

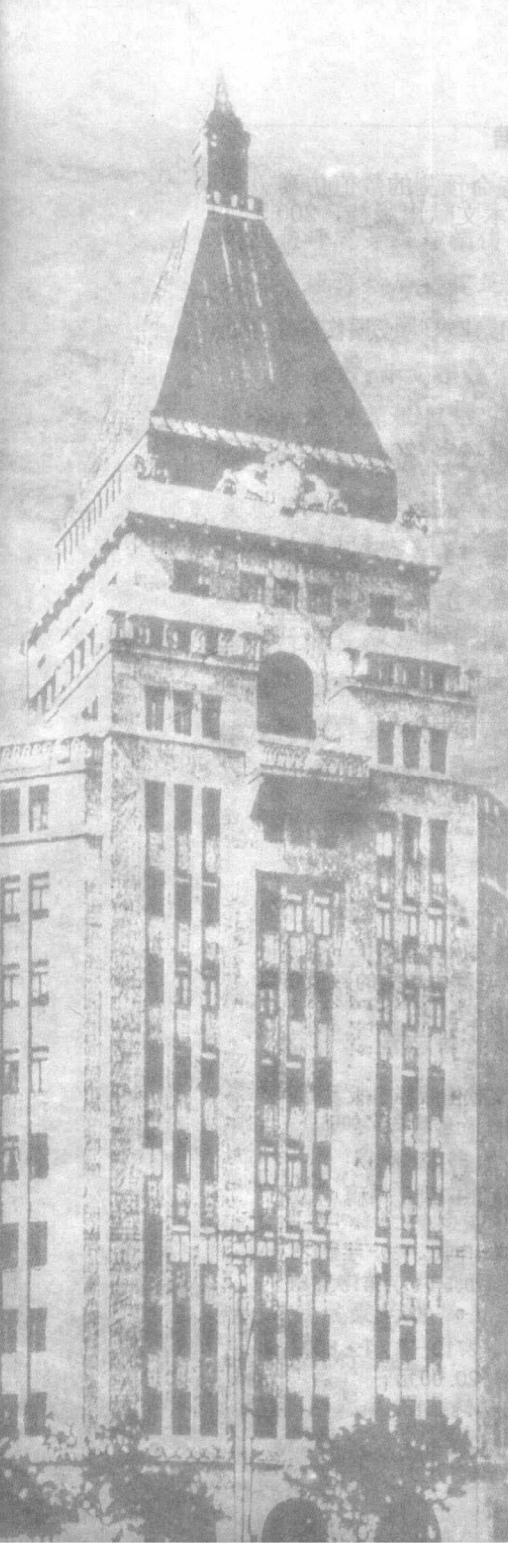


李瑞礼 著

历史建筑损伤检测与 寿命预测的数值仿真

NUMERICAL SIMULATION
OF DAMAGE DIAGNOSES
& LIFE PROGNOSTICATION
ON THE HISTORICAL
ARCHITECTURE

上海科学技术文献出版社



李瑞礼 著

历史建筑损伤检测与 寿命预测的数值仿真

NUMERICAL SIMULATION
OF DAMAGE DIAGNOSES
& LIFE PROGNOSTICATION
ON THE HISTORICAL
ARCHITECTURE

上海科学技术文献出版社

图书在版编目(CIP)数据

历史建筑损伤检测与寿命预测的数值仿真 / 李瑞礼著. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005.11
ISBN 7-5439-2719-5

I. 历... II. 李... III. 建筑物—损伤—检测—计算机仿真 IV. TU17

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第114632号

责任编辑: 钱晓文

封面设计: 倪捷

历史建筑损伤检测与寿命预测的数值仿真

李瑞礼 著

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路2号 邮政编码200031)

全国新华书店经销

江苏常熟人民印刷厂印刷

*

开本890×1240 1/32 印张5.125 字数133 000

2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

印数: 1—1 300

ISBN 7-5439-2719-5 / T·800

定价: 20.00元

<http://www.sstlp.com>



李瑞礼，高级工程师，一级注册结构工程师，注册咨询工程师（投资），英国皇家特许建造师（CIOB），工学博士。自1982年在同济大学结构工程系工民建专业学习以来，一直从事工业与民用建筑的设计、检测鉴定、项目管理及研究工作，已在国家级核心刊物上发表了数十篇学术论文。其中《近代保护建筑无损检测的计算机评估系统》获2005年度上海市科技进步三等奖，《土木工程分析的施工力学方法》获上海市科学技术成果奖。

内 容 简 介

本书以历史建筑为背景,综合运用了工程结构、系统识别、振动理论、振动测试技术、信号采集与分析等跨学科领域的方法,通过结构损伤力学与带有损伤系数有限元模型的建立,研制了历史建筑结构无损检测的计算机专用程序,具有搜索迭代和直接反演计算功能,实践了损伤结构的定量计算,有工程实用性;提出了用损伤系数来定量地评估历史建筑宏观损伤的理念与方法,探讨了用损伤指标来定量反映结构的实际损伤程度,实现了历史背景建筑无损检测的信息化和智能化,对历史建筑的无损检测提出了新的方法和手段,丰富了房屋质量检测方法,为进一步研究我国历史建筑的无损检测作出了一定贡献。

本书可供土木工程专业的科学研究人员、工程技术人员、房屋质量检测人员、高等院校的教师及研究生、本科生参考使用。



序

结构损伤诊断是一个十分复杂但又非常重要的问题,不同对象的损伤有不同的评估方法,损伤识别方法的执行过程也各不相同。目前基本处于理论和研究试验阶段的建筑结构损伤本身千差万别,要把损伤力学中的方法直接应用于实际建筑工程中,特别是历史建筑是难以实现的。因此,工程实践迫切需要用整体无损检测方法识别既有建筑物,特别是历史建筑的损伤位置和损伤程度,即适应复杂结构的实用损伤识别方法,以便应用于历史建筑损伤检测与进一步的重分析和寿命预测,这是一项非常有意义的基础应用性研究工作。

该书以历史建筑为背景,综合运用了工程结构、振动理论、振动测试技术、系统识别、信号采集与分析等跨学科领域的方法,结合工程检测实践,收集了较多的资料,通过损伤有限元模型的建立,在 ADINA 通用程序的平台上,研制了历史建筑结构无损检测的计算机专用程序,实践了结构损伤的定量计算;提出了用损伤指标来定量地评估近代保护建筑宏观损伤的理念与方法,提出了历史建筑损伤评估的规范建议,改善了过去只能依靠定性的办法来反映实际既有结构的损伤问题,在实现历史背景建筑无损检测的信息化和智能化的道路上前进了一大步。

希望该书对从事于既有房屋质量检测人员有所启迪,并在历史建筑保护大事业中有所得益。

上海市力学学会工程结构诊断及加固专业委员会主任
上海市建筑科学研究院教授、博导

2005 年 8 月 20 日于上海



目 录

第一章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 在役建筑物检测方法现状	5
1.3 无损检测研究进展	9
1.4 结构动力学在损伤检测中的应用现状	12
1.5 问题的提出	15
1.6 主要研究内容与特色	16
1.6.1 主要研究内容	17
1.6.2 特色与创新	18
第二章 历史建筑分析的损伤理论与动力学基础	19
2.1 损伤理论发展概况	19
2.2 损伤力学的基本理论	22
2.2.1 损伤力学基本概念	22
2.2.2 损伤本构基本方程	24
2.3 历史建筑的损伤理论及其数值模型	29
2.3.1 上海历史建筑典型结构体系	29
2.3.2 历史建筑的有限元模型	30
2.3.3 按损伤理论建立的有限元算式	32
2.4 损伤结构动力特性分析	33
2.4.1 体系的自由度	34
2.4.2 损伤结构动力方程	34
2.4.3 损伤结构动力特性	35
2.5 损伤结构动力数值分析	37
2.5.1 损伤结构动力特性的算法	37

2.5.2 损伤结构动力响应的算法	40
2.6 历史建筑的动力模型修正	42
2.6.1 模型修正的基本理论及方法	43
2.6.2 模型修正在历史建筑中的应用	44
第三章 损伤参数与实际损伤状态间关系	46
3.1 现行建筑损伤的评估方法	46
3.2 实际损伤和损伤系数之间定量关系	48
3.2.1 构件损伤系数 D_i 确定	48
3.2.2 整体结构损伤系数 D	49
3.2.3 D_i 与 D 关系	50
3.3 工程算例	52
3.3.1 中国工商银行上海市分行第二营业所	52
3.3.2 中山东一路 24 号(中国工商银行上海市分行)	54
3.4 损伤分布对结构动力特性影响程度	55
第四章 历史建筑损伤检测数值仿真的搜索迭代法	60
4.1 反演理论的研究进展	60
4.2 参数反演与损伤识别的搜索迭代法	62
4.2.1 系统辨识与参数辨识	62
4.2.2 准则函数	63
4.2.3 优化方法	65
4.3 搜索迭代法的程序开发	66
4.3.1 正演程序	66
4.3.2 反演程序	68
4.4 工程算例	69
4.4.1 工程概况	69
4.4.2 反演内容	73
4.4.3 反演结果分析	74



第五章 历史建筑损伤检测数值仿真的直接解析法	74
5.1 损伤识别的直接解析法	74
5.1.1 损伤结构的模态分析	75
5.1.2 直接解析法的基本算式	76
5.1.3 频率对损伤系数的偏导数计算	77
5.1.4 振型对损伤系数的偏导数计算	78
5.1.5 直接解析法的基本方法	80
5.1.6 直接解析法的自迭代修正	81
5.2 直接解析法的程序开发	83
5.2.1 程序调用及子程序	83
5.2.2 功能数据文件	84
5.3 工程算例	85
5.4 历史建筑损伤检测的在线系统	90
 第六章 历史建筑的重分析	92
6.1 历史建筑重分析方法	93
6.1.1 历史建筑重分析特点	93
6.1.2 历史建筑荷载分析的原则	94
6.1.3 历史建筑荷载估计	94
6.2 历史建筑的重分析算例	95
6.2.1 重分析基本条件	96
6.2.2 竖向荷载静力分析	97
6.2.3 抗风分析	100
6.2.4 抗震分析	103
6.2.5 计算结果分析与小结	106
6.3 历史建筑重分析的工程应用	107
 第七章 历史建筑的剩余寿命预测	108
7.1 结构寿命预测问题研究现状	109

7.1.1 结构耐久性研究动态	109
7.1.2 结构寿命预测研究动态	111
7.2 建筑结构寿命预测的现有方法	112
7.2.1 基于结构可靠度的剩余寿命预测	112
7.2.2 基于结构承载力的剩余寿命预测	112
7.2.3 基于结构耐久性的剩余寿命预测	113
7.2.4 基于混凝土碳化的剩余寿命预测	113
7.2.5 基于结构经济风险优化的剩余寿命预测	113
7.3 历史建筑的寿命预测	114
7.3.1 建筑物的耐用寿命	114
7.3.2 房屋的损伤系数与耐久性等级关系	115
7.3.3 历史建筑剩余寿命预测	115
7.4 工程应用实例	116
7.5 剩余寿命预测研究展望	118
第八章 结论与讨论	119
8.1 主要结论与成果	119
8.2 研究成果的工程应用	121
8.3 有待深入研究的问题	122
8.4 发展与应用前景	123
8.4.1 发展前景	123
8.4.2 应用前景	123
参考文献.....	126
后记.....	152



第一章 绪 论

1.1 前 言

上海是一座有着 4000 多年特殊历史内涵的国际性大都市,是历史文化遗产非常丰富的城市。不但凝聚了中国传统文化的精华,深厚的文化积淀,而且蕴藏着极为丰富的建筑文化资源,浓缩了上海特有的东西交融、海纳百川的历史文化底蕴,成为东西方文化以及中国广泛地域文化交融的场所^[1]。建筑是文化领域中最具有时代性、社会性和民族性的因素,整体而又集中地体现了民族传统、地域特性、时代精神和社会的价值取向。建筑所反映的空间与时间关系,其深度和广度是无可比拟的。而与现代城市发展密切相关的上海历史建筑,则综合反映了上海乃至中国近代社会和城市的发展演变历程,渗透了西方建筑文化的影响,形成了独特的海派建筑文化。自 1843 年 11 月开埠以来,上海逐渐发展成为国际大都会,成为中国其他城市不可替代的经济中心、贸易中心、金融中心和文化中心。近年来上海一直是我国中西方文化交汇的重要窗口。上海不仅是中国近代革命的发源地,也是中国近代工业、近代文化的发祥地,又是中国近代建筑的发源地。上海丰厚的历史文化是近代中国历史文化的缩影,具有独特的历史价值和纪念意义。近百年来,在上海这个国际建筑创作舞台上,中外优秀建筑师为上海近代建筑奉献了一大批风格迥异的华彩乐章——新古典主义、哥特复兴式、折衷主义、现代主义、装饰艺术派、中国新古典



建筑……数量之多、种类之繁、规模之宏,为世界所罕见。素有“万国建筑博览会”之称的上海近代建筑,加上现存的上海古代建筑,都是上海城市发展历史文化的重要载体,是上海的宝贵财富,也是城市的文脉和血脉。上海的历史文化风貌区和优秀历史建筑,是我国珍贵文化遗产的重要组成部分,充分体现了上海作为国家历史文化名城的鲜明特点。保护和利用好上海的历史文化风貌区和优秀历史建筑,是上海建设现代化国际大都市不可或缺的重要内容。上海这些优秀历史建筑 and 历史文化风貌街区,是城市景观的重要组成部分,是城市发展的历史见证,是城市精神的物质载体。她具有上海城市丰富多彩的特点,构成了中国近代城市与建筑发展史中最为重要也最为精彩的一个组成部分。

城市的优秀历史建筑 and 历史文化风貌区,是一个城市历史的浓缩、文化的积淀,是难能可贵的文化遗产。优秀历史建筑需要全民善待,城市的历史 and 历史的建筑应当是我们的资源,城市的特色。加强对优秀历史建筑 and 历史文化风貌区的保护,一直是政府和有关部门关心的一个热点。自1980年国务院批准上海为国家历史名城以来,为保护这些宝贵的历史遗产,上海市政府已将历史建筑的保护提上了重要的议事日程,提出在城市旧区改造中推进具有历史文化价值的街区和建筑的保护性改造,并投入了大量的人力、物力和财力。1981年市政府8号令颁布了《上海市优秀近代建筑管理规定》之后,上海市房屋土地管理局相继发布了《关于加强本市优秀近代建筑管理的通知》《上海市优秀近代建筑房屋质量检测管理暂行规定》,这些文件中更明确规定,优秀历史建筑的改建、扩建、迁移、装饰、置换或变动主体的大修,必须对其检测;1991年上海市政府又颁布了《上海市优秀近代建筑保护管理办法》,并于1991、1994、1999年分三批公布了398处1398幢近代保护建筑名单,率先划定了11处历史文化风貌保护区和4个历史文化名镇,有近400万平方米的优秀历史建筑被列入了保护名录,明确了保护范围 and 建设控制地域;1999年又批准了上海中心城区



234 个完整街坊近 1000 万平方米的历史文化建筑的保护控制规划;2003 年上海市颁布实施了《历史风貌文化保护区和优秀建筑保护条例》,市政府批准的《中心城区历史文化风貌区范围》共确定 12 个街区,总面积达 27 平方公里,体现了真正的整体性保护;2004 年市政府又颁布了《关于进一步加强本市历史文化风貌区和优秀历史建筑保护的通知》,再一次强调对优秀保护建筑进行修缮整改、改变使用性质等,要严格按照有关法规的规定,保护建筑的产权人应依法承担保护建筑的维修养护责任,定期对保护建筑进行检测和维修;最近第四批共 230 处 746 幢优秀近代保护建筑已向社会公示,目前全市优秀历史建筑数目已超过 2000 幢。从新天地到衡山路,从老城厢到外滩源,今天,上海城市文脉的保护与开发,取得了骄人的成绩:外滩长达 1500 米的临江大道上耸立了 20 多个国家近 30 幢不同风格的高楼建筑,成为楼宇型的近代建筑保护区;新华路集中了近百幢风格迥异的西式花园洋房,构成了洋房类建筑的保护区域;陕西路一带别具特色的连体式花园住宅,成为平房类建筑的保护区域;山阴路、溧阳路一带集中了百余幢带有江南市井特色的中式别墅,成为中式别墅的保护地块;多伦路不同建筑风格的名人故居,形成了具有人文建筑景观的文化名人街;九龙路沿苏州河一带是石库门建筑的集聚区,构成了石库门建筑的保护区;以龙华寺为代表的上海十余处禅寺庙宇,构成了寺庙古建筑的保护点……。这些成规模、有特色的优秀历史建筑不仅展示了其具有自身的文化和艺术价值,而且对促进城市的经济发展,丰富和满足社会精神文明的需要发挥着独特的作用。

进入新世纪,上海的城市建设必须走统筹、协调、可持续发展之路,必须正确处理开发与保护的关系,必须更加注重对历史文化风貌区和优秀历史建筑的保护。既要追求特征鲜明的时代气息,更要注重体现深厚历史文化的底蕴。按照“全面规划、整体保护、积极利用、依法严管”的原则,实行最严格、最科学的保护制度,进一步凸显上海历史文化名城与现代化国际大都市相互交融的独特魅力。

上海市政府邀请一批享有国际声誉的国外历史文化保护机构管理者、国际著名城市建筑保护专家等,参加2004年10月在上海锦江小礼堂召开的以城市遗产保护为主题的首届“上海市历史文化风貌区与优秀历史建筑保护国际研讨会”,就如何保护历史文化风貌区和优秀历史建筑,以及如何让这些建筑在新的历史时期发挥更好的使用功能进行研讨,并召开专题会议研究历史风貌建筑保护工作,紧紧围绕“建立最严格的历史文化风貌区和优秀历史建筑保护制度”这一目标,牢固树立“改造是发展,保护也是发展”的观念,把保护优秀历史建筑作为延续上海城市发展历史文脉和“两个文明一起抓”的一项重要工作,就此已形成“一个规划、三项制度”的总体考虑。一个规划,就是要根据城市总体规划和有关法规的要求,确立保护范围,明确保护对象,使规划真正落地;三项制度,就是要明确责任主体,进一步加强法治和建立长效管理机制。市政府已经决定成立上海市历史文化风貌区和优秀历史建筑保护委员会,统一负责全市的保护工作,以形成全社会积极参与、共同保护优秀历史建筑 and 历史文化风貌区的良好氛围。这也为加速上海新一轮城市改造、建设和发展创造了有利条件。

然而,这类具有鲜明时代特征的绝大部分优秀历史建筑已有几十年甚至上百年的历史,经历了时代变迁及不同使用人需求变化,有相当数量历史建筑已接近或超过预定的设计基准期,存在着影响安全的结构隐患^[2]。这些建筑在复杂的服役环境中受到超荷载的作用以及各种不利外在因素的影响而导致结构损伤积累的问题,使结构的物理力学性能发生退化,留下隐患,潜伏着危险,从而使结构的安全受到威胁。没有被发现的结构损伤将影响结构的整体强度和刚度,从而引发更大的结构损伤积累,最终甚至有可能导致结构突发性失效,造成建筑物的破坏。

如何有效地保护好、管理好、使用好、利用好这些人类优秀文化遗产,避免发生破坏,提高房屋的可靠性、安全性,是社会发展的需要,市场发展的需要,也是一项极有意义的工作。



目前我国土木工程事故频发,造成了重大的人员伤亡和财产损失,已经引起人们对重大工程安全性的关注和重视。另外,历史建筑都经几十年甚至上百年的使用,它们的安全性如何?近年来自然灾害频繁,也对这些历史建筑造成了不同程度的损伤等,也越来越引起人们的密切关注。因此,对历史建筑的结构性能进行监测和诊断,及时地发现结构的损伤,对可能出现的灾害进行预测,评估其安全性,已成为必然要求,这也是本研究课题的目的所在。

1.2 在役建筑物检测方法现状

建筑与人类的生活息息相关。建筑物从建成到投入使用(伴随着维修保养、加固改造等)过程中,受到各种外界环境和自身因素的作用,如使用荷载、使用环境(风蚀日晒)、自然灾害(地震、强风、火灾、意外撞击)、构件老化、疲劳等,其材料的微观成分就会随时间的推移而发生演变,常常存在着表面缺陷或破损,如梁板的裂缝、钢筋的锈蚀、火灾后混凝土的过火、钢结构的开焊等,从而在结构上产生裂缝、腐蚀、变形等损伤(症状),其结果导致材料、强度、刚度等力学参数的降低^[3]。损伤发展到一定程度就需要加固维修,甚至拆除。这些肉眼可见的破损或缺陷容易引起人们重视,可及时诊断并采取措施加以修复和维修。近年来建筑行业突发事故频发,重者导致建筑物的破坏,表明实际结构构件还存在着内部缺陷。这些肉眼不可见的潜在缺陷有时更具危险性,常常造成较大的经济损失甚至危害人身安全。据有关部门统计^[4],我国在役结构物中约有 1/3 以上存在不同程度的损伤,有许多结构已经进入服役的后期,急待采用结构改造技术来提高结构的安全性。如不采取措施,到本世纪中叶,我国将至少有一半以上的在役结构由于安全度过低而退役。由于这些建筑结构都是单纯地按照力学原理来设计的,没有生命、没有智能,不能感知自然灾害和各种不利

的外在因素的作用,不能做出适当响应来保护自己。实践表明,这些潜伏的危险如不及时解决,将会酿成更大的事故。因此,对这些建筑物进行可靠性鉴定、检测评定,是十分迫切也是十分必要的。

如何避免损坏的开始,又如何减缓它的发展,保证结构的安全并使它的工作寿命延长,是经济建设中无法回避的问题。这个问题的解决首先要靠性能优异、准确可靠、方便实用的检测技术。鉴于此,结构的鉴定与评估已引起世界各主要发达国家的极大重视,列为优先发展的研究领域和优先培育的 21 世纪高新技术产业之一^[5]。目前各国特别重视建筑物检查和鉴定政策的研究,加强对建筑物的检查鉴定的立法、标准和规范的研究和编制。近几年建筑物可靠性鉴定的研究成果越来越多,应用这些成果解决实际工程的实例也越来越普遍,同时也出版了一系列具有丰富理论和实践经验的著作和研究成果^[6-13]。

这方面的工作,国外大体上可以分为三个阶段^[5]。20 世纪 40 年代开始为探索阶段,注重对建筑结构缺陷原因的分析 and 修补方法的研究,检测工作大多依赖有经验的技术人员进行现场视察和必要的结构验算,然后凭其个人所拥有的知识作出评价和处理,这就是所谓的传统经验方法(局部检测)。这种方法主要以个人观察为前提,调查过于简单,判断也多属于定性推断。由于缺乏一套科学的检测与评定方法,在工程处理上一般趋于保守。传统经验法尽管有不足之处,但由于鉴定程序少,成本低,对结构单一、易于鉴定的建筑物仍是可行的。所以传统经验法仍然被广泛使用。60 年代到 70 年代为发展阶段,注重对建筑物检测技术和评估方法的研究,提出了破损检测、有损检测、物理检测等几十种现代检测技术,还提出了分项评价、综合评价、模糊评价等实用鉴定方法(局部无损检测)。日本和美国在 20 世纪 70 年代分别提出了综合鉴定法和安全性评估程序的鉴定方法^[14];1971 年 James 等^[15]提出在现场检测的基础上,按专门制定的评分准则对现有结构进行分级;1975 年 Calcer^[16]提出现场评估法等;以上方法在鉴定程度、检



测技术、组织形式上比传统经验法有了较大改进,评价结论比传统经验法更接近实际,但是已有建筑物的作用力、结构抗力等影响建筑物安全与质量的诸多因素,实际上都是随机变量甚至是随机过程,采用现有规程进行应力计算、结构分析,显然是不合理的。80年代以后为完善阶段,随着概率论和数理统计在结构工程中应用日益取得进展,用结构失效概率来定义结构可靠度,从而可较好地反映结构可靠度的实质。这一阶段中制定了一系列的规范和标准,强调了综合评价,并引入知识工程,使结构可靠性评估工作向着智能化方向迈进。如 Hart 等^[17]在 1981 年提出了应用可靠指标来评估结构的损坏;Fitzsimons^[18]也提出了类似的可靠性分析方法;Meyer 等^[19]则定义了适合于可靠度分析的损坏参数;国际标准委员会安全度分会用概率法研究建筑物的可靠度已取得重要成果;美国编制了《建筑物检查手册》;美国加州大学 Bresier 教授^[20]对已有建筑物完成了一套比较完整的鉴定方法和规程;美国空军研制的防护系统结构损坏评价 DAPS 系统;美国波普(Purdue)大学研制的房屋破损评估专家系统 Speril,目前已发展至第四版本,正在向实用化方向迈进;新加坡建筑研究协会研制的《结构湿汽损坏诊断系统》;前苏联建立了《建筑物区分等级方法》《居住和公用建筑物定期检查标准》《建筑物使用可靠性》《建筑物检测方法》等;日本的鉴定理论范围全面,出版有《建筑物损伤和对策》《建筑物耐久性设计和对策》《建筑物鉴定方法和检验手册》《钢筋混凝土建筑物诊断规程》《钢结构建筑物诊断规程》《围护结构诊断规程》等^[21]。当检测评估和有限元结合起来开展工作,推动了该领域的研究。

我国在经历了地震、火灾和洪水等自然灾害的惨痛教训后,也开始重视对已有建筑的诊断与评估工作。从 20 世纪 80 年代以前,工作重点是对旧房进行鉴定与加固;从 90 年代中期以后,对旧房和新房都存在着鉴定与加固问题。近年来也非常重视建筑物检测鉴定的立法、标准和规范的制定工作,并开发了具有适合本国特