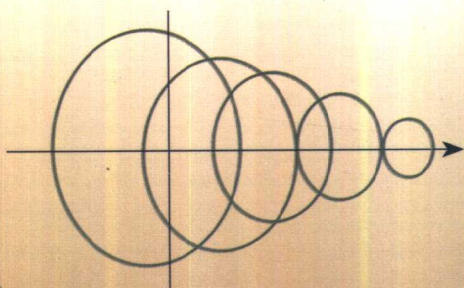
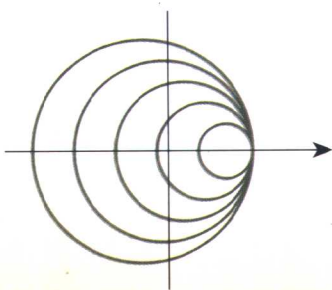
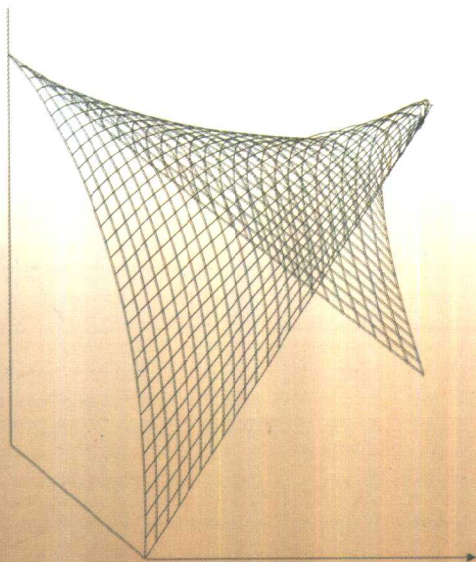


中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科（专业）学术著作

车辆—地面结构

系统动力学

邓学钧 孙璐 著



人民交通出版社

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

Cheliang — Dimian jiegou
Xitong Donglixue

车辆—地面结构系统动力学

邓学钧 孙 璐 著

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

车辆——地面结构系统动力学/邓学钧,孙璐著.

北京:人民交通出版社,2000.4

ISBN 7-114-03627-2

I.车... II.①邓...②孙... III.汽车-关系-路面-系统动态学 IV.U461.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 23502 号

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作
车辆——地面结构系统动力学
邓学钧 孙璐 著

版式设计:刘晓方 责任校对:张捷 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:15.375 字数:402千

2000年8月 第1版

2000年8月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:33.00元

ISBN 7-114-03627-2

U·02623

内 容 提 要

本书将车轮与地面结构视为一个大系统,深入分析这两个系统之间相互作用的运动荷载特性。从理论上阐述了地面结构在车辆随机荷载作用下产生的随机动力响应和动力特性。全书共分为10章,第1章至第6章介绍弹性动力学,车辆动力学和地面动力响应基本理论和必要的基本数学知识;第7章至第10章着重介绍随机动力响应之下地面结构的动力特性。本书所有内容的研究工作曾得到国家自然科学基金委员会等单位的资助。作者孙璐以此研究成果完成的博士学位论文获得全国首届优秀博士学位论文奖励。

本书可供从事车辆地面结构动力学研究、设计理论与设计方法研究的工程师作参考,也可作为这一领域博士、硕士学位研究生的教学、研究参考书籍。

前 言

车辆—地面结构系统动力学是研究载运工具(汽车、火车、飞机)沿地面结构表面(公路、铁道、机场跑道)高速运动时,沿接触界面上产生动力学行为特性的新兴学科分支。由于接触界面的不平整性、激励车辆在运行之中发生随机振动,形成了同时作用在车辆和地面结构的随机振动荷载。

目前世界各国对地面结构的设计均以车辆的静荷载为结构的外力荷载,这在荷载不太大、运行速度较低的情况下,基本上是合理的。然而,随着运动荷载的移动速度越来越快,静力荷载模式与车辆行驶过程中对地面的实际作用力之间的差异越来越大,地面结构的动力学特性也远非静力学特性所能描述。对于高速运行的车辆设计,若缺乏地面动力学理论基础,则很难保证其结构强度和可靠的稳定性。特别是高速行驶的平稳性得不到保证,这将严重危及车辆交通的安全。

地面动力学作为车辆动力学与结构动力学交叉的边缘学科近年来在世界各国倍受重视。美国“战略公路研究计划”以相当大的部分用于地面动力学研究,欧洲共同体也正日益加紧这方面的研究。地面动力学正在成为该领域国际学术界最热门的研究内容。

笔者于1964年在国内最早提出研究地面动力学问题,并发表了题为“路面平整度指标的理论分析”一文。自1985年至今,笔者在该领域的研究工作连续获得三项国家自然科学基金项目的资助:“机场道面承载能力快速评定”(1986—1989)、“道面结构在动荷载作用下的分析与研究”(1989—1992)、“运动随机荷载作用下道

面结构的动力学特性理论研究”(1996—1998),此外还得到高等学校博士学科点专项基金的资助“车—路相互作用的地面动力学研究”(1996—1998)。笔者所完成的本学术专著,汇集了数十年来在本领域进行研究的系列成果,从系统构思至关键问题的论述都有独特之处,以此公之于世,与同行、学者交流,以达到共同推进科学事业之目的。

如果将车辆动力学与结构动力学单独分开考虑,则已有较多著作论述。特别是车辆动力学,运用四分之一车辆模型描述车体悬挂部分质量和非悬挂质量,配置若干弹性原件和粘弹性原件,通过某一假想的频率响应函数进行分析,已为许多学者所熟知。而结构动力学在地面结构中的应用尚不多见,由 G. Martinec 编著的“路面结构动力学”(Dynamics of Pavement Structures, 1994),对路面体多层结构在假想动力荷载作用下应力应变的发生与传播作了详细论述。目前的车辆动力学与地面结构动力学共同的不足之处在于对动力荷载的发生,缺乏深入的研究和论述。而这一发生在车辆与地面结构之间的、随机而又相互制约的动力荷载则是两者动力学分析的关键,特别在车辆高速运行时,更是一项起决定作用的因素。

本学术专著的特点就是将车辆与地面结构视为一个大系统,深入分析这两个分系统之间相互作用的运动荷载特性。在详尽分析了各种地面的波数谱密度之后,利用线性定常系统频率响应函数的概念,从理论上和数值上阐述了车辆振动以及由此产生的对地面的作用力,并建立了随机荷载谱与地面波数谱、车辆动态特性和行车速度之间的定量关系。笔者还研究了进行车辆荷载实验测定的理论基础,提出了一套准确有效的实验方法。通过野外实验结果证明了理论分析的正确可靠。随后,笔者把运动的车辆随机荷载作为地面动力系统的激励源,从理论上阐述了地面结构在这种实际荷载作用下的随机动力响应,提出并严格证明了对处理线

性系统受运动源作用问题具有广泛意义的广义 Duhamel 积分原理,该原理和随后运用的积分变换方法分别把运动源与固定源问题、确定性与随机性问题在数学物理理论上统一起来。对随机偏微分方程的求解获得了 Bornoulli—Euler 梁、Kirchhoff 板、无限介质和弹性半空间介质在运动点源或线源或面源的确定性和随机性荷载激励下所产生的位移场理论解。

本学术专著阐述的理论体系和研究成果国内外均无先例,有一定的独创性,希望本书能成为本领域科技工作者的重要参考书,共同推动车辆—地面结构系统动力学的发展,同时为现代化交通运输车辆和地面结构基础设施的设计、建造提供新的理论基础,使得载运工具与基础设施更加完善。

本书共分为 10 章,第 1 章至第 6 章着重介绍弹性动力学、车辆动力荷载和地面动力响应基本理论,以及必要的基本数学知识;第 7 章至第 11 章为随机动力响应之下地面结构的动力特性分析以及应用推广的初探。

本书所进行的研究工作先后得到国家自然科学基金委员会、国家教委博士点专项科研基金委员会、中国人民解放军空军后勤部、交通部科教司的资助。

在研究工作和本书撰写过程中,得到西北工业大学王尚文教授、清华大学宋镜瀛教授、空军工程学院姚炳卿教授、哈尔滨建筑大学王哲人教授、西安公路交通大学陈荫三教授给予的帮助和指教,在此一并表示感谢。

著 者

一九九八年八月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 车辆—地面相互作用的传统分析方法	2
1.3 车辆—地面结构系统动力学的发展和应用.....	14
第2章 预备的基本数学知识	24
2.1 随机过程与谱分析	24
2.2 数字信号处理	45
第3章 车辆动力荷载	81
3.1 地面不平整度	81
3.2 车辆动力荷载分类.....	93
3.3 车辆振动数学模型.....	98
3.4 车辆随机荷载理论	99
3.5 车辆随机荷载实验及其统计特征	104
第4章 弹性动力学基本理论	143
4.1 笛卡儿张量	143
4.2 运动和变形的描述	153
4.3 应变张量	157
4.4 质量守恒定律与动量定理	163
4.5 场方程的线性化与本构方程	174
4.6 位移表示的运动方程及其解的唯一性	180
4.7 弹性动力学的 Hanmilton 变分原理	183
4.8 固体中的弹性波	187

第5章 弹性动力学问题的有限元法	215
5.1 弹性动力学方程的本征函数解	215
5.2 弹性动力学问题的有限元法	220
5.3 振型叠加法求动力响应	253
5.4 逐步积分法直接解运动方程组	255
第6章 地面结构动力响应基本理论	260
6.1 车辆—地面结构系统动力学描述	260
6.2 广义 Duhamel 积分原理	262
6.3 随机动力响应理论分析	270
6.4 动力响应统计特性极值分霄	280
第7章 一维运动	292
7.1 Bernoulli-Euler 梁中的波	292
7.2 Timoshenko 梁理论	298
7.3 有限长梁的振动	302
7.4 点源运载下的无限长梁	310
7.5 线源运载下的无限长梁	322
7.6 随机响应分析	325
第8章 二维运动	332
8.1 无限平板中的纵波	332
8.2 薄板的横向振动	334
8.3 有限尺寸板的动力特性	340
8.4 点源运载下的无限大板	346
8.5 面源运载下的无限大板	354
8.6 随机响应分析	358
第9章 三维运动	365
9.1 Stokes 问题	365
9.2 表面垂直线源的 Lamb 问题	373
9.3 自由表面深度 h 处垂直点源的 Lamb 问题	387

9.4 表面源 Lamb 问题	394
9.5 多层体系的力学分析	401
9.6 多层介质动力特性	418
第 10 章 总结与展望	420
附录 I 弹性动力学基本方程汇总	426
附录 II 张量分析	429
参考文献	445

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

随着经济的发展,对交通的需求日益提高。一方面,世界各国的公路交通都突出表现为交通量增大、汽车载重增加、车速加快,高速公路的建设更是加速了这种状况的出现。另外,国防建设与民航事业的发展,高速重型飞机大量使用,作用在机场跑道上的飞机荷载也朝着重型高速化方向发展。少数发达国家出于军事上的考虑,已经实现了在高速公路的部分路段起降大型飞机的计划。所有这些,不仅对车辆设计提出了很高的要求,也对地面结构的安全可靠性与经济耐久性提出了非常高的要求。另一方面,各国目前对地面结构的设计均是以静止的车辆荷载作用下的结构为研究对象,这在荷载不太大,车速较低的情况下基本上是合理的。然而,在明显的运动荷载作用下,静力荷载模式与车辆行驶过程中对地面的实际作用力之间的差异越来越大,地面结构的动力学特性也远非静力学特征所能描述。这些差异和缺陷,对于现有的设计理论和方法而言是无法从根本上加以解决的。并且,在公路、桥梁、机场、铁道建成使用了一段时间后,出现了许多用静力学理论无法解释的破坏现象,如疲劳开裂、材料松散等等,若不能阐明这些实际上是由动力效应产生的破坏的机理,将会给结构的设计、施工、养护和改建工作带来很大的盲目性。

作为世界上经济科技实力最雄厚、公路交通与航空运输最发

达的国家,美国从 1987 年开始,投资 1.5 亿美元用于开展“战略公路研究计划”(Strategic Highway Research Program,简称 SHRP 计划。该计划于 1992 年结束后,国会又追加投资 7 亿美元用于路面长期性能观测),其中相当大的部分用于路面动力学的研究。他们对当代繁重交通作用下地面结构的设计方法必将以动力学为基础有着非常深刻的认识和长远的构思。欧洲共同体也日益抓紧这方面的研究,如英国在这方面颇有建树。地面结构的动力响应分析近年来也成为学术界十分重视的课题。从国际上的权威刊物《Journal of Applied Mechanics》以及 ASCE(美国土木工程师协会)的各种国际刊物上发表的论文就可以看出,对该领域的研究已成为热门。

如能对运动车辆随机荷载及其激励下的地面动力响应理论进行系统的、深入的研究,甚至取得重大突破,不仅能使我国在该领域的研究居于国际领先水平,而且对于地面结构整个设计方法和体系的根本性变革在理论上具有重大的科学意义,对今后工程实际也会有十分重要的应用价值。正因如此,这项研究工作得到了中国科学院数学学部的大力支持,并被列为 1996~1998 年度为期三年的国家自然科学基金(NSF)资助课题(19572025 号)和博士点专项研究课题(9528617 号)。

1.2 车辆—地面相互作用的传统 分析方法

路面体系在构造上比较复杂。它往往是一个大面积的层状结构,支承在无限深的地基上,再加上材料的非弹性性质,在解算它的内力时会遇到很多力学和数学上的困难。作用在路面上的外荷载是多次重复的动荷载,汽车轮胎的印迹是近乎椭圆形的,在印迹上的压力分布也并不完全是均匀的。路面材料的性能也极为多样化,除了水泥混凝土比较接近于线性弹性体外,其他材料往往具有

弹、粘和塑性,以及各向不均一性,如高温下的沥青混凝土、颗粒状松散材料和土体等。因此,对路面体系想作很完善的力学分析,是极为困难的。

近代发展得比较完善的弹性地基板和层状弹性体系理论都是属于弹性理论的范围,假设物体是连续的、线弹性的、均匀的和各向同性的,变形是微小的等,它们与路面—路基体系的真实性状尚有很大的差异。如果采用近代已有研究的非线性弹性力学、塑性理论、粘弹性理论、流变学等来分析路面结构问题,则在力学和数学上尚有很多未曾克服的难题,或是在应用上过分复杂。为了解决路面设计这样的实际问题,这就需要根据目前可能运用的力学手段,建立尽量能符合实际路面结构体系的力学模型。

为路面体系建立力学模型,是用科学原理来解决实际工程问题的一种方法,但如果试图建立一个包罗万象的力学模型来分析路面体系的内力,势必出现过于复杂甚至无法求得解答的情况。而如果回避矛盾,像早期那样完全采用经验方法确定路面结构的尺寸,又将过于概略和具有局限性。很多路面设计理论的研究工作者总是力图采用某些假设,或忽略某些因素,使路面体系的力学模型得到简化,从而获得理论解答,再通过各种实验手段对理论结果加以修正,取得理论与实际的统一,这已经被公认为是可行的方法。随着现代数学和力学的发展,以及快速大型电子计算机的应用,人们可以建立愈来愈完善的力学模型,从而也可得到更接近于实际的理论解答。因此,现代路面设计理论愈来愈从半经验半理论性过渡到更具理论性,但最终仍然免不了要作必要的实验修正。

建立路面体系的力学模型,可以分为三个组成部分:

1. 建立在外荷载作用下路面体系的平衡方程,求解支承反力,或使它成为可解的,运用近代弹性理论的静力、几何与物理三大条件,再加上求解微分方程和积分变换等方法,目前对线弹性的路面体系已能得到较完善的解决。

2. 在已知支承反力的条件下, 求算路面体系内各特征点或任意点的应力与变形。在早期, 当第一个问题未能很好解决时, 往往对支承条件作某些简化的假设, 然后求算应力和变形的近似解答。目前, 运用弹性理论对多层体系的平衡问题能获得更完善的解答时, 我们就可以得到更为精确的应力和变形分析, 现代快速电子计算机和数值计算方法又能帮助我们完成在应力和变形计算中大量、冗长的计算任务。

3. 分析路面材料的基本特性, 确定其抗变形能力和抗弯拉、抗剪切等的的能力, 根据路面体系破坏的力学特征, 建立它的强度理论, 也就是建立路面体系内各特征点的变形与材料抗变形能力的对比关系, 或是应力与抗力之间的对比关系。由于路面体系内各点的三维复杂应力状态, 以及材料的弹、粘、塑性和各向不均一性, 使得变形与抗变形、应力与抗力对比的验算(或称强度验算)遇到了较大的困难。很多研究工作者正在从理论和实验两个方面着手进行着大量的研究工作。

总之, 如果我们能建立愈完善的路面体系的力学模型, 我们就能得到更易于广泛运用和更接近于实际的解答。但是路面力学计算的发展也必然随着数学、力学等基本理论的发展而发展, 它始终包含着历史的局限性。在实际工作中, 理论计算仍然必须与现场验证、使用中的效果分析和实验室试验相联系, 并作出必要的修正, 才能付之运用。

早在 19 世纪末, 可以适用于路面设计的某些力学理论已经得到发展, 其中突出的有赫兹(H. Hertz)在 1884 年提出的液体支承板, 布辛尼斯克(J. Boussinesq)在 1885 年提出的半空间弹性课题, 它们在本世纪 50 年代的路面设计研究中都获得了广泛的运用。

赫兹是一个物理学家, 他解出了液体上弹性板受集中荷重时的弯沉和应力问题。当时他有兴趣的具体问题是—一个人站在浮冰上, 浮冰会产生多大的弯沉量。在推演数学公式时, 采用了忽略板

竖向应变的假设,并假设板底面的水平向剪应力等于零,又假设浮冰下各点的竖向支承力是与弯沉成正比的。这个模型就是土力中大家熟知的弹簧模型,或称文克勒(Winkler)地基假设。他采用了板的刚性半径 l 和支承液体的反应系数 k 两个特征参数,列出了板的中央弯沉值和弯沉盆形状的计算式。同时也计算出了板块中的最大应力,并根据冰块破裂时的强度、弹性模量和泊松比,估算出各种厚度浮冰的最大可能负重量。

在20世纪初期出现水泥混凝土路面后,就遇到了如何估算路面板厚度的问题。最初并没有采用赫兹理论,而是由奥尔德(C. Older)于1924年根据板角隅最易破坏的观察结果,假设板角完全失去土基支承且把它看作为端点受集中荷载作用宽度变化的悬臂梁,从而建立了计算公式。

1925年,威斯特卡德(H. M. S. Westergaard)以赫兹理论为基础,发表了混凝土路面应力分析的论文,他计算了土基上混凝土板中的应力和位移。其中假设土类似于液体那样作用着,把液体反应系数改称为地基反应系数 k ,作为衡量土基强度的指标。威氏方法和计算公式在后来经过几次修改补充,直到现在仍然广泛地运用于很多国家的刚性路面设计的实践中。

1885年,布辛尼斯克对弹性均质半空间体在单个集中荷载作用下的应力与位移计算作出了理论解,并在近代土力学中获得了广泛的运用。1916年,日本学者寺宽一(K. Terasawa)对在轴对称荷载下的半空间体,采用贝塞尔函数法求得了应力和位移计算的完整表达式,对于一些特殊点,还可简化为收敛迅速的无限级数,从而获得半空间体在轴对称荷载下应力和位移计算的某些数值解。1929年,洛夫(A. E. H. Love)采用势能法得出了半空间体在均布圆面积荷载作用下任意点应力计算的近似解。这些计算结果在后来几十年的路面设计研究中曾得到广泛应用。

在单个集中水平力作用下,均质弹性半空间体内应力和位移

计算的理论解是在 1882~1888 年由塞路蒂(Cerruti)提出的。但它的进一步发展和在路面设计理论中的应用,只是近年来才受到人们的注意。

由于数学和弹性力学的发展,到了本世纪 40~50 年代,路面力学理论又有了较大的发展。其中主要有 1938 年霍格(A. H. A. Hogg)作出的弹性地基上无限大薄板的解,以及 1945 年波密斯特(B. M. Burmister)对双层和多层弹性体系应力和位移计算的理论解。它们对刚性路面和柔性路面设计理论的发展有很大的影响。

前苏联舍赫捷尔(О. Я. Шехтер)在 1939 年也提出了弹性地基上无限大板在圆面积均布荷载下板底中心处最大弯拉应力的计算值。以此作为基础,伊万诺夫等提出了以弹性模量作为地基强度指标的刚性路面设计的实用方法。我国在解放后也采用了相同的方法进行刚性路面设计。

波密斯特于 1945 年提出的层状弹性体系的一般理论,显然是层状路面体系的一个很好的力学模型。但由于计算式的复杂冗长,当时仅提供了 $\mu = 0.5$ 时双层体系的中心弯沉值。在相当长时期内,它并不能较快地付诸实际应用。英国福克斯(L. Fox)和阿克姆(W. E. A. Acum)于 1948~1951 年间,采用波密斯特的方法,对双层体系和三层体系就层间是连续的和滑动的当 $\mu = 0.5$ 时计算出了一系列的各种应力值表。前苏联学者科岗(В. Н. Коран)于 1952~1958 年间,发表了一系列关于双层和三层弹性体系应力和形变计算的文献,列出了一定数量的计算图表。法国学者乔费洛(G. Jeuffroy)等于 1957~1959 年,在有关文献中列出了三层体系(看成为双层体系上的板)计算应力和位移的诺谟图,其中也采用了 $\mu = 0.5$ 。希夫曼(R. L. Schiffman)于 1957~1962 年,在有关文献中阐述了三层体系的理论解,并详细讨论了数值解的方法与技巧,也包括了数值分析所需要的详细步骤以及误差分析,以使用现代高速电子计算机获得可靠解答。英国壳牌(Shell)实验研究室,在

阿克姆和福克斯采用电子计算机计算三层体系的应力方面获得大量数据之后,于1962年由桑顿(Thornton)研究中心的琼斯(A. Jones)发表了三层体系当 $\mu = 0.5$ 时参数范围较为广泛的计算图表,为发展柔性路面设计方法打下了较好的基础,这些数据和图表后来为现代路面研究工作者所引用。

近年来,由于大型电子计算机的应用,以及力学理论和数值计算方面的发展,采用汉克尔(Hankel)变换式和反演法,已能编制出多层弹性体系的计算机程序,求算多层体系内任意点的应用和位移值。目前,采用积分变换法求解 N 层弹性系应力和变形的计算机程序有:美国加利福尼亚(California)研究院的 ELSYM 程序、切夫隆(Chevron)研究公司的 CHEV—5L 程序、荷兰阿姆斯特丹(Amsterdam)壳牌(Shell)研究工作组的 BISAR 程序、澳大利亚联邦科学与工业研究院的 GCP—1 程序等。后两者也适用于计算水平力作用下的应力和变形。

除了弹性多层体系力学计算的发展外,对粘弹性体系力学的研究,对非轴对称课题的研究,以及采用有限元技术(有限元、有限条或有限环)处理层状体系、板、非线性弹性材料等各方面,都有一定的进展。

我国从1962年起,为开展柔性路面设计方法的研究,开始收集和学习国外近年来的路面力学计算方面的论文。1964年,同济大学公路工程研究所在中国科学院计算技术研究所的协助下,对双层和三层弹性体系(层间连续和层间滑动)在圆形均布垂直荷载下的应力和位移进行了较全面的数值计算,提出了数解表及计算图,并于1975年发表。此后,又进行了水平荷载作用下应力和位移的计算,以便通过叠加求出在垂直和水平荷载综合作用下的应力和位移值。近年来,为开展刚性路面设计方法的研究,也采用了有限元方法分析弹性地基上水泥混凝土板中和板边的应力。

对地基支承的水泥混凝土路面,宜采用薄板理论。