



大连理工大学学术文库

长跨桥梁三维风振分析

Three Dimensional
**Wind-Induced Vibration Analysis
of Long-Span Bridges**

孙东科◇著



大连理工大学出版社 Dalian University of Technology Press

大连理工大学学术文库

长跨桥梁三维风振分析

孙东科 著

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

长跨桥梁三维风振分析 / 孙东科著. —大连: 大连理工大学出版社, 2013. 10

(大连理工大学学术文库)

ISBN 978-7-5611-8164-5

I. ①长… II. ①孙… III. ①长跨桥—风振控制
IV. ①U448.431

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 196557 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连金华光彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:155mm×230mm	印张:14.25	字数:171 千字
2013 年 10 月第 1 版	2013 年 10 月第 1 次印刷	

责任编辑:遼东敏 周 瑜

责任校对:李建英

封面设计:陈佳靖

ISBN 978-7-5611-8164-5

定 价:45.00 元

Dalian University of Technology Academic Series

**Three Dimensional Wind-Induced
Vibration Analysis of Long-Span Bridges**

Sun Dong-ke

Dalian University of Technology Press

**《大连理工大学学术文库》
编委会**

主 任：申长雨

副主任：李俊杰 曲景平

委 员：胡祥培 宋永臣 金英伟

序

教育是国家和民族振兴发展的根本事业。决定中国未来发展的关键在人才,基础在教育。大学是培育创新人才的高地,是新知识、新思想、新科技诞生的摇篮,是人类生存与发展的精神家园。改革开放三十多年,我们国家积累了强大的发展力量,取得了举世瞩目的各项成就,教育也因此迎来了前所未有的发展机遇。国内很多高校都因此趁势而上,高等教育在全国呈现出欣欣向荣的发展态势。

在这大好形势下,我校本着“海纳百川、自强不息、厚德笃学、知行合一”的精神,长期以来在培养精英人才、促进科技进步、传承优秀文化等方面进行着孜孜不倦的追求。特别是在人才培养方面,学校上下同心协力,下足功夫,坚持不懈地认真抓好培养质量工作,营造创新型人才成长环境,全面提高学生的创新能力、创新意识和创新思维,一批批优秀人才脱颖而出,其成果令人欣慰。

优秀的学术成果需要传播。出版社作为文化生产者,一直肩负着“传播知识,传承文明”的历史使命,积极推进大学文化建设和大学学术文化传播是出版社的责任。我非常高兴地看到,我校出版社能够始终抱有这种高度的使命感,积极挖掘学校的学术出版资源,以充分展示学校的学术活力和学术实力。

在我校研究生院的积极支持和配合下,出版社精心策划和编辑出版的“大连理工大学学术文库”即将付梓面市,该套丛书也获得了大连市政府的重点资助。第一批出版的是获得“全国百优博士论文”称号的6篇博士论文。这6篇论文体现了化工、土木、计算力学等几个专业的学术培养成果,有学术创新,反映出我校近几年博士生培养的水平。

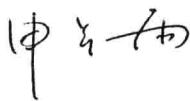
评选优秀学位论文是教育部贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》、实施辽宁省“研究生教育创新计划”的重要内

容,是提高研究生培养和学位授予质量,鼓励创新,促进高层次人才脱颖而出的重要举措。国务院学位办和省学位办从1999年开始首次评选,至今已开展14次。截至目前,我校已有7篇博士学位论文荣获全国优秀博士学位论文,30篇博士学位论文获全国优秀博士学位论文提名论文,82篇博士学位论文获辽宁省优秀博士学位论文。所有这些优秀博士论文都已经列入了“大连理工大学学术文库”出版工程之中,在不久的将来这些优秀论文会陆续出版。我相信,这些优秀论文的出版在传播学术文化和展示研究生培养成果的同时,一定会在全校范围内营造出一个在学术上争先创优的良好氛围,为进一步提高学校的人才培养质量做出重要贡献。

博士生是我们国家学术发展最重要的力量,在某种程度上代表了国家学术发展的未来。因此,这套丛书的出版必然会有助于孵化我校未来的学术精英,有效推动我校学术队伍的快速成长,意义极其深远。

高等学校承担着人才培养、科学研究、服务社会、文化传承创新四大职能任务,人才培养作为高等教育的根本使命一直是重中之重。2012年辽宁省又启动了“大连理工大学领军大学建设工程”,明确要求我们要大力实施“顶尖学科建设计划”和“高端人才支撑计划”,这给我校的人才培养提供了新的机遇。我相信,在校师生的共同努力下,立足于持续,立足于内涵,立足于创新,进一步凝心聚力,推动学校的内涵式发展;改革创新,攻坚克难,追求卓越,我校一定会迎来美好的学术明天。

大连理工大学校长



2013年10月

摘 要

风致振动问题对于长跨桥来说至关重要。桥梁风工程经过几十年的发展,在对风振现象本身的研究,以及发展解析与试验相结合的方法解决颤振、抖振和涡振问题等方面均取得了长足的进步。在三维随机风场的测量与统计方面也已有了相当的积累。所有这些成果为三维抖振分析奠定了坚实的基础。直到 Jain 等将多模态方法扩展到抖振和颤振分析之前,单振型抖振分析方法一直占据主导地位。尽管传统方法引进了正交三维振型以考虑振型间的气动与机械耦合,但在体系与形式上都不能与现代结构有限元模型构成匹配关系。本书基于传统气动理论,并结合有限元法提出了用于求解复杂结构颤振和抖振问题的理论模式体系。该模式体系具有传统模式体系所不具备的优点,特别是当其与随机振动虚拟激励法相结合,用于求解抖振响应时,克服了传统方法难以逾越的困难。

本书首先将虚拟激励法引入风工程,求解一座大型起重机的抖振问题;并基于计算结果分析了该起重机的使用舒适性以及疲劳寿命。第二,针对长跨斜拉桥和悬索桥提出基于有限元模型的颤振与抖振分析理论模式体系。该体系在结构有限单元范围内考虑自激力和抖振力,即:结构的气动阻尼矩阵和气动刚度矩阵由各单元气动阻尼矩阵和刚度矩阵组装而成;结构的抖振力功率谱由各单元等效抖振力功率谱矩阵组装而成。结构各部分风力之间的相互作用、振型间的气动与机械耦合、结构性质的非连续性、气动中心与质心的偏差、非零攻角和非零偏向角等,都可以在这种体系

下自动考虑。颤振分析中,通过引入参考折减频率来考虑风场的非均匀性。抖振分析中,虚拟激励法结合振型叠加法用来高效而又精确地求解结构的随机抖振响应。基于这种理论模式体系,桥梁抖振与颤振分析已成为常规有限元静力与动力分析的自然延伸。各分析过程取得了形式与体系上的统一。第三,本书将所提出的颤振与抖振分析方法用于香港青马悬索桥,深入研究了包括主板、主索,以及主塔在内的全桥三维抖振响应。抖振分析表明:自激力显著影响主板响应;多振型扭转与竖向响应远远超过单振型扭转与竖向响应;主板的抖振带动主索的抖振,而且主索的抖振也在一定程度上影响主板的横向抖振。颤振分析表明:青马悬索桥各振型间具有很强的耦合颤振倾向。第四,构造了统一风振分析理论框架,并提出两项用来提高抖振分析效率的计算方案。这些方案的有效性通过本书计算实践得以验证。

本书提出的方法已在计算机上实现,具体分析过程包括:(1)有效攻角分析;(2)对离散风力系数、气动导数试验数据的处理功能;(3)三维颤振分析;(4)三维抖振分析。

Abstract

Wind-induced vibration is the major concern for long-span bridges. In the last several decades, significant advances have been made in understanding of various phenomena and in developing of analytical and experimental approaches to deal with bridge flutter, buffeting and vortex shedding; and the 3D lateral coherence characteristics of the natural, turbulent wind have also been quite well documented. All of these achievements have laid down a solid basis for wholly coupled 3D buffeting analysis. However the single-mode buffeting analysis remains predominant until recently when Jain, et. al. (1996) extended multi-mode approaches to both buffeting and flutter analyses. Although the 3D normal modes of vibration have been introduced in order to consider the aerodynamic and structural couplings between modes, the conventional formulation still remains inconsistent with delicate finite-element models. This thesis presents a systematic formulation for bridge flutter and buffeting analyses, which is featured by finite element methods (FEM) and the pseudo-excitation method (PEM).

The PEM is an accurate and efficient method for structural random response analysis, which was firstly used to compute the buffeting response of a crane. The comfortability and serviceability, as well as the fatigue life of this crane due to the buffeting wind forces are evaluated. Secondly, a new formulation system for buffeting and flutter is developed based on the finite element theory, in which the aeroelastic damping, aeroelastic stiffness and the buffeting forces are all derived within the

element level. The aeroelastic damping and stiffness matrices are generated in the element level before they are assembled to form the global aeroelastic damping and stiffness matrices. The PSD (power spectral density) matrices of buffeting forces are formed in the similar way. Under this formulation, the interaction between the wind forces acting on different parts of the structure, structural and aerodynamic couplings between modes, varying properties of the structure, offsets between the aerodynamic centers and elastic centers, effects of mean wind angle of attack and non-zero yaw angle can be taken into account simultaneously. The new formulation, combined with conventional mathematical tools, is also applied to flutter analysis, with a reference reduced frequency introduced to account for the inhomogeneity of the wind field. The PEM, in conjunction with the mode superposition schemes, is used to compute the buffeting response of the structure efficiently and accurately. According to the proposed formulation, the flutter/buffeting analysis has become a natural extension of the static and natural vibration analyses based on the general finite element models, and so is convenient to implement. Thirdly, the proposed flutter/buffeting approach has been applied to the aerodynamic analysis of the Tsing Ma long span suspension bridge in Hong Kong. The fully coupled buffeting of the bridge deck, towers and main cables are investigated. The results show that aeroelastic forces significantly influence the torsional response of the deck; the multi-mode responses are much larger than the single-mode responses for the vertical and torsional motions of the deck; the significant inter-mode responses may exist in the coupled torsional and translational modes; the buffeting of the bridge deck considerably impacts the buffeting of the towers and main cables whereas the buffeting of towers and

Abstract

main cables only moderately influences the lateral vibration of the bridge deck. The new buffeting approach can also be shown to be able to accommodate the conventional method very well through the comparison of deck responses when only the aeroelastic and/or aerodynamic forces on the deck are acted on. The flutter analysis shows that the Tsing Ma Bridge has a very strong tendency towards coupled flutter. Fourthly, a framework for united analysis of wind-induced vibration of cable-supported bridges is presented. Some computational techniques, which further enhance the efficiency of the buffeting analysis by the new approach, are detailed. Their effectiveness has been verified by computation practice.

The proposed formulation has been implemented, and the developed program includes; (1) nonlinear analysis of mean angle of attack; (2) processing of the experimental results about aerodynamic coefficients and flutter derivatives; (3) 3D flutter analysis; and (4) 3D buffeting analysis.

目 录

1 绪论	1
1.1 科研背景	1
1.2 研究目标	3
1.3 本章布局	4
2 文献综述	6
2.1 引言	6
2.2 桥梁风致振动	6
2.2.1 颤振	6
2.2.2 抖振	7
2.2.3 涡激振动	8
2.2.4 桥梁风振实例	8
2.3 颤振理论综述	10
2.4 抖振理论综述	18
2.5 国内桥梁风振研究进展	24
3 复杂结构抖振分析	25
3.1 引言	25
3.2 抖振求解一般方程	26
3.3 虚拟激励法简介	29
3.3.1 单点平稳随机激励虚拟激励法	29
3.3.2 多点平稳随机激励虚拟激励法	31
3.4 起重机抖振分析	33
3.4.1 结构模型	33
3.4.2 自振分析	33

3.4.3	静风作用	35
3.4.4	抖振响应	36
3.4.5	起重机使用平顺性评价	39
3.5	小结	41
4	长跨桥空气动力学	42
4.1	引言	42
4.2	桥梁气动力表述形式	43
4.3	风作用下的桥体运动方程	49
4.4	单振型颤振分析方法	50
4.5	单振型抖振分析方法	50
4.6	多振型颤振分析方法	52
4.7	多振型抖振分析方法	54
4.8	小结	57
5	三维桥梁颤振分析	58
5.1	引言	58
5.2	自激力的有限元模型	60
5.3	考虑偏心的单元气动刚度和阻尼阵	70
5.4	偏向角和攻角的处理	75
5.5	三维颤振分析	76
5.6	颤振分析算例	80
5.7	小结	87
6	三维桥梁抖振分析	88
6.1	引言	88
6.2	单元抖振力的矩阵描述	94
6.2.1	考虑攻角、偏向角和偏心的桥面抖振力	94
6.2.2	考虑攻角、偏向角和偏心的桥塔抖振力	103
6.2.3	考虑攻角和偏向角的桥索抖振力	105

6.2.4	单元抖振力的一般形式	107
6.3	抖振力功率谱的形成	107
6.4	抖振响应求解	110
6.4.1	抖振虚拟激励法——BPEM	111
6.4.2	BPEM 的计算效率	114
6.5	非定常气动导纳	117
6.6	小结	117
7	有效攻角计算	119
7.1	引言	119
7.2	初始攻角 α_0	123
7.3	静力攻角 α_l	123
7.4	静风攻角 α_w	123
8	香港青马悬索桥三维抖振-颤振分析	125
8.1	引言	125
8.2	青马悬索桥简介	125
8.3	青马悬索桥抖振分析	131
8.3.1	计算参数确定	131
8.3.2	桥面抖振响应对比	134
8.3.3	自激力对抖振响应的影响	137
8.3.4	多振型和振型耦合对抖振的影响	141
8.3.5	全桥抖振效应	144
8.3.6	静风攻角对抖振的影响	151
8.3.7	u_s 和 α 对抖振的影响	155
8.4	青马悬索桥颤振分析	158
8.5	小结	163
9	三维桥梁风振分析相关过程	164
9.1	引言	164

9.2	荷载作用下的桥梁状态分析	166
9.3	考虑附加质量的动力分析	167
9.4	平均风下静力分析	167
9.5	三维颤振分析	168
9.5.1	参考折减频率上下确界	170
9.5.2	折减频率搜寻步长	170
9.6	三维抖振分析	171
9.6.1	抖振分析积分范围	174
9.6.2	气动力单元排序	175
9.7	小结	179
10	总结与展望	180
	参考文献	185
	作者学术成果索引	199
	致谢	203

Table of Contents

1	Introduction	1
1.1	Research background	1
1.2	Research objective	3
1.3	Thesis layout	4
2	Literature summary	6
2.1	Introduction	6
2.2	Wind-induced vibration of bridge	6
2.2.1	Flutter vibration	6
2.2.2	Buffet vibration	7
2.2.3	Vortex-induced vibration	8
2.2.4	Wind-induced vibration case of bridge	8
2.3	Introduction of flutter vibration theory	10
2.4	Introduction of buffet vibration theory	18
2.5	Advance in wind-induced vibration research of inland	24
3	Buffet vibration analysis of complex structure	25
3.1	Introduction	25
3.2	General equation of buffet vibration analysis	26
3.3	Introduction of PEM	29
3.3.1	PEM under single point stationary random excitation	29
3.3.2	PEM under multi point stationary random excitation	31
3.4	Buffet vibration analysis of crane	33
3.4.1	Structure model	33