

Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems

斜拉桥斜拉索系统 检查与维护

编译 姚超 郭友谊

主审 叶觉明

评审 徐恭义 黄燕庆 易伦雄 王碧波 李正熔

彭元诚 徐宏光 苏权科 卢伟 庄卫林

胡涛 张哲 吉林 瞿光义 罗世东



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems

斜拉桥斜拉索系统检查与维护

编	译	姚 超	郭友谊			
主	审	叶觉明				
评	审	徐恭义	黄燕庆	易伦雄	王碧波	李正熔
		彭元诚	徐宏光	苏权科	卢 伟	庄卫林
		胡 涛	张 哲	吉 林	瞿光义	罗世东

人民交通出版社股份有限公司

内 容 提 要

本书为关于斜拉桥斜拉索系统检查与维护的一份综合报告。本报告概述了应用在斜拉桥上的各种斜拉索系统及结构材料,介绍了其目前的应用情况,分析了斜拉索系统检查和维护存在的问题与挑战。在此基础上,系统介绍了目前应用于斜拉索系统检查和监测的各种技术,对其利弊进行了分析;并对比分析了斜拉索维护和维修的各种方法。

本报告适用于斜拉桥业主,斜拉桥设计、检查、维修的专业工程师,并可供相关研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥斜拉索系统检查与维护 / 姚超, 郭友谊编译

— 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 7

ISBN 978-7-114-11594-3

I. ①斜… II. ①姚… ②郭… III. ①斜拉桥—工程
设备—设备检修 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 180414 号

书 名: 斜拉桥斜拉索系统检查与维护

编 译 者: 姚 超 郭友谊

责任编辑: 李 洁

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880 × 1230 1/16

印 张: 4.5

字 数: 120 千

版 次: 2014 年 7 月 第 1 版

印 次: 2014 年 9 月 第 2 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11594-3

定 价: 120.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

序

本世纪以来,中国大跨度缆索桥梁建设快速发展,深圳市科兰德实业发展有限公司也积极参与了这一发展过程,他们引入国内外先进技术为缆索桥梁长效安全提供保障,重点参与了缆索桥梁结构除湿防护和运营期检查、维护和维修等工作。已经完成了30多座缆索桥梁结构除湿防护系统的设计、试验研究、设备开发制造和安装施工,以及多座缆索桥梁结构除湿防护系统的检查、维护、改造和维修工程。该公司定位于缆索桥梁结构长效安全和高新技术科技产品应用方向发展,在参与国际项目投标的过程中,积极与美国等国家桥梁界的设计、工程总包商、业主和桥梁养护等单位进行合作交流。亲身感受和关注了美国缆索桥梁设计、建设、养护的一些先进理念和标准、规范,并带回了一些关于美国缆索桥梁检查维护的重要资料,其中美国国家科学院交通研究委员会组织编写的NCHRP534——《悬索桥平行钢丝主缆检查及强度评估指南》,已由该公司编译,并于2013年出版;本综合报告为其姐妹篇NCHRP353——《斜拉桥斜拉索系统检查与维护》。国内多位知名缆索桥梁设计师均给予这两本著作高度评价,认为其对中国大跨度缆索桥梁设计、建设和养护具有重要的参考价值和借鉴意义。

我国从1987年建成第一座斜拉桥——山东省胜利黄河大桥,迄今已经建成了百余座斜拉桥,我国是特大跨度斜拉桥数量最多的国家。不容讳言,我国也有多座斜拉桥已经进行了斜拉索大修和更换。斜拉桥的检查和维修是难以避免的,但在高速发展中我国尚未制定统一的斜拉桥检查与维护的技术标准和指南,这是斜拉桥养护维修所面临的重要课题。《斜拉桥斜拉索系统检查与维护》是一本关于斜拉桥斜拉索系统检查与维护的综合报告。该报告通过搜集斜拉索检查、维修、检测及设计方面的相关文献,利用网上相关数据资料进行调研,并对美国和加拿大的桥梁进行问卷调查,系统总结和介绍了斜拉桥斜拉索系统的各种检查、评估及维修方法。

本人有幸先读了本篇报告,结合国内缆索桥梁现状的思考,感触良多。深圳市科兰德实业发展有限公司组织编译此报告,不仅有利于提高员工的专业技术水平,也为国内斜拉桥设计、施工和养护维修提供了很好的参考资料,是为推进中国缆索桥梁事业的有益之举。

徐恭义

2014年7月

原 书 前 言

公路管理人员、工程师和研究人员想要采用信息时,常常面临一个问题——究竟哪些信息是已经存在的,无论是以文件形式还是未公开的经验或做法。这些信息可能是不完整的、零散的或是未经过评估的。因此,目前已掌握的全部知识可能并不足以解决问题。昂贵的研究可能会被闲置,宝贵的经验可能会被忽视,不能为解决问题或者缓解问题提供适当的建议措施。

公路管理人员和工程师所关注的主题几乎都有信息资料,主要来源于研究结果或者实际操作时在每天工作中遇到的问题。为了提供系统的方法搜集和评估这些有用的信息,并且使其能够运用到整个公路体系中,美国国家公路与运输协会官员,通过国家公路合作研究项目,授权交通运输研究委员会展开一系列研究。这项研究即 NCHRP Project 20-5——“公路问题相关信息资料综合报告”,从所有可用资源查找并搜集有用信息,从而形成特定主题的报告。这些报告构成 NCHRP 的系列报告之《公路实践综合报告》。

这一系列综合报告以简洁的格式系统报告了当前的知识和实践,没有包括在操作手册或设计说明书中的细节说明。该系列的每一份报告提供了在解决特定问题时采用的最有效的措施的纲要。

美国交通运输研究委员会工作人员

原 书 导 读

这份综合报告介绍了斜拉桥斜拉索系统的各种检查和维护技术,讨论了其短期和长期检查和监测的方法。主要包括检查和评估的方法,无损检测和评估程序,修复和翻新技术,控制斜拉索振动(包括风雨振动)的方法,斜拉索疲劳和失效问题,各种检查和维修方法的有效性,可用技术的局限性,以及未来研究的趋势和建议。

这份报告的成果是基于综合评述斜拉索检查、维修、试验和设计方面的相关文献,仔细研究网上的信息资料以及工程数据,向美国和加拿大的所有州和省交通部门发放调查问卷以获悉当前实际现状,还与一批专业人士联系以获取信息。搜集研究斜拉桥检查中的试验报告和状况评估报告,审核数量有限的斜拉桥维护和检查手册,以及利用美国专利和商标局数据库进行专利检索,获取了更多的额外信息。

来自威斯康星大学密尔沃基分校(University of Wisconsin-Milwaukee)的 Habib Tabatabai 结合搜集到的信息资料,撰写了这份报告。课题专题小组成员名单在前页已作公布(专门致谢)。这份综合报告是可以即刻使用的文件,记录了现有知识的局限性,以及在一段时间内可以接受的一些实际做法。随着研究和实践的持续进行,新的认识将会及时添加到现有资料中。

目 录

概要..... 1

1 概述 3

1.1 背景 3

1.2 目的和范围 4

1.3 问卷调查 5

2 斜拉索系统及结构材料..... 10

2.1 斜拉索系统..... 10

2.2 斜拉索的材料..... 15

2.3 斜拉索设计面临的挑战..... 25

2.4 斜拉索的制造和架设..... 37

3 检查和监测技术..... 38

3.1 本章概述..... 38

3.2 短期检查和评估..... 39

3.3 长期检查和评估..... 48

4 斜拉索的维护与维修..... 51

4.1 维修和翻新的策略和方法..... 51

4.2 减缓斜拉索的振动..... 52

4.3 保养、维修和翻新面临的挑战 58

5 未来趋势..... 59

6 总结..... 60

后记 63

概要

这份综合报告进行了全球范围内斜拉索检查、维修、测试和设计的信息研究,仔细研究了网上的信息资料以及工程数据,并与一批专业人士联系以获取相关信息。此外,研究人员准备了一份问卷调查并发放到美国和加拿大所有州和省的交通部门,从75%的美国著名斜拉桥(36座桥梁中的27座)和81%的加拿大著名斜拉桥(16座桥梁中的13座)获得了完整的调查问卷信息。在这些信息资料的基础上,这份报告对斜拉索检查与维护的各种方式、方法和实际做法做出了详细解释,明确了其优缺点,介绍并讨论了一些特殊的方法。

斜拉桥检查与维护面临的挑战是显而易见的。在多数情况下,检查人员无法观察到一束拉索内的主要应力元件(MTEs)。检查人员一般很难接近拉索进行目视检查或者展开无损检测,在锚固区域就更不可能。负责检查和维护斜拉索的工作人员面临着诸多挑战,因为目前成熟的和得到认可的方法和工具是有限的,且多数情况下费用昂贵。

进行这项研究时,美国有36座斜拉桥,加拿大有16座。截至2005年,美国斜拉桥的平均使用年限达11.4年。随着这些桥梁使用年限的上升,对斜拉桥斜拉索检查与维护的有效方法和工具的需求变得更加迫切。

以下列举了斜拉索的检查、维护和维修所涉及的一些问题,提出了文献中解决这些问题的方法,并简要总结了其已知的利与弊,及其他因素。对这些方法的详细描述与讨论将贯穿整个报告。

一般检查(目视)——在绝大多数情况下,目视检查是唯一使用在斜拉桥的方法。

自由长度间的MTE状况评估(漏磁检测)——这种检查系统在工业缆索和钢丝绳检查中的应用历史悠久。

MTE状况评估(拉索索力测量)——该方法应用最广泛,有时会被误认为是无损评估方法。

MTE状况评估(超声波检测)——这个方法应用在一些桥梁上,用于评估Hi-Am锚(高应力幅值锚)索的MTE状况。

MTE状况评估(放射线照相)——理论上,这个方法也许能成功获取可接近的拉索锚固区周边的情况。

检测断丝发生(声学监控)——进行斜拉索质量合格认证疲劳试验的试验室,长期使用这种方法检测拉索样本试验过程中发生的断丝。

检测高密度聚乙烯(HDPE)管套内的灌浆孔隙(脉冲雷达)——手提式脉冲雷达设备可以放在拉索上方,并且可沿长度方向移动以确定拉索套内部可能存在的灌浆孔隙。

修复大型灌浆孔隙(真空灌浆)——这个方法长期在后张钢筋束施工中应用。

拉索索力测量(基于振动,使用激光测振仪)——激光测振仪用于远距离测量拉索的小振动。

拉索索力测量(基于振动,使用加速计)——与前述的激光方法类似。

拉索索力测量(测量拉索垂度)——一条拉索中的张力与基本频率的平方相关,也与拉索垂度成反比。因此,测量拉索垂度也能够用于估算拉索张力。

检测HDPE中的隐藏开裂(红外线热成像)——手持式红外线热成像设备能够用于检测HDPE管中隐藏在保护膜下方的开裂。

检测聚氟乙烯带的损伤(红外线热成像)——与检测HDPE中隐藏开裂的方法类似。

评估拉索振动(使用加速计长期监测)——当怀疑拉索存在振动问题时,把传感器(加速计)安装在选择的拉索上,在一段时间(例如几周、几个月、几年)内监测振动。

评估拉索振动(在桥梁上装摄影机)——没有已知的使用摄影机监测斜拉桥振动的案例。曾在两座桥梁发生飓风风暴的时候讨论过这种方法,但是没有实施。

评估拉索阻尼(振动衰减法)——测量拉索阻尼有多种方法。其中一种是,把加速计安装在拉索上进行测量。

不可能使用单一的方法就可以解决斜拉索状况的所有问题。大多数情况下,需要将无损检测技术与工程师、检查人员、技术人员的经验、知识和判断结合在一起,才能够得出适当的解决方法。已知桥梁无缺陷时,如果能够作为基准进行比较测量,那么许多方法的有效性和准确性可能会大大提高。

1 概 述

1.1 背 景

随着世界各地斜拉桥应用的普及及其数量的快速增长,斜拉索检查与维护的相关问题显得越来越重要。影响斜拉索性能的问题,包括过度的振动、腐蚀、疲劳等。一般不能可靠地确定缆索的内部状况,尤其是在关键的锚固区域。许多评估和修复方法仍处于早期发展阶段,可靠的资料和成熟的技术还不容易获得。

桥梁业主和工程师面临的状况是,需要选择和使用一些新技术或新方法评估拉索,但又无法得知其能获得的有效程度。虽然一些有价值的数据是可用的,但一般不容易获取。因此,本项目旨在收集并整理信息资料,综合组成一份报告。

斜拉桥和悬索桥是两种主要的缆索承重桥梁。在这两种系统中,缆索都由桥塔支撑。斜拉桥的拉索是倾斜的,直接支撑在桥塔和桥面上;悬索桥垂直的吊索使负载从桥面直接传递到悬链线状主缆。悬索桥主缆锚固在桥梁两端的大体积锚碇上,斜拉桥的斜拉索则锚固在桥面上。

斜拉桥的概念和基本形式已经存在几个世纪。在 1832 年,法国工程师 C. L. Navier 提出了使用铁链支撑桥梁的一些概念,如图 1.1-1 所示。虽然这些草图非常类似于现代斜拉桥,但是 Navier 只设想出了地锚式背索。

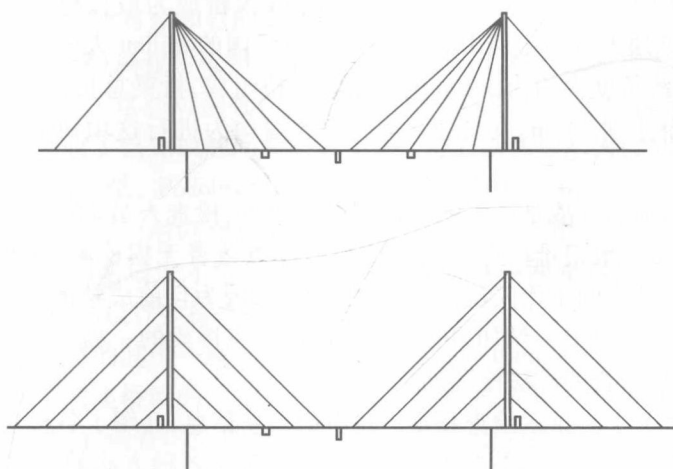


图 1.1-1 Navier 设想的斜拉桥系统

接下来是包含悬挂和斜拉系统的组合系统设计。19 世纪,由 John A. Roebling 设计的 Brooklyn 大桥就是一个典型的例子。第一座现代斜拉桥是 1955 年建于瑞典的 Strömsund Bridge,该桥由 Franz Dischinger 设计,主跨为 182.6m(599ft)。

当时,第一大跨度的采用混凝土桥塔和主梁的斜拉桥是 1962 年建于委内瑞拉的 Maracaibo 桥。报告中稍后将讨论,这座桥的拉索由于腐蚀的原因,后来被更换。

早期的桥梁只有少量斜拉索在需要设置桥墩的位置提供支撑。这样使用大间距拉索的概念没有充分实现斜拉桥的结构和经济潜力。1976 年,H. Homber 在德国的 Friedrich Ebert 桥上使用密间距斜拉索

(密索体系或多斜拉索系统)。法国的 Brotonn 桥使用的也是密间距斜拉索,拉索系统基于后张拉技术,平行的 7 丝钢绞线包在钢管内并使用灌浆填封。阿根廷的 Zarate-Brazo Largo 桥是第一批设计为同时承载铁路交通和汽车交通的斜拉桥。后文会提到,一座阿根廷的斜拉桥在营运时间不到 20 年就有一根斜拉索完全失效。



图 1.1-2 位于阿拉斯加的锡特卡海港大桥
(美国最古老的斜拉桥)

美国最古老的斜拉桥是于 1970 年在阿拉斯加建造的 Sitka Harbor 桥(图 1.1-2)。北美最古老的斜拉桥应该是加拿大魁北克省的 North Romaine 铁路桥,它建于 1960 年。加拿大最早建立的高速公路斜拉桥是新不伦瑞克省的 Longs Creek #1 桥和 Hawkshaw 桥,分别建于 1966 年和 1967 年。北美的其他早期和知名的斜拉桥还包括蒙特利尔的 Papineau (1969) 和华盛顿州的 Pasco-Kennewick 桥 (1978)。

在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初,美国斜拉桥新建的步伐加快。今天,中长跨度的新建桥梁中,斜拉桥已完全取代桁架桥。例如,在过去的 15~20 年,所有密西西比河的新建桥梁都是斜拉桥,而在这之前的桥梁都是桁架桥。关键原因是斜拉索系统的成本低且其有优雅的外观。

进行这项研究时,美国斜拉桥的总数超过了 35 座,还有几座正在建造或者计划当中。处于规划阶段的包括在纽约、圣路易斯的桥梁,以及一座位于密西西比州和阿肯色州跨越密西西比河的桥梁。如果圣路易斯的桥梁建成,其主跨为 610m(2000ft),将成为当时西半球最长跨度的斜拉桥。进行这项研究时,缆索尺寸的世界纪录属于俄亥俄州托莱多的 Maumee River 桥,计划于 2006 年年底建成。这座桥梁的斜拉索的索股包含 156 根直径为 15.2mm(0.6in)的 7 丝钢绞线,拉索的直径达 508mm(20in)。当时世界上最长跨度的斜拉桥为日本爱媛县的 Tatara 大桥,主跨 890m(2920ft)。然而,即将在 2008 年建成的 Stonecutters 桥,主跨为 1018m(3339ft),将会超过 Tatara 大桥成为最长跨度的斜拉桥。(译注:中国 2008 年建成通车的江苏苏通大桥为主跨 1080m 斜拉桥。)法国的 Millau 大桥是当时世界上最高的桥梁,跨越塔恩河河谷,它由桥跨长度大约为 340m 的多个斜拉桥组成,桥梁总长约为 2.5km。桥面在河谷上方约 270m,桥塔高出地面达到 343m。(译注:此处的数据均为进行这项研究时的数据,截至 2005 年年底。)

斜拉桥检查与维护面临的挑战是巨大的。在多数情况下,检查人员无法观察到拉索束内的主要应力元件(MTEs)。检查人员一般很难接近拉索进行目视检查或者无损检测(NDT),在锚固区域就更不可能。负责检查和维护斜拉索的工作人员面临着诸多挑战,因为目前成熟的和得到认可的方法和工具是有限的,且多数情况下费用昂贵。例如,1996 年阿根廷一座桥梁的一根斜拉索的内部退化和失效的情况,事先就没能通过目视检查的方法检测到。

这份综合报告记录了关于斜拉索检查和维护现有的最新信息,介绍了各种现有工具和方法,并且检验其解决斜拉索评估的业绩记录或未来潜能。为了更好地理解各种方法的适用性和复杂性,对不同的斜拉索系统和材料也做了一个简单的概述。

1.2 目的和范围

这份综合报告的目的是为了确定并解释应用在斜拉索的有效、有前景的检查和维修技术,报告中讨论了短期方法和长期方法。

该综合报告的依据如下:

(1)全面调研了国内和国际文献,获取各种不同的技术及其业绩记录、记录的问题和案例研究等。

(2)对美国和加拿大各州和省的交通部门、缆索供应商、检测试验公司的桥梁设计师、研究人员,以及承包商进行了正式和非正式的调查,确定了斜拉索的状态评估情况,确定了维修和更新斜拉索的目前实际现状及未来的发展趋势。调查以问卷的方式进行,并通过会议、电话联系、电子邮件等多种形式与专业人士交流。

(3)审核了重点检查的斜拉桥的测试报告和状态评估结果。

(4)查看了数量有限的斜拉桥维护和检查手册。

(5)使用美国专利和商标办公室专利数据库进行专利检索。

这份综合报告包含以下信息:

(1)无损检测的检查和评估方法。

(2)维修方法。

(3)控制拉索振动(包括风雨振动)的方法。

(4)内部和外部湿度的控制方法。

(5)斜拉索的疲劳研究。

(6)斜拉索失效的案例研究。

(7)维修和更换的问题及细节。

(8)各种检查和维修方法的有效性和费用。

(9)现有技术的局限性。

(10)未来的趋势和有前景技术。

(11)未来研究的建议。

1.3 问 卷 调 查

研究人员给美国和加拿大所有州和省的交通部门准备并发放了一份问卷调查。同样的问卷也发放给了美国后张预应力协会(PTZ)斜拉桥委员会的所有成员,以及美国和加拿大主要的斜拉索供应商和检测试验公司。表 1.3-1 列举了这些对调查作出回复的州和省以及每个机构报告的桥梁数量。此外,也从一个斜拉索供应商处回收了已完成的问卷。表 1.3-2 是美国和加拿大已知斜拉桥的清单。清单资料来源于调查中的信息、出版文献、Podolny 的论文(1992),以及 Kumarasena 等(2004)的报告。

在美国,有 43 个州的交通部门对调查作出了回答,其中有 24 个州管辖范围内没有斜拉桥。密尔沃基这个城市(威斯康星州)有两座最近才完工的斜拉桥。俄亥俄州两座斜拉桥的其中一座——Maumee River 桥的问卷答复是由该桥的设计师提供的。

佛罗里达州的两座斜拉桥的其中一座——杰克逊维尔市的 Dame Point 桥的调查问卷也回收了。印第安纳州的交通部门提供了两座桥梁的问卷答复,包括一座斜拉桥和一座采用拉索的拱桥,表 1.3-1 只列举了其中的斜拉桥,但是问卷调查的结果分析包含了两座桥梁的信息。

在美国,所有已知的斜拉桥的已完成问卷的回收率为 75%(即,36 座斜拉桥中的 27 座桥,附加一座拱桥)。需要注意的是,美国桥梁调查清单中列举了 4 座人行天桥。因此,美国所有的公路桥应该占 84%。美国人行天桥的调查问卷没有得到回复。没有收到回复的其他几座主要的斜拉桥包括佛罗里达州的 Sunshine Skyway 桥,弗吉尼亚西部(东亨廷顿和威尔顿—斯托本维尔)的两座桥,以及波多黎各建成的 La Plata River 大桥。

在加拿大,13 个省中有 5 个省回复,代表了 16 座加拿大已知的斜拉桥中的 13 座(81%)。在亚伯达省卡尔加里中的 5 座斜拉桥都属于人行天桥。不列颠哥伦比亚省的 ALRT Fraser River 桥,群岛上的桥以及在魁北克省的 North Romaine 铁路桥没有得到回复。在不同的州或省,是由不同机构负责斜拉桥维护的,因此,辨别合适的机构也是一个艰巨的任务。

从美国和加拿大各州/省获得回复结果的汇总 表 1.3-1

州/省	问卷是否 收回	报告的 桥梁数量	州/省	问卷是否 收回	报告的 桥梁数量
United States 美国					
Alabama 亚拉巴马州	Y	1	Missouri 密苏里州	Y	1
Alaska 阿拉斯加州	Y	2	Mississippi 密西西比州 ^a	—	0
Arizona 亚利桑那州	Y	0	Montana 蒙大拿州	Y	0
Arkansas 阿肯色州 ^a	—	1	North Carolina 北卡罗来纳州	Y	0
California 加利福尼亚	Y	1 ^f	North Dakota 北达科他州	Y	0
Colorado 科罗拉多州	Y	0 ^e	New Hampshire 新罕布什尔州	Y	0
Connecticut 康涅狄格州	Y	0	New Jersey 新泽西州	Y	0
Delaware 特拉华州	Y	1	New Mexico 新墨西哥州	Y	0
Florida 佛罗里达州 ^b	—	1	Nevada 内华达州	Y	0
Georgia 佐治亚州	Y	2	New York 纽约州	Y	0
Hawaii 夏威夷州	Y	0	Ohio 俄亥俄州 ^c	—	2
Idaho 爱达荷州	Y	0	Pennsylvania 宾夕法尼亚州	Y	0
Illinois 伊利诺伊州	Y	2	Rhode Island 罗德岛州	Y	0
Indiana 印第安纳州	Y	2	South Carolina 南卡罗来纳州	Y	1
Iowa 艾奥瓦州	Y	1	Tennessee 田纳西州	Y	0
Kansas 堪萨斯州	Y	0	Texas 得克萨斯州	Y	2
Kentucky 肯塔基州	Y	2	Utah 犹他州	Y	0
Louisiana 路易斯安那州	Y	1	Virginia 弗吉尼亚州	Y	1
Massachusetts 马萨诸塞州	Y	1	Washington 华盛顿州	Y	2
Maryland 马里兰州	Y	0	Wisconsin 威斯康星州	Y	2
Michigan 密歇根州	Y	0	Wyoming 怀俄明州	Y	0
Minnesota 明尼苏达州	Y	0			
Canada 加拿大					
Alberta 亚伯达省 ^d	—	5	New Brunswick 新不伦瑞克省	Y	3
British Columbia 不列颠哥伦比亚省	Y	1	Ontario 安大略省	Y	0
Manitoba 曼尼托巴省	Y	1	Québec 魁北克省	Y	3
a 密西西比州和阿肯色州共同承担一座桥梁的施工,阿肯色州将会负责维护工作。 b 佛罗里达州两座斜拉桥收回了一份调查问卷。 c 俄亥俄州交通部的报告称有两座斜拉桥正在施工,并且其中一座桥的问卷已收回。 d 加拿大亚伯达省卡尔加里市报告中提到的所有斜拉桥都是人行桥。 e 美国科罗拉多州的丹佛市中心有两座人行斜拉桥,撰写这份报告时没能够获取这两座桥梁的信息。 f 美国加利福尼亚州的兰丁市有一座人行斜拉桥,完成这份报告之后才收到这座桥的信息。					

以表 1.3-2 中的数据为依据,图 1.3-1 和图 1.3-2 显示了 1955 ~ 2005 年,以 10 年为间隔单位,在美国和加拿大修建完工(即通车)的斜拉桥的数量。1996 ~ 2005 年,美国斜拉桥建设的速度和数量大幅度增长,修建了 17 座斜拉桥,占自 1970 年以来建造的这类桥梁数量的 47%。美国调查清单(截至 2005

年)中的斜拉桥平均使用年限是 11.4 年,而加拿大斜拉桥的平均使用年限是 27 年。

美国和加拿大斜拉桥汇总 表 1.3-2

序 号	桥 梁 名 称	州/省	桥 跨		年 份
			(m)	(ft)	
United States 美国					
1	Cooper River 桥	South Carolina 南卡罗来纳州	472	1546	2005
2	Greenville 桥	Mississippi 密西西比州	420	1378	2005
3	Dame Point 桥	Florida 佛罗里达州	397	1300	1989
4	Fred Hartman 桥/Houston Ship Channel 桥	Texas 得克萨斯州	381	1250	1995
5	Sidney Lanier Bridge 桥	Georgia 佐治亚州	381	1250	2003
6	Hale Boggs 桥/Luling 桥	Louisiana 路易斯安那州	373	1222	1984
7	Sunshine Skyway 桥	Florida 佛罗里达州	366	1200	1987
8	William Natcher 桥/Owensboro 桥	Kentucky 肯塔基州	366	1200	2002
9	Bill Emerson 桥/Cape Girardeau 桥	Missouri 密苏里州	351	1150	2003
10	Talmadge Memorial 大桥	Georgia 佐治亚州	336	1100	1991
11	William Harsha 桥	Kentucky 肯塔基州	320	1050	2000
12	Pasco-Kennewick 桥	Washington 华盛顿州	299	981	1978
13	East Huntington 桥	West Virginia 西弗吉尼亚州	275	900	1985
14	Quincy Bayview 桥	Illinois 伊利诺伊州	275	900	1986
15	US Grant 桥	Ohio 俄亥俄州	267	875	2004
16	Weirton-Steubenville 桥	West Virginia 西弗吉尼亚州	250	820	1990
17	Cochrane Africatown 桥	Alabama 亚拉巴马州	238	780	1991
18	Clark 桥	Illinois 伊利诺伊州	230	756	1994
19	C&D Canal 大桥	Delaware 特拉华州	229	750	1995
20	L. P. Zakim Bunker Hill 桥	Massachusetts 马萨诸塞州	227	745	2002
21	Burlington 桥	Iowa 艾奥瓦州	201	660	1995
22	Veterans Memorial 桥/Neches River 桥	Texas 得克萨斯州	195	640	1991
23	Varina-Enon 桥/James River 桥	Virginia 弗吉尼亚州	192	630	1990
24	Maumee River Crossing 大桥	Ohio 俄亥俄州	187	613	2005
25	SR 46 桥/East Fork White River 桥	Indiana 印第安纳州	142	466	1999
26	Sitka Harbor 桥/John O' Connel 桥	Alaska 阿拉斯加州	137	450	1970
27	Tea Foss Waterway 桥	Washington 华盛顿州	114	375	1996
28	Captain William Moore 桥/Skagway 桥	Alaska 阿拉斯加州	83	271	1975
29	Milwaukee Art Museum 桥/Calatrava 桥	Wisconsin 威斯康星州	70	231	2003

续上表

序 号	桥 梁 名 称	州/省	桥 跨		年 份
			(m)	(ft)	
United States 美国					
30	Menomonee Falls 桥 ^a	Wisconsin 威斯康星州	66	217	1971
31	Sixth Street Viaduct-North 桥	Wisconsin 威斯康星州	59	195	2003
32	Sixth Street Viaduct-South 桥	Wisconsin 威斯康星州	59	195	2003
33	Sacramento River (Meridian) 桥 ^b	California 加利福尼亚州	55	180	1977
34	Rockefeller University Campus 人行桥 ^a	New York 纽约州	38	123	1999
35	Old Plank Road Trail 桥 ^a	Illinois 伊利诺伊州	35	114	1999
Canada 加拿大					
1	Alex Fraser (Annacis) 桥	British Columbia 不列颠哥伦比亚省	465	1526	1986
2	ALRT Fraser River 桥	British Columbia 不列颠哥伦比亚省	340	1115	1988
3	Papineau-Leblanc 桥	Quebec 魁北克省	241	790	1969
4	Hawkshaw 桥	New Brunswick 新不伦瑞克省	218	713	1967
5	Longs Creek #1 桥	New Brunswick 新不伦瑞克省	218	713	1966
6	Price 桥	Quebec 魁北克省	137	450	1972
7	Esplanade Riel 桥	Manitoba 曼尼托巴省	106	348	2003
8	Bridge of the Isles	Quebec 魁北克省	105	344	1967
9	Stoney Trail 人行桥 ^a	Alberta 亚伯达省	102	335	1998
10	Galipeault 桥	Quebec 魁北克省	94	308	1963
11	Carburn Park 人行桥 ^a	Alberta 亚伯达省	80	262	1982
12	Prince's Island 人行桥 ^a	Alberta 亚伯达省	67	220	1972
13	Nackawic River 桥	New Brunswick 新不伦瑞克省	66	216	1967
14	North Romaine River 桥 ^c	Quebec 魁北克省	61	200	1960
15	McMahon 桥	Alberta 亚伯达省	47	154	1987
16	Fox Hollow 桥	Alberta 亚伯达省	45	148	1996
注:桥梁是根据桥跨的跨长从大到小排序的。完成这份报告之后,才发现美国有三座最近新建的人行斜拉桥。两座在科罗拉多州的丹佛市中心,一座在加利福尼亚州的兰丁市。这三座桥梁没有进行分析。					
^a 人行桥。					
^b 旋开桥。					
^c 铁路桥。					

早期的加拿大桥梁,217m 的 Hawkshaw 桥建于 1967 年,应用镀锌桥梁钢绞线,桥面以上 1.52m (5ft)高的拉索用镀锌钢丝缠包,然后覆盖保护泥子层,这个方法有点类似于悬索桥的主缆。蒙特利尔的 Papineau 桥(1969)的斜拉索是镀锌桥梁钢绞线,覆盖有聚乙烯外套。阿拉斯加州的 Sitka Harbor 桥(1970)的拉索也使用镀锌桥梁钢绞线,但没有使用聚乙烯外套。华盛顿州的 Pasco-Kennewick/Gum Street-Kennewick 桥(1978)是美国第一座使用高密度聚乙烯管包住平行未镀锌钢丝,用聚氯乙烯(PVC)带缠包并且用水泥浆灌浆的斜拉索。这是从基于与镀锌钢丝和钢绞线有关的工业和悬索桥缆索技术的

早期设计,向基于后张预应力技术的灌浆缆索的一个根本性转变。

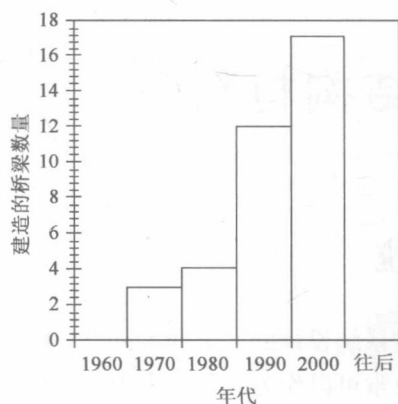


图 1.3-1 美国的斜拉桥数量

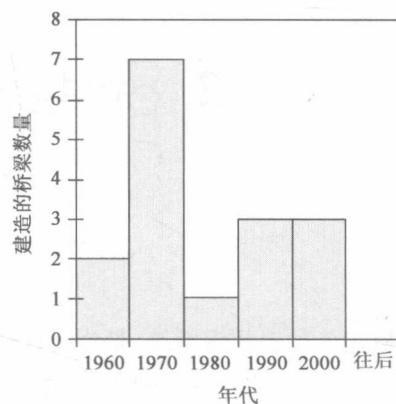


图 1.3-2 加拿大的斜拉桥数量

后文会讨论到,这种灌浆缆索的方法首先是在欧洲应用的,最著名的例子是法国的 Brotonne 桥,在这之前曾应用在 Pasco-Kennewick 桥上。在美国,应用这种使用高密度聚乙烯管道填充水泥灌浆的方法,开启了“灌浆时代”,这种方法主导美国斜拉桥的设计将近 20 年,一直持续到 20 世纪 90 年代后期。加拿大、德国和日本是避免使用这种缆索灌浆办法的主要国家。Pasco-Kennewick 桥也是美国同类桥梁中第一座使用较多拉索(即减少拉索间距)的桥梁。

在加拿大,465m 的 Alex Fraser 桥(1986)采用通长镀锌桥梁钢绞线,外套 PE 套管,并在内部填充石蜡阻隔化合物。美国第一座也是唯一一座使用钢筋(或螺纹钢)的桥梁是佛罗里达州杰克逊维尔的 Dame Point 桥(1989)。在这座桥梁中,未镀锌的钢筋包在钢管内并灌浆。加拿大卡尔加里有四座人行天桥,使用钢拉杆拉索,所有钢拉杆都镀锌,没有使用高密度聚乙烯(HDPE)和灌浆,钢拉杆通过螺纹接头器锚固。第一座使用环氧树脂涂层 7 丝钢绞线斜拉索的桥梁是美国伊利诺伊州昆西的 Quincy Bay-view 大桥(1986)。

在过去的 20 年中,斜拉索的设计,包括腐蚀防护和抗疲劳系统有了持续明显的发展和改进。在 20 世纪 90 年代,所有主要的斜拉索供应商提供的系统在连续的工程项目中很少(如果有的话)保持不变,尽管已经采取经济激励措施来限制这种改变。这是因为设计师、缆索供应商、业主主要是从他们的经验和早期斜拉索系统在测试和施工过程中表现的特征来学习提高的。

自 2000 年,美国不同供应商提供的部分斜拉索系统中出现了一套趋于接近的初步方案。所有美国主要的斜拉索供应商开始提供一种使用平行 7 丝钢绞线的系统,单独涂油脂加护套(或涂石蜡加护套),包在没有灌浆的 HDPE 管内,并且使用夹片楔子锚固。通常是张拉单根钢绞线的张拉,这与所有钢绞线使用大型液压千斤顶的同步张拉不同。更近期报道的一些系统允许定期去掉单根钢绞线进行检查,有的为拉索未来增加钢绞线保留了一些空间。

本章节介绍之后,第二章概述了不同的斜拉索系统,涉及其设计、材料、制造和架设等。第三章介绍了短期和长期的检查和监测技术。第四章讨论了斜拉索的维护与维修。第五章简单讨论了未来的发展趋势。第六章汇总调查结果,并为将来的研究提出了建议。

2 斜拉索系统及结构材料

2.1 斜拉索系统

本节概述各种斜拉索系统,是为了让读者熟悉不同斜拉索系统设计的术语和工艺,以及了解斜拉桥斜拉索检查和维护中存在的问题。根据通用术语的描述,斜拉索可以作为一种张力构件,由单个和多个纵向的主要应力元件(MTE)组成,一端连接在桥塔上,另一端锚固在桥面上。

多年来,关于斜拉索的设计有两种根本不同的竞争理念。第一种理论支配着德国、英国和日本早期斜拉桥的设计,在发展成熟的悬索桥技术(即悬索桥主缆和吊索,以及工业应用的钢丝绳技术)的基础上设计斜拉索。第二种理论大概是起源于法国的 Brotonne 桥,直到 20 世纪 90 年代还主导着美国斜拉索的设计,斜拉索是根据后张拉预应力技术设计的。这两种主要的理念也各自有变化。本节后面部分会对这些理念的基本概念和在过去的 30~40 年间发生的重大演变进行讨论。改进这些系统的动机是基于该系统的现场使用性能和技术发展,最重要的还是经济因素。

2.1.1 主要应力元件

在斜拉索的自由长度间,主要应力元件(MTE)有几种不同的组成。自由长度指的是不在锚固区附近的缆索的长度。MTE 可能是一根杆、几根平行杆、螺旋钢绞线(钢丝绳或桥梁钢绞线)、平行钢丝或者平行 7 丝钢绞线。图 2.1-1 为部分 MTE 系统。

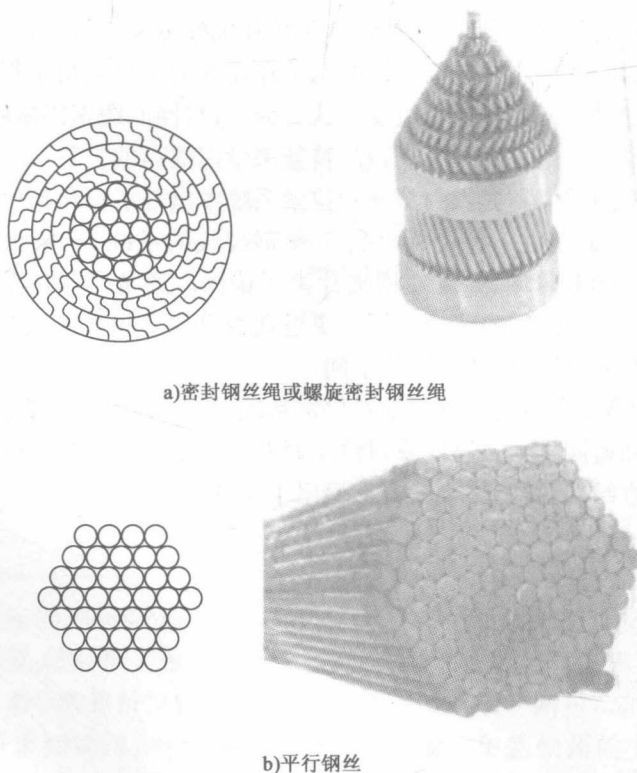


图 2.1-1