

车辆—沥青路面系统 力学分析

Mechanical Analysis of Vehicle-Asphalt Pavement System

内容提要

本书是为了推广应用西部交通建设项目——“沥青路面动力响应分析方法研究”所取得的成果而编写的，系统而全面地阐述重型车辆荷载作用下沥青路面的力学行为，分理论研究和试验研究两部分。理论部分阐述了车辆动力学和沥青路面动力学理论体系，试验部分阐述了实际交通荷载下沥青路面内部动力响应研究和沥青路面层间黏结强度研究。

本书研究成果不仅理论方法和内容新颖，而且在实际工程应用中适应性强，适合于从事公路交通科研人员和工程技术人员阅读参考，也可供高等学校教师和研究生学习参考。

吕彭民 董忠红 著



人民交通出版社
China Communications Press

Mechanical Analysis of Vehicle-Asphalt Pavement System

车辆—沥青路面系统力学分析

吕彭民 董忠红 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是为了推广应用西部交通建设项目——“沥青路面动力响应分析方法研究”所取得的成果而编写的,系统而全面地阐述了重型车辆荷载作用下沥青路面的力学行为,分理论研究和试验研究两部分。理论部分阐述了车辆动力学和沥青路面动力学理论体系,试验部分阐述了实际交通荷载下沥青路面内部动力响应研究和沥青路面层间黏结强度研究。

本书研究成果不仅理论方法和内容新颖,而且在实际工程应用中适应性强,适合于从事公路交通的科研人员和工程技术人员阅读参考,也可供高等学校教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆—沥青路面系统力学分析/吕彭民,董忠红著.
—北京:人民交通出版社,2010.5
ISBN 978-7-114-08390-7

I ①车… II .①吕… ②董… III .①汽车-沥青路面-系统动力学-动力学分析 IV .①U461.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 075439 号

书 名: 车辆—沥青路面系统力学分析
著 作 者: 吕彭民 董忠红
责任编辑: 韩亚楠 贾秀珍
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010) 59757969, 59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 787×980 1/16
印 张: 13
字 数: 269 千
版 次: 2010 年 5 月第 1 版
印 次: 2010 年 5 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08390-7
定 价: 27.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

改革开放以来,中国公路交通得到迅速发展。到2008年年底,全国高速公路通车里程达到6.03万km,为国民经济发展提供了基础条件。但近年来我国高速公路在运营过程中出现了使用寿命严重不足的现象。

引起路面结构使用寿命不足的原因较多,现有路面结构设计体系无法有效反映实际交通荷载下路面结构力学行为是其重要原因之一。目前我国及世界其他国家的沥青路面设计方法中,把车辆荷载视为静荷载或近似等效静荷载,路面结构视为弹性体系结构。但随着高速公路建设的发展,高速公路运输已经实现高速重载化。运行速度越高,车辆振动越严重,车辆对路面的振动冲击荷载越大;运载重量越大,路面承受的荷载越高,尤其是高温状态下,沥青路面表现出严重的黏弹性。路面设计中仍旧使用静载模式已不能反映路面的实际受力状况,无法解释动态荷载作用下路面结构产生的各种现象。因此,深入研究重型车辆作用下沥青路面承受的动荷载以及沥青路面在移动荷载下的动力响应,具有十分重要的现实意义。

公路交通运输中,车辆均采用橡胶轮胎,轮胎变形较路面变形大得多,车辆、轮胎与路面组成一个弱耦合系统。本书运用系统动力学思想,建立车辆动力学模型和路面动力学模型,开展重型车辆—沥青路面系统力学行为研究。

全书共分8章。第1章阐述沥青路面常用设计方法,车辆动力学和沥青路面动力学研究现状。第2章进行了交通现状调查与车辆—沥青路面系统动力学模型相关参数的调查。第3章建立了常用重型车辆动力学模型,将轮胎刚度处理为轴重和胎压的函数,使得车辆动荷载影响因素与路面设计输入条件结合起来,分析了路面不平度、轴重、胎压和车辆速度对车辆动荷载的影响。第4章建立了基于三维黏弹性本构关系的移动荷载作用下沥青路面动力响应模型,分析多种典型路面结构动力响应特点,分析轴重、胎压和车辆速度等参数对其动力响应的影响。第5章将沥青路面简化为作用在Kelvin黏弹性地基上具有黏弹性的无限长梁,建立了移动载荷下黏弹性道路动力学模型。利用数学变换解得了路面响应解析解,分析了在车辆速度、轴载和面层黏性

阻尼取不同值时路面响应的变化规律。第6章采用试验方法研究沥青路面动力响应特点,修筑试验路和足尺试验场,埋入置入式传感器,采用重型运输车辆和加速加载设备作为加载装置,研究沥青路面动力响应影响规律,也验证了理论研究的正确性。第7章采用动力响应研究结果和交通调查结果,进行沥青路面疲劳寿命评估。第8章根据半刚性沥青路面的受力特点,对沥青路面基层与面层之间的剪切强度进行了研究。介绍了检测仪器、试验方法和部分现场试验结果,通过试验结果给出了提高层间剪切强度的方法和措施。

本书内容是依托西部交通建设项目——“沥青路面动力响应分析方法研究”的研究成果撰写而成。第1章由董忠红、吕彭民完成,由董忠红执笔撰写;第2章由董忠红、叶俊杰完成,由董忠红执笔撰写;第3章由董忠红完成并执笔撰写;第4章由董忠红、吕彭民完成,由董忠红执笔撰写;第5章由吕彭民、田润利、刘小云完成,由吕彭民执笔撰写;第6章由吕彭民、董忠红、郑仲浪、张培森、贺雨田、孔庆强、汪锋、梁佳、司小伟、王保良等完成,由董忠红执笔撰写;第7章由董忠红、吕彭民完成,由董忠红执笔撰写;第8章由吕彭民、宋绪丁、梁佳、司小伟、吴卫国、包维杰完成,由吕彭民执笔撰写。全书由吕彭民统稿。

项目研究过程中得到了西部项目管理中心领导小组的关心和支持,试验部分得到了陕西省高速公路建设集团、甘肃路桥公路投资有限公司、河南公路项目代理有限公司、北京路桥中咨科技有限公司、河北省公路局等单位的大力支持,在此表示诚挚的感谢!另外,本书的编写得到人民交通出版社的大力支持,借此机会向为本书出版付出努力的编辑表示感谢!

限于著者水平,书中错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

著者

2009年12月于西安

目 录

1 绪论	1
1.1 常用路面设计方法	1
1.2 车辆动力学研究现状	3
1.3 沥青路面动力学研究现状	4
2 车辆—路面系统动力学模型相关参数调查	7
2.1 典型重型车辆和轴载谱调查	7
2.2 沥青路面材料静态和动态模量调查	13
3 重型车辆对路面作用动力荷载	25
3.1 路面不平度和路面谱	25
3.2 车辆动力学模型	26
3.3 主要动力学参数	43
3.4 典型重型车辆选择及车辆参数	46
3.5 车轮动荷载影响因素分析	49
4 基于三维黏弹性本构关系的沥青路面动力响应分析	63
4.1 移动荷载下黏弹性层状体系动力响应模型	63
4.2 沥青路面结构动力响应评价指标讨论	72
4.3 典型半刚性基层沥青路面动力响应研究	73
4.4 典型沥青路面结构动力响应研究	90
4.5 倒装结构沥青路面结构动力响应研究	100
5 基于解析解的沥青路面动力响应研究	110
5.1 引言	110
5.2 瞬态解析解推导	110
5.3 应用实例及说明	116
6 沥青路面动力响应试验研究	120
6.1 沥青路面高速公路动应变传感器设计	121
6.2 常温状态下,沥青路面动力响应野外现场试验研究	126
6.3 低温状态下,沥青路面动力响应野外现场试验研究	135
6.4 沥青路面动力响应足尺试验研究	143
7 移动车辆荷载下沥青路面疲劳寿命研究	153

7.1	疲劳寿命预估方法	153
7.2	沥青路面轴载谱研究	155
7.3	荷载横向分布修正系数	158
7.4	现场修正系数	162
7.5	疲劳寿命计算	162
8	沥青路面层间黏结强度研究	164
8.1	沥青路面层间黏结强度检测系列仪器简介	164
8.2	河南某城际快速干道层间黏结强度现场检测	170
8.3	贵州某一级路大修工程层间黏结强度试验检测	178
8.4	河北某高速公路大修工程层间黏结强度检测	183
	参考文献	192

1 绪 论

自 1988 年沈大、沪嘉高速公路建成通车,我国公路建设进入了以高速公路和高等级公路为主的崭新时代。到 2007 年年底,高速公路通车总里程已经达到 5.36 万 km^[1]。经过短短十几年的建设,我国高速公路的发展走完了发达国家半个多世纪的发展历程,成就斐然^[2]。在取得巨大成就的同时,也出现了一些问题,特别是在已建成的高速公路中,沥青路面结构出现了较多的早期损坏,明显表现出沥青路面结构长期使用性能不足^[2-5]。一些高速公路建成通车后不久,短的几个月或者半年,长的 3~5 年就不得不进行大面积维修,既造成巨大的国有资产浪费,又影响交通服务能力。这促使我们对现有设计方法进行深入研究,提出能够反映实际交通荷载下路面结构力学行为的结构分析方法。

目前世界各国的沥青路面设计方法中,把车辆荷载视为静荷载或近似等效静荷载。经过多年的发展,静荷载模式路面设计方法已经较完善,使用较广,为工程设计人员所接受。同时,在车速较低、车载较小的情况下,静荷载模式路面结构设计也是比较合适的。但从世界公路交通发展的规律看,随着国家高速公路交通网致密化,交通车辆组成必然向高速重载方向发展。我国的公路交通现已进入重交通阶段。尽管可通过采用增加轴数、轮胎数及轮胎接地面积等措施,使得重载车辆单位作用面积下的静态压强与小吨位车辆相同或接近,但由于车辆速度的提高和车辆载重的增大,使车辆在运动状态下由于振动所引起的惯性荷载和冲击荷载会大大增加。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,地面结构的动力特性也远非静力特性所能描述。因此,仍旧使用静载模式已不能反映路面的实际受力状况,无法解释动态荷载作用路面结构产生的各种现象。

随着交通运输业的发展,车辆类型越来越多,而且沥青路面结构属于典型的层状黏弹性体系。因此,道路结构在运动车辆荷载作用下的力学行为相当复杂,既受到车辆结构参数、车辆运行速度和车辆载重的影响,也受路面结构参数和路面平整度及周围环境的影响,同时与轮胎和路面的接触关系密切相关。必须利用大系统理论,研究路面在实际运行车辆作用下的动力响应,确定不同路面结构在不同车辆作用下的动态响应规律、车辆动荷载影响系数规律,从而为高速公路路面设计提供合理的车辆荷载,为路面结构设计评价指标的合理确定提供理论依据,为路面动态设计方法乃至设计规范的制订做前期准备工作。

1.1 常用路面设计方法

路面结构由路基、垫层、基层和面层组成。面层是道路工程中直接承受荷载和环境

作用的部分。对路面最基本的要求是耐久、平整和光滑。路面设计的主要任务就是确保其寿命期间不发生不可接受的损坏。常用的沥青路面设计方法可分为两类：经验设计法和力学—经验设计法^[3,6]。

有代表性的经验设计方法有 CBR 设计法和 AASHTO 设计法。有代表性的力学—经验设计方法有 Shell 设计法和 AI 设计法^[3,6]。

Shell 设计法^[7,8]把路面当作一种多层线弹性体,设计中考虑两项主要设计指标和两项次要设计指标。两项主要设计指标是沥青面层底部的容许弯拉应变 ε_r 和路基顶面的容许竖向压应变 ε_z :

$$\varepsilon_r = CN^{-0.25} \quad (1-1)$$

$$\varepsilon_z = 0.018 (\text{或 } 0.021) N^{-0.25} \quad (1-2)$$

式中: N ——累计标准荷载作用次数;

C ——与沥青层模量有关的系数。

式(1-2)中系数 0.018 的保证率为 95%;系数 0.021 的保证率为 85%。

两项次要指标是水泥稳定类材料底面的弯拉应力 σ_{r2} 和路表面的永久变形 Δh 。

$$\sigma_{r2} = \sigma_{r1} (1 - 0.075 \lg N) \quad (1-3)$$

式中: σ_{r2} ——容许弯拉应力;

σ_{r1} ——材料的极限弯拉强度。

$$\Delta h = kh \frac{\sigma_0}{S_{\text{mix}}} \quad (1-4)$$

$$k = C_m Z_0 \quad (1-5)$$

式中: Δh ——车辙深度;

h ——沥青层厚度;

σ_0 ——标准轮载作用下的应力;

S_{mix} ——沥青混合料的劲度;

C_m ——动态因子;

Z_0 ——构造因子。

AI 设计法^[3]也把路面结构视为弹性层状体系,设计中采用沥青层底面的水平拉应变 ε_t 控制沥青面层的疲劳裂缝,采用路基顶部竖向压应变 ε_c 控制路面的永久变形。路面寿命与 ε_t 和 ε_c 的关系为:

$$N_f = a(1/\varepsilon_t)^b \quad (1-6)$$

$$N_d = c(1/\varepsilon_c)^d \quad (1-7)$$

式中: N_f ——路面开裂时的荷载作用次数;

N_d ——路面永久变形的荷载作用次数;

ε_t ——沥青层底面的水平拉应变;

ε_c ——路基顶面的竖向压应变;

a 、 b 、 c 、 d ——相关系数,由疲劳试验得到。

同时,世界各国还对本国的道路使用状况进行深入调查研究,制定相应的沥青路面设计规范和设计方法,总体来讲,各国沥青路面设计均采用多层弹性体系理论,损坏模式主要为疲劳和路面结构的永久变形,路面设计中考虑的外部使用条件主要是交通荷载和温度。

我国的《公路沥青路面设计规范》是众多学者辛勤劳动的结晶,总结了我国道路结构设计经验,已正式颁布五个版本。在最新发布的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)^[9]中,以弹性层状连续体系理论为基础,路面结构层厚度设计时,应满足结构整体刚度和沥青层或半刚性基层、底基层抗疲劳开裂的要求,分别采用轮隙中心处路表弯沉和面层及基层层底拉应力作为控制指标,采用双圆均布垂直荷载模式和 BZZ-100 标准荷载计算路面结构层厚度。

总体来讲,国内外沥青路面设计规范均采用力学—经验设计方法,理论基础均为弹性层状体系理论。采用的荷载模式均为静态荷载,对动荷载的影响提出基于经验的修正系数。设计模型中采用的材料性能参数有的是静模量,有的是动模量,但只考虑环境因素对模量的影响,没有考虑荷载因素对模量的影响。虽然有些设计方法,如 AI 设计法,考虑了沥青混合料的黏弹性特性,但也只是在实践基础上提出相应的模量修正公式。从动力学角度分析实际车辆荷载下路面结构的动力响应还有待深入研究。

1.2 车辆动力学研究现状

车辆动力学是伴随着车辆的出现而发展起来的一门专业学科^[10]。车辆动力学从严格意义上讲,包括与车辆系统运动相关的所有研究,然而最为核心的是平顺性和操纵稳定性这两大领域。一般认为,平顺性主要研究影响车身的垂向跳跃、俯仰、侧倾振动的因素,而操纵稳定性主要研究车辆的横向、横摆和侧倾运动。目前,在车辆动力学方面的研究已经取得了很大的成就。车辆系统的线性建模相当多,有平面模型、空间模型,自由度数可以高达 40 多个。车辆动力学的研究重点为如何提高车辆的行驶平顺性,改善乘员的乘坐舒适性。国内外汽车行业的专家学者,利用随机振动和系统动力学等理论,研究车辆动力学模型在路面不平度作用下的频率响应函数,目的在于完善汽车动态设计、减小车辆振动、提高舒适性和疲劳寿命。国外的研究机构,特别是许多大型汽车制造公司,如美国通用公司、福特公司、德国大众公司、日本丰田公司等,在这方面都做了大量深入的研究工作。国内也进行了相关研究,如清华大学、吉林工业大学(现吉林大学)、中国第一汽车集团公司、中国第二汽车集团公司等单位从理论研究和试验研究两方面做了大量工作,得到许多有价值的结论和理论分析方法及试验方法。

进行车辆动力学研究时,常常将车辆简化成由弹簧、质量和阻尼元件的组合。其中较为经典的模型有整车模型^[11,12]、二分之一车辆模型^[13,14]、四分之一车辆模型^[15]等。线

性范围内的研究手段和研究方法已经比较成熟。为了更准确地模拟车辆动力性能,许多学者还建立了非线性车辆动力学模型^[16-19]。车辆研究人员对以上模型进行了研究,其目的基本集中在改善车辆平顺性、舒适性和安全性。

实际上,高速行驶的车辆高速行驶在不平整的路面上,路面和车辆相互作用一个随机激励,不仅影响车辆的振动,而且对路面的动力响应有着严重影响。尤其是重型运输车辆,对路面作用的冲击荷载是路面结构产生早期破坏的力学条件。在车辆对路面结构作用的动力荷载方面的研究相对较少。采用系统动力学方法,研究运动车辆和路面结构之间的相互作用,分析车辆的振动性能和路面结构的动力响应,建立车—路友好系统,提出相应的车辆和路面设计参数,是目前国际上研究的热点。比较著名的研究项目为美国的 SHRP 计划^[20]。另外,Cebon^[21-24]、Sun Lu^[25-28]、Christison^[20]和 Corinell^[20]等人在这方面作出了突出的贡献。由于安装在车辆上的充气轮胎具有包容特性,而且轮胎的变形量较路面变形量大得多,因此,车辆和路面是一弱耦合系统。Cebon 将车辆响应和路面响应分开建模,在建立路面模型时着重考虑路面的转移函数和脉冲响应,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。Christison 和 Corinell 则是使用了与路面结构模型有关的影响函数,考虑到不同的响应(如应力、应变等)将会有不同的影响函数,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荷载下的响应。

1.3 沥青路面动力学研究现状

由前述基于力学—经验法的沥青路面设计方法知道,进行沥青路面动态设计时,要建立路面使用寿命与路面结构参数之间的关系,首先应知道移动车辆荷载下路面结构的动力响应。但沥青路面结构是一个复杂的黏弹塑性层状体系,即使在位置固定的动荷载下求解其动力响应也非常困难。因此,研究其动力响应的力学模型常常要对路面结构进行一定的简化处理。Alpan^[29]、Harr^[30]和 Kerr^[31]采用离散的质量、弹簧和阻尼元模拟路面结构,研究位置固定荷载下路面结构的动力响应。Kenis^[32]、Monismith^[33]、Ullidtz^[34]等人采用弹性层状体系理论,模型中的参数考虑了荷载频率及车辆速度的影响,修正静态分析结果。这些模型既没有考虑车辆荷载形式对路面结构动力响应的影响,也没有考虑动力响应的时间累计效应。许多学者采用线性系统的叠加原理,研究移动荷载下的动力响应,采用的力学模型有无限长梁模型、无限大板模型、弹性均质半空间体模型和层状介质模型。Battisto^[35-37]等人采用双层和三层黏弹性层状体系模型研究了移动半正弦波作用下的动力响应。Kausel^[38,39]等人采用 Green 函数研究刚性基础上层状体系的动力响应。Hardy 和 Cebon^[40-43]采用数值积分方法研究了随机移动荷载下 Winkler 地基上无限长梁的动力响应。

大量研究发现,沥青混合料的模量既受应力应变大小影响,也受加载频率影响。

Huang^[44] 和 Monismith^[45] 等人分别开发了 KENLAYER 软件和 SAPSI 软件,两个软件功能相似,都是将路面结构视为多层体系,各层的材料参数可以是线弹性的也可以是黏弹性的。所施加的车轮荷载为位置固定的圆形荷载,荷载大小随时间变化,为半正弦波形式,作用时间为车辆速度的函数。考虑到计算多轮荷载下的动力响应时进行了轴对称处理,该方法无法研究复杂轮迹荷载下的动力响应,Siddharthan^[46-54] 等人建立了移动荷载下层状体系的动力学模型,并编制了 3DMOVE 软件,引起广泛的反响。其模型采用 Fourier 变换技术对复杂的车轮荷载进行处理,求解出在简单移动荷载下路面结构动力响应的基础上,采用线性叠加原理分析实际车辆荷载下的动力响应。但该方法采用的是弹性体的本构关系模型,在考虑沥青路面的黏弹性时,仅仅是用沥青混合料的复模量代替弹性本构关系的模量。

我国在路面动力学研究方面也做了大量工作。任瑞波^[55] 等人采用传递矩阵法研究了 FWD 冲击荷载下黏弹性层状体系路表弯沉的解析解。钟阳^[56] 等人利用积分变换和传递矩阵相结合的方法研究了轴对称半空间体的动力响应。东南大学的邓学钧和孙璐^[57-60] 采用广义 Duhamel 积分和积分变换方法研究了 Bornoulli-Euler 梁、Kirchhoff 板和弹性半空间介质在运动点源、线源和面源荷载作用下的动力响应。

任何理论研究模型都是在一定的假设条件下是适用的。如前所述,实际交通荷载下沥青路面的动力响应既受车辆荷载和轮胎参数的影响,还受路面结构及材料性能的影响,同时还受温度、湿度等环境因素的影响。虽然经过众多学者的不懈努力,已经建立了多个路面结构动力学模型,考虑了一些影响因素,但与实际路面结构的动力性能还有一定的差距。为了更好地研究路面结构的使用性能,为基于力学—经验设计法提供符合实际情况的寿命模型和参数,许多国家进行了大量的野外现场动力性能试验。

国际上进行路面结构行为研究的研究方法可分为两类。第一类通过对正在使用的道路进行跟踪调查,长期观测路面结构行为的变化,提出各种因素对路面使用性能影响的模型,比较有代表性的研究为 SHRP 研究计划中的 LTPP^[61-63] 研究计划。另一类为进行足尺加速加载试验 APT(Accelerated Pavement Test)^[64-66],修建不同组成的路面结构,采用加速加载装置,在较短时间和一定控制条件下反复施加车轮荷载,研究路面使用性能的变化规律。受试验条件的限制,对路面结构行为的研究主要采用测量路表反映,如测量路表裂纹和车辙,或切开路面观测内部变化的方法进行。主要原因在于缺乏使用可靠的用于直接检测路面结构内部动力响应的传感器,美国 CTL 公司开发了一套用于检测沥青路面动力响应的传感器,在许多大型工程中得到应用^[67]。采用置入传感器,检测车轮荷载下路面结构内部的动力响应,如应变和弯沉,是近十余年才广泛开展起来的。比较著名的研究项目有 Mn/Road 试验路、The Virginia Smart Road、NCAT 试验路、CPATT 试验路、HVS、SISSI 等^[68-77]。

各个研究项目都选择多个本国或本地区常用路面结构,修筑试验路,道路结构施工时埋入传感器(也有些项目在施工结束后局部刨开路面置入传感器),采用加速加载设备

或本地区典型重型运输车辆作为加载装置,监测移动车辆荷载下路面结构的动力响应。各个项目检测的参数基本相同,反映路面结构动力响应的参数为面层底部弯拉应变和路基顶部的竖向压应变以及各个结构层的竖向弯沉,反映路面结构内部环境因素的参数有各个结构层的温度和湿度。该类项目研究时间一般较长,如 SISSI 至今已进行了 6 年的试验^[76,77],研究不同季节及不同的使用年限下路面结构的动力响应。由于路面结构组成差异较大,各个项目的试验结果差异很大。

在路面结构动力响应试验研究方面,国内研究相对较少,主要通过采用 FWD 弯沉仪检测路表弯沉,评价路面结构的动刚度,进而推断各个结构层的动态性能。与国外的研究思想和研究手段存在较大差距。近年来,由于高速公路路面结构出现大面积的早期破坏现象,促使我们对其破坏机理进行深入研究,交通运输部公路科学研究院在北京、江苏、山西等地区修筑足尺试验场,置入相应的传感器,研究不同组成路面结构的动力性能^[2,5]。

2 车辆—路面系统动力学模型相关参数调查

本书采用系统动力学方法建立车辆动力学模型和路面结构动力学模型,分析典型重型车辆对路面结构的动力荷载和沥青路面结构在移动车辆荷载下的动力响应,研究路面结构动力响应特点,分析不同参数对车辆动力响应和路面结构动力响应的影响。

车辆—路面系统动力学模型中包括大量的车辆动力学参数和路面动力学参数,参数的取值直接影响动力学研究结果能否反映实际交通荷载下路面结构的动力响应。因此,需要对车辆—路面系统动力学模型中重要的参数进行深入调查研究,其中包括典型重型车辆、轴载谱、路面结构材料模量等。

2.1 典型重型车辆和轴载谱调查

实际交通车辆组成及轴载是进行车辆—路面系统动力响应研究的基础数据。因此,作者采用现场调查和收集资料相结合的办法,进行调查研究,包括车辆组成调查研究和轴载谱调查研究。

调查时,借助于收费站的动态称重收费系统,根据记录的每辆车每个轴的轴重,确定车辆类型和轴重,进而确定一段时间内的车辆组成(即不同类型车的比例)和轴载谱。调查时间为24h。

值得说明的是,2004年之前,我国高速公路超载普遍严重,使得高速公路出现严重的早期破坏现象,既影响高速公路的服务能力,又造成严重的国有资产浪费。为了解决超限超载运输问题,交通运输部、公安部、国家发展和改革委员会、国家质量监督检验检疫总局、国家安全生产监督管理总局、工商行政管理总局、国务院法制办公室等七部委于2004年6月20日在全国范围内开展了联合治超行动。2004年10月1日起,重型汽车生产厂家在制造车辆时,必须执行《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2004)强制性标准。这些文件的出台,对交通组成影响很大。本书给出的调查数据全部是“治超”以后的数据。

我国高等级公路上常见载货汽车按轴型分为5类:①二轴车;②三轴车;③四轴车;④五轴车;⑤六轴车。各轴型货车如图2-1所示。

值得说明的是,图2-1中所指的“1型轴”是指两侧各有一个轮胎的单轴,即单轴,单轮,该型轴标准轴重为70kN;“2型轴”是指两侧各有两个轮胎的单轴,即单轴,每侧双轮,该型轴标准轴重为100kN;“5型轴”是指两侧各有四个轮胎的双联轴,即双联轴,每侧双轮;“7型轴”是指两侧各有六个轮胎的三联轴,即三联轴,每侧双轮。

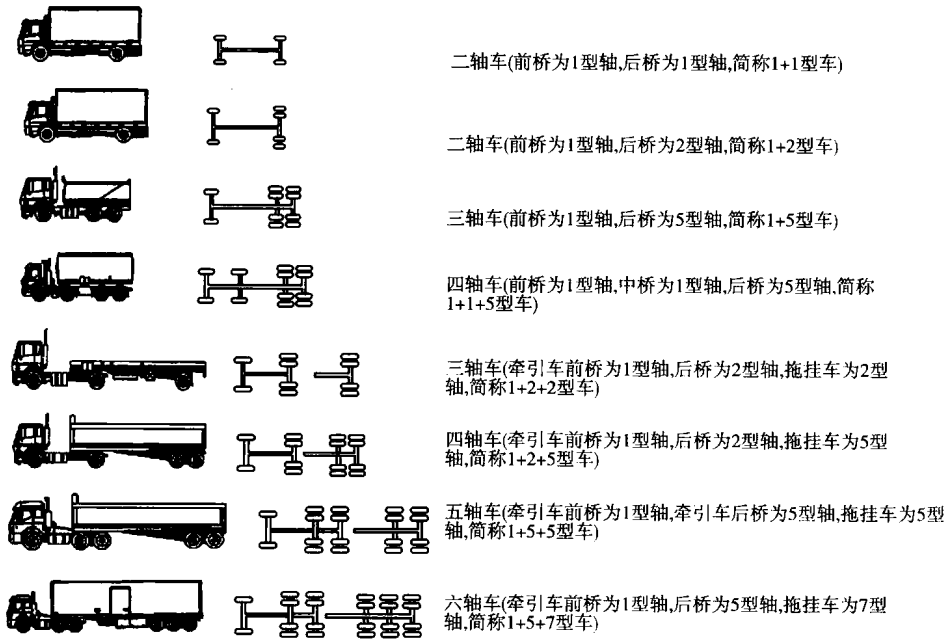


图 2-1 我国高等级公路上常见的各轴型货车

2.1.1 典型路段交通组成和轴载谱调查

1) 京珠高速公路河南段轴载谱

京珠高速公路河南段车型比例统计见表 2-1。

京珠高速公路河南段车型比例统计表

表 2-1

车 型	二轴车	三轴车	四轴车	五轴车	六轴车	合计
数量(辆/24h)	961	396	514	70	58	1 999
比例	48.07%	19.81%	25.71%	3.50%	2.90%	100%

从表 2-1 可见,京珠高速公路河南段上重型车中二轴车所占比例最大,达 48.07%,其中 1+2 型车辆比例最大,达到 47.8%,1+1 型车辆仅占 0.27%。三轴车和四轴车也占有较大比例,分别达到 19.81% 和 25.71%。通过现场调查发现,二轴车和三轴车以短途运输为主,而四轴车以长途运输为主。五轴车和六轴车所占比例较小,可以认为是非典型车辆。

京珠高速公路河南段的汽车通行量为 1 999 辆/d,这表明京珠高速公路河南段的货物运输非常繁忙,是一条载货汽车比较集中的重载道路。根据测试结果,对京珠高速公

路河南段各类型载货汽车的轴载进行统计得到四种主要轴型的轴载谱,如图 2-2 ~ 图 2-5 所示。

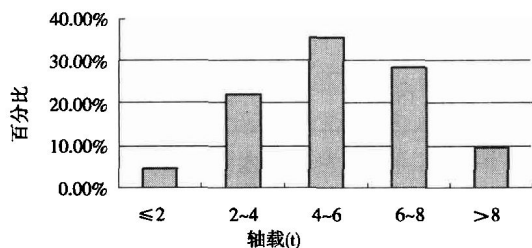


图 2-2 京珠高速公路河南段 1 型轴
(单轴、每侧单轮)轴载谱

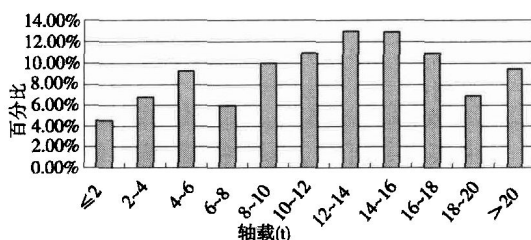


图 2-3 京珠高速公路河南段 2 型轴
(单轴、每侧双轮)轴载谱

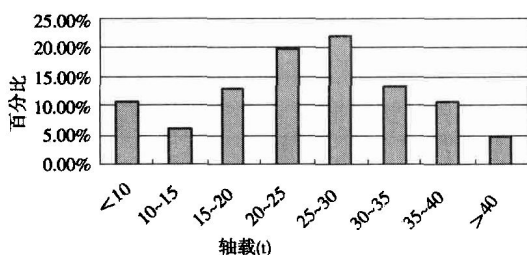


图 2-4 京珠高速公路河南段 5 型轴
(双联轴、每侧双轮)轴载谱

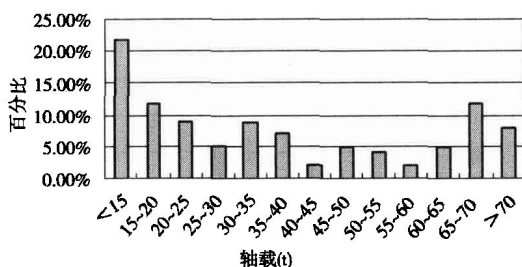


图 2-5 京珠高速公路河南段 7 型轴
(三联轴、每侧双轮)轴载谱

由图 2-2 ~ 图 2-5 各轴型的轴载谱可以看出,1 型轴(单轴、每侧单轮)的轴载谱只显示一个峰值,近似服从正态分布,因为车辆前轴多用这种轴型,车辆载质量的大小对它的影响较小。但是 1 型轴载超过 6t 的比例占到 37.96%,根据《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2004)标准,这些轴处于超负荷运行状态。2 型轴(单轴、每侧双轮)轴载谱出现两个峰值,分别对应于空车和承载车。超出国家规定的最高限 10t 的轴数较多,占总轴数的 63.9%,甚至有 9.49% 的 2 型轴载超过了 20t。5 型轴(双联轴、每侧双轮)轴载谱近似服从正态分布,荷载大多集中在 20 ~ 40t。其中有 75.61% 的轴载超出国家规定最高限 18t,所以这种轴型的车辆对路面的损伤很大。按国家规定的 7 型轴(三联轴、每侧双轮)轴限为 22t,由京珠高速公路河南段轴载谱知,绝大部分的三联轴类型车辆都超过了这个范围,超限比例为 76.48%。其中最大轴载为 79.14t,是轴限 22t 的 3.6 倍。因此,从京珠高速公路河南段的车辆轴载数据可知,虽然进行了“治超”,但货车超载情况依然十分严重,这就加剧了路面的损伤。

2) 山西祁临高速公路轴载谱

山西祁临高速公路车型比例统计见表 2-2。

山西祁临高速公路车型比例统计表

表 2-2

车 型	二轴车	三轴车	四轴车	五轴车	六轴车	合计
数量(辆/d)	200	46	40	55	16	357
比例	56.02%	12.89%	11.20%	15.41%	4.48%	100%

由表 2-2 可知,山西祁临高速公路通行车辆以二轴车为主,达到 56.02%。三轴车、四轴车和五轴车也占有一定比例,六轴车仅占 4.48%,可以认为是该路段的非典型车辆。

山西祁临高速公路的车辆通行量为 357 辆/d,有 154 辆载货汽车实际装载量超过了额定装载量,占总车辆的 43.13%,甚至有 5.32%的载货汽车载质量超过了额定载质量的 200%,这种车型多为五轴车。对山西祁临高速公路各类型载货汽车的轴载进行统计得到四种主要轴型的轴载谱,如图 2-6 ~ 图 2-9 所示。

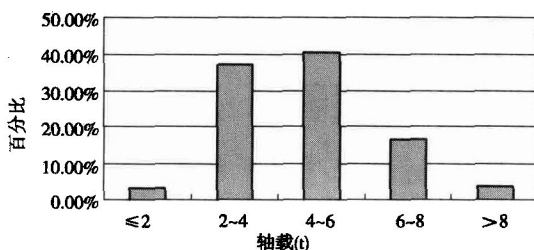


图 2-6 山西祁临高速公路 1 型轴(单轴、每侧单轮)轴载谱

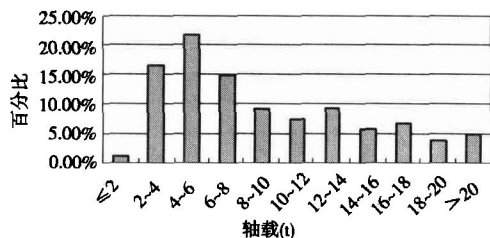


图 2-7 山西祁临高速公路 2 型轴(单轴、每侧双轮)轴载谱

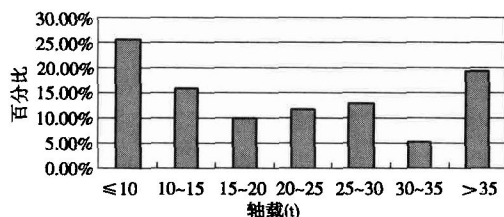


图 2-8 山西祁临高速公路 5 型轴(双联轴、每侧双轮)轴载谱

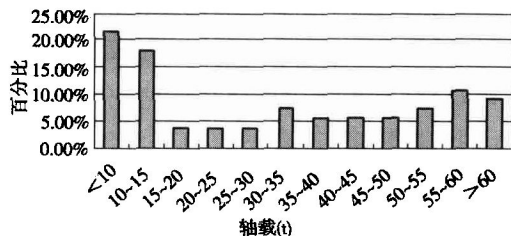


图 2-9 山西祁临高速公路 7 型轴(三联轴、每侧双轮)轴载谱

由图 2-6 ~ 图 2-9 各轴型轴载谱可以看出,1 型轴(单轴、每侧单轮)的轴载谱只显示一个峰值,近似服从正态分布,因为车辆前轴多用这种轴型,车辆载质量的大小对它的影响较小。但是 1 型轴超限(6t)比例达到 19.75%,这些轴处于超负荷运行状态。2 型轴(单轴、每侧双轮)轴载谱出现两个峰值,分别对应于空车和承载车,其中有 36.96%轴载