

现代悬索桥

Modern Suspension Bridges

严国敏 编著
周世忠 主审



人民交通出版社

内 容 提 要

本书共分14章。前9章是悬索桥的一般概述,第10章至第13章分别列举美国、欧洲、日本及中国的现代悬索桥实例,第14章是现代悬索桥的回顾与展望。

本书可供桥梁设计、施工技术人员学习使用,亦可作为桥梁专业本科生、研究生教辅用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代悬索桥 / 严国敏编著. —北京: 人民交通出版社,
2001. 12
ISBN 7-114-04157-8

I. 现... II. 严... III. ①悬索桥—设计②悬索桥—桥梁工程—工程施工 IV. U448. 25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 094696 号

现代悬索桥

严国敏 编著

周世忠 主审

正文设计:彭小秋 责任校对:刘高彤 责任印制:杨柏力

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

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 400 千

2002 年 4 月 第 1 版

2002 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册 定价: 29.00 元

ISBN 7-114-04157-8

U · 03040

前 言

本书早在 1998 年初就已动手编写,原计划在当年年底脱稿并恭请江苏省交通厅副厅长兼扬子大桥公司总经理周世忠主审。

由于意外的车祸导致老伴左腿骨折,以及由此引起笔者生活劳累和哮喘病缠身,在力不从心的情况下一度停笔放弃编写计划。直到今年春季才再下决心,争取在身患重病的极困难条件下完成本书的写作。

在设计院领导的大力支持以及同事们的帮助下,经过半年有余的与疾病作斗争,总算勉强地完成了书稿。

全书分为 14 章。前 9 章是悬索桥的一般概述;第 10 章至第 13 章分别列举美国、欧洲、日本及中国的现代悬索桥实例,用以补充前 9 章的论述不足,并可作为备查用的资料,使本书还带有一定的工具书的功能;第 14 章是现代悬索桥的回顾与展望。

书中涉及的比较新的特写内容主要有以下一些方面:

- (1)采用直升飞机架设导索;
- (2)采用无抗风索的猫道;
- (3)采用新材料 1800MPa 高强钢丝制造主缆与吊索(CFRC);
- (4)主孔跨中采用缆梁联结细节;
- (5)加劲梁端部与锚碇之间采用阻尼器的细节;
- (6)加劲梁采用多点吊拉的无铰架设法以及各种特殊架设法;
- (7)钢丝索股与鞍座之间的抗滑措施;
- (8)钢加劲梁与混凝土加劲梁的比较;
- (9)4 月 25 日大桥的扩建(增设铁道)工程;
- (10)加劲梁钢箱截面上的积雪与抗风稳定的关系;
- (11)悬索桥中的一些世界之最与世界首创;
- (12)悬索桥的养护设备、景观设计与灯光管理。

由于在病中抢时间来编写,心有余而力不足,错误与疏漏在所难免,还望各方斧正。

最后,借此机会向设计院全体领导及同事们致谢!同时对内科护士长李鑫女士定期上门为我打针护理,女儿严力亚工程师为我找文献资料、插图、联系打字与复印以及作部分校对,老伴张珊珍女士为我作部分剪贴(包括图中字体与文中附图)与校改,在此一并表示感谢!没有大家的支持与帮助,我个人是无法完成编写工作的。

作者: 严国敏

1999 12

目录

第一章 悬索桥的历史与发展	1
第一节 历史上的悬索桥	1
第二节 现代悬索桥的发展	1
第三节 世界悬索桥现状	5
第二章 悬索桥的构造和形式	15
第一节 悬索桥构造简述	15
第二节 悬索桥的形式	16
第三章 总体布置与结构特性	20
第一节 跨度比	20
第二节 垂跨比	22
第三节 宽跨比	25
第四节 高跨比与箱型加劲梁的高宽比	26
第五节 加劲梁的支承体系	28
第六节 主缆与加劲梁的特殊联结	29
第四章 计算理论与设计要求	31
第一节 计算理论	31
第二节 设计要求	35
第五章 悬索桥的桥塔	44
第一节 桥塔的概述	44
第二节 桥塔的结构形式	45
第三节 桥塔的截面组成与施工概述	49
第四节 倒 V 形及菱形桥塔用于悬索桥的特例	53
第六章 悬索桥的缆索体系	54
第一节 主缆	54
第二节 吊索	57
第三节 缆索体系的架设	60

第四节 主缆的防护	70
第七章 悬索桥的加劲梁	73
第一节 加劲梁的结构形式	73
第二节 加劲梁的横截面	74
第三节 加劲梁的桥面构件	78
第四节 加劲梁单位长度用钢量资料	79
第五节 钢桁梁与钢箱梁的概略比较	80
第六节 加劲梁的风洞试验	80
第七节 加劲梁的制造、组拼与运输	81
第八节 加劲梁的架设	81
第八章 悬索桥的锚碇	90
第一节 概述	90
第二节 重力锚	90
第三节 岩洞锚	92
第四节 岩孔锚	92
第五节 串联悬索桥的共用锚墩	93
第六节 三角形空腹构架式重力锚	94
第七节 平板式重力锚	95
第八节 软土层中的深基础重力锚	96
第九章 悬索桥的大型支承件与节点连接件	99
第一节 塔顶鞍座	99
第二节 散索鞍座	101
第三节 喇叭形散索套及摩阻套箍	101
第四节 主缆副鞍座及向下系拉点	102
第五节 索夹	102
第六节 主缆与加劲梁之间的跨中固结件	104
第七节 加劲梁端部的伸缩缝与缓冲梁构造	105
第八节 钢丝绳股的靴套	106
第九节 加劲梁的连杆	107
第十章 美国的悬索桥实例	108
第一节 旧金山——奥克兰海湾大桥	108
第二节 金门大桥	113
第三节 乔治·华盛顿桥	119
第十一章 欧洲的悬索桥实例	122
第一节 4月25日大桥	123

第二节	瑞典的高海岸大桥	130
第三节	丹麦的大贝尔特东桥	136
第四节	塞文桥	148
第五节	恒伯尔桥	152
第六节	博斯普鲁斯海峡一桥	154
第七节	博斯普鲁斯海峡二桥	156
第十二章	日本的悬索桥实例	158
第一节	明石海峡大桥	158
第二节	彩虹大桥	167
第三节	白鸟大桥	182
第四节	下津井大桥	200
第五节	南北备赞桥	202
第六节	因岛大桥	204
第七节	大鸣门桥	206
第十三章	我国的悬索桥实例	208
第一节	江阴长江公路大桥	208
第二节	香港青马大桥	212
第三节	西陵长江大桥	214
第四节	虎门珠江大桥	216
第五节	厦门海沧大桥	218
第六节	汕头海湾大桥	220
第十四章	回顾与展望	231
第一节	回顾 20 世纪的现代悬索桥	231
第二节	展望 21 世纪的新一代悬索桥	235
参考文献		247
后记		250

第一章

悬索桥^{*}的历史与发展

第一节 历史上的悬索桥

悬索桥的构思据说来自猴桥,它是由若干强壮的猴子组成一条悬链来让病猴或年老体衰的猴子通过的桥梁。最原始的人类悬索桥采用植物类的竹子或藤条来制造悬索。我国四川省的灌县早在千年之前就出现竹索桥。17 世纪开始出现用铁链作悬索的桥梁。我国四川省大渡河上由 9 条铁链组成的泸定桥是在 1706 年建成的。到 19 世纪又发展为采用眼杆(eyebars)与销铰作悬链的桥梁。英国 1826 年建成跨度为 177m 的麦地海峡桥和 1864 年建成跨度为 214m 的克利夫顿(Clifton)桥都是属于这种形式。这两座古老的悬索桥至今尚在使用。利用钢缆绳、钢绞线和钢丝等现代钢材来制造的悬索桥则基本上是进入 20 世纪后才出现的。

第二节 现代悬索桥的发展

现代悬索桥的发展迄今出现四次高峰。在第一次与第二次高峰之间的 20 世纪 40 年代,因美国塔科马(Tacoma)老桥的风毁事故,大跨悬索桥的修建停顿了约有 10 年之久。但在此期间由于悬索桥的抗风设计引入了风洞试验而使悬索桥的发展在 20 世纪 50 年代得到复苏,并分别在 60 年代与 80 年代进入第二次与第三次高峰。进入 90 年代之后,包括中国在内的在全球范围内又出现新的建设高峰,即目前的第四次高峰。以下对四次高峰,包括挫折期与复苏期,分别作概略的叙述。

一、1930 年前后美国的悬索桥—第一次发展高峰

1883 年在纽约建成的主跨为 486m 的布鲁克林(Brooklyn)桥是美国,也是世界首座跨度较大的悬索桥。此桥除了具备现代悬索桥的缆索体系之外,还混有若干加强用的斜拉索。因此,严格地说,它不是一座纯粹的悬索桥,而是混合体系的缆索承重(cable-supported)桥。真正的

注 * 悬索桥的名称在各国语言中有不同的表述。

中国:悬索桥(吊桥);

英国:Suspension Bridge;

美国:Suspension Bridge;

日本:吊桥(つりばし);

德国:Hängebrücke;

法国:Pont Suspendu;

俄国:Висячий Мост;

葡萄牙:Ponte Suspensaõ。

跨度较大的悬索桥首先是 1903 年建成的主跨为 488m 的威廉姆斯堡(Williamsburg)桥,其次是 1909 年建成的主跨为 448m 的曼哈顿(Manhattan)桥。这两座桥都是在纽约市区跨越东河,并且都是在空中用编丝轮(spinning wheel)将钢丝编拉后组成主缆(main cable)的。这种在空中编丝成缆的方法被称为空中编缆(Air Spinning)法,简称 AS 法。

20 世纪 20 年代美国各地建成较多的小跨度城市悬索桥,其中有宾夕法尼亚州的匹兹堡市的 6 号街桥、7 号街桥和 9 号街桥。它们的主跨分别为 131m、139m 和 131m,悬链都是用眼杆以销铰连接而成,加劲梁都是实腹钢板梁,结构形式都是自锚式而非地锚式。除此之外,美国在 20 年代中还建成两座主跨超过 500m 的悬索桥。其中一座是 1926 年建成的本杰明—富兰克林(Benjamin—Franklin)桥,主跨为 533m,此桥又名费城—坎姆登(Philadelphia—Camden)桥,在费城跨越特拉华(Delaware)河,此桥的跨度和载重规模在当时都是空前的。另一座是 1929 年在底特律(Detroit)(美国与加拿大交界处)建成的大使(Ambassador)桥,主跨 564m,跨越底特律河。在此时期美国还为美洲其他国家建成不少中小跨度悬索桥。

20 世纪 30 年代是美国修建大跨度悬索桥的最兴旺时期,1931 年建成跨度首先突破千米的乔治·华盛顿(George·Washington)桥。此桥在纽约跨越赫德森(Hudson)河,主跨达 1067m。1936 年建成旧金山—奥克兰海湾大桥,此桥分东西两桥,其中西桥是两座一前一后串联衔接的孪生悬索桥,每座均为三跨悬吊,主跨均为 704m,采用加劲钢桁梁,桥面分上下两层,上层可通行 6 个车道的小汽车,下层可通行三个车道的重车(货运卡车)和双轨电车。继此之后在 1937 年又建成举世闻名的,并象征旧金山城市标记的金门(Golden Gate)大桥,主跨为 1280m,曾保持世界最大桥梁跨度记录达 27 年之久。1939 年又在纽约建成跨越东河的布朗克斯·惠斯登(Bronx—Whitestone)桥,主跨 701m。

以上这些悬索桥的建成,包括出现两座跨度大于千米的桥梁,形成美国(也是世界)悬索桥的第一次发展高峰,主跨 1280m 的金门大桥为其代表。

二、20 世纪 40 年代悬索桥发展史上的挫折——塔科马桥的风毁

进入 40 年代之后,美国发展悬索桥的步子放慢了,这是由于塔科马老桥的风毁事故造成的。

1940 年在华盛顿州建成主跨为 853m 的塔科马老桥。此桥的加劲梁不是钢桁梁而是下承式(半穿式)钢板梁。由于加劲梁断面抗风稳定性差(图 1-1),在建成当年的 11 月 7 日近中午的时候被风吹断。

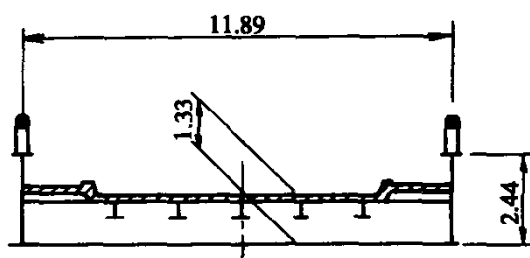


图 1-1 塔科马老桥加劲梁的横截面

事故发生时的风速仅 19m/s 左右。实际上在事故发生之前该桥曾有经受过更大风速的记录,但那时反倒平安无事。究其原因,在发生事故的风速下,桥梁开始时发生摇晃,跨中防止加劲梁与主缆间相互位移的几根稳定索断裂,桥型突然变化。此摇晃非但没有逐渐衰减,反而越来越厉害,最后产生扭曲振动,桥面发生很大的倾斜,即忽左忽右地发生扭曲倾斜,乃至造成剧裂的扭曲运动,最终将加劲梁扭断而坠毁(见图 1-2 的破坏过程的照片)。

三、20 世纪 50 年代悬索桥发展的复苏——风洞试验的兴起

1940 年塔科马老桥发生事故之后,美国的(也是世界的)悬索桥建设事业的发展整整停止了 10 年之久。但以此为转机,成立了塔科马桥的事故调查委员会,经过利用风洞进行了三维模型试验,对发生事故原因的扭曲颤振现象进行考察研究,肯定了无衰减的反复力逐渐累积起

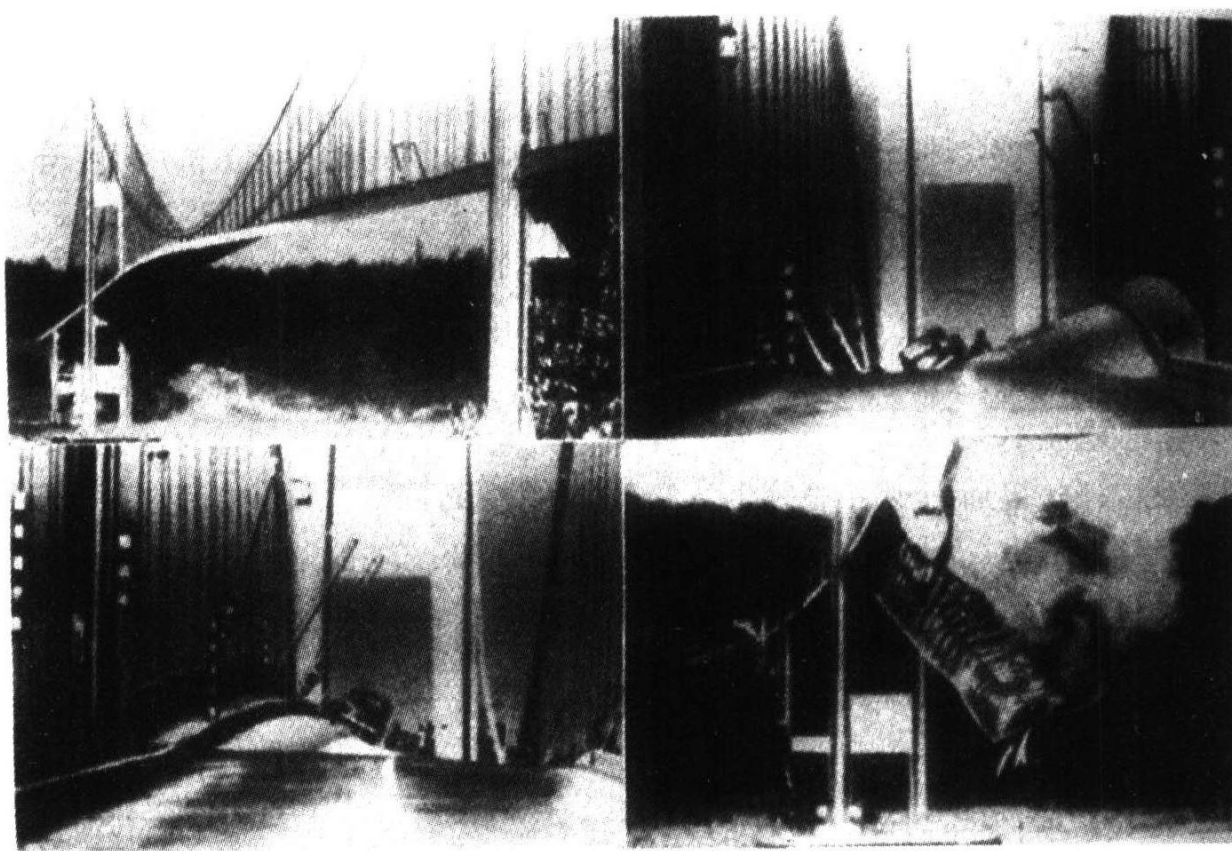


图 1-2 塔科马老桥从晃动到扭曲及破坏的过程

来以后可以发生极度的共振乃至破坏。1950 年按原有跨度重建塔科马新桥。在新桥的设计中,对加劲梁利用风洞试验作了反复的研究比较后,决定将加劲梁由钢板梁改为钢桁梁,梁的高跨比从 $1/350$ 提高到 $1/85$ ($= 10.06\text{m}/853\text{m}$),宽跨比从 $1/72$ 提高到 $1/47$ ($= 18.3\text{m}/853\text{m}$),并在桥面部分开有若干带状孔隙,以进一步改善抗风性能(图 1-3)。通过塔科马新桥的设计,悬索桥的模型风洞试验从此在设计中成为必要的手段。

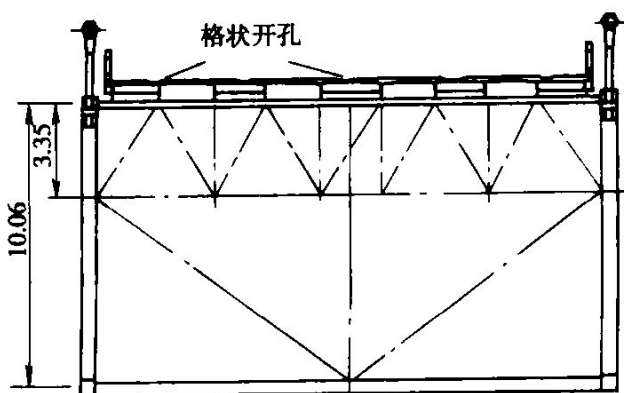


图 1-3 塔科马新桥加劲梁的横截面(m)

50 年代中,美国在克服了风灾挫折后又重整旗鼓再度致力于修建大跨度悬索桥。1951 年首先于威明登建成主跨为 655m 的特拉华纪念桥(Delaware Memorial Br.)。1957 年又建成主跨为 1158m 的麦基纳克(Mackinac)湖口大桥和主跨为 610m 的华尔特·惠特曼桥(Walt—Whiteman Br.)。除此之外,还先后在 1951 年和 1955 年建成两座跨度为 610m 和 555m 的煤气管道悬索桥。

在吸取塔科马老桥的痛苦经验教训的同时,美国还重新检查了一些在 30 年代所建悬索桥的抗风能力。为了提高安全度,将加劲桁梁的高跨比与宽跨比分别为 $1/68$ 与 $1/47$ 的金门大桥的横联作适当加固(增加了下弦平面内的联结系),还将市朗克斯·惠特斯登桥的高跨比仅为 $1/200$ 的加劲钢板梁改造成 $1/92$ 的钢桁梁。

以上的重建、加固与新建(包括出现一座跨度大于千米的麦基纳克桥)形成了悬索桥复苏的局面。

四、20 世纪 60 年代欧美的悬索桥——第二次发展高峰

进入 60 年代后,美国首先在 1960 年于纽约的圣·劳伦斯河上建成跨度 655m 的 Seaway Skyway 桥,1961 年接着在纽约的东河上建成跨度为 549m 的 Throgs—Neck 桥,1964 年又再显身

手于纽约海湾建成主跨超过金门大桥 $18\text{m}(1280\text{m} + 18\text{m} = 1298\text{m})$ 的维拉扎诺海峡桥 (Verrazano Narrows Br.), 此桥的世界桥梁第一大跨度的记录曾保持了 17 年之久, 一直到 1981 年才被英国的主跨为 1410m 的恒伯尔 (Humber) 桥打破。1968 年再建了特拉华纪念桥 (跨度与老桥相同, 仍为 655m)。

欧洲最早的大跨度悬索桥是 60 年代前夕 (1959 年) 法国建成的主跨为 608m 的坦卡维尔桥 (Tancarville Br.)。其后, 英国在 1964 年与 1966 年先后在苏格兰和布里斯托尔 (Bristol) 建成主跨为 1006m 的福斯 (Forth) 公路桥与主跨为 988m 的首次采用钢箱梁与斜吊索闻名于世的塞文 (Severn) 桥。葡萄牙于 1966 年也在其首都里斯本建成主跨为 1013m 的 4 月 25 日大桥。

以上这些悬索桥 (包括出现三座跨度大于千米的桥梁) 的建成形成第二次悬索桥发展高峰, 并以美国主跨为 1298m 的维拉扎诺桥和英国主跨 988m 的塞文桥为代表。前者为美国流派, 后者为新型的英国流派。

五、20 世纪 70 年代 ~ 80 年代的欧洲与日本的悬索桥——第三次发展高峰

在欧洲, 1970 年丹麦建成主跨为 600m 的小贝尔特 (Little Belt) 桥, 1973 年又在土耳其伊斯坦布尔建成主跨为 1074m 的博斯普鲁斯海峡第一大桥。到 1981 年英国建成当时世界第一大跨度 (1410m) 的恒伯尔桥, 并一直将此记录保持到 1998 年, 也达到 17 年之久。除此之外, 土耳其于 1988 年又建成主跨为 1090m 的博斯普鲁斯海峡第二大桥。

在日本, 首先经过修建三座悬索桥 (1962 年福冈的主跨为 367m 的若户桥、1973 年主跨为 712m 的关门桥以及 1977 年长崎的主跨为 465m 的平户桥) 的实践, 然后在 80 年代通过本州四国连络桥的建设, 修建了一系列的大跨度悬索桥。到 80 年代末为止, 在本四连络桥的初期建设中已经建成了 6 座大跨度的悬索桥。这 6 座悬索桥是位于尾道—今治线上的因岛大桥 (主跨 770m , 1983 年建成) 和大岛大桥 (主跨 560m , 1988 年建成), 位于神户—鸣门线上的大鸣门桥 (主跨 876m , 1985 年建成), 以及位于儿岛—坂出线上的下津井大桥 (主跨 940m , 1988 年建成), 南备赞大桥 (主跨 1100m , 1988 年建成) 和北备赞大桥 (主跨 990m , 1988 年建成)。

综上所述, 在 70 年代—80 年代共出现千米以上的大跨度悬索桥 4 座, 形成悬索桥发展史中的第三次高峰, 其代表是英国的恒伯尔桥 (跨度 1410m , 破记录) 与日本的南备赞大桥 (公铁合用的荷载规模与结构规模为世界第一, 包括主缆的直径达 1070mm)。

六、20 世纪 90 年代以亚洲为主的悬索桥——第四次发展高峰

进入 20 世纪 90 年代, 世界悬索桥的发展中心已从欧美移到亚洲。

首先是日本在本四连络桥的后斯建设中出现再度破跨度记录的神户—鸣门线上的主跨达 1990m 的明石海峡大桥 (1998 年建成), 以及尾道—今治线上的来岛一桥、二桥与三桥, 其中来岛二桥与三桥的主跨都超过千米, 分别为 1020m 与 1030m 。此外, 在日本的东京湾上与北海道已分别建成主跨为 570m 的彩虹 (Rainbow) 桥与主跨为 720m 的白鸟大桥, 其中彩虹桥的荷载规模 (双层桥面, 共有 8 个高速车道与双线导轨式交通车) 与结构规模 (主缆直径 771mm , 相当于千米大跨度桥) 都是相当巨大的。

其次是从 20 世纪 90 年代初开始, 中国也进入发展悬索桥的队伍之中。20 世纪末建成的主跨为 1385m 的江阴长江大桥与 1998 年建成的主跨为 1377m 的香港青马大桥分别已插入世界大跨度桥梁序列中的第四位与第五位。

中国除了上述两座跨度大于千米的悬索桥之外, 已经在 90 年代中建成主跨为 648m 的厦

门海沧大桥、主跨为 900m 的西陵长江大桥、888m 的广东虎门大桥及 452m 的广东汕头海湾大桥;正在修建中的尚有主跨为 960m 的湖北宜昌长江大桥与重庆市主跨为 612m 的鹅公岩长江大桥,后者除初期开通城市道路交通之外,还计划在后期要增加双线地铁交通。

除亚洲外,90 年代在欧洲也建成两座跨度为千米以上的悬索桥,其中一座为主跨 1624m 仅次于日本明石海峡大桥 1990m 的丹麦大贝尔特(Great—Belt)东桥,另一座为原计划在 1998 年~1999 年建成的瑞典的主跨为 1210m 的高海岸桥(Hoga Kursten Br.),已于 1997 年底之前建成。另外,在挪威还有一座主缆组成形式非常独特的露索式(Open—Bundle Type)吉姆内桑特(Gjemnessund)桥,其主跨为 623m,每根主缆由 3 行 $\times$ 7 列 = 21 根封闭式锁口旋扭钢缆(Locked Coil Rope)组成,此桥已于 1992 年完成。

以上这些 90 年代修建的主要悬索桥,其中包括 7 座跨度超过千米的悬索桥(亚洲 5 座,欧洲 2 座),形成第四次发展高峰。

第三节 世界悬索桥现状

迄今为止世界上已出现三个悬索桥大国,即美国、英国与日本。全球各类悬索桥的总数已超过 100 座。

尽管美国在 60 年代之后修建新的悬索桥相对地比较少,但至今世界上拥有与修建悬索桥最多的仍是美国,跨度在 1000m 以上的已有 4 座,在 500m 以上的根据不完全的统计也达 15 座以上。美国在悬索桥的发展上花了将近 100 年的时间,技术上日趋成熟,为全球悬索桥的发展奠定了基础,并首先使悬索桥成为跨越千米以上的唯一桥型。美国除了在其本国拥有大量的悬索桥之外,还为其他许多国家修建了不少的悬索桥,如葡萄牙里斯本的 4 月 25 日桥、委内瑞拉的 Augostura 桥($L = 712\text{m}$, 1967)、加拿大的奎北克桥($L = 668\text{m}$, 1970)、扎伊尔的 President Mobutu Seseseko 桥($L = 520\text{m}$, 1982)等。

美国的悬索桥由于出现较早,在风格上有与其时代相适应的特色,主要有以下各点:

- (1)主缆采用 AS 法架设。
- (2)加劲梁采用非连续的钢桁梁,适应双层桥面,并在桥塔处设有伸缩缝。
- (3)桥塔采用铆接或栓接钢结构。
- (4)吊索采用竖直的 4 股骑跨式。
- (5)索夹分为左右两半,在其上下采用水平高强螺栓紧固。
- (6)鞍座采用大型铸钢件。
- (7)桥面板采用 RC 构件。

以上一些特点形成标准的美国流派悬索桥。

英国的悬索桥由于出现较晚些,故自成流派。其主要特点如下:

- (1)采用流线型扁平钢箱梁作为加劲梁。
- (2)早期采用铰接斜吊索,经塞文桥、博斯普鲁斯一桥以及恒伯尔桥的实践之后,在博斯普鲁斯二桥改回到垂直吊索。
- (3)索夹分为上下两半,在其两侧采用垂直于主缆的高强螺栓紧固。
- (4)桥塔采用焊接钢结构或钢筋混凝土结构。
- (5)钢桥面板采用沥青混合料铺装。

日本的悬索桥出现较晚,故也有其相应技术随时代进步的特色,其主要特点如下:

(1)采用预制平行钢丝索股架设主缆,简称 PWS 法。

(2)加劲梁主要沿袭美国流派的钢桁梁型式,但近年来对非双层桥面的梁体已转向采用流线型扁平钢箱梁。

(3)吊索沿袭美国流派的竖直 4 股骑跨式,不接受英国流派的斜吊索。

(4)桥塔采用钢结构,主要采用焊接方式。

(5)鞍座采用铸焊混合方式。

(6)采用钢桥面板沥青混合料铺装桥面。

(7)主缆索股与锚碇内钢构架采用预应力工艺锚固。

除了以上三个悬索桥大国之外,世界其他国家(包括我国)对加劲梁基本上都接受了英国流派的流线型扁平钢箱梁型式,对吊索仍保持美国流派的竖直形式。但按照各桥具体情况分别采用 4 股骑跨式或双股铰接方式;对主缆架设方法我国引用日本的 PWS 法,欧洲(特别是英国)仍喜爱用 AS 法;对鞍座与锚碇内的锚固方式都分别偏向采用铸焊混合结构与预应力锚固工艺。至于其他一些方式的不同点将在后面的有关章节与桥例中再细述。

以下对世界各国主要悬索桥的概要资料按跨度分类列示在表 1-1 中,供读者查考用。图 1-4 ~ 图 1-18 为 15 座跨度大于千米的悬索桥照片。

世界大跨度悬索桥的主要尺寸

表 1-1

No.	桥 名 (国家)	建成 年代	跨度(m) 边主跨比	主缆 间距(m) 垂跨比	悬吊 型式	主缆 $n \times \phi$ (mm)	桥塔 高度 (m)	加劲梁			荷载	钢材 (t)
								型式	高度 (m)	宽度 (m)		
1	明石海峡大桥 (日本)	1998	960 + 1991 + 960 0.51	35.5 1/10	3 跨 双铰	PWS 2×1120	297 (钢)	桁梁	14.00	35.50	公 6	缆 50500 梁 74400
2	大贝特东桥 (丹麦)	1998	535 + 1624 + 535 0.33	27.3 1/9	3 跨 连续	AS 2×827	(混凝土)	箱梁	4.00	31.00	公 4	
3	润扬长江大桥 (中国)	在建	470 + 1490 + 470 0.315	35.3 1/10	单跨 双铰	PWS 2×895	208 (混凝土)	箱梁	3.00	35.8	公 6	缆 21000 梁 21000
4	恒伯尔大桥 (英国)	1981	530 + 1410 + 280 0.376 0.20	22.0 1/12	3 跨 双铰	AS 2×684	155 (混凝土)	箱梁	4.50	22.00	公 4	缆 11000 梁 16000
5	江阴长江大桥 (中国)	1999	369 + 1385 + 309 0.27 0.22	32.5 1/10.5	单跨 双铰	PWS 2×870	197 (混凝土)	箱梁	3.00	33.10	公 6	缆 16800 梁 18000
6	香港青马大桥 (中国)	1998	355 + 1377 + 300 0.26 0.22	36.0 1/11	两跨 连续	AS 2×1100	206 (混凝土)	开空 箱梁	7.70	41.00	公 6 铁 2	缆 24700 梁 50000
7	维拉扎诺桥 (美国)	1964	370 + 1298 + 370 0.280	31.39 1/11.1	3 跨 双铰	AS 4×599	207 (钢)	桁梁	7.35	30.63	双层 桥面	131166
8	金门大桥 (美国)	1937	343 + 1280 + 343 0.27	27.43 1/8.94	3 跨 双铰	AS 2×924	210 (钢)	桁梁	7.62	27.43	公 6	83663
9	高海岸桥 (瑞典)	1997	317.5 + 1210 + 287.5 0.26 0.24	20.8 1/9.5	3 跨 连续	AS 2×640	180 (混凝土)	箱梁	4.00	22.00	公 4	缆 8000 梁 15000
10	麦基纳克桥 (美国)	1957	549 + 1158 + 549 0.44	20.73 1/10.8	3 跨 双铰	AS 2×622	157 (钢)	桁梁	11.58	20.73	公路	38018
11	南备赞大桥 (日本)	1988	274 + 1100 + 274 0.25	35.0 1/11	3 跨 连续	PWS 2×1070	181 (钢)	桁梁	13.00	30.00	公铁 双层	77900
12	博斯普鲁斯二桥 (土耳其)	1988	210 + 1090 + 210 0.19	33.8 1/12	单跨 双铰	AS 2×700	110.1 (钢)	箱梁	3.00	33.80	公 8	

续上表

No.	桥 名 (国家)	建成 年代	跨度(m) 边主跨比	主缆 间距(m) 垂跨比	悬吊 型式	主缆 $n \times \phi$ (mm)	桥塔 高度 (m)	加劲梁			荷载	钢材 (t)
								型式	高度 (m)	宽度 (m)		
13	博斯普鲁斯一桥 (土耳其)	1973	231 + 1074 + 255 0.22 0.24	28.0 1/11.8	单跨 双铰	AS 2 × 600	165 (钢)	箱梁	3.00	28.00	公 6	22000
14	乔治·华盛顿桥 (美国)	1931	186 + 1067 + 186 0.17	32.31 1/10.8	3 跨 双铰	AS 4 × 914	170 (钢)	桁梁	12.80	32.31	双层	101866 4 条主缆
15	来岛二桥 (日本)	1999	250 + 1020 + 245 0.24	27.0 1/10.5	两跨 连续	PWS 2 × 650	173.5 (钢)	箱梁	4.30	约 30	公 4	缆 6847 梁 20866
16	来岛三桥 (日本)	1999	260 + 1030 + 280 0.27	27.0 1/10	单跨 双铰	PWS 2 × 640	183.9 (钢)	箱梁	4.30	约 30	公 4	缆 6754 梁 16871
17	4 月 25 日桥 (葡萄牙)	1966	483 + 1013 + 483 0.474	23.5 1/9.5	多跨 连续	AS 2 × 586	181 (钢)	桁梁	10.65	21.00	公铁	38030
18	福斯公路桥 (英国)	1964	409 + 1006 + 409 0.407	23.77 1/10.5	3 跨 双铰	AS 2 × 603	149 (钢)	桁梁	8.37	23.77	公 4	30480
19	北备赞桥 (日本)	1988	274 + 990 + 274 0.28	35.0 1/11	3 跨 连续	PWS 2 × 1006	170 (钢)	桁梁	13.00	30.00	公铁	69000
20	塞文桥 (英国)	1966	305 + 988 + 305 0.31	22.86 1/12	3 跨 双铰	AS 2 × 483	122 (钢)	箱梁	3.05	22.86	公 4	18796
21	宜昌长江大桥 (中国)	在建	246 + 960 + 246 0.26	24.4 1/10	单跨 双铰	PWS 2 × 640	142.3 (混凝土)	箱梁	3.00	24.40	公 4	缆 6670 梁 10390
22	下津井大桥 (日本)	1988	130 + 940 + 130 0.32	35.0 1/10	单跨 带伸臂	AS 2 × 956	137 (钢)	桁梁	13.00	30.00	双层 公铁	59200
23	西陵长江大桥 (中国)	1995	225 + 900 + 255 0.25 0.28	20.0 1/10.5	单跨 双铰	PWS 2 × 550	120 (混凝土)	箱梁	3.00	20.60	公 4	缆 4000 梁 8000
24	虎门大桥 (中国)	1997	320 + 888 + 348.5 0.34 0.39	33.0 1/10.5	单跨 双铰	PWS 2 × 687	147.8 (混凝土)	箱梁	3.00	35.60	公 6	缆 7611 梁 11538
25	大鸣门桥 (日本)	1985	330 + 876 + 330 0.38	34.0 1/10.5	3 跨 双铰	PWS 2 × 840	126 (钢)	桁梁	12.50	34.00	公 6	53600
26	塔科马新桥 (美国)	1950	335 + 853 + 335 0.29	18.29 1/12.1	3 跨 双铰	AS 2 × 514	142 (钢)	桁梁	10.06	18.29	公 4	23473
27	ASKOYBRUA (挪威)	1993	173 + 850 + 173 0.204	13.75 1/10.6	单跨 双铰	2 × 21 × 99	152 (混凝土)	箱梁	3.00	15.22	公 2	
28	因岛大桥 (日本)	1983	250 + 770 + 250 0.33	26.0 1/10	3 跨 双铰	PWS 2 × 626	136 (钢)	桁梁	9.00	26.00	公 4	26600
29	白鸟大桥 (日本)	1996	330 + 720 + 330 0.46	18.0 1/10.5	3 跨 双铰	PWS 2 × 472	129.4 (钢)	箱梁	2.50	23.00	公 4	塔 5097 缆 3559 梁 13036

续上表

No.	桥 名 (国家)	建成 年代	跨度(m) 边主跨比	主缆 间距(m) 垂跨比	悬吊 型式	主缆 $n \times \phi$ (mm)	桥塔 高度 (m)	加劲梁			荷载	钢材 (t)
								型式	高度 (m)	宽度 (m)		
30	关门大桥 (日本)	1973	178 + 712 + 178 0.25	0.29	3 跨 双铰	PWS 2 × 667	134 (钢)	桁梁	9.00	29.00		29000
31	安哥斯吐拉 (委内瑞拉)	1967	280 + 712 + 280 0.39	17.6	3 跨 双铰	AS 2 × 470	119 (钢)	桁梁	7.62	17.60		20034
32	旧金山奥克兰海 湾桥(美国)	1936	2 × (354 + 704 + 354) 0.50	20.12	3 跨 双铰	AS	140 (钢)	桁梁	9.14	20.12		36512
33	布朗克斯·惠特 斯登(美国)	1939	224 + 701 + 224 0.32	22.6	3 跨 双铰	AS 2 × 559	114 (钢)	I 梁 + 桁梁	7.62	22.60		28395
34	Stordabrua (挪威)	2001	+ 677 + 边跨曲梁	11.7 1/10	单跨 双铰	2 × 323	约 90	箱梁	2.70	约 12.7		
35	Pierre-La-Porte (加拿大)	1970	188 + 668 + 188 0.28		3 跨 双铰	AS 2 × 622	106 (钢)	桁梁	8.53			12000
36	特拉华纪念桥 (美国)	1951 (老)	229 + 655 + 229 0.35	18.51	3 跨 双铰	AS 2 × 502	134 (钢)	桁梁	6.10	18.51		43000
37	特拉华纪念桥 (美国)	1968 (新)	229 + 655 + 229 0.36	18.51	3 跨 双铰	AS 2 × 502	134 (钢)	桁梁	6.10	18.51		
38	海沧大桥 (中国)	1999	230 + 648 + 230 0.35	34.0 1/10.5	3 跨 连续	PWS 2 × 570	128 (混凝土)	箱梁	3.00	36.60	公 6	缆 4200 梁 15670
39	华尔特·惠特曼 (美国)	1957	235 + 610 + 239 0.39	27.41	3 跨 双铰	AS 2 × 387	105 (钢)	桁梁	5.49	27.41		23518
40	坦尔维尔桥 (法国)	1959	176 + 608 + 176 0.27	12.5	3 跨 连续	旋扭钢缆 2 × 564	123 (混凝土)	桁梁	6.00	12.50	公 2	16212
41	小贝尔特桥 (丹麦)	1970	240 + 600 + 240 0.4	28.1	3 跨 双铰	旋扭钢缆 2 × 580	118 (混凝土)	箱梁	3.00	33.00	公路	17900
42	来岛一桥 (日本)	1999	140 + 600 + 170 0.23 0.28	27.0	3 跨 连续	PWS 2 × 43	149 (钢)	箱梁	2.50	约 30	公 4	缆 1993 梁 13995
43	鹅公岩长江大桥 (中国)	在建	212 + 600 + 212 0.35	29.0 1/10	3 跨 连续	PWS 2 × 57	混凝土	箱梁	3.00	32.5	公 4	
44	彩虹桥 (日本)	1993	114 + 570 + 114 0.2	29.0 1/10.2	3 跨 双铰	PWS 2 × 762	119 (钢)	桁梁	8.90	29.00	双层	46141
45	大使桥 (美国)	1929	236 + 564 + 249	20.42	单跨 双铰	AS 2 × 489	110 (钢)	桁梁	6.71	20.42		
46	大岛大桥 (日本)	1988	140 + 560 + 140 0.25	22.5 1/10.1	单跨 双铰	PWS 2 × 465	90 (钢)	箱梁	2.20	23.70	公 4	10500

续上表

No.	桥 名 (国家)	建成 年代	跨度(m) 边主跨比	主缆 间距(m) 垂跨比	悬吊 型式	主缆 $n \times \phi$ (mm)	桥塔 高度 (m)	加劲梁			荷载	钢材 (t)
								型式	高度 (m)	宽度 (m)		
47	Throgs-neek (美国)	1961	169 + 549 + 169	28.22	3 跨 双铰	AS 2×575	109 (钢)	桁梁	5.18	28.22		
48	本杰明·富兰克林 (美国)	1926	218 + 533 + 218	27.13	3 跨 双铰	AS 2×762	116 (钢)	桁梁	8.53	27.13		
49	President Mobuto- Seseseke(扎伊尔)	1982	91 + 520 + 91		单跨 双铰	PWS 2×471	96 (钢)	桁梁	9.0	14.0		13120
50	EMERICH (德国)	1965	152 + 500 + 152		3 跨 连续	LCR $2 \times$		桁梁	3.5	16.8		9900

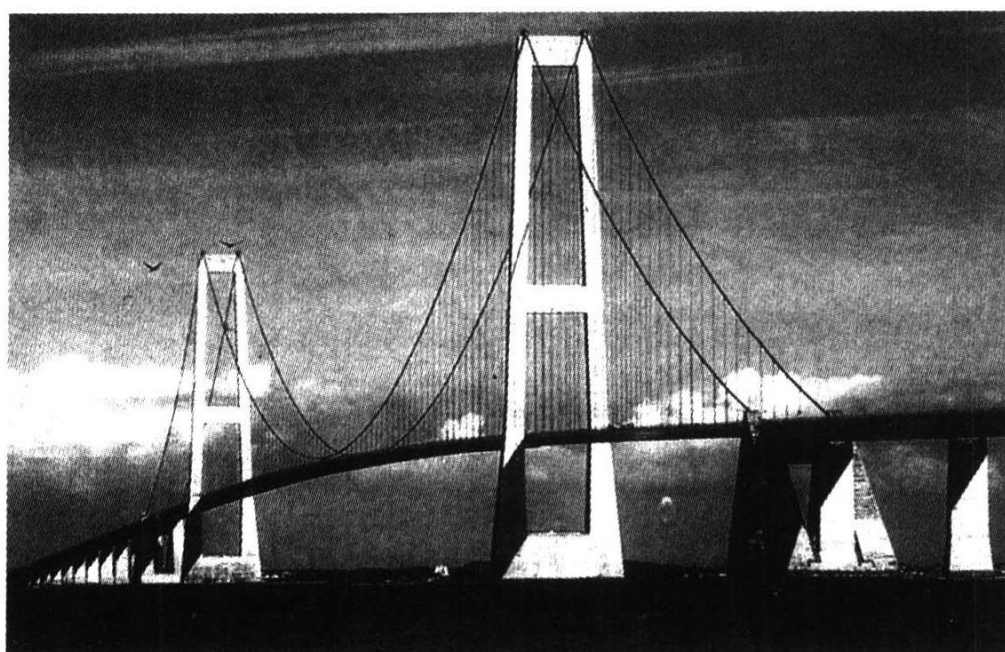


图 1-4 丹麦的大贝尔特东桥(1624m)

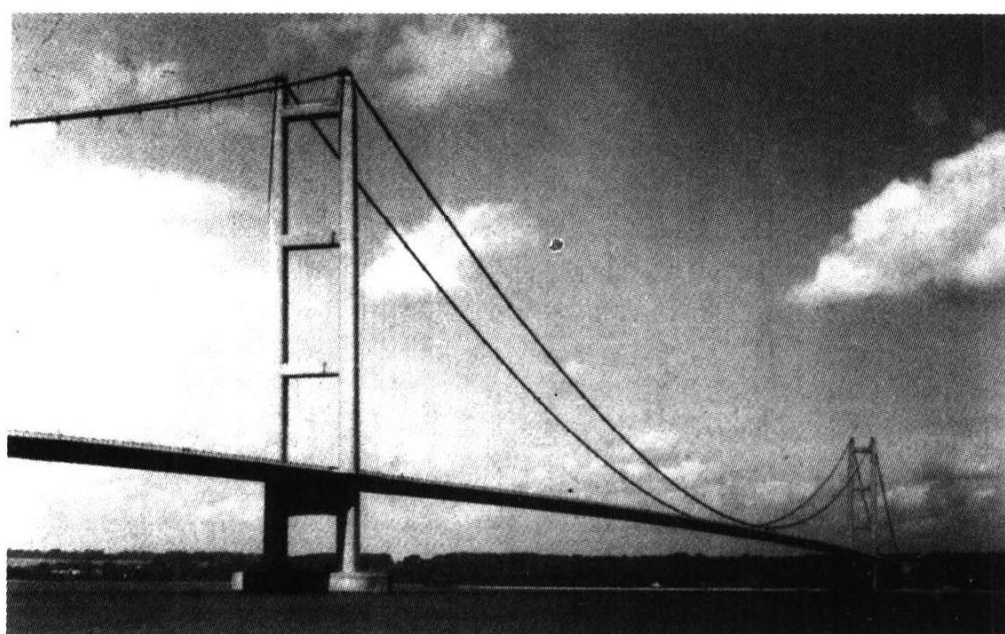


图 1-5 英国的恒伯尔桥(1410m)



图 1-6 中国的江阴长江大桥(1385m)

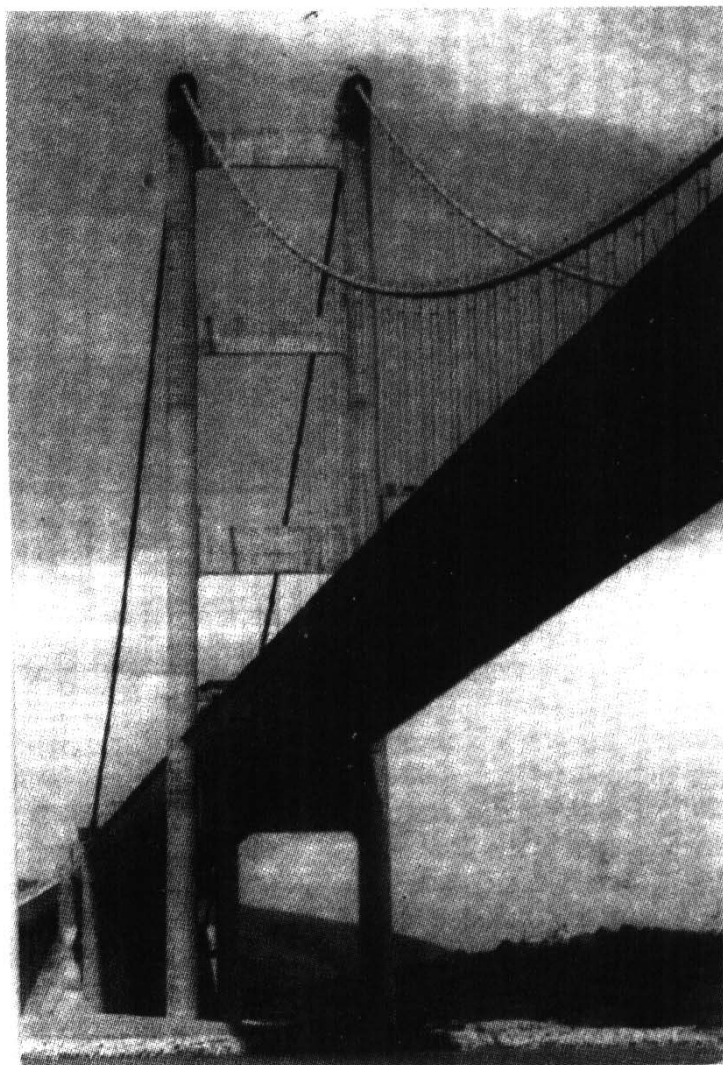


图 1-7 中国香港的青马大桥(1377m)

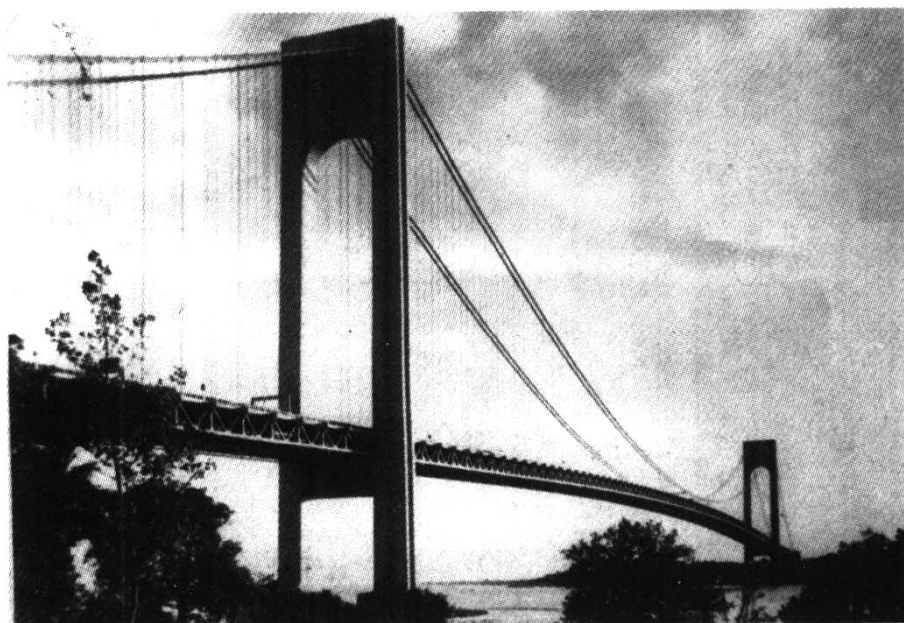


图 1-8 美国的维拉扎诺桥(1298m)



图 1-9 美国的金门大桥(1280m)



图 1-10 瑞典的高海岸大桥(1210m)