

Nonlinear and **R**eliability **A**nalysis of
Cable-stayed **B**ridge

斜拉桥

非线性动力及可靠性分析



王新岐 主 编

刘旭楷 刘文江 杨晓蓉 刘玉民 副主编



人民交通出版社
China Communications Press

斜拉桥非线性动力及可靠性分析

Nonlinear and Reliability Analysis of Cable-stayed Bridge

王新岐 主 编

刘旭楷 刘文江 杨晓蓉 刘玉民 副主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书介绍斜拉桥动力学理论、非线性动力分析经典理论、斜拉桥非线性动力特性,并且以永和斜拉桥为例进行了非线性动力分析,实现了斜拉索的垂度效应、梁柱效应、大位移效应斜拉桥几何非线性的模拟;介绍现有破损诊断技术的研究成果,对斜拉桥破损诊断技术进行了深入的研究,以永和斜拉桥为例对永和斜拉桥破损进行了诊断,通过理论分析及静动力测试结果,对其现有使用状况进行评价,并对斜拉桥可靠性进行了分析。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥非线性动力及可靠性分析/王新岐主
编. —北京:人民交通出版社, 2010.12
ISBN 978-7-114-08791-2

I. ①斜… II. ①王… III. ①斜拉桥—非线性力学—
动力学—研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第238207号

书 名:斜拉桥非线性动力及可靠性分析

著 作 者:王新岐

责任编辑:王文华

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门内大街斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:10.5

字 数:177千

版 次:2010年12月 第1版

印 次:2010年12月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08791-2

定 价:30.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《斜拉桥非线性动力及可靠性分析》

编写委员会

主任委员:	孙 涛	刘立健		
副主任委员:	刘润有	肖瑞捷	刘晓宇	付向东
主 审:	吴 云	王艳宁		
主 编:	王新岐			
副 主 编:	刘旭楷	刘文江	杨晓蓉	刘玉民
编 委:	宋广君	王艳红	蔺金太	常国旺
	谭伟姿	张宝刚	贺志雄	赵培军
	华龙海	黄思勇	陈广勇	陈志国
	李文深	魏继合	杨 亮	冯克岩
编 务:	王新岐	杨晓蓉	王艳红	蔺金太



前 言

钢材疲劳腐蚀、预应力松弛、桥梁变形等诸多因素会使斜拉桥发生局部破损,这些局部破损虽然不会立即导致整个结构的破坏,但对其安全构成了潜在的危险。局部破损会引起斜拉桥整体刚度下降及承载能力降低,影响车辆的行驶质量,严重者会出现失稳破坏。其结果不仅缩短结构的使用寿命,而且还威胁到人员生命和财产的安全。如果能及时发现破损,并诊断出局部破损的位置及破损程度,就能使维修人员制订出正确的维修策略,及时进行修复,这对于保障人们的生命财产安全尤为重要。

由于斜拉桥跨度大、主梁长细比大而具有柔性,所以在荷载作用下的斜拉桥变形表现为几何非线性,且由于风雨荷载、地震荷载、交通荷载等都属于非线性荷载,因此大型斜拉桥属于非线性荷载作用在典型的非线性结构上的柔性高次超静定结构。斜拉桥的非线性动力分析将使我们获知未破损和已破损结构的各种动力特征,为安全诊断测试结果提供理论指导和分析依据。而安全诊断测试结果则是斜拉桥可靠性研究的主要依据。

任何结构都可看作是由刚度、质量、阻尼矩阵(统称结构参数)构成的动力学系统,结构一旦出现破损,结构参数也随之变化,从而导致系统频响函数和模态参数的改变,这种改变可视为结构破损发生的标志。这样,可利用由试验所测试的结构破损前后的动态数据来诊断结构的破损,进而提出修复方案,现代发展起来的“结构破损诊断”技术就是这样一种方法。其最大优点是将导致结构振动的外界因素作为激励源,诊断过程不影响结构的正常使用,能方便地完成结构破损的在线监测与诊断。

对于大跨度斜拉桥,由于野外测试噪声会引起较大的误差,更重要的是无法测到比较完整的振动模态(只能测到少数自由度上的模态分量),这使得一般的基于振动测试的结构损伤检测方法(需要用到比较完整的振动模态)不能应用。故此,基于动态测试数据的斜拉桥破损诊断研究国内外进行得甚少,目前取得的进展主要反映在:①通过强迫振动试验,能够分析模态参数对结构局部变化的反应;②在车重、车速、路面及支承对桥梁模态参数的影响方面有深入的认识及理论上的依据,证明了用环境振动法进行桥梁自动检测的可行性;③对适用于桥梁检测的结构状态敏感参数积累了理论认识和试验基础;④在一定程度上能够利用测试的数据进行计算模型的修正;⑤开发了各种基于频率、振型、振型曲率、应

变振型等改变量的损伤检测和定位技术,在处理方法上探寻了 MAC 法、CO-MAC 法、柔性矩阵法、矩阵摄动修正法、非线性迭代法以及神经元网络法等诊断技术,这些方法各具特色,在局部的范围内都取得了积极的效果。

然而,这些研究成果在斜拉桥状态评估系统的研究中还属于基础性的探索,距离系统的评估目标尚有很大的差距,尽管某些整体性评估技术已在一些简单结构上有成功的例子,但还不能可靠地应用于复杂结构。阻碍这一技术进入实用的主要原因包括:①结构与环境中的不确定性和非结构因素的影响;②测量信息不完备;③测量精度不足和测量信号噪声;④桥梁结构测量信号对结构局部损伤不敏感。对于大型斜拉桥结构还存在以下问题:①斜拉桥结构不确定性因素和复杂的工作环境对结构模态响应的灵敏度造成了不利的影响,导致了目前斜拉桥整体监测的许多问题;②对斜拉桥在使用年限内工作特性的变化缺乏全面深入的研究,难以建立客观统一的桥梁状态评估标准。

国外在结构破损诊断方面的研究主要体现在以下几方面:①在突发性极端事件后,能从桥梁模型的损伤中识别出非结构损伤、非关键性损伤以及严重的结构损伤,在操作上做到实时快速检测,能从记录的数据中对非线性结构模型进行参数时域评估,并在此基础上完成能力分析,但实桥破损诊断进展缓慢,提出的最优弯曲模态特征矢量识别法(A. K. Pandey)及应变能模态识别法仅停留在室内模型分析中;②在长期的健康监测状态评估中,能通过定时开启系统,利用交通、风或其他低幅值振动输入进行结构动力测试,为维修加固工作明确指出结构的损伤位置、程度、性质以及承载能力评估,同时记录子结构“指纹”变化情况,逐渐更新桥梁健康数据库。这方面的研究正在进行中,主要集中在框架结构及钢结构桥梁的研究,对大跨桥梁实桥破损检测的报道很少。

在国内,除利用振型及频率等基本模态参数进行结构破损诊断外,许多学者寻求别的途径进行结构的健康检查,提出了不同的方法,并通过室内模型试验或仿真试验验证这些方法的正确性。

本书以永和斜拉桥为例,利用现有破损诊断技术的研究成果,对斜拉桥非线性动力特性及其破损诊断技术进行深入研究,识别斜拉桥破损状态下的模态参数,对斜拉桥破损进行诊断,通过理论分析及静动力测试结果,对斜拉桥现有使用状况进行评价,从而丰富斜拉桥可靠性研究成果。

作者

2010 年 7 月



目 录

1 绪论	1
1.1 斜拉桥发展概况	1
1.2 斜拉桥的分类	3
1.3 斜拉桥结构分析的特点	4
本章参考文献	4
2 斜拉桥动力学理论	6
2.1 斜拉桥动力特性的特点	6
2.2 斜拉桥的固有频率计算	7
2.2.1 竖向振动固有频率计算	7
2.2.2 横向振动(挠曲—扭转振动)固有频率计算	12
2.3 斜拉索的振动特性	18
2.3.1 水平张紧钢丝的横向振动	18
2.3.2 斜拉索的横向固有频率	21
2.4 本章小结	24
本章参考文献	25
3 非线性动力分析经典理论	26
3.1 非线性动力分析的近似解析方法	26
3.1.1 摄动法	26
3.1.2 平均法(KB法)	27
3.1.3 渐近法(KBM)	29
3.1.4 多尺度法	29
3.2 非线性动力分析的数值方法	30
3.2.1 非线性有限元理论	30
3.2.2 时域有限元分析理论	32
3.3 非线性动力系统的分岔	34
3.3.1 分岔现象	34
3.3.2 李雅普诺夫—施密特(L-S)约化	36
3.3.3 庞加莱—伯克霍夫(P-B)范式	37

3.4 非线性动力系统的混沌现象·····	40
3.4.1 定常运动的分类和混沌运动的定义·····	40
3.4.2 通向混沌的道路·····	41
本章参考文献·····	42
4 斜拉桥非线性动力特性·····	43
4.1 斜拉桥拉索非线性振动·····	43
4.1.1 端部位移引起的振动·····	43
4.1.2 涡激共振·····	43
4.1.3 尾流驰振·····	44
4.1.4 风雨激振·····	44
4.2 非线性载荷作用下斜拉桥结构的非线性振动·····	45
4.2.1 气动力的表达式·····	45
4.2.2 风荷载作用下斜拉桥主梁的颤振·····	48
4.2.3 风荷载作用下斜拉桥桥梁结构的抖振·····	48
4.2.4 地震荷载作用下斜拉桥的动力特性·····	49
本章参考文献·····	50
5 斜拉桥非线性动力分析·····	51
5.1 斜拉桥几何非线性主要影响因素及解决方法·····	51
5.2 永和斜拉桥的总体描述·····	53
5.2.1 分跨及缆索布置·····	53
5.2.2 主梁·····	53
5.2.3 桥塔·····	54
5.2.4 下部结构及支承布置·····	54
5.2.5 设计荷载·····	54
5.2.6 主要材料性能·····	54
5.2.7 地质水文资料·····	55
5.3 永和斜拉桥非线性动力分析·····	55
5.3.1 永和斜拉桥动力分析中的计算模型·····	55
5.3.2 永和斜拉桥动力分析有限元模型的建立·····	57
5.4 计算结果分析·····	65
5.5 动力分析数值结果与已有实测结果的比较·····	86
5.6 非线性问题研究·····	89
本章参考文献·····	91



6 斜拉桥的试验与检测	93
6.1 正常交通流下斜拉桥模态测试	93
6.2 斜拉桥随机振动测试原理	94
6.3 利用车辆随机激振测试永和斜拉桥自振特性方法	96
6.4 振动测试参数及测试仪器	100
6.5 振动测试的实施	102
6.5.1 测点	103
6.5.2 测站	103
6.5.3 振动测试步骤	105
6.6 斜拉桥模态参数识别及索力的测定	107
6.6.1 斜拉索索力的测定	107
6.6.2 固有频率的识别	110
6.6.3 振型的识别	115
6.6.4 阻尼的识别	117
本章参考文献	119
7 斜拉桥破损诊断技术	120
7.1 斜拉桥破损诊断技术概况	120
7.2 结构损伤的识别	122
7.2.1 通过频率变化进行破损识别的缺陷	122
7.2.2 采用模态置信度识别永和斜拉桥桥面板破损	124
7.3 结构损伤位置识别的数值模拟	128
7.4 在线监测中动力指纹法的局限性	133
7.5 斜拉桥破损诊断的最优矢量法	134
7.5.1 破损位置的识别	135
7.5.2 破损程度评定	137
本章参考文献	139
8 斜拉桥可靠性分析	141
8.1 永和斜拉桥主梁内力分析及控制断面的确定	141
8.1.1 斜拉桥主梁内力计算	141
8.1.2 主梁内力计算中动荷载的考虑	145
8.2 永和斜拉桥静载试验	146
8.2.1 加载位置	146
8.2.2 测点布置	147

8.2.3 测试方法及仪器	147
8.2.4 测试	147
8.3 永和斜拉桥可靠性调查及破损原因分析	149
8.3.1 永和斜拉桥可靠性调查	149
8.3.2 永和斜拉桥破损原因分析	152
8.4 提高永和斜拉桥可靠性措施	156
8.4.1 主梁裂缝	156
8.4.2 缆索锚头的锈蚀	157
8.4.3 2号、3号桥墩处抗风挡块的破坏	157
8.4.4 缆索防风振设施	157
8.4.5 支座	157
8.4.6 桥面平整度	157
本章参考文献.....	158



1 绪 论

1.1 斜拉桥发展概况

斜拉桥又称斜张桥,属于组合体系桥梁,它的上部结构由主梁、拉索和索塔三种构件组成。它是一种桥面体系以主梁受轴向力(密索体系)或受弯(稀索体系)为主、支撑体系以拉索受拉和索塔受压为主的桥梁。

斜拉桥的构思起源于 1617 年意大利人福斯图斯维兰蒂尤(Faustus Verantius)提出的一种由斜向眼杆悬吊木桥面的桥梁体系。但由于受到当时科技水平的限制,使得斜拉桥在此后 300 多年的漫长岁月中没有得到很大的发展,又由于法国著名工程师纳维耶(Navier)对 19 世纪 20 年代前后修建的几座斜拉桥坍塌事故进行了报道,并建议采用悬索桥而不用斜拉桥,这一论述使得斜拉桥的发展长期处于停滞状态。

直到 20 世纪 30 年代,德国工程师迪辛格(Dischinger)首先认识到斜拉桥的优越性并加以发展,研究设计了第一座现代斜拉桥——1955 年建成的主跨 182m 的斯特罗姆松德(Stromsund)桥,紧接着 1958 年德国的杜塞尔多夫又建成了由莱昂哈特(Leonhardt)设计的北莱茵河斜拉桥,1959 年德国科隆建成了 Severin 桥,从此斜拉桥得到了迅速的发展。

1962 年委内瑞拉建成的马拉开波桥为第一座混凝土斜拉桥,主跨径 235m,主梁为带挂孔的悬臂体系。

随着计算机技术的广泛应用,人们求解多次超静定结构内力的难题得到了解决,20 世纪 60 年代开始采用密索体系斜拉桥,从而避免了稀索体系斜拉桥主梁重且配筋多的缺点。

1967 年德国波恩建成了弗瑞德里西—埃伯特桥,主跨径 280m,是单索面的密索体系。

1969 年德国的杜塞尔多夫建成的 Knie 桥,主孔跨径 320m,索塔无横系梁,拉索竖琴形布置,主孔主梁采用钢结构,边孔主梁为混凝土结构。

1975 年法国修建的 Saint-Nazaire 桥,跨径组成为 158m+404m+158m,主梁采用正交各向异性箱梁桥面,A 形索塔,拉索呈放射形布置。

1984 年西班牙修建的 Luna 桥,主跨 440m,采用预应力混凝土桥面,双塔双索面,拉索扇形布置。1986 年加拿大温哥华修建的安娜西斯桥,主跨 465m,是一座双塔双索面扇形布置的叠合梁斜拉桥。主梁采用两个“I”形钢梁及钢筋混凝土桥面板组成。

1991 年挪威修建的 Skamsundet 桥,主跨 530m,采用预应力混凝土梁,是当今跨径最大的混凝土斜拉桥。

1994 年法国修建的诺曼底桥,主跨 865m,是一座混合材料的斜拉桥,边跨为混凝土结构,中跨为钢箱梁。与此设计相似,日本 1998 年修建的多多罗桥又把记录提高到了 890m。

2004 年修建的希腊里翁—安蒂里翁大桥主跨 2 252m,为一座四塔叠合梁斜拉桥,斜拉索呈扇形布置,索塔为四柱提篮式构造。同年,法国修建了世界上最高的斜拉桥——Millau 高架桥,Millau 高架桥全长 2 460m,共八跨;两边跨跨径各 204m,六中间跨跨径均为 342m,主梁为流线型正交异性钢箱梁。

斜拉桥在我国的发展始于 1975 年,由重庆交通科研设计院设计的云阳县跨径 76m 的钢筋混凝土斜拉桥,开创了我国斜拉桥建设的先河。

1982 年在山东省建成济南黄河大桥,主跨径 220m,为双塔双索面扇形布置拉索的混凝土斜拉桥,采用悬臂现浇混凝土施工工艺。

1991 年上海建成的南浦大桥,主跨 423m,为一座双塔双索面扇形布置拉索的叠合梁斜拉桥;1993 年上海又建成了同种类型的杨浦大桥,主跨 602m。

1998 年香港建成的汀九桥为一座三塔叠合梁斜拉桥,跨径组成为 127m+448m+475m+127m。

1998 年建成的广东汕头石桥,主跨 518m,2000 年建成的武汉白沙洲大桥,主跨为 618m,均为双塔双索面混合梁斜拉桥。

2001 年建成通车的南京长江第二大桥南汊桥主桥,主跨达 628m,为双塔双索面扇形布置拉索的斜拉桥,主梁采用钢箱梁断面,环氧沥青混凝土桥面铺装。

2001 年建成的湖南洞庭湖大桥,为一座预应力混凝土三塔斜拉桥,主桥跨径组成为 130m+2×310m+130m。

2002 年湖北荆州建成的荆沙长江大桥,为一主跨 500m 的预应力混凝土斜拉桥。

2005 年建成通车的南京长江第三大桥,为一座双塔双索面钢斜拉桥,主桥跨径组成为 63m+257m+648m+257m+63m,主梁采用钢箱梁断面,飘浮体系,索塔采用“人”字形曲线钢塔。

2010 年建成的苏通长江大桥主跨达到 1 088m,同时将斜拉桥的跨径延伸到



了千米级大桥的行列,在创造世界纪录的同时又刷新了自己创造的世界纪录。苏通长江大桥总共创造了四项世界之最:①主跨达到 1 088m,为当前世界上最大跨径的斜拉桥;②主墩基础由 131 根长约 120m、直径 2.5m/2.8m 的钻孔灌注桩组成,承台长 114m、宽 48m,是世界规模最大、入土最深的桥梁桩基础;③苏通大桥为高 300.4m 的混凝土桥塔,比香港昂船洲大桥(主跨 1 018m,斜拉桥)桥塔高 6m,为世界最高桥塔;④苏通大桥最长索为 577m,最大质量为 59t,比多多罗大桥斜拉索长 100 多米,为世界最长斜拉索。

截至目前,我国已建跨径大于 200m 的各类型斜拉桥已有 70 余座,跨径超过 400m 的斜拉桥有 30 座,充分表明中国的斜拉桥建造技术已进入世界先进水平。

目前斜拉桥结构正在朝着桥面轻巧化、矮塔斜拉桥、多塔斜拉桥的方向发展。斜拉桥结构的分析必须考虑由于初始内力存在引起内力增长,从而带来稳定安全度降低的问题。应考虑进行结构非线性分析和模拟施工、安装、运营过程结构仿真分析。

1.2 斜拉桥的分类

斜拉桥按照主梁的构造形式可以分为以下四类。

钢斜拉桥(steel deck cable stayed bridge):指主梁结构为钢制作的斜拉桥。分为实腹钢梁和钢桁梁两种。前者多用于公路,后者多用于铁路。在跨度较大时,前者采用相关措施来保证抗风稳定性,如将截面做成流线的扁平箱,后者则不用。钢斜拉桥的主要优点是跨越能力大,施工速度快,质量可靠度高;缺点是价格较贵,后期养护工作量大,抗风稳定性较差。

PC 混凝土斜拉桥(prestressed concrete cable stayed bridge):指主梁结构为 PC 混凝土制作的斜拉桥。其主要优点是:①造价低。但对于跨径较大的斜拉桥,当主跨大于 500m 时,混凝土主梁的低造价难以抵消混凝土自重大而导致拉索和基础费用的额外增加。②刚度大,挠度小。在汽车荷载作用下,产生的主要挠度约为类似钢结构的 60%左右。③抗风稳定性好。这是由于混凝土结构振动衰减系数约为钢结构的两倍。④后期养护比钢桥简单、费用少。缺点是跨越能力不如钢结构大,施工速度不如钢结构快。

叠合梁斜拉桥(congruence beam cable stayed bridge):叠合梁即在钢主梁上用预制混凝土桥面板代替常用的正交异性钢桥面板。它除具有与钢主梁相同的优点外,还能节约钢材用量且其刚度和抗风稳定性均优于钢主梁。叠合梁一般采用双钢主梁。其断面形式常采用实腹开口 I 字形、箱形、II 形等。

混合梁斜拉桥(composite beam cable stayed bridge):指在中跨全部或部分采用钢主梁,两侧采用混凝土梁的斜拉桥。这种结构的优点是:①加大了侧跨主梁的刚度和重量,减小了主跨内力和变形。②可减小或避免边跨出现负反力。③边跨预应力梁容易架设,主跨钢梁也较容易地从主塔开始用悬伸法连续架设。④减小全桥钢梁长度,节约造价。这种桥型特别适用相对于边跨于中跨比较小的情况。

1.3 斜拉桥结构分析的特点

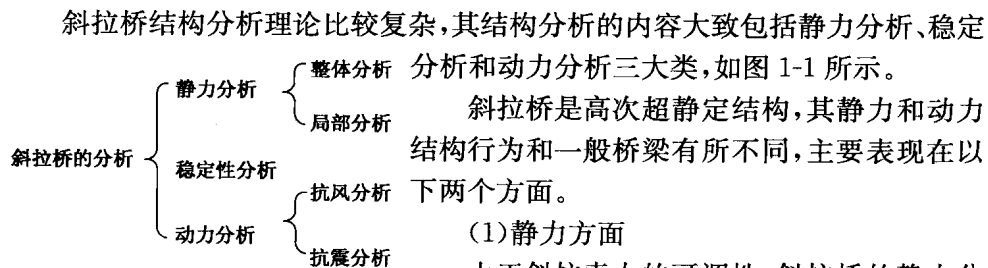


图 1-1 斜拉桥结构分析分类

由于斜拉索力的可调性,斜拉桥的静力分析与其他梁式桥有所不同,主要表现在合理成桥状态的确定和合理施工状态的确定。合理成桥状态的确定过程是一个恒载内力优化的过程,即一旦斜拉桥的结构体系被确定,总能找到一组索力,使结构体系在确定性的荷载作用下,某种反映受力性能的目标达到最优;合理施工状态的确定即是以合理成桥状态为目标找到一组合理的施工阶段的索力,从理论上讲,倒退分析法可以完成这一计算,但实际施工中却存在诸多不闭合因素,因此这也是一个寻找最优索力的过程。

(2)动力方面

斜拉桥由于其高次超静定,其结构行为表现出较强的耦合性,尤其是扭转和竖向弯曲振型经常强烈地耦合在一起。因此在斜拉桥的设计中,在一些地震较频繁的地区,控制设计的是地震荷载而不是使用荷载。

鉴于以上原因,斜拉桥的分析计算一般都必须借助计算机有限元软件进行。对于初步设计阶段可简化成平面杆系,对于动力特性和稳定分析一般必须采用空间分析,对于各结构连接部位还必须进行局部应力分析。

本章参考文献

- [1] M·S·特罗伊茨基. 斜拉桥理论与设计. 王学俊,程国庆,等,译. 北京:中国铁道出版社,1980



- [2] 林元培. 斜拉桥. 北京:人民交通出版社,1995
- [3] 刘士林,梁智涛,候金龙,等. 斜拉桥. 北京:人民交通出版社,2002
- [4] 王伯惠. 斜拉桥结构发展和中国经验. 北京:人民交通出版社,2003
- [5] 项海帆. 高等桥梁结构理论. 北京:人民交通出版社,2000
- [6] 华孝良,徐光辉. 桥梁结构非线性分析. 北京:人民交通出版社,1997
- [7] 顾安邦. 桥梁工程(下册). 北京:人民交通出版社,2002
- [8] 陈玉峰. 斜拉桥空间行为分析研究. 成都:西南交通大学硕士学位论文,2004
- [9] 伊超. 大跨度斜拉桥几何非线性分析. 成都:西南交通大学硕士学位论文,2005
- [10] 方兴. 大跨度斜拉桥非线性及整体稳定性研究. 北京:北京工业大学工学硕士学位论文,2003
- [11] 辛克贵,冯仲. 大跨度斜拉桥的施工非线性倒拆分析. 工程力学,2004(10)
- [12] 方志,郭棋武,刘光栋. 混凝土斜拉桥施工及运营阶段的非线性影响研究. 工程力学,2005(2)
- [13] 程国庆,等. 关于大跨度斜拉桥几何非线性问题//全国桥梁学术论文集(下册). 上海:同济大学出版社,1992
- [14] 张雪松,梁鹏,贾丽君,等. 非线性因素对超大跨度斜拉桥活载内力的影响. 重庆交通学院学报,2005(2)

2 斜拉桥动力学理论

2.1 斜拉桥动力特性的特点

在车辆动荷载、风力和地震力作用下,桥梁结构产生的振动会产生较大的动力响应和可能引起结构局部疲劳损伤,或会形成影响桥上行车舒适与安全的振动变形和加速度,甚至使桥梁完全破坏。1940年主跨853m的美国塔科马吊桥在仅有19m/s的风速下,因发生激振而造成闻名于世的毁桥事故。在斜拉桥方面,有日本狩河口桥与加拿大Hawkshaw桥等相继因风振而被加固,至于地震引起震区不设防的桥梁坍塌的事例更多。可见桥梁结构的振动是影响桥梁使用与安全的重要因素之一。在斜拉桥方面,斜拉桥在交通荷载、风荷载和地震作用下的响应一直是工程实践中的一个重要问题,它的大小直接取决于对动力荷载的描述以及斜拉桥的动力特性。由于斜拉桥结构本身的复杂性和特殊性,且因拉索柔度大、质量小、阻尼低等特点,对斜拉桥动力学分析研究显得尤为重要。随着斜拉桥应用范围越来越广,对斜拉桥动力特性的研究也越来越多。

斜拉桥的动力特性分析是研究斜拉桥动力行为的基础,其自振特性决定其动力反应的特性,分析斜拉桥自振意义重大。斜拉桥的高次超静定,决定其结构行为表现出较强的耦合性,尤其是扭转和横向弯曲振型经常强烈耦合在一起。而空间斜拉索的存在,使得斜拉桥的侧向弯曲和扭转强烈地耦合在一起,其结果是几乎不存在单纯的扭转振型,而只有侧向弯曲为主兼有扭转的振型,或者以扭转为主兼有侧向弯曲的振型。斜拉桥由于其大跨度和结构的柔性,在动力方面不同于一般工程结构的特殊性,长期的研究和工程实践总结出斜拉桥的动力特性有以下特点:

(1) 飘浮体系的斜拉桥是一种长周期结构,大于一般结构周期。土木工程结构的周期大多在2s以内,高耸结构的周期也大多在5s以内,而大跨度斜拉桥的基本周期远远超过5s。

(2) 斜拉桥具有密布的频谱。斜拉索具有膜的性质,大跨度斜拉桥的模式远较一般的结构密集,在一个较宽的频率范围内,许多振型都可能被动力荷载激起



强烈的振动,一般的结构在采用振型叠加法时,只需要取前几阶振型即可得到比较满意的精度。但对大跨度的斜拉桥而言,在 10 阶或 20 阶甚至更高阶的振型情况下,模态频率仍然处于地震激励有意义的频率范围之内,在采用反应谱分析其地震反应时,应该取更多的振型参与计算。

(3)斜拉桥的大尺度导致其地震响应不同于一般结构。

(4)斜拉桥的自振特性表现出明显的三维性和相互耦合的特点。主梁、桥塔、斜拉索和下部基础之间相互影响,在振动发生时全桥振动体系中结合有各部分构件本身的振动,无论在低次振型还是在高次振型中,各部分构件的振动都会影响全桥的振动,使其三维特性的振动不能采用任何二维分析的组合作。

(5)斜拉桥的基础一般比较软弱,斜拉桥大多数都是自锚式结构,它不像悬索桥有很大的水平力传递到基础上,所以斜拉桥适合在较软的基础上修建。

2.2 斜拉桥的固有频率计算

斜拉桥是空间结构,在振动时,除在桥梁立面上出现竖平面振动外,还有越出平面的横向挠曲及扭转振动。竖平面上的振动主要表现在加劲梁的垂直方向挠曲振动及塔沿桥纵向的挠曲振动,就其性质而言均属竖平面挠曲振动,简称竖向振动。而越出平面的横向挠曲振动,由于梁截面的扭转中心与质量重心一般不同的斜拉桥的牵制作用,它总是与加劲梁及塔的扭转振动耦合在一起,所以我们称之为横向扭曲——扭转振动,简称横向振动。多数斜拉桥在横桥向上无论是结构布置还是质量分布均对中心线左右对称,在这种情况下,竖向振动与横向挠曲——扭转振动之间无耦合关系,因而在计算时可分别考虑。

结构的内力及变形的最大值与结构的固有频率和振型密切相关。固有频率和周期是反映振动体系本身固有的动力特性。在动力计算中,常需要首先求出结构的固有频率及周期。斜拉桥的振动,不管是竖向的还是横向的都是简谐振动。在求解时,都必须把斜拉桥离散为若干单元,用矩阵分析法分析固有振型和频率。

2.2.1 竖向振动固有频率计算

(1)简谐弯曲振动时杆件的刚度方程

如图 2-1,一等截面的匀质杆单元 m ,以频率 f 作简谐弯曲振动,杆端位移