



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

单伽铨 施卫星 著

建筑结构混合 健康监测与控制研究

Study on Integrated Health Monitoring and
Control for Building Structure



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

单伽铨 施卫星 著

建筑结构混合 健康监测与控制研究

Study on Integrated Health Monitoring and
Control for Building Structure



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书对适用于建筑结构的混合健康监测与控制进行了相关研究。首先提出了混合健康监测与控制系统应具有的特点,包括实时监测驱动、局部反馈控制和自适应控制。在此基础上,提出了基于结构模型解耦的在线损伤识别算法和模型参考自适应控制算法,用以组成混合系统。

本书适于土木专业研究者、土木工程设计人员、工程管理运维专业人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构混合健康监测与控制研究 / 单伽程, 施卫星著. — 上海: 同济大学出版社, 2018. 9

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6841-7

I. ①建… II. ①单… ②施… III. ①建筑结构—监测—研究 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067598 号

建筑结构混合健康监测与控制研究

单伽程 施卫星 著

出品人 华春荣 责任编辑 吕 炜 卢元姗

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

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

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 10.5

字 数 210 000

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6841-7

定 价 54.00 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	关佶红
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	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	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 卢元姍 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

本书对适用于建筑结构的混合健康监测与控制进行了相关研究。首先提出了混合健康监测与控制系统应具有的特点,包括实时监测驱动、局部反馈控制和自适应控制。在此基础上,提出了基于结构模型解耦的在线损伤识别算法和模型参考自适应控制算法,用以组成混合系统。主要研究内容、方法和结论如下:

1. 通过将多自由度剪切型结构模型解耦成为一系列单自由度子结构,并定义虚拟的健康子系统构建结构健康监控器。基于监控器初始输出和归一化输出进行结构损伤识别、定位和评估。利用一个三自由度和一个八自由度剪切模型开展数值模拟研究,讨论了一系列在实际工程应用中可能遇到的对结构损伤识别存在影响的因素。研究表明监控器初始输出会受到结构地震动输入特性和幅值的影响,归一化输出在不同的地震动输入下能保持对结构损伤位置和程度准确的识别能力,并且在不同噪声水平下与结构损伤程度仍然有良好的单向相关性。

2. 对提出的基于加速度反馈的在线结构损伤识别算法进行了振动台试验系统的研究。通过附加弹簧组实现一个三层铝质金属结构底层不同的层间刚度状态人工模拟结构损伤状态,验证了损伤识别算法在不同结构损伤程度下的诊断能力。基于数值计算和试验量测对应的归一

化输出间的吻合,提出一种数值预测曲线用于实际结构损伤程度估计。对数值计算中的时间间隔参数进行收敛性分析,分析表明过大的时间步长将影响归一化输出的相对位置和相应均值。另外,利用持续模拟地震动输入一个十二层钢筋混凝土框架结构,验证了结构损伤识别算法对天然的结构裂缝发生、发展和位置的诊断能力。

3. 根据多自由度剪切型结构模型解耦得到一系列单自由度子结构,提出了相应的基于解耦的模型参考自适应控制。详细阐述了由在线损伤识别算法和模型参考自适应控制组成的混合结构健康监测和控制系统的概念和功能。利用一个三自由度剪切数值模型开展了自适应控制数值模拟研究。研究表明,提出的基于解耦的模型参考自适应控制算法具有局部反馈控制的特点,能实现受损结构实际层间动力响应与未受损结构参考响应间的渐进式趋于一致,继而有效降低结构的动力响应。相对于峰值,自适应控制算法对基于整个时间历程的相应均方根值(RMS)拥有更明显的控制效果。调节权重矩阵对角元上的参数越大,相应的自适应控制输出越大。自适应控制效果依赖于局部损伤程度,损伤程度越大控制效果越明显,同时相应的控制力峰值也越大。

4. 对结构混合健康监测与控制系统进行了系统的数值模拟和振动台试验研究。基于三层剪切型数值模型和不同损伤工况条件,验证了在有控条件下在线损伤识别算法的损伤识别能力和在损伤发生条件下混合系统的控制模块能迅速地在受损区域输出相应的控制力,以降低结构动力响应。继续利用附加弹簧组模拟改变一个三层铝质金属结构底层的层间刚度,结合振动台试验验证了混合系统对受损结构的损伤识别和振动控制能力。研究发现数值计算和振动台试验在自适应控制器时变参数、控制力、结构位移和加速度响应上具有良好的吻合度,说明本书提出的混合健康监测与控制系统相关理论的正确性和可应用性。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景与意义	1
1.2 基于振动的结构损伤识别	5
1.2.1 基于模态域数据的方法	6
1.2.2 基于时域数据的方法	10
1.2.3 基于时频域数据的方法	13
1.3 结构振动控制	14
1.3.1 结构振动控制装置	15
1.3.2 结构振动控制算法	17
1.4 结构混合健康监测与控制研究	22
1.5 本书主要研究内容	25
第 2 章 结构损伤识别理论及数值模拟	28
2.1 在线结构损伤识别理论	28
2.1.1 多自由度系统解耦	28

2.1.2	基于解耦的结构损伤识别	31
2.2	三自由度剪切型结构数值模拟	35
2.2.1	结构时不变损伤	36
2.2.2	结构时变损伤	41
2.2.3	识别结果的影响因素分析	44
2.3	八自由度剪切型结构数值模拟	49
2.4	本章小结	51
第 3 章	结构损伤识别方法试验研究	52
3.1	三层铝质金属结构	52
3.1.1	振动台试验基本信息	52
3.1.2	结构损伤状态	55
3.1.3	结构损伤识别	58
3.1.4	结构损伤程度估计	62
3.2	十二层混凝土框架结构	64
3.2.1	振动台试验基本信息	66
3.2.2	结构模型损伤状态	67
3.2.3	结构损伤识别	68
3.3	本章小结	73
第 4 章	结构混合健康监测与控制理论	74
4.1	结构混合健康监测与控制概念	74
4.2	结构混合健康监测与控制理论	78
4.2.1	多自由度结构系统解耦	78
4.2.2	基于解耦的受控结构损伤识别	79
4.2.3	基于解耦的模型参考自适应控制	80
4.2.4	结构健康监控器的状态空间表示	84
4.3	模型参考自适应控制数值模拟	86
4.3.1	不同自适应律调节参数	87

4.3.2 不同地震动输入	93
4.3.3 不同结构损伤程度	96
4.4 本章小结	98
第5章 结构混合健康监测与控制理论数值和试验研究	100
5.1 三自由度剪切型结构数值模拟	100
5.1.1 数值算例基本信息	100
5.1.2 结构损伤识别	102
5.1.3 结构自适应控制	104
5.2 三层铝质金属结构振动台试验	111
5.2.1 试验基本信息	111
5.2.2 结构损伤识别	113
5.2.3 结构振动控制	116
5.3 本章小结	122
第6章 结论和展望	124
6.1 结论	124
6.2 未来工作和展望	126
参考文献	128
后记	148

第 1 章

绪 论

1.1 课题的研究背景与意义

为了满足人类社会发展的各种需要,土木工程结构正在向大型化、复杂化、自动化和连续化方向发展。同时,随着我国国民经济的持续增长,一大批重大工程结构,如高层建筑、大跨度桥梁、大跨空间结构、大型水利工程、海洋平台结构以及核电站建筑等,与日俱增。2008 年建成的上海环球金融中心主体建筑高度达到了 492 m,正在建设的上海中心建筑设计高度 632 m,它们与其他超高层建筑一起,共同组成了上海陆家嘴地区的地标性建筑群和天际线。分别于 2008 年和 2010 年建成的全长 35.7 km 的杭州湾跨海大桥和全长 41.58 km 的青岛胶州湾跨海大桥,是目前世界第三和第一长跨海大桥。

在长达几十年甚至上百年的服役期中,工程结构不可避免地会受到环境侵蚀、材料性能退化、荷载长期效应和疲劳效应,以及突发灾害性事件(强地震、强风等)等因素的耦合作用。由此导致结构使用功能减低甚至破坏、区域功能瘫痪、严重的经济损失甚至人员伤亡。例如,1940 年美国的 Tacoma Narrow 大桥在强风作用下失稳破坏;1965 年英国北海

海上石油钻井平台失效;1994 年韩国首尔 Sung-Soo Grand 大桥中间跨断塌;1995 年韩国首尔五层百货大楼在 30 秒内层层塌陷;1999 年重庆彩虹桥突然倒塌,40 人死亡,14 人受伤;2004 年法国巴黎戴高乐机场 2E 候机楼发生屋顶局部坍塌;2007 年在密西西比河上 I-35W 钢桁架桥由于螺栓连接板的局部失效引起突然倒塌,如图 1-1(a)所示。在众多可能导致结构损伤及功能失效的因素中,地震作用,由于其相对短时间内的能量释放,不可预测性,波及范围广和次生灾害等特点,一直是导致严重工程结构破坏的主要因素之一。如 1994 年美国加利福尼亚州 6.7 级 Northridge 地震,1995 年日本神户 7.2 级 Kobe 地震,1999 年台湾 7.3 级集集(Chi-Chi)地震,2008 年四川 8.0 级汶川地震和 2011 年日本 9.0 级 Tohoku 地震。在这些大地震中,大量的建筑物在主震和余震

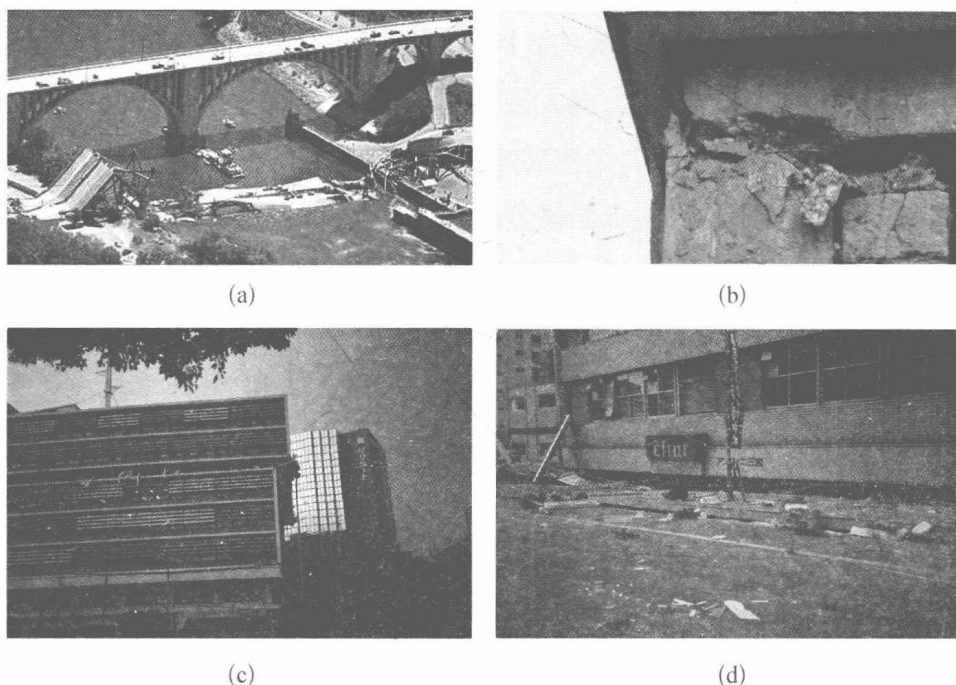


图 1-1 (a) 工程结构整体破坏——I-35W 钢桁架桥;(b) 工程结构地震作用下局部破坏——混凝土柱节点;(c) Kobe 地震中高层建筑中部楼层破坏;(d) Kobe 地震中高层建筑底部楼层破坏