

路面结构 动力学

钱振东 张 磊 陈磊磊 / 编著



东南大学出版社
Southeast University Press

东南大学科技出版基金资助

路面结构动力学

钱振东 张磊 陈磊磊 / 编著



东南大学出版社
Southeast University Press

图书在版编目(CIP)数据

路面结构动力学 / 钱振东, 张磊, 陈磊磊编著.
—南京: 东南大学出版社, 2010. 11
ISBN 978-7-5641-2486-1

I. ①路… II. ①钱… ②张… ③陈… III. ①路面—
工程结构—结构动力学 IV. ①U416. 201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 204537 号

路面结构动力学

出版发行 东南大学出版社(南京市四牌楼 2 号 邮编 210096)
电 话 (025) 83793191(发行); 57711295(传真)
出 版 人 江建中
网 址 <http://www.seupress.com>
经 销 全国各地新华书店
印 刷 徐州新华印刷厂
版 次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 12.75
字 数 315 千字
印 数 1—2 000 册
书 号 ISBN 978-7-5641-2486-1
定 价 32.00 元

(凡东大版图书因印装质量问题,请直接向读者服务部调换。电话:025-83792328)

前 言

欧美等国在 19 世纪初期开始路面设计研究,从 1901 年美国麻省道路委员会提出了第一个路面设计公式以来,路面理论经历了古典理论设计方法、经验设计方法、理论-经验结合设计方法等阶段。20 世纪 60 年代起国外研究者开始关注路面材料和结构的实际工作状况,部分学者也将研究成果总结写入了教材或专著,如 *Dynamics of Pavement Structures* (G. Marticek 编) 主要介绍了刚性路面的动力学分析原理。(AASHTO) 近年来开展了 LTPP 长期路面观测计划、加速加载试验、动态模量的研究等动态试验与数据采集工作,并提出了力学-经验法设计指南 MEPDG (2002),于 2006 年对软件作了升级。该设计方法采用了动模量作为输入参数,以更加有效的评价沥青混合料的黏塑性。但是目前设计软件的力学计算部分仍然采用静力学弹性层状体系内核。

我国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006) 仍然以静力学为基础,虽然计入了材料疲劳特性以及现场情况和室内试验条件的差异,但是力学控制指标仍然由静态计算得到,与路面的真实受力状况具有较大的偏差。随着我国高等级道路的不断建设,路面出现了大量的早期病害,引起工程界和学术界的重视,并有学者开始采用结构动力学原理分析路面结构的响应,以更加准确地得到路面的受力状态。为了使我国的沥青路面设计参数更能反映路面结构的实际工作状况并与国际接轨,许多科研单位系统地开展材料动态性能的研究和动态参数试验研究,以便在沥青路面的设计中,逐渐用动态参数取代静态参数。

路面结构动力学是从动力学的角度探讨路面结构动态响应,是多学科多专业交叉的研究领域。以静力学为依据的设计方法不能全面反映路面受力特性,越来越多的学者采用动力学方法对路面结构进行研究和设计,路面材料和结构的动态性能研究受到道路工程师和学者关注。本书主要介绍路面结构动力学的相关基本理论知识和应用状况,主要包括路面材料动态参数、路面结构分析、路面动态检测、路面结构疲劳断裂特性、车辆与路面间的相互作用等方面。本书编写时结合了作者及研究团队的近期科研成果及研究进展,旨在帮助读者学习路面结构动力学的相关基本概念,掌握相关检测分析技术理论,为新建道路路面结构设计、已有道路运营状态评估提供分析方法和手段。

本书可以作为交通运输工程和道路与铁道工程研究生课程用书,也可作为相关专业课程的参考用书。同时本书可作公路、城市道路、铁道、机场等部门从事科研和设计

的工作人员参考用书。

本书涉及多个学科,专业面广,限于作者水平,难免有错误和不当之处,敬请读者和广大师生批评指正,以便及时修改和完善。

感谢研究团队的所有老师和研究生,特别感谢参与本书编辑整理工作的老师和研究生。

本书是东南大学“路面结构动力学”精品课程建设内容之一,并获得东南大学出版基金资助。

作 者

2010. 8

目 录

1 绪论	1
1.1 路面材料动态参数	1
1.2 路面结构分析	2
1.3 路面动态检测	3
1.4 路面结构疲劳断裂特性	4
1.5 车辆与路面间的相互作用	5
1.6 小结	7
参考文献	7
2 结构动力学基础理论	11
2.1 结构动力学原理	11
2.1.1 达朗贝尔原理	11
2.1.2 虚功原理	12
2.1.3 拉格朗日方程	13
2.2 单自由度系统和多自由度系统的振动	16
2.2.1 单自由度系统的振动	16
2.2.2 两自由度系统的振动	23
2.2.3 多自由度系统的振动	27
2.3 常用工程结构振动求解方法	29
2.3.1 能量法	29
2.3.2 瑞利法	30
2.4 小结	34
参考文献	34
3 沥青路面材料动态参数	35
3.1 沥青混合物阻尼参数	35
3.1.1 沥青混合物动态阻尼参数试验	35
3.1.2 环氧沥青混合物动态阻尼参数试验分析	37
3.2 沥青混合物动态模量参数	40
3.2.1 概述	40
3.2.2 动态模量 $ E^* $ 的力学意义	40
3.2.3 动态模量指标 $ E^* /\sin \varphi$	42

3.3 沥青混合料动态模量试验研究	43
3.3.1 试验准备与方案	44
3.3.2 试验结果及分析	47
3.3.3 沥青混合料动态模量主曲线的建立	50
3.4 沥青混合料动态弯拉劲度模量试验研究	53
3.4.1 试验准备与方案	54
3.4.2 试验结果与分析	55
3.5 小结	56
参考文献	56
4 动载作用下沥青混凝土路面力学响应	58
4.1 弹性体应力波	58
4.1.1 弹性体的运动微分方程	58
4.1.2 弹性体中的无旋波和等容波	59
4.1.3 弹性体表面波	60
4.2 沥青路面动态响应理论解	62
4.2.1 路面动态响应的研究方法	62
4.2.2 移动线荷载下层状半空间体动态响应理论解	63
4.2.3 移动面荷载及脉冲面荷载下层状半空间体动态响应理论解	68
4.3 沥青路面动态响应数值模拟	76
4.3.1 有限元动力方程	76
4.3.2 计算实例	81
参考文献	84
5 动载作用下刚性路面力学响应	86
5.1 地基模型与弹性板理论	86
5.1.1 地基模型	86
5.1.2 弹性板模型假设	88
5.1.3 弹性板振动理论	90
5.2 动载作用下水泥混凝土路面动态响应	92
5.2.1 Winkler 地基上弹性板动态响应	92
5.2.2 双参数地基——板动态响应	96
5.2.3 弹性半空间地基——Mindlin 板的动态响应	99
参考文献	101
6 路面结构动力学检测的原理与方法	103
6.1 应力波波速测试方法	103
6.1.1 方法原理和试验技术	103
6.1.2 理论假设	105

6.2 力阻抗法	109
6.2.1 复弹性模量	109
6.2.2 力阻抗函数	110
6.2.3 测试方法	112
6.2.4 试验设备	115
6.3 波速法和力阻抗法在路面检测中的应用	115
6.3.1 路基的动态检测	115
6.3.2 路面层状结构的动态弹性模量与刚度的检测	118
6.4 FWD 测试技术及其应用	120
6.4.1 落锤式弯沉仪构造及其工作原理	120
6.4.2 检测方法	122
6.4.3 FWD 在路面结构检测中的应用	122
6.5 路面结构的其他检测技术	124
6.5.1 雷达检测技术	124
6.5.2 超声波检测技术	125
6.5.3 激光检测技术	126
参考文献	126
7 动载作用下路面结构疲劳断裂行为	128
7.1 基于断裂力学的路面疲劳裂缝理论	128
7.1.1 路面材料的断裂力学基础	128
7.1.2 常用的裂缝扩展准则	132
7.2 沥青路面断裂行为模拟	137
7.2.1 沥青路面断裂行为的有限元实现	137
7.2.2 带裂缝路面的三维实体模型	140
7.2.3 动荷载作用下裂缝尖端的应力强度因子分析	142
7.2.4 带裂缝路面的动荷载响应	145
7.3 沥青路面结构裂缝监测	147
7.3.1 沥青路面结构裂缝无损检测	147
7.3.2 基于 BOTDA 的沥青路面裂缝监测	149
参考文献	154
8 大跨径钢桥桥面铺装动力响应	156
8.1 大跨径钢桥桥面铺装体系受力特性研究概述	156
8.2 移动恒载作用下铺装层动力响应	157
8.2.1 桥面车辆荷载模型	157
8.2.2 铺装层动力响应	160
8.3 考虑桥面不平度的铺装层动力响应	169
8.3.1 桥面铺装层不平整度模拟	169

8.3.2 考虑不平度的铺装层动力响应	174
8.4 带裂缝铺装层的动荷载响应	184
8.4.1 动力学及应力强度因子基本理论	184
8.4.2 计算模型及假设	186
8.4.3 计算结果及分析	187
参考文献	193

1 绪 论

目前,世界各国在柔性路面设计中一般采用静荷载方法。静载反映的仅是车辆驻停于路面时的一种状态,而实际路面承受的是车辆移动荷载的反复作用。路表平整状况、行车速度及车辆本身的参数都会对行车荷载产生影响,行车荷载的变化又会影响到路面结构的应力、应变状态,静载方法对这些都无法进行描述。随着国内外高速公路的不断建设,不少公路路面出现了早期病害,而除了施工因素以外,工程界普遍认为行车荷载是主要原因之一,目前设计规范中路面设计采纳的静力学方法,无法充分反映路面结构在实际通车状态下的响应,因此路面结构动力学逐渐成为道路工作者研究的重点。本章将对路面动力学所涉及的主要内容进行概述,主要包括路面材料动态参数、路面结构分析、路面动态检测、路面结构疲劳断裂特性、车辆与路面间的相互作用等方面。

1.1 路面材料动态参数

材料参数的选取是路面动力学分析的基础,不同材料参数的分析结果与路面在运动车辆作用下的实际响应有很大差异。例如 Chen, S. S. (1988)^[1]所做的理论分析表明,当速度从 0 m/s 增加到 27 m/s 时,路面内部应力增加 7%,这是微乎其微的,因而他建议在路面响应的计算中不必考虑车速的影响。然而 AASHO(1962)试验测试中却观察到速度从 0 m/s 变化到 18 m/s 时,内部应力增加 40% 的现象,这表明速度的影响是显著的,不能忽略。并且不同研究人员采用的研究方法和所用的力学模型也存在差别,甚至对于同一课题的研究可能会得到相互矛盾的结论。例如对于行车速度与动载的关系,大量研究表明,随着速度的增大,动力荷载也将增大,Fryba L. (1987)^[2]却得到了随着速度增大而应力减小的结论。因此,路面结构动力学研究首先要对路面材料参数进行研究。

由于我国在沥青路面设计中采用的是沥青混合料的静态参数,因此我国学者在沥青混合料的动态参数方面的研究成果不多。在“八五”国家重点科技项目(攻关)“道路沥青及沥青混合料路用性能的研究”中,曾采用四种仪器和方法对沥青混合料设计参数进行了对比试验研究:①普通劈裂仪静载劈裂试验;②诺丁汉试验仪动载劈裂试验;③MATTA 试验仪动载劈裂试验;④MTS 试验机动载劈裂试验。研究表明动态模量与静态模量之间有一定的相关性,但试验数据的再现性很差,做设计参数问题很大。同济大学的许志鸿^[3-5]等对沥青混合料在动载作用下的力学特性进行了研究,并对试验方法和参数取值给出了一些建议。总体来说,国内相关的研究成果还较少,缺乏系统性。

针对上述问题,交通部在沥青路面设计指标与参数的研究总报告中指出^[6]:为了使我国的沥青路面设计参数更能反映路面结构的实际工作状况并与国际接轨,有必要系统地进行

材料动态性能的研究和动态参数试验,确定材料的动态参数,以便在沥青路面的设计中,逐渐用动态参数取代静态参数。

此外在道路、桥梁结构的动力有限元分析中,必须建立刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,其中阻尼矩阵是确定路面和桥面体系振动的重要动力参数之一。阻尼矩阵比较复杂,通常在结构分析中将阻尼分为结构阻尼和材料阻尼。路面动力研究中,多数忽略阻尼,有的虽然计入阻尼但是其阻尼参数均为假设值,因此,如何准确地获取材料阻尼参数对于路面、桥面铺装体系的设计和动力分析也非常重要。

1.2 路面结构分析

关于路面结构动态力学模型的研究始于 19 世纪 70 年代,N. C. Yang(1972)^[7]针对机场道面设计的需要提出有必要对飞机与道面间的动力相互作用进行研究,并建议用功率谱密度(PSD)描述两者之间的随机振动。1987 年,Frybal 提出“车辆与路面相互作用的动力学问题是一个新的科学分支”,使车辆与路面相互作用的动力学成为新兴研究领域而得到较大发展。普通路面动力学的研究最早是从水泥混凝土路面开始的。这是因为混凝土路面的出现很大程度上是为了承受更大的交通量和更重的轴载,这种情况下的车辆对路面的动力作用非常明显;同时,由于混凝土路面的结构较为简单,混凝土材料的力学参数变异性较小,便于力学模型的建立。最早的路面力学模型都是建立在弹性地基板的基础上。Seong-Min^[8]利用 Fourier 变换求得弹性地基板在均布的恒值移动荷载、瞬态正弦及稳态正弦移动荷载的解。M.-H. Huang^[9]利用有限条分法分析了弹簧地基上板的响应,分析了移动集中荷载速度、基础刚度等对板响应的影响。Kim 等^[10]利用三维 Fourier 变换求得 Winkler 地基板受运动荷载作用下的解。成祥生(1987)^[11]研究了运动荷载引起的弹性地基板的受迫振动,他通过叠加的方法获得了问题的级数解。郑小平等(1989)^[12]用同样的方法把板的振形函数取成梁函数,然后进行振形叠加,得到运动负荷下四边自由矩形板的双重级数解。1991 年,他们用类似的方法处理了无限长梁受运动荷载的影响。弹性地基进一步发展就成为黏弹性地基,黏弹性地基板在运动的变化荷载下的动力响应解答则是由王虎等(2001)^[13]推得。

随后沥青路面动力学的相关研究也取得了一定的成果,A. Scarpas 等(1997)^[14]提出一个适合有限元模型分析的沥青混合料非线性本构模型,并采用数值动力分析方法对沥青路面损坏的发展进行模拟。Sebaaly^[15]用弹性动力学的方法对动载下的路面响应进行了分析,通过编写计算机程序 DYNAMIC1 和 DYNAMIC2 分别求解谐荷载和冲击荷载下的多层体系的响应问题,最后研究了车辆速度对路面疲劳破坏的影响。Kyong Ku Yun^[16]在静态荷载下路面力学模型 SAPSI 的基础上,提出新版的任意移动荷载下的计算程序 SAPSI-M,并将计算结果与 PACCAR 足尺路面试验结果相比较,表明 SAPSI-M 有较高的精确性。W. Uddin 等(1997)^[17]采用三维有限元模型,模拟落锤式弯沉仪法(Falling Weight Deflector,简称 FWD)作用于沥青路面表面,分析了荷载大小、加载时间等因素对路表弯沉的影响。在国内,黄晓明(1990)^[18]对路面结构在特定动荷载作用下的一般响应进行了理论分析,孙璐等(1996)^[19]研究了路面上运动荷载的数学模型,钱振东等^[20]研究了移动荷载作用下沥青路面动力模型及其响应。

1.3 路面动态检测

自 20 世纪 60、70 年代以来,许多国家针对道路检测技术开展了深入研究,并且随着计算机技术、自动化控制技术、高精度测微技术的进步,在最近的 20 年里取得了突破性的进展。我国从 20 世纪 80 年代后期开始,通过设备、技术引进和自主开发,路面检测技术也取得了巨大的进步^[21]。

路面结构检测可分为静态检测和动态检测,本书着重介绍动态检测技术。所谓的路面结构动态检测,就是基于动荷载作用于道路表面,检测道路各结构层因之产生的弯沉盆或者两次动荷载之间的相位差的一种无破损检测技术。动态检测在路面检测中开始广泛应用,并成为评价路面性能的有力工具。路面结构检测目前在理论和应用研究上以动态检测技术为主流,研究的重点为检测手段、软件研发、评价技术^[22]。

在许多情况下,通过动态检测设备得到的数据,不仅可用作对路面结构的静力分析,而且还可以运用波在弹性半空间体内、刚性基层上有限厚度的层状空间体内或者水平层状介质内等的传播理论对路面结构进行动力分析^[23]。动态检测在实际运用中主要针对的是路面结构的承载能力及路面材料性能。典型的动态检测技术包括落锤式弯沉仪法和表面波频谱分析法(Spectral Analysis of Surface Wave,简称 SASW)。

FWD 是目前应用较为广泛的动态弯沉检测设备。20 世纪 60 年代,法国首先提出冲击式动力弯沉仪的初步设想,70 年代后期丹麦和瑞典首先研制成 FWD,80 年代以后,美国、英国和日本等相继引进和仿制了这种弯沉仪。研究表明,FWD 的冲击荷载与时速 60~80 km/h 的车辆对路面的荷载相似,可以较好地模拟行车荷载作用,并且测速快、精度高^[24]。自 20 世纪 80 年代初以来,FWD 在国际上得到日益广泛的应用,美国联邦公路局经过对比分析,确认 FWD 是较理想的路面承载能力评定设备,并选为实施 SHRP 计划中路面承载能力评定部分的重要设备。通过对 FWD 所测弯沉盆数据的分析,可以反演路面结构层的弹性模量,此外 FWD 还可与加速路面试验(APT)相结合,在试验路上进行加速破坏试验,路面结构内设置各种传感器,测试应力、应变、温度、含水量等信息。在试验过程中,采用 FWD 进行弯沉检测、模量反演、性能评价及剩余寿命预测等试验和分析,并与荷载重复作用次数、应力、应变、表面破损等信息建立联系,从而修正 FWD 的性能评价和剩余寿命预测方法^[25]。

SASW 法利用了瞬态激振时产生频率丰富的瑞利波,通过频谱分析来确定传播介质的特性。瑞利波的特点是能量大、传输速度低、频率低(可以低于 0.01 Hz)、衰减慢,因而信号易于提取;并且瑞利波的能量几乎只集中于一个波长左右的范围内,即在一定的深度范围内,可以选择一定的波长,其速度提供的信息只在一个波长范围内,这对工程测试深度不大时(一般在数十米范围内)确定传播介质的特性显然是极为有利的;瑞利波的另一重要特征是当其在均匀介质中传播时,无频散特性;而当其在非均匀层状介质中传播时,不同频率的瑞利波其传输速度是不同的,这种频散特性为将其应用到工程实践中提供了重要的前提条件^[23]。

由于动力分析方法复杂,并且建模时增加了许多假设,到目前为止路面结构动力计算结果和实际值有较大差异,而短期的动态检测又受到环境条件和道路状况的影响,因此发达国家先后建立了试验路,对车辆运动荷载下的路面响应进行直接观测。如阿灵顿试验路(The

Arlington Road Test, 1930), 美国内华达州西部环道试验路(West Track Test, 1996)以及美国路面长期性能(Long Term Pavement Performance)研究计划^[26]对路面结构的动荷载响应包括位移、应变等进行了监测。2000年, 美国佛罗里达州则在此基础上提出了采用传感器和动力弯沉仪(Dynaflect)测量路面动态弯沉的测量方法^[27]。

1.4 路面结构疲劳断裂特性

目前, 关于路面结构开裂研究领域主要集中在疲劳断裂力学理论与方法的应用。由于路面结构始终处在交通荷载和温度荷载的循环作用下, 其破坏特性主要表现为疲劳破坏特性。

路面结构疲劳特性的研究方法可分为现象学法、力学法。应用传统的现象学法进行疲劳试验的方法有很多, 归纳起来可以分为四类^[28]: 第一类是实际路面在真实汽车荷载作用下的疲劳破坏试验, 如美国的 AASHO 试验路, 历时 3 年才完成。第二类是足尺路面结构在模拟行车荷载作用下的试验研究, 如南非的重型车辆模拟车(HVS), 澳大利亚的加速加载设备(ALF), 美国华盛顿州立大学的室外大型环道和我国东南大学的室内大型环道疲劳试验。第三类是缩尺模型试验法。第四类是室内小型沥青混合料试件的疲劳试验研究。

传统的疲劳强度理论认为材料由于荷载循环作用会造成损伤积累, 但是针对连续完整的结构体系而言, 该理论并没有考虑材料、结构内部先天存在的缺陷或因在使用期内而逐渐出现的缺陷, 这使得运用传统的疲劳强度理论与方法对沥青路面结构进行的计算和分析结果与实际情况存在偏差, 尽管引入了不同的修正系数或安全系数, 但仍带有较大程度的不确定性^[29]。随着断裂力学及损伤力学的兴起, 研究人员普遍认识到结构的破坏正是由于其内部存在的缺陷而引起的应力集中与内部损伤, 当这种应力集中与损伤积累超过材料与结构抵抗破坏的容许值时, 就造成了内部缺陷的发展并导致结构的破坏。基于结构内部存在裂缝之类缺陷的断裂力学理论与方法在沥青路面工程中的应用, 大约开始于 20 世纪 60 年代末、70 年代初, 断裂力学依次经历了线弹性断裂力学、疲劳断裂力学与黏弹性断裂力学以及损伤断裂力学等阶段。

路面结构的疲劳破坏可以分为两个阶段, 无缺陷的疲劳起裂阶段和其后考虑裂缝扩展的疲劳断裂阶段。国外在这方面开展了较多研究并得到应用。对于前者, 已经做了大量的疲劳破坏试验与结构分析, 积累了相当多的经验, 其研究成果至今仍在沥青路面结构设计方法中沿用。对于后者, 主要围绕疲劳断裂规律展开研究, 其中牵涉到材料疲劳断裂规律的数学模型的建立及其描述, 模型参数的测试与确定以及各类影响因素及其对模型与计算方法的影响修正等, 且普遍采用基于应力强度因子的经验性总结的 Paris 公式。Pell P. S.^[30]曾对路面性能和疲劳裂缝间的关系做过全面调查, 表明沥青路面的疲劳裂缝对路面结构性能的连续性有损害。Melcalf 等人^[31]基于足尺路面加速加载试验结果分析得出, 沥青路面疲劳裂缝并不总是从底面出现, 也可能由表面引起。

国内对于裂缝的开展规律也做了一定的研究。郑健龙等^[32]将基层中含有贯穿裂缝的路面体简化为二维问题, 以应力强度因子作为表征参量, 探讨了车辆荷载对称作用和非对称作用下基层和面层之间加入软弱层对反射裂缝的防止效果, 得出软弱层可以防止基层中的

裂缝向上反射的结论。吴国雄^[33]等人应用断裂力学、损伤力学和路面疲劳破坏的基本原理,重点对水泥混凝土路面的开裂过程进行分析,提出了混凝土路面开裂破坏的3个阶段及其之间的关系,并阐述各个阶段裂纹形成和板断裂破坏的原因及机理;彭妙娟等^[34]针对基层中含有贯穿裂缝的路面层状体模型,考虑车辆荷载和温度应力的作用进行了三维有限元断裂力学分析。敬森森^[35]运用有限元法计算应力强度因子,分析沥青铺装层的破坏情况和桥面铺装系统各参数对裂缝尖端应力的影响,得到各参数对影响裂缝扩展的敏感性。结果表明裂缝扩展的形式和速率受到铺装层开裂的长度和深度影响,且受沥青铺装层厚度和模量的影响较大。陈团结^[36]对环氧沥青混凝土复合结构疲劳扩展阻力曲线的形式进行了探讨,并提出了适合于环氧沥青混凝土的复合结构R曲线。在此基础上,提出了疲劳裂缝扩展的三个阶段:启裂阶段、稳定扩展阶段和失稳扩展阶段,同时还提出了当量裂缝长度的概念。关永胜^[37]、韩光义^[38]、陈春红^[39]等采用带有预制切口的环氧沥青混凝土复合结构模型进行疲劳试验,对环氧沥青混凝土的裂缝扩展规律进行了研究,并采用BOTDA光纤技术及光栅监测技术对复合梁裂缝疲劳扩展过程进行监测,通过疲劳裂缝行为的监测分析,给出了BOTDA光纤监测铺装层裂缝病害的指标。随着我国道路交通的不断发展,路面结构的疲劳断裂理论也将不断发展完善,并最终应用于设计规范。

1.5 车辆与路面间的相互作用

由于路面在车辆作用下的动力响应较静力分析结果有明显的差异,Chen S. S. (1987)^[40], Monismith et al. (1988)^[41-42]和 Sousa et al. (1988)^[43]等的研究表明这种动荷载响应对路面的疲劳寿命产生显著的影响。为了使力学分析模型能客观地反映路面结构在各种荷载和环境条件下的工作状态,研究人员开始建立车辆-路面动力结构模型,并试图运用各种计算方法得到可靠的路面响应解。如 T. D. Gillespie 等(1993)^[44]为研究重载车辆对路面的破坏作用,对动荷载特征和路面响应进行研究,分析了轴载、车辆悬挂系统、轴距、轮压等因素的影响。综合众多的文献以及近年来的研究进展,可以将车辆-路面动力作用系统分为三个方面:①路面表面特性,即路面不平整度;②车辆及其动荷载;③路面的动力响应或影响函数。该系统的整体分析内容和方法如图 1-1 所示。

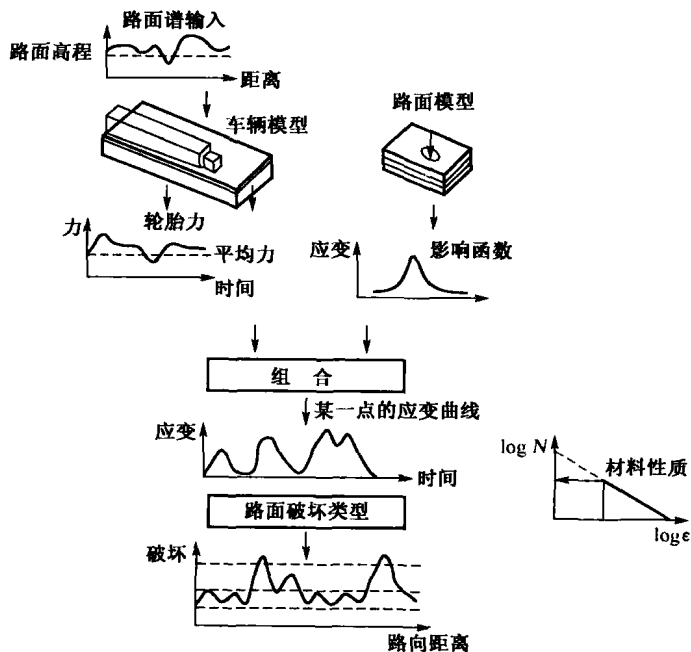


图 1-1 车辆-路面动力作用系统整体分析内容和方法

以路面为对象,分析其动荷载下的响应情况,主要的路线可以大体分为以下三种:

(1) 分析路面不平整度。该思路认为路面结构动力响应主要源于车辆动荷载,而车辆动荷载又取决于路面表面特性即不平整度状况。此外路面不平整度还是人体舒适度的控制指标,因此各国道路工作者对此都相当重视,进行了大量的研究工作。在得到路面表面的不平整度之后,一种方法就是直接根据已有的经验,推知路面的动力响应幅值,该方法属于准静态分析。

由于路面不平整度具有随机特性,许多统计方法被用于描述路表的总体属性。这些方法可以概括为三类,并且都立足于工程实践:①竖向加速度或竖向位移的统计指标,如 Hudson et al. (1985)^[45] 建议通过均方根垂直加速度量化平整度指数,并可以表现路面使用状况的几何特性,这些几何特性已经通过试验建立了与道路使用车辆的联系。②路面不平度的功率谱密度函数(PSD),它可以从理论上将车辆振动^[46]、人的反应^[47] 和动态路面加载^[48-49] 协同考虑,目前基于 PSD 的方法已经广泛用于车辆制造业和研究机构。③基于 1/4 车辆的统计方法。20 世纪 80 年代,世界银行和美国联邦公路局发起,密西根大学的学者(Gillespie et al. 1980; Sayers 1985)^[50-51] 在巴西进行了国际平整度实验。现在,国际平整度指数 IRI 已经作为评价路面平整度的最常用的统计量。在最近几年中,美国联邦公路局要求国家运输机构采用 IRI 代替以往的 PSI 作为评估路面平整度的指标^[52]。

(2) 建立车辆模型进行动荷载分析。根据不同的车辆建立的简化二维或三维模型,通过已经获得的路面不平整度参数,可以直接计算轮胎的动态力,即车辆施加给路面的动载,然后利用动载系数推知路面的动力响应。

Cebon 等^[53-54] 分别测得二轴、三轴和四轴车辆对路面作用的动荷载。经过分析得到结论为:行驶车辆对路面作用的动荷载不仅与车辆本身特性有关,如车辆系统的弹簧刚度、质量、阻尼,还与路面表面特征有关。车辆的行驶速度对动荷载的影响也很大,Stoner 等^[55-56] 分析研究了地面车辆的动力计算模型,分别分析了四分之一车辆的一个自由度和两个自由度模型,二分之一车辆的两个自由度和五个自由度模型,以及整体车辆的七个自由度模型,把路面作为输入,采用各种模型计算出相应点的加速度,并对悬挂系数进行优化。许多学者还将这方面的结果应用于对车辆悬挂系统的设计和优化研究,如 P. E. Uys、P. S. Els 和 Lu Sun 等^[57-58]。

(3) 根据弹性动力学理论,研究运动荷载和动力荷载下的路面响应。这一方法偏重于理论研究。可分为两种情况:①建立单位荷载(脉冲荷载或移动荷载)作用下路面结构影响函数,然后通过在路面上施加之前得到的车辆动荷载时间序列,进一步叠加求解结构响应。②运用弹性动力学和随机振动理论,建立路面结构在车辆载荷和动力载荷作用下的数学模型,即描述路面运动的控制方程^[59],需要计算自相关函数和功率谱等参量,仅适合于稳态响应的情况。由于上述理论方法十分复杂,因此数值解法是公认的比较有利和简便的方法,其中包括有限单元法和边界元法。

Cebon D.^[60] 将车辆响应和路面响应分开建模,车辆模型可以是线性模型也可以是非线性模型,在建立路面模型时则是着重考虑路面的转移函数和脉冲响应,该方法的实质就是借助于振动系统理论计算运动的点源随机载荷下的路面响应问题,还详细分析了车辆参数对轮胎动压力的影响,并给出了动荷系数的具体计算实例。Christison J. T.^[61], Michael J.、Markow^[62] 和 O'Connell S.^[63] 使用了影响函数,影响函数与路面的结构模型有关,考虑到不

同的响应,如应力、应变时将有不同的影响函数,然后综合影响函数和车辆模型,就可得到路面结构层的某点在随机载荷下的响应。

随着我国大跨径桥梁的不断建设,钢桥面铺装成为我国桥梁建设的关键技术之一,目前绝大多数的分析都将桥面铺装视为静力问题,然而桥梁受到风载以及行车荷载等的作用将会产生很大的振动,这将影响桥面铺装的响应,东南大学的张磊^[64]、刘云^[65]等结合直接积分和有限元技术对桥面铺装的动力响应开展了有益的尝试。

1.6 小 结

道路工作者开始建立路面结构动力学模型进行路面结构分析,并尝试应用动力分析的结果来解答路面早期病害和疲劳损伤发展规律。路面结构动力学分析是一个包括车辆-道路相互作用的复杂问题,在数学上存在很多困难,例如精确地分析无限介质和半空间在运动点源负荷下的弹性动力学问题就相当复杂;对于含边界的有限尺寸结构如梁、板、层状介质等,由于这些结构的边界会对传播中的弹性波形成多次的反射和折射,在不同的边界条件和入射条件下还会出现波形转换。数学上的巨大困难使得一方面出现了梁板等结构的初等理论,如 Bernoulli-Euler 梁、Timoshenko 梁、Kirchhoff 薄板、Mindlin 厚板、Reissner 厚板等模型^[66];随着计算机和计算技术的发展,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)的理论在国际上掀起了研究高潮,但研究方法绝大多数是数值方法。路面结构动力学作为一门新兴的学科,还需要利用现在数值计算和先进的测试手段不断的革新和发展。路面动力学的研究会加深人们对路面和车辆工作特性的理解,为进一步改善路面设计和车辆设计提供重要的理论依据。

本书主要以路面结构为研究对象,介绍路面结构动力学的相关基本理论知识,阐述模型建立、动力响应求解,以及结果分析和实际应用,旨在帮助读者掌握路面结构动力学的相关基本概念,巩固以往的专业知识,掌握相关检测分析技术,并为新建道路路面结构设计、已有道路运营状态评估提供有效的分析方法和手段。

参考文献

- [1] Sousa J B, Lysmer J, Chen S S, Monismith C L. Dynamic Loads: Effects on the Performance of Asphalt Concrete Pavements. Paper Presented at 67th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington D. C., 1988
- [2] Fryba L. Dynamic Interaction of Vehicles with Tracks and Roads. *Vehicle System Dynamics*, 1987, 16 (3): 129-138
- [3] 许志鸿,李淑明,高英,丰晓. 沥青混合料动态性能研究. *同济大学学报(自然科学版)*, 2001, (08): 893-897
- [4] 许志鸿,丰晓,高英,李淑明. 沥青混合料动态性能影响因素的研究. *建筑材料学报*, 2001, (03): 238-243
- [5] 许志鸿. 沥青混合料动态性能参数标准: [博士学位论文]. 上海: 同济大学道路与交通工程系, 2000
- [6] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数. 北京: 人民交通出版社, 2001

- [7] N C Yang. Design of Functional Pavements. Mc Graw-Hill Book Company, 1972
- [8] Seong-Min Kim, Jose M Roesset. Moving Loads on a Plate on Elastic Foundation. Journal of Engineering Mechanics, 1998
- [9] M-H Huang, D P Thambiratnam, F Asce. Dynamic Response of Plates on Elastic Foundation to Moving Loads. Journal of Engineering Mechanics/September, 2002
- [10] Seong-Min Kim, B Frank Mc Cullough. Dynamic Response of Plate on Viscous Winkler Foundation to Moving Loads of Varying Amplitude. Engineering Structures, 2003,25:1179-1188
- [11] 成祥生. 弹性地板由运动载荷引起的动力反应. 应用数学和力学, 1987,8(4):347-355
- [12] 李自锋, 谢瑛, 郑小平. 含局部支承弹性地基梁问题的迭代解法. 第14届全国结构工程学术会议论文集(第一册), 2005
- [13] 王虎. 连续配筋混凝土路面静动力学计算与分析:[博士学位论文]. 西安:长安大学, 2001
- [14] A Scarpas, R Al-khoury, C van Gurp, S Erkens. Finite Element Simulation of Damage Development in Asphalt Concrete Pavements. Proceedings of 8th ICAP, Washington, 1997
- [15] Sebaaly. Dynamic Models for Pavement Analysis Ph. D., Arizona State University, 1987
- [16] Kyong Ku Yun, Ph. D. Michigan State University, 1995
- [17] W Uddin, Z Pan, P Noppalcunwijai, et al. Finite-Element Dynamic Analysis of Distressed Asphalt Pavements. Proceedings of 8th ICAP Washington, 1997
- [18] 黄晓明. 路面结构在动荷载作用下的力学分析:[博士学位论文]. 南京:东南大学, 1990
- [19] 孙璐, 邓学钧. 路面波谱密度与运动车辆对路面的随机动压力分析. 西安公路交通大学学报, 1996,16(2)
- [20] 钱振东, 舒富民. 移动荷载作用下沥青路面动力响应分析. 交通运输工程与信息学报, 2007,5(3):90-95
- [21] 胡霞光. 国内外路面快速检测技术的现状和发展. 中外公路, 2003,23(6):95-99
- [22] 喻翔, 彭其渊. 公路路面检测技术的发展. 交通标准化, 2004,(12):69-71
- [23] Jose M Roesset. Nondestructive Dynamic Testing of Soils and Pavements. Tamkang Journal of Science and Engineering, 1998,1(2):61-81.
- [24] 刘宛予, 谢凯等. 公路路面自动检测系统发展综述. 中外公路, 2007,27(4):30-33
- [25] 郑国梁. 路面性能无损检测技术与评价:[硕士学位论文]. 广州:华南理工大学, 2007.
- [26] Study of Road Damage Due to Dynamic Wheel Loads Using a Load Measuring Mat[R]. National Research Council, SHRP-91-518, 1991
- [27] Florida Method of Test for Dynamic Pavement Deflection Measurements. 2000
- [28] 马正军. 基于表面裂缝的沥青路面疲劳断裂分析:[硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2005
- [29] 郑健龙, 周志刚, 张启森. 沥青路面抗裂设计理论与方法. 北京:人民交通出版社, 2003:1-119
- [30] Pell P S. Characterization of Fatigue Behavior. In Special Report 140: Structure Design of Asphalt Concrete Pavement Systems to Prevent Cracking, HRB, National Research Council. Washington D. C, 1973
- [31] Melcalf, J B, Rasoulia S, Romanoschi and Y Li. The Louisiana Accelerated Loading Facility, Report 2, Experiment 1, Phase II and III, Louisiana Transportation Research Center, 1998
- [32] 郑健龙等. 半刚性路面反射裂缝及其应力强度因子的有限元分析. 岩土工程学报, 1990,12(3):22-26
- [33] 吴国雄, 易志坚, 何兆益. 水泥混凝土路面开裂过程研究. 公路, 2001,(10):141-143
- [34] 彭妙娟等. 半刚性基层沥青路面断裂力学计算方法及其应用. 中国公路学报, 1998,11(2):30-38
- [35] 敬森森. 大跨径钢桥面沥青铺装层裂缝病害研究:[硕士学位论文]. 南京:东南大学, 2005
- [36] 陈团结. 大跨径钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝行为研究:[博士学位论文]. 南京:东南大学, 2006