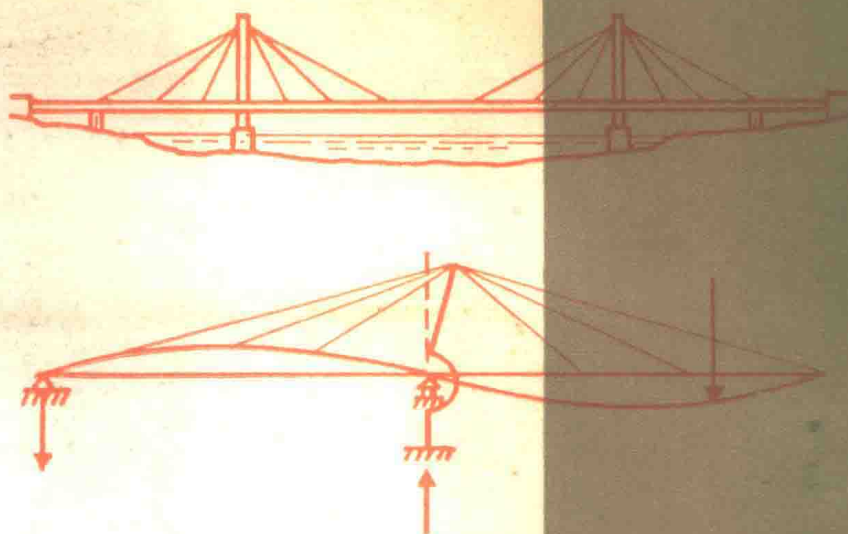




XIELAQIAO

LILUN YU SHEJI

# 斜拉桥理论与设计

中国铁道出版社

# 斜拉桥理论与设计

[英] M.S. 特罗伊茨基著

王学俊、程庆国、顾发祥等译

中国铁道出版社

1980年·北京

## 内 容 提 要

本书对现代斜拉桥结构体系的理论研究及设计作了综合性的论述。内容包括：结构特性，结构细节，典型斜拉桥，结构体系的近似分析和精确分析方法，模型分析和空气动力稳定性的试验分析等，可供桥梁工程技术人员及大专院校有关专业师生阅读参考。

本书各章分别由顾发祥、王学俊、殷宁骏、张国田、程庆国、李本安、吴亮明、万德友、潘家英、沈恒济、庄军生、郭鑫浩、赵其文、张焜、周巧荣、许成业、赵特伟等译。全书译稿由程庆国总校，劳远昌、许成业、李本安参加部分章节的校阅。

M.S.Troitsky, DSc  
CABLE-STAYED BRIDGES  
Theory and Design  
Crosby Lockwood Staples, London  
1977

## 斜拉桥理论与设计

〔英〕M.S.特罗伊茨基著

王学俊、程庆国、顾发祥等译

中国铁道出版社出版

责任编辑 施以仁

封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：18 字数：402 千

1980年7月第1版 1980年7月第1次印刷

印数：0001—4,500 册 定价：1.90 元

# 目 录

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 序言                  | 1   |
| 第一章 斜拉桥体系           | 2   |
| 1.1 引言              | 2   |
| 1.2 历史的回顾           | 2   |
| 1.3 基本概念            | 17  |
| 1.4 斜缆的布置           | 17  |
| 1.5 缆索在空间的位置        | 18  |
| 1.6 桥塔型式            | 20  |
| 1.7 桥面型式            | 21  |
| 1.8 主梁与主桁           | 21  |
| 1.9 结构上的优点          | 23  |
| 1.10 斜拉桥与悬索桥的对比     | 24  |
| 1.11 经济性            | 32  |
| 1.12 桥梁的建筑艺术        | 32  |
| 参考文献                | 34  |
| 第二章 典型的斜拉桥          | 36  |
| 2.1 双面式斜拉桥          | 36  |
| 2.2 单面式斜拉桥          | 48  |
| 2.3 斜塔式斜拉桥          | 64  |
| 2.4 铁路桥             | 67  |
| 2.5 铁路公路两用桥         | 70  |
| 2.6 混凝土斜拉桥          | 72  |
| 2.7 人行桥             | 86  |
| 2.8 管道桥 (南非, 比勒陀利亚) | 97  |
| 参考文献                | 98  |
| 第三章 结构细节            | 106 |
| 3.1 加劲主梁和加劲主桁       | 106 |
| 3.2 桥塔              | 106 |
| 3.3 缆索型式            | 111 |
| 3.4 缆索的弹性模量         | 114 |
| 3.5 缆索的容许应力         | 117 |
| 3.6 缆索的疲劳试验和强度      | 118 |
| 3.7 弯索的性能           | 120 |
| 3.8 缆索在桥塔上的支承方式     | 121 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 3.9 缆索在桥面的锚固 .....         | 126        |
| 3.10 加劲主梁的锚固 .....         | 132        |
| 3.11 架设方法 .....            | 133        |
| 3.12 斜缆的调整 .....           | 136        |
| 参考文献 .....                 | 139        |
| <b>第四章 结构的近似分析</b> .....   | <b>140</b> |
| 4.1 加劲梁在桥梁体系中的作用 .....     | 140        |
| 4.2 缆索的最佳倾斜度 .....         | 141        |
| 4.3 桥塔高度和节间长度 .....        | 144        |
| 4.4 边跨和中跨的关系 .....         | 144        |
| 4.5 缆索的根数和间距 .....         | 145        |
| 4.6 多跨悬臂梁结构 .....          | 146        |
| 4.7 在自重作用下的斜缆索 .....       | 146        |
| 4.8 桥式体系 .....             | 148        |
| 4.9 超静定次数 .....            | 149        |
| 4.10 缆索体系的运营性状 .....       | 150        |
| 4.11 线性分析和初步设计 .....       | 152        |
| 4.12 桥梁体系的近似重量 .....       | 159        |
| 4.13 近似分析方法 .....          | 162        |
| 4.14 非线性分析 .....           | 165        |
| 参考文献 .....                 | 166        |
| <b>第五章 精确的结构分析方法</b> ..... | <b>167</b> |
| 5.1 分析方法 .....             | 167        |
| 5.2 柔度法 .....              | 167        |
| 5.3 力一位移法 .....            | 173        |
| 5.4 还原法 .....              | 183        |
| 5.5 模拟法 .....              | 190        |
| 5.6 桥梁体系的扭转 .....          | 197        |
| 5.7 桥塔分析 .....             | 208        |
| 参考文献 .....                 | 220        |
| <b>第六章 模型分析和设计</b> .....   | <b>222</b> |
| 6.1 引言 .....               | 222        |
| 6.2 基本概念 .....             | 222        |
| 6.3 方案制定 .....             | 223        |
| 6.4 静力相似条件 .....           | 226        |
| 6.5 模型的截面特性和几何状态 .....     | 228        |
| 6.6 模型的设计 .....            | 229        |
| 6.7 影响线的确定 .....           | 229        |
| 6.8 非线性特性 .....            | 244        |
| 6.9 缆索中的张拉力 .....          | 248        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 参考文献 .....               | 250        |
| <b>第七章 空气动力稳定性 .....</b> | <b>253</b> |
| 7.1 引言 .....             | 253        |
| 7.2 风的作用 .....           | 253        |
| 7.3 空气动力 .....           | 255        |
| 7.4 自然频率 .....           | 258        |
| 7.5 竖向弯曲振动 .....         | 259        |
| 7.6 扭转振动 .....           | 263        |
| 7.7 阻尼 .....             | 267        |
| 7.8 风洞模型分析 .....         | 272        |
| 7.9 空气动力失稳的防止 .....      | 274        |
| 7.10 结论 .....            | 279        |
| 参考文献 .....               | 279        |

## 序 言

斜拉桥在过去十年内在欧洲取得了成功的进展, 由于它对大、中跨度公路桥在结构上具有超乎寻常的优点, 有必要对这个现代桥梁体系的理论与设计进行综合性的论述。但直到现在, 这样的资料仅在各种分散的且其中大多数在外国的出版物中才能得到。

本书试图总结关于这种新型桥梁的经验, 在这个主题方面写出一本最新的实用参考书, 着眼于论述简明与应用方便。还打算为对这个主题特别感兴趣的桥梁工程师与研究生们提供一些设计这种结构的准则和方法。

包括在这本书中的资料按四部分向读者介绍:

第一至第三章提出了斜拉桥发展的综合性评论和它们的基本结构特性以及一般理论的概述, 并说明和列举了反映世界各国在实践中最好的典型结构。

第四章至第五章对斜拉桥体系的近似的和更精确的结构分析的数种方案进行讨论, 并详细列出实际设计步骤, 包括用计算机求解的方法。

第六章对利用模型作为斜拉桥分析与设计中的直接助手进行探讨。

第七章讨论斜拉桥的动力性能, 并研究其空气动力稳定性的分析与实验方法。

这本书的内容最初是作者于1968年至1972年在加拿大蒙特利尔 (Montreal) 康科迪亚 (Concordia) 大学, 就现代桥梁体系的理论与设计所开设的一系列研究生课程中介绍的。书中引进了最新的知识并且补充了目前所能得到的新资料。

# 第一章 斜拉桥体系

## 1.1 引言

在过去十年间,斜拉桥特别在西欧得到了广泛的应用,在世界其它地区则稍有逊色。

在近代桥梁工程中,斜拉索体系获得新生是由于在西欧,首先是在西德,在第二次世界大战后的年代里在材料供应缺乏的条件下,桥梁工程师们倾向于从使用材料中获得最佳结构性能。

斜拉桥是循着这样一种结构体系建造的,它由正交异性板桥面与连续梁组成,其梁部由拉索支撑,这些斜拉索穿过或连于位在主墩上的桥塔。

使用缆索来支撑桥梁决不是新的想法,这种构造物型式的一些实例在很久以前就有了记载。不幸的是,这个体系一般来说,没有得到多少成功,这是由于它的静力学没有完全被了解以及使用了象杆与链那样不适宜的材料做成斜向支撑或拉索的原故。这样做成的拉索不能完全拉紧,而在松弛状态下在拉索能参与承受设计拉力荷载以前会使桥面出现大的变形。

随着高强度钢材、正交异性桥面板的引用,以及焊接技术与结构分析方面的进展,广泛地和成功地应用斜拉体系只是在最近才得以实现。电子计算机的发展与应用,为精确地解算这些高次超静定体系并对其空间作用进行精确的静力分析揭示了新的、实际无限的可能性。

现有的斜拉桥提供了有关这种新体系的设计、制作、架设与养护方面有用的资料。随着这些桥梁的建造,表明已经成功地解决了在工程中遇到的许多基本问题。可是,这些重要的资料显然在以前从未曾有系统地介绍过。

概略地说来,下列因素有助于使斜拉桥成功地发展:

- (1) 高次超静定结构分析方法的发展以及电子计算机的应用。
- (2) 正交异性钢桥面板的发展。
- (3) 关于以前修建的具有斜拉桥基本构件的桥梁的经验。
- (4) 高强度钢以及制作与架设新方法的应用。
- (5) 通过模型研究来分析这种结构的能力。

## 1.2 历史的回顾

斜拉桥的历史表明,用从桅杆或塔架上悬吊斜拉索或链条的方法来支撑梁的概念自古以来就已被人们所了解。埃及人<sup>[1]</sup>把这个概念应用于他们的帆船如图1.1所示。

在世界上一些热带地方建造了如图1.2与1.3所示的原始型式的斜拉桥<sup>[2]</sup>。系于两岸树上的倾斜葛藤悬吊着一条由葛藤与竹条交织成的人行道。

图1.4表示一座采用藤竹混织的斜拉索的原始桥,索的端部扎牢于每侧树上。这座原始的结构物表明它的建造者对桥梁工程的某些原理已具有模糊的概念。

1617年意大利人福斯图斯维兰蒂尤斯 (Faustus Verantius) 提出一种由斜向眼杆悬吊

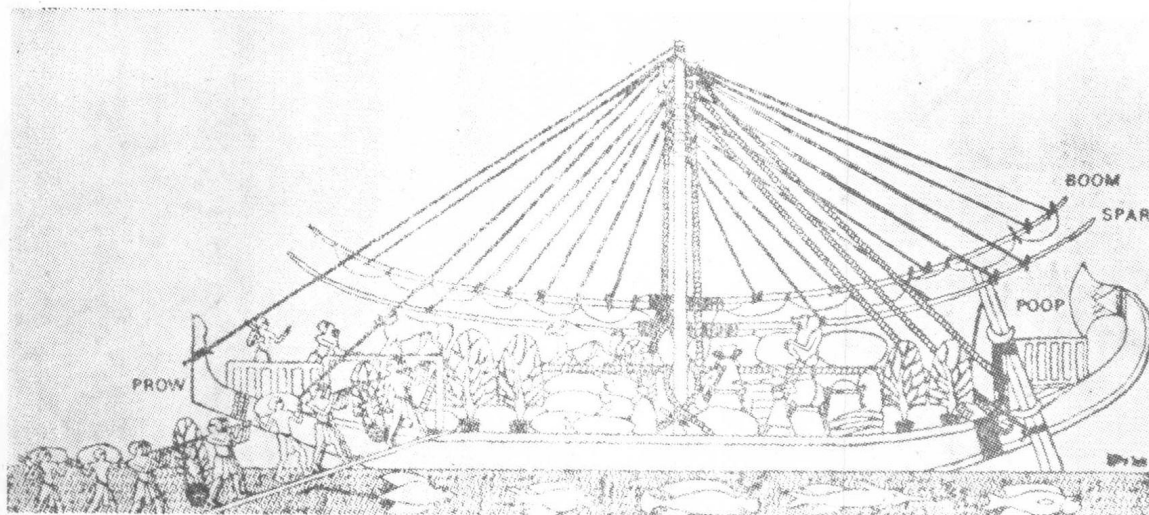


图1.1 埃及具有斜拉索帆梁的帆船  
图中: *BOOM* 帆杠, *SPAR* 帆桁, *POOP* 船尾, *PLOW* 船头。

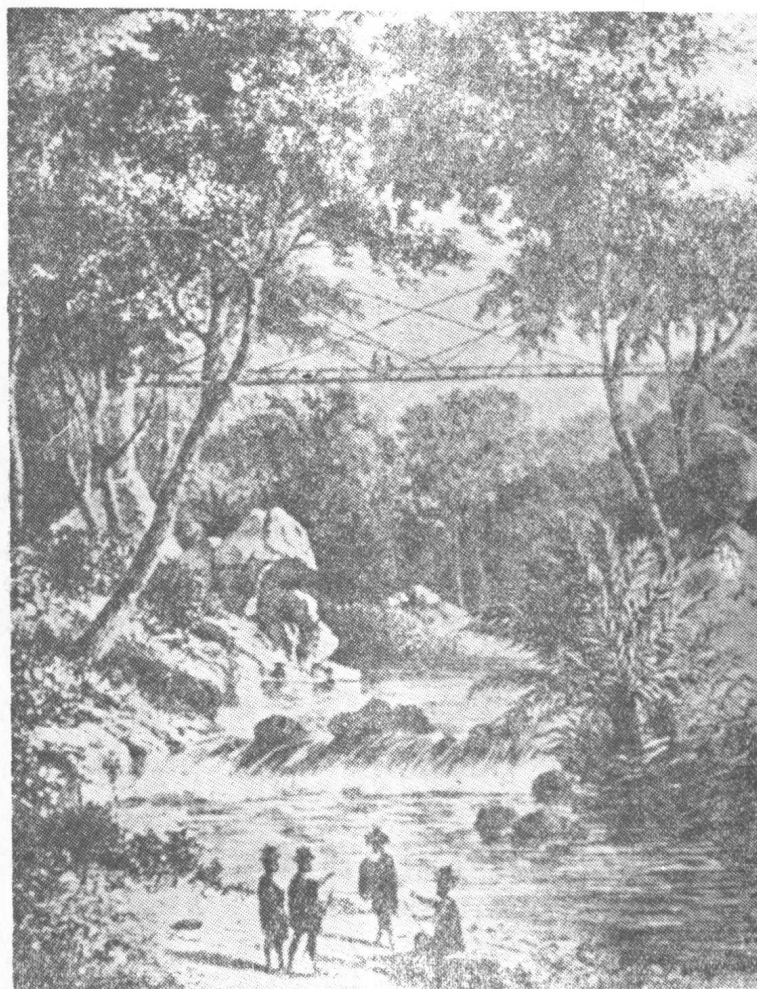


图1.2 婆罗洲\* (Borneo) 的原始竹桥

\* 译注: 加里曼丹的旧称。

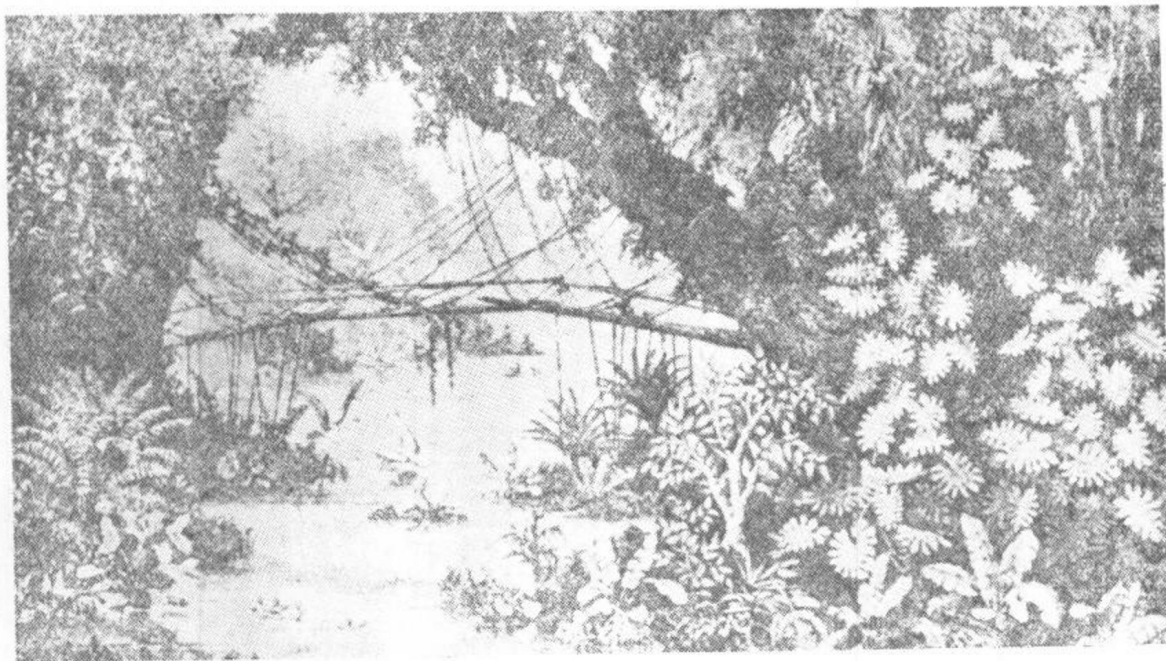


图1.3 老挝的原始竹桥

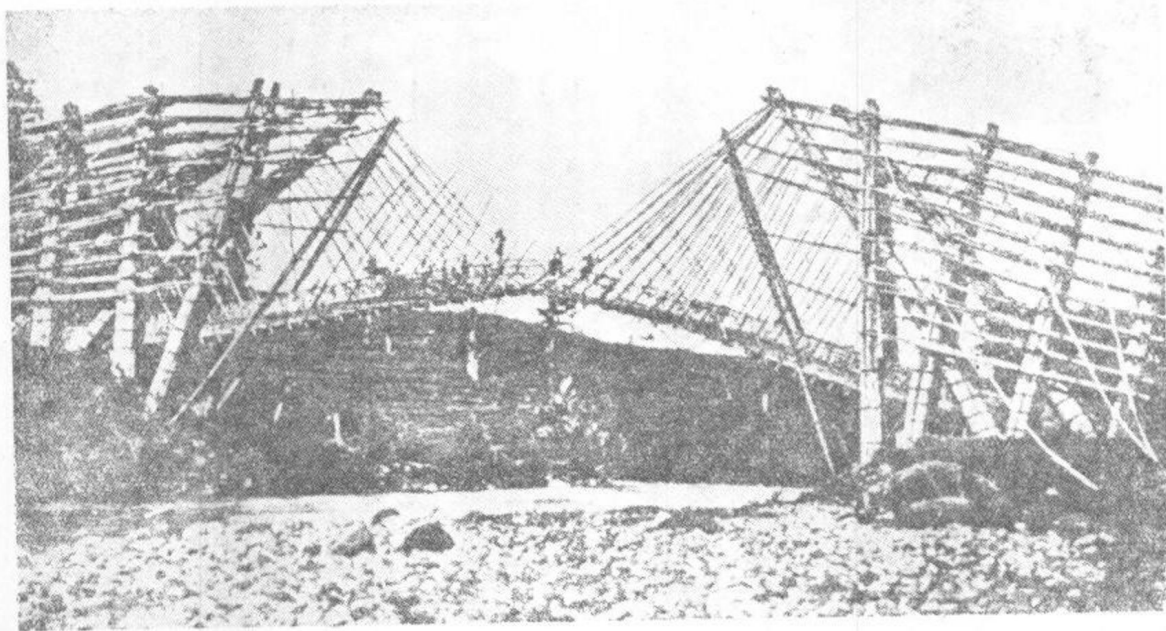


图1.4 印度尼西亚爪哇 (Java) 跨过塞拉尤河 (Serajoe River) 的竹拉索桥

木桥面的桥梁体系<sup>[3]</sup> (图1.5)。

像这个时代的所有桥梁设计一样, 上述几座桥与结构分析所指出的有很多偏离之处; 然而, 它毕竟包含了一座用斜拉索加劲的金属悬索桥的主要特点与基本原理。

1784年一位德国木工伊曼奴艾尔勒舍尔 (Immanuel Löscher)<sup>[4]</sup> 在弗里堡 (Fribourg) 设计了一座跨度105英尺 (32米) 的木桥, 这座桥由连接于木制桥塔的木拉索构成 (图1.6)。

1817年两位英国工程师雷德帕思 (Redpath) 与布朗 (Brown) 建造了皇家梅多斯桥 (King's Meadows Bridge)<sup>[5]</sup>, 英格兰的一座跨度约110英尺 (33.6米) 的人行桥, 采用了

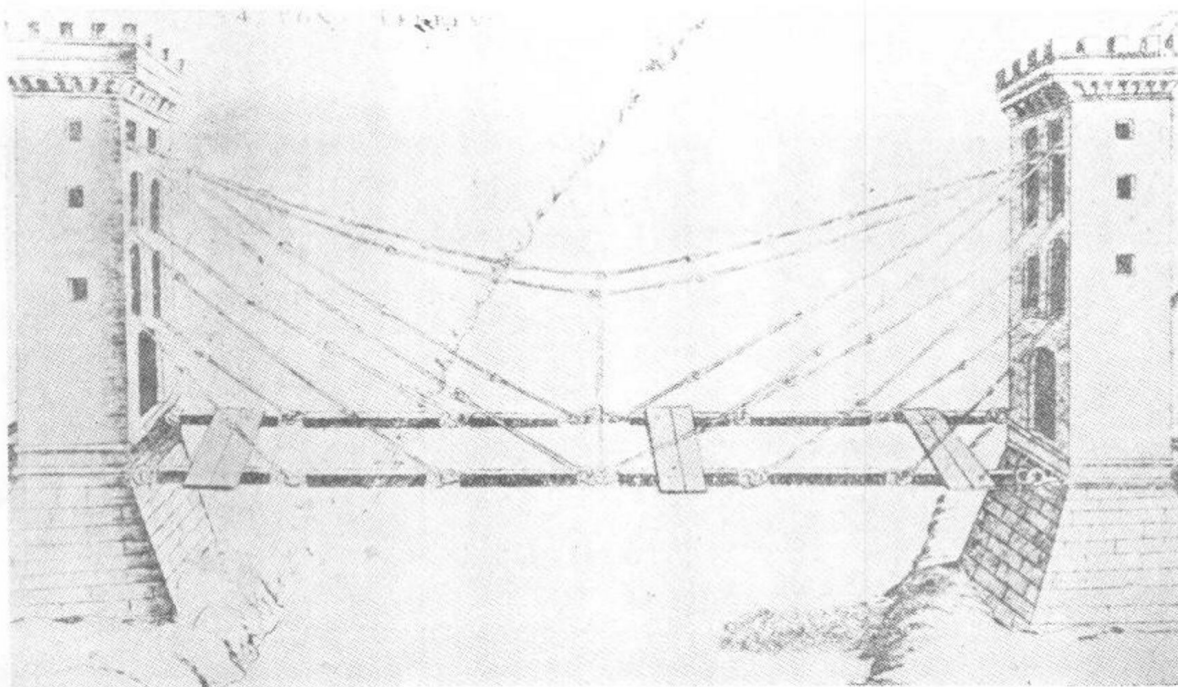


图1.5 1617年意大利人福斯图斯维兰蒂尤斯 (Faustus Verantius) 设计的用眼杆加劲的桥梁

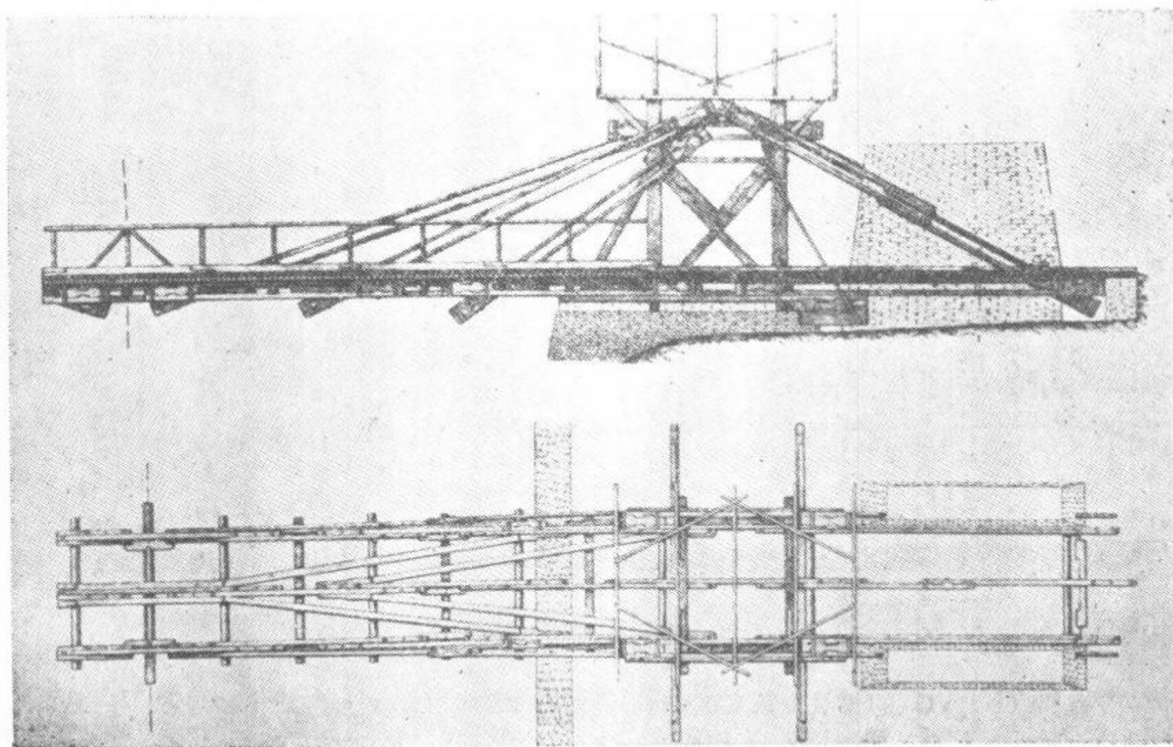


图1.6 1784年德国勒舍尔设计的用斜向木拉杆加劲的全木料桥

连接于铸铁桥塔的斜金属缆吊索 (图1.7)。

1817年在英格蘭德赖伯教堂 (Dryburgh Abbey) 建造的跨过特威德河 (Tweed River)<sup>[6]</sup>的桥上采用了斜链体系。这座桥跨长260英尺(79.3米), 宽4英尺(1.2米)(图1.8)。

当时发觉当行人通过时这座桥产生明显的振动, 链条的运动看来象是易于加速的样子。

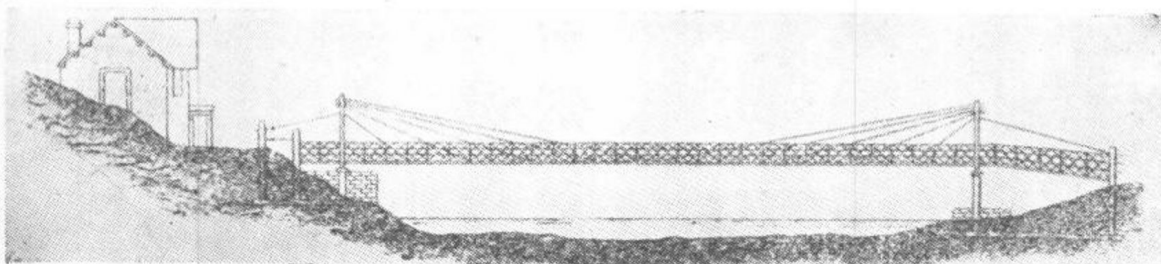


图1.7 梅多斯桥 (King's Meadows Bridge), 英格兰, 1817年

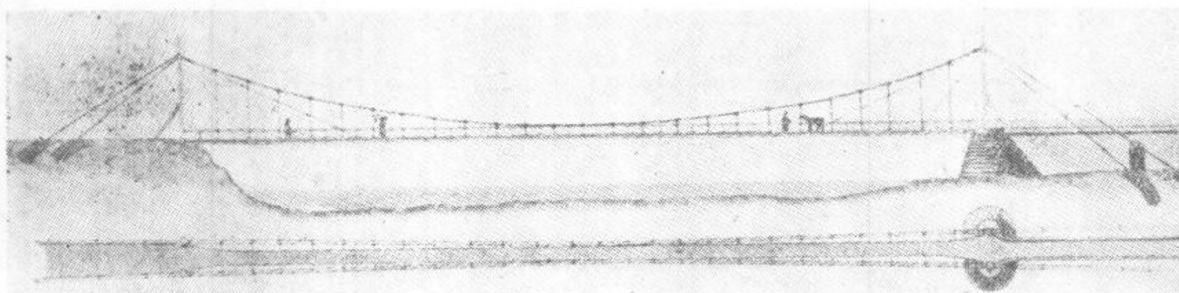


图1.8 英格兰德赖伯桥 (Dryburgh Bridge), 1817年

在1818年，完工后六个月，这座桥被一次猛烈的强风所摧毁。

大约在1821年，法国建筑师普瓦耶 (Poyet) [7] 推荐用锻铁杆件将梁吊到相当高的桥塔上。在这个体系中他建议采用扇形布置的拉索，所有拉索都锚固于桥塔顶部 (图1.9)。

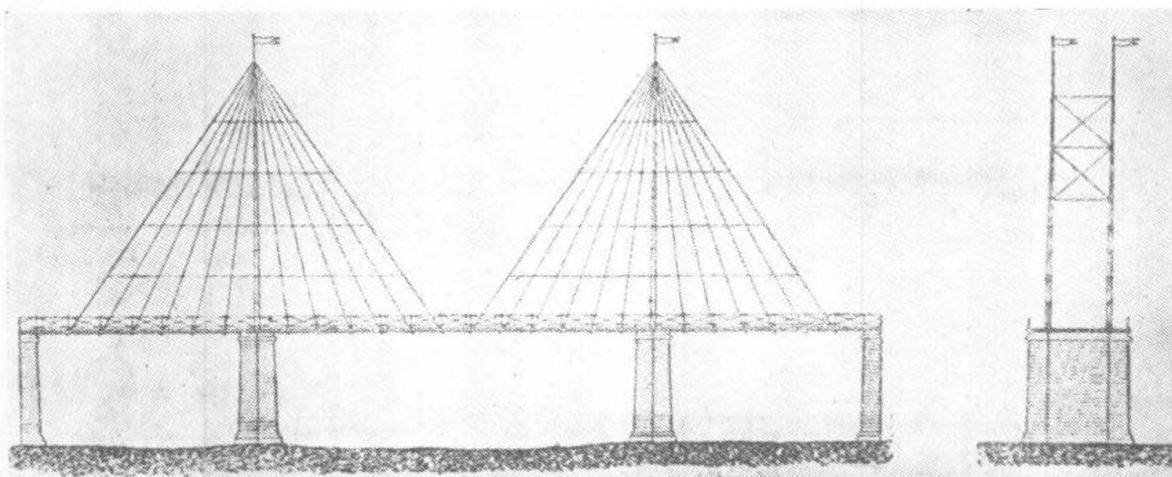


图1.9 1821年法国普瓦耶 (Poyet) 推荐的扇型拉索桥

普瓦耶 (Poyet) 的想法由著名的法国工程师纳维耶 (Navier) 进一步发展了。纳维耶在1823年研究了以斜链加劲的桥梁体系 [8] (图1.10)。

对照两种体系的桥道与斜链的重量，纳维耶发现，对于给定的跨度与桥塔高度，两种体系的造价大约相等。

1824年德国在尼恩堡 (Nienburg) 跨萨勒河 (Saale River) 架设了一座跨度为256英尺 (78米)，主梁用斜向杆件加劲的桥梁 [9]。但是，这座桥在荷载下产生过量的挠度，第二年就在许多行人通过的情况下由于链拉索的破坏而倒塌了 (图1.11)。

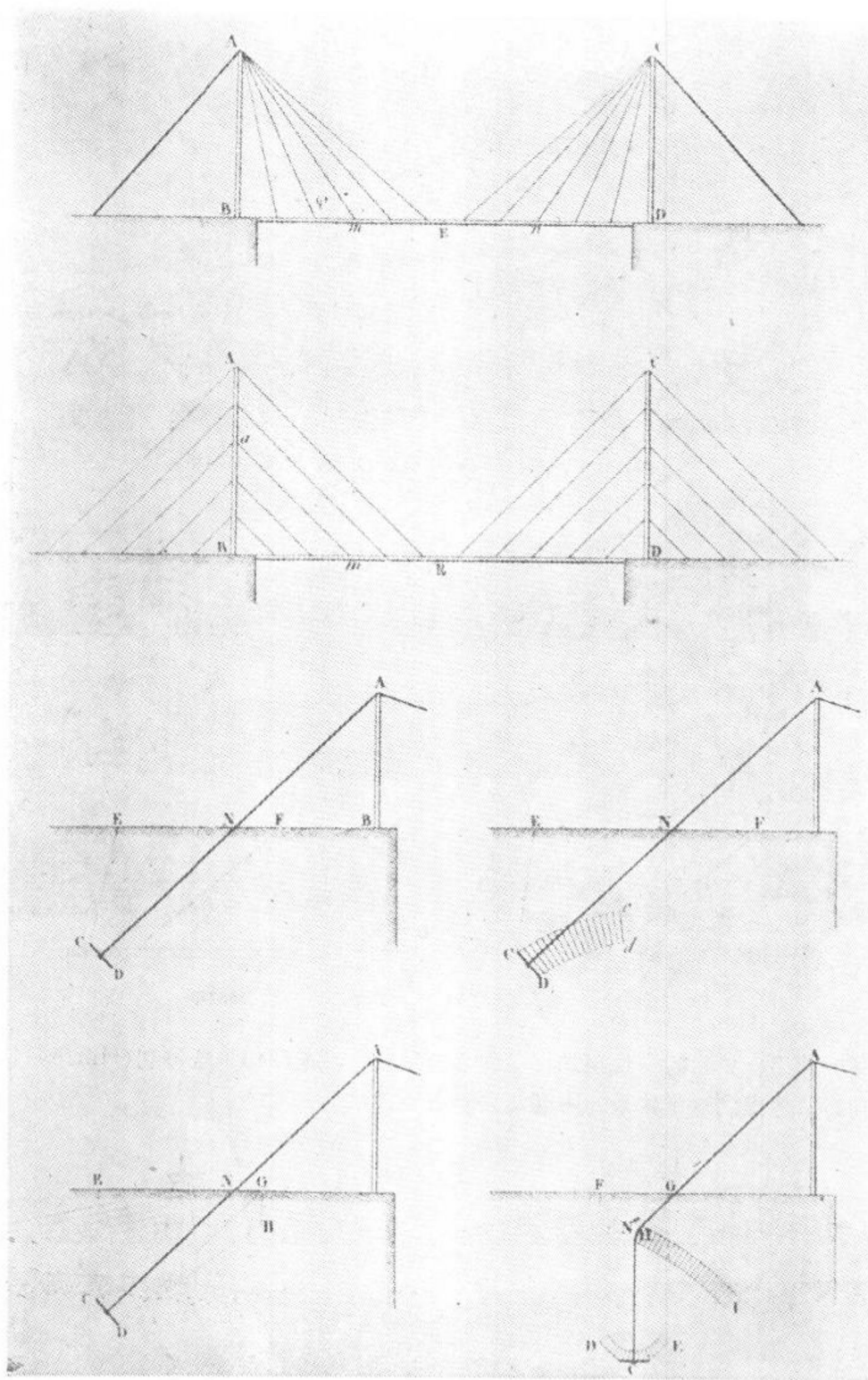


图1.10 1823年法国纳维耶 (Navier) 推荐的以链加劲的桥梁体系

1837年莫特利 (Motley) <sup>[10]</sup> 在英国蒂弗顿 (Tiverton) 建造了一座桥梁, 是采用直拉索的高次超静定双悬臂梁 (图1.12)。

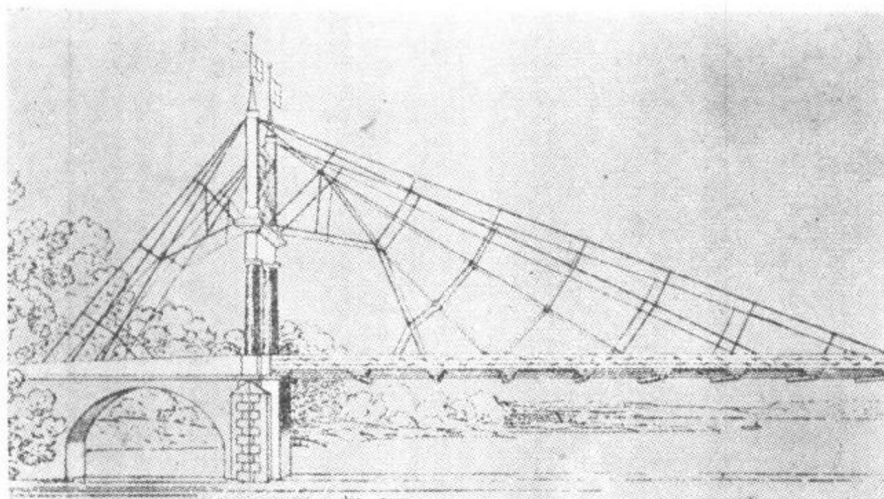


图1.11 萨勒河 (Saale River) 桥, 德国, 1824年

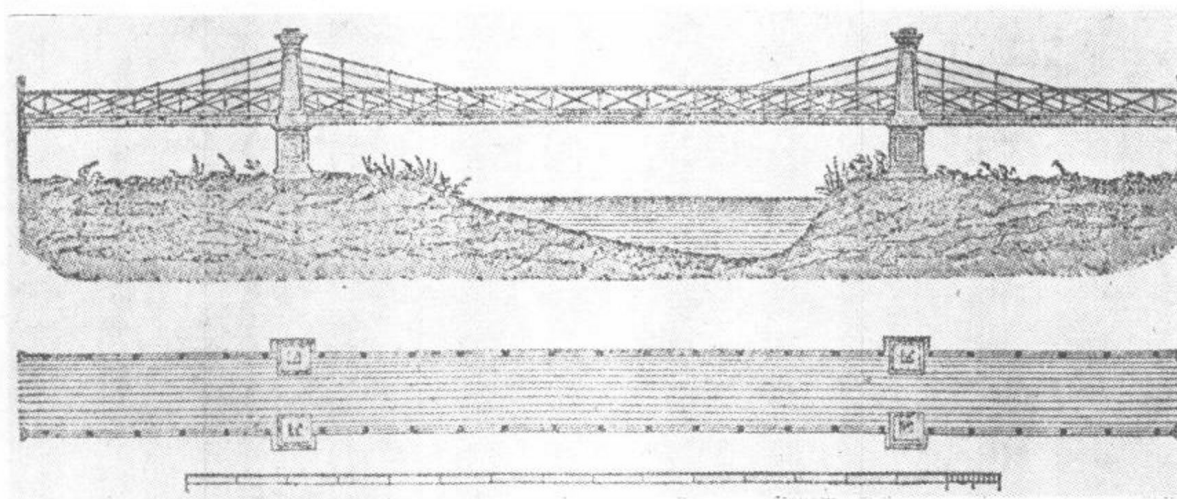


图1.12 蒂弗顿 (Tiverton) 桥, 英格兰, 1837年

另外一种平行拉索的布置型式, 现称为竖琴型的, 是1840年哈特利(Hatley)<sup>[11]</sup>提出的(图1.13)。他提到这个体系的刚度比扇形者小。

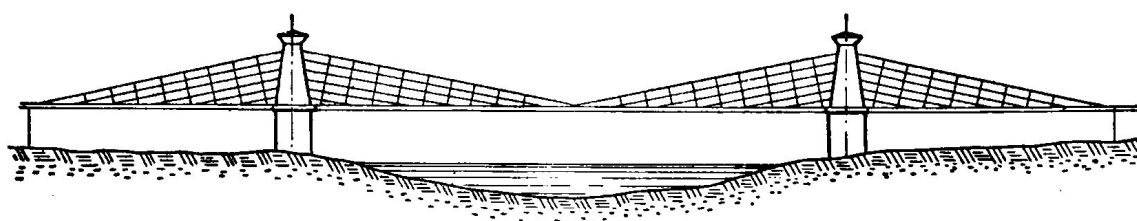


图1.13 英格兰哈特利 (Hatley) 提出的竖琴型拉索桥, 1840年

英格兰曼彻斯特海船运河 (The Manchester Ship Canal) 桥<sup>[12]</sup>提出了一座颇有趣的斜缆型结构(图1.14)。1843年克莱夫 (Clive)<sup>[13]</sup>提出斜拉桥的一种有独创性的体系, 示于图1.15。

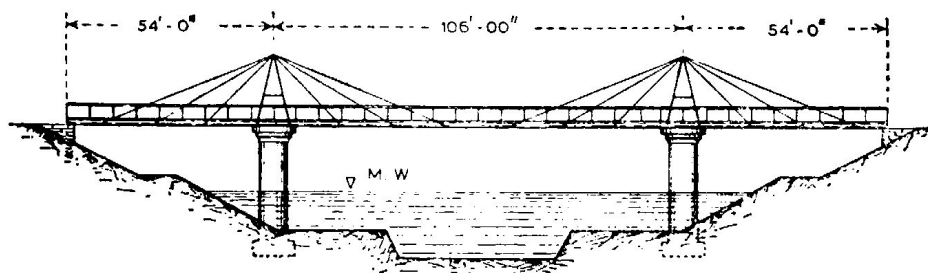


图1.14 英格兰曼彻斯特海运河桥, (The Manchester Ship Canal Bridge, England)

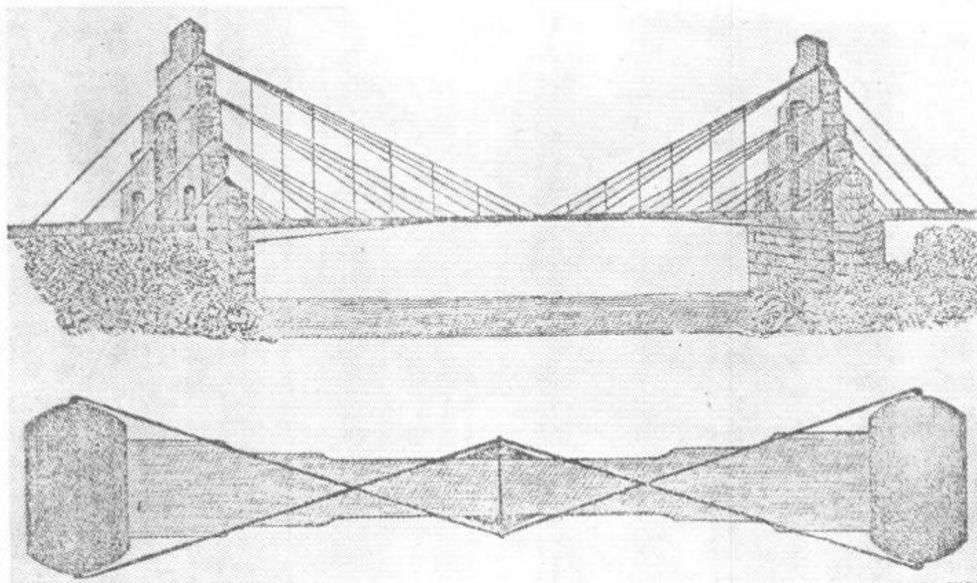


图1.15 英格兰克莱夫 (Clive) 提出的桥梁体系, 1843年

1868年在捷克斯洛伐克布拉格 (Prague) 跨过伏尔塔瓦河 (Moldau River)\*建造了弗朗茨约瑟夫桥 (Franz Joseph Bridge), 它是由奥尔狄施 (Ordish) 和勒弗弗尔 (Le Feu-vre) [14]设计的 (图1.16)。这座桥实际上体现了斜拉桥与古典的悬索桥的组合。

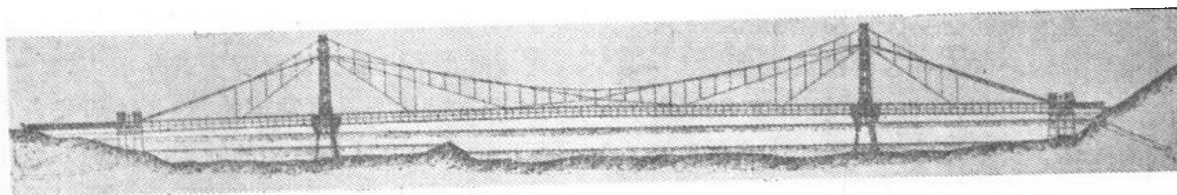


图1.16 捷克斯洛伐克布拉格伏尔塔瓦河 (Moldau River) 上的弗朗茨约瑟夫桥 (The Franz Joseph Bridge), 1868年

在这座桥中引入了新的悬吊型式, 使用直接从桥面系节点奔向桥塔顶部的斜拉杆, 由桥塔之间悬链线缆索悬吊着这些轴向受拉杆件, 并使之保持在固定位置, 这些悬链线缆索就是为了承受轴向受拉杆件的重量。用斜杆来支撑中间节点, 将拉力传到另一半跨的最长拉索上去, 这是一个颇富趣味的想法。

在英格兰切尔西 (Chelsea) 跨过泰晤士 (Thames) 河、主跨为 400 英尺 (122米) 的

\* 译注, 原文Moldau River即伏尔塔瓦河。

阿尔伯特桥 (Albert Bridge) [15], 是早在1873年奥尔迪施 (Ordish) 用他的体系建造的 (图1.17)。这座桥的悬索系统由汇聚于桥塔顶的拉杆组成。在中央跨每侧有三个斜拉杆件, 端跨每侧有四个。

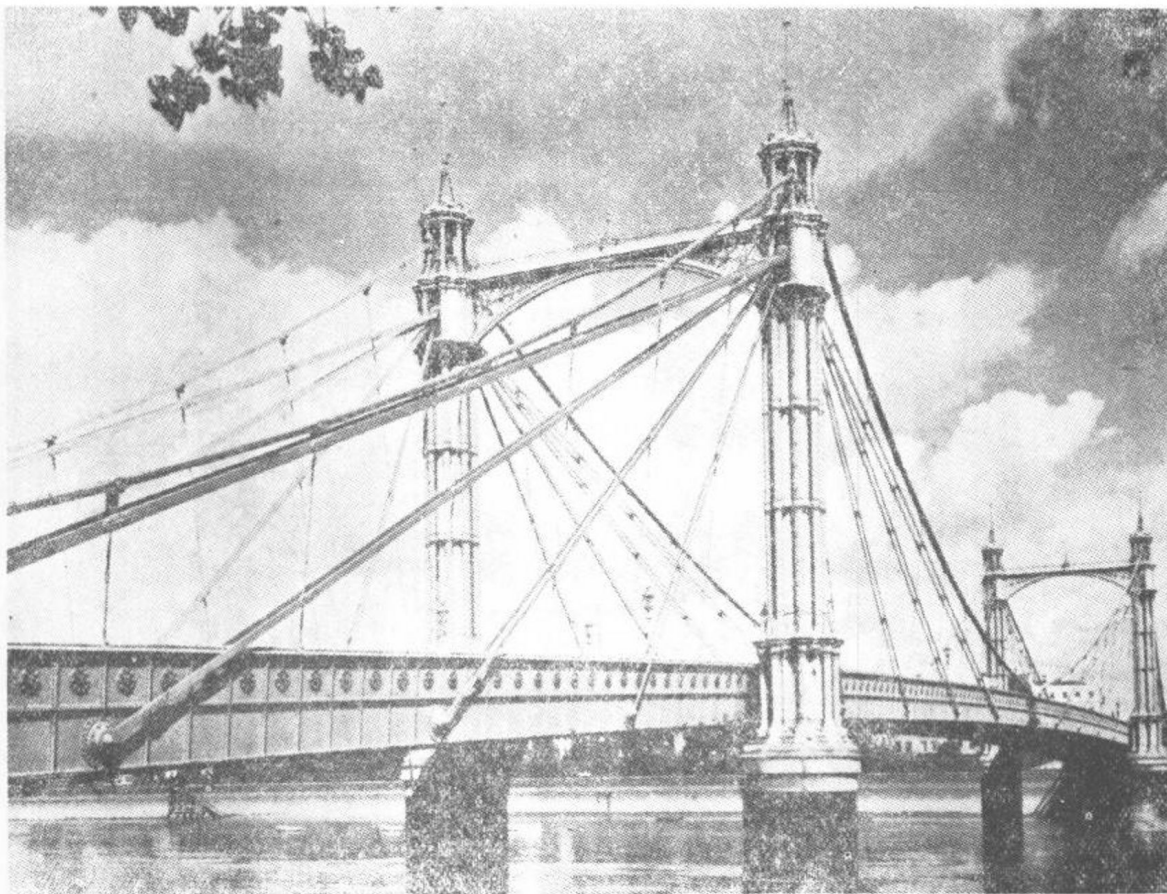


图1.17 英格兰泰晤士河上的阿尔伯特桥 (Albert Bridge), 1873年

这里所介绍的简短的历史回顾表明拉索梁桥的想法是很古老的, 然而直到二十世纪才应用成功。进展如此之慢必须在几座最初建造的斜拉桥的倒塌中寻找理由。

斜拉索最初在英国采用, 十九世纪初期在那里得到广泛的应用。然而, 由于抵抗风压的强度不足, 一些具有这样拉索的悬索桥失败了。这导致在英国部分地放弃了这种型式。

必须注意到, 在许多情况下这些早期的斜拉桥实际在结构上是有缺陷的, 这些缺陷导致它们的破坏。这主要是由于设计者对这种桥梁的实际结构性能及其构造中的缺陷的误解, 例如缆索通常截面不足而且在架设时未绷紧, 因而, 在荷载作用下整个结构产生巨大变形以后缆索才起正常作用。缆索在这方面的表现导致了这样的看法, 即斜拉桥异常柔弱且不安全。是纳维耶 (Navier) 对这些桥的破坏进行了报道并建议采用悬索桥而不用斜拉桥的。纳维耶的论述使桥梁工程师们更加倾向于发展悬索桥了。

十九世纪后半叶, 在美国, 著名的桥梁工程师勒布灵 (Roebing) 查核了斜拉索。与加劲桁架 (勒布灵所提出) 和有效的横撑相比较, 斜缆显得更为有效。

在勒布灵设计的悬索桥中悬索总是辅之以斜拉索 [16]。一个斜向拉索网与悬索居于同一斜平面内。设置这些斜拉索的目的是双重的, 它们不仅大大地帮助了悬索支撑梁桥, 而且在为抵抗可能由风作用所引起的累积振动而需要加强桥面方面, 提供了最经济与最有效的措施。

1855年勒布灵建造了世界上第一座成功的尼亚加拉河（Niagara River）铁路悬索桥（图1.18）。全部荷载由悬索与广泛设置的放射型拉索系统二者分担。应用斜拉索系统为快速通过列车以及抗风稳定性提供了所需要的全部刚度。

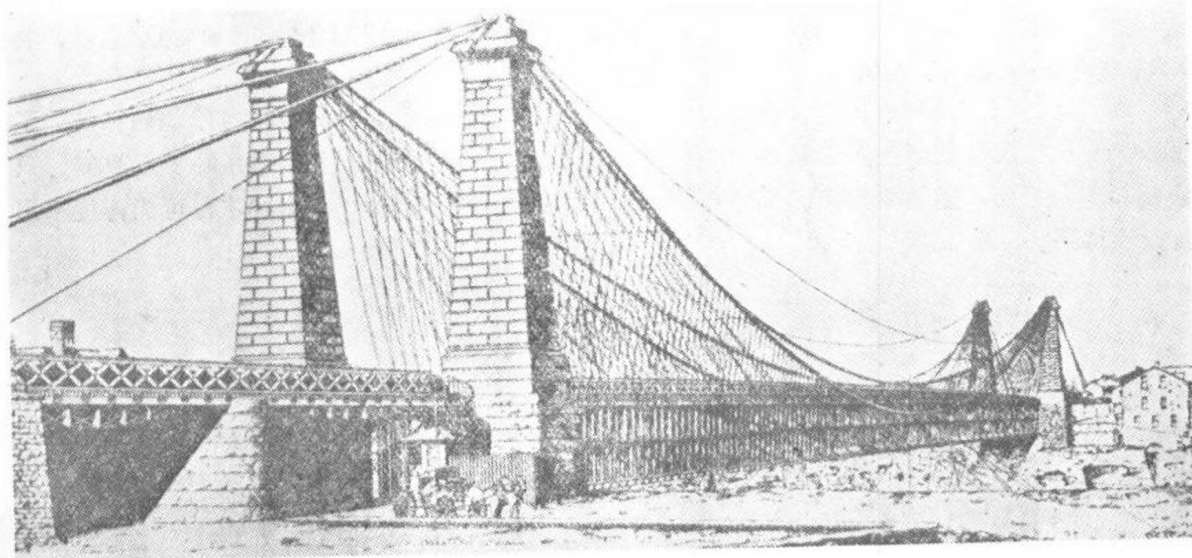


图1.18 美国尼亚加拉悬索桥（The Niagara Suspension Bridge），1855年

勒布灵还在俄亥俄桥（Ohio Bridge）工程中大量采用了斜拉索（图1.19）。钢丝绳做的斜拉索承担几乎车行道与活荷载总重的一半，这些斜拉索从桥塔顶部径直奔向沿着桥面的一个接一个的点。用这种布置加劲的主索实际上仅需承担车行道与荷载总重的一半。拉索用来有效地加强桥面并在重载通过和疾风中防止或控制桥面的振动。

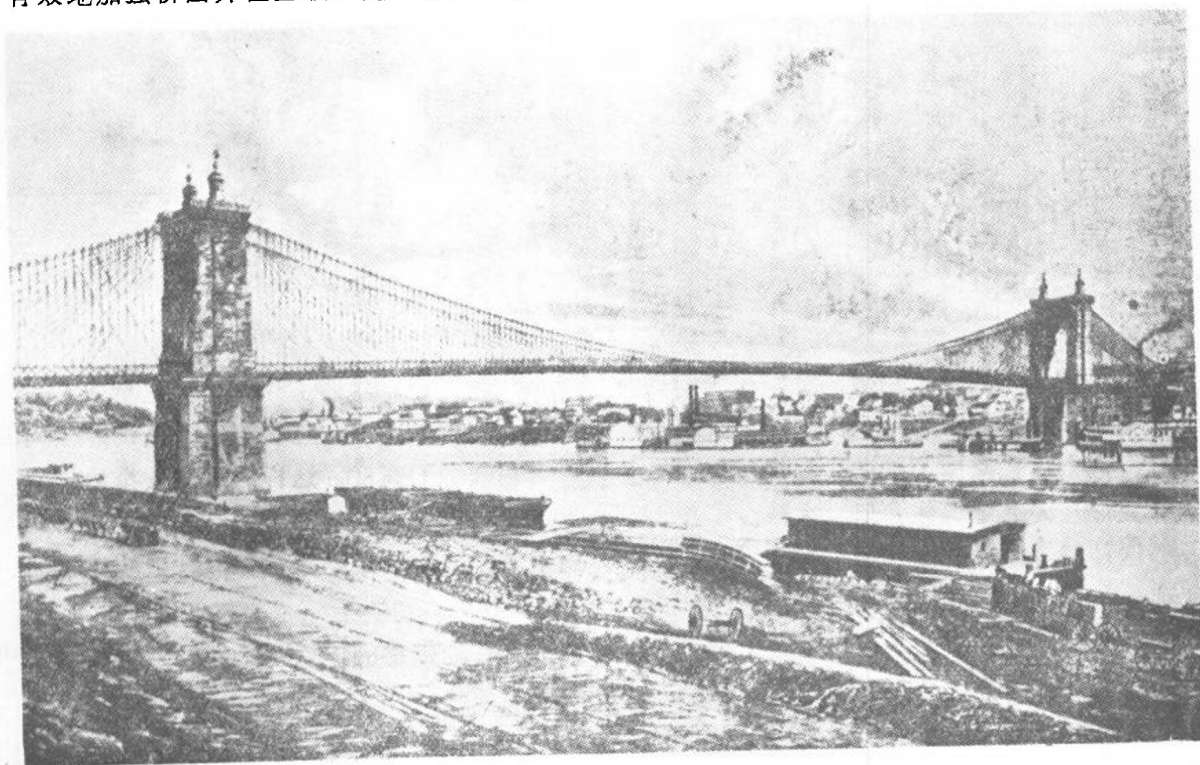


图1.19 美国辛辛那提（Cincinnati）俄亥俄河桥（The Ohio River bridge），1867年