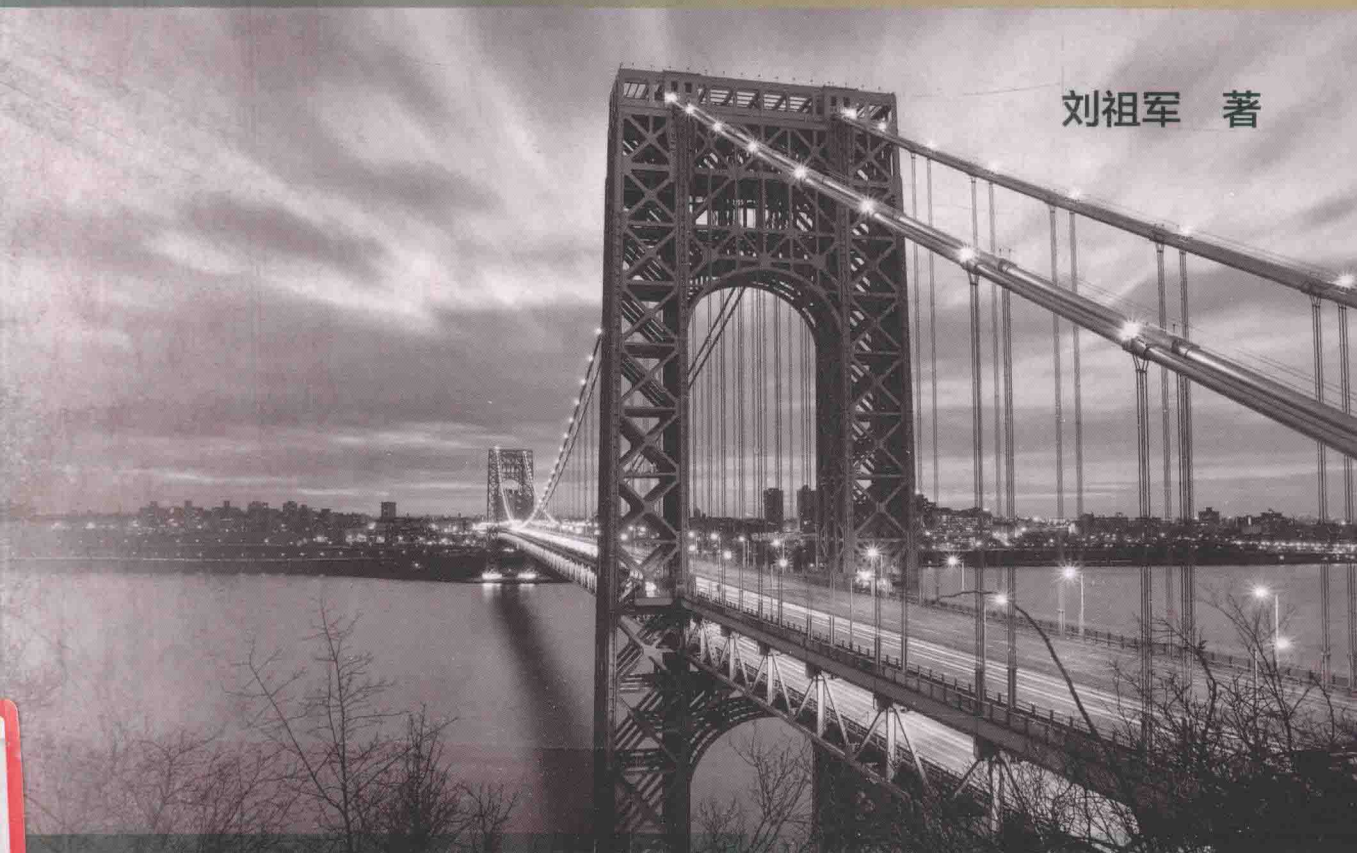


桥梁风致振动的 能量特征研究

刘祖军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

桥梁风致振动的 能量特征研究

刘祖军 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书主要论述了桥梁风致振动的能量转换机理以及驱动桥梁振动的流场演化特征。从能量角度出发在宏观和细观两个层次上研究了风振动过程中的能量转换机理。在宏观层次上从二维两自由度耦合颤振分析方法入手建立了耦合颤振能量分析框架,应用该分析方法研究了平板以及箱梁断面耦合颤振过程中能量在扭转自由度和竖向自由度之间的传递和反馈机制,从能量角度揭示了耦合颤振的发生机理。在细观层次上采用粒子测速技术和计算流体动力学相结合的研究手段分析桥梁风致振动的流场驱动机制。采用本征正交分解技术研究模型表面压力的分布特点,结合分块分析的思路阐述了桥梁风致振动过程中的能量输入特征。本书可供从事桥梁抗风的科研人员 and 高等院校的师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁风致振动的能量特征研究 / 刘祖军著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5170-4672-1

I. ①桥… II. ①刘… III. ①桥—风致振动—研究
IV. ①U441

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第207824号

书 名	桥梁风致振动的能量特征研究 QIAOLIANG FENGZHI ZHENDONG DE NENGLIANG TEZHENG YANJIU
作 者	刘祖军 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着桥梁跨度的不断增大,结构质量越来越轻,结构刚度越来越小,结构阻尼越来越低,结构对风作用的敏感性越来越强,风致振动对桥梁的安全性能和使用性能的影响更加突出。在各种风致振动中对桥梁稳定、安全和使用性能影响最大的是自激振动。本书从桥梁自激振动的能量传递和转换规律入手,对典型桥梁断面风致振动的发生机理进行了探讨和总结,希望对大跨度桥梁的抗风设计和风振控制措施的研究提供有益的借鉴。

本书共分为8章。第1章简要介绍了桥梁颤振的研究现状,在此基础上提出了新的研究思路。第2章建立了二维耦合颤振能量分析的框架,给出了耦合颤振能量方程及求解方法。第3章从宏观层面上分析了平板、箱梁、H型断面等典型主梁断面颤振过程中的能量转换规律,并从能量的角度对这三种断面颤振的发生机理进行深入探讨。第4章建立了细观层次上的颤振能量分析框架。研究采用PIV流场测试技术与CFD数值计算相结合的手段分析典型桥梁断面颤振过程中流场和压力场的变化规律。第5章应用CFD数值模拟与PIV流场测试技术对平板、箱梁和类似旧塔科马桥的H形断面固定状态下的流场特征进行了比较分析。第6章对平板断面颤振能量转换的细观机理进行了研究,分析了平板断面风致振动过程中尾部旋涡的尺度从小涡向大涡的演化过程,而最终结构的振动由大涡控制。第7章从细观层面上对比分析了箱梁和H形断面颤振过程能量转换的特性。研究了箱梁尾部风嘴处上下旋涡的交替作用对箱梁振动的激发作用以及H形断面表面大型旋涡对模型振动的影响。结合POD分解,分析了这两种断面颤振过程中模型表面压力时空分布特性的演化规律。第8章对从能量转换的角度出发,在宏细观两个层面上对典型桥梁断面颤振机理进行了总结。

本书作者为华北水利水电大学副教授刘祖军。同济大学博士研究生导师葛耀君教授、杨詠昕副研究员对本书的编写提出了宝贵的修改意见,在此致以衷心的感谢。

由于著者水平有限,本书难免存在不足之处,尚祈读者批评指正。

刘祖军

2016年2月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 桥梁风致振动	1
1.2 桥梁颤振机理研究现状	2
1.2.1 古典耦合颤振	2
1.2.2 分离流颤振	3
1.2.3 多模态颤振	4
1.3 颤振能量转换机理研究	5
1.4 颤振机理研究手段	7
1.4.1 传统方法	7
1.4.2 PIV 流场测试技术	7
1.5 研究思路	8
1.6 主要研究内容	10
第 2 章 二维耦合颤振能量转换的宏观机理研究	13
2.1 宏观层次的颤振能量转换分析框架	13
2.2 耦合颤振能量方程的建立	14
2.2.1 广义的颤振运动控制方程	14
2.2.2 考虑阻尼影响的竖向和扭转简谐振动方程形式	15
2.2.3 耦合颤振能量方程	17
2.2.4 应用能量方程确定弯扭的幅值比和相位差	17
2.3 扭转振动颤振能量分析	19
2.3.1 竖向振动产生的气动升力矩输入到系统能量	20
2.3.2 扭转气动阻尼产生的能量	25
2.3.3 扭转气动刚度产生的能量	28
2.3.4 扭转机械阻尼产生的能量	31
2.3.5 扭转系统惯性力和弹性力产生的能量	32
2.4 竖向振动颤振能量分析	33
2.5 能量在两个自由度上的分配	34

2.5.1 扭转振动的能量	34
2.5.2 竖向振动的能量	34
第3章 典型断面颤振过程中能量转换宏观机理	37
3.1 平板断面颤振过程能量转换宏观机理	37
3.1.1 平板扭转振动能量分析	37
3.1.2 平板竖向振动能量转换分析	51
3.1.3 平板扭转振动和竖向振动的总能量分析	55
3.1.4 平板耦合颤振的能量转换机理	56
3.2 箱梁和 H 形断面颤振过程能量转换宏观机理	59
3.2.1 扭转振动的能量分析	59
3.2.2 竖向振动的能量分析	70
3.2.3 气流输入到振动系统的总能量分析	71
3.2.4 箱梁和 H 形断面颤振过程中的能量转换机理	72
第4章 颤振过程能量转换细观机理研究	74
4.1 数值方法在风工程研究中的应用	74
4.2 细观层次的颤振能量转换的分析方法	75
4.2.1 颤振能量转换细观分析框架	75
4.2.2 细观层次和宏观层次之间的关系	77
4.3 钝体绕流的数值模拟技术	79
4.3.1 CFD 数值模拟的基本原理	79
4.3.2 颤振过程的数值模拟方法	81
4.4 钝体绕流的流场测试技术	83
4.4.1 PIV 流场测试技术原理	83
4.4.2 PIV 流场测试结果的后处理方法	84
4.4.3 POD 技术的原理及应用	88
第5章 典型桥梁断面固定状态下的细观流态特征	90
5.1 平板断面绕流	90
5.1.1 PIV 试验	90
5.1.2 数值模拟计算	90
5.1.3 流场特征比较	96
5.2 箱梁断面绕流	97
5.2.1 PIV 试验	97
5.2.2 数值模拟计算	97
5.2.3 流场特征比较	103
5.3 H 形断面绕流	104
5.3.1 PIV 试验	104
5.3.2 数值模拟计算	105

5.3.3	流场特征比较	107
第6章	平板断面颤振能量转换细观机理	114
6.1	振动断面流场分析方法	114
6.1.1	相位平均	114
6.1.2	外触发锁相技术	115
6.1.3	基于互相关技术的条件平均	115
6.2	平板颤振的流态特征及其表面压力分布特点	116
6.2.1	平板测振及 PIV 试验	116
6.2.2	平板颤振 CFD 数值模拟	122
6.2.3	平板压力场的 POD 分析	126
6.3	基于分块分析思想的平板颤振能量分析	129
6.4	平板颤振的细观机理	132
6.4.1	驱动平板颤振的流场机理	132
6.4.2	平板颤振的宏观机理与细观机理之间的联系	133
第7章	箱梁和 H 形断面颤振能量转换细观机理	139
7.1	振动断面的细观流态特征	139
7.1.1	箱梁的测振和 PIV 试验	139
7.1.2	H 形断面测振及 PIV 试验	144
7.2	颤振 CFD 数值模拟	147
7.2.1	箱梁颤振的数值模拟	147
7.2.2	H 形断面风振的数值模拟	149
7.3	压力场的 POD 分析	151
7.3.1	箱梁表面压力场的 POD 分解	151
7.3.2	H 形断面表面压力场的 POD 分解	152
7.4	基于分块分析思想的颤振能量分析	155
7.4.1	箱梁颤振能量分析	155
7.4.2	H 形断面风振能量分析	158
7.5	驱动桥梁断面颤振的流场机理	162
7.5.1	箱梁颤振的流场机理	162
7.5.2	H 形断面风振流场机理	163
7.6	桥梁断面颤振的宏观机理与细观机理之间的关系	164
7.6.1	箱梁颤振的宏观机理与细观机理之间的联系	164
7.6.2	H 形断面风振的宏观机理与细观机理之间的联系	170
第8章	结论与展望	175
8.1	主要研究工作	175
8.2	主要研究结论	176
8.3	研究的创新点	178

8.4 未来研究工作的展望	179
参考文献	180
致谢	187

第 1 章 概 述

1.1 桥 梁 风 致 振 动

风与桥梁结构之间相互作用的研究源于发生在 1940 年的 Tacoma 桥风毁事故。在不到 20m/s 的风速下桥梁由竖向振动转为扭转振动，在经过持续的大幅扭转振动后，桥梁丧失整体稳定性，折为两段跌入峡谷（图 1.1），从此拉开了桥梁风振研究的序幕。

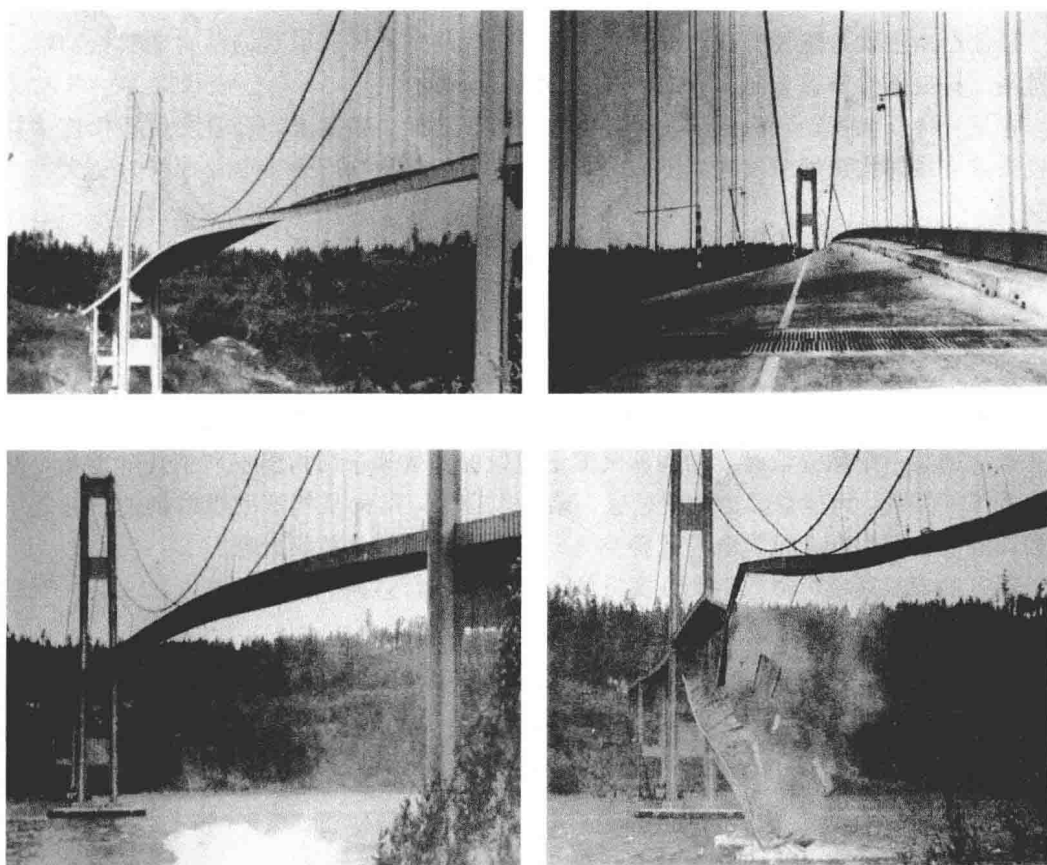


图 1.1 Tacoma 桥风毁事故

由于自然界的风受近地边界层影响，其速度、方向及其空间分布都是非定常且是随机的，因此具有明显的湍流特性。风与桥梁结构之间相互作用由于受到风的自然特性、结构动力性能以及风与结构的相互作用 3 个方面的制约而变得更加复杂。流体本身具有黏性作用，故当风流过非流线形桥梁断面时，就会产生流动的分流和再附，形成复杂的作用力。



当桥梁结构较长、较柔时,这种作用力将激发起桥梁的振动,而振动起来的桥梁又反过来影响流场,改变空气作用力,引起风与结构的相互作用机制。当气动力受结构振动影响较小时,空气的动力作用可以看作一种强迫振动荷载;而当气动力受结构振动影响较大时,空气同振动结构形成了一个具有相互作用反馈机制的动力系统,则表现为一种自激力。

桥梁风致振动按照气弹性动力响应可以分为自激振动和强迫振动两大类。自激振动是在平均风作用下,桥梁从流动的气流中吸收能量,引起结构的振动,而振动起来的桥梁结构又将一部分能量反馈到气流中形成桥梁结构与风的相互激励与反馈作用。不同的断面形式表现出来的自激振动形态也不相同。流线形桥面可能发生弯扭耦合的古典颤振,非流线形桥面的分离流扭转颤振,矩形和方形截面的桥塔可能发生挠曲振动占优势的驰振以及伴随着上述振动同时发生的因旋涡脱落而引起的涡激振动。涡激振动虽然也带有自激性质,但它和颤振和驰振的发散性振动现象不同,其振动响应是一种强迫型的限幅振动,因而具有双重性。

强迫振动主要是空气的脉动成分产生的。大气的脉动风谱引起的结构随机振动响应称为抖振。抖振不像颤振和驰振那样具有自激和发散的性质,不会造成桥梁的空气动力失稳,它是一种限幅振动,但由于发生抖振响应的风速低、频度大,而且会使桥梁连接杆件的接头或支座等构造细节发生局部疲劳,同时过大的抖振响应还会危及行车的安全。

1.2 桥梁颤振机理研究现状

桥梁颤振是一种空气动力失稳现象,是风致振动中最具破坏性的一种振动形式。风场中的振动结构和气流之间存在着剧烈的相互作用,结构和气流之间不断地进行能量交换。当风速较低时,结构从气流中吸取能量小于结构阻尼所消耗的能量,振动会逐渐衰减。当风速增加到某一个临界值时,结构从气流中吸取的能量等于结构阻尼所消耗的能量,结构将维持等幅振动,风速继续增加超过这一临界风速时,结构从气流中吸取的能量超越了自身的耗散能力就引起系统发散,这种空气动力失稳现象就是桥梁颤振。

现有的颤振理论可以概括为3类方法,即古典耦合颤振、分离流颤振和多模态颤振。

1.2.1 古典耦合颤振

1922年, Birnbaum 利用 Prandtl 的约束涡旋理论,提出了第一个简谐振动平板机翼的气动升力解析表达式。1935年, Theodorsen^[1]首先从理论上研究了薄平板的空气作用力,用势能原理推导出了作用在理想二维振动平板上的非定常气动力(自激力)的解析表达式,即

$$L = -2\pi\rho bU^2 \left\{ C(k) \left(\alpha + \frac{\dot{h}}{U} \right) + [1 + C(k)] \frac{b}{2} \frac{\dot{\alpha}}{U} \right\} \quad (1.1)$$

$$M = \pi\rho bU^2 \left\{ C(k) \left(\alpha + \frac{\dot{h}}{U} \right) + [1 - C(k)] \frac{b}{2} \frac{\dot{\alpha}}{U} \right\} \quad (1.2)$$

1940年, Tacoma 桥风毁后,由华盛顿大学的 Farquharson 教授领头的调查小组对 Tacoma 桥风毁原因进行了一系列研究,这可以看作是桥梁颤振研究的开端,也是颤振机理研究的起步。



1948年, Bleich^[2]第一次提出采用 Theodorsen 平板气动力公式来解决悬索桁架式加劲梁的颤振分析, 从而建立起了悬索桥古典耦合颤振分析方法。1967年, Klöppel 和 Thiele 将 Bleich 悬索桥古典耦合颤振理论的逐次逼近求解过程编制成计算机程序, 采用无量纲参数计算编制了一套便于实用计算的诺模图, 利用这个诺模图可以直接求解出颤振临界风速, 并且揭示了各参数对颤振临界风速的影响。

1976年, Vander Put^[3]在 Klöppel/Thiele 诺模图方法的基础上, 偏于安全地忽略结构阻尼的影响, 并且假定折算风速 U/f_B 和扭弯频率比 $\epsilon = \omega_a/\omega_h$ 之间具有近似线性关系, 从而提出了平板耦合颤振临界风速的实用计算公式, 即

$$U_{cr} = \eta \left[1 + (\xi - 0.5) \sqrt{\frac{r}{b} 0.72\mu} \right] \bar{\omega}_b b \quad (1.3)$$

式中: ξ 为弯扭频率比; r 为断面回转半径; μ 为结构密度与空气密度比, $\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}$; η 为断面形状修正系数; b 为半桥宽。

这一系列方法只适合求解流线形断面, 只有这类断面气流绕流流态接近平板时才满足 Theodorsen 形式的非定常气动力成立的前提条件。

1.2.2 分离流颤振

分离流颤振理论主要应用于非流线形断面。当均匀气流绕过非流线形断面时, 流动会发生分离甚至再附以及旋涡脱落。这时, 建立在有势流沿平板流动基础上的古典耦合颤振理论就不再适用。Scanlan^[4]于1971年提出用在风洞中测定的6个颤振导数来描述作用在结构上的非定常气动力, 并用广义坐标和振型分解法求得了颤振特征值。此后, Sarkar 和 Jones 又将气动力的表达式推广到了采用18个气动导数来表示, 这些被统称为 Scanlan 自激力表达式, 即

$$L_h = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left[K H_1^*(k) \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^*(k) \frac{B \dot{a}}{U} + K^2 H_3^*(k) a \right] \quad (1.4)$$

$$M_a = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left[K A_1^*(k) \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^*(k) \frac{B \dot{a}}{U} + K^2 A_3^*(k) a \right] \quad (1.5)$$

式中: $K = Bf/U$ 为无量纲折减频率; 气动导数 H_i^* , A_i^* 为无量纲折减频率的函数, 取决于桥梁断面的气动外形, 一般需要通过风洞试验获得。

Scanlan 自激力模型成立具有两个前提条件: ①线性化假定, 颤振本质是非线性的, 但是在进行颤振分析时所关心的是即将发生颤振的临界状态, 只需要对小幅振动做趋势性研究, 因此该假定对颤振稳定性分析仍然是足够精确和有效的; ②攻角不变假定, 虽然在气流作用下结构通常会发生攻角变化从而导致自激力发生变化, 但是这种改变可以看作是由于断面气动外形变化所致, 这样就可以分别考虑各种攻角情况下的气动反应, 而模型本身做攻角不变的假定得以成立, 如图 1.2 所示。

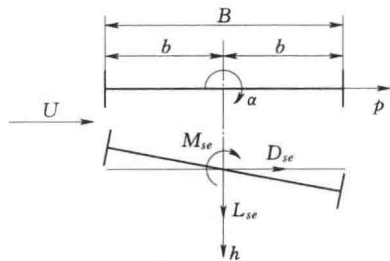


图 1.2 二维桥梁断面运动及
气动自激力示意图



Scanlan 建立的颤振分析方法既可以求解古典耦合弯扭颤振问题, 又可以用于分离流颤振, 目前所有颤振分析方法都是建立在 Scanlan 颤振分析理论构架基础之上。一旦建立了非定常气动力计算模型, 气动失稳临界状态就很容易确定了。其中, 最典型的方法就是将“片条理论”应用到气流与结构相互作用中, 确定出一个垂直于桥轴线方向的二维节段, 假定沿着桥轴线方向的任意三维影响都可以忽略不计, 由此可得二维颤振方程为

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_h & 0 \\ 0 & C_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_h \\ M_a \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

式中: C_h 和 C_a 分别为 h 和 α 方向的结构阻尼系数; K_h 和 K_a 分别为 h 和 α 方向的结构刚度。

与传统的平板颤振类似, 阻力方向的振动影响一般忽略不计。此外, 还假定二维节段在竖向和扭转两个方向的振动是小振幅的同频简谐振动, 这样就可以在传统的颤振分析中采用随折算频率变化的非定常气动力。因此, 气动力项是频域内的函数, 方程式有解的唯一形式是以下的耦合振动, 即

$$h_{(t)} = h_0 \exp(i\omega t) \quad (1.7)$$

$$\alpha_{(t)} = \alpha_0 \exp(i\omega t) \quad (1.8)$$

将式 (1.7) 和式 (1.8) 代入式 (1.6), 便能够确定颤振临界状态, 这一求解过程就称为二维颤振分析。

1.2.3 多模态颤振

放弃片条假定后的三维桥梁颤振分析方法的应用还只有很短的历史, 这种分析主要是通过两种不同的途径来实现: 第一条途径是将频率或时域内的非定常气动力直接作用到结构的三维有限元计算模型上, 一般称为直接方法; 第二条途径是把结构响应看作是分散在各阶模态上的影响, 然后将各阶模态所对应的响应叠加起来, 称为模态叠加法。

模态叠加法是在结构动力特性分析的基础上, 人为地选择几阶对颤振贡献较大的模态进行模态颤振分析, 所以又称多模态颤振分析法。最简单的模态叠加法就是由 Scanlan 提出的选取一阶竖弯振动模态和一阶扭转振动模态进行颤振分析。20 世纪 80 年代末, Agar^[5]将系统颤振运动方程转化为一种不对称实矩阵的特征值求解问题, 采用风速和频率两个参数搜索的迭代方法, 建立了较为完善的多模态两参数颤振分析法。20 世纪 90 年代初, 陈振清在 Agar 方法的基础上, 将颤振分析转化为复矩阵的广义特征值问题, 并建立了多模态单参数颤振分析方法, 与此同时, Namini 将机翼颤振分析的 P-K 法推广到大跨度斜拉桥颤振分析中, 并且提出了求解颤振后状态的 P-KF 模态方程求解法^[6,7]。此后 Jones 等人又提出了直接利用行列式搜索求解广义特征值问题, 简化了参与模态较少时的多模态颤振分析过程。

由于模态叠加法只是基于所选振动模态的一种近似计算方法, 所以一些学者想到了基于桥梁结构有限元模型的精确分析方法——直接计算法。直接计算法最早是由 Miyata Yamada^[8,9]提出的。他们将直接法归纳为用频域内的气动导数所表示的一个复特征值问题, 并且忽略了结构阻尼对颤振的影响, 因而在颤振分析中不需要经历搜索和迭代过程, 但即使这样也需要大容量和高速度的计算机来完成全部复特征值的求解问题。此外,



Dung 改进了该直接颤振分析方法, 在求解特征值方程时采用模态追踪技术, 这在一定程度上提高了该方法的计算效率, 但仍不能有效地考虑结构阻尼的影响。20 世纪末, 葛耀君等人提出了类似于直接计算法的三维桥梁颤振的全模态方法, 全模态颤振分析方法是一种适合于大跨度桥梁颤振计算的方法, 它是在 Scanlan 非定常气动力假定基础上建立起来的一种频域内颤振分析的精确方法, 是对多模态颤振分析的一种推广。

1.3 颤振能量转换机理研究

随着人们对颤振本质认识的深入以及计算机技术的进步, 解析法得到快速发展, 桥梁颤振研究的目的不仅在于确定系统颤振临界风速、颤振频率及颤振形态, 而且还应研究系统颤振的物理机理。由于颤振属于自激振动, 其物理机理可以从能量的角度加以深入阐释。

处于气流中的桥梁其能量反馈机制表现为气流输入到结构—气流系统中的能量与结构阻尼耗散能量之间的平衡关系, 当输入到结构—气流系统中的能量小于结构阻尼耗能时, 结构在初始扰动下将做衰减(阻尼)振动; 而当输入的能量大于结构阻尼耗能时, 结构在初始扰动下将做发散振动。两者相等时, 结构在初始扰动下将做等幅简谐振动。

Scanlan^[10,11]最早建立了桥梁颤振的多模态分析方法, 并从能量的观点对桥梁的颤振稳定性进行了很有价值的研究, 给出了在一个振动周期内气流沿桥梁断面每延米输入的总能量和结构耗能的表达式, 并阐述了气流输入到结构中的能量不仅与弯扭位移的幅值有关, 而且与弯扭位移间的相位差有着密切的关系, 但他在能量部分仅给出了一个理论框架, 如何从能量的角度对桥梁进行颤振分析, 并没有给出具体的方法。

$$E_{\text{input}} = \int_{\text{period}} F_m^L \dot{\xi}_{\text{def}} dt + \int_{\text{period}} F_m^M \dot{\alpha}_{\text{def}} dt = \frac{1}{2} \pi \rho U^2 K^2 \xi_0 b \alpha_0 (E_{\text{vel}} + E_{\text{def}}) \quad (1.9)$$

$$E_{\text{dis}} = \int_{\text{period}} 2m_e \xi \omega_{\xi} (\dot{\xi}_{\text{def}})^2 dt + \int_{\text{period}} 2I_e \xi \omega_{\alpha} (\dot{\alpha}_{\text{def}})^2 dt = 2\pi_0 (m_e \xi \omega_{\xi} \omega_{\xi_0}^2 + I_e \xi \omega_{\alpha} \omega_{\alpha_0}^2) \quad (1.10)$$

Scanlan 在上述能量表达式中引入两个假设条件: ①每级风速下竖向和扭转振动均采用等幅的正弦运动形式; ②以颤振临界位置处的幅值比和相位差代替任意折减风速下的幅值比和相位差。

这两个假设条件限制了上述表达式的使用范围: ①它不能考虑每级折减风速下阻尼对振动形式的影响; ②用颤振临界位置处的弯扭幅值比和相位差替代任意折减风速下的幅值比和相位差, 有很大的近似性。因此, 该方法不适合进行颤振全过程的能量分析。

Larsen^[12]以 CFD 方法为基础, 根据离散涡方法的计算结果提出了一个涡旋的运动规律简化分析模型, 这个模型描述了桥梁断面扭转运动的一个周期里涡旋的运动情况, 并通过积分估算由涡旋产生的气动力对桥梁断面所做的总功, 通过用能量方法分析涡激力做功与结构稳定之间的关系。

Larsen 的研究具有很好的开创性, 但是他的计算模型是基于以下的假定: ①横截面扭转振动为正弦运动; ②单个旋涡所做功的变化率等于旋涡力与旋涡作用位置横截面的竖向

振动速度的乘积,即旋涡所做的总功可由各个旋涡在一个振动周期所做的功积分而得;
③旋涡沿横截面移动时,旋涡升力保持不变;④旋涡的无量纲移动时间与弹性悬吊横截面的振动周期无关;⑤结构阻尼为零。

根据以上计算和分析他得出结论:当断面上下表面移动的两个连续旋涡的间距正好等于加劲梁宽度的一半时,在一个扭转振动周期内涡激力所做净功为零;当断面上下表面移动的两个连续旋涡的间距大于加劲梁宽度的一半时,所做净功为正,该正功被吸收后,扭转振幅增大,表示不稳定。当两个连续旋涡间的距离小于加劲梁宽度的一半时,扭转振幅减小,为稳定提供条件。

但是 Larsen 在能量分析时假设旋涡沿横截面移动时,旋涡升力保持不变并且结构阻尼为零,这和实际情况有很大的不同,如图 1.3 所示。另外,流线形较好的平板和箱梁断面由于在颤振发生过程中结构的表面并没有明显的大型旋涡的移动和生成,因此也无法用该方法来解释此类断面颤振过程的能量变化情况。

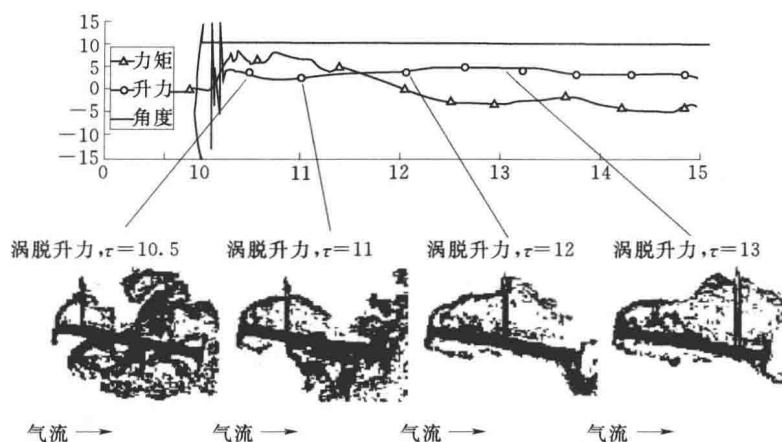


图 1.3 截面上漩涡的形成与移动

我国的刘高博士^[13]从结构—气流系统内部能量平衡的观点对系统的颤振进行研究,发展了一种全桥多模态颤振分析方法——能量法,他通过建立系统等效阻尼比与系统能量变化率之间的关系,推演了系统以及各阶模态等效阻尼比的计算方法,他根据不同风速下系统能量变化率来判断系统的颤振稳定性:当能量变化率小于 0 表示由气流输入到系统中的能量小于结构阻尼耗散的能量,系统总的能量变化表现为耗能,系统处于气动稳定状态;能量变化率大于 0 表示由气流输入到系统中的能量大于结构阻尼耗散的能量,系统总的能量变化表现为吸能,系统处于气动不稳定状态;能量变化率等于 0 表示由气流输入到系统中的能量与结构阻尼耗散的能量相平衡,系统总的能量变化表现为不吸能也不耗能,此时系统处于颤振临界状态。他的这种方法不能很好地分析气流与结构之间的细观作用,不利于从微观的角度解释颤振的能量机理。

在航空方面机翼的气动弹性力学研究中, Frazer^[14]早在 1939 年就分析了维持机翼强迫振动所需要的能量条件, Nissim^[15]在 20 世纪 70 年代提出了气动能量概念作为对机翼主动控制的理论基础, Jones^[16]分析了颤振发生的能量特征,上述工作构成机翼的气动弹性



力学研究应用的基础。在机械领域的叶轮机气动弹性力学研究中 Carta^[17] 提出了用于颤振失稳预测的能量稳定判据。后来 Klose 和 Heinig^[18] 通过研究证明能量法用于颤振失稳的预测, 可被认为是特征值法在叶片高质量比下的特殊应用, 并指出应用能量法预测的一些失效情况。

1.4 颤振机理研究手段

1.4.1 传统方法

目前桥梁颤振机理的研究手段主要有两种: 一种是以计算流体动力学为基础, 重点研究引起桥梁颤振的风场特征, 包括压力、速度分布和漩涡的生成、运动规律, 通过 CFD 可以得到十分详细的流场和压力分布随时间变化的信息, 不过受计算方法及计算机性能的限制, 三维均匀流和紊流条件下的计算尚无法精确实现, 目前比较适合对二维均匀流情况进行定性分析; 另一种途径是风洞试验结合理论计算的研究方法, 它首先通过节段模型风洞试验识别相应桥梁的气动导数, 然后应用数值计算方法进行二维或三维颤振分析, 重点研究桥梁颤振的驱动机理、颤振形态及颤振发生的模态参与作用。

国内外很多学者采用上述两种研究方法, 对颤振驱动机理给出了较为合理的解释。日本学者 Matsumoto^[20] 从 1995 年起对一系列简单断面的颤振问题进行了系列研究, 其核心研究方法是分步分析方法 (Step by Step Analysis)。该方法的思想是将颤振分析分为扭转分支和竖向分支, 在各分支中考虑扭转和竖向运动的耦合效应, 从而将气动阻尼表达为各个气动导数的组合。这种方法除了可以描述系统阻尼、频率随风速的变化规律, 其最大特点是能反映在颤振发生过程中各个气动导数对系统参数改变所起的作用, 并且他也据此就耦合颤振导数对系统阻尼的影响进行了定量分析, 结合这一方法, 并通过强迫振动测压来识别气动导数。

Matsumoto 对不同宽高比的矩形断面以及菱形、椭圆形、三角形等断面进行了试验和理论研究。将颤振按机理区分为 4 类, 即耦合颤振、高速颤振、低速颤振和限速颤振。不过 Matsumoto 没有根据这一方法提出描述颤振自由度参与程度的合理方法, 从而无法对颤振形态进行定量而形象地描述。

同济大学杨詠昕博士^[21] 以 Matsumoto 的分布分析方法为基础, 对桥梁典型断面的颤振机理进行了更加深入的研究分析。他认为理想薄平板的经典扭弯耦合颤振不是由刚度驱动的, 系统扭转牵连运动气动阻尼也不等同于 A_2^* 所代表的那部分气动阻尼, 这类颤振现象真实的驱动原因是扭转和竖向运动耦合效应所产生的耦合项气动负阻尼, 特别是 D 项耦合气动负阻尼, 这也就是说, 在经典扭弯耦合颤振的自由度耦合效应中, 扭转主运动位移所产生的气动升力激发起耦合竖向运动, 耦合竖向运动的速度产生的耦合气动升力矩又反馈作用到扭转主运动上的这样一条激励反馈路线是导致系统发散的主线。根据这一分析方法, 通过分析气动阻尼的由正变负, 可以计算得到平板的颤振临界风速。

1.4.2 PIV 流场测试技术

PIV (粒子图像速度场仪) 是 20 世纪 80 年代发展起来的流动测试手段, 具有瞬时性、

全场性、无损性和定量性等特点。它是在传统流动显示技术基础上,利用图形图像处理技术发展起来的一种新的流动测量技术。既具备了单点测量技术的精度和分辨率,又能获得平面流场显示的整体结构和瞬态图像。

PIV 技术的基本原理是:在流场中布散示踪粒子,以粒子速度代表其所在流场内相应位置处流体的运动速度。使用脉冲激光片光源入射到所测流场区域中,通过连续两次或多次曝光,粒子的图像被记录在底片上或 CCD 相机上。逐点处理 PIV 底片或 CCD 记录的图像,用图像分析技术(如自相关法或互相关法等)得到流场中各点的流速矢量,获得流场速度分布,并由此计算出其他运动参量(包括流场速度矢量图、速度分量图、流线图、游度图等)。PIV 设备测速流程参见图 1.4。



图 1.4 PIV 设备测速流程

PIV 技术的出现只有 20 多年的时间,但已经广泛应用到几乎所有与流体有关的研究领域中。对于钝体绕流的研究主要集中在低矮建筑或以高耸建筑为原型,研究手段以 PIV 技术测量速度场与传统风洞测压相比较的方法。Kyung Chun Kim 等于 2003 年在釜山国立大学的边界层风洞运用 PIV 分析了低矮建筑模型的周围流场,结果同以往常规方法大致吻合,试验也表明,采用 PIV 技术能够揭示如局部小涡这样的结构,还能精确确定回旋区域的大小及再附点的位置等。

Taylor^[22]等人于 2006 年研究了方柱周围的流场和表面压力分布情况,他们将 PIV 技术结合测压试验和 CFD 计算结果进行了比较,结果表明二者差别较大。E. Palombi^[23]等人于 2006 年对不同类型的桥梁断面进行了 PIV 试验,这些断面包括矩形断面、带不同倒角的矩形断面及大海带桥断面,他们分析了几种断面的尾流特征和漩涡大小,并比较了相应的升力系数。

1.5 研究思路

基于目前颤振机理的研究相对滞后,本书在总结国内外研究人员对桥梁颤振机理研究的基础上,以结构自激振动能量的分布与转化为重点研究对象,在宏观和细观两个层次上从能量的角度出发研究结构颤振的能量分配与转化规律。

在宏观层次上从二维两自由度耦合颤振分析方法入手,设定了考虑阻尼影响的竖向和扭转振动方程的最一般形式,竖向和扭转振动方程不再采用颤振临界状态时的等幅正弦振动的形式。由于颤振过程中竖向系统和扭转系统的相互耦合作用,竖向振动和扭转振动的方程都拓宽到能同时包含竖向运动频率成分和扭转运动频率成分的形式,不再采用仅以一



个颤振扭转频率来表达的运动方程形式,采用分步分析的思想确定了扭转振动方程中由竖向运动激发的扭转运动,也就是扭转运动方程中所包含的竖向频率成分的振动,用同样的方法确定竖向运动方程中扭转频率成分的振动。建立耦合颤振能量控制方程后,根据确定的振动方程形式来分析一个振动周期内系统内各气动力、机械阻尼、弹性力、惯性力做功情况及能量在扭转自由度和竖向自由度之间的传递和反馈,计算能量在不同自由度上的分配。根据系统能量变化情况建立颤振能量稳定条件,分析引起桥梁断面颤振的主要能量来源、能量输入方式及影响输入能量大小的主要因素。

在细观层次上采用 CFD 数值计算和 PIV 试验相结合的研究手段,首先通过 PIV 试验研究了典型桥梁断面静止状态下绕流特征,并将试验结果与 CFD 计算结果进行了对比验证,确定了适合不同断面的数值计算的湍流模型,为振动断面的数值计算模拟提供了依据。

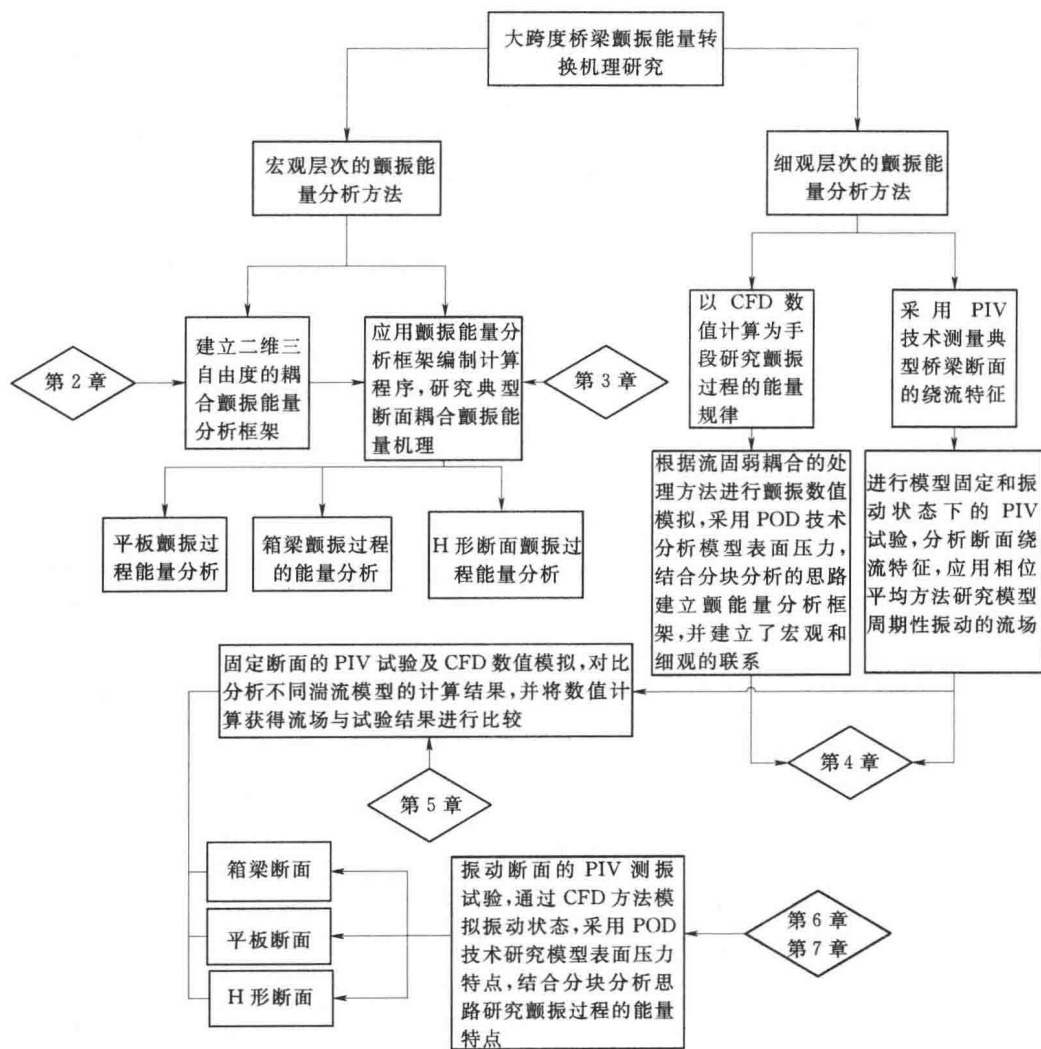


图 1.5 技术路线流程图