

# 京杭运河矮塔斜拉桥主塔 及斜拉索施工方案

覃巍巍 石伟 雷欢

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**矮塔斜拉桥是以承受两端拉力的斜拉索作为主要承受构建的桥梁形式,本文结合京杭大桥双塔单索面预应力混凝土矮塔斜拉桥为工程背景,从主桥的施工工艺方面简述矮塔斜拉桥主桥在施工过程中的施工流程,详细介绍主桥施工过程中的关键施工步骤,重点阐述了主塔斜拉索挂索的具体施工流程和施工关键技术,最后论述了矮塔斜拉桥主桥的施工特点及斜拉索施工技术的优势,得出该技术可推广应用的结论,为今后的同类型桥梁施工提供了借鉴和经验。

**关键词:**矮塔斜拉桥 总体施工工艺 主塔施工 挂索工艺

## 1 工程概况

矮塔斜拉桥是近十多年来出现的一种新型桥梁结构形式。这种桥型是介于常规斜拉桥与梁桥之间的一种组合体系桥梁,京杭大桥为矮塔斜拉桥,桥跨布置为100m+175m+100m,桥宽28m,桥梁全长1207.53m。斜拉索锚固点布置在箱梁中室内,对称布置。主桥为双塔单索面预应力混凝土部分斜拉桥,采用塔梁固结、塔墩分离的体系,墩顶设支座。主塔高32m,为混凝土独柱实心矩形截面,顺桥向长4m,横桥向宽2.5m。设分丝管式鞍座;斜拉索为14对28根单索面斜拉索,每根索由37根 $\phi 15$ 钢绞线,外包单层PE,整索外包HDPE套管。

## 2 总体施工工艺

根据矮塔斜拉桥的结构形式和特点,主梁、斜拉索和主塔采用施工工艺为:

(1)主梁拟采用0#块、边跨23#块采用支架现浇施工,1#~21#块采用挂篮施工,斜拉索挂索前先把挂篮向前跑,后挂斜拉索;挂篮采用后支点挂篮,每付设4片桁架。

(2)斜拉索采用单根走丝、分次张拉调整至设计索力后,按设计要求进行后期锚索。

(3)主塔采用施工翻模法施工,每次浇筑4m高,塔吊配合脚手架逐渐上翻,在分丝管处适当调整分节位置,确保施工质量<sup>[1]</sup>。

## 3 主桥主塔施工

主塔高32m,采用独柱实心矩形截面,顺桥向宽4m,横桥向宽2.5m,设置于中分带内,并与主梁固接。C55混凝土227.08m<sup>3</sup>,塔身上部设鞍座,通过分丝器、抗滑锚固装置等措施在鞍座处锚固斜拉索。

主塔由4块模板组成,分块吊装,现场拼装成型。每节模板由2块2m高模板按平口缝拼接,每个主塔进场6m高模板。第1次支立4m高;第二次拆除最下面2m高模板、接在第1次余下模板上,另外拼接2m高模板,形成4m高;第3次拆除下面4m高模板,接在第2次浇筑上,形成4m高;余次类推,如图1所示。每节模板严格对中,对中时,在模板顶部中心垂吊悬线与墩柱轴心重合,加挂风缆进行稳定。模板拆除时,预留一段,留给上段模板稳固和接头用。上一节段施工完成安装下一节钢筋时,拆除外模,除光、安装下一节段模板,节约施工作业时间并提高工效。

为消除翻模产生的施工缝,确保塔柱外观质量和线形,模板采用大面积钢模板,四周用型钢加固。拼装时,严格控制“横平竖直”,清除焊渣、杂物,并采取措施,上、中、下模板支撑稳固,确保就位位置准确,防止胀模和变形。主塔模板四周采用搭设钢管扣件支架作为人员、操作安全平台,四周用密目安全网全封闭,随着高度

增加,及时加挂2层防坠安全网。人员上下采用钢管扣件上搭设楼梯,加设护栏、踏步、踢脚板、防滑板;施工平台采用实木板,绑扎稳固,设护栏、踏步、踢脚板、防滑板,确保施工安全。

为满足塔柱钢筋和分丝管定位的需要,同时方便测量放样,塔柱施工时设置劲性骨架。为确保钢筋加工尺寸准确,主筋采用套筒挤压连接头连接,用劲性骨架辅助定位。索鞍区施工,安装加工好的索鞍时,在钢筋骨架上对劲性骨架进行固定,以确保索鞍准确就位。混凝土浇筑时,加强振捣,确保分丝器下混凝土密实且不移位。分丝管安装定位误差满足设计要求,若与普通钢筋交错时,进行适当调整。节段混凝土施工完成后,及时进行养护和成品混凝土保护,在满足强度的情况下确保外观质量满足要求。

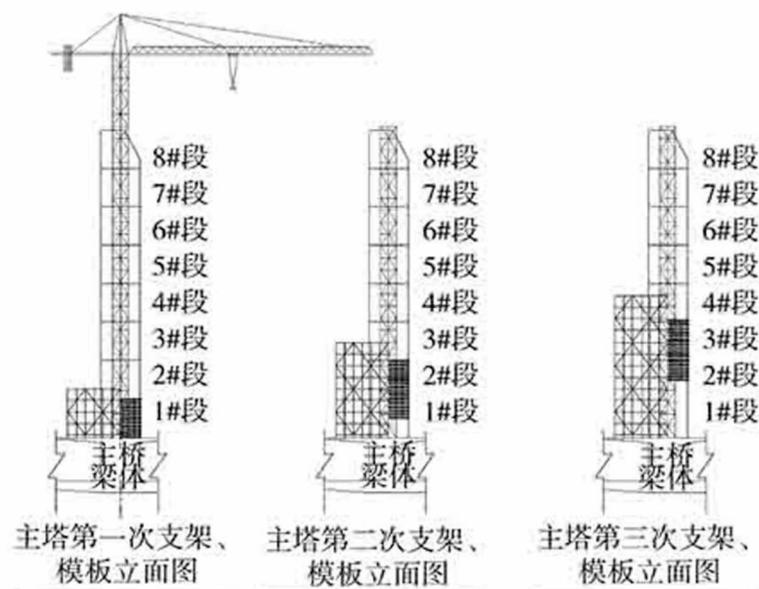


图1 主塔模板拼装成型流程

#### 4 主塔挂索施工

斜拉索为单索面双排对称布置,塔上横桥向索间间距1m、竖向间距1m、主梁纵向间距4m,每塔14层共28根斜拉索在主梁中室锚于横隔板附近,全桥共56根斜拉索。每根斜拉索由37根PE层包裹的 $\phi 15.2$ 的钢绞线、OVM250-37锚具锚固,在桥面以上2.5m范围内包裹不锈钢管,安装减振装置,整根拉索包裹HDPE套管进行防腐、防潮保护。斜拉索在鞍座处通过分丝管( $\phi 29\text{mm}$ )“散挂”于鞍座内,在索力调整完成后,经索夹等固定,形成稳定受力体系。

施工时采用“先跑挂篮后进行斜拉索挂索”施工作业顺序,以方便施工操作。主塔挂索施工

工艺流程如下:锚具调整→钢绞线下料、编索→HDPE套管焊接、穿管→牵引、挂索→紧索→整索张拉→调索→安装减振器、索夹等附属装置→安装防护装置→防护、锚固→检查、成索<sup>[2]</sup>。

##### 4.1 下料

根据现场实际情况,选取已完成的桥面作为斜拉索下料、编索场地。这样,可以减少钢绞多次移运对PE层的损伤,减少成索移运。

###### (1) 下料场地布设

下料时,清理干净桥面浮渣,铺上彩条布等进行隔离和保护。放索时,在转弯处支立专用防护滚轮,钢索沿轮前行,有效保证PE层不损伤,对已损伤的,应及时进行修复。

###### (2) 下料长度计算

根据施工设计尺寸,按下列方法确定斜拉索长度,并经校核无误后交下料人员执行。

下料长度计算:  $L=L_0+2L_1+2A_1+L_3+L_4+10$

式中:  $L$ —下料长度(单位: cm)

$L_0$ —边、中跨锚固端垫板底面之间中心线弧长(单位: cm)

$L_1$ —锚固端张拉工作长度(单位: cm)

$A_1$ —锚固端锚具长度(单位: cm)

$L_3$ —有圆管限制的垂度影响长度(单位: cm)

$L_4$ —塔梁施工误差影响长度(单位: cm)

锚固端及鞍座抗滑处理PE层剥除长度如下:

锚固端:  $L_{固}=L_1+A_1+\Delta L-L_5+10$

式中 $\Delta L$ —该索张拉后伸长量(单位: cm)

$L_5$ —钢绞线PE层进入锚具内长度(单位: cm)

鞍座抗滑处理PE层剥除长度满足锚固要求即可。

##### 4.2 HDPE套管焊接

按HDPE套管设计长度每端加5cm下料、焊接,每索2根。人工配合支护措施,在编索完成后,先穿一根于拉索上,另一根穿好牵引钢丝绳,在挂索时牵引斜拉索穿入,形成成索。

HDPE套管焊接前,将管介入夹具内夹紧,在压力作用下用平行机动旋刀处理两管材被焊接面,确保2个端面相互接触时满足规范要求。对接口断面进行加热、对接,确保色线对齐,外观满足为后续检查束扭转提供方便。

焊接好的HDPE套管要加强保护,不得有重物挤压、不得有人员踩压、不得有器物挂伤。

沿已焊接好的HDPE套管穿入牵引钢丝绳,钢丝绳穿入时,对HDPE套管进行保护,防止被钢丝绳切伤。

#### 4.3 施工平台建设

施工中建立两处施工平台。一处利用塔身施工时的支架,在主塔两侧每束索距鞍座端中心低1m处,用木材料和钢管、扣件、铅丝组成带1.5m高栏杆的施工平台,施工平台加挂安全网、防坠网;另一处设置在主梁中室斜拉索锚固端,利用已完成的主梁段、挂篮模板等构成,拟安装液压升降平台,以方便挂索、张拉作业<sup>[3]</sup>。

#### 4.4 锚固端锚具安装

梁内锚固端锚具安装前,应将锚垫板等预埋件清理干净,以保持干净整洁、无污染。此锚具由多个部件组成,出厂前已调整准确,运到工地后,不得随意移动、装拆任何部件,吊装采用吊装带等专用工具,不得用钢丝绳吊挂,防止制作锚具。

安装要求如下:

(1) 安装锚具前,按设计位置,用醒目标示对每一锚孔进行编号;

(2) 安装锚具时,分丝管、锚具按相应孔号对应位置,不得扭转,同时,使压浆孔在下、排气孔在上;

(3) 锚板中心线与锚垫板中心线力求重合,两者偏差 $\leq 5\text{mm}$ ;

(4) 锚板与斜拉索轴线垂直,防止损伤斜拉索;

(5) 未成索前,为避免索股自重影响,应采取相应措施,以防锚板滑移。

#### 4.5 斜拉索挂索

(1) 制作和安装放索架,把成盘的带PE的单根钢绞线整盘放入放索架,固定稳固。

##### (2) 安装牵引装置

在主塔、主梁上锚孔位置安装牵引支架和导向装置、牵引装置。将卷扬机钢丝绳绕过保护管旁的转向滑轮,与穿索板两端用卸扣连接,穿入HDPE管内,使其成为闭环回路,通过控制卷扬机正反循环转动,牵引钢丝绳穿过索板上下行,

牵引两侧钢绞线向主梁锚孔行进并就位。牵引装置要求位置准确,设备可靠,运行稳定、安全。

(3) 人工放钢绞线并把端部装入固定在牵引钢丝绳的专用夹具上,上行至分丝管处,穿入对应分丝管并推至另一侧,安装上相应附件后,装入另一侧的穿索板,拆除本侧牵引,经另一台卷扬机牵引至梁上锚索护管处,拆除牵引,人工穿入锚具内,计算长度,采用砂轮切割机切断PE钢绞线,剥除端部PE,装入锚具,进行初张拉。对牵引头、索头进行处理,防止牵引过程中损伤HDPE套管,如图2所示。

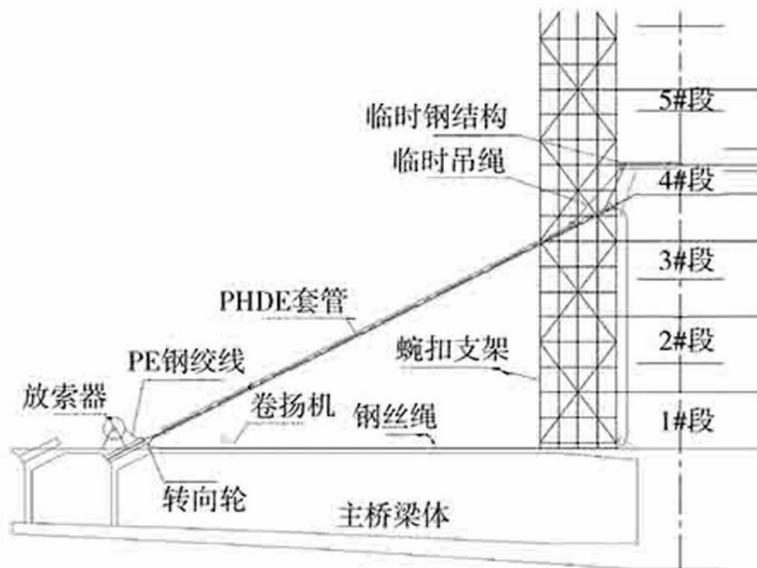


图2 挂索施工示意图

(4) 按上述步骤循环开动牵引,牵引PE钢绞线依次、缓慢经HDPE套管、索夹、减振器、保护管进入锚垫板,逐根穿入锚具进行初张拉<sup>[4]</sup>。

向梁内锚具穿钢绞线时,可以用细钢管等进行导引,确保锚具不受损伤。

穿索和牵引过程中,注意对HDPE套管、钢绞线的PE套等进行保护以防止其在保护管口、牵引板头等作用下损伤。

(5) 初张拉时,逐根调整张拉力,使每根钢绞线应力大致一致,满足索力均匀要求。

(6) 检查索股扭转情况,并调整至正确位置,根据束编号,逐一对应穿入相应孔号的工作锚内。

##### (7) 两端同时进行夹片预紧索

预紧索采用单束顶两端逐根对称进行张拉。为使斜拉中每根索力均匀,采用等值法进行张拉,即每根钢绞线的拉力以控制压力表读数为准,通过传感器读数进行监测。挂索预紧前,将

监测传感器安装在第一根钢绞线上，安装位置为工作锚与张拉支座的工具锚之间，单根张拉示意如图3所示。

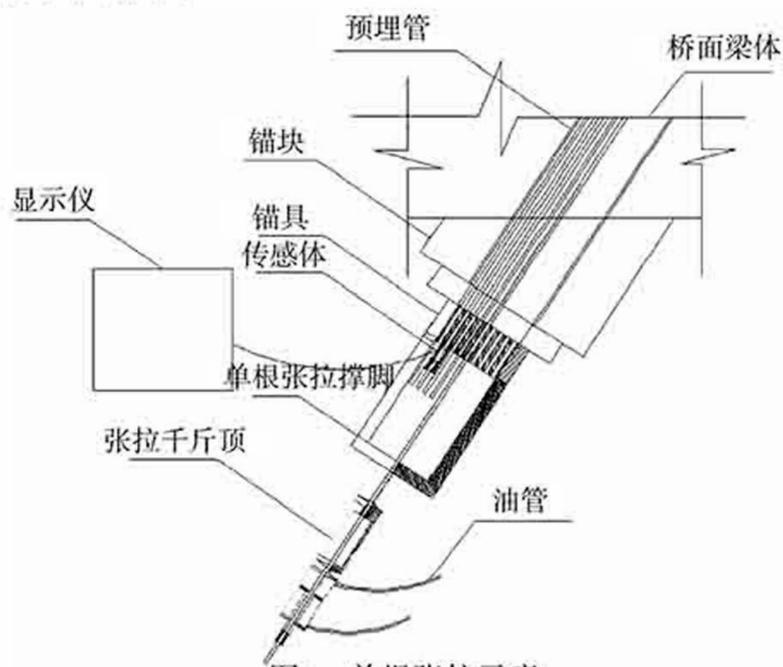


图3 单根张拉示意

张拉时，每根钢绞线的拉力根据传感器监测值进行动态调整和控制，具体控制如下：

设整索张拉力为 $T$ ，则每根钢绞线的张拉力为 $T/37$ ；第一根钢绞线安装传感器后张拉力为 $N_1$ （ $N_1$ 可适当进行超张拉， $N_1=T/37 \times 1.03$ ）进行张拉；第二根钢绞线张拉到接近 $N_1$ 时，读取传感器读数，计算传感器变化值 $\Delta N_1$ ，则第二根钢绞线张拉力为 $N_2=N_1-\Delta N_1$ ；第3根钢绞线张拉到接近 $N_2$ 时，读取传感器读数，计算传感器变化值 $\Delta N_2$ ，则第3根钢绞线张拉力为 $N_3=N_1-\Delta N_2$ ；第4根钢绞线张拉到接近 $N_3$ 时，读取传感器读数，计算传感器变化值 $\Delta N_3$ ，则第4根钢绞线张拉力为 $N_4=N_1-\Delta N_3$ ；如此循环进行，至第37根钢绞线张拉到接近 $N_{36}$ 时，读取传感器读数，计算传感器变化值 $\Delta N_{36}$ ，则第37根钢绞线张拉力为 $N_{37}=N_1-\Delta N_{36}$ 。最后拆除第一根钢绞线上的传感器，补充张拉至 $N_1-\Delta N_{36}$ 。

（8）整索张拉完成后，即认为整索张拉力近似为 $N=(N_1-\Delta N_{36}) \times 37$ ，通过比较 $N$ 与设计整索张拉力 $T$ ，两者差值是否满足规范要求，如不满足要求，则进行整体索力张拉、调整。

（9）索力调整有两种情况，第一种为增加索力或减少索力，增加索力可利用油顶整体张拉，直至满足要求；第二种为减少索力则要利用撑架，先张拉，然后对钢绞线进行卸载，调整夹

片至要求索力位置、重新锚固。

（10）工艺质量控制要点：

单束顶轴心与每根钢绞线轴心重合；

初始应力按15% $N_1$ 测量的伸长值和按30% $N_1$ 进行控制张拉测量的伸长值进行初始应力伸长值推算，每根钢绞线加至控制应力时测量的伸长值为终止伸长值。

将最终实测值进行平差后的平均值作为整索伸长量值，比对设计伸长量值，是否符合规范要求，否则查明原因并进行解决后，方可进行后续张拉。由于钢绞线工作长度较长，实测值要进行修正，具体为：实测伸长值=终止伸长值-初始伸长值-工作长度段计算伸长值。

张拉完成后，检查相邻钢绞线“张弛情况”，索束间距是否均匀，确保成索质量满足设计要求。

每束索穿索完成并初张拉结束后，对HDPE套管两面的外露钢绞线进行保护，防止雨水进入预埋保护管内，腐蚀锚具和钢绞线。

#### 4.6 整索张拉

整索张拉采用450T穿心式油顶及其配套油泵进行张拉。张拉时，借助辅助工具安装撑脚、油顶、油泵、工具锚，确保工具锚、油顶、斜拉索3个力心重合，斜拉索整体张拉图如图4所示。

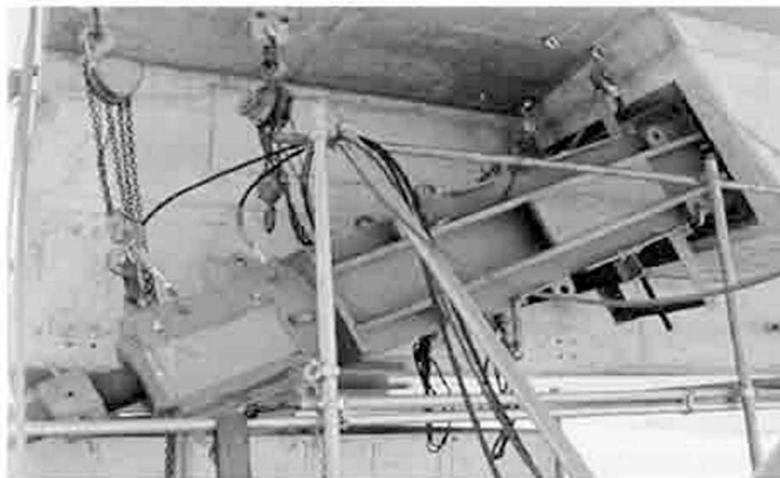


图4 斜拉索整体张拉

在整体张拉过程中，当锚具螺母松动脱离工作锚时油表读数对应的拉力为初始应力，以此为起点，按要求分级加载至设计张拉力，进行伸长量测量。考虑锚具和混凝土变形、夹片回缩等，拟进行1.03超张拉，并持荷3min，进行锚固，张拉时同步、对称进行，并严格控制油顶伸长量，要求两端伸长量大致一致，确保索力满足要求。

张拉时,根据监控单位提供的数据,一次张拉索力到位,一般不进行二次索力调整<sup>[5]</sup>。

#### 4.7 施工监控计算

施工监控计算是充分利用现场采集的数据,综合分析,为施工修正提供科学依据。主要进行以下计算:

##### (1) 正装倒拆计算

根据设计资料和参数,对结构进行正装倒拆计算,对成桥及各施工阶段的索力、变形、应力以及设计线形进行计算,相互核对。

##### (2) 对各施工阶段进行跟踪计算

由于理论选用参数与实际工况参数差异,施工荷载、实际索力、结构线形等都有误差,不可能与理论计算一致。施工中,应根据实测索力、温度、线形、应力等参数值,修正实际计算参数,采取措施进行修正,确保实际工况与理论接近一致。

##### (3) 中间调索计算

由于施工中各种因素综合影响和各种偏差的积累,当主跨施工至跨中时,索力和线形有一定误差,需要进行中间索力的调整计算,应按索力与线形双控的原则,重新计算索力,优化调索工作。

#### (4) 成桥索力调整计算

主梁建成后,根据实测线形、索力,比对设计线形、索力,对偏差超过要求的梁段进行索力调整,调整时,应根据实测参数,重新计算索力,优化调索方案,使全桥索力与线形均满足要求。

### 5 总结和建议

在京杭大桥主桥施工实践证明,主塔施工和挂索施工工艺的关键工序均经过现场的实际施工验证,其工艺合理,安全可靠,可操作性强,即保证安装精度,提高施工效率。主体结构完工后其质量检测各项指标均符合设计要求和施工规范,其施工工艺方法为同类型桥梁的建设中提供了有益的经验。

#### 参考文献

- [1] 李晓磊,赵艳.淮安通甫路大运河桥斜拉索施工技术[J].预应力技术,2012,92(3):35-39.
- [2] 李文献,徐栋,肖军等.拉萨市纳金大桥桥塔节段尺寸模型试验研究[J].世界桥梁,2012,40(5):63-68.
- [3] 李文献,宋强.矮塔斜拉桥中交叉抗滑键的研究及应用[J].桥梁建设,2012,42(6):92-96.
- [4] 闫云友,庞维林.OVM250平行钢绞线拉索单根换索试验研究[J].预应力技术,2005,52(5):19-23.
- [5] 叶生.谈某斜拉桥环氧涂层钢绞线斜拉索施工工艺[J].山西建筑,2009,35(5):310-311.

(上接第9页)

均方值  $X_{rms}$  信号的二阶矩统计平均,用于描述信号的整体能量。均方值定义为:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

滤波后的信号经过峭度特征提取,结果如图6所示。其中横坐标每个点代表音频文件的1s;纵坐标为峭度指标,值越大则为疲劳破坏的概率越大。数据处理过程准确判定出疲劳破坏发生的时刻。

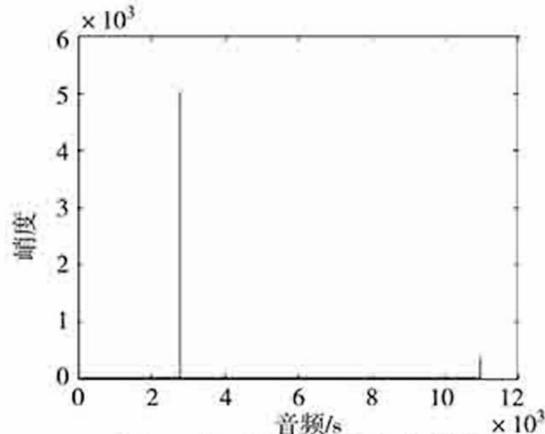


图6 信号的声压峭度特征

### 3 结论

本文对桥梁拉索疲劳试验声压信号进行处理,采用低通滤波和峭度特征提取出声压信号中疲劳破坏声压发生的时刻,从而准确判定出疲劳破坏发生的时刻。基于C#实现本文算法,准确给出疲劳破坏发生时的荷载循环次数,解决了拉索疲劳试验存在的不足。

#### 参考文献

- [1] 杨华伟,吴国庆,葛沈瑜.桥梁拉索疲劳试验智能监测系统研究[C]//纪念徐秉汉院士船舶与海洋结构力学学术会议,2011.
- [2] 胡倩.桥梁拉索疲劳声发射信号处理及损伤分析[D].大连:大连理工大学,2011.
- [3] 陈军堂,廖世勇,甘剑锋等.峭度分析法在发动机噪声信号故障特征提取中的应用[J].移动电源与车辆,2011(1):15-18.