

文章编号: 0451-0712(2004)09-0001-20

中图分类号: U448.25

文献标识码: B

# 20 世纪悬索桥的历史和美学

金增洪

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

**摘 要:** 论述 20 世纪百年来悬索桥的发展历史和美学。1883 年美国纽约布洛克林桥以 486 m 跨径创 19 世纪悬索桥跨径的世界记录。20 世纪悬索桥经过曲折发展,到 1998 年日本明石海峡大桥主跨径逼近 2 000 m,这就是 20 世纪悬索桥跨径的世界记录。文中系统论述 20 世纪上半世纪美国引领现代悬索桥的大发展,促进了欧洲、日本乃至全世界悬索桥的大发展。中国的悬索桥后来居上,在 20 世纪最后 10 年里,随着改革开放政策的实施,国民经济和交通建设大发展,中国的悬索桥建设也获得长足的发展,步入世界先进行列。最后对 21 世纪悬索桥的发展展示了美好的前景。

**关键词:** 悬索桥; 历史; 美学; 超长跨径; 加劲梁(桁架); 索塔; 主缆

## 1 历史的回顾

全世界都承认,中国是悬索桥的故乡,迄今至少有 3 000 年历史。远在公元前 250 年蜀太守李冰在四川都江堰上建成的竹索桥跨越河流宽度达 320 m。据记载我国唐代中期就从藤索、竹索发展到用铁链建造悬索桥,而西方在 16 世纪才开始建造铁链悬索桥,比我国晚了近千年。最著名的四川大渡河上的铁索桥,跨径达 104 m,宽约 2.8 m,建于清康熙 45 年(公元 1696 年),45 年后才在英国出现一座跨径仅 21.34 m 的铁索桥。

现代悬索桥随着西方产业革命的进展,早在 19 世纪就开始建设了,最著名当数英国于 1826 年建成的门纳衣(Menai)桥,跨径 176 m。真正用钢丝作为主缆的悬索桥,是 1834 年在瑞士弗里堡建成的跨径达 273 m 的大吊桥。到 19 世纪中叶以后,美国成为悬索桥的中心。天才的桥梁工程师罗勃林(J. Roebling)建成多座有名的悬索桥,其中最著名的是 1883 年在纽约东河上建成的布洛克林(Brooklyn)桥,跨径达到 486 m,这就是 19 世纪世界上最大跨径的悬索桥。

## 2 20 世纪美国的悬索桥

罗勃林以后,受过工程教育的工程师在设计桥梁时往往过于把精力集中于计算工作上,需要一个更严格的数学模型。由于高次超静定结构体系导致

无法逾越的大量计算工作,在选择结构体系时不得不顾及计算能力,这在设计上反而有所退步,结果就不能像布洛克林桥那样采用悬索和斜拉索双重缆索体系,只能采用较为简单的结构体系来代替。

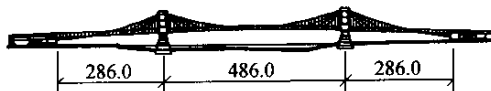
在 19 世纪后期,悬索桥计算的有效理论是一阶理论,如朗金(Rankine)提出的处理两铰和三铰加劲梁的悬索桥理论。这一理论首先合理地考虑缆索和加劲梁间的相互作用。以后提出的一阶理论,错误地称谓“弹性理论”。按照这一理论设计的美国 20 世纪第一座悬索桥——威律姆斯伯格桥。由于这一理论的缺陷,设计的结果与布洛克林桥大相径庭,实在不能令人满意。美国著名桥梁工程师斯泰曼称此桥具有“笨拙的索塔和过高的加劲梁,结构呈现不和谐和笨拙的外观,标志着从一个极端走向另一极端;以后就向相反方向发展,在悬索桥的设计中越来越倾向柔细和优美观”。该桥虽然比布洛克林桥晚建 20 年,但其主跨径只有 488 m,仅比布洛克林桥跨径大 2 m,虽然如此,还是创造了桥梁跨径的世界记录。以后由摩伊瑟夫(L. Moisseff)设计的跨越纽约东河的第三座桥梁——曼哈顿桥,主跨径只有 448 m,于 1909 年建成。该桥因是采用米兰在 1888 年提出的挠度理论进行分析的第一座桥梁而著名。挠度理论是在车辆荷载作用下计算加劲梁的弯矩时考虑了主缆位移的二阶理论,因此对挠曲体系建立平衡关系,要比初始恒载的几何体系更加准确。

万方数据

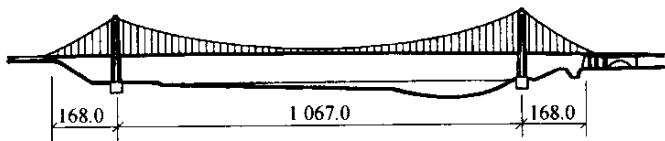
收稿日期: 2004-05-28

随着技术的进步,悬索桥的主跨径逐渐增大,1924 年建成的熊山桥跨径达到 497 m 和 1926 年在费城附近建成跨越特拉华河的富兰克林桥,主跨径达到 533 m,两次创世界记录。最终于 1929 年在底特律附近建成的大使桥,主跨径达到 564 m,超过了当时世界上公认的大跨径桥型之一的加拿大魁北克伸臂悬挂桁架桥(549 m)。从跨径大小来判别,悬索

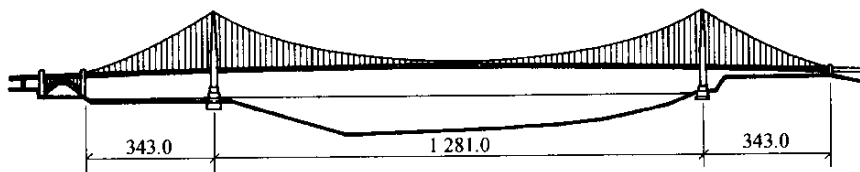
桥开始成为桥梁的“皇后”。当然也要考虑到其他方面的顶级要求,如美学要求。不可否认,在 20 世纪前 60 年内,美国在悬索桥领域内独领风骚,最大跨径逼近 1 300 m,成为悬索桥的巨人。下面就美国在引领悬索桥建设方面对世界特别有影响的桥梁专家和著名桥梁重点加以评述。美国几座著名的悬索桥列于图 1。



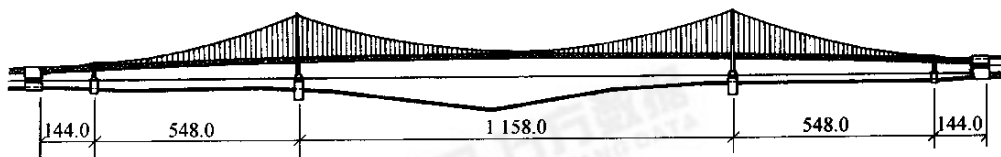
(1) 布洛克林桥 (1883 年)



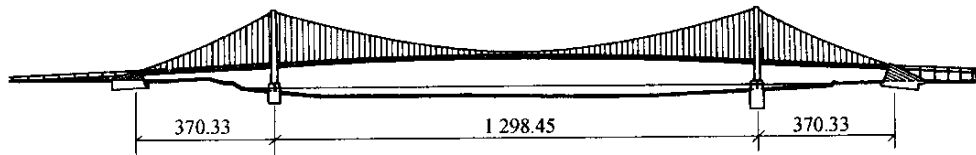
(2) 华盛顿大桥 (1931 年)



(3) 金门大桥 (1937 年)



(4) 麦金纳克桥 (1957 年)



(5) 维列扎诺海峡大桥 (1964 年)

单位: m

图 1 美国的悬索桥

(1) 纽约的华盛顿大桥

20 世纪初随着纽约人口的增长需要建设跨越哈得逊河的桥梁。早在 1888 年美国著名桥梁工程

林顿塞尔(G. Lindenthal)就计划在纽约曼哈顿的第 59 街附近修建跨越哈得逊河的桥梁。到 1920 年林顿塞尔又有新的构想,计划建一座公铁两用桥,投

资达 1 亿美元。为此,邀请有才华的年青工程师阿曼(O. Ammann)作为该桥的设计咨询工程师,但由于当时纽约市区发展太快,曼哈顿第 59 街的桥位很快为一些高层建筑所占据。到 1923 年阿曼很快提出他自己的构想:将桥位向河流上游移到第 179 街。此处河流较窄,两岸高耸,桥面具有满足通航的足够高度,而且不需建设很长的引桥。桥梁的功能主要为满足汽车和轻轨列车通行。所以阿曼的方案要比林顿塞尔方案便宜。时任纽约港总工程师的阿曼雇请摩依瑟夫(L. Moisseiff)和戴纳(A. Dana)为咨询工程师,吉尔伯特(C. Gillbert)为建筑师。于 1927 年 10 月开工建设。桥梁决定采用钢结构,既能减轻桥梁自重,又能增加桥梁的承载能力。桥梁跨径布置为 168 m+1 067 m+168 m,其纵剖面如图 1 所示,桥面宽 37 m,可适应 6 车道通行,桥下通航净空 65 m。桥面梁由 4 根主缆支承,主缆的垂跨比为 1/10.8,主缆的直径为 914 mm。每一根主缆由 61 根索股组成,每一根索股包含直径 5.0 mm 的钢丝 434 根,每根主缆共有钢丝 26 474 根。主缆由罗勃林发明的空中纺线(AS)法编织架设。主缆分为左右各一对,中心距为 32.31 m。华盛顿大桥是世界上第一座跨径超过 1 000 m 的悬索桥,其主跨径一跃几乎为前记录保持者——大使桥主跨径 564 m 的两倍。该桥两座别俱一格的拱门式的索塔高 184 m,由结构工程师和建筑师共同设计。按照阿曼的意见,格构式索塔结构还需填充混凝土,计算的结果,完全没有必要;建筑师吉尔伯特的意见是应在骨架外表镶嵌装饰石材。由于当时美国正处于经济大萧条时期,建设当局一概予以摒弃,所以索塔的钢骨架一直暴露至今,并没有损害其外在的特殊美。

从一般悬索桥的设计观念出发,华盛顿大桥缺少加劲梁(桁架)。在其以 8 车道通车的 30 年内,以“柔式”桥面梁成功地承受交通荷载作用和风载的袭击。在设计过程中,梁的高跨比非常小,梁的宽跨比只有 1/33。阿曼的合作者摩依瑟夫善于应用挠度理论,他认为桥面梁混凝土的巨大恒载和 8 车道的桥面宽度具有足够的稳定性,还有长度小于 1/6 主跨径的短边跨也增大了缆索体系的刚度,在某种程度上补偿了加劲梁刚度不足的缺陷。取消加劲桁架可以节约资金,而且还保持非比寻常的轻盈柔细的特殊外观。

华盛顿大桥于 1931 年 10 月建成通车,耗资 5 900 万美元。到 1946 年在桥面梁的中心部位又增

加 2 个车道,在 1962 年增设加劲桁架和下层桥面 6 个车道,使该桥同时承担了 14 车道交通荷载。所有这些,阿曼在设计之初,已经考虑到如此巨大的载重量。如今华盛顿大桥每年承载 500 万辆的交通量,成为世界上最繁忙的桥梁之一。

## (2) 金门大桥

1924 年金门大桥建设项目总工程师斯特劳斯(J. Strauss)提出该桥的初步设计是一座混合型桥梁,见图 2 所示,主跨径为 850 m 的悬索体系,两端为 209 m 长的伸臂桁架。这个设计,遭到广大公众的反对,认为这一设计毁坏了自然景观。直到 1929 年,斯特劳斯求助于阿曼、摩依瑟夫等人的咨询,跨越金门口采用主跨径 1 220 m 的悬索桥是可能的,经摩依瑟夫计算完全可以取消混合结构,斯特劳斯接受了这一建议,这就是金门大桥设计的基础。1930 年经论证,桥梁建成后无碍船舶航行,美国国防部批准这一方案。最终的主要设计工作由斯特劳斯的主要助手爱列斯(Charles Ellis)承担的。

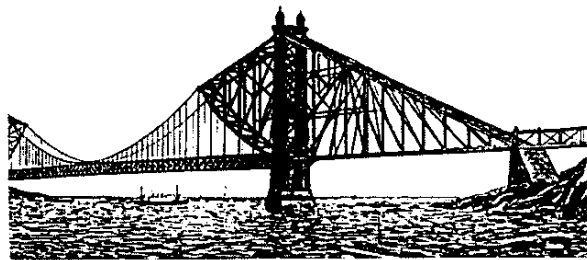


图 2 斯特劳斯设计的金门大桥

1933 年 1 月开工建设,最终确定的主跨径是 1 280 m,要比华盛顿大桥主跨径大 20%,又创造了一个新的世界记录。桥梁跨径布置为 343 m+1 280 m+343 m(其纵剖面如图 1 所示),按照这一跨径布置,北索塔应建立在浅滩上,工程进展比较顺利。南塔墩也于同年 3 月开工,但工程相当复杂。南塔建在深槽(335 m)的岸滩上,易被高潮位的浪涛所袭击。第一阶段是开挖 1 200 万  $\text{m}^3$  岩石。然后在 50 m×90 m 范围内采用防浪措施的前提下建设南墩,为此采用沉箱做基础。当沉箱按计划拖到相应位置后,受狂风浪的顶托,并重复受到冲击。于是工程师们只好放弃沉箱法,不得不采用混凝土围堰挡水,围堰内水抽干后再浇筑基础混凝土,再做混凝土墩台,并于 1935 年晚期完成,其后安装索塔。

建筑师莫洛(F. Morrow)负责大桥和索塔的建筑和装饰设计。索塔高出水平面 227 m。索塔由两根

中心距为 27.43 m 的竖向柱组成,与两主缆的中心距一致。塔柱由角钢和钢板组合成多室箱形截面。受浪漫主义建筑的影响,塔柱截面的宽度是随其升高而减小,创造一个鲜明的视觉效果。在加劲桁架的下方,塔柱用剪刀撑联接,在行车道上方用 4 道横梁联接。索塔和墩台是通过塔柱的纵向腹板与深埋入墩台中的角钢用铆钉相联。

金门大桥加劲梁是有竖杆的桁架,桁高 7.6 m,节间长 7.6 m,用横梁将两片加劲桁架联结起来。横梁上架设纵梁,然后浇筑混凝土桥面。

金门大桥的加劲桁架的高跨比仅为 1/168,在细长度方面达到了极限值。同时加劲桁架是由 3 榱桁架组成,这种构造形式导致其抗扭刚度不足。于 1951 年,在 4 h 风暴来临时,该桥的竖向振幅达到 3.3 m,只能封闭交通 3 h。鉴于这一情况,从理论研究揭示其扭转刚度不足,可能导致灾难性扭转振动,决定在桁架下弦增加横向支撑形成一个闭合的空间桁架,保证了桥梁的稳定性。

金门大桥的主缆直径为 925 mm,由 61 根索股组成,每根索股含有直径 4.87 mm 钢丝 452 根,主缆是按 AS 法编织施工的。主缆的垂度为 143.62 m,垂跨比为 1/8.9,比以前所建悬索桥的都大。

金门大桥造型优美与周围景观配合非常和谐,深红色的外表与蔚蓝色海洋形成强烈反差,更显巍峨壮观,其雄伟的塔姿,强劲的主缆和柔韧有力的吊索蕴含着强大的张力,巨大的跨度使水平桥面系显得轻盈舒展,给世人留下不可磨灭的印象。自从 1937 年 3 月建成开放以来深受全世界游客称赞。

金门大桥建设耗时 4 年,耗资 3 500 万美元,是一座较经济的桥梁。

金门大桥因地震影响受到破坏,现正在改造加固中,计划 2006 年完成。

### (3) 旧金山—奥克兰海湾大桥

虽然桥梁的意义一般取决于其主跨径的大小,但有时却是由设计和施工等其他因素所决定的。如旧金山—奥克兰海湾大桥却取决于其巨大的基础工程。

1933 年~1936 年间加利福尼亚州收费桥梁当局,为了建设跨越旧金山湾联接旧金山市和奥克兰市 13 km 的海湾大桥,最大的挑战是面对深水基础。

线路从旧金山的海滩开始向东北跨越 2 822 m 宽的旧金山湾,到达叶尔巴—布依纳(Yerba Buena)岛,成为跨越海湾的踏步石。从此路线进入

岛上的 23 m 宽的隧道,出隧道进入岛的另一侧,即东海湾桥。这里主要讨论西海湾悬索桥。

项目由总工程师帕塞尔(H. Purcell)和其主要助手安德鲁(E. Andrew)和胡特洛夫(B. Woodruff)负责,他们都属于加州公共工程部。经多方比较,西海湾桥由首尾相联、在中央以共用锚碇分隔的 2 座形式完全相同的悬索桥组成。悬索桥的跨径布置为 354 m+705 m+354 m。4 座索塔是由 2 根立柱用 5 道剪刀撑(桥面下 2 道,桥面上 3 道)和 2 根横梁联接组成门式框架,靠两边的两座索塔高 126.3 m,中间的两座索塔高 138.5 m。索塔上端两塔柱中心距与主缆中心距以及加劲桁架吊点的横向距离是一致的,为 20.13 m。因两柱在横向呈微斜,其下端中心距为 25.3 m。

两片加劲桁架的间距为 20 m,宽跨比为 1/35。上层路面宽 17.68 m 为 6 车道,下层布置 3 车道重交通(卡车或公共汽车)和穿梭列车。以后经修改,上、下层均为 5 车道。加劲梁高 9.14 m。

由于海湾桥跨径较小,只需 2 根主缆,主缆垂度为 70.5 m,垂跨比为 1/10。主缆由直径 4.95 mm 的钢丝编制,每根主缆含有 37 根索股,每股 472 根钢丝。主缆直径 730 mm。

4 座塔基中,只有 1 座靠近海滩,其余 3 座均处于 35 m 的深水中,岩层更是处在水下 75 m 处。基础施工是极端困难的。由莫伦(E. Moran)工程师发明的由多根竖直钢管集束组成的沉箱,内壁衬以重木材,上覆壳盖,内充压缩空气,浮运,经精确定位后用钢缆在海底固定,压缩空气在几根管中同时释放,沉箱下沉,管子接长,沉箱沉底后用开挖设备下去开挖,直到岩层为止,再浇筑混凝土。如中心锚墩基础平面为 28 m×60 m,由 15 个挖掘井组成,每一个管子的直径为 4.6 m。

海湾桥的美,体现在纵向造型方面,这是世界上第一座由 2 座首尾相接的悬索桥联接在一起并共用中心锚碇,形成一道连续的抛物线缆悬挂在 4 座索塔上,成为一种韵律,仿佛像倒挂的悬虹升腾在宽阔的海湾上。开车从桥上通过时,从视觉角度出发观察到主缆的起伏,吊杆由短变长,又由长变短,产生动感美。

### (4) 塔可马老桥

1932 年摩依瑟夫和林哈特(F. Leinhard)提出了悬索桥在横向荷载作用下的计算理论时,悬索桥分析显现出有趣的发展过程。实际上把这一理论视



为二阶挠度理论的延续(在此以前二阶理论只推导平面内的竖向荷载的情况),现已推广到水平荷载作用的情况。在计算加劲梁水平抗风的弯矩和剪力时,还要考虑缆索平面的倾斜。这样,新理论大大增大了加劲梁的柔度,使加劲梁的水平抗风能力越来越小,这一理论导致没有加劲梁也能建立横向平衡。

塔可马大桥由摩依瑟夫主持设计,该桥跨径布置为  $335\text{ m}+853\text{ m}+335\text{ m}$ ,梁高  $2.45\text{ m}$ ,即梁的高跨比只有  $1/350$ ,梁的宽度  $11.9\text{ m}$ ,宽跨比是  $1/72$ ,也比金门大桥的  $1/47$  和华盛顿大桥的  $1/37$  大大减小了,超出以前的实践。尽管该桥的加劲梁极端细长,但在充分利用二阶效应后,却具有足够的承受车辆交通荷载和静风压力的安全系数。

从 1903 年的威律姆斯伯格桥到 1940 年的塔可马桥近 40 年里,加劲梁的高度几乎降低到  $1/10$ ,从一个极端走到另一个极端。塔可马桥开通不久,自然界的作用显示增大加劲梁的细长度必然带来灾难性的后果。通车后前 4 个月产生竖向振动,振幅达到  $1.5\text{ m}$  时衰减下来。随着主跨中阻止加劲梁和主缆间相对位移的斜拉索疲劳断裂,振型突然改变,出现扭转振动。以主跨中心点为振动波的驻点分成 2 个节段做非对称扭转振动。扭转振动是发散的,振动越来越剧烈,在主跨  $1/4$  点的桥面上从  $+45^\circ$  到  $-45^\circ$  做翻转运动。这种由空气动力的负阻尼引起的自激振动持续了近  $1\text{ h}$  后,吊杆因疲劳在套筒口断裂,大部分加劲梁落入水中。此时风速只有  $18\text{ m/s}$ ,远低于桥梁设计所能抵御的最大风速。根本的原因是作为加劲梁的板梁截面尖角处形成的脉冲涡流产生的动力作用。所以过于细长的加劲梁,极易招致空气动力不稳定性。

塔可马桥事故以后,引起桥梁界和空气动力学家极大的关注,集中精力对空气动力特性进行卓有成效的研究,如法奎逊、勃拉希、冯卡门和塞尔伯格都提出了计算理论和试验方法。此外,对已建成的桥梁做了广泛的检查。如上述的金门大桥因加劲桁架的细长度过大,早已显示出非灾难性的振动,不得不加固加劲桁架,添加下横向支撑,使加劲梁形成一空间体系,临界扭转刚度增大了 3 倍。

1949 年塔可马又建新桥,桥梁跨径不变,改用钢桁架作为加劲梁,桁架宽  $18.29\text{ m}$  桁高  $10.06\text{ m}$ ,大大增加了加劲梁抗弯和抗扭刚度。

#### (5) 麦金纳克桥

1950 年由美国著名桥梁工程师斯泰曼(D. B.

Steinman)设计的跨越沟通休伦湖和密歇根湖的麦金纳克桥。这座桥梁在尺度上超过美国已建成的任何桥梁,其跨径布置为  $144\text{ m}+548\text{ m}+1\,158\text{ m}+548\text{ m}+114\text{ m}=2\,542\text{ m}$ (桥梁纵剖面如图 1 所示),虽然主跨径稍逊金门大桥,但总长度却比金门大桥长  $575\text{ m}$ 。垂跨比  $1/12$ ,主缆直径  $692\text{ mm}$ 。门式的钢索塔。该桥于 1954 年开工,1957 年竣工。耗资 1 亿美元。

除了一般静力计算(包括静风荷载)外,麦金纳克桥是进行了动力风载计算的首座悬索桥。早在塔可马桥坍塌前两年,斯泰曼已经对悬索桥的动力特性做了深入细致的数学分析和实验研究。在麦金纳克桥开工前的 17 年里,斯泰曼献身于这一研究,他超前认识到加劲梁截面具有动力稳定和非稳定特征。特别认识到振动可分解为竖向、扭转或两者的耦合作用。

如果截面是不稳定的,平常风就可引起主跨与风同步振动,只要桥梁提供最小的竖向或扭转振动,振动将导致振幅以对数增长。几分钟内通过共振振幅达到足够大而导致桥梁毁坏。如果是稳定截面,空气动力振动可能与竖向或扭转同步,但相位是相反的,当桥梁向上运动时空气动力作用方向相反,反之亦然。从这一意义上讲,由任何交通荷载引起的振动很快消失,因此桥梁在风作用下是稳定的,越强的风桥梁越稳定。这一发现似乎有些荒唐,但已为事实所证实。有必要认识和分析稳定截面准则。斯泰曼提出的准则以后得到改进和提炼。这些发现,就是麦金纳克桥设计的基础。麦金纳克桥的设计临界风速达到近  $1\,000\text{ m/h}$ ,几乎大于战前建成桥梁的 10 倍。

在具体设计中,中央车道改为开敞的网格桥面,据说临界风速可达无限。这种设计必然导致加大加劲桁架的尺度,梁高  $11.6\text{ m}$ ,高跨比为  $1/100$ ,梁宽为  $22\text{ m}$ ,而当时设计的路面只要求宽  $6.0\text{ m}$ ,宽跨比为  $1/55.9$ 。但自然界决无如此大的风速,从这一意义上讲设计又造成很大的浪费。实际上又走到 50 年前的威律姆斯伯格桥的情况,随之而来的再向相反方向发展。

从美学角度来看,该桥完全对称式的布置,显得雄伟壮观,在浩渺湖面上宛如横卧长虹。

#### (6) 维列扎诺海峡大桥

美国著名桥梁工程师阿曼一生在纽约和美国其他地方设计过多座悬索桥。1939 年阿曼从公务岗位上退休后,建立了自己的咨询公司,7 年后承担了维列扎诺海峡大桥的设计。维列扎诺海峡大桥跨越纽

约港入口的维列扎诺海峡处,联结布洛克林区和斯塔顿区(岛)。1959 年开始设计,1960 年开工建设,历时近 5 年,于 1964 年底建成通车,耗资 3.25 亿美元。在 27 年后,以 17.45 m 超过金门大桥的主跨径,又一次创造了跨径的世界记录。从总体设计上看,该桥十分类似于阿曼早年设计的华盛顿大桥。

该桥跨径布置为  $370.33\text{ m}+1\,298.45\text{ m}+370.33\text{ m}=2\,039.11\text{ m}$ ,总长  $2\,194.6\text{ m}$ 。桥梁的纵剖面如图 1 所示。此桥分上下两层,每一层都设 6 车道,即上下行各 3 个车道。由于恒载( $538.7\text{ kN/m}$ )较大,桥梁每侧采用两根主缆。左右两对主缆的中心距为  $31.39\text{ m}$ 。每一根主缆由 61 根索股组成,每根索股包含直径  $4.97\text{ mm}$  钢丝 428 根。压紧后的主缆直径为  $897\text{ mm}$ 。主缆的垂度为  $117.4\text{ m}$ ,垂跨比为  $1/11$ 。从布洛克林桥到维列扎诺海峡大桥,上述美国悬索桥主缆的施工,全部采用空中纺线(AS)法。

维列扎诺海峡大桥的加劲梁由带竖杆的瓦仑桁架组成,总宽  $31.13\text{ m}$ ,总高  $10.3\text{ m}$ 。两片主桁架中心距离  $30.6\text{ m}$ ,上下弦中心距离  $7.3\text{ m}$ ,两桁架间上下弦用横梁相联。横截面上形成刚架。在横截面中心,横向框架的横梁与一根竖向构件联结,使作用于上下桥面之一的集中荷载能分配给上下横梁。在双层桥面都满载时,两横梁的竖向挠度是等量的,竖向构件不起作用。但竖向构件对横向框架的对角刚度有显著的影响。虽然加劲梁的截面较大,但该桥的高跨比仅为  $1/177$ ,比金门大桥的还小。梁的宽跨比为  $1/42.4$  和金门大桥的相近。

维列扎诺海峡大桥的索塔高  $192\text{ m}$ ,两塔柱之间的净距为  $27.4\text{ m}$ 。塔柱之间用两根横撑相连,上横撑的下缘为拱形,下横撑设置在加劲梁以下。塔柱分成 16 个节段采用多室箱形结构,工厂采用铆钉或高强螺栓连接,工地采用高强螺栓连接。维列扎诺海峡大桥的索塔与华盛顿大桥的十分相似,只是前者采用了板式结构,而后者采用了格构式结构。

维列扎诺海峡大桥气势雄伟,造型优美。从肯尼迪机场起飞后,从天空俯瞰,宛若卧于纽约港口的长虹。

美国在建成维列扎诺海峡大桥以后,修建大型悬索桥的高潮已经过去,直到 1969 年在美国罗得岛州建成跨越兰克斯特海湾的一座中等跨径( $487.7\text{ m}$ )的新港桥。这座桥梁的特点是主缆采用了预制平行索股(PPWS)法施工,这是一大创新。

### 3 20 世纪欧洲的悬索桥

欧洲在 20 世纪上半叶悬索桥发展缓慢,主要原因是 19 世纪所建的悬索桥坍塌的较多,尤其是英国。一直到 1929 年,德国修建了首座跨径较大的悬

索桥。这便是科隆的曼海姆(Müheim)桥,主跨径  $315\text{ m}$ ;1941 年又在科隆修建第二座悬索桥,即洛敦科兴(Rodenkirchen)桥,主跨径  $378\text{ m}$ ,而且这两座桥梁在第二次世界大战中都遭炸毁,但战后分别于 1951 年和 1954 年重建。在美国修建大型悬索桥高潮过去后,德国在 1965 年修建了跨越莱茵河、主跨径为  $500\text{ m}$  的欧姆里希(Emmerich)桥,同时欧洲修建大型悬索桥的高潮也正在酝酿之中。欧洲几座著名的悬索桥列于图 3。

#### (1) 法国的坦卡维尔桥

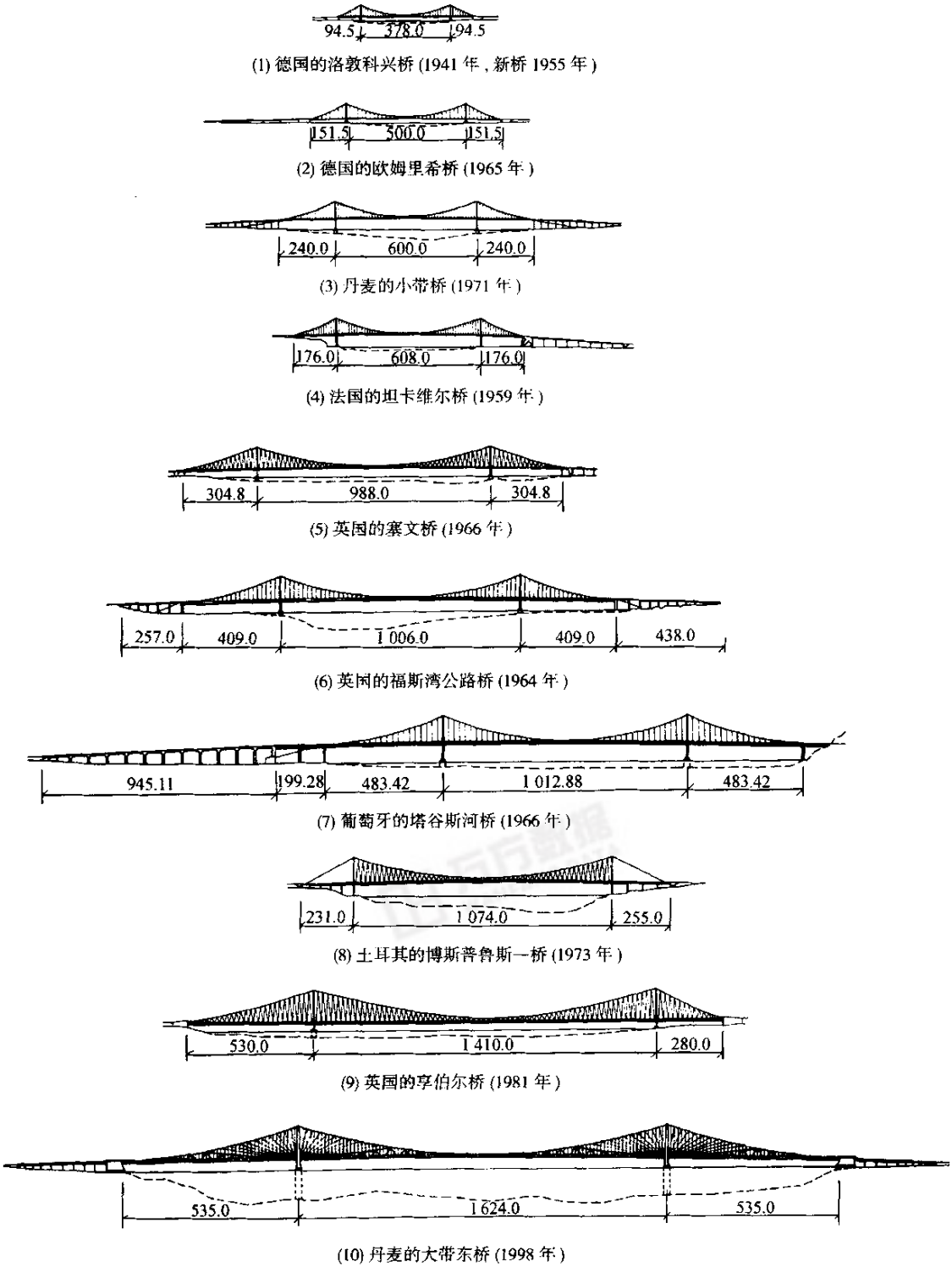
直到 1959 年 7 月 25 日坦卡维尔桥在法国的雷哈维尔附近的塞纳河上建成,这标志着欧洲的现代大型悬索桥的起步。这种桥梁自 1883 年展开讨论,到 1952 年法国的交通状况发展到无法容忍的状态下,举行了一次国际设计竞赛。结果,欧洲第一座大型悬索桥以主跨径  $608\text{ m}$  超过前面所述的加拿大魁北克桥的主跨径,桥梁的跨径布置及其纵剖面见图 3。法国主张自力更生建设这样一座桥梁,因而具有欧洲独特创新风格,也有别于美国式的悬索桥。例如加劲桁架是连续的只在桁架的端部与一个锚碇固结;主缆采用封闭的螺旋索股组成六角形截面,主缆的外轮廓尺寸  $580\text{ mm}$ ,吊索与索股间采用一种特殊的联结构造;主缆在主跨中点与加劲桁架固结,主缆的垂跨比为  $1/9$ 。索塔采用钢筋混凝土结构,这种主要用来承压的结构,采用钢筋混凝土是一种自然选择。桥梁跨径布置为  $176\text{ m}+608\text{ m}+176\text{ m}$ ,加劲桁架宽  $16\text{ m}$ ,桁高  $6\text{ m}$ ,高跨比  $1/101$ ,宽跨比  $1/38$ 。

#### (2) 英国的福斯湾公路桥

英国悬索桥的建设整整停滞了 70 年,直到 20 世纪 60 年代才迎来英国悬索桥的新时代。继法国的坦卡维尔桥之后,于 1964 年在苏格兰建成一座跨越福斯湾,在著名的福斯湾铁路桥附近,花了 6 年时间建成欧洲第一座主跨径超过  $1\,000\text{ m}$  的福斯湾悬索桥。这座桥梁由英国的弗里曼—福克斯伙伴公司设计,在设计风格上和美国式悬索桥十分相似,桥塔类似旧金山海湾桥,加劲梁采用钢桁架。但在桥梁的细节设计上有许多创新,如利用桥位的有利地形条件采用隧道锚节省投资,设计的加劲桁架的高度仅  $8.4\text{ m}$ ,相应的高跨比为  $1/120$ ,比美国同期建造的悬索桥加劲桁架更加细长单薄。桥梁的跨径布置为  $408.4\text{ m}+1\,005.8\text{ m}+408.4\text{ m}$ ,通航净空  $45.7\text{ m}$ 。两根主缆中心距为  $23.77\text{ m}$ ,主跨主缆的垂度为  $90.5\text{ m}$ ,垂跨比为  $1/11$ 。由 37 根索股组成,每一根

索股由 314 根直径为 4.97 mm 的钢丝组成,压紧后主缆的直径为 591 mm。

南北两座锚碇均采用隧道锚。这是福斯桥的特点。桥梁布置见图 3。



单位: m

早在 1920 年就提出修建本桥计划,因前期工作和二次世界大战影响,直到 1959 年 11 月开工建设,1964 年 9 月 4 日建成。该桥在施工过程中是多灾多难的。在基础施工两年后开始架设索塔,当第一座索塔高度达到约 120 m 时,在正常风速下发生振动,振幅达 1.0 m,与基础的联结螺栓拉出 4 mm,塔顶用斜拉索固定,在风荷载作用下被拉断而遭失败。1961 年初开始采用空中纺线法架设主缆,在 1962 年 2 月从北海吹来的巨风,使尚未完成的缆索产生摇晃,在跨中振动的摆幅达 20 m。主跨的振荡是稳定的,边跨的振荡毫无规则,结果索股松弛,单独钢丝搞乱。松开的钢丝、猫道和空中纺线设备受损,花了一个月时间才修理好。

### (3) 英国的塞文桥

1966 年建成的英国塞文桥,仍然是弗里曼—福克斯伙伴公司设计的,以罗伯茨爵士(Sir Gilbert Roberts)为首的工程师们,在设计中引进了不少新概念。自美国塔可马桥灾难以来,所有重要悬索桥都采用抗弯抗扭刚度巨大的桁架以获得空气动力稳定性。在塞文桥的设计中,最大的创新是以 3 m 高的扁平箱梁代替桁架,桥面采用正交异性钢板,桥面平整,增大行车的舒适性。箱梁制作和安装均采用焊接,提高工效,节约资金。

塞文桥跨越英国塞文河是联接英格兰和威尔士高速公路上的一座重要悬索桥。

在塞文桥的设计中,消除了导致像塔可马桥失稳的两个决定性因素,即以流线型箱梁代替锐利的板梁,减小了风的阻力,消除涡流的形成,避免了风流对桥梁产生涡激振动;以宽大的箱梁代替板梁,大大增强了加劲梁的抗扭刚度,提高了桥梁的抗扭性能,同时还减小梁的自重。这些成果是设计者罗伯茨爵士对悬索桥设计的重要贡献。

该桥是欧洲第二座跨径接近千米的悬索桥,桥梁的跨径布置为 304.8 m+988 m+304.8 m,其纵剖面如图 3 所示。

全桥两根主缆,中心距 22.86 m。主缆由 19 根索股组成,每根索股包含直径 4.39 mm 的钢丝 439 根,压紧后主缆直径为 511 mm。主缆的垂跨比为 1/12。第一次采用斜置吊索。

由于桥梁的自重较小,所以索塔结构也较轻巧,塔柱截面为由 4 块加劲板构成的箱形截面。索塔按门式框架设计,塔高 122 m,两塔柱间有 3 道横撑,梁下 1 道,其余 2 道分别布置在塔顶和桥面梁上

30.48 m 处。两岸均采用重力式锚碇。

因采用箱梁,相应的高跨比只有 1/324,比较接近塔可马桥的高跨比(1/350)。

尽管塞文桥的主跨径是福斯湾公路桥主跨径的 98%,其用钢量仅为后者的 65%。可见采用钢箱梁比桁架作为加劲梁,具有无可置疑的优点。

### (4) 葡萄牙的塔谷斯河桥

该桥虽然建造在欧洲的葡萄牙,却是美国悬索桥实践的产物。设计者是美国的斯泰曼等,施工承包商也是美国公司。尽管如此,塔谷斯河桥还是与美国的实践有所区别,如加劲梁采用三跨连续。这些差别主要反映在桥梁功能需求所致。原设计为 4 车道公路桥面,以后又要在下层扩建双轨铁路,加劲桁架不仅从主跨到边跨要连续,而且要进一步伸展到悬吊跨以外 100 m 的梁跨中。桥梁的纵向布置见图 3 所示。

由于增加铁路荷载,除索塔和锚碇不必加固外,缆索和桁架都要加强。如何加固主缆?如单独采用布洛克林桥的方式,因边跨距较大,索塔太柔并不完全奏效。除了采用斜拉索加固外,还额外增加副主缆。最后实施时只是增加了副主缆。加劲桁架也是经过加固的。

塔谷斯河桥又名萨拉扎桥,1974 年 4 月 25 日革命后又改名为 4 月 25 日桥。这是当今世界上跨径最大的公铁两用悬索桥之一。桥梁的一些参数如下:跨径布置为 483.4 m+1 012.9 m+483.4 m;垂跨比 1/9.5;梁的高跨比 1/95.1;梁的宽跨比 1/48.2;主缆直径为 586 mm。

### (5) 土耳其博斯普鲁斯一、二桥

博斯普鲁斯海峡位于欧亚两洲之间,沟通黑海与地中海,长约 30.4 km,最宽处 2 400 m,最窄处 708 m。博斯普鲁斯一桥就建在伊斯坦布尔市内海峡最窄处。英国和德国财团取得博斯普鲁斯一桥的建设权,仍由英国弗里曼—福克斯伙伴公司按塞文桥的风格设计。并于 1973 年建成通车。原设计车流量为 12 万辆/d,由于从中东到欧洲过往运油车辆剧增,到 20 世纪 80 年代过桥车流量已趋饱和,于是从 1985 年开始修建博斯普鲁斯二桥,仍由原设计单位设计,1988 年建成通车。二桥在一桥北 5 km 处。

两桥在风格上极其相似,均采用单跨悬吊悬索桥,加劲梁为流线型扁箱梁,梁高均为 3 m,钢塔,重力式锚碇,采用空中纺线法编制主缆,桥下通航净空均为 64 m。一桥和塞文桥一样采用斜吊杆,二桥则采用竖吊杆。一桥为双向六车道,梁总宽 33.4 m,二



桥为双向八车道,梁总宽 39.4 m。

两桥主要参数见表 1:

表 1 博斯普鲁斯一桥和二桥的主要参数

桥 名	跨径布置/m	垂跨比	高跨比	宽跨比	主缆直径/mm	塔高/m
博斯普鲁斯一桥	231+1 074+255	1/11.5	1/385	1/32.1	580	164.64
博斯普鲁斯二桥	210+1 090+210	1/11.4	1/383	1/27.7	764	111.1

两桥边跨主缆在塔顶上的倾角均比主跨的大,边跨主缆拉力增大,各增加 4 股,一桥的每股 192 丝;二桥的为 264 丝两股,288 丝两股。

两座桥梁造型优美,从空中俯瞰犹如两条横卧于博斯普鲁斯海峡上的卧龙。一桥纵向布置见图 3。由于欧亚间交通量还在不断增加,最近又在酝酿建造博斯普鲁斯三桥。

福斯桥和以下的亨伯尔桥采用空中纺线法架设主缆时,都曾带来诸多困难,因此怀疑空中纺线法是否应当废弃。但在博斯普鲁斯二桥施工时,空中纺线法引进了日本下津并濑户大桥开发的低强度张拉工艺,使空中纺线法有所改进。低强度张拉工艺取消了对每根钢丝的个别垂度进行调整,变为只要求对整个多丝索股的垂度进行调整。二桥采用低强度张拉工艺方法编制主缆,整个主缆安装用了 4 个月时间,证明这一方法仍然是有生命力的,从而恢复了空中纺线法的名誉。

从塞文桥、第一博斯普鲁斯桥、亨伯尔桥到博斯普鲁斯第二桥都是同一公司设计的所以这几座桥梁有许多相似之处。

(6) 英国的亨伯尔桥

早在 20 世纪 70 年代英国就着手在霍尔筹建亨伯尔桥,由钢铁财团威律·阿洛和克里夫兰合作建设,经 8 年施工,于 1981 年 7 月 17 日建成通车。和福斯桥一样因天气原因,主缆安装采用的空中纺线法,因对天气的敏感造成困难。此外基础沉箱施工也遇到不少困难。主梁安装过程中在两个梁节段架设后发生振荡,安装吊机约束缆索断裂等发生一系列事故,所以施工期限一拖再拖。

亨伯尔桥是英国继塞文桥、博斯普鲁斯一桥之后建成的第三座采用扁平流线型箱梁、吊索采用斜置的悬索桥,也是 20 世纪 80 年代建成的一座世界著名桥梁。桥梁纵向布置如图 3 所示,其跨径布置为 280 m+1 410 m+530 m。亨伯尔桥以 1 410 m 的主跨径打破了维列扎诺以 1 298 m 保持 17 年的世界记录。

本桥设计的特点是两个边跨不对称,北边跨特别短,所以主缆的倾角加大,北边跨主缆拉力相应加

大,故在北边跨另外增加 4 股钢索丝,每股 200 丝。另一特点是索塔采用混凝土门式框架结构。

桥下通航净空 35 m,主跨垂度 133 m,垂跨比 1/10.6,梁高 4.5 m,梁宽 28.5 m,高跨比 1/313,宽跨比 1/49.5,主缆直径 700 mm,重力式锚碇。钢筋混凝土索塔,高 155.5 m,4 层门式结构。

亨伯尔桥,跨径很大,梁高较小,远观桥面梁特别轻薄,疑似向上微弯的飘带,桥塔高耸入云,气势如虹。

(7) 丹麦的大带东桥

丹麦是个半岛和诸多岛屿组成的国家,沟通北海和波罗的海的大带海峡宽 18 km,将菲因岛和首都哥本哈根所在的西兰岛分割开来。在大带海峡中间有一斯坡洛格小岛,正好是渡过海峡的步石,小岛东侧为东航道,西侧为西航道。丹麦政府为了发展快捷的陆上交通事业,早在 1936 年酝酿要建大带海峡桥,并做过可行性研究和方案设计。1939 年暴发第二次世界大战而停止,直到 1959 年又提出新的建桥计划,按公铁双层桁架桥设计。1967 年决定针对东航道进行国际设计竞赛,共有 18 个设计方案获奖,其中 11 个是缆索支承桥梁方案,主跨径从 350~600 m。从 20 世纪 70~80 年代对不同方案进行深入研究,认为主跨 780 m 的斜拉桥和主跨 1 410 m 的悬索桥比较合适。但在 1987 年的国家立法中指定跨越东航道联络线为一座铁路隧道和一座公路桥。后者由 CBR 公司进行设计。

1989 年春,大带东桥的投标设计作为初步设计的序幕。投标设计对大带东桥的跨径布置、空气动力学问题、静力体系以及梁塔和美学设计都做了广泛的研究。提出 4 个方案:两个斜拉桥方案,主跨径分别为 916 m 和 1 204 m;两个悬索桥方案,主跨径分别是 1 448 m 和 1 688 m。其次是对通航和船撞事故做了细致的分析,同时对环境的影响也做出评价。

对不同方案论证比较,随着主跨径的增大,上部结构费用增大,而下部结构则由于桥墩数量减少和基础水深变浅,总费用变化不大。然而主跨径增大引起费用的增加,完全为提供的安全设施所平衡,所以从 900~1 400 m 主跨径方案比较,费用基本相同。

经对桥梁多方案筛选最终选择桥梁的跨径布置为 535 m+1 624 m+535 m 的三跨悬索桥,见图 3 所示。桥下通航净空 65 m,桥面纵坡为 2‰。东西引桥分别为 2 518 m 和 1 533 m。两座引桥除端跨 140 m 和锚碇连接跨为 62 m 外,其余均为 193 m 跨径的连续钢箱梁。通航路线与桥轴线呈 78° 夹角。

本桥设计的最大特点是在两锚碇间 2.7 km 长的连续主箱梁完全采用悬挂体系,避免在桥塔处按传统设置膨胀缝和竖向支座;箱梁内部采用除湿装置除湿防腐;为了部分地限制主梁纵向位移,在主梁的两端和锚碇块之间安置两台液压缓冲器,在主跨中心,主梁和主缆中心用刚性索夹固结,取消短吊杆,由中心索夹和液压缓冲器结合起来阻止主梁纵向的急剧移动。流线型箱梁宽 31 m,梁高 4.0 m,按双向 6 车道设计。

主塔采用钢筋混凝土结构,从海平面以上主塔高 254 m,比金门大桥的索塔还高 26 m,创塔高的世界记录。塔的外形经过精心的美学设计,而且做了许多模型进行比较,获得目前采用的塔形。塔柱呈锥形和缓和曲线变化,受力合理,稳重挺拔,落落大方,造型特别优美;采用开敞式稳定三角楔形锚碇,并建立在楔形基础上,以承受巨大水平力,这是世界上独一无二的锚碇结构,形成一座简洁、力线清晰,浮现在大带海峡上的一座人工雕塑。大带东桥的雄姿见图 4 所示的模型照片。

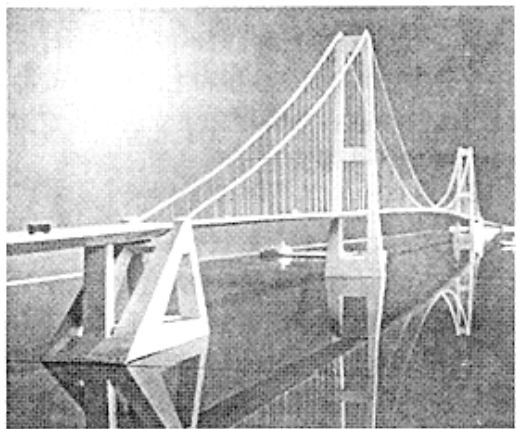


图 4 大带东桥的模型照片

大带东桥主跨径比亨伯尔桥的主跨径大 214 m,增大了 15.17%,再一次创造了世界记录,但历时一个月后,其主跨径又为日本的明石海峡大桥所打破。

大带东桥设计的主要参数:梁高 4 m,高跨比 1/406;梁宽 30 m,宽跨比 1/54.1;主缆直径

810 mm,主缆的垂跨比 1/9。

大带东桥于 1991 年开工建设,1998 年 6 月建成通车,历时 7 年,比原计划推后了 2 年。

欧洲的悬索桥,除上述桥梁外还有丹麦的主跨径为 600 m 的小带桥,是世界上第一次采用除湿空气装置防腐的箱梁悬索桥。瑞典的高海岸桥主跨径达 1 210 m,在设计风格上类似于丹麦的悬索桥。挪威悬索桥的特点是桥面较窄,主缆都采用螺旋封闭索股拼合,索夹类似于法国的坦卡维尔桥的。

#### 4 20 世纪日本的悬索桥

第二次世界大战后日本开始修建现代悬索桥,从 20 世纪 50 年代起步,1960 年建成小鸣门桥,1962 年建成若户大桥。但重要的悬索桥开创于本州和九州之间的关门桥,该桥主跨径 712 m,设有 6 车道,并于 1973 建成通车。在关门桥的设计中,受美国高加劲桁架、不参与纵向受力的桥面和有剪刀撑的钢索塔传统特征的影响很大。但在施工过程中,关门桥的主缆安装已经采用了从美国新港桥引进的预制平行索股(PPWS)法,并进一步加以推广发展。

关门桥以后,日本的悬索桥建设在很大程度上与本州到四国之间的桥梁建设联系在一起的。从 20 世纪 70 年代,由于交通在现代生活和生产中的重要性,日本政府投巨资建造本州和四国之间的 3 条联络线:(1)淡路线即神户鸣门线,从明石海峡经淡路岛再过鸣门海峡到四国的鸣门。本路线上有两座悬索桥,即明石海峡大桥和大鸣门桥;(2)备赞线即儿岛坂出线,又称濑户大桥线。从本州侧的儿岛跨下津井濑户海峡到砥石岛经岩黑岛架桥到羽佐岛、与岛,最后再跨备赞濑户海峡到四国的坂出。这条线路上共有 5 座大桥,其中下津井濑户大桥和北、南备赞濑户大桥是悬索桥;(3)尾道今治线,从本州的尾道市穿越尾道水道到向岛、因岛再跨海到生口岛,跨越多多罗海峡到三大岛,接着到伯方岛、大岛最后跨过来岛海峡到四国的今治。这条线路上总共有 9 座大桥,其中有因岛大桥、大岛大桥和来岛第一、第二和第三大桥等 5 座是悬索桥。

本四联络桥除一般梁桥外,长大的桥梁共有 16 座,其中 10 座是悬索桥,5 座斜拉桥,1 座拱桥。10 座悬索桥中,有 4 座是公铁两用桥,6 座是公路桥。

从 1976 年大鸣门桥开挖基坑到 1999 年来岛第一、第二和第三大桥建成通车,历时 1/4 世纪的本四联络桥,在建桥规模、技术创新、新材料的引用、设计

革新、新结构架设方法的发明以及海中深水基础设计和施工等各个领域都获得前所未有的进步。这一段建桥史正好反映日本 20 世纪悬索桥的发展史。除大岛大桥因规模较小不再叙述外,下面就其中 9 座悬索桥按竣工年份分述如下,借以描述日本 20 世纪悬索桥的历史和美学。必须指出,这些桥梁都是日本本四联络工团设计和施工的。日本几座著名的悬索桥见图 5。

### (1) 因岛大桥

因岛大桥位于尾道今治线广岛县境内的向岛和因岛间的 800 m 宽的布刈濑户海峡上,即尾道今治线上的第二座大桥,也是本四联络线上建成的第一座悬索桥。从 1976 年 11 月开工建设到 1983 年 12 月 8 日竣工,其中约有一年半时间停工,实际工期 5 年多。桥梁形式为三跨二铰加劲桁架悬索桥,桥梁跨径布置为 250 m+770 m+250 m,桥梁纵向布置见图 5 所示。桥长 1 270 m,桥面总宽 20 m,4 车道。桥下通航净空 50 m。

桥梁的主要设计参数:垂跨比 1/10,桁梁宽 26 m,桁高 9 m,高跨比 1/85.6,宽跨比 1/29.6。主缆直径 618 mm。主缆采用预制平行索股(PPWS)法施工。

因岛大桥是一座美国风格的悬索桥,主梁采用加劲桁架,三跨简支;索塔采用带剪刀撑的钢塔。

因岛大桥与周围环境甚为匹配。

### (2) 大鸣门桥

大鸣门桥位于神户淡路线的南端,横跨大鸣门海峡,将淡路岛与大毛岛联结起来。这是本四联络线上筹建的第一座悬索桥,也是本四联络线上建设的第一座公铁两用悬索桥,于 1976 年中开工,到 1985 年初建成,同年 6 月 8 日通车,建设工期达 9 年。从建成开通以来只有上层通行汽车,下层计划通行双轨高速铁路——新干线,但在 20 世纪 80 年代中建设神户淡路线上另一座特大桥——明石海峡大桥时,仅作为公路桥梁设计,未为以后增设铁路提供条件。所以在本州和淡路岛的铁路隧道未建成前,或淡路岛向东跨越伊势海峡通往大阪的公铁两用桥建成前,大鸣门桥是不可能通行火车的。

大鸣门桥也是一座美国风格的悬索桥,主梁采用加劲桁架,三跨简支;索塔采用带剪刀撑的钢塔。重力式锚碇。主缆采用平行预制索股(PPWS)法施工。主缆直径 840 mm,垂跨比 1/10.7。

大鸣门桥的跨径布置为:93 m+330 m+

876 m+330 m,桥梁纵向布置见图 5 所示,其中 93 m 纯属桁架跨,全桥长 1 629 m。桥下通航净空 41 m,桁梁宽 34 m,桁梁高 12.5 m,高跨比 1/70.1,宽跨比 1/25.8。

大鸣门桥处于日本国立公园的特别地域,日本名胜“鸣门”是日本国家指定的风光明媚的游览胜地,因此大鸣门桥与当地环境配合十分和谐。由于大鸣门桥的加劲桁架受制于通行火车,所以加劲梁较高,桥梁显得有些敦实。

### (3) 北、南备赞濑户大桥

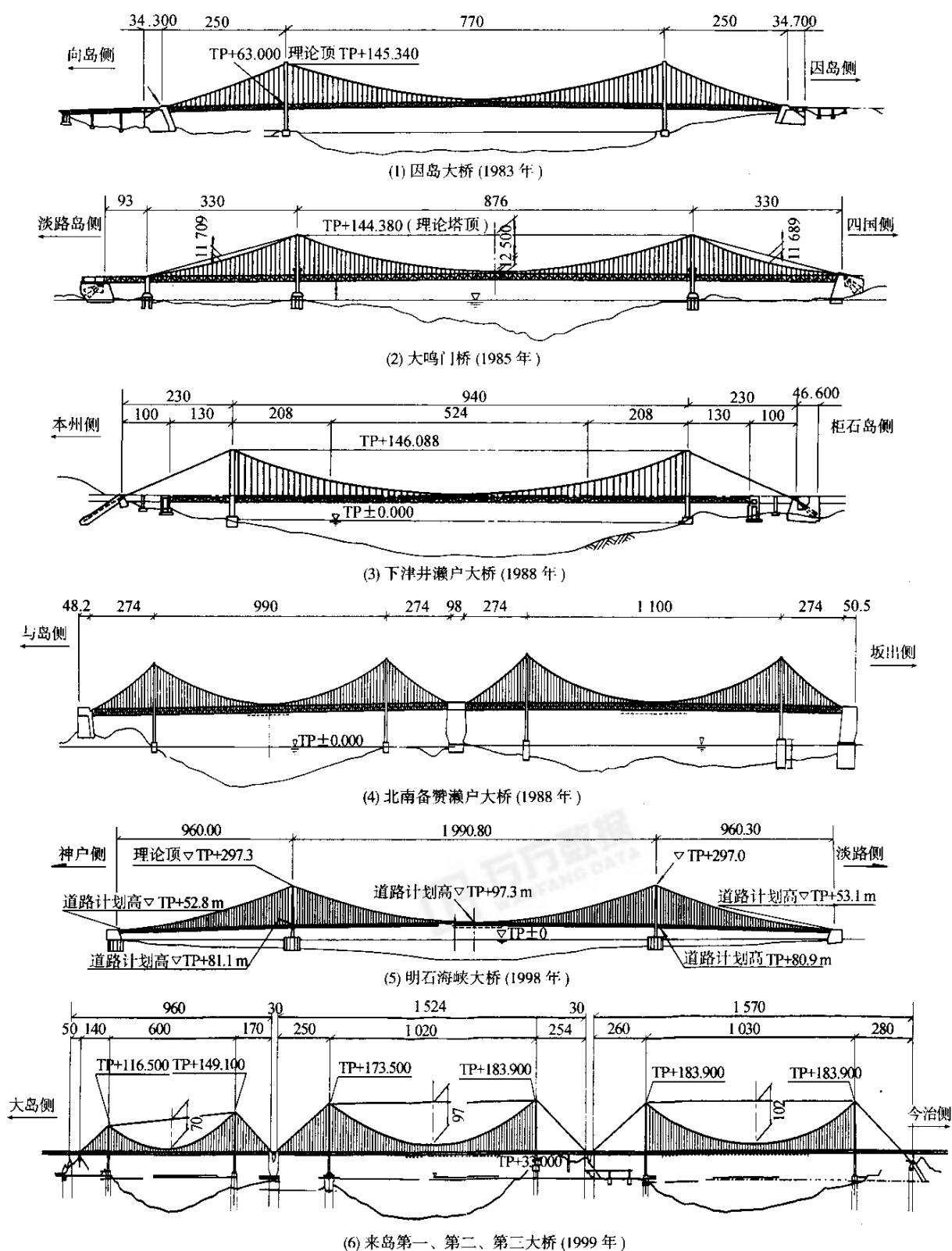
北、南备赞濑户大桥位于本四联络线的中线——儿岛坂出线或濑户大桥线的南端,是两座形式相同,都是三跨连续加劲桁架公铁两用悬索桥,只是两桥的跨径不同和桥长不同。桥梁上层承担四车道公路交通,设计时速 100 km/h,下层承担 4 线铁路交通,两线为普通列车,两线为高速列车——新干线。北备赞濑户大桥架在与岛和三ッ岛之间的濑户海峡上,南备赞濑户大桥架在三ッ岛和番の洲之间的濑户海峡上。该桥从 1978 年秋开工建设,1988 年 4 月 10 日建成通车,历时 10 年,是一项精雕细刻的工程。

桥梁的跨径布置和桥长是:北备赞濑户大桥跨径布置,274 m+990 m+274 m,桥长 1 538 m;南备赞濑户大桥跨径布置,274 m+1 100 m+274 m,桥长 1 648 m。两桥桥下通航净空为 65 m。桥梁纵向布置见图 5 所示。

这两座桥梁的最大特点是共用中间一个锚碇,在结构上非常紧凑简洁。

两桥设计的主要参数:北、南备赞濑户大桥的桁高 13 m,桁宽 30 m,但两主缆中心距为 35 m,故加劲桁架的左右侧都有三角形吊架。高跨比:北桥 1/76.2;南桥 1/84.6。宽跨比:北桥 1/33;南桥 1/36.7。主缆的垂跨比两桥相同为 1/11。主缆直径:北桥 1 006 mm;南桥 1 070 mm。主缆采用预制平行索股(PPWS)法施工。桥梁的形式和风格类似于美国式悬索桥,加劲梁采用钢桁架,索塔是带剪刀撑的钢塔。两座桥梁共 3 个锚碇,均为重力式锚碇。

通过比较得知,备赞濑户大桥总长度大大超过旧金山海湾大桥,同时还了解到旧金山海湾大桥有相当于主跨半长的边跨,而备赞濑户大桥则有相对短的边跨,相当于主跨的 25%。这意味着备赞濑户大桥紧靠中央锚碇似乎更加合理,桥梁刚度较大,因为两座桥梁首尾相接的两边跨位于中央锚碇的两翼。虽然两座备赞濑户大桥在尺度并不一致,但由于透





视失真,从总体上观察,是难于发现其间有所差别。两桥建设地点属于国立公园,也是渔船航行必经之地,所以对环境保护和保证航行安全应给予足够重视。

#### (4) 下津井濑户大桥

下津井濑户大桥是儿岛一坂出线上的第一座桥梁。该桥位于日本濑户内海国立公园中部核心地带,处在鹫羽山和柜石岛之间的下津井濑户海峡上。

下津井濑户大桥是一座连续两边跨向外悬伸的单跨加劲桁架悬索桥,也是一座公铁两用桥,上层布置四车道公路交通,下层布置两条双轨普通列车和两条高速列车新干线。下津井濑户大桥于1981年初开工建设,1988年4月10日和北南濑户备赞大桥一起竣工交付使用。

下津井濑户大桥在设计风格上与备赞濑户大桥是有区别的,下津井濑户大桥的索塔采用框架式门形塔。在塔柱的横向,从桥面梁以上,柱的宽度从6 m逐渐扩展到9.8 m,取得较好的视觉效果。南锚采用重力式锚,北锚则根据地形采用隧道式锚,这样做的结果大大减少开挖土方量,可使鹫羽山的自然景观得以保留。

下津井濑户大桥的跨径布置:100 m+130 m+940 m+130 m+100 m=1 400 m(桥梁总长),桥梁纵向布置见图5所示。桥下通航净空26 m。加劲桁架高度和宽度与备赞濑户大桥的相同,即13 m和30 m。相应的高跨比为1/72.3,宽跨比为1/31.3。但两主缆中心距为35 m,故加劲桁架的左右侧都有三角形吊架。

下津井濑户大桥每一根主缆截面由44股552根直径为5.37 mm钢丝组成,主缆直径为944 mm,垂跨比为1/10。由于采用开挖断面较小的隧道锚,锚固面积小,要求索股根数少、截面大,只能采用空中纺线(AS)法编织架设。并在这座桥梁的缆索架设施工中开发了低强度法,这一方法,使空中纺线法获得新生。在与备赞濑户大桥架缆的竞赛中,低强度法并不比预制平行索股(PPWS)法逊色。这是下津井濑户大桥对空中纺线法的优化改进,使这一方法在悬索主缆编织中永葆青春的一大贡献。

从鹫羽山上远望濑户大桥一览无余,下津井濑户大桥、柜石岛桥、岩黑岛桥和北、南备赞濑户大桥尽收眼底,气势宏伟,濑户内海中的诸岛礁像用濑户大桥串了起来的项链。

#### (5) 明石海峡大桥

明石海峡大桥是神户淡路线上的主要桥梁,该桥位于本州侧神户市垂水区和淡路岛侧的津名郡淡路町之间的明石海峡上。明石海峡,行船如梭,在桥位处水深达110 m,潮急浪高,最大流速达4.5 m/s,加上台风和地震,自然条件十分不利。在宽约4 km的海峡中央部位的1 500 m宽的主要航道上,有长约7 km的国际航道,桥下净空必须保持65 m。最初规划是修建主跨1 780 m的公铁两用桥,后因情况变化,提出修建960 m+1 990 m+960 m=3 910 m的公路桥,桥梁纵向布置见图5所示。1 990 m的明石海峡大桥的主跨径超过前一记录保持者亨伯尔桥主跨径达41%,超过另一记录创造者——丹麦大带东桥主跨径达22.5%。这一记录可能要保持到2011年,也只能保持13年时间,为即将开工建设的意大利墨西诺海峡大桥所超过。

桥梁按三跨两铰加劲桁架悬索桥设计,边跨与主跨之比接近1/2,设计依据是:通过对不同跨径分配比较,包括上部 and 下部结构在内的总工程费用最为经济;对通航影响最小;也为设计施工超大跨径悬索桥积累技术经验。日本本四联络桥公团,从大鸣门桥以来,把钢丝的抗拉强度1 600 MPa除以2.5的安全系数,容许应力定为640 MPa。但在明石海峡大桥设计过程中开发强度达1 800 MPa的钢丝,而活载占用钢丝的强度仅8%,所以将安全系数取为2.2,容许应力升至820 MPa,把最佳垂跨比从1/8.5降到1/10,结果使索塔的高度降低约30 m。

索塔高出海平面达300 m,是目前世界上最高的索塔。通过风洞试验确定塔的截面,每一座塔必须配备20台调质阻尼器,即TDM。加劲桁架设计高14 m、宽35.5 m。对加劲桁架进行风洞试验确认:在主跨的加劲桁架中心部位要设稳定子;在桥面的中心和两边分别设3.0 m和2.3 m宽的格栅桥面,就足以保证桁梁的抗风稳定性。

设计的主要参数如下:垂跨比1/10;桁梁的高跨比1/142;宽跨比1/56.1。明石海峡大桥的主缆,第一次采用新开发的极限强度达1 800 MPa钢丝的桥梁,主缆采用 $\phi=5.23\text{ mm}\times 127$ 根钢丝 $\times 290$ 索股组成。主缆直径1 108 mm,主缆截面的空隙率18%。采用预制平行索股(PPWS)法施工,是第一次采用除湿空气法为主缆防腐。

明石海峡大桥于1988年初开工建设,于1995年1月阪神大地震时,主缆已经架设完毕,主跨径从1 990 m变更到1 990.8 m,3P-4A(南)边跨从

960 m 变更到 960.3 m, 桥梁的设计高程也发生了变化。为此加劲桁架的制作必须进行调整, 主跨两端两个节间各增大 0.4 m, 边跨靠近锚碇的一个节间要增大 0.3 m。于是明石海峡大桥地震后其跨径布置: 960.0 m + 1 990.8 m + 960.3 m。经过整整 10 年施工建设, 于 1998 年 7 月竣工。

当今世界上最大桥梁在景观设计方面下了一番功夫。其景观研究主题是“可靠性”、“未来性”以及“光亮和阴影”。从几个索塔方案中选定对称的桁架式塔。塔顶的索鞍顶盖和水平横梁以及塔柱的斜度都做了美学处理。锚碇块体积硕大, 为了改变视觉效果, 采用多面体, 混凝土表面以凹凸水平砌缝嵌套 PC 板, 形成纹理以取得好的视觉效果。上部工程采用绿灰色与湛蓝的海洋相匹配。为了创造桥梁周边良好的夜间景观, 桥的主塔、主缆、加劲桁架和锚碇各部位都设置夜间照明设施。使主缆呈现多姿多彩, 并随时间流逝使照明图案发生异彩纷呈的变化。

#### (6) 来岛第一、第二和第三大桥

来岛大桥位于本州—四国联络西线(尾道—今治线)的南端。来岛大桥东起大岛, 来岛第一大桥跨越来岛东水道到达武志岛; 来岛第二大桥从武志岛跨越来岛中水道抵马岛; 来岛第三大桥从马岛跨越西水道到达四国的今治。中、西水道是国际航线, 水道迂回, 航船频繁, 潮急礁多, 所以海难较多。来岛大桥建桥地址属濑户内海多岛屿风景区, 是国立公园指定的第二种特别区域。来岛大桥于 1990 年开工建设, 于 1999 年 5 月建成通车历时 9 年。

来岛第一大桥属三跨二铰加劲钢箱梁悬索桥, 即三跨主缆都悬挂加劲梁, 跨径分配  $50\text{ m} + 140\text{ m} + 600\text{ m} + 170\text{ m} = 960\text{ m}$  (桥长); 来岛第二大桥属二跨二铰加劲钢箱梁悬索桥, 即只有两跨主缆悬挂加劲梁, 跨径分配  $250\text{ m} + 1\,020\text{ m} + 254\text{ m} = 1\,524\text{ m}$  (桥长); 来岛第三大桥属单跨二铰加劲钢箱梁悬索桥, 即只有中心主跨主缆悬挂加劲梁, 跨径分配  $260\text{ m} + 1\,030\text{ m} + 280\text{ m} = 1\,570\text{ m}$  (桥长)。来岛大桥纵向布置见图 5 所示。

来岛大桥是世界上第一次将三座悬索桥中间共用两个锚碇串联起来形成一串悬索桥桥梁链。充分利用来岛海峡特有的地形条件, 因地制宜地采用不完全对称布置。但从外观上却很难观察出这些桥梁的细微的变化。

3 座桥梁主要设计参数: 加劲梁采用六角流线型钢箱梁截面, 梁高和梁宽分别均为 4.3 m 和

32 m; 梁的高跨比相应于第一、第二和第三分别为 1/140、1/237 和 1/240; 梁的宽跨比相应地分别为 1/18.8、1/31.9 和 1/32.2。主缆中心距 27 m; 主缆直径相应地分别为 414 mm、653 mm 和 636 mm; 垂跨比分别为 1/8.6、1/10.5 和 1/10.1。主缆采用强度高达 1 760 MPa 的镀锌钢丝组成。除了钢箱梁内采用除湿空气体系防腐外, 主缆第一次采用新开发的 Z 形缠丝, 气密性好, 也采用先进的除湿空气防腐体系防腐。

索塔的美学设计采用从陆上和通过桥梁生成的计算机印象图来考察桥梁的视觉效果。根据美学和造价多方案比较后, 选用门形钢框架结构。6 座索塔采用同一形式。框架的横梁在与塔柱交接处有向下弯曲的趋势, 横梁给人以向上翱翔的印象。本桥造型优美, 富具现代悬索桥的气息。3 座悬索桥串联在一起, 每两座悬索桥使用一个中心锚碇, 这在世界上是独一无二的。

日本悬索桥在近 1/4 世纪里获得高速发展, 除了上述桥梁外, 还有于 1998 年在北海道建成的主跨径 720 m 的白鸟大桥、2000 年建成的主跨径 750 m 的安云滩大桥等。

## 5 20 世纪中国的悬索桥

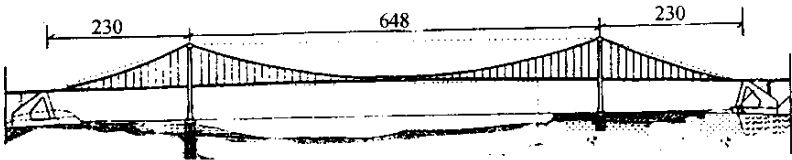
现代中国悬索桥的起步较晚, 在 20 世纪 90 年代以前虽然中国也建设了一些悬索桥, 但总的说来是跨径小、宽度窄和荷载等级低。较著名的有 1951 年建成的四川泸定大渡河桥, 主跨径 165 m, 代替著名的大渡河铁索桥; 1969 年建成的重庆朝阳桥, 主跨径 186 m, 是一座混凝土结合梁的双链式悬索桥; 1985 年建成的西藏达孜桥, 缆索跨径 500 m, 桥面梁跨径 415 m, 桥长 541 m, 悬索一端锚固于岩石中, 仅设一座索塔; 1987 年建成的大连北大桥, 主跨径 132 m, 是一座加劲桁架悬索桥; 1988 年甘肃文县建成跨越白龙江的关头桥, 是一座双链式加劲桁架悬索桥, 主跨径 180 m; 1989 年福建省泰宁建成的金湖桥, 缆索跨径 284 m, 桥面梁长 200 m, 主缆一端锚固于岩体上, 和西藏达孜桥一样只设一座索塔。

20 世纪 90 年代以后, 中国的悬索桥在短短的 10 年中建成 8 座大跨径悬索桥, 这些桥梁基本上代表我国 20 世纪悬索桥建设的总体水平, 体现中国 20 世纪悬索桥的发展历程。中国几座著名的悬索桥见图 6。现将这些桥梁简述如下。

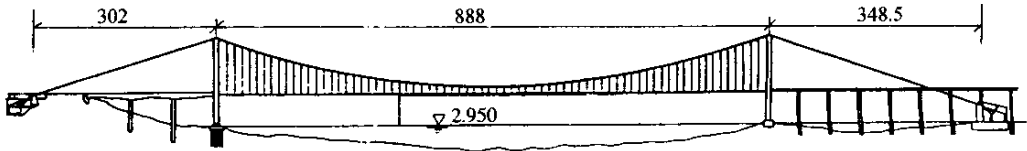
#### (1) 汕头海湾大桥



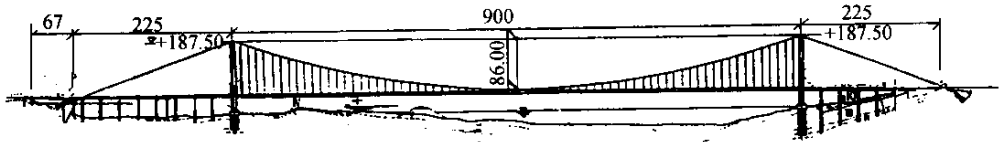
(1) 汕头海湾大桥 (1984 年)



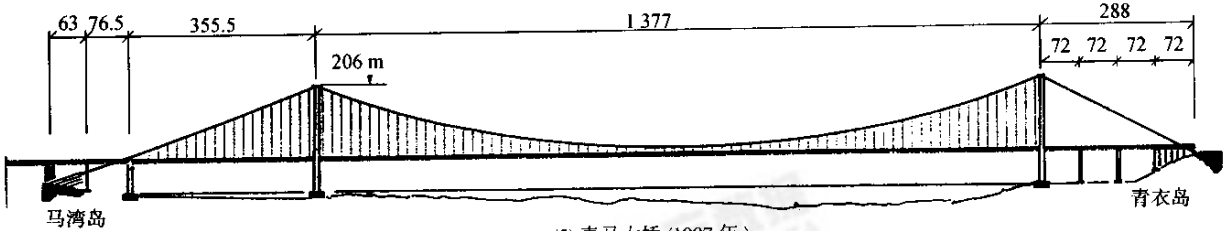
(2) 厦门海沧大桥 (1999 年)



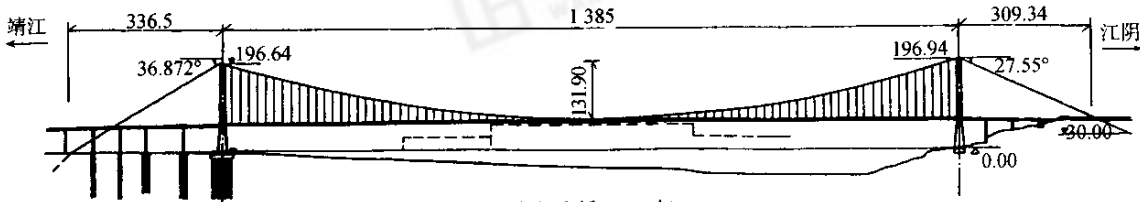
(3) 虎门大桥 (1997 年)



(4) 西陵长江大桥 (1996 年)



(5) 青马大桥 (1997 年)



(6) 江阴长江大桥 (1999 年)

单位:m

图 6 中国的悬索桥

汕头海湾大桥是我国第一座现代悬索桥。该桥为三跨二铰预应力混凝土流线型箱梁悬索桥,其跨径布置为 154 m+452 m+154 m,桥梁纵向布置见图 6 所示。本桥为半漂浮结构体系。预应力混凝土加劲梁在主塔和边墩处均由竖向拉压支座支承,桥

梁纵向由设置在塔内的阻尼设施提供正常使用状态下纵向水平弹性约束。当桥梁受到地震作用时,梁体产生较大的纵向飘移,梁端受边跨端处橡胶缓冲垫块制约,将能量传至两岸桥台上。当加劲梁受横向水平力作用而产生水平方向弯曲时,上述支承体系可

任其转动,其反力则由设置在主塔处的特殊结构段和边墩上的横向挡块所承受。

本桥加劲梁采用单箱三室预应力混凝土结构,梁体截面的外轮廓似橄榄流线型,上翼缘板与路面横坡一致,下翼缘为半径 76.88 m 的圆弧形,梁高 2.0 m,梁宽 24.72 m。同时因混凝土梁自重加大,也增大主缆的直径,导致增大主缆的重力刚度,从而提高了桥梁整体的抗风性能。梁体材料为 C60 混凝土。91.5 m 高的钢筋混凝土门形框架结构索塔。

主缆直径为 560 mm,垂跨比为 1/10。梁的高跨比 1/205、宽跨比 1/18.3。

本桥为中铁大桥局勘测设计院设计,中铁大桥局工程集团公司施工,1995 年建成通车。

汕头海湾大桥对称布置,虽属混凝土加劲梁,但梁体扁平,造型优美。目前其主跨径在同类型桥梁中居世界第一位。

## (2) 西陵长江大桥

西陵长江大桥是长江三峡水利枢纽的配套工程,联接长江两岸施工工地,在三峡工程施工期间要求该桥通过总重达 780 kN 的重型车队。为了适应长江在三峡大坝施工期间航道多次改变,采用一跨过江的悬索桥。该桥在我国首次采用正交异性板钢箱梁作为加劲梁。

西陵长江大桥是单跨两铰钢箱梁悬索桥,其跨径布置为 225 m+900 m+225 m,桥梁纵向布置见图 6 所示。主跨为单跨流线型钢箱加劲梁悬索桥,两边跨为梁桥,南边跨为 5 跨预应力混凝土桥,北边跨为 9 跨预应力混凝土桥。桥下通航净空 18 m,并适当留有余地。梁高 3.0 m,桥面总宽 20.6 m,高跨比 1/300,宽跨比 1/43.7。主缆采用预制平行索股(PPWS)法施工。主缆直径 570 mm。垂跨比 1/10.5。索塔为三层钢筋混凝土门形框架结构,基础以上高 120 m,略高于三峡大坝坝顶。塔基底为桩基。重力式锚碇。

西陵长江大桥系中铁大桥局勘测设计院设计,中铁大桥局工程集团公司施工。1993 年年底开工,到 1996 年中竣工,历时仅 32 个月。

溯长江上行,红色的西陵大桥横跨长江两岸,距三峡大坝仅 4.5 km,大桥与三峡大坝相得益彰。从三峡大坝下泄的江水,浩浩荡荡从桥下奔腾而下,形成三峡特有的风景线。

## (3) 香港青马大桥

香港青马大桥是香港大屿山干线上的重要工

程,也是香港的重要标志性建筑,是联接香港市区和新机场之间高速公路和铁路的组成部分。青马大桥经青衣岛横跨马湾水道到马湾岛,是目前世界上最大跨径的公铁两用桥,主跨径 1 377 m,比美国的金门大桥的主跨径还长 97 m。桥面上层设置 6 车道高速公路,下层设置双线时速达 120 km/h 快速列车铁路。此外下层还留有公路双车道,供平时维修和台风时或紧急通行之需。为了确保在强台风下的空气动力稳定性,对桥面梁的外形进行了精心设计。主桁架从索面稍微向内移置,吊索锚固到三角形托架上。加劲桁架的截面外侧采用 1.5 mm 的不锈波纹钢板覆盖形成整流罩,使加劲梁的横截面形成流线型。这种整流罩既改进了空气动力特性,又保护下层车道免遭台风袭击。在上层桥面的中央还开 3.5 m 宽的槽用来进一步改善空气动力特性。

青马大桥跨径布置为 355 m+1 377 m+300 m,桥梁纵向布置见图 6 所示,为三跨连续加劲桁架悬索桥,主跨和马湾侧的边跨都为悬吊跨,青衣侧的边跨因与立交相接,采用了 4 孔跨径为 72 m 的梁桥。桥面梁固定在马湾端,连续梁一直延伸到青衣侧桥台。青衣桥台的伸缩缝须承受整根加劲梁因温度变化引起的全部伸缩量,在极端状态下伸缩量可达 835 mm。桥下通航净空 62 m。桥塔采用钢筋混凝土结构,塔高 206 m,在两塔柱之间设置 4 道钢桁架横撑,在塔柱施工到顶后,在钢横撑上浇注混凝土形成 4 层门形框架塔。桥面梁的总宽度 41 m,两主缆的间距 36 m。梁高 7.232 m。高跨比为 1/240;宽跨比为 1/33.6。青马大桥的主缆采用空中纺线(AS)法施工,主缆由 91 根索股组成,每一根索股由 368 根直径为 5.38 mm 的钢丝组成。两边跨额外增加 6 根索股,以承担比主跨更大的拉力。主缆直径达 1 100 mm。主缆的垂跨比为 1/11。

青马大桥由万隆顾问香港有限公司设计,英高日建筑联营所施工,耗资 9.23 亿美元。该桥 1992 年 3 月开工建设,1997 年建成通车。

青马大桥气势雄伟,特别是其夜间照明,将桥梁烘托的更加壮观,现已成为香港的著名旅游景点之一。

## (4) 虎门大桥

虎门大桥位于广州东南珠江出海口附近,是连接广深和广珠高速公路的主要枢纽工程,大桥工程全长 15.76 km,东起东莞市虎门镇的威远山,西至番禺市南沙镇的南北台。其中主桥工程长 4 606 m,包括主航道悬索桥、副航道连续刚构桥和东引桥、中



引桥和西引桥。

主航道桥为跨径 888 m 的单跨双铰加劲钢箱梁悬索桥。悬索桥主缆的跨径布置为 302 m + 888 m + 348.5 m, 桥梁纵向布置见图 6 所示, 桥下通航净空 60 m, 这样布置是为了避开深水基础, 充分利用西塔和西锚碇位置的浅滩修筑塔基和锚碇, 和充分满足通行巨轮的要求。从抗风稳定性考虑, 施工风险小; 与斜拉桥相比较, 塔高降了 1/3, 在经济上也是非常有利的。

虎门大桥是完全按高速公路行车速度设计的, 桥面宽 30 m, 按双向 8 车道设计。加劲梁总宽 35.6 m, 两主缆的中心距 33 m。

虎门大桥地处强台风区, 加劲梁必须具备良好的抗风性能。加劲梁采用扁平闭口流线型钢箱形截面。流线型钢箱梁结构轻巧美观, 梁的高度低, 受风面积小, 抗风阻力小, 抗扭刚度大, 有较高的抗风稳定性。梁高 3.012 m, 高跨比为 1/296, 宽跨比 1/25。是国内首座悬索桥加劲钢箱梁内部采用除湿空气体系防腐。

虎门大桥的主缆采用预制平行索股 (PPWS) 法制作、架设, 每一根主缆由 110 根索股组成, 每一根索股由 127 根直径为 5.2 mm 钢丝组成。预制平行索股两端锚头采用锌、铜合金热铸挤压的热铸锚。主缆直径 687 mm, 主缆的垂跨比 1/10.5。索塔高 151 m, 为钢筋混凝土门形框架结构。两塔间由 3 根横撑联结。东西两塔都设有升降机提供自桥面和塔底到塔顶的通道, 对大桥进行维修和养护。东西锚碇均为重力式锚。

虎门大桥于 1997 年 6 月 9 日在香港回归前建成, 意味深长, 大桥与虎门古炮台相互辉映, 其雄伟的形像向世人宣告, 中华民族已巍然屹立于世界之林, 百年雪耻, 弘扬国威。

虎门大桥由中交公路规划设计院设计, 广东省公路工程总公司施工。1992 年 10 月开工建设, 1997 年香港回归前建成通车, 历时 5 年。

#### (5) 丰都长江大桥

丰都长江大桥位于重庆至湖北巴东的干线公路上, 双向单车道。主缆为空间曲线, 主缆在主跨中心的间距为 14 m, 比塔上的间距小 6.5 m。主缆采用预制平行索股 (PPWS) 法预制、运输和架设。丰都长江大桥为单跨简支加劲桁架悬索桥, 主跨径 450 m, 边跨为梁桥。加劲梁为钢桁架与钢筋混凝土桥面板相结合的组合结构。桁架杆件采用 H 形截面, 桁架

为工厂分节段预制的全焊结构, 工地上采用高强螺栓联接, 联接构造装置设在上下弦杆体以外。吊杆为平行钢丝, 与索夹和加劲桁架均为销接。锚碇为隧道锚, 隧道的上缘为圆形, 下缘为矩形, 锚体的棱台呈楔形, 充分利用岩体的力学性能。

#### (6) 江阴长江大桥

江阴长江大桥是中国东部沿海高速公路和京沪高速公路跨越长江的重要工程。1987 年 3 月江苏省委托有关单位对长江第二通道的项目进行规划, 于同年提交报告, 报告提出南京、仪征、镇江、江阴和南通 5 地 12 个桥址共 75 个桥隧方案。在此基础上经有关专家评审, 最终选定江阴西山桥位。长江江阴河段, 河道稳定形成微弯。江阴西山桥位, 西山突出江中, 河段狭窄, 约 1 400 m 左右, 南岸基岩裸露, 北岸为软土地基。根据江阴西山桥位的特殊地形、水文情况、地质条件和自然环境, 结合施工安全, 采用一跨过江的悬索桥。江阴大桥的布置充分利用西山突出江中的有利条件, 在南岸临水边修建南塔, 西山脊梁东侧修建南锚, 垂直江流方向作为桥轴线, 北塔在距大堤 83 m 的浅滩上筑岛修建北塔塔基, 在距北岸江堤约 240 m 处修建北锚。桥跨从北到南的布置为 336.5 m + 1 385 m + 309.34 m, 为单跨简支钢箱梁悬索桥, 桥梁纵向布置见图 6 所示。该桥在目前已建成的悬索桥中跨径居中国第一、世界第四。

江阴长江大桥按车速 100 km/h 设计, 双向 6 车道。桥下通航净空 50 m, 万吨级轮船溯江而上, 可直达南京。190 m 高的索塔由钢筋混凝土塔柱和 3 道横撑形成门形框架结构。下横撑上支承主梁和引桥, 设置竖向支座、横向支座、纵向限位支座和大型伸缩装置等。因南岸是岩体, 南塔基采用 24 根直径 2.8 m 的嵌岩灌注桩; 南锚碇为嵌岩式重力锚; 北岸为冲积平原, 北塔基础采用 96 根直径 2.0 m 的灌注桩; 北锚采用深埋沉井基础的重力锚。

江阴长江大桥主梁采用扁平闭合流线型截面钢箱梁, 梁的总宽 36.9 m, 桥面净宽 29.5 m, 两侧风阻宽 1.5 m, 风阻上设人行道、栏杆和检修车轨道。梁高仅 3.0 m, 高跨比为 1/462, 宽跨比 1/42。这是世界上具有最小高跨比的悬索桥, 也是具有最小宽跨比的桥梁之一。大桥主缆采用预制平行索股 (PPWS) 法制作、架设, 每一根主缆由 169 根索股组成, 每一根索股由 127 根直径为 5.35 mm 的钢丝组成。两边跨又各增加 8 根索股。主缆的直径: 主跨平均为 876 mm; 边跨平均为 897 mm。主缆的垂跨比为 1/

10.5。吊索长于 10 m 的,采用平行钢丝索股共 290 根,短吊索采用直径 80 mm 的钢丝绳。

江阴长江大桥最大的特点是桥位选择工作精当,获得一跨过江的良好效果;北锚采用巨型沉箱,为减少沉箱施工不均匀沉降,在锚体后缘 5 m 宽的混凝土待主缆架设完成后再浇筑;主缆架设时严格控制主缆孔隙率小于通常的 18%,以加速主缆架设和吊索安装的速度。

江阴长江大桥由中交公路规划设计院任主体设计单位,江苏省交通规划设计院和同济大学建筑设计研究院桥梁分院为合作设计单位,由中港集团第二航务工程局、英国克里夫兰桥梁公司施工。1994 年 11 月 22 日正式开工建设,1999 年 9 月 28 日建成通车。

江阴长江大桥的建设,标志着我国悬索桥设计施工水平已进入世界前列。大桥造型优美、刚劲流畅,真正实现了一跨过江、飞架大江南北、天堑变通途的伟大理想。夜幕降临,桥上千百盏华灯齐放,如彩练横跨,晶莹剔透,塔顶射灯直播云层,雪光斑斓,如多月共辉。从江面仰望大桥如铁索行空,飞架天际,桥塔昂首云天,横空出世。大桥的建成象征着我们经济腾飞,国运昌盛,激励人们为社会主义祖国的建设自强不息。

#### (7) 厦门海沧大桥

厦门海沧大桥位于厦门市西港中部,是厦门岛的第二条对外通道。大桥全长 5.926 km,包括西引道、西引桥、西航道桥、东航道桥、东引桥和东渡互通立交桥。这里主要讨论东航道悬索桥。海沧大桥东航道桥为了满足通航要求,采用三跨连续飘浮体系悬索桥。继丹麦大带东桥之后第二座采用这种结构形式的桥梁。桥梁的跨径布置为 230 m + 648 m + 230 m,通航净空 55 m,桥梁纵向布置见图 6 所示。按双向六车道加双向人行道设计,设计车速 80 km/h;厦门地区受台风影响,最大风力超过 12 级;抗震烈度为 8 度。

厦门海沧大桥两主缆的间距 34 m,垂跨比 1/10.5。每一根主缆由 110 根索股组成,每一根索股由 91 根直径为 5.10 mm 的高强钢丝组成,主缆的直径为 570 mm。主缆采用预制平行索股法预制、安装和架设。吊索间距为 12 m;为避免采用过短的吊索,短吊索的下吊点置于钢箱梁的底部,并在边跨端 42 m 长的区域内未布置吊索。加劲梁采用三跨连续流线型扁平钢箱梁。梁高 3.0 m,梁总宽 36.6 m,梁的高跨比为 1/216,宽跨比为 1/17.7。

厦门海沧大桥的锚碇采用空腹三角形框架结构,突破了传统的重力式实体锚碇外观笨重的结构形式,实现了大型结构力线与美学的和谐统一,并为锚碇内部建筑物提供了所需空间。

厦门海沧大桥由中交公路规划设计院设计,中国路桥集团第二公路工程局和广东省长大公路工程公司施工。1996 年 12 月 18 日开工建设,1999 年 12 月 30 日顺利竣工通车。

厦门海沧大桥造型优美,结构新颖,已成为厦门市标志性建筑之一,也是厦门旅游胜地之一。

#### (8) 鹅公岩大桥

鹅公岩大桥是重庆市跨越长江的城市桥梁,桥面设汽车六车道加两条轻轨交通和人行道。为了满足轻轨交通的要求,采用 3 跨连续扁平钢箱梁悬索桥,其跨径组合为 210 m + 600 m + 210 m。加劲梁采用流线型飘浮体系,在索塔下不设竖向支座,而采用特殊吊索措施,在边墩上设有粘滞阻尼器,以增大抗震能力。加劲梁采用流线型抗风截面,梁宽 44.3 m,是当前国内最宽的悬索桥。梁高 3.0 m,梁的高跨比为 1/200,宽跨比为 1/13.5。主缆采用平行预制索股法预制、运输和架设。索塔采用钢筋混凝土门形框架结构,东西塔分别高 147.5 m 和 144.5 m。西锚碇采用三角形重力式锚,东锚碇采用隧道锚。该桥由上海市政工程设计院设计,重庆桥梁总公司施工。2000 年 12 月建成通车。这就是中国 20 世纪最后一座悬索桥。

在 20 世纪的最后的 10 年中,中国建成 8 座悬索桥,各具特色,代表了当代中国悬索桥的建设水平,也与世界水平拉近了距离,如 1995 年建成的汕头海湾大桥,虽然跨径不大,但它是世界上跨径最大的加劲预应力混凝土箱梁悬索桥,也是我国第一座现代化悬索桥。1997 年建成的虎门大桥,是中国第一座建造在强台风地区的钢箱梁悬索桥。1998 年建成的香港青马大桥,主跨径 1 377 m,它是世界上最大跨径的公铁两用桥。1999 年建成的江阴长江大桥主跨径 1 385 m,列世界大跨径桥梁第 4 位,在土质地基上建造深沉并锚碇基础技术获得成功。厦门海沧大桥采用三跨连续全飘浮体系加劲梁,和三角形框架结构锚碇取得了很好的视觉效果。上述事实说明中国在建造大跨径悬索桥方面已步入世界先进行列。

除了桥梁工程实践外,在桥梁科研和学术理论方面也取得重大进展。改革开放以来,开发了一系列悬索桥的静力和动力分析软件和数值风洞计算技术,考虑地震动态时程分析以及多点激励和结构与

土相互作用的桥梁非线性地震响应分析方法和程序。建造了多个风洞试验室,为大跨桥梁提供抗风性能试验。

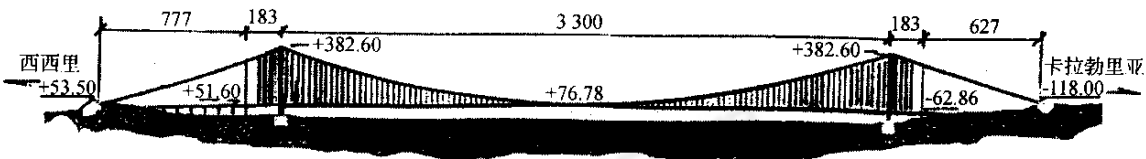
6 展望

20 世纪已经过去,21 世纪的悬索桥将有更大的发展。目前发展速度最快的要数中国,到目前为止,中国已有宜昌、忠县两座长江大桥于 2001 年建成,前者主跨径达 960 m,后者主跨径达 560 m。目前正在紧张施工的润扬长江大桥,主跨径达 1 490 m,2005 年建成以后列世界第三位。该桥在主跨中心部位采用刚性索夹代替短吊杆,以减少短吊杆的疲劳;用地下连续墙和排桩冻结法为支护施工锚碇基础以及采用除湿空气法为主缆防腐等先进技术。正在设计和建造中的广州东环跨越珠江的珠江桥、武汉阳逻大桥和浙江舟山联岛工程—西堠门大桥主跨径分别达到 1 168 m、1 280 m 和 1 650 m 的悬索桥,后者建成后将作为世界上第二大跨径桥。此外跨越渤海海峡、长江口、象山湾、港珠澳和琼州海峡有多座超大跨径悬索桥需要建设。如琼州海峡宽 20~30 km,水深 70~90 m,计划修建 2 000~2 500 m 的多跨悬索桥。所有这些桥梁的进展充分说明 21 世纪中国悬索

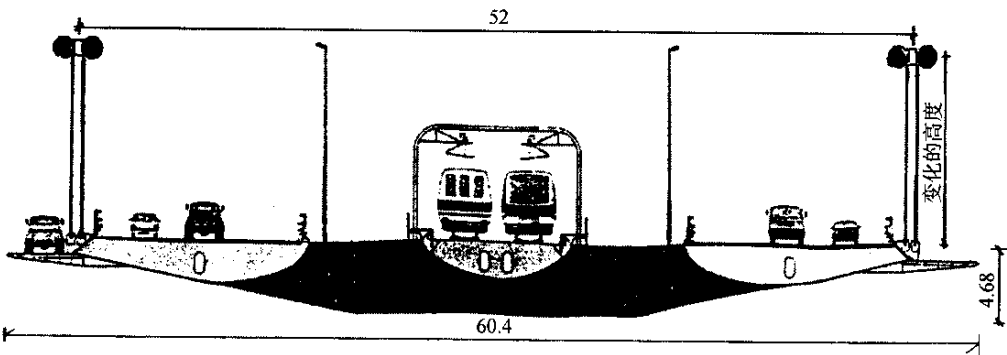
桥的建设方兴未艾,建桥技术水平将渐趋世界前列。

美国近期要建设旧金山—奥克兰东海湾桥,是一座自锚式的悬索桥,跨径分配为 385 m+180 m,双箱梁,单向箱宽 25 m,包括 5 车道汽车和 1 条轻轨铁路;主缆呈空间曲线。该桥预计 2006 年建成。联结亚洲和北美的白令海峡工程,总长 75 km,上世纪曾提出过桥梁方案。

欧洲 21 世纪的悬索桥当推意大利本土到西西里岛跨墨西诺海峡的墨西诺海峡大桥,跨径布置为 777 m+3 300 m+810 m,主梁宽 52 m,为分离式截面,两侧箱梁通行汽车,中间箱梁为双轨铁路。该桥预计 2005 年开工建设,2011 年建成通车。届时将成为世界上最大跨径的桥梁,见图 7 所示。欧洲未来超大跨径悬索桥当属联结欧非两大大陆的跨越直布罗陀海峡大桥。该工程预可研指出,跨越海峡有两条路线:其一是在海峡最窄处稍东宽 14 km,经探测海峡中心有一条山脉,利用深度 480 m 山顶作 4 跨悬索桥中心 A 形索塔的塔墩基础平台,4 跨悬索桥主跨径 5 000 m;其二是从海峡最窄处向西,水域变宽达 28 km,水深减小,建议修一座主跨径为 3 550 m 的 5 跨悬索桥,基础水深 290 m。这些工程为桥梁工程师提出严峻的挑战,同时也带来施展才华的大好机遇。



(1) 纵剖面



(2) 加劲梁截面

单位:m  
图 7 墨西诺海峡大桥设计

日本 21 世纪建桥计划是雄心勃勃的,规划已经出笼,要在太平洋沿岸 4 个海湾和轻津海峡间建设超大跨径悬索桥。东京湾口宽达 12 km,计划修建一座 3 跨悬索桥,中心跨径 2 250 m,用来跨越 1 750 m 的国际航道。在伊势湾口按两种方案建设:第一方案是一主跨径 2 100 m 的 3 跨悬索桥+3 座跨径从 850 ~ 1 000 m 的斜拉桥。第二方案是一座主跨径为 1 400 m 的 4 跨悬索桥。从淡路岛到纪伊半岛间的纪淡海峡宽 11 km,有 6 km 的开敞地带要建一座主跨径 2 100 m 的 3 跨悬索桥。在联结九州和四国的予丰海峡,宽 15 km,也有两个方案:一是建设主跨径 2 800 m 的 3 跨悬索桥,但基础水深达 110~150 m;二是如果下部结构水深限制在 100 m 内,则要建一座主跨径为 3 000 m 的 4 跨悬索桥。跨越轻津海峡有两条路线可供选择,即 19 km 的西线和 13 km 的东线,如以西线为例要建一座主跨径为 3 000 m 和 4 000 m 的 4 跨悬索桥,即使采用这样大的跨径,基础仍然要建在海平面 200 m 以下深度。

展望 21 世纪跨径超过 2 000 m 的悬索桥的主要问题有:空气动力学设计,基本采用单箱或多箱带格栅或开槽截面的加劲梁结构;对于主缆而言,活载对总荷载的贡献随跨径加大越来越小,同时主缆的重量对整个悬吊结构的比重也越来越大,如 3 000 m 跨径的主缆重量占 75%,安全系数可以降低;材料质量提高,如采用碳纤维索等,将导致主缆重力刚度下降,对抗颤振不利;索塔随跨径增大,高度越来越大,如直布罗陀海峡大桥的索塔高出水平面 646 m,比目前世界上最高建筑还高 194 m,压弯失稳的问

题更趋突出;下部结构,在急流浪高水深地区构筑深水基础传统的方法,困难很多,必须寻求新的方法,如采用平台型或双塔型等。

#### 参考文献:

- [1] 樊凡. 桥梁美学[M]. 北京:人民交通出版社,1987.
- [2] 盛洪飞. 桥梁建筑美学[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [3] 中国土木建筑百科全书—桥梁工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] 中华人民共和国交通部. 中国桥谱[M]. 北京:外文出版社,2003.
- [5] 项海帆,等. 中国大桥[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 尼·吉姆辛. 金增洪,译. 缆索支承桥梁设计与概念[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [7] 小西一郎. 戴振藩,译. 钢桥(第五分册). 北京:人民铁道出版社,1981.
- [8] Building Bridges History Technology Construction Hans Wittfoht Beton—Verlag,1984.
- [9] Civil Engineering,2002,72(11,12).
- [10] Bridges Aesthetics and Design Fritz Leonhardt Deutsche Verlags—Anstalt, 1984.
- [11] 30 Bridges Matthew Well Published in 2002 by Laurence King Publishing Ltd.
- [12] Bridge Builders Martin Pearce and Richard Jobson First published in Great Britain in 2002 by Wiley—Academy.
- [13] 中国公路学会桥梁和结构工程学会. 1994 年~2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社.

## 欢迎订阅 2005 年《公路》杂志

2005 年度报刊杂志征订工作已经开始,请您到当地邮局办理订阅手续。

《公路》杂志邮发代号:2—81。每期每本单价:6.8 元。

若订阅不便的读者,可直接在我部办理零售业务。2005 年零售价全年每套 96.00 元(含邮寄费)。

另本刊还有《公路》2000 年~2004 年合订本:每年度合订本 180.00 元(含邮寄费)。欢迎选购。

零售部联系电话:010—65279988 转 1408(上午) 2202(下午) 联系人:叶萍

地址:北京东四前炒面胡同 33 号 邮编:100010