

# 双肋四桁提篮式钢桁拱散件吊装施工工法

中铁十八局集团第二工程有限公司 中铁十八局集团有限公司

于长彬 贺常松 田波 张敏 张喆

## 1 前言

随着新技术、新材料、新设备、新工艺的飞速发展，桥梁的跨度在不断增大。以造型美观、结构承载能力高和抗风、抗震性能好为优势的钢桁架拱桥成为西南高山峡谷地区桥梁结构的最优选择。国内外大跨钢桁拱桥大多采用支架法施工、悬臂架设施工、转体施工的方法成拱。各类施工方法因地形、跨度等方面因素影响均存在一定的局限性，不同的方法中依然存在临时辅助设施选择及设计和施工风险等问题需要我们解决。

中铁十八局集团联合设计单位和高校开展了科技创新，采用散件吊装，省去钢构件现场预拼的过程，有效降低缆索吊机单钩吊重过大的问题；设计和施工横移式缆索吊机、杆件之间对拉措施及长短吊耳解决了提篮式钢桁拱构件三维空间对位问题；采用局部组合式吊装解决了杆件吊装过程中杆件之间的碰撞问题。期间多次向国家专利局申请，形成实用新型专利《缆索吊机主索横移式锚碇机房》、《用于缆索吊机索鞍横移的动力装置》、《锚碇抗倾覆锚栓》、《用于安装提篮拱杆件的对位导向装置》，同时，形成了双肋四桁提篮式钢桁拱精确对位施工技术。关键技术通过科技部西南信息中心查新显示在国内未见文献报道，经过中国铁建股份公司组织专家进行鉴定，结论为本技术成熟，达到国内领先水平，同时获 2018~2019 年度集团公司优秀工法、2018~2019 年度中国铁建股份公司优秀工法一等奖。

## 2 工法特点

2.1 钢桁拱采用整体横移式缆索吊散件吊装；

2.2 主弦杆及部分腹杆采用单杆件对称吊装；

2.3 平联部分采用组合式吊装；

2.4 单件杆件尺寸大、重量大、最重的杆件重约 97t 左右，施工时采用缆索吊双钩抬吊。

2.5 杆件种类多、数量大，且为全栓接结构，全桥 922 根杆件由 70 多万颗高强螺栓连接，安装时需通过长短吊耳、倒链、缆索吊共同调整三维空间角度。

### 3 适用范围

本工法主要适用于山区地形，大跨度钢桁拱桥梁拱圈安装工程。尤其适用于拱肋间距不断变化、杆件三维定位困难的钢桁拱安装。

### 4 工艺原理

根据钢桁拱成桥状态，结合杆件起吊场地、杆件结构形式、弦杆相对位置，利用一系列技术措施对钢桁拱杆件吊装姿态进行调整，方便对位。提篮拱设计拱肋间距变化，利用缆索吊机整体大幅度横移，解决了拱圈各节段上下游弦杆间距变化问题。利用倒链及钢丝绳精确调整弦杆水平间距，利用长短吊耳调整杆件内倾角，同时利用缆索吊钩调整竖向角度。调整完成后将杆件吊至设计位置，待测量定位完成后高栓固结。

### 5 施工工艺流程及操作要点

5.1 施工工艺流程如图 5.1。

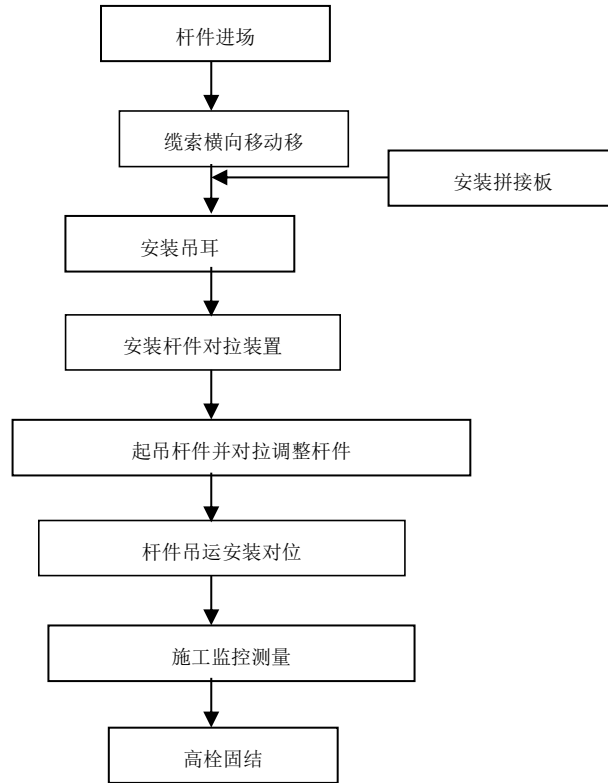


图 5.1 钢桁拱安装顺序

## 5.2 操作要点

由于杆件为对接杆件，在空中安装拼接板难度高，在地面提前将杆件拼接板安装在杆件尾段，与已安装杆件前端形成插入式安装，降低了拼接难度。预装拼接板采用松动式安装，为杆件精准定位提供了一定导向和临时锁定作用。

每节段吊装前进行缆索吊横移，弦杆吊装时上下游两根弦杆对称吊装。利用钢丝绳配合倒链精确调整上下游弦杆间距，利用缆索吊机调整其仰角，利用内外侧长短吊耳调整其内倾角，达到其成桥三维空间状态。腹杆利用拼接板作为导向装置，平联预先在地面将平联 1 个横撑及 2 个斜撑组合成整体，缆索吊机四钩抬吊安装。

整节段吊装完成后，施工监控人员进行应力、位移监测，并根据监测数据对扣锚索进行分析计算张拉，达到监控位置后，对杆件进行锁定安装，高强螺栓施拧和油漆封闭。

### 5.2.1 缆索吊横移

主拱圈为提篮拱，拱脚拱肋间距 34m，跨中拱肋间距 18m。为满足提篮拱每节段拱肋间距的变化，我项目设计施工了横移式缆索吊，缆索吊主索（吊钩）间距需随着钢桁拱拱肋的变化而变化。缆索吊主索间距的变化需索鞍及后锚卷扬机房同步横移，索鞍采用横移式组合索鞍，卷扬机房采用整体式卷扬机房，索鞍及卷扬机房下设置滑道。

### 5.2.2 杆件进场检验及吊装前处理

1. 钢构件进场后对钢构件表面涂装进行检查，对涂装有损坏的进行补涂。
2. 吊装前将拼接板安装于杆件底部临时固定，方便后续杆件与已安装好的杆件对位。
3. 根据杆件内倾角要求，设计长短吊耳各两个，利用长短吊耳调整杆件内倾角，吊耳安装如图 5.2.2-1。安装吊耳时，内测安装长吊耳，外侧安装端吊耳，将钢构件与杆件高栓连接。

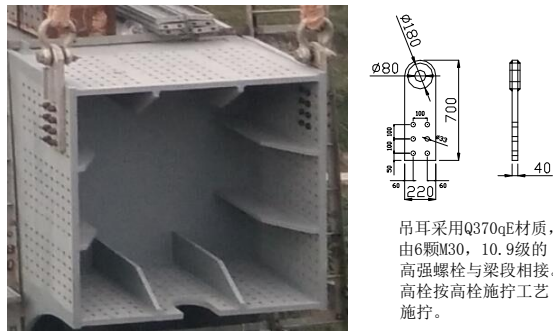


图 5.2.2-1 吊耳设计与应用

### 5.2.3 吊装顺序

根据提高效率、避免返工、施工安全的原则对杆件吊装顺序进行对比选择，确定如下图的吊装顺序。既先内后外、先下后上的施工顺序，如图 5.2.3-1。

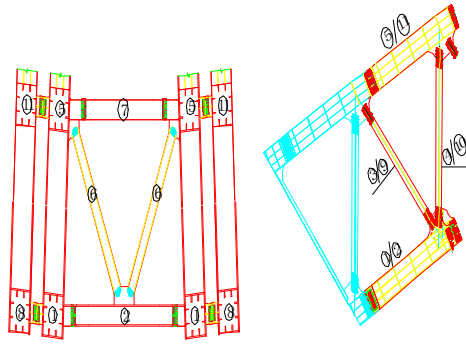


图 5.2.3-1 节段杆件吊装顺序图

### 1. 吊装前对拉措施

杆件吊装前利用内侧吊点位置，将倒链挂于吊点之间，用以微调杆件之间的间距，以便于精确对位（如图 5.2.3-2 所示）。

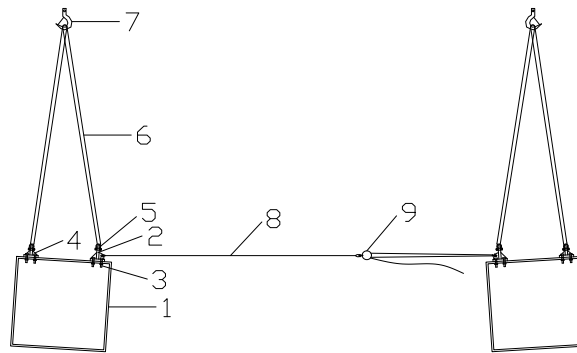


图 5.2.3-2 弦杆吊装时倒链对拉示意图

### 2. 吊装就位

#### 1) 弦杆吊装

杆件安装采用插入法，即先在待装杆杆接头处安装连接板，利用连接板作为限位、导向作用，将吊装梁段插入已安装梁段，如位置出现偏差需微调时，施工人员采用手拉葫芦或千斤顶进行微调定位。

主索道四个吊点同时提升杆件并向前运送，弦杆后端超过与上一节弦杆连接处的位置 50cm 左右后索道停止前进，后吊点下降，采用数显角度测量仪贴于杆件上测量弦杆仰角，达到设计要求后同时下降前后吊点。索道采用最慢速档位边下降边

后退，杆杆插入就位。

杆件起吊就位对孔时，在栓孔基本重合时将小撬棍插入孔内拨正，然后微微起落吊钩，使杆件转动对合其它孔眼。弦杆先对近端孔眼，竖杆先对下端孔眼，斜杆先吊成较陡状态，待下端对合后再徐徐降低吊钩对合上端。对主弦杆时，可用扁铲式小撬棍引导，必要时用牵引器或导链滑车拉入节点板内。上、下弦杆节点外拼接的拼接板及其填板应预拼在带有填板的一端，并预留 2~3 排螺栓且仅作一般手工拧紧，以便套插拼装。

打入引钉对好孔眼后，先在栓孔群四角打入四个定位冲钉，随即安装 4~6 个工具螺栓夹紧板束，确认板缝间无任何杂物时，即拧紧螺栓，随后打安装 30%冲钉。待一个节间拼装完成后再替换为高强螺栓进行节间固结。杆件拼装时，为保证拼装符合设计拱度，需按接头孔眼总数的 30%均匀分布打入冲钉后方能松钩。

## 2) 平联吊装

平联由 1 个平联横撑和 2 个平联斜撑组成。平联横撑与平联斜撑三件在拼装平台上拼成整体，组合吊装。地面拼装如图 5.2.3-3。

根据所拼节段的平联的线型在平台上放好地样线，根据地样布置钢支墩。

将平联横撑吊装于胎架上，平联在胎架上按地样线与支撑钢墩固定。吊装平联斜撑，用冲钉和普通螺栓与平联横撑进行临时紧固。

利用水准仪检查平联水平标高，偏差超过精度要求则用千斤顶进行调整，所有几何尺寸合格后，平联横撑与节点板置换下平面临时螺栓及冲钉，完成高栓施拧并对栓接区域做封闭。

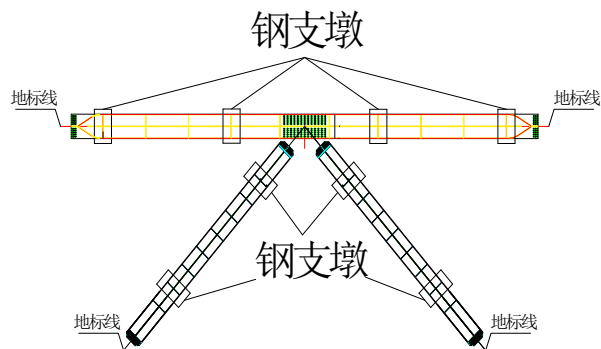


图 5.2.3-3 平联地面拼装

平联拼装合格后，再利用缆索吊四钩起吊，起吊如图 5.2.3-4 示意。

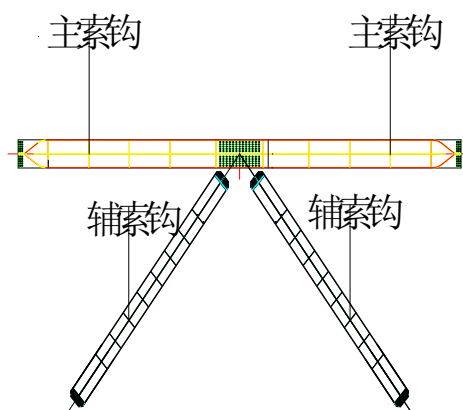


图 5.2.3-4 平联吊装示意图

### 3) 腹杆吊装

**竖腹杆吊装：**根据重心计算，竖腹杆安装时只需在工字形腹杆靠线路外侧的翼缘板上安装吊耳，然后直接与主钩进行连接，行走设计位置后插入下弦杆节点板之中即可。

### 4) 斜腹杆吊装

下弦杆安装完成后即可安装斜腹杆。斜腹杆亦采用缆索吊前后两个吊钩吊装。

**吊耳安装：**在腹杆两块拼接板各安装一个吊耳，吊耳用四颗高强螺栓进行连接。

**起吊及安装：**索道两个吊点同时提升杆件并向前运送，腹杆上端超过与上一节弦杆连接处的位置 50cm 左右后索道停止前进，然后吊点下降，采用数显角度测量仪贴于杆件上测量弦杆仰角，达到设计要求后同时下降前后吊点。索道采用最慢速

档位边下降边后退，杆杆就位采用插入法，即先在已装杆杆接头处安装连接板，利用连接板作为限位、导向作用，将吊装梁段插入已安装梁段，如位置出现偏差需微调时，施工人员采用手拉葫芦或千斤顶进行微调定位。

#### 5.2.4 施工监控、扣锚索调整

节段吊装完成后，施工监控单位对杆件应力，位移进行采集，对采集的数据尽快进行分析对比，如满足监控要求，即可进行高强螺栓的施工。如不满足，需对扣锚索进行调整，调整至监控数据要求后再进行高强螺栓的施工。

#### 5.2.5 高栓固定

待钢桁拱应力、线性符合监控要求后，对临时螺栓及冲钉用高栓替换。高强螺栓施拧采用电动扳手，检查采用检查扳手。

### 5.3 劳动力组织

施工作业人员分为起重司索工、拼装工、电工、焊工、杂工等，具体人数见表

5.3

5.3 劳动力组织表

序号	工种	人数	备注
1	起重司索工	15	
2	拼装工	12	
3	电工	1	
4	焊工	1	
5	杂工	2	

## 6 材料与设备

6.1 本工法主要涉及的材料，具体情况见表 6.1

表 6.1 主要涉及的设备与机具

序号	材料名称	数量	型号	备注
1	钢跳板	200 套	4m	
2	冲钉	8 箱	Ø26~33	
4	普通螺栓	3000 套	S4.8 (24)	
5	角钢	30 件	75/50	



6	钢管	1020t	250~1000mm	
7	钢板		20~34mm	
8	钢绞线		Ø15×7	
9	锚具夹片	108套	30~48孔	

6.2 本工法主要涉及的设备及机具，具体情况见表 6.2

表 6.2 主要涉及的设备与机具

序号	设备或工具名称	数量	机械型号	备注
一	主要大型设备			
1	缆索起重机	1台	4×50t	
2	100t32m跨距龙门吊	1台		
3	液压移梁平车	1辆	100t	
4	叉车	1辆	3t	
5	卷扬机	20台	2~5t	
6	汽车吊	2辆	25t/40t	
7	板车	2辆	9m	
二	主要施工工具			
1	氧气乙炔割具	8套		
2	移动配电箱	12只		
3	水平仪	1台		
4	手工焊机	4台		
5	二氧化碳焊机	16台		
6	电动空压机	3台		
7	机械千斤顶	12个	10~50t	
8	液压千斤顶	24个	10~400t	
9	电动角磨机	10台		
10	手动葫芦	12只	3~5t	
11	电动葫芦	8只	5t	
12	卷扬机	26台	2~5t	
13	油泵	16台		
14	板手	4套	16~24	
15	油漆喷涂机	1台		
16	高压油漆喷涂机	1台		
17	电动扳手	16套		
18	磁力钻	6套		
19	磁力起重机	2台		
20	撬棍	若干		

## 7 质量措施

为确保工程质量，要建立健全质量管理和质量保证体系；严格按照现行施工规范、质量检验标准和设计文件要求进行施工，同时对重点部位和关键环节要高度控制，精准施工。

7.1 质量控制相关标准如表 7.1。

表 7.1 质量控制相关标准

序号	标准名称	标准号
1	铁路技术管理规程	铁道部令第 29 号
2	铁路桥涵设计基本规范	TB10002.1-2005
3	铁路桥梁钢结构设计规范	TB-10002.2-2005
4	铁路桥涵地基和基础设计规范	TB10002.5-2005
5	钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程	JGJ82-2011
6	铁路钢桥高强度螺栓连接施工规定	TBJ 214-92
7	铁路钢桥制造规范	TB10212-2009
8	铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件	TB/T1527-2011
9	铁路混凝土结构耐久性设计规范	TB10005-2010
10	客货共线铁路桥涵工程施工技术指南	TZ203-2008
11	新建客货共线铁路设计暂行规定	铁建函（2003）76 号
12	铁路工程环境保护设计规范	TB10501-98
13	桥梁钢检验指南	GD 01-2005

### 7.2 质量控制措施

#### 7.2.1 合理安排安装顺序

根据施工进度、工期安排、杆件完成情况等，制订合理施工方法、吊装路线，并根据实际的空间结构位置，制定合理的安装要求和相应作业指导书，同时配置相

应的资源—包括合适的机械、吊具、测量仪器、工程技术人员、测量人员、质检人员等。对所有相关人员进行专业培训，使其明确自己的职责和应掌握的技能。

#### 7.2.2 根据现行国家及行业标准，严格把控质量

**高强螺栓安装：**安装高强螺栓时，严禁强行穿入。当不能穿入时该孔应用绞刀进行修整，修整后孔的最大直径不应大于螺栓直径的 1.2 倍，且修整数量不应超过该节点螺栓数量的 25%。

**高强螺栓检测：**高强螺栓预拉力误差在设计预拉力 $\pm 2\%$ 范围内。

**钢构件涂装：**钢结构涂装采用 TBT1527-2011《铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件》要求办理，摩擦面滑移系数出厂时不小于 0.55，架设时不小于 0.45。

#### 7.2.3 成品保护的措施

本工程现场杆件均为成品杆件，现场主要是成品保护和个别散件、小件需要现场拼装或焊接，从而成品保护为重中之重。防止杆件表面油漆破坏及变形等，经过大量工程的损失为例，特此制订以下保护措施。

##### 1) 防止变形

杆件均存放在特制的胎架上，小件放置在木胎架上。大型杆件起吊、转运均有保护装置，小件均有电磁进行吸附起吊，所有杆件都慢起、轻放，防止杆件与杆件、杆件与胎架等的碰撞损坏。

##### 2) 防止油漆破坏

在胎架、起吊设备都设有橡胶或木制保护用具，防止铁与杆件直接接触，造成油漆破坏。场地清洁，设置内测排水沟，操作人员均佩戴洁净防护用具进行施工。

## 8 安全措施

### 8.1 高空作业及立体交叉作业

8.1.1 高空作业人员必须正确佩戴防滑鞋、安全帽、安全带等安全防护用品；

8.1.2 高空作业处都设有护栏、安全绳或防坠网；

8.1.3 高空作业面都设有工具统一安放点，避免随意丢放，造成物体坠落；

8.1.4 风速达到六级及以上时，停止一切高空作业；

8.1.5 高空作业与地面联系应有专人负责，或配对讲机等通讯设备；

8.1.6 高空作业不得坐在平台、孔洞的边缘，不得骑坐在栏杆上，不得躺在走道板上和安全网内休息，不得站在栏杆处工作或凭借栏杆起吊物件；

8.1.7 油漆封闭，应注意废弃料和漆筒不得随意丢弃，统一处理。

8.1.8 安装作业的安全措施

8.1.9 各种施工用具准备全（千斤顶、手拉葫芦、岛链、撬棍等）；

8.1.10 操作平台搭设，安装好临时防护，如护栏、安全网等。

8.2 防火安全措施

8.2.1 消防宣传教育和培训

8.2.2 设立检查和监督机制

8.2.3 现场的生产、生活区设足够的消防水源和消防设施网点，消防器有专人管理，不乱扔乱放，各项目队组成由15~20人的义务消防队，所有施工人员熟悉并掌握消防设备的性能和使用方法。

8.2.4 季节性安全措施

8.2.5 雨季，在拱圈上搭设防雨棚、安全通道、休息平台和避雨走廊等；

8.2.6 施工人员配备雨衣、雨鞋等；

8.2.7 高强螺栓佩戴雨布起吊，未使用的高强螺栓一定全覆盖。

## 9 环保措施

9.1 水土保持措施

站在可持续发展的高度对待建设过程中的环境保护工作，自觉爱护沿线的一山

一水，一草一木。制定《环境保护管理办法》、《水土保持管理办法》，成立环境保护领导小组，各施工队伍的第一管理者是其管辖范围环保、水保的第一责任人，要求指定专人负责环境保护工作，自觉接受各级地方政府环境保护和水利部门的监督、检查和指导。严格按国家和地方政府有关规定及设计要求做好环保工作，坚持“三同时”（同时设计、同时施工、同时竣工），防止水土流失和空气污染，控制施工噪声。

对施工沿线进行调查和收集资料，充分了解当地环境、生态和植被保护的法律法规。

### 9.2 避免油料外泄措施

现场存放油料的地面进行防渗处理，如采用防渗砼地面、铺防油毡等措施。在使用过程中，要采取防止油料跑、冒、滴、漏的措施，防止土壤受到污染。

### 9.3 生活区垃圾排放措施

工地临时厕所的化粪池采取防渗措施，并尽可能利用既有建筑物内的水冲式厕所，同时做好防蝇、灭蛆工作。

### 9.4 易燃易爆品存放措施

乙炔、油漆等易燃物品存放必须远离火源，集中储存，储存库房应通风避阴。

## 10 效益分析

采用常规桁片式吊装需设置强大的缆索起吊装备，通过散件吊装降低了缆索起重设备的规模，降低了大型设备的风险。横移式缆索吊在满足吊重的前提下解决了大跨度提篮拱拱肋变化的问题。同时利用对拉措施，减少了缆索吊横移次数，相应减少了人员设备的投入。另外散件吊装不需要设置预拼装平台，减少了用地面积的同时，也减少了地面拼装设备的投入。

### 10.1 经济效益

地面预拼场地节省 7000 m<sup>2</sup>，地面预拼龙门吊节省 2 台，节约人工 2190 工日，节约成本 316.94 万元。将平联组合式吊装，减少吊装 150 余次，减少高空作业量，加速了施工进度，节约工期 1.5 个月，节省了 65 万元利用对拉方式减少横移次数 12 次，节约人工 240 工日，节约工期 24d，共计节约成本 150 万元。共计节约成本 531.94 万元。

## 10.2 社会效益

本技术科学地解决了山地峡谷地形、场地有限的双肋四桁提篮式钢桁拱吊装与三维空间对位的难题，减少缆索吊横移、平联组合式吊装等为我们节约了工期，在全标段树立了良好的形象，得到了业主、监理的认可，赢得了社会各界媒体的关注与报道，赢得了良好的社会效益。

## 11 应用实例

### 11.1 工程概况

怒江四线特大桥位于金刚元隧道与高黎贡山隧道之间，于大坪子附近跨越怒江，桥上设怒江车站，为四线特大桥，桥上线路线间距均为 5.0m。桥梁全长 1024.20m。桥高约 226m。桥址纵断面上线位处开口 1030m，是较典型的 V 型峡谷，主桥采用 1-490m 上承式钢桁拱桥跨越峡谷，钢桁拱矢高 109.5m，矢跨比为 1/4.475，拱轴线采用悬链线，拱轴系数 2.0。主桥为上承式提篮双肋四桁结构，全桥钢桁拱 40 个节段，每个节段有 8 个弦杆、8 个腹杆、6 个平联、2 个横撑组成。通过横杆连接成整体。主桁为 N 型桁架，主桁采用全节点结构形式。主弦杆均采用箱型截面，最重的杆件重约 97t 左右，腹杆采用箱型及 H 型截面，联结系为箱型，上、下平联在节点之间“K”型布置。

### 11.2 应用效果

本工法应用于大瑞铁路怒江四线特大桥解决了大型杆件现场预拼难度大、大型

杆件三维空间对位困难、吊装过程中杆件之间的碰撞的技术难题，顺利完成主拱圈的悬臂拼装施工。采用散件吊装省去钢构件现场预拼过程，有效降低缆索吊机单钩吊重过大的问题，降低了施工风险；设计和施工横移式缆索吊机，施工过程中减少了缆索吊横移次数，降低了施工成本；杆件之间对拉措施、长短吊耳设计、局部组合式吊装等一系列措施加快了对位速度，解决了提篮式钢桁拱构件三维空间对位问题，技术先进，效果显著，有明显的社会效益和经济效益。同时为我国发展山地大跨度提篮式大型钢构拱桥提供了宝贵经验，其推广和应用前景十分广阔。