

城市轨道交通

引起的地面振动

王福彤◎著

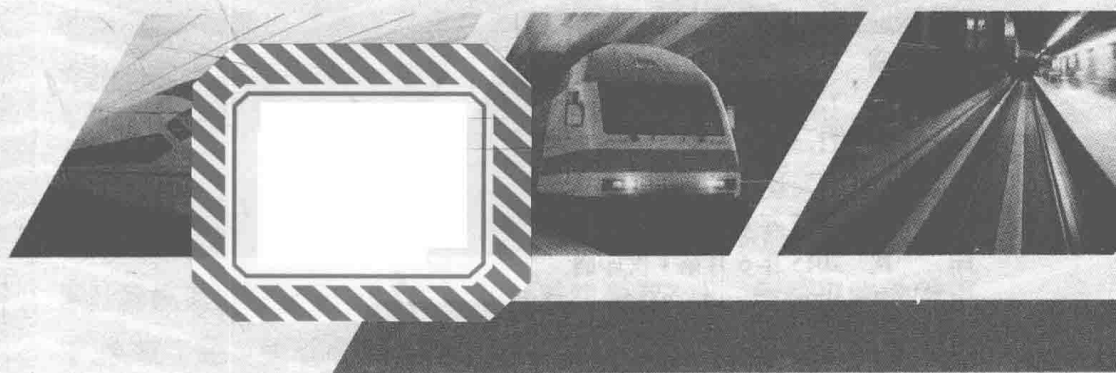


黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

城市轨道交通

引起的地面振动

王福彤◎著



图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通引起的地面振动 / 王福彤著. -- 哈尔滨 : 黑龙江大学出版社, 2015.6

ISBN 978 - 7 - 81129 - 907 - 6

I. ①城… II. ①王… III. ①城市铁路 - 轨道交通 - 地面 - 振动 - 研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 101244 号

城市轨道交通引起的地面振动

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG YINQI DE DIMIAN ZHENDONG

王福彤 著

责任编辑 于 丹 王选宇
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 720 × 1000 1/16
印 张 11.5
字 数 155 千
版 次 2015 年 6 月第 1 版
印 次 2015 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 907 - 6
定 价 35.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

城市轨道交通是解决大城市交通拥堵的有效途径之一,近年来在我国各大城市迅速发展。列车穿越人口密集的市区,给人们带来了便捷,其运行中引发的振动通过土层向周边传播,却形成了干扰沿线人们正常生产生活的特殊环境问题。

关于轨道交通周边场地振动的激励源和振动传播的研究,已成为国内外岩土地震工程领域的研究热点。最近十几年,数学物理模型研究的重点集中于发展列车-轨道-场地大系统的三维计算。一个难以逾越的困难是计算模型庞大,受计算机资源限制,网格尺寸不得不取几米至几十米,使得时域解的最高频率只能达到十几赫兹,与城市轨道交通环境振动的主要频段相差较大。从三维的观点分析,靠近轨道的任何地点观测到的振动都不仅仅包括距离这一点最近的轨道段的振动,还包括以前和以后许许多多轨道段振动的影响,使振源的研究相当困难。

从2006年起,在哈尔滨工业大学陶夏新教授指导下,笔者参与了国家自然科学基金重点项目“城市轨道交通引起的环境振动及传播规律”(项目编号:50538030)的研究,建立了城轨交通场地振动的三维频域计算模型,在“基于场地振动数据反演振源”这一创新思路的指引下,实现了轮-轨不平顺谱密度函数的成功反演。本书是这段研究工作的阶段性总结,概括来说,包括以下几部分内容:

首先,从构建合理的列车、轨道、场地动力分析模型入手,从几何上强调轨道一维无限性和分层场地的半空间无限性,物理上强调波动的三维传播,突出运行中的列车与静止中的轨道、场地三者的动力相

互作用。将场地简化为层状的阻尼弹性半空间,在三维直角坐标系下详细推导了频率-波数域格林函数,获得了无限长谐波线荷载激励下轨道-场地系统的解答,通过对谐波线荷载在频域的积分得到移动坐标系下钢轨顶面的传递函数矩阵,求解了谐波不平顺条件下列车-轨道-场地体系的动力相互作用问题,进而获得轮-轨随机不平顺激励的场地振动响应。数值计算了谐波不平顺激励下的地表振动,空间波形显示:移动轴重随列车移动的地表下沉变形迅速单调衰减,表现了准静态变形特征;取不平顺波数不为零,前后车轮激发的波动相互干涉,表达出了列车移动的 Doppler 效应。地表振动频谱显示:单一频率不平顺激励产生的地表振动频率成分并非单一,反映了移动荷载激励的特征;不平顺激励频率越高,地表振动频率越高且带宽越大;计算的轮-轨随机不平顺激励产生的地表振动频率范围为 5~85 Hz,主要成分集中于 40~60 Hz 之间,与已有的城轨交通环境振动观测数据的频率范围基本符合。

将上述地表振动的列车-轨道-三维场地耦合动力分析与遗传算法结合,设计了轮-轨不平顺振源函数和道砟路基刚度等轨道结构参数的联合反演方案。采用虚拟反演方法检验了反演算法在解空间的稳定性。依据北京城轨 13 号线的实际观测数据反演了振动源函数,据其计算的地表振动级与实测值很接近。反演得到的激励功率谱,在 1.2 m 以上的波长范围低于美国 FRA 的 6 级轨道谱,表明北京城轨的平顺程度好于美国最好的干线轨道的平顺程度;在 1.2 m 以下的波长范围高于 FRA 的 6 级轨道谱,这并不是轨道不平顺引起的,应该是车轮的不圆顺产生的,包括车轮扁疤、轮轴偏心、踏面几何不圆等车轮几何与弹性不圆顺。城轨车速较低,这个短波长段恰恰对应城轨交通环境振动的主要频带。国内外以轨道谱表达轨道交通环境振动源,1.2 m 以下短波长的激励被低估,会严重影响环境振动主要频段的地表振动的估计。以轮-轨不平顺功率谱密度函数(简称轮-轨谱)表达轨道交通环境振动源就会大有改善。相对轨道谱只反映轨道的平顺状况,轮-轨谱表达的是轮轨不平顺接触,既反映轨道不平顺因

素,又包含车轮不圆顺状况。用地表振动实测数据反演轮-轨不平顺状态,是综合获取两类激励因素的一个有效途径,已有的其他方法是难以实现的。

为了适应沿海、沿江地区地下水埋藏较浅场地的复杂工况,利用积分变换的手段求解三维直角坐标系下的 Biot 方程,采用 Haskell'-Thomson 传递矩阵方法获得了饱和层状半空间频率-波数域的竖向位移格林函数,据此计算了单位简谐点源激励产生的地表位移。结果显示随着孔隙率的增加,计算的地表竖向位移幅值减小、衰减速率增加;频率越高,孔隙率的影响越明显。场地渗透系数越低,计算的地表位移幅值越小,衰减越快;频率越高,影响越明显。计算结果反映了流固两相黏滞耦合效应。通过与单相介质模型计算的结果相比较,说明了采用单相介质模型计算饱和场地上城市轨道交通环境振动有可能导致高估,激励频率越高,高估越严重。

将饱和层状场地格林函数应用于列车-轨道-三维场地耦合动力分析,模拟了饱和场地轨道交通环境振动。结果显示,相对于饱和软土,剪切模量高的饱和密砂场地振动强度低、频带窄;地表振动能量主要分布在 20~80 Hz 频段,高频振动的衰减明显比低频快;Biot 黏性耦合参数值越大,振动水平就越低;值的影响在一定程度上类似于频率相关的黏滞阻尼效应,对高频、远场的影响明显大于对低频、近场的影响。

总之,本书的研究工作实现了列车-轨道-场地大系统的三维动力相互作用的频域计算,克服了三维大系统时域数值计算频率分辨率低的困难。借助遗传算法实现了轮-轨不平顺谱密度函数的成功反演,表明这是定量揭示轨道不平顺和车轮不圆顺同时作用的有效方法。

本书的研究工作先后得到国家自然科学基金(50538030)、黑龙江省自然科学基金(E201221, E201330)、中国博士后科学基金(2013M531084)和国家留学基金委的资助。本书的出版得到了黑龙江大学学科建设基金的资助。

在近十年的研究过程中,笔者始终受到哈尔滨工业大学陶夏新教授的悉心指导。本书的部分编写工作是与东北林业大学崔高航副教授、黑龙江八一农垦大学郑鑫副教授和中南大学陈宪麦副教授共同完成的。西南交通大学牵引动力国家重点实验室的圣小珍教授曾给笔者帮助和指导,本书的部分研究成果就是基于他在南安普顿大学期间的杰出工作。内华达大学里诺分校的 Raj Siddharthan 教授热情提供了为期一年的赴美研习机会,他们的路基场地耦合动力分析软件 3D - Move 和大尺寸层状土体动力试验对本书的编写富有启发和参考价值。笔者在此一并表示诚挚的感谢。

轨道交通引发的场地环境振动体系极其庞大复杂,研究工作仍处于探索阶段。作者水平有限,书中难免存在诸多不足与错误之处,恳请读者批评指正。

王福彤

2015 年 4 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 城轨交通引起的环境振动问题	1
1.2 轨道交通地面环境振动的研究进展	2
1.3 需要进一步研究的问题	14
第 2 章 轨道交通引起的环境振动现场实测	28
2.1 引言	28
2.2 测试概况	29
2.3 观测数据中本底成分的处理方法	31
2.4 地表振动现场观测结果与讨论	46
2.5 本章小结	54
第 3 章 列车 - 轨道 - 层状场地三维耦合动力分析	57
3.1 引言	57
3.2 列车 - 轨道 - 三维场地耦合动力模型	58
3.3 城市轨道交通引起地表振动的算例分析	96
3.4 本章小结	113
第 4 章 列车 - 轨道 - 场地系统的振动源反演	117
4.1 引言	117
4.2 地表振动的计算与实测结果的对比	117

4.3	轨道结构参数和振源函数的联合反演	119
4.4	本章小结	135
第5章	列车引起饱和层状场地振动的模拟研究	138
5.1	引言	138
5.2	Biot 饱和多孔介质动力学	139
5.3	饱和层状半空间的动力柔度矩阵	142
5.4	饱和层状半空间格林函数的退化验证	154
5.5	饱和层状场地格林函数算例分析	155
5.6	列车 - 轨道 - 饱和层状场地耦合振动模拟分析	161
5.7	本章小结	174

第1章 绪 论

1.1 城轨交通引起的环境振动问题

城市轨道交通运能大、速度快、安全准时、成本低、节约能源、乘坐舒适方便、不会被拥堵,是城市交通问题很有效的解决方案之一。随着我国大城市的交通拥堵问题日益严重,城市轨道交通日益受到各方面的重视。

轨道列车运行对附近区域产生振动,一定条件下会形成环境问题。一方面,轨道交通线路日益扩张,另一方面,人们对生活质量要求不断提高。过去人们能够容忍的环境振动,现在成为公众敏感问题。关于环境振动的投诉逐年增加,已经成为影响城市轨道交通发展的瓶颈。

城轨环境振动不仅会干扰人们的日常生产生活,还可能会影响精密仪器的使用,甚至导致古旧建筑受损,这已经成为国际上公认的七大环境公害之一。以哈尔滨城轨1号线为例,其线路穿越南岗区的密集办公、商务和住宅区域,沿线毗邻哈尔滨工业大学航天学院、中国地震局工程力学研究所、哈尔滨医科大学、哈尔滨工程大学等多所科研教育机构。这些机构研制、使用大量的精密仪器设备,承担重要的民用和军工科研任务,环境振动严重影响了其工作。

为了减少投入,根据城市的具体条件,城轨线路往往部分铺设在地表。例如,北京城轨13号线穿越东城、海淀和西城等密集商务和住

宅区域,90%以上为地面或高架区段。从全世界范围看,轨道交通埋设在地下的约占70%,地面和高架的约占30%,只有部分城市的轨道交通系统完全埋设在地下。相对于埋在地下的城轨交通,地面轨道交通列车运行产生的环境振动强度更高,环境影响问题更为突出。

为了避免受到环境振动的影响,线路两侧一定距离内不宜建设建筑物和生产、生活设施,例如上海市规定城轨20 m之内如果有建筑物就需要采用减振降噪措施。显然,这个距离过小就会影响生产生活,过大则过分占用城市建设用地,还会削弱城轨交通的便利优势。科学、合理地确定这个范围,需要观测振动的强烈程度,研究城市轨道交通环境振动的产生原因、振动传播规律以及减振降噪措施的效果。减振降噪措施的研究,亦有赖于对产生振动根源的特点和振动在地表传播规律的认识和把握。

地面环境振动涉及列车、轨道、场地土层甚至周边建筑物的动力相互作用,体系十分复杂而庞大。对这样一个系统进行建模分析,无论采用解析方法还是数值方法,都必须深入研究运动中的列车与静止中的轨道的动力耦合、振动源的激发、土与结构的动力相互作用、无限长轨道结构和半无限岩土介质中波动的传播等问题。换言之,难度很大的轨道交通环境振动研究与若干个相关领域、研究和技术发展有相互推进和带动的关系。

因此,城市轨道交通引起的环境振动及其传播规律已成为科学界的一个研究热点,受到各国研究者的关注。

1.2 轨道交通地面环境振动的研究进展

1.2.1 试验研究

列车、轨道、场地系统由多种物理力学属性相差极大的材料构成,物理力学属性的复杂性和作用域的几何无限性,使得室内模型试验不

仅成本高昂,而且几乎不能保证模型与实际的相似。轨道交通环境振动研究的基础是观测,亦可称为现场试验,即在轨道沿线布设观测设备,对真实现场进行原位观测。尽管不如室内试验方便灵活、各种条件可控,但获取的数据源于实地,能够综合、客观地反映环境振动的实际状况与传播规律,因此成为环境振动评价的最直接依据。而且,观测数据能够为理论分析和数值模拟提供可靠的验证依据,具有不可替代的重要作用。

目前,关于城市轨道交通环境振动的实测研究以城轨和高架轨道交通为多。对地面轨道交通的测试多集中于速度快、轴重大的干线铁路。

为了对环境振动问题建立恰当的理论分析模型,确定更接近实际的模型参数取值区间,先要对以下几个问题有总体上的把握:

① 轨道交通影响范围,即对人们生产生活造成影响的空间尺度大体有多大;

② 在影响范围内,环境振动的强度随着与轨道距离的增加是如何衰减的;

③ 在不同的空间位置,振动分别集中于哪一段频率范围;

④ 地面振动的三个方向分量中,哪一个分量最为显著。

通过对现有的城轨周边地表和建筑物进行观测,可知地表振动主要集中在与轨道距离 50 m 以内的区域中,竖向振动分量显著高于两个水平分量;振动频率范围在 80 Hz 以内,卓越频率为 60 ~ 80 Hz;高频振动衰减快,低频振动衰减慢,传到建筑物中的振动以 20 Hz 以内的低频振动为主。

蒋通和张昕观测了上海明珠线高架轨道交通引起的地表竖向振动,给出了距轨道中心线 20 m 以内 6 个测点的实测数据,并拟合了振动级衰减公式。结果显示地表振动频率在 100 Hz 以内,范围在 30 m 以内的振级统计值可超过 63 dB。魏鹏勃等在北京城轨 5 号线天通苑附近高架路段 30 m 内的地面布设了 5 个测点,数据表明 30 m 以内竖向峰值加速度振级超过了 95 dB。

相对于城市轨道交通,干线铁路的振动强度更高,影响区域更大。在某些软土地带,高速列车的速度可能接近甚至超过土层的剪切波速,形成强烈的马赫效应。例如,1997年比利时铁路公司在巴黎至布鲁塞尔高速铁路线上组织的联合测试,以及1997至1998年瑞典铁路局在X2000高速列车西部海岸线Ledsgard组织的大规模联合测试,都表明地表竖向振动的剧烈程度已经危及行车安全。即使在普通干线铁路沿线,其振动强度和范围也均超过城市轨道。据陈建国等报道,在京广线80 m范围内,地表振动加速度级可超过80 dB,线路120 m内的竖向振动可超过60 dB,与高架和地下城轨相似,只在紧邻轨道区域存在频率较高振动,周边场地振动的频率成分基本都在100 Hz以内,并且随着与轨道距离的增加,振动衰减并非单调,在某些距离上可出现不衰减或略有放大(亦可称为衰减反弹或局部放大)的情况,不同频率的振动对应的距离有所不同。

地面城市轨道交通与干线铁路类似,都在地表运行。相对于干线铁路而言,城轨速度慢、运量低、轴重小、与生产生活区距离更近。目前,对地面城轨交通引发的地表振动测试不多。笔者所属的研究团队于2007年在北京对城轨13号线进行了两次现场观测,分析结果显示:城轨振动水平比干线铁路低,距轨道50 m内的地面振动可超过60 dB;地面振动竖向分量显著高于水平分量;地面振动频率范围为80 Hz以内,卓越频率在20~60 Hz之间;载客量的大小对地表Z振级的影响不超过2 dB;不同频率成分衰减反弹距离不同。可见,环境影响评价以及工程防治中应以竖向振动为主;在建模分析中,计算区域至少应包括轨道两侧50 m远处。

现场观测获得的数据不可避免地含有本底振动。文献认为,只有在距离交通线路非常近的区域,本底振动的影响才可以忽略,在距离较远区域只有有效地清除这些干扰,对实测数据进行修正,才能对轨道交通诱发的环境振动问题做出准确和客观的分析。张昕、邱俊杰、崔高航、常乐等采用振动级修正法去除了本底振动。他们假设所有本底振动由一个振源引起,推导观测振动加速度级、真实振动加速度级

和本底振动加速度级的关系,利用观测的总加速度数据和本底加速度数据计算真实振动加速度级。该方法可以快捷有效地计算真实振动的加速度级,但不能获得真实振动的时程和功率谱密度。张向东等用观测振动 Fourier 谱幅值减去本底振动 Fourier 谱幅值,得到不含本底振动的幅值,再经过逆 Fourier 变换,得到真实振动的时程。笔者曾假设轨道交通环境振动与其他因素引起的本底振动为互不相关的随机过程,通过对观测功率谱密度的修正达到了去除本底振动的目的,克服了振级修正法不能计算时程和功率谱密度的不足,数值结果优于谱幅值修正法。

利用现场观测结果研究轨道交通引起的环境振动,要考虑样本的代表性和样本数量的问题。为了获取一般性的规律,必须有足够多的观测,要花费大量的时间和经费。因此,试验研究多与理论研究结合,利用有限的观测数据验证理论模型,确定理论模型的设定参数,充分发挥理论方法的分析优势,深入探寻和揭示环境振动的一般规律,为解决工程实际问题提供理论基础。

1.2.2 地面振动的数学物理建模及数值模拟

1.2.2.1 振动体系的激励源表达

列车运行过程中,轮轨接触相互挤压形成激励源。振动通过轨道、路基以波的形式向周围传播,引起线路周边区域地表及建筑物的环境振动。目前的共识是激励轨道振动的源来自三个方面:①轴重荷载的移动(称为准静态激励);②车轮经过钢轨接头、焊缝和以轨枕离散支承的轨道;③车轮经过表面不平顺的轨道。后两者加载到轨道结构上的轮轨力均与车辆-轨道动力相互作用密切相关。

由于体系的复杂性和计算设备的限制,初期的理论研究大多不考虑列车与下部轨道场地的动力相互作用,采用轨道上的荷载代替列车的作用。这些预先设定的荷载是振动体系的激励源,荷载的表达式是

模型的振动源函数。随着研究的深入和计算设备的提升,列车、轨道和场地三者相互影响的耦合振动研究成为近期模型研究的发展趋势。轮-轨动荷载可以通过分析轮-轨不平顺接触对体系的激励得出,成为体系的一个动力响应。表达不平顺接触的函数描述了体系的振动源,是模型的输入,成为体系的振源函数。

1.2.2.2 二维轨道-场地模型的局限性

在相当多的列车运行引起的地表振动模拟分析中,轨道结构和场地被简化为垂直于列车行进方向的二维模型,如图 1-1a 所示。众所周知,二维平面上的点荷载 $P(t)$ 是沿轨道方向均布的无限长线荷载,如图 1-1b 所示。实际上,轮轨相互作用力是图 1-1c 所示的随列车移动的有限长移动荷载。以无限长线荷载代替有限长移动荷载,有可能过高估计荷载引起的振动响应。另外,二维模型不能考虑振动沿轨道方向的传播,低估了出平面方向的辐射阻尼,与实际中列车的行进效应相去甚远。过高估计轨道交通的不利影响可能会使原本可以建设的项目受到不应有的制约,从而影响城市轨道交通的发展。

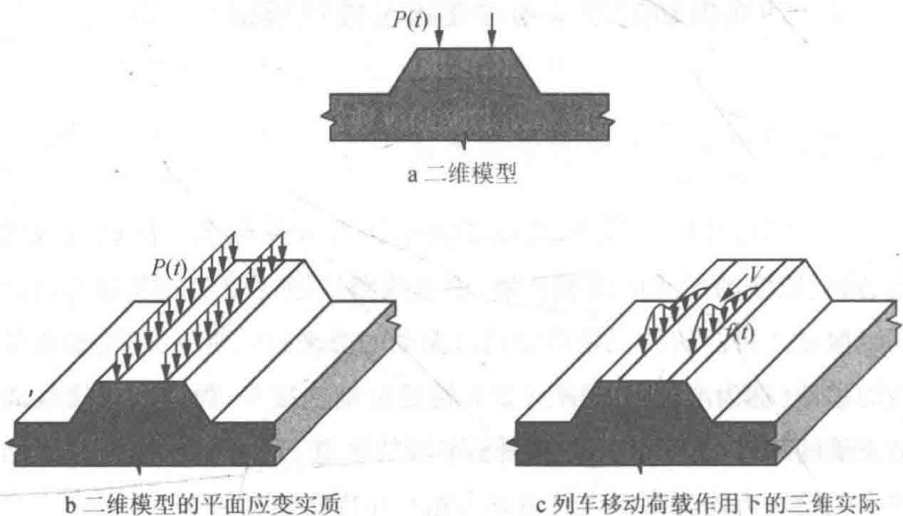


图 1-1 轨道-场地二维模型及其与真实情况的比较

1.2.2.3 三维时域模型及其困境

作为一种天然形成的介质,土层的几何形态和物理力学属性可能具有不规则的空间分布;轮轨接触关系和紧邻轨道区域土介质的应力、应变也可能呈现一定程度的非线性。有限元方法对于几何形状不规则和力学属性不均匀的体系具有良好的适应性。对于非线性问题,时域分析是首选的研究手段。要解决轨道交通引起的环境振动问题,三维有限元方法的时域分析应该是最为理想的计算方案。然而,国内外研究中进行时域分析的文献较为少见。主要原因在于,用三维有限元模型处理很宽频带的问题需要采用足够小的单元尺寸,导致单元数量巨大,受计算资源的限制无法接受。如前所述,轨道交通场地振动的高频成分达到甚至超过 80 Hz;地面振动影响区域宽度达到轨道两侧 50 m。按 80 Hz 考虑,对于一般剪切波速在 140 ~ 500 m/s 的场地土层,剪切波长在 1.75 ~ 6.25 m。依据下式估计有限元离散网格的尺寸:

$$\Delta x \leq \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{8} \right) \lambda_{\min} \quad (1-1)$$

其中 $\lambda_{\min}$ 为最小波长。可知,单元尺寸 Δx 应在 0.2 ~ 1.0 m 之间。为了考察整列车的行进效应,计算区域沿轨道方向的尺度不能小于三个列车的长度。考虑一列 4 节编组的 DKZ5 列车,整列车长度近 80 m,考虑 30 m 深范围内的土层,则整个计算区域至少应该达到 240 m × 100 m × 30 m,单元数量会达到 720 000 ~ 90 000 000 个。为了保证数值积分的精度,按下式采用动力计算的时间步长:

$$\Delta t \leq \Delta x / c_{\max} \quad (1-2)$$

其中的 $c_{\max}$ 为最大波速值。可知,时间步长应该在 0.002 s 以下。对如此规模的单元数量进行 10 s 左右的时域分析,在现有的计算设备上运行,困难几乎不可逾越。

为了实现数值计算,为数不多的在时域进行的分析研究均采取了简化的方案,或限于低频波动研究,或退化为二维有限元计算。

1.2.2.4 三维波动的频域分析模型

(1) 频域方法的优势

鉴于时域分析存在数值计算量的障碍,近年来国际上轨道交通引起地面振动的研究更偏重于采用频域方法。频域方法的基本数学工具是积分变换,首先将时间、空间上的力和位移函数变换成频率-波数域中的力和位移函数,使得时间-空间域中复杂的偏微分方程变成频率-波数域的常微分方程或代数方程,时间-空间域中的卷积关系成为频率-波数域中简单的相乘关系。在频率-波数域对系统求解后,经过逆变换获得时间-空间域解答。

利用积分变换手段求解系统响应,可以看作是应用了极限形式的叠加原理。叠加原理的适用对象是线性系统,所以频域分析仅限于线性范围内,是一个固有的局限。在实际工程中,为了保证长期的反复荷载作用下的行车安全,设计上要使场地土体应变水平一般保持在 10^{-5} 量级或以下。可以推测,仅在紧邻轨道下方的局部路基很小的区域内才有一定程度的非线性影响。否则,长期往复的非线性土体变形不断累积将会使轨道变形逐渐增大,致使列车无法正常运行。另外,轮轨接触点上的相互作用力与相对位移呈非线性弹性关系,列车各个组成单元间也可能存在非线性接触,这在频率域都是难以表达的。场地环境振动研究的重点不在车辆动力系统,对上述三个环节进行线性化导致的误差还是可以接受的。

相比于时域分析高频分辨率低的局限性,频域方法的优势很明显。第一,频域方法擅长于解决空间上的无穷远问题,避免了时域分析中复杂的计算域边界处理难题。第二,频域方法可很好地处理与频率或波数相关的计算问题,比较容易考察随机过程的功率谱密度等统计特征,适于随机振动分析。第三,借助格林函数等数学手段,能够完美地解决列车、轨道和场地动力相互作用问题。第四,相对于时域分析方法,频域分析的数值计算量可以小很多,在常用的个人计算机上很容易实现高达 100 Hz 的三维波动计算。