

文章编号: 1002-0268 (2004) 05-0053-04

# 超大跨度缆索承重桥梁结构体系

梁鹏, 肖汝诚, 夏 翥, 刘浩

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:** 设计和建造跨海连岛大桥是新世纪桥梁工程面临的巨大挑战。超大跨度桥梁并不只是常规概念的外推, 需要与之对应的结构体系。从根本上改变缆索承重桥梁的缆索体系, 可以突破跨度极限。本文指出了常规结构体系向更大跨度发展的制约因素, 从缆索体系的角度介绍了超大跨度斜拉桥、悬索桥以及斜拉-悬索组合桥可能采用的各种体系。这些体系试图在静力、动力方面能远远超出有限限制范围, 极大地提高桥梁的跨越能力。同时, 新体系的采用也给材料、设计和施工提出了很大的挑战。

**关键词:** 超大跨度桥梁; 缆索承重桥梁; 斜拉-悬索组合体系; 空间缆索体系; 空间索网桥

中图分类号: U448.43

文献标识码: A

## Structural Systems for Ultra-long Span Cable Supported Bridges

LIANG Peng, XIAO Ru-cheng, XIA Min, LIU Hao

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** There is perhaps no greater challenge to the bridge profession than the proper design and construction of a bridge crossing over a strait. Ultra-long span cable supported bridges are not merely extend its capabilities by simple extrapolations of rather conventional concepts and they must have corresponding structure systems. With fundamental changes in structural systems, the span limit can be increased. This paper introduced the various cable systems of ultra-long span cable supported bridges, including cable-stayed bridges, suspension bridges and Combined Suspension and Cable-stayed systems. These systems try to break through the limits and make quantum leaps. It is hoped that this paper will be good for the research on structural systems for ultra-long span cable supported bridges.

**Key words:** Ultra-long span bridges; Cable supported bridges; Combined suspension and cable-stayed systems;

Spatial cable systems; Space-Web bridges

## 0 引言

随着设计理论的完善、施工方法的改进、新材料的利用, 桥梁跨度记录不断被刷新。新一轮建造更大跨度桥梁的跨海连岛工程正在酝酿或实施当中, 主要有: 中国沿太平洋高速公路 (跨越渤海海峡、长江口、杭州湾、珠江口和琼州海峡)、舟山连岛工程、台湾海峡工程; 日本第二国土轴工程 (跨越东京湾、伊势湾、纪淡海峡、丰予海峡和津轻海峡); 日韩朝海峡工程; 马来西亚-印尼马六甲海峡工程; 印尼连岛工程<sup>[1]</sup>; 菲律宾连岛工程; 意大利墨西哥拿海峡桥工程; 欧亚白令海峡工程<sup>[2]</sup>; 欧非直布罗陀海峡工程<sup>[3]</sup>;

英伦三岛跨海工程。

为避免超深水基础和满足通航要求, 跨海工程可能出现超大跨度的缆索承重桥梁。设计首要考虑的问题是如何抵抗风荷载和防止空气动力失稳。一般有三类方法改善结构抗风性能: 改善断面气动性能、控制结构振动特性和改变结构体系。进入超大跨度范围后, 前两种方法效果有限, 采用新的结构体系可从根本上改变结构性能, 突破跨度极限。丹麦 Gimsing、德国 Leonhardt 和美国林同炎是超大跨度桥梁体系研究的代表人物。

超大跨度缆索承重桥梁的结构整体刚度主要来源于缆索体系, 本文主要探索超大跨度缆索承重桥梁可

收稿日期: 2003-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59895410)

作者简介: 梁鹏 (1977-), 男, 江西高安人, 博士研究生, 主要从事缆索承重桥梁设计理论及施工控制研究。

能采用的各种缆索体系。

## 1 超大跨度斜拉桥体系

斜拉桥的发展正进入一个崭新的时代。Normandy大桥和Tatara大桥的建成,充分展现了斜拉桥巨大的跨越能力和优越的结构性能,斜拉桥已经进入曾被认为是悬索桥独占的跨度领域。香港昂船洲大桥国际方案竞赛的冠军方案为主跨1 018m斜拉桥方案,ARUP和COWI公司正在作施工图设计;苏州—南通长江大桥方案为主跨1 088m斜拉桥,正在作技术设计和施工图设计;上海—崇明跨越长江口的通道工程国际方案竞赛中,提出了主跨1 200m斜拉桥方案。

对斜拉桥来说,扭转频率和弯曲频率都随着跨度的增加而降低,但扭转频率比降低很少。超千米的斜拉桥采用斜索面和流线形箱梁可以获得足够的气动稳定性,但主梁压力过大和侧向稳定问题需要重视。

### 1.1 减小主梁轴力——部分地锚斜拉体系

斜拉桥主梁中的压力与跨径的平方成正比。当斜拉桥跨径不大时,主梁截面主要由桥面系构造决定,不需为承受压力而额外增加主梁截面。但当跨径达到千米级后,主梁压力的增加将导致强度和稳定问题。为保证结构稳定和主梁应力,需要较大量地增加主梁截面。

可以采用斜拉-悬索组合体系或索网体系减小主梁轴力,另一种可行的解决方法是采用部分地锚斜拉桥体系<sup>[4]</sup>。

部分地锚斜拉桥在中跨跨中部分主梁内具有拉力,大大减小主塔处主梁内的压力。如果在主梁跨中附加纵向拉索,可以大大增加跨中受拉能力。箱梁拉索可以分批张拉和更换,温度影响也较小。

### 1.2 改进侧向稳定性——空间缆索体系

传统竖直索面的自锚体系的斜拉桥并不能从缆索体系中获得抵抗横向风荷载的能力,横向风荷载必须由主梁以横向荷载的形式传递。主梁除承担自身所受的风载外,还必须大约承担风载对缆索作用的一半。横向风载对主梁的弯矩按跨径二次方增长;而风作用在索体系上的对梁产生的弯矩按跨径的三次方增长<sup>[5]</sup>。粗略分析表明,对某些宽跨比较小的斜拉桥,侧向风荷载引起的挠度和应力甚至可能超过活载效应引起的竖向挠度和应力。

斜拉桥跨径的大幅增加,而主梁宽度并不增加,使得桥梁宽跨比减小。在某些连岛工程中,虽然跨径不是很大,但交通量小,桥面只需布置双车道,使得宽跨比也很小。对只提供竖向和扭转支撑的传统斜拉

体系,要获得施工时和成桥后的稳定更成问题。悬臂安装时的侧向稳定性甚至有可能控制自锚式斜拉桥能实现的最大跨径。

可以采用加宽主梁和主梁中央分槽的办法来增加侧向刚度,以提高侧向稳定。但它常常不经济,且对超大跨度桥梁效果十分有限。采用能同时提供竖向和横向支撑的空间缆索体系似乎是一种十分可行的结构方案。文献[5]通过数值分析,研究了图1所示4种不同的空间缆索布置,重点在于横向风荷载效应。

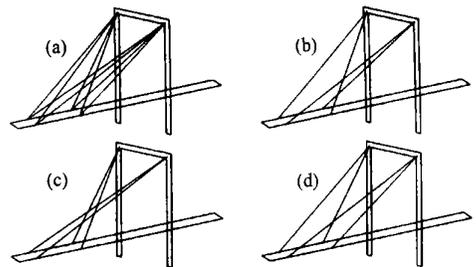


图1 斜拉桥4种空间缆索体系布置

体系(a)被认为是完全空间缆索体系,因为它传递横向荷载的缆索与承受竖向荷载的缆索为同一缆索的体系,且横向力可以不需主梁的帮助,完全由缆索体系传递;体系(b)中的主梁需要具有一定抗扭刚度,因为承受横向荷载时,在两对锚固点之间存在局部扭矩。在下一个锚固节段中,扭矩将反号;体系(c)中,缆索体系传递横向力会在主梁中引起局部弯矩。因为主梁具有一定的抗弯刚度,这不会引起较大问题;体系(d)中,如果横向力由缆索体系传递,主梁需要具有相当抗扭刚度。在这种体系中,扭矩不会像(b)中一样在下一个锚固节段中反号。所以,在体系(d)中缆索体系传递横向力会在主梁中引起全局的扭矩和扭转角,这又将进一步增大横向风荷载,有可能会静风失稳。

横向风荷载作用下,体系(b)和(c)的挠度是一样的。由于作用在缆索上的风荷载较大,体系(a)的挠度大一些。体系(a)中,66%的跨中横向挠度由作用在缆索上的风荷载引起。体系(d)的挠度最大,这是因为静风引起主梁扭转位移,从而导致更大的静风荷载。

空间缆索体系的引入,除减小主梁横向位移和应力外,也可大大提高桥梁侧向稳定性能。

### 1.3 Gimsing的斜拉桥体系

提高斜拉桥跨度的措施主要有3个方面:引进空间缆索体系;部分地锚体系;设置辅助索形成索网结构。Gimsing将这些措施一起应用到一座未来桥梁中,呈现图2的形式。根据Gimsing的分析,采用这种体

系, 跨度超过 1 000m, 而桥宽可以只有 2 车道的 9m。

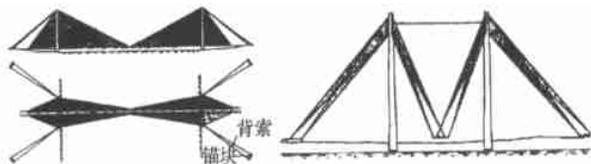


图 2 Gimsing 提出的斜拉桥空间缆索体系

4 个侧向倾斜的扇形拉索体系同时提供竖向、扭转和侧向支承。这种体系试图在静力、动力方面能远远超出出现有限制范围, 控制因素仅限于材料的强度。

## 2 超大跨度悬索桥体系

主跨 1 991m 的日本明石海峡悬索桥 1998 年投入运营; 主跨 3 300m 的墨西拿海峡大桥在 90 年代初就完成设计; 日本正在研究横跨津轻海峡的主跨 4 000m 的四跨悬索桥方案。

随着悬索桥跨度增大, 弯曲频率与扭转频率互相接近, 颤振临界风速降低。通过改变缆索体系, 可以将加劲梁的扭转振动同侧向水平振动在一定程度上耦合起来, 达到提高结构抗扭刚度和扭转频率的目的。颤振临界风速同桥梁扭转频率和扭弯频率比相关, 所以这类方法对提高大跨悬索桥的颤振稳定性行之有效。以下按主缆的根数对悬索体系分类。

### 2.1 单主缆体系

单主缆悬索桥的概念由 Leonhardt 教授于 1947 年首先提出, 图 3 是 1960 年 Leonhardt 为莱茵河上的一座桥梁提出单主缆悬索桥方案。单主缆通过双倾斜吊索网与加劲梁连接, 桥面板和吊索组成稳定的三角形, 主梁通过类似钟摆的反应来产生回复力, 提高整体扭转刚度。该方案主跨 500m, 梁高仅 1.2m, 宽 21.3m, 首次采用扁平翼形端面的加劲梁新概念, 带来了日后世界长大悬索桥的革命。英国 National Physical laboratory 详尽的风洞试验表明, 这种体系具有非常好的抗风性能。它的缺点是可能会有较大的扭转变形。

林同炎根据远距离的山峰以及周围环境优美曲线相互协调的关系, 对 San Francisco-Oakland 海湾西桥



图 3 Leonhardt 提出的单主缆悬索桥方案

提出了新的单主缆多跨自锚式悬索桥方案, 如图 4。细长的主缆以壮丽的悬链曲线在 3 座塔柱之间起伏, 形式相同但跨度从 1 006m 变小到 610m, 连续地从旧金山飞越至小岛, 给人们以一个优雅、开敞、轻巧的造型。



图 4 林同炎提出的单主缆多跨自锚式悬索桥方案

### 2.2 双主缆体系

传统悬索桥通常采用两根竖直平面内的主缆。这种体系对恒载是非常适合的, 但对风荷载则不是最佳。可以考虑 3 种改进的方案。

(1) 增加横向吊索。横向吊索将加劲梁的扭转运动和侧向运动耦合起来(转动中心上移), 从而提高扭转刚度<sup>[6]</sup>。

(2) 将两根主缆的间距从跨中到桥塔逐渐拉大, 以增大抵抗横向风荷载能力。Nervi 在 1969 年 Messina 海峡大桥方案征集中提出的主跨 3 000m 的单跨悬索桥采用这种主缆布置方式, 在主塔处将主缆加宽至 285m, 以减小风引起的横向摇摆。

(3) 两根主缆从跨中到主塔顶部逐渐靠拢。与方案 2 减小横向风引起的横向位移和振动不同, 方案 3 由于约束了主塔桥轴方向反相位振动, 可提高一阶对称扭转频率。印尼 Bali 海峡大桥协作体系方案采用双分离主梁, 每个主梁的两条主缆采用这种布置方式<sup>[1]</sup>。

### 2.3 三主缆体系

三主缆体系是单主缆体系与双主缆体系的结合。位于两侧的主缆悬索面既可是竖向的, 也可是斜向的, 使得没有横向水平运动时梁体不能转动。

图 5 是 COWI 公司提出的 Gibraltar 海峡桥梁方案之一, 该方案是三跨 3 550m 悬索桥<sup>[7]</sup>。竖向荷载由竖直平面内的单索承受, 而水平荷载由位于主梁平面的水平索体系承受。行车道位于气动截面的椭圆形管内。

### 2.4 四主缆体系

四主缆体系有两根主要的承重缆索和两根辅助缆索。辅助缆索主要用来提高结构侧向刚度、扭转刚度和竖向刚度。Musmeci 对 Messina 海峡大桥方案建议的方案就是四主缆体系。

以上各种悬索桥缆索体系在管道桥和人行桥中已

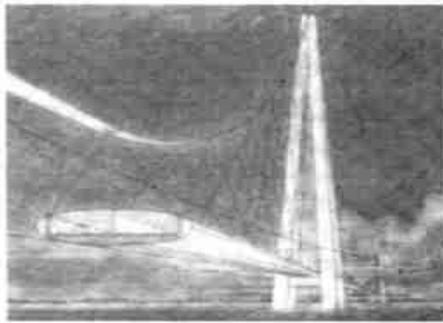


图5 COWI公司提出的三主缆悬索桥方案

有所应用。

### 2.5 空间索网体系

英国工程师Gordan Rose为白令海峡提出空间索网桥方案<sup>[2]</sup>，包括14个连续的2英里长的主跨，如图6。在这个设计中，通过附加索网和三维主塔，对各个方向都提供有效支承，大大提高了桥梁的气动性能和抗震性能。附加索网包括三对额外纵向索面和二次索。

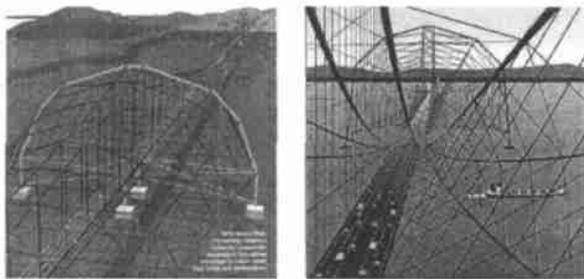


图6 Gordan Rose提出的空间索网桥方案

索网桥的设计概念来源于张拉集成体系，它的刚度是拉索和压杆单元之间自应力平衡的结果。张力集成体系具有预应力提供刚度、形成应力回路、自平衡、自锁和自支承、自适应等特点。索网桥梁概念可能是桥梁工程的一次突破，也给桥梁设计、施工带来巨大挑战。

## 3 超大跨度斜拉-悬索组合体系

悬索桥与斜拉桥之间既有竞争又有协作，未来应更着重从协作方面考虑，取长补短。中跨跨中部分采用悬索桥可以解决斜拉桥悬拼过程中的静力稳定、气动稳定和主梁压力过大的问题；借助与斜拉桥的协作，可以提高悬索桥的刚度、降低主缆拉力和锚碇规模，尤其对深水和软土地基情况意义重大。

### 3.1 常规斜拉-悬索组合体系

斜拉-悬索组合体系首先由Dischinger在1938年提出。德国Max Herzog教授为土耳其伊兹米特海湾设计的一座跨度为2000m的桥梁方案采用该体系，经

济性能良好。同济大学在伶仃洋大桥、润扬大桥等设计竞赛中提出了斜拉-悬索组合体系方案。Flint & Neill Partnership公司1997年提出的印尼Bali海峡大桥方案为主跨2300m的斜拉-悬索协作体系方案<sup>[1]</sup>。

人们对这种体系还存在以下担忧：斜拉悬吊结合部位的吊杆疲劳、传力不明确、视觉不连续等。但随着人们对这种体系优良特性的认识加深，相信斜拉-悬索体系在新世纪将会有很大发展。

### 3.2 混合双悬臂组合体系

林同炎为直布罗陀海峡桥提出带有斜撑的多跨5000m混合双悬臂组合体系方案<sup>[3]</sup>，如图7。其特点是用双悬臂来支承距桥墩1000m范围内的桥面，以降低主缆的荷载，并起着3000m中跨的支承点的作用。分析表明，无论是从静力学上或动力学上，5000m跨径均可降到相当于一般的3000m的悬跨。

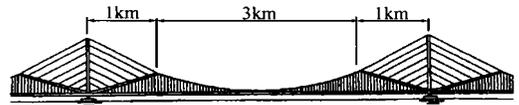


图7 林同炎提出的多跨混合双悬臂组合体系

### 3.3 带面外斜拉索塔的斜拉-悬索组合体系

瑞士Christian Menn教授提出一种适用于超大跨度桥梁或宽跨比很小的桥梁的新结构体系构思<sup>[8]</sup>，如图8。传统框架式主塔由带面外斜拉索塔的倒Y型塔柱代替。桥梁的气动稳定、静风稳定及静力稳定通过设于加劲梁两侧的倾斜的斜拉索体系来保证。中央塔柱通过斜拉索支撑面外斜拉索塔，面外斜拉索塔再通过斜拉索支撑加劲梁。中央塔柱、面外斜拉索塔和加劲梁三者通过斜拉索相连，组成了一个稳定的空间体系。在近塔处，斜拉索体系也承担竖向荷载；在跨中区段，间距更大的斜拉索主要为加劲梁提供侧向支撑。如果需要限制加劲梁内的压力，也可以将部分缆索地锚，形成部分地锚斜拉体系。

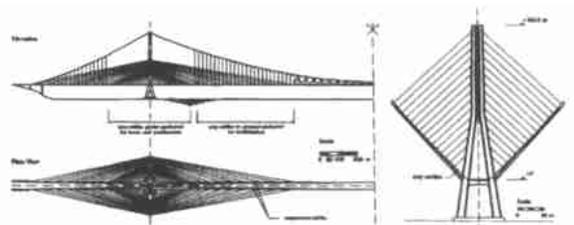


图8 Christian Menn提出的空间斜拉索面斜拉-悬索体系

## 4 结论

超大跨度桥梁并不只是常规概念的外推，需要与之对应的结构体系。采用新的缆索体系可从根本上改变结构性能，突破跨度极限。本文初（下转第69页）

以不同的频率对大兴安岭图强林业局府库其河桥(4×20m 钢筋混凝土筒支梁桥)在不同车速的车辆荷载作用下的主梁振动及钢筋应力共 28 个样本进行了离散采样分析,采样频率分别采用 20Hz 和 50Hz 两种。

经试验分析知,随车速的加快,其采样频率也相应增加。每个样本采样点数为 256。将这些数值按  $\mu = \frac{m\sigma}{y_{smax}}$  输入计算机计算,基于挠度及钢筋应力的动力系数见表 1 及图 2。

不同车速的动力系数值 (n 取 1.645) 表 1

车速 V	基于挠度的 $\mu$	基于钢筋应力的 $\mu$
4.95	0.069	0.099
7.6	0.119	0.151
8.1	0.117	0.163
8.2	0.132	0.169
8.66	0.134	0.153
11.6	0.241	0.277
12	0.209	0.195
13	0.217	0.179
14	0.189	0.222
15.5	0.222	0.22
18.4	0.238	0.247
26.5	0.225	0.247
30.1	0.198	0.247

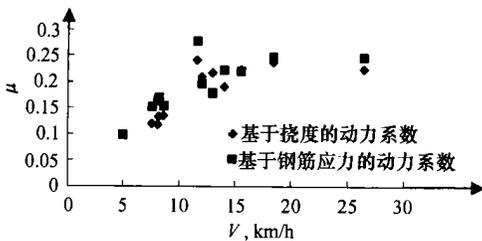


图 2 动力系数比较图

### 3 冲击系数的规范计算值与实测计算值的比较

经计算,部分国家和我国各部门规范所计算的钢

筋混凝土桥梁冲击系数见表 2。

各国、各部门冲击系数计算值 (L=20m) 表 2

冲击系数	日本	美国	原苏联	铁道部	林业部	交通部
计算公式	$7/(20+L)$	$50/(125+3.3L)$	$10/(20+L)$	$12/(30+L)$	$9/(20+L)$	$0.3 \times (45-L)/40$
$\mu$	0.175	0.262	0.25	0.24	0.225	0.1875

本文对府库其河桥(跨径为 20m 钢筋混凝土筒支梁桥)用统计方法试验研究冲击系数,得到了在不同车速车辆荷载作用下基于挠度及钢筋应力的冲击系数  $\mu$  如表 1 及图 2 所示。通过数据处理知其车速达到 18.4km/h 时,基于挠度和钢筋应力的冲击系数  $\mu$  分别为 0.238 和 0.247,将此值与文中表 2 冲击系数计算比较表明:本文试验研究的冲击系数与各国及我国各部门规范计算值基本相符合。

### 4 结论

(1) 桥梁振动的动力系数,采用随机振动理论用统计方法确定是可行的。用此法计算的动态系数与先前的研究成果大致相符合。

(2) 动力系数的计算可通过测试挠度及钢筋应力分别计算,基于钢筋应力的动力系数略高于基于挠度的动力系数。

#### 参考文献:

- [1] 徐日昶,等编著. 结构振动与振动测试 [M]. 东北林业大学出版社, 1993.
- [2] 横山功一. 道路桥梁冲击系数的实桥实验及模拟分析 [M]. 土木技术资料(日本), 1986.
- [3] Honda H. Dynamic Factor of Highway Steel Girder Bridge [M]. IABSE Per (瑞士), 1986.
- [4] Gising NJ. Cable Supported Bridges [M]. Chichester: John Wiley, 1997.
- [5] Vejrsum T, Petersen A. Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future [C]. Malm, Sweden; Bridges with Spatial Calbe Systems-Theoretical and Experimental Studies IABSE Conference, 1999.
- [6] Astiz MA. Flutter Stability of Very Long Suspension Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3 (3): 132-139.
- [7] Jensen PO. on Cable-supported Bridges-Challenging Technical Limits [C]. Seoul, Korea; The Beauty of Suspended Structures IABSE Conference, 2001.
- [8] Menn C, Billington DP. Breaking Barriers of Scale: a Concept for Extremely Long Span Bridges [J]. Structural Engineering International, 1995, (1): 48-50.

(上接第 56 页)

步探索了超大跨度缆索承重桥梁的几种缆索体系,有助于进一步研究超大跨度桥梁体系。

#### 参考文献:

- [1] Firth IPT, Jensen PO. Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future [C]. Malm, Sweden. The Design of the Java Bali Bridge IABSE Conference, 1999.
- [2] <http://www.copper.edu/classes/eng/EID111/paceweb/default.htm> [Z].
- [3] Lin TY, Chow P. Gibraltar Strait Crossing-A Challenge to Bridge and Structural Engineers [J]. Structural Engineering International, 1991, (2): 53-58.