

团 体 标 准

T/JSCTS ×××—2022

桥梁动态挠度与索力数字图像法 检测技术规程

Technical specification for dynamic displacement and cable
force of bridge based on digital image inspection

(征求意见稿)

2022-××-××发布

2022-××-××实施

江苏省综合交通运输学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
4 基本规定	3
5 数字图像获取	4
6 数字图像预处理	6
7 位移和挠度计算	7
8 索力计算	9
9 报告编制	10

前 言

本文件是在充分总结工程实践经验，在参考国内外成熟科研成果的基础上编制而成的。

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由江苏省综合交通运输学会提出并归口。

本文件起草单位：江苏现代路桥有限责任公司、江苏现代工程检测有限公司、南京工业大学

本文件主要起草人：袁守国、王红祥、余兆宇、胡健、李枝军、张建东、刘安军、马志国、张伊青、谢韦韦、吴岳、李倩、杨琨、周东升

桥梁动态挠度与索力数字图像法检测技术规程

1 范围

本文件规定了桥梁动态位移测以及缆索承重桥梁索力检测的基本规定、数字图像获取、数字图像预处理、位移和挠度计算、索力计算以及报告编制。

本文件适用于各种类型桥梁的动态位移测试以及缆索支撑桥梁的索力或吊杆力的数字图像检测方法。

对桥梁动态挠度与索力数字图像法检测时，除应遵照本文件规定外，尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准的规定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

JTG/T J21-2011 公路桥梁承载能力检测评定规程

JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准

T/CECS XXX-XXXX 工程结构数字图像法检测技术规程（征求意见稿）

DB31/T973-2016《基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法》

3 术语和符号

3.1 术语

3.1.1

数字图像 digital image

由模拟图像数字化得到的、以像素为基本元素的、可以用数字计算机或数字电路存储和处理的图像。

3.1.2

成像设备 imaging device

由成像元件、镜头等部件组成的满足薄透镜成像原理的设备。

3.1.3

分辨率 resolution

图像系统可以测到的受检物体上的最小可分辨特征尺寸

3.1.4

感光元件 photosensitive element

将光信号转化成电信号装置

3.1.5

物理分辨率 **physical resolution**

指相机光学传感器上包含的感光元器件的个数，一般以横纵的乘积表示。

3.1.6

视场 **Field of view**

指观测物体的可视范围，也就是充满相机采集芯片的物体部分

3.1.7

失真 **distortion**

又称畸变，指被摄物平面内的主轴外直线，经光学系统成像后边缘为曲线，则此光学系统的成像误差称为畸变，畸变只影响影像的几何形状，而不影响像的清晰度。

3.1.8

量测型镜头 **measuring lens**

透镜组的排列进行过严格的校正的镜头，内方位元素、焦距等光学信息已知的镜头

3.1.9

非量测型镜头 **non-metric lens**

透镜组的排列没有进行严格的校正的镜头，内方位元素，焦距等光学信息未知的镜头

3.1.10

焦距 **focal length**

焦距是光学系统中衡量光的聚集或发散的度量方式，指透镜的光学中心到光聚焦点的距离。亦是相机中从镜头中心到底片或 CCD 成像平面的距离。

3.1.11

交向摄影 **convergent photograph**

在摄影基线两端，两相机主光轴在物方相交成某一角度的摄影。

3.1.12

缩放 **zooming**

均匀缩小或放大

3.1.13

相机检校 **camera calibration**

在满足特定检定环境要求的实验室内，对相机进行检定

3.1.14

景深 **Depth of view**,即 **DOF**

物体离最佳焦距点较近或较远时，镜头保持分辨率的能力

3.1.15

模板匹配法 **template matching method**

在数字图像处理中，采用预先定义的标准图像模板在目标图像上进行滑动搜索，以获取兴趣目标对象的技术

3.1.16

相似度评价函数 **similarity function**

用于评价模板图像与目标图像之间相似程度的度量函数

3.1.17

数字图像相关 **Digital Image Correlation, DIC**

按一定的搜索方法，通过处理变形前后被测物表面的数字图像直接获得位移或变形信息的一种数字图像处理技术

3.2 符号

A_0 ——图像量测面积；
 A ——图像真实面积；
 D ——测量距离；
 d ——测量分辨率；
 f ——镜头焦距；
 K ——亚像素细分数，无量纲。
 L_0 ——图像量测长度；
 L_l ——图像真实长度；
 L ——测量范围的对角线距离；
 l ——感光元件的对角线距离；
 m_A ——与面积量测精度对应的相对误差分母；
 m_L ——与长度量测精度对应的相对误差分母；
 m_x 、 m_y 、 m_z ——点位 x 、 y 、 z 方向上的中误差；
 n ——物方控制点的个数；
 S ——图像传感器像元大小；
 Δx 、 Δy 、 Δz ——量测 x 、 y 、 z 坐标与对应的物方控制点坐标差；
 $\Delta\alpha_{AB}$ ——倾斜度；
 d_A 、 d_B ——构件倾斜方向上 A、B 两点位移量；
 l_{AB} ——A、B 两点距离

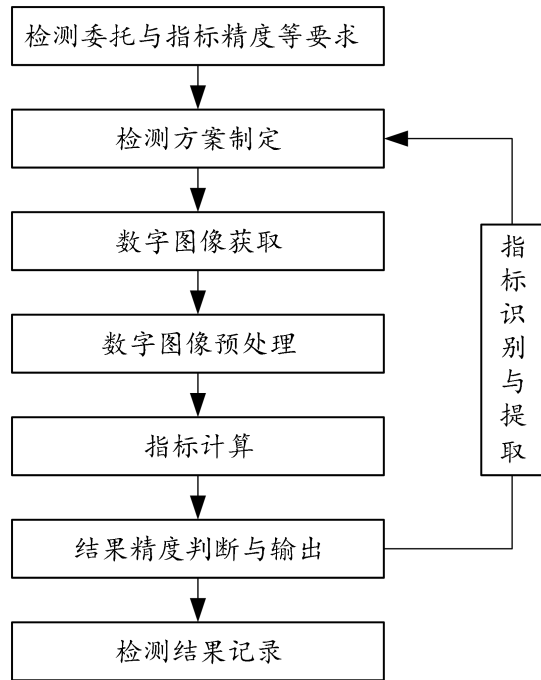
4 基本规定

4.1 一般规定

- 4.1.1 数字图像法检测技术可用于以下指标检测：结构动位移与动挠度、结构模态参数、拉索（吊杆）内力。
- 4.1.2 以下条件下宜采用数字图像法检测：
- (1) 难以使用接触式方法检测或检测存在安全隐患时；
 - (2) 采用人工检测效率低下时；
 - (3) 其他传统检测方式难以定量、全面、客观描述时。
- 4.1.3 数字图像法检测人员应掌握数字图像获取与处理的基本方法，具备操作成像设备的经验。
- 4.1.4 对于重要基础设施和大型桥梁进行数字图像法长期监测。

4.2 检测程序 and 基本要求

- 4.2.1 数字图像法检测宜按下述流程进行：



4.2.2 数字图像法检测应依据检测委托与指标精度等要求，按下列规定制定检测流程：

- (1) 确定数字图像分辨率、成像元件参数、镜头参数与成像范围，完成成像设备与摄影方案的选定，制定检测方案；
- (2) 经过成像操作获取符合要求的数字图像数据，完成数字图像获取；
- (3) 进行数字图像预处理、降噪与增强等，确保数字图像数据满足质量和精度要求，完成数字图像预处理；
- (4) 进行位移、模态参数、索力等指标的识别与提取，完成指标计算。
- (5) 对指标计算结果进行精度判断，如果满足要求进行结果输出，如果不满足要求须补测或重测；
- (6) 根据具体要求进行检测结果记录；
- (7) 完成指标的定量计算与输出结果不满足要求时，应重复执行（1）~（4）步骤。

4.2.3 数字图像检测的结果精度与输入输出格式应根据相关规范要求并参照委托方的要求执行。

5 数字图像获取

5.1 一般规定

- 5.1.1 数字图像获取应综合考虑成像设备、成像环境、拍摄方式、图像技术参数等因素。
- 5.1.2 根据检测对象特征和检测要求，选择适用的成像设备，成像设备应满足 5.2 节的要求。
- 5.1.3 成像环境及拍摄方式应满足 5.3 节的要求。
- 5.1.4 所拍摄获取的图像数据技术参数应满足 5.4 节的要求。

5.2 成像设备技术要求

5.2.1 成像设备应符合下列要求：

- (1) 感光元件的物理分辨率应不小于视场/标称分辨率的 1/3；
- (2) 快门速度和采样频率应满足结构响应动态测试的要求；

(3) 测量应用中的标称分辨率在使用亚像素技术时不宜高于物理分辨率 100 倍。

5.2.2 镜头宜符合下列要求：

- (1) 宜选用量测型镜头，若采用非量测型镜头，镜头应满足失真小、可标定、成像清晰等要求。
- (2) 镜头靶面尺寸宜大于感光元件尺寸。
- (3) 镜头的分辨率宜大于相机感光元件的物理分辨率。
- (4) 镜头焦距的选择应由测量距离、感光元件的对角线距离、测量范围的对角线距离确定。

非量测镜头相机包括工业相机和民用相机，常用的接口包括 C 接口、CS 接口、F 接口等）（C 接口和 CS 接口是工业相机最常见的国际标准接口）。

(5) 镜头焦距的选择应满足如下公式：

$$f \geq \frac{D \times l}{L}$$

式中：L—测量范围的对角线距离（mm）

l—感光元件的对角线距离（mm）

f—镜头焦距（mm）

D—测量距离（mm）

5.3 成像环境与操作技术要求

5.3.1 成像环境应符合下列要求：

- (1) 拍摄时应选择光线柔和、亮度均匀的视觉场景，应避免逆光拍摄；
- (2) 检测目标环境照度不高，可设置附加照明装置；附加照明光源宜设置于不同位置，且应避免直射镜头；
- (3) 检测目标物表面反差适中，可采用向目标投影格网、斑点等增强表面反差；
- (4) 检测目标环境的工作温度、湿度等应符合成像设备工作要求，必要时可采用防护罩。

5.3.2 拍摄站点应满足以下要求：

- (1) 以保证精度和获取最有效的摄影覆盖为原则，避开屏障，并避免出现盲区；
- (2) 拍摄站点宜布设在稳固的地面或平台上，拍摄站点场地应避免振动；拍摄站点不固定或使用无人机平台时，应保证拍摄相机稳定、防止抖动；
- (3) 相邻摄站之间的高程，应小于摄站间距离的 1/5；
- (4) 定量检测时更应该保证相机成像稳定，现场拍摄时，可选用稳定三角架固定成像设备。

5.3.3 根据检测对象复杂度与检测要求，拍摄站点宜采用以下方式布设：

- (1) 拍摄方式可采用单一视角拍摄或不同视角拍摄；
- (2) 测定被检测对象的二维坐标变化，或平面型目标的二维测定宜采用单一视角拍摄；
- (3) 测定被检测对象的三维空间坐标，高精度变形量，或复杂形状立面信息时宜采用不同视角拍摄；
- (4) 复杂度包括被检测对象的大小、形状等因素；检测要求包括被检测对象精度要求、目标环境条件要求、成像设备类型要求以及图像测量处理技术要求等。

5.3.4 标定控制信息宜符合以下要求：

- (1) 控制信息可包括已知的三维坐标控制点、或已知长度、角度等绝对尺寸；
- (2) 标记宜分布在图像畸变较小的区域，或均匀分布在检测目标对象周围；
- (3) 控制信息是指带有绝对尺度量的标尺或参照物、或已知坐标的控制网等。

5.3.5 图像拍摄应符合下列要求：

- (1) 检测对象宜置于图像中心位置；
- (2) 拍摄角度宜保持镜头正对目标物的主立面；

- (3) 检测目标的环境照度不高且图像清晰度要求较高时，宜选择灰度图模式；
- (4) 静态目标拍摄时宜使用光圈优先模式；动态目标拍摄时应使用快门优先模式。

5.4 数据质量要求

- 5.4.1 灰度图像像素位深不应小于 8bit；彩色图像像素位深宜为 12bi，且不应小于 8bit，饱和度等级不应小于 10 级；
- 5.4.2 图像应反差适中、色调一致、纹理清楚、层次丰富，不失真、无偏色，无伤痕和污迹；
- 5.4.3 图像数据应完整的覆盖检测目标和控制标靶。正直摄影时，图像对重叠度应为 60%-80%；交向摄影时，图像对重叠度不应小于 80%，交向摄影的偏角应小于 40°；
- 5.4.4 图像中控制标记点应与被检测对象色调有明显的反差；
- 5.4.5 采集数据宜采用无压缩格式存储，图片压缩存储时，压缩倍率宜小于 10 倍；视频数据压缩存储时，压缩倍率宜小于 5 倍。

6 数字图像预处理

6.1 技术要求

- 6.1.1 应依据检测委托与指标精度要求选用合适的图像预处理技术，图像数据质量应符合第 4 章中相关要求。
- 6.1.2 应视具体要求，选择适宜的数字图像预处理的的操作；如果数字图像素材质量较好且满足检测与测量要求，也可不进行预处理。
- 6.1.3 图像预处理宜包括图像格式转换、降噪与增强，必要时可进行裁剪与缩放。
- 6.1.4 图像文件宜采用无损转换方法转换为通用格式，转换不得损失几何信息和辐射信息。
- 6.1.5 图像降噪与增强处理应符合下列规定：
 - (1) 图像中存在异于检测目标的异常像素点或像素点集时，应采用滤波或人机交互方式进行降噪处理，滤波器窗口尺寸宜选择 3×3 像素到 15×15 像素之间；
 - (2) 图像增强可选用减影、二值化、细化等操作增强图像细部；
 - (3) 应综合考虑检测对象特征和算法适用性，选择合适的软件进行图像降噪与增强；
 - (4) 图像噪声类型选择适宜的降噪滤波器，包括空间域和频率域滤波器等。如：椒盐噪声可选择中值滤波器，高斯噪声可采用选择中值滤波器均值滤波器。增强图像明暗视觉效果增强，可通过亮度、对比度、曝光度等参数调节；增强色彩视觉效果，可通过颜色值、色调、饱和度、色彩平衡等调节。增强图像边缘可以采用形态学。

6.2 质量要求

- 6.2.1 处理后的图像应真实地反映实际材质的图案、质感、颜色及透明度，细节信息应完整，不应影响后续图像的处理；
- 6.2.2 处理后的图像像素偏移不应大于 0.5 像素，图像主点位移不应大于 0.1 像素；
- 6.2.3 图像裁剪合成时应保证细节表现清晰，图像间无拼接、镶嵌、缝隙或错位，重叠区域应无明显色彩差异。

7 位移和挠度计算

7.1 一般规定

7.1.1 位移测量内容应包括静、动态二维位移的测量，测量方法应按照本规程第 6.2 节至 8.3 节的规定执行。

结构的静载试验是指将静止的载荷作用于结构上的指定位置，以便能够测试出结构的静位移、静应变等，从而推断结构在载荷作用下的工作状态和使用能力的试验。动载试验是指将动力载荷作用于结构上，来测出结构的动力特性，从而判断出结构在动力载荷下受冲击和受振动影响的试验。动载试验的目的在于测定结构的动力特性，如结构的自振频率、阻尼特性及固有振型等；测定结构在动力载荷作用下的强迫振动的响应，如振幅、动应力、冲击系数及疲劳性能等。本章的静、动态位移测量指的便是分别对应于静、动载试验下的位移或振幅测量。

7.1.2 成像设备宜采用工业相机，且其帧率不应低于被测结构位移频率的 2.56 倍，数据传输应避免丢帧。

成像设备宜采用工业相机，原因在于：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，可在较差的环境下使用。一般的家用数码设备是做不到这些的；2、通过家用数码设备获得的图像数据一般经过了家用数码设备内置的图像预处理（比如滤波或平滑等），可能造成原始图像一些特征信息的丢失，而这些丢失的特征信息对于本章位移测量来说又可能是至关重要的；3、家用数码相机的数据传输速率不高，难以满足现场实时测量的要求；

7.1.3 当相机分辨率无法满足位移测量精度要求且测量范围、距离及硬件设备无法改变时，宜采用亚像素数字图像处理技术。

在一定的测量精度要求下，可采用以下几种方式提高测量分辨率：1、采用更大焦距的镜头；2、采用更高分辨率的工业相机；3、缩小检测距离。采用方式 1 和 2 的话，在现场测量时，现场更换镜头或工业相机不太方便，还可能造成测量设备成本直线上升；采用方式 3 的话，会相应的缩小测量范围；而采用基于亚像素的数字图像处理技术，在硬件设备和测量范围不变的条件下，便可极大提高测量分辨率。

拍摄站点选定后，其位移测量分辨率可按式（7-1）进行估算。估算出的位移测量分辨率应满足测量分辨率要求。

$$d = \frac{ps \times D}{f \times K} \quad (7-1)$$

式（7-1）中：

d ——测量分辨率，mm；

f ——镜头焦距，mm；

ps ——感光元件尺寸大小，um；

D ——测量距离，m；

K ——亚像素细分数，无量纲。

7.1.4 相机光轴宜垂直于位移运动方向，当相机光轴不垂直于位移运动方向，应实测倾斜角度并进行倾斜修正。

7.1.5 位移测量受设备振动影响显著时应进行消振修正。

7.1.6 位移测量的程序宜按图 7-1 执行。

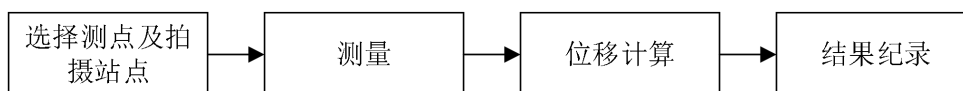


图 7-1 位移测量程序框图

7.1.7 测点选择应根据结构形式、结构材料以及测量要求等合理选定。

7.1.8 拍摄站点选定应满足以下要求：

- (1) 测量距离应根据镜头焦距、感光元件尺寸及测量分辨率要求等综合考虑；
- (2) 测量设备架设时，相机视野应能覆盖所有选定测点或测量区域。

7.2 位移计算

7.2.1 位移计算方法宜采用模板匹配法和特征点跟踪法。

特征点跟踪法利用数字图像的灰度和梯度等细节信息提取出特征点，然后跟踪特征点的相对像素位置信息变化而实现位移测量。可根据现场情况和需要的运算速度与准确度选择特征点算法，如 SURF 算法，ORB 算法，BRIEF 算法、方向码匹配算法等。

7.2.2 模板匹配法计算流程宜按图 7-2 执行。

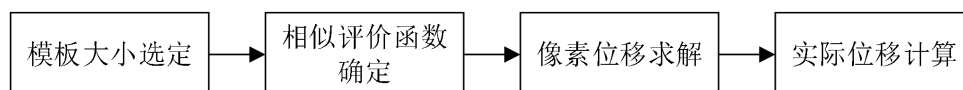


图 7-2 模板匹配法计算流程图

7.2.3 特征点跟踪法计算应满足以下要求：

- (1) 宜预先对图像进行亚像素处理，以获得更高的精度；
- (2) 应通过跟踪前后图像中相同的特征点的坐标并作差以获得像素位移。

7.2.4 实际位移应按下列步骤计算：

- (1) 可根据测量距离、镜头焦距以及感光元件尺寸大小直接计算标定系数；
- (2) 当检测目标某部分长度已知时，也可通过实际长度除以像素长度获得标定系数；
- (3) 实际位移应为像素位移乘以标定系数。

标定系数可根据测点距相机距离 D 、镜头焦距 f 、感光元件尺寸大小 ps ，按式 (7-2) 计算：

$$\delta = \frac{ps \times D}{f} \quad (7-2)$$

式 (7-2) 中：

δ —标定系数， $mm/像素$ ；

f —镜头焦距， mm ；

ps —感光元件尺寸大小， um ；

D —测量距离， m 。

7.3 精度要求

7.3.1 位移测量示值误差应符合表 7-1 规定：

表 7-1 静态位移测量示值误差

测量距离	位移范围	最大误差
------	------	------

10m	1~50mm	±0.01mm
50m	1~50mm	±0.1mm
300m	1~50mm	±2mm

7.3.2 室内静态位移测量偏差系数应满足 $10\text{m} \pm 5\text{mm}$ 距离处不大于 0.1% 的要求；

7.3.3 室内单点动态位移测量示值误差应满足 $10\text{m} \pm 5\text{mm}$ 距离处相对误差不大于 $\pm 5\%$ 的要求；

7.3.4 室内动态位移曲线拟合相关性系数应满足 $10\text{m} \pm 5\text{mm}$ 距离处不小于 0.99 的要求；

参照计量检定规程《JJG（交通）XX-XXXX 桥梁挠度检测仪（讨论稿）》中对计量性能要求之规定，对本章的静、动态位移测量的精度做了上述要求。

7.4 标定方法

7.4.1 视频位移测量系统标定可采用振动台标定方法：为验证视频测量系统的稳定性与准确性，可采用振动台进行标定；

7.4.2 在振动台布置位移传感器进行位移测量，在被测物体表面布置高灵敏度振动传感器进行振动测量。

8 索力计算

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于斜拉桥、拱桥、悬索桥拉索或吊杆内力测量；

8.1.2 动态加载中，成像设备的帧率不应低于加载频率的 2.56 倍，同时应考虑数据传输速率，避免丢帧。

8.2 索力计算

索力计算方法如下：

拉索索力测试采用动测法（频率法）。其基本原理是通过测量斜拉索自振频率，然后根据弦振动理论进行计算分析确定索力。该方法有快速、方便的特点，适用于运营中大桥的索力现场测试。

动测法采用环境随机激振，测量拉索的前几阶自振频率，然后依据弦振动理论分析求解，得到拉索的内力。基本原理如下：

当索构件两端的边界条件可以简化为铰支时，索力为

$$T = 4m(f_n^2 / n^2) \cdot L^2 - EI\pi^2(n^2 / L^2) \quad (1)$$

其中：

- T — 索构件所受的轴向力
- m — 索构件单位长度的质量
- EI — 索构件的弯曲刚度
- f_n — 索构件的第n阶振动频率(单位：Hz)
- n — 振动阶次
- L — 索构件的长度

当构件满足索类构件的定义，即长细比足够大时，式（1）的第二项可以忽略不计，式（2）可以简化成：

$$T = 4m(f_n^2 / n^2) \cdot L^2 \quad (2)$$

如果已知索类构件的长度 L ，每沿长度方向的单位质量 m ，再测出它的前几阶振动频率，则根据式 (2) 就可以求出索力。

8.3 精度要求

8.3.1 频率应符合倍频关系；

8.3.2 拉索索力误差不大于 5%；

9 报告编制

9.1 一般规定

9.1.1 桥梁动态挠度与索力数字图像法检测工作完成后，应编制动态挠度与索力检测报告，动态挠度与索力检测报告应由说明书和附件组成。

9.1.2 报告应在综合分析的基础上进行编制，编制的报告应内容全面，重点突出，立论有据，结构严谨，文字简练，图表齐全。

9.2 说明书

对桥梁动态挠度与索力数字图像法检测项目，应编写动态挠度与索力数字图像法检测说明书，说明书的内容一般应包括：

- (1) 检测日期；
- (2) 选用的测试仪器以及检测方法；
- (3) 检测单位；
- (4) 数据的整理解释；
- (5) 结论和建议。

9.3 附件

包括数字图像法检测工况统计表、工程照片等。

表 9-1 数字图像法检测工况统计表

桥梁名称：

检测人：

工况序号	测试时间	镜头焦距 (mm)	测量距离 (m)	备注
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				