

专著 出版资助项目
基金 ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

机场水泥混凝土 道面表面特性及随机振动分析

许金余 范建设 李为民 编著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

出版基金资助项目

机场水泥混凝土道面表面特性 及随机振动分析

Study on surface characteristics and random vibration
of airfield cement concrete pavement

许金余 范建设 李为民 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书测试和研究了典型机场的道面不平度及其功率谱特性,提出道面不平度指数作为评价机场道面的指标;将机场道面不平度视为随机振源,研究道面不平度的随机激励,并借助 Matlab 对作用于机场道面上的随机动载进行了数值分析;采用弹性半空间地基上的薄板模型,应用有限元法和样条子域法对不同不平度激励下的道面板振动响应进行了计算分析;最后,分析了基于可靠性的机场道面系统的优化。

本书读者对象为从事机场工程和土木工程专业的研究人员和设计人员,以及高等学校的教师、研究生和高年级学生。

图书在版编目(CIP)数据

机场水泥混凝土道面表面特性及随机振动分析/许金余,范建设,李为民编著. —西安:西北工业大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-5612-2507-3

I. 机… II. ①许…②范…③李… III. ①机场—飞机跑道—水泥混凝土路面—表面性质—研究②机场—飞机跑道—水泥混凝土路面—随机振动—分析 IV. V351.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 011360 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpu.com

印刷者:陕西丰源印务有限公司

开本:850 mm×1 168 mm 1/32

印张:9.75

字数:255 千字

版次:2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

现代高科技条件下,机场在飞机执行任务的过程中处于越来越重要的地位。道面是机场的重要组成部分,道面质量直接影响飞机的滑行安全,加之在起飞、降落的滑行状态下,机场跑道的不平度是飞机承载系的主要冲击源,所以,对机场道面表面特性的研究更显得至关重要。

传统的道面设计将道面各层假设为一定厚度的和模量的弹性匀质体,假设道面所承受的飞机荷载为集中荷载或均布荷载。由于这些假设与实际不一致,所以很难解释道面出现不均匀破坏的原因,也很难解释为什么有的道面具有良好的使用性能,而同样设计、施工的有些道面很早就被破坏了。现行《民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范》以及《军用机场水泥混凝土道面设计规范》中仍然是将飞机静载乘上一个经验放大系数,以此来考虑飞机动力作用的影响。现在有必要重新审视以前的一些道面假设以及由此得出的各种结论。由于动载和静载对道面材料特性、结构特性的影响有着本质区别,将道面所承受的滑行飞机荷载假设为静载乘上经验放大系数显然不合适,由此而建立的道面响应模型也不能反映道面的实际状况。为了建立符合实际情况的道面响应模型,必须对道面所承受的随机激励荷载进行分析,研究不同不平度激励下的随机荷载作用特征及其对道面动力响应的影响。

然而,在已有的研究中,人们要么将飞机的滑行情况简化为移动的集中荷载,要么简化为正弦波荷载,不论哪种简化都与实际情况有较大出入,而且,通常采用的有限元方法也存在着许多不足。因此,进一步研究道面不平度的随机支承激励,并采用经济有效的

计算方法分析机场道面在不平度激励下的动力响应,研究道面结构破坏机理,为机场道面设计提供符合实际的设计参数,成为研究的关键,本书正是在这一系列研究的基础上形成的。

本书测试和研究了典型机场的道面不平度及其功率谱特性,提出道面不平度指数作为评价机场道面的指标,从而反映了道面对飞机的随机激振能量随激励频率的分布情况;将机场道面不平度视为随机振源,建立并求解飞机在不平度激励下的非线性自适应随机接地印迹轮胎力学模型、全机滑行动力学方程及与道面板相互作用的微分方程,以此研究了道面不平度的随机激励,并借助 MATLAB 对作用于机场道面上的随机动载进行了数值分析;采用弹性半空间地基上的薄板模型,应用有限元法和样条子域法计算了不同不平度激励下的道面板振动响应,并与实测结果进行了对比、分析;在随机应力作用下,相当一部分机场道面的破坏是疲劳损伤累积的结果,鉴于此,分析了基于可靠性的机场道面系统的优化,为完善机场道面设计奠定了理论基础。

本书由许金余、范建设、李为民编著,由郑颖人院士审校。在编著过程中,白二雷等参与了部分内容的录入和部分图表的绘制工作。在此谨向帮助完成本书的同志表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏及错误之处,衷心希望读者批评指正。

著 者

2008 年 3 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	2
1.2 本书的研究思路及主要内容	15
第 2 章 随机道面不平度与道面谱分析	17
2.1 道面不平度及其描述	17
2.2 道面不平度模拟方法研究	22
2.3 随机过程与随机振动概述	27
2.4 道面不平度模拟	71
2.5 道面不平度功率谱特性研究	82
2.6 道面不平度评价方法研究	87
2.7 道面不平度的小波分析	90
第 3 章 机场道面系统的动力特性	95
3.1 状态变量法概述	95
3.2 道面系统状态方程的建立	98
3.3 道面系统状态方程的解法	102
3.4 转移矩阵的计算	111
3.5 道面系统的脉冲响应函数	120
3.6 脉冲函数的计算	126
3.7 道面系统的频率响应函数	130

第 4 章 飞机滑行动力学模型及其计算方法研究	139
4.1 飞机轮胎模型分析	139
4.2 非线性自适应随机接地印迹轮胎力学模型的提出	143
4.3 非线性自适应随机接地印迹轮胎力学模型的建立	144
4.4 飞机滑行动力学模型的分析与建立	149
4.5 飞机滑行动力学方程及其求解	152
4.6 道面—飞机作用力数值分析	162
第 5 章 道面板随机振动研究	167
5.1 离散线性系统随机振动	167
5.2 非线性系统随机振动	210
5.3 道面不平度激励下道面板随机振动响应的数值 计算方法研究	213
第 6 章 应用实例	249
6.1 J—8 滑行时道面随机激励与响应	249
6.2 S—27 滑行时道面随机激励与响应	252
6.3 H—6 滑行时道面随机激励与响应	254
6.4 小结	255
第 7 章 机场道面系统的可靠性研究	256
7.1 结构可靠性理论及其在机场道面工程中的初步应用	256
7.2 不平度激励下道面板疲劳损伤的累积	261
7.3 不平度激励下道面板疲劳裂纹的扩展	271

7.4 基于可靠性的机场道面系统优化	279
第 8 章 本书主要结论及进一步研究的重点	284
8.1 主要结论	284
8.2 进一步研究的重点	285
附录	287
附录 A 弹性薄板的刚度矩阵	287
附录 B 道面位移功率谱密度计算程序	289
附录 C 道面不平度信号处理程序	291
附录 D 不平度激励荷载计算程序	292
参考文献	296

第1章 绪 论

道面是机场的重要组成部分,道面质量直接影响飞机的滑行安全,加之飞机在起飞、降落的滑行状态下,机场跑道的不平度是飞机承载系的主要冲击源,所以,对机场道面不平度的研究更显得至关重要。尤其是在现代高科技条件下,战争制空权对战争的进程、胜负起着决定性作用,机场道面在飞机执行其职能的过程中,处于越来越重要的地位。

在传统的道面设计中将道面各层假设为一定厚度的和模量的弹性匀质体,假设道面所承受的飞机荷载为集中荷载或均布荷载。由于这些假设与实际不一致,所以很难解释道面出现不均匀破坏的原因,很难解释为什么有的道面具有良好的使用性能,而同样设计、施工的有些道面很早就破坏了。现行《民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范》(MHJ5004—1995)和现行《军用机场水泥混凝土道面设计规范》(GJB1278A—2008)中仍然是将飞机静载乘上一个经验放大系数,以此来考虑飞机动力作用的影响。现在必须重新审视以前的一些道面假设以及由此得出的各种结论。由于动态荷载(动载)和静态荷载(静载)对道面材料特性、结构特性的影响有着本质区别,将道面所承受的滑行飞机荷载假设为静载乘上经验放大系数显然不合适,由此而建立的道面响应模型也不能反映道面的实际状况。为了建立符合实际的道面响应模型,必须对道面所承受的随机激励荷载进行分析,研究不同不平度激励下的随机荷载作用特征及其对道面动力响应的影响。

1.1 国内外研究现状

机场道面结构动力学研究包括两个方面的内容:一是机场道面表面特性及动态荷载研究;二是道面结构在飞机荷载作用下的动力响应研究。

1.1.1 道面表面特性及动态荷载研究方面

1. 国外

美国早在 20 世纪 40 年代就对军用机场跑道不平度进行过功率谱分析。到了 20 世纪 70 年代,由美国海军装备工程司令部资助的机场道面不平度研究项目在 Ferritto 等(1976 年)^[1]的努力下取得了很大的进展,他们运用随机振动理论,通过快速傅里叶变换得出道面功率谱,并对其进行分析。

美国空军飞行动力实验室 Gerardi(1976 年,1977 年)^[2,3]建立了飞机的非对称数学模型,并运用 Lagrange 方程建立了模型的运动方程,由此推导出滑行时飞机重心及驾驶舱等位置的垂直方向振动加速度,并绘制出了不同道面不平度下的飞机振动加速度时间历程曲线。

Lin(1978 年)^[4]研究了飞机起、降时对机场跑道的动力作用问题,他在研究分析中把飞机和跑道视为互相独立的隔离体,分别列出动力方程进行数值求解。他得出的结论为,由于道面不平整的激励,飞机悬挂系统会产生共振,所以飞机对跑道的动载要远大于静载。

Dodds 等(1973 年)^[5]将路面不平度视为是行车偏离实际平坦表面的决定函数,并开始用 PSD(Power Spectral Density 功率谱密度)随机方式描述高速公路的不平度,但 Braun(1991 年)^[6]经过研究则认为 PSD 并不适合低等级道路的不平度研究。

Tevelow(1983 年)^[7]、Marcondes 等(1988 年)^[8]、Antle(1988 年)^[9]通过实验指出,频率高于 50 Hz 的振动对车辆的影响不显著,使车辆发生损坏的主要振动频率在 15~50 Hz 范围内。

根据文献^[10]可知,Carrick 于 1985 年实测了行驶车辆对路面的动态荷载,并计算了动载系数 DLC(动载与静载的和再除以静载),在他所测量的路段中,最大动载系数为 1.57,但他所得到的只是荷载放大系数,并没有与道路结构发生联系。

Gillespie 在一系列文章中^[11-13](1985 年,1986 年,1988 年),对车辆动态荷载的特性进行了阐述,由于路面和轮胎的刚柔差异使得问题变得复杂,他将车辆和路面割裂开来,先假定路面结构为恒单一的均质体,再求取其上的动态荷载。而实际上,路面和车辆荷载是互相依存、相互作用的。

Cebon 等(1988 年,1991 年)^[14,15]做了许多前瞻性的工作,他们对英国各种道路进了大量的实地测量。结果表明,行驶车辆对路面的动载频率在 1~15 Hz 范围内,他们还以不同的破坏准则研究了动荷载对路面破坏的影响,并指出车辆与路面的相互作用力是引起道路破坏的重要因素。

Marcondes(1992 年)^[16]研究了路面不平度的频谱分析方法,建立了路面功率谱密度(PSD)与国际不平度指标(IRI)之间的经验公式,并指出,目前采用的不平度测试技术(如 IRI 法)只是反映路面不平度幅值的变化,而没有反映不平度频率的变化,是很不完善的。

Mark(1992 年)^[17]研究了车辆垂直加速度与 IRI 之间的函数关系,并且根据不同类型的路面结构测定了加速度的均方差。

Drosner(1989 年)^[18],Hunt(1991 年)^[19,20]使用类似线性车辆模型分别研究车辆与路面之间的相互作用、车辆与桥梁之间的相互作用和车辆振动,并运用响应频率方程将车辆振动转换为车辆动态荷载。

Courage(1993 年)^[21], Hao 等(1998 年)^[22]等提出了类似的车辆振动分析模型,动态荷载函数通过车辆振动加速度和高速公路不平度的 PSD 来计算。

Al — Hunaidi (1991 年)^[23]和 Watts (1984—2000 年)^[24,25,26,27,28,29,31,32]通过大量的调查和长期的实验观测,指出车辆振动与路面结构的不平度的离散性有关,他们分析了路面上存在坑洞、裂缝等细观缺陷时的车辆振动规律,他们的工作为车路相互动态作用的研究奠定了坚实的基础。

Holscher(1998 年), Pelgrom(1998 年)和 Westera(2000 年)等人采用了比前人更新更全面的多自由度车辆模型,研究这些模型在路面不平度激励下的动态响应,在他们的研究中,路面不平度模型包括了从高速公路到低等级公路几乎所有的路面结构类型。

国外很早就展开了测试车辆行驶过程中的动荷载研究,最早的测试系统是将称重装置直接放置在高速公路车道上测量轮胎对路面的作用力,非常容易损坏,而且测试结果随车型、车速的不同波动很大,测试结果很不准确。因此,许多研究人员致力于开发比较准确的测试系统。由英国 Case Western Reserve 大学研制的 FASTWEIGH 就是一个比较典型的测试系统,但此系统需要很长的称重垫和功能强大的计算机以实时监控及实时处理数据,而且测得的结果只是车辆的总重量。为获得轮轴动荷载,澳大利亚 Western Australia 大学开发了一种应用应变桥获得车辆动荷载的测试系统——CULWAY,该系统不需要在现场使用计算机。此外,有关运输机械对机场道面的荷载谱方面曾有过一定程度的分析,飞机对跑道形成的随机动压力的样本也有过一些实验记录,如美国的 Waterways 试验站对机场刚性道面和柔性道面在飞机 B—727 和 C—880 动荷载作用下的振动谱进行过大量的测试^[37]。

2. 国内

钟阳等(1992 年)^[38]把车辆分别简化为两自由度和五自由度

体系,初步分析了车辆荷载与行车速度的关系;黄晓明(1993年)^[39]也利用上述模型作了类似的分析。

孙璐等(1997年)^[40]在引入随机过程理论的基础上,利用简化的车辆模型对车路相互作用力进行了研究,详细分析了行车速度、车辆载重、车身后桥阻尼和轮胎刚度等主要因素对动荷载的影响,认为车速增加,车辆对路面的作用力也随之增加,空载车辆在同样车速下比满载车辆更易发生“跳车”现象,但在概率意义上空载车辆对路面的作用力仍然小于满载车辆。轮胎刚度增大,车辆对路面的作用力也增大。

檀润华等(1998年)^[41]应用已有幂函数功率谱的数据确定了有理函数功率谱的参数,建立了一般路面及路面离散事件(路面凹陷、裂缝等)对车辆单点及单轮激励的时域模型,并对该模型进行了仿真。

金睿臣等(1999年)^[42]应用机械分析软件 ADAMS 建立了 11 自由度汽车非线性振动模型,用由伪白噪声法生成的符合实际路面统计特性的伪随机序列来模拟路面不平度,并在此基础上,利用数值算法在时域内对汽车的非线性随机振动响应进行了计算机仿真研究。

邓学钧(2002年)^[43]将车辆与地面结构视为综合体系,用数学模型描述了车辆与路面结构接触面的不平度,建立了随机场,深入研究了在随机振动激励下发生的车辆对路面结构的各种动态荷载,并分三种情况研究了各种运动荷载作用下各类路面结构的动力响应。他的研究成果完全改变了以往以稳态点源荷载,甚至以静力荷载作为动力源,又将车辆和路面结构分开,进行单项研究等不符合实际的研究方法,从而开创了车辆—路面结构动力学理论的新体系。

陶向华等(2003年)^[44]利用建立四分之一车辆模型对车辆的动载特性进行了分析,描述了反映路面不平度的波数功率谱密度

与时间角频率谱密度之间的关系,运用频域模拟分析方法计算了车辆动荷载的功率谱密度、均方根偏差与动载系数 DLC,并且分析了车速与路面不平度对车辆动荷载变化的影响。

李晓雷等(2003 年)^[45]运用小波变换的方法,根据路面样本值,运用 ARMA 模型建立路面不平度时间序列,并建立二分之一车辆模型,将路面不平度时间序列作为输入,来获得车辆振动产生的动荷载。

葛剑敏等(2004 年)^[46]对软路面上车辆的扭转、垂直和纵向振动进行了研究,首先对振动车辆进行单因素(路面不平度、胎压、路面抗压强度和牵引负荷)分析,找出对车辆振动影响显著的因素及影响规律,在此基础上对影响振动的多因素进行正交试验,分析了交互作用对车辆振动的影响规律。

蒯行成等(2005 年)^[47]等以装有平衡悬架系统和全悬浮驾驶室的三轴汽车为研究对象,建立了车辆多自由度振动系统模型,为了便于采用实模态叠加法进行随机振动分析及优化设计,提出了一种阻尼矩阵的等效方法,采用模态阻尼比将系统的实际阻尼矩阵转化为对角阵,在此基础上导出了系统的响应功率谱密度矩阵,并用路面不平度功率谱函数构造车轮所在位置的输入功率谱密度矩阵,对车辆的随机振动进行了分析。

空军工程大学协同南昌飞机制造公司 650 所,在杭州笕桥机场耗资数百万元对 Q—5II 型飞机,在哈尔滨机场对 J—8II 型飞机在试车振动、滑行、刹车、转弯、着陆撞击等情况下的动态荷载进行了大规模的现场实测,这一宝贵的资料对于研究机场道面的动力性能也具有十分重要的价值^[48]。

通过测量车辆轮胎力也可以获得动荷载,测量轮胎力的一种方法是通过测量轮胎的径向或横向变形来确定车轮的垂直反作用力。但这种方法的缺点非常明显,由于动力不仅与轮胎的变形有关,还与轮胎的刚度有关,而轮胎的动态刚度与静态刚度差别很

大,而且与车辆速度、振动频率有复杂的关系,故根据轮胎变形测定垂直反作用力的方法极不准确。与之相比,另一种通过测定车辆悬挂和非悬挂部分不同点的加速度值来确定车辆动态力的方法就比较理想,一方面安装加速度传感器比较方便,测试数据清晰准确,另一方面是试验记录方法已经非常成熟。邓学钧等在南京汽车研究所的协助下,通过在 IVECO 汽车前后四个左轮的轴头及其上方车厢底部安装加速度传感器,分别在南京绕城公路、205 国道、南京长江大桥正桥桥面、大墅至全椒段公路对 IVECO 在匀速行驶时的随机动态荷载进行了测量,获得了一些有价值的资料^[49]。陈静(2002 年)^[50]在其博士论文中也详细描述了对青黄(环胶州湾)高速公路半刚性基层路面动荷载的测量,通过在解放 CA1150P1K2L2A80 前后桥的轴头处安装加速度传感器,分别测试了车辆空载、满载、超载情况下的随机动荷载的时间历程。

由于影响动态荷载的因素很多,使得滑行于道面上的飞机荷载充满了随机性和不确定性,要想准确确定这种动态荷载的值,是非常困难的,如果考虑飞机与道面的动力耦合作用将使问题变得更加复杂。在上述诸多学者的研究中,为使问题得到求解,根据不同的需要从不同角度出发了各种各样的假设和简化。简化是研究的可行手段,但不合理的简化将使问题失真。研究飞机动荷载离不开其产生和作用的环境——机场道面,不同等级、不同使用年限、不同结构类型的道面结构,对飞机的激励不同,并且这种激励还与时间有关,不同的时段产生的激励也存在差异。故在研究飞机动态荷载时,从实际道面出发,根据研究问题的目的,采用合理的飞机模型(并不是越复杂越好),借助于随机过程理论来求解或模拟这种随机荷载,无疑具有巨大的理论价值和工程实际意义。

1.1.2 道面动力响应研究方面

随机荷载作用下道面的动力响应与其在恒载下的静力响应差

别很大,滑行在道面上的飞机,通过机轮把荷载传给道面,由道面传给道基和地基,在道基道面结构内部及地基中产生应力、应变和位移。飞机荷载作用下道面结构的各部分及地基是一个相互影响的有机整体,研究时必须考虑道面结构和道基的相互作用,才能较全面地反映道面的整体变形特性。

1. 国外

国外学者很早就对道路与地基的动力响应问题进行了研究。如美国“战略公路研究计划”就有相当大的部分是研究路面动力学的,欧洲经济发展与合作组织(OECD)在这方面也做了大量的研究。现在路面动力学正成为公路科研领域国际学术界最热门的话题之一。对于移动荷载的动力响应问题,在弹性动力学领域,20世纪50年代就有人进行了研究,但主要是针对弹性均质的空间、半空间或单层板,研究中普遍借助于积分变换这一有力的数学工具。由相关文献^[51-54]可知,Sneddon(1952年)用积分变换方法得到了匀速运动的线状恒定负荷下弹性均质半空间的响应;Cole和Huth(1958年)研究了由运动荷载产生的波来分析爆炸波对半空间表面的影响;Miles和Craggs则分别用不同的方法讨论了更高速的情形;线状负荷下平板的问题是由Fulton,Sneddon和Morley(1955年)用积分变换方法加以解决的;对于三维问题,最早是由Eason,Fuhon和Sneddon(1956年)研究的,他们研究了弹性无限介质内部由匀速运动的恒定点源负荷引起的稳态响应(移动的Stockes问题);Mandel和Avramesco(1961年)用类似的方法研究了半空间的问题(移动的Lamb问题);而移动的Stockes问题和移动的Lamb问题瞬态响应首先是Payton(1964年)用动力互易定理加以确定的;关于移动的Lamb问题瞬态解更精确更完整的分析则是后来由Gakenheimer和Miklowitz(1969年)用积分变换方法给出的,他们获得了半空间内部的位移场;1974年,Mooney发表了Lamb问题的通解,使得有关半空间问题的描述

和求解方法统一起来。可见,精确地分析无限介质和半空间在运动点源荷载作用下的弹性波激发问题就已经相当复杂。而对于含边界的有限尺寸结构,如梁、板、层状介质等,情况就变得更加复杂,希望获得精确瞬态解,几乎是不可能的。数学上面临的困难使得一方面是出现了梁、板等结构的初等理论;另一方面,多层体系的动力响应问题(不仅是运动荷载下的动力响应,甚至是位置不动的动力荷载下的动力响应)的理论研究在1970年以后就很少有人涉足,基本处于停滞状态。

随着大型计算机的广泛应用,以及结构动力力学理论和数值计算方法的发展,这方面的研究在国际上又重新成为热点,但研究方法绝大多数是数值方法。Michael等(1990年)^[55]分析了黏弹性地基上矩形薄板在移动荷载作用下的瞬态响应。黏弹性地基由一系列不连续的弹簧和黏壶组成,交通荷载由两个独立的黏弹性体系组成,两者具有相同的速度,荷载和板的接触假定为点接触;Siddharthan(1993年)^[56]和Zafir(1994年)^[57]利用连续基有限层路面模型分析受到运动交通荷载下的路面响应。Collins等(1993年)^[58]采用振动理论并利用Hankel变换和Laplace反变换技术得到了三维层状路面体系的临界振动荷载,考虑了荷载分布形式、路面各层厚度以及每层材料的强度对临界振动荷载的影响。当荷载小于临界振动荷载时,路面塑性变形随加载循环次数的增加而逐渐趋于稳定,继续施加荷载时不再产生永久变形,而只产生弹性变形;当荷载大于临界振动荷载时,路面永久变形随作用次数而累积,变形持续发展,直到破坏。为了能处理水平面上任意方向的运动荷载,Siddharthan等(1998年)^[59]继续发展了他的模型。现有的Siddharthan模型的荷载可以是更加真实的移动荷载。由于使用了Fourier变换的连续基有限元处理方法,可以处理诸如多荷载和非圆形轮胎路面接触压力的复杂荷载,轮胎印迹可以是任何形式。因此这种模型适用于分析宽基轮胎。另外,此模型运算效