

修建自锚式悬索桥所面临的挑战

钟启宾

【摘要】根据自锚式悬索桥的定义、起源和发展,阐述这种桥型设计和施工方面需要解决的主要问题——主体结构怎样才能满足“自锚”的要求?怎样设计“先架梁、后挂索”的自锚式悬索桥才是合理、经济和安全的。

【关键词】自锚 悬索桥 施工方案 挑战

1、前言

悬索桥不仅具有无与伦比的跨越能力,而且无论跨度大小都比较美观。虽然在城市一般没有修建大跨度悬索桥的机会,但为了景观的和谐,人们已经不满足于简支梁、连续梁等普通的桥式,近年来自锚式悬索桥在国外和国内的特定环境有被优选的趋势。然而,在达到美感景观效果的同时,必须是经济、安全和合理的,否则,它就失去了优选的价值。

2、自锚式悬索桥的特点

“自锚”即不需要一般悬索桥的巨大锚碇,主缆锚固于边跨主梁的跨中或端部,由主梁承担主缆的水平分力和竖向分力。为此必须先架梁,后挂索。它的主要优点除美观外,节省了巨大锚碇的工程费用,也给软土地基不便建造锚碇的桥址提供了修建悬索桥的可能。由于它的施工程序与悬索桥恰恰相反,主梁要承担主缆传递的水平力,故只能达到中等跨度(目前是 300m 左右),跨度再大就不经济了。

3、自锚式悬索桥的由来和发展

早在 1859 年,奥地利工程师约瑟夫·郎金就写出了悬索桥“自锚”的设想,美国工程师查里斯·本德在 1867 年申请了自锚式悬索桥构思的专利。1915 年德国建成主跨 185m 的科隆-迪兹桥,它是采用木脚手架先架钢梁,后挂主缆的。选择

这种桥式的主要理由除美观外,是担心地质条件不允许修建锚碇。基于同样理由,德国在 1929 年建成主跨 315m 当时欧洲跨度最大的科隆-米尔海姆自锚式悬索桥。后来的发展,除了因为它没有锚碇,还因为它按弹性理论假定进行设计比较简单。1990 年日本建成主跨 300m 的北港桥,1999 年韩国建成主跨 300m 的永宗桥。

我国在 1999 年建成诸暨浦阳江桥(见图 1)(70+70m),2002 年将建成的大连金石滩桥(24+60+24m)、主跨 70m 的桂林丽君桥(见图 2)和浙江永康桥(38+90+38m)。2003 年建成苏州竹园桥(见图 3)(40+90+40m)。金华跨义乌江桥(38+100+38m)和天津子牙河桥(45+115+45m)已经开工。

4、修建者面临的挑战

这里的“修建者”是广义的,包括业主、设

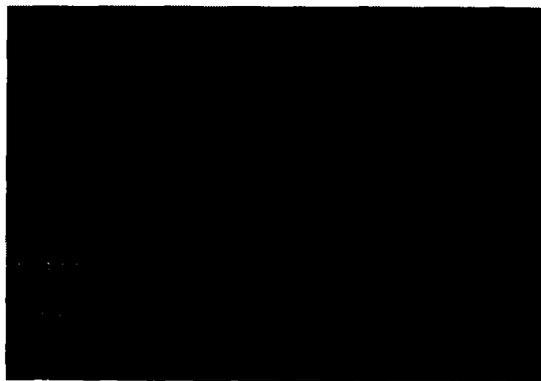


图 1 浦阳江桥

钟启宾: 中铁十八局集团有限公司

计、监理、施工、构件生产厂家等单位。但起主导作用的仍然是设计单位。当然,业主在审定方案时,将起决定性作用。为了充分体现自锚式悬索桥的优点,提高它在特定条件下桥式竞争中的优势,将面临如下挑战:

4.1 是否认定“先架梁,后挂索”的特定程序?

由于自锚式悬索桥必须先架梁、后挂索,在同既有公路、铁路、运河、深谷立交时,设计方案对既有线路(河、谷)干扰的有无、大小,是评价设计水平的极其重要的标志。其实,即使有条件搭设支架,也应该努力寻求无干扰架梁的优化设计方案。因为当跨度较大时,满布支架(含压载)的工程费用很高。而当不设法避开干扰,在既有线路(河、谷)搭设支架等临时施工设施时,它所带来的干扰费用高、不安全因素多、干扰正常的交通秩序和对工期的延误等问题,将使这种本来很美的桥式大为逊色。至于有的自锚式悬索桥设计采用临时锚碇先挂索,索端部连接临时索同临时锚碇锚固,利用主缆安装加劲梁,然后再把主缆转换锚固到主梁端横梁上的方案所带来的技术、经济、安全、工期等问题是不言而喻的。

此外,在考虑方案时,应该注意到自锚式悬索桥的另一特点,即为了减小主梁承担主缆的水平分力,往往加大主缆的矢跨比,例如北港桥(日)为 1:6;永宗桥(韩)为 1:5;中国丽君桥为 1:5.49,这显然大于有锚碇悬索桥 1:10 的矢跨

比。由于跨度较小和主缆直径较小及主缆如此陡峭的纵向坡度,不可能采用常规的紧缆机、缠丝机、缆载吊机等大型专用机具进行施工;先架梁,后挂索,可以不必采用传统悬索桥的猫道进行挂索。

笔者认为,我国已经是国际上的斜拉桥大国,超千米大跨度悬索桥也正跻身于世界先进行列,以现有的设计和施工水平完全可以解决自锚式悬索桥的方案及细节问题。有以下几种方法可以在不同的条件下选用:

4.1.1 从主墩退后半主跨长度,设置纵向滑道并立临时塔架或作正式主塔,采用钢绞线束作临时斜拉索拼装加劲梁,两个临时“独塔斜拉桥”相对顶推,跨中合龙后挂索并安装吊杆,逐步体系转换为自锚式悬索桥(施工步骤见图 4)。

4.1.2 就地制作边墩、主塔,采用临时斜拉索拼装主梁,跨中合龙后挂索并安装吊杆,逐步体系转换为自锚式悬索桥。这在地质条件不适合顶推的桥址可行。它不需要在河中(或既有线路上)搭设临时支架,施工干扰小。临时斜拉索(钢绞线)拆下后,大部分可用于引桥梁部工程(如图 5 所示)。

4.1.3 在两岸平行于河道(或既有线路)拼装主梁—斜拉索体系,然后水平转体、跨中合龙、挂索安装吊杆,逐步体系转换为自锚式悬索桥。这要求两岸各留出半个桥宽的岸上施工空间,这种城市桥梁的布局也是有可能入选的。它不一定满布支架,可以少支架或无支架斜拉索拼装主梁。其优点是完全避开干扰,技术也是成熟的(如图 6 所示)。

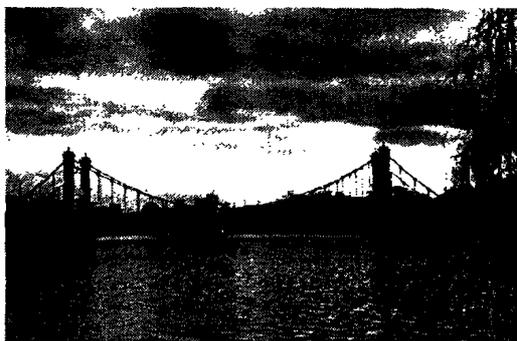


图 2 桂林丽君桥



图 3 苏州竹园桥效果图

4.2 是否把解决“先架梁，后挂索”的方案纳入设计招标时的初步设计和施工图设计？

显然，如果仅仅作自锚式悬索桥的结构设计，不考虑怎样把图纸实现为工程结构，其工作量仅限于结构本身。但是，完整的设计应该包括施工程序。而上述施工方案的施工程序都同结构设计密切相关，只有通过设计检算才能得出方案是否可行的结论。在市场经济条件下，虽然对工程设计也进行招标，可是，往往把设计费用作为中标选择的重要条件，这就迫使一些设计单位没有条件进行更加细致的方案比选。因为每一种方案的结构计算都需要时间和人力等资源投入。于是，真正应该优选的方案不一定在招标阶段被提出和选中。到了施工招标时，施工单位再提出优化设计和施工方案已经不太可能了。

4.3 是否在招、投标阶段就同熟悉施工的资深专业技术人员和专用构件生产厂家讨论关键构件的结构形式和施工方案？

目前国内的工程市场，招标文件一般是不能更改的，施工单位必须按招标文件规定的初步设计方案编制投标书。但是，招标文件中的初步设计方案是否完全经济、合理、安全、可行；是否需要进一步优化，投标单位无权进行推敲。然而，

一旦实施了有缺欠的设计方案，遭受损失的不仅是施工单位，带给业主的问题更多！

4.3.1 主缆 由于挂缆是在已经合龙的主梁顶面上进行，有的设计为厂内制造的成品索，例如丽君桥主缆是 PES7-451，钢丝的标准强度不低于 1670Mpa。但是，由于索夹与主缆接触的部分必须清除 PE（即厂内热挤聚乙烯），挂缆前不能确定吊杆中心线及索夹范围，挂缆后在空中定位并清除 PE，费工费时。而且索夹安装后，用什么材料和工艺封闭 PE 切口与索夹的接触面，达到永久防水的要求，现在还没有定论。有的桥主缆设计为厂内生产的多索股成品索，在工地逐股挂索，甚至就地制锚。但是，它需要在桥上将主缆整型、紧缆、捆缆、防腐处理等一系列工序，没有猫道或满布支架不能完成，这就回到了传统悬索桥的施工方法而又不能使用紧缆、缠丝等大型机械。

由于索股两端是锚头锚形式，设计必须给出精确的厂内下料长度，而一般设计长度是其几何长度与弹性伸长值之差。安装索股时，有一端不能自由牵出锚碇张拉端。有时其一端是在工地锚头，但施工单位不能同意两端均在索股牵出锚碇张拉端后锚头。因为，为了锚头，必须临时把主缆挠度减小以提供操作长度 ($\Delta S=8(f_1^2-f_2^2)/$

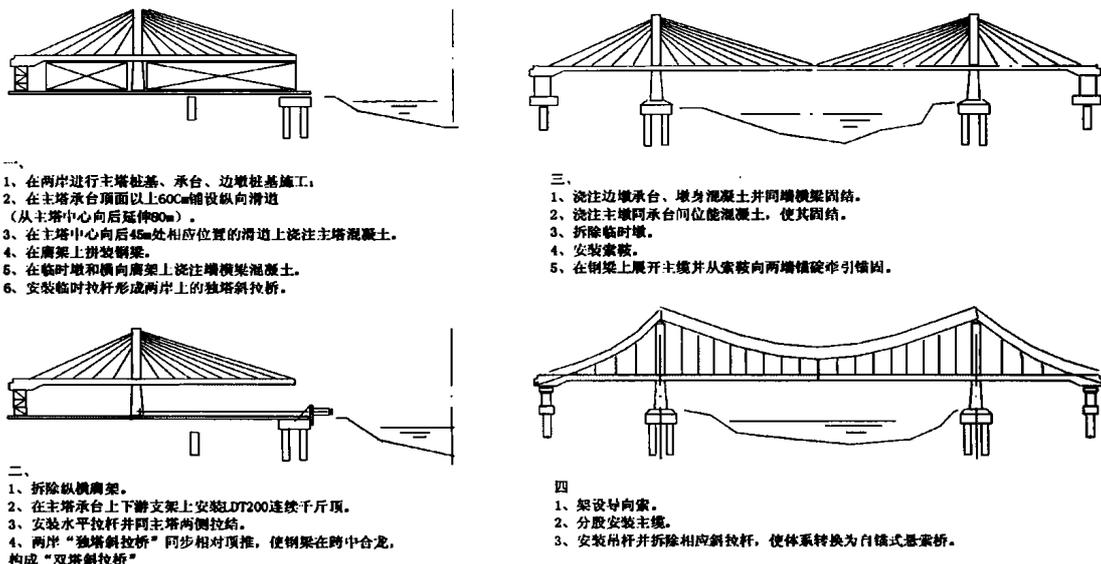


图 4

3L_A)，这样操作烦琐而且浪费材料。

4.3.2 索夹 由于自锚式悬索桥的矢跨比大，大部分索夹倾斜度大，它同主缆间的摩阻力、握裹力怎样才能达到设计要求，必须通过厂内工艺试验才能确定。

4.3.3 吊杆 它的上端同索夹结构配套，下端除结构必须满足便于安装、张拉、养护维修和便于更换等要求外，其工作螺母的调整范围必须满足主梁设计线形调整工艺的要求。

4.3.4 索鞍 它必须同主缆外形、尺寸配套；下面有调整中心的滚轴。由于它的重量较大，应制定安装工艺流程。

4.3.5 散索构件 因主缆是多索股组成，必须设计精确的散索装置以便把索股引导至锚碇张锚端。

4.3.6 主缆锚固端 为了便于养护维修，不应冷铸锚杯，改为防腐油脂，其防护罩和注油管应为不锈钢的。

4.3.7 主缆、吊杆的防腐材料与施工工艺 主缆尽管不可能达到墩台结构的寿命，将来更换是极其困难的。吊杆将来更换时，也不容易。它们的防腐性能决定桥梁的健康和寿命。

4.4 设计必须给出主梁、主缆的安装线形

由于主梁相对于主缆的刚度很大，必须按安装线形安装，即预留必要的上拱度，以期安装吊杆后符合设计线形。绝不能指望在成桥后再利用吊杆的张拉调整线形。同理，主缆必须按设计给出的安装线形施工，以期最终符合设计线形。

4.5 自锚式悬索桥的设计理论有待更新

弹性理论的基本假定是：主缆是完全柔性的，轴线符合外力平衡多边形的轮廓；主梁的截面惯性矩为常数，全长由均匀布置的吊索连到主缆；主梁和主缆的恒载沿跨长均匀分布，主缆的初始轮廓线为抛物线，受活载后保持原来的形状和坐标；恒载全部由主缆承受，加劲梁承受主缆水平力、活载及温度应力。按上述假定设计虽然能达到安全

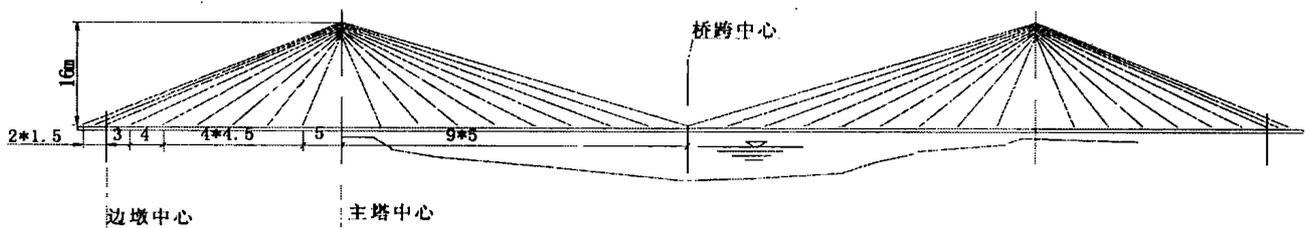


图 5

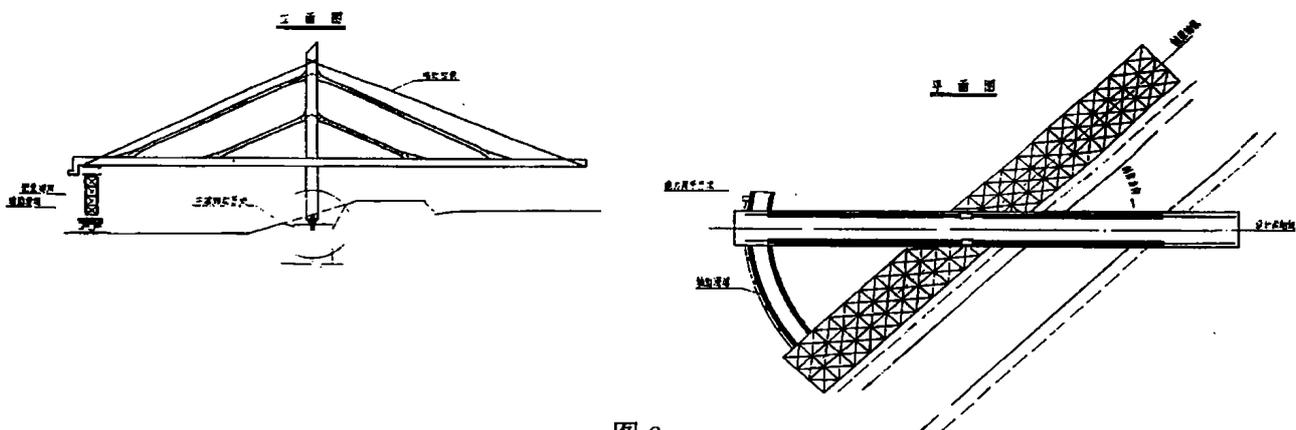


图 6

的要求,但计算结果主梁的弯矩偏大,造成结构用钢量大的一系列缺点。不考虑活载对主缆的影响,主缆和主梁的线形在施工期间和使用阶段也难以控制。

从上个世纪30年代发展起来的挠度理论考虑了活载作用下主梁产生挠度时主缆随之变形而增加的水平分力使主梁弯矩减小的实际情况,从而减小了对主梁的强度要求,由于主梁用钢量的减少,挠度理论具有明显的经济效益。至于现代的SAP2000等计算机程序更提供了用有限元等理论进

行分析、计算的条件。

参考文献

- [1]王序森、唐秉澄。桥梁工程,中国铁道出版社,北京,1995。
[2]钱冬生、陈仁福。大跨悬索桥的设计与施工。西南交通大学出版社,成都,1992。
[3]颜娟,自锚式悬索桥。国外桥梁,<桥梁建设编辑部>,武汉,2002-1。

(上接第38页)

的运行,并记录下关键数据。肉眼几乎觉察不出大桥的转动,但只要与周围的参照物一对比,便知道我们一直在向着目标靠近。大概是因为异乎寻常的顺利,秩序开始有点松动,许多人都围了过来,幸亏被隔离栏挡在工作范围外。机器的轰鸣声丝毫不觉得刺耳,主控台的电器元件有规律地运作着,每一次跳动都暗合着心中的节律,惬意极了!

不知不觉中,大桥已经跨过了铁路,渐渐逼近合拢段……

“停”!

16点25分,指挥长下达停机指令,大桥在距离合拢位置1.5米的地方稳稳停下,开始进入手动点进状态。

“点动”!

“点动”!

……

“距离1米”!

……

“50公分”!

“30公分”!

……

“1公分”!

……

“就位”!

“……转体成功”!!!随着主席台的宣布,刹时间,鞭炮齐鸣!人们欢呼起来,击掌庆贺,忙不迭地握手、拥抱,媒体开始追逐着设计者、总工、指挥长等人物,采访、拍照……

我们如释重负!整个转体总计耗时68分钟!中途没有出半点差错!未用任何应急方案,未用微调装置,仅凭着手感,依靠主牵引系统实现精确就位!

列车声又隆隆响起,我们没有多占用铁路1秒钟!

大桥飞跨铁路,结构安全可靠!

我们终于给首都人民一份满意的答卷!给专家,给各级领导一份满意的答卷!

热闹过后的人们开始散去,或握手道别,或相邀庆功。我们默默收拾工具,做着退场的各项准备工作……,该考虑下一个工程的工作了!夕阳西下,工地笼罩在一片金色的光辉中。我们成功了。
(周庠天)