

# 斜拉桥的拉索体系及其振动控制

Stay Cable Systems for Cable-stayed Bridges and Their Vibration Control

项海帆

## 1 引言

斜拉桥作为二次大战后出现的新桥型, 由于其外型美观、施工方便和造价经济, 现已成为大跨度桥梁的主要桥型, 不但在跨度200米至600米的范围内占有优势从而使战前的拱桥连续桁架桥等被淘汰, 而且在600米至1000米甚至更大跨度的范围内由于其“自锚”的优点也表现出对于传统的悬索桥的竞争力。目前斜拉桥的最大跨度已达到890米(日本多多罗桥), 而正在进行设计竞赛的中国香港特区的昂船洲大桥将具有超千米的创记录跨度。

斜拉桥的发展史可以追溯到古代城门口的“吊桥”。十九世纪初, 英国一些通行火车的斜拉桥的破坏, 使这一桥型被埋没了一个多世纪。材料强度低, 拉索之间受力分配不均匀, 而且当时还没有超静空结构的分析手段, 使斜拉桥被受力明确的悬索桥所替代。然而, 悬索桥刚度低的缺点往往使工程师们想起斜拉索的作用, 于是在十九世纪下半叶出现了斜拉索和悬索桥的组合体系, 著名的如英国泰晤士河上的Albert桥(1873年)和美国纽约的布鲁克林桥(L=873米, 1883年)。

悬索桥需要巨大的锚碇来平衡主缆的水平拉力, 在一些平原地区的软土地基上修建悬索桥将会遇到极大的困难。于是, 在20世纪初, 法国工程师Gislard提出了自锚式斜拉桥的概念。1938年, 德国工程师Dishinger为主跨750米的汉堡易北河桥建议了一种斜拉和悬索桥协作体系(中段

为悬索, 边段为斜拉的组合)。二次大战后, 他为修复被战争破坏的莱茵河桥又多次建议了这种体系, 但都未被采纳。然而, 他的努力终于在瑞典的stromsund桥得以实现, 成为世界第一座现代的自锚式斜拉桥, 该桥主跨182.6米, 有两对放射形拉索, 材料的进步以及用计算机完成了四次超静定的结构分析, 帮助他于1956年顺利建成了这一具有重要历史意义的斜拉桥。

从五十年代末起, 斜拉桥开始在德国得到推广, 在莱茵河上建造了许多钢斜拉桥, 这些钢斜拉桥采用了稀索体系(一座桥上只有3~5对斜拉索)。六十年代又出现了混凝土斜拉桥和密索体系, 同时在英、法、奥地利建造了一系列斜拉桥, 以及由德国人在美国建造了美洲第一座斜拉桥——P-K桥。

从七十年代起, 斜拉桥传播到美洲和亚洲各国, 并且得到了迅速的推广。特别是在中国改革开放以来出现的交通建设的高潮中, 斜拉桥在中国五大水系的大江大河上被广泛采用, 成为世界上建造斜拉桥最多的国家, 在表一中列出的世界上前十座最大跨度斜拉桥中, 中国占有六座。

可以预期: 在未来的20年内, 斜拉桥还将得到更大的发展, 跨度将突破千米, 中国建造的斜拉桥将会占有更重要的地位。

## 2 拉索体系的类型

斜拉桥由塔、梁和拉索三大部分组成。桥面上的荷载通过拉索传入桥塔, 每根拉索相当于桥面的一个弹性支承, 从而形成了极大的跨越能

表1 大跨度斜拉桥

	桥名	国家	跨度 (米)	完成 年份	桥梁 型式
1	多多罗桥	日本	890	1999	钢
2	诺曼底桥	法国	856	1995	混合
3	南京二桥	中国	628	2001	钢
4	武汉三桥	中国	618	2000	混合
5	青州闰江桥	中国	605	2001	结合
6	杨浦大桥	中国	602	1993	结合
7	名港中央大桥	日本	590	1997	钢
8	徐浦大桥	中国	590	1996	混合
9	斯卡恩圣特桥	挪威	530	1991	混凝土
10	岩石大桥	中国	518	1994	混合

力。在将近半个世纪的斜拉桥的发展过程中,拉索的技术也在不断地取得进步。

对拉索的技术要求是多方面的。首先是优良的力学性能,包括高强度、高弹性模量和足够的抗疲劳性能。其次是防腐性能和施工安装方便的要求。最后是经济指标的要求以保证斜拉桥的竞争力。

直径4-7mm的高强度冷拔钢丝是拉索采用的基本材料。钢丝的强度从最初用于钢丝绳的1500~1600MPa,以及用于平行钢丝索的1570-1750MPa,到近年来日本发展的更高的强度1800~2000MPa。拉索的弹性模量因钢丝的扭角而有所下降。带微小扭角(3~4°)的平行钢丝束为200GPa,7股钢绞线为190GPa,封闭索为180GPa。钢丝绳的扭角最大,使弹性模量降低为170GPa。

按照拉索体系的发展过程有以下几种拉索体系:

### 2.1 钢丝绳拉索(Helical Wire Ropes)

最初的斜拉桥很自然会采用中小跨度悬索桥所用的起重缆索,这也是十九世纪下半叶出现的悬索和斜拉索组合体系中所采用的,包括五十年代第一座斜拉桥--瑞典的Stromsund桥的斜拉索。

### 2.2 封闭索(Lock Coil Ropes, LCR)

为建造德国最初的斜拉桥,五十年代德国蒂里公司开发了一种新型的封闭索(图1),核心用普通的圆钢丝,而表层则用异型(T型或Z型)钢丝形成光滑的表面和更紧凑的断面。最大直径达到174mm,且表面可用油漆或色带缠包。这种拉索在德国使用很广,而且至今仍在一些中小跨悬索桥和斜拉桥中继续被采用。中国曾引进一条生产LCR的流水线,但随着斜拉桥跨度的日益长大化,这种封闭索因制造工艺复杂,承载索力有限,防护效果又不十分可靠而将逐渐被弃用。

### 2.3 平行钢丝索(Parallel Wire Cable, PWC)

七十年代欧洲各国发展了一种新型的平行钢丝索(图2),在金属套管或聚乙烯(PE)套管中灌水泥浆以防腐,同时用冷铸锚头锚以保证抗疲劳性能,这种称为Hiam锚(即高达200MPa应力幅的抗疲劳性能)的平行钢丝索得到广泛的使用。但水泥砂浆的防腐技术却证明是失败的(详见后节“拉索的防腐”)。

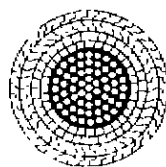


图1 封闭索断面图

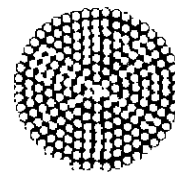


图2 平行钢丝索断面图

#### 2.4 新平行钢丝索 (New Parallel Wire Cable, NPWC)

八十年代初,日本借鉴电缆制造技术开发了一种新型拉索防腐技术,即在小扭角的平行钢丝索上热挤高密度聚乙烯(HDPE)外套。小扭角使拉索具有自紧固的性能,同时又便于弯曲装盘运输。我国在自主建造上海南浦大桥中筹建了上海浦江缆索厂,成功地开发了这一新拉索技术,现已在我国多数斜拉桥中得到使用。最大索力已超过千吨级,达到 $421\Phi 7$ ,外径为15厘米。最大长度为南京二桥所用的336米。世界最大跨度的日本多多罗桥(最长索为460米,最大拉索直径16.5厘米)也采用这种拉索体系(图3)。

#### 2.5 平行钢绞线索 (Parallel Strand Cable, PSC)

七丝钢绞线是预应力混凝土桥梁中广为采用的力筋材料,对于粗大的力筋可采用多股钢绞线和共用锚板形成钢绞线群锚。法国工程师率先将多股钢绞线用于斜拉桥拉索(图4),发现其具有安装方便、张拉机具小的优点,在欧洲得到推广。一些著名的预应力企业,如Freyssinet, VSL, Dywidag等都先后发展了各有特色的集索方法和索端防腐技术。世界第二斜拉桥--主跨856米的法国诺曼底桥是采用这一新拉索系统的成功范例。

### 3 拉索的防腐

在拉索锚固端的疲劳问题解决以后,拉索的防腐问题成为七十年代的主要问题。采用密索体

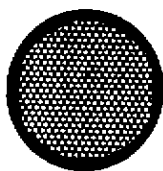


图3 新平行钢丝索断面图

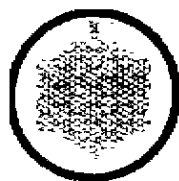


图4 平行钢绞线索断面图

系可以方便地逐根换索,但拉索防腐的失效仍是桥梁养护部门感到十分烦恼的事,因为换索将需要一笔不小的投资(往往全部拉索要一起换),而且在一定程度上会影响正常的交通。

拉索的防腐应当由内外两层保护所组成:直接保护钢丝的内层保护通常是镀锌或镀塑,其目的是在拉索安装期间避免钢丝的初期锈蚀。镀塑钢丝在北美很流行,主要是防止水泥浆和锌的化学作用而造成“氢脆”。在不用水泥浆作为外层保护的情况下,镀锌钢丝作为内层保护应当是最为合适的。

外层保护曾经历过几代的尝试和发展:

3.1 六十年代的外层保护曾采用手工缠包的发泡聚乙烯和玻璃纤维塑料带,由于感到施工不便以及外观上的缺陷而被淘汰。

3.2 在七十年代,普遍采用金属套管(钢、不锈钢、铝合金等材料)作为比较耐久的护套,在拉索和外套的缝隙中灌以水泥浆是一种采用碱性防腐的传统方法。当拉索承受全部恒载以后再灌入水泥浆,以免将其拉裂。然而,水泥浆的收缩以及活载的应力反复作用仍会造成水泥浆保护层的断裂,如果金属套管的接头不密封,外界的水气将浸入到内部未镀锌的钢丝从而造成锈蚀。此外,过于刚性和笨重的金属管也会给施工带来困难。

3.3 在八十年代,日本发展了一种用高密度聚乙烯材料(HDPE)直接热挤在镀锌的平行钢丝外面,表面的PE防护层用以抵抗水汽、氧及其他有害气体的腐蚀和机械损伤。为抵抗紫外线辐射加入2-3%的碳粉,形成了一种带黑色护套的成品索。由于这种拉索的全部防腐工作都在工厂完成,防腐层的质量易于控制,即使在运输过程中防腐层受到局部的损伤,修复也很方便。这种新型的双层保护的拉索在斜拉桥中得到了广泛

的采用。以后又发展了彩色护套技术：一种是在外面再包一层荧光氯丁橡胶彩色薄膜，另一种是用特殊（荧光稀族）的涂料，也有用彩色Tedlar包带缠绕方式。

3.4 九十年代，在单根HDPE热挤钢绞线（用于体外索）基础上发展了钢绞线群锚拉索体系，并在1995年建成的法国诺曼底桥上使用获得成功。为了防止绞线表面的热挤材料的裂缝危及钢丝，而采用双层PE护套，并在外套和内部热挤PE钢绞线之间的间隙中灌以石蜡油脂（85°-105°液态时灌入，冷却后凝固）的混合物。目前，也有采用外套管中不灌油脂的平行钢绞线索体系，如福州闽江大桥所采用的VSL技术，可能是认为双层PE护套已具有足够的防腐能力。

必须指出的是，这种拉索体系在工地上是单根张拉的，因而索端的防腐问题要依靠高品质的锚头密封装置以及仔细的工地灌注工艺来保证。虽然安装和张拉工艺得到简化，但锚头的防腐处理却增加了对工地施工工艺的要求。因此，一般非大吨位的长索应优先考虑完全工厂预制的平行钢丝拉索体系，只是对于超大跨度斜拉桥中的超长、超粗拉索才应根据施工队伍的条件考虑钢绞线群锚拉索体系，以确保拉索的防腐质量。

#### 4 拉索的振动控制

在八十年代拉索的防腐技术取得进步的同时，由于斜拉桥跨度的长大化，使拉索长度不断增大，而热挤PE防腐的拉索又减小了其外径。长而细的拉索在风、风雨以及桥面振动等外界因素的作用下极易发生不容忽视的振动，这就使拉索的振动问题上升为新的关注热点。

拉索的致振机理十分复杂。迄今为止已经知道可能发生的振动类型有以下几种：

##### a) 涡激振动

这是圆形截面的拉索容易发生的振动，由涡

流脱落引起。对于某一直径的拉索，涡脱频率与风速有关，大振幅的拉索振动只有在低阶振动时才会出现，而引起低阶涡振的风速很低。低风速不能提供足以激发起大振幅的能量，随着风速的增高，气流能提供的能量也随之增加，但是，只能激发起高阶的振动，此时，振动振幅相应减小。一般用安装在索端的橡胶阻尼垫圈即可抑制涡激振动。

##### b) 尾流驰振

早期建造的斜拉桥受拉索吨位的限制，在一个锚固点上布置相互平行的两根或四根拉索。此时，在一对并列的拉索中，背风的一根索处在迎风索的尾流中，当风向和拉索间距满足一定条件时，会发生这种自激振动。随着成对细拉索逐渐被单根粗拉索所替代。这种振动问题就不再是重要的了。

##### c) 参数振动

拉索的两端分别与桥塔和桥面相连接，当桥面或索塔的振动频率和拉索的横向振动频率成整数倍关系时，微小的桥面振动能激起较大振幅的拉索振动。沿索长方向的桥面振动会引起拉索索力的改变，从而周期性地改变着拉索的振动参数，所以称这种振动为参数振动。理论上已经证明，参数激励会导致振动发散。

##### d) 雨振

1985年首次报导了这种在风雨作用下的拉索振动现象。拉索上突出的雨线改变了圆形断面，从而引发了类似结冰电缆的驰振。雨振的机理目前尚未完全清楚，但已在实验室中重现了这种复杂的振动现象。通过在拉索表面护套上加设一些破坏雨线的措施可以有效地抑制这种拉索的雨振。

针对不同激励机制的拉索振动，提出了相应的拉索振动控制措施，归纳起来大致有以下几

## 学术报告

类：

#### 4.1 改变拉索的气动特性

拉索的涡振、雨振等振动都是由于气流流经一定外形的拉索时，气流流态发生改变，这种改变能周期性地对拉索进行振动激励。通过改变拉索的横断面形状或拉索的表面形态来改变拉索的气动特性，使流经拉索的气流不再引起拉索的振动。具体的办法是在原来光滑的圆柱形拉索表面上增加V形凹槽、矩形凸条(图5)、螺旋条(图6)及圆形凹点(图7)。

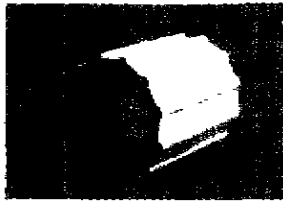


图5 日本东神户桥带纵向棱的索



图6 法国诺曼底桥带螺旋条的拉索外套



图7 日本多多罗桥带圆形凹点的索

#### 4.2 改变拉索的自振特性

通过采用连接器将同一锚固点上相互并列的两根拉索联接起来，或用辅助索将多根拉索联接起来，能起到改变单根拉索自振特性的效果。例如采用辅助索后能显著提高拉索的自振频率。这对避免因桥面振动引起的拉索振动十分有效。如法国的诺曼底桥在每一个索面内安装了4对辅助索(图8)。

#### 4.3 增加拉索的模态阻尼

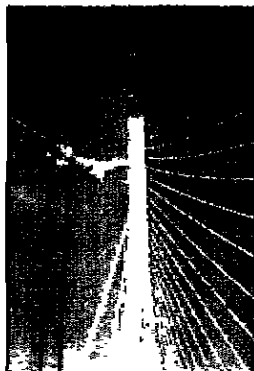


图8 诺曼底桥的辅助索

各种外界因素对拉索的激励过程，也是拉索振动能量逐渐积聚的过程。在拉索的适当部位安装各种形式的阻尼器，通过提高拉索的模态阻尼来耗散拉索的振动能量是一种“广谱的”措施。对各种拉索振动都有良好减振效果。根据不同的要求可以选择：

a) 最简单和廉价的氯丁橡胶或高阻尼橡胶垫圈，安装在拉索出口处的钢管和拉索之间。如上海三座黄浦江大桥所用的(图9)、以及日本的多多罗桥所用的(图10)橡胶垫圈。

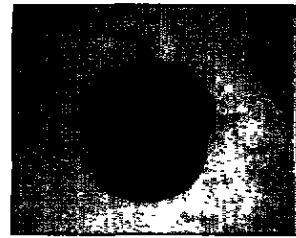


图9 南浦、杨浦桥上的橡胶减振圈



图10 多多罗桥橡胶减振圈

b) 用抑制结冰电缆振动的古典Stockbridge阻尼器。

c) 用汽车避震器做的油阻尼器，通过支架系统连接在斜拉索上。由于连接点可以离开锚头有相当距离，效果比橡胶垫圈好，已用于杭州钱塘江三桥。(图11)

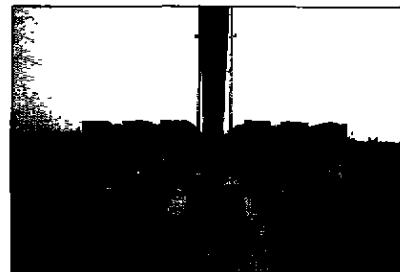


图11 钱江三桥的液压阻尼器

**学术报告**

d) 对于双索面的斜索面, 由于没有可安装阻尼器托架的中央分隔带, 可以采用一个横杆式装置, 如法国诺曼底桥(图12)。



图12 诺曼底桥阻尼器

e) 采用剪切粘滞材料做的阻尼器将具有更紧凑的外型, 已用于日本一些桥梁和中国的汕头岩石大桥(图13)。

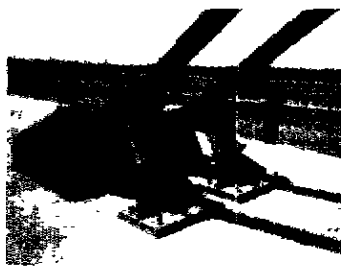


图13 粘滞剪切型阻尼器

f) 用汽车刹车片做的摩擦阻尼器, 这是最新的VSL专利, 已用于瑞典Oresund桥(图14)。

g) 改进的有调节孔的油阻尼器, 可以优化减振效果, 已用于南京长江二桥(图15)。

h) 最后, 需要特别指出的是, 采用双层PE套管, 又不灌油腊的钢绞线群锚拉索系统, 如福州闽江大桥所用的。由于在外套管和拉索系之间存在空隙, 其自振特性和风荷载的传递是一个复杂的问题。这样的拉索体系是否还有风振问题值得仔细研究。如果需要增加阻尼, 则如何设计阻尼器的连接装置也是一个需要研究解决的问题。据说, 可采用发泡塑料的工艺局部填充外套的空隙, 以使用夹具连接所需的阻尼装置。

**5 结束语**



图14 摩擦阻尼器

拉索体系的有效防腐和振动控制仍然是目前斜拉桥拉索技术发展中的关键问题, 也是设计单位在选择拉索体系时着重考虑的因素。应当根据施工队伍的素质, 工地的气候条件、结构的特点以及造价等综合进行比较, 作出判断。

新一代的耐腐蚀复合纤维材料拉索体系已问世, 并已在人行桥中成功试用。如果能解决经济性的问题, 将会成为21世纪的新拉索体系。我们也应当加快研制这种新一代拉索体系, 以适应斜拉桥的未来发展。

**参考文献:**

[1] Podolny, Jr. W. Current Corrosion Protection Methods for Cable Stays. IABSE Report 73/2, 1995  
 [2] Ito, M., Tada, K.; Kitagawa, M. Cable-Corrosion-Protection Systems for Cable-supported Bridges in Japan. IABSE Report 73/2, 1995  
 [3] Virlogeu, M. Cable Vibrations in Cable-stayed Bridges, Proc. of Bridge Aerodynamics Symposium, Copenhagen, 1998  
 [4] Matsumoto, M. Observed Behaviour of Prototype Cable Vibration and its Generation Mechanism, Proc. of Bridge Aerodynamics Symposium, Copenhagen, 1998  
 [5] FIB Recommendations for the Acceptance of Stay Cable Systems (Draft), 2000

**作者简介**

项海帆: 中国工程院院士、教授, 同济大学土木工程学院顾问院长、土木工程防灾国家重点实验室主任, 中国土木工程学会副理事长, 中国风工程学会副理事长。

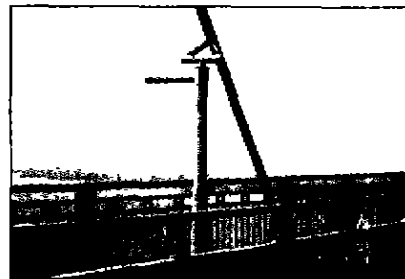


图15 南京二桥阻尼器