

1 钢桥的发展与垮塌事故

直到公元 19 世纪，木材和砌体（砖和石块）一直都是最重要的桥梁建筑材料。公元前 6 世纪，巴比伦人开始用柏木和松木搭建桥梁，罗马人用石块和混凝土建造拱桥。以钢铁作为主要承载结构材料的桥梁起源于英国，1779 年，英国建成了世界上第一座铸铁拱桥。随着经济和社会的发展，桥梁用材料、结构形式和设计计算理论的发展促进了钢结构桥梁向大跨和轻柔方向发展，如图 1.1 所示^[1, 2]。

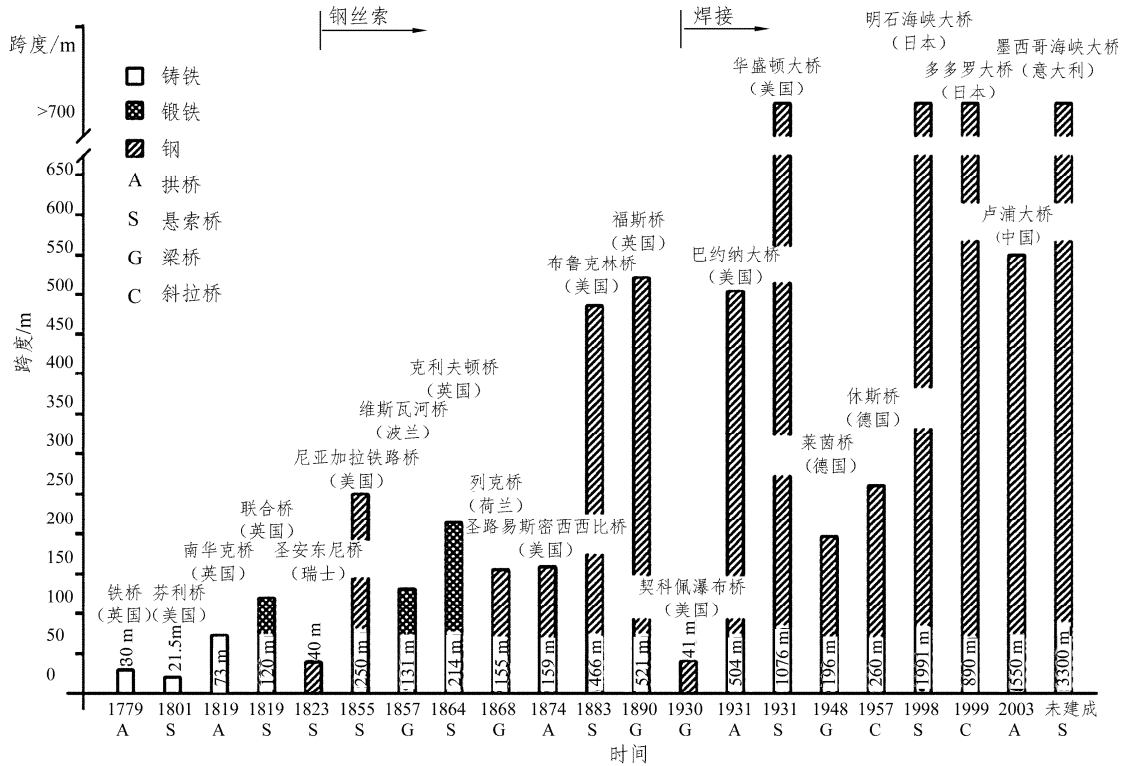


图 1.1 钢桥发展历程

钢铁材料性能的不断提高是钢桥发展的基础。钢材经历了从铸铁、铸钢、精炼钢、沸腾钢、镇静钢、低合金高强度钢到高强度性能钢的过程。钢材既需适应制造工艺的要求，又要满足运营阶段的使用要求，需要不断调整和改善其化学成分和主要力学性能以符合结构需要。同时，钢桥的连接方式也经历了铆接、铆接到栓接和焊接的过程，使得钢桥施工更快捷，成本更低。随着钢桥跨度的增大，如何保证施工和运营阶段桥梁安全是结构设计面临的主要问题。在长期的钢桥工程实践过程中，在现代力学和数学发展的推动下，设计理论经历了经验设计法、容许应力设

计法和极限状态设计法^[3-5]的发展过程。这些理论和方法指导了钢桥的设计和施工。钢桥结构形式的发展几乎和材料、设计理论的发展是同步的。拱桥、梁桥和缆索承重桥梁充分应用了钢铁材料的特性，吸收了设计理念和分析方法的发展成果，呈现出了复杂多样的钢桥结构形式。当然，钢桥的发展也并非一帆风顺，在材料、结构形式和设计理念的创新和实践过程中，因各种原因不可避免地发生了桥梁垮塌事故，损失惨重。这些事故促进了钢桥技术的发展，也让我们铭记发展的代价，前事不忘，后事之师，这也正是本书的目的所在。

1.1 桥梁用钢铁材料的发展历程

1.1.1 概 述

钢，或称钢铁、钢材，是一种由铁与其他元素结合而成的合金，其他元素当中最普遍的是碳。人类认识和利用铁合金的历史已经超过 3000 年。最早使用火炉或壁炉熔炼，利用化学还原反应从矿石中得到铁，但这种工艺的生产规模很小、效率低、含碳量高。直到 17 世纪，欧洲才开始以焦炭代替木炭，采用高炉把铁矿炼成生铁，使得钢铁可以大规模生产。1856 年，英国人贝塞麦（H.Bessemer）发明了底吹酸性转炉炼钢法，以后被称为贝塞麦转炉炼钢法，从此开创了大规模炼钢的新时代。1879 年，英国托马斯（S. G. Thomas）创造了碱性转炉炼钢法，一般称托马斯转炉炼钢法。造碱性渣除磷适用于西欧丰富的高磷铁矿的冶炼。1891 年，法国人特罗佩纳（Tropenas）创造了侧面吹风的酸性侧吹转炉炼钢法，曾经在铸钢厂得到应用。1856 年，英国人西门子（K.W.Siemens）使用了蓄热室，为平炉的构造奠定了基础。1864 年，法国人马丁（Pierre-Émile Martin）利用西门子发明的带蓄热室的火焰炉，用废钢和生铁成功地炼出了钢液，发展出了平炉炼钢法，成为当时世界上主要的炼钢方法。平炉炼钢法的最大缺点是冶炼时间长（一般需要 6~8 h），燃料耗损大（热能的利用率仅 20%~25%），基础设施投资和生产费用高。1952 年，奥地利在林茨（Linz）和多纳维茨（Donawitz）的钢厂建立 30 t 氧气顶吹转炉车间，后来取这两个名字的首字母称氧气顶吹转炉炼钢法为 LD 炼钢法。1950 年代，LD 炼钢法传播到世界各国，逐步取代平炉炼钢法。

根据碳含量的不同，钢铁可分为铸铁、锻铁和钢材。铸铁含碳量高，一般由浇铸而成，抗压强度高，但抗拉强度低。锻铁含碳量较低，具有较好的抗腐蚀性、韧性和延展性，硬度和强度较低。钢材碳含量居中，综合性能优异。以上三种材料特性如表 1.1 所示。回顾铁合金结构的发展过程，一般可根据三种材料占主导地位期间大致分类如下：铸铁时代为 1780—1850 年，锻铁时代为 1850—1900 年，钢材时代为 1880 年至今。

表 1.1 铸铁、锻铁和钢材碳含量及强度

物质	碳含量范围/%	极限强度范围/MPa	
		抗压	抗拉
铸铁	2.25 ~ 4.0	400 ~ 1 000	100 ~ 150
锻铁	0.02 ~ 0.05	250 ~ 400	250 ~ 400

钢材	0.2 ~ 1.0	350 ~ 700	350 ~ 700
----	-----------	-----------	-----------

1.1.2 铸铁桥梁时代 (1780—1850 年)

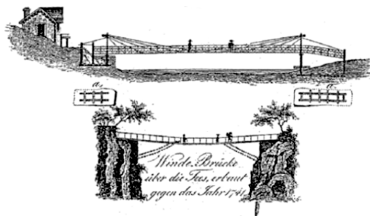
1. 拱 桥

相对于砌体拱桥，铸铁结构因自重小、水平推力小、成本低、工期短等优点，很快得到广泛应用。英国 1779 年建成了世界上第一座跨度为 30 m 的铸铁拱桥，这座桥虽充满了不合理的结构设计，还混杂着木结构和砌体结构的特征，但至今仍作为工业革命的遗迹供人瞻仰。此后，英国还建造了一系列的铸铁拱桥，如 1792—1796 年托马斯·威尔逊 (Thomas Wilson) 设计的跨径为 72 m 的威尔茅斯桥 (Wearmouth Bridge)，和约翰·伦尼 (John Rennie) 于 1819 年建成的跨度达到 73 m 的南华克大桥 (Southwark Bridge)。铸铁拱桥的高峰是托马斯·泰尔福 (Thomas Telford) 于 1823—1826 年建造的迈斯大桥 (Mythe Bridge)，虽然跨径只有 53 m，但结构合理且新颖。19 世纪前，在欧洲其他地方，铸铁拱桥还是非常罕见的，大多停留在设计方案阶段。路易斯-亚历山大 (Louis-Alexandre de Cessart) 于 1801—1803 年在巴黎建造的艺术桥 (Pont des Arts) 可能是最有名的，但非常可惜的是，它现在已经被一座外形相似的焊接钢桥所替代。俄罗斯也有一些早期铸铁拱桥。1840 年后，铸铁被认为是一种不可靠的材料而退出桥梁结构领域，特别是 1847 年迪桥 (Dee Bridge) 垮塌后。

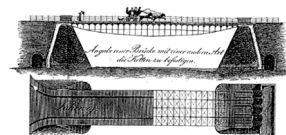
2. 缆索承重桥

缆索承重桥实际上是一种古老的桥型，最早由藤蔓上铺设木板而成，后来有人提出使用铸铁来制造缆索，但逐渐被锻铁替代。我国在 1476 年 (明成化年间) 就在澜沧江上建造了单跨为 60 m 的铁索吊桥——霁虹桥，可惜于 1986 年被洪水冲毁，否则将是我国现存最古老的铁索桥，比闻名于中外的泸定桥还早二百多年。英国于 1741 年建成的首座铁索人行桥，跨度为 21 m、桥宽 1 m。德国 1785 年在魏尔堡 (Weilburg-an-der-Lahn) 修建了一座悬索式引水渠，并沿用至 1933 年。19 世纪后欧洲修建了很多缆索承重桥梁，如图 1.2，主要包括 4 种典型结构形式：

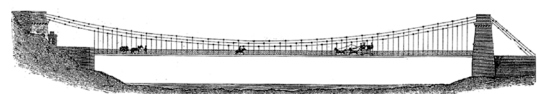
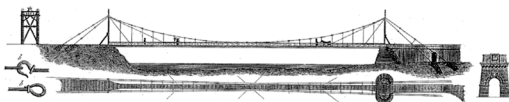
- (1) 悬索桥，如图 1.2 (a) 所示的 1741 年英国的温奇桥 (Winch Bridge)。
- (2) 斜拉桥，如图 1.2 (b) 所示的建于 1817 年的国王草甸桥 (King's Meadow Bridge)。
- (3) 斜拉悬吊组合桥，如图 1.2 (c) 所示的 1838 年重修的德雷堡修道院桥 (Dryburgh Abbey 2nd)。
- (4) 悬索桥，如图 1.2 (d) 所示的联合桥 (Union Bridge)。国王草甸桥和德雷堡修道院桥都是人行桥。尤其德雷堡修道院桥，桥宽仅 4 英尺 (1.22 m)。



(a)



(b)



(c)

(d)

图 1.2 欧洲近代缆索承重桥梁

值得注意的是，第一座德雷堡修道院桥是一座无背索斜拉桥，跨中索面扇形布置，如图 1.3 所示。这座桥因刚度小桥面容易大幅度振动，在 1818 年 1 月 15 日的风暴中垮塌。

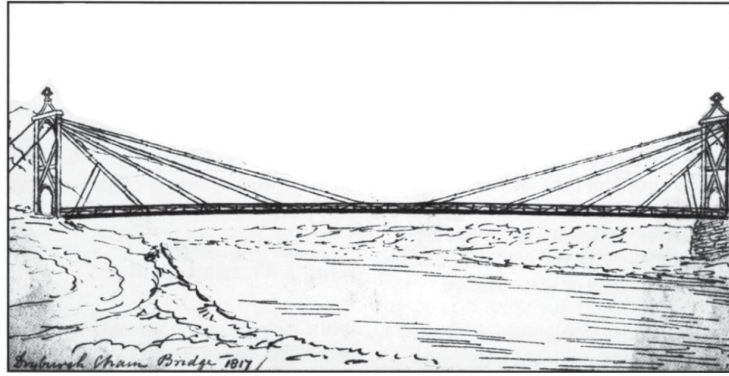


图 1.3 第一座德雷堡修道院桥

19 世纪上半叶，美国人在建筑领域主要使用木材而不是钢铁，直到詹姆斯·芬利（James Finley）于 1808 年建成第一座锻铁眼杆悬索桥。此后，悬索桥的主缆结构形式朝不同方向发展：根据芬利的提议，英国多采用锻铁眼杆组成的主缆结构，而法国更倾向于缆索，其原因是两国钢铁工业上的差异。1850 年前，法国曾建造过上百座悬索桥，主要归功于马克·赛昆（Marc Séguin）。然而 1850 年昂热悬索桥（Basse-Chaine Bridge）的垮塌造成了 226 人死亡，此后悬索桥在法国停滞了很多年。由于法国的影响，美国采用钢丝代替链杆，形成了一套标准结构形式。

早在 1784 年德国吕斯彻（Loscher）就曾提出斜拉桥的概念，1821 年法国人波耶特（Poyet）提出钢拉杆斜拉桥，1840 年英国哈特利（Hateley）提出平行布索。19 世纪就曾建造斜拉桥，但是因材料性能和计算分析手段的局限，斜拉桥发生多起垮塌事故，如 1825 年垮塌的宁堡斜拉桥（Nienburg Cable-stayed Road Bridge）就是一个代表。后来，法国工程师纳维尔（Navier）参观了英国 1818 年垮塌的斜拉桥并做了分析，虽然没否定斜拉桥设计，但提出了其建造的难点，明显降低了此后工程师建造斜拉桥的热情。因此，直到 1949 年德国工程师迪辛格尔（Dishinger）发表斜拉桥结构体系的研究，现代斜拉桥才开始发展。

1.1.3 锻铁桥梁时代（1850—1900 年）

锻铁又称熟铁，其应用于桥梁的时期是从 19 世纪 40 年代的铆接锻铁梁开始的，以不列颠尼亚桥（Britannia Bridge）和康威管状桥（Conwy Tubular Bridge）最为有名。桥梁工程师的代表人物是铁路工程师罗伯特·斯蒂芬森（Robert Stephenson），和拥有丰富建造铁船经验的工程师威廉·费尔贝恩（William Fairbairn）以及伊顿·霍奇金森（Eaton Hodgkinson）。

1845 年，在需要建造一座跨越梅奈海峡的铁路桥梁时，经过方案比选首先排除了拱桥和悬索桥，因为它们承载能力不足。斯蒂芬森等人于是提出了一种新的结构形式——箱梁，并

通过实验证明了锻铁箱梁结构具有足够的承载能力让火车在其内部通行。不列颠尼亚桥于 1850 年 3 月竣工，而康威大桥在稍早的 1848 年 12 月开通。值得一提的是，在建造不列颠尼亚桥的同时，斯蒂芬森还承担了大量其他铁路工程项目，包括纽卡斯尔建于 1846—1849 年的采用铸铁系杆拱的六跨高架桥和采用铸铁桁梁的迪桥。迪桥由于设计存在缺陷，1847 年通车后不久便发生了垮塌。

桁架形式来源于木结构，但铆接和锻铁的应用极大地开拓了桁梁的适用范围。不列颠尼亚桥一直因为比桁梁桥耗费材料而为人诟病，但这并不公允，因为 19 世纪 40 年代中期工程师对桁架的受力行为知之甚少。此后，各种结构形式的锻铁桥梁在世界范围内大量出现。在英国，伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔 (Isambard Kingdom Brunel) 的索尔塔什大桥 (Saltash Bridge) 建成于 1859 年，托马斯·鲍奇 (Thomas Bouch) 的泰河桥 (Tay Bridge) 于 1878 年竣工。在法国，居斯塔夫·埃菲尔 (Gustave Eiffel) 因在波尔图 (1875—1877 年) 和嘎拉比特 (1880—1884 年) 修建拱桥而闻名于世。在美国，查尔斯·埃利特 (Charles Ellet) 修建于 1847—1849 年的惠灵悬索桥 (Wheeling Suspension Bridge)，罗伯林 (John Augustus Roebling) 建成于 1855 年的尼亚加拉瀑布悬索桥 (Niagara Bridge)，及詹姆斯·布坎南·伊兹 (James Buchanan Eads) 修建于 1867—1874 年的伊兹桥 (Eads Bridge) 都声名远播。

1.1.4 钢桥时代 (1880 年至今)

钢材不仅比锻铁强度高，而且更容易加工。钢材与锻铁不易区分，两者都使用铆接，很多方面几乎完全一样。采用钢材的福斯桥 (Forth Bridge) 和采用锻铁的埃菲尔铁塔，几乎同时在 1889 年左右完成。钢材的发展动力首先来自于造船业，劳埃德船级社 (Lloyd's Register of Shipping) 在 1908 年要求所有船舶用钢都使用平炉炼钢。

采用钢材是桥梁跨度得以大幅度提高的主要原因，此时钢材的发展重心从英国转移至桥梁大国美国。一直到 1945 年，美国所有大跨悬索桥都采用高强钢丝，并在建造摩天大楼时普遍采用钢材。首先是 1893 年建成的费城火车站 (Philadelphia Railway Stations) 采用的大跨三角拱结构 (79 m 和 91 m 的跨度)；然后是为 1889 年巴黎世博会所建的机械展厅 (Galerie des Machines)，跨度 111 m，是圣潘克拉斯火车站 (St Pancras Railway Station) 的钢结构屋顶跨度的 1.5 倍。当然，这些跨度与第二次世界大战后的穹顶体育场相形见绌。1975 年建成的路易斯安那超级巨蛋 (Louisiana Superdome) 207 m 超级穹顶，跨度超过艾伯特音乐厅 (Albert Hall) 的 3.5 倍。钢材焊接技术从 20 世纪 20 年代开始发展起来，焊接和栓接在钢结构中占据了主导地位。

1.1.5 钢材的发展趋势

美、日、英、德等国用于钢桥的低合金高强度钢 (High Strength Steel, HSS)，其屈服强度达到 700 MPa。另外，耐候钢 (Weathering Steel) 和高性能钢 (High Performance Steel, HPS) 也得到持续开发和应用。普通钢材不能抵抗锈蚀，在使用过程中需定期涂装，这显著增加了养护费用。采用含铜、镁、钼、铝等元素的耐候钢，其表面能逐渐形成一层因锈蚀而

产生的保护膜，其附着性强，可阻止水和氧气的持续渗入，从而阻碍和减缓了钢材锈蚀。高性能钢则是一种综合优化了材料的力学性能、便于加工制造、适于低温和腐蚀环境、具备较高性价比的桥梁结构用钢。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、抗断裂和疲劳性能等方面都比传统钢材有明显的提高和改善。

1.2 钢桥结构形式的发展历程

1.2.1 概 述

在古代，由于桥梁与军事和贸易紧密相连，其建造技术意义重大，所以木桥和圪工桥的建造技术相当发达。古罗马人设立了一个直属于罗马皇帝的独立单位——桥梁工程师，近代法国国王如路易十四（Louis XIV）和拿破仑（Napoléon Bonaparte），也积极建立新型工程学校，如巴黎路桥学院（Ecole de Ponts et Chaussées）和巴黎综合理工学院（Ecole Polytechnique）。古代建桥技术主要依靠工匠们代代相传的经验，而不是基于力学和数学的指导。工业革命后钢铁材料的大规模低成本生产，为其在桥梁上的应用提供了坚实基础，于是钢（铁）桥结构大量借鉴了木桥和圪工桥设计原则和施工方法，如圪工桥提供了铸铁拱桥形式，木桥提供了钢桁架梁形式。随着高性能钢材和新施工方法的出现，适用于各种跨度的新型钢桥结构体系迅速发展起来。桥梁按照基本受力模式和发展历史不同可分为三类：拱桥、梁桥（包括桁梁、板梁、箱梁和其他受弯结构，如斜拉桥和系杆拱桥）和悬索桥。

1.2.2 拱 桥

拱桥以受压为主，而圪工材料抗压强度高，因此拱桥结构形式最适合石桥。古希腊时期拱桥已经在小亚细亚出现，到罗马时代达到全盛时期，当时罗马帝国广泛使用典型的拱式渡槽将水引入城市，如法国尼姆附近建于公元前 18 年的“嘉德水道桥”（Le Pont du Gard）（图 1.4），当时拱圈一般为半圆形，跨度不超过 40 m。中世纪时，为减轻结构自重并增大跨度，出现了坦拱桥，之后坦拱基于工程经验和数学理论得以发展成熟。洛多罗夫·佩罗内（J. R. Perronet）于 1791 年建成巴黎的“协和桥”（Pont de la Concorde）（图 1.5）。圪工拱桥的经验积累奠定了铸铁拱桥建造的技术基础。

1779 年，英国亚伯拉罕·达比三世（Abraham Darby III），在柯尔布鲁克代尔（Coalbrookdale）成功建造了第一座铁拱桥，如图 1.6，结构形式跟石拱桥很相似，但按照木结构的施工方法施工，采用了 5 个轻拱肋，跨度为 30 m，至今仍在使用。此前英、法等国都曾尝试建造铸铁拱桥，但都因铸铁抗拉强度很低和结构体系不合理而失败，此后铸铁桥梁很快便在英国普及并传播到其他国家。

随着铸铁桥梁建造技术的发展，铸造预制构件开始应用于拱桥，如 1796 年的英格兰威尔茅斯大桥（Wearmouth Bridge）跨度达到 72m。德国工程师赖兴巴赫（Reichenbach）采用铸铁管作为拱桥受压构件，这种经济的结构形式很快被广泛使用，其中杰出代表是由卡米耶·波隆梭（Polonceau）于 1839 年建成的巴黎三跨卡鲁塞尔桥（Carrousel Bridge），每

跨 48 m，如图 1.7。最大的铸铁拱桥为由约翰·伦尼（John Rennie）建造的跨越伦敦泰晤士河的萨瑟克区桥（Southwark Bridge），跨度 73 m，如图 1.8。后来铸铁拱桥遍布德国和法国。

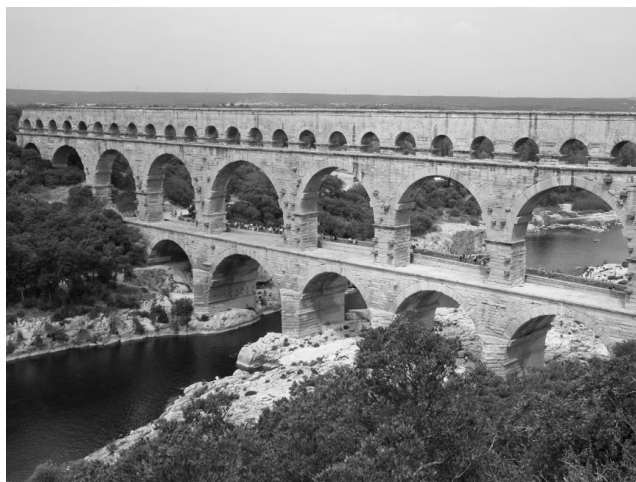


图 1.4 嘉德水道桥



图 1.5 巴黎“协和桥”

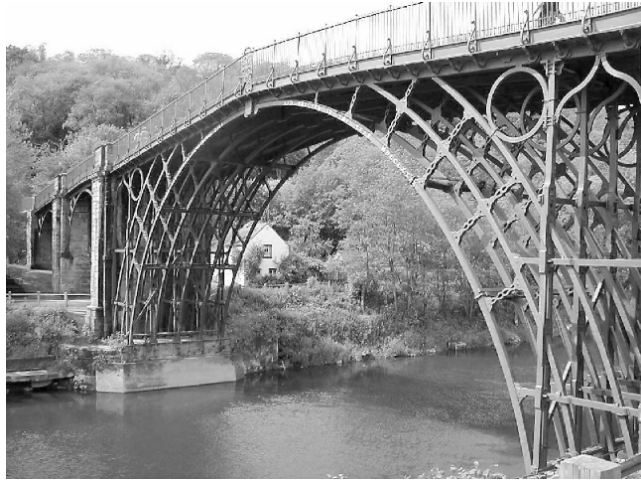


图 1.6 柯尔布鲁克代尔铁拱桥



图 1.7 卡鲁塞尔桥



图 1.8 萨瑟克区桥

托马斯·泰尔福 (Thomas Telford) 是当时最著名的工程师之一，他最初只是一个泥瓦匠，后来自学建筑学，在莱茵河上建造了三座桥梁，此后任职于运河公司，修建了约 900 英里 (1448.41 km) 的公路和两个跨越运河的大跨渡槽。1819—1826 年，泰尔福在梅奈海峡和康威河上修建了两座著名的链杆悬索桥，1828 年当选为英国土木工程师协会第一任主席。位于圣路易斯的伊兹桥由詹姆斯·布坎南·伊兹于 1874 年建成 (图 1.9)，采用部分为铁部分为钢的箱形构件来建造跨度为 159 m 的格构式拱桥。这是他修建的第一座桥梁，并成为当时世界上跨度最大的拱桥。

提到钢拱桥就不能不提居斯塔夫·埃菲尔，作为当时最伟大的工程师之一，他创立了世界闻名的工程公司 (钢桥，特别是拱桥方面) 和钢材制造公司 (埃菲尔公司, Société Eiffel)。埃菲尔善于设计桁架结构，是第一位进行钢结构完整细节设计和绘图的工程师。1878 年，埃菲尔修建的第一座桥梁是葡萄牙跨越多罗河 (Duoro) 的跨度为 160 m 的铁路桥。他设计的最美桥梁是 1884 年建成的法国嘎拉比特高架桥 (Viaduc de Garabit)，跨度为 165 m (图 1.10)。当然最著名的还是他修建的高 300 m 的埃菲尔铁塔 (La Tour Eiffel, 1889 年) 和自由女神像 (Statue of Liberty, 1886 年)。

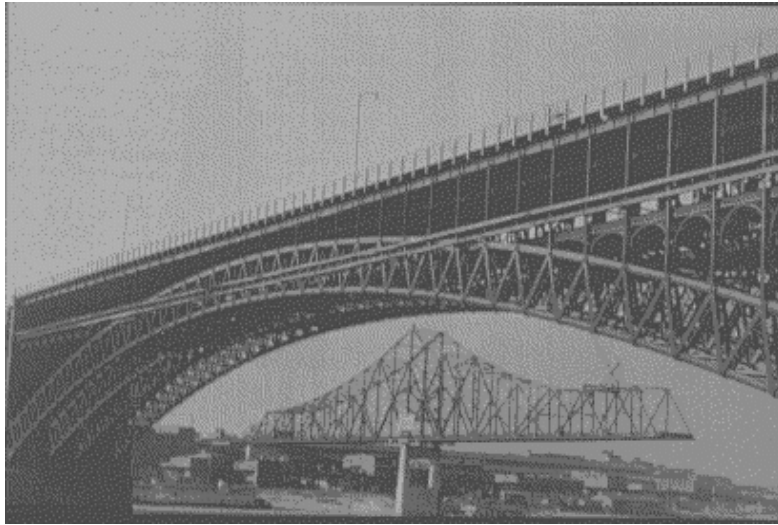


图 1.9 伊兹桥

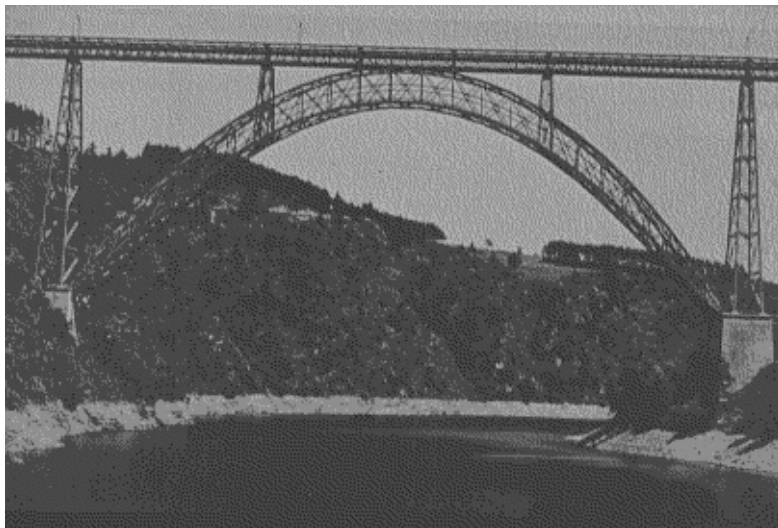


图 1.10 嘎拉比特高架桥

随着钢材性能的发展，结构跨度也随之增大。到 1930 年，最大跨度的拱桥为：安曼（O. H. Ammann）于 1931 年建造的跨度为 504 m 的新泽西巴约纳大桥（Bayonne Bridge），如图 1.11；弗里曼（R. Freeman）于 1932 年建造的跨度为 503 m 的悉尼港湾大桥（Sydney Harbour Bridge），如图 1.12。这两座桥都是中承式桁架拱桥。