

# 面向自动化检测的水泥混凝土道面损坏状况评价方法

袁捷, 李一凡, 汪恒

(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)

**摘要:** 针对现有道面评价方法不能完全适用于自动化检测技术的问题, 对目前机场道面自动化检测特征进行了分析, 重新划分了水泥混凝土道面病害类型。根据我国 32 个机场的道面损坏数据统计结果, 对现行道面评价规范中各病害的扣分值进行加权合并, 确定了新病害类型的扣分值, 在此基础上形成了机场水泥混凝土道面表观破损、隐蔽病害和综合损坏状况评价指标, 并通过与道面状况指数 (PCI) 的对比分析和指标值分布特征确定了各指标的等级阈值。锡林浩特机场跑道区块道面损坏状况人工巡检和自动化检测结果评价指标对比表明, 新构建的水泥混凝土道面损坏状况评价方法所得安全等级与 PCI 的评价等级一致。

**关键词:** 水泥混凝土道面; 自动化检测; 道面损坏状况; 评价方法

中图分类号: V351. 11

文献标志码: A

## Automatic Detection and Evaluation of Damage Conditions in Airport Cement Concrete Pavement

YUAN Jie, LI Yifan, WANG Heng

(Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aiming at the fact that the existing airport pavement evaluation methods are not fully applicable to automated detection technology, this paper analyzes the characteristics of current airport pavement automated detection and reclassifies the types of cement concrete pavement diseases. Based on pavement damage data from 32 airports in China, the deduction values for various diseases in the current pavement evaluation specifications are weighted and combined to obtain the deduction values for new disease types. On this basis, the evaluation indicators for the apparent damage, hidden disease, and

comprehensive damage condition of airport cement concrete pavement are developed. By comparing and analyzing the measured values of PCI (pavement condition index) and the distribution characteristics of the index values, the grade thresholds of each index were determined. The comparison of the results of manual and automatic detection and evaluation of pavement damage in Xilinhot airport runway block shows that the safety grade obtained by the newly developed cement concrete pavement damage condition evaluation method is consistent with the evaluation grade of PCI.

**Key words:** cement concrete pavement; automated detection; damage condition of airport pavement; evaluation method

在交通荷载和环境因素的反复作用下, 机场道面会产生各种损坏, 影响道面使用性能, 对这些损坏进行科学、准确的评价能反映道面损坏状况, 为水泥混凝土道面运行安全预警和预防性养护提供参考<sup>[1]</sup>。国内外学者对机场水泥混凝土道面性能评价做了大量研究, 1970 年, 美国陆军工程兵团提出以道面状况指数 (PCI) 作为道面损坏状况的评价指标, 并给出一整套调查、计算和评价的方法<sup>[2]</sup>。我国《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2019) (以下简称《评价规范》) 借鉴美国标准, 结合我国道面状况对 PCI 等级进行了调整。而我国空军提出道面破损指数 ( $L$ ) 来表征军用机场道面损坏状况<sup>[3]</sup>。这些道面损坏状况评价方法均采用人工徒步巡检的方式, 经过调查、判断、统计道面病害, 计算评价指标的数值<sup>[4]</sup>, 存在耗时长、精度差、主观性强等缺点。

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1310603)

第一作者: 袁捷, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。

E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

通信作者: 李一凡, 博士生, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: 1910916@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

为减少这些缺点带来的影响,自动化检测技术开始被引入路面和道面检测领域。20世纪70年代初期,法国道路管理部门研发了第一台道面病害自动检测设备 GERPHO 系统<sup>[5]</sup>;美国开发 SIR-10H 地质雷达<sup>[6]</sup>,用于公路路面内部病害检测;2010年长安大学基于三维激光技术研发了道路检测车<sup>[7]</sup>。针对这些应用于公路的自动化检测技术,我国《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)规定了相应的评价方法<sup>[8]</sup>。机场道面领域近年来也逐渐开始引入自动化检测技术<sup>[9]</sup>,但现有技术仅能进行病害识别,无法详细划分病害类型,现有评价指标不能完全适用于机场道面自动化检测技术。

针对在我国机场道面中占比较大的水泥混凝土道面,考虑目前自动化检测技术的特征,重新划分了道面自动化检测的病害类型,在此基础上形成起了适用于机场道面自动化检测技术的道面损坏状况评价方法,并以我国实际机场道面的检测为例对其水泥混凝土跑道道面损坏状况进行了评价。

## 1 道面自动化检测病害类型划分

《评价规范》将水泥混凝土道面病害分为15种(多数病害对应轻、中、重3种程度),但由于道面病害特征复杂,检测数据的可用性和智能算法分类能力的限制导致现有道面自动化检测技术难以实现对《评价规范》中所有病害的识别和提取<sup>[10]</sup>。因此,需要对《评价规范》中的道面病害类型进行调整,以适

应道面自动化检测特征。

### 1.1 道面表观破损

道面表观破损是通过自动拍摄的道面图片进行图像识别获取病害信息<sup>[11]</sup>。纵向、横向和斜向裂缝、角隅断裂、破碎板或交叉裂缝、胀裂4种病害因其宽度较大能够被识别,但由于裂缝特征复杂无法详细区分裂缝种类,且这4类裂缝均为道面结构性损坏,将其归为结构裂缝一类。补丁、板角剥落与接缝破碎为常见病害类型,样本量大,特征简单,能够被单独识别,各自分别划分为一类。通过补丁面积是否大于0.5 m<sup>2</sup>对大补丁和小补丁进行划分。填缝料损坏可由自动化检测随行人员对整体损坏程度进行判断。

### 1.2 道面隐蔽病害

道面隐蔽病害主要为唧泥和板底脱空,可由探地雷达检测。Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了基于浅层卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)模型探地雷达数据解译方法,得到脱空病害识别的准确率为90.05%,召回率为87.44%,F1分数为92.82%,能够实现机场道面脱空的自动、快速、精确检测。而沉陷和错台一般伴随有脱空病害<sup>[2]</sup>,基层疏松的后果与脱空相似,可将其均归为脱空类病害。重新划分后的水泥混凝土道面病害见表1。表中,文中提到以“类”为单位(如“各类病害”、“新类别病害”)的病害,均指表1中的自动化检测病害类型;文中提到以“种”为单位(如“各种病害”、“某种病害”)的病害,均指《评价规范》中的病害类型。

表 1 道面自动化检测病害划分

Tab. 1 Automated detection of disease division in pavement

序号	自动化检测病害类型	原有病害类型
1	结构裂缝类	纵向、横向和斜向裂缝、角隅断裂、破碎板或交叉裂缝、胀裂
2	板角剥落	板角剥落
3	接缝破碎	接缝破碎
4	小补丁	小补丁
5	大补丁	大补丁和开挖补块
6	填缝料损坏	填缝料损坏
	脱空类	沉陷和错台、唧泥和板底脱空

## 2 道面损坏状况评价指标体系

以最常用的 PCI 为参照指标,构建新的水泥混凝土道面表观破损评价指标 SDI (surface damage index, 表观破损指数)、道面表观破损与隐蔽病害综合评价指标 APDCI (airport pavement damage

condition index, 道面损坏状况指数)。此外,由于目前只有脱空判定指标,没有脱空评价指标,针对区内道面板整体隐蔽病害评价需求,采用脱空率作为评价指标。同时考虑水泥混凝土道面表观破损与隐蔽病害,构建出适用于自动化检测的道面损坏状况评价指标体系(图1)。

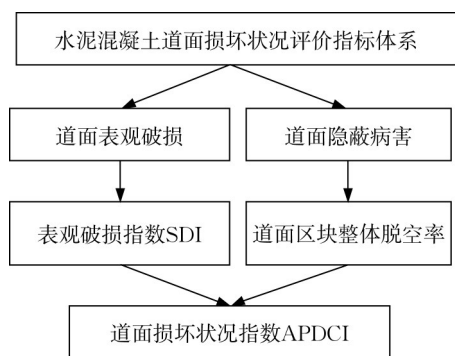


图 1 道面损坏状况评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of surface damage condition

### 3 评级指标计算

#### 3.1 表观破损指数(SDI)

##### 3.1.1 折减扣分函数

参照 PCI,采用百分制扣分的方式构建 SDI。为合理地获取各类新病害的扣分函数,统计了我国机场道面病害实测数据的比例,并将该比例分配给包含不同损坏程度的各类病害。按比例分别计算《评价规范》中各种病害的扣分值,求和后即为自动化检测第  $i$  类病害的扣分值。由我国 32 个机场 417 个水泥混凝土道面区块的巡检数据,统计各种不同损坏程度的病害总板块数占对应类别病害总板块数的比例(表 2—4)。

表 2 结构裂缝类病害中各种病害板块占比

Tab. 2 Proportion of various diseases in structural fracture diseases

病害	损坏程度		
	轻	中	重
纵向、横向和斜向裂缝	0.781 5	0.032 8	0.024 4
角隅断裂	0.083 0	0.006 2	0.000 7
破碎板或交叉裂缝	0.043 6	0.021 4	0.010 1
胀裂	0.000 5	0	0

表 3 板角剥落、接缝破碎、小补丁、大补丁中各种病害板块占比

Tab. 3 Proportions of various disease plate in plate angle spalling, joint breaking, small patch, and large patch

病害	损坏程度		
	轻	中	重
板角剥落	0.928 2	0.064 5	0.007 3
接缝破碎	0.951 4	0.041 6	0.007 0
小补丁	0.966 4	0.031 4	0.002 2
大补丁	0.895 9	0.096 1	0.008 0

表 4 脱空类病害中各种病害板块占比

Tab. 4 Proportion of various disease plates in cavitation diseases

病害	损坏程度	占比
沉陷和错台	轻	0.069 9
	中	0.008 7
	重	0.002 9
唧泥和板底脱空		1

将表 2、表 3 和表 4 中的比例作为各种病害损坏密度的占比,代入《评价规范》中拟合的相应病害扣分函数(函数形式采用五次多项式函数),计算同类病害中各种病害的扣分函数之和,得到该类病害的扣分函数,各类病害扣分函数的系数见表 5。

表 5 自动化检测病害扣分函数多项式系数

Tab. 5 Automated detection of disease deduction function polynomial coefficient

病害类型	五次项 $a_i$	四次项 $b_i$	三次项 $c_i$	二次项 $d_i$	一次项 $e_i$
结构裂缝类	26.016	-103.647	168.845	-155.816	134.309
板角剥落	-10.695	19.821	2.540	-32.763	45.964
接缝破碎	76.063	-211.051	213.021	-109.311	50.106
小补丁	14.234	-38.925	32.967	-15.312	19.319
大补丁	20.005	-78.280	121.528	-112.112	89.312
脱空类	52.101	-160.036	169.144	-120.873	120.479

##### 3.1.2 SDI 计算

SDI 按以下步骤进行计算:

(1) 分别计算结构裂缝、板角剥落、接缝破碎、小补丁、大补丁的损坏密度  $D_i$ 。

$$D_i = \frac{n_i}{N}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

式中:  $n_i$  为区块中出现第  $i$  类表观破损病害的板块数量;  $N$  为区块中的板块数量。

(2) 根据病害类型和损坏密度,分别计算相应病害的扣分值  $g_i(D_i)$ 。

$$g_i(D_i) = a_i D_i^5 + b_i D_i^4 + c_i D_i^3 + d_i D_i^2 + e_i D_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

式中:  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$  为第  $i$  类表观破损病害系数,参照表 5 取值。

(3) 由检测随行人员根据《评价规范》对待评价区块的填缝料损坏程度进行整体判定,按式(3)确定填缝料损坏扣分值  $g_6(D_6)$ 。

$$g_6(D_6) = \begin{cases} 2, & \text{轻微损坏} \\ 7, & \text{中等损坏} \\ 12, & \text{严重损坏} \end{cases} \quad (3)$$

(4) 计算道面表观破损综合折减值 CDV。



$$CDV = h \left( \sum_{i=1}^6 g_i(D_i) \right)^3 + l \left( \sum_{i=1}^6 g_i(D_i) \right)^2 + m \sum_{i=1}^6 g_i(D_i) + p, \quad i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4)$$

式中:  $h, l, m, p$  为系数, 与  $g_i(D_i)$  中大于 5 的病害数量  $q$  有关, 按表 6 所示《评价规范》中综合折减曲线拟合函数的系数取值。

表 6 综合折减系数<sup>[2]</sup>

Tab. 6 Comprehensive reduction coefficient

$q$	$h$	$l$	$m$	$p$
0或1	0	0	1	0
2	$-0.2150 \times 10^{-4}$	$0.3080 \times 10^{-3}$	0.7436	0.0995
3	$-0.1539 \times 10^{-4}$	$0.2430 \times 10^{-3}$	0.6586	0.4527
4	$-0.7117 \times 10^{-5}$	$0.4125 \times 10^{-3}$	0.7145	-0.5238
5	$-0.5500 \times 10^{-5}$	$0.1750 \times 10^{-3}$	0.7022	-0.3235
6	$-0.4358 \times 10^{-5}$	$-0.5478 \times 10^{-4}$	0.6899	-0.1232

(5) 计算 SDI。

$$SDI = 100 - CDV \quad (5)$$

### 3.2 道面隐蔽病害评价指标

#### 3.2.1 脱空率

脱空率  $D_i$  根据探地雷达检测结果, 按式 (6) 计算。

$$D_i = \frac{n_i}{N} \quad (6)$$

式中:  $n_i$  为待评价区块中的存在板底脱空的板块数。

#### 3.2.2 隐蔽病害扣分值

将脱空率  $D_i$  代入式 (2), 并由表 5 查得对应扣函数各项系数, 按式 (7) 计算道面隐蔽病害扣分值 TDV。

$$TDV = 52.101D_i^5 - 160.036D_i^4 + 169.144D_i^3 - 120.873D_i^2 + 120.479D_i \quad (7)$$

### 3.3 道面损坏状况指数 (APDCI)

APDCI 由道面表观破损综合折减值 CDV 与道面隐蔽病害扣分值 TDV 两部分加权扣分组成。由道面病害数据的统计, 确定道面表观破损中各种病害 (填缝料损坏除外) 占比如表 7 所示。

可用不同损坏程度填缝料损坏的区块占比表示不同损坏程度填缝料损坏在某一区块出现的概率 (表 8)。将不同损坏程度填缝料损坏在某一区块发生的概率乘以不同损坏程度填缝料损坏的扣分值并求和, 即可得到某一区块填缝料损坏可能对应的扣分值 (该值为常数)。

在损坏密度 0~1 范围上选取 21 个等距节点, 计算这些点处前 5 种表观病害扣分值, 并加上填缝料损坏对应的扣分值, 得到表观破损扣分。此外, 计算关键节点处的隐蔽病害扣分, 将得到的两组数据分

表 7 表观破损中各种病害占比

Tab. 7 Proportion of various diseases in apparent damage

病害	损坏程度		
	轻	中	重
纵向、横向和斜向裂缝	0.39826	0.01673	0.01241
角隅断裂	0.04231	0.00315	0.00036
破碎板或交叉裂缝	0.02219	0.01092	0.00517
胀裂	0.00026	0	0
接缝破碎	0.21057	0.00920	0.00156
板角剥落	0.15627	0.01085	0.00123
小补丁	0.14018	0.00455	0.00032
大补丁	0.02180	0.00234	0.00019

表 8 填缝料损坏出现区块占比

Tab. 8 Proportion of area affected by caulk damage

填缝料损坏程度	出现区块数量	出现区块占比
无	237	0.569
轻	157	0.376
中	15	0.036
重	8	0.019

别线性拟合, 结果见图 2。

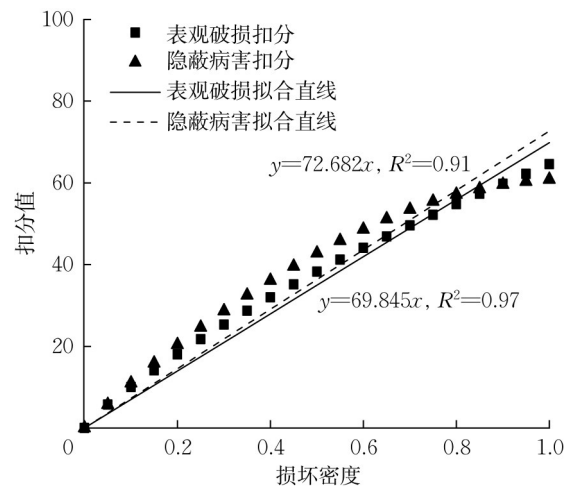


图 2 扣分值拟合结果

Fig. 2 Score deduction curve and its fitting line

用图 2 中直线斜率表征病害的影响程度, 可得道面表观病害扣分值的权重  $\omega_1 = 69.845 / (69.845 + 72.682) = 0.49$ , 道面隐蔽病害扣分值的权重  $\omega_2 = 72.682 / (69.845 + 72.682) = 0.51$ 。则 APDCI 可按式 (8) 计算:

$$APDCI = 100 - 0.49CDV - 0.51TDV \quad (8)$$

### 3.4 道面损坏状况安全评价阈值

#### 3.4.1 道面损坏状况等级

美国的标准根据 PCI 值大小, 将道面损坏状况分为 7 个等级<sup>[2]</sup>。但根据上述 417 个道面区块的统计结果, 板块数大于 25 的区块中, 只有济南遥墙国

际机场的T01A联络道、厦门高崎国际机场的TB4垂直接络道和上海大场机场的2号联络道共3个区块的PCI值小于55,仅占板块数大于25的区块数量的1.5%,其占比极低,主要原因是PCI接近55之前,我国绝大多数机场都已经采取了工程措施进行道面整修。故将 $PCI < 55$ 的损坏状况等级合并,其他评定等级标准<sup>[2]</sup>沿用,此时,PCI评价等级可分为好、中、次、差4个等级(表9)。

表9 PCI等级新划分

Tab. 9 New division of PCI grade

等级	好	中	次	差
PCI范围	$PCI \geq 85$	$70 \leq PCI < 85$	$55 \leq PCI < 70$	$PCI < 55$

3.4.2 各评价指标等级阈值

(1)SDI等级阈值

对于上述417个道面区块的病害数据,分别计算各个道面区块的SDI和PCI,并绘制散点图结合数值分布特征确定SDI各评价等级阈值(图3)。

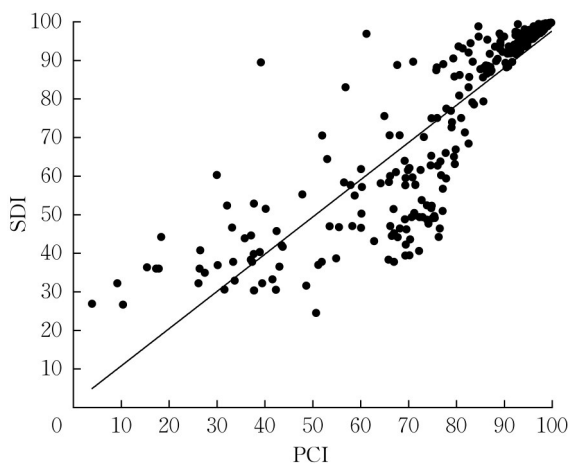


图3 PCI-SDI散点图

Fig. 3 Scatter plot of PCI-SDI

由图3可知,SDI与PCI之间总体上具有一定的相关性和趋势一致性,但散点分布较为离散。该现象可以解释为:左上部分的点所在区域脱空类或细微裂缝病害较严重,而用于道面表观破损评价的SDI指标中未计入脱空类病害,并且由于细微裂缝难以被自动化检测识别,故导致SDI相对于PCI偏大;右下部分的点所在区域在计算PCI时进行了大量折减,而计算SDI所需的6种病害只有结构裂缝类的扣分值此时可能会大于5,并未进行折减,使得PCI比SDI大。

由于SDI所包含的病害类型少于PCI,故对应于道面状况为“好”的SDI的阈值应大于85。而工程

上对于经验性较强的评价阈值一般取5的倍数,故将对应的SDI阈值取为90。对于同一道面区块来说,计算SDI时的 $q$ (扣分值大于5的病害种类数)较小,因此折减幅度偏小,加之忽略了结构裂缝类中4种病害扣分的折减,因此随着病害的增多,SDI区间长度相较于PCI会逐渐变长。由此确定SDI指标的评价标准,如表10所示。

表10 SDI等级划分

Tab. 10 Grade classification of SDI

等级	好	中	次	差
SDI范围	$SDI \geq 90$	$75 \leq SDI < 90$	$55 \leq SDI < 75$	$SDI < 55$

(2)脱空率等级阈值

我国32个机场的123个跑道道面区块出现了脱空,板底脱空区块的脱空率分布情况见图4。

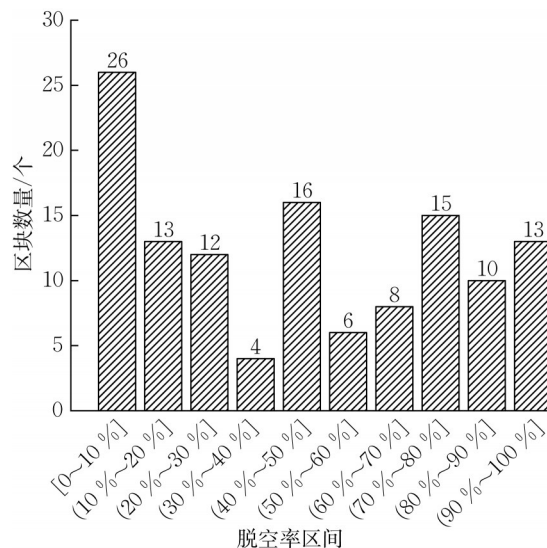


图4 脱空区块脱空率分布

Fig.4 Distribution of discharge rate in discharge block

由图4可知,脱空率的分布相对比较均匀,涵盖了0~100%整个区间,考虑脱空率较大的区块检测前后仍在正常使用,板底脱空短期内不会对道面使用造成严重影响(表11),故平均设置各等级脱空区间。

(3)APDCI等级阈值

从上述417个道面区块中,提取出同时含有道面表观和隐蔽病害的共计67个道面区块,分别计算其APDCI和PCI,并分析二者关系(图5)。

由图5可知,APDCI与PCI之间呈现出较强的线性关系。将3.4.2节所述PCI各等级阈值85、70、55代入图5中APDCI和PCI的关系式,可得APDCI

表 11 脱空率等级划分

Tab. 11 Grade classification of emptying rate

等级	好	中	次	差
脱空率范围	$D_t \leq 25\%$	$25\% < D_t \leq 50\%$	$50\% < D_t \leq 75\%$	$D_t > 75\%$

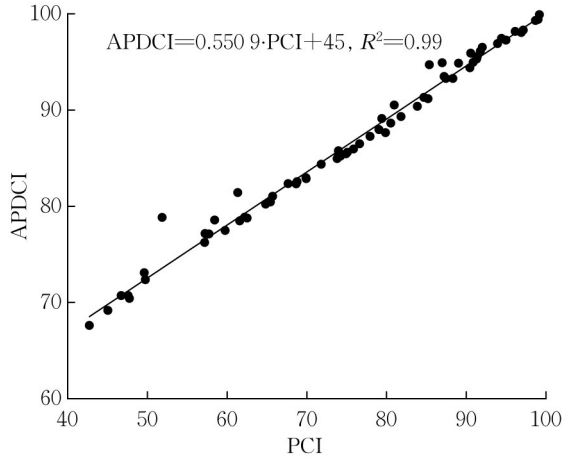


图 5 APDCI 与 PCI 的关系

Fig. 5 Relationship between APDCI and PCI

的各等级阈值(表 12)。

表 12 APDCI 等级划分

Tab. 12 Grade classification of APDCI

等级	好	中	次	差
APDCI 范围	$APDCI \geq 92$	$84 \leq APDCI < 92$	$75 \leq APDCI < 84$	$APDCI < 75$

## 4 算例分析

### 4.1 病害检测结果

为分析新损伤类型对自动化检测设备的适应性及道面损坏状况评价方法的实际应用效果,在对锡林浩特机场跑道开展人工巡检的同时,使用“机场道面健康自动检测系统”开展了自动化检测作业。将检测区块分为 I、II 和 III 号区块,总板块数分别为 590、1 400 和 3 590,自动化检测结果见表 13。

表 13 各区块出现病害的板块数

Tab. 13 Number of diseased plates in each block

自动化检测病害类型	I号区块	II号区块	III号区块
结构裂缝类	30	968	1050
板角剥落	23	110	243
接缝破碎	27	74	415
小补丁	1	0	29
大补丁	0	0	2
填缝料损坏	0	0	3
脱空	20	140	244

### 4.2 评价指标计算及对比

按照 3.1~3.3 节内容计算各评价指标,并与各

区块的 PCI 计算结果进行对比,见表 14。

表 14 各区块评价指标和等级

Tab. 14 Evaluation index and grade of each block

评级指标	I号区块		II号区块		III号区块	
	数值	等级	数值	等级	数值	等级
SDI	89.7	中	48.1	差	67.1	中
Dt	0.034	好	0.100	好	0.068	好
PCI	86.7	好	45.9	差	69.2	次
APDCI 拟合值	92.8	好	70.3	差	83.1	次
APDCI 实测值	92.7	好	68.5	差	79.6	次

由表 14 可知,对于检测的 3 个区块,由自动化检测结果算出的 APDCI 和由规范方法算出的 PCI 评价等级均一致。APDCI 实测值和由 PCI 推算出的拟合值最大相差仅 3.5,二者比较接近,基本符合 APDCI 与 PCI 间的线性关系,验证了该方法的可用性。

## 5 结论

(1) 根据目前机场道面自动化检测特征,对水泥混凝土道面外观破损和隐蔽病害类型进行了重新划分。以 PCI 和损坏密度为量化参照指标,结合我国机场道面病害实测统计数据,构建了新的水泥混凝土道面外观破损评价指标——SDI、道面隐蔽病害评价指标——脱空率、道面损坏状况综合评价指标——APDCI,确定了各评价指标的计算方法。

(2) 实测道面区块的 SDI 与 PCI 间具有趋势一致性和分布差异性,由此确定了 SDI 的各评价等级阈值;我国机场存在脱空的道面区块脱空率分布较为平均,故对脱空率等级区间进行了均匀划定;实测道面区块的 APDCI 和 PCI 两指标之间具有线性关系,由 PCI 阈值计算得到了 APDCI 分级评价标准。

(3) 锡林浩特机场跑道人工巡检和自动化检测评价结果表明,SDI 和脱空率可根据道面自动化检测结果分别对道面外观破损和隐蔽病害进行评价,实测数据计算结果验证了 PCI 与 APDCI 的线性关系,且各道面区块损伤状况的综合评价等级相同,说明了新评价方法的准确性与适用性。

本文建立的面向自动化检测的水泥混凝土道面损坏状况评价方法可为机场道面自动化检测评价提供依据,但各评价指标的参数是基于国内部分机场

的实测数据得到,随着实测道面病害数据的补充、自动识别效果的提升和分析,评价指标的参数将更加科学合理。

#### 作者贡献声明:

袁捷:确定研究思路和技术路线,提供研究所需数据,指导论文写作。

李一凡:开展数据分析计算,指导论文初稿写作和论文修改。

汪恒:进行数据整理、图表绘制,完成论文初稿写作。

#### 参考文献:

- [1] 张耀华. 机场水泥混凝土道面评价系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
ZHANG Yaohua. Research on assessment system for airport cement concrete pavement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [2] 中国民用航空局. 民用机场道面评价管理技术规范: MH/T 5024—2019[S]. 北京: 中国民用航空局, 2019.  
Civil Aviation Administration of China. Specifications for pavement evaluation and management of civil airports: MH/T 5024—2019[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2019.
- [3] 中国空军工程设计局. 军用机场水泥混凝土道面使用质量评定标准: GJB 2264—1995[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 1995.  
Chinese Air Force Engineering Design Bureau. Evaluation standard of maintenance management for cement concrete pavement of military airfield: GJB 2264—1995[S]. Beijing: General Logistics Department of the People's Liberation Army, 1995.
- [4] 李柯, 邵斌, 何小科, 等. 水泥混凝土道面预防性养护评价指标体系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1993.  
LI Ke, SHAO Bin, HE Xiaoke, *et al.* Research on evaluation index system of preventive maintenance of cement concrete pavement in military airports[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(8): 1993.
- [5] 吴治龙. 基于深度图像的道面病害检测与测量方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
WU Zhilong. Based on depth image of the pavement disease detection and measurement method research[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [6] 王春晖, 杨强, 陈长, 等. 探地雷达技术的发展及其在公路工程中的应用综述[J]. 中外公路, 2007(4): 211.  
WANG Chunhui, YANG Qiang, CHEN Zhang, *et al.* Review on the development of ground penetrating radar technology and its application in highway engineering [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2007(4): 211.
- [7] 王建锋. 激光路面三维检测专用车技术与理论研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
WANG Jianfeng. Research on vehicle technology on road three-dimension measurement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway performance assessment standards: JTG 5210—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [9] 侯海涛, 邱雄, 范洪祥, 等. 基于机器人技术的道路病害自动化检测系统应用研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 1.  
HOU Haitao, QIU Xiong, FAN Hongxiang, *et al.* Application research of automatic road disease detection system based on robot technology[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(3): 1.
- [10] PIETERSEN R, BEAUREGARD M, EINSTEIN H. Automated method for airfield pavement condition index evaluations [J]. Automation in Construction, 2022, 141(10): 178.
- [11] American Society for Testing and Materials. Standard test method for airport pavement condition index surveys: ASTM D5340—2011[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2011.
- [12] ZHANG Jun, LU Yaming, YANG Zhe, *et al.* Recognition of void defects in airport runways using ground-penetrating radar and shallow CNN[J]. Automation in Construction, 2022, 138(8): 127.