

三维激光扫描应用于跑道功能性指标评价研究^{*}

裴磊洋¹, 郭成超¹, 刘国光^{2,3}, 秦磊¹, 王海波¹,
李盈辉², 安治文¹, 王根叶⁴

(1. 中山大学土木工程学院 广州, 510000)

(2. 中国民航大学交通科学与工程学院 天津, 300300)

(3. 民航机场智能建造与工业化工程技术研究中心 北京, 100010)

(4. 民航机场建设工程有限公司 天津, 300456)

摘要 为研究跑道主要功能指标对飞机和跑道的影响, 首先, 通过三维激光扫描技术构建三维道面高程模型, 较为准确地反映道面平整度和纵横坡坡度信息, 当跑道全长范围内的国际平整度指数(international roughness index, 简称 IRI)等于 0.855 m/km 和分段 IRI 均小于规范规定值 1 m/km 时, 该机场跑道平整度处于“优”; 其次, 结合道面高程数据计算得到的着陆过程 3 个阶段平整度影响系数最大值(1, 1.185, 1.145)可知, 平整度对飞机着陆过程影响大小排序依次为减速阶段、滑行阶段、接地阶段, 与机场管理机构日常记录得到的结果一致; 最后, 通过间隔 6 年的 2 次点云数据对比表明, 飞机重复起降荷载对道基土压实有利于其抵抗自然疲劳, 也说明为节约造价而对跑道中部采用的减薄设计是合理的。

关键词 机场跑道; 三维激光扫描; 道面平整度; 飞机振动响应; 纵横坡; 排水性能

中图分类号 TH82; TU435

引言

跑道是飞行区内最重要的基础设施, 其结构性能和功能性能会直接影响跑道运行安全, 跑道功能性能通常采用平整度和纵横坡坡度等指标来衡量。

平整度反映了机场道面实际高程和理想平面之间的偏差程度, 是机场跑道施工质量和道面日常管理维护的一项重要指标^[1]。研究表明, 轮胎和路面间的作用力受到车辆悬挂系统、路面平整度和车辆速度的显著影响^[2]。尽管飞机上常采用主动型起落架系统来减少飞机与跑道间的激励幅度, 以降低飞机对跑道平整度的要求^[3], 但由于道面不平整度和前后主起落架荷载相位差所引起的荷载幅值变化使得道面板变形和应力更大, 影响乘客舒适度^[4]。目前, 研究人员通过将非接触式(激光或超声波)传感器固定在车辆上测得跑道平整度, 再用数值模拟实现飞机着陆过程振动响应量化, 减少人为错误^[5]。但传统检测方法效率低且数据有限, 不适合大范围道面平整度检测。

道面功能性能的另一指标是纵横坡坡度。郑悦

峰等^[6]对机场道面排水性能进行研究, 建立了基于道面纵横坡度、积水点和集水沟(井)泄水能力等排水能力评价模型, 并以道路纵横坡度和降雨强度为变量设计了交叉试验, 以道路网格单元径流流速和径流深度为评价指标, 对不同坡度组合下的道路排水能力进行分析, 提出最佳坡度组合设计。孙悦^[7]基于路面产流机制建立了仅考虑横坡的二维道面层排水渗流模型, 发现当路面宽度增加时, 应该设置更大的横坡来保证路面排水性能, 且道路排水性能与合成坡度有关。上述分析研究了公路坡度和排水性能的关系, 但机场跑道宽度要远大于公路, 因此对其纵横坡坡度规定更为严格。

随着 3D 传感技术的发展, 激光扫描技术使得进行区域大范围的道面平整度分析成为可能。杨必胜等^[8]总结了三维激光扫描技术的现状及发展趋势。耿靖杰等^[9]使用三维激光扫描车载雷达对路面轮廓扫描, 发现车速影响测试结果的稳定性和鲁棒性。倪飞等^[10]在高速公路检测中使用该技术进行非接触式测试, 所得结果数据精度和测量效率与传统检测方法相比具有优势。司垒等^[11]结合图像和激光点云

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1600102); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(3122023PY03)

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-10-25

融合技术实现了采面煤岩的智能识别。郑树斌等^[12]基于三维激光扫描技术实现了测量数据点集与标准钢轨点集的匹配,为列车安全运行提供了技术保障。但机场跑道宽度远大于公路,较少将其应用于跑道高程扫描。

笔者首先依托某机场改扩建时的三维激光雷达扫描过程,对该技术进行了介绍;其次,对扫描高程点云数据进行预处理,通过采样计算道面平整度和纵横坡坡度,分别研究其对于飞机着陆过程振动响应和道面排水性能的影响;最后,通过间隔6年的2次高程扫描数据对比,分析了服役时间内飞机荷载作用和外界环境因素对道面高程变化的影响。

1 某机场跑道三维激光雷达扫描数据

1.1 工程概况

该机场改扩建工程采用三维激光技术对3 600 m × 45 m跑道进行测量,通过高程点云数据分析跑道平整度、纵横向坡度、排水性和高程变化,从而帮助施工单位做出科学的工程决策。

1.2 跑道三维激光雷达扫描技术

三维激光扫描技术利用激光扫描装置获取道面的三维坐标信息,快速重构出跑道三维模型^[10]。该技术以激光为测量媒介,既保证了测试数据的准确性,也不会引起测试对象的损伤。

该测试工程使用2台长距离三维激光扫描仪ScanStation P50,扫描距离提高至1 km以上,精度可达3 mm+10 ppm,扫描速度为100万点/s。为提高高程测量精度,将3 600 m跑道分为6段,2台仪器分别负责A、B段。站点计划和标靶点计划示意图分别如图1、2所示,其中:三角形表示测站;圆形表示标靶。标靶实物图如图3所示。

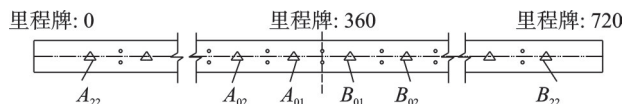


图1 站点计划示意图(单位:m)

Fig.1 Plan of test sites (unit: m)



图2 标靶点计划示意图(单位:m)

Fig.2 Plan of target sites (unit: m)



图3 标靶实物图

Fig.3 Target in field

1.3 点云数据预处理

该跑道长度为3 600 m,需要分多次扫描后利用标靶进行同一坐标系下数据拼接。扫描数据是以仪器坐标系为基准,本研究中直角坐标系原点为激光束发射处, x 轴为垂直于飞机行驶方向, y 轴为平行于飞机行驶方向, z 轴向上为正,符合笛卡尔坐标系。该跑道在高程测量中共采用94个标靶,并提出了适用于大旋转角情况的三维坐标转换模型^[13],即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

模型中的旋转变换矩阵为正交矩阵,仅有3个独立旋转变量,因此有以下6个限制条件

$$\begin{cases} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1 \\ a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2 = 1 \\ a_1a_3 + b_1b_3 + c_1c_3 = 1 \\ a_2a_3 + b_2b_3 + c_2c_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

通过线性化处理 and 间接平差求解,得到7个转换参数,将各站的点云数据统一到同一坐标系中,完成数据拼接。基于该模型的最大拼接误差仅有0.000 5 m,符合工程精度要求。

能反映跑道细节特征的三维激光扫描数据会存在大量冗余数据,要通过配准、去噪、法向量、曲率和压缩率对点云数据进行精简。经过预处理后的跑道点云图如图4所示。



图4 预处理后的跑道点云图

Fig.4 Point cloud image of test runway after preprocessing

2 道面平整度

2.1 国际平整度指数计算

公路管理协会对我国境内的多条公路道面高程状况进行了测试,发现 IRI 和标准差 s 之间的换算关系为

$$\text{IRI}=0.380\ 3s-0.453\ 7\tag{3}$$

两者之间的相关系数 R^2 为 0.975,表明在式(3)中两者具有很强的相关性^[14]。道面标准差算法具体描述见文献[15]。平整度采样分析图如图 5 所示。通过图 5 所示方式对跑道点云高程数据进行提取,再通过式(4)~(6)计算该道面区域^[15],即

$$\bar{h}_p=\frac{1}{z}\sum_{w=1}^zh_w\tag{4}$$

$$s_p=\sqrt{\frac{1}{z-1}\sum_{w=1}^z(h_w-\bar{h}_p)^2}\tag{5}$$

$$s=\frac{1}{o}\sum_{p=1}^os_p\tag{6}$$

其中: o 为采样区域中的小采样区数量; z 为小采样区中的高程数量; h_w 为第 p 个小采样区内第 w 个高程值; $\bar{h}_p$ 为第 p 个小采样区内的高程算术平均值; s_p 为第 p 个小采样区的标准差。

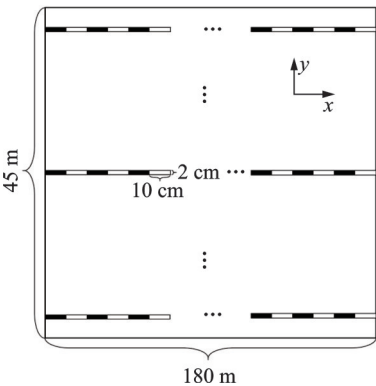


图 5 平整度采样分析图
Fig.5 Sample diagram of pavement roughness

根据飞机在跑道着陆时的积胶区域、飞机刹车时的轮印长度和文献[16]中对飞机各着陆阶段的划分,计算得到跑道各采样区域标准差、IRI 和对应于着陆过程各阶段的 IRI。跑道各区域 IRI 统计见表 1。其中,分段 IRI 沿跑道分布如图 6 所示。

通过机场跑道运行状况记录可知:表 1 中接地带前端 1、接地阶段 1 和减速阶段 1 为该机场次起降方向;接地带前端 2、接地阶段 2 和减速阶段 2 为主起降方向;滑行阶段是主次起降方向共用道面区域,对应的道面区域 IRI 计算值最差,说明航班量和横向偏移距离对跑道性能产生了重大影响^[17]。

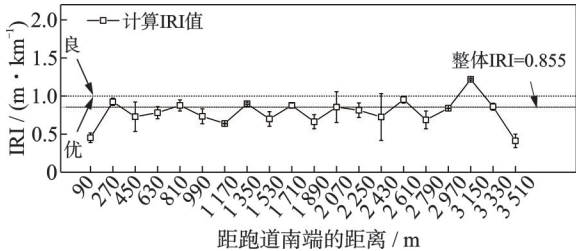


图 6 分段 IRI 沿跑道分布图
Fig.6 Segment IRI distribution along the runway

表 1 跑道各区域 IRI 统计表
Tab.1 Calculated IRI of runway sections

着陆过程	跑道区域	s/mm	IRI/ ($\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$)	分段 IRI/ ($\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$)
接地带前端 1	[0 m, 180 m]	2.384 6	0.453	0.453
接地阶段 1	[180 m, 360 m]	3.625 0	0.925	0.925
减速阶段 1	[360 m, 540 m]	3.111 1	0.729	0.796
	[540 m, 720 m]	3.250 0	0.782	
	[720 m, 900 m]	3.500 0	0.877	
	[900 m, 1 080 m]	3.125 0	0.735	
	[1 080 m, 1 260 m]	4.875 0	1.400	
滑行阶段	[1 260 m, 1 440 m]	3.555 6	0.898	0.931
	[1 440 m, 1 620 m]	4.333 3	1.194	
	[1 620 m, 1 800 m]	3.500 0	0.877	
	[1 800 m, 1 980 m]	3.444 4	0.856	
	[1 980 m, 2 160 m]	3.444 4	0.856	
	[2 160 m, 2 340 m]	3.333 3	0.814	
	[2 340 m, 2 520 m]	3.100 0	0.725	
减速阶段 2	[2 520 m, 2 700 m]	3.700 0	0.953	0.915
	[2 700 m, 2 880 m]	3.000 0	0.687	
	[2 880 m, 3 060 m]	3.400 0	0.839	
	[3 060 m, 3 240 m]	4.400 0	1.220	
接地阶段 2	[3 240 m, 3 420 m]	3.454 5	0.860	0.860
接地带前端 2	[3 420 m, 3 600 m]	2.277 8	0.413	0.413

经过计算,跑道全长范围内的 $\text{IRI}=0.855\ \text{m}/\text{km}$ 。该机场跑道全长和分段 IRI 都符合《世界银行报告》对机场跑道平整度的要求。按照《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2019)^[18],该机场跑道平整度处于“优”。

2.2 平整度影响系数

为简化飞机对道面的作用,将道面理想化为一个平面,但在分析飞机动力响应时,平整度影响不可

忽略。为定量描述道面平整度对飞机动荷载的影响,定义平整度影响系数 $\lambda^{[3]}$ 为

$$\lambda = F_d/F_s \tag{7}$$

其中: F_d, F_s 分别为不考虑和考虑平整度时的飞机动荷载。

平整度对飞机和汽车动荷载的影响有以下不同:①飞机存在一个与水平滑跑速度相关的升力,会使飞机荷载不断变化;②飞机滑跑速度与汽车相比较快,平整度对汽车的影响不能直接应用到飞机上。文献[19]考虑了飞机升力、飞机滑跑速度和道面平整度状况,发现 IRI 与 λ 存在以下关系

$$\lambda = 1 + 0.020\,7\text{IRI}\sqrt{v} - \frac{v^2}{v_0^2}\left(1 + 0.020\,7\text{IRI}\sqrt{v_0}\right) \tag{8}$$

其中: v 为飞机滑跑速度; v_0 为飞机接地速度。

根据 IRI 将道面平整度分为 3 个等级,IRI 取值 1,3,5 分别代表道面平整度为优、良、差^[18]。文献[16]根据划分飞机着陆过程中接地阶段、减速阶段和滑行阶段的临界速度计算了飞机升力系数 α 。为考虑最不利情况,在 3 个阶段通过选取响应速度使 λ 取值最大,并结合美国国家航空实验中心的平整度测试结果^[20]对 $\lambda_{\max}$ 进行了调整。着陆过程 3 个阶段的 $\lambda_{\max}$ 如表 2 所示。文献[21]研究发现,平整度主要影响着陆过程的减速阶段和滑行阶段,所以 3 种道面状况下接地阶段的 $\lambda_{\max}$ 均取值为 1。

表 2 着陆过程 3 个阶段的 $\lambda_{\max}$

Tab.2 $\lambda_{\max}$ of three periods in landing process

IRI	接地阶段	减速阶段	滑行阶段
1	1.00	1.21	1.15
3	1.00	1.49	1.30
5	1.00	1.62	1.48

由表 2 可以看出,在 3 种道面平整度状况下,减速阶段 $\lambda_{\max}$ 最大,说明在着陆过程中的减速阶段平整度对飞机振动响应影响最大。表 2 中着陆过程 3 个阶段 $\lambda_{\max}$ 计算值比文献[22]中取值大,这是因为在计算 3 个阶段 $\lambda_{\max}$ 时,速度取值均为使 λ 取最大值时的速度。

2.3 平整度对飞机着陆过程振动响应影响分析

根据某机场跑道分段 IRI 计算结果在表 2 中进行线性插值,得到 B737-800 飞机在标准着陆时的各阶段 $\lambda_{\max}$,如表 3 所示。

表 3 B737-800 飞机在标准着陆时的 $\lambda_{\max}$

Tab.3 Selected $\lambda_{\max}$ when B37-800 standardly lands at test airport

着陆阶段	接地阶段 1	减速阶段 1	滑行阶段	减速阶段 2	接地阶段 2
$\lambda_{\max}$	1.000	1.150	1.145	1.185	1.000

由表 3 可知,平整度对飞机减速阶段的动力响应放大幅度大于滑行阶段。减速和滑行阶段大于 1 的 $\lambda_{\max}$ 取值对飞机在着陆过程中后 2 个阶段的加速度响应进行了放大,使之更加接近于跑道实测加速度响应,减小了解析值和实测值之间的误差,说明在道面滑行速度不同区域应采用不同的平整度评价标准^[23]。

由表 3 还可看出,该跑道减速阶段 2 平整度状况较差,与机场管理部门定期进行的道面状况评估结果一致。减速阶段 2 处于该机场主要的起飞和着陆方向,说明多年的机场运行使得该区域的道面状况变差,从而对飞机的着陆过程振动响应产生更大的放大效果,应加强对此区域的维护和管理。

3 道面纵横坡坡度

3.1 坡度计算原理

道面坡度算法如图 7 所示。横断面里程从跑道南端开始计算,对于某一区域的坡度计算主要包括:跑道中心线左右侧纵、横坡度及其左右侧坡度比。

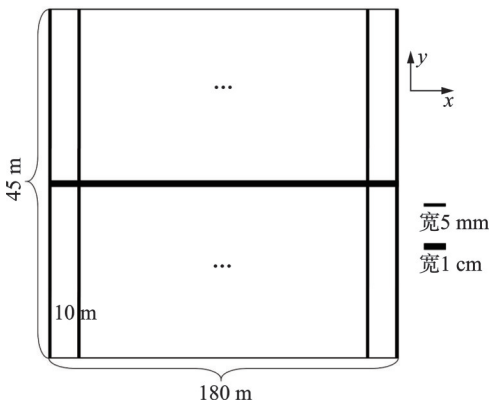


图 7 跑道坡度采样分析图

Fig.7 Sample diagram of pavement slope

本研究基于跑道横坡坡度算法对采样间隔取值进行了敏感性分析。采样间隔分别设置为 1,2,5,10,20 和 50 m 时,计算采样间隔引起的坡度偏差以及采样个数。不同采样间隔对横坡坡度影响分析如表 4 所示。可以看出,当采样间隔超过 10 m 时,坡度计算结果偏差超过 1%。合理设置采样间隔能

够有效减少点云数量,采样间隔为 10 m 时可以减少点云数量 96%。因此,本研究选择 10 m 采样间隔对跑道全长点云数据进行采样并计算道面横坡坡度。

表 4 不同采样间隔对横坡坡度影响分析
Tab.4 Influence of different sampling intervals on transverse slope

采样间隔/m	坡度偏差/%	采样个数
原始	—	9 084
1	0.35	3 601
2	0.40	1 801
5	0.45	721
10	0.73	361
20	2.20	181
50	5.60	73

利用 RANSAC 算法对图 7 采样分析方法提取的跑道纵横坡点云高程数据进行直线拟合,拟合直线与水平面夹角的正切值即为跑道坡度值。跑道坡度计算原理如图 8 所示。

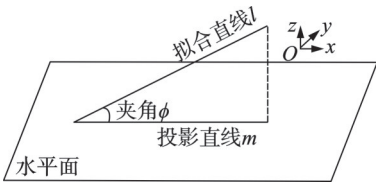


图 8 跑道坡度计算原理图
Fig.8 Schematic diagram of runway slope calculation

假设拟合直线方向向量为 $(a,b,c)^T$,其在水平面上投影方向向量为 $(a,b,0)^T$,两直线之间夹角的计算式为

$$\theta = \arccos \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

(9)

纵横坡坡度*i*计算式为

$$i = \tan \theta$$

(10)

通常情况下,跑道横坡应采用双面坡,左右侧横坡坡度对称,在跑道和联络道相交处采用较为平缓的坡度进行过渡。跑道纵、横坡坡度标准^[24]分别如表 5,6 所示。

表 5 跑道纵坡坡度标准表
Tab.5 Standard of runway longitudinal slope gradients

飞行区指标 I	全长纵坡坡度/%	两端 1/4 纵坡坡度/%	其余部分纵坡坡度/%
1	2	2.0	2.00
2	2	2.0	2.00
3	1	0.8	1.50
4	1	0.8	1.25

表 6 跑道横坡坡度标准表
Tab.6 Standard of runway transverse slope gradients

飞行区指标 II	最大横坡坡度/%	最小横坡坡度/%
A	2.0	1.0
B	2.0	1.0
C	1.5	1.0
D	1.5	1.0
E	1.5	1.0
F	1.5	1.0

3.2 纵横坡计算结果

利用坡度计算原理得到横坡沿跑道分布图,如图 9 所示。可以看出,左侧横坡坡度大于 1.5% 的测点数量为 4 个(占比为 4.4%);坡度在 1.0%~1.5% 之间的分析点数量为 83 个(92.3%);坡度小于 1% 的分析点数量为 3 个(3.3%)。右侧横坡坡度大于 1.5% 的测点数量为 3 个(3.3%);坡度在 1.0%~1.5% 之间的分析点数量为 73 个(81.1%);坡度小于 1% 的分析点数量为 14 个(15.6%)。跑道横坡坡度统计见表 7。此外,还有少部分坡度比接近 1.5 (约占 5.6%)。

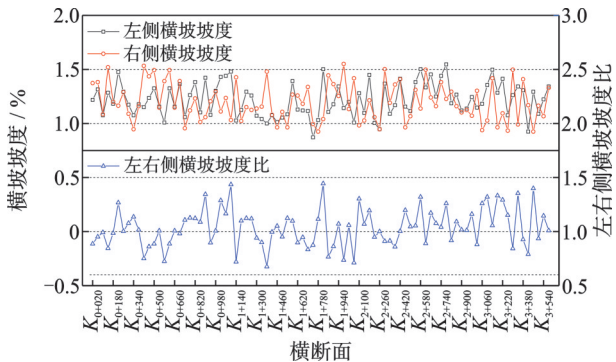


图 9 横坡沿跑道分布图
Fig.9 Transverse slope gradients along the runway

表 7 跑道横坡坡度统计
Tab.7 Statistics of runway transverse slope gradients

统计参数	左/右侧横坡坡度		
	>1.5%	1.0%~1.5%	<1.0%
测点数	4/3	83/73	3/14
百分比/%	4.4/3.3	92.3/81.1	3.3/15.6

同理,可得到纵坡坡度沿跑道分布图,如图 10 所示。可以看出,跑道 03 端(南端)相对较低,21 端(北端)相对较高。从 03 端到 21 端,其坡度变化总体上呈现随道面高程逐渐上升的趋势,具体表现为坡度值呈现先波动(0.2% 上下)后减小(0.1% 附

近),再逐步增加(0.3%~0.5%),最后波动趋稳。在两侧接地带区域,坡度变化整体相对稳定,个别测点纵坡分析结果存在较大波动。另外,跑道中线左右两侧纵坡坡度比值绝大部分在 0.83~1.20 之间,表明两侧坡度相差在 20% 以内,可能引起两侧纵坡坡度差异在 0.1%,少部分纵坡坡度比率相差接近 40%(6 个测点,占比为 6.7%)。

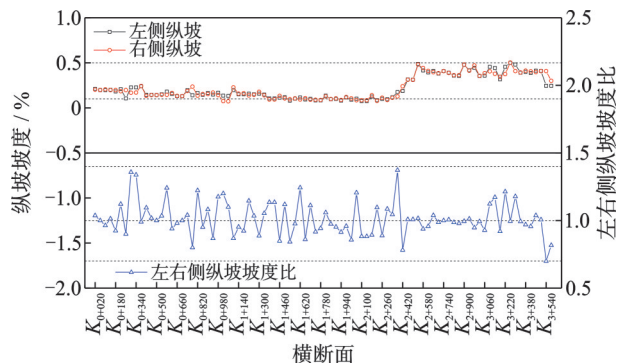


图 10 纵坡坡度沿跑道分布图
Fig.10 Longitudinal slope gradients along the runway

3.3 纵横坡对排水性能的影响分析

国际航空运输协会对 2009—2019 年间全球发生的飞机冲出跑道事故的统计分析表明,飞机冲出跑道事故远高于其他事故类别^[25]。其中,跑道湿滑是最主要的原因。目前,我国跑道宽度大部分处于 45~60 m 范围内,道面径流流线较长,汇流所需时间较长,道面积水对飞机的影响将大于公路积水对车辆的影响。一方面,合适的坡度将会满足飞机在滑跑过程中的竖向加速度变化,减少零部件损耗,提高乘客舒适度以及飞机操控性;另一方面,当水膜厚度为 12 mm、行驶速度达到 200 km/h 时,飞机存在滑水危险^[26]。因此,要合理划分跑道纵横坡坡度范围,降低积水对飞机操纵性的影响。对于降水较多的机场来说,道面的纵横坡坡度,特别是横坡坡度将成为提高跑道利用率的关键控制因素。

按文献[24]要求,上述跑道纵坡坡度测试结果大部分符合排水性能和飞机运行安全对坡度的要求,但左侧横坡有 3 个分析点、右侧横坡有 14 个分析点的坡度较小,不利于道面降水后积水排出。因此,应该参照图 9 在跑道上定位出这些坡度较小的位置,进行工程修复使之满足规范要求,但坡度提升要保证跑道和联络道相交处平缓过渡。

3.4 横坡坡度过大处原因分析

该机场属于 4E 机场,跑道横坡坡度应不大于 1.5% 且不小于 1%。跑道左右侧坡度比与 1 的差值

越大,越易导致飞机侧倾,影响滑跑安全。坡度分析过程中记录的跑道横坡坡度过大处见表 8,其沿跑道分布图如图 11 所示。

表 8 跑道横坡坡度过大处
Tab.8 Steeply transverse slope gradient along the runway

标号	横断面	跑道横坡坡度 / %	
		左侧	右侧
1	K ₀ +120	—	1.520
2	K ₀ +400	—	1.533
3	K ₁ +800	1.502	—
4	K ₁ +960	—	1.551
5	K ₂ +280	—	1.502
6	K ₂ +560	1.502	—
7	K ₂ +760	1.547	—



图 11 横坡坡度过大处沿跑道分布图
Fig.11 Steeply transverse slope distribution along the runway

图 11 中横坡坡度较大值出现的原因分析如下:
①飞机从跑道端滑行进入跑道时,因右转弯惯性造成重量右倾;②飞机在主起降端降落时因侧向风影响,造成累积右倾冲击;③在跑道和联络道相交处,飞机从主起降端降落时在跑道上右转弯经联络道滑出时因累积重量左倾,此处中型飞机高频滑出;④在跑道和联络道相交处,飞机从次起降端降落时在跑道上左转弯滑出时因累积重量右倾,此处中型飞机也高频滑出;⑤飞机偏离跑道中心靠右滑跑造成累积重量右倾;⑥飞机偏离跑道中心靠左滑跑造成累积重量左倾;⑦飞机在次着陆端降落时因侧向风的影响造成累积左倾冲击。因此,在改扩建和后续的机场设计及施工过程中应该对这些区域加以重视,飞行员也应以更高的着陆技术标准操控飞机着陆和滑行。

4 服役状况对道面高程的影响

因工程改扩建,该机场在 2013 年和 2019 年分别对跑道进行了 2 次三维激光扫描。通过分析 2 次高程差研究了道面高程受飞机荷载及外界环境作用的影响程度。其中,机场跑道南端为主起降端,假设跑道中线北端点为高程不变点,对点云数据进行换算,得到高程差沿跑道分布图,如图 12 所示。

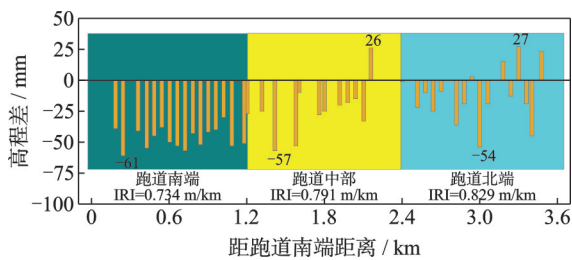


图12 高程差沿跑道分布图

Fig.12 Elevation difference distribution along the runway

由图12可看出,跑道南端主起降端在运营飞机荷载和外界环境作用下发生沉降,沉降最大幅值为61 mm,但南端沉降较为均匀,均值为41 mm。结合图6计算IRI可知,该主起降端的计算IRI较小,仅为0.734 m/km,小于全长IRI。这说明该跑道南端施工质量较好,使得道基能够在飞机荷载作用下发生均匀沉降。

跑道中部也发生了沉降,但沉降幅值(56 mm)小于主起降端(61 mm),说明飞机着陆时的冲击荷载会造成跑道发生较大沉降。另外,跑道中部IRI值为0.791 m/km,与跑道南端IRI值相差不大,但从图12中却看出跑道中部的沉降不均匀,说明IRI仅能反映道面某一较大范围内的平整度,而不能反映道面局部的平整度状况,需要对平整度评价指标进行优化。

跑道北端次起降端以沉降为主,其中沉降最大幅值为54 mm,隆起最大幅值为27 mm,IRI值为0.829 m/km,与跑道全长IRI值、南端及中端IRI值都差别不大,但是局部沉降却较为复杂,进一步说明IRI值在反映道面平整度状况时的不足。

该机场地处东南沿海,降水较为丰富。另外,主起降端沉降较为均匀,次起降端有隆起也有沉降,说明飞机荷载对跑道沉降的影响占主导作用,外界环境次之,飞机重复起降荷载所造成的道基压实对其抵抗自然疲劳起到积极作用。道面中间区域采用减薄设计时,道基受飞机荷载作用影响大,发生沉降也会增大,但观察图12发现经过多年运行,跑道中部并不是沉降最大区域,证实了道面采用减薄设计的合理性。

5 结 论

1) 通过平整度算法对道面高程点云数据进行计算,可知跑道全长范围内的IRI(0.855 m/km)和分段IRI都符合相应平整度规范要求,跑道整体平整度处于“优”。

2) 通过某机场跑道高程实测数据计算得到

B737-800飞机标准着陆过程3个阶段平整度影响系数最大值(1,1.185,1.145),对比可知,平整度对3个阶段的影响为减速阶段最大、滑行阶段次之、接地阶段最小。考虑平整度影响可减小飞机振动响应解析解与实测值间的误差,了解飞机对跑道作用较大的区域。

3) 通过分析道面纵横坡坡度计算结果,可知在飞机冲击、减速和滑行荷载的影响下,跑道整体存在不均匀沉降,进而造成纵坡坡度值变化。另外,不均匀沉降也造成跑道局部存在横坡坡度较小的区域,可能造成排水性能下降,影响飞机起降安全,因此应对这些区域坡度进行提升。

4) 对间隔6年的2次高程数据进行对比,发现飞机荷载对道面沉降影响最大,外界环境影响次之。沿跑道纵向沉降差异说明飞机重复起降荷载所造成的道基压实对其抵抗自然疲劳起到积极作用,也证明了道面中部采用减薄设计的合理性。

参 考 文 献

- [1] 刘国光,裴磊洋,武志玮.一种基于激光测距的移动式道面高程扫描设备:中国,CN213455444U[P].2021-06-15.
- [2] SIDDHARTHAN R, YAO J, SEBAALY P. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution [J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(6): 557-566.
- [3] WANG H, XING J, PRICE W, et al. An investigation of an active landing gear system to reduce aircraft vibrations caused by landing impacts and runway excitations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(1/2): 50-66.
- [4] LYU Z, QIAN J, SHI Z, et al. Dynamic responses of layered poroelastic ground under moving traffic loads considering effects of pavement roughness [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105966.
- [5] GORGES C, ÖZTÜRK K, LIEBICH R. Impact detection using a machine learning approach and experimental road roughness classification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 738-756.
- [6] 郑悦锋,凌建明,袁捷,等.机场道面排水性能评价方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版),2004(10):1394-1398. ZHENG Yuefeng, LING Jianming, YUAN Jie, et al. A method for drainage evaluation of airport pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004(10): 1394-1398. (in Chinese)
- [7] 孙悦.海绵型道路关键几何设计参数优化及雨天行车安全研究[D].南京:东南大学,2019.

- [8] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报,2017,46(10): 1509-1516.
- YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang. Challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509-1516. (in Chinese)
- [9] 耿靖杰,吕润华,周晶. 基于三维激光路面轮廓调查系统及应用[J]. 科学技术与工程,2022,22(5):2084-2092.
- GENG Jingjie, GUO Runhua, ZHOU Jing. Survey system and application of road surface profile based on 3D laser[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 2084-2092. (in Chinese)
- [10] 倪飞,王浩丞,杨艺卓,等. 三维激光扫描技术在高速公路运行非接触式变形监测中的应用[J]. 测绘通报,2021(3):164-166.
- NI Fei, WANG Haochen, YANG Yizhuo, et al. Application of 3D laser scanning technology in contactless deformation monitoring for expressway operation [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(3): 164-166. (in Chinese)
- [11] 司垒,王忠宾,李嘉豪,等. 基于图像和激光点云融合的智能采面煤岩识别[J]. 振动、测试与诊断,2023,43(2):254-262.
- SI Lei, WANG Zhongbin, LI Jiahao, et al. Coal-rock recognition of intelligent mining face based on the fusion of image and laser point cloud[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 254-262. (in Chinese)
- [12] 郑树彬,彭乐乐,钟倩文,等. 用于便携式轨检小车的轨距及磨耗检测方法[J]. 振动、测试与诊断,2022,42(3):600-605.
- ZHENG Shubin, PENG Lele, ZHONG Qianwen, et al. Gauge and wear detection method for portable track inspection trolley [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 600-605. (in Chinese)
- [13] 丁世海,阳恩慧,王郴平,等. 沥青路面表面纹理三维高精度激光非接触式检测[J]. 西南交通大学学报,2020,55(4):758-764.
- DING Shihai, YANG Enhui, WANG Chenping, et al. Three-dimensional high-precision laser non-contact detection of asphalt pavement surface texture [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 758-764. (in Chinese)
- [14] 李鹏飞. 基于车载三维激光点云数据的路面平整度评价算法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2019.
- [15] 张梦虹. 地面三维激光扫描应用于路面平整度检测的研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [16] LIU G, PEIL, FENG L, et al. A mathematical model for aircraft landing impact analysis during touch-down period [J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023,12(3): 4149-4162.
- [17] LIU G, PEIL, WU Z. Subgrade performance assessment for rigid runway using long-term pavement performance [J]. Transport, 2024, 39(2): 161-173.
- [18] GB MH/T 5024—2019 民用机场道面评价管理技术规范[S]. 北京:中国民用航空局,2019.
- [19] 裴磊洋. 基于热力作用的寒区场道动力性能研究[D]. 天津:中国民航大学,2022.
- [20] LEDBETTER R. Pavement response to aircraft dynamic loads [R]. [S. l.]: United Army Engineer Waterways Experiment Station Soils and Pavement Laboratory, 1976.
- [21] PEI L, GUO C, LIU G, et al. Effects of temperature on the dynamic response of airfield runway subgrade in cold regions[J]. Road Materials and Pavement Design, 2024: 1-19.
- [22] 王肖江. 飞机荷载作用下跑道冻土地基长期变形特性研究[D]. 天津:中国民航大学,2018.
- [23] 凌建明,刘诗福,袁捷,等. 不平激励下机场道面和公路路面平整度评价综合分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(4): 519-526.
- LING Jianming, LIU Shifu, YUAN Jie, et al. Comprehensive analysis of pavement roughness evaluation for airport and road with different roughness excitation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(4): 519-526. (in Chinese)
- [24] GB MH 5001—2021 民用机场飞行区技术标准[S]. 北京:中国民用航空局,2021.
- [25] VAN E, ROELEN A, KRUIJSEN E, et al. Safety aspects of aircraft performance on wet and contaminated runways[J]. Nationaal Luchten Ruimtevaartlaboratorium, 2001, 21(6): 3-4.
- [26] 蔡靖,李岳,宗一鸣,等. 湿滑跑道飞机着陆轮胎-水膜-道面相互作用[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(12):2382-2391.
- CAI Jing, LI Yue, ZONG Yiming, et al. Aircraft tire-water film-pavement interaction on wet pavement in landing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2382-2391. (in Chinese)



第一作者简介:裴磊洋,男,1996年4月生,博士生。主要研究方向为机场跑道平整度、飞机与跑道的相互作用。曾发表《寒区高边坡机场坡顶土体振动响应研究》(《振动、测试与诊断》2023年第43卷第5期)等论文。

E-mail:peily6@mail2.sysu.edu.cn