

任必年 主 编
张学锋 陈建阳 沈承金 副主编

公路钢桥腐蚀与防护

Corrosion and Protection of Highway Steelbridge



人民交通出版社
China Communications Press

Corrosion and Protection of Highway Steelbridge

公路钢桥腐蚀与防护

任必年

主 编

张学铎 陈建阳 沈承金

副主编

人民交通出版社

北京·2002

内 容 提 要

本书重点对近 20 年来国内外特大型公路钢桥防腐蚀技术进行总结,阐述了桥梁腐蚀环境、防腐蚀技术、防腐蚀涂装、桥梁防腐蚀失效和维修,以及钢桥梁防腐蚀性能检测和桥梁防腐蚀设计标准等内容,同时还介绍了大量的国内外钢桥防腐蚀实例。

本书是我国公路钢桥腐蚀与防护方面第一本系统性专著,可供从事公路钢桥设计、施工、监理及养护的专业技术人员参考与借鉴,也可供相关专业大中专院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路钢桥腐蚀与防护/任必年主编. —北京:人民交通出版社,2002.11

ISBN 7-114-04487-9

I.公... II.任... III.①公路桥:钢桥—腐蚀
②公路桥:钢桥—防腐 IV.U448.145.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 086132 号

公路钢桥腐蚀与防护

Gonglu Gangqiao Fushi Yu Fanghu

任必年 主编

张学锋 陈建阳 沈承金 副主编

正文设计:彭小秋 责任校对:刘晓方 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:294 千

2002 年 11 月 第 1 版

2002 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001~5000 册 定价:33.00 元

ISBN 7-114-04487-9

《公路钢桥腐蚀与防护》

编辑委员会

主 编 任必年

副主编 张学锋 陈建阳 沈承金

委 员 索双富 肖跃文 徐国平 李雄晖

易少平 黄梅辛 郑修典 朱正群

邓燕清 陈仕周 张少军 刘 丽

付 红 易春龙 王 林 徐 华

乐云祥

序

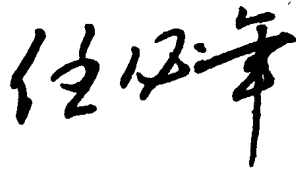
在辽阔的华夏大地上,从早期的石桥、木桥,到近代的钢筋混凝土桥、预应力混凝土桥,直至现代各种形式的大跨钢桥,从设计理论、建造技术、建筑材料等不同侧面展示了我国桥梁的发展历史。其中,钢结构桥梁以其跨度大,承载力强,施工速度快而成为大跨径桥梁结构的优选桥型,仅湖北省在长江上就先后建成了武汉长江大桥、白沙洲长江大桥、军山长江大桥以及宜昌长江大桥等多座公路和公铁两用钢桥。随着钢桥建设的迅速发展,一个不容忽视的问题,即钢桥的腐蚀与防护,成为我国公路桥梁界需下大力气解决的重要课题。

武汉军山长江公路大桥是我国京珠、沪蓉两条国道主干线跨越长江的共用特大桥梁,也是国内首次采用全断面焊接成桥的钢箱梁斜拉桥。在三年的工程建设中,军山长江大桥的建设者坚持科技创新、推进精品战略,组织完成了近20项重大科技攻关项目,多项被鉴定为达到国际先进水平。其中,围绕钢箱梁腐蚀课题,相继完成并成功实施了大规模自动工装电弧喷铝、电弧喷锌长效防腐。为更好地总结有关科技创新成果,我们结合军山长江大桥和国内外一大批大跨径钢桥建设经验,对公路钢桥腐蚀与防护进行了专题研究,在大量调研、试验研究的基础上,编撰了《公路钢桥腐蚀与防护》一书,重点对近20年来国内外特大型公路钢桥防腐技术进行总结,阐述了桥梁腐蚀环境、防腐蚀技术、防腐蚀涂装,桥梁防腐蚀失效和维修,以及钢桥梁防腐蚀性能检测和桥梁防腐蚀设计标准,同时还介绍了大量的国内外钢桥防腐蚀实例。

此书是我国公路钢桥腐蚀与防护方面第一本系统性专著,可供从事公路钢桥设计、施工、监理及养护的专业技术人员参考与借鉴,也希望供制订类似行业标准作参考。

借本专著出版之际,我代表湖北省交通厅衷心感谢广大桥梁建设者为公路钢桥防护技术所做的贡献,感谢各科研机构、高等院校以及各方面专家学者给予湖北省桥梁建设的大力支持。希望我省的交通建设者继续走科技创新之路,为我省交通事业的进一步发展创造新的辉煌。

湖北省交通厅厅长
湖北省京珠高速公路建设指挥部
常务副指挥长、总监理工程师



2002年9月 武汉

目 录

第一章 公路钢桥腐蚀与防护简介

第一节 桥梁建造技术的发展	1
第二节 公路钢桥的基本类型	1
一、钢拱桥	1
二、斜拉桥	4
三、悬索桥	5
第三节 桥梁的腐蚀	7

第二章 桥梁的腐蚀环境

第一节 大气腐蚀	9
一、大气腐蚀的分类	9
二、大气腐蚀机理	12
三、大气腐蚀的主要破坏形态	13
四、大气腐蚀的影响因素	18
第二节 水介质腐蚀	19
一、淡水腐蚀	19
二、海水腐蚀	21
第三节 土壤腐蚀	22
一、土壤腐蚀的特征	22
二、金属的土壤腐蚀	22
三、混凝土的土壤腐蚀	23
四、土壤腐蚀的评价	24

第三章 桥梁防腐蚀涂料及涂装技术

第一节 桥梁防腐蚀涂料	28
一、涂料防腐蚀特点	28
二、涂料的基本组成	28
三、桥梁常用的防腐蚀涂料	30
第二节 涂料成膜机理	36
一、物理成膜方式	37
二、化学反应成膜方式	37



第三节 涂料防腐涂装	38
一、表面清理	39
二、表面除油	39
三、表面除锈	41
四、涂料涂装方法	45
五、涂料防腐涂装工艺	49
第四节 涂料防腐涂装体系	51
一、涂装体系的设计	51
二、防腐涂装体系推荐	53
三、涂料防腐涂层的使用寿命	56

第四章 桥梁热喷涂长效防腐技术

第一节 概述	57
一、热喷涂工艺分类	57
二、热喷涂技术的特点	58
三、热喷涂方法和特性比较	58
第二节 热喷涂长效防腐	59
一、火焰喷涂防腐	59
二、电弧喷涂防腐	59
第三节 电弧喷涂技术及设备的发展	70
一、电弧喷涂的发展	70
二、电弧喷涂技术的发展方向	73
三、二次雾化电弧喷涂设备	74
第四节 电弧喷涂的机械化	77
一、机械化电弧喷涂的意义	77
二、机械化电弧喷涂的实现方式	78
第五节 电弧喷涂长效防腐工艺	79
一、电弧喷涂工艺	80
二、电弧喷涂工艺设备	81
三、热喷涂材料	91

第五章 钢桥梁防腐涂装

第一节 钢桥梁结构基本知识	96
一、斜拉桥的结构	96
二、悬索桥的组成	100
三、钢拱桥	105
第二节 钢桥防腐涂装	106
一、钢箱梁的防腐涂装	106



二、斜拉索防护	125
三、主缆防护	129
四、混凝土索塔、桥墩及混凝土引桥的涂装	136
五、伸缩缝	143

第六章 涂层的失效与维修

第一节 防腐蚀涂装层的失效	145
一、油漆涂层的失效	145
二、油漆涂层的老化	145
三、油漆涂层化学侵蚀	149
四、有机涂层微生物腐蚀	149
五、有机涂层的溶胀与溶解	150
六、金属涂层的失效	152
七、复合涂层的失效	153
第二节 防腐蚀涂层的维修	153
一、涂层维修期的确定	153
二、有机涂层老化评价	155
三、电弧喷涂长效防腐蚀涂层的维修确定	157
四、有机涂层老化的测量	157
第三节 防腐蚀涂层维修施工	157
第四节 钢桥防腐蚀涂装的展望	158

第七章 涂层性能分析与测试

第一节 表面粗糙度	159
一、粗糙度定义	159
二、粗糙度测量方法	159
第二节 涂层厚度	160
一、磁性测厚法原理	160
二、测量精度影响因素	160
三、测量方法	161
第三节 结合强度	161
一、拉力法	162
二、刻划法	163
三、弯曲法	164
第四节 耐腐蚀性	164
一、介质浸渍试验	164
二、中性盐雾试验	164
三、弱极化腐蚀电流密度试验	164

四、二氧化硫腐蚀试验	170
五、油漆涂层耐腐蚀试验	170
六、油漆涂料性能检测	171

第八章 桥梁防腐涂装质量控制

第一节 防腐标准介绍	173
一、热喷涂防腐标准	173
二、油漆涂装防腐标准	174
三、其他相关标准	175
第二节 桥梁防腐过程控制	175
一、防腐设计	175
二、防腐涂装施工	176
三、涂装质量监理	176
参考文献	180
后记	183



第一章 公路钢桥腐蚀与防护简介

第一节 桥梁建造技术的发展

桥梁是跨越江河、湖泊、山谷、海峡或其他各类障碍物,提供具有承载能力的铁路、公路、管线、渠道等的架空建筑物。桥梁按功能分为铁路桥、公路桥、公铁两用桥、立交桥、管线或渠道架空桥等。

我国的桥梁建设源远流长,公元 599 年建成的赵州桥、公元 1059 年建成的万安桥和公元 1192 年建成的汀子桥,被称为我国古代三大名桥。无论其建桥规模,还是建造技术在当时均属世界前列,是世界古代桥梁建设的杰出代表。近几十年来,我国各类桥梁建造技术水平更是突飞猛进,如 5 400 多公里的黄河上已建成各类桥梁 60 多座,万里长江上已有近 40 座结构各异的大桥横跨滔滔江水之上,一些跨越海湾连接大陆与海岛的大桥也相继建成,使我国桥梁的设计、制造、施工水平和桥梁结构理论、材料科学均达到国际先进水平。其中桥梁建筑材料也从最早的木桥、石桥发展到今天的混凝土桥、预应力混凝土桥、钢结构桥,桥梁的长度也从几十米到十余公里。我国桥梁建设大致可以分为三个时期:第一时期为 1949 ~ 1954 年,主要修复和加固各类旧桥;第二时期为 1954 ~ 1978 年,建设大量中、小跨径的钢筋混凝土桥和预应力混凝土简支梁桥、拱桥及少量钢桁梁桥;第三时期为 1978 年至今,大量建设大跨径钢管拱桥、斜拉桥和悬索桥,大量采用预应力混凝土连续梁和钢箱梁。

钢桥因具有跨径大、承载能力强、施工工期短等特点,被世界各国广泛采用。例如 19 世纪建成的跨径 250m 的尼亚加拉大瀑布悬索桥,澳大利亚 1932 年修建成的跨径 520.9m 的悉尼港钢拱桥,美国 1937 年建成净跨 1 280m 的金门大桥,20 世纪 60 年代英国建成的跨径 1410 m 恒比尔河桥,之后日本建成明石海峡大桥跨径达 1991m。我国同江至三亚国道主干线上将修建五项跨海工程——渤海湾跨海工程、长江口越江工程、杭州湾跨海工程、珠江口伶仃洋跨海工程和琼州海峡工程,其他国道主干线将修建一系列跨越大江大河特大跨径钢桥。

公路钢桥正向更大跨径,更宽桥面,更加耐久、可靠,减震效果更好的方向发展。

第二节 公路钢桥的基本类型

一、钢 拱 桥

钢拱桥的承重结构拱肋,主要承受轴向力,没有弯矩或弯矩很小。拱桥比梁桥具有更大的跨越能力,甚至在某些建设条件下可以与斜拉桥竞争。拱桥比梁桥节约 10% ~ 15% 的钢材,钢管轻便,现场施工吊装方便,主拱和横梁可以分别吊装、现场焊接,解决一次吊装质量过重问

题,大大缩短施工工期。钢拱桥还具有外形美观,富有民族建筑风格,与自然景观协调好等特点,因而得到广泛应用。

图 1-1 为 1963 年原联邦德国建成的跨越费马海峡的钢拱桥,跨度 248.4m,拱肋斜置,吊杆斜置,全焊接结构。

图 1-2 为 1986 年建成的横跨莱茵河的哈姆桥,主跨 250.5m,拱肋为加劲桁在两片斜置拱肋的空间内穿过,并与跨度 135.5m 的邻跨构成连续梁,桁梁的下弦与桥面系为整体钢箱梁,拱肋与桁间用柔性吊杆连接,每根吊杆在横向具有各自不同的斜角。

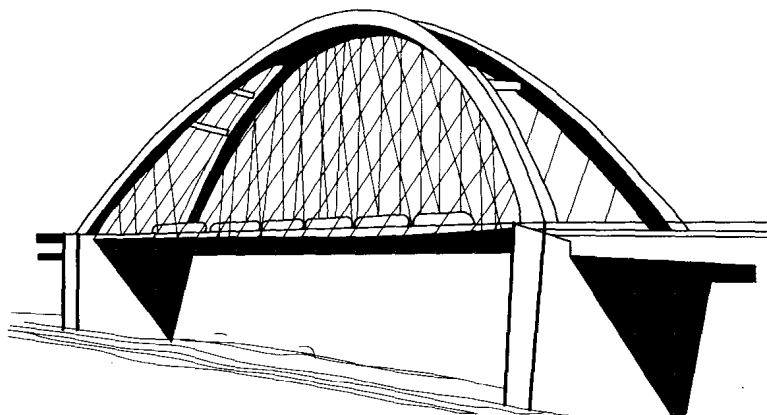


图 1-1 德国费马海峡大桥

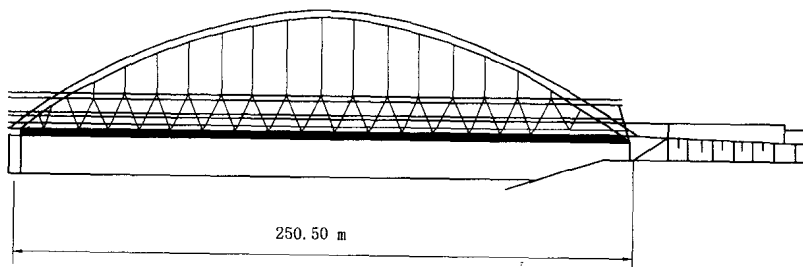


图 1-2 德国莱茵河哈姆大桥

图 1-3 为澳大利亚悉尼港公铁两用钢拱桥,跨度 502.9m,桁梁和吊杆全部采用铆接。

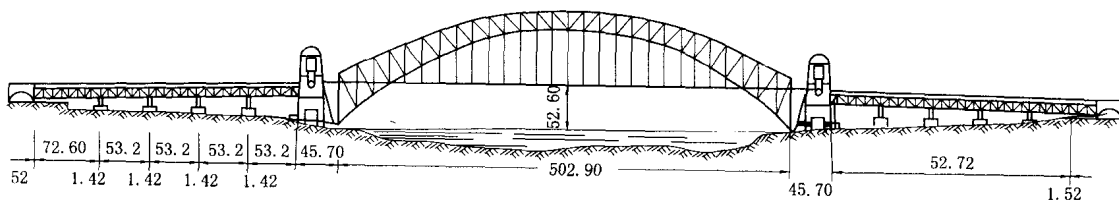


图 1-3 澳大利亚悉尼港公铁两用钢拱桥(尺寸单位:m)

图 1-4 为武汉江汉三桥,主跨 280m,是等截面四管双哑铃的下承式钢管混凝土拱桥。截至 2000 年,世界上主要大跨度钢拱桥列于表 1-1 中。

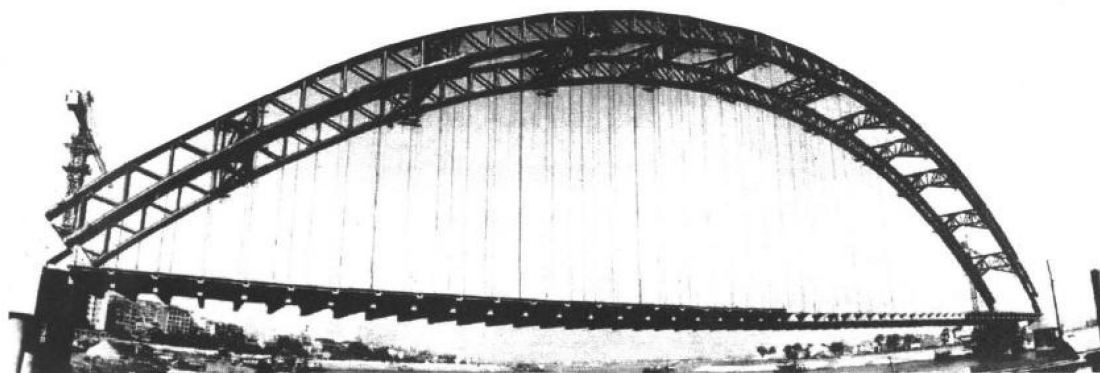


图 1-4 武汉江汉三桥

截至 2001 年世界建成的主要大跨径钢拱桥

表 1-1

桥 名	主 跨 (m)	桥 址	建 成 年 份
新河拱桥	518	美国费耶特维尔	1978
贝永桥	504	美国纽约	1931
悉尼港桥	503	澳大利亚悉尼	1932
费里芒特桥	383	美国波特兰	1973
曼港桥	366	加拿大温哥华	1964
塔歇尔桥	344	巴拿马巴拉那	1962
拉比奥莱特桥	335	加拿大三河城	1967
朗克恩桥	330	英国默西河	1961
兹达可夫桥	330	捷克澳尔利克湖	1967
伯钦诺夫桥	329	津巴布韦萨比河	1935
罗斯福湖桥	329	美国希拉	1990
佛陈大桥	110.4	中国佛山	1996
江汉三桥	280	中国武汉	2000
江汉五桥	240	中国武汉	2000
邳州大桥	235	中国徐州	2002
黄柏河大桥	268	中国宜昌	1996
青干河大桥	256	中国宜昌	2000
南海三山西大桥	200	中国广东	1997
龙潭溪大桥	208	中国宜昌	2000
乌江大桥	300	重庆涪陵	1989
万县长江大桥	420	四川万县	1992
丫髻沙桥	344	中国广州	2000

二、斜 拉 桥

斜拉桥由加肋梁桥面体系与钢索索塔支承体系共同组成,如图 1-5 所示。斜拉桥具有如下特点:

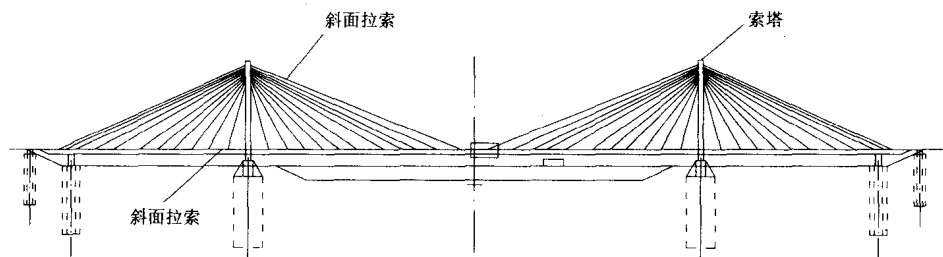


图 1-5 斜拉桥示意图

- (1)它是一种自锚体系,一般不须昂贵的地锚基础。
- (2)支承体系防腐技术要求比悬索桥低,从而降低拉索的防腐费用,斜拉索设计时已留有充分的余量,即使钢铁遭受腐蚀,也可以在通车情况下更换斜拉索。
- (3)刚度比悬索桥好,抗风能力比悬索桥好。
- (4)斜拉桥与拱桥和悬索桥相比较时,在主跨 200 ~ 500m 范围内,斜拉桥比拱桥昂贵;在主跨 500 ~ 1 000m 范围内,斜拉桥比悬索桥经济。

斜拉桥跨度从 300m 发展到 500m,经历 30 余年(1959 ~ 1991 年),而主跨从 500m 发展到 900m 仅用 10 年时间(1991 ~ 1999 年),在 20 世纪 90 年代,特别是中国建造了大量大跨径的斜拉桥。斜拉桥的索塔均为混凝土结构,桥面体系可以为钢箱梁、混凝土梁、结合梁、钢桁梁、公铁两用等。我国早期斜拉桥以预应力混凝土桥为主,20 世纪 80 年代后期我国建造大量大跨度桥中,钢箱梁被大量采用,截至 2000 年我国已建成各类大跨径斜拉桥 15 座以上,目前仍有多座斜拉桥在建。表 1-2 为截至 2000 年世界最大跨径的斜拉桥。

截至 2000 年世界建成的大跨径斜拉桥

表 1-2

桥 名	主 跨 (m)	桥 址	建 成 年
多多罗大桥	890	日本 尾道今治线	1999
诺曼底大桥	856	法国 勒阿费尔	1995
南京长江二桥	628	中国 南京	2000
武汉白沙洲大桥	618	中国 武汉	1999
闽江大桥	605	中国 福州	1999
杨浦大桥	602	中国 上海	1993
徐浦大桥	590	中国 上海	1997
名港中央大桥	590	日本 名古屋	1998
斯卡恩圣桥	530	挪威 特隆赫姆峡湾	1991
岑石大桥	518	中国 广东	1999
鹤见航道桥	510	日本 横浜	1994



续上表

桥 名	主 跨 (m)	桥 址	建 成 年
荆江长江大桥	500	中国 湖北	2001
生口大桥	490	日本 尾道今治线	1991
厄勒大桥	490	丹麦/瑞典 哥本哈根	2000
东神户大桥	485	日本 神户	1992
湛江大桥	480	中国 广东	1998
鄂黄长江大桥	480	中国 武汉	2000
汀九大桥	475	中国 香港	1998
西奥哈大桥	470	韩国	1998
安纳西斯大桥	465	加拿大	1986
横滨港湾大桥	460	日本	1989
武汉军山长江大桥	460	中国 武汉	2001
第二胡党利大桥	457	印度	1996
第二塞文大桥	456	英国	1987
湄南河大桥	450	泰国	1990
达特福德大桥	450	英国	1995
重庆长江大桥	444	中国 重庆	1983
卢纳大桥	440	西班牙	1995
铜陵长江大桥	432	中国 铜陵	1997
汲水门大桥	430	中国香港	1991
赫尔格兰特大桥	425	挪威	1991
南浦大桥	423	中国 上海	1988
岩黑岛大桥	420	日本	1988
柜石岛大桥	420	日本	1994
鄞阳汉江人桥	414	中国 鄞阳	1997
名港东桥	410	日本	1985
名港西桥	405	日本	1975
圣纳泽尔大桥	404	法国	1995
浪德大桥	400	西班牙	

三、悬 索 桥

悬索桥是特大跨径桥梁的主要形式之一,一般经济跨径在 500 m 以上,理论上最大跨径可达 4 000m,可以说是跨千米以上桥梁的优选桥型。悬索桥无论在哪个时代,它都是跨径最大的桥梁,未来特大跨径的桥梁主要靠悬索桥来实现。

悬索桥的特点是依靠固定于索塔的主缆支承梁跨,主缆为承重索,它通过吊索吊住加劲梁,主缆索的两端锚于地面(图 1-6),表 1-3 为截至 2000 年世界上建造的大跨径悬索桥。

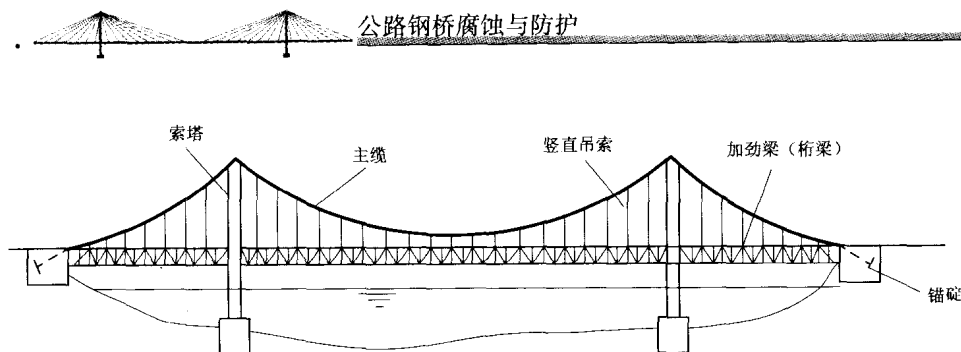
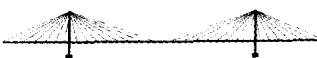


图 1-6 悬索桥示意图
世界大跨径悬索桥一览表

表 1-3

桥 名	中 跨 长 (m)	国 家	竣 工 年 份
明石海峡大桥	1 991	日本	1998
大贝尔特大桥	1 624	丹麦	1997
恒比尔大桥	1 410	英国	1981
江阴长江大桥	1 385	中国 江苏	1999
青马大桥	1 377	中国 香港	1997
韦拉扎诺大桥	1 298	美国	1964
金门大桥	1 280	美国	1937
延姆海湾大桥	1 257	挪威	1992
赫加海湾大桥	1 210	瑞典	1997
麦金纳克大桥	1 158	美国	1957
南备赞濑户大桥	1 100	日本	1988
博斯普鲁斯二桥	1 090	土耳其	1988
博斯普鲁斯一桥	1 074	土耳其	1973
乔治华盛顿桥	1 067	美国	1931
来岛第三大桥	1 030	日本	1999
来岛第二大桥	1 020	日本	1999
4 月 25 日桥	1 013	葡萄牙	1966
福斯桥	1 006	英国	1964
北备赞濑户桥	990	日本	1988
塞文桥	988	英国	1966
宜昌长江大桥	960	中国 湖北	2001
下津井濑户大桥	940	日本	1988
西陵长江大桥	900	中国 重庆	1997
虎门大桥	888	中国 广东	1997
大鸣门桥	876	日本	1985
塔科玛桥	853	美国	1950
阿斯克于岛桥	850	挪威	1992



续上表

桥 名	中 跨 长 (m)	国 家	竣 工 年 份
因岛桥	770	日本	1983
白鸟桥	720	日本	1997
安果斯都拉桥	712	委内瑞拉	1967
关门桥	712	日本	1973
旧金山奥克兰桥	705	美国	1936
布朗克斯怀特斯通桥	701	美国	1939
厦门海沧大桥	648	中国 厦门	1999
小带桥	600	丹麦	1969
重庆鹅公岩大桥	600	中国 重庆	2000
布鲁克茵桥	486	美国	1983
狮门桥	473	加拿大	1939
本杰明-费兰克林桥	533	美国	1926
汕头海湾大桥	452	中国 汕头	1996
重庆丰都长江大桥	450	中国 重庆	1996

第三节 桥梁的腐蚀

世界各国自古至今建造了无数桥梁,特别是特大型结构桥梁的建成,它们一方面提供给人类方便;另一方面自身也经受巨大的损坏,需要进行维修,甚至报废重建。为此各国桥梁专家纷纷对钢桥梁的损坏原因进行研究,得出结论:钢桥梁失效主要由材料和制作不良、自然灾害和各类交通事故、金属腐蚀等造成。其中,金属腐蚀是主要原因之一,如日本统计的 104 座悬索断桥事例(表 1-4)中,有 23 例是与钢材质量和腐蚀有关。斜拉桥的斜拉索腐蚀引起换索现象频繁发生,1959~1981 年欧洲最大的混凝土悬索桥保持者——唐卡维尔桥,由于两根主缆严重腐蚀,于 1990 年更换了两根主缆,又另加了两根主缆,所以该桥拥有四根主缆。美国路易斯安娜州新奥尔良的鲁林桥、阿根廷的扎拉特布拉什拉桥、委内瑞拉的马拉开波桥和中国济南黄河大桥均进行过换索工作。英国伦敦塔桥因主塔底下钢梁腐蚀生锈无法支撑大桥自重、被迫关闭重建新桥,2001 年中国宜宾大桥因吊索钢丝锈蚀折断,造成桥梁断成三节等等。

104 座悬索桥断桥原因分析

表 1-4

事故原因	荷载及交通事故	自然灾害	腐蚀	材料不良	其它
数量	37	35	19	4	9

钢桥梁因腐蚀需要进行涂装维修更是不计其数,可以说每一座钢桥每隔 3~5 年左右均应进行一次防腐蚀涂装维护,10~15 年需将原有油漆涂装层全部喷砂除去,进行重新防腐蚀涂装。据美国高速公路管理局 1998 年统计资料,美国境内州际和国家级桥梁 279 543 座,其中因腐蚀不合格需要维修的桥梁为 68 466 座,腐蚀率占 24.5%;城镇间桥梁 309 792 座,腐蚀率达



35.4%,为此美国设立桥梁研究和建设创新基金,以期开发桥梁防腐蚀新材料新技术。目前美国每个州每年都要拿出数千万美元用于桥梁防腐蚀涂装维修。金属腐蚀已经成为钢桥的一大灾害,它给钢桥的维修带来很大困难,特别是难以接近的地方,必须有庞大昂贵的专用设备配合,才能使防腐蚀涂装得以充分进行。据统计,钢桥的防腐蚀涂装费用将占钢桥总费用的10%以上。