

山区悬索桥轨索滑移法施工的关键技术及其装置研发

邓年春¹ 刘显晖¹ 张念来² 伍柳毅¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006 2 湖南路桥建设集团公司 长沙 410018)

摘要:针对山区的特殊建设条件,提出了悬索桥主梁架设的轨索滑移法施工技术。该方法是利用悬索桥主缆和吊索作承重结构,吊索下端连接吊鞍,吊鞍上支承轨索,利用在轨索上运动的运梁小车输送节段梁,待到达安装位置后,借助缆载吊机进行垂直吊装和安装。以矮寨特大悬索桥施工为背景,介绍了轨索滑移法架梁系统的组成和关键技术,以及核心组件吊鞍、运梁小车和轨索系统等的结构设计和计算分析。对整个架梁系统,介绍了整体缩比模型试验和足尺模型试验的试验方法和试验结果,并总结了实际工程应用情况。通过模型试验和工程应用的研究结果表明: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。

关键词:悬索桥 主梁架设 轨索滑移法 运梁小车 吊鞍

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.003

1 概述

采用高强钢丝作为主要承重结构的现代悬索桥,具有跨越能力大、受力合理、能最大限度发挥材料强度、造价经济、桥型优美等特点,被广泛应用^[1]。目前大跨度悬索桥的加劲梁结构形式主要有钢箱梁和钢桁梁两种。在山区跨峡谷修建大跨度悬索桥,一般桥梁处于山高谷深的群山之中,两岸地势陡峭,运输条件差,施工场地狭窄,另外桥位处的河流浅、河面窄,无法通航,不能像跨江或跨海修建大跨悬索桥一样,对加劲梁采用船舶运输并利用缆载吊机进行垂直吊装架设。加劲梁通常采用桁架式,适用的施工方法主要有桥面吊机法和缆索吊法^[2]。桥面吊机施工法,是在生产厂内将钢桁梁杆件先进行试拼装,然后分拆为杆件运输到工地,在现场组装拼成桁架片,最后采用全回转桥面吊机和桥面运梁小车结合,进行桁架梁架设。该方法是从两岸向桥中依次架设,常采用大段刚接,分段设临时铰工艺,需要桁架杆件在空中拼装,这样施工工序多,施工工期相对较长。缆索吊施工法,是充分利用悬索桥自身的结构物,搭设由锚碇、塔架、承重索、跑马及牵引系统等组成的缆索吊系统,利用缆索吊进行主桁架片的运输、提升和

安装。该施工方法,技术成熟,但随着跨径的增大,施工成本显著提高,施工安全性大幅下降,对主跨超过900m的悬索桥施工,不具有经济性^[3]。不同的施工工艺对桥梁结构的成桥后受力、施工工期、施工成本等影响较大。因此在山区建设大跨度悬索桥,现有的主梁架设方法存在很大的局限性。

2 轨索滑移法构思与关键技术

针对山区的特殊建设条件,在借鉴运输索道工作原理的基础上,借助于悬索桥主缆自身的强大承载能力,提出了悬索桥加劲梁架设的轨索滑移法施工技术。它的基本思路是:在悬索桥的桥塔、主缆、索夹和吊索施工完成后,在吊索下端安装临时吊鞍,在临时吊鞍上设置水平轨索,轨索张拉并锚固于两岸的基础上,将运梁小车置于轨索上进行节段梁运输。将在工厂加工好并运至现场的钢桁梁杆件,拼装成节段梁。利用临时吊装设备将节段梁提升,并使其与轨索上的运梁小车相连,利用运梁小车将单节段梁纵向运输至待安装位置,然后用缆载吊机的吊具连接钢桁梁,并将荷载转换至缆载吊机,之后退出运梁小车,利用缆载吊机安装节段梁,这样完成一个施工周期,再逐节段对称施工,最后使桥梁合拢。轨索滑移法施工方案见图1。



图1 轨索滑移法施工方案图

本施工方法的关键技术是轨索运梁系统的组建与运梁过程中的安全性，主要有以下几个方面：（1）吊鞍结构设计及稳定性研究。吊鞍是轨索架梁系统中最关键的组件之一，它的直接作用是给轨索提供支承，并将轨索的荷载传至吊索和主缆，在吊索运梁区间，轨索会发生局部挠曲变形，对运梁小车通过吊鞍形成一定的阻碍，需限制最大阻力，以确保运梁过程中的稳定性；（2）运梁小车的结构设计及负载行走性能和安全性能的研究。运梁小车的设计要合理，以利于与梁连接、在轨索上平稳运行、牵引运动及防脱轨；（3）轨索与牵引系统设计。运梁过程中，吊索区间会发生轨索的局部挠曲变形，轨索的局部变形对运梁过程的影响分析是关键。（4）施工全过程仿真模拟。施工过程中，需要对轨索系统、桥梁结构等进行全过程计算分析，确保合理受力。（5）运梁过程中安全保障措施方案研究。针对任何安全隐患，必须设置安全保障措施和安全预案。

3 轨索滑移法在矮寨大桥中的应用

3.1 工程概况

矮寨特大悬索桥位于中国湖南省湘西土家族苗族自治州境内，在矮寨镇上空跨越德夯大峡谷，峡谷两岸地势陡峭，高差达400多米。大桥设计为钢桁加劲梁单跨悬索桥，主跨布置为242m+1176m+116m，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。它是目前世界上跨峡谷跨径最大的钢桁梁悬索桥，桥梁概貌见图2。



图2 桥梁概貌

3.2 轨索架梁系统设计

轨索滑移法施工中的轨索架梁系统主要包括主缆、索夹、吊索、吊鞍、轨索、牵引系统、运梁小车、缆载吊机及梁临时吊装设备等。在两根悬索桥主缆的每根缆下，对应钢桁架梁的两侧，各设4根轨索，轨索两端锚固于两岸岩体，全桥共8根轨索，见图3。

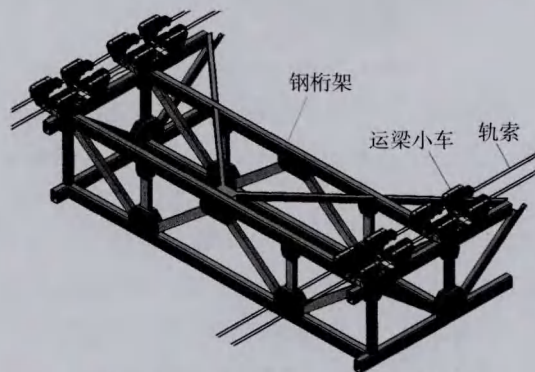


图3 轨索架梁系统运梁的整体构造图

运梁小车由滑轮机构和矩形梁组成。滑轮机构（见图4，主要包括滑轮组和三角形分配梁）直接与轨索接触，通过牵引索拖拉产生运动。矩形分配梁（见图5）主要由梁体、轴、吊耳等组成，与钢桁梁相连，并与4个滑轮机构组成小车单元。同片钢桁梁两侧的4根轨索上的运梁小车为1台，即每片钢桁梁由2台运梁小车运输。每台运梁小车由前后2个小车单元组成，前后2个小车单元通过连接绳相连。每台运梁小车的滑轮组共64个轮子，并可分成对称2组，构成对轨索的钩挂状态。为保证所有轮子受力均匀，利用二力杆原理，通过8个三角形分配梁和2个矩形分配梁，传递荷载。轨索架梁系统运梁的整体构造图见图3。



图4 标准滑轮机构

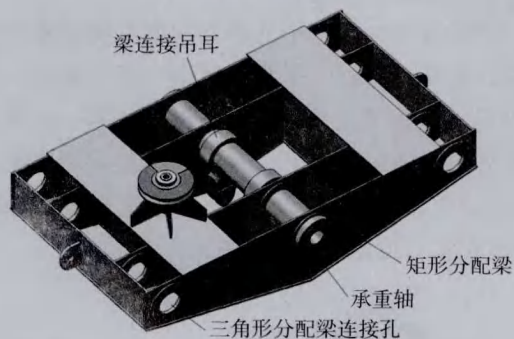


图5 矩形分配梁

吊鞍主要由鞍体、轨索鞍座、轨索压盖、定位绳压盖、轨道板、限位卡板及牵引索托辊组成，构造见图6。鞍体设计成中空的结构，见图7。根据四个永久吊索间距在鞍体上设计了四个耳板，在两端的顶面上设计有三条隔板式的圆弧V形槽，与轨索鞍座的V形面形成配合对。在轨索鞍座（见图8）的两端设限位卡板，使轨索鞍座与鞍体形成铰接，并可在一定范围内摆动，以适应由轨索及运梁小车施加的不均匀荷载造成或由吊索的长度误差造成的吊鞍倾斜或扭转；在轨索鞍座V形面上设计了四个凸块，用于增加轨索鞍座与鞍体的纵向约束能力。

将鞍座上的轨索槽设计成中间为直线半圆弧、两端向下的相切圆弧形槽，且尖角处圆弧光滑过渡，保证轨索在吊鞍支承处得到平顺过渡和保护；将鞍座轨索槽两侧设计成空间圆弧，且根据车轮槽选择合适的配合间隙，能对车轮进行限位，保证当运梁小车的轮边缘总是压在轨道板上，运梁小车不脱轨。

在鞍座上设有轨索压盖（见图6）、轨道板

和定位绳压盖。轨索压盖对轨索起到承托和纵向固结的作用；由于运梁小车经过吊鞍时，牵引力将有所加大，此时对吊鞍的纵向推动力较大，而短小的轨索压盖对轨索压紧力较小，因此在两轨索中间增加定位绳，起到纵向约束吊鞍的作用，保证吊鞍不被牵引力水平推动。

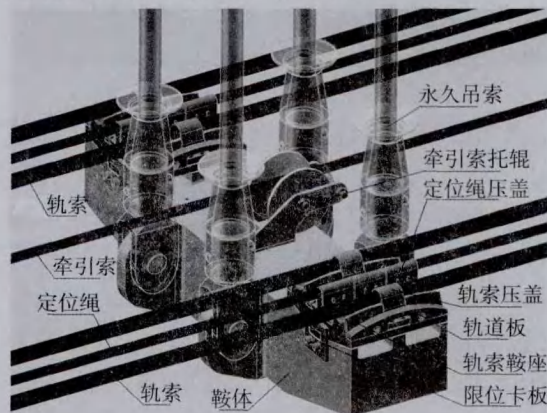


图6 吊鞍构造图

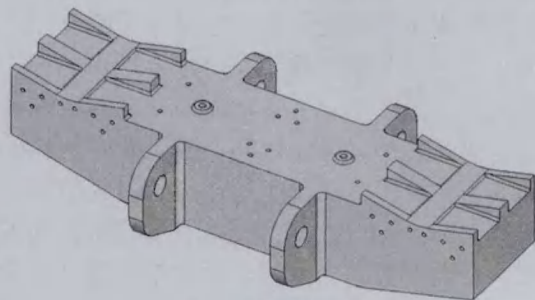


图7 鞍体构造图

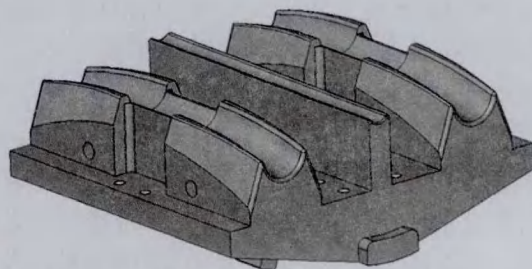


图8 轨索鞍座构造图

轨索采用直径56mm的密封钢丝绳。为了减少气候温度变化对轨索索力的影响，轨索的一端设计成固结装置，与岩锚索锚碇相连，另一端设计成活动装置，与平衡重相连，见图9和图10。这样可避免轨索两端都固结的情况下，夏天轨索遇热膨胀，松弛垂度大，以致运梁小车运行阻力大甚至不能通行，冬天轨索收缩，索力增大，如再增加运梁小车及主梁重，可能会超过轨索的承

载力。而把轨索设计为一边是固结装置，一边是平衡重装置，可始终保持每一根轨索都承受恒定索力，保证小车运行状态的一致性。

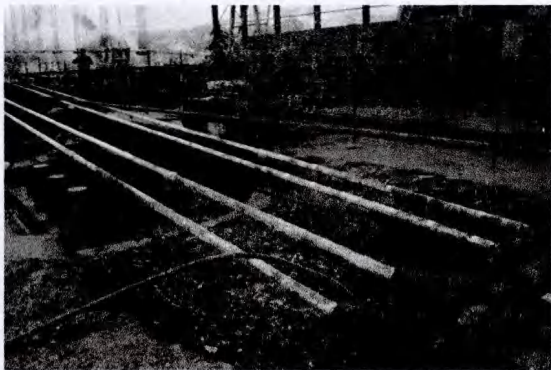


图9 轨索固结端

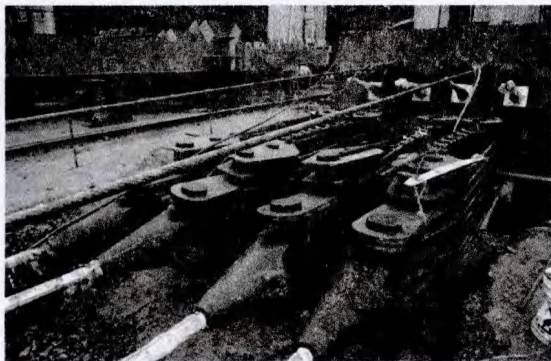


图10 轨索平衡重端

在桥梁两岸主塔附近设置拼装场，运梁小车的安装和钢桁梁的拼装都在拼装场内完成。在主缆的下方、拼装场的上方设置临时吊点，运梁小车和节段梁的入轨，都借助此临时吊装设备完成。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点上，即完成节段入轨，见图11和图12。



图11 运梁小车的入轨

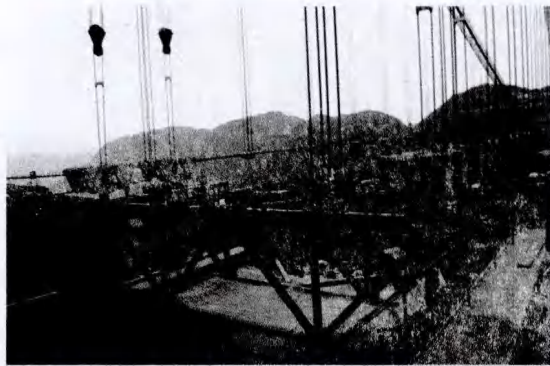


图12 节段梁的入轨

3.3 结构设计计算

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，假设滑轮与轨索呈Hertz弹性接触，且接触面积很小，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，力学模型见图13，由力平衡可得出牵引索力大小。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14。滑轮过鞍座ANSYS的计算结果，见图15。三角形梁、矩形梁和吊鞍鞍体的ANSYS的计算结果分别见图16~图18。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，计算结果为最不利施工工况下，轨索的最大倾角为 13° ，最大牵引力为 $74.2\text{kN}^{[4-5]}$ 。

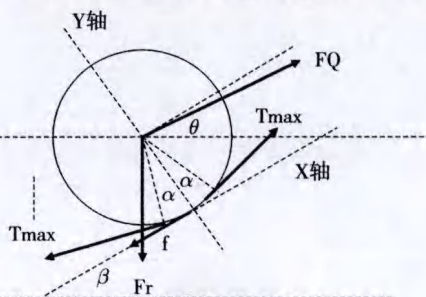


图13 牵引索、滑轮与钢丝绳作用简化模型

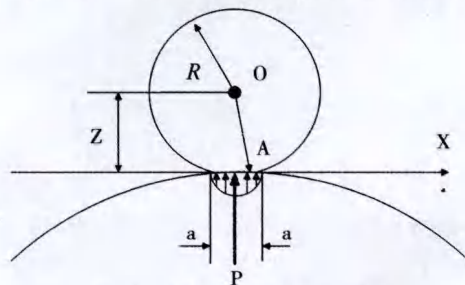


图14 滑轮与鞍座接触模型

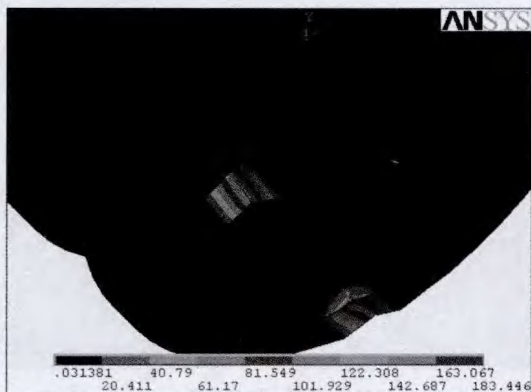


图15 滑轮过鞍座ANSYS的计算结果

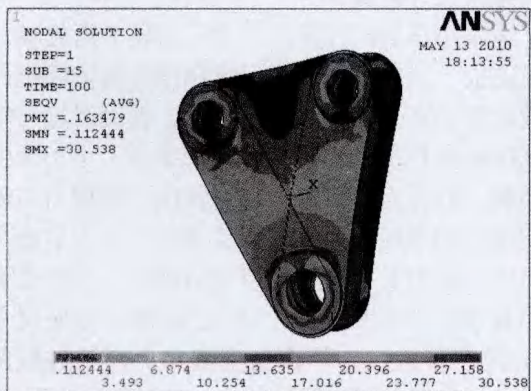


图16 三角形梁ANSYS计算结果

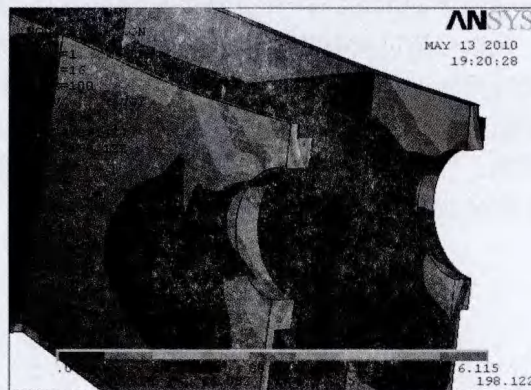


图17 矩形梁ANSYS计算结果

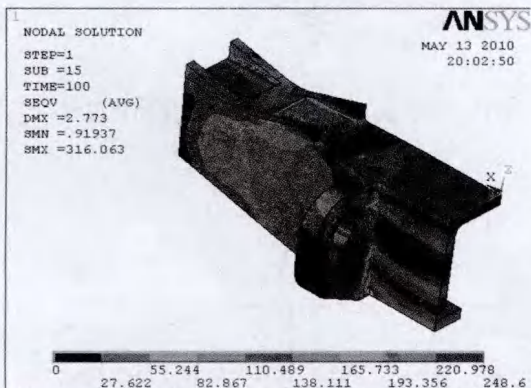


图18 吊鞍鞍体ANSYS计算

3.4 轨索运梁系统试验

(1) 整体缩比模型试验

矮寨大桥采用的轨索滑移法施工方案属于一种新的施工工艺,为了完善和优化施工方案的关键细节,通过全桥整体模型试验来研究施工阶段的结构力学行为。根据试验室条件,确定采用1:33缩尺比例模型,整体模型尺寸确定为(7.333+35.636+3.515)m,整个试验模型由2个锚碇系统、2根主缆、68对吊索、3对岩锚索、2个索塔及索塔支墩、加劲梁、轨索及张拉和锚固系统、运梁小车系统、测试系统等组成。选用与实桥同参数的钢丝模拟主缆,主索鞍座以考虑摩擦系数和鞍槽曲线形状相结合的方式模拟实桥索鞍。特殊设计的运梁小车、吊鞍和索满足轨索运梁施工过程的试验需要。经过多次测试,试验结果表明:(1)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4%以内,但变化最大值均小于6%;(2)运梁过程中两吊鞍间轨索局部挠曲变形小,运梁小车过吊鞍时不会产生较大的爬坡角度^[6]。

(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、运梁小车等均与实桥施工完全相同。出于经济考虑只模拟了一幅的4根轨索,见图19;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。实验梁段的重量与最大加劲梁段的半幅重量等同。试验过程中,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张力、轨索的线形、吊索力及其变化、吊鞍座的状态等。



图19 足尺模型试验

经过多次测试,试验结果表明:(1)在运梁过程中运梁小车能平稳、顺利地跨过吊鞍,轮对过吊鞍时能平稳地实现从柔性过渡到轨道板再从轨道板到柔性索的支承轨道转换;(2)运梁小车通过吊鞍时运行状态基本平稳,冲击作用小、时间短,吊鞍前后左右的变形小,吊鞍的微小偏转变形不影响运梁小车的通过;(3)轨索力变化与理论计算索力较吻合,轨索线形与理论计算线形吻合;运梁过程中,轨索力的变化不大,这对运梁车的平稳运行提供了保证^[5]。

3.5 工程应用

轨索架梁系统通过试验之后正式应用于湖南矮寨特大悬索桥实际工程。2011年2月23日,全桥完成吊鞍安装。5月10日,完成了首段192t钢桁梁架设,见图20。架梁过程中,对整个运梁系统的结构受力进行了测试,结果表明测试值与理论值比较吻合,系统运行正常。该桥于2011年8月20日完成了所有钢桁梁的吊装,全桥合拢。运梁到位进行荷载转换的照片,见图21。



图20 运梁小车运梁

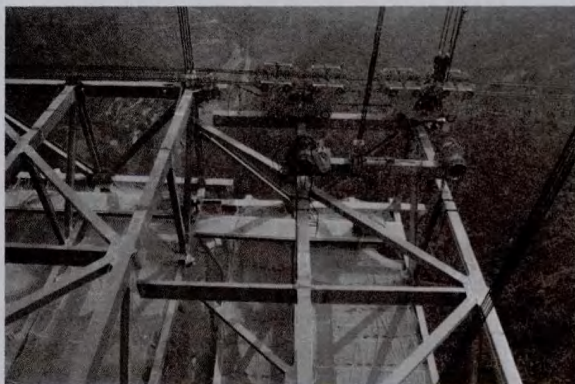


图21 运梁到位进行荷载转换

4 结论

在深山峡谷中修建大跨度悬索桥,传统的主梁架设方法难以实施,文中创造性地提出了轨索滑移架梁的新方法,即利用主缆、吊索、轨索构成移梁轨道,把已拼装好的梁段运送到待安装位置,然后由缆载吊机完成安装就位。模型试验和工程应用的结果表明,轨索滑移施工方法,巧妙地把大跨度的吊装运输过渡为两吊索间距的运输,方案切实可行;此外,梁段的拼接可在岸上进行,极大地减少了高空拼接风险,有效地保证了施工质量。矮寨大桥钢桁梁架设仅用了3个月,就工期而言大大领先于国内外同类桥梁的施工。总体而言,轨索滑移施工方法具有施工速度快、安全性好、经济性好等特点,具有很广阔的应用前景和推广价值。

参考文献

- [1] 周昌栋,谭永高,宋官保. 悬索桥上部结构施工[M]. 北京:人民交通出版社,2003,12
- [2] 陈明宪,潘权,龙跃海等. 山区特大跨度悬索桥主梁架设新工艺整体模型试验研究[J]. 中外公路,2011(06): 23-26
- [3] 邓年春,刘显晖,张念来,伍柳毅. 矮寨大桥轨索架梁系统的研制及工程应用[J]. 预应力技术,2012,06
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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