适应未来大型飞机的水泥混凝土道面设计方法

吴爱红 蔡良才 顾强康 李光元

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 现行水泥混凝土道面设计规范,采用"设计飞机"按疲劳等效原则将各型飞机的作用次数换算成"设计飞机"的作用次数,并假定飞机轮迹在通行宽度内均匀分布,实际上飞机轮迹在跑道横断面上服从正态分布.未来大型飞机的起落架更加复杂,各型飞机对道面的累积疲劳损伤峰值不在同一位置,采用"设计飞机"换算的方法日益暴露出不足.按轮迹服从正态分布采用覆盖通行率计算覆盖作用次数,用累积疲劳损伤替代了"设计飞机"在交通量换算中的作用,直接计算各型飞机对道面结构总的累积疲劳损伤,探讨了基于累积疲劳损伤的道面设计方法.实例分析表明:采用累计疲劳损伤作为设计指标的道面设计方法计算结果更精确,更适合未来大型飞机复杂起落架作用下的水泥混凝土道面设计.

关 键 词: 交通量; 大型飞机; 累积损伤曲线; 覆盖通行率; 水泥混凝土道面; 机场

中图分类号: U 412.22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)09-1169-07

Airport concrete pavement design for large aircraft in future

Wu Aihong Cai Liangcai Gu Qiangkang Li Guangyuan

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The present concrete pavement design specification uses design aircraft to convert the traffic of other aircrafts into traffic of design aircraft according to the principle of equivalent damage, and it assumes that the wheel path in the lane of runway follows uniform distribution. Actually, wheel path follows the normal school, landing gear of new large aircraft becomes more complex, the peak value of cumulative damage of each aircraft maybe not at the same location, shortages of conversion method using design aircraft is increasing. Based on the wheel path in the lane of runway follows the normal school, pass-to-coverage ratio is used to calculate passes number. Design aircraft's function is replaced by cumulative fatigue damage of pavement structure, which produced by all kinds of aircrafts is carried out directly. A new design method for concrete pavement based on cumulative fatigue damage is discussed and a design example is given. It is approved that the pavement design method using cumulative fatigue damage as design index is more suitable for concrete pavement design of large aircraft with complex landing gear.

Key words: traffic; large aircraft; cumulative damage curve; pass-to-coverage ratio; concrete pavement; airport

随着航空工业的快速发展,尤其是新一代大型飞机(如 B-777 和 A-380)的出现,飞机质量日益增大,起落架构型日益复杂,飞机对道面的作用也发生了较大变化,之前的道面设计理论采用"设计飞机"将其它飞机的交通量按经验公式换算成"设计飞机"交通量的方法,由于其基本假定比较粗略,已难以满足未来大型飞机的设计要求[1-3].1995 年美国发布了 LEDFAA 软件,取消了"设计飞机"的概念,用累积损伤因子替代了"设计飞机"在交通量换算中的作用,不再将其它飞机的交通量转换成"设计飞机"的交通量,直接计算每架飞机在跑道横断面上累积损伤,根据

收稿日期: 2010-10-22

作者简介: 吴爱红(1982 -),男,湖南涟源人,博士生,wuaihong@163.com,现为广州军区空军勘察设计院工程师.

Miner 准则通过累积损伤曲线对所有使用飞机的疲劳损伤进行叠加,道面结构厚度设计通过判断累积损伤曲线的最大值是否小于且接近于 1 来确定[4]. 1999 年,美国在新泽西州建立了完善的国家道面实验室,与波音、空客两大航空公司合作,对机场道面开展了广泛而深入的研究,道面设计方法得到了迅猛发展. 2008 年美国联邦航空局完成了新设计规法(AC150/5320-6E)的修订,发布了最新设计软件 FAARFIELD,使得道面设计理论朝着精确的方向发展前进了一大步[5-6].

2009 年,我国修订了机场道面设计规范,改进了道面交通量模型,对同一组交通量,道面厚度设计不再因采用哪种机型作为"设计飞机"而不同[7]. 但我国规范仍假定轮迹在通行宽度内均匀分布,采用"设计飞机"对各型飞机的交通量进行换算[8],由于换算方法本身的局限性及换算过程中导致的误差,对道面的累积损伤计算并不准确,且难以适应未来飞机发展的趋势,因此需要改进.

1 现行道面规范交通量模型

由于机场使用机型并不单一,现行规范为了简化计算,通常将各型飞机的交通量按照一定的原则换算成某一种飞机的交通量,以减少道面厚度设计时工作量. 我国道面设计规范即以道面板底拉应力为指标,按照疲劳等效原则,将各型飞机的作用次数换算成"设计飞机"的作用次数.

1.1 "设计飞机"年重复作用次数计算

目前机场道面设计规范对"设计飞机"重复作用次数的计算采用通行宽度内的平均作用次数来计算,采用式(1)计算.

$$N_c = \frac{N_j \cdot \eta \cdot n \cdot W_t}{T} \tag{1}$$

式中,N_c为"设计飞机"的重复作用次数;N_j为"设计飞机"的运行次数;η 为"设计飞机"在通行宽度内的通行百分率,Ⅰ类飞机取 0.90;Ⅱ类、Ⅲ类飞机取 0.85;n 为主起落架机轮数;W_t为一个轮胎的宽度,m,由实测求得;T 为通行宽度,m. Ⅰ类飞机在跑道上取 3.8 m,在滑行道上取 1.2 m;Ⅱ类、Ⅲ类飞机在跑道上,当其主起落架间距小于 7 m 时取 4.4 m,大于 7 m 时取 5.0 m,在滑行道上取 1.5 m. 对式(1)进行变换,以便进一步明确式中变量的含义.

$$N_c = N_j \cdot \frac{\eta}{T} \cdot (n \cdot W_t) \tag{2}$$

从式(2)可以看到,η/T 是"设计飞机"在通行宽度内的概率密度的均匀分布平均值,即假定机轮轮迹在通行宽度内均匀分布,"设计飞机"重复作用次数按通行宽度内的平均作用次数计算,如图 1 所示. 其次,W_t是轮胎宽度,而不是有效轮胎宽度,忽略了荷载扩散作用对重复作用次数的影响. 此外,n 是主起落架机轮数,而不是起落架作用于道面时的应力峰值数目,抹去了起落架作用于水泥混凝土道面与沥青混凝土道面的不同.

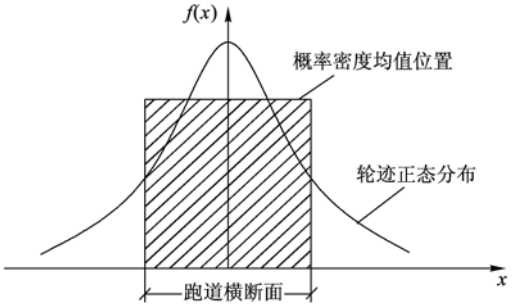


图 1 现行规范重复作用次数计算方法

1.2 其他飞机年重复作用次数换算

为了简化设计过程,将其他飞机的重复作用次数换算成"设计飞机"的当量重复作用次数,按式(3)进行换算.

$$N_{di} = \left(\frac{K_i}{K_c}\right)^{71.31}\left(\frac{r_i}{r_c}\right)^{71.31}\left(\frac{q_i}{q_c}\right)^{41.67} N_{ci} \tag{3}$$

式中,N_{di}为第 i 种使用飞机的重复作用次数换算成"设计飞机"后的当量重复作用次数;N_{ci}为第 i 种使用飞机的重复作用次数;K_c,r_c,q_c分别为"设计飞机"的荷载折减系数、一个主轮上的荷载圆半径,m 及胎压,MPa;K_i,r_i,q_i分别为拟换算飞机的荷载折减系数、一个主轮上的荷载圆半径,m 及胎压,MPa.

式(3)中的系数是拟合回归系数,只对特定起落架构型以及有限范围的飞机荷载重复作用次数转化为"设计飞机"的重复作用次数适用. 再者,换算过程本身只是一种近似等效,对超出换算范围的飞机荷载换算会产生较大误差.

多种飞机混合使用时总的作用次数按式(4)计算.

$$N = N_c + \sum_{i=1}^{m} N_{di} \tag{4}$$

式中,N 为总的重复作用次数;m 为使用飞机种类数目.

从式(4)可以看到,各型飞机作用次数换算成"设计飞机"作用次数后,直接求和得到总的作用次数,实际上由于各型飞机起落架构型、有效轮胎宽度、轮迹分布等不同,其作用次数在跑道横断面上的分布曲线不同,采用"设计飞机"按式(4)进行交通量计算掩盖了这种区别,会导致计算结

果不够精确.

2　累积损伤曲线交通量模型

2.1　使用飞机累积损伤的计算

将跑道横断面按一定轮带宽度分成有限数目的条带,对每条带宽的累积损伤进行计算. 考虑使用飞机的起落架构型及侧滑特性,将每条带宽中心点位置的重复作用次数与道面结构此处允许的重复作用次数的比值作为此带宽的累积损伤,按式(5)计算. 由于跑道横断面上轮迹的不均匀分布,不同位置各带宽的累积损伤往往不同,形成使用飞机的累积损伤曲线.

$$D = \frac{N_i}{N_i'} \tag{5}$$

式中,N_i 为第 i 种使用飞机重复作用次数;N_i'为在第 i 种使用飞机作用下道面结构允许的重复作用次数.

2.2　各型飞机累积损伤的叠加

根据混凝土的线性累积疲劳损伤“Miner”准则,可对道面同一位置在对各型飞机作用下的道面疲劳损伤直接求和,通过线性叠加确定各型飞机的总的累积损伤,按式(6)计算. 换而言之,可对各型飞机在跑道横断面上的累积损伤曲线进行叠加,形成总的累积损伤曲线即可. 国外对跑道任意位置的总的累积损伤量用累积损伤因子(cumulative damage factor)表示,简称 C_{DF},并以 C_{DF}是否接近于 1 来判定道面是否达到疲劳损坏状态.

$$C_{DF} = \sum_{i=1}^{m} \frac{N_i}{N_i'} = \sum_{i=1}^{m} N_i \cdot \frac{1}{N_i'} \tag{6}$$

从式(5)、式(6)可以看到,基于累积损伤曲线的交通量模型不再将其他使用飞机的交通量转换成“设计飞机”的交通量,直接计算各型飞机在跑道横断面上任意位置的累积损伤,根据“Miner”准则对各型飞机的损伤进行叠加,形成总的累积损伤曲线,道面结构厚度设计通过判断累积损伤最大值是否小于且接近于 1 来确定.

3　覆盖作用次数计算

对道面设计来说,影响结构厚度的是使用飞机的实际作用次数,国外称之为覆盖作用次数,但覆盖作用次数不能直接通过观测得到,需要进行预估. 本文根据我国现行道面设计规范的通行宽度及通行百分率,分析我国飞机轮迹分布的参数,按轮迹服从正态分布探讨覆盖作用次数的计算方法.

3.1　轮迹分布及参数分析

轮迹横向分布曲线的形状取决于其正态分布的标准差,或者说取决于于飞机滑行时的滑偏宽度. 国外将飞机的运行中心线(或一个轮胎的中心线)两侧范围内轮迹分布概率为 75% 的宽度称之为滑偏宽度. 国外对军用和民航飞机滑行的轮迹分布进行过大量的实际观测和统计分析,滑行道和跑道(端部为跑道两端各 304.8 m 范围内)的滑偏宽度取值如表 1 所示.

表 1　美国机场道面的滑偏宽度

参数	军用飞机		民航飞机			
	跑道	滑行道	跑道		滑行道	
			端部	中部	端部	中部
滑偏宽度/m	2.032	1.016	1.778	3.566	1.778	3.566
通行百分率/%	75	75	75	75	75	75

国外滑偏宽度与我国道面设计规范中的通行宽度基本相似,我国道面设计规范中规定的通行宽度如表 2 所示.

表 2　我国机场道面的通行宽度

参数	军用飞机				民航飞机	
	Ⅰ类飞机		Ⅱ类、Ⅲ类飞机		跑道	滑行道
	跑道	滑行道	跑道	滑行道		
通行宽度/m	3.8	1.2	4.4~5.0	1.5	11.4	2.3
通行百分率/%	90	90	85	85	75	75

从表 2 可以看到,我国采用的通行宽度 11.4 m比国外对跑道采用的滑偏宽度 3.56 m 要宽得多;军用机场对跑道采用的通行宽度也比国外对跑道采用的滑偏宽度要大,但如果将通行百分率改用 75%,军用机场对跑道和滑行道采用的通行宽度和国外对跑道和滑行道采用的滑偏宽度的数值基本接近[9-10].

根据通行宽度和通行百分率,计算美国和我国飞机轮迹正态分布的标准差,结果如表 3 所示.

表 3　美国和我国轮迹分布标准差

标准差	美国						我国					
	军用飞机		民航飞机				军用飞机				民航飞机	
	跑道	滑行道	跑道		滑行道		Ⅰ类飞机		Ⅱ类、Ⅲ类飞机		跑道	滑行道
			端部	中部	端部	中部	跑道	滑行道	跑道	滑行道		
数值	0.883	0.441	0.772	1.543	0.772	1.543	1.152	0.364	1.528~1.736	0.521	4.954	0.999

比较表3中美国和我国轮迹分布的标准差σ,可以看出,我国飞机轮迹的标准差比美国的要大一些,反映出我国飞行员的技术水平可能要低一些,导致飞机轮迹分布分散性较大.这也表明,国内与国外的情况并不完全相同,不能照搬国外的测试结果,不能完全采用美国的设计软件来进行道面设计.

3.2 覆盖作用次数计算方法

通常采用通行覆盖率P/C来计算覆盖作用次数."覆盖"指的是使用飞机在道面上通过时对某一点产生一次最大应力(或应变),即认为对该点施加了一次"覆盖".通行覆盖率即为跑道横断面上总通行次数与某点处覆盖作用次数之比,为了计算方便,不妨使用覆盖通行率的概念,将P/C的分子分母互换,即C/P,表示跑道横断面上某点处的覆盖作用次数与总通行次数之比[2,11].

覆盖作用次数的计算以轮迹服从正态分布$N(\mu,\sigma)$按式(7)计算.

$$N_i = n_i \cdot \frac{C}{P} \tag{7}$$

式中,N_i为第i种使用飞机的覆盖次数;n_i为第i种使用飞机的运行次数.

C/P采用式(8)计算.

$$\frac{C}{P} = c_{xi} w_{ti} \tag{8}$$

式中,W_{ti}为第i种使用飞机的有效轮胎宽度;C_{xi}为第i种使用飞机在某条轮带中心点处轮迹分布概率密度.

覆盖通行率与起落架构型、有效轮胎宽度、道面结构类型、轮迹分布等因素有关.起落架构型的影响主要是轴距、轮距以及轮胎数目及其分布,计算覆盖通行率时,需要对起落架同一轴上所有轮胎的轮迹进行叠加,形成总的轮迹分布曲线,以此确定某条轮带中心点处轮迹分布的概率密度.有效轮胎宽度、道面结构类型的影响是起落架作用于沥青混凝土道面上荷载有一定的扩散角,有效轮胎宽度比轮印宽度要大,作用于水泥混凝土道面时可以认为荷载扩散角为0,有效轮胎宽度取轮印宽度即可[11-12].此外,复杂起落架通过沥青混凝土道面上某点一次时,对该点产生的最大拉应变的数目一般等于轮胎数目;而水泥混凝土道面是以一个挠曲板来承受荷载的作用,即使是复杂起落架,通过道面上某点一次时,也只对该点产生一次最大应力.因此复杂起落架作用于柔性道面时,既需起落架横向轮胎的轮迹叠加,也需对纵向轮胎的轮迹叠加;当其作用于水泥混凝土道面时,只需对起落架横向轮胎的轮迹叠加即可.轮迹分布对覆盖通行率的影响实质上反映的是飞机侧滑对覆盖通行率的影响,即影响覆盖通行率曲线的形状[13-14].

4 允许作用次数计算

由于美国的道面设计软件并未考虑温度应力的影响,两者采用的疲劳方程不同,此外,美国道面设计未考虑结构可靠度系数,因此在允许作用次数上与我国道面设计方法还是存在较大的不同.

4.1 荷载应力与温度计算

各型起落架作用于道面时,荷载应力σ_p采用弹性半空间地基上弹性薄板有限元分析的拟合回归计算公式,参考机场水泥混凝土道面设计规范提供的应力计算简化公式进行求解.如双轴双轮起落架作用于纵缝边缘时板底最大弯拉应力按式(9)、式(10)求解[15].

$$\sigma_p = (5.2059 - 2.0984T_w) \cdot \left(\frac{E_c}{E_t}\right)^{0.0715} (K_{r2}r)^{1.7114} q h^{-1.3692} \tag{9}$$

$$K_{r2} = 1 + 0.0073\left(\frac{E_c}{E_t}\right)^{-0.0271} h^{0.2290} R_1^{-0.5565} r^{-2.0625} - 0.0845\left(\frac{E_c}{E_t}\right)^{0.0067} h^{-0.0147} R_1^{0.3109} R_2^{0.4165} \tag{10}$$

式中,σ_p为最大荷载应力,MPa;h为面层板厚度,m;r为荷载圆半径,$r = \sqrt{p/(1000\pi q)}$,m,p为考虑动力影响后一个机轮上的荷载,kN,q为胎压,MPa;T_w为接缝传荷系数;E_c为水泥混凝土弹性模量,MPa;E_t为基层顶面当量回弹模量,MPa;R_1为双轮荷载的轮距,m;R_2为双轴双轮荷载的轴距,m;K_{r2}为荷载折减系数.

参照现行水泥混凝土道面设计规范,温度应力可采用式(11)进行计算:

$$\sigma_t = k_t \sigma_{tm} = k_t \frac{\alpha_c E_c h T_g}{2} B_x \tag{11}$$

式中,k_t为等效温度应力与最大温度应力的比例系数;σ_{tm}为温度翘曲应力,MPa;α_c为混凝土的线膨胀系数,1/℃;T_g为最大温度梯度,B_x为水泥混凝土道面的温度应力系数.

按照现行道面设计规范,应考虑可靠度系数,因此计算得到荷载应力和温度应力在代入疲劳方程之前,两者分别乘以可靠度系数即可.

4.2 疲劳方程及允许作用次数

现行混凝土道面设计规范采用考虑高低应力

比的水泥混凝土疲劳方程式,如式(12),将温度应力造成的疲劳损伤计入累积疲劳损伤量.

$$\lg\frac{S(1-R)}{1-S\cdot R}=\lg a-b\lg N_i' \tag{12}$$

式中,$S=\sigma_{max}/f_r$,σ_{max}为循环加载的高应力,f_r为水泥混凝土的弯拉强度;$R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$,$\sigma_{min}$为循环加载的低应力;$N_i'$为各型飞机允许作用次数;$a$,$b$为疲劳方程回归系数,$a$取 1.25,$b$取 0.024.

根据水泥混凝土道面的实际受力情况,取温度应力σ_t为低循环应力σ_{min},荷载应力和温度的综合应力$\sigma_p+\sigma_t$为高循环应力σ_{max},以此代入式(12),可得重复荷载应力和温度应力综合作用下,道面允许作用次数按式(13)进行计算,或作用一次对道面产生的疲劳损伤按式(14)进行计算.

$$N_i'=\left[\frac{a(f_r-\sigma_t)}{\sigma_p}\right]^{\frac{1}{b}} \tag{13}$$

$$\frac{1}{N_i'}=\left[\frac{\sigma_p}{a(f_r-\sigma_t)}\right]^{\frac{1}{b}} \tag{14}$$

5　采用累积损伤的道面设计方法

5.1　设计准则

直接计算各型的累积疲劳损伤,并按“Miner”准则进行叠加,形成总的累积疲劳损伤曲线,通过比较累积疲劳损伤因子C_{DF}与 1 的关系来判定道面是否达到疲劳损坏状态:

当$C_{DF}=1$时,道面在到达预期的设计使用年限时正好达到损坏标准,道面初拟厚度符合设计要求;

当$C_{DF}<1$时,道面在到达预期的设计使用年限时尚未达到损坏标准,道面初拟厚度还可以再减薄;

当$C_{DF}>1$时,道面在未到预期设计使用年限时就提前达到损坏标准,道面初拟厚度还需要再加厚.

5.2　设计流程

采用基于累积损伤曲线的道面设计方法,首先需要计算各使用飞机的覆盖通行率和设计期内覆盖作用次数;其次根据初拟的道面结构组合,对各使用飞机采用规范的应力公式分别计算其在临界荷位处板底最大弯拉应力和温度应力,在考虑可靠度系数以后,采用考虑温度应力和荷载应力的综合疲劳方程,计算各使用飞机的允许作用次数;然后计算各使用飞机的累积损伤曲线,并对各型飞机的累积损伤曲线叠加,形成总的累积损伤曲线;最后根据总的累积损伤曲线疲劳损伤因子C_{DF}最大值验算道面厚度,可以通过增加或减少道面厚度,重复上述步骤,反复试算直到C_{DF}小于且接近于 1,此时的道面厚度即是设计所需的厚度,具体流程如图 2 所示.

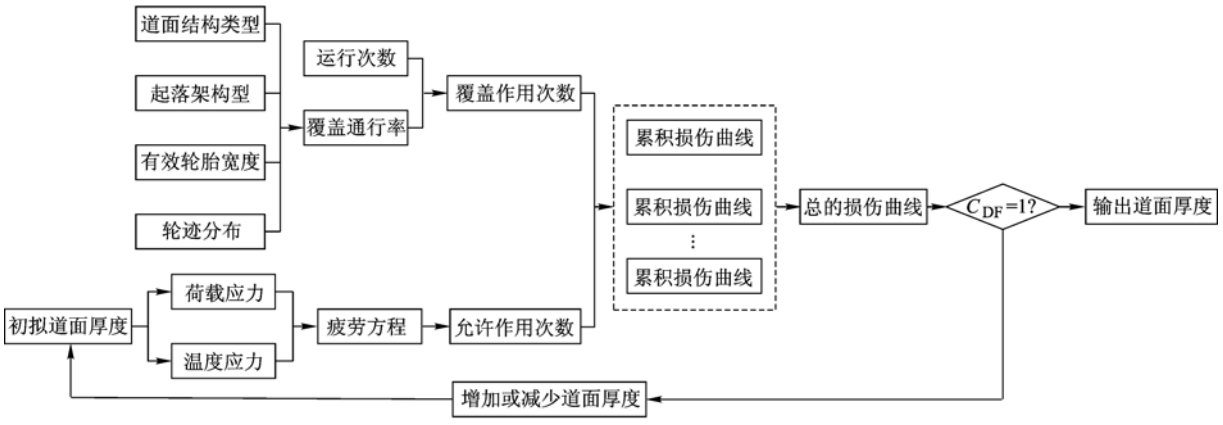


图 2　道面设计流程图

5.3　设计实例

某机场位于公路自然区划分Ⅱ区,使用飞机为 B737-800,MD-83,B767-300ER 和 C-141,道面设计使用年限为 30 a. 土基回弹模量 38 MPa;底基层为天然砂砾石垫层,厚 0.30 m,回弹模量 200 MPa;基层为水泥稳定碎石,回弹模量 1 500 MPa;混凝土 28 d 龄期弯拉强度 5.0 MPa,弹性模量 36 000 MPa;道面板尺寸为 5 m×5 m,企口缝,按非受荷板与受荷板应力比定义的接缝传荷系数为 0.65. 飞机设计参数如表 4 所示,计算该道面厚度.

表 4　道面设计参数

机型	重量/kN	年运行次数	总运行次数	胎压/MPa	轮距/m	轴距/m	轮印面积/cm²
B737-800	792	1 250	37 500	1.413	0.863	0	1 664
MD83	730	1 000	30 000	1.344	0.714	0	1 613
B767-300 ER	1 873	3 000	90 000	1.379	1.143	1.422	2 016
C-141	1 564	750	22 500	1.310	0.825	1.219	1 773

道面初拟厚度采用0.275 m,考虑荷载传递系数后,B737-800 飞机、MD83 飞机、B767-300 ER 飞机和 C-141 飞机起落架作用下的道面板底应力依次为 3.189,3.097,3.188,3.288 1 MPa. 参照温度应力的确定方法,求得道面厚度 0.275 m 时的温度疲劳应力 σ_t 为 0.854 MPa. 考虑可靠度系数 1.2,可求得在荷载应力和温度应力作用下,B737-800 飞机、MD83 飞机、B767-300 ER 飞机和 C-141 飞机作用一次产生的疲劳损伤依次为 $1.879\,9\times10^{-5}$,$5.542\,6\times10^{-6}$,$1.850\,3\times10^{-5}$,6.701×10^{-5},从而得到 B737-800 飞机、MD83 飞机、B767-300 ER 飞机和 C-141 飞机单独作用时的累积损伤曲线.

对 B737-800 飞机、MD83 飞机、B767-300 ER 飞机和 C-141 飞机的累积损伤曲线进行叠加后形成的总的累积损伤曲线如图 3 所示,道面初拟厚度 0.275 m 时累积损伤峰值为 0.768. 道面厚度 0.28 m 时总的累积损伤峰值为 0.469,厚度为 0.27 m时总的累积损伤峰值为 1.581,厚度 0.275 m时累积损伤最接近 1,初拟厚度 0.275 m 符合设计要求,道面在完成预定交通量时正好达到损坏标准.

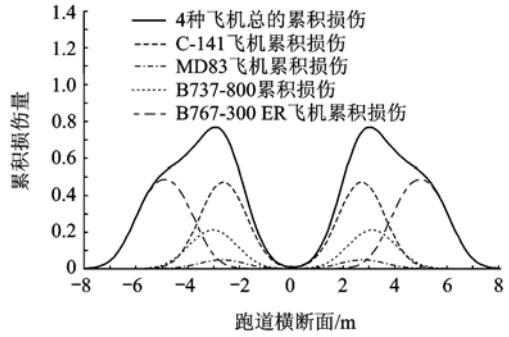


图 3 所有飞机总的累积损伤曲线

从图 3 中可以看到,B767-300 ER 飞机单独运行时的累积损伤峰值为 0.487,为损伤最大的飞机,亦是单独运行时需要厚度最厚的飞机,按国内现行道面设计理论,B767-300 ER 飞机为“设计飞机”,其对道面“贡献”的损伤应该是最大的,但事实上,在总的累积损伤曲线的峰值位置,峰值为 0.768,C-141 飞机“贡献”的累积损伤为 0.442,为最大者,其次是 B737-800 飞机,“贡献”的损伤为 0.210,然后才是 B767-300 ER 飞机,“贡献”的损伤为 0.069,略大于 MD83 飞机“贡献”的损伤为 0.047,仅占总累积损伤的 9%. 道面设计规范一度以运行次数最多的飞机作为“设计飞机”;或以重量最大的飞机作为“设计飞机”;再到现行道面设计规范以单独运行所需厚度最厚的飞机作为“设计飞机”. 从表 4 中可以看到,B767-300 ER 飞机满足上述 3 点:①其运行架次为 90 000 次,为其它 3 种飞机交通量之总和;②其又是最重的飞机;③其还是单独运行时需要道面厚度最厚的飞机,但其对道面“贡献”的损伤仅占总的累积损伤的 8.98%. 由此可见,道面厚度不一定取决于现行道面设计理论中的“设计飞机”,其它飞机的交通量也不能按现行方法简单等价于“设计飞机”的交通量. 现行国内道面设计方法已难以满足未来大型飞机的水泥混凝土道面的设计要求,需要进一步改进.

6 结 论

现行水泥混凝土道面设计方法将各型飞机交通量等效换算成“设计飞机”交通量,其主要不足有:①换算过程掩盖了各型飞机因轮迹分布、起落架构型、有效轮胎宽度等造成在跑道横断面的损伤分布不同;②换算公式有其适用范围,换算过程本身会产生一定误差;③道面厚度不一定取决于现行道面设计理论中的“设计飞机”,其它飞机的交通量也不能按现行规范所谓的等价方法转化为“设计飞机”的交通量.

本文采用累积疲劳损伤因子为设计指标,通过计算各型飞机的覆盖作用次数,采用同时考虑荷载应力和温度疲劳应力的综合疲劳方程,直接计算各型飞机对道面结构累积疲劳损伤. 实例计算表明,本文方法可行,并有以下主要优点:①不再需要指定“设计飞机”,省去了换算过程,直接计算各型飞机的累积损伤,这对于超出换算公式适用范围的道面设计意义更大,更适应未来大型飞机种类增多和起落架日趋复杂的道面设计发展需求;②本文方法不仅可以提供道面所需最大厚度,还可以提供其所在位置. 还可计算横断面上任意位置所需道面厚度,为不等厚设计提供了理论根据;③累计损伤因子对道面厚度非常敏感,易于得到更加精确设计结果.

对比分析了我国与美国飞机轮迹的标准差,我国飞机轮迹横向分布分散性较大. 这表明国内道面设计方法不能完全照搬国外测试结果及配套软件. 由于以往对轮迹分布的测试过于笼统,各型飞机尤其是新机型的轮迹分布数据还需要进一步测试.

参考文献(References)

[1] 李巧生,赵鸿铎,凌建明. 适应大型特种飞机的机场水泥混凝土道面结构设计方法[J]. 土木工程学报,2011,44(1):

121 – 126
Li Qiaosheng, Zhao Hongduo, Ling Jianming. Method of airport concrete pavement design for largem ilitary transport aircrafts [J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(1):121 – 126 (in Chinese)

[2] 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 computation theory of pass-to-coverage ratio of airport pavement[J]. Airport Engineering, 2008(4):1 – 12 (in Chinese)

[3] Zhao Hongduo, Ling Jianming, Yao Zukang. Study on pavement superposition effects under multiple aircraft tires [C]//Geo Shanghai 2010 International Conference in China. Shanghai, ASCE, 2010:546 – 551

[4] David R. Calibration of FAARFIELD rigid pavement design procedure(DOT/FAA/AR-09/57)[R]. USA:FAA, 2010

[5] Rodney N. AC 150/5320-6E and FAARFIELD [R]. USA: FAA, 2008:1 – 129

[6] Gary L. FAA pavement design: AC 150/5320-6E-FAARFIELD [R]. Presented to ACPA-Southeast Chapter Workshop. USA: FAA, 2008

[7] 翁兴中,蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2007:294 – 360
Weng Xingzhong, Cai Liangcai. Airport pavement design[M]. Beijing:China Communications Press, 2007:294 – 360 (in Chinese)

[8] GJB 1278A-2009 机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 2009
GJB 1278A-2009 Airport concrete pavement design specification [S]. 2009 (in Chinese)

[9] Guo Edward H, Hay hoe, Gordon F, et al. Analysis of NAPTF traffic test data for the first-year rigid pavement test items[C]// Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference. USA:New Jersey, 2002:1 – 15

[10] Gordon F, Hay Hoe. Traffic testing results from the FAA's national airport pavement test facility [C]//2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing. Minnesota: University of Minnesota, 2004:1 – 23

[11] Zhao Hongduo, Ling Jianming, Liu Wen. Discussion of coverage for airport asphalt pavement design[C]//Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China: Proceedings of the Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals. Shanghai: ASCE, 2007:833 – 840

[12] 吴爱红,蔡良才,顾强康,等. 基于通行覆盖率的路面交通量分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6):82 – 87
Wu Aihong, Cai Liangcai, Gu Qiangkang, et al. Traffic analysis of highway using pass-to-coverage ratio[J]. Journal of Traffic and Transportation, 2010, 10(6):82 – 87 (in Chinese)

[13] AC 150/5320-6E Airport pavement design and evaluation[S]. 2009

[14] 李青,赵鸿铎,姚祖康. 基于道面响应的飞机荷载作用次数计算方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(12): 1637 – 1641
Li Qing, Zhao hongduo, Yao Zukang. Aircraft load repetition calculation methods[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12):1637 – 1641 (in Chinese)

[15] 郑飞,翁兴中. 飞机荷载下水泥混凝土道面板应力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4):8 – 15
Zheng Fei, Weng Xingzhong. Calculating methods of stress for cement concrete pavement slab under plane load[J]. Journal of Traffic and Transportation, 2010, 10(4):8 – 15 (in Chinese)

(编　辑:赵海容)

(上接第 1168 页)

3) HNCTS 是一个双输入双输出系统,存在流量耦合,使用模糊控制算法可以实现 HNCTS 的高精度控制;

4) HNCTS 将液压传动技术应用于 NCT 研制中,开辟了液压应用的新领域.

参考文献 (References)

[1] Moore C, Peshkin M, Colgate E. Design of 3R Cobot using continuous variable transmissions[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detriot: Conference on Robotics and Automation, 1999:3249 – 3254

[2] Boy E, Burdet E, Teo C, et al. The learning Cobot [C]//Proceeding of International Mechanical Engineering Conference and Exposition. New Orleans: Dynamic Systems and Control, 2002: 867 – 873

[3] Lavalle'e S, Troccaz J, Gaborit L, et al. Image guided operating robot: a clinical application in stereotactic neurosurgery [C]// Proceedings of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Nice: Conference on Robotics and Automation, 1992:618 – 624

[4] Hirche S, Buss M. Passive position controlled telepresence systems with time delay[C]//2003 American Control Conference. Denver: American Control Conference, 2003:168 – 173

[5] 董玉红. 欠驱动力合作机器人的驱动及控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院, 2006
Dong Yuhong. Research on actuation and control technology of insufficient power Cobot[D]. Harbin: College of Mechanical and Electrical, Harbin Engineering University, 2006 (in Chinese)

[6] 罗永俊. 一种基于液压变传动原理的合作机器人研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2009
Luo Yongjun. Research on Cobot based on hydraulic variable transmission[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009 (in Chinese)

[7] 方道星. 欠驱动 2R 机械臂模糊控制算法研究[D]. 北京:北京工业大学机械工程与应用技术学院, 2007
Fang Daoxing. Study on fuzzy control method of underactuated 2R manipulator[D]. Beijing: College of Mechanical Engineering & Applied Electronica Technology, Beijing University of Technology, 2007 (in Chinese)

(编　辑:张　嵘)