

箱梁振动和 噪声辐射研究

常亮 镇斌 ◇ 著

中国建筑工程工业出版社

箱梁振动和噪声辐射研究

常 亮 镇 斌 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

箱梁振动和噪声辐射研究 / 常亮, 镇斌著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-112-22933-8

I. ①箱… II. ①常… ②镇… III. ①城市铁路-轨道交通-交通噪声-研究 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第258318号

本书对桥梁结构中的箱梁结构振动和噪声辐射问题进行了系统地研究和总结, 有助于了解桥梁结构噪声的形成机理及制定合适的减振降噪措施。全书共分为7章, 分别为绪论、ANSYS基本原理及计算方法简介、列车荷载作用下高铁箱梁结构振动特性分析、箱梁结构设计措施对振动的影响分析、声级理论、列车荷载作用下箱梁结构的振动响应与噪声辐射的频谱特性、结论与展望。

本书适合从事结构振动的科研人员和技术人员参考使用。

责任编辑: 杨 允

责任校对: 王 瑞

箱梁振动和噪声辐射研究

常 亮 镇 斌 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京建筑工业印刷厂制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×960毫米 1/16 印张: 10¹/₂ 字数: 201千字

2019年3月第一版 2019年3月第一次印刷

定价: 40.00元

ISBN 978-7-112-22933-8

(33038)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

随着高速铁路的迅速发展,其带来的振动与噪声问题也日益突出。桥梁结构噪声作为铁路噪声的一种,是列车通过桥梁结构时引起的“二次辐射”噪声。从频率范围来讲,桥梁结构噪声属于低频辐射噪声(100Hz),和轮轨噪声等其他铁路噪声相比,其在整个铁路噪声中所占的比重不大。但是低频噪声对人体有较大的危害,且目前针对桥梁结构低频噪声的减噪措施不多,因此对桥梁结构噪声的形成机理及减振降噪措施进行研究就显得十分必要。

本书研究了箱形梁的振动和噪声辐射,共分7章。第1章绪论,分析了箱梁振动和噪声辐射的研究现状及存在的问题,提出了本书的研究内容和创新点;第2章介绍了有限元分析的基本原理及计算方法和本书研究过程中采用的有限元参数;第3章分析了列车荷载作用下箱梁结构振动特性;第4章分析了箱梁结构设计措施对振动的影响;第5章介绍了声级理论;第6章实测了列车荷载作用下箱梁结构的振动响应与噪声辐射的频谱特性;第7章结论与展望,指出了今后的研究方向和本书研究的不足之处。

本书是作者对箱梁结构振动和噪声辐射研究的成果总结,可作为理工科院校土木、交通等专业的本科生、研究生参考学习教材。第一完成单位南昌航空大学。武汉理工大学谢伟平教授在箱梁振动和噪声实测方案上提出了宝贵意见,上海理工大学镇斌副教授在结构振动理论方面也给予了指导,南昌航空大学硕士研究生康乐参与了有限元数值计算,南昌航空大学硕士研究生董芳明参与了书稿的整理工作。在此一并表示感谢!

本书的出版得到国家自然科学基金(11472160, 11672185),江西省自然科学基金(20161BAB216103),江西省教育厅科技项目(GJJ160708)的资助,在此一并感谢!

限于作者水平,本书一定存在不少缺点,恳请读者批评指正!

作者

2018年秋于南昌航空大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的主要研究内容	9
第 2 章 ANSYS 基本原理及计算方法简介	11
2.1 ANSYS 有限元软件介绍	11
2.2 ANSYS 计算分析基本方法	12
2.3 列车荷载动力方程的建立	14
2.4 ANSYS 积分时间步长的确定	19
2.5 ANSYS 阻尼特性的计算	20
第 3 章 列车荷载作用下高铁箱梁结构振动特性分析	22
3.1 概述	22
3.2 铁路箱梁设计参数	25
3.3 箱梁有限元模型的建立及相关参数选择	28
3.4 箱梁有限元模型模态分析结果	29
3.5 列车荷载模拟及加载方式	32
3.6 荷载作用下箱梁结构振动特性分析	33
3.7 振级理论	51
3.8 列车荷载作用下箱梁结构的振动	53
3.9 本章小结	57

第 4 章 箱梁结构设计措施对振动的影响分析	59
4.1 单箱单室与单箱双室箱梁结构振动比较分析	60
4.2 加劲肋的布置对高铁箱梁振动影响分析	65
4.3 本章小结	78
第 5 章 声级理论	80
5.1 声级的定义	80
5.2 声级的计算	81
5.3 列车荷载作用下箱梁结构的噪声辐射	83
5.4 本章小结	87
第 6 章 列车荷载作用下箱梁结构的振动响应与噪声辐射的频谱特性	90
6.1 箱形梁结构的自振频率	90
6.2 箱形梁结构振动和噪声辐射的频谱	93
6.3 箱形梁结构的减振降噪	96
6.4 本章小结	101
第 7 章 结论与展望	102
7.1 结论	102
7.2 展望	104
附录 1	106
附录 2	110
附录 3 主要研究成果	122
参考文献	156

第1章 绪 论

1.1 引言

在高铁桥梁的建设当中，广泛采用箱形梁结构。其中，预制混凝土箱梁应用最为广泛，其整体性好、偏心荷载下较为有利、能有效抵抗正负弯矩、刚度大、施工方法多、节省材料、简洁美观等优点，让其在桥梁建设中具有广泛的发展运用空间。

然而，当高速铁路在桥梁上运行时，伴随着强大的摩擦损耗和能量输入，在高速列车的动力作用下，会使箱梁结构体系发生振动。高速铁路箱梁振动不仅影响了车辆的平稳性和乘车的舒适性，也影响了桥梁的使用寿命和正常的工作状态，甚至在车桥的动力响应达到一定的界限时会使车桥发生共振，严重影响列车的行车安全，对公共财产和乘客生命安全带来极大的危害。另外，城市轨道交通按产生噪声的声源可以分为轮轨噪声、车辆非动力噪声、牵引动力系统噪声和结构噪声等。

结构噪声和轮轨噪声一样，都是由轮轨间的相互作用力导致的。在这个力的作用下，钢轨产生振动，这种振动通过钢轨传递到桥梁结构上，引起桥梁结构的振动。桥梁结构在振动时带动周围的空气一同振动引发“二次噪声”。结构噪声可以认为，是由于尺寸较大的水平板的振动所产生的。因为结构物的尺寸比较大，因此低频段的噪声会有大量辐射，表现为低频特性。在噪声向远处传播的特性方面，根据文献，在高架线路的下部，通过对高位测点和低位测点噪声频谱特性的比较可以看出，在低频段噪声水平有差别，而在高频段噪声水平大致是相同的。这说明，沿铅垂方向，低频噪声衰减较快，而高频噪声衰减较慢；在同一水平面上，通过对距轨道中心线不同距离测点噪声频谱特性的比较，可以看出，在低频段噪声水平大致相同，而在高频段噪声水平有差别，这说明沿水平方向，低频段的衰减较慢，而高频段的衰减较快，即低频噪声的影响范围比高频噪声

更大。

城市高架轨道箱形梁产生的噪声属于结构噪声，这部分噪声以低频噪声为主。低频噪声具有更远的传播距离，并会使人产生恶心、呕吐等多种不适，对人们生活产生极为不利的影响。正常人能听到的声音频率为 $20 \sim 20000\text{Hz}$ ，频率低于 500 Hz 的声音为低频声音。低频噪声对生理的直接影响没有高频噪声那么明显，但医学专家通过研究发现，低频噪声对人体不仅造成功能性损害，还可能引起器质性损害以及精神损害。人体内器官固有频率基本上在低频和超低频范围内，很容易与低频声音产生共振，所以人会烦恼、感觉不适，低频噪声由于可直达人的耳骨，而且会使人的交感神经紧张，心动过速，血压升高，内分泌失调。人被迫接受这种噪声，容易烦恼激动、易怒，甚至失去理智。如果长期受到低频噪声袭扰，容易造成神经衰弱、失眠、头痛、综合判断能力下降等各种神经官能症。低频噪声还可以穿透人体腹壁和子宫壁，影响胎儿器官发育，甚至造成胎儿畸形。对于控制轻轨运行时所产生的噪声及促进轨道交通的健康发展，铁路箱梁振动控制措施的研究具有非常重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 振动部分

1937 年，Kolousek^[1] 研究了单轮过桥的问题，将车载简化为移动周期力来建立模型，这个模型充分考虑了车辆和桥梁的重量对车桥振动的影响。Timoshenko^[2] 假定在仅考虑桥梁质量而忽略轮对质量的前提下，建立了桥梁竖向振动方程，并求解出了结果。

计算机技术和有限元的发展将梁桥振动的研究推向了更高的阶段。日本学者松浦章夫^[3] 在新干线的基础上对梁桥的振动进行了进一步的研究，建立了新的二轴式转向架高铁模型。研究表明，当列车速度小于 200km/h ，桥梁所承受的冲击系数在现行的标准内依旧符合要求，并依据高速车辆的动力响应给出了桥梁的挠度限值。他还建立了四轮对沉浮运动、两个转向架的十自由度列车模型，研究了轨道平顺度、桥跨以及车速等因素对车桥动力系数的影响。美国伊利诺理工学院的 K. H. Chu^[4] 采用一种新的模型，即假设车辆由许多刚体拼凑而成，各个刚体在空间具有六个自由度，这种多刚体多自由度的模型通过弹性元件连接成整体

来研究车桥的振动。L.Fryba^[5] 则把车辆设定为四个自由度的质点系, 桥梁则为等截面、具有黏滞阻尼特性的简支梁桥, 以此推导出一系列在此作用下的车桥动力响应的解析解, 并考虑到轮对的不平衡、轨道的刚度大小、轨道的平顺性等因素的影响, 建立了系统的车桥振动方程和力学模型, 在不同的车桥初始化状态以及不同的桥梁设计参数下进行分析。

20 世纪 80 年代, 美国朱光汉教授^[6] 等将车体、轮对、转向架等通过阻尼与弹簧连接起来, 把车辆看成多刚体系统, 使得车辆系统更为复杂。同时, 考虑到轨道的平顺性等因素, 将车辆与桥梁分开分别建立了振动方程。在此基础上, 使得两个方程在轮轨接触作用下联系起来, 研究列车和桥梁的振动问题。Dhar C.L.^[7] 的模型建立在朱光汉教授研究的基础上, 但他假定轮轨紧密贴合, 以桥梁承受车辆竖向作用力为主, 分析不同车辆在进入桥梁初始响应情况下产生的竖向振动问题。

对于车桥模型, 欧洲各国学者也做了系统的研究。对于时速大于 200km 的高速列车欧洲铁路研究院^[8] 建立车桥模型, 采用谐波分解法, 致力于以此来进行桥梁振动响应分析, 得到了桥梁在共振速度下的动力响应限值。研究表明轨道不平顺对车桥的动力响应有着巨大的影响, 高速列车在通过桥梁时给桥面板带来巨大的加速度可能会成为道床失稳的诱因。这项研究采用了比较复杂的模型, 将轨道细分为枕木、道床、缓冲垫、钢轨等元件, 在轨道平顺度低甚至是包含缺陷的情况下, 研究轨道对车桥振动的影响。桥梁振动的频率越大, 则车桥的振动响应越大, 而在轨道缺陷的情况下, 情况有相反的变化趋势。

在朱光汉教授之后, Boganert^[9] 对车辆通过拱桥进行了建模, 在简化了模型的基础上对桥梁因车辆带来的冲击进行了研究, 并给出了计算式。Yong-Bin Yang^[10] 采用了新的方法——动态响应法对复杂的车桥动力响应模型进行了计算, 大大提高了计算效率。Green 和 Cebon^[11] 建立了新的模型, 创新性的研究车桥动力响应问题。M. Olsson^[12] 利用有限元-模态技术研究车桥动力响应, 对车桥振动进行了求解, 给出了冲击系数的简化表。

20 世纪 80 年代, 铁道科学研究院就开始对车桥耦合振动展开了研究。程国庆^[13] 院士以中小跨度梁桥为研究对象, 考虑到轨道不平顺、旅客舒适度、列车加速度、行车安全性等因素, 假定列车由多节车厢组成, 每节车厢均视为刚体, 不考虑转向架、轮对等部件的弹性变形, 车辆为匀速行驶, 不考虑纵向动力作用的影响, 车轮始终与轨道接触等, 用轮轨接触理论模拟轮轨之间的横向力, 讨论

中小跨度梁桥纵横向刚度限制,并且分别对桥梁和车辆建立振动方程,利用轮轨之间的相互作用将方程联立求解。孙建林^[14]针对铁路运输大跨度斜拉桥,在程国庆院士的模型基础上,讨论研究了大跨度斜拉桥的横向振动,用频谱法针对模型进行了分析。张锻^[15]综合整理了铁路提速发展当中出现的脱轨等事故,针对事故原因进行分析整合,作为样本并对几大干线的列车提速进行了现场测试,得到了大量的实测数据。许慰平^[16]也在先前模型的基础上,针对列车桥梁之间的弱耦合性,结合列车转向架菱形变形和翘曲,用数值分析的分组迭代加以求解,此举提高了对大跨度桥梁和多车辆系统的整体动力问题求解的效率。

北京交通大学夏禾与陈英俊^[17]老师将模态综合技术应用在车辆、桥梁模型中,通过车桥之间力与位移的平衡关系,使两者联系在一起进行研究。夏禾教授充分考虑车桥之外桥墩和基础对模型的影响,将车辆、桥梁、墩台基础综合起来考虑,建立了车-桥-墩相互影响作用的分析模型,并在车桥的动力响应中将风荷因素与车载充分考虑,将车辆运行安全性、桥梁振动作用下车辆运行平稳度等一一加以分析,所得研究成果对车桥振动的深入研究具有巨大的参考价值。

西南交通大学宁晓骏、强士中^[18]等采用23自由度的列车模型,运用车桥耦合振动理论,假定列车车轮始终与轨道紧贴,分别对列车和桥梁建立了方程,用数值迭代分别求解。同时,比较计算不同横向刚度的桥墩对车辆-桥梁系统的影响,通过研究计算指出桥墩的横向刚度是保证车辆行驶安全和桥梁稳定的重要因素。在研究横向刚度问题时,对车桥耦合振动中的线性方程进行了一定的改变,求解轮轨蠕变系数和法向力时采用迭代法,并假定轮轨之间的接触是三维非线性的。李小珍^[19]将上述理论模型应用到钢构桥的分析中,她针对大跨度刚斜拉桥以及组合刚构桥对车桥耦合振动进行了研究。李运生、阎贵平^[20]在研究桥墩横向振动时实地收集了大样本的梁桥墩台横向振动数据,并从墩台类型,高度和上部结构组成等方面对桥梁进行了细致的分类,从影响墩顶最大横向位移的诸如墩台刚度、高度、车速等几个因素进行了分析划分,并提出了与桥墩横向位移相关的墩台刚度建议值。李乔教授与他的研究生何发礼^[21]共同研究了高速铁路曲线梁上车桥耦合振动特性,针对曲线超高、曲线半径大小对车桥振动的影响,建立了4轴三十五自由度的车辆模型进行研究。

中南大学曾庆元^[22-23]课题组理论结合实际,在车桥振动方面的研究首先考虑重力角、弹簧、刚度以及蠕滑力的影响作用,将整体混凝土梁桥在空间范围内进行离散,并建立21自由度车辆的简化模型,将车辆-桥梁的总势能建立计算

关系式,利用矩阵系统——对应法则以及弹性系统势能不变法则,将桥梁与车辆看成一个整体,这个整体的振动效应随列车通过桥梁的时间变化而变化。一次建构振动方程,在蛇行波的系统激振下,将车桥模型的振动响应进行求解。基于此模型的研究计算,大量分析了车桥模型的相关振动问题,并取得了可观的研究成果。朱汉华^[24]教授也一直致力于对车桥振动的研究,他在车辆-桥梁模型中强调能量的随机分析方法,将影响车辆-桥梁的诸多因素转为对车桥模型振动能量的随机分析方法,结合以往对人工地震波的研究,以此为激振源架构车桥模型振动蛇形波,研究表明车桥振动时变系统的振动响应对概率水平有相关对应要求。张麒^[25]就 Sperling 指标以及列车运行时的抗脱轨安全度,结合车桥模型的横向刚度分析结果,对钢析桥的横向刚度限值进行了研究,得出了钢析架桥的横向刚度控制指标,即梁桥的宽跨比随桥梁跨度的变化曲线。娄平^[26]将车辆-桥梁-轨道看作一个整体,着重对轨道不平顺时车桥的竖向振动和车辆运行、桥梁稳定、轨道等在动力响应方面的影响进行研究,取得了一定的成果。向俊^[27]结合高速铁路发展过程中的一系列脱轨事故进行分析。分析认为,列车运行脱轨与车桥系统横向振动丧失稳定有关,就车桥系统能量随机分析提出了自己的理论。周智辉^[28]在向俊对车辆脱轨能力随机分析理论的基础上,结合实际对列车与桥梁是否脱轨的案例进行分析,对该理论的正确性进行了验证,并据此给出了为预防列车脱轨的横向刚度设计限值,为今后的铁路桥梁建设与列车安全运行提供了参考。

胡辰锁^[29]等利用大型 ANSYS 软件建立有限元模型,对高速列车作用下桥梁结构的动力性能、高铁简支梁桥竖向动挠度和行车速度之间的关系和移动荷载下不同车桥耦合模型进行了研究,研究表明四分之一车模型与移动车轮簧上质量模型相比,移动质量模型和荷载模型的计算偏于保守;高速列车作用下,桥梁的竖向动挠度和加速度与列车行车速度是非线性关系,桥梁结构的动挠度和竖向加速度与荷载的质量呈线性关系,在适当的范围内提高桥梁结构的阻尼比和刚度,可以有效减小桥梁的振动。

张运山^[30]以京津城际简支梁为工程背景,通过改变车桥刚度、质量比、车速等,对铁路简支梁在移动荷载下的振动进行研究;王森^[31]采用了两种不同的车桥模型对高速铁路简支梁桥耦合振动进行仿真分析。结果表明,列车轴重越大,梁跨中竖向挠度和加速度也都越大,车速越大,跨中挠度与横向振幅都趋于增大,同时增大桥梁阻尼有助于减小车辆运行产生的振动。另外,一个多世纪前,

Schwedler 提出应建立轨道系统模型计算应力以防止轨道构件的损坏,特别是轨道的裂缝。Schwedler 关于轨道数学模型的论断一直沿用至今,他将纵向枕木支撑的铁轨模拟为连续的 Winkler 弹性地基梁,而结论由 Timoshenko 得出^[32-34]。在 1930 年左右,人们普遍认为铁轨应支撑在横向枕木上,可以很好地应用 Winkler 梁来模拟。1954 年, Kenny^[35] 采用拟静力方法计算了 Winkler 梁模型的动力响应,分析了弯曲波的传播速度和其与梁的临界速度的关系。但是,由于没有考虑时间作用上的连续性影响,所得的结果只在荷载移动速度等于波的传播速度时才有效,没有体现出振动问题的波动性。

对于采用浮式床板减振的轨道系统的计算模型有很多种,英国剑桥大学的 Hugh Hunt^[36] 等人提出了用单自由度体系模型代替 Winkler 梁模型来计算轨道系统的动力特性。结果表明,除了计算对基础的传力比以外,使用单自由度体系模型来计算振幅,频率等更为简单、有效。对于多层 Winkler 梁模型,同样可以用多自由度体系模型来代替,从而可以大大地简化计算,但这一方法并不适用于所有的振动问题;日本的阿部和久^[37] 将轨道的振动响应用格林函数的时域积分方程式表示,将垫层和枕木与车轮一并考虑,由此得到时间域的解答,但这种方法没有考虑时间作用上的连续性,而把每一个作用时间点单独考虑,显然与实际情况不相符合。

武汉理工大学谢伟平、于艳丽等^[38],针对荷载作用在时间和空间上的连续性,采用格林函数法,求解轨道系统在移动荷载作用下的控制方程。在计算 Euler 梁位移时,考虑荷载作用在时间上的连续性,考虑前一时间段荷载作用时产生的位移对下一时间段位移的影响,在时间域和空间域内作双重积分,求解 Euler 梁的动力响应表达。

刘学毅^[39] 等依据高速轮轨系统的作用特点,提出了一种高速轨道频域响应分析方法,分析了轨道刚度和阻尼对轨道振动的影响,得到了关于高速轨道动力作用的一些特点,指出轨道的不平顺性会加大振动作用。

在对移动荷载下 Winkler 梁的稳态响应分析中, Timoshenko^[40]、Steele^[41]、Fryba^[42] 主要采用本征函数叠加的方法获得级数解。对有限长梁,取少数几项就能得到较好的结果;但对无限长梁,计算量势必增大,且精度也受到影响。Kenney^[43] 通过坐标变换将偏微分方程化为常微分方程得到了梁稳态动力响应的解析解。郑小平等^[44] 通过对空间的傅立叶变换和对时间的拉普拉斯变换给出了梁动力响应的一般解。以上都只是对匀速移动荷载的研究。此外,除了 Kenney

的经典解析解外,其他的解析解都只是无穷积分形式的解析表达式。谢伟平^[45]将移动荷载下 Winkler 梁波数域中的动力响应分解为瞬态和稳态两部分,经讨论舍弃瞬态部分,对稳态部分作逆傅立叶变换,得到了变速移动荷载下无限长 Winkler 梁稳态动力响应的解析表达式,并进一步探讨了阻尼在求解过程中的作用,指出了经典解在处理阻尼时存在的问题。与 Kenney 的经典解求解过程相比,该解的求解过程具有更加明确的物理意义。

1.2.2 噪声部分

桥梁结构辐射的“二次噪声”是由于桥梁结构的振动所引起的,目前国内外的学者对这一问题的研究主要有以下几个方面:

徐利平、胡世德^[46]根据能量比拟原理,通过对箱梁桥面板作用车轮荷载后的应变能的计算,得到其比拟简支正交异性板的刚度参数,利用 G-M 法图表计算横向分布影响线,从而得到箱梁桥面板的荷载有效分布宽度。该方法忽略了悬臂板、腹板与底板的能量,实际上在高速列车通过高架桥梁时悬臂板、腹板与底板也存在较大的能量,因此该方法存在着一定的局限性。

丁桂保、郑史雄^[47]考虑结构与声介质的辐射条件,导出了具有耦合关系的有限元列式,分析计算了高速列车通过桥梁时各构件的振动响应所诱发的低频噪声,提出了预防与控制噪声的措施,即采用黏弹性阻尼材料,对产生噪声的主要部件进行处理,从而达到减小或消除结构振动以及由振动引起的噪声的目的,作者虽然提出了减少桥梁结构振动与噪声的方法,但并未对该措施的减振降噪效果进行验证也没有提出该措施在实际工程中的具体做法,因此其在实际应用中还存在着较大的困难。所以,对桥梁结构振动而产生的结构噪声问题以及采取何种具体、有效的降噪措施,还需要进一步研究。

Y.Y.Lee 和 K.W.Ngi^[48]研究了高架桥梁模型在脉冲荷载作用下的振动响应。分别在顶板中心和顶板与腹板交界处施加竖向脉冲力,获得了底板中心和底板与腹板交界处的傅立叶谱。将结构的振动分为全局振动(结构只发生纵向弯曲,而截面不发生变形)和局部振动(结构不发生纵向弯曲,而截面发生变形),并用有限元方法建立了局部振动模型。将每一截面考虑成梁单元并且仅考虑梁的横向变形,研究指出全局振动模型以相对低的频率振动,低频振动声辐射效率相对较小,纵向弯曲对梁的噪声辐射贡献不大。

K.W.Ngi、C.F.Ng^[49]使用 FFT 算法对高架桥梁结构噪声辐射和振动的测量结

果进行分析,结果表明当列车以 140km/h 的速度运行时高架桥梁噪声和振动的频率范围在 20 ~ 157Hz,共振频率是 43Hz 和 54Hz。Moritoh^[50] 对混凝土桥梁结构的声辐射进行了现场测量,并进行频谱分析,得出当列车以 240km/h 的速度运行时,桥梁结构正下方处,桥梁结构辐射噪声峰值所对应的频率是 50Hz。Stüber^[51] 得出当列车以 80km/h 的速度运行时在距轨道中心线 25m,地面以上 1.6m 处桥梁结构辐射噪声峰值所对应的频率是 50Hz。

Theeraphong Chanpheng^[52] 认为,在减小噪声辐射的问题上,辐射模型优于振动模型,声辐射模型更能够反映结构的声辐射和振动特性,通过声辐射模型可知结构表面速度的分布情况。

在对香港西线铁路高架桥梁噪声辐射问题的研究中,有关专家提出了三种解决结构二次辐射噪声技术方案:(1) 采用弹性悬挂吸声护罩将高架结构辐射面遮盖。(2) 加强高架结构,若使高架结构刚度增大,则仅对控制低频噪声有效;若使高架结构更结实,仅对控制高频噪声有效。(3) 采用弹性轨道结构,可以减少对高架结构振动能量输入。方案 1 和方案 3 势必会使工程造价大大增加,方案 2 只是从理论上说明了降噪的方法。但对具体的措施,如何使桥梁结构达到一种最优的形式以降低桥梁结构辐射的噪声问题,并未说明。

A.R.Crockett 和 J.R.Pyke^[53] 在对香港某高架铁路的降噪及建模过程的研究中,将总噪声分为直接噪声(来自轨道、路面、机车)和桥体结构辐射噪声。指出对直接噪声,仅在轨道旁边安装单一的吸声屏障,不能达到有关的噪声规定,为了提高吸声屏障的利用,采用了一系列声屏障同时放在临近轨道边和机车下,效果要比仅在轨道边安装吸声屏障好 12 ~ 17dB。对于桥体结构辐射的噪声,建立了有限元计算模型,考虑了弹性基座、弹性的支撑链接和浮置路面轨道(FST)这些有可能降低噪声辐射的因素。通过理论模型的计算和试验,文献的作者认为仅浮置路面轨道是能够充分发挥降噪作用的,桥体结构的形式会改变低频噪声,但不会消除浮置路面轨道这种形式对噪声的影响。

A.Wang 和 S.J.Cox 在对悉尼 RSA 线某一钢构桥梁的动力测试后指出:当列车以 65km/h 的速度行驶时,枕木上安置刚性基座的桥梁,在距离轨道中心线 5.5m 处噪声水平是 95dB,主要的频率范围在 200 ~ 1000Hz,而对枕木上安置弹性基座的桥梁总体噪声水平较之减少 6dB 左右。增加轨道构件的阻尼并不能有效地降低总体噪声水平,由于阻尼构件吸收大量的能量,因此很快受到破坏。减少轨道的支撑刚度可以减少传递到桥梁上的力,并降低桥梁结构辐射的噪声,但

这样会增加钢轨辐射的噪声。

Wilson Ihrig^[54]采用车辆-轨道-高架结构数学模型对箱形梁结构辐射噪声进行研究分析后表明：即使采用不实用的加强高架结构（增强结构的质量和刚度）与高弹性轨道，仍然不能满足噪声控制规定。最有效的解决方法是减少结构能量输入。通过各种轨道结构以及扣件匹配分析，采用浮置板式轨道结构与高弹性扣件结合，是解决结构噪声辐射的最有效技术方案。

A.R.Crockett、A.Wang^[55]、Wilson Ihrig 在减少桥梁结构噪声的方面主要是采用浮置板式轨道结构形式和高弹性基座，这种轨道结构形式虽然可以有效地减少结构噪声的辐射，但在我国目前的条件下，采用浮置板式轨道结构形式的工程造价是一般轨道结构形式（如弹性短枕式轨道结构形式）的 7 ~ 10 倍，因此在我国目前的条件下，将浮置板式轨道结构形式大量应用于工程实际中，还存在着一定的困难。

1.3 本书的主要研究内容

（1）比较分析国内外对高速铁路箱梁振动特性的研究计算方法，结合国内外的研究成果和时速 350km 高铁 32m 箱梁的特点，确定研究高铁振动的计算方法及荷载步、阻尼系数等参数的计算。

（2）高速铁路箱梁振动特性的研究：建立时速 350km 高铁 32m 箱梁 ANSYS 有限元模型，将高速列车的实际动力参数作为箱梁振动的激励源，考虑箱梁振动的动力特性，将高速列车行驶带来的荷载简化加载到箱梁上，分析在列车荷载作用下箱梁的振动特性。

（3）分析结构腔室变化、设置加劲肋等措施对箱梁振动特性的影响。在建立的时速 350km 高铁 32m 箱梁 ANSYS 有限元模型基础上，采用单箱双室结构及在箱梁顶板、底板、腹板设置加劲肋，建立新的有限元模型。分析单箱双室箱梁及加劲肋的设置对结构振动的影响，比选减振结果，给出设计建议。

（4）对武汉市轨道交通一号线做了较大规模的振动与噪声的实测工作，采集了振动与噪声的原始时域数据。

（5）根据振动级理论和声压级理论对原始的时域数据做了处理，得到了测点处的振动加速度级与声压级。总结出振动强度与噪声辐射沿箱形梁截面的变化规律。

(6) 使用 Matlab 数值计算软件绘制了 1/4 箱形梁结构的外表面法向振动加速度级和声压级的等值线分布图, 确定了箱形梁结构振动强度与噪声辐射的最大部位。

(7) 对箱形梁结构做了有限元模态分析, 并与实测的结果进行了对比分析, 确定了箱形梁结构的前四阶自振频率及其所对应的振型。

(8) 对原始的加速度与声压的时域数据进行了自相关与互相关处理, 通过快速傅立叶变换获得了振动加速度自谱、噪声声压自谱及振动与噪声互谱, 确定了高架轻轨列车远轨运行与近轨运行时箱形梁结构各部位振动响应与噪声辐射的频率范围。

(9) 假定轻轨列车运行时箱形梁结构所辐射的噪声与周围背景噪声是完全不相关的, 系统为理想线性系统, 计算了箱形梁结构振动与噪声辐射的相干函数, 得到了相干输出声压自谱, 确定了箱形梁结构振动响应与噪声辐射相关性较强的频率范围, 通过降低该频率处的振动响应达到减小结构噪声辐射的目的。

(10) 通过对每一测点处振动加速度自谱与相干输出声压自谱的对比分析, 确定了箱形梁结构各部位较小辐射声功率的频率范围。

最后, 在总结全书工作的基础上, 提出了今后尚需深入研究的问题。

第2章 ANSYS 基本原理及计算方法简介

高铁自诞生以来,在世界各国都得到了不同程度的发展,其桥梁结构的形式也呈现多样化的特点,主要包括刚架结构、T梁结构、简支箱梁、钢筋混凝土连续式箱梁、大跨度系杆钢拱结构等。近年来我国高铁建设发展迅速,主要采用的是箱梁结构。各国学者对高铁箱梁结构的设计优化研究一直在进行,传统的研究方法掣肘于箱形梁大尺寸、高自重等特点,实体研究费时费力,难以开展。随着科技的发展,尤其是计算机技术的进步,许多工程数值模拟软件(ANSYS、SAP2000、MIDAS等)的开发,让越来越多的学者将箱形梁的研究转向数值模拟分析,采用数值模拟软件对箱梁结构的分析研究已经取得了不少成果。与实测相比,数值模拟方法较贴近实际,可真实模拟高铁箱形梁在荷载作用下的动力效应,误差在允许范围内,是一种较精确、切实可行的研究方法。

本章主要对 ANSYS 的基本原理及计算方法进行介绍,阐明高铁箱梁模型高速列车荷载的模拟方法、时间步长的选择、结构阻尼特性的选取等关键问题。

2.1 ANSYS 有限元软件介绍

ANSYS 有限元软件主要包括以下三个部分:前处理、后处理及分析计算模块。

前处理模块主要包括建立实体模型,在模型上施加约束与荷载,划分网格生成有限元模型等前期工作。

后处理模块可将分析计算结果以等值线显示、矢量显示、梯度显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

分析计算模块包括在结构分析中可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析等,具体可分为静力分析、模态分析、瞬态分析、谐分析、谱分析等。

ANSYS 程序提供两种后处理器:通用后处理器和时程后处理器。

(1) 通用后处理器简称为 /POST1,用于分析处理整个模型在某特定时间或