

水泥混凝土道面预防性养护判定标准体系

陈奇奇, 龙小勇, 蔡良才, 王观虎, 李柯, 陈正磊

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 为了对道面养护管理者提供决策依据,建立了水泥混凝土道面预防性养护判定标准体系。基于路面抗滑性能评价指标与路面状况指数预防性养护标准研究成果,依据水泥混凝土道面衰变过程中平整度-动态荷载相互作用的基本理论,采用导数拐点法与混淆矩阵等模型研究了摩擦系数、道面国际平整度指数、道面破损指数与主导病害单项指标的判定标准。从判断性维度、综合性维度及控制性维度的角度对各个指标的作用与判定原理进行了分析,形成了军用机场水泥混凝土道面预防性养护判定标准体系。水泥混凝土道面预防性养护各项指标判定标准为:摩擦系数(跑道摩阻测试车 95 km/h) ≥ 0.41 ;摩擦系数(跑道摩阻测试车 65 km/h) ≥ 0.50 ;摩擦系数(摆式摩擦仪) ≥ 0.51 ;国际平整度指数 ≤ 3.2 m/km;道面破损指数(3%~10%);边角剥落率 $\leq 35\%$;表面剥落率 $\leq 30\%$;表面裂缝率 $\leq 8\%$;板间错台率 $\leq 0.5\%$ 。该标准可为军用机场水泥混凝土道面预防性养护最佳时机的确定提供依据。

关键词 水泥混凝土道面;预防性养护;平整度-动态荷载;导数拐点;混淆矩阵

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.02.015

中图分类号 V351.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)02-0099-08

A Judgment Standard System for Preventive Maintenance of Cement Concrete Pavement

CHEN Qiqi, LONG Xiaoyong, CAI Liangcai, WANG Guanhu, LI Ke, CHEN Zhenglei
(Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract In order to provide a decision-making basis for pavement maintenance managers, a judgment standard system for preventive maintenance of cement concrete pavement is established. Based on the research results of pavement anti-sliding performance evaluation index and pavement condition index preventive maintenance standard, and according to the basic assumption of the interaction between evenness and dynamic load in the process of cement concrete pavement decay, the judgment standards of friction coefficient, international pavement evenness index, pavement damage index and single index of dominant disease are studied by using the derivative inflection point method and confusion matrix model. This paper analyzes the function and judging principle of each index in the perspective of judging dimension, comprehensive dimension and controlling dimension, forming the judging standard system of preventive maintenance of cement concrete pavement in military airport. The results show that the criteria for preventive maintenance of cement concrete pavement are as follows: Friction coefficient (runway friction test vehicle 95 km/h) \geq

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51578540)

作者简介: 陈奇奇(1996—),男,河南孟津人,硕士,研究方向:机场道面预防性养护。E-mail:kgdqqq@163.com

通信作者: 蔡良才(1960—),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,研究方向:机场路面设计。E-mail:liangcaio7@126.com

引用格式: 陈奇奇,龙小勇,蔡良才,等.水泥混凝土道面预防性养护判定标准体系[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(2):99-106. CHEN Qiqi, LONG Xiaoyong, CAI Liangcai, et al. Judgment Standard System for Preventive Maintenance of Cement Concrete Pavement [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(2): 99-106.

0.41; Friction coefficient (runway friction test vehicle/65 km · h⁻¹) ≥ 0.50; Friction coefficient (pendulum friction instrument) ≥ 0.51; International flatness index ≤ 3.2 m/km; Pavement damage index (3%, 10%); Corner peeling rate ≤ 35%; Surface peeling rate ≤ 30%; Surface crack rate ≤ 8%; And inter-plate slip rate ≤ 0.5%. The cement concrete pavement of a military airport can be provided with this scientific basis in determining the best time of preventive maintenance.

Key words cement concrete pavement; preventive maintenance; flatness-dynamic load; derivative inflection point; confusion matrix

水泥混凝土道面在使用过程中不可避免的会产生各种损坏,其使用性能受到机轮荷载和环境影响等因素的共同作用会逐渐衰减,导致飞机加速损坏,飞行安全风险增大。预防性养护是一种先进的养护理念,在公路沥青路面领域已经取得良好的应用效果。然而,现阶段我军机场道面养护管理技术仍然比较落后,预养护尚未在我军机场道面管理工作得到有效的推广应用,其中一个很重要的原因就是缺乏科学合理并可以量化指导预养护实施的判定标准。因此,有必要深入揭示水泥混凝土道面预养护的内涵,针对军用机场水泥混凝土道面的养护需求,建立科学的、量化的预养护判定标准体系。

目前,国内外学者对预养护标准进行了大量研究^[1-3],李丽苹针对水泥混凝土路面特点,从抗滑能力、平整度与路面破损状况3个方面进行分析,确定了水泥混凝土路面预防性养护宏观标准^[4]。李源渊等结合公路沥青路面早期病害的类型和特征,在现有评价指标体系基础上,提出沥青路面预养护评价指标体系^[5]。王丽君等针对目前规范缺乏具体的预养护评定标准,从抗滑性能、行驶质量和强度等方面进行了深入研究,界定了沥青路面进行预养护的路面使用性能指标范围^[6]。张逆针对高速公路沥青路面预养护评定标准,探讨并明确路面使用性能关键指标如路面状况指数、国际平整度指数、路面车辙等的临界值范围^[7]。QIAO等通过水泥路面性能模型,开发了一种优化方法计算路面国际平整度指数与抗滑性能指标的预防性养护标准^[8]。FAN等提出了一种综合评价模型,该模型结合了国内技术规范中路面和材料性能评价指标,用于沥青路面的预防性维护^[9]。

分析国内外预养护标准研究可知,目前,预养护标准研究主要针对公路沥青路面,针对机场道面的研究较少,关于水泥混凝土道面的研究更少,而关于军用机场水泥混凝土道面的研究更是少之又少。大部分研究者采用定性或半定量的方法确定预养护标准,采取定量方法精准计算预养护标准的研究很少,且成果零散而不成体系。因此,本文从定性分析与

定量计算相结合的角度,综合采用规范类比法、导数拐点法、破损指数法及混淆矩阵法等多种方法对预养护需求判定标准进行系统研究,建立一套可以量化指导军用机场水泥混凝土道面预养护的判定标准体系。

1 预养护评价指标体系及数据来源

1.1 预养护评价指标体系

本课题组利用目标层次分解-多元统计综合方法,筛选出摩擦系数、道面破损指数(L)、国际平整度指数(IRI)及主导病害单项指标作为预养护时机的控制指标,构建了军用机场水泥混凝土道面预养护评价指标体系(如图1所示)。本文在此基础上作进一步研究,以期得到水泥混凝土道面预养护判定标准。

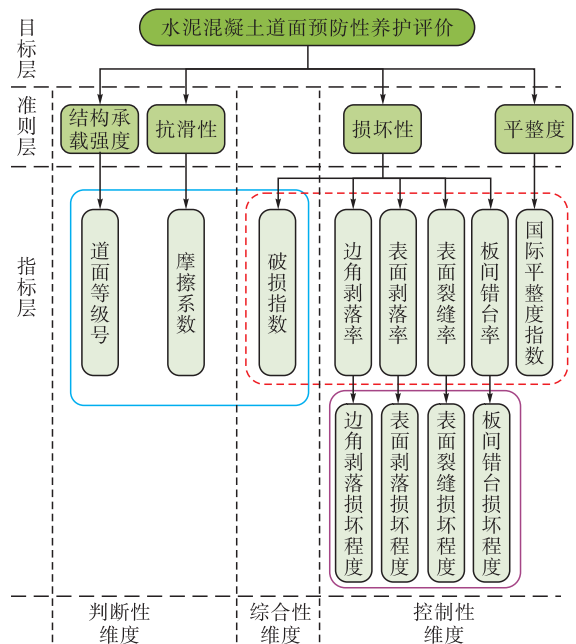


图1 水泥混凝土道面预养护评价指标体系

1.2 数据来源

本文通过调查东北冬季冻区若干个机场道面使用性能状况,获取该地区水泥混凝土道面预养护评价指标数据。在预防性养护指标判定标准求解的过程中,需得到同一个机场某一区域的连续累积指标

序列。本文通过分析各项指标汇总数据,发现个别数据存在缺项或者异常的情况,若不对其加以处理,则会降低数据的统计规律性。为解决该问题,国内外学者进行了相关的研究,孙立军等提出了时间-空间转换法(用空间代替时间),把同一类型的机场道面在不同寿命时间点的道面性能状况(空间分布)当作同一道面在不同寿命时间点的表现(时间变化),以延长数据的时间序列^[10]。

本文应用此方法,对于某一机场缺乏连续的指标数据等问题,找到其同类相似机场,即需满足机场等级类型、机场规模、气候条件等较为相似的机场,通过比较该机场与其相似机场的指标数据,将其相似机场的指标数据补充到该机场所缺乏的指标数据(需在同一寿命时间点),得到某军用机场连续的预养护评价指标数据,以进行后续预防性养护判定标准的研究。

2 预养护判定标准确定

2.1 摩擦系数判定标准

2.1.1 路面抗滑性能评价指标分析

本节通过参考沥青路面抗滑性能预防性养护标准制定的思路,为军用机场水泥混凝土抗滑性能指标预防性养护标准确定提供参考依据。《公路沥青路面养护技术规范》^[11]规定采用横向力系数(SFC)作为路面抗滑性能评价指标;《公路技术状况评定标准》^[12]规定采用路面抗滑性能指数(SRI)作为路面抗滑性能评价指标,二者对应的评价标准如表 1 所示。

表 1 SFC 与 SRI 的评价标准

标准	优	良	中	次	差
SFC	>90	80~≤90	70~≤80	60~≤70	≤60
SRI	>48	40~≤48	33.5~≤40	27.5~≤33.5	≤27.5

总结公路领域路面抗滑性能指标标准范围研究成果,如表 2 所示。

表 2 路面抗滑性能评价指标标准范围

研究者	SRI	SFC	对应评价等级
李源渊 ^[5]	40~48	—	良
王丽君 ^[6]	40~50	—	优、良
李娜 ^[13]	30~50	—	优、良、中
赵婷 ^[14]	40~54	—	优、良
张亮 ^[15]	(35.6~48)	73~90	良、中
何光兵 ^[16]	(44~48)	85~90	良
张睿卓 ^[17]	(44~48)	85~90	良

注:括号内 SRI 数据根据表 1 由 SFC 转换所得。

根据表 1 中 SFC 与 SRI 的对应关系,将 SFC 标准范围转换为 SRI 标准范围,并对表 2 中所有的 SRI 标准范围的上下限取平均值,得到 SRI 的平均标准范围为(39.08,49.42),上限值 49.42 大致对应“优”和“良”的界限值 48;下限值 39.08 大致对应“良”和“中”的界限值 40。大部分研究者认为当抗滑性能评价指标等级从“优”变成“良”时,适合进行预养护;当抗滑性能评价指标等级从“良”变成“中”时,则不适合进行预养护。

2.1.2 摩擦系数判定标准确定

《军用评定标准》规定采用摩擦系数评价水泥混凝土道面抗滑性能,采用“跑道摩阻测试车+摆式摩擦仪”的方法对机场道面摩擦系数进行测试^[3]。跑道和滑行道等部位直线段区域的抗滑性能采用跑道摩阻测试车测试,当不具备测试条件及其他道面区域采用摆式摩擦仪进行测试。摩擦系数评价标准如表 3 所示。

表 3 道面摩擦系数评价标准

测试仪器				
摆式摩擦仪		跑道摩阻测试车		
等级	标准	等级	测试速度/(km/h)	
良	≥0.61		65	95
中	0.51~0.60	好	≥0.60	≥0.54
可	0.45~0.50	中	0.50~0.60	0.41~0.54
差	≤0.44	差	≤0.50	≤0.41

分析路面抗滑性能评价指标预养护标准范围可知,大部分研究者将评价等级“良”和“中”的界限值取作预养护标准的下限值。由表 3 可知,摆式摩擦仪测定的摩擦系数的最高的评价等级为“良”,“中”的评定意见为“道面正常制动”,“可”的评定意见为“制动有困难”,可以看出,军用机场跑道道面摩擦系数的评定标准趋于严格。因此,本文取“中”和“可”的界限值 0.51 作为摩擦系数(摆式摩擦仪)的判定标准。同理,取“中”和“差”的界限值作为跑道摩阻测试车测定的摩擦系数的判定标准,具体判定标准如表 4 所示。

表 4 道面摩擦系数判定标准

测试仪器	测试速度/(km/h)	判定标准
摆式摩擦仪	—	≥0.51
跑道摩阻测试车	65	≥0.50
	95	≥0.41

2.2 道面国际平整度指数判定标准

2.2.1 基于导数拐点的 IRI 判定标准求解

不平整是水泥混凝土道面的固有特性,当飞机行驶在不平整的道面上时,将对道面产生附加的动

荷载。道面越不平整动荷载越大,则道面损坏速率越快,形成恶性循环。道面处于该临界值时,道面损坏发展的加速度最大。若求出临界值并在其附近采取对应的预养护措施,就可以最有效地减缓道面使用性能的衰减。孙立军^[10]等人综合国内外路面使用性能研究的成果,结合对国内部分地区路面使用性能变化的分析,提出了经典的路面衰变方程:

$$G=G_0\{1-\exp[-(\alpha/y)^\beta]\} \quad (1)$$

式中: G 为使用性能指数; G_0 为初始使用性能指数; y 为路龄; α 和 β 为模型参数。参数 α 反映路面使用寿命的长短;参数 β 决定路面的衰变模式。

周文献^[18]采用该模型形式,对路面状况指数(式中简记 I_{PCI})与路面平整度指数(式中简记 I_{IRI})之间的关系进行研究,二者的关系为:

$$I_{\text{PCI}}=100\{1-\exp[-(7.54/I_{\text{IRI}})^{2.82}]\} \quad (2)$$

本文参照孙立军和周文献的做法,并结合水泥混凝土道面自身特点,建立道面 $I_{\text{IRI}}-L$ 的关系式为

$$L=100\{1-\exp[-(a/I_{\text{IRI}})^b]\} \quad (3)$$

式中: a 和 b 为模型参数。

基于目前我军仍采用三米直尺进行平整度测试的现状,而本文拟采用 I_{IRI} 来描述道面平整状况,因此为便于建立 L 与 S 之间的拟合关系,对我军若干个同类型的水泥混凝土道面分别采用三米直尺和 I_{IRI} 测试车(自动式激光平整度测量仪)进行平整度测试,得到若干组 I_{IRI} 和 S 数据,如图2所示。

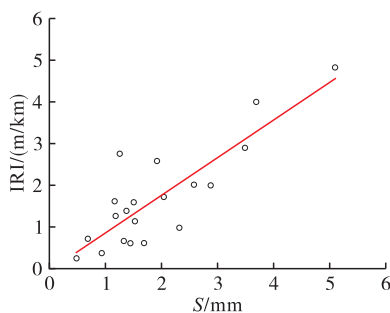


图2 道面 I_{IRI} 与 S 之间的转换关系

通过对 S 与 I_{IRI} 的数据进行拟合,得到二者转换关系式为:

$$I_{\text{IRI}}=0.9043S-0.0606 \quad (4)$$

$R^2=0.7164$,说明式(4)具有较高的精度。

要建立符合我军机场道面实际情况的 $L-I_{\text{IRI}}$ 关系式,需要获取道面长期性能的数据。然而我军机场道面历史数据较少,且数据的时间序列不长。因此引入时间-空间转换法,获取50组 L 与 I_{IRI} 的数据并进行拟合,得到 L 与 I_{IRI} 的关系,如图3所示。

通过对 L 与 I_{IRI} 数据进行拟合,得到拟合关系式为:

$$L=100\{1-\exp[-(8.42/I_{\text{IRI}})^{-2.46}]\} \quad (5)$$

$R^2=0.8874$,说明式(5)具有较高的精度。

为了求得 L 变化速率最大的点所对应的 I_{IRI} ,对式(5)二次求导,可知,当 I_{IRI} 达到3.2时, L 衰减速度达到最大值,此时进行预养护效果最佳。

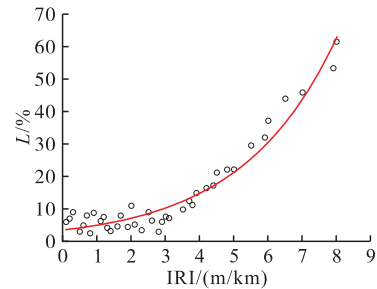


图3 I_{IRI} 与 L 之间的关系

2.2.2 道面 I_{IRI} 判定标准确定

平整度作为反映道面平整性能的一项宏观性指标,通常情况下,其衰减速率比较缓慢。若选取上限值判定道面预防性养护需求,则判定结果可能有悖于实际情况。因此,本文建议对于 I_{IRI} 的判定标准只设定下限标准,用于单独从 I_{IRI} 角度对道面预防性养护需求进行初步判定,最终是否进行预防性养护,还需结合其他指标综合判定。

由2.2.1节可知,道面衰减最快时的 I_{IRI} 为3.2 m/km,将其代入式(4),反算出 $S=3.605$ mm,大致对应GJB 2264—1995标准中“良”和“中”的界限值3.6。因此,本文取3.2 m/km作为道面 I_{IRI} 判定标准的下限值,最终得到 I_{IRI} 的预防性养护判定标准为 $I_{\text{IRI}}\leq 3.2$ m/km。

2.3 道面破损指数判定标准

2.3.1 路面 PCI 的标准范围分析

目前尚无关于道面 PCI 预防性养护需求判定标准的研究,而国内外沥青路面 PCI 预防性养护标准研究较为成熟,因此本文通过对路面 PCI 预养护标准相关研究的梳理总结,提出适用道面 PCI 的判定标准。为结合部队实际,将道面 PCI 转化为道面破损指数,建立起道面破损指数判定标准。总结国内外部分路面 PCI 的标准研究成果,如表5所示。路面破损状况评价标准如表6所示。

表5 路面 PCI 标准范围

研究者	PCI	对应的评价等级
张逆 ^[7]	80~95	优、良
李源渊 ^[5]	90~95	优
王丽君 ^[6]	70~85	良
李娜 ^[13]	60~85	良、中
张亮 ^[15]	70~90	优、良
何光兵 ^[16]	82~88	优、良

表 6 路面破损状况评价标准

评价等级	优	良	中	次	差
PCI	>85	70~≤85	55~≤70	40~≤55	≤40

资料来源:文献[11]。

分析上述路面 PCI 标准研究成果可知,当路面损坏等级为“优”和“良”时,是进行预养护的合适时机。由于道面 PCI 与路面 PCI 评定标准一致,本文参照道面 PCI 标准,初步将下限值定为“良”和“中”分界值,即取 70 作为 PCI 的判定下限值;进一步考虑到大部分公路领域 PCI 标准的下限值≥70,且道面较路面要求更严格,故本文从严取 75 作为道面 PCI 判定标准的下限值,取 95 作为上限值,最终确定道面 PCI 判定标准范围为(75,95)。本节借鉴沥青路面 PCI 预防性养护标准制定思路及其经验方法,通过道面 IRI-L 关系式与道面 IRI-PCI 关系式进行迭代,确定道面 PCI-L 关系式,进而得到道面破损指数 L 预防性养护标准的上下限。

2.3.2 道面 PCI 与 L 的转换关系

目前没有关于道面 PCI 与 L 转化关系的研究成果,为建立道面 PCI 与 L 之间的相关关系,本文引入 IRI 作为中间变量,并通过道面 IRI-L 关系式与道面 IRI-PCI 关系式确定出道面 PCI-L 关系式。由式(5)可知,建立了道面 IRI-L 的关系式。凌建明^[19]等人通过对 2000—2003 年上海虹桥机场主跑道各调查单元的 PCI 值和 IRI 值进行统计回归分析,得到了 PCI 与 IRI 的相关关系式为:

$$I_{IRI} = 23.007 - 4.684 \ln I_{PCI} \quad (6)$$

然而,该公式主要适用于沥青道面的情况,目前并没有文献直接对水泥混凝土道面的 PCI 与 IRI 之间的关系进行大量回归统计。因此,本文以凌建明 PCI-IRI 关系模型为蓝本,取 4 个军用机场的 50 组 PCI-IRI 数据,对该模型加以修正拟合,得到水泥混凝土道面 PCI-IRI 关系式为:

$$I_{IRI} = 18.82 - 3.64 \ln I_{PCI} \quad (7)$$

$R^2 = 0.9763$,说明拟合效果较好。

结合式(5)与式(7),经计算得到 PCI-L 的关系式为:

$$L = 121.9 - 26.11 \ln I_{PCI} \quad (8)$$

2.3.3 道面破损指数的判定标准确定

经上述分析得到道面 PCI 的判定标准范围为(75,95),通过道面 PCI-L 的相关关系式转换,可以初步得到 L 的判定标准为(3%,10.5%)。由军用机场水泥混凝土道面外观质量分级标准可知(见表 7)，“优”和“良”的界限值为 2.0%。

由 L-PCI 转换关系可知,军用机场道面外观质量分级标准相对严格,若采用 $L = 2.0\%$ 作为判定标

准的上限值,则会导致预养护时机过于提前,不利于预养护最佳时机的确定,结合实际情况,本文取 3.0% 作为 L 判定标准的上限值。将 2.2 节所得到的 IRI 下限标准值 3.2 代入式(5)得到对应的 $L = 10.16\%$,与初步得到的 10.5% 相吻合,本文取整将 10% 作为 L 判定标准的下限值。最终确定 L 的判定标准为(3%,10%)。

表 7 军用机场道面破损指数评定标准

评定等级	优	良	中	次	差
破损指数/%	<2	2~5	5.1~15	15.1~20	>20

2.4 主导病害单项指标判定标准

2.4.1 混淆矩阵模型介绍

混淆矩阵是机器学习中总结分类模型判定结果的情形分析表,可描绘样本数据的真实属性与识别结果类型之间的关系^[20],结合本文实际问题,判定是否需要预防性养护与实际是否需要预防性养护属于混淆矩阵二分类模型,且属于最佳阈值的判定,因此本文选择混淆矩阵模型。其基本模型如表 8 所示。

表 8 混淆矩阵表

混淆矩阵	实际值		
	1	0	合计
判定值 1	T_P	F_P	$T_P + F_P$
判定值 0	F_N	T_N	$F_N + T_N$
合计	$T_P + F_N$	$F_P + T_N$	$T_P + F_P + F_N + T_N$

对于混淆矩阵模型,一般采用 ROC 曲线与 KS 曲线,分别从分类能力与模型判定准确性两方面对其进行评价。

ROC 曲线中包括 TPR(式中简记为 R_{TPR})和 FPR(式中简记为 R_{FPR})2 个指标。 $R_{TPR} = T_P / (T_P + F_N)$,表示将正例判对的概率; $R_{FPR} = F_P / (F_P + T_N)$,表示将负例判错的概率。在 ROC 曲线中,每一个点的横坐标为 FPR,纵坐标为 TPR。最佳的分类阈值为左上角(0,1)点,这个点表示将负例判错的概率为 0,将正例判对的概率为 1,即模型判定值与实际值完全一致。一个完全随机的判定点的组合会得到一条右对角线,这条线上的任一点对应的准确率都是 50%。KS 曲线以 TPR 和 FPR 作为判定依据,TPR 和 FPR 都作为纵坐标,而样本阈值作为横坐标。按照顺序选取阈值,并计算 TPR 和 FPR,得到 KS 曲线,TPR 和 FPR 曲线差值中绝对值最大值为 KS 值,所对应的阈值即为最佳阈值,通常大于 0.2 即认为模型判定准确性较好,ROC 与 KS 曲线示意图如图 4 所示。

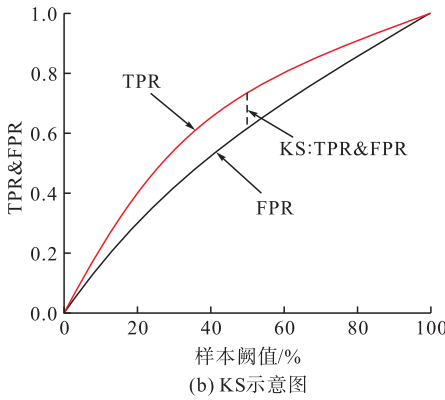
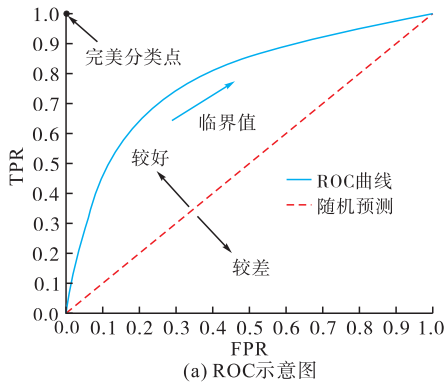


图4 ROC与KS曲线示意图

2.4.2 混淆矩阵模型的建立与求解

结合本文研究问题,定义“1”表示需要进行预养护,“0”则不需要进行预养护。根据采集到的主导病害单项指标数据,结合样本阈值,该样本阈值以下数据需要预养护,在该样本阈值以上数据则不需要预养护。选取不同的边角剥落率阈值,可得到相应ROC与KS曲线,并经综合分析确定 $P_{边}$ 的预养护最佳判定阈值。表面剥落率($P_{表}$)、表面裂缝率($P_{裂}$)与板间错台率($P_{错}$)判定阈值的确定方法同上。

2.4.2.1 边角剥落率判定阈值求解

作 $P_{边}$ 的ROC曲线如图5所示。

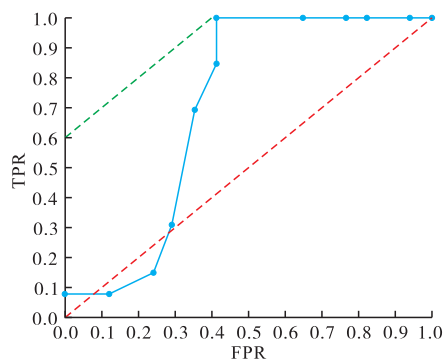


图5 $P_{边}$ ROC曲线

由图5可知,(0,0)到(1,1)对角线上的任一点对应的ACC都是50%。沿着无识别率线进行平移,直到得到FPR最小且TPR最大的点,可得到最

接近左上角的点为(0.41,1),1-特异度为0.41,即判定值与实际值一致的样本占实际不需要预养护的比重为0.41。TPR为1,反算出该点所对应最佳阈值阈值为35%。

作 $P_{边}$ 的KS曲线如图6所示。当 $P_{边}$ 处于(25%,45%)区间,1-特异度与TPR差值的绝对值大于0.2,模型判定较为准确。当 $P_{边}=35%$ 时,二者差值达到最大值0.59,此时模型判定最为准确, $P_{边}$ 的判定效果最佳,其最佳阈值为35%。

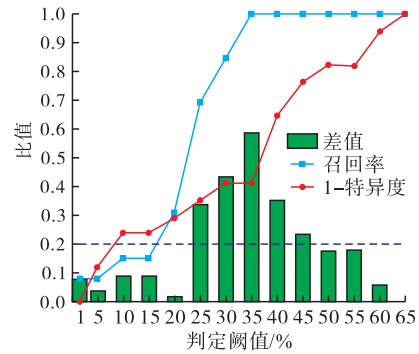
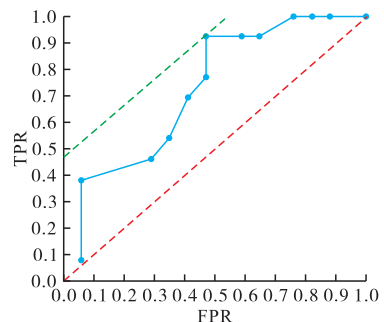


图6 $P_{边}$ KS曲线

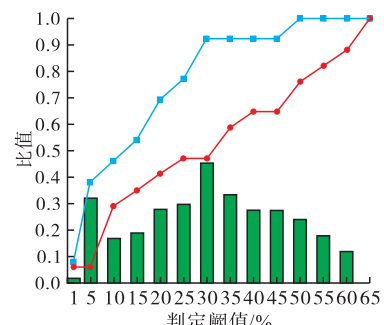
综合以上对ROC与KS曲线的求解分析,本文认为将35%作为 $P_{边}$ 的判定阈值最合适。

2.4.2.2 表面剥落率、表面裂缝率及板间错台率阈值求解

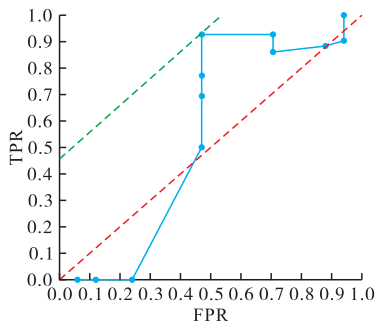
$P_{表}$ 、 $P_{裂}$ 及 $P_{错}$ 阈值求解方法同 $P_{边}$,绘制该3项指标的ROC曲线与KS曲线如图7所示,综合得到 $P_{表}$ 、 $P_{裂}$ 及 $P_{错}$ 的判定阈值分别为30%、8%及0.5%。



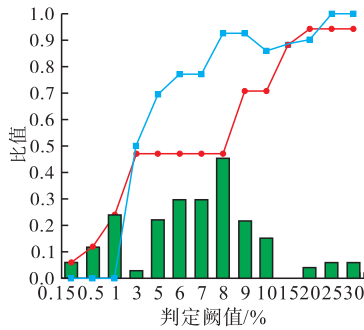
(a) $P_{表}$ ROC曲线



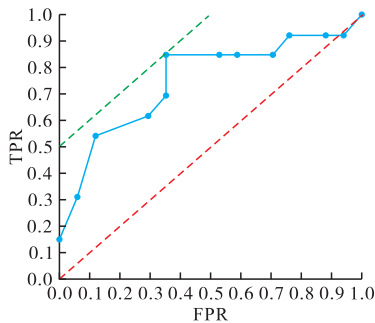
(b) $P_{表}$ KS曲线



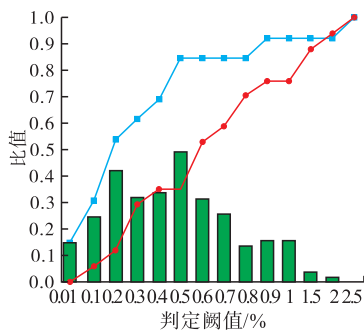
(c) $P_{裂}$ ROC曲线



(d) $P_{裂}$ KS曲线



(e) $P_{错}$ ROC曲线



(f) $P_{错}$ KS曲线

图 7 $P_{边}$ 、 $P_{表}$ 、 $P_{裂}$ 、 $P_{错}$ 各评价指标变化曲线

经上述分析,确定了 $P_{边}$ 、 $P_{表}$ 、 $P_{裂}$ 及 $P_{错}$ 的判定阈值下限值。当该 4 项指标大于等于其相应判定阈值时,道面破坏速度加剧,不适合进行预养护。当该 4 项指标处于良好水平时,由于其相应指标只代表了道面病害的一种类型,不能整体反应道面损坏状况,因此设置上限值没有实际意义。经过综合分析,主导病害单项指标的判定标准为 $P_{边}$ 、 $P_{表}$ 、 $P_{裂}$ 及 $P_{错}$ 分别小于等于其相应判定阈值下限值(35%、30%、8%及 0.5%)。

3 预养护需求判定标准体系

摩擦系数作为判断性维度指标,是道面预养护的先决判断条件。当摩擦系数(摆式摩擦仪、跑道摩阻测试车 65 km/h、跑道摩阻测试车 95 km/h)分别大于等于 0.51、0.50 与 0.41 时,道面制动性能正常,适合进行预养护,当摩擦系数分别小于其相应判定标准时,道面制动性能较差,不适合进行预养护。道面破损指数作为综合性维度指标,可以从整体上反映道面损坏状况。当 $L < 3\%$,道面损坏状况轻微,不需要进行预养护,当 $L > 10\%$,道面整体损坏状况较严重,不适合进行预养护。国际平整度指数与主导病害单项指标作为控制性维度指标,能从某一方面具体地反映道面损坏状况。当道面 $IRI \leq 3.2$ m/km,道面平整度良好,适合进行预养护,当道面 $IRI > 3.2$ m/km,道面平整度较差,不适合进行预养护。当 $P_{边} \leq 35\%$ 、 $P_{表} \leq 30\%$ 、 $P_{裂} \leq 8\%$ 及 $P_{错} \leq 0.5\%$,说明相应的主导病害损坏情况较轻,适合进行预养护;当各项主导病害单项指标分别大于相应判定标准时,道面加剧损坏,不适合进行预养护。

以上从判断性、综合性及控制性 3 个维度对预养护评价指标进行了分析,形成了军用机场水泥混凝土道面预养护需求判定标准体系,如表 9 所示。

表 9 水泥混凝土道面预养护需求判定标准体系

预养护评价指标	判定标准
国际平整度指数	≤ 3.2 m/km
摩擦系数(摆式摩擦仪)	≥ 0.51
摩擦系数(跑道摩阻测试车 65 km/h)	≥ 0.50
摩擦系数(跑道摩阻测试车 95 km/h)	≥ 0.41
道面破损指数	(3%, 10%)
边角剥落率	$\leq 35\%$
表面剥落率	$\leq 30\%$
表面裂缝率	$\leq 8\%$
板间错台率	$\leq 0.5\%$

4 结论

1) 分析了军用机场水泥混凝土道面预养护评价指标体系的组成及含义;针对军用机场道面缺乏性能检测历时数据的问题,引入了“时间-空间”转换法;参考了路面性能指标预养护标准研究的经验。在此基础上,开展了军用机场水泥混凝土道面预养护需求判定标准体系研究。

2)采用归纳类比法,确定了摩擦系数与道面破损指数的预养护需求判定标准;基于导数拐点模型,对道面 IRI-L 关系式进行求解,得到了 L 衰变最快时的道面 IRI 临界值,经过分析得到道面 IRI 的预养护需求判定标准;基于混淆矩阵模型采用 ROC 曲线与 KS 曲线确定了边角剥落率、表面剥落率、表面裂缝率及板间错台率的预养护需求判定标准。

3)通过对判断性维度指标、综合性维度指标及控制性维度指标的分析,建立了一套基于军用机场水泥混凝土道面自身特点的预养护需求判定标准体系。此外,该体系可为军用机场水泥混凝土道面预养护最佳时机的确定提供相应标准,为道面养护管理者提供决策支撑,并为下一步此类方面的研究奠定基础。

参考文献

- [1] CHEN X Q, ZHU H H. Optimal Thresholds for Pavement Preventive Maintenance Treatments Using LTPP Data[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2017, 143(6): 04017018. 1-04017018. 9.
- [2] ARY S. Predicting the Remaining Service Life of Road Using Pavement Condition Index[J]. Procedia Engineering, 2015, 125: 417-423.
- [3] 龙小勇,蔡良才,张罗利.基于破损指数法的水泥道面预养护最佳时机决策模型[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(3):33-37.
- [4] 李丽苹.基于预防性养护概念的水泥砼路面板底脱空处治技术研究[D].南京:东南大学,2015.
- [5] 李源渊,孙建勇,张艳.道路路面预养护指标体系建立及标准研究[J].公路交通技术,2016,32(3):52-57.
- [6] 王丽君,王朝辉,白军华,等.基于时段的沥青路面预养护时机与对策一体化研究[J].中国公路学报,2010,23(5):27-34.
- [7] 张逆.沥青路面预防性养护关键指标临界范围浅析[J].公路交通技术,2015(4):72-74.
- [8] QIAO Y N, ANDREW D, TONY P, et al. Immediate Effects of Some Corrective Maintenance Interventions on Flexible Pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 19(6): 502-508.
- [9] FAN X Y, GAO F C, HE T F, et al. Establishment of An Evaluation Model for Asphalt Pavement Preventive Maintenance Based on Improved EW-AHP [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 11(3): 48-53.
- [10] 孙立军,梁远路,陈长.振动的时效性对道路行驶舒适性评价的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(10):1470-1476.
- [11] 交通运输部.公路沥青路面养护技术规范:JTJ 5142—2019[S].北京:交通运输部,2019.
- [12] 交通运输部.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S].北京:交通运输部,2018.
- [13] 李娜.公路沥青混凝土路面预养护使用性能预测与决策模型的研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [14] 赵婷.高速公路沥青路面使用性能评价及预养护决策研究[D].西安:长安大学,2011.
- [15] 张亮.基于灰色马尔可夫模型的路面状况指数预测[J].科学技术与工程,2011(22):5462-5465.
- [16] 何光兵.高速公路沥青路面预养护研究[D].西安:长安大学,2012.
- [17] 张睿卓,宁华宇.高速公路沥青路面预养护评价指标体系[J].中国市政工程,2012(6):8-9.
- [18] 周文献.在最适当的时机养护水泥路面[J].中国公路,2007(12):84-85.
- [19] 凌建明,刘诗福,袁捷.采用 IRI 评价机场道面平整度的适用性[J].交通运输工程学报,2017,17(1):65-71.
- [20] RAED S. The Application of ROC Analysis in Threshold Identification, Data Imbalance and Metrics Selection for Software Fault Prediction[J]. Innovations in Systems and Software Engineering, 2017, 13(2/3): 201-217.

(编辑:姚树峰)