

# 基于 ADAMS 的机场道面平整度评价方法

蔡宛彤<sup>1</sup>, 种小雷<sup>1</sup>, 王海服<sup>1\*</sup>, 张罗利<sup>2</sup>

(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** 现有机场道面平整度评价标准没有按照飞机在跑道和滑行道滑行速度的不同加以区分,针对这一问题,在确定飞机在滑行道和 A、B 两级机场跑道代表速度的基础上,以 3 m 波长作为机场道面最不利波长、0.40g 作为不舒适的评价标准,利用机械系统动力学分析软件 ADAMS 对飞机作用下的道面动态响应进行分析,得到不同道面平整度的最大凹陷允许标准。分析结果表明:滑行道道面平整度的最大凹陷允许标准为 57 mm,A 级机场道面平整度的最大凹陷允许标准为 12 mm,B 级机场道面平整度的最大凹陷允许标准为 19 mm;道面最大凹陷允许标准与飞机滑跑速度密切相关,而不依赖于机场等级。

**关键词** 机场工程;道面;平整度;评价;ADAMS

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.004

**中图分类号** V351.11;U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0015-05

## An Evaluation Method for Roughness of Airport Pavement Based on ADAMS

CAI Wan-tong<sup>1</sup>, CHONG Xiao-lei<sup>1</sup>, WANG Hai-fu<sup>1\*</sup>, ZHANG Luo-li<sup>2</sup>

(1. Airport Architecture Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Airport and Construction Section of Air Force Logistics Department, Beijing 100720, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that airport pavement roughness evaluation indexes and standards fail to make strict distinction between the two different slipping speeds of aircraft respectively on runway and taxiway in existing standard, taking three-meter wavelength as the most disadvantageous wavelength to airport pavement, and taking 0.40g as a discomfort evaluation standard on the basis of airplane speed representative value on the taxiway and on runway of airport rand A and rand B, this paper analyzes the dynamic response of pavement under the action of aircraft by using software ADAMS. The analyzed results show that allowable roughness of taxiway pavement is 57 mm and runway for airport class A is 12 mm, for class B is 19 mm. The analytic results indicate that the allowable roughness is rather closely related with the airplane slipping speed than the airport classification.

**Key words:** airport engineering; pavement; roughness; evaluation; ADAMS

收稿日期:2013-06-14

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:蔡宛彤(1988—),女,浙江宁波人,博士生,主要从事机场规划与设计研究。

\* 通信作者:王海服(1985—),男,博士生,主要从事机场规划与设计研究.E-mail:wanghaifu12@yahoo.com.cn

引用格式:蔡宛彤,种小雷,王海服,等.基于 ADAMS 的机场道面平整度评价方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):15-19. CAI Wantong, CHONG Xiaolei, WANG Haifu, et al. An evaluation method for roughness of airport pavement based on ADAMS[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 15-19.

机场道面平整度是指道面表面相对于理想平面的竖向偏差,或者说道面表面诱使行驶飞机出现振动的高程变化,它会影响到飞机动力特性、行驶质量、道面所受动荷载及排水。机场道面的不平整会增加飞机轮胎的磨损和燃油消耗,而且对飞机的机械性能及道面损坏速率等产生直接或间接影响<sup>[1-4]</sup>。因此,平整度作为度量道面使用性能的一项重要指标,其特性和量测方法便成为机场道面维护研究中最被关注的问题之一<sup>[5-8]</sup>。

现有机场道面平整度评价指标和标准主要是参照公路路面平整度规范制定的,由于飞机胎压、起落架构型及荷载作用特性与车辆存在一定的差异,且现行的标准对跑道和滑行道没有加以区分,故平整度评价标准应区别对待。现行的测试方法主要为3 m直尺法和平整度测试仪法,这2种方法均要进行一定的实测,且数据处理工作量巨大。近年来,在道路工程上对于路面和车辆的耦合作用分析多采用机械系统动力学分析软件ADAMS。只要路面模型得当,其计算结果对实际情况的吻合度很好。但这种方法在机场道面平整度研究中应用较少。本文将ADAMS引入到机场跑道平整度模拟中,通过对跑道道面不同平整度情况的模拟,分析飞机在不同滑行速度下的动态响应,以确定飞机在不同速度下最大允许凹陷标准,在此基础上制定出合乎飞机运行特点的机场道面评价方法。

## 1 全机仿真模型的建立

采用ADAMS软件进行飞机滑跑仿真,需要建立全机装配模型,主要包括:机身子系统、前起落架子系统、主起落架子系统、前起落架机轮子系统、主起落架机轮子系统以及刹车子系统(可不选)。由于Aircraft模块为用户提供大量典型飞机子系统的模板,所以用户可以直接调用所需的子系统,或根据需要重新建立并修改相应的参数,最后用装配命令将各子系统装配成整机模型<sup>[9]</sup>。本文的研究重点不是飞机的设计与分析,而是用飞机的虚拟样机模型来研究机场道面平整度情况,所以采用ADAMS所配套的标准模块,所建立的飞机模型是验证过的标准样机模型。本文所采用的某型飞机结构参数见表1。

表1 某型飞机质量重心处结构参数

Tab.1 Parameter of aircraft structure

坐标/m		转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )		
X轴	Z轴	X轴	Y轴	Z轴
11.43	2.54	58 527.9	87 791.9	58 527.9

## 2 仿真参数的确定

### 2.1 飞机滑跑速度代表值的确定

本文主要采用2种滑行速度进行仿真:①滑行道代表速度:飞机在滑行道上的滑跑速度一般在20~40 km/h,故本文取40 km/h作为代表速度进行仿真;②跑道滑跑的代表速度:不同机型在跑道上的滑跑速度对不同等级机场跑道的平整度评价标准影响较大,限于篇幅,本文以A、B 2个等级的机场为例,取起飞离地速度最大的机型作为相应等级机场的代表机型进行分析,A级机场I型飞机速度350 km/h,B级机场II型飞机速度287 km/h(取290 km/h),进而制定出A、B级机场跑道平整度的评定标准。

### 2.2 道面最不利波长的确定

机场道面最不利波长是指在该波长情况下,飞机动力响应(重心处水平位移、竖向位移、速度、加速度)反应剧烈,各指标值方差较大。孙立军<sup>[10-11]</sup>对1~100 m波长情况下飞机的动力响应进行模拟分析,得出飞机在低速滑行阶段(即对应于滑行道)最不利波长(敏感波长)为3 m和6 m。高速情况下(即对应于机场跑道)最不利波长为3 m、6 m、7 m。鉴于目前机场主要采用“3 m直尺”进行平整度测试,并制定相应的评价标准,本文将3 m波长作为机场道面最不利波长进行分析研究。

### 2.3 最不利波长下的动态响应

要利用ADAMS软件模拟确定机场道面最不利波长下最大隆起或凹陷标准,必须给出一个与飞机在最不利波长下动态响应的相关关系。文献<sup>[11]</sup>中提出采用飞机重心处的竖向加速度作为舒适度的评价指标。对于竖向加速度标准,波音公司从飞机的疲劳寿命出发,得到了0.25g、0.55g和0.80g的3级标准;一些机场道面研究中采用了0.35g的标准;而目前研究结果表明,当竖向加速度大于0.40g时,会使乘客感觉不舒适,同时飞机长期在这种条件下运行,会很快地降低起落架和机身结构以及跑道道面结构的疲劳寿命。

本文采用了0.40g作为不舒适的评价标准,通过仿真分析发现,最不利波长下飞机重心处加速度均值接近于0,因此可以将加速度标准差作为加速度的代表值,并以此来作为加速度的衡量值。对于低速仿真情况,按统计学相关原理,对于均值为0的数列将3倍标准差作为最大值,故本文将加速度的标准差作为加速度大小的判断标准。

### 3 最不利波长下最大隆起或凹陷标准的确定

#### 3.1 滑行道最大隆起或凹陷标准

本文根据机场滑行道道面的实际情况,建立仿真道面。仿真速度为 40 km/h,不考虑风速等外界因素的影响,主要考虑最不利波长下道面不同波高对飞机模型的动力响应(重心处的水平位移、竖向位移、速度、加速度)。滑行道道面长度 30 m,波长 3 m,波数 10,由于滑行道上飞机速度低,其平整度要求相应低于跑道,模拟计算预设波幅可取大些,参考文献[10],取 10.16~81.28 mm 间隔 10.16 mm,分别编号 1~8,见表 2。部分仿真结果见图 1~2。

表 2 3 m 波长滑行道道面相关参数表

Tab.2 Simulation parameter for taxiing way with 3 m wavelength

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
波高/mm	10.16	20.32	30.48	40.64	50.80	60.96	71.12	81.28

受摩擦系数的影响,运行到后阶段时,飞机滑跑速度稍微有所降低,但影响很小,从图 1 可见,当飞机后轮还没有进入不平整道面时,飞机重心竖向位移变化幅度很小,飞机模型重心处竖向位移主要受后轮的影响,由于道面是隆起的波形,故当飞机进入隆起道面时,其重心处加速度急剧上升,当后轮全部进入不平整道面后,竖向位移随道面波形的变化而产生有规律的波形变化,同时可以看出随着道面波

幅的增加,飞机竖向位移响应增加。从图 2 可见,当飞机后轮还未进入不平整区时,正向加速度小于负向加速度,随后当前后轮都进入仿真道面后,正负向加速度急剧增加,且随道面波形呈有规律的变化,同时随着波幅的增加,竖向加速度成倍增加。

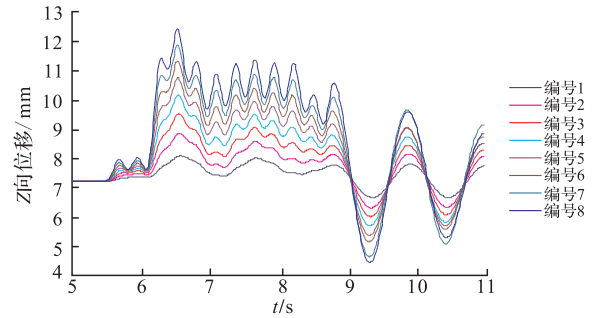


图 1 飞机重心的 Z 方向位移(滑行道道面)

Fig.1 Vertical displacement of c-g with 3 m wavelength

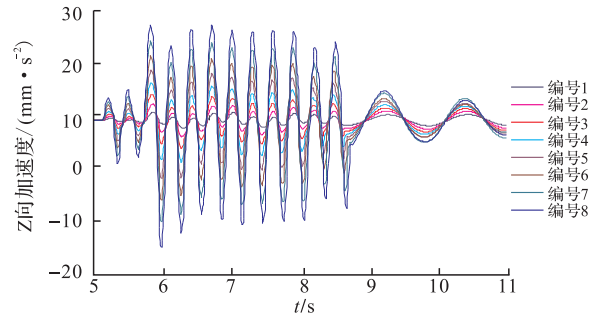


图 2 飞机重心的 Z 方向的加速度(波长为 3 m)

Fig.2 Vertical acceleration of c-g with 3 m wavelength

本文对仿真分析过程中每 0.01 s 采集一次数据,通过对 601 个不同波幅情况下飞机重心处加速度进行采集分析,见表 3。

表 3 滑行道滑行时飞机重心处加速度

Tab.3 Acceleration of c-g for aircraft on taxiing way

计算值	波幅/mm							
	10.16	20.32	30.48	40.64	50.80	60.96	71.12	81.28
$a_{max}$	10.58	19.82	31.79	47.22	64.97	85.09	107.40	131.71
$a_{min}$	-10.73	-23.32	-39.62	-58.67	-80.06	-103.56	-129.11	-155.78
平均值	-0.25	-0.65	-1.10	-1.57	-2.02	-2.52	-2.98	-3.12
方差	31.15	136.06	383.25	881.27	1 763.40	3 178.95	5 289.37	8 229.54
标准差	5.58	11.66	19.58	29.69	41.99	56.38	72.73	90.72
3 倍标准差	16.744 18	34.993 55	58.729 97	89.058 77	125.978 5	169.146 5	218.184 14	272.150 39

根据 0.40g 的不舒适度评定标准,当飞机滑行速度在 40 km/h 代表速度时,由表 3 可看出,机场道面最大凹陷允许值应在 50.80~60.96 mm 波幅之间,采用插值法可得为 57.50 mm,取整为 57 mm。因此,本文建议将 60 mm 作为采用 3 m 直尺法检测机场滑行道道面平整度的最大凹陷允许标准。

#### 3.2 跑道最大隆起或凹陷标准

A 级机场仿真速度取 I 型飞机 350 km/h, B 级机

场取 II 型飞机 290 km/h。仿真过程中同样没有考虑风速等外界因素的影响,主要考虑最不利波长下道面、不同波幅对飞机模型的动力响应。

本文设跑道长度 150 m,波长 3,波数 50,借鉴当前机场道面平整度评价标准中最大允许为 25 mm,文中对模拟计算的预设道面波幅取值为 2.54~20.32 mm,间隔为 2.54 mm,编号 1~8,见表 4,部分仿真结果见图 3~4。

表 4 3 m 波长跑道道面相关参数表  
 Tab.4 Simulation parameter for runway  
 with 3 m wavelength

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
波幅/mm	2.54	5.08	7.62	10.16	12.70	15.24	17.78	20.32

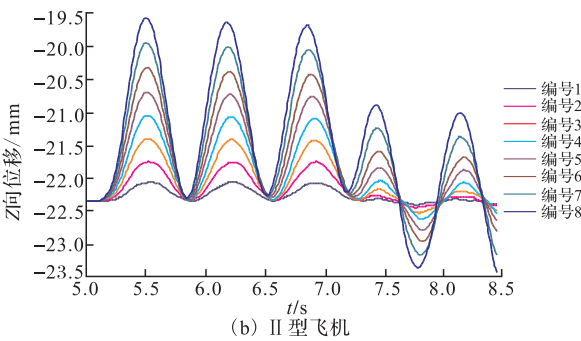
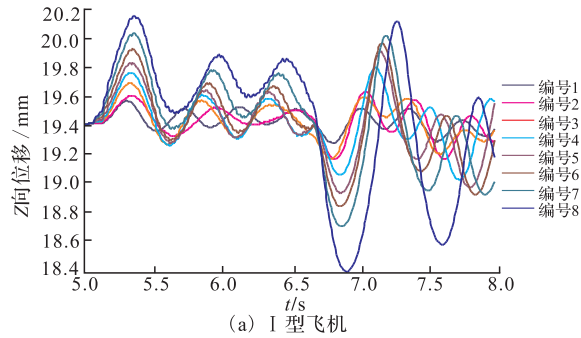


图 3 飞机重心的 Z 方向位移(跑道道面)

Fig.3 Vertical displacement of c-g on runway

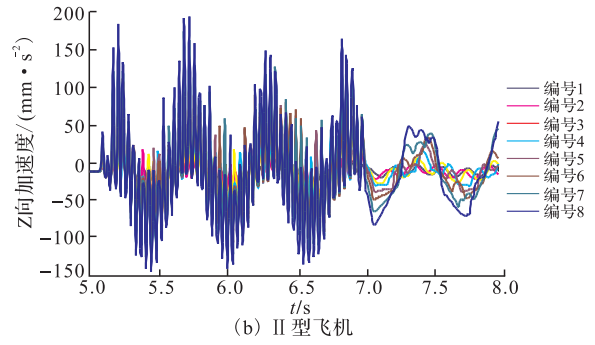
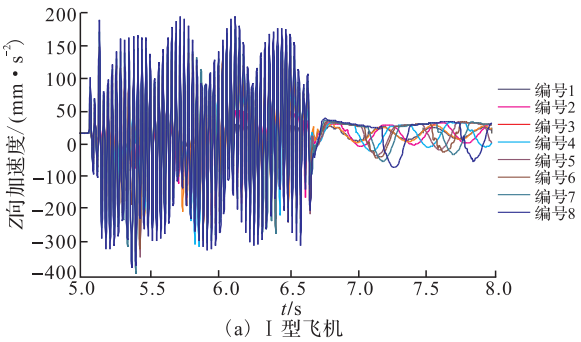


图 4 飞机重心的 Z 方向的加速度(跑道道面)

Fig.4 Vertical acceleration of c-g on runway

受摩擦系数的影响,运行到后阶段时,飞机滑跑速度稍微有所降低,由于飞机滑行速度较大,影响很小。从图 3 可见,飞机在跑道上滑行与在滑行跑道同样不存在前后轮进入的顺序问题,当前后轮都进入跑道不平整区域方可进行分析,此时竖向位移随道面波形的变化而产生了规律的波形变化,同时可以看出随着道面波幅的增加,飞机竖向位移显著增加,其规律与滑行跑道仿真基本相同。从图 4 可以看出,随着波幅的增加,竖向加速度成倍增加。

本文在采用 ADMAS 对 II 型和 I 型飞机在跑道上滑跑过程进行仿真分析时,数据仍按每 0.01 s 采集一次,由于飞机在跑道上滑跑速度较快,故共采集 301 个点,通过对 301 个不同波幅情况下飞机重心处加速度进行采集,取前后轮均进入不平整区域时段内飞机重心处加速度进行分析,见表 5~6。

根据 0.40g 的不舒适度评定标准,当 I 型飞机滑跑速度为本文给定的 A 级机场代表速度 350 m/s 时,由表 5 可看出,机场跑道道面最大凹陷值应在 10.16~12.70 mm 波幅之间,采用插值法计算为 11.94 mm,取整为 12 mm。此标准与现有平整度评价标准中评定为“优”的“3 m”直尺间隙极大值相同。本文建议将 12 mm 作为采用 3 m 直尺法检测 A 类型机场跑道道面平整度的最大凹陷允许标准。

表 5 跑道滑行时 I 型飞机重心处加速度

Tab.5 Acceleration of c-g for aircraft I on runway

计算值	波幅/mm							
	2.54	8.08	7.62	10.16	12.70	15.24	17.78	20.32
$a_{max}$	22.13	43.39	72.85	94.70	117.14	140.08	159.20	173.57
$a_{min}$	-65.47	-124.64	-160.04	-167.71	-183.75	-182.69	-205.46	-190.97
平均值	-1.46	-1.47	0.50	0.33	1.28	-0.50	-1.96	-1.80
方差	252.35	923.92	1 273.81	2 058.22	2 920.34	4 291.66	5 703.28	6 849.03
标准差	15.89	30.40	35.69	45.37	54.04	65.51	75.52	82.76
3 倍标准差	47.66	91.19	107.07	136.10	162.12	196.53	226.56	248.28

表 6 跑道滑行时 II 型飞机重心处加速度

Tab.6 Acceleration of c-g for aircraft II on runway

计算值	波幅/mm							
	2.54	8.08	7.62	10.16	12.7	15.24	17.78	20.32
$a_{max}$	22.13	43.39	72.85	94.70	117.14	140.08	159.20	173.57
$a_{min}$	12.32	24.55	37.55	53.49	66.81	84.77	126.38	141.45
$a_{min}$	-12.23	-21.51	-31.99	-42.54	-55.45	-68.15	-79.73	-91.51
平均值	-0.71	-1.64	-2.22	-3.34	-4.13	-4.54	-4.58	-5.53
方差	32.72	136.39	308.20	570.98	895.84	1 535.94	2 256.28	3 082.98
标准差	5.72	11.68	17.56	23.90	29.93	36.55	44.23	50.82
3 倍标准差	17.16	35.04	52.67	71.69	89.79	117.57	142.50	166.57

当 II 型飞机滑跑速度在本文给定的 B 级机场代表速度 290 m/s 时,由表 6 可看出,机场跑道道面最大凹陷值应在 17.78~20.32 mm 波幅之间,采用插值法可得为 19.02 mm,取整为 19 mm。本文将 19 mm 作为采用 3 m 直尺法检测 B 类型机场跑道道面平整度的最大凹陷允许标准。

## 4 结语

本文针对现有机场道面平整度标准没有对跑道和滑行道加以区分的现状,应用机械系统动力学分析软件 ADAMS 对飞机作用下的道面动态响应进行分析,得到滑行道道面平整度的最大凹陷允许标准为 57 mm, A 级机场跑道道面平整度的最大凹陷允许标准为 12 mm, B 级机场为 19 mm。这与人们的常规思维相差较大。一般认为随着机场等级的提高,道面平整度要求也会越高,但道面的响应对飞机滑跑速度和质量较为敏感,不依赖于机场等级,这与实际是相符的。同时仿真过程中所采用的起落架形式为 ADMAS 默认形式,评价标准的适用性有待进一步检验和修正。

## 参考文献 (References):

- [1] 周晓青,孙立军,颜利.路面平整度评价发展及趋势[J].公路交通科技,2005,10(22):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, 10(22): 18-22. (in Chinese)
- [2] 王新明,王秉纲.高速公路路面功率谱[J].交通运输工程学报,2003,3(2):53-56.  
WANG Xinming, WANG Bingang. Expressway pavement-power spectral density[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2003, 3(2): 53-56. (in Chinese)
- [3] 马荣贵,宋宏勋,来旭光.激光路面平整度检测系统[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):38-41.  
MA Ronggui, SONG Hongxun, LAI Xuguang. Pavement-

roughness measurement system based on laser displacement-sensors[J]. Journal of changan university: natural science edition, 2006, 26(2): 38-41. (in Chinese)

- [4] Federal aviation administration. Advisory circular 150/5380-6B. Guidelines and procedures for maintenance of airport pavements[R]. Washington D C: USA department of transportation, 2007.
- [5] 宋一凡,陈榕峰.基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J].交通运输工程学报,2007,7(4):39-43.  
SONG Yifan, CHEN Rongfeng. Analysis method of vehicle vibration response caused by pavement roughness[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2007, 7(4): 39-43. (in Chinese)
- [6] Federal aviation administration. Advisory circular 150/5320-6E. Airport pavement design and evaluation [R]. Washington, D C: USA federal aviation administration, 2009.
- [7] Shahin M Y, Keifer Kurt A, Burkhalter Jeffrey A. Airport pavement management: enhancements to micro payer[C]// The federal aviation administration airport technology transfer conference. Washington D C: FAA, 2002: P-57.
- [8] Papaleo Steven. Airport pavement maintenance management systems summary report[R]. Australia: Airport planning pty ltd, 1998.
- [9] 晋萍.飞机起落架动态性能仿真分析[D].南京:南京航空航天大学,2003.  
JIN Ping. Simulation analysis of dynamic behavior for airplane landing gear[D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics and astronautics, 2003. (in Chinese)
- [10] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智.路面平整度 PSD 和 IRI 评价方法比较[J].交通运输工程学报,2008,8(1):36-41.  
WU Qingxiong, CHEN Baochun, XI Lingzhi. Comparison of PSD method and IRI method for road roughness evaluation [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2008, 8(1): 36-41. (in Chinese)
- [11] 孙立军.道路与机场设施管理学[M].北京:人民交通出版社, 2009.  
SUN Lijun. Transportation infrastructure management system: theory and practice[M]. Beijing: China communications press, 2009. (in Chinese)

(编辑:徐敏)