



斜拉桥

〔联邦德国〕K·罗伊克等著
林正清 译

斜 拉 桥

《联邦德国》工学博士K·罗伊克等著

交通部公路规划设计院

林正清译

译 者 的 话

斜拉桥是当今世界大跨径桥梁结构中最经济的结构形式。经过长期的历史发展过程，这种桥型的优点在实践中逐渐得到证实。

联邦德国是修建斜拉桥最早的国家之一，建成的各类斜拉桥可谓首屈一指，而且在实践中积累了设计、施工方面可供参考的丰富经验。

本书作者以联邦德国的桥梁建筑为主，汇集了世界上有关国家建成的部份有代表性的桥（其中包括在中国和台湾建成和正在施工中的斜拉桥）的桥型、并就斜拉桥的结构材料及施工工艺等主要细节问题给予了综合介绍。作者还将搜集到的世界上有代表性的较大跨径斜拉桥，按其主要尺寸、塔架、断面等，连同相应的文献来源附书后，以资参考。此外还选登了典型桥的照片，绘制了134张图，列出了16张表。

目前，斜拉桥结构的发展在我国方兴未艾。为了向对斜拉桥感兴趣的工程师，大专院校师生和从事实践工作的工程技术人员提供一点信息和参考依据，为此翻译了这本书。在力求忠实原文的基础上，为使译文的技术含义准确无误，定稿时特请交通部公路规划设计院高级工程师彭宝华同志以及交通部公路第一工程局高级工程师王伯伟同志从技术上做了全面、详细的校正，在编排出版过程中又得到本院标准规范室的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于个人水平有限，译文有误和不当之处敬请有关专家和读者批评指正，在此表示衷心的感谢。

译者1992.7.

前 言

25年来,斜拉桥已被证实为较大跨径桥梁结构中最经济的承重体系。对于已建成的这类桥梁及基本的考虑和细节问题,过去时有报导,但散见于为数众多的书刊。

因此,综述至今取得的认识,并深入讨论这类具有意义的结构的某些细节问题是十分有益的。这样做的目的在于,引起对此有兴趣的“门外汉”和研究人员以及从事实践的工程师的注意。对本书内容产生了极大影响的下述考虑也清楚地说明了这一点。

——正象作者所希望的,全面汇总世界各地建成的较大跨径的斜拉桥,包括主要尺寸,塔架、断面等,以及其他文献的有关资料。

——选登一些照片,主要是德国的斜拉桥照片。

——指出这类结构在构造上的一些重要细节问题。

本书作者曾合作建造了几座大型斜拉桥,这对本书内容也产生了影响。全书共分八部分:

- 1.斜拉桥的发展历史和已建成的斜拉桥汇总表。
- 2.主要承重体系——静力计算、荷载、内力计算、承重结构安全度的验算。
- 3.塔架——作用、形式、计算标准、力的传递。
- 4.受拉构件——制造、螺旋形钢索、平行钢丝束、锚头、疲劳强度、防蚀。
- 5.次要承重体系——简化复杂的局部应力问题。
- 6.安装——设计、计算、施工。
- 7.空气动力学——原理、振动、模型试验、结构措施。
- 8.参考书目——四百多种文献。

——本书承蒙I·阿尔贝斯夫人和R·森格尔夫人设计封面,P·施泰因巴赫精心制作插图,以及工学学士哈格曼先生和工学研究生D·约翰共同汇总了已建成的斜拉桥的资料和有关文献。

——本书承蒙杜塞尔多夫钢材使用咨询公司希尔敦的H·G·魏格尔先生、杜伊斯堡-莱茵豪森的克虏伯工业技术有限公司、哈姆的图森·德拉特有限公司以及瑞士苏黎世的BBR有限公司不吝转让书目中列出的图片和插图。

——本书承蒙出版社的厚待,装帧精美。

为此,作者特一一致谢。

K·罗伊克

G·阿尔布莱希特

U·魏 尔

1986年1月于波鸿

目 录

1.斜拉桥的发展.....	(1)
1-1 引 言	(1)
1-2 斜拉桥的发展历史	(1)
1-3 第二次世界大战后斜拉桥的发展	(11)
1-4 建成的斜拉桥	(15)
1-5 发展趋势	(28)
1-5-1 概况	(28)
1-5-2 钢斜拉桥	(29)
1-5-3 混凝土斜拉桥	(29)
1-5-4 组合结构形式的斜拉桥	(29)
1-5-5 总结	(30)
附录：建成的斜拉桥汇总表.....	(30)
2.主要承重结构的静力计算.....	(47)
2-1 静力体系的考虑	(47)
2-1-1 概况	(47)
2-1-2 布置两个平行钢索面的斜拉桥	(47)
2-1-3 布置中间钢索面的斜拉桥	(48)
2-1-4 空间体系的概况	(50)
2-2 荷载和内力计算	(51)
2-2-1 概况	(51)
2-2-2 有效荷载	(51)
2-2-3 恒载	(51)
2-2-4 恒载作用下随时间变化产生的内力	(54)
2-2-5 温度影响	(55)
2-2-6 风力影响	(55)
2-2-7 其他影响	(56)
2-3 按Ⅱ次理论的计算	(56)
2-3-1 概况	(56)
2-3-2 主要承重体系的Ⅱ次理论	(56)
2-3-2-1 概况	(56)
2-3-2-2 杆件的静力形变法	(57)
2-3-2-3 在斜拉桥上的应用	(57)
2-3-2-4 Ⅱ次理论对结构计算尺寸的影响	(60)

2-3-3	钢索的Ⅱ次理论	(60)
2-3-3-1	钢索承重状态的概况	(60)
2-3-3-2	主梁受力体系上钢索的应力、应变性能	(61)
2-4	承重结构安全的验算	(61)
2-4-1	概况	(61)
2-4-2	梁的承重情况	(61)
2-4-3	允许应力的设计	(62)
2-4-4	安全值	(63)
2-4-4-1	决定性经验的考虑	(63)
2-4-4-2	概率理论的考虑	(63)
2-4-5	用部份安全系数值的设计方法	(64)
2-4-6	用部份安全系数概念的设计	(64)
2-4-6-1	荷载和应变的关系	(64)
2-4-6-2	不同荷载作用的组合	(65)
2-4-6-3	斜拉桥Y-值概念	(66)
3. 塔架		(67)
3-1	塔架的功能和形式的概况	(67)
3-2	使用阶段和安装阶段的设计标准	(69)
3-2-1	钢塔架	(69)
3-2-2	混凝土塔架	(70)
3-3	钢索力在塔架上的分布	(71)
3-3-1	钢塔架	(72)
3-3-2	混凝土塔架	(72)
3-4	组合式塔架	(76)
4. 受拉杆件 (钢索)		(76)
4-1	概况	(76)
4-2	钢丝的制造	(77)
4-3	螺旋钢索及其索锚固	(78)
4-3-1	概况	(78)
4-3-2	螺旋钢索的制作	(79)
4-3-3	螺旋钢索的锚固 (钢索锚头)	(80)
4-4	平行钢丝束及其锚固	(81)
4-4-1	概况	(81)
4-4-2	预制平行钢丝束的制造	(81)
4-4-3	平行钢丝束的锚头	(82)
4-5	受拉杆件的特殊性能	(82)
4-5-1	概况	(82)
4-5-2	破坏力	(83)
4-5-3	应变性能和钢索模量	(85)

4-5-4	螺旋钢索的拉伸	(86)
4-5-5	疲劳强度、疲劳	(87)
4-5-6	受拉杆件的转折性	(88)
4-6	防腐蚀	(88)
4-6-1	概 况	(88)
4-6-2	内部防护	(89)
4-6-3	外部防护	(89)
4-6-4	锚头和钢丝转向位置范围的保护	(89)
4-6-5	总结	(90)
4-7	全封闭钢索和平行钢丝束的比较	(90)
5.次要承重体系		(90)
5-1	概况	(90)
5-2	非干扰区的次要承重体系	(91)
5-3	穿钢索范围内的次要承重体系—加劲梁	(92)
5-3-1	局部力的分布	(93)
5-3-2	钢索力的垂直分力	(93)
5-3-3	钢索力的水平分力	(95)
5-3-4	构造问题	(97)
5-4	在加劲梁、塔架穿透范围的次要承重体系	(99)
5-4-1	中间塔架	(99)
5-4-2	外侧塔架	(102)
5-5	桥梁端部的次要承重体系	(104)
6.斜拉桥的安装		(104)
6-1	安装计划的基本标准	(104)
6-1-1	安装阶段的承重安全	(104)
6-1-2	有计划的内力和变形状态的形成	(105)
6-2	安装阶段的静力计算	(107)
6-3	工地上的安装过程	(109)
6-3-1	桥梁的悬臂拼装	(109)
6-3-2	钢索的安装	(110)
6-3-2-1	概 况	(110)
6-3-2-2	单根钢索的超张拉	(110)
6-3-2-3	钢丝束的超张拉	(112)
6-3-3	塔架的安装	(113)
6-3-4	塔架的控制和校正措施	(113)
6-4	总结	(114)
7.空气动力学		(114)
7-1	历史变迁	(114)
7-2	对空气动力学原理的说明	(116)

7-2-1	气压	(116)
7-2-2	气流	(117)
7-2-3	振动	(119)
7-3	斜拉桥上的振动	(121)
7-3-1	单根钢索的振动	(121)
7-3-2	竖琴形钢索上的振动	(122)
7-3-3	塔架上的振动	(122)
7-3-4	加劲梁上的振动	(123)
7-4	模型试验	(124)
7-5	构造物上的量测	(126)
7-6	构造措施	(126)
7-6-1	防止钢索的振动	(126)
7-6-2	防止塔架的振动	(127)
7-6-3	防止加劲梁的振动	(127)
7-7	总结	(130)

资料索引

文献

术语索引 (略)

1. 斜拉桥的发展

1-1 引言

象斜拉桥这样的桥梁体系，发展如此迅速，实属罕见。大约在25年中——从德国开始——在全世界建成了一百多座斜拉桥。

由于第二次世界大战的破坏，德国几乎所有大型桥梁都必须重新修建。这些桥梁的绝大部分是以竞争的方式进行修建的，竞争者必须提交他们自己的独特设计方案，因此，桥型选定不受任何限制。这种有利的形势为斜拉桥的发展提供了优势。尤其应指出的是，联邦各州和城市的公路和桥梁管理部门的大力支持，使这些新的设计思想得以付诸实现。

随着钢结构斜拉桥的进步，轻型钢桥面板的发展接踵而至（正交异性板）。由于钢结构的每一块构件都共同受力，因而这种大跨径桥梁的经济性主要受桥面体系的影响。于是形成一个无“死重”的空间承重体系。使人们认识到这一点的是，战后重建的一些桥梁，虽然承担的交通量较大，但其设计重量比过去的桥梁轻40%。而且轻型钢桥面系的发展同焊接技术领域的进步密切相关。

事实上，促进斜拉桥迅速发展的另一种情况是，受拉杆件使用了已经在其他承重体系上试验过的结构杆件，一种“全封闭式桥梁钢索”。这种钢索至今几乎仅在德国广为采用，但也为斜拉桥的迅速发展作出了贡献。在国外，大多数斜拉桥不采用全封闭钢索，而用裸露的螺旋形钢索，或平行钢丝束。这种不同构造的受拉构件的对比在第四章中介绍。

当然，没有计算和设计原理方面的进步，斜拉桥的迅速发展是难以想象的。虽然最初还用“手算”然而现代桥梁的计算问题只需借助于电子数据程序（EDV）就能解决。

斜拉桥的经济性，与其说不仅取决于使用状态下结构的适宜的承重作用，还不如说还没有一种体系象这种体系那样，适合采用悬臂施工方法，而且不需辅助措施（如辅助支架等）便可以安装。它的各类设计方案日益倾向于安装阶段不必采取辅助措施，如加固，用辅助钢索或类似的措施等。

从美学角度看，斜拉桥造形的可能性几乎是取之不尽的。迄今建成的每一座桥都“独具一格”，几乎都符合美学原则。因为，许多设计都是在工程师和建筑师的有益合作下完成的。

随着时间的推移，斜拉桥已被证实为大跨径桥梁特别经济的体系。似可认为，以前的大跨径桥只有吊桥这种形式。迄今已建成的布置对称拉索的斜拉桥，其最大跨径约有460m，单侧（非对称）布置拉索的斜拉桥，其最大跨径约370m。如果人们使非对称布索的桥与对称布索的桥互为补充，图1—43，立即会发现700m至800m跨的钢斜拉桥无疑是合理的。这种对比还要进行广泛的理论研究。

斜拉桥这种体系，由于用许多钢索拉紧，在主梁上会有很大的压力，且弯矩比较小。由此可以看出，这就为建筑材料混凝土的应用提供了很有利的前景。因此，近几年来也能看到混凝土结构的斜拉桥得以显著发展。但是不利的是，当跨径大时这种斜拉桥首先重量大。所以，应考虑将两种材料合理地结合起来的最佳方案。预应力混凝土已经逐步地与钢结构完成了多次结合。目前，第一座“大型”组合结构斜拉桥正在建造中。

1-2 斜拉桥的发展史

斜拉桥并不是我们这个世纪的发明。这种结构的主要特征已存在于18世纪和19世纪的许多设计中。然而，这种承重体系的来源，即这个原始的“发现”无疑应追溯到更早的时期。

以婆罗洲桥的图画为例,这是一座用竹子和藤条架设的桥,它能使人猜到我们的祖先是怎样用树木和藤条架起最初的桥,图1—1,而图1—2和1—3中的桥位于老挝和印度尼西亚的

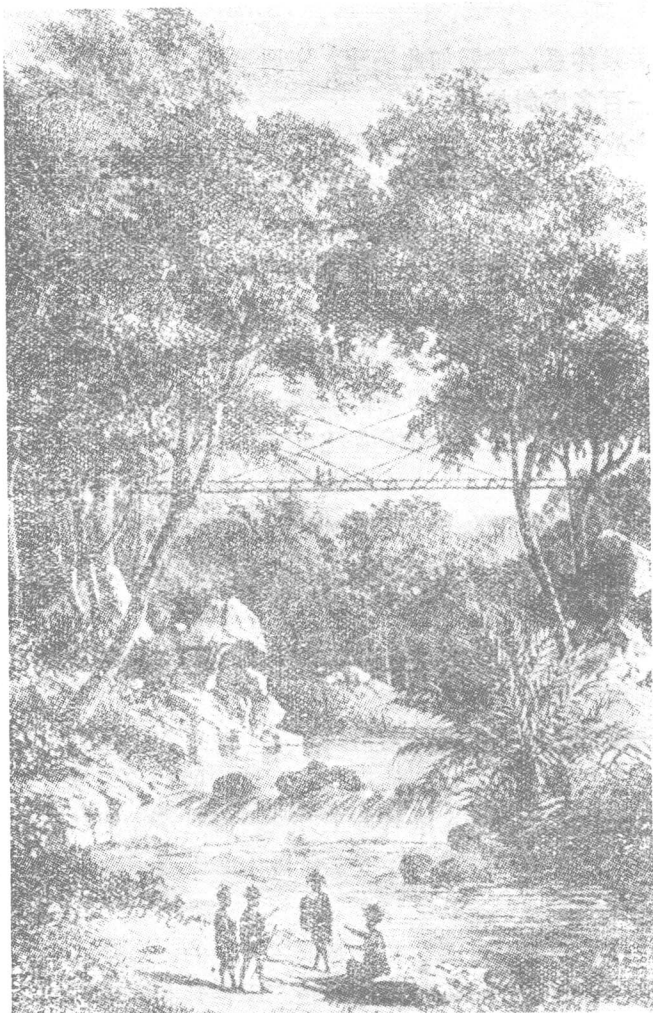


图1—1, 加里曼丹竹子和藤条架设的桥

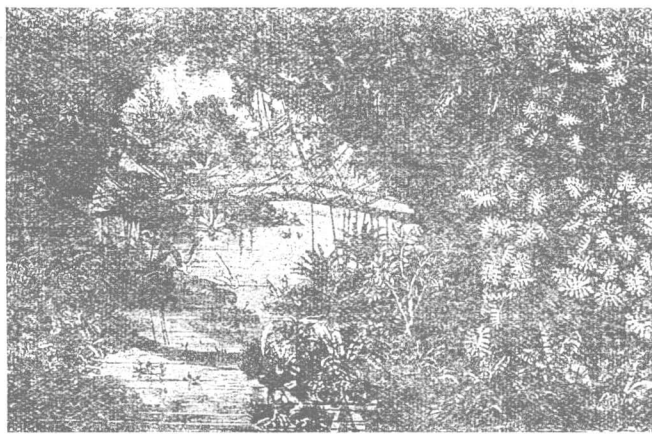


图1—2 老挝的桥

爪哇岛，这些桥所具有的斜拉桥原理的特征清晰可见。在这期间，莱奥纳尔多·丹文斯已经采纳了用索拉紧梁的原理，图1—4。

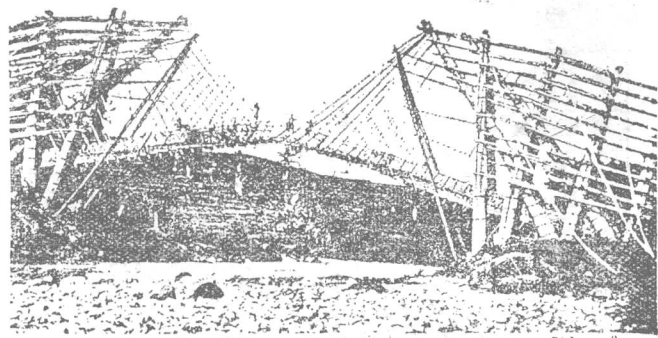


图1—3 印度爪哇桥

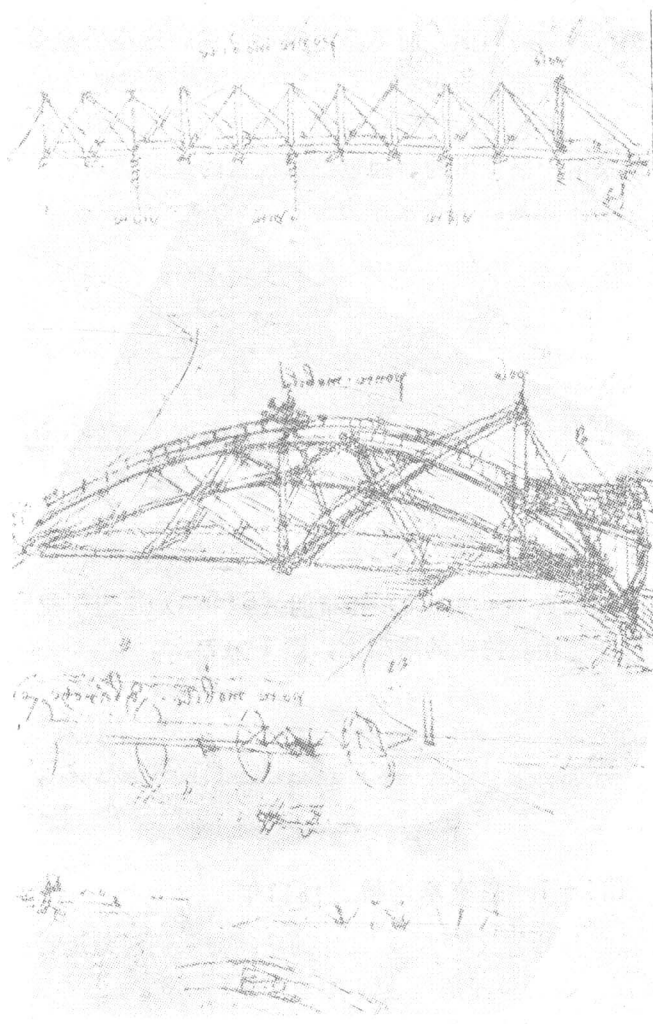


图1—4 法国万塞利奥诺多斯基茨桥

由威尼斯建筑大师福斯图斯·费尔安蒂翁斯于1617年在达尔马提亚出版的一部著作中发现了第一座用斜铁索链锚固的吊桥，图 1—5。

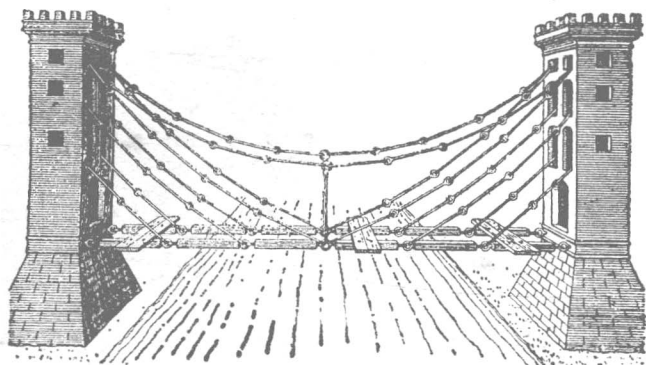


图1-5 链条桥，1617年

1784年，费赖贝格的伊曼努尔·勒舍尔说明了在图 1—6 中描绘的与众不同的悬带结构桥，这座桥用少量木质材料横跨河面，而不是用拱形结构。这座桥承受很大的荷载，在强大的冰流冲击下安然无恙。这种结构的净跨若采用32m不知是否能取得成功。不过这一结构与下述一些桥梁相比，已经具备斜拉桥“自身锚固”结构的所有特征。木质的拉索是锚固在桥身梁的后端，这种结构采用一根悬出的、通过拉索拉紧的加劲梁来加以平衡。这根加劲梁由后端的平衡重物加以控制。在基础中无水平力分布。

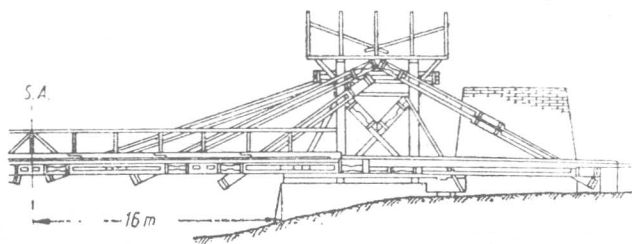


图1-6 木制拉索桥，1784年

1817年，英国人雷德帕斯 (Redpath) 和布朗 (Brown) 建造了皇家草场桥。该桥跨径约为33m。它用斜向拉杆连接在铸铁的塔架上，图 1—7。

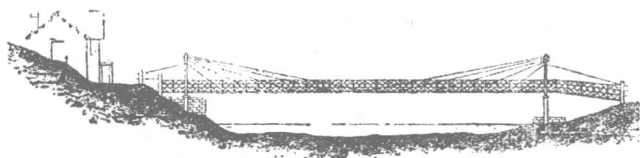


图1-7 皇家草场桥 1817年

1821年，法国工程师扑叶特 (Poyet) 设计的结构使人们清楚地看出了一座由许多支撑拉杆连接的斜拉桥特征。桥的拉杆是由锻钢制成，图 1—8。

1823年，纳维 (Navier) 研究出用斜向链条支撑的不同体系，从而进一步发展了扑叶特的构思，图 1—9。

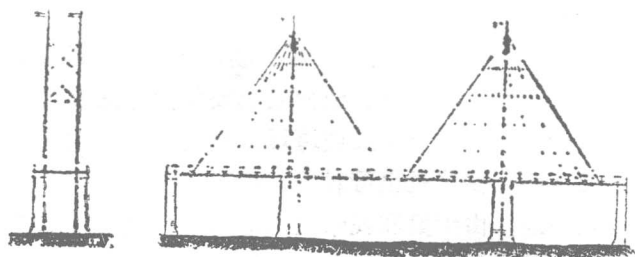
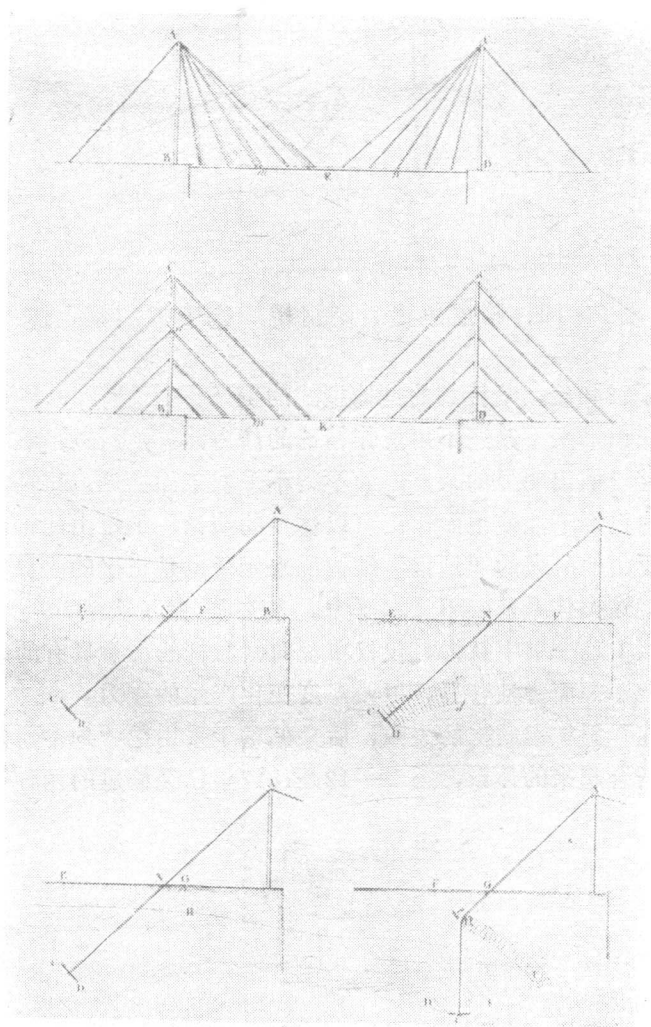


图1-8 法国工程师扑叶特设计的桥，1821年



纳维的设计草图，1823年

然而与扑叶特的设计相比，纳维的设计，其桥梁的后锚钢索不是锚固在梁上，而是固定在基础中。由此而形成了“地锚”体系。因此产生了吊桥结构这种形式。在这种体系上桥的梁要承受拉力。而实际的梁自身是固定在两端的桥台上，还是考虑设置活动支座，在纳维的设计草图上还辨认不出来（可以假设是固定在桥台上）。在固定支座上尤其受温度影响能形

成引起高的应力的约束力。

1824年，在尼恩堡（Nienburg）建造的跨越萨勒河（Saale）的斜拉链条桥，跨径78m，图1—10。在荷载试验时已经证实该桥较弱，致使它仍要依附施工支架的支持，后来还给予了加固。但一年以后，由于一次火炬游行而致使垮塌，造成50人丧生，这是当时的一大悲剧。正如从图1—10可辨认的那样，在这里也可看出，见图1—9，后锚索不在梁上固定，而在基础中固定。如已经提及到的，由于梁和拉索之间的力的传递，尤其是温度变化影响形成了错综复杂的情况，可想而知，由于上述原因和在结构细部上的不足之处致使桥梁垮塌。

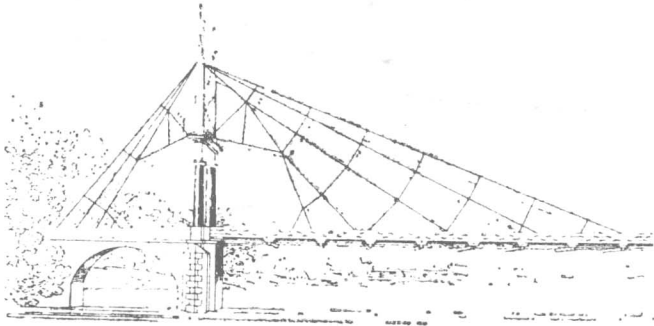


图1—10 跨尼思堡、萨河桥、建于1824年，毁于1825年

图1—11展示了1840年，哈特利的结构型式的链条桥。

因为在当时的知识水平下，还不可能作精确的静力计算，所以，这类桥的承载力往往不够。随着时间的推移暴露出明显的缺点，而不得不采取加固措施。早期，关于斜拉桥的报导往往以它在短时期内已经不能使用而作出可以休矣的结论，纳维由此得出结论，吊桥优于斜拉桥。这个结论对于由他研究的“地锚”结构说来无疑也是正确的。显然，他的判断也适用于自身锚固的体系，这类体系基础不受水平力。梅尔滕森（Mehrtens）1908年在他出版的关于铁桥结构文献〈1〉一书中认为，仅仅布置向斜拉杆的吊桥具有的缺陷大，他把这个缺陷归咎于因斜索长度不等而弹性各异，以及温度变化产生的应力。

鉴于采用“单纯”斜拉索结构的失败，后来偏重于采用把“地锚”的吊桥与辅助的“自身锚固”的斜索桥结合起来的体系，图1—12是1817年已经修建的两种锚固方式结合的桥。

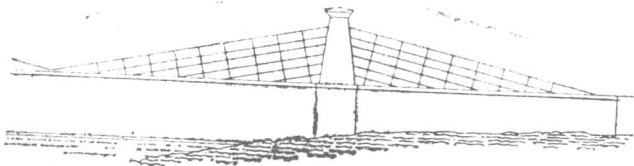


图1—11 哈特利结构型的链条桥，1840年



图1—12 德吕布尔桥，英国1817年

19世纪下半叶，美国著名的吊桥建筑师罗布林（Roebing）已采用了这种结构，他设计的吊桥有的都有辅助斜索，辅助斜索有两个作用：

——提高刚度，加固受风力振动的桥面。

——受力时有助于主钢索。这种结构大约一半的总荷载（自重加交通荷载）分配给了斜索，另一半荷载分配给了主拉索。

罗布林言简意赅地阐明了他独创的结构原理：地锚同支撑索连接，将自身支承而不要钢索辅助。仅仅这个支承承载力已经足以支撑桥面。假如钢索取消，桥将要下垂，但不会塌落。

图1—13和1—14便是当时颇有名气的桥的描绘图。

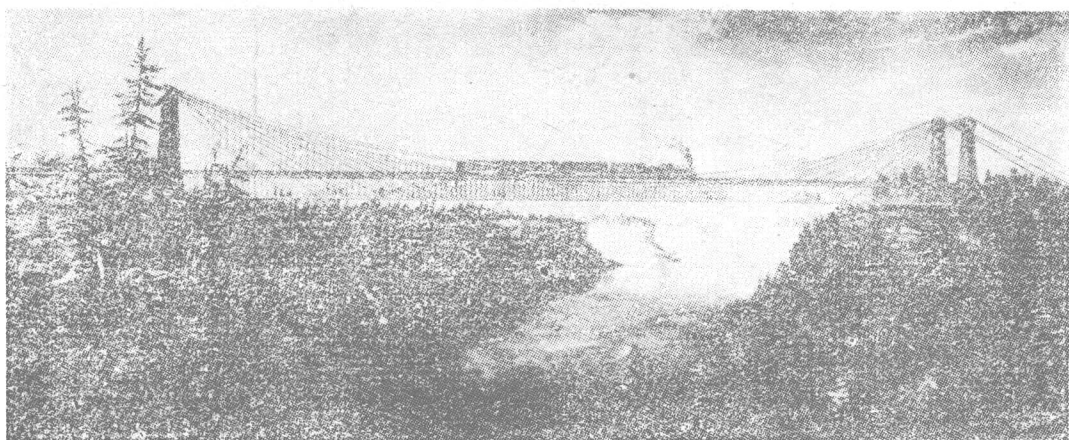


图1—13约翰·罗布林、布鲁克林设计的瀑布桥，1855年。

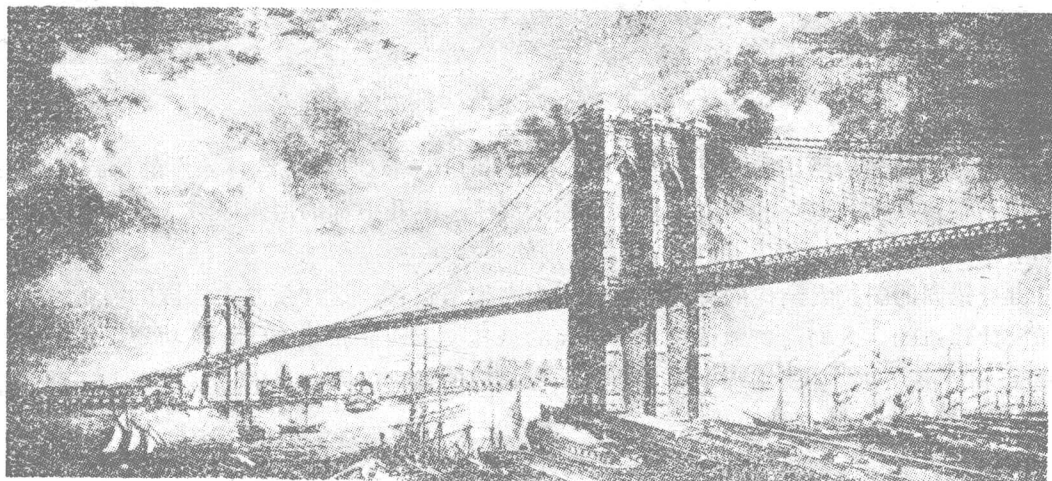


图1—14、约翰·罗布林、布鲁克林桥，1867年

在布拉格，跨越莫尔登昂河（Moldau）的费朗茨-约瑟夫（Frang—goseph）斜拉索吊桥上，找到了类似的设计特征。该桥是1868年由奥尔狄斯（Ordish）和福伊尔（Le Feuvre）设计的，图1—15。

横跨伦敦泰晤士河（Themse）的艾伯特桥（Albert）中跨122m，也是按照奥尔狄斯的这种体系设计建造的，图1—16。该桥至今仍在通行。



图1-15 位于布拉格跨莫尔登昂河桥，1868年

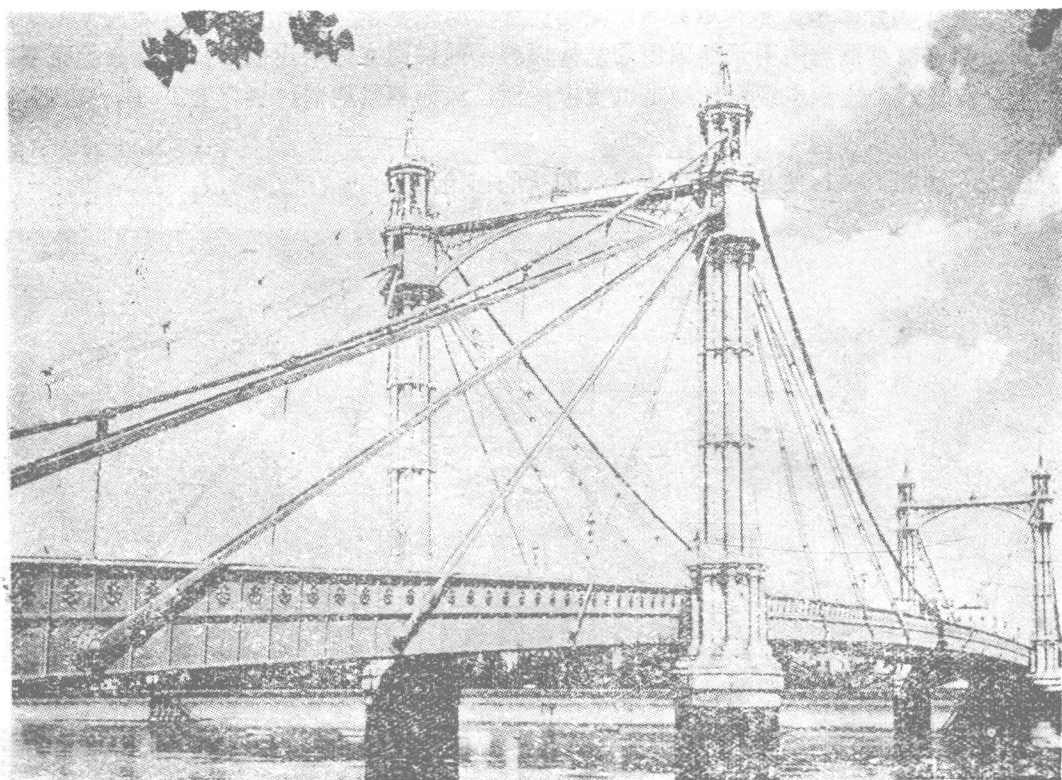


图1-16、伦敦、跨泰晤士河的艾伯特桥

19世纪，法国的阿诺狄恩（Arnodin）也设计了几座这种“混合体系”的桥。他将这种体系作了下述改动；主孔的中央部分改用缆索支撑，主孔中部的两侧区域（约位于四分之一点和塔架之间）由斜索固定，图1-17。

自身锚固的斜拉索结构的特殊形式表现为高架吊运桥，这种桥是由法国的阿狄恩于20世纪初设计建造的。人们清楚地认识到，中间的悬挂梁有明显张紧的承重功能。这种结构以140m跨和塔高75m，表明了那个时代法国工程师们的特别引人注目的成就，图1-18和1-19。

法国人吉斯克劳尔德（Gisclard）的设计，表现为斜拉索体系的又一种方案，图1-20。这种超负荷拉索体系是通过附加“水平索”构成，仅使垂直的悬吊力传给梁。在法国及其殖民地，这种体系也用来架设铁路桥。这种体系由法国人莱内屈格勒（LeinekuguLe CoCq）作了进一步发展，这种体系将承受的水平力作为压力分配给梁。由此形成了一种体系，该体系可以视为当今呈扇形布置钢索的斜拉桥的先驱，图1-21。该桥设计为在主孔的四分之一点处设铰，假设在四分之一点处出现最大的变曲应力（如在吊桥上）。虽然有误差，但证实这种体系是很有刚度和很经济的。

