

文章编号:1671-1637(2026)08-0175-15

基于实测数据的机场水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价分析

马鲁宽¹, 李杰², 袁捷^{*2}, 姜昌山³, 史超³, 王顺杰²

(1. 中国民航大学科技创新研究院, 天津 300300; 2. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804; 3. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100029)

摘要:为深入研究机场水泥混凝土道面承载能力的飞机分类等级-道面分类等级(ACR-PCR)评价方法,结合中国运输机场道面强度报告更新工作,基于中国民用航空局-道面分类等级评价软件(CAAC-PCR)及相应参数获取原则与方法,构建了覆盖中国运输机场水泥混凝土道面的ACR-PCR评价数据库;选取近20年建成投用的190条跑道数据作为分析样本,对其结构参数分布特征进行了统计分析;在此基础上,重点分析了PCR受结构参数影响的敏感性及变化规律,探讨了交通量和机型组合等交通参数对其的影响,并统计了其分布特征,进而对比分析了ACR-PCR与飞机分类号-道面分类号(ACN-PCN)2种评价方法。研究结果表明:面层厚度与抗弯拉强度是PCR最敏感的参数,基层参数次之,道基参数整体影响相对较小;PCR随交通量增长呈下降趋势,且降幅逐渐趋缓,其数值取决于机型组合中ACR最大机型及机型组合作用下的道面最大疲劳累积损伤因子;就中国机场水泥混凝土道面而言,随着飞行区等级由4C、4D提升至4E、4F,PCR的最大值总体接近,而最小值、中位数和平均值依次增大,且B类道基强度下的道面PCR整体略高于A类道基强度;与ACN-PCN评价方法相比,ACR-PCR能更灵敏地反映道面结构疲劳累积效应,评价结果更为保守,但二者在限载机型判别上具有一致性。

关键词:机场道面;道面承载能力;ACR-PCR;实测数据;特征分布;敏感性分析

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.328

Analysis of ACR-PCR to evaluate bearing capacity of airport cement concrete pavements using field-measured data

MA Lu-kuan¹, LI Jie², YUAN Jie^{*2}, JIANG Chang-shan³, SHI Chao³, WANG Shun-jie²

(1. Science and Technology Innovation Research Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. China Airport Construction Corporation of Civil Aviation Administration of China, Beijing 100029, China)

Abstract: To advance the understanding of the aircraft classification rating-pavement classification rating (ACR-PCR) method for evaluating the bearing capacity of airfield cement concrete pavements, this study establishes a comprehensive ACR-PCR evaluation database for such pavements at China's

出版历程:2025-12-31 收稿,2026-04-17 修回,2026-05-27 录用

基金项目:民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室开放课题(MK202501)

作者简介:马鲁宽(1990-),男,山东冠县人,副研究员,工学博士,E-mail:malukuan5071@163.com。

*通信作者:袁捷(1971-),男,上海人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:yuanjie@tongji.edu.cn。

引用格式:马鲁宽,李杰,袁捷,等.基于实测数据的机场水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价分析[J].交通运输工程学报,2026,26(8):175-189.

Citation: MA Lu-kuan, LI Jie, YUAN Jie, et al. Analysis of ACR-PCR to evaluate bearing capacity of airport cement concrete pavements using field-measured data[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 175-189.

transport airports. This effort is grounded in the national pavement strength-report updating program and employs the civil aviation administration of China-pavement classification rating (CAAC-PCR) software, alongside standardized principles and procedures for parameter acquisition. A total of 190 runways commissioned over the past two decades are selected as the analytical sample, and the distribution characteristics of their structural parameters are statistically examined. On this basis, the sensitivity of PCR to structural parameters and its variation patterns are investigated in detail, while the influences of traffic volume and aircraft mix are also assessed. Furthermore, the distribution characteristics of PCR are statistically summarized, and a comparative analysis is conducted between the ACR-PCR and the aircraft classification number-pavement classification number (ACN-PCN) methods. The results indicate that slab thickness and flexural strength are the most sensitive parameters governing PCR, followed by base-layer parameters, whereas subgrade parameters exert a comparatively minor influence. PCR decreases with increasing traffic volume, with the rate of reduction gradually diminishing; its value is governed by both the aircraft with the largest ACR in the fleet mix and the maximum cumulative fatigue damage factor induced by the traffic mix. For rigid pavements at Chinese airports, as the airfield area class upgrades from 4C and 4D to 4E and 4F, the maximum PCR values remain generally comparable, while the minimum, median, and mean values show a consistent upward trend. Additionally, PCR on class B subgrade is slightly higher than that on class A subgrade. Compared with the ACN-PCN method, the ACR-PCR approach exhibits greater sensitivity to cumulative fatigue effects and yields more conservative evaluations, yet both methods demonstrate consistency in identifying aircraft requiring load restrictions.

Keywords: airport pavement; pavement bearing capacity; ACR-PCR; field-measured data; characteristic distribution; sensitivity analysis

Publication history: Received 2025-12-31; Received in revised form 2026-04-17; Accepted 2026-05-27

Funding: Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC Open Research Project (MK202501)

* **Corresponding author:** YUAN Jie, professor, PhD, E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn.

0 引 言

道面结构承载能力评价是保障机场安全运行的重要工作之一^[1]。国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)于1983年颁布飞机分类号-道面分类号(Aircraft Classification Number - Pavement Classification Number, ACN-PCN)评价方法用于道面结构承载能力评价,并在全世界范围内广泛应用^[1]。然而,随着飞机类型及其起落架构型日益繁杂,同时道面结构设计方法的不断更新,该方法在结构形式、疲劳损伤计算、与现有结构设计方法的统一性等方面的局限性日益凸显^[2-7]。为此,ICAO颁布飞机分类等级-道面分类等级(Aircraft Classification Rating - Pavement Classification Rating, ACR-PCR)评价方法用于取代ACN-PCN评价方法,并要求各成员国于2024年11月28日前完成更新。

针对ACR-PCR评价方法,现有研究主要涉及ACR/PCR计算方法、ACR-PCR与ACN-PCN的对比分析以及其工程应用等方面。对于ACR/PCR计算,ICAO规定了基于弹性层状体系理论的ACR计算方法,同时明确了PCR的技术计算流程,建议各成员国基于本国道面结构设计方法开展PCR技术计算;Armeni等^[8-9]分析了沥青层厚变化对道面PCR的影响,并构建了基于PCN的PCR预测模型;李龙海等^[10]采用理论计算开展了道面PCR影响参数的敏感性分析。在对比2种评价体系方面,Alves等^[11]指出ACR-PCR评价方法采用经验-力学分析方法并考虑了混合交通中各机型对总损伤的贡献等,克服了原先ACN-PCN评价方法的诸多局限;袁捷等^[12]通过对比2种评价方法的计算过程,发现ACR-PCR评价方法能够实现与现有基于疲劳损伤的道面结构设计方法的统一;袁捷

等^[12-13]研究均发现ACR与ACN属于不同的体系,不能简单地用10倍关系表示,必须独立计算;此外,与ACN-PCN评价方法相比,ACR-PCR评价方法在应用于柔性道面的承载能力评价时更为保守^[13-14],Sun等^[15-16]基于美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)的道面结构与评价方法分析刚性道面,发现ACN-PCN评价方法偏于保守,相反的是袁捷等^[12]基于中国机场道面结构与评级方法分析刚性道面,发现ACR-PCR评价方法偏于保守。在应用方面,FAA推荐采用FAARFIELD软件开展结构承载能力ACR-PCR评价;中国民用航空局组织实施了ACR-PCR评价方法在中国机场道面中的应用,并于2024年底完成了所有运输机场的道面强度报告更新工作。

现有研究对于深化ACR-PCR评价方法的认识、推动其工程应用,并实现从ACN-PCN到ACR-PCR评价体系的平稳过渡具有重要意义。相对于以柔性道面为主的国外机场,中国机场以水泥混凝土道面为主,且道面结构设计方法与国外存在一定差异。为此,中国在运输机场道面强度报告更新工作中,结合机场道面的结构设计方法,明确了道面PCR技术计算方法,并编制了相应的中国民用航空局-道面分类等级评价软件(Civil Aviation Administration of China - Pavement Classification Rating, CAAC-PCR),有力推动了中国运输机场的道面强度报告更新工作的实施。

目前,基于完成的全国运输机场道面强度报告更新工作,中国已积累了系统、详实的机场道面承载能力ACR-PCR评价的实测数据,为深入分析ACR-PCR评价方法提供了坚实的数据基础。鉴于此,本文依托上述评价实测数据,聚焦于水泥混凝土道面,在介绍水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价方法的基础上,阐述基于评价数据库的ACR-PCR评价分析数据集并分析其参数特征,重点对结构参数和交通参数对道面PCR的影响、道面PCR的分布特征以及与ACN-PCN评价方法的对比开展研究。研究结果对于深化ACR-PCR评价方法的理论认知、完善其在中国机场水泥混凝土道面承载能力评价中的工程应用具有重要意义。

1 水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价方法

1.1 ACR-PCR评价方法概述

ACR-PCR评价方法是ICAO为改进ACN-PCN评价体系的局限性而提出的新型道面承载能

力评价体系。在该体系中,ACR与ACN相对应,表征飞机对道面结构的作用,其计算在继承ACN基本原理的基础上,对标准结构、力学响应算法、当量单轮胎压及数值量级等方面进行了优化^[12]。PCR则对应于PCN,表示道面在不限重条件下的承载能力,其确定方式同样包括经验法和技术计算法:经验法直接取运行机型组合中飞机的ACR最大值作为PCR;技术计算法则需结合各国道面结构设计方法(道面疲劳损伤计算方法)并按规定流程进行。

在报告格式上,ACR-PCR沿用了ACN-PCN评价体系,采用“PCR值/道面类型/道基强度类型/最大允许胎压类型/评定方法”的结构。评价时遵循以下规定。

(1)若ACR值不大于PCR值,则该飞机可在规定胎压下不受重量限制运行。

(2)若ACR值小于PCR值且不大于1.1倍的PCR值,允许飞机在规定胎压下有限超载运行,但其年超载运行次数不得超过除轻型飞机外年总运行次数的5%。

(3)若ACR值大于1.1倍的PCR值,则该飞机限制运行。

1.2 基于中国设计方法的道面PCR技术计算

PCR为道面分类等级,用于表征在给定评价期与机型组合作用下,道面结构所能承受的最大飞机作用等级。ICAO要求各成员国优先采用技术计算方法确定PCR值,该方法基于道面结构参数、评价期及评价期内机型组合与交通量,利用道面结构设计方法计算道面疲劳累积损伤因子(Cumulative Fatigue Damage Factor, CDF),并通过控制CDF等于1.0得到PCR值。针对PCR技术计算方法,ICAO给出了以下通用实施步骤:①确定结构参数、评价期及评价期内的机型组合及交通参数;②计算评价期内所有机型作用下道面最大疲劳累积损伤因子 $C_{\max}$;③依据 $C_{\max}$ 所在条带处各个机型对道面疲劳累积损伤的贡献度,以贡献度最大为原则确定关键机型(用 A_i 表示,其中 $i=1,2,3,\dots$);④基于道面疲劳累积损伤等效原则,首先调整该关键机型的累计作用次数,使其单独作用下产生的最大疲劳累积损伤因子与整个机型组合下在道面产生的 $C_{\max}$ 保持一致,随后,在保持其累计作用次数不变的条件下,进一步调整该关键机型的质量,直至其单独作用下产生的最大疲劳累积损伤因子达到1.0,此时对应的飞机质量即为该关键机型的最大容许质量;⑤计算关键机型 A_i 在最大容许质量下的ACR值,记为 a_i ;⑥第3步中的关键机型不是机

型组合中 ACR 值最大机型(用 AM 表示),剔除该机型,用剩余机型组合重复第 3~5 步;⑦ PCR 值记为 $P, P = \max(a_i)$, 最终结果取 10 的整数倍。

在上述步骤中,2~4 步中均涉及道面疲劳累计损伤的计算。《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)假定飞机的横向轮迹偏移呈

正态分布,以条带为单位计算飞机荷载的作用次数;同时计算临界荷位应力,并根据疲劳方程确定单个条带上道面的容许作用次数;并依据 Miner 定律实现以条带为单位的道面疲劳累积损伤计算。据此可以确定出适用于中国水泥混凝土道面 PCR 技术计算流程,如图 1 所示。

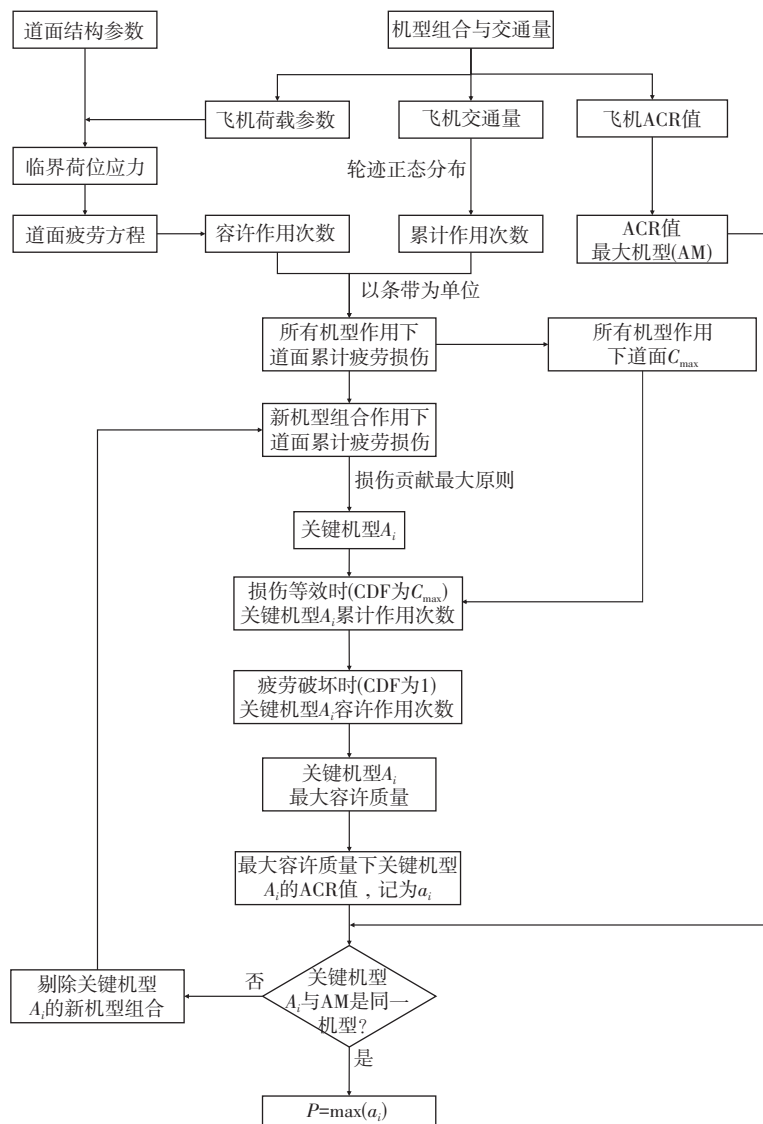


图 1 PCR 技术计算流程

Fig. 1 Technical evaluation flow of PCR

1.3 CAAC-PCR 评价软件

在明确 ACR-PCR 评价方法以及 PCR 技术计算方法的基础上,为推进中国水泥混凝土道面承载能力评价工作,编制了 CAAC-PCR 评价软件。该软件采用分层架构设计,如图 2 所示,主要包括数据访问层、算法解析层、应用层和表示层。在运行流程上,首先通过数据访问层导入外部基础数据;用户在表示层选定功能并建立具体计算场景;随后,算法解析层与应用层调用内置计算引擎完成 PCR 计算与

ACR-PCR 评价分析;最终,评价结果通过表示层统一输出与可视化,供用户查看与研判。

基于 ACR-PCR 评价方法,CAAC-PCR 评价软件支持水泥混凝土道面 PCR 值的两种确定方式—技术计算法与经验法。其核心功能主要包括以下 3 个方面。

(1) PCR 计算与强度报告,依据输入参数计算道面 PCR 值,并生成符合规范标准的道面强度报告。

(2) 道面承载能力评价,实现飞机 ACR 值与道

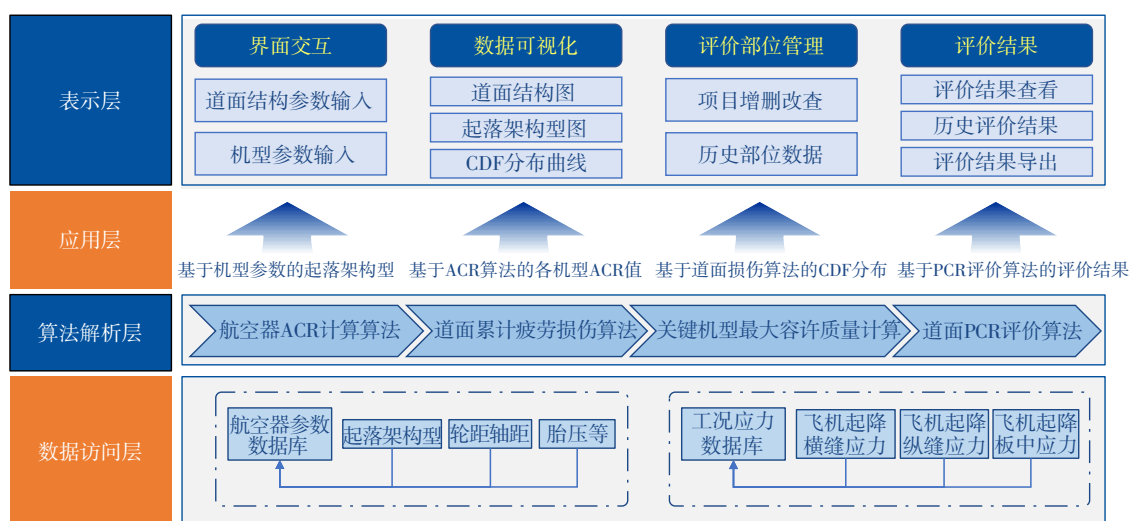


图2 CAAC-PCR软件构架

Fig. 2 Software architecture of CAAC-PCR

面PCR值的系统比对,完成ACR-PCR评价,判断运行限制条件。

(3)超载运行分析,针对ACR值超过PCR值的情况,计算超载飞机的最大允许质量,为运行决策提供依据。

对比验证与工程应用表明,CAAC-PCR软件计算逻辑准确,结果合理可靠,具备良好的可操作性与工程适用性,可满足中国机场水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价的工程需求^[17]。

2 ACR-PCR评价数据库与分析数据集

2.1 参数获取原则与方法

准确获取各项评价参数是开展道面结构承载能力ACR-PCR评价的前提。对于水泥混凝土道面,实施该方法所需明确的核心参数包括评价期、航空交通量以及结构参数。本文依据中国现行《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025)和《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2019),并结合实际工程经验,系统梳理并制定了上述参数的获取原则与具体方法,详见表1。

2.2 ACR-PCR评价数据库

在明确参数获取原则与方法的基础上,依托中国运输机场道面强度报告更新工作,基于上述方法系统采集了评价所需各类参数,并运用CAAC-PCR评价软件完成了道面结构承载能力的评价。在此基础上,构建了水泥混凝土道面承载能力ACR-PCR评价数据库。该数据库全面收录了各评价对象的机

场名称、评价部位、使用年限、结构参数、航空交通参数,以及计算得出的PCR值、规范格式的道面强度报告和详细的承载能力评价结果,以机场1、2为例其形式如表2所示。

截至2024年底,中国已完成全部运输机场的道面强度报告更新工作。基于此次系统性更新,按照表2所示的数据结构,目前已累计收录中国263个运输机场的跑道、滑行道及停机坪等道面结构的承载能力评价数据,从而构建了覆盖中国运输机场体系水泥混凝土道面ACR-PCR评价数据库。

2.3 ACR-PCR评价分析数据集

基于ACR-PCR评价数据库,本文以水泥混凝土跑道样本数据作为ACR-PCR评价分析数据集,并对上述数据库中的跑道样本数据进行了针对性筛选。首先,剔除非常规结构(比如因防冻要求而设置较大厚度垫层)的跑道样本;其次,剔除了接近设计使用年限的样本数据,重点排除评价期小于5年的个例;最后,为减小设计方法演变与建造水平代际差异的影响,进一步筛选近20年内建成并投入使用的水泥混凝土跑道作为研究样本。最终筛选出190条水泥混凝土跑道作为分析样本,并选取跑道端部道面(结构设计厚度未减薄)的承载能力评价参数与结果数据,构建ACR-PCR评价分析数据集,用于后续分析。所选跑道覆盖4C、4D、4E、4F这4个飞行区等级,各等级跑道数量及占比如图3所示。

根据抗弯刚度与结构响应等效原则,将上、下基层等效为单一基层,并计算得到基层厚度与回弹模量;同时基于道基反应模量及垫层参数推算

表 1 评价参数获取原则和方法

Table 1 Acquisition principles and methods for evaluation parameters acquisition

参数	指标	获取原则和方法
评价期	评价期	新建道面与道面结构设计年限保持一致;既有道面可由道面设计年限减去已使用年限确定,当小于 5 年时,建议按 5 年取值
航空交通量	机型组合	新建道面按照设计文件获取;对于既有道面,应尽可能地收集近 10 年的航空交通量,并经过统计分析,预测出各机型的评价期起始年运行架次和年平均增长率。其中,对于特殊年份(如新冠疫情期间)的航空交通量历史数据宜剔除
	评价期起始年交通量 年平均增长率	
结构参数	面层厚度	新建道面根据工程竣工文件确定;对于既有道面或者竣工文件缺失的道面,其厚度采用现场钻芯取样或探地雷达检测的方法进行确定
	面层弯拉弹性模量	新建道面根据设计文件确定;对于既有道面或者设计文件缺失的道面,可根据航空交通等级参照设计规范确定
	面层弯拉强度	宜通过现场取芯进行劈裂试验,同一区域内宜选取不少于 3 个芯样,由测试结果的算术平均值作为测定值,结果精确至 0.01 MPa
	(上、下)基层厚度	新建道面通常根据工程竣工文件确定;对于既有道面或者竣工文件缺失的道面,其厚度采用现场钻芯取样或探地雷达检测的方法进行确定
	(上、下)基层回弹模量	新建道面通常根据工程竣工文件确定;对于既有道面或者竣工文件缺失的道面,使用重型落锤式弯沉仪进行弯沉测试,反算其回弹模量
	垫层厚度	新建道面根据工程竣工文件确定;对于既有道面或者竣工文件缺失的道面,其厚度采用现场钻芯取样或探地雷达检测的方法进行确定
	垫层回弹模量	新建道面通常根据工程竣工文件确定;对于既有道面或者竣工文件缺失的道面,可根据材料类型按照设计规范确定
	道基顶面反应模量	道基顶面反应模量的获取方法取决于道面建设历史:建设历史不超过 3 年,可参照设计文件确定;近 3 年内进行过评估的道面,可参照评估报告确定;其他情况则需使用重型落锤式弯沉仪进行弯沉测试,反算道基顶面反应模量

表 2 ACR-PCR 评价数据库形式

Table 2 Form of the ACR-PCR evaluation database

机场名称	部位	评价期/年	面层厚度/mm	面层弯拉弹性模量/MPa	面层弯拉强度/MPa	上基层厚度/mm	上基层回弹模量/MPa	下基层厚度/mm	下基层回弹模量/MPa	垫层厚度/mm	垫层回弹模量/MPa	道基顶面反应模量/(MN·m ⁻³)	机型(架次,起飞占比,增长率)	PCR值	道面强度报告结果	评价结果
机场1	配备平行滑行道的跑道	20	340	37 000	5.1	180	2 250	180	2 250	600	200	161	B737-800(304, 50%, 0) ARJ21700ER(907, 50%, 0) A321-100(200, 50%, 0)	640	640 R/A/W/T	不限制运行
机场2	配备平行滑行道的跑道	5	340	38 900	5.8	210	500	210	500	0	0	36	A320-200(1 602, 50%, 2%) A319-100(846, 50%, 2%) A321-100(860, 50%, 2%) A320-NEO(860, 50%, 2%) B737-700(54, 50%, 2%) B737-800(3 750, 50%, 2%) ARJ21-700ER(1 012, 50%, 2%)	660	660 R/B/W/T	不限制运行

出道床顶面反应模量。随后,按飞行区等级对 190 条跑道端部道面的结构参数进行统计分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知:面层厚度随飞行区等级提升(4C~4F)呈阶梯式增长,均值(取整)分别为 330、360、390、420 mm,符合设计预期;各等级飞行区道面面层弯拉强度均高于 5.0 MPa,均值与分布

接近,说明中国机场水泥混凝土面层整体具有较高的强度水平;除 4C 飞行区因上、下基层材料差异导致回弹模量离散性较大外,其余等级飞行区道面的上、下基层均由水泥稳定碎石构筑,因而其基层厚度与回弹模量分布均一旦离散小;道床顶面反应模量最小值随飞行区等级升高而增大,符合高航空交通

等级跑道对道基支撑的更高要求的规定,同时经转换为道床回弹模量后^[18],其对应道基强度均属 A 类(≥ 150 MPa)或 B 类(120~150 MPa),且高等级飞

行区(4E/4F)跑道中 A 类道基占比更高。

3 ACR-PCR 评价结果分析与讨论

3.1 结构参数对道面 PCR 的影响分析

由道面 PCR 技术计算方法可知,道面 PCR 主要受面层厚度、面层抗弯拉强度、基层厚度、基层回弹模量、道床顶面反应模量等结构参数,以及航空交通参数的共同影响。为排除航空交通参数变化对分析结果的干扰,本文按飞行区等级分别选取代表性跑道的航空交通参数作为对应等级跑道的交通条件,并统一按 20 年评价期计算累计交通量。代表性跑道的筛选以航空交通参数与对应飞行区等级跑道的运行特征一致性为原则,同时优先选取代

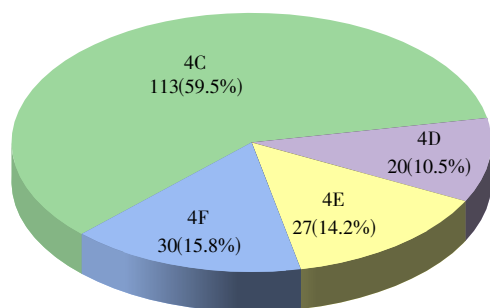


图 3 190 条水泥混凝土跑道所属飞行区等级 (单位:条)

Fig. 3 Airfield area class of 190 cement concrete runways

(unit: strips)

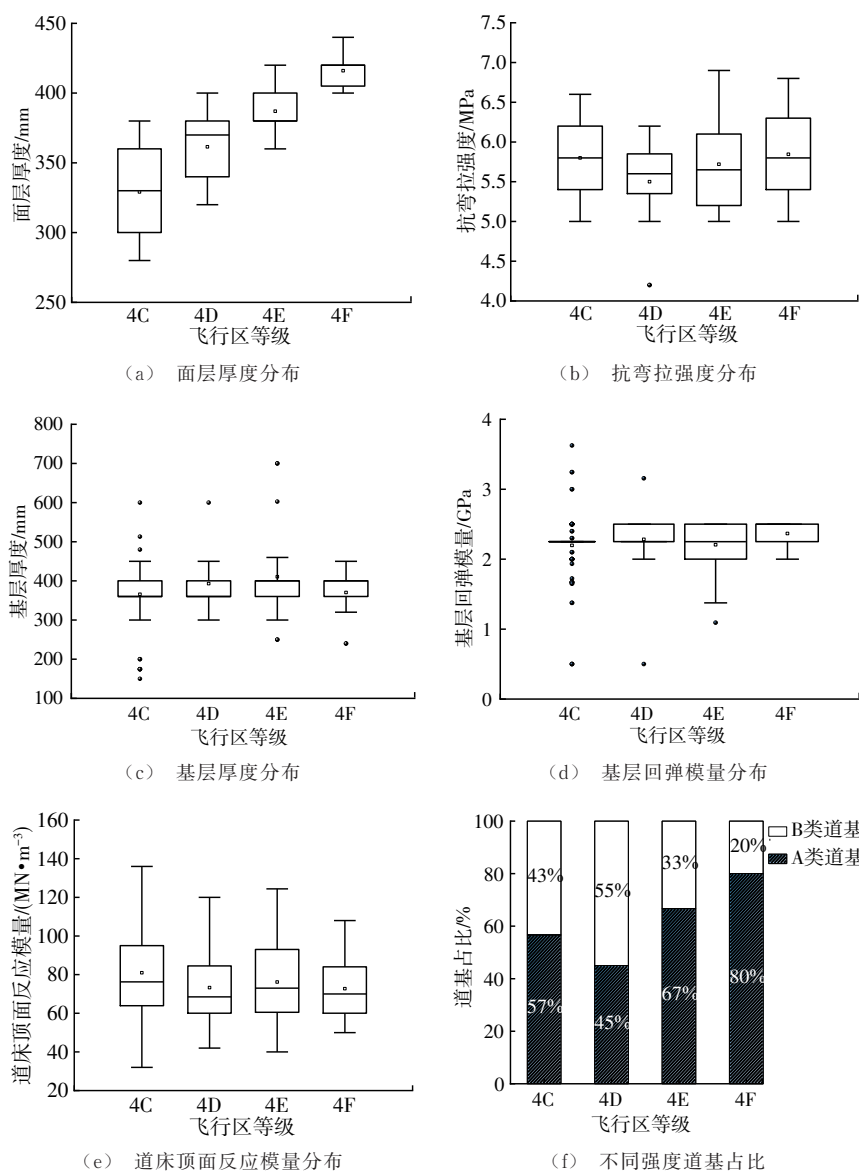


图 4 190 条跑道结构参数分布

Fig. 4 Distribution of structural parameters for 190 runways

表性强且数据完整、来源可追溯的样本。所选跑道的主导运行机型构成应与对应飞行区等级跑道的典型运行机型特征相一致,评价期起始年交通量水平应处于该等级跑道样本的常见范围内,避免选取交通量异常的极端样本,且年均增长率应与对应等级跑道的一般运行发展水平相匹配。基于上述原则,选取 4C-跑道 1、4D-跑道 2、4E-跑道 3 和 4F-跑

道 4 的航空交通参数(见表 3)作为对应飞行区跑道的交通条件。此外,由于道面 PCR 的计算基于 ACR,而 ACR 的计算与道基强度等级直接相关,因此将所涉及的 190 条跑道数据依据道基强度等级(A 类和 B 类)划分为 2 组。在此基础上,开展结构参数对 PCR 的影响分析,主要包括参数敏感性分析及其影响变化分析。

表 3 不同飞行区代表性跑道的航空交通参数

Table 3 Aircraft traffic parameters of representative runways for different airfield area class

跑道名称	航空交通参数(机型(起始年架次,起飞架次占比,年均增长率))
4C-跑道 1	B737-800(4 744, 50%, 2%); A320-200(7 854, 50%, 2%); A321-100(994, 50%, 2%); ARJ21-700-STD(624, 50%, 2%); A319-100(896, 50%, 2%)
4D-跑道 2	A320-200(3 040, 50%, 3%); A320-NEO(2 322, 50%, 3%); A321-100(1 414, 50%, 3%); ARJ21-700-STD(1 076, 50%, 3%); B737-800(15 561, 50%, 3%); B757-200-PF(1, 50%, 3%)
4E-跑道 3	A320-200(69 049, 100%, 2%); A330-300(1 733, 100%, 2%); A350-1000(37, 100%, 2%); B737-800(74 856, 100%, 2%); B757-200(845, 100%, 2%); B787-9(1 887, 100%, 2%); B777-200(2 229, 100%, 2%); ARJ21-700-ER(3 997, 100%, 2%)
4F-跑道 4	A320-200(54 033, 50%, 2%); A330-300(8 366, 50%, 2%); A340-300(94, 50%, 2%); A340-600(193, 50%, 2%); A350-900(1 428, 50%, 2%); B737-800(23 071, 50%, 2%); B747-400B(2 828, 50%, 2%); B777-200-LR(11 198, 50%, 2%); B787-9(7 257, 50%, 2%)

在敏感性分析方法的选择上, Morris 法通过均值敏感性指数(μ^*)表征输入变量对输出响应的全局平均影响强度,具有计算效率高、适用性广的优点^[19]。鉴于此,采用 Morris 法进行敏感性分析,不同等级飞行区的计算结果如图 5 所示。由图 5 可知,在 A 类与 B 类强度道基下,不同等级飞行区的道面

PCR 对结构参数的敏感性均具有明显的层次性特征,对比各参数 μ^* 的大小可以得到相同的影响排序:面层结构参数(面层厚度、面层抗弯拉强度)、基层厚度、基层回弹模量、道床顶面反应模量。其中,相较于面层厚度,飞行区等级越高,面层抗弯拉强度对道面 PCR 的影响越大。

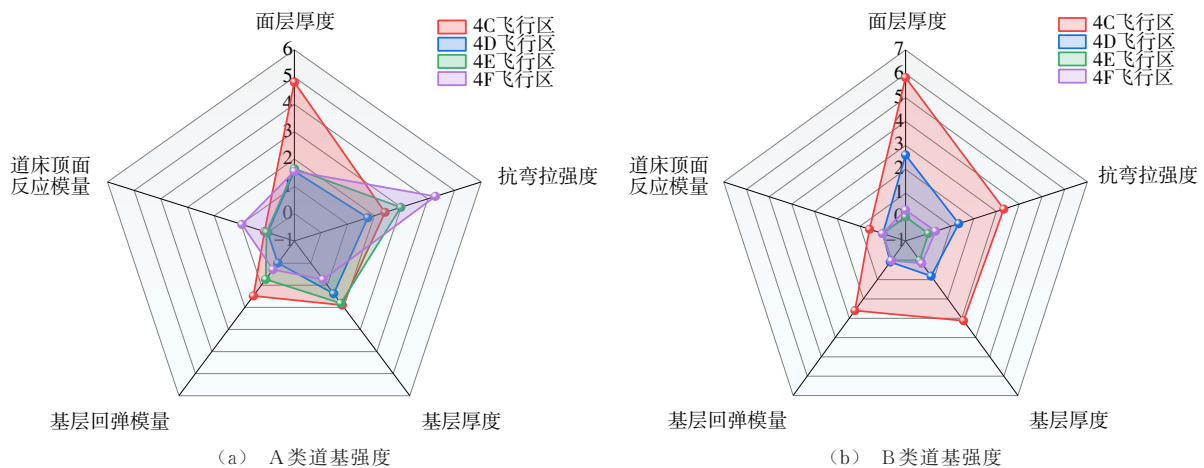


图 5 道面 PCR 的结构参数敏感性指数 μ^* 分布

Fig. 5 Distribution of structural parameter sensitivity index μ^* for PCR

在敏感性分析的基础上,进一步采用累积局部效应(Accumulated Local Effects, ALE)方法,量化结构参数对道面 PCR 的影响变化。针对 4C 飞行区跑道,基于道基强度分组数据,分别计算各结构参数的 ALE 曲线,并叠加全样本道面的 PCR 均值,从而得到各参数在工程应用分布区间内变化时对应的

PCR 平均变化趋势,需要说明的是,在 ALE 分析中的 PCR 采用取整前的精确计算值,以反映结构参数变化对 PCR 影响的连续响应规律,结果如图 6 所示。由图 6 可知, A 类和 B 类道基的道面 PCR 随结构参数的变化基本一致,随面层厚度、基层厚度、基层回弹模量的增大呈非线性增大趋势,随面层抗弯拉强度

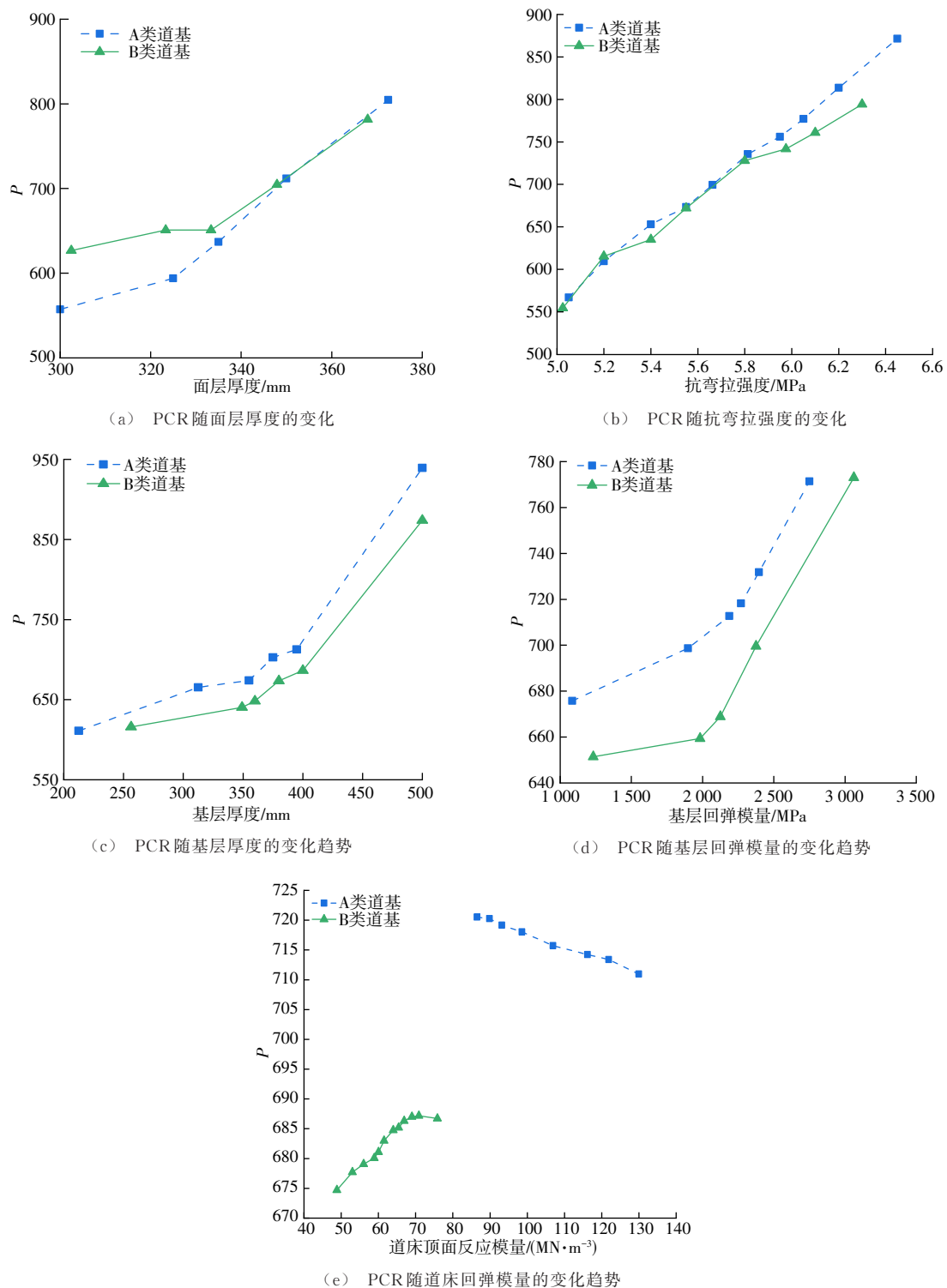


图 6 PCR随结构参数的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of PCR with the structural parameters

增大呈线性增大趋势。这主要源于结构参数的增大减小了道面的疲劳累积损伤,进而提升了道面PCR。图6的结果表明,道基强度等级不同,道面PCR随道床回弹模量的变化呈现出不同的变化规律,A类道基的道面PCR随道床回弹模量增大而减小,但B类道基则呈现先增大后减小的趋势。这一差异归因于

过高的道基强度易诱发道面产生自上而下(Top-down)的开裂,反而加速道面疲劳破坏,导致PCR下降。此外,由图6可以计算得到中国机场跑道常用结构参数范围内PCR值的变化率。面层厚度每增加10 mm(340~420 mm),PCR值约提升50;基层厚度每增加10 mm(360~420 mm),PCR值约提升20;基

层回弹模量每增加 100 MPa (2 000~3 500 MPa), PCR 值约提升 10; 面层抗弯拉强度每提高 1 MPa (5.0~6.5 MPa), PCR 值显著提升约 100。对于道基, 其影响相对有限且方向不一: A 类道基的道床顶面反应模量每增加 $10 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ (80~120 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$), PCR 值略微下降约 2; B 类道基对应模量每增加 $10 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ (50~70 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$), PCR 值约提升 5。

综合分析表明, 面层厚度与面层抗弯拉强度均为影响 PCR 值的主控参数, 基层参数次之, 而通过改善道基所能获得的性能提升相对有限。进一步地, 不同飞行区等级下面层厚度与面层抗弯拉强度的相对敏感性存在差异: 在低等级飞行区中, 面层厚度的影响更为突出, 而随着飞行区等级提高, 面层抗弯拉强度对 PCR 的影响逐渐增强。

3.2 交通参数对道面 PCR 的影响分析

与第 3.1 节相对应, 为减弱结构参数差异对分析结果的干扰, 在分析交通参数对道面 PCR 的影响时, 以表 2 选定的代表性跑道的结构参数为对应飞行区的跑道结构参数, 如表 4 所示, 其中 4C-跑道 1、

4D-跑道 2 和 4E-跑道 3 的道基强度等级为 B, 4F-跑道 4 的道基强度等级为 A。在此基础上, 本文将结构参数作为既定条件进行控制, 评价期调整仅用于表征交通荷载随服役时间延长而产生的累积效应, 重点分析既有结构条件下 PCR 随交通量变化的响应规律, 而不涉及不同评价期下结构参数的重新设计; 同时, 在相同结构参数基础上, 对不同机型组合引起的 PCR 评价差异进行对比分析。

为分析交通量对道面 PCR 的影响, 针对上述 4 条跑道, 分别计算评价期为 10~40 年 (以 5 年间隔递增) 的交通量对应的道面 PCR 值和最大疲劳累积损伤因子, 结果如图 7 所示。由图 7(a) 可见, 随着评价期内交通量的增加, 各跑道道面 PCR 值 P 均呈现下降趋势, 且下降速率逐渐减缓。其原因在于, 荷载作用的持续累积会加剧道面结构的疲劳损伤, 而根据 PCR 技术计算方法, 疲劳累积损伤的增大会直接导致 PCR 值降低, 且当 $C_{\max}$ 超过 1.0 时 [图 7(b)], 表明道面已出现疲劳破坏, 需考虑采取限载运行措施。

表 4 不同飞行区代表性跑道的结构参数

Table 4 Structure parameters of representative runways in different airfield area class

跑道名称	面层厚度/mm	弯拉弹性模量/MPa	抗弯拉强度/MPa	基层厚度/mm	回弹模量/MPa	道床顶面反应模量/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$)
4C-跑道 1	340	33 000	5.0	360	2 250	48
4D-跑道 2	360	37 000	5.0	360	2 500	58
4E-跑道 3	400	36 000	5.0	400	2 500	63
4F-跑道 4	420	36 000	5.0	400	2 500	66

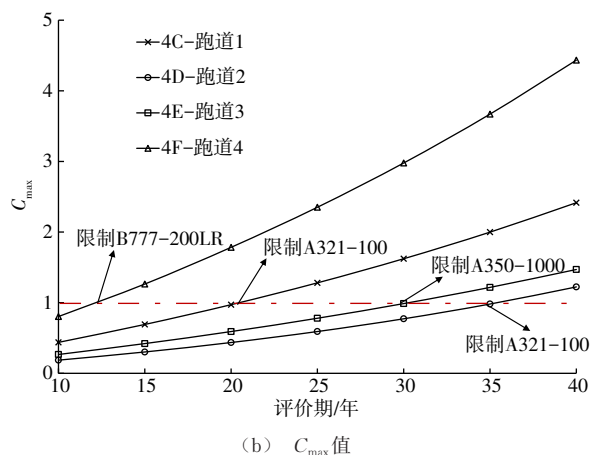
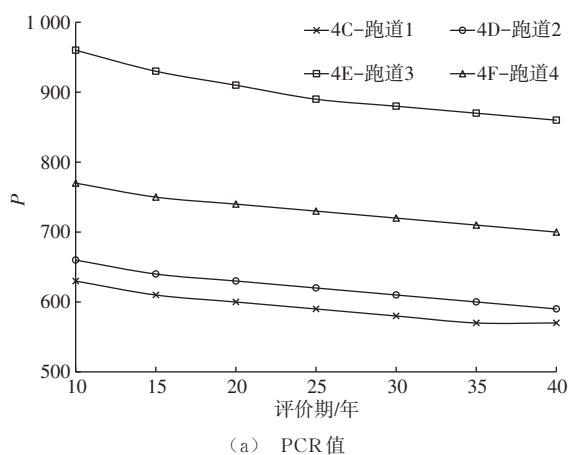


图 7 交通量对道面 PCR 值和 $C_{\max}$ 值的影响

Fig. 7 Influence of traffic volume on PCR and $C_{\max}$ values of the pavement

为分析机型组合对道面 PCR 的影响, 根据表 3 的飞机类型与占比, 选择 4C-跑道 1 和 4F-跑道 4 作为分析对象。为便于计算, 将 4F-跑道 4 的机型归类为 C、D、E 这 3 类, 并分别选取 B737-800、A330-300 和 B777-200LR 作为代表机型, 且保持各类飞机

的交通量不变。由此得到 4C-跑道 1 和 4F-跑道 4 在原组合机型下的道面 PCR 如表 5、6 所示。从以下 2 个方面分析机型组合的影响, 具体工况如下:

(1) 机型组合变化。在交通量不变的条件下, 通过移除 ACR 最大的机型来调整组合。具体为: 在

原机型组合的基础上,将 ACR 最大机型对应的全部交通量累加到 ACR 次大的机型,同时额外增加 2 架次该机型(其对疲劳累积损伤的贡献可忽略)作为对照,形成表 5 和表 6 所示的工况 1;在工况 1 机型组合基础上,采用相同的方法形成工况 2,如表 5、6 所示。

(2)机型组合比例变化。针对 4F-跑道 4,保持

交通量不变,在原机型组合的基础上,保持机型类别不变,动态调整 D 类和 E 类飞机的占比,形成表 6 所示的工况 3 和工况 4。

基于上述工况,计算得到 $C_{\max}$ 、交通量最大机型、疲劳损伤贡献度最大机型、ACR 最大机型、决定 PCR 值的关键机型以及 PCR 值,结果汇总于表 5、6。

表 5 机型组合对 4C-跑道 1 道面 PCR 的影响

Table 5 Influence of the combination of aircraft mix on the PCR of lane 1 of 4C runway

工况	评价期为 20 年时的交通量占比/%					$C_{\max}$ 值	交通量最大机型	损伤贡献度最大机型	ACR 值最大机型	决定 PCR 值的关键机型	PCR 值
	B737-800	A319-100	A320-200	A321-100	ARJ21-700-STD						
原组合	31.39	5.93	51.97	6.58	4.13	0.924 8	A320-200	A321-100	A321-100	A321-100	600
工况 1	37.97	5.93	51.97	0	4.13	0.632 7	A320-200	B737-800	B737-800	B737-800	540
	37.97	5.93	51.97	2 ^a	4.13	0.632 7	A320-200	B737-800	A321-100	A321-100	620
工况 2	0	5.93	89.94	0	4.13	0.370 8	A320-200	A320-200	A320-200	A320-200	530
	2 ^b	5.93	89.94	0	4.13	0.370 8	A320-200	A320-200	B737-800	B737-800	550

注:2^a为 2 架次 A321-100;2^b为 2 架次 B737-800。

表 6 机型组合对 4F-跑道 4 道面 PCR 的影响

Table 6 Influence of the combination of aircraft mix on the PCR of lane 4 of 4F runway

工况	评价期为 15 年时的交通量占比/%			$C_{\max}$ 值	交通量最大机型	疲劳累积损伤贡献度最大机型	ACR 值最大机型	决定 PCR 值的关键机型	PCR 值
	C 类	D 类	E 类						
	B737-800	A330-300	B777-200LR						
原组合	91.1	7.7	1.2	0.152 6	B737-800	B777-200LR	B777-200LR	B777-200LR	840
工况 1	92.3	7.7	0.0	0.028 8		A330-300	A330-300	A330-300	780
	92.3	7.7	2 ^a	0.028 8		A330-300	B777-200LR	B777-200LR	920
工况 2	100.0	0.0	0.0	0.001 2		B737-800	B737-800	B737-800	670
	100.0	2 ^b	0.0	0.001 2		B737-800	A330-300	A330-300	940
工况 3	81.1	17.7	1.2	0.189 1		B777-200LR	B777-200LR	B777-200LR	830
	71.1	27.7	1.2	0.226 5		B777-200LR			820
	61.1	37.7	1.2	0.263 8		A330-300			810
	51.1	47.7	1.2	0.301 2		A330-300			810
工况 4	91.1	7.7	2.2	0.257 0		B777-200LR			810
	90.1	7.7	3.2	0.361 3		B777-200LR			800
	89.1	7.7	5.2	0.570 0		B777-200LR			780

注:2^a为 2 架次 B777-200LR;2^b为 2 架次 A330-300。

根据表 5、6 的工况 1 和工况 2 分析结果可知,在额外增加 2 架次 ACR 最大机型后, $C_{\max}$ 未发生变化,但道面 PCR 值出现显著变化。进一步分析表明,此时决定 PCR 值的关键机型转变为 ACR 最大的机型,而与交通量最大或疲劳累积损伤贡献最大的机型无关。同样,由表 6 中工况 3、4 的结果可见,在固定机型组合的前提下,仅调整各机型比例(即改变交通量占比), $C_{\max}$ 会发生变化,但决定 PCR 的关键机型仍为机型组合中 ACR 最大的机型,并不受交通量或疲劳累积损伤贡献最大的机型影响。

为进一步验证上述规律,针对表 6 的工况 3 与工况 4,计算了决定 PCR 的关键机型(B777-200LR)的最大容许质量(其 ACR 即为 PCR),并通过理论分析确定了 $C_{\max}$ 达到 1.0 时该机型的最大容许质量等于其最大滑行质量。据此绘制最大容许质量随 $C_{\max}$ 变化的关系曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在机型组合相同而比例不同的情况下,工况 3 与工况 4 的曲线完全重合,这说明道面 PCR 值仅与 $C_{\max}$ 相关,而与机型组合比例无关。此外,最大容许质量随 $C_{\max}$ 增大呈下降趋势,且下降速率逐渐趋缓,而当

$C_{\max}$ 超过 1.0 后,最大容许质量即低于最大滑行质量,表明道面需进入限载运行状态,这与图 8 的分析结果一致。

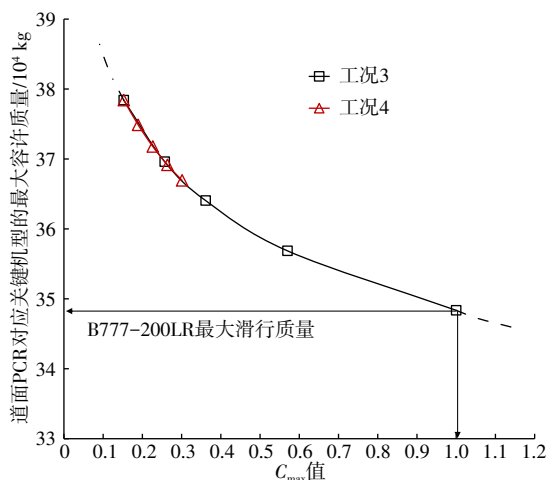


图 8 决定 PCR 值的关键机型最大容许质量与 $C_{\max}$ 的关系

Fig. 8 Relationship between the maximum allowable mass and $C_{\max}$ of critical aircraft that determine the PCR value

3.3 道面 PCR 分布特征

在上述结构参数与交通参数影响分析的基础上,为进一步探究中国机场水泥混凝土道面 PCR 的特点,依据道基强度等级(A类和B类)分组的 190 条数据,对不同等级飞行区道面的 PCR 开展分布特征统计分析,结果如图 9 和表 7 所示。

由图 9 和表 7 可知:总体而言,4C~4F 飞行区道面 PCR 值的范围依次为(520, 1 130)、(550, 1 210)、(700, 1 220)、(840, 1 230),4E、4F 较 4C、4D 的道面 PCR 最小值提高显著,最大值也有提高但差异较小;具体而言,对于 A 类强度道基的道面,飞行区等级从 4C~4F,道面 PCR 的最小值、中位数及平均值依次增大,B 类强度道基的道面 PCR 也呈现出相同的变化。上述数据表明,飞行区等级从 4C~4F,道面 PCR 呈现出最大值稳定且整体增大的趋势,这主要由于面层厚度对道面 PCR 影响显著(第 3.1 节),且 4C~4F 的道面厚度呈现阶梯增大而其他结构参数差异较小(图 4),因而较高等级飞行区道面 PCR 也偏大。此外,进一步对比图 9 中每个等级飞行区道面 PCR 可以发现,相较于 A 类道基强度道面,B 类道基强度道面 PCR 的最小值、中位数及平均值均偏大,这说明 B 类道基强度道面 PCR 整体水平高于 A 类道基强度道面,主要原因在于过高的道基强度易诱发道面产生自上而下(Top-down)的开裂,反而加速道面疲劳破坏,导致 PCR 下降。

3.4 与 ACN-PCN 对比分析

为系统对比 ACR-PCR 评价方法与传统的 ACN-PCN 评价方法之间的差异,本研究基于选定的 190 条跑道数据集,首先依据中国《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2019)开展了 ACN-PCN 评价。初步结果表明,全部跑道在 2 种评价方法下均未出现需限制运行的情况。为深入比较两种方法,进一步选取了不同飞行区等级的代表性跑道(其航空交通参数与结构参数分别见表 3 与表 4),分别计算了评价期为 10~40 年(以 5 年为间隔)时 2 种方法下的评价结果,详细对比数据见表 7。

根据表 8 的对比分析结果,不同飞行区跑道在 2 种评价方法下均表现出差异。具体而言,ACR-PCR 方法在较短的评价期(如 10、15 年)即出现需限载运行的情况,而 ACN-PCN 方法则在更长的使用年限后才出现类似结论。这表明 ACR-PCR 方法对道面结构性能的要求更为严格,其评价结果相对保守。这是由于 ACR-PCR 方法实现了与现有道面结构设计方法的统一,其在分析中分别计算各机型作用下的道面疲劳累积损伤,因而能更充分反映各个机型对道面疲劳损伤贡献与评价期内的交通量累积效应,使得 PCR 值对机型变化与评价期更敏感。对运行安全和管理而言,ACR-PCR 方法有助于避免道面在高疲劳累积损伤水平下继续服役,从而提高承载能力评价的风险前瞻性,同时能够为机场管理单位提供更早的养护干预窗口,在限载前通过工程措施、交通组织优化等方式延缓结构性能劣化。此外,两种方法所识别出的限载机型完全一致,这是因为 ACR-PCR 方法在评价逻辑上继承了 ACN-PCN 法的基本原理,均为通过对比飞机等级评价值(ACR/ACN)与道面等级评价值(PCR/PCN)来确定是否需限制运行^[12]。

4 结 语

(1)评价参数数据分析表明,面层厚度随飞行区等级提升(4C~4F)呈阶梯式增长;各等级飞行区面层抗弯拉强度均高于 5.0 MPa,表明中国机场水泥混凝土面层整体具有较高的强度水平;4C 飞行区基层回弹模量离散性较大,其余等级飞行区基层厚度与回弹模量分布均一旦离散小;道床顶面反应模量最小值随飞行区等级升高而增大,且高等级飞行区(4E/4F)跑道中 A 类道基占比更高。

(2)结构参数对 PCR 的影响分析表明,结构参数对 PCR 的影响具有明显的层次性特征,其中面层厚

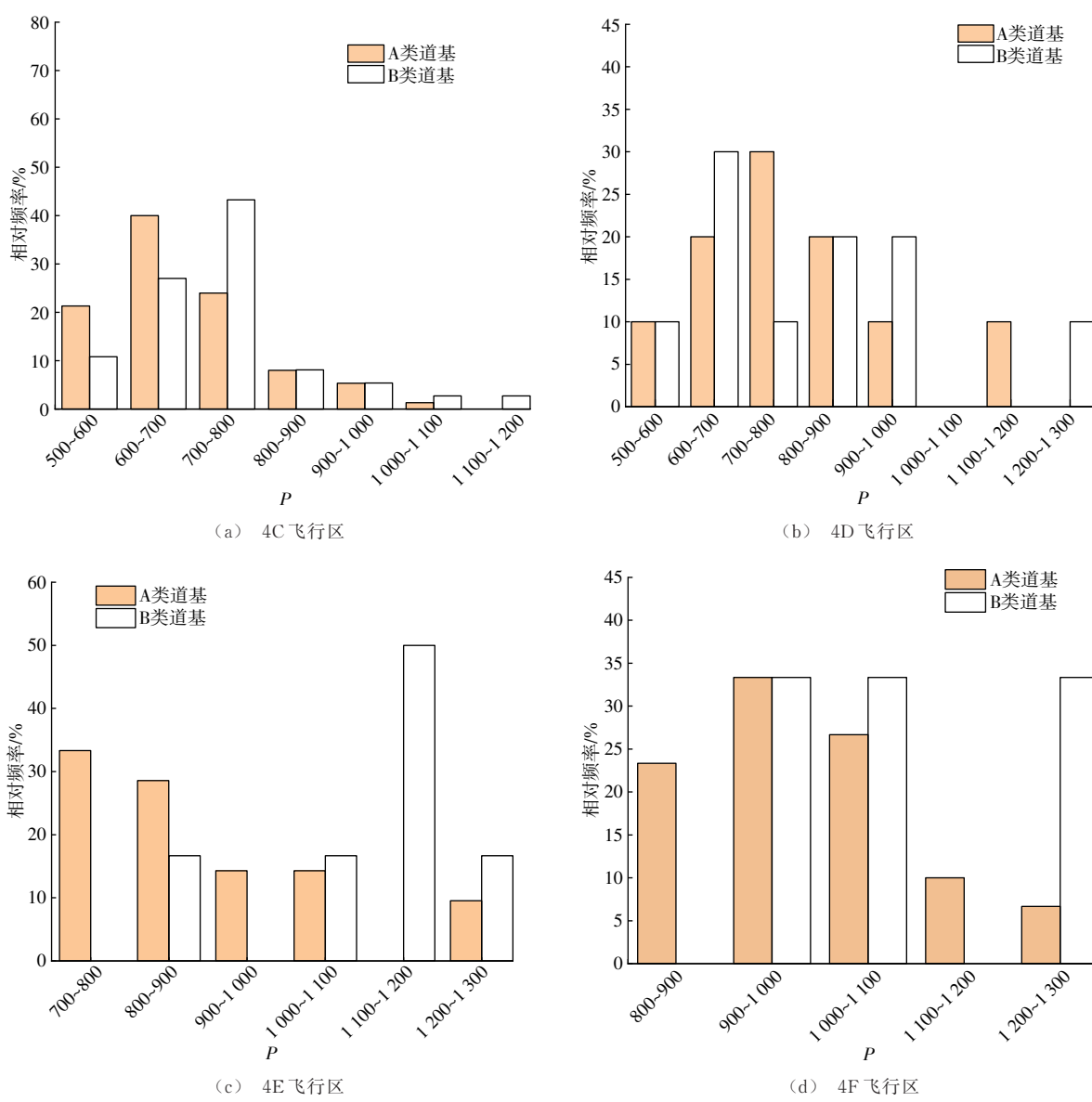


图 9 不同飞行区等级 PCR 值分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of PCR values at different airfield area class

表 7 不同飞行区等级 PCR 特征值

Table 7 PCR eigenvalues for different airfield area class

飞行区等级-道基类别	PCR 值			
	最小值	最大值	平均值	中位数
4C-A	520	1 070	685	670
4C-B	550	1 130	726	710
4D-A	550	1 130	787	760
4D-B	560	1 210	807	780
4E-A	700	1 220	902	880
4E-B	860	1 210	1 098	1 125
4F-A	840	1 230	995	980
4F-B	960	1 230	1 080	1 045

度与面层抗弯拉强度均为主导控制因素,基层参数次之,道基参数整体影响相对有限;同时在低等级

飞行区中,面层厚度对 PCR 的影响更突出,而随着飞行区等级提高,面层抗弯拉强度对 PCR 的影响进一步增强。因此,既有跑道道面结构承载能力提升宜优先围绕面层厚度及其材料强度指标进行优化设计。

(3)交通参数对 PCR 的影响分析表明,道面 PCR 随交通量的增长呈下降趋势,且降幅逐渐趋缓;当 $C_{\max}$ 值超过 1.0 时,需通过限载、优化机型组合等措施降低运行风险;决定道面 PCR 的关键机型始终为运行机型组合中 ACR 最大的机型,且道面 PCR 仅与该关键机型 ACR 与机型组合作用下的 $C_{\max}$ 有关,与机型比例无关。因此,当跑道运行引入新机型、重载机型占比提高、交通量持续增长或评价期调

表 8 不同评价期时代表性跑道的道面承载能力评价结果

Table 8 Evaluation results of pavement bearing capacity of representative runways at different evaluation periods

跑道名称	评价方法	不同评价期(年)的评价结果						
		10	15	20	25	30	35	40
4C-跑道 1	ACR-PCR	否	否	否	限载(A321-100)		限制(A321-100)	
	ACN-PCN	否	否	否	否	否	否	限载(A321-100)
4D-跑道 2	ACR-PCR	否	否	否	否	否	否	限载(A321-100)
	ACN-PCN	否	否	否	否	否	否	否
4E-跑道 3	ACR-PCR	否	否	否	否	否	限载(A350-1000)	
	ACN-PCN	否	否	否	否	否	否	否
4F-跑道 4	ACR-PCR	否	限载(B777-200LR)	限载(B777-200LR、A350-900)	限载(B777-200LR、A350-900、B787-9)	限制(B777-200LR) 限载(A350-900、B787-9)	限制(B777-200LR) 限载(A340-600、A350-900、B787-9)	
	ACN-PCN	否	否	否	否	否	限载(B777-200LR)	

整时,应优先对 ACR 最大机型开展 PCR 复核,并将 $C_{\max}$ 值接近或达到 1.0 作为运行策略调整、限载论证和养护干预的预警阈值依据。

(4)道面 PCR 分布特征分析表明,中国机场飞行区等级从 4C~4F,水泥混凝土道面 PCR 的最大值相近但最小值、中位数和平均值呈现增大的趋势;B 类道基强度道面 PCR 整体高于 A 类道基强度道面,但二者差异较小。

(5)对比分析结果表明,与 ACN-PCN 评价方法相比,对于水泥混凝土道面,ACR-PCR 评价方法能更敏感地反映道面结构疲劳累积效应,在较短评价期即可识别潜在限载情形,即 ACR-PCR 评价方法更保守;但二者在限载机型判别上一致。

(6)未来建议进一步结合道面 PCR 技术计算的基本流程,扩展多机场、多飞行区等级的案例数据,围绕“重载机型及其占比变化、架次增长率与机型替换”等典型运营情景开展机型组合对 PCR 影响的验证研究,定量揭示 PCR 及 $C_{\max}$ 的响应规律与变化幅度,以得到更为普适的结论,为改进水泥混凝土道面 PCR 技术计算方法提供理论支撑。

参 考 文 献:

References:

- [1] 杨 恒,凌建明,钱 鑫,等. 冲击载荷与盐雾干湿循环下的刚性道面表层性能劣化机理[J/OL]. 交通运输工程学报, 2026-02-03. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.181>.
YANG Heng, Ling Jian-ming, QIAN Xin, et al. Surface deterioration mechanism of rigid pavement at airports under impact loading and salt spray dry-wet cycles[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026-02-03. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.181>.

- [2] FABRE C, VAURS G. Development of rational ACN/PCN system[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [3] Hartman A M. Investigation into the variation in airfield pavement strength rating calculation[C]//SATC. Proceedings of the 40th Annual Southern African Transport Conference. Pretoria: SATC, 2022: 221-222.
- [4] LOIZOS A, ARMENI A, PLATI C. Airfield pavement overloading and current practice [C]//OZER H, RUSHING J F, LENG Z. Airfield and Highway Pavements 2021. Reston: ASCE, 2021: 88-97.
- [5] WHITE G. Limitations and potential improvement of the aircraft pavement strength rating system to protect airport asphalt surfaces[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(12): 1111-1121.
- [6] LOIZOS A, ARMENI A, CLATT B. Why can't the PCN index be uniquely defined [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [7] 凌建明,王增逸,刘诗福,等. 飞机滑跑激振和着陆冲击的动载预估模型[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(8): 1-19.
LING Jian-ming, WANG Zeng-yi, LIU Shi-fu, et al. Dynamic load predictive model for aircraft taxing excitation and landing impact [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 1-19.
- [8] ARMENI A, LOIZOS A. Reporting the bearing capacity of airfield pavements using PCR index[J]. NDT, 2024, 2(1): 16-31.
- [9] ARMENI A, LOIZOS A. Challenges in estimating airfield pavement strength[J]. Transportation Engineering, 2025, 20: 100343.
- [10] 李龙海,伍思铭. 机场刚性道面等级评价与参数敏感性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2026, 45(2): 14-23.
LI Long-hai, WU Si-ming. Evaluation of airport rigid pavement grades and parameter sensitivity [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2026, 45(2): 14-23.
- [11] ALVES T, FONTUL S. Airport pavement structural evaluation: The new ACR-PCR method applied to existing

- runway pavements [C]//Springer. MAIREPAV 2024 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements. Cham: Springer, 2024: 233-243.
- [12] 袁捷,李杰,马鲁宽,等. 机场道面承载能力 ACR-PCR 评价方法及其改进方向[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2026, 54(2): 255-263.
- YUAN Jie, LI Jie, MA Lu-kuan, et al. ACR-PCR evaluation method and its improvement for bearing capacity of airport pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2026, 54(2): 255-263.
- [13] ARMENI A, LOIZOS A. Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements[J]. Transportation Engineering, 2022, 8: 100117.
- [14] SENSENEY C T, SAGISIER R. A correlation between ACN and ACR for the C-17 aircraft on flexible pavement in the ACN-PCN and ACR-PCR airport pavement rating systems [C]//GARG N, BHASIN A, VANDENBOSSCHE J M. Airfield and Highway Pavements 2023. Reston: ASCE, 2023: 1-8.
- [15] SUN J Y, OH E, CHAI G, et al. Comparison between ACN-PCN and ACR-PCR for rigid airport pavement with case study [J]. Road Materials and Pavement Design, 2025, 26(3): 720-732.
- [16] Federal Aviation Administration (FAA). Airport Pavement Design and Evaluation [R]. Washington DC: FAA, 2021: 1-195.
- [17] YUAN Jie, LI Jie, MA Lu-kuan, et al. ACR-PCR Method for Bearing Capacity Evaluation of Rigid Airfield Pavements: Practice in China [C]//TRB. Proceedings of the 103th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2025: 1-8.
- [18] 谈至明,王力. 基于弯拉应力等效的地基当量回弹模量 [J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 46-50.
- TAN Zhi-ming, WANG Li. Equivalent resilient modulus of subgrade based on principle of flexural-tensile stress equivalence [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 46-50.
- [19] 张硕,康光宗,贺泳超,等. 基于道路 SWMM 模型的参数敏感性分析及参数率定 [J]. 公路, 2020, 65(5): 21-26.
- ZHANG Shuo, KANG Guang-zong, HE Yong-chao, et al. Sensitivity analysis of parameters based on SWMM road model [J]. Highway, 2020, 65(5): 21-26.