

第一章 绪 论

第一节 桥梁概说

工程 (engineering) 是指应用科学知识和实践经验, 制造出具备某种功能、满足人类需求的产品科技与生产活动。土木工程是其分支之一。

土木工程 (civil engineering) 是以桥梁、隧道、道路、房屋等工程设施为研究对象的学科, 是建造各类工程设施的科学技术的统称。所谓工程设施, 指由若干构件组成并固定于地面, 能为人们提供服务且能安全承受各种作用 (荷载) 的结构物。土木工程既指工程设施本身, 也指与其相关的各种科技活动。

桥梁工程 (bridge engineering) 是土木工程的一个分支。“桥梁工程”一词通常有两层含义: 一是指桥梁建筑的实体; 二是指建造桥梁所需的科技知识, 包括桥梁的应用基础理论, 以及桥梁的规划、设计、施工、运营、管理和养护维修等专门技术知识。

桥梁 (bridge) 是供车辆 (汽车、列车) 和行人等跨越障碍 (河流、山谷、海湾或其他线路等) 的工程建筑物。从线路 (公路、铁路或城市道路) 的角度讲, 桥梁就是线路在延伸至上述障碍时的跨越部分或连接部分。简而言之, 桥梁就是跨越障碍的通道。“跨越”一词, 突出表现出桥梁不同于其他土木建筑的结构特征。

桥梁的起源与人类社会的发展相伴而行。当原始人类尚不知如何造桥时, 会利用自然界的物体, 如天然倒下的树干 (梁的雏形)、山体因受自然环境长期侵蚀而形成的拱状物 (拱的雏形)、森林里攀缠悬挂的藤萝 (索的雏形) 等, 来帮助他们跨越溪流、山涧和峡谷。这就是所谓的天生桥 (natural bridge)。人类的生存需求、学习和创造能力, 会逐渐促使他们在遇到溪流山涧时自己动手建造简陋的桥梁, 例如汀步、圆木桥、踏板桥等。汀步 (step-stone bridge) 是指沿河道横向间断摆放的一连串石块, 以便帮助人们在水流较小时踏石过河。将未经刨削加工的树干搭放在小溪两岸而成的桥, 为圆木桥或独木桥 (log bridge)。将稍长稍平坦的石板搁放在石堆上, 就形成踏板桥 (clapper bridge)。这些桥梁的共同特点是建桥材料不用加工, 搭设简便, 使用时间不长, 统称为原始桥 (primitive bridge)。

到人类已能够聚族而居、拥有简单生产劳动工具的时候, 桥梁也得到发展。根据距今约 6 800 ~ 6 300 年的陕西西安半坡村新石器时代遗址的考古发现, 在居住区四周有用于防御的宽 7 ~ 8 m、深 5 ~ 6 m 的大围沟, 当时的居民已能用树木搭设房屋, 想必也可以搭设方便进出围沟的通道 (木梁桥)。在公元前 4000 年左右, 阿尔卑斯地区的史前湖上桩屋, 大量采用木桩结构。同一时期, 生活在两河流域的苏美尔人开始采用泥砖建造墓穴、宫殿和庙宇等, 创造出叠涩拱 (corbel arch, 指用砖石层层堆叠延伸合拢形成的拱状物), 其逐渐演变成今天大家熟知的拱形结构。由此可以合理地推断, 大约在公元前 4000 年前后, 人类就具备了建造简陋的木桥、石桥和拱形结构的能力。

以木、石等作为建桥材料，古代桥梁经历了几千年漫长的发展过程。从中国远古时代的浮桥到古巴比伦的石墩木梁桥，从中国古代的“溜索”到古罗马的石拱桥，从欧洲文艺复兴时期的廊桥到 18 世纪的铁桥，人类创造出了丰富多彩的桥梁遗产。

19 世纪中期后，钢材和混凝土可大量生产，结构分析和设计方法为工程界所掌握，桥梁工程开始进入现代工业的行列。100 多年的现代桥梁史，就是伴随着历史的演进和社会的进步而逐渐发展起来的。纵观历史，可以认为，每当一个国家或地区的经济及基础设施建设发展迅猛，每当陆地交通运输工具和运输方式发生重大变化（例如，从步行、马车发展到火车、汽车，从常规公路、铁路发展到高速公路、高速铁路），每当工程材料（从木、石到钢材、混凝土）产生重大进步，就对桥梁在载重、跨度、运营等方面提出了新的要求，由此推动了桥梁工程的技术进步。桥梁发展到今天，其基本类型虽仍是梁桥、拱桥和悬索桥，但设计建造更加先进合理，建筑材料更加坚固耐用，结构形式更加丰富多彩，使用功能更加完备齐全。

在当今社会中，大力发展交通运输事业，建立四通八达的公路、铁路交通网，对促进交流、发展经济、提高国力，具有非常重要的意义。在公路、铁路线路中，桥梁以及涵洞(culvert)是其重要组成部分。从技术上讲，重要的特大跨度桥梁通常会集中体现出一个国家在土木工程设计建造、建筑材料和制造工艺等方面的水平。从数量上讲，一条线路中桥涵的长度通常要占到线路总长度的 5%~10%（视线路所在地区而变，对山区线路或高速线路，这一比值会更高。例如，我国已建的高速铁路中，桥梁延长约占线路总长的 45%）。从建筑学上讲，桥梁不仅仅是满足跨越通行这一实用功能要求的工程结构物，还常作为建筑实体长久地存在于社会生活之中。那些工程宏大、雄伟壮观的大桥，往往成为一座城市的标志和骄傲；那些造型别致、建筑精良的中小桥梁，往往成为人们日常生活中必不可少的通道和景观。桥梁发展到 21 世纪，已成为跨越承载的工程结构，开放公共的大众建筑，造型多样的人工景观，沟通交流的社会纽带。

我国幅员辽阔，大小山脉纵横，江河湖泊众多。截至 2019 年，我国已建成的公路桥梁超过 87.83 万座、延长达到 6.06 万千米。随着国家经济建设的进一步发展，仍需要大力加强包括公路、铁路和城市道路在内的基础设施建设，需要新建和管理养护大量的公路、铁路和城市桥梁。

第二节 桥梁的组成、分类和结构体系

一、桥梁的组成

桥梁组成部分的划分与桥梁结构体系有关。常见的简支梁桥（图 1.1），通常由以下几部分组成。

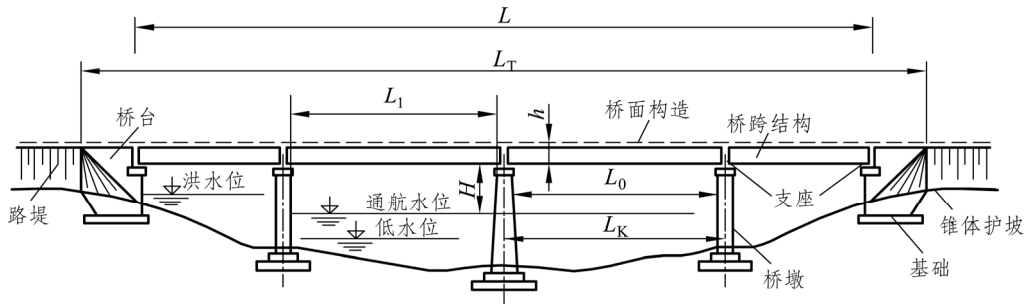


图 1.1 桥梁的基本组成

1. 上部结构

上部结构 (superstructure) 指桥梁位于支座以上的部分。它包括桥跨结构和桥面构造两部分：前者指桥梁中能直接承受桥上交通荷载的、架空的主体结构；后者则指为保证桥跨结构正常使用而设置的各种附属结构或构造。

桥跨结构的型式多样。对梁桥而言，其主体结构是梁；对拱桥而言，其主体结构是拱；对悬索桥而言，其主体结构是缆。详见后述。

桥面构造是指公路桥的行车道铺装，铁路桥的道砟（道床）、桥枕、钢轨，以及伸缩装置、排水防水系统、人行道与栏杆、安全带或安全护栏、路缘石、照明等（见第四章）。

2. 下部结构

下部结构 (substructure) 指桥梁位于支座以下的部分，也叫支承结构。它包括桥墩 (pier)、桥台 (abutment) 以及墩台的基础 (foundation)，是支承上部结构、向下传递荷载的结构物（见第七章）。

桥梁墩台的布置需与桥跨结构的布置相对应。桥台分设在桥跨结构的两端，桥墩则设在两桥台之间。对只有一个孔跨的桥梁，则无须设置桥墩。桥台除起到支承和传力作用外，还起到与路堤衔接、防止路堤滑塌的作用。为此，通常需在桥台周围设置锥体护坡 (abutment slope protection)。墩台之下需设置基础，其是承受由上至下的全部荷载（包括交通荷载和结构重力）并将荷载传递给地基的结构物。它通常埋入在土层中或构筑在基岩上，时常需要在水中施工。

架空的桥跨结构与支承结构一起，组成承重结构 (load-bearing structure)。承重结构由梁、墩台、拱、塔、缆、拉索等构件组成，例如由梁、桥墩、桥台组成的梁桥，由塔、缆、锚碇组成的悬索桥等。承重结构承受荷载、跨越障碍并支承在基础之上。承重结构的任何一部分破坏，桥梁结构就可能发生局部或整体破坏。

3. 支 座

在桥跨结构与墩台之间，还需要设置支座 (bearing)，以连接桥跨结构与桥梁墩台，提供荷载传递途径，适应结构变位要求（见第七章）。支座提供的约束影响着上部结构的受力行为，因此，也可视其为上部结构的一部分。

视具体情况，与桥梁配套建造的附属物可能包括：挡墙、护坡、检查设备、导治建筑物、防撞设施、检查设备、台阶扶梯、导航装置等。

结合图 1.1，对桥梁工程常用的专业名词和技术术语，择要说明如下。

正桥与引桥 对规模较大的桥梁，通常包含正桥（bridge proper）与引桥（approach）两部分。正桥指桥梁跨越主要障碍物（如通航河道）的结构部分。一般，它采用跨越能力较大的结构体系，需要深基础，是全桥的重点。引桥指连接正桥和路的桥梁区段，其跨度一般较小，基础一般较浅。在正桥和引桥的分界处，有些桥还曾经设置过桥头建筑。

跨径 也叫跨度（span），其表示桥梁的跨越能力，是表征桥梁技术水平的重要指标。对多跨桥梁，最大跨度称为主跨（main span）。桥跨结构顺桥方向相邻两支座中心间的水平距离 L_1 ，称为计算跨径。桥梁结构的分析计算以计算跨径为准。对梁式桥，设计洪水位线上相邻两桥墩（或桥台）间的水平净距 L_0 ，称为桥梁的净跨径。各孔净跨径之和，称为总跨径，它反映出桥位处泄洪能力的大小。

对公路梁桥，把两桥墩中线间距离或桥墩中线与台背前缘的间距，称为标准跨径 L_K （也称之为单孔跨径）。当跨径在 50 m 以下时，通常采用标准跨径（从 0.75 m 至 50 m，共 21 级，常用者为 16 m、20 m、30m、40 m 等）设计。对铁路梁桥，则以计算跨径作为标准跨径（从 4 m 至 168 m，共 18 级，常用者为 20 m、24 m、32 m、48 m、64 m、96 m 等）。采用标准跨径设计，有利于桥梁建造的工业化，也有利于桥梁养护维修和战备需要。

桥长 对梁桥，两桥台侧墙或八字墙尾端之间的距离 L_T ，称为桥梁全长。它标志桥梁的长度规模。两桥台台背前缘（对铁路桥，指桥台挡砟前墙）之间的距离 L ，称为多孔跨径总长（对公路桥）或桥梁总长（对铁路桥）。它仅作为划分特大桥、大桥、中桥、小桥和涵洞的一个指标，见表 1.1。

表 1.1 桥涵按跨径分类

桥涵分类	公路桥涵		铁路桥涵
	多孔跨径总长 L/m	单孔跨径 L_K/m	桥长 L/m
特大桥	$L > 1000$	$L_K > 150$	$L > 500$
大桥	$100 < L < 1000$	$40 < L_K < 150$	$100 < L < 500$
中桥	$30 < L < 100$	$20 < L_K < 40$	$20 < L < 100$
小桥	$8 < L < 30$	$5 < L_K < 20$	$L < 20$
涵洞		$L_K < 5$	

注：横穿公路或铁路路基，使水流或行人从路下通过而修建的结构物，称为涵洞。涵洞的构造形式有圆管涵、盖板涵、拱涵、箱涵等，可采用砖石、混凝土、钢筋混凝土等材料建造。对管涵和箱涵，不论孔数多少和跨径大小，均称为涵洞。一般指 $L < 6$ m 且顶上有填土者。

水位 指河流、湖泊等水体的自由水面离某一基本水准面（简称基面）的高程，以米计。我国桥梁设计中通常采用的是黄海基面。经过长时期对桥位处水位（water level）的观测后，可得出该处的最高或最低水位。汛期因降雨或融雪引起的河流急剧上升的水位，称为洪水水位。能保持船舶正常航行时的最高和最低水位，称为通航水位。

桥下净空高度 设计通航水位或设计洪水位对桥跨结构最下缘的高差 H ，称为桥下净空

(clear opening) 高度。桥下净空高度应大于通航及排洪要求所规定者。

桥梁建筑高度与容许建筑高度 公路桥面(或铁路桥梁的轨底)至桥跨结构最下缘的垂直高度 h ,称为桥梁建筑高度(construction depth)。公路或铁路桥梁线路设计中所确定的桥面(或轨底)高程与通航及排洪要求所规定的净空高程之差,为容许建筑高度。显然,桥梁建筑高度不得大于容许建筑高度。

二、桥梁的分类

桥梁有各种不同的分类方式,每一种分类方式均反映出桥梁在某一方面的特征。

桥梁按工程规模划分,有特大桥、大桥、中桥、小桥等,见表 1.1。

桥梁按用途划分,有铁路桥、公路桥、公铁两用桥、人行桥、城市桥等。

铁路桥(railway bridge)专供铁路列车行驶,桥的宽度(其由线路数决定,多为单线或双线)有限,其所承受的车辆活载相对较大。由于铁路迂回运输不易实现,铁路桥必须结实耐用且易于修复更换。与铁路桥相比,公路桥(highway bridge)的车辆活载相对较小,桥的宽度可根据实际需要确定。

公铁两用桥(combined highway & railway bridge)指同时承受公路和铁路车辆荷载的桥。我国在长江上建造的一部分特大桥(如在武汉、南京、枝城、九江、芜湖等地的大桥),大多采用公铁合建的方式。公铁两用桥中通常布置双线铁路,近年来,随着城际客运专线铁路的迅猛发展,公铁两用桥的线路数常常达到 4 线。一般认为:在增加费用不多的情况下(桥的墩台和基础可以共用),将公路桥、铁路桥合建,可把专为公路建桥的时间大为提前。随着经济发展,公路交通量剧增,专为公路修建特大桥的事现已屡见不鲜。

人行桥(pedestrian bridge, footbridge)指专供行人(有时包括非机动车)使用的桥。它跨越城市繁忙街道处,或市区内河流,或封闭的高速公路,为行人及非机动车提供便利。除高速公(铁)路上的桥梁外,其他桥梁通常设置行人过桥的通道。

相对于公路桥和铁路桥而言,在城市范围内的桥梁(包括立交桥及人行桥,但不包括铁路桥)也被称为城市桥(municipal bridge),其设计荷载标准(见第三章)与公路桥者有所差别,桥梁的造型和景观也需适当考虑城市环境因素。

按桥跨结构所用的材料来划分,有钢桥,钢筋混凝土桥,预应力混凝土桥,结合梁桥,用砖、石、素混凝土块等砌体材料(习称圬工)建造的拱桥,以及木桥等。

由于钢材具有匀质性好、强度高、自重小等优点,钢桥(steel bridge)具有较大的跨越能力,在跨度上处于领先地位。在我国,传统上铁路桥采用钢桥(见第六章)较多。近年来,随着大跨度公路悬索桥、斜拉桥及城市桥梁的发展,公路和城市钢桥的应用越来越普遍。

钢筋混凝土桥(reinforced concrete bridge)和预应力混凝土桥(prestressed concrete bridge)的建造费用较少,养护维修方便,是目前应用最为广泛的桥梁,在中、小跨度内已逐步取代钢桥,在大跨度范围内也具有较强的竞争力。

结合梁桥(composite bridge)主要指钢梁与钢筋混凝土桥面板组合形成的梁桥。随着桥梁工程的技术发展,桥梁结构的材料组合有了更多的构造形式,例如,钢梁与混凝土梁连接形成的混合梁,钢管内灌注混凝土形成的钢管混凝土(多用于拱桥),钢塔段与混凝土塔段组合形成的混合塔等。

圬工桥(masonry bridge)主要指石拱桥,其取材方便,构造简单,适用于跨度不大、取材

方便的山区拱桥。木桥 (timber bridge) 多采用梁桥形式, 主要用于一些临时性桥梁和林区桥梁。

历史上, 还曾先后采用铸铁 (cast iron) 和锻铁 (wrought iron) 作为建桥材料, 修建过少量的铸铁拱桥和锻铁梁桥。在结构钢 (structural steel) 出现之后, 这类桥梁就不再修建了。

按结构体系 (结构受力特征及立面形状) 划分, 有梁桥 (beam bridge, girder bridge)、拱桥 (arch bridge)、悬索桥 (suspension bridge) 三种基本体系, 以及由两种基本体系或一种基本体系与梁、柱、塔及斜索等构件形成的组合体系, 如系杆拱桥 (tied arch bridge) 和斜拉桥 (cable-stayed bridge)。图 1.2 所示为按结构体系划分的主要桥梁结构类型, 详细论述见后续有关章节。

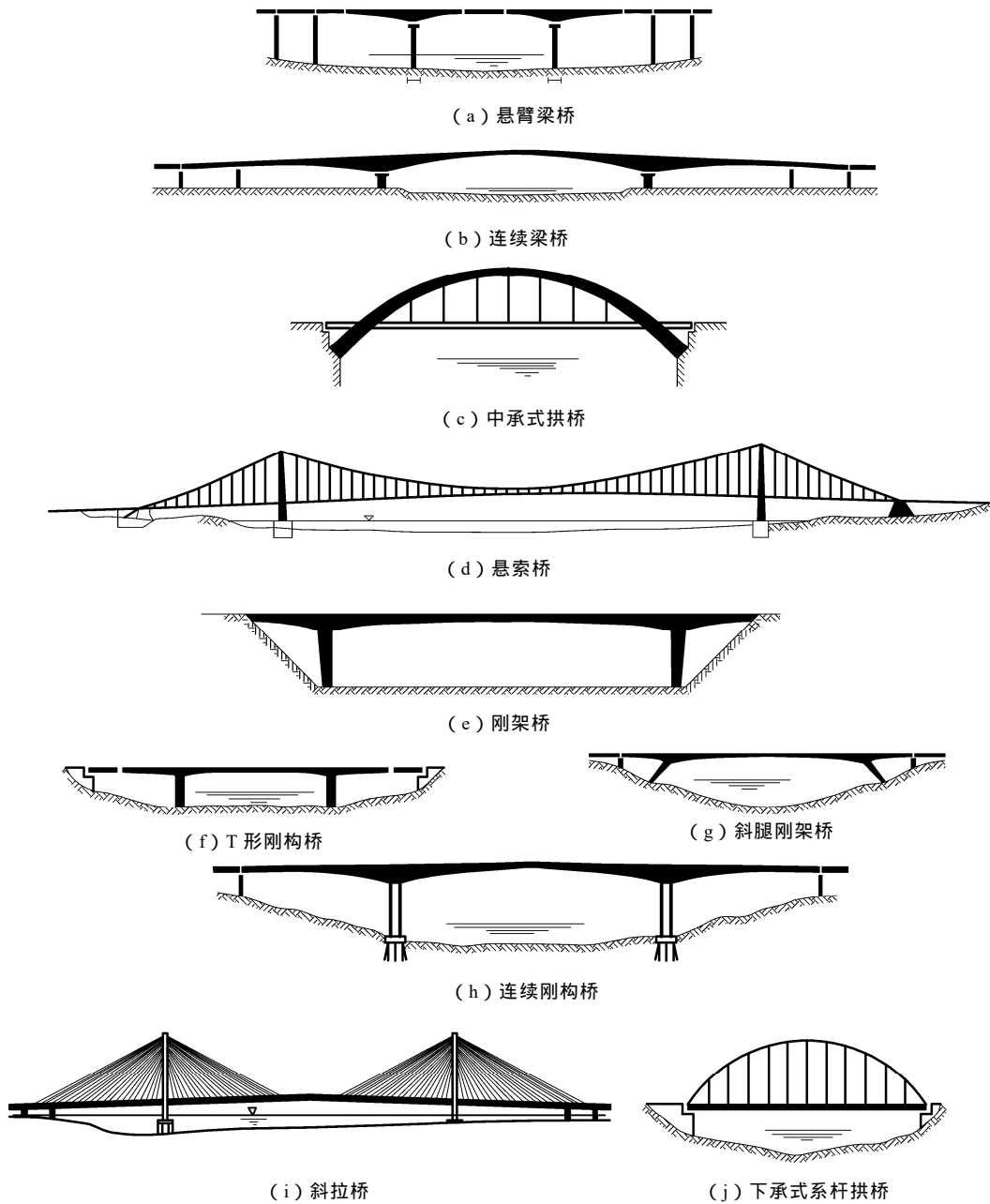


图 1.2 桥梁结构体系分类

按桥跨结构与桥面布置的上下相对位置划分,有上承式桥、下承式桥和中承式桥。

对梁桥和拱桥,桥面(deck)布置在桥跨结构顶面的,为上承式桥(deck bridge);相应地,布置在底面的称为下承式桥(through bridge,如图1.2(j)所示),布置在中间位置的称为中承式桥(half through bridge,如图1.2(c)所示)。桥面位置的选择与容许建筑高度和实际需要有关。上承式桥被广泛采用,适用于容许建筑高度较大的情况,其特点是上部结构的宽度较小,墩台的材料用量有所节省,桥面视野开阔等。在容许建筑高度很小、布置上承式桥困难时,可采用下承式桥。由于桥跨结构在桥面之上且需要满足桥面净空(见第二章)的要求,故结构横向宽度相对较大,墩台尺寸也相应有所增加。对拱桥,有时因地形限制或结构造型要求,需要把桥面布置在桥跨结构高度的中间部位,形成中承式拱桥。因承重结构有一部分是位于桥面之上,占用了桥面宽度;为使桥面宽度满足行车要求,需加宽两片拱肋的中心距,导致用料偏多。

另外,在同一座桥中,桥跨结构与桥面的相对位置也可能有所变化。

按桥梁所跨越的对象划分,有跨河桥、跨谷桥、跨线桥、立交桥、地道桥、旱桥、跨海桥等。

大部分桥梁是跨越河流的。修建跨河桥(river-crossing bridge),不可使河流功能受到损害。为此,必须遵循相关设计规范的要求,使桥的孔径、跨度、桥面高程、基础埋深等的设计既能保证桥在排洪和通航时的安全,又不碍及河流的功能。

跨谷桥(gorge-crossing bridge)指跨越谷地的桥梁。谷地的特点是地形变化大、地质变化大、水流变化大,谷底至桥面较高,不适于采用高墩小跨的结构型式。通常,对于较窄的河谷,可考虑采用一跨结构(如拱、斜腿刚架或悬索桥)作为正桥越过,避免修建高桥墩;对于较为开阔平坦的河谷,可考虑采用跨度较大的多跨连续梁(刚构)桥、多塔斜拉桥或悬索桥。

跨越其他线路(公路、铁路、城市道路等)的桥称为跨线桥(overpass, flyover),其中跨越城市街道的人行桥,也叫天桥(overpass)。当跨线桥还需要与其所跨越的线路互通时,就形成立交桥(grade separation bridge)。跨线桥和立交桥多建于城区,囿于桥下净空和桥面高程的要求,容许建筑高度有限,多采用建筑高度较小的桥跨结构。

当桥梁采用下降方式(而不是架空方式),从被跨越线路的下方穿过时,因其主要部分是位于地下,便称为地道桥(underpass bridge)。旱桥(dry bridge)指建在无水地面的桥。其跨度一般不大,其桥墩截面形状无需适应河流要求。对于引桥的不过水区段,有时用此名称。

跨海桥泛指跨越海峡(straits)、海湾(gulf, bay)或为连接近海岛屿而向海上建造的桥。在通航频繁的海峡或海上航道处,需采用大跨度的悬索桥或斜拉桥作为通航孔桥;对水域宽阔的海面,多采用跨度适中的多跨梁式结构作为非通航孔桥。跨海桥的长度,从几千米到几十千米,需在自然条件复杂的近海环境中施工,对质量(尤其对材料耐久性和防腐蚀)的要求高,应采用以大吨位预制和浮运架设为主的施工方法,尽量减少海上作业量及对海洋环境的影响。

按桥梁的平面形状划分,有直桥、斜桥、弯桥。绝大部分桥梁为直桥或正交桥(right bridge),其纵轴线方向同水流方向(或所跨越的线路方向)基本正交。斜桥(skew bridge)指水流方向(或所跨越的线路方向)同桥的纵轴线不呈直角相交的桥。由于斜桥所提供的桥下净空的有效宽度比直桥所提供者小,为保证同样的桥下有效宽度,斜桥的跨度就需加大,因此,不宜使桥梁斜交过甚。在水平面上呈曲线状的桥,称为弯桥或曲线桥(curved bridge)。

当桥位于线路的曲线区段、且跨度不大时，可将多跨直梁按折线布置，仅让桥面适应曲线要求；若跨度较大，便应改变梁的平面形状，使桥跨结构本身呈曲线状。

按预计使用时间的长短划分，有永久性桥梁和临时性桥梁。永久性桥梁指用钢材、混凝土、石材等耐久材料所修建的桥梁，其设计和施工应该遵照适用的规范办理，期在经济合理，使用寿命在百年左右。临时性桥梁也称为便桥（detour bridge），指为了使线路早日开通、对使用寿命不作长久打算的桥。建桥材料可用木材、钢材和制式设备（如万能杆件、贝雷梁等），和跨径布置可以基本上不考虑洪水影响；使用时，通常还会对桥上的行车提出一些限制。

绝大部分的桥梁在建成后不可移动，可称为固定式桥梁；在特殊情况下，为兼顾陆路交通要求和河流通航要求，也修建开启桥或活动桥（movable bridge）。开启桥指一部分桥跨结构（通常为钢梁）可以提升或转动（平转、竖转或其他转动方式）的桥，而提升或转动的目的则是为了让桥下可通过体形较大的船舶。与固定式桥梁相比，开启桥的桥面高程可降低，桥长可缩短，规模可减小，由此建造费用可节省，但其桥上交通和桥下航运均会受到一定限制，且后期维修管理费用也较高。

专为军事目的而修建的桥，可称之为军用桥（military bridge）。军用桥多为临时性桥梁，常用者之一就是贝雷桥（Bailey bridge），其由贝雷桁架组成，拆装简便，运输方便，承载力大；另一种就是浮桥或舟桥（floating bridge, pontoon bridge），其用船或浮箱浮在水面代替桥梁。现代军用桥多采用高强钢材制造，种类繁多，构造各异，可由制式装备载运，具有拆装快速、承载力大的特点。

伴随着城市交通的发展，需要修建高架桥（viaduct）或高架路。其主要目的是让新增道路高出于地面，从而增加通行能力。高架桥也指跨越陆地或地势较平坦的河谷、桥面高程起伏不大、跨数较多的长桥。在山区修建高架桥（以桥代路），主要目的则是避开山地灾害（如滑坡、落石、泥石流等）频发区，保护森林植被，减少大面积挖填对自然环境的破坏。

在码头上用于沟通河岸与轮船，以装卸货物或上下旅客的通道，称为栈桥（trestle bridge）。传统的栈桥采用木桩与梁形成的小跨度梁柱结构，因其与古代栈道相似而得名。桥梁施工中，为在河岸与水中桥墩之间建立通道，往往也搭建临时性栈桥。

廊桥或风雨桥（covered bridge）是指在桥面之上设有顶盖的人行桥。古代廊桥的顶盖构造各异，起到遮阳避雨、保护结构、彰显建筑特色等作用。现代廊桥多采用钢或混凝土梁式结构，作为城市跨街天桥或建筑之间的通道。

为输水而修建的架空渠道称为渡槽或水道桥（aqueduct），而为通过管道输送油气、水、电力等而建造的桥，统称为管线桥（pipeline bridge）。为让人工运河跨越河流等障碍而修建的桥，称为运河桥（canal bridge, water bridge），桥上可行船。

漫水桥（low water crossing）允许洪水从桥面漫过，常修建在低等级公路上，适于洪水持续时间较短、允许交通暂时中断的情况。堤道桥（causeway）越过宽阔水面或湿地，一指跨度较小、桥面尽量接近水面的长桥，也指由路堤加高的线路。摆运桥（transporter bridge, ferry bridge）是一种跨越河流的架空缆车，是一种既满足航运又节省费用的经济桥式，早已不建。

另外，还可根据桥梁的构造特点进行分类，详见后续各章，在此不一一列举。

三、桥梁的结构体系

按结构体系及其受力特点，桥梁可划分为梁、拱、索三种基本体系和组合体系。不同的结构体系具有不同的结构型式和受力特点，简述如下。

1. 梁 桥

梁桥是古老的结构体系之一。梁作为承重结构，主要是以其抗弯能力来承受荷载。在竖向荷载作用下，其支承反力也是竖直的；简支的梁部结构只受弯、剪，不承受轴向力。

常用的简支梁（simply-supported beam，见图 1.1）的跨越能力有限，例如，预应力混凝土简支梁的跨度通常不超过 50 m；为加大跨度，悬臂梁和连续梁（图 1.2（a）和图 1.2（b））得到发展。它们都是利用增加中间支承以减少跨中正弯矩，更合理地利用材料并分配内力，加大跨越能力。悬臂梁（cantilever beam）采用铰结或一跨简支梁（称为挂孔）来连接其两个悬臂端，结构静定，受力明确，计算简便，但因结构变形在接头处不连续而对行车和桥面养护产生不利影响，近年来已很少采用。连续梁（continuous beam）因桥跨结构连续无断缝，克服了悬臂梁的不足，是目前采用得较多的梁式桥型。

梁桥分实腹式和空腹式。实腹梁的横截面形式多为 T 形、I 字形和箱形等，空腹梁主要指桁架（truss）式桥跨结构。不论实腹式还是空腹式，梁的高度和截面尺寸可在桥长方向保持一致或随之变化。对中小跨度的实腹梁桥，常采用等高度混凝土 T 形梁（见第五章）或 I 形钢梁（见第六章）；跨度较大时，可采用变高度（在中间支承处增大梁高）的箱形截面预应力混凝土连续梁（刚构）桥或钢桁架梁，并配合悬臂法施工（见第八章）。

2. 拱 桥

拱桥（图 1.2（c））的主要承重结构是具有曲线外形的拱圈（arch ring）。在竖向荷载作用下，拱圈主要承受轴向压力，但也受弯、受剪。拱脚（arch springing）处的支承反力除了竖向反力外，还有较大的水平推力（thrust）。根据拱的受力特点，多采用抗压能力较强且经济合算的砌体材料（石材等）和钢筋混凝土来修建拱桥；也因拱是有推力的结构，对地基的要求较高，故通常建在地基良好之处。

拱桥的型式多样，构造各异，其取决于拱桥的建筑材料，拱圈与桥面的相对位置，拱脚是否有推力，拱圈的静力图式、截面型式和拱轴线等。广泛应用的是上承式钢筋混凝土无铰拱桥，大跨度拱桥多采用钢箱、钢桁架或钢管混凝土构造。详见第八章。

拱桥的施工，可采用传统的支架法和斜拉扣挂、转体等无支架方法。

3. 悬索桥

悬索桥主要由缆（又称索，cable）、塔（pylon, tower）、锚碇（anchorage）、加劲梁（stiffening girder）、吊索（hanger）等组成，见图 1.2（d）示意。对跨度较小（通常小于 300 m）、活载较大且加劲梁较刚劲的悬索桥，可以视其为缆与梁的组合体系。对大跨度悬索桥，其主要承重结构为缆，组合体系的效应可以忽略。

在竖向荷载作用下，缆受拉，塔受压，锚碇处会承受较大的竖向力（向上）和水平力（向河心）。大缆通常用高强度钢丝制成，加劲梁多采用钢桁架梁或扁平钢箱梁，桥塔可采用钢筋

混凝土或钢或两者。因缆的抗拉性能得以充分发挥且其截面尺寸基本上不受制造限制，故悬索桥的跨越能力一直在各种桥型中名列前茅。不过，由于结构较柔，悬索桥在满足当代重载铁路桥的要求时，难度相对较大一些。

对跨度相对较小（通常不大于 300 m）的悬索桥，当两岸用地受到限制而无法布置锚碇时，或者出于景观需要，可采用自锚式悬索桥（self-anchored suspension bridge）。其特点是：将大缆的两端直接固定在加劲梁的两端，不用修建大体积的锚碇。这样的桥式适于某些特定的桥位环境，但可能会增加桥梁的材料用量和施工难度。

4. 桥梁组合体系

桥梁组合体系（combined system bridge）指承重结构采用两种基本体系，或一种基本体系与某些构件（塔、柱、索等）组合在一起的桥。在两种基本体系中，梁经常是其中一种；与梁组合的，则可以是柱、拱、塔与斜索、塔与缆等。

代表性的组合体系有以下几种：

（1）斜拉桥

斜拉桥（cable-stayed bridge，见图 1.2（i））是梁、塔与斜索组成的组合体系，结构型式多样，造型优美壮观。在竖向荷载作用下，梁以受压弯为主，塔以受压为主，斜索则承受拉力。梁体被斜索多点扣住，在恒载作用下表现出弹性支承连续梁的特点；这样，梁的恒载弯矩减小，梁高可以降低，自重可以减轻，跨度可以增加；另外，塔与斜索的材料性能也能得到较充分地发挥。因此，斜拉桥的跨越能力仅次于悬索桥，是 20 世纪 50 年代以来发展得最快的一种桥式。

公路斜拉桥中，多采用预应力混凝土箱梁，或扁平钢箱梁，或结合梁作为主梁。大跨度铁路斜拉桥或公铁两用斜拉桥中，因车辆活载相对较大，多采用钢桁架主梁来提高结构刚度。

尽管斜拉桥是一种组合体系，但由于其已得到广泛应用，已成为继梁桥、拱桥、悬索桥三种基本桥型之后的一种常用桥型。

（2）梁-拱组合体系

梁-拱组合体系同时具备梁的受弯和拱的承压特点。依据梁、拱的相对抗弯刚度大小，组合形式可以是刚性拱及水平系杆（称为系杆拱），也可以是柔性拱及刚性梁（见图 1.2（j）），还可以是刚性拱及刚性梁。这类结构的主要优点是：利用水平系杆或梁部受拉（若是混凝土梁部则对其施加预应力）来承受和抵消拱在竖向荷载作用下产生的水平推力。这样，桥跨结构既具有拱的外形和承压特点，但又不存在大的水平推力，可在一般地基条件下修建。相对而言，梁-拱组合体系的施工较为费时。

梁-拱组合体系的布置形式灵活多样，可以是上承式、中承式或下承式，可以是单跨简支或多跨连续。常见的是单跨简支的下承式系杆拱桥。

（3）刚架桥

刚架桥（portal bridge）是梁与立柱（或称为墩柱）的组合体系。刚架桥中的梁与立柱（也可以是桥台）刚性连接，形成刚架，见图 1.2（e）。其主要特点是：立柱具有相当的抗弯刚度，故可有效分担梁部跨中正弯矩，由此可降低梁高、增大桥下净空。在竖向荷载作用下，主梁与立柱的连接处会产生负弯矩；主梁、立柱承受弯矩，也承受轴力和剪力；柱底约束处既有竖直反力，也有水平反力。刚架桥多采用立柱直立的、单跨或多跨的门形框架，柱底约束可

以是铰结或固结。钢筋混凝土刚架桥适用于中小跨度的、建筑高度要求较严的跨线桥或地道桥。

立柱斜向布置的刚架桥称为斜腿刚架桥 (portal bridge with inclined legs, 图 1.2 (g)), 其受力特点与刚架桥大致相同。在竖向荷载作用下, 斜腿以承压为主, 两斜腿之间的梁部受到一定的轴向力。斜腿底部可采用铰结或固结形式, 并受到较大的水平推力。对跨越深沟峡谷、两侧地形不宜建造直立式墩柱的情况, 斜腿刚架桥表现出其独特之处。跨越较宽的高速公路的人行桥, 为不影响桥下行车并尽量减小跨度, 也常采用斜腿刚架桥。除斜腿形式外, 墩柱在立面上可呈 V 形布置并与梁部固结, 这样的桥梁称为 V 形刚架桥, 其在受力上具有连续梁和斜腿刚架的特点。由于 V 形支撑的作用, 跨中支点负弯矩及梁高可适当减小, 跨度可适当加大, 外形也较灵动。

(4) T 形刚构桥和连续刚构桥

随着预应力技术和悬臂施工方法的发展, 具有刚架形式和特点的桥梁可用于跨径更大的情况, 如 T 形刚构桥 (T-shaped rigid frame bridge), 见图 1.2 (f)。预应力混凝土 T 形刚构桥是因悬臂施工方法的发展而衍生出来的一种桥型。其桥墩的尺寸及刚度较大, 墩顶与梁部固结, 墩底与基础固结; 与前述悬臂梁桥相同, 仍在跨中设铰或挂孔来连接邻近 T 构。它融合了悬臂梁桥和刚架桥的部分特点: 因是静定结构, 能减少次内力、简化主梁配筋; T 构有利于对称悬臂施工, 但粗大的桥墩因承受弯矩较大而费料; 桥面线形不连续而影响行车。目前, 已很少采用这种桥式。

在连续梁桥的基础上, 借助 T 形刚构的立面外观, 把主跨内较高、较柔细的桥墩与梁部固结起来, 就形成所谓的连续刚构桥 (continuous rigid frame bridge, 图 1.2 (h))。其特点是: 桥墩 (为独柱墩或双薄壁墩) 较为纤细, 以承受轴向压力 (而不是弯矩) 为主, 表现出柔性墩 (见第七章) 的特性, 这就使得梁部受力仍然体现出连续梁的受力特点 (主跨梁部仅受到较小的轴向力作用)。这种桥式除保持连续梁的受力优点外, 还节省了大型支座的费用, 减少了桥墩及基础的工程量, 改善了结构在水平荷载下的受力性能, 简化了施工工序, 适用于需要布置大跨、高墩的桥位。

为突出结构外观上的不同, 将 T 形刚构桥和连续刚构桥划归为组合体系。但从主要受力特点上看, T 形刚构桥和连续刚构桥仍主要表现出梁的受力特点。字面上, “刚构” 一词可以理解为墩-梁刚性连接形成的桥跨结构。

(5) 其他组合体系

其他组合体系主要包括: 矮塔斜拉桥或部分斜拉桥 (extradosed prestressing bridge), 其为矮塔、斜索与连续梁或连续刚构形成的组合体系。这种桥型本质上将原来置于梁体内的一部分预应力钢筋外置, 以便提高预应力效率并减小主梁高度。该桥型外形上与斜拉桥相近, 但受力上介于传统梁桥和斜拉桥之间。斜拉-悬索组合体系 (cable stayed-suspension hybrid bridge), 其是在悬索桥的基础上, 用斜拉索取代桥塔两侧的一部分吊索而形成的组合结构。

斜拉拱桥 (cable-stayed arch bridge), 其为拱、塔与斜索的组合。在这种桥式中, 通常将斜索下端锚于桥面以便有效分担荷载。

对结构体系的分类, 无一定之规; 上述分类也不可能包容式样繁多的桥型。需要强调的是, 仅仅对桥梁的结构体系有所了解, 还远不能把握住桥梁的结构特点。在结合桥位情况选择某种结构体系的同时, 还需要对这一结构体系相适应的建桥材料 (钢, 混凝土或两者) 结

构立面布置（分跨，梁高变化，实腹或空腹等）结构横截面形状及布置（多主梁，或箱梁，或桁架梁等）重要构造细节（如预应力配筋，桁架节点处理，塔及索的布置，支座约束方式等）施工方法（支架法、悬臂法、大件转移法等）等进行综合比较、分析和选择。这样，才能设计建造出符合功能要求、具有经济效益的桥梁。

第三节 桥梁建筑的历史、现状及发展

在介绍国内外桥梁建筑的历史、现状及发展之前，有必要简要论述从古至今桥梁发展的主要技术特征。

大体上，把 19 世纪中叶以前所修建的桥梁视为古代桥梁（ancient bridge）。这些桥梁的设计和施工完全依靠建造者的经验，没有力学知识的指导。建桥材料以天然的或加工过的木材、石材为主，以及竹索、藤索、铁索、铸铁和锻铁。在桥式方面，有梁、拱和索三大类。当时技术落后，工具简陋，不会修建深水基础，施工周期也长。

直到第一次工业革命时期，结构理论和计算开始应用于工程建筑，出现了钢材和混凝土。通常，把 19 世纪中后期以来，由工程师使用工程力学、设计规范及桥梁工程知识所兴建的桥梁，称为现代桥梁（modern bridge）。19 世纪 20 年代，世界上出现铁路。现代桥梁主要是为了适应铁路建设的需要，在 19 世纪中后期逐步发展起来的。在铁路发展的初期，建桥材料仍是木材、石材、铸铁和锻铁等，后来钢材逐步占据主导地位。到 19 世纪末—20 世纪初，钢筋混凝土也逐渐应用于中小跨度桥梁。建桥工具得到发展，出现了蒸汽机、打桩机、电动工具、风动工具、起重机具、铆钉机等。在深水基础方面，可以施工沉井、压气沉箱和大直径的桩。从 20 世纪 30 年代起，随着汽车工业的发展，公路桥梁也开始得到大力发展。

20 世纪 50 年代以来，桥梁工程得到蓬勃发展。在材料方面，除常规钢材和钢筋混凝土外，还有预应力混凝土、高强螺栓、高强钢丝、低合金钢以及其他新型材料。用于桥梁建造的机具和设备有焊接机、张拉千斤顶、振动打桩机、水上平台、大吨位起重机和浮吊、钻孔机、架桥机等。在桥梁基础方面，可修建高位承台、大直径打入式斜桩和就地灌注桩、浮运沉井等。在梁、拱和悬索桥等基本桥式的基础上，发展了许多新桥式和新构造，如斜拉桥，梁-拱组合体系，连续刚构桥，箱形梁，结合梁，正交异性钢桥面板等。结构设计理论得到改进，逐步从容许应力法向极限状态法发展；结构分析也更加注重大跨、柔细结构的振动（地震、风振）问题。施工技术和工艺得到重视，出现了不少新的施工方法，如悬臂施工、顶推施工、转体施工、大吨位浮运架设以及大件吊装等。这一时期建造的桥梁，主要服务于公路、高速铁路和城市道路交通，体现出当代桥梁科技的水平。

一、我国桥梁建筑

我国历史、文化悠久，是世界文明古国之一。就桥梁讲，我们的祖先在世界桥梁建筑史上曾写下光辉灿烂的一页。随着国家经济建设和交通事业的发展，当代的桥梁工作者正在创造桥梁建筑的新篇章。

据史料记载，远在 3 000 余年前的周朝，渭河上就出现过浮桥。鉴于浮桥的架设具有简

便快速的特点，常被用于军事。公元前 257 年，在山西蒲津渡建造跨越黄河的第一座浮桥；公元 724 年，改固索木桩为铁牛，易笮索为铁链，对蒲津渡浮桥进行改建；其遗址现已成为全国重点文物保护单位。汉唐以后，浮桥的运用日趋普遍。

在公元前 550 年左右，汾水上建有木柱木梁桥；秦、汉时期在渭河、灞河上修建的多座木梁桥，史书中均有确凿记载。秦代咸阳渭桥（后称中渭桥）为木梁桥，68 孔，总长 500 余米，桥宽约 14 m，在 2013 年初的考古中基本得到证实；汉代又建东渭桥和西渭桥。在灞河上建桥，始于秦；西汉时期建木梁桥，隋唐时期建南北两座灞桥，其中南桥就是著名的“灞桥折柳”之处。这些桥屡毁屡建，多采用木柱木梁或木梁石柱桥式。

在拱式木桥中，宋代虹桥（1032—1033 年）构造奇特。宋代画家张择端在其名画《清明上河图》中所描绘的是汴京（今河南开封）的虹桥。该桥采用两套木拱（一套由 3 根长木按梯形布置，另一套由 5 根短木组成），并配以横木，形成稳定的拱架，见图 1.3。后来这一桥式传至浙江和福建等地，其结构与虹桥相似但有所改进（在拱架两端增加了形成水平桥面的梁柱构件以利通行，在桥上修建廊屋以保护木结构）。例如，始建于明隆庆四年（1570 年）、1745 年重建、1986 年重修的浙江泰顺县泗溪溪东桥，建于 1802 年的浙江云和梅崇桥（跨度为 33.4 m，见图 1.4）等，尽管历经风雨，至今仍基本保持原貌。

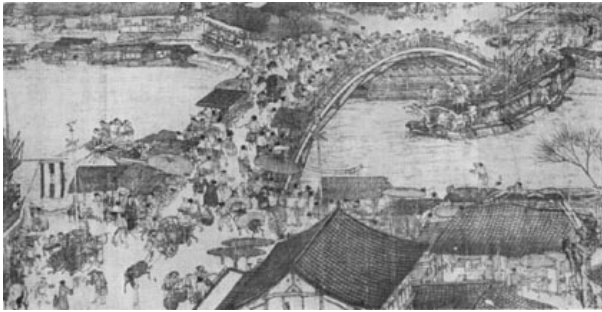


图 1.3 宋代木虹桥（1032—1033 年）

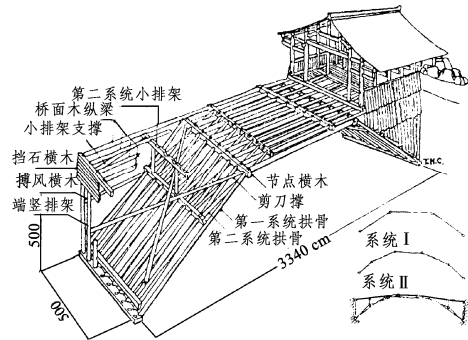


图 1.4 浙江梅崇木廊桥结构示意图

古代木桥的另一种形式是伸臂木梁桥，其发源于我国西北地区，散布在甘肃、四川、西藏等地。伸臂木梁桥的构造是由两岸向河心依次悬臂伸出木梁多层（上一层比下一层长），在中空处再以平置木梁连接两悬臂端。例如：甘肃渭源灞陵桥，始建于明洪武初年（1368 年），全长约 40 m，跨度约 30 m，从两岸向跨中以 4 层悬臂梁伸出，形成独特的拱式伸臂木梁桥；兰州握桥（又名卧桥），始建于明永乐年间（1403—1424 年），清代两次重建，1952 年拆除，此桥由两岸向河心斜上伸出重叠的悬臂梁各 5 层，中接平梁，全长 27 m。

最晚自汉朝起，我国就已广泛修建石拱桥。在 1957 年出土的东汉画像砖上，刻有石拱桥图形，桥上有车马，桥下有两叶扁舟，证明当时已能修建跨河石拱桥。在隋大业元年（605 年），李春在河北赵县修建了赵州石拱桥（又称安济桥），净跨 37.02 m，宽 9 m，见图 1.5。该桥构思巧妙，造型美观，工艺精致，历 1400 余年而无恙，举世闻名，被评为“国际土木工程里程碑建筑”。江苏苏州的宝带桥，始建于唐元和年间（816—819 年），桥长约 317 m，宽 4.1 m，共 53 孔。桥以长度闻名，远望犹如长龙卧踞，又似玉带浮于水面，显得秀丽精巧。1192 年建成的位于北京西南的卢沟桥，共 11 孔，跨度 11.4~13.5 m，桥栏上配有栩栩如生的

大小石狮 485 个，世所罕见。北京颐和园内的十七孔桥建于清乾隆年间（1736—1795 年），玉带桥建于乾隆十五年（1750 年）；前者的拱洞随桥面的缓和下坡从桥中间向两端逐渐收小，后者则以两端有反弯曲线的玉石穹背高出绿丛。这两座桥都以同环境协调，使湖光山色增辉见称。

古代石梁桥也同样杰出。我国建于宋朝的福建泉州万安桥（又称洛阳桥，1053—1059 年）现长 834 m，共 47 孔，位于“波涛汹涌，水深不可址”的洛阳江口上。在建桥时先顺桥向抛投大量块石，在水面上形成一条长堤；然后在块石上放养牡蛎，靠蛎壳与块石相胶结形成的整体筏形基础来抵抗风浪。在这水下长堤上，用大条石纵横叠置（不用灰浆）形成桥墩，再架设石梁。目前世界上最长的石梁桥，是福建泉州安平桥。该桥始建于南宋绍兴八年（1138 年），前后历经 13 年建成，长近五华里（俗称五里桥），共 352 孔，现存 2 070 m，被誉为“天下无桥长此桥”，见图 1.6。1237 年建造的福建漳州虎渡桥，长 335 m，其所用的巨型条石尺寸为 $1.7\text{ m} \times 1.9\text{ m} \times 23.7\text{ m}$ ，质量将近 200 t，据记载这些石梁是利用潮水涨落浮运架设的。



图 1.5 赵州桥（605 年左右）



图 1.6 安平桥（1138 年）

我国是世界上公认最早有索桥的国家。据记载，至迟在汉唐时期，我国就从藤索、竹索发展到用铁链建造索桥，而西方直到 16 世纪才开始建造铁索桥。索桥起源于我国西南地区，据史料记载，公元 7 世纪时在云南塔城建有铁索桥。著名的古代索桥有四川灌县（现都江堰市）的竹索桥、云南宝山的霁虹桥和四川泸定的大渡河铁索桥等。灌县竹索桥是世界上最古老的索桥，相传由战国时代著名的水利工程专家李冰所建，最初采用竹子做缆，称为笮桥。现有史料记载该桥建于宋朝（990 年），1803 年仿旧制重建，名安澜桥，桥长 340 m，分为 8 孔，最大跨度 61 m，1975 年仿旧式改为钢丝绳索桥。霁虹桥跨越澜沧江，始建于明成化年间（1476 年），是我国最古老的铁索桥之一。该桥长约 110 m，宽约 3.5 m，由 18 根铁索链悬吊两岸，清康熙年间重修，1986 年被洪水冲毁。大渡河铁索桥建成于 1706 年，跨度 101.6 m，宽约 2.8 m，由 13 条锚固于两岸的铁链组成，其为世界上第一座跨度超过 100 m 的桥梁，也是著名的重点文物和革命遗址。

近代中国受腐朽的封建制度统治，1840 年后又屡遭西方帝国列强入侵，国运衰败，战争连年，生产力极为低下。1881 年清政府修建唐（山）胥（各庄）铁路，是在中国有铁路和铁路桥的开端，但大部分桥梁是由外商承建的。1894 年，我国铁路先驱詹天佑先生主持修建完成滦河铁路大桥（第一次采用气压沉箱基础，全长 670.6 m，17 孔，包括 30.5 m 上承式钢桁梁、61 m 下承式钢桁梁、9.14 m 上承式钢板梁等，已废弃）。1901 年，沙俄承建了哈尔滨松花江铁路桥（19 孔，1 051 m 长，1964 年大修）；1906 年，比利时承建了郑州黄河铁路桥（102 孔，3 015 m 长，1960 年停用，1987 年拆除）；1908 年，法国承建了云南屏边人字桥（单跨，

桥长 67 m，现为全国重点文物保护单位)；1936 年，中国修建了原粤汉铁路省界桥（凌鸿勋设计建造，混凝土拱，主跨 40 m，已废弃）等。

在公路和城市道路方面，从 20 世纪初到 20 世纪 30 年代，也修建过一些钢桥。例如，天津大红桥（1888 年建铁拱桥，跨度约 40 m，1924 年被洪水冲垮，1937 年改建为主跨约 56 m 的钢系杆拱桥），浙江奉化方桥（1907 年建成，德国工程师设计，单孔下承式钢桁梁，85.5 m 长，2007 年被船撞毁），兰州黄河铁桥（1909 年建成，德国人承建，5 孔，233 m 长，1954 年改造加固，2004 年全面维修），广西龙州铁桥（1915 年，法国人设计，黄英承建，单孔跨径 106 m 下承式钢桁梁，1940 年 7 月，为阻遏日军进犯将铁桥炸毁），湘西能滩吊桥（1938 年，周凤九主持设计建造，单孔 80 m 链式钢悬索桥，1970 年停用）等。

1937 年 9 月建成通车的杭州钱塘江大桥（图 1.7），由我国桥梁先驱茅以升先生主持修建，是我国现代桥梁的里程碑建筑。该桥公铁两用，主跨为 16×65.84 m 钢桁梁，采用气压沉箱基础，浮运法架设钢梁；同年 12 月为阻遏日军进犯将桥炸毁，1947 年 3 月修复。

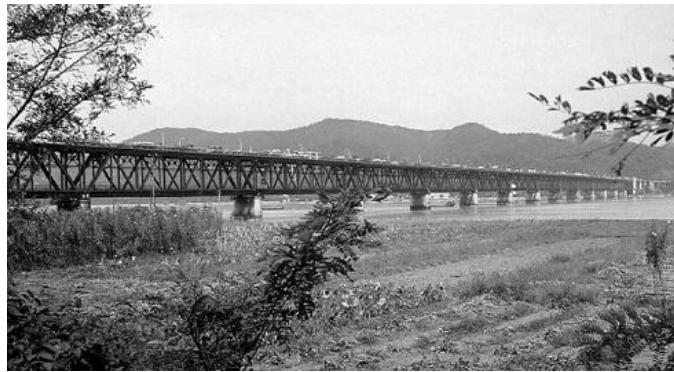


图 1.7 杭州钱塘江桥（1937 年）

中华人民共和国成立后，桥梁工程得到很大改观和发展。在国民经济恢复时期和第一个五年计划期间，国家迅速修复并加固了不少旧桥，也新建了不少重要大桥。在 20 世纪 50—60 年代，修订了桥梁设计规范，编制了桥梁标准设计，逐步培养并形成了一支桥梁工程设计与施工队伍，为桥梁工程的稳步发展创造了有利条件。

1957 年，武汉长江大桥建成。它使中国的南北铁路网连接起来，结束了我国万里长江无桥的状况，标志着我国钢桥技术提高到新的水平。该桥为公铁两用，大桥正桥为 3×128 m 的连续钢桁架梁，下层为双线铁路，上层为 18 m 宽的公路桥面，全桥总长 1 670.4 m。1969 年，南京长江大桥建成（图 1.8）。这是我国自行设计、制造、施工，并采用国产高强钢材的现代化公铁两用桥。大桥正桥为 3×160 m 的连续钢桁架梁及 1 孔 128 m 的简支钢桁架梁。下层为双线铁路，全长 6 772 m；上层公路桥总长 4 589 m。因桥址处水深流急，河床地质极为复杂，基础施工非常困难。该桥的建成，标志着我国钢桥建设技术上上了一个新台阶。

在 20 世纪 60—70 年代，我国建造的大跨度桥梁多采用钢桁架梁结构，如：宜（宾）珙（县）铁路支线上的金沙江大桥（ 112 m + 176 m + 112 m 的三跨连续钢桁梁，1968 年），成（都）昆（明）线金沙江三堆子桥（铁路简支钢桁梁，跨度 192 m，1969 年），枝城大桥（连续钢桁架梁，最大跨度 160 m，公铁桥面处于同一平面，1971 年），山东北镇黄河公路大桥（ 4×112 m 三角形连续钢桁架梁，1972 年）等。1993 年，九江长江大桥（公铁两用

桥,见图 1.9)建成,该桥主跨采用 180 m + 216 m + 180 m 的钢桁架梁加柔性拱,第一次使连续钢梁桥的跨度超过 200 m。2013 年,在广东东莞建成的穗莞深城际轨道东江南特大桥,采用加劲连续钢桁梁形式,主跨提升到 264 m。2020 年建成的浙江宁波三官堂大桥,为主跨达 465 m 的三跨连续钢桁梁结构。



图 1.8 南京长江大桥(1969 年)



图 1.9 九江长江大桥(1993 年)

2000 年 8 月,芜湖长江大桥(图 1.10)顺利合龙。它的建成,表明我国已彻底结束长江上火车轮渡的历史。芜湖长江大桥主跨为连续钢桁架梁加低塔斜拉索加劲的组合体系,分跨为 180 m + 312 m + 180 m,其余为最大跨度为 144 m 的连续钢桁架梁,主跨基础采用大直径双壁钢围堰钻孔桩。下层铁路桥全长 10.6 km,上层公路桥为 4 车道,宽 18 m,全长 6.08 km。大桥建设体现出钢桥的当代水平,除桥型外,还采用钢筋混凝土桥面板与主桁结合的板桁组合结构、厚板焊接整体节点、大尺寸箱形杆件等。



图 1.10 芜湖长江大桥(2000 年)

我国大跨径铁路(包括公铁两用)桥梁以桁架梁形式为主。材料主要采用低合金钢,结构的连接从早期的铆接过渡到栓焊连接(指杆件或构件在工厂焊接制造,在工地采用高强度螺栓拼接),施工采用伸臂拼装等方法。在 20 世纪 80 年代,我国开始研制钢箱梁和正交异性桥面板结构。1982 年,在陕西安康建成专用线铁路斜腿刚架桥(主跨 176 m,居当时世界同类桥梁首位)。近 20 年来,随着大跨度公路悬索桥、斜拉桥的建设,全焊加劲钢箱梁结构得到较多的应用。进入 21 世纪后,随着我国高铁的发展,钢桁梁桥在新结构、新材料、新工艺、新设备等方面均取得了长足的进步。

钢筋混凝土筒支梁在小跨度桥梁中应用较早。从 20 世纪 50 年代起,我国就开始对预应力

混凝土桥进行研究和试验。1956年，建成第一座跨度为20m的公路预应力混凝土简支梁桥（京周公路哑吧河桥）和跨度为23.8m的铁路预应力混凝土简支梁桥（东陇海线新沂河桥）。几十年来，按各种标准跨度、不同截面形式、先张法或后张法、普通高度梁或低高度梁等，逐步形成了系列标准设计，使混凝土简支梁桥在中小跨度范围内得到广泛应用。跨度较大的预应力混凝土简支梁桥的例子是：浙江瑞安飞云江公路桥（1985年，62m，T形梁），洛阳黄河铁路桥（1991年，50m，T形梁），南昆铁路线打梗大桥和白水河1号桥（1995年，56m，箱形梁）等。

1965年，我国采用悬臂施工方法，开始建造预应力混凝土T形刚构桥，如江苏盐河公路桥（分跨16.5m+33.0m+16.5m）和河南五陵卫河窄轨铁路桥（分跨25m+50m+25m），这为以后修建大跨度预应力混凝土桥提供了有益的经验。1966年，我国铁路上首次应用悬臂拼装法建成了成昆线旧庄河一号桥（预应力混凝土悬臂梁，分跨25m+48m+25m）。1968年，我国公路上首次应用悬臂浇筑法建成广西柳州柳江大桥（T形刚构，主跨124m，挂孔长25m）；1971年建成福建乌龙江公路大桥，主孔跨径为3×144m；1980年建成的重庆长江公路大桥为挂孔式T构，主跨达174m。近年来，单个T构的桥式（不设铰或挂孔）得到应用，如宜万铁路马水河大桥（主跨2×117m，2010年），雅泸高速公路唐家湾大桥（主跨2×114m，2012年）等。

从20世纪80年代起，采用悬臂法施工的大跨度预应力混凝土连续梁桥以及连续刚构桥得到迅速发展。通常，这类桥型在纵向采用三跨对称布置的变高度变截面梁，在横向采用单箱（或多箱）单室（或多室）的箱形截面，纵横向钢筋采用大吨位钢绞线预应力体系，竖向预应力采用高强度粗钢筋或钢绞线，施工方法为对称悬臂浇筑或拼装。近年来，主要在城市跨线桥、立交桥中，中等跨度的全焊连续钢箱梁桥开始得到应用。

公路预应力混凝土连续梁桥的典型例子是：广东顺德容奇大桥（分跨73.3m+3×90.0m+73.3m，1983年），湖北沙洋汉江大桥（分跨62.4m+6×111.0m+62.4m，1985年），云南六库怒江大桥（分跨85m+154m+85m，1990年，见图1.11）等。1996年，采用预制悬臂拼装方法，建成了广东佛开高速公路九江桥（分跨50m+100m+2×160m+100m+50m）。2000年后，连续梁桥的跨度有所增长。例如，南京长江二桥北汊桥（分跨90m+3×165m+90m，2001年），舟山长松大桥（分跨94m+170m+94m，2007年），宜宾向家坝金沙江大桥（分跨70m+170m+90m，2007年），广州海怡大桥（分跨95m+166m+108m，2010年）等。钢箱连续梁桥的典型例子是：2011年建成的上海崇启大桥，上部结构为102m+4×185m+102m的6跨连续变截面钢箱梁，采用两台浮吊进行抬吊架设，吊装长度为146.8m，起吊质量2100余吨。

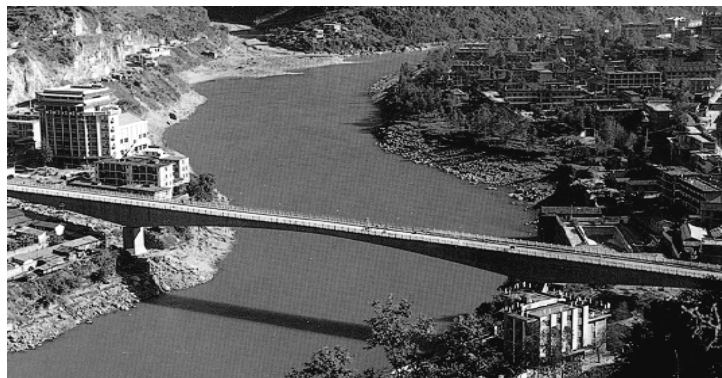


图 1.11 云南六库怒江大桥（1990年）

在预应力混凝土连续刚构桥方面，1988年在国内首次建成的广东洛溪公路大桥（双薄壁墩，分跨 65 m + 125 m + 180 m + 110 m，图 1.12），是混凝土梁桥向更大跨度发展的开端，也为这一桥型在国内的发展奠定了坚实基础。在随后的 20 多年里，先后修建了百余座同类桥梁，如黄石长江大桥（主跨 245 m，1995 年），虎门大桥辅助航道桥跨（主跨 270 m，1997 年），重庆嘉陵江黄花园大桥（主跨 250 m，1999 年），四川泸州长江二桥（主跨 252 m，2000 年），福建下白石大桥（主跨 260 m，2003 年），云南元江大桥（主跨 265 m，2003 年），苏通长江大桥辅航道桥（主跨 268 m，2008 年）等。2006 年建成的重庆石板坡大桥，采用混合梁构造（主跨跨中设置 103 m 长的钢箱），把连续刚构桥的跨度推进到了 330 m。雅泸高速公路上的腊八斤大桥，主跨 200 m，墩高达到 182.5 m，主墩采用新颖的钢管混凝土组合箱形截面。



图 1.12 广东洛溪大桥（1988 年）

近 20 年来，大跨度预应力混凝土连续梁和连续刚构体系也广泛应用于铁路桥梁。1986 年，广西防城建成茅岭江桥（连续梁，单线，主跨 80 m）。1991 年，浙江杭州建成钱塘江二桥（连续梁，双线，主跨 80 m；一联长度达 1 340 m；2011 年，又建成跨度和联长相同的四线高速铁路新桥）。1995 年，四川渡口建成攀钢专用线金沙江桥（连续刚构，单线，主跨 168 m）。1996 年，南昆线上建成了多座各具特色的预应力混凝土桥，如清水河桥、板其 2 号桥、南盘江桥等。清水河桥采用连续刚构体系，主跨 128 m，墩高 100 m。板其 2 号桥采用曲线连续刚构体系，主跨布置为 44 m + 72 m + 44 m，曲线半径 $R = 450$ m，是我国铁路上的第一座连续刚构弯梁桥。南盘江桥的主跨是带“V”形支承的连续梁体系，按部分预应力混凝土理论设计。2001 年，建成宁波大榭跨海大桥（连续刚构，主跨 170 m，公路与预留单线铁路合建于同一平面）。2004 年，建成渝怀线黄草乌江双线铁路桥（连续刚构，主跨 168 m）。2009 年，建成襄渝铁路牛角坪双线铁路连续刚构桥，主跨达 192 m。2012 年，建成兰渝铁路重庆朝阳嘉陵江大桥，使单线铁路连续刚构桥的跨度达到 176 m。

我国石拱桥历史悠久。中华人民共和国成立以来，修建了大量经济美观的石拱桥。1959 年建成的湖南黄虎港桥，主跨 50 m，首次采用木板拱架技术施工；1961 年建成的洛阳龙门桥，主跨 90 m，采用钢拱架施工；同年建成的云南长虹桥主跨达 112.5 m。1972 年，建成了四川丰都县九溪沟公路大桥，跨度达到 116 m。1990 年，湖南凤凰建成鸟巢河桥，跨度达 120 m，见图 1.13。2000 年完成的山西晋城至河南焦作公路线上的丹河大桥，跨度达 146 m。铁路石拱桥的跨度记录为 54 m（成昆铁路一线天桥，1966 年）。

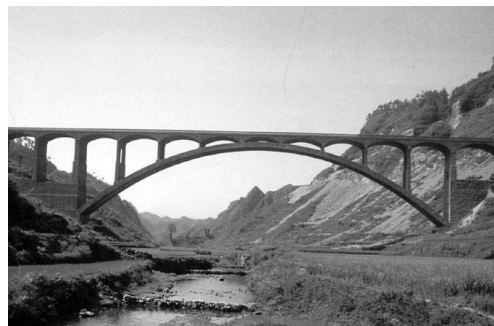


图 1.13 湖南凤凰鸟巢河桥（1990 年）

除传统石拱桥外，我国还创造出一些特殊的混凝土和钢筋混凝土拱桥结构。1964 年，公路双曲拱桥开始建于江苏无锡。这种桥在结构上“化整为零”，造型美观，节省钢材，无需大型起

吊设备，适宜于小跨轻载；随后这种桥型被推行到干线公路，其最大跨度曾达 150 m（河南嵩县前河桥，1968 年）。但因其构造难以适应大跨度、重载以及软土地基条件，结构耐久性差，已不再新建。另外，还有钢筋混凝土桁架拱、刚架拱、扁壳拱等，这些桥型在设计上或施工上各具特色，为中小跨度的拱桥建筑做出了贡献。在铁路桥梁方面，1966 年 6 月竣工的丰沙线永定河 7 号桥，采用一孔 150 m 跨度的中承装配式钢筋混凝土拱，是当时亚洲跨度最大的钢筋混凝土拱桥。

由于受支架施工方法的限制，采用砌体材料难以（也不宜）建造大跨度拱桥。无支架施工方法对推动钢筋混凝土拱桥向大跨度发展起到了重要的作用。目前采用的无支架施工方法主要是借助缆索吊装设备，采用悬臂法（包括斜拉扣挂法和悬臂桁架法，每种方法又可分为悬臂拼装或悬臂浇筑）、大件转移法（包括转体法、顶推法和大件吊装法等）施工。

公路桥梁方面，1988 年，跨度 200 m 的四川涪陵乌江公路大桥建成。该桥拱圈为箱形截面，采用转体法施工。1990 年建成的四川宜宾金沙江中承式公路拱桥的跨度为 240 m，采用斜拉扣挂劲性骨架、然后浇筑拱圈混凝土的施工方法。1996 年建成的广西邕宁邕江公路桥，跨度 312 m，采用上述同一施工技术。1997 年，重庆万州长江公路大桥完工（图 1.14）。该桥跨度达 420 m；主拱圈采用钢管混凝土与劲性骨架组合的钢筋混凝土箱形截面，采用斜拉扣挂方法施工。近年来修建的西攀路白沙沟 1#大桥（主跨 150 m，2007 年）、攀枝花新密地大桥（主跨 182 m，2013 年）等，均采用挂篮悬臂浇筑法施工。铁路桥梁方面，云桂铁路云南境内的南盘江大桥（主跨为 416 m），沪昆高铁贵州境内的北盘江特大桥（主跨 445 m），均采用带劲性骨架的钢筋混凝土拱。两桥均采用斜拉扣挂劲性骨架、然后分段浇筑拱圈混凝土的施工方法。

自 20 世纪 90 年代起，钢管混凝土拱在发挥材料性能，降低工程造价，美化结构造型和减少施工设备等方面的优点逐步被桥梁界所重视，钢管混凝土拱桥应运而生。1990 年，建成跨度 115 m 的中国第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍东河大桥。近年来，已修建了数百座这样的公路和铁路拱桥，例如，广东高明桥（2×100 m 中承式拱，1991 年），柳州文惠桥（3×180 m 中承式钢管拱，1994 年），广东三山西桥（中承式钢管混凝土刚架系杆拱，跨度 200 m，1995 年），武汉汉江三桥（跨度最大的下承式钢管混凝土拱，主跨 280 m，2000 年），广州丫髻沙珠江桥（中承式系杆拱，主跨 360 m，转体法施工，2000 年），湖北支井河大桥（上承式，主跨 430 m，2008 年），重庆巫峡长江大桥（中承式，主跨 460 m，2005 年），四川泸州合江一桥（中承式，主跨 530 m，2013 年）等。2020 年合龙的广西平南三桥，主跨达 575 m。在铁路桥梁方面，2001 年建成的水柏铁路北盘江大桥（单线），为上承式提篮拱，主跨 236 m，采用转体法施工。2011 年合龙的准朔铁路黄河特大桥，为双线上承式提篮拱，主跨 360 m。2018 年主拱合龙的拉（萨）林（芝）铁路藏木雅鲁藏布江特大桥，主跨 430 m，是国内首座耐候钢大跨桥。

进入 21 世纪后，钢拱桥（钢箱拱和钢桁架拱）受到青睐。钢箱拱多采用中承式提篮拱结构，2002 年建成跨度 130 m 的云南小湾大桥，接着又相继建成上海卢浦大桥（主跨 550 m，2003 年，见图 1.15）、厦门钟宅湾大桥（主跨 208 m，2004 年）和重庆菜园坝大桥（主跨 420 m，2007 年）等。2011 年建成的宁波明州大桥，主跨 450 m，采用中承式双肢钢箱系杆提篮钢箱拱结构。2011 年合龙的南广铁路肇庆西江特大桥，是我国首座中承式铁路钢箱提篮拱桥（双线），主跨达 450 m。在钢桁架拱方面，宜万铁路上的万州长江大桥采用单拱连续钢桁架梁结

构,主跨达到 360 m,2005 年合龙。2009 年合龙的南京大胜关长江大桥是世界上设计活载(6 线铁路)最大的高速铁路桥,桥型为 6 跨连续钢桁梁拱桥,两连拱的主跨为 2×336 m。2019 年完成主体结构的大瑞铁路怒江特大桥,为跨度 490 m 的四线车站桥,是目前世界上跨度最大的铁路钢桁拱桥。广州新光大桥(主跨 428 m,2007 年)采用飞雁式连续中承式三跨钢箱桁架拱结构,部分拱段采用整体提升施工。重庆朝天门大桥为三跨中承式系杆钢桁架拱结构,同时承担城市轨道交通和道路交通,主跨达到创纪录的 552 m,2009 年建成通车。



图 1.14 重庆万州长江大桥(1997 年)



图 1.15 上海卢浦大桥(2003 年)

自 20 世纪 50 年代公路斜拉桥问世以来,这种结构合理、跨越能力大、外形美观的桥型就异军突起,发展迅猛。在 20 世纪 70 年代,我国开始探索和实践斜拉桥,修建了四川云阳汤溪河桥(主跨 76 m,1975 年,已废弃)和上海松江县新五桥(主跨 54 m,1975 年)。至今,我国已成为世界上斜拉桥最多的国家之一,截至 2019 年,已建成的跨度超过 500 m 的各类斜拉桥近 50 座,占世界同类桥梁的 70%;在建的 29 座跨度超过 500 m 的各类斜拉桥中,我国就占 25 座。

在 80 年代,我国建成的跨度超过 200 m 的公路斜拉桥有:上海泖港大桥(混凝土梁,主跨 200 m,1982 年),济南黄河大桥(混凝土梁,主跨 220 m,1982 年),山东东营黄河桥(钢梁,主跨 288 m,1987 年),天津永和桥(混凝土梁,主跨 260 m,1987 年),重庆石门桥(混凝土梁,独塔,主跨 200 m+230 m,1988 年)等。

进入 90 年代,斜拉桥向更大跨度发展。除混凝土梁和钢梁外,也开始采用结合梁(梁部是钢梁与混凝土桥面板的结合)和混合梁(桥的边跨梁段采用混凝土梁,中跨梁段采用钢梁)。跨度超过 400 m 的桥有:上海南浦大桥(结合梁,主跨 423 m,1991 年),上海杨浦大桥(结合梁,主跨 602 m,1993 年),上海徐浦大桥(混合梁,主跨 590 m,1997 年),邵阳汉江大桥(混凝土梁,主跨 414 m,1993 年),重庆长江二桥(混凝土梁,主跨 444 m,1995 年),武汉长江三桥(混合梁,主跨 618 m,2000 年),福建青州闽江大桥(结合梁,主跨 605 m,2000 年),南京长江二桥(钢箱梁,主跨 628 m,2001 年,见图 1.16),南京长江三桥(钢箱梁,钢塔,主跨 648 m,2005 年),上海长江大桥(分离式钢梁,主跨 730 m,2009



图 1.16 南京长江二桥(1997 年)

年), 荆岳长江大桥(钢梁, 主跨 816 m, 2010 年)等。千米级的特大跨度斜拉桥包括: 香港昂船洲大桥(混合梁, 主跨 1 018 m, 2009 年)、苏通长江大桥(钢箱梁, 主跨 1 088 m, 2008 年)和鄂东长江大桥(混合梁, 主跨 926 m, 2010 年)。这些桥梁的建成, 使我国斜拉桥的设计施工水平占据世界领先地位。

随着桥梁科技的进步, 斜拉桥也开始广泛应用于公铁两用桥梁。我国早期的铁路斜拉桥是广西红水河桥(混凝土梁, 主跨 96 m, 单线, 1981 年建成)。2009 年建成的武汉天兴洲公铁两用桥(钢桁梁, 见图 1.17), 主桥采用“双塔三索面斜拉桥”方案, 主跨 504 m, 公路桥面为双向 6 车道, 铁路桥面布置两条客运专线和两条货运线。该桥因其独特的设计和特有的施工技术, 成为我国公铁两用桥建设史上新的里程碑。2014 年通车的黄冈长江大桥, 集城铁、国铁、高速公路三位一体, 主桥为双塔钢桁梁斜拉桥, 主跨达 567m, 桁梁为上宽下窄的倒梯形。另外, 主跨达 1 092 m 的公铁两用斜拉桥(沪通长江大桥), 在 2019 年实现全桥合龙; 主跨达 1 176 m 的常泰长江大桥, 也在同年开工建设。



图 1.17 天兴洲长江大桥(2009 年)

斜拉桥以其结构形式多样、造型挺拔飘逸而受到人们青睐。目前我国常采用的是双塔双(密)索面(半)漂浮结构体系, 主塔材料多采用预应力混凝土, 主梁材料为预应力混凝土或钢或两者的组合, 主梁截面为双主梁式、箱形、桁架等, 采用悬臂方法施工。

在取得了双塔斜拉桥的建设经验、解决了体系刚度和长联的温度影响后, 多塔斜拉桥的建设得到发展。1998 年建成的香港汀九桥为不等高三塔结合梁斜拉桥, 分跨 127 m+448 m+475 m+127 m。接着建成了岳阳洞庭湖大桥(2000 年, 三塔, 主跨 310 m, 混凝土梁)和宜昌夷陵长江大桥(2001 年, 三塔, 主跨 348 m, 混凝土梁)等。2012 年通车的武汉二七长江大桥为三塔双索面结合梁斜拉桥, 主跨达 616 m。浙江绍嘉大桥为 5 跨 428 m 的独柱式六塔斜拉桥, 桥宽 40.5 m, 联长达 2 680 m。郴州赤石特大桥为四塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 最大跨度 380 m, 最高主塔达 287.6 m。2017 年建成的蒙华铁路洞庭湖大桥, 为主跨 406 m 的三塔斜拉双线重载铁路桥。在建的马鞍山长江大桥, 按四线铁路和双向六车道标准设计, 其中长江左汊主通航桥采用主跨 $2 \times 1 120$ m 三塔钢桁梁斜拉桥, 为世界上首个单跨超千米的三塔斜拉桥。

尽管悬索桥在我国有悠久的历史, 也曾建造过一些悬索桥, 但直到 20 世纪 90 年代,

随着交通事业的飞速发展和对特大跨度桥梁的需求，我国才真正开始修建大跨度公路悬索桥。截至 2019 年，已建成的跨度超过 600 m 的各类悬索桥超过 40 座，约占世界同类桥梁的 50%；在建的 26 座跨度超过 600 m 的各类悬索桥中，我国就占 22 座。

1995 年建成通车的汕头海湾大桥是我国第一座大跨度悬索桥（三跨双铰预应力混凝土加劲梁，主跨 452 m），见图 1.18。该桥的完成具有开创性意义，为随后修建的大跨度悬索桥积累了经验。1996 年，被誉为“神州第一跨”的西陵长江大桥（全焊钢箱加劲梁，主跨 900 m）建成通车。1997 年，虎门大桥（钢箱加劲梁，主跨 888 m）和香港青马大桥（主跨 1 377 m，公铁两用，双层桥面）建成通车。1999 年完工的江阴长江大桥（主跨 1 385 m，钢加劲梁，见图 1.19），已跃居到世界大跨度悬索桥前列。进入 21 世纪后，悬索桥建设继续保持发展势头。先后建成润扬长江公路大桥（钢箱加劲梁，主跨 1 490 m，2005 年），武汉阳逻长江公路大桥（主跨 1 280 m，2007 年），舟山西堠门大桥（主跨 1 650 m，2009 年），广东南沙大桥坭洲水道桥（主跨 1 688 m，2019 年）和武汉杨泗港大桥（主跨 1 700 m，2019 年）等一批大跨度悬索桥。在建的桥梁包括南京仙新路过江通道（主跨 1 760 m）和深中通道伶仃航道桥（主跨 1 666 m）等。

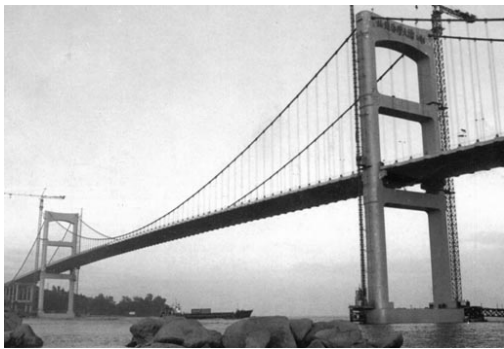


图 1.18 汕头海湾大桥（1995 年）



图 1.19 江阴长江大桥（1999 年）

在山区建造悬索桥，需要克服地形陡峭、地质复杂、交通不便等困难。近年来在山区建造的几座千米级大跨悬索桥，如四渡河大桥（主跨 900 m，单跨钢桁加劲梁，2009 年）、坝陵河大桥（主跨 1 088 m，单跨钢桁加劲梁，2009 年）、矮寨大桥（主跨 1 176 m，单跨钢桁加劲梁，2012 年）等，为山区大跨悬索桥的建设积累了成功的经验。

在技术创新方面，2012 年建成世界上首座千米级三塔悬索桥——江苏泰州长江大桥（主跨 $2 \times 1\,080$ m，不等高塔，中塔为钢塔）。同类桥梁包括马鞍山长江大桥（主跨 $2 \times 1\,080$ m，中塔为钢混叠合塔，2013 年）和武汉鹦鹉洲长江大桥（主跨 2×850 m，结合梁，2014 年）。在建的镇江五峰山长江大桥（主跨 1 092 m），是我国首座公铁两用悬索桥。

从 20 世纪 90 年代中期起，我国开始规划超长的跨海桥梁工程。2002 年 6 月，东海跨海大桥开工建设。该桥全长约为 31 km，主通航孔采用主跨 420 m 的双塔双索面结合梁斜拉桥，另设辅通航孔 3 处，引桥为 50 ~ 70 m 的预应力混凝土连续箱梁，2005 年年底建成通车。宁波杭州湾跨海大桥位于同（江）三（亚）国道主干线上，大桥全长 36 km，设南北两个航道，其中北航道桥为主跨 448 m 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥，南航道桥为主跨 318 m 的单塔双索面钢箱梁斜拉桥，引桥采用 30 ~ 80 m 的预应力混凝土连续箱梁，2008 年建成通车。2009 年建成通车的舟山大陆连岛工程，全长 26.54 km，包含主跨 1 650 m 的西堠门大桥和主跨 620 m

的金塘大桥等 5 座桥梁。2011 年建成通车的青岛海湾大桥，全长达 35.4 km，整个海湾大桥工程包括 3 处航道桥（采用斜拉桥、自锚式悬索桥等桥式）、海上非通航孔桥和路上引桥等。2018 年建成通车的港珠澳大桥，采用桥岛隧组合方案，是中国桥梁建设史上里程最长、投资最多、施工难度最大的跨海桥梁项目。大桥全长为 49.968 km，主体工程“海中桥隧”长 35.578 km，按 120 年使用寿命设计。桥梁工程主要包括 3 处航道桥（斜拉桥）和非通航孔桥（85 m 跨分幅式组合连续箱梁和 110 m 跨整体式钢箱连续梁），见图 1.20。

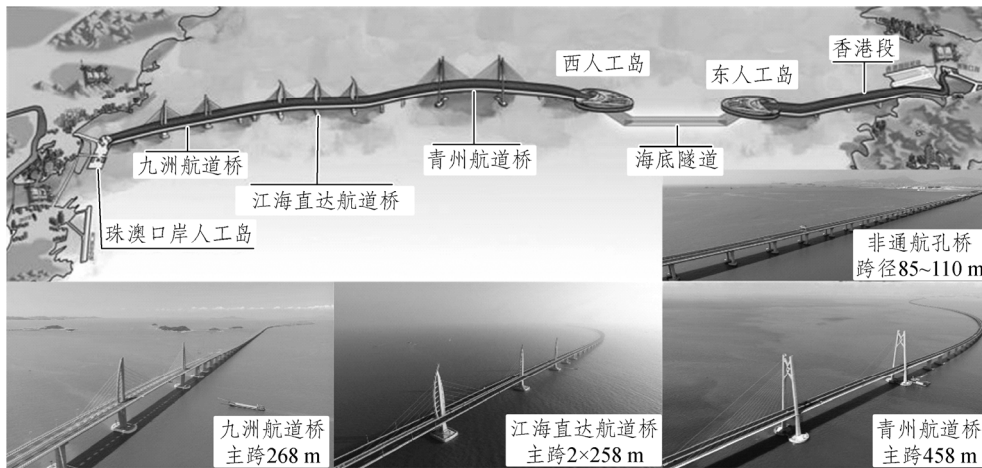


图 1.20 港珠澳大桥（2018 年）

自 1978 年我国实行改革开放政策以来，伴随着国家经济的腾飞和陆地交通事业的持续发展，桥梁工程的建设日新月异，桥梁工程也进入了快速发展时期。40 余年来，我国的桥梁事业经历了从小到大，从弱到强，从“学习与追赶”到“提高与紧跟”的成长壮大过程，正在迈入“创新与超越”的新时期。

二、国外桥梁建筑

如同中国桥梁建筑一样，国外的古代桥梁以木、石为建筑材料，建造梁桥、浮桥、拱桥等；至 18 世纪，开始采用铸铁、锻铁建造桥梁。

据记载，公元前 600 年前后，巴比伦曾在幼发拉底河上建造石墩木梁桥，桥长 180 m。第一座在罗马跨越台伯河的 Sublicius 桥，采用石墩木梁结构，建于公元前 621 年，毁于公元前 23 年。公元前 480 年，波斯王薛西斯曾在今天土耳其境内的达达尼尔海峡处修建浮桥两座，用于波希战争。在古罗马恺撒所著的《高卢战记》中，记载着曾因行军需要，在莱茵河上修建一座长度超过 300 m 的木排架桥。在瑞士卢塞恩，始建于 1333 年的 Chapel 桥（廊桥）经多次修缮得以保存至今（1993 遭受火灾后重建，见图 1.21）。日本岩国市的 5 孔锦带木拱人行桥（Kintai Bridge），跨度约 35 m，始建于 1673 年，1950 年重建，为日本著名古桥之一。18 世纪末至 19 世纪初，美国盛行建有屋盖（以保护木结构）的木梁桥。1812 年宾夕法尼亚州费城建成的 Colosum 木桥，跨度达到 103.6 m，堪称空前。

在希腊，仍保留着公元前 1300 年建造的石拱桥雏形。现伊朗境内的 Dezful 桥（遗迹），建于公元前 400—前 350 年，计 23 孔，跨径 7 m，长 383 m，尖拱，墩处开泄水孔。古罗马人十分善于建造石拱桥，他们发明了石灰砂浆和火山灰水泥，创造出木桩围堰用以建造河中基础。这个时期修建的石拱桥，拱圈呈半圆形，拱石经过细凿，砌缝一般不用砂浆。因当时难以修建深水基础，桥墩过宽，阻水面积过大，所修建的跨河桥多已冲毁。古罗马城外的 Mulvius 桥，始建于公元前 109 年，1806 年重建，原有的一部分拱跨（包括疏洪孔）仍保留至今。目前仍在使用的 Fabricius 桥，位于罗马城内，始建于公元前 62 年，两跨，桥长 62 m，宽 5.5 m，最大跨度 24.5 m。西班牙境内的阿尔坎塔拉桥（Alcantara，6 孔石拱桥，最大跨度 28.8 m，建于公元 104—106 年）因大部分桥墩建在岩石上，至今完好。图 1.22 所示的在罗马跨越台伯河的天使桥，始建于公元 134 年，共 5 孔（中间 3 孔为原桥），跨度 18 m；1688 年，在栏杆柱上增加了 10 尊天使雕像，使其成为罗马最优雅美观的古桥。

古罗马时代还修建了不少渡槽，其中最著名的是法国加尔（Gard）水道桥，见图 1.23。该桥建于公元前 167—前 158 年，呈 3 层半圆拱结构，最大跨度 24 m；建成后约 400 年，桥两端被战争破坏，1670 年重建。



图 1.21 瑞士 Chapel 桥（1333 年）



图 1.22 罗马天使桥（134 年）

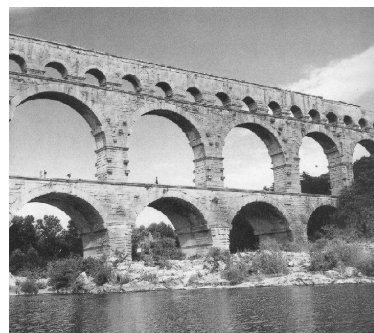


图 1.23 法国加尔水道桥（前 167—前 158 年）

在中世纪（5—15 世纪），欧洲桥梁建设曾因封建割据而衰退。11—12 世纪，源于中东地区的尖拱（拱石加工较粗，砌筑用石灰砂浆，拱弧在顶部往往形成尖角）被引入欧洲，用于教堂及桥梁建筑。在法国阿维尼翁，1177—1187 年建成的一座跨越罗那河的 20 孔（现只剩 3 孔）石拱桥，跨度 30.8~33.5 m，曾驰名一时。英国在 1176—1209 年建成的跨越泰晤士河的伦敦老桥，使用了 600 余年，直到 1826 年才拆除。这一时期建造的桥梁，习惯在桥上设置教堂、神像、关卡、碉堡、商店、住房等。比较著名的桥梁有：法国卡奥尔的 Valentre 桥（6 跨带箭楼的石拱桥，跨度 16.5 m，总长 138 m，1350 年），意大利佛罗伦萨的老桥（Vecchio，3 跨带桥屋的石拱桥，跨度 29 m，1345 年），捷克布拉格的查尔斯桥（Charles Bridge，带神像雕塑的多跨石拱桥，最大跨度 23.38 m，宽 10 m，长 515 m，1380 年）等。到文艺复兴时期（14—17 世纪），为使桥面纵坡平缓，以利交通，欧洲城市石拱桥的矢跨

比（矢高与拱跨之比）明显降低，拱弧曲线相应改变，石料加工又趋精细。代表性的桥梁有：佛罗伦萨的圣特里尼塔桥（Santa Trinita，分跨 29 m+32 m+29 m，矢跨比约 1/7，1569 年），威尼斯的瑞阿尔托桥（Rialto，单孔，跨度 26.6 m，矢跨比约 1/4，1591 年），巴黎新桥（桥长 232 m，桥宽 22 m，跨度 9~16.4 m，12 孔，1607 年）等。到 18 世纪，欧洲石拱桥达到最高水平。

随着冶炼业的发展，18 世纪中期开始采用铸铁建造桥梁。由于铸铁性脆，受拉强度低而受压强度高，故铸铁主要是用以修建拱桥。第一座铸铁拱桥是英国在 1779 年建造的科尔布鲁克代尔（Coalbrookdale）桥，桥跨 30.5 m，矢高 13.7 m，有 5 片半圆形铸铁拱肋。该桥开创了工业化造桥（工厂制造、工地安装）的先河，曾使用 170 年，现作为文物保存，见图 1.24。在此之后的几十年间，英、德、法等国家建造了一些扁平铸铁拱桥，如苏格兰的 Craigellachie 桥（单跨，跨度 50 m，1815 年），英格兰的 Albert Edward 铁路桥（单跨，跨度 61 m，1864 年），法国巴黎的 Sully 桥（分跨 46 m+49 m+46 m，1876 年）等。

19 世纪初，欧洲开始使用锻铁建造悬索桥、梁桥和拱桥，并一直延续到 19 世纪末。英国 1820—1826 年在梅奈（Menai）海峡建造的跨度达 177 m 的锻铁链杆柔性悬索桥，历经风霜而保存至今，见图 1.25。同一时期建造的，还有匈牙利布达佩斯的链桥（Chain Bridge，主跨 202m，1849 年），英格兰的克利夫顿桥（Clifton Bridge，主跨 214 m，1864 年）等。铁路出现初期，英国采用铸铁、锻铁建造小跨度的工字形截面梁桥，1846—1850 年间先后建成 Conwy 桥和 Britannia 桥。这两桥均是采用锻铁建造的铁路箱管桥（tubular bridge），列车从箱中穿过。Britannia 桥为 4 跨箱形结构，分跨 70 m + 140 m + 140 m + 70 m，1970 年毁于火灾；Conwy 桥的跨度 125m（1899 年通过添加铸铁支墩予以补强），至今仍在服役。1857 年，波兰建成 6×130.88 m 的 Tczew 格构式锻铁桁梁桥，用于铁路和道路（现仅用于公路）交通。由于在兴建这些桥梁的过程中所做的试验证实了实腹梁的可靠性，从 19 世纪后期起，钢板梁桥在小跨度铁路桥中得以推广。在锻铁拱桥方面，英国 1849 年建成 Windsor 铁路桥（下承式系杆拱，跨度约 60 m），1862 年在伦敦建成韦斯特敏斯特桥（Westminster Bridge，7 跨，桥长 250 m，跨度 29~37 m）；法国艾菲尔设计的 Maria Pia 桥（跨度 160m，1877 年）和 Garabit 桥（跨度 165m，1884 年），均为月牙形两铰桁架铁路拱桥。

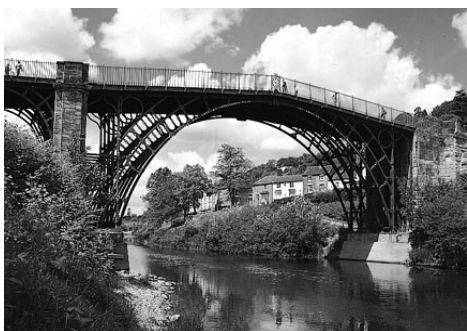


图 1.24 英国科尔布鲁克代尔桥（1779 年）

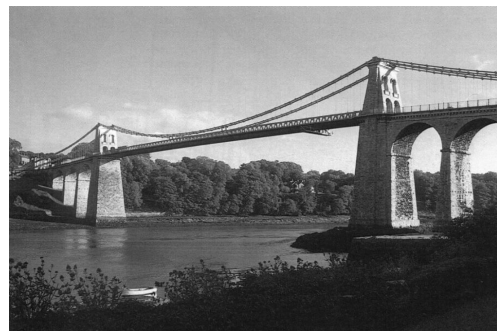


图 1.25 英国梅奈悬索桥（1820—1826 年）

19 世纪中期，钢材问世，静定钢桁架梁、拱以及悬索桥的内力分析方法逐步被工程界所掌握，各种大跨度钢桥应运而生。1867 年，德国的 H·格贝尔建造了一座主跨 38 m 的静定悬臂桁架梁桥（Hussfurt 桥，称为格贝尔桁架）。1880—1890 年，英国采用该桥式，建成了跨

度空前的福斯铁路桥 (Forth Bridge, 悬臂桁架梁, 主跨 521.2 m, 总长 1 620 m, 支承处桁高达 110 m, 见图 1.26)。该桥被视为现代桥梁的经典代表。1874 年, 美国建成世界上第一座钢拱桥——Edas 桥。该桥公铁两用, 最大跨度 158.80 m, 采用伸臂法施工。1852—1855 年, 美、加两国边境处建造了尼亚加拉瀑布桥 (Niagara Falls Bridge), 该桥为主跨 251 m 的公铁两用悬索桥, 由 J·A·罗伯林设计, 1886 年改建, 1897 年重建为跨度 167.6 m 的公铁两用钢桁拱桥。1869—1883 年, J·A·罗伯林及其儿子 W·A·罗伯林设计并建成了至今仍在使用的布鲁克林桥 (Brooklyn Bridge, 主跨 487 m, 见图 1.27), 为悬索桥向更大跨度发展开创了先例。

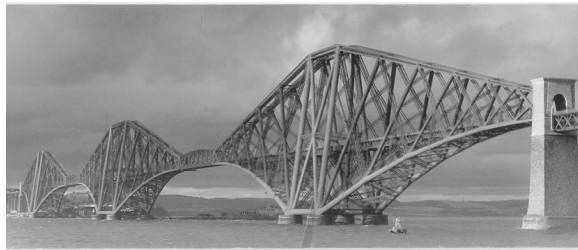


图 1.26 英国福思铁路桥 (1880—1890 年)

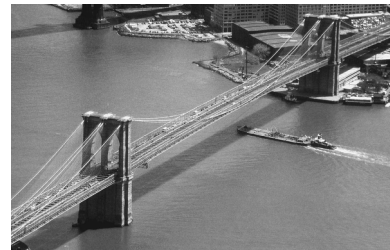


图 1.27 美国布鲁克林桥 (1869—1883 年)

从 20 世纪初期至中期, 结构力学的弹性内力分析方法普遍用于超静定结构的桥梁设计, 这为钢梁、钢拱和悬索桥等桥式向前所未有的跨度发展奠定了有力的科学基础。1916 年, 美国纽约建成 Hell Gate 桥 (钢桁架拱, 主跨 298 m, 四线重载铁路, 道砟桥面); 1916 年, 美国在俄亥俄州建成 Sciotoville 铁路桥 (连续钢桁架梁, 跨度 236.3 m); 1917 年, 在伊利诺伊州建成 Metropolis 桥 (简支钢桁架梁, 跨度 219.5 m)。1918 年, 加拿大采用 Corbel 桁架建成魁北克铁路桥 (Quebec Bridge, 主跨 548.6 m)。有代表性的公路桥是: 美国 Bayonne 桥 (1931 年, 钢桁架拱, 主跨 503.6 m), 澳大利亚悉尼港大桥 (Sydney Harbor Bridge, 1932 年, 钢桁架拱, 主跨 503 m), 美国纽约乔治·华盛顿大桥 (George Washington Bridge, 1931 年, 跨度 1 066.8 m, 世界上第一座跨度超过 1 000 m 的悬索桥), 旧金山金门大桥 (Golden Gate Bridge, 1937 年, 跨度 1 280 m) 等。

在 19 世纪上半叶, 素混凝土材料就开始在拱桥中得到应用, 如法国 1824 年建成的 Souillac 桥 (跨度 7×22 m)。到 19 世纪中后期, 钢筋混凝土材料逐渐受到桥梁界重视, 被用于拱桥和梁桥。在 20 世纪上半叶, 钢筋混凝土拱桥的跨度记录不断被刷新, 从 20 世纪初的 50 m (法国 Hogues 桥, 1900 年), 到 40 年代的 264 m (瑞典 Sandö 桥, 1943 年)。这一时期的著名桥梁有: 建于阿尔卑斯山区的瑞士 Salginatobel 桥 (三铰混凝土拱, 主跨 90 m, 1930 年, 图 1.28), 法国 Plougastel 桥 (主跨 3×188 m, 1930 年), 西班牙 Elsa 铁路桥 (跨度 210 m, 采用劲性骨架, 1942 年) 等。最早的钢筋混凝土梁桥, 是 1875 年法国建成的 Chazelet 桥, 跨度 13.8 m。由于受制于材料性能和自重, 钢筋混凝土梁的跨度发展不大, 主要用于中小跨度桥。

从 20 世纪 50 年代至今, 随着公路和城市桥梁的大量兴建, 桥梁科技的迅猛发展, 新型桥式的广泛采用, 施工方法的不断改进等, 各种桥型的跨度纪录一再被刷新, 世界桥梁工程取得长足进步。



图 1.28 瑞士 Salginatobel 桥 (1930 年)

在钢悬臂桁架梁桥方面，1974 年，日本港大桥 (Minato Bridge) 的主跨达到 510 m；同年美国建成主跨 501 m 的 Commodore Barry 桥。由于结构不连续而对行车不利，近几十年来这种桥型建造很少。2012 年日本建成的 Tokyo Gate 桥，采用钢桁架-箱梁组合结构，主跨达到 440 m。在钢桁架连续梁桥方面：1966 年美国建成的 Astoria 桥的主跨达 376 m，1977 年建成的 Francis Scott Key 桥，主跨达 366 m；1988 年日本在本四联络线上修建的与岛大桥 (Yoshima) 为跨度 245 m 的公铁两用曲线连续桁架梁，1991 年修建的生月大桥 (Ikitsuki) 的主跨达 400 m，见图 1.29。

正交异性钢桥面板 (steel orthotropic deck) 是 20 世纪 40 年代出现的一种桥面构造。这种桥面不仅节省材料，且能充当钢梁的上翼缘，这推动了钢梁桥向更大跨度发展，也为大跨度悬索桥、斜拉桥提供了经济合理的梁部结构。1946 年，首先在德国科隆莱茵河上的 Deutz 桥 (连续钢箱梁，主跨 184.5 m) 上使用；1951 年用于杜塞尔多夫 Cardinal Frings 桥时，钢箱梁主跨达到 206 m；1972 年用于波恩 Konrad Adenauer 桥时，主跨增加至 230 m。1974 年，巴西修建的里约—尼泰罗伊桥 (Rio-Niteroi Bridge) 的主跨达 300 m，见图 1.30。在 90 年代，跨度超过 200 m 的钢箱梁桥多建于日本，如 Kaita 桥 (主跨 250 m，1991 年) 和 Namihayai 桥 (主跨 250 m，1994 年) 等。不过，由于受钢板轧制、构件制造等因素的影响，钢箱梁桥跨度的进一步发展受到一定限制。



图 1.29 日本 Ikitsuki 桥 (1991 年)

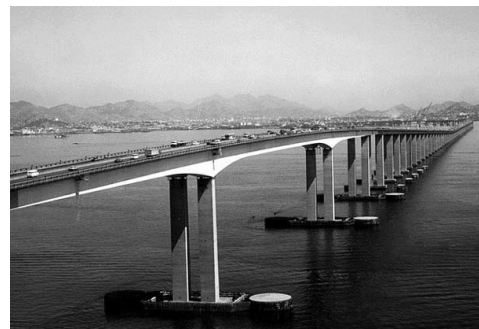


图 1.30 巴西 Rio-Niteroi 桥 (1974 年)

随着高强材料、预应力技术和施工方法的进步，预应力混凝土实腹式梁桥在 100 到 300 m 跨度范围内具有很强的竞争力。早在 20 世纪 30—40 年代，巴西、法、德等国家就开始尝试

用预应力混凝土建造桥梁。1930年，巴西第一次采用悬臂浇筑的方法，建造了主跨68m的里约佩希桥（1983年被洪水冲垮）。1938年，法国的弗莱西奈（Freyssinet）采用先张法预应力混凝土，建成了一座跨度38m的梁桥。1946—1950年，弗莱西奈采用预应力钢筋将预制的梁段串联成整体的方法，建造了跨度为55~74m的双铰刚架桥多座。1950年，德国修建的Gänstor桥（预应力混凝土刚架桥）的跨度达到82.4m。1951年，德国采用悬臂浇筑法，修建了主跨为62m的预应力混凝土桥。在1952年及1964年，又用同一施工方法建成了Worms桥（主跨114.2m）和Bendorf桥（主跨达208.0m，带铰刚构）。从50—70年代，世界上修建了一些大跨T形刚构桥，如日本的滨名桥（主跨240m，1976年，5跨带铰）和巴拉圭的亚松森桥（主跨270m，1979年，多跨带铰）。

20世纪70年代，预应力混凝土连续刚构桥首先在瑞士得到应用。1975年，修建了主跨144m的Felsenau桥。进入80年代后，连续刚构桥在世界范围内得到广泛应用，如澳大利亚门道桥（Gateway Bridge，主跨260m，1986年，见图1.31，2011年再建一座），奥地利Schottwien桥（主跨250m，1989年），英国Skye桥（主跨250m，1995年），加拿大联邦大桥（Confederation Bridge，主跨250m，1997年）等。

1991年，葡萄牙在波尔图港建成了双线铁路连续刚构桥（São João桥，主跨250m，见图1.32），成为当时铁路预应力混凝土梁桥的跨度领先者。1998年，挪威建成Raftsundet桥和Stolmasundet桥，两桥均为预应力混凝土连续刚构，前者主跨298m，后者主跨达到301m。为减少墩顶负弯矩，主跨内一定长度的梁段（Raftsundet桥为224m，Stolmasundet桥为184m）采用了细骨料高强轻质混凝土。



图 1.31 澳大利亚 Gateway 桥（1986 年，2011 年）

图 1.32 葡萄牙 São João 铁路桥（1991 年）

类似于钢梁桥的发展过程，钢拱由于自重轻、易于施工、跨越能力大而得到广泛应用。在20世纪中期，钢拱桥在西方国家（尤其是美国）得到进一步发展，例如，美国的弗里蒙特桥（系杆拱桥，主跨382.6m，1973年，提升架设施工），英国的Widnes-Runcorn桥（主跨330m，1961年），加拿大的曼恩港大桥（主跨366m，1964年）等。1977年，美国建成新河谷大桥（New River Gorge Bridge，图1.33），该桥主拱圈为钢桁架，且采用耐候钢以减少养护工作量，跨度518.2m，



图 1.33 美国 New River Gorge 桥（1977 年）

这一拱桥跨度纪录一直保持到 2000 年。这一年韩国建成傍花大桥 (Banghua Bridge), 主跨达到 540 m。

钢筋混凝土拱桥自重较大, 但造价低, 养护量小, 抗风性能好, 使用较广泛。在 20 世纪中期, 钢筋混凝土拱桥的跨度徘徊在 300 m 左右, 如葡萄牙的 Arrabida 桥 (跨度 270 m, 1963 年), 澳大利亚的 Gladesville 桥 (跨度 305 m, 1964 年), 巴西的 Amizade 桥 (跨度 290 m, 1965 年) 等。到 80 年代, 跨度增加到近 400 m。南斯拉夫在 1980 年建成的克尔克 (Krk) I 号桥 (图 1.34), 跨度达 390 m, 采用悬臂桁架法拼装施工。美国



图 1.34 南斯拉夫 Krk 桥 (1980 年)

2010 年完工的胡佛大坝绕道桥, 主跨 323 m, 采用斜拉扣挂法悬臂浇筑施工主拱。目前, 世界上跨度超过 200 m 的钢筋混凝土拱桥有 20 余座。普遍采用箱形截面作为主拱圈。

20 世纪初期, 法国建造的 Cassagne 桥 (主跨 156 m, 1909 年) 和 Lézardrieux 桥 (主跨 112 m, 1925 年) 已经具备斜拉桥的基本形式。当代斜拉桥的建造技术 (正交异性板, 钢箱梁, 斜拉索预应力工艺, 施工方法等) 发展于德国, 建桥材料以钢为主。1955 年, 由德国人迪辛格设计的第一座当代钢斜拉桥 (Strömsund 桥, 分跨 74.7 m + 182.6 m + 74.7 m) 在瑞典建成。1959 年, 德国修建了主跨达 302 m 的 Severins 独塔斜拉桥; 1969 年, 又建成主跨 319 m 的 Knie 独塔斜拉桥。1975 年, 法国建成 Saint Nazaire 桥 (主跨 404 m), 使钢斜拉桥的跨度突破 400 m。从 80 年代中期起, 日本接连修建了十余座大跨度钢斜拉桥, 如名港西大桥 (主跨 405 m, 1985 年)、横滨港桥 (主跨 460 m, 1989 年)、生口桥 (主跨 490 m, 1991 年)、名港中央大桥 (主跨 590 m, 1997 年) 等。1999 年建成的多多罗大桥, 将跨度增加到 890 m。2009 年, 韩国建成跨度 800 m 的仁川大桥。2012 年, 俄罗斯在符拉迪沃斯托克 (海参崴) 建成两座特大跨度斜拉桥——金角湾大桥 (Golden Horn Bay Bridge) 和俄罗斯岛桥 (Russky Island Bridge)。前者跨度 737 m, 采用横向外倾的塔柱; 后者则以 1 104 m 的主跨, 成为当时世界上最大跨度的斜拉桥 (图 1.35)。

1962 年委内瑞拉建成的 Maracaibo 桥 (主跨 235 m, 1981 年换索) 开创了混凝土斜拉桥的先例。20 世纪 70 年代以来, 混凝土斜拉桥得到较快发展。杰出的桥例有: 意大利的 Polsevera 桥 (主跨 206 m, 1967 年), 美国的 Pasco-Kennewick 桥 (主跨 299 m, 1974 年)、East Huntington 桥 (主跨 274.3 m, 独塔, 1985 年) 和 Dames Point 桥 (主跨 396.34 m, 1989 年), 法国的 Brotonne 桥 (主跨 320 m, 1977 年), 西班牙的 Barrios de Luna 桥 (主跨 440 m, 1983 年), 阿根廷的 Posadas Encarnacion 桥 (主跨 330 m, 1984 年), 挪威 Helgeland 桥 (主跨 425 m, 1991 年) 等。1991 年, 挪威修建了 Skarnsundet 桥, 把混凝土斜拉桥的跨度提高到 530 m, 见图 1.36。



图 1.35 俄罗斯 Russky Island 桥 (2012 年)



图 1.36 挪威 Skarnsundet 桥 (1991 年)

在结合梁斜拉桥方面，西班牙在 1978 年修建了主跨 400 m 的 Rande 桥，加拿大在 1986 年修建了主跨达 465 m 的 Alex Fraser 桥，印度在 1993 年修建了主跨 457.2 m 的 Hooghly 二桥，美国在 2005 年修建了主跨 471 m 的 Arthur Ravenel 桥。在混合梁斜拉桥方面，1995 年完工的法国 Normandy 桥主跨达到 856 m，见图 1.37。该桥为 3 跨斜拉桥，边跨为混凝土连续梁，中跨由桥塔两边各 116 m 的混凝土梁和中部 624 m 的钢梁组成。悬出的混凝土梁段对中部钢梁起到加劲作用，改善了结构在风荷载下的动力特性。

近年来，多塔斜拉桥得到建筑师和桥梁工程师的青睐。典型的桥例是 2004 年完成的希腊 Rion-Antirion 桥和法国的 Millau 高架桥。前者是 4 塔结合梁斜拉桥，分跨 $286\text{ m} + 3 \times 560\text{ m} + 286\text{ m}$ ，悬臂法施工。该桥在解决深水软弱基础、桥梁抗震减振以及抗风和抗船舶撞击等方面取得进展。后者是一座 7 塔钢梁斜拉桥，分跨 $204\text{ m} + 6 \times 324\text{ m} + 204\text{ m}$ ；最高的混凝土桥墩达 245 m，钢塔高 90 m；上部结构的施工方法是：顶推主梁就位，桥塔转体就位并张拉斜索。



图 1.37 法国 Normandy 桥 (1995 年)

悬索桥是能够充分发挥大缆钢材的力学性能、跨越能力最大的一种桥型。从 1883 年美国建成布鲁克林桥至今，世界上已建成跨度超过 400 m 的悬索桥 100 座左右。20 世纪 60 年代，美、英等国建造了若干座大跨悬索桥。1964 年，美国纽约市建成主跨 1 298.45 m 的维拉扎诺海峡大桥 (Verrazano-Narrows Bridge)；同年英国建成的主跨 1 005.8 m 的福斯公路桥 (Forth road Bridge)，成为欧洲第一座跨度超过 1 000 m 的桥。这些桥梁均采用钢桁架作为加劲梁，采用“空中送丝法”现场编制大缆。

1940 年，美国的塔科马桥 (Tacoma Narrows Bridge，钢板梁，主跨 853.4 m) 因风振致毁，这促使人们对悬索桥结构的空气动力稳定问题进行研究。英国通过对塞文桥 (Severn Bridge，主跨 987.55 m) 的动力分析和风洞试验，提出以流线型扁平钢箱梁来代替传统的钢桁架 (加劲) 梁。这种结构不仅具有良好的抗风性能，而且节省大量钢材，外形也显得纤细流畅。1966 年塞文桥建成通车，成为第一座采用梭形扁平钢箱梁作为加劲梁的悬索桥。以后陆续建造的悬索桥，如丹麦的小贝耳特桥 (Lillebælt，主跨 600 m，1970 年)、土耳其博斯普

鲁斯I桥 (Bosporus I, 主跨 1 074 m, 1973 年) 和II桥 (主跨 1 090 m, 1988 年)、英国恒比尔桥 (Humber Bridge, 主跨 1 410 m, 3 跨不对称结构, 1981 年)、瑞典的霍加库斯腾桥 (Höga Kusten Bridge, 主跨 1 210 m) 等, 均采用这类加劲梁。

日本的本州—四国联络线中, 修建了一批千米级别的悬索桥, 如下津并濑户大桥 (主跨 940 m, 1988 年)、南备赞濑户大桥 (主跨 1 100 m, 1988 年)、北备赞濑户大桥 (主跨 990 m, 1988 年)、来岛第二大桥 (主跨 1 020 m, 1999 年)、来岛第三大桥 (主跨 1 030 m, 1999 年) 等。20 世纪 90 年代引人注目的大跨悬索桥是丹麦的大贝耳特桥 (Greatbælt, 见图 1.38) 和日本的明石海峡大桥 (Akashi Kaikyo, 见图 1.39)。前者主跨长 1 624 m, 边跨长 535 m, 塔高 254 m。后者是目前世界上跨度最大的桥, 达到 1 991 m。该桥塔高 280 m, 桥面宽 35 m, 设 6 车道; 两根大缆的直径为 1.222 m。1998 年这两桥的顺利开通, 为 20 世纪的桥梁工程建设添上了辉煌的一笔。



图 1.38 丹麦 Greatbælt 桥 (1998 年)



图 1.39 日本 Akashi Kaikyo 大桥 (1998 年)

在超长跨海 (湾、峡) 桥方面: 1964 年, 美国修建了切萨皮克海湾桥隧工程 (Chesapeake Bay Bridge-Tunnel)。该桥隧工程全长 28.2 km, 由大约 3.22 km 长的堤道和海底隧道、4 个人工岛、2 座用于通航的大桥以及 19.3 km 长的多跨混凝土梁桥组成。1986 年, 在沙特和巴林之间, 建成了长达 26 km 的堤道桥。加拿大的联邦大桥跨越诺森伯兰海峡, 全长 12.9 km, 由 63 孔预应力混凝土连续梁 (刚构) 桥组成, 其中 43 孔的跨度为 250 m, 1997 建成通车。其他的跨海桥还有: 马来西亚的檳城桥 (Penang Bridge, 全长 13.5 km, 1985 年), 巴西的里约—尼泰罗伊桥 (全长 13.29 km, 1974 年), 美国的七英里桥 (Seven Mile Bridge, 全长 11.27 km, 1982 年), 韩国的仁川桥 (Incheon Bridge, 全长 12.5 km, 2009 年) 等。

三、桥梁工程展望

从 1890 年英国建成的福思铁路桥算起, 现代桥梁已走过 130 年的发展历程。人类对陆地交通的不断需求, 科学技术的不断进步, 是桥梁工程得以发展的强大动力。20 世纪后期, 通过对结构型式、工程材料、设计理论、施工设备、制造工艺等的不断研究与创新, 使桥梁工程取得了长足的技术进步。纵观中外桥梁近几十年的发展情况, 可以预见, 21 世纪的桥梁建设会表现出以下几个特点。

1. 桥跨结构继续向大跨发展

在具有一定承载能力条件下，跨越能力仍然是反映桥梁技术水平的主要指标。为避免修建或少建深水桥墩，加大通航能力，悬索桥、斜拉桥等桥式的跨度记录一再被打破。一方面，为适应陆地交通发展，需要建造跨越能力更大的桥梁；另一方面，建造前所未有的大跨度桥梁，需要渊博的技术知识、卓越的才能和创造性的勇气，是对自然和人类自身的挑战，因此具有极大的吸引力。回顾过去百余年间各类钢桥主跨的增长情况可知：悬索桥的主跨从 19 世纪末期的 500 m 左右增长到 20 世纪末期的近 2 000 m，而斜拉桥主跨从 20 世纪 50 年代的 200 m 左右增长到 21 世纪初期的 1 100 m 左右。各种桥型的跨度排名，见附录。

修建跨海（湾、峡）桥是促使桥梁向大跨度发展的重要因素之一。土耳其在建的恰纳卡莱 1915 大桥，跨越达达尼尔海峡，主跨达到 2 023 m。在规划的跨海大桥项目中，对超大跨桥梁的需求越来越明显。意大利墨西拿（Messina）海峡悬索桥方案（图 1.40）采用的主跨达 3 300 m。印度尼西亚拟在巽他海峡修建 27 km 长的跨海大桥，采用主跨约 3 000 m 的悬索桥跨越主航道。挪威计划在斯图尔峡湾建造跨度 2 300 m 的悬索桥。日本跨越纪淡海峡大桥的跨度在 2 500 ~ 3 000 m，而跨越丰予海峡及津轻海峡的悬索桥方案的跨度在 3 000 m 以上。在我国，21 世纪的陆地交通工程将有更大规模的发展，需要修建一系列更大跨度、更大规模的跨海通道（桥梁，或隧道，或桥隧结合）跨海工程和连岛工程。目前，我国跨度超过 2 000 m 的悬索桥建设项目（如江苏张皋过江通道、广东狮子洋大桥等）正在实施之中。

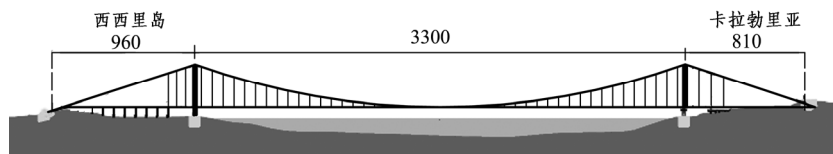


图 1.40 意大利墨西拿（Messina）海峡悬索桥示意（单位：m）

2. 新桥设计理论与旧桥评估理论更趋完善

桥梁设计理论是桥梁工程建设的基石。随着桥跨的增加、建桥环境的变化（如海洋环境、艰险山区环境）、结构体系的多样和复杂，桥梁设计会面临许多新的课题和难题，需要适应桥梁发展的需要，进一步开展设计理论研究，完善设计规范。

20 世纪 70 年代以来，国际上开始逐步采用以结构可靠性理论为基础、以分项系数表达的概率极限状态设计法，如欧洲结构规范 EUROCODE、美国桥梁规范 AASHTO、加拿大桥梁规范 CAN/CSA-S6 等。与过去采用的容许应力设计和破坏强度设计等方法相比，极限状态设计理论更趋完善和合理。我国公路桥梁已从 1985 年开始采用极限状态法进行结构设计，从 2004 年起，逐步颁布新一代设计规范。基于概率极限状态设计法的铁路桥梁设计规范也已颁布实施。

桥梁工程的发展大致要经历以下 3 个阶段：以新建为主的阶段、新建与养护维修并重的阶段、以养护维修和加固改造为主的阶段。由于不利的环境影响、结构的自然老化、车辆荷载的增加以及养护维修的不足，一部分桥梁不可避免地要暴露出各种结构损伤。这导致结构

的承载能力和耐久性降低,运营状况不能完全满足规定。如何评估既有桥梁的运营条件和承载能力,如何对已损伤桥梁进行修复加固,是保证线路安全畅通的重要问题。

自20世纪80年代起,在一些工业发达国家,桥梁工程的重心已逐步转移到其养护维修、监测监控、鉴定评估和加固改造方面。在公路桥梁方面,美、英、加拿大等国家先后颁布了基于结构可靠性理论的评估规范。我国在公路桥涵养护规范的基础上,近年来也相继颁布了公路桥梁技术状况和承载力评定、加固设计和施工等一系列标准和规范。

开展旧桥评估理论和技术的研究和实践,一方面对准确评估桥梁的承载能力、尽量延长桥梁的使用寿命和减少加固替换的高额费用,具有明显的技术意义和经济意义;另一方面,可针对旧桥暴露出来的问题,更新设计理念,完善设计理论和方法。今后的设计规范应在安全、适用、经济、美观的原则基础上,基于全寿命设计思想,考虑桥梁的耐久性,满足环保要求,推动桥梁工程的可持续性。

3. 建桥材料向高强和多功能方向发展

材料科学的进步是推动桥梁工程发展的重要动力之一。当代桥梁向大跨度发展的趋势,对建桥材料提出了高强和多功能的更高要求。

世界各国都很注重提高建桥材料的强度。我国在建设九江长江大桥时,发展了15MnVNq钢;芜湖长江大桥采用的是14MnNbq新钢种,沪通长江大桥采用的是新研发的Q500级高性能钢材。近年来我国颁布的低合金高强度结构钢标准中,列入的强度等级已提升到690MPa。高强度低松弛钢丝及钢绞线在桥梁工程中的应用日趋广泛,目前国内外开发出的 $\phi 5 \sim 7$ mm的高强镀锌钢丝,其强度达2000MPa左右。高强混凝土具有强度高、抗冲击性能好、耐久性强等优点,其既可减小结构尺寸,又能减轻梁体自重而增大跨度。目前,投入使用的混凝土等级达到C80~100级。预应力混凝土用螺纹钢筋是向大直径、高强度、低松弛、耐腐蚀、与混凝土黏结力高、拼接便利的方向发展。目前钢筋的最大直径为 $\phi 75$ mm,抗拉强度约为1330MPa。

在钢材的功能方面,抗腐蚀性能好的耐候钢(weathering steel)逐步得到应用。自20世纪60年代起,欧美和日本就在桥梁上应用耐候钢;1991年我国在京广线巡司河上建成第一座耐候钢桥,目前正得到重视和应用。在国外,高性能钢(high performance steel)的种类及其应用逐步增加。它不仅保持了较高的强度,而且在材料的抗腐蚀和耐候性能、可焊性、抗脆断和疲劳性能等方面都比传统钢材有明显的提高和改善。其他具备多功能的钢材有:按热力控制加工生产的高质量、高强度的厚钢板(该类钢材在40~100 mm厚度内不需要降低标准设计强度),能大幅度减轻焊接时预热作业的抗裂钢,抗层裂钢,变厚度钢,波纹钢板(用于结合梁桥的腹板),树脂复合型减振钢板等。在混凝土方面:具备高强、早强、缓凝、微膨胀、不离析、自密实等性能的混凝土得到广泛应用;近年来研发的超高性能混凝土(UHPC-Ultra-High Performance Concrete)是一种钢纤维增强水泥复合材料,具备卓越的耐久性和力学性能,将会带来水泥基工程材料的跨越发展。

纤维增强复合材料(FRP-Fibre Reinforced Polymer)起源于20世纪70年代。近20年来,在桥梁工程领域的应用越来越多。FRP具有高强、轻质、耐腐蚀、易维护等显著优点。在桥梁工程中,FRP短纤维加入混凝土中,可大大提高混凝土的抗裂性、延性和承载力;FRP片

材（板或布）可粘贴于钢或混凝土结构表面，用于旧桥的加固补强；在新桥建造中，FRP棒材（筋和索）可用来替代钢筋和预应力索，FRP夹层结构和蜂窝板可用作桥面板。对抗腐蚀、耐久性要求高的桥面板，采用FRP筋（也包括FRP夹层结构和蜂窝板）可大大减少日常维护费用和改造维修费用。

4. 信息技术在桥梁工程中的应用更趋广泛

进入 21 世纪，随着信息技术和智能材料的广泛应用，桥梁结构会变得“灵敏”和“智能”，其设计、施工和管理也将更为科学合理。在规划和设计方面，可以通过快速仿真分析等逼真演示桥梁造型及功能，为决策提供可靠依据。在建造方面，可通过虚拟设计和施工技术提高安全性和功效，采用遥控技术进行施工控制和管理，GPS 和 3D 激光扫描技术进行定位与测量，机器人技术进行结构整体安装或复杂环境下的施工等。在健康监测和管理方面，可综合应用计算机技术（网络及数据库，图像图形技术、BIM 技术等）、人工智能技术、传感器技术及计算数学、有限元分析等多学科，建立一套桥梁设计、施工及养护维修的科学评价体系（施工控制，运营状态监测，损伤诊断及评估，预警和养护对策等），实时掌握桥梁的健康状况。可以预见，第四次工业革命（包括人工智能，机器人，智能传感，大数据，云计算，3D 打印，物联网等）将推动桥梁工程跟上时代步伐。

5. 日益重视桥梁美学、建筑造型和景观设计

桥梁作为建筑实体，除向社会大众提供使用功能外，还凸现出其作为建筑审美客体的作用。在历史上，许多著名的桥梁建筑，如旧金山海湾大桥、悉尼港大桥、武汉长江大桥等，以其宏大的气势和造型，成为城市或地区的象征。

国家经济的持续发展、大众审美要求的提高，以及社会不断增强的自我标志意识，将会导致桥梁建筑设计理念的逐步改变。桥梁作为可定量计算分析的设计产品，一直是工程师独占的领域。随着设计学科之间的交叉，会有更多的建筑师、艺术家、景观和环境方面的专家参与到桥梁设计中来，通过设计合作，把技术（材料，结构，施工）与美学、造型和景观密切联系起来，共同创造出既保证安全适用，又体现美学魅力的桥。

概括地讲，桥梁建设的基本目标是安全、适用、经济、美观。针对我国近几十年来的桥梁状况，需要更多地关注桥梁耐久和环保问题。围绕这一基本目标，桥梁技术的发展应表现在：具有较大的跨越能力、承载能力和良好的耐久性能；车辆能安全运行于桥上并使旅客有舒适感；讲求经济效益，力图降低造价；结构造型优美并能较好地与周边环境协调。

今后我国桥梁的发展方向主要有以下一些方面：

- 发展大跨度桥梁，进一步研究与自然环境和使用条件相关的动力和稳定等问题。
- 研究超长跨海（湾，峡）桥的设计、施工和耐久、环保技术。
- 开发中小跨度钢桥、混凝土桥和结合梁桥的新的截面形式，完善桥梁的标准设计。
- 注重施工技术的发展，提高桥梁建造的机械化、工厂化、大型化水平。
- 广泛采用以极限状态法和可靠性理论为基础的方法指导桥梁设计与评估。
- 更多地将高强和高性能材料应用于桥梁工程。

- 建立和完善桥梁健康监测与管理系統，提高既有桥梁的养护、评估和加固水平。
- 开展桥梁美学、建筑造型和景观设计的系統研究。
- 开展桥梁设计与施工风险评估研究，提高桥梁安全水平。

思考題

- 1.1 简述简支梁桥的基本组成部分，讨论拱桥、悬索桥和斜拉桥的基本组成部分。
- 1.2 比较跨度、主跨、计算跨度的含义。
- 1.3 概述桥梁的主要分类。
- 1.4 视桥梁由主要受拉、受压、受弯为主的构件组成，总结各类桥梁中的梁、拱、索、墩、塔等构件的主要受力特点。
 - 1.5 以一座悬索桥为例，分析作用在桥上的车辆荷载是如何传递到地基上去的。
 - 1.6 桥梁的主要特征是“跨越”，试用一个简单的词汇来描述隧道、建筑结构、公路和铁路、水坝、码头的特征。
 - 1.7 结合材料科学的进步和陆地交通工具的发展过程，讨论桥梁的基本演变进程。