

文章编号:1671-1637(2013)01-0070-07

近距平行跑道间隔确定方法

田 勇, 孙 佳, 万莉莉, 李永庆

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:应用最不利环境下的尾流运动特性,研究了近距平行跑道相关平行进近模式下配对飞机斜距、进近下滑角和机型组合对跑道间隔的影响,利用最小尾流间隔标准和 NASA 侧风统计数据,并根据机型参数,提出了跑道中心线间距和跑道头错开间距的确定方法。分析结果表明:当配对前后机的斜向间隔标准一定时,跑道头错开间距随中心线间距和配对后机下滑角的增大而减小;当配对前后机下滑角相同时,跑道头错开间距随中心线间距和斜向间隔标准的增大而减小;当跑道中心线间距为 380 m,前后机下滑角均为 3° ,斜向间隔标准为 2 780 m 时,长沙黄花国际机场跑道头错开间距应不小于 1 483 m,符合国外已授权机场跑道参数。

关键词:航空运输;近距平行跑道;间隔标准;相关平行进近;尾流运动;跑道中心线间距;跑道头错开间距

中图分类号:V351.11

文献标志码:A

Separation determining method of closely spaced parallel runways

TIAN Yong, SUN Jia, WAN Li-li, LI Yong-qing

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: By using wake vortex movement characteristics under the most adverse environment, the effects of the slant range and approach glide angles of paired aircrafts and aircraft type combination on runway separation under the dependent parallel approach mode of closely spaced parallel runways were researched, the minimum wake vortex separation standard and crosswind statistical data of NASA were used, and the determination methods of runway centerline distance and threshold offset were put out based on aircraft type parameters. Analysis result shows that when the slant separation standard of paired leading and trailing aircrafts is a certain value, threshold offset decreases with the increases of runway centerline distance and the glide angle of paired trailing aircraft. When the glide angles of paired leading and trailing aircrafts are same, threshold offset decreases with the increases of runway centerline distance and slant separation standard. When runway centerline distance is 380 m, the glide angles of paired leading and trailing aircrafts are both 3° , and slant separation standard is 2 780 m, the threshold offset of Changsha Huanghua International Airport should be more than 1 483 m, which is accord with the runway parameter of foreign authorized airports. 3 tabs, 5 figs, 23 refs.

Key words: air transportation; closely spaced parallel runways; separation standard; dependent parallel approach; wake vortex movement; runway centerline distance; threshold offset

Author resume: TIAN Yong(1976-), male, associate professor, PhD, +86-25-84893461, 138139@263.net.

收稿日期:2012-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61104159)

作者简介:田 勇(1976-),男,湖北洪湖人,南京航空航天大学副教授,工学博士,从事空中交通管理研究。

0 引言

近年来,随着中国航班流量的迅猛增长,部分繁忙机场通过增加平行跑道等方法来满足日益增长的流量需求。近距平行跑道(Closely Spaced Parallel Runways, CSPR)为两条平行跑道中心线之间的距离小于 762 m 的跑道对^[1],相比单跑道不仅使用策略灵活,提升容量显著,而且占地规模、对环境的影响远小于远距平行跑道,正成为机场规划研究的重点领域之一。

国外许多大型机场都已运行近距平行跑道,如美国亚特兰大哈兹菲尔德-杰克逊国际机场、德国法兰克福国际机场、英国伦敦希斯洛国际机场和法国夏尔·戴高乐国际机场。中国目前也已在上海浦东国际机场、上海虹桥国际机场等几个航空枢纽机场运行近距平行跑道,并在长沙黄花国际机场、深圳宝安国际机场、重庆江北国际机场等规划建设近距平行跑道。可以预见,未来近距平行跑道将成为中国大中型机场主要跑道类型之一。但中国近距平行跑道主要采取双跑道隔离平行运行模式,近距平行跑道规划方法和构型参数确定方法也还没有系统的指南。为满足近距平行跑道的安全性和高效性,亟需对相关平行进近下的跑道间隔确定方法进行研究。

自 21 世纪初,国内外学者已开展近距平行跑道相关平行进近的研究。Hammer 等首次提出了近距平行跑道配对进近的思想,并进一步分析了配对进近中前机尾流对配对后机的影响^[2-3];Mundra 等分析了近距平行跑道采用配对进近的优势和实施配对进近所需要的硬件环境^[4];Laurence 等发现近距平行错列跑道构型(即跑道头错开一段距离的近距平行跑道)可避免配对后机受前机尾流的影响^[5];Rossow 等分析了尾流的运动特性,并提出了近距平行跑道规避尾流的建议^[6-7]。虽然上述研究取得了一定成果,但仅对近距平行跑道相关平行进近的概念和运行模式进行了深入研究,并未从跑道规划角度分析适用相关平行进近的跑道间隔约束。胡明华等综述了提高近距平行跑道容量的主要进近方法,分析了包括空中侧向间隔信息系统(AILS)和配对进近方法的利弊^[1];顾正兵系统研究了近距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平行跑道的最佳运行方式^[8];徐肖豪等用大涡模拟方法对飞机进近中尾流进行了数值模拟,总结了空中交通管制中尾

流间隔缩减技术^[9-11];冯志勇等分析了尾流对后机飞行安全的影响,并建立了动态尾流的基本数学模型^[12-15];王维等通过综合分析全球各大机场的近距平行跑道构型,给出了近距平行跑道间距的建议值和入口错开的决策建议^[16];郭海琦等利用双排队系统理论与逻辑推理方法,分别建立了近距平行跑道容量与平均延误水平计算模型^[17];张洪海等基于协同决策理念,提出了满足安全性和公平性约束条件下多跑道降落飞机的协同调度优化模型^[18]。国内对近距平行跑道相关平行进近的研究主要集中在尾流的特点和对容量的影响,对跑道间隔的研究还处于起步阶段,仅停留在数据统计和几何分析方面,未综合考虑尾流侧移和下沉的运动特性及结合最不利环境因素。

本文在已有研究成果的基础上,系统介绍近距平行跑道相关平行进近模式,分析尾流的侧移运动特性,结合最不利环境因素,建立数学计算模型,得到使配对后机不受前机尾流影响的近距平行跑道中心线最小间距;分析尾流的下沉运动特性,结合单跑道前后机尾流间隔特点,建立数学计算模型,得到使配对后机不受前机尾流影响的近距平行跑道头错开最小间距;确定出影响近距平行跑道相关平行进近的主要间隔因素,包括配对后机下滑角和配对前后机斜向间隔标准,并分析跑道头错开间距与配对后机下滑角、配对前后机斜向间隔标准和跑道中心线间距之间的变化关系。

1 近距平行跑道的相关平行进近模式

2005 年 5 月,中国民航管理部门颁布了《平行跑道同时仪表运行管理规定》,定义平行跑道有 4 种运行模式:独立平行仪表进近模式、相关平行仪表进近模式、独立平行离场模式和隔离平行运行模式。其中相关平行仪表进近模式(简称相关平行进近)是指在相邻的平行跑道仪表着陆系统上进近的航空器之间需要配备规定的雷达间隔,在平行跑道上同时进行的仪表着陆系统进近的运行模式,而现阶段中国近距平行跑道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。

美国学者 Hammer 最早提出配对进近,即前机与后机各自建立航向道后,可在保持一定斜距的条件下配对进近,见图 1,其中 C 为近距平行跑道的跑道中心线间距; D 为近距平行错列跑道的跑道头错开间距; Z 为配对进近前后机的斜向间隔标准。考虑配对前机尾流对配对后机的影响,相关平行进近中前后机

纵向间距应保持在一定范围内。其中最小纵向间距是假设前机发生错误进近而闯入后机的航向道,后机仍能及时进行避让机动,不至于造成危险接近甚至碰撞的风险所需满足的间距;最大纵向间距是最大不利侧风的影响下后机仍能避开前机尾流进行正常进近所需满足的间距。

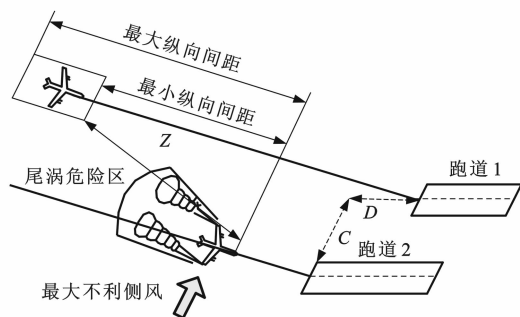


图1 配对进近

Fig. 1 Paired approach

2011年FAA发布了基于ILS/MLS的近距离平行跑道相关平行进近文件,这表明美国已开始正式授权一些建有近距离平行跑道的机场实施相关平行进近,文件规定被授权机场导航设施应满足相关精密进近程序,需在一定天气条件下实施,前后机之间保证2 780 m的斜向间隔,应用错列跑道以及满足一定的机型组合下实现相关平行进近。

中国虽还未在近距离平行跑道实施相关平行进近,但在前期规划跑道构型时,需为将来实施相关平行进近做好准备,以避免建成后因不能进行相关平行进进而限制跑道的容量,阻碍机场的发展。

2 跑道间距的确定

当跑道对为平行错列跑道时,前机与后机会额外增加垂直间隔,不仅能增加跑道容量,而且利于实施相关平行进近^[19-20],平行错列跑道在国内外的应用日益广泛,因此,本文研究的对象为近距离平行错列跑道。在近距离平行跑道规划和实施相关平行进近中,确定2条跑道的中心线间距 C 和跑道头错开间距 D 是2个关键技术问题。

2.1 跑道中心线间距

近距离平行跑道中心线间距应不大于762 m,在此范围内,跑道中心线间距的确定与管制程序、运行方式与飞行安全、效率和土地节约等问题密切相关,但最主要的影响因素为侧风环境下的尾流影响。

本文主要分析在最大不利侧风影响下,如何确定近距离平行跑道中心线间距,使相关平行进近时后机避开前机尾流的影响。

在图1所示的配对进近中,最大不利侧风将前机所产生的尾流吹向后机航向道,可能影响后机的正常进近。分析美国NASA对1988~1999年所发生的165起飞行安全事故中的侧风统计数据可得,侧向风速为 $1\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为尾流事故多发风速环境,其中侧向风速为 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最为危险;当侧向风速小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,尾流的侧移运动可忽略不计;当侧向风速大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,较大的侧风会吹动2个尾涡,而使尾涡迅速消散。本文最不利侧风风速值取 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为垂直于航向道。

尾流的侧移根据是否受地面效应影响可分为2个阶段考虑:一个为尾流不受地面效应影响的阶段(飞机距离地面高度大于翼展长度),若在稳定的大气条件下,尾涡的中心间距几乎保持不变,当有侧风影响时,尾涡会以略大于风速的速度侧移;另一个为尾流受地面效应影响的阶段(飞机距离地面高度小于翼展长度),若尾涡距地面高度小于半个翼展长度,尾涡会与地面相互作用而快速消散,若尾涡距离地面高度大于半个翼展长度,尾涡之间及与地面的相互作用会导致其分离并阻碍它们正常下降,在稳定大气条件下,尾涡会以 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向两侧移动。

当不受地面效应影响时,尾涡流的最大侧移距离 C_1 为

$$C_1 = \frac{b_0}{2} + \frac{l(\omega + \delta_1)}{V_1} \quad (1)$$

$$b_0 = \frac{\pi b}{4} \quad (2)$$

式中: b_0 为前机产生两股涡流的起始涡距; l 为前后机的纵向间距; ω 为最不利侧风的速度; δ_1 为不受地面效应影响时,无侧风影响下的尾涡侧移速度; V_1 为后机最后进近速度; b 为前机翼展长度。

当受地面效应影响时,尾涡流的最大侧移距离 C_2 为

$$C_2 = \frac{b_0}{2} + \frac{l(\omega + \delta_2)}{V_1} \quad (3)$$

式中: δ_2 为受地面效应影响时,无侧风影响下的尾涡侧移速度。

在最大不利侧向风速为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,尾涡能维持约40 s不消散^[14-15],要得到受尾流影响的最不利情况,就需要保证配对后机到达与前机位置平行处时,所用的时间不大于40 s。

当配对后机为轻型机时, l 取为2 780 m,轻型机以Aerostar机型为例,进近速度为 $204\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,计

算得到配对后机到达前机位置平行处时所用时间为 49.0 s, 大于 40 s, 尾流已消散, 不符合研究要求。当配对后机为中型机时, l 取为 2 780 m, 中型机以波音 737-800 为例, 进近速度为 $258 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 计算得到配对后机到达前机位置平行处时所用时间为 38.8 s, 小于 40 s, 符合研究要求, 因此, 本文在计算跑道中心线间距时, 配对后机选取中型机, 前机选取重型机。

本文中型机以波音 737-800 为例, 重型机以波音 747-400SP 为例, V_1 取 $258 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, b 取 64.3 m, l 取 2 780 m, w 取 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综合可得, 近距平行错列跑道在相关平行进近时跑道中心线之间的最小间距 C 为

$$C = \max\{C_1, C_2\} + \Delta C \quad (4)$$

式中: ΔC 为安全余量, 本文取 20 m, 并以 5 m 向上取整。结合式(1)~(4)计算可得 C 约为 280 m。

当侧风风速分别为 1、2、3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 对应的跑道中心线最小间距分别为 200、240、280 m。当机场可用面积有限, 不能提供足够的近距平行跑道中心线间距时, 可限制近距平行跑道在一定侧风环境下实施相关平行进近。

2.2 跑道头错开间距

近距平行错列跑道的跑道头错开间距不仅影响跑道容量、地面滑行路径、飞行区占地, 还有助于相关平行进近时在左右跑道对应的下滑道间建立垂直间距。

近距平行跑道的跑道头错开间距应满足相关平行进近时后机受配对前机尾流影响的风险不大于后机受同一跑道前机尾流影响的风险, 即无论是后机到达同一跑道进近的前机位置, 还是相关平行进近时到达与配对前机平行位置时, 距离前机尾流的垂直距离相同。

近距平行错列跑道下滑道垂直间距见图 2, A_1 、 A_2 、 A_3 分别为配对进近前机、同一跑道进近后机、

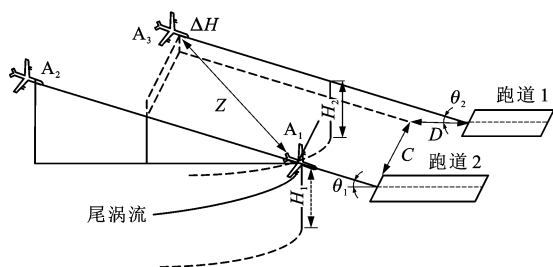


图 2 下滑道垂直间距

Fig. 2 Vertical distance of glide slopes

配对进近后机; θ_1 、 θ_2 分别为配对前机、配对后机的下滑角。假设 A_1 在 T_0 时刻到达图中所示位置, 同一跑道进近的后机 A_2 经过时间间隔 ΔT_1 到达该位置, 距离 A_1 在 T_0 时刻产生尾流的垂直距离为 H_1 , 配对进近的后机 A_3 经过时间间隔 ΔT_2 到达与该位置平行处, 距离 A_1 在 T_0 时刻产生尾流的垂直距离为 H_2 。要使尾流垂直环境相同, 需要满足

$$\begin{cases} H_1 = H_2 \\ H_1 = h_1 \\ H_2 = h_2 + \Delta H \end{cases} \quad (5)$$

式中: h_1 为 A_1 在 T_0 时刻产生的尾流经过 ΔT_1 后下沉的距离; h_2 为 A_1 在 T_0 时刻产生的尾流经过 ΔT_2 后下沉的距离; ΔH 为因跑道头错开而产生的垂直间距。

根据《中国民用航空空中交通管理规划》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。雷达间隔的最小尾流间隔标准见表 1, 不同机型组合下前后机的尾流间隔不同^[21-23]。为了得到最保守的时间间隔值, 取在同一条跑道上着陆的前机为重型机, 后机为轻型机, 可得前后机的最小时间间隔 ΔT_1 为 167 s。

表 1 最小间隔标准

Tab. 1 Minimum separation standards

飞机类型		后机					
		最小距离间隔/km			最小时间间隔/s		
		轻型	中型	重型	轻型	中型	重型
前机	轻型	6	6	6	98	74	74
	中型	10	6	6	138	74	74
	重型	12	10	8	167	114	94

在近距平行跑道相关平行进近时, 配对前后机需满足至少 2 780 m 的斜向间隔, 忽略由跑道头错开而产生的垂直间距 ΔH , 结合上节得到的跑道中心线间距(为保守起见, 本文取最小值), 可以计算出相关平行进近中配对前后机之间的纵向距离约为 2 764 m, 在计算跑道头最小错开间距时, 由于不同机型产生尾流的强度和抗尾流的能力不同, 因此, 本文选取最不利情况下的配对机型组合, 即选取配对后机为轻型机, 前机为重型机, 轻型机以 Aerostar 机型为例, 其最后进近速度为 $204 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 计算出最不利情况下, 配对前后机的最小间隔时间 ΔT_2 为 49 s。

要得到一定时间间隔下飞机距离尾流的垂直间距, 首先需考虑尾流的运动。尾流主要会发生下沉和侧移两种运动, 本文在计算跑道头错开间距时主要考虑尾流的下沉运动。

依据 FAA 的 Volpe 国家交通研究中心尾流研究报告绘制出尾流随时间的下沉速度曲线,重型机和中型机产生的尾流随时间的下沉速度曲线见图 3。两种机型产生的尾流下沉速度特性均可分 3 个时间段。尾流在产生 120 s 后基本不再下沉,可得

$$\Delta H = \int_{\Delta T_2}^{75} (0.003t - 1.61) dt + \int_{75}^{90} (0.034t - 3.81) dt + \int_{90}^{120} (-0.0009t - 0.74) dt \quad (6)$$

式中: t 为时间。

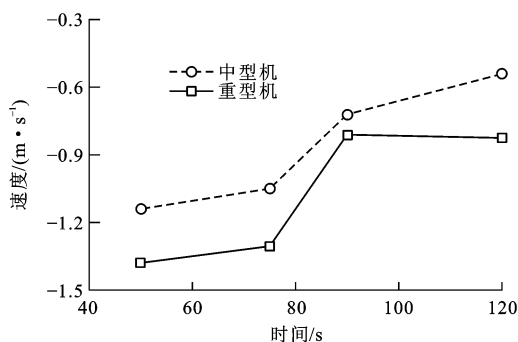


图 3 尾流下沉速度曲线

Fig. 3 Wake sinking velocity curves

分别对 3 个时间段积分后求和,由于 ΔT_1 为 167 s, ΔT_2 为 49 s, ΔH 也就是在 $\Delta T_1 - \Delta T_2$ 时间段内尾流的下沉距离,经计算,得到 $|\Delta H|$ 为 78 m。 D 与 $|\Delta H|$ 的关系为

$$D = |\Delta H| \cot(\theta_2) \quad (7)$$

式(7)将需补偿的垂直间距 $|\Delta H|$ 与配对后机的下滑角 θ_2 结合,可得跑道头需错开的最小间距。本文中 θ_2 取 3° ,得到配对前机为重型机、配对后机为轻型机时,为使后机不受到尾流的影响,近距平行错列跑道的跑道头至少需错开 1 492 m。该最小间距与前机类型、前后机的间隔时间、下滑角等因素密切相关。

当机场周边地形复杂,土地资源有限时,为在保证安全的前提下尽量缩短跑道头错开间距,可以采用高角度进近。如将后机进近的下滑角由 3° 增加到 $3.1^\circ \sim 3.3^\circ$ 时,可以有效增大 $|\Delta H|$,从而减小跑道头错开间距 D ,高角度进近时 D 的取值见表 2。

应用 MATLAB 软件可得在相关平行进近航空器斜向距离为 2 780 m 时,近距平行跑道跑道头错开间距 D 、配对后机下滑角 θ_2 和跑道中心线间距 C 之间的关系见图 4。

由图 4 可以看出,近距平行跑道采用相关平行进近,当配对前后机的斜向间隔标准一定时,跑道头

表 2 高角度进近时的 D

Tab. 2 D of high angle approach

$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	D/m
3.0	3.1	1 444
3.0	3.2	1 399
3.0	3.3	1 356

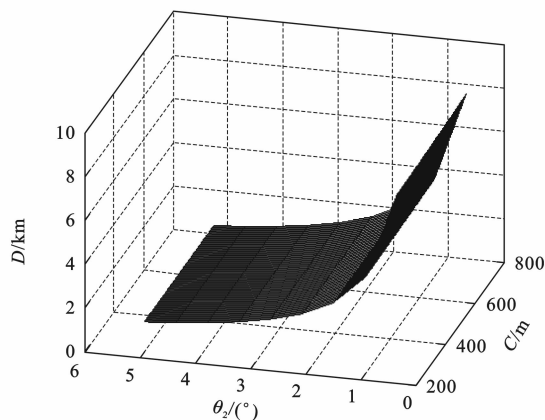


图 4 D 、 θ_2 和 C 之间的关系

Fig. 4 Relationship among D , θ_2 and C

错开间距 D 随配对后机的下滑角 θ_2 增大而减小,随跑道中心线间距 C 增大而减小。

当配对后机下滑角与前机下滑角相同时,跑道头错开间距 D 、跑道中心线间距 C 和配对航空器斜向间隔标准 Z 之间的关系见图 5。

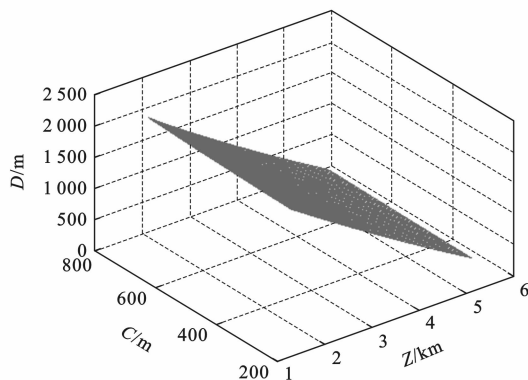


图 5 D 、 C 和 Z 之间的关系

Fig. 5 Relationship among D , C and Z

由图 5 可以看出,当配对后机下滑角与前机下滑角相同时,跑道头错开间距 D 随跑道中心线间距 C 的增大而减小,随配对航空器斜向间隔标准 Z 的增大而减小,因此,本文结论为考虑各不利影响因素均为极端情况时,跑道头需要错开的最小安全间距。

在 2011 年,美国已授权波士顿罗甘将军国际机场、克利夫兰霍普金斯国际机场、费城国际机场等 5 个机场进行近距平行跑道的相关平行进近运行,本文的研究结果符合已授权机场跑道间隔参数,文

中得到影响因素的变化趋势也与授权机场跑道间隔影响因素的种类与变化趋势相同。

3 实例分析

长沙黄花国际机场 2011 年旅客吞吐量已达到 1 381 万人次,现有的单条跑道已趋于饱和,需要新建跑道以提高机场容量。规划的第 2 条跑道位于现跑道东侧,规划间距为 380 m,与现跑道形成一组近距平行跑道,其中现跑道长 3 200 m,宽 45 m;规划的第 2 条跑道跑道长 3 800 m,宽 60 m。若采用相关平行进近运行模式,则需满足配对前后机的斜向间隔为 2 780 m。由此可以计算出相关平行进近中配对前后机之间的纵向距离约为 2 754 m,选取配对后机为轻型机,前机为重型机,轻型机以 Aerostar 机型为例,其最后进近速度为 $204 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,计算出最不利情况下,配对前后机的最小间隔时间 ΔT_2 为 48.6 s。

将 ΔT_2 代入式(6)可得 $|\Delta H|$ 为 77.70 m,考虑配对前后机不同的下滑角,可以得到对应的跑道头需错开的最小间距,见表 3。

表 3 长沙黄花国际机场跑道头错开最小间距
Tab. 3 Minimum threshold offsets of Changsha Huanghua International Airport

$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	D / m
3.0	3.0	1 483
3.0	3.1	1 437
3.0	3.2	1 390
3.0	3.3	1 348

由以上计算可得,若在长沙黄花国际机场规划的近距平行跑道实施相关平行进近,跑道头错开间距需满足表 3 中下滑角不同时所对应的最小值。

4 结 语

本文首先分析在最大不利侧风及地面效应影响下,若要使近距平行跑道相关平行进近的后机不受前机尾流影响,所需要保证的最小跑道中心线间距约为 280 m,并在此基础上分析了若要保证配对后机受前机尾流影响的风险不超过单跑道运行的风险,近距平行错列跑道所需的最小跑道头错开间距为 1 492 m。随后,确定出配对后机下滑角、配对前后机斜向间隔标准为主要间隔影响因素,应用 MATLAB 软件得到跑道头错开间距随配对后机下滑角、配对前后机斜向间隔标准和跑道中心线间距的变化趋势图,得出跑道头错开间距随配对后机下滑角、配对前后机斜向间隔标准和

跑道中心线间距的增大而减小。以长沙黄花国际机场为例,当跑道中心线间距为 380 m,配对前后机下滑角均为 3° ,斜向间隔标准为 2 780 m 时,跑道头错开间距应不小于 1 483 m,可供长沙黄花国际机场规划第 2 条跑道和实施相关平行进近设置跑道间隔时参考。

近距平行跑道是中国未来大中型机场的主要跑道构型之一,相关平行进近更是未来的发展趋势,本文主要研究了相关平行进近的近距平行跑道规划中的两个关键技术问题,即近距平行跑道的跑道中心线间距和跑道头错开间距的确定。本文的研究为以后更好地实施近距平行跑道的相关运行提供了跑道构型参考,从而可更大程度提升跑道容量,增加机场运行效率。

参考文献:

References :

- [1] 胡明华,田 勇,李 凯. 机场近距平行跑道进近方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2003,1(1):64-69.
HU Ming-hua, TIAN Yong, LI Kai. Study of approach procedure to closely spaced parallel runways[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2003, 1(1): 64-69. (in Chinese)
- [2] HAMMER J B. Case study of paired approach procedure to closely spaced parallel runways[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2000, 8(3): 223-252.
- [3] EFTEKARI R R, HAMMER J B, HAVENS D A, et al. Feasibility analyses for paired approach procedures for closely spaced parallel runways[C]//IEEE. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference(ICNS), 2011. Venice: IEEE, 2011: 1-14.
- [4] MUNDRA A D, COOPER W W, SMITH A P, et al. Potential Benefits of a paired approach procedure to closely spaced parallel runways in instrument and marginal visual conditions [C] // IEEE. Digital Avionics Systems Conference. St. Paul: IEEE, 2008: 10-27.
- [5] LAURENCE A, DAVID D, STEVEN L, et al. Increasing airport arrival capacity in NextGen with wake turbulence avoidance[C]//IEEE. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference(ICNS), 2009. Richmond: IEEE, 2009: 1-15.
- [6] ROSSOW V J. Vortex-free flight corridors for aircraft executing compressed landing operations[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(5): 1424-1428.
- [7] ROSSOW V J, MEYN L A. Guidelines for avoiding vortex wakes during use of closely spaced parallel runways[R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [8] 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 Zheng-bing. 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. (in Chinese)
- [9] 徐肖豪, 赵鸿盛, 王振宇. 尾流间隔缩减技术综述[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 654-662.
- XU Xiao-hao, ZHAO Hong-sheng, WANG Zhen-yu. Overview of wake vortex separation reduction systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 654-662. (in Chinese)
- [10] 徐肖豪, 赵鸿盛, 杨传森, 等. 飞机进近中尾流的大涡数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 179-184.
- XU Xiao-hao, ZHAO Hong-sheng, YANG Chuan-sen, et al. Large eddy simulation of wake vortex during approach [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(2): 179-184. (in Chinese)
- [11] 韩红蓉, 李娜, 魏志强. 飞机遭遇尾流的安全性分析[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 45-49.
- HAN Hong-rong, LI Na, WEI Zhi-qiang. Safety analysis of aircraft encountering wake vortex [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 45-49. (in Chinese)
- [12] 冯志勇. 尾流对飞行的影响及安全间隔研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- FENG Zhi-yong. How wake vortexes affect the flights and safety separation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [13] 杨新涅. 尾流对飞行影响的研究[J]. 空中交通管制, 2003, 1(1): 25-28.
- YANG Xin-nie. Influence of wake flow on flight [J]. Air Traffic Management, 2003, 1(1): 25-28. (in Chinese)
- [14] 周彬, 王雪松, 王涛, 等. 侧向风速对飞机尾流运动的影响[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 773-779.
- ZHOU Bin, WANG Xue-song, WANG Tao, et al. Influence of cross wind speeds on aircraft wake vortex movement [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 773-779. (in Chinese)
- [15] 周彬. 飞机尾流的微结构特征及散射特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- ZHOU Bin. Study on the microstructure and scattering characteristics of aircraft wake vortices [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] 王维, 王美玲, 潜雪冰. 机场近距平行跑道间距和入口错开的选择研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(2): 23-26.
- WANG Wei, WANG Mei-ling, QIAN Xue-bing. Study on method of determination of centrally distance and threshold staggering manner for closely spaced parallel runways of airport [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(2): 23-26. (in Chinese)
- [17] 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 Hai-qi, ZHU Jin-fu. Calculation models of capacity and delay for closely spaced parallel runway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(4): 68-72. (in Chinese)
- [18] 张洪海, 胡明华. 多跑道降落飞机协同调度优化[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 86-91.
- ZHANG Hong-hai, HU Ming-hua. Multi-runway collaborative scheduling optimization of aircraft landing [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 86-91. (in Chinese)
- [19] ABDULMALIK A B, NARIN C, ROBERT E, et al. Closely spaced parallel approaches in terminal airspace [C] // IEEE. 2006 Systems and Information Engineering Design Symposium. Charlottesville: IEEE, 2006: 190-195.
- [20] STEVEN J L, ALFRED L. Safe zone for closely spaced parallel approaches [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2011, 34(2): 608-613.
- [21] 张莹, 胡明华, 田勇. 一种新的机场地面容量评估模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(2): 61-65, 93.
- ZHANG Ying, HU Ming-hua, TIAN Yong. Research on a new capacity evaluation model of airport ground [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(2): 61-65, 93. (in Chinese)
- [22] 田勇, 傅建军, 王艳军. 机场地面容量评估研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5): 619-622.
- TIAN Yong, FU Jian-jun, WANG Yan-jun. Research on airport ground capacity evaluation [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(5): 619-622. (in Chinese)
- [23] 叶博嘉, 胡明华, 田勇. 基于航班时刻优化的多机场地面等待问题——模型和算法[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(3): 464-469.
- YE Bo-jia, HU Ming-hua, TIAN Yong. Multi-airport ground holding problem based on airline schedule optimization models and algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(3): 464-469. (in Chinese)