



同济大学优秀博士论文文库

大跨度桥梁耦合颤抖振 响应分析



DAKUADU QIAOLIANG OUHE CHANDOUZHEN XIANGYING FENXI

丁泉顺 著



同济大学出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学优秀博士论文文库
同济大学研究生院出版基金资助

大跨度桥梁耦合颤抖振响应分析

丁泉顺 著

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书回顾了桥梁风工程中颤振和抖振的研究概况,提出了桥梁断面颤振导数识别的修正最小二乘方法等,建立了用于分析桥梁结构气动耦合颤振问题统一的多模态和全阶方法,并证实了其可靠性和有效性,发展了用于大跨度桥梁耦合抖振响应分析的有限元 CQC 方法,论述了桥梁结构非线性颤抖振响应的时域方法,对大跨度桥梁非线性风致振动问题进行了分析和研究,并总结了理论与方法以及实际应用方面的研究成果,对今后进一步的研究与发展提出了合理的建议。

本书是一本桥梁风工程领域的研究专著,可供桥梁工程教学与科研人员,以及桥梁抗风设计和建造工程师们参考使用。

本书的研究工作由国家自然科学基金重大项目资助(编号 59895410)。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度桥梁耦合颤抖振响应分析/丁泉顺著. —上海:同济大学出版社,2007.4
(同济大学优秀博士论文文库)
ISBN 978-7-5608-3404-7

I. 大… II. 丁… III. 长跨桥—振动分析
IV. U448.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155901 号

同济大学优秀博士论文文库

大跨度桥梁耦合颤抖振响应分析

丁泉顺 著

责任编辑 兰孝仁 责任校对 徐春莲 封面设计 李志云

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏句容排印厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 9.25
字 数 225 000
版 次 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-3404-7/U·64

定 价 28.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

出版说明

“本科教育为立校之本,研究生教育为强校之路”。20 余年来,同济大学始终把全面提高培养质量作为研究生教育改革的指导思想,取得了较好效果,为国家培养了一大批高素质的高级专门人才.在连续多年的“全国百篇优秀博士学位论文”评选中,我校先后有 7 篇论文入选,另有 7 篇论文获得提名.

在此,我们选编了海洋科学、土木工程、建筑学等学科的 10 篇获奖论文,辑录出版《同济大学优秀博士文库》第一辑,以展现我校研究生教育的优秀成果.同时,也希望以此为契机,进一步加强我校高层次创造性人才的培养工作,鼓励创新精神,提高我校研究生教育,特别是博士生教育的质量.

谨以本套丛书,向百年华诞的同济大学献礼!

同济大学研究生院

2007 年 3 月

前 言

《大跨度桥梁耦合颤抖振响应分析》主要内容是著者在攻读博士学位期间从事科研工作所取得的创新性成果积累。在长沙铁道学院陈政清教授的推荐下,著者怀着对桥梁风工程研究的憧憬进入同济大学桥梁系攻读博士学位。经国家自然科学基金委批准,由导师项海帆教授主持九五国家自然科学基金重大项目“大型复杂结构体系的关键科学问题及设计理论”(编号59895410)。通过与导师多次讨论,确定将该项目子课题中大跨度桥梁颤振和抖振分析作为著者博士学位论文的研究课题。

颤振和抖振问题一直都是桥梁风工程研究的焦点。经过许多研究学者的不懈努力,已初步建立了分析桥梁颤振和抖振响应的基本理论和实用方法,为本书的研究奠定了扎实的基础。尽管如此,桥梁颤振和抖振问题的研究仍不完善,尚有不少有待进一步研究的课题。譬如,随着现代桥梁结构向跨度更大、更柔、更纤细的方向发展,大跨度桥梁结构颤振和抖振响应中模态耦合效应显著,且非线性问题更加突出。基于上述考虑,我感觉到该课题的研究是具有实际意义的。

一直以来,作为桥梁颤振和抖振分析重要环节之一的桥梁断面颤振导数识别中存在着不少的问题,如高风速范围和涡振区颤振导数的识别以及识别方法的稳定性等,这些方面我在前期风洞试验过程中都深有体会。有效解决这些问题是提高桥梁断面颤振导数识别精度的迫切需要。著者纵观桥梁颤振分析之后发现,现有分析方法多数是基于双参数搜索的迭代方法。部分学者所提出的单参数搜索方法有的需要迭代,有的需要对颤振导数进行预处理等,应用起来不方便。本书基于固有模态坐标提出了一种不迭代的单参数搜索方法,简单实用,具有很好的强健性和自动性。同时,为了完善桥梁颤振分析的理论方法体系,将其扩展到物理坐标,但此时需要迭代。在大跨度桥梁抖振频域分析方面,理论方法较为完善。然而,如果要考虑大跨度桥梁各部分构件上的风荷载,如桥塔和斜拉索上的抖振力时,计算量问题就非常突出。在合理假设的基础上,本书发展的大跨度桥梁耦合抖振响应有限元 CQC 分析方法则有效地解决了这方面地问题。

由于其简单、实用、高效等特点,桥梁结构颤振和抖振频域分析一直以来都被广泛应用。尽管如此,我们同时也要认识到频域分析中所存在的局限性。它不能全面地反映结构的非线性行为,不能考虑气动非线性因素,并且在频域中研究紊流对桥梁颤振稳定性的影响也存在着较大的难度。从研究方法本身的角度来说,时域分析方法则给予了我们更大的自由度,不失为一个有力的研究工具。著者开展桥梁结构颤抖振时域分析方面研究工作的目的在于试图考虑结构和气动非线性等因素对大跨度桥梁颤抖振响应的影响。

全书共分7章,第1章简要回顾了桥梁颤振和抖振的研究概况;第2章提出了桥梁断面颤振导数识别的修正最小二乘方法等;第3章建立了用于分析桥梁结构气动耦合颤振问题统一的多模态和全阶方法,并证实了其可靠性和有效性;第4章发展了用于大跨度桥梁耦合抖振响应分析的有限元 CQC 方法;第5章和第6章论述了桥梁结构非线性颤抖振响应的时域方法,对大跨度桥梁非线性风致振动问题进行了研究;第7章对本书在理论方法和实际应用方面的

成果进行了总结和建议。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重大项目(编号 59895410)的资助;本书的出版得到同济大学研究生院出版基金的资助,导师三年来的辛勤培养使我得以顺利地完成了本课题的研究,在此,著者表示衷心的感谢。值得注意的是,书中部分研究结论目前尚无定论,仅代表著者的个人观点,尚有待进一步的研究进行验证,望读者谨慎参考。书中若有差错和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2006 年 10 月

目次

出版说明

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 大跨度桥梁的发展	(1)
1.2 桥梁颤抖振研究概况	(2)
1.2.1 颤振	(2)
1.2.2 抖振	(8)
1.2.3 时域颤抖振	(11)
1.3 本书研究的内容	(13)
第2章 桥梁断面颤振导数的识别	(15)
2.1 颤振导数识别的修正最小二乘方法	(16)
2.1.1 分析模型	(16)
2.1.2 颤振导数识别方法	(18)
2.1.3 确定复频率初始值	(21)
2.2 高风速时颤振导数的非耦合识别方法	(22)
2.3 涡振区颤振导数的识别	(24)
2.3.1 竖弯涡振	(24)
2.3.2 扭转涡振	(25)
2.4 节段模型颤振导数识别试验	(26)
2.4.1 改进效果	(26)
2.4.2 润扬长江悬索桥节段模型试验	(27)
2.5 小结	(31)
第3章 均匀流场耦合颤振频域分析	(32)
3.1 颤振基本理论	(33)
3.2 多模态颤振自动分析方法	(35)
3.3 耦合颤振全阶分析方法	(38)
3.4 算例分析	(41)
3.4.1 具有理想平板截面的简支梁	(41)
3.4.2 江阴长江大桥颤振分析	(43)
3.4.3 杨浦大桥颤振分析	(52)
3.5 小结	(56)
第4章 耦合抖振响应频域分析	(58)
4.1 气动运动控制方程	(58)
4.2 耦合抖振有限元 CQC 分析方法	(60)
4.3 大气边界层脉动风速谱的选取	(62)
4.4 算例分析	(63)

4.4.1 薄平板截面简支梁结构	(64)
4.4.2 江阴长江大桥抖振分析	(64)
4.4.3 杨浦大桥抖振分析	(74)
4.5 小 结	(78)
第5章 非线性颤抖振时域分析方法	(80)
5.1 三维空间脉动风速场的计算机模拟	(80)
5.1.1 Shinozuka's 谐波合成法	(81)
5.1.2 Deodatis' 谐波合成法	(82)
5.1.3 AR(p)线性滤波法	(84)
5.1.4 数值算例	(85)
5.2 风荷载处理	(90)
5.2.1 静风力荷载	(90)
5.2.2 抖振力荷载	(91)
5.2.3 自激力处理	(92)
5.3 非线性颤抖振时程分析	(98)
5.3.1 大跨度桥梁结构的有限元模型	(98)
5.3.2 结构几何非线性分析方法	(98)
5.3.3 动力平衡方程及求解策略	(100)
5.3.4 大跨度桥梁颤抖振时程分析	(101)
5.4 程序编制与算例验证	(102)
5.4.1 平面坦拱的静力大变形分析(算例1)	(103)
5.4.2 空间非线性静动力分析(算例2)	(103)
5.4.3 颤振时域分析验证(算例3)	(104)
5.4.4 抖振时域分析验证(算例4)	(106)
5.5 小 结	(107)
第6章 大跨度桥梁非线性颤抖振分析	(109)
6.1 润扬长江悬索桥	(109)
6.2 润扬长江悬索桥颤抖振频域与时域分析	(113)
6.2.1 耦合颤振分析	(113)
6.2.2 耦合抖振分析	(116)
6.3 考虑静风荷载作用桥梁颤抖振分析	(118)
6.4 桥梁颤抖振响应参数的分析	(120)
6.5 小 结	(125)
第7章 结 语	(127)
7.1 理论方法上的进步	(127)
7.2 实际应用结论	(128)
7.3 改进和建议	(130)
参考文献	(131)
后 记	(137)

第1章 绪论

1.1 大跨度桥梁的发展

在人类文明的发展史中,桥梁占有重要的一页。中国古代桥梁技术曾经有过辉煌的业绩,中国的古代木桥、石桥和铁索桥都长时间占据世界领先地位。

15世纪的意大利文艺复兴和18世纪的英国工业革命造就了近代科学技术,也使欧美各国相继进入现代桥梁工程的新时期。到18世纪末,英国伦敦的铁拱桥就已达183m的跨度。19世纪是钢桥的世纪,钢桥的跨度从世纪初的200m到世纪末已突破了500m。这一进步凝聚了许多桥梁先驱者的智慧和艰辛。

进入20世纪之后,随着现代科学技术的迅速发展,桥梁工程也取得了惊人的成就。1931年建成的纽约华盛顿悬索桥,主跨突破了千米,达到1067m。随后为庆祝1937年旧金山世界博览会而建造的跨度1280m的金门大桥,是这一时期桥梁工程的代表作。第二次世界大战后,预应力混凝土技术的应用完全改变了传统的施工方式,使梁桥的跨度飞速增加到200m以上。斜拉桥的复兴是另一辉煌的成就。这一桥型以其多姿多态的造型、方便的施工和竞争力,使第二次世界大战前常用的一些大跨度钢桥,如钢拱桥和钢桁架桥失去了原有的竞争地位。现代斜拉桥在200m到800m跨度的范围内显示出的优越性,使之成为大跨度桥梁的最主要桥型,也迫使悬索桥向更大跨度方向退让。英式钢箱悬索桥的问世创造了一种更经济,抗风能力更好的新型悬索桥,并成为20世纪悬索桥的主流。

20世纪60年代,日本和丹麦两个岛国率先实施了宏伟的跨海工程计划。日本以关门桥为起点,建设具有东中西三条通道的本州—四国联络线工程,并以创本世纪跨度的明石海峡大桥(1991m悬索桥)和多多罗大桥(890m斜拉桥)的建成宣告这一计划的胜利实现。丹麦则从小海带桥开始,以最终建成连接领土两岛的大海带桥(排名世界第二位的1624m悬索桥)成为新崛起的桥梁强国。法国也以居世界第二位的诺曼底桥(856m斜拉桥)的独特设计构思赢得国际桥梁界的赞誉。上述四座大桥被公认为是20世纪桥梁的代表作而载入史册^[1]。

目前,最令国际桥梁工程界瞩目的当属意大利墨西拿海峡(Messina Strait)大桥。这一从意大利半岛到西西里岛的跨海工程早在20世纪50年代就开始规划,经历了40多年的漫长准备,多次修改方案,最后考虑到水文、地质和地震等因素,已确定采用主跨为3300m的单孔悬索桥,它将是世界跨海大桥工程的一座丰碑。此外,在20世纪桥梁工程所取得的巨大成就鼓舞下,一些发达国家在基本完成了本土交通建设的任务后,开始构想更大跨度和更大规模的跨海工程和跨岛工程,如欧非直布罗陀海峡、美亚白令海峡等洲际跨海工程,以期使世界五大洲可以用陆路相连形成交通网。

我国20世纪70年代的改革开放也迎来了桥梁建设的春天,20余年的成就令世人瞩目^[2]。1991年建成的主跨423m上海南浦大桥(结合梁斜拉桥)标志着我国的桥梁技术水平正在迅速赶上世界先进水平,也可以说是这一时期我国桥梁进步的里程碑。继南浦大桥之后,主跨602m记录跨度的上海杨浦大桥的成功兴建,不但使我国的建桥水平上了一个台阶,缩小了

和先进国家的差距,而且增强了全国桥梁界的信心,带动了建造大跨度斜拉桥和悬索桥的新高潮.我国第一座现代悬索桥——汕头海湾大桥的胜利建成进一步促进了我国现代悬索桥建设技术的发展.现已建成通车的主跨跨度 1385m 的江阴长江大桥标志着中国正在走向世界桥梁强国之列.为了满足 21 世纪经济发展的需要,中国交通部规划了被称为“五纵”和“七横”的高等级公路骨架网.其中,太平洋沿岸的同三线(黑龙江同江至海南三亚)包含了五个跨海工程,自北向南依次为:

- ① 渤海湾工程;
- ② 长江口越江工程;
- ③ 杭州湾工程;
- ④ 珠江口伶仃洋工程;
- ⑤ 琼州海峡工程.这些工程的顺利完成将是 21 世纪中国桥梁工程师面临的严峻挑战.

1.2 桥梁颤抖振研究概况

现代桥梁结构向跨度更大、更柔、更纤细的方向发展,这必然导致对风的敏感性增加.在桥梁风毁事故中,最为著名者当属美国跨径 851.2m 的老 Tacoma 吊桥,建成数月后于 1940 年即被风速不足 20m/s 的风振所毁.这个事实大大震撼了土木工程界,从那以后许多学者从事了土木建筑风工程的研究工作,取得了大量的有益成果.现代大跨度桥梁成功设计和建造的一个重要方面在于桥梁结构抗风问题的解决.

众所周知,颤振和抖振问题一直都是桥梁风工程研究的焦点.经过土木工程师和空气动力学家们半个多世纪的不懈努力,已逐步建立了分析桥梁颤振和抖振响应的基本理论和实用方法.作为本论文的研究基础,首先简要回顾一下风工程界在研究桥梁颤抖振问题的过程中所经过的历程.为了与原论文保持一致,这里暂时保留原有的符号表示方式.

1.2.1 颤 振

颤振是由于气动不稳定性引起的一种自激发散振动.该振动现象一旦发生,将导致结构整体的彻底破坏.因此,不论是在航空还是在土木工程领域,颤振都是必须严格杜绝的振动形式.颤振按其振动形态分为单自由度弯曲颤振(弛振)、单自由度扭转颤振(失速颤振)和弯扭耦合颤振(经典颤振).在航空领域中,人们很早就开始认识到机翼的颤振现象,并对之进行了研究.1935 年,Theodorsen^[3]首先从理论上研究了薄平板的空气作用力,用势流理论求得了作用于振动平板上的非定常气动力的解析表达式.1938 年 Von Karman 也得到了同样的结果.

在均匀流场中,平行于来流的二维理想平板作微小振动时所受到的非定常气动升力和扭矩可表示为

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

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

式中 ρ ——空气密度;

b ——平板的半弦长, 板宽 $B=2b$;

U ——空气来流流速;

h, α ——截面竖向位移和扭转角;

k ——无量纲折减频率, $k=\omega b/U$,

ω ——振动的圆频率;

$C(k)$ ——Theodorsen 函数, 当用 Bessel 函数表示时可写成

$$C(k) = F(k) + iG(k). \quad (1.2)$$

式(1.1)奠定了对飞机进行颤振研究的基础. 对于桥梁这种钝体断面型式, 人们试图直接用机翼理论中 Theodorsen 的表达式来近似描述作用于桥梁上的气动力, Bleich^[4]首次运用了这一思路. 他认为在悬索桥中常用的桁架加劲梁的上承桥面接近于一块平板, 而空腹桁架上所受到的空气力相对较小可忽略不计. 此时, 悬索桥桥面的二维颤振运动微分方程可写成

$$m\ddot{h} + m\omega_h^2(1 + ig_h)h = L, \quad (1.3a)$$

$$I\ddot{\alpha} + I\omega_a^2(1 + ig_a)\alpha = M; \quad (1.3b)$$

式中 m, I ——桥面每延米的质量和转动惯量;

ω_h, ω_a ——悬索桥的弯曲基频和扭转基频;

$g_h = 2\xi_h, g_a = 2\xi_a$ ——弯曲和扭转振动的复阻尼系数;

L, M ——Theodorsen 平板气动升力和扭矩.

Bleich 运用结构的固有模态坐标, 将问题转化为变系数的齐次方程组. 并利用系数行列式为零的条件求出临界状态时的 k_c 和 ω_c , 从而得到颤振临界风速. 但由于式(1.1)中的气动力系数 $C(k)$ 是 k 的函数, 因而必须通过迭代方式进行求解. 这便是后来被广泛采用的经典半逆解法的思路.

实验研究表明, 钝体断面的气动力系数对其断面形状非常敏感. 因而 Bleich 采用 Theodorsen 函数的描述方法是严重失真的, 且其求解方法也甚为复杂. 为此, Klöppel 和 Thiele^[5]提出了一种变系数的图解法. 该方法虽同样用 Theodorsen 函数求解桥梁颤振临界风速, 但对实际桥梁断面, 他们引入一个折减系数 η 对计算结果进行修正, 并由各种实验得出的修正系数绘制成图表以供查阅, 其表达式为

$$U_{cr} = \eta U_{c0}. \quad (1.4)$$

1976 年, Van der Put^[6]注意到在影响平板耦合颤振临界风速的诸参数中, 可以偏安全地忽略结构阻尼的影响. 同时他发现, 折减风速与扭弯频率比之间接近线性关系. 据此, 他给出了一个实用的平板颤振临界风速近似公式:

$$U_{cr} = \eta \left[1 + (\epsilon - 0.5) \sqrt{\left(\frac{r}{b}\right)^{0.72} \mu} \right] \omega_h b; \quad (1.5)$$

式中 ϵ ——扭弯频率比, $\epsilon = \frac{f_a}{f_h} = \frac{\omega_a}{\omega_h}$;

μ ——桥梁与空气密度比, $\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}$;

$\frac{r}{b}$ ——桥梁断面的惯性半径比, $\frac{r}{b} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{I}{m}}$.

以上解法尽管有一定的进步,但归根结底仍是沿用平板颤振理论作为参考.然而,实际桥梁断面均具有明显的棱角,其流动情况与平板有着本质的区别.当均匀气流绕过一个振动着非流线型断面时,在迎风面的棱角处气流将发生分离,同时出现旋涡的脱落,且脱落的气流又有可能再附,因而流态十分复杂.用势流理论已不能描述空气作用在非流线体上的非定常力.1966年,日本 Sakata 发表了基于实测气动参数的桥梁颤振分析论文. Scanlan^[7,8]对比了桥梁断面和机翼断面颤振导数的本质差别,建立桥梁结构的分离流扭转颤振理论.他建议用六个实函数的颤振导数表示钝体气动自激力的公式:

$$\begin{cases} L_x = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left[K H_1^* (K) \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* (K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* (K) \alpha \right], \\ M_x = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left[K A_1^* (K) \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* (K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* (K) \alpha \right]; \end{cases} \quad (1.6)$$

式中 K ——折减频率, $K = \frac{\omega B}{U}$;

H_i^*, A_i^* ——颤振导数(也称气动导数),从具体桥梁断面的节段模型试验或 CFD 计算中提取.

Scanlan 同时建议了一种分阶段识别桥梁断面颤振导数的方法,并用该方法对典型桥梁断面形式的颤振导数进行了识别^[8].由于该气动力学模型能较好地反映实际桥梁断面的气动特性和弯扭运动的气动耦合效应,因而自诞生以来便广受欢迎,一直作为桥梁颤振研究的经典公式被桥梁工程界沿用至今.类似于航空中机翼颤振运动方程的求解方法,Scanlan^[9]采用了一种半逆解的方法求解桥梁的颤振临界风速.

近几年来,人们逐渐注意到桥梁断面侧向位移对其气动性能的影响.为此, Sarkar^[10]和 Jones^[11]将上述气动力模型予以推广,提出了用 18 个颤振导数表示的气动力公式:

$$L_x = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left(K H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + K H_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B} \right), \quad (1.7a)$$

$$L_y = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left(K P_1^* \frac{\dot{p}}{U} + K P_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{p}{B} + K P_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right), \quad (1.7b)$$

$$M_x = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left(K A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + K A_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B} \right). \quad (1.7c)$$

在实际应用中,由于 18 个颤振导数识别上的困难,一般需针对具体的情况进行不同程度的简化.

以上所述的颤振研究均对桥梁主梁的节段进行,用该节段的气动特性来代表全桥,忽略了气动特性沿桥梁纵向的变化,所以称为二维颤振理论.对于一般的悬索桥,该简化尚可接受.但对于斜拉桥等桥梁,实验证明节段是不能正确反映全桥的.为此,需要把二维理论推广到三维.

Scanlan^[9]通过引入模态坐标,得出了用广义坐标表示的系统气动运动方程如下:

$$I_i(\ddot{\zeta}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{\zeta}_i + \omega_i^2\zeta_i) = (Q_i)_s; \quad (1.8)$$

式中, ζ_i 为广义模态坐标; I_i 为对应于第 i 模态的广义质量惯矩

$$I_i = M_{Vi}B^2 + M_{Li}B^2 + I_{0i}; \quad (1.9)$$

式中, $M_{Vi} = \int_{\text{span}} m(x)h_i^2(x)dx$, $M_{Li} = \int_{\text{span}} m(x)p_i^2(x)dx$, $I_{0i} = \int_{\text{span}} I(x)\alpha_i^2(x)dx$, 其中, $m(x)$ 和 $I(x)$ 分别为主梁单位长度的分布质量和质量惯矩; $(Q_i)_s$ 为对应于第 i 模态的广义自激力

$$(Q_i)_s = \int_{\text{span}} [L_{se}h_i(x)B + D_{se}p_i(x)B + M_{se}\alpha_i(x)]dx; \quad (1.10)$$

$$L_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2(2B) \left[KH_1^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j h_j B}{U} + KH_2^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j \alpha_j B}{U} + K^2 H_3^*(K) (\sum_j \zeta_j \alpha_j) \right],$$

$$D_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2(2B) \left[KP_1^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j p_j B}{U} + KP_2^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j \alpha_j B}{U} + K^2 P_3^*(K) (\sum_j \zeta_j \alpha_j) \right],$$

$$M_{se} = \frac{1}{2}\rho U^2(2B^2) \left[KA_1^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j h_j B}{U} + KA_2^*(K) \frac{\sum_j \dot{\zeta}_j \alpha_j B}{U} + K^2 A_3^*(K) (\sum_j \zeta_j \alpha_j) \right].$$

通过求解式(1.8)分析桥梁结构的三维颤振问题. 由于用解析方式求解式(1.8)方面的难度, 他建议一种逐个模态的颤振分析方法. 该方法仅分析桥面主梁的运动, 因而只能考虑桥面主梁上气动力的作用.

谢舜明, 项海帆^[12]较早注意到了大跨度斜拉桥多模态耦合颤振的特点. 他们采用二元非定常气动力模型, 提出了多模态颤振分析的状态空间法, 分析中首次结合了有限元方法. 该方法沿用现代控制理论中有关状态空间的概念, 将结构与气流作为一个系统来处理, 取结构广义模态坐标与气动力变量作为描述系统的状态变量, 导出结构颤振的状态空间方程, 从而将结构气动稳定性问题转化为一个一般特征值问题. 根据非定常气动力学原理, 可写出 Laplace 域内二元非定常气动力的一般形式为

$$\bar{F} = \rho V^2 B^T - A(\bar{s}) B \bar{\delta}, \quad (1.11)$$

式中 $\bar{F} = [D \quad L \quad M]^T$, D, L, M 分别为阻力、升力和升力矩的 Laplace 变换;

$$\bar{\delta} = [\bar{\delta}_x \quad \bar{\delta}_y \quad \bar{\delta}_\theta]^T;$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ B \end{bmatrix}, B \text{ 为断面特征宽度};$$

V 为平均风速;

$[A(\bar{s})]$ 为无量纲复系数矩阵, 设其具有 Roger 的有理分式级数型, 即取

$$A(\bar{s}) = P_1 + \bar{s}P_2 + \bar{s}^2P_3 + \sum_{j=1}^N \frac{\bar{s}}{\bar{s} + \gamma_j} Q_j, \quad (1.12)$$

式中 $\bar{s} = \beta + ik$, $\beta = \frac{nB}{V}$ 为无量纲约化阻尼, $k = \frac{\omega B}{V}$ 为无量纲约化频率;

$P_1, P_2, P_3, Q_j (j = 1, \dots, N)$ ——待定实系数矩阵, 阶数均为 3×3 , 且它们都是与频率无关的系数矩阵;

γ_j ——气动力模型参数.

并且, 还建立了初脉冲耦合振动识别方法, 结合卡尔曼滤波技术可以直接从节段模型试验中得出式(1.11)中的系数矩阵 $A(\bar{s})$. 为了与 Scanlan 的实测颤振导数兼容, 也可采用对各级风速下离散的气动力系数进行拟合的方法得到 $A(\bar{s})$.

进而, 桥梁整体结构自激振动有限元方程可写为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F, \quad (1.13)$$

式中 M, C, K ——结构的质量矩阵, 阻尼矩阵和刚度矩阵;

F ——气动自激力向量.

通过数学推导, 最后得到了下列状态空间颤振方程:

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi} \\ \vdots \\ \dot{\xi} \\ \dot{\eta}_1 \\ \vdots \\ \dot{\eta}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ -\tilde{M}^{-1}\tilde{K} & -\tilde{M}^{-1}\tilde{C} & \rho V_0^2 \tilde{M}^{-1} & \cdots & \rho V_0^2 \tilde{M}^{-1} \\ 0 & \tilde{Q}_1 & -\frac{V_0}{B} \gamma_1 I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \tilde{Q}_N & 0 & \cdots & -\frac{V_0}{B} \gamma_N I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \\ \eta_1 \\ \vdots \\ \eta_N \end{pmatrix}, \quad (1.14)$$

式中 $\tilde{M} = I - \rho B^2 \Phi^T \bar{P}_3 \Phi$, Φ 为规格化振型, I 为单位对角矩阵;

$\tilde{C} = [2\xi_i \omega_i] - \rho V_0 B \Phi^T \mu \bar{P}_2 \Phi$;

$\tilde{K} = [\omega_i^2] - \rho V_0^2 \Phi^T \mu^2 \bar{P}_1 \Phi$;

$\tilde{Q}_j = \Phi^T \mu^2 \bar{Q}_j \Phi$;

ξ 为广义模态坐标向量;

η 为增广坐标, 它的 Laplace 变换为

$$\bar{\eta}_j = \frac{s}{s + \frac{V_0}{B} \gamma_j} \tilde{Q}_j \bar{\xi}, \quad (1.15)$$

式中 V_0 ——距地表 10m 高度的基准风速;

μ ——随坐标变化的分布系数, 代表风速在空间分布上是非均匀性的.

只需给定风速, 就可以由式(1.14) 求出表征系统动力特性的各特征值和特征向量, 其中特征值实部代表振动阻尼, 而虚部则代表振动频率. 可见, 该状态空间法是一种单参数搜索的颤振分析方法, 且不需要迭代过程. 但由于确定该气动力模型参数方面的困难, 当时该颤振分析方法没有得到推广. 后来, Scanlan 提出的自激力模型被桥梁风工程界广泛接受和应用. 尽管如此, 谢舜明研究中的许多思想仍被后来的研究者采用, 如初脉冲耦合振动参数识别方法, 有限元方法的应用等. 甚至, 最近有些学者 (Booyapinyo^[13]; Chen^[14]) 在分析颤振时依旧沿用了

该状态空间求解方法,仅在表现形式方面略有不同。

在应用上述单参数的颤振分析状态空间方法之前,需要首先对颤振导数进行最小二乘拟合,这对颤振导数识别结果的完整性有一定的要求。此外,由于增广坐标的引入,式(1.14)的模态根并不都是真实的结构模态根,需要从中辨别出结构模态根,才能判断系统的颤振状态。这些因素都将影响到桥梁颤振分析的自动性。

此后,基于 Scanlan 的线性自激力模型和颤振基本理论,国内外很多学者对大跨度桥梁颤振问题进行了大量的研究。到目前为止,许多学者已经提出了不同的颤振分析方法,大致可分为两种类型。第一类颤振分析方法是基于结构的固有模态坐标,叫多模态(Multimode)颤振分析方法。Agar^[15]和 Beith^[16]将系统颤振运动方程转化为一种不对称实矩阵的特征值问题进行颤振分析,但分析中必须进行两参数搜索的迭代求解。Namini^[17]提出了用于多模态颤振分析的 pK-F 方法,其特点是求解一非线性方程组,能给出结构颤振发生全过程的结果,程韶红^[18]和张新军^[19]在大跨度桥梁颤振分析中均采用了这种方法。陈政清^[20]将颤振分析问题转化为复矩阵的广义特征值问题,并提出了 M-S(Multimode and Single-parameter)颤振分析方法,该方法对于无结构阻尼情况不需要迭代。在他的研究中发现,桥梁结构颤振中高阶模态的参与具有正、负效应。Jain^[21]也将颤振运动方程转化为特征值问题,但通过求解其特征多项式的实部和虚部方程进行颤振分析。这些颤振分析方法基于结构固有模态坐标,计算量较小,应该说各有其特点。与上述状态空间方法不同的是,这些方法直接应用了 Scanlan 的线性气动自激力模型,且它们都需要两参数搜索或迭代过程。迭代计算过程中的稳定性将会影响颤振临界状态搜索的顺利进行,因而它们通常是预先选定用于颤振分析的参与模态,且颤振分析时需要较大幅度的人为参与。

另一类分析大跨度桥颤振问题的方法是基于桥梁结构有限元全模型的物理坐标。这类方法叫做直接(或全模态)颤振分析方法或颤振全阶(Full-order)分析方法。Miyata & Yamada^[22]最早提出了一种直接颤振分析方法。由于当时他忽略了结构阻尼对颤振的影响,因而颤振分析中不需要迭代搜索过程,但该方法分析桥梁颤振的计算量非常大。此后,Dung^[23]进一步发展了该直接颤振分析方法,求解特征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,但它仍不能有效地考虑结构阻尼。Ge^[24]也提出了在物理坐标下分析大跨度桥梁三维颤振的全模态方法。该全模态方法较好地考虑了结构阻尼的影响,但它是一种双参数搜索方法。与多模态颤振分析方法相比,目前的直接(或全模态)颤振分析方法都存在一些缺陷,因而在实际大跨度桥梁颤振分析中很少应用。

以上的桥梁颤振分析都是对均匀流场中的颤振问题而言,没有考虑紊流对桥梁颤振的影响。但有研究表明,紊流对桥梁颤振的影响不能忽略^[25]。目前,研究紊流对桥梁颤振的影响主要有两种途径:确定性方法和随机性方法。Scanlan^[9]和 Scanlan & Jones^[26]提出了一种确定性方法,将紊流场中气动自激力处理为确定性的。除颤振导数直接从紊流场中测定以考虑紊流的影响外,该方法与均匀流情况完全一样。通过紊流场与均匀流场颤振导数的对比,Scanlan 指出紊流对桥梁节段的颤振无趋势性影响。同时他认为,随着桥梁跨度的增加,紊流空间相关性的减弱有可能提高桥梁结构气动的稳定性^[27]。

正如一些实验所观察到的那样,与均匀流场相比,紊流场中的桥梁通常在更高的风速下发生颤振。然而,由于实验设备方面的限制,以前的相似模型实验中产生的紊流尺度均较相似原则要求的小。因此这些实验并没有完全真实地反映紊流对颤振稳定性的影响。

Lin^[28,29] 第一个用随机参激方法(RPE)从数学上模拟了紊流对颤振稳定性的影响,他发现现在紊流度较大的情况下空气中的紊流分量可能减小颤振风速.大尺寸紊流实验中^[25]测定颤振导数的结果在一定程度上支持了 Lin 的结论.随机参激分析的缺点是它的数学复杂性和用于多模态分析时计算量很大,且紊流数学模型的选用对结果有较大的影响^[28-31].

可见,关于紊流对桥梁颤振的影响尚有待进一步的深入研究.

1.2.2 抖 振

实际的自然风均具有一定的紊流特性.抖振是指结构在自然风中脉动成分作用下的随机强迫振动.抖振虽然不会引起灾难性的破坏,但是过大的抖振响应在施工期间可能危及施工人员和机械的安全,在成桥运营阶段则会影响行人和车辆的舒适性和缩短局部构件的疲劳寿命.因此,正确估计桥梁结构的抖振响应是十分重要的.根据引起抖振的脉动风来源不同可将抖振分成:

① 结构物本身尾流引起的尾流抖振;

② 其他结构物尾流引起的抖振;

③ 大气边界层紊流引起的抖振.其中研究最多的大气紊流来流引起的结构抖振现象,也是本书抖振研究的重点之一.

20 世纪六七十年代,国外学者已经开始了对桥梁结构抖振问题的研究. Davenport^[32,33] 最早将概率统计的方法引入到桥梁结构的抖振响应分析中,应用随机振动理论来分析桥梁抖振响应的方法开辟了桥梁气动弹性研究的新领域,并成为至今人们研究抖振问题的主要方法之一.由于自然风场的非定常性, Davenport^[33] 又提出了气动导纳的概念来修正其按准定常气动力模型计算的误差. Davenport 建议的准定常气动抖振力模型可表示如下(其中包括了静风力):

$$L(t) = \bar{L} + 2\bar{L}\chi_{Lu} \frac{u(t)}{U} + \frac{d\bar{L}}{d\alpha}\chi_{Lw} \frac{w(t)}{U}, \quad (1.16a)$$

$$P(t) = \bar{P} + 2\bar{P}\chi_{Pu} \frac{u(t)}{U}, \quad (1.16b)$$

$$M(t) = \bar{M} + 2\bar{M}\chi_{Mu} \frac{u(t)}{U} + \frac{d\bar{M}}{d\alpha}\chi_{Mw} \frac{w(t)}{U}; \quad (1.16c)$$

式中 $u(t), w(t)$ ——水平和竖向脉动风速;

U ——平均风速;

$\chi_{Lu}, \chi_{Lw}, \chi_{Pu}, \chi_{Mu}, \chi_{Mw}$ ——气动导纳函数,它们依赖于桥面的几何构形,且随折减风速而变化;

$\bar{L}, \bar{P}, \bar{M}$ ——平均风引起的升力、阻力和扭矩;

$$\bar{L} = \frac{1}{2}\rho U^2 BC_L(\alpha), \bar{P} = \frac{1}{2}\rho U^2 BC_D(\alpha), \bar{M} = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 C_M(\alpha); \quad (1.17)$$

式中, $C_L(\alpha), C_D(\alpha), C_M(\alpha)$ 分别为桥梁断面的静风升力,阻力和扭矩系数.

通过 Fourier 变换,可以得出抖振力的功率谱密度为

$$S_L(n) = 4\bar{L}^2 |\chi_{Lu}|^2 \frac{S_{uu}(n)}{U^2} + \left(\frac{d\bar{L}}{d\alpha}\right)^2 |\chi_{Lw}|^2 \frac{S_{ww}(n)}{U^2}, \quad (1.18a)$$

$$S_P(n) = 4\bar{P}^2 |\chi_{Pu}|^2 \frac{S_{uu}(n)}{U^2}, \quad (1.18b)$$

$$S_M(n) = 4\bar{M}^2 |\chi_{Mu}|^2 \frac{S_{uu}(n)}{U^2} + \left(\frac{d\bar{M}}{d\alpha}\right)^2 |\chi_{Mu}|^2 \frac{S_{uu}(n)}{U^2}; \quad (1.18c)$$

式中, $S_{uu}(n)$, $S_{uv}(n)$ 分别为水平和竖向脉动风速谱. $|\chi_{Lu}|^2$, $|\chi_{Lv}|^2$, $|\chi_{Pu}|^2$, $|\chi_{Pv}|^2$, $|\chi_{Mu}|^2$, $|\chi_{Mv}|^2$ 通常被称为气动导纳. 由于桥梁断面的钝体性质, 至今还没有适用于桥梁抖振响应分析的气动导纳表达式.

对于方形截面的构件, Davenport 给出了其气动导纳的近似表达式如下^[33]

$$|\chi(\xi)|^2 \approx C(\xi) = \frac{2}{(7\xi)^2} (7\xi - 1 + e^{-7\xi}). \quad (1.19)$$

但对扁平状的桥梁断面来说, 他认为气动导纳采用 Sears 函数可能更为合理.

若将桥面运动按模态进行分解, 可得出不同方向上第 r 阶模态的广义气动抖振力功率谱为(以阻力为例)

$$S_{Pr}(n_r) = 4\bar{P}^2 |\chi_{Pu}|^2 |J_r(n_r)|^2 \frac{S_{uu}(n_r)}{U^2}, \quad (1.20)$$

式中, $|J_r(n_r)|^2$ 为反映脉动风速空间相关性的联合接受函数.

对于自激力在抖振中的表现, Davenport 仅考虑了其中非耦合气动阻尼力的作用. 由此得出各模态的抖振响应谱, 从而确定结构的抖振响应.

Davenport 为了修正准定常气动力的误差, 引入了气动导纳函数, 为了反映抖振力沿跨向的相关性, 采用了联合接受函数, 但他对自激力则仅考虑了气动阻尼的影响而忽略了气动刚度的作用和气动耦合效应. 对于断面两个方向的尺寸相当的结构, 这样简化还基本上可以接受. 但对于大跨度桥梁断面来说, 特别是由于竖向和扭转运动的相互耦合作用, 这种简化则是非常局限的. 为此, Scanlan^[9, 21, 34] 在其建立的颤振分析理论基础上, 提出了考虑结构自身运动引起的自激力以及自然风产生的抖振力同时作用下的颤抖振分析理论. 他特别强调了气动自激力在抖振中的参与效应. 基于准定常气动力理论, Scanlan 建议用如下表达式描述作用于桥梁上的抖振力:

$$L_b(t) = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[2C_L(\alpha) \frac{u(t)}{U} + \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D(\alpha) \right) \frac{w(t)}{U} \right], \quad (1.21a)$$

$$D_b(t) = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[2C_D(\alpha) \frac{u(t)}{U} + \frac{dC_D}{d\alpha} \frac{w(t)}{U} \right], \quad (1.21b)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \left[2C_M(\alpha) \frac{u(t)}{U} + \frac{dC_M}{d\alpha} \frac{w(t)}{U} \right]. \quad (1.21c)$$

可以看出, 式(1.21)与式(1.16)稍有不同, 且在桥梁结构的抖振响应分析中, 他没有考虑气动导纳的影响. Scanlan 分析桥梁结构的抖振响应主要还是在频域中进行, 其中自激力处理为气动刚度和气动阻尼. 其余的计算方面与 Davenport 基本相同, 都是通过模态分解, 求得各阶模态的响应谱, 再迭加得到结构位移和内力总的响应谱. Scanlan 的抖振分析理论较为全面地考虑了自激力的作用, 但偏安全地忽略了气动导纳的影响.