



申请同济大学工学博士学位论文

风-汽车-桥梁系统空间 耦合振动研究

(国家自然科学基金 编号: 50478109)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 桥梁工程

研究生: 韩万水

指导教师: 陈艾荣 教授

二〇〇六年三月



A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Three-dimensional Coupling Vibration of Wind-vehicle-bridge system

(Supported by the National Natural Science Fund, Grant No. 50478109)

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Bridge Engineering

Candidate: Wan-Shui Han

Supervisor: Prof. Ai-Rong Chen

March, 2006

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：		学位论文作者签名：	
	年 月 日		年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：

年 月



摘要

风—汽车—桥梁系统空间耦合振动是风—桥相互作用、风—汽车相互作用及汽车—桥梁相互作用三方面协调工作的结果，其振动特性决定于自然风特性、车辆动力特性、桥梁振动特性、车辆和桥梁气动特性相互影响等多种因素。在发展完善风—桥相互作用、风—汽车相互作用及汽车—桥梁相互作用的基础上，将风、汽车、桥梁三者作为一个相互作用的系统，提出一个较为完善的风—汽车—桥梁系统空间耦合振动分析模型。本文主要研究内容如下：

1、为了进行对现有抖振时域分析理论的实例验证，在杭州湾跨海大桥全桥模型风洞试验中，不仅对抖振位移进行了测量，还通过在塔根布设动态应变片完成了桥塔内力的实测。采用改进的谐波合成方法实现了三维空间脉动风场的模拟，风场模拟时采用了风洞中实测的紊流风速谱。空间相关性是影响桥梁抖振响应的一个重要因素，在杭州湾跨海大桥风洞试验中，对风洞空间相关性进行了测量研究，并在风场模拟时将衰减因子取为实测值。同时，介绍了桥梁结构上的不同风荷载的处理方式，编制了相应的非线性颤抖振动力分析程序，并采用了不同的数值算例进行验证。以杭州湾跨海大桥为例，探讨了桥塔和斜拉索上的脉动风、空间相关性、Sears 函数以及风谱对抖振响应的影响。

2、对现有车辆的类型进行合理的划分，选择典型车辆进行风洞试验以获得其气动力系数。采用一个更加合理的、符合实际并能较全面考虑众多因素的侧风作用下车辆动力分析模型，在考虑路面粗糙度和车辆悬挂系统的基础上，能够预测行驶在路面上的车辆突然受到侧向阵风的安全性。探讨了路面粗糙度，干、湿、雪、冰路面状况以及车辆悬挂系统对行车安全的影响，获得了侧风作用下典型车辆的安全行车风速标准。此外，对侧风作用下行驶于路面上车辆舒适性进行评价，并对路面粗糙度、平均风速以及车速对车辆驾驶舒适性的影响进行了研究。

3、将整个汽车—桥梁系统划分为车辆与桥梁两个子系统，引入汽车—桥梁系统几何协调条件和力学平衡关系，采用分离迭代法编制了汽车—桥梁系统空间耦合振动分析程序，并分别采用集中力匀速通过简支梁、弹簧质量系统匀速通过简支梁和江阴长江公路大桥动载试验对程序的可靠性进行了验证；以杭州湾跨海大桥和润扬长江公路大桥为工程实例，运用所编程序详细研究了车辆数目、车辆间距、不同车道、车辆相向行驶、不同路况、以及不同车速时车流通过桥梁时桥梁的动力响应和冲击系数，同时对斜拉桥和悬索桥在车流通过时的振动特征进行了对比分析，得到了一些有益的结论。

4、为了考虑车轮相对于桥梁的侧向耦合关系，在车轮与桥面之间引入了一个特殊阻尼器，这个阻尼器的阻尼系数依赖于车辆与桥梁的未知运动。在综合考虑汽车—桥梁系统空间耦合关系的基础上，提出一个较为完善的风—汽车—桥梁系统空间耦合分析模型，该模型能够综合考虑桥梁的静风响应、抖振响应、汽车—桥梁耦合振动、风荷载对车辆的影响、系统的时变特性以及结构几何非线性和气动荷载非线性的影响等。运用所编制的程序研究了路面粗糙度、风速以及干、湿、雪、冰路面状况对行驶于桥梁上的车辆安全性的影响，并给出了典型车辆在桥梁上发生事故的临界风速；研究了侧风和桥梁振动对车辆驾驶舒适度的影响以及侧风和车辆移动荷载对桥梁振动的影响。

关键词：抖振时域分析；实例验证；内力；改进的谐波合成方法；气动导纳；Sears 函数；空间相关性；车辆气动力系数；路面粗糙度；车辆悬挂系统；汽车—桥梁系统；分离迭代法；侧向耦合关系；特殊阻尼器；风—汽车—桥梁系统



Abstract

A wind-vehicle-bridge system can be regarded as an interaction result of wind-bridge interaction, wind-vehicle interaction and vehicle-bridge interaction, which is determined by nature wind, dynamic characteristics of vehicle and bridge structures, interrelationship between bridge and vehicle dynamic properties and so on. Based on further development of wind-bridge interaction, wind-vehicle interaction and vehicle-bridge interaction, Wind, vehicles and the bridge can be regarded as a coupled vibration system. A state of the art three-dimensional dynamic model of the wind-vehicle-bridge coupling vibration is presented. This research is focused mainly on the following aspects:

1、 In order to carry out example verification of existing time-domain buffeting theory in the full model wind tunnel test of Hangzhou Bay Bridge, the buffeting-induced structural displacements are measured as well as buffeting-induced internal forces at the bottom of towers by means of arrangement of dynamic strain gauges. Three-dimensional stochastic wind field is simulated by improved WAWS method by utilizing measured turbulence wind spectrums. Spatial correlation is an important factor that would influence buffeting responses. A spatial correlation study is carried out in the wind tunnel test of Hangzhou Bay Bridge and the result is used in simulation of wind field. Furthermore, the approaches to treat various wind loads on the bridge structures are introduced. These approaches are coded to an FEM program and its reliability is verified by variety of examples. In the buffeting analysis of Hangzhou Bay Bridge, the influence of pylon and cable wind field, Sears admittance function, spatial correlation and wind spectrum on buffeting responses are investigated.

2、 Existing vehicles are properly classified and typical vehicles are chosen to carry out wind tunnel test to get their aerodynamic coefficients. A more realistic and rational dynamic model of vehicles subjected to cross wind by considering the effects of road surface roughness and vehicle suspension system would predict the safety of vehicle due to sudden crosswind gust. The influences of road surface roughness, different road surface condition (dry, wet, snowy and icy) and vehicle suspension system on safety of vehicle are investigated. A series of vehicle accident speeds or critical wind speeds for typical vehicles due to sudden crosswind gust are gained for various road roughness and road surface condition. The ride comfort of vehicles running on the ground under cross wind with various road surface roughness, mean wind velocity, and vehicle speed is assessed.

3、 Coupling vehicle-bridge vibration system can be treated as two subsystems, one for the bridge and the other for the vehicle, the geometric and mechanical coupling relation between vehicle and bridge are introduced, a separated iterative method is used to work out three-dimensional coupling vibration program, whose



reliability is proved using dead load moving over a beam, sprung mass moving over a beam and measured values of final completion of Jiangyin Yangtze river highway bridge. In the vehicle-bridge analysis for response and impact factor of Hangzhou Bay Bridge and Runyang Suspension Bridge, the effects of vehicle number, vehicle distance, vehicle lane, two-way direction, road surface roughness and vehicle speed are discussed. At last, the vibration properties of cable-stayed bridge and suspension bridge are compared.

4、A special damper, of which the damping coefficient is dependent on unknown motion of the vehicle and the bridge, is introduced to consider the lateral coupling of the vehicle tire relative to the bridge deck. A state of the art three-dimensional dynamic model of the wind-vehicle-bridge coupling vibration is presented, in which the effects of bridge deformation due to static wind loads, buffeting-induced bridge responses, vehicle-bridge coupling vibration, wind loads on vehicle, time-variation property of system, structural geometrical nonlinearity and aerodynamic nonlinearity are included. The influences of road surface roughness, mean wind velocity, different road surface conditions (dry, wet, snowy and icy) on the safety of vehicle running on the bridge are investigated. A series of vehicle accident speeds or critical wind speeds of typical vehicles running on the bridge due to sudden crosswind gust are obtained. The effects of crosswind and oscillating bridge on the ride comfort of vehicles and the influences of crosswind and vehicles on vibration of bridge are discussed.

Key words: time-domain buffeting analysis; example verification; internal forces; improved WAWS method ; aerodynamic admittance ; Sears function ; spatial correlation; aerodynamic coefficients of typical vehicles; road surface roughness; vehicle suspension system ; vehicle-bridge vibration system ; separated iterative method; lateral coupling ; special damper; wind-vehicle-bridge coupling vibration



目 录

第一章 绪论	1
1.1 风-汽车相互作用研究概况	2
1.2 车-桥耦合振动研究概况	3
1.3 桥梁抖振研究概况	4
1.4 风-车-桥系统研究概况	7
1.5 本文的研究内容	8
第二章 大跨度桥梁非线性颤抖振时域分析	10
2.1 三维空间脉动风速场的计算机模拟	10
2.1.1 改进的谐波合成法	10
2.1.2 风参数的确定	12
2.1.3 数值算例	14
2.2 风荷载处理	15
2.3 非线性颤抖振时程分析	19
2.3.1 大跨度桥梁结构的有限元模型	19
2.3.2 结构几何非线性考虑方法	19
2.3.3 动力平衡方程及求解策略	20
2.4 程序验证	22
2.4.1 具有理想平板断面的简支梁	22
2.4.2 空间非线性静动力分析	23
2.5 杭州湾跨海大桥	24
2.5.1 时域颤抖振分析	24
2.5.2 风载内力试验与分析	34
2.6 本章小结	38
第三章 风-汽车系统相互作用研究	40
3.1 车型分类及汽车模型风洞气动力测量试验研究	40
3.1.1 车型分类	40
3.1.2 汽车模型风洞空气动力学试验方法	41
3.1.3 汽车模型风洞空气动力学试验与气动力系数修正	41
3.2 风-汽车系统振动分析理论	43
3.2.1 路面粗糙度模型	44
3.2.2 车辆所受风荷载	44
3.2.3 车辆分析模型	45
3.2.4 车辆运动方程	46
3.2.5 风致车辆事故模型的建立	53
3.2.6 汽车行驶舒适性评价方法	53
3.3 典型车辆安全性分析	54
3.3.1 路面粗糙度对车辆安全性的影响	56
3.3.2 路况对车辆安全性的影响	58
3.3.3 车辆悬挂系统对车辆安全性的影响	59



3.3.4 安全行车标准.....	61
3.4 侧风作用下车辆驾驶舒适性分析.....	63
3.4.1 路面粗糙度的影响.....	63
3.4.2 车速的影响.....	65
3.4.3 风速的影响.....	67
3.5 本章小结.....	69
第四章 汽车—桥梁系统空间耦合振动研究	71
4.1 汽车—桥梁系统运动方程.....	71
4.1.1 汽车—桥梁系统几何耦合关系.....	72
4.1.2 汽车—桥梁系统力学耦合关系.....	73
4.1.3 汽车—桥梁系统运动方程求解及程序实现.....	74
4.1.4 算例验证.....	75
4.2 杭州湾跨海大桥.....	78
4.2.1 桥梁的动力响应及冲击系数.....	78
4.2.2 车辆的动力响应以及驾驶舒适性.....	87
4.3 润扬长江公路大桥.....	90
4.4 本章小结.....	93
第五章 风—汽车—桥梁系统空间耦合振动研究	94
5.1 风—汽车—桥梁系统运动方程.....	94
5.1.1 风—汽车—桥梁系统安全性分析侧向耦合关系.....	94
5.1.2 风—汽车—桥梁系统舒适性分析侧向耦合关系.....	95
5.1.3 风—汽车—桥梁系统运动方程求解及程序实现.....	96
5.2 杭州湾跨海大桥.....	98
5.2.1 行驶于桥梁上的车辆安全性分析.....	98
5.2.2 行驶于桥梁上的车辆响应与舒适性分析.....	105
5.2.3 侧风、车辆移动荷载对桥梁响应的研究.....	112
5.3 苏通长江公路大桥.....	114
5.3.1 车辆行驶于路面和桥梁上安全性对比.....	114
5.3.2 行驶在路面与桥梁上典型车辆事故临界风速(车速)对比.....	115
5.3.3 侧风作用下车辆行驶于路面上与桥梁上的响应对比.....	117
5.4 本章小结.....	121
第六章 结 语	123
6.1 理论方法上的进步.....	123
6.2 实际应用结论.....	124
6.3 需要改进之处和对进一步研究的建议.....	126
参考文献.....	127
致谢	134
作者简介.....	135



第一章 绪论

为了满足21世纪经济发展的需要，我国交通部规划了“五纵”和“七横”的高等级公路骨架网。其中，仅以太平洋沿岸的同三线为例就包含了五个跨海工程，自北向南依次为：渤海湾工程、长江口越江工程、杭州湾通道工程、珠江口伶仃洋工程、琼州海峡工程。为了避免深水基础和海下施工的诸多困难，长大桥梁将成为跨海工程的有力竞争者，同时，也带来了因桥位处大风频袭所导致的风对通行车辆的影响问题。在强风作用下，行驶在振动桥梁上的车辆的安全性和舒适性研究不仅是一个科学问题，同时关于强风作用下关闭交通的临界风速标准的确定更是一个影响广泛的社会问题。如果发生桥梁上大风所导致的行车事故，不仅仅会因车辆破坏、桥梁损毁、人员伤亡、交通中断、货物人员滞留等带来直接和间接的经济损失，还会影响受众的心理，让其出行时另择他路，甚至还会带来极为不良的社会影响。



图 1.1 虎门大桥风致行车安全事故

为了减少大风天气下的交通事故，有关部门已经采取了一些措施，如制定大风天气下的车辆行驶限制车速，以及在自然风达到一定风速等级时关闭交通。目前，车辆行驶的车速限制也好，关闭交通措施也罢，相关指标的确定和决策都缺少量化的数据支撑。如果限制车辆行驶的风速标准制定的过高，就会让车辆在本已不安全的大风环境中行驶，必然会增加行车安全事故发生的几率；反之，过低的限制车辆行驶风速标准，势必又会影响桥梁的通行效率，过多地关闭交通无疑将会造成极大的经济损失，并带来不良的社会影响。故而，通过大风所致车桥系统的动力响应研究，对大风天气下桥梁上通行车辆的行驶安全性及舒适性做出合理地评价是至关重要的。因此，风-汽车-桥梁系统的空间耦合振动研究具有十分重要的理论意义和实用价值。

当大跨度桥梁桥址位于强风频袭地区时，侧向风作用下，当车辆匀速直线通过大跨度桥梁时，风、汽车、桥梁三者间的相互作用主要表现在以下几个方面：1),由于路面粗糙度的存在，高速运动的车辆和柔性的大跨度桥梁间会发生耦合振动。2),脉动风的作用会使桥梁发生抖振，从而影响车桥耦合振动特性。3),侧向风会使车辆受到横向力和倾覆力矩的作用，从而显著改变车辆的振动特性。4),车辆在桥面上的存在会改变桥道的气动绕流，桥道断面的气动特性随车辆的到达和离去而改变，整个主梁所受风载随车辆的运行而动态变化。5),车辆处在桥道的气动绕流之中，桥道的几何外形会对桥上车辆的气动荷载产生影响。6),车辆质量沿桥跨的动态分布会改变桥梁结构的振动特性。

为了预测大风天气下行驶在振动桥梁上的车辆的响应，必须建立风-汽车-桥梁系统耦



合振动分析框架，以前的大多研究要么基于风对桥梁的影响而未考虑车辆的影响，要么研究车桥耦合振动而未考虑紊流风的作用，或者是研究车辆行驶于路面上，而非桥梁上的安全问题。而本研究要建立的风—汽车—桥梁空间耦合振动系统则是在考虑风—桥相互作用、车—桥相互作用和风—车相互作用的基础上，构建涵盖三个作用部分的作用系统。

1.1 风—汽车相互作用研究概况

风—汽车相互作用研究主要包括四个方面^[15]：1),风险分析——评价风致事故发生的发生方法和可能性，通常采用概率方法，以满足管理部门采用救助或交通管理措施的评定。**Baker**首先提出了时域内侧风作用下车辆动力学的理论模型^[16,17]，后来发展到可以考虑驾驶行为，并努力建立了气动力、轮胎、车体和牵引力共同作用下考虑轮胎位移协调条件的单质点四轮车的六个平衡方程。**Baker**^[18]后来量化了车辆发生翻转、侧滑及旋转事故的临界风速，并估算了发生事故的风险。他们通过收集到的1990年1月25日美国暴风引起的车辆事故数据来校核他们的分析框架及相应的计算程序，发现基于他们分析框架计算出的发生事故发生的临界风速太高。他们把这种差异归因于缺乏可靠的车辆气动力及气动力矩系数。尽管需要进一步的实验得到可靠的车辆气动力及气动力矩系数，但同样也需要改进他们的理论分析模型。这主要由于其分析框架是基于车辆自重、轮胎力和气动力及气动力矩系数作用下的单质点车辆系统。显而易见，车辆分析模型过于简化，忽略悬挂系统的影响，并未考虑多轮胎设置都是其获得过高临界风速的原因。然而，在其分析模型中，一个影响车辆动力特性的重要因素——路面粗糙度指标的缺失，又是导致这一结果的重要原因，即其分析模型中将竖向加速度假设为零，这样就影响了轮胎接触力，同时导致过高的发生事故发生的临界风速。因此，有必要提出一个更加复合实际、较全面考虑众多因素的风—车计算模型。2),车辆气动力学研究——确定侧风作用下汽车的气动特性以及车辆气动力系数，以便满足风险事故计算的需要。**Baker**^[19]对一个1:50的牵引车—拖车模型在桥面上运动时横风作用的风洞实验，测试了低紊流度和格栅紊流的情况，发现紊流对于车辆气动力影响很大，特别是在使车辆顶部压力减小进而使升力显著增大方面响应很大，并强调紊流风模拟的重要性。**Baker**^[20]又对横风作用下的车辆气动力和气动力矩的基本规律并作了油迹显示技术实验，试着对相关的流体力学作出基本解释，结果发现车辆周围的主要气流是一对形成于拖车上表面的圆锥形的涡流，类似于低层建筑屋顶出现的情况。这些涡对于大气的紊流度是很敏感的。气动力试验也表明车辆气动侧边力的波动主要是由紊流抖振引起的，而升力的波动主要是由于涡脱唤起的不稳定性。**Baker**在路面车辆侧风作用方面进行了大量的研究，但他的研究主要集中于侧向高度较大的高边车。为研究大风天气对行车安全的影响，获得典型车辆在各种路况条件下的行车安全风速标准，首要的任务就是对现有车辆的类型进行合理的划分，然后通过风洞试验获得典型车辆的气动力系数，以获得风—车模型计算中较为准确的风荷载输入。3),自然风环境特性分析——确定车辆所行驶场地的自然风环境特性，场地应从桥梁跨越的范围延伸至周边的高速公路网，目的是要反映区域性范围的风环境特性。4),提高行车安全措施研究。目前，从定性上分析，大风天气下针对所有通行车辆的限速、车流量和车流密度的控制、针对易发生风致行车安全问题车辆的限行等措施都会使车辆发生事故的风险降低。同时研究为提高行车安全风速标准所采取工程措施的有效性，如基于护栏横向防撞系高度和外形的气动优化，基于风障透风率和结构型式等进行风障减风效果研究。但如何将诸多控制指标量化，如何评价行车事故的风险水平，并最终通过控制指标的实施将行车事故的风险降低到可接受的水平，这无疑是桥梁科学管理和决策必须要解决的问题。



1.2 车-桥耦合振动研究概况

对于桥梁在移动车辆荷载动力性能和承载能力的最早研究可追溯到1844年英国工程师对著名的Britannia桥所做的模型试验。在英国的一些铁路桥梁失事以后，R. Willis^[107]于1847年导出了在移动荷载下忽略质量的桥梁的振动方程，并从1849年起系统的开始了模型试验。1896年G.G. Stockes获得了Willis方程的幂级数解。考虑到中小路矿铁路桥梁的重量和铁路列车荷载相比较小可以忽略，使这一理论结果被近似应用于铁路桥梁。对于大跨度桥梁，1905年俄国学者Krylowt & Timoshenko^[80]考虑了忽略车辆荷载质量的移动常量力作用下的梁桥的振动方程，获得了精确解。1911年S. Timosenko^[81]和1928年C.E. Inglis^[49]进一步讨论了移动周期作用力的动力响应问题。1941年李国豪^[130]继Inglis之后研究了悬索桥在铁路列车荷载作用下的强迫振动问题，以后又研究了拱桥的车辆振动问题。50年代起，J.M. Biggs开始用数值积分的方法求解车辆-梁桥系统的动力响应取得成功，并且理论计算与现场实测相当一致，证明了方法的可靠性。

尽管60年代以前的古典车辆振动分析理论对于弄清机理，揭示激振的主要原因等有重要的贡献，但由于车辆和桥梁耦合的振动系统的本身复杂性，古典车辆振动分析理论无法从理论上解决各种激振源的随机性。

1960年，R.K. Wen^[86]假定桥梁动力挠曲线的形状与静力曲线相似，并考虑路面的不平顺影响，用能量法研究了两轴车辆（汽车）的过桥问题。从20世纪70年代开始，车桥动力相互作用分析的研究突破了传统框架，进入了系统动力学研究阶段。

由于计算机和有限元法的问世，自70年代起的现代车辆振动分析理论以考虑更加接近真实的车辆模型和将桥梁理想化为多质量的有限元或有限条理论为主要特点，同时着重研究公路桥梁的不平整对荷载动力效应的影响。

一种研究方法为把车桥耦合问题处理成两种不同的运动方程系统^[37,46,50,83,87,132]，一个用于桥梁计算，另一个用于车辆计算，并通过迭代过程来考虑车辆与桥梁的连接状况。为研究三维的车-桥耦合振动系统，首先要先形成车辆以及桥梁的刚度矩阵，质量矩阵，阻尼矩阵和力矢量矩阵，然后通过车辆与桥梁的接触点将两个系统耦合起来。先前许多研究者采用两个运动方程来处理这个问题，一个为车辆运动方程，另一个为桥梁运动方程，然后通过迭代考虑接触条件。在这个迭代过程里必须首先假定接触点位移，通过求解车辆运动方程来解出车桥相互作用力，再通过这个相互作用力来求解桥梁的运动方程来得到改进后的接触点位移。当两个循环迭代所得到所有接触点的位移充分接近时迭代终止。这种方法的好处是两组方程中的动力特性矩阵能在求解过程中一直保持致。

另一种方式是用直接积分法求解耦合车桥系统运动方程，能得出没有迭代过程的时程结果。这种方法的主要缺点是运动方程是与时间相关的，在每个时间步内，运动方程的特性矩阵均需要重新生成。为了提高计算效率，可以采用模态叠加的方法^[59,88,90,145]。在耦合车桥系统矢量中包含有桥梁的模态成分和车辆的物理成分，可使耦合系统的自由度显著降低。这种方法的缺点是必须通过模态分析找出桥梁的真实频率和模态形状，而且高阶频率引起的局部变形是难以预测的。

比较新的一种研究方法叫做压缩法。这种方法主要特点是车辆所有的自由度，通过Guyan法或动态压缩法，压缩到与桥梁自由度相关。但是用之来分析以驾驶者和乘客的舒适度为指标的车辆振动是比较困难的。Yang和Yau^[91~94]采用有限差分公式来压缩支在弹簧上的质量（车辆模型）到桥梁相应的位置上，这样桥梁的位移就可以用来表示车辆的位移，但是随着模拟的更接近实际，带来了用桥梁位移表示的车辆位移增量的表达式是越来越难推导。



W.H.Guo, Y.L.Xu^[38]提出了全用计算机集成的分析方法，能处理斜拉桥上行驶各种车辆的情况，并能考虑路面的粗糙度和车辆进出桥梁时的状况。但是运动方程也是耦合的，不可避免的要每个时间步形成新的各个矩阵。

1.3 桥梁抖振研究概况

桥梁结构的抖振现象可大致分为三类^[5]，即有结构物自身尾流引起的抖振、其他结构物特征紊流引起的抖振和自然风中的脉动成份引起的抖振。在这三者之中，大气中脉动风引起的抖振响应占主要地位，因而通常所说的桥梁抖振分析理论主要是针对大气紊流引起的抖振。近四十多年来，国内外学者对大气紊流引起的桥梁结构抖振响应进行了大量的研究，概括起来，主要有三种，即 Y. K. Lin 随机抖振理论、Davenport 抖振理论、Scanlan 颤抖振理论。Y. K. Lin 以随机理论为基础，首先提出了用 Ito 随机微分方程来研究桥梁结构在紊流作用下的随机稳定性问题，继而建立了桥梁抖振的随机分析方法^[95-98]。Y. K. Lin 将自激力系数做为时变随机系数考虑，在某些方面是对 Scanlan 理论中自激力为常数的分析方法的修正。Y. K. Lin 随机抖振理论着重于研究紊流对结构的颤振稳定的影响。1962 年，Davenport 将 Sears 函数和 Liepmann 的机翼抖振理论应用到桥梁结构的抖振响应分析中^[1]，该理论以 Davenport 脉动风谱为基础，提出了修正静力三分力的气动导纳概念，建立用气动导纳表示的抖振力功率谱密度。基于随机振动理论，采用振型分解法求得结构水平、垂直等响应的均方差，最后用峰值系数建立响应方差与结构最大抖振响应的关系^[1,2]。Davenport 抖振理论贡献主要在于提出了气动导纳的概念，从而使抖振力计算模型更加符合实际情况。对于自激力，该理论只考虑了气动阻尼的影响而忽略了气动刚度的影响以及气动耦合效应。Scanlan 在颤振导数试验方法与脉动风谱统计方法的基础上，建立了脉动风作用下悬索桥、斜拉桥抖振响应的 Mode-by-Mode 方法^[62,63]，以后又经 Anurag Jain、Nicholas P. Jones、Hiroshi Katsuchi 等将其发展为多振型耦合抖振理论^[8,9,47]，该理论较全面地考虑了气动阻尼与气动刚度对桥梁抖振响应的影响，即考虑了自激力对抖振的影响，因而称为颤抖振理论。Scanlan 没有考虑气动导纳的影响，后 Hiroshi Katsuchi 对其进行考虑气动导纳影响的修正，并将其应用到明石海峡桥(AKASHI-KAIKYO)的抖振响应分析中^[47,48]。

Davenport 抖振力模型用阻力、升力与升力矩表示如下：

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(2C_D \frac{u(t)}{U} + C'_D \frac{w(t)}{U} \right) \quad (1-1a)$$

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(2C_L \frac{u(t)}{U} + (C'_L + C_D) \frac{w(t)}{U} \right) \quad (1-1b)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left(2C_M \frac{u(t)}{U} + C'_M \frac{w(t)}{U} \right) \quad (1-1c)$$

式中 ρ 为空气密度； C_L 、 C_D 、 C_M 分别为升力、阻力与升力矩系数； C'_L 、 C'_D 、 C'_M 分别为升力、阻力、升力矩系数对攻角 α 的导数，这些都可在风洞试验室由测力试验测得； U 为平均风速， u 、 w 分别为水平向及垂直向的脉动风速。

Scanlan 等通过基于试验的自激力模型来修正结构的刚度矩阵与阻尼矩阵，在 Davenport 抖振模型的基础上进一步考虑了结构与气流之间的相互影响。其自激力表达式如下：

$$L_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) (KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{P}}{U} + K^2 H_6^* \frac{P}{B}) \quad (1.2a)$$

$$D_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) (KP_1^* \frac{\dot{P}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{P}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B}) \quad (1.2b)$$



$$M_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) (KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B}) \quad (1.2c)$$

其中, ρ 为空气密度; U 为平均风速; $B = 2b$ 为桥面宽度; $K = \omega B/U$, 为折减频率, ω 为振动圆频率; h 、 p 、 α 分别为主梁的竖向、横向和扭转位移; 上点标表示对时间的偏导数; H_i^* 、 P_i^* 、 A_i^* ($i=1\sim 6$)是颤振导数, 均为折减频率 K 的函数, 与桥梁断面的几何构形和来流有关。

基于频域内的抖振响应方差具体求解方法有 SRSS^[69]法、CQC 法和虚拟激励法^[52,99,133]三种。SRSS 法忽略了模态与模态之间的耦合效应, 因而与 CQC 法相比, 其计算量大大减小, 但随着桥梁跨度的增大和断面的流线化, 在大气来流的作用下将使得桥梁结构的振动频率更加接近且振动模态相互耦合, 这种模态气动耦合效应将显著地影响大跨度桥梁的抖振响应。有研究表明, 忽略模态气动耦合效应的传统抖振分析方法的结果将明显偏低。CQC 法考虑模态与模态之间的耦合, 是一种精确的计算方法, 一般来说其计算量相当大, 但丁泉顺^[74]基于结构的固有模态坐标, 提出了用于大跨度桥梁耦合抖振响应分析的有限元 CQC 方法, 可以考虑自然风的任意风谱和空间相关性以及桥梁结构抖振响应的多模态和模态耦合效应, 且计算效率较高; 虚拟激励法与 CQC 法及 SRSS 法相比, 其求解效率大大提高, 而精度却是与 CQC 法完全相同。

Davenport 抖振理论与 Scanlan 颤抖振理论是基于固有模态的频域分析方法, 对于线性结构, 这些方法都是简单实用而高效的方法, 因而长期以来大跨度桥梁结构的抖振响应分析都是在频域内进行的。频域分析方法的局限性在于不能考虑结构的非线性因素以及气动力非线性因素。因此, 有必要寻找一种行之有效的方法来尽可能全面地研究和分析这些因素的影响。从研究方法本身的角度来说, 时域分析方法不失为一个有力的研究工具。Y. K. Lin^[95-98]、Bucher & Lin^[22-25]等用随机振动稳定性方法研究紊流对桥梁颤振稳定性和随机抖振响应的影响时就是基于了时域的分析方法。由于该方法的数学复杂性和对大气紊流模型的理想简化, 因而应用非常有限。Agar^[10]开始研究均匀流场中桥梁结构的颤振问题时, 也尝试了时域的分析方法, 终因计算上的原因而放弃了该方面的研究。

随着计算机软硬件技术的飞速发展, 使计算速度和计算量的问题将越来越容易解决, 许多以前无法计算的问题现在变得已非常简单。在此形势下, 时域分析方法的优势也就开始表现出来而成为各种工程领域研究中的新兴方向之一。

针对悬索桥的颤振问题, Scanlan^[66]将 Wagner^[74]在航空中提出的经典阶跃函数(indicial function)的概念引入到桥梁中, 提出了用阶跃函数来描述在任意运动时作用于桥梁节段的气动力表达式。其最终表达可以写成(以纯扭转运动为例)

$$M_{\alpha} = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \frac{dC_M}{d\alpha} \left[X_{M\alpha} \dot{\alpha}(s) + \int_0^s \Phi_{M0}(s-\tau) \dot{\alpha}(\tau) d\tau \right] \quad (1.3)$$

其中, $s = Ut/B$ 为无量纲时间;

$\frac{dC_M}{d\alpha}$ 为静力扭转系数对扭转角的导数;

$X_{M\alpha}$ 为待定系数;

$\Phi_{M0}(s)$ 为气动力阶跃函数, 该阶跃函数在航空中可以用 Wagner 函数表示。

在桥梁分析中, Scanlan 先仿照 Wagner 函数构造了阶跃函数表达形式如下(以 $\Phi_{M0}(s)$ 为例):

$$\Phi_{M0}(s) = 1 + C_1 e^{C_2 s} + C_3 e^{C_4 s} \quad (1.4)$$

其中, C_1, C_2, C_3, C_4 为待定系数。

式(1.3)同样满足均匀流下结构作简谐振动的情形, 因而均匀流中式(1.3)与式(1.2)是等价的。根据这一关系, 运用最小二乘拟合技术, 便可确定这五个待定系数, 从而得到式(1.3)



的具体表达形式。类似地可以获得弯扭耦合运动情况下的气动力计算公式。

用阶跃函数表达气动力的一个优点在于它是纯时域的表达式,因此它既可以通过变换应用到频域分析,也可直接用于时域求解。事实上, Scanlan 提出阶跃函数的初衷在于使之与时域化的抖振力相配合,用于求解抖振响应。因为在实际抖振情况下,式(1.2)表达的线性自激力从实际上讲是不成立的(因为没有有一个确定的频率)。从理论上讲,只要我们能获得各自由度上的颤振导数,则对应自由度对气动力的贡献都可用阶跃函数的形式来表达。然而由于 Wagner 函数自身的一些特点,致使气动力耦合项的阶跃函数表达式的确定比较困难。因而在 Scanlan 的例子中他仅分析了单自由度扭转的情况。

参考阶跃函数表达气动力的思想, Bucher & Lin^[25]和 Li & Lin^[60]提出了一种以单位脉冲响应函数表示的自激力模型,利用该模型可以完善地描述三个方向的耦合气动力。其基本表达式如下(以弯扭耦合为例)

$$\left. \begin{aligned} L_{se}(t) &= L_h(t) + L_\alpha(t) = \int_{-\infty}^t f_{Lh}(t-\tau)h(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^t f_{L\alpha}(t-\tau)\alpha(\tau)d\tau \\ M_{se}(t) &= M_h(t) + M_\alpha(t) = \int_{-\infty}^t f_{Mh}(t-\tau)h(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^t f_{M\alpha}(t-\tau)\alpha(\tau)d\tau \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

式中, $f_{Lh}(t-\tau)$, $f_{L\alpha}(t-\tau)$, $f_{Mh}(t-\tau)$, $f_{M\alpha}(t-\tau)$ 分别为对应自由度方向的单位脉冲响应函数。在准定常气动力理论的基础上, Lin 借助于航空中非定常气动力的 Roger 有理函数,推导出了如下的气动力表达式

$$M_\alpha(t) = \rho U^2 B^2 \left[C_1 \alpha(t) + C_2 \frac{B}{U} \dot{\alpha}(t) + \sum_{k=3}^n C_k \int_{-\infty}^t e^{-\frac{d_k U}{B}(t-\tau)} \dot{\alpha}(\tau) d\tau \right] \quad (1.6)$$

式中 C_1, C_2, C_k, d_k 为待定系数,可通过对实测颤振导数的拟合确定。

从本质上来说,用脉冲响应函数表达的气动力公式与阶跃函数表达的气动力公式是一致的。但利用脉冲响应函数表达式时,研究人员可以容易地寻找到全面描述耦合气动力的具体表达形式。当时, Lin 提出用脉冲响应函数描述自激力的目的是为了研究紊流对桥梁颤振的影响。后来,在用时域分析方法研究桥梁结构的颤抖振问题时,不少学者都沿用了这种自激力的处理方式。

Kovacs^[55]对挪威主跨为 425m 的 Helgeland 桥风振响应进行了时程分析,开辟了桥梁风振响应分析的新思路。他在分析中用了一种简化的谐波合成法(WAWS)模拟作用于桥梁上的脉动风速,并且认为用相对速度计算的脉动风压可以描述气动阻尼对结构气动响应的影响。在此基础上, Kovacs 还较为细致地考虑了结构中钢筋混凝土的材料非线性和开裂情形,对桥梁结构进行了风载下的极限状态分析。

Boonyapinyo & Miyata^[30]采用了 Roger 形式的非定常气动自激力模型,对主跨 1991m 的明石海峡大桥(Akashi Kaikyo Bridge)进行了抖振时程分析。他应用了一种多维的自回归滑动平均(ARMA)模型模拟桥梁上的随机风速,同时综合了状态空间方法计算桥梁结构的抖振时程响应。由于基于结构的固有模态坐标,他忽略结构非线性对动力响应的影响,仅考虑了该桥的静风非线性效应。Chen & Matsumto^[32,33]采用了一种自回归模型生成桥面主梁上的随机脉动风速,并将气动自激力、抖振力、气动导纳和联合接受函数都表示成有理函数形式。他也主要是从模态坐标方面讨论了桥梁结构颤振和抖振响应的时域分析问题,并将时域分析的结果与频域结果进行了比较。

基于 Bucher & Lin^[25]和 Li & Lin^[60]提出的自激力时域模型,近几年一些学者从时域的角度研究了大跨度桥梁结构的颤抖振响应问题。我国学者周述华^[147]、刘春华^[134]、曹映泓^[119]和丁泉顺^[120]对大跨度桥梁结构非线性颤抖振时域分析进行了较为深入的研究。周应用自回归(AR)模型模拟桥梁上的随机脉动风速,抖振力按 Davenport 的准定常理论公式计算并考虑了气动导纳的修正。对于自激力,他采用了 Scanlan 提出的阶跃函数表达式并且忽略了耦合项



的影响。在刘的研究中，互相关随机风速的模拟沿用了 Kovacs 的简化谐波合成法。抖振力的计算也按考虑气动导纳修正的 Davenport 理论公式进行，但自激力则采用的是 Lin 的脉冲响应函数表达式。他推导了水平、竖向和扭转三个方向的耦合自激力，但在非线性动力响应分析时未考虑气动耦合项。曹应用特殊情况下谱矩阵的显式分解，大大提高了谐波合成法的效率，成功地模拟了大跨度桥梁沿水平主梁的脉动风速。在非线性抖振时程分析中，他考虑了自激力气动耦合项的影响。但由于改进后的随机模拟方法无法模拟三维空间的脉动风速，因而他的研究仅限于对桥面主梁来进行，不能分析桥梁其他各部分的紊流效应。丁首先通过对谱分解矩阵引入插值近似，减少谱分解的次数，改进了平稳高斯随机过程模拟的谐波合成方法，从而提高计算效率，并节省内存花费。并通过对比改进的谐波合成法与 AR(p)线性滤波法发现，改进方法不但模拟随机样本的精度明显高于 AR(p)线性滤波法，而且具有更快的计算速度，适合于大跨度桥梁三维空间脉动风场的模拟。其次，讨论了桥梁结构上风荷载在时域中的处理问题和在风荷载作用下桥梁结构的非线性颤抖振时程分析问题。从时域的角度较为全面地分析和研究大跨度桥梁的颤抖振问题，考虑缆索和桥塔上的脉动风荷载，结构的几何非线性和气动荷载非线性等因素的影响。

1.4 风-车-桥系统耦合振动研究概况

风-车-桥系统耦合振动的大部分研究正在进行或刚刚起步^[15]，最初进行的风-车-桥系统耦合振动研究主要集中于铁路桥梁，葛玉梅^[121]以芜湖长江大桥及高速列车为例，对车-桥系统进行了节段模型风洞试验研究。通过试验确定了桥上有车时，桥本身的气动力参数，以及列车在桥上时，列车本身的气动力参数，用计算机模拟了列车与桥梁所受的风荷载，桥梁和车辆的静风荷载采用三分力表达，脉动荷载采用 Scanlan 的准定常表达，采用时域积分法对风作用下斜拉桥的车-桥耦合振动进行了分析^[122]。分析中模拟的脉动风场未考虑空间相关性，风荷载中未考虑自激力的影响。

郭向荣、曾庆元^[123]提出一种在风荷载作用下对列车桥梁时变系统空间振动响应进行仿真计算的方法。针对京沪高速铁路南京长江斜拉桥方案。考虑脉动风沿桥梁纵向的空间相关性，随机模拟出沿桥跨若干点处的风速时程曲线，采用时域分析法对脉动风作用下高速列车通过该桥时的车桥时变系统动力响应进行较详细的分析。从安全性与舒适性两方面计算分析该桥列车行车的临界风速，得出了该桥能确保安全与舒适行车的预警风速和能确保安全行车的封闭桥梁风速。但分析中未模拟主梁的竖向脉动风速场，且桥梁风荷载中也未考虑自激力的作用，此外，桥梁和车辆的气动参数未考虑桥梁和车辆间相互的气动影响。

夏禾、Y.L. Xu 等^[146]对香港青马大桥在风和列车荷载同时作用下的振动特性进行了分析，分析中基于模拟的脉动风速场，得到桥梁的模态抖振风力和模态自激风力，较真实地模拟了桥梁的风致振动，采用模态综合法求解车桥动力响应，研究了桥梁风致振动对车桥耦合振动特性的影响。因列车从加劲梁内部通过，故未考虑风对列车的作用，此外，采用基于振型函数的模态综合法难以考虑桥上列车质量动态分布引起的结构自振特性的变化以及多种非线性因素的影响。郭薇薇、夏禾、Y.L. Xu^[124]根据实测空气动力参数和颤振导数模拟产生抖振力和自激力时域随机风荷载作为输入激励，建立了风-列车-桥梁体系动力分析模型，以武汉天兴洲大跨度悬索桥方案为例，分析了风作用下桥梁和车辆的动力响应。

李永乐^[131]将风、高速列车、桥梁三者作为一个相互作用的系统，提出了一种较为完善的风-车-桥系统非线性空间耦合分析模型。该模型综合考虑了桥梁的抖振响应、车-桥耦合振动、桥梁静风位移对轨道不平顺的影响、风荷载对车辆的影响、车辆经过时对桥梁气动参数的影响、桥梁绕流对车辆气动性能的影响、结构非线性和气动非线性的影响等。该模型



较真实地反映了风与车辆及桥梁间的气动耦合关系、车辆和桥梁间的几何耦合关系和力学耦合关系。

已经开展的风-汽车-桥梁系统耦合振动主要研究成果有，W.H.Guo, Y.L.Xu^[89,100,101]提出了时域内分析侧风作用下车辆与斜拉桥耦合振动系统分析框架，首先采用了一个更加合理的、符合实际并能较全面考虑众多因素的侧风作用下车辆动力分析模型。与传统的汽车-桥梁相互作用不同，引入了一个特殊阻尼器，用来考虑车辆轮胎与桥面侧向可能发生的侧滑，阻尼器的阻尼系数依赖于车桥系统的未知运动有关。通过对给定的路面粗糙度功率谱进行逆傅立叶变换来模拟随机路面粗糙度，采用全计算机集成的方法组集了侧风作用下具有特殊阻尼器的汽车-桥梁运动方程。

C.S. Cai, S.R. Chen^[35,76]也提出了一种侧风作用下车辆与桥梁耦合振动系统分析框架。这个风-汽车-桥梁分析模型在处理车桥系统位移协调条件时假定车轮与桥面之间始终保持接触，车轮与桥面之间不存在侧向相对运动。这样的分析模型可以预测桥梁各个方向的响应，而对于车辆，仅能分析竖向、摇头和点头方向的响应。风-汽车-桥梁耦合振动分析中得到的车辆竖向、摇头和点头方向的动力响应将被用在局部事故分析模型中而车辆的侧向和偏转响应也将在局部事故分析模型中计算得到。局部事故分析模型主要集中于摩擦力作用和车辆与桥梁侧向相对运动的模拟。桥梁侧向振动对车辆动力响应的影响主要通过将桥梁侧向加速度作为基础激励对车辆模型进行输入，如同地震波的激励。

正是由于上述富有成效的研究，使风-汽车-桥梁系统耦合振动研究中的各个关键环节不断完善和发展，也给作者的研究给予了很大启发和帮助，如本研究中的两轴和三轴车辆模型正是基于W.H.Guo, Y.L.Xu^[89,100,101]所发展的能够考虑车轮与路(桥)面侧滑的车辆模型。

1.5 本文的主要研究内容

第一章简要回顾了风-车相互作用、车桥耦合振动、大跨度桥梁抖振频域、时域分析以及风-汽车-桥梁系统耦合振动研究概况。

第二章侧重于对现有抖振时域理论的实例验证。在杭州湾跨海大桥全桥模型风洞试验中，对抖振位移和桥塔内力进行了实测。采用改进的谐波合成方法实现了三维空间脉动风场的模拟，风场模拟时采用风洞实测的风谱和空间相关系数。将试验值与计算值进行了对比并进行了详细的参数分析，从中得出一些结论。

第三章首先介绍了箱式货车、桑塔纳、一汽佳宝风洞测力试验。然后详细介绍了风-汽车相互作用理论：针对两轴四轮、三轴六轮车辆，考虑车辆轮胎与地面之间侧向位移的独立自由度，分别建立了17个和23个自由度的空间分析模型，推导了车辆系统的运动方程。将路面粗糙度假设为零均值平稳高斯随机过程，采用逆傅立叶变换模拟了路面粗糙度样本。在综合考虑路面粗糙度、车辆所受风荷载和车辆悬挂系统的基础上，编制了风-汽车相互作用分析程序，分别给出了风致车辆事故模型和汽车行驶平顺性评价方法。研究了路面粗糙度、车辆悬挂系统以及雨、雾、冰、雪等主要路面状况对行车安全的影响，获得了侧风作用下典型车辆的安全行车风速标准。此外，也对侧风作用下行驶在道路上车辆的驾驶舒适性以及路面粗糙度、平均风速以及车速对驾驶舒适性的影响进行了研究。

第四章采用分离迭代法编制了汽车-桥梁系统空间耦合振动分析程序，通过算例验证了程序的可靠性。以杭州湾跨海大桥为例，运用所编制的程序详细研究了车辆数目、车辆间距、不同车道、车辆相向行驶、不同路况、以及不同车速时车流通过桥梁时桥梁的动力响应和冲击系数，并对车辆通过桥梁的舒适性进行了评价。此外，还研究了不同路况和不同车速下车流通过润扬长江公路大桥时桥梁的动力响应和冲击系数，并对斜拉桥和悬索桥在车流通过时