

文章编号 1004-924X(2016)11-2672-11

基于工业摄像技术的动态轴功率测量

资新运^{1*}, 钱仁军¹, 赵姝帆², 耿 帅³, 张卫锋¹

- (1. 军事交通学院 工程实验中心, 天津 300161;
2. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264000;
3. 中国人民解放军 94303 部队, 山东 潍坊 261000)

摘要: 基于工业摄像技术提出一种非接触测量传动轴动态轴功率的方法。首先设计了轴功率测量系统, 提出了测量轴转速和轴转矩的方法。通过数字散斑的相关搜索和亚像素计算等手段, 测得轴转速和转矩值, 最终计算得出轴功率。为验证本文方法的测量精度, 搭建了车载试验系统, 并在底盘测功机上对其进行了实际测量试验。试验结果表明: 提出的轴功率测量方法得到的结果与底盘测功机测量结果变化趋势一致, 其相对误差平均值为 9.37%。其中轴转速的测量范围可以覆盖整个过程, 测量值波动较小, 与底盘测功机测量结果基本一致, 其相对误差平均值为 0.73%, 抗噪能力强; 轴转矩的测量范围可覆盖部分高转矩, 测量值波动较大, 两者测量结果趋势一致, 其相对误差平均值为 15.15%, 抗噪能力较弱。本文方法克服了一些传统测量方法的不足, 为解决轴功率动态测量提供了一种新思路。

关键词: 数字图像相关; 轴功率测量; 转速测量; 转矩测量; 梯度法; 工业摄像

中图分类号: TH133.3; TB971 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162411.2672

Measurement of dynamic shaft power based on industrial photography

ZI Xin-yun^{1*}, QIAN Ren-jun¹, ZHAO Shu-fan², GENG Shuai³, ZHANG Wei-feng¹

- (1. *Engineering Experiment Center, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;*
2. *Department of Aircraft Engineering,*
3. *Unit 94303, The Chinese People's Liberation Army, Weifang 261000, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zixinyun1971@163.com*

Abstract: On the basis of the industrial photography, a non-contact measurement method for dynamic shaft power of a transmission shaft was proposed. Firstly, a measurement system of shaft power was designed, and the measurement method of shaft rotational speed and shaft torque was put forward. Then the shaft rotational speed and torque were measured by digital image correlation method and sub pixel computation. Finally, the shaft power was figured out. To validate the accuracy of this measurement method, a test system mounted on a vehicle was set up, and the actual test was carried out on a chassis dynamometer. The test results show that the measurement results by proposed shaft power measurement method and the chassis dynamometer have the same trend, and the average of

收稿日期: 2016-04-25; 修订日期: 2016-07-02.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2013AA065303); 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 91120306); 天津市自然科学基金资助项目 (No. 14JQCQNJC01600)

relative error is 9.37%. The measuring range of the shaft rotational speed covers the whole process, and the fluctuation of measurement results is smaller. The measurement results are basically consistent with that of the chassis dynamometer, and the average of relative error is 0.73%, which verifies its strong anti-noise ability. Moreover, the measuring range of the shaft torque covers the part of the high torque, and the measurement results is in a larger fluctuation. The measurement results have the same trend with that of the chassis dynamometer, and the average of relative error is 15.15%, the anti-noise ability is weaker. The method proposed in this paper overcomes shortcomings of some traditional measurement methods, and provides a new way to solve the measurement problem of dynamic shaft power.

Key words: digital image correlation; shaft power measurement; rotational speed measurement; torque measurement; gradient method; industrial photography

1 引 言

轴功率是反映动力装置动力性能和工作状态的重要参数,其精确测量对机械设备的研发、分析测试、结构优化和故障诊断具有重要意义。轴功率与轴转矩和转速成正比关系,其测量关键在于实现转矩和转速的精确测量。目前,国内外轴转速的测量方法主要有磁电式、电涡流式和光电式,并且均为非接触测量,然而这些方法在安装传感器的过程中均需要改装轴结构,从而在一定程度上影响轴的正常运动和系统的测量精度。对轴转矩的测量方法主要分为两类:一类是在轴上粘贴应变材料,根据材料的应变计算出轴的形变量,得到扭矩值,如电阻应变片式扭矩传感器等,然而该方法无法实现非接触测量,不仅系统布线复杂,还易受测量环境干扰;另一类是通过测量轴两端截面的相对扭转角,根据角位移量计算出扭矩值,如电磁式、电容式、光电式和激光式等,然而此类方法仍需要对轴结构进行改装,安装复杂、成本较高。

数字图像相关技术(Digital Image Correlation Method, DICM)是工业摄像技术的一个重要分支,它作为新一代光学测量技术具有非接触、全场测量、测量精度高和适用于恶劣环境等优点,并已经广泛应用于物体运动、微小形变和力

学性能等测量中^[1]。本文基于 DICM 和静力学理论提出了一种基于工业摄像技术的轴功率测量方法。该方法将轴面的运动和变形转换为散斑图像的像素位移,通过数字散斑的相关搜索和亚像素计算等手段得出轴功率。与传统测量方法相比,它克服了布线困难、装置复杂等缺点,为机械设备轴功率的在线监测提供了新手段。

2 数字图像相关方法

DICM 利用 CCD 工业相机对物体运动、变形前后的表面散斑图像进行拍摄采集,通过相关函数和亚像素算法分析两幅图像的灰度分布,从而得出物体的运动和变形信息^[2-3]。在数字散斑场中,由于斑点具有随机性,每点周围区域的散斑分布规律各不相同,因此可在参考图像(应变前图像)中选择以 P_0 为中心点的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素的子区,通过相关计算在目标图像(应变后图像)中搜索相似度最大的子区,并得到与 P_0 相对应的中心点 P_1 ,完成对物体表面任意一点位移和变形的测量^[4]。

根据 Tong W 和 Pan B^[5]对 DICM 多种相关函数抗噪强度的研究,这里采用抗干扰能力最强、应用最为广泛的零均值归一化互相关函数进行相关计算,即:

$$C = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \times [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 分别为参考子区和目标子区的灰度分布函数, \bar{f} 和 \bar{g} 分别为参考子区

和目标子区的平均灰度。

在轴的实际运动和变形过程中,整像素级别的测量精度无法满足实际测量需求,因此考虑对图像进行亚像素位移计算^[6]。根据文献^[7]对几种主要的亚像素算法进行的精度为 0.01 pixel 的对比研究,本文采用测量精度较高,抗干扰能力较强的梯度法进行图像的亚像素计算。

当图像计算子区足够小且物体具有微小形变时,该子区可近似看成刚体运动^[8],此时图像变形前后的关系为:

$$f(x_i, y_i) = g(x'_i, y'_i) = g(x_i + u + \Delta u, y_i + v + \Delta v), \quad (2)$$

$$C = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M F(x_i, y_j) [G(x_i, y_j) + G_x \cdot \Delta u + G_y \cdot \Delta v]}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [F(x_i, y_j)]^2} \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [G(x_i, y_j) + G_x \cdot \Delta u + G_y \cdot \Delta v]^2}}. \quad (4)$$

对式(4)取驻值,即 $\frac{\partial C}{\partial(\Delta u)} = 0, \frac{\partial C}{\partial(\Delta v)} = 0$,得:

$$\begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$A_{12} = 2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_x \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_y - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_x \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_y - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G_x G_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG,$$

$$A_{21} = 2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_x - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_x - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G_x G_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG,$$

$$A_{22} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_y - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G_y^2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG,$$

$$B_1 = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_x - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_x \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G^2,$$

$$B_2 = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_y - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_y \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G^2.$$

3 系统设计

基于工业摄像技术的轴功率测量系统如图 1 所示。由 CCD 工业相机采集轴面散斑图像并存储在工业主机中,运用 DICM 对图像进行分析,计算得出图像的像素位移,从而测得轴的转速转矩值,并最终计算出轴功率。

轴在旋转时,相机所拍摄的相邻图像很可能对应于轴表面的不同位置,其图像本身就不相关,不具有可比性。因此,需要在轴不受转矩作用的状态下,预先对轴表面 $0 \sim 2\pi$ 进行标定,实现对运动轴面的位置匹配。根据文献^[10]提出的划分方法,对

其中: u, v 为整像素位移, $\Delta u, \Delta v$ 为亚像素位移。将 $\Delta u, \Delta v$ 进行泰勒展开,高阶量影响较小暂不考虑,仅保留一阶量,即有:

$$g(x_i + u + \Delta u, y_j + v + \Delta v) \approx g(x_i + u, y_j + v) + \Delta u \cdot g_x(x_i + u, y_j + v) + \Delta v \cdot g_y(x_i + u, y_j + v), \quad (3)$$

其中: g_x 和 g_y 为一阶灰度梯度,通常由 Barron 算子^[9]得到。

为方便计算,记 $G(x_i, y_j) = g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}$, $F(x_i, y_j) = f(x_i, y_j) - \bar{f}$,将式(3)代入式(1),简化得到:

其中: $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, B_1, B_2$ 分别为:

$$A_{11} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG_x \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M GG_x - \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M G_x^2 \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M FG,$$

轴面参考位置进行等转角划分并拍摄采集,得到一组图像序列,称为参考图像序列,记为 $S_1 \sim S_n$ 。

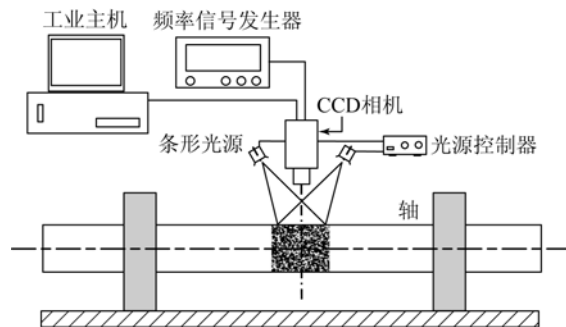


图 1 动态轴功率测量系统结构示意图

Fig. 1 Sketch map of measurement system for dynamic shaft power

3.1 转速测量方法

通过频率信号发生器,设置相机的采集频率为 f ,相机一共拍摄轴面应变图像(目标图像) n 张,记为 $A_1 \sim A_n$ 。从中选择 t 时刻前后连续拍摄的两张图像 A_t 和 A_{t+1} ,将两张图像分别与参考图像进行相关计算,找到其中相关系数最大的参考图像,即与之相匹配的参考图像 S_p 和 S_q 。

匹配完成后,通过整像素搜索和亚像素计算得出在竖直方向目标图像 A_t 距参考图像 S_p 中心点的像素位移为 u_p ,目标图像 A_{t+1} 距参考图像 S_q 中心点的像素位移为 u_q ,如图 2 所示。

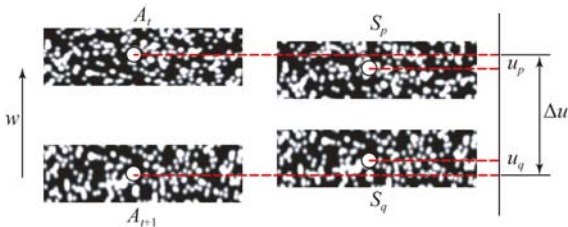


图 2 A_t 与 A_{t+1} 的像素位移

Fig. 2 Pixel displacements of A_t and A_{t+1}

假设每张参考图像对应覆盖轴面的有效像素为 m ,则在 $t \sim t+1$ 的时间内,轴表面相邻图像的像素位移 $\Delta u = |p - q| \cdot m + (u_p - u_q)$ 。通过像素位移和实际位移的换算,得到轴表面的实际运动位移为 Δs_1 ,则轴在 $t \sim t+1$ 内的平均转速 v 为:

$$v = \Delta s_1 \cdot f = \frac{60 \Delta s_1 \cdot f}{\pi D}, \quad (6)$$

式中 D 为轴外径, v 的单位为 r/min 。

3.2 转矩测量方法

转矩测量的基本原理是通过比较轴表面应变前后的两帧图像,通过计算图像两端的应变位移得到转矩,如图 3 所示。

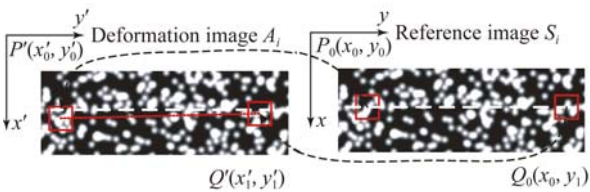


图 3 轴面应变计算

Fig. 3 Calculation of strain shaft

在图 3 中,取某一时刻图像 A_t 和与它相关度最高的参考图像 S_t 。在 S_t 同一水平 x_0 处选择距离较远的两点 $P_0(x_0, y_0)$ 、 $Q_0(x_0, y_1)$,首先通过整像素的相关计算,分别计算两点在 A_t 中对应的位置 $P'(x'_0, y'_0)$ 和 $Q'(x'_1, y'_1)$,得到 A_t 两端在应变前后的整像素位移为:

$$\begin{cases} (u_P, v_P) = (x'_0 - x_0, y'_0 - y_0) \\ (u_Q, v_Q) = (x'_1 - x_0, y'_1 - y_1) \end{cases} \quad (7)$$

进一步计算亚像素级别的位移,通过梯度法分别求得亚像素位移 $(\Delta u_P, \Delta v_P)$ 和 $(\Delta u_Q, \Delta v_Q)$,最终的像素位移为 $\Delta u_1 = u_P + \Delta u_P$ 和 $\Delta u_2 = u_Q + \Delta u_Q$,其两端像素的位移差为 $\Delta u = \Delta u_1 - \Delta u_2$ 。假设像素位移差对应的实际位移为 Δs_2 ,根据静力学原理,两测量点相距为 l 的弹性轴的转矩为:

$$M = \frac{GI_P}{l} \cdot \frac{2\Delta s_2}{D}, \quad (8)$$

式中: G 为材料的剪切弹性模量, I_P 为截面极惯性矩。对于实心轴,有 $I_P = \pi D^4 / 32$;对于空心轴,有 $I_P = \pi (D^4 - d^4) / 32$,其中 D 为轴外径, d 为轴内径。

4 试验验证

为验证本系统的实用性及测量精度,在所搭建的车载试验平台上进行了上车试验。试验用车选用东风 EQ1030n15Q,其后桥比为 5.875,轮胎直径为 70 cm。

试验用车传动轴所用碳钢的弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$,切变模量 $G = 79.4 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.297$ 。将传动轴擦拭、打磨、抛光、制作人工散斑,如图 4 所示。

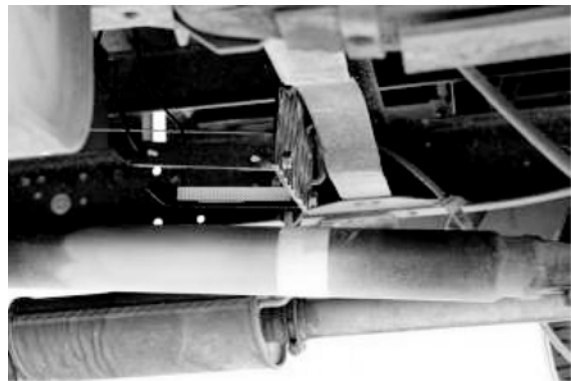
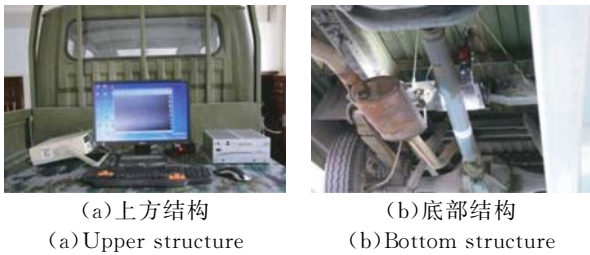


图 4 加工后的传动轴

Fig. 4 Processed drive shaft

车载平台搭建在车辆后部的车厢板上,工业计算机、频率信号发生器及光源控制器位于车厢板上方,如图 5(a)所示。高速 CCD 相机与条形 LED 光源位于车厢板下方,传动轴正上方,并用支架固定在车架上,如图 5(b)所示。



(a)上方结构 (b)底部结构
(a)Upper structure (b)Bottom structure

图 5 车载试验平台

Fig. 5 Test platform mounted on vehicle

试验选用的底盘测功机型号为 FCDM-100, 设置底盘测功机的测试工况为 20 km/h, 试验用车行驶挡位为 2 档; 相机曝光时间设置为 1 μ s, 拍摄频率为 30 Hz, 由频率信号发生器进行外部触发。试验前先采集传动轴匹配位置的参考图像。传动轴外径为 68.9 mm, 将其划分为 60 等份, 建立参考图像序列 $S_1 \sim S_{60}$, 每张图像的有效像素 m 为 49,661 pixel。

4.1 传动轴转速测量

为了与底盘测功机的测量值进行对比, 将本系统采集的图像时间与测功机的采集时间对准, 并以测功机时间为基准处理图像。第 80 s 采集的图像如图 6 所示, 这里以图 6 及下一张采集图像为例进行传动轴转速计算。



图 6 第 80 s 采集图像

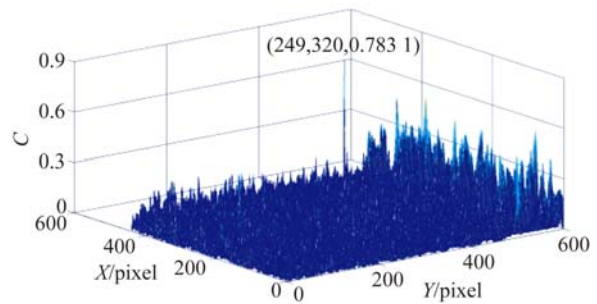
Fig. 6 Collection image at 80 s



图 7 序号 12 的参考图像

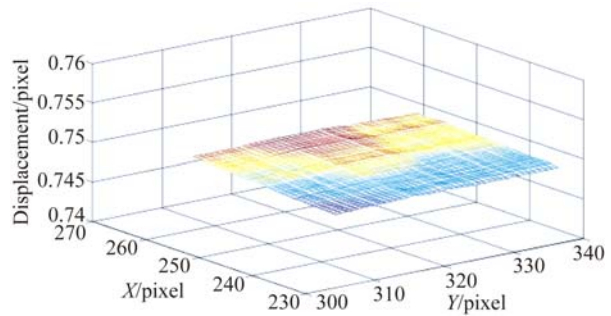
Fig. 7 Reference image S_{12}

以采集图像为目标图像, 在 60 张参考图像中进行相关计算, 得到目标图像与序号 12 的参考图像相匹配, 如图 7 所示。搜索窗口设置为 41 pixel \times 41 pixel, 以第 80 s 图像中心点 (240, 320) 为子区中点, 在 12 号图像中进行相关搜索计算, 找到相关像素点为 (249, 320)。整像素位移为 (9, 0), 如图 8(a) 所示; 亚像素位移为 (0.744, 0.657), 如图 8(b) 所示, 总像素位移为 (9.744, 0.657)。



(a) 整像素搜索结果

(a) Result of integer-pixel search



(b) 亚像素 u 场结果

(b) Result of sub-pixel u field

图 8 12 号参考图像中相关搜索的计算结果

Fig. 8 Results of correlation calculation in reference image S_{12}

同理,如图 9 所示,以第 80.5 s 采得图像为目标图像.进行寻源计算,得到该图像与序号 47 的参考图像匹配,如图 10 所示,采用相同的设置进行相关搜索。

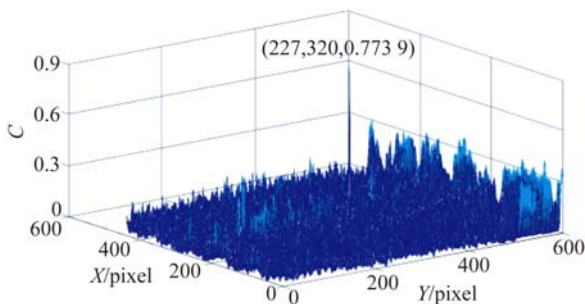


图 9 第 80.5 s 采得图像
Fig.9 Collection image at 80.5 s

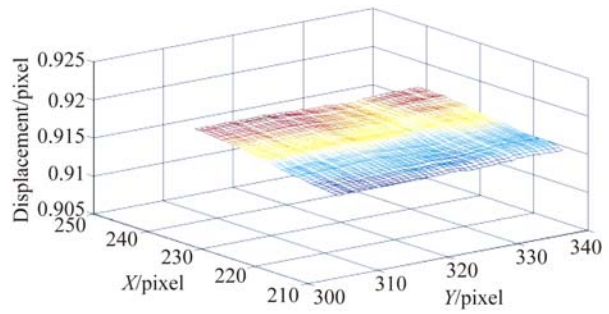


图 10 序号 47 的基本图像
Fig.10 Reference image S₄₇

如图 11 所示,相关像素点为(227,320),整像素位移为(-14,0),亚像素位移为(0.915,0.441),总像素位移为(-13.085,0.441)。



(a)整像素搜索结果
(a)Result of integer-pixel search



(b)亚像素 u 场结果
(b)Result of sub-pixel u field

图 11 47 号参考图像中相关搜索的计算结果

Fig.11 Results of correlation calculation in reference image S₄₇

因此参考图像的序号差为 35,像素位移差为 22.413,代入式(7)可得到传动轴转速 v_2 为 3.741 m/s. 底盘测功机测得速度 v_3 均为车辆行驶速度,第 80 s 底盘测功机测得速度为 23.105 km/h,将其转换为传动轴转速可得:

$$v_1 = k \cdot \frac{d}{D} \cdot \frac{v_3}{3.6} = 5.857 \times \frac{6.89}{70} \times \frac{23.105}{3.6} \approx 3.700 \text{ m/s}, \quad (9)$$

其中: k 为后桥速比, D 为车轮直径, d 为传动轴直径.对所得全部数据进行处理,得到底盘测功机测得转速 v_1 与 DICM 测得转速 v_2 ,如表 1 所示.本系统的转速测量范围较大,可以测量整个 120 s 的试验过程,而系统转矩的测量只能覆盖试验过程中 28~65 s 较大的转矩.为了计算传动轴的轴功率,这里计算的转速范围与转矩范围保持一致。

绘制曲线如图 12 所示,DICM 和底盘测功机测得的转速十分接近,相对误差平均值为 0.73%,测量精度较高.在转速测量中,算法对图像质量的要求不高,抗噪声能力强.转动时某时刻前后两帧图像的总像素位移差 Δu 可达 1 000 pixel 级别,因此由噪声引起的较小像素位移波动对测量结果不会产生较大的影响。

表 1 数字相关法(v_2)和底盘测功机(v_1)测得的转速值
Tab. 1 Speed values measured by DICM(v_2) and chassis dynamometer(v_1) ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

t/s	v_1	v_2	t/s	v_1	v_2
74.0	4.595	4.574	91.5	3.136	3.189
74.5	4.590	4.612	92.0	3.184	3.209
75.0	4.527	4.545	92.5	3.189	3.172
75.5	4.458	4.463	93.0	3.173	3.182
76.0	4.406	4.427	93.5	3.118	3.076
76.5	4.458	4.476	94.0	3.176	3.220
77.0	4.606	4.571	94.5	3.226	3.267
77.5	4.548	4.508	95.0	3.215	3.250
78.0	4.437	4.491	95.5	3.163	3.137
78.5	4.274	4.238	96.0	3.163	3.173
79.0	4.098	4.047	96.5	3.189	3.137
79.5	3.905	3.912	97.0	3.221	3.213
80.0	3.700	3.741	97.5	3.229	3.208
80.5	3.531	3.550	98.0	3.173	3.137
81.0	3.416	3.382	98.5	3.165	3.131
81.5	3.360	3.346	99.0	3.186	3.178
82.0	3.397	3.393	99.5	3.218	3.174
82.5	3.402	3.455	100.0	3.223	3.234
83.0	3.437	3.399	100.5	3.189	3.186
83.5	3.487	3.525	101.0	3.176	3.197
84.0	3.497	3.513	101.5	3.184	3.205
84.5	3.489	3.476	102.0	3.210	3.225
85.0	3.508	3.474	102.5	3.223	3.173
85.5	3.505	3.497	103.0	3.200	3.153
86.0	3.476	3.474	103.5	3.176	3.156
86.5	3.450	3.409	104.0	3.308	3.311
87.0	3.397	3.407	104.5	3.545	3.561
87.5	3.323	3.294	105.0	3.892	3.882
88.0	3.255	3.242	105.5	4.319	4.353
88.5	3.215	3.224	106.0	4.690	4.714
89.0	3.189	3.162	106.5	4.358	4.409
89.5	3.205	3.182	107.0	3.839	3.843
90.0	3.215	3.228	107.5	3.237	3.218
90.5	3.184	3.158	108.0	2.683	2.641
91.0	3.139	3.174	108.5	2.262	2.274

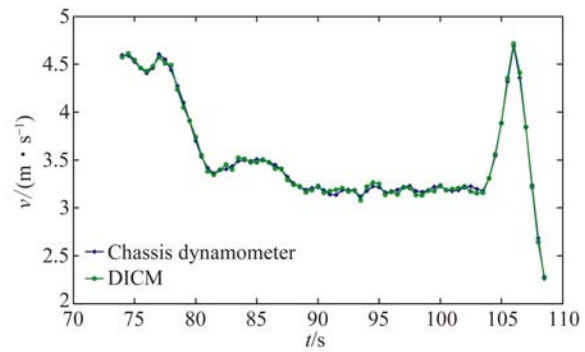
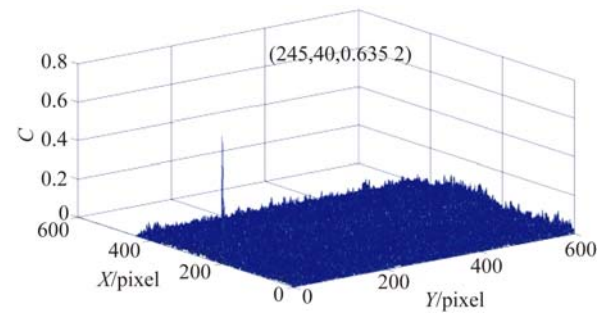


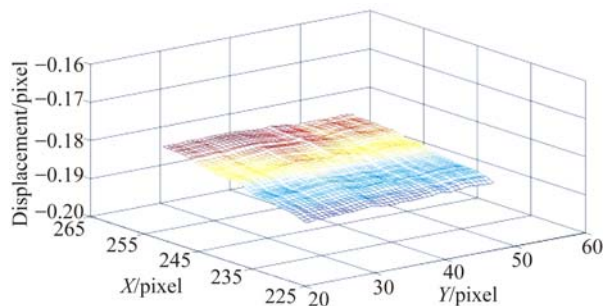
图 12 两种方法测得传动轴转速相对的误差曲线
Fig. 12 Relative errors of shaft speed measured by two methods

4.2 传动轴转矩测量

依据转矩测量原理对测得图像进行处理。以第 80 s 采集的图像为例,先对它进行寻源计算。搜索窗口设置为 $41 \text{ pixel} \times 41 \text{ pixel}$,选择图像中 y 坐标为 40 和 540 的点,其测点距离 $\Delta y = 500 \text{ pixel}$ 。由转速测量可知,第 80 s 图像的整像素位移在 $9 \sim 10 \text{ pixel}$,故选坐标 x 为 235 水平线上的点(235,40)和(235,540)进行相关搜索。计算得到点(235,40)在 12 号图像中的匹配点为(245,40),如图 13 所示,其整像素位移为(10,0),亚像素位移为(-0.182,0.481),总位移为(9.818,0.481)。



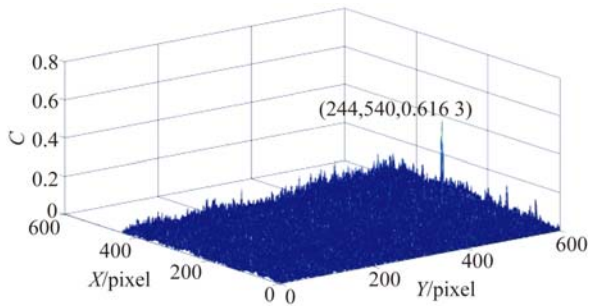
(a) 整像素搜索结果
(a) Result of integer-pixel search



(b) 亚像素 u 场结果
(b) Result of sub-pixel u field

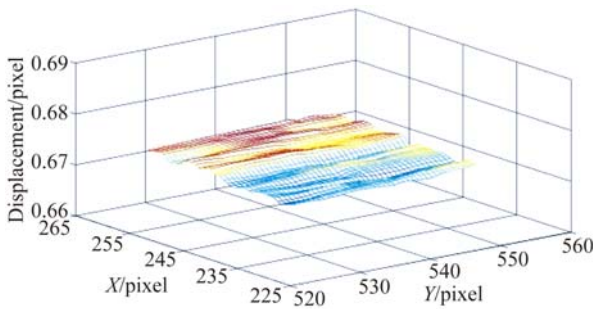
图 13 点(235,40)在 12 号图像中的寻源计算
Fig. 13 Reference search for (235,40) in reference image S_{12}

同理得到点(235,540)在 12 号图像中的匹配点坐标为(244,540),如图 14 所示,其整像素位移为(9,0),亚像素位移为(0.673,0.325),总位移为(9.673,0.325)。因此, $\Delta u_1 = 9.818, \Delta u_2 = 9.673$,将其代入转矩计算公式(9)可得转矩值为 401.393 N·m。



(a)整像素搜索结果

(a)Result of integer-pixel search



(b)亚像素 u 场结果

(b)Result of sub-pixel u field

图 14 点(235,540)在 12 号图像中的寻源计算

Fig. 14 Reference search for (235,540) in reference image S_{12}

底盘测功机测得的扭力为轮边扭力 F ,将其转换为传动轴转矩 M_1 可得:

$$M_1 = \frac{1}{k} \cdot F \cdot R, \quad (10)$$

其中: k 为后桥速比, R 为车轮半径。对所得全部数据进行处理,得到底盘测功机测得的转矩值 M_1 与 DICM 测得的转矩值 M_2 ,如表 2 所示。

表 2 底测功机和数字图像相关法测得的转矩值

Tab. 2 Torque values measured by chassis dynamometer and DICM (N·m)

t/s	M_1	M_2	t/s	M_1	M_2
74.0	81.770	136.432	91.5	344.945	351.752
74.5	118.758	162.696	92.0	345.927	374.850
75.0	146.382	177.679	92.5	344.992	374.133
75.5	169.462	174.323	93.0	342.888	396.958
76.0	188.729	250.308	93.5	344.525	391.720
76.5	214.430	241.075	94.0	344.712	407.016
77.0	253.406	301.384	94.5	345.787	374.806
77.5	286.105	344.612	95.0	345.507	361.768
78.0	303.164	311.436	95.5	344.338	351.178
78.5	319.518	329.613	96.0	344.431	405.360
79.0	329.799	373.175	96.5	345.460	361.694
79.5	331.669	369.968	97.0	345.132	375.779
80.0	331.108	401.393	97.5	345.834	389.386
80.5	324.332	387.394	98.0	344.244	362.315
81.0	319.004	376.966	98.5	342.982	393.650
81.5	316.995	321.047	99.0	343.356	381.596
82.0	317.369	323.122	99.5	344.244	356.229
82.5	322.743	329.730	100.0	343.776	405.494
83.0	327.323	390.336	100.5	342.327	350.268
83.5	335.268	409.700	101.0	340.737	363.948
84.0	342.561	396.527	101.5	342.234	360.969
84.5	346.582	357.007	102.0	343.823	385.725
85.0	347.330	404.375	102.5	343.262	350.484
85.5	353.831	362.542	103.0	341.719	373.711
86.0	357.200	366.473	103.5	318.724	326.999
86.5	359.165	409.737	104.0	296.948	305.811
87.0	360.662	386.615	104.5	269.411	331.326
87.5	357.855	409.460	105.0	245.724	268.738
88.0	355.375	414.504	105.5	219.222	266.859
88.5	351.913	397.944	106.0	193.349	269.471
89.0	349.996	408.407	106.5	166.908	201.044
89.5	348.827	367.362	107.0	144.054	198.891
90.0	347.938	405.948	107.5	120.621	180.458
90.5	345.787	422.397	108.0	97.690	131.839
91.0	344.618	413.045	108.5	76.706	128.445

绘制曲线如图 15 所示, DICM 与底盘测功机测得的转矩基本呈同一变化趋势, 但 DICM 的测量值偏大, 波动范围较大, 其相对误差平均值为 15.15%。转矩测量是微小形变测量, 在图像上呈亚像素变化, 因此, 噪声对其影响较大, 抗噪能力较弱。而且发动机曲轴的输出转矩本身也是循环波动的, 其波动频率与点火频率相关, 因此, 即便是稳定工况, 传动轴转矩也是瞬时波动的。底盘测功机测得的转矩为平均值, 而 DICM 测得的转矩为瞬时值, 因此 DICM 测得值也会存在一定范围内的波动。

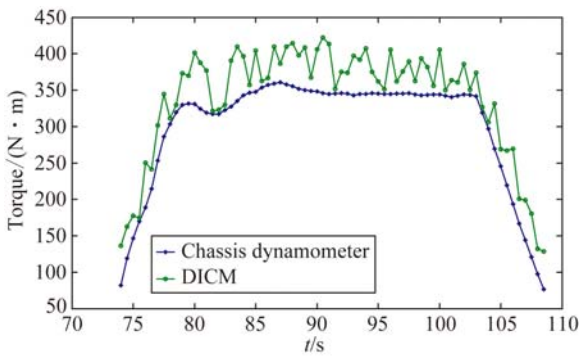


图 15 两种方法测得的传动轴转矩

Fig. 15 Shaft torques measured by two methods

4.3 传动轴功率计算

当传动轴转矩 M 与转速 v 都测出后, 便可得到传动轴功率 P , 由公式:

$$P = \frac{3}{955} \cdot \frac{M \cdot v}{\pi \cdot r}, \quad (11)$$

其中 r 为传动轴半径。对测得的全部数据进行计算, 得到的轴功率值如表 3 所示。其中功率值 P_1 为底盘测功机测得的轴功率, 是由底盘测功机显示的转速和转矩带入式(11)计算, 并进行补偿后的功率; 功率值 P_2 为 DICM 测得的轴功率。

绘制曲线如图 16 所示, P_1 和 P_2 基本呈同一趋势变化, 其中, 底盘测功机测得的轴功率较小, DICM 测得值较大, 相对误差平均值为 9.37%。底盘测功机显示的功率为车辆发动机的功率, 其对传动系统的功率损耗进行了补偿, 因此 DICM 的轴功率误差小于转矩误差。

表 3 数字相关值和底盘测功机测得的功率值

Tab. 3 Power values measured by DICM and chassis dynamometer (kW)

t/s	P_1	P_2	t/s	P_1	P_2
74.0	18.197	12.806	91.5	32.022	32.574
74.5	21.676	17.719	92.0	34.641	33.162
75.0	23.346	21.097	92.5	34.632	33.130
75.5	22.559	23.756	93.0	36.562	32.771
76.0	32.009	25.933	93.5	35.452	32.343
76.5	31.197	29.576	94.0	37.519	32.967
77.0	40.291	35.784	94.5	35.095	33.591
77.5	45.491	39.643	95.0	33.763	33.454
78.0	40.111	40.863	95.5	32.238	32.794
78.5	40.891	41.369	96.0	37.212	32.803
79.0	44.383	40.864	96.5	33.481	33.174
79.5	41.937	39.138	97.0	35.129	33.475
80.0	43.170	36.999	97.5	36.489	33.623
80.5	39.708	34.602	98.0	33.371	32.896
81.0	37.372	32.928	98.5	36.168	32.697
81.5	31.312	32.194	99.0	35.293	32.951
82.0	31.861	32.587	99.5	33.273	33.364
82.5	32.563	33.169	100.0	37.937	33.375
83.0	38.935	33.963	100.5	32.423	32.884
83.5	41.463	35.266	101.0	33.549	32.600
84.0	40.251	36.114	101.5	33.358	32.820
84.5	36.157	36.439	102.0	35.940	33.242
85.0	41.170	36.709	102.5	32.790	33.327
85.5	36.884	37.343	103.0	34.706	32.937
86.0	36.976	37.372	103.5	30.143	30.571
86.5	41.028	37.283	104.0	29.360	29.759
87.0	38.122	36.856	104.5	34.088	29.082
87.5	39.497	35.779	105.0	30.360	29.295
88.0	39.161	34.801	105.5	33.452	29.234
88.5	37.140	34.052	106.0	36.684	28.273
89.0	37.805	33.594	106.5	25.432	22.888
89.5	34.173	33.653	107.0	22.165	17.562
90.0	37.887	33.681	107.5	16.953	12.548
90.5	39.035	33.149	108.0	10.269	8.577
91.0	37.633	32.572	108.5	8.434	5.826

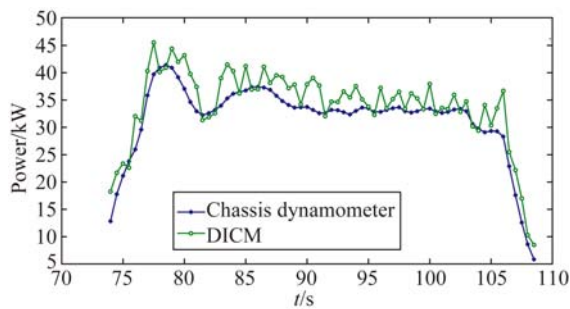


图 16 两种方法测得的轴功率

Fig. 16 Shaft power measured by two methods

5 结 论

本文针对动力装置动态轴功率测量的需求,利用 DICM 提出了一种基于工业摄像的轴功率

测量方法。搭建了车载试验系统,并在底盘测功机上对该方法进行了精度验证。试验结果表明:本文方法的轴功率测量结果与底盘测功机的测量结果呈同一变化趋势,其相对误差平均值为 9.37%。其中轴转速的测量范围可以覆盖整个过程,测量值波动较小,与底盘测功机的测量结果基本一致,其相对误差平均值为 0.73%,抗噪能力强;轴转矩的测量范围可覆盖高转矩的部分,测量值波动较大,两者趋势一致,其相对误差平均值为 15.15%,抗噪能力较弱。该方法属于非接触式测量,克服了轴改装、布线困难、安装复杂等传统测量方法的不足,为解决轴功率的动态测量提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] 王永红,梁恒,王硕,等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. 中国光学,2013,6(4):470-480.
WANG Y H, LIANG H, WANG SH, et al.. Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 470-480. (in Chinese)
- [2] 孙涛,梁晋,蔡勇,等. 用数字散斑法测量铜/铝复层板拉伸变形[J]. 光学精密工程,2012,20(12):2599-2606.
SUN T, LIANG J, CAI Y, et al.. Measurement of deformations for copper/aluminum clad under tension with digital speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2599-2606. (in Chinese)
- [3] 俞海,郭荣鑫,夏海廷,等. 数字图像相关法在 WC/Cu 复合材料线膨胀系数测量中的应用[J]. 光学精密工程,2013,21(20):2697-2703.
YU H, GUO R X, XIA H T, et al.. Application of digital image correlation method in measuring linear expansion coefficients of WC/Cu composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(20): 2697-2703. (in Chinese)
- [4] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. 光学精密工程,2012,20(7):1636-1644.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, et al.. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1636-1644. (in Chinese)
- [5] PAN B, XIE H M, WANG Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [6] 顾国庆,王开福,许星. 基于数字图像相关的刚体面内微小转动测量及转动中心定位[J]. 中国激光,2012(1):185-191.
GU G Q, WANG K F, XU X. Measurement of in-plane micro-rotations and rotation-center location of a rigid body by using digital image correlation [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012(1): 185-191. (in Chinese)
- [7] 资新运,耿帅,赵姝帆,等. 3种亚像素位移测量算法的比较研究[J]. 计量学报,2015,36(3):260-267.
ZI X Y, GENG SH, ZHAO SH F, et al.. Comparison of three sub-pixel displacement algorithm [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(3): 260-267. (in Chinese)
- [8] 资新运,耿帅,赵姝帆,等. 基于数字工业摄像的非接触扭矩传感测量研究[J]. 传感器与微系统,2015(4):19-21,26.
ZI X Y, GENG SH, ZHAO SH F, et al.. Research of non-contact torque sensor measurement based on the digital industrial photogrammetry [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015(4): 19-21, 26. (in Chinese)
- [9] 潘兵,吴大方,谢惠民,等. 基于梯度的数字体图像相关方法测量物体内部变形[J]. 光学学报,2011,31(6):1-7.
PAN B, WU D F, XIE H M, et al.. Spatial gradient based digital volume correlation technique for internal deformation measurement [J]. *Acta Optica*

Sinica., 2011, 31(6): 1-7. (in Chinese)

- [10] 资新运, 耿帅, 李永乐, 等. 应用数字散斑相关的运动轴面位置匹配[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 941-948.

ZI X Y, GENG SH, LI Y L, *et al.*. Position matching of dynamic shaft surface based on digital speckle correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 941-947. (in Chinese)

作者简介:



资新运(1971—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,1999年于大连理工大学获得博士学位,1999年至2001年在清华大学进行博士后研究工作,2004年至2005年赴日本高级访问学者,主要从事动力装置监测技术的研究。
E-mail: zixinyun1971@163.com



钱仁军(1991—),男,江苏盐城人,硕士,2014年于军事交通学院获得学士学位,主要从事传感与检测的研究。
E-mail: 18902016296@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)