



“十四五”职业教育新形态教材

桥涵结构施工

CONSTRUCTION OF
BRIDGES AND CULVERTS

主编 李 振 曹守江 刘 昀
主审 郭昌凯 彭富强



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长 沙 ·

图书在版编目(CIP)数据

桥涵结构施工 / 李振, 曹守江, 刘昀主编. —长沙:
中南大学出版社, 2023. 8
ISBN 978-7-5487-5364-3

I. ①桥… II. ①李… ②曹… ③刘… III. ①桥涵
工程—工程结构—工程施工 IV. ①U44

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 078375 号

桥涵结构施工

李振 曹守江 刘昀 主编

☐ 出版人 吴湘华
☐ 策划组稿 谭 平
☐ 责任编辑 谭 平
☐ 责任印制 李月腾
☐ 出版发行 中南大学出版社
社址: 长沙市麓山南路 邮编: 410083
发行科电话: 0731-88876770 传真: 0731-88710482
☐ 印 装 长沙印通印刷有限公司

☐ 开 本 787 mm×1092 mm 1/16 ☐ 印张 24.25 ☐ 字数 616 千字
☐ 互联网+图书 二维码内容 3 个 VR
☐ 版 次 2023 年 8 月第 1 版 ☐ 印次 2023 年 8 月第 1 次印刷
☐ 书 号 ISBN 978-7-5487-5364-3
☐ 定 价 58.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

出版说明 INSTRUCTIONS

为了深入贯彻党的二十大精神和全国教育大会精神，落实《国家职业教育改革实施方案》（国发〔2019〕4号）和《职业院校教材管理办法》（教材〔2019〕3号）有关要求，深化职业教育“三教”改革，全面推进高等职业院校土建类专业教育教学改革，促进高端技术技能型人才的培养，依据教育部高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》和国家教学标准及职业标准要求，通过充分的调研，在总结吸收国内优秀高职高专教材建设经验的基础上，我们组织编写和出版了这套高职高专土建类专业新形态教材。

高职高专教学改革不断深入，土建行业工程技术日新月异，相应国家标准、规范，行业、企业标准、规范不断更新，作为课程内容载体的教材也必然要顺应教学改革和新形势，适应行业的发展变化。教材建设应该按照最新的职业教育教学改革理念构建教材体系，探索新的编写思路，编写出版一套全新的、高等职业院校普遍认同的、能引导土建专业教学改革的系列教材。为此，我们成立了教材编审委员会。教材编审委员会由全国30多所高职院校的权威教授、专家、院长、教学负责人、专业带头人及企业专家组成。编审委员会通过推荐、遴选，聘请了一批学术水平高、教学经验丰富、工程实践能力强的骨干教师及企业专家组成编写队伍。

本套教材具有以下特色：

1. 教材遵循《“十四五”职业教育规划教材建设实施方案》的要求，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，注重立德树人，在教材中有机融入中华优秀传统文化、“四个自信”、爱国主义、法治意识、工匠精神、职业素养等思政元素。

2. 教材依据教育部高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》及国家教学标准和职业标准（规范）编写，体现科学性、综合性、实践性、时效性等特点。

3. 体现“三教”改革精神，适应高职高专教学改革的要求，以职业能力为主线，采用行动导向、任务驱动、项目载体，教、学、做一体化模式编写，按实际岗位所需的知识能力来选取教材内容，实现教材与工程实际的零距离“无缝对接”。

4. 体现先进性特点，将土建学科发展的新成果、新技术、新工艺、新材料、新知识纳入教材，结合最新国家标准、行业标准、规范编写。

5. 产教融合，校企双元开发，教材内容与工程实际紧密联系。教材案例选择符合或接近真实工程实际，有利于培养学生的工程实践能力。

6. 以社会需求为基本依据，以就业为导向，有机融入“1+X”证书内容，融入建筑企业岗位(八大员)职业资格考试、国家职业技能鉴定标准的相关内容，实现学历教育与职业资格认证的衔接。

7. 教材体系立体化。为了方便教师教学和学生学习，本套教材建立了多媒体教学电子课件、电子图集、教学指导、教学大纲、案例素材等教学资源支持服务平台；部分教材采用了“互联网+”的形式出版，读者扫描书中的二维码，即可阅读丰富的工程图片、演示动画、操作视频、工程案例、拓展知识等。

高职高专土建类专业新形态教材

编 审 委 员 会

前言 PREFACE.

本书是根据教育部高职高专工学学科教学基本要求并结合人才培养模式的要求,引入行业标准,在广泛征求现场专家意见的基础上编写的。本书主要适用于交通运输类道路桥梁工程技术专业群的教学。全书划分为5个情境13章。

情境一:走近桥梁施工

第1章主要介绍中国桥梁发展的历史、与桥梁相关的历史典故与传说、茅以升先生的主要贡献和他在我国交通史上的重要地位、诗词里蕴含的桥梁知识。

第2章主要介绍桥梁结构组成、桥梁结构有关名词、各种分类方式下的不同结构、不同跨度的桥梁在功能经济等方面的特征、不同结构形式的桥梁结构所采用的施工方法。

第3章主要介绍常用主要施工设备,如桥梁施工常用的起重机具设备、预应力张拉及锚固设备、混凝土施工设备。

情境二:岗位基础知识

第4章主要介绍桥梁施工场地布置要素;模板工程、钢筋工程、混凝土工程施工要点;不同环境下混凝土运输、浇筑、养护的施工要求。

第5章主要介绍识读桥梁施工图的基本方法;确定桥梁名称、种类、主要技术指标、施工措施、比例、尺寸单位等;了解桥梁各部分所使用的建筑材料,并阅读工程数量表、钢筋明细表及说明等。

情境三:简支梁桥施工

第6章主要介绍明挖基础施工的开挖方法,桩基础施工方法的分类及其施工注意事项,还涉及沉井基础的施工技术。

第7章主要介绍墩台施工模板的类型、构造、设计及多种墩台施工技术。

第8章主要介绍钢筋混凝土简支梁和预应力混凝土简支梁的施工工艺,重点介绍先张法

及后张法的张拉要点。

情境四：连续梁桥施工

第9章主要介绍连续梁桥中逐孔架设法、移动模架法、顶推法和悬臂施工法等方法。

第10章主要介绍桥面系的组成，桥面铺装层的类型，伸缩缝和梁间铰接缝的类型及施工工序，桥梁防水和排水措施及其他附属工程的施工。

情境五：其他结构施工

第11章主要对拱桥的有支架施工、悬臂浇筑施工、装配式拱桥安装施工、转体法施工、钢管混凝土拱桥施工等进行了介绍，其中包括各种施工方法的基本原理、适用条件、技术要求、施工组织及过程控制等。

第12章主要介绍斜拉桥与悬索桥的分类、构造和施工方法。

第13章主要介绍圆管涵、盖板涵、拱涵、箱涵、倒虹吸管的施工方法及其注意事项。

本书第1章由湖北大学文学院颜慧贤编写；第2章由长沙市轨道交通集团有限公司曹守江编写；第3章由湖南交通职业技术学院李振和河北交投路桥建设开发有限公司程学丽合编；第4章由长沙市轨道交通集团有限公司曹守江编写；第5章由湖南交通职业技术学院刘昀编写；第6章由长沙市轨道交通集团有限公司曹守江和湖南交通职业技术学院李振合编；第7章由河北通华公路材料有限公司程学志编写；第8章由湖南交通职业技术学院李振和湖南省交通科学研究院有限公司马衡合编；第9章由湖南省交通科学研究院有限公司马衡编写；第10章由湖南交通职业技术学院刘昀编写；第11章由湖南交通职业技术学院李振编写。全书由湖南交通职业技术学院李振、曹守江、刘昀主编，郭昌凯、彭富强主审。

全书的校对工作由李航、刘俊、马晶、杨一希、何佳等同志负责，在此，对他们表示衷心的感谢！

本书编写过程中，参考了有关书籍和资料，在此谨向其作者深表谢意。同时，由于编写水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2023年8月

CONTENTS. 目录

情境一 走近桥梁施工

第 1 章 桥梁文化与创新	(3)
1.1 桥之史：人世变更仙迹在	(3)
1.2 桥之诗：半烟半雨溪桥畔	(12)
1.3 桥之时：一桥飞架惊世殊	(17)
1.4 桥之师：青山着意化为桥	(25)
第 2 章 桥梁通识知识	(28)
2.1 桥梁组成	(28)
2.2 桥梁结构类型	(31)
2.3 桥梁施工方法及选择	(33)
第 3 章 桥梁施工常用机械和设备	(41)
3.1 常备式结构及其应用	(42)
3.2 施工常用机械设备	(57)

情境二 岗位基础知识

第 4 章 桥梁施工图的识读	(65)
4.1 识读桥梁施工图基本方法	(65)
4.2 识读钢筋结构图	(67)
4.3 识读钢筋混凝土桥梁施工图	(72)

第 5 章 桥梁基本施工	(79)
5.1 场地布置	(79)
5.2 模板工程	(81)
5.3 混凝土工程	(85)
5.4 钢筋工程	(99)

情境三 简支梁桥施工

第 6 章 桥梁基础施工	(111)
6.1 概述	(111)
6.2 明挖基础施工	(111)
6.3 桩基础施工	(125)
6.4 沉井与沉箱基础施工	(137)
第 7 章 桥梁墩台施工	(145)
7.1 混凝土墩台施工模板的类型和构造	(145)
7.2 墩台模板设计	(153)
7.3 高桥墩施工	(156)
7.4 砌体墩台施工	(165)
7.5 盖梁和台帽施工	(167)
7.6 拼装式墩台施工	(172)
第 8 章 混凝土简支梁施工	(174)
8.1 概述	(174)
8.2 施工支架与模板	(175)
8.3 钢筋混凝土简支梁施工	(182)
8.4 预应力混凝土分类	(186)
8.5 预应力混凝土简支梁先张法施工	(187)
8.6 预应力混凝土简支梁后张法施工	(193)
8.7 无黏结预应力技术	(202)

8.8 装配式梁桥的安装	(207)
--------------------	-------

情境四 连续梁桥施工

第9章 混凝土连续梁施工	(217)
9.1 概述	(217)
9.2 逐孔架设法	(218)
9.3 移动模架法	(221)
9.4 顶推法	(223)
9.5 悬臂浇筑施工法	(233)
9.6 悬臂拼装施工法	(242)
第10章 桥面系及其附属工程	(250)
10.1 桥面铺装	(250)
10.2 伸缩装置及其安装	(252)
10.3 梁间铰接缝施工	(261)
10.4 桥面防水、排水设施	(265)
10.5 其他附属工程	(268)

情境五 其他结构施工

第11章 拱桥施工	(275)
11.1 拱桥就地浇筑施工	(275)
11.2 装配式拱桥施工	(287)
11.3 转体施工法	(301)
11.4 钢管混凝土拱桥施工	(313)
第12章 斜拉桥及悬索桥施工	(323)
12.1 斜拉桥的分类及构造	(323)
12.2 斜拉桥的施工	(332)

12.3	斜拉桥施工的控制与调整	(338)
12.4	斜拉桥主梁施工实例	(341)
12.5	悬索桥的分类及施工	(342)
第 13 章	涵洞施工	(351)
13.1	涵洞的构造	(351)
13.2	涵洞施工	(358)
参考文献		(375)

情境一

走近桥梁施工

第1章

桥梁文化与创新

【知识目标】

1. 了解中国桥梁发展的历史；
2. 了解和桥梁相关的历史典故与传说；
3. 了解茅以升先生的主要贡献和他在交通史上的重要地位；
4. 理解诗词里蕴含的桥梁知识。

【能力目标】

1. 培养学生善于发现、敢于创新的思维能力和善于协作、和谐统一的团队精神；
2. 提升学生的审美素养，体会古诗词之中蕴含的韵律之美、内容之美、哲理之美；
3. 培养学生在面对人生挫折时，处变不惊、稳重从容、沉潜蓄势、厚积薄发的态度。

【素养目标】

1. 增强学生对桥梁文化价值的肯定和职业自信；
2. 传承并发扬敬业、精益、专注、创新的工匠精神；
3. 厚植学生的职业理想和家国情怀。

1.1 桥之史：人世变更仙迹在

1.1.1 桥的来生今世

原始社会时期，人类处于游猎状态之中，需要外出狩猎和采集果实来维持生存。在这个过程中，他们会遭遇到困难，比如会遇到跨度太大而跳不过去的峡谷、水流太急而游不过去的溪流。于是他们会观察自然环境中倒卧在溪流上的树木，或者是森林中悬挂的藤蔓，以及一些受自然环境长期侵蚀而形成的拱状山体。他们还发现其他的动物会利用这些物体过河或者攀缘。这些现象启发了原始人类在还不知道如何造桥，或者说还没有桥的概念的时候，利用这些物体来帮助他们跨越溪流、山涧和沟谷。这样的物体，统称为天生桥。

但这些天生桥并不牢固，也并非随处可见。大风可以将它们掀翻，激流可以将它们冲走。需要它们的时候，它们可能并不在视野所及范围之内。于是人类天然的生存需求、学习和创造能力，促使他们在遭遇行进障碍时，模仿并动手造桥，这就是原始桥。

原始桥十分简陋，材料无须加工。比如，原始人有意识地将附近的大树砍倒，把它横架在要跨越的深沟或溪流之上。这样的原始桥，我们把它叫作圆木桥或者独木桥。但俗话说，独木难行，独木桥虽然给人们交通提供了方便，行走起来却很不容易。随着人们经验的积累，他们开始将两根圆木并排放在一起，在两根分开的圆木上放上横向的圆木，上边铺上树枝或木板，于是独木桥有了进一步的发展。再往后，人们将圆木打进河床做墩，来支撑桥面，增强它的稳定性。于是，木梁桥出现了。用圆木来做墩，这大概是最早意义上的桥墩，也大概是建造桥梁的开端。

另一类原始桥，叫作汀步桥(图 1-1)。枯水季节，我们常常可以看到河中有裸露的石块，借助这些石块，人们可以一步一跳地跨过河流。这种自然现象，启发了原始人类的创造智慧，于是他们在要渡过的河流中摆放一些石头，然后踏石过河，这就是石桥的雏形。但是当雨季到来时，人们发现这些石头很快就会被水淹没。于是他们把建造圆木桥的大树架到石头之上，这样，出现了最早意义上的石墩桥。它的出现，弥补了木墩桥容易腐蚀、耐久性差的缺点。

第三类原始桥，是藤蔓索桥。索桥起源于中国，在中国古代的西南地区，植物茂盛，藤蔓密布。原始人类注意到，猴子们经常利用这些藤蔓植物在树林中穿行荡漾。这些现象给了他们启发，于是，他们将藤蔓植物或竹子等加工成索，把它们捆绑到两岸的大树上，来跨越险峻地区的峡谷和河流。但靠索过河很不舒服，也不方便，甚至有一定的危险。悬在半空中的索桥，随风摇晃，难免让人心惊胆战。于是，聪明的人类想到了一些改进的办法，他们把几根索串在一起，在索与索之间，用藤蔓或其他材料连接呈网状，或者直接用藤蔓编织成网，这就是后来的索网桥(图 1-2)或藤网桥。再后来，人们造桥的时候，把一部分索平铺在下面，上面铺板形成桥面，然后将一部分索放在两侧，做扶手与护栏。这样的索桥，既可以行人，也可以运送货物等，这就是古代的索桥了。再后来，随着铁的出现，人们发现，用铁来替代藤蔓等天然纤维，有令人惊叹的强度和寿命。于是，铁索桥出现了。



图 1-1 汀步桥



图 1-2 索网桥

还有一类原始桥，是拱桥(图 1-3)。大自然的鬼斧神工，让很多岩石有了特殊的形状。其中，有一种天然拱桥，或伫立于大地之上，或横跨激流，或连通天堑，如同一道道彩虹，颇为壮观。壮观之美也许激发了人类建造拱桥的灵感，李白就有“安得五彩虹，驾天作长桥”的浪漫诗句。拱桥结构最早出现在两河流域苏美尔文明中。它在中国出现得较晚，一般认为汉

代出现了我国最早的拱桥形式。古罗马时期欧洲和地中海的周边地区出现了大量的石拱桥。石拱桥(图 1-4)在我国也出现得较晚,中国现存最早的石拱桥,建造于隋朝,即举世闻名的赵州桥。石拱桥一经出现,便获得了非常迅猛的发展,即使在现代社会,它仍然以旺盛的生命力,结合现代的工程理论和新的建筑材料,取得了相对稳定的发展。



图 1-3 拱桥



图 1-4 石拱桥

随着时间的推移,工业革命来临,钢铁得到广泛的推广应用,混凝土产生,桥的结构设计理念日趋完善,铁桥、钢桥、混凝土桥相继出现,现代桥梁建设的序幕正式拉开了。

从天生桥到原始桥,再到古代桥梁和现代桥梁,人类从观察自然到模仿自然,逢山开路、遇水架桥,并不断创新,在这当中启迪了智慧,开发了创造力。

1.1.2 古代桥梁的发展阶段

中国桥梁的历史可以上溯至 6000 年前的氏族公社时代,到 1000 多年前的隋、唐、宋三代,古代桥梁发展到了巅峰时期。而之后,中国的桥梁技术全面落后于世界的脚步。自 20 世纪 90 年代以来,中国桥梁的成就才重新无愧于祖先地站到了世界前列,开始了中国桥梁建设的伟大复兴时代。

1. 创始时期

这一时期所对应的历史阶段主要为西周至春秋。这一阶段桥梁的建造多是对天然桥梁的仿照,主要的形式有汀步桥、独木桥、浮桥及索桥。

《诗经》里就提到“造舟为梁”的浮桥。《孟子》中也提道:“惠而不知为政。岁十一月,徒杠成,十二月,舆梁成,民未病涉也……”其意是当时主持郑国国政的国相子产,是个肯施小恩惠于民众的人,却并不懂治国理政。如果十一月修成走人的桥,十二月修成走车的桥,百姓就不会为渡河发愁了。

由此可见,当时人们已经把执政者对桥梁修建的态度和认识,纳入执政者的政绩之中。

《国语》中记载:“(周)定王使单襄公聘于宋,遂假道于陈,以聘于楚……道弗(路上长草)不可行也。候不在疆,司空不视涂,泽不陂,川不梁……单子归,告王曰:陈侯不有大咎,国必亡。……故先王之教曰:雨毕而除道,水涸而成梁。……故《夏令》曰:九月除道,十月成梁。……今陈国……泽不陂障,川无舟梁,是废先王之教也。”这段话的大概意思是,周定王派单襄公出使宋国,此后又借道陈国去访问楚国。……陈国的道路杂草丛生无法通行,负

责接待宾客的官员不在边境迎候，司空不巡视道路，湖泽不筑堤坝，河流不架桥梁。……单襄公回朝后告诉周定王说：“陈侯如果不遭凶灾，国家也一定要灭亡。”……先王的教诲说：“雨季结束便修整道路，河流干枯便修造桥梁。”……《夏令》说：“九月修路，十月架桥。”现在陈国……湖泊不筑堤坝，河流不备舟桥，这是荒废了先王的遗教。

由此可见，在我国桥梁建设的创始阶段，我们的祖先就充分表达了对桥梁修建的态度和认识，充分关注桥梁修建，并将其和国家兴亡联系起来。这也从一定程度上使得桥梁修建成执政者的必要行为，为我国古代桥梁的繁荣奠定了坚实的基础。

2. 发展时期

这一时期对应的历史阶段，为战国至三国时期，以秦、汉为主。

战国初期，桥梁的发展主要有两个方面的原因：一是冶炼技术的进步，出现了铁，从而快速推进了石料在建筑方面的利用，为大规模建造石桥提供了物质条件。比如在木柱梁桥的基础上，增添了石柱、石梁、石桥等新的建筑构件。石拱桥也应运而生，成为建筑史上划时代的标志。二是这一时期战火纷飞，桥梁作为交通咽喉，具有重要的战略地位。《史记·秦本纪》就记载了秦昭襄王十八年(公元前 289 年)，秦国与魏国交战，秦国名将司马错就采用了截断桥梁的办法，夺得了这一战的胜利。这一时期，造桥工程已成规模。《史记·滑稽列传》就记载了战国时期魏国人西门豹征发百姓开凿了十二条水渠并修建了十二座桥，且一直被使用到汉朝的事迹。

秦汉时期，大兴土木，建造了不少巍峨壮丽的建筑，不管是在建筑群的总体设计还是在个体建筑如桥梁的设计史上，都留下了浓墨重彩的一笔。比如渭桥、灞桥，就不仅宽广大气，而且注重装饰，其四周植下柳树，并饰以雕栏，绿荫环绕，实现了桥梁功能性和审美性的统一。这一时期，还有秦始皇在海中立柱建桥，以及汉朝薛广德谏阻文帝御楼船，称“乘船危，就桥安”的故事广为流传。汉武帝时，还曾派司马相如联系西南少数民族，为打通民族间的关塞，遂凿出灵山(今广西灵山县)隧道，在孙水(今安宁河)之上架桥。同时，这一时期，波涛汹涌的黄河之上，架起了第一座蒲津渡浮桥(图 1-5)；四川的产竹之乡，出现了竹索笮桥(图 1-6)。以上内容，既说明在这一时期人们的心目中，桥给了他们安全可靠之感；还说明这一时期，无论是统治者还是大臣，都非常重视桥的军事价值；同时，蒲津渡浮桥和竹索笮桥的出现，也意味着秦汉时期，梁、拱、吊桥梁的三大基本体系已在我国形成。



图 1-5 蒲津渡浮桥遗址



图 1-6 竹索笮桥

3. 全盛时期

这一时期对应的主要历史阶段，为两晋南北朝至宋代，以唐、宋两朝为主。

这一时期，国力较之秦汉更为强盛，与此相对应，中国在经济、文化、艺术以及建筑上都到了鼎盛时期。单就桥梁建筑而言，这一时期所取得的成就可谓是举世瞩目。

究其原因，主要有两点：一是经济的愈加繁荣，建筑技术的愈加精进，加之前朝在桥梁修建方面所打下的良好基础，使政府和民间更有能力组织和修建质量优良、技术高超、富有美感的桥梁。二是经济重心南移产生的附加影响。在南方水乡之地，伴随着经济的繁荣，人口的增多，建造桥梁的需求也日益增多。

这一时期建造的著名古桥，有隋匠李春设计建造的石拱桥赵州桥，北宋牢城废卒发明的叠梁拱虹桥，还有泉州万安桥（现名洛阳桥，图1-7）、潮州广济桥（图1-8）等，都在世界桥梁史上享有盛誉。在这一时期，石桥墩砌筑工艺不断改进，日臻完善，为日后长大桥梁的兴建奠定了良好的基础。从此之后，中国石桥建设飞跃发展，无论在数量上还是在质量上，都达到了历史的高峰。

这一时期，还有两部建筑学著作，一部是北宋木工喻皓写就的《木经》三卷，一部是李诫编写的《营造法式》。其内容涵盖土木工程技术、建筑设计规范和估工算价的规定，总结了古代劳动人民长期积累的丰富经验。虽然它们不属于桥梁建筑专著，但由此可窥得工程技术的一般法则，也可算是桥梁方面珍贵的技术文献。



图 1-7 泉州万安桥



图 1-8 潮州广济桥

4. 建造及修缮时期

这一时期对应的是元、明、清三代。这一时期，由于驿路和漕运的发展，中国古代桥梁在建造和修缮方面都有突出表现。

《马可·波罗游记》中就有记载，位于永定河上始建于金代的卢沟桥，在元代时被修整一新。游记还以杭州和泉州为例，展现出这个时期中国古代桥梁不仅多而且美观的壮丽画面。从桥梁主要聚集地区、桥梁形式和技术可以看出，元代桥梁建造还是深受宋代桥梁的影响。

比起宋、元时期，明代的桥梁略显逊色，不复前朝的繁盛景象，但也出现了诸如江西南城县的万年桥、贵州盘江铁桥等艰巨的桥梁工程。

到了清代，桥梁建筑业出现了新气象。一是有别于前朝偏重新建桥梁的做法，清代重视桥梁修缮工程，对一批古桥进行了修缮和改造，从而延长了古桥的使用寿命。二是索桥技术有了大幅度提高，在川滇一带兴建了不少索桥，例如泸定桥。三是桥梁艺术有跨越式发展，

尤其是园林桥梁的艺术性，达到了前所未有的高度。四是在此期间修建的桥梁，也许是受到了《木经》和《营造法式》的影响，会留下施工说明，例如灞桥、文昌桥、万年桥等都有完整的建筑过程和施工方法记述。

元、明、清三代既继承了唐、宋桥梁建造历史的辉煌，又步入了中国桥梁技术革命的道路。清代末期，我国桥梁历史上发生了一次技术革命。从此，更加适应近代交通发展的铁路桥和公路桥开始走上中国桥梁的历史舞台。

在中国古代桥梁发展的历史中，我们可以看到古代的劳动人民既有坚韧不拔的毅力，又有勇敢创新的智慧，他们在反复实践和创新之中，摸索出适应时代发展的造桥技术，创造出形式多样且富有中华民族文化特征的桥梁。它们是极为珍贵的物质文化遗产，也是极为珍贵的精神文化遗产，更是我们今天古为今用的研究对象。

1.1.3 桥与民间传说

桥梁本无情。但当一座桥梁，经历了人间故事，见证了人类品格，它便不再是一座冰冷的建筑，而有了温度与内涵。

1. 豫让与豫让桥

明《顺德府志》记载，“豫让桥在城北五里”，即位于现在的邢台桥东区翟村西南角，据传这里是战国时期义士豫让刺杀赵襄子的地方。《史记·刺客列传》记载了这段故事：

春秋时期，晋国智伯被赵襄子杀死，其家臣豫让立志为智伯报仇，发誓刺杀赵襄子。当时，邢台是晋国大夫赵襄子的封地，邢台城以北五里建有一座石桥，名曰五里桥。豫让为替主报仇，数次刺杀赵襄子未遂，而赵襄子有感于豫让肯为故主报仇，是有义之人，而释放他。但豫让报仇之心不改，以油漆涂面、火炭哑喉，化装为乞丐伏于板桥之下，准备伺机再次刺杀赵襄子。一天，赵襄子骑马过桥，座下马忽然惊鸣，军士从桥下搜出豫让。豫让陈述报仇理由，并提出鞭抽赵的袍服以报智伯知遇之恩。赵襄子感其对故主忠心，满足了豫让的要求。豫让挥剑砍袍后自刎而死。传说赵襄子下桥时袍服浸血，车毂断裂，而后大病一场。

后人为了纪念豫让侠义之风，把五里桥改称“豫让桥”（图 1-9），也曾称之为“国土桥”。



图 1-9 豫让桥遗址

这个故事也留下了“士为知己者死，女为悦己者容”这句千古名言。

明代诗人张孟兼曾作诗怀念豫让：

豫让桥

明·张孟兼

豫让桥边杨柳树，春至年年青一度。
行人但见柳青青，不问当时豫让名。
斯人已往竟千载，遗事不随尘世改。
断碑零落野苔深，谁识孤臣不二心。
豫让桥，路千里，桥下滔滔东逝水。
君看世上二心人，遇此多应羞愧死。

豫让桥，是一座“义”之桥。

2. 张飞与当阳桥

当阳桥又名长坂桥，因在当阳市北郊并西连长坂坡而得名，原名官桥。传说三国时蜀将张飞曾在这里横矛独退曹兵。

据传，东汉建安十三年(208年)，曹操统率五十万大军杀气腾腾地直奔刘备驻地新野。当时，刘备手下的战将只有关羽、张飞和赵云等，士兵不过三千人，难敌曹操大军。曹军追兵日行三百里，终在当阳追上刘军。刘备眷属失散，赵云几进曹军救出阿斗，但至当阳桥时却无力对付敌兵，幸好张飞出现。张飞横矛立于桥上，大喝曰：“燕人张翼德在此，谁敢来决一死战？”声如巨雷，夏侯杰吓得当场毙命，众将弃枪丢盔一起往西奔逃。有诗云：“长坂桥头杀气生，横枪立马眼圆睁。一声好似轰雷震，独退曹家百万兵。”现当阳桥遗址尚有清雍正九年(1731年)所立石碑，上刻“张翼德横矛处”，以记其事。

京剧里有唱词“当阳桥头一声吼，喝断桥梁水倒流”，用这种夸张的手法，来表现当时张飞的威猛。

当阳桥，是一座“勇”之桥。

3. 尾生与蓝桥

《庄子》中有这样的记述：“尾生与女子期于梁(桥)下，女子不来，水至不去，抱梁柱而死。”据考证，这座桥在陕西蓝田县的兰峪水上，称为蓝桥。

据传，春秋时，鲁国曲阜有个年轻人名叫尾生，与圣人孔子是同乡。尾生为人正直，乐于助人，和朋友交往很守信用，受到四乡八邻的普遍赞誉。

后来，尾生迁居梁地(今陕西韩城南)，并在此地认识了一位姑娘。两人一见钟情，私订终身。但是姑娘的父母嫌弃尾生家境贫寒，坚决反对。最后，姑娘决定与尾生私奔，回曲阜老家。两人约定在韩城外的蓝桥下会面。黄昏时分，尾生提前来到桥下等候。不料，突然乌云密布，狂风怒吼，雷鸣电闪，滂沱大雨倾盆而下。滚滚河水裹挟泥沙席卷而来，淹没了桥面，没过了尾生的膝盖。但由于有约在先，尾生寸步不离，死死抱着桥柱，最终被水淹死。

这本是一个悲伤的故事。但在中国古代，人们非常重视追求人格的圆满，在期待中被洪水淹没的尾生，是信守承诺的贤者。尾生所抱的梁柱，也和他一道成为守信的标志。

历代文人对尾生多有褒扬之语。三国时嵇康在《琴赋》中写道：“比干以之忠，尾生以之信。”《史记·苏秦列传》有语：“孝如曾参，廉如伯夷，信如尾生。”李白在《长干行》中慨叹：“常存抱柱信，岂上望夫台。”

“尾生之信”“尾生抱柱”这两个成语，也因此流传于世，喻指人坚守信用，不违约定之意。

尾生抱柱之蓝桥，是一座“信”之桥。

4. 刘秀与卧龙桥

卧龙桥遗址位于河南省商丘市宁陵县张弓镇。

据载，西汉末期，外戚王莽专权，毒死了小皇帝，又扶了两岁的孺子婴做太子，自己便做起“假皇帝”，觉得不过瘾，后来又废了太子，自立为帝。王莽的这番倒行逆施，使得天下反对，各地起义风起云涌。刘秀以“中兴汉室”为旗号，起兵反对王莽，却不幸被王莽军包围。刘秀带着十二勇士冲出重围，莽军紧追不舍，最后被追杀到张弓村西的小桥附近。他环顾四周，见河两岸杂树葳蕤，桥旁河坡上水草茂密。于是，他命令手下散开隐蔽，自己钻进桥洞，趴在里面躲过一劫。此时，水中蛙鸣戛然而止，苍蝇蚊子全部飞出。莽军兵马四蹄生烟，飞驰而过。刘秀搬来救兵，解了兵困之危，之后节节胜利，取了长安，杀了王莽，定天下。这就是“光武兴，为东汉”。

刘秀登基后，人们就把这桥叫作卧龙桥。

当年，刘秀于桥洞藏身，逃过一劫。今天，我们回溯历史，可能再次生发感慨：王莽为逆贼，刘秀合天道。历史的走向，向“道”而生。

卧龙桥，是一座“道”之桥。

桥梁里，有美丽的传说，更有“义”“勇”“信”“道”这些中华优秀传统文化的传承与赓续。

1.1.4 名桥与桥名

中国的名桥，每一座，都有着自己的名字；每个名字，几乎都有一番由来。

1. 与桥梁特征相关

有不少的桥，以其本身特征而命名。比如江苏吴江的垂虹桥(图 1-10)，就因其桥身“环如半月，长若垂虹”而得名。王安石曾写诗称赞它“颇夸九州物，壮丽此无敌”。



图 1-10 江苏吴江垂虹桥

“二十四桥明月夜，玉人何处教吹箫”中的二十四桥(图 1-11)，桥长 24 m，宽 2.4 m，栏柱 24 根，台阶 24 级，处处都与“二十四”对应，相传隋炀帝时，曾有 24 个美人月夜在此吹箫，因而得名。

还有著名的十七孔桥(图 1-12)，则因为有 17 个桥孔而得名。二十四桥也好，十七孔桥也罢，读起来都寻常不过，似无美感。但桥本身却是极美的。如二十四桥，周围山清水秀，风光旖旎，桥与水衔接处湖石堆叠，周围遍植馥郁丹桂，花开时节，芳香绕遍。若是月夜来此，则花与水与月相互交融，月色朦胧、清辉笼罩之下，犹如人间仙境。除杜牧写诗称道之外，姜夔也在《扬州慢》中写道：“二十四桥仍在，波心荡，冷月无声。念桥边红药，年年知为谁生？”十七孔桥皆以汉白玉石精工砌成，拦河望柱上雕有多只石狮子，神态各异，兼得赵州和卢沟两桥的风韵。从远处看，桥身似一条玉带，桥孔像一串珍珠，浮于碧波之上，璀璨夺目，美不胜收。



图 1-11 二十四桥



图 1-12 十七孔桥

2. 与生活愿景相关

有一些名桥，在修建之初，本只是出于交通需要，为了解决民生问题，后却因其技术之先进、留存之长久而闻名于世，比如赵州桥。赵州桥的建造，本是因为赵州在隋朝时为南北官道所经，交通位置极其重要，因此赵州洹河之上，如果无桥，交通将极为不便。而洹河一带，原又洪水、地震频发，因此赵州桥最初取名安济桥，多有吉祥平安之意。

除此之外，像福建泉州的万安桥(即洛阳桥)，建造之初，是为渡海所用。宋朝蔡襄的《万安渡石桥记》里这样写道：“渡实支海金舟而徙，易危以安，民莫不利。”它体现了其造福民众的愿景和功用。此外，湖南湘乡的万福桥、福建晋江的安平桥、广东潮州的广济桥等桥，其中的“福”“安”“广”“济”等字，也多是表达平安、布善之意。即便是诗情画意的江南，所建之桥，也诸多表达现实愿望，比如古镇周庄有富安桥。同里有太平桥、吉利桥、长庆桥、普安桥、富观桥等，西塘有安仁桥、安境桥、安善桥、五福桥等，皆表达了造福大众这一真实而美好的愿望。“济”“平”“安”“福”“广”“普”等字眼，表现了人们对家国天下和现实生活的愿望，富有丰厚的文化意蕴。

3. 与文学艺术相关

诸多名山之有名，除了山本身的原因，更多是文人来此游历，留下著名诗文而成。我们因李白的《关山月》而知天山，因杜甫的《望岳》而知泰山，因苏轼的《题西林壁》而知庐山……文学里的诗情、典故、传说等，也同样为桥闻名作出不少贡献。比如，江苏苏州的枫

桥(图 1-13), 就因唐朝诗人张继的《枫桥夜泊》而闻名于世; 西安的灞桥, 在《开元天宝遗事》里有记载, “长安东灞陵有桥, 来迎去送皆至此桥, 为离别之地, 故人呼之为销魂桥”; 鹊桥, 则是神话传说中牛郎织女在银河上的相会处, 《风俗记》中就有这样的记载: “七夕, 织女当渡河, 使鹊为桥。”



图 1-13 枫桥

有一些桥的修建, 本身就以观赏性为主。因此念其名字, 再观其周围之景, 就极富文学意味, 耐人咀嚼, 令人沉醉。如西湖著名的六桥: 映波桥, 左有“花港观鱼”, 右有“雷峰夕照”; 锁澜桥, 前有“三潭印月”, 后有“柳浪闻莺”; 望山桥, 可近看丁家山及远观“双峰插云”; 压堤桥, 可尽收湖光山色于眼底, 故称“压堤”, 与“压轴”近意; 东浦桥, 前有“曲院风荷”, 后有孤山; 跨虹桥, 常见雨后长空挂彩虹。文学, 赋予了这些桥与景以极美之名, 名桥与美景在此相得益彰, 诗情荡漾。古今文人在此徜徉徘徊, 流连忘返。美桥美景, 引发他们各种美丽的幻想, 勾起他们各种离合悲欢的情绪, 文人们把这一切糅入文字, 又留下诸多动人的诗篇。苏轼就有诗句“东风第六桥边柳, 不见黄鹂见杜鹃”, 连民谣都有“西湖景致六座桥, 一枝杨柳一枝桃”之句。

名桥和桥名里, 有现实的愿景, 有理想的观照, 有文学的表达, 更显我国丰厚的文化意蕴。

1.2 桥之诗: 半烟半雨溪桥畔

1.2.1 诗词里的桥梁之美

桥, 越过沟壑, 跨水行空, 使天堑变通途。在文人的诗词里, 桥, 还承载着过去与未来, 悲欢与离合, 梦想与希望……

在我国, 最早描述桥梁的诗出现在《诗经》之中。《诗经·大雅·大明》中这样写道:

文王嘉止, 大邦有子。
大邦有子, 侃天之妹。
文定厥祥, 亲迎于渭。
造舟为梁, 丕显其光。

这首诗里所说的“造舟为梁”，就是把船联结起来，在河水之上搭建成一座浮桥。这首诗记载了周文王娶亲的往事，写出了迎娶时的隆重。它也是我国最早关于桥梁建筑文化的文字记录。它体现了桥梁的功能之美。

随着时间的推移，关于桥梁的诗词大量涌现，其中又以唐宋最为集中。一些名桥，因为名诗词的加持，被赋予了更多的意义与情感，广为传诵，为人熟知。有时甚至是，桥本无名，因诗词而名。

比如宋代词人秦观所作的《鹊桥仙》：

纤云弄巧，飞星传恨，银汉迢迢暗度。金风玉露一相逢，便胜却人间无数。

柔情似水，佳期如梦，忍顾鹊桥归路。两情若是久长时，又岂在朝朝暮暮。

秦观的这首词里，写了传说之桥——鹊桥，承载着经久不衰的美丽传说——牛郎织女的故事。鹊桥，在秦观的词里，是一座爱情之桥，展现了相思之痛，更呈现了久经离别后的相逢之美。

秦观除了写传说之桥鹊桥外，还写了一座很有名的石柱木梁桥——灞桥。

他在《念奴娇·咏柳》中写道：“闻说灞水桥边，年年春暮，满地飘香絮。掩映夕阳千万树，不道离情正苦。”

灞桥(图 1-14)，本称霸桥，也称灞水桥、灞陵桥，在今天的西安城东南灞水上。《开元天宝遗事》写汉人“来迎去送皆至此桥，为离别之地，故人呼之为销魂桥”。秦观在这首词里，写出了暮春时节的灞桥之美。当暮春来临，满地落花，行走于灞桥之上，观桥面落花绕遍，桥下落红朵朵，很容易生发出“流水落花春去也，天上人间”的感慨。而若是刚好遇上夕阳西下，夕阳的余晖里，落花的飘香中，又要在此送别好友或是恋人，此去经年，相见何时？景色愈美，离别愈痛。因为此后，良辰美景应是虚设，“便纵有千种风情，更与何人说”啊。秦观笔下的灞桥，有暮春之美，更有离别之苦。



图 1-14 灞桥

关于离别之苦，不得不提的一座桥是断桥。传说白娘子与许仙在水漫金山之后，经历漫长的离别，后来终于在断桥邂逅重逢，再续前缘，于是断桥由此而被笼罩上了一层浪漫色彩。他们再次相逢之前的断桥，一定孤独而空寂。唐代诗人张祜有诗《题杭州孤山寺》：“断桥荒

藓涩，空院落花深。犹忆西窗月，钟声在北林。”在张祜的笔下，断桥上苔藓斑驳，幽静的院落里积满了落花。断桥，在这里，有一种孤寂之美。

有一些桥，本是桥中杰作，又因名诗加持，因而有了双重的名气，比如二十四桥。二十四桥位于江苏省扬州市，为单孔拱桥，汉白玉栏杆，如玉带飘逸，似霓虹卧波，极为美观。唐朝诗人杜牧诗《寄扬州韩绰判官》云：

青山隐隐水迢迢，秋尽江南草未凋。

二十四桥明月夜，玉人何处教吹箫？

这首诗写于杜牧离开扬州之后，他思念友人，怀念当年两人一起逍遥自在的时光。在这首诗里，他调侃朋友，问他在自己离开后，是否还在明月夜里的二十四桥教美人吹箫？短短几句，却道尽了他们在二十四桥所度过的悠闲欢乐时光。如今再去到二十四桥，依旧可以看到洁白栏板上的彩云追月浮雕，桥与水衔接处的美丽湖石，以及周围的草木葱郁。这样的美景，可以让人回望时光，体会到“二十四桥明月夜”的妙境，遥想杜牧当年的风流佳话。二十四桥，在杜牧的笔下，有一种闲逸之美。

有一些桥，则本籍籍无名，却因诗闻名，比如枫桥。枫桥位于江苏苏州，本名封桥。唐朝安史之乱后，张继逃往相对安定的江南，夜宿封桥下时，江南水乡的美丽夜色映入眼帘，一时之间，羁旅之愁、家国之忧一齐涌上心间，他挥笔写下《枫桥夜泊》：

月落乌啼霜满天，江枫渔火对愁眠。

姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船。

这首意境清远的诗里，只字未提桥，但枫桥却从此闻名。《枫桥夜泊》问世后，人们把封桥改名为枫桥。枫桥，因为此诗，被赋予一种朦胧之美。

道不尽的古诗词，说不完的桥梁美。一座桥建成之后，它见证了岁月更迭，目睹了人间悲欢，已然不再是一座冰冷的建筑，而有了温度与灵魂。诗词，则将这一切进行了文学上的呈现。多少年来，诗词因桥而作，桥因诗词而愈美。

1.2.2 “古桥仙迹”话赵州

赵州桥(图 1-15)，又名安济桥、大石桥。它全长 64.4 m，桥两端宽度为 9.6 m，中部宽 9 m，主桥孔净跨径长达 37.02 m，是我国现存最古老的一座大跨径石拱桥，是中国古代“四大名桥”之一，被称为“天下第一桥”。



图 1-15 赵州桥

传说，赵州桥为鲁班所造。据说大桥建成后，八仙之一的张果老倒骑着毛驴，连带着柴王爷，也兴冲冲地去赶热闹。他们来到桥头，正巧碰上鲁班，便问这座大桥是否经得起他俩走。鲁班心想，这座桥，骡马大车都能过，两个人算什么？于是请他俩上桥。谁知张果老带着装有太阳、月亮的褙褙，柴王爷推着载有五岳名山的小车，他们上桥后，桥竟被压得摇晃起来。鲁班见状不妙，急忙跳进水中，用手使劲撑住大桥东侧。由于鲁班使劲太大，大桥东侧下便留下了他的手印，桥上也留下了驴蹄印、车道沟印和膝盖印。这些印迹，被称为“古桥仙迹”。直至今日，这些依然是人们津津乐道的话题，来到赵州桥，都不免先要寻觅一番，看看个究竟。

这个美丽的传说，饱含着人们对赵州桥建造者的肯定与赞许。

赵州桥得以建成并留存至今，得益于隋朝的一位普通工匠——李春。

为了让赵州桥具有独一无二的风格，李春将建桥经验与实际情况相结合，大胆突破旧传统进行设计。在此之前，在建造比较长的桥梁时，人们通常采用多孔形式，这样每个孔的跨径比较小，坡度比较平缓，也有利于施工；但缺点是桥墩多，不利于船只通行与洪水宣泄。李春在这一点上大胆创新，采用单孔长跨石拱的形式，在河心不设立桥墩，使石拱跨径可以长达 37.02 m。采用如此大的跨径造桥，李春是历史上第一人。

在拱的样式上，李春也进行了大胆创新。在此之前，桥拱的样式大多是半圆形。假如在 37 m 宽的河面上也采用半圆形拱的话，拱顶将达到近 20 m，这样一来，桥高坡陡，车马行人过桥就会十分不便。李春创造性地改用平拱样式，将桥造成了扁弧形，把石拱的高度降到了 7.23 m。如此一来，桥面平缓了，桥的稳定性增强了，不仅有利于车马行人的来往，而且节省了用料，加快了施工进度。

此外，为了加大泄洪能力，李春还在大拱肩上另外设置了两个小拱，即“敞肩式”。这样的形式，达到了建筑与艺术的完美统一。元代诗人称赞它“水从碧玉环中过，人在苍龙背上行”。

赵州桥建成后，直至 20 世纪 30 年代，上千年的时光里，它只是被人们看作一座普通石桥，在历史的光影里寂静伫立，直至梁思成出现。

1933 年，梁思成在考察中发现了这座精妙绝伦的桥梁。第一次见到赵州桥的梁思成，犹如见到了心仪已久的恋人。他欣喜地记录下了当时的感受：“我在那里得见这伟丽惊人的隋朝建筑原物，……几乎不敢相信自己的眼睛。实在赞叹景仰不能自己。”1938 年，梁思成将关于赵州桥考察的英文手稿寄往英国，并发表在国际权威的建筑杂志《笔尖》上。至此，赵州桥为全世界所知。它比欧洲兴建的同类石拱桥早了 10 多个世纪，可算是世界敞肩拱桥的始祖。

1991 年 10 月 24 日，赵州桥经受住了极其苛刻的评选标准，和埃及金字塔、伦敦塔桥、法国埃菲尔铁塔一起，作为世界历史上最辉煌的土木工程范例，被评为世界第 12 个“国际土木工程里程碑”。这也是中国唯一入选的土木工程建筑。

而今，1400 多年的时光过去，赵州桥经历了多次水灾、战乱，依然巍然屹立于洺河之上，一如清代杜英的诗所言：“人世变更仙迹在，水神畏避浪头低。”

世事更迭，逝者如斯，而赵州桥，见证了这一切。

1.2.3 至美卢沟桥

卢沟桥(图 1-16),坐落在北京西南郊永定河上,在金朝建成,是中国四大古桥之一。它是联拱式石桥,桥身总长 266.5 m,桥身总宽 9.3 m,桥面宽 7.5 m,共有 11 个桥孔。如果要用一个字来形容卢沟桥的话,那应当是“美”。世界著名旅行家马可·波罗在他的游记中,对卢沟桥造型之美赞叹不已,称赞它为“世界上最好的桥”,卢沟桥也因此最早为西方人所知。

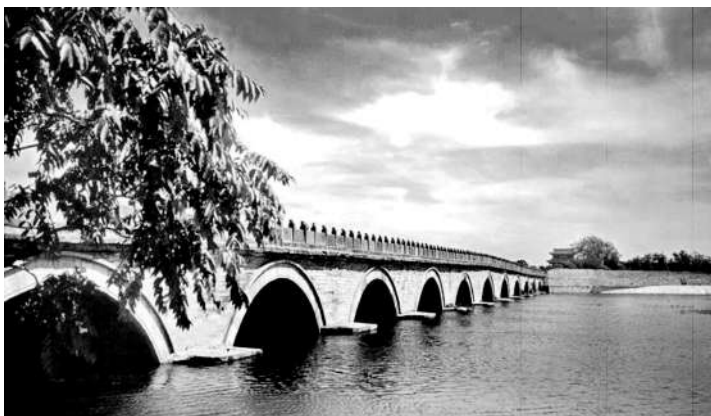


图 1-16 卢沟桥

1. 卢沟晓月之美

“卢沟晓月”是著名的“燕京八景”之一。传说之中,五更夜其他处不见月,只有卢沟桥能见到,晓月波光,上下荡漾,极为美丽。乾隆皇帝曾在秋日路过卢沟桥,被此地的美景打动,赋诗“半钩留照三秋淡,一练分波平镜明”于此,并题“卢沟晓月”,立碑于桥头。

卢沟桥距京城 30 余里,在交通不发达的古代,差不多是半天的路程。出京的旅人上午在京城吃罢饯别酒,启程上路,来到卢沟河畔已是夕阳西下。他们不得不找地投宿,准备来日早行。于是此处逐渐发展为京城西南的一个歇宿点。古时的卢沟河畔,也因此茶肆酒馆林立,供风尘仆仆的旅人临时歇脚,颇为繁华。留宿的旅人,一觉醒来,天空残月倒挂,卢沟桥上月色如霜,远处的京城若隐若现。这样的背景与色彩,带着旅人的羁旅之思,渲染出无尽的美感。明朝邹缉的《卢沟晓月》诗就生动地描写了这样的历史景象:

河桥残月晓苍苍,照见卢沟野水黄。
树入平郊分淡霭,天空断岸露微光。
北趋禁阙神京近,南去征车客路长。
多少行人此来往,马蹄踏尽五更霜。

由于北京的水资源匮乏,“卢沟晓月”这一美景因为晓月湖的干涸而消失 20 多年。直到 2008 年 7 月,晓月湖成功实现了蓄水,作为“燕京八景”之一的“卢沟晓月”景观才得以再现。

2. 卢沟石狮之美

卢沟桥做工精美,桥上的石刻比如莲花座、荷叶墩、石狮子等雕刻美观,是难得的艺术精品。尤其是其中的石狮子,以数目众多又灵动精美而闻名中外。

民间一直流传着“卢沟桥的狮子——数不清”的歇后语。但卢沟桥的石狮子其实并非真的数不清，1983年经文物工作者核查，桥上石狮共计498只，1997年政府对卢沟桥进行大规模修缮时，又修复了3只原来被雷电劈毁的石狮，现共有石狮501只。这些姿态各异、构思巧妙的石狮子分别雕刻自金、元、明、清、民国等不同历史时期，见证了历史的变迁。

这些石狮子，有的歪着头专注地看着脚下的绣球，好像生怕被别人抢走似的；有的温柔地注视着怀中正在玩耍的小狮子，舐犊情深；有的挺胸张嘴作咆哮状，威风凛凛不可一世；还有的好像侧耳倾听桥下潺潺的水声，享受生命中惬意的时光。它们神态各异，生动优美，活灵活现，是石刻艺术史上不可多得的珍品。

3. 卢沟精神之美

“我站在卢沟桥上浏览过一幅开朗的美景，令人眷恋，北面正浮起一片辽阔的白云，衬托着永定河的原野，伟大的卢沟桥也许将成为伟大的民族解放战争的发祥地了！”这段文字，出自牺牲于抗日前线的战地记者方大曾的《卢沟桥抗战记》，写于1937年卢沟桥事变后的第三天。它既饱含深情，又充满担忧。

卢沟桥的炮火拉开了中国全民抗战的序幕，伟大的抗战精神自此孕育，掀开了可歌可泣、波澜壮阔的全民族抗日篇章。歌曲《卢沟桥歌》中这样唱道：“卢沟桥！卢沟桥！男儿坟墓在此桥！……卢沟桥！卢沟桥！立功报国在此桥！”

卢沟桥，见证了烽火岁月。卢沟桥上中国军人的坚守和激战，体现了中国人民同仇敌忾、克服万难、实现民族复兴的抗战精神。

80多年的时光过去，这一伟大的抗战精神，穿越时空，依然饱含着激励我们奋进的力量。

1.3 桥之时：一桥飞架惊世殊

1.3.1 滔滔长江，巍巍大桥——联合桥

联合桥是铁路与公路联合使用的桥，具有铁路桥和公路桥的双重作用，因而是一种很经济的桥梁结构。它的形式可分为两大类：单层式及双层式。单层式联合桥，铁路与公路同在一层桥面。双层式联合桥，铁路与公路各占一层桥面，一般是铁路在下面而公路在上。总体说来，双层式优于单层式，杭州钱塘江大桥、武汉长江大桥及南京长江大桥都是双层式联合桥。

1. 时代的选择

武汉长江大桥(图1-17)和南京长江大桥(图1-18)，从起意到最终建设，都经历了漫长的历史时期。

清朝光绪年间，张之洞便首次提出了在长江中建一铁桥连接武汉至汉口的提议。此后，在清朝末年不同年间，不同人士均提出过建议，但最终都因资金匮乏而搁置。加之后来辛亥革命爆发，建桥念想随着清朝的灭亡而进入民国时期。

民国二年(1913年)，在詹天佑的支持下，国立北京大学(现北京大学)工科德国籍教授乔治·米勒带领夏昌炽、李文骥等13名土木系学生，到武汉来对长江大桥桥址进行初步勘测和进行设计大桥的实习。孙中山先生在《建国方略》中也有这一规划，但最终搁浅。此后若干年，国民政府也数次启动武汉长江建桥事宜，但都因耗资巨大以及军阀战争频发而搁浅。



图 1-17 武汉长江大桥



图 1-18 南京长江大桥

直至 1949 年 9 月，中华人民共和国即将成立，63 岁的桥梁专家李文骥联合茅以升等一批桥梁专家，向中央人民政府递交了《筹建武汉纪念桥建议书》，建议建造武汉长江大桥，作为新民主主义革命成功的纪念建筑。同月 21 日至 30 日，毛泽东在北平主持召开中国人民政治协商会议第一届全体会议，会议通过了建造武汉长江大桥的议案。

南京长江大桥的建设，是因为 20 世纪初开通的沪宁铁路和津浦铁路在南京被隔断在长江两岸无法贯通，过江客货都要乘船摆渡，严重影响了运输效率。民国之初开始，从北洋政府到国民政府，曾数次启动规划，但由于各种原因，尤其是后来战争爆发而搁置。

中华人民共和国成立后，铁路运量大增，轮渡的渡运能力已趋饱和，天堑长江成为京沪铁路建成的严重瓶颈。据此，国务院于第一个五年计划末期，即提出修建南京长江大桥的建设计划。1956 年，武汉长江大桥还在建设之中，国家又做出了在南京建设长江大桥、贯通京沪铁路线的决定。

从数次起意，至最终动工，联合桥的建设，是时代的选择。

2. 长远的眼光

1955 年 9 月，武汉长江大桥工程动工，1957 年 10 月 15 日正式通车，武汉三镇连成一体，中国南北大动脉京广铁路打通。彼时，全城沸腾，举国欢庆。

作为我国首座公路、铁路两用跨长江钢梁桥，武汉长江大桥虽经历 7 次较大洪水、77 次轮船撞击，但仍健康如初，被誉为“桥坚强”。

这样的“坚强”，源于当初造桥者的长远眼光。

创建伊始，建设者们便将大桥规划为公路、铁路两用桥，上层为公路，双向四车道，两侧有人行道；下层为复线铁路。桥身为三联连续桥梁，每联 3 孔，共 8 墩 9 孔。每孔跨径为 128 m，为终年巨轮航行无阻起了很大的作用。

作为中华人民共和国桥梁史的“长子”，武汉长江大桥原计划 4 年 1 个月完工，但意气风发的建设者们仅用 2 年 1 个月时间，就完成了这一宏大的工程。大桥横跨于武昌蛇山和汉阳龟山之间，是我国在万里长江上修建的第一座铁路、公路两用桥。武汉铁路局武汉桥工段相关负责人表示，武汉长江大桥的设计寿命是 100 年。现在，它仍值“壮年”。

而作为中华人民共和国第一个五年计划的主要成就，武汉长江大桥图案入选 1962 年 4 月发行的第三套人民币，成为中华人民共和国建设的重要标志。大桥通车后，我国结束了不能修建深水基础和大跨径桥梁的历史，更为重要的是，培育了一支技术成熟、作风过硬、勇于创新的建桥大军。

南京长江大桥同样由于创建者们的长远眼光，最终克服了一系列困难，成就了长江之上第一座由中国自行设计和建造的双层式铁路、公路两用桥梁。

建设之初，南京长江大桥设计组便讨论决定：大桥的修建，按铁路、公路两用桥设计，并考虑桥下可通过万吨级海轮；且根据“多、快、好、省”方针进行，并同时考虑城市的需要及美观的要求。

此后，桥梁建设者们先后克服了大桥工程建设中遭遇的最大危机、三年困难时期经费开支不足、“文革”之中建桥职工分成两派相互武斗，以及国际紧张形势下物资再度紧缺、遭遇修桥成果是否会在可能的战争中被毁的质疑声等多重困难，以顽强的毅力、长远的眼光，确保了大桥施工持续进行。

1968 年 9 月 30 日，第一列火车拉着 7 节车厢从江岸南边开往浦口区。通车时，5 万多人挤上大桥，桥下的路上甚至树上都是人。同年 12 月 28 日，南京长江大桥公路桥也胜利通车。南京城里万人空巷。第一辆开过大桥的彩车上，有一尊高大的毛主席塑像。数十万人涌向桥头，据说，仅庆祝时挤掉的鞋子就装了两卡车。

3. 创新的理念

武汉长江大桥与南京长江大桥的最终建成，除了时代的选择、长远的眼光之外，还离不开创新的理念。

武汉长江大桥的初步设计是采用桥梁建设界惯用的气压沉箱基础。这种技术，工人得到深水作业，承受气压和水压的变化，在长江这样接近 40 m 深的江底，每个工人一天只能工作 2 h，而且呼吸困难，极易出现氮麻醉现象，得“沉箱病”。

苏联专家西林提出了大胆的建议：摒弃气压沉箱法，采用管桩钻孔法，就是将空心管柱打入河床岩面上，并在岩面上钻孔，往孔内灌注混凝土，使其牢牢插在岩石内，然后在上部修筑承台及墩身。这是一项完全创新的技术。两国技术人员紧密合作，经过一年多的地质勘测和艰苦的试验研究，最终决定使用这种技术。

因为使用了这一当时世界最先进的施工方法，解决了施工过程中的大难题，原计划 4 年 1 个月完工的武汉长江大桥，实际仅用 2 年 1 个月。

中苏关系破裂后，中国决定走“自力更生”的道路，依靠自身力量，完成南京长江大桥的建设。铁道部发动全国有关方面共同攻关。

在大桥建设过程中，建设者们以创新的理念，克服了技术、自然灾害等多方面的困难。比如，在浅水面覆盖层深厚墩址处，采用重型混凝土沉井，穿越深度达 54.87 m，创造了当时的中国纪录；在基岩好而覆盖层较厚的墩位处，选用钢板桩围堰管柱基础，并首次采用大直径 3.6 m 先张法预应力混凝土管柱等。

此外，1964 年 9 月，大桥建设者以先进的理念，解决了大桥工程建设中遭遇的最大危机：在秋汛洪水的冲击下，5 号和 4 号桥墩悬浮沉井的锚绳先后崩断，自重 6000 多 t 的沉井在激流中作最大幅度 60 m 的周期性摆动，大桥面临着沉井倾覆、桥址报废的巨大危险。建桥工人在洪水中冒着生命危险，连续抢险近两个月。林荫岳研究的“平衡重止摆船”方案，克服了沉

并摆动，使大桥转危为安。

建设者们的拼搏精神、长远眼光及创新的理念，最终成就了这座中国最伟大的桥梁建筑之一的铁路、公路两用特大桥。它的建成，使火车过江时间由过去靠轮渡的 1.5 h 缩短为 2 min，南京长江大桥迅速成为中国南北交通的命脉之一。它的建成，也开创了中国“自力更生”建设大型桥梁的新纪元。它也因此被称为“争气桥”。

联合桥，在滔滔江水之上，巍然屹立。它承载了中国人民的光荣与梦想，见证了中华民族的奋斗与崛起。一如毛主席诗词所言：“一桥飞架南北，天堑变通途。更立西江石壁，截断巫山云雨，高峡出平湖。神女应无恙，当惊世界殊。”

1.3.2 朴实的伟力——橘子洲大桥

半个世纪前，湘江长沙段飞跃起一道“长虹”。它东起五一路，横跨橘子洲，西连溁湾镇，结束了长沙河东、河西彼此割裂的历史。这道长虹，便是今日的橘子洲大桥。

橘子洲大桥(图 1-19)总长 1532 m，1972 年通车，经历了半个世纪的风风雨雨，如今依然是全国规模最大、保存最完好的双曲拱桥。



图 1-19 橘子洲大桥

1. 朴实的愿景

湖南省著名桥梁专家，已是耄耋高龄的上官兴，曾经回忆自己几十年前在长沙过河的奇特经历：“当时人们过河要排队坐轮渡，花一个多小时才能过河。遇到大风、浓雾、洪水时，轮渡还会停开。”一天深夜，他错过了通往河西的最后一班行人轮渡，恰巧一辆货车正准备从汽车轮渡过河，司机好心，招呼上官兴坐到车厢货物上过河。上官兴爬上车才知道，那是一辆运送棺材的货车。他回忆道：“当时大雨，也管不了那么多，只能躲进棺材，心惊胆战地过河。”

湘江北去，把长沙分割成河东、河西。湘江之上，建一座桥，是青年上官兴的愿景。

在湘桥之上修桥的愿景，由来已久。

早在 1876 年，曾先后在英、法等国担任驻外使节的郭嵩焘便有过这样的愿景。他深感英国泰晤士河和法国塞纳河上的大桥给人们带来的便利，在日记里流露出效仿英法建桥的想

法。回湖南后，他提出在湘江上修建一座铁桥。据记载，他是在湘江上建大桥的最早提议者。

1912年，黄兴在构想长沙城市规划时提出：如果在水陆洲（即橘子洲）、岳麓山、溁湾市一带，建一铁桥往来，则居民散布，得受空旷之气。

这些修桥的念想反映出来的，是人们渴望交通便利、生活方便的朴实愿景。

而这种朴实的愿景的真正付诸实践，已是中华人民共和国成立之后。

1965年，时任中共中央中南局第一书记的陶铸来长沙视察，看到车辆和行人在五一路上排队等轮渡过河，队伍足足有两三公里。他深感人们过江的艰辛，当即承诺：“应该修一座桥，中南局可以出一半钱。”湖南省交通规划勘察设计院随即启动方案设计。

1970年5月，长沙湘江大桥工程指挥部成立；1971年9月6日，在中共湖南省委及长沙市委直接领导下，橘子洲大桥（原名长沙湘江大桥）正式开工修建；1972年国庆前夕建成通车。

至此，一江两岸，东西相连，长沙在湘江上修桥的朴实愿景终于实现。

2. 朴实的建设者们

橘子洲大桥从开工修建到正式通车，仅用了1年时间。工程之大，速度之快，质量之高，无不令人惊叹。

白天，吊装工上场，将拱肋吊起，初步完成合龙；随后，木工、混凝土工开始作业；晚上，电焊工登场，将拱肋接头上下缘伸出的钢筋焊牢。

4个不同的工种连续流水作业，夜以继日。这还不包括以各种方式参与的义工。比如，当电焊工人手不够的时候，省建设部门在了解情况之后，几天内调来1000多名电焊工。

“不管什么时候，桥上永远挤满了正在作业的人，大家恨不得把一天掰成三四天来用。”上官兴说。橘子洲大桥的主桥一共有17个桥拱，1个桥拱有24条拱肋，4个工种配合，最快时，1天便可以吊完1个桥拱。

修湘江大桥采取的是人海战术和义务劳动的办法，前后有80万人次参加了桥梁建设。工地上每天都是热火朝天的，一个桥墩建好了，广播就响个不停，把好消息传到所有干活人的耳朵里。人人都愿意为修桥出力，有的同志为把岩石缝隙中的沙石清除掉，没有合适的工具，就用手抠，手指被泥沙磨出了血也不叫苦。

在这期间，缺少钢筋，便动员涟钢工人为修建大桥增产优质钢材；缺少资金，就号召长沙全市人民义务为修桥贡献力量。

如此一来，桥梁下部，18个主桥桥墩，半年时间全部建成。桥梁上部，1900多件质量近万吨的混凝土预制构件吊装任务，72个工作日完工。

“橘子洲大桥创造了桥梁建设史上的奇迹。”上官兴说。而这一切，都离不开无数朴实无华、肯吃苦能耐劳、甘于全力投入的大桥建设者。

3. 朴实的建筑文化

1965年，橘子洲大桥建造方案启动后，相关人员先后提出了大跨径石拱桥、中承式钢筋混凝土肋拱桥、双曲拱桥等多种方案。双曲拱桥方案最终胜出。这样的选择背后有着时代的原因。

20世纪70年代，中国国民经济较为贫弱，这决定了各地修不起耗资巨大的桥梁的现实。而双曲拱桥，具有施工周期短、造价低廉、施工方便、承载能力强、外观又较为轻巧美观等优点。

点, 适合当时的中国国情, 因而最终胜出。

为了确保橘子洲大桥的稳固, 河东部分原本设计的 6 拱 100 m 跨径, 改成 8 拱 76 m 跨径, 每一个拱有 8 根拱肋, 每根拱肋分为 3 节吊装, 拱肋合龙后再盖上拱波, 砌上拱板。如此, 一个重达上千吨的桥拱, 便化零为整为许多个几十吨的小块, 像拼积木一样拼接而成。

因使用钢筋少, 难以承受越来越多的重型车, 当年全国修建的大部分双曲拱桥出现了开裂等诸多问题。湖南省交通史专家蒋响元说, 自 20 世纪 80 年代开始, 全国基本上停止继续修双曲拱桥。全国 4 万多座双曲拱桥中, 有一半已经炸毁。这一中国人自己发明的桥型, 已经在财政紧张时期完成了历史使命, 正在逐渐退出历史舞台。

而橘子洲大桥, 经过一次次提质改造, 而今拥有平整的沥青路面、麻石铺成的人行道、涂刷一新的栏杆……大桥的颠簸、开裂等问题得到解决。桥上, 往来河东、河西的行人和车辆, 依然川流不息。

或许, 正是为了铭记橘子洲大桥朴实中显现的伟力, 1978 年, 中国邮政专门为橘子洲大桥发行了 T.31 邮票(小型张)——“公路拱桥——长沙湘江大桥”。1980 年, 橘子洲大桥获得第一届国家优秀设计金质奖。2017 年底, 橘子洲大桥被列为第三批长沙市历史建筑。

而今, 若是在晴朗的秋日, 信步于橘子洲大桥, 抬头蓝天如洗, 低头江水滔滔, 天与水与桥, 相映生辉。俯瞰橘子洲头, 一片生机; 远看麓山, 红枫尽染。一如毛主席的诗词: 独立寒秋, 湘江北去, 橘子洲头。看万山红遍, 层林尽染; 漫江碧透, 百舸争流。鹰击长空, 鱼翔浅底, 万类霜天竞自由……

而若是夜晚, 桥拱的黄色灯光次第亮起, 与优美的桥身一同倒映于江水之中, 温暖绵长之感顿时发乎心底。橘子洲大桥之美, 是它朴实无华的外形之美, 也是它朴实无华的人文之美, 更是它朴实无华的力量之美。

1.3.3 湖湘新歌——矮寨大桥

矮寨大桥(图 1-20)位于湖南湘西吉首市矮寨镇, 是湖南吉首—茶峒高速公路上的一座特大悬索桥, 横跨于德夯大峡谷两峰之间, 使天堑从此变通途。因远望如同挂在天上的彩虹, 当地苗族群众又称它为彩虹桥。



图 1-20 湘西矮寨大桥

1. 云端苗歌

横亘于峡谷之间的矮寨大桥，犹如一弯彩虹，凌空飞架于崇山峻岭之上。此处薄雾缥缈，青山环绕，深红色的桥身点缀其间，犹如天路。

矮寨大桥的建成，意味着湖南、重庆、贵州等省市的几大高速公路网从此贯通，制约湘西州发展的交通瓶颈从此被打破，湘西州从此纳入了湖南省4小时经济圈；也意味着，德夯，这一位于矮寨大桥下方的古老苗寨，从此不再是“养在深闺人未识”的羞答答的女子，而是向世人掀开了她的神秘面纱，展露出她的绝美容颜。所谓“百年路桥奇观，千年苗寨风情，万年峡谷风光”，即是如此。

矮寨大桥建成之前，这里极为闭塞。

“德夯”，在苗语中意为“美丽的大峡谷”，是中国苗寨中保持最完整、苗族习俗最浓郁的地方之一。这里地势险要，山高坡陡，奇石林立，森林茂密。清朝《乾州厅志》中，将此地形容为“盘旋盛梯，路绕羊肠，一将当关，万夫莫过”的矮寨天险。

1936年，现矮寨大桥下，建成了著名的矮寨盘山公路。因地势陡峭，短短6 km的公路形成了13道锐角急弯，26节几乎平行的路面，被称为“公路奇观”。70多年来，这段公路一直是衔接粤汉、湘桂黔路通向西南的咽喉要道。在大桥建成前，它也是长沙通往重庆的唯一通道。堵车几个小时，是这里的交通常态。此外，这里弯道大，特别容易发生交通事故。

落后的交通状况，造成了这里居民生活的不易与闭塞。这一状况即使在20世纪80年代，德夯被开发为景点后依然没有得到改善。住在这里的居民回忆，小时候上学，每天早晨四五点就要起床，翻山越岭步行4 km才能到达镇上的学校。而住得更远的村民，每次到镇上赶个集，来回都要花去一天时间。

为改变湘西落后的交通状况，政府决定在这里架桥修高速。历经艰苦不懈的努力，矮寨特大悬索桥终于建成通车。

通车那天，村民们自发聚集，将苗鼓敲得震天响。他们说：“大家从没想过，只有鸟能飞过的悬崖还能架桥。”兴奋之情，溢于言表。欢快的苗歌，传遍山谷，响彻云霄。它是一支欢乐之歌。

2. 技建夯歌

矮寨大桥的成功建设，谱写了一曲高亢的路桥人从施工技术到施工质量的技建夯歌。

矮寨大桥在设计上，创造了当时的4个“世界第一”：在355 m上空跨越大峡谷，大桥两索塔间跨径1176 m，跨峡谷跨径创世界第一；在世界上第一次采用塔、梁完全分离的结构设计方案；在世界上第一次采用岩锚吊索结构，并用碳纤维作为预应力筋材料；在世界上第一次采用“轨索滑移法”架设钢桁梁。此外，大桥在建设的同时，重视环保，确保了不破坏德夯峡谷的原生态自然风貌，与环境实现了完美融合。

创造这样的4个“世界第一”，有多么不容易呢？极为不易！

由于湘西矮寨地处云贵高原山脉断层处，山高坡陡，地势陡峭，矮寨大桥需要跨越1000多米的德夯大峡谷，桥面距离峡谷底部高度达355 m，施工难度在国际、国内建桥史上都十分罕见。因此，大桥建设者们从一开始就与世界级难题狭路相逢。第一，要面对的是险恶的地形。湘西矮寨地处奇峰峻岭间，是险绝的峡谷。第二，要面对复杂的地质条件。矮寨大桥地处云贵高原和沅麻盆地的交界处，地质条件极为复杂。第三，峡谷的气候多变。峡谷经常遭遇暴雨、大雾、雷电、冰冻、大风等恶劣天气，给施工带来极大不便。第四，吊装困难。矮

寨大桥的架设，要在离地面 300~400 m 的高空中进行，单件吊装的最大质量达 120 t，施工起重和吊装十分困难，安全风险极大。第五，运输难。矮寨大桥土建工程运输量巨大，仅钢材、水泥、砂石等材料运输总量就达 18 万 t，绝大多数材料运输要经过素有“山高、坡陡、弯急、路窄、车多”之称的矮寨盘山公路。

“狭路相逢勇者胜。”面对困难，面对种种不利条件的制约，大桥建设者们用坚定的信念和开拓创新的精神，勇敢挑战天险，面对压力从未退缩。比如，从图纸设计到建成养护，作为矮寨大桥建设指挥部副总工程师的张永健，就与矮寨大桥相伴了 7 年多的时间。这 7 年多里，张永健吃住几乎都在工地上。连拍婚纱照，都是他的妻子自己带着婚纱来矮寨大桥拍的。

大桥建设者们把矮寨大桥建在了德夯大峡谷上，也把大桥永远放在了自己心上。交通人常说，干一个项目，树一座丰碑。矮寨大桥就如同一座丰碑，代表着中国的高速发展，代表着中国桥梁技术的进步，也代表着湖南人吃得苦、霸得蛮、耐得烦，敢打硬仗、敢为人先的拼搏精神。它也是一支力量之歌。

3. 盛世笙歌

作为盛世中国的标志性建筑，矮寨大桥在建成之后获得了多项国内荣誉：2012 年度湖南省建筑业协会湖南省优质工程；2013 年度湖南省住房和城乡建设厅湖南省优秀工程设计一等奖；2013 年度湖南省建筑业协会湖南省建设工程芙蓉奖；2014 年度中国公路勘察设计协会公路交通优秀勘察一等奖；2016—2017 年度李春奖（公路交通优质工程奖）；2018—2019 年度中国建设工程鲁班奖（国家优质工程）；2020 年第十八届中国土木工程詹天佑奖。此外，其还获得了“中国十大最美公路”“新中国成立 70 年来湖南标志性工程”等称号。

与此同时，矮寨大桥也是盛世中国在国外的一张亮丽名片：2013 年，美国国家广播公司、NBC 旗下的“今日新闻”网站，推荐了 10 个非去不可的世界新地标，矮寨大桥与日本东京晴空塔、澳大利亚黄金海岸天际点眺望观景台、英国伦敦奥运瞭望塔、美国华盛顿州 LeMay 汽车博物馆、美国拉斯维加斯黑帮博物馆、美国纽约布鲁克林大桥公园泳池、美国堪萨斯城海洋生物水族馆、芬兰赫尔辛基静默教堂、挪威“拱门”文化中心一同登榜；2015 年度矮寨大桥获国际道路成就奖。

矮寨大桥不仅仅是盛世中国在技术维度的壮歌，更是盛世中国在文化维度的笙歌：2012 年 9 月，首届湘西矮寨大桥国际低空跳伞节在矮寨大桥举行，该次跳伞节有来自 13 个国家的 40 名运动员参与；2013 年 3 月，矮寨大桥架设观光电梯，该电梯采用贴山钢结构井架的方式修建，设 4 台 R 型观光电梯并列分体运行，采用曲面玻璃材质，具有视野宽广的特点，为游客提供了观赏矮寨大桥景色的便捷通道；2016 年 10 月 15 日，在“天下鼓乡”矮寨景区，人们以蓝天为屏，青山作幕，雄伟壮观的矮寨大桥为景，举行“2016 吉首鼓文化节”，湘西苗族鼓舞与来自各地的多支鼓队互动交流，让人们寄情于山水间，欣赏了一场世界鼓文化争鸣的视听盛典。

矮寨大桥，是谱写 in 群山之间的传奇，是世界级人类工程的奇迹。现代工程技术与峡谷风光在此交相辉映、相映成趣。而它所创造的 4 个“世界第一”，更是让世界见证了“湖南精神”“中国力量”。它让湘西插上了腾飞的翅膀，谱写了一首湖湘新歌，更是一曲盛世笙歌。

1.4 桥之师：青山着意化为桥

茅以升先生(图 1-21)是江苏镇江人,是著名的土木工程学家、桥梁专家、工程教育家,是中国科学院院士、美国工程院院士、中央研究院院士。他主持中国铁道科学研究院工作 30 余年,为铁道科学技术进步作出了卓越的贡献。他的一生,是造梦的一生。



图 1-21 青年茅以升

1. 梦起

1907 年端午节,江苏南京在文德桥一带举行龙舟赛。茅以升早早和小伙伴约好要一起去观看比赛。不巧的是,这一天他生病了,只能待在家中。外边锣鼓声四起,而茅以升只能满腹怅然躺在床上。

然而刹那间,热闹的呐喊声消失了,变成了尖叫声、惊呼声,夹杂着仓皇奔跑的脚步声,还有物体的坍塌声。正在茅以升紧张却不知道发生了什么的时候,有一个小伙伴闯了进来,神色惶恐,满脸泪水。

茅以升才知道出了大事,文德桥坍塌了,几百人掉进了秦淮河,不少人被淹死,其中有几个就是此前和他约好一同去看比赛的小伙伴。转眼之间,阴阳两隔,前一天还活蹦乱跳的小伙伴,永远无法再见。这件事带给茅以升极大的冲击和痛苦。他在作文中含泪写下:“如果我将来造桥,一定是不会塌的好桥。”

11 岁的茅以升心中悄然埋下了一个桥梁梦。

2. 寻梦

1911 年,茅以升考入唐山路矿学堂,选择了桥梁专业,开始了他与桥为伴的人生旅途。但每个人的寻梦之旅,大概都会有些波澜,茅以升也不例外。入校后的一年里,学霸茅以升曾一度想放弃学习。当时的清朝政府,对外无法维护国家主权,对内横征暴敛,人民处于水

深火热之中。1911年，武昌起义爆发，清政府土崩瓦解，革命风暴席卷全国。作为一名热血爱国青年，茅以升急切地想为国家尽一份力。他想投笔从戎，加入革命的队伍。在母亲的劝告下，茅以升才暂时放弃了从军的念头。真正的转机出现在1913年。这一年，孙中山在唐山路矿学堂发表讲话，并重点提到国民革命军需要两支大军，一支是武装起义的大军，另一支是建设的大军，他要向西方学习先进的科学技术，彻底改变我国贫穷落后的面貌，采矿、筑路、造桥也是为革命。这让茅以升坚定了决心：一定要努力钻研，掌握最先进的造桥技术，学成报国。

1916年，茅以升大学毕业，参加清华留美官费研究生考试，以第一名的成绩被美国康奈尔大学录取。21岁，他获得桥梁专业硕士学位。23岁时，茅以升获美国卡耐基梅隆大学工学院博士学位，是该校第一位工科博士。他关于桥梁建造的博士论文一经发表，立刻引起了国际土木工程界的轰动，其中的创见被称为茅氏定律。也是同一年，在美国有着大好前景的茅以升，谢绝了康奈尔大学和卡耐基梅隆大学的留校任教邀请，以及好几家桥梁公司的高薪邀约，毅然回国。他回到了自己的母校唐山路矿学堂，一边教书，一边寻找着建造现代化桥梁的机会。

3. 梦萦

掌握着最先进造桥技术的茅以升，渴望在中国的土地上建造出现代化的大桥，为当时贫弱的中国贡献一份现代的先进技术，走出只能由外国人来造中国现代桥梁的困境。

然而现实的崎岖坎坷远胜于想象。从1919年12月回国到1933年，漫长的14年里，由于种种原因，茅以升无桥可造。

这期间，他曾短暂地出任江苏镇江水利局局长，认为这样将离他的造桥梦更近一步。然天意弄人，他上任的那一年，江苏遭遇百年不遇的特大洪灾，茅以升恪守岗位，日夜巡视，彻夜难眠，然而洪水呼啸，堤坝坍塌。茅以升引咎辞职，饱受非议。

无桥可造的时光里，茅以升致力于培育桥梁建设人才。14年里，他携家带口，辗转多地教书，传授先进的桥梁建造知识，并琢磨出一套特别的教学方式。比如，他要求学生每节课上课向自己提问，根据提问的水平给学生打分。这一方式，极大地激发了学生的学习兴趣。他们争先恐后，想尽办法学习桥梁知识，以便提出高质量的问题。同时，他要求桥梁专业的学生进入大学后，第一学期去桥梁工地实习，边做边学。他以渊博的学识、独特的育人方式，把造桥之梦的种子种到诸多学生的心中，培育出一大批桥梁建设人才，为后来的钱塘江大桥建设、修复，以及中华人民共和国成立后武汉长江大桥的建设贡献出巨大力量。

4. 造梦

1933年，造桥的机会终于来了。正在天津北洋大学教书的茅以升接到建造钱塘江大桥的邀约。可是，造这样的大桥是极为不易的。

一是钱塘江的地质条件险恶。每年春夏之间，山洪暴发，江水猛涨，而下游则因潮汐而波浪大作。如果上下水势并发，江水就像不可驯服的野马，势不可当。万一遇到台风，更是凶险万分。二是钱塘江水底淤积的流沙，一遇水冲，即被冲走。这样，光是如何固定桥墩就是一个大问题。

他的妻子对此极为反对，此时茅以升出任镇江水利局局长的往事再次浮现在眼前。茅以升的妻子辗转难眠，忧心不已，她不希望自己的丈夫再次陷入当年的困境。

思虑再三的茅以升最终答应了主持建造钱塘江大桥。钱塘江大桥的建设，对浙江的防务

与经济有重大影响。他认为把桥建好，就是为国家做贡献。

从1934年到1937年9月，两年多的时间里，茅以升等人经受住了重重压力。比如，开工不久，就遇上山洪暴发，把已经筑的围堰全部冲毁，心血和汗水顷刻之间付诸东流。一时之间，质疑声四起，银行不愿再提供贷款。当年的建设厅厅长向他发出通牒：“建桥只许成功不许失败，如若失败，你第一个跳钱塘江，我跟着跳。”

在重重压力下，茅以升等人日以继夜，终于克服了无数的艰难险阻，成功地建造了第一座由中国人自己设计的现代化大桥——钱塘江大桥。中国人不能造现代化大桥的历史在此刻宣布结束。

然而，这一年，日军开始全面侵华。3个月后，杭州失守。为阻止敌军前进，茅以升于1937年12月23日，满怀悲愤亲手炸掉了大桥。他满腔悲痛，挥笔写下“斗地风云突变色，炸桥挥泪断通途。五行缺火真来火，不复原桥不丈夫”之誓言。

5. 梦圆

抗日战争胜利后，自1946年开始，茅以升开始组织修复大桥。1947年3月，大桥铁路和单行公路恢复临时通车，但由于损坏严重，修桥工作总体进展缓慢。杭州解放前夕，大桥又遭国民党撤退军队爆炸破坏。直到1953年9月，大桥全部修理工作才完成，并恢复到原设计状态。至此，茅以升终于组织成功修复了钱塘江大桥，回应了他当年含泪挥笔写下的“不复原桥不丈夫”。

中华人民共和国成立后，茅以升相继主持修建了武汉长江大桥和多座桥梁的设计。可以说，有中国现代化桥梁的地方，就有茅以升的汗水和脚印。

他曾说，人生之路崎岖多于平坦，忽似深谷忽似洪涛，幸赖桥梁以渡。

自11岁那年种下造桥梦的种子，茅以升先生这一生，与桥相伴，历经曲折不曾悔，搭建出中国通往现代化的桥梁，搭建出向世界证明中国的桥梁，搭建出向年轻一代播撒造桥之梦种子的桥梁。桥梁里，有他至深的家国情，有他不变的强国梦。

第2章

桥梁通识知识

【知识目标】

1. 识别桥梁结构组成；
2. 概述桥梁结构有关名词；
3. 分辨各种分类方式下的不同结构、不同跨度的桥梁在功能、经济等方面的特征；
4. 识别不同结构形式的桥梁结构所采用的施工方法。

【能力目标】

1. 绘制桥梁结构组成、结构类型分类简图；
2. 辨别桥梁施工相关的影响因素；
3. 联系桥梁结构与施工方法之间的关系；

【素养目标】

1. 培养爱岗敬业的职业道德和专业认同感；
2. 培育具有科技报国的家国情怀和使命担当；
3. 引导学生将个人梦融入中国梦，通过刻苦读书认真做事将来报效祖国奉献社会。

2.1 桥梁组成

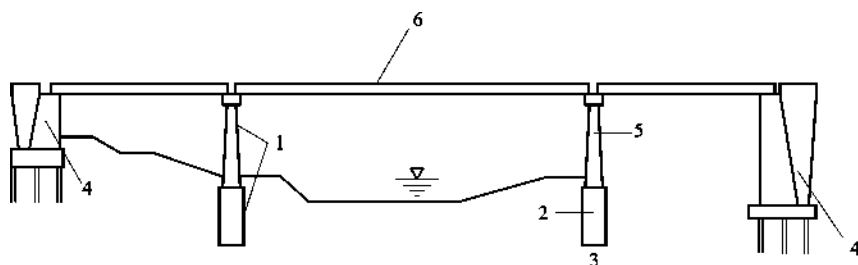
2.1.1 桥梁结构组成

一般桥梁通常由上部结构、支座、下部结构以及附属设施组成。其中，桥梁上部结构为桥跨结构，而下部结构包括桥墩、桥台及其基础，如图 2-1 所示。

1. 上部结构

上部结构(即桥跨结构)是路线中断时，跨越障碍物的主要承载构造物，包括桥面板、桥面梁以及支承它们的结构构件，如梁(板)、拱、悬(拉、吊)索等，其作用是承受桥面上各种车辆、人群等荷载。除承受车辆和人群等荷载及恒载(即自重)外，上部结构还要安全地承受各种外来荷载的作用(如风、地震)。上部结构是桥梁结构的主要承重结构，当跨度较大时，不仅其结构比较复杂，施工也相当困难。

上部结构具体是指梁桥支座以上的总称，拱桥拱座以上的部分、拱桥拱座顶面以上的部分。



1—下部结构；2—墩台基础；3—地基；4—桥台；5—桥墩；6—上部结构。

图 2-1 桥梁结构各部位立面示意图

2. 支座

支座是在桥跨结构与桥墩或桥台的支承处所设置的传力装置，承受上部结构传来的荷载并将其传递给桥梁墩台，同时还应满足上部结构在荷载、温度变化或其他因素作用下所产生的位移的要求。

3. 下部结构

下部结构（即桥墩、桥台及基础）是支承上部结构的承重构件。桥台设在桥身两端，其作用除支承桥跨结构外还要与路堤衔接并防止路堤滑塌。桥墩设在两桥台之间，其作用是支承桥跨结构。墩台基础是桥墩、桥台埋入土中的延续部分，其作用是使桥上全部荷载传至地基。墩台基础在整个桥梁施工中是比较困难的部分，经常需要进行水上作业。

下部结构包括桥梁墩、台及其基础。桥墩及桥台具体指承台顶面至墩帽顶面或（梁）板底面的部分，斜拉桥、悬索桥梁的桥塔部分；桥梁墩台基础具体指承台、钻孔灌注桩或扩大基础顶面以下部分。

4. 附属设施

附属设施是直接为桥梁服务功能有关的部件，包括桥面铺装，防水及排水设施，桥面伸缩装置，人行道与安全带，栏杆与护栏，桥头引道，桥梁照明设施，桥梁防撞保护设施，桥梁防震抗震设施，桥梁标志、标线、视线导引，等等。

（1）桥面铺装的作用是防止车辆轮胎或履带直接磨耗行车道板，保护主梁免受雨水侵蚀，并对车辆轮重的集中荷载起分布作用，具有抗车辙、行车舒适、抗滑、不透水、刚度好的性能。桥面铺装的类型为：水泥混凝土（厚度 5~8 cm），强度等级不低于行车道板混凝土强度等级；沥青混凝土（单层式 5~8 cm）；防水混凝土（厚度 8~10 cm），为延长桥面寿命，在上面铺装 2 cm 沥青表面处作为磨耗层。其中水泥混凝土和沥青混凝土必须设置防水层。防水层设置在行车道铺装层下边，透过铺装层渗下的雨水汇集到排水设备排出。排水系统是为了迅速排出桥面积水，防止雨水积滞于桥面和渗入梁体而设置的一定数量的排水管以及桥面上的纵横坡。

（2）防水与排水设施是为了迅速排除桥面积水，防止雨水积滞于桥面并渗入梁体而影响桥梁的耐久性。

（3）桥梁伸缩装置简称为伸缩缝，主要由传力支承体系和位移控制体系组成，以适应桥梁纵、横位移的变化和梁端翘曲发生的转角变化。伸缩缝包括对接式伸缩缝、钢制支承式伸缩缝、橡胶组合剪切式伸缩缝、模数支承式伸缩缝和无缝式伸缩缝等。

(4) 人行道是专供(城镇)人群行走的桥面(边缘)部分,由人行道板、梁及缘石组成。高速公路桥梁中一般不设人行道,而采用宽度不少于0.25 m的护轮安全带以保障行车安全;一般公路视具体情况设置。行人稀少区可不设人行道,只设安全带,其宽度不小于0.5 m。

(5) 桥梁栏杆及护栏主要用于设人行道的桥梁上,桥梁栏杆应具有足够的高度,防止行人跌落桥下;而桥梁护栏主要用在无人行道的封闭式桥梁上,由于桥上行车速度较快,它具有吸收碰撞能量,迫使失控车辆改变方向并恢复到原有行驶方向的作用,防止其越出护栏而跌落桥下。

(6) 桥头引道是桥梁两端与道路连接的路段,桥头引道的线形宜与桥的线形相适应。

(7) 桥梁照明设施要求限制眩光,一是避免给正在桥头引道上或与桥位相邻近道路上的行车者造成眩光;二是当桥下有船只通航时避免给船上领航员造成眩光。一般在其灯具上安装专门的挡光板或格栅。其布置方式有灯杆分散照明、高杆集中照明、栏杆照明三种。

(8) 防撞保护设施是为了保护桥梁本身免受船只或大冰块撞击,防止桥梁受损而设置的一种装置。

(9) 桥梁防震抗震设施为减少地震及其他因素带来的振动对桥梁自身造成损坏的保护措施。

(10) 桥梁标志是一种用图案、符号或文字、数字对交通进行指示、导向、警告、控制和限定的交通管理措施。它有主标志和辅助标志之分。

2.1.2 桥梁结构有关名词

公路桥梁基本尺寸术语示意图如图2-2所示。

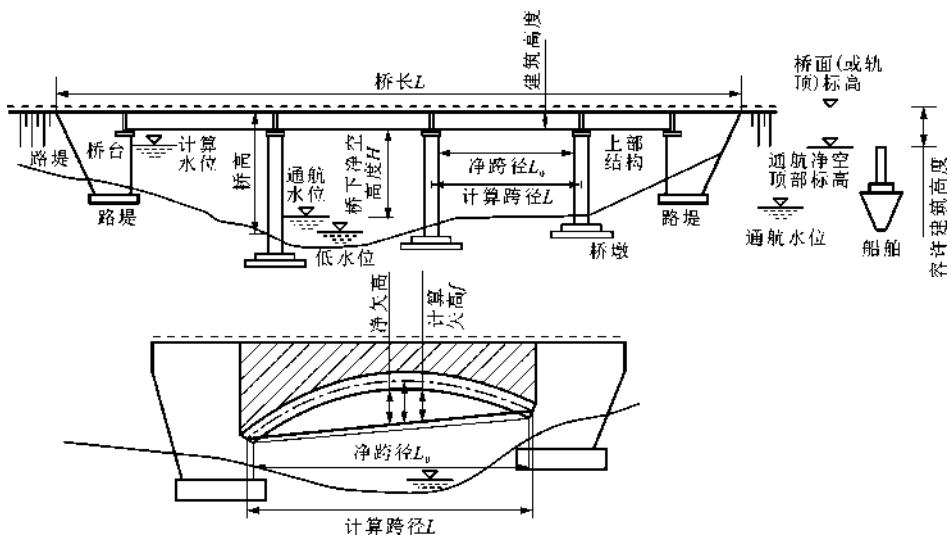


图 2-2 公路桥梁基本尺寸术语示意图

(1) 净跨径:指相邻两个桥墩(或桥台)之间的净距。对于拱式桥,它是每孔拱跨两个拱脚截面最低点之间的水平距离。

(2) 计算跨径:对于具有支座的桥梁,是指桥跨结构相邻两个支座中心之间的距离;对于拱式桥,是指两相邻拱脚截面形心点之间的水平距离,即拱轴线两端点之间的水平距离。

(3) 拱轴线:指拱圈各截面形心点的连线。

(4) 桥梁高度：指桥面与低水位之间的高差，或指桥面与桥下线路路面之间的距离，简称桥高。

(5) 桥下净空高度：指设计洪水位、计算通航水位或桥下线路路面至桥跨结构最下缘之间的距离。

(6) 建筑高度：指桥面(或轨顶)标高至桥跨结构最下缘之间的距离。

(7) 容许建筑高度：指公路或铁路定线中所确定的桥面(或轨顶)标高与通航净空顶部标高之差。

(8) 净矢高：指从拱顶截面下缘至相邻两拱脚截面下缘最低点之连线的垂直距离。

(9) 计算矢高：指从拱顶截面形心至相邻两拱脚截面形心之连线的垂直距离。

(10) 矢跨比：指计算矢高与计算跨径之比，也称拱矢度，它是反映拱桥受力特性的一个重要指标。

(11) 涵洞：指用来宣泄路堤下水流的构造物。通常在建造涵洞处路堤不中断。凡是多孔跨径的全长不到 8 m 和单孔跨径不到 5 m 的泄水结构物，均称为涵洞。

2.2 桥梁结构类型

公路桥梁建设总体要求是安全可靠、适用耐久。其设计原则是根据不同公路等级及功能作用、性质和将来发展需要，按照经济美观和保护环境的原则进行因地制宜、就地取材、技术先进、经济合理、便于施工和养护等方面的研究。公路桥梁有各种不同分类方式，每一种分类方式均能够反映不同结构、不同跨度的桥梁在功能、经济等方面的特征。

(1) 按工程规模分类。

桥梁按工程规模(即跨径)可分为特大桥、大桥、中桥与小桥。

(2) 按受力分类。

桥梁由基本构件组成，在力学上可归类为拱式桥、梁式桥、悬吊式桥和它们之间的各种组合体系桥梁四大类。

(3) 按承重结构的材料分类。

① 石拱桥，即用石料建造的拱桥，外形美观，养护简便，并可就地取材，以降低造价。其缺点是自重较大，跨越能力有限；石料的开采、加工及砌筑均需要较多人工，且工期长。其一般用于小跨径桥梁。

② 混凝土桥梁，即用水泥混凝土建造的桥梁，包括钢筋混凝土和预应力混凝土两类。其优点是跨度大，可建造成拱式或梁式桥梁。

③ 钢桥，即上部结构用钢材建造的桥梁。其优点是跨越能力大，且自重轻；缺点是结构复杂，对地基承载要求高，造价高，维护费用多，一般适用于大跨度桥梁。

(4) 按用途分类。

桥梁按用途可分为公路桥、公路铁路两用桥、农村道路桥、人行桥、管线桥和渡槽桥等。

(5) 按跨越障碍性质分类。

桥梁按跨越障碍性质可分为跨河桥、跨线桥(立体交叉)、高架桥和栈桥。

(6) 按上部结构行车道位置分类(特指拱桥)。

① 桥面布置在主要承重结构之上的称为上承式拱桥，如图 2-3(a) 所示。

- ②桥面布置在承重结构之下的称为下承式拱桥，如图 2-3(b) 所示。
- ③桥面布置在桥跨结构高度之间的称为中承式拱桥，如图 2-3(c) 所示。

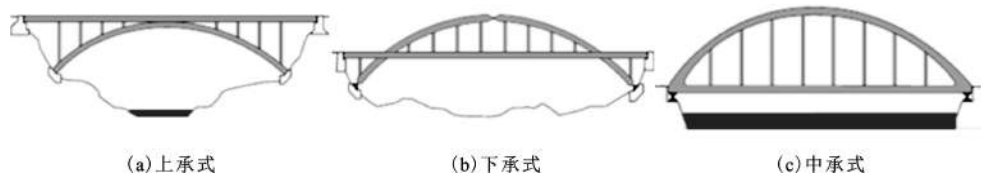


图 2-3 拱桥

(7)按桥面布置分类。

- ①双向车道布置桥梁是指行车道的上下行交通布置在同一桥面上，上下行交通根据画线分隔，没有明显的界线的桥梁。车辆在桥梁上行驶的速度只能是中速或者低速，交通量较大的道路，桥梁往往会形成交通滞留状态。
- ②分车道布置，即在桥面上设置分隔带，用以分隔上下行车辆，因而上下行交通互不干扰，可提高行车速度，便于交通管理。其在城市道路和高等级公路中常被采用。
- ③双层桥面布置是桥梁结构在空间上可以提供两个不在同一平面上的桥面构造。它可以使不同的交通严格分道行驶，提高了车辆和行人的通行能力，并便于交通管理。同时，可以充分利用桥梁净空，在满足同样交通要求的条件下，减小桥梁宽度，缩短引桥长度，达到较好的经济效益。公路铁路两用桥梁也常常采用将公路、铁路线路分别在两个平面中布置的形成，典型的有南京长江大桥、青马大桥等。

桥梁分类层次如图 2-4 所示。

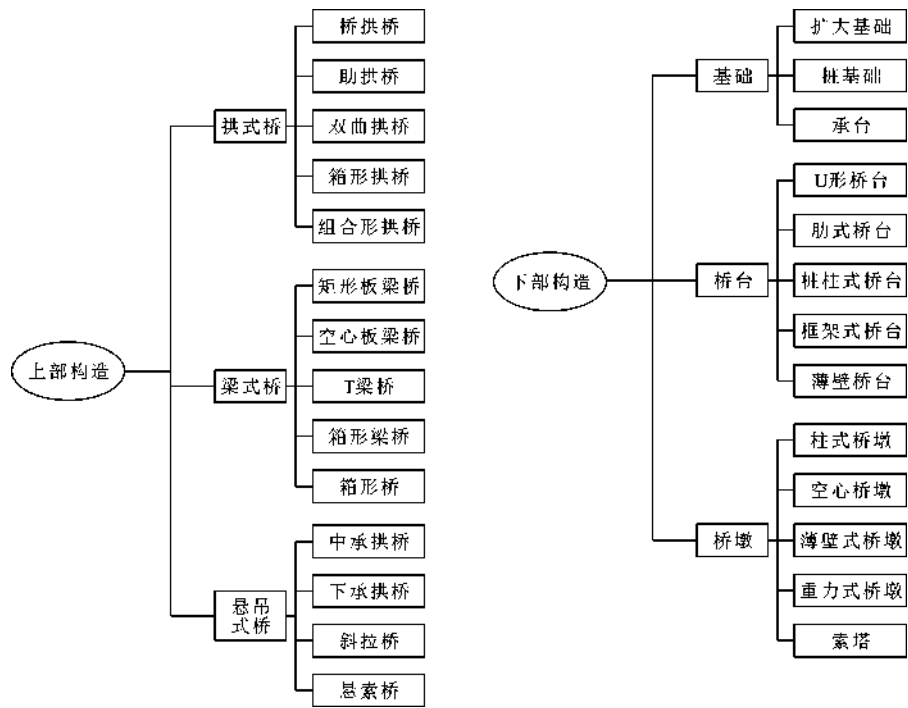


图 2-4 桥梁分类层次

2.3 桥梁施工方法及选择

2.3.1 桥梁施工方法

桥梁的施工方法需要充分考虑桥位的地形、地质、环境、安装方法的安全性、经济性、施工速度等因素。同时，桥梁结构的施工与设计有着十分密切的关系。对不同结构形式的桥梁所采用的施工方法可不同，对同种结构形式也可采用不同的施工方法。结构运营阶段的受力状况取决于所选用的施工方法，因此桥梁设计往往预先假定施工方法，并在设计上考虑施工全过程的受力状态。设计与施工是相互配合、相互约束的。

(1) 桥梁基础施工。

桥梁基础作为桥梁整体结构的组成部分，其结构的可靠性影响着整体结构的力学性能。基础施工形式和方法的选用要针对桥跨结构的特点和要求，并结合现场地形、地质条件、施工条件、技术设备、工期、季节、水利水文等因素统筹考虑。

桥梁基础施工形式大致可以归纳为扩大基础、桩和管柱基础、沉井基础、组合基础和地下连续墙基础几大类(图 2-5)。桥梁基础工程由于在地面以下或在水中，涉及水和岩土的问题，从而增加了复杂程度，就基础的施工方法而言，都是针对具体的结构形式，无统一的施工方法模式。

(2) 桥梁墩台施工。

桥梁墩台按建筑材料可分为圬工、钢筋混凝土、预应力混凝土和钢结构等多种形式，按施工方法可分为石砌式墩台、就地浇筑式墩台和预制装配式墩台(图 2-5)。

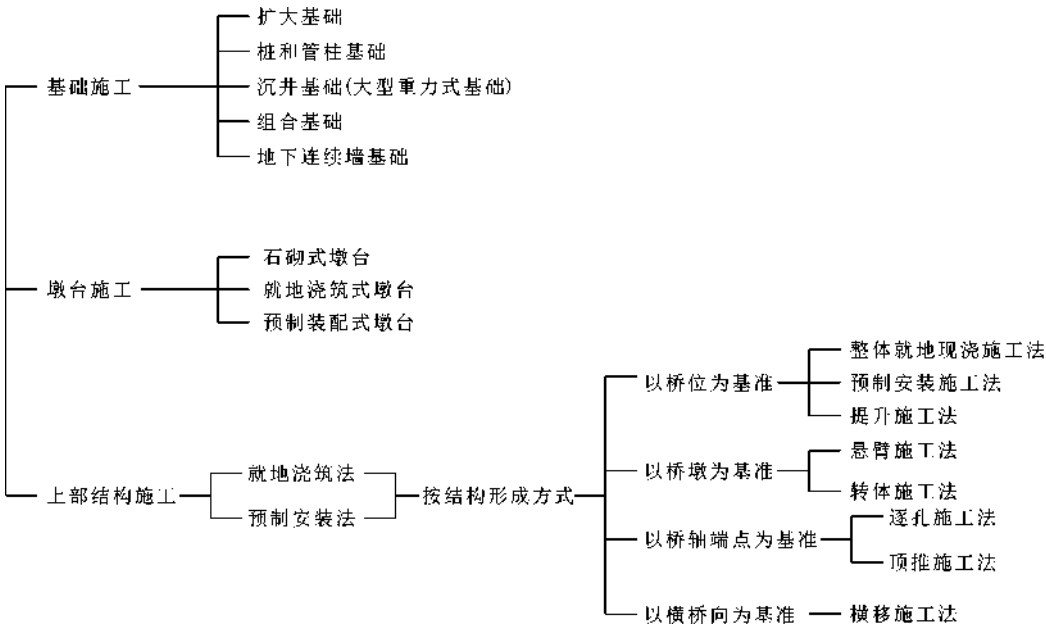


图 2-5 桥梁施工方法

(3) 桥梁上部结构施工。

随着预应力混凝土的应用、桥梁类型与跨径幅度的增加、构件生产的预制化、结构设计方法的进步、机械设备的发展等，多方面促进了桥梁上部结构施工方法的进步和发展，形成了多种多样的施工方法(图 2-5)。

桥梁施工方法总体上可分为就地浇筑法和预制安装法。具体而言，按照桥梁结构的形成方式可将施工方法划分如下：以桥位为基准的固定支架整体就地现浇施工法、预制安装施工法和提升施工法；以桥墩为基准的悬臂施工法和转体施工法；以桥轴端点为基准的逐孔施工法和顶推施工法；以桥横向为基准的横移施工法。针对某一桥梁结构，并不一定严格地按照某一施工方法和结构形式顺序进行，或许是多种施工方法的组合。

下面介绍几种主要施工方法及其施工特点。

(1) 整体就地现浇施工法。

固定支架整体就地现浇施工法是在桥位处搭设支架，在支架上浇筑混凝土，待混凝土达到设计强度后拆除模板、支架。

就地浇筑施工无须预制场，而且不需要大型起吊、运输设备，桥跨结构整体性好，无须做梁间或节间的连接工作。它的缺点主要是工期长，施工质量易受季节性气候的影响、不容易控制；对预应力混凝土梁，因受混凝土收缩、徐变的影响，将产生较大的预应力损失；施工中的支架、模板耗用量大，施工费用高；搭设支架影响排洪、通航；施工期间可能受到洪水和漂流物的威胁。

(2) 预制安装施工法。

预制安装施工法是在预制工厂或在运输方便的桥址附近设置预制场进行整孔主梁或大型主梁节段的预制工作，然后采用一定的架设方法进行安装、连接，完成桥体结构的施工(图 2-6)。



图 2-6 预制安装施工法

这种方法的主要特点：采用工厂预制，有利于确保构件的质量；采用上、下部结构平行作业，将缩短现场施工工期，由此也可降低工程造价；主梁构件在安装时一般已有一定龄期，故可减少混凝土收缩、徐变引起的变形；对桥下通航能力的影响视采用的架设方式而定。此施工方法对施工起吊设备有较高的要求。

(3) 逐孔施工法。

逐孔施工法是一种中等跨径预应力混凝土简支梁和连续梁的施工方法。它使用一套设备从桥梁的一端逐孔施工，直到对岸。其根据施工设备、梁体构件制造等可分为使用移动支架逐孔组拼预制节段施工和移动模架逐孔现浇施工(图2-7)。



图 2-7 移动模架施工法

逐孔施工法的主要特点：无须设置地面支架，不影响通航和桥下交通，施工安全、可靠；有良好的施工环境，保证施工质量，一套模架可多次使用，具有在预制场生产的优点；机械化、自动化程度高，节省劳动力，降低劳动强度；移动模架设备投资大，施工准备和操作都较复杂；移动模架逐孔施工法宜在桥梁跨径小于 50 m 的多跨长桥上使用。

(4) 悬臂施工法。

悬臂施工法是从桥墩开始向跨中不断接长梁体构件(包括拼装与浇筑)的悬出架桥法(图2-8、图2-9)。其有平衡悬臂施工和不平衡悬臂施工、悬臂浇筑施工和悬臂拼装施工之分。



图 2-8 悬臂拼装施工法



图 2-9 悬臂浇筑施工法

悬臂施工法的主要特点如下：

①桥梁在运用该方法施工的过程中，主梁或与桥墩固接，或在桥墩附近支承，在主梁上将产生负弯矩。因此，该施工法适用于运营状态下的结构受力与施工状态比较接近的桥梁，如连续梁、悬臂梁、刚构桥等。

②对非墩、梁固接的预应力混凝土梁桥，在施工时须采取措施，使墩、梁临时固接，保证施工期结构的稳定。对施工中墩、梁固接的桥墩，可能承受因施工而产生的弯矩。

悬臂浇筑施工简便，结构整体性好，施工中可不断调整位置；悬臂拼装施工速度快，桥梁上下部结构可平行作业，但施工精度要求比较高；悬臂施工法可不用或少用支架，施工不影响通航，节省施工费用，降低工程造价。

(5) 转体施工法。

转体施工法是先将桥梁构件在桥位处岸边(或路边及适当位置)进行制作，待混凝土达到设计强度后旋转构件就位的施工方法(图 2-10、图 2-11)。在转体施工中，桥梁结构的支座位置一般设定为施工时的旋转支承和旋转轴，桥梁完工后，按设计要求改变支承情况。



图 2-10 竖转施工法



图 2-11 平转施工法

转体施工法的主要特点：可利用施工现场的地形安排构件制造的场地；施工期间不断航，不影响桥下交通；施工设备少，装置简单，容易制作和掌握；减少高空作业，施工工序简单，施工迅速。转体施工法适用于单跨、双跨和三跨桥梁，可在深水、峡谷中建桥时采用，同时也适用于平原区以及城市跨线桥。

(6) 顶推施工法。

顶推施工法是在沿桥纵轴方向的后台设置预制场，分节段预制，并用纵向预应力筋将预制节段与施工完成的梁段连接成整体，然后通过顶推装置施力，将梁体向前顶推出预制场，之后在预制场连续进行下一节段的预制，循环操作直至施工完成(图 2-12)。

顶推施工法的特点：可运用简易的施工设备建造长大桥梁，施工费用低，施工平稳无噪声，可在深水、山谷和高桥墩上采用，也可在曲率相同的弯桥和坡桥上使用；对变坡度、变高度的多跨连续梁桥和夹有平曲线或竖曲线较长的桥梁均难以适用；主梁在固定场地分段预制，连续作业，便于施工管理，避免了高空作业，结构整体性好；施工阶段梁的受力状态与运营时期的受力状态差别较大，因此在梁的截面设计和预应力钢束布置时为同时满足施工与运营的要求，将需要较大的用钢量。



图 2-12 顶推施工法

2.3.2 桥梁施工方法选择

- 桥梁施工方法的选定，可依据下列条件综合考虑：
- (1)使用条件，包括桥梁的结构形式和规模、梁下空间的限制、平面场地的限制等。
 - (2)施工条件，包括工期要求、机械设备要求、施工管理能力、材料供应情况、架设施工经验、施工经济核算等。
 - (3)自然环境条件，包括山区或平原、地质条件及软弱层状况、对河道的影响、运输线路的限制等。
 - (4)社会环境影响，主要是指对施工现场环境的影响，包括公害、景观、污染、架设孔下的障碍、道路交通的阻碍、公共道路的使用及建筑限界等。
- 表 2-1 列出了典型桥梁上部结构可供选择的主要施工方法。实际桥梁施工中，根据可选用的施工设备，施工方法又可进行细分，详见本书第 5、第 6 章。

表 2-1 各种类型桥梁可选择的主要施工方法

施工方法	适用 跨径 /m	梁桥			刚架桥	拱桥			斜拉桥	悬索桥
		简支梁	悬臂梁	连续梁		圬工桥	标准及组合体系拱	桁架拱		
整体就地现浇施工法	20~60	√	√	√	√	√	√		√	
预制安装施工法	20~50	√	√	√	√		√	√	√	√
逐孔施工法	20~60	√	√	√	√					
悬臂施工法	50~320		√	√	√		√	√	√	
转体施工法	20~140		√	√	√		√	√	√	
顶推施工法	20~70			√	√		√		√	
横移施工法	30~100	√	√	√	√				√	
提升施工法	10~80	√	√	√			√			

注：拱桥的顶推施工是针对组合体系拱而言。

2.3.3 桥梁施工的相关影响因素

桥梁施工应包括施工方法选择,必要的施工验算,选择或设计制作施工机具设备,选购与运输建筑材料,安排水、电、动力、生活设施,以及施工计划、施工组织与管理等方面的事务。施工是一项复杂且涉及面很广的工作,上至天文、气象,下至工程地质、水文、地貌、机械、电子、管理等各领域,同时与人的因素、与地方政府的关系密切相关。因此,现代的大型工程施工,应由多种行业的技术人员和工人协力完成。

1. 施工与设计的关系

桥梁施工与设计有着十分密切、不可分割的关系。

对不同结构形式的桥梁,施工方法可不同;对同种结构形式,也可采用不同的施工方法。对体系复杂的桥梁,采用不同施工方法,因其施工过程的结构受力体系各不相同,结构的内力将随着结构体系的改变而变更,结构运营阶段的受力状况取决于所选用的施工方法。另外,绝大多数桥梁施工往往不是一次完成,其间常需经历若干次结构体系的转换。

因此,在考虑桥梁设计方案时,必须根据实际情况,考虑施工的可能性、经济性与合理性;施工方法的选用可视工程结构的跨径、孔数、桥梁总长、截面形式和尺寸、地形、设备能力、气候、运输条件、设备的重复使用等综合条件来选择。在技术设计中要计算施工各阶段结构的强度(应力)、变形和稳定性,桥梁设计要同时满足施工阶段与运营阶段的各项要求。

桥梁结构的施工应忠实地按设计要求完成。在施工前,须对设计图纸、说明书、工程预算、施工计划,以及主要施工阶段的强度(应力)、挠度、稳定性等有关文件和图纸进行详细的研究,掌握设计的内容与要求。同时,按照设计要求以及施工设备情况,精心安排、合理调整施工细节,编制施工组织设计。在整个施工期间,设计需与施工相互配合、协调,及时发现问题,及时变更设计,达到实际上的统一。

2. 施工技术与机械设备的关系

对于桥梁施工而言,一方面,施工机具设备的优劣往往决定了桥梁施工技术的先进与否,施工方法的确定在很大程度上取决于是否有与之相配套的施工机械设备,尤其是对一些大跨径、深水及结构形式较特殊的桥梁。另一方面,桥梁结构体系及施工技术的发展,要有大量的、先进的机械设备作为保证,要求各种施工设备和机具不断地更新和创造,以适应桥梁建造技术发展的需要,先进的施工技术发展的同时又促进了机械制造业水平不断提高。

着眼于桥梁结构整个施工进度,根据使用目的的不同,桥梁施工设备和机具大致可以分为以下几类:测量设备;基础施工设备;混凝土施工设备;各种常备式结构;预应力施工设备;运输、安装和起重设备;专用施工设备;等等。

大型浮吊的研制利用,使桥梁上、下部结构的施工向着大快件组拼体系发展,适应了当前越来越多的跨海工程建设的需要。

总体上讲,桥梁施工设备的使用,应根据具体的施工对象、工期、劳动力及施工单位现有设备的情况,考虑对现场条件的适应性,以及整个工程的经济效益,经由施工组织设计而合理地加以选用和安排。

3. 施工与工程造价的关系

桥梁工程的总造价包括规划、工程可行性研究、勘察设计、征地拆迁、工程施工等费用,其中施工一般要占工程费用的60%以上。近年来,工程施工费用和劳动力的工资所占比例呈

现上升趋势,特大跨径和结构比较复杂的桥梁更是如此。因此,施工费用对工程造价有着举足轻重的影响。

影响桥梁施工费用的主要因素是构件制作的费用、架设费用和工期。为在施工阶段降低工程造价、节省投资,除采取加强施工的组织管理、节约材料、提高机械设备的利用率等措施外,一条重要途径是在施工中应用新技术、新工艺来改善施工条件。施工方法和手段的不同,会影响施工所需的费用。科学合理的、先进的施工方法,既能保证工程的质量和进度,也能使施工费用处于最合理的水平。不合理的、落后的施工技术不仅无法保证施工质量和进度,而且可能造成极大的浪费,导致工程成本升高。合理地采用先进施工技术,对于降低工程造价的作用是显而易见的。

为此,桥梁施工的组织管理人员和工程技术人员必须高度重视施工技术的合理应用,加强施工的科学管理,提高施工机械化程度,组织专业化施工,使工程质量、施工期限、工程造价达到最优。

4. 桥梁施工与组织管理的关系

桥梁施工是一项庞大的系统工程,涉及大量的人力、资金、材料和机具设备,因此必须进行科学的管理。

施工组织管理的目的是要保证工程按设计要求的质量、计划进度和低于设计预算与合同承包价的成本,安全、顺利地完施工任务。

桥梁工程施工的特点:有固定的场所;流动的劳动力、机具和材料;较长的施工周期;不断变化、调整的施工程序和工艺。复杂的管理工作要求所有参与施工的人员(建设方、施工方、监理方、设计方)必须相互协作、互相促进,在施工中随时掌握工程进展的实际情况和存在的问题,采用科学的管理方法,从计划、技术、质量、定额、成本、信息和企业规章制度等方面,切实有效地进行工作。

桥梁施工组织管理大致可分为以下几个方面:

①确认工程项目,进行现场布置和施工准备。在认真审查和熟悉有关协议、文件及设计资料、图纸后,施工单位要明确施工现场,了解现场地理位置、水电资源、工程地点的气象条件等,用以确定施工现场的生产场地和生活设施,并进行合理布局。

②制订工程进度计划。根据施工技术要求有关重要事项,依照完工期限和气象、水文等条件,制订分项工程进度计划和整体工程进度计划,它是施工组织管理的总纲领。

③安排人事劳务计划。根据各施工阶段的进度和施工内容,确定各阶段所需的技术人员、技工及劳务工的计划;同时确定工程管理机构 and 职能干部,负责各方面的事务。

④临时设施计划。拟订工程施工中所需的生产性和非生产性临时设施的类别、数量和使用时间,生产性临时设施包括构件预制场、栈桥、便道、运输线、临时墩等,非生产性临时设施包括办公室、仓库、宿舍等。

⑤机具设备使用计划。它包括确定各施工阶段所需机具设备的种类、数量、使用时间等,以便制订机具设备的购置、制作和调拨计划。

⑥材料及运输计划。根据计划编制材料供应计划,安排材料、设备和物资的运输计划。

⑦工程财务管理。它包括工程的预算、资金的使用概算、各种承包合同、施工定额、消耗定额等方面的管理。

⑧安全、质量与卫生管理。它包括各种作业的安全措施、安全检查与监督、工地现场保卫、施工质量验收制度、工程监理和环境卫生、生活区的卫生等。

桥梁的施工技术与组织管理内容上是有区别的，但在实际工作中关系是密切的。施工技术是工程能按设计要求进行施工的保证，而只有严格、科学的组织管理才能确保按照承包合同圆满地完成工程任务。

第3章

桥梁施工常用机械和设备

【知识目标】

1. 识别桥梁常用机械和设备；
2. 概述桥梁各机械和设备使用用途和方式。

【能力目标】

1. 列出桥梁常用机械和设备；
2. 举例常用机械和设备在桥梁结构施工中的用途；
3. 分辨常用机械和设备的使用范围。

【素养目标】

1. 激发学生的民族自尊心、自信心；
2. 培育学生的行业责任感。

随着我国国民经济的快速稳定持续发展，公路交通建设需求不断增加，大批公路桥梁工程陆续兴建，且建设规模逐年扩大，其发展速度之快，使得工程技术标准和质量要求不断提高，从而桥梁施工技术以及桥涵施工设备也得到长足的发展。在大量新建与扩建改造工程中，先进机械设备与机械化施工的推广，取得了一系列优质高效的成果，令世界瞩目。现代桥梁机械化施工确保了工程施工质量，加快了施工速度，降低了工程成本，最大限度地减轻了工人劳动强度。施工设备和机具的优劣往往决定了桥梁施工技术的先进与否；反过来，桥梁施工技术的发展，也要求各种施工设备和机具不断进行改造、更新，以适应施工技术的发展。

桥梁施工设备和机具分类标准不一，按功能分主要有常备式结构(装配式支架设备)、架设安装机具设备(起重、架桥设备)、混凝土施工设备、预应力张拉设备、钢筋加工设备、模板设备、桩工设备、钻孔设备、泥浆系统及其设备、挖泥(砂)设备、浮运设备、梁桥施工机械、拱桥施工机械、斜拉桥施工机械、悬索桥施工机械、桥梁检测机械和排水设备等。另外，桥梁施工可分为下部(桥梁基础)施工和上部施工，桥梁施工设备也可分为桥梁基础施工机械设备和桥梁上部结构施工机械设备。

桥梁施工用的设备和机具门类品种繁多，故在进行施工组织 and 规划时，常常要根据具体的施工对象、工期、劳动力分布等情况，合理地选用和安排各种机具设备，以使它们能够发挥最大的工效和经济效益，确保整个工程能够高质量和高效率地如期完成。此外，桥梁的施

工实践证明,施工设备选用得正确与否,也是保证桥梁施工能否安全进行的一个重要条件。许多重大事故的发生,常常同施工设备陈旧或使用不当有关。

3.1 常备式结构及其应用

桥梁施工中常备式结构主要有万能杆件、贝雷梁、钢管支架等。

3.1.1 万能杆件

钢制万能杆件又称拼装式钢脚手架,是用角钢制成的可拼成节间距为 2 m×2 m 的桁架杆件。其通用性强,弦杆、腹杆及连接板等均为标准件,所以具有装拆方便、运输方便、利用率高等特点,可以拼装成桁架、墩架、塔架、龙门架等形式,以作为桥梁墩台、索塔施工的手脚手架,或作为吊车主梁以安装各种预制构件,必要时还可作为临时桥梁的墩台和桁架。

1. 万能杆件的构造

万能杆件的构件一般分为三大类,分别是杆件(在拼装时组成桁架的弦杆、腹杆、斜撑)、连接板(连接各种杆件成为需要的形状)、缀板(加强两肢、四肢角钢组合断面的整体性)。

万能杆件的类型有铁道部门生产的甲型(又称 M 型)、乙型(又称 N 型)和西安筑路机械生产的乙型(称为西乙型)。它们在结构、拼装形式上基本相同,仅弦杆角铁尺寸、部分缀板的大小和螺栓直径稍有差异。下面以西乙型为例,介绍万能杆件的构造。

西乙型万能杆件共有大小杆件 24 种,其中杆件及拼接用的角钢零件 9 种、节点板 9 种、缀板 2 种、填塞板 1 种、支承靴 1 种以及普通螺栓 2 种。各种构件的具体规格、尺寸详见表 3-1。

表 3-1 西乙型万能杆件规格、尺寸表

编号	名称	规格/mm	单位质量/kg	说明
1	长弦杆	∠100×100×12×3994	71.49	
2	短弦杆	∠100×100×12×1994	35.69	
3	斜杆	∠100×100×12×2350	42.07	
4	立杆	∠75×75×8×1770	15.98	
5	斜撑	∠75×75×8×5478	22.38	
6	联结角钢	∠90×90×10×580	8.20	用于 1 或 2
7	支承角钢	∠100×100×12×494	8.84	用于 1 或 2
	支承靴角钢	∠100×100×12×594	10.63	用于 1 或 2
8	节点板	□250×280×10	9.42	1、2 与 4、5 相连
11	节点板	□860×552×10, A=33.89 cm ²	35.98	1、2 与 3、4 相连
13	节点板	□580×552×10, A=2492 cm ²	19.56	1、2 与 4、16 相连
15	填塞板	□8×480×10	3.01	用于 1 或 2
16	长立杆	∠L75×75×8×3770	24.04	

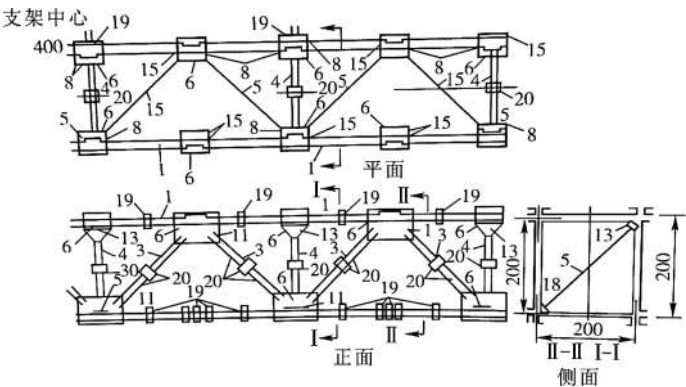
续表3-1

编号	名称	规格/mm	单位质量/kg	说明
17	节点板	□626×350×10, A=2005 cm ²	15.74	4、16与4、5相连
18	节点板	□305×314×10, A=606 cm ²	4.76	4、16与4、5相连
19	缀板	□210×180×10	2.97	用于1或2
20	缀板	□170×160×10	2.14	用于3、4、5、16
	支承靴		24.01	
22	节点板	□580×392×10	17.85	1、2与4、5相连
	节点板	□580×566×10	25.77	1、2与4、5相连
23	节点板	□305×314×10, A=1334 cm ²	10.47	4、16与4、5相连
24	普通螺栓	φ22×(40, 50, 60)		
25	普通螺栓	φ27×(40, 50, 60, 70, 80)		
28	大节点板	□860×886×10, A=7042 cm ²	73.84	1、2与3、4相连

注：各种杆件除19号、20号用A3钢制作外，其余均用16锰钢制作；表中A表示节点板面积。

2. 万能杆件的组拼

用万能杆件组拼成桁架时，其高度可为2 m及2 m的倍数。当高度为2 m时，腹杆为三角形；当高度和宽度为4 m时，腹杆为菱形；当高度超过6 m时，则可做成多斜杆的形式，如图3-1所示。



注：图中各杆件的型号见表3-1。
图 3-1 万能杆件组拼桁架示意图

桁架承载能力，应根据荷载标准和跨径验算。可采用下列方法变更承载能力：①变更组成杆件的杆件数目；②变更杆件的自由长度；③变更桁架的高度；④变更桁架的数目；⑤变更杆件组拼的结构形式。

用万能杆件组拼成墩架、塔架时，其柱与柱之间距离可以与桁架相同，按2 m倍数变更。图3-2所示为万能杆件组拼浮式吊架示意图；图3-3所示为万能杆件组拼塔架示意图。

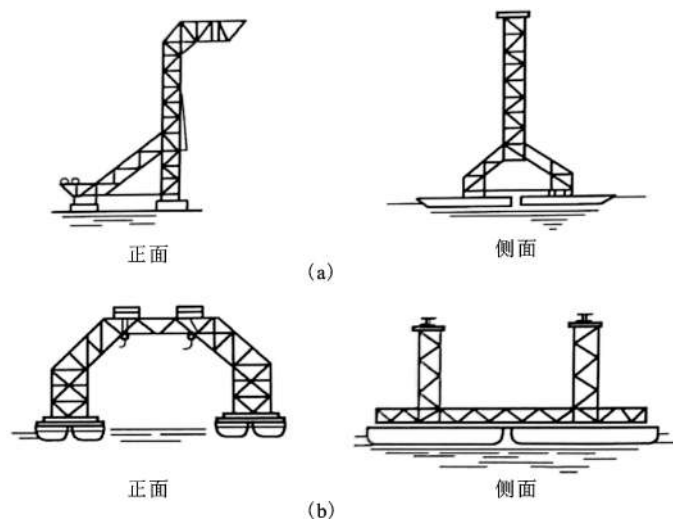


图 3-2 万能杆件组拼浮式吊架示意图

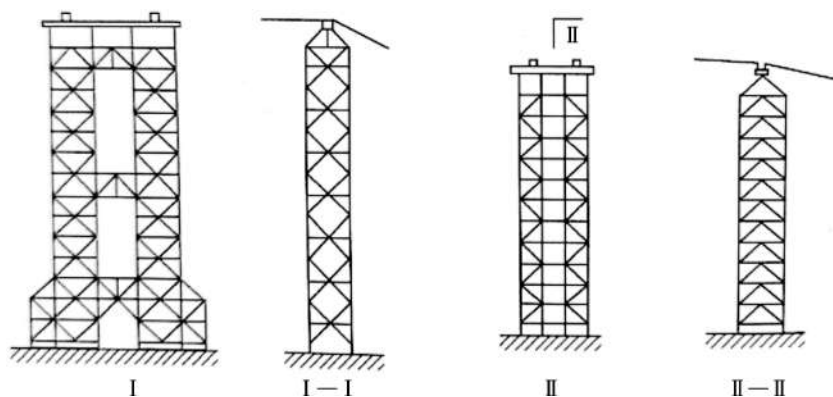


图 3-3 万能杆件组拼塔架示意图

3.1.2 贝雷梁

贝雷梁是一种由桁架拼装而成的钢桁架结构，可用于搭设便桥，组拼支架、拱架和施工钢梁，组装装配式公路钢桥等。图 3-4 所示为某大桥预制场中以贝雷梁组拼成龙门吊的应用实例。贝雷梁现有进口与国产两种。

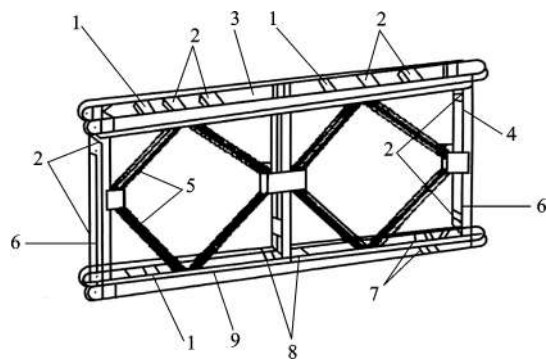
贝雷梁主要由桁架、桁架销、加强弦杆、横梁、支撑连接构件等组成，现分别介绍如下。

1. 桁架

桁架结构如图 3-5 所示。它是由上弦杆、下弦杆、竖杆及斜撑焊接而成。弦杆上焊有多块带圆孔的钢板，其中，弦杆螺栓孔用在拼装双层或加强梁上，在拼装时将桁架螺栓或弦杆



图 3-4 贝雷梁拼装的龙门吊



1—弦杆螺栓孔；2—支撑架孔；3—上弦杆；4—竖杆；5—斜撑；
6—横梁夹具孔；7—风构孔；8—横梁垫板；9—下弦杆。

图 3-5 桁架结构

螺栓插入此孔内，使双层桁架或桁架与加强弦杆连接起来；支撑架孔用来安装支撑架，以加固上、下节桁架；风构孔用来连接抗风拉杆；竖杆上的支撑架孔用来安装支撑架、斜撑和联板；横梁夹具孔用来安装横梁夹具。下弦杆上设有4块横梁垫板，垫板上有栓钉，用来固定横梁位置。

2. 桁架销(销子)

桁架销(图 3-6)用于连接桁架，其端部有一小圆孔，用以插保险插销(图 3-7)，防止销子脱落。销子头有一凹槽，其方向与小圆孔相同，安装时如看不见插销孔，可借凹槽方向确定插销孔方向，使插销顺利安装。

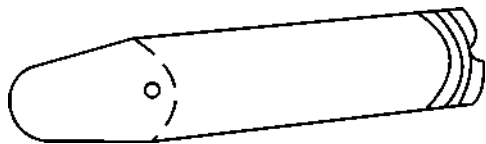


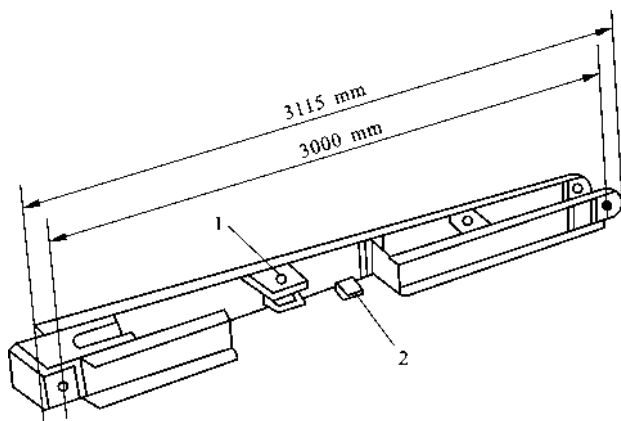
图 3-6 桁架销



图 3-7 保险插销

3. 加强弦杆

加强弦杆(图 3-8)是为了提高梁的抗弯能力、充分发挥桁架腹杆的抗剪作用而与桁架弦杆平行连接的特殊弦杆构件,一般不设于首、尾节桁架。加强弦杆中部设有支撑架孔和弦杆螺栓孔。

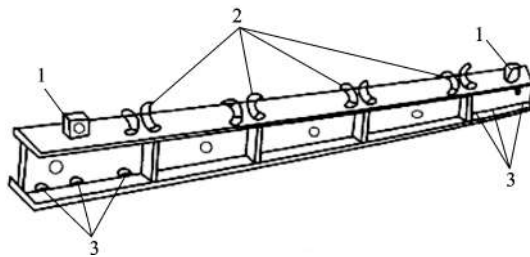


1—支撑架孔; 2—弦杆螺栓孔。

图 3-8 加强弦杆

4. 横梁

横梁结构如图 3-9 所示,中部 4 个卡子用以固定纵梁位置,两端设短柱以连接斜撑。安装横梁时,将栓钉孔套入桁架弦杆横梁垫板上的栓钉,使横梁在桁架上就位。栓钉孔的间距与桁架间距相同,横梁就位后,桁架间距即固定。



1—短柱; 2—卡子; 3—栓钉孔。

图 3-9 横梁结构

为了增加单片贝雷桁架的强度，主桁架可数排并列或双层叠置，贝雷桁架的组合形式多达十余种。

3.1.3 钢管支架(钢管脚手架)

桥梁施工中，常用的钢管支架有扣件式、螺栓式和承插式三种连接方式。扣件式钢管支架的特点是拆装方便，搭设灵活，能适应结构物平面、立面的变化。螺栓式钢管支架的基本构造形式与扣件式钢管支架大致相同，不同的是用螺栓连接代替扣件连接。承插式钢管支架是在立杆上焊承插短管，在横杆上焊插栓，用承插方式组装而成。现列举几种典型的钢管支架。

1. WDJ 碗扣式多功能钢支架

WDJ 碗扣式多功能钢支架是一种先进的扣件式钢管支架，因具有功能多、功效高、承载力大、安全可靠、便于管理、易改造等优点而被广泛应用于建筑、市政及交通的各个领域。WDJ 碗扣架构件主要有立杆、专用立杆、横杆、间横杆、斜杆、窄挑杆、宽调杆、脚手板、提升滑轮、斜道板、架梯、直角撑、立杆垫座、立杆可调底座、立杆可调托撑、立杆连接销，以及双可调早拆依托-I型、双可调早拆依托-II型、单可调早拆依托-I型、单可调早拆依托-II型等。WDJ 碗扣式多功能钢支架配有模板早拆支撑体系，有双可调早拆依托-I型和单可调早拆依托-II型两种模板早拆依托撑。应用模板早拆支撑体系可使模板周转速度加快2~3倍，模板投入量减少1/3~2/3。

2. 轻型钢支架

轻型钢支架适用于桥下地面较平坦、有一定承载力的梁桥，并且可以达到节省木料的目的。轻型钢支架(图3-10)的梁和柱以工字钢、槽钢为主要材料，斜撑、连接系等可采用角钢。构件规格应统一，排架应预先拼装成片或成组，并以混凝土、钢筋混凝土枕木或木枕木作支承基底。支撑基底常需要埋入地面以下适当深度以防冲刷；在排架下垫一定厚度的枕木或木楔来适应桥下高度；纵梁支点处设置木楔以便于支架和模板的拆卸等。

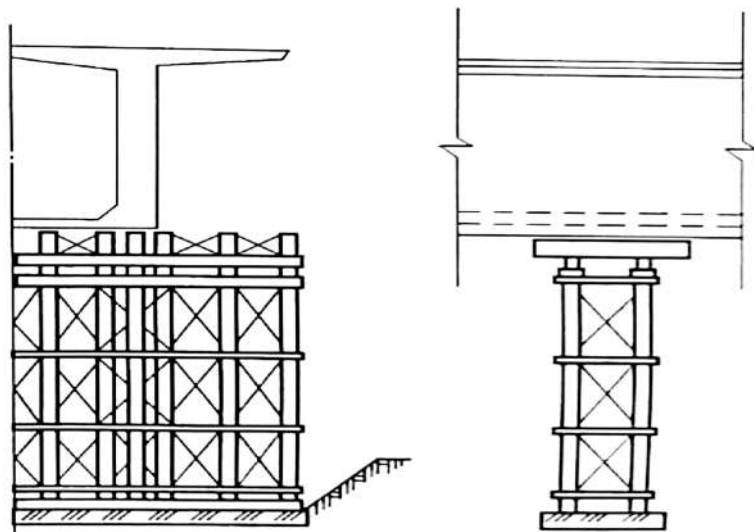


图 3-10 轻型钢支架

3. CKC 门式钢支架

CKC 门式钢支架因轻巧、灵活、使用简单方便,在桥梁建设中曾广泛应用。其品种规格多,适宜支撑各种形状的混凝土构造物,但因它轻巧而刚度小,采用插接和销接,连接间隙较大,虽本身配有小交叉杆,仍容易晃动,多层门架叠合使用时更为明显。因此,为保证支架的整体稳定性,一定要设置纵横大交叉杆将门架纵横交叉连接。

3.1.4 预应力张拉及锚固设备

1. 锚具类型

预应力锚具是后张法预应力工程中的核心元件。这种元件永久埋设在混凝土中,承受着长期的荷载。预应力筋所用夹具,是先张法预应力混凝土构件施工时为保持预应力筋拉力,而将其固定在张拉台座(设备)上的临时装置。

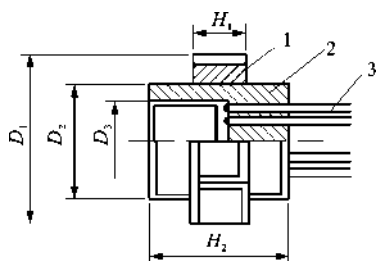
锚具按锚固原理不同可分为支承式锚具、楔紧式锚具、握裹式锚具和组合式锚具等体系。支承式锚(夹)具主要有螺杆锚具、镦头锚具。这种锚具在张拉后,依靠螺纹和垫板的支撑作用锚固。楔紧式锚(夹)具主要有锥形锚具、夹片锚具等。握裹式锚具是将预应力筋直接埋入或加工后(如把钢绞线压花、钢筋镦头)埋入混凝土中,或在预应力筋端头用挤压的办法固定一个钢套筒,利用混凝土和钢套筒的握裹锚固。锚(夹)具应具有可靠的锚固能力,其材料的优劣、热处理工艺的好坏,直接影响锚具的可靠性,影响操作人员及结构的安全。锚(夹)具是建立预应力值和保证结构安全的关键,要求锚具的尺寸形状准确,有足够的强度和刚度,受力后变形小,锚固可靠,不致产生预应力筋的滑移和断裂现象。对锚具的技术要求包括几个方面:静载锚固性能、动载锚固性能、疲劳荷载性能等。

2. 常用锚具

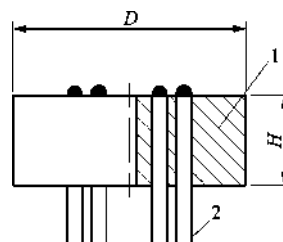
锚具的种类很多,以下仅选部分国内常见种类作简单介绍。

(1) 镦头锚。

镦头锚具是一种利用钢丝(或热轧粗钢筋)两端的镦粗来锚固预应力钢丝的锚具。镦头锚具加工简单、张拉方便、锚固可靠、成本低,还可以节约两端伸出的预应力钢丝。这种锚具可根据张拉力大小和使用条件,设计成多种形式和规格,能锚固任意根数的钢丝。常用的 DM 型镦头锚具如图 3-11、图 3-12 所示。DMA 型用于张拉端或固定端,DMB 型用于固定端。



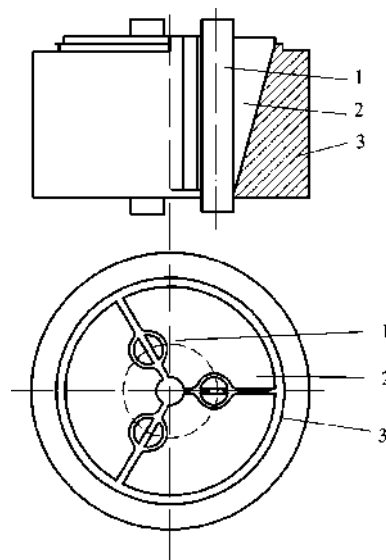
1—螺母; 2—锚杯; 3—钢丝。
图 3-11 DMA 型张拉锚具



1—锚板; 2—钢丝。
图 3-12 DMB 型张拉锚具

(2) JM 锚具。

JM 锚具见图 3-13。它不仅可锚固直径 12 mm 的光圆冷拉热轧钢筋束，还能锚固直径 12 mm 的螺纹冷拉热轧钢筋束和钢丝线束及直径 15 mm 的钢绞线束。它是利用双重的楔紧式锚固作用原理来制造锚具的，其夹具和锚具相同。张拉千斤顶为兼张拉和顶紧夹片双重作用的千斤顶。这种锚固的优点是预应力筋(钢绞线)相互靠近，结构尺寸小，混凝土构件无须扩孔。缺点是如果一个楔块损坏，会导致整束预应力筋失效；没有锚固单根或大于 6 根预应力筋的能力；不能锚固钢丝。



1—预应力筋；2—夹片；3—锚具。

图 3-13 JM 锚具

(3) 扁锚。

扁锚由扁锚头、垫板、扁形喇叭管及扁形管道等组成。扁锚的优点：张拉槽口扁小，可减小混凝土板厚，可以单根分束张拉，施工方便。因此，这种锚具特别适用于后张预应力简支梁、空心板、城市低箱梁等薄壁结构以及桥面横向预应力结构等。

(4) 楔片式锚具。

这类锚具有 XM、QM、YM、OVM 等品牌。一般也称这种锚具为群锚，它由多孔锚板与楔片组成。这类锚具是在每个锥形孔内装一副(2 片或 3 片)楔片，夹持一根钢绞线。这种锚具的优点是每束钢绞线的根数不受限制，且任何一根钢绞线锚固失效，都不会引起整束锚固失效。这种锚具可广泛应用于斜拉索以及体外预应力结构和构件，在动载和低频疲劳荷载条件下都可使用，也无须考虑有无黏结、有无地震力。

(5) 锥形锚具。

锥形锚具如图 3-14 所示，是一种用于锚固直径 5 mm 钢丝的楔紧式锚具。它由钢锚环和锥形锚塞组成。其因构造简单、价格低廉，目前仍应用于张拉吨位较小的预应力结构中。锥形锚具是靠锚塞的楔紧作用对受拉钢丝进行楔紧式锚固，张拉后必须顶压锚塞。顶压锚塞的力为最大控制张拉力的 40%~60%。钢丝束张拉后，放松千斤顶时，锚塞随同受拉钢丝一起向锚孔小端回缩，使锚具内阻碍钢丝滑动的阻力增大到与钢丝的拉力相平衡为止。

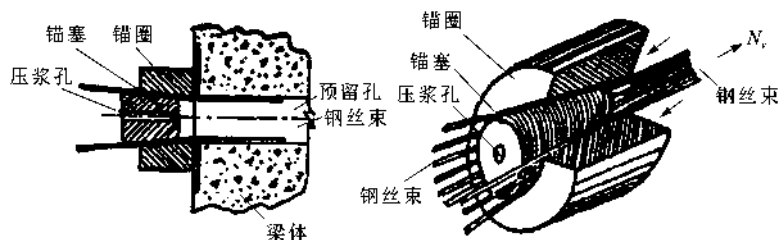


图 3-14 锥形锚具

3. 预应力用液压千斤顶

预应力张拉结构由预应力用液压千斤顶和供油的高压油泵组成。其中液压千斤顶常用的有拉杆式千斤顶、穿心式千斤顶、锥锚式千斤顶、台座式千斤顶四类。选用千斤顶型号与吨位时,应根据预应力筋的张拉力和所用的锚具形式确定。按照《预应力用液压千斤顶》(JG/T 321—2011)行业标准,其分类及代号见表 3-2。

表 3-2 预应力用液压千斤顶分类及代号

分类	拉杆式千斤顶	穿心式千斤顶			锥锚式千斤顶	台座式千斤顶
		双作用	单作用	拉杆式		
代号	YDL	2YDC	YDC	YDCL	YDZ	YDT

现在比较常用的是穿心式千斤顶和锥锚式千斤顶。下面对这两种作简单介绍。

1) 穿心式千斤顶

穿心式千斤顶中轴线上有通长的穿心孔,可以穿入预应力筋或拉杆,如图 3-15 所示。此类千斤顶主要用于群锚及 JM 锚预应力张拉,还可配套拉杆、撑脚,用于镦头锚具及冷铸锚预应力张拉。穿心式千斤顶是一种适应性较强的千斤顶,能张拉钢绞线、钢丝束、螺纹钢、光圆钢,还能配套卡具等附件,用作顶推、起重、提升等。目前,国内厂家生产的牌号 YCQ 系列千斤顶, YC 系列千斤顶, YCD 及 YCW、YDN 等系列千斤顶均属于穿心式液压千斤顶。还有 YCQ20 型前卡式千斤顶,多用于单根钢绞线张拉及事故处理。

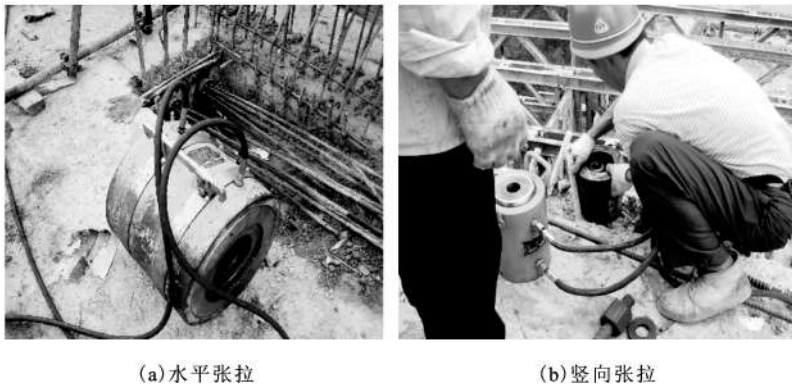
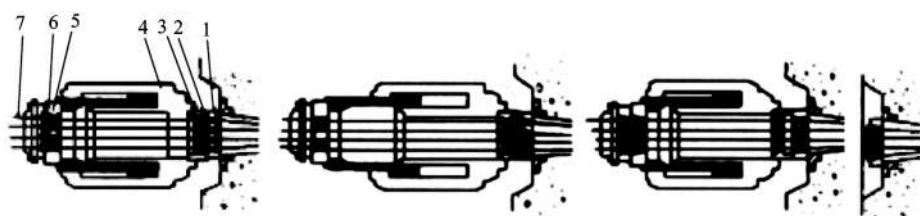


图 3-15 穿心式千斤顶

用穿心式液压千斤顶进行后张法作业(图 3-16)的基本步骤如下。

(1) 锚固安装。

- ①安装工作锚锚板和夹片。
- ②安装限位板。
- ③安装千斤顶。
- ④穿入预应力筋。



1—工作锚锚板；2—工作锚夹片；3—限位板；4—千斤顶；5—工具锚；6—工具锚夹片；7—钢绞线。

图 3-16 穿心式液压千斤顶后张法作业示意图

⑤安装工具锚组件。

(2)张拉、测量和记录。

①向张拉缸供油至初始张拉油压，持荷并测量油缸初始伸长值。

②继续向张拉缸供油至设计张拉油压，持荷并测量油缸最终伸长值。

③记录伸长值。

(3)放张、灌浆并封锚。

①张拉缸油嘴回油至油压为零。

②顶压缸油嘴进油，张拉缸液压回程。

(4)卸下工具锚组件、千斤顶、限位板。

(5)切除多余钢绞线。

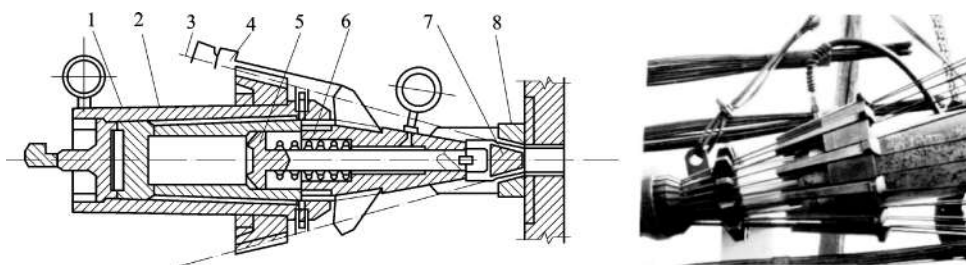
(6)封住工作锚并灌浆。

(7)浇捣封端混凝土。

2)锥锚式千斤顶

后张法预制梁，尤其是跨度较小时，大量采用的是高强钢丝束、钢制锥形锚并配合锥锚式千斤顶的张拉工艺。TD60 型锥锚式千斤顶是一种具有张拉、顶压与退楔三种作用的千斤顶，见图 3-17。

由楔块夹住预应力钢丝，当向张拉缸供油时，分丝头顶住锚圈，张拉缸、楔块与预应力钢丝一起向后移动。张拉工序完成后，顶压缸进油顶紧锚塞。顶锚完毕后，张拉缸回油，退楔缸进油，张拉缸前移直至夹丝楔块顶住退楔翼板，使楔块顶松而退出楔块为止。当两个油缸均回油时，在弹簧力的作用下，顶压活塞杆后移复位。



1—张拉缸；2—顶压缸；3—钢丝；4—楔块；5—活塞杆；6—弹簧；7—锚塞；8—锚环(圈)。

图 3-17 TD60 型锥锚式千斤顶构造

4. 高压油泵

预应力高压油泵是预应力液压机具的动力源。油泵的额定油压和流量，必须满足配套机具的要求。大部分预应力液压千斤顶都需要油压在 50 MPa 以上，流量较小，能够连续供油，供油稳定，操作方便。高压油泵按驱动方式，分为手动和电动两种。目前，国内生产的大部分为电动式高压油泵。预应力混凝土行业应用最广的是 ZB3/630 型和 2ZB4-50 型电动油泵。

3.1.5 混凝土施工设备及应用

混凝土工程是混凝土结构工程的一个重要组成部分，其质量直接关系到结构的承载能力和使用寿命，而混凝土施工设备对混凝土质量起着重要的作用。混凝土机械主要包括混凝土搅拌机、混凝土搅拌站(楼)、混凝土搅拌运输车、混凝土输送泵及泵车和振动机械等。

1. 混凝土搅拌机

混凝土搅拌机按照搅拌原理，可分为自落式和强制式两类。

自落式搅拌机指搅拌叶片和拌筒之间无相对运动。自落式按形状和出料方式，又可分为鼓筒式、锥形反转出料式、锥形倾翻出料式。自落式多用于搅拌塑性混凝土和低流动性混凝土，具有机件磨损小、易于清理、移动方便等优点，但动力消耗大、效率低，适用于施工现场。

强制式搅拌机指搅拌机搅拌叶片和拌筒之间有相对运动。强制式搅拌机主要用于搅拌干硬性混凝土和轻骨料混凝土，也可搅拌低流动性混凝土，具有搅拌质量好、生产率高、操作简便、安全等优点；但机件磨损大，适用于预制场使用。

2. 混凝土搅拌站(楼)

搅拌站(楼)的特点是制备混凝土的全过程机械化或自动化，生产量大、搅拌效率高、质量稳定、成本低、劳动强度减轻。搅拌站与搅拌楼的区别是：搅拌站(图 3-18)的生产能力较小，结构容易拆装，能组成集装箱转移地点，适用于施工现场；搅拌楼(图 3-19)体积大，生产效率高，只能作为固定式的搅拌装置，适用于产量大的预拌(商品)混凝土供应。

搅拌站(楼)主要由物料供给系统、称量系统、控制系统和搅拌主机四大部分组成。

物料供给系统，指组合成混凝土的砂子、石、水泥、水等几种物料的堆积和提升系统。砂和石料的提升，一般是以悬臂拉铲为主，另有少部分采用装载机上料，配以皮带输送机输送的方式。水泥则以压缩空气吹入散装的水泥筒仓，辅之以螺旋机和水泥秤供料。搅拌用水

一般用水泵实现压力供水。



图 3-18 搅拌站



图 3-19 搅拌楼

称量系统对砂石一般采用累计计量，水泥单独称量，搅拌用水一般采用定量水表计量。

控制系统一般有两种方式：一种是开关电路，继电器程序控制；另一种是采用运算放大器电路，增加了配比设定，落实调整容量变换等功能。近几年，微机控制技术开始应用于搅拌站(楼)控制系统，从而提高了控制系统的可靠性。

主机系统搅拌主机的选择，决定了搅拌站(楼)的生产率。自落式和强制式搅拌机均可作为搅拌站(楼)的搅拌机。

3. 混凝土搅拌运输车

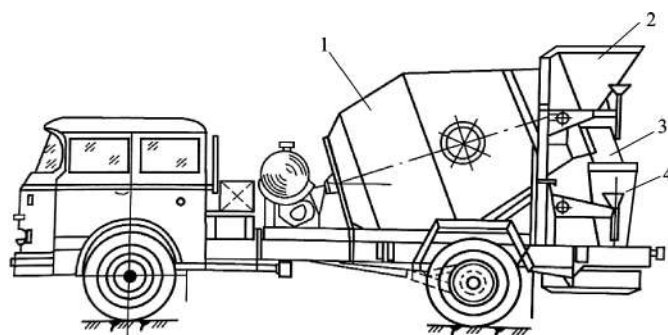
混凝土运输机具设备的选择，应根据结构物特点、混凝土浇灌量、运距、现场道路情况以及现有机具设备等条件确定。

混凝土的水平运输，短距离多用双轮手推车、机动翻斗车、轻轨翻斗车，长距离则用自卸汽车、混凝土搅拌运输车等。

混凝土搅拌运输车，是一种用于长距离运输混凝土的施工机械。它是将运输的搅拌筒安装在汽车底盘上，把在预拌混凝土搅拌站生产的混凝土成品装入拌筒内，然后运至施工现场，在整个运输过程中，混凝土的搅拌筒始终在做慢速转动，从而使混凝土在长途运输后，仍不会出现离析现象，以保证混凝土的质量。混凝土搅拌运输车及其结构见图 3-20、图 3-21。



图 3-20 混凝土搅拌运输车



1—搅拌筒；2—进料斗；3—卸料斗；4—卸料溜槽。

图 3-21 混凝土搅拌运输车结构

4. 混凝土输送泵和混凝土泵车

混凝土输送泵(图 3-22)是利用水平或垂直管道,连续输送混凝土到浇筑点的机械,能同时完成水平和垂直输送混凝土,工作可靠。混凝土输送泵适用于混凝土用量大、作业周期长及泵送距离远和高度较大的场合。

混凝土泵车属于自行式混凝土泵,是把混凝土泵和布料装置直接安装在汽车的底盘上的混凝土输送设备,如图 3-23 所示。它的机动性好、布料灵活,工作时无须另外铺设混凝土管道,使用方便,适合大型基础工程和零星分散工程的混凝土输送。它的缺点是布料杆的长度受汽车底盘限制,泵送的高度较小、距离较短。混凝土泵根据驱动方式主要有两类:挤压泵和柱塞泵(活塞泵)。后者又可分为机械传动和液压(水压或油压)传动两种。我国主要发展柱塞泵(活塞泵),此种泵自动化程度高,水平输送距离达到 200~500 m,垂直运距通常在 50~100 m,排出量为 30~60 m³/h。挤压泵的输送距离较柱塞泵短,其水平运距在 200 m 内,垂直运距在 50 m 内。新型混凝土泵仍在不断问世,水平和垂直运距都有新的突破。



图 3-22 混凝土输送泵



图 3-23 混凝土泵车

5. 混凝土振动器

混凝土振动设备——混凝土振动器，是一种借助动力，通过一定装置作为振源产生频繁的振动，并使这种振动传给混凝土，以振动捣固混凝土的设备。合理选择和正确使用混凝土振动器，不但可以提高混凝土浇筑速度和质量，而且可以降低工程成本，改善劳动条件，是人工振捣无法达到的。

目前，经常使用的振动设备按振动传递方式分类，有插入式振动器、平板式振动器、附着式振动器和振动台等。

1) 插入式振动器

插入式振动器又叫内部振动器，主要由振动棒、软轴和电动机3部分组成。振动棒工作部分长约500 mm，直径35~50 mm，内部装有振动子，电机开动后，振动子的振动使整个棒体产生高频微幅的振动。振动棒和混凝土接触时，便将振动能量传给混凝土，很快使混凝土密实成形。一般只需20~30 s的时间，即可把棒体周围10倍于棒体直径范围内的混凝土振捣密实。插入式振动器主要用于振动各种垂直方向尺寸较大的混凝土体，如桥梁墩台、基础、柱、梁、坝体、桩及预制构件等。

根据振动原理的不同，可把插入式振动器分为偏心式和行星式两种。偏心式是在振动棒中心安装具有偏心质量的转轴。偏心转轴在电机带动下，高速旋转时产生的离心力将振动传给振动棒外壳。而行星式是振动棒内部安有一带有滚锥的转轴，转轴在电机带动下，其滚锥沿滚道公转从而使棒体产生振动。电动硬轴插入式振动器结构如图3-24所示。

2) 平板式振动器

平板式振动器(图3-25)属外部振动器。它是直接放在混凝土表面移动进行振捣工作，适用于坍落度不太大的塑性、半塑性、干硬性、半干硬性的混凝土，或浇筑层不厚、表面较宽敞的混凝土捣固，如水泥混凝土路面、平板、基础、拱面等。在水平混凝土表面振捣时，平板式振动器是利用电动机振子所产生的惯性水平力自行移动，操作者只需控制移动的方向即可。平板与混凝土接触，使振波有效地传给混凝土，使混凝土振实至表面出浆，不再下沉。

3) 附着式振动器

附着式振动器(图3-26)也属于外部振动器，其振动构造同于平板式振动器的工作部分。由于振动作业方式的不同，附着式振动器靠底部的螺栓或其他锁紧装置固定安装在模板外部(或滑槽料斗等)。振动器的能量是通过模板传给混凝土，从而使混凝土被振捣密实。附着式振动器的振动作用半径不大，仅适用于振捣钢筋较密、厚度较小等不宜使用插入式振动器的结构。

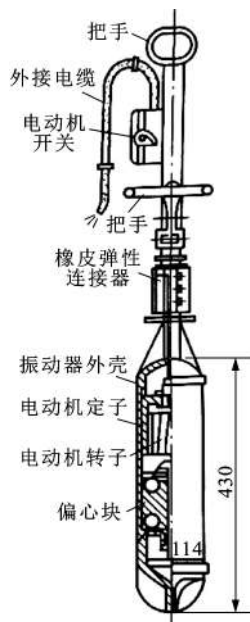
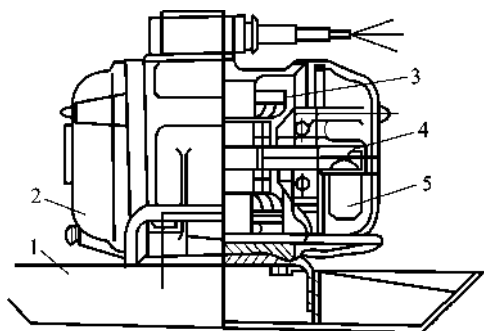
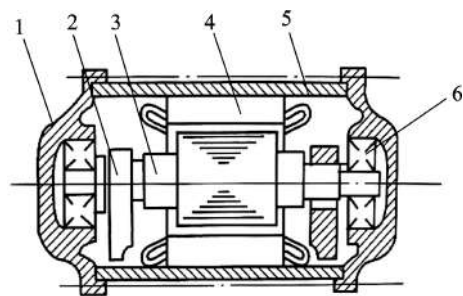


图 3-24 电动硬轴插入式振动器结构示意图(单位: mm)



1—底板；2—外壳；3—定子；4—转子轴；5—偏心块。

图 3-25 平板式振动器构造示意图

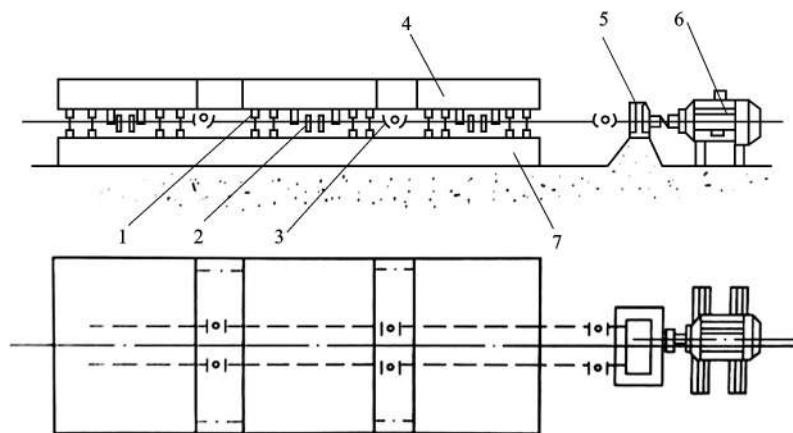


1—电动机密封端盖；2—偏心块振动子；3—转子轴；
4—电动机定子；5—机壳；6—轴承。

图 3-26 附着式振动器构造示意图

4) 振动台

振动台为一个支承在弹性支座上的工作平台，平台下设有振动机构。混凝土振动台是由电动机、同步器、振动平台、固定框架、支承弹簧及偏振子等组成(图 3-27)。工作时，振动机构做上下方向的定向振动。振动台具有生产效率高、振捣效果好的优点，主要用于混凝土制品厂预制件的振捣。混凝土振动台需承受强力振动而使混凝土振实成形，故应安装在牢固的基础上。混凝土构件厚度小于 200 mm 时，可将混凝土一次装满振捣；如厚度大于 200 mm，则需分层浇筑，每层厚度不大于 200 mm 时，可随浇随振。



1—弹簧座；2—偏心振动子；3—联轴器；4—振动台面；
5—同步器；6—电动机；7—底座。

图 3-27 混凝土振动台的结构

3.2 施工常用机械设备

3.2.1 浮吊

在通航河流上建桥,浮吊是重要的工作船(图3-28)。常用的浮吊有铁驳轮船浮吊和用木船、钢及人字扒杆等拼成的简易浮吊。在跨海桥梁工程项目中都采用预制安装法施工,如加拿大联邦大桥(Confederation Bridge),上部结构预制构件的最大重量就有7500 t,这就需要起吊能力大的专用浮吊。



图3-28 浮吊

通常简易浮吊可以利用两只民用木船组拼成门船,用木料加固底舱,舱面上安装型钢组成底板构架,上铺木板,其上安装人字扒杆。对于起重动力,可使用双筒电动卷扬机一台,安装在门船后部中线上。制作人字扒杆的材料可以是钢管或圆木,并用两根钢丝绳分别固定在民船尾端两舷旁的钢构件上。吊物平面位置的变动由门船移动来调节。另外还需配备电动卷扬机绞车、钢丝绳、锚链、铁锚作移动及固定船位用。

3.2.2 缆索起重机

缆索起重机适用于高差较大的垂直吊装和架空纵向运输,吊运量几吨至几十吨,纵向运距几十米至几百米。缆索起重机是由主索、天线滑车、起重索、牵引索、起重及牵引绞车、主索地锚、塔架、风缆、主索平衡滑轮、电动卷扬机、手摇绞车、链滑车及各种滑轮等部件组成。在吊装拱桥时,缆索吊装系统除了上述各部件外,还有扣索、扣索排架、扣索地锚、扣索绞车等。其布置方式见图3-29。

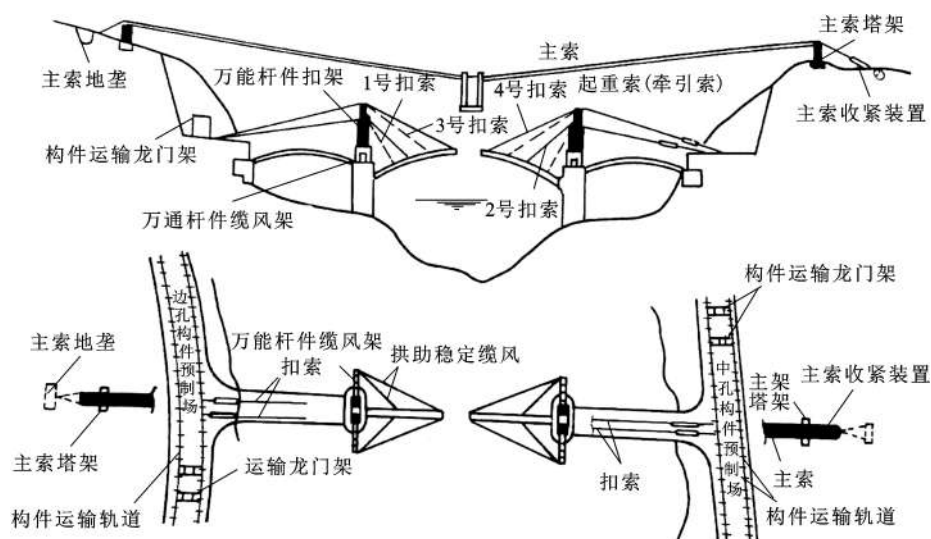


图 3-29 缆索吊装布置示例图

3.2.3 架桥机

目前我国使用的架桥机类型很多，其构造和性能也各不相同，最常用的有单梁式架桥机、双梁式架桥机、联合架桥机和吊运架一体式架桥机等类型。另外，结合逐孔施工方法的有上行式、下行式预制拼装架桥机和移动模架等。

1. 双梁式架桥机

双梁式架桥机(图 3-30)主要由导梁、台车、机臂、前端门架与前支柱、后端门架与后支柱、吊梁桁车及发电室等几部分组成。此架桥机的特点如下：

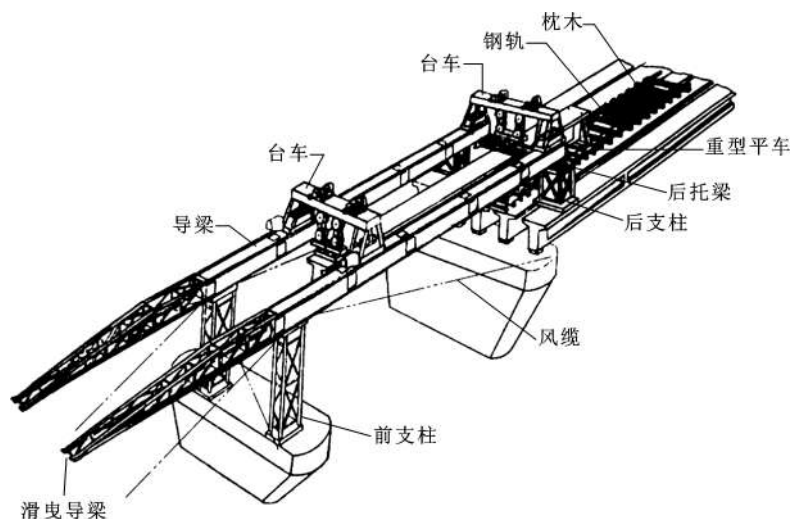


图 3-30 双梁式架桥机安装示意图

- (1) 架桥机吊梁行车可直接在运梁平车上起吊梁, 不需换装。
- (2) 架梁时, 由于吊梁行车可横向移动, 因此每片梁均能一次就位, 不需要人工在墩台上移梁。
- (3) 机臂能做水平转动, 可在 250 m 半径的曲线线路上架桥。
- (4) 架桥机最大高度为 5.976 m, 最大宽度(不包括人行道)为 3.82 m, 因此, 可在隧道口和隧道内架桥。
- (5) 机臂前后两端均能架梁, 架桥机不需转向。此外, 双梁式架桥机还自带发电设备, 结构简单、操作方便, 便于养护维修, 适用于山区和地形复杂的铁路铺轨和架桥工作。

2. 吊运架一体式架桥机

吊运架一体式架桥机是一种具有吊梁、运梁、架梁多功能的架桥机, 由运架梁机和下导梁组成, 其结构见图 3-31。

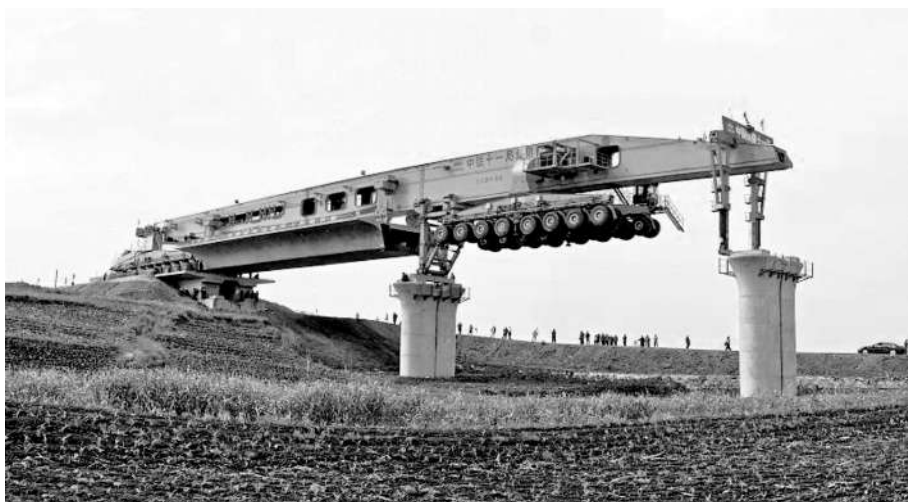


图 3-31 吊运架一体式架桥机架梁

架桥机的主梁分为 4 个节段, 通过高强度螺栓连接, 主梁铰接支承于前后轮胎式台车上, 整个架桥机共 24 对 48 轮(其中包括 4 对辅助轮对), 每对轮胎可随轴在水平面内回转 90°, 使整机既可纵行供梁到位, 又可横行取梁, 还可以靠液压联动转向系统在曲线上行进。此外, 每对轮胎均装有液压升降装置、制动装置。架桥机的起升机构由卷扬机、钢丝绳、滑轮组实现三点起吊, 使被吊梁体在吊、运和落梁时能保持最佳平衡。下导梁分为 6 个节段, 由高强度螺栓连接。导梁支腿包括后支腿、主支腿、前支腿、辅助支腿, 另有支腿吊装架和运行小车。

3. DP450 架桥机

DP450 架桥机(图 3-32)主要由主梁、支腿(前支腿、后支腿和辅助中支腿)、起吊天车、调梁小车、吊挂系统、电气控制系统、液压系统等组成。

DP450 架桥机的特点如下:

- (1) 采用单主梁结构, 前端 2 节为空腹轻型“格构式”箱梁, 后部 4 节为实腹加强型“Π”

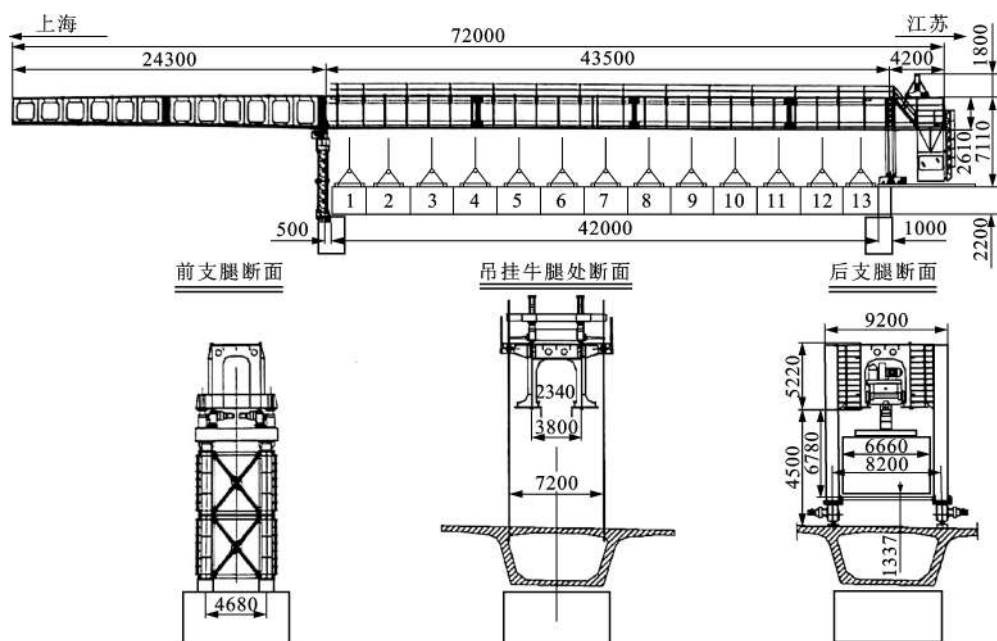


图 3-32 DP450 架桥机结构示意图(单位: mm)

形断面,起吊天车穿行腹内,调梁小车骑跨梁顶,结构新颖,受力明确。

(2)可实现变跨架设,通过调整前支腿、中支腿位置即可实现。

(3)全面采用变频技术。所有走行、移位均采用自动走行、变频调速,整机采用 PLC 程序控制技术,实现了平稳启动和制动,安全可靠。

(4)前、后支腿在工作时(架梁)与桥墩或桥面设有可靠的锚固机构,可确保稳定及安全。支腿上端设托辊机构和螺旋顶,过孔时托辊支承架桥机主梁,架梁时由螺旋顶支撑导梁。辅助中支腿为轮轨式台车形式,利用运梁道自动独立走行移位,上部为托辊机构,在整机过孔移位时,由托辊支承托移架桥机纵移过孔;下部由车架轮轨和液压系统组成,站位工作时由 4 台 120 t 油顶传递反力,架桥机整机横移时由轮轨直接传递反力。后支腿下部设有自动走行轮箱和 2 台 250 t 螺旋顶,架梁时轮轨脱空,由螺旋顶传递反力,纵、横移位时由轮轨直接传递反力,横移时,走行轮箱转向 90°横行。

(5)起吊天车:主要由卷扬机、滑车组、走行机构、自动旋转吊具等几部分组成,可实现吊运箱梁节段旋转,初步就位。

(6)调梁小车:主要由走行机构、液压支承柱及伸缩横梁等几部分组成,可实现箱梁节段的精确快速定位。

3.2.4 移动模架(造桥机)

移动模架(造桥机)是以钢桁梁或钢箱梁作为临时支撑梁,提供一个在桥位逐跨现浇梁体混凝土后,能顺桥轴线纵向移动的制梁平台设备。

移动模架(造桥机)(图3-33)分为上行式(移动悬吊模架)和下行式(支承式活动模架)两种,模架主梁在现浇钢筋混凝土梁体上面称为上行式移动模架;模架主梁在现浇钢筋混凝土梁体下面称为下行式移动模架。

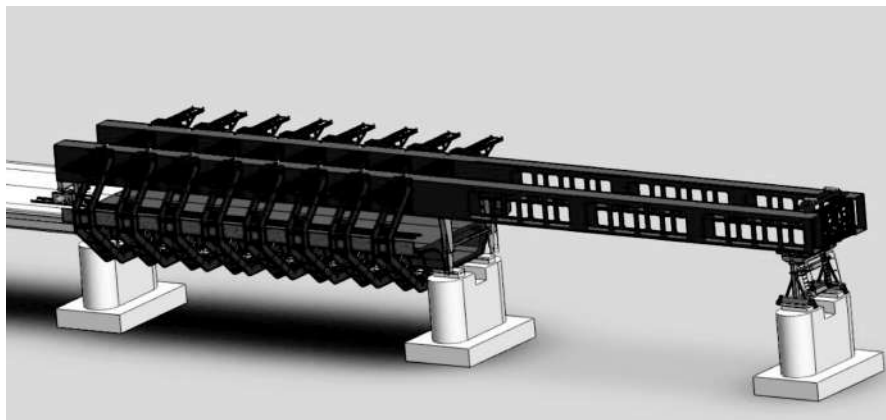


图3-33 移动模架(造桥机)

移动模架由承重系统、模板系统、模架支承系统及液压走行系统组成。其中,承重系统由设置在箱梁腹板外侧的两根主梁组成,主梁的前后端为导梁,用于导向和纵移,中部为承重梁,用于支承施工荷载;设置在承重梁间的模板系统包括底模、外侧模、内模及模板支承框架等部件;模架支承系统为设置于桥墩两侧的托架(或辅助墩),托架上设有供活动模架前移的液压走行系统。整个模架通过机械装置、液压装置和机械手完成控制操作。

思考与练习

- 3-1 万能杆件的组成及各组成部分的作用?
- 3-2 移动模架的组成?
- 3-3 试述穿心式液压千斤顶进行后张法的基本步骤。
- 3-4 试述锚具的类型。