

# 斜拉索整体索力检测和监测方案的研究与实践

许登根

(宜昌夷陵长江大桥建设开发有限公司 湖北宜昌 443003)

**摘要:**平行钢绞线斜拉桥成桥前后一般采用单根张拉长期固定重复的拨动1、5、10…根钢绞线的索力测试的方法,经常拨动会增加张拉端夹片的咬痕位移和滑丝的可能性,影响斜拉索的安全。采用扁平整体索力检测方法,不松动夹片,提高了测试效率和准确性,增加斜拉索的安全性。索力监测采用磁通量测试方法,传感器先在工厂进行模拟标定,再在现场直接绕制,是一种无损、非接触测量方法,尤其适合成桥后的索力长期监测。本文通过夷陵长江大桥成桥后斜拉索整体索力检测和监测方案的研究与实践,探索如何安全实现成桥后斜拉索索力的检测与监测。

**关键词:**平行钢绞线斜拉索 整索索力 检测 监测 磁通量 传感器

## 1 前言

宜昌夷陵长江大桥主桥为单索面混凝土加劲梁三塔斜拉桥。跨径布置为:120+2×348.0+120m,主桥全长936.0m,对中塔呈对称布置,其主跨达348m,为目前国内同结构类型最大跨径三塔斜拉桥。桥梁宽23m,为双向4车道。

斜拉索置于桥面中央,断面上每个编号的斜拉索均由2根组成,间距1.2m,梁上索距主跨8m,边跨5.5m,塔上索距约1.6m。每个边塔都布置了18对斜拉索,中塔上布置了23对斜拉索,全桥共236根斜拉索。夷陵长江大桥采用的是无粘结平行钢绞线斜拉索,用夹片锚具,全封闭构造。单根钢绞线直径为15.24mm,镀锌钢绞线外包PE护层,内注油性蜡。钢绞线强度=1860MPa,容许应力 $[\sigma]=0.45$ 。

斜拉索按钢绞线数目划分共6种规格:27股、31股、34股、37股、41股、47股。斜拉索长度最短约45米,最长约210米。斜拉索钢绞线本身具有防护能力,钢绞线束外套双层HDPE管。全桥共用四种直径的HDPE管:外径分别为 $\phi 160\text{mm}$ 、 $\phi 180\text{mm}$ 、 $\phi 200\text{mm}$ 、 $\phi 220\text{mm}$ ,厚度分别为6mm、7mm、8mm、8mm。

主梁采用单箱三室截面,三向预应力混凝土结构,梁高3.0m,顶板宽23.0m,底板宽5.0m,两侧悬臂板悬臂长度3.5m。

该桥于1998年11月动工兴建,2001年12月竣工通车。见图1所示。



图1 宜昌夷陵长江大桥

## 2 索力张拉测试工艺的分析和探讨

宜昌夷陵长江大桥于2001年12月28日建成通车已历时近9年,竣工后于2003、2006年进行二次索力检测。钢绞线拉索体系索力检测采用千斤顶单根张拉的方法,在每根斜拉索群锚中按1、5、10…根钢绞线依次进行测试,然后再计算出整索索力。虽然该体系是成熟的技术工艺,在国内外桥梁中广泛应用,但由于每次索力测试时长期固定按上述方式重复进行,可能会影响该索的夹片咬痕松动错位,从而影响斜拉索的耐久性和安全性。主要有以下两个方面:一是单根张拉长期固定重复的拨动1、5、10…根钢绞线,会增加张拉端夹片的咬痕位移和滑丝的可能性;二是通过测试单根索力再计算出整索索力无论在技术和实践证明都是可行的,但还不够全面和直接,而一次性整体索力测试,对掌握斜拉索的实际索力更为准确。

因此,我们提出了改变单根张拉索力测试的工艺,建议采用穿心小行程扁平千斤顶整体索力测试的新工艺,上述设想通过与有关厂家多次沟通,研究并编制了《宜昌夷陵整体张拉检测施工方案》,并对整体索力测试所需要的机具进行了专门研制。

### 2.1 成桥后整索专用张拉千斤顶研制

与施工过程中的索力检测相比,成桥后的整体索力检测难度较大,主要是因为张拉端的钢绞线已被切短,采用常规的群锚千斤顶进行整体索力检测几乎是不能实现的,为了克服张拉端钢绞线预留长度较短困难,研制了一套成桥后专门用来整体检测斜拉索索力的小行程扁平群锚千斤顶,见图2。千斤顶分两种规格,一种是400t,主要适用于检测6~37孔之间的群锚;另一种是600t,主要适用于检测6~55孔之间的群锚。

### 2.2 整索索力检测过程

安装压板、工作锚环及工作夹片并敲紧。安装连接套、撑脚、并临时固定撑脚,安装千斤顶、连接丝杆及螺母,见整索检测安装示意图3;启动油泵车,给千斤顶缓慢供油,到锚具的螺母被提取的瞬间停止供油,稳定后记录数显油表上显示的读数。然后卸压、回油依次上述逆向工序操作,完成一根斜拉索索力检测。



图2 群锚千斤顶

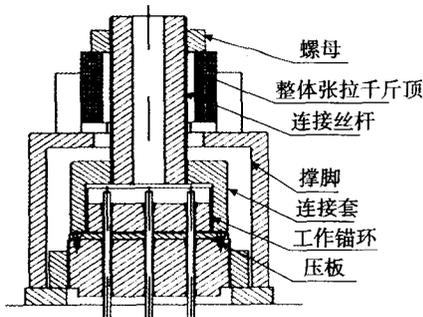


图3 整索检测安装示意图

## 3 索力监测方案比选

大桥经过近9年的运营,根据本桥特点及实际需要,安装斜拉索索力监测系统,以便监测索力变化趋势和荷载状态,为评估结构的安全提供依据。

### 3.1 索力监测的重要性

斜拉索的安全评估主要通过对拉索的抗力和荷载响应(索力状态水平)两方面进行比较。斜拉索抗力主要是检查拉索的病害情况,分析抗力是否衰减以及衰减程度。通过索力测量,可直接得到拉索的荷载响应情况,并得到历史变化趋势曲线。因此,斜拉索索力测量是分析斜拉索是否处于正常运营状态的一个重要依据。

### 3.2 斜拉索索力监测的几种方法比较

钢绞线拉索索力的监测方法主要有:振动频率法、千斤顶法、压力传感器、光纤光栅传感器、磁通量传感器等。

振动频率法是通过建立拉索的简化模型,实测拉索的振动频率,经过计算间接得出索力。测试时,将加速度传感器固定在拉索PE外,测试拉索的振动频率,方法简单,可重复使用,是目前索力检测普遍使用的一种方法。但由于拉索上的减振器、PE外护套等影响,同时平行钢绞线拉索的钢绞线之间不是紧密接触,各自会发生振动,各根钢绞线振动的不同步,影响索体的整体频率分布和理论规律,测量精度比较差,甚至无法得到正确结果,一般不适用于平行钢绞线拉索体系。

千斤顶法是利用小吨位千斤顶张拉钢绞线或大吨位千斤顶整体张拉拉索锚杯,使锚固装置稍微离开垫板,利用油表的读数,得到拉索索力。该方法测量过程中,改变原结构的的状态,需要打开保护罩并进行张拉和补张作业,一方面操作麻烦,另一方面存在安全隐患,使用频次不易过多。

压力传感器是以拉紧的金属弦、应变片等作为敏感元件,安装在拉索锚具的螺母下,索长必须增加以适应传感器的高度。索力通过螺母传递到传感器的弹性体上,弹性体产生变形并将变形

传递到敏感元上，通过测量敏感元件的信号变化，最终得出索力。这种方法短期测量的精度最好，但由于徐变及零漂等影响，长期测量误差较大。另外，对既有运营桥梁，一方面安装空间存在问题，另一方面须将拉索卸载进行传感器安装后再重新张拉，一般在已运营桥梁中难以使用。

光纤Bragg光栅传感器是通过在光纤内部写入的光栅反射或透射布喇格波长光谱的检测，实现被测结构的应变和温度量值的绝对测量。缺点是必须有可靠的封装保护，且必须在制索过程中植入，不能用于运营中的桥梁。

磁通量传感器基于磁弹效应通过感应构件的磁特性变化测量应力，是一种无损、非接触测量方法，可用于斜拉索、吊杆、系杆、体外索及预应力筋的索力长期监测，测试时不需要了解构件的加载历史和使用情况，适用于在建及已建桥梁拉索的长期监测。

综上所述，结合夷陵大桥的特点及实际情况，采用现场制作磁通量传感器的方式实现斜拉索索力监测。

### 3.3 磁通量传感技术简介

#### 3.3.1 磁通量测试原理

磁通量传感器的测量原理是基于拉索的磁弹效应，即拉索受到荷载作用，内应力发生变化，引起拉索内部的磁场发生变化，通过测量拉索的磁导率变化，得到索力。国外应用较多，多座实际桥梁结构的安全检测表明效果较好。目前国内实例相对较少，但技术日趋成熟，发展前景较好。

磁通量传感器结构如图4所示，主要由初级线圈和次级线圈构成，内置温度传感器用于温度补偿。部分型号的实物见图5。磁通量测试系统见图6，主要由传感器和磁弹仪组成，便携式磁弹仪自身带有操作平台及LCD显示器，能实现多通道测量，可直接操作读数，也可通过仪器上的通讯接口与计算机系统相连，实现数据自动采集及远程操控。

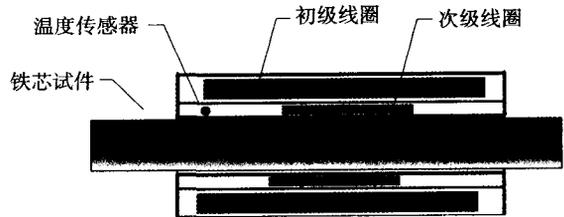


图4 磁通量传感器结构简图



图5 磁通量传感器实物图

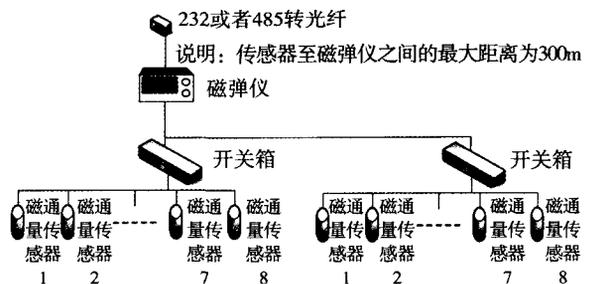


图6 磁通量监测系统

#### 3.3.2 技术指标

- (1) 传感器量程：拉索的弹性范围
- (2) 接线长度： $\leq 200\text{m}$
- (3) 适应环境温度： $-40 \sim 60^\circ\text{C}$
- (4) 系统误差： $\leq 5\%FS$ （传感器采用现场制作方式）
- (5) 供电电源：AC 110 ~ 240V, 60/50HZ
- (6) 测量响应频率：0.05Hz

#### 3.3.3 技术特点

- (1) 非接触性测量，不损伤结构；
- (2) 不需对被测件进行表面处理，不破坏索体原有PE保护层；
- (3) 传感器维护成本低、使用寿命长；
- (4) 测量精度高、重复性好；

(5) 操作简便可靠;

(6) 可实现自动温度补偿, 自动测量

### 3.3.4 制作方式

磁通量传感器应用于拉索索力测量, 其制作方式主要有两种: 现场制作和工厂制作。现场制作指成桥后现场在拉索上制作传感器, 该方法优点是可以在成桥后安装, 缺点是精度较低, 需要模拟标定。工厂制作指在工厂制作好传感器, 制索时直接穿心套在拉索上, 利用拉索超张拉时进行标定, 之后随拉索直接运往现场, 性能稳定且精度高。

### 3.3.5 监测系统形式

磁通量传感器的监测系统主要分为在线监测系统和离线检测系统。在线监测系统需要到现场布设传感器、采集仪和信号发送装置等, 实现实时采集系统; 离线检测系统主要是现场布设传感器, 并将信号集中于某处或某几处, 需要检测时, 携带仪器至现场进行手动采集存储数据。

## 4 夷陵大桥斜拉索索力监测方案

### 4.1 监测目标

组建拉索索力离线监测系统, 可定期对拉索索力进行巡检。

### 4.2 监测方法

选择有代表性的部分拉索安装磁通量传感器, 并在这部分拉索中选择几根在其索体内安装温湿度传感器。

### 4.3 布设方案

(1) 拉索监测传感器布设。夷陵大桥斜拉索的根数比较多, 基于经济性、实用性考虑, 选择关键截面上的部分拉索布设传感器, 并尽可能包括全部的规格, 使选择更具代表性。传感器的布置见图7。全桥斜拉索计有四种直径的HDPE管, 外径分别为 $\phi 160\text{mm}$ 、 $\phi 180\text{mm}$ 、 $\phi 200\text{mm}$ 、 $\phi 220\text{mm}$ , 适配的传感器型号分别为: CCT170JH、CCT190JH、CCT210JH、CCT230JH。

(2) 磁通量传感器的安装位置。为减少传感器的制作安装对既有拉索结构的影响, 直接在斜拉索PE外护套上进行制作及安装, 具体的安装位置如图8所示。

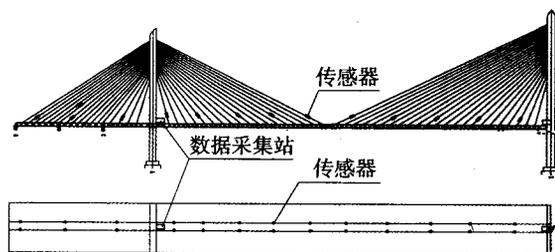


图7 斜拉索传感器和采集站分布图 (1/2)

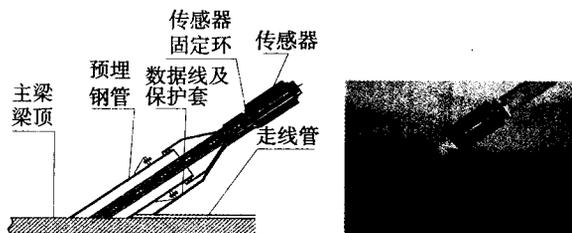


图8 斜拉索传感器安装位置图

### 4.4 监测方式及系统集成

根据夷陵大桥实际需要, 从经济性、实用性等综合考虑, 采用信号集中, 人工检测方式。具体如下:

(1) 全桥设三个数据采集站, 分别位于三个桥塔与桥面接合处的适当位置;

(2) 斜拉索上传感器的传输线, 用护线管沿桥面往桥塔方向走线。

(3) 信号线做好相应的编号和标记。测试时, 携带磁弹仪进行数据采集。

(4) 数据采集站设置在每个塔的下方, 预留标准接口, 以便日后升级成在线监测系统。

### 4.5 传感器的标定

在试验室采用与现场相同的制作工艺, 分别额外制作CCT170JH、CCT190JH、CCT210JH、CCT230JH上述四种传感器各一台。在试验室进行模拟标定。同时, 为了消除测量位置和环境的影响, 在现场用千斤顶法测量部分拉索索力, 进行磁通量传感器的零点校核。

## 5 结语

2009年9月《宜昌夷陵长江大桥索力检测方案》和《宜昌夷陵长江大桥磁通量监测方案》通过了专家评审。2010年7月开始对桥梁进行整体索力检测和磁通量传感器的安装施工, 今年9月底结束。从目前索力测试情况来看, 整索检测与

单根检测相比,整体张拉解决了单根张拉时提起钢绞线夹片松动的问题,同时提高索力检测的全面性,增强了斜拉索锚固的安全性。磁通量索力监测系统的安装,与索力检测同步进行,实现了对每个传感器的现场标定和校核,弥补了试验室模拟标定的不足,保证了传感器的精确度要求,其方法简便实用、安全可靠。夷陵长江大桥整索

(上接第25页)



某厂家的5孔圆锚垫板 重量:4.1kg  
某名优品品牌的5孔圆锚垫板 重量:6.3kg

图6 不同厂家的5孔锚垫板对比

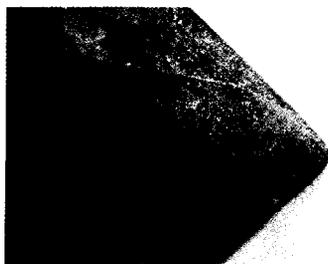


图7 某厂家锚垫板在工程应用中加强肋出现的裂纹

### (5) 螺旋钢筋尺寸越来越小

螺旋钢筋又称抗劈裂钢筋,外套于锚垫板的下方,对锚下核心混凝土起约束增强作用和抗劈裂作用。因此,在设计螺旋钢筋时,应通过分析锚下混凝土的受力状况以确定螺旋筋的尺寸,并通过锚下荷载传递性能试验进行验证。但是,为了减轻重量而降低成本,很多厂家将螺旋钢筋的螺旋直径和钢筋直径减小很多。如某厂的9孔螺旋钢筋尺寸为 $\phi 168 \times \phi 12 \times 55 \times 4$ (mm),重为1.88kg,但国内某名优品牌相应的螺旋钢筋为 $\phi 200 \times \phi 14 \times 50 \times 4$ (mm),重3.05kg;15孔螺旋钢筋尺寸为 $\phi 210 \times \phi 12 \times 60 \times 5$ (mm),重仅为2.94kg,而某名优品牌为 $\phi 250 \times \phi 14 \times 50 \times 5.5$ (mm),重达6.84kg。

综上,标准不完善的锚具产品在无序的竞争环境中逐渐走向仿制、短斤缺两、材料劣质化,

索力测试与磁通量监测方法为成桥后的同类斜拉索索力测试和监测探出了一套新的思路和工艺。

### 参考文献

- [1] 柳州OVM公司《磁通量传感器索力监测系统应用指南》. 2008.5
- [2] 柳州OVM公司《夷陵长江大桥索力监测方案》. 2010.6
- [3] 合肥VSL公司《夷陵长江大桥索力检测方案》. 2009.8

导致锚下荷载传递性能大大下降,承载能力和混凝土抗裂性明显不足。值得注意的是,在实际工程结构中,一旦出现锚下混凝土开裂等病害,通常是采取增强锚固区普通钢筋,很少对造成混凝土开裂的锚具产品提出质疑。由此,锚固区不断增强的普通钢筋也间接助推了锚垫板短斤缺两、材料劣质化及螺旋钢筋不断缩减的恶性循环。

### 3 建议

事实上,克服锚具锚下混凝土病害的最有效方法,就是强制进行锚下荷载传递性能试验,任何出现在产品中的设计缺陷、短斤缺两及材料劣质等影响锚下承载力及锚下混凝土抗裂性能的问题,都将在这个试验中呈现出来。这也正是国外标准对荷载传递性能的试验方法和验收标准都进行详细规定的原因。因此,我们提出如下建议:

(1) 为了确保锚具产品安全、可靠,避免锚下混凝土开裂等病害,有关管理部门应将锚下荷载传递性能试验作为国标中的一个强制性的规定,制定出相应的试验方法及验收标准。

(2) 在相关标准没有颁布前,应让设计单位充分认识锚下荷载传递性能试验的重要性,使它们通过设计文件对锚具产品的锚下荷载传递性能试验提出验收要求。

(3) 业主应从工程设计使用年限内安全、可靠、耐久及经济合理的高度支持设计单位的要求,对锚具产品的选用进行深入监督,避免片面追求初期投资最低的管理手段。

### 参考文献

- [1] 美国规范AASHTO
- [2] 欧洲认证标准ETA013
- [3] 国际预应力混凝土协会. FIP1993《后张预应力体系验收建议》[S].
- [4] 美国后张预应力协会. PTI《后张预应力体系验收标准》[S].
- [5] 中华人民共和国锚具产品的国家标准. GB/T14370-2000《预应力筋用锚具、夹具和连接器》[S].