

doi: 10.7690/bgzd.2021.03.015

军用机场刚性道面 PCN 的计算分析及软件开发

李晓萌, 王 正, 祝华远

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对军用机场道面强度评价指标 PCN 值计算参数多、迭代复杂的问题, 设计一款实用型计算软件。在文克勒地基、弹性半空间体地基模型的基础上, 对 PCN 计算公式及推理过程进行分析, 制定 2 种刚性道面 PCN 值求解流程图。结合 Visual Basic 编程语言, 借助 Visual Basic 6.0 平台开发 PCN 计算软件, 通过分析 2 种计算方法的优缺点及实际应用情况, 提出相应建议。验证结果表明: 该软件计算结果准确、快速, 具有一定的实际应用意义, 且换算后亦适用于复合道面。

关键词: 刚性道面; PCN; 强度评价; 地基模型; Visual Basic; 计算软件

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A

Calculation Analysis and Software Development of PCN for Military Airport Rigid Pavement

Li Xiaomeng, Wang Zheng, Zhu Huayuan

(Qingdao Branch, Navy Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to solve the problem that the PCN value of military airport pavement strength evaluation index has many parameters and complex iteration, a practical calculation software is designed. On the basis of Winkler foundation model and elastic half-space foundation model, the PCN calculation formula and reasoning process are analyzed, and two kinds of PCN value solving flow charts of rigid pavement are formulated. Combined with Visual Basic programming language and Visual Basic 6.0 platform, PCN calculation software is developed. By analyzing the advantages and disadvantages of the two calculation methods and their practical application, the corresponding suggestions are put forward. The verification results show that the calculation results of the software are accurate and fast, and it has certain practical significance, and it can also be applied to composite pavement after conversion.

Keywords: rigid pavement; PCN; strength evaluation; foundation model; Visual Basic; computing software

0 引言

随着机场道面使用年限的增加, 道面性能的衰减速度加快, 承载力下降, PCN (pavement classification number) 的数值动态变化、逐渐减小^[1], 需要工作人员对其进行检测与评价。宏观来看, 军用机场道面保障评价体系主要涵盖 3 大模块: 1) 道面损坏状况调查与评价, 主要包含道面的病害类型、损坏等级; 2) 道面结构性能的测试与评价, 主要包含强度评价方法、结构适应性厚度、剩余寿命预估; 3) 道面功能性能的测试与评价, 主要包含道面抗滑性能、平整度及排水性能等^[2]。

道面损坏状况调查与评价将破损指数 PCI (pavement condition index) 作为评价指标^[3]; 道面功能性测试与评价时, 道面的抗滑性能将横向力系数 SFC (sideway force coefficient)、摩擦摆值 BPN (british pendulum number) 等作为评价指标, 道面平整度将国际平整度指数 IRI (international

roughness index) 等作为评价指标^[4]; 而对道面结构性能进行评价时, 国际民航组织 (international civil aviation organization, ICAO) 推荐, 目前被世界各国普遍采用、我国军用机场也广泛使用的是 ACN-PCN 强度评价法^[5], 以 PCN 值作为评价指标, 用以确定机场道面承受荷载能力, 判别道面板能否适用于不同机型及其组合变换。

在实际测试与评价时, PCN 计算公式较复杂。为解决这一问题, 文献^[6]提出多元参数拟合方法, 得出 PCN 与其影响因素之间的显式公式, 但由数据拟合公式求解存在不可避免的误差; 因此, 笔者剖析了 2 种刚性道面 PCN 值的计算原理, 基于 Visual Basic 程序设计语言编制计算软件, 以实现 PCN 求解的便捷性、实用性。

1 ACN-PCN 强度评价法

ACN (aircraft classification number) 代表飞机的

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-12-10

作者简介: 李晓萌 (1994—), 女, 山东人, 硕士, 助教, 从事机场场道工程研究。E-mail: 117667565981@163.com。

等级号，是衡量飞机对道面作用大小的数值，通过查表予以确定或由飞机制造厂商提供。PCN 代表道面等级号，为衡量道面起降飞机能力大小的数值，采用技术评定法时通过计算得到。ACN 代表飞机对道面造成影响的程度，相当于荷载效应，而且是最大的荷载效应。PCN 则为道面能够承受多大的飞机作用，相当于结构抵抗力。选取 ACN 信息表中最大的 ACN 和 PCN 作对比，即选取最大的荷载效应与结构抵抗力进行比较，留有一定的安全冗余度。

当 $ACN \leq PCN$ 时，即荷载效应 \leq 结构抵抗力时，飞机能在道面上正常运行；当 $ACN > PCN$ 时，即荷载效应大于结构抵抗力，表明此时已超出道面承受能力范围，飞机不能正常运行^[7]；当超过值不大时，仍然允许继续使用，但需满足表 1 中条件。若 ACN 超出 PCN 值过多，表明道面破坏比较严重，要考虑对其进行维修，以提高其结构抵抗力，即增大 PCN 的值。

表 1 超载运行条件

道面类型	超载运行条件	备注
柔性道面	$ACN \leq 1.1PCN$	年超载运行次数不超过总运行次数的 5%
刚性道面或以刚性道面为主的复合道面	$ACN \leq 1.05PCN$	年超载运行次数不超过总运行次数的 5%

2 PCN 的计算

目前军用机场多选用刚性道面形式，关于此种类型道面 PCN 的求解，根据管理规定，比较典型的途径有基于文克勒地基模型、基于弹性半无限空间体地基模型 2 种。

2.1 地基模型

2.1.1 文克勒地基模型

因水泥道面板刚度特性大幅超出了基层与土基的刚度特性^[8]。当荷载作用于道面上，面层能够较好将其传递到基层，传布面积广；因此，产生的挠度较小，支承它的基层和土基的变形也很小，一般受力不超过弹性比例极限应力，所以可以近似地认为变形是可恢复的弹性变形。

如图 1 所示，文克勒(E.Winkler)地基板模型即假定地基顶面任选一点所受的反力只与此点产生的挠度成正比，也就是可以将地基看作多个互相独立的弹簧所构成集合体，又称为 K 地基、弹簧地基^[9]。

$$q(x,y) = K\omega(x,y) \tag{1}$$

式中： $q(x,y)$ 为地基反力，MPa； $\omega(x,y)$ 为该点的挠

度，m； k 为地基反应模量，MPa/m，可采用刚性承载板实验获取，并进行修正。

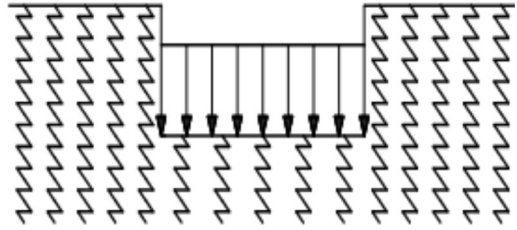


图 1 文克勒地基

薄板变形如图 2 所示。

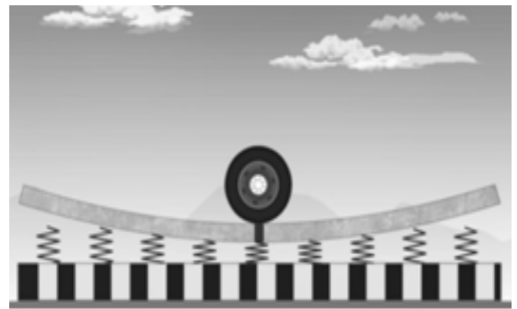


图 2 薄板变形

2.1.2 弹性半空间体地基模型

如图 3 所示，弹性半空间体地基模型将地基看成一各向同性的弹性半无限体。地基不只在荷载作用的区域内发生变形，在其之外仍有挠度，此时地基上某点及其他各点所受的反力均对该点的挠度产生不可忽视的影响^[9]，即

$$q(x,y) = f[\omega(x,y)] \tag{2}$$

式中， $q(x,y)$ 、 $\omega(x,y)$ 的含义与式(1)相同， $q(x,y)$ 两者不再是线性关系。

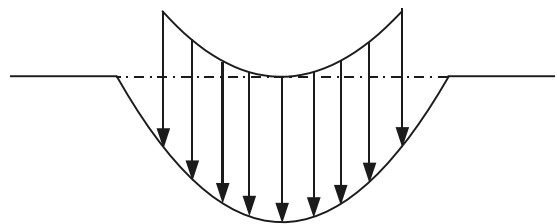


图 3 弹性半空间体地基

2.2 PCN 计算公式

对应 2 种不同的地基模型，求解 PCN 值时亦有 2 种相应的计算公式可供选择。

2.2.1 威斯特卡德中心受荷应力公式

威斯特卡德(H.M.S Westergaard)在文克勒地基模型的基础上，提出了 3 种情况下的板底最大弯拉应力公式，分别为轮载分布在板中、板边、板角处，假设道面接缝具有足够的传递轮载能力，符合板中

受荷条件。因此，选用中心受荷应力公式(法 1)，得到 σ 与 W 、 h 等的关系式如下：

$$\sigma = 0.275W/h^2(1 + \mu) \lg[E_c h^3 / Kb^4]; \quad (3)$$

$$PCN = W \times 2; \quad (4)$$

$$b = \begin{cases} \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h & a < 1.724h \\ a & a \geq 1.724h \end{cases}; \quad (5)$$

$$a = \sqrt{\frac{W}{\pi p_s}}. \quad (6)$$

式中： σ 为水泥混凝土的允许弯拉强度，MPa； W 为道面能够安全承受的推导单轮荷载，MN； h 为水泥混凝土道面厚度，m； E_c 为水泥混凝土抗折弹性模量，MPa； μ 为水泥混凝土的泊松比， $\mu=0.15$ ； K 为地基反应模量，MN/m³； a 为轮胎接地面积当量半径，m； b 为荷载作用面积当量半径，m； p_s 为标准轮胎压力， $p_s=1.25$ MPa。

荷载作用于道面上，影响的范围可能是某一不规则的形状。以车轮为中心，距离车轮越远，荷载越来越小，但总有一个边界，边界外的荷载可以忽略不计。为了简化计算，选取荷载作用明显的一个圆作为荷载作用面积当量圆， b 即为荷载作用面积当量半径，对于轮胎接地面积当量半径 a 的理解同上。因荷载通过轮胎作用到地面上，为求出荷载作用面积，将其与轮胎接地面积联系起来，修正得出 a 、 b 之间的换算如式(5)。当 a 的值大于或等于 1.724 倍的混凝土板(面层)厚度时，轮胎与地面接触面积大，近似认为荷载作用被轮胎传递得比较充分，轮胎接地影响的圆即代表了荷载作用的当量圆， $b=a$ 。

通过 a 值可计算出 b ，将轮胎荷载作用等效为均匀分布的标准轮胎压力 p_s ，即道面能够安全承受的推导单轮荷载 $W = \pi a^2 \times p_s$ ，由 W 值即可计算出 a 。所以求解 PCN 时，第一步为假设 W 值。这个假设没有明确的约束，根据工程经验假设初始值，但仍有一定规律可循。根据实际经验，通常情况下：1) 若测试机场道面为新建或使用时间不长，即可根据机场目前运行的评价机型的最大运行质量作为初始 W 值 W_1 。评价机型为有代表性的机型，一般情况下显然是对地面作用最强的即荷载效应最大的或者说信息表中 ACN 值最大的飞机，另一方面，其每年起降次数不少于机场每年总起降次数 5%。2) 若机场道面修筑已久，可以选取目前在运行的起飞次数最多的机型的最大运行质量作为初始 W 值 W_1 。其求解流程如图 4 所示。

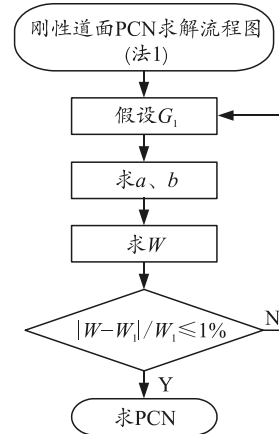


图 4 刚性道面 PCN 求解流程(法 1)

2.2.2 弹性半空间体应力公式

弹性半空间体地基模型情况下对应的(法 2)计算公式如下：

$$\sigma = 6M_0 W_p / h^2. \quad (7)$$

式中： σ 为水泥混凝土的允许弯拉强度，MPa； h 为水泥混凝土道面厚度，m； M_0 为圆形均布荷载中心单位弯矩，查表得出。同理，第 2 种方法对应的流程如图 5 所示。

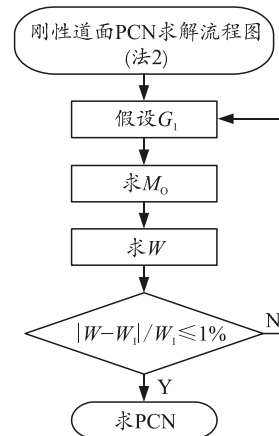


图 5 刚性道面 PCN 求解流程(法 2)

因迭代计算 W 的取值时代入参数、单位换算较多，容易出错，所以笔者借助 Visual Basic 6.0 平台开发适用的计算软件攻克此难题。

3 计算软件的编制

Visual Basic 6.0 作为一款集图形用户接口 (graphical user interface, GUI) 与快速程序开发 (rapid application development, RAD) 于一体的编程软件，帮助工程人员打通了理论应用于实际的通道。笔者编制 PCN 计算软件的主要设计思想如下：

1) 利用 Visual Basic 6.0 软件，在 EXE 工程界面新建 Label 标签控件用于定义输入数值、TextBox

文本框控件用于数据输入、data 数据控件用于数据库操作、CommandButton 命令按钮用于程序执行等，并将相应的初始属性更改为符合本软件设计的设置形式。在编写程序语言时，定义允许弯拉应力 σ (MPa)、道面板厚度 h (m)、抗折弹性模量 E_c (MPa)、地基反应模量 K (MPa/m)、水泥混凝土泊松比 μ 、轮胎压力 P (MPa)等为数值型-双精度变量^[10]。

2) 基于 PCN 计算流程，CommandButton 命令按钮程序主体采用 DO-loop 循环语言(先判断后执行)。精度设置为 1%(可根据实际需求更改为更高精度)，用变量 y 表示，定义为整型数据类型^[10]。当假设值 G_1 大于计算值 G ，继续假设时 G_1 递减 5 kg；当假设值 G_1 小于计算值 G ，继续假设时 G_1 递加 5 kg。

3) 对于法 2，计算过程中涉及到圆形均布荷载中心单位弯矩 M_0 时，必须查表进行线性插值。将中间变量 M_0 假设为 y_0 ，采用一次线性内插如下式：

$$y_0 = y_1 + (x_0 - x_1) / (x_2 - x_1) (y_2 - y_1) \quad (8)$$

其中 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_0, y_0) 分别为数据表的上界、下界、中间值。

求解 M_0 编写程序时重点在于建立 VB 与 Microsoft Access 数据库的连接。VB 中常用的数据库访问接口有 DAO、RDO、ADO 3 种，其中 ADO (activex data object) 技术对 OLEDB (object link and embedding database) 展开封装并达成了其所有功能，ADO 经由 OLEDB 可访问任意类型数据源^[11-12]，过程如图 6 所示。

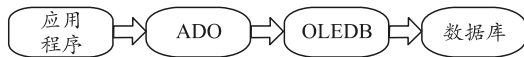


图 6 ADO 访问数据库体系

笔者使用 ADO 技术的步骤为：1) 创建新的数据源连接用以链接数据库；2) 设置相应的命令访问数据源的数据；3) 执行命令；4) 结束链接。

经设计后，法 1、法 2 对应的计算软件最终版界面如图 7 所示。



(b) 计算界面(法 1)



(c) 计算界面(法 2)

图 7 刚性道面 PCN 计算软件界面

4 应用示例及分析

4.1 应用示例

举例进行计算演示。经实测，某机场水泥混凝土跑道端部道面厚度 $h=0.32$ m；混凝土允许弯拉应力 $\sigma=2.689$ MPa，抗折弹性模量 $E_c=29\ 400$ MPa；基础综合回弹模量 $E_d=186$ MPa，地基反应模量 $K=110$ MN/m³，标准胎压为 1.25 MPa，水泥混凝土的泊松比为 0.15，计算该机场跑道的 PCN 值。

在计算软件中输入数值后，点击“开始计算”按钮，得出该条件下机场跑道 PCN 的数值法 1、法 2 计算值分别约为 52、54，如图 8、图 9 所示，即取值分别为 26、27 t。2 个软件求解出的 PCN 差别不大，法 1 更小一些，考虑安全取较小值。



(a) 封面



图 8 PCN 计算示例(法 1)



图 9 PCN 计算示例 (法 2)

4.2 PCN 值影响因素分析

收集机场道面 PCN 测试数据如表 2、3。表中混凝土 28 d 弯拉应力为 4.5 MPa。

表 2 不同影响因素下的 PCN 值 (法 1)

道面厚度 h/cm	地基反应模量 $K/(MPa/m)$			
	20	40	80	150
29	31	34	37	41
33	44	48	54	60
37	53	57	64	71
41	68	73	81	89

表 3 不同影响因素下的 PCN 值 (法 2)

道面厚度 h/cm	基础综合回弹模量 $K/(MPa/m)$			
	150	180	210	240
40	64	67	70	72
44	74	75	79	81
48	82	88	96	98
52	91	93	95	101

对测得数据展开研究，处理得到 2 种方法相应的 PCN 随影响因素变化如图 10、11。可知对于法 1:

1) K 大小相同时，PCN 随道面厚度 h 的增大而不断提高。 $K=20$ MPa/m 时，PCN 值 $h=0.41$ m 是 $h=0.29$ m 的 2.19 倍。同理， K 为 40、80、150 MPa/m 时， $h=0.41$ m 是 $h=0.29$ m 的 2.15、2.19、2.17 倍。

2) h 大小相同时，PCN 随地基反应模量 K 的增大而不断提高。 $h=0.29$ m， K 从 20 MPa/m 变化至 150 MPa/m，PCN 值增大至原来的 1.32 倍。同理， h 为 0.33、0.37、0.41 m 时，PCN 值提高至原来的 1.36、1.34、1.31 倍。同理可求出法 2 的影响变化。

其他参数不变，取道面厚度 $h=0.40$ m，基础综合回弹模量 $E_d=210$ MPa，地基反应模量 $K=40$ MN/m³，混凝土允许弯拉应力 σ 从 3.5 MPa 依次递增 0.5 MPa 变化至 6.0 MPa 时，PCN 与 σ 呈幂函数变化如图 12。

总结可得：当 h 、 K 、 E_d 、 σ 值发生变化时，PCN 值均随其增大而呈上升趋势，但机场道面厚度 h 、混凝土允许弯拉应力 σ 对 PCN 值的影响最为明显，每提升一个等级，PCN 值平均提升 20~50%。

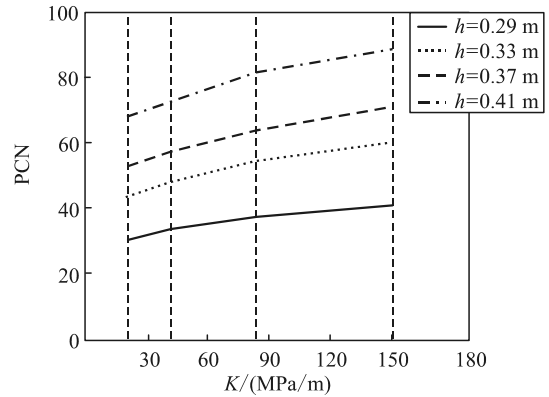


图 10 影响因素曲线 (法 1)

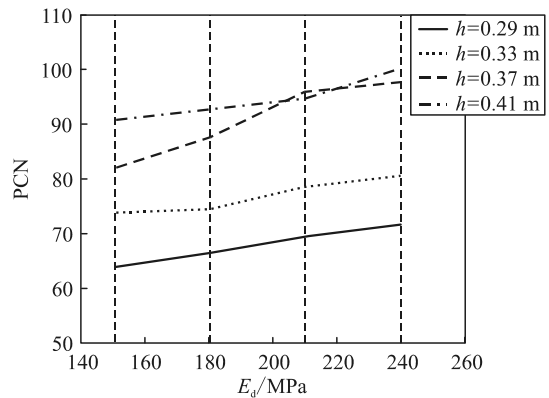


图 11 影响因素曲线 (法 2)

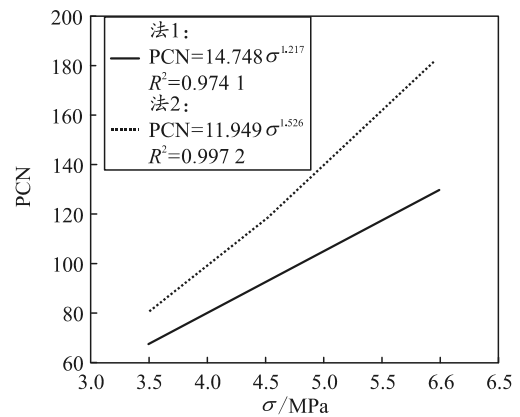


图 12 PCN 随 σ 变化曲线

4.3 2 种方法实际应用情况分析

现对 2 种模型的实际应用情况进行分析总结：

1) 文克勒地基模型未将地基产生的剪应力计入考虑范围，其假定仅基底区域产生一定的变形，其余区域保持不变，与实际情况有出入；因此，在工程中使用此模型计算 PCN 时，地基土越软弱，土体抗剪强度越低，该模型越精确。

2) 弹性半空间体地基模型把地基等效为均质、各向同性的土体，但实际地基并非为这种完全理想的状态；因此，当地基土的杂质越少，土体越均匀时，该模型越精确。

4.4 复合道面 PCN 值求解

虽然目前军用机场基本上均为水泥混凝土道面，符合法 1、法 2 面层性质要求，但后期机场道面性能下降，需要维修时，若设置沥青加铺层形成复合式道面，以上算法 1、2 均准确性不足，不再适用。现具体的解决手段如下：1) 可借助有限元软件如 ABAQUS、ANSYS 等综合求解。2) 将道面的结构厚度换算成刚性或柔性道面的当量厚度。文献[13]把复合道面分别换算成刚性、柔性道面后求解其 PCN 值如图 13，可知换算成柔性道面计算 PCN 求出结果明显高于换算为刚性道面求出结果。为留出一定的安全冗余度，应按照换算为刚性道面计算 PCN，并选取各区域最小值进行通报。文献[14]基于位移等效原则，得出折算厚度回归公式：

$$h_d = 1.667h_f^{1.4431} E_f^{0.5254} E_r^{-0.7093} \quad (9)$$

式中： h_d 为沥青混凝土加铺层折算厚度，cm； h_f 为沥青混凝土加铺层厚度，cm； E_f 为沥青混凝土加铺层弹性模量，MPa； E_r 为水泥混凝土板弹性，MPa。

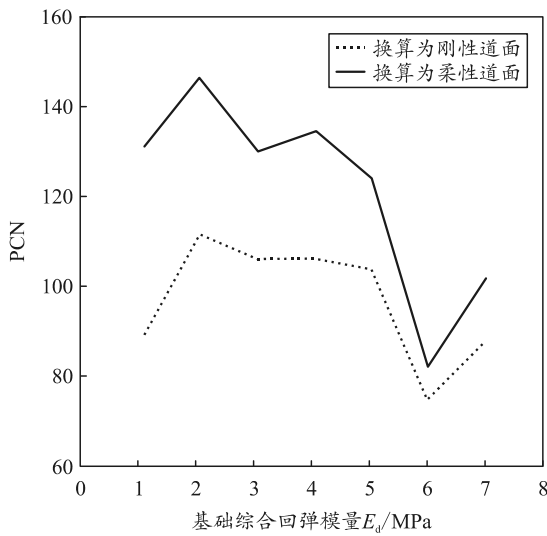


图 13 不同计算方法下的复合道面 PCN 值

5 结束语

笔者从 2 种地基模型出发编制 PCN 计算软件。经实例分析验证可知：该软件计算结果精确、节时高效；机场道面厚度 h 、混凝土允许弯拉应力 σ 对

PCN 值的影响最为明显，每提升一个等级，PCN 值平均提升 20~50%。2 种方法实际应用结果表明：1) 地基土越软，文克勒地基模型越适用；2) 土质越均匀弹性，半空间体地基模型越适用。将复合道面结构厚度换算为刚性道面当量厚度，该计算软件仍适用。

参考文献：

- [1] 李萌, 谭悦. 基于机场刚性道面 PCN 评价方法研究[J]. 上海空港, 2012, 1(5): 13-16.
- [2] 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.
- [3] ASTM International. ASTM D5340-03 Standard test method for airport pavement condition index surveys[S]. Pennsylvania: ASTM International, 2003.
- [4] 袁捷, 王宇翔. 中国机场道面管理系统分析优化理论模型[J]. 公路, 2016, 61(12): 163-170.
- [5] MORRIS C. Parametric empirical Bayes inference: theory and applications[J]. Journal of the American Statistical Association, 1983, 78(831): 47.
- [6] 刘桂松. 机场刚性道面 PCN 的参数取值与计算[C]//第四届国际道路和机场路面技术大会论文集. 中国公路学会, 2002: 611-613.
- [7] AC 150/5320-6E, Airport Pavement Design and Evaluation[S]. 2009.
- [8] 翁兴中. 机场道面设计[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2017: 103.
- [9] 黄晓明. 路基路面工程[M]. 6 版. 北京: 人民交通出版社, 2019: 376-379.
- [10] 陈惠娥, 胡安明. Visual Basic 2015 实践教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 12-18.
- [11] 马兴, 童卓, 周丽娟. 基于 VB 的 PC 机与单片机间串口通讯及程序设计[J]. 兵工自动化, 2010, 29(10): 94-96.
- [12] 杨志峰, 邹义洪, 刘科言, 等. 基于 VB 的枪械故障查询应用程序[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 94-96.
- [13] 赵忠进, 袁捷, 周正峰. 机场复合道面 PCN 计算方法分析[J]. 城市道桥与防洪, 2006(6): 19-22, 195.
- [14] 张献民, 陈新春, 董倩, 等. 基于位移等效的复合道面 PCN 计算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(4): 532-538.