



重返桥梁垮塌现场

——世界著名钢桥失效事故分析

叶华文 著



西南交通大学出版社

“西南交通大学 2018 年度研究生教材（专著）建设项目”资助

重返桥梁垮塌现场

——世界著名钢桥失效事故分析

叶华文 著



西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

重返桥梁垮塌现场：世界著名钢桥失效事故分析 /
叶华文著. —成都：西南交通大学出版社，2019.11
ISBN 978-7-5643-7255-2

I. ①重… II. ①叶… III. ①钢桥 - 垮塌 - 事故分析
- 世界 IV. ①U447

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 272272 号

Chongfan Qiaoliang Kuata Xianchang
—Shijie Zhuming Gangqiao Shixiao Shigu Fenxi

重返桥梁垮塌现场

——世界著名钢桥失效事故分析

叶华文 / 著

责任编辑 / 姜锡伟

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)
发行部电话：028-87600564 028-87600533
网址：<http://www.xnjdcbs.com>
印刷：四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 12 字数 301 千
版次 2019 年 11 月第 1 版 印次 2019 年 11 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7255-2
定价 68.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

序

我国以铁造桥是很早的，在清朝康熙年间就有世界最早用铁链建成的悬链桥，跨径达百米。但是之后我国闭关锁国、工业发展迟缓，造桥技术长期落后于西方。

西方钢桥建造技术始于英国。1779年，英国人用铸铁建造了一座桥，之后则是用锻铁造桥。随着钢铁冶炼、轧制技术的进步，建桥广泛采用结构钢，钢桥的跨越能力越来越大。高强钢丝的制备和应用，使缆索承重桥梁——斜拉桥和悬索桥的跨度迅速突破千米。

和圯工桥、木桥相比，钢桥有很多优点。西方发达国家钢铁产量大增时，许多钢桥便应运而生。由于对钢材性能、钢结构受力特点有一个认识过程，所以在钢桥建造过程中出了不少的问题，甚至发生了一些桥毁人亡的重大事故。

本书作者叶华文博士，论述了桥梁钢铁材料的发展历程，钢桥结构的发展历史，钢结构桥梁设计方法的发展。本书详细介绍了14个桥梁事故，除了详述这些桥梁事故的基本情况外，还就其垮塌或损伤原因进行了较为详细的分析，对一些桥的关键参数进行了分析，对部分桥梁的修复和重建进行了介绍。对于桥梁建设者来说，这都是十分宝贵的经验和教训。前车之鉴，后事之师。认真分析了解已发生的桥梁损伤和垮塌事故，对我们建好新桥和维护好正在服役的桥梁是大有裨益的。

由于我们对桥梁结构及其构件稳定性认识不足，导致很多桥梁损伤和垮塌。古时候修桥主要靠工匠的经验和判断。随着科技的进步，人们逐渐认识了桥梁的结构特点及受力特点，引入了数学力学模型，通过计算分析了解整个结构及其各个部件的受力情况。钢桥在刚出现时，主要是钢材的强度控制设计，随着冶金技术的提高，钢材的强度越来越高，很长时间各国建桥用钢大都属于Q235这一级别，现在已常用Q500或更高级别的钢材。这样一来，强度条件较易满足，于是结构及其构件朝着轻、柔的方向发展。这样，在结构设计中就必须考虑结构和构件的稳定问题。在传统的设计中，设计者都是用欧拉理论计算结构和构件的临界应力。在建桥实践中，人们发现用欧拉理论计算受压构件偏于不安全，因此采用较高的安全系数，不少资料建议取大于或等于4的安全系数；而对于承剪腹板，欧拉临界应力则偏于保守，建议取较小的安全系数。1969—1971年，5座钢箱梁垮塌事件（奥地利维也纳多瑙河第四桥、墨尔本亚拉河西门桥、英国米尔福港大桥、西德科布伦茨茨桥、东德措伊伦罗达桥）促使人们重新审视欧拉稳定理论。在这些研究中，英国梅里逊委员会的报告得到了较为广泛的认同。梅里逊报告认为，欧拉理论是针对理想平直构件，在理想受力条件（理想支撑和中心加载）下推演出来的。其试验支持也是用小型构件在实验室接近于理想条件下完成的。而工程实用构件尺寸大，无法达到理想的平直状态。因此在做结构稳定分析时，不能略去构件的几何初始缺陷（初曲矢度）和物理初始缺陷（主要是焊接残余应力）。对于受压构件，计算和试验都表明，有初始缺陷的实用构件，其极限承载力远低于用欧拉理论算得的屈曲荷载。而对于承

剪腹板，由于有周边构件（上、下翼缘和加劲肋）的帮助，在其达到临界剪应力时，在周边构件帮助下仍可以斜向拉力承受进一步增加的剪力，这种现象称为屈曲后承载力。基于此，人们把针对工程实用构件，计及其初始缺陷的稳定计算称为第二类稳定理论，而把针对理想构件按理想边界条件计算的欧拉理论称为第一类稳定理论。

可以说，桥梁结构整体失稳或因一个构件失稳而导致桥梁整体坍塌是桥梁失事的最重要的原因之一。本书对此有详细论述，读者可从中细细分析失稳的原因和事故发展的全过程，以便汲取教益，在桥梁设计、制造、架设和管理维修中堵住每一个可能导致构件和结构失稳的漏洞。动力失稳也是桥梁坍塌的一个重要原因，例如美国的塔科马桥。由于缆索承重结构（斜拉桥和悬索桥）跨越能力大，现在越来越多的大跨桥梁都采用斜拉桥或悬索桥，它们的风致振动失稳越来越被人们重视。

桥梁结构失事的另一重要原因是疲劳断裂。人们很早就认识到钢桥疲劳断裂现象，但究其原因，则有多种看法和分析处理方法。直到 20 世纪 70 年代美国 Fisher 教授从一批试验得出结论，认为其内因是因为构造细节的焊接缺陷，外因是活荷载的应力幅（即最大活载应力与最小活载应力之差）。这一认识已得到全世界的普遍认可，并纳入了许多国家的桥梁设计规范。在桥梁设计、加工制造和安装过程中，要特别注意构造细节的处理，尽力避免出现会产生应力突变、应力集中的构造，合理选择焊缝设计，避免难以保证焊接质量的焊缝，尽量避免焊缝集中、交叉。对所选焊接工艺的评定，焊接质量都要慎之又慎。

钢桥通常是在工厂制造安装成一个大的节段，这样可以保证制造质量，之后运往桥址安装成桥，这大大加快了建桥速度。但是节段在制造、运输及安装过程中，经常会受到运输能力、起吊安装能力的限制，以及遇到一些意外情况，工程师们在处理这些问题时往往考虑不周、措施失当而造成重大事故。如澳大利亚墨尔本西门桥，该桥原设计为钢箱梁截面，抗扭刚度相当大，在桥梁节段吊装阶段，由于起吊能力不足，乃决定将箱梁段在纵向中心线处切开，这样分开的梁段成了开口截面，抗扭刚度极小，在起吊过程中发生了较大的扭转变形，致使两部分产生了较大高差，为消除这一高差，乃采用压重，这一错误措施不仅没有减小高差，反而使两梁段高差进一步扩大（实际上是一种变相失稳现象），同时由于压重在翼板上产生了很大的弯曲压应力（见第 1 章），导致上翼板压曲失稳，随之，全桥垮塌，多人死伤。这是一个很严重的事故。这说明，在桥梁建设过程中，临时处置措施不当是十分危险的。

这本书详述了历史上发生的重大钢桥事故，还罗列了 2000—2014 这 15 年内国内外发生的桥梁事故共 194 起，其中先天夭折达 77 次，自然灾害引起的有 52 起，人为灾害引起的有 65 起。除了部分自然灾害引起的事故是人力无法抗拒之外，大部分桥梁垮塌事故都与我们的认识能力、责任心等人为因素有关。认真了解前人的失误，提高我们的建桥水平，避免历史悲剧重演，是我们桥梁建设者的责任。这本著作对桥梁工程专业本科生和研究生都是大有裨益的，对所有桥梁建设者都有参考意义。

强士中

2019 年 10 月 11 日

自序

我国交通基础设施建设正处于高速发展时期，公路通车总里程已经超过 500 万千米，各类桥梁突破 100 万座。交通系统是关乎国计民生的生命线工程，而桥梁结构是该生命线工程正常运营的关键性枢纽，其结构安全和服役性能对保障人民生活和经济发展具有重要意义。钢结构桥梁因其自重轻、力学性能优越、工业装配化程度高、综合经济效益显著、造型美观等众多优点，正在显示出无与伦比的优势和无穷的魅力。在全球范围内对环境保护日益重视的时代，在我国经济和社会结构快速转型的背景下，钢桥大有用武之地。

当我们在回顾钢桥的发展历程，展望其美好前景的同时，世界范围内的各类钢桥垮塌事故频繁发生，英国泰河桥、加拿大魁北克桥、美国塔科马桥、澳大利亚西门桥等轰然倒塌的情景至今仍历历在目，鲜活的生命瞬间消失于钢铁丛林之中，惨痛的教训让全世界的结构工程师认识到开展钢桥垮塌事故分析的重要性。

桥梁垮塌事故是一个复杂的系统性问题，涉及材料、设计、施工和运营管理，往往没有简单且显而易见的原因。世界各国陆续出版了一批有关桥梁垮塌事故的书籍，但大都侧重于传统的砌体结构和钢筋混凝土结构，或是专注于综述桥梁垮塌原因，至今尚无一本针对世界典型钢桥垮塌事故案例，系统全面论述该事故的工程背景、连续垮塌过程和原因分析的专著。我国的工程技术人员对钢结构桥梁相对陌生，缺乏设计与施工经验，国内相关的出版物不多。因此，大规模的钢桥建造和过度依赖有限元软件的倾向也同时意味着事故风险的增加。另外，著者在长期的本科生课程“钢结构设计原理”和研究生课程“钢桥”教学生涯中深刻体会到学生理解和掌握钢桥垮塌事故前因后果的必要性。桥梁垮塌事故是前人以生命为代价换来的宝贵财富，值得珍视，以史为鉴，可以明得失，可以继往开来，这正是本书写作的目的所在。

全书根据典型钢桥失效案例分为 15 章。第 1 章系统地论述了钢桥在材料、结构形式和设计方法的发展历程以及发展过程中的桥梁垮塌事故。第 2~15 章按桥梁事故发生的时间分别为宁堡斜拉桥、泰河桥、魁北克桥、塔科马桥、银桥、五大钢箱梁桥、塞文桥、阿摩尔桥、I-35W 和 I-895 桥。本书力求理论联系实际，图文并茂，并注重实用性。作者的硕士和博士研究生导师强士中教授阅读全书，提出了非常中肯的意见，并为本书作序，使本书质量得到显

著提高，在此感谢强老师的多年教诲和专业指导。多位学生参与了案例翻译与分析，分别为段智超（第2章）、吴传杰（第3、12章）、陈醉（第4章）、刘长孟（第5章）、王天琦（第6、9~11章）、胡劼成（第7章）、张庆（第8、14章）、王义强（第13章）、陈栋军（第15章），特向他们表示衷心感谢。对为本书出版付出辛勤劳动的西南交大出版社各位编辑表示敬意。在此还要特别感谢我的父母、妻子殷璐和儿子叶天民给我提供的巨大的精神和生活上的支持。

著者及其研究团队花费了多年的心血完成本书，但由于时间、水平及资料所限，书中难免存在不少的缺憾与不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2019年10月

目 录

CONTENTS

1 钢桥的发展与垮塌事故	001
1.1 桥梁用钢铁材料的发展历程	002
1.2 钢桥结构形式的发展历程	006
1.3 中国钢桥的发展历程	030
1.4 钢桥设计方法的发展历程	032
1.5 桥梁垮塌事故	035
参考文献	036
2 宁堡斜拉桥 (Nienburg Cable-stayed Road Bridge)	037
2.1 引 言	037
2.2 桥梁概况	037
2.3 垮塌过程	041
2.4 垮塌原因分析	042
2.5 结 论	046
参考文献	047
3 泰河桥 (Tay Bridge)	049
3.1 引 言	049
3.2 桥梁概况	049
3.3 垮塌过程	054
3.4 垮塌原因分析	054
3.5 重建后的泰河桥	057
3.6 结 论	059
参考文献	059
4 魁北克桥 (Quebec Bridge)	060
4.1 引 言	060
4.2 桥梁概况	060

4.3	垮塌过程	065
4.4	垮塌原因分析	067
4.5	重建后的魁北克桥	074
4.6	结 论	074
	参考文献	075
5	塔科马大桥 (Tacoma Narrows Bridge)	076
5.1	引 言	076
5.2	桥梁概况	076
5.3	垮塌过程	077
5.4	垮塌原因分析	078
5.5	重建后的塔科马大桥	082
5.6	结 论	083
	参考文献	083
6	银桥 (Silver Bridge)	085
6.1	引 言	085
6.2	桥梁概况	085
6.3	垮塌过程	086
6.4	眼杆断裂分析	089
6.5	结 论	094
	参考文献	094
7	西门大桥 (Westgate Bridge)	096
7.1	引 言	096
7.2	桥梁概况	096
7.3	垮塌原因分析	098
7.4	关键参数分析	103
7.5	重建的西门大桥	106
7.6	结 论	106
	参考文献	107
8	措伊伦罗达桥 (Zeulenroda Bridge)	108
8.1	引 言	108
8.2	桥梁概况	108
8.3	垮塌原因分析	109
8.4	关键参数分析	113
8.5	结 论	115
	参考文献	116

9	维也纳多瑙河第四桥 (Fourth Danube Bridge)	117
9.1	引言	117
9.2	桥梁概况	117
9.3	垮塌原因分析	120
9.4	重建的第四桥	122
9.5	结论	125
	参考文献	125
10	米尔福港大桥 (Milford Haven Bridge)	126
10.1	引言	126
10.2	桥梁概况	126
10.3	垮塌过程	127
10.4	垮塌原因分析	129
10.5	结论	130
	参考文献	131
11	科布伦茨莱茵河桥 (Koblenz Rhine Bridge)	132
11.1	引言	132
11.2	桥梁概况	132
11.3	垮塌过程	134
11.4	垮塌原因分析	135
11.5	结论	136
	参考文献	136
12	塞文桥 (Severn Bridge)	137
12.1	引言	137
12.2	桥梁概况	137
12.3	桥梁病害	139
12.4	结论	146
	参考文献	147
13	阿摩尔桥 (Almö Bridge)	148
13.1	引言	148
13.2	桥梁概况	148
13.3	垮塌原因分析	149
13.4	连续垮塌过程分析	157
13.5	结论	158
	参考文献	158

14	I-35W 连续钢桁梁桥	160
14.1	引 言	160
14.2	桥梁概况	160
14.3	垮塌原因分析	162
14.4	连续垮塌过程分析	166
14.5	结 论	168
	参考文献	169
15	I-895 连续焊接钢板梁桥	170
15.1	引 言	170
15.2	桥梁概况	170
15.3	开裂分析	173
15.4	裂纹扩展驱动力分析	176
15.5	修复方案	180
15.6	结 论	181
	参考文献	182

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]。

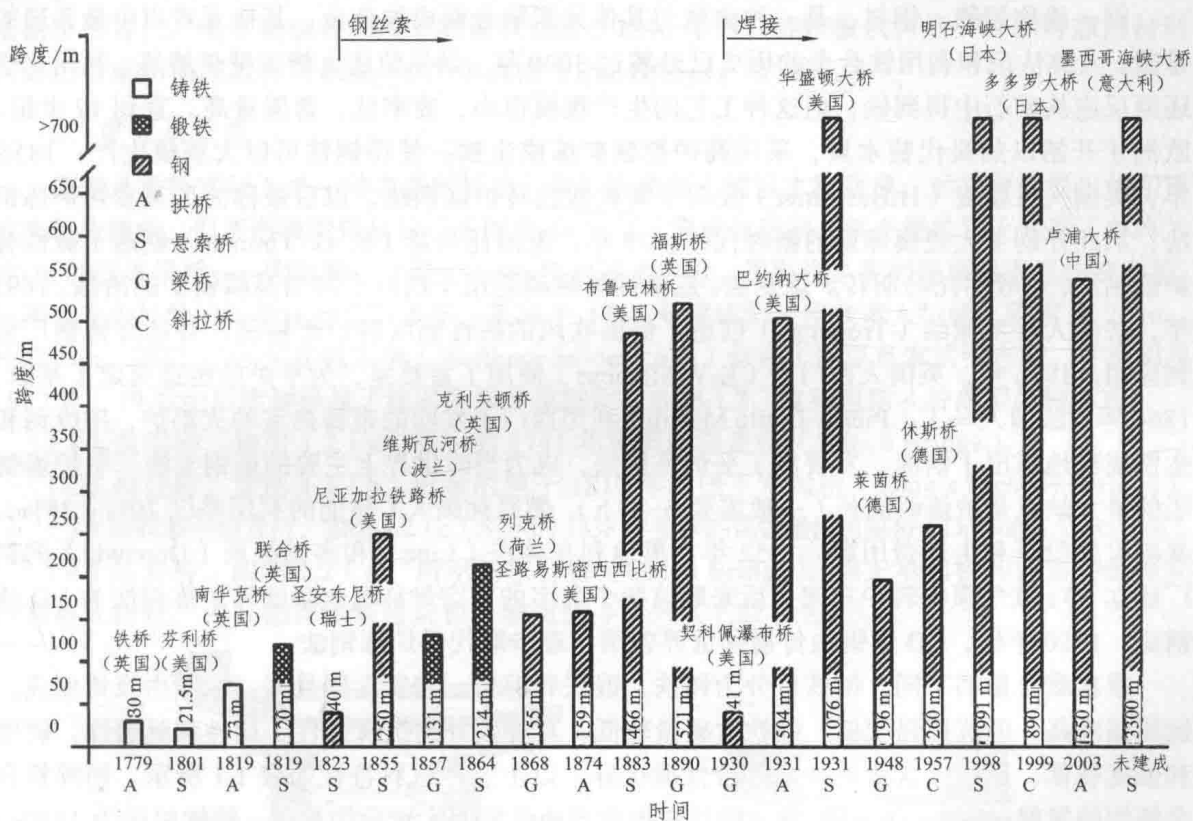


图 1.1 钢桥发展历程

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)。

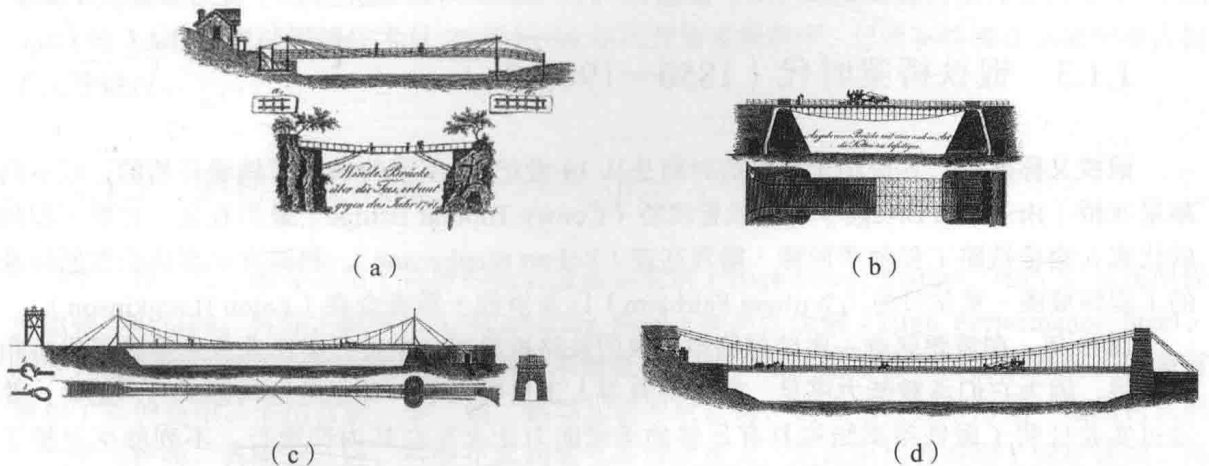


图 1.2 欧洲近代缆索承重桥梁

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。

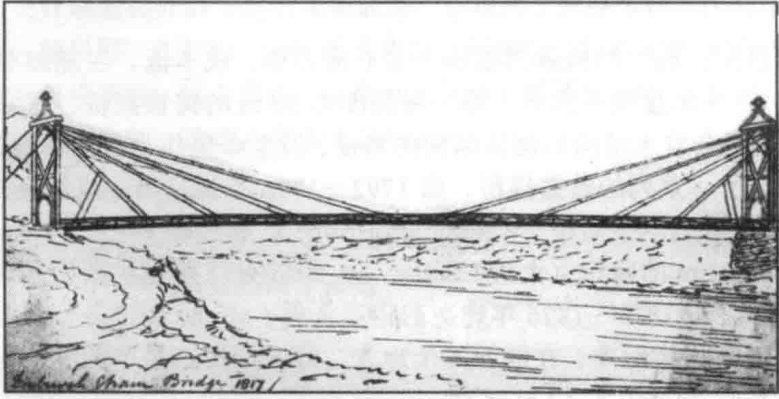


图 1.3 第一座德雷堡修道院桥

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廊(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，所以木桥和圬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圬工桥设计原则和施工方法，如圬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，而圬工材料抗压强度高，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）。圬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。