

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.021

基于国际平整度指数 IRI 的飞机动载系数分析

张献民^{1,3} 陈新春² 李少波⁴

(1. 中国民航大学机场学院,天津,300300;2. 福建兆翔机场建设有限公司,厦门,361012;
3. 南京航空航天大学民航学院,南京,210016;4. 邢台市交通运输局,邢台,054000)

摘要:为分析道面不平整引起的动载作用,研究了国际平整度指数(International roughness index,IRI)与道面功率谱密度(Power spectral density,PSD)的关系,并通过建立四分之一飞机振动模型,分析了飞机作用于道面上的动载特性,建立了基于概率的经空气动力修正后的动载系数分析模型,最后以某机型为例对动载系数影响因素进行讨论。结果表明:动载系数随速度增加呈先增大后减小的趋势;道面平整度等级是影响飞机对道面动力作用的最关键因素;飞机重量与升力影响因子(Lift impact factor,LIF)呈非线性关系,因此动载系数随飞机重量的增加呈非线性变化;飞机高速滑行时动载系数随飞机重量变化的离散程度较大,此时随飞机重量增加,飞机对道面的动力作用增大;动载系数随机轮轮胎刚度、机身缓冲系统阻尼及刚度的增加近似呈线性变化,机身缓冲系统阻尼增大,动载系数则减小;机轮轮胎刚度及机身缓冲系统刚度增大,动载系数则增大。

关键词:场道工程;动载系数;空气动力修正;国际平整度指数;随机振动

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)01-0136-07

Aircraft Dynamic Load Coefficient Based on International Roughness Index

Zhang Xianmin^{1,3}, Chen Xinchun¹, Li Shaobo⁴

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

2. Fujian Zhao Xiang Airport Construction Co., Ltd., Xiamen, 361012, China;

3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

4. Xingtai Transport Bureau, Xingtai, 054000, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic load caused by uneven airport pavement, the relationship between international roughness index (IRI) and power spectral density (PSD) of airport pavement is studied. The dynamic load characteristic based on aircraft-pavement interaction is analyzed by building a quarter aircraft model, and a probability-based analysis model of dynamic load coefficient under aerodynamic correction is established. Finally, taking a certain aircraft type for example, the influence factors of dynamic load coefficient are discussed. The results indicate that the dynamic load coefficient increases at first and then decreases with the increase of velocity. The grade of airport pavement roughness is the most critical factor influencing the dynamic effect of aircraft on pavement. The relationship between aircraft weight and lift impact factor (LIF) is nonlinear, so the change of dynamic load coefficient with the increase of the aircraft weight is nonlinear. When the aircraft is taxiing at a high-speed, the discrete de-

基金项目:国家自然科学基金(51178456)资助项目;中央高校基金(3122013P002)资助项目。

收稿日期:2015-01-14;**修订日期:**2015-12-22

通信作者:张献民,男,教授,博士生导师,E-mail:cauczxm@126.com。

引用格式:张献民,陈新春,李少波.基于国际平整度指数 IRI 的飞机动载系数分析[J].南京航空航天大学学报,2016,48(1):136-142. Zhang Xianmin, Chen Xinchun, Li Shaobo. Aircraft dynamic load coefficient based on international roughness index[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1):136-142.

gree of dynamic load coefficient changing with aircraft weight is greater, and as the aircraft weight increases, the dynamic effect of aircraft on pavement increases. Dynamic load coefficient approximately linearly changes with the increase of the stiffness of aircraft wheel tire, damping and stiffness of fuselage buffer system. The damping of fuselage buffer system increases, then the dynamic load coefficient decreases. The stiffness of aircraft wheel tire and fuselage buffer system increases, then the dynamic load coefficient increases.

Key words: airport pavement engineering; dynamic load coefficient; aerodynamic correction; international roughness index; random vibration

飞机滑行时跑道所受荷载是一种随机动荷载,道面不平整是引起飞机振动的主要原因,因此分析飞机对跑道动力作用的关键是准确地描述道面平整度。国际平整度指数(International roughness index, IRI)是目前国际上运用最广泛的平整度指标,被国内外机场广泛采用。国内学者对机场道面表面特性与动力作用方面做了大量研究。孙璐等研究认为道面平整度是具有零均值的平稳随机场,通过对平整度与机场道面谱进行分析,建立了机场道面功率谱与随机动压力谱之间的联系^[1-2],但在道面检测中,一般不能直接得到功率谱密度的值。在公路工程领域, Lu Sun 建立 IRI 与路面功率谱密度的表达式^[3];黄立葵对其简化并基于四分之一车辆模型计算得到了动载标准差表达式^[4]。虽然车辆与飞机的动力响应研究有很大区别,但上述研究成果仍为道面动载系数分析提供了新思路。

在飞机动载研究领域,国内外学者并没有综合考虑道面平整度、飞机升力及飞机结构参数对飞机动载的影响,所得飞机动载系数相关成果有待进一步探讨。本文利用 IRI 与道面功率谱密度(Power spectral density, PSD)的转换关系,结合四分之一飞机振动模型,对道面不平整引起的飞机动载进行分析,建立基于概率的经空气动力修正后的动载系数分析模型,最后分析动载系数的影响因素,从而为道面设计、维护与结构动力响应分析提供参考。

1 IRI 与 PSD 转换关系

目前,道面平整度测量通常是沿道面纵向作一维测量。大量的实测数据表明,道面平整度可近似为具有零均值的一维均匀各态历经的平稳高斯随机场,可用功率谱密度描述^[1,5]。路面功率谱密度 $G_d(n)$ 可采用《车辆振动输入路面平度表示方法》(GB7013—86)^[6] 中规定的式(1)拟合

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega} \quad (1)$$

式中: n 为空间频率, m^{-1} ; n_0 为参考空间频率,

$n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_d(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值,称为路面平整度系数,单位为 m^2/m^{-1} ; ω 为频率指数,取 $\omega = 2$ 。

通过理论分析,文献[3]给出了 IRI 与 PSD 的关系式。文献[4]利用 IRI 定义的模型参数,并考虑实际测量的要求,将路面功率谱和传递函数的表达式代入 IRI 与 PSD 的关系式,得到其简化关系式

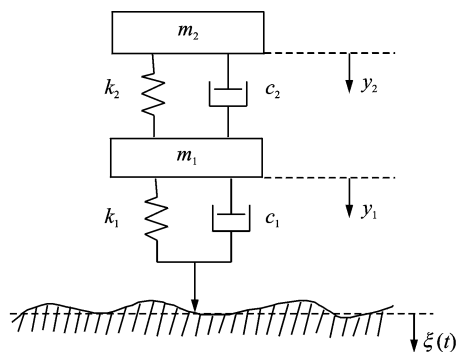
$$IRI = 0.78a_0 \sqrt{G_d(n_0)} \quad (2)$$

式中: a_0 为系数, $a_0 = 10^3 \text{ m}^{-1.5}$; IRI 的单位为 m/km 。

2 基于道面平整度的飞机动载分析

2.1 道面不平整引起的飞机动载分析

分析由于道面不平整引起的飞机竖向振动响应时,基于一维道面模型的飞机垂直方向振动响应预测比较成功^[7]。飞机是一个复杂的多自由度振动系统,为便于分析,需对其进行合理的简化。研究表明,采用四分之一车身结构作为振动模型即有令人满意的精度^[8]。为简化计算,本文在分析飞机动载时借鉴上述结论,采用四分之一飞机振动模型,如图 1 所示。



注: m_1 , m_2 分别为非悬挂系统和悬挂系统质量; k_1 , k_2 分别为机轮轮胎与机身缓冲系统的刚度; c_1 , c_2 分别为机轮轮胎和机身缓冲系统的阻尼; y_1 , y_2 分别表示质量 m_1 , m_2 的绝对竖向位移; $\zeta(t)$ 为平整度。

图 1 简化的飞机振动模型

Fig. 1 Simplified aircraft vibration model

文献[1]根据这一模型,在机场道面平整度的功率谱密度已知的情况下,通过频率响应函数建立机场道面功率谱密度 $S_{\zeta}(\omega)$ 与随机动压力谱密度 $S_p(\omega)$ 间的关系

$$S_p(\omega) = |(k_1 + ic_1\omega)H_1(\omega)|^2 S_{\zeta}(\omega) \quad (3)$$

式中: ω 为时间角频率, $\omega = 2\pi f$; $H_1(\omega)$ 为非悬挂系统质量的频率响应函数, $H_1(\omega) = [\omega^4 - i\alpha_2(1+h)\omega^3 - \beta_2(1+h)\omega^2]/[\omega^4 - i(\alpha_1 + h\alpha_2 + \alpha_2)\omega^3 - (\alpha_1\alpha_2 + \beta_1 + \beta_2 + h\beta_2)\omega^2 + i(\alpha_1\beta_2 + \alpha_2\beta_1)\omega + \beta_1\beta_2]$, 其中: $h = m_2/m_1$, $\alpha_1 = c_1/m_1$, $\alpha_2 = c_2/m_2$, $\beta_1 = k_1/m_1$, $\beta_2 = k_2/m_2$ 。

利用式(1),将式(3)换算成以时间频率表示的单边功率谱 $G_p(f)$,表达式为

$$G_p(f) = v^{w-1} n_0^w G_d(n_0) |(k_1 + 2i\pi f c_1)H_1(2\pi f)|^2 f^{-w} \quad (4)$$

由于随机动载为零均值随机过程,其标准差等于均方根,由式(5)得出随机动载的标准差为

$$\sigma_p = \left[\int_0^{\infty} G_p(f) df \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\int_0^{\infty} v^{w-1} n_0^w G_d(n_0) |(k_1 + 2i\pi f c_1)H_1(2\pi f)|^2 f^{-w} df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

本文把飞机作用于道面的动载视为高斯分布, σ_p 反映了飞机动载的大小, σ_p 越大,飞机动载较大的部分越多。

统计学中规定:一组测定值中与平均值偏差超过两倍标准差的测定值称为异常值。与平均值偏差超过3倍标准差的测定值称为高度异常的异常值。工程设计中,一般取均值加3倍标准差作为可能出现的最大值^[9],此时荷载超过最大动载的概率仅为0.27%,显然以高度异常的异常值计算得到的动载系数在道面设计中过于保守,会造成很大的浪费;而最大动载取静荷载 P_s 加两倍标准差 σ_p 时,不仅剔除了异常值,动载保证率也达到了95.43%,可满足计算要求。综上分析,本文定义了基于概率的动载系数(Dynamic load coefficient, DLC)表达式为

$$DLC = \frac{P_s + 2\sigma_p}{P_s} \quad (6)$$

联立式(2,5,6),本文建立了 IRI 与飞机 DLC 之间的关系,即

$$DLC = 1 + \left\{ 2.56 v^{\frac{(w-1)}{2}} n_0^{\frac{w}{\sigma}} IRI \left[\int_0^{\infty} |(k_1 + 2i\pi f c_1) \cdot H_1(2\pi f)|^2 f^{-w} df \right]^{\frac{1}{2}} \right\} / [a_0(m_1 + m_2)g] \quad (7)$$

飞机固有频率分布范围为 $f = 0.5 \sim 35$ Hz^[10]。根据国际道路协会(PIARC)提出的路面构造分类,路面平整度空间频率范围为 $0.02 \sim 2$ m⁻¹^[11]。基于飞机在起飞和降落的滑跑过程速度范围在30~360 km/h之间,将其换算成时间频率范围为2~16.7 Hz。综合考虑,本文取道面作用于机轮激励时间频率上限为 $f_u = 35$ Hz,下限为 $f_l = 0.5$ Hz,该频带宽度包括了飞机的固有频率分布范围。

2.2 空气动力修正的飞机动载系数

由于飞机升力,飞机对道面的激励荷载并非随飞机滑行速度的提高而持续增大^[12]。当飞机在理想光滑且水平的道面上滑行时,机轮对道面的竖向荷载 P ^[13]为

$$P = G - F_s \quad (8)$$

式中: G 为飞机重量, $G = Mg$; F_s 为飞机升力, $F_s = C_y S \rho_g v^2 / 2$, 其中, C_y 为升力系数, S 为升力面积, ρ_g 为空气密度, v 为飞机速度。

当飞机滑行速度 v 达到离地速度 v_l 时,飞机升力等于飞机自身重力,则有

$$G = F_s = \frac{1}{2} \rho_g v_l^2 C_y S \quad (9)$$

所以,飞机离地速度 v_l 为

$$v_l = \sqrt{\frac{2Mg}{C_y \rho_g S}} \quad (10)$$

为考虑空气动力对随机动载的影响,本文定义升力影响因子(Lift impact factor, LIF)表达式为

$$LIF = \frac{G - F_s}{G} = 1 - \frac{v^2}{v_l^2} \quad (11)$$

对于本文飞机简化模型,由于不同飞机参数对道面作用力存在差异,不宜将由某一机型参数得到的飞机动载系数运用于其他机型的分析中。本文综上分析得到了经空气动力修正后的飞机动载系数 K_d 分析模型为

$$K_d = DLC \cdot LIF = \left\{ 1 + \left\{ 2.56 v^{\frac{(w-1)}{2}} n_0^{\frac{w}{\sigma}} IRI \left[\int_{f_l}^{f_u} |(k_1 + 2i\pi f c_1) \cdot H_1(2\pi f)|^2 f^{-w} df \right]^{\frac{1}{2}} \right\} / [a_0(m_1 + m_2)g] \right\} \cdot \left(1 - \frac{v^2}{v_l^2} \right) \quad (12)$$

许金余等对机场跑道上440多次飞机起飞着陆等动载系数的实测值进行了统计分析,动载系数的概率分布服从对数正态分布,并给出了相应的统计参数: $q \geq 1.08$ N/mm²时, $\mu = 1.00$, $\sigma = 0.14$ ^[14]。文献[12]定义最大动载系数为 $K_d = \mu + \sigma = 1.14$,

保证率为 68.3%;本文定义最大动载系数 $K_d = \mu + 2\sigma = 1.28$,保证率为 95.4%,则最大动载系数在 1.14~1.28 范围内较为合理。

3 动载系数 K_d 影响因素分析

某机型参数如下^[15]: $m_1 = 785.6 \text{ kg}$, $m_2 = 15\,345 \text{ kg}$, $k_1 = 2\,046 \text{ kN/m}$, $k_2 = 1\,215.7 \text{ kN/m}$, $c_1 = 0 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_2 = 3.5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。对式(12)编程($\omega = 2$, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$),计算得到该机型动载系数的表达式为

$$K_d = (1 + 13.6c_0 \text{IRI} \sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{v_l^2}\right) \quad (13)$$

式中: c_0 为系数, $c_0 = 10^{-3} \text{ m}^{-0.5} \text{ s}^{0.5}$ 。

3.1 滑行速度

设飞机起飞时的离地速度为 75 m/s,道面平整度 $\text{IRI} = 4 \text{ m/km}$,图 2 给出了不同速度下 K_d , DLC , LIF 的变化规律。

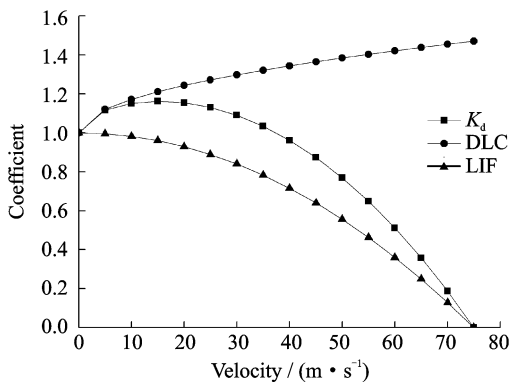


图 2 K_d , DLC 及 LIF 随速度变化曲线
Fig. 2 K_d , DLC and LIF varying with velocity

由图 2 可知:

(1)当速度为 0 m/s 时,即飞机处于静止状态,飞机对道面的荷载等于静荷载,动载系数为 1。当飞机滑行速度较低时,飞机升力对动载影响较小,这一阶段随着速度增加,振动加剧,动载系数也随之增加。当滑行速度增加到 15.5 m/s 时,飞机对道面的动载作用达到最大,动载系数为 1.163。此后随滑行速度的增加,飞机升力显著增大,动载系数不断减小,当速度达到离地速度时,动载系数为 0。

(2)飞机起飞滑行时, DLC 随着速度的增加而增大,低速滑行时 DLC 增加的幅度较高速滑行时大,此时 DLC 对动载系数影响显著;而 LIF 随着速度的增加而减小,高速滑行时 DLC 减少的幅度较低速滑行时大,此时 LIF 对动载系数影响显著;总体来看,动载系数随速度增加呈非线性变化,且

呈先增大后减小的趋势。

(3)飞机着陆瞬间,跑道端部受撞击动载,着陆撞击动载的随机性较大。正常着陆时出现极粗暴着陆的概率仅为万分之五^[16]。对于飞机正常着陆情况,由于飞机着陆瞬时速度较大,升力也较大,此时道面受到的动载小于静载,飞机着陆滑行过程可视为起飞滑行的逆过程。

3.2 道面平整度

根据《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T5024—2009)^[17]规定,道面平整度等级的评价标准如表 1 所示。

表 1 道面平整度等级评价标准 (IRI 指标)

Tab. 1 Evaluation criterion of airport pavement roughness grade (by IRI)

评价等级	好	中	差
IRI 平均值 / ($\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$)	<2.0	2.0~4.0	>4.0

本文取道面 IRI 平均值 (m/km) 为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 分别代表好、中、差 3 种等级的道面平整度状况。图 3, 4 及表 2 给出了(最大)动载系数、速度及道面平整度之间的变化规律。

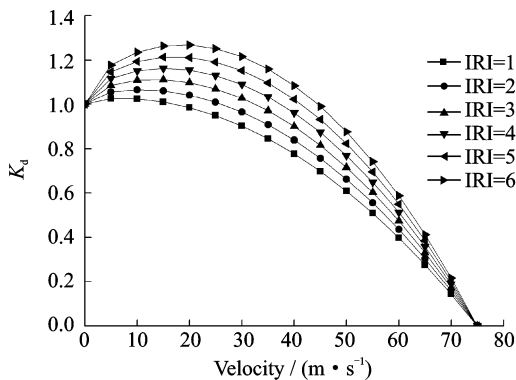


图 3 不同道面平整度等级下动载系数随速度变化
Fig. 3 K_d varying with velocity at different IRIs

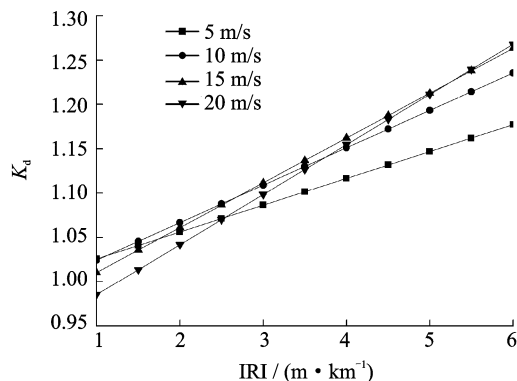


图 4 不同速度下动载系数随道面平整度等级变化
Fig. 4 K_d varying with IRI at different velocities

表2 最大动载系数及对应速度随道面平整度等级变化
($v_l = 75 \text{ m/s}$)

Tab. 2 The maximum K_d and corresponding velocity varying with IRI ($v_l = 75 \text{ m/s}$)

IRI/($\text{m} \cdot \text{km}^{-1}$)	最大动载系数	飞机速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.027	7.0
2	1.067	10.7
3	1.113	13.4
4	1.162	15.5
5	1.215	17.2
6	1.269	18.6

由表2和图3~4可知:

(1)道面等级对动载系数的影响极为显著,是影响飞机对道面动力作用的最关键因素。相同速度下,道面平整度等级越低,动载系数越大,最大变化率达到了40%。最大动载系数与道面平整度近似呈线性变化,随道面平整度状况的恶化,最大动载系数及对应的速度随之增加,飞机振动系统对道面结构的冲击荷载不断增大。

(2)飞机滑行速度低于20 m/s时,速度越高动载系数随道面平整度状况恶化的增幅越大。当IRI=6 m/km时,动载系数从 $v=5 \text{ m/s}$ 时的1.177增大到 $v=20 \text{ m/s}$ 时的1.268,增大了23.6%。当滑行速度超过20 m/s时,飞机升力显著增加,对道面的动载作用迅速减小。这说明:飞机在平整度状况不佳的道面高速滑行(接近20 m/s)时,飞机上下颠簸程度较低速滑行时更为剧烈,从飞机-道面协同工作的角度分析,飞机在驶入或驶离跑道时应保持较低速度,以获得较好的舒适度。

3.3 飞机重量

下面分析飞机重量为1.0G,1.1G,1.2G,1.3G和1.4G这5种工况下的动载系数。由式(10)可知:当空气动力参数为定值时,飞机离地速度的平方值与重量成正比。表3计算得到了不同飞机重量下的动载系数表达式,图5给出了不同飞机重量下动载系数随飞机滑行速度变化的规律曲线。

由表3、图5可知:随飞机重量增加,飞机离地速度增大,LIF呈非线性减小。当飞机滑行速度低于30 m/s时,不同飞机重量下的动载系数曲线几乎重合,飞机重量对飞机动载系数影响很小。此后随滑行速度的增加,动载系数随飞机重量变化的离散程度增大。当 $v=60 \text{ m/s}$ 时,1.0G重量的飞机动载系数为0.512,1.4G重量的飞机动载系数为0.738,增大了44%。结果表明:飞机重量与LIF呈非线性关系,因此动载系数随飞机重量的增加呈

非线性变化;飞机高速滑行时动载系数随飞机重量变化的离散程度较大,此时随飞机重量增加,飞机对道面的动力作用增大,重量对动载系数的影响不可忽视。

表3 不同飞机重量下的动载系数表达式 (IRI=4 m/km)
Tab. 3 K_d expressions at different aircraft weights (IRI=4 m/km)

重量	离地速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动载系数表达式
1.0G	75	$K_d = (1 + 13.6c_0 \text{IRI}\sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{75^2}\right)$
1.1G	79	$K_d = (1 + 12.9c_0 \text{IRI}\sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{79^2}\right)$
1.2G	82	$K_d = (1 + 12.4c_0 \text{IRI}\sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{82^2}\right)$
1.3G	86	$K_d = (1 + 11.9c_0 \text{IRI}\sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{86^2}\right)$
1.4G	89	$K_d = (1 + 11.4c_0 \text{IRI}\sqrt{v}) \left(1 - \frac{v^2}{89^2}\right)$

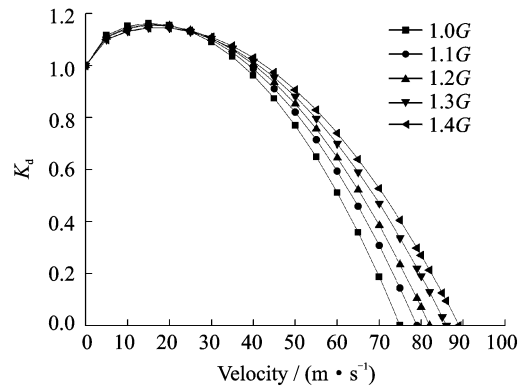


图5 不同重量下动载系数随速度变化 (IRI=4 m/km)
Fig. 5 K_d varying with velocity at different weights
(IRI=4 m/km)

3.4 机轮轮胎刚度、机身缓冲系统阻尼及刚度

从式(12)可以看出,机轮轮胎刚度 k_1 、机身缓冲系统阻尼 c_2 及刚度 k_2 对动载系数有影响,限于篇幅,本文只分析了在飞机重量为1.0G,IRI=4 m/km, $v_l=75 \text{ m/s}$, $v=30 \text{ m/s}$ 的情况下机轮轮胎刚度、机身缓冲系统阻尼及刚度对动载系数的影响规律。

由图6~8可知:对于机身缓冲系统阻尼变化范围为3.5~20 kN·s/m,动载系数由1.091减少到0.946;机轮轮胎刚度变化范围为1500~5000 kN/m,动载系数由1.088增大到1.136;机身缓冲系统刚度变化范围为200~1400 kN/m,动载系数由0.930增大到1.127。结果表明:动载系数随机轮轮胎刚度、机身缓冲系统阻尼及刚度的增

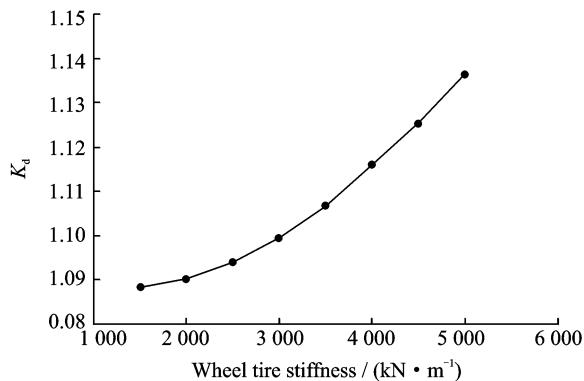


图 6 机轮轮胎刚度对动载系数的影响

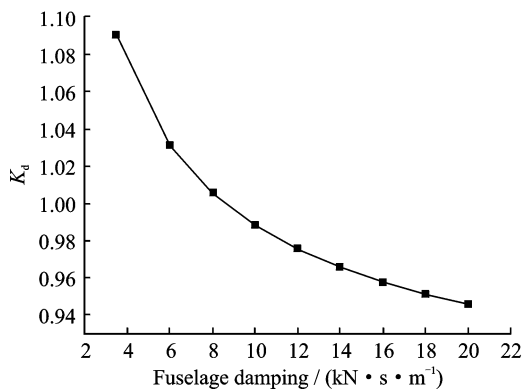
Fig. 6 Influence of aircraft wheel tire stiffness on K_d 

图 7 机身缓冲系统阻尼对动载系数的影响

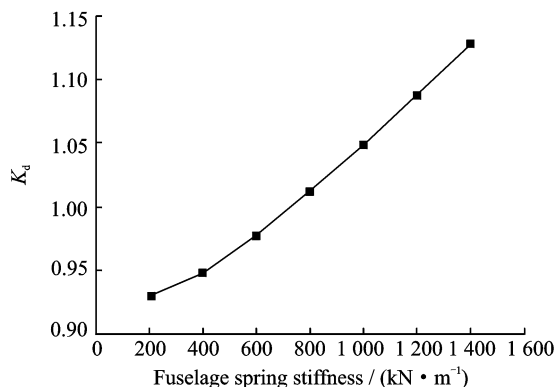
Fig. 7 Influence of fuselage damping on K_d 

图 8 机身缓冲系统刚度对动载系数的影响

Fig. 8 Influence of fuselage spring stiffness on K_d

加近似呈线性变化。机身缓冲系统阻尼增大,动载系数则减小;机轮轮胎刚度及机身缓冲系统刚度增加,动载系数则增大。

4 结 论

本文基于 IRI,对道面不平整引起的飞机动载作用进行了理论探讨,并讨论了动载系数影响因素,主要得到以下结论:

(1)动载系数随速度增加呈非线性变化,且呈先增大后减小的趋势;道面平整度等级对动载系数的影响极为显著,是影响飞机对道面动力作用的最关键因素。随道面平整度状况的恶化,飞机振动系统对道面结构的冲击荷载不断增大;飞机重量与 LIF 呈非线性关系,因此动载系数随飞机重量的增加呈非线性变化;飞机高速滑行时动载系数随飞机重量变化的离散程度较大,此时随飞机重量增加,飞机对道面的动力作用增大,重量对动载系数的影响不可忽视。随着航空运输的发展,大型飞机不断涌现,其离地速度和载重都在不断提高,机场在道面设计及维护过程中必须注意动载对道面动力作用的影响。

(2)动载系数随机轮轮胎刚度、机身缓冲系统阻尼及刚度的增加近似呈线性变化。机身缓冲系统阻尼增大,动载系数则减小;机轮轮胎刚度及机身缓冲系统刚度增加,动载系数则增大。

(3)采用本文提出的动载系数分析模型可根据不同工况快速计算得到飞机对道面的动载,研究成果可为道面设计、维护与道面结构动力响应分析提供参考。

参考文献:

- [1] 孙璐,邓学钧. 飞机对机场道面的随机动压力[J]. 重庆交通学院学报,1996,15(4):14-20.
Sun Lu, Deng Xuejun. Random pressure generated by airplane-airfield interactions [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1996, 15(4):14-20.
- [2] 孙璐,邓学钧. 平整度与机场道面谱分析[J]. 华东公路,1996,19(2):35-39.
Sun Lu, Deng Xuejun. The analysis for roughness and airfield pavement spectrum [J]. East China Highway, 1996, 19(2):35-39.
- [3] Sun Lu, Zhang Zhanming, Ruth J. Modeling indirect statistics of surface roughness[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001,127(2): 105-111.
- [4] 黄立葵,盛灿花. 车辆动荷系数与路面平整度的关系[J]. 公路交通科技,2006,23(3):27-30.
Huang Likui, Sheng Canhua. Relationship between vehicle dynamic amplification factor and pavement roughness[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,23(3):27-30.
- [5] 陈洪兴,何兆益. 基于国际平整度指数 IRI 的路面不平整仿真研究[J]. 公路,2008,53(11):155-160.
Chen Hongxing, He Zhaoyi. A study on simulation of road roughness based on international roughness index[J]. Highway, 2008,53(11):155-160.

- [6] 长春汽车研究所. GB/T 7031—1986. 车辆振动输入路面平度表示方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986. Changchun Automotive Research Institute. Vehicle vibration-describing method for road surface irregularity[S]. Beijing: Standards Press of China, 1986.
- [7] 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.
- [8] 黄晓明. 路面动荷载与路面平整度关系的随机分析[J]. 东南大学学报, 1993, 23(1): 56-61. Huang Xiaoming. The spectral analysis of the surface roughness and pavement dynamic loads[J]. Journal of Southeast University, 1993, 23(1): 56-61.
- [9] 王直民, 张土乔, 吴小刚. 不平整路面上的车辆等效动载系数[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(6): 1007-1011. Wang Zhimin, Zhang Tuqiao, Wu Xiaogang. Equivalent vehicle dynamic load coefficient on rough pavement [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(6): 1007-1011.
- [10] 刘锐琛. 飞机地面滑行动力响应分析[J]. 航空学报, 1987, 8(12): B601-B610. Liu Ruichen. The analysis for dynamic response during airplane taxiing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1987, 8(12): B601-B610.
- [11] 赵济海, 王哲人, 关朝雳. 路面不平度的测量分析与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000: 15. Zhao Jihai, Wang Zheren, Guan Zhaoli. Measurement analysis and application of road roughness[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000, 15.
- [12] 张献民, 董倩, 吕耀志, 等. 水泥混凝土跑道边缘区域力学响应[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 693-699. Zhang Xianmin, Dong Qian, Lü Yaozhi, et al. Mechanical responses of edge of rigid airport pavement under aircraft loadings[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(5): 693-699.
- [13] 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. Zhang Xianmin, Chen Xinchun, Dong Qian, et al. PCN calculation method for composite pavement based on equivalent displacement [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4): 532-538.
- [14] 许金余, 赵国藩. 机场水泥砼道面动载系数的研究[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(3): 367-370. Xu Jinyu, Zhao Guofan. Study of dynamic load coefficient of airfield's cement concrete pavement [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(3): 367-370.
- [15] 许金余, 范建设, 李为民. 机场水泥混凝土道面表面特性及随机振动分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 163. Xu Jinyu, Fan Jianshe, Li Weimin. Analysis of airport cement concrete pavement surface characteristics and random vibration[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009: 163.
- [16] 秦飞. 飞机着陆滑跑动响应分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. Qin Fei. Analytical dynamic responses of aeroplane in landing and taxiing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [17] 同济大学. MH/T5024—2009. 民用机场道面评价管理技术规范[S]. 北京: 中国民用航空局, 2009. Tongji University. MH/T5024—2009. Technical specification for civil airport pavement evaluation and management[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2009.

