

基于多峰拟合的直线电机定子位置精密测量方法^{*}

王 辉,赵 静,赵吉文,窦少昆,宋俊材

(安徽大学电气工程与自动化学院 合肥 230601)

摘 要:为满足直线电机定子位置的高精度测量要求,提出一种基于多峰拟合相位相关算法的直线电机定子位置精密测量方法。通过直线电机定子上的高速相机采集相邻栅栏图像;采用相位相关算法得到相邻栅栏图像的相位相关函数;根据相位相关频谱的峰值分布特性,采用多峰拟合获得相邻栅栏图像的亚像素位移值;根据测量系统标定系数,进而获得直线电机定子位置的精确位置。实验结果表明,该亚像素测量方法用于直线电机定子位置检测能达到精密定位,测量精度为 1/100 pixel,且具有较强的鲁棒性和较高的实时性。

关键词: 直线电机;位置检测;相位相关;多峰拟合;亚像素测量

中图分类号: TM301 TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Ultra-precision position detection for linear motor mover based on multi-peak fitting

Wang Hui,Zhao Jing,Zhao Jiwen, Dou Shaokun, Song Juncui

(School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to satisfy high-precision measurement requirement of the linear motor mover position, a multi-peak fitting phase correlation algorithm is proposed. The adjacent fence image is captured with a high-speed micro camera installed on the linear motor mover, and the phase correlation function of adjacent fence images is obtained by phase correlation algorithm. According to peaks distribution characteristics of the correlation function, the multimodal fitting method is utilized to acquire subpixel displacement of adjacent fence images. Based on the calibration coefficient of measuring system, the precise position of linear motor mover can be further acquired. Experimental results show that the sub-pixel image measuring method can achieve precise positioning, and the position detection accuracy of linear motor mover, can be up to 1/100 pixel, and it has strong robustness and high real-time performance.

Keywords: linear motor; position detection; phase correlation; multi-peak fitting; sub-pixel measurement

1 引 言

直线伺服系统具有高精度、高加速度、大行程等特点使其在超精密制造业中得到越来越广泛的应用^[1]。直线电机定子位置的检测精度直接影响了电机的控制精度,进而决定产品的制造精度。因此,研究一种高精度的直线电机定子位置测量方法对于精密加工具有重要的指导意义。

传统的直线电机定子位置测量主要采用光栅式传感

器,其用于定子位置测量例子较多且技术成熟,具有测量不受磁力线干扰、分辨率高、能耗低、精度高等优点^[2],但高精度的光栅价格昂贵,维护相对困难,对工作环境 and 安装精度有较高要求^[3]。图像测量方法是近年来发展起来的一种位置检测方法^[4-5],其具有高精度、非接触和受环境影响小等优点,将该方法引入到直线电机定子位置测量上,以提高直线电机定子位置的检测精度,为定子位置测量提供一种新的思路。目前常用的图像测量算法主要分两类:1)空域测量方法,如像素递归法(pixels-recursive algorithm, PRA)^[6],是一种基于像素微分运算的算法,易

满足实时性要求,但对噪声敏感,且在偏移量大时计算误差较大,仅适合微位移测量;2)频域测量方法,如基于 Fourier - Mellin^[7] 和相位相关算法^[8] (phase correlation algorithm, PCA) 的位移测量方法,这些方法是一种基于傅里叶变换的频域相关技术^[9],利用频域信息进行检测。因此,对目标图像的灰度变化和环境的光线变化不敏感,具有较强的抗干扰能力,且运动量的检测范围较大,但以上方法的测量精度仅能够达到整像素级别,对亚像素级别的测量具有一定误差。鉴于以上分析,提出一种拓展的 PCA 位移测量方法,并应用于直线电机动子位置检测,能够达到亚像素级别测量,同时具有较强的抗干扰性。

本文根据文献[10]中栅栏图像的构造方法筛选出鲁棒性较强的栅栏图像作为目标拍摄源;采用改进的 Hanning (flap-top) 窗函数进行预处理采集的栅栏图像,抑制 Fourier 变换时的频谱泄露,更有利于后续计算;根据相位相关运算时相关函数的峰值分布特性,提出一种基于多峰拟合的 PCA 亚像素测量方法应用于直线电机动子位置的高精度检测。对比传统的频域相位相关技术,拓展的 PCA 方法测量精度能够达到亚像素级别,有检测较高的精度,且具有较强的抗干扰能力。因此,该亚像素测量方法应用于直线电机动子位置检测,提高直线伺服反馈系统的控制精度,为动子位置检测提供一种新的方式。

2 位置检测模型及原理

在动子运动方向上,将非周期条纹图像雕刻在直线电机定子上作为拍摄的目标源图像,将高速相机安装在直线电机动子上用于实时采集运动图像。图1所示为直线电机动子位置检测系统示意图。当电机运动时,设高速相机采集的位移前后参考图像和目标图像分别为 f_1 和 f_2 ,则它们之间存在坐标变换关系:

$$f_2 = f_1(w(x, y)) \quad (1)$$

式中: w 表示 f_1 和 f_2 在 2-D 空间上的坐标变换,检测的实质就是寻找最佳的变换参数,根据 similarity 变换模型^[11] 则:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: (x, y) 和 (x', y') 分别为 f_1 和 f_2 中的像素坐标; γ 为缩放因子; $\Delta\theta$ 为旋转角度; $(\Delta x, \Delta y)$ 为位移量。由于直线电机仅在水平方向上运动,不存在缩放和旋转,因此这里 γ 为 1, $\Delta\theta$ 为 0,则模型简化为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (3)$$

通过 PCA 将空间位移转换到频域中,根据相位相关

函数的峰值分布特性:一个相关峰周围通常有一些不相关峰以零均值正太分布在其周围^[12],因此当位移是亚像素时,位移量就出现在相位相关频谱的多峰之间。通过分析对相关峰以及周围峰值进行多峰拟合,便可得相邻条纹图像间的水平像素位移值 Δx ,将像素位移值与动子实际位移值进行标定,进而得直线电机动子位置的实际位移量,实现动子位置的精确定位。

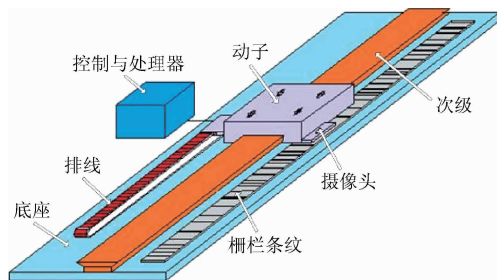


图1 直线电机动子位置检测系统

Fig. 1 Setup sketch of the linear motor mover position measurement

3 相位相关位移检测方法

由于直线电机运动时会产生纵向振动,为了削弱纵向振动带来的影响,根据文献[10]筛选出抗干扰性强的非周期条纹图像作为目标拍摄源,再利用 PCA 算法,便可获得图像间的像素位移值。PCA 检测算法的原理源于傅里叶变换的平移特性,其对噪声和环境光线变化均有较强的忍耐度,是一种抗干扰性强的图像测量算法。

3.1 位移量计算

相位相关算法检测目标位移是利用频域傅氏功率谱获取图像间的相似度和空间域平移^[13]。设参考图像 $f_1(x, y)$ 位移 $(\Delta x, \Delta y)$ 后得到目标图像 $f_2(x, y)$, 则:

$$f_2(x, y) = f_1(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (4)$$

根据傅里叶变换的平移特性,对式(4)进行傅里叶变换则:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp[j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)] \quad (5)$$

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-2\pi j\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right] \quad (6)$$

则平移前后两幅图像的归一化互功率谱为:

$$C(u, v) = \frac{F_2(u, v) F_1^*(u, v)}{|F_2(u, v) F_1^*(u, v)|} = \exp[j2\pi(u\Delta x + v\Delta y)] \quad (7)$$

式中: $F_1^*(u, v)$ 为 $F_1(u, v)$ 的复数共轭, $F_2(u, v)$ 和 $F_1(u, v)$ 分别为 $f_2(x, y)$ 和 $f_1(x, y)$ 的傅里叶变换,

Δx 和 Δy 分别表示水平和垂直方向上的像素位移值。将式(7)经过傅里叶逆变换可得:

$$q(x,y)=F^{-1}(\exp[2\pi j(u\Delta x+v\Delta y)])=\delta(x+\Delta x,y+\Delta y)$$

(8)

该式(8)求归一化互功率谱的傅里叶逆变换过程即为 PCA,由式(8)可得到平移的 2-D 单位脉冲函数 $\delta(x+\Delta x,y+\Delta y)$,脉冲函数 δ 的偏移位置即为图像间的位移量 $(\Delta x,\Delta y)$ 。

3.2 相位相关检测

理想状态下脉冲函数 δ 的峰值应为 1,但由于现实环境中的噪声、光线以及图像采样等干扰,往往使脉冲函数的峰值小于 1,峰值的大小反映了两幅图像的相关性程度,同时可作为抗干扰性的表征。当 $(\Delta x,\Delta y)$ 均为整数时,则 2-D 脉冲函数 δ 会形成一个明显的峰值,峰值坐标表示图像间的像素位移值;当 $(\Delta x,\Delta y)$ 不是整数时,则峰值能量 q 会向周围相邻像素扩散,在主峰周围形成很多小的毛刺,降低了平移参数估计的精度^[14]。图 2 所示为将具有不同位移量的两幅图像进行 PCA 获取的脉冲函数频谱图,表 1 列出了 PCA 检测对应的脉冲函数峰值。

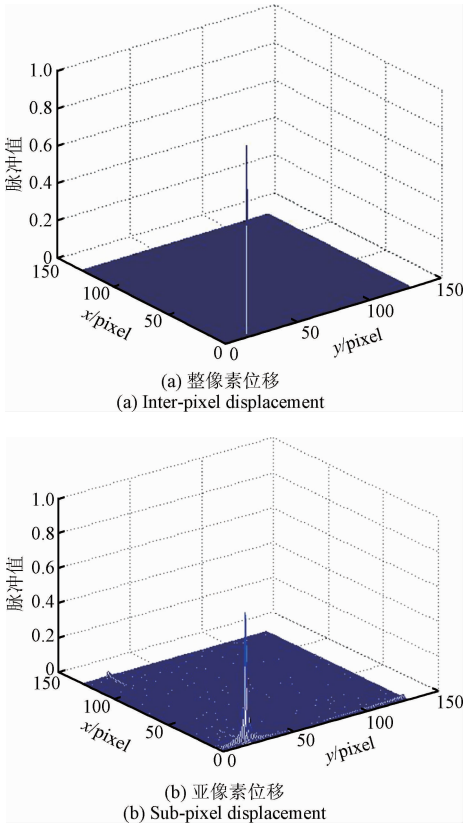


图2 不同位移值的相位相关频谱图
Fig.2 Impulse function spectrum under different displacements

表 1 相位相关算法的检测结果
Table 1 Calculated results of PCA

测试图	平移(Δx, Δy)	检测结果(Δx, Δy)	峰值大小
Lena	(3.0,8.0)	(3.0,8.0)	0.996 2
	(1.472,5.368)	(1.0,5.0)	0.536 1
Boat	(2.0,7.0)	(2.0,7.0)	1.000 0
	(3.175,6.735)	(3.0,7.0)	0.844 2

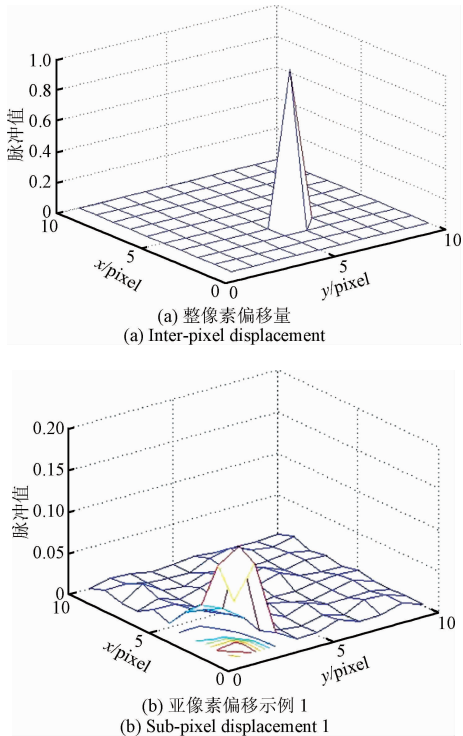
从图 2 和表 1 中看出,当平移量 $(\Delta x,\Delta y)$ 均为整数时,脉冲函数 $\delta(x+\Delta x,y+\Delta y)$ 的峰值越接近 1,位移检测结果越精确;当平移量 $(\Delta x,\Delta y)$ 为亚像素时,脉冲函数 δ 的实测峰值仅是最近的解,且主峰周围有许多不相关峰,运动估计精度降低。因此,相位相关算法仅能够测量整像素位移量。

4 基于多峰拟合的 PCA 检测图像位移值

4.1 多峰拟合的相位相关算法

采用相关函数进行空域位移检测时,产生的 2-D 脉冲函数 δ 常常在偏移量对应一个明显的相关峰,四周会出现以零均值正态分布的不相关峰^[12]。

通过将脉冲函数频谱图的峰值进行局部放大,如图 3 所示,当位移量为整像素时,脉冲函数 δ 呈单峰状;当位移量为亚像素时,脉冲函数 δ 表现为多峰状或断层状,或者主峰周围附带几个次峰;同时能够确定实际的像素位移值一定不在任何一个峰值坐标上,而是位于几个最高的峰值之间。



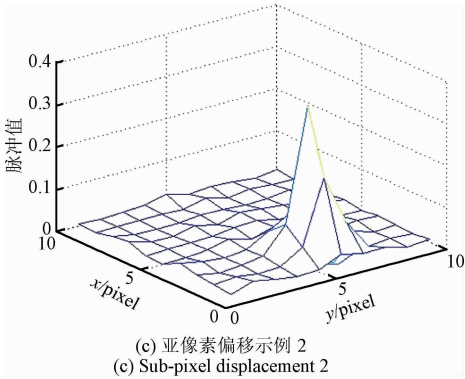


图 3 不同位移值的相位相关频谱图

Fig.3 Phase correlation spectrum of different displacements

根据相位相关峰值分布特点,当位移出现亚像素时,其位移值落在相位相关频谱的多峰之间^[15]。设最高的 4 个峰为相关峰,其中,最高峰为主峰,峰值 C_1 ;其他 3 个次峰的峰值分别为 C_2 、 C_3 、 C_4 ,它们对应的位置分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) ,则其位置关系根据亚像素位移值的不同,存在如图 4 所示的 4 种情况,实际的位移值 $(\Delta x, \Delta y)$ 位于 4 个峰值之间,采用双线性拟合,则获得亚像素位移值 $(\Delta x, \Delta y)$ 为:

$$\Delta x = \begin{cases} \frac{|x'_2 \cdot C_2 + x'_3 \cdot C_3 + w_1 \cdot x'_4 \cdot C_4|}{C_1 + |x'_2 \cdot C_2 + x'_3 \cdot C_3 + x'_4 \cdot C_4|}, & x'_2 + x'_3 + x'_4 > 0 \\ -\frac{|x'_2 \cdot C_2 + x'_3 \cdot C_3 + w_1 \cdot x'_4 \cdot C_4|}{C_1 + |x'_2 \cdot C_2 + x'_3 \cdot C_3 + x'_4 \cdot C_4|}, & x'_2 + x'_3 + x'_4 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta y = \begin{cases} \frac{|y'_2 \cdot C_2 + y'_3 \cdot C_3 + w_2 \cdot y'_4 \cdot C_4|}{C_1 + |y'_2 \cdot C_2 + y'_3 \cdot C_3 + y'_4 \cdot C_4|}, & y'_2 + y'_3 + y'_4 > 0 \\ -\frac{|y'_2 \cdot C_2 + y'_3 \cdot C_3 + w_2 \cdot y'_4 \cdot C_4|}{C_1 + |y'_2 \cdot C_2 + y'_3 \cdot C_3 + y'_4 \cdot C_4|}, & y'_2 + y'_3 + y'_4 < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x'_i = x_i - x_1$ ($i = 2, 3, 4$), $y'_i = y_i - y_1$ ($i = 2, 3, 4$), w_1 和 w_2 代表第 4 个相关峰作用于水平和垂直方向上偏移量的权重,计算公式如下:

$$w_1 = \left| (x_2 - x_4) \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_3} + (x_3 - x_4) \cdot \frac{C_3}{C_2 + C_3} \right| \quad (11)$$

$$w_2 = \left| (y_2 - y_4) \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_3} + (y_3 - y_4) \cdot \frac{C_3}{C_2 + C_3} \right| \quad (12)$$

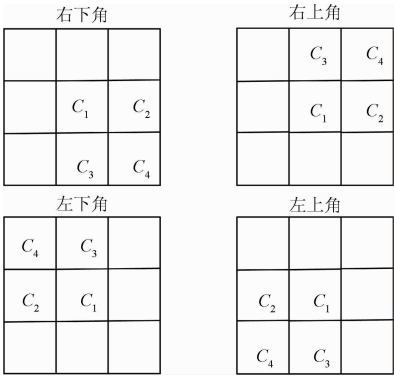


图 4 相关峰值的 4 种位置分布情况

Fig.4 Location distribution of four different correlation peaks

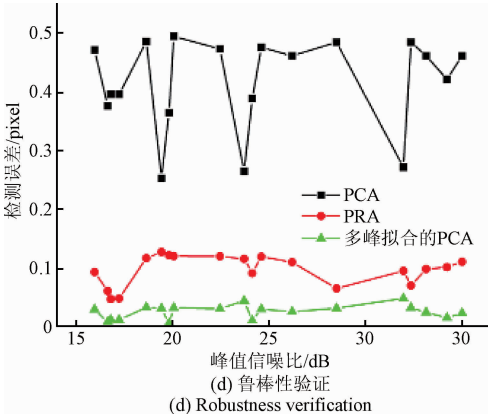
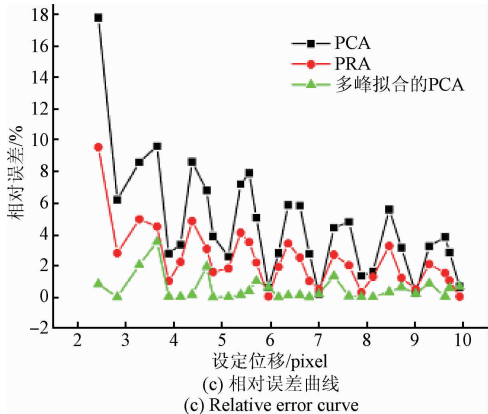
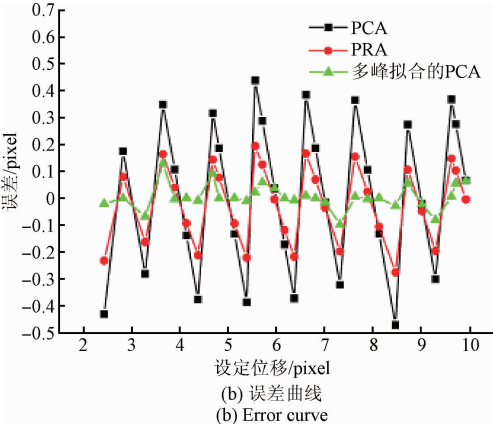
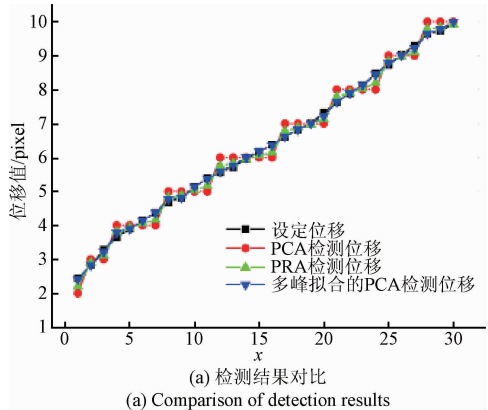
首先采用 PCA 获得位移前后的两幅图像的 2-D 单位脉冲函数,通过单位脉冲函数的主峰 C_1 的偏移量得到整像素位移值 (dx, dy) ,然后根据 4 个相关峰的位置分布,按式(9)、(10)计算得到图像间的亚像素偏移量 $(\Delta x, \Delta y)$,因此最终计算的相邻图像间的位移值为 $(dx + \Delta x, dy + \Delta y)$ 。将上述测试图,采用多峰拟合的 PCA 算法进行检测位移值,结果如表 2 所示。

表 2 多峰拟合的 PCA 检测结果
Table 2 Calculated results of PCA based on multi-peak fitting

测试图	平移 $(\Delta x, \Delta y)$	检测结果 $(\Delta x, \Delta y)$	峰值大小
Lena	(3.0, 8.0)	(3.0, 8.0)	1.000 0
	(1.472, 5.368)	(1.453, 5.423)	0.537 1
Boat	(2.0, 7.0)	(2.0, 7.0)	1.000 0
	(3.175, 6.735)	(3.176, 6.759)	0.844 2

对比表 1,从表 2 中可以看出,采用多峰拟合的 PCA 算法进行位移值测量,不仅可以准确地检测整像素位移值,对亚像素位移测量也很精确。为了验证本文基于多峰拟合的 PCA 算法的有效性,如图 5(b)和(c)所示,对比传统 PCA 与 PRA,给出相应的检测结果误差曲线图;根据峰值信噪比-绝对误差曲线评价本文算法的鲁棒性,如图 5(d)所示。

从图 5(a)中可以看出本文采用的检测方法的计算位移曲线与设定位移曲线基本吻合,而 PCA 与 PRA 检测结果在设定位移曲线旁浮动;从图 5(b)中获得 PCA、PRA、多峰拟合的 PCA 算法测量的绝对误差分别为 $-0.471 5 \sim 0.384 8$, $-0.231 6 \sim 0.194 5$, $-0.098 3 \sim 0.128 6$;从图 5(c)相对误差曲线得出 3 种算法的相对误差分别为 $0.202 4\% \sim 17.753\%$, $0.038 3\% \sim 9.524 2\%$, $0.0071\% \sim 3.523\%$;由对比结果可以看出采用基于多峰拟合的 PCA 算法检测精度较高,测量误差较小。从图 5(d)对比 3 种算法的峰值信噪比-绝对误差曲线得出,本文采用的算法有较强的鲁棒性,更有利于实际测量。



4.2 Flap-top 窗函数的应用

相位相关算法是将域中的位移转换为频谱中的相位信息,利用图像的频域信息进行偏移量测量^[16]。傅里叶变换时引进了栅栏效应,截断引进了频率泄露^[17],进而影响后续计算的精度。因此在傅里叶变换前,使用窗函数可以使主瓣突出、降低旁瓣、抑制频谱混叠和边缘效应,进而提高相位相关算法的精度及抗干扰性。本文采用改进的 Hanning (flap-top) 窗函数对采集的栅栏图像加窗函数预处理,为后续算法提供数据保障^[18]。Flap-top 窗函数的表达式为:

$$W(m,n)=\begin{cases} 1, & \Gamma(m,n)\geq 1 \\ \Gamma(m,n), & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\Gamma(m,n)=k\times 0.5(1-\cos(2\pi(m/M)))\times 0.5(1-\cos(2\pi(n/N))) \quad (14)$$

式中: M,N 为图像的大小, k 为结构因子,通过选择不同的结构因子寻找一个最佳的窗函数,可以更好地抑制频谱混淆,更有利于后续计算。

从式(14)可以看出,当 k 为1时,就是 Hanning 窗函数,因此 flap-top 窗函数的应用范围更广。图 6(a)为 flap-top 窗函数,为了验证 flap-top 窗函数的有效性,对采集的栅栏图像分别进行不加窗、加 Hanning 窗、加 flap-top 窗函数处理,测量误差情况如图 6(b)和(c)所示,对比 3 种情况下的误差分别为 $-0.0094\sim 0.0098$, $-0.0073\sim 0.0106$, $-0.0079\sim 0.0087$,因此,加 flap-top 窗函数预处理后,再结合相应的算法检测位移量,测量精度更高,验证了 flap-top 窗函数的有效性。

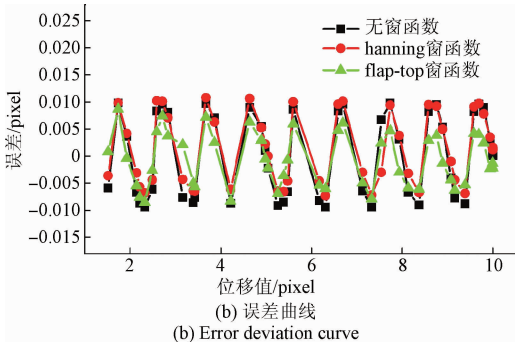
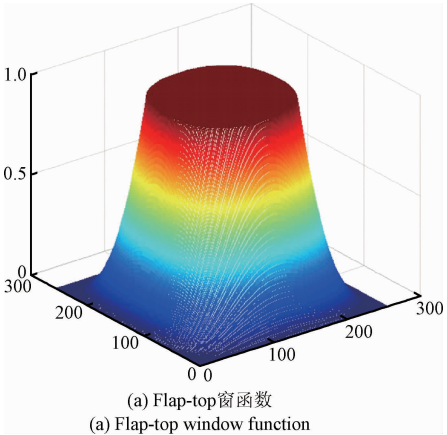


图5 三种方法的对比结果

Fig.5 Comparative results under three conditions

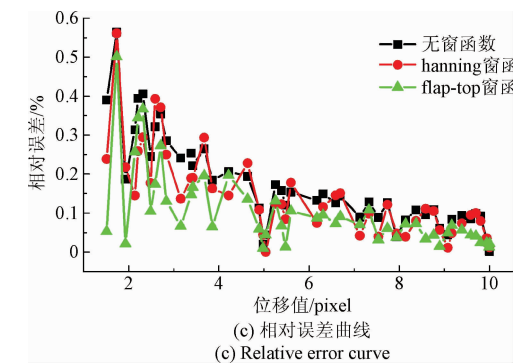


图6 Flap-top 窗函数应用
Fig. 6 Experiment of flap-top window function

5 实验结果与分析

5.1 实验平台

在本文中,检测流程如下:先通过高速相机采集动子位移前后的栅栏图像 f_1 和 f_2 ;用flap-top窗函数对采集的图像 f_1 和 f_2 进行预处理,抑制边缘效应和频谱混叠;再采用相位相关算法检测 f_1 和 f_2 间的整像素位移值 dx ,根据峰值分布特性,采用双线性拟合获得图像间的亚像素位移 Δx ;根据测量系统标定系数 ε ,最终可得直线电机动子位移值为 $s = \varepsilon \cdot (dx + \Delta x)$,实现电机动子位移的精确测量,且以高精度光栅作为基准验证该方法的有效性 & 误差情况。

根据检测模型及原理搭建直线电机动子位置测量系统如图7(a)所示。为了便于实验,根据相对运动,实验中采用固定高速相机,让条纹图像随动子运动。

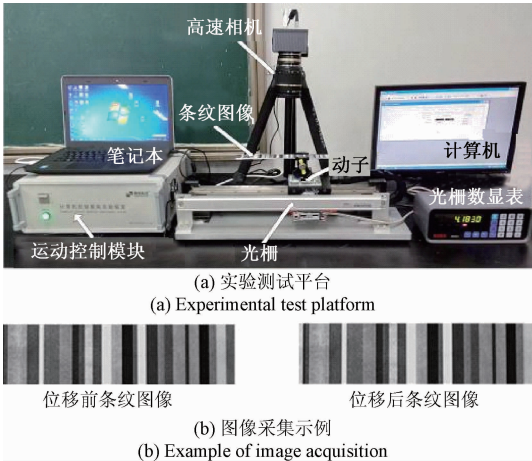


图7 直线电机动子位置测量系统
Fig. 7 Linear motor mover position detection system

本测量系统有直线电机,运动控制模块,高速相机,光栅数显表等组成。实验中选用双次级U型直线电机,

运行速度在0~1 m/s,有效行程380 mm,高速相机15 000 帧/s。实验通过运动控制模块控制电机以一定的速度运动,利用高速相机采集运动前后的栅栏条纹如图7(b)所示,将图像传送到计算机处理获得图像间位移 $(dx + \Delta x)$,根据测量系统标定系数 ε ,可得直线电机动子实际位移为 $s = \varepsilon \cdot (dx + \Delta x)$,结合拍摄间隔 Δt ,可得电机运行速度为:

$$v = \frac{\varepsilon \cdot (dx + \Delta x)}{\Delta t}$$
(15)

将图7(b)中采集的栅栏图像计算像素位移为2.004 9 pixels,实际位移为2.502 0 mm,镜头放大倍数为1,可得系统标定系数 ε 为1.248,用于测量系统标定。

5.2 实验结果对比与分析

为了验证本文检测方法的有效性,可行性,先通过运动控制模块控制直线电机以一定速度运行不同的距离,用3种测量算法检测动子位移值,测量结果和误差情况如表3所示;再控制直线电机以不同的速度 v 运行一段位移 s ,根据拍摄间隔 Δt ,结合式(15)通过算法计算出动子的速度,并与设定速度进行对比,检测结果和误差情况如表4所示。

表3 三种方法下位移测量结果对比
Table 3 Calculated displacement results under three measuring methods

设定位移/ mm	计算位移/mm			误差/mm		
	PCA	PRA	本文算法	PCA	PRA	本文算法
4.52	4.992	4.580	4.527 6	0.472	0.060	0.007 6
8.82	9.984	9.427	8.736 0	1.164	0.607	-0.084 0
12.91	12.480	12.224	12.790 8	-0.430	-0.686	-0.119 2
17.21	16.224	16.942	17.219 9	-0.986	-0.268	0.009 9
19.03	19.968	18.720	19.037 0	0.938	-0.310	0.007 0
28.38	27.456	27.865	28.362 0	-0.924	-0.515	-0.018 0
31.94	31.200	31.347	31.953 8	-0.740	-0.593	0.013 8
35.11	36.196	35.862	35.095 0	1.082	0.752	-0.015 0
46.64	47.424	47.015	46.664 0	0.784	0.375	0.024 0
59.74	58.656	58.862	59.701 8	-1.084	-0.878	-0.038 2

从表3和4中可得,PCA与PRA检测方法测量直线电机动子的实际位移与速度误差较大,检测结果在设定值上下浮;而基于多峰拟合的PCA测量方法能够高精度测量出动子的实际位移与速度,检测结果更接近实际设定值。图8所示为3种测量方法的速度与位移检测误差曲线。

表 4 三种检测方法的速度结果对比

Table 4 Calculated speed results under three measuring methods

设定速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	测量速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	PCA	PRA	本文算法	PCA	PRA	本文算法
0.10	0.086	0.107 6	0.099 7	-0.014 0	0.007 6	-0.000 3
0.20	0.226	0.193 1	0.204 7	0.025 8	-0.006 9	0.004 7
0.25	0.235	0.243 8	0.248 7	-0.014 6	-0.006 2	-0.001 3
0.30	0.283	0.308 2	0.300 1	-0.017 1	0.008 2	0.000 1
0.35	0.320	0.353 6	0.349 4	-0.030 0	0.003 6	-0.000 6
0.40	0.371	0.386 0	0.400 9	-0.028 9	-0.014 0	0.000 9
0.45	0.417	0.419 3	0.454 2	-0.033 0	-0.030 7	0.004 2
0.50	0.467	0.497 5	0.497 9	-0.033 5	-0.002 5	-0.002 1
0.60	0.568	0.595 2	0.599 3	-0.037 1	-0.004 8	-0.000 7
0.75	0.703	0.789 6	0.748 0	-0.047 4	-0.039 6	-0.002 0

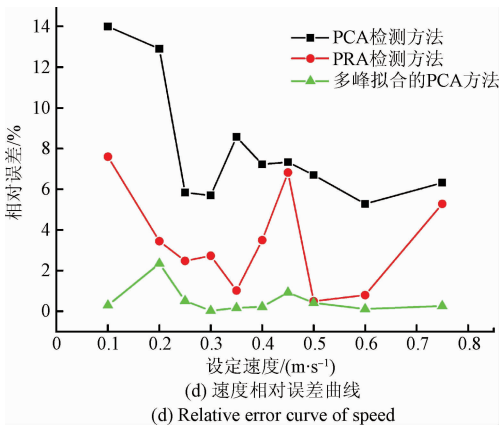
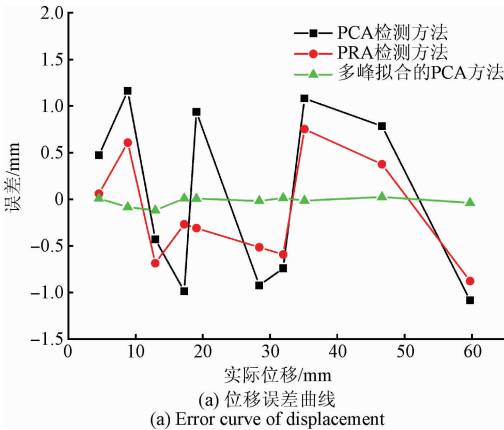
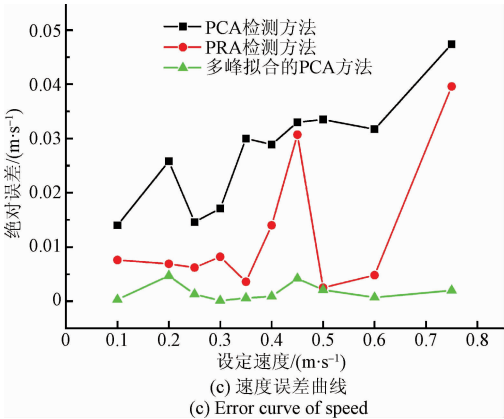
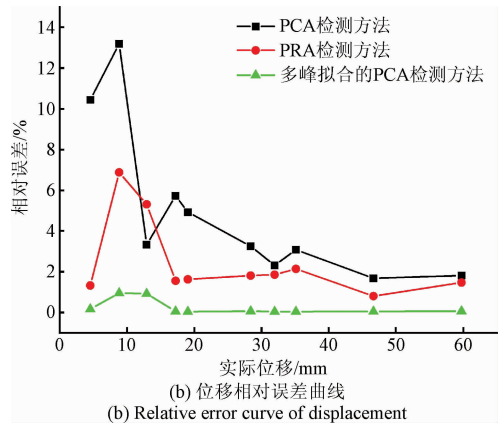


图 8 速度和位移误差曲线

Fig. 8 Error curve of speed and displacement



从图 8(a) 中 3 种方法的位移检测误差曲线中得出, PCA、PRA 方法测量的误差波动较大,而本文基于多峰拟合的 PCA 算法误差范围更平稳,检测结果更接近真实值;从图 8(b) 位移测量相对误差曲线中可得,PCA、PRA、多峰拟合的 PCA 3 种测量方法的相对误差分别为 1.681% ~ 10.442%、0.804% ~ 6.882%、0.0368% ~ 0.9524%;从图 8(c) 速度检测误差曲线中看出本文采用的算法测量结果更精确稳定,误差波动较小;从图 8(d) 中获得,3 种方法的速度检测相对误差分别为 5.7% ~ 12.9%、0.5% ~ 6.822%、0.0333% ~ 2.35%;因此,本文采用的基于多峰拟合的 PCA 算法用于检测直线电机定子的位移与速度更加稳定精确,误差较小、测量的结果更接近于设定值,且具有较强的鲁棒性,为直线电机定子位置图像测量提供一种新的思路。随着支持硬件的小型化、成本较低、采用图像非接触全景式测量,不受工作环境的影响,应用范围广。

6 结 论

本文分析了相位相关算法具有较强的抗干扰性、利用图像的频域信息检测、对环境光线变化不敏感,但仅能测量整像素位移值,在此基础上提出了基于多峰拟合的相位相关亚像素测量算法应用到直线电机定子位置测量上;根据直线电机运动特性,采用非周期强鲁棒性的条纹图像作为目标拍摄源,从目标源头上提高测量的抗干扰性,并介绍了位置检测模型及原理、实验测试平台。通过实验验证了基于多峰拟合的 PCA 算法检测直线电机定子位置的准确性和可行性。实验结果表明:

- 1) 该测量方法利用图像的频谱信息进行检测,对环境光线变化不敏感,有较强的稳定性;
- 2) 该测量方法采用 flap-top 窗函数对采集的栅栏图像预处理,通过调节结构因子 k , 寻找最佳窗函数,能有效抑制频谱泄露和边缘效应;
- 3) 实际应用时为了达到 μm 甚至 nm 级测量,可以选用放大倍数更高的光学镜头,测量更精密。

参考文献

- [1] 叶云岳. 直线电机在现代机床业中的应用与发展[J]. 电机技术, 2010(3): 1-5.
YE Y Y. Application & development of the linear motor in the modern machine tool industry [J]. Electrical Machinery Technology, 2010(3): 1-5.
- [2] KHIAT A, LAMARQUE F, PRELLE C, et al. Two-dimension fiber optic sensor for high-resolution and long-range linear measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 158(1): 43-50.
- [3] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁, 等. 基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1077-1083.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al. A high speed and high precision displacement measurement method using double grating scales [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1077-1083.
- [4] 赵吉文, 王荔枝, 张梅, 等. 直线电机定子位置检测的图像亚像素测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2592-2598.
ZHAO J W, WANG L ZH, ZHANG M, et al. Image sub-pixel measurement algorithm for linear motor rotor position detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2592-2598.
- [5] 邓辉, 谢俊, 孟广月, 等. 基于机器视觉的重复定位精度测量技术[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 45-48.
DENG H, XIE J, MENG G Y, et al. Repeat positioning

- accuracy measurement technology based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(12): 45-48.
- [6] TEDMORI S, AL-NAJDAWI N. Hierarchical stochastic fast search motion estimation algorithm [J]. IET Computer Vision, 2012, 6(1): 21-28.
- [7] 郭晓新, 许志闻, 卢奕南, 等. 基于 Fourier-Mellin 不变量的图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊3): 421-424.
GUO X X, XU ZH W, LU Y N, et al. A method of image registration based on Fourier-Mellin invariant [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Suppl. 3): 421-424.
- [8] 周美丽, 白宗文, 延小进. 基于相位相关法的图像拼接系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 31-33.
ZHOU M L, BAI Z W, YAN X J. Design of the image mosaic system based on phase correlation method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(5): 31-33.
- [9] 吴成中, 王耀南, 冯明涛, 等. 基于神经网络的医药微弱异物视觉检测机器人[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1746-1756.
WU CH ZH, WANG Y N, FENG M T, et al. Neural network based pharmaceutical insoluble foreign matter inspection robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1746-1756.
- [10] 张凯, 董菲, 赵吉文, 等. 基于图像熵的直线电机定子位置精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2821-2827.
ZHANG K, DONG F, ZHAO J W, et al. Precise measurement of linear motor mover position using an improved digital image correlation based image entropy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2821-2827.
- [11] 蒋建国, 牛杰杰, 齐美彬. 基于 SURF 和轨迹滤波的旋转视频稳像算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 550-557.
JIANG J G, N J J, QI M B. Rotational video stabilization algorithm based on SURF and trajectory smoothing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 550-557.
- [12] STONE H S, WOLPOV R. Blind cross-spectral image registration using prefiltering and Fourier-based translation detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(3): 637-650.
- [13] TONG X, YE Z, XU Y, et al. A novel subpixel phase

correlation method using singular value decomposition and unified random sample consensus [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(8): 4143-4156.

- [14] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(3): 188-200.
- [15] 赵朝杰, 朱虹, 刘薇, 等. 一种基于多峰拟合的相位相关扩展方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(11): 228-230.
ZHAO CH J, ZHU H, LIU W, DONG M. Extended phase correlation method based on multi-peak fitting[J]. Computer Engineering, 2011, 37(11): 228-230.
- [16] ERTURK S. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1320-1325.
- [17] 张鸿博, 蔡晓峰, 鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2835-2841.
ZHANG H B, CAI X F, LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2835-2841.
- [18] GE P, LAN C, WANG H. An improvement of image

registration based on phase correlation [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(22): 6709-6712.

作者简介



王辉, 2015 年于湖南工业大学获得学士学位, 现为安徽大学硕士研究生, 主要研究方向为图像测量技术。

E-mail: wanghuiahu@126.com

Wang Hui received his B. Sc. degree in 2015 from Hunan University of Technology.

Now he is a master student in Anhui University. His main research interest is image measurement technology.



赵吉文(通讯作者), 分别在 1996 年和 2002 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2005 年于中国科学技术大学获得博士学位, 2007 年于中国科学技术大学博士后出站, 现为安徽大学教授, 主要研究方向为电机设计与控制、光电检测技术等。

E-mail: ustczjw@ahu.edu.cn

Zhao Jiwen (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1996 and 2002, respectively, and received his Ph. D. degree in 2005 from University of Science and Technology of China. Currently, he is a professor in Anhui University. His main research interests include motor optimization design, motor control and photoelectric detection technology.