分别为446 168.4元和55 992.8 kg,相对DPC策略都具有更优的成本。它将更多的滑行道等待时间转化为了停机位等待时间。为了更明显地对比各策略优化效果,总成本和燃油节省百分比如图6所示。

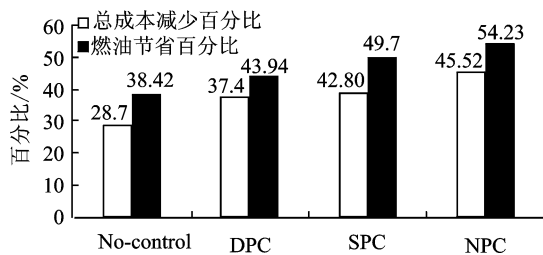


图6 总成本和燃油节省百分比

Fig. 6 Saving percentages of total cost and fuel burn consumption

图6除了提出的SPC和NPC两种动态推出控制策略外,还给出了当前已有的静态N-control策略和动态DPC策略的总成本及燃油节省成本对比结果。可以看出动态推出控制策略的结果整体优于静态推出策略,而NPC策略的在最优阈值时( $N=23$ )总成本和燃油成本节省分别可达45.52%以及54.23%,可以进一步降低机场的离港成本。虽然SPC策略的成本节省量不是最优的,但是其控制方法在一定区间内为恒定值,具有最简介的控制手段,可以大大降低机场调度者的工作负担。

## 4 结束语

针对当前机场离港地面运行高成本和长时间滑行等待的现状,提出了两种动态推出控制策略的一般形式,使得推出率可以随当前滑行道排队长度实时变化。为了寻找策略的最优参数和滑行道队长阈值的最优值,建立了离港控制模型,并设计了基于网格参数优化的蒙特卡洛仿真优化方法。分别对已有的DPC控制策略和提出的阶梯函数控制策略以及非线性函数控制策略的最优解进行离港过程仿真。仿真对比结果表明,最优参数和队长阈值的合理选择可以使离港推出控制策略具有更好

的控制效果。其中NPC策略能够使离港总成本和燃油成本减少45.52%和54.23%;而SPC策略具有减少调度员工作负担的优点,可以为机场管理者调度方式的改进提供建议。

由于未考虑飞机类型的不同,本研究采用平均当量跑道服务时间及滑行燃油成本进行仿真,而且18L/36R跑道为主起飞跑道,此研究并未考虑少量进港飞机的影响,所以存在一定局限性。因此,如何使离港推出策略更具普适性还有待深入研究。

## 参考文献:

- [1] KHADILKAR H, BALAKRISHNAN H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(7): 532-537.
- [2] IDRIS H, CLARKE J P, BHUVA R. Queuing model for taxi-out time estimation [J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2002, 10(1): 1-22.
- [3] CARR F, EVANS A, CLARKE J P, et al. Modeling and control of airport queuing dynamics under severe flow restrictions [C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, USA: [s. n.], 2002.
- [4] MADAS M A, ZOGRAFOS K G. Airport slot allocation: A time for change [J]. *Transport Policy*, 2010, 17(4): 274-285.
- [5] VOSSSEN T, BALL M. Slot trading opportunities in collaborative ground delay programs [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(1): 29-43.
- [6] 高强,严俊,朱金福. 协同决策机制下航空公司时隙分配优化决策 [J]. *交通信息与安全*, 2012, 30(1): 30-34.  
GAO Qiang, YAN Jun, ZHU Jinfu. Airlines' optimization model of slot allocation through collaborative decision-making mechanism [J]. 2012, 30(1): 30-34.
- [7] LIU Lihua, ZHANG Yaping, LIU Lan, et al. Congestion pricing for aircraft pushback slot allocation [J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): 1-15.
- [8] PUJET N, DELCAIRE B, FERON E. Input-output modeling and control of the departure process of congested airports [C]//*Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Portland, USA: AIAA, 1999.
- [9] CHENG V H L, SHARMA V, FOYLE D C. A study of aircraft taxi performance for enhancing airport surface traffic control [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001, 2(1): 39-54.
- [10] ROLING P, VISSER H. Optimal airport surface

- traffic planning using mixed integer linear programming[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2008, 8(1): 1-11.
- [11] FERONE R, HANSMAN R J, ODONI A R, et al. *The departure planner: A conceptual discussion*[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [12] SIMAIAKIS I, SANDBERG M, BALAKRISHNAN H. Dynamic control of airport departures: Algorithm development and field evaluation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 285-295.
- [13] SIMAIAKIS I, KHADIKAR H, BALAKRISHNAN H, et al. Demonstration of reduced airport congestion through pushback rate control[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 66: 251-267.
- [14] MARTINEZ H F, BALAKRISHNAN H. Analysis of potential implementations of pushback rate control at LaGuardia airport[C]//*Proceedings of the Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. Washington DC, USA: [s. n.], 2015.
- [15] 张亚平, 廉冠, 邢志伟, 等. 飞机推出控制停机位等待惩罚策略[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(3): 15-21.
- ZHANG Yaping, LIAN Guan, XING Zhiwei, et al. Aircraft departure pushback control strategy based on gate-hold penalty[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(3): 15-21.
- [16] 中国民航局. 2016年民航行业发展统计公报[R/OL]. (2017-05-08) [2017-09-10]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>.
- Civil Aviation Administration of China. 2016 civil aviation industry development statistics bulletin[R/OL]. (2017-05-08) [2017-09-10]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201705/P020170508503230814473.pdf>.

(编辑:张蓓)