

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211469

# 螺纹钢性能测试视频引伸计研究

江 润 钟 昊 王雪梅 倪文波  
(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**摘要:** 针对日前视频引伸计在实际应用中存在的做标记困难、标记在试验中容易发生脱落的问题,面向螺纹钢性能测试,研究了一套无需特殊人工标记,基于螺纹钢自身的纹理特征就可实现高精度位移跟踪测量的视频引伸计系统。介绍了视频引伸计测量系统的硬件组成、选型和基本工作原理。主要对所采用的图像匹配算法进行了研究,分析讨论了匹配模板位置和大小选取、基于曲面拟合的亚像素定位算法以及动态测试中匹配模板的更新等问题。最后通过静态试验、刚性位移试验和动态试验验证了该视频引伸计系统能够保证测量的实时性和准确性。

**关键词:** 视频引伸计;螺纹钢;图像匹配;拉伸试验

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Research on video extensometer for rebar performance test

Jiang Run Zhong Hao Wang Xuemei Ni Wenbo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In view of the current problems that the video extensometer is difficult to mark in practical applications and the mark is easy to fall off in the test, a set of video extensometer system that can realize high-precision displacement tracking measurement based on the texture characteristics of the rebar itself without special manual marks was designed for the performance test of rebar. The hardware composition, selection and basic working principle of the video extensometer measurement system were introduced. The image matching algorithm used was mainly studied, and the selection of the position and size of the matching template, the sub-pixel positioning algorithm based on surface fitting, and the update of the matching template in dynamic test were analyzed and discussed. Finally, static test, rigid displacement test and dynamic test all verify that the designed video extensometer system can meet the real-time and accuracy requirements of the measurements.

**Keywords:** video extensometer; rebar; image matching; stretching test

## 0 引 言

螺纹钢又名热轧带肋钢筋,作为中型以上建筑构件的必用钢材,广泛应用于房屋、桥梁、道路等土建工程建设<sup>[1-2]</sup>。大到高速公路、铁路、桥梁、水坝等公用设施,小到房屋建筑的基础、梁、柱、墙,螺纹钢都是不可或缺的结构材料,螺纹钢本身的质量关系着这些建筑与结构的质量。螺纹钢作为金属材料的一种,其下屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、最大力总延伸率等力学性能参数应该符合国标 GB/T 1499.2 中的规定,而要检验其力学性能,必须按照国标 GB/T 228 规定进行金属拉伸试验。

引伸计是进行材料拉伸试验的关键设备之一,引伸计从测量原理上可以分为接触式引伸计和非接触式引伸计<sup>[3]</sup>。接触式引伸计的工作原理是把刀口卡在被测试件

上,利用固定刀口和活动刀口传递试件的位移变形信息到弹性元件,弹性元件再将位移变形信息传递给应变片,最后转化为电信号,实现测量<sup>[4]</sup>。在材料拉伸过程中,如果固定刀口夹持力不足、刀口缺损钝化、材料受拉力或受压力作用下变形产生震动都会导致刀口打滑从而产生测量误差。此外,受限于其本身的结构以及测量原理,接触式引伸计在特殊环境下,如高温高压、测试试件微小或试件变形量较大超出引伸计量程等,也无法使用,其对环境的适应性较差。

针对接触式引伸计的不足,非接触式的材料应变测量方法开始出现,视频引伸计即是一种非接触式的材料应变测量仪<sup>[5]</sup>。视频引伸计是通过工业相机将材料在拉伸过程中的位移变形情况连续拍摄下来,借助图像处理算法检测、跟踪材料的位移变形情况,实现材料变形量的测量<sup>[6-8]</sup>。视频引伸计按照被检测试件的标记形式的不同可以分为有人

收稿日期:2022-09-20

工标记的视频引伸计和无人工标记的视频引伸计两类。现在的视频引伸计大多是基于有人工标记的视频引伸计。在试验开始前,需要额外在试样表面制作特征信息以便于图像处理 and 特征提取,通常的方法是在试样表面喷上随机分布的散斑或在试样表面制作黑白的阶跃边缘。但这些方法在实际的大批量工程测量中不仅加大了工作量,增加了操作难度,并且表面额外增加的散斑或者黑白标记在螺纹钢拉伸过程中,特别是在强化阶段和颈缩阶段,极易随着螺纹钢表面氧化皮的脱落而脱落,影响视频引伸计的工作。所以研发用于无人工标记试件的视频引伸计具有非常重要的工程价值。近年来,针对无人工标记情况下的视频引伸计系统,文献[9]提出一种背景减法算法,通过测量压缩试验中圆柱形试件的整体轮廓变化来计算试件的直径和高度变化。该方法为无人工标记材料的应变测试提供了一个较好的思路,但该系统高度测量的最大绝对误差为 0.55 mm,直径测量的最大绝对误差为 0.026 mm,其测量精度很难满足国标中对视频引伸计的精度要求。文献[10]针对无人工标记的钢筋试件开发视频引伸计系统,基于试件表面自然纹理,使用视觉软件 Halcon 中的归一化互相关匹配(normalized cross correlation, NCC)算法直接追踪材料变形后的位置,该方法的测量精度较高,位移测量的最大绝对误差约为 0.004 mm,但是该系统计算过程复杂、耗时长,使视频引伸计测量系统的实时性不够高,此外测量精度也有待进一步提高。

针对目前相关研究的不足,本文针对螺纹钢拉伸试验,在无特殊人工标记的情况下,对其视频引伸计测量系统开展研究,以期基于螺纹钢表面自然纹理,通过图像处理算法实现螺纹钢拉伸位移的高精度实时追踪测量。论文将在介绍测量系统基本结构和工作原理的基础上,重点对所采用的图像匹配算法进行分析研究并进行相应的试验验证。

## 1 视频引伸计测量系统整体方案设计

### 1.1 视频引伸计测量系统工作原理

螺纹钢试样在拉伸过程中产生变形,沿拉伸方向的变形称为伸长量,视频引伸计采用图像测量的方法获取螺纹钢的初始标距在拉伸过程中的伸长量。

本文研究的无人工标记的视频引伸计测量系统主要由硬件系统和软件系统两个部分组成。其中硬件部分主要有拉伸试验机及其控制器、光源系统、工业相机和计算机,如图 1 所示。进行测量时,将螺纹钢试样固定在拉伸试验机上,然后调节好工业相机和 LED 光源的位置,确保能够采集到最清晰的图像。在螺纹钢试样拉伸的过程中,工业相机实时采集其变形图像,并将图像数据传送到计算机中,视频引伸计的工作原理框图如图 2 所示。图像在计算机中以二维数组的形式进行存储,二维数组中的每个元素存储的是图像在此位置的灰度信息。软件系统是视频引伸计测量系统至关重要的组成部分,其主要功能包括图像预处理、匹

配区域划分、图像匹配算法、数据分析和结果显示输出等,如图 3 所示为软件系统的主要功能及流程。

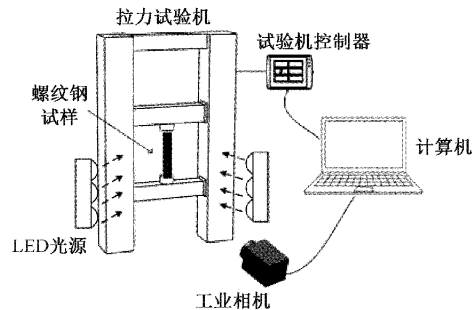


图 1 硬件系统结构示意图

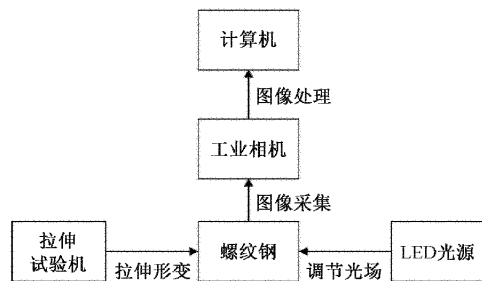


图 2 视频引伸计工作原理框图

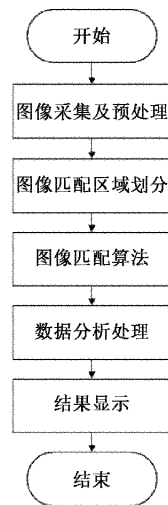


图 3 软件系统主要功能及流程

### 1.2 视频引伸计成像系统分析及硬件选型

本视频引伸计测量系统的检测对象为拉伸试验机上装载的直径 20 mm 的 HRB400 螺纹钢试样,其在拉伸试验中的拉伸量较大。并且按照国标 GB/T 228.1 中的规定,螺纹钢试样在拉伸试验中的初始标距应至少为其直径的 5 倍,所以对于直径 20 mm 的螺纹钢试样,初始标距长度应为 100 mm。故综合螺纹钢的拉伸量和初始标距长度将视场范围定为 250 mm。按照国标 GB/T 12160 中的 2 级引伸计的绝对误差要求(表 1),图像测量分辨精度至少要达到 0.006 mm/pixel,这就要求相机分辨率至少为

40 000 pixels, 目前市面上的工业相机很难满足该要求。本文将在合理选用工业相机的情况下, 采用先进的数字图像处理算法对数据进行处理以达到测量系统精度的要求。

表 1 国标 GB/T 12160 中引伸计的分级

引伸计系统 级别	标距相对 误差/%	系统误差	
		相对误差/%	绝对误差/ $\mu\text{m}$
0.2	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.6$
0.5	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$	$\pm 1.5$
1	$\pm 1.0$	$\pm 1.0$	$\pm 3.0$
2	$\pm 2.0$	$\pm 2.0$	$\pm 6.0$

为了满足视频引伸计的高测量精度和实时监测的应用需求, 光学成像器件应具有输出速度快、高分辨率、光学畸变小的特点, 同时考虑视频引伸计对于图像颜色无特别的需求, 故本文选择黑白工业相机, 该相机的分辨率为 5 480 pixels $\times$ 3 648 pixels, 帧率为 22 fps, 传感器尺寸为 13.13 mm $\times$ 8.76 mm。

根据视频引伸计实际使用要求, 将视场高度  $h$  定为 300 mm, 物距  $D$  定为 1 000 mm, 根据式(1)与图 4 的光路原理可以计算出所需要的镜头焦距大小, 本文选择  $f = 25$  mm 的工业镜头。

$$f = u \times D / h \quad (1)$$

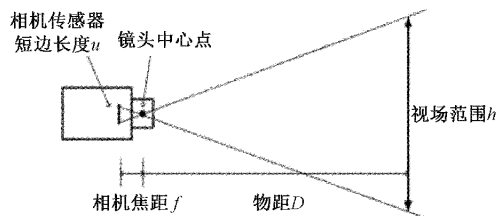


图 4 视觉成像光路原理

此外, 一个可靠、稳定的光源系统是视频引伸计系统能获取优质图像的基础, 好的光源能够突出螺纹钢试件的表面纹理, 对于保障和提高系统的检测精度和检测效率起着重要作用。考虑螺纹钢试样为长条形, 通过对比, 本文选用工业中常用的条形 LED 白色光源。

## 2 视频引伸计测量系统图像处理算法

视频引伸计的核心算法是目标追踪算法。在开始检测时, 需要在螺纹钢图像上设置初始的标距位置及长度, 然后在试件的拉伸形变过程中持续追踪该标距的变化情况, 以此反映螺纹钢试件的表面形变。

目前国内外针对视频引伸计的目标追踪算法的相关研究主要有边缘检测算法、图像匹配算法和基于深度学习的目标追踪算法等<sup>[11-15]</sup>。边缘检测算法通过跟踪试件表面的黑白阶跃纹理即可完成追踪。该算法原理简单、计算速度快, 但受光照等环境因素的影响大。图像匹配算法的原理

是将选择的初始模板图像遍历待测图像, 找到相似度最大的区域和像素点, 以此实现跟踪定位<sup>[16]</sup>。该算法精度较高并且不需要外在试样表面附加标记, 但缺点是遍历整个待测图像区域计算量较大, 影响实时性。基于深度学习的目标追踪算法通过大量拉伸过程中的图片数据或已有跟踪信息预训练深度模型, 以此来实现目标跟踪, 该算法较复杂, 测量精度和实时性都有待进一步研究。

针对无特殊人工标记的螺纹钢试件的拉伸测量, 考虑测量精度和实时性的要求, 本文采用图像匹配算法对之进行了分析研究。

### 2.1 图像匹配区域划分

在相机的拍摄画面中, 只有螺纹钢所在的图像区域才是有效的检测区域, 而其余区域包括背景板、拉伸试验机等都是不需要的无效计算区域。为了提高图像处理效率, 在图像处理之前需进行匹配区域划分。

通过阈值分割、形态学处理和边缘检测可实现对螺纹钢轮廓位置的计算, 根据算法需要将螺纹钢所在区域划分为两个需要匹配的图像区域, 如图 5 中虚线所框出来的两个图像区域。边缘检测为该步骤的关键, 经典的边缘检测算子有 Robert 算子、Sobel 算子和 Canny 算子等, 此处使用的是 Canny 算子。

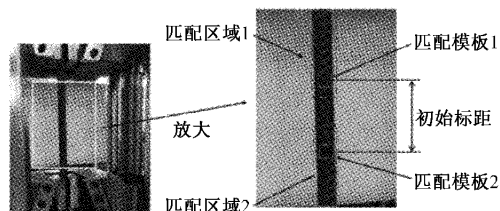


图 5 匹配区域划分

### 2.2 匹配模板的大小和位置

本文采用基于灰度的模板匹配算法对螺纹钢表面的纹理进行追踪计算, 其利用图像本身的像素灰度信息作为计算基元来进行模板匹配计算<sup>[17]</sup>。在进行模板匹配算法之前, 首先需要设置初始的匹配模板的大小和位置, 以此作为螺纹钢试件初始标距的两个端点。

考虑图像的中心畸变较小, 匹配模板的位置应该尽量位于图像的中心位置, 如图 5 所示, 并且应保持匹配模板的中心线的距离即初始标距长度为 100 mm。

匹配模板大小的选择应兼顾考虑测量精度和实时性的要求。匹配模板增大, 匹配精度会提高, 但计算时间也会增加; 匹配模板减小, 计算时间会减少, 但匹配精度也会随之降低, 甚至会出现匹配失败的情况。如表 2 所示是采用不同大小模板分别完成 300 次模板匹配运算得到的结果。

为了满足测量的实时性要求, 本文的视频引伸计系统的处理速度至少应达到 10 fps。从表 2 的数据可以看到, 不同大小模板的算法处理时间都能满足视频引伸计的实时性要求, 但是匹配的准确率会随着模板变小而降低。故兼

表 2 不同大小模板匹配结果比较

模板大小	匹配处理时间/s	匹配成功率/%
100×100	0.04	95
120×120	0.06	97
140×140	0.07	99
150×150	0.08	100
180×180	0.10	100

顾及实时性和精度要求,本文选择 150 pixels×150 pixels 作为匹配模板的大小。

2.3 图像匹配算法

使用模板匹配算法对螺纹钢初始标距变化进行跟踪可分为两个步骤。第 1 步是对选定目标区域进行整像素的模板匹配运算,得到目标区域的位移数据,图像处理分辨精度为 1 pixel,这里约为 0.068 mm/pixel。显然该精度大小无法满足国标 GB/T 12160 中 2 级引伸计的标准要求,因此需要采用先进的图像算法进行进一步处理。第 2 步便是在整像素定位的基础上进行亚像素的精确搜索。

整像素模板匹配所得结果为模板在图像中的整像素坐标,但模板的真实坐标可能存在于两整数坐标之间。因此可以将整像素模板匹配的结果作为亚像素模板匹配的初始值,在 1 个像素单位内寻找模板位移的真实坐标,进而得到亚像素匹配的最终结果。将整像素和亚像素匹配相结合可以显著提高图像匹配的效率与精度。

1) 整像素图像匹配

在基于灰度的图像匹配算法中,若要在拉伸形变后的图像中找到相似度最高的图像区间,其关键就是在形变后的图像中计算与匹配模板图像的相关性。

本文的整像素图像匹配算法使用的是相关系数匹配法,首先利用式(2)、(3)分别对匹配模板图像和待测图像进行去均值处理,然后利用式(4)计算匹配模板图像与待测图像的相似度。计算结果存储在矩阵 **R** 中,并进行归一化处理。遍历找到结果矩阵中等于 1 的点,该点即为与匹配模板最相似的整像素位置。经过去均值处理之后的相关系数匹配法稳定性更好,可以减小因光照变化导致的图像整体灰度变化的影响。

$$T'(x', y') = T(x', y') - 1/(w \cdot h) \cdot \sum_{x'', y''} T(x'', y'') \quad (2)$$

$$I'(x + x', y + y') = I(x + x', y + y') - 1/(w \cdot h) \cdot \sum_{x'', y''} I(x + x'', y + y'') \quad (3)$$

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T'(x', y') \cdot I'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T'(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I'(x + x', y + y')^2}} \quad (4)$$

式中:**T**代表匹配模板的像素矩阵;**T'**代表匹配模板去均值

处理之后的像素矩阵;**I**代表待测图像的像素矩阵;**I'**表示待测图像区域去均值处理之后的像素矩阵;**R**代表结果矩阵; $(x, y)$ 为结果矩阵的坐标; $(x', y')$ 为去均值之后的匹配模板矩阵的坐标; $(x'', y'')$ 为匹配模板矩阵的坐标; $w, h$ 为匹配模板图像的像素宽度和高度。

2) 亚像素图像匹配

本文使用的亚像素计算方法为曲面拟合法,其基本计算原理<sup>[18]</sup>:通过整像素模板匹配可以得到目标点周围的相关系数,取相关系数为 1 的点,以该点为坐标中心,将该点周围的 3×3 区域的所有相关系数拟合成一个连续曲面,找到拟合曲面的极大值点,这就是目标区域的亚像素位移点。如图 6 所示(0,0)点为整像素匹配点,三角形点为亚像素匹配点。

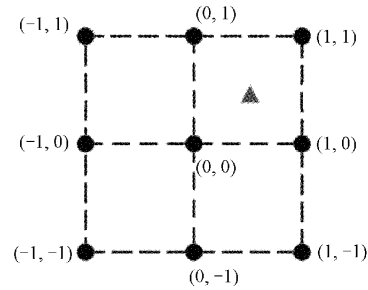


图 6 亚像素坐标点示意图

设曲面方程为:

$$H(x_i, y_j) = ax_i^2 + by_j^2 + cx_i y_j + dx_i + ey_j + f \quad (5)$$

将图 6 中的 9 个坐标点代入式(5),利用最小二乘法便可以求得模型参数  $a, b, c, d, e, f$  的大小。如图 7 为某次拟合得到的二维曲面  $H(x, y)$ ,坐标点  $(x, y)$  为曲面的极大值点。

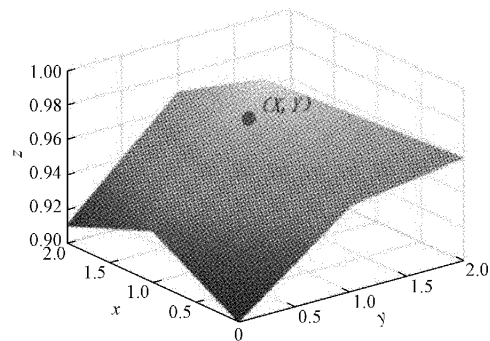


图 7 拟合曲面  $H(x, y)$

对函数  $H(x, y)$  分别求  $x$  和  $y$  的偏导,得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} = 2ax + cy + d = 0 \\ \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} = 2by + cx + e = 0 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行求解可以得到极值点  $(x, y)$  的坐标为:



$$\begin{cases} x = \frac{2bd - ec}{c^2 - 4ab} \\ y = \frac{2ae - dc}{c^2 - 4ab} \end{cases} \quad (7)$$

此也即为经过亚像素计算之后的匹配点坐标 $(x, y)$ 。

如表 3 所示是采用整像素图像匹配算法和亚像素图像匹配算法分别对连续采集的 15 帧图像进行跟踪匹配的结果对比。

表 3 整像素匹配算法和亚像素匹配算法匹配结果对比

帧数	整像素结果/pixel	亚像素结果/pixel
1	0	0.00
2	0	0.35
3	0	0.42
4	0	0.73
5	1	1.08
6	1	1.38
7	1	1.54
8	1	1.67
9	1	1.99
10	1	2.18
11	2	2.36
12	2	2.58
13	2	2.79
14	2	2.83
15	3	3.25

可以看到,经过亚像素模板匹配计算之后,像素分辨率可以达到 0.01 pixels。

#### 2.4 匹配模板更新

在螺纹钢的实际动态拉伸试验中,螺纹钢的表面氧化皮有时会随着拉力的增大而脱落,特别是在螺纹钢拉伸的强化阶段末期和颈缩阶段这种现象尤为明显,这会使螺纹钢的表面纹理发生变化,影响视频引伸计的检测效果和精度。图 8 所示为螺纹钢拉伸前后表面纹理对比,可以看到拉伸完成后的螺纹钢表面纹理发生了明显变化。

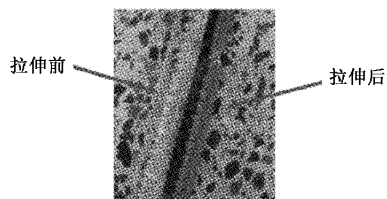


图 8 因氧化皮脱落螺纹钢拉伸前后表面纹理对比

在螺纹钢表面纹理发生变化后,如果仍然采用初始匹配模板对螺纹钢试样的变形位移进行追踪就可能失效,所以针对此种情况,在检测到变形位移出现非正常速度的增加时,就需要进行匹配模板的更新。图 9 是螺纹钢拉伸

变形过程的 4 个阶段。在强化阶段末期螺纹钢拉伸速度显著加快之后,当模板的后一帧的位移相较于前一帧的位移大于 2 pixels 时,即采用前一帧的未匹配失效的匹配图像作为新的匹配模板继续进行后续的图像匹配。图 9 中在强化阶段后期的虚线即为发生表面氧化皮脱落后,没有更新匹配模板的结果,此后图像匹配跟踪失败;而实线条为匹配模板更新后的检测结果,可以看到此时可较好克服因纹理快速变化造成的影响。

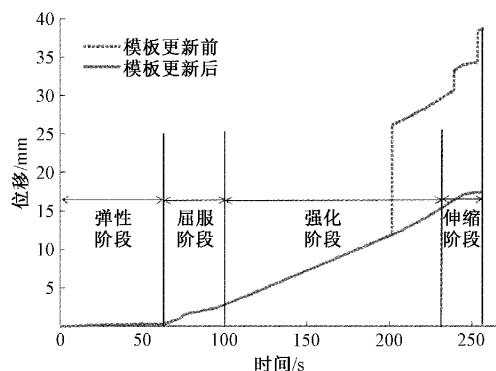


图 9 匹配模板更新对检测效果影响对比

### 3 试验研究

#### 3.1 静态试验

为了检验所设计的视频引伸计测量系统的性能,首先对处于静止状态下的螺纹钢试件进行测量,以评估其重复精度。

在螺纹钢静止不动的状态下,检测软件在螺纹钢图像上创建 2 个初始匹配模板,并使用检测软件持续追踪两个模板的距离变化,如图 10 所示为持续检测、跟踪 120 s 的时间-位移图。

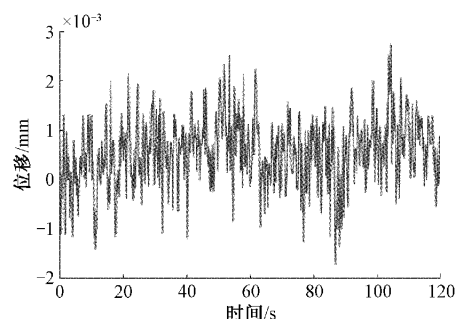


图 10 视频引伸计测量系统静态试验曲线

由图 10 可知在螺纹钢试件静止不动的状态下,视频引伸计测量出来的位移变化范围在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 之间,可见在试件静止的状态下,该测量系统能够达到国标 GB/T 12160 中 1 级引伸计的精度。

#### 3.2 刚性位移测量试验

为了进一步评价视频引伸计的测量精度,使用专用的引伸计标定义 GWB-200JA 进行刚性位移测量试验。该引

引伸计标距范围为 0~500 mm, 微分测头的分辨率为 0.000 2 mm, 量程为 25 mm。

如图 11 所示, 使用视频引伸计在引伸计标定仪的固定量杆和移动量杆图像上分别创建初始匹配模板并进行追踪, 检测计算两个模板之间的距离变化。沿同一方向拧动标定仪的精密微分测头, 使量杆每次移动 0.5 mm, 每次拧动后使视频引伸计采集 20 s 左右数据。拧动 10 次, 测得引伸计标距仪移动 0~5 mm 的对应试验结果如图 12 所示。

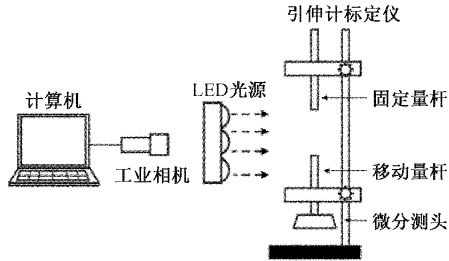


图 11 刚性位移实验原理

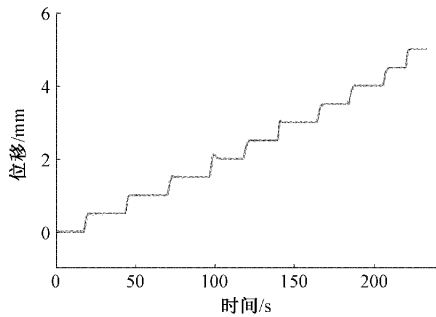


图 12 刚性位移测试结果

对每次移动 0.5 mm 后 20 s 时间内采集的数据(图中平稳段)进行分析, 其结果如表 4 所示。

表 4 刚性位移试验数据分析

测量平均值/ mm	误差范围/ μm	绝对误差/ μm	相对误差/ %
0.499 9	-2.2~2.1	±2.2	±0.44
0.998 5	-1.5~2.6	±2.6	±0.26
1.502 8	-2.4~1.3	±2.4	±0.15
1.999 9	-1.8~2.5	±2.5	±0.12
2.501 8	-2.0~2.9	±2.9	±0.11
3.000 5	-2.4~1.7	±2.4	±0.08
3.498 1	-2.5~2.4	±2.5	±0.07
4.002 3	-1.8~2.1	±2.1	±0.05
4.498 1	-2.3~2.1	±2.3	±0.05
5.000 5	-1.6~1.7	±1.7	±0.03

由表 4 结果可知, 本文设计的视频引伸计测量系统在刚性位移测量中的最大绝对误差为 ±2.9 μm, 最大相对误差为 ±0.44%, 满足国标 GB/T 12160 中 1 级引伸计的精度要求。

度要求。

综合上述两个实验, 本文设计的视频引伸计能够达到国标要求的 1 级引伸计的标准。这里影响视频引伸计分辨精度的因素主要是相机分辨率和视场范围。相机的分辨率直接决定了图片所包含的像素点个数, 分辨率越高视频引伸计的精度也就越高; 视场范围决定了相机的 1 个像素点的实际大小, 视野范围越小视频引伸计的分辨精度也就越高。所以, 若要提高视频引伸计的分辨精度, 可以更换分辨率更高的相机或者缩小相机的视场范围。

### 3.3 动态试验

上述的两个试验都是针对未施加载荷的螺纹钢试件进行测试, 不能反映视频引伸计的实际工作状态, 为了验证视频引伸计的有效性和准确性, 还需要针对螺纹钢试件的实际拉伸过程进行动态试验。

如图 13 所示, 将螺纹钢试样夹持在拉伸试验机上, 并同时安装在螺纹钢中间位置安装接触式引伸计(量程为 25 mm, 标距大小为 100 mm, 引伸计级别为 1 级)以便进行对比。试验时, 视频引伸计测量系统在接触式引伸计的两个刀口图像的位置设置初始匹配模板进行动态试验。

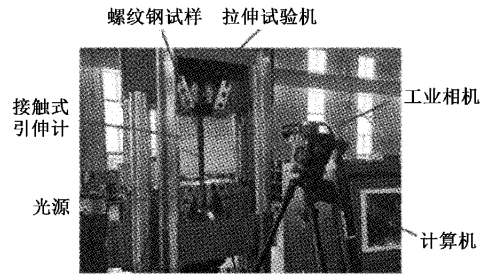


图 13 动态拉伸试验现场照片

如图 14 所示是两种方法测试得到的螺纹钢试件拉伸过程的位移-时间曲线。

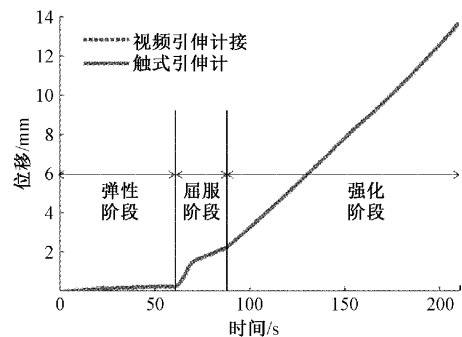


图 14 两种方法对螺纹钢试件进行动态试验结果对比

对两种方法的测试数据进行对比, 由图 14 可以看到, 视频引伸计的位移-时间曲线与接触式引伸计的位移-时间曲线贴合度很高, 两条曲线具有很好的一致性。

如表 5 所示是分别根据两种方法的测试数据计算得到的螺纹钢试件的性能指标, 并和国标 GB/T 1499.2 中规定的力学性能指标进行对比。可以看到两种方法测试结果非

常相近,该螺纹钢试件的最大力总延伸率符合国标要求。表明该视频引伸计完全满足实际动态测试要求。

表 5 两种方法得到的螺纹钢试件性能参数对比

性能指标	视频引伸计	接触式引伸计	国标要求
弹性模量	177 GPa	183 GPa	
最大力总延伸率	12.87%	12.90%	≥7.5%
最大力塑性延伸率	12.59%	12.5%	

## 4 结 论

本文基于机器视觉技术设计了一套针对无人工标记的螺纹钢试件的视频引伸计测量系统。详细介绍了系统的硬件组成、选型和基本工作原理,重点对所采用的模板匹配算法进行了分析研究,兼顾测量精度和实时性要求,讨论了匹配模板位置和大小选取;采用基于曲面拟合的亚像素定位算法提高了算法跟踪定位精度;通过匹配模板的及时更新,较好克服了因实际拉伸试验中螺纹钢氧化皮脱落造成的影响,保障了视频引伸计的测量效果和精度。最后通过静态试验、刚性位移试验和动态试验证明了该视频引伸计系统能够在螺纹钢表面不做任何处理的情况下保证测量的实时性和准确性,并且能够达到国标 GB/T 12160 中的 1 级引伸计的标准。未来将使用双相机兼顾测量范围和分辨精度的要求,并完善视频引伸计系统的图像处理算法,进一步提高视频引伸计的精度。

## 参考文献

- [1] 李雪峰,王春芬,郭海霞. HRB400 螺纹钢表面缺陷形成原因分析[J]. 理化检验:物理分册,2013,49(6):413-415.
- [2] 王煦阳. 我国螺纹钢期货市场与现货市场联动效应的实证分析[D]. 南京:南京师范大学,2014.
- [3] LISNAWATI L, SUCIYATI S W, WARSITO W. Rancang bangun sensor extensometer elektris sebagai pendeteksi pergeseran permukaan tanah dan sistem akuisisi data pada komputer [J]. Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika, 2013, 1(1):19-24.
- [4] 郭贵勇,薛金. 引伸计的测量技术、工程用途及检定方法的探讨[J]. 电子元器件与信息技术,2018(11):54-56.
- [5] 张敬敏,王春华,周巍松,等. 视频引伸计的误差源解析[J]. 物理测试,2013,31(3):25-28.
- [6] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术,2021,44(3):22-26.
- [7] 张吉雷,郑会宝,张永侠. 视频引伸计用纤维复丝拉伸测试技术的研究[J]. 计量与测试技术,2017,44(6):

74-76.

- [8] 葛云燕,王健. 视频引伸计[J]. 工程与试验,2015(S1):24-26.
- [9] FELLING A J, DOMAN D A. A new video extensometer system for testing materials undergoing severe plastic deformation [J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme, 2018,140(3):1-10.
- [10] 骆佩文,陈从桂,雷臻宇,等. 视频引伸计动态测量系统设计[J]. 机电工程技术,2019,48(9):190-192.
- [11] 梁飞,尹秋霞. 视频引伸计中 Harris 角点算法的改进[J]. 工具技术,2018,52(3):139-141.
- [12] 张悦,潘兵,郭广平,等. 接触式与非接触式引伸计应变和泊松比测量精度比较[J]. 实验力学,2018,33(1):59-68.
- [13] 王永红,王欢庆,吴双乐,等. 基于机器视觉的材料力学性能全场测量方法[J]. 测控技术,2020,39(8):35-46.
- [14] PAN B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals [J]. Measurement Science and Technology,2018,29(8):1-32.
- [15] PAN B. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement [J]. Optics Express,2016,24(17):19082-19093.
- [16] 齐昕雨,江剑,丁良华,等. 基于自适应模板匹配阈值选取算法的显示器件多目标定位[J]. 国外电子测量技术,2020,39(5):44-48.
- [17] 万宏强,张晨辉,孙正阳. 基于改进的模板匹配在规则边缘零件内孔检测中的应用[J]. 电子测量技术,2021,44(7):88-92.
- [18] 李荣丽,郭琦,刘小勇,等. 数字图像相关中非迭代相关系数曲面拟合算法的研究[J]. 制造技术与机床,2019(9):40-43.

## 作者简介

江润,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉技术及其应用。

E-mail:jackleo000@163.com

钟昊,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉技术及其应用。

E-mail:1171975187@qq.com

王雪梅(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为现代测控技术及应用。

E-mail:xmwang2012@home.swjtu.edu.cn

倪文波,博士,教授,主要研究方向为机车车辆主动控制技术、列车制动技术。

E-mail:nwb@home.swjtu.edu.cn