

# 矮寨大桥轨索架梁系统的研制及工程应用

邓年春<sup>1</sup> 刘显晖<sup>1</sup> 张念来<sup>2</sup> 伍柳毅<sup>1</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 湖南路桥建设集团公司 长沙 410004)

**摘要:**矮寨大桥为钢桁加劲梁单跨悬索桥,主跨布置为242m+1176m+116m。它横跨德夯大峡谷,峡谷两岸地势陡峭,桥面设计标高与地面高差达355米左右。为了克服运输条件差的困难,提出了轨索滑移架梁法的施工方案。它是利用悬索桥主缆作承重结构,永久吊索连接临时吊鞍支承张紧的轨索作为轨道,运梁小车在轨索上移动运送钢桁加劲梁段,到达待安装位置,借助缆载吊机垂直起吊安装。文中对轨索滑移架梁系统及其缩比模型试验和足尺模型试验进行了介绍,同时对缆载吊机的设计和试验也进行了描述,最后介绍了工程应用情况。试验和工程应用结果表明:轨索滑移架梁法能快速实现悬索桥的主梁架设,并具有很好的安全性和经济性,具有广阔的应用前景和推广价值。

**关键词:**悬索桥 主梁架设 轨索架梁 运梁小车 缆载吊机

## 1 工程概况

矮寨大桥位于中国湖南省湘西土家族苗族自治州境内,是长沙至重庆公路通道-吉首至茶洞高速公路的控制性工程。桥位距吉首市区约为20公里,在矮寨镇上空跨越德夯大峡谷,峡谷两岸地势陡峭,地形变化急剧,起伏很大,高差达400多米,地质情况复杂。桥位右侧为著名风景旅游区-德夯,左侧是中国著名的“公路奇观”G209国道矮寨盘山公路。大桥设计为钢桁加劲梁单跨悬索桥,主跨布置为242m+1176m+116m,主梁全长1000.5m,桥面系宽24.5m。全桥采用71对吊索,吊索标准间距为14.5m。钢桁架梁宽27m,高7.5m,全桥共分69个节段,跨中设一合龙节段。标准节段梁长14.5m,宽27m,重量为124.5t,合龙节段梁长17.5m,宽27m,重量为192t。桥面设计标高与地面高差达355m左右。索塔采用钢筋混凝土门式索塔,吉首岸塔高129m,茶洞岸塔高62m。吉首岸锚碇采用重力式锚碇,茶洞岸锚碇为隧道式锚碇,两岸桥台均与隧道直接相连。矮寨大桥,是目前世界上跨峡谷跨径最大的钢桁梁悬索桥。



图1 桥梁概貌

## 2 轨索运梁系统设计

矮寨大桥桥位处地势陡峭,地表地质复杂多变,交通条件差。在这样的高山上修建大跨度悬索桥时,第一个困难便是艰难的运输条件,这里无路可行,无江河可利用。人工开凿的施工便道,一路盘旋曲折,如登天梯。如何将巨大的钢梁运输并架设到位,是必须解决的一个难题。

目前世界上大型悬索桥钢桁梁施工的架设方案主要有三种:第一种是利用江河湖海的水运条件,实现大吨位加劲梁节段的整体运输,然后用缆载吊机垂直提升架梁,第二种方案是用桥面运输车运梁和桥面吊机吊装悬臂安装架梁,第三种方案是用缆索吊(又称缆索起重机)吊装桁梁片架梁。这些方法中,缆载吊机结合水运架设法,需要深水位的通航条件,这里不具备。桥面吊机吊装悬臂法是在高空中逐片安装桁架梁,施工质量难以保证,而且速度慢。对于千米以上跨度的悬索桥,传统的缆索吊运输与吊装施工方案,由于跨度太大、吊装重量大、牵引起重绳太长等原因,极大地影响施工方案的经济性、施工可操作性和运输与吊装速度,实施困难大,经济性较差。

悬索桥主缆的承载能力很大,传统的缆载吊机吊装施工法正是以主缆为支撑,实现重物垂直提升和吊机水平移位。在借鉴货运索道及林业运输索道的工作原理和利用强大的主缆承载能力,

轨索滑移运梁法的施工方案被创造性地提出。这样矮寨大桥钢桁梁的安装方法拟采用节段拼装,整体吊装的方式,其思路是钢桁梁的杆件在工厂加工好后,通过运输车运输至大桥两岸的节段拼装场,在拼装场组拼成钢桁梁标准节段。然后利用大桥安装好的永久性主缆和吊索,在吊索下端安装临时吊鞍,在临时吊鞍上设置水平轨索,锚固于两岸岩体;用水平轨索作为标准节段梁的运梁轨道,利用运梁小车将单个节段在轨索上纵向运输就位至永久吊索下方,用缆载吊机接住钢桁梁,退出运梁小车,节段对接并销接吊索,逐节段由跨中向两岸对称施工。

轨索架梁系统主要包括主缆、吊索、吊鞍、轨索、牵引索、运梁小车、缆载吊机。在钢桁架梁的横向两侧各设4根轨索,全桥共8根轨索运输钢桁架梁(见图2)。同片钢桁架梁两侧的4根轨索上的运梁小车为1台,即每片钢桁架梁由2台运梁小车运输。每台运梁小车由前后2个结构相同的滑轮机构和矩形梁组成。前后两部分通过连接绳相连。以主缆和吊鞍作为轨索支撑点,滑轮组以轨索作为支撑轨道,通过牵引索拖拉,运梁小车把钢桁梁节段由两岸向跨中滑移,实现水平运输,将钢桁架梁运输至指定位置。然后由缆载吊机实现垂直提升并安装。由跨中往两端拼装主梁,最终实现全桥贯通。

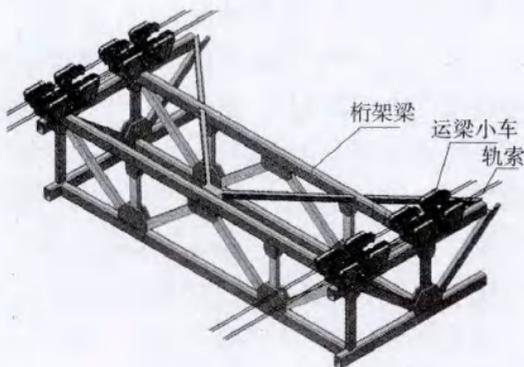


图2 运梁小车的整体构造图

吊鞍直接与悬索桥的永久吊索相连,支承于吊索下端。在其鞍体纵向侧面设置吊耳,与吊索下端的叉形耳板销接。在鞍体顶面、吊索两侧设置轨索鞍座,轨索放置于吊鞍的鞍座上。吊鞍的

作用是给轨索提供支承,并将轨索的荷载传至吊索和主缆,但同时会给运梁小车的通过形成一定的阻碍。吊鞍的构造见图3。

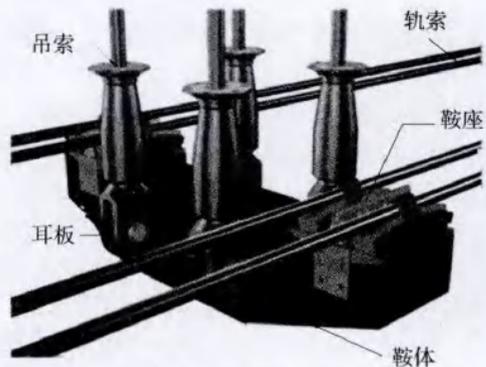


图3 吊鞍构造图

轨索采用直径56mm的密封钢丝绳,其设计进行了周详地考虑。如果轨索两端都设置为固结,夏天轨索遇热会膨胀,结构松弛,运梁小车就无法在上面行走;冬天张紧收缩,再放上运梁小车,可能会超过轨索的承载力。为了解决这个问题,把轨索设计为一边是固结装置,一边是张紧装置,作为活接头挂上平衡重,这样可以始终保持每一根轨索都承受近百吨的恒力,防止轨索松弛或太紧。

运梁小车的安装首先在两岸的场地内完成,临时悬挂在运梁场的上方。钢桁梁的拼装需要在两岸主桥塔的两端设置拼装场。节段入轨为在两岸的拼装场上方,主缆的下方设置临时吊点,将短吊索穿过运梁小车之后,与钢桁梁底面进行销接,提升钢桁梁与运梁小车连接,然后放松吊点使钢桁梁的重量转移到运梁小车的吊杆上,完成节段入轨,见图4。



图4 节段梁的入轨

运梁小车的设计重点考虑了滑轮、滑轮轴、滑轮连板、三角形梁、矩形梁和吊鞍鞍体等组件的设计与计算。其中滑轮的计算，分多种工况进行考虑。未牵引时，可简化成轨索直接支承滑轮模型进行计算，见图5，假设滑轮与轨索呈Hertz弹性接触，且接触面积很小，接触应力方向为竖直方向，并呈椭圆分布，由此进行分析。小车牵引运动时，滑轮受牵引力、自身轴压、摩擦力与轨索支承力的作用，力学简化模型见图6，根据Hertz弹性接触理论进行计算。滑轮组过吊鞍时，滑轮受力将由轮槽转到轮缘受力，假定轮槽与吊鞍属于Hertz弹性接触，计算模型见图7。滑轮过鞍座ANSYS的计算结果，见图8。三角形梁、矩形梁和吊鞍鞍体的ANSYS的计算结果分别见图9~图12。轨索移梁过程中的计算，分别考虑了轨索移梁对称施工、不对称架设施工，以及在此过程中的轨索初张力、架设过程中的温度变化等方面的影响。施工工况最大轨索节间挠度图，见图13，轨索的最大倾角为 $13^\circ$  [2-3]。

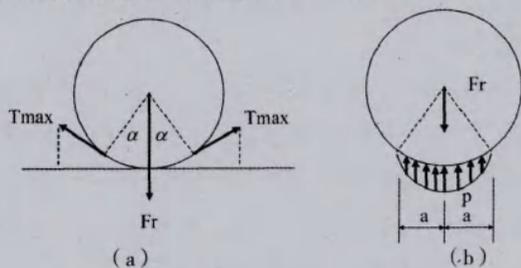


图5 轨索直接支承滑轮简化模型

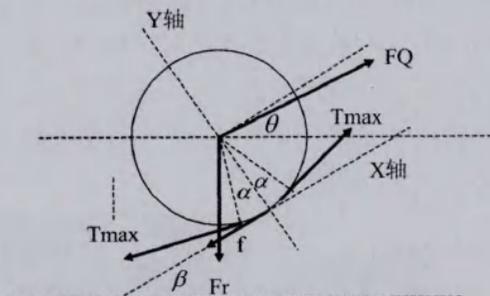


图6 牵引索、滑轮与钢丝绳作用简化模型

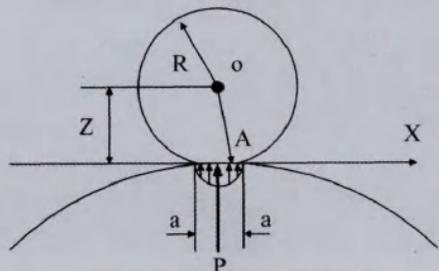


图7 滑轮与鞍座接触模型

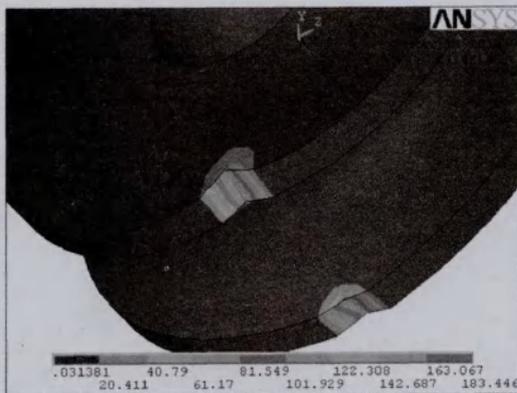


图8 滑轮过鞍座ANSYS的计算结果

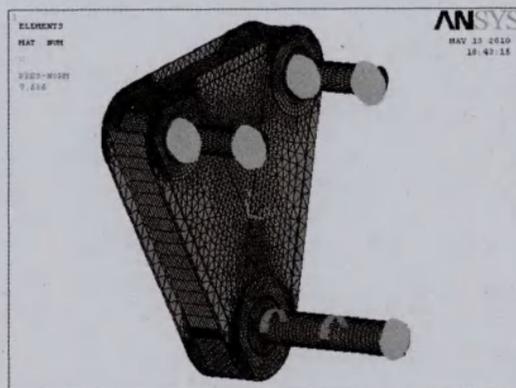


图9 三角形梁实体单元模型

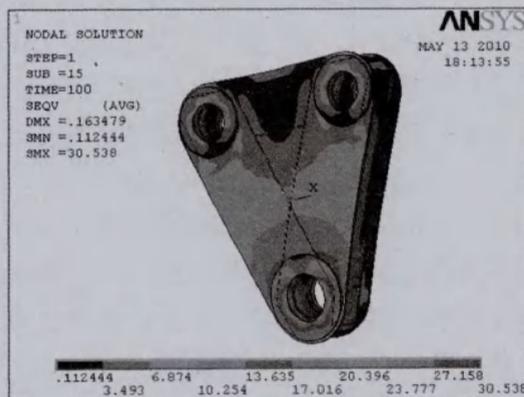


图10 三角形梁实体ANSYS计算结果

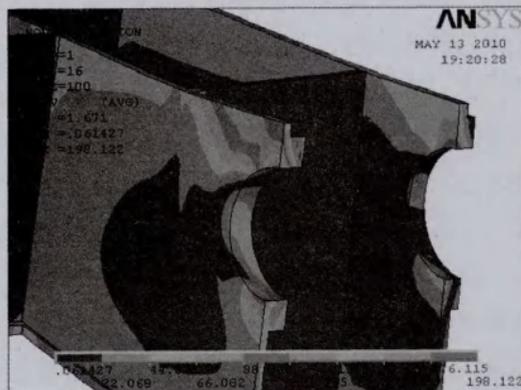


图11 矩形梁实体ANSYS计算结果

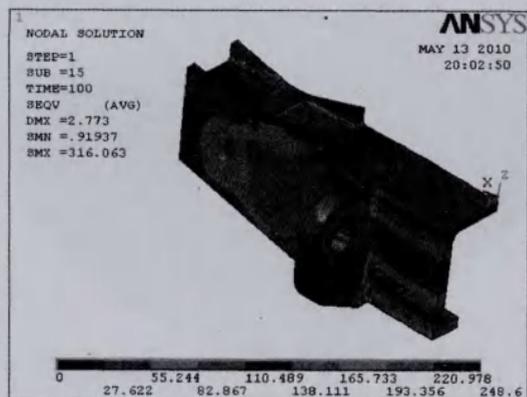


图12 吊鞍鞍体实体ANSYS计算结果

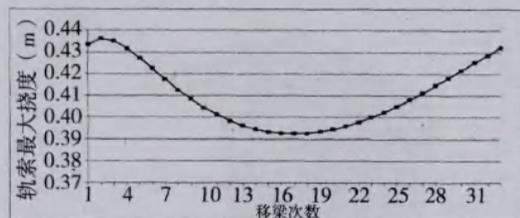


图13 施工工况最大轨索节间挠度图

### 3 轨索运梁系统试验

#### 3.1 运梁系统缩比模型试验

矮寨特大桥采用的“轨索运梁架设施工方案”属于一种新的施工工艺，为了优化和完善施工方案的关键细节，通过矮寨特大悬索桥全桥模型试验来研究施工阶段的结构行为变化情况。根据试验室条件，确定采用1:33缩尺比例模型，主跨尺寸为7.333m+35.636m+3.515m，主缆中心间距为818mm，吊索的纵向间距为439.4mm，选用与实际桥同参数的钢丝模拟主缆，主索鞍座以摩擦系数和鞍槽曲线形状结合方式模拟实桥索鞍。特殊设计的运梁小车、吊鞍和索扣能满足轨索运梁施工过程的试验模拟需要。为确保实桥的边界条件在试验模型中能够较好得到满足，通过数值仿真模拟分析，对模型中所有的锚固支墩进行了优化设计，确保其满足误差精度要求。经过多次测试，试验结果表明：全桥模型试验的钢桁架轨索运输阶段，试验工况配重设计合理，实测轨索力在试验过程中均匀性比较好，一般变化在少数工况大于4%，但变化最大值均小于6%。<sup>[4]</sup>

#### 3.2 足尺模型试验

轨索运梁足尺模型选取了矮寨悬索桥靠近吉首岸的5对加劲梁吊索来模拟，其工作跨径为

17m+5×14.5m，为了准确反应轨索运梁系统的力学特性和检验实际可操作性，其吊索、轨索、吊鞍座、运梁小车等均与实际桥设计和施工完全相同。出于经济考虑只模拟了一幅的4根轨索，见图14；为了尽量减少轨索抗弯刚度对模型的影响，真实地反映实桥施工系统的力学性能，将轨索设计到一定长度（跨过5根吊索），同时为测量不同轨索初张力对整个系统的影响，将轨索一端设计为固定，另一端设计为可活动的形式，在可活动的一端通过滑轮组和配重来控制轨索初张力。实验梁段的重量与加劲梁段的半幅重量等同。轨索运梁足尺模型试验分别测定了轨索在不同设计张力下的反应，包括在运梁过程中轨索力的变化、轨索的线形、吊索力及其变化、吊鞍座的状态等。经过多次测试，试验结果表明：

(1) 轨索截面几何参数与材料选择：轨索的材料和截面几何参数的选择是整个系统的关键，关系到施工成本与轨索运行的安全。设计可从满足轨索疲劳安全性能出发确定轮压比和轨索设计张力。

(2) 轨索力的不均匀性：在试验过程中发现4根轨索的轨索力既不相同也不对称。轨索力的不均匀会造成空间平行的轨索承担的荷载分配不均，张力大的轨索承担的荷载比张力小的轨索承担的荷载要大，但变化幅度有限。

(3) 在可以控制的误差范围内（误差不超过±10cm），吊索长度的误差对结构的受力影响较小。空载下会有吊索脱空（误差超过5cm），但移动荷载经过时，吊索力与无误差情况相比变化较小，不起控制作用。<sup>[3]</sup>



图14 足尺模型试验

#### 4 缆载吊机设计与试验

LZDJ500T全液压步履式缆载吊机主要由一个钢主桁梁、两个在主缆上的步履式行走机构、两套液压提升系统（含提升和牵引千斤顶、液压泵站、控制系统及钢绞线收线装置）、吊具扁担梁、发电设备等部分组成。为了适应矮寨大桥钢桁架吊点位置，在离主缆6.75m的位置设置中吊点，中吊点的最大起吊重量为2400kN，通用边吊点，设在离主缆2.56m的位置，起吊能力为5000kN。提升系统共用两套LSD2500-500提升系统，单顶提升能力为2500kN。缆载吊机型式试验的目的是验证其结构承载能力和使用性能。荷载试验的方法是，在一块平整的场地上，搭设两个试验钢架，每个试验钢架的顶端设置一个与主缆半圆直径一致的半圆，以支承缆载吊机。为模拟实桥主缆是可摆动的结构，一个试验钢架设计为固定结构，另一个为可沿横向和纵向自由滑动的结构。在两试验架的地面上，与扁担梁吊点相对应的位置，设置地锚索，形成加载锚固反力点（见图15）。最大荷载根据缆载吊机的额定荷载5000kN或2400kN的1.25倍加载，试验过程中测量关键点应力应变和跨中挠度。试验结果表明，静载试验的位移和变形测试值与理论值比较吻合，误差在设计要求范围内，结构安全可靠。



图15 缆载吊机试验

#### 5 工程应用

试验之后的运梁小车和缆载吊机应用于湖南矮寨大桥实际工程。2011年4月15日，矮寨大桥进行了首段192t钢桁梁架设的试运行（见图16）。对整个运梁系统的结构受力进行了测试，

对钢桁梁运行的指挥和操作系统进行了检验，效果良好。该桥于2011年8月20日完成了所有钢桁架梁的吊装，全桥合拢。轨索运梁与吊机提升系统架梁（见图17）。



图16 运梁小车运梁



图17 轨索运梁与吊机提升系统架梁

#### 6 结论

所有试验和工程结果表明，轨索运梁方法巧妙地把1200m跨度的吊装过渡为14.5m吊装，结构具有较好的安全性，也具有很好的经济性。该方法不仅适用于山区峡谷的悬索桥，也可以使用在大跨度中承式与下承式拱桥的主梁拼装上，具有很广阔的应用前景和推广价值。

#### 参考文献

- [1] 郭友根. 矮寨悬索桥主桁架设计方案研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009
- [2] 李俊龙. 悬索桥加劲梁轨索移梁架设系统力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010
- [3] 马碧波. 悬索桥轨索运梁系统设计参数与误差影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011年
- [4] 冯剑. 矮寨特大悬索桥缩尺模型设计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG Q7002-2007桥式起重机型式试验细则[s]
- [6] 中华人民共和国国家标准. GB-T5905-1986起重机试验规范和程序[s]