

# 铁路混合梁斜拉桥设计技术



报告人：刘振标

2018年7月

过渡页  
Transition

技术特点

体系构建

典型工程

结 语



## 公路、铁路混合梁斜拉桥的发展



1995年，法国建成主跨856m的诺曼底大桥

2012年，海参崴俄罗斯岛跨海大桥  
主跨1104m混合梁斜拉桥



# 01

## 技术特点

J I S H U T E D I A N



前南斯拉夫萨瓦河双线铁路斜拉桥，  
主跨254m，1979年建成



香港昂船洲大桥，主跨1018m，  
2009年建成。我国最大的混合梁  
斜拉桥。

宁波铁路枢纽北环线甬江特大桥，  
主跨468m，2014年建成。目  
前最大跨度铁路混合梁斜拉桥



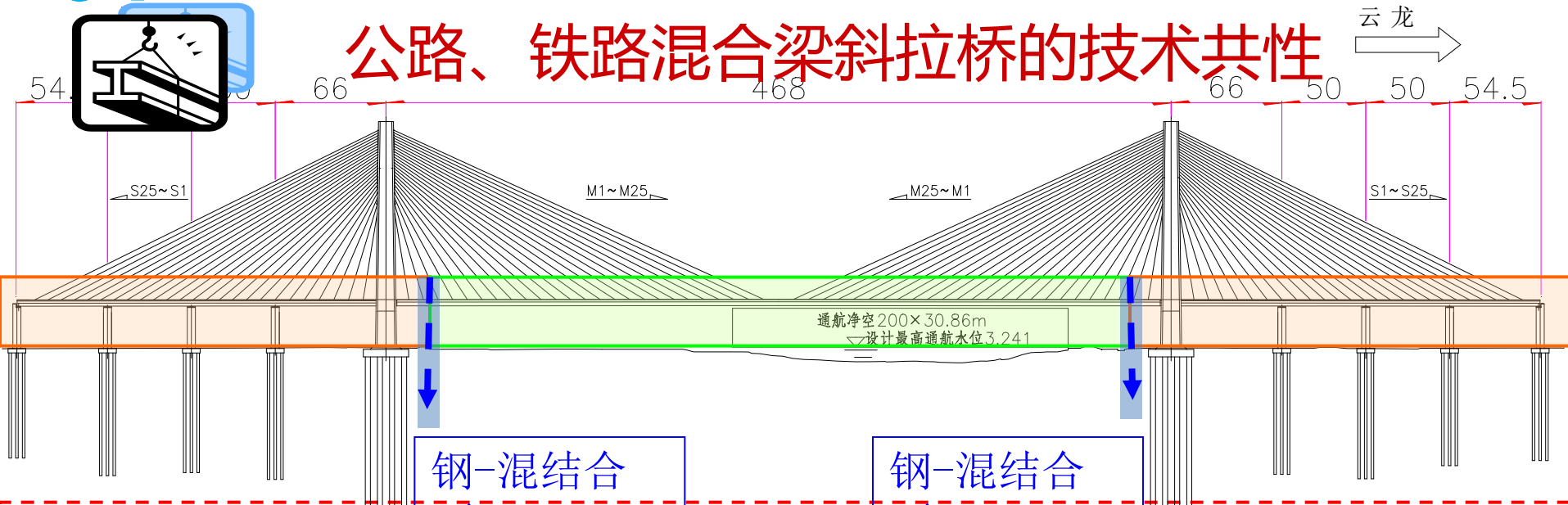
# 01 技术特点

JI SHU TE DIAN



## 公路、铁路混合梁斜拉桥的技术共性

云龙



- 中跨全部或部分采用钢梁，充分发挥钢结构材质均匀、自重轻、跨越能力大、安装快捷方便、工期短的优点。
- 边跨采用自重较大的混凝土梁作为压重跨，增强了对中跨的锚固作用，减小了中跨梁体内力和变形，改善了梁端转角，避免了边墩产生负反力。

## 01

## 技术特点

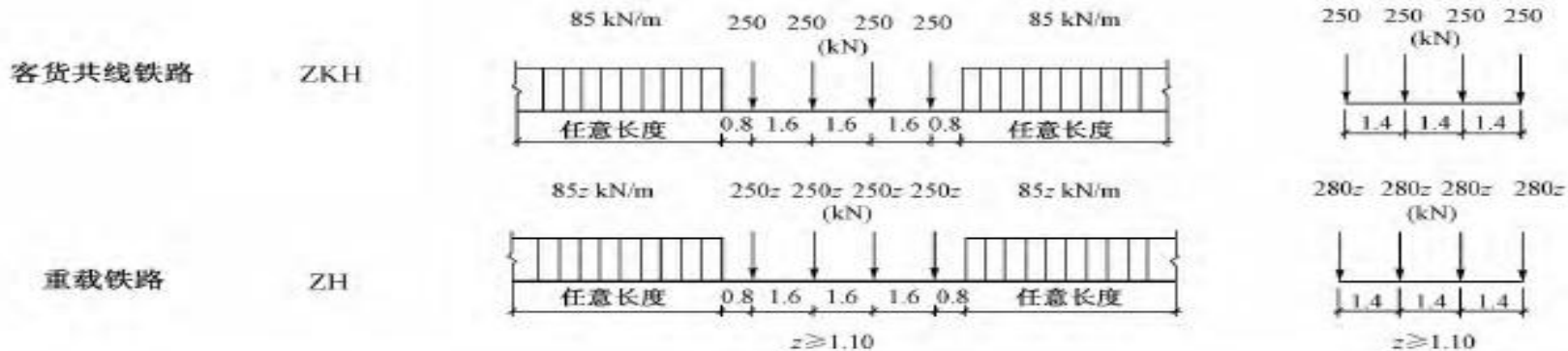
JI SHU TE DIAN



# 建造铁路混合梁斜拉桥 面临的技术难题：



## ● 设计活载大



注： $z$ 为ZH荷载图式中重载等级系数；距离以m计。

以加载长度500m为例，我国的双线铁路“中一活载”大约相当于6车道“公路一Ⅰ级”的竖向静活载的4.35倍。

# 01 技术特点

JI SHU TE DIAN



## 建造铁路混合梁斜拉桥

### 面临的技术难题



● 恒活比小、疲劳问题突出

桥名	渝利桥	甬江桥	沪通桥	天兴洲桥	铜陵桥	厄勒海峡桥
主桥跨度	432	468	1092	504	630	490
主梁结构形式	钢桁梁	混合梁	钢桁梁	钢桁梁	钢桁梁	钢桁梁
活载标准	双线铁路	双线铁路	4线铁路 6车道公路	4线铁路 6车道公路	4线铁路 6车道公路	双线铁路 4车道公路
活载集度 (t/m)	15.6	16.3	35.1	35.1	35.1	20.2
主梁恒载集度 (t)	39.1	钢箱梁部分31.2	94	87	90	62
<b>恒活比</b>	<b>2.506</b>	<b>1.914</b>	<b>2.678</b>	<b>2.479</b>	<b>2.564</b>	<b>3.069</b>
挠跨比 (公+铁)	1/799	1/705	1/581	1/500	1/700	
最大索规格	301丝 φ7	223丝 φ7	131股 φ15.24	451丝 φ7	127股 φ15.24	



# 建造铁路混合梁斜拉桥 面临的技术难题



## ● 行车安全性、平稳性、舒适性及动力性能要求高

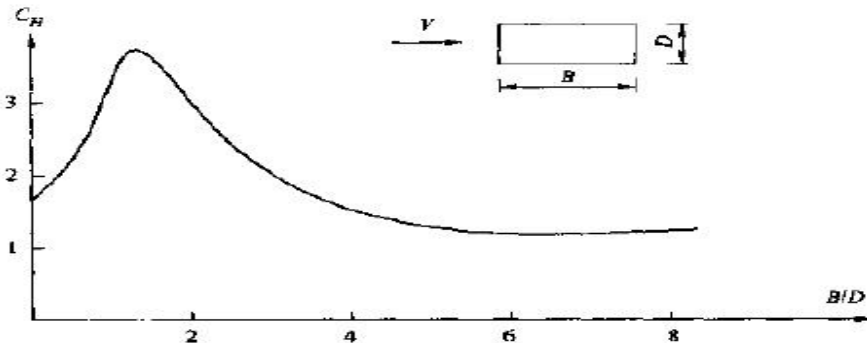


图 S-1-3 矩形截面  $B/D$  对阻力系数的影响

- 混合梁基频低，需要关注车体低频振动对车桥、风车桥动力响应，安全性（脱轨系数、轮重减载率）及舒适性（车体横、竖向加速度）
- 钝形截面的气动性能
- 作为承轨结构，须控制荷载作用下的横、竖向挠度、梁端转角、桥面扭转等刚度条件



# 01 技术特点

JI SHU TE DIAN



## 铁路混合梁斜拉桥 关键技术研究：



- 合理成桥状态研究
- 关键设计参数
- 钢混结合段连接构造
- 索梁锚固连接构造
- 新型铁路钢桥面加劲肋研究
- 钝形钢箱截面气动选型理论分析及试验
- .....



过渡页

Transition

技术特点

体系构建

典型工程

结 语



## 2.1 合理成桥状态研究

斜拉桥的理想成桥状态是使桥塔恒载弯矩接近于零或尽可能小，加劲梁恒载弯矩接近刚性支承连续梁的弯矩。

- **公路桥梁**：活载小，恒载大，大多沿用常规“塔直梁平”成桥状态。
- **铁路桥梁**：若沿用常规“塔直梁平”的理想成桥状态，在强大的铁路活载作用下，桥塔下塔柱两侧纵向弯矩和中跨钢梁正负弯矩量值相差较大，结构受力不均衡。
- **思路**：根据主梁截面上、下缘的正应力控制条件，综合考虑后期活载作用以及斜拉索力对主梁成桥恒载弯矩的可调性，确定主梁成桥状态的恒载弯矩合理域，以此作为理想成桥状态。

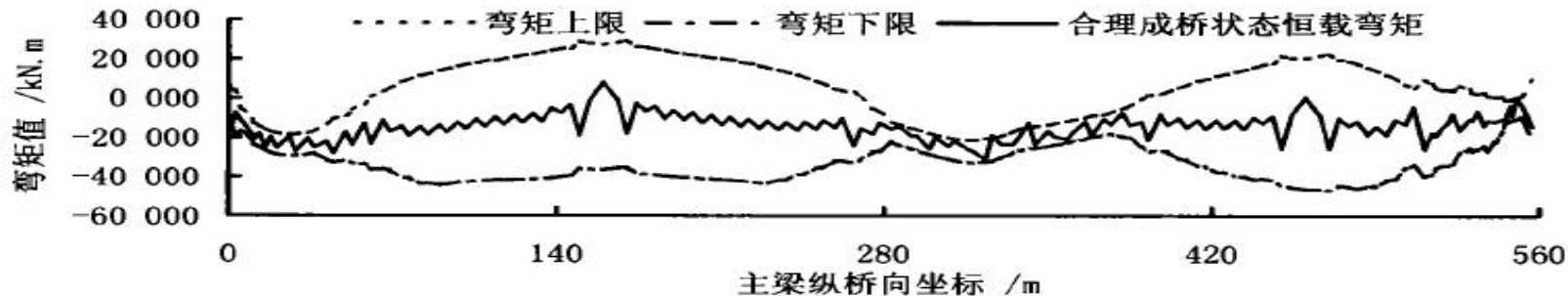


图 6 主梁成桥恒载弯矩分析图

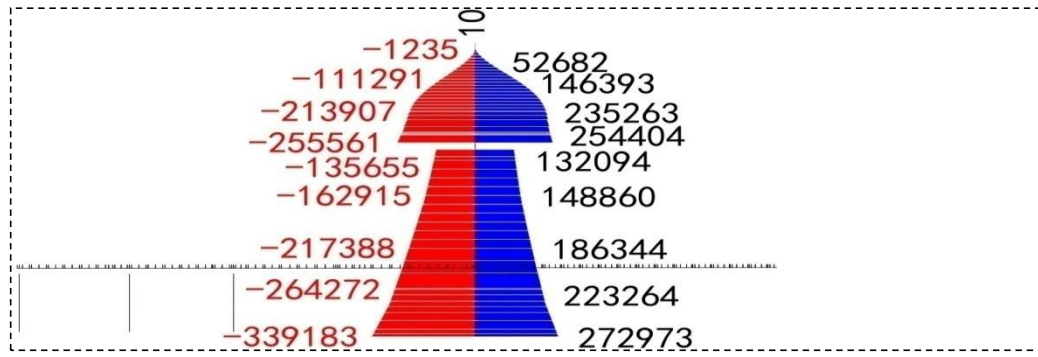
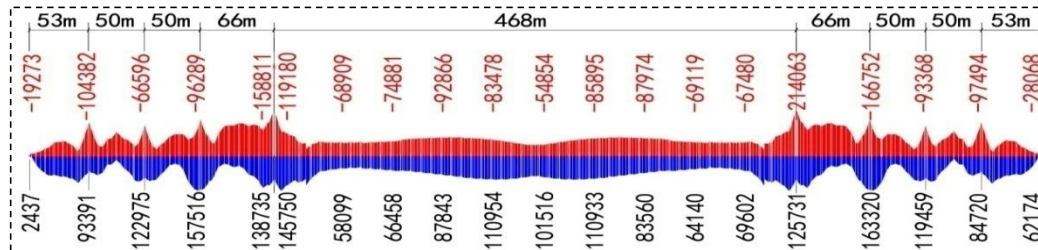
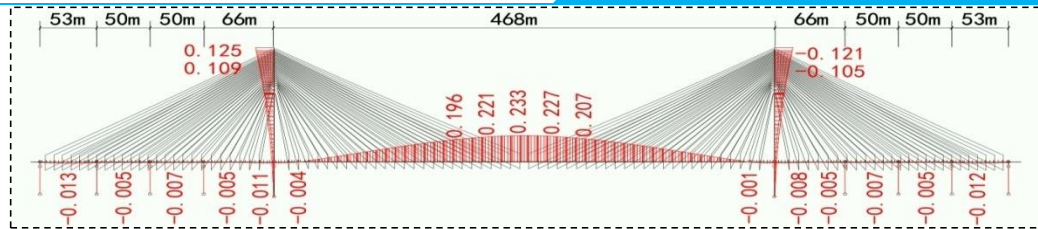
- 合理域具有一定带宽，斜拉索力非唯一性
- 以理想成桥状态为目标的正装施工，考虑收缩徐变等影响，其最终状态必然与理想状态有所差异，只要控制其内力位于合理域即可
- 位移可通过预拱度调整

# 02 体系构建

TI XI GOU JIAN

□ 预加弯矩，建立“塔偏梁拱”合理成桥状态，解决活载大、恒活比小引起的结构受力不均衡难题：

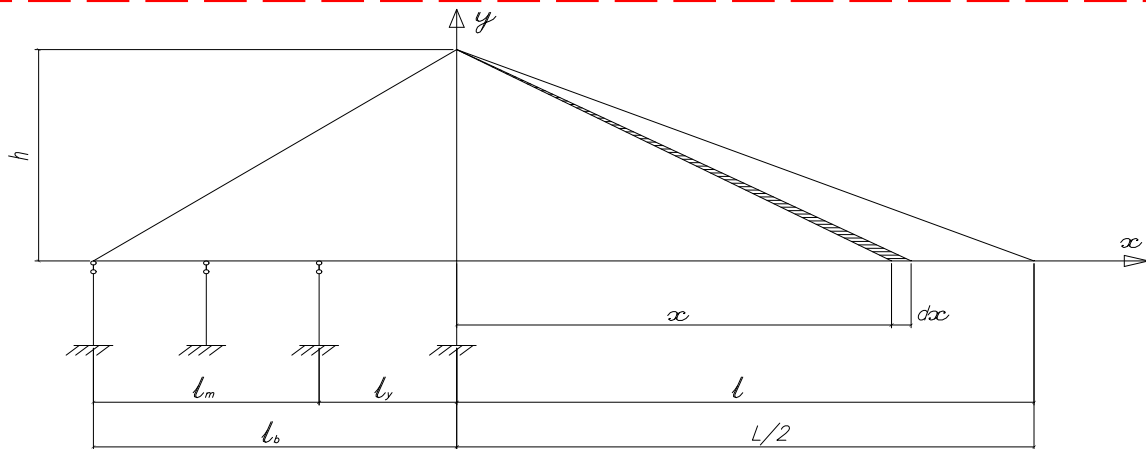
- 首先确定桥塔、主梁的恒载弯矩合理域
- 合龙后调整斜拉索力，使桥塔向岸侧偏移、跨中钢箱梁上拱，以介于恒载弯矩合理域区间作为偏移、上拱控制值，即对塔、梁施加预存弯矩，平衡部分活载效应，减小主力工况下中跨钢箱梁正负弯矩和桥塔下塔柱两侧纵向弯矩差值
- 同时提高索力，减小斜拉索非线性影响，提升结构整体刚度





## 2.2 关键设计技术参数研究

基于索力平衡、斜拉索用量最省原则，以“塔偏梁拱”为目标成桥状态，研究了边跨跨度、中跨跨度、桥面以上塔高，以及边、中跨恒活载集度比等关键设计参数之间的相互关系。



$l_b$ —边跨跨径

$l_m$ —锚固跨

$l_y$ —压重跨

$q_b$ —边跨加劲梁包含二恒在内单位平均重量

$q_m$ —边跨锚固跨增加重量

$q_z$ —中跨恒+活单位长度重量

基本假定：

- (1) 斜拉索呈放射形布置，集中布置在塔顶；
- (2) 斜拉索应力为 $\sigma_0$ ，在 $dx$ 范围内的加劲梁重量由该范围内的斜拉索承担；
- (3) 忽略桥塔纵向水平刚度；
- (4) 中跨加载后，桥塔两侧索力平衡。

□ 中跨斜拉索用量：

$$W_m = \frac{q_m}{\sigma_0} \cdot \left[ l \cdot \left( h + \frac{l^2}{3h} \right) - l_b \cdot \left( h + \frac{l_b^2}{3h} \right) \right] = \frac{q_m}{\sigma_0} \cdot \left[ h(l - l_b) + \frac{1}{3h} (l^3 - l_b^3) \right]$$

□ 边跨斜拉索用量：

$$W_b = \frac{q_b \cdot l_b}{\sigma_0} \cdot \left( h + \frac{l_b^2}{3h} \right) + \frac{q_m}{\sigma_0} \cdot \left[ h(l - l_b) + \frac{1}{3h} (l^3 - l_b^3) \right]$$

令：  $\frac{dW_b}{dl_b} = \frac{dW_z}{dl}$  得到：  $\frac{q_b - q_m}{\sigma_0} \cdot \left( h + \frac{l_b^2}{h} \right) = \frac{q_z}{\sigma_0} \cdot \left( h + \frac{l^2}{h} \right)$

令： $K_b = \frac{q_b}{q_z}$   $K_m = \frac{q_m}{q_z}$ ，得到：

$$l_b = \sqrt{\frac{1}{(K_b - K_m)} \cdot \left( h^2 + \frac{1}{4} L^2 \right) - h^2}$$

$K_b$ —单位长度边跨主梁恒载重与中跨主梁恒载、满布活载之和的比值；

$K_m$ —单位长度边跨主梁压 重与中跨主梁恒载、满布活载之和的比值

得到如下规律：

(1) 得到了边跨跨度、中跨跨度、桥面以上塔高，以及边、中跨恒活载集度比等关键设计参数之间的相互关系。

(2) 有别于公路桥的“高”塔、“大”边中跨比、“大”高跨比的铁路混合梁斜拉桥设计体系；

(3) 同样适用于多塔铁路混合、结合梁斜拉桥；

(4) 实现了铁路混合梁斜拉桥孔跨的快速合理化布置。





## 2.3 关键构造技术研究

### 2.3.1 钢混结合段梯形填充混凝土连接构造

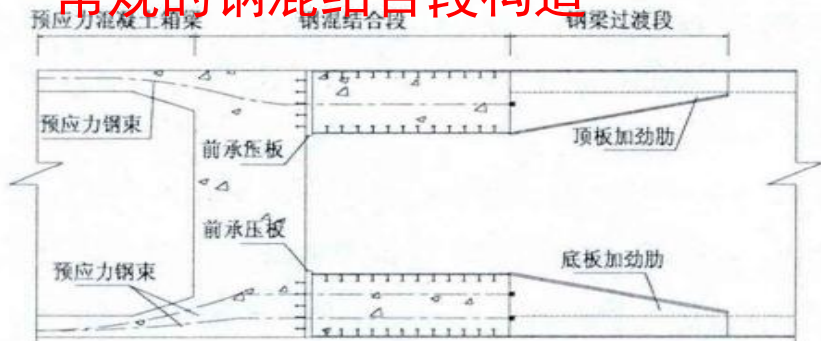
对于铁路桥梁而言，要求：

- 连接可靠
- 传力平顺
- 刚度过渡平缓，避免突变造成的变形差导致长、短波不平顺，避免截面形心轴变化产生的附加弯矩影响连接的可靠性。

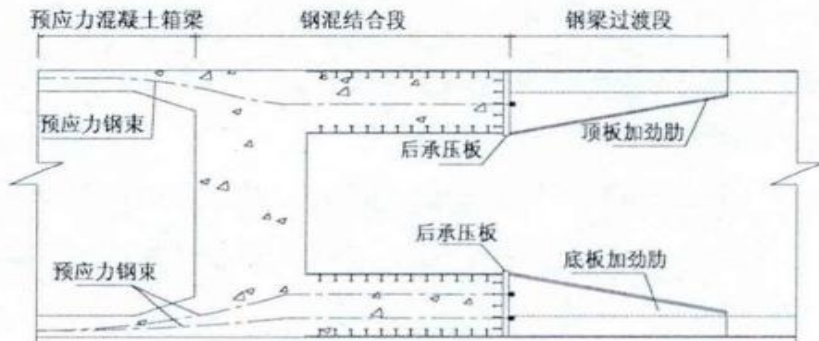
研究提出并采用钢混结合段梯形填充混凝土、控制结合段各截面形心突变、减小截面

附加弯矩影响的工程措施。

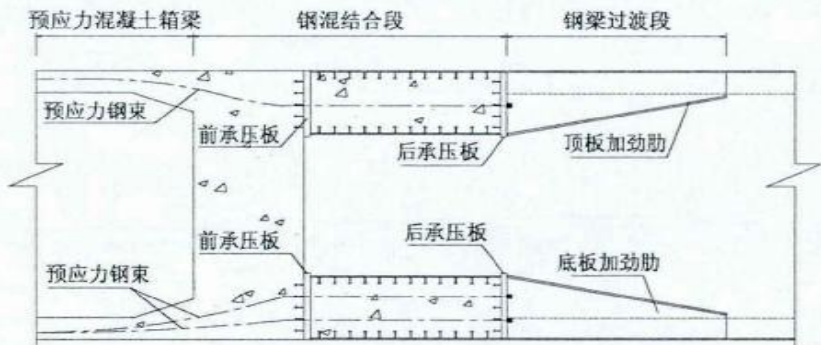
## □ 常规的钢混结合段构造



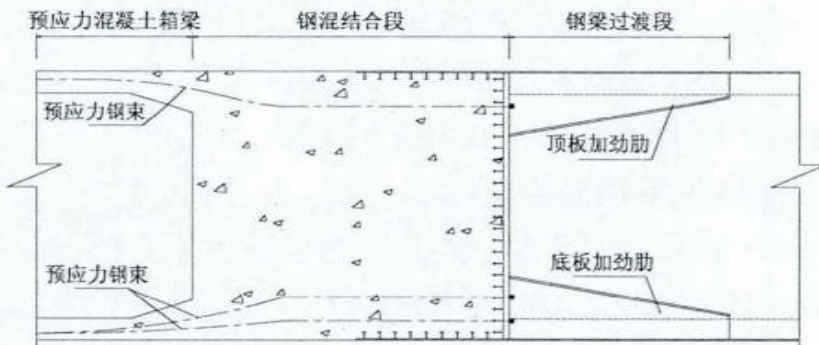
(a) 有格室前承压板方式



(b) 有格室后承压板方式

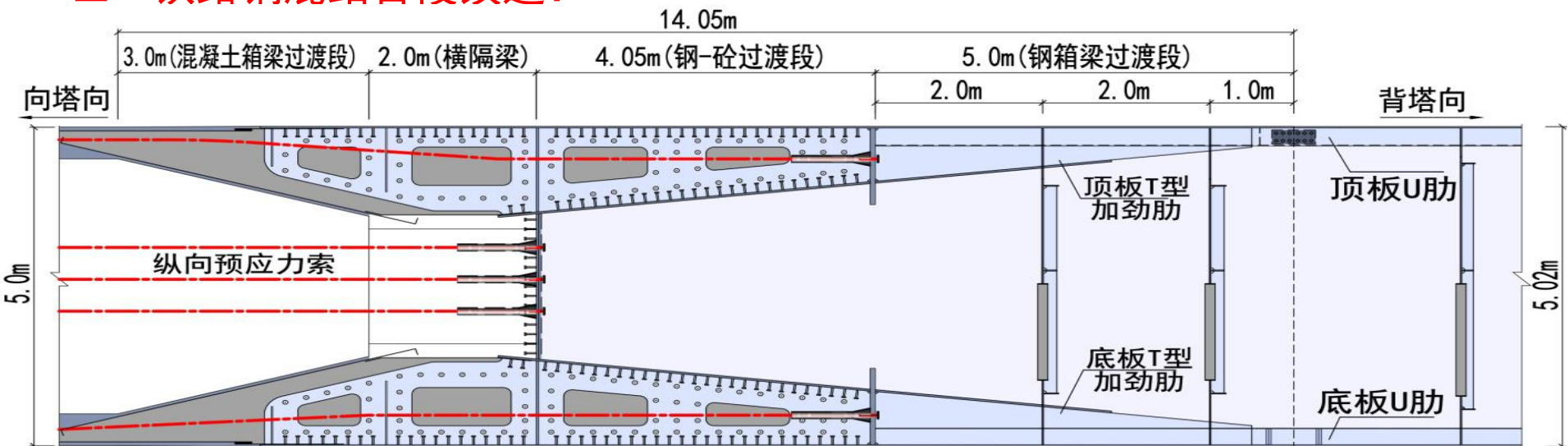


(c) 有格室前后承压板方式



(d) 无格室后承压板方式

## 铁路钢混结合段改进：



与传统钢混结合段相比：一是将钢格室顶底板梯形倾斜布置、加长渐变，其内填充混凝土，控制形心轴变化幅度，保证刚度过渡平顺，减小附加弯矩；二是纵预应力束分散锚固于钢混结合段的前后承压板，实现了混凝土梁与钢箱梁的可靠连接

## 铁路钢混结合段改进：

已甬江桥为例，整个钢混过渡段的截面形心变化平缓，钢箱梁标准截面和混凝土梁截面距上缘的形心轴距离分别为2.05226m和2.13675m，二者仅相差8.45cm。说明由钢箱截面渐变至混凝土截面，截面形心变化平缓，可以减小因连接部位断面形心轴突变引起的附加弯矩。

在成桥轴向力作用下，由于截面形心轴变化引起的附加弯矩占成桥总弯矩的比值，刚度过渡段区段均小于0.5%，钢混结合段含混凝土区段为6.2~11.7%；而附加应力与成桥应力比，刚度过渡段区段均小于3%，钢-混结合段含混凝土区段为2.9~7.2%。



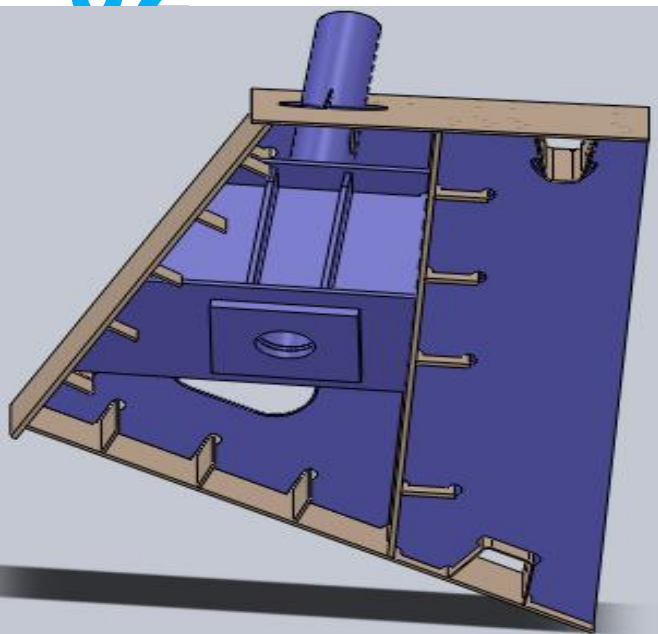


### 2.3.2 新型索梁锚固结构

铁路桥梁恒活比小、抗疲劳性能要求高，例如甬江桥斜拉索活载索力幅高达2868kN，基本与成桥索力相当。



- 传力途径为：斜拉索→锚垫板→锚箱承压板→锚箱支承板→钢梁
- 钢锚箱与加劲梁腹板单侧连接传力，索力与边腹板之间存在一个偏心距，面外弯矩会对主梁边腹板造成一定影响，导致局部应力和疲劳应力幅过大、超限。

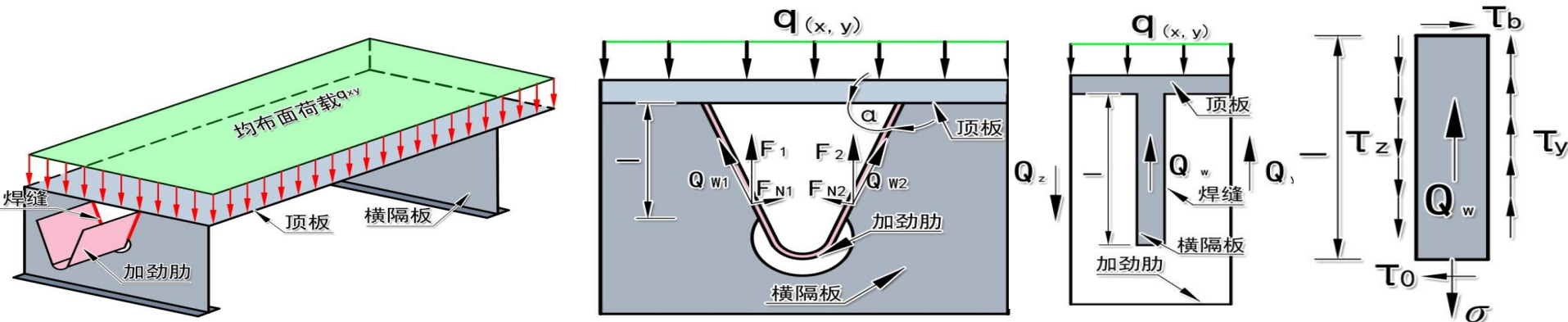


**双挑式索梁钢锚箱：**对于双线或多线铁路，将风嘴板加厚，使之参与结构整体受力，形成由边腹板、风嘴板共同承担索力的双挑式锚固结构，充分利用桥面宽度，集结构与风嘴功能于一体，双侧焊缝传力，减小了索力偏心矩及焊缝剪应力。



### 2.3.3 V肋加劲铁路正交异性钢桥面结构

基于弹性支撑梁理论与闭口薄壁杆件理论，推导加劲肋与横隔板连接处沿焊缝长度剪应力  $\tau_i$  与法向应力  $\sigma_i$ 、焊缝端部加劲肋疲劳敏感部位面内疲劳应力  $\sigma$  解析公式。



$$\tau_i = Q_{wi} / (2l \cdot h_f / \sin\alpha + t_1 \cdot h_f) = F_i \sin\alpha / (2l \cdot h_f / \sin\alpha + t_1 \cdot h_f)$$

$$\sigma_i = F_{Ni} / (2l \cdot h_f / \sin\alpha + t_1 \cdot h_f) = F_i \cos\alpha / (2l \cdot h_f / \sin\alpha + t_1 \cdot h_f)$$

$$\sigma = \frac{Q_y - Q_z}{2t_1(2h_f + t_1)} \left[ \sin\alpha + \frac{l^2(1-3y_c)t_1}{3I_x \sin^2\alpha} \right] - \frac{q(x, y) \sin\alpha bdz}{2t_1(2h_f + t_1)}$$

揭示了铁路正交异性钢桥面结构的疲劳影响因素及规律：

(1) 加劲肋与横隔板的焊缝长度增加、加劲肋腹板与顶板内夹角减小、横隔板厚度增加均能降低敏感点的疲劳应力。

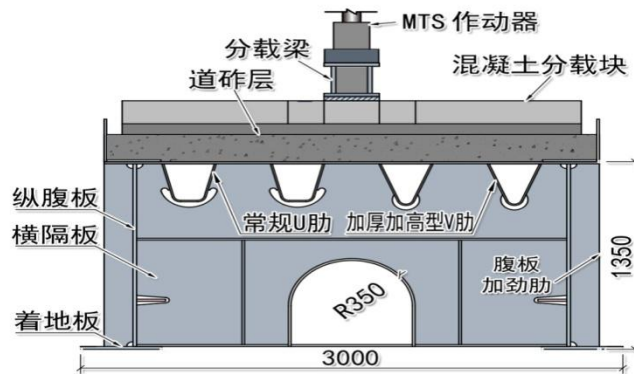
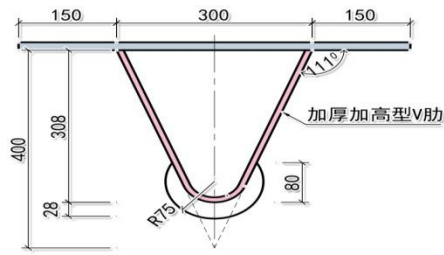
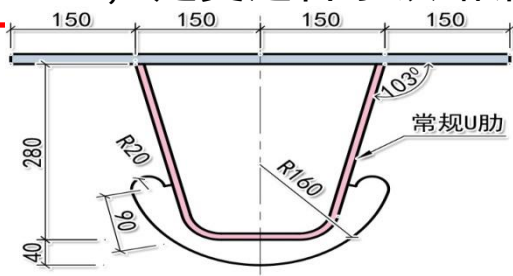
(2) 过焊孔尺寸的减小提高了横隔板对加劲肋的竖向支撑刚度，改善了敏感点的疲劳性能。

该解析公式的计算结果与有限元分析、疲劳加载试验吻合良好，误差控制在5%~10%。



首创加厚加高型V肋，与面积、惯性矩相等的常规U肋相比：V肋腹板高度增加10%、与横隔板焊缝长度增加23.4%，圆弧形过焊孔面积减小20.9%。

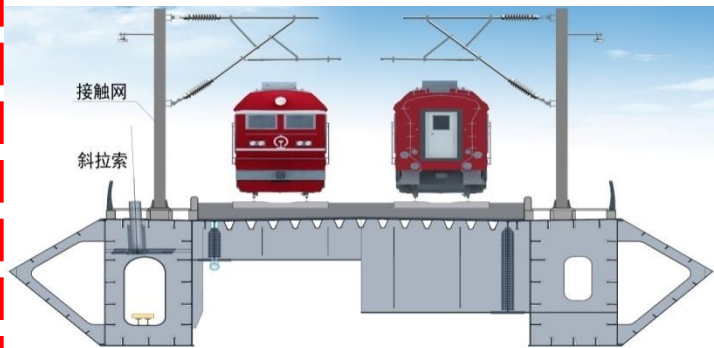
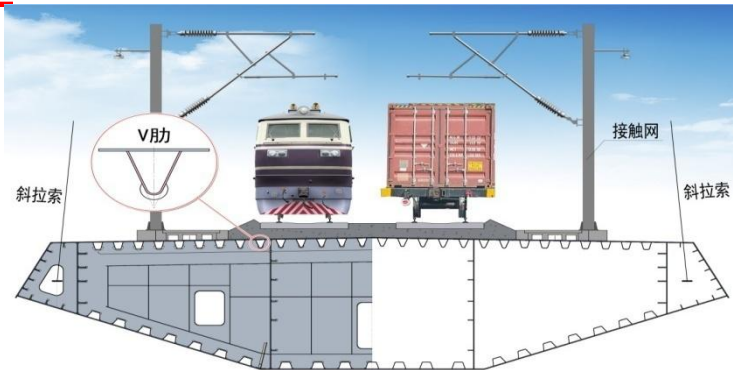
理论分析及560万次足尺疲劳对比试验表明：V肋较U肋的疲劳敏感点应力幅降低5%~12%，是更适合于铁路钢箱梁的加劲肋形式。





## 2.4 钝形钢箱梁气动选型

- 铁路混合梁斜拉桥的宽高比 $B/H$ 较小，截面呈明显钝形。
- 竖桥向抗弯惯矩及抗扭惯矩较大，竖向弯曲和扭转基频均较高，颤振、驰振的临界风速较大。
- 钢箱梁质量和阻尼相对边跨混凝土梁轻且小，更容易发生明显的涡激共振现象。
- 在轨道静态不平顺及外在风荷载激励引起的动态不平顺相互叠加影响，影响行车安全性及乘坐舒适度，这也是铁路混合梁斜拉桥需要关注的特殊之处。



### □ 涡激共振竖向振幅：

与列车活载挠度相比，竖向涡激共振振幅值一般较小，对轨道的高低几何状态影响相对有限，可视为桥梁变形引起的轨道不平顺，作为系统激励源进行输入。

### □ 公路规范规定的扭转涡激共振的允许振幅及局限性：

我国公路规范： $\theta_c = [\theta_a] = \frac{4.56}{B \cdot f_c}$ ，与桥面宽度、扭转振动基频成反比。

仅适用于跨径小于200m的公路桥梁，对于铁路桥梁而言，扭转涡振实质上是引起同一轨道横截面上左右钢轨顶面产生高度差，即改变了轨道的水平几何状态。

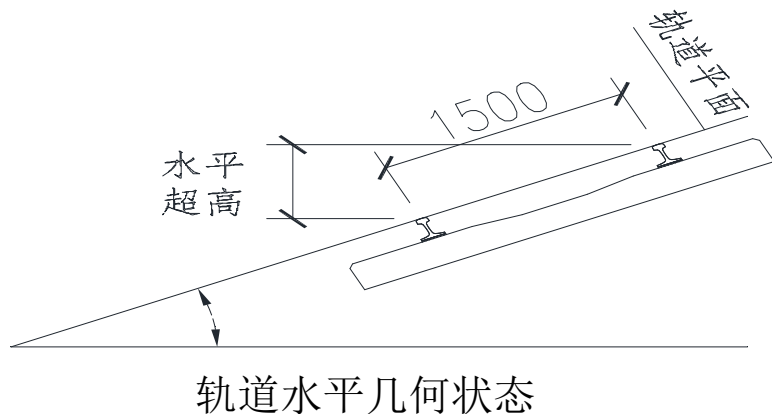


表2 轨道水平几何状态幅值幅值评价允许偏差验收管理值

线路设计速度等级 (km/h)	160 ≤ v ≤ 250	250 < v ≤ 350
轨道水平几何状态 (mm)	4	3

## 扭转涡激共振的允许振幅：

建议铁路钢箱梁设计时，成桥状态按轨道几何状态幅值评价允许偏差验收管理值、公路规范规定扭转涡激共振的允许振幅二者取小值，施工状态可参考公路规范规定进行结构气动选型，并开展风车桥振动耦合分析予以验证。

表 3 潭江特大桥风嘴模型参数及试验结果

参数	竖向(mm)	扭转 (°)
频率	3.3875	7.286
阻尼 (%)	0.49%	0.46%
风速比	7.391	7.381
容许值	72mm	公路规范 0.251°/动态验收 0.1528°



## 2.5 经济性

项目		混合梁斜拉桥	钢桁梁斜拉桥	
技术指标	竖向挠跨比	钢桁梁整体刚度稍大；混合梁有条件进一步优化；混合梁对温度敏感		
	梁端转角 (rad)	混合梁为整体截面，转角更小		
	车桥动力响应	脱轨系数	两方案均能满足安全性和舒适性要求，指标基本相当	
		轮重减载率		
平稳性指标				
设计	结构新颖，结合段构造复杂	有成熟的设计经验		
制造	制造工艺均成熟，桁梁杆件制造精度要求较高			
安装	大节段焊接或栓接，混合梁线形易于调整			
养护维修	钢桁梁的杆件数量多，养护维修工作量稍大			
景观协调性	梁高矮，与下游公路桥的景观协调性相对较好	梁高较高，与公路桥的景观协调性稍差		
施工工期	两个工作面，工期略短	一般4个节段，拼装工期稍长		
主要工程数量	桥塔	钢桁梁自重大，桥塔工程量略多		
	加劲梁	边跨混凝土主梁，混合梁较钢桁梁钢材大大减少（7821t、22549t）		
	斜拉索	数量基本相当		
	下部结构	混合梁辅助墩较多		
建筑工程费	1.0（5.109亿元）	1.2（6.308亿元）		

## 2.6 推广应用



序	桥名	桥式结构	技术特点
1	宁波铁路枢纽北环线甬江特大桥	主跨468 m双塔混合梁斜拉桥	国内铁路桥上首座混合梁斜拉桥。2014年12月建成通车。
2	贵广南广铁路穗盐路特大桥	2×175 m四线铁路弯斜拉桥	四线铁路，弯斜拉桥，2014年底建成通车。
3	江汉铁路岳口汉江特大桥	主跨260 m单线独塔斜拉桥	单线货运铁路。已建成，预计2018年年底通车。
4	深茂铁路潭江特大桥	主跨256 m独塔混合梁斜拉桥	设计时速200km/h，边跨钢箱梁大节段吊装，高强螺栓连接。2018年6月通车。
5	昌赣客专赣江特大桥	主跨300 m双塔混合结合梁斜拉桥	首座铺设无砟轨道的大跨度斜拉桥，边跨采用混凝土梁。在建。
6	福厦高铁乌龙江特大桥	主跨432 m四线铁路斜拉桥	国内外首座高低塔四线铁路斜拉桥。在建。
7	广州南沙港铁路龙穴南特大桥	主跨448 m双塔混合梁斜拉桥	钢箱梁现场节段栓焊结合，施工速度快，结构线形好。在建。
8	广州南沙港铁路西江特大桥	主跨600 m双塔不对称混合梁斜拉桥	国内最大跨度的双线铁路桥梁。在建。

过渡页

Transition

技术特点

体系构建

典型工程

结 语

## 3.1 宁波铁路枢纽北环线甬江特大桥



孔 跨：(53+50+50+66+468+66+50+50+53) m

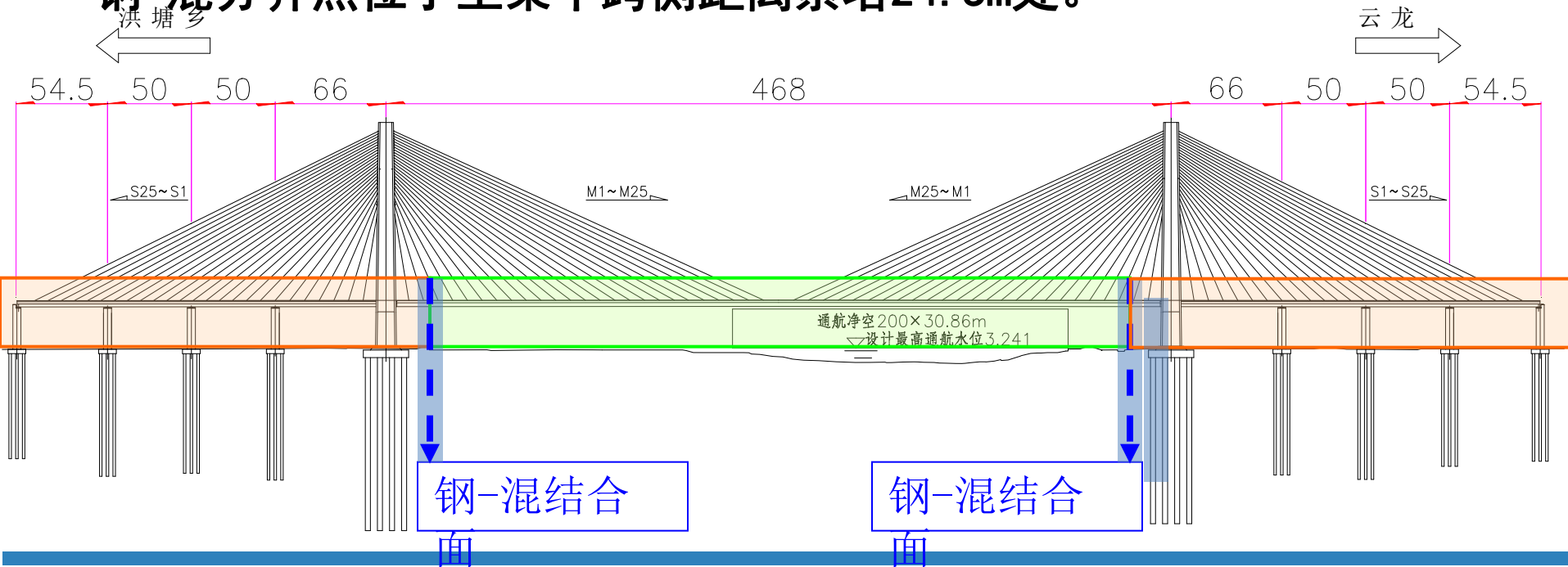
活载类型：双线，中—活载

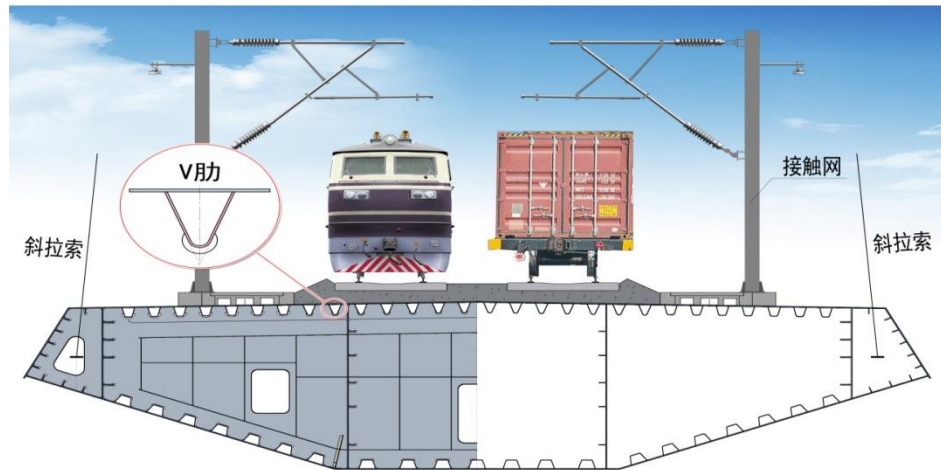
结构体系：半漂浮

建成时间：2014年



- 边跨及部分中跨主梁为预应力混凝土箱梁，其余中跨主梁为钢箱梁。  
钢-混分界点位于主梁中跨侧距离索塔24.5m处。





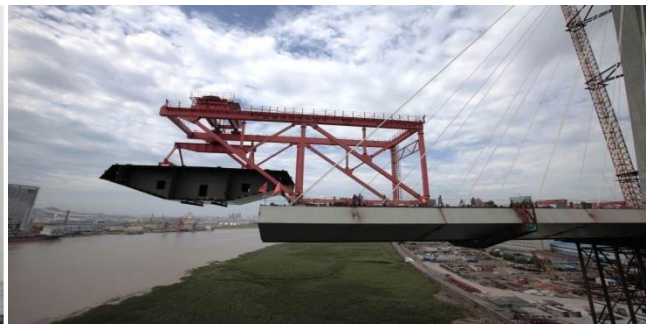
提梁门架系统

钢箱梁



钢箱梁

轮轨式运梁车



边跨提梁

梁上运梁

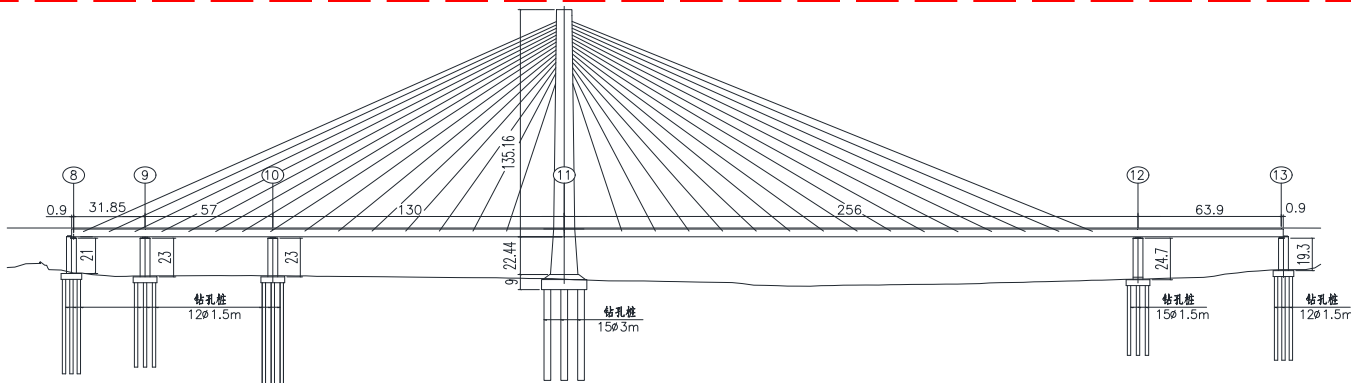
旋转拼装

## □ 技术特点及创新性:

- (1) 首次建立了铁路混合梁斜拉桥“塔偏梁拱”理想成桥状态。
- (2) 钢混结合段采用梯形填充混凝土连接构造技术。
- (3) 创新采用双挑式钢锚箱结构。
- (4) 首创加厚加高型V肋。



## 3.2 独塔混合梁斜拉桥—深茂铁路潭江特大桥

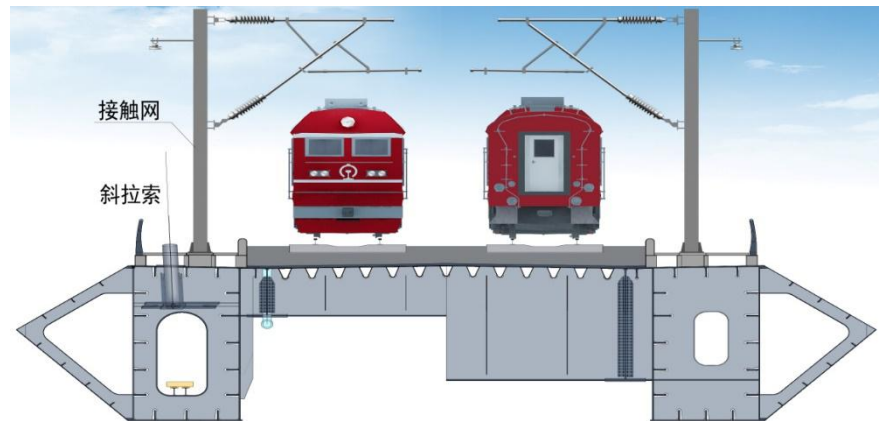
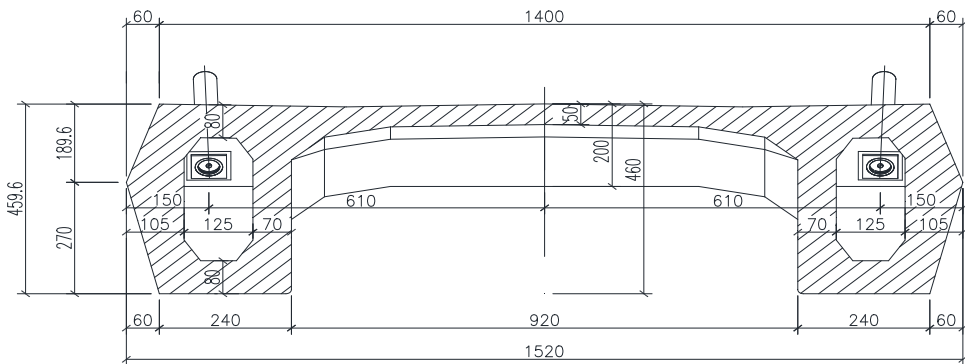


**孔 跨：**（ 31.8+57+130+256+63.9 ） m

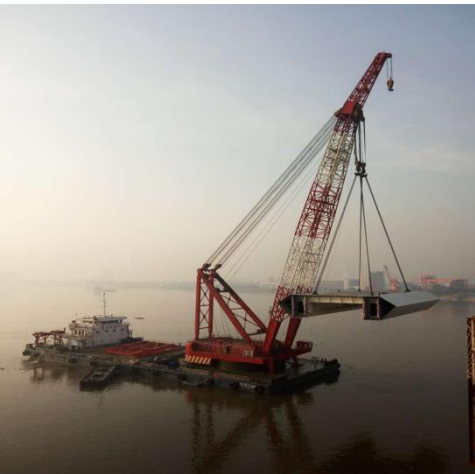
**活载类型：**双线，中—活载，客货共线

**结构体系：**集固定支座、熔断式黏滞阻尼器、横向E型钢阻尼器于一体的综合抗震体系

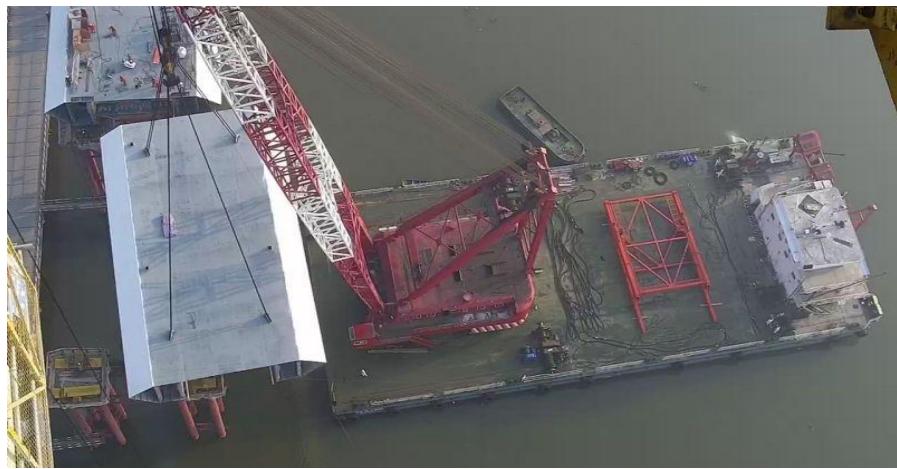
**建成时间：**2018年7月1日通车运营



- 混凝土梁采用双箱边主梁，截面全宽14 m，中心处梁高4.6 m。
- 钢箱梁由边箱双主梁、正交异性钢桥面板与密横梁组成，桥面宽14 m，梁高4.6 m，两侧各设2.6 m宽风嘴。边箱梁之间每隔3 m设一道倒T形横梁，高1.5 m，墩顶设箱形横梁，高3.4 m。



钢箱梁大节段吊装



钢箱梁大节段拼装



钢箱节段高强螺栓连接

## □ 技术特点及创新性:

1

国内大跨度铁路首次采用双主梁混合梁斜拉桥，中跨竖向挠跨比突破 $L/600$ 。双主梁主要承担纵向荷载，桥面列车活载由密横梁传递至双主梁，传力途径清晰，充分发挥了构件各自的承载性能，钢梁段用钢量仅 $15.7\text{ t/m}$ ，技术经济性良好。

2

首次采用集固定支座、熔断式黏滞阻尼器、横向E型钢阻尼器于一体的综合抗震体系。各抗震体系分工明确、安装空间小、工程成本低，较好地实现了三级设防思想。

3

提出了铁路桥梁扭转涡激共振允许幅值控制标准，可供相似加劲梁抗风气动选型参考。

4

国内铁路首次采用钢箱梁大节段架设及现场高强螺栓连接技术，钢梁架设耗时缩短 $2/3$ ，显著加快了施工进度，保证了线形和现场焊接施工质量。

### 3.3 四线铁路曲线混合梁斜拉桥—贵广南广铁路跨穗盐路特大桥



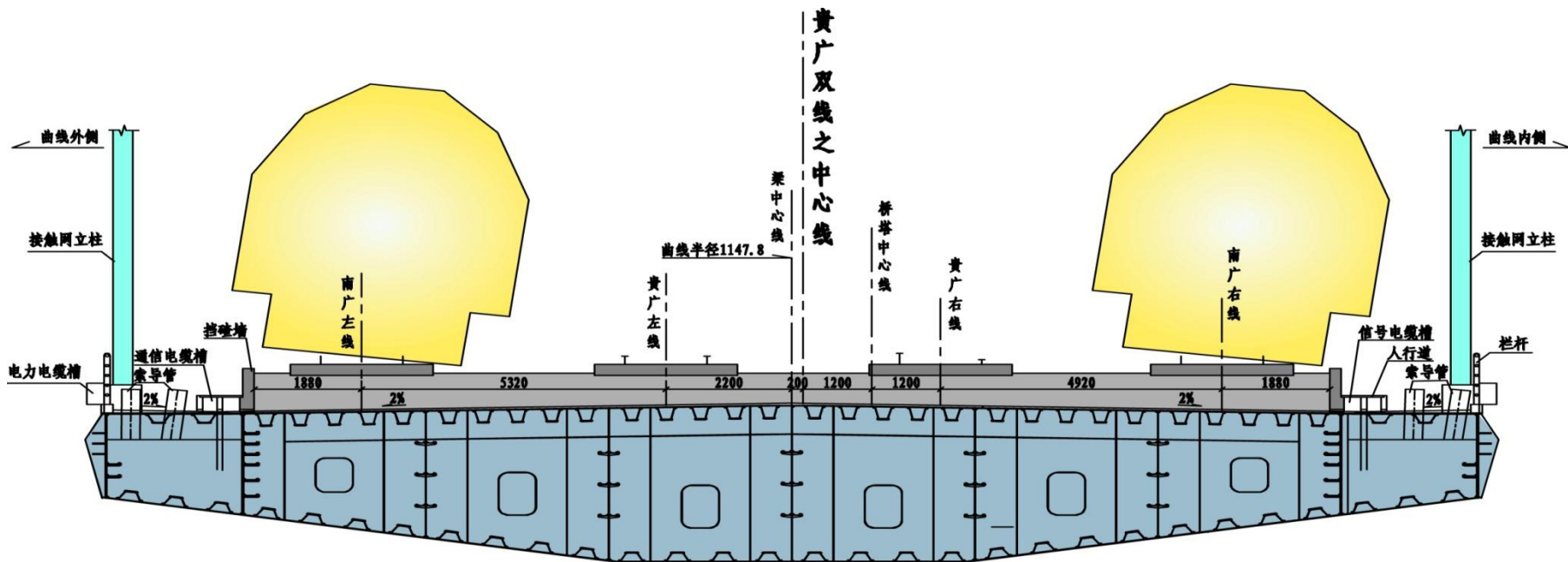
**孔 跨：** (32+175+175+32) m

**活载类型：** 四线，中—活载

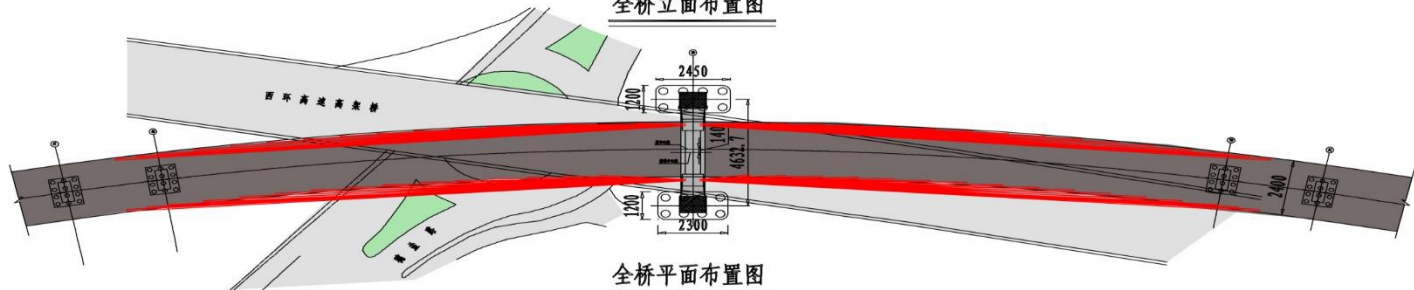
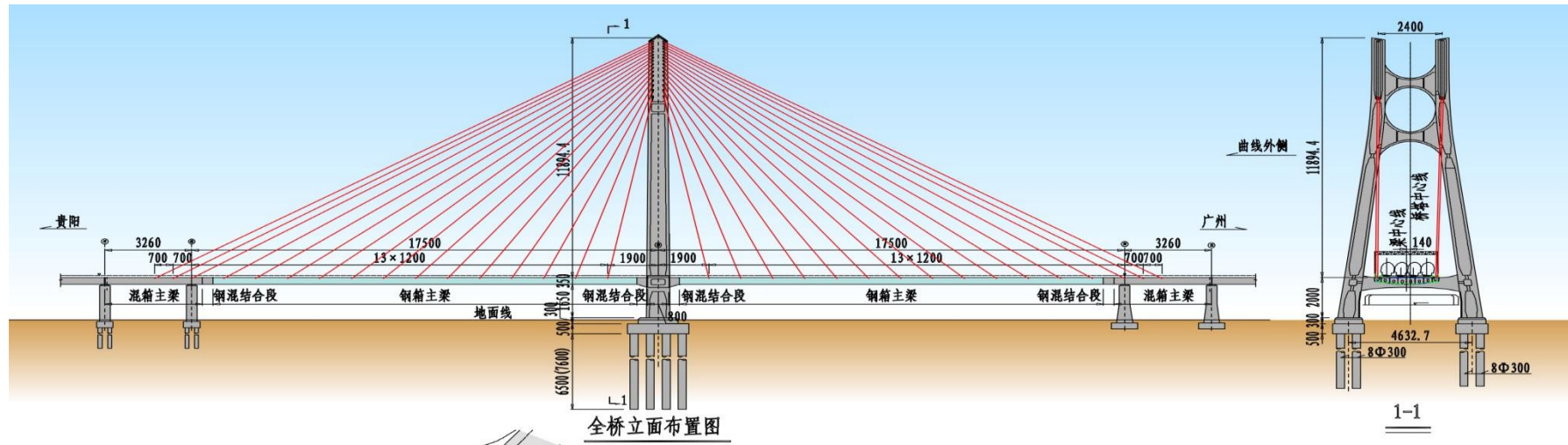
**结构体系：** 塔梁固结

**建成时间：** 2014年12月通车运营





## 钢箱梁构造及桥面布置



## 主桥布置图

## □ 技术特点及创新性：

1

四线铁路小半径曲线桥的桥塔、边墩及辅助墩的横向受力特性差异较大，采用墩塔梁固结、空间双索面左右侧不对称索力等措施，增强结构的抗弯、抗扭刚度。

2

通过对H型桥塔及边墩、辅助墩设置横向预偏心，塔柱间设置增强型板，分离式桥塔基础差异设计，增大了桥塔横向刚度，改善了四线曲线钢箱混合斜拉桥的受力性能。

3

采用双向活动支座与边墩E型加横向限位销钉的抗震技术，较好地适应了减隔震需求及四线铁路宽桥面横向温度变形需求。

03

典型工程

DIAN XIN GONG CHENG

其他工程：

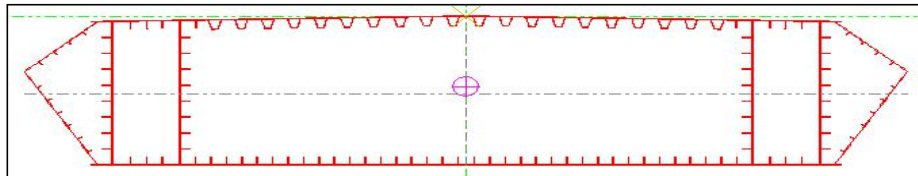
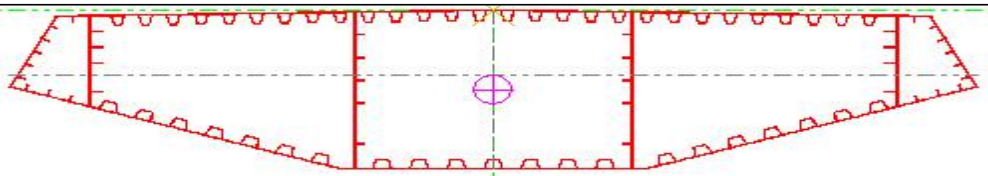
广州南沙港铁路西江特大桥主跨600m双线铁路混合梁斜拉桥，施工中





截面类型	A (m <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> (m <sup>4</sup> )	E <sub>y</sub> (m)
传统截面(1)	1.58	57.17	4.159	1.578
内置边纵梁截面(2)	1.559	59.83	5.07	2.422
(2)/(1)	98.7%	104.7%	121.9%	-

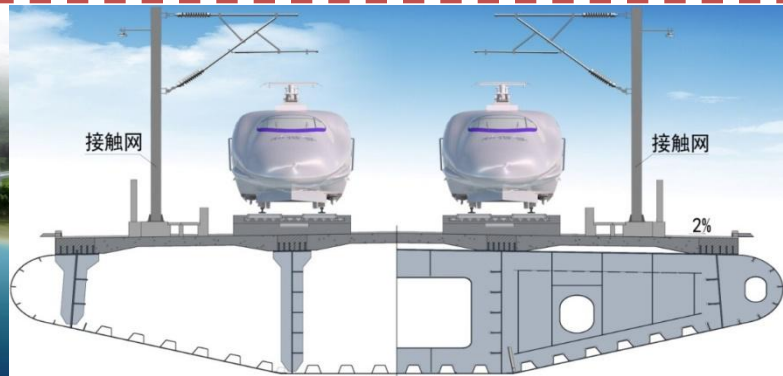
广州南沙港铁路龙穴南特大桥主跨448m双线铁路混合梁斜拉桥，施工中



## 福厦客专乌龙江特大桥，高低塔斜拉桥，主跨432m，四线，施工中



# 昌吉赣客专赣江特大桥，跨度（35+40+60+300+60+40+35）m，350km/h，无砟轨道桥梁，施工中

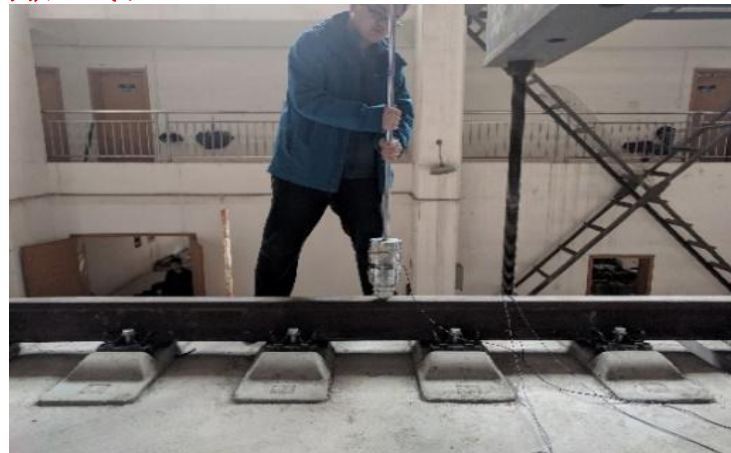


梁型	钢梁重	桥面板重	二恒重	恒载总重	挠跨比
组合梁	12.5	16.9	15.1	44.5	1/880
钢箱梁	16.4	0	15.1	31.5	1/691
钢桁梁	17.8	0	15.1	32.9	--





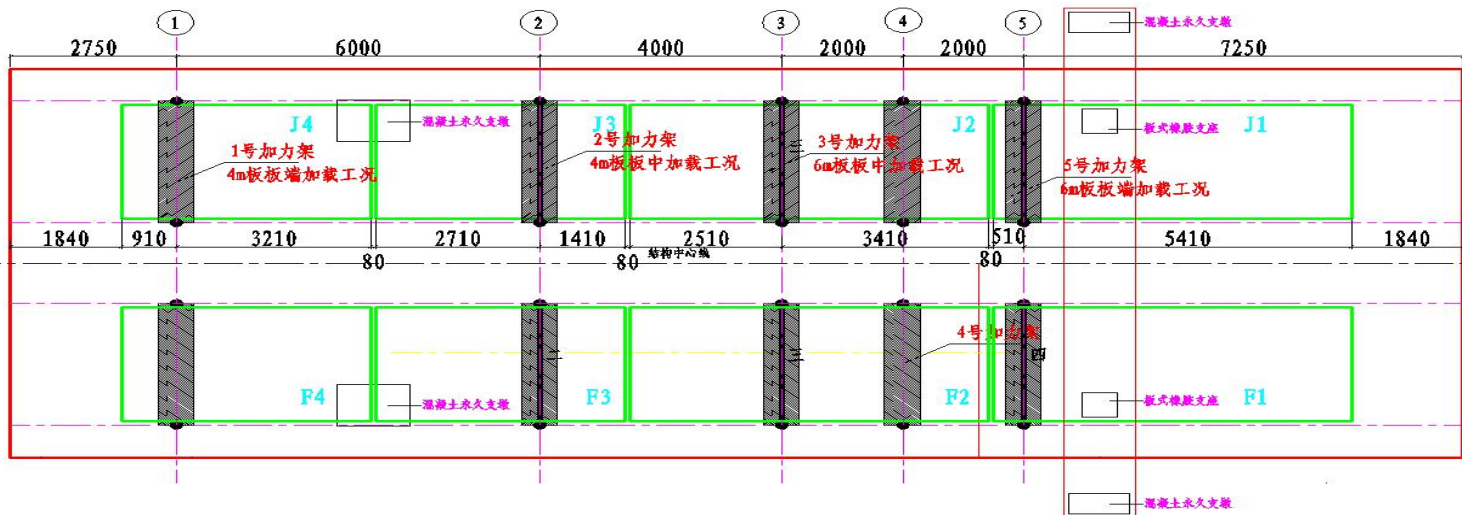
## 无砟轨道减隔振试验



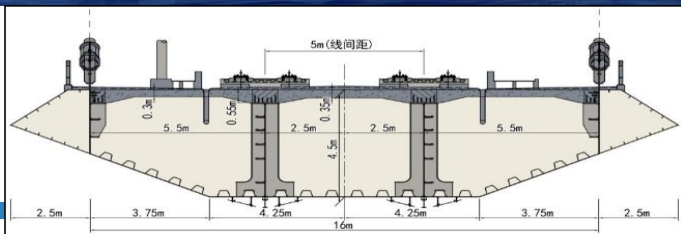
## 推板试验



### 无砟轨道轴载试验



4m长板与6m长板  
试验加载点布置图



福厦高铁泉州湾大桥主跨400m、安海湾大桥主跨  
300m跨海斜拉桥，在建

过渡页  
Transition

技术特点

体系构建

典型工程

结 语

# 04 结 语

## 铁路大 跨度混 合梁斜 拉桥结 构体系 构建

建立了适应铁路混合梁斜拉桥“塔偏梁拱”的合理成桥理论，解决了铁路活载大、恒活比小引起的结构受力不均衡性难题

确定了梁、塔、索关键设计参数及其影响规律，揭示了结构受力行为

采用钢混结合段梯形填充混凝土连接构造技术，解决了铁路荷载作用下结合段刚度过渡平顺性技术难题，确保了传力可靠性及行车安全性

首创双挑式钢锚箱、外置式锚拉箱等索梁锚固结构，实现了多路径传力，改善了铁路混合梁斜拉桥巨大活载索力幅作用下的锚固结构疲劳问题

提出铁路正交异性钢桥面板的疲劳应力解析公式，揭示了疲劳影响因素及规律，首创加厚加高型V肋，改善了铁路钢桥面结构疲劳性能

提出了钝形钢箱梁涡振扭转振幅限值标准，为气动选型提供参考

成果推广应用用于主跨256~600 m等多座不同设计速度目标值的重大铁路项目关键控制性桥梁，形成了铁路混合梁斜拉桥建造成套技术，是大跨度铁路斜拉桥采用钢桁梁之外的又一创新技术体系。



汇报结束 谢谢

