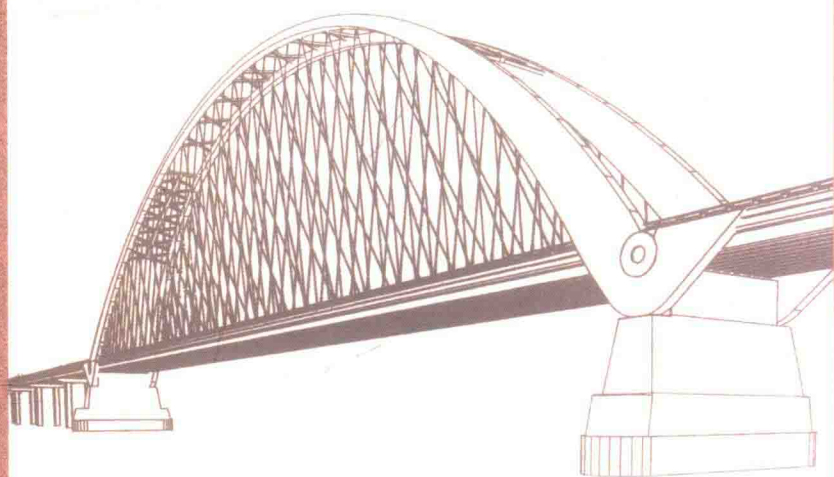


*Xielasuo Jiankang Jiance
yu Anquan Pingding*

斜拉索健康监测 与安全评定

兰成明 著



 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

斜拉索健康监测 与安全评定

兰成明 著

内 容 简 介

本书旨在对斜拉索健康监测与安全评定进行阐述,主要包括结构可靠度及随机变量敏感性分析、车辆荷载及斜拉索荷载效应分析、腐蚀斜拉索承载力与疲劳性能退化、平行钢丝斜拉索安全评定和桥梁结构全寿命设计方法等方面的研究,系统地阐述斜拉索车辆荷载效应分析方法、腐蚀对斜拉索力学性能的影响、斜拉索强度与疲劳寿命预测模型以及斜拉索安全评定方法。为斜拉索的设计、监测、换索决策以及安全评定提供理论基础。

本书可供高等院校桥梁专业的师生以及从事土木工程的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉索健康监测与安全评定 / 兰成明著. — 天津 :
天津大学出版社, 2018. 5
ISBN 978-7-5618-6121-9

I. ①斜… II. ①兰… III. ①斜拉桥—工程设备—安全评价 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 103059 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish.tju.edu.cn
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm×260mm
印 张	12
字 数	300 千
版 次	2018 年 6 月第 1 版
印 次	2018 年 6 月第 1 次
定 价	38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

桥梁是交通运输系统中的枢纽工程,对于保障交通和国民经济发展起着非常重要的作用。大跨径斜拉桥的广泛建设,大大提升了我国的桥梁设计和建造水平。随着桥梁结构设计理论、土木工程材料和施工技术的发展,桥梁结构复杂程度和跨径不断增大。这不仅要求有更为精细的桥梁设计理论和先进的施工技术支持,同时对桥梁建成后的安全维护提出了更高要求。

自 1975 年我国建成的四川云阳斜拉桥到 2008 年建成的苏通长江大桥,40 多年来我国已建成百余座大跨径缆索支承桥梁。特别是近几年,我国已在大江大河上建设了一批特大型悬索桥,如虎门大桥(主跨 888 m)、西陵长江大桥(主跨 900 m)、宜昌长江大桥(主跨 960 m)、香港青马大桥(主跨 1 377 m)、江阴长江大桥(主跨 1 385 m)、润扬长江大桥(南汊悬索桥,主跨 1 490 m)、西堠门跨海大桥(主跨 1 650 m),还有一批特大型斜拉桥,如荆岳长江大桥(主跨 816 m)、九江长江大桥(主跨 818 m)、鄂东长江公路大桥(主跨 926 m)、香港昂船洲大桥(主跨 1 018 m)、苏通长江大桥(主跨 1 088 m)。我国桥梁设计和建造技术已进入世界先进行列。

如果在桥梁设计和建造时没有很好地考虑桥梁的安全性与耐久性,将会在桥梁的运营和维护中付出惨重的代价。过去 40 年间,全世界修建了 300 余座大跨径斜拉桥,其中因拉索锈蚀原因,使部分斜拉桥结构损坏严重。如委内瑞拉马拉开波(Maracaibo)桥建成 16 年后因为拉索锚具端严重锈蚀而换索耗资 5 000 万美元,德国汉堡的科尔布兰特(Köhlbrand Estuary)桥建成后 3 年就因拉索锈蚀严重全部更换新索,耗资 6 000 万美元。此外著名的英国伍埃(Wye)桥和美国的帕斯科-肯尼威克(Pasco-Kennewick)桥以及我国广州的海印大桥均因拉索锈蚀原因,使用不到 10 年即更换了拉索。据不完全统计,20 世纪 70—90 年代,我国已建成的 30 余座斜拉桥,其中已加固修复的占 65%,有 4 座斜拉桥已拆除或改为其他桥型;全部或部分更换斜拉索的占 35%。近几年尚有 10 余座 20 世纪 90 年代后修建的斜拉桥需要更换拉索。

自 1940 年美国塔科马(Tacoma)悬索桥风毁事故后,桥梁安全监测的重要性就引起人们的关注。20 世纪 60 年代以来,全球相继发生多起桥梁结构的突发性断裂事故。例如,1962 年,美国金斯(Kings)钢桥因疲劳而倒塌;1967 年,

美国俄亥俄河上的一座主要桥梁倒塌,46人丧生;1994年,韩国圣水(Sungsu)大桥中孔崩塌,32人死亡;1999年,重庆綦江彩虹桥突然倒塌,死伤数十人;2001年11月,四川宜宾南门大桥桥面突然断裂;2004年6月,辽宁盘锦田庄台大桥中孔突然倒塌;2007年8月1日,美国明尼苏达州横跨密西西比河的I-35W桥突然倒塌。

桥梁在环境侵蚀、材料老化和交变荷载的长期共同作用下,将不可避免地产生累积损伤和抗力衰减。桥梁在整个寿命期内(设计、施工、运营、养护管理)面临着如何保证结构设计的合理与安全、施工安全与质量保证、使用期内的安全性与耐久性、养维护管理的经济性等问题。为保障结构的安全性、完整性和适用性,亟须采用监测手段采集表征结构健康状况的损伤指标,通过结构可靠性评定方法评估各种损伤对结构可靠性的影响,以保障结构安全可靠。在桥梁上增设长期健康监测系统和损伤控制系统,对保障桥梁全寿命周期内养护维修计划的制订、保证桥梁的正常运营以及结构的耐久性与安全性具有重要意义。

桥梁的各种结构损伤,其原因可能是使用维护不当、车祸事故等人为因素,也可能是自然灾害等自然因素。长期的人为因素和自然因素造成的结构损伤累积和结构材料性能退化,必然造成桥梁结构的使用功能和安全性逐渐退化。引发桥梁结构破坏和功能退化的原因是多方面的。近年来,国内发生的几起大桥坍塌或局部破坏事故多数是由于构件疲劳和监测养护措施不足引发的。理论研究和工程实践表明,加强建设期和成桥后运营过程中的结构健康监测、损伤检测、运营状态分析与预警、适时维修,有助于消除隐患及避免灾难性事故的发生。

为确保桥梁结构的安全,应制订更具有针对性的维修计划,以实现桥梁安全经济的运行。健康监测系统可以帮助我们发现早期病害,节约维修费用,避免重大的经济损失。20世纪80年代中后期,欧美国家提出了桥梁结构健康监测理念,并先后在许多重要桥梁或复杂结构上建立了结构健康监测系统。我国桥梁结构健康监测系统的研究和应用始于20世纪90年代,依托我国大规模基础设施建设的背景,桥梁结构健康监测系统在我国得到了广泛的应用。

基于以上原因,本书重点开展斜拉索健康监测与安全评定研究,以结构可靠度及随机变量敏感性分析、车辆荷载及斜拉索荷载效应分析、腐蚀斜拉索承载力与疲劳性能退化、平行钢丝斜拉索安全评定和桥梁全寿命设计方法等为主要内容。系统阐述斜拉索的健康监测、荷载效应模型、斜拉索强度与疲劳寿命预测模型,为斜拉索设计、健康监测、换索决策与安全评定提供理论基础,为相

关研究人员提供参考。

本书的研究得到国家重点研发计划(2017YFC0806100,2017YFC0703000)、国家自然科学基金(51478039、51008302)、北京市科技新星计划(Z151100000315053)、中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-15-001C1)、教育部留学回国人员科研启动基金的资助。

限于作者水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

作者

2018年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 斜拉桥的建设现状和结构特点	3
1.1.1 斜拉桥的建设现状	3
1.1.2 斜拉桥的结构特点	4
1.1.3 斜拉索的服役现状	7
1.1.4 斜拉索的力学性能与疲劳性能	12
1.1.5 斜拉索的检测、监测及维修	13
1.2 大跨桥梁损伤的主要原因	15
1.2.1 车辆荷载	16
1.2.2 温度	16
1.2.3 风荷载	16
1.2.4 地震	17
1.2.5 缆索的振动与风振	17
1.2.6 环境腐蚀	17
1.3 桥梁结构健康监测系统的研究与应用	17
1.3.1 结构健康监测发展概述	17
1.3.2 桥梁结构健康监测系统的研究与应用	20
1.3.3 国内桥梁结构健康监测系统的研究与应用	21
1.4 结构可靠度及安全评定研究	21
1.4.1 结构可靠度基本理论与方法	22
1.4.2 可靠度敏感性分析	24
1.4.3 结构安全评定理论与方法	25
1.5 桥梁结构全寿命设计研究	25
1.5.1 桥梁结构全寿命设计研究的背景与意义	26
1.5.2 桥梁结构全寿命设计研究现状	27
参考文献	28
第 2 章 结构可靠度及随机变量敏感性分析	34
2.1 引言	34
2.2 结构可靠指标的优化模型	34
2.2.1 可靠指标的优化模型	35
2.2.2 非正态随机变量当量正态化	36
2.3 粒子群优化算法	37

2.4 随机变量敏感性分析	39
2.4.1 基于梯度的敏感性分析	39
2.4.2 基于 PSO 算法的敏感性分析	40
2.5 极限状态方程重构	47
2.5.1 代理模型	48
2.5.2 试验设计	52
2.5.3 精度比较	52
2.6 结构可靠度数值模拟	54
2.6.1 Monte Carlo 方法	55
2.6.2 重要抽样	56
2.6.3 重要抽样结合代理模型	57
2.7 小结	59
参考文献	60
第3章 基于健康监测的桥梁车辆荷载及斜拉索荷载效应分析	64
3.1 引言	64
3.2 山东滨州黄河公路大桥简介	64
3.3 桥梁车辆荷载模型	65
3.3.1 车辆荷载概率分布	65
3.3.2 车辆荷载极值分布	68
3.4 桥梁车辆疲劳荷载模型	70
3.4.1 车辆疲劳荷载谱	70
3.4.2 车流量预测的 Logistic 模型	72
3.5 平行钢丝智能拉索	74
3.5.1 光纤 Bragg 光栅传感原理	74
3.5.2 FRP-OFBG 筋	75
3.5.3 平行钢丝智能拉索	75
3.6 拉索车辆活荷载效应	76
3.6.1 智能拉索布设方案	76
3.6.2 活荷载效应分析	77
3.6.3 活荷载效应概率分布	79
3.6.4 活荷载效应极值分布	81
3.6.5 活荷载效应更新方法	84
3.7 拉索疲劳荷载效应	86
3.7.1 数据提取	87
3.7.2 等效疲劳荷载幅	89
3.7.3 拉索疲劳累积损伤	89
3.8 小结	93

参考文献	94
第 4 章 腐蚀斜拉索承载力与疲劳性能退化	97
4.1 引言	97
4.2 国内某斜拉桥拉索检测结果分析	97
4.2.1 齿板检测	97
4.2.2 主梁锚头检测	98
4.2.3 索塔锚头检测	98
4.2.4 拉索 PE 防护层检测	98
4.3 旧索腐蚀试验与评定	100
4.3.1 均匀腐蚀	100
4.3.2 局部点蚀	102
4.4 腐蚀拉索强度试验与分析	104
4.4.1 腐蚀钢丝本构关系试验与分析	104
4.4.2 拉伸断口分析	106
4.4.3 钢丝反复弯曲性能试验与分析	106
4.4.4 拉索本构关系	106
4.5 腐蚀拉索剩余疲劳寿命评定	109
4.5.1 腐蚀钢丝疲劳性能试验	109
4.5.2 腐蚀拉索疲劳性能试验	112
4.6 小结	117
参考文献	118
第 5 章 平行钢丝斜拉索安全评定	120
5.1 引言	120
5.2 平行钢丝拉索强度评定	120
5.2.1 钢丝强度	120
5.2.2 斜拉索强度	123
5.2.3 斜拉索承载力可靠度	127
5.3 平行钢丝斜拉索疲劳寿命评定	130
5.3.1 钢丝疲劳寿命	130
5.3.2 斜拉索疲劳寿命	132
5.3.3 斜拉索疲劳寿命参数分析	133
5.3.4 拉索 S-N 曲线模拟	138
5.3.5 斜拉索疲劳累积损伤	141
5.4 斜拉索疲劳可靠度	141
5.5 小结	144
参考文献	145

第 6 章 桥梁结构全寿命设计方法	148
6.1 引言	148
6.2 桥梁结构全寿命经济分析与模型	149
6.2.1 全寿命成本组成	149
6.2.2 全寿命经济模型	150
6.2.3 资金的时间价值	151
6.3 斜拉索全寿命设计	151
6.3.1 疲劳可靠指标退化模型	151
6.3.2 拉索全寿命分析	152
6.3.3 拉索全寿命设计实例	153
6.4 基于事件树模型的桥梁结构全寿命分析	156
6.4.1 检测及其成本	156
6.4.2 维修及其成本	158
6.4.3 事件树模型	159
6.4.4 计算实例	160
6.5 基于 Markov 决策过程的全寿命分析模型	169
6.5.1 MDP 基本原理	170
6.5.2 基于 MDP 的全寿命分析模型	173
6.6 小结	179
参考文献	180

第1章 绪 论

重大工程结构在环境侵蚀、材料老化和交变荷载的长期共同作用下,将不可避免地产生结构系统的损伤累积和抗力衰减,导致抵抗自然灾害和正常使用条件下的抗力下降,极端情况下易引发灾难性事故,造成重大损失,并对公共安全造成巨大冲击,产生恶劣的社会影响。因此,保障结构的安全性、完整性、适用性与耐久性,对于重大工程结构和基础设施急需采用有效的监测手段控制结构损伤,保障结构安全可靠。新建的大型结构和基础设施总结以往的经验教训,在工程建设的同时增设长期的健康监测系统和损伤控制系统^[1-2]。

随着经济的高速发展和社会的进步,大型桥梁等基础设施建设方兴未艾。特别是近几年,我国已在大江大河上建设了一批特大型斜拉桥和悬索桥,如虎门大桥(悬索桥,主跨 888 m)、西陵长江大桥(悬索桥,主跨 900 m)、宜昌长江大桥(悬索桥,主跨 960 m)、香港青马大桥(悬索桥,主跨 1 377 m)、江阴长江大桥(悬索桥,主跨 1 385 m)、润扬长江大桥(南汊悬索桥,主跨 1 490 m)、西堠门跨海大桥(悬索桥,主跨 1 650 m)、荆岳长江大桥(斜拉桥,主跨 816 m)、九江长江大桥(斜拉桥,主跨 818 m)、香港昂船洲大桥(斜拉桥,主跨 1 018 m)、苏通长江大桥(斜拉桥,主跨 1 088 m)。

桥梁的全寿命周期包括规划、设计、施工、运营、养维护管理、维修及报废拆除等阶段。在全寿命周期内桥梁结构面临着诸多问题,保证结构设计的合理与安全、施工安全与质量保证、使用期内的耐久性与安全性、养维护管理与维修的经济性等都需要解决的问题。因此,结构健康监测与安全评定,对于全寿命周期内的桥梁养维护、维修决策,保障桥梁的正常运营以及结构的耐久性与安全性具有重要意义。

从桥梁结构体系的特点看,桥梁的安全性主要体现在基础的安全性和上部结构的安全性上。大型桥梁的跨径长、自重大,传递到地基上的作用力很大。基础是桥梁的关键承载结构,一旦发生基础的异常变形与破坏,将导致桥梁的整体破坏。因此,桥梁地基基础的安全性监测与分析是桥梁建设与使用过程中的一项重要工作。上部结构受交通荷载、环境荷载的影响更直接,在长期的运营使用过程中,由于气候、环境等自然因素的作用,日益增加的交通量以及重车、超重车过桥数量的增加,桥梁上部结构的使用功能逐渐退化,不可避免地造成各种结构损伤,从而导致桥梁安全性降低。

如果在桥梁的设计和建造时期没有很好地考虑桥梁的耐久性与安全性,将会在桥梁的运营和维护中付出沉重的经济代价^[3-6]。过去 40 年间,全世界修建了 300 余座大跨径斜拉桥,其中由于斜拉索锈蚀的原因,使得部分早期修建的斜拉桥结构损坏非常严重。如著名的委内瑞拉马拉开波(Maracaibo)桥建成 16 年后即因为拉索锚具端严重锈蚀换索,耗资 5 000 万美元,换索工期长达 2 年;德国汉堡的科尔布兰特(Köhlbrand Estuary)桥建成后 3 年就因拉索锈蚀严重全部更换了新索,耗资 6 000 万美元,为原始造价的 4 倍。此外著名的

英国伍埃(Wye)桥和美国的帕斯科—肯尼威克(Pasco-Kennewick)桥以及我国广州的海印大桥均因拉索锈蚀原因,使用不到10年即更换了拉索。尽管桥梁设计者采用了多种斜拉索的防腐办法,但许多防腐方法和维护技术在某种程度上依然存在不足。斜拉桥虽具有跨越能力大、结构形式简洁、受力明确、空气动力稳定性好、结构轻巧美观等优点,但拉索腐蚀退化和疲劳抗力衰减已经成为影响桥梁使用、严重威胁桥梁结构服役安全的最主要因素之一。

自1940年美国塔科马(Tacoma)悬索桥风毁事故后,桥梁安全监测的重要性就引起人们的关注。由于科技水平的限制和认识的局限性,早期的监测手段比较落后。20世纪60年代以来,在一些国家和地区相继发生了桥梁结构的突然性断裂事件。例如,1962年,美国金斯(Kings)钢桥因疲劳而倒塌;1967年,美国俄亥俄河上的一座主要桥梁倒塌,造成46人丧生;1994年,韩国圣水(Sungsu)大桥中孔崩塌,造成32人死亡;1999年,我国重庆市綦江彩虹桥突然倒塌,死伤数十人;2000年8月,我国台湾高屏大桥倒塌;2001年11月,四川宜宾南门大桥桥面突然断裂;2004年6月,我国辽宁盘锦田庄台大桥中孔突然倒塌;2007年8月1日,美国明尼苏达州横跨密西西比河的I-35W桥在使用40年后突然倒塌。

自1975年我国建成的四川云阳斜拉桥到2008年建成的世界第一的苏通大桥(跨径1088 m)。40多年来,我国已建成百余座斜拉桥。特别是近10年来,我国斜拉桥建设技术已进入世界先进行列。建桥速度之快、数量之多、跨越能力之大为世人所瞩目。尤其是近年来建成及在建的一批跨海、跨江大桥,如杭州湾大桥工程、东海大桥工程、苏通大桥工程、港珠澳大桥、沪通长江大桥主航道桥均为斜拉桥。缆索结构一旦遭到破坏,不仅桥梁自身的经济损失严重,而且会因为交通中断导致巨大的间接经济损失。

据不完全统计,20世纪70—90年代初,我国修建的30余座斜拉桥中,其中已经加固修复的占65%,有4座斜拉桥已拆除或改为其他桥型,全部或部分更换斜拉索的占35%。近几年尚有10余座20世纪90年代后修建的斜拉桥需要更换拉索^[7]。

引发桥梁结构破坏和功能退化的影响因素是多方面的。有些桥梁破坏是人为因素(比如劣质工程),但大多数桥梁的功能退化和结构破坏是自然因素造成的。自然因素中,基础沉降变位、循环荷载作用下疲劳裂纹失稳扩展是造成许多桥梁结构发生灾难性事故的主要原因。近年来,国内发生的几起大桥坍塌或局部破坏事故多数是由于构件疲劳和监测养护措施不足造成的。现代桥梁设计向更大跨度、更轻柔结构形式与功能日趋复杂的方向发展,理论研究和工程实践表明,加强建设期和成桥后运营过程中的结构状态监测、损伤检测,加强桥梁运营状态分析与预警,提高结构耐久性并采用合适的维修策略,有助于消除隐患及避免灾难性事故的发生。

近年来,结构智能健康监测愈来愈成为重大工程结构健康与安全的重要保障技术,成为重大工程结构损伤累积乃至灾害演变规律的重要研究手段,也是发展重大工程结构全寿命设计理论和方法的重要基础^[8]。智能材料的出现、计算机科学和通信技术的飞速发展,促进了重大工程结构健康监测系统的数据采集、数据传输、数据管理以及系统集成技术的研究与应用,使结构健康监测系统向实时性、自动化、集成化和网络化的方向发展。以斜拉桥拉索的健康监测为例,监测拉索索力、荷载效应、断丝及腐蚀状况已成为评定拉索安全性

的重要手段,同时为减少桥梁结构全寿命周期内的总成本、发展桥梁结构全寿命设计理论和方法提供重要科学依据。

缆索支承桥梁主要指斜拉桥和悬索桥,缆索体系是缆索支承桥梁最关键的构件之一,起着牵一发动全身的作用;但缆索易遭受腐蚀和疲劳累积损伤,严重威胁缆索支承桥梁的服役安全。因此,系统研究缆索全寿命服役期内的腐蚀、力学性能和疲劳性能,发展基于健康监测技术的缆索安全评定、服役寿命预测和全寿命设计方法,对避免重大安全事故的发生及减少全寿命周期内桥梁的总成本具有重要的科学意义和工程意义。

1.1 斜拉桥的建设现状和结构特点

斜拉桥是由主梁、索塔和斜拉索组成的组合桥梁结构体系,具有跨越能力大、材料用量省、施工简便以及造型美观等诸多优点。斜拉桥是一种自锚结构体系,它不需要拉索两端的巨大且昂贵的锚墩结构,索内应力基本上是沿索长不变的,能充分利用材料。斜拉索在斜拉桥跨内成直线布置,并具有相当的抗拉刚度。斜拉桥呈现出不同的结构体系与形式,充分展现了斜拉桥的强大生命力和优越性。由于斜拉索中所受的力很难计算和控制,所以一直没有得到发展和广泛应用。直到20世纪中叶,由于电子计算机的出现逐步解决了索力计算难的问题,调整装置完善解决了索力的控制问题,使得斜拉桥得到很大的发展。此外,由于斜拉桥设计理论、计算机技术的应用和发展,结构风洞稳定验证和减振控制以及有限元分析和施工质量的控制、监测技术等发展和进步,使斜拉桥结构轻巧美观,经济跨径可与悬索桥一争高低^[9]。

1.1.1 斜拉桥的建设现状

经过多年的发展,斜拉桥已从最初的稀索发展到密索体系,从辐射形索和平行索发展到扇形(半扇形)索,从钢斜拉桥、混凝土斜拉桥发展到组合梁(叠合梁)以及混合梁(边跨混凝土与主跨钢梁连接)斜拉桥^[10-11]。起初,人们将斜拉桥的经济跨径定为300~600 m。随着悬臂施工技术的不断发展,高性能混凝土和高强度斜拉索、大吨位群锚技术等材料与工艺的出现,计算机技术的日新月异,斜拉桥完全有可能向更大纪录突破。现在,对于小于800 m主跨,斜拉桥已成为首选的桥型方案。毋庸置疑,斜拉桥在跨越能力、经济、美学等方面具有相当明显的优势,具有非常广阔的发展前景。

自从1955年瑞典建成了主跨185 m的斯特劳姆桑德(Stromsund)钢斜拉桥,1962年委内瑞拉建成了5孔236 m的马拉开波(Maracaibo)混凝土斜拉桥以后,斜拉桥的建设取得辉煌的成就。1994年法国修建的诺曼底(Normandy)桥和1999年日本完成的多多罗(Tatara)桥第一次把斜拉桥带入特大跨径领域。60多年来,斜拉桥的发展呈现出强劲势头。由于斜拉桥比悬索桥有更好的经济性,而且线条纤秀、结构简洁、桥型优美,因此尽管它的建造历史远比悬索桥晚,但发展极为迅速,不到半个世纪已普及世界各地。目前世界桥梁跨度排名前十的斜拉桥资料见表1-1。

表 1-1 目前世界桥梁跨度排名前十的斜拉桥

序号	国家	桥名	主跨/m	完成年份	序号	国家	桥名	主跨/m	完成年份
1	俄罗斯	俄罗斯岛大桥 Russky Island Bridge	1 104	2012	6	日本	多多罗大桥 Tatara Bridge	890	1999
2	中国	沪通长江大桥	1 092	在建	7	法国	诺曼底大桥 Normandy Bridge	856	1995
3	中国	苏通长江大桥	1 088	2008	8	中国	九江长江大桥	818	2013
4	中国	香港昂船洲大桥 Stonecutters Bridge	1 018	2008	9	中国	荆岳长江大桥	816	2010
5	中国	鄂东长江公路大桥	926	2010	10	韩国	仁川大桥 Incheon Bridge	800	2009

我国第一座斜拉桥是四川云阳斜拉桥,建于 1975 年,斜拉索采用双面辐射形布置^[12]。同年,上海松江县的新五桥也宣告建成,斜拉索采用双面竖琴形布置。1982 年在山东建成济南黄河大桥,主跨为 220 m。20 世纪 80 年代末建成的天津永和桥主跨为 260 m,该桥在动力分析等方面取得了新进展。自那以后,在吸收国外先进技术和经验的基础上,我国斜拉桥建设经验和技術有了长足发展。至今已建成跨径大于 200 m 的斜拉桥 50 余座,跨径超过 400 m 的斜拉桥也有 20 余座,目前已建成的四川宜宾中坝大桥与四川泸州泰安长江大桥均为独塔斜拉桥,主跨分别为 252 m、270 m,技术含量在世界斜拉桥中处于领先地位;已经建成的苏通长江大桥和香港昂船洲大桥是我国斜拉桥发展史上的一个新的里程碑。仅十几年的时间我国斜拉桥的发展与建设已经跨入世界先进行列,我国已建成的跨度排名前十的斜拉桥见表 1-2。

表 1-2 我国已建桥梁跨度排名前十的斜拉桥

序号	桥名	主跨/m	完成年份	序号	桥名	主跨/m	完成年份
1	苏通长江大桥	1 088	2008	6	厦门大桥北汊桥	780	2013
2	香港昂船洲大桥 Stonecutters Bridge	1 018	2008	7	上海长江大桥	730	2009
3	鄂东长江公路大桥	926	2010	8	上海闵浦大桥	708	2010
4	九江长江大桥	818	2013	9	南京长江三桥	648	2005
5	荆岳长江大桥	816	2010	10	南京长江二桥	628	2001

1.1.2 斜拉桥的结构特点

斜拉桥承载构件主要由主梁(桥面)、拉索、桥塔三部分构成。斜拉桥是高次超静定结构,主梁和桥塔是主承重构件,通过斜拉索组合成整体结构。由于拉索的支承,斜拉桥主梁具有跨越能力大、梁的截面高度小和能够借助拉索的初应力对主梁线形和内力进行调整等特点。

主梁由锚固在索塔上的斜拉索作为弹性支承,主梁作为多点弹性支承的连续梁,索将

梁的自重和活载传给索塔,因而降低了主梁跨中正弯矩,增加了主梁的跨越能力。当然,斜拉索对梁的这种弹性支承作用,只有在索始终处于拉紧状态时才能得到充分发挥,因此必须在承受荷载前对斜拉索进行预拉。这样的预拉还可以减小斜拉索的应力变化幅度,提高斜拉索的刚度,从而改善结构的受力状况。

另一方面,斜拉索的水平分力对主梁产生轴向预施压力的作用可以增强主梁的抗裂性能,节约高强度钢材的用量。同时,由于斜拉索的水平分力使主梁承受巨大的纵向预压力,因而斜拉桥的结构刚度较悬索桥要大得多。张拉和调整斜拉索的索力,可以使斜拉桥的主梁处于最佳受力状态。

如果将斜拉桥看成一个预应力体系,斜拉索即为体系的体外索。因此,设计上体外索需要考虑的疲劳和防腐等问题,斜拉索亦要考虑。如果将斜拉桥主梁在墩和塔的支承全部改用活动支座,为了给主梁以纵向约束,则需在塔梁间设置弹性索。如将塔上支承改为索支承,两边墩改为活动支座,斜拉桥则成为漂浮体系。采用漂浮体系可减小主梁在塔处的负弯矩,但需要在主塔处主梁侧放置侧向支座,以限制梁的侧向位移。如果塔梁连接处采用固接方式,使塔梁形成刚构,这就增加了悬臂施工的安全性和成桥的侧向刚度,相应削弱了索支承的特点,刚结点和塔柱截面甚至主塔基础均需加大,以承受所分配的更大的弯矩和剪力。

斜拉桥结构与一般非索结构桥梁相比,具有明显的索的非线性和结构的非线性特征,这点必须在设计时加以考虑。索垂度造成的索的非线性,随着恒载状态的形成,可以基本消除,但成桥后活载下结构的非线性是设计时需要考虑的。在斜拉桥中,梁和塔是主要承重构件,通过斜拉索组合成整体结构。根据梁的支承方式,组成不同形式的母体结构。

斜拉桥结构体系按力学性能可分为漂浮体系、半漂浮体系、支承体系、塔梁固结体系和刚构体系。目前,在大跨径斜拉桥中,应用较多的是漂浮体系、半漂浮体系。

漂浮体系为塔墩固结、塔梁分离,主梁除两端有支承外,其余全部用拉索悬吊,是具有多点弹性支承的单跨梁。为了抵抗横向水平力,一般在塔梁间设置橡胶支座。其主要优点是:①两跨布载时,塔柱处主梁无负弯矩峰值,温度及收缩徐变内力较小,变形和内力变化平缓;②地震时,允许全梁纵向摆动,成为长周期运动,从而吸震消能。其缺点是:悬臂施工时,塔柱处主梁需临时固结,塔梁固结体系梁以抵抗施工中不平衡弯矩和纵向剪力。目前,斜拉桥设计多采用漂浮体系。

半漂浮体系是指在漂浮体系的基础上,为了使主梁不至于产生过大的纵向位移,并避免主梁横向位移对桥塔产生“撞击”,在构造上采取一定的措施来适当地强制主梁在纵、横两个方向上的变位。在结构计算上仍按漂浮体系计算。

1. 斜拉索

斜拉索是斜拉桥的重要组成部分,并显示了斜拉桥的特点。斜拉桥桥跨结构的重量和桥上荷载,绝大部分通过斜拉索传递到塔柱上。

斜拉索在构造上可分为刚性索和柔性索两大类。现在应用较多的平行钢丝索属于柔性索,是用几十根到几百根的圆截面钢丝紧密而平行地组成六角形蜂巢状截面。平行钢丝索的抗拉强度和弹性模量均较大,抗疲劳性能也较好,但其缺点是由于刚度大而引起的二

次应力问题以及架设和防腐处理较复杂。

根据斜拉索的数量,斜拉桥可分为稀索桥和密索桥。总的说来,稀索多为刚性索,密索多为柔性索。早期采用刚性稀索斜拉桥较多,近些年来则采用柔性密索斜拉桥多,两者各有优缺点。柔性密索斜拉桥的主要受力特点包括:

- (1)索间距短,主梁中的弯矩小;
- (2)每索的拉力较小,锚固端的构造简单;
- (3)锚固点附近的应力流变化较小,补强范围也较小;
- (4)悬臂施工时所需辅助支撑较少,甚至可以不要;
- (5)多密索的自振周期不一样,互相干扰,不易产生共振,可减少风振的危险。

斜拉桥斜拉索在横桥向布置上,大体可分为单面索、双面索和三面索三种。其中双面索应用最为广泛,我国建成的斜拉桥多采用双面索。从结构受力分析看:采用单面索时,斜缆对桥跨抗扭不起作用,因此主梁应采用抗扭刚度较大的截面;采用双面索时,作用于桥梁上的扭矩可由斜拉索的索力变化来抵抗。

拉索的截面形式、材料及防护措施有多种。早期修建的斜拉桥用得较多的是平行镀锌钢丝束外加聚乙烯(Polyethylene, PE)套管,内部压注水泥浆的形式。平行钢丝索和平行钢绞线索是现代斜拉桥上采用较多的拉索类型,它通常由多根钢丝或钢绞线平行排列而成。

由于斜拉索防腐问题一直是斜拉桥上十分重要的一个问题,现代斜拉桥都开始采用由单独防护的钢绞线制成的平行钢绞线索。单根钢绞线采用日本在 20 世纪 90 年代提出的同步热挤聚乙烯的技术进行防护,再将多根这样单独防护的钢绞线平行组合在一起。钢绞线的组装和更换,可以用简单轻便的张拉设备进行,且不影响桥上交通。

斜拉索主要承受轴向拉力,与桁架中的弦杆类似。端部拉索也部分承弯,在拉索大幅振动时弯曲更加明显,这样会增加端部的磨损,由相互间独立的平行钢绞线组成的拉索在这方面性能有所改善。

2. 桥塔

斜拉桥桥塔除承受自重外,还将由拉索传递来的主梁的恒、活载传至基础,并承受拉索水平分力引起的塔柱弯矩和剪力,是斜拉桥的重要受力构件。从顺桥向看,经常采用的主塔结构形式有单柱式、A 形和倒 Y 形等。从横桥向看,斜拉桥主塔形式有柱式、门式、A 形、倒 Y 形及菱形、花瓶形、钻石形等。目前,采用较多的是花瓶形索塔,这种形式的索塔能承受较大的横向弯矩,且抗扭刚度大、外形美观。

桥塔一般均为空心断面,用钢结构或钢筋混凝土制作,根据需要也可采用预应力混凝土结构。桥塔的结构形式应根据斜拉索的布置、桥面宽度以及主梁跨度等因素决定。现在大跨斜拉桥应用较多的是倒 Y 形结合顶部门形框架桥塔,缆索可为单面索或双斜面索。

3. 主梁

目前,斜拉桥主梁主要有预应力混凝土主梁、叠合梁、混合梁和正交各向异性箱梁四种形式。现在大跨桥梁结构中应用较多的是梯形形式的正交异性钢箱梁,其优点是悬臂伸出到全部路面宽度,并且有很好的空气动力稳定性,抗扭刚度大,工厂制造质量易于保障,安装方便快捷,近年来采用较多,适用于特大跨度斜拉桥。润扬大桥斜拉桥、南京长江二桥、

南京长江三桥、安庆长江大桥都采用了这种形式。

4. 锚固结构

斜拉索与塔、梁锚固结构的功能是将斜拉索内力可靠地传递给桥塔及主梁。其结构根据斜拉索布置、根数、桥塔及主梁的结构等情况确定。锚固结构上的传力途径为索力、锚头、支承板、锚梁、传递剪力的纵隔板、桥塔或主梁。在其结构的设计和施工中,各部分都应严格避免有较大的应力集中。

斜拉索与主梁是以锚固形式连接的,但与桥塔则有两种连接方式:一种是直接锚固;另一种是通过塔顶索鞍延伸到桥塔的另一侧主梁上锚固。斜拉桥主梁的轴力随斜拉桥的支承条件而变化。

1.1.3 斜拉索的服役现状

由于斜拉索锈蚀的影响,使得部分早期修建的斜拉桥结构损坏非常严重,拉索使用性能均过早衰退^[7]。斜拉索的防腐问题多年来一直困扰着工程界,拉索防护技术已成为制约斜拉桥发展的关键技术之一。

美国两位工程师调查表明,20世纪90年代前世界上100余座已建斜拉桥的各种拉索体系均存在不同程度的腐蚀,而日本推出的新平行钢丝系统的防腐蚀寿命也仅为25~30年,桥梁拉索腐蚀的危害触目惊心^[7]。表1-3对国内外由于拉索腐蚀失效的斜拉桥进行了统计分析,并给出了斜拉桥拉索的具体使用时间。

从表1-3中可以看出,无论是国内还是国外的斜拉桥,斜拉索系统腐蚀失效的事例屡见不鲜,有的桥梁换索工程的费用甚至比原桥梁造价还要高。导致斜拉索系统失效的原因有很多,总体来说,可以分为三类。一是斜拉索系统的防护体系失效,进而导致斜拉索系统腐蚀失效,如济南黄河公路大桥、广州海印桥、上海恒丰北路斜拉桥、重庆嘉陵江石门大桥等。二是成品索存在初始缺陷,这种缺陷主要表现在防护体系和内部高强钢丝上,在运输和吊装过程中,如果工艺不合理,防护体系极易受到破坏,如苏州绕城高速(南)京杭运河斜拉桥和上虞人民桥就属于这种情况。三是索体在制作过程中,钢丝表面的镀层也容易受到破坏导致先天性破损。

表 1-3 斜拉桥斜拉索失效调查表

序号	国别	桥名	桥梁概况	斜拉索使用年限	原因及处理	备注
1	中国	山东 济南黄河 公路大桥	该桥位于山东省济南北郊,是一座预应力混凝土斜拉桥。大桥总长2 023.44 m,主桥长488 m,有5个孔,其中最大跨径220 m。桥面全宽19.5 m,其中行车道宽15 m。该桥于1978年12月动工,1982年7月建成通车	13年	斜拉索锈蚀严重;全部更换原有的斜拉索	济南黄河公路大桥换索工作自1995年9月26日开始至1995年11月12日结束,使用的新斜拉索是上海浦江缆索厂生产的成品索