

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.024

基于多自由度飞机模型的机场道面平整度评价方法

程国勇 郭稳厚

(中国民航大学机场学院,天津,300300)

摘要:从三自由度飞机模型出发,提出了新的机场道面平整度评价理论,以不同平整度等级的 3 条测线的道面高程作为输入,在 Matlab/Simulink 环境中对飞机的三自由度振动方程进行求解,得到飞机机身的 3 个振动响应量:纵向俯仰角 φ 、横向滚转角 θ 及质心处竖向位移。在此基础上计算出道面整机平整度指数(Full aircraft roughness index, FARI)沿跑道纵向的分布曲线;同时计算出相同道面的国际平整度指数(International roughness index, IRI)。分别将 FARI, IRI 与在相应道面上滑行的飞机加权加速度均方根值进行了相关性分析,相关系数分别为 0.980 6 和 0.886 9。结果表明整机平整度指数 FARI 更能够客观反应飞机所有机轮覆盖范围内道面起伏情况对飞机滑行过程中颠簸量的影响效果,更适合于机场道面平整度的评价。

关键词:道路工程;整机平整度指数;软件模拟;三自由度飞机模型;Simulink 仿真

中图分类号:U416 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)04-0606-09

Airport Pavement Roughness Evaluation Based on Three-Degree-of-Freedom Aircraft Model

Cheng Guoyong, Guo Wenhou

(Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: Based on the three-degree-of-freedom aircraft model, a new airport pavement roughness evaluation theory is proposed. Taking three lines with different roughness grades as input, the three-degree-of-freedom vibration equation of the aircraft model is solved using Matlab/Simulink, through which the three vibration responses are obtained, namely, pitching angle φ , transverse roll angle θ and vertical displacement at the center of mass. By utilizing three vibration response parameters, the distribution of full aircraft roughness index (FARI) along pavement longitudinal direction is acquired. Simultaneously, the international roughness index (IRI) parameter along the same line is calculated. Then the relevance between FARI and the aircraft root mean square value of weighted acceleration, and the relevance between IRI and the aircraft root mean square value of weighted acceleration are analyzed, respectively. The corresponding correlation coefficients are 0.980 6 and 0.886 9. The results show that FARI is a more objective parameter to describe the aircraft bumpy effect in the taxiing process because of pavement fluctuation in the range of all aircraft wheel covering. Therefore, FARI is more suitable for airport pavement roughness evaluation.

Key words: road engineering; full aircraft roughness index; software simulation; three-degree-of-freedom aircraft model; Simulink simulation

收稿日期:2015-01-30;修订日期:2016-01-26

通信作者:程国勇,男,教授,硕士生导师,E-mail:gy_cheng@126.com。

引用格式:程国勇,郭稳厚. 基于多自由度飞机模型的机场道面平整度评价方法[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(4):606-614. Cheng Guoyong, Guo Wenhou. Airport pavement roughness evaluation based on three-degree-of-freedom aircraft model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(4):606-614.

1960年美国国有公路运输管理员协会(American association of state highway and transportation officials, AASHTO)道路试验研究表明,大约95%的路面服务性能来自于道路表面的平整度;长期路面性能(Long term pavement performance, LTPP)的研究也表明,路面平整度严重影响路面使用寿命^[1]。目前国际上应用最广的平整度评价指标是国际平整度指数(International roughness index, IRI),美国 and 大部分欧洲国家均采用 IRI 为平整度验收指标^[2]。但该指标于机场道面平整度评价中的适用性问题越来越受到质疑^[2],主要包括:不能反映飞机在不同轮迹带道面激励下飞机综合的振动反应;不能反映飞机所有机轮覆盖范围内的道面起伏情况对飞机滑行颠簸的影响效果;没有充分考虑飞机由于尺寸较大而与单条测线平整度相关性较差的情况。

基于此,本文将建立三自由度飞机力学模型,求解其振动方程,构造与该模型相应的平整度评价指标,并用 Matlab 软件里的 Simulink 工具对该模型进行建模并仿真,探究机场道面平整度的评价新方法。

1 模型建立及仿真

本文建立的三自由度飞机力学模型如图1所示。图1中: $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, k_{31}$ 和 k_{32} 分别为起落架前轮胎、前悬挂、左后轮胎、左后悬挂、右后轮胎和右后悬挂的刚度系数; c_1, c_2 和 c_3 分别为前悬挂、左后悬挂和右后悬挂的阻尼系数; m_1, m_4, m_5 和 m_6 分别为机身、前轮胎、左后轮胎和右后轮胎的质量; J_x, J_y 分别为飞机模型绕 x 轴和 y 轴的转动惯量; q_1, q_2 和 q_3 分别为前轮胎、左后轮胎和右后轮胎下的道面激励; Z_1, Z_4, Z_5 和 Z_6 分别为机身、前轮胎、左后轮胎和右后轮胎的竖向位移; X, Y 和 Z 分别为纵向(飞机滑行方向)、水平横向和竖向; θ 和 φ 分别为飞机的横向滚转角和飞机的纵向俯仰角; O 为飞机质心; a, b 和 $2l$ 分别为飞机质心到前起落架的距离、质心到两后起落架连线的垂直距离和两主起落架之间的距离。

本文建立的模型仿真系统包括3个部分,分别为道面激励子系统、振动处理子系统和指标处理子系统。

1.1 道面 Simulink 模型

大量实测数据表明道(路)面高程为平稳、遍历、均值为零的 Gaussian 过程,在时域内是各态历

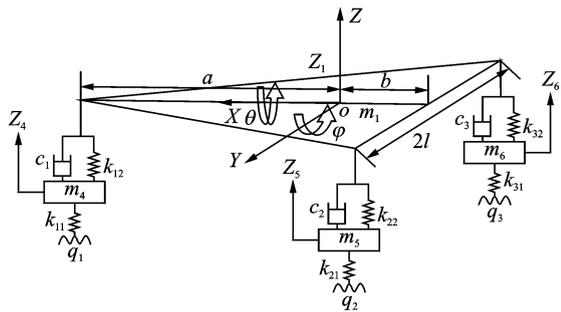


图1 飞机三自由度物理模型

Fig. 1 Plane model of three-degree-of-freedom

经的平稳随机过程^[3]。可以用不同形式的三角级数进行重构^[4],因此将道面看做是一组波长、振幅和相位不同的正弦波的叠加,空间频率 n (波长的倒数)范围为 (n_1, n_2) ,将区间 (n_1, n_2) 划分为 N 个小区间,第 i 个小区间的中心频率为 n_{mid-i} ,区间宽度为 Δn ,所对应的道面位移功率谱密度为 $G_q(n_i)$,则

$$\Delta n = \frac{n_2 - n_1}{N} \quad (1)$$

$$n_{mid-i} = n_1 + (i - 1/2)\Delta n \quad (2)$$

$$G_q(n_i) = G_q(n_{mid-i}) = G_q(n_0) \left(\frac{n_{mid-i}}{n_0}\right)^{-\omega} \quad (3)$$

式中: n_0 为参考空间频率; ω 为频率指数; $G_q(n_0)$ 为不平度系数,不同 $G_q(n_0)$ 下的路面谱值见表1^[5-6];则该区间的功率谱为 $G_q(n_i)\Delta n$,由巴什瓦等式^[7]得其标准差为 $\sqrt{G_q(n_{mid-i})\Delta n}$,所以该区间对应的正弦信号为

$$\sqrt{2G_q(n_{mid-i})\Delta n} \sin(2\pi n_{mid-i}x + \alpha_i) \quad (4)$$

将 N 个这样的正弦波叠加起来得到道面随机激励为

$$q_j(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_q(n_{mid-i})\Delta n} \sin(2\pi n_{mid-i}x + \alpha_i) \quad (5)$$

式中: x 为道面飞机滑行方向距起点的距离; $q_j(x)$ 为第 j 条轮迹带下面的道面激励($j=1, 2, 3$); N 为将频率范围 (n_1, n_2) 均分所得小区间数量; α_i 为均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 的随机数。

以文献[8]中建立标准路面模型的方法为依据选择相关参数: $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$; $n_1=0.011 \text{ m}^{-1}$; $n_2=2.830 \text{ m}^{-1}$; $N=500$; $\omega=2.00$ 。

根据式(1~5),利用 Matlab 编写道面激励程序,可绘出3条A级道面激励沿道面的纵向分布,如图2所示。

表1 路面不平度八级分类标准

Tab. 1 Eight-grade classification standard of pavement roughness

路面等级	$G_q(n_0)/(10^{-6} \text{ m}^3)$ ($n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$)	$\sigma/(10^{-3} \text{ m})$ ($0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1}$)
A	16	3.81
B	64	7.61
C	256	15.23
D	1 024	30.45
E	4 096	60.90
F	16 384	121.80
G	65 536	243.61
H	262 144	487.22

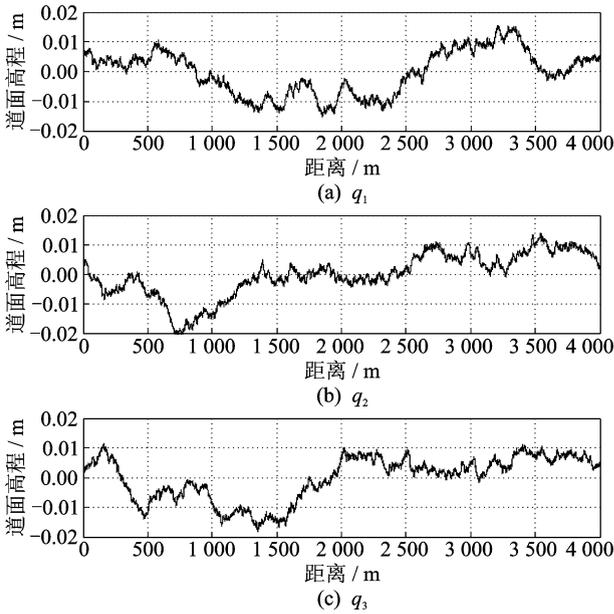


图2 A级道面

Fig. 2 Road surface of class A

使道面等级分别为 B, C, D, 并根据表 1 更换对应的 $G_q(n_0)$ 的值, 保持其他参数值不变, 运行道面激励生成程序, 可得相应等级道面激励的纵向分布, 如图 3~5 所示。

调用 Simulink 工具箱里面的相应模块建立三自由度飞机的机场道面平整度模型, 模拟评价系统中的道面激励子系统, 如图 6 所示。该子系统包含模块: From Workspace1 为从 Matlab 工作空间获取模块 1; From Workspace2 为从 Matlab 工作空间获取模块 2; From Workspace3 为从 Matlab 工作空间获取模块 3; Gain 1 为增益模块 1; Gain 2 为增益模块 2; Gain 3 为增益模块 3; Add 为加模块; Out 为输出端口模块。其中: From space 模块的功能为从工作空间和存储工作区中读取数据作为输入信号; Gain 模块的功能为使输入的信号乘

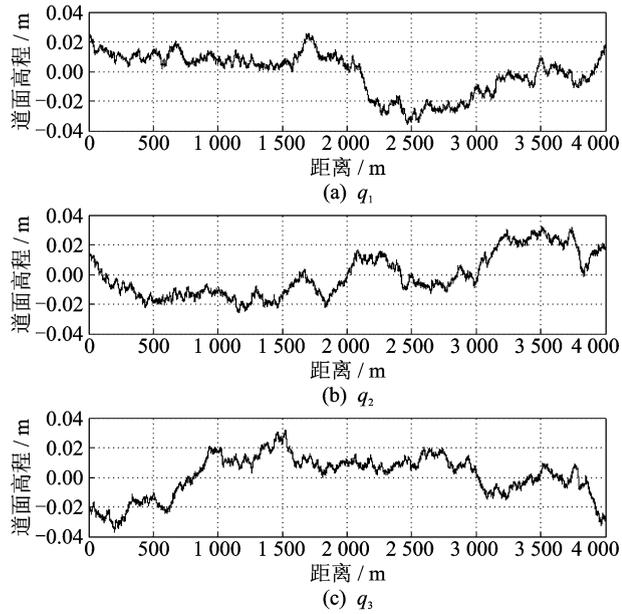


图3 B级道面

Fig. 3 Road surface of class B

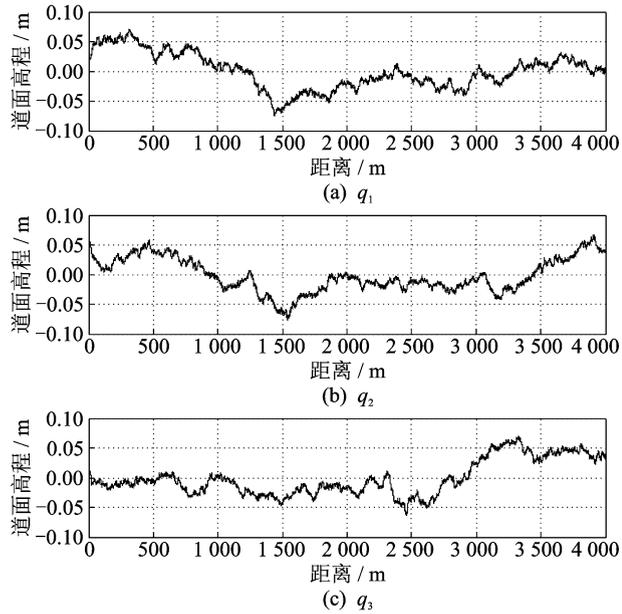
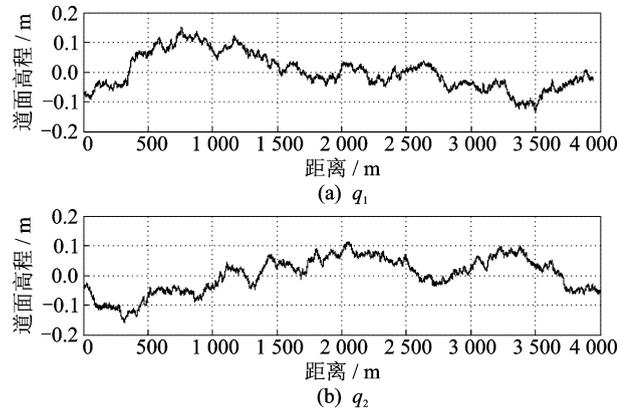


图4 C级道面

Fig. 4 Road surface of class C



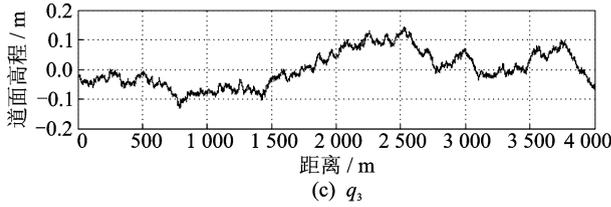


图 5 D 级道面

Fig. 5 Road surface of class D

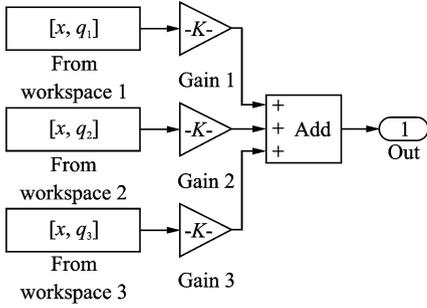


图 6 道面激励子系统 Simulink 模型

Fig. 6 Simulink model of road surface excitation subsystem

以一个向量,使信号转化为向量的形式;Add 模块的作用是对两个或多个信号进行求和运算;Out 模块作用是将信号输入到下一级。

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_3 & -c_1 a + c_2 b + c_3 b & 0 & -c_1 & -c_2 & -c_3 \\ -c_1 a + c_2 b + c_3 b & c_1 a^2 + c_2 b^2 + c_3 b^2 & 0 & c_1 a & -c_2 b & -c_3 b \\ 0 & 0 & c_2 l^2 + c_3 l^2 & 0 & c_2 l & -c_3 l \\ -c_1 & c_1 a & 0 & c_1 & 0 & 0 \\ -c_2 & -c_2 b & c_2 l & 0 & c_2 & 0 \\ -c_3 & -c_3 b & -c_3 l & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[K]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} k_{12} + k_{22} + k_{32} & -k_{12} a + k_{22} b + k_{32} b & 0 & -k_{12} & -k_{22} & -k_{32} \\ -k_{12} a + k_{22} b + k_{32} b & k_{12} a^2 + k_{22} b^2 + k_{32} b^2 & 0 & k_{12} a & -k_{22} b & -k_{32} b \\ 0 & 0 & k_{22} l^2 + k_{32} l^2 & 0 & k_{22} l & -k_{32} l \\ -k_{12} & k_{12} a & 0 & k_{12} + k_{11} & 0 & 0 \\ -k_{22} & -k_{22} b & k_{22} l & 0 & k_{22} + k_{21} & 0 \\ -k_{32} & -k_{32} b & -k_{32} l & 0 & 0 & k_{32} + k_{31} \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据式(6~14),利用 Simulink 工具箱中 Continuous 模块库中的相关模块建立模型系统的振动处理子系统,如图 7 所示。该系统所包含模块:In 为输入模块;Gain 1 为增益模块 1;Gain 2 为增益模块 2;Gain 3 为增益模块 3;Gain 4 为增益模块 4;Gain 5 为增益模块 5;Gain 6 为增益模块 6;

1.2 三自由度飞机的动力学、数值及 Simulink 模型

建立飞机三自由度物理模型如图 1,模型中机体为刚体,不考虑自身变形对其运动状态的影响。

由于本文研究的道面类型主要为水泥混凝土道面,刚度很大,变形很小,可以不用考虑飞机轮胎和道面的刚度耦合作用^[9],且轮胎刚度系数对振动的影响要远大于其阻尼系数的影响^[10],因而本文模型不计轮胎阻尼,对于图 1 所示的动力学模型,利用拉格朗日方程建立其振动微分方程为

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = [K_r]\{q\} \quad (6)$$

式中

$$\{Z\} = \{z_1, \varphi, \theta, z_4, z_5, z_6\}^T \quad (7)$$

$$\{\dot{Z}\} = \{\dot{z}_1, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{z}_4, \dot{z}_5, \dot{z}_6\}^T \quad (8)$$

$$\{\ddot{Z}\} = \{\ddot{z}_1, \ddot{\varphi}, \ddot{\theta}, \ddot{z}_4, \ddot{z}_5, \ddot{z}_6\}^T \quad (9)$$

$$\{q\} = \{q_1, q_2, q_3\}^T \quad (10)$$

$$[M]_{6 \times 6} = \text{diag}\{m_1, J_y, J_x, m_4, m_5, m_6\} \quad (11)$$

$$[K_r]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{21} & 0 \\ 0 & 0 & k_{31} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Gain 7 为增益模块 7;Add 为加模块;Integrator 1 为积分模块 1;Integrator 2 为积分模块 2;Out 为输出端口模块。其中:In 模块的作用是做为子系统里面的一个接受外部输入的一个端口从子系统的上一级接受变量向量;Integrator 模块的作用是对信号进行积分。

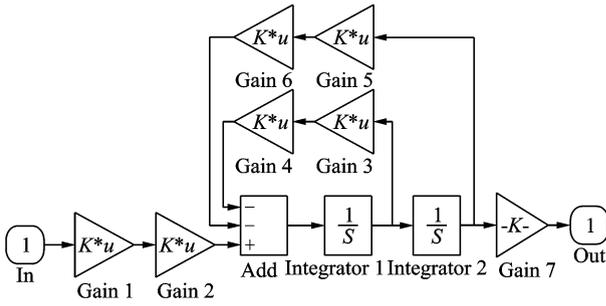


图7 振动处理子系统 Simulink 模型

Fig. 7 Simulink model of vibration processing subsystem

三自由度飞机模型可选取任意一种起落架形式为前三点式飞机的参数做为计算参数,本文以波音707-320C型飞机原始数据^[11-13]为例,选取模型参数如下: $m_1 = 1.44 \times 10^5 \text{ kg}$; $m_4 = 156 \text{ kg}$; $m_5 = m_6 = 2294 \text{ kg}$; $J_x = 5.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $J_y = 7.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $a = 16.66 \text{ m}$; $b = 1.32 \text{ m}$; $2l = 6.73 \text{ m}$; $k_{11} = 2.37 \times 10^6 \text{ N/m}$; $k_{21} = k_{31} = 1.7 \times 10^7 \text{ N/m}$; $k_{12} = 1.92 \times 10^6 \text{ N/m}$; $k_{22} = k_{32} = 5.54 \times 10^6 \text{ N/m}$; $c_1 = 3.61 \times 10^4 \text{ (N} \cdot \text{(m/s)}^{-1})$; $c_2 = c_3 = 2.13 \times 10^5 \text{ (N} \cdot \text{(m/s)}^{-1})$ 。

将以上参数代入式(11~14)得

$$[M]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1.44 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.28 \times 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.28 \times 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 156 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2294 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2294 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[C]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 4.62 \times 10^5 & -3.91 \times 10^4 & 0 & -3.61 \times 10^4 & -2.13 \times 10^5 & -2.13 \times 10^5 \\ -3.91 \times 10^4 & 1.08 \times 10^7 & 0 & 6.01 \times 10^5 & -2.81 \times 10^5 & -2.81 \times 10^5 \\ 0 & 0 & 4.82 \times 10^6 & 0 & 7.17 \times 10^5 & -7.17 \times 10^5 \\ -3.61 \times 10^4 & 6.01 \times 10^5 & 0 & 3.61 \times 10^4 & 0 & 0 \\ -2.13 \times 10^5 & -2.81 \times 10^5 & 7.17 \times 10^5 & 0 & 2.13 \times 10^5 & 0 \\ -2.13 \times 10^5 & -2.81 \times 10^5 & -7.17 \times 10^5 & 0 & 0 & 2.13 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[K]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 1.3 \times 10^7 & -1.74 \times 10^7 & 0 & -1.92 \times 10^6 & -5.54 \times 10^6 & -5.54 \times 10^6 \\ -1.74 \times 10^7 & 5.52 \times 10^8 & 0 & 3.20 \times 10^7 & -7.31 \times 10^6 & -7.31 \times 10^6 \\ 0 & 0 & 1.25 \times 10^8 & 0 & 1.86 \times 10^7 & -1.86 \times 10^7 \\ -1.92 \times 10^6 & 3.20 \times 10^7 & 0 & 4.29 \times 10^6 & 0 & 0 \\ -5.54 \times 10^6 & -7.31 \times 10^6 & 1.86 \times 10^7 & 0 & 2.25 \times 10^7 & 0 \\ -5.54 \times 10^6 & -7.31 \times 10^6 & -1.86 \times 10^7 & 0 & 0 & 2.25 \times 10^7 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[K_r]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2.37 \times 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 1.7 \times 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7 \times 10^7 \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式(15~18)中的数值输入到图7所示的振动处理子系统中,设置道面等级依次为A,B,C和D,运行系统,得到与图3~6对应的飞机振动响应量 Z_1 , $a\varphi$ 和 $l\theta$,如图8~11所示。

1.3 新评价指标 FARI 的构建

由于IRI只能反映1/4车模型悬挂的竖向累积位移,不能反映飞机滑行过程中对机械磨损、乘客舒适性和燃油消耗等影响较为显著的飞机横向

的滚转效应和纵向的俯仰效应。

IRI表达式^[14]为

$$\text{IRI} = \frac{1}{L'} \int_0^{L'} |Z_2' - Z_1'| dx \quad (19)$$

IRI来源的1/4车模型如图12所示。图中: L' 为IRI输出间隔长度; Z_0' 为道面不平度; Z_1' 为1/4车模型轮胎竖向位移; Z_2' 为1/4车模型车体竖向位移; k_1' 为1/4车模型轮胎刚度系数; k_2' 为1/4车

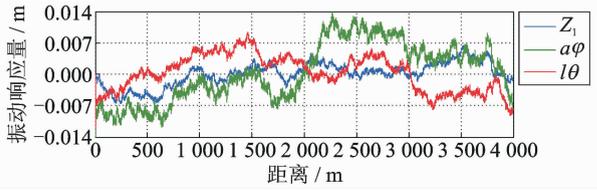


图 8 A 级道面振动响应

Fig. 8 Pavement vibration response of class A

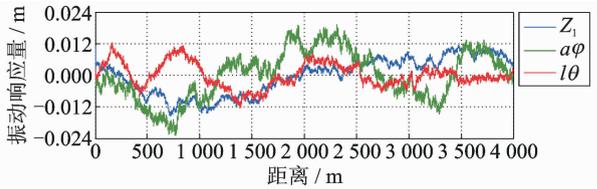


图 9 B 级道面振动响应

Fig. 9 Pavement vibration response of class B

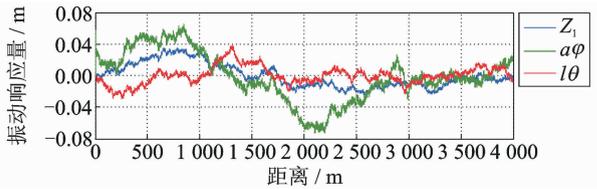


图 10 C 级道面振动响应

Fig. 10 Pavement vibration response of class C

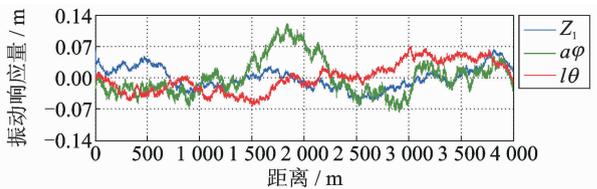


图 11 D 级道面振动响应

Fig. 11 Pavement vibration response of class D

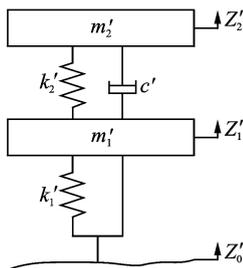


图 12 1/4 车模型

Fig. 12 Quarter car model

模型悬架刚度系数; c' 为 1/4 车模型悬架阻尼系数; m_1' 为 1/4 车模型非悬挂系统质量(车轮质量); m_2' 为 1/4 车模型悬挂系统质量(车身质量)。

因此,依据 1/4 车模型推导得 IRI 的原理,由三自由度飞机模型推得整机平整度指数(Full aircraft roughness index, FARI),表达式为

$$FARI = \frac{1}{L} \left(\int_0^L |Z_1| dx + \int_0^L |a\varphi| dx + \int_0^L |l\theta| dx \right) \quad (20)$$

式中: L 为 FARI 输出间隔长度; Z_1 为飞机模型质心处纵向位移; a 为飞机模型质心到前起落架的距离; l 为飞机模型主起落架间距的一半; φ 为飞机模型俯仰角; θ 为飞机模型滚转角。

由式(20)可知,新指标 FARI 由 3 部分组成,分别为:飞机质心处的累积竖向位移量、俯仰效应引起的前起落架处机身累积位移量以及滚转效应引起的位于飞机质心处机身横截面最边缘位置的累积竖向位移量。

根据式(20),Simulink 工具箱 Continuous 模块库中的相关模块建立模型系统的指标处理子系统如图 13 所示。该子系统所包含模块:In 为信号输入模块;Abs 为取绝对值模块;Gain 为增益模块;Pulse generator 为脉冲发生器模块;Integrator limited 为定积分模块;Out 为输出端口模块。其中:Abs 模块的作用是对信号取绝对值使其全部为正;Pulse generator 模块的作用是以一定的间隔产生脉冲信号;Integrator limited 模块的作用是以脉冲信号间隔为界限对信号进行定积分。

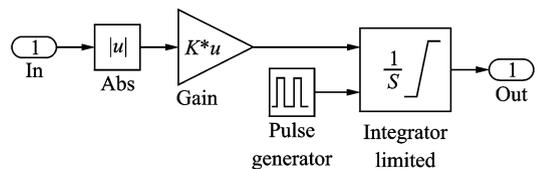


图 13 指标处理子系统 Simulink 模型

Fig. 13 Simulink model of index processing subsystem

道面等级依次取 A,B,C 和 D,运行系统,得到不同道面等级的 FARI 值沿道面纵向分布如图 14~17 所示。

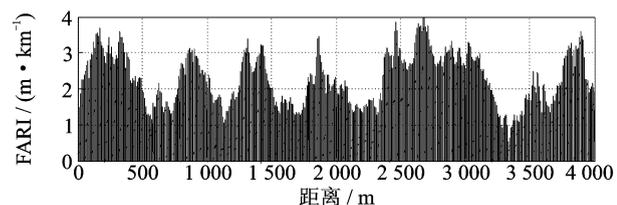


图 14 A 级道面的 FARI 分布

Fig. 14 Road surface FARI distribution of class A

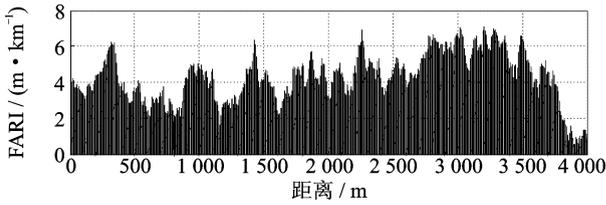


图 15 B级道面的 FARI 分布

Fig. 15 Road surface FARI distribution of class B

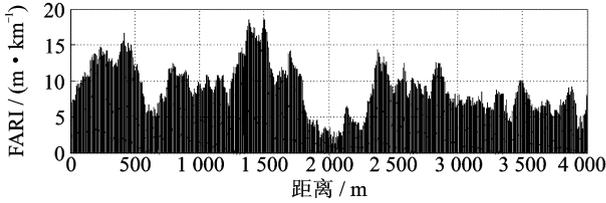


图 16 C级道面的 FARI 分布

Fig. 16 Road surface FARI distribution of class C

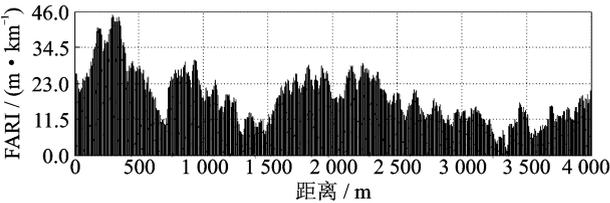


图 17 D级道面的 FARI 分布

Fig. 17 Road surface FARI distribution of class D

由图 14~17 可知:A 级道面激励下整机平整度指数取值范围为 0~4 m/km;B 级道面激励下整机平整度指数取值范围为 0~8 m/km;C 级道面激励下整机平整度指数取值范围为 0~20 m/km;D 级道面激励下整机平整度指数取值范围为 0~46 m/km。由图知 FARI 的值随道面等级的降低而升高,这是由于随着道面等级的降低道面越来越不平整,从而引起的飞机颠簸量越来越大,单位距离内的飞机累积颠簸量也越来越大,所以 FARI 值越来越大,这与实际情况相符合。

2 评价指标分析

目前平整度评价指标较多,对平整度评价指标进行评判的标准一般从以下 4 个方面考虑,即飞机的油耗、飞机的机械磨损、道面的损坏程度或者乘客的舒适性。本文将从乘客的舒适性方面考虑,通过研究 FARI 与其相关性,从而对 FARI 进行评判。目前国际上使用最广泛的振动舒适性标准是 ISO 2631-1—1997^[15]和 BS 6841—1987^[16],两个标

准均采用加权加速度均方根值作为基本评价指标^[2],其计算公式如下

$$a_w = \left[\frac{1}{X} \int_0^X a_w^2(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

式中: X 为分析距离长度; $a_w(x)$ 为瞬时频率加权加速度幅值。

通过研究 FARI,IRI 和 $a_w(x)$ 的相关性,得到更为优越的道面平整度评价指标。相关系数计算公式如下

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n u_i v_i - \sum_{i=1}^n u_i \times \sum_{i=1}^n v_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n u_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n u_i \right)^2} \times \sqrt{n \sum_{i=1}^n v_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n v_i \right)^2}} \quad (22)$$

式中: n 为所取数据的组数; u_i 为整机平整度指数 FARI 或 3 条测线的国际平整度指数 IRI 的平均值; v_i 为加速度均方根值。

将各子系统系统进行组合得完整仿真系统如图 18 所示。系统中所包含模块:Subsystem 1 为道面激励子系统模块;Subsystem 2 为振动处理子系统模块;Subsystem 3 为指标处理子系统模块;Scope 为示波器模块;Out 为输出端口模块。

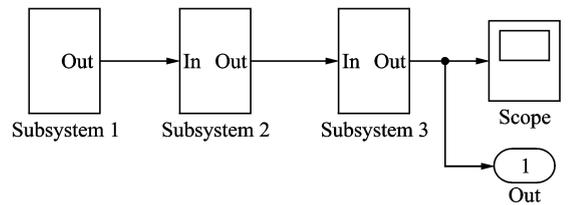


图 18 模型总系统 Simulink 模型

Fig. 18 Simulink model of total system

模拟 A~D' 八个等级的 8 条跑道道面的高程数据,其中 A',B',C' 和 D' 为介于上下相邻两个道面等级之间的道面等级,其值为上下相邻两个道面等级不平整度系数值的中值。模拟道面长度 4 000 m,离散间隔 1 m,飞机参数参考美国波音 707-320C 型飞机,运行基于三自由度飞机模型的道面平整度评价仿真系统,得到相应的整机平整度指数 FARI,通过 Matlab 编程,计算对应不同等级道面的飞机的加权加速度均方根值 a_w (该加速度为飞机质心处竖向加速度、俯仰效应引起的前起落架处机身竖向加速度机身以及滚转效应引起的位于飞机质心处机身横截面最边缘位置的竖向加速度三者的均值),结果见表 2。

表 2 不同等级道面的 FARI 和对应的 a_w

Tab. 2 FARI of different grades of pavement surface and corresponding a_w

道面等级	$G_q(n_0)/$ ($10^{-6} m^3$)	FARI/ ($m \cdot km^{-1}$)	$a_w/$ ($m \cdot s^{-2}$)
A	16	1.1	0.326 6
A'	40	2.2	0.429 8
B	64	3.1	0.687 6
B'	160	4.5	0.856 7
C	256	7.5	0.961 4
C'	640	10.4	1.120 1
D	1 024	16.1	1.261 2
D'	2 560	24.4	1.327 5

依据表 2 数据,由式(21)计算的整机平整度指数 FARI 和加权加速度均方根值 a_w 的相关系数 $r_1=0.980 6$ 。将 a_w 作为因变量 y ,FARI 作为自变量 x ,得拟合表达式为

$$y=0.043 8x+0.484 3 \quad (23)$$

参照世界银行公布的 IRI 计算源程序,用 Matlab 编程计算 A~D' 八个等级道面的 IRI 值,取每个等级道面 3 条测线的 IRI 平均值为该级道面的 IRI 值,并计算对应不同等级道面的飞机的加权加速度均方根值 a_w ,结果见表 3。

表 3 不同等级道面的 IRI 和对应的 a_w

Tab. 3 IRI of different grades of pavement surface and corresponding a_w

道面等级	$G_q(n_0)/$ ($10^{-6} m^3$)	IRI/ ($m \cdot km^{-1}$)	$a_w/$ ($m \cdot s^{-2}$)
A	16	1.202 4	1.612 6
A'	40	2.431 7	1.998 4
B	64	3.205 9	2.267 7
B'	160	5.131 4	2.432 3
C	256	7.176 2	2.603 4
C'	640	8.013 4	3.013 9
D	1 024	9.675 3	4.066 5
D'	2 560	10.723 0	6.005 3

依据表 3 数据,由式(22)计算的国际平整度指数 IRI 和加权加速度均方根值 a_w 的相关系数 $r_2=0.886 9$ 。对比可知 $r_1>r_2$,即 FARI 与 a_w 的相关程度要大于 IRI 与 a_w 的相关程度,因此用 FARI 来表示道面的平整度要比 IRI 更为合理。

3 评价指标的量化分级

由于整机平整度指数 FARI 与加权加速度均方根值 a_w 有着较好的相关性,因此可以依据 a_w 的标准对 FARI 进行量化分级。加权加速度均方根

值与行车舒适性的关系见表 4^[17]。

表 4 加权加速度均方根值与行车舒适性的关系
Tab. 4 Relationship between weighted RMS value and driving comfort

加权加速度均方根值/ ($m \cdot s^{-2}$)	人体舒适程度
<0.315	没有不舒适
$0.315 \sim 0.630$	稍不舒适
$0.5 \sim 1.0$	有些不舒适
$0.8 \sim 1.6$	不舒适
$1.25 \sim 2.50$	非常不舒适
>2.0	极不舒适

对比表 2,4,以表 4 中人的舒适度标准为依据,可以将道面不平度分为 3 个等级:当 $a_w=0.63$ 时,由式(23)整机平整度指数 FARI=3.3,此时的加速度值是舒适与不太舒适的界限;当 $a_w=1.25$ 时,得整机平整度指数 FARI=17.5,此时的加速度值是不舒适与很不舒适的界限。以这两个界限为分界点对 FARI 分级如表 5 所示。

表 5 整机平整度指数评价标准

Tab. 5 Evaluation standard of FARI

评价等级	好	中	差
FARI	<3.3	$\geq 3.3, \leq 17.5$	>17.5

表 5 即为整机平整度指数的分级标准,对于波音 707-320C 型飞机,当 FARI 值小于 3.3 时,道面平整度的情况为良好,当 FARI 大于等于 3.3 且小于等于 17.5 时,道面平整度的情况为中等,当 FARI 大于 17.5 时,道面平整度的情况为差。

4 结束语

本文构建了道面激励数学模型,建立了飞机的三自由度力学振动模型,给出并求解了其振动方程,提出了新的平整度评价指标 FARI。通过研究发现 FARI 比 IRI 更适合于机场道面平整度评价,并对 FARI 进行了分级,给出了分级标准。本文结果为机场道面平整度评价提供了新视角和新方法。

参考文献:

[1] 周晓青,孙立军,颜利. 路面平整度评价发展趋势[J]. 公路交通科技,2005,22(10):18-22.
Zhou Xiaqing, Sun Lijun, Yan Li. Research progress and trend of pavement roughness indices[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(10): 18-22.

[2] 张洪亮,杨万桥. 基于人-车-路五自由度振动模型的

- 路面平整度评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4):16-22.
- Zhang Hongliang, Yang Wanqiao. Evaluation method of pavement roughness based on 5-DOF human-vehicle-road vibration model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4):16-22.
- [3] Lu Sun. Simulation of pavement roughness and IRI based on power spectral density[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 61(4):77-88.
- [4] 聂彦鑫, 李孟良, 过学迅, 等. 基于谐波叠加法的路面不平度重构[J]. 汽车科技, 2009(4):55-58.
- Nie Yanxin, Li Mengliang, Guo Xuexun, et al. Road roughness simulation based on partial wave adding model[J]. Auto Mobile Science and Technology, 2009(4):51-58.
- [5] 中国汽车技术研究中心. GB/T 7031—1986. 车辆振动输入与路面平度表示方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- China Automotive Technology & Research Center. GB/T 7031—1986. Vehicle vibration-describing method for road surface irregularity [S]. Beijing: Standards Press of China, 1986.
- [6] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. GB/T 7031—2005. 道路路面谱测量数据报告[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- National Committee on Mechanical Vibration and Impact Standardization. GB/T 7031—2005. Measurement data report of road surface spectrum[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [7] 赵济海, 王哲人. 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.
- Zhao Jihai, Wang Zheren. Road roughness measurement analysis and application[M]. Beijing: Beijing Institute of Press, 2000.
- [8] 潘双夏, 陈助碧, 冯培恩. M-File S函数在时域路面不平度建模中的应用[J]. 中国机械工程学报, 2006, 4(4):379-384.
- Pan Shuangxia, Chen Zhubi, Feng Peien. Investigating M-File S-function on time-domain road roughness modeling[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006, 4(4):379-384.
- [9] 张洪亮, 王秉纲, 杨万桥. 基于人-车-路三自由度振动模型的路面平整度评价方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(6):1041-1045.
- Zhang Hongliang, Wang Binggang, Yang Wanqiao. Pavement roughness evaluation method based on three-degree-freedom models including human, vehicle and road[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(6):1041-1045.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Yu Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.
- [11] 刘莉, 杨国柱, 何庆芝. 飞机地面滑行随机振动分析[J]. 航空学报, 1993, 14(4):126-132.
- Liu Li, Yang Guozhu, He Qingzhi. Analysis of statistical vibration in aircraft during taxiing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(4):126-132.
- [12] 刘莉, 杨国柱, 何庆芝. 起落架缓冲系统参数对飞机滑行状态响应的影响[J]. 航空学报, 1992, 13(6):266-273.
- Liu Li, Yang Guozhu, He Qingzhi. Influences of landing gear system on dynamic response in aircraft during taxiing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1992, 13(6):266-273.
- [13] Tung C C. The effects of runway roughness on the dynamic response of airplanes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 5(1):164-168.
- [14] Sayers M W, Gillespie T D, Queiroz C A V. International road roughness experiment: A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements[J]. Transportation Research Record, 1986: 76-85.
- [15] International Organization for Standardization. ISO 2631-1—1997. Mechanical vibration and impact-evaluation of human exposure to whole-body vibration-part1: General requirement [S]. [S.l.]: IX-ISO, 1997.
- [16] British Standards Institute. BS 6841—1987. Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [S]. BK: BSI, 1987.
- [17] 杨万桥. 基于人-车-路相互作用的沥青路面平整度评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- Yang Wanqiao. Research on asphalt pavement evaluation method based on human-vehicle-road interaction [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.