

# 矮塔斜拉桥的发展及前景展望

刘松鑫\*, 徐海滨, 雷余鹏, 杜永超

河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作

收稿日期: 2022年6月10日; 录用日期: 2022年6月20日; 发布日期: 2022年6月29日

## 摘要

矮塔斜拉桥是介于梁式桥与传统斜拉桥之间的典型混合体系桥梁, 近些年在国内外发展态势良好。文章基于近年来矮塔斜拉桥的发展进行综述, 阐述了矮塔斜拉桥的起源和发展历程、成桥索力和施工索力优化方法、构造特征, 并总结了矮塔斜拉桥面临的问题, 展望了矮塔斜拉桥的发展趋势, 希望对矮塔斜拉桥的推广有所裨益。

## 关键词

矮塔斜拉桥, 起源, 索力优化, 结构特点, 发展前景

# Development and Prospect of Extradosed Cable-Stayed Bridges

Songxin Liu\*, Haibin Xu, Yupeng Lei, Yongchao Du

School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The extradosed cable-stayed bridge is a typically combined bridge between the girder bridge and the traditional cable-stayed bridge, and it has developed well at domestic and foreign in recent years. Based on the development of extradosed cable-stayed bridges in recent years, this paper summarizes the origin and development process of extradosed cable-stayed bridges, the optimization methods of bridge cable force and construction cable force, structural system and structural characteristics, and summarizes the problems faced by extradosed cable-stayed bridges. Looking forward to the development trend of extradosed cable-stayed bridges, we hope that it will be beneficial to the popularization of extradosed cable-stayed bridges.

\*通讯作者。

## Keywords

The Extradosed Cable-Stayed Bridge, Origin, Optimization of Cable Force, Structural Features, Development Prospects

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近些年,随着桥梁设计理论及建设技术的进步、国民经济的发展,桥梁结构除了满足其必要的功能性要求外,人们对桥梁的美观性及环境协调性愈加重视。在满足受力合理、环境协调、外形美观的前提下,桥梁结构从粗大笨重向纤细轻薄转变,具有鲜明特点的不同形式的组合体系桥梁逐渐丰富起来。其中,作为新型结构体系的代表之一,矮塔斜拉桥结合了梁式桥和传统斜拉桥的优点,其主梁高度不及同等跨径梁桥的一半,索塔高度一般为主跨的  $1/12\sim 1/8$ ,较之常规斜拉桥的  $1/7\sim 1/4$  有大幅降低。其主梁的刚性与斜拉索的柔性相得益彰,桥塔雄伟而不突兀,极易与当地地域环境、文化背景相融合。加之其施工简单、结构刚度大、经济性好、外形美观等特点,在主跨跨径为  $100\text{ m}\sim 300\text{ m}$  的范围内拥有很大竞争力。从上世纪九十年代开始,矮塔斜拉桥在国内外获得了迅速发展。中国从 2000 年开始,相继建造了芜湖长江大桥、漳州战备大桥、安徽省芜湖长江三桥等多座矮塔斜拉桥。考虑目前大跨径梁式桥存在主梁高度过大、跨中挠度持续增长过大等突出问题,传统斜拉桥容易出现桥塔过高与周边环境不协调的问题,可以预见,今后矮塔斜拉桥将是主跨跨径  $100\text{ m}\sim 300\text{ m}$  范围内的最重要选择之一。

## 2. 矮塔斜拉桥的起源

矮塔斜拉桥的起源是反拱型梁桥,见图 1,这种桥型的主要受力构件形状与结构受力弯矩图相似,因此是一种受力合理的桥型[1]。1980 年,建造于瑞士的甘特大桥被认为是世界上第一座矮塔斜拉桥,索塔高度  $11.1\text{ m}$ ,主跨  $174\text{ m}$ ,高跨比为  $1/16.7$ ,约为传统斜拉桥高跨比的  $1/8\sim 1/7$ 。1988 年,法国工程师 Jacques Mathivat 正式提出了矮塔斜拉桥的定义。当时称为超配量体外索 PC 桥(Extra-dosed prestressing concrete bridge) [2]。1995 年,我国桥梁专家严国敏首次将这种桥型结构称为“部分斜拉桥[3]”,王伯惠 [4]、顾安邦、徐君兰等学者把这种桥型称为“矮塔斜拉桥”。

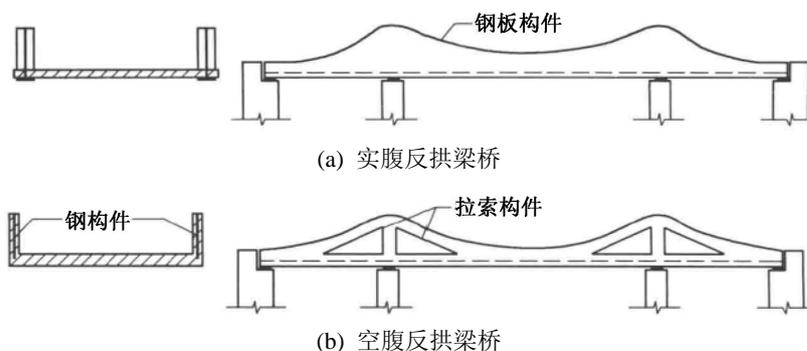


Figure 1. Anti-arch girder bridge

图 1. 反拱型梁桥

### 3. 矮塔斜拉桥在国内外的的发展

矮塔斜拉桥这种桥型首次出现之后并没有被推广开来。1990年初,日本学者结合本国特殊的地理环境,在前人的基础上对矮塔斜拉桥进行了多方面研究,发现其具有技术性、经济性,结构性能以及美观协调性等多方面的优势。1994年,日本建造了国内首座矮塔斜拉桥—小田原港桥。在其后的十多年间,日本又陆续建造了屋代南桥、冲原桥、蟹泽桥、和佐敷大桥等将近30多座各种形态的矮塔斜拉桥。矮塔斜拉桥的设计和施工工艺等方面日渐成熟,成为了当时日本桥梁发展的主流桥型。1998年,瑞士在阿尔卑斯山区建造的 Sunniberg Bridge 属于四塔五跨柔性梁矮塔斜拉桥[5]。见图2,该桥主梁高0.8 m,桥面以上塔高15 m,最大主跨140 m,其主跨度与梁截面高度之比为1/175,大大低于日本建造矮塔斜拉桥的(1/70~1/50)。全桥结构柔美简洁、雄壮而不突兀,将山的稳重与桥的轻盈有机结合,形成一幅优美的山村风景画。此外在菲律宾、法国、美国等国家都有矮塔斜拉桥建成。



Figure 2. Sunniberg Bridge  
图2. 森尼伯格桥

矮塔斜拉桥传到中国为时较晚,2000年初,中国建成了首座公铁两用的矮塔斜拉桥—芜湖长江大桥如图3所示。芜湖长江大桥采用了低塔斜拉索加劲的连续钢桁梁构造,并采取了悬浮结构,上层为路桥建筑,下层为轨道桥梁。跨径布置(180 + 312 + 180) m,高跨比为1/9。桥梁附近为芜湖宣州机场,桥塔高度受飞机飞行净空高度限制,主梁的梁底高程受到船只通行高度限制,铁路桥面线路高程又受到已有的铁路路线的高度限制[6],其特殊的地理位置及净空高度决定了该桥不能采用梁式桥或斜拉桥等常规桥型,而矮塔斜拉桥凭借塔矮、梁刚的特点在桥梁选型中脱颖而出。这座大桥的建成通车,为中国矮塔斜拉桥的发展开辟了先例。2001年漳州战备大桥如图4所示建成通车,漳州战备大桥主桥采用了双塔单索面三跨连续预应力混凝土矮塔斜拉桥,跨径布置(80.8 + 132 + 80.8) m,高跨比1/8。其结构形式采用塔梁固结体系、塔梁与墩分离,墩顶设支座。在桥头左侧有一座拥有400多年历史外观呈八角形的威镇阁,高度52 m。漳州战备大桥采用矮塔斜拉桥形式,塔高16.5 m,与阁楼融为一体且丝毫不影响威镇塔雄伟壮观的气概。漳州战备大桥是中国首座城市道路矮塔斜拉桥[7]。此后的十多年间我国陆续建造了许多矮塔斜拉桥。如小西湖黄河大桥、三门江大桥、中堂水道桥等。



Figure 3. Wuhu Yangtze River Bridge  
图3. 芜湖长江大桥



Figure 4. Zhangzhou Zhanbei Bridge  
图 4. 漳州战备大桥

部分国内外矮塔斜拉桥见表 1。

Table 1. Part of extradosed cable-stayed bridges domestic and abroad [8]  
表 1. 部分国内外矮塔斜拉桥[8]

序号	桥名	跨径/m	塔高/m	索塔索面	建成时间
1	日本小田原港桥	74 + 122 + 74	10.5	双塔扇形双索面	1994
2	日本屋代南桥	64.2 + 105 + 105 + 64.2	12	三塔扇形双索面	1995
4	瑞士森尼伯格桥	59 + 128 + 140 + 134 + 65	9	四塔平行双索面	1998
5	菲律宾麦克坦桥	111.5 + 185 + 111.5	18.15	双塔双索面	1999
6	老挝 pakse Bridge	123 + 143 + 91.5	14.95	双塔扇形双索面	2000
7	美国 Q- Bridge	75.85 + 157 + 75.85	27	双塔扇形双索面	2010
8	兰州小西湖黄河桥	81.2 + 136 + 81.2	17	双塔扇形单索面	2003
9	柳州三门江大桥	100 + 160 + 100	21	双塔双索面	2006
10	广东中堂水道桥	95 + 168 + 95	26	双塔单索面	2011

## 4. 成桥索力优化方法

矮塔斜拉桥属于多次超静定结构，桥梁达到合理成桥状态时内力必须分布均匀。斜拉索索力是影响矮塔斜拉桥合理成桥状态内力的一个重要因素。因此对矮塔斜拉桥索力的优化尤为重要，成桥索力优化方法按其原理分为三类：指定受力状态的索力优化法、无约束索力优化法、有约束索力优化法。

### 4.1. 指定受力状态的索力优化方法

指定受力状态的索力优化方法以刚性支承连续梁法和零位移法为代表。刚性支承连续梁法是由著名的德国桥梁专家 F·Leonhardt 教授[9]提出，其原理是通过对成桥索力进行优化，使斜拉桥的主梁在恒荷载作用下的内力分布和刚性支承连续梁内力分布相似。零位移法的原理是通过约束条件使成桥状态下主梁和斜拉索锚固点处不产生位移。

车小林[10]分别用刚性支承连续梁法、零位移法、刚性吊杆法三种方法对钢筋混凝土系杆拱桥成桥索力进行优化分析，结论：零位移法在优化这种桥梁的索力方面优于其他方法。张文献[11]采用 Midas-civil 建立有限元模型对正南阳湖斜拉桥进行分析，用刚性支承连续梁法，零位移法，弯曲能量最小法三种方法优化成桥索力，对比结果得到以下结论：刚性支承连续梁法得出的索力值整体偏大，且边索索力分布不均衡。零位移法计算结果边跨索力过大，其他索力分布均匀。弯曲能量最小法得出的索力最为合理。但在主塔处负弯矩过大。这三种方法各有利弊，还需要采用综合的方法对索力进行优化。

综上，指定受力状态的索力优化方法，都仅仅是针对某一个约束条件来达到索力优化的目的，这样会使结果有很大的局限性，若要得到理想的优化结果，还需要进一步优化才能得到理想的成桥索力。

## 4.2. 无约束索力优化法

无约束索力优化法以弯曲能量最小法和弯矩最小法为代表。弯曲能量最小法原理是求出一组斜拉索索力,使斜拉桥整体弯曲应变能最小。最小弯矩法以主梁弯矩的平方和作为目标函数。

乔建东[12]以斜拉桥主梁和索塔的拉压和弯曲应变能为目标函数,以结构弯矩、位移、索力为约束条件,建立数学优化模型,利用梯度投影法求解,更加全面的优化了成桥索力。黄侨[13]提出了一种新的成桥索力优化的方法,即多种约束条件下的最小能量法。该方法将索力、位移、弯矩、能量作为约束条件。对哈尔滨松花江斜拉桥索力进行优化优化后索力见图 5,优化结果为边跨索索力大,中间跨索力小,符合索力分布原则。

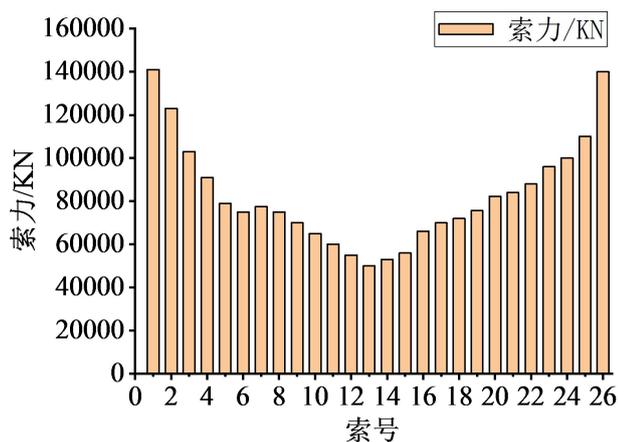


Figure 5. Bridge cable force after optimization  
图 5. 优化后成桥索力

综上,无约束索力优化方法与指定结构状态的优化方法的不同之处是,不仅仅以结构的某一项指标作为目标,而是通过结构整体的总应变能最小来优化索力,这样体现了索力优化的本质特征。是一种较为理想的索力优化方法,但是这种方法只能优化恒荷载作用下的斜拉桥成桥索力。

## 4.3. 有约束索力优化法

有约束索力优化法以用索量最小法和最大偏差最小法为代表。用索量最小法其目标函数为斜拉桥索的用量,约束条件为受力构件的内力和结构位移。最大偏差最小法利用可行域中参与与期望值的偏差作为目标函数,使最大偏差达到最小。

陆楸[14]以用索量最小为目标,控制主梁的内力和位移为约束条件利用线性规划方法,计算出在恒载作用下的最优索力。目标函数为斜拉索用量(用张拉索力 × 索长表示)最小,即:

$$\min(\sum T_i L_i) \quad (1)$$

约束条件是控制截面或节点的内力或位移在期望值范围内,即:

$$\{E_{\min}\} \leq \{D\} + k\{L\} + \{C\}\{T\} \leq \{E_{\max}\} \quad (2)$$

其中:  $T_i$ 、 $L_i$  为第  $i$  根斜拉索的张拉索力和索长;  $\{D\}$ 、 $\{L\}$  为控制截面的内力和位移;  $\{T\}$  为初始索力;  $\{C\}$  为影响矩阵。

Baldomir [15]选取斜拉索用量最少为目标函数,以拉索的应力以及塔梁位移为约束条件。然后建立数学模型来求解成桥索力[16] [17] [18] [19]。

综上, 有约束索力优化方法是在上述索力优化方法的基础上, 根据施工项目的具体情况增加了一个控制目标, 这个目标必须符合工程的实际的可能性。也是一种较为实用的索力优化方法。

#### 4.4. 影响矩阵法

影响矩阵法以矮塔斜拉桥的主梁位移、内力、应力、弯曲或(和)拉压应变能为目标函数。建立索力与目标函数之间的函数关系, 实现对成桥索力的优化。

孙全胜[20]以珲春大桥为背景, 利用有限元软件 Midas Civil 进行模拟分析, 以主梁及主塔的弯曲和拉压应变能最小为目标函数, 利用影响矩阵法进行了成桥索力优化。索力设计值和优化值对比见图 6, 施工过程中主梁的应力最大、最小值见表 2, 全桥没有出现拉应力, 压应力最值减小, 降低了施工难度, 同时有利于主梁的长期受力。通过该实际工程证明影响矩阵法独塔斜拉桥索力优化有较好的实用价值。

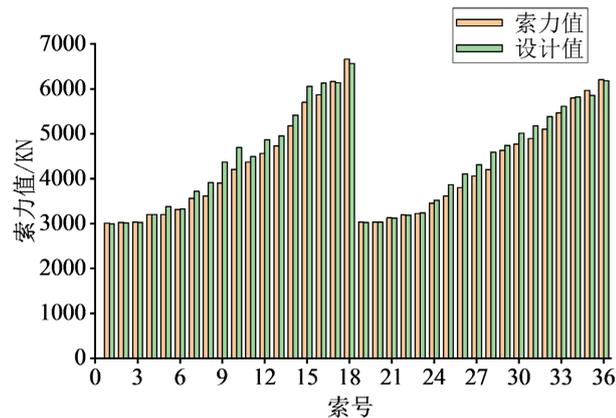


Figure 6. Cable-stayed cable force  
图 6. 斜拉索索力

Table 2. Stress max value during the construction of the main girder  
表 2. 主梁施工过程中应力最值

项目	拉应力最大值	拉应力最小值	压应力最大值/KN	压应力最小值/KN
设计值	无	无	-17.3	-1.89
优化值	无	无	-15.9	-1.89

综上, 影响矩阵法是在上述各类方法的基础上通过设置不同的约束条件, 考虑多种成桥过程中的影响因素, 是一种综合性的索力优化方法。

### 5. 施工索力优化方法

在确定合理成桥索力之后, 要通过施工阶段张拉斜拉索, 使斜拉桥达到合理成桥状态, 在施工过程中要找到合适的初始拉力使矮塔斜拉桥达到的理想成桥状态。施工索力优化方法分为正装迭代法、倒拆迭代法、正装-倒拆迭代法、无应力长度法。

#### 5.1. 正装迭代法

黄侨[21]利用正装迭代算法计算施工初拉力, 通过最小二乘法进行几次迭代。

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i|}{T_i} \leq P_1$$

$$\max \frac{|X_i|}{T_i} \leq P_2$$

其中： $X_i$ 为第*i*次索力迭代差值； $T_i$ 为第*i*次施工初拉力； $P_1$ 取0.005； $P_2$ 取0.025。

当索力迭代达到精度范围内，得到的优化后初拉力就可以使斜拉桥达到合理成桥状态。该方法也同时考虑混凝土收缩、徐变和结构本身的非线性问题。通过结合哈尔滨松花江斜拉桥工程，证明了该方法的可靠性且具有一定的应用价值。孙胜江[22]采用正装优化法进行施工索力优化，通过引入加权矩阵，得到的结果与设计索力吻合，通过调整加权矩阵对斜拉索的索力进行优化。成功的将这个办法应用到仙桃汉江公路大桥工程中，证明了此方法的实用性。曹林[23]同时采用基于影响矩阵的正装迭代法和差值迭代法，计算了六安市赤壁路桥的合理施工索力。通过三次迭代计算得到了的施工初拉力。结论：用影响矩阵的正装迭代法方法结果误差最大为0.19%，差值迭代法结果误差最大为1.23%。因此基于影响矩阵的正装迭代法计算结果更为准确，且迭代过程中索力值收敛速度快，是一种确定成桥索力较好的一种方法。基于影响矩阵的正装迭代法和差值迭代法的三次迭代过程分别见图7、图8。

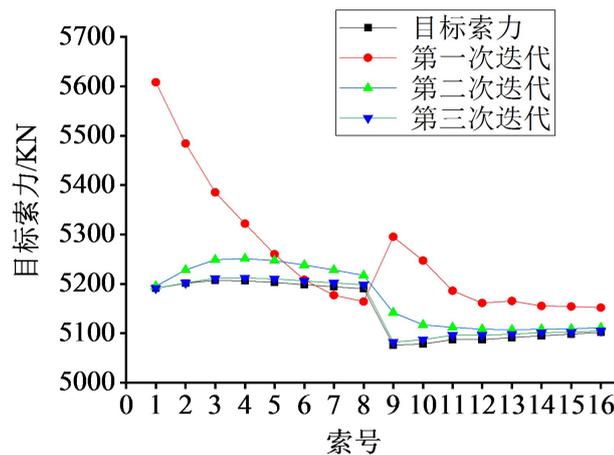


Figure 7. The iterative process of the cable force affecting the matrix method

图7. 影响矩阵法的索力迭代过程

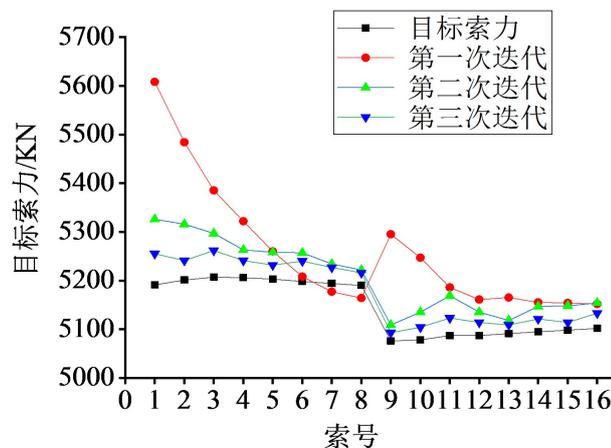


Figure 8. The iterative process of the cable force the difference iterative method

图8. 差值迭代法的索力迭代过程

## 5.2. 倒拆迭代法

辛克贵[24]以已知初拉力达到的成桥状态为倒拆分析的开始阶段,倒拆分析法施工过程中同时考虑了混凝土的收缩、徐变,把每个施工阶段倒拆分析得到的索力作为相应施工阶段的斜拉索张拉力,最后得到的优化结果与设计索力结果基本相吻合。

## 5.3. 正装-倒拆迭代法

符强[25]利用 ANSYS 有限元软件对独塔斜拉桥模型进行分析,通过正装倒拆计算法得到施工初拉力,将实测值与设计值相比较。索力最大误差为 5%。最大挠度出现在主梁 2/3 处,大小为 0.349 mm。本文的方法对实际工程有一定的参考意义。

## 5.4. 无应力状态法

王晟[26]基于无应力状态法基本原理,依据北盘江大桥工程为背景,对比索长迭代法和索力控制法计算的结果,结论:索长迭代法得到的标高与成桥状态相差 20.3 mm,索力与目标索力差值为 25.2 kN,采用索力控制法时,与目标线形、索力的最大差值达到了 523.9 mm、380.7 kN,因此采用索长迭代法优化的结果更好。叶再军[27]采用无应力状态法对某斜拉桥进行建模分析来对施工索力进行优化,斜拉索的无应力索长为目标,在模型中利用无应力索长计算出斜拉索的初张拉力。结论:计算得到的成桥索力与设计索力两者最大绝对差值是 A8 索为 127.5 kN,最大相对差值是 J6 号索为 3.70%,结果满足规范要求。

综上,上述每一种施工索力优化的方法都具有各自的优势,可以得到合理的施工初拉力,由于不同的工程项目所采用的施工工艺、方法略有不同,因此施工索力优化的方法需要根据具体的工程项目进行选择。

## 6. 矮塔斜拉桥的结构特征

矮塔斜拉桥是由主梁、拉索、索塔三种基础结构组成的一种组合体系桥梁[11],属于多次超静定组合结构。依据梁式桥见图 9、矮塔斜拉桥见图 10 和传统斜拉桥见图 11 三种基本桥型的对比图,通过对文相关献[28]-[33]进行总结列出矮塔斜拉桥的特点如下:



Figure 9. The Girder bridge  
图 9. 梁式桥

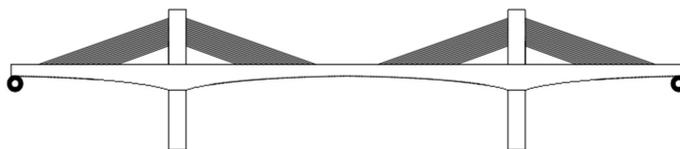


Figure 10. The extradosed cable-stayed bridge  
图 10. 矮塔斜拉桥

1) 主塔高度矮、高跨比一般为 1/12~1/8,拉索倾角较小,在塔上布置较集中,因此拉锁索对主梁的弹性支撑较弱,其作用更加倾向于大偏心的体外预应力。主梁高度约为同跨径梁式桥的 1/2,刚度大,主梁承受大部分弯矩,斜拉索承担竖向分力多不超过 30%。

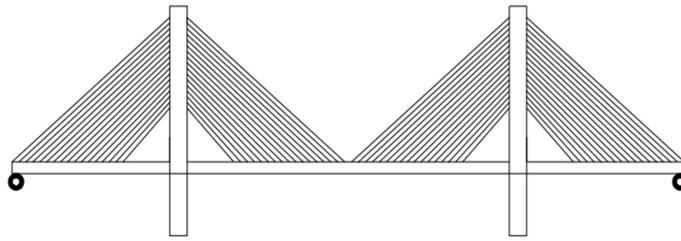


Figure 11. The cable-stayed bridge  
图 11. 斜拉桥

2) 桥梁整体为半刚半柔性结构, 可以采用悬臂结构浇筑施工、悬臂式拼装、支架浇筑施工、顶推浇筑施工、转体施工等多种措施, 施工方法可选性较多, 设计灵活。

3) 在同等跨径下主梁截面高度大约为梁式桥的 1/2, 传统斜拉桥的 2 倍。因此主梁刚度大而不显笨重, 与矮塔和斜拉索结合后, 具有自重小、挠度小、外形美观, 易与外部环境协调、施工及抗风稳定性好等优点, 同时解决了梁式桥主梁高度过大造成的压迫感和桥梁上下部结构不平衡的问题。

4) 相较于传统斜拉桥, 矮塔斜拉桥的主塔高度更矮, 斜拉索倾角小, 跨中及边跨具有较长无索段。考虑主梁刚度较大, 无需像传统斜拉桥一样设置较粗的端锚索。从受力角度来看, 多塔的矮塔斜拉桥并不存在中间跨刚性不足和各跨之间相互影响的问题。矮塔斜拉桥的斜拉索数量较少, 应力变幅小。考虑疲劳影响, 拉索容许应力可取极限应力的 60%~70%, 而传统斜拉桥只能取极限应力的 40%, 因此, 矮塔斜拉桥的斜拉索更能充分发挥材料性能。

## 7. 结论及展望

矮塔斜拉桥作为斜拉桥结构体系的一个分支, 因其刚柔并济的结构特性, 及其良好的外观效果和优异的经济特性, 已被普遍使用在高速公路、铁道和市政桥梁中, 并获得了工程师们的广泛青睐。未来将会是 100 m~300 m 跨径桥梁建设中的首选桥型。但矮塔斜拉桥发展的时间相对较短, 目前世界范围内已建成的矮塔斜拉桥也不过 100 多座, 因此, 尚有一些问题值得进一步探讨。

1) 矮塔斜拉桥受自身结构的限制, 目前该桥型的理论极限跨度为 400 m, 超过此跨径不仅力学性能表现不佳, 而且经济性较差。解决此问题一方面我们要进一步研究该类桥梁的结构特性, 针对结构缺陷做进一步的改良。另一方面可从材料方面入手, 将具有更高强度、轻质、耐久性能好的材料引入进来。

2) 矮塔斜拉桥的受力性能与斜拉索的索力有很大关系。恒载下的索力由工程师人为设定, 活载下的索力则由结构的特性决定。矮塔斜拉桥索力优化与传统斜拉桥有所差异, 因此, 在进行成桥索力优化时, 需要考虑不同因素对结构的影响, 目前每一种成桥索力优化方法都有各自的特点和局限性, 因此要研究一种综合性的成桥索力优化理论, 使达到合理的成桥状态的同时, 能够使索力更加均匀、整体结构的内力、变形及经济性更好。

3) 在实际施工过程中, 矮塔斜拉桥作为一个高次超静定结构, 施工中需要经过体系转换, 结构的内力和线形都在不断地变化。因此, 使矮塔斜拉桥达到理想的成桥状态, 需要根据工程项目的施工特点选择最适合的施工索力优化方法。桥梁建设在不断发展, 将来会出现更多不同的桥梁结构形式和更为复杂的施工工艺, 因此需要提出更完善的施工索力优化理论, 这是今后需要重点解决的问题。

目前, 我国高速铁路呈现出迅猛发展的态势, 矮塔斜拉桥在这方面有巨大的发展潜力。未来随着矮塔斜拉桥的发展, 可以预见将来矮塔斜拉桥会与其他桥型结合起来, 组成更加丰富的桥梁结构形式, 为我国快速发展的交通事业留下浓墨重彩的一笔。

## 参考文献

- [1] 杨鸿波. E-D 桥桥梁结构概念设计[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2005.
- [2] 王柏惠. 斜拉桥结构发展和中国经验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] 严国敏. 试谈“部分斜拉桥”——日本屋代南桥、屋代北桥、小田原港桥[J]. 国外桥梁, 1996(1): 47-50.
- [4] 陈从春, 周海智, 肖汝诚. 矮塔斜拉桥研究的新进展[J]. 世界桥梁, 2006(1): 70-73+80.
- [5] 施文杰. 矮塔斜拉桥在国内外的发展与实践[J]. 现代交通技术, 2012, 9(3): 22-25+36.
- [6] 林国雄, 方秦汉, 秦顺全. 芜湖长江大桥设计与关键技术研究[J]. 桥梁建设, 1998(4): 3-10.
- [7] 余永强, 李敏, 陈亨锦. 漳州战备大桥主桥设计[J]. 桥梁建设, 2002(1): 5-7+14.
- [8] 张清旭. 矮塔斜拉桥的索力研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [9] Chen, D.W., Au, F.T.K. and Tham, L.G. (2000) Determination of Initial Cable Forces in Pre-Stressed Concrete Cable-Stayed Bridges Forgiven Design Deck Profiles Using the Force Equilibrium Method. *Computer & Structures*, **74**, 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00315-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00315-0)
- [10] 车小林, 杜斌, 张兴, 王涛, 张玉涛, 沈明轩, 郭仔翔. 钢筋混凝土系杆拱桥成桥吊杆索力确定方法对比分析研究[J]. 施工技术, 2018, 47(14): 58-61.
- [11] 张文献, 刘旭光, 李东炜, 欧丹. 斜拉桥成桥及施工阶段的索力优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8): 1201-1204.
- [12] 乔建东, 陈政清. 确定斜拉桥索力的有约束优化方法[J]. 上海力学, 1999(1): 49-55.
- [13] 黄侨, 吴红林. 确定斜拉桥成桥索力多约束条件下最小能量法[J]. 哈尔滨工业大学报, 2007, 39(2): 288 -291.
- [14] 陆楸, 徐有光. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报, 1990(1): 38-48.
- [15] Baldomir, A., Hernandez, R., Nieto, R., et al. (2010) Cable Optimization of a Long Span Cable Stayed Bridge in La Corua (Spain). *Advances in Engineering Software*, **41**, 931-938. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.05.001>
- [16] Zhang, J. and Au, F. (2014) Calibration of Initial Cable Forces in Cable-Stayed Bridge Based on Kriging Approach. *Finite Elements in Analysis & Design*, **92**, 80-92. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.08.007>
- [17] Hassan, M.M. (2013) Optimization of Stay Cables-Stayed Bridges Using Finite Element, Genetic Algorithm, and B-Spline Combined Technique. *Engineering Structures*, **49**, 643-654. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.036>
- [18] Banafsheh, A., Siti, A.O. and Azlan, B.A. (2015) Optimization of Pre-Tensioning Cable Forces in Highly Redundant Cable-Stayed Bridge. *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, **15**, Article ID: 1540005. <https://doi.org/10.1142/S0219455415400052>
- [19] Sung, Y.C., Chang, D.W. and Teo, E.H. (2006) Optimization Post-Tensioning Cable Forces of Ma-Lo His Cable-Stayed Bridge. *Engineering Structures*, **28**, 1407-1417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.009>
- [20] 孙全胜, 孟安鑫. 基于影响矩阵法的非对称独塔斜拉桥索力优化[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 85-88.
- [21] 黄侨, 吴红林, 李志波. 确定斜拉桥施工索力的正装计算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1702-1704.
- [22] 孙胜江, 姜智英, 高剑, 黄平明. 正装优化法确定斜拉桥合理施工状态[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 63-66.
- [23] 曹林, 任伟新. 用正装迭代法确定斜拉桥合理施工索力[C]//第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2017: 1724-1728.
- [24] 辛克贵, 冯仲. 大跨度斜拉桥的施工非线性倒拆分析[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 31-35.
- [25] 符强, 李延强. 确定斜拉桥施工索力的正装倒拆优化法[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(3): 33-37.
- [26] 王晟, 宁平华, 颜东煌, 潘权. 基于索长迭代法的斜拉桥合理施工阶段索力研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 6-10+32.
- [27] 叶再军. 无应力状态法在确定斜拉桥二次调索索力中的应用[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 167-170.
- [28] 缪长青, 王义春, 黎少华. 矮塔混凝土斜拉桥成桥索力优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(3): 526-530.
- [29] 李晓莉, 肖汝诚. 矮塔斜拉桥的力学行为分析与设计实践[J]. 结构工程师, 2005, 21(4): 9-11+24.
- [30] 王成, 宁宏翔. 矮塔斜拉桥施工技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
- [31] 蔡小杨, 王雷, 韩金豹, 刘淦彬. 柔梁密索体系矮塔斜拉桥静力分析[J]. 世界桥梁, 2022, 50(2): 99-104.

- [32] 张家元, 吴学伟, 张铭. 基于主梁受力特点的部分斜拉桥合理成桥状态确定方法研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 35-41.
- [33] 马帅, 刘朵, 金文刚, 张建东. 波形钢腹板部分斜拉桥受力性能分析[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 61-66.