

# 机场水泥混凝土道面状况指数两层次 分区方法及适应性

凌建明<sup>1</sup>, 刘诗福<sup>1</sup>, 黄崇伟<sup>2</sup>, 吴越<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海理工大学 交通运输工程系, 上海 200093; 3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 针对目前机场水泥混凝土道面采用“部位→区域→单元”三层次分区计算道面状况指数(PCI)方法的复杂性, 提出了机场水泥混凝土道面“部位→区域”两层次分区方法并分析了该方法的适用性。利用 6 个机场 55 个区域的实际病害信息, 通过两层次分区方法计算区域 PCI, 并采用单因素方差分析方法计算道面区域所在部位、区域大小、不同机场等因素之间的显著性影响水平。结果表明, 利用民用机场水泥混凝土道面两层次分区方法计算得到的区域 PCI 略小于规范中三层次分区方法的计算值, 结果更偏安全; 平均偏差仅为 1.04, 对区域的损坏等级评价基本无影响; 部位划分、区域大小、不同机场对计算偏差无显著性影响。两层次分区方法可大大减少道面状况评价的工作量, 可推广性强。

**关键词:** 机场工程; 水泥混凝土道面; 道面状况指数; 两层次分区

**中图分类号:** V351.11; U416.217

**文献标志码:** A

## Analysis of a Double-Level Partitioning Method for Determining Pavement Condition Index of Airport Concrete Pavement

LING Jianming<sup>1</sup>, LIU Shifu<sup>1</sup>, HUANG Chongwei<sup>2</sup>, WU Yue<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Aiming at the complexity of the previous pavement condition index(PCI) calculation using triple-level partitioning method of part-area-unit, a novel double-level partitioning method of part-area was proposed along with the analysis of its

applicability. Area PCI was first calculated using double-level partitioning based on the data from 55 areas in 6 airports. The significance of area location, area size and different airports was then analyzed using single factor variance analysis. The results show that the double-level partitioning method is safety preferable with an average deviation of 1.04 compared with previous triple-level one. The proposed method has little influence on damage level evaluation. Part identification, area size, and airports also have no significant influence on calculation deviation. The double-level partitioning method is recommendable and could significantly reduce workload for pavement condition evaluation.

**Key words:** airport engineering; concrete pavement; pavement condition index(PCI); double-level partition method

我国超过 90% 的机场采用水泥混凝土道面。水泥混凝土道面损坏状况调查及评价是机场运行管理必要的工作<sup>[1]</sup>。道面损坏调查一般只能在机场停航后进行。由于飞行区停航时间短, 作业时间有限, 高效的道面损坏调查作业及合理的道面损坏状况评价是机场道面运行维护的关键<sup>[2]</sup>。同时, 科学合理地收集机场道面损坏状况信息也是目前机场道面管理系统应用的重要基础<sup>[3-4]</sup>。

20 世纪 70 年代, 美国空军发布了《机场道面状况指数调查标准试验方法》(ASTM D5340), 用以评估道面使用状况, 提出了道面状况指数(PCI)以及配套的调查、计算、分析和评价流程<sup>[5-6]</sup>。目前我国民用机场的道面评估也主要借鉴了该方法<sup>[2]</sup>。近年来, 多数学者致力于分析机场道面 PCI 指标的演变规律<sup>[7-8]</sup>, 关于分区规则本身对 PCI 影响的研究相对较少。ASTM D5340 方法对机场道面进行“部位→区域

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51678444)

第一作者: 凌建明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机场工程、路基工程。E-mail: jmling@tongji.edu.cn

通信作者: 黄崇伟(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为道路设计与分析理论、有轨电车轨下基础。E-mail: hcwei@126.com

→单元”三层次分区。“区域”层的划分主要依据道面结构、荷载等级,是道面损坏状况评价的直接对象;“单元”层的划分是建立更加完善位置参考体系的同时,利用扣分折减曲线和修正折减曲线来定量评价道面的损坏情况,是计算道面损坏状况的最小单位。随着北斗定位技术(BDS)的成熟以及机场道面管理系统的应用,现场获取损坏调查病害发生的位置变得更加容易<sup>[9-10]</sup>。采用“区域+BDS 位置”的方式,既能满足道面损坏状况的评价,也能将定位工作有效分离,可显著提高调查效率。

本文将研究道面状况评价体系中,由“部位→区域→单元”三层次分区方法转换为“部位→区域”两层次分区方法的可行性。重点以区域 PCI 为分析对象,分析病害空间分布对 PCI 的影响,提出了取消单元划分的两层次道面分区方法及 PCI 计算程序。基于国内 50 个机场的实际损坏调查数据,定量分析了两层次分区方法下区域 PCI 值的适用性,研究结果有助于提高民用机场道面评价管理技术水平。

## 1 道面 PCI 三层次分区评价方法

### 1.1 PCI 计算方法

我国现行规范规定,道面分区按照“部位→区域→单元”三个层次进行划分<sup>[2]</sup>,水泥混凝土道面将相邻 20 块板划分为一个单元。道面损坏状况调查采用人工目测法,记录调查日期、调查人员、单元编号、损坏类型、损坏程度、损坏量等信息。单元 PCI 可利用式(1)进行计算,道面区域和部位的 PCI 值在单元基础上采用面积加权方法计算。

$$I_{\text{PCI}} = 100 - \sum D_{ijk} \cdot \omega(D, d) \quad (1)$$

式中: $I_{\text{PCI}}$ 为 PCI 值; $i, j$ 分别为损坏类型( $i=1, 2, \dots, n$ )和损坏程度等级数( $j=1, 2, \dots, m$ ); $D_{ijk}$ 为  $i$  类损坏类型、 $j$  级程度、 $k$  范围(损坏密度)的扣分值,由各损坏对应的扣分折减曲线确定; $\omega(D, d)$ 为多种损坏的综合修正函数,与累计折减值  $D$  和折减次数  $d$  有关,由综合修正折减曲线确定。

### 1.2 病害空间分布对 PCI 的影响

研究表明,PCI 值是由道面表现损坏类型、损坏程度及损坏密度确定的函数<sup>[11]</sup>。病害在道面区域空间的分布状况直接影响各单元内病害密度及组合情况,因此不同的病害空间分布将影响单元 PCI 值和区域 PCI 值<sup>[12]</sup>。在讨论两层次分区方法适应性之前,有必要定量分析病害空间分布对 PCI 的影响。

以中度损坏程度的交叉裂缝病害为研究对象,

假设区域共辖 10 个单元、200 块水泥混凝土板,共有 10 处该病害。试验考虑两种极端情况:病害分布最集中的方式为 10 个病害在同一单元的 20 块板内;分布最分散的方式为 10 个病害分别在 10 个单元内。两种情况区域 PCI 差异如下:

(1) 病害集中时,病害单元的损坏密度为  $10/20=0.5$ ,由图 1 可知,相应的扣分为 61.2,则该单元的  $I_{\text{PCI}}=100-61.2=38.8$ ;其他 9 个单元的  $I_{\text{PCI}}=100$ ,区域  $I_{\text{PCI}}$  为  $(38.8+9 \times 100)/10=93.88$ 。

(2) 病害分散时,各个单元的损坏密度均为  $1/20=0.05$ ;该损坏密度下的扣分为 19.5,故单元  $I_{\text{PCI}}=100-19.5=80.5$ ;由于各单元  $I_{\text{PCI}}$  相同,故区域  $I_{\text{PCI}}$  也为 80.5。

可见,集中和分散情况的区域 PCI 值差异显著,达到 13.38。这是因为图 1 中单种病害的扣分曲线是凹函数非线性曲线,损坏密度的增加引起的单一损坏扣分值减小速率放缓。若对于多种病害而言,还存在多损坏组合导致的对总扣分值修正的影响。因此,病害空间分布对 PCI 值的影响较大。

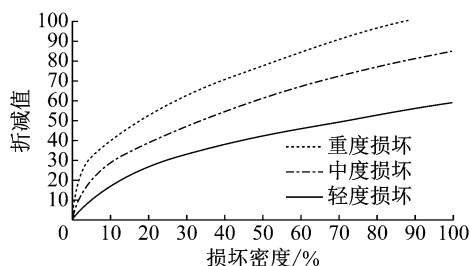


图 1 破碎板和交叉裂缝扣分折减曲线

Fig.1 Deduction and reduction of cross cracking

## 2 两层次分区方法及 PCI 计算

### 2.1 两层次分区 PCI 计算方法

“部位→区域”两层次分区方法中,对于部位和区域的划分原则保持一致,仅仅取消以面积为基准的单元划分。

#### 2.1.1 计算方法

为了保证指标的一致性,仍利用病害扣分折减曲线和扣分值综合修正曲线计算 PCI 值。因此可在区域 PCI 中假设虚拟单元,以利用现有方法先计算虚拟单元 PCI 值,进而通过几何平均值求得区域 PCI 值。

以某区域为例,认为某一病害可能发生在区域内的任意板块,因此将所有病害均随机分布到区域内的各板块中,通过计算各个虚拟单元的 PCI 值进

而求得区域 PCI 值。一次随机分布过程可对应一个区域 PCI 值,通过迭代多次随机分布过程则可获取区域 PCI 值的变异水平,以此表征区域 PCI 计算方法的稳定性。

### 2.1.2 计算案例

现拟定大小为 2 000 块板的一个区域,计算不同病害数量和组合情况下随机分布过程对区域 PCI 的影响。具体计算思路如下:①以 20 块板为一虚拟单元,则共有 100 个单元,并对 100 个单元进行编号;②对于某一条病害记录,利用 MATLAB 软件随机生成该病害记录的单元编号,即假定该病害发生在该单元;③依次对每一条病害记录重复上述过程,完成所有病害在区域内的随机分布;④依据式(1)计算各单元的 PCI 值,进而得到区域 PCI 值;⑤重复上述操作,得到  $n$  次随机分布过程区域 PCI 的分布情况。

## 2.2 区域 PCI 的影响因素分析

### 2.2.1 单一病害情况

国内 15 个机场水泥混凝土道面损坏数据的统计结果表明,平均损坏密度为 9.2%,本文选定 10% 的损坏密度进行研究。以纵横斜向裂缝病害为例,500 次病害随机分布,计算得到的区域 PCI 值的分布如图 2 所示。可见,每次随机分布得到的区域 PCI 之间存在差异,且分布情况与正态分布相近。选用 0.95 的置信区间  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$  ( $\mu$  为均值,  $\sigma$  为方差),即  $4\sigma$  的大小表示区域 PCI 值的稳定性,  $4\sigma$  越小,区域 PCI 值越稳定。

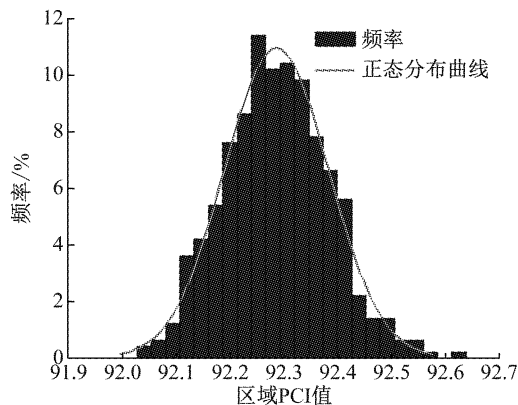


图2 10%轻微纵横斜向裂缝随机分布区域 PCI 值的频率直方图

Fig.2 Histogram of PCI frequency in random distribution area of 10% slight transverse and oblique fractures

分析水泥混凝土道面 15 种常见病害在不同损坏程度下病害位置的随机分布对区域 PCI 计算值的影响,结果如表 1 所示。由表 1 可知,对于同一病害,

其损坏程度越严重,区域 PCI 稳定性越差;  $4\sigma$  最大值为 2.76,相对误差仅为 4.3%。

表1 单一损坏下区域 PCI 值分布情况

Tab.1 Distribution of regional PCI values in single damage

损坏编号	轻度损坏		中度损坏		重度损坏	
	PCI 均值	$4\sigma$	PCI 均值	$4\sigma$	PCI 均值	$4\sigma$
1	92.29	0.38	83.29	0.92	75.91	1.22
2	91.76	0.21	85.57	0.63	79.12	0.99
3	84.21	0.95	75.08	1.87	64.56	2.76
4	91.96	0.24	86.64	0.64	76.61	1.37
5	80.32	0.93	63.10	2.65	0	0
6	98.00	0	93.00	0	88.00	0
7	96.58	0.12	92.53	0.31	81.94	1.11
8	90.14	0.08	90.14	0.08	90.14	0.08
9	94.01	0.25	84.64	0.98	74.12	1.61
10	98.03	0.02	98.03	0.03	98.03	0.03
11	93.13	0.22	93.14	0.23	93.14	0.28
12	96.01	0.16	87.74	0.49	76.03	1.01
13	96.24	0.09	93.30	0.28	91.23	0.24
14	98.37	0.04	94.69	0.19	90.05	0.41
15	94.37	0.23	85.19	1.02	74.33	1.72

嵌缝料损坏(编号 6)和重度的胀裂病害(编号 5)的扣分为定值,故得到的区域 PCI 值亦为定值,  $4\sigma$  等于 0。对于收缩裂缝(编号 10),其扣分曲线不区分等级,并且曲线接近直线,因此区域 PCI 稳定性好。由表 1 可见,分析结果与病害扣分折减曲线线形基本保持一致。

### 2.2.2 多种损坏组合情况

单一损坏的情况不涉及损坏扣分值的综合修正过程。本文选择统计中发生频率大于 1% 的 9 种水泥混凝土道面损坏类型,选取各损坏的密度的变化范围为 0~6%,得到区域 PCI 值的分布情况如图 3 所示。

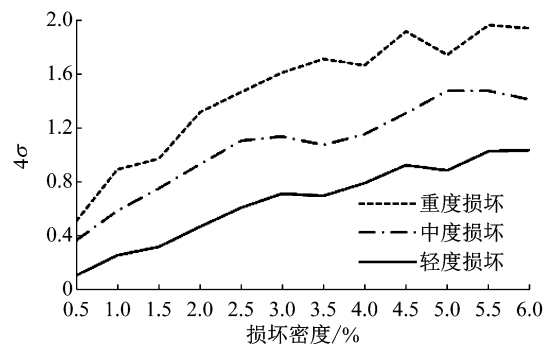


图3 不同损坏程度下区域 PCI 值随密度的分布曲线  
Fig.3 Area PCI distribution with density at different degrees of damage

由图 3 可知,区域 PCI 变化区间  $4\sigma$  的最大值小于 2,区域 PCI 值分布较稳定,变异水平低;对于 3 种

损坏程度的病害来说,随着损坏密度的增大,区域 PCI 值稳定性变差;而在同一损坏密度下,损坏程度越严重,对区域 PCI 值的稳定性影响越大。此外,在各种工况下,病害随机分布模拟得到的区域 PCI 值稳定性良好,变异性小。

### 3 两层次分区方法的适应性分析

本文共选取了 6 个机场共 55 个区域水泥混凝土道面损坏调查的实际数据进行分析,两层次分区方法采用 100 次随机分布,对比分析两层次分区方法与三层次分区方法计算的区域 PCI 值,并对两者得到的 PCI 偏差值进行单因素显著性分析。

#### 3.1 偏差的总体分布

区域 PCI 值的对比情况如图 4 所示。大多数区域采用随机分布得到的 PCI 值小于确定单元划分时的计算值,这是因为环境和荷载作用的相似性,机场道面病害的实际分布往往具有聚集效应,而病害的集中分布会导致区域的总扣分值减小,因此三层次分区方法的区域 PCI 值较大。对于机场道面的运营管理而言,两层次方法的计算结果更偏保守和安全。统计发现,在 55 组数据中,定单元分区与随机分布得到的 PCI 值的平均偏差仅为 1.04,对区域损坏等级的判定基本无影响。因此,两层次分区方法具有较好的适用性。

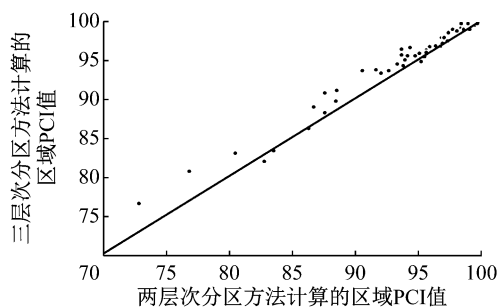


图 4 两种分区方法计算的区域 PCI 值对比

Fig.4 Comparison of PCI in regions calculated by using two partitioning methods

#### 3.2 偏差的影响因素

##### 3.2.1 区域所在部位的不同

机场道面按照使用功能的不同可划分为跑道、机坪和滑行道。将区域 PCI 计算偏差值根据 3 个不同部位分组并进行方差分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知,区域所在部位的不同对区域 PCI 计算偏差不存在显著性差异,即两层次分区时病害随机分布计算区域 PCI 的方法可适用于机场飞行区道面的不

同部位分区。

表 2 区域所在部位对 PCI 计算偏差值影响显著性的方差分析

Tab.2 Variance analysis of the significance of regional location on the deviation of PCI calculation

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
组间	7.51	2	3.75	2.44	接受假设
组内	80.09	52	1.54		
总和	87.60	54		$F_{0.95}(2,52)=3.182$	

##### 3.2.2 区域大小的差异

所分析的 55 个区域中,区域所辖单元数从 8~240 个单元不等,分析区域 PCI 稳定性指标  $4\sigma$  与区域大小的关系如图 5 所示。由图 5 可知,区域所辖的单元数越多,随机分布得到的区域 PCI 值稳定性越好。为量化单元大小对区域 PCI 计算值稳定性的影响程度,将验算的 55 个区域按照单元数量分为 4 组(表 3)进行方差分析,结果见表 4。由表 4 可知,区域所辖单元数的不同对区域 PCI 计算偏差不存在显著性差异,即两层次分区方法计算区域 PCI 可适用于机场不同区域大小的道面。

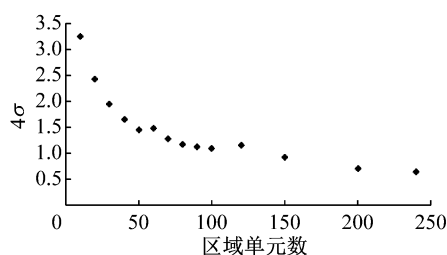


图 5 区域大小对区域 PCI 变异性的影响

Fig.5 Influence of region size on regional PCI variability

表 3 区域大小分组

Tab.3 Grouping of area size				
区域单元数	$\leq 20$	20~50	50~100	$>100$
区域数量	17	16	12	10

表 4 区域大小对 PCI 计算偏差值影响显著性的方差分析

Tab.4 Variance analysis of influence of region size on deviation value of PCI calculation

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
组间	0.91	3	0.30	0.18	接受假设
组内	86.69	51	1.70		
总和	87.60	54		$F_{0.95}(3,51)=2.792$	

##### 3.2.3 不同机场的差异

考察不同机场对两层次分区区域 PCI 计算值的差异性影响。对 55 个区域的偏差值根据 5 个机场分组后并方差分析,如表 5 所示。由表 5 可知,不同机场之间不存在显著性差异,即两层次分区方法计算区域 PCI 可适用于不同的机场。

由上述方差分析结果可知,区域所在部位、区域

大小和不同机场对病害随机分布计算得到的 PCI 值与定单元划分 PCI 值之间的偏差无显著性影响,即基于两层次分区方法的病害随机分布计算区域 PCI 的方法可适用于所有民用机场水泥混凝土道面的区域 PCI 计算中。

表5 不同机场对 PCI 计算偏差值影响显著性的方差分析  
Tab.5 Variance analysis of influence of different airports on deviation value of PCI calculation

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
组间	6.06	5	1.21	0.73	接受假设
组内	81.54	49	1.66		
总和	87.60	54		$F_{0.95}(5,49)=2.414$	

## 4 结论

(1) 提出的机场道面“部位→区域”两层次分区方法,可显著提高水泥混凝土道面损坏状况调查及评价的工作效率。

(2) 在各种工况下,病害多次随机分布得到的区域 PCI 值稳定性好,且近似呈正态分布,在 0.95 的置信区间 $[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$ 内,PCI 的  $4\sigma$  最大值为 2.76,相对误差仅为 4.3%。

(3) 分析了两层次分区方法的适应性。通过 6 个机场 55 个单元的实际损坏调查数据,分析了与三层次分区方法区域 PCI 计算值的偏差,平均偏差仅为 1.04,且结果对机场管理评价偏于安全。

(4) 单因素方差分析表明,区域所在部位、区域大小和不同机场对病害随机分布计算得到的 PCI 值与分区 PCI 值之间的偏差无显著性影响,两层次分区方法适应性较好,推广性强。

## 参考文献:

- [1] 王显伟,刘玉海,袁捷. 厦门高崎机场跑道道面损坏评价及其成因分析[J]. 中国民航学院学报,2005,23(6):48.  
WANG Xianyi, LIU Yuhai, YUAN Jie. Runway distress evaluation and analysis of Xiamen Gaoqi Airport[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2005, 23(6):48.
- [2] 凌建明,张光辉,刁永海,等. 民用机场道面评价技术管理规范:MH/T 5024—2009 [S]. 北京:中国民用航空局,2009.  
LING Jianming, ZHANG Guanghui, DIAO Yonghai, et al. Technical specifications of aerodrome pavement evaluation and

- management: MH/T 5024—2009 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2009.
- [3] 杨明珠. 基于 GIS 的机场道面管理系统研究与框架设计[D]. 南京:东南大学,2017.  
YANG Mingzhu. Research and framework design of airport pavement management system based on GIS [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [4] 凌建明,袁捷,西绍波,等. 上海机场道面管理系统研究与开发[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1041.  
LING Jianming, YUAN Jie, XI Shaobo, et al. On development of Shanghai airport pavement management system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(8):1041.
- [5] SHALIN M Y, DATER M I, KOHN S D. Development of a pavement maintenance management system[R]. Tynall: U. S Air Force Engineering and Services Center, 1977.
- [6] ASTM International. Standard test method for airport pavement condition index surveys: D5340-03 [S]. [S. l.]: ASTM International, 2004.
- [7] 袁捷,苏尔好,杜先照,等. 基于线性混合效应模型的道面使用性能预测[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(5):707.  
YUAN Jie, SU Erhao, DU Xianzhao, et al. Linear mixed effect model for airport pavement performance prediction [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5):707.
- [8] 袁捷,唐龙,杜浩. 机场道面使用性能的动态自回归预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(3):399.  
YUAN Jie, TANG Long, DU Hao. Dynamic auto-regression prediction model of airport pavement performance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(3):399.
- [9] 任红梅. 基于差分 GPS 的机场道面巡检系统的设计与实现[J]. 信息通信,2014,28(7):65.  
REN Hongmei. Design and implementation of airport pavement inspection system based on differential GPS[J]. Information & Communications, 2014, 28(7):65.
- [10] 宋海瑞. GIS 技术在机场建设和运营中的设计应用[J]. 智能建筑与城市信息,2015,28(7):66.  
SONG Hairui. Design and application of GIS on the construction and operation of the airport [J]. Intelligent Building & City Information, 2015, 28(7):66.
- [11] 杜浩. 机场道面使用性能预测的混合效应模型[D]. 上海:同济大学,2009.  
DU Hao. The mixed effects models for airport pavement performance prediction [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 陈文来,凌建明,郝航程,等. 水泥混凝土道面调查单元划分及病害程度对 PCI 的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(11):1646.  
CHEN Wenlai, LING Jianming, HAO Hangchen, et al. Effect of unit dividing and distress severity on PCI accuracy for cement concrete pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(11):1646.