

大跨度桥梁抗风丛书

Wind Resistance of
Long Span Suspension Bridges

大跨度

悬索桥抗风

葛耀君 著



人民交通出版社
China Communications Press

大跨度桥梁抗风丛书

大跨度悬索桥抗风

葛耀君 著

人民交通

序

悬索桥是各类桥梁中跨越能力最大的一种桥型,在现代斜拉桥问世之前,对于跨度 500m 以上的大桥,悬索桥是唯一可选用的桥型。近半个世纪以来,斜拉桥的跨度有了突飞猛进的发展,从最初的一百余米到苏通大桥和香港昂船洲大桥已突破了千米跨度。然而,研究表明:由于斜拉桥拉索垂度的非线性效应和主梁中承受的轴压力的二阶效应,跨度超过 1 400m 的斜拉桥的结构力学性能将急剧弱化,其经济指标也不断下降。因此,在 1 400~5 000m 的跨度范围内,悬索桥仍是最经济合理的首选桥型。

大跨度悬索桥是一种柔性体系,对风的作用比较敏感,因而在悬索桥的设计中,抗风问题往往是最重要的控制因素,必须在概念设计阶段给予认真考虑和妥善解决。

本书是近十年来葛耀君教授及其团队对大跨度悬索桥抗风理论和设计实践的全面总结,内容涉及悬索桥的各种抗风性能,如静风稳定性、各类风致振动以及桥面风环境的分析理论、控制措施和概率性评价方法等,也包括风洞试验和实测结果的对比和验证。书中还介绍了国际风工程界对悬索桥抗风研究的最新进展。

我国浙闽沿海有数以千计的海岛,其中人口较多的主要岛屿将会和大陆用桥梁连接起来,以利于经济的发展和繁荣,不少跨海连岛工程已在规划中,其中也包括琼州海峡和台湾海峡等巨型工程。我相信本书的出版将对可能采用大跨度悬索桥方案的抗风设计提供理论和方法的参考,并为中国未来的跨海连岛工程建设和从桥梁大国迈向桥梁强国作出重要贡献。

同济大学土木工程学院顾问院长
土木工程防灾国家重点实验室名誉主任

项海帆

二〇一一年六月

前言

悬索桥或吊桥最早称为笮桥,最先的记载有四川《盐源县志》:“周赧王三十年(公元前 285 年)秦置蜀守,因取笮,笮始见于书”。笮桥后称绳桥、絙桥、索桥等。目前有确凿历史记载的最古老的悬索桥是我国陕西省汉中地区的樊河铁索桥,建于公元前 206 年,而国外记载最早的悬索桥到 18 世纪中期才出现在英国。在悬索桥、斜拉桥、拱桥和梁桥四种基本桥型中,悬索桥是唯一一种起源于中国的桥梁。

悬索桥是四种基本桥型中跨越能力最大的桥梁。在悬索桥流传到国外之前的 18 世纪初,我国已经建成了跨度超过 100m 的四川泸定桥,这种古代悬索桥的主要特征是以铁链为主要承重构件。近代悬索桥改用钢丝编制主缆为主要承重构件,经过两个多世纪的发展,悬索桥的跨度已突破了 500m。以 1931 年建成的 George Washington 桥为代表的现代悬索桥,将跨度提高到了 1 000m 以上,并在之后不到 70 年的时间里 5 次刷新跨度纪录,将跨度增长到 1 991m,这主要得益于多索股主缆方便施工。可以预计,在不久的将来,将会出现 3 000m,甚至 5 000m 跨度的悬索桥。

随着跨度的不断增长,悬索桥结构变得越来越轻、越来越柔、越来越容易振动,特别是风引起的结构振动。1940 年秋天,美国华盛顿州 853m 跨度的 Tacoma Narrows 桥在 8 级大风作用下,发生强烈的振动而坍塌,揭开了悬索桥抗风研究的历史。70 多年的大跨度悬索桥抗风研究表明:尽管 800 多米跨度的悬索桥发生风毁,但如果采用合理的桁架梁或闭口箱梁等加劲梁,悬索桥不需要附加抗风措施的跨越能力应该可以达到 1 500m 左右,当然需要进行必要的抗风设计研究;接近或超过这一跨度时,设计师就需要主动考虑采用合适的抗风措施来改善结构抗风性能,包括静风稳定性、颤振稳定性、涡振性能、抖振性能,甚至桥面行车性能等;为了满足悬索桥跨度的较大增长,譬如 3 000m 或 5 000m,就必须专门研究适合于大跨度悬索桥结构的加劲梁形式及其抗风安全性,特别是颤振稳定性。

本书是在国内外现有风工程和桥梁抗风研究基础上编著的专门针对大跨度悬索桥抗风的专著,全书共分十二章。第一章介绍悬索桥跨度的演变历史,由此引出大跨度悬索桥抗风的研究背景;第二章从工程应用的角度介绍了目前已经形成的悬索桥抗风设计原则;第三章介绍大跨度悬索桥所处的地球表面的自然风环境——边界层风特性及其在风洞试验中的模拟方法,其中“第六节主动方式风特性模拟”是目前最新的研究进展;第四章介绍已经探明的悬索桥风致振动形式、设计研究方法、有效控制措施等;第五章介绍以提高桥梁空气动力性能为目的桥梁断面气动选型,采用的是非传统风洞试验的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)方法,即确定性离散涡方法和格子玻尔兹曼方法,不仅针对加劲梁断面而且还包含了桥塔断面;第六章介绍静风作用下加劲梁的扭转发散理论分析和风洞试验方法,其中“第四节考虑紊流影响的静风稳定性分析”和“第五节静风失稳概率性评价”都是目前最新的研究进展;第七章介绍悬索桥结构动力特性分析的解析方法和数值方法,并介绍典型悬索桥的动力特性分析结果和实测结果;第八章介绍悬索桥颤振分析方法和控制措施,并对悬索桥施工阶段的动力性能和颤振性能进行了分析,其中“第五节分体式箱梁颤振性能”是目前最新的研究进展;第九章介绍悬索桥,特别是分体式钢箱梁悬索桥的涡激共振性能及其控制方法,其中“第

四节涡振控制措施研究”和“第五节现场观察与实测”是目前最新的研究进展;第十章主要介绍悬索桥抖振分析方法和风洞试验方法,其中“第三节风速与气动力相关性”和日本宫崎大学主动紊流风洞试验结果都是目前最新的研究进展;第十一章介绍桥面行车风环境及其改善方法,比较系统地阐述了桥面行车风环境的标准确定、研究方法、改善措施和实际效果等;第十二章介绍为了适应跨度不断增长需求的极限跨度悬索桥的抗风安全性能及其有效改善措施,并预测基于静风稳定性和颤振稳定性的悬索桥极限跨度,反映了目前在悬索桥抗风极限跨度研究中的最新研究进展。

本书由葛耀君负责确定各章节内容、制订全书大纲,并且编写了第一至第四章、第六章和第十二章的内容,学科组成员分工合作编写了其他章节的内容。其中,第五章由曹丰产编写,第七章的第二、第三和第四节由杨詠昕编写,第八章的第一、第三和第四节由杨詠昕编写,第九章的第一、第二和第四节由曹丰产编写,第十章由赵林编写,第十一章的第二至第五节由曹丰产编写,其余内容仍由葛耀君编写。另外,桥梁抗风研究室的博士生邵亚会参与了部分初稿的准备工作,部分内容直接来自于邵亚会、张志田、周立、陈晓冬、刘天成、张伟、周小洁、汪正华、周玉芬等人的博士或硕士学位论文,博士生刘十一参与了各个章节的排版和校核工作。

本书是近十年来同济大学桥梁抗风研究团队在大跨度悬索桥抗风理论和实践方面的专项研究总结,主要内容来自于国内外公开发表的论文和学位论文以及基于舟山西堠门大桥的国家科技支撑计划项目课题二——“跨海特大跨径钢箱梁悬索桥抗风关键技术研究”的研究报告,希望能对读者有所裨益。错误和不当之处还望各位同仁批评指正。

同济大学

葛耀君

二〇一一年六月

目 录

第一章 悬索桥跨径演变	1
第一节 悬索桥起源.....	1
第二节 大跨径悬索桥.....	5
第三节 超大跨径悬索桥规划.....	9
本章参考文献	15
第二章 悬索桥抗风设计概念	16
第一节 风与桥梁抗风	16
第二节 减小静风荷载	20
第三节 抑制风致振动	24
第四节 风振控制措施	28
本章参考文献	31
第三章 边界层风特性及其模拟	32
第一节 平均风空间特性	32
第二节 平均风时间特性	39
第三节 脉动风空间特性	48
第四节 脉动风时间特性	49
第五节 被动方式风特性模拟	54
第六节 主动方式风特性模拟	59
本章参考文献	67
第四章 悬索桥风振基本理论	75
第一节 空气动力作用	75
第二节 抗风稳定性问题	76
第三节 抗风强度和刚度问题	85
第四节 抗风疲劳问题	97
第五节 抗风舒适度问题.....	101
本章参考文献.....	105
第五章 桥梁断面气动选型数值方法	110
第一节 桥梁断面气动性能研究.....	110
第二节 基于任意欧拉-拉格朗日方程的有限单元法	112
第三节 无网格的确定性离散涡方法.....	116
第四节 基于分子运动的格子玻尔兹曼方法.....	123
第五节 加劲梁断面气动选型.....	133
第六节 桥塔断面气动选型.....	140
第七节 加劲梁表面风压数值分析与实测对比.....	147
第八节 桥塔表面风压数值分析与实测对比.....	151

第九节 桥梁断面气动选型数值分析软件开发·····	154
本章参考文献·····	157
第六章 静风稳定性分析与评价·····	160
第一节 桥梁静风稳定性问题·····	160
第二节 二维线性扭转发散分析·····	162
第三节 三维非线性静风稳定性分析·····	170
第四节 考虑湍流影响的静风稳定性分析·····	180
第五节 静风失稳概率性评价·····	197
本章参考文献·····	202
第七章 悬索桥结构动力特性·····	204
第一节 基频估算公式·····	204
第二节 有限元动力特性分析·····	210
第三节 悬索桥动力特性实测·····	224
第四节 典型悬索桥动力特性·····	237
第五节 悬索桥结构阻尼比·····	251
本章参考文献·····	253
第八章 悬索桥颤振稳定性及其控制·····	256
第一节 二维桥梁颤振分析·····	256
第二节 三维桥梁颤振分析·····	269
第三节 加劲梁断面颤振性能·····	293
第四节 气动控制措施效果·····	300
第五节 分体式箱梁颤振性能·····	309
第六节 施工阶段颤振性能·····	317
本章参考文献·····	326
第九章 悬索桥涡激共振性能及其控制·····	332
第一节 旋涡与涡激共振·····	332
第二节 涡激力与涡振振幅·····	335
第三节 分体式箱梁涡振风洞试验·····	338
第四节 涡振控制措施研究·····	347
第五节 现场观察与实测·····	351
本章参考文献·····	354
第十章 悬索桥抖振分析与风洞试验·····	356
第一节 桥梁风致抖振响应分析·····	356
第二节 桥梁断面气动导纳·····	357
第三节 风速与气动力相关性·····	378
第四节 抖振时域分析方法·····	391
第五节 全桥气弹模型风洞试验验证·····	416
本章参考文献·····	423
第十一章 桥面行车风环境及其改善·····	428
第一节 桥面侧向风速·····	428

第二节	侧风控制措施·····	431
第三节	风障对结构抗风性能的影响·····	441
第四节	风障效果现场实测·····	444
第五节	侧风行车安全分析·····	453
第六节	侧风行车安全概率性评价·····	462
第七节	侧风行车安全限速标准·····	468
	本章参考文献·····	470
第十二章	悬索桥抗风极限跨径·····	471
第一节	极限跨径概念·····	471
第二节	主缆静力和动力性能·····	479
第三节	加劲梁抗风性能·····	489
第四节	基于静风稳定性的极限跨径·····	498
第五节	基于颤振稳定性的极限跨径·····	518
第六节	钢箱加劲梁抗风稳定性·····	530
	本章参考文献·····	544

第一章 悬索桥跨径演变

第一节 悬索桥起源

一、早期竹藤索桥

中国早在新石器时代(公元前 8000~5000 年)农耕聚落就已形成。据多处考古正式挖掘发现,聚落有居住区、窑场和墓地三类遗存。居住区位于中央位置,外环为深沟,防止野兽侵扰,深沟上安有桥梁式的跨空构件。因此,从众多的考古材料及丰硕的多方研究成果可以推断出,中国远古时代的桥梁应该出现于新石器时代的中晚期(公元前 5000~2000 年)。

根据国家“夏商周断代工程”的研究成果,可以把夏(公元前 2000~1600 年)、商(公元前 1600~1000 年)和西周(公元前 1000~771 年)共 1 230 年的时间作为中国古桥的创始阶段。这一时期是中国奴隶制社会产生、发展并孕育着危机的时期,是古代中国文明开化时代的开端。商朝开始了发达的青铜时代,由于建造都城、军事运输、农业水利等的需要,桥梁技术得以形成。据记载,这一时期出现了多跨木梁木柱桥、浮桥、城门悬桥、水闸桥等。

从东周(公元前 770~256 年)到秦朝(公元前 221~206 年)共 564 年是古代桥梁的发展阶段。在这个时期中,奴隶制社会向封建社会过渡,中国社会也从王权国家走向中央集权制的封建国家。科学技术出现了第一高峰,工、商、士、农等社会阶层诞生了,良匠、良工受到尊重。铁器取代了铜器,标志着生产力取得了突飞猛进的发展。战争成了时代的主题。从过去争奴隶、分胜负进入了争地盘、抢资源、夺人才的时期,成为推动社会发展的强大动力。在这个时期,索桥,即后来的悬索桥这一新的结构形式诞生了。

索桥最早称笮桥,最早的记载有四川《盐源县志》:“周赧王三十年(公元前 285 年)秦置蜀守,因取笮,笮始见于书”。笮桥后称绳桥、絙桥。索桥始建于东周,至两汉时期(公元前 206 年~公元 220 年)在云南、贵州、四川、甘肃、青海、新疆等地的深谷悬崖地区得到了普遍运用,在西域的开拓与屯田戍边等方面发挥了重要作用。从西汉张骞两次出使西域开辟丝绸之路、霍去病两出河西走廊战败匈奴、赵充国河湟羌中道屯田建设,到东汉班超出使西域复通丝绸之路、甘英出使大秦并延伸至波斯湾、班勇继父班超之业经营西域,在丝绸之路通达的三百多年中,修建了难以计数的索桥,不少索桥屡毁屡修。

地以笮名,水以绳名,都和索桥密切相关。《史记·司马相如传》记:“通灵关道(今雅州),桥孙水以通邛都。”唐《元和郡县图志》记:“台登湖(今四川冕宁县西)胡浪山下,有司马相如定西(南)夷桥。桥孙水以通邛笮,即此水也。”可见,该索桥建于汉武帝元鼎六年(公元前 111 年),至唐代还存在。早就有“中国有绳州,西域有悬度”之说,自西汉起有了用绳索的悬度记载,绳州是四川沿岷江的茂汶羌族自治县,“取桃关之路,以绳为桥”。

索桥起源于中国,并在我国一直沿用至今,已经有 2 300 多年的历史。最早的索桥是以竹、藤、麻等天然材料制索的,因此跨径都不是很大,一般在 60m 左右,随着天然材料制索水平的提高,竹藤索桥的跨度也有了进一步的增长。据记载,我国古代最大跨度的竹藤索桥是跨度



图 1.1-1 灌县安澜桥

达到 140m 的四川盐源县的打冲河桥,该桥是用竹子制索的,也称竹索桥,建于清代。始建于北宋淳化元年(990 年)的四川灌县的安澜桥是世界上第一座多跨(并列)索桥,安澜桥长 340m,全桥共分 8 孔,最大一孔跨径达 61m;全桥用细竹篾编成粗 5 寸的竹索 24 根,每隔 1~2m 有一个由横木梁与两侧的竖直木条(杆)组成的 U 形木框;自清嘉庆八年“仿旧制”重建后的二百余年中,经无数次的修缮已用钢丝绳代替了竹索,钢筋混凝土柱代替了木柱(图1.1-1)。

二、中国古代铁索桥

由天然材料制索过渡到铸铁材料制索并没有经历太长的时间,最早的铁索桥上的索是用铁链制成的,而链始见于青铜器时代,从铜链到铁链的材料过渡,为铁索桥提供了形式、材料与技术上的可能性。2007 年年底在对咸阳战国时期(公元前 256~221 年)古墓的第三次发掘中,发现了六马一车墓坑和圈马铁链。中国最早的铁索桥可能是陕西留坝县樊河桥、云南景东县兰津桥或四川保山县霁虹桥。

据《史记》记载,西汉元年(公元前 206 年)汉高祖刘邦入汉中,拜韩信为大将,以曹参、樊哙等为前队,由樊哙修建陕西留坝县马道镇上跨褒水支流的桥梁——樊河上的樊河铁索桥(图 1.1-2)。樊河今名西河,又名寒溪、韩溪、马道河。该桥始建时是否已经采用铁索尚无定论。

据明朝《南诏野史》记载:“兰津桥,景东厅城西沧江两岸,峭壁飞泉,俯映江水,地势绝险,以铁索系南北为桥,东汉明帝(公元 58~76 年)时造”。长期以来,云南景东县兰津桥被认为是世界上最早的一座铁索桥(图 1.1-3),李约瑟(Joseph Needham)博士在其《中国科学技术史》中对此有记述,并标有“桥图”,说明为东汉时所建。该桥历史上是否存在尚有争议。



图 1.1-2 陕西留坝县樊河桥(1942 年摄)



图 1.1-3 云南景东县兰津桥

据唐朝樊绰《蛮书十卷》记：“澜沧江南流入海，龙尾城西第七驿有桥，即永昌也。两岸高险，水迅激，横巨大竹索为梁，上布箬，箬上实板，仍通以竹屋盖桥。其穿索石孔，孔明所凿也，昔诸葛征永昌，于此筑城”。说明四川保山县霁虹桥在三国时已建成竹索桥。明朝成化年(1475年)建成铁索桥，总长 106m，净跨 60m，桥宽 3.7m，全桥共 18 根铁索，其中承重底索 16 根，扶栏索每边一根(图 1.1-4)。

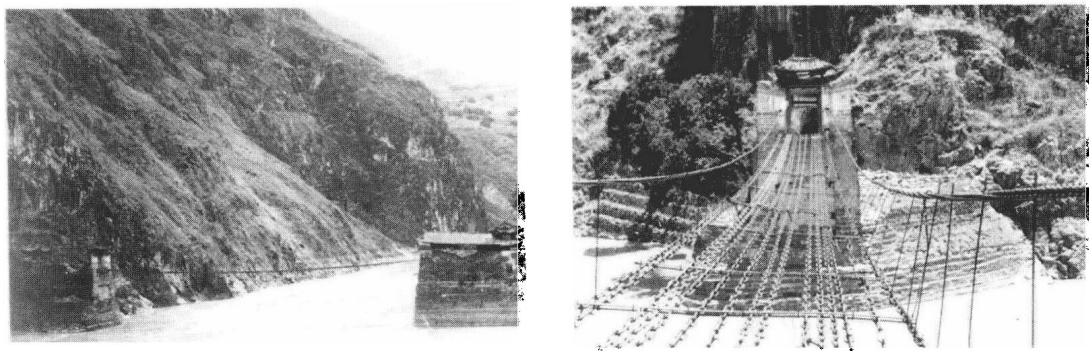


图 1.1-4 四川保山县霁虹桥(1980 年摄)

据记载，我国古代最大跨度的铁索桥是 142m 的四川芦山县龙门桥(图 1.1-5)，该桥建于清朝光绪七年(公元 1881 年)。此外，比较著名的铁索桥还有建于清朝康熙四十四年(1705 年)的四川泸定县泸定桥，该桥净跨径 100m、净宽 2.8m(图 1.1-6)。

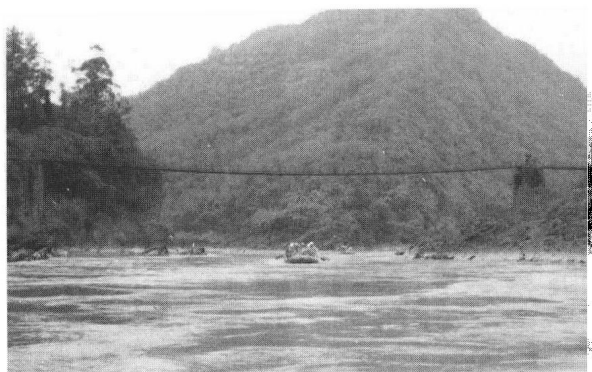


图 1.1-5 四川芦山县龙门桥

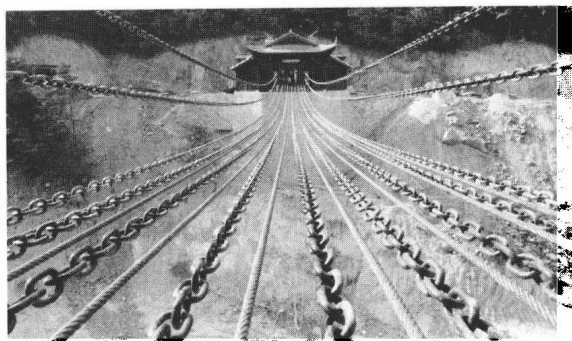


图 1.1-6 四川泸定县泸定桥

三、欧美近代悬索桥

欧洲从 1595 年开始提出了建造悬索桥的设想,1665 年徐霞客的《铁索桥记》详细描述了建于明朝崇祯四年(1631 年)的贵州安南县的北盘江铁索桥,1667 年法国传教士 Kircher 出版一本《中国奇迹览胜》,书中介绍了中国铁索桥。李约瑟博士曾经指出:这两本书直接启发了西方人建造铁索桥的尝试。

18 世纪中叶,欧美等国开始出现了用铁链制成的悬索桥,一般也称为古代悬索桥。据记载,最早的欧洲古代悬索桥是 1741 年在英国 Tees 河上建成的跨径 21.3m(70ft,1ft=0.3048m)的铁链式铁索桥,一般认为这是对中国古代铁索桥的一种直接模仿,并不很成功。1796 年,美国在西弗吉尼亚建成了第一座铁索桥,这座被称为 James Finley 的铁索桥,跨径也不大,但由于首次采用了吊杆悬吊水平桥面,被认为是近代悬索桥的雏形,并且在 1801 年获得了专利,这也许是铁索桥的第一项专利。此后,英国又分别在 1817 年和 1820 年建成了 Dryburgh Abbey 桥和联合大桥,后者跨度已经达到了 137m。法国在 1821 年建成了第一座铁索桥,德国和俄国也在 1824 年分别建成了第一座铁索桥。1826 年,英国建成了跨径达到 177m 的 Menai 桥(图 1.1-7),该桥是当时最大跨度的铁索桥,全桥由每段长 2.9m 的熟铁双眼杆装配起来形成的一对铁链来支撑。尽管铁链作为主要承重构件的跨越能力已经非常有限,但是 1864 年,英国还是建成了史上最大跨度的铁链悬索桥——Clifton 桥(图 1.1-8),该桥的跨度是 214m,锻铁打造的铁链强度与密度之比,只有现代缆索钢材的 1/5 左右。

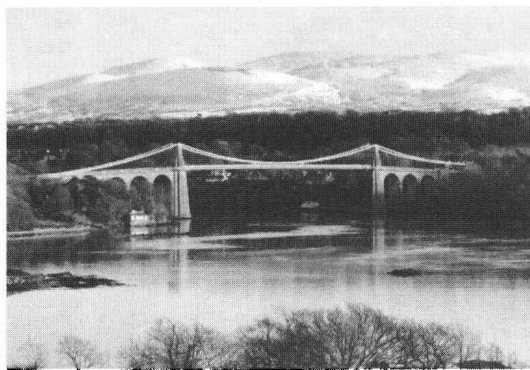


图 1.1-7 英国 Menai 海峡大桥

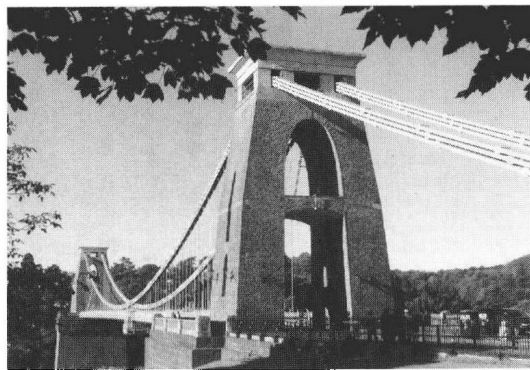


图 1.1-8 英国 Clifton 大桥

近代悬索桥则是以铁丝或钢丝作主缆索为标志的。1816 年,美国在费城用铁丝制成主缆索建成了第一座近代悬索桥——Schuylkill 瀑布人行桥,主跨达到 124m,从而揭开了近代悬索桥发展的序幕,也为美国悬索桥发展奠定了基础。尽管欧洲在大跨径悬索桥建设方面前期还有一定优势,例如瑞士 1834 年建成了当时最大跨径的悬索桥——跨径 237m 的 Grand Pont 桥,但是,美国先后在 1849 年、1866 年和 1869 年三度刷新了悬索桥跨径的世界记录——308m 的 Wheeling 桥、322m 的 John A. Roebling 桥和 384m 的 Niagara Clifton 桥,前者在 1854 年被狂风吹垮后又重建。此外,1855 年建成的 Niagara 瀑布桥的跨度虽然没有创造世界记录(图 1.1-9),只有 250m,但是它开创了两个先列,首座采用空中纺线法(Air Spinning)施工主缆的悬索桥和首座采用双层桥面承受铁路和公路荷载的悬索桥。1883 年,在美国纽约建成了跨

径接近于 500m 的悬索桥 Brooklyn 大桥(图 1.1-10),跨径达到了 486m,该桥具备了现代悬索桥的几乎全部优点,从而被称为是第一座现代悬索桥,并由此揭开了悬索桥跨径不断增长的激烈竞争,而在这一征程中,美国独领了 130 多年悬索桥跨径世界记录的风骚。

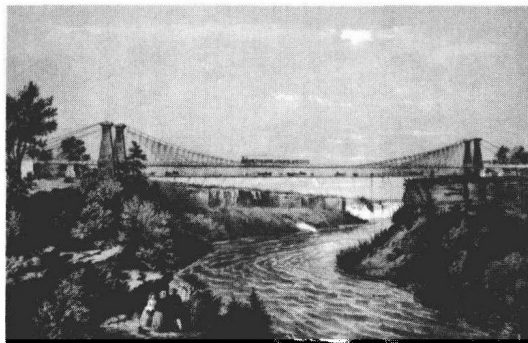


图 1.1-9 美国 Niagara 瀑布桥

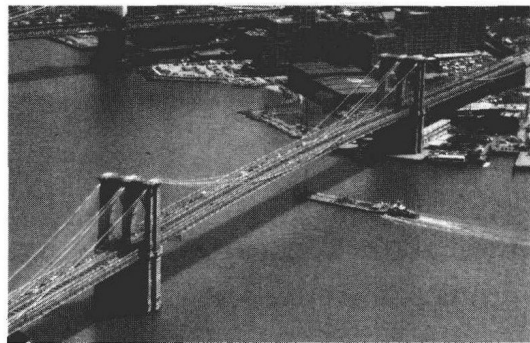


图 1.1-10 美国 Brooklyn 大桥

美国 Brooklyn 大桥的世界最大跨度悬索桥记录保持了 20 年,直到 1903 年跨径 488m 的美国 Williamsburg 桥才以 2m 优势胜出;1924 年跨径 497m 的 Bear Mountain 桥建成;此后,分别在 1926 年和 1929 年,建成了跨径 533m 的 Benjamin Franklin 桥和跨径 564m 的 Ambassador 桥。这四座桥梁尽管从跨度上讲一座比一座大,但是,它们都没有突破 Brooklyn 大桥的技术框架,其跨度增长也不是很大,所以还是应该归类为近代悬索桥。

第二节 大跨径悬索桥

一、世界纪录跨径悬索桥

如果把悬索桥跨度的世界记录分成三个阶段,第一个阶段是古代悬索桥发展阶段,从远古时代一直到 Menai 桥建成,古代悬索桥的主要特征是以铁链为主要承重构件的跨度较小($L < 200\text{m}$)的悬索桥,目前有历史记载的 100m 以上的铁链悬索桥是建于 1705 年的中国泸定桥。第二个阶段是近代悬索桥发展阶段,从 1834 年建成的 Grand Pont Suspendu 桥到 1929 年建成的 Ambassador 桥,近代悬索桥的主要特征是以钢丝编制主缆为主要承重构件的跨度中等($200\text{m} < L < 600\text{m}$)的悬索桥,在近一百年的近代悬索桥的发展中,共诞生了 9 个世界纪录,平均每次增长了 43m。第三个阶段是现代悬索桥发展阶段,从 1931 年建成的 George Washington 桥到 1998 年建成的明石海峡大桥,现代悬索桥的主要特征是多索股主缆方便施工的大跨度($1000\text{m} < L < 2000\text{m}$)的悬索桥,悬索桥跨径从 1000m 增大到了接近 2000m。

在悬索桥跨度世界纪录发展的第三个阶段,终于建成了人类历史上第一座跨度破千米的悬索桥——跨径 1067m 的 George Washington 桥(图 1.2-1)。1937 年跨径 1280m 的 Golden Gate 桥横空出世(图 1.2-2),并保持悬索桥跨径世界记录达 27 年之久;1964 年,美国又建成了跨径 1298m 的 Verrazano Narrows 桥;1981 年,英国终于打破了美国垄断悬索桥世界记录 130 多年的历史,创造了新的悬索桥跨径世界记录——跨径 1410m 的 Humber 桥;1998 年,分别在丹麦建成了跨径 1624m 的 Storebaelt East 桥(图 1.2-3)和在日本建成了跨径 1991m 的明石海峡桥(图 1.2-4)。



图 1. 2-1 美国 George Washington 桥



图 1. 2-2 美国 Golden Gate 桥

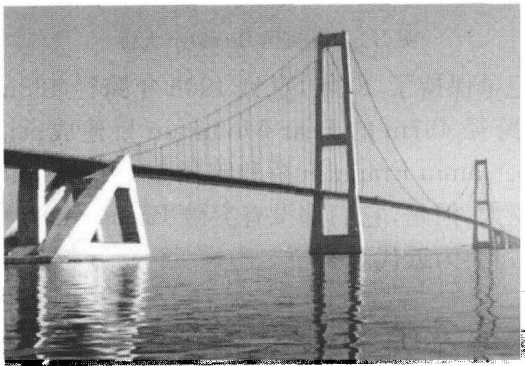


图 1. 2-3 丹麦 Storebaelt East 桥



图 1. 2-4 日本明石海峡桥

表 1. 2-1 给出了 18 世纪以来曾创造跨径世界纪录的 19 座悬索桥的有关信息。

世界纪录跨径悬索桥 表 1. 2-1

阶段	建成年代(年)	桥 名	跨径(m)	主缆	主梁	索塔	国家
古代	1705	泸定桥	100	铁链	简易梁	石材	中国
	1816	Schuylkill 瀑布人行桥	124	铁丝	简易梁	石材	美国
	1820	Union 桥	137	铁链	铁板梁	石材	英国
	1826	Menai 桥	177	铁链	铁板梁	石材	英国
近代	1834	Grand Pont 桥	237	钢丝	铁板梁	石材	瑞士
	1849	Wheeling 桥	308	钢丝	铁板梁	石材	美国
	1866	John A. Roebling 桥	322	AS 法	铁桁梁	石材	美国
	1869	Niagara Clifton 桥	384	AS 法	铁桁梁	石材	美国
	1883	Brooklyn 桥	486	AS 法	铁桁梁	石材	美国
	1903	Williamsburg 桥	488	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1924	Bear Mountain 桥	497	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1926	Benjamin Franklin 桥	533	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1929	Ambassador 桥	564	AS 法	钢桁梁	钢材	美国

续上表

阶段	建成年代(年)	桥 名	跨径(m)	主缆	主梁	索塔	国家
现代	1931	George Washington 桥	1 067	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1937	Golden Gate 桥	1 280	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1964	Verrazano Narrows 桥	1 298	AS 法	钢桁梁	钢材	美国
	1981	Humber 桥	1 410	AS 法	钢箱梁	混凝土	英国
	1998	Storebaelt East 桥	1 624	AS 法	钢箱梁	混凝土	丹麦
	1998	明石海峡桥	1 991	PPWS	钢桁梁	钢材	日本

二、中国大跨度悬索桥

中国从公元前 250 年起就有古代悬索桥的建设纪录,是悬索桥的发源地,在早期的竹藤索桥和以铁链为主索的古代铁索桥建设技术方面,一直处于世界领先水平,并持续到 18 世纪末。从 19 世纪初以铁丝和钢丝为主索的近代悬索桥开始,中国的悬索桥技术开始慢慢落后于欧美等国。新中国成立后,虽然励精图治,在前 40 年的桥梁建设中,共建成了 70 多座悬索桥,但工程规模都比较小、结构形式也相对简单、跨径更是不足 400m,唯一跨径超过 400m 的是 1984 年建成的西藏达孜桥(图 1.2-5),主跨 500m,桥宽 4m,该桥是以人行桥梁来设计的,目前允许 2t 以下的小型车辆通行。

20 世纪 50 年代初,在成功建设现代斜拉桥经验的鼓舞下,中国大跨度现代悬索桥建设揭开了历史性的篇章。作为中国第一座现代悬索桥——汕头海湾大桥(图 1.2-6)采用了混凝土加劲梁,三跨连续桥面布置为 154m+452m+154m,该桥于 1994 年建成,成为世界最大跨径的混凝土加劲梁悬索桥。1996 年建成了主跨 900m 的西陵长江大桥;1997 年相继建成了主跨 888m 的虎门珠江大桥和 450m 的丰都长江大桥,后者是中国第一座钢桁加劲梁悬索桥;1999 年相继建成了 648m 的厦门海沧大桥和 1 385m 的江阴长江大桥(图 1.2-7),后者是中国自主建成的第一座超千米悬索桥,凝聚着几代中国桥梁人的梦想,是中国现代桥梁发展的重要里程碑。

进入 21 世纪后,中国建设大跨度悬索桥的步伐加快了,在 21 世纪的前 10 年里,不仅在数量上平均每年建成一座大跨度悬索桥,而且在桥梁跨径上又实现了两次突破,即 2005 年建成了跨径 1 490m 的润扬长江大桥,2009 年建成了跨径 1 650m 的舟山西堠门大桥(图 1.2-8)。到 2010 年年底,中国已经建成 400m 以上的大跨径悬索桥 18 座,如表 1.2-2 所示。



图 1.2-5 西藏达孜桥



图 1.2-6 汕头海湾大桥



图 1.2-7 江阴长江大桥



图 1.2-8 舟山西堠门大桥

中国大跨径悬索桥

表 1.2-2

序号	建成年代(年)	桥 名	跨径(m)	主缆	主梁	索塔	地点
1	1984	西藏达孜桥	500	钢丝	钢桁梁	混凝土	西藏
2	1994	汕头海湾大桥	452	PPWS	混凝土	混凝土	广东
3	1996	西陵长江大桥	900	PPWS	钢箱梁	混凝土	湖北
4	1997	丰都长江大桥	450	PPWS	钢桁梁	混凝土	四川
5	1997	虎门珠江大桥	888	PPWS	钢箱梁	混凝土	广东
6	1997	香港青马大桥	1 377	AS 法	钢桁梁	混凝土	香港
7	1999	厦门海沧大桥	648	PPWS	钢箱梁	混凝土	福建
8	1999	江阴长江大桥	1 385	PPWS	钢箱梁	混凝土	江苏
9	2000	重庆鹅公岩大桥	600	PPWS	钢箱梁	混凝土	重庆
10	2001	忠县长江大桥	560	PPWS	钢桁梁	混凝土	四川
11	2001	宜昌长江大桥	960	PPWS	钢箱梁	混凝土	湖北
12	2004	万州长江大桥	580	PPWS	钢桁梁	混凝土	四川
13	2005	润扬长江大桥	1 490	PPWS	钢箱梁	混凝土	江苏
14	2007	阳逻长江大桥	1 280	PPWS	钢箱梁	混凝土	湖北
15	2008	黄埔珠江大桥	1 108	PPWS	钢箱梁	混凝土	广东
16	2009	湖北四渡河大桥	900	PPWS	钢桁梁	混凝土	湖北
17	2009	贵州坝陵河大桥	1 088	PPWS	钢箱梁	混凝土	贵州
18	2009	舟山西堠门大桥	1 650	PPWS	钢箱梁	混凝土	浙江

三、国内外千米级悬索桥

随着悬索桥跨度的不断增加,为了能够抵抗更大的外加荷载,结构质量逐步减小,而结构刚度也逐步减小,使得结构对风致效应更加敏感,除了众所周知的美国塔科玛旧桥在 1940 年发生风毁之外,其他大跨度悬索桥的抗风问题依然成为建设关键。为了说明已经建成的大跨度悬索桥的抗风问题,表 1.2-3 给出了全世界已经建成的跨径超过 1 000m 的悬索桥。在这 22 座已经建成的千米级悬索桥中,钢桁加劲梁占 10 座、钢箱加劲梁占 12 座,在设计或使用过程中发现有抗风问题并采用了抗风措施的有 7 座桥梁,而且前 4 座桥梁都发现过抗风问题,主要抗风问题是颤振,其次为涡振。

国内外已经建成的千米级悬索桥 表 1.2-3

序号	建成年代(年)	桥 名	跨径(m)	主梁	抗风问题	国家
1	1998	明石海峡桥	1 991	钢桁梁	颤振	日本
2	2009	舟山西堠门大桥	1 650	钢箱梁	颤振	中国
3	1998	Storebaelt East 桥	1 624	钢箱梁	涡振	丹麦
4	2005	润扬长江大桥	1 490	钢箱梁	颤振	中国
5	1981	Humber 桥	1 410	钢箱梁	—	英国
6	1999	江阴长江大桥	1 385	钢箱梁	—	中国
7	1997	香港青马大桥	1 377	钢桁梁	颤振	中国
8	1964	Verrazano Narrows 桥	1 298	钢桁梁	—	美国
9	1937	Golden Gate 桥	1 280	钢桁梁	颤振	美国
10	2007	阳逻长江大桥	1 280	钢箱梁	—	中国
11	1997	Hoga Kusten 桥	1 210	钢箱梁	—	瑞典
12	1957	Mackinac 桥	1 158	钢桁梁	—	美国
13	2008	黄埔珠江大桥	1 108	钢箱梁	—	中国
14	1988	南备赞桥	1 110	钢桁梁	—	日本
15	1988	Bosporus 二桥	1 090	钢箱梁	—	土耳其
16	2009	贵州坝陵河大桥	1 088	钢桁梁	颤振	中国
17	1973	Bosporus 一桥	1 074	钢箱梁	—	土耳其
18	1931	George Washington 桥	1 067	钢桁梁	—	美国
19	1999	来岛三桥	1 030	钢箱梁	—	日本
20	1999	来岛二桥	1 020	钢箱梁	—	日本
21	1966	Tagus 桥	1 013	钢桁梁	—	葡萄牙
22	1964	Forth Road 桥	1 006	钢桁梁	—	英国

第三节 超大跨径悬索桥规划

一、墨西拿海峡大桥工程

墨西拿海峡位于意大利本土与西西里岛之间的地中海上,平均宽度 31km,最窄处约 3.3km,最浅的海底水深 110m,海底变化复杂,潮流速度 3m/s。建设跨越海峡连接的宏伟规划始于 19 世纪末期,初步形成于 20 世纪中期,基本完成于 20 世纪末期。

最终确定的桥梁设计方案的使用年限为 200 年,并按 50 年、400 年、2 000 年的重现期进行极限状态设计。按 2 000 年重现期设计时,离海平面高度 70m 处的设计风速为 60m/s,地震动最大水平加速度按 0.6g 持续 25s 计算。主桥采用 3 300m 中间一跨悬吊加上两边跨 1 800m 悬吊结构,矢跨比 1 : 11。加劲梁采用分体三钢箱梁构造,全宽 60.4m,其中包括两个 8.25m 宽的开槽,边上两个有效宽度 11.5m 的桥面用于提供 3 条公路车道,中间宽 10m 的桥面用于