

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.11.004

机场跑道轮迹测试及横向分布参数研究

程国勇, 张扬扬, 周 浩
(中国民航大学 机场学院, 天津 300300)

摘要: 为分析飞机主轮迹横向分布参数的合理取值问题并克服目前测试方法的不足, 依据机轮在跑道上制动时会在道面积聚黑色轮迹的现象, 研究了通过轮迹测试分析飞机主轮迹横向分布参数的方法。首先根据光的反射及光电转换原理开发了飞机轮迹测试装置; 利用该装置对某4D机场跑道进行了轮迹测试, 分别在接地带及跑道中部附近进行了轮迹数据采集, 得到接地带10条测线及跑道中部4条测线的测试数据; 在假定各机型轮迹横向分布标准差相同, 且各机型每次降落时主轮在道面上所留下的黑色轮迹宽度、颜色深浅相同的前提下, 结合各机型主起落架间距、降落架次得到轮迹横向分布理论叠加曲线, 基于最小二乘原理对归一化处理后的轮迹测试曲线与理论叠加曲线进行拟合, 最终得到在该机场跑道上飞机主轮横向分布参数。研究表明: 跑道接地带部位, 飞机主轮横向分布标准差为1.214 m, 通行宽度为2.791 m; 跑道中部区域, 飞机主轮标准差为2.210 m, 通行宽度为5.082 m。该数值与目前我国在水泥混凝土路面设计中对飞机在跑道部位的取值相差较大, 与国外对该参数的研究结果相比也有一定差距。上述研究结论、飞机轮迹测试方法及分析思路对于开展民航飞机主轮迹横向分布规律的系统研究可提供一定参考。

关键词: 道路工程; 飞机轮迹横向分布参数; 轮迹测试装置; 标准差; 通行宽度; 接地带

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)11-0022-09

Study on Wheel Track Test and Lateral Distribution Parameters of Airport Runway

CHENG Guo-yong, ZHANG Yang-yang, ZHOU Hao

(School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to analyze the reasonable value of the lateral distribution parameters of aircraft main wheel tracks and overcome the shortcomings of the current test methods, according to the phenomenon that the wheels will gather black tracks on the pavement surface when braking on the runway, the method of analyzing the lateral distribution parameters of aircraft main wheel tracks by wheel tracks test is studied. First, according to the principle of light reflection and photoelectric conversion, an aircraft wheel track test device is developed. Using this device, the wheel track test of a 4D airport runway is carried out, and the data of wheel tracks near the touchdown zone and the middle of the runway are collected, and the test data of 10 measuring lines in the touchdown zone and 4 measuring lines in the middle of the runway are obtained. On the premise that the standard deviation of wheel track lateral distribution of each type of aircraft is the same, and the width and color of black wheel tracks left by main wheels of each type of aircraft at each landing on the pavement are the same, the theoretical superposition wheel track lateral distribution curve is obtained combining with the main landing gear spacing and landing sorties of each type of aircraft. Based on the principle of least square method, the normalized wheel track test curve is fitted with the theoretical superposition curve, and the lateral distribution parameters of the wheels on the runway are obtained. The research result shows that (1) the standard deviation of the lateral distribution of the main wheels is 1.214 m

收稿日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178456)

作者简介: 程国勇(1971-), 男, 河北衡水人, 博士, 教授。(gy_cheng@126.com)

and the pass width is 2.791 m in the runway touchdown zone; (2) the standard deviation of aircraft main wheels is 2.210 m and the pass width is 5.082 m in the middle of runway. These values are quite different from the values of the aircraft on the runway in the design of cement concrete pavement in China, and there are also certain gaps between these values and foreign research results. The above research conclusions, aircraft wheel track test methods and analysis ideas can provide certain reference for the systematic research on the lateral distribution law of civil aircraft main wheel tracks.

Key words: road engineering; aircraft wheel track lateral distribution parameter; wheel track test device; standard deviation; pass width; touchdown zone

0 引言

飞机在机场跑道的横向分布规律是计算飞机荷载对道面作用次数的重要依据^[1-3]，关系到道面结构与强度评定。国内外一般按照飞机轮迹在道面上服从正态分布进行飞机覆盖作用次数的计算^[1-18]，通行宽度和标准差是表征轮迹横向分布规律的两个常用参数。75% 轮迹所覆盖的范围称为通行宽度（滑偏宽度），通行宽度 W_w 与标准差 σ 之间的关系^[4]为： $W_w = 2.3\sigma$ 。

飞机在道面上滑行时，存在一定的偏移和摆动，为确定飞机在主轮的横向分布规律，国内外学者开展了一定的相关研究。从 1955 年开始，美国空军对飞机在跑道上的渠化交通进行调研分析，认为飞机降落的范围集中在道面的 1/3 宽度内（60.96 m）^[2,19]；1973 年，Brown 等测试分析了 C-5A 和 B-747 的轮迹分布规律，并用于空军机场道面设计^[2,20]；1975 年，Hosang 等通过红外线测试仪对飞机轮迹的横向偏移规律进行了调查分析，认为飞机轮迹在道面上服从正态分布^[1-2,21-22]；波音公司和 FAA 合作，采用激光对肯尼迪国际机场和安克雷奇国际机场的 B-747 飞机的偏移规律进行了测试，用于分析大型飞机滑出滑行道的可能性^[2,23]；Rufino 等通过埋入式传感器分析了美国丹佛国际机场飞机轮迹偏移情况^[2,24]；郑翔仁采用定位计对台湾中正机场飞机轮迹进行了监测，结果表明飞机的轮迹横向分布为标准差 0.504 m^[1-2,25]；姚炳卿^[4]认为飞机轮迹在道面上服从正态分布，系统阐释了机场道面通行覆盖率的计算原理，确定了正态分布标准差与通行宽度之间的数学关系，并对比了国内外机场通行宽度的取值，指出民航机场滑行道和跑道端部（约 300 m 范围内）通行宽度应取 1.78 m，跑道中部应取 3.56 m；吴爱红^[11]等根据通行宽度和通行百分率，将美国与我国在军用机场和民航机场中轮迹正态分布标准差、通行宽度的取值进行了对比，指出我国

飞机轮迹的标准差大于美国的取值，与飞行员驾驶水平有关，认为国内外机场情况不同，不能照搬国外设计参数；边际^[1]统计了国内外机场道面设计方法中轮迹分布参数的取值，根据飞机轮迹的横向分布规律计算飞机对道面的覆盖次数；袁捷^[22]等研发了高频非接触轮迹测试系统，分析了虹桥机场西跑道的飞机横向分布规律，认为轮迹偏移符合负偏态分布。上述分析可以看出，对于标准差和通行宽度的取值国内外并不统一，且我国现行规范中的取值要远远大于国外的取值。目前不同国家对于轮迹分布标准差的取值汇总见表 1。

表 1 不同设计方法轮迹横向分布参数取值

Tab. 1 Wheel track lateral distribution parameter values in different design methods

设计方法	标准差/m		通行宽度/m	
	滑行道	跑道	滑行道	跑道
美国 UFC	0.77	1.55	1.771	3.565
美国 FAA	0.773	0.773	1.778	1.778
澳大利亚 APSDS	0.773	1.546	1.778	3.556
荷兰 PAVER	0.76 ~ 1.8	1.8 ~ 3.4	1.748 ~ 4.14	4.14 ~ 7.82
台湾中正机场	0.504	0.504	1.159	1.159
英国	0.384	0.777	0.884	1.788
中国	0.999	4.954	2.3	11.4

表 2 美国和我国轮迹分布标准差

Tab. 2 Standard deviations of wheel track distribution of U. S. and China

标准差/m	美国				中国	
	民航飞机				民航飞机	
	跑道		滑行道		跑道	滑行道
	端部	中部	端部	中部		
	0.772	1.543	0.772	1.543	4.954	0.999

飞机轮迹横向分布测试方面，并没有统一、直接的测试方法和测试设备，国内外缺乏相关实测研究。目前公路和机场道面上确定轮迹横向分布规律采用的测试方法主要有红外测试法、在道面埋设传感器法、在道面上用粉笔等涂画刻度及视频摄像法、激光测试

法等方法^[26-30]。但是由于机场飞行区对飞机运行安全的高度敏感性,现有的测试方法在机场道面的应用均存在一定的局限性:红外线测试易受其他障碍物的影响;埋传感器测试只适用于新建或加铺跑道,成本高,使用寿命短,存活率低;在道面上画刻度及视频摄像的方法,干扰飞机正常运行;激光测试技术受架设高度限制不适用于大规模测试^[22,26]。

基于上述分析可以看出如果采用轮迹测试的方法分析飞机在机场跑道横向分布的规律,则可利用航班间隙进行测试,对飞机运行完全无干扰且成本低廉,便于大规模开展研究。基于上述思路,首先自主研发出轮迹测试装置并对我国北海福成机场进行了跑道接地带轮迹采集,然后基于最小二乘原理对归一化处理后的轮迹实测数据与各机型主轮横向分布理论计算值进行了拟合,最终获取了该机场跑道接地带的飞机轮迹横向分布参数。

1 飞机轮迹测试装置开发

飞机接地瞬间,轮胎与道面剧烈摩擦产生大量热量而导致轮胎热脱胶,在接地带留下黑色胶印,即道面积胶。飞机轮胎接地越频繁的区域,道面积胶越严重、道面颜色越深。因此,道面颜色的深浅与飞机主轮通过的频率密切相关。捕捉飞机在接地带留下的轮迹是研究主轮横向分布的关键,轮迹颜色深浅不同,其反光强度也不同,将道面某一横断面反光强度的变化转化为相应电流幅值的变化,即可获得轮迹在道面上的横向分布数据。

基于上述原理,开发出道面轮迹测试装置。道面轮迹测试装置原理及实物见图1及图2。

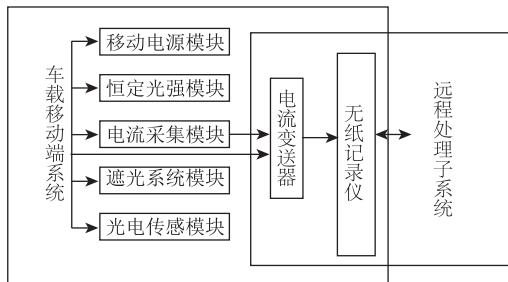


图1 轮迹测试装置原理

Fig.1 Principle of wheel track test device

2 某4D机场接地带轮迹测试及分析

2.1 测试方案

利用开发的轮迹测试装置对某4D机场01/19跑道接地带轮迹进行现场测试。该机场道面主体宽度

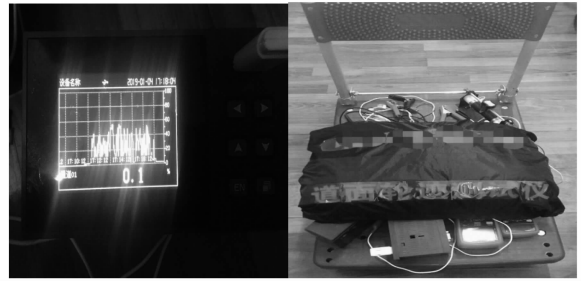


图2 轮迹测试装置

Fig.2 Wheel track test device

45 m (两侧道肩宽度各7.5 m),跑道全长3 200 m。在跑道主降端接地带布设10条轮迹测线,试验起点距离19端300 m;跑道中部布设4条测线,试验起点距离19端1 500 m。每条测线长40 m (跑道中线左右各20 m)、间隔10 m。测线布置见图3。测试时,沿跑道横向移动测试装置,则自动记录距离及道面反射光电信号,测试过程见图4。

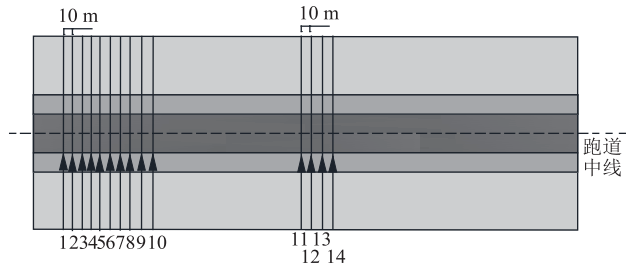


图3 测线布置

Fig.3 Layout of measuring lines



图4 轮迹测试过程

Fig.4 Wheel track test process

2.2 测试数据分析与处理

图5为跑道主降端接地带区域10条测线的道面反射光电信号结果,图6为跑道中部区域4条测线的道面反射光电信号结果。沿道面某一横断面的电流值变化曲线近似服从正态分布,跑道中线附近存在两个低谷。跑道边缘的电流变化较为平缓,这是

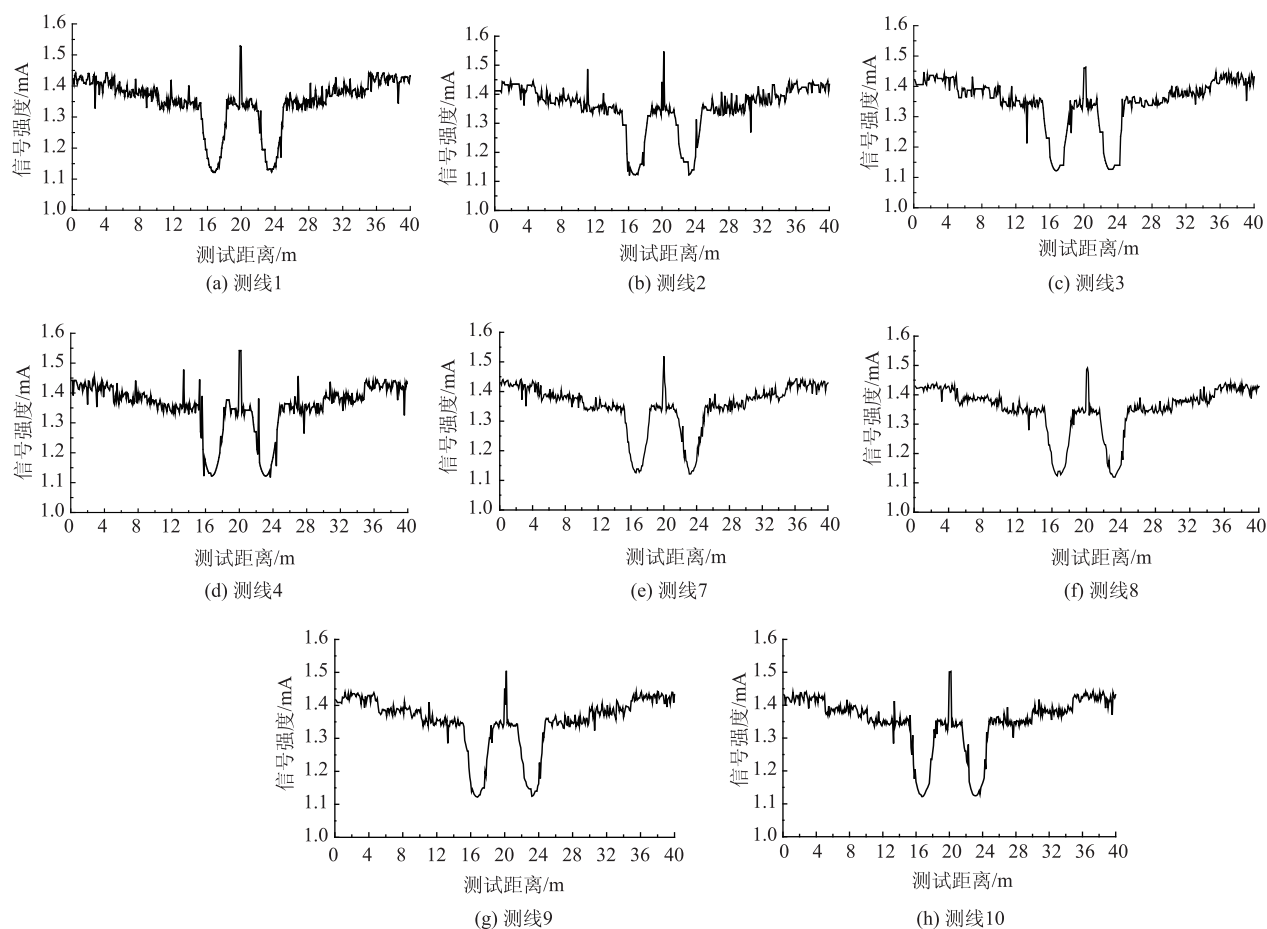


图 5 测线 1 ~ 10 光电信号值

Fig. 5 Photoelectric signal values of measuring line 1 – 10

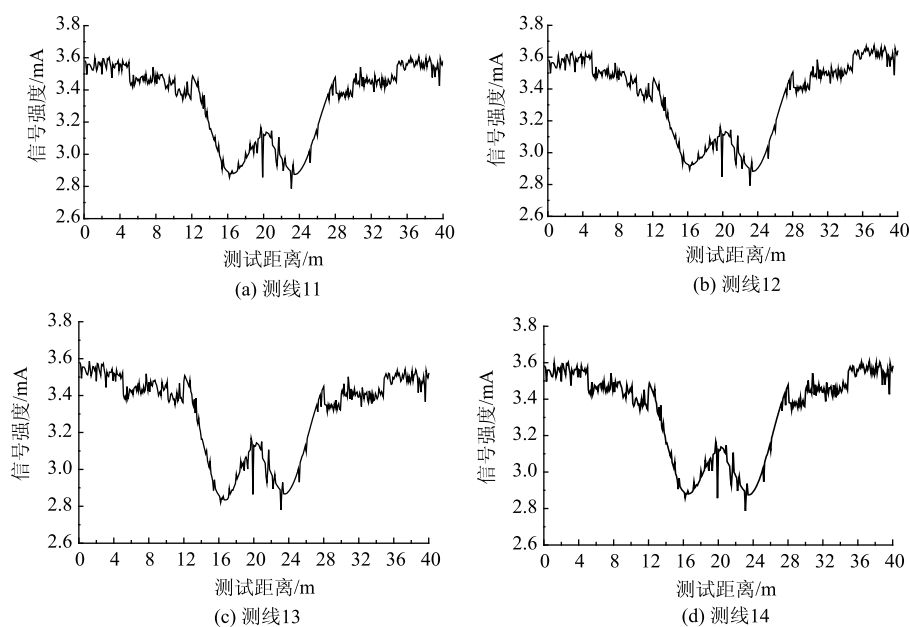


图 6 测线 11 ~ 14 光电信号值

Fig. 6 Photoelectric signal values of measuring line 11 – 14

因为此区域很少有主轮碾压磨耗道面,随着距离跑道中心线的距离越来越近,轮迹颜色深度逐渐加强,电流信号强度值迅速减小,电流信号最小的地方对应不同机型轮迹分布叠加后的峰值位置。

为将轮迹分布实测曲线与理论计算曲线进行最优拟合,分析确定该机场飞机横向分布参数取值,对实测数据曲线作如下变换:

(1) 变换横坐标,使坐标原点处于跑道中线位置,即横坐标数据分别减去 20 m,实现横坐标范围为 $(-20 \sim 20 \text{ m})$;

(2) 变换纵坐标,对实测数据的光电信号值进行处理,由于曲线两端信号值变化比较平缓,分别将曲线两端各 5 m 范围内的电流信号值取平均,然后该曲线内的所有数据均减去该平均值,即实现实测数据曲线的整体向下平移,此时实测数据曲线将在 x 轴附近及下方变化。处理后的实测数据曲线示意图见图 7。

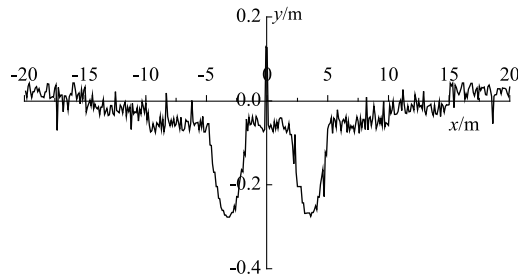


图7 处理后的实测数据曲线

Fig. 7 Measured data curve after processing

2.3 接地带轮迹横向分布理论分析

经调研,近年来该机场跑主要运营机型 B737-800 和 A320,机场 2014—2017 年交通量及机型构成见表 3, A320 和 B737-800 主要机型参数见表 4。

表3 该机场近四年航空业务量

Tab. 3 Air traffic of airport in past 4 years

机型 (架次)	A320	B737-800
年份	降落	降落
2014	2 992	1 711
2015	2 332	1 928
2016	2 392	1 248
2017	2 515	1 288
合计	10 231	6 175

表4 A320 和 B737-800 机型主要参数

Tab. 4 Main parameters of A320 and B737-800

机型	主起落架 间距/m	主起落架 个数	主起落架 轮距/m	主起落架 构型
A320	7.6	2	0.78/1.01	双轴双轮
B737-800	5.72	2	0.86	双轮

由于飞机主起落架与飞机为一个整体,因此每个主轮在道面横向分布的概率密度函数与该飞机相同。横向排列的关于跑道中线对称的左右两对主轮的概率密度为 2 个主轮概率密度函数的叠加^[14-15],见式 (1),概率密度曲线叠加情况如图 8 所示。

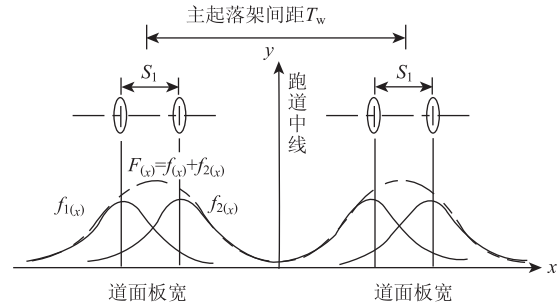


图8 双轮飞机的概率密度曲线

Fig. 8 Probability density curves of double-wheel aircraft

$$\begin{cases}
 f_{\text{左}} = f_{1(x)} + f_{2(x)} = \\
 \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(T_w+S_1)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(T_w-S_1)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right), x < 0, \\
 f_{\text{右}} = f_{1(x)} + f_{2(x)} = \\
 \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(T_w+S_1)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(T_w-S_1)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right), x > 0,
 \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_w 为主起落架中-中间距; S_1 为两轮的中-中间距。

假设各机型轮迹正态分布的标准差一致,且每次降落时在接地带道面留下的黑色轮迹的宽度和深浅相同,并考虑不同飞机起落架构型和交通量的影响,故各机型叠加后的轮迹分布理论计算模型为:

$$\begin{aligned}
 f' = & \\
 & \left(2 \times 10231 \times \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(7.6+0.78)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(7.6-0.78)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right) + \right. \\
 & 2 \times 10231 \times \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(7.6+0.78)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(7.6-0.78)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right) + \\
 & 1 \times 6175 \times \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(5.72+0.86)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+(5.72-0.86)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right) + \\
 & \left. 1 \times 6175 \times \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(5.72+0.86)/2}{\sigma_x} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-(5.72-0.86)/2}{\sigma_x} \right)^2} \right) \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中:第 1 列中的“2”和“1”为机型 A320 和 B737-800 对应的主起落架轴数;“10 231”和“6 175”为其对应的累积降落次数。

为了使理论计算曲线与实测数据曲线相拟合,分析得到飞机轮迹正态分布标准差,将上式 f' 进行

归一化、无量纲处理, 使理论计算曲线的峰值与处理后实测曲线的峰值相接近, 故各机型叠加后的轮迹分布理论计算值 f 为:

$$f = -\alpha \cdot f', \quad (3)$$

式中, $\alpha = | \text{归一化处理后的轮迹实测值} |_{\max} / f'_{\max}$ 。

2.4 实测数据曲线与理论计算曲线相拟合

将各机型叠加后的轮迹分布实测曲线与理论曲线绘制在同一个坐标系中, 实测数据曲线是固定的, 但理论计算曲线会随标准差取值的变化而变化。借鉴国内外机场标准差取值范围, 跑道接地带区域飞机横向分布标准差依次取 0.5, 0.6, 0.7, 0.8,

0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 m, 跑道中部区域飞机横向分布标准差 σ 值依次取 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 m 分别计算相应的实测值与理论计算值的残差和, 绘制 σ 值与残差和之间的关系曲线, 基于最小二乘原理, 最小残差和所对应的 σ 值即为该机场跑道飞机横向分布的标准差。

图 9 和图 10 分别为跑道接地带区域 10 条测线以及跑道中部区域 4 条测线, 实测曲线与理论曲线的最优拟合结果。

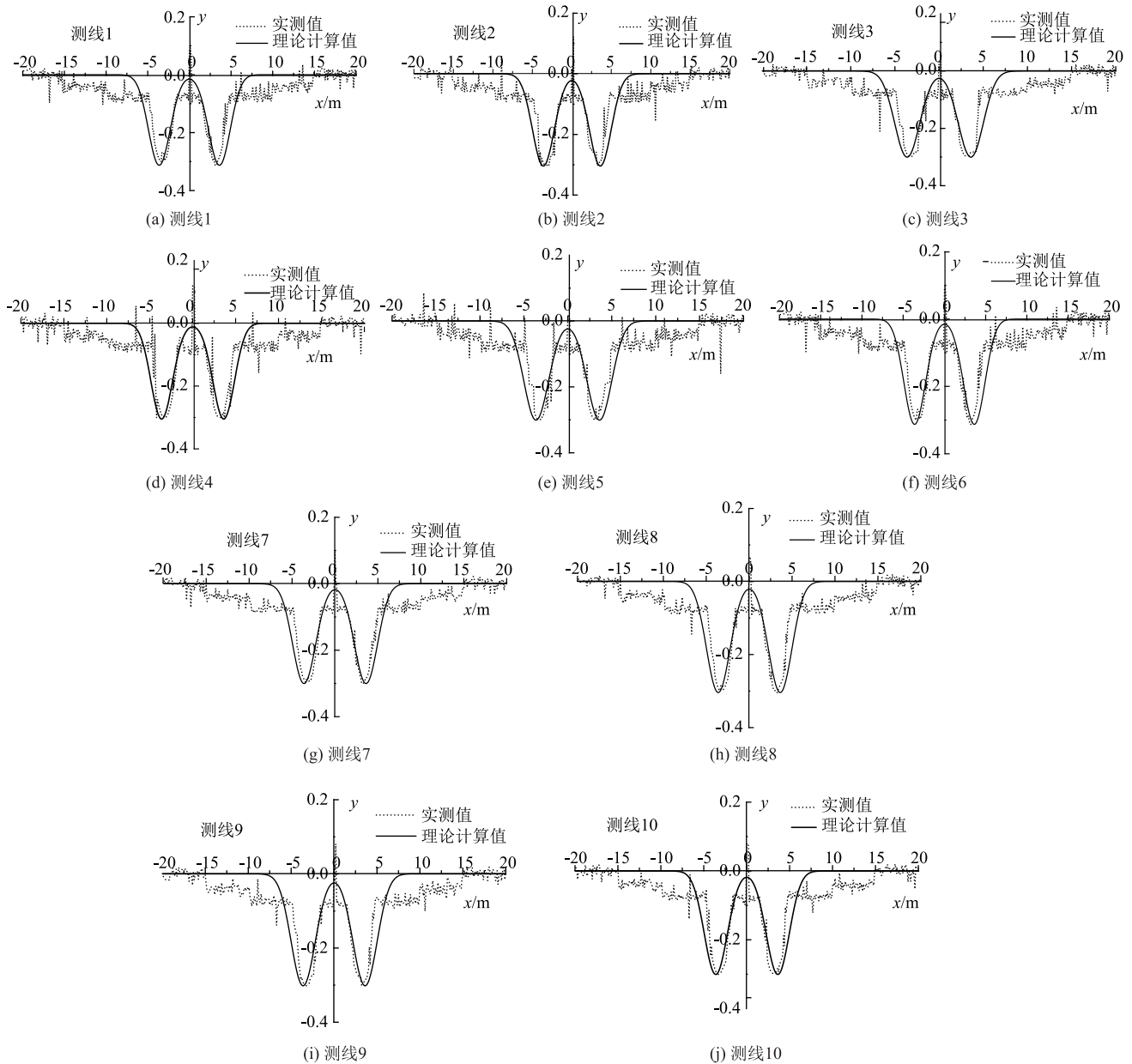


图 9 测线 1~10 实测值与理论计算值最优拟合图

Fig. 9 Optimal fitting curve between measured values of measuring line 1 – 10 and theoretical calculation values

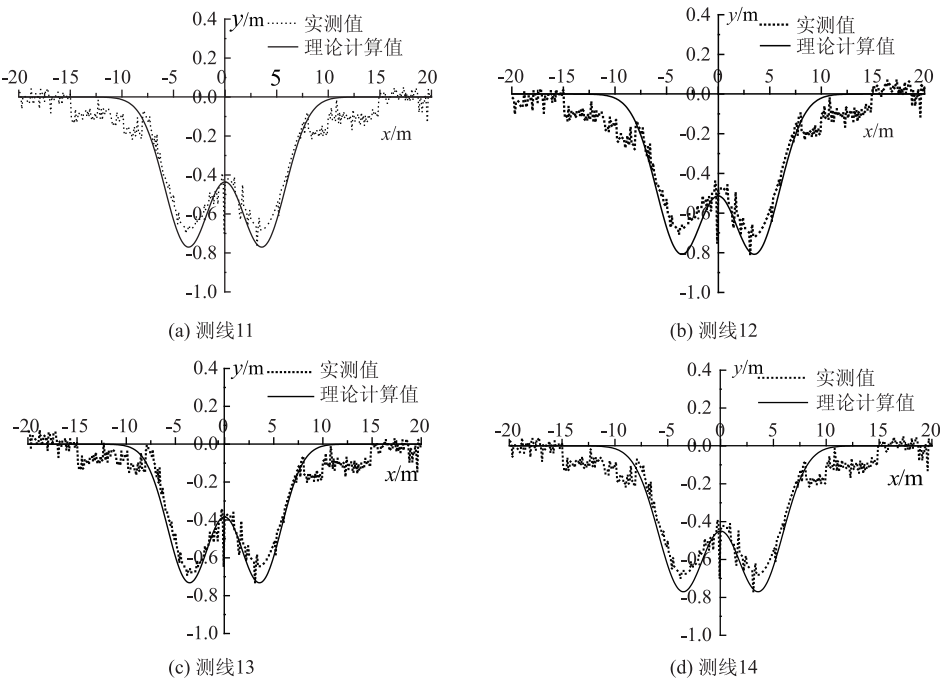


图 10 测线 11 ~ 14 实测值与理论计算值最优拟合图

Fig. 10 Optimal fitting curve between measured values of measuring line 11 – 14 and theoretical calculation values

将跑道接地带和跑道中部区域共 14 条测线计算结果汇总，见表 5。

为跑道端部标准差的 2 倍，因此，本研究跑道端部和中部标准差和通行宽度的计算结果在合理范围之内。

表 5 计算结果汇总表

Tab. 5 Summary of calculation results

区域	测线号	最优标准差	标准差 平均值/m	通行 宽度/m
跑道接地带	1	1.042	1.214	2.791
	2	1.260		
	3	1.299		
	4	1.120		
	5	1.284		
	6	1.173		
	7	1.213		
	8	1.245		
	9	1.282		
	10	1.217		
跑道中部	11	2.189	2.210	5.082
	12	2.310		
	13	2.120		
	14	2.220		

上述分析结果表明，该机场跑道接地带区域飞机横向分布标准差为 1.214 m，通行宽度为 2.791 m；跑道中部区域，标准差为 2.210 m，通行宽度为 5.082 m。参照表 2 文献中国外跑道端部和跑道中部的标准差的取值，跑道中部的标准差和通行宽度大于跑道端部的取值，一般而言，跑道中部的标准差近似

3 结论

- (1) 根据机场跑道接地带附近飞机黑色轮迹积聚明显的现象，基于光的反射原理自主研发了飞机轮迹测试装置，并在某 4D 机场进行了轮迹实测和数据分析研究确定了该机场跑道接地带区域飞机的横向分布标准差，表明基于轮迹测试的飞机道面横向分布参数确定方法具有一定的可行性。
- (2) 基于对我国某 4D 机场进行的飞机轮迹测试，初步确定的该跑道接地带部位飞机轮迹横向分布标准差为 1.214 m，此研究结论可为该机场道面结构设计 with 道面强度评估计算提供参考。
- (3) 飞机在机场跑道的横向分布参数是道面结构设计 with 强度评定的重要依据，该参数可能会受机型、环境因素、地域等众多因素的影响，本研究得出的结论只是基于单个机场的数据，参数最终确定还需要进行深入研究。但基于轮迹测试无疑是一种经济、可大面积开展普查测试与统计的可行方法。

参考文献：

References：

[1] 边际. 基于混合交通分析的机场柔性基层沥青道面轮辙控制研究 [D]. 上海：同济大学，2008.

- BIAN Ji. Rutting Control for Asphalt Pavement with Flexible Base of Airport Based on Mixed Traffic Analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [2] 王龙. 基于损伤等效的刚性道面 PCN 计算方法 [D]. 上海: 同济大学, 2014.
- WANG Long. PCN Calculation Method for Rigid Pavement Based on Damage Equivalent [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [3] 吴爱红, 蔡良才, 顾强康, 等. 采用通行覆盖率的路面交通量分析 [J]. 交通运输工程学报, 2010, 10 (6): 82-87, 110.
- WU Ai-hong, CAI Liang-cai, GU Qiang-kang, et al. Analysis of Pavement Traffic Volume Using Pass-to-coverage Ratio [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10 (6): 82-87, 110.
- [4] 姚炳卿. 机场道面通行覆盖率的计算原理 [J]. 机场工程, 2008 (4): 2-12.
- YAO Bing-qing. Calculate Theory of Airport Pavement Pass-to-Coverage Ratio [J]. Airport Engineering, 2008 (4): 2-12.
- [5] FAA. Airport Pavement Design and Evaluation, AC No: 150/5320-6D [R]. Washington, D. C.: FAA, 1995.
- [6] FAA. Airport Pavement Design and Evaluation, AC No: 150/5320-6E [R]. Washington, D. C.: FAA, 2009.
- [7] 林小平. 复杂条件下机场跑道沥青加铺层结构设计理论与方法 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- LIN Xiao-ping. Asphalt Overlay Design Theory and Method for Airport Runway Pavement under Complicated Conditions [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [8] 李青, 赵鸿铎, 姚祖康. 基于道面响应的飞机荷载作用次数计算方法 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (12): 1637-1641.
- LI Qing, ZHAO Hong-duo, YAO Zu-kang. Aircraft Load Repetition Calculation Methods Based on Pavement Responses [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2008, 36 (12): 1637-1641.
- [9] 王振辉. 基于损伤优化模型的机场道面设计 [D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
- WANG Zhen-hui. Airport Pavement Design Based on Damage Optimization Model [D]. Xi'an: Airforce Engineering University, 2010.
- [10] 吴爱红. 基于累积损伤的机场道面设计方法研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2011.
- WU Ai-hong. Research on Method of Airport Pavement Design Based on Cumulative Damage [D]. Xi'an: Airforce Engineering University, 2011.
- [11] 吴爱红, 蔡良才, 顾强康, 等. 适应未来大型飞机的水泥混凝土道面设计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (9): 1169-1175.
- WU Ai-hong, CAI Liang-cai, GU Qiang-kang, et al. Airport Concrete Pavement Design for Large Aircraft in Future [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (9): 1169-1175.
- [12] 王振辉, 蔡良才, 顾强康, 等. 考虑荷载应力分布的机场刚性道面累积损伤优化模型 [J]. 土木工程学报, 2011, 44 (11): 143-150.
- WANG Zhen-hui, CAI Liang-cai, GU Qiang-kang, et al. Airport Rigid Pavement Cumulative Damage Optimization Model Considering Load Stress Distribution [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (11): 143-150.
- [13] CAI L C, ZHU Z Q, WU A H, et al. Cement Concrete Pavement Design Based on Cumulative Damage Factor [J]. Journal of Transportation Engineering. 2012, 12 (4): 1-8, 24.
- [14] 方华, 蔡良才, 张罗利, 等. 基于通行覆盖率的机场道面交通量分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39 (1): 60-63.
- FANG Hua, CAI Liang-cai, ZHANG Luo-li, et al. Airport Traffic Analysis Based on Cover to Pass Ration [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39 (1): 60-63.
- [15] 蔡良才, 王海服, 张罗利, 等. 基于累积损伤的机场道面剩余寿命预测模型 [J]. 交通运输工程学报, 2014, 14 (4): 1-6.
- CAI Liang-cai, WANG Hai-fu, ZHANG Luo-li, et al. Prediction Model of Remaining Life for Airport Pavement Based on Cumulative Damage [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14 (4): 1-6.
- [16] FAA. Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN, AC No: 150/5335-5C [R]. Washington, D. C.: FAA, 2014.
- [17] 杨光. 寒区机场水泥混凝土道面剩余寿命评估预测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- YANG Guang. Research on Evaluation and Prediction of Residual Life of Cement Concrete Pavement of Airport in Cold Region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [18] 马鲁宽, 赵鸿铎, 杜增明, 等. 考虑飞机运行特性的柔性道面累积损伤计算 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36 (9): 38-43.
- MA Lu-kuan, ZHAO Hong-duo, DU Zeng-ming, et al. Cumulative Damage Calculation of Flexible Pavement Considering Aircraft Operation Characteristics [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2017, 36 (9): 38-43.

- [19] RICHARD G. Origin of Developments for Structural Design of Pavements, Report No. GL-91-26 [R]. Vickburg: U. S. Army Corps of Engineers, 1991.
- [20] BROWN D N, THOMPSON O. Lateral Distribution of Aircraft Traffic, Miscellaneous Paper S-73-56 [R]. Vickburg: U. S. Army Corps of Engineers, 1973.
- [21] HOSANG V A. Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements, FAA-RD-74-36 [R]. Washington, D. C. : FAA, 1975.
- [22] 袁捷, 史恩辉, 雷电, 等. 上海虹桥国际机场飞机轮迹横向偏移规律研究 [J]. 中国民航大学学报, 2015, 33 (2): 1-6.
YUAN Jie, SHI En-hui, LEI Dian, et al. Lateral Deviation Pattern and Model of Aircraft Wheel Path on Shanghai Hongqiao International Airport [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2015, 33 (2): 1-6.
- [23] FAA. Statistical Extreme Value Analysis of ANC Taxiway Centerline Deviations for 747 Aircraft, 01-CRDA-0164 [R]. Washington, D. C. : FAA, 2003.
- [24] DULCE R, JEFFERY R, ERNEST B. Mechanistic Analysis of Pavement Responses from Denver International Airport, Report No. 26 [R]. Washington, D. C. : FAA, 2004.
- [25] 郑翔仁. 中正机场刚性铺面监测资料分析 [D]. 台北: 台湾大学, 2004.
ZHENG Xiang-ren. Analysis of Monitoring Data of Rigid Paving in Zhongzheng Airport [D]. Taipei: Taiwan University, 2004.
- [26] 雷电, 赵鸿铎, 吴璨. 飞机轮迹横向分布测试系统的比选分析 [J]. 西部交通科技, 2012 (10): 63-68.
LEI Dian, ZHAO Hong-duo, WU Can. The Analysis and Selection for Aircraft Deviation Test System [J]. Western China Communications Science & Technology, 2012 (10): 63-68.
- [27] 赵延庆, 王国忠, 谭忆秋. 道路交通荷载横向分布特性分析 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39 (6): 26-29.
ZHAO Yan-qing, WANG Guo-zhong, TAN Yi-qiu. Analysis of the Transverse Distribution of Traffic Loading on Highways [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2012, 39 (6): 26-29.
- [28] 赵延庆, 王国忠, 王志超. 沥青路面轮迹横向分布系数的实测与分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40 (4): 569-572.
ZHAO Yan-qing, WANG Guo-zhong, WANG Zhi-chao. Measurement and Analysis of Lateral Distribution Factor on Asphalt Pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2012, 40 (4): 569-572.
- [29] 黄立葵, 贾璐, 万剑平, 等. 高速公路车辆横向分布特征 [J]. 中南公路工程, 2005 (1): 73-76.
HUANG Li-kui, JIA Lu, WAN Jian-ping, et al. Traverse Distribution Characteristics of Vehicles on Freeways [J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2005 (1): 73-76.
- [30] 刘黎萍, 孙立军. 高速公路沥青路面轮迹横向分布研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005 (11): 31-34, 50.
LIU Li-ping, SUN Li-jun. Research on Wheel Path Lateral Distribution for Freeway Asphalt Pavements [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2005 (11): 31-34, 50.