

基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试*

张健滔^{1,2}, 姚志远², 宋小刚², 杨东², 赵淳生²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海, 200072)

(2. 南京航空航天大学精密驱动研究所 南京, 210016)

摘要 针对直线超声电机机械特性测试问题,建立了基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统。设计了力与速度测试系统,为测试的直线电机提供加载,配置的压力传感器与直线型光电编码器分别用于电机输出力与速度的测量,利用虚拟仪器技术搭建了测试硬件平台。利用虚拟仪器编程语言LabVIEW对各个模块进行软件设计,以实现各自的功能。利用该系统对杆式直线超声电机和双变幅杆V形直线超声电机的机械特性进行了测试,测试结果证实该测试系统的可行性,为直线超声电机机械特性测试提供了所必需的条件。

关键词 直线超声电机; 机械特性; 虚拟仪器; LabVIEW

中图分类号 TM356

引言

直线超声电机是利用压电元件的逆压电效应产生微幅的超声振动,并通过定、动子间摩擦传动,将定子的微幅振动转化为动子的宏观直线运动^[1]。它具有响应快、功率密度大、定位精度高、结构简单和断电自锁等优点,在便携式通讯设备、医疗机械、精密光学仪器、微型机器人和半导体加工伺服机构等领域有广泛的应用前景^[1-7]。

直线超声电机机械特性是衡量电机设计好坏的重要指标,关于电机特性的测试在电机研究中占有重要的地位。国内外学者开发出各种超声电机机械特性测试系统,文献^[1]通过对一套电磁电机机械特性自动测试系统进行改进,建立起能测量旋转超声电机机械特性的测试系统。Lim等^[8]利用可以测量电机的扭矩和转速的扭矩计建立了一套测试系统,测量旋转超声电机的转速-扭矩特性。Bekiroglu等^[9]利用电磁制动器为电机提供负载,光学转速计和扭矩计测量电机的转速和扭矩,测得旋转超声电机的转速-扭矩特性。Petit等^[10]利用基于PC机的试验装置测量出旋转超声电机的机械特性,其中包括电机的扭矩-速度和扭矩-功率特性曲线。文献^[11]利用转速力矩测试仪测得旋转超声电机的转速-扭

矩特性。目前,对超声电机特性测试技术的研究主要针对旋转型超声电机,而直线型超声电机的机械特性很多还是利用吊砝码等简单手段进行测量^[12-13],这些方法不但操作不便而且影响测量精度。笔者基于主控计算机、高速数据采集卡、力与速度测试机构(包括力传感器与位移传感器)等,构建了一个基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统,并对所研制的杆式直线超声电机和双变幅杆V形直线超声电机的电机性能进行了测试,得到了其速度-输出力特性曲线。

1 基于虚拟仪器测试系统的组成

基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统硬件的总体结构如图1所示。该测试系统由主控计算机、NI PXI-1031机箱(包括NI PXI-6133采集卡)、力与速度测试机构(包括直线型光电编码器与压力传感器)、直线超声电机、电机驱动器和调理电路等组成。其中,主控计算机和NI PXI-1031机箱(包括机箱上的各种板卡)构成了直线超声电机机械特性数据采集系统,两者之间采用主、从式硬件体系结构,其硬件连接方式是通过线缆连接计算机内MXI-4接口卡与PXI机箱上的MXI-4模块NI PXI-8331。在两级的测试结构中,上位的计算机主要实现

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50735002, 50975136);中国博士后科学基金资助项目(编号:20100480581, 201104252)

收稿日期:2011-08-02;修改稿收到日期:2011-10-13

人机界面交互、接口管理、参数设置、控制接收数据、结果处理与实时通讯等功能;下位PXI机箱及其上的板卡实现数据采集、控制输出等功能。

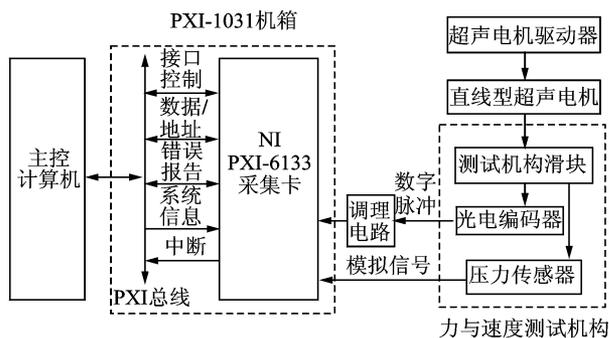


图1 系统硬件的总体结构图

1.1 输出力与速度测试机构

用于测量直线超声电机输出力与速度的测试机构如图2所示。它由基座、光栅尺、光电编码器读头、压力传感器、滑轨、滑块和加载弹簧等部件组成。直线超声电机固定在电机固定台上,电机运动滑轨与测试机构上的滑块固定,并能推动测试机构滑块向左移动。测试机构滑块移动的过程会对弹簧进行挤压,随着弹簧的变形量由零逐渐增大,其对电机的负载力也是由零逐渐增大,这样就会形成一个对直线电机逐渐加载的过程,加载力由零一直增大到电机的最大输出力为止。弹簧的加载力变化的过程可以通过弹簧另一端压力传感器测量出来。在测试机构滑块上还安装了一个直线光栅尺,其配合一旁的直线光电编码器读数头,就可以测量滑块移动过程中的位移量,经过计算就得出滑块移动的速度,即直线超声电机的运行速度。

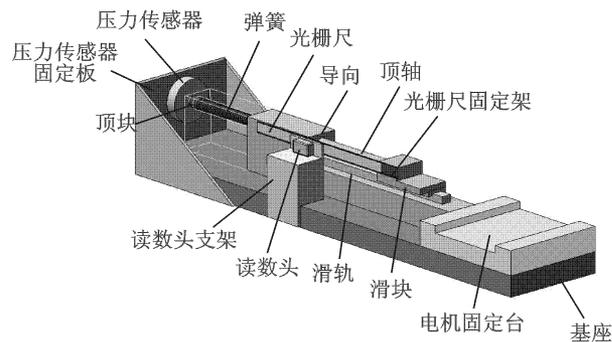


图2 直线超声电机输出力与速度测试机构

1.2 采集卡、传感器与调理电路

采用的采集卡PXI-6133(NI Inc.)具有8路同步

采样模拟输入,每通道具有3 MS/s采样速率并配备经启用的高速模式;±1.25 V到±10 V的4类输入范围和高容量的板载内存(32 MS);8条硬件定时数字I/O线,2个24位计数器,模拟和数字触发。选用的直线型光电编码器(Mercury 1520-8, MicroE/GSI Inc)的信号周期为10 μm,该位置测量分辨率完全能满足测试的精度要求。选用的力传感器为CL-YB-2型应变式力传感器,其输出电压与作用力的关系为40 mV/N。

在数据的采集、传送和转换过程中,由于系统内部、外部干扰和噪声的影响,会在采集的数据中混入干扰信号;因此,将设计信号调理电路,最大限度地消除混入数据中的干扰信号,以保证采集数据的精度。针对直线型光电编码器输出的TTL信号,设计了基于LM339的调理电路,如图3所示。输入信号 V_{in} 即待比较电压,其接入同相输入端,在反相输入端接一个参考电压 V_{ref} 。参考电压可以由电源电压 V_{cc} 与 R_1, R_2 确定。由于光电编码器输出的TTL电压值不超过5 V,这里取 $R_1=R_2=1\text{ k}\Omega$,得到的参考电压 V_{ref} 为2.5 V。当输入电压 $V_{in} \geq V_{ref}$ 时,输出为高电平 V_{omax} ;当输入电压 $V_{in} < V_{ref}$ 时,输出为低电平 V_{omin} 。对光电编码器输出的TTL信号进行调理,可以在消除噪声的前提下得到相对平稳的读数,提高数据采集的精度。针对压力传感器采集的信号,采用软件方法对其进行调理。

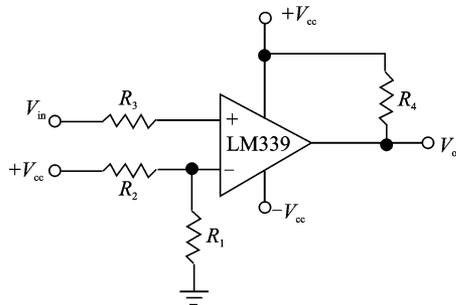


图3 基于LM339的调理电路

2 测试系统软件设计

在硬件设备的基础上,通过虚拟仪器编程语言LabVIEW的集成开发环境来实现试验数据的采集、存储、处理和输出等功能。测试系统软件主要包括4个大模块:主控模块、数据采集驱动模块、数据处理模块和输出模块功能。直线超声电机测试系统软件的工作过程可描述为:由主控界面设置需要实现的控制功能,通过数据采集驱动模块获取各种超声电机特性原始数据。然后,由数据处理模块对原始

数据进行各种处理,在测试的过程中实时输出测试结果,或是将数据保存到文档文件,以备数据采集结束后再进行处理。

输出力的测试为对一个模拟信号进行采集,其任务类型属于 Analog Input,输出力测量程序如图4所示。考虑到电机的测试要求,并不需要连续采集输出力信号,故采用间隔采集。使用DAQmx 平化通道字符串VI,将由物理通道名称组成的数组转换为用逗号分隔的名称列表,创建DAQmx AI电压虚拟通道,测量从压力传感器采集的电压信号。设置定时采样时钟,配置要获取或生成的采样数,并创建所需的缓冲区。这里所设定的采样率为2 MHz,采样模式选择的是 Finite Samples,缓冲区设置为500 kS。通过模拟1D波形N通道N采样DAQmx 读取VI,读取指定任务或虚拟通道中的采样,指定读取的采样数为10 000。同时为了去除采集数据中的噪声,设计了滤波器子程序(见图4小框图)对数据进行预处理。并利用基本平均直流-均方根VI,计算滤波后的信号的有效值。之后,又调用一个 Butterworth 滤波器(逐点)对有效值进行滤波,其滤波器类型选用的是低通,阶数为2阶,高截止频率为0.45,低截止频率为0.125。最后,通过乘运算计算出该直流电压所表示的输出力大小。

电机运行速度的测量是通过测量单位时间内的直线光电编码器发出的脉冲数,并通过计算得到。测量光电编码器发出的 TTL 信号采用 Analog Input 与 Count Input 两种方法都可以。但采用 Analog Input 法其数据流量大,而且采样频率不能太高。根据测量要求,速度采集并不关心 TTL 信号波形,只关心其个数;因此,采用 Count Input 法更合适,其可采集的最大信号源频率可高达20 MHz,分辨率能达24 bit,完全满足速度测量的需要。

该测试系统的速度信号频率最高为40 kHz,相对于NI PXI-6133的2 MHz时钟是低频信号,故选用带1个计数器的低频测量方法。将待测信号输入计数器的Gate端,Source端引入内部的2 MHz恒定基。速度测量程序如图5所示。通过创建虚拟通道DAQmx CI-Frequency采集光电编码器发出的TTL信号,设定采用的是带1个计数器的低频方法测量。通过模拟DBL1通道1采样,从指定任务通道中读取一个浮点采样,即获得一个采样点的TTL信号个数频率。乘以一个信号周期代表电机实际移动的步长 $10\ \mu\text{m}$,即可得到电机的运行速度。最后,利用一个 Butterworth 滤波器(逐点)对数值进行滤波,滤波器类型选用的是低通,阶数为2阶,高截止频率为

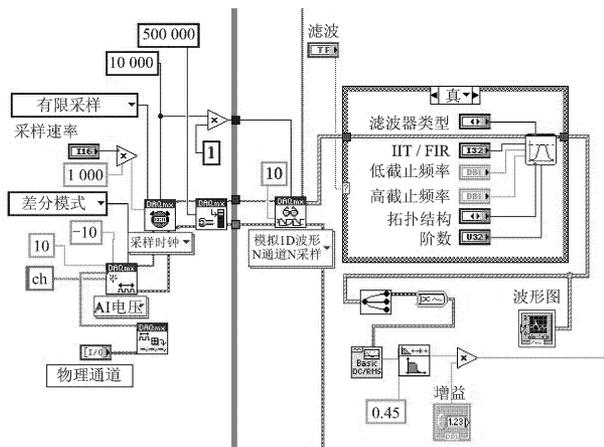


图4 输出力采集程序

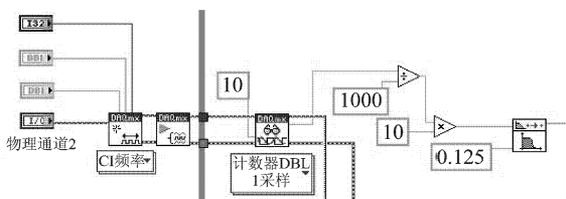


图5 电机速度采集程序

0.45,低截止频率为0.125。

为了能实时显示数据结果以及缩短采集过程中的数据处理时间,在测试过程中采用Chart方式显示数据结果,测试结束后再对数据进行处理,绘制出电机机械特性曲线图。

3 测试结果与分析

基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统实物,如图6所示。利用该系统对所研制的一款杆式直线超声电机进行测试,获得该电机的机械特性曲线,如图7所示。杆式直线超声电机通过专用的超声电机驱动器供电,驱动器的输入电压为直流15 V,驱动频率为34.34 kHz。由于测试过程时间短,为了缩短采集过程中的数据处理时间以及为了采集到更多的数据点,首先利用本系统测得电机运行速度随时间的变化曲线以及电机输出力随时间的变化曲线,测试结束后再对数据进行离线处理,得到电机机械特性曲线图。由图7可以看出,电机运行速度随输出力的增加而线性减小,电机的最大运行速度为5.59 mm/s,最大输出力为8.01 N。

利用该系统还测试了一款双变幅杆V形直线超声电机的机械特性,结果如图8所示。电机通过信号发生器与功率放大器供电,驱动频率为33.9 kHz,驱

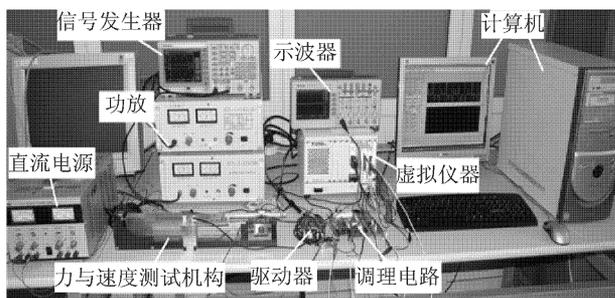


图6 直线超声电机机械特性测试系统实物图

动电压为 $300 V_{p-p}$ 。由图8可以看出,电机运行速度随输出力的增加而线性减小,电机的最大运行速度为 488.2 mm/s ,最大输出力为 11.9 N 。此外,利用秒表计时测试电机运行一段距离所用的平均时间和吊砝码测试电机负载能力的方法,测得了该电机的最大运行速度为 458 mm/s ,最大输出力为 11 N 。手工测试方法虽然存在测量误差,与机械特性测试系统的试验结果比较,两款直线超声电机机械特性的试验结果证实了该测试系统的可行性。

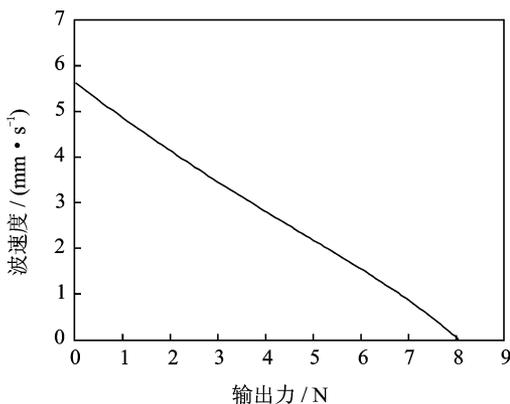


图7 杆式直线超声电机机械特性试验结果曲线

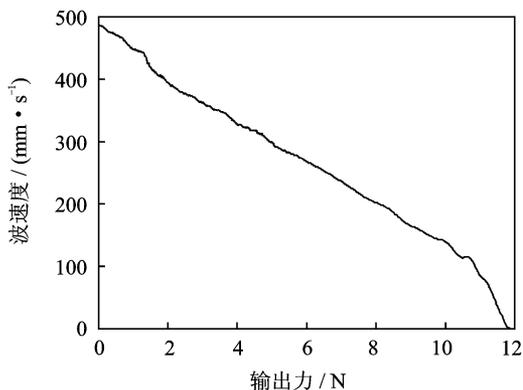


图8 双变幅杆V形直线超声电机机械特性试验结果

声电机机械特性测试系统,规划、构建了整个测试系统的基本硬件要素,基于虚拟仪器编程语言 LabVIEW 完成了各个模块的软件设计。利用该系统对杆式直线超声电机和双变幅杆V形直线超声电机的电机性能进行了测试,试验结果证实了该测试系统的可行性。

2) 基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统具有良好的扩展性,可以在此基础上扩充其他超声电机参数的测试。与其他测试方法相比较,基于虚拟仪器的测试方法具有性能高、功能强、灵活性好、开发简单和使用方便等特点,是超声电机测试技术值得关注的-一个发展方向。

参 考 文 献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] Yun C H, Watson B, Friend J, et al. A piezoelectric ultrasonic linear micromotor using a slotted stator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(8): 1868-1874.
- [3] 李玉宝,时运来,赵淳生. 高速大推力直线型超声电机设计与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 49-53.
Li Yubao, Shi Yunlai, Zhao Chunsheng. Research on linear ultrasonic motor with high speed and large thrust force[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33):49-53. (in Chinese)
- [4] 姚志远,杨东,赵淳生. 杆结构直线超声电机的结构设计和功率流分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24):56-60.
Yao Zhiyuan, Yang Dong, Zhao Chunsheng. Structure design and power flow analysis of bar-structure linear ultrasonic motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24):56-60. (in Chinese)
- [5] Lee W H, Kang C Y, Paik D S, et al. Butterfly-shaped ultra slim piezoelectric ultrasonic linear motor [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2011, 168: 127-130.
- [6] 孙志峻,帅双辉,金家楣,等. 基于径向神经网络的直线超声电机位置控制[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(6):650-653.
Sun Zhijun, Shuai Shuanghui, Jin Jiamei, et al. Position control of linear ultrasonic motor using radial basis function neural network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(6): 650-653. (in Chinese)
- [7] 时运来,李珊珊,赵淳生. 轮式直线型超声电机定子的

4 结 论

1) 设计和实现了一个基于虚拟仪器的直线超

- 动态设计和分析[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 1-5.
- Shi Yunlai, Li Shanshan, Zhao Chunsheng. Dynamic design and analysis of wheel-shaped linear ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):1-5. (in Chinese)
- [8] Lim C K, Chen I M. Systematic design and prototyping of a disc-typed traveling wave ultrasonic motor[C] // Proceedings of 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan:[s. n.], 2003: 113-118.
- [9] Bekiroglu E, Bal G. Experimental investigation of input-output characteristics of a travelling-wave ultrasonic motor [J]. Journal of Electroceramics, 2008, 20: 287-292.
- [10] Petit L, Gonnard P. Inter-phases mechanical coupling in ultrasonic motors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 116: 492-500.
- [11] 陈宇, 刘庆利, 周铁英. 大力矩行波超声电机的性能 [J]. 清华大学学报: 自然科学版. 2006, 46(3): 396-398.
- Chen Yu, Liu Qingli, Zhou Tieying. Performance of large torque traveling ultrasonic motor[J]. Journal of Tsinghua University: Edition of Natural Science, 2006, 46(3):396-398. (in Chinese)
- [12] Arafa M, Aldraihem O, Baz A. Modeling and characterization of a linear piezomotor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(16): 1913-1921.
- [13] 石胜君, 陈维山, 刘军考, 等. 一种基于纵弯夹心式换能器的直线超声电机[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18):30-34.
- Shi Shengjun, Chen Weishan, Liu Junkao, et al. Ultrasonic linear motor using longitudinal and bending multimode bolt-clamped langevin type transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18):30-34. (in Chinese)

第一作者简介 张健滔,男,1979年7月生,博士后。主要研究方向为超声电机技术。曾发表《Combined finite element analysis and subproblem approximation method for the design of ultrasonic motors》(《Sensors and Actuators A: Physical》2010, Vol. 163)等论文。
E-mail: zhangjt@shu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊入选 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,为双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdcns.nuaa.edu.cn