



同济大学 1907-2017  
Tongji University

 同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张志田 葛耀君 著

# 大跨度桥梁非线性抖振 及其对抗风稳定性影响的研究

Nonlinear Buffeting Vibration and Its Effects  
on Aerostatic and Aerodynamic Stability  
of Long-Span Bridges

 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张志田 葛耀君 著

# 大跨度桥梁非线性抖振 及其对抗风稳定性影响的研究

Nonlinear Buffeting Vibration and Its Effects  
on Aerostatic and Aerodynamic Stability  
of Long-Span Bridges



 同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书是有关大跨度桥梁非线性抖振及抗风稳定性的研究著作,共7章内容,主要阐述了大跨度桥梁在线性抖振、非线性抖振的时域分析,风荷载的动力稳定性和静力稳定性等方面的内容。全书主要从风洞试验入手进行研究,建立了相关的模拟计算模型,并对理论数据和试验数据进行了比较,运用了大量的实验数据进行阐述,具有直观性和实践性。

本书适合桥梁工程、土木工程及相关专业的专业人士作为参考资料,也可供对此有兴趣的人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大跨度桥梁非线性抖振及其对抗风稳定性影响的研究 /  
张志田, 葛耀君著. —上海: 同济大学出版社,  
2018. 11

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 6870 - 7

I. ①大… II. ①张… ②葛… III. ①长跨桥—非线性  
振动—抖振—研究②长跨桥—非线性振动—风致振动—  
稳定性—研究 IV. ①U448.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 270274 号

---

## 大跨度桥梁非线性抖振及其对抗风稳定性影响的研究

张志田 葛耀君 著

出品人 华春荣 责任编辑 马继兰 熊磊丽

责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://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

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 11.75

字 数 235 000

版 次 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6870 - 7

---

定 价 58.00 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

# “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

# “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 闾耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月



# 论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

# 前言

为了精确计算桥梁风致抖振响应,人们普遍关注的只是气动导纳的研究。然而,在影响桥梁抖振响应计算的诸多因素中,气动导纳只是其中的一个方面,抖振计算中还涉及气动刚度与气动阻尼的计算模型、结构几何非线性和抖振荷载非线性等因素。同样重要的一个问题是抖振响应对桥梁抗风稳定性的影响,包括动力失稳与静力发散。桥梁抖振响应与抗风稳定问题并非是相互独立的两个问题,它们是密切相关的,要实现任一方面的精确分析,两者不可缺一。

本书对大跨度桥梁非线性抖振计算和考虑抖振影响的静风稳定性以及颤振稳定性进行了研究,主要完成了以下几个方面的研究工作:

1. 从风洞试验入手,分析了现有最小二乘法识别气动导数的不足以及据此进行气动刚度和气动阻尼计算的误差。为此,本书建议采用准定常模型计算气动刚度、采用节段模型试验结果作为阻尼值,经理论计算与试验结果比较,该法具有较高的计算精度。

2. 采用现有频域线性抖振计算方法,以东海大桥与西堍门大桥为研究背景,对比分析了本书提出的抖振响应计算方法与 Scanlan 颤抖振方法的差异。

3. 完善了现有时域非线性抖振计算方法,通过与频域计算结果的对比,着重研究了几何非线性因素与静风预张力效应对大跨度桥梁抖振的影响。研究表明,几何非线性与静风预张力效应对抖振振幅的影响可能是导致目前抖振响应计算误差大的主要原因,忽略几何非线性与静风预张力效应将导致抖振振幅明显偏大。

4. 编制了时域内均匀流场中三维桥梁颤振稳定分析程序,并提出了采用有限范围内搜索的线性最优化方法来代替以往对预设初始向量相当敏感的非线性最小二乘法。

5. 在桥梁静风稳定性分析方面,采用超松弛迭代法分析了静风扭转发散的机理;提出了采用动力有限元法分析考虑脉动风抖振影响的桥梁静风稳定问题。研究表明,脉动风抖振对静风稳定性是有利的。

# 目 录

总序  
论丛前言  
前言

第 1 章 概述 .....	1
1.1 颤振失稳 .....	1
1.1.1 古典耦合颤振 .....	2
1.1.2 分离流颤振 .....	4
1.1.3 三维颤振分析 .....	5
1.2 驰振 .....	7
1.3 静风失稳 .....	8
1.4 随机抖振 .....	9
1.5 涡激振动 .....	12
1.6 主要研究目的与内容 .....	15
第 2 章 气动刚度与气动阻尼确定 .....	16
2.1 非定常模型 .....	17
2.2 准定常模型 .....	21
2.3 气动刚度计算 .....	23
2.4 气动阻尼计算 .....	32

2.5	本章小结 .....	35
<b>第3章</b>	<b>线性抖振频域分析 .....</b>	<b>36</b>
3.1	现有分析方法 .....	36
3.2	基于气动新模型的分析方法 .....	40
3.3	抖振频域分析数值比较 .....	45
3.3.1	东海大桥抖振响应计算 .....	45
3.3.2	西堍门大桥抖振响应计算 .....	49
3.4	本章小结 .....	54
<b>第4章</b>	<b>非线性抖振时域分析 .....</b>	<b>55</b>
4.1	时域抖振分析基本方程 .....	55
4.2	脉动风功率谱密度 .....	57
4.3	风谱模拟的谐波合成法 .....	58
4.4	抖振时域分析数值比较 .....	65
4.5	抖振响应影响因素的探讨 .....	70
4.5.1	几何非线性影响 .....	70
4.5.2	静风预张力影响 .....	72
4.6	本章小结 .....	76
<b>第5章</b>	<b>风致动力稳定分析 .....</b>	<b>77</b>
5.1	自激力时域表达 .....	77
5.2	非线性有限元程序验证 .....	85
5.3	非线性颤振时域分析数值比较 .....	86
5.3.1	东海大桥颤振分析 .....	86
5.3.2	西堍门大桥颤振分析 .....	89
5.4	本章小结 .....	92

<b>第 6 章 风致静力稳定性分析</b> .....	94
6.1 现有静风稳定分析方法 .....	94
6.2 不计抖振影响的静风稳定 .....	97
6.3 考虑抖振影响的时域分析 .....	101
6.4 基于振型叠加的静风稳定频域分析 .....	102
6.5 西埃门大桥静风稳定分析 .....	106
6.5.1 ANSYS 计算 .....	106
6.5.2 动力有限元计算 .....	108
6.5.3 基于模态叠加的计算 .....	110
6.6 东海大桥静风稳定分析 .....	112
6.6.1 ANSYS 计算 .....	113
6.6.2 动力有限元计算 .....	114
6.6.3 基于模态叠加的计算 .....	116
6.7 抖振响应对静力失稳的影响 .....	117
6.8 材料非线性的影响 .....	121
6.9 静风失稳机理的探讨 .....	122
6.10 本章小结 .....	123
<b>第 7 章 结论与展望</b> .....	125
7.1 主要研究工作 .....	125
7.2 主要研究结论 .....	126
7.3 今后研究展望 .....	127
<b>参考文献</b> .....	129
<b>附录 PBRW 程序类文件使用说明</b> .....	139
<b>后记</b> .....	172

# 第 1 章

## 概 述

自 1940 年美国塔科马悬索桥风毁事故以来,桥梁的风致响应问题越来越受到世界桥梁界工程师们的重视与关注。我国正处于一个跨海大桥兴建的阶段,跨海大桥有结构跨度大、柔性大、自振频率低、风荷载大的显著特点,因此,风荷载作用下其静动力响应问题尤其突出。目前为止,人们所关心的大跨度桥梁风致响应问题主要有以下五个方面,即颤振失稳、静风发散、随机抖振、涡激振动以及驰振失稳。

### 1.1 颤 振 失 稳

桥梁颤振是一种空气动力失稳现象。当气流流经桥梁结构断面时,对于刚度小柔度大的大跨度桥梁,空气作用力表现为静力作用与动力作用两方面。风的动力作用激发了桥梁结构的振动,振动的结构又反过来影响空气的流动、改变空气力,从而形成风与结构的相互作用机制。当空气力受结构振动的影响较小时,空气的动力作用可以看作是一种强迫振动荷载;而当空气力受结构振动影响较大从而形成一个具有相互作用反馈机制的动力系统时,气动力表现为一种结构自激力的形式。当振动系统的机械阻



尼与气动阻尼之和小于零时,则系统能量将不断增大一直到发散,桥梁结构这种空气动力失稳现象称为颤振失稳。

自 1940 年美国 Tacoma 大桥风毁事故以来,借助于航空的已有成就,各国学者致力于研究桥梁空气动力失稳的机理及防止桥梁颤振发散的气动措施。对于无分离流动的理想流线型断面的颤振,Theodorson、Bleich、Van der put 等学者的研究已经形成较为完善的古典耦合颤振理论。实际工程中的加劲梁断面在来流作用下,大多会产生气流分离,这种有分离流的钝体断面,其颤振特性目前主要通过风洞试验来解决,理论上的计算也只能依赖于实验得出的气动导数来加以近似分析,即目前桥梁抗风中广泛使用的 Scanlan 自激力模型。随着计算机应用的发展,各国风工程界的学者们开始以计算流体力学 CFD 为基础对桥梁颤振的风场特性以及颤振机理展开研究。

### 1.1.1 古典耦合颤振

对于理想平板的非定常气动力,Theodorson 于 1935 年用势流理论得出其表达式,即二维理想平板在均匀水平流中作微小振动所受到的非定常空气升力与升力矩可以表示为<sup>[89,100]</sup>:

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

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

式中, $\rho$ 为空气密度; $b$ 为平板的半宽度; $v$ 为空气流速; $h, \alpha$ 分别为截面竖向位移与扭转角; $k$ 为折算频率; $k = \omega b/v, \omega$ 为振动的圆频率; $C(k)$ 为 Theodorson 函数,当用 Bessel 函数表示时,可写成  $C(k) = F(k) + iG(k)$ 。

$$C(k) = 1 - \frac{0.165}{1 - \frac{0.0455}{k} \cdot i} - \frac{0.335}{1 - \frac{0.3}{k} \cdot i} \quad (1-2)$$