

# 矮寨大桥轨索滑移架梁吊鞍的设计及制作

黄家珍<sup>1</sup> 彭春阳<sup>1</sup> 邓年春<sup>1</sup> 刘琳琳<sup>1</sup> 杨恒<sup>2</sup> 彭力军<sup>2</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

(2 湖南路桥建设集团有限责任公司 湖南长沙 410004)

**摘 要:**矮寨大桥为钢桁加劲梁单跨悬索桥,采用了轨索滑移架梁法进行架梁施工,轨索滑移架梁法能快速实现悬索桥的主梁架设,具有很好的安全性、经济性、优质和高效性,应用前景非常广阔,本文简述轨索滑移架梁系统结构组成,重点介绍轨索滑移架梁法中关键部件吊鞍的设计、制作及检验。

**关键词:**悬索桥 主梁架设 轨索架梁 运梁小车 吊鞍 轨索鞍座 轨索压盖

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2014.04.001

## 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—湖南省吉首至茶洞高速公路跨越矮寨镇德夯大峡谷的一座特大型桥梁,峡谷谷深坡陡,地形复杂,高差达四百多米(见图1所示)。大桥设计为钢桁加劲梁单跨悬索桥,桥跨布置为242m+1176m+116m,矢跨比1/9.6,主缆采用平面索布置,两根主缆中心间距27m;全桥采用71对吊索,吊索标准间距为14.5m。主梁全长为1000.5m,桥面系宽24.5m。钢桁加劲梁全宽27m,主跨梁高(主桁中心线处)7.5m;

全桥钢桁加劲梁,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。矮寨大桥是目前世界上跨峡谷跨径最大的钢桁梁悬索桥,钢桁梁构造图如图2所示。



图1 矮寨大桥概貌

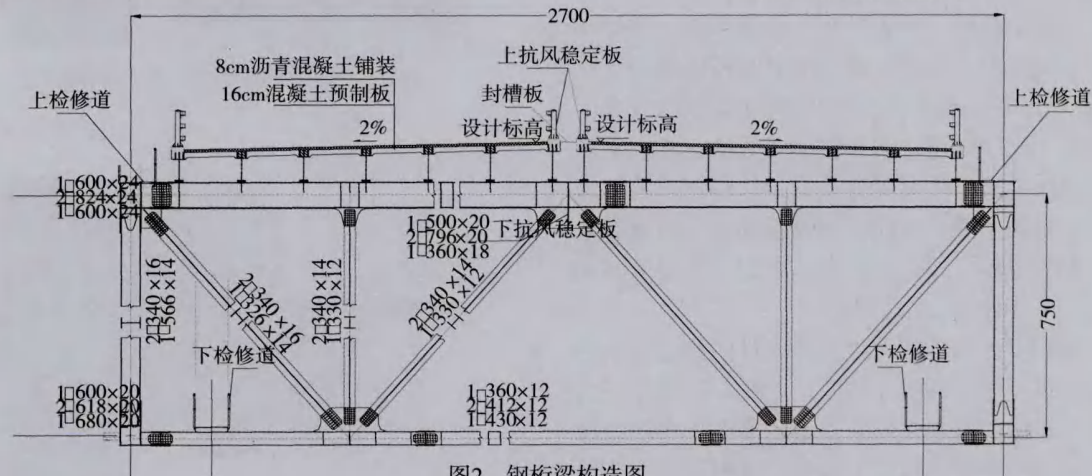


图2 钢桁梁构造图

## 2 轨索运梁系统

在山区架设悬索桥钢桁梁,通常用桥面吊机悬拼法和节段拼装整体吊装两种方案,该桥采用世界首创的节段拼装整体吊装的“轨索滑移架梁法”,以创世界纪录的速度完成了矮寨大桥钢桁梁的拼装。“轨索滑移架梁法”安装新工艺最突

出的特点是:安全、经济、优质、高效。“轨索滑移架梁法”其构思巧妙,充分利用了悬索桥自身的结构,以主缆及永久吊索通过吊鞍作为支撑,将在索塔之间拉起多根作为轨道的钢索吊起,形成一个支承体系——轨索运梁体系,体系主要包括主缆、吊索、吊鞍、轨索、牵引系统、运梁小



车。矮寨大桥在每根主缆下面设置4根轨索，全桥共8根轨索，轨索两端锚固于两岸岩体，分别在两岸组拼钢桁梁节段，每节段梁通过2台运梁小车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，直至全桥贯通。

运梁小车由滑轮机构（滑轮组和三角形分配梁）和矩形梁组成，每台运梁小车的滑轮组共计64个轮子，轮子沿顺桥向设置16排，每排4个，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；滑轮组以轨索作为支撑轨道，通过牵引索拖拉，将钢桁梁运输至指定位置，运梁小车构造见图3。



图3 运梁小车的整体构造图

### 3 吊鞍的结构

吊鞍由鞍体、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（见图4）。吊鞍是轨索运梁系统中最关键的节点，吊鞍设计的好坏是轨索滑移法成败的关键；吊鞍的直接作用是给轨索提供支撑，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，因此吊鞍的结构设计既要紧凑和灵巧，又要使用安全可靠。

吊鞍设计的精妙之处也是设计的难点：一是运梁小车经过吊鞍时（见图5、图6），轮子受力点由车轮槽底行走在软轨索上转换到由车轮边缘走在硬的吊鞍轨道板上，软硬过渡时会有一个最大不超过 $13^\circ$ 的上坡。二是保证轨索在吊鞍处平顺，不受剪切和挤压破坏，保证运梁小车过吊鞍时轻巧和稳定，并考虑吊鞍安装的可靠、方便。主要部件结构设计如下：鞍体为中空的结构（见图7），根据四个永久吊索间距设计了四个耳板，在两端的顶面设计有三条隔板式的圆弧V

形槽，与轨索鞍座的V形面配合，在轨索鞍座（见图8）两端设限位卡板，使轨索鞍座与鞍体形成铰状连接，并可在一定范围内摆动，以调整由轨索及运梁小车施加的不均匀荷载、吊索的长度误差造成吊鞍整体倾斜或扭转、吊鞍及运梁小车的加工误差、轨索张力误差、运梁小车轮轴变形；并在轨索鞍座V形面上设计了四个凸块，增加轨索鞍座与鞍体纵向约束可靠性。

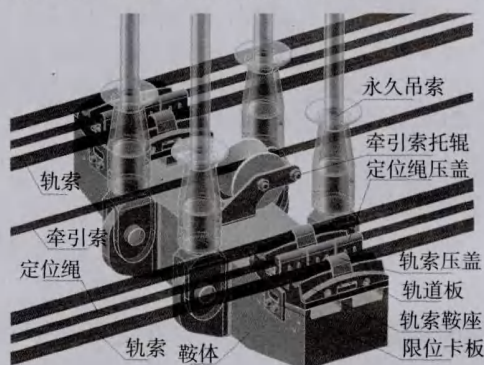


图4 吊鞍构造图

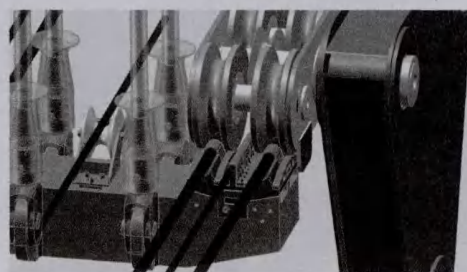


图5 运梁小车滑轮组经过吊鞍的瞬间

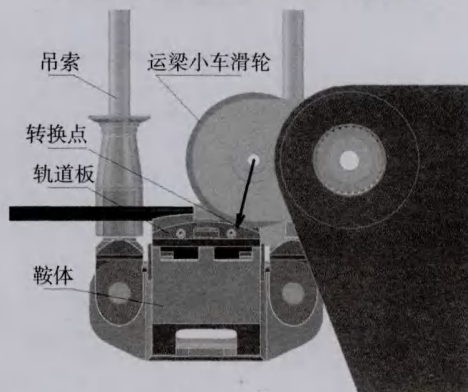


图6 运梁小车过吊鞍受力点转换示意图

将轨索鞍座索槽设计成中间为直线半圆弧两端向下相切圆弧形槽，且尖角处圆弧光滑过渡，保证轨索在吊鞍节点支承处得到平顺过渡和保护；将轨索鞍座索槽两侧设计成空间圆弧，且根据车轮槽选择了合适的配合间隙起到限位作用，



保证当运梁小车车轮边缘总是压在轨道板上,运梁小车不脱轨。轨索压盖的设计很关键,必须保证满足强度要求下轨索压盖被置于轮槽的空间内,但无接触,但间隙也不能过大,对车轮也要起到限位作用。

在轨索鞍座上设有轨索压盖(见图9)、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,用定位绳压盖与轨索鞍座夹紧,起到纵向约束吊鞍的作用,保证吊鞍不被牵引力水平推动。(见图4)。

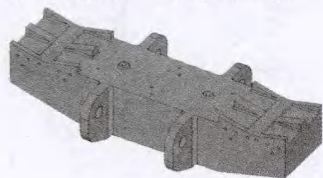


图7 鞍体构造图

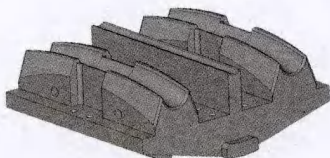


图8 轨索鞍座构造图



图9 轨索压盖构造图

#### 4 吊鞍的设计计算

吊鞍的设计重点考虑了鞍体、轨索压盖、定位绳压盖等组件的设计与计算。

鞍体采用了实体建模进行有限元分析计算。考虑到结构的对称性和荷载的对称性,只取鞍体的四分之一进行分析;鞍体由材料为ZG20SiMn的铸钢铸造而成,屈服强度为295MPa,抗拉强度为510MPa,弹性模量 $E=180\text{GPa}$ ,泊松比 $\mu=0.3$ 。在吊鞍体吊耳处模拟一个刚体做为插销,销与鞍体之间的摩擦系数取0.15,在鞍体V形面最危险面上加载。梁自重、运梁小车及临时施工设备共重340t。鞍体实体单元模型见图10。

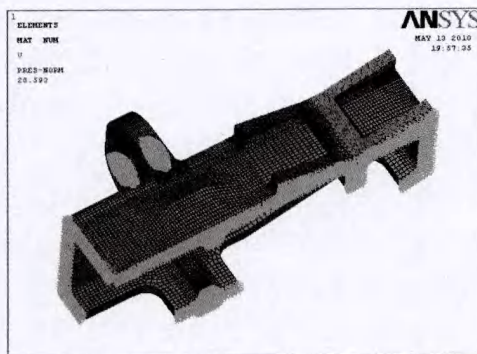


图10 鞍体实体单元模型(四分之一)

鞍体分两种工况进行分析计算,第一种工况:按4个吊鞍均匀受载,冲击系数取1.5,在鞍体与轨索鞍座接触的面上施加31.875t均布压力。此时最大应力为130MPa,鞍体整体变形最大1.502mm,以屈服强度为强度极限,安全系数为 $K=295/130=2.27$ 。鞍体实体ANSYS计算结果见图11。

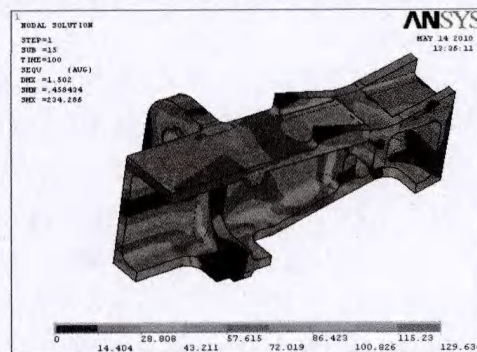


图11 鞍体实体ANSYS计算结果一

第二种工况:按最不利受力位置,小车爬坡过程中4个吊鞍中只有2个吊鞍承受荷载,冲击系数取1.5,在鞍体与轨索鞍座接触的面上施加63.75t均布压力。此时最大应力为248.6MPa,鞍体整体变形最大2.733mm,以屈服强度为强度极限,安全系数为 $K=\sigma_s/\sigma_{max}=295/248.6=1.187$ 。鞍体实体ANSYS计算结果见图12。

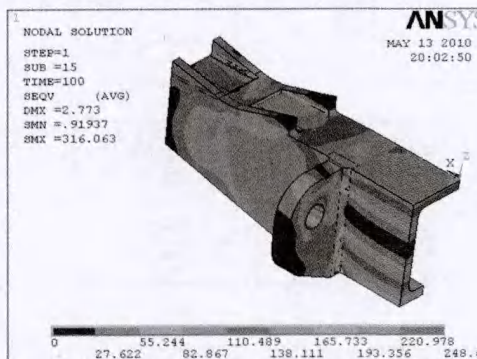


图12 鞍体实体ANSYS计算结果二



轨索压盖、定位绳压盖设计计算,运梁系统的牵引系统采用煤矿无极绳牵引技术,选用25t卷扬机。当运梁小车经过吊鞍时将有一个约 $13^\circ$ 的上坡,此时对吊鞍的纵向推动力最大,为保证吊鞍不被牵引力水平推动。须分析计算轨索压盖对轨索和定位绳压盖对定位绳夹紧力及其自身强度。轨索压盖(见图13)材料选用40Cr,屈服强度 $\sigma_s=540\text{MPa}$ 。定位绳压盖(见图14)材料选用Q345B,屈服强度 $\sigma_s=345\text{MPa}$ 。压盖与轨索的摩擦系数按0.15计算,轨索压盖与轨索的抗滑摩擦力为: $F=Nu=4\times 94.5\times 0.5\times 0.15=28.35\text{kN}$ ;定位绳压盖与定位索的抗滑摩擦力为: $F=Nu=6\times 94.5\times 0.5\times 0.15=42.525\text{kN}$ 。每个吊鞍的抗滑摩擦力为: $28.35\text{kN}\times 4+42.525\text{kN}\times 6=368.55\text{kN}$ 。运梁小车同时经过两个吊鞍,因此压盖定位纵向约束安全系数为 $n=2\times 368.55\div 250=2.95$ 。

压盖最弱处强度验算,单根M16螺栓可承受94.5kN的力,一般设计紧固力为其保证荷载的50%,轨索压盖最弱处受拉应力计算: $\sigma_l=N/2Lt=94.5\times 0.5\times 1000\times 4\div (2\times 9\times 98)=107.14\text{MPa}$ ,安全系数 $n=540\div 107.14=5.0$ 。定位绳压盖最弱处受拉应力计算: $\sigma_l=N/2Lt=94.5\times 0.5\times 1000\times 6\div (2\times 8\times 140)=126.56\text{MPa}$ ,安全系数 $n=345\div 126.56=2.73$ 。

综上所述,认为吊鞍能基本能满足施工要求。

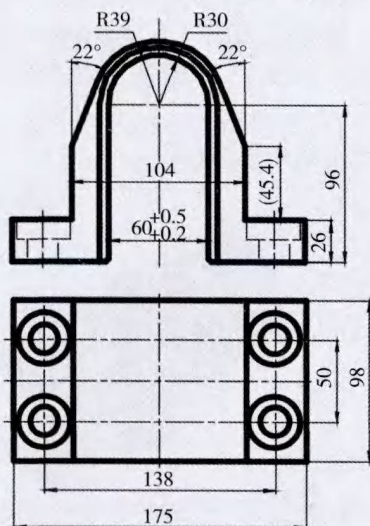


图13 轨索压盖结构图

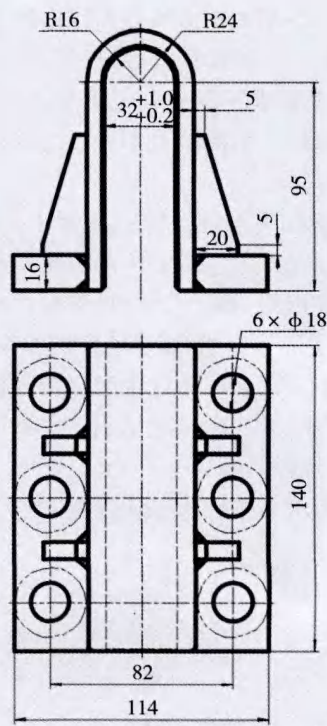


图14 定位绳压盖结构图

## 5 吊鞍的制作

### 5.1 铸造工艺

鞍体、轨索鞍座都是采用整体铸造,鞍体结构复杂,形体怪异,为薄壁交叉箱形结构。根据铸件结构特点,将冒口放置在铸件热节最大处,在适当位置放置冷铁并增设多个冒口,确保补缩通道顺畅,保证铸件组织致密,无缩孔、缩松缺陷。浇注系统采用底注加阶梯式渠道,确保浇注平稳、顺序凝固、不卷气,保证获得无气孔、夹砂、夹渣。铸件生产工艺流程为:铸造工艺设计→模具制造→模具检验→造型、制芯→备料冶炼→真空或吹氩精练→浇注、保温→冷却、落砂、开箱清理→退火、加热、切浇冒口(化学成分检查→成分报告)→抛丸→检验→焊修→热处理→抛丸→精整→检验→抛丸→转机加工。

铸件造型材料采用先进的碱性酚醛树脂砂造型、制芯,砂模表面采用树脂新砂,制芯采用全树脂新砂,砂型表面刷醇基锆英粉涂料,保证铸件尺寸精度高、稳定,铸件表面光滑、无粘砂、表面无气孔、无渣孔等。铸件无变形,尺寸精度高,可预留机加工余量小,大大减少了数控机加工时间。

## 5.2 吊鞍主要零件的机加工工艺

由于鞍体为形状多变的薄壁箱形受力结构件,铸件各处的加工余量有可能不均匀,为了保证加工后能符合设计受力和外形的要求,在编制鞍体的机加工工艺时必须充分综合考虑各个加工面的加工量。采用数控机床划线,首先以四个耳板为基准,兼顾鞍体顶面及两个V形槽的位置,确定出鞍体的中心,先加工出鞍体底面,定义为第一基准;再以底面为基准加工出四个耳板侧面,得到鞍体中心定义为第二基准。以第一基准与第二基准同时为基准,加工出V形槽、各个平面、螺纹孔及耳板孔等,保证了鞍体耳板、V型槽的位置和尺寸精度。

鞍体的制作工艺流程:铸造→正火→划线→铣鞍体底面→铣四个耳板两侧面→铣V型及R圆弧面→铣限位卡板安装处平面及安装滑轮处平面→超声波探伤→钻镗四个耳板孔→划线,制作螺纹孔→磁粉探伤→喷砂→各螺纹孔涂防腐油防锈→表面喷漆。

轨索鞍座的制作工艺流程:铸造→正火→划线→铣轨索鞍座底面成平面作为基准→铣四周边→铣索槽各侧面及轨道板安装上平面→超声波探伤→数控铣轨索槽、两侧的空间圆弧、定位绳槽及两端勾挂限位卡板的凸台圆弧→轨道板安装上平面为基准铣两V形面及圆弧→铣四个限位凸台;数控打点定位、制作螺纹孔→磁粉探伤→表面电镀锌→脱氢处理。

轨索压盖的制作工艺流程:下料→锻造→正火→按工艺附图粗铣各面→调质处理→精铣各侧面、端面及斜面→插轨索绳槽内圆弧及外圆弧→精铣开口槽→铣两端倒角及圆角→钻铣螺栓台阶

孔→磁粉探伤→表面电镀锌→脱氢处理。

轨索鞍座的轨索槽、两侧的空间圆弧、定位绳槽及两端勾挂限位卡板的凸台圆弧的加工是难点。加工这些圆弧时采用五轴联动数控铣床,铣销头能按编制的数控程序在空间任何角度进行切削加工,按照设计绘制好三维图形,并依据三维图形编制数控加工程序,输入机床的数控程序直接控制机械加工出这些有配合要求的圆弧。确保了运梁小车滑轮经过吊鞍时轮槽与轨索鞍座合适的间隙要求,保证了运梁小车过吊鞍时轻巧和稳定。

## 6 吊鞍的检验

吊鞍的各零部件除了严格按照图纸要求检验外,每套都要在厂内进行总成试装配,并保证:

(1) 装配好后保证轨索鞍座在鞍体V形槽上转动灵活;

(2) 安装轨索压盖时用 $\phi 60$ 钢丝绳模拟轨索,拧紧轨索压盖螺栓后轨索压盖底面与轨索鞍座间应有间隙(约4mm);

(3) 安装定位绳压盖时用 $\phi 21$ 钢丝绳模拟定位绳,拧紧定位绳压盖螺栓后定位绳压盖底面与轨索鞍座间应有间隙(约4mm);

(4) 用运梁小车的车轮轮缘在轨道板上滚动时,车轮槽与轨索压盖应没有接触;

(5) 销轴与鞍体进行试装配,要求安装顺畅销轴转动灵活。

为验证设计计算的正确性,确保吊鞍在工程使用时安全可靠,从批量生产中抽取三套备用吊鞍做模拟实际工况的加压检验,专门设计制作了一套对鞍体和轨索鞍座加压的扁担压梁和V形垫块架,放在试验压力机上加加载检验(见图15、16)。

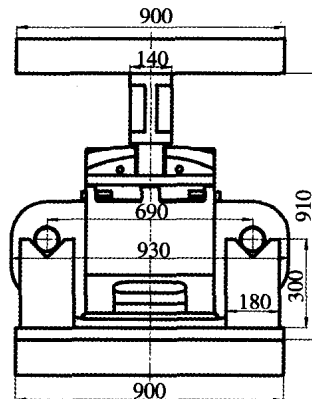
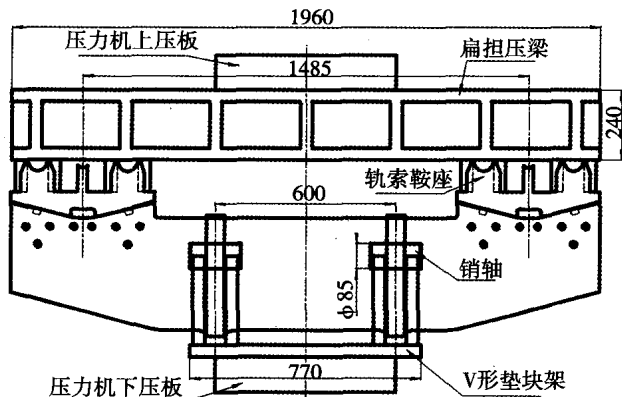


图15 吊鞍检验安装示意图

(下转第32页)

了地震对结构的动力响应。

(3) 隔震建筑隔震层以上的结构在8度(0.3g)设计地震作用下各楼层地震剪力,均小于未隔震结构在8度(0.3g)设计地震作用下楼层地震剪力的0.33倍。根据《建筑抗震设计规范》GB50011-2010的规定,本工程隔震层以上结构的水平向地震影响系数取为0.096,即隔震层以上结构可降低1度进行抗震设防<sup>[8]</sup>。

(4) 结果给出隔震支座在罕遇地震作用下隔震层最大位移285mm,小于隔震支座的极限水平变位330mm。隔震设防可以满足隔震支座在罕遇地震作用下的可靠性和稳定性。

(上接第7页)

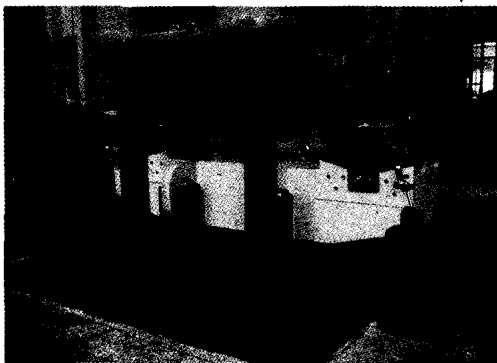


图16 检验安装照片

加载检验压力按两种工况进行,第一种:假设当运梁小车与钢桁梁的重量(340t)由4个吊鞍承受,每个吊鞍压力为85t,三个吊鞍先按此种工况压力的1.5倍,即127.5t进行逐级加压检验,百分表测得最大变形量为4mm;第二种:假设当运梁小车与钢桁梁的重量(340t)由2个吊鞍承受,每个吊鞍压力为170t,选其中一个吊鞍再按此种工况压力的1.25倍,即212.5t进行逐级加压检验,百分表测得最大变形量为7.4mm。当压力试验机缓慢卸压后百分表基本都回到零位。

试验结果表明整个吊鞍变形量较小,销轴和鞍体耳板孔接触面完好,销轴容易拆下,吊鞍结构完好无损。证明吊鞍设计计算正确,吊鞍能在实际工程中安全使用。

## 7 结语

矮寨大桥采用“轨索滑移架梁法”铺设钢桁梁,梁段拼接都在岸上进行,极大地减少了高空拼接风险,施工质量得到保证,钢桁梁架设仅用

(5) 隔震支座竖向承载力和受拉情况均满足规范要求。

## 参考文献

- [1] GB 50011-2010建筑抗震设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2010
- [2] 李向真,王铁成,雷丽. 底部弱层非规则布置隔震结构的计算研究[J]. 世界地震工程, 2006,22(4):84-88
- [3] 周福林. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997
- [4] 郭迅. 汶川大地震震害特点与成因分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009,29(6):74-87
- [5] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京:科学出版社, 2000
- [6] 李中锡,周锡元. 规则型隔震房屋的自振特征和地震反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002,22(2):33-41.
- [7] 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计与施工指南[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007

了2.5个月,就工期而言大大领先于国内外同类桥梁,创世界最快纪录。在经济效益方面,至少节约了钢材5000t。在运梁过程中运梁小车能平稳、顺利地跨过吊鞍,车轮过吊鞍时能平稳地实现从柔性索过渡到轨道板再从轨道板到柔性索的支承轨道转换,运梁小车通过吊鞍时冲击作用小、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;小车通过后吊鞍能很快地恢复平稳状态,牵引体系平稳、安全、保养容易。

针对矮寨大桥轨索运梁系统各结构及功能要求,确定了吊鞍的结构组成,并根据各个零配件的结构特点,选用整体铸造工艺,关键部位采用五轴联动数控机床加工。加工过程中对重点项目进行了检验,结果均满足设计要求。在矮寨大桥中成功应用,表明吊鞍结构尺寸设计与制作工艺合理,可以为今后类似轨索运梁系统的设计和施工提供宝贵的经验。

## 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
- [4] 冯剑. 矮寨特大桥悬索桥缩尺模型设计研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010
- [5] 易继武. 矮寨特大桥悬索桥钢桁加劲梁架设方案研究[D]. 湖南:湖南路桥建设集团公司, 2013
- [6] 邓年春. 矮寨大桥轨索架梁系统的研制及工程应用[D]. 柳州:柳州欧维姆机械股份有限公司, 2013