

文章编号: 0451-0712(2001)03-0001-06

中图分类号: U445

文献标识码: B

# 乌江吊拉组合索桥

## ——一种新的桥型及施工方法

杨光华, 蔡义前

(贵州省桥梁工程总公司 贵阳市 550001)

**摘 要:** 乌江大桥是世界上第一座由吊桥和斜拉桥组合而成的吊拉组合桥,也是国内首次采用钢筋、碳纤维、钢丝网复合混凝土薄壁箱梁,成功的使用了预应力岩锚代替传统的重力式锚,节省了大量锚碇混凝土。在施工工艺上首创了用缆吊平台“无猫道架设主缆新工艺”,完善了重 100 t 箱梁缆吊悬拼等施工工艺。通过 3 年运营证明,乌江大桥结构性能良好。

文章主要介绍主塔、岩锚、箱梁预制吊装、无猫道主缆架设的施工工艺。

**关键词:** 乌江大桥; 吊拉组合桥; 岩锚; 无猫道架设

### 0 前言

乌江大桥是目前国内、外建成的第一座由斜拉桥和吊桥组合而成的预应力碳纤维混凝土(P.F.C)吊拉组合桥梁。此桥型,1938 年由德国桥梁构想家迪辛格首次提出,由于受当时计算理论和计算技术的限制,对该桥型的结构性能和计算方法无法深入了解,所以桥梁界一直未能将此种桥型付诸实践。当今由于计算机特别是大型计算机的应用,计算技术大大提高,计算理论及施工工艺也日趋成熟,1997 年丹麦的大贝尔特桥初设方案又重新提出吊拉组合桥设想,但也仅仅是限于设想阶段。1995~1997 年在贵州省贵遵高等级公路跨越乌江渡上,成功的修建了世界上第一座吊拉组合的乌江大桥。经过施工实践和运营检验,我们认为,吊拉组合桥型在结构性能和外形上,都是一种合理而美观的桥型,它与吊桥和斜拉桥相比,具有更多的优越性。

与斜拉桥相比,吊拉组合桥由于采用的是吊桥的塔高,所以比斜拉桥塔高降低 1/3~1/2。与吊桥相比,因为吊桥的部份承重由斜拉桥承担,所以主缆的断面可减小近一半。由于斜拉桥的参与,增强了吊拉组合桥的刚度,因此它的抗风性能比吊桥要好。也由于斜拉索在主塔前、后对称设置,因此增强了主塔的稳定性。最重要的是交接区从计算和施工中,实际受力甚小,变形协调,促使吊桥和斜拉桥连为整体而

成吊拉组合桥。

乌江吊拉组合桥不论在设计上,还是在施工工艺上都有新的突破。首先是采用岩锚,它比重力式锚碇节省了大量的锚碇混凝土;第二是首创了国内用缆吊平台无猫道架设主缆的新工艺,节省了较多的设备和投资;第三是完善了 100 t 箱梁缆索吊装工艺,这是全国无支架缆索吊装的最大重量;第四是三钢混凝土(钢筋、碳纤维和预应力钢索)薄壁箱梁的使用,增加了混凝土箱梁的强度、刚度和韧性;第五是斜拉索在主塔上不设锚具,斜拉索通过钢板、碳纤维混凝土索鞍,减小了主塔的几何尺寸;第六是单束张拉斜拉索并用标高调整箱梁,避免了内力调整箱梁的繁琐和不精确;第七是掌握了卸载及施工温度对吊桥和斜拉桥组合的影响,取得了可以在任何工况和任何温度下进行组合的成功经验。

### 1 工程及设计概况

乌江大桥为吊拉组合桥型,行车道采用薄壁碳纤维预应力混凝土箱梁,吊桥主缆由高强平行钢丝组合而成,斜拉索用高强度钢绞线。全桥为双塔双索面。主缆地锚采用岩锚。在箱梁的两端加平衡重。遵义岸主塔基础为直径 1.5 m 的钢筋混凝土挖孔桩,贵阳岸主塔基础是明挖扩大基础。

全桥长 461.6 m,中跨 288 m,其中吊桥部分

168 m,斜拉桥部分各为 60 m,边跨各为 66 m。塔高 60 m。桥面净宽 12.6 m,外宽 14.5 m。该桥设计荷

载为汽车—超 20 级、挂车—120。全桥布置见图 1。

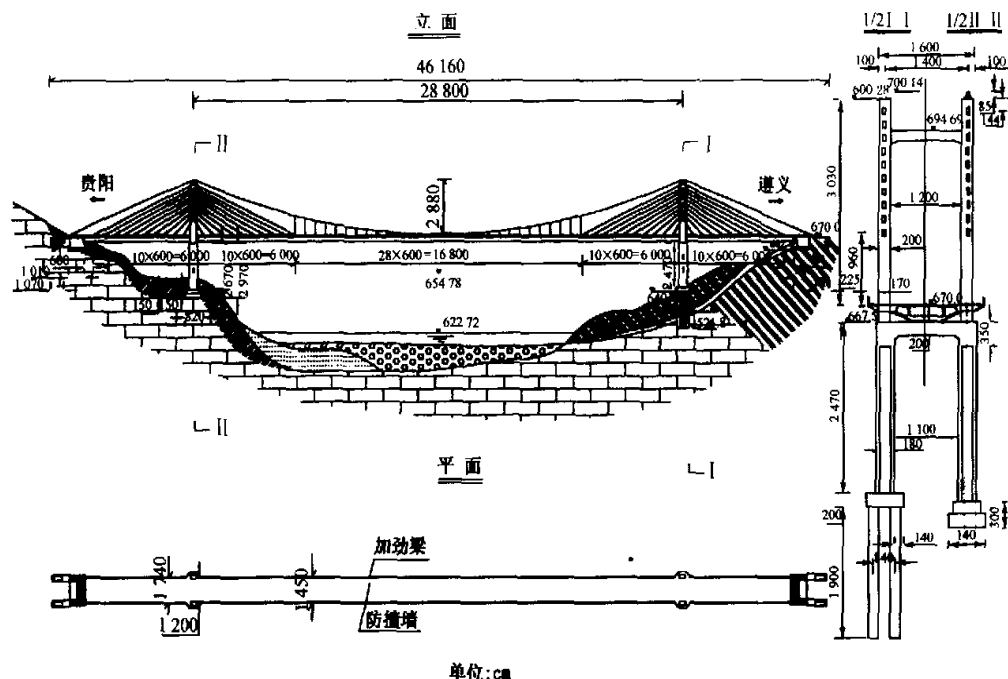


图 1

桥址处地质情况为:遵义岸塔基处岩层向遵义岸倾斜,不呈滑动状态,塔前、后土体为滑坡,处理后塔基为稳定状态。

水文根据上游乌江大坝泄洪情况而定,施工期间泄洪水位对建桥无影响。

## 2 主塔施工

### 2.1 基础

遵义岸桩基按抗滑桩设计,挖孔桩平均桩长 19 m,嵌入中风化岩层 3 m,强风化 6 m 左右。挖孔之前将浮土清至承台底标高。混凝土护壁厚 15~20 cm,孔内岩石用爆破方法开挖,直达桩底标高。

贵阳岸基础为明挖,挖至微风化岩石,平整基岩并清洗干净后直接立模浇筑混凝土。

### 2.2 主塔

主塔施工是利用塔吊立模、安装钢筋和浇注混凝土。塔吊的功能不局限于主塔施工,在安装吊装设备、搭设现浇支架、运转箱梁节头混凝土、运转吊桥配重及主缆防腐等都起到较大的作用。为保证塔吊的稳定性,塔吊用粗钢管附壁于主塔。塔柱用钢翻模施工,逐段往上提升。在立模、安装钢筋和浇注过程

中,应注意塔柱的垂直度以及各段连接的平顺。塔柱的横梁和横系梁采用支架方法施工,浇注顺序为先底板后肋板再顶板,以减轻支架承重,避免横梁和横系梁下挠。

## 3 岩锚施工

### 3.1 岩锚概述

两岸上、下游各设一个岩锚,共 4 个岩锚。每个岩锚埋入岩洞的钢丝束有 19 束,每束钢丝又分 10 小束,每小束为 7 根直径 7 mm 的钢丝,用夹片锚具锚在洞口的混凝土壁上。锚具用梯形螺纹与连接盒相连,而连接盒与每束主缆(边为 19 束)的锚头相连。每层钢丝束的埋入角度不同,越下层俯角越大。遵义岸由于岩层较好,锚深为 22 m;贵阳岸锚深为 26 m。

### 3.2 岩锚受力要点

首先是埋入岩洞的高强钢丝强度、灌注的水泥浆与高强钢丝的粘结力、水泥浆自身的抗剪强度、水泥浆与岩石的摩阻力和岩石的整体强度,以上的力均能抵抗主缆的拉力。其次是在岩锚施工时采用张拉高强钢丝的办法,以高强钢丝的预应力抵抗主缆

拉力。

### 3.3 施工要点

(1)定位。在岩锚出口浇一块混凝土,倾斜面与主缆垂直。在混凝土面上定出岩孔位置。岩锚施工情况见图2。

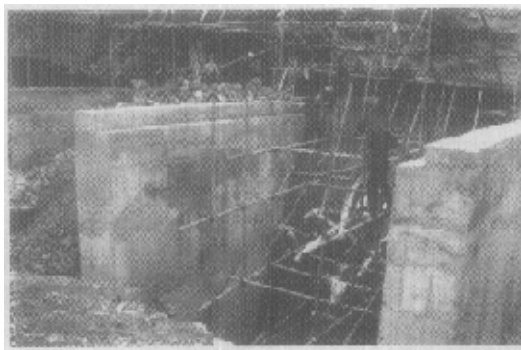


图2

(2)钻孔。用悬臂钻机钻孔,悬臂钻机的钻杆可调整任何角度。钻孔直径,下端17 cm,上端15 cm。当钻完直径15 cm钻孔时,钻头的特设装置注水后即可钻17 cm孔洞,直达钻孔深度。

(3)下钢丝束。钢丝束下端安装类似炮弹头的钢筒,以钢筒的重量带动钢丝束下沉至孔底。

(4)设弯转器。在混凝土壁内孔口处设置铸钢弯转器,使每束钢丝束出口正对主缆。

(5)灌底部水泥浆。用加膨胀剂的水泥浆灌注孔洞底部(9 m深)。

(6)钢丝束张拉。每束钢丝束张拉300 t,即每小束钢丝张拉30 t,并顶压夹片。

(7)用50号加膨胀剂的水泥浆灌孔洞顶部,灌至孔口。

(8)用高标号水泥砂浆封锚。

### 3.4 岩锚效果

岩锚每束钢丝张拉至300 t,张拉钢丝束有两个作用,一是抵抗主缆拉力(每束主缆设计最大拉力为173 t),其二是张拉钢丝束可对岩体起到预压和稳固作用。

在施工过程中,吊桥预压重量超压162 t,岩锚无异常现象。

## 4 边跨施工

### 4.1 支架型式

支架搭设长度除边跨处,还在塔前搭设12 m,

以满足吊装中跨箱梁起吊点的需要。支架用万能杆件、贝雷架和立体桁架节搭成门式框架,并用槽钢作横撑和斜撑;部分支架用建筑钢管和工字钢搭成满堂支架。梁式支架基础采用挖孔桩,桩径1.5 m,嵌入中风化岩层1.5 m,强风化岩层约4 m。在塔前、后设置的这些支架挖孔桩基,对土体可起到抗滑桩的作用。支架的承载力除承担边跨箱梁重量外,还需承担中跨箱梁预制和纵向滑移设备的重量。

### 4.2 边跨箱梁混凝土浇注和预应力张拉

边跨和塔前12 m箱梁用钢管和大块模板立模施工。接底板、肋板再顶板依次浇注,在浇注混凝土前绑扎底板和肋板钢筋,并预留波纹管位置,待肋板浇注完毕后,再绑扎顶板钢筋。浇注箱梁混凝土,从塔前后开始直至桥台前。待每段达到设计强度后,穿钢束张拉,顶锚和灌浆直至边跨箱梁施工完毕。

## 5 箱梁预制和吊装布置

### 5.1 箱梁预制

在边跨已完成的箱梁上按吊装顺序进行预制,用钢管和大块模板立模,待浇注箱梁混凝土强度达到设计要求后,张拉横隔板处横向预应力钢束。在箱梁下面上、下游侧各布置两根规格为38 kg/m的滑移钢轨,上设4个钢箱拖子,用两台5 t电动慢速卷扬机各走6线拖拉钢箱拖子。当用4台50 t油压千斤顶将预制好的箱梁顶升脱模后,降落在钢箱拖子上,即可纵移至塔前起吊。箱梁预制见图3,箱梁吊装情况见图4。

### 5.2 索塔和地锚

索塔利用钢筋混凝土主塔,在主塔顶端预埋两层I360型工字钢牛腿,支承由万能杆件拼装的4 m高横梁,并用过载梁支承工字钢顶横梁和索鞍。上、下游各设一组后浪风和前浪风,后浪风每组为4根直径32 mm的钢丝绳,前浪风每组为两根直径32 mm钢丝绳。地锚则利用将U形桥台改为实体,并设两个直径为3.2 m的半圆形的内墩柱和两个宽1 m的线槽,半圆形柱外包厚1 cm的钢板。则主索平衡轮的千斤索可以绕过内墩柱捆绑。这样可使地锚承载能力加大,并节省了较多的地锚横梁工字钢。

### 5.3 吊装索道系统

在上、下游主缆内2 m处设两组吊装主索,每组主索为8根直径52 mm的钢索,用平衡轮串联,使主索受力均匀。在主索下设8线索鞍和索鞍座,索鞍座内设滑轮使起重索和牵引索顺利通过索塔。每



图 3



图 4

组主索两个跑车,每个跑车设有两组走线,而每组走线为走 12 线直径 19.5 mm 的起重索,动滑轮重 3 t。牵引索采用两组每组走 2 线直径 21.5 mm 的钢索,两岸来往对牵。每岸起重动力为 4 台 8 t 电动慢速卷扬机。为避免起重索及牵引索下挠而增加卷扬机负荷和下挠引起的操作不安全,采用支索器,支索器除配合起重索和牵引索的位置外,还要求重心要低,以防止支索器在使用过程中翻转。每个跑车吊装能力为 50 t。

#### 5.4 吊装系统的功能

万方数据

首先用主索吊空中平台辅助主缆架设。即用塔顶万能杆件横梁提升主缆索鞍,并用 4 台 5 t 链条滑车转移安装主缆索鞍。其次吊运箱梁和调整箱梁标高。还可使主箱梁纵向起吊,可转 90°顺利吊装就位。最后利用空中平台对箱梁底部进行修饰。

### 6 主缆架设

#### 6.1 无猫道主缆架设

通常吊桥主缆采用猫道架设,即在主缆下 1.5 m 设置索道桥,上、下游各一座,在索道桥上对主缆牵拉、组缆、安装索夹和吊杆、主缆防腐等多项操作工序。这次乌江大桥采用无猫道施工,同样能完成上述各工序。架设主缆的布置为:主缆卷筒设在遵义岸隧道远端出口,用 5 t 卷扬机作后梢拉住卷筒。在 200 m 隧道内设钢管支架,上置尖槽托轮,间距 7 m 左右,直至遵义岸桥台口,并在两塔顶端用 5 个尖槽托轮组成弧状形。遵义岸用 3 台 8 t 电动卷扬机作后梢,并用蝴蝶夹和付夹垫以橡胶皮夹住主缆束;贵阳岸用 3 台 8 t 电动卷扬机拖拉,也用蝴蝶夹和付夹垫以橡胶皮夹住主缆束。为避免主缆束下挠和减少拖拉力量,用主索跨中吊一空中平台,平台上设两个尖槽托轮托住跨中主缆束,减少主缆束的跨径。在拖拉过程中,遵义岸由于后梢转换,但始终保持两台 8 t 和一台 5 t 电动卷扬机作为后梢,贵阳岸保持 3 台 8 t 卷扬机作拖拉。特别是主缆束锚头就位时,此时拖拉力最大,最后用 5 t 链条滑车将主缆束放入主索鞍。架设主缆的要点是:主缆束不能扭、不能散,即主缆束的成型胶带破损不超过三分之一或二分之一。经过上、下游主缆(各 19 束共 38 束)的拖拉架设,效果是不错的,由于利用蝴蝶夹拖拉锚头上端,以及用一根工作天线提住锚头行走起到防扭的作用。也由于使用尖槽托轮和六角形蝴蝶夹及附夹,成型胶带破损少于三分之一,且是间断性破损,对 19 束组合成圆形主缆无大影响。无猫道主缆架设情况见图 5。

#### 6.2 主缆组合及索夹吊杆安装

主缆组合用带螺栓的钢箍,从塔顶往边跨和跨中用主缆上的滑动挂篮上紧缆,并用空中平台安装索夹和吊杆,安装索夹主要是定位准确和螺杆的扭紧力,计算结果是每颗螺栓以 1 m 手柄扭力为 50 kg,情况良好。

#### 6.3 主缆防腐

主缆防腐主要是将主缆封闭,使空气和水不能



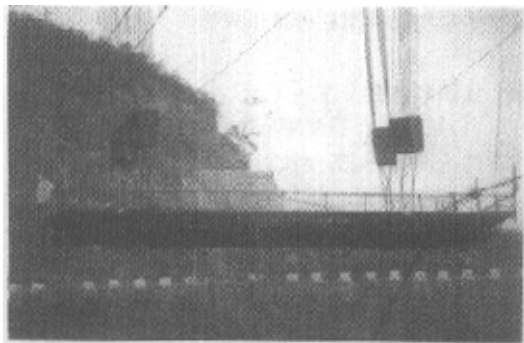


图5

进入,起到主缆防腐作用。主缆防腐在全桥完成后最后进行。主缆由于采用无镀锌钢丝,所以在主缆组合并带上索夹后涂上一层机油。防腐工作中,按如下的工序操作:首先在主缆上喷含活化剂和除锈剂的清洗剂,然后喷高压水蒸汽、清除锈渍及油污杂质。喷清洗剂和热水蒸汽均用高压发生器进行。待干燥后涂环氧富锌底漆,再用腻子封闭。然后涂两道防水漆,最后涂面漆,防紫外线和酸雨等。

## 7 箱梁安装

### 7.1 斜拉桥箱梁安装

由于塔前12 m箱梁(两段)已现浇,并已挂斜拉索,两岸只剩8段箱梁需要安装。每段箱梁安装程序为:将箱梁用滑道纵移至塔前起吊点,用吊装索道4个跑车抬吊箱梁到安装位置,松对角线跑车起重索,调整上、下游持重跑车,使箱梁转 $90^\circ$ 后落下就位,在加劲梁和顶板中肋支承共6个点垫钢板,并灌环氧树脂,张拉顶、底板部分预应力钢索,对称单根安装斜拉索并单根张拉,顶夹片锚具,绑扎接头钢筋并现浇接头钢纤维混凝土,张拉剩余的预应力钢索,将主索的力移交给斜拉索。箱梁安装情况见图6。

斜拉索为每束19根钢绞线,每根钢绞线单独张拉11 t或6 t,顶压夹片锚均为3.3 t。按标高调整箱梁,如箱梁标高不够,再将已张拉6 t的单根钢绞线再张拉至11 t,依此类推,直至箱梁标高符合要求为止。

### 7.2 吊桥箱梁安装

吊桥部分有27段箱梁需要从斜拉桥端头向跨中安装,吊桥与斜拉桥吊装重量均为94 t。安装程序为:将箱梁用滑道纵移至塔前起吊点,用吊装索道(4个跑车)将箱梁抬到安装位置,松对角线方向上的跑车起重索,调整上、下游的持重跑车,使箱梁转 $90^\circ$

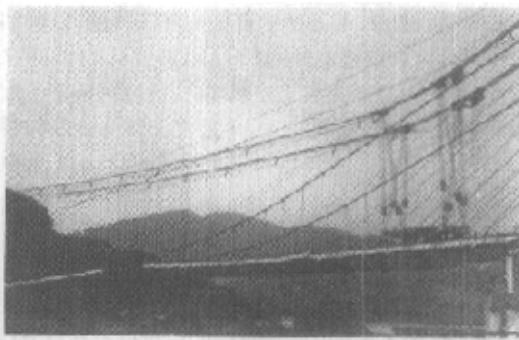


图6

后落下就位,按计算的标高调准吊杆螺帽,将主索的力移交给主缆。

吊桥箱梁安装是各段自由悬挂,待27段箱梁全部悬挂完毕,再用吊装主索调整各段箱梁标高,并加配重使27段箱梁达到设计标高。然后从跨中向两边用钢板垫箱梁的6个支点,并灌环氧树脂,张拉部分预应力索,浇钢纤维湿接头混凝土,再张拉预应力索,类推至吊桥端头箱梁,将吊桥全部箱梁连成整体。

### 7.3 主塔主索鞍顶的动配合

由于主缆逐渐持重会引起主索鞍往前移动,因主索鞍对主塔的摩擦力,主塔也因此会往河心偏移。为避免主塔偏移超过容许值,所以在主索鞍处设置了反力架,用千斤顶顶动主索鞍,以减少主索鞍对主塔的摩擦力,此时主塔会立即往后岸方向回弹,偏移值则立即减少。主缆逐渐持重,所以需多次顶动主索鞍。

## 8 吊桥和斜拉桥的组合

吊桥和斜拉桥的组合,是本桥的重要工序。由于吊桥全部箱梁连成整体之前,每段箱梁用碎石袋压重22 t,配重的目的是让吊桥和斜拉桥基本成型,即吊桥两端与斜拉桥端头标高基本一致。实践中吊桥两端低于斜拉桥端头。

为了吊桥和斜拉桥的组合,应掌握好当时的温度,即早晚的温差。卸除吊桥两端头配重,第一段22 t,第二段22 t,第三段10 t,第四段8 t,斜拉桥端头压30 t,此时端头比斜拉桥端头低6 cm左右。在1997年8月6日晚12时,由于降温,主缆收缩,致使吊桥整段箱梁标高上升,使得贵阳岸端头与斜拉桥端头齐平,此时立即将接头钢板的6个支点填实,焊接肋板钢筋和顶、底板钢筋,张拉顶板6束和底板

7 束预应力钢束,灌 6 个支接头环氧树脂,以限制吊桥部分标高继续上升。过了 2 h,即凌晨 2 时,遵义岸接头齐平,同样完成上述工序后,恢复吊桥端头配重和卸除斜拉桥端头压重,最后浇注接头钢纤维混凝土,再对未张拉的预应力钢束进行张拉,吊桥和斜拉桥组合成功。

### 9 拆除配重和桥面及栏杆混凝土的浇注

拆除配重和桥面及栏杆浇注程序为:首先浇注两岸斜拉桥部分的中间两幅桥面与斜拉桥部分的栏杆混凝土,然后浇筑吊桥跨中两幅和斜拉桥边幅桥面,再浇筑吊桥端头与交接区中幅桥面,然后卸除吊桥配重,浇注吊桥栏杆。最后浇筑吊桥跨中边幅桥面和吊桥端头与交接区边幅桥面。

在整个桥面混凝土中,敷设了直径为 5 mm 的高强钢丝网,网格间距为 15 cm×15 cm。在交接区再加铺细格钢丝网。桥面为钢纤维混凝土。至此,全

桥主体结构及桥面栏杆施工完毕。

### 10 认识和体会

(1)吊拉组合桥型可向大跨径发展,相对于吊桥和斜拉桥而言,经济性和实用性愈加明显。

(2)“三钢”混凝土可修至跨径 600 m,更大跨径时可采用钢箱梁,不设配重,可采用千斤顶强迫顶升位移,也可采用装水配重。

(3)在表层地质不良时,岩锚可进入深层。

(4)大直径主缆可分组。

(5)斜拉索夹片锚具,在低应力状况下,容易打滑,工程实践中加 QM 锚进行双保险,所以斜拉索应注意选择优良可靠的锚具。

(6)乌江大桥主缆每束 127 丝,重约 9 t 多,采用了无猫道架设。当主缆每束为 91 丝时,无猫道架设可达 600 m 跨径。

## Cable-Stayed and Suspension Bridge over Wujian River—A New Type of Bridge and Its Construction Method

Yang Guanghua, Cai Yiqian

(Guizhou Provincial Bridge Engineering General. Corp., Guiyang, China)

**Abstract:** The Wujian River Bridge is the first bridge that its deck supported by a combination of cables stayed and suspended in the world. The composite concrete thin wall box beam with reinforcement, steel fibre and steel wire mesh has been adopted in China for the first time. The traditional gravity anchoring is successfully replaced by prestressed rock anchoring, which saves a significant quantity of concrete anchoring. The pioneering techniques of construction, such as “flying fox (cradle)” and “main cable erection construction without temporary bridge” facilitated the erection and joining of 100-ton box deck beams. After two years in operation, the bridge is certified as good in its structure and performance. In this article, main tower erection, rock anchoring, prestressing and erection of beams, main cable erection without temporary bridge are described.

**Key words:** Wujian River Bridge; Cable-stayed and suspension bridge; Rock anchoring; Erection without temporary bridge

加快西部地区交通基础设施建设是今后交通发展的  
重中之重