

Qiaoliang

Chengzaili Jianding Yu

Qiaoliang Jiagu Sheji

桥梁承载力鉴定  桥梁加固设计

蒋泽汉 江涛  编著



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

# 桥梁承载力鉴定与桥梁加固设计

蒋泽汉 江涛 编著



西南交通大学出版社  
· 成 都 ·



-----  
**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

桥梁承载力鉴定与桥梁加固设计 / 蒋泽汉, 江涛编  
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2011.3  
ISBN 978-7-5643-1123-0

I. ①桥… II. ①蒋…②江… III. ①桥—承载力—  
鉴定②桥—加固 IV. ①U441②U445.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 039156 号  
-----

**桥梁承载力鉴定与桥梁加固设计**

**蒋泽汉 江涛 编著**

|         |   |
|---------|---|
| 责任编辑    | 张 波   |
| 封面设计    | 墨创文化  |
| 出版发行    | 西南交通大学出版社<br>(成都二环路北一段 111 号)                                     |
| 发行部电话   | 028-87600564 028-87600533   |
| 邮 政 编 码 | 610031  |
| 网 址     | <a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a> |
| 印 刷     | 成都勤德印务有限公司  |
| 成 品 尺 寸 | 185 mm×260 mm   |
| 印 张     | 26.125  |
| 字 数     | 648 千字  |
| 版 次     | 2011 年 3 月第 1 版   |
| 印 次     | 2011 年 3 月第 1 次   |
| 书 号     | ISBN 978-7-5643-1123-0  |
| 定 价     | 49.80 元   |

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

本书是依托建设部重点科技项目“用动态法快速鉴定桥梁承载力及桥梁加固设计”的研究成果及大量的加固设计工程实践编写而成。研究项目已通过部级鉴定并获得部级勘察设计一等奖。书中的重点内容已在《中国公路学报》、《应用力学学报》及《振动、测试与诊断》等期刊发表，大部分发表的论文被选入《中国科技文库》及《中国运输全书》。

全书为两篇。第一篇的是桥梁承载力鉴定，主要内容是用动态方法快速鉴定既有桥梁的承载能力。书中对理论分析和试验检测的方法做了比较详尽的叙述，并提出了承载力的鉴定方法。第二部分为桥梁加固设计，针对我国公路旧桥常用加固方法，在加固原则、桥梁加固中应用的新工艺和新材料、加固设计方案、桥梁各分部结构的加固设计方法、加固施工方法及质量控制等方面做了比较详尽的介绍和分析。并对不同类型的桥梁加固设计方法做了介绍。例举了各种类型桥梁的加固设计实例供读者参考。本书在编写刚完成时发生了 5·12 汶川大地震，作者又补充了桥梁抗震加固设计的内容和计算分析实例。本书的作者期待对从事旧桥加固设计工作的技术人员有所裨益。

作者十分感谢撰写本书所依托的科研项目的众多参与人，他们在科研工作中付出了大量的精力和辛勤的劳动。其中主要的人员有华中科技大学的杨叔子院士、谢月云教授、谌刚教授、成都市城市建设科学研究所的沈仁富高级工程师等。在这里对他们表示最崇高的敬意和诚挚的感谢。

由于作者学识水平有限，书中不当或错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2011 年 2 月

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一篇 桥梁承载力鉴定 .....              | 1  |
| 1 概 述 .....                    | 3  |
| 1.1 前 言 .....                  | 3  |
| 1.2 用动态试验分析法鉴定桥梁承载力的主要内容 ..... | 3  |
| 1.3 模型梁的破坏性试验 .....            | 4  |
| 1.4 全桥试验 .....                 | 6  |
| 1.5 荷载模型的研究 .....              | 6  |
| 1.6 非线性外推及桥梁承载力计算 .....        | 7  |
| 1.7 桥梁承载力的评价方法 .....           | 10 |
| 1.8 结 论 .....                  | 11 |
| 2 模型桥设计及模型律分析 .....            | 13 |
| 2.1 建立模型桥的意义和作用 .....          | 13 |
| 2.2 模型桥设计的依据和设计原则 .....        | 14 |
| 2.3 模型桥设计中相似参数的确定 .....        | 14 |
| 2.4 模型桥设计计算 .....              | 18 |
| 2.5 验证和结论 .....                | 24 |
| 3 桥梁有限元分析及结构动力学模型修改 .....      | 26 |
| 3.1 概 述 .....                  | 26 |
| 3.2 单梁有限元模型的建立 .....           | 26 |
| 3.3 单梁在加载下的动力分析 .....          | 27 |
| 3.4 模型桥的动力特性 .....             | 29 |
| 3.5 实桥分析 .....                 | 31 |
| 3.6 结构动力学模型修改 .....            | 37 |
| 4 单梁静动力试验及分析 .....             | 42 |
| 4.1 概 述 .....                  | 42 |
| 4.2 试验模态分析的基本概念 .....          | 43 |
| 4.3 进行试验模态分析的方法 .....          | 46 |
| 4.4 模态试验的激励 .....              | 47 |
| 4.5 静荷加载方法 .....               | 47 |
| 4.6 试验内容及方法 .....              | 48 |
| 4.7 结 论 .....                  | 53 |

|                   |                     |            |
|-------------------|---------------------|------------|
| 5                 | 全桥静动力试验及分析          | 55         |
| 5.1               | 概述                  | 55         |
| 5.2               | 模型桥试验               | 56         |
| 5.3               | 模型桥脉冲测量             | 57         |
| 5.4               | 原型桥试验               | 59         |
| 5.5               | 结论                  | 63         |
| 6                 | 桥梁在运行状态下动力参数的研究     | 64         |
| 6.1               | 概述                  | 64         |
| 6.2               | 基本原理                | 65         |
| 6.3               | 具体公式推导              | 67         |
| 6.4               | 试验及结果               | 74         |
| 6.5               | 结论                  | 79         |
| 7                 | 汽车对桥梁作用力的荷载模型       | 81         |
| 7.1               | 概述                  | 81         |
| 7.2               | 汽车-桥梁系统及其相互作用       | 81         |
| 7.3               | 汽车、桥梁系统的动态模型        | 82         |
| 7.4               | 确定性荷载               | 83         |
| 7.5               | 随机荷载                | 86         |
| 8                 | 桥梁动力响应的非线性计算及其承载力评定 | 90         |
| 8.1               | 概述                  | 90         |
| 8.2               | 结构静、动力参数在加载下的非线性特性  | 90         |
| 8.3               | 桥梁极限参数的非线性计算        | 94         |
| 8.4               | 桥梁承载力的评价方法          | 99         |
| 8.5               | 计算程序流程图             | 100        |
| <b>第二篇 桥梁加固设计</b> |                     | <b>105</b> |
| 9                 | 绪论                  | 107        |
| 9.1               | 概述                  | 107        |
| 9.2               | 旧桥加固设计采用的材料         | 108        |
| 9.3               | 旧桥加固设计的基本原则         | 112        |
| 9.4               | 旧桥加固的基本内容           | 113        |
| 9.5               | 桥梁加固的设计方法           | 116        |
| 10                | 旧桥表层缺陷加固设计          | 118        |
| 10.1              | 概述                  | 118        |
| 10.2              | 混凝土桥梁结构表层缺陷的修补      | 119        |
| 10.3              | 混凝土桥梁结构表层修补的常用方法    | 123        |

|      |                  |     |
|------|------------------|-----|
| 10.4 | 混凝土桥梁表面裂缝的修补技术   | 127 |
| 11   | 旧桥桥面系的加固设计       | 139 |
| 11.1 | 概 述              | 139 |
| 11.2 | 混凝土桥面板的加固设计      | 139 |
| 11.3 | 桥面铺装层的加固设计       | 141 |
| 11.4 | 桥面伸缩缝的加固设计       | 145 |
| 11.5 | 栏杆及排水设施的加固       | 145 |
| 11.6 | 桥头搭板及引道的加固       | 148 |
| 12   | 旧桥上部结构的加固设计      | 149 |
| 12.1 | 概 述              | 149 |
| 12.2 | 混凝土梁式桥的加固设计      | 151 |
| 12.3 | 拱桥的加固设计          | 171 |
| 12.4 | 钢管混凝土拱桥的加固设计     | 181 |
| 12.5 | 斜拉桥的加固设计         | 184 |
| 13   | 旧桥下部结构及地基基础的加固设计 | 202 |
| 13.1 | 概 述              | 202 |
| 13.2 | 墩台基础的加固设计        | 205 |
| 13.3 | 墩(台)的加固设计        | 214 |
| 13.4 | 墩台基础的改建          | 216 |
| 14   | 桥梁抗震及抗震加固        | 222 |
| 14.1 | 地震震级与烈度          | 222 |
| 14.2 | 地震对桥梁的危害         | 226 |
| 14.3 | 桥梁抗震设防标准         | 238 |
| 14.4 | 桥梁抗震分析           | 245 |
| 14.5 | 桥梁抗震加固设计与计算      | 258 |
| 15   | 桥梁加固设计实例         | 274 |
| 15.1 | 梁 桥              | 274 |
| 15.2 | 拱 桥              | 311 |
| 15.3 | 斜拉桥、悬索桥及城市立交     | 331 |
| 15.4 | 桥梁下部结构加固         | 349 |
| 15.5 | 桥梁抗震加固分析实例       | 379 |
|      | 参考文献             | 408 |

# 第一篇

## 桥梁承载力鉴定





# 1 概 述

## 1.1 前 言

随着国民经济的发展，公路和城市道路运输量和货物周转量大幅度增长，车辆的载重吨位和车流密度增长得相当迅速。我国除近年修建的桥梁按较大吨位的荷载设计外，多数桥梁均按汽车-15级及以下的较轻型荷载设计。这些桥梁在大吨位、高流量车辆荷载的冲击下，面临严峻的考验，已建桥梁是否能够适应运输发展的需要已成为迫切需要解决的问题。为了确保行车安全和运输的畅通，必须对已有按低荷载设计的桥梁作承载力的鉴定和分析。

我国沿用至今的桥梁设计方法是静力设计法，即将标准荷载的车辆，按最小安全距离停在桥上，作为设计荷载。这与桥梁实际工作受力状况有较大差异。在部分桥梁（特别是大跨桥梁）设计中用冲击系数来考虑对桥梁的动态作用。但仅用单一的冲击系数远远不能反映桥梁在行驶车辆作用下的受力特性。在以往的设计中，为使工程安全可靠，均采用较大的安全系数，也就是说已有桥梁尚有一定的承载潜力没有发挥出来。但是这种安全储备到底有多大，是否能适应现在交通不断发展的需要呢？在城市这样人口、车辆高度密集的地区，进行桥梁承载力鉴定的作用就更加突出。

以往沿用的桥梁荷载试验的方法主要采用静力试验。即用多辆载重汽车满载后按一定间隔布置在桥上，用千分表、挠度仪、引伸仪和应变计等测量桥梁关键部位的位移、变形和应变，来判定桥梁的受力状态和承载能力。但是，上述方式不但耗资巨大，而且需要大量人力和时间。如我国汉江某桥的一次荷载试验即耗资数十万元，动员了数十辆大吨位载重汽车，工作人员达数十人。不但如此，静力试验也难于确定桥梁实际的极限承载能力。研究简便的、符合桥梁工作状态的试验分析方法就成了当务之急。目前国内外都投入了一定的人力和物力进行这方面的研究。但由于此项工作难度较大，对旧桥极限承载力的鉴定尚处于研究阶段。

## 1.2 用动态试验分析法鉴定桥梁承载力的主要内容

公路和与城市桥梁的主要功能是通行各种类型的汽车。桥梁承受的荷载除车辆的自重外，还有车辆在桥上行驶时所产生的动荷载。此外尚受到强风、地震等其他动荷载的作用。为保证桥梁工作的可靠性，必须对桥梁进行动力分析，研究其动力特性。桥梁在动态外力的作用下产生动力响应，其结果是使构件产生动应力。桥梁在超限动应力的作用下，就会危及结构的完整性，使结构产生破坏，即所谓动强度问题。另一方面动力响应可能引起过大的动态变形和加速度，使桥梁共振失稳而破坏，即所谓刚度和稳定性问题。因而，桥梁承载力鉴定的中心问题就是桥梁在动荷载作用下的强度、变形、刚度和稳定的问题。在桥梁动力特性研究的基础上用动力试验方法确定各项极限参数，以进行极限承载力和使用寿命的估计和预测，从而提出合理和有效的加固措施和方案，提高原有桥梁的承载能力。

用动态试验分析法快速鉴定桥梁承载能力的主要内容为：

- (1) 进行桥梁结构的有限元分析，通过计算得到各项动力参数：质量矩阵  $M$ ，刚度矩阵  $K$ ，特征向量（振型矩阵  $\Phi$ ）和特征值（模态频率  $\omega$ ）等。
- (2) 对桥梁进行试验模态分析，即用动力试验的方式，通过计算机分析计算得到桥梁的动力参数，如各阶模态振型、模态频率及模态阻尼等。由于分析中采用质量规范化的方式，因而模态频率即代表了广义刚度。用正交性校验试验的可靠性。
- (3) 试验数据和有限元分析数据进行对比。由于有限元分析得到动力参数是耦合的振动微分方程的系数矩阵，因而它是满秩的。为了与由桥梁动力试验得到的解耦的模态微分方程的系数矩阵进行比较，必须用模态坐标（正规坐标）进行解耦运算。
- (4) 在必要时（例如用精确的非线性分析计算方法计算响应时）用测试得到的参数作为目标函数对有限元计算结果进行结构动力学修改。
- (5) 在线性非时变结构系统中，其动力参数是常量，不随荷载和时间而改变。对于混凝土这一类混合的非匀质材料，其动力参数在结构受大荷载作用时特别是在过荷的极限阶段，其动力参数和受力大小，成非线性变化的关系（即动力参数不为常量）。这种关系无法用理论分析得到，为了探知其非线性变化规律，必须进行结构的破坏性试验，并须有一定数量的平行试验方可探求变化规律。大量进行足尺的实体桥梁的破坏性试验是不可能的，因而必须采用模型试验。为此，必须进行结构动态模型率的设计，制作小尺寸的模型梁，并进行小尺寸模型的破坏试验，求得动力参数  $K$ 、 $\omega$ 、 $D$  的非线性变化规律。并运用模型率推算出实体结构的变化规律。
- (6) 用材料试验确定混凝土弹性模量随荷载作非线性变化的规律。
- (7) 用时序的分析法（AR、ARMA）探求桥梁在运行状态下进行试验模态分析的方法。由于桥梁动态试验虽然比静力试验简便得多，但在做现场试验时，不仅要安装较为笨重的脉冲加载装置，而且要中断交通。为了进一步简化试验，我们进行了这方面的分析研究，并且在信号处理和分析中引入人工智能（专家系统），使试验人员可以按照事先设定的人工智能，自动地选择分析方法。
- (8) 采用非线性外推的方法，进行动力参数的外推计算。
- (9) 分析计算汽车对桥梁作用荷载的数学模型。
- (10) 分析计算桥梁控制截面及部位在设计荷载作用下的最大变形和最大应力。
- (11) 采用桥梁极限承载力的评定方法，对桥梁承载力进行鉴定。

### 1.3 模型梁的破坏性试验

模型梁的破坏性试验的主要内容为通过大型桥梁模型试验，对理论方法（或试验理论分析）进行验证；对测试、数据采集控制和计算系统的实用性、可靠性进行验证；对桥梁承载力鉴定方法进行验证。为简化分析过程和减少边界条件，为全桥结构分析提供子结构的动态参数，必须对组成桥梁体系的主要结构件单 T 梁进行静、动态试验和分析。试验分析的结果可以求得单 T 梁的模态参数。

实体的桥梁结构是相当庞大的，为求得其动态响应必须对实桥进行大能量的激励，这通常是

不方便的,而且难于准确确定激励动荷载的定量变化规律。国内外目前已开始研究环境激励。但是,环境激励的特征及试验分析方法,必须用传统的激励方法进行对比。因此单梁试验中,必须在各种试验条件下,采用不同激励方式,进行对比试验。将不同类型试验分析得到的模态参数进行对比、分析研究,以探求不同激励法对试验结果的影响,评价其可靠性。

在结构动力试验后,对采集到的测试数据进行信号预处理,并根据分析方法的要求进行各种数学变换或建立参数模型。再用不同的方法进行后分析处理,识别结构的模态参数。随机脉动(环境)激励方式研究的目的是建立结构时序参数模型,即 AR、ARMA 模型,再由该模型识别模态参数。由于建立桥梁参数模型尚无成功经验可资借鉴,必须采用传统激励和传统的分析方法进行验证。分析的方法为:①用较成熟的分析软件 ANSYS 进行分析;②采用 CRAS 软件包中的传统频域方法(拟合法等)进行分析、比较,评价其可靠性。

现行的桥梁承载能力的评定标准,是采用静荷载试验作为依据的。但实际的桥梁除自重(恒载)外,作用在其上的荷载均为动荷载(如风、地震、地面脉动及运动车辆),尽管桥梁在动荷载作用下的受力情况与静荷载有较大的差别,但由于科学技术发展水平的限制,目前尚不可能建立成熟的理论分析和试验鉴定的动态方法。采用动态试验分析鉴定桥梁承载能力的中心议题,就是寻求桥梁在承受动荷载时的动力参数可能达到的极限值。但是,为了能和现行设计理论相配合和具有普遍说服力,必须比照静荷载试验的结果,来推断动态方法的合理性和可靠性。因而单 T 梁的静荷载试验,特别是研究单 T 梁在大荷载作用下,处于弹塑性状态时非线性特征(以便在作非线性外推时,提供依据)就显得十分重要了。因此,在单 T 梁的试验项目中进行了不同等级的逐级加载的静荷载试验,在试验中对单混凝土梁的钢筋应力、混凝土应力、支座反力等进行全面观测,重点是结构在大荷载作用下的非线性特征(如中性轴变化情况、残余变形,及应力的非线性变化规律等),对测试数据和理论分析进行了对比。

动态试验分析鉴定桥梁承载能力的中心问题是采用常规动荷载,进行结构动力试验,求得在较大荷载作用下的响应,进行参数识别和系统识别,探求结构动力特性的一般规律和数学模型。并根据理论分析和在试验中求得的结构的某些非线性特征(如阻尼和刚度的非线性特征),利用非线性外推法,探求结构在极限状态下的动力参数值,由此计算在动荷载作用下结构内力及变形的极大值,推求相应的最大荷载量。因而在单梁试验中的主要项目是在不同等级的静荷载作用下探求结构动力参数的非线性变化规律,外推结构极限承载力。在试验中为了不改变结构的力学约束状态,静荷载采用了重物加载和柔(性弹簧)刚度加载两种方式进行对比。

进行单 T 梁的破坏性试验,研究在结构破坏阶段的内力变化规律和前述的外推极限值进行了对比,修正外推方法,使之更符合实际情况。

对各次试验和结果进行对比分析均有较好的平行试验准确度。各次试验均进行了正交性检验,其参数(不包括模态阻尼)矩阵的对角项与非对角项元素对比,非对角元素的数量均在 10% 以下,这对于像钢筋混凝土这一类结构来说已经是相当满意的结果了。各动力参数非线性的变化规律明显,在各级荷载下的各阶振型曲线(前 4 阶)均相当清晰。由此可以说明,我们采用的柔刚度加载系统是非常成功的。加载系统不但没有改变结构的力学体系,而且还避免了(由于重物加载引起的)质量附加的影响,这在国内外尚属独创。

## 1.4 全桥试验

室内模型桥空载动力试验和加载动力试验均采用 SIMO (单点激励, 多点测响应)。激励的方式采用了冲击、随机及快速扫描 3 种方式, 加力点避开各低阶振型节点的位置, 并在相邻跨进行了激励, 以试验通过支座传递的激励对各阶振型产生的影响。此外, 还进行了水平激振的试验, 但由于结构水平刚度很大 (可能是由于模型为变态相似模型, 其水平刚度得到加强) 未能激起水平模态。从关于全桥试验的报告可以看出, 用不同激励方法和分析方法, 能准确地识别全桥动力参数, 识别出的模态频率与用有限元计算的频率相差很小。探索了进行桥梁动态分析的合理激励方法和测试分析方法, 为足尺全桥试验、设计冲击加载装置打下了很好的基础。

实践证明, 构成全桥的各片单梁相互有横梁的约束, 但其振型和各阶模态频率和单片梁十分相近。也就是说在进行全桥动力分析时可将各片梁的横向分配系数取得大致相等。甚至可以在全桥试验中, 为减少工作量, 可以只在一片梁上布置激振点和测点。这样做虽然会带来较小的偏安全的误差, 但可大量减少工作量, 并且在进行旧桥试验时不会影响通行。

在进行全桥试验时也进行了二级加载, 即按规范取用。第一级为加重车及标准车列, 第二级为加重带标准拖车。由于加载设备无法再采用柔刚度加载, 因而所得到的动力参数有质量附加的影响, 无法和单梁的加载结果进行对比。但加载的静力试验结果 (应力的挠度) 可以和动力计算结果进行对照。

在进行模型试验、取得经验和数据之后, 在新津龙王渡大桥做了原型桥的大型静、动力试验。在试验中, 用电阻应变计观测各梁跨中断面的混凝土应变沿梁高的变化情况, 用千分表、精密水准仪和电测挠度仪观测挠度, 用在全桥作网格布置的加速度传感器观测各测点加速度。加载设备利用两辆各重 25 t (包括载重) 的太脱拉自卸车作为荷载。用 25 t 自控力锤作为激励装置, 试验的各次成果请参阅第 5 章。试验结果表明, 原型桥的各阶模态频率和有限元计算结果十分接近。桥的模态振型也较为规范。经振型最大值归一后 (CRAS 分析软件进行模态分析时利用的质量归一) 其规范化模态和模型桥也非常相近。因而可以认为模型试验采用的各模型参数基本上符合模型律的设计。为以后用模型来研究实体桥梁的特性提供了可资借鉴的依据, 为进一步进行承载力计算打下了基础。由于桥梁冲击系数的研究已比较充分, 我们在全桥试验中未进行跳车试验。

## 1.5 荷载模型的研究

汽车在桥上行驶的荷载模型的研究, 是采用动态试验分析鉴定桥梁承载能力的中心研究内容之一。在国内已有的桥梁结构动力研究中<sup>[22]</sup>, 均将汽车荷载简化为在梁跨中作用一集中荷载  $P$  来表示, 以此为依据由实测的桥梁的自振频率 (实际上是一阶模态频率) 和挠度来推算桥梁的抗弯动刚度  $(EI)_D$  和静刚度  $(EI)_S$  进行对比求出其关系, 并以动刚度作为计算最大挠度的依据。但是, 结构在受到极大动荷载作用时, 材料的弹性模量  $E$  和截面惯性矩  $I$  并不在每个时刻都是定值, 在某时刻结构的各受力部分也不是一个统一的恒值, 它们是随受荷状态而成非线性变化的。而且  $E$ 、 $I$  值仅仅是结构的静力属性, 而动态参数 (比如我们赖以计算结构动力响应的运动微分方程的各系数矩阵) 的非线性变化, 难以用  $E$ 、 $I$  的非线性变化完全表示出来。因而我们在计算结构极限动承载力时, 引入了汽车对桥梁作用的荷载数学模型, 而且对它们进行了较充分的研究。

荷载模型研究的主要内容是在桥梁动力分析的基础上,采用试验建模的方法得出桥梁动力参数模型,建立汽车在运行状态下的数学模型。运用振型叠加和非线性有限元的方法并考虑材料和结构的非线性特征(即 $E$ 、 $I$ 的非线性变化)分析计算桥梁在汽车动力荷载作用下的各种内力,并对计算结果在大比例模型桥和足尺实体桥上进行了验证。

对于钢筋混凝土桥,在一般情况下,由于车辆的自重比桥梁的自重小,可以把桥梁看做受动力作用的弹性梁来考虑。但是由于汽车是行驶过桥的,作为动态力,它不仅幅度随时间改变,而且也是作用点位置的函数。假定在一般情况下汽车是匀速过桥的(特别是按预定行驶的超重型车更是如此)。一般而言,车辆对桥施加的荷载由三部分叠加而成: $P_S$ —汽车施加的静荷载; $P_{D1}$ —由汽车施加的确定性动荷载; $P_{D2}$ —由于桥面的不平整引起汽车的随机振动,施加给桥的随机动荷载。上述两种动荷载的叠加结果,是汽车实际施加给桥的荷载,是一种非平稳的随机过程。严格地分析非平稳的随机过程是颇为困难的,对于工程计算我们可以认为这个非平稳的随机过程是由确定性的函数和具有零均值的平稳过程组合叠加而成,并可用高斯分布近似。

从分析汽车的动力学模型入手,进行若干简化后作为确定性的激励源,推导出用于运动微分方程计算的广义荷载列阵,并计入车辆轴距、安全车距的影响采用叠加算法,并编制了相应的计算机程序。

在考虑随机荷载时,主要考虑将车辆的动态激励认为是平稳的各态历过程。同时,也对非平稳随机过程做了初步分析。在我们的分析中,将主要采用时域分析法,这是由于它的适用条件是:

- (1) 激励自谱按频率成分的分布与时间 $t$ 无关,而谱幅与 $t$ 有关。
- (2) 结构的损坏形式是首次破坏,响应的频率结构对系统损坏的影响不显著。
- (3) 仅研究最不利断面破坏出现的时刻。
- (4) 桥梁是稳定的系统。

同时假定:随机激励力的概率分布与车辆在桥面上的位置无关。

经过一系列分析计算求得:由于桥面不平整引起的汽车对桥作用的随机过程的一些特性和该随机过程与桥面不平整度的关系,并引入了路面空间频率谱的概念。得到了由于桥梁任一点的运行车辆对桥梁作用力的功率谱函数。并由此推算出了桥梁任一点的随机挠度响应的功率谱密度函数、随机挠度均方值、自相关函数和随机挠度的概率密度函数。得到了在某级随机荷载下的概率分布(即某级极限荷载出现的可能性的或然率)。

如果车辆在起伏特别大的桥面行驶时,将汽车对桥的随机激励仅看做平稳的随机过程则是不严格的。我们也初步分析了将随机过程看作非平稳随机过程的情况。

本书详尽地分析了汽车在桥上行驶对桥梁施加的动力作用,建立了桥梁荷载数学模型。该模型考虑了车辆在桥上运行的响应和由于桥面不平整所产生的随机振动的影响,比较全面和符合实际情况。这在国内外尚属首次提出,并投入工程应用。

## 1.6 非线性外推及桥梁承载力计算

用动态法快速测定桥梁承载力的主要内容为,桥梁在动荷载作用下的变形、强度和刚度问题。我们进行这项研究工作时必须对桥梁进行动力试验,用实测的方法确定结构的各项动力参数。而

钢筋混凝土结构是用非匀质材料建造的，它在大荷载作用下的静、动力特性是非线性的。用小荷载或运行状态激振求得的结构处在线性状态下固有的动力参数，并不代表结构在超限荷载作用下的动力参数。为了探求结构在大荷载作用下，桥梁结构的动力参数非线性变化的规律，做了一定数量的单梁在不同等级加载，直至破坏的试验模态分析，以期求得其在大荷载作用下，动力参数的变化规律。此外，我们还进行了大量的混凝土材料试验，探求荷载-变形的非线性规律。

试验方法是在不加载和各级加载情况下进行试验模态分析，已如前述，我们采用了不同的激励方法和试验分析方法进行对比。

在静荷载作用下，结构参数的非线性将主要表现在刚度的非线性，而钢筋混凝土梁的非线性主要表现为抗弯刚度的非线性（纯弯曲梁）。 $E$  是钢筋混凝土的弹性模量，可以从混凝土的材料试验得到，称之为材料的物理非线性。而  $I$  是截面惯性矩，其非线性是由钢筋混凝土的特殊工作状态所引起的。钢筋混凝土梁在受弯时，如果施加的荷载不大，其下沿的钢筋和混凝土都参与受拉。此时钢筋混凝土梁的荷载-反应关系接近于线性， $I$  接近常量。当继续加大外荷载，梁下沿的拉应力超过混凝土的抗拉强度，而出现裂缝时，混凝土逐渐退出抗拉的工作状态，抗拉区  $I$  值下降，此时钢筋混凝土梁的中性轴逐渐上移，梁的荷载-反应关系出现非线性，称之为几何非线性。

在大的动荷载作用下，除梁的抗弯刚度出现明显的非线性外，其他的动力参数，如阻尼、各阶振动频率、各阶振型及模态刚度等也表现出非线性特征，产生明显的变化。对于钢筋混凝土梁这类由非匀质材料构成的非线性结构，较难于用理论分析方法确定其动力参数（特别是阻尼参数）的非线性变化规律，因而通过一定数量的梁结构在不同等级加载，直至破坏的试验模态分析，求出其相应的动力参数的非线性变化规律，就是本方法的主要内容之一。由于在做这类试验时，必须要将梁加荷到破坏，才能了解加载过程中动力参数变化的全过程。由于条件不许可，不能进行大量的全桥加载的破坏试验。为简化试验，我们做了一定数量的模型梁的加载破坏试验，计算出其动态参数的非线性规律，再根据设计的模型律，恢复实体结构的动参数变化规律。

在分析试验数据求出各参数的非线性变化规律时采用了两种外推法，即多项式逼近法及非线性最小二乘法，并分别编制了有关的分析程序。多项式逼近法由于对试验数据的精确度要求很高，而混凝土的不均匀性又使各次试验数据有一定的离散性，在加载等级不够多、试验点不够密集时，易于产生“振荡”，因而计算结果不够理想。这主要是由于采用多项式作为外推函数存在稳定性问题，即试验误差、模态分析误差、材料的不一致性及计算过程中的舍入误差等，均会使外推的基本数据与实际结构的动力参数变化规律有一定误差。而这种误差在插值过程中，可能被扩散和放大。

当采用的多项式次数较高和外推距离较远时，其结果较难保证。同时，由于结构加载过程中，荷载等级不可能分得过细，极限荷载的掌握和布局不可能事前设计得很准确，也使平滑的变化规律可能产生“振荡”。因而在当各次平行试验（特别是材料均匀度相差较大）的相对误差较大时，其计算结果就不太令人满意。

如果认为原始数据本身含有“噪声”，即含有不可避免的误差时，则可设定一个初等函数  $F(x)$ ，它不是严格地通过试验点，在某种意义上总的偏差最小，从而按给定的函数  $F(x)$  来进行外推。在进行这项工作时我们先在方格纸上点上试验数据点，再根据变化规律的趋势，人为地描绘出与此规律相近的曲线，以初步决定  $F(x)$  的性质，设定合适的初等函数  $F(x)$ 。然后采用非线性最小二乘法进行曲线拟合，选定  $F(x)$  的各项系数。在这种方法中，可以根据曲线的形状来选择拟合曲线的非线性数学模型，并在分析确定若干模型后，再通过实际计算选择较好的非线性模型，最后完成

了非线性外推的计算。

在试验模态分析中得到的结构的动力参数都是模态参数。而结构的模态参数是利用正交性原理，将离散化结构的有限个互相耦合的线性微分方程组，用模态坐标（主坐标）解耦后，得到的各阶相互独立的微分方程组的参数。对应于每一个模态都有一个独立的微分方程。我们得到各阶模态参数之后，即已知模态方程的系数对角矩阵。这样，可以方便地用各种数学方法，分别求解在各阶模态下的模态坐标响应。各阶模态坐标响应与相应阶的振型的乘积即为各阶的动挠度。各阶动挠度的代数和即为结构的动力响应或总挠度。在这个过程中，振型矩阵中起着将模态坐标响应转换成物理坐标  $y$  的作用。根据结构的动力试验结果所做的试验模态分析，可以得到振型矩阵，尚须求得各阶的模态坐标。这个过程即为动力响应的非线性计算过程。在进行这种计算时，我们提出了三种方法。即：

### 1. 确定荷载的解析解

在已知车辆的荷载模型及经过非线性外推的模态参数之后，即可求解各阶模态运动微分方程，得到各阶的模态坐标。大量的实践证明，越低阶的振型对动力反应贡献越大，因而对于桥梁，我们取前 3 阶振型进行叠加运算已有足够的精确度。

对确定性荷载的解析解的运算步骤是：

- (1) 将梁的运动方程用振型阵解耦，简化为求模态坐标的方程。
- (2) 求模态坐标的解析解。
- (3) 进行振型叠加，求得总挠度。

用上述法，我们对单梁和模型全桥进行了计算，与试验对比有满意的结果。但是，上述计算是在下列假定下提出的。即：

- (1) 结构的各参数矩阵在结构处于非线性情况下仍可解耦。
- (2) 梁的抗弯刚度  $EI$  的非线性变化在梁的各个断面同时出现。

实际上，上述假设与非线性的钢筋混凝土梁式结构的实际情况是有一定出入的。但是从试验模态分析得到的模态阻尼的离散性相当大，即使对于像飞机、汽车这一类金属结构的线性体系，其阻尼的测量误差也在 30% 以上。如果采用非对角阻尼矩阵耦合的联立微分方程组，也不可能得到精确的结果。实际上，从计算的角度来看，结构的阻尼在响应计算中所引起的误差是非常有限的。

此外，对弯拉刚度  $EI$  的假设，实际上使响应的计算偏于安全。这在工程计算中，特别是钢筋混凝土这一类材料特性离散较大的结构，是有利和合理的。

上述计算方法实际上是将非线性结构用线性化的方法进行处理而得到的近似算法，即将结构的非线性变化曲线，用少量的折线来逼近，是一种简便的算法，有一定的精确度和可靠性。

上述算法，我们编制了计算机程序，可以计算汽车在桥上运动时，梁结构任一断面挠度变化的时间历程和各断面在同时刻的挠度曲线。其计算结果与挠度的测量结果是比较吻合的。

### 2. 考虑随机荷载作用的简化逐步积分法

对于非线性结构的分析计算，比较有效的算法是逐步积分法，在这种算法中，假定在足够短的时段  $\Delta t$  中（一般为结构振动最短周期  $T$  的  $1/10 \sim 1/5$ ），结构的物理参数（包括动力参数）保持不变，也就是忽略在时间间隔  $\Delta t$  范围内，由于结构参数变化所产生的不平衡。体系的非线性特性可用每个时间增量起点所求得当前挠度的新特性来说明。利用该时间区间终了时的运动量作为下



一时间区间的初始条件,如此进行积分处理即可得到结构任一断面随时间变化的挠度。由于我们在动力参数的非线性外推中已经得到其与荷载变化之间的非线性关系,而荷载又是随时间变化的,因而可以得到各动力参数随时间变化的关系,可以较好地考虑结构各断面在非线形变化中不同的特性。这对于第一种方法来说,有明显的优越性。此外该法可以较好地考虑随机振动的影响。这在桥梁计算中尚属少见,有较好的计算精度。该方法是逐步积分法用于实际工程的非线性计算的一个成功例子,创造性地运用了结构动力学计算的新成就。利用该法对新津龙王渡大桥进行了计算,计算与测试结果吻合得相当好。

此外尚引用了 Willson- $\theta$ 法(一种基于有限元分析的非线性计算方法),由于该法较难考虑运用移动荷载来计算响应,因而结果不太令人满意。

## 1.7 桥梁承载力的评价方法

通过对桥梁的有限元分析,并在现场对实桥进行动态性能测试分析,即可通过下列步骤进行桥梁的承载力评定。评定的要求有下列两个方面:

### 1. 已知重型车辆的性能,确定桥梁的通过能力

在公路规范中,规定了车辆荷载的设计等级,称为标准荷载。但在桥梁的使用中,往往由于重点建设的需要,有时必须通过公路运输超大型构件。为了使重型车辆安全通过桥梁,必须了解桥梁的耐受能力和重型车辆运行的速度,研究重型车辆是否对桥梁产生不利的影响。对这一类的评价问题,我们进行研究的方法可以按下述的步骤进行:

(1) 如能搜集到必要的桥梁结构设计资料和技术图纸可对桥梁进行有限元的分析(荷载及动力参数),分析方法可按本书第3章的方法进行。

(2) 进行桥梁的试验模态分析,得到桥梁的模态参数并进行外推计算。

(3) 根据试验所得的模态参数对结构的有限元动力模型进行修改,得到趋近于实际的动态有限元模型。这一步骤可按本书第3章所提供的方法进行。如果旧桥无法进行有限元分析,可以不进行该步骤。

(4) 根据预定通过车辆的参数和桥面平整度的评价等级,计算出施加于桥梁的动力荷载的数学关系式(即确定荷载模型)。

(5) 进行桥梁的外观检查(详见有关规范及大跨径混凝土桥梁的试验方法,1982年10月公布)。

(6) 在桥梁非重要部位截取混凝土试件,进行材料试验,以得到长期使用后的抗压强度。如能搜集到桥梁在施工时的材料试验记录,则可按疲劳试验的结果进行折减,得到近似的长期使用后的抗压强度,用以外推计算 $E$ 、 $I$ 。

(7) 根据以上分析所提供的资料计算重型车辆在桥上行驶时桥梁各特征断面的动挠度随时间变化历程,求出最不利的断面。最不利断面按最大应力值的断面确定。在桥梁断面已定时,按最大内力值确定,而最大内力处即得最大挠度值,最大挠度要求符合桥梁设计规范。计算时可根据已提供的资料情况和对计算的精度要求选择本书所提供的计算方法:

① 桥面非常平整时,可只计算确定性荷载的最不利组合所引起的动挠度、动应力响应。

② 桥面不够平整时必须考虑由于桥面不平整所引起的随机振动的影响,可以采用考虑随