



目 录

第一章 总述	1
第一节 悬索桥及其发展展望	1
一、悬索桥的历史及发展	1
二、未来悬索桥的发展趋势及展望	4
第二节 悬索桥及其上部结构的主要形式和特点	7
一、悬索桥的主要特点	7
二、悬索桥的基本类型	8
三、上部结构的主要形式和构造特点	10
第三节 上部结构安装施工简介	21
一、施工准备	21
二、主要施工机具	23
三、上部结构的主要施工工序	26
第二章 牵引系统的架设施工	34
第一节 概述	34
一、牵引系统的常用形式	34
二、牵引系统的选择	37
第二节 牵引系统架设工艺流程及施工准备	38
一、牵引系统架设的工艺流程	38
二、施工准备	39
第三节 牵引系统的架设施工	40
一、导索过江	40
二、牵引索的架设施工	46
三、施工组织及安全措施	52
第三章 猫道系统架设施工	54
第一节 概述	54
一、猫道系统的设计施工要求	54
二、猫道的构造及布置	54
第二节 猫道的制作与架设施工	58
一、猫道施工工艺流程	58
二、猫道索的制作与架设施工	58
三、猫道面层结构的安装及抗风缆的架设	65

四、猫道的悬挂与拆除	67
第三节 宜昌长江公路大桥猫道架设施工实例	73
一、概况	73
二、猫道架设施工准备	73
三、承重轨道索的架设	79
四、猫道承重索的架设	79
五、猫道面层、横向通道及扶手绳的安装	83
六 猫道的拆除	87
七、施工组织及质量保证措施	89
第四章 索鞍的制造与安装	94
第一节 概述	94
一、索鞍的分类	94
二、索鞍的主要构造	95
三、主索鞍与散索鞍的功能	99
四、索鞍的制造	101
第二节 主索鞍的安装施工	103
一、形成起吊系统	103
二、主索鞍安装工艺	104
第三节 散索鞍安装	109
一、散索鞍锚碇支墩门架结构形式的确定	109
二、散索鞍吊装施工	109
三、散索鞍安装技术要求	116
第五章 主缆的架设施工	118
第一节 概述	118
一、主缆的构造	118
二、主缆架设施工工艺流程	122
三、主缆架设机械设备配置	122
第二节 主缆索股架设	125
一、主缆的两种形成方法	125
二、空中编缆(AS)法	126
三、预制绳股(PPWS)法	134
四、主缆紧缆	142
第三节 宜昌长江公路大桥主缆架设施工实例	145
一、宜昌长江公路大桥主缆的组成规模	145
二、主缆索股架设的准备工作及施工工艺流程	145
三、索股架设	150
四、主缆线形调整	156



五、索股锚跨张力调整	160
六、宜昌长江公路大桥主缆紧缆作业	164
七、施工组织及质量安全保证措施	167
第六章 索夹、吊索的安装施工	170
第一节 概述	170
一、吊索、索夹的结构类型	170
二、吊索、索夹安装的工艺流程及施工准备	172
第二节 索夹的安装	174
一、索夹安装作业程序	175
二、索夹安装施工	176
第三节 吊索的安装施工	180
一、吊索施工作业程序及拉力试验	180
二、吊索安装	182
三、索夹与吊索安装技术要求	185
第七章 主梁架设施工	187
第一节 概述	187
一、悬索桥不同结构形式加劲梁的应用和发展	187
二、加劲梁的结构构造特点	190
三、加劲梁安装的常用方法	193
第二节 施工准备	194
一、加劲梁的制造、运输及定位	194
二、机械设备准备	198
第三节 主梁吊装的基本方法	202
一、主梁吊装的推进方式	202
二、钢桁梁式加劲梁架设施工	204
三、钢箱加劲梁的架设施工	213
四、悬索桥预应力混凝土加劲梁架设施工	222
第四节 加劲梁节段的工地焊接	228
一、加劲钢箱梁的工地焊接	228
二、加劲桁梁的工地连接	233
第五节 宜昌长江公路大桥钢箱梁安装施工实例	239
一、钢箱梁吊装施工	239
二、宜昌长江公路大桥钢箱梁工地焊接	252
第八章 桥面铺装	266
第一节 概述	266
一、钢桥面铺装现状	266
二、钢桥面铺装的特点及技术要求	267

三、钢桥面铺装的构成	268
四、钢桥面铺装工艺流程	275
第二节 防锈体系施工	276
一、钢桥面板表面处理(除锈防腐)	276
二、防锈体系施工	277
三、宜昌长江公路大桥钢桥面防锈体系施工实例	280
第三节 主体铺装体系施工	284
一、GA 混合料施工	284
二、SMA 混合料施工	291
三、密级配沥青混合料(AC 混合料)施工	310
四、环氧改性沥青施工	315
五、接缝及人行道施工	318
第四节 混凝土加劲梁桥面施工	323
一、概述	323
二、混凝土桥面的施工	325
三、沥青混凝土桥面施工	328
第九章 防腐涂装	334
第一节 概述	334
一、主缆系统防腐涂装技术的应用和发展	334
二、主缆结构体系防腐涂装要求及设计	336
三、加劲钢箱梁的防护方式及应用发展	342
第二节 悬索桥缆索系统防腐涂装施工	346
一、主缆系统的涂装防护	347
二、主缆系统防护涂装施工	348
三、主缆的除湿防腐	357
四、主缆缠丝防护	359
第三节 加劲钢箱梁的防腐涂装	374
一、重防腐涂料(油漆)涂装	374
二、喷涂施工	380
三、钢箱梁除湿防腐	382
第十章 施工控制	385
第一节 概述	385
一、施工控制的重要意义	385
二、悬索桥施工控制的主要工作任务及原则	387
第二节 施工控制的前期准备工作	389
一、施工监控计划的编制	389
二、施工监控组织准备	390



三、施工控制技术准备工作	391
第三节 施工监控的实施	399
一、猫道施工监控	399
二、主缆施工监控	404
三、主梁施工监控	416
四、桥面铺装阶段监控	423
五、成桥状态监控	424
第四节 健康监测	427
一、概述	427
二、监测系统的布置	429
三、上部结构的主要观测内容	430
四、健康观测方法	431
五、健康状况评定	432
参考文献	434



第一章 总 述

悬索桥也称吊桥,是指利用主缆和吊索作为加劲梁的悬挂体系,将荷载作用传递到桥塔、锚碇的桥梁。其主要结构由主缆、索塔、锚碇、吊索、加劲梁组成。近代悬索桥的主缆采用高强钢丝作为主要承拉结构,具有跨越能力大、受力合理、能最大限度发挥材料强度、造价经济等特点。悬索桥跨径越大,材料耗费越少,加之桥型优美,因此,在多种结构形式的大跨径桥梁中,悬索桥以其艺术和技术的完美融合而被广泛运用。

第一节 悬索桥及其发展及展望

一、悬索桥的历史及发展

悬索桥有着悠久的历史。我国早在原始社会就有人利用森林中的藤、竹、树茎为材料做成悬式桥以渡小溪,这种利用拉索支撑建造的人行小桥,就是最早的悬索桥雏形。早期的悬索桥根据制索材料的不同,分为藤悬索桥、竹悬索桥、皮革悬索桥等。公元前 206 年,山西的汾河桥采用了铁链作主缆;18 世纪中叶,英国始建铁链悬索桥;1801 年美国建造的跨度为 21m 的雅各布希腊人桥可谓是西方文明圈中最初的悬索桥,也是第一座近代悬索桥。1883 年在纽约建成的布鲁克林桥,中跨 486m,将当时的桥跨记录一下子提高了 100m,从而使该桥成为现代悬索桥的开始之作。20 世纪初,钢缆悬索桥逐步兴起,1931 年,美国建成跨度超过 1000m 具有里程碑意义的乔治·华盛顿桥(1067m),使得桥梁跨径首次突破千米。1879 年英国泰桥垮塌事故,使技术人员对于风致振动有了深刻的认识,1940 年 11 月 7 日,凝聚着现代技术的美国塔科玛老桥因风致振动发生了可怕的垮桥事故,使得技术人员对于桥梁抗风有了更为全面的认识。20 世纪 50 年代,美国人克服了悬索桥的抗风难题;1966 年,英国塞文河桥采用具有良好抗风性能的全焊扁平流线型钢箱梁,把悬索桥的发展又向前推进了一大步;1998 年,日本建成明石海峡大桥,主跨为 1991m,首次使悬索桥的跨径接近 2km。悬索桥是迄今为止建成桥梁中主跨达到 1km 以上的惟一桥型,并以其雄伟的规模和优美的造型被誉为“桥梁皇后”。

(一)国内悬索桥的起源及发展

我国悬索桥的起源较早,至今已有 3000 余年历史。远在公元前 250 年,李冰就在四川境内建有人行“笮桥”(即竹索桥)。汉宣帝甘露四年建成长百米的铁索桥,比英国在 1741 年始建的铁索桥要早 1800 年,汉代建成的铁索桥还有云南澜沧江兰津桥。唐宋时期,建成的四川岷江都江堰珠浦(安澜)桥,最大跨径 60m,全长 330m,宽 3m,木面板,1975 年依原式将竹索改为钢绳,木架墩改为钢筋混凝土墩。同期建成的还有贵州北盘江桥,跨径 120m,宽 3m,底链 30 根。建于公元 1706 年的四川泸定县大渡河铁索桥,主跨 103m,是当时世界上的最大跨悬索



桥,至今保留完好。古代悬索桥跨度小,桥面窄,且无加劲梁,上下波动大,仅适用于人畜通过。

近代第一座公路悬索桥是湖南的能滩桥,建成于 1938 年,跨径为 80m,宽 4.5m,无加劲梁,两侧设风缆,可通行 10t 汽车。同年还建成云南澜沧江老功果桥,跨径 88.55m,宽 4m,为钢索、铁塔、木面柔式桥,后加设加劲梁,可通行 5t 汽车。1940 年为提高老功果桥通行能力,又在上游加建新功果桥,跨径为 135m,宽 5m,可通行 10t 汽车。20 世纪 40 年代建成的还有四川大渡河桥、贵州北盘江桥、怒江惠人桥等。其中 1948 年建成的怒江惠人桥跨径已达 140m,宽 4m,可通行 20t 汽车。近代悬索桥与古代悬索桥相比有了明显进步;一是提高了载重量和稳定性;二是以钢索代替铁索;三是设高塔和加劲梁;四是改缆顶面上承为缆底面下承,从而提高了稳定性和荷载能力。

1949 年,新中国建立后,悬索桥建造与公路交通事业同步发展。一是数量迅速增长,自 1949 年至今,全国建成悬索桥计 80 余座,特别是近 10 年来,长大悬索桥实现了跨越式发展;二是跨径大幅度提高,建国前所建悬索桥,最大跨径不过 200m,而目前所建悬索桥的跨径长达 1000 米以上。现代悬索桥建造史,可分为两个阶段。1949 年至 20 世纪 80 年代中期为第一阶段,所建悬索桥跨径均在 500m 以下。50 年代建成的悬索桥,跨径都未超过 150m,大都为汽—10 单车道桥,如 1951 年建成的大渡河泸定桥、飞仙关桥,1958 年建成的贵州鸭池河桥。60 年代,国内所建悬索桥较多,跨径大多超过 150m。如 1966 年建成的四川渡口雅砻江桥,单孔跨径 171.83m,宽 8.5m,钢筋混凝土塔,钢加劲梁高 4m;1968 年建成的四川渡口金沙江桥,跨径 185m,宽 6.2m, A 字形栓焊钢塔,钢加劲梁,钢筋混凝土预制桥面;1969 年建成重庆嘉陵江朝阳桥,跨径 186m,宽度 8.5m,荷载汽—13,拖—60,主缆为无中央吊索双链式,钢筋混凝土门式塔,开口栓焊钢箱上预制钢筋混凝土板结合加劲梁,隧道式锚碇;60 年代我国对外援建的桥梁中也有悬索桥,如援建缅甸的滚弄桥,援建尼泊尔的特力索里桥等。

20 世纪 80 年代,跨径小于 200m 的桥梁,已可用预应力混凝土 T 构,连续梁和斜拉桥代替,因而悬索桥跨径向 200m 以上发展。1984 年建成的西藏达孜桥,跨径达 500m,宽 4.2m,可同时通行 4 辆 20t 汽车,该桥的建成标志着我国悬索桥建设进入第二个发展阶段。

20 世纪 90 年代,随着高等级公路建设和沿海经济的发展,中国的悬索桥建设实现了跨越式发展。1991 年 12 月动工,1995 年建成的广东汕头海湾大桥,采用的是预应力混凝土加劲梁,跨度为 154m + 452m + 154m,不仅是国内第一座大跨度现代悬索桥,而且其主跨径位居世界预应力混凝土加劲梁悬索桥的第一;1994 年开工,1996 年 8 月建成的三峡西陵长江大桥,主跨 900m,首次实现了一跨跨越长江;1992 年 10 月动工,1997 年 10 月建成的广东虎门大桥,主跨 888m,是中国第一座高速公路上的六车道钢箱梁悬索桥。1994 年 11 月开工,1999 年建成的江阴长江大桥,主跨长达 1385m,为单孔钢箱加劲梁悬索桥,是中国第一座跨径超越千米的特大悬索桥,居世界第四位(前三名依次是主跨 1991m 的日本明石海峡桥、主跨 1624m 的丹麦大带桥、主跨 1410m 的英国亨伯桥,中国香港的主跨 1377m 的青马大桥名列第五);1996 年 12 月开工,1999 年 12 月建成的厦门海沧大桥,主桥跨径为 230m + 648m + 230m,是国内第一座三跨连续飘浮式悬索桥;1997 年 12 月开工,2001 年 9 月建成通车的宜昌长江公路大桥,主跨为 960m,全长 1187m,桥面全宽 30m,设计荷载为汽—超 20,挂—120 级,桥型采用双塔单跨钢箱梁悬索桥,除香港青马大桥外,其单孔跨径长度为目前国内第二,是我国第一座完全由中国人自己设计、施工、监理、监控和管理的特大跨悬索桥。已建成的悬索桥还有重庆鹅公岩长江大



桥、重庆忠县长江大桥,正在施工建设的悬索桥有江苏润扬长江大桥、重庆万县长江大桥等。这些长大悬索桥的建设所取得的成就大大缩短了我国现代悬索桥同世界水平的差距,使中国的悬索桥修筑技术跻身于世界先进行列。

(二) 国外悬索桥的发展及技术进步

国外铁悬索桥起源晚于我国,但发展进步很快。1741年英国建成一座铁链悬索桥,叫“侏氏桥”,跨度为21.34m,使用了61年。

19世纪初期,美国也相继建成多座铁链悬索桥,最大的一座为靠近费城的夸施基尔(Schuylkill)河桥。英国悬索桥技术在借鉴美国经验的基础上也有了新发展,其中最有代表性的是由泰尔伏于1826年建成的,跨径为174m的威尔士—梅来峡悬索桥。泰尔伏在该桥设计中,对金属丝作了许多试验,认为设计容许应力不宜超过 $1/3$ 抗拉强度,改变了过去设计重实际经验而轻理论的情况;在法国,纳维尔受政府委派到英国学习悬索桥技术并开展理论研究。1823年,纳维尔在研究报告中考虑了悬索桥的动力作用,并取得“稳定性随桥的重力与跨长而增加”的结论。这一年,法国开始大量修建悬索桥,至1870年,共建成500余座,其中最有代表性的为1834年建成的弗赖堡(Freibourg)桥,跨径为265m,直到19世纪末,它仍为欧洲最大跨径桥。里昂的机械工塞昆和拉梅首先用优质锻铁丝代替链条,在俄国的丰塔卡河上自行设计施工建成第一座法国式悬索桥;美国的埃勒脱于1830年至1832年到法国学习,回国后也用优质锻铁丝代替链条,于1830年至1849年在惠林设计并建成跨越俄亥俄河的悬索桥,跨径长达308m,创当时跨径纪录,但该桥在1854年被大风所毁。美国的罗勃林针对该桥的事故,进行了潜心研究认为:惠林桥系运动所毁,运动能量来自桥体的自重,桥被风吹得左右摇摆,引起剧烈振动。他同时提出要加三角结构物件使之固定,以控制振动回到平衡。该研究结果对悬索桥的设计与分析作出了许多重要贡献。19世纪至20世纪早期,国外曾建造了大量出色的悬索桥,除上文提到的外,还有布达佩斯跨多瑙河的赛赫尼大桥,主跨203m,1849年首次建成,在第二次世界大战中被破坏,1949年重建;位于英国布里斯托尔,主跨为214m的克利夫顿大桥;位于巴西弗洛里亚诺波里斯的埃尔西利乌大桥,主跨399m,1926年建成,至今仍是世界上最大跨铁悬索桥。1883年,美国在纽约建成的布鲁克林桥,主跨为488m,主缆采用了高强钢丝,当时被称为世界第八奇迹,代表着欧美前期悬索桥建设的光辉成就。

20世纪30年代是美国修建大跨度悬索桥最为兴旺的时期。1931年首先建成跨度突破千米的乔治·华盛顿桥,此桥在纽约跨越赫德森河,主跨达1067m。1937年建成的旧金山金门大桥,其主跨达1280m,曾保持世界最大跨桥纪录达27年之久。进入20世纪40年代以后,由于塔科玛老桥风振垮塌事故,美国放慢建造悬索桥的步伐,开始了对空气动力稳定理论分析和风洞实验研究。20世纪50年代,美国成功克服悬索桥的抗风问题,再次致力修建大跨度悬索桥。1954年首先于威明登建成长度为229m+655m+229m的特拉华纪念一桥。1957年又建成主跨为1158m的麦金奈克海峡大桥。20世纪60年代,美国相继建成跨度为234m+655m+234m跨越纽约圣·劳伦斯河的航海高架桥,跨度为169m+548m+169m的期来克罗克桥,纽约海湾主跨超过金门桥18m的维拉扎诺海峡桥,特拉华纪念二桥等。其中维拉扎诺海峡桥主跨长度的世界纪录保持达17年之久。20世纪60年代以后美国修建的悬索桥较少,但至今世界上拥有悬索桥最多的国家仍然是美国。美国悬索桥的发展历经百年,在技术上日趋成熟,为悬



索桥的发展铺平了道路。

目前,许多国家所建的大跨度悬索桥基本上都受美国式悬索桥影响,在风格上基本一致。一般而言,美国悬索桥有如下特点:(1)绝大多数为三跨地锚式;(2)主塔采用钢结构;(3)钢结构采用铆接或栓接;(4)桥面上、下游侧各有一竖直的索平面;(5)主缆都采用空中编缆法制造架设;(6)采用竖直的吊索;(7)绝大多数加劲梁采用桁架形式;(8)加劲梁是非连续的;(9)采用钢筋混凝土桥面;(10)绝大多数是公路桥,个别通行城市客运电车。

欧洲在 19 世纪中叶多致力于铁路的发展,当时的悬索桥不适用,加之风毁事件多次发生,悬索桥的发展暂时停顿。直到第二次世界大战后美国成功地从塔科玛悬索桥的风振垮塌事故中吸取了教训并取得技术上的突破口后,欧洲才又重新开始了悬索桥的研究。1964 年英国在苏格兰建成主跨 1006m 的福斯公路桥。该桥在修建过程中,大量引进美国的先进技术并加以改进:主缆采用美国的平行钢丝空中编法制造;而塔的设计大量采用工厂焊接,并用纵向加劲的大型钢板件代替铆接多室构造,使塔的用钢量大大减少;加劲梁设计中,虽仍采用桁架,但桥面改为正交异性板,使恒载减轻。该桥虽有改进,但仍近似美国的传统悬索桥。1966 年,英国建成的塞文河桥,其主梁在通过大量的风洞试验后,将加劲梁大胆改为全焊的扁平的钢箱梁,梁高只有 3m,使高跨比降至 1:324;梁宽 22.8m,使宽跨比为 1:43,采用这种流线形钢箱梁,减轻了梁的扭振和风压力,这是英国对悬索桥发展的一个重大贡献。20 世纪 60 年代以来,欧洲先后建成的有葡萄牙首都里斯本的萨拉扎桥、丹麦的小贝尔特桥、土耳其的博斯普鲁斯一桥、德国莱茵河上的克莱埃默—埃里希桥、挪威的斯克约门桥和克瓦尔松桥。1981 年英国又建成当时世界第一大跨度的亨伯尔河桥,此桥也是采用流线形扁平钢箱梁和斜吊索,桥塔采用混凝土。纵观欧洲悬索桥,其主要特点是:(1)加劲梁采用流线形扁平钢箱梁;(2)不断探讨采用斜吊桥;(3)采用混凝土桥塔;(4)采用连续的加劲梁;(5)有采用主缆与加劲梁在主跨中点固接的形式;(6)钢结构用焊接代替铆接和栓接。

日本近代悬索桥发展迅速并后来居上,在本州至四国的三条联络线上的 22 座大桥中,有 11 座采用了悬索桥形式。在本四联络线修建以前,首先于 1962 年在福冈建成主跨为 367m 的若户桥,其后又相继建成关门桥、长崎平户桥。通过以上三桥的实践,接着在本四桥中陆续建成一系列的悬索桥。如 1984 年建成的因岛大桥、1985 年建成的大鸣门桥、1988 年建成的下津井大桥、北备赞大桥等;1998 年建成的明石海峡大桥,主跨为 1991m,是一座超世界跨度纪录的特大跨悬索桥,受到全世界的瞩目。日本的悬索桥,接受美国模式的特点较多,但对英国模式的悬索桥也作过尝试实践。由于工业的发达和技术的进步,日本悬索桥也有自己的特点:(1)主缆的制造和架设基本是用预制平行索股法代替了空中纺线法;(2)采用大跨度公、铁两用悬索桥,以缓冲梁来解决铁路对桥面伸缩量和转角方面的要求;(3)采用连续桁梁,在塔墩处设有伸缩缝;(4)采用正交异性板代替钢筋混凝土板。

二、未来悬索桥的发展趋势及展望

悬索桥的发展历史证明,纤巧美观的悬索桥是特大跨径桥梁的惟一结构形式,当今世界主跨长度排名前十名的都是悬索桥,专家分析今后悬索桥的跨径将有望超过 3000m。可见,悬索桥的发展是与社会的进步、交通事业的发展和科学技术水平的高低密切相关。在 21 世纪,悬



索桥技术将不断向前发并更广泛地运用到建桥实践中。

(一) 社会进步和交通事业发展的需要

交通建设历来被称为社会经济发展的“先行官”，“经济发展，交通先行”已成共识。我国改革开放 20 多年来，公路交通建设有了很大发展，截至 2003 年底，全国公路通车总里程达 170 余万公里，居世界第四位；其中高速公路从无到有，已突破 2.5 万公里，居世界第二位；但从高速公路占路网比重，高级、次高级路面铺装率和公路网密度等方面来看，与发达国家还有很大差距。美国的高速公路达 8.86 万公里，占全国公路总里程的 1.4%，而中国只占 1.17%，不仅所占比例小，通车的里程和美国也相差很远。据统计，我国国道网的拥挤度达 1.13，有一半里程处于拥挤状态；从公路密度看，我国的公路密度为每百平方公里 18.3km，居世界第 16 位，远低于美国的 67km/100km²，更低于日本的 304km/100km²。公路的通达水平很低，特别是以公路为主要运输方式的西部地区，公路的等级、密度不足的问题更加突出。

沿海地区的开放开发，也必然带动桥梁等配套基础设施建设的发展。中国大陆海岸线长达 18000km，有众多的沿海岛屿、漫长的海岸线和辽阔的领海水域，蕴藏着丰富的资源，正在发展的许多港口城市为中国的对外交流提供了极好的口岸。中国已正式加入 WTO，这些岛屿、海湾将被进一步开发利用。21 世纪初中国正在规划与建设的跨海通道有从杭州至宁波的杭州湾跨海通道，从上海到南通的长江口岸通道，雷州半岛至海南岛、大连至蓬莱的跨海工程；由珠海至香港的伶仃洋跨海通道。沿海地区的加速发展，必然对交通运输提出更高要求。伴随着高新科学技术、建筑材料的进步，在大江大河及宽阔的水域采用跨越能力强的超大跨径悬索桥，将是未来桥梁建设的一个发展趋势。

(二) 设计理论的研究与完善

纵观悬索桥的发展历史，是一个不断研究、改进、完善的过程。近几十年来，各国坚持不懈地对悬索桥进行了研究。

1. 设计理论设计方法的研究

悬索桥的设计理论正在不断地研究完善，从古典的弹性理论、挠度理论、线性挠度理论到广泛使用的有限变形理论和运用电子计算机进行的各种非线性分析和动力分析，考虑了各种变形情况和边界条件，从微分方程到有限元，矩阵分析越来越复杂，越来越细致，越来越全面。悬索桥的设计也在不断完善优化。悬索桥设计的难点：一是抗风设计；二是抗震设计和疲劳设计。抗风设计有两种方法：一种是英国式，采用流线形扁平箱梁和斜吊桥；另一种是美国式，采用加劲桁梁和直吊索。当前无论采用那种设计都趋向于静态设计和动态验算。根据风力进行静态计算时，先求出应力和变形，并验算压屈失稳；动态验算的主要对象是箱梁及桁梁的自激振动，以及箱梁、腹杆挡风面积率较大的桁梁的主塔设计时的涡流振。21 世纪，日本在超长跨径悬索桥规划中最重要的方针之一是采用抗风设计，同时也考虑了施工及维护费用，加劲梁的基本形状计划采用单箱或双箱并带风嘴的截面形式，其附加措施是采用很宽的开敞式的格栅桥面和考虑列入一些空气动力学附件。另外一些抵抗空气动力学不稳定预防手段是通过辅助性构件以增加结构的刚度，使用交叉吊杆或十字交叉构架斜向地将主缆和桥面梁连接等，此外还提出许多消除超长悬索桥风生不稳定的新构思，悬索桥的设计规程也在不断修改、补充、完善之中。如日本现行公路桥和铁路桥的设计标准的适用跨度分别是 200m 和 150m，而日本本



四联络线上的悬索桥均大大超过此值,加之本四桥位于世界台风常袭地带,其抗风稳定性特别重要。因此,日本自本四公团成立后,花了大约 10 年时间,编制了本四桥设计、施工专用规范和标准 10 余种,并随着工程的进展,在不断修改补充。国内对悬索桥的设计理论、施工方法也在不断研究、创新,近年来,出版了许多有关悬索桥设计、施工、控制等方面的技术专著,即将颁布实施的中华人民共和国行业标准《公路悬索桥设计规范》将为悬索桥设计提供基本依据。

2. 新的悬索桥型的研究

20 世纪美国的悬索桥结构体系,主要是地锚式悬索桥。近几十年来,研究和推广的桥型有:

(1)上承式悬吊桥。这种桥型由美籍华人林同炎首创。上承式悬吊桥是根据悬索桥、悬臂结构和拱桥等桥型的特点,并通过施加预应力而发展起来的。一般由下弦构、主柱和上弦构组成。它不设桥塔,主缆索在桥下部,上部混凝土作为上承式桥面,犹如反方向的悬索桥,故而又称反向悬吊桥。其主要特点是:比悬索桥抗扭刚度,稳定性好;下弦构、立柱可作为施工脚手架和支架;水平反力比钢悬索桥大,需要锚固,但不需要桥塔;桥型美观、协调,宜于深谷、海峡处建桥,但要占一定的桥下空间。

(2)悬吊板桥。它是将预应力钢筋以一定的间隔水平排列一层或几层,施加强拉力后包以混凝土,使它成为桥面兼缆索的构造。也就是说把一般悬索桥中的主缆、吊索、加劲梁和桥面板融合为一体,成为一条预应力混凝土结构的悬带。

(3)悬索拱桥。相当于将悬索桥中的桥塔和加劲梁的一部分材料分出来做成拱肋或斜撑,主缆的两个悬挂点更近,从而增强全桥的整体刚度。悬索拱桥的拱脚可以锚固在主梁上,也可以落在塔墩或基础上。其优点:与一般的悬索桥相比有较大的刚度优势;无需像斜拉桥那样高的桥塔;吊索自由长度缩短,对全桥的动力特性有利;起伏的拱肋与缆索共同承重,刚柔相济;施工期间,刚性斜撑可起抗风稳定的作用。

(4)吊拉组合式桥型。悬索桥跨径增大达 3 500m 时,动力问题将是一个突出的矛盾,所以,对特大跨桥梁,已提出用悬索桥和斜拉桥相结合的“吊拉式”桥型。在国外,这种桥型还停留在研究之中,并未付诸实施。然而,1997 年在我国贵州省乌江上建成了一座用预应力钢纤维混凝土薄壁箱梁作为加劲梁的吊拉组合桥,把桥梁工作者多年梦寐以求的桥型付诸实践。乌江吊拉组合桥经过两年运行和测试,结构性能良好,特别是两种桥型交接部位的处理,较为合理。

3. 特大跨度悬索桥的研究

目前,世界上最大跨度的桥梁尚未超过 2 000m,悬索桥的最大跨度能达到多少,是桥梁工程技术人员正在研究的课题。国外曾有文献报道:如采用传统的材料,只考虑施工架设技术的可行性,最大跨度为 3 500~4 000m;如采用新的原材料来编制主缆,则最大跨度可达 7 000~8 000m。国内也有文献认为:采用传统的钢丝来编制主缆,只考虑成桥后主缆的承载能力时,最大跨度可达 2 620~6 330m。

(三)施工方法的改进及材料的更新

近几年来,随着悬索桥的不断发展,对桥梁的功能(跨越能力、通过能力、承载能力等)、美学(纤细轻盈的外观、美化协调环境等)、环境保护(防噪声、防震动、防污染等)提出了越来越高的要求,因而形成了悬索桥结构向高强、轻型、大型化、设计标准化、电算化、构件生产工厂(场)化、施工装配化、机械化方向发展的总趋势。各国在悬索桥的施工中都在不断改进和革新,如桥塔、主缆索、锚碇施



工工艺设备,表面防护工艺设备,开发控制系统等。主要表现在以下几个方面:

1. 改善纺丝轮车,加快空中纺丝速度。如纺轮从 1 轮、2 轮至 8 轮;纺丝速度有 200 ~ 427m/min。

2. 采用工厂预制平行钢丝主缆,可降低主缆纺丝时间,并能和安装塔架同时施工,减少空中纺丝设备。但跨度大时,应对施工方法作全面比较后采用。

3. 新材料的使用。大跨度悬索桥一般都用柔性索,主缆钢丝的抗拉强度不断增强,如布鲁克林桥主缆的钢丝抗拉强度为 1 100MPa,而明石海峡大桥主缆钢丝抗拉强度为 1 800MPa,目前,正在开发 2 000MPa 的钢丝。今后,开发碳素纤维,高强度螺栓、高强合金钢等将会成为热点。

4. 引进新的施工机械,如液压主缆机、缠丝机、大吨位吊机,加强自动控制管理的质量管理,使悬索桥设计跨径能达到 3000m 以上。

5. 耐久性 & 抗腐蚀性材料的研究。如耐久性高强钢、钢丝及防腐防锈工艺的开发,高强度耐久性混凝土、水下混凝土的研究,并使材料向轻型化发展。

第二节 悬索桥及其上部结构的主要形式和特点

悬索桥与其它大跨度桥梁相比,具有明显的优势和极高的美学价值。悬索桥的下部结构由塔、支撑着塔的桥墩、锚固着主缆的锚碇组成;其上部结构由主缆、加劲梁和吊索组成。这种基本结构形式是大跨度桥梁结构最适合的形式。

一、悬索桥的主要特点

(一)悬索桥与其它大跨度桥式相比较的主要特点

1. 悬索桥与拱桥相比:凭借柔性的缆而使桥具有刚性,是悬索桥的主要特色。悬索受拉的大缆不会失稳,这样就省去了支撑,而拉应力是均布于缆的截面,使材料强度能够充分利用。而拱桥就不能这样,拱是弯曲压杆,轴压力和弯矩都会使拱失稳。另外,拱的质量中心较高,对于抗震也是一个不利因素。还有大跨拱的施工架设方法,一般是采用从两岸进行伸臂安装,在跨中合龙,这就需要较长的工期,且在施工中还要担心飓风的袭击。

2. 悬索桥与斜拉桥相比:悬索桥的恒载主要由主缆承受,所以当活载对恒载之比较小时,其加劲梁所承受的弯矩是小的,其梁的截面尺寸可以较小。而在斜拉桥中,恒载是由斜缆受拉和主缆受压来承担。随跨度的增大,梁所承受的恒载压力就不小,其截面尺寸就无法减小。当跨度不算大或活载相对高时,斜拉桥在活载下的刚度可以较好。但对于更大的跨度,斜拉桥至今尚无实例,而悬索桥跨度大于 1 000m 者,已建成 10 余座,且无一例感到其刚度不够。

(二)悬索桥显著的美学价值

自古以来,人类对桥梁艺术造型美不断探索,不懈追求桥梁建筑与环境的协调美。20 世纪 70 年代,日本在特大型现代桥梁规划中开始提出桥梁景观概念。悬索桥作为日常突出于周围环境的巨型建筑物,其景观的美学价值更为突出。2001 年建成通车的厦门海沧大桥,突破了国内传统的桥梁工程建设观念,在初步设计阶段就同步开展了系统的桥梁景观研究、设计,提出了创“一流景观,建设适应 21 世纪的现代化桥梁”的建设目标。建设单位在建设过程中,



把桥梁景观设计与桥梁结构设计、桥位环境保护和环境建设统一起来,把桥梁艺术造型美作为选定桥型方案的重要条件并用以指导施工图设计,在主体工程施工阶段同步完成景观工程建设,成为我国桥梁工程建设中的一大亮点。桥梁景观应涵盖的基本内容是:在普遍美学原则指导下进行桥梁结构艺术造型美学设计,以桥梁结构为载体进行桥梁美学设计,结合桥址周边地形及人文特点进行桥位周边景观设计,对景观资源进行综合开发利用。桥梁景观包括以下内容:桥型优选,桥梁主体结构艺术造型,锚碇内部空间开发利用,涂装及色彩,灯饰夜景及照明工程,周边景观等。具有薄饰带状桥面的大跨度悬索桥,当它跨越水面,浮穿长空时,看上去轻若无物、宛如流云,其美丽景致令人陶醉,成为江河湖海上的亮丽风景,具有极高的美学价值。

二、悬索桥的基本类型

悬索桥的类型可根据悬吊跨数、主缆锚固方式及悬吊方式等方面加以划分。

(一)按悬吊跨数分类

可分为单跨悬索桥、三跨悬索桥、四跨悬索桥和五跨悬索桥,其结构形式如图 1-2-1。其中单跨悬索桥和三跨悬索桥最为常用。

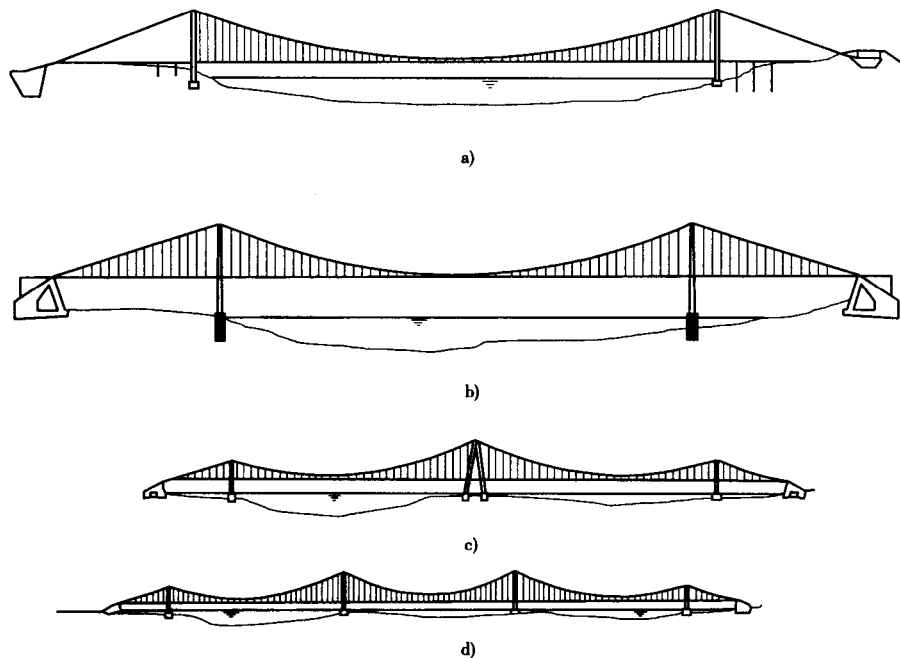


图 1-2-1 悬吊跨数不同的悬索桥

a)单跨悬索桥;b)三跨悬索桥;c)四跨悬索桥;d)五跨悬索桥

1. 单跨悬索桥。单跨悬索桥常用于高山峡谷地区,两岸地势较高,采用桥墩支撑边跨更为经济,或者道路的接线受到限制,使得平面曲线布置不得不进入大桥边跨的情况。就结构特性而言,单跨悬索桥由于边跨主缆的垂度较小,主缆长度相对较短,对中跨荷载变形控制更为有利。

2. 三跨悬索桥。三跨悬索桥是目前国际工程实例中应用最多的桥型,世界上大跨度悬索



桥几乎全采用这种形式,这不仅是因其结构受力特征较为合理,同时其流畅对称的建筑造型也更符合人们的审美观点。

3. 多跨悬索桥。相对于三跨悬索桥而言,四跨或五跨悬索桥又称之为多跨悬索桥。这种桥型由于结构柔性大,固有振动频率较低,难以满足特大跨度悬索桥的受力及刚度需要,因而也就不具备实用优势,世界上几乎没有这类特大桥工程的实例。在建桥条件需要采用连续大跨布置时,可以用两个三跨悬索桥联袂布置,中间共用一座桥的锚碇锚固这两桥的主缆(如图 1-2-2 所示),美国的旧金山—奥克兰海湾大桥和日本本州四国联络线中的南北备赞大桥即采用此形式。当建桥条件特别适于作连续大跨布置而采用四跨悬索桥时,其中央主塔为满足全桥刚度要求通常需作 A 形布置,如图 1-2-1c)所示,相应的塔顶主缆须采取特殊锚固措施,以克服两侧较大的不平衡水平拉力。

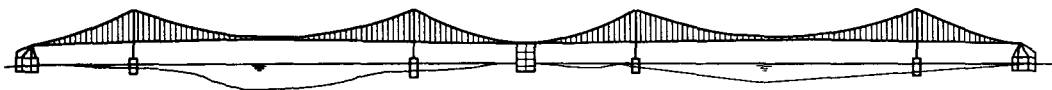


图 1-2-2 联袂布置的悬索桥

(二)按主缆的锚固方式分类

按主缆的锚固形式划分,可分为地锚式悬索桥和自锚式悬索桥。

1. 地锚式悬索桥。通常所讲的绝大多数悬索桥都采用地锚方式锚固主缆,即主缆通过重力式锚碇或岩隧式锚碇将荷载产生的拉力传至大地来达到全桥的受力平衡,这是大跨度悬索桥最佳的受力模式。

2. 自锚式悬索桥。在较小跨度的悬索桥中,也有个别以自锚形式锚固主缆的,这种自锚式悬索桥的主缆在边跨两端将主缆直接锚固于加劲梁上,主缆的水平拉力由加劲梁提供轴压力自相平衡,不需要另外设置锚碇,如图 1-2-3。这种桥式的加劲梁要先于主缆安装施工,实践中因施工困难、经济性差等原因也极少采用。

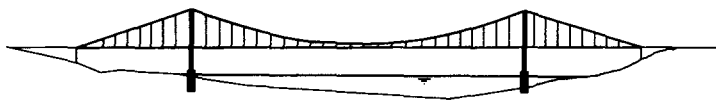


图 1-2-3 自锚式悬索桥

(三)根据悬吊方式分类

1. 采用竖直吊索并以钢桁架作加劲梁,如图 1-2-4 所示。

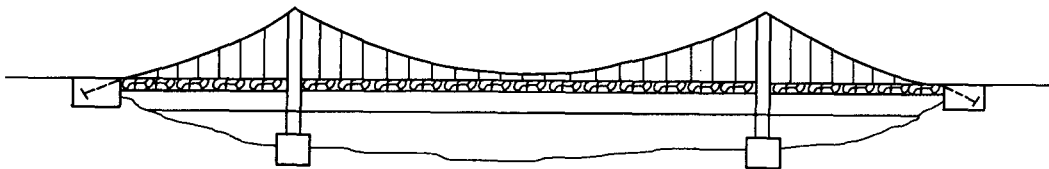


图 1-2-4 采用竖直吊索桁式加劲梁的悬索桥

2. 采用三角布置的斜吊桥,并以扁平流线形钢箱梁作加劲梁,如图 1-2-5 所示。也有呈交



叉形布置的斜吊桥,如 1952 年建成的圣马科桥。

3. 混合式,即采用竖直吊索和斜吊索,流线形钢箱梁作加劲梁。
4. 除了有一般悬索桥的缆索体系外,还设有若干加强用的斜拉索,如图 1-2-6 所示。

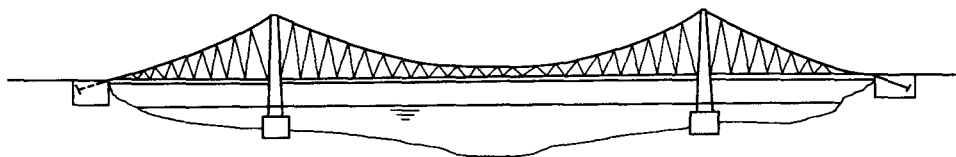


图 1-2-5 采用斜吊索钢箱加劲梁的悬索桥

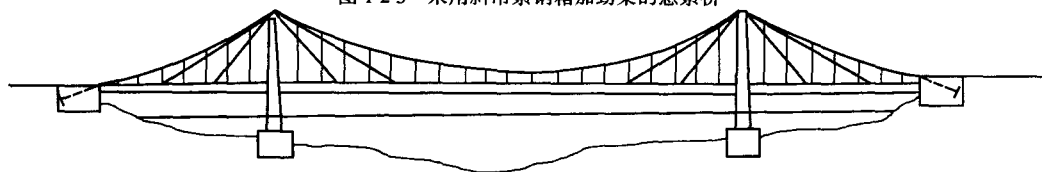


图 1-2-6 带斜拉索的悬索桥

(四)按支承结构分类

如果按加劲梁的支承结构来分的话,又可分为单跨两铰加劲梁悬索桥、三跨两铰加劲梁悬索桥及三跨连续加劲梁悬索桥等,如图 1-2-7 所示。

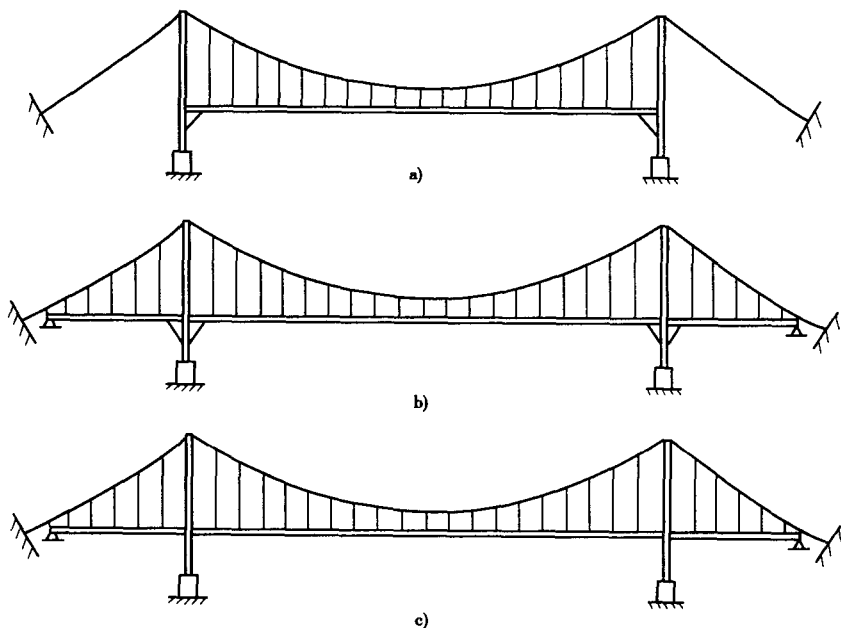


图 1-2-7 按支承构造划分悬索桥形式

a)单跨两铰加劲梁;b)三跨两铰加劲梁;c)三跨连续加劲梁

三、上部结构的主要形式和构造特点

现代悬索桥通常主要由主缆、主塔、锚碇与加劲梁等四大主体结构以及塔顶主索鞍、锚口、



散索鞍座或散索束箍和悬吊系统等重要附属系统组成。其上部结构主要包括主缆、吊索、索夹、加劲梁。下面分别介绍其上部结构的主要结构及特点。

(一) 主缆

主缆是以桥塔及支墩为支承,两端锚固于锚碇,并通过吊索悬挂加劲梁的缆索,是悬索桥的主要承重构件。主缆除承受自重恒载、索夹、吊索、加劲梁等恒载外,还承受索夹、吊索传来的活载。另外,主缆还承担一部分横向风以及湿度变化的影响,并直接传到桥塔顶部。

1. 主缆的材料

悬索桥的主缆材料必须具有强度高、弹性模量大、耐腐蚀等性能,故现代长大悬索桥都选用高强镀锌钢丝及镀锌钢丝绳。主缆先后经历了钢结构眼杆式缆链、钢丝绳缆、封闭钢绞索缆,最终发展为现在的平行钢丝主缆。在欧洲和美洲,悬索桥的主缆都曾采用过眼杆式缆链,其主要优点是可以适应缆力沿桥变化而改变截面,使用料经济。1931年,在巴西建成的弗洛里亚诺波利斯(Florianopolis)桥,为跨度 $129\text{m} + 340\text{m} + 129\text{m}$ 的悬索桥,其主缆中段和加劲梁上弦合成一体,其经济性更加明显。随后,美国也曾修建几座这种式样的悬索桥。但这种用眼杆作主缆的悬索桥有一致命弱点,那就是某一眼杆其净截面裂缝会导致全桥破坏、甚至坠毁。所以,随着工业技术的发展,悬索桥主缆多采用拉力强度和疲劳强度更高的钢丝。此时,为了方便施工,中、小跨悬索桥多使用钢绞线。但是,钢绞线的弹性模量低,使得桥的变形增大,且钢绞线作主缆时不易按设计截面形状压紧,也难采取有效的防腐措施。所以,现代长大悬索桥主缆宜采用弹性模量高的高强镀锌钢丝组成的主缆。

2. 主缆的类型

目前,在悬索桥主缆的设计中,多是根据上述材料要求条件而选择主缆的类型。而主缆类型主要有如下两类:

(1) 钢丝绳主缆。多用于中、小跨悬索桥,它又分为钢绞线绳和螺旋钢丝绳(Spiral rope,简称 SPR)、封闭式钢绞线索(Locked coil rope,简称 LCR)。

(2) 平行丝股主缆。主要用于大跨悬索桥,其根据制作方法分为空中纺线法的平行丝股主缆(Airspinning method,简称 AS)和预制丝股法平行丝股主缆(Shop-fabricated parallel wire strand method,简称 PPWS 或 PS)两种。钢丝绳主缆仅用于 600m 以下跨度的悬索桥,而平行丝股主缆用于跨度在 400m 以上的悬索桥。

3. 主缆的制作

主缆的形成方法主要有空中纺线法(AS法)和预制平行索股法(PPWS法)两种。

空中纺线法(AS法)是利用牵引机械往复曳拉钢丝,在现场制作平行钢丝索股的施工方法。1883年,美国的罗勃林(John A. Roebling)在修建跨度为 250m 的尼亚加拉(Niagara)桥时,发明了以后许多大跨悬索桥主缆制作采用的空中纺线法,但此桥的主缆是用熟铁丝编制的。而其后,1883年在纽约建成的布鲁克林(Brooklyn)桥,其主缆是用平行钢丝采用空中纺线法制作。而在欧洲修建的悬索桥,其主缆主要是用钢丝绳制作,直到1964年英国修建福斯湾(Forth Road)桥才开始采用平行丝股主缆。

预制平行索股法(PPWS法)是将在工厂预制平行高强钢丝组成的索股运到工地安装的方法。1965年,美国伯利恒钢铁公司试制成功工厂预制平行丝股主缆,1969年美国建成的跨度

为 $210\text{m} + 488\text{m} + 210\text{m}$ 的新港 (New port) 桥主缆首次采用工厂预制的平行钢丝束。其后此方法用在许多大跨悬索桥中。日本 20 世纪 70 年代后建成的关门桥、大鸣门桥、南备赞濑户桥、北备赞濑户桥、明石海峡大桥等都采用预制平行索股法；我国自 20 世纪 90 年代以来修建的长大悬索桥如汕头海湾大桥、虎门大桥、厦门西陵长江大桥、江阴长江大桥、宜昌长江大桥、海沧大桥等采用的也都是预制平行索股法。

空中纺线法 (AS 法) 是将制索股的工作放到了以猫道为工作平台的空中去完成, 在制索股的同时完成了架设。相对于工厂预制平行索股而言, 空中纺线法每股丝数量大, 因而索股数量少, 锚靴数亦少, 锚室内的锚固面积小, 但该法的编缆设备一次性投入高; 工厂预制平行索股法 (PPWS 法) 可节省架设时间、提高索股质量, 所以目前国内修建的悬索桥均采用此法。总之, 主缆的形成方法应结合设备、工艺情况、成缆质量、防护要求及经济性等因素选择。

4. 主缆的形式

大多数悬索桥都采用双面主缆, 但也有用单面主缆者。至于主缆的根数, 一般为 2 根主缆, 即一侧布置一根, 但若有主缆太粗、架设困难或者工期限制等原因, 也有一侧用两根主缆的设计。在桥的每侧都用两根主缆, 并让两主缆在立面的几何形状不同, 这种叫复式主缆。我国 1969 年建成的重庆北碚朝阳大桥, 就是采用这种复式主缆。它是以跨中为界, 一缆的曲率在跨中的这一侧较大, 在另一侧较小; 而另一缆的曲率分布就和它相反。这样, 当单跨加活载时, 在该半跨中曲率较大的那一根缆当承担较多活载, 这就有利于减小挠度, 并减小加劲梁的弯矩。但这些, 对大跨悬索桥却无此必要。

5. 主缆的截面组成

主缆常见的截面类型有由高强钢丝组成的圆形截面 [见图 1-2-8a)] 和由钢丝绳组成的主缆其它截面 [见图 1-2-8b)、c)]。主缆的截面组成一般是由 $\phi 5\text{mm}$ 左右的镀锌钢丝组成的钢丝束股, 然后再由若干束钢丝索股构成一根主缆。每根主缆截面大小是由各座具体悬索桥的拉力大小确定的, 一旦钢丝直径选定, 其主缆钢丝所含钢丝总股数 n 即随之而定。而具有 n 根钢丝的主缆应有多少股钢束 n_1 和每股钢丝含多少根钢丝 n_2 , 则需要根据主缆的编制方法确定。

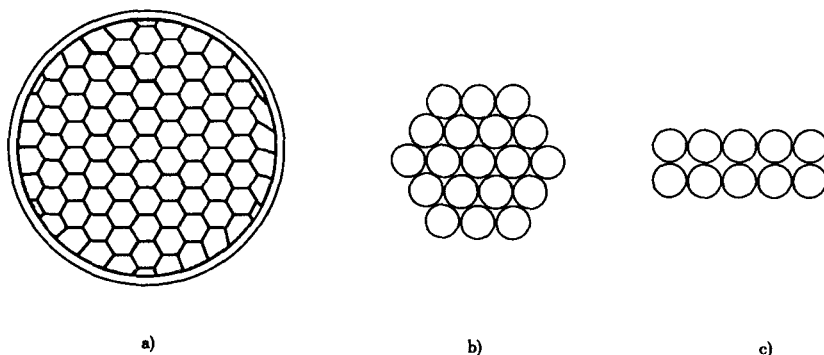


图 1-2-8 主缆截面类型

采用 AS 法的束股较大, 每缆所含总股数 n 较少, 约 30 ~ 90 束, 每股所含丝数 n_2 多达 300 ~ 500 根, 因而其单股锚固吨位大, 锚固空间相对集中。