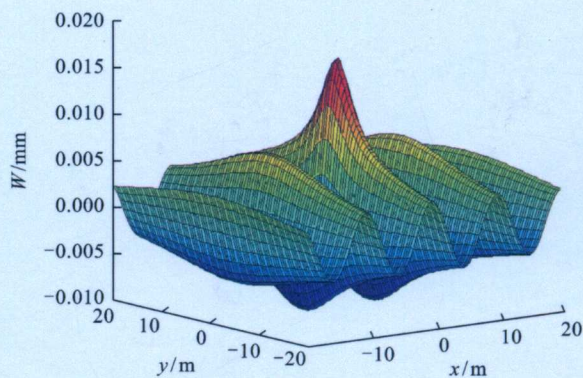


Dynamic Response and Design
Method of Highway Subgrade

公路路基动力响应与 动力学设计方法

卢正 姚海林 著



张外信



科学出版社

公路路基动力响应与 动力学设计方法

卢 正 姚海林 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书总结作者近年来在公路路基路面结构动力响应方面的研究成果,并结合国内外相关研究成果,对公路结构动力特性的黏弹性地基模型、三维层状弹性结构模型、三维层状饱和多孔介质模型等进行较系统和全面的论述。通过开展室内足尺寸模型试验,深入揭示路面路基结构在交通荷载作用下的动力响应分布与衰减特征,验证理论模型的适用性。进一步考虑路面路基协调作用,提出一种基于动变形控制的路基动力学设计方法,并给出详细的设计实例。本书对于公路路基路面结构长期服役性能保障具有重要的参考价值。

本书可供岩土工程、道路工程等专业的科研人员、设计和施工人员,以及高等院校的教师、研究生、本科生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路路基动力响应与动力学设计方法/卢正,姚海林著. —北京:科学出版社,2018.7

ISBN 978-7-03-058089-4

I. ①公… II. ①卢… ②姚… III. ①公路路基—结构动力学 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 134284 号

责任编辑:杨光华 何 念/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018年7月第一版 印张:9 1/4 插图:2

2018年7月第一次印刷 字数:225 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来我国交通基础设施建设突飞猛进,截至 2017 年底,全国高速公路和高速铁路通车总里程分别达到 13.6×10^4 km 和 2.5×10^4 km,均居世界第一。在 2020 年以前,我国还将新增 4×10^4 km 高速公路、 1×10^4 km 普通公路,全国铁路营运里程将达到 15×10^4 km,其中高铁突破 3×10^4 km。路基是路面、钢轨的基础,是整个道路结构中的重要单元体,其性能稳定与否对于整个道路的服役寿命及车辆的安全运行具有十分重要的影响。服役中的路基承受长期交通循环荷载作用和自然环境条件侵蚀,加之车辆超载和交通量日益增大,许多道路出现了由路基服役性能衰变引起的不均匀沉降、路表开裂、路面板脱空、路基边坡垮塌等灾害现象,严重影响着行车安全性和舒适性,同时导致道路维修周期的缩短和维修工作量的增加。追其根源是长期以来人们对路基服役性能的认识不足和现有的设计体系不能适应新时期的发展要求。对于路基而言,交通动荷载是一种低幅值、高加载次数的长期循环荷载,是引起路基服役性能变化的重要因素之一。因此,揭示交通荷载作用下路基的动力响应分布与衰减规律,并在此基础上开展相关设计理论与方法的研究,对于推动我国公路、铁路等建造技术的发展及“一带一路”基础设施建设具有重要的科学意义和实用价值。

本书关于交通荷载作用下公路路基动力响应和动力设计方法的研究结果,是作者长期从事路基工程及相关领域发表论文的凝练。本书是按照交通荷载作用下的路基动力学的发展逻辑来安排的,研究模型由易到难,共分为六章,分别是:第 1 章绪论;第 2 章黏弹性地基上路面结构动力响应;第 3 章三维层状弹性路基结构动力响应;第 4 章三维层状饱和路基结构动力响应;第 5 章公路路基动力响应模型试验;第 6 章基于动力学的公路路基路面协调设计方法。

本书得到了中国科学院青年创新促进会(2015270)、中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-STZ-ZDTP-037)、国家自然科学基金项目(41472286, 41472290, 41672312, 51209201)和湖北省自然科学基金杰出青年项目(2017CFA056)的资助,在此表示感谢。

感谢中交第二公路勘察设计研究院有限公司吴万平教授级高工和湖南省交通科学研究院有限公司李志勇教授级高工为本书研究所做的贡献。感谢中国科学院武汉岩土力学研究所路基工程学科方向组成员和研究生在理论和试验研究中给予的支持与帮助。另外,本书还参考了很多国内外专家和同行学者的论文及专著,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者和同行专家批评指正。

作 者

2018 年 3 月于武昌小洪山

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 公路交通荷载模型及研究现状	2
1.3 路面模型及动力响应研究现状	6
1.4 路基模型及动力响应研究现状	8
1.4.1 基于 Winkler 理论的地基模型及动力响应研究现状	8
1.4.2 单相弹性地基模型及动力响应研究现状	10
1.4.3 饱和多孔介质模型及动力响应研究现状	11
1.4.4 热流固耦合地基模型及动力响应研究现状	12
1.5 路基和路面动力响应试验研究现状	14
第 2 章 黏弹性地基上路面结构动力响应	17
2.1 引言	17
2.2 多轮荷载作用下黏弹性地基上路面的动力分析	18
2.2.1 基本控制方程	18
2.2.2 数值计算及分析	22
2.3 考虑基底剪切阻力的黏弹性地基上路面振动参数分析	27
2.3.1 基本控制方程	28
2.3.2 数值计算及分析	31
2.4 黏弹性地基上不平整路面的动力响应分析	35
2.4.1 路面不平整实测分析	35
2.4.2 车辆动荷载理论分析	39
2.4.3 不平整路面的动力控制方程及响应解	43
2.4.4 数值计算及分析	45
2.5 变速荷载作用下黏弹性地基上路面的动力分析	50
2.5.1 基本控制方程及其解	50
2.5.2 板的关键速度	52
2.5.3 数值计算及分析	52

2.6	本章小结	57
第3章	三维层状弹性路基结构动力响应	59
3.1	引言	59
3.2	弹性土体介质动力响应基本理论	59
3.3	路面-弹性层状结构系统的动力响应分析	61
3.3.1	三维弹性分层地基模型	61
3.3.2	路面-弹性分层地基的动力响应	62
3.3.3	数值计算及分析	65
3.4	基于传递-反射矩阵法的弹性层状系统动力分析	68
3.4.1	理论推导和求解思路	69
3.4.2	数值实施方法	74
3.4.3	数值计算及分析	75
3.5	本章小结	78
第4章	三维层状饱和路基结构动力响应	79
4.1	引言	79
4.2	饱和土体介质动力响应基本理论	79
4.3	路面-饱和层状结构系统的动力响应分析	82
4.4	路面-弹性层-饱和层结构系统的动力响应分析	85
4.4.1	路面-弹性层-饱和层混合结构的动力响应解	85
4.4.2	数值计算及分析	88
4.5	本章小结	95
第5章	公路路基动力响应模型试验	96
5.1	引言	96
5.2	模型试验介绍	96
5.2.1	模型尺寸及荷载	96
5.2.2	各结构层试验材料	98
5.2.3	试验仪器及内容	99
5.3	试验结果及分析	101
5.3.1	结构层基本性质	101
5.3.2	动应力	101
5.3.3	动弹性变形	109

5.3.4 累积塑性变形	111
5.4 试验结果与理论分析的比较	115
5.5 本章小结	117
第 6 章 基于动力学的公路路基路面协调设计方法	118
6.1 路基结构设计指标体系与方法的选择	118
6.2 基于路基路面协调作用的路基结构设计思路	119
6.3 路基结构设计的动变形控制标准	120
6.4 路基结构设计实例	122
6.4.1 满足动变形条件的路基动回弹模量指标控制	122
6.4.2 满足动变形条件的路基含水率和压实度指标控制	123
6.5 本章小结	129
参考文献	130

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

近年来,随着我国基础设施建设投资的加大,已建和待建的高等级公路越来越多,截至 2017 年底,全国高速公路通车总里程已超过 13.6×10^4 km。但从使用情况来看,由于近些年来交通量日益增大,车速提高,车辆荷载大幅度增加,以及新建公路修筑速度加快,一些道路在交通循环荷载作用和自然条件侵蚀下出现了许多破坏现象,如路面疲劳开裂、路基材料松散并产生过大的永久变形,造成路面板脱空等,导致公路路面结构状态恶化和维修工作量的增加,同时严重影响着高速公路的行车安全。

我国传统的路面设计规范中,将汽车荷载假定为静载,以静荷载作用下路面表面弯沉、面层底部的拉应力和基层底面的拉应力为设计指标。这种基于静力学的设计方法在荷载不太大,车速较低的情况下基本上是合理的。然而,交通荷载是一种大小和位置都时刻变化的运动荷载。在这种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路面的实际作用力之间的差异越来越大,特别是超载车辆在不平整路面上行驶对路面结构产生的影响更大。路面结构的疲劳试验表明:沥青材料的疲劳寿命与应力呈四次或五次方关系;水泥混凝土材料的疲劳寿命则与之呈十六次方的关系。结构所承受的应力只要增加很小一点,结构的疲劳寿命就会成倍地下降^[1]。因此,若在高速公路路面结构分析和设计中仍只考虑静荷载作用,分析结果必然与实际情况有较大出入。

对于路基的设计存在同样的问题。实际工程中仍是将交通荷载简化为当量厚度的土柱,并通过静力学来估算交通荷载引起的路基沉降。然而,路基土体在动荷载作用下的力学特性远非静力学特征所能描述。根据目前的理论和试验研究结果,交通荷载作用下土体的变形不仅与动应力水平有关,而且与动荷载的作用次数紧密相关,特别是对于含水量较高的软黏土路基和低填方路基,动荷载的影响更加显著。许多公路路基工后沉降达到 1 m 以上,甚至接近总沉降的 1/3。例如,日本某机场高速公路正式通车后,由交通荷载引起的变形约占总沉降的 30%^[2],建于 Ariake 黏土上的日本某低路堤高速公路,运行 5 年后发生了近两米的惊人沉降^[3]。研究表明,软土路基的长期沉降中由交通荷载引起的部分是相当可观的^[4]。一般来说,交通荷载引起的长期沉降由两部分组成:一是由循环动荷载作用引起的路基土永久累积塑性变形;二是循环动荷载作用产生的超孔隙水压力消散而造成的土体固结沉降。而这两部分都与动应力水平及荷载作用次数息息相关。另外,目前路基设计时未考虑路面路基的相互作用,路基填筑以加州承载比(California bearing ratio, CBR)值作为填料控制标准,在施工中以压实度和土体含水量对施工过程进行控制。这种设计方法把路基和路面的设计分割开来,忽略了路基与路面的相互作用和协调变形。

同时,作为控制标准的 CBR 值难以和路基路面结构的力学分析联系起来。这些都是现有路基设计理论亟待解决和完善的地方。因此,考虑路基路面协调作用,对交通荷载作用下公路结构的动力响应特性和动应力分布特征展开系统的研究,对路基路面结构优化设计及保证公路结构的长期使用性能都具有重大的理论意义和工程应用价值。

1.2 公路交通荷载模型及研究现状

本书研究的内容是交通荷载下公路结构的动力响应问题,因此,如何准确地模拟作用在公路结构上的交通荷载对于解决该问题是十分重要的。与地震、波浪等动荷载不同的是,公路交通荷载是一种疲劳荷载,它具有瞬态性、重复性和不均匀性等特点。目前,关于路面上行车动荷载的特性方面的研究还很少,只是汽车部门或空军科研部门在研究减震和提高车辆行驶舒适性或起落架的疲劳寿命等问题时有所触及。由汽车产生的动荷载一般可分为两部分:一部分是汽车本身的质量,即固定荷载;另一部分是汽车在路面上运行时由振动产生的附加动荷载。在进行路面及路基结构计算时,常用的汽车荷载模型主要有以下几类:①静荷载;②移动恒载;③移动简谐荷载;④冲击荷载;⑤经验模型;⑤随机荷载。

用静荷载来代替汽车动荷载是世界各国公路结构设计规范沿用至今的方法。该方法把车辆轮载看成是集中的点源、线源均布或面源均布荷载,这种荷载可统一地用下述公式来表示^[1]

$$F(r) = \begin{cases} 0 & (|r| > |r_0|) \\ p & (|r| \leq |r_0|) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中: r 是坐标轴; p 是荷载大小; r_0 是荷载分布边界至荷载中心的距离,如果 $r_0 \rightarrow 0$ 就成为集中荷载,如果荷载是线源分布, $2r_0$ 就是线源分布的长度,如果荷载是面源分布, r_0 就是面源分布的半径。

我国在路面设计时,采用单轴 100 kN 双轮圆形均布荷载作为标准的设计荷载。

移动恒载是用来模拟交通荷载的一种较为理想的荷载模型。当汽车荷载以一定的速度在平整的路面上行驶时,便对路面结构施加了一个随时间变化大小不变的移动荷载,此时可把车辆荷载简化为沿行驶方向移动的常值荷载,其大小等于车辆的自重。这种荷载又可以分为突加移动恒载和匀速移动恒载两类。突加移动恒载用来模拟汽车刚刚启动的一瞬间,初始时刻的速度扰动、加载等对路面结构响应的影响,即瞬态响应。匀速移动恒载可用来模拟荷载在无穷远处就施加在地面结构上的情形,即初始时刻的速度扰动和加载的影响已经消失,也就是常说的稳态响应。此种荷载形式在目前的地面结构动力学模型中较为多见,其数学表达式为

突加移动恒载:

$$F(x, y, t) = p\psi(x, y)\delta(x-vt)\delta(y)H(t) \quad (1.2)$$

匀速移动恒载:

$$F(x, y, t) = p\psi(x, y)\delta(x-vt)\delta(y) \quad (1.3)$$

式中： p 是荷载大小； $\psi(x, y)$ 是荷载分布形式，常见的有点源分布、线源分布、矩形分布和圆形分布等； $\delta(\cdot)$ 是 Dirac 函数； $H(t)$ 是 Heaviside 函数。

实际的路面不是绝对平整的，当车辆以一定的速度在路表面行驶时，由于自身的振动和路面的不平整，车轮是以一定的频率和振幅在路面上跳跃的，轮载时而大于静荷载，时而小于静荷载，此时可假设荷载为移动简谐荷载。移动简谐荷载和移动恒载一样，也可分为突加移动简谐荷载和匀速移动简谐荷载，分别对应于瞬态响应问题和稳态响应问题。其数学表达式可写成

突加移动简谐荷载：

$$F(x, y, t) = p\psi(x, y)\delta(x - vt)\delta(y)H(t)e^{i\omega t} \quad (1.4)$$

匀速移动简谐荷载：

$$F(x, y, t) = p\psi(x, y)\delta(x - vt)\delta(y)e^{i\omega t} \quad (1.5)$$

式中： ω 是荷载振动圆频率。

这种荷载形式在目前的地面结构动力学模型中应用最多，它能够反映荷载自振频率的影响，而自振频率的产生一般是由路面的不平整造成的，因此它综合反映了路面不平整和荷载速度的影响，更加接近实际情况，且在计算分析中应用较为方便。另外，目前关于匀速移动恒载和匀速移动简谐荷载作用下地基结构响应方面的文献比较丰富，本书将在 1.4 节中做详细评述。而关于变速移动荷载作用下结构的响应问题，国内外只有少量报道。例如，Huang 等^[5]对加速移动荷载作用下 Winkler 地基板的竖向位移进行了分析。Michaltsos^[6]对单跨梁在变速移动荷载作用下的动力学特性进行了研究，讨论了加速度对梁挠度的影响。谢伟平等^[7]推导了变速移动荷载下无限长 Winkler 梁的稳态响应解答，但未给出具体的荷载形式和数值解。彭献等^[8]考虑了移动质量块的牵引惯性力和加速度对简支梁横向振动的影响，利用时变力学系统的求解方法分析了加速度对梁挠度的影响。钟阳等^[9-11]利用 Duhamel 积分方法对匀变速移动荷载作用下的无限长梁、无限大板及矩形板的动力响应进行了研究，给出了梁和板的挠度随着荷载速度和加速度的变化规律。

当汽车车轮以一定的速度经过路表某一点时，该点受到的轮载变化是一个先增大再减小的过程，其受力曲线是一个半波正弦曲线。Hyodo 等^[12]将 10 t 重的卡车作为交通荷载以 0 km/h、10 km/h、20 km/h 和 35 km/h 的不同速度在试验道路上往返运动，得到了交通荷载作用下不同深度地基的竖向土压力。对地基某一点而言，竖向土压力的波形如图 1.1 所示。

那么可以设想有一种冲击荷载，其对路面产生的位移变化曲线与图 1.1 相一致，这种荷载模型的表达式可写成：

$$F(x, y, t) = \begin{cases} p\sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) & (0 \leq t \leq T) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1.6)$$

式中： T 是荷载周期，对应于地基某点的受力时间，与荷载的运行速度有关。

另外，在对新建道路和已经使用的道路的品质进行评价时，常采用落锤式弯沉仪 (falling weight deflectometer, FWD) 和表面波频谱分析等方法，这些方法通常给路面施加一个瞬时的脉冲荷载，再利用相关理论反算路面各层的模量。因此，冲击荷载模型也常

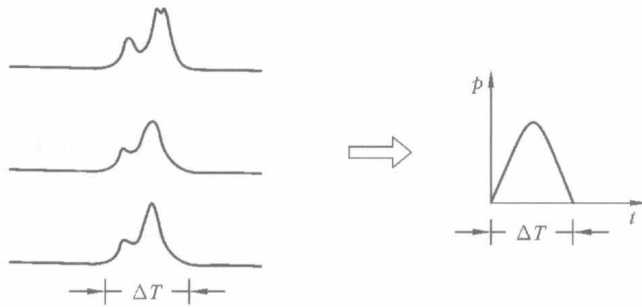


图 1.1 竖向土压力观测波形

p 是荷载大小; t 是时间; ΔT 是荷载作用时间

常被用到路面的质量评价中。

实际上,车辆作用在地面结构上产生的动荷载的大小不仅随时间变化,而且随空间位置也是不断变化的。另外,因为路面不平整是一个随机过程,所以车辆荷载还具有随机性。利用随机振动模型来模拟交通荷载比前几种荷载形式更符合实际。随机振动模型中振动没有固定的周期,不能用简单的函数组合来表达其规律,同时事先无法预测某一时刻的振幅、速度和加速度等,但是随机振动的物理量服从概率分布,可以而且只能用概率统计方法进行研究,计算出随机过程的数学期望值、均方值等,从而得出振动随机过程的幅值和频率等可靠信息。随机振动模型中的输入源可以是土体参数也可以把交通荷载的位移波形作为输入函数,这两种输入源都是具有零均值的局部均匀高斯平衡随机场,因而,交通荷载作用下产生的动应力结果也为零均值高斯平衡过程。Dodds 等^[13]最先利用路面功率谱密度随机方式来描述高速公路的不平整状况,他们将路面不平度视为车辆偏离实际基准面的决定函数。Antle^[14]实测了由移动车辆产生的随机动荷载,并计算了动荷载系数。Marcondes 等^[15]利用频谱分析法建立了路面功率谱密度和国际不平度指标之间的关系,并指出目前采用的不平度测试技术只反映了路面不平度幅值的变化,而没有反映不平度频率的变化。Fryba^[16]和 David 等^[17]采用了更加准确的多自由度车辆模型,研究了这些模型在路面不平度激励下的动态响应。国内许多学者也对车辆产生的随机动荷载进行了研究,最具代表性的是孙璐和邓学钧^[18-21]。他们将路面假设为零均值的平稳随机场,引入随机理论,并把 1/4 车辆模型看成是两自由度振动体系,采用频率响应函数的概念获得了车辆对不平整道面的随机动压力谱。随后,邓学钧^[22]将车辆与地面结构视为综合体系,研究了随机振动激励下各类地面结构的动力响应,同时设计了试验来进行验证。在上述研究中,一些学者在建立车辆振动模型时忽视了轮胎阻尼的影响,这实际上考虑的是火车车轮的作用,与汽车轮载有较大差距。

随机理论借助统计原理,可以得到振动过程的交通荷载输入函数,可以详细描述出作用荷载的动态特征,通过此方法获得的荷载模型显然更符合实际。然而,利用此荷载模型来分析地基介质的动力响应时,对数据来源的处理和分析的复杂性使得问题变得异常困难。因此,为了既能符合实际又能简化计算,人们往往采用通过一定的试验

或理论分析得来的简化荷载形式,称作经验模型。Hardy 等^[23]通过试验将荷载假设为 $F(t)=10+5\sin(2\pi ft)$ 的形式(f 为振动频率),获得了此种荷载形式作用下柔性路面的动力响应解,同时分析了荷载速度和振动频率对土体动应变的影响。黄仰贤^[24]在他的 Kenlayer 程序中假设交通荷载为静荷载和附加动荷载之和,可表示为

$$F(x, y, t) = p_0 + q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi Vt}{12R_0}\right) \quad (1.7)$$

式中: p_0 是静轮载大小; R_0 是轮胎接地面源半径,一般取 15 cm; V 是行车荷载速度; q_{\max} 是车辆附加动荷载幅值,根据路面平整程度而定,一般不超过 $0.3p_0$ 。

张艳美等^[25]综合考虑了车体本身悬挂、非悬挂质量,路面几何不平整及车辆速度的影响,建议车辆动荷载的表达式为

$$F(t) = p_0 + M_0 h_0 \omega^2 \sin^2(\omega t) \quad (1.8)$$

式中: p_0 是静轮载大小; M_0 是车体簧下质量; h_0 是路面不平整幅值; $\omega = 2\pi V/\lambda_0$ 是振动圆频率,是行车速度 V 和路面不平整波长 λ_0 的函数。

于清等^[26]考虑了汽车侧倾因素在路面不平引起的汽车动荷载问题中的影响,利用建立的四自由度车辆模型获得了汽车动荷载的表达式如下:

$$F(t) = k_0 \left[y_0 - h_0 \sin\left(\frac{2V\pi t}{\lambda}\right) \right] \quad (1.9)$$

式中: k_0 是轮胎刚度, y_0 是后轴左车轮垂直位移; h_0 是路面不平整幅值; λ_0 是路面不平整波长; V 是车速。

周华飞等^[27]结合实测资料将路面凹陷变形假设为 Ricker 小波函数,其数学表达式为

$$y_0(x) = 2h_0(a-0.5)e^{-a} \quad (1.10)$$

式中: $a = [\pi(x-x_s)/x_p]^2$, x_s 是路面凹陷变形达到幅值时的位置; x_p 是路面凹陷变形区域的长度; h_0 是路面不平整幅值。

然后采用两自由度的车辆振动模型,分析了车辆通过路面凹陷时的振动水平。

黄立葵等^[28]基于车路相互作用,运用 1/4 车辆模型,通过求解其运动方程得到了动荷载系数的简化计算式,并利用国际平整度指标(international roughness index, IRI)与路面平整度的关系,导出了动荷系数与 IRI 及车速的近似关系式,最终得到的动荷载形式为

$$F(t) = p_0(1+a\sqrt{V}) \quad (1.11)$$

式中: p_0 是静轮载大小; V 是车速; a 可以根据 IRI 和连续平整度仪测定的标准差查表取值。

实际上,上述提到的几种典型的交通荷载只是分别强调了实际荷载的不同方面。从公路交通荷载的现有研究成果可以发现,尽管目前荷载模型的种类很多,但由于公路交通荷载产生机理的复杂性,至今尚没有被普遍认同的荷载模型。若想给出一个包罗万象的交通荷载模型也不太现实。在这种情况下,在实际动力分析中,根据问题的侧重点,着重考虑影响动应力大小的主要因素,适当忽略次要因素,才是科学地解决实际问题的一种方法。

1.3 路面模型及动力响应研究现状

公路结构由路面、路基共同组成,路面结构的功能主要是承受和扩散由交通荷载引起的集中应力,以保护路基不致产生过多的沉降,确保路面表面的平整性。现有的路面结构大体可分为两大类:刚性(半刚性)路面和柔性路面。因此对于不同的路面结构需要建立不同的力学模型。

一般公路工程中的水泥混凝土路面具有较高的力学强度,同时具有较高的弹性模量,在外荷载作用下变形微小,因此从力学观点出发,称其为刚性路面。例如,素混凝土路面、连续配筋混凝土路面(continuously reinforced concrete pavement, CRCP)、预应力混凝土路面及钢纤维混凝土路面等都属于刚性路面的范畴。目前的刚性路面应力分析与设计方法,多数是以弹性地基上的薄板为基本力学模型。薄板理论是 Kirchhoff 于 1850 年首先提出的,他在推导过程中做了如下假设:①原来垂直于平板中面的法线,变形后仍保持为直线且垂直于弯曲后的中面,即横向剪切应变为零;②在横向荷载作用下产生弯曲时,板的中面并不伸长,即薄板中面内各点都没有平行于中面的位移。在大量由板壳组成的工程结构中,根据 Kirchhoff 假设建立的薄板近似理论的计算结果可以满足工程计算的精度。因此, Kirchhoff 薄板理论又称为经典薄板理论。此后, Westergaard 运用该薄板理论结合 Winkler 地基模型,推算了弹性地基上混凝土板的荷载-应力关系式,该公式目前仍是许多国家刚性路面设计方法的基础。Hogg 于 1938 年首先提出了以弹性半空间地基上薄板为力学模型的刚性路面应力分析及厚度计算方法,我国目前采用的刚性路面设计方法的基本理论模型便是由此建立的。它假设薄板为无限大,而荷载分布为圆形,因此只适合于求解轴对称问题。起初的薄板力学计算都是基于静力荷载,随着数学和力学的发展,研究者开始致力于薄板的动力学分析。Sonzogni 等^[29]对一边自由的矩形板的振动问题进行了分析,他采用改进的 Knatorovcic 方法,并对振型函数做出假定,获得了矩形板振动的一般解,同时与有限元的计算结果进行了比较。Gupta 等^[30]也探讨了弹性地基上非均质矩形板的横向振动问题。

实际的公路路面并非无限大, Huang 等^[31]用有限条分法分析了运动荷载下矩形板的动力学问题。研究表明,路面结构可以用无限长板来模拟。Kim 等^[32]、Rystwej 等^[33]和颜可珍等^[34]也将路面看成沿行车方向的无限长薄板,分析了荷载参数、板参数和地基参数对路面动力响应的影响。薄板理论假设横向剪切应变为零,而由平衡方程可知,非均布弯矩和扭矩必将产生横向剪切应力和相应的剪切应变。有剪切应力而没有剪切变形不符合固体力学基本方程,这是经典理论的矛盾之一。此外,板边的三个物理边界条件仅满足两个。对于比较厚的板,在集中力作用点附近及薄板边界周围,对于断裂板壳裂纹尖端处应力的奇异性 and 幅角分布规律,经典理论不仅不能取得满意的结果,甚至会导致错误的结论^[35]。为了解决经典理论的这些缺陷,研究者提出了一些新的假定,建立了更符合实际的中厚板力学模型,比较著名的有 Reissner^[36]、

Green^[37]和 Mindlin^[38]等提出的厚板理论。他们考虑了横向剪应力对板变形的影响,同时计及法向应力和应变的影响,采用拉格朗日乘子变分法导出基本方程,最终得到一个关于厚板横向挠度的六阶偏微分方程式。厚板理论既能避免数学方面的困难,又能克服采用 Kirchhoff 假定忽略横向剪切变形所带来的误差。此后,许多学者开始将厚板理论应用到弹性地基板的研究中去^[39]。但是关于运动荷载作用下弹性地基或连续介质地基上中厚板的动力响应问题的研究并不多见。这是由于中厚板振动问题的控制方程和边界条件较薄板理论复杂,其力学和数学处理上均存在较大困难。为了解决此问题,有学者根据板的尺寸和所受荷载状况,将厚板看成是多层薄板的叠加,各层薄板之间紧密相连,这样既能采用薄板理论简化计算,又可满足工程精度。例如,我国的王虎等^[40]将 CRCP 视作弹性地基上对边自由的无限长复合层合板结构,获得了横向局部荷载作用下路面挠度和应力的精确解析解。借助此思路便可将路面假设为复合层合板,进一步研究弹性或连续介质地基上路面板的振动特性。

柔性路面主要是指一般的粒料路面或以粒料基层为主的沥青路面。相对于刚性路面而言,柔性路面结构层材料的弹性模量和强度较低,外荷载作用下的变形较大。柔性路面的力学模型一般采用层状体系(黏)弹性介质理论,对路面结构有四点假设^[41]:①各层都由均质、(黏)弹性、各向同性的材料组成;②假定土基在水平方向和竖直方向均为无限,土基之上各层结构的厚度均为有限,但水平方向为无限;③假定路面上层表面作用有垂直均布荷载和水平均布荷载,在无限远及无限深处,应力及位移均为零;④各层之间接触界面根据不同的接触情况可以采用两种不同的假设,一是层间接触完全连续,其上位移完全连续,二是层间接触完全滑动,其上剪应力为零。层状体系理论最早由均质弹性体假设即 Boussinesq 理论开始,逐渐发展到双层和三层弹性层状理论体系,而后经过许多研究者的努力发展到多层体系,并广泛应用于柔性路面的分析与设计。这些理论都基于静力荷载下的轴对称理论模型,如已开发出来的计算机程序有 California 研究院的 ELSYM 程序、Chevron 研究公司的 CHEV-5L 程序、荷兰 Shell 研究工作组的 BISAR 程序和澳大利亚联邦科学与工业研究院的 GCP-1 程序等。

考虑运动荷载和动力荷载(大小变化、位置不变)作用下的层状体系理论近年来也有了很大的发展。Eason^[42]研究了多层弹性体系和黏弹性体系在移动荷载作用下的动态反应,结果认为,在移动荷载作用下,表面位移要大于相应的静力位移。Picoux 等^[43]以层状弹性半空间为分析模型,把列车轮载当作移动集中荷载,获得了分层地基表面振动响应解。Yang 等^[44]和 Galvin 等^[45]分别运用有限元方法和边界元方法对层状弹性地基的动力响应问题进行了分析。孟凡顺等^[46-47]利用传递矩阵法求解了多层半无限弹性体在任意荷载作用下的解析解,并对轴对称动力问题的奇异解进行了分析。郑国芳等^[48]则利用傅里叶变换,求出了平面多层地基动力问题的初参数解。钟阳等^[49]利用刚度矩阵法推导了多层黏弹性半空间轴对称问题在位置固定的简谐荷载作用下,层间完全接触情况的解析解,并通过 Durbin 数值逆变换给出了数值结果。姬亦工等提出应用样条半解析法求解层状黏弹性地基的动力响应^[50-51]。王暄^[52]根据柔性路基路面多层黏弹性体系假设,采用 ANSYS 建立了柔性路面路基结构的三维有限元模型,分析

了路基路面结构在车辆荷载作用下的动态响应。李志毅^[53]通过二次形函数薄层单元法得到了柱坐标系下分层半空间土体的稳态响应解。边学成等^[54]发展了分析移动荷载作用下层状地基动力响应的 2.5 维有限元方法,通过对沿荷载移动方向坐标变量的傅里叶变换将三维问题降为二维平面应变问题,进而在垂直荷载运动方向的平面内进行有限单元的离散和求解。

利用多层体系上的板理论和多层地基理论来建立刚性路面和柔性路面在运动荷载作用下的力学响应模型是切实可行的。尽管许多研究者在这方面做了大量的工作,但大都集中于柱坐标系下的轴对称问题或二维平面问题,关于交通荷载下分层地基的三维振动问题还有待更深入地研究。

1.4 路基模型及动力响应研究现状

1.4.1 基于 Winkler 理论的地基模型及动力响应研究现状

Winkler 地基模型是一种最简单的线弹性地基模型,它假设土介质表面任意一点处的位移与作用在该点处的反力成正比,而与作用在其他点处的反力无关。Winkler 地基实际上是由一系列相互独立的弹簧单元组成的,其主要特点是在荷载作用的区域内立刻产生位移而在荷载作用区域外位移为零。事实上,对于一般土介质而言,在外力作用下土颗粒之间存在摩擦阻尼,土体中绝大部分能量的耗散都是由这种摩擦造成的。反映到地基模型中,即在模型中加上阻尼器,这时的地基模型便称为黏弹性 Winkler 地基或 Kelvin 地基。因为此种地基模型形式简单、计算方便,所以被广泛地用于工程结构静力和动力分析中。例如,公路和机场跑道中的刚性路面,常用黏弹性 Winkler 地基上的薄板理论来计算;铁路工程中的轨道,常用黏弹性 Winkler 地基上的无限长梁来模拟。

Kenny^[55]通过坐标变换得到了黏弹性 Winkler 地基上无限长梁在移动集中荷载作用下的稳态响应解答,并分析了阻尼对响应结果的影响。Fryba^[56]采用本征函数叠加法对此问题进行了更为系统的研究。Taheri 等^[57-58]分别运用结构阻尼法和有限元方法研究了 Winkler 地基上的刚性路面在移动荷载作用下的瞬态响应。Kim 等^[59]利用 Winkler 地基模型研究了移动恒载和移动简谐荷载作用下无限大薄板的动力响应,得到了板的临界速度和共振频率的近似表达式,同时分析了荷载速度、频率及地基阻尼对板的挠度分布的影响。Kim 等^[60]进一步考虑了前后双轮荷载的情况,主要分析了双轮荷载间的相位差对无限大板的动力响应的影响。Huang 等^[61]利用有限条分法研究了运动荷载下 Winkler 地基的动力响应,并对移动点源简谐荷载作用下的 Winkler 地基矩形薄板的动力响应问题进行了分析。结果发现,地基刚度、荷载频率和速度对板的动力响应有一定影响,分析远离边界位置处的响应时,可以将板用无限长板来代替。Kim^[62-63]考虑了路面和列车轨道可能由于预应力、温度等的影响受到面内压力的情况,分别研究了 Kelvin 地基上无限大薄板和无限长梁在移动荷载和面内压力共同作用下的动力响应,详细讨论了面

内压力对板和梁的动力响应结果的影响。在国内,成祥生^[64]利用振型叠加法分别求得了 Winkler 弹性地基上四边简支矩形板的级数解。郑小平等^[65]对弹性地基采用 Winkler 假设,建立了 Euler-Bernoulli 梁的动力方程,并采用傅里叶变换技术得到了弹性地基无限长梁的一般动力解析解,并对自由振动、脉冲激振和运动荷载情况进行了讨论。黄晓明等^[66]利用积分变换法得到了 Kelvin 地基上无限大板的稳态挠度的积分形式解。孙璐等^[67]利用拉普拉斯变换和傅里叶变换求解弹性 Winkler 地基上无限长梁的动力方程,获得了线源脉冲响应函数,并得到了运动线源荷载下梁的动力解答。谢伟平等^[7]运用傅里叶变换和留数理论得到了变速移动荷载作用下无限长 Winkler 梁的稳态响应解,进一步探讨了阻尼在求解过程中的作用,并指出了经典解在处理阻尼时存在的问题。侯芸等^[68]应用有限元方法研究了移动匀速荷载下 Winkler 地基板的动力反应,并进行了全面的参数敏感性分析。颜可真^[69]结合黏弹性 Winkler 地基模型和 Kirchhoff 薄板理论对板的动力响应进行了详细的研究。蒋建群等^[70]和周华飞等^[71]也以 Kelvin 地基为基本地基模型,用解析的方法推导得到了无限大板和无限长梁的动力响应解,并给出了数值结果。

如果考虑地基的非线性性质,则可对 Winkler 理论进行修正,加上地基刚度的非线性项。Dahlberg^[72]和 Wu 等^[73]提出了一种非线性黏弹性 Winkler 地基的数学模型,地基反力表达式为

$$q(x, y, t) = k_L w(x, y, t) + k_{NL} w^3(x, y, t) + \eta \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} \quad (1.12)$$

式中: k_L 和 k_{NL} 分别是地基刚度的线性项和非线性项; $w(x, y, t)$ 是板的竖向位移; η 是黏弹性地基的阻尼系数。

Kargarnovin 等^[74]研究了简谐荷载作用时此非线性地基上梁的动力响应,并和线性情况进行了比较。由于该地基模型的响应解在推导和计算时较为复杂,因此难以在工程中推广。

黏弹性 Winkler 地基和非线性 Winkler 地基均不能考虑板或梁与地基间的剪切作用。鉴于此, Filolenko-Borodich 发展了一种包括地基压缩系数和水平剪切系数的双参数地基模型,地基反力的表达式为

$$q(x, y) = k_v w(x, y, t) - T_h \cdot \nabla^2 w(x, y) \quad (1.13)$$

式中: k_v 是地基的压缩系数; $T_h = f(k_h)$, 是关于地基水平剪切系数 k_h 的函数; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。

显然,这种模型较经典 Winkler 模型更能反映地基的实际工作状况。Kim^[75]和颜可珍等^[34]利用积分变换方法获得了双参数地基上板的稳态和瞬态动力响应解答,并讨论了荷载参数及地基参数对板的挠度的影响,结果发现,地基水平剪切系数对动力响应结果的影响较为明显。

现有的研究资料表明,基于 Winkler 理论的地基模型在理论上发展已较为完善,然而如何准确获得地基的弹性参数和阻尼参数,有待更深入地研究。

1.4.2 单相弹性地基模型及动力响应研究现状

基于 Winkler 理论的地基模型在求解和计算时比较简便,但它没有考虑土介质的连续性,因而与实际地基特性有一定的距离。为克服这一缺点,提出了能表征土体连续性态的单相弹性地基模型,如弹性半空间模型和弹性分层地基模型。Boussinesq、Cerruti 等著名课题都给出了均质各向同性弹性半空间的精确解。Burmister^[77] 最早推导获得了双层弹性地基在静荷载作用下的解答,自此以后,分层地基模型日益受到重视。这是由于分层地基模型符合地基土成层沉积,且各层内土性质均匀,各层之间差别很大这一物理特点,可以代表范围广泛的地基^[78]。为了方便工程设计,Odemark^[79] 提出了一种折算多层地基等效厚度的经验公式。近年来,由于快速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,采用积分变换方法,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力和位移值。目前,采用积分变换法求解多层弹性体系应力和变形的计算机程序,在美国有 California 研究院的 ELSYM 程序, Chevron 研究公司的 CHEV-5L 程序,在荷兰 Amsterdam 有 Shell 研究工作组的 BISAR 程序,在澳大利亚有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。

在国内,王凯^[80] 应用应力函数回代递推法研究了多层弹性半空间地基的轴对称问题。王林生^[81] 利用传递矩阵法求解了成层地基空间轴对称问题。钟阳等^[82] 通过精确刚度矩阵法推导获得了任意坐标系下多层弹性半空间问题的精确解,并编制了相关程序。上述这些方法和程序都是基于静荷载假设的,地基的应力和位移只取决于荷载大小,而与加载经历和作用时间长短无关。然而实际道路和机场工程中的交通荷载是一种移动荷载,由此产生的地基土的力学特性会发生根本变化。Cole 等^[83] 最早将地基看成是弹性半空间体,利用 Helmholtz 分解原理,推导了地基表面在移动荷载作用下的应力分布公式,并给出了低音速、亚音速和超音速时的解。Eason^[84]、Kennedy 等^[85-86] 也以三维弹性半空间地基为研究对象,得到了移动荷载作用下半空间的应力和位移解析解。Gakenheimer 等^[87] 得到了弹性半空间在突然施加的竖向移动点荷载作用下内部的瞬态位移,并求解了不同移动速度所对应的解。

随后,很多学者用无限长梁和半无限地基耦合的模型来模拟由列车产生的地基振动。Filippov^[88] 采用移动荷载作用下的弹性半空间梁模型来模拟列车-地基的相互作用,通过计算,认为列车的临界速度约为 Rayleigh 波波速,小于 Winkler 地基模型的荷载临界速度。Kenny^[55] 对匀速移动荷载作用下黏弹性地基梁的稳态响应问题进行了研究,并给出了地基和梁的共振曲线。Suiker 等^[89] 研究了弹性半空间上 Timoshenko 梁在加速移动荷载作用下的动力性状,发现当梁的刚度比弹性半空间体的刚度大时,存在两种临界速度,一个是地基表面的瑞利波波速,而另一个波速要相对前一个波速小。Sheng 等^[90] 研究了集中简谐荷载作用下土的动力响应,主要分析了由动荷载引起的钢轨和弹性地基的振动。Huang 等^[91] 考虑了移动集中荷载、移动线均布荷载和移动线非均布荷载的作用,研究了