

东南土木
青年教师
科研论丛

大跨缆索桥钢箱梁结构的 疲劳状态评估

王莹 著

Fatigue State Assessment of
Steel Girders of Long-span Cable Bridges

东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

中央高校基本科研业务费专项资金资助

大跨缆索桥钢箱梁结构的 疲劳状态评估

王莹 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内 容 简 介

本书介绍了作者十多年来在大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估方法领域的研究成果及其在重要桥梁工程中的应用。主要内容包括:大跨缆索桥疲劳应力监测和响应时程分析方法、面向疲劳状态评估的大跨缆索桥钢箱梁结构有限元模拟方法和大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳损伤状态分析方法。重点介绍了大跨缆索桥钢箱梁应变监测及响应时程的规律和应力谱特征、钢箱梁结构疲劳易损构件的疲劳损伤状态评估方法和局部出现裂纹后的疲劳裂纹扩展分析方法,以及钢箱梁结构疲劳易损构件损伤时变状态更新方法及其可靠度评估方法。同时介绍了上述研究成果在润扬长江公路大桥等大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估中的应用。

本书可以作为力学、土木、交通相关专业研究生的参考读物,亦可供相关领域科研人员、桥梁运营管理和设计的技术人员在研究和工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨缆索桥钢箱梁结构的疲劳状态评估/王莹著.

—南京:东南大学出版社,2015.10

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-6072-2

I. ①大… II. ①王… III. ①大跨度结构-悬索桥-
钢箱梁-评估 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 248469 号

大跨缆索桥钢箱梁结构的疲劳状态评估

著 者 王 莹

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 南京玉河印刷厂

版 次 2015 年 10 月第 1 版

印 次 2015 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 9

字 数 219 千

书 号 ISBN 978-7-5641-6072-2

定 价 38.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝桢、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木·青年教师·科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吕志涛

2013. 12. 23.

前 言

随着国民经济的发展与国家实力的提高,我国已经建造了很多现代化的大跨缆索桥,这些桥梁很多已成为当地重要的标志性建筑和交通枢纽的关键节点。如何确保这些大跨缆索桥梁的安全服役也就成为土木结构领域中热门和前沿的研究课题。为此,目前国内很多重要的大跨缆索桥梁上都安装了结构健康监测系统,采集了大量的数据,如何利用这些数据实现桥梁结构疲劳状态评估和寿命预测更是当前亟待解决的问题。由于现有的结构损伤识别方法尚无法实现对复杂的大跨缆索桥钢箱梁结构的局部疲劳损伤进行检测和识别,而一般的观念上,也认为对于大跨缆索桥钢箱梁这样复杂的结构进行结构疲劳性能衰退分析很难实现。我们的前期基础理论研究已经表明,利用结构多尺度模拟和分析方法则可以实现结构动力响应和局部疲劳损伤演化的仿真分析。在此模拟和分析过程中利用结构在线监测的信息可保证结构模拟的准确性,因此采用桥梁结构健康监测系统的在线实测数据研究和结构疲劳性能衰退分析,综合利用各种检测信息,可望发展具有创新性的大跨度桥梁结构疲劳损伤评估和寿命预测方法。

大跨缆索桥结构的疲劳性能衰退的主要作用因素是桥梁上的交通载荷,其他影响因素也包括风载荷和其他形式的过载。需要关注的主要是钢箱梁结构关键构件的焊接细节部位。其结构疲劳性能衰退分析相对于结构损伤识别的反演分析而言,是目标更明确、损伤演化过程更清晰的。由于结构疲劳性能衰退的正分析的技术路线明确,能够从本源上描述桥梁结构衰退行为和疲劳损伤特征,为桥梁结构疲劳状态评估与寿命预测提供先验性知识基础,而已经建立的桥梁结构健康监测系统提供了桥梁结构在环境、载荷和响应方面的大量的数据和信息,又为结构疲劳状态反演过程提供了反分析所必需的在线实测信息。因此,将二者结合起来互补不足,无疑是一个极有发展前景的和有实用价值的研究方法。我们相信,这是发展有实用价值的结构疲劳状态监测、评估与寿命预测技术的最好的研究技术路线。这也是本书介绍的研究工作的主要思路。

这些年来我们研究工作的展开主要基于如下的学术思想:将大跨缆索桥结构基于实时监测信息的结构疲劳状态反演(反分析)与结构疲劳性能衰退程度仿真分析(正分析)相互结合起来进行结构疲劳状态识别。复杂结构的疲劳状态识别和寿命预测就如同医生依据脉象信息给病人做病情诊断,需要调用他事先掌握的大量病理特征进行综合分析才能作出正确的判断。本课题研究正是遵循这样的科学思想,突破传统的单一反分析诊断方法,将正分析方法与反分析方法相结合,发展基于实时监测信息和时间多尺度分析的结构疲劳状态反演(反分析)与结构性能衰退程度仿真分析(正分析)的“配对性”的疲劳状态识别方法。为此,我们

将桥梁结构健康监测系统的实时动载荷信息,施加于包含焊接细节的有限元模型,并将人工检测与无损探伤信息用来实时更新有限元模型,从而得到大跨缆索桥钢箱梁结构关键构件细节的疲劳应力随机过程的时变规律,建立起反映结构疲劳性能衰退的时变可靠性的数学模型。同时,对健康监测系统实时监测应变数据的时变特征加以分析,构建基于实时监测信息的结构疲劳状态反演(反分析)与结构性能衰退程度仿真分析(正分析)的“配对性”的疲劳状态识别方法。

在上述学术思想指导下,经过多年研究取得的成果在大跨缆索桥工程中的应用,将可望建立基于桥梁结构健康监测系统的钢箱梁结构疲劳状态评估和寿命预测系统,并根据系统的监测和评估信息进行结构故障预报和预防性养护,显然具有极大的经济效益和社会效益。围绕这些研究,我们完成了国家自然科学基金项目“大跨桥梁疲劳性能衰退的多尺度分析与寿命预测”(51008069)、“基于健康监测的大型钢桥梁疲劳损伤早期识别方法及应用(50178019)”,以及相关的国家重点工程项目“润扬桥结构健康监测评估系统研究”等。在上述项目完成过程中取得了有关大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估分析方法的大批研究成果,本书将系统地总结近年来的这些研究成果。

作者在此感谢国家自然科学基金委员会对本书中研究工作的资助,也感谢为相关研究工作提供了宝贵的桥梁工程结构设计、施工与测试资料和长期监测数据的桥梁管理部门如江苏润扬大桥发展有限责任公司。感谢东南大学基本科研业务费专著出版基金对本书出版提供的资助。作者还要感谢我们研究团队中的老师和研究生们,尤其是李兆霞教授、郭力副教授、赵丽华、缪海萍、吴佰建等人。正是大家把研究过程中完成的具体计算和分析结果系统地汇聚起来,才能够有这本书中展现给读者的研究成果之整体。作者也深知,虽集一个团队多年来的努力形成本书之成果,但我们对自然现象的认识永远是阶段性的和有局限的;同时,由于作者的水平有限,本书中恐有疏漏与表述不当之处,热切盼望同行和读者予以指正。

王 莹

2015 年夏于南京

目 录

第 1 章 绪 论	1
第 2 章 大跨缆索桥疲劳应力监测和响应时程信息分析	7
2.1 大跨缆索桥结构健康监测系统的应变传感器布置概述	7
2.1.1 青马大桥结构健康监测系统中的应变传感器布置	7
2.1.2 润扬大桥结构健康监测系统中的应变传感器布置	9
2.2 钢箱梁结构应变监测和应变时程的基本规律	11
2.3 应变响应监测结果分析	14
2.3.1 应变时程分析提取出车辆经过时的主要应变幅	14
2.3.2 应力幅谱分析	16
2.3.2.1 雨流计数法原理	16
2.3.2.2 对应变监测数据的循环提取	19
2.3.3 应变时程中的温度效应分析	22
2.4 钢箱梁结构中的疲劳等效应力分布	25
第 3 章 面向疲劳状态评估的大跨缆索桥钢箱梁结构有限元模拟	28
3.1 大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳损伤分析方法概述	28
3.1.1 基于结构健康监测系统的分析方法	30
3.1.2 结合监测数据和有限元模拟的分析方法	31
3.2 大跨缆索桥整体结构与局部易损构件的多尺度建模	32
3.3 等效异性桥面板与疲劳易损构件细节模型的跨尺度衔接	34
3.3.1 基于子结构技术的跨尺度连接	34
3.3.2 基于子模型技术的跨尺度连接	35
3.4 面向疲劳状态评估的润扬斜拉桥多尺度建模	36
3.5 考虑疲劳时变损伤状态的结构有限元模型更新方法	41
3.5.1 考虑疲劳损伤时变特性的主要因素	41
3.5.2 易损部位疲劳裂纹萌生后的结构模型更新方法	42
3.5.3 表面缺陷的人工检测信息量化及其模型更新方法	43
3.5.4 考虑疲劳时变损伤状态的结构有限元模型更新流程	44

第 4 章 大跨缆索桥钢箱梁结构动力响应分析和疲劳损伤评估	47
4.1 大跨缆索桥服役载荷模拟方法概述	47
4.1.1 标准卡车载荷模拟方法概述	48
4.1.1.1 基于等效疲劳损伤原理的标准疲劳车辆载荷的模拟	48
4.1.1.2 基于 Monte-Carlo 随机仿真的交通载荷谱模拟	50
4.1.2 铁路载荷模拟方法	50
4.1.3 环境变温载荷模拟方法	53
4.1.3.1 钢箱梁温度场数值分析方法	53
4.1.3.2 桥梁健康监测系统反映的结构温度分布规律	54
4.2 大跨桥梁在正常运营环境下的结构应力时程分析	55
4.2.1 正常运营环境下基于应变时程监测信息的载荷因素分析	55
4.2.2 卡车荷载所引起的应力时程	63
4.2.2.1 润扬斜拉桥卡车荷载所引起的应力时程	63
4.2.2.2 青马大桥卡车荷载所引起的应力时程	66
4.2.3 基于有限元模拟的列车荷载所引起的应力时程	68
4.2.4 环境温度变化引起的应力时程	73
4.3 大跨桥梁在突发载荷作用下的结构响应分析	76
4.3.1 撞击事故引起的结构应力时程	76
4.3.2 地震载荷引起的结构应力时程	78
4.4 桥梁钢箱梁疲劳损伤理论概述	80
4.5 服役载荷作用下钢箱梁结构疲劳关键部位的识别方法	82
4.5.1 疲劳关键位置的识别方法	83
4.5.2 服役载荷作用下桥梁疲劳关键部位的确定	83
4.6 服役载荷作用下钢箱梁疲劳损伤累积分析	85
4.6.1 正常运营环境下桥梁疲劳损伤累积	86
4.6.1.1 基于监测系统应变数据的润扬大桥损伤累积	86
4.6.1.2 基于有限元模拟的青马大桥损伤累积	88
4.6.2 突发性事故对疲劳损伤累积过程的影响	93
第 5 章 大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳易损构件的损伤状态分析	98
5.1 疲劳裂纹扩展理论	98
5.2 润扬斜拉桥索梁锚固区的疲劳裂纹状态分析	99
5.2.1 典型疲劳交通载荷谱的确定	101
5.2.2 疲劳应力分析	102
5.2.3 基于 S-N 曲线法的索梁锚固区疲劳状态评估	104
5.2.4 润扬斜拉桥索梁锚固区的疲劳裂纹扩展分析与寿命评估	105

5.2.4.1 标准疲劳等效荷载的确定	106
5.2.4.2 疲劳裂纹尖端应力状态分析	108
5.3 索梁锚固区疲劳裂纹扩展状态评估	111
第 6 章 钢箱梁疲劳易损构件损伤时变状态更新及其可靠度评估	113
6.1 钢箱梁桥面板人工检测信息及无损探测信息的分类描述	113
6.2 裂纹信息的量化模型	115
6.2.1 人工无损检测中的疲劳裂纹出现的概率特性	115
6.2.2 基于贝叶斯定理的疲劳裂纹失效概率更新模型	115
6.2.3 基于 Paris 方程的裂纹扩展模型	117
6.3 斜拉桥疲劳易损构件可靠度分析	118
6.3.1 斜拉桥钢箱梁多尺度模型中的子模型	118
6.3.2 表面缺陷对疲劳构件的影响	119
6.3.3 基于检测信息的斜拉桥钢箱梁疲劳裂纹失效的可靠度更新	122
6.4 考虑服役载荷变化的钢箱梁疲劳损伤时变状态更新	125
6.4.1 正常运营环境下的钢箱梁时变状态更新	125
6.4.2 考虑突发性因素的钢箱梁时变状态更新	127
参考文献	131

第 1 章 绪 论

大跨缆索桥包括大跨悬索桥、大跨斜拉桥等重要的大型现代化桥梁,这些桥梁结构的使用期长达几十年、上百年,在服役期内由于环境侵蚀、材料老化、荷载的长期疲劳效应、突发事件过载效应等因素的综合作用,将不可避免地导致结构系统中的损伤累积和抗力衰减,从而使结构抵抗自然灾害甚至正常服役载荷的能力下降,极端情况下会引发灾难性事故。由于大部分大跨缆索桥的钢箱梁结构都是由多重桁架、薄板、薄壁钢梁和加劲肋等各种构件通过焊接、铆接或其他方式连接构成,疲劳损伤包括早期的疲劳裂纹会在这些连接部位处累积,构成大跨缆索桥的钢箱梁结构的安全隐患。因此,钢箱梁结构焊接细节附近的疲劳累积以及由此而发生的结构脆断是桥梁疲劳破坏的一个主要根源,而结构疲劳失效是关键构件局部性能衰退到一定程度发生的结果,这就要求桥梁结构的疲劳寿命评估必须在综合在线运营监测、动力测试和结构性能衰退分析等各种方法的基础上,尽早地发现疲劳损伤并跟踪其演化累积过程。

桥梁结构健康监测系统提供了桥梁在线运营状态下的结构真实响应,给桥梁结构的模型参数识别、疲劳累积状态评估提供了可靠的实测信息。但是,由于结构健康监测系统中的传感器在安装过程中往往受到钢箱梁等结构复杂构造的限制,安装传感器的部位不一定就是钢箱梁结构中高危部位,如钢箱梁结构中焊接细节部位往往发生疲劳累积的可能性很高,但在这些位置加布传感器十分困难,这就需要建立更为精细的有限元模型来反映桥梁结构中关键构件的局部应力集中分布。以结构疲劳评估为目标的钢箱梁结构有限元模拟,能够准确计算和分析结构在车辆动荷载下的动力响应和桥梁结构中关键构件的热点应力分布;在此基础上,可进一步进行疲劳损伤累积过程和其他类型失效过程的仿真分析。为了达到这一目的,相应建立的结构有限元模型应满足如下要求:除了依据有限元模型所获得的结构动力特性应该满足的要求以外,在结构应力模拟中,还要准确模拟出包含关键构件的焊接细节处的应力集中。

结构发生疲劳的成因是作用于整体结构上的服役载荷,而结果却是萌生于焊接细节等不利部位的微缺陷、微孔洞或微裂纹的非线性演化,因果不在一个空间尺度内。考虑到这种结构尺度与疲劳细节尺度之间的悬殊差距,要准确地模拟结构的疲劳衰退性能,必须在不同尺度根据不同假设和理论建立结构一致多尺度模型。只有在不同尺度模型中以不同的、恰当的方式准确引入疲劳性能的衰退及其演化过程,建立起有效用于结构疲劳性能衰退分析的一致结构多尺度模型,才有可能满足不同尺度下结构特性分析和局部疲劳损伤演化过程仿真计算的需要,达到对大跨空间类结构进行疲劳失效分析和状态评估的目的。作者所在

的研究团队多年来致力于研究大跨复杂结构损伤分析与评估所需的模拟方法,提出了“结构行为一致多尺度”模型,将小尺度的局部精细有限元模型嵌入到大尺度的结构全尺度整体有限元模型当中,这种模型可依据大跨缆索桥钢箱梁结构的实际构造,反映诸如焊缝等连接部位的细节特征,因而可以用来进行结构的动力特性分析、静力响应分析及整体与局部的动力响应分析,不仅可得到桥梁结构的固有频率和振型、静载作用下整个桥梁较为精确的整体和局部应力、位移,以及动载作用下主梁较为精确的整体和局部加速度、位移和应力时程曲线,甚至能得到局部细节包括焊缝处的应力分布情况和应力时程曲线。对于大跨缆索桥钢箱梁结构而言,现有的有限元建模方法仍需进一步研究改进,应达到在同一模型上进行动力特性、静力响应和动力响应分析,提取整体、局部和细节的三种层次计算结果(即结构动力特性、结构整体静动力响应和结构局部及细部的静动力响应)的要求。大跨缆索桥钢箱梁结构的疲劳状态评估须直接着眼于局部焊接细节处,需要通过模拟分析提取出局部细节的应力时程曲线,所以还需要进行结构响应多尺度一致逼近建模和模拟。

在对桥梁结构的疲劳性能综合评估方面,以往的评估方法较多按经验方法分级或近似估算。这类经验方法由于主观性较大,较难准确地反映出桥梁结构实际疲劳损伤所产生的结构性能变化。实际上,桥梁结构在服役期间,由于受外界环境侵蚀等因素的影响,桥梁结构的抗力是随时间增加而衰减的,要进行整个服役期内结构状态的精确评定,必须掌握载荷的时变性和抗力的衰减性。考虑到载荷效应和抗力实际上均为随机过程,有必要引入结构时变可靠度理论,对桥梁的状况进行评估和剩余寿命进行预测。目前考虑抗力的衰退和载荷的时变所进行的桥梁性能的评价,其研究对象大都为中小桥梁,以关键构件的性能作为代表来评定整个桥梁系统的性能衰退状态,而对于大跨缆索桥钢箱梁结构由于疲劳累积造成的桥梁结构时变安全性能衰退的评估方法研究亟待加强。

大跨缆索桥钢箱梁结构通常构造复杂,由多重桁架、板、薄壁钢梁和杆件通过焊接、铆接或其他方式连接构成。在这些焊连接构件中,疲劳损伤包括早期的疲劳裂纹会在焊接部位处累积,构成结构的安全隐患。而目前任何结构损伤检测或监测理论及方法均对此类损伤无能为力,只能靠人工检查去发现。近年来,随着人工检测或无损探伤在大跨桥梁结构中的应用,桥梁管理部门会定期给出年检报告,记录下桥梁各部分构件上每年新增的各类缺陷,包括检测到的裂纹的长度和方向、钢筋锈蚀程度、螺栓断裂程度,以及掉漆、轧光侵蚀和表面处理等保护措施不到位等,其详尽程度已着眼到桥梁任一跨度上的任一构件和局部细节。如此详细的检测报告,一方面使得传统的以局部构件替代整个体系的可靠性的评价方法已经不敷应用,另一方面使得建立足够精度的多尺度有限元模型,在模型中嵌入这些缺陷来对含缺陷桥梁当下的服役状态进行仿真分析成大势所趋。嵌入多尺度模型各类缺陷,必然改变了桥梁的最不利截面与关键构件的位置和分布,其性能分析必须考虑到这类桥梁关键构件空间尺度的变异性。而基于大跨桥梁上布设的活载测量系统可以获得准确的荷载时变性的模型,不需要以往有关车辆荷载的类型和分布的假定。将每年甚至每日的精确的车辆载荷谱施加于多尺度模型,就可以考察疲劳应力的时变特征。

桥梁结构的疲劳性能不仅取决于材料特性、裂缝发生地点的几何尺寸,还与载荷和应

力-应变历程等有关。由于经过桥梁的车辆类型、轴距、轴重都是不确定的,桥梁承受的是变幅随机序列的应力循环。同时,桥梁结构的疲劳破坏又不同于静力作用下的极限承载力破坏,它是结构材料在反复荷载作用下损伤不断积累的结果,随着材料损伤的演化结构抗力也相应地降低。所以,桥梁结构的疲劳累积是一个复杂而随机的过程。因此在疲劳寿命预测过程中就存在着由于模式的不精确和数据、信息的不完整而带来的不确定性。考虑到这些不确定性因素,对桥梁结构在使用寿命期间的确定性疲劳分析事实上很难得到准确的结果。因此在预测疲劳寿命时必须考虑各种不确定因素带来的疲劳估计的不确定性以及随着服役时间增长桥梁疲劳抗力的衰减性,即对结构在使用寿命期间进行疲劳损伤的时变可靠性分析。但目前对时变结构疲劳可靠性的研究比较少见,部分对时变可靠性的研究多是着眼于钢筋混凝土结构的研究,研究工作多是考虑恶劣环境如腐蚀、碳化、冻融等对结构抗力的影响,以及研究作用在结构的活载的随机过程的统计特征。总体上,有关大跨桥梁基于实测交通载荷和结构有限元疲劳性能衰退仿真分析的疲劳时变可靠度分析尚未系统地展开研究。

综上所述,相关领域目前的研究现状表明,在基于结构健康监测系统进行结构损伤识别和状态评估方面的已有的理论研究成果尚不足以达到准确进行结构疲劳性能评估和寿命预测的目标。因为结构疲劳性能的变化是结构局部性能衰退到一定程度后发生的结果,而目前的损伤检测理论和方法主要依赖于结构整体动态特性的改变,不足以进行结构局部性能的评估和局部损伤的检测或识别。但是,我们在桥梁结构多尺度模拟和疲劳损伤仿真分析方面的大量研究成果给基于结构疲劳性能衰退分析的疲劳状态评估和寿命预测提供了较好的理论基础。在现有的比较完善的重要桥梁结构健康监测系统基础上,在这些我们已经取得的桥梁结构模拟和性能分析的理论成果基础上,对大跨桥梁工程结构进行基于结构疲劳性能衰退分析的疲劳状态评估和寿命预测是完全有可能的。

本书的写作目的旨在总结我们多年来在大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估方法及其应用领域的研究成果。将我们在以下几方面的研究成果系统地呈现给相关专业的读者与工程界:大跨缆索桥疲劳应力监测与响应时程分析、面向疲劳损伤评估的大跨缆索桥钢箱梁结构有限元模拟与模型更新方法、服役载荷作用下大跨缆索桥钢箱梁结构动力响应和疲劳损伤评估、大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳易损构件的损伤状态分析、钢箱梁结构疲劳易损构件损伤时变状态更新及其可靠度评估。同时,介绍了这些研究成果在润扬长江公路大桥钢箱梁结构疲劳评估中的应用。

本书重点介绍了当前大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳分析中的如下关键问题的分析思路与解决途径:

- 焊接细节处的疲劳损伤模拟及耦合损伤的疲劳应力分析:疲劳损伤萌生和演化是发生在结构中最不利构件或连接件细节的局部现象,因此在构件焊接细节附近应力集中处的局部应力变化梯度将在细观模型中描述。在损伤细节的模拟计算中必须耦合细节处的损伤演化进行应力和变形场的计算。这也是疲劳损伤累积分析能够获得准确结果的关键。

- 采用检测信息进行模型更新过程中,结构性能参数衰退的精确度评价问题:由于此过程中获得的结构缺陷信息与结构定量分析的模型是处于不同的评价体系,如何将不同评

价体系下的结构信息关联并且有效地耦合起来,是结构模型更新的关键。

• 基于健康监测系统实时监测信息的结构疲劳状态反演(反分析)与结构疲劳性能衰退程度仿真分析(正分析)的“配对”识别:众所周知,医生在依据脉象信息给病人诊断时需要调用他事先掌握的大量病理特征进行综合分析才能作出正确的判断。复杂结构的疲劳状态识别和寿命预测就如同医生做病情诊断。因此,识别疲劳状态与准确评估寿命的关键就在于将项目研究过程中获得的正分析结果与反分析结果相结合,基于实时监测信息集成的结构疲劳状态反演与结构性能衰退程度仿真分析(正分析)发展“配对性”的疲劳状态识别方法。

为了解决上述问题而采取的大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估研究的路线图如图 1.1 所示。

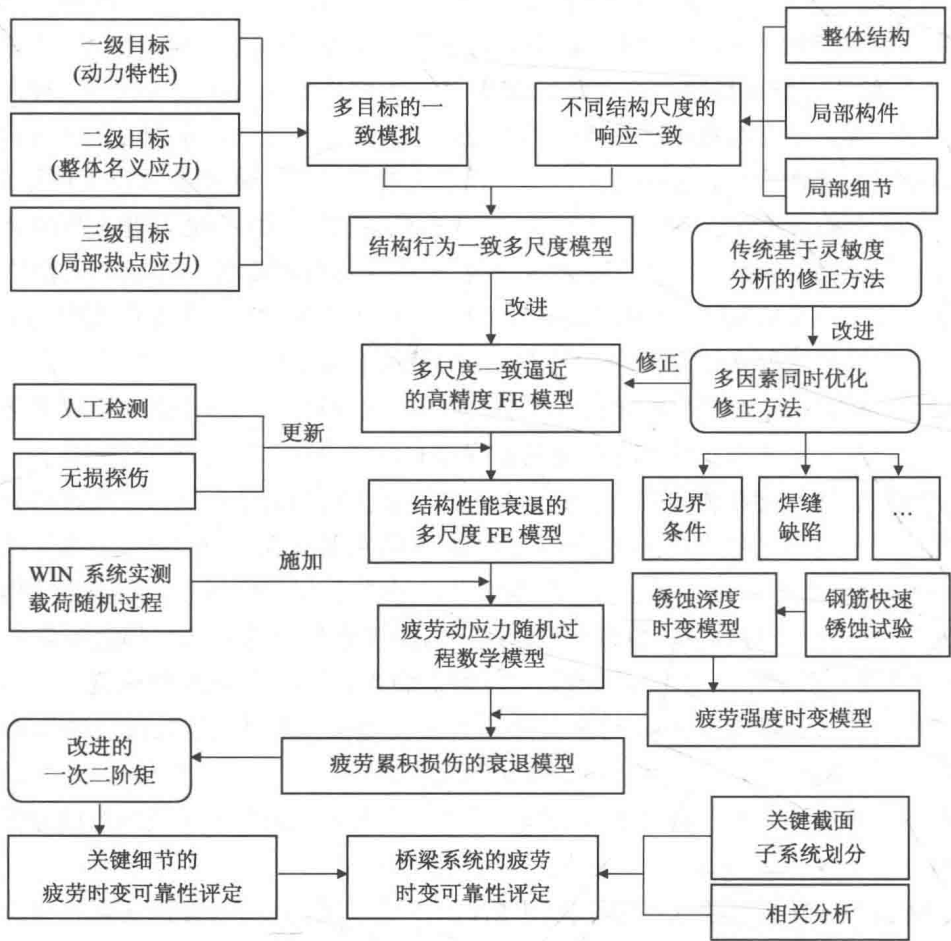


图 1.1 大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估研究的路线图

众所周知,重大桥梁的管理部门每年都会对桥梁结构进行人工检测,给出各含缺陷构件的有关钢筋锈蚀面积、裂纹长度或保护措施不到位等缺陷的等级描述,检测结果可以充分反映该构件在已服役历史中的表现。这样的检测信息本是针对每个具体构件,但在结构安全

性评价领域,通常同一类型的单个构件往往会被合并为一类构件来描述其共同的特征,使得这样的检测信息的应用失去了价值。为充分利用这些检测信息,须将人工检测和无损探伤到的裂纹、损伤、螺栓断裂、钢筋锈蚀等缺陷均考虑进多尺度有限元模型中,检测信息对应的各个构件均一一对应于有限元模型中的各个构件,这样才能最准确地描述和模拟结构真实的状态。各类缺陷可归一化为构件或焊接细节有效截面面积的折减或者力学参数比如弹性模量的折减。在布设健康监测系统传感器的截面上,采用系统实测数据对截面面积或弹性模量折减率进行有效性验证,从而获得各类缺陷的存在对钢结构有效截面面积或弹性模量影响程度的定量描述。

对车辆动载荷的随机时变性的描述,用以时间为参数的随机过程是比较合适的,载荷的时变概率特性通过随机过程的各阶矩近似地描述。一般来说,交通载荷随时间的变化是多维非平稳、非齐次随机过程。以目前的研究水平,要建立大跨桥梁准确的载荷的随机时变模型是比较困难的,这是因为健康监测系统在桥梁上的应用时间尚比较短,基础数据尚比较缺乏。拿润扬大桥来说,桥梁自2005年通车以来,监测系统虽然已采集了大量监测数据,但对于设计使用寿命为100年的桥梁来说,进行整个剩余寿命期内动载荷的随机过程的准确描述是比较困难的。但是我们可以根据最近的监测数据来进行未来载荷时变模型的预测,为此,转而寻找能基本满足每年交通流递增特征并能提供实现途径的各类简化与实用模型。目前,常用的模型有:1)用某类确定性函数表示的随时间变化的递增函数,将非平稳随机过程平稳化为平稳随机过程模型;2)简化为考虑各时点交通流相关性的独立增量随机过程;3)直接转化为各阶段的随机变量。对于布设健康监测系统的桥梁,车辆动载描述要顾及的另一个重要特征是存在验证荷载,也就是系统实测的过去服役期内的荷载数据。使用历史上存在过的验证荷载对车辆动载的影响分析一般可采用 Bayesian 方法。

在基于监测信息的疲劳结构状态反演(反分析)与结构疲劳性能衰退分析(正分析)的“配对”识别方法方面,目前桥梁结构损伤诊断研究的基本思想是基于振动测试与信号分析(例如傅里叶变换和小波变换等)基础上的结构整体状态反演技术。然而,越来越多的研究工作表明,基于反演分析的结构损伤检测与评估研究路线正遭遇低效、低精度和灵敏度差等困难,距离在识别复杂工程结构中的损伤的目标有很大差距,因此,基于结构监测信息进行状态识别目前正面临“瓶颈”技术:即如何解释和应用监测数据,得到反映结构运行状况并指导决策的有价值的信息。本课题提出在结构性能衰退分析的基础上,结合结构健康监测信息和多尺度有限元模拟,研究结构疲劳状态评估技术,进行结构寿命预测。一方面在役桥梁结构现场监测的信息可以有助于通过结构性能衰退分析揭示结构疲劳失效机理,另一方面也使结构疲劳损伤识别和健康诊断不仅仅依赖少量传感器的输出信息。依据含损伤结构正分析的结果去认识结构损伤特征,则有可能为结构状态识别提供有益的帮助。其主要原因在于:尽管结构正分析手段也有待于研究和提高,但是,只要模拟准确,它可以提供令人信服的结果,有助于我们认识结构的损伤过程、失效路径和结构损伤特征参数,给结构状态识别过程提供大量的先验信息,帮助我们从反分析得出的非唯一、非确定性答案中去伪存真,提高识别的正确性和准确性;其作用就好比医生在依据脉象信息给病人诊断时也需要调用他

事先掌握的大量病理特征才能作出正确的判断。

相信我们在对大跨缆索桥钢箱梁结构疲劳状态评估方法的研究及应用的成果,可望在一定程度上为了解监测桥梁结构疲劳状态、延长桥梁使用寿命发挥作用,并可望能够较早地发现结构中出现局部疲劳裂纹或者疲劳性能显著衰退的部位,实施经济合理的维修养护计划,避免桥梁大修关闭交通所引起的重大损失,对于保障大桥安全运营、进行合理的维护将具有重要的意义。

第2章 大跨缆索桥疲劳应力监测和响应时程信息分析

大跨缆索桥结构疲劳应力监测是结构健康监测和安全评估的关键环节。为了精确评估桥梁结构的疲劳损伤状态和剩余疲劳寿命,首先需要保证用于桥梁构件疲劳评估的应力谱是精确的。因此,本章的研究目标是针对疲劳状态评估环节中对应力谱分析的需要,以润扬长江公路大桥和香港青马大桥为工程背景,基于大跨桥梁健康监测系统记录的应变时程数据,探讨钢箱梁结构关键部位在运营载荷下的应变时程曲线的规律,研究钢箱梁结构在正常交通载荷和特殊工况下(重车过桥和台风时)疲劳应力谱的特征;结合桥梁实时监测的温度变化,分析钢箱梁结构应变时程和温度时程之间的关联性。

2.1 大跨缆索桥结构健康监测系统的应变传感器布置概述

本书以润扬长江公路大桥^[1]和香港青马大桥^[2]为工程背景,来评估这两座大跨桥梁的疲劳状态。润扬大桥是由南汊悬索桥和北汊斜拉桥组合而成的特大型跨江大桥,其中的南汊悬索桥目前保持主跨国内第一、世界第三的记录,其重要地位不言而喻。青马大桥总长2.2 km,主跨长1 377 m,是世界上最长的公路、铁路两用悬索桥。作为大屿山(Lantau)干线的主要部分,青马大桥是连接青衣(Tsing Yi)岛与马湾(Ma Wan)岛的铁路公路两用的重要交通枢纽,已成为香港新机场交通干线中不可或缺的部分。

这两座大跨缆索桥上都安装了结构健康监测系统,在结构构型和健康监测两个方面都可以作为我国和当今世界上重要的大跨缆索桥的代表。因此,本章以润扬大桥和青马大桥为例,以其钢箱梁结构上记录的应变时程数据为基础,研究影响桥梁疲劳损伤的运营载荷下的疲劳应力的特征。

2.1.1 青马大桥结构健康监测系统中的应变传感器布置

青马大桥建成于1997年5月22日,桥面分为两层,上层用于高速公路运输,包括两个三车道;下层主要用于铁路运输,包括两条铁路和两条单行应急公路,见图2.1所示。为保证大桥的安全,在桥梁建成投入使用的同时,设于该桥上的结构健康监测系统就开始记录桥梁每天的载荷和结构响应,至今健康监测系统已记录了大量数据。