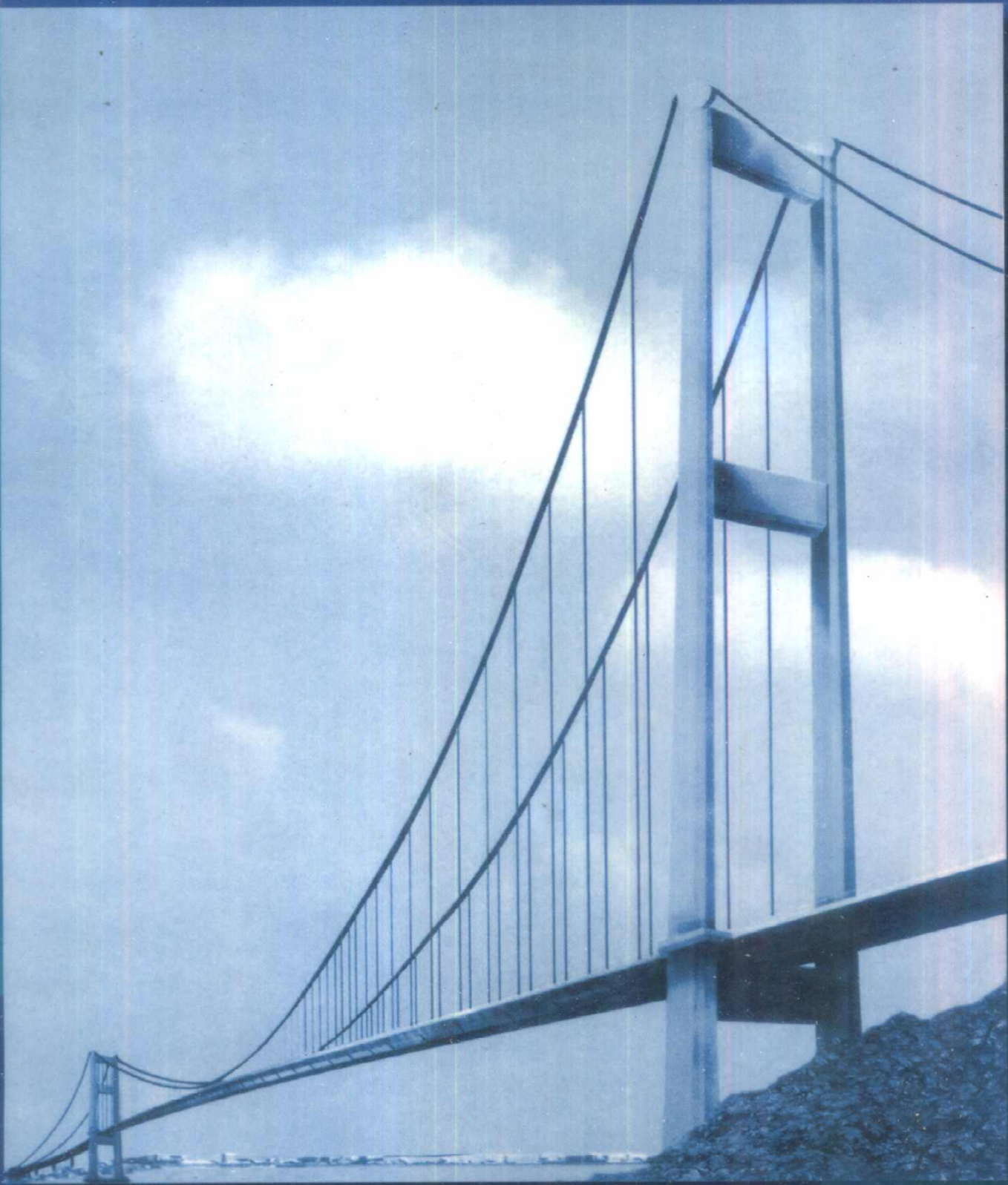




高等学校土木工程专业系列教材



桥梁工程概论

李亚东 主编

4-43

西南交通大学出版社

584

高等学校土木工程专业系列教材

桥梁工程概论

主编 李亚东

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书是关于桥梁工程的一本人门教材。全书共分十一章，较广泛地介绍了公路、铁路桥梁工程的基本特点、主要构造特征、设计和计算理论要点以及施工建造方面的知识。本书除可作为土木工程专业的本科教学用书外，亦可供从事桥梁工程工作的技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

桥梁工程概论 / 李亚东主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2001.1
高等学校土木工程专业系列教材
ISBN 7-81057-526-0

I. 桥... II. 李... III. 桥梁工程 - 高等学校 - 教材
IV. U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 57224 号

高等学校土木工程专业系列教材

桥 梁 工 程 概 论

主编 李亚东

*

出版人 宋绍南

责任编辑 李彤梅

封面设计 肖 勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都市交大路 148 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 18.875

字数: 460 千字 印数: 1 ~ 3000 册

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-526-0/U · 035

定价: 30.00 元

前 言

为适应和配合目前进行的专业调整、课程体系和教学内容的修订，结合国家教委在土木类教学改革方面的研究和试点工作，编写了该教材。

《桥梁工程概论》是土木工程专业的一门必修课，是桥梁工程的入门教材。学生在学习了《结构力学》、《结构设计原理》等课程的基础上，通过本课程的学习，能达到了解和掌握桥梁工程的基本特点、主要构造特征、设计和计算理论要点以及桥梁施工方面的知识的目的。

本教材在编排上有以下几个特点：一是在内容上包括了公路和铁路桥梁的知识，避免了以往教材偏重于公路或铁路桥梁的情况，并在内容选编上注意公、铁路桥梁的共性与个性的关系；二是因教材篇幅有限，在论述上注重阐述基本原理和概念，避免对规范条文和计算公式作冗长的解释，突出常规桥梁（公、铁路简支梁桥上、下部结构）的设计与施工内容；三是力图较全面地介绍桥梁工程的最新进展和新技术的应用。

本教材共分十一章。在第一章概论中，主要介绍桥梁的组成、分类和结构体系以及桥梁建筑的成就、现状和发展。第二章桥梁的规划与设计包括桥梁设计原则和科学依据、建桥程序、规划设计和初步设计以及桥梁结构的造型和美学观点等内容。这两章内容的学习，可使学生在后续内容之前，对桥梁工程有一个全局的、概括的了解。第三章介绍桥梁的设计荷载。第四章讨论桥面构造。第五章、第六章和第七章分别介绍混凝土简支梁桥上部结构、简支钢板梁和钢桁梁桥以及桥梁支座、墩台和基础。这三章从结构类型、构造特点、设计方法以及施工技术等方面介绍了常见简支梁桥的上、下部结构，是学生需要掌握的基础知识。在第八章其它桥型中，简要论述了预应力混凝土连续梁（刚构）桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的一般构造、施工和设计特点。第九章为结构设计理论和桥梁设计规范，结合桥梁工程介绍结构设计方法的演进、结构可靠性理论基础以及桥梁设计规范的主要内容和特点，以帮助学生正确理解和使用规范。在第十章中，简要介绍了桥梁抗震与抗风的基本概念和方法。计算机辅助桥梁设计的内容列在第十一章。书的最后附上主要参考书目和文献，供读者查阅。

本教材初稿的编写人员如下：李亚东（第一章~第三章，第八章第一节，第九章），周厚斌（第四章，第七章），武守信（第五章），唐继舜（第六章），周述华（第八章第二节~第三节，第十章），沈锐利（第八章第四节），唐亮（第十一章）。在教材试用两年后编写此教材，由李亚东担任本书的全面修订工作。

本教材的授课学时可采用 34 或 51，教师可根据实际情况对讲授内容进行取舍或增删。对部分专业名词，列出其英文名称，以便对照。每章后附有若干思考题，供学生练习。

在教材编写中，参考引用了国内外大量有关桥梁工程的专著、教材和文献。在此，谨向这些专著、教材和文献的作者们表示敬意和谢意。

由于编者水平有限，教材中谬误之处在所难免，敬请读者批评指正，以便修订。

编者于西南交通大学
2000 年 12 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 桥梁概说.....	1
第二节 桥梁的组成、分类和结构体系.....	2
第三节 桥梁建筑的成就、现状及发展.....	9
思考题.....	29
第二章 桥梁工程的设计与规划	30
第一节 桥梁设计原则和科学依据.....	30
第二节 桥梁立面、断面和平面布置.....	34
第三节 桥梁设计与建设程序.....	38
第四节 桥梁建筑美学的基本观点.....	44
思考题.....	45
第三章 桥梁的设计荷载	47
第一节 荷载分类与组合.....	47
第二节 永久荷载(恒载).....	49
第三节 可变荷载.....	50
第四节 偶然荷载.....	56
思考题.....	58
第四章 桥面构造	59
第一节 桥面组成.....	59
第二节 桥面铺装及排水防水系统.....	60
第三节 桥梁伸缩装置.....	63
第四节 安全带、人行道、栏杆灯柱、安全护栏等.....	68
思考题.....	71
第五章 混凝土简支梁桥上部结构	72
第一节 混凝土简支梁桥的设计与构造特点.....	72
第二节 混凝土简支梁桥的预制和施工方法.....	89
第三节 混凝土简支梁桥的设计计算.....	96
思考题.....	117

第六章 简支钢板梁和钢桁梁桥	118
第一节 钢桥概述.....	118
第二节 钢板梁桥.....	124
第三节 简支钢桁梁桥.....	131
第四节 钢桥制造及架设.....	137
思考题.....	142
第七章 桥梁支座、墩台与基础	143
第一节 桥梁支座.....	143
第二节 桥墩和桥台.....	153
第三节 桥梁基础.....	169
思考题.....	179
第八章 其它桥型	180
第一节 预应力混凝土连续梁（刚构）桥.....	180
第二节 拱 桥.....	198
第三节 斜拉桥.....	209
第四节 悬索桥.....	222
思考题.....	241
第九章 结构设计理论与桥梁设计规范	243
第一节 结构设计方法的演进.....	243
第二节 结构可靠性理论要点.....	250
第三节 桥梁规范的一般特点和内容.....	257
思考题.....	264
第十章 桥梁抗震与抗风	265
第一节 桥梁抗震.....	265
第二节 桥梁抗风.....	273
思考题.....	280
第十一章 计算机辅助桥梁设计	281
第一节 概 述.....	281
第二节 计算机辅助桥梁结构分析.....	282
第三节 计算机辅助桥梁工程图绘制.....	289
第四节 计算机辅助桥梁设计实例简介.....	291
思考题.....	293
主要参考文献	295

第一章 绪 论

第一节 桥梁概说

桥梁就是供汽车、火车、行人等跨越障碍（河流、山谷或其它线路等）的建筑工程物。从线路（公路或铁路）的角度讲，桥梁就是线路在跨越上述障碍时的延伸部分或连接部分。“桥梁工程”一词通常包含两层含义。一是指桥梁建筑的实体，二是指建造桥梁所需的科学知识和技术，包括：桥梁的基础理论和研究，桥梁的规划、勘测设计、建造和养护维修等。

在原始人类尚不知如何造桥时，往往会利用自然界的物体，如天然倒塌的树木（梁的雏形）、因自然地壳变化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。等到人类已能够聚族而居的时候，桥梁也势必得到发展。例如，对距今已有 6 000 余年的陕西西安半坡村新石器时代遗址的考古发现，在居住区四周有宽、深各约 5~6 m 的大围沟。当时的居民已能用木柱、草泥盖成圆形的房屋，因而出入这样的围沟时不可能没有搭设的桥梁。

对桥梁起源的详细考察和论证是考古学家的事。可以确定的是，桥梁是随着历史的演进和社会的进步而逐渐发展起来的。综观近代历史，可以认为，每当陆地交通运输工具（火车、汽车）发生重大变化，对桥梁在载重、跨度方面提出新的要求时，这种要求便推动了桥梁工程技术的发展。桥梁发展到今天，其基本类型虽仍是梁桥、拱桥和悬索桥，但建筑材料更加坚固耐用，结构型式更加丰富多彩，使用功能更加完备齐全，建桥技术更加先进合理。

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，一座重要的大跨度桥梁通常会集中体现一个国家在工程设计、建筑材料和制造工艺等方面的当代水平；从经济上讲，一条线路中桥涵的造价要占线路总造价的 10%~20%（对山区铁路，这一比例会更高）；从美学上讲，桥梁不仅仅是满足实用要求的工程结构物，还常作为建筑艺术实体长久地存在于社会生活中。那些工程宏大、结构造型雄伟壮观的大桥，往往成为一座城市的标志和骄傲。

我国幅员辽阔，大小山脉纵横，江河湖泊众多。随着国家经济建设的发展，需要大力加强基础设施（包括铁路、公路工程）建设，修建大量的公路、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。常见的梁式桥（见图 1-1 示意），通常由以下几部分组成：

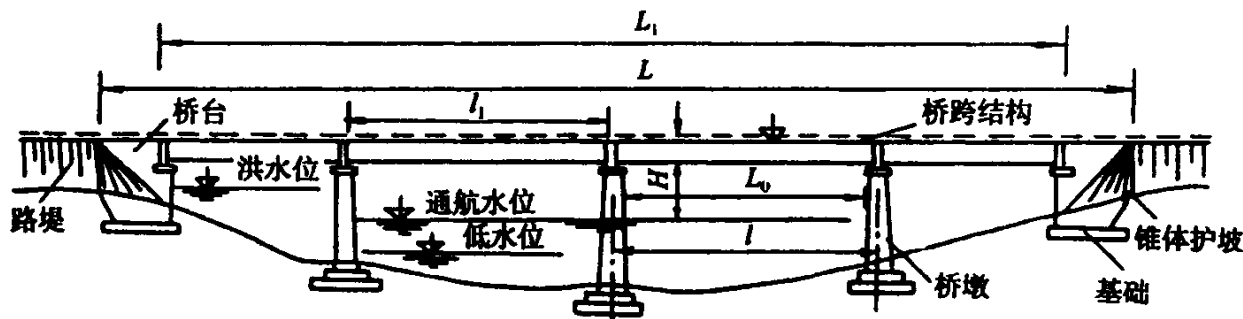


图 1-1 桥梁的基本组成

(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 (也叫承重结构) 和桥面构造两部分, 前者指桥梁中直接承受桥上交通荷载的、架空的结构部分, 后者则指承重结构以上的各部分 (指公路桥的行车道铺装, 铁路桥的道碴、枕木、铁轨, 排水防水系统, 人行道, 安全带, 路缘石, 栏杆, 照明或电力装置, 伸缩缝等。详见第四章)。

(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。桥梁墩台的布置是与桥跨结构相对应的。桥台设在桥跨结构的两端, 桥墩则分设在两桥台之间。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 (slope protection)。墩台基础是承受由上至下的全部荷载 (包括交通荷载和结构自重) 并将其传递给地基的结构物。它通常埋入土层中或建筑在基岩之上, 时常需要在水中施工。

在桥跨结构与墩台之间, 还需设置支座 (bearing), 以连接桥跨结构与桥梁墩台, 提供传力途径。

除上述基本结构外, 桥梁还常常需要建造一些附属结构物, 如路堤、挡土墙、护坡、导流堤、检查设备、台阶扶梯、导航装置等。

对桥梁工程常用的专有名词和技术术语, 摘要说明如下。

正桥与引桥 对规模较大的桥梁工程, 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, 它一般采用跨越能力较大的结构体系, 需要深基础, 是整个桥梁工程中的重点; 引桥指连接正桥和路堤的桥梁区段, 其跨度一般较小, 基础一般较浅。在正桥和引桥的分界处, 有时还会设置桥头建筑 (桥头堡)。

跨度 也叫跨径 (span), 表示桥梁的跨越能力。对多跨桥梁, 最大跨度称为主跨 (main span)。一般而言, 跨度是表征桥梁技术水平的重要指标。桥跨结构相邻两支座间的距离 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，它反映出桥梁排泄洪水的能力。

对公路梁式桥，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 。当跨径在 60 m 以下时，通常采用标准跨径（从 0.75 m 至 60 m，共 22 级，常用者为 10 m、16 m、20 m、40 m 等）设计。对铁路梁式桥，则以计算跨径作为标准跨径（从 4 m 至 160 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，有利于桥梁制造和施工的机械化，也有利于桥梁养护维修和战备需要。

桥长 对梁式桥，两桥台侧墙或八字墙尾端之间的距离 L ，称之为桥梁全长。它标志桥梁工程的长度规模。两桥台台背前缘（对铁路桥，指桥台挡碴前墙）之间的距离 L_1 ，称之为多孔跨径总长（公路）或桥梁总长（铁路）。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 桥梁涵洞按跨径分类

桥涵分类	公路桥涵		铁路桥涵
	多孔跨径总长 L_1 (m)	单孔跨径 l (m)	桥长 L_1 (m)
特大桥	$L_1 \geq 500$	$l \geq 100$	$L_1 > 500$
大桥	$L_1 \geq 100$	$l \geq 40$	$100 < L_1 \leq 500$
中桥	$30 < L_1 < 100$	$20 \leq l < 40$	$20 < L_1 \leq 100$
小桥	$8 \leq L_1 \leq 30$	$5 \leq l < 20$	$L_1 \leq 20$
涵洞	$L_1 < 8$	$l < 5$	①

注：① 一般指 $L_1 < 6$ m 且顶上有填土者。

桥下净空高度 设计洪水位或设计通航水位与桥跨结构最下缘标高的高差 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 桥面（或铁路桥梁的轨底）到桥跨结构最下缘的高差 h ，称为桥梁建筑高度。公路或铁路桥定线中所确定的桥面（或轨底）标高与通航及排洪要求所规定的净空高度之差，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。

按工程规模划分，有特大桥、大桥、中桥、小桥等，见表 1-1。

按桥梁用途划分，有铁路桥、公路桥、公铁两用桥、人行及自行车桥、农桥等。铁路桥（railway bridges）专供铁路列车行使，其活载相对较大，桥宽不大；由于铁路迂回运输不易实现，桥必须结实耐用且易于修复。与铁路桥相比，公路桥（highway bridges）活载相对较轻，桥的宽度相对较大。公铁两用桥（combined highway & railway bridges）指能同时承受公路和铁路荷载的桥梁。我国长江上的主要特大桥（如武汉、南京、枝城、九江、芜湖大桥等）都是如此。一般认为：在增加费用不多的情况下（桥梁墩台和基础可以共用），将公路、铁路桥合建，就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。特大桥是以公铁合建、还是以公铁分建为合理，需要慎重研究决定。

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、结合桥、圬工（指砖、石、素混凝土等材料）桥、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 bridges）具有较大的跨越能力，在跨度上一直处于领先地位。在我国，铁路桥采用钢材较多。近年来，大跨度公路悬索桥或斜拉桥，往往采用钢箱梁。钢筋混凝土桥（reinforced concrete bridges）和预应力混凝土桥（prestressed concrete bridges）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。钢与混凝土形成的结合桥（composite bridges）主要指钢梁与钢筋混凝土桥面板组合成的梁式桥。大跨度斜拉桥的梁部，也可采用这种构造，称为结合梁或叠合梁。圬工桥（masonry bridges）主要指石拱桥，其取材方便，构造简单，尤其适用于中、小跨度的山区桥梁。除临时性桥梁和林区桥梁外，一般不采用木桥（timber bridges）。在历史上，还曾先后采用过铸铁（cast iron）和锻铁（wrought iron）作为建桥材料，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（结构受力及立面形状）划分，有梁桥（beam bridges or girder bridges）、拱桥（arch bridges）、悬索桥（suspension bridges）三种基本体系，以及由基本体系与其它体系或基本构件（塔、柱、斜索等）形成的组合体系，见图 1-2。详细论述见后续有关章节。

按桥跨结构与桥面的相对位置划分，有上承式、下承式和中承式桥。桥面布置在桥跨结构上面的，为上承式桥（deck bridges）；相应地，布置在下面的称为下承式桥（through bridges，如图 1-2j 所示），布置在中间的称为中承式桥（half through bridges，如图 1-2c 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，墩台的圬工数量有所节省，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上净空的要求，故结构横向宽度相对较大，墩台尺寸也相应有所增加。对大跨度拱桥和桁架梁桥，有时也因需要把桥面布置在桥跨结构高度的中部，形成中承式桥。因承重结构有一部分是位于桥面之上，对桥面宽度起了限制作用；为使桥面宽度满足要求，必需加宽两片主梁或拱肋的中心距，这将使横梁跨度增加，用料较多。

按桥梁所跨越的对象划分，有跨河桥、跨谷桥、跨线桥、地道桥、立交桥、旱桥等。修建跨河桥（river-crossing bridges），不能使河流功能受到损害。为此，必须遵循桥渡勘测设计规范要求的要求，使桥的孔径、跨度、桥面高程、基础埋深等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 bridges）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。通常，对于较窄的河谷，可考虑采用一跨大拱或一跨斜腿刚构桥作为正桥越过；对于较为开阔的河谷，可考虑采用直腿连续刚构桥（配以高桥墩）。跨越其它线路（公路、铁路、城市道路等）的桥梁称为跨线桥（grade separation bridges）。当桥梁采用下降方式（而不是架空方式）、在被跨越线路的下方穿过时，因其主要部分位于地下，便称为地道桥（underground bridges）。当桥梁所在的线路还需要与其它线路互通时，就形成立立交桥（flyover bridges）。旱桥（dry bridges）指建在无水地面的桥。其跨度一般不大，其桥墩截面形状不需适应水流需要。对于引桥的不过水区段，有时用此名称。

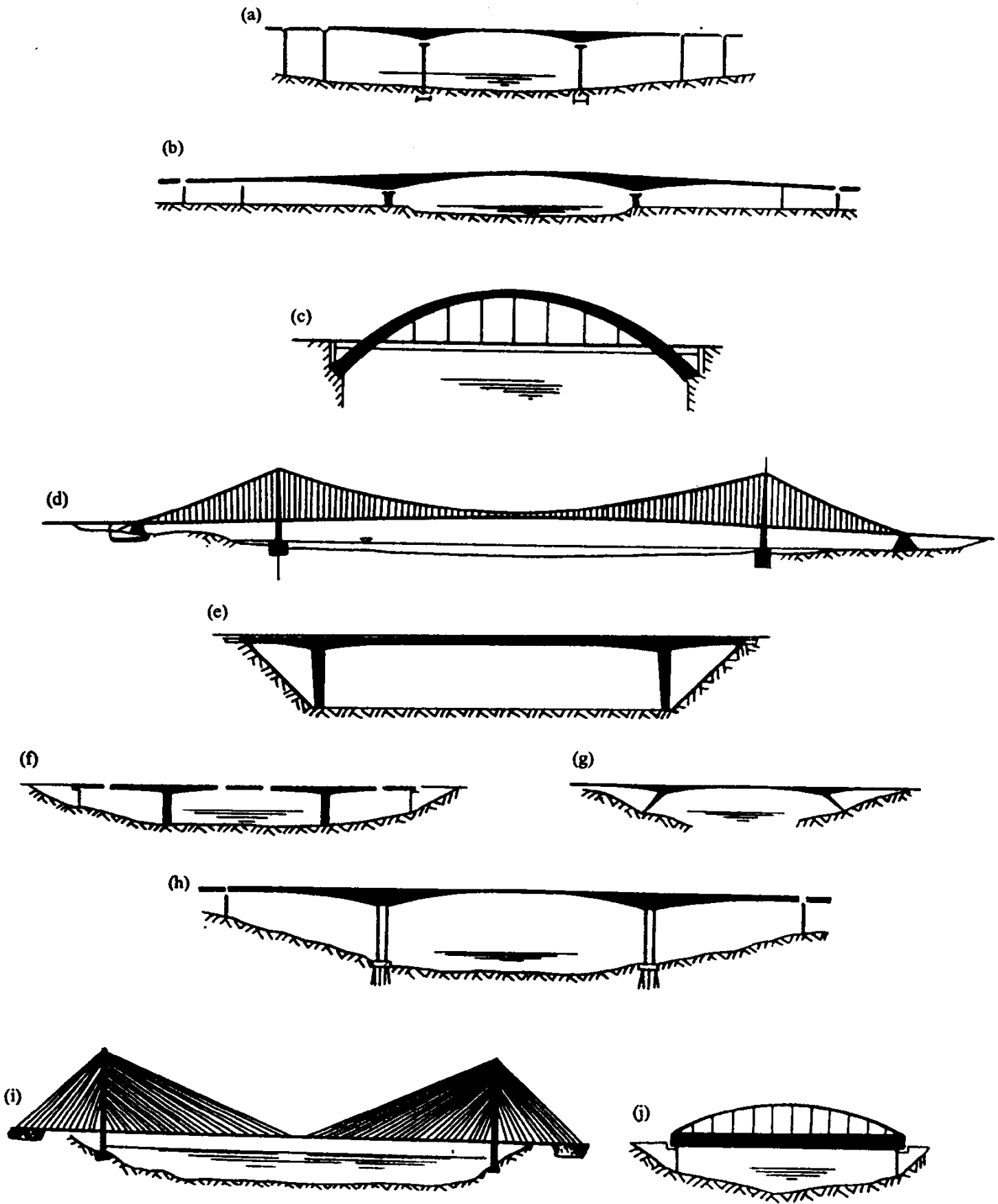


图 1-2 桥梁结构体系分类

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（或称正交桥）。斜桥（skew bridges）指水流方向同桥的轴线不呈直角相交的桥。就桥下净空的有效宽度讲，斜桥所提供的有效宽度比直桥提供的小。为提供同样的桥下有效宽度，斜桥的跨度应当较大，因此，不宜使桥梁斜交过甚。若线路曲线区段位于桥上，则在桥的跨度小时，可以仍用直线梁，仅让桥面适应曲线要求；但当跨度较大时，便应改变桥梁的形状，使桥跨结构在水平面内呈曲线状，形成弯桥（或曲线桥，curve bridges）。

桥梁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（permanent bridges）指用钢材、混凝土、石材等耐久材料所修建的桥梁。桥梁的设计和施工应该遵照适用的规范办理，期望使用寿命在 100 年左右。临时性桥梁（temporary bridges）也称为便桥，指为了使线路早日开通，对使用寿命不作长久打算的桥，其材料可用木材或储备的物资；孔径和跨度可以不考虑洪水影响。当造桥物资不充足时，还可以对桥上行车提出一些限制。

在城市繁华街道交汇处或在城市内有河流经过处，为使行人不和行车干扰或过河方便，可以修建人行及自行车桥（pedestrian bridges or footbridges）。伴随着城市交通的发展，也需要修建高架桥（或称高架路，viaducts）。其主要目的是让线路高出地面，从而保持线路畅通或增加通行能力。高架桥也曾指跨越深谷或宽谷的高桥。

绝大部分的桥梁在建成后不可移动，称为固定式桥梁；在特殊情况下，为同时满足线路高程要求和河流通航要求，也修建开启桥或活动桥（movable bridges）。开启桥指一部分桥跨结构（通常为钢梁）可以提升或转动（平转或竖转）的桥梁，而升高或转动的目的则是为了在桥下可通过较高的船舶。与固定式桥梁相比，开启桥的总造价可以节省，但其交通量将受限制，而维修管理费也较高。

为军事目的而修建的桥，可称之为军用桥（military bridges）。在军事上，常采用临时性的浮桥或舟桥（floating bridges），其用船或浮箱代替桥墩，浮在水面。在军用的制式舟桥中，为增加其机动性，常让其具有自行性。在我国，曾有农桥（peasant bridges）一词，它指在南方水网地区专为农用机械越过沟渠而建的小桥。今天，这一名词已无实用意义。

跨越运河等人工水道的桥梁可称为运河桥（canal bridges）。专为输水而修建的架空渠道称为渡槽或水道桥（aqueducts）。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）。栈桥采用桩和梁作为承重结构，因其和古代栈道相似而得名。在桥梁施工中，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。

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，以及由基本体系与其它基本体系或基本构件（塔、柱、斜索等）形成的组合体系。不同的体系对应于不同的力学型式，表现出不尽相同的受力特点。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的。在竖向荷载作用下，其支承反力也是竖直的；一般，梁部结构只受弯、受剪，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（一般在 50 m 以下），因此，悬臂梁和连续梁（图 1-2a 和图 1-2b）得到发展。它们都是利用增加中间支承以减少跨中弯矩，更合理地分配内力，加大跨越能力。悬臂梁（cantilever beam）采用铰接或一简支跨（称为挂孔）来连接其两个端头，其为静定结构，受力明确，计算简便；因结构变形在连接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，克服了悬臂梁的不足，是目前采用得较多的梁式桥型。

梁式体系分实腹式和空腹式。前者梁的截面型式多为 T 形、工字形和箱形等，后者指主要由拉杆、压杆、拉压杆以及连接件组成的桁架（truss）式桥跨结构。梁的高度和截面尺寸可在桥长方向保持一致或随之变化。对中小跨度的实腹式梁，常采用等高度 T 形梁；跨度较大时，可采用变高度箱型截面预应力混凝土连续梁桥，并配合悬臂方法施工。

2. 拱 桥

拱桥（图 1-2c）的主要承重结构是具有曲线外形的拱（其拱圈的截面型式可以是实体矩形、肋形、箱形、桁架等）。在竖向荷载作用下，拱主要承受轴向压力，但也受弯、受剪。支承反力不仅有竖向反力，也承受较大的水平推力（thrust）。

根据拱的受力特点，多采用抗压能力较强且经济合算的圬工材料（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，故一般宜建于地基良好之处。按照静力学分析，拱又分成单铰拱、双铰拱、三铰拱和无铰拱。因铰的构造较为复杂，一般采用无铰拱体系。

随着施工方法的进步，除过去常采用的有支架施工方法外，现可采用悬臂施工、转体施工、劲性骨架等无支架施工新技术，这对拱桥在更大跨度范围内的应用，起到了重要的促进作用。

3. 悬索桥

悬索桥主要由索（又称缆，cable）、塔（pylon）、锚碇（anchorage）、加劲梁（stiffening girder）等组成，见图 1-2（d）示。对跨度较小（如小于 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。但大跨度（1000 m 左右）悬索桥的主要承重结构为缆，组合体系的效应可以忽略。在竖向荷载作用下，其悬索受拉，锚碇处会产生较大的竖向（向上）和水平反力。悬索通常用高强度钢丝制成圆形大缆，加劲梁多采用钢桁架或扁平箱梁，桥塔可采用钢筋混凝土或钢。因悬索的抗拉性能得以充分发挥且大缆尺寸基本上不受限制，故悬索桥的跨越能力一直在各种桥型中名列前茅。不过，由于结构的刚度不足，悬索桥较难满足当代铁路桥梁的要求。

4. 组合体系

组合体系桥（combined system bridges）指承重结构采用两种基本结构体系，或一种基本体系与某些构件（塔、柱、斜索等）组合在一起的桥。在两种结构系统中，梁经常是其中一种，与梁组合的，则可以是拱、缆或塔、斜索。代表性的组合体系有以下几种。

（1）刚架桥

刚架桥（rigid frame bridges）是指梁与立柱（或称为墩柱）刚性连结的桥梁（图 1-2e）。其主要特点是：立柱具有相当的抗弯刚度，故可分担梁部跨中正弯矩，达到降低梁高、增大桥下净空的目的。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。刚架桥的形式多半是立柱直立的（也可斜向布置）、单跨或多跨的门形框架，柱底约束可以是铰结或固

结。钢筋混凝土和预应力混凝土刚架桥适用于中小跨度的、建筑高度要求较严的城市或公路跨线桥。

随着预应力技术和对称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 型刚构桥。预应力混凝土 T 型刚构桥（T-shaped rigid frame bridges，见图 1-2f）是因悬臂施工方法的发展而衍生出来的一种桥型。它的桥墩的刚度较大，与梁部固结，仍采用跨中设铰或简支挂孔来连接两 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；桥面线型不连续而影响行车。目前，已很少采用这种桥式。

斜腿刚构桥（rigid frame bridges with inclined legs，图 1-2g）的墩柱斜置并与梁部刚性连接，其受力特点介于梁和拱之间。在竖向荷载作用下，斜腿以承压为主，两斜腿之间的梁部也受到较大的轴向力。斜腿底部可采用铰接或固结形式，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桥墩的情况，斜腿刚构桥表现出其独特之处。另外，墩柱在立面上呈 V 形并与梁部固结的桥梁，称为 V 形刚构桥，其在受力上具有连续梁和斜腿刚构的特点。V 形支撑既可加大跨度，也可适当减小梁高，外形也较美观。

在连续梁桥的基础上，把主跨内的较柔性的桥墩与梁部固结起来，就形成所谓的连续-刚构桥（continuous rigid frame bridges，图 1-2h）。其特点是：桥墩（为单壁或双壁，称为薄壁墩）较为纤细，以受轴向力（而不是受弯）为主，表现出柔性墩的特性，这使得梁部受力仍然体现出连续梁的受力特点（主跨梁部受到较小轴力作用）。这种桥式除保持了连续梁的受力优点外，还节省了大型支座的费用，减少了墩及基础的工程量，改善了结构在水平荷载下的受力性能，有利于简化施工工序，适用于需要布置大跨、高墩的桥位。近年来，连续-刚构体系在桥梁工程中的应用越来越普遍，公路桥的跨度已接近 300 m。

（2）梁、拱组合体系

梁、拱组合体系（图 1-2j 示）同时具备梁的受弯和拱的承压特点，可以是刚性拱及柔性拉杆，也可以是柔性拱及刚性梁。这类结构的主要优点是：利用梁部受拉（若是混凝土梁，则对其施加预应力），来承受和抵消拱在竖直荷载下产生的水平推力。这样，桥跨结构既具有拱的外形和承压特点，又不存在很大的水平推力，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复杂。

（3）斜拉桥

斜拉桥（cable-stayed bridge，见图 1-2i）是由梁、塔和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，表现出弹性支承连续梁的特点。这样，梁体荷载弯矩减小，梁体高度可以降低，从而减轻了结构自重并节省了材料。另外，塔和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，是近几十年来发展很快的一种桥式。由于刚度问题，斜拉桥在铁路桥梁上的应用极为有限。

需要说明，上述对结构体系的分类远不能包容式样繁多的桥梁型式。需要强调的是，仅仅对桥梁的（纵向）结构体系有所了解，还远不能完全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，还需要对与这一结构体系相适应的建桥材料（钢、混凝土或两者兼有）、结构横截面形状及布置（多主梁或箱梁）、结构的横向和立面布置（如斜拉桥和

索面的布置和造型)、重要构造细节(如预应力配筋方式及其锚头的型式和吨位,杆件汇合处的节点处理)、施工方法(如浮运、顶推、悬臂施工之类)等进行比较、分析和选择。这样,才能建造出符合工程规律、具有经济效益的桥梁工程。

第三节 桥梁建筑的成就、现状及发展

在介绍国内外桥梁建筑的成就、现状及发展之前,有必要论述按时间划分的古代桥梁、现代桥梁和当代桥梁的主要特征。

古代桥梁(ancient bridges)大致指19世纪中叶及其以前所修建的桥梁。这些桥梁的设计和施工完全依靠人们的经验,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,及竹索、藤索、铁索、铸铁、乃至锻铁。在桥式方面,有梁、拱和索桥三大类。当时技术落后,工具简陋,不会修建深水基础,施工周期也长。

现代桥梁(modern bridges)指19世纪后期以来,由工程师使用工程力学、桥涵规范及桥梁工程知识所兴建的桥梁。19世纪20年代,世界上出现铁路。现代桥梁主要是为适应铁路建设的需要,在19世纪后期逐步发展起来的,并在铁路上使用至今。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。20世纪初,钢筋混凝土也逐渐受到桥梁界重视,开始用于中、小跨度桥梁。建桥工具得到很大发展,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。从这时起,铁路方才改变“见大河就断”的现象。从20世纪30年代起,公路桥梁也开始大力发展。

可以把在20世纪50年代左右发展起来的、主要为公路和城市道路服务的桥梁称之为当代桥梁(contemporary bridges)。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、低合金钢以及其它新型材料。用于桥梁建造的机具和设备有焊接机、张拉千斤顶、震动打桩机、水上平台、大吨位起重机和浮吊、钻孔机等。在桥梁基础方面,可修建高位承台、大直径打入斜桩和就地灌注桩、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,如连续-刚构桥、斜拉桥、梁拱组合体系、箱形梁、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、纤细结构的振动(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、转体施工、浮运法以及整件吊装等。

一、我国桥梁建筑

我国历史、文化悠久,是世界文明古国之一。就桥梁来讲,我们的祖先在世界桥梁建筑史上曾写下光辉灿烂的一页。

据史料记载,远在约3000年前的周朝,宽阔的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。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;秦代在长安(今西安)所修建的渭河桥、

灞河桥等，在史书中均有确凿记载。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》中所描绘的便是汴京（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，形成稳定的超静定结构，见图1-3。后来这一桥式传至浙江和福建等地。建于1802年的浙江云和木拱桥跨度为33.4m，至今仍保持原貌。

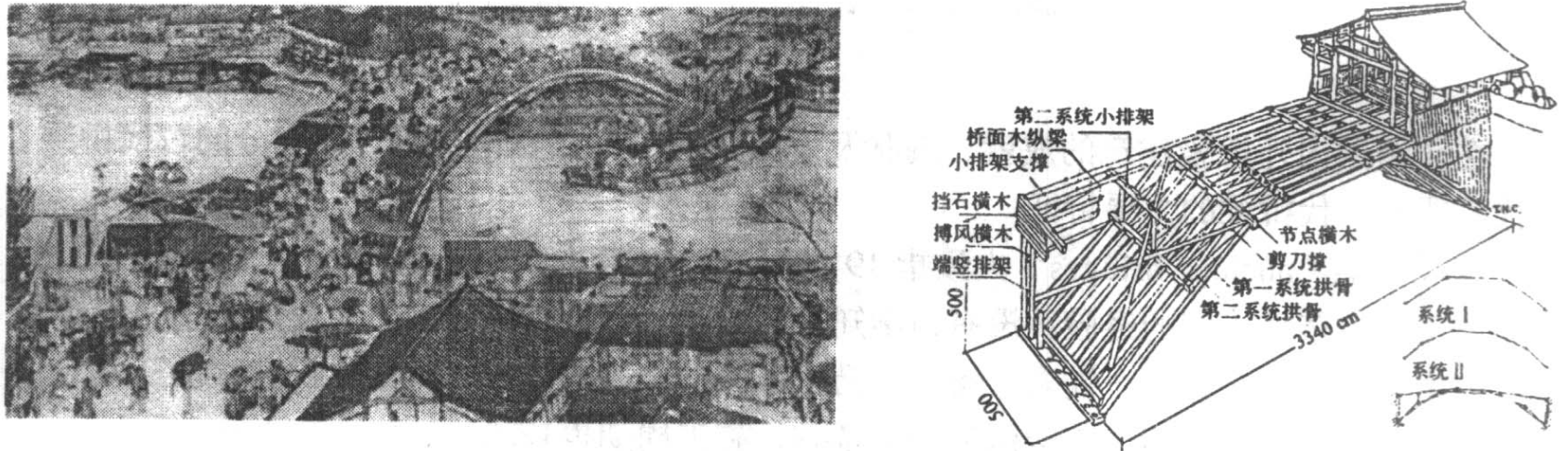


图 1-3 宋代木虹桥（1032~1033年）

在秦汉时期，我国已广泛修建石桥。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（公元605年左右），李春在河北赵县修建了赵州石拱桥（又称安济桥，净跨37.02m，宽9m），见图1-4。该桥构思巧妙，造型美观，工艺精致，历经1400年而无恙，举世闻名，被誉为“国际土木工程里程碑建筑”，不愧为桥梁文物宝库中的精品。1192年建成的位于北京西南的卢沟桥，共11孔，跨度11.4~13.5m，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15年（1750年）；前者的拱洞随桥面缓和的上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。

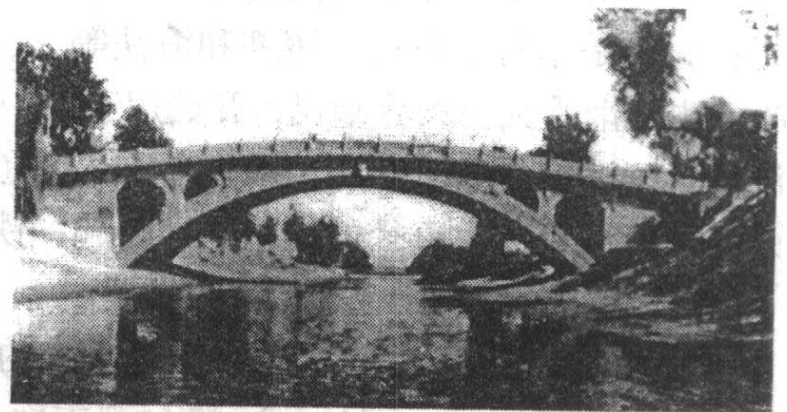


图 1-4 隋朝赵州桥（公元605年左右）

古代石梁桥也同样杰出。目前世界上尚保存的最长、工程最艰巨的石梁桥，就是我国建于宋朝的福建泉州万安桥，又称洛阳桥（1053~1059年）。此桥现长834m，共47孔。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，靠牡蛎壳与块石相胶结形成的整体基础来抵抗风浪。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。1237年建造的福建漳州虎渡桥（长335m），其所用的巨型条石尺寸达1.7m×1.9m×23.7m，重量将近200t。据记载，这些石梁是利用潮水涨落浮运架设的。

我国是公认最早有索桥的国家。据记载，最迟在唐朝中期，我国就从藤索、竹索发展到用铁链建造索桥，而西方到16世纪才开始建造铁索桥。至今尚保存下来的古代索桥有四川灌县的竹索桥（世界上最古老的索桥）和泸定县的大渡河铁索桥。灌县竹索桥始建于宋朝（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; 竹索现已被换为钢丝索。大渡河铁索桥建于 1706 年, 长约 100 m, 宽约 2.8 m, 由 13 条锚固于两岸的铁链组成, 现作为革命文物保存。

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, 生产力极为低下。在铁路方面, 1876 年, 英商在上海私修淞沪铁路, 是中国有铁路和铁路桥的开端, 但大部分桥梁建造是由外商垄断包办的; 在公路方面, 可供通车的里程很少且质量低劣, 桥梁大多为木桥, 年久失修。在 20 世纪 30 年代, 曾修建过一些钢桁架梁桥和混凝土拱桥, 如著名的杭州钱塘江桥 (压气沉箱基础, 主跨 $16\text{ m}\times 65.84\text{ m}$, 公铁两用, 由我国桥梁先驱茅以升先生主持修建。1937 年 9 月通车, 同年 12 月侵华日军攻陷杭州, 我国军队西撤后将桥炸毁, 1947 年 3 月修复。见图 1-5), 但与当时世界桥梁建筑技术相比, 还是非常落后的。

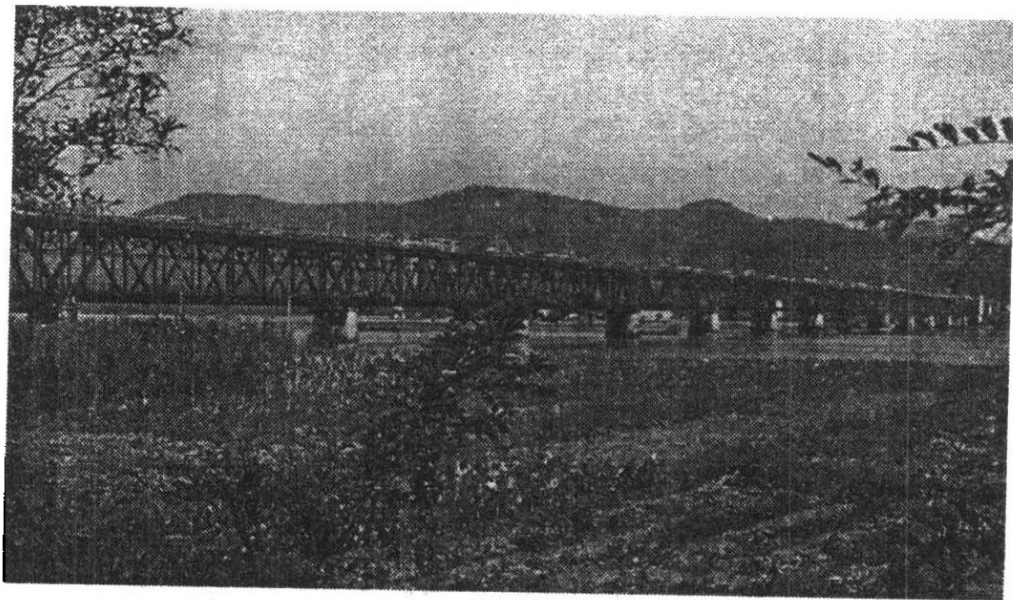


图 1-5 杭州钱塘江大桥 (1937 年)

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, 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 至 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。1978 年, 我国实行改革开放政策。随着国家经济的迅猛发展和国力的增强, 桥梁工程出现了前所未有的好局面, 正在奋力赶上和超越世界先进水平。

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起点。该桥为公铁两用, 大桥正桥为 $3\times 128\text{ m}$ 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 1-6)。这是我国自行设计、制造、施工, 并采用国产高强钢

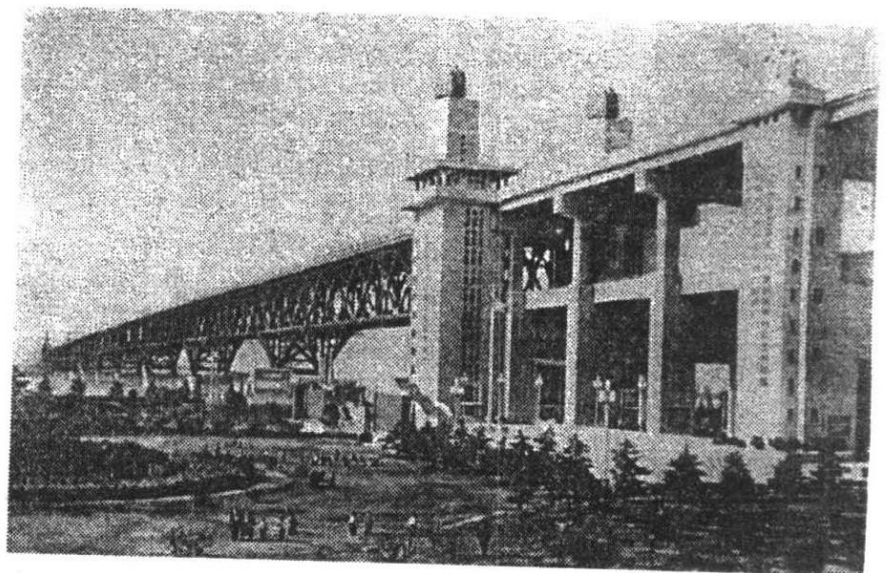


图 1-6 南京长江大桥 (1969 年)