

基于模糊数学的机场道面使用性能评价方法

田甜¹, 白二雷², 高志刚²

(1. 中国航空港第九工程总队, 四川 成都 611431; 2. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 从影响机场道面使用情况的两个主要因素道面承载力和道面不平整度出发, 分别建立了基于通行-覆盖率的道面承载力数学模型和基于功率谱密度的道面不平整度数学模型, 随后提出了基于模糊数学的机场道面使用性能综合评价方法, 对机场道面使用性能进行评价。最后, 选取了国内3个机场作为评价对象, 通过实际数据进行仿真分析, 得到的评价结果与道面当前使用情况吻合, 证明该方法可以对机场道面使用情况进行有效的数学描述, 从而指导机场及时掌握当前道面的使用情况, 为道面的维修决策提供依据。

关键词 机场道面; 通行-覆盖率; 功率谱密度; 模糊数学; 综合评价

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.004

中图分类号 V351.11; U416.216 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0018-04

近年来, 国内外的学者都针对机场道面的评价展开了研究。国外对机场道面的评价研究开始于20世纪70年代, 其中美国陆军建筑工程研究所提出了PCI指标(Pavement Condition Index)和一整套调整、计算、分析和评价方法^[1], 随后美国联邦航空局(FAA)在民用机场道面管理方面陆续发表了一系列用于指导道面测试评价的技术文件^[2-4]。1995年, 日本运输省航空局颁布了《空港土木设施管理规程》作为道面评价管理的技术标准。国内道面评价技术研究起步较晚, 同济大学长期以来处于领先地位。目前的研究主要基于人为观测, 并且以统计数据为基础, 因此含有一些人为主观因素, 缺乏客观论证。本文从模糊数学的角度出发, 选取2种典型的影响机场道面使用的因素进行数学描述, 构建出一种基于模糊数学的综合评价方法。

1 道面影响因素的选取及数学描述

道面评价参考的因素很多, 包括道面损坏程度、道面抗滑性能、道面平整程度、道面承载力、道面排水能力等。本文选取了道面承载力和道面平整度这2个性能作为评价的参考因素。

1.1 基于通行覆盖率道面承载力评价模型

在机场修建时, 设计方往往会根据机场的待飞行机种以及机场寿命对道面厚度进行设计, 由此可见机场道面厚度直接与飞机荷载在道面上最大应力点的作用(覆盖)次数有关。飞机机轮在道面最大应力点处通过一次称之为一次覆盖。因此, 真正影响结构厚度的是飞机覆盖次数。一般采用通行-覆盖率(Pass-to-Coverage Ratio, P/C)来综合反应^[5]。

1.1.1 飞机通行-覆盖率计算模型

早期空军和民航的道面实际规范都假定机轮轮迹在通行宽度内均匀分布, 但是近年来根据大量调查和分析表明, 飞机轮迹应该近似服从正态分布更为合理。

单轮飞机的通行覆盖率为:

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{C_x W_t} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ6011; 2011JM6014)

作者简介: 田甜(1984-), 女, 湖北北京山人, 硕士, 主要从事机场施工研究. E-mail: helove144@sohu.com

$$C_x = f(x) \Big|_{x=0} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2} \Big|_{x=0} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

式中: $\frac{P}{C}$ 是单轮飞机通行 - 覆盖率; C_x 为正态分布曲线上的最大概率密度; W_i 为轮胎接触面积的宽度; σ_x 为正态分布曲线标准差。

双轮飞机的通行覆盖率由下式计算确定, 其中 s_i 为双轮间距:

$$C_{xc} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-s_i}{\sigma_x}\right)^2} \right] \quad (3)$$

1.1.2 承载力评价模型

借鉴 Miner 原理建立承载力的评价模型, 这里进行实现, 具体步骤如下: 每一个机场都有自己的设计使用寿命, 采用《军用机场水泥混凝土道面设计规范》中的疲劳方程计算其最大可允许的覆盖次数, 即:

$$\sigma_p = \sigma_s (0.944 - 0.077 \log N_e) \quad (4)$$

式中 σ_p 为飞机在临界荷位处板底最大弯拉应力, σ_s 为道面水泥混凝土弯拉强度, N_e 为最大允许覆盖次数。根据实际的运行年数以及飞机种类算出当前机场道面的覆盖次数 N_i , N_i 与 N_e 的比值作为疲劳损伤因子, 对疲劳损伤因子线性叠加得到累积疲劳损伤因子 CDF (Cumulative Damage Factor), 根据 CDF 是否接近于 1 来判定道面是否达到疲劳损坏状态。

1.2 道面平整度评价模型

道面平整度是影响机场道面的重要因素之一, 本文采用功率谱特性对道面平整度进行衡量。假定飞机轮胎与道面点接触, 道面不平度对飞机结构的激励是一个矢量随机过程。在目前技术水平下, 通常对道面沿纵向作一维测量。大量测量数据表明, 道面不平度 $H(S)$ 是具有零均值的一维局部均匀各态历经的高斯随机场, 可用功率谱密度描述^[6]。

在一维道面中, 假设飞机在道面上以常速 u 滑行时, 作用在前轮和主轮上的随机激励 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 为零均值各态历经平稳随机过程, 则自谱密度和互谱密度分别为:

$$G_{x_1}(n) = G_{x_2}(n) = \frac{1}{u} G_H \left(\frac{n}{u} \right) \quad (5)$$

$$G_{x_1 x_2}(n) = G_{x_2 x_1}^*(n) = \frac{1}{u} G_H \left(\frac{n}{u} \right) \exp \left(i \frac{nl}{u} \right) \quad (6)$$

最后将空间频率功率谱密度转化为道面不平度位移功率谱密度如下:

$$G_x(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma_{x-\Delta n}^2}{\Delta n} = \frac{1}{u} G_x(n) \quad (7)$$

本文将采用功率谱密度的均值作为评价标准。式中: $G_x(f)$ 为激励功率谱密度; $\sigma_{x-\Delta n}^2$ 为道面谱在频带 Δn 内所包含的“能量”; u 为飞机滑行速度; $G_x(n)$ 为空间功率谱密度; f 为时间激励频率; n 为空间频率。

2 基于模糊数学的综合评价模型

从第一节分析可以看出承载力和不平度是衡量道面使用情况的重要参数, 但是模型与结论之间的关系并不明确, 本文利用模糊数学的原理^[7], 建立一种综合评价模型, 对机场道面使用情况进行评价。

首先确定评判对象的因素集 $X = (X_1, X_2)$, 其中 X_1 为道面累计疲劳损伤因子, X_2 为道面不平度功率谱密度均值。其次给出道面累计疲劳因子的隶属度函数:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & 0 \leq x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (8)$$

然后考虑不平度的隶属函数, 通过分析表明道面最不平整的情况为道面最大凹凸达到 0.2 m, 这时道面将无法使用。转换成功率谱密度均值最大为 -5.5 dB (此时飞机滑行速度为 48 km/h)。而当道面十分平整, 没有任何凹凸的极限情况下功率谱密度均值为 ∞ 。这样设计隶属度函数为一个分数函数:

$$u(x) = -5.5/x, \quad -\infty < x < -5.5 \quad (9)$$

最后给出权重分配矩阵。考虑不平度因素影响道面承载力要更重要一些, 所以选取承载力因素占 40%

而不平整因素占 60%,因此权重分配矩阵为 $A = (0.4, 0.6)$ 。最后根据实测数据以及隶属度函数构建模糊关系矩阵 R ,最终按下式得出评价结果:

$$B = A \circ R \quad (10)$$

3 算例

本文以国内某 3 个机场的道面数据为依据进行模糊综合评价,机场使用时间都是 10 年,则 3 个机场的累计疲劳因子见表 1。

表 1 机场累计疲劳因子
Tab.1 Cumulative Damage Factor of airport

	飞机型号	通行覆盖次数	允许覆盖次数	CDF_i	累计疲劳损伤因子 CDF
机场一	B747-400	1 598	6 579	0.243	0.304 7
	B737-300	7 751	1 061 632	0.007 3	
	A310-300	4 437	787 234	0.005 6	
	MD-82	3 508	71 968	0.048 8	
机场二	B747-400	1 598	6 579	0.243	0.327 9
	B737-300	7 751	1 061 632	0.007 3	
	B330-300	5 525	238 025	0.023 2	
	A310-300	4 437	787 234	0.005 6	
	A321-100	3 509	71 968	0.048 8	
机场三	B757-300	3 541	8 694	0.407 3	0.505 2
	B330-300	5 525	238 025	0.023 2	
	A320-300	4 437	787 234	0.005 6	
	B737-300	7 751	1 061 632	0.007 3	
	A321-200	5 284	85 463	0.061 8	

下面通过 3 个机场的不平整度数据求得位移功率谱密度均值:机场一为 $-8.347 7$ dB,机场二为 $-6.382 9$ dB,机场三为 $-5.781 6$ dB。根据第 2 节的模糊综合评价方法,首先根据隶属度函数确定模糊关系矩阵为 $R = \begin{bmatrix} 0.307 4 & 0.327 9 & 0.505 2 \\ 0.658 9 & 0.861 7 & 0.951 3 \end{bmatrix}$,评价结果为 $B = A \circ R = (0.4, 0.6) \circ \begin{bmatrix} 0.307 4 & 0.327 9 & 0.505 2 \\ 0.658 9 & 0.861 7 & 0.951 3 \end{bmatrix} = (0.518 3 \ 0.648 2 \ 0.772 9)$ 。对 B 进行归一化得到 $B = (0.267 2 \ 0.334 2 \ 0.398 5)$ 。根据前面的分析,百分比越小表示道面性能越好,可见机场一的道面性能最好,其次是机场二的道面,机场三的道面情况较差。

4 结论

本文对机场的评价方法进行研究,提出了一种基于道面承载力和道面不平整度的模糊数学综合评价模型,该模型对影响道面使用情况的 2 个主要因素道面承载力和道面不平整度进行数学描述,将定性的评价因素转化为定量的表示,比通常的评价方法更客观。通过仿真分析,证明评价结果与实际道面使用情况吻合,可以较好地反应出道面使用的真实情况,能够指导机场对道面进行维护。本文只选取了 2 种典型的影响机场道面使用的因素,并没对所有因素进行考虑,下一步研究应该针对更多的影响因素寻找合适的数学描述,建立更为完整的评价模型。

参考文献:

- [1] 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 Model of airport pavement performance prediction [D]. Shanghai: Tongji university, 2009. (in Chinese)
- [2] Yue Xianghua, Liu Zhiren. Research and development of GIS airport pavement management system based on mapX[C]// ICICTA 09 Second international conference on intelligent computation technology and automation. [S.l.]: ICICTA press, 2009: 407-409.

- [3] 暨育雄, 阚胜男, 孙立军, 等. 基于 GIS 的机场道面管理系统[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 70-74.
JI Yuxiong, KAN Shengnan, SUN Lijun, et al. Airport pavement management system based on GIS [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2004, 4(1): 70-74. (in Chinese)
- [4] 凌建明, 郑悦锋, 金维明. 机场道面评价体系研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 29-33.
LING Jianming, ZHENG Yuefeng, JIN Weiming. On airport pavement evaluation system [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2001, 1(1): 29-33. (in Chinese)
- [5] 姚炳卿. 机场道面通行覆盖率的计算原理[J]. 机场工程, 2008, 4: 1-12.
YAO Bingqing. The theory of pass-to-coverage ratio of airport pavement [J]. Airdrome engineering, 2008, 4: 1-12. (in Chinese)
- [6] 王鹏辉, 许金余, 李为民, 等. 机场道面不平度功率谱特性研究[J]. 中外公路, 2008, 28(3): 50-53.
WANG Penghui, XU Jinyu, LI Weimin, et al. The research of accidental degree power spectral density of airport pavement [J]. China and foreign countries road, 2008, 28(3): 50-53. (in Chinese)
- [7] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 132-137.
LIANG Baosong, CAO Dianli. Fuzzy mathematics and application [M]. Beijing: Science press, 2007: 132-137. (in Chinese)
- [8] Cooper J A. The application of fuzzy mathematics in safety analysis [J]. IEEE transactions on power delivery, 1996, 18(3): 1002-1006.
- [9] Lu Sun. Developing spectrum-based models for international roughness index and present serviceability index [J]. Journal of transportation engineering, 2001, 127(6): 463-470.
- [10] 暨育雄, 阚胜男, 冯奇, 等. 机场道面管理的评价模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 731-735.
JI Yuxiong, KAN Shengnan, FENG Qi, et al. Evaluation models of airport pavement management [J]. Journal of tongji university: natural science, 2004, 32(6): 731-735. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

The Research of the Airport Pavement Evaluation Method Based on Fuzzy Mathematics

TIAN tian¹, BAI Er-lei², GAO Zhi-gang²

(1. No. 9 Engineering Corps of China Airport, Chengdu 611431, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In this paper, based on pass-to-coverage ratio and power spectral density, which are the major factors of the airport pavement, we separately construct the carrying capacity mathematics model of airport pavement and the accidental degree mathematics model of the airport pavement. Then based on fuzzy mathematics, we propose the evaluation method of the airport pavement. Then, this thesis selects three domestic airports as the evaluation samples, makes imitation analyses based on actual data, and achieves identical results with the current operation situation of the plane. Also, the evaluation method is an effective mathematics description of the airport pavement condition and gives clear evaluation result according to the computer simulation. The method above gives suggestions to the airport pavement management.

Key words: airport pavement; pass-to-coverage ratio; power spectral density; fuzzy mathematics; comprehensive evaluation