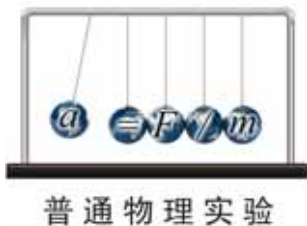


文章编号:1005-4642(2020)06-0014-04



基于视频图像处理技术测量滑动摩擦系数

段茜, 廖凯, 于锐锐, 蒋荣, 曾斌

(西南石油大学理学院, 四川成都 610500)

摘要:针对目前滑动摩擦系数测量方法的不足,采用双弹簧振子系统,并基于视频图像处理技术,通过实验测量和数值计算相结合的方法测量了滑块与接触表面之间的滑动摩擦系数.该方法采用数码摄像机进行数据采集,测量工作量少,简便易行且成本低;借助基本的图像处理技术计算振动参量,算法简单,易于实现.

关键词:滑动摩擦系数;弹簧振子;视频;图像处理

中图分类号:O313.5

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.06.003

2个物体的干燥接触表面之间的干摩擦力,在实际工程中广泛存在.滑动摩擦系数作为重要的技术参量,常用于研究由摩擦引起的非线性动力学现象^[1-3].同时,滑动摩擦系数的精确测定,对于选择合适的工作参量以完成实际工程中的预定要求也具有重要的指导意义^[4-6].

目前对滑动摩擦系数的测量方法主要分为两大类,一类是机械传动式测量方法^[7],另一类是采用力传感器,通过测量摩擦过程中的正压力和摩擦力来求得摩擦系数^[8-10],但二者都存在着实验精度不好控制、测量结果不够精确的问题.本文提出了基于视频图像处理技术^[11]的非接触式测量方法,通过测量在小阻尼情况下双弹簧振子的振动曲线计算滑动摩擦系数,并以钢与木材之间的滑动摩擦系数为例进行了计算,将计算结果与文献^[12]中的参考值对比,验证了结果的合理性.该方法仅从一次实验中就可得到较多与滑动摩擦系数有关的数据.

1 实验原理

如图1所示,2根轻弹簧两端固定,中间系一滑块,构成了水平双弹簧振子系统,让滑块做往返振动,考虑滑块与接触表面之间的干摩擦阻力 f ,假设 f 的大小不变,其方向始终与运动方向相

反,那么滑块的振动为阻尼振动,其位移逐步减小为零.设滑块的质量为 m_0 ,弹簧的质量分别为 m_1 和 m_2 ,劲度系数分别为 k_1 和 k_2 ,滑块与接触表面之间的滑动摩擦系数为 μ .

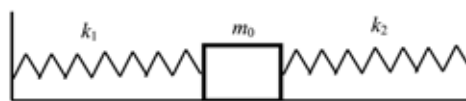


图1 水平双弹簧振子示意图

当滑块处于平衡位置 O 时,弹簧的伸长量分别为 x_1 和 x_2 ,以平衡位置 O 为原点,水平向右为 x 轴正向,建立一维坐标系,则

$$-k_1 x_1 + k_2 x_2 = 0. \quad (1)$$

当滑块距离平衡点为 x 且自右向左运动时,滑块运动的微分方程为

$$-k_1(x_1 + x) + k_2(x_2 - x) + \mu mg = m\ddot{x}, \quad (2)$$

其中

$$m = m_0 + \frac{1}{3}(m_1 + m_2), \quad (3)$$

为振动系统的有效质量^[13].考虑式(1),则式(2)化简为

$$-(k_1 + k_2)x + \mu mg = m\ddot{x}. \quad (4)$$

同理,当滑块自左向右运动时,滑块运动的微分方

收稿日期:2020-03-05

基金项目:西南石油大学大学生课外开放实验重点项目(No. KSZ19912)

作者简介:段茜(1981-),女,四川简阳人,西南石油大学理学院讲师,博士,主要从事信息光学和数字图像处理方面的教学与研究工作. E-mail:duanxi_2001@swpu.edu.cn



程为

$$-(k_1 + k_2)x - \mu mg = m\ddot{x}. \quad (5)$$

令

$$\omega^2 = \frac{k_1 + k_2}{m}, \quad (6)$$

$$C = \frac{\mu mg}{k_1 + k_2}, \quad (7)$$

则解得式(4)和式(5)的通解分别为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) + C, \quad (8)$$

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) - C, \quad (9)$$

其中, $A = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}$, $C = \left| \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \right|$, φ 是由初始条件决定的常量, x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示滑块振动位移的相邻极大值和极小值. 由此可知, 滑块真正的动平衡位置有 2 个, 分别位于 C 和 $-C$ 处, 滑块往复运动, 动平衡位置在振动中心 O 点两侧往复跃迁. 因此, 只要能够绘制出滑块的阻尼振动曲线, 求解到一系列位移极大值和极小值点, 就可计算出滑块动平衡位置 C 的平均值, 再代入式(7)即可求到滑动摩擦系数 μ .

尽管阻尼振动不是严格的周期运动, 但如果仍把滑块往复运动 1 次所用的时间称为周期, 振动仍具有等时性. 因为在振动的各个阶段角频率 ω 都相同, 周期 T 表示为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}. \quad (10)$$

2 实验方法

2.1 双弹簧振子振动视频图像的获取与预处理

滑块采用了圆柱形的不锈钢钩码, 经精密磨制, 质量为 50.0 g, 其底面半径 $r = 12.50$ mm, 高度 $h = 14.00$ mm, 并用游标卡尺进行了验证, 因此可将底面半径值和高度值作为标准值用于像素大小的标定. 将滑块置于松木板上, 滑块两端连接相同的弹簧, 弹簧质量均为 30.0 g, 劲度系数均为 25.0 N/m. 为方便以后提取滑块目标图像, 预先将滑块外表面涂黑, 但滑块与松木板的接触底面不涂黑, 滑块往返振动, 就构成了阻尼双弹簧振子系统, 该振动系统的有效质量由式(3)计算为 70.0 g. 开始时, 滑块静止在平衡位置, 采用数码摄像机拍摄一段振子的视频, 通常 6 s 左右即可, 不必拍摄两弹簧两端的固定点位置. 视频的帧率为 24 帧/s, 每帧图像大小为 640 pixel \times 480 pixel. 在相同的拍摄条件下, 将滑块向右平移一段位

移后, 再次开始拍摄, 然后将滑块放开, 滑块往返振动直至静止, 即可停止拍摄. 将 2 段视频编号, 视频 1 对应滑块静止在平衡位置的情形, 视频 2 对应滑块作阻尼振动情形, 再将 2 段视频分别读入计算机, 获取视频的每帧图像, 对每帧图像进行预处理. 预处理主要包括: 灰度化、二值化和去噪声^[14]等操作. 图 2 是视频 2 中第 31 帧弹簧振子的图像, 由于所使用的数码摄像机电子快门的时间在 $\frac{1}{10\,000} \sim \frac{1}{50}$ s 之间, 拍摄时电子快门设置为自动电子快门方式, 因此滑块突出清晰, 不会产生拖尾现象. 图 3 是对图 2 灰度化、二值化和去噪声后的结果, 可见滑块目标已经完全分割出来了. 其中去噪声主要采取了形态学的开运算, 使得滑块的外轮廓线变得光滑, 这在进一步计算滑块的几何特征参量时可以提高精度.

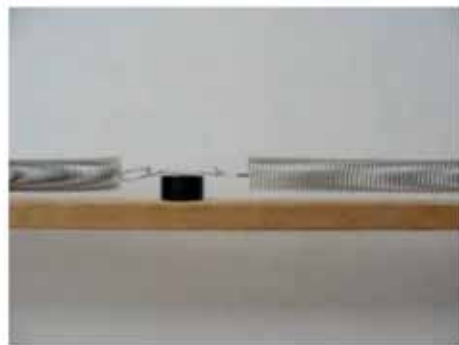


图 2 弹簧振子的原始图片



图 3 预处理后的滑块图片

2.2 图像单个像素的标定与滑块平衡位置的确定

摄像机参量的标定是计算滑块振动参量的前提, 其标定结果的精度将直接影响各个振动参量结果的准确性. 考虑到需要求解的物理量是滑块的位移, 而滑块的实际空间点坐标可以不必计算.

因此本文采用简单易行的标定方法,即仅标定图像单个像素的大小,从而避免了复杂求解摄像机参量的过程,且标定精度完全满足实验需求. 标定方法如下:滑块为精密加工的圆柱形不锈钢钩码,因此可将其过圆心的横截面积作为参照物对图像像素大小进行标定,逐帧计算视频 1 中预处理后滑块的面积,并取平均作为滑块的图像面积,得到结果为 2 134 pixel. 由于滑块的图像面积是对大量图像(大于 100 帧)取平均的结果,因此其测量带来的偶然误差可以忽略不计. 已知滑块的实际横截面积为

$$S=2rh=350.00\text{ mm}^2, \quad (11)$$

计算得到图像单个像素的面积为 0.16 mm^2 , 单个像素的边长为 0.40 mm , 并将此作为标定系数应用在振动参量的计算中. 注意到视频每帧图像分割出来的滑块目标形状并不完全相同,因此提取滑块的质心坐标作为滑块的准确位置. 将视频 1 中每帧滑块的质心坐标求平均,得到滑块的平衡位置 O 点的像素坐标为(320, 95, 256. 75).

2.3 滑块阻尼振动曲线的绘制以及滑动摩擦系数计算

将视频 2 中每帧滑块的质心像素坐标求出,令其横坐标与平衡位置 O 点的横坐标相减,再乘以单个像素长度的标定系数 0.40 mm ,便可得到滑块的实际位移量. 绘制每帧滑块的位移,并将帧数换算成时间,得到滑块的位移-时间曲线,如图 4 所示. 找出滑块位移-时间曲线的位移极大值和极小值坐标点,列于表 1 中. 计算两相邻位移极大值与极小值之间的时间间隔,并取平均值再乘以 2 作为滑块的振动周期,结果为 0.236 s . 滑块振动的理论周期由式(10)计算为 0.235 s ,二者相对偏差仅为 0.47% ,证明了滑块阻尼振动曲

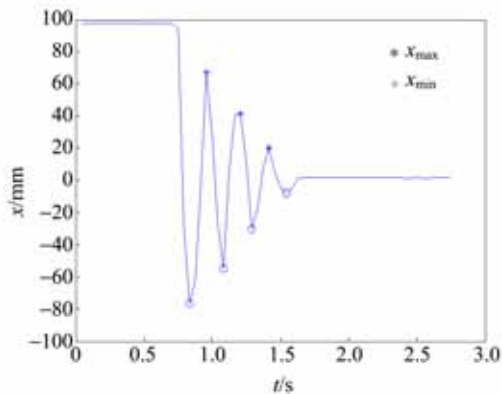


图 4 视频 2 中滑块的位移-时间曲线

线的准确性. 将滑块位移极大值与其前一位移极小值求平均,即可得到动平衡位置 $-C$, 将位移极大值与其后一位移极小值求平均,即可得到动平衡位置 C , 结果列于表 2 中.

表 1 滑块的位移-时间曲线参量

t/s	x_{\max}/mm	x_{\min}/mm
0.833	—	-76.514
0.958	66.733	—
1.083	—	-54.389
1.208	41.222	—
1.292	—	-30.342
1.417	20.249	—
1.542	—	-7.755

表 2 滑块的动平衡位置

No.	C/mm	$-C/\text{mm}$
1	6.172	-4.890
2	5.440	-6.584
3	6.247	-5.047

将表 2 中所有动平衡位置取绝对值再求平均,结果为 5.730 mm , 代入式(7)并通过不确定度计算即可求得滑动摩擦系数 μ 为

$$\mu = \frac{C(k_1 + k_2)}{mg} \approx 0.40 \pm 0.04. \quad (12)$$

将该结果与文献[12]中软木与钢的干摩擦因数 $0.30 \sim 0.50$ 对比,结果在正常范围之内,说明了该方法的正确性. 对同一段松木板反复测试,计算所得的滑动摩擦系数结果略有波动,相对偏差不超过 4.8% ,这也充分说明了该方法的精确性.

3 结束语

基于计算机视频图像处理技术,提出了非接触式的测量滑动摩擦系数的方法,该方法原理简单、操作简便且计算精度高,可以测量常用材料之间的滑动摩擦系数. 但值得注意的是,在测量不同材料之间的滑动摩擦系数时,要选择合适的滑块质量及弹簧劲度系数,使滑块作小阻尼振动,不要出现临界阻尼和过阻尼的情形.

参考文献:

- [1] 姚永琪,郭乙木,朱凌,等. 高速切削时摩擦系数对切削影响的数值模拟[J]. 工程设计学报,2004,11

- (1):31-36.
- [2] 唐进元,熊兴波,陈思雨. 含非线性摩擦系数的单自由度颤振系统全局动力学行为数值研究[J]. 计算力学学报,2011,28(3):417-422.
- [3] 龚中良,黄平. 基于非连续能量耗散的滑动摩擦系数计算模型[J]. 物理学报,2011,60(2):024601.
- [4] 刘清泉. 路用石料的摩擦特性分析[J]. 中国公路学报,2004,17(3):19-22.
- [5] 郑木莲,陈拴发,王选仓,等. 纵向摩擦系数在路面抗滑性能评价中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):9-12.
- [6] 李红,徐彤,王莉,等. 渤海地区大位移井摩擦系数变化规律研究与应用[J]. 海洋石油,2019,39(1):70-75.
- [7] 王黎钦,齐毓霖,朱宝库. CM-I型多功能擦膜摩擦试验机的研制(I)——原理与构成[J]. 摩擦学报,1994,14(4):345-351.
- [8] 史炎. 用于摩擦系数测量的二维力传感器[J]. 内燃机车,2002(2):41-42.
- [9] 吴福兵. 板成形摩擦系数测量影响因素的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.
- [10] 田成达,唐鼎,李大永,等. 一种摩擦系数的测量方法及其在数值模拟中的应用[J]. 塑性工程学报,2008,15(5):53-56.
- [11] 段茜,邹其徽. 基于视频图像处理的单摆振动特性研究[J]. 光学技术,2015,41(2):128-131.
- [12] 成大先. 机械设计手册[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2008:14.
- [13] 张庆海,潘华锦,齐建英. 用最小二乘法测弹簧的有效质量[J]. 大学物理,2002,21(11):33-34.
- [14] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2003:448-452.

Measuring sliding friction coefficient based on video image processing technology

DUAN Xi, LIAO Kai, YU Rui-ru, JIANG Rong, ZENG Bin

(Department of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the current measurement methods of sliding friction coefficient, a method combining experimental measurement and numerical calculation was proposed by using the double spring vibrator system and video image processing technology. This method used digital camera to collect data, which was simple, easy, and low cost. The calculation of vibration parameters mainly relied on some basic image processing technology, and the algorithm was simple and easy to realize. Because this method could get many data related to the coefficient of sliding friction from the waveform of friction vibration, it had a high precision, far higher than the direct measurement results of traditional experiments.

Key words: sliding friction coefficient; spring vibrator; video; image processing

[责任编辑:尹冬梅]