

# 超声波电机转速控制的动态模糊建模

史敬灼, 吕琳

(河南科技大学电子信息工程学院, 河南省 洛阳市 471003)

## Dynamic Fuzzy Modelling for Speed Control of Ultrasonic Motor

SHI Jingzhuo, LÜ Lin

(College of Electronics & Information, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan Province, China)

**ABSTRACT:** Ultrasonic motor's dynamic model is the precondition for the realization of speed control with high performance. The dynamic fuzzy model of ultrasonic motor system was worked out using fuzzy reasoning modelling method. The experiment was designed to obtain the data used for model identification. Based on the data, proportional spacing method was adopted to determine the structure of model. Then, the coefficients of the model were obtained using least squares method. Comparison between experimental data and calculated output of the model proves that, the model has good precision, and it can reflect the nonlinear relationship among the amplitude of driving voltage, frequency and rotating speed. The fuzzy model can be used to analyze performance of motor, and also can be used to design speed controller of ultrasonic motor.

**KEY WORDS:** ultrasonic motor (USM); speed control; dynamic model; fuzzy model; Takagi-Sugeno model

**摘要:** 超声波电机动态模型是实现其高性能转速控制的前提。设计基于模糊逻辑的辨识建模方法,建立了超声波电机系统动态模糊模型。在设计实验获取建模所需数据的基础上,采用等分区间法确定了模型结构,进而利用最小二乘法辨识得到了模型中的待定参数。模型输出与实验数据的对比表明,所建模糊模型精度较高,反映了驱动电压幅值、频率与电机转速之间的非线性动态关系,可以用于超声波电机性能分析与转速控制器设计。

**关键词:** 超声波电机; 转速控制; 动态模型; 模糊模型; 高木-关野(Takagi-Sugeno)模型

## 0 引言

超声波电机系统的模型,是超声波电机性能分

析的基础<sup>[1]</sup>,也是设计电机运动控制器、尝试提高控制性能的重要前提。超声波电机的能量转换过程包括多个层次,首先是通过压电陶瓷材料逆压电效应将高频高压电能转换为定子表面质点的波动机械能,随后这一质点运动通过定转子接触表面的摩擦作用转换为转子的旋转运动<sup>[2-3]</sup>。复杂的能量转换过程及功能材料的非线性特性<sup>[4-5]</sup>,使得超声波电机具有较强非线性<sup>[6]</sup>,内部状态变量耦合关系复杂<sup>[7-8]</sup>,因而也就使超声波电机的准确理论建模难于实现。

建立超声波电机系统模型可以采用不同的方法<sup>[9]</sup>。近年来,由于超声波电机理论建模的局限性,同时也是为了便于设计控制器,基于实验数据的超声波电机辨识建模方法逐渐兴起<sup>[10-16]</sup>。根据辨识方法及模型用途的不同,模型形式有传递函数<sup>[10-11]</sup>、差分方程<sup>[12-13]</sup>、神经网络<sup>[14-16]</sup>等多种。

由于模糊逻辑独特的模糊非线性特征,基于模糊逻辑构建的模糊模型日益引起人们的重视,并成为系统非线性的另外一种有效表述形式。在电机研究领域,模糊建模的研究还不多,更多的是采用模糊方法实现转速或位置控制<sup>[17-19]</sup>。文献[20]采用相位差作为控制变量,对超声波电机的非线性控制进行了研究,给出了一种超声波电机的模糊哈默斯坦(Hammerstein)模型。该模型由稳态非线性部分和动态线性传递函数两部分串联构成;在模型的稳态非线性部分中,文献[20]根据实测的超声波电机转速与驱动电压相位差之间的稳态关系数据,用模糊规则表述了上述关系中的稳态死区特性。在这里,简单的模糊逻辑仅被用来表述系统的一部分稳态特性。事实上,模糊逻辑不仅可用来表示稳态特性,更可被用来表述超声波电机系统完整的非线性动

基金项目: 河南省基础与前沿技术计划(092300410164)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Henan Province (092300410164).

态特性。

文献[21]采用模糊建模方法,建立了超声波电机系统的稳态模糊模型。该模型以电机驱动电压幅值和频率为输入变量,通过模糊推理,能计算出电机的稳态转速,但不能用来分析系统的动态过程。

文献[22]利用 Takagi-Sugeno(T-S)模糊模型建立了超声电机的模型,并基于此模型提出了超声电机速度的模糊跟踪控制算法,数值仿真表明了模型及所提算法的有效性。该文所建 T-S 模糊模型是以驱动电压为输入、转速为输出的单输入单输出模型,未考虑超声波电机驱动电压、频率等多个可控变量之间的耦合及它们对电机转速的共同作用。

本文研究超声波电机系统动态模型的模糊建模方法,论述了超声波电机系统的模糊建模方法与过程,给出了等分区间法获取聚类中心并确定模糊聚类隶属函数的方法,并用最小二乘法辨识模糊规则结论部分的待定参数,建立了超声波电机系统的 Takagi-Sugeno 模型。

## 1 实验获取建模所需数据

采用已商业应用的 Shinsei USR60 型两相行波超声波电机进行实验,系统框图如图 1 所示。电路以 DSP 为主控芯片,编程实现两相电压幅值控制器及转速控制器。转速控制器输出的控制量为驱动频率,对电压幅值的控制则通过调节相移 PWM 的相移角度来实现。图中  $N_{ref}$ 、 $U_{ref}$  分别为转速和电压幅值的给定值。

可用于实现超声波电机转速控制的可控变量有驱动电压的幅值、频率及两相电压相位差等 3 个。现有文献对超声波电机的控制,多采用单一控制变量,控制目的也是单一的转速或位置控制。目前,随着研究者对超声波电机非线性运行机理认识和控制策略研究的不断深入,超声波电机的控制已经

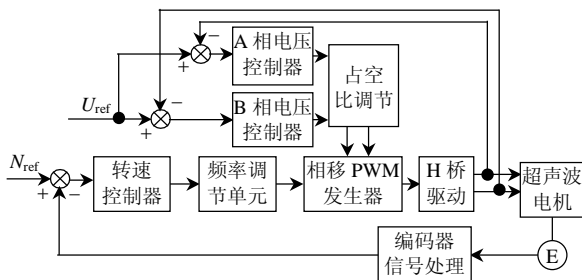


图 1 转速控制实验系统结构  
Fig. 1 Structure of the experimental system for speed control

开始向着充分利用控制自由度、实现性能整体优化的方向发展,控制目标由上述单一目标发展为转速、位置控制基础上的优化控制(例如效率优化控制);相应地,控制手段也由单一控制变量发展为多变量的协调控制。而多输入的控制模型正是这种多变量、多目标控制研究的前提条件。理论分析及相关实验研究表明,将两相电压相位差设定为  $\pm 90^\circ$  可使电机保持较好的运行状态,且机电能量转换效率较高。因而,本文将设定两相电压相位差为  $\pm 90^\circ$ ,实验测取驱动电压的幅值、频率与电机转速之间的动态关系数据,建立以驱动电压幅值和频率为输入、转速为输出的动态模糊模型。

实验过程设计为,设定  $N_{ref}$  测取转速阶跃响应,其间调节  $U_{ref}$  以改变电机驱动电压的幅值大小;随着驱动电压幅值的变化,在转速闭环控制作用下,频率必然改变以维持电机转速为  $N_{ref}$ 。同时记录  $U_{ref}$ 、频率及转速的动态变化过程,得到一组数据如图 2 所示。改变  $U_{ref}$  调节方式、 $N_{ref}$  数值,重复上述过程,测得多组数据用于建模。

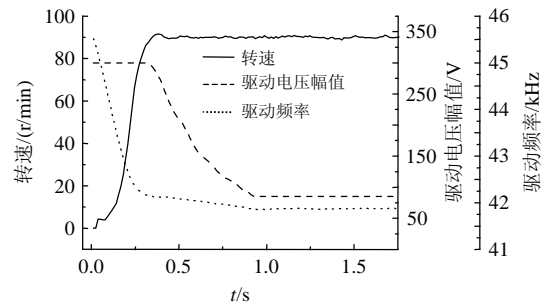


图 2 转速控制实验数据

Fig. 2 Tested data of speed control

## 2 超声波电机系统模糊建模方法

T-S 模糊模型是一类典型的动态非线性模型,其模糊规则形式如下:前提条件是模糊的,结论是清晰值,不需要进行解模糊运算。

$R_i$ : If( $x_1$  is  $A_{i1}$ ) and( $x_2$  is  $A_{i2}$ ) and...and( $x_r$  is  $A_{ir}$ ), then  $y_i = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ir}x_r$

其中,  $R_i$  代表第  $i$  条模糊规则;  $x_k$  为模糊模型的第  $k$  个输入变量;  $A_{jk}$  为变量  $x_k$  的第  $j$  个模糊子集;  $y_i$  为第  $i$  条规则  $R_i$  的输出;  $a_{ij}$  为结论部分的待定参数。

建立超声波电机系统的 T-S 模型,需要根据实测输入、输出数据进行结构辨识和参数辨识。

结构辨识,首先要确定输入变量及输入论域空间。然后,可采用模糊网格、模糊聚类、模糊树等

算法进行输入空间的模糊划分。其中，最常用的模糊聚类算法容易陷入局部极小，且计算量较大。为克服这些缺陷，本文采用等分区间算法。首先设定一个聚类数，该聚类数既是隶属函数个数也是规则数。然后对输入空间进行模糊划分，利用等分区间法确定高斯型隶属函数的中心、宽度等特征值，即可完成超声波电机系统 T-S 模型的结构辨识。建模的基本步骤如下：

- 1) 确定输入变量及个数  $p$ 、聚类数  $c$ ；
- 2) 根据实测的建模数据，确定驱动电压幅值、频率和转速对应的论域区间  $[M^-, M^+]$ ；
- 3) 采用等分区间法确定高斯型隶属函数的中心  $\bar{V}_i$  和宽度  $h_i$ ：

$$\bar{V}_i = M^- + \frac{M^+ - M^-}{c+1} i, \quad i=1, 2, \dots, c \quad (1)$$

$$h_i = \frac{M^+ - M^-}{c+1} \quad (2)$$

- 4) 计算各数据点  $x_k$  与聚类中心  $\bar{V}_i$  的距离  $d_{ik}$ ：

$$d_{ik} = \|x_k - v_i\|, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

- 5) 计算建模数据的隶属度  $\mu_{ik}$ ：

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (4)$$

式中  $m$  为常数，通常取  $m=2$ 。

- 6) 采用最小二乘法求得 T-S 模型结论部分的待定参数  $a_{ij}$ ；

- 7) 进行模型验证。若模型精度不理想，则改变输入变量个数  $p$  和/或聚类数  $c$ ，转步骤 2)。

### 3 超声波电机转速控制的动态模糊建模

动态模糊模型反映超声波电机转速控制系统与时间相关的动态特征，其输出变量为当前时刻的转速值  $n(k)$ 。输入变量包含当前及以前时刻的驱动电压幅值(峰峰值)和频率值  $u(k-m)$ 、 $f(k-m)$ ，其中， $m=0, 1, 2, \dots$ ；也可能包含以前时刻的转速值  $n(k-l)$ ，其中， $l=1, 2, 3, \dots$ 。

实验获得不同转速情况下的 9 组数据用于模糊建模。其中，7 组用来建模数据，另外 2 组作为验证数据。考察实测数据，可得到  $u$ 、 $f$  和  $n$  的论域区间分别为  $[60, 300]$ 、 $[41.9572, 45.5482]$  和  $[0, 120]$ 。为简化建模过程，3 个变量的量化因子均设定为 1，

并定义量化后的变量分别用符号  $U$ 、 $F$ 、 $N$  表示。

建立 T-S 动态模糊模型的过程，是按照前述建模步骤不断尝试的寻优过程。根据经验及实测数据分析，首先选择输入变量为  $u(k-1)$ 、 $u(k)$ 、 $f(k-1)$ 、 $f(k)$ 、 $n(k-1)$ ，输出变量为  $n(k)$ ，输入变量个数  $p=5$ ，规则数  $c=5$ 。采用等分区间法，编程计算高斯型隶属函数的中心和宽度，得到  $U$  的隶属函数如图 3 所示。图中  $A_1$ - $A_5$  表示隶属函数所对应的模糊语言变量。限于篇幅， $F$  和  $N$  的隶属函数图形不再给出，其模糊语言变量分别用  $B_1$ - $B_5$ 、 $C_1$ - $C_5$  来表示。

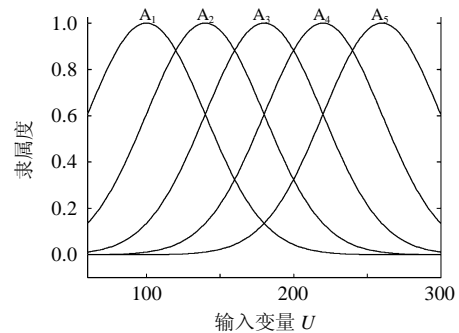


图 3 输入变量  $U$  的隶属函数

Fig. 3 Membership functions of  $U$

随后进行参数辨识，可得到模型的 5 条模糊规则。对所建模型进行验证，模型输出数据与 2 组实测数据的对比分别如图 4、图 5 所示。图 4 是转速给定值  $N_{ref}$  为 30 r/min 的阶跃响应曲线，模型输出与实测值的变化趋势基本一致，但是模型输出明显高于实际值。最大绝对误差为 3.76 r/min，出现在阶跃响应曲线的起始阶段；平均相对误差为 4.04%。图 5 是  $N_{ref}=90$  r/min 的情况，模型输出误差整体情况稍好于图 4，平均相对误差为 0.70%。在转速起始上升阶段，模型输出稍微低于实测值，然后在转速稳定阶段又出现了小幅度的升高，最后逐渐与实

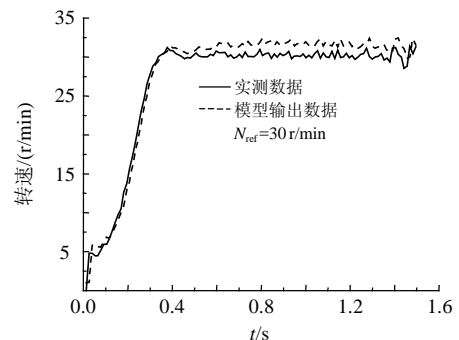


图 4 模型输出与实测数据对比( $N_{ref}=30$  r/min)

Fig. 4 Comparison between model output and tested data

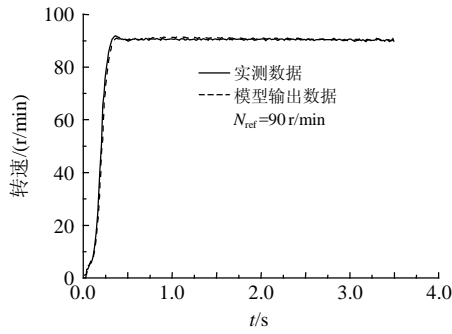


图5 模型输出与实测数据对比( $N_{ref}=90$  r/min)

Fig. 5 Comparison between model output and tested data

测值趋于一致。最大绝对误差为 12.9159r/min, 出现在 0.22s 时。

图 4、图 5 表明上述所建模型精度不高, 突出表现为低速时的相对误差较大, 仍需通过改变输入变量个数  $p$  和/或聚类数  $c$  来改进。首先固定聚类数  $c$  增加输入变量个数  $p$ , 当模型误差增大时, 则固定效果较好的输入变量个数  $p$ , 增加聚类数  $c$ 。按照上述步骤, 分别建立对应于不同  $p$ 、 $c$  取值的模型进行尝试。部分模型输出数据的误差对比如表 1 所示, 表中列出的模型编号代表尝试的先后次序。表 1 数据表明, 过小的  $p$ 、 $c$  取值使得模糊模型的非线性表述能力有限, 不足以表征超声波电机系统的动态特征; 而过大的  $p$ 、 $c$  取值则会导致模型拟合过度, 误差也会较大。

表 1 模糊模型平均相对误差比较

Tab. 1 Comparison of the even relative error among fuzzy models

转速给定值(r/min)	30	90
模型 1( $p=5, c=5$ )	4.04	0.70
模型 6( $p=8, c=8$ )	3.72	0.82
模型 11( $p=10, c=10$ )	2.10	0.72
模型 13( $p=11, c=9$ )	2.37	0.53
模型 17( $p=12, c=8$ )	3.01	0.54
模型 20( $p=12, c=11$ )	4.78	0.88

综合考虑低速和高速情况的模型精度, 表 1 列出的模型 11 效果较为理想, 由此确定输入变量为  $u(k-3)$ 、 $u(k-2)$ 、 $u(k-1)$ 、 $u(k)$ 、 $f(k-3)$ 、 $f(k-2)$ 、 $f(k-1)$ 、 $f(k)$ 、 $n(k-2)$ 、 $n(k-1)$ , 输出变量为  $n(k)$ , 输入变量个数  $p=10$ , 规则数  $c=10$ 。编程计算得到  $U$  的隶属函数如图 6 所示, 模糊规则如表 2 所示。图 7、图 8 给出模型验证结果。转速给定值为 30r/min 时, 与图 4 相比, 图 7 所示模型误差情况明显改善, 平

均相对误差减小为 2.10%。高速情况下, 图 8 与图 5 相似, 仍保持了较高精度, 平均相对误差为 0.72%。

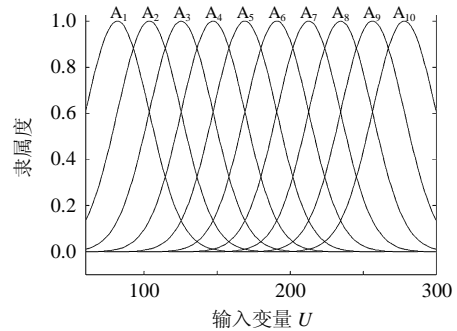


图 6 输入变量  $U$  的隶属函数

Fig. 6 Membership functions of  $U$

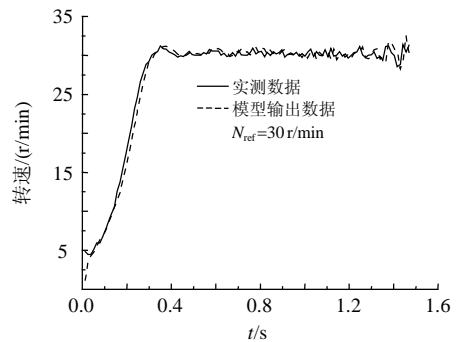


图 7 模型输出与实测数据对比( $N_{ref}=30$  r/min)

Fig. 7 Comparison between model output and tested data

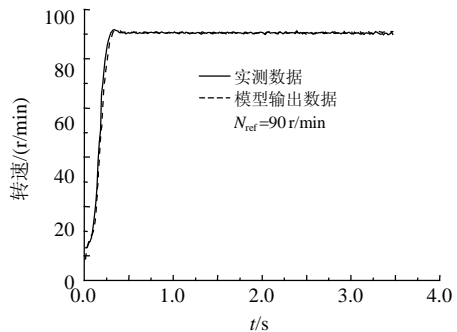


图 8 模型输出与实测数据对比( $N_{ref}=90$  r/min)

Fig. 8 Comparison between model output and tested data

上述模型输出与实测数据的对比, 包括建模所用的实测数据, 其测试条件均是在电机转速进入稳态后开始调节驱动电压幅值。为进一步验证所建模糊模型的有效性, 设置与建模数据不同的测试条件, 在调速过程中改变电压幅值并实测数据用于模型校验。图 9 给出了这种情况下的模型输出与实测数据的对比, 图中同时给出了电压幅值变化过程。模型平均相对误差为 1.40%, 仅比图 5、图 8 情况稍大。

表 2 模糊模型的模糊规则  
Tab. 2 Fuzzy rules of the fuzzy model

$R_i$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$	
前提部分	$u(k-3)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
	$u(k-2)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
	$u(k-1)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
	$u(k)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
	$f(k-3)$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$
	$f(k-2)$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$
	$f(k-1)$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$
	$f(k)$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$	$B_{10}$
	$n(k-2)$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
	$n(k-1)$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
结论部分	$a_0$	180.9	1249	145.2	255.8	169.2	130.1	13.5	30.78	59.04	38.81
	$a_1$	0.0937	-0.04148	0.2	0.1259	0.4378	0.3607	0.1464	0.2738	0.8669	1.252
	$a_2$	-0.517	-0.009459	-0.7707	-0.273	-1.328	-1.252	-0.5266	-1.185	-2.115	-5.656
	$a_3$	0.6663	0.007595	0.7137	0.1353	1.266	1.416	0.6314	1.586	1.617	7.234
	$a_4$	-0.2366	0.08016	-0.1412	0.0179	-0.38	-0.5232	-0.247	-0.6777	-0.3582	-2.806
	$a_5$	32.89	37.2	155.9	49.56	88.89	18.67	0.8444	22.93	134.8	22.62
	$a_6$	-7.497	-108.4	-342.1	-96.72	-87.43	44.22	-21.45	-6.138	-163.2	-9.541
	$a_7$	-20.24	173.1	275.5	53.49	-70.97	-129.3	51.14	-44.23	-64.11	-42.66
	$a_8$	-9.343	-130.9	-92.69	-12.25	65.63	63.41	-30.86	26.74	91.09	28.54
	$a_9$	0.153	0.428	0.4712	-0.5714	-0.1322	0.0339	0.8306	0.3826	0.1745	-0.0896
	$a_{10}$	0.7901	0.1586	0.486	1.49	1.079	0.9205	0.1608	0.6079	0.807	1.076

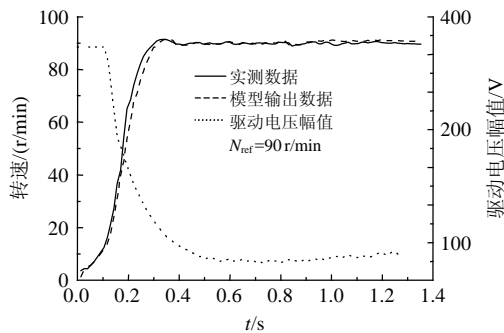


图 9 模型输出与实测数据对比(调速过程中变压)

Fig. 9 Comparison between model output and tested data with voltage regulation during speed response

#### 4 结论

基于实验数据，建立了以电压幅值和频率为输入、电机转速为输出的超声波电机系统 T-S 动态模糊模型。采用等分区间、最小二乘等算法，分别辨识模型结构和模型参数。所建模型结构简单，模糊规则数少，在线计算量小。实验验证表明，所建模型精度较高。给出的模糊建模算法易于应用，建模过程基于实测数据，不需要其它先验知识。但是，就像其它非参数建模方法一样，关于建模对象的先验知识有助于寻找或确定适当的模型结构并加快建模过程。所建模型结构简单，所需模糊规则数少，在线计算量小；模型利用模糊逻辑本身所具有的非线性，易于实现非线性建模，逼近非线性特性的能

力强，适合于描述超声波电机系统这类具有较强非线性的系统。

#### 参考文献

- [1] Radi B, Hami A E. The study of the dynamic contact in ultrasonic motor[J]. Applied Mathematical Modeling, 2010, 34(12): 3767- 3777.
- [2] 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 149-155. Chen Chao, Zhao Chunsheng. Study on the three dimensional contact mechanism of traveling wave type rotary ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 149-155(in Chinese).
- [3] 杨明, 阙沛文, 季钢, 等. 环形行波式超声马达变频特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 52-54. Yang Ming, Que Peiwen, Ji Gang, et al. The frequency performance of the annular traveling wave ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 52-54(in Chinese).
- [4] 曲建俊, 周铁英, 张志谦. 超声波电动机定子和转子接触状态的数值分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 74-78. Qu Jianjun, Zhou Tieying, Zhang Zhiqian. Numerical simulation of contact state of stator and rotor in ultrasonic motor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 74-78(in Chinese).
- [5] 刘锦波, 陈永校. 超声波电动机定转子接触的摩擦传动模型及其实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4):

- 59-63.  
Liu Jinbo, Chen Yongxiao. Investigation on contact model of ultrasonic motor and its experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 59-63(in Chinese).
- [6] 周盛强, 赵淳生, 黄卫清. 旋转型行波超声电机接触界面的空间域分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 63-68.  
Zhou Shengqiang, Zhao Chunsheng, Huang Weiqing. Contact analysis of traveling wave type rotary ultrasonic motor in space domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 63-68(in Chinese).
- [7] 郭吉丰, 魏燕定, 刘晓, 等. 纵扭复合型超声波电机的力传递模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 80-85.  
Guo Jifeng, Wei Yanding, Liu Xiao, et al. Force transferring model of hybrid transducer type ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 80-85(in Chinese).
- [8] 杨淋, 丁庆军, 黄卫清, 等. 斜槽式纵扭模态转换型超声电机在不同摩擦副下的负载特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 94-98.  
Yang Lin, Ding Qingjun, Huang Weiqing, et al. Load characteristics of ultrasonic motor using longitudinal-torsional convertor with diagonal slits under various friction pairs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 94-98(in Chinese).
- [9] 颜佳佳, 阮新波. 旋转型行波超声电机的等效电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 80-87.  
Yan Jiajia, Ruan Xinbo. Electrical equivalent circuit model of traveling wave rotary ultrasonic motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 80-87(in Chinese).
- [10] 王心坚, 金龙, 尧波, 等. 行波超声波电机非参数辨识模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 83-89.  
Wang Xinjian, Jin Long, Yao Bo, et al. System identification model of traveling-wave ultrasonic motors based on nonparametric estimation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 83-89(in Chinese).
- [11] Tomonobu S, Mitsuru N, Naomitsu U, et al. Mathematical model of ultrasonic motors for speed control[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(6): 637-648.
- [12] Mou S, Ouyang M. Establishing the dynamic transfer function of a shaft-driving type ultrasonic motor by system identification[C]//Proceedings of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2004: 302-305.
- [13] Chung S W, Chau K T. Speed control of traveling-wave ultrasonic motors using a practical modeling approach [J]. Electric Power Components and Systems, 2007, 35(4): 411-428.
- [14] Chen Tien-Chi, Yu Chih-Hsien. Generalized regression neural-network-based modeling approach for traveling-wave ultrasonic motors[J]. Electric Power Components and Systems, 2009, 37(6): 645-657.
- [15] Faajeng L, Rongjiong W, Chunming H. Identification and control of rotary traveling-wave type ultrasonic motor using neural networks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(4): 672-680.
- [16] Mohammad J, Hamed M. Neural network based modeling of traveling wave ultrasonic motor using genetic algorithm [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering. Singapore: Singapore IEEE Computer Society, 2010: 486-490.
- [17] Faajeng L, Syuanyi Chen, Pohuan Chou, et al. Interval type-2 fuzzy neural network control for X-Y-Theta motion control stage using linear ultrasonic motors [J]. Neurocomputing, 2009, 72(4-6): 1138-1151.
- [18] 夏长亮, 徐绍辉, 史婷娜, 等. 基于遗传算法的超声波电机模糊自适应速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 99-103.  
Xia Changliang, Xu Shaohui, Shi Tingna, et al. Fuzzy adaptive speed control for ultrasonic motor based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 99-103(in Chinese).
- [19] Senjyu T, Kashiwagi T, Uezato K. Position control of ultrasonic motors using MRAC and dead-zone compensation with fuzzy inference[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(2): 265-272.
- [20] Fazel B, Behnood R, Hamed M. A Fuzzy modeling and position control of a traveling wave ultrasonic motor[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering. Singapore: Singapore IEEE Computer Society, 2010: 457-461.
- [21] 史敬灼, 吕琳. 超声波电机转速控制的稳态模糊建模方法研究[J]. 微电机, 2011, 44(8): 55-59.  
Shi Jingzhuo, Lv Lin. Study on stable fuzzy model for speed control of ultrasonic motor[J]. Micromotors, 2011, 44(8): 55-59(in Chinese).
- [22] 白锐, 佟绍成, 王峰. 超声电机速度的模糊跟踪控制 [J]. 控制工程, 2011, 18(1): 138-141.  
Bai Rui, Tong Shaocheng, Wang Feng. Fuzzy tracking control for the speed of ultrasonic motor[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(1): 138-141(in Chinese).



史敬灼

收稿日期: 2011-08-01。

作者简介:

史敬灼(1974), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为运动控制与智能系统, shijz@mail. Haust.edu.cn;

吕琳(1986), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为电机系统建模, lylnlv@sina.com。

(责任编辑 王剑乔)