

# 悬索桥锚碇可更换无粘结预应力锚固系统试验研究

徐国平<sup>1</sup> 刘明虎<sup>1</sup> 黄芳玮<sup>2</sup> 苏均<sup>2</sup>

(1.中交公路规划设计院 100010 2.柳州OVM机械股份有限公司 545005)

**摘要:**本文针对我国目前悬索桥锚碇预应力锚固系统存在耐久性差的问题,提出了耐久性好、更加安全可靠的,具有“可检测”、“可更换”特点的新型油脂防腐预应力锚固系统。该系统经过了动静载及变形试验,安装、换油、换预应力钢束施工工艺试验,研究成果应用于悬索桥锚碇工程。

**关键词:**锚碇 可更换 无粘结 预应力锚固系统 研究

## 1. 锚固系统现状及发展趋势

悬索桥锚碇锚固系统分为钢框架锚固系统和预应力锚固系统两种类型。国内外早期的悬索桥多采用钢框架锚固系统,如美国华盛顿大桥、金门大桥、新港桥、日本东京港联络桥、下津井桥、南北备赞桥、广东虎门大桥、汕头海湾大桥等。钢框架锚固系统全部由型钢构成,主缆索股与型钢拉杆相对应,整个钢框架浇筑在锚块混凝土内,该系统用钢量大,施工复杂,逐步被预应力锚固系统所代替。预应力锚固系统由预应力和索股连接件构成,主缆索股通过连接件与预应力筋相连将力传给锚块,该系统用钢量少,布置灵活,施工方便。近期修建的悬索桥大多采用预应力锚固系统。

预应力锚固系统分为预应力钢绞线和预应力粗钢筋两种体系,两者均通过张拉预应力筋在锚块内部储备预压力,虽然受力机理相同,但由于材料不同,两者在布置、锚具、防腐方面存在一定差异。预应力钢绞线系统布置灵活,施工方便,应用广泛。应用预应力钢绞线锚固系统的桥梁有瑞典霍加库斯腾桥、丹麦大贝尔特桥、江阴长江大桥、厦门海沧大桥、宜昌长江大桥、润扬长江大桥、香港青马大桥、重庆鹅公岩大桥等,国外应用预应力粗钢筋的桥梁有英国塞文桥、土耳其博斯普鲁斯大桥。国内预应力粗钢筋系统由于粗钢筋材料及制作工艺

尚须研究解决,目前国内尚无在大型悬索桥中使用的例子。

预应力结构中材料的防腐和耐久性问题一直是备受关注而棘手的问题。国内外预应力结构中因预应力材料腐蚀而导致结构损害的例子很多,1950~1977年世界范围有28例建筑因腐蚀破坏,1978~1982年50例中有10例由预应力筋腐蚀导致脆性破坏,1983~1988年仅美国与加拿大就有近100例腐蚀破坏。

目前采用的预应力锚固系统多为有粘结不可更换的预应力钢绞线锚固体系,钢绞线采用压注水泥浆防腐,在后期运营过程中无法检查、检测和更换。跨越江河的悬索桥,由于桥下通航净空不高,锚碇锚固系统一般都位于地下水位以下,预应力锚固系统长期处于潮湿的环境。国内有一些桥梁因设计或施工原因出现了管道漏灌浆或灌浆后有泌水干缩现象,导致预应力管道出现渗水现象。预应力钢绞线的防腐问题十分突出,已经严重影响到桥梁结构的安全。

锚固系统是悬索桥的生命线工程。预应力锚固系统采用防腐性能好,可检测、更换的无粘结预应力体系,是悬索桥锚碇锚固系统的发展方向。这种更加安全可靠的新型预应力锚固系统应用于近期修建的悬索桥锚碇,并逐渐推广使用,将产生很大的直接和间接效益。

## 2. 研究内容及实现途径

### 2.1 锚固体系

#### 2.1.1 可更换新型锚具的开发及研究

#### 2.1.2 系统静载、疲劳试验

#### 2.1.3 连接器平板变形试验

### 2.2 防腐系统

#### 2.2.1 防腐材料性能研究

#### 2.2.2 锚固系统施工工艺试验

#### 2.2.3 锚固系统防腐油、预应力钢束更换工艺试验

### 2.3 实现途径

实现途径如下:

产品设计——→试验研究——→实桥应用——→推广使用

## 3. 锚固系统方案研究

### 3.1 工程概况

本研究课题依托工程为“武汉阳逻长江公路大桥锚碇工程”。该桥是京珠、沪蓉国道主干线武汉绕城公路东北段的跨江工程,是国家“十五”重点建设项目。主桥采用布跨250+1280+440 m的双塔单跨悬索桥。南、北两个锚碇均为重力式锚,锚固系统采用预应力锚固系统。主桥桥型布置见图1,锚碇锚固系统总体布置见图2。

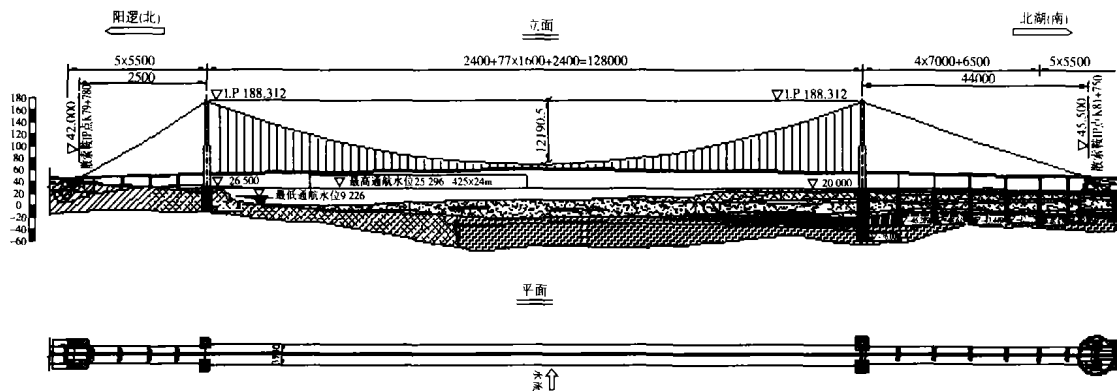


图1 主桥桥型布置

锚碇锚固系统在水平、竖向两个面内均呈辐射形布置,拉杆方向与其对应的索股方向一致,前、后锚面均为与中心索股垂直的平面,预应力钢束沿索股发散方向布置。拉杆方向误差用球面垫圈和内球面垫圈予以调整。

索股连接构造分单索股锚固单元和双索股锚固单元两种类型。单索股锚固单元由2根拉杆和单索股联结器构成,双索股锚固单元由4根拉杆和双索股联结器构成。单索股采用15-16规格锚具锚固,双索股采用15-31规格锚具锚固。

### 3.2 技术指标

锚固系统锚下混凝土采用30号混凝土,锚碇预应力锚固系统分为可更换构件和不可更换构件两部分。不可更换构件按等强度设计原则,与索股有同等的安全系数,可更换的预应

力钢束施加的有效力不低于索股拉力的1.2倍。

3.2.1 拉杆组装件的静载抗拉强度的安全系数 $K \geq 2.5$ ;

3.2.2 拉杆组装件的疲劳性能在上限荷载977.3kN、下限荷载804.8 kN,经200万次周期循环加载后,拉杆、螺母应无裂缝,螺母不松动,螺纹不产生变形;

3.2.3 连接器在索股设计荷载的120%作用下,最大变形量 $\leq 0.5\text{mm}$ ;

3.2.4 预应力钢绞线锚具组装件静载锚固效率系数 $n_A \geq 95\%$ ,破断总应变 $\epsilon_u \geq 2\%$ ;

3.2.5 预应力钢绞线锚具组装件的疲劳性能,在应力上限为 $0.65\sigma_b$ ,应力幅130 MPa的条件下,经200万次周期循环加载,预应力钢绞线的破坏面积不大于其总积的5%。

3.2.6 密封试验技术要求:预应力管道油压

上升到2Mpa后保压5小时，要求油液无泄漏。

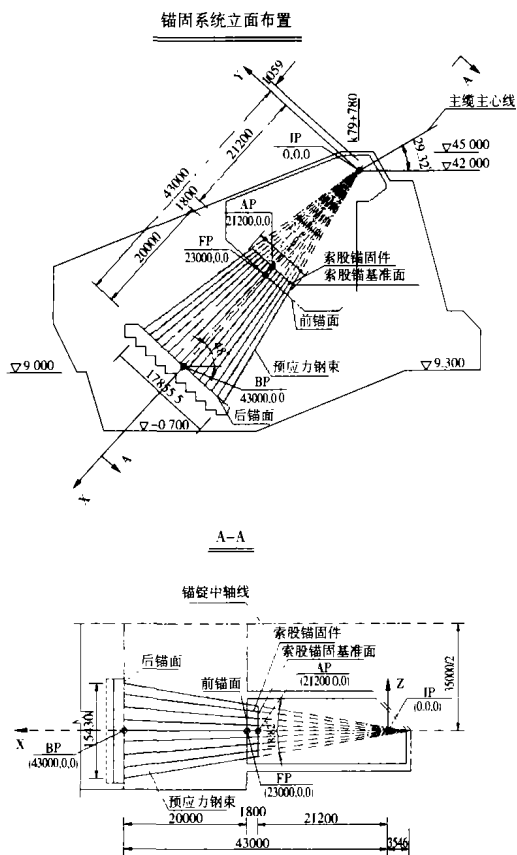


图2 北锚碇锚固系统总体布置

3.2.7 油脂的指标要求见表1。

表1

检测项目	标准指标	实验方法
工作锥入度, 1/10mm	--	GB/T 269
水分, % 不大于	0.1	GB/T 512
钢网分油 (100℃, 24h)	8.0	SH/T 0324
腐蚀试验 (45# 钢片, 100℃, 24h)	合格	SH/T 0331
蒸发量 (99℃, 22h) %, 不大于	2.0	GB/T 7325
低温性能 (-40℃, 30min)	合格	SH 0387
湿热试验 (45# 钢片, 30d) 级不大于	2	GB/T 2361
盐雾试验 (45# 钢片, 30d) 级不大于	2	SH/T 0081

### 3.3 锚固系统构造与特点

#### 3.3.1 锚固系统构造

锚固系统构造见图3。锚固系统主要受力构件为：拉杆、可换式预应力体系、连接器。

##### (1) 拉杆组件

拉杆与主缆锚头的连接由拉杆上的锁紧螺母、六角螺母及平垫圈来固定，与连接器平板的连接是通过球面垫圈、球面螺母以及锁紧螺

母来固定。

拉杆、螺母的螺纹均采用军用MJ标准，以提高拉杆的疲劳强度，连接器平板处采用球面螺母和球面垫圈，以调节设计、制作、安装上的误差，使拉杆中心与索股轴线在一直线上，以避免由于偏心引起的次应力，为防止螺母在动载下的松动，设计时加设了锁紧螺母。拉杆采用40CrNiMoA，长3.1m，直径85mm，螺母、垫圈采用40Cr。

##### (2) 连接器

连接器包括连接平板及连接筒，既是预应力锚头下的垫板又起连接拉杆作用，连接器采用45号优质碳素结构锻钢。

##### (3) 可换式预应力体系

预应力体系由预应力钢绞线、预应力锚具、夹片放松装置、预埋钢管、防腐油、防护罩、铜垫圈、油面观察管等组成。采用符合美国 ASTM A416-92标准270级，公称直径15.24mm，标准强度1860Mpa的低松弛预应力钢绞线，预应力管道采用电焊钢管。预应力钢绞线在必要时可进行单根检测、更换，保证锚碇预应力锚固系统的长期有效性。

#### 3.3.2 锚固系统的特点

(1) 拉杆及预应力筋结构简单、受力明确、用钢量省、安装方便；

(2) 预应力管道内灌注液态油脂，并设置油面观察管，施工质量容易保证，检查方便直观；

(3) 预应力管道内防腐油脂性能可随时检测、更换，确保了防腐的长效性；

(4) 预应力钢绞线直线布置，防腐介质为油脂，可单根更换；

(5) 预应力体系设置监测系统，随时监测应力变化。

#### 3.4 锚固系统防腐研究

首先，在前锚室内设抽湿设备，使锚室内相对湿度不大于50%；此外，还采取如下防腐措施。

3.4.1 拉杆、螺母、垫圈出厂前均须经发兰防腐处理，到工地后再涂醇溶性无机硅酸底漆一道，干膜厚度20μm，二次表面处理，涂改性厚浆环氧面漆一道，干膜厚度100μm；联接

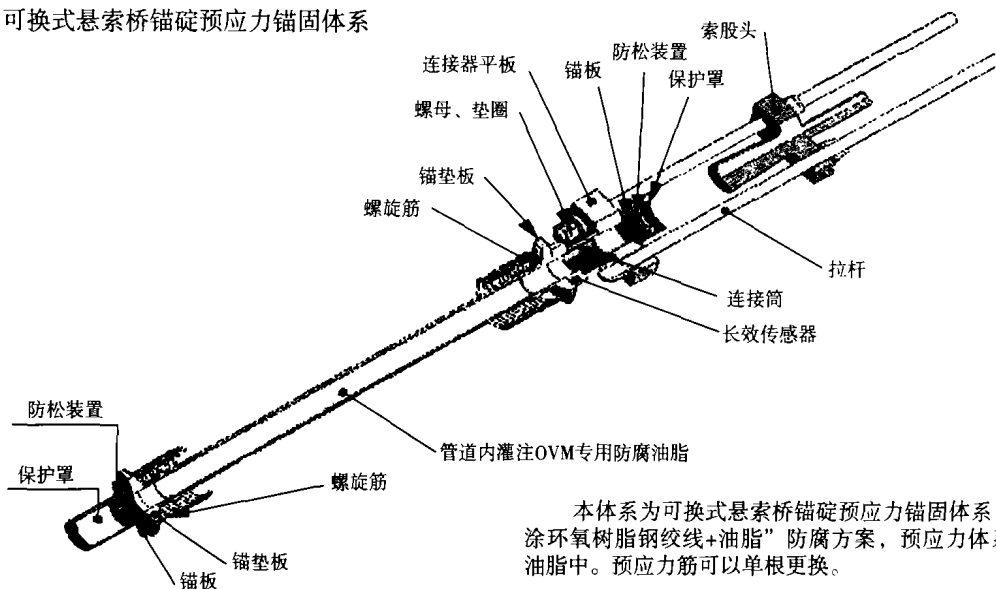
器出厂前涂醇溶性无机硅酸底漆一道，干膜厚度 $20\mu\text{m}$ ，到工地后经二次表面处理涂改性厚浆环氧面漆一道，干膜厚度 $100\mu\text{m}$ 。

### 3.4.2 预应力体系的防腐

预应力管道内、锚头保护罩内灌防腐油脂。上锚罩设置观察管窗，可观察到整个预应力体系的防腐状况。

## 4. 锚固系统试验

可换式悬索桥锚碇预应力锚固体系



本体系为可换式悬索桥锚碇预应力锚固体系“采用喷涂环氧树脂钢绞线+油脂”防腐方案，预应力体系浸泡在油脂中。预应力筋可以单根更换。

图3 锚固系统构造

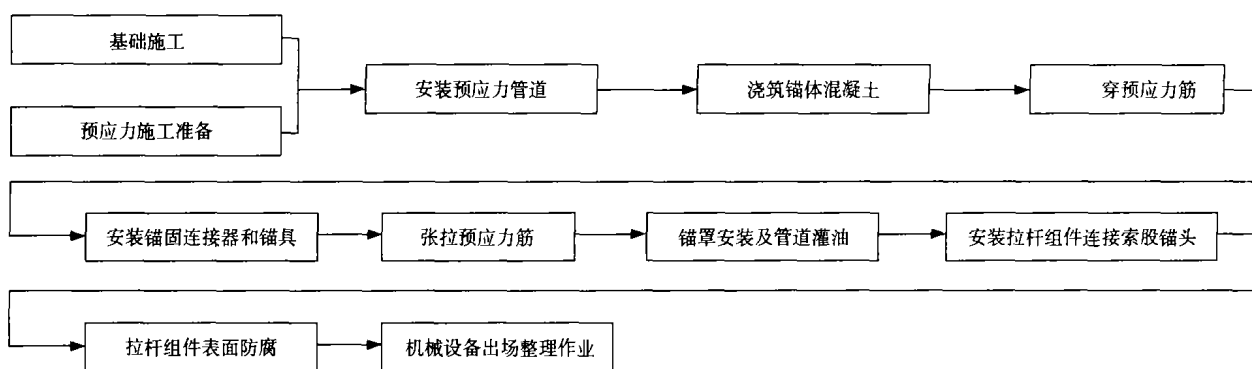


图4 OVM.MDT15锚碇预应力锚固系统施工工艺流程图

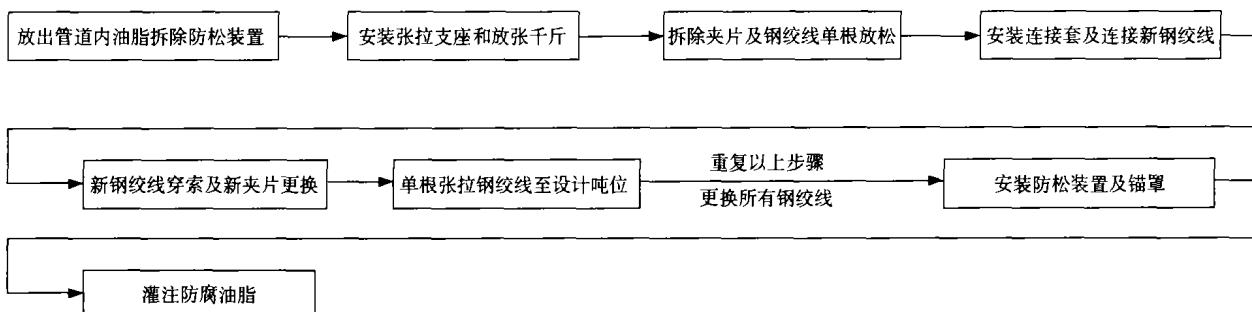


图5 OVM.MDT15锚碇预应力锚固系统换索工艺流程图

### 4.3 模拟施工工艺试验结论

4.3.1 预应力锚固系统可进行编束穿索张拉;

4.3.2 体系内可灌注专用防腐油脂并进行更换油脂;

4.3.3 体系中的预应力筋可用连接器进行新旧更换并能单根补张拉, 最终完成换束要求。

### 4.4 防油脂渗漏密封性能试验结论

试验介质压力上升至2MPa, 保压5小时后, 密封处没有出现渗漏现象。

## 5. 锚固系统监测

在预应力体系中选取一定的监测点(5~15%左右)来安装光栅压力传感器, 对预应力体系进行即时或定期检测, 监测系统采用计算机控制和采集、分析数据。

### 5.1 系统结构

如图6所示, 整个系统由传感器群、采集系统和浏览系统组成, 通过采集线路和数据库将三者有机的结合起来。

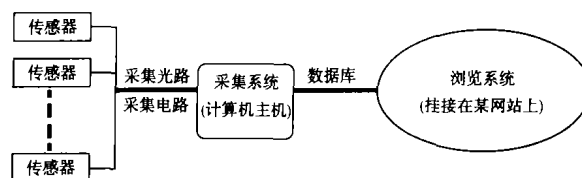


图6 系统结构示意图

系统采用web sever client模式, 即操作界面基于web网页的方式。

### 5.2 系统功能

软件功能主要包括数据采集方式、数据显示、历史数据查询、告警、远程数据传输日志记录以及系统自检等。

## 6. 技术经济比较

技术经济比较见表2。

表2

项目	可更换无粘结锚固体系	传统锚固体系
构造	采用特殊设计的锚具系统, 降低锚下应力水平, 方便施工。设置夹片防松装置, 钢绞线用量省。	锚固预应力系统采用常规的锚固方式和锚具, 对锚下混凝土强度要求高, 钢绞线用量多。
防腐方式	管道及两端锚罩内均压注防腐油脂。	管道内压注水泥浆, 两端锚罩内采用环氧砂浆充填。
可监测性	可随时监测锚固系统的受力及油面情况。	桥梁运营期间不可监测。
可更换性	可更换	永久不可更换
耐久性	寿命长	有限寿命
施工技术适应性	对施工技术水平的适应性强	使用寿命很大程度上取决于压浆施工的技术质量保证程度
经济性	应用初期价格可能相对较高, 将得到广泛推广应用, 长远看经济性优于前者, 总造价比1.067。	国产化, 成熟, 价格稳定合理, 短期内经济性优于后者, 总造价比1.0。

## 7. 试验研究结论

锚碇锚固系统是悬索桥的生命, 其安全性及耐久性直接影响到悬索桥的使用寿命。

新型悬索桥锚碇预应力油脂防腐锚固体系的主要特点是“可检测”、“可更换”。可检测即对防腐油脂可随时取样检测, 同时可通过压力传感器对锚固系统受力进行监测; 可更换表示: 第一, 通过检测发现油脂的指标发生变化, 可十分方便的更换管道内油脂; 第二, 通过压力传感器或经过几十年后, 对钢绞线进行抽样检查, 若认为有必要更换, 则可逐根进行更换预应力钢绞线, 更换时不影响大桥的正常运营, 大大提高了锚固系统的防腐耐久性。

本课题首先对锚固系统如何提高防腐耐久性进行理论研究, 特别对防腐油脂的性能进行了研究, 改变其状态, 增加其流动性, 提高了防腐效果。对可更换件和不更换件采用不同安全系数的设计原则, 节约了工程造价。对锚具进行理论研究, 将原锚下40号混凝土降低到30号, 方便了施工, 节约了造价。通过锚固系统静载(疲劳)试验、防腐油脂材料性能试验、防腐油脂密封性能试验、锚固系统施工工艺试验、锚固系统换油、换钢绞线束工艺试验等, 证明本课题提出的悬索桥锚碇可更换无粘结预应力锚固系统能解决目前悬索桥锚碇锚固系统普遍存在的防腐耐久性差的问题。