

文章编号:1671-1637(2014)04-0001-06

基于累积损伤的机场道面剩余寿命预测模型

蔡良才¹,王海服¹,张罗利^{1,2},王鹏飞²

(1. 空军工程大学 机场建筑工程系,陕西 西安 710038; 2. 空军后勤部机场营房部,北京 100720)

摘要:通过统计分析道面轮迹和道面板荷载应力横向分布规律,得出了飞机起落架道面通行覆盖次数的计算方法。在道面板中部荷载应力回归公式的基础上,建立了道面板横向应力分布函数。选取 NCHRP1-26 方程作为疲劳方程,通过对 A 机场过去 13 年飞机起飞架次的历史数据进行分析,得出未来 7 年 2 种机型飞机的起飞架次,利用覆盖作用曲线与应力分布函数提出了机场道面累积损伤量的计算方法,并进行实例验证。分析结果表明:2 年后机场道面的最大累积损伤趋近于 1,即在不采取任何维修措施的情况下,A 机场剩余使用寿命为 2 年,与实际运营状况相符。可见,建立的模型有效。

关键词:机场工程;剩余寿命;累积损伤;轮迹分布;荷载应力;预测模型

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Prediction model of remaining life for airport pavement based on cumulative damage

CAI Liang-cai¹, WANG Hai-fu¹, ZHANG Luo-li^{1,2}, WANG Peng-fei²

(1. Department of Airport and Architecture Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China;

2. Airport and Construction Section of Air Force Logistics Department, Beijing 100720, China)

Abstract: Through the statistical analysis on the transverse distribution rules of wheel trace and pavement load stress, the calculation method of pavement pass-to-coverage for landing gear was obtained. Based on the regression formula of load stress on the middle part of pavement slab, the lateral stress distribution function of pavement slab was established. NCHRP1-26 function was chosen as fatigue function, the takeoff data of the 2 types of aircrafts in the next 7 years were calculated based on the historical takeoff data of airport A in the past 13 years, the calculation method of cumulative damage for airport pavement was set up according to the coverage curve function and the stress distribution function, and example verification was carried out. Analysis result shows that, the maximum cumulative damage of pavement tends to be 1 after 2 years, which means the remaining life of airport pavement is 2 years without any maintenance measure. It is consistent with the actual operating condition of airport A, so the established model is effective. 3 tabs, 3 figs, 16 refs.

Key words: airport engineering; remaining life; cumulative damage; wheel tracking distribution; load stress; prediction model

Author resume: CAI Liang-cai (1960-), male, professor, PhD, +86-29-84787008, liangcai07@126.com.

收稿日期:2014-03-14

基金项目:军队科研项目(ZHY12J118)

作者简介:蔡良才(1960-),男,浙江宁波人,空军工程大学教授,工学博士,从事机场规划与设计研究。

0 引 言

目前,国内外在机场道面剩余寿命预估方面尚无统一的计算模型。国际民航组织(ICAO)最早提出用逆转设计的方法来预估道面剩余寿命,同济大学凌建明等根据中国民用机场道面设计方法,参照ICAO的逆转思维建立了中国民用机场道面剩余寿命预估模型^[1]。但由于中国早期的机场道面设计方法中采用的是“设计飞机思想”,即在进行道面设计时要将不同类型飞机对道面的作用次数按照损伤等效的原则换算为设计飞机的疲劳作用次数,掩盖了不同飞机作用在道面横断面上产生不同损伤分布的缺陷,进而使得采用不同的设计飞机,逆算得到的剩余寿命不同^[2]。

王维等根据现行民用机场道面设计规范和Miner定律对机场刚性道面剩余使用寿命计算方法进行了改进,并根据国内外常用的机场道面性能模型研究状况和道面管理系统的特点,建立了机场道面使用性能预估模型^[3-4];Yeo等通过道面加速试验研究了道面剩余疲劳寿命,依据试验结果对道面疲劳寿命进行了预测^[5];Zhang等在混凝土道面设计规范的基础上,通过实测数据结合ICAO方法计算了混凝土道面剩余寿命,并应用于道面性能预测和道面管理^[6];王观虎等根据道面的使用性能特点,确定道面破损度为道面使用寿命的控制指标,采用灰色系统理论建立了道面使用寿命灰色预测模型^[7];王振辉探讨了水泥混凝土的疲劳方程,结合飞机覆盖作用分布函数和应力分布函数,利用线性累积损伤模型建立了机场刚性道面在混合交通作用下的累积损伤优化模型,并通过实例验证了采用NCHRP1-26疲劳方程的优化模型是可靠的^[8];吴爱红等提出建立基于累积损伤的道面设计方法,用累积损伤因子替代了“设计飞机思想”在交通量换算中的作用,根据国内外对飞机在道面横向宽度内近似服从正态分布的统计分析结果,有效弥补了传统设计方法的不足^[9-13];Cai等采用累积损伤因子的概念,考虑荷载疲劳应力和温度疲劳应力的综合疲劳方程,计算了单轴单轮与单轴双轮轴载的覆盖通行率,利用累计损伤因子替代标准轴载在交通量换算中的作用,提出了直接计算各级轴载对路面结构总的累积疲劳损伤方法^[14-15];和鹏远分析了道面剩余使用寿命及其影响因素,提出了评价期机型的年均运行次数和有限元模拟分析中轮载面积的等效转换方法,并研究了道面剩余寿命对厚度和混凝土板弯

拉强度的敏感性^[16]。

借鉴前人研究成果,本文建立了基于累积疲劳损伤的机场道面剩余寿命预测模型。根据道面结构参数计算道面横向应力荷载分布,确定使用机型允许作用次数,并结合使用机型横向轮迹分布,计算道面累积损伤;根据机场飞行历史资料,采用趋势外推法预测未来航空业务量,在此基础上,进行机场道面剩余寿命预估。

1 道面通行覆盖次数的确定

建立基于累积损伤的道面剩余寿命预估模型,首先必须计算已消耗的道面累积损伤量,即机场道面荷载覆盖作用次数。而道面荷载覆盖作用次数很大程度上取决于道面横向轮迹的分布规律,因此,要计算荷载覆盖作用次数,首先必须对道面横向轮迹的分布规律进行深入透彻的研究。

当单轮飞机左、右2个主起落架机轮的距离大于通行宽度时,2个机轮轮迹的正态分布曲线互不重叠。此时,飞机覆盖作用曲线与轮迹分布曲线基本一致,函数表达式为

$$F_1(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x+T_w/2}{\sigma_x})^2} & x < 0 \\ \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-T_w/2}{\sigma_x})^2} & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_1(x)$ 为轮迹不重叠单轮飞机覆盖作用曲线; x 为跑道宽度方向道面板上点与跑道中线的距离,中线左侧为负,右侧为正; σ_x 为轮迹沿 x 方向的标准差; T_w 为主起落架间距。

当单轮飞机左右2个主起落架机轮的距离小于通行宽度时,2个机轮轮迹的正态分布曲线出现重叠,覆盖作用曲线则是轮迹分布曲线的叠加,覆盖作用曲线函数为

$$F_2(x) = f_1(x) + f_2(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \left[e^{-\frac{1}{2}(\frac{x+T_w/2}{\sigma_x})^2} + e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-T_w/2}{\sigma_x})^2} \right] \quad (2)$$

式中: $F_2(x)$ 为轮迹重叠单轮飞机覆盖作用曲线; $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 分别为1个主起落架左、右轮迹分布曲线。

对于双轮和多轮飞机,主起落架间距一般大于通行宽度距离,1个主起落架上机轮的轮迹与另1个主起落架上机轮的轮迹一般不会发生重叠,因此,飞机对道面板的覆盖作用曲线只需将1个主起落架上机轮的轮迹进行叠加。此时,有

$$\begin{cases} f_3(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w+S_1)/2}{\sigma_x} \right]^2} \\ f_4(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w-S_1)/2}{\sigma_x} \right]^2} \end{cases} \quad (3)$$

主起落架的覆盖作用曲线函数 $F_3(x)$ 为

$$F_3(x) = f_3(x) + f_4(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w+S_1)/2}{\sigma_x} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w-S_1)/2}{\sigma_x} \right]^2} \right\} \quad (4)$$

式中: $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 分别为多轮飞机 1 个主起落架左、右机轮的轮迹分布曲线; S_1 为轮距。

对于串列(多轴)单轮、串列(多轴)多轮的覆盖作用曲线可以按照单轮、多轮的覆盖作用曲线确定方法。

对于特殊的起落架构型,如 DC-10、A340-600、B747、A380、C5 等,进行飞机的覆盖作用曲线叠加时,以不改变主起落架的间距、轴距和轮距为原则进行主起落架等效参见文献[8]。本文以 C5 飞机为例,主起落架等效时,保持主起落架的间距、轴距和轮距不变,C5 飞机主起落架构型见图 1, S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 均为轮距,数字 1~12 为机轮编号。C5 飞机的主起落架覆盖作用曲线见图 2, y 为覆盖次数。

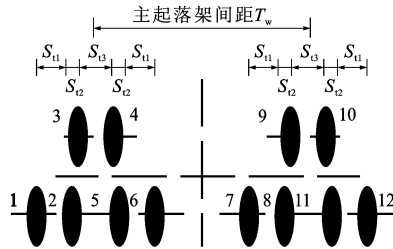


图1 C5 飞机主起落架构型

Fig. 1 Main landing gear for C5

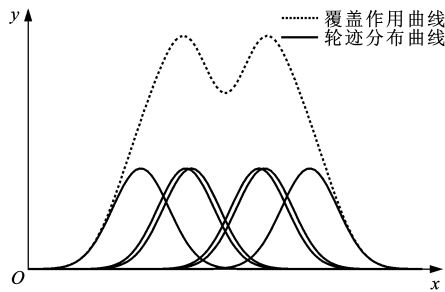


图2 C5 主起落架覆盖作用曲线

Fig. 2 Coverage curves of main landing gear for C5

通过分析 C5 飞机一个主起落架上所有机轮的轮迹正态分布函数,可得其覆盖作用曲线函数 $F_4(x)$ 为

$$F_4(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+S_{11}+S_{12}+(T_w+S_{13})/2}{\sigma_x} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+S_{12}+(T_w+S_{13})/2}{\sigma_x} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w+S_{13})/2}{\sigma_x} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w-S_{13})/2}{\sigma_x} \right]^2} + e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w-S_{13})/2-S_{12}}{\sigma_x} \right]^2} + \right.$$

$$\left. e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{x+(T_w-S_{13})/2-S_{11}-S_{12}}{\sigma_x} \right]^2} \right\} \quad (5)$$

2 道面允许作用次数确定

计算道面允许作用次数,即道面的疲劳寿命,需通过计算道面荷载应力,运用选定的疲劳方程确定。

2.1 疲劳方程的选取

通过对国内外疲劳方程的对比研究可以看出,美国 NCHRP1-26 疲劳方程采用有限元法计算应力,充分融合室外足尺试验和室内试验成果以及路面和机场道面的理论研究成果,与实际状态更加接近,且与现在通用的有限元分析相统一。在同济大学的《大型军用运输机场场道工程建设新技术研究与应用》研究报告中的道面设计方法建议采用 NCHRP1-26 疲劳方程。本文的荷载应力简化公式来源于通用有限元软件模拟得到计算应力的统计分析,能较好地适应 NCHRP1-26 疲劳方程,因此,在后面的剩余寿命预测时也采用该疲劳方程,即

$$\lg(N) = \begin{cases} -1.7136e + 4.284 & e > 1.25 \\ 2.8127e^{-1.2214} & e \leq 1.25 \end{cases} \quad (6)$$

$$e = \frac{\sigma}{f} \quad (7)$$

式中: N 为 50% 道面板开裂时的覆盖次数,即道面板疲劳寿命; e 为应力比; σ 为由 ILLI-SLAB 有限元程序计算得到的板边最大应力; f 为道面设计强度。

2.2 道面板荷载应力分布函数确定

根据疲劳方程计算道面允许作用次数的关键一步是计算飞机荷载作用下道面结构响应,水泥混凝土道面是多层结构,道面板被接缝划分为有限尺寸的矩形板。参考文献[8],利用目前常用的水泥混凝土板力学分析方法即有限元法建立了多层弹性地基上道面板的单板三维有限元模型,以道面规范建议值作为计算参数,主要计算了 3 种不同起落架构型飞机在典型道面结构上的荷载应力,选用 64 种道面结构形式进行了横向和纵向板边中部的单轮、双轮和双轴双轮荷载应力计算。通过分析研究荷载应力与道面结构各层参数之间的关系,得出道面板中部荷载应力回归公式为

$$\sigma_0 = ak_1k_2Ph^{-2} \left(\frac{l}{R} \right)^b \left(\frac{u}{R} \right)^c \left(\frac{v}{R} \right)^d \quad (8)$$

$$l = 0.537h \left(\frac{E_c}{E_t} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中: σ_0 为道面板中部荷载应力回归值; a 、 b 、 c 和 d 为应力回归系数; P 为 1 个主起落架的质量; l 为混凝土板的相对刚度半径; R 为荷载当量圆半径; u 为

主起落架中的主距; v 为主起落架中的主轴距; k_1 为试验验证后的综合修正系数; k_2 为考虑接缝传荷能力的应力折减系数; h 为水泥混凝土板厚度; E_c 为水泥混凝土的弹性回弹模量; E_t 为基层顶面的当量回弹模量。

由于不同机型作用于道面的荷载当量圆半径及起落架构型的差异,要计算不同飞机作用下的道面基层顶面当量回弹模量,需对反算得出的基层顶面回弹模量 E 进行修正,修正式为

$$E_t = kE \quad (10)$$

$$k = 10^{-2.64} k_R k_w \left(\frac{hE_c}{E} \right)^{0.8} \quad (11)$$

$$k_R = 1.41R^{-0.29} \quad (12)$$

式中: k 为模量增大系数; k_R 为荷载当量圆半径对应的修正系数; k_w 为轮距 u 与轴距 v 对应的修正系数。

通过分析荷载作用位置及道面板尺寸对道面结构荷载应力的影响,得出机场道面荷载应力是以板宽 B 为周期的分段函数,见图 3。机场道面横向位置 x 处荷载应力 $\sigma_3(x)$ 为

$$\sigma_3(x) = \begin{cases} \sigma_Z - \frac{(\sigma_Z - \sigma_H)}{0.15B}(|x| - nB) & 0 \leq |x| - nB \leq 0.15B \\ \sigma_H & 0.15B < |x| - nB \leq 0.85B \\ \sigma_H + \frac{(\sigma_Z - \sigma_H)}{0.15B}(|x| - nB - 0.85B) & 0.85B < |x| - nB \leq B \end{cases} \quad (13)$$

式中: n 为从跑道中线开始, x 所在板的整板数; σ_H 、 σ_Z 分别为根据式(8)计算得到的横向、纵向板边中部应力。

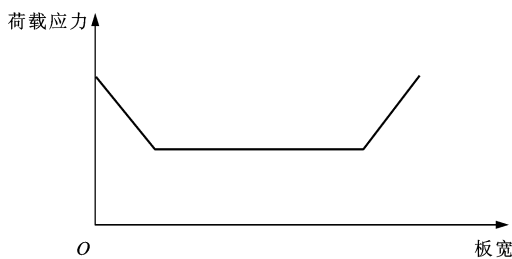


图 3 道面荷载应力

Fig. 3 Pavement load stress

2.3 道面允许作用次数确定

第 i 种飞机在道面板横向位置 x 处作用的荷载应力函数式可表示为 $\sigma_{3i}(x)$,显然, $\sigma_{3i}(x)$ 是周期为道面板宽度 B 的周期函数,根据道面的设计强度 f 计算应力比 e 与疲劳方程(6),得第 i 种飞机作用于道面板上时 x 处的疲劳寿命 $N_i(x)$ 为

$$N_i(x) = \begin{cases} 10^{-1.713} 6e^{4.284} & e > 1.25 \\ 10^{2.812} 7e^{-1.221} & e \leq 1.25 \end{cases} \quad (14)$$

此时,应力比的取值简化为

$$e = \frac{\sigma_{3i}(x)}{f} \quad (15)$$

3 道面剩余寿命计算模型

设第 i 种飞机在道面上的覆盖作用曲线函数式为 $F_i(x)$,则第 i 种飞机作用于道面板上的损伤曲线函数 $D_i(x)$ 可以表示为

$$D_i(x) = \frac{F_i(x)}{N_i(x)} \quad (16)$$

第 i 种飞机在道面板上累积作用次数为 N_{1i} 时累积产生的损伤量 $C_i(x)$ 为

$$C_i(x) = N_{1i} D_i(x) = \frac{N_{1i} F_i(x)}{N_i(x)} \quad (17)$$

跑道上 m 种飞机在道面上产生的累积损伤量为

$$\sum_{i=1}^m C_i(x) = \sum_{i=1}^m \frac{N_{1i} F_i(x)}{N_i(x)} \quad (18)$$

基于累积损伤的道面交通量作用下的道面设计可以看作道面通行宽度 $L(0 \leq x \leq L)$ 范围内的优化模型为

$$\max \sum_{i=1}^m C_i(x) = \sum_{i=1}^m \frac{N_{1i} F_i(x)}{N_i(x)} \quad (19)$$

通过式(18)可计算得到在道面横向位置 x_d 处累积损伤量最大,且可得出最大累积损伤量 C_{\max} ,假设第 i 种使用飞机的未来某年运行架次为 N_{2i} ,对于预测年内的飞行架次,可采用趋势外推法进行预测得到,则道面剩余寿命 t 与 C_{\max} 的关系为

$$1 - C_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{F_i(x_d) \sum_{n_1=1}^t N_{2i}}{N_i(x_d)} + \epsilon \quad (20)$$

式中: n_1 为预测年限; ϵ 为任意小的正数。

4 计算结果分析

某机场主要使用 I、II、III 三种机型,其对应的起飞轮迹概率曲线函数分别为

$$f_{I-1}(x) = \frac{1}{0.5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+1.3}{0.5} \right)^2} \quad (21)$$

$$f_{I-2}(x) = \frac{1}{0.5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-1.3}{0.5} \right)^2} \quad (22)$$

$$f_{II-1}(x) = f_{III-1}(x) = \frac{1}{0.48\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x+1.9}{0.48} \right)^2} \quad (23)$$

$$f_{II-2}(x) = f_{III-2}(x) = \frac{1}{0.48\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-1.9}{0.48} \right)^2} \quad (24)$$

式中: $f_{I-1}(x)$ 、 $f_{I-2}(x)$ 分别为 I 型飞机起落架左、右两轮的轮迹分布; $f_{II-1}(x)$ 、 $f_{II-2}(x)$ 分别为 II 型飞机起落架左、右两轮的轮迹分布函数; $f_{III-1}(x)$ 、

$f_{\text{III}-2}(x)$ 分别为Ⅲ型飞机起落架左、右两轮的轮迹分布函数。

使用飞机的起飞轮迹曲线按照起落架等效转化原则后,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ机型飞机对应的覆盖作用分布概率曲线函数表达式分别为

$$F_{\text{I}}(x) = f_{\text{I}-1}(x) + f_{\text{I}-2}(x) = \frac{1}{0.5\sqrt{2\pi}} \cdot \left[e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-1.3}{0.5})^2} + e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-1.3}{0.5})^2} \right] \quad (25)$$

$$F_{\text{II}}(x) = F_{\text{III}}(x) = f_{\text{II}-1}(x) + f_{\text{II}-2}(x) = \frac{1}{0.48\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-1.9}{0.48})^2} + e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-1.9}{0.48})^2} \right] \quad (26)$$

式中: $F_{\text{I}}(x)$ 、 $F_{\text{II}}(x)$ 、 $F_{\text{III}}(x)$ 分别为机型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的覆盖作用分布概率曲线函数。

通过道面结构参数测试及反算,得出某机场道面基层顶面回弹模量 E 为 122 MPa,水泥混凝土弯拉弹性模量 E_c 为 34 465.6 MPa,板厚度为 25 cm。

根据式(10)、(11)可得:机型Ⅰ作用下的基层顶面当量回弹模量为 352.11 MPa;机型Ⅱ作用下的基层顶面当量回弹模量为 334.87 MPa;机型Ⅲ作用下的基层顶面当量回弹模量为 324.47 MPa。

根据荷载应力回归公式,横向接缝时的 k_2 取 0.77,纵向接缝时的 k_2 取 0.87,可以得到Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ机型飞机的计算荷载应力见表 1。

表 1 荷载应力计算结果

Tab. 1 Calculation values of load stresses

机型	$\sigma_{\text{H}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{Z}}/\text{MPa}$
Ⅰ	1.85	2.14
Ⅱ	3.01	3.47
Ⅲ	3.71	4.27

由于机型Ⅰ的荷载应力小于 $0.5f$,认为Ⅰ机型飞机作用道面不产生累积损伤,则根据式(13),Ⅱ、Ⅲ机型飞机的荷载应力函数 $\sigma_{\text{II}}(x)$ 、 $\sigma_{\text{III}}(x)$ 分别为

$$\sigma_{\text{II}}(x) = \begin{cases} 3.47 - 0.51(x-nB) & 0 \leq x-nB \leq 0.15B \\ 3.01 & 0.15B < x-nB \leq 0.85B \\ 0.40 + 0.51(x-nB) & 0.85B < x-nB \leq B \end{cases} \quad (27)$$

$$\sigma_{\text{III}}(x) = \begin{cases} 4.27 - 0.62(x-nB) & 0 \leq x-nB \leq 0.15B \\ 3.71 & 0.15B < x-nB \leq 0.85B \\ 0.54 + 0.62(x-nB) & 0.85B < x-nB \leq B \end{cases} \quad (28)$$

将应力分布函数代入式(14)得到Ⅱ、Ⅲ机型飞机的作用在道面板上横向各点的疲劳寿命,进而可求得Ⅱ、Ⅲ型飞机的损伤函数,设道面设计基准期内Ⅱ、Ⅲ机型飞机的起飞架次分别为 N_{II} 和 N_{III} 。根据资料统计,A 机场已使用整 13 年,其中各种机型的

历史年份起飞架次见表 2。

表 2 十三年的飞机起飞数据

Tab. 2 Aircraft takeoff data in 13 years 架次

年份	机型Ⅰ	机型Ⅱ	机型Ⅲ
2001	1 000	800	600
2002	1 100	600	600
2003	1 200	600	800
2004	1 250	750	900
2005	1 400	900	700
2006	1 000	950	650
2007	1 100	900	1 200
2008	1 500	1 200	1 300
2009	1 470	1 300	1 200
2010	1 520	1 800	1 600
2011	1 580	1 560	1 507
2012	1 610	1 665	1 607
2013	1 590	1 771	1 707

通过线性累积可得到这 2 种飞机作用于道面的累积损伤,应用 MATLAB 优化最大化函数求解最大损伤位置 x 为 1.9 m,最大累积损伤量 C_{max} 为 0.756。

采用趋势外推法对飞机起飞运行架次历史数据进行分析,得出未来 7 年 2 种机型的起飞架次,见表 3。

表 3 飞机起飞数据预测结果

Tab. 3 Prediction results of aircraft takeoff data 架次

年份	机型Ⅱ	机型Ⅲ
2014	1 876	1 808
2015	1 982	1 908
2016	2 087	2 008
2017	2 193	2 108
2018	2 298	2 209
2019	2 404	2 309
2020	2 509	2 409

根据本文所建立的机场的道面剩余寿命计算模型,可得该机场剩余使用寿命约为 2 年,即在不采取任何维修措施,且使用机型的飞行架次按历史资料增减趋势变化的情况下,2 年后机场的最大累积损伤量大约为 1。根据 A 机场的实际运营情况,机场管理部门决定 2015 年底对机场进行大规模维护,这与本文方法求得的结果一致。

5 结 语

本文根据道面横向轮迹分布规律近似服从正态

分布的特点及道面板横向应力分布周期函数,得出机场道面累积损伤量的计算方法。建立了机场道面剩余寿命预测模型,能更加真实、客观地对道面结构剩余寿命预测进行预测,为制定科学合理的道面维护决策方案奠定基础。在今后的研究中,随着对飞机横向轮迹分布的进一步研究和有限元计算方法的进一步发展,飞机覆盖作用曲线和道面板应力计算将更为精确,对本文提出的道面剩余寿命预测方法的精度有很大提升。

参考文献:

References:

- [1] 凌建明,郑悦峰. 机场水泥混凝土道面剩余寿命的预估方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(4):484-488.
LING Jian-ming, ZHENG Yue-feng. On prediction method of remaining life for cement concrete pavement of airport[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(4): 484-488. (in Chinese)
- [2] 翁兴中,孙建斌. 军用机场沥青混凝土道面交通量换算[J]. 公路,2003(6):82-86
WENG Xing-zhong, SUN Jian-bin. Conversion of traffic volumes on asphalt concrete pavement for military airport[J]. Highway, 2003(6): 82-86. (in Chinese)
- [3] 王 维. 机场道面剩余使用寿命计算方法改进[J]. 中国民航大学学报,2004,22(3):37-41.
WANG Wei. Improved method for computing residual service life of civil airport pavement[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2004, 22(3): 37-41. (in Chinese)
- [4] 王 维,韩利斌. 机场道面使用性能预估理论和模型[J]. 中国民航大学学报,2007,25(2):28-32.
WANG Wei, HAN Li-bin. Introduction to prediction theory and models of airport pavement operational performance[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007, 25(2): 28-32. (in Chinese)
- [5] YEO I, SUH Y, MUN S. Development of a remaining fatigue life model for asphalt black base through accelerated pavement testing[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(8): 1881-1886.
- [6] ZHANG Luo-li, CAI Liang-cai, CHONG Xiao-lei, et al. Methods for estimating remaining life of cement concrete pavement of military airport[C]// ASCE. Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering, Shenyang: ASCE, 2009: 2225-2230.
- [7] 王观虎,蔡良才,邵 斌,等. 机场水泥混凝土道面使用寿命的改进灰色预测模型[J]. 交通运输工程学报,2009,9(3):45-48.
WANG Guan-hu, CAI Liang-cai, SHAO Bin, et al. Modified gray prediction model of service life for airport cement concrete pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 45-48. (in Chinese)
- [8] 王振辉. 基于损伤优化模型的机场道面设计[D]. 西安:空军工程大学,2010.
WANG Zhen-hui. Airport pavement design based on damage optimization model [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [9] 吴爱宏. 基于累积损伤的机场道面设计方法研究[D]. 西安:空军工程大学,2011.
WU Ai-hong. Research on the method of airport pavement design based on cumulative damage[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [10] 孙建斌,翁兴中. 军用机场沥青混凝土道面结构设计指标确定[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(1):8-10.
SUN Jian-bin, WENG Xing-zhong. Research on structure design criteria of asphalt concrete pavement for military airport[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2005, 6(1): 8-10. (in Chinese)
- [11] AC 150/5320-6D, airport pavement design and evaluation[S].
- [12] AC 150/5320-6E, airport pavement design and evaluation[S].
- [13] 姚炳卿. 机场道面通行覆盖率的计算原理[J]. 机场工程, 2008(4):2-12.
YAO Bing-qing. Calculate theory of airport pavement pass-to-coverage ratio[J]. Airport Engineering, 2008(4): 2-12. (in Chinese)
- [14] CAI Liang-cai, ZHU Zhan-qing, WU Ai-hong, et al. Cement concrete pavement design based on cumulative damage factor[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 1-8, 24.
- [15] MAGGIORE C, AIREY G, MARSAC P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [16] 和鹏远. 机场道面剩余寿命评估方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.
HE Peng-yuan. Research on airport pavement remaining life assess method [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012. (in Chinese)