

ICS 号  
中国标准文献分类号

# 团体标准

T/CHTS ××××-××××

## 公路桥梁非接触式索力测量 技术指南

Technical Guidelines for Non-contact Cable Force  
Measurement of Highway Bridges  
(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国公路学会 发布

团体标准

公路桥梁非接触式索力测量技术指南

Technical Guidelines for Non-contact Cable Force

Measurement of Highway Bridges

T/CHTS ××××-××××

主编单位：苏交科集团股份有限公司

发布单位：中国公路学会

实施日期：××××年××月××日

××××××××××(出版单位)

# 中国公路学会文件

公学字〔××××〕××号

## 中国公路学会关于发布 《公路桥梁非接触式索力测量技术指南》 的公告

现发布中国公路学会标准《公路桥梁非接触式索力测量技术指南》(T/CHTS ××××-××××)，自××××年××月××日起实施。

《公路桥梁非接触式索力测量技术指南》(T/CHTS ××××-××××)的版权和解释权归中国公路学会所有，并委托主编单位苏交科集团股份有限公司负责日常解释和管理工作。

中国公路学会

××××年××月××日

# 前 言

本指南是在系统总结国内外相关技术研究成果和经验以及基于频率法测索力的理论基础上编制而成。

本指南按照《中国公路学会标准编写规则》(T/CHTS 10001)编写。共分为5章、4个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、光学测量、微波雷达测量等。

本指南由苏交科集团股份有限公司提出，受中国公路学会委托，负责具体解释工作。请有关单位将实施中发现的问题与建议，反馈至苏交科集团股份有限公司（地址：江苏省南京市江宁区科学园诚信大道2200号 联系方式：025-86576852；电子邮箱：xyc576@jsti.com），供修订时参考。

**主编单位：**苏交科集团股份有限公司

**参编单位：**东南大学，广东交科检测有限公司，中公智联（北京）科技有限公司，武汉二航路桥特种工程有限责任公司，中铁十局集团有限公司，中国铁道科学研究院集团有限公司，中铁第四勘察设计院集团有限公司，南京市城市道路管理中心，河南高速公路试验检测有限公司，河南工业大学，西南交通大学，江苏大学，湖南大学

**主要起草人：**张建，吴刚，张宇峰，许肇峰，车功健，朱世峰，赵文举，苏子阳，赵欣欣，严乃杰，陈泽，路大鹏，严爱国，陈安京，殷鹏程，徐一超，杨基好，冀孟恩，张亮，苏云超，黄辉，田永丁，车锋，周云，程玉瑶，孔烜，赵晨阳

**主要审查人：**

目次

1 总则 ..... 1

2 术语和符号 ..... 2

    2.1 术语 ..... 2

    2.2 符号 ..... 3

3 基本规定 ..... 6

    3.1 一般规定 ..... 6

    3.2 基于动力特性的索力计算方法 ..... 6

    3.3 考虑抗弯刚度时拉索索力计算 ..... 7

    3.4 考虑垂度时拉索索力计算 ..... 8

    3.5 考虑复杂边界时拉索索力计算 ..... 9

4 光学测量 ..... 12

    4.1 一般规定 ..... 12

    4.2 光学测量设备 ..... 12

    4.3 现场测试要求 ..... 16

    4.4 现场测量方法 ..... 17

    4.5 数据采集 ..... 18

    4.6 数据分析 ..... 19

5 微波雷达测量 ..... 21

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 5.1 一般规定 .....             | 21 |
| 5.2 微波雷达测量设备 .....         | 21 |
| 5.3 现场测试要求 .....           | 22 |
| 5.4 现场测量方法 .....           | 23 |
| 5.5 数据采集 .....             | 24 |
| 5.6 数据分析 .....             | 25 |
| 附录 A 拉索振动测试及数据处理流程 .....   | 26 |
| 附录 B 基于光学测量的拉索位移提取算法 ..... | 28 |
| 附录 C 基于微波雷达的拉索位移提取算法 ..... | 29 |
| 附录 D 索力测量现场工况记录表 .....     | 32 |
| 本指南用词说明 .....              | 33 |
| 引用标准名录 .....               | 34 |

中国公路学会标准征求意见稿

# 公路桥梁非接触式索力测量技术指南

## 1 总则

1.0.1 为规范和指导公路桥梁拉索非接触式索力测量技术，保障公路桥梁工程的施工和运营安全，制定本技术指南。

1.0.2 本指南适用于各级公路桥梁拉索的非接触式索力测量，适用的拉索断面形式包括平行钢丝和平行钢绞线两种。

1.0.3 本指南使用的仪器设备，均应符合相应的标准规定，并经检验合格。

1.0.4 公路桥梁非接触式索力测量除应符合本指南的规定外，尚应符合国家和行业现行有关强制性标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 桥梁拉索 Cable in bridge

指斜拉桥的斜拉索，以及悬索桥和拱桥的吊杆。

#### 2.1.2 非接触式索力测量 Non-contact cable force measurement

不需在拉索表面布置传感器，利用非接触式测量设备获得拉索在环境振动或冲击振动下的振动信号，经数据处理算法处理得到拉索的动力特性（固有频率、模态振型），通过索力与动力特性的关系计算求得索力。

#### 2.1.3 环境振动 Ambient vibration

外部自然条件（如地脉动、车辆荷载、风荷载等）激励下的结构振动。

#### 2.1.4 冲击振动 Impact vibration

人为荷载激励下的结构振动。

#### 2.1.5 固有频率 Natural frequency

结构系统在受到外界激励振动时，只由系统本身性质决定的振动特征频率。

#### 2.1.6 模态振型 Modal shape

在振动的任一时刻，各质点位移的比值保持不变，即振动的形状保持不变，将此振动形式称为模态振型。

#### 2.1.7 光学测量 Optical camera measurement

通过高速光学相机设备采集拉索的视频图像，通过数字图像处理技术得出拉索振动信号，进而结合拉索固有参数计算出索力。

#### 2.1.8 微波雷达测量 Microwave radar measurement

通过微波雷达设备发射并接收调频微波信号，获得被测拉索的距离和振动信号，进而得到拉

索固有频率并计算出索力。

2.2 符号

$u(x,t)$ —— 拉索上各点在时刻  $t$  的横向位移；

$T$ —— 实测索力值；

$m$ —— 拉索单位长度质量；

$l$ —— 拉索计算长度；

$l_0$ —— 拉索水平长度；

$f$ —— 拉索垂度；

$f_n$ —— 拉索第  $n$  阶固有频率；

$n$ —— 拉索固有频率阶次；

$EI$ —— 拉索抗弯刚度；

$EA$ —— 拉索抗拉刚度；

$\alpha$ —— 拉索倾斜角度；

$\delta$ —— 拉索垂跨比；

$T_d$ —— 设计索力值；

$K_t$ —— 索力偏差率；

$x(t)$ —— 位移响应;

$\phi_{ir}$ ——  $i$  点第  $r$  阶振型分量;

$f_k(t)$ —— 作用在  $k$  点上的动力荷载;

$m_r$ —— 第  $r$  阶模态质量;

$\xi_r$ —— 第  $r$  阶阻尼比;

$\omega_{dr}$ —— 第  $r$  阶有阻尼体系的自振圆频率;

$\omega_{nr}$ —— 第  $r$  阶无阻尼固有频率;

$R_{ijk}(T)$ —— 当  $k$  点作用有高斯白噪声时,  $i, j$  两点响应的互相关函数;

$\tilde{H}^d(\omega)$ —— 频响函数;

$N_0$ —— 输出测点的个数;

$N_i$ —— 参考测点的个数;

$C_{f,g}(\vec{p})$ —— 相关函数;

$f(x, y)$ —— 参考图像子区灰度值;

$g(x', y')$ —— 目标图像子区灰度值;

$\xi, \eta$ —— 形函数;

$\vec{p}$ —— 待定参数矢量;

$\Delta x, \Delta y$  —— 点  $(x, y)$  到参考图像子区中心  $(x_0, y_0)$  的距离;

$u, v$  —— 参考图像子区中心在  $x$  和  $y$  方向的位移;

$u_x$  —— 参考图像子区的一阶位移梯度;

$u_{xx}$  —— 参考图像子区的二阶位移梯度;

$x_k(t)$  —— 拉索振动响应信号;

$A_t$  —— 发射信号的幅度;

$A_r$  —— 发射信号的幅度;

$f_0$  —— 发射信号的起始频率;

$f_\Delta$  —— 信号差拍频率;

$k$  —— 调制斜率;

$B$  —— 雷达工作带宽;

$T_s$  —— 雷达发射信号周期;

$R$  —— 测索距离;

$\Delta\varphi$  —— 被测拉索自振的相位差;

$\lambda$  —— 微波信号波长;

$d$  —— 微变形时程;

### 3 基本规定

#### 3.1 一般规定

3.1.1 非接触式索力测量主要包括拉索的位移信号测量、基于位移信号的拉索动力特性求解以及拉索的索力计算。

3.1.2 在一定条件下，拉索的索力与拉索的动力特性存在对应关系。在已知拉索的长度、单位长度质量等基本参数条件下，应通过拉索的动力特性计算拉索的索力。若拉索安装有减振架，阻尼器等装置，不宜将拉索边界视为简单固定端，应根据现场情况、设备性能、拉索资料进行综合分析，选用合适的数据处理方法。

3.1.3 现场测试人员应熟练掌握非接触式索力测量仪器设备和振动信号采集方法，了解拉索基本构造。进行索力计算的人员应了解通过固有频率计算索力的基本原理，具有采用此计算方法的经验。

3.1.4 拉索截面特性和单位长度质量应查阅拉索构件的出厂技术指标或根据拉索的横截面积进行折算。拉索现场测量应符合国家有关安全生产的规定。

3.1.5 非接触式索力测量仪器设备应满足测量准确度、分辨能力、量程及振动信号的性能要求，以及气候环境和电磁环境的适应性要求。测量仪器设备应在检定或校准有效期内。测量前应对仪器设备检查调试；当测量辅助仪器设备对现场测量的质量、安全有影响时，应对其功能进行检查。

#### 3.2 基于动力特性的索力计算方法

3.2.1 在一定条件下，拉索索力与拉索的动力特性（固有频率、模态振型）存在对应关系。在已知拉索的长度、单位长度质量等参数时，通过拉索的动力特性计算索力。

3.2.2 不考虑抗弯刚度、垂度和复杂边界时，按下式计算索力：

$$T = 4ml^2 (f_1)^2 \quad (3.2.2)$$

式中：  $m$  —拉索单位长度质量，单位：  $\text{kg/m}$  ；

$l$  —拉索计算长度，单位：  $\text{m}$  ；

$f_1$ —拉索第 1 阶固有频率，单位：Hz。

3.2.3 获得拉索索力数据后应进行索力偏差评估，索力偏差率  $K_t$  按下式计算

$$K_t = \frac{T - T_d}{T_d} \times 100\% \quad (3.2.3)$$

式中： $T$ —实测索力值；

$T_d$ —设计索力值。

索力偏差率超过  $\pm 10\%$  时，宜对测量数据进行检查。

### 3.3 考虑抗弯刚度时拉索索力计算

3.3.1 拉索抗弯刚度不可忽略时，应按描述抗弯刚度影响的无量纲参数大小选取相应公式计算索力。

3.3.2 基于前 5 阶实测固有频率的索力计算方法，描述抗弯刚度影响的无量纲参数通过下式计算：

$$\xi = l \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (3.3.2-1)$$

式中： $EI$ —拉索抗弯刚度，其中  $E$  为弹性模量，单位：N/m<sup>2</sup>， $I$  为惯性矩，单位：m<sup>4</sup>；

当拉索抗弯刚度不可忽略时，即描述抗弯刚度影响的无量纲参数  $\xi \leq 210$ ，并且拉索两端约束条件简化为铰支时，采用下式计算索力：

$$T_n = \frac{4ml^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (3.3.2-2)$$

式中： $T_n$ —利用第  $n$  阶拉索固有频率计算的索力值，单位：N；

$f_n$ —拉索第  $n$  阶固有频率，单位：Hz；

$n$ —拉索固有频率阶次， $n \leq 5$  为宜。

3.3.3 当拉索抗弯刚度未知时，按下列公式计算索力：

$$T = \frac{ml^2}{3} (16f_1^2 - f_2^2) \quad (3.3.3)$$

式中：  $f_1$ —拉索第 1 阶固有频率，单位：Hz；

$f_2$ —拉索第 2 阶固有频率，单位：Hz。

### 3.4 考虑垂度时拉索索力计算

3.4.1 当考虑垂度影响时，应按描述垂度影响的无量纲参数大小选取相应公式计算索力。

3.4.2 描述垂度影响的无量纲参数通过下式计算：

$$\Gamma = \left( \frac{ml}{128EA\delta^3 \cos^5 \alpha} \right)^{1/2} \cdot \frac{0.31\xi + 0.5}{0.31\xi - 0.5} \quad (3.4.2)$$

式中：  $EA$ —拉索抗拉刚度，其中  $A$  为截面积，单位： $\text{m}^2$ ；

$\alpha$ —拉索倾斜角度，单位：rad；

$\delta$ —拉索垂跨比， $\delta = f/l_0$ ， $f$  为拉索垂度，单位：m， $l_0$  为拉索水平长度，单位：m。

3.4.3 对于垂度较小的拉索，即  $\Gamma \geq 3$ ，直接采用公式 3.3.2-2 计算索力，在索力计算时应采用偶数阶频率。

3.4.4 对垂度足够大的拉索，即  $\Gamma \leq 3$ ，采用以下公式通过第 2 阶频率计算索力；

1. 当  $\xi \geq 60$  时：

$$T = m(f_2 l)^2 \left[ 1 - 4.40 \frac{c}{f_2} - 1.10 \left( \frac{c}{f_2} \right)^2 \right] \quad (3.4.4-1)$$

2. 当  $17 \leq \xi \leq 60$  时：

$$T = m(f_2 l)^2 \left[ 1.03 - 6.33 \frac{c}{f_2} - 1.58 \left( \frac{c}{f_2} \right)^2 \right] \quad (3.4.4-2)$$

3. 当  $0 \leq \xi \leq 17$  时：

$$T = m(f_2 l)^2 \left[ 0.882 - 85.0 \left( \frac{c}{f_2} \right)^2 \right] \quad (3.4.4-3)$$

式中：  $c = \sqrt{\frac{EI}{ml^4}}$ 。

### 3.5 考虑复杂边界时拉索索力计算

3.5.1 当安装有减振器时，应先确定减振器刚度，并考虑复杂边界影响。

3.5.2 当已知减振器刚度时，宜结合拉索已知参数和测量所得固有频率，将减振器及其他影响集中到计算长度，对拉索索长进行修正，用  $T = 4mL_{eq}^2 (f_1)^2$  计算索力。

拉索等效索长应按下式计算：

$$L_{eq} = L - cL_{s1} \quad (3.5.2-1)$$

式中：  $L_{s1}$ —减振器中心至拉索固定端的距离；

$c$ —拉索索长修正系数

拉索索长修正系数  $c$  通过下式计算：

$$c = \frac{c_1}{c_{01} + c_1} \quad (3.5.2-2)$$

描述未考虑复杂边界的索力修正参数  $c_1$  通过以下公式计算：

$$c_1 = \frac{k_1 L_{s1}}{T_0} \quad (3.5.2-3)$$

式中：  $T_0 = 4ml^2 (f_1)^2$ ；

$k_1$ —减振器刚度，单位：N/m

描述固接边界拉索  $EI$ 、中间弹性支撑影响的修正参数  $c_{01}$  通过以下公式计算：

$$c_{01} = 1 + 6.2 \left( \frac{D}{L_{s1}} \right) + 106 \left( \frac{D}{L_{s1}} \right)^2 \quad (3.5.2-4)$$

式中：  $D$ —拉索直径，单位：mm

3.5.3 对于未知减振器刚度的拉索，宜采用模态振型法进行索力计算。计算公式如下

$$T = \frac{4m\pi^2 f_i^2}{\delta_i^2} - EI\delta_i^2 \quad (3.5.3)$$

式中：  $f_i$ —拉索第  $i$  阶固有频率；

$\delta_i$ —第  $i$  阶模态振型函数参数，模态振型函数参数  $\delta_i$  求解参见本指南第 3.5.4 条规定。

3.5.4 通过附录 A 中方法得到拉索五个测试点处的振型幅值  $\phi_1 \sim \phi_5$ ，其中任意两点(如  $i$  和  $j$  点)在某阶模态的模态位移比如下：

$$\lambda_{ij} = \frac{\phi(x_i)}{\phi(x_j)} = \frac{c1 \sin(\delta \cdot x_i) + c3 \cos(\delta \cdot x_i) + c3 \sinh(\varepsilon \cdot x_i) + c4 \cosh(\varepsilon \cdot x_i)}{c1 \sin(\delta \cdot x_j) + c3 \cos(\delta \cdot x_j) + c3 \sinh(\varepsilon \cdot x_j) + c4 \cosh(\varepsilon \cdot x_j)} \quad (3.5.4-1)$$

进一步转换得到：

$$\begin{aligned} & c1(\sin(\delta \cdot x_i) - \lambda_{ij} \sin(\delta \cdot x_j)) + c2(\cos(\delta \cdot x_i) - \lambda_{ij} \cos(\delta \cdot x_j)) \\ & + c3(\sinh(\varepsilon \cdot x_i) - \lambda_{ij} \sinh(\varepsilon \cdot x_j)) + c4(\cosh(\varepsilon \cdot x_i) - \lambda_{ij} \cosh(\varepsilon \cdot x_j)) = 0 \end{aligned} \quad (3.5.4-2)$$

构建特征方程组： $S_{4 \times 4} [c1 \ c2 \ c3 \ c4]^T = 0$ ，由于  $c1 \sim c4$  有非零解，则存在特征矩阵  $S$  的行列式等于 0，如下式所示。

$$|S| = 0 \quad (3.5.4-3)$$

$\varepsilon$  通过  $\delta$  唯一表达，求解上式得到  $\delta$ ，代入公式 3.5.3 即可求解索力。

#### 条文说明：

1 拉索的测试原理基于弦振动理论。单位长度质量为  $m$  的索在张力  $T$  作用下被张紧，索的抗弯刚度为  $EI$ ，如图 3.5.4 所示。当忽略拉索垂度影响时，此时拉索相当于轴向受拉梁，得到无阻尼自由振动方程为：

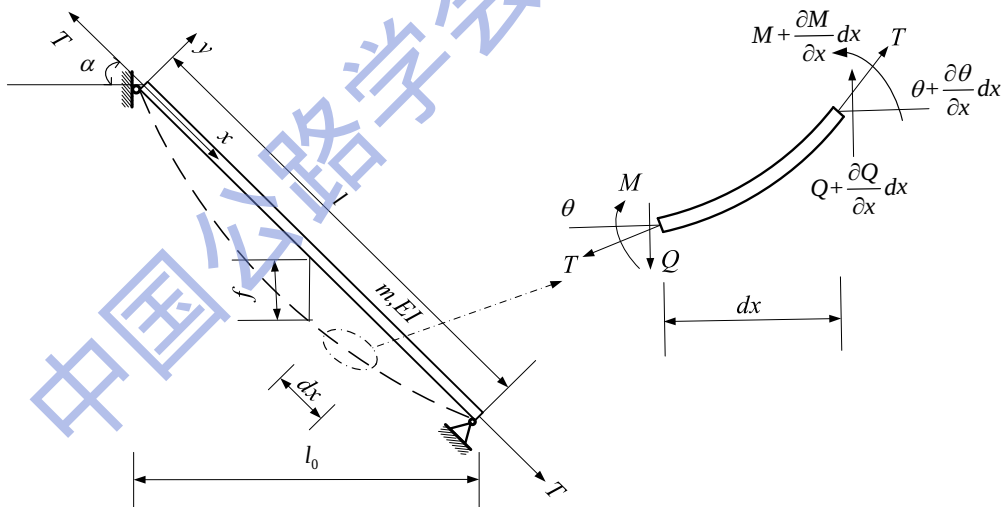


图 3.5.4 索振动模型示意图

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial^4 x} - T \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.5.4-4)$$

式中,  $u(x,t)$  为拉索上各点在时刻  $t$  的横向位移, 单位: m;

进一步推导可得到振型函数为:

$$\phi(x) = c1 \sin(\delta \cdot x) + c2 \cos(\delta \cdot x) + c3 \sinh(\varepsilon \cdot x) + c4 \cosh(\varepsilon \cdot x) \quad (3.5.4-5)$$

式中:  $\delta$  与  $\varepsilon$  为振型函数参数。

当两端简化为铰支时, 由上述公式进一步推导可求得公式 3.3.2-2。

2 在实际工程应用中, 对于长度较大的拉索 ( $\xi \geq 210$ ), 横向刚度主要由几何刚度组成, 抗弯刚度所占总体横向刚度的比例很小, 宜忽略其影响, 不考虑垂度影响下采用公式  $T = 4ml^2(f_1)^2$  进行索力计算得到具有较高精度的拉索索力。对于不能忽略抗弯刚度的影响的索 ( $\xi \leq 210$ ), 则采用公式 3.3.2-2 进行索力计算。然而公式 3.3.2-2 是建立在铰支边界基础上推导得出索力, 实际中的拉索边界并不是铰支, 索长越短, 边界条件就会趋向于固支, 因此利用此式计算短粗索仍有较大误差。针对短粗索, 可按本指南第 3.5 条中考虑复杂边界方法计算索力。

3 对于公式  $T = 4ml^2(f_1)^2$ , 采用以下平均处理法公式对实测前几阶频率进行拉索第 1 阶频率的准确识别:

$$f_1 = \frac{f_n + f_m + f_k}{n + m + k} \quad (3.5.4-6)$$

式中:  $f_n, f_m, f_k$  分别为第  $n, m, k$  阶频率, 单位: Hz。

如果不能识别得到拉索的第 1 阶频率, 可以利用相邻两阶固有频率的差值来代替, 并宜取多次高阶频率差的平均值, 减小近似误差。拉索频率差用  $\Delta f = f_{n+1} - f_n$  计算。

4 公式 3.3.3 同时考虑了抗弯刚度和边界条件的影响, 将抗弯刚度作为隐式计算参数, 有效避免拉索抗弯刚度难以准确识别问题。

5 垂度对第 1 阶频率影响较大, 对偶数阶影响忽略不计, 为最大限度避免垂度效应, 应采用偶数阶频率计算索力。

6 以往的基于模态振型的索力测试方法只局限于实验室, 在实际桥梁推广中需要在拉索中安装较多传感器, 安装过程繁琐。采用非接触式索力测量方法可以方便快捷获得多个测点的位移响应数据, 进而通过模态分析进行索力测量。非接触式测量凭借全场多点测量、经济性强、效率高、成本低等优势使得模态振型法进行实桥索力测量成为可能。

## 4 光学测量

### 4.1 一般规定

4.1.1 基于光学相机的现场测量是指利用单个光学相机设备按规定周期或在线对大跨桥梁单/多根拉索的索力进行现场测量。测量内容为拉索二维振动信号的测量，索力计算方法应按照本指南第3章的规定执行。

### 4.2 光学测量设备

4.2.1 光学相机非接触式索力测量设备应包括站立式光学测量设备和在线式光学测量设备。

4.2.2 站立式测量设备应包括成像设备、镜头、计算机、三角架、数据线等，示意图如图 4.2.2 所示。

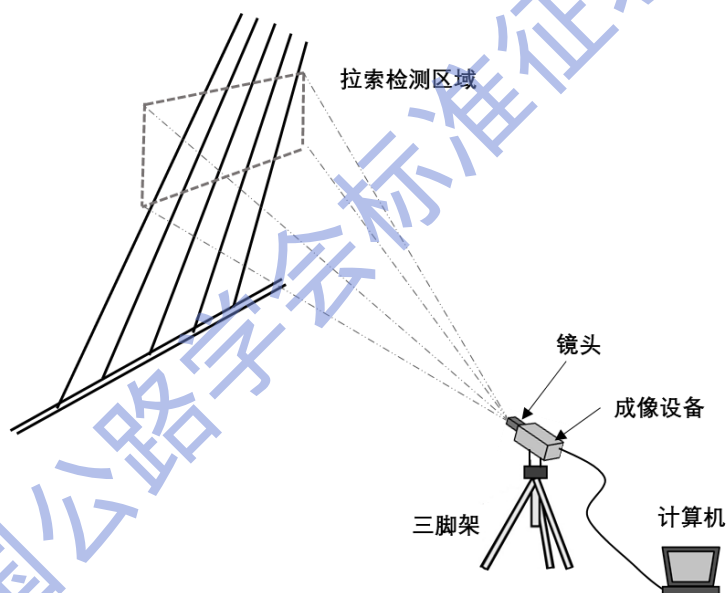


图 4.2.2 站立式测量设备示意图

4.2.3 在线式光学测量设备应具备边缘计算能力的实时图像位移测量仪器，硬件主要包括工业相机及镜头、微型工控机、防护壳、温控风扇以及各类接头等。工业相机实时传输至微型工控机

的图像可以直接进行分析计算处理，实现位移的连续在线监测（图 4.2.3）。

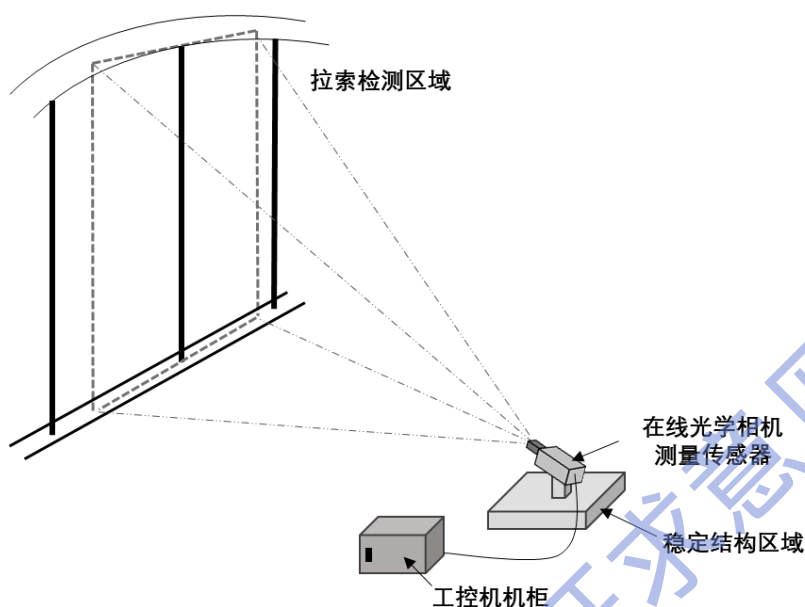


图 4.2.3 在线式光学测量设备示意图

#### 条文说明：

鉴于长期实时监测的需求，应选择工业相机，工业相机连续工作时间长，拍摄帧率高，传输速率高，环境适应性强。工业相机可分为 USB3.0 接口和 Gige 网口两类，USB3.0 工业相机传输至工控机距离一般不超过 5 米，Gige 工业相机传输至工控机距离可达到 100 米。

一般采用 USB3.0 工业相机与工控机安装同一处。若检修不便或者安装不便时，可考虑采用 Gige 接口工业相机，将工控机安装至检修方便处，但考虑到 Gige 网口传输量不及 USB3.0 接口，此时应确保计算帧率满足要求。

4.2.4 测量设备应满足检测精度、量程和耐久性要求，且应持有产品合格证和计量鉴定报告。

4.2.5 成像设备应符合下列要求：

1 可采用工业相机或普通相机。

2 成像设备分辨率应考虑被测拉索的测试精度，根据测试精度要求选择分辨率。成像设备应具备的最小像素分辨率通过以下公式计算：

$$R_{\min} = \frac{FOV}{l_{\min}} \cdot p_{\min} \quad (4.2.5)$$

式中： $R_{\min}$ —成像设备最小像素分辨率，单位：像素；

$FOV$ —视场，即成像设备可检测到的最大区域，单位：mm；

$l_{\min}$ —检测目标最小特征长度（视觉系统分辨率），单位：mm；

$p_{\min}$ —最小特征像素数，无特别要求时，取值为2；

3 成像设备最大采集帧率应满足本指南第4.5条采集频率的要求。

#### 条文说明：

1 工业相机一般经过特殊设计，结构紧凑结实、不易损坏，连续工作时间长，快门时间特别短，传输速率高，能清晰地抓拍高速振动的结构，适合于在高速拍摄、长期实时监测、恶劣环境等场景下使用。普通相机包括数码相机、单反相机、手机等，价格相对便宜，使用便捷，适合于在没有特定测试要求下使用。

2 当有实时监测、评估和预警需求时应采用工业相机。当测量场地不允许或不方便搭设平台放置计算机及没有供电设备时，或无实时监测需求的情况下宜采用普通相机或者工业相机先进行数据采集，再进行后处理。

3 根据奈奎斯特采样定律，必须对信号每个周期采样两个点以上才能完整恢复该信号，所以在没有特别要求的情况下，应至少采用两个像素来表示目标中的最小特征。

视觉系统分辨率是成像设备可以识别出检测目标的最小细节或最小特征，如“要求系统检测精度达到0.1mm”，应确定待测拉索的精度，参照计量检定规程《JJG（交通）143-2020 桥梁挠度检测仪》中对计量性能要求的规定。

以某个例子说明，有一个分辨率为1200x960的相机，希望知道在任意方向上可以检测出的最小特征的分辨率。因为要求测量不依赖于方向，因此取尺寸参数中的短边，即960，假设想捕获的 $FOV$ 是250mm。因此，能够检测到的最小特征尺寸是 $FOV$ 除以传感器分辨率再乘以2（最小特征尺寸 $= (250/960) * 2$ ）。这样可以计算出能检测到的最小特征尺寸就是0.52mm。需要注意的是，该公式没有考虑到镜头失真、具体的特征检测算法以及是否采用亚像素精度。

4 当被测物体有运动要求时，要选择帧数高的工业相机。但需注意，分辨率越高，帧数越低。

4.2.6 镜头的选择应符合下列要求：

1 宜选用量测型镜头，镜头靶面尺寸应大于等于图像传感器的对角线尺寸，镜头接口应与相机接口相适配。宜选择低畸变的镜头，减少因畸变造成的误差。

2 镜头焦距的选择应由测量工作距离、图像传感器尺寸、视场范围确定，按以下公式确定所需焦距大小：

$$\frac{S}{FOV} = \frac{f}{WD} \tag{4.2.6}$$

式中：S — 图像传感器尺寸，单位：mm；

f — 镜头焦距，单位：mm；

WD — 工作距离，即相机镜头到检测目标的距离（相当于物距），单位：mm。

条文说明：

一般出厂的镜头都有标准焦距，通常包括6mm，25mm，35mm，50mm，75mm等几种。一旦选择的焦距接近图像采集系统所需焦距的镜头，应调整物距以使被检测物体合焦。工作距离和图像传感器尺寸确定的情况下，焦距数值小，所观察的视场范围大；焦距数值大，所观察的视场范围小。

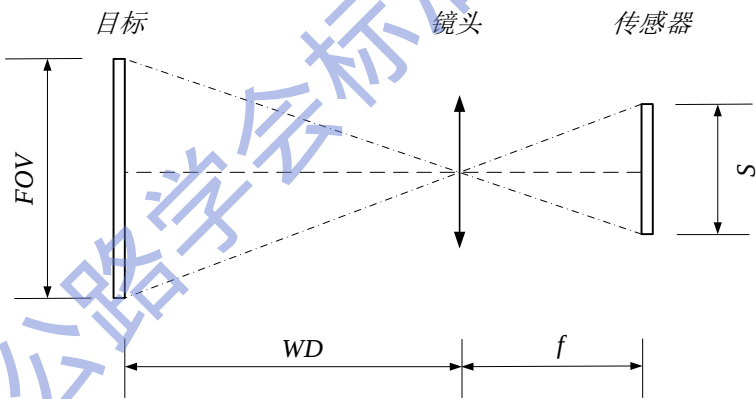


图 4.2.6 成像原理示意图

4.2.7 在线式光学测量设备应具备相机参数设置、数据采集和处理、数据储存等主要功能，主要包括以下功能：

- 1 具备工业相机工作状态和通信状态监测和显示功能；
- 2 具备工业相机采集帧率、曝光时间、增益等参数调整功能；

3 具备目标位移的自动计算功能，实时显示数位移据曲线或列表，实时保存位移文本数据；

4 具备不小于 180 天的位移数据存储空间，应能够实现在网络中断情况下原始数据的本地存储，并应在网络恢复后将数据回传至监控中心；

5 具备图像或视频数据本地存储回放功能，图像或视频数据存储方式宜采用循环更新存储方式，普通图像或视频存储宜不小于 1 个月，突发事件图像或视频应进行转移备份存储并永久保存；

6 具备对桥梁拉索出现的异常状态进行实时警示报警的功能；

7 在线式光学测量设备应保证其在复杂环境下（光影变化、基点扰动等）的匹配精准度，能够在高温、高振动、高电磁干扰等复杂环境下连续稳定运行。

#### 条文说明：

在线式光学测量设备为保证其实时性，应轻量化算法，图像追踪算法宜采用灰度平方质心法。

4.2.7 光学测量设备，除应符合本指南外，尚应符合国家现行有关标准/规程的规定。

### 4.3 现场测试要求

4.3.1 测量前应掌握被测拉索的预估索力、锚固点间的距离、截面构造、单位长度质量、减振器形式及位置等相关参数。

4.3.2 现场测量环境应符合下列要求：

1 拉索应受到良好的光照条件，表面应亮度均匀，且与背景明显区分开。

2 现场工作温度、湿度等应符合测量设备工作要求，必要时可采用防护罩。

4.3.3 测量前应保证成像设备、镜头和三脚架之间连接稳固，保证成像设备与计算机采集系统的数据连接线接触良好。

4.3.4 成像设备宜布设在稳固的地面或平台上以避免振动。

4.3.5 成像设备站点视野应能覆盖拉索所选定测量区域，应避免障碍物遮挡被测拉索。

4.3.6 成像设备站点应符合现场交通条件要求，应选择安全区域，宜选取检修道。

4.3.7 成像设备光轴应尽量垂直于拉索长度方向。

4.3.8 拉索测量区域应符合下列要求：

- 1 远离锚固端，避免模态节点区域。
- 2 拉索测量区域应选择拉索表面特征明显处，便于后处理图像追踪。
- 3 拉索测量区域宜位于图像中心处。
- 4 应考虑拉索景深范围，使拉索测量区域清晰完整，反差适中。

4.3.9 非接触式索力在线测量中，现场应对测点与测量仪器予以防护，避免日照、风雨、振动和周围其他干扰。

4.3.10 在线式光学测量设备安装运行后，应保持供电和通信畅通，以避免在线系统停止工作和数据缺失。

4.3.11 应详细检查接电、接地、防雨（水）、防尘、防风、防雷等措施是否正确、完备；所有设备都应轻拿轻放、安置稳固；运输过程中应按设备本身的防振、防尘要求进行包装防护。

#### 4.4 现场测量方法

4.4.1 现场测试中，根据成像设备站点选定的不同，测量方法主要分为以下两种，拉索位移提取方法参见附录 B。

1 在现场允许条件下，宜将成像设备放置于桥墩上部桥面板或桥塔与桥面板连接处的检修道或安全道上，将成像设备瞄准对面一侧拉索面。

2 若桥上条件无法满足，宜将成像设备放置桥梁底部侧面，根据公式 4.2.6 由所选成像设备和镜头确定工作距离，将成像设备瞄准较近一侧拉索面。

4.4.2 进行多根拉索索力同时测量时，应综合考虑成像设备分辨率、视场范围、镜头焦距、图像传感器尺寸、测量距离等因素影响。首先根据本指南第 4.2.5 条中确定成像设备的分辨率后，根据所需测量拉索根数估计视场范围，再通过公式 4.2.6 选择合适镜头。

#### 条文说明：

拉索测量根数根据现场条件确定。在测量距离和图像传感器尺寸确定的情况下，若进行单根拉索索力测量时宜选择大焦距镜头。若进行多根拉索索力测量时宜选择小焦距镜头，拉索数目越

多，焦距越小。应保证最远处被测拉索直径占据至少 20 个像素，拉索数目不超过 10 个为宜。

#### 4.4.3 现场激振条件要求

1 环境振动作用下，当拉索振动响应比较微弱时，测量设备测试站点宜选取较近位置或被测拉索测试区域宜选取拉索中部附近响应较大位置。

2 当采用外部激励装置加大拉索振动响应时，激振装置选用原则为激励力的频率范围大于所需的频带范围，保证能够激励起被测拉索所需的各阶固有模态频率，激励位置宜在拉索振动响应比较大的位置，激励方向应与传感器采集方向一致。激励荷载应保证不破坏拉索的保护套，应符合国家有关安全生产的规定。

#### 4.4.4 在线式光学测量设备的测点放样与站点布设应符合下列规定：

- 1 现场测点放样应事先准备详细的测点布置方案。
- 2 站点布置时，如需局部调整布置方案，应做好记录。
- 3 站点布设时应保证成像设备与安装支架黏结良好，不松动，无振动，且对站点做好防护措施。

#### 4.4.5 采用在线式光学测量设备测量时，现场测量应满足下列要求：

- 1 在线式光学测量设备主机站点应根据现场测试条件布设，不应阻碍交通，宜安装在稳定结构上，如桥塔上。
- 2 其余现场测试要求参见本指南第 4.3 条相关规定。
- 3 成像设备可同步监测多根拉索，相关要求参见本指南第 4.4.2 条相关规定。

### 4.5 数据采集

4.5.1 数据采集前应调试成像设备位姿及光圈并对焦，成像设备应连接至计算机，以便于从计算机采集软件上查看实时图像。

4.5.2 确定成像设备站点、位姿后，在数据采集软件中根据各拉索距离成像设备的距离确认拉索的编号，并做好工况记录工作。工况记录表见附录 D，宜包含下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 检测目的、内容、范围及依据；

- 3 成像设备及其参数;
- 4 计算机采集系统参数选择;
- 5 拉索编号、基本信息;
- 6 工况存储文件夹;
- 7 必要的数据处理过程。

4.5.3 根据成像设备的性能指标和拉索的设计频率设置采样频率以及数据采集长度。采集频率根据奈奎斯特采样定理确定,采集频率不应小于模拟信号频谱中最高频率的 2 倍,即  $f_s \geq 2f_{\max}$ 。考虑到光学相机通过测量拉索的位移响应得到拉索频率一般不超过五阶,因此光学相机的采样频率不宜小于 30Hz。频率分辨率不应小于 0.01Hz。

## 4.6 数据分析

4.6.1 图像预处理:应视具体要求,宜选择适宜的图像预处理操作(包括降噪与增强、畸变校正、以及裁剪缩放等)。

4.6.2 提取位移:应在初始参考图中选择被测拉索的兴趣区域,通过图像追踪算法得到拉索的位移。常见的图像追踪算法包括数字图像相关技术(DIC)、SIFT 或者 SURF 特征点匹配、Lucas-Kanade 光流法、边缘检测、质心检测、角点检测等,宜采用数字图像相关技术进行拉索位移测量,相关原理详见附录 B。

4.6.3 位移数据预处理:测量的位移数据应进行预处理,常用的预处理方法有消除趋势项、滤波以及施加窗函数等,振动信号预处理流程见附录 A;

4.6.4 拉索频谱分析:对预处理后的位移数据进行傅里叶变换,读取能量峰值对应的横坐标作为拉索的各阶固有频率。

### 条文说明:

1 对非接触设备采集得到的拉索振动信号宜采用时域描述或频域描述进行分析与结果呈现。时域描述用来描述信号的幅值随时间变化的数学表达式;频域描述是指将采集的信号通过傅里叶变换转换为频域信号,绘制信号幅值与结构固有频率的变化关系。在时域信号描述中,拉索各阶固有频率可以通过时域模态参数识别方法得到,常用的时域模态识别方法有自然激励法、随机减

量法、随机子空间方法和特征系统实现算法等。在频域信号描述中，拉索各阶固有频率可以从频谱曲线上得到，常用的频域模态参数识别算法有峰值法、复模态指示函数法和 PolyMAX 方法等。

2 宜通过拉索实测相邻阶次频率的差值判断是否存在漏频。若各相邻阶频率差值大致相等，且近似于第 1 阶频率，则不存在漏频。

4.6.5 拉索索力计算：结合拉索已知参数和测量所得动力特性（固有频率、模态振型），根据本指南第 3.2~3.5 条索力相关公式求解索力大小。

中国公路学会标准征求意见稿

5 微波雷达测量

5.1 一般规定

5.1.1 基于微波雷达的索力现场测量是指按规定周期或在线利用微波雷达设备对大跨桥梁单/多根拉索的索力进行现场测量。测量内容为被测拉索沿微波雷达视线方向的位移测量，索力计算方法应按照本指南第 3.2 条~3.5 条的规定执行。

5.1.2 根据微波雷达工作原理，微波雷达设备具备全天候全天时、远距离高精度和微波穿透性的优势。相较于光学相机、加速度计等传感器，微波雷达较适用于斜拉桥拉索面各拉索索力的同步测量，以及适用于具备高密度聚乙烯（HDPE）护套的拉索索力测量。

5.2 微波雷达测量设备

5.2.1 微波雷达非接触式索力测量设备应包括雷达主机、计算机、三脚架、移动电源、数据线等，示意图如图 5.2.1 所示。

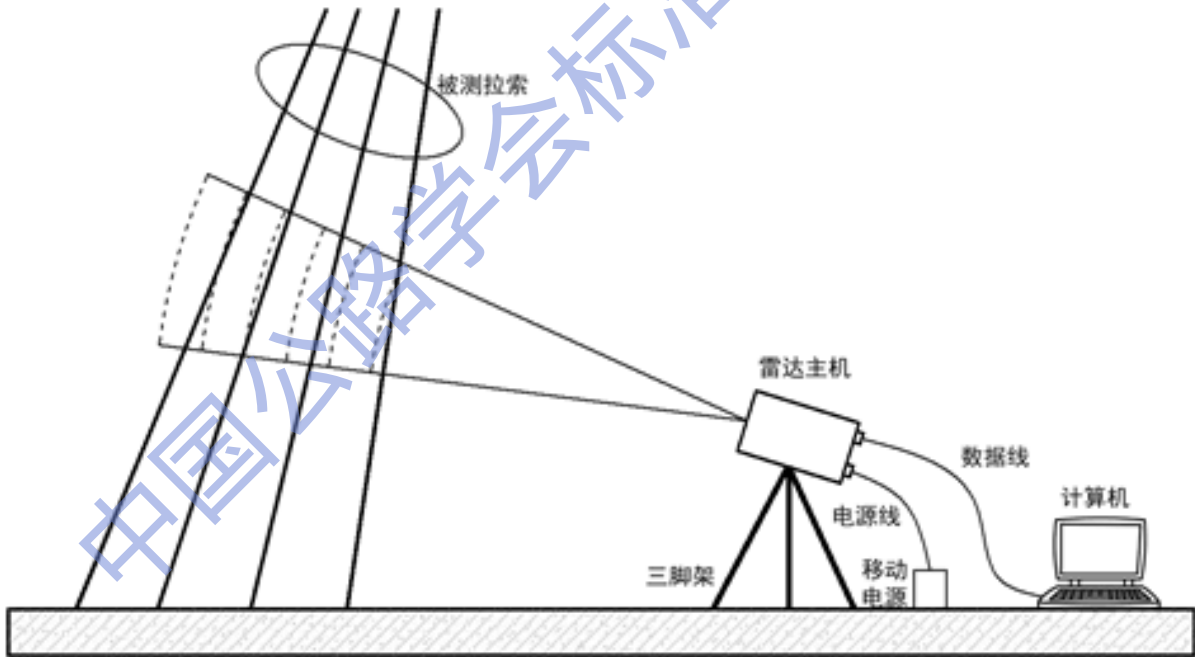


图 5.2.1 微波雷达非接触式索力测量设备示意图

5.2.2 微波雷达非接触式索力测量设备的工作频率应按国家无线电管理委员会规定，根据测试

要求宜在  $K$  波段中选取，具体指标由产品规范规定。

5.2.3 微波雷达非接触式索力测量设备的测量精度不宜低于  $0.02\text{mm}$ ，距离分辨率不宜低于  $2\text{m}$ 。

5.2.4 微波雷达非接触式索力测量设备的工作温度  $-40^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$ ，应具有防雨、防雷、防潮、防风沙措施，雷达主机为小功率，辐射安全应符合《电磁环境控制限值》GB 8702-2014 的规定。

5.2.5 微波雷达非接触式索力测量设备应具备雷达工作参数控制调节、被测拉索位移监控、拉索数据采集处理、测试数据读取显示等主要功能。一般应包括以下方面：

1 由于索力测试现场环境不同，所需配置的雷达参数（发射增益、回波门限、相干累积次数）、辅助单元诸如激光指示器和激光测距仪工作状态、以及微波雷达设备通信在线状态不同，微波雷达系统应具备微波雷达工作状态和通信状态控制调节以及显示功能；

2 微波雷达设备系统应具备被测拉索距离信息和其位移时程曲线实时监控和选取功能，以便工作人员确定被测目标编号和监控数据是否异常；

3 在拉索大位移振动时，即其位移变化量大于雷达设备微波波长的二分之一，微波雷达设备系统应具备自适应相位解缠绕功能，以实现被测拉索真实位移数据的自动录取；

4 微波雷达系统应具备多根拉索位移数据的实时显示和存储回放等功能。

5.2.6 微波雷达非接触式索力测量设备，除应符合本指南外，尚应符合国家现行有关标准/规程的规定。

### 5.3 现场测试要求

5.3.1 测量前应掌握被测拉索的基本信息，具体参见本指南第 4 章第 4.3.1 条相关规定。

5.3.2 现场测量环境应符合下列要求：

1 测试应在不影响正常工作的振动和电磁干扰等的条件下进行。

2 气象条件相对稳定，应不受到强电磁场、电场、以及振动等干扰。

3 现场工作温度、湿度等应符合测量设备工作要求，必要时采用防护罩。

5.3.3 测量前应保证雷达主机和三脚架之间连接稳固，保证雷达主机与计算机采集系统的数据

连接线接触良好。

5.3.4 微波雷达设备宜布设在稳固的地面或平台上以避免振动。

5.3.5 微波雷达设备站点视野应能覆盖拉索所选定测量区域，应避免障碍物遮挡被测拉索。

5.3.6 微波雷达设备站点应符合现场交通条件要求，应选择安全区域，宜选取检修道。

5.3.7 现场测试中，拉索测量区域应远离锚固端，避免模态节点区域。

5.4 现场测量方法

5.4.1 现场测试中，根据微波雷达站点选定的不同，测量方法主要分为以下三种，拉索位移提取方法参见附录 C。

1 当测量单根拉索振动信号时，宜将微波雷达放置于图 5.4.1 中的位置 1 测量。

2 当测量多根拉索索力时，现场测试环境较好，允许分批次测量拉索面。宜将微波雷达放置于图 5.4.1 的位置 2 测试距离较近的多根拉索；宜将微波雷达放置于图 5.4.1 的位置 3 测试距离较远的多根拉索。

3 当测量多根拉索索力时，现场测试环境恶劣，不允许分批次测量拉索面，宜将微波雷达放置于图 5.4.1 的位置 2 测试整个拉索面。针对该监测方案，测试中微波雷达的有效测量单元数目小于监测拉索数，且各距离单元内的信号为各拉索信号的混叠信号，需考虑引入信号盲源分离的方法分离各拉索信号以满足测试需求。

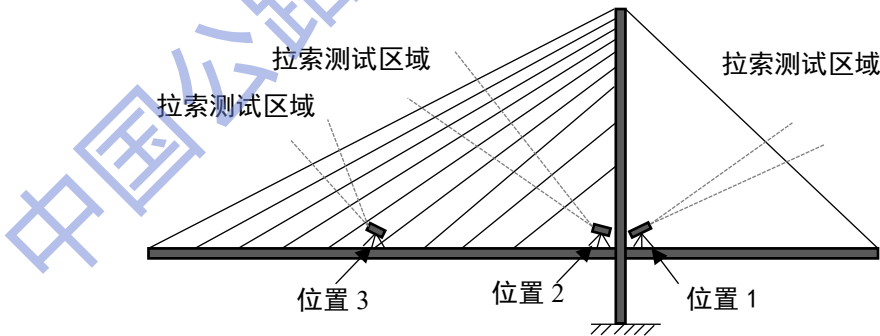


图 5.4.1 微波雷达非接触式测索力现场测试位置示意图

条文说明：

1 在现场测试环境允许条件下，将微波雷达放置于桥墩上部桥面板或桥塔与桥面板连接处，以尽量抑制桥面板的振动对测试结果的影响；同时，通过现场勘测以合理俯仰角度监测桥梁拉索位移。

2 分批次测量多根拉索振动信号时，通过现场勘测以合理俯仰角度监测桥梁多根拉索，从而实现各拉索位于微波雷达的不同测试距离单元内，可通过不同距离单元信息判别被测拉索编号。

3 若上述分批次测试条件无法满足，则宜将微波雷达放置桥梁底部侧面，在微波雷达水平面上尽可能同被测试多拉索平行。此时，微波雷达测试距离相对较远，其视线方向上距离单元辐射范围越宽，同一距离单元内存在多根拉索。因此，需引入融合变分模态分解(VMD)和时频分析的单通道信号盲源分离方法进行信号分离。具体为：1)对雷达距离单元观测信号进行变分模态分解；2)将雷达距离单元观测信号与分解得到的各独立模态分量及其残余项组成多维虚拟信号；3)基于贝叶斯信息准则估计雷达距离单元观测信息中信号源的数目；4)构建正定观测信号，并基于时频分析进行信号盲源分离；5)对源信号进行估计；6)基于本指南第4章相关规定的索力公式进行拉索索力识别。

5.4.2 现场激振条件要求参见本指南第4.4.3条相关规定。

## 5.5 数据采集

5.5.1 数据采集前应调试微波雷达设备位姿以确定拉索测量区域位于微波雷达视线内，上述设备应连接至计算机，以便于从计算机上查看实时被测拉索的回波信号。

5.5.2 确定微波雷达设备站点、位姿后，在数据采集软件中根据各拉索距离微波雷达设备的距离确认拉索的编号，并做好工况记录工作。工况记录表见附录D，宜包含下列内容：

- 1 工程概况。
- 2 检测目的、内容、范围及依据。
- 3 微波雷达设备及其参数。
- 4 计算机采集系统参数选择。
- 5 拉索编号、基本信息、工况存储文件夹。
- 6 必要的数据处理过程。

5.5.3 根据微波雷达的性能指标和拉索的设计频率、横截面积等参数，设置采样频率、微波信号相干累计次数以及数据采集长度。

5.5.4 微波雷达设备的采样频率应根据奈奎斯特采样定理确定，即  $f_s \geq 2f_{\max}$ 。考虑到微波雷达通过测量拉索的位移响应得到拉索频率一般不超过五阶，因此微波雷达设备的采样频率不宜小于 30Hz。频率分辨率具体参考本指南第 4.5.3 条规定。

## 5.6 数据分析

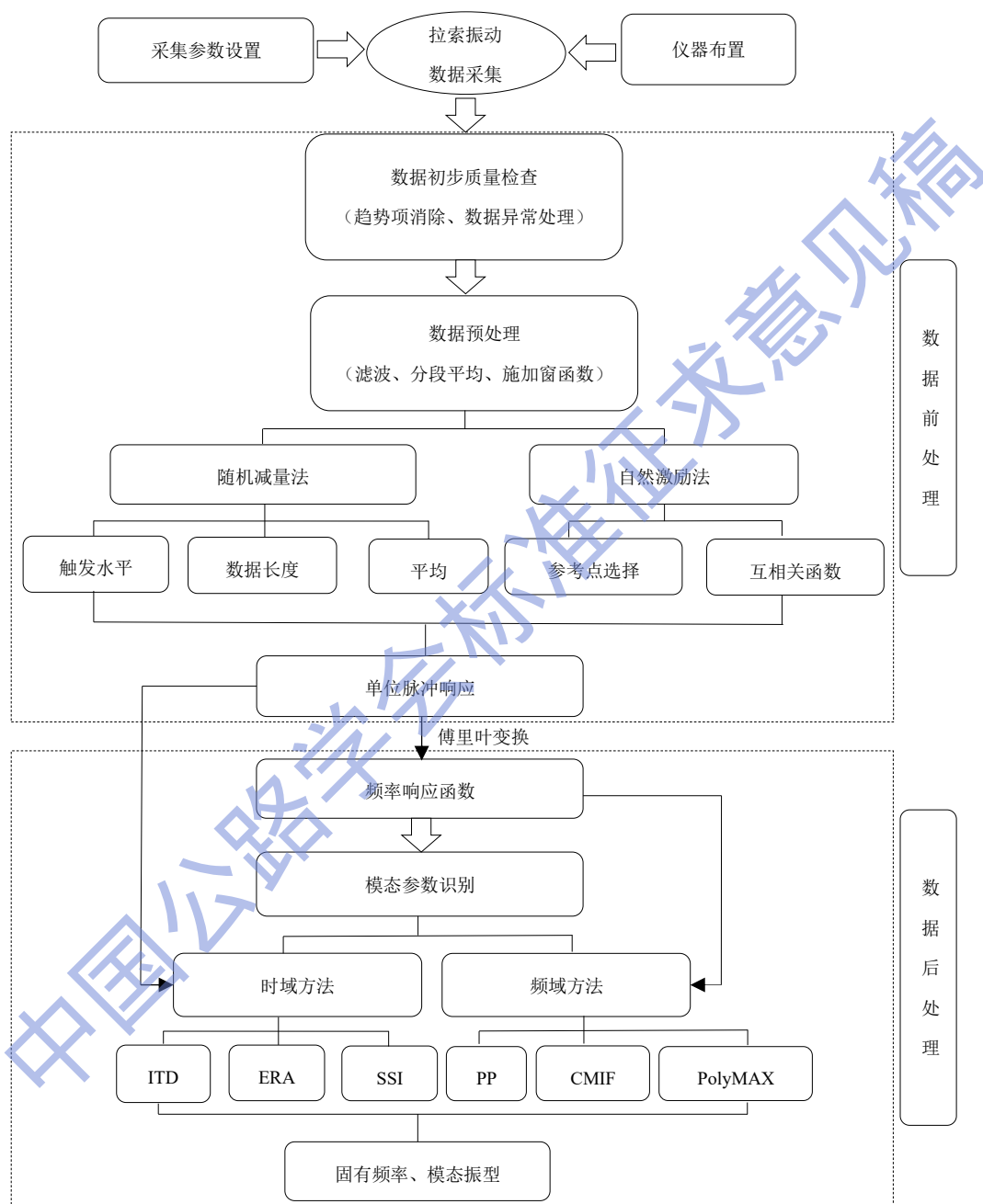
5.6.1 数据预处理：应对测试信号进行检查和评判，将采集到的拉索位移响应导入数据处理软件，应视具体要求，宜选择适宜的数据预处理操作（包括降噪与增强、去趋势项等）。

5.6.2 提取拉索位移：基于线性调频技术，微波雷达设备通过发射并接收微波信号，得到各被测拉索距离微波雷达的距离信息，进而通过相位干涉法得到被测拉索的位移信号，具体原理详见附录 C。

5.6.3 拉索频谱分析和拉索索力计算参见本指南第 4.6.4 条和 4.6.5 条相关规定。

## 附录 A 拉索振动测试及数据处理流程

### A.1 振动数据处理流程示意图



## A.2 频域识别法

频域模态参数识别法主要有峰值拾取法 (Peak Picking, PP), 复模态指数函数法 (Complex Mode Indicator Function, CMIF), 多参考点最小二乘复频域法 (Poly Reference Least Squares Complex Frequency, PolyLSCF) 等。峰值拾取法是最简单直观的一种方法, 是通过直接选取频响函数或功率谱密度函数的峰值来获取结构的固有频率, 这种方法无法识别阻尼和振型, 也无法识别密集模态, 因此辨识精度较低。复模态指示函数法最初仅对频响函数矩阵作奇异值分解获取奇异值曲线用以确定模态阶数, 后来用奇异向量加权获取增强频响函数, 用以识别固有频率、阻尼比、振型和模态缩放系数, 形成了应用广泛的复模态指示函数法, 该方法在识别密集模态方面具有很高的精度。在随后的研究中发现, 最小二乘复频域 LSCF 法不易识别密集模态、振型, 原因是 LSCF 方法采用的是标量的公分母模型, 后来通过使用频响函数的右矩阵分式模型代替公分母模型, 将最小二乘复频域法推广到多参考点形式, 发展为多参考点最小二乘复频域法, 该方法能够同时估计极点与模态参与系数, 在密集模态识别、振型估计等方面相对于最小二乘复频域法有了较大提高。该方法后来被 LMS 公司采用, 成为 Test.Lab 测试系统中的 PolyMAX 方法。

## A.3 时域识别法

时域模态参数识别法主要有随机减量法 (Random Decrement Technique, RDT), 自然激励技术 (Natural Excitation Technique, NExT), 特征系统实现算法 (Eigensystem Realization Algorithm, ERA) 和随机子空间识别法等。随机减量法和自然激励法严格意义上并不是一种独立的参数识别方法, 他们都仅体现了一种参数辨识的思想, 即怎样从随机振动响应数据中获取自由衰减响应数据。随机减量法的主要思想是利用平稳随机振动信号的均值为零的性质, 将包含有确定性振动信号和随机信号两种成分的实测信号通过选取初始触发值经过多次平均, 就将确定性信号从随机信号中分离出来, 得到自由衰减振动响应信号, 而后便可利用时域识别方法进行模态参数识别。自然激励技术是目前处理环境振动模态参数识别时较为常用的一种预处理方法, 该方法利用白噪声激励下结构的响应信号间的互相关函数与脉冲响应函数具有相似的数学表达式这一性质, 采用互相关函数代替脉冲响应函数, 然后采用常用的时域参数识别算法识别结构的模态参数。特征系统实现算法是一种多输入多输出的时域模态参数识别方法, 它只需很短的自由响应数据便能识别参数, 且识别速度快, 对低频、密频、重频有很强的识别能力, 更重要的是能得到系统的最小实现, 便于控制应用。随机子空间法是目前应用非常普遍且效果良好的方法。随机子空间来自于控制领域, 由 Bart Peeter 等人提出, 该方法以离散时间状态空间模型为基础, 直接处理时间序列, 假设输入信号为随机白噪声, 适用于环境激励条件下结构模态参数的识别。

## 附录 B 基于光学测量的拉索位移提取算法

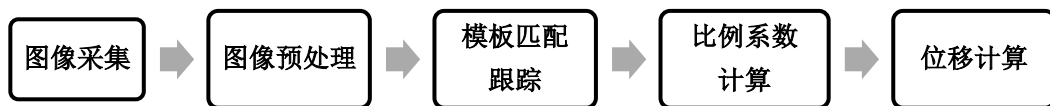


图 B.1 基于光学测量的拉索位移提取算法示意

数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）方法通过处理变形前后被测物体表面的两幅数字图像来直接获得位移和应变信息。它的基本流程如图 B.1 所示。相机连续拍摄拉索图片，采集图像，将图像中拉索产生位移的区域进行网格划分，将每个子区域当成刚性运动，利用图像去噪、图像增强等数字图像方法将图像进行预处理，再将图片转换为计算机可以处理的二值图像。采取设定阈值、采取图像分割等图像相关算法获取图像边缘，针对每个含有追踪目标的子区域，即模板，通过在变形后的图像中做预先定义的相关函数运算，完成全局搜索。建议采用标准化协方差互相关函数：

$$C_{f,g}(\vec{p}) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m][g(x',y') - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \quad (\text{B.0-1})$$

在变形后的图像中搜索与该子区域互相关系数为最大值的区域，即该子区域在变形后的位置，完成模板匹配跟踪。图像匹配获得目标的像素变形信息之后，便是通过计算得到位移换算关系，最后再通过坐标转换得到拉索实际位移。数字图像相关方法的基本原理如图 B.2 所示。

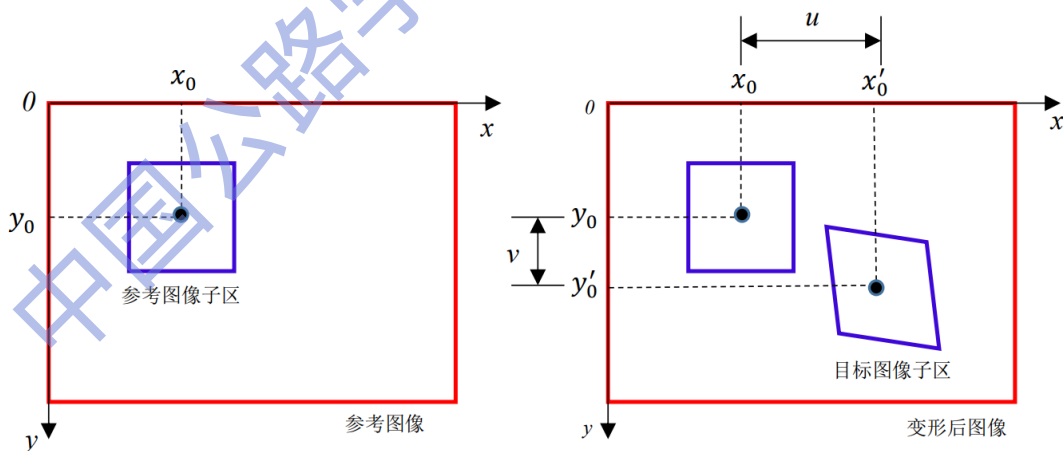


图 B.2 变形前后图像子区示意图

## 附录 C 基于微波雷达的拉索位移提取算法

### 1 微波雷达测距原理

如图 C.1 所示, 雷达主机内部发射机产生线性调频连续波信号, 经雷达主机内部放大器放大后通过发射天线发射出去, 当发射的微波信号遇到被测索后反射回来, 雷达主机的接收天线接收回波信息, 经雷达主机内部接收机依次混频、滤波处理后, 经过雷达主机内部的信号处理机采样后获得零中频 I/Q 信号, 该信号含有被测索的距离信息和微变形时程信息。

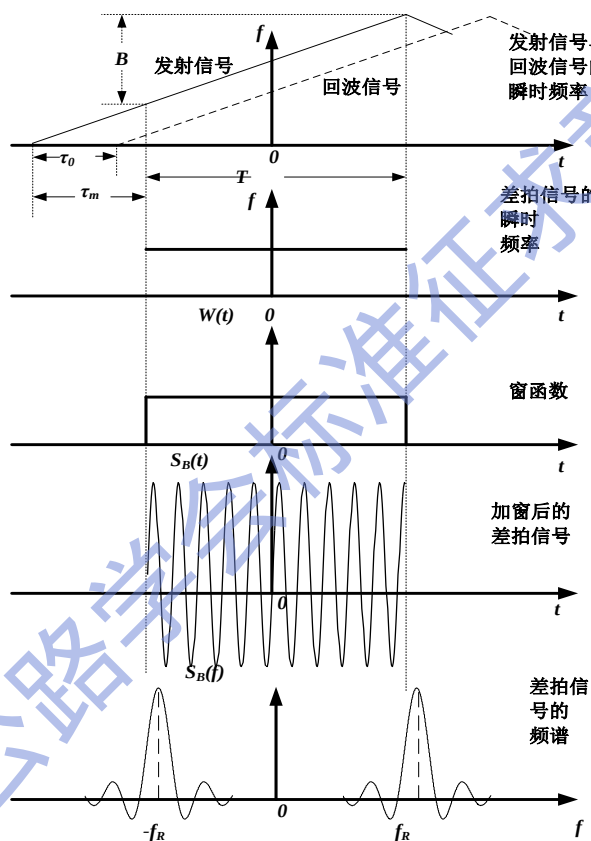


图 C.1 回波信号混频处理示意图

雷达主机对回波信号混频处理示意图见图 C.1 所示。雷达主机内部发射机发射信号为:

$$s_t(t) = A_t e^{j\left(2\pi f_0 t + \frac{kt^2}{2}\right)} \quad (C.1-1)$$

式中:  $A_t$  为发射信号的幅度;  $f_0$  为发射信号的起始频率;  $k = B/T_s$  为调制斜率;  $B$  为雷达工作带宽;  $T_s$  为雷达发射信号周期。

假设被测索位于微波雷达索力检测仪  $R$  处产生回波信号，则该回波到达雷达主机后，回波延迟为  $\tau_0$ ，并且  $\tau_0 = \frac{2R}{c}$ ，（ $c$  为光速），则回波信号可表示为：

$$s_r(t) = A_r e^{j\left\{2\pi f_0(t-\tau_0) + \frac{k(t-\tau_0)^2}{2}\right\}} \quad (C.1-2)$$

经过混频得到零中频差拍信号：

$$s_\Delta(t) = A_t A_r e^{j\left(2\pi f_0 \tau_0 + k t \tau - \frac{k \tau_0^2}{2}\right)} \quad (C.1-3)$$

把相位对时间求微分，可得差拍频率为：

$$f_\Delta = k\tau \quad (C.1-4)$$

综上可得被测索距离  $R$  为：

$$R = \frac{T c f_\Delta}{2B} \quad (C.1-5)$$

## 2 基于相位干涉法测位移原理

雷达主机内部信号处理机采样得到正交同相双路零中频 I/Q 差频信号信号，在信号处理器内对离散回波信号进行 FFT 处理，对一个采样周期数据做  $N$  点 FFT，可得到不同距离目标的回波相位信息，连续做  $M$  个快拍的 FFT，把数据排成  $M$  行  $N$  列，再对每列数据做 FFT 变换，可得到每个距离目标的回波相位波动信息，通过回波信号的频谱分析可得信号的差频进而可得被测目标的距离，基于相位干涉法（如图 C.2.1 所示）可得不同目标的微变形时程信息。

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi \quad (C.2-1)$$

其中， $\Delta\varphi$  为被测索自振的相位差； $\lambda$  为微波信号的波长。

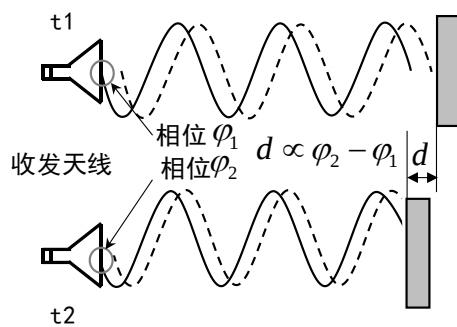


图 C. 2. 1 相位干涉法

## 附录 D 索力测量现场工况记录表

### 工况记录表

工程地点: \_\_\_\_\_ 项目名称: \_\_\_\_\_ 检测内容: \_\_\_\_\_

检测日期: \_\_\_\_\_年\_\_月\_\_日 设备型号及参数: \_\_\_\_\_

采集系统参数: \_\_\_\_\_ 环境条件: \_\_\_\_\_

[illegible]

检测人：

复核人：

第 页 共 页

## 本指南用词说明

1 本指南执行严格程度的用词，采用下列写法：

- 1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

- 1) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准或行业标准时，应表述为“应符合《×××××》(×××)的有关规定”。
- 2) 当引用标准中的其他规定时，应表述为“应符合本标准(规范/规程/指南……)第×章的有关规定”“应符合本标准(规范/规程/指南……)第×.×节的有关规定”“应按本标准(规范/规程/指南……)第×.×.×条的有关规定执行”。

## 引用标准名录

- 1 《工程摄影测量规范》 GB 50167
- 2 《公路桥梁荷载试验规程》 JTGTJ21-01-2015
- 3 《基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法》 DB31\_T973-2016
- 4 《工程结构数字图像法检测技术规程》（征求意见稿）
- 5 《电磁环境控制限值》 GB 8702-2014
- 6 《城市桥梁养护技术规范》 CJJ 99
- 7 《桥梁挠度检测仪》 JJG（交通）143-2020

中国公路学会标准征求意见稿