

Theory and Practice of
Modern Self-Anchored Suspension Bridges



现代自锚式悬索桥 理论与应用

胡建华 著



人民交通出版社
China Communications Press

PDG

策划编辑：杨文银

责任编辑：刘 涛 李文臣 李 农

封面设计：杨真朴



ISBN 978-7-114-07313-7



9 787114 073137 >

定价：36.00元

设计
杨真朴
PDG

U448.25
C10

现代自锚式悬索桥理论与应用

Theory and Practice of Modern Self-Anchored Suspension Bridges

胡建华 著

人民交通出版社

新
知
识
PDG

内 容 提 要

本书结合国内外自锚式悬索桥的典型实例,系统论述了自锚式悬索桥的计算理论、设计方法及施工技术。内容包括:自锚式悬索桥的历史与发展;结构组成与设计方法;静动力计算理论及分析;抗风及抗震设计;结构模型试验研究;施工及施工控制技术。

本书可供高等院校桥梁工程专业师生阅读,亦可供从事桥梁工程设计、施工与科研的专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代自锚式悬索桥理论与应用/胡建华著.—北京:人民交通出版社,2008.7
ISBN 978-7-114-07313-7

I. 现… II. 胡… III. 悬索桥—桥梁工程 IV. U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第117080号

书 名: 现代自锚式悬索桥理论与应用

著 作 者: 胡建华

责任编辑: 刘 涛 李文臣 李 农

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.75

字 数: 328千

版 次: 2008年8月 第1版

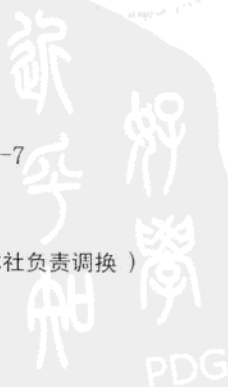
印 次: 2008年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07313-7

印 数: 0001~1500册

定 价: 36.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前言

工程设计承载历史,桥梁结构体系的创新是桥梁设计师的永恒追求。随着时代的发展,现在人们不仅更注意桥梁结构自身的力学美,还特别注重桥梁建筑结构与环境的相互协调,崇尚结构与艺术的完美融合,追求结构与区域文化的深度契合。

19世纪60年代桥梁工程师提出了自锚式悬索桥的设想。1915年,德国设计师在科隆的莱茵河上建造了第一座大跨度自锚式悬索桥——科隆—迪兹桥,由此揭开了自锚式悬索桥建设的序幕。而德国1929年建成的科隆—米尔海姆桥,主跨达315m,更是将自锚式悬索桥推向第一个顶峰。

由于斜拉桥的兴起与迅速发展,自锚式悬索桥20世纪50~80年代一度沉寂达30余年之久。直到20世纪90年代,随着桥梁设计理论、架设技术与材料科学的进步,人们又开始关注自锚式悬索桥,并进行了新的尝试。1990年日本此花大桥和2000年韩国永宗大桥成功建成,展示了现代自锚式悬索桥在中小跨径范围内的强劲生命力。进入21世纪,佛山平胜大桥、新奥克兰海湾大桥等一批自锚式悬索桥的相继设计与建成,标志着这一造型美观的桥型进一步的发展与繁荣。

自锚式与地锚式悬索桥的差别只是主缆锚固方式的不同,但其结构性能、设计方法和施工工艺却因此大为不同。到目前为止,关于现代自锚式悬索桥的结构性能、力学行为、架设技术等方面资料较少,尚缺乏能系统全面阐述自锚式悬索桥的专著。作为一名热衷桥梁建设事业的工作者,作者深感其必要性。

2003年作者主持了佛山平胜大桥设计,该桥是世界上首座采用独塔、四索面、混合梁的悬索桥,也是目前世界跨度最大的自锚式悬索桥。针对佛山平胜大桥建设面临的诸多设计与施工技术难题,作者和湖南省交通规划勘察设计院设计团队一道与湖南大学、西南交通大学、长沙理工大学、同济大学、中南大学及湖南科技大学等多所高校合作,开展了“大跨度自锚式悬索桥设计理论与关键技术研究”,成功地解决了自锚式悬索桥结构体系、混合加劲梁、整体稳定与局部屈曲、串列双桥面与双主缆气动干扰、钢箱梁顶推工艺、结构体系转换等技术难题,形成了一套自锚式悬索桥设计与施工关键技术,其研究成果也为本书奠定了基础。为丰富本书内容,作者还收集了一些自锚式悬索桥的实桥资料,以供读者参考;此外,本书还引用了部分国内外公开发表的文献资料,谨在此一并致谢。本书经过多次补充与修订,于2008奥运之年成稿。真诚地希望本书的出版能对推动自锚式悬索桥建造技术的发展有所贡献。

全书共分六章,第一章介绍了自锚式悬索桥的发展历程;第二章从自锚式悬索桥结构组成出发,探讨了结构体系的设计方法,并提供了部分实桥资料;第三章论述了自锚式悬索桥的静力计算理论及计算方法;第四章首先对自锚式悬索桥的结构动力特性进行参数研究,在此基础上分别对自锚式悬索桥抗风及抗震设计进行了阐述;第五章主要内容是佛山平胜大桥相关试

目 录

第一章 绪论	1
第一节 自锚式悬索桥的特点	1
第二节 自锚式悬索桥的发展历史	2
第三节 自锚式悬索桥的展望	9
参考文献	10
第二章 自锚式悬索桥结构设计	12
第一节 自锚式悬索桥结构组成	12
第二节 自锚式悬索桥概念设计	28
第三节 自锚式悬索桥结构设计	36
第四节 双塔自锚式悬索桥示例	39
第五节 独塔自锚式悬索桥示例	43
参考文献	54
第三章 自锚式悬索桥静力理论与分析	55
第一节 计算理论	55
第二节 两节点空间索单元	58
第三节 自锚式悬索桥主缆成桥线形计算	63
第四节 自锚式悬索桥施工过程模拟分析	75
第五节 结构参数对自锚式悬索桥静力性能的影响	81
第六节 自锚式悬索桥稳定性分析	84
参考文献	95
第四章 自锚式悬索桥动力特性及抗风抗震	96
第一节 自锚式悬索桥动力特性	96
第二节 自锚式悬索桥抗风设计	109
第三节 自锚式悬索桥抗震减震设计	131
参考文献	152
第五章 自锚式悬索桥结构模型试验	155
第一节 全桥模型试验	155
第二节 钢箱梁局部稳定模型试验	164
第三节 吊索锚箱模型试验	169
第四节 加劲梁钢—混凝土结合段试验	173
参考文献	188

第六章 自锚式悬索桥施工与施工控制..... 190

第一节 钢箱梁顶推架施工工艺..... 190

第二节 自锚式悬索桥主缆架设..... 200

第三节 自锚式悬索桥体系转换..... 204

参考文献..... 212



第一章 绪 论

第一节 自锚式悬索桥的特点

悬索桥是目前跨越能力最强的桥梁结构。传统的地锚式悬索桥一般只适用于超大跨度,需要建造体积庞大的锚碇来锚固主缆,当跨度逐步减小时(特别是在软弱地质地区),其主缆锚固(地锚)所占全桥造价的比重将迅速增大,传统地锚式悬索桥的优势将会逐渐丧失。如果将主缆通过适当的方式直接锚固在加劲梁上,就可以取消造价昂贵的锚碇,从而演变成自锚式悬索桥。这样,一方面,避免了修建巨大且昂贵的地下锚碇,使得在软基地区修建悬索桥成为可能;另一方面,将主缆锚固于加劲梁上还可以为加劲梁提供附带的预应力,从而有效地降低工程造价。

自锚式悬索桥与地锚式悬索桥虽然只是主缆锚固方式的不同,但其结构性能、设计方法和施工工艺却大为不同。自锚式悬索桥具有以下几个方面的特点^[1,2]。

一、桥型布置

自锚式悬索桥取消了巨大的主缆锚碇,不仅可以节省建造锚碇的费用,而且大大降低了对于基础地质条件的要求,有效地拓展了悬索桥的适用范围,从而为软基地区的中等跨径桥梁提供了一种造型优雅而富有竞争力的桥型比选方案,两种桥型布置示意图见图 1-1。

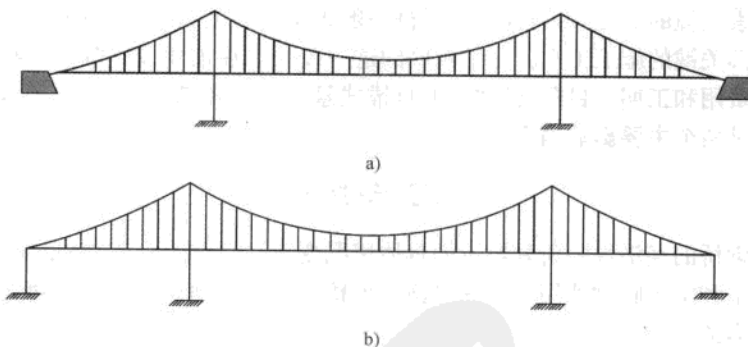


图 1-1 地锚式悬索桥与自锚式悬索桥桥型布置示意图

a)地锚式悬索桥;b)自锚式悬索桥

二、结构体系

自锚式悬索桥主缆锚固于加劲梁两端,吊索受拉,加劲梁受压弯,形成自平衡的缆索支承结构体系,与斜拉桥有许多相似之处。首先,两者索塔和加劲梁都承受巨大的轴向压力,特别

是当跨径增大时,结构体系的整体稳定和局部屈曲都是桥梁工程师十分关注的问题;其次,两种桥型都是高次超静定结构,加劲梁受力对索力变化非常敏感,如何通过索力调整以达到技术经济合理的成桥状态是其设计中的共同目标。

三、力学行为

由于自锚式悬索桥的压弯效应在一定程度上抵消了主缆的重力刚度效应,因此自锚式悬索桥成桥后结构整体的几何非线性一般小于同跨径的地锚式悬索桥。但是,施工过程中其结构体系变形较大,具有明显的非线性效应,因此,现代自锚式悬索桥的设计一般均采用非线性有限元理论。

四、加劲梁

地锚式悬索桥加劲梁一般抗弯刚度较小,属纯弯曲构件,而自锚式悬索桥加劲梁通常刚度较大,属压弯构件。造成这一改变的主要原因是自锚式悬索桥的加劲梁必须承受缆索支承体系从锚固系统传来的巨大轴压力,使加劲梁成为压弯杆件。主缆锚固点之间加劲梁必须连续且有较大的抗弯刚度以保证其整体稳定性,若采用钢加劲梁则还存在局部稳定问题。

五、缆吊系统

为降低加劲梁轴压力,自锚式悬索桥一般采用较大的垂跨比。以双塔悬索桥为例,自锚式悬索桥的垂跨比一般在 $1/8 \sim 1/4$ 之间,而相应地锚式悬索桥的垂跨比一般在 $1/12 \sim 1/8$ 之间。

地锚式悬索桥主缆一般均采用平行双面索布置,自锚式悬索桥则出现了单索面和空间索面等多种形式。

六、施工工艺

在采用钢索主缆的前提下,自锚式悬索桥一般先架设加劲梁,然后再架设主缆,成桥时结构体系转换是其关键的施工工艺。施工顺序的这一改变往往需要设置临时支撑,一定程度上增加了施工的费用和工期。目前,已建成的自锚式悬索桥跨径都不大,究其原因,加劲梁轴压力和施工工艺是两个主要影响因素。

七、经济指标

自锚式悬索桥的经济性随所处桥位的具体情况变化,主要取决于节省的锚碇费用与增加的加劲梁用钢量和施工临时费用之间的平衡。该桥型在软基地区和中等跨度范围内,还是具有良好的竞争力的。

第二节 自锚式悬索桥的发展历史

19 世纪 60 年代桥梁工程师就提出了自锚式悬索桥的结构设想。一个半世纪以来,自锚式悬索桥的发展经历了 20 世纪上半叶的兴起阶段、20 世纪下半叶的相对沉寂阶段和 20 世纪 90 年代后复兴与发展阶段。本节简要回顾自锚式悬索桥的发展历程^[3]。

一、自锚式悬索桥的兴起

19 世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫·朗金(Josef Langer)和美国工程师查理斯·本德(Charles Bender)分别独立地构思出自锚式悬索桥的造型。约瑟夫·朗金首先在 1859 年提出了这种桥型的构思,查理斯·本德于 1867 年就自锚式悬索桥申请并获得了专利。他们在进行悬索桥设计时,都没有采用连续主缆,而是将主缆分别锚固在桥梁主跨跨中位置和边跨加劲梁两端。约瑟夫·朗金于 1870 年为弗朗兹—尤瑟夫(Franz-Joseph)铁路建造了世界上第一座跨度 22.8m 的自锚式悬索桥 Wrsowicer 桥,而查理斯·本德则从没有建造过这种桥梁。尽管他们关于自锚式悬索桥的构思是最早的,但对后来的桥梁设计并没有直接的影响。真正意义的自锚式悬索桥是在 20 世纪初的德国兴起并发展的。

1915 年,德国工程师在科隆的莱茵河上建造了第一座大跨度自锚式悬索桥即科隆—迪兹(Cologne-Deutz)桥,主跨 184.5m,桥塔为拱门造型,且铰支在承台上,见图 1-2。该桥在进行桥型方案选择时,从桥梁美学的角度考虑选择了悬索桥方案,因为担心地质条件不允许修建巨大的锚碇,创造性地采用了自锚式悬索桥结构体系。该桥的施工过程是先在临时木支架上铺设钢梁,然后架设主缆。主缆是由一节节的眼杆组成的链条,因此很容易锚固到加劲梁上。加劲梁在桥塔与跨中处设置施工临时铰,可以消除恒载产生的弯矩,成桥后用钢板铆接成连续梁。临时铰的设置起到了简化受力分析的作用,这在当时是十分必要的。科隆—迪兹桥在 1945 年被毁,而原来桥台上的钢箱梁仍保存至今。世界各国的桥梁工程师普遍认为科隆—迪兹桥主缆采用的眼杆链式结构是一个重要的创新,10 年后美国工程师又利用这种眼杆结构实现了自锚式悬索桥的悬臂施工法。科隆—迪兹桥的建造促成了自锚式悬索桥的兴起。位于美国宾夕法尼亚州匹兹堡跨越阿勒格尼河的 3 座自锚式悬索桥、塞尔维亚贝尔格莱德的亚历山大一世桥以及日本东京清州桥都效仿了科隆—迪兹桥的设计。

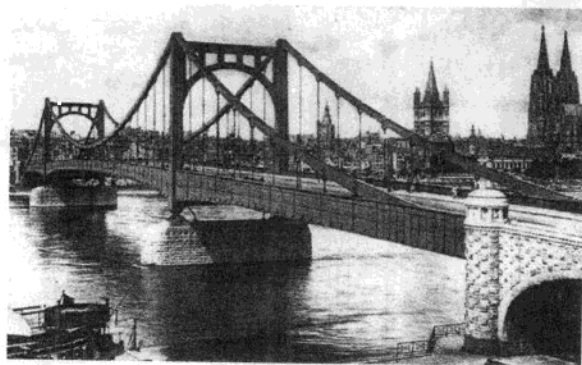


图 1-2 德国科隆—迪兹桥

1925~1928 年间美国在匹兹堡阿勒格尼河上相继修建了 3 座类似的自锚式悬索桥,表明自锚式悬索桥的应用在美国得到了认可。城市建筑委员会在规划第六、第七和第九条街时,基于桥位地质条件和景观考虑选择了自锚式悬索桥方案。匹兹堡桥效仿了科隆—迪兹桥的眼杆、链式主缆、拱形索塔和连续钢梁等构造,见图 1-3。



图 1-3 美国匹兹堡市阿勒格尼河第七街桥

这 3 座自锚式悬索桥的主跨约为 131~135m,比科隆—迪兹桥短了近 30%,但采用了一种独特的悬臂施工法。这种悬臂施工法基于其特殊的链式主缆和吊杆系统。主缆和吊杆不是采用通常的钢丝编制,而是用一种特殊的眼杆逐段相连而成的链式结构。眼杆是一片两头有圆孔的条形钢板,每段主缆由 9 片或 8 片眼杆并列组成,加上吊杆的两片眼杆,总计 19 片眼杆由一根钢制插销连接在一起,如图 1-3 所示。这种逐段相连的刚性链式主缆为悬臂施工法提供了必要条件。施工时先用支架法铺架边跨钢梁,然后将边跨主缆由边跨锚固端逐段栓接,并用临时压杆支撑,一直连接到塔顶。边跨完成后施工主跨,每栓接一段眼杆即用一根临时压杆支撑,然后用桥面吊机悬拼一段加劲梁,连接好吊杆后进入下一阶段的施工。待全桥合龙后拆除临时压杆就完成了体系转换,形成自锚式悬索桥。图 1-4 是悬臂施工过程照片,图 1-5 为该桥的施工示意图。该桥的具体施工方法如下^[4]:

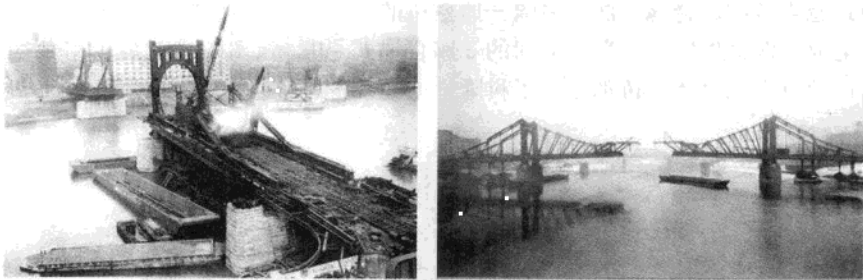


图 1-4 美国匹兹堡市阿勒格尼河第七街桥施工照片

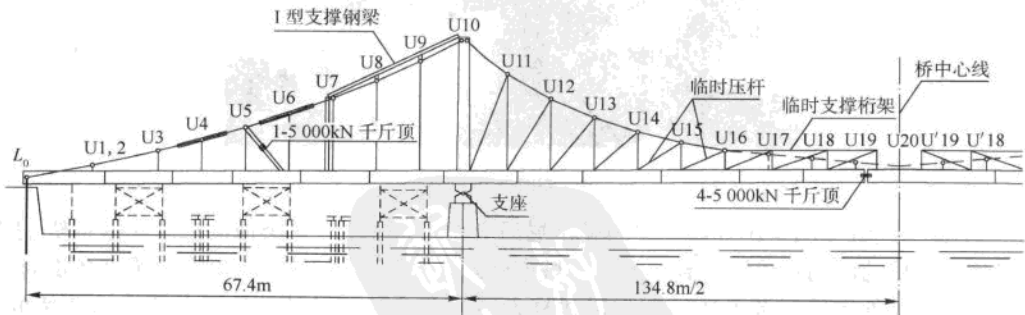


图 1-5 美国匹兹堡市阿勒格尼河第七街桥施工示意图(尺寸单位:m)

(1) 边跨临时墩施工

首先施工边跨 1~9 号临时墩,其中 1~3、5、6、8 及 9 号墩在边跨架设完成后拆除,4、7 号墩在边跨施工完成后仍保留,以作为边跨加劲梁的支承,待中跨加劲梁合龙后再拆除。

(2) 边跨施工

在 1~9 号边跨临时墩上搭设支架,在支架上再铺设轨道,采用重约 1 000kN 的移动起重机将边跨加劲梁架设在支架上。边跨眼杆主缆锚固端逐段栓接,首先安装边跨第 1、2 段眼杆主缆,并将对应的 3 号吊杆安装就位。安装主缆第 3~5 段、5~7 段主缆时,使用临时工字钢梁连接 3~5 号、5~7 号节点,依靠临时杆件实现节点 4 和 6 的栓接。主缆 7 号节点至塔顶段的安装方法类似,使用了一根更长的 I 型支撑钢梁连接节点 7 至塔顶。为了实现中跨加劲梁的合龙,专门设计了一套可伸缩的构造系统,该系统采用 5 000kN 的千斤顶与杆件组成,既可受压也可受拉,在 5 号吊杆处垂直于主缆切线方向处连接主缆和加劲梁。该结构系统的作用是当中跨加劲梁悬臂挠度太大时,通过将塔往回拉以控制悬臂梁的次应力;同时可控制中跨加劲梁悬臂端的高程,以辅助中跨加劲梁合龙;并可通过调节该系统确保 L_4 和 L_6 处加劲梁下侧铰顺利连接,见图 1-5。

需要说明的是,合龙前南侧加劲梁要向中跨方向移动 30.48cm(12in),从而确保主缆在跨中 U20 节点顺利连接合龙。在施工边跨时,边跨的 4、5、6 号吊杆下端未与加劲梁连接,并且在南侧桥塔处设置了滚动支座。待加劲梁向跨中移动完后,在滚动支座处采用临时板固定以防止进一步移动,桥梁北侧桥塔处则设置固定铰支座。

(3) 中跨施工

施工中跨时,每栓接一段眼杆主缆即用一根斜向临时压杆支撑,然后用桥面吊机悬拼一段加劲梁,连接好吊杆后进入下一阶段的施工。当施工中跨跨中部分时,由于眼杆主缆与加劲梁之间的间距较小,无法设置临时压杆,必须采用临时支撑桁架。该桁架具有上弦杆及横撑,并将加劲梁作为下弦杆。合龙前南侧桥塔滚动支座处的固定钢板放松,该处支座变成滚动支座。在中跨加劲梁合龙处对称布置了 4 台 5 000kN 的千斤顶,从而使它们的合力通过加劲梁横截面重心。通过千斤顶将南侧加劲梁向南侧顶推,随着千斤顶顶推,开始将桥梁从悬臂体系向悬吊体系转换,加劲梁跨中向上抬高,同时加劲梁南端也逐渐移动到成桥位置;当千斤顶顶推的应力达到加劲梁在悬臂状态结构自重作用下的应力时,中跨主缆悬臂施工时的临时压杆就会自动放松,从而实现了桥梁结构体系由悬臂状态向自锚式悬索桥体系的转换。然后安装 35.56cm(14in)(比原先移动的 1ft 长了 2in)中间合龙段,待合龙梁段两端被铆定后拆除千斤顶,完成全桥施工。该桥于 1926 年 6 月正式建成通车。

这种施工技术避免了在航道中布置支架,相比科隆—迪兹桥的施工有了很大进步。匹兹堡每一座桥的工期都在 15 个月以内。当 1928 年第六街桥通车时,该桥获得了美国钢结构协会评出的年度最美桥梁奖。目前,这 3 座桥仍在正常工作。在匹兹堡桥之后美国只修建了 2 座自锚式悬索桥:1933 年建成的密苏里州跨径 69m 的小奈安瓜河(Little Niangua)桥和 1939 年建成的印第安纳州沃巴什河跨径 107m 的哈森威尔(Hutsonville)桥。

科隆—迪兹桥建成后的 25 年间德国在莱茵河上又修建了多座自锚式悬索桥,最著名的是 1929 年建成的主跨 315m 科隆—米尔海姆(Koln Mulheim)桥,跨径布置为 85m+315m+85m,是当时欧洲跨径最大的悬索桥,并且该桥采用了现代的钢丝主缆,见图 1-6。在 1927 年,最初设计评审团从 38 个竞争方案中选中了钢拱桥,主要是考虑桥型的美观,后来因为担心桥

位区地质条件不能承担拱脚的推力,才要求改为自锚式悬索桥。非常遗憾的是,该桥于 1945 年在战争中被毁。1934 年修建的科瑞菲尔德(Krefeld)桥也很有特色,该桥主缆没有在跨中连接,也是采用链式主缆和悬臂法施工。该桥主缆在跨中直接锚固于梁中,从某种意义上说已经孕育了现代斜拉桥的思想。科瑞菲尔德(Krefeld)桥 1945 年在战争中被毁,但战后仍按原设计重建,一直使用至今。

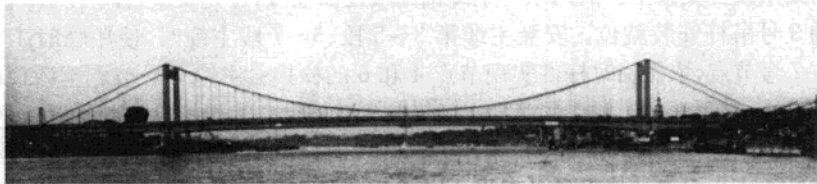


图 1-6 德国科隆—米尔海姆(Koln Mulheim)桥

20 世纪 30 年代初,一些工程师热衷于研究并采用自锚式悬索桥,并不是完全因为它没有锚碇,而是因为计算理论简单。美国和法国的一些文献都建议用弹性理论来计算自锚式悬索桥,那时人们已经知道挠度理论是悬索桥较为精确的计算方法,但是工程师们认为自锚式悬索桥加劲梁的轴力使其受力性能接近于更简便的弹性理论。基于这种思想,20 世纪 30 年代美国和德国修建了许多座自锚式悬索桥,这也是当时自锚式悬索桥在欧洲、美国和日本得到广泛采用的原因之一。表 1-1 给出了近代主要自锚式悬索桥的技术参数^[5]。

近代主要自锚式悬索桥技术参数 表 1-1

桥址及桥名		建成年代	主跨跨径(m)	边跨跨径(m)	垂跨比	加劲梁
欧洲	Wrsowicer 桥(德国)	1870	22.8	11.4	—	钢桁梁
	Muhlenthor 桥(德国)	1899	42.0	19.7	1/7.3	钢桁梁
	Napageld 桥(奥地利)	1910	36.0	21.0	1/9.0	钢桁梁
	科隆—迪兹桥(德国)	1915	184.5	92.2	1/8.6	钢板梁
	Lippstadt 桥(德国)	1917	55.2	11.5	—	钢桁梁
	Admiral Scheer 桥(德国)	1927	96.3	36.9	1/9.0	钢板梁
	Forst 桥(德国)	1927	39.6	19.8	—	钢桁梁
	科隆—米尔海姆桥(德国)	1929	315.0	91.0	1/9.1	钢板梁
	King Alexander I 桥(南斯拉夫)	1934	261.0	75.0	1/9.3	钢板梁
	Krefeld 桥(德国)	1935	250.0	125.0	1/8.2	钢桁梁
美国	切尔西桥(英国)	1937	107.3	52.7	1/8.8	钢板梁
	第七街桥(匹兹堡)	1926	134.8	67.5	1/8.1	钢板梁
	第九街桥(匹兹堡)	1927	131.1	65.5	1/8.1	钢板梁
	第六街桥(匹兹堡)	1928	131.1	65.5	1/8.1	钢板梁
	Little Niangua 桥(密苏里州)	1933	68.6	34.3	1/9.0	工字梁
	Hutsonville 桥(印第安纳州)	1939	106.7	45.7	—	工字梁
亚洲	清州桥(日本)	1928	91.5	45.8	1/7.1	钢箱梁

二、自锚式悬索桥沉寂中的发展

从 1954 年前联邦德国在杜伊斯堡建成最后一座跨度为 285.5m 的大跨度自锚式悬索桥起,到 1990 年日本建成主跨 300m 的此花大桥的 30 多年当中,世界上很少建造自锚式悬索桥,该类桥型进入了相对沉寂的阶段。其中主要的原因是 20 世纪 50 年代以后受到了斜拉桥迅速发展与普及的强烈冲击,这种冲击主要表现在三个方面:

(1)斜拉桥适用的地质条件与跨径范围完全覆盖了自锚式悬索桥。

(2)与广泛采用悬臂施工法的斜拉桥相比,自锚式悬索桥“先梁后缆”的施工方法使得自锚式悬索桥的造价相对较高,工期较长。

(3)相对于历史悠久的悬索桥造型,斜拉桥造型在这一时期具有一定的新颖性,因而乐于被采用。

自锚式悬索桥面临斜拉桥的有力竞争导致发展缓慢,但是也有桥梁工程师通过创造性地努力,不断推动了自锚式悬索桥的发展,其间,主要成就是法国工程师努力将 1928 年弗莱西奈发明的预应力混凝土技术应用于自锚式悬索桥。1943 年法国工程师巴迪克(Baticle)提出了混凝土加劲梁的自锚式悬索桥方案,并于 1950 年在法国建成了世界上第一座混凝土自锚式悬索桥——圣日耳曼(St. Germain)桥,该桥主跨 57.9m,边跨 21.8m。

20 世纪 50 年代,比利时工程师范德皮德(Vandepitte)对混凝土自锚式悬索桥也进行了深入的研究,于 1960 年设计并建成了安特卫普莫伯克(Merelbeke)桥,其桥型布置图见图 1-7。该桥主跨 100m,边跨 46m,主缆垂跨比 1/11.1,混凝土加劲梁高 1.93m,加劲梁横断面图见图 1-8。1965 年,范德皮德又在比利时安特卫普斯凯尔特(Scheldt)河大桥方案竞赛中提出了主跨 350m 的混凝土自锚式悬索桥方案。

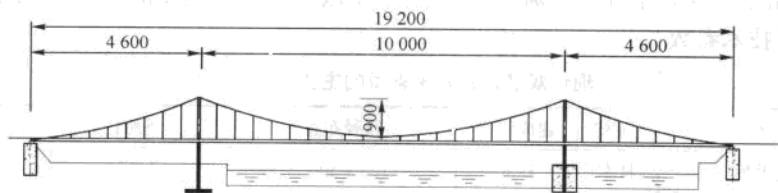


图 1-7 比利时安特卫普莫伯克(Merelbeke)桥桥型布置图(尺寸单位:cm)

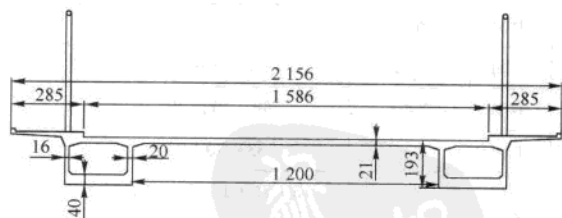


图 1-8 比利时安特卫普莫伯克(Merelbeke)桥混凝土加劲梁横断面图(尺寸单位:cm)

20 世纪 70 年代以后德国工程师施莱希(Schlaich)成功地建造了一系列混凝土自锚式悬索桥结构的人行桥。自锚式悬索桥加劲梁内存在强大的轴向压力,一方面,采用混凝土加劲梁

可充分发挥其抗压性能好的优点;另一方面,加劲梁内的强大轴向压力同时也为自身提供了“免费的”预应力,因此,虽然混凝土加劲梁增加了结构体系的自重,但综合考虑还是具有一定的经济性。表 1-2 给出了这一时期内几座自锚式悬索桥的主要技术参数^[6]。

自锚式悬索桥主要技术参数 表 1-2

桥名(桥址)	建 成 年 代	主跨跨径(m)	边跨跨径(m)	垂跨比	加 劲 梁
St. Germain 桥(法国)	1950	57.9	21.8	—	混凝土箱梁
杜伊斯堡(duisburg)桥 (德国)	1954	285.5	128.4	1/9.2	钢箱梁
Merelbeke 桥(比利时)	1960	100.0	46.0	1/11.1	混凝土箱梁
Rosenstein I 桥 (德国)	1977	51.1	27.0	—	混凝土箱梁
Kelheim 桥 (德国)	1987	61.8	—	—	混凝土箱梁
Necharstrasse 桥 (德国)	1990	37.1	—	—	混凝土箱梁

三、现代自锚式悬索桥的发展

工程设计承载历史,桥梁结构体系的创新是桥梁设计师的永恒追求。随着时代的发展,现在人们不仅更注意桥梁结构自身的力学美,还特别注重桥梁建筑结构与环境的相互协调,追求结构与艺术的完美融合,追求结构与区域文化的深度契合。随着设计理论、架设技术和工程材料的进步,特别是传统的悬索桥越来越难以满足特定地形、地质条件下修建城市特殊景观桥梁的需要,人们开始重新关注自锚式悬索桥,并进行了新的尝试。现代自锚式悬索桥的开山之作是建于 1990 年主跨 300m 的日本此花大桥。随后,世界上其他国家也分别开始了自锚式悬索桥建设的新高潮,表 1-3、表 1-4 分别给出了 1990 年以来国内外主要的双塔、独塔现代自锚式悬索桥的主要技术参数^[6~8]。

现代双塔自锚式悬索桥的主要技术参数 表 1-3

桥 名	国家	建成年代	跨径布置(m)	垂跨比	加劲梁形式
日本此花大桥	日本	1990	120+300+120	1/6.0	钢箱梁
韩国永宗大桥	韩国	1999	125+300+125	1/5.0	钢桁梁
韩国 Sorok 岛桥	韩国	在建	110+250+110	1/5.0	钢箱梁
桂林丽泽桥	中国	2001	25+70+25	1/5.5	钢桁梁
大连市金石滩金湾大桥	中国	2002	24+60+24	1/8.0	混凝土边主梁
延吉市布尔哈通河局子街桥	中国	2003	69+162+69	1/7.0	混凝土边主梁
苏州竹园大桥	中国	2003	33+90+33	1/8.0	钢—混组合梁
抚顺市万新大桥	中国	2004	15+70+160+70+15	1/6.0	混凝土箱梁
天津子牙河大桥	中国	2004	48.05+115+48.05	1/6.05	钢箱梁
浙江金华康济大桥	中国	2004	36+100+36	1/7.5	钢—混组合梁
平湖市海盐塘桥	中国	2005	30+72+30	1/8.0	混凝土箱梁
江山市北关大桥	中国	2005	40+118+40	1/7.0	混凝土梁

续上表

桥 名	国家	建成年代	跨径布置(m)	垂跨比	加劲梁形式
永康溪心大桥	中国	2005	37+90+37	1/6.0	混凝土箱梁
安亭吴淞江人行桥	中国	2005	25+70+25	1/7.8	混凝土箱梁
长沙三汊矶湘江大桥	中国	2006	70+132+328+132+70	1/5.0	钢箱梁
吉林兰旗松花江大桥	中国	在建	12.5+90+240+90+12.5	1/8.0	混凝土箱梁

现代独塔自锚式悬索桥的主要技术参数

表 1-4

桥 名	国家	建成年代	跨径布置(m)	垂跨比	加劲梁形式
美国新奥克兰海湾大桥	美国	在建	180+385	1/12.6	钢箱梁(公铁两用)
佛山平胜大桥	中国	2006	39.64+5×40+30+350+30+29.60	1/12.5	钢、混凝土混合箱梁
广州猎德大桥	中国	在建	47+167+219+47	1/12.5	钢箱梁
南京长江隧道工程右汊大桥	中国	在建	35+77+60+248+35	1/12.4	钢、混凝土混合箱梁
青岛海湾大桥大沽河航道桥	中国	在建	80+190+260+80	1/12.5	钢箱梁

由表 1-3 和表 1-4 可以归纳出国内、外现代自锚式悬索桥如下特点:

(1) 景观造型是桥梁设计的一个主要因素。

(2) 桥位处地质条件不适合修建巨大锚碇。

(3) 双塔桥跨度在 100~328m 范围之内,独塔桥跨度在 219~385m 范围之内。

(4) 跨度越大,垂跨比越大;双塔桥垂跨比为 1/8~1/4,独塔桥垂跨比为 1/14~1/12。

自锚式悬索桥在 20 世纪初的兴起主要是德国和美国工程师的贡献,20 世纪末至今现代自锚式悬索桥的复兴则主要归功于日本、韩国和中国工程师的努力。日本此花大桥主跨 300m,结构设计采用了单索面斜吊索的主缆支承体系和自重较轻的钢箱梁;施工技术也有进步,采用了钢箱梁分段整体吊装和平行钢丝束的制缆技术。韩国永宗大桥跨度也达 300m,是世界上第一座公铁两用的自锚式悬索桥。中国自 2000 年以来,已建成了二十几座自锚式悬索桥,其中佛山平胜大桥是世界上首座采用独塔、四索面、混合梁的悬索桥,其主跨跨度 350m,也是目前世界上跨度最大的自锚式悬索桥。另外,美国新奥克兰海湾大桥的设计方案也包含了诸多有价值的技术创新,建成后将成为世界上跨度最大的自锚式悬索桥。

第三节 自锚式悬索桥的展望

日本此花大桥、韩国永宗大桥的建成表明自锚式悬索桥在中等跨径上可以和斜拉桥竞争。佛山平胜大桥、美国新奥克兰海湾大桥等一系列自锚式悬索桥的相继设计和建成标志着这一结构新颖、造型美观的桥型已得到进一步的发展、繁荣,同时也出现了一些新的特点和趋势^[8]。

一、桥型布置

自锚式悬索桥桥型布置多种多样,目前主要有:双塔三跨,双塔单跨,单塔双跨,单塔单跨等,今后也可能建造多塔自锚式悬索桥。自锚式悬索桥技术经济指标合理的适用跨径范围以

目前的技术水平来看在 50~600m 之间。随着技术的发展,在此范围内的技术经济优势必将更为显著。

二、结构体系

加劲梁的轴压力和架设方法一定程度上限制了自锚式悬索桥跨径的发展,为此有研究者提出了自锚式斜拉—悬索桥协作体系:斜拉区可采用混凝土梁,悬吊区为钢梁。这种桥型方案继承了自锚式悬索桥及斜拉桥的诸多优点,在大幅度降低造价的同时,提高了自锚式悬索桥的跨越能力,但如何解决斜拉索和吊索之间的刚度匀顺过渡问题,将是我们面对的关键技术难题。

三、加劲梁及缆吊系统

随着自锚式悬索桥跨度的不断增大,加劲梁的轴压力和缆索支承体系的体系转换已成为控制设计的关键,修建大跨度自锚式悬索桥将面临较大的挑战。因此,提高材料强度,增加跨越能力,减少恒载,研发新型材料,以及便捷体系转换和加快施工进度都是今后研究的重要课题。

四、架设方法

“先梁后缆”的施工方法已成为阻碍自锚式悬索桥广泛应用的一个主要因素,因此,研究加劲梁和主缆的架设方法,达到缩短工期和降低造价的目的,是一个重要的研究方向。

佛山平胜大桥初步设计施工比选方案借鉴斜拉桥的施工工艺,提出了斜拉扣挂法架设加劲梁。该方法就地现浇筑边墩和索塔,采用临时斜拉索拼装加劲梁,跨中合龙后安装主缆和吊索,体系逐步转换为自锚式悬索桥。该方法可以实现少支架甚至无支架架梁,施工干扰小,技术也相对成熟,但是,也同样存在体系转换的技术问题。该方法尚无工程实践,但不失为自锚式悬索桥可供比选的一种施工方法。

1925 年美国匹兹堡的 3 座跨河桥梁采用链条式的主缆和临时压杆相结合,成功地实现了自锚式悬索桥的悬臂拼装,大大缩短了工期。自重大的链式主缆目前已被高强钢丝编制的主缆取代,但这种悬臂施工方法能否在目前的条件下加以改进而重新采用,也是值得研究的问题。

在科学技术高速发展的今天,自锚式悬索桥的设计理论和架设技术也将趋于完善。在新理论、新材料、新结构、新工艺和新设备的推动下,自锚式悬索桥跨越能力将不断提高,必将具有越来越强的竞争力。

参考文献

- [1] 胡建华. 大跨度自锚式悬索桥结构体系及静动力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2006.
- [2] 胡建华. 自锚式悬索桥结构体系的创新设计[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(6): 111-119.