

超声电机驱动及控制技术的新进展*

梁大志¹, 时运来², 朱 华^{1,2}, 赵淳生²

(1. 江苏丰科超声电机科技有限公司 南京, 210019)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 以 TRUM-60 行波型超声电机为研究对象, 挖掘和利用超声电机的一些优异伺服动作特性, 从驱动控制器的电气特性入手, 对超声电机驱动及控制技术进行了更加深入的应用工程研究。在超声电机再次加电启动、开环条件下旋转角秒级和直线纳米级的分辨率、快速往复动态特性、双 PWM 功率驱动拓扑结构等驱动及控制算法与策略等方面, 获得了一些新的研究进展。

关键词 超声电机; 驱动器; 分辨率; 快速往复

中图分类号 TM356; TP39

引 言

超声电机是 20 世纪 80 年代开始发展起来的一种全新概念的微特电机。我国超声电机的研究始于 20 世纪 90 年代, 在超声电机的运行机理、机电耦合动力学模型、结构参数优化设计、驱动与控制以及试验技术等方面开展了系统而深入的研究, 并取得了一定的成果^[1-2]。但是, 就驱动及控制的研究而言, 理论研究和分析多于应用研究, 制约了超声电机技术的应用和发展。

2009 年以来, 笔者以 Cypress 公司生产的 PSoC1 嵌入式数字与模拟可编程 MCU 芯片 (CY8C29466) 构造的基于嵌入式单芯片 UMD-3 型驱动器为基础, 以 TRUM-60 行波型超声电机为研究对象, 挖掘和利用超声电机的一些优异伺服动作特性。从驱动器的电气特性入手, 对超声电机驱动及控制的技术进行了更加深入的应用工程研究。在超声电机再次加电启动、开环条件下旋转角秒级和直线纳米级的分辨率、快速往复动态特性、双 PWM 功率驱动拓扑结构等驱动及控制算法与策略等方面, 获得了一些新的研究进展。

1 驱动及控制

1.1 再次加电启动

TRUM-60 行波型超声电机再次加电启动时, 存在超声电机无法启动的随机现象, 即超声电机被搁置一段时间以后, 再次加电 CW/CCW 操作不能够运行超声电机, 这种不调节驱动器设定参数就不能够再次运行的现象称之为再次加电启动问题。尤其是在温度高和湿度大^[3]的条件下, 此随机现象更为明显, 它严重制约了超声电机的产业化。

笔者对超声电机驱动及控制方法与策略进行了多次改进和反复试验, 在现有 TRUM-60 超声电机的基础上, 编制了再次启动程序软件, 并经过实际运行的检验, 证明已解决了超声电机再次加电启动的问题。

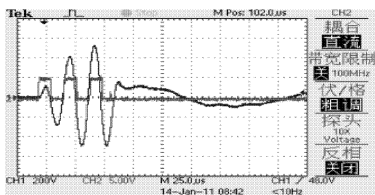
1.2 驱动信号的精确控制

TRUM-60 超声电机具有 ms 级的快速响应和断电自锁的特性。通过测试超声电机两端 PWM 驱动信号的电压, 发现得到角秒级分辨率的关键在于能够准确控制驱动超声电机的输出能量的大小。如

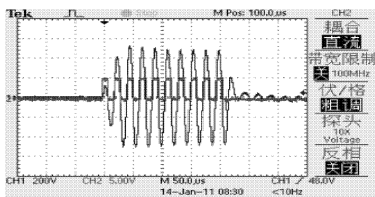
* 国家基础研究发展计划 (“九七三”计划) 资助项目 (编号: 2011CB707602); 国家自然科学基金资助项目 (编号: 11174149, 50905085)

收稿日期: 2012-09-17; 修改稿收到日期: 2012-10-28

图1所示为输出驱动脉冲数(或PWM驱动信号周期的个数)^[4],输出驱动脉冲数越多,超声电机所对应的角位移就会越大。



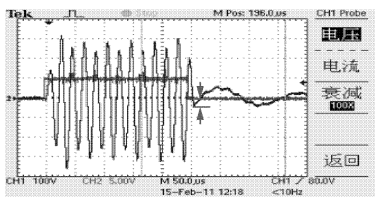
(a) CW 3个脉冲



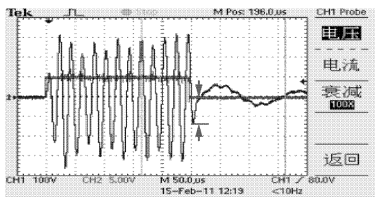
(b) CW 10个脉冲

图1 输出驱动脉冲数的精确控制

降低角秒级分辨率误差的关键在于PWM驱动信号输出消失的那一刻。如果每一次PWM驱动信号结束的关断时间不能够精准控制,则后续的曲线就会产生不一致的变化(如图2中两个箭头之间的距离),超声电机所产生的附加位移也会不一致,势必会造成更多的附加误差;所以,保持每一次PWM驱动信号结束时,后续曲线的一致性是小误差的关键,即需要精准控制PWM驱动信号结束的关断时间。



(a) 反向过冲较小



(b) 反向过冲较大

图2 PWM驱动信号波形结束以后反向过冲的比较

笔者根据上述测试结果的分析,充分发挥和利用超声电机的快速响应和断电自锁的特性,再结合PSoC芯片嵌入式数字/模拟可编程的特点来提高角位移分辨率,即准确控制PWM驱动信号的输出

脉冲(周期)数和精准控制PWM驱动信号输出结束时的关断时间。根据这一思路,笔者重构了驱动器的PWM信号发生器的硬件逻辑结构,重新拟定了步进脉冲控制算法,编写了完整的PWM信号周期控制程序,使得驱动器的PWM信号发生器能够在超声电机模态工作频率的任意整数倍周期上,即刻实现双向同步停止正交PWM信号发生器的PWM驱动信号的输出。然后,搭建了超声电机微角位移测试系统,该系统由Renishaw-XL80激光干涉仪、钢制隔振测试平台、TRUM-60超声电机、驱动器以及磁钢连接杆等组成,如图3所示。磁钢连接杆将超声电机稳固地吸合在平台上。设置驱动器输出脉冲的数目为 N ,即超声电机模态工作频率的 N 个周期^[5]。

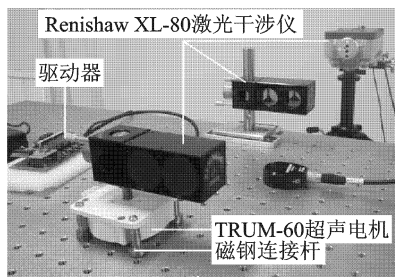
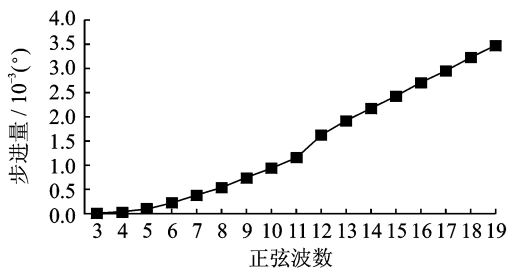
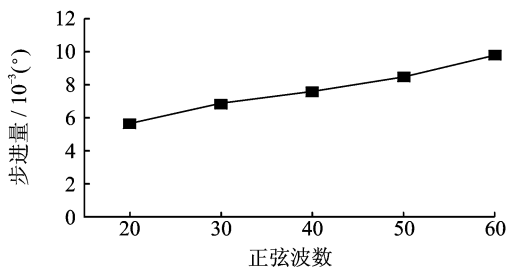


图3 超声电机微角位移测试系统

利用激光干涉仪来测量超声电机转过微小角度的偏移量,即角分辨率。图4为驱动器输出的信号脉冲数与超声电机实际角分辨率之间的关系。由图4可以看出,当连续信号脉冲数达到10个以上时,超声电机角分辨率与驱动脉冲数呈现良好的线性关系。



(a) 小脉冲数与角分辨率的关系



(b) 大脉冲数与角分辨率的关系

图4 脉冲数(正弦波数)与角分辨率(步进量)的关系

通过大量的测试工作,积累了642个样本测试值。这些样本值呈现为正态分布,在可置信度98%的条件下,超声电机模态工作频率的每个周期所产生旋转角位移的平均值(即分辨率)为 $0.79''$, 3σ 误差为 $\pm 0.24''$ 。 3σ 误差产生的原因如下:

- 1) 超声电机的定子与转子沿着一周的接触面,接触特性不会完全一致;
- 2) 虽然停止了PWM信号的输出,谐振匹配电路上储存的能量还需要释放,也会产生附加的位移;
- 3) 超声电机自身的惯量也需要释放。

1.3 快速往复动态特性

笔者在实现了角秒级分辨率的基础上,编写了驱动器系统软件的驱动程序架构,增加了LCD参数和菜单显示界面,改造和完善了事件触发的控制机制。所研发的快速响应测试仪如图5所示。

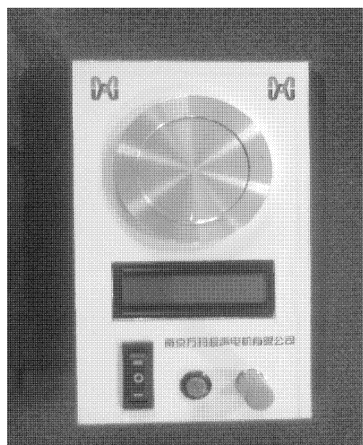


图5 快速响应测试仪

首先,该测试仪令TRUM-60超声电机分别在两端安装有光电限位开关有限角度^[6]的范围之间作往复运行,每往复一次就记录一次当前的时间值;然后,计算当前时间值与上一次时间值的差值,该差值即为超声电机往复该有限角度范围所需要的时间值,该时间值的倒数就是超声电机快速往复动态响应频率。实测了TRUM-60超声电机在 3° 、 20° 、 45° 、 65° 等4个往复角度的响应频率,其中往复 3° 时的往复动态响应频率为470 Hz,如图6所示。根据图6曲线的趋势,通过计算可以得到 $1\ 500\text{ Hz}/(^{\circ})$ 以上的往复动态响应频率。由于测试仪条件的限制, 1° 时的数据有待于后续的试验来验证。

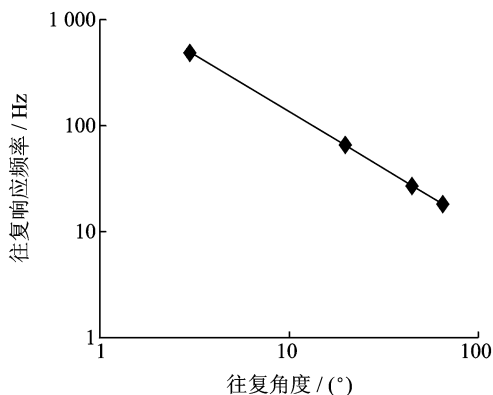


图6 往返角度与快速往复动态响应频率的关系

2 双PWM功率驱动拓扑结构

目前,使用的单PWM推挽拓扑结构,加串联匹配网络的功率驱动拓扑结构的驱动器。其阻抗特性的非线性现象严重,驱动器无法与超声电机实现良好的阻抗匹配,从而使得它的动态转换效率下降明显,发热现象严重。

为此,笔者研发了一种基于双PWM功率驱动拓扑结构的驱动器,其工作原理如图7所示。该功率驱动结构将恒流供电电源、功率驱动和耦合谐振并联匹配等三部分电路有机地结合在一起,实现了正交调节(调压和调频分别独立调节、互不影响),又通过耦合谐振并联匹配大大降低了超声电机动态阻抗的影响。

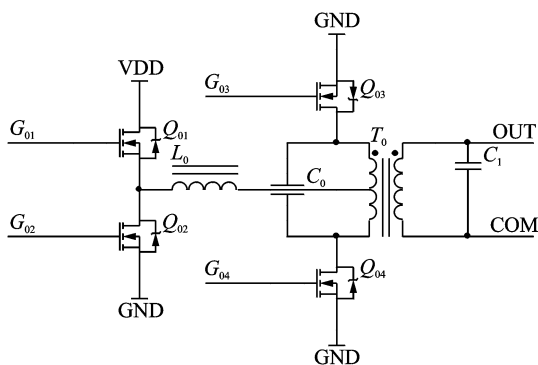


图7 双PWM功率驱动拓扑结构

该功率驱动结构在超声电机不带负载时输出的电压波形为准正弦波,带负载以后的输出电压波形基本保持不变,具有很好的稳定性,如图8所示。

在LMLS2-1型(二维)直线定位平台的应用中,该功率驱动拓扑结构的驱动器发挥了较好的线性调压和耦合谐振并联匹配的特性。经过中国计量科学

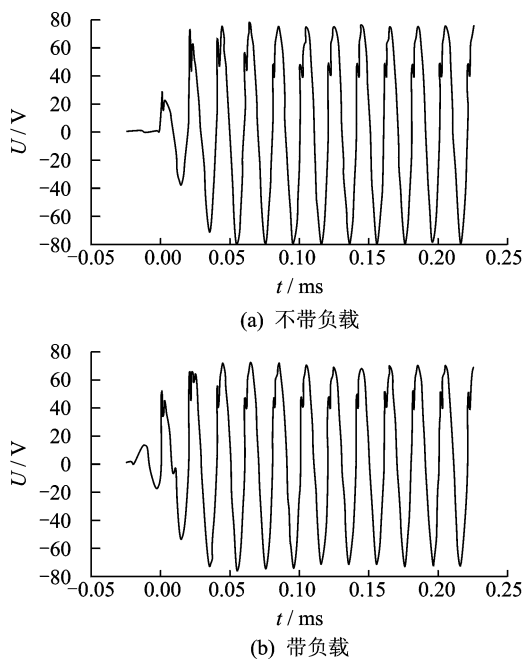


图8 驱动器不带负载和带负载时的输出波形

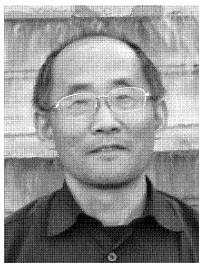
研究院的严格检验和测试,LMLS2-1 直线定位平台实现了小于 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的定位精度和小于 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 的重复定位精度。

3 结束语

针对超声电机的再次加电启动问题给出了一种通过程序软件的控制方法和策略。要实现电机最小分辨率的作动,就必须控制最小分辨率作动时的相对误差。精确地控制输出驱动信号关断时间的相位,就能有效地控制超声电机在最小分辨率作动时的相对误差。通过测试超声电机可以实现 $1\ 500 \text{ Hz}/(^{\circ})$ 的往复响应频率。双PWM 功率驱动拓扑结构,增加了PWM 恒流供电和耦合谐振等电路,改善了超声电机驱动器的输出线性调压特性和负载特性。

参 考 文 献

- [1] 赵淳生. 世界超声电机技术的新进展[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 1-5.
Zhao Chunsheng. Recent progress in ultrasonic motor techniques [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] Zhao Chunsheng. Ultrasonic motors: technologies and applications[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-3.
- [3] 郑伟, 赵淳生. 超声电机启动稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S): 282-287.
Zheng Wei, Zhao Chunsheng. Research on start reliability of traveling wave type rotary ultrasonic motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S): 282-287. (in Chinese)
- [4] Shi Yunlai, Zhao Chunsheng. Simple new ultrasonic piezoelectric actuator for precision linear positioning [J]. Journal of Electroceramics, 2012, 28(4): 233-239.
- [5] 朱华, 梁大志, 赵淳生. 实现超声电机高精度步进的一种驱动方法[EB/OL]. [2010-09-25]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201009-519>.
- [6] 张铁民, 周斌, 赵淳生. 超声电机快速反应装置的控制时序分析和电路设计[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(1): 30-33.
Zhang Tieming, Zhou Bin, Zhao Chunsheng. Control sequence analysis and electric circuit design of a quick response unit composed of ultrasonic motor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(1): 30-33. (in Chinese)



第一作者简介: 梁大志, 男, 1955年8月生, 工程师。主要研究方向为超声电机驱动控制器及相关电路的研发设计。
E-mail: ldz84@nuaa.edu.cn