

离心摆式减振器回转运动的数字摄影测量方法

邵卫澍, 吴光强*, 张逸, 毛礼波

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要:离心摆式减振器(Centrifugal Pendulum Vibration Absorber, CPVA)由于能够有效吸收发动机产生的扭振而被广泛应用于传动系统。针对研究 CPVA 动态特性时缺少运动参数测量方法的问题,提出了 1 种基于计算机视觉的非接触式测量方法。首先在转子与摆子上布置标记,然后利用高速摄像机拍摄 CPVA 的运动视频,随后利用数字图像处理技术对标记位置进行识别,最终通过标记坐标计算转子与摆子的运动状态参数。实验结果表明所提出的方法能够对 CPVA 在重力场中的运动进行准确测量。

关键词:传动系统;非接触式测量;数字图像处理;离心摆式减振器;计算机视觉

中图分类号:U463.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)04-0146-08

Digital photogrammetry measurement method for the rotary motion of Centrifugal Pendulum Vibration Absorber

SHAO Weishu, WU Guangqiang*, ZHANG Yi, MAO Libo

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Centrifugal Pendulum Vibration Absorber (CPVA) is widely used in transmission systems due to its ability to effectively absorb torsional vibration generated by the engine. To address the lack of methods measuring kinematic parameters in the study of CPVA dynamic characteristics, a non-contact measurement method based on computer vision is proposed. Firstly, markers are arranged on the rotor and the pendulum, and a high-speed camera is used to capture the motion video of the CPVA. Then digital image processing techniques are used to recognize the positions of the markers. Finally, the kinematic parameters of the rotor and the pendulum are calculated according to the coordinates of the markers. The experimental results show that the proposed method can accurately measure the motion of CPVA in a gravity field.

Key words: transmission system; non-contact measurement; digital image processing; Centrifugal Pendulum Vibration Absorber(CPVA); computer vision

汽车的振动和噪声不仅会影响到车内人员的驾乘体验,同时也会加剧零部件的磨损,带来严重的安全隐患。因此,研究传动系统的振动阻尼技术至关重要。CPVA 是 1 种调谐动态减振器,围绕其旋转轴悬挂有质量块。其工作机理是在做回转运动时,质量块受离心力驱动,并通过沿着定义的轨迹运动提供反向扭

收稿日期:2024-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075388)

作者简介:邵卫澍(1998—),男,山东青岛人。硕士,研究方向为汽车智能驾驶与控制。E-mail:1825131283@qq.com。

* 通信作者:吴光强(1965—),男,河北卢龙人。教授,主要从事汽车智能驾驶、自动变速器理论与技术方面的研究。
E-mail:wuguangqiang@tongji.edu.cn。

矩,以消除扭转振动^[1]。20世纪初,CPVA已被安装于航空用往复式内燃机以抑制扭振^[2-3]。此后,研究人员对其在汽车领域的应用展开了研究。MAHE等基于分析扰动技术提出了1种适用于具有任意偶数摆子CPVA的特定次谐波解动态稳定性分析方法^[4]。ZHANG等研究了CPVA在发动机启动时的动态特性,分析并总结了控制减振器行为与降低爆震功率的措施^[5]。CERA等研究了梯形摆子的运动学和非线性动力学特性,提出了CPVA旋转部件的优化标准和整体设计指南^[6]。由于在做回转运动的过程中,CPVA与回转机械运动的不一致可能导致传动系统不稳定,影响减振效果。因此,为了设计具有更稳定阻尼效果的CPVA,有必要研究其运动特性并设计1种测量其运动的方法。

一般来说,回转运动的测量可通过在测量对象上安装角度传感器来完成,但这种方法由于存在接触容易对测量对象的运动造成影响进而影响测量结果。非接触式的方法多采用光电、声学 and 电磁等原理实现^[7-10],但这些方法对于实验设备要求较高,实施难度较大。LI等基于SIFT算法实现了CPVA回转运动的识别,但由于SIFT计算量较大导致效率较低^[11]。因此,本文利用高速摄像机拍摄CPVA的运动视频,通过数字图像处理识别了CPVA转子与摆子在每一采样时刻的位置,并基于位置信息计算了转子与摆子的运动状态参数。

1 图像获取

使用高速摄像机记录CPVA的旋转运动视频,摄像机和CPVA的布置方案如图1所示。其中,摄像机镜头的光轴与CPVA旋转轴平行。此外,镜头的中心应与CPVA的旋转中心对齐。在实验过程中,CPVA的旋转方向为顺时针,摆动将随着转子运动的开始和停止而振荡。如图2所示,以CPVA旋转中心为原点 O 建立直角坐标系,以图像的左上顶点为原点 O_p 建立像素坐标系。

2 转子运动识别

2.1 制作掩膜

首先,在CPVA的旋转表面上放置1个纸质码盘,码盘的圆心与CPVA的旋转中心重合。码盘的形状是1个空心圆,沿着环的周长以 2° 间隔均匀分布有径向线段簇,因此码盘被等分为180块。线段簇由179条等长线段与1条短线段组成,使用短线段的位置检测CPVA转过的角度。在码盘固定过程中需要确保码盘不会干扰到CPVA转子与摆子的运动,并且码盘上的线段不会被遮挡。

其次,将高速摄像机拍摄的运动视频离散化,以获取图3中所示的图像。高速摄像机记录的每一帧都是1个RGB图像,即每个像素由3个通道表示,每个通道的分量值介于0和255之间。为了使后续处理更容易,此处对图像进行降采样。降采样有2种选项:二进制图像和灰度图像。二进制图像中的每个像素只有2个可能的值,0和1,其中

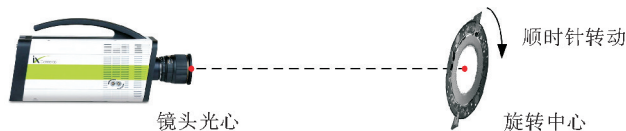


图1 实验设备布置方案

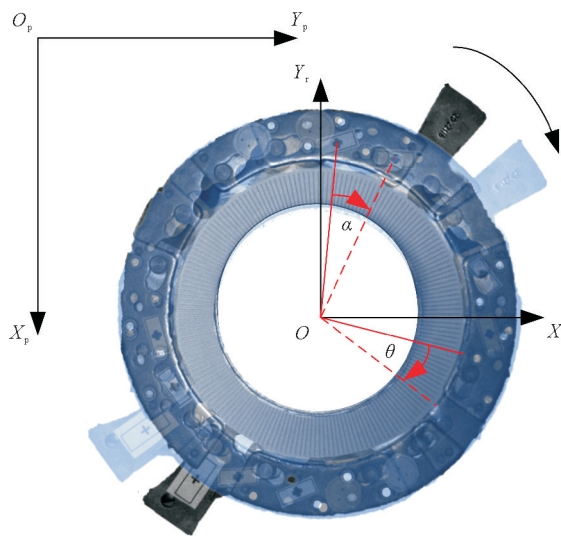


图2 CPVA坐标系与像素坐标系
 θ —转子的旋转角度; α —摆子的旋转角度



图3 视频离散后所得图像

0 代表黑色,1 代表白色。灰度图像只包含 1 种信息通道,但与二进制图像相比,它在黑色和白色之间有更多的色深,可以存储更多的信息,因此选择将 RGB 图像转换为灰度图像。

随着 CPVA 的旋转,码盘也将以相同的角度旋转。因此,在识别线段簇中短线段所对应的特征点时,只需要在码盘区域进行操作。在本文中,笔者创建了用于提取码盘区域的掩膜,通过掩膜提取操作区域可以避免遍历图像中所有像素带来的高运算量。在数字图像处理中,掩膜是由 0 和 1 组成的特定形状的二进制图像模板,可以用于覆盖图像。在执行掩膜处理时,通过将其与图像相乘,使图像中与掩膜中的 0 对应的像素被设置为 0,而与 1 对应的像素值保持不变。因此,码盘区域的像素被保留,而码盘外的区域显示为黑色。图 4 显示了使用掩膜进行图像处理的过程,其中每个方格中的值表示该位置的像素值。

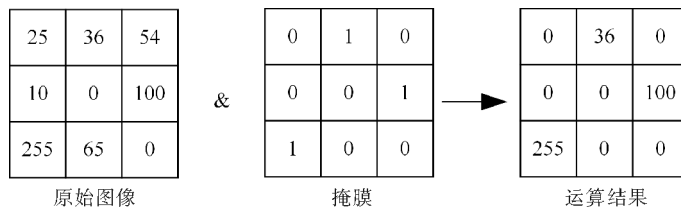


图 4 掩膜运算过程

由于码盘的形状是 1 个圆环,因此需要制作 2 个掩膜,分别对应其外圆形状和内圆形状。其中,与外圆相对应的掩膜用来移除图像中码盘外侧的区域,而与内圆相对应的掩膜用来消除 CPVA 固定工具边缘对图像处理的影响。2 个掩膜(以下称掩膜 1 和掩膜 2)的尺寸与码盘尺寸的对应关系如图 5 所示。在图 5 中, O 表示 CPVA 的旋转中心;红色框表示识别码盘运动所需的特征。

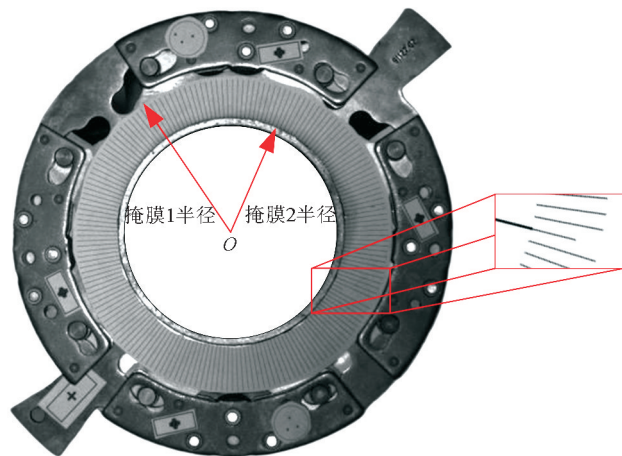


图 5 掩膜尺寸与码盘特征

在制作掩膜 1 时,首先绘制 1 个与图像尺寸相同的图幅,并将图幅中的所有像素设置为黑色。接下来在图幅上绘制 1 个半径与码盘外圆相同的圆并将其内部填充为白色,随后利用掩膜 1 与视频图像进行位逻辑运算。图像上常见的位逻辑运算有:与运算(AND)、或运算(OR)和异或运算(XOR)等。当进行位逻辑运算时,2 幅图像对应位置的像素值将被转换为二进制数。对于不同类型的位逻辑运算,2 个二进制数的对应数位的运算结果见表 1。在本节中,需要保留掩膜 1 中的白色区域,并用黑色遮盖其他区域,因此对图像和掩膜 1 执行与操作。

表 1 位逻辑运算法则

二进制数	AND		OR		XOR	
	0	1	0	1	0	1
0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	1	0

掩膜 2 的制作过程与掩膜 1 类似,其半径与码盘内圆边缘的半径一致,从而消除 CPVA 固定工具对运动位置识别的影响。将制备好的掩膜 2 与经过掩膜 1 处理的结果执行与操作。

2.2 边缘检测

经过上一步,获得了识别转子运动位置所需的操作区域。然后需要检测区域内短线段对应的凹槽并输出位置坐标。由于码盘的底色与均匀分布在其上的黑色线段簇在形态和亮度上存在显著差异,因此选择边缘检测方法来提取线段簇。图像的边缘是指灰度级变化急剧或不连续的部分,这种不连续性可以通

过微分算子来检测,常用的边缘检测算子按照微分阶次可分为三类^[12-15],见表 2。

为比较不同类型检测算子在本文任务中的性能,使用 Sobel 算子、Canny 算子和 LoG 算子进行了线段提取对比实验,实验结果如图 6 所示。

表 2 常见边缘检测算子

微分阶次	1 阶	2 阶	混合阶次
边缘检测算子	Roberts、Sobel、Prewitt	Laplacian、Canny	LoG

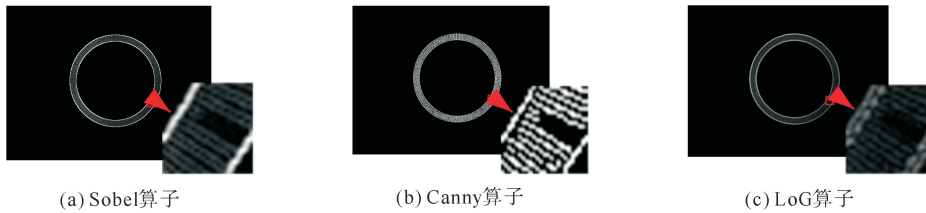


图 6 不同类型检测算子边缘检测结果

为验证边缘检测效果与原图结构是否一致,参考峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)对 3 种边缘检测算子的检测效果进行评价。PSNR 是 1 个衡量图像或视频质量的指标,它通过比较原始信号和经过压缩或失真处理后的信号之间的差异来评估图像质量,其最小值为 0,数值越高表示处理后的图像质量与原图质量越接近。PSNR 值的计算公式为

$$V_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{\text{max}}^2}{e_{\text{mse}}} \right) \quad (1)$$

式中: V_{PSNR} 为峰值信噪比的值; p_{max} 为图像像素可能取到的最大值; e_{mse} 为原图与处理后图像的均方误差。

使用 3 种边缘检测算子处理后图像与原图的 PSNR 计算结果见表 3。

表 3 PSNR 对比

边缘检测算子	Sobel	Canny	LoG
PSNR	21.026	18.174	21.686

由于使用的 CPVA 图像受光照等原因导致图像中存在噪声,使得线段簇与码盘底色的明暗对比减弱,因此,当 PSNR 值较小时,说明检测算子对噪声的滤除效果较好。由图 6 与表 3 可以看出,Canny 算子的边缘检测效果优于 Sobel 算子和 LoG 算子,因此,选择 Canny 算子进行边缘检测。

2.3 图像形态学处理

图像形态学处理^[16-18]是 1 种基于数学思想的图像处理方法,其基本思想是利用一些结构元素提取图像中的特征。常见的图像形态学处理有膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。膨胀操作的原理是通过结构元素在图像上移动,计算由结构元素覆盖的区域的像素值,并将原始像素替换为最大值。腐蚀操作的原理与膨胀操作类似,区别在于结构元素会将覆盖区域的原始像素替换为覆盖区域内的最小像素值。设 A 为原始图像, B 为结构元素,则使用 B 对 A 进行膨胀操作的过程可用式(2)表示:

$$A \oplus B = \{x \mid (B)_x \cap A\} \quad (2)$$

式中: \oplus 为膨胀算子; $(B)_x$ 由 B 在 A 上滑动得到; x 为 $(B)_x$ 与 A 做与运算得到的像素点。

使用 B 对 A 进行腐蚀操作的过程可用式(3)表示:

$$A - B = \{x \mid (B)_x \in A\} \quad (3)$$

式中: x 为 $(B)_x$ 完全包含于 A 的像素点。

开运算和闭运算则是膨胀与腐蚀操作的组合。在开运算中,先进行腐蚀操作,再进行膨胀操作。而在闭运算中,先进行膨胀操作,再进行腐蚀操作。

在完成 2.2 节中的边缘检测后,通过闭运算提取线段簇中短线段位置对应的不规则缺口。在这一过程中,膨胀操作使得等长线段构成联通区域,而腐蚀操作最终分离出缺口。此后,再次对图像进行边缘检

测,此时可以得到分布在缺口边缘上的点的坐标。通过计算所有点与 CPVA 回转中心的距离,距离最短的索引对应的即是线段簇中短线段的端点。

至此,已得到每一采样时刻下短线段端点在图像坐标系中的坐标,从而完成 CPVA 转子在回转过程中的位置识别。图 7 给出了以上所述的图像处理过程,图 7 中红色方框标记部分即为转子运动识别所需提取的特征。

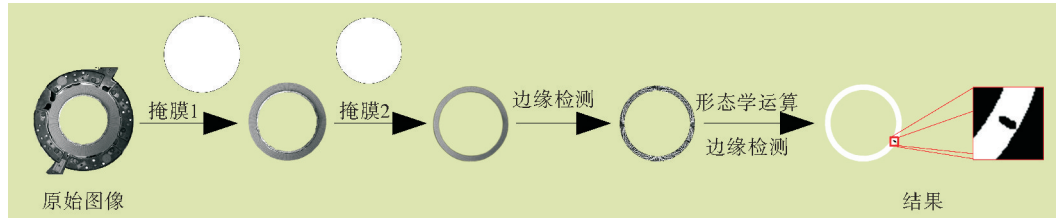


图 7 转子运动识别流程

3 摆子运动识别

为了识别摆子的运动,在 1 对摆子上放置 1 个矩形标记。这个矩形标记会随着摆子的摆动而移动,因此摆子运动识别的任务可以转化为边缘检测任务。由于摆子在任意时刻的位置均位于第 2 节中介绍的码盘外缘与 CPVA 外缘之间,因此制作第 3 个掩膜(以下称掩膜 3)提取摆子的运动区域,避免图像中其他元素或结构对边缘检测结果的影响。掩膜 3 的制作过程与制作掩膜 1 类似,其半径与 CPVA 在图像中的半径一致。将原始图像先后与掩膜 3、掩膜 1 做与运算,使得 CPVA 边缘外部和码盘边缘内部的区域得到覆盖。

应用 Canny 算子对摆子的运动区域进行边缘检测,随后通过 OpenCV 库中的 findContours 函数和 approxPolyDP 函数进行轮廓遍历与近似,最终通过顶点数量对近似结果进行筛选,得到与摆子上标记相对应的矩形轮廓以及 4 个顶点的坐标。设 1 条对角线 2 个端点在像素坐标系下的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 则矩形轮廓几何中心在像素坐标系下的坐标 (x_{gc}, y_{gc}) 可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_{gc} &= \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \\ y_{gc} &= \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4 运动状态参数计算

通过上述过程,得到了转子与摆子上的标记在图像坐标系下的坐标。以 CPVA 回转中心 O 为原点建立直角坐标系,设在像素坐标下,转子或摆子上一点 P 的坐标为 (x_{pi}, y_{pi}) , 回转中心 O 的坐标为 (x_o, y_o) , 则点 P 转换到转子坐标系下对应坐标为 (x_{pr}, y_{pr}) , 转换公式如下:

$$\left. \begin{aligned} x_{pr} &= x_{pi} - x_o \\ y_{pr} &= y_{pi} - y_o \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

所研究的运动状态包括转子与摆子的累计旋转角度以及转子的角速度。其中,定义累计旋转角度为:以初始时刻所处位置为 0° 起点,转子在每一采样时刻相较于起点所转过的角度。为验证所提测量算法的性能,对 CPVA 进行固定,使其仅在重力作用下做回转运动,运动过程利用高速摄像机进行记录。拍摄过程中,CPVA 转过了 125° 。同时,在重力的影响下,摆子相对于转子存在着不同程度的相对运动。图 8、图 9 分别为转子和摆子的旋转角度测量值,并给出了测量误差。

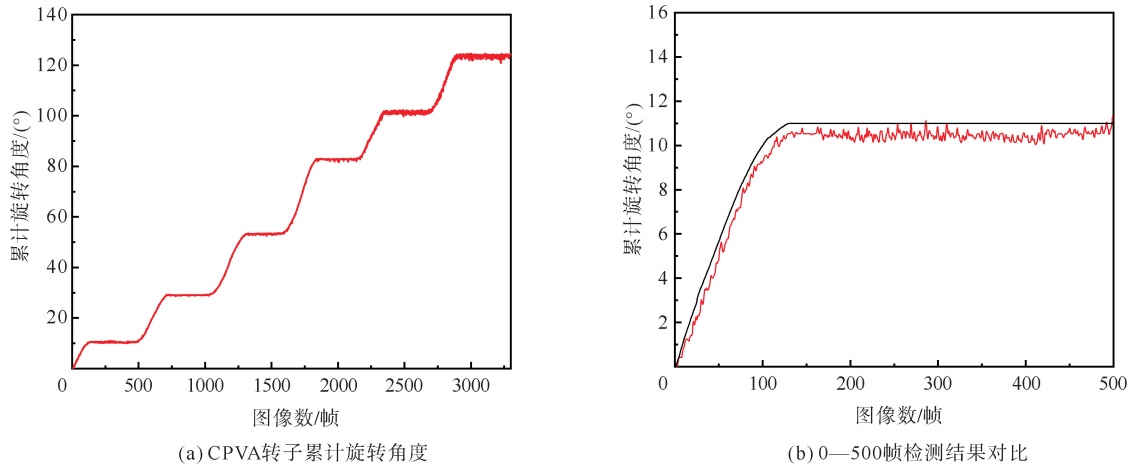


图 8 CPVA转子位置识别结果

— 转子状态; ——— 角度真实值

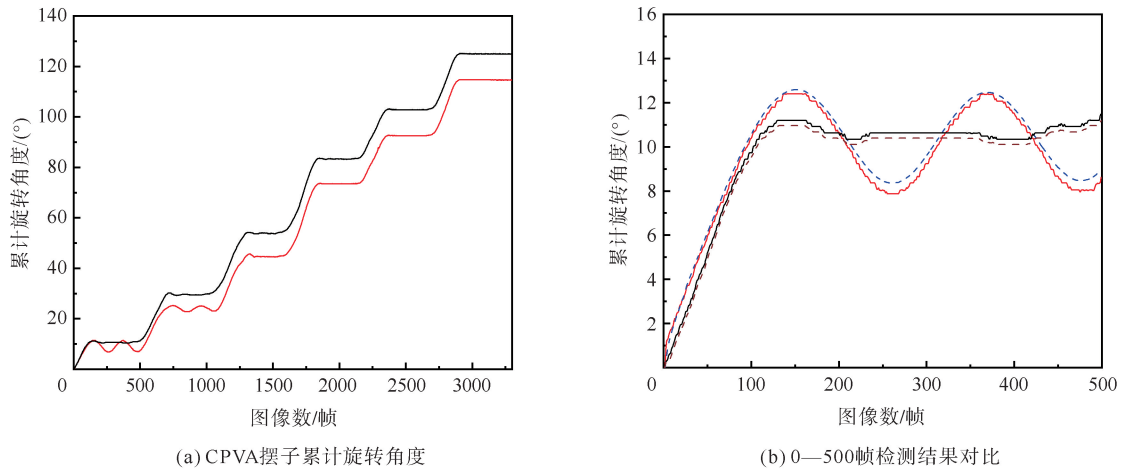


图 9 CPVA摆子位置识别结果

— 摆子1状态; - - - 摆子1真实值; ——— 摆子2状态; - - - 摆子2真实值

由图 8(a)与图 9(a)可以看出,笔者提出的非接触式测量方法能够准确地反应 CPVA 转子与摆子的位置变化。结合图 8(b)与图 9(b)数据,通过将测量值与设定工况下的真实值相比较可知,所提方法能够将累计旋转角度的测量误差控制在 0.6° 以内,测量结果的均方根误差不超过 0.5° ,表现出良好的测量精度和测量稳定性。

设转子在每一采样时刻的累计转动角度为 $\theta_i (i = 1, 2, 3, \dots)$,则转子的角速度 $\dot{\theta}_i$ 和角加速度 $\ddot{\theta}_i$ 可由式(6)(7)计算:

$$\dot{\theta}_i = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta t} \quad (i = 2, 3, 4, \dots) \quad (6)$$

$$\ddot{\theta}_i = \frac{\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1}}{\Delta t} \quad (i = 2, 3, 4, \dots) \quad (7)$$

式中: Δt 为每 2 幅图像之间的时间间隔,设在 t 时间内共获取到 n 幅图像,则 $\Delta t = n/t$ 。

实验中所测转子角速度与角加速度变化如图 10 所示。

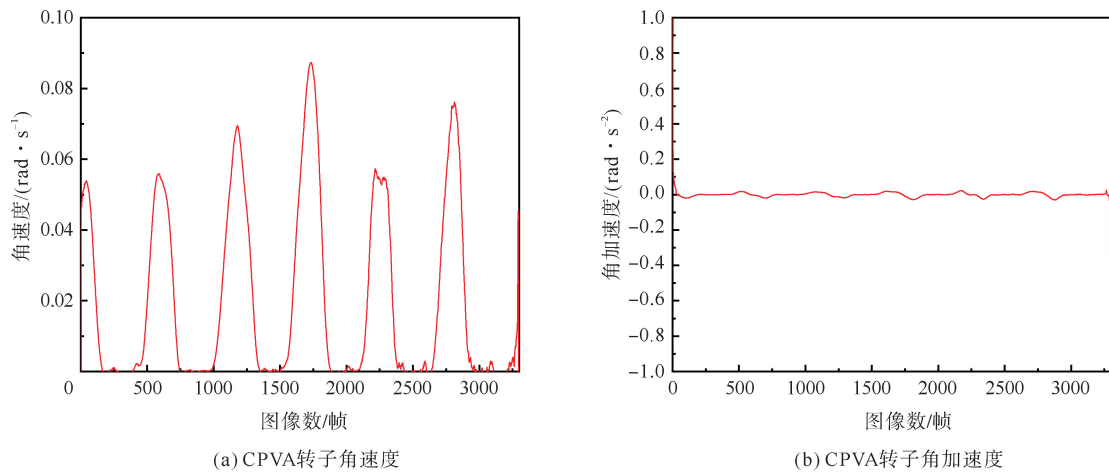


图10 CPVA 转子运动状态参数

设摆子在每一采样时刻的累计旋转角度为 α_i ($i=1,2,3,\dots$), 则摆子的角速度 $\dot{\alpha}_i$ 和角加速度 $\ddot{\alpha}_i$ 可用式(8)(9)计算:

$$\dot{\alpha}_i = \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{\Delta t} \quad (i=2,3,4,\dots) \quad (8)$$

$$\ddot{\alpha}_i = \frac{\dot{\alpha}_i - \dot{\alpha}_{i-1}}{\Delta t} \quad (i=2,3,4,\dots) \quad (9)$$

本实验得到的摆子角速度和角加速度的变化如图11所示。

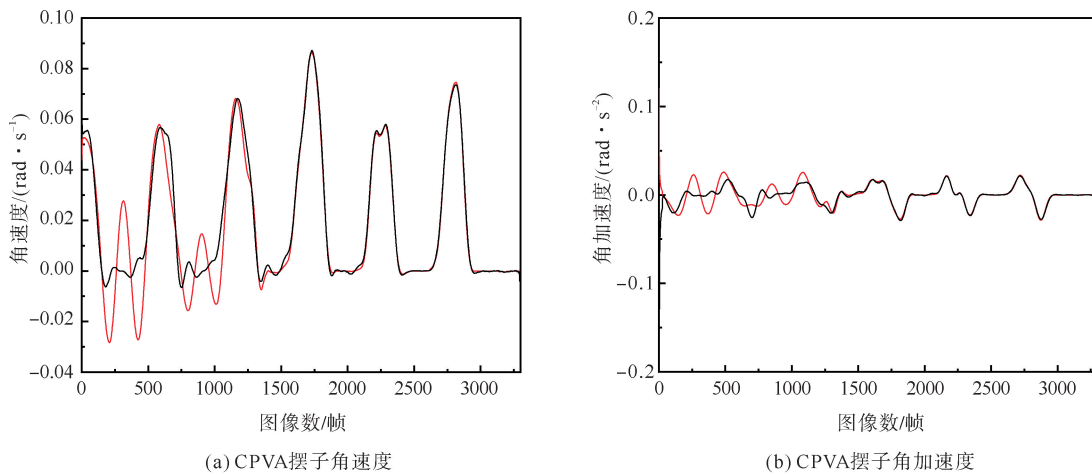


图11 CPVA摆子运动状态参数

— 摆子1状态; — 摆子2状态

5 结论

本文针对 CPVA 提出了 1 种基于计算机视觉的非接触式测量方法, 该方法使用高速摄像机记录 CPVA 在重力场中的回转运动, 通过数字图像处理技术对 CPVA 图像进行分析, 利用掩膜操作、边缘检测以及图像形态学处理技术实现了 CPVA 运动位置标志物的提取, 通过标志物坐标得到每一采样时刻 CPVA 转子与摆子的旋转角度并计算出角速度和角加速度。根据实验结果, 本文提出的方法能够将旋转角度测量误差控制在 0.6° 以内, 测量均方根误差小于 0.5° , 测量精度与稳定性表现良好。

本文提出的 CPVA 回转运动识别的测量方法有助于研究人员更好地了解 CPVA 的运动特性,该方法所使用的设备与 CPVA 不会产生接触,对其运动不会造成影响。此外,该方法对高速摄像机记录的画面进行数字图像处理,与常见的声学、光电以及电磁原理等测量方法相比,在保证测量精度的同时设备要求更低,实施也更为方便。

参考文献(References):

- [1] ZHAO G, WU G, ZHANG Y. Effects of gravity of centrifugal pendulum vibration absorber on its damping performance[J]. *International Journal of Vehicle Performance*, 2021, 8(1): 109-127.
- [2] NEWLAND D E. Nonlinear aspects of the performance of centrifugal pendulum vibration absorbers[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1964, 86(3): 257-263.
- [3] DENMAN H H. Tautochronic bifilar pendulum torsion absorbers for reciprocating engines[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 159(2): 251-277.
- [4] MAHE V, RENAULT A, GROLET A, et al. On the stability of pairs of subharmonic centrifugal pendulum vibration absorbers allowing a rotational mobility[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111: 17859-17886.
- [5] ZHANG Y, WU G, LONG Y. Dynamic response control of centrifugal pendulum vibration absorber with motion-limiting device during startup in gravity field[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(21/22): 5107-5122.
- [6] CERA M, CIRELLI M, PENNESTRI E, et al. Design analysis of torsichrone centrifugal pendulum vibration absorbers[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 104: 1023-1041.
- [7] KIRTAN A, CHOKEY Y, BAHADUR J M, et al. Coupling of approximate convection diffusion wave method with ultrasonic sensor to estimate discharge in Himalayan Rivers[J]. *ISH Journal of Hydraulic*, 2023, 29(S1): 282-297.
- [8] KUMAR A, BODY G. A noncontact angle sensor based on eddy current technique[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(4): 1275-1283.
- [9] MANGE A, ATKINSON T, BASTIAAN J, et al. An optical-based technique to obtain vibration characteristics of rotating tires[J]. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability and NVH*, 2019, 3(3): 197-208.
- [10] SWAMI A, LIU C, KUBENZ J, et al. Experimental study on tire contact patch characteristics for vehicle handling with enhanced optical measuring system[J]. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability and NVH*, 2021, 5(3): 333-350.
- [11] LI W, WU G, ZHANG Y. The pendulum motion measured digital photogrammetry for a centrifugal pendulum vibration absorber[C]// *WCX SAE World Congress Experience*, 2023.
- [12] JI D, LIU Y, WANG C. Research on image edge detection based on improved Canny operator[C]// *3rd International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDS)*. Guangzhou, 2022: 229-232.
- [13] EDDY C, DE SAXE C, CEBON D. Camera-based measurement of cyclist motion[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233(7): 1793-1805.
- [14] ZHANG H, ZHOU J, WANG Q, et al. Classification-detection of metal surfaces under lower edge sharpness using a deep learning-based approach combined with an enhanced LoG operator[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2023, 137(2): 1551-1572.
- [15] LIU S, YANG B, WANG Y, et al. 2D/3D multimode medical image registration based on normalized cross-correlation[J]. *Applied Science*, 2022, 12(6): 2828.
- [16] LIU S, DONG L, LIAO X, et al. A dilation and erosion-based clustering approach for fault diagnosis of photovoltaic arrays[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(11): 4123-4137.
- [17] KANTI T H, KANISHKA S, ARDHENDU M, et al. A robust head MRI/CT background removing approach using dynamic morphological operations[J]. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2023, 89(3): 673-688.
- [18] PRAKASH S, KAKARLA J. Three level automatic segmentation of optic disc using LAB color space contours and morphological operation[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2023, 33(5): 1796-1813.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)