

文章编号 1004-924X(2008)07-1218-05

真空环境下超声电机的速度测试与控制

芦丹, 郑伟, 赵淳生

(南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016)

摘要:研制了基于单片机的速度测试控制系统,根据超声电机的工作原理和运行速度与其驱动频率之间的关系,利用模糊参数自整定 PI 方法直接检测超声电机的转速,调节超声电机的驱动频率,控制超声电机以期望的速度运行于真空环境。实验结果表明,利用该系统可控制超声电机长时间稳定运行于真空环境下(最高真空度可达 0.003 Pa),速度偏差控制在 1 r/min 以内,基本满足真空环境下超声电机测控的要求。

关键词:超声电机;速度测试;真空;模糊 PI 控制

中图分类号:TM356 **文献标识码:**A

Speed test and control for ultrasonic motor working in vacuum

LU Dan, ZHENG Wei, ZHAO Chun-Sheng

(Precision Driving Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and
Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A system using a Single Chip Micryoco(SCM) to test and control the speed of ultrasonic motor was studied. Based on the relation between the ultrasonic motor's speed and its driving frequency, the speed of ultrasonic motor working in vacuum is controlled by fuzzy PI control strategy. The test results prove that the ultrasonic motor using the system can work steadily in design speed in vacuum (the highest vacuum degree can be up to 0.003 Pa), and the speed deviation doesn't exceed 1 r/min. It can satisfy the requirement for measuring and controlling the speed of ultrasonic motor working in vacuum.

Key words: Ultrasonic Motor(USM); speed test; vacuum; fuzzy-PI control

1 引言

超声电机(Ultrasonic Motor, USM)是一种新型作动器,与传统的电磁电机相比,具有低速大扭矩、响应快、结构简单、不受磁场干扰等优点,因而在航空航天、半导体加工等领域有着广阔的应

用前景^[1-4]。为将超声电机真正应用到航空航天领域,必须先对其实施环境实验,考验其对极端环境的耐受性。美国和日本率先开展了此类研究,但具体的实验数据并没有公开^[5-6]。目前国内刚开始此方面的工作,哈工大利用真空实验机和超声波电机模拟实验台配合,初步探索了超声电机在真空和低温环境下的某些特性^[7]。为满足我国

收稿日期:2007-10-16;修订日期:2007-12-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90405010)

航空航天技术发展的需要,将超声电机应用到航空航天和军工产品,南航精密驱动研究所启动了超声电机环境实验项目。运行于真空环境下的超声电机速度的测试与控制是其中一个子项目。由于超声电机自身结构和驱动原理上的特点,其控制方法也有别于传统型电机。本文通过直接检测超声电机的转速,调节超声电机的驱动频率,控制其以期望速度稳定运行于真空环境。

2 调速原理

由超声电机的驱动机理可知,其调速方法主要有以下几种^[8]。

2.1 电压幅值

通过调节施加在压电陶瓷上的激励电压幅值,控制超声电机定子行波的振幅,从而改变其运行速度。

2.2 相位差控制

通过调节两相驱动电压的相位差,控制超声电机定子表面质点的运行轨迹,从而改变其运行速度。

2.3 调频控制

当驱动频率工作在谐振点附近时,电机振子阻抗最小,振幅最大,电机转速最大。当驱动频率向反谐振点变化时,电机振子阻抗变大,振幅减小,电机转速变慢。

超声电机在运行过程中由于摩擦损失及介电损耗,不可避免都带有温升现象。特别是在真空中,由于缺少空气传导与对流,电机温升较高,其谐振频率也会随之漂移,开环驱动下电机的转速降低更为明显(见图1)。当超声电机驱动频率远离其谐振点时,单纯的利用调压或调相的方法控制转速,无法达到满意的效果。因此,本文通过调

频控制超声电机转速,使其以期望速度稳定运行于真空环境。

3 系统结构

3.1 真空箱

真空环境模拟采用 TSP025 型真空箱,该真空箱利用两级真空泵抽取空气,最高真空度可达到 0.001 Pa。实验时将超声电机与编码器放在真空箱内,测控电路部分置于真空箱之外,驱动及测试信号由航空插头传输。由于内置物品在真空环境下有放气现象,实验过程中最高真空度可达到 0.003 Pa。

3.2 编码器

采用 E40H8-500 型光电编码器,超声电机每旋转一周,编码器产生 500 个脉冲。超声电机转速变化时,脉冲频率也随之改变,即可达到检测转速的目的。

3.3 测控电路

光电编码器输出的频率信号由航空插头传递,经光偶滤波后利用 51 单片机的两个定时计数器进行处理,LED 管实时显示转速,期望速度由外接键盘给定。存储于单片机的控制算法根据当前速度值与期望速度值计算出频率变化量,并以控制电压的形式输出到压控振荡器 CD4046 的电压控制端口,改变电机驱动频率。双触发器对 CD4046 输出方波分频处理,由推挽功放进行放大,并利用电感谐振剔出高次谐波。控制电压器件采用 12 位 D/A 转换芯片 MAX530,输出最高电压 4.095 V,经运放电路放大后,与压控振荡器配合控制输出频率。根据实验所用超声电机工作的频率范围及压控振荡器的性能,确定压控振荡器 CD4046 外接电阻 R_1 、 R_2 及电容 CT 值。主要考虑因素如下:确保数模转换的电压增量值与电机驱动频率增量值呈线性关系;考虑到超声电机运行于谐振点右侧时稳定性较好,可控的频率范围应位于电机谐振点右侧;由于电机温升导致的谐振频率降低,需适当调低 CD4046 输出的最低频率,为电机长时间稳定运行于高速区域留有余度。最终确定 R_1 、 R_2 及 CT 值使其对应的最高输出频率 40 kHz,最低输出频率 33 kHz。如图 2 所示,在 34~39 kHz 范围内,数模转换的电压增量值与驱动频率增量值之间有良好的线性关系,

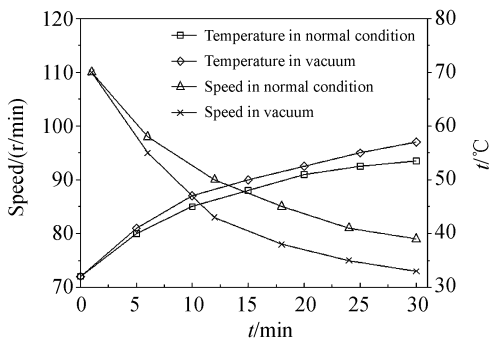


图1 真空与常态下超声电机的温度及转速
Fig. 1 Temperature and speed of ultrasonic motor working in vacuum and normal condition

所以可控驱动频率保持在此区间。

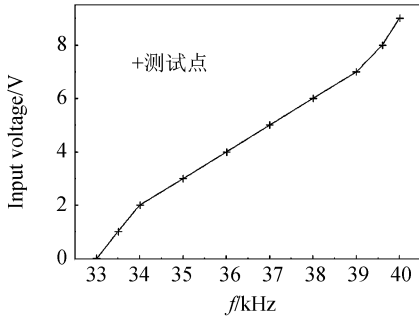


图 2 控制电压与输出频率关系

Fig. 2 Relationship between control voltage and output frequency

4 控制方法

由超声电机工作原理的限制,其结构的传递函数不易获得。特别是当超声电机运行在真空环境时,电机温度不断升高,更是增加了其结构的非线性。而PID控制具有结构简单、稳定性好、可靠性高等优点,可不依赖于系统的数学模型进行控制。在控制理论和技术飞速发展的今天,工业过程控制领域仍有近90%的回路在应用PID控制,本文即采用此控制策略。因为超声电机转速与其驱动频率呈非线性关系(如图3所示),所以利用固定增益PI调整频差控制速度,效果并不理想。这就要求PI参数能够在线调整,满足实时控制的要求。考虑到比例增益对速度的影响最大,利用模糊规则和推理对P值进行调整,即用模糊比例增益代替固定比例增益,而I值固定不变。

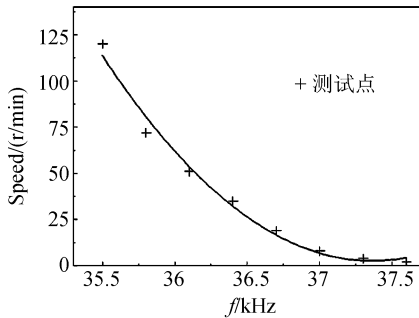


图 3 驱动频率与速度关系

Fig. 3 Relationship between driving frequency and speed

模糊控制系统的设计主要是模糊控制器的

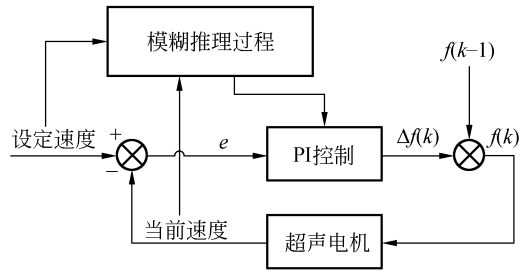


图 4 模糊 PI 控制系统

Fig. 4 Fuzzy-PI control system

设计,其主要组成功能模块如图4所示^[9]。

4.1 输入输出变量及其论域

模糊控制需要把确定的输入输出变量的值转化成模糊语言变量值。本文根据超声电机的工作特点,选取电机的实际速度及预期速度作为模糊逻辑控制器的输入,以控制驱动频率增量的P值作为输出。在输入输出变量确定后,基于变量模糊化的需要,对其量化处理,把它们从基本论域转换到模糊论域中。本文将实际速度及预期速度的基本论域[0~100]量化为11个等级,将P值[1~7]量化为7个等级,并适当加大了量化因子。

4.2 模糊集的确定

定义变量模糊集的目的就是确定该集合各模糊子集的数量及其隶属函数。变量划分的模糊子集分档越多,控制规则越灵活,但分档过多会增大控制规则制定的难度和内存占用量,分档过少会使控制器性能变差。基于以上考虑,将各模糊集划为7个等级,变量语言值为[ZO, RS, S, M, RB, B, MB]。考虑到不同速度对驱动频率变化的敏感度不同,确立模糊集合隶属度函数的原则是:在低速区域采用低分辨率的模糊集,在高速区域采

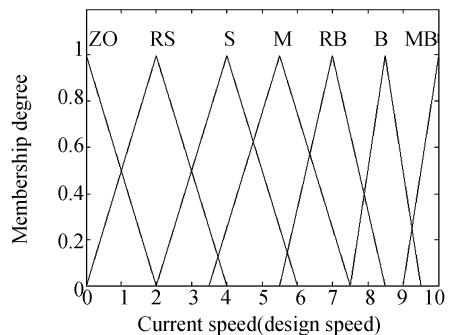


图 5 输入变量隶属度函数

Fig. 5 Membership function of input variable

用高分辨率的模糊集,另外算法应尽可能简单易实现。综上考虑,如图5、6所示,对输入变量采用三角分布函数,对输出变量采用单点模糊集。

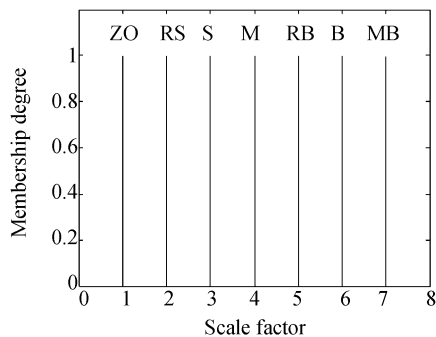


图6 输出变量隶属度函数

Fig. 6 Membership function of output variable

4.3 模糊推理

模糊控制是基于模糊推理实施控制的,模糊推理建立在手动控制的经验上,这些经验通过长期实验学习积累得到。超声电机手动调速实践表明,如电机当前速度与期望速度相距较大且电机当前速度较低时,模糊增益可调高;如电机当前速度与期望速度相距较小且电机当前速度较高时,模糊增益可调低。

模糊推理过程需要将模糊推理所得到的模糊矢量转换成实际的控制量,主要有 Mamdani 及 Sugeno 两种模糊推理方法。Mamdani 方法直观,具有广泛的接受性,适用于人工输入。Sugeno 方法计算效率高,用于线性化技术工作时性能良好(例如 PID 控制),比一般的需找到二维函数重心的 Mamdani 方法所需的计算量小,提高了反模糊化过程的效率。本文采用 Sugeno 型模糊推理,规则形式如下:

if x is A and y is B then $z=k$,

其中 A 和 B 是输入变量的模糊集, k 是经加权平均判决法得到的具有明确定义的输出常量,放大后即实际对应 P 值,模糊推理结果如图7所示。

为提高控制的实时性,针对元素的所有可能组合,离线计算出它们所对应的值制成模糊控制查询表存放于单片机的程序存储器中。当需要对其实施控制时,根据电机实时速度及期望速度查阅该表,即可得到当前采样周期所对应的 P 值,进行 PI 控制。

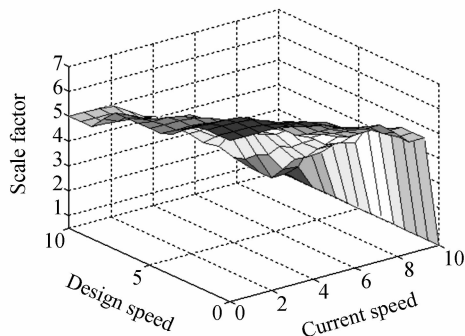


图7 模糊推理

Fig. 7 Fuzzy inference

5 实验结果

实验过程中,超声电机一直运行在 0.003 Pa 的高真空环境下。如图8所示,超声电机可实时依照按键设定的速度运行。如图9所示,随着超声电机运行时间的增加,驱动频率不断降低,而电机的速度稳定在 80 r/min,控制过程中速度偏差不超过 1 r/min。

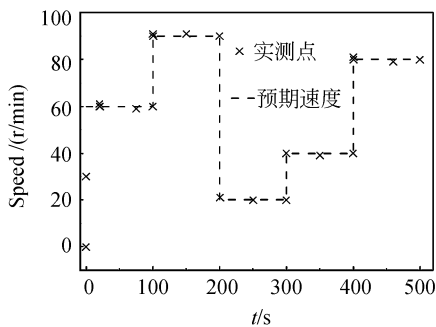


图8 超声电机转速控制

Fig. 8 Speed control for USM

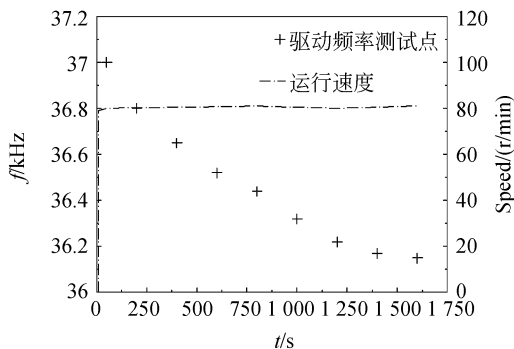


图9 电机转速与驱动频率

Fig. 9 USM speed with driving frequency

6 结 论

本文建立了基于单片机的超声电机伺服测控系统。根据超声电机的工作原理,针对超声电机运行速度与其驱动频率的关系,利用模糊参数自整定 PID 方法控制超声电机在真空环境下的

运行速度,取得了较为满意的效果,速度偏差控制在 1 r/min 以内。由于实验测试所用的编码器精度及单片机自身资源有限,实际采样频率设置较低,速度数据由 LED 显示,其在毫秒级的波动并没有表现。在以后的工作中可利用高分辨率编码器,提高采样频率,控制超声电机更加稳定的运行于真空环境。

参考文献:

- [1] 赵淳生. 面向 21 世纪的超声电机技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 86-91.
ZHAO CH SH. Ultrasonic motor techniques for 21st century [J]. *Engineering Science*, 2002, 4(2): 86-91. (in Chinese)
- [2] 马建旭, 吴清文, 卢鄂. 纵弯式压电微电机自然频率的有限元计算[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(6): 81-85.
MA J X, WU Q W, LU E. Finite element analysis on natural frequency of longitudinal-bending piezoelectric micro-motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 81-85. (in Chinese)
- [3] 刘国嵩, 杨志刚, 曾平, 等. 新型压电步进式二维精密驱动器[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 602-606.
LIU G S, YANG ZH G, ZENG P, *et al.*. Novel sophisticate stepping 2-DOF piezoelectric actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 602-606. (in Chinese)
- [4] 莫岳平, 胡敏强, 金龙, 等. 双转子柱体超声波电机运行机理与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 84-87.
MO Y P, HU M Q, JIN L, *et al.*. Operation mechanics and experimental research of cylindrical ultrasonic motor with double rotors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 84-87. (in Chinese)
- [5] MORITA T, NIINO T, ASAMA H. Rotational feedthrough using ultrasonic motor for high vacuum condition[J]. *Vacuum*, 2002, 65: 85-90.
- [6] MORITA T, TAKAHASHI S, ASAMA H, *et al.*. Rotational feedthrough using an ultrasonic motor and its performance in ultra high vacuum conditions[J]. *Vacuum*, 2003, 70: 53-57.
- [7] 曲建俊, 程敏, 罗云霞, 等. 超声波马达的真空和温度特性研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(3): 324-331.
QU J J, CHENG X M, LUO Y X, *et al.*. Performance of ultrasonic motor under vacuum and high temperature condition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 324-331. (in Chinese)
- [8] 朱华, 陈志华, 黄卫清, 等. 行波型超声电机速度测控系统的研究[J]. 压电与声光, 2003, 25(3): 216-218.
ZHU H, CHEN ZH H, HUANG W Q, *et al.*. Study on speed control system for piezoelectric traveling wave motor[J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2003, 25(3): 216-218. (in Chinese)
- [9] 贺红林, 朱华, 赵淳生. 基于模糊与自校正技术的超声电机的伺服控制[J]. 传感器技术, 2005, 24(8): 18-21.
HE H L, ZHU H, ZHAO CH SH. Servo control for ultrasonic motor using fuzzy logical and self-tuning technique [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(8): 18-21. (in Chinese)

作者简介: 芦 丹(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事超声电机非常态环境下的实验研究。E-mail: ld197832@163.com

郑 伟(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事超声电机非常态环境下的实验研究。

赵淳生(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事超声电机方面的研究。