



DYNAMICS AND INTELLIGENT MONITORING
OF COMPLEX CABLE SYSTEMS

复杂索缆体系 动力学分析及智慧监测

淡丹辉 韩 飞 徐 斌 著



上海科学技术出版社

复杂索缆体系 动力学分析及智慧监测

淡丹辉 韩 飞 徐 斌

| 著 |



上海科学技术出版社

内 容 提 要

动力学分析是索缆结构设计、服役期性能监测与维护、振动控制的关键问题。随着现代工程结构跨度和高度的不断增长,复杂索缆体系成为一种必然选择。在此情况下,已有的针对单个简单拉索的动力分析方法不再适用。如何采用简单、高效、高精度的解析方法来分析复杂索缆体系的动力问题,已成为一个迫切需要解决的难题。本书主要介绍了基于动刚度理论的复杂索缆系统的动力分析理论方法,以解决复杂索缆系统的动力特性分析、索力监测与识别、系统参数识别、振动控制、索缆疲劳状态智慧感知和疲劳寿命预测等问题。

本书可为从事工程结构设计、维护管养、监测、振动控制等工作的广大工程师和科研人员提供参考,也可作为土木工程方向的研究生辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

复杂索缆体系动力学分析及智慧监测 / 淡丹辉, 韩飞, 徐斌著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2023. 1
ISBN 978-7-5478-5750-2

I. ①复… II. ①淡… ②韩… ③徐… III. ①悬索桥—缆索—结构动力分析 IV. ①U448. 25

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第128617号

复杂索缆体系动力学分析及智慧监测

淡丹辉 韩 飞 徐 斌 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)
邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 24.75

字数 572千字

2023年1月第1版 2023年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5750-2/U·127

定价: 290.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

前 言

人类文明是伴随着技术进步而进步的,技术不仅促进了社会财富的增长,而且不断对人类赋能,使个体的人和群体的人的时空运动能力不断增强,进而使人们对自己生活环境空间的需求持续增长。于是,工程结构作为人造环境空间的基础和支撑,一直保持着强劲的发展动力。到了近现代,随着技术的井喷式发展,人们对工程结构提出了高度更高、跨度更大、规模更大、功能更丰富、安全性更高、经济性更好的要求,尤其是进入 21 世纪 20 年代以来,对工程结构全生命存续过程的环境友好性更加重视,在低碳、环保等方面也提出了更高的要求。从具体的参数角度来说,这主要体现在对工程结构高度和跨度的持续增长需求上。一方面,大跨桥梁、高层建筑、大跨空间结构、空天结构、能源工程、海洋工程等各种工业用的构造物,其跨度和高度的增长已经超越了普通的梁、柱、板、壳等传统刚性构件的能力极限。另一方面,由于柔性的索、膜构件能够充分利用材料的抗拉强度,而且能够将材料的承载能力按照任意设计的空间走向进行配置。因此,索、膜结构在迎合现代工程结构更高、更长方向发展这一趋势方面更具有优势,已成为现代工程结构受力体系的主力。

索缆结构作为索、膜结构中的一大类,由于其组成构件为一维柔性索缆,可以非常方便地与梁、柱、板、壳等刚性构件相连接,也可以与膜结构连接,相互配合,构成复杂的索缆结构,如索承桥梁、大跨结构、高层建筑等。其基本构件——柔性索缆来承担拉力,其他构件承担其他内力,共同构成复杂的空间受力体系。索缆通过轴向拉伸能力来抵抗外荷载作用,不仅使得钢材强度得以充分利用,而且由于拉索自重轻、强度高、施工便捷等特点,被当作主要承力结构而直接应用于各类工程结构中,同时成为复杂索缆结构的重要构件,被广泛应用于现代工程结构中。

最近几十年来,由于人们对土木工程结构的跨度、高度等提出了更大的要求,所使用的索缆构件变得越来越长,其柔度随着长细比的增大而增大,其静力强度、动力稳定

性、疲劳等问题变得越来越突出。为了改善结构的力学性能,传统的纯索系统正在被更为复杂的索缆系统代替,如索网体系、横向弹性支撑的拉索、端部或横向附加安装阻尼器的拉索、带作动器件的拉索、横截面带软弱层的拉索、有联系层的双梁/多梁、柔性地基上的索缆等。当然,悬索桥的主缆和吊索是更早就出现的复杂索缆体系。

不管是单根拉索,还是复杂索缆体系,共同的突出问题就是,由于拉索长细比大、横向刚度和内阻尼很小,在工作荷载的影响下,容易产生各种类型的振动现象,进一步会导致舒适性、安全性和疲劳耐久性问题。这些问题都与索缆结构的动力学分析有关。动力学分析问题已成为现代索缆结构的设计、运营期性能监控与维护、振动控制的关键问题。

索缆结构虽然可以一定程度上改善单根拉索的动力性能,但也不可避免地增加了动力分析的难度。已有的动力学分析方法已经难以解决复杂索缆体系的动力学分析问题。因此,鉴于现代土木工程结构对复杂索缆系统日益增长的需求,以及对其进行精确动力学分析的需求,迫切需要研发一套专门用于复杂索缆结构的动力分析理论和方法。

对于复杂索缆体系的动力学分析,目前有解析法、数值分析法和半解析半数值分析法。解析法是将拉索看成无限自由度的连续体,通过建立该系统的动力控制微分方程来确定振型函数,进而得到特征频率方程及运动方程。解析法可以得到动力学问题的显式解,因此在参数分析、参数识别和需要反复修改设计参数的设计选型阶段有重要用途。现有的解析法分析理论包括基于张紧弦理论和梁理论,均是通过尽可能地忽略一些次要影响因素,对振动控制方程进行简化。已经证明,在面对复杂索缆体系时,这些简化会对分析结果造成不可接受的误差。数值法包括几何非线性有限元法和其他一些基于连续介质的数值分析方法。这类方法显然有着分析效率和分析精度方面的问题,限制了其在需要反复修改输入参数的设计分析和对时效要求很高的力学反分析等计算场合的应用。对于复杂索缆体系而言,有必要建立一套可方便调整参数、可同时考虑多种拉索因素影响的高精度高效率的动力分析理论。

为此,本书针对复杂拉索的实际几何构型和设计参数变化特点,将组成复杂索缆体系的拉索按照其空间受力及与其他构件的接触或支撑情况,将拉索划成若干自然索段,在每一个索段内,采用考虑多种拉索力学因素(抗弯刚度、轴向抗拉刚度、倾角、垂度、边界条件、横向受力、阻尼、内阻尼等)的动力控制微分方程来描述其振动行为,通过建立多索段索缆系统的横向动刚度方式,建立结构平衡方程,进而得到系统的解析形式特征

频率方程。另外,发展了几种方程的求解方法,包括 Wittrick - Williams 算法和粒子群搜索算法等,很好地解决了复杂索缆体系的动力特性的精确求解问题。在此基础上,将此理论应用于各种复杂索缆体系的索力识别、动力特性识别中,发展了在线和离线两种版本的索力监测和识别技术框架,以及针对服役期复杂索缆体系在工作荷载作用下的时变索力问题,发展了批处理和实时在线识别索力的技术与拉索全场域实时在线疲劳应力识别和疲劳状态智慧感知技术,初步形成了面向复杂索缆体系的实时疲劳寿命监测与预测技术框架。

课题组对复杂索缆动力问题及其监测问题的关注最早可追溯到 10 多年前的拉索振动控制话题。同样,也是出于对长索的振动控制需要,在斜拉桥工程实践中常采取在索端部外置阻尼器的方式进行减振抑振。为了得到最佳的减振效果,需要拉索阻尼器系统进行动力特性分析。这些分析大多是基于张紧弦模型的,阻尼器在索上的支撑点的阻尼力常通过狄拉克函数方式被引入动力方程中。由于对倾角、抗弯刚度、内阻尼和边界条件等因素的忽略,动力分析的误差在某些情况下变得不可忽视。在拉索索力的监测方面,工程中常遇到一些困难。比如,对于端部套筒内置阻尼器的拉索、外层 PE 护套和内部索丝之间存在油膏等软弱层的拉索,以及长度较短的拉索,由于传统的拉索动力分析理论的成立条件没有很好地被满足,由对应的索频-索力关系式识别得到的索力误差将大到无法使用的程度。另外,出于对索网体系、悬索桥体系和体外预应力索的动力学行为的关切,我们开始了对诸如此类的复杂索缆体系动力分析方法的探索。

面对复杂索缆体系,为了获得高精度的分析结果,势必在动力分析中需要尽可能全面地考虑拉索受到的影响因素,使其尽可能接近拉索的物理实际情况。为此,首先尝试了考虑抗弯刚度的分段动力控制方程来描述划分出的自然索段的动力学行为,然后建立索段的横向动刚度解析表达式,通过索段的端部变形协调关系和边界条件,采用类似有限元单刚集组总刚的方式,建立了基于横向动刚度表达的复杂索缆体系的总体平衡方程。在此基础上,进一步建立了用于动力特性分析的特征频率方程,并利用该方程展开了对特殊情况下索力识别的研究。基于上述研究,在国家自然科学基金项目(50978196)《复杂索缆结构动力分析理论及工程应用研究》的基础上,博士生韩飞和徐斌分别展开更一般、更复杂类型的索缆体系动力分析方法及其监测中的应用研究。韩飞在博士期间主要是从复杂索缆体系的动力学正分析角度,进一步将课题组提出的横向动刚度拉索动力分析方法进行一般化提炼,发展了考虑阻尼的动刚度分析框架和

高效的频率方程的数值求解方法,进而将其应用于裸索系统、基于双梁的复杂索缆体系和多段式拉索系统的动力分析。另外,还进一步发展了基于多段式主缆的悬索桥的动力分析模型和方法。徐斌主要集中于复杂索缆体系的力学反分析问题,旨在发展基于振动监测的拉索全场域时变效应的在线智慧感知与疲劳评估技术。另外,在拉索动力分析的横向动刚度方法基础上,进一步系统地建立了不同拉索类型的反分析特征方程,以粒子群智能搜索算法(PSO)为求解工具,建立了索力和索参数的求解方法,研究了拉索时变索力的实时在线感知方法和振动附加索力的频域计算方法。在此基础上,还发展了拉索全场域动力响应和弯曲应力的全场域反演感知技术,提出了拉索的在线疲劳状态智慧感知和寿命预测方法。

课题组基本上建立起了一套针对复杂索缆体系动力分析任务的完整方法体系,并取得了丰硕的成果,相应的应用工作也在课题组承担的大跨索承桥梁的监测、检测和研究项目中得以应用,先后服务于东海大桥、明州大桥、甬江大桥、西堍门大桥等 20 余座大桥的索缆监测识别,也和国内主要索缆制造商就科研成果转换建立了合作关系。相关的研究成果形成专利、软件著作权数部,先后发表索缆相关的 SCI 论文近 40 篇,引起了国际学术界瞩目,一篇论文^①两次成为 ESI 高被引(1%)和 ESI 热点(0.1%)论文,另一篇索缆动力学分析论文^②被国际著名工程新闻网站 Advances In Engineering(AIE)遴选为对“卓越工程”有显著贡献的科学论文,并予以高亮专题报道,入选率为当年所有工程领域发表论文总数的 1%以内。

课题组取得的成绩离不开国家基金委的大力支持,韩飞、徐斌从同济大学毕业后,先后依托西北工业大学、郑州大学,获得了国家自然科学基金青年项目“悬浮隧道锚索非线性动力特性及其快速分析方法研究”(12002279)和“基于振动监测的拉索全场域实时应力识别方法及疲劳损伤动态评估”(52108290)的继续支持,在此深表感谢!

本书的素材来自课题组先后发表的期刊论文和研究生的学位论文。本书的主要内容安排如下:绪论部分主要介绍建立理论体系的背景和综述;第一篇基于横向动刚度的拉索系统动力分析理论,主要介绍索缆动力学中的动刚度法基础、单梁拉索体系的横向动刚度理论和考虑多因素的裸索系统动力特性分析方法;第二篇是复杂索缆系统的动

^① Han F, Dan D, Cheng W, et al. A novel analysis method for damping characteristic of a type of double-beam systems with viscoelastic layer[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 80: 911 - 928.

^② Fei H, Dan D, Wei C. Extension of dynamic stiffness method to complicated damped structures[J]. Computers & Structures, 2018, 208(10): 143 - 150.

力分析理论,主要介绍复杂索缆体系的动力特性分析方法、含填充层的双层复合索、带索卡的双吊索系统、多段式索缆系统和悬索桥动力分析模型;第三篇是复杂索缆系统的平均索力及索参数智能监测与感知,主要介绍基于 PSO 的复杂索缆系统模型修正及参数识别、中等长度索的索力精确识别、短吊索索力及参数精确识别、索缆悬吊系统索力及参数精确识别,并在最后介绍了一个工程应用实例——交通荷载对悬索桥动力特性的影响分析——涡振后的交通管制决策启示;第四篇是复杂索缆系统的在线疲劳状态智慧感知与寿命预测,主要介绍拉索时变索力在线实时智慧感知、拉索振动附加索力的在线智慧感知、拉索全场域动力响应和内力在线智慧感知、拉索在线疲劳状态智慧感知与寿命预测和复杂拉索体系动力分析及智慧监测工具箱的初步开发与应用。

本文的主要作者是淡丹辉、韩飞和徐斌。博士生余学文为实时索力识别部分做出了重要贡献,毕业研究生但强负责全书的组稿和编辑。另外,课题组的其他研究生对本书也有不同程度的贡献。笔者在新疆大学带的硕士生廖霞也直接为本书贡献了单吊索动力特性分析部分内容,在此一并表示感谢!

本书全面总结和回顾了课题组近 10 年来在复杂索缆体系动力分析和智慧监测领域所取得的理论成果,可以作为继续从事这方面研究工作的科研工作者的参考书,也可作为土木工程、结构工程或其他相关学科研究生的教材。对目前方兴未艾的土木工程结构健康监测领域而言,本书也可以为志在从事现代索缆结构智慧监测系统研发的工程和技术人员的参考工具书。

同济大学



2022 年 2 月 22 日晚 10 点

草于上海同济大学桥梁馆 709 室

目 录

第一篇

7

第1章

9

绪论 1

0.1 概念体系 1

0.2 研究综述 3

基于横向动刚度的拉索系统动力分析理论

索缆动力学中的动刚度法基础

1.1 动刚度法 9

1.1.1 基本理论 10

1.1.2 动刚度矩阵特性 11

1.1.3 存在的问题 12

1.2 W-W法 12

1.2.1 基本理论 13

1.2.2 计算流程 14

1.2.3 存在的问题 16

1.3 适用于复杂梁式结构的改进 W-W法 16

1.3.1 基本理论 16

1.3.2 计算流程 17

1.3.3 准确性验证 18

1.3.4	改进 W - W 法优势	20
1.4	W - W 法在弱几何非线性结构中的扩展	20
1.4.1	计算步骤	20
1.4.2	准确性验证	21
1.5	扩展动刚度法	22
1.5.1	基本理论	23
1.5.2	系统阻尼比的计算	27
1.5.3	方法验证	28
1.5.4	优势	30
1.5.5	复合索缆体系	31

| 第2章 |

32

单梁拉索体系的横向动刚度理论

2.1	单梁拉索体系的分段振动微分方程	32
2.2	分段微分方程的通解	34
2.3	界动位移表征的无量纲振型函数	36
2.4	拉索-横向力元件系统的横向动刚度矩阵分析 模型	37
2.5	实例研究：拉索体系的动刚度规律	40
2.5.1	数值验证	40
2.5.2	实索激振实验	45
2.5.3	拉索横向动刚度特性研究	47

| 第3章 |

52

考虑多因素的裸索系统动力特性分析方法

3.1	系统频率方程的建立	53
3.1.1	裸索体系阻尼比计算	53
3.1.2	动刚度矩阵计算	54
3.1.3	系统频率方程的求解	56
3.2	准确性验证	57

| 第二篇 |

61

| 第4章 |

63

复杂索缆系统的动力分析理论

复杂拉索体系的动力特性分析

4.1	复杂拉索系统的动刚度理论	63
4.2	复杂拉索体系的统一频率方程	64
4.3	统一频率方程的解法	67
4.4	有效性验证	69
4.4.1	与张紧弦方法比较	69
4.4.2	与文献计算结果比较	70
4.4.3	横向元件位置对纯索频率计算结果影响	72
4.5	实际应用	73
4.5.1	在拉索动力特性研究中的应用	73
4.5.2	弹性支撑	75
4.5.3	集中质量块	76
4.5.4	阻尼器	76

| 第5章 |

78

含填充层的双层复合索

5.1	概述	78
5.2	由黏弹性层连接的双梁系统阻尼特性分析	79
5.2.1	双梁系统的控制微分方程及其通解	80
5.2.2	动刚度矩阵的建立	82
5.2.3	等效阻尼比的计算	84
5.2.4	黏弹性双梁系统阻尼特性分析	85
5.2.5	在复合拉索系统设计中的应用	91
5.3	双梁系统动力特性分析	93
5.3.1	频率求解	94
5.3.2	振型分析	97

第6章

117

5.4	双层索套复合拉索系统动力特性研究	102
5.4.1	系统横向动刚度矩阵的建立	104
5.4.2	横向动刚度特性研究	109
5.4.3	护套-拉索系统振动机理分析	111
5.4.4	系统频率贡献判断流程图	114

复杂吊索系统特性研究

6.1	考虑吊索两端约束的吊索动力特性研究	117
6.1.1	吊索动力分析的基本理论	118
6.1.2	边界条件对吊索动力特性的影响分析	123
6.1.3	应用讨论	127
6.2	双吊索动力分析的横向动刚度理论	130
6.3	双吊索动力特性影响因素分析	134
6.3.1	与文献方法比较	134
6.3.2	索长的影响	135
6.3.3	抗弯刚度分析	136
6.3.4	减振支架位置对双吊索系统动力特性的影响	137
6.3.5	非对称索力的影响	138

第7章

140

多段式索缆系统

7.1	概述	140
7.2	基本理论	141
7.2.1	动力分析模型	141
7.2.2	拉索附加索力的推导	142
7.2.3	索段动刚度矩阵的推导	145
7.2.4	多段式系统总体刚度矩阵的集组	149
7.3	实验验证	151
7.3.1	实验工况介绍	151

| 第8章 |

166

悬索桥动力特性分析

7.3.2 实验结果分析	155
7.4 实验结果讨论及误差分析	162
7.5 参数分析	165

| 第三篇 |

175

复杂索缆系统的平均索力及索参数智能监测与感知

| 第9章 |

177

基于 PSO 的复杂拉索系统模型修正及参数识别

9.1 概述	177
9.2 模型修正及参数识别	177
9.2.1 模型修正的基本思路	178
9.2.2 识别参数的选择	178
9.2.3 目标函数的选择	178
9.2.4 PSO 优化算法	181
9.3 拉索参数识别仿真分析	193
9.3.1 短索	193
9.3.2 中索	194
9.3.3 长索	195
9.3.4 与张紧弦法和考虑抗弯刚度公式法比较	197
9.4 拉索参数识别的试验验证	198

| 第10章 |

203

中等长索的索力精确识别

9.4.1	1号拉索识别	199
9.4.2	2号拉索识别	200
<hr/>		
10.1	拉索动力分析的横向动刚度理论	203
10.2	拉索反分析特征函数	208
10.3	拉索反分析特征函数特性研究	208
10.3.1	索长影响	208
10.3.2	拉索横截面面积和单位长度质量的影响	211
10.4	平均索力及拉索参数的精确感知方法	213
10.4.1	基于特征函数 $H-I$ 脊线的参数感知方法	213
10.4.2	索长误差对感知结果的影响	214
10.5	实索试验验证	215
10.5.1	拉索试验介绍	215
10.5.2	20 m 拉索索力及抗弯刚度感知	217
10.5.3	168 m 拉索索力及抗弯刚度感知	220

| 第11章 |

222

短吊索索力及参数精确识别

11.1	考虑吊索锚固区影响的三节段吊索动力分析 模型	222
11.2	短吊索反分析特征函数	223
11.3	锚固区参数对吊索模态参数的影响分析	224
11.3.1	锚固区抗弯刚度的影响	224
11.3.2	锚固区线质量的影响	225
11.3.3	锚固区长度在吊索中所占比重的影响	227
11.4	短吊索索力及吊索参数的精确感知方法	228
11.4.1	面向服役期吊索的 PSO 索力精确感知 方法	229

| 第12章 |

236

索缆悬吊系统索力及参数精确识别

11.4.2	面向工程或实时在线监测环境的实用 公式法	229
11.5	方法验证	231
11.5.1	PSO 优化算法感知效果验证	231
11.5.2	实用公式法验证	232
11.5.3	实索试验验证	233

| 第13章 |

246

交通荷载对悬索桥动力特性的影响分析——
涡振后的交通管制决策启示

13.1	概述	246
13.2	考虑交通荷载的悬索桥动力学模型	248
13.2.1	单梁悬索桥模型：交通荷载作为附加均匀 质量	248
13.2.2	双梁悬索桥模型：交通荷载作为柔性副梁	249
13.3	悬索桥动力特性求解	250
13.3.1	单梁模型模态阻尼比的显式解	250
13.3.2	双梁模型模态阻尼比的显式解	251
13.3.3	无阻尼模态频率 ω 的求解	253
13.4	交通荷载对动力特性的影响	254
13.4.1	验证单梁模型的动力特性解	255

13.4.2	交通荷载对动力特性的影响	256
13.4.3	现场监测数据验证	257
13.5	关于交通管理决策的讨论	260

| 第四篇 |

261

复杂索缆系统的在线疲劳状态智慧感知与
寿命预测

| 第14章 |

263

拉索时变索力在线实时智慧感知

14.1	概述	263
14.2	时变频率的智能感知	264
14.2.1	块递推 APES 法介绍	264
14.2.2	时变频率智能获取方法	265
14.3	时变索力感知	266
14.3.1	时变索力拟合方法	266
14.3.2	时变索力公式拟合	266
14.3.3	时变索力智慧感知流程	270
14.4	实桥拉索验证	271
14.4.1	工程背景	271
14.4.2	拉索时变频率智能感知	272
14.4.3	拉索时变索力公式拟合	275
14.4.4	时变索力感知	279

| 第15章 |

283

拉索振动附加索力的在线智慧感知

15.1	概述	283
15.2	基于非线性分析的振动附加索力感知方法	283
15.3	参数分析及简化公式	286

15.3.1	Irevin 参数 λ 对振动附加刚度的影响	287
15.3.2	频率和观测点相对位置对振动附加刚度的影响	287
15.3.3	振动附加索力简化公式	289
15.4	实索振动附加索力感知	289

| 第16章 |

293

拉索全场域动力响应和内力在线智慧感知

16.1	概述	293
16.2	拉索全场域动力响应感知	293
16.2.1	振型叠加法	293
16.2.2	拉索振型函数	294
16.2.3	动力响应感知方法	299
16.2.4	数值方法验证	299
16.2.5	实索试验验证	314
16.3	拉索全场域内等效节点荷载感知	317
16.3.1	基本原理	317
16.3.2	数值方法验证	318
16.4	拉索全场域内截面内力及应力感知	322
16.4.1	弯曲内力及应力感知方法	322
16.4.2	数值方法验证	324

| 第17章 |

327

拉索在线疲劳状态智慧感知与寿命预测

17.1	概述	327
17.2	拉索疲劳荷载	328
17.3	拉索疲劳应力谱的获取	328
17.4	疲劳寿命预测方法	329
17.4.1	拉索 S-N 曲线	329
17.4.2	变幅荷载作用下的疲劳寿命	331