

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.011

## 基于延误油耗优化的平行跑道运行方式

杨越<sup>1,2</sup> 潘宏达<sup>2</sup> 刘永欣<sup>1,2</sup> 黄贻刚<sup>1,2</sup> 杨向阳<sup>3</sup>

- (1. 中国民航大学国家空管运行安全技术重点实验室, 天津, 300300;
2. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津, 300300;
3. 西北空管局管制中心安全业务室, 西安, 710082)

**摘要:** 在比较现有平行跑道运行方式的基础上, 制定了基于延误油耗优化原则的跑道选择策略。同时根据航班时刻表及起降间隔标准, 建立了数学模型, 提出了基于油耗优化原则的跑道选择和排序方法。算例表明该方法提高了混合运行方式下跑道的运行效率, 减少了航空器的滑行时间和等待时间, 降低了航空公司的运营成本。

**关键词:** 航空运输; 平行跑道; 运行方式; 间隔标准; 油耗

**中图分类号:** TP311.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2015)01-0077-06

## Operation Modes of Parallel Runways Based on Fuel Consumption Optimization

Yang Yue<sup>1,2</sup>, Pan Hongda<sup>2</sup>, Liu Yongxin<sup>1,2</sup>, Huang Yigang<sup>1,2</sup>, Yang Xiangyang<sup>3</sup>

- (1. National Key Laboratory of Air Traffic Operational Safety Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;
2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;
3. Security Business Department of Control Center, Xibei Air Traffic Management Bureau, Xi'an, 710082, China)

**Abstract:** By comparing the existing operation modes of the parallel runways, a selection strategy for runways is given based on the principle of optimizing fuel consumption. Then according to the airline schedules and the separation standard, a mathematical model is established, and a selection and ordering method for runways is proposed based on the fuel consumption optimization. An example indicates that the method can enhance the efficiency on the mixed operation mode of parallel runways, reduce the taxi time and holding time of aircrafts, as well as reduce the operation cost of airlines.

**Key words:** air service; parallel runways; operation mode; separation standard; fuel consumption

目前, 国内众多机场为了解决机场容量不足的问题普遍采用新建平行跑道的方式来增加机场容量。但是, 多跑道运行并不能沿用原有的跑道运行模式, 需要制定新的跑道运行方案, 根据航空器流量、跑道构型和空域结构进行协同管理。在当前的管制运行环境下, 国内的管制员对于航空器的空中交通管制服务普遍采用先到先服务的原则(First

come first serve, FCFS)。例如在具有平行跑道的机场, 塔台管制员会根据航空器的离场方向选择跑道就近起飞, 进近管制员也根据航空器的进场方向就近选择跑道引导航空器落地。这种情况下, 人的经验占据着主导因素, 缺乏科学的理论依据, 没有考虑到机场和航空公司的运行效率, 旅客的满意程度也有所降低。随着航班流量的迅速增长, 在保障

**基金项目:** 中国民航大学科研启动基金(2011QD12X)资助项目; 大学生创新创业训练计划(201410059019)资助项目; 中国民航大学教育教学改革(CAUC-ETRN-2013-30)资助项目。

**收稿日期:** 2014-04-16; **修订日期:** 2014-07-02

**通信作者:** 杨越, 男, 博士, 讲师, E-mail: yueyang@cauc.edu.cn。

安全的前提下,如何提高机场当局的运行效率、减小航空公司的运营成本、制定出满足最大效益的跑道运行方式和相关规则,是空管部门急需解决的问题。

对于平行跑道的运行方式和模型,国内学者已做了一些研究。郭海琦等借鉴单跑道混合运行的计算模型,建立了近距离平行跑道时空图,给出了近距离平行跑道容量和延误水平的计算模型<sup>[1]</sup>;徐肖豪等构建了近距离平行跑道容量的评估模型,比较了一降一起和两降运行模式下的近距离平行跑道理论容量<sup>[2]</sup>;顾正兵等系统地研究了近距离平行跑道的仪表运行方式,提出了具有实际可操作性且适合虹桥机场近距离平行跑道的最佳运行方式<sup>[3]</sup>。

本文在已有研究成果的基础上,重点研究了平行跑道混合运行模式下的跑道选择策略,提出了基于油耗优化原则的跑道选择和排序算法,并且结合实例说明了算法的可行性。

## 1 平行跑道运行方式及规则

2005年5月,中国民用航空总局颁布了《平行跑道同时仪表运行管理规定》,定义了平行跑道有4种运行模式<sup>[4]</sup>:独立平行仪表进近、相关平行仪表进近、独立平行离场和隔离平行运行。按照4种运行模式的不同组合,也可以分为半混合和混合运行。其中,半混合运行指两条跑道同时用于进近而其中一条跑道用于离场,或者两条跑道同时用于离场而一条跑道用于进近。混合运行指两条跑道同时用于进近和离场,离场可以独立离场,也可以非独立离场;进近可以相关进近,也可以独立进近。

对于近距离平行跑道(跑道中心线小于762 m),如虹桥机场、江北机场,我国现阶段主要采用隔离平行运行模式,即一条跑道用于起飞,另一条跑道用于降落,尚未达到采取相关或独立平行进近的使用能力。而对于远距离平行跑道(跑道中心线大于1310 m),如咸阳机场、长水机场,在起初实行双跑道运行时采取隔离平行运行,随着管制经验的积累,会根据空中流量、天气状况、空军活动和起降分布等情况,逐步向半混合和混合运行模式进行过渡,其步骤可分为:

(1)半混合运行A:两起一降,起飞飞机从执行单跑道放行间隔向独立平行离场模式过渡;

(2)半混合运行B:两降一起,降落飞机从执行单跑道放行间隔过渡到相关平行仪表进近模式,最终实现独立平行仪表进近;

(3)混合运行:两降两起,起飞飞机从执行单跑

道放行间隔向独立平行离场模式过渡;降落飞机从执行单跑道放行间隔向相关平行仪表进近模式过渡,最终实现独立平行仪表进近。

本文研究的对象是远距平行跑道,及其在隔离平行运行(一起一降)、半混合运行A(独立平行离场,两起一降)、半混合运行B(相关平行仪表进近,两降一起)和混合运行(独立平行离场,相关平行仪表进近,两起两降)4种跑道运行方式下的跑道选择及延误水平,并在混合运行模式下设计了基于油耗优化原则的算法。

## 2 跑道选择和排序方法

### 2.1 模型的建立

本文根据航班的预计起降时间及相邻航班的间隔要求,计算不同跑道运行方式下的航班延误成本,并给出使得延误油耗成本最优化的跑道选择及排序方案。为解决这一问题,特做如下假设:

(1)在所研究的时间段内,起降航班总数不超过机场允许的容量,气象条件良好;

(2)所有航班的计划起降时间(ETD/ETA)是已知或可求的;

(3)在一架飞机的分配起降时间(STD/STA)确定后,其他请求起降的飞机只能排队等候,顺序起降;

(4)如果有航班冲突,首先对优先级高的航班进行分配,本文规定在同一起降时刻下,进港航班具有较高的优先级。

若某一机场所在的终端区有 $N$ 架航班等待起降,表示为 $n=\{1,2,\dots,N\}$ ( $N$ 为起降总架次),跑道 $r=\{1,2,\dots,R\}$ ( $R$ 为机场跑道数)。 $D_{ij}$ 为先后起降的相邻两航班之间的间隔要求,与航班 $i$ 和航班 $j$ 的机型以及跑道的运行模式相关。 $T_{ir}$ 为航班 $i$ 选择 $r$ 跑道起降所需要的地面滑行时间。 $F_i$ 为第 $i$ 架飞机在起降时由于等待或滑行所需要的燃油流量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ),其中: $F_{1i}$ 为第 $i$ 架飞机在地面滑行阶段的燃油流量; $F_{2i}$ 为第 $i$ 架飞机在地面等待阶段的燃油流量; $F'_{2i}$ 为第 $i$ 架飞机在空中等待阶段的燃油流量; $ET_{ir},ST_{ir}$ 分别为航班 $i$ 在跑道 $r$ 起降的预计起降时间和分配起降时间, $d_i$ 为航班 $n_i$ 的延误时间。定义

$$y_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{航班 } i \text{ 在跑道 } r \text{ 上起降} \\ 0 & \text{航班 } i \text{ 不在跑道 } r \text{ 上起降} \end{cases} \quad (1)$$

本文所研究的是使总延误油耗成本达到最优的跑道选择和排序方法,并不与航班队列的总延误时间完全对应,即使相同的延误时间对不同飞行阶

段的航班所造成的影响也会有所差异。因此,在衡量航班延误造成的损失时,为兼顾航班的延误时间和飞行阶段的特征系数,以总的延误油耗成本最小对进离场航班进行优化,所采用的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^N F_i \cdot d_i = \min \sum_{i=1}^N [F_{1i} \cdot T_{ir} + F_{2i} \cdot (ST_{ir} - ET_{ir}) + F'_{2i} \cdot (ST_{ir} - ET_{ir})] \quad (2)$$

约束条件为

$$\sum_{r=1}^R y_{ir} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$F_{2i} = 0 \cup F'_{2i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式(3)表示同一时间只能有一架飞机占用跑道;式(4)表示在考虑等待延误时,起飞航空器只计算地面等待延误成本,降落航空器只计算空中等待延误成本。

## 2.2 起降间隔标准

对于平行跑道运行的机场来说,飞机降落或者起飞的间隔要求以及具体的运行方式对延误水平起着关键作用。根据相关规定,本文制定了算法所依据的航空器起降间隔标准。

### (1)前机进场,后机进场的间隔标准

根据《中国民用航空空中交通管理规则》第 46 条规定,同一跑道前后进近的航空器,应配备相应的尾流间隔标准,不同机型组合下前后机的尾流间隔不同<sup>[5]</sup>。若各机型降落的平均速度取值为:重型机 300 km/h、中型机 270 km/h、轻型机 200 km/h,则可得到同一跑道前后进近航空器的时间间隔<sup>[6]</sup>,如表 1 所示。

表 1 最小间隔标准

Tab. 1 Minimum separation standard

飞机位置	飞机类型	后机					
		最小距离间隔/km			最小时间间隔/s		
		重型	中型	轻型	重型	中型	轻型
前机	重型	8	10	12	96	133	216
	中型	6	6	10	72	80	180
	轻型	6	6	6	72	80	108

对于采用相关平行仪表进近模式,在两条相邻的仪表着陆系统航向道上同时进近的航空器,根据民航总局第 123 号令中的规定,应配备不小于 4 km 的雷达间隔。按照各机型降落的平均速度,当两机按照相关平行仪表进近模式前后进近时,机型为重型机、中性机、轻型机的后机与前机的最小时间间隔分别为:48,53,72 s。

### (2)前机离场,后机进场的间隔标准

根据实际的管制运行经验,考虑后机对前机的

追赶和跑道占用时间,包含必要的管制间隔裕度,单跑道在起降相间运行方式下落地航空器的间隔为 12~13 km,即起降航空器平均纵向间隔为 6~6.5 km。本文以 6 km 为标准,即同一跑道起降的航空器,当前机起飞开始滑跑时,后面落地飞机距跑道入口的距离不得小于 6 km,按照各机型降落的平均速度,机型为重型机、中型机、轻型机的后机与前机的最小时间间隔分别为:72,80,108 s。对于前后机分别在两条跑道起降的运行方式,尾流不会造成影响,无需配备间隔标准。

### (3)前机进场,后机离场的间隔标准

对于同一跑道前机进场,后机离场的间隔标准,主要依据落地飞机从飞越跑道入口到从跑道脱离的跑道占用时间。当前机分别为重型机、中型机、轻型机时,本文规定前后两机的间隔分别为 58,50,48 s<sup>[2]</sup>。对于前后机分别在两条跑道起降的运行方式,尾流不会造成影响,无需配备间隔标准。

### (4)前机离场,后机离场的间隔标准

对于同一跑道前后离场的两架航空器,其间隔标准按照非雷达尾流间隔 2 min 计算,对于按照独立平行离场方式离场的两架航空器,无需配备间隔标准。

## 2.3 算法流程

为实现使飞机总体延误油耗最低的目标,在航班时刻表已知的条件下,根据模型设计了基于延误油耗优化原则的跑道选择和排序算法,算法流程如下:

(1)按照航班时刻表的预计起降时间( $ET_{ir}$ )读取航班信息;

(2)根据前序航班的机型,确定该航班与前序航班的安全间隔标准  $D_{ij}$ ;

(3)根据该航班的停机位相对于跑道的位置属性,分别计算选择不同跑道起降时所需要的滑行时间  $T_{ir}$ ;

(4)确定在不同跑道起降时的分配起降时间  $ST_{ir}$ 如下

①若该航班的预计起降时间不早于其前序航班的分配起降时间,即  $ET_{ir} \geq ST_{jr}$ ,则该航班的分配起降时间  $ST_{ir} = \max\{ST_{jr} + D_{ij}, ET_{ir}\}$ ;

②若该航班的预计起降时间早于其前序航班的分配起降时间,即  $ET_{ir} < ST_{jr}$ ,则该航班的分配起降时间  $ST_{ir} = ST_{jr} + D_{ij}$ ;

(5)根据目标函数(2),以延误油耗成本最小选择起降跑道;

(6)保存每条跑道已排序的航班信息;

(7)重复步骤(1),直至航班结束。

本文算法流程图如图1所示。

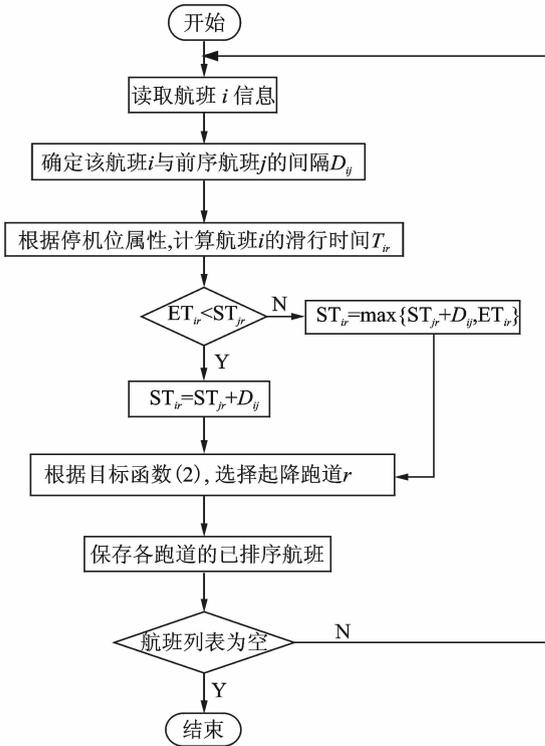


图1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of algorithm

### 3 算例分析

本文以西安咸阳机场某日某时段的20个进离港航班为研究对象,分析在不同跑道运行方式下的延误水平,并验证算法的有效性。咸阳机场双跑道属于远距平行跑道,南跑道(05R/23L)长3 800 m,北跑道(05L/23R)长3 000 m,跑道间距2 100 m,满足平行跑道独立运行的要求。《咸阳机场平行双跑道同时仪表运行管制保障方案》中规定:根据咸阳机场两条平行跑道的构型、几何数据和设备运行标准,确定南跑道为主跑道,采用一起一降即隔离平行运行模式时,一般情况下采用北跑道(05L/23R)降落,南跑道(05R/23L)起飞的方式。因此,分别对该算例中的运行方式做如下规定:

(1)隔离平行运行方式:离港飞机使用南跑道起飞,进港飞机使用北跑道降落;

(2)半混合运行方式 A:离港飞机根据停机位位置就近选择跑道起飞,独立平行离场,进港飞机使用北跑道降落;

(3)半混合运行方式 B:进港飞机根据停机位位置就近选择跑道降落,相关平行仪表进近,离港飞机使用南跑道起飞;

(4)混合运行方式:进离港飞机根据停机位位置就近选择跑道起降,独立平行离场,相关平行仪表进近;

(5)算法:基于混合运行方式及其间隔标准,以函数(2)为优化目标,按照算法流程进行跑道选择和排序。

对于就近起降的航空器,从跑道滑行至停机位(或从停机位滑行至跑道)的地面滑行时间平均设定为5 min,而在连接两条跑道的联络道上滑行的时间需额外增加3 min。根据ICAO标准排放量模型,发动机厂家提供了在海平面与15℃条件下,各个飞行阶段的基准燃油流量<sup>[7]</sup>,算例以CFM56-7B26发动机为例,在所研究的各阶段,飞机发动机的燃油流量取值为:地面滑行0.113 kg/s,进近着陆(空中等待)0.338 kg/s,慢车状态<sup>[8]</sup>(地面等待)0.083 kg/s。涉及的算法按照上述流程在Matlab 7.0的运行环境下编程实现,跑道选择的结果如表2所示,航班时刻及延误水平如表3所示。

表2中,停机位表示该航班的停机位位置位于南航站楼一侧(S)或是位于北航站楼一侧(N);使用跑道1表示南跑道,2表示北跑道。表3中,延误时间表示进港航班的空中等待时间或离港航班的地面等待时间。根据该运行结果做如下分析:

(1)隔离平行运行是双跑道最基本的运行模式,目前我国多数具有近距平行跑道的机场采取了这种运行模式,具有远距平行跑道的机场在起始运行的一段时间内也会采取这种方式。该模式降低了对管制水平的要求,但在一定程度上限制了跑道的容量,增加了地面航空器的滑行时间,同时提高了航空公司的运营成本,降低了旅客的满意度。

(2)双起一落运行方式是一起一落的改进,仿真中采用了根据停机位位置就近选择跑道起飞的原则,有效减小了航空器的地面滑行时间。但由于该方式限制了降落航空器的跑道,在落地航班流较大的时段内,会造成较长的空中延误,延误油耗相对于隔离平行运行不会有很大程度的改进。

(3)双落一起运行方式在仿真中采用了根据停机位位置而就近选择落地跑道的原则,在一定程度上降低了航空器的地面滑行时间。但这种方式在实际运行中对进近管制员的航空器雷达引导和排序方案的灵活制定提出了比较高的要求,而且在起飞航班流较大的时段内,会造成较长的地面延误。

(4)双起双落运行方式下,航空器就近起飞、就近落地,最大程度地减小了由于穿越联络道而产生

表 2 4 种运行方式下本文算法给出的跑道选择结果

Tab. 2 Runway selection results on four operational models by proposed algorithm

航班	类型	起飞/目的 机场	停机位	隔离平	半混合	半混合	混合运行	优化算法
				行运行	运行 A	运行 B		
OKA2885	离港	ZWWW	N	1	2	1	2	2
CQH8974	离港	ZSSS	N	1	2	1	2	2
GCR7465	进港	ZBTJ	N	2	2	2	2	2
HBH3275	离港	ZGKL	N	1	2	1	2	2
CES2391	进港	ZSWZ	S	2	2	1	1	1
CHH7784	进港	ZGSZ	N	2	2	1	1	2
CES2323	离港	ZGSZ	S	1	1	1	1	1
CES7002	进港	VTSP	S	2	2	1	1	1
CSC8806	离港	ZUCK	N	1	2	1	2	2
CQH8832	离港	ZYTX	N	1	2	1	2	2
CES2955	离港	ZLLL	S	1	1	1	1	1
CES2955	进港	ZSWX	S	2	2	1	1	1
CSN3213	进港	ZGSZ	S	2	2	1	1	1
CXA8239	离港	ZWWW	N	1	2	1	2	2
CES5480	离港	ZSQD	S	1	1	1	1	2
CCA1775	离港	ZLIC	N	1	2	1	2	2
CES2212	进港	ZLYL	S	2	2	2	2	1
CSN6920	进港	ZSHC	S	2	2	1	1	1
CCA1231	进港	ZBAA	N	2	2	2	2	2
CES2769	进港	ZSNJ	S	2	2	2	2	1

表 3 4 种运行方式下本文算法给出的航班时刻和延误水平

Tab. 3 Flight schedule and delay level on four operational models by proposed algorithm

航班	机型	ETD/ ETA	隔离平行运行		半混合运行 A		半混合运行 B		混合运行		优化算法	
			STD/ STA	延误 时间/s								
OKA2885	B738	0200	0200	0	0200	0	0200	0	0200	0	0200	0
CQH8974	A320	0205	0205	0	0205	0	0205	0	0205	0	0205	0
GCR7465	A320	0207	0207	0	0207	0	0207	0	0207	0	0207	0
HBH3275	E190	0210	0210	0	0210	0	0210	0	0210	0	0210	0
CES2391	B738	0214	0214	0	0214	0	0214	0	0214	0	0214	0
CHH7784	B738	0214	0215	80	0215	80	0215	80	0215	80	0214	0
CES2323	A319	0215	0215	0	0215	0	0216	70	0216	70	0215	0
CES7002	A320	0217	0217	0	0217	0	0218	30	0218	30	0217	0
CSC8806	A320	0220	0220	0	0220	0	0220	0	0220	0	0220	0
CQH8832	A320	0225	0225	0	0225	0	0225	0	0225	0	0225	0
CES2955	A320	0225	0227	120	0225	0	0227	120	0225	0	0225	0
CES2955	A320	0225	0225	0	0226	80	0228	200	0226	80	0226	80
CSN3213	A320	0227	0227	0	0228	40	0230	160	0228	40	0228	40
CXA8239	B737	0230	0230	0	0230	0	0231	30	0230	0	0230	0
CES5480	A320	0230	0232	120	0230	0	0233	150	0230	0	0232	120
CCA1775	A319	0230	0234	240	0232	120	0235	270	0232	120	0234	240
CES2212	A319	0232	0232	0	0234	108	0232	0	0234	108	0232	0
CSN6920	B737	0232	0234	108	0236	216	0236	258	0232	0	0234	108
CCA1231	A333	0233	0235	120	0237	228	0233	12	0235	120	0235	132
CES2769	A320	0234	0237	193	0239	301	0237	185	0237	193	0236	125
滑行时间/s			8 520		7 080		7 620		6 540		6 180	
总延误时间/s			981		1 173		1 565		841		845	
总延误油耗/kg			1 172		1 166		1 227		975		890	

的额外滑行时间,在总延误时间和延误油耗指标方面相比于其他3种运行方式也有了明显改善。

(5)以式(2)为目标函数的优化算法,在综合考虑航空器地面滑行、地面等待和空中等待油耗成本的基础上,对航空器的起降跑道进行选择,实际上是一种在混合运行模式下的优化策略。同一时段内,使用该算法计算得到的跑道选择和排序结果,在延误油耗指标上相比于上述4种运行方式分别提高了24%,23%,27%和9%,在实际的管制运行中为空管部门提供了一种可供参考的优化方案。

## 4 结束语

本文在总结现有平行跑道运行模式的基础上,建立了数学模型,给出了基于延误油耗最优化的跑道选择及排序方案。通过实例分析了在4种不同跑道运行方式下的延误水平,结果表明在相同的航班时刻及起降间隔标准下,该算法能够提高机场当局和航空公司的运营效益,减少了延误成本,提高了服务质量。

### 参考文献:

- [1] 郭海琦,朱金福. 近距平行跑道容量及延误水平计算模型[J]. 交通运输工程学报,2008,8(4):68-72.  
Guo Haiqi, Zhu Jinfu. Calculation models of capacity and delay for closely spaced parallel runway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(4): 68-72.
- [2] 徐肖豪,于跃,黄宝军,等. 不同运行模式的近距平行跑道容量分析[J]. 中国民航大学学报,2012,30(6):34-39.

Xu Xiaohao, Yu Yue, Huang Baojun, et al. Research on capacity of closely spaced parallel runways based on different operation models[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(6): 34-39.

- [3] 顾正兵. 虹桥机场近距平行跑道仪表运行方式研究[J]. 中国民航大学学报,2010,28(5):21-24.  
Gu Zhengbing. Study on instrument operation modes for closely spaced parallel runways of Hongqiao Airport[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28(5):21-24.
- [4] 中国民航局 123 号令. 平行跑道同时仪表运行管理规定[G]. CCAR-98TM,1998.
- [5] 中国民航局 86 号令. 中国民用航空空中交通管理规则[G]. CCAR-93TM-R2,1993.
- [6] 田勇,孙佳,万莉莉,等. 近距平行跑道间隔确定方法[J]. 交通运输工程学报,2013,13(1):70-76.  
Tian Yong, Sun Jia, Wan Lili, et al. Separation determining method of closely spaced parallel runways [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1):70-76.
- [7] 魏志强,王超. 航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(6):48-52.  
Wei Zhiqiang, Wang Chao. Estimating method of pollution emissions for scheduled flight in different phases[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6):48-52.
- [8] 张金柱,张榕. 发动机燃油流量研究[J]. 航空维修与工程,2013(3):50-54.  
Zhang Jinzhu, Zhang Rong. A study of engine fuel flow[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2013 (3):50-54.

