

文章编号:1674-8190(2022)04-155-07

# 机场机动区滑行道运行方案设计及仿真评估

苏庭文,徐川,朱新平

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

**摘要:** 我国多跑道机场日益增多,研究此类机场机动区滑行道运行方案的优化设计及评估方法,对促进机场场面资源的集约高效利用具有重要意义。给出多跑道机场机动区滑行道运行方案“固定、单向、顺向、循环”的设计原则,以及面向平行跑道隔离运行场景的“单侧运行”和“双侧运行”滑行道运行方案设计范式;基于“航班备选滑行路径库”和所给滑行道运行方案设计基本原则及范式,两者综合运用开展机动区滑行道运行方案优化。以成都天府国际机场为例,设计三种机动区滑行道备选运行方案,并针对典型的日航班架次采用 AirTOp 软件进行仿真及量化分析。结果表明:所给多跑道机场机动区滑行道运行方案设计方法有助于缓解航班滑行延误、滑行冲突等待时间以及滑行冲突占比,所给仿真评估方法适用于大航班量下的场面运行方案对比论证。

**关键词:** 机场;机动区;滑行道运行方案;设计;仿真

中图分类号: V351.11

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.04.18

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Taxiway Operation Scheme Design and Simulation Evaluation in Airport Maneuvering Area

SU Tingwen, XU Chuan, ZHU Xinping

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** With the increasing number of multi runway airports in China, it is of great significance to study the optimal design and evaluation method of taxiway operation scheme in maneuvering area of multi runway airport for promoting the intensive and efficient utilization of airport surface resources. The “fixed, one-way, forward and circular”, which is the design principle of taxiway operation scheme in maneuvering area of multi runway airport is given, as well as the design paradigm of “one-sided operation” and “two-sided operation” taxiway operation scheme for isolated operation scenario of parallel runway; Based on the “flight alternative taxiing path library” and the given basic principles and paradigms of taxiway operation scheme design, it is comprehensively working out to optimize the taxiway operation scheme in the maneuvering area. Taking Chengdu Tianfu International Airport as an example, three alternative operation schemes of taxiway in maneuvering area are designed, and AirTOp software is used for simulation and quantitative analysis for typical daily flight sorties. The results show that the design method of taxiway operation scheme in maneuvering area of multi runway airport is helpful to alleviate flight taxi delay, taxi conflict waiting time and taxi conflict proportion, The simulation evaluation method is suitable for the comparison and demonstration of surface operation schemes under large flight volume.

**Key words:** airport; maneuvering area; taxiway operation scheme; design; simulation

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1733105); 四川省中央引导地方科技发展专项(2020ZYD094)

通信作者: 朱新平, zhu408@163.com

引用格式: 苏庭文, 徐川, 朱新平. 机场机动区滑行道运行方案设计及仿真评估[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 155-161.

SU Tingwen, XU Chuan, ZHU Xinping. Taxiway operation scheme design and simulation evaluation in airport maneuvering area [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 155-161. (in Chinese)

## 0 引言

机场机动区是指除机坪之外,机场内供航空器起飞、着陆、滑行的部分,又称之为运转区<sup>[1]</sup>。机动区滑行道运行方案是指为航空器使用机动区滑行道资源而设计标准滑行路线,需综合考虑滑行限制、管制移交点设置、冲突缓解与控制等多个因素。机动区内航空器活动与机坪内航空器活动紧密衔接,因此,机动区滑行道运行方案的设计及评估对于促进机场资源集约高效利用非常重要。尤其是近年来多跑道机场在我国日益增多,开展此类机场的机动区滑行道运行方案设计及评估方法研究,形成具有普适性的设计范式,可促进提升我国多跑道机场的机动区管理水平。

当前,专门针对多跑道机场机动区滑行道运行方案的优化设计可分为绕行滑行道的运行方案优化<sup>[2-4]</sup>、平行滑行道和垂直联络滑行道的运行模式优化<sup>[5]</sup>、普通滑行道运行方案优化<sup>[6-11]</sup>,并且通常会考虑场面冲突管控<sup>[12]</sup>或跑道与滑行道运行联合调度<sup>[13]</sup>来实施滑行方案优化。但是,这些研究多针对某一多跑道场景且未形成具有普遍指导意义、面向多跑道机场的滑行道运行方案设计方法。

本文研究机场机动区滑行道运行方案设计及仿真评估方法,并以成都天府国际机场为例进行验证。给出多跑道机场机动区滑行道运行方案设计原则及范式,规划成都天府国际机场机动区滑行道多种运行方案,并应用 AirTOp 软件建立对应的场面运行微观仿真模型,开展基于不同运行方案的量化分析。

## 1 多跑道机场机动区滑行道运行方案设计原则及范式

### 1.1 基本原则

多跑道机场机动区滑行道运行方案设计基于“固定、单向、顺向、循环”的基本原则,并考虑机场航站区分布以及整个场面滑行的冲突热点等因素来进行优化。具体包括:

(1)“固定”是指在某一跑道运行模式下,脱离不同机坪或机位(或连续相邻几个机位)的航班,均设计使用同一标准路线滑行,依次占用同样的

滑行道。

(2)“单向”是指在某一跑道运行模式下,针对同一滑行道或连续几个滑行道而言,进港或离港航班均设计沿着某一规定的方向来滑行。

(3)“顺向”是指针对同一滑行道或连续的几个滑行道而言,若存在进离港航班混流的情况,均设计航班沿着同一方向滑行,以避免对头滑行冲突的出现。

(4)“循环”是指利用滑行道系统中平行滑行道、垂直联络滑行道以及机坪滑行道之间的空间连通性,设计机动区滑行道系统不同子区域内的交通流,使之与其他机动区子区域之间或邻近机坪内的进离港航班交通流顺次衔接。

### 1.2 机动区滑行道系统运行方案设计范式

多跑道机场机动区滑行道系统运行方案的设计及选择,与跑道运行模式、航站区布局、机场跑道构型、垂直联络滑行道的数量等因素密切相关。目前,我国多跑道机场以平行跑道居多(包括跑道入口平齐和相互错开),仅北京大兴国际机场和成都天府国际机场存在侧向跑道,且我国平行跑道运行多采取隔离运行模式。归纳总结我国多跑道机场的机动区滑行道运行方案设计范式,主要有以下两种。

(1)范式 1:单侧运行设计范式。该范式对应平行跑道处于航站区一侧的情形,基于该范式设计的机动区滑行道运行一般方案如图 1 所示。

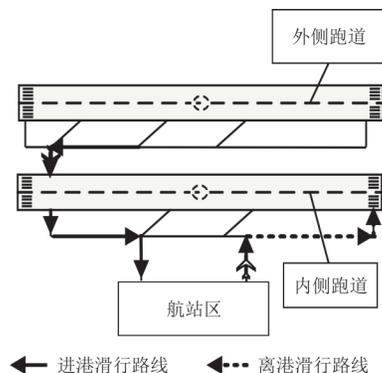


图 1 基于单侧运行设计范式的机动区滑行道运行一般方案  
Fig. 1 General scheme of taxiway operation in maneuvering area based on unilateral operation design paradigm

该范式主要考虑:①此种情形下,通常靠近航站区的跑道(内侧跑道)用于起飞、远离航站区的

跑道(外侧跑道)用于着陆,故外侧跑道着陆的航班需穿越内侧跑道。因此,在机动区滑行道运行方案制定过程中,应合理设计穿越滑行道的使用方案,通常选择在起飞跑道的远端实行穿越;②对于平行滑行道,可基于滑行道运行方案设计原则来设计相应的标准滑行路线,并尽可能减少进离港航班交通流交织。

基于范式 1 设计的机动区滑行道运行方案,其优势在于,进离港航班场面滑行交通流交叉点位相对较少,冲突较易控制。

(2) 范式 2: 双侧运行设计范式。该范式对应平行跑道处于航站区两侧的情形。该情形下,机场通常会修建垂直联络滑行道。依据不同场景下垂直联络滑行道的数量和位置,可设计机动区滑行道运行一般方案,具体如图 2 所示。

场景①: 仅航站区一端存在垂直联络滑行道。该情形下,基于范式 2 设计的机动区滑行道运行一般方案如图 2(a) 所示。主要考虑:①对于机动区平行滑行道,可依据单侧运行设计范式来为其制定运行方案,便于进离港航班及时抵离相应机坪;②对于垂直联络滑行道(通常有两条),宜分别将其用于进港航班和离港航班使用,实现进离港航班分流。

该方案的特点是:航班滑行距离相对较长,个别路段存在进离港航班混流;此外,个别滑行道交叉口由于进离港航班流交叉,存在潜在的冲突点位。

场景②: 航站区的两端均存在垂直联络滑行道。该情形下,基于双侧运行设计范式的机动区滑行道运行一般方案如图 2(b) 所示。主要考虑:①对于机动区平行滑行道,可依据单侧运行设计范式来为其制定运行方案,便于进离港航班及时抵离相应机坪;②对于垂直联络滑行道(通常有四条),应均衡相应滑行道上的交通负载,并尽可能地实现进离港航班交通流分离;③鉴于此时平行滑行道、垂直联络滑行道构成“回”字形连通结构,应实现该结构上航班交通流与机坪内部交通流的循环衔接,同时,还应考虑管制员指挥的便利性。该方案的特点在于:运行方案较复杂,个别机坪的进离港航班滑行距离相对较长,潜在冲突点位较多。

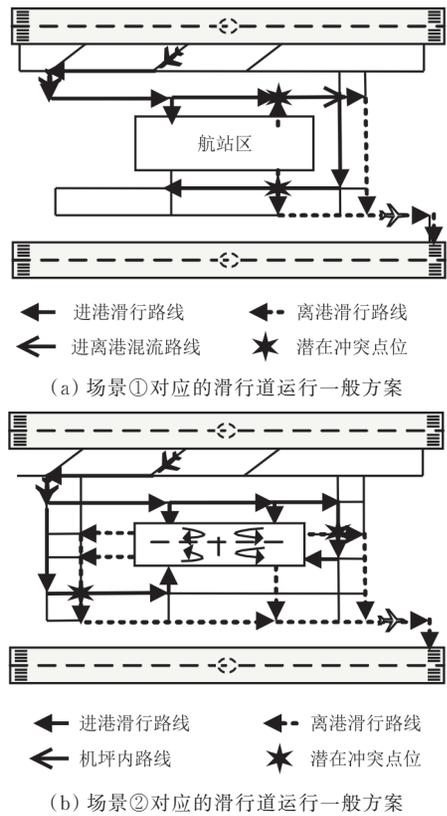


图 2 基于双侧运行设计范式的机动区滑行道运行一般方案  
Fig. 2 General scheme of taxiway operation in maneuvering area based on bilateral operation design paradigm

## 2 成都天府国际机场滑行道运行方案设计

成都天府国际机场是国家级国际航空枢纽,一期建成三条跑道、两个航站楼,满足年旅客吞吐量 4 000 万人次,其飞行区布局如图 3 所示。三条跑道包括两条宽距平行跑道、一条交叉跑道,具有独有的构型和运行特点。

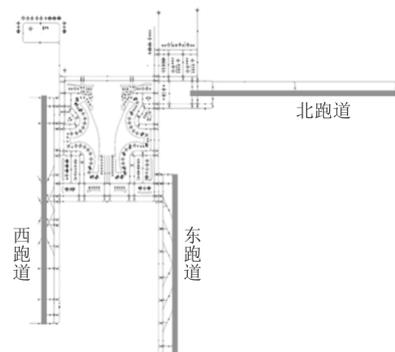


图 3 成都天府国际机场飞行区场区布局  
Fig. 3 Chengdu Tianfu International Airport flight area ground layout

基于成都天府国际机场平行跑道采用隔离平行运行、独立平行离场,北跑道仅用于自西向东起飞的基本运行模式,采用滑行路径规划算法(比如,基于遗传算法的初始路径规划算法<sup>[14]</sup>)得到航班滑行备选路径库,综合运用多跑道机场机动区滑行道运行方案设计原则及范式,针对该机场向北运行,给出3种机动区滑行道运行方案,具体思路如图4所示,运行方案如图5所示。

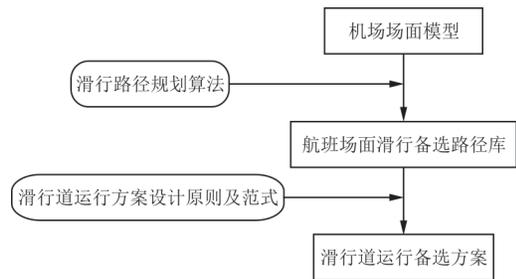


图4 滑行道运行备选方案生成过程  
Fig. 4 Process for generating taxiway operation scheme

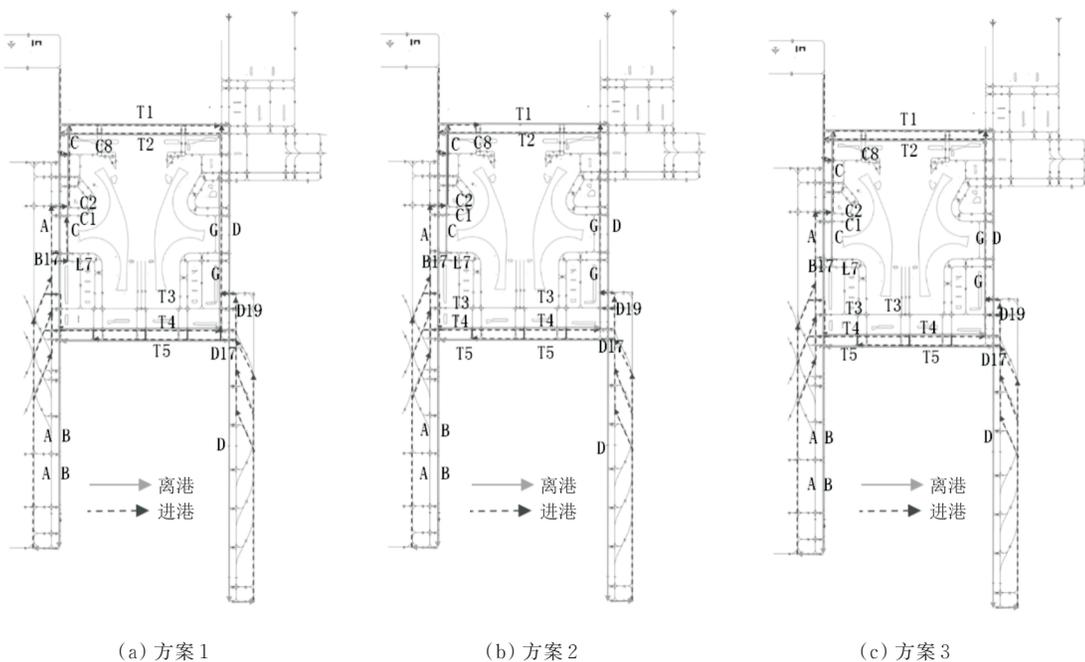


图5 成都天府国际机场机动区滑行道运行方案

Fig. 5 Taxiway operation scheme of Chengdu Tianfu International Airport

备选方案1如图5(a)所示。首先,利用基于Petri网和GA的初始滑行路径规划算法,生成备选路径库;然后,基于“固定、循环”原则,从备选路径库中,设置由垂直联络滑行道T1、平行滑行道D、垂直联络滑行道T5、平行滑行道A滑,以及一部分C滑(C2滑至T1之间、L7滑至C1之间),构成环形滑行路线(简称“外环”),外环上的航空器滑行路线设计呈“顺时针”状;垂直联络滑行道T4、平行滑行道G、垂直联络滑行道T2、平行滑行道B滑,构成环形滑行路线(简称“内环”),内环上的航空器滑行路线设计呈“逆时针”状。总体上,机动区滑行道系统整体的滑行路线方案呈“外顺内逆”的特征。基于不同的跑道运行方向,“内环”和“外环”滑行道的运行均遵循上述规律。

备选方案2如图5(b)所示。其“内环”滑行道运行方案同方案1;“外环”滑行道运行方案不同于方案1,进一步考虑“单向”原则,设置为:(1) T1滑(C8至G之间)仅供离港航空器使用;(2) 开放D19滑用于进港,关闭D17至D18之间的G滑;(3) 关闭B17滑。相对方案1,该方案有利于进港航班快速汇入T3滑行道,同时避免了机坪内L7滑行道上的潜在对头冲突。

备选方案3如图5(c)所示。其“内环”滑行道运行方案与方案1相同;“外环”滑行道运行方案不同于方案2,开放T1滑(C8至G之间)供进港航空器使用。相对方案2,该方案将原经由T4滑行至2号航站楼的进港航班改至经过T1滑行,以促进场面滑行道资源负载均衡。

### 3 成都天府国际机场仿真建模

目前 AirTOp 已成为民用机场及空域运行仿真的主流软件之一<sup>[15]</sup>。采用 AirTOp 软件对成都天府国际机场机动区滑行道运行备选方案进行仿真评估。

仿真过程针对向北运行展开。其中,跑道使用模式采取平行跑道(01/02)为隔离平行运行、独立平行离场,侧向跑道(11跑道)仅用于起飞;机动区滑行道运行方案即为第2节所给三种备选方案;机坪内航空器滑行及机位进出方案依据机场机坪塔台工作细则设定,如图6所示。

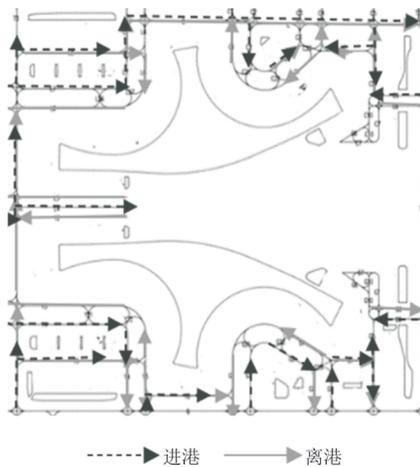


图6 成都天府国际机场机坪运行方案  
Fig. 6 Apron operation scheme of Chengdu Tianfu International Airport

机动区滑行道的航空器平均滑行速度设定为 30 km/h,机坪滑行道滑行速度设定为 10 km/h,机位推出速度设定为 3 km/h,飞行区内航班滑行纵向间隔按 50 m 控制,管制运行间隔参考成都天府国际机场起降间隔设置,暂不考虑空域限制因素。基于成都地区的历史航班数据特征,比如各航空公司航班量占比、机型比例、时刻分布等,分别构建 270、600、900 架次/日的仿真航班时刻表。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 航班地面滑行延误

航班地面滑行延误是指离港航班从机位推出至进入跑道头等待队列期间所产生的延误,或进港航班从跑道脱离至进入机位期间所产生的延误。

地面滑行延误降低比例:

$$\gamma = (C_1 - C_2) / C_1 \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为两种方案对比,总地面滑行时间延误降低比例; $C_1$ 、 $C_2$ 分别为某两种方案总的地面滑行延误时间。

针对三种机动区滑行道运行备选方案,在不同的日航班量仿真过程中,得到航班总的地面滑行延误如图7所示。

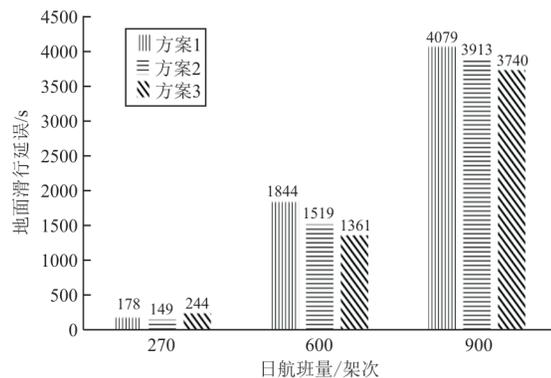


图7 3种滑行道运行方案下,不同的日航班量所对应的航班总地面滑行延误

Fig. 7 Under the three taxiway operation schemes, the total ground taxi delays corresponding to different daily flight volumes

从图7可以看出:当航班量为270架次/日时,方案2对应的总地面滑行延误较方案1、方案3分别降低了16%、39%;当航班量增长到600、900架次/日时,方案3对应的总地面滑行延误较方案1分别降低了26%和8%,较方案2分别降低了10%和4.4%。因此,总体来看,方案3在日航班量较多时,航班的总地面滑行延误时间较少,更有利于提高场面资源利用效率。

### 4.2 航班滑行冲突等待时间

航班滑行冲突等待时间是指离港航班从机坪开始滑行,至进入跑道头等待队列期间,或进港航班从跑道脱离至进入机位期间,由于滑行冲突所致航班等待的时间。

依据冲突发生位置不同,滑行冲突等待时间:

$$\alpha = A + B \quad (2)$$

式中: $A$ 为机坪内滑行冲突等待时间; $B$ 为机动区滑行冲突等待时间。

针对3种滑行道运行备选方案,在不同的日航班量仿真过程中,得到对应的航班滑行冲突等待

时间如表 1 所示,可以看出:在架次较少时(270 架次/日),方案 2 对应的机动区滑行冲突等待时间( $B$ )较小;架次较多时,方案 3 对应的总冲突等待时

间( $\alpha$ )相对较小,同时,对应的机动区滑行冲突等待时间 $B$ 与方案 2 差别不大,因此,架次较多时,方案 3 较优。

表 1 3 种滑行道运行方案下,不同的日航班量所对应的航班等待时间

Table 1 The flight waiting time corresponding to different daily flight volume under three taxiway operation schemes

航班计划	方案 1		方案 2		方案 3	
	总冲突等待时间( $\alpha$ )/s	机动区冲突等待时间( $B$ )/s	总冲突等待时间( $\alpha$ )/s	机动区冲突等待时间( $B$ )/s	总冲突等待时间( $\alpha$ )/s	机动区冲突等待时间( $B$ )/s
270 架次/日	135	59	114	33	126	47
600 架次/日	1 341	393	1 073	288	862	240
900 架次/日	2 704	838	2 504	627	2 151	649

### 4.3 航班滑行冲突占比

航班滑行冲突占比是指航班滑行过程中遭遇的冲突次数与总航班滑行冲突次数的比值,可表示为

$$\beta = E/D \quad (3)$$

式中: $E$ 为机坪内冲突次数或机动区内冲突次数; $D$ 为总航班滑行冲突次数。由式(3)可得不同区域

的冲突占比。

针对 3 种滑行道运行备选方案,在不同的日航班量仿真过程中,得到航班滑行冲突占比如表 2 所示,可以看出:对进港航班而言,方案 3 对应的机动区内滑行冲突占比相对较小,其所含进港航班滑行方案设计较优;对离港航班而言,方案 2 对应的机动区内滑行冲突占比相对较小,其所含的离港航班滑行方案设计较优。

表 2 3 种滑行道运行方案下,不同的日航班量所对应的航班滑行冲突占比

Table 2 The proportion of flight taxi conflicts corresponding to different daily flight volumes under three taxiway operation schemes

航班计划	方案 1				方案 2				方案 3			
	进港航班		离港航班		进港航班		离港航班		进港航班		离港航班	
	机坪内冲突占比/%	机动区冲突占比/%										
270 架次/日	38.6	61.4	45.0	55.0	42.8	57.2	60.7	39.3	41.0	59.0	51.7	48.3
600 架次/日	25.7	74.3	53.0	47.0	33.4	66.6	60.0	38.0	34.9	65.1	51.4	48.6
900 架次/日	31.4	68.6	53.1	46.9	37.8	62.2	61.1	38.9	35.4	64.6	47.0	53.0

## 5 结 论

(1)“固定、单向、顺向、循环”的多跑道机场机动区滑行道运行方案设计基本原则,以及对应的单侧运行方案设计范式、双侧运行方案设计范式有助于缓解航班滑行延误、冲突等待时间以及冲突占比。

(2)将“航班滑行备选路径库”和本文所给“多跑道机场机动区滑行道运行方案设计基本原则和范式”两者结合,可用于辅助开展多跑道机场滑行道运行方案优化。

下一步将考虑构建更科学全面的滑行道运行方案评估体系,支持开展运行方案仿真评估。

### 参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准: MH/T 5001—2020[S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.  
Civil Aviation Administration of China. Aerodrome technical standards: MH/T 5001—2020 [S]. Beijing: CAAC, 2020. (in Chinese)
- [2] 张兆宁, 王彤. 远端绕行滑行道的机场滑行路径优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(10): 241-248.  
ZHANG Zhaoning, WANG Tong. Taxiing path optimization of airport at the end-around taxiway[J]. Science Tech-

- nology and Engineering, 2019, 19(10): 241-248. (in Chinese)
- [3] 林有超, 唐小卫. 绕行滑行道的设置对机场运行的影响分析——以上海浦东国际机场为例[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(6): 29-33.  
LIN Youchao, TANG Xiaowei. Influence of end-around taxiway on airport operation: take PVG for instance [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2019, 37(6): 29-33. (in Chinese)
- [4] FENG Yilin, JOHNSON M E. Simulation analyses of end-around taxiway operations under four different runway and taxiway choices[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2021, 124: 1-10.
- [5] 李杰. 平行滑行道、垂直联络滑行道运行模式研究[J]. 民航学报, 2018, 2(6): 26-29.  
LI Jie. Research on the operation mode of parallel taxiway and vertical contact taxiway [J]. Journal of Civil Aviation, 2018, 2(6): 26-29. (in Chinese)
- [6] BROWNLEE A, WEISZER M, CHEN Jun, et al. A fuzzy approach to addressing uncertainty in airport ground movement optimization [J]. Transportation Research Part C, 2018, 92: 150-175.
- [7] 何庶, 卢朝阳, 王颜, 等. 侧向跑道机场滑行路径优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8695-8701.  
HE Shu, LU Chaoyang, WANG Yanyan, et al. Lateral runway airport based on improved genetic algorithm glide path optimization [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8695-8701. (in Chinese)
- [8] LI Nan, ZHANG Lei, SUN Yu, et al. 4-D trajectory prediction and dynamic planning of aircraft taxiing considering time and fuel [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(5): 852-866.
- [9] 李善梅, 高艺. 基于改进A\*算法的机场场面滑行路径优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 27-32, 228.  
LI Shanmei, GAO Yi. Optimization of aircrafts taxiing path based on improved A\* algorithms [J]. Computer Simulation, 2020, 37(3): 27-32, 228. (in Chinese)
- [10] 张兆宁, 王彤. 基于跑道出口滑行道选择的机场滑行路径优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 33-39.  
ZHANG Zhaoning, WANG Tong. Taxiing route optimization at airport based on runway exit taxiways selection [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(6): 33-39. (in Chinese)
- [11] 疏利生, 李桂芳, 嵇胜. 基于强化学习的航空器机场智能静态路径规划[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 65-70.  
SHU Lisheng, LI Guifang, JI Sheng. Aircraft AI static path planning on airport ground based on reinforcement learning [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 65-70. (in Chinese)
- [12] BENLIC U, BROWNLEE A, BURKE E. Heuristic search for the coupled runway sequencing and taxiway routing problem [J]. Transportation Research Part C, 2016, 71: 333-355.
- [13] 姜雨, 王欢, 樊卫国, 等. 场面航空器滑行时空协同优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 127-134.  
JIANG Yu, WANG Huan, FAN Weiguo, et al. Spatio-temporal cooperative optimization of surface aircraft taxiing [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 127-134. (in Chinese)
- [14] 朱新平, 汤新民, 韩松臣. 基于Petri网与遗传算法的航空器滑行初始路径规划[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 565-571.  
ZHU Xinping, TANG Xinmin, HAN Songchen. Initial path planning of aircraft taxiing based on Petri net and genetic algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 565-571. (in Chinese)
- [15] 柯雨辰, 胡明华, 杨磊, 等. 面向实际运行的战略航班时刻优化技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4260-4265.  
KE Yuchen, HU Minghua, YANG Lei, et al. Strategic flight schedule optimization technology for actual operation [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4260-4265. (in Chinese)

#### 作者简介:

苏庭文(1997-),男,硕士研究生。主要研究方向:复杂大型机场场面运行管理。

徐川(1998-),男,硕士研究生。主要研究方向:大型机场场面拥堵机理。

朱新平(1983-),男,博士,教授。主要研究方向:新一代空中交通管理,民航应急管理。

(编辑:马文静)