

第一篇 设计篇

1. 宜昌长江公路大桥工程设计

姜 友 生

(湖北省交通规划设计院宜昌长江公路大桥设计组)

摘要：本文重点介绍宜昌长江公路大桥设计概况，以及结构特点，供同行借鉴和参考。

关键词：桥塔 加劲梁 锚碇 主缆 吊索 索鞍 支座

宜昌长江公路大桥是沪蓉国道主干线在宜昌境内跨越长江的一座特大型一级公路桥梁，是国家“九五”重点工程。桥址位于宜昌市虎牙滩，距宜昌市区约 15km，上游距葛洲坝 22km、距三峡大坝 40km，下游距枝城长江大桥约 45km。

大桥北岸经过陈家湾岗，通过长约 4.5km 的接线，在高家店与宜黄公路相连接，跨通过引桥 318 国道。大桥的南岸，近期暂接长江南岸沿江大道，远期顺延至古周公路，在高家堰与沪蓉国道主干线相接。

在桥位处，长江流经低丘陵地带，河谷较开阔，左右两岸不对称，但河道顺直，系单一河型。江岸由砾岩组成，抗水冲力强，河势相对稳定。枯水期江面宽度约 960m 左右，常年平均水深 8.7m 左右。

桥位基岩为钙泥质及泥钙质胶结砾岩，局部夹砂岩、粉砂岩透镜体，岩性较单一，极限抗压强度较低，为软质岩。岩层产状平缓稳定，倾左岸偏下游。两岸大都基岩裸露，局部表面有 1~5m 钙化硬壳，其下基岩较破碎，南岸桥塔及锚碇处有多条破碎裂隙，基岩整体性较差。河床左侧为基岩，江中及右侧有约 7~25m 厚度不等的砂、砂卵石层覆盖。

1 主要设计标准

(1) 公路等级：一级公路；

(2) 荷载等级：汽 - 超 20 级，挂 - 120，人群：3.5kN/m²；

(3) 大桥设计时速：80km/h；

(4) 大桥桥面有效宽度：2.0m (人行道) + 2.5m (停车带) + 2 × 3.75m (行车道) + 0.5m (路缘带) + 1.0m (中央分隔带) + 0.5m (路缘带) + 2 × 3.75m (行车道) + 2.5m (停车带) + 2.0m (人行道) = 26m；

(5) 接线路基宽：24.5m 四车道；

(6) 地震烈度：基本烈度为 6 度，按 7 度设防；

(7) 温度：桥位区域极端最低温度 - 14.6℃，极端最高温度 43.9℃，年平均气温 16.5℃；

(8) 风况：设计基准风速为 29m/s，成桥颤振检验风速为 44m/s。

2 大桥设计方案

长江大桥初步设计，共拟定三个桥型方案：主跨 960m 单跨悬索桥、主跨 550m + 550m 两跨

悬索桥主跨 466m PC 斜拉桥方案。

主跨 960m 悬索桥方案 是本着减小主桥跨度 并使南岸主塔基础“近水不进入深水”的原则而拟定。本方案基本上是一跨过江，主桥无深水基础，国内有较成熟的设计及施工经验，建设的工期短。

主跨 466m 斜拉桥方案 主桥布置为 203m + 466m + 203m 是结合航道实际情况、结构体系的需要及河工模型试验结论而拟定。该方案有三个深水基础，施工难度相对较大，工期长，对天然航道影响大，但造价相对最低。

主跨 550m + 550m 两跨连续悬索桥方案，江中仅布设一个桥塔，能适应现在及将来（三峡大坝建成之后 长江航道的变化 符合航运部门的要求 桥型方案构思新颖 但有一深水基础的施工问题。

考虑到长江航运事业发展的需要，工程实施的难易程度等方面因素，通过综合经济技术比较 经建设主管部门审定 最后确定主跨 960m 悬索桥为建设方案。

3 主跨 960m 悬索桥

3.1 主桥总体布置

桥址北岸为陡崖 高度达 60m 之多。临江陡崖的中部，有 5 ~ 10m 深的风化凹槽 在江水冲刷之下 陡崖存在有坍塌、后退的可能性。南岸临江地势 相对较平坦 坡度较小 并呈阶梯形，但在临江坡面有多条夹层，岩石较为破碎。根据此地形条件，北岸主塔墩布置在距岸边约 40m 处 地面标高 73 ~ 77m。南岸主塔墩，根据主墩基础以“基本避开夹层，不加大主跨跨度”原则而布置 主塔墩位于长江常水位边 距岸边约 25m。该处地面标高约为 36 ~ 39m 左右。

悬索桥主跨跨度为 960m，主梁简支在两侧桥塔横梁或交界墩承台上。主桥南岸通过 3 孔 30m 简支梁桥 同南岸互通立交工程相接 北岸通过跨度为 16、20、25m 空心板组合的引桥 跨越 318 国道，与北岸接线工程相连。主桥桥梁全长 1206m。

3.2 悬索桥主要设计参数

结构形式 单跨双铰悬索桥

主缆跨径 (m): 246.255 + 960 + 246.255

主缆矢跨比 : 1/10

主缆直径 (mm): 655 (索夹外 空隙率 20%), 647 (索夹内 空隙率 18%)

主缆中心距 (m): 24.4

吊索直径 (mm): 45

吊索间距 (m): 12.06 边吊索距桥塔中心 15.69

桥塔高度 (m) 北塔 112.415 (承台顶面以上) 南塔 142.227 (承台顶面以上)

加劲梁全宽 (m): 30.00

加劲梁中心高 (m): 3.0

3.3 结构设计

3.3.1 桥塔结构

由于南北两岸地势条件及地质情况不尽相同，南北两桥塔结构上略有区别：南塔承台以上塔高 142.227m，有三道横梁，行车道主梁及南岸引桥支承在下横梁上；北塔承台以上塔高 112.415m，设上、中两道横梁，行车道主梁及北引桥支承在交界墩上。南北两塔均采用分离式承台 每一承台长 19.1m、宽 9.1m、高 7m 其下设 8 根直径 2.5m 的桩基础。北塔上游塔柱下桩

基长 18.6m,下游塔柱下桩基长 14.6m。南岸桥塔 16 根桩基长度均为 27m。

两塔身塔柱均为空心矩形箱结构,塔顶顺桥向 6m 宽,并按 1:100 的坡度加宽至塔脚 8.40m (北塔)、8.84m (南塔)。塔顶横桥向等宽 5m。塔柱壁厚度按上、中、下三道横梁分为三种,壁厚分别为 0.7m、0.8m、1.0m。

为有效地扩散塔顶主索鞍传递的巨大压力,塔顶设有 12.8m 高的渐变段,塔冠设有 3.4m 高的实体段。

上横梁高 5.4m、宽 5.08m,中横梁高 7.5m、宽 6.08m,壁厚均为 0.8m。

南岸下横梁高 6.8m、宽 7.19m,壁厚为 1.0m。

为改善桥塔外观效果,在塔柱的四角及外侧中央设有 $0.3\text{m} \times 0.5\text{m}$ 、 $3\text{m} \times 0.15\text{m}$ 的凹槽。

塔柱竖向主筋采用 $\phi 32$,间距 15cm。水平箍筋采用 $\phi 16$,除桥塔根部变化段间距 15cm 外,其余均为 20cm。同时在间距 20cm 的水平箍筋之间设置了两根 $\phi 6.5$ 防裂分布箍筋。

横梁主筋采用 $\phi 25\text{mm}$,间距 15cm,箍筋采用 $\phi 16\text{mm}$,间距 15cm。在各道横梁上设有根数不等的钢绞线预应力筋。

塔身及横梁为 C50 号混凝土,承台为 C30 号混凝土,桩基为 C25 号混凝土。全桥桥塔 C50 号混凝土 10554m^3 , C30 号混凝土 4867m^3 , C25 号混凝土 4768m^3 。

3.3.2 加劲梁

加劲行车道主梁为类似鱼鳍形扁平钢箱梁结构。主梁结构全宽为 30.0m,中心梁高 3m,高宽比为 1:10。顶板宽度为 22m,设 2% 的双向横坡。上斜腹板水平宽度为 1.2m。悬臂人行道宽度为 2.8m,设 1.5% 的向内单向横坡。

桥面为正交异性板,顶板及上斜腹板厚 12mm。行车道 U 型加劲肋中心间距 0.59m,板厚 6mm。底板及下斜腹板板厚 10mm。底板、斜腹板球扁钢加劲肋中心间距一般为 0.4m,球扁钢规格为 16a。

加劲梁横隔板间距 4.02m,无吊索处板厚为 10mm,有吊杆处板厚为 12mm。为有效改善桥面板在汽车荷载作用下的变形及受力状况,在每两道横梁之间设有一道矮加劲肋。矮肋高 0.45m,板厚 16mm。

人行道顶板板厚 12mm,其下横向设有间距为 2.01m 一道板厚 12mm 的横肋板。顶板纵向设有球扁钢加劲肋,间距 0.3m。

加劲梁上的锚箱是钢箱梁重要的传力结构,本设计进行了特殊设计处理。锚箱主要由三块承力板、一块承锚板组成。三块承力板间距为 50cm,中间一块板厚 32mm,另两块板厚 20mm。三块承力板均穿过加劲梁斜腹板,其中间一块与横隔板相连接。承力锚板厚 50mm,其上设有多道板厚 20mm 的加劲板。

为适应加劲梁端部结构的复杂受力的需要,对长 7.33m 的端节段进行了特殊加强设计。端节段设有 6 道横隔板,横隔板板厚为 16mm 或 20mm,并结合支座系统连接的需要进行局部加劲处理。

加劲梁钢材材质为 Q345-E,结构钢材共用 10390t。

加劲梁顶板上铺设 6.5cm 厚改性沥青混凝土铺装层,人行道上铺设 3cm 厚的沥青砂。

3.3.3 锚碇

南北锚碇所处的地质情况不尽相同。北锚碇基坑基岩在高程 54.8m 以下整体性较好,无明显的夹层及破碎带,基岩为泥钙质胶结砾岩;高程 54.8m 以上基岩破碎,且多为红色粉砂岩。南岸整个岩体整体性差,基岩破碎,有多条夹层及断层,岩体以泥钙质为主夹有粉砂岩或

红砂岩的砾岩。南北基岩均为强度较低的软质岩。故南北两锚碇均为设计为重力式钢筋混凝土锚碇。

为保证锚碇上方行车道的宽度，锚碇采用埋置式，利用其上方回填路基土压重，以减少锚碇混凝土的数量。锚碇结构最大长度为 65m 宽 39m 前缘高 42m 后部高 22.8m。每一锚碇混凝土为 42584m³ 锚固体及前支承墙为 C40 号混凝土 其它各部分均采用 C25 号混凝土。

本锚碇为少筋结构，仅在锚碇内外表面设置直径 $\phi 22$ 间距 20cm 的分布钢筋网。为防止大体积混凝土产生有害的裂纹，在锚碇内外表面及每一施工层面上设置了规格为 BQ3030(间距 75mm $\times$ 150mm) 的金属扩张网。

在锚固体系张拉完成以后，后锚室用低标号混凝土回填密封，前锚室设有通风除潮设备。在锚碇支承墙前缘，结合保护路面以下主缆的需要，设有地下展览室。

3.3.4 主缆及吊索

主缆为预制平行钢丝束，每根为 104 束 127 ϕ 5mm 平行镀锌钢丝集结成束，定型包扎带绑扎，两端嵌固热铸锚头而成。钢丝为强度 1600MPa 普通松弛镀锌钢丝。为方便施工，在热铸锚上设有与锚固体系连接为一体的连接器。

主缆防护层由防护油漆、 $\phi 4$ 软质镀锌钢管、表面防锈腻子构成。

吊索为 7 $\times$ 19 ϕ 3mm 镀锌高强钢丝组成，单根钢丝绳直径 45mm。每侧每一个吊点有 4 根 7 $\times$ 19 ϕ 3mm 吊索。为克服传统吊索不能调整长度的缺点，在吊索两端冷铸锚上设有可调整长度螺母。

主缆钢丝共 6670t 吊索钢丝绳 188t。

3.3.5 主索鞍及散索鞍

主索鞍和散索鞍由鞍头、鞍体、底座组成。鞍头、鞍体分开浇铸 然后铸焊成组合结构。为方便加工、运输、主索鞍吊装施工，主鞍分左右两半制造，吊装就位后用高强螺栓联结为一体。主索鞍鞍体与底座之间，主索鞍施工期间设有聚四氟乙烯滑板。散索鞍鞍体采用摆式结构，以适应施工期间及成桥后的微量位移。主索鞍最大吊装重量为 32t。散鞍最大吊装重量为 43t。

为使主缆在鞍内能保证相对固定、不滑动，在鞍槽内设有竖向镀锌隔板，并在主缆调股到位后顶部用锌质填块填平、压紧。

主索鞍及散索鞍鞍体铸钢采用 ZG275 - 485H 底座铸钢采用 ZG230 - 450, 槽盖等采用 Q235 - A 号钢。

3.3.6 锚固体系

锚碇内锚固系统 由 64 根预应力锚固体系组成，其中单锚 24 个 双锚 40 个。单锚采用 16 根公称直径 15.24mm 的低松弛高强钢丝锚固，双锚采用 31 根公称直径 15.24mm 的低松弛高强钢丝锚固。在锚碇结构中，设有型钢骨架以便锚固预应力管道的精确定位施工。前锚面设有锚固连接器与主缆相连接。

3.3.7 主桥伸缩缝

为适应主跨加劲梁在活载作用下的大变形，加劲梁两端各设一道最大伸缩量为 1360mm 的大位移伸缩缝。

3.3.8 支座

为传递主梁端节段受力，约束主梁端节段的变形，保证梁端伸缩缝正常工作，在主梁每一端节段设有两个竖向支座、两个梁侧辅助支撑、两个风支座。竖向支座能适应加劲梁在温度及荷载作用下的纵向位移及面内梁端转动，能承受一定的竖向拉压反力。风支座主要承受横向

风载。梁侧辅助支撑，主要控制风载或活载偏载作用下的梁端扭转，以能适应梁端纵向位移及转动，承受结构扭转倾覆拉力，但不能承受压力。支座系统均为材质要求较高的铸焊结构。

4 结语

宜昌长江公路大桥的设计工作，得到了国内一大批桥梁专家的大力支持，借此一并表示衷心感谢。大桥设计组主要工作人员有李发、浦金华、姜友生、邓海、王成启、经华、陈卉、张铭、丁望星、袁任重、吴文武、张定明、易涛、戚萍、常英、虞晓群、卢欣欣等。

2. 宜昌长江公路大桥桥位 桥型 桥跨 方案选择与经济和环境评价

周昌栋¹ 王敬平¹ 宋官保² 谭永高³ 黄耀峰³ 陈景丽³

(1. 宜昌市交通局, 2. 宜昌市公路管理局, 3. 宜昌长江公路大桥建设开发公司)

摘要: 本书主要介绍宜昌长江大桥的桥位、桥型及桥跨方案的选择, 经济与环境的评价。

关键词: 桥位 桥型 经济 环境

沪蓉国道主干线是交通部确定的“两纵两横”国道主干线之一, 在宜昌长江公路大桥建设项目立项时, 东部的沪宁(上海至南京)、宁甬(南京至合肥)路段已基本建成, 西部成渝(成都至重庆)段也已建成, 湖北段的宜黄公路已推进至宜昌。为尽快西进, 促进沪蓉快速通道按计划建成, 无论是从地理条件考虑, 还是从服从总体路网规划着眼, 在宜昌过江是惟一合理的选择, 因此, 解决沪蓉国道主干线的过江通道迫在眉睫。根据宜昌区域的过江通道现状, “改渡为桥”则是解决交通量增长与过江通过能力之间矛盾的根本所在; 是“服务三峡工程, 加速我国能源基地建设”的需要, 也是开发长江经济带, 促进鄂西、湘西和川东地区经济发展的需要。

宜昌长江公路大桥前期工作自 1993 年开始, 1995 年 2 月交通部以交计发[1995]101 号文批复, 同意建设宜昌长江公路大桥。

1 桥位选择

宜昌长江公路大桥是一座特大型公路桥梁, 在湖北宜昌境内跨越长江, 位于沪蓉国道咽喉之处。根据沪蓉国道在宜昌地区的总体走向, 按照桥位选择“近城不进城”的原则, 先后初选出三个桥位, 即第 I 桥位虎牙滩桥位、第 II 桥位范家溪桥位、第 III 桥位古老背桥位, 进行综合比选。为了做好比选工作, 宜昌长江公路大桥建设开发公司分别委托有关单位完成了六个专题报告:《大桥对航运影响专题报告》、《河工模型定床试验报告》、《防洪专题研究报告》、《大桥桥位地球物理勘探报告》、《工程地质勘察报告》和《环境影响评价工作大纲》。在这 6 个专题报告的基础上, 综合大桥城市规划要求、大桥功能、桥头接线, 考虑了地方政府要求, 对 3 个桥位进行了比选, 详见表 1。

经过对水文地质勘察, 考虑了航运、防洪、建港的规划, 以及便于与沪蓉国道连接, 然后进行综合比选。所拟三个桥位虽然均处于河道顺直、河势平稳、适宜建桥河段, 但由于古老背桥位有悖国道主干线“近城不进城”的原则, 且大桥较长, 对防洪还有一定影响, 范家溪桥位位于宜昌河段少有的深水港区, 建桥就不宜建港, 并且处于三峡工程确定的砂石料取料场, 此处建桥会严重影响三峡工程的砂石取料, 桥址北岸拆迁工作量大, 对工程造价控制有较大影响; 虎牙滩桥位工程地质良好, 桥长较短, 征地拆迁工作量较小, 对防洪安全无影响, 并且符合沪蓉国道主干线鄂西段走向。1996 年 11 月, 交通部以交计发[1996]1001 号文批复同意采用虎牙滩

桥位。

2 桥型及桥跨的选择

2.1 桥型选择的基本原则

桥型选择的基本原则是：安全、适用、经济和美观。宜昌长江公路大桥从其建桥的社会与自然背景看，都将成为宜昌市的门户，因此，选择好大桥造型对宜昌市的门户印象至关重要。大桥桥型设计方案的构思原则如下：

桥位综合比选表 表 1

序号	比选项目名称	虎牙滩桥位	范家溪桥位	古老背桥位
一	水文地质			
	1. 与洪水流向夹角	约 90°	约 88°(工可调整后)	约 85°
	2. 桥位洪水要素	$Q_{1\%} = 83700\text{m}^3/\text{s}$	$Q_{1\%} = 83700\text{m}^3/\text{s}$	$Q_{1\%} = 83700\text{m}^3/\text{s}$
	3. 最大表面流速	3.86m/s	3.83m/s	3.86m/s
	4. 河床表面质构成	砾岩裸露、砂砾石浅层覆盖	砂砾石覆盖,中等厚度下卧砾岩	砂砾石河床,较厚,下卧粉砂岩
	5. 基岩组成及高程	砾岩,基岩面高程 14 ~ 34m	砾岩,基岩面高程 2 ~ 30m	粉砂岩为主,部分砾岩,岩面高程 5~ 17m
二	防洪	岩坎式河岸,无防洪之忧	右岸为岩坎,左岸为局部高位滩地,均较安全	两岸滩地,高水位局部受淹,不影响大局
三	通航条件	左岸为主航道,右岸为滩地,且上游有锚地,桥跨的选择对通航条件有一定影响(大跨径有利)	河段顺直,航线稳定,深泓冲淤变化小,便于船舶航行和河道疏浚	有两个基本点航槽,且河道浅区不稳定,建桥后对航运有一定影响
四	城市规划要求	符合开发区城镇布局规划	桥位正位于规划建设的虎牙滩港区,未来将影响港区建设	主干线穿过开发区,不利于城市总体布局
五	大桥功能	可以满足主干线及路网布局要求,有利于宜昌南北交通	可以满足主干线及路网布局要求,有利于江南开发	可以满足主干线及路网布局要求,有利于开发江南
六	桥头接线(沪蓉主线)	大桥北岸接线 6.04km(接宜黄路),较为顺适,南岸规划布线较为困难,近期方案绕行稍远	北岸接宜黄路,接线长 5.86 km,较为顺畅,南岸规划近期方案走线较顺	北岸接宜黄路,接线长 6.55 km,连接宜黄路线性不顺,南岸近期走向最顺
七	环境保护	搬迁与占地少,对自然环境影响较小	搬迁与占地多,对自然环境有一定的影响	影响城区建设,施工期与运营期都会对周围环境产生一定影响
八	地方政府态度	城市规划桥位	建设困难很大	不赞成采用
	比选意见	推荐桥位(I)	舍弃	舍弃

(1)既能发挥国道主干线快速通道作用，又能基本上解决大桥两岸过江交通的问题，同时兼顾远景交通发展的需要。

(2)充分考虑桥位河段现有航道条件及将来三峡大坝建成后航道可能产生的变化，力求将工程对航道的不利影响减少到最小限度，满足航运发展的要求。

(3)经济合理、工期较短、节约投资 较快的发挥经济效益。

(4)大桥桥型要有现代气息 符合 20 世纪 90 年代先进水平 在高度、跨度的选择和线条的设计等方面力求与环境相协调 力求做到不仅雄伟壮观 而且自然质朴、浑然天成 使人观之有“处丘壑之高路、卧洪波之长虹”的感觉。

2.2 桥型方案的选择

根据桥址地形、地貌、航道、水文、地质等条件 大桥在初步设计中拟定了以下 3 种桥型方案 见图 1)。

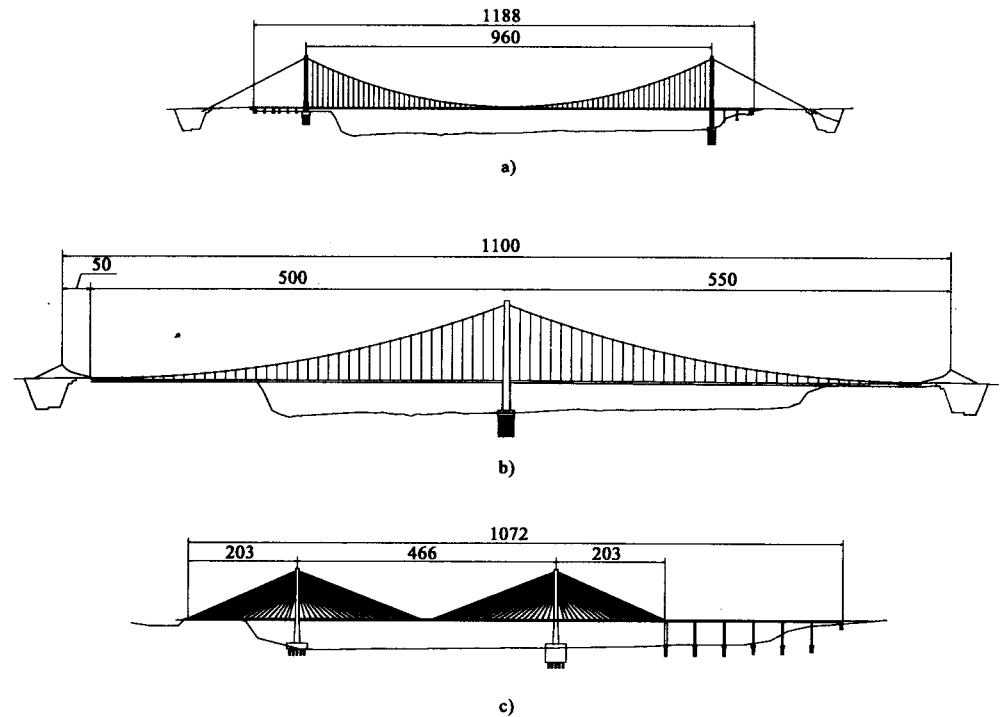


图 1 桥型方案图 尺寸单位 :m)

a)方案一 双塔悬索桥 ;b)方案二 独塔悬索桥 ;c)方案三 PC 斜拉桥

综合结构特征、施工、养护、航运环境及景观评价、工期等因素进行比较 详见表 2。

桥型方案比较表

表 2

方 案	方 案 一	方 案 二	方 案 三
主桥桥型	双塔悬索桥	独塔悬索桥	PC 斜拉桥
主桥桥跨(m)	960	500 + 550	203 + 466 + 203
全桥长(m)	1020	1050	1072

续上表

方 案	方 案 一	方 案 二	方 案 三
结构特征	主桥为双塔钢箱主梁悬索桥,主梁梁高 3m,宽 30m,主缆为 $2 \times 104 \times 127\phi 5.1\text{mm}$ 镀锌高强钢丝,北塔在河岸,塔高 112.42m,南塔布置在右侧枯水边,塔高 142.27m,桥塔为混凝土矩形箱结构,吊索为 $7 \times 19\phi 3\text{mm}$ 高强钢丝,重力式钢筋混凝土锚碇	主桥为双塔钢箱主梁悬索桥,主梁梁高 3m,宽 30.4m,主缆为 $2 \times 91 \times 127\phi 5\text{mm}$ 平行钢丝组成,桥塔布置在长江中央,塔高 106.7m,塔身为门式矩形箱混凝土结构,塔基为 $18\phi 2.5\text{mm}$ 嵌岩桩,每根吊杆为 $4 \times 7 \times 19\phi 3\text{mm}$ 高强钢丝,重力式钢筋混凝土锚碇	主桥为双塔双索面边主梁斜拉桥,主梁梁高 2~3m,宽 29m,桥塔为宝石型矩形箱混凝土结构,塔高 135m,塔基为 $26\phi 2.5\text{mm}$ 嵌岩桩,拉索为 $85 \sim 283\phi 7\text{mm}$ 平行钢丝
施工	施工工艺成熟,无深水基础	无特殊工艺要求,施工工艺成熟,有涂水基础	工艺成熟,但悬臂施工长达 200~233m,有一定难度,工期难以保证
养护	钢结构需定期防护	钢结构需定期防护	混凝土结构无需防护,若干年后,斜拉索可能要更换
航运	一跨过江,无深水基础,对航道影响较小,是航运部门推荐的墩位布置方案之一	江中央设有一墩,对航运有一定影响,但还是能够适应现在及将来航运的要求	江中央设有两个大型、一个小型基础,对河道影响较大,施工期间影响尤为显著,不能完全满足航道部门要求,但该桥跨布置基本上满足河工模型试验的结论意见
环境及景观评价	①大跨径悬索桥是公认的最优美的桥型;②大桥景观与环境和谐统一	①结构新颖,桥型美观;②布局合理,环境协调,风格独特,能成为区域一景	①布置合理,结构协调,桥型美观;②景观协调,能成为区域一景
工期	3 年	3 年	3.5 年

2.3 桥型综合评价

经过上述比较 所提出双塔斜拉桥、独塔悬索桥和双塔悬索桥三个方案 理论上均可行 现就三个桥型方案综合评价如下。

方案一 双塔悬索桥方案：采用一跨过江，大跨径悬索桥是公认的最优美的桥型，大桥景观与环境和谐统一 无水中墩 与航运无干扰 国内已有成熟的设计、施工经验。

方案二 独塔悬索桥方案：桥型新颖，但此桥型存在以下几个问题：(1)由于设水中墩 不仅有碍通航，而且还存在桥墩受船舶撞击的危险，因此，还应对桥墩设置防撞设施；(2)根据地质勘测，水中墩处基岩面高度不一，双壁钢围堰不能在同一岩面上落床，施工困难；(3)悬索桥属特大跨径桥梁优选的主要桥型之一，如果人为在河当中设一个桥墩，就使该桥变成了两个 550m 的悬索桥，因此从大跨径的选用原则，就使该桥失去了选择大跨径的意义；(4)由于梁在桥墩处不连续，要设置伸缩缝，且由于转角较大，设置困难，行车不舒适；(5)在深水中修建桥墩 洪水期间难以预料偶发情况 比如双壁钢围堰不稳定、船撞围堰、混凝土封底困难等 使得深水墩基础成为控制工期的主要因素，难以实现三年建成此桥的目标，由于工期的延长，以及深水墩在施工期和使用期间要设置导航设施和长年的维护费用，由此，该方案的造价优势不一

定比双塔悬索桥大。

方案三 :PC 斜拉桥方案：由于桥位上游为弯曲河段，上下水船舶在此会船，加上上游江中有浅滩，下水船队过桥前直线段长度不足，设有两个水中墩，对航运不利，两个深水基础，施工难度大，且施工中要设临时墩，施工周期长，所以不推荐选用斜拉桥方案。

综上所述，在当前时间紧迫，施工期要求短和没有独塔悬索桥实际经验可以借鉴的情况下，建议以采用双塔悬索桥为宜。1997 年 10 月 交通部批复初步设计中，同意宜昌长江公路大桥的桥型为双塔钢箱梁悬索桥。

2.4 桥跨的选择

在桥跨的选择上，由于北塔所在的岸坡为陡崖，顶部高程 83m，深泓区位于坡脚，贴岸江底高程 22m，岸坡高度达 60m 之多，平均坡角约 60°。有余。塔位的布置是控制桥梁主跨的制约因素，愈近岸边，则造价愈低，但岸坡稳定安全度降低，反之，则工程造价急剧增加。在保证岸坡稳定足够安全的情况下，北岸塔位选择在桩号 K300 + 490 处，距岸坡 60m，南岸主塔墩根据主墩基础“近水不进入深水、减小主跨跨度”的原则，主塔中心桩号为 K301 + 450，主跨径 960m。

3 经济与环境评价

经过桥位、桥型、桥跨的选择，宜昌长江公路大桥的桥址选定于长江宜昌河段的虎牙滩，桥型选择为双塔钢箱梁悬索桥，主跨 960m，全长 1188m，详见图 2。桥全宽 30m，设计荷载汽超 20 挂 120，设计行车速度 80km/h。项目概算总投资为 8.95 亿元，批准建设工期为 3 年。

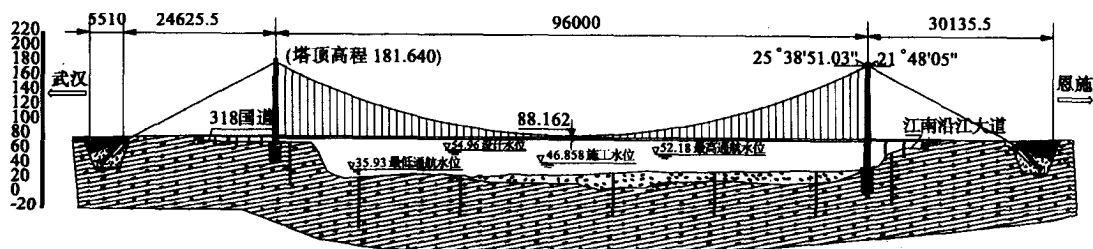


图 2 宜昌长江公路大桥桥型立面布置图（尺寸单位 cm）

3.1 经济评价

宜昌长江公路大桥是国家公路网主骨架沪蓉国道主干线在湖北境内跨越长江的一座特大桥梁，是交通部和湖北省的“九五”交通重点工程，也是宜昌城区跨越长江南北两岸的重要通道。宜昌长江公路大桥的建设有利于加速沪蓉国道主干线和国家公路网主骨架尽快形成；有利于开发长江经济带，促进鄂西湘西和川东地区的经济发展；也是服务三峡工程，加速我国能源基地建设的需要，有明显的社会效益。

宜昌长江公路大桥总投资 8.95 亿元人民币，自筹资金 3.14 亿元，其它采用国内银行贷款、加拿大政府混合贷款和发行债券的方法进行筹集。项目建成后，静态投资回收期（含建设期）13.77 年，项目收益率高于行业基准收益率，且有较好的财务效益，同时，项目抗风险能力亦较强。

3.2 环境评价

由于大桥跨越长江，工程规模巨大，施工期辟山筑路，营运期的噪声、尘埃、污染物等都将对周围的环境造成一定的影响，其主要因素有：

(1) 道路交通噪声；

- (2)空气中的主要污染物 CO、NO_x、TSP;
- (3)服务区产生的废水及固体废弃物;
- (4)公路桥梁建设对生态系统的影响,包括工程的水土流失,对生态影响程度,工程占地;
- (5)公路桥梁建设的社会影响 包括工程对沿线居民生活影响、占地搬迁及安置情况 公众对工程的态度。

宜昌长江公路大桥桥位、桥型的选择,重点研究了对环境的保护,并采取了以下措施和对策:

(1)按照工程‘三同时’的要求 进行了大桥环保景观设计 主要包括桥梁的色彩设计、桥梁夜景设计、桥面系设计、桥头公园设计、立交桥景观设计等,力求大桥景观与环境和谐统

(2)与文物主管部门一道研究保护方案,对名胜古迹—猓亭古战场遗址进行了保护;

(3)对桥位区长江两岸岸坡及接线路边坡统一规划,采用框架式支护结构,保证边坡稳定,防止水土流失 同时 框架网格内为草皮植被 使支护断面形成错落有致的自然景观;

(4)桥位选择时 对搬迁及安置工作量大 影响沿线居民生活 占田多的桥位不推荐;

(5)选择噪声小的沥青混凝土路面和桥面 减少运营期噪声;

(6)加大环保投入 治理污染源 通过排污设备 隔音设备 绿化工程保护环境。

4 结语

随着我国公路交通的迅速发展 跨越大江、大河的特大型桥梁将越来越多 桥位、桥型选择考虑和研究的因素也将越来越全面,越来越深入,尤其是在综合进行技术经济比较的同时,要加强对服务地区经济开放、开发的研究,加强对桥梁美学的研究,加强对大跨度梁桥技术发展趋势的研究,加强对保护生态环境协调发展的研究,使现代桥梁既成为经济建设的大通道,又成为当代优美的景点,受到人们的赞赏。

参考文献

- 1 中华人民共和国行业标准.公路工程技术标准 (JTJ 001—97).北京:人民交通出版社,1997
- 2 中华人民共和国行业标准.公路桥位勘测设计规范 (JTJ 062—91).北京:人民交通出版社,1992

3. 悬索桥主缆线形计算

丁 望 星

(湖北省交通规划设计院)

摘要：本文简要介绍了主索两种线形近似计算方法，同时重点阐述了一种非常接近主缆实际线形的精确计算方法，并列出了用这种线形计算方法计算宜昌大桥的结果。

关键词：主缆线形 悬链线

悬索桥缆索系统的设计，一般根据确定的跨径和矢跨比，计算出主缆无应力长度、主缆架设时的控制标高、吊索长度、施工时索鞍的预偏量、索夹安装位置。以上数据准确与否均与主缆线形计算方法有关。对悬索桥主缆线形进行分析时，应作如下假定：

- 缆是柔性的 仅承受拉力 不承受压力和弯矩 即主缆的抗弯刚度为零；
- 缆的应力与应变为线性关系，符合虎克定律；
- 主缆的截面积、自重荷载和弹性模量在外荷载的作用下无变化；
- 索塔为刚性（即没有弹性压缩和弯曲变形）；
- 主缆与索鞍之间没有滑动，并可在塔顶或锚碇处自由滑动或转动；
- 主缆在中跨和边跨任何一点处的水平分力相等；

线形计算方法

主缆线形计算方法很多，使用精确计算方法可以为线形设计和施工控制提供十分准确的数据；而利用既能写出解析表达式，结果又比较准确的近似计算方法的，可以大大提高计算效率 检算精确计算方法的结果 特别适用于工地计算使用。

1.1 近似计算方法

1.1.1 抛物线法

若将主缆自重和吊点集中力等外荷载简化为沿跨径方向的均布荷载，则可根据弯矩平衡理论，求出主缆线形方程为抛物线方程：

$$Y = QX(l - X)/2H + cX/l \quad (1)$$

式中：Q——沿跨径方向的均布荷载；

H——主缆恒载水平分力；

c——主缆两端高差 若为中跨 则 c 值为 0)；

l——主缆水平跨径。

由弹性理论分析主缆索 可求得 $H = ql^2/8f$ 代入方程 结果如下：

中跨：
$$Y = (4f/L)X - (4f/L^2)X^2;$$

边跨：
$$Y = [(4f_1 + c)/L_1]X - (4f_1/L_1^2)X^2;$$

式中： f ——中跨跨中矢高；

f_1 ——边跨跨中矢高；

L ——中跨主缆跨径；

L_1 ——边跨主缆跨径；

c ——散索鞍处主缆理论交点与主索鞍处理论交点之间的高差。

这种方法计算模式非常简单，在过去小跨径悬索桥计算分析时常用，但由于其理论假设与实际线形有较大差距，故其计算结果有较大误差。对于大跨径悬索桥，抛物线法一般仅作简要估算用。

1.1.2 抛物线与悬链线组合曲线法

当主缆沿弧长自重集度为 q_2 ，并将吊点集中力等外荷载简化为沿跨径方向均布的荷载 q_1 时 则其曲线方程为：

$$Y = q_1 X(L - X)/2H + H[\operatorname{ch}\alpha - \operatorname{ch}(2\beta X/L - \alpha)]/q_2$$

式中： L ——主缆跨径；

H ——主缆恒载水平分力；

α, β ——计算参数，具体意义见下文。

上述曲线方程由两部分组成，前部分为抛物线方程，后部分为悬链线方程，若后部分悬链线方程按幂级数展开后取第一项，则结果与抛物线方程一样，因此组合曲线法比抛物线法多保留了主缆自重影响的高阶项，其精度高于抛物线法。

1.2 精确计算方法

1.2.1 计算方程

这种方法假定主缆承受沿弧长均布的自重荷载和吊点集中力，取任两吊点间的一段主缆来作分析（见图 1）根据垂直方向静力平衡的原则有：

$$V_1 - V_2 = q ds \quad (2)$$

由于

$$V = H \frac{dy}{dx}, ds = \sqrt{(dy)^2 + (dx)^2}$$

式 (2) 变为：

$$H \frac{dy_1 - dy_2}{dx} = q \sqrt{(dy)^2 + (dx)^2} \quad (3)$$

由于 $\frac{dy_1 - dy_2}{dx} = \frac{d^2 y}{dx^2}$ ，式 (3) 两边除以 dx ，

$$\text{式 (3) 变为：} H \frac{d^2 y}{(dx)^2} = q \sqrt{\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + 1} \quad \text{即} \quad y'' = \frac{q}{H} \sqrt{(y')^2 + 1} \quad (4)$$

满足微分方程 边界条件的解为：

$$y = \frac{H}{q} \left[\operatorname{ch}\alpha - \operatorname{ch}\left(\frac{2\beta}{l}x - \alpha\right) \right] \quad (5)$$

式中参数 $\alpha = \operatorname{sh}^{-1} \left[\beta \left(\frac{c}{l} \right) \div \operatorname{sh}\beta \right] + \beta$; $\beta = \frac{ql}{2H}$

由方程 可知，两吊点间的主缆的线形为悬链线，这种计算模式更接近于主缆实际受力情况。

1.2.2 计算方法

若将主缆按吊点分成 n 段 则第 i 段索的曲线方程为：

$$y_i = \frac{H}{q} \left[\operatorname{ch}\alpha_i - \operatorname{ch}\left(\frac{2\beta_i}{l_i}x_i - \alpha_i\right) \right] \quad (6)$$

式中参数 $\alpha_i = \text{sh}^{-1} \left[\beta_i \left(\frac{c_i}{l_i} \right) \div \text{sh} \beta_i \right] + \beta_i$; $\beta_i = \frac{ql_i}{2H}$ 。

各段索应满足以下边界和力平衡条件：

(1) 已知主缆两端点的高程，则各段主缆索的 c 值之和

为一常数 即 $\sum_{i=1}^n c_i = C$;

(2) 主缆应通过给定点 对中跨来说，一般预先给定主缆跨中矢高 跨中点为给定点)；

(3) 各吊点应满足以下力平衡条件：

$$V|_{x_i=l_i} - V|_{x_{i+1}=0} = P_i, \text{ 亦即 } H \frac{dy_i}{dx_i} \Big|_{x_i=l_i} - H \frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}} \Big|_{x_{i+1}=0} = P_i; \quad (7)$$

根据式⑥和上述三个边界和力平衡条件，可建立以下迭代计算过程：

(1) 假定主缆水平分力的迭代初始值为 $H = H_0$ (一般按抛物线法 $H_0 = Ql^2/8f$ 估算)；

(2) 假定左鞍座处竖向力为 P_0 (P_0 亦可按抛物线法估算)，由式⑥⑦推导得 $P_0 = H_0 \text{sh} \alpha_1 / q$ 于是可以求出 α_1, β_1 再由 α_1, β_1 可求得 $c_1 = H_0 [\text{ch} \alpha_1 - \text{ch}(2\beta_1 - \alpha_1)] / q$ ，

由式⑥⑦推导得 $H \frac{dy_1}{dx_1} \Big|_{x_1=l_1} = -H_0 \text{sh}(2\beta_1 - \alpha_1) / q$ ；

(3) 继续求出下一段的 α_i, β_i 依次循环求得 $c_2, c_3, \dots, c_n$ ；

(4) 求得 $\sum_{i=1}^n c_i$ 若 $|\sum_{i=1}^n c_i - C| \geq \epsilon$ (ϵ 为给定精度) 则使 $P = P_0 + \Delta P$ (ΔP 为由误差确定的 P_0 修正量) 重新进行 1)~4) 的循环 直至 $|\sum_{i=1}^n c_i - C| \leq \epsilon$ 为止；

(5) 检验索是否通过指定点，否则使 $H = H_0 + \Delta H$ (ΔH 为由误差确定的 H_0 修正量) 重新进行 1)~5) 的循环，直至主缆索通过给定点。

以上循环迭代过程 只要采用变步长的 $\Delta P, \Delta H$ 则可很快收敛。

1.2.3 主缆无应力长度

求得满足精度要求的水平分力 H 和鞍座处竖向力 P_0 后(图 2 图 3) 根据式 可得各段

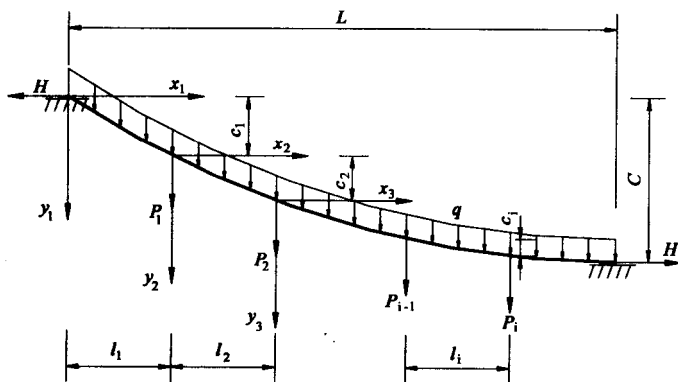


图 2

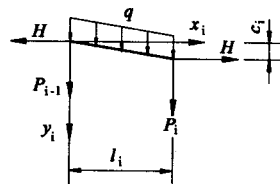


图 3

索的长度：

$$s_i = H [\text{sh} \alpha_1 - \text{sh}(2\beta_1 - \alpha_1)] / q; \quad (8)$$

各段索的弹性伸长为：

$$\Delta s_i = H \{ l_i + H [\operatorname{sh}(4\beta_i - 2\alpha_i) + \operatorname{sh}2\alpha_i] / 2q \} / 2EA \quad (9)$$

其中 EA 为主缆抗拉刚度。

各段索的无应力长度为

$$s_0 = s_i - \Delta s_i \quad (10)$$

主缆无应力长度等于各段索之和，但还需进行索鞍处圆弧影响的修正。修正方法是根据索上某点斜率与鞍座上同一点斜率相等的原则计算出索与鞍座的切点，再分别计算出切点至理论顶点的曲线长及绕鞍座的弧线长，两者差值即为主缆索长修正量。由于地球曲率的影响而造成塔顶相对距离增加从而使主缆长度增加，也应考虑修正。

1.2.4 索鞍预偏量及索夹安装位置

为不让悬索桥塔发生偏移，桥建成主缆索达到设计线形，必须在上部构造架设过程中使中跨与边跨主缆索水平分力相等、散索鞍转索前后索力相等，而要达到上述条件就得让索鞍预偏。索鞍预偏量计算的边界和力平衡条件有：

- (1) 两锚碇前锚面主缆锚固点相对坐标不变；
- (2) 上部构造架设过程中中跨与边跨主缆索水平分力相等、散索鞍转索前后索力相等；
- (3) 锚碇前锚面主缆锚固点与散索鞍、散索鞍与主索鞍、主索鞍与主索鞍之间的主缆无应力长度应等于成桥状态的无应力长度。

根据以上条件可以比较方便地建立循环迭代过程，精确计算出上部构造架设过程中各个阶段索鞍的预偏量和主缆线形。

为保证成桥时吊索的正确位置，需要准确计算空缆状态下索夹安装位置。主缆线形计算分段点设在索夹中心（吊点），各段索的无应力长度即为主缆索夹间的无应力长度。索夹安装位置计算的原则是空缆状态下索夹之间的无应力长度应等于成桥状态索夹之间的无应力长度。根据这一原则建立循环迭代过程，对空缆进行分析。

2 宜昌大桥主缆线形计算结果

宜昌大桥成桥状态主缆沿弧长均布自重荷载为 44.124kN/m （空缆状态为 42.361kN/m ），将钢箱梁、桥面系、吊索和索夹等一、二期恒载换算成吊点集中力。根据精确计算方法得主缆线形计算结果如下：

设计成桥时主缆索力水平分量 $H = 246617.460\text{kN}$

锚跨计算结果：

理论锚跨等效长度 = 26.75000m ；

理论锚跨等效无应力长度 = 26.68811m 。

边跨索长计算结果：

边跨与散索鞍的切线角 = 23.2905837° ；边跨在主索鞍内实际长 = 2.6692870m ；

边跨在散索鞍内理论长 = 1.1034871m ；边跨在主索鞍内长度修正 = 0.1845359m 。

边跨在散索鞍内实际长 = 1.0960669m ；索曲线总长 = 270.3462m ；

边跨与主索鞍的切线角 = 25.5772547° ；弹性总伸长量 = 0.6877m ；

边跨在主索鞍内理论长 = 2.8538229m ；无应力长度 = 269.6585m 。

中跨索长计算结果：

中跨左侧与索鞍的切线角 = 21.5509988° ；中跨右侧在索鞍内实际长 = 2.6772495m ；

中跨左侧在索鞍内理论长 = 2.8191752m ；中跨右侧在索鞍内长度修正 = 0.1418879m ；