

超声电机 LLCC 谐振电路研究

俞浦, 李华峰, 黄卫清

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

Study on Driving Circuit of Ultrasonic Motor With LLCC Resonant Technique

YU Pu, LI Huafeng, HUANG Weiqing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: High driving voltage is required for ultrasonic motors, so the driving circuit needs a transformer to boost voltage. Since the ultrasonic motor (USM) is a nonlinear capacitive load, a matching circuit is needed to keep the output voltage and the phase shift constant. Based on the switching circuit with push-pull topology, it was analyzed that the switching loss under inductive load is less than that under capacitive load, which will increase its efficiency and reliability. A novel LLCC resonant network was proposed and its parameters were given. Theoretical analysis and simulation were presented, which demonstrated that the output voltage and the phase shift of the resonant network can be decoupled from driving conditions, and the load characteristics can be changed from capacitive to inductive. This novel driver has been applied to the TRUM-60 type ultrasonic motor, and the experimental results have verified the effectiveness of the proposed circuit.

KEY WORDS: ultrasonic motor (USM); driver; push-pull; LLCC; resonance

摘要: 超声电机需要幅值较高的驱动电压, 因此其驱动电路需要变压器升压。超声电机为非线性容性负载, 需要进行阻抗匹配, 并保持电压和相移恒定。采用推挽电路作为驱动器拓扑, 分析了该驱动电路在不同性质负载情况下工作过程, 结果表明驱动器在感性负载时的开关管损耗较容性负载时小, 感性负载可提高驱动器效率和可靠性。给出 LLCC 谐振网络及其参数计算方法, 通过理论分析和仿真证明了电机谐振电压和相移与驱动条件可解耦, 且该 LLCC 谐振网络可使驱动电路的负载性质由容性转变为感性。用 TRUM-60

型超声电机进行实验, 结果证明了该方法的有效性。

关键词: 超声电机; 驱动; 推挽; LLCC; 谐振

0 引言

超声电机(ultrasonic motor, USM)是一种新型电机, 它利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动, 将弹性材料(定子)的微变形通过共振放大和摩擦耦合转换成转子或滑块的宏观运动^[1-4]。与传统电磁电机相比, 超声电机具有惯性小、响应快、不受磁场影响且其本身也不产生磁场的特点; 此外, 它还有重量轻、结构简单、噪声小、低速大扭矩以及可直接驱动负载等优点。超声电机目前已应用于宇宙飞船、火星探测器、导弹、核弹头等航空航天工程和军事领域, 以及自动调焦镜头和石英表等民用领域^[5-8]。

超声电机虽具有上述优点, 但因其内部参数的非线性及时变特性, 存在控制电路复杂等问题。针对超声电机内部参数的非线性及时变特性, 要求设计的驱动电路输出电压幅值及相位角不随频率和负载的变化而改变^[9-10]。当驱动电压为正弦波形时, 电机的机械振动特性最佳, 故谐振电路产生正弦波形最常用。谐振电路应用于超声电机时, 会出现电机在固定驱动频率下, 输出相电压幅值和相位容易因负载变动而改变的问题。常用的解决方法是利用输出电压反馈调整输入电压, 使其输出电压幅值为定值, 或设计相位互锁电路让各相的相角保持平衡, 但这些方法都增加了驱动器的复杂程度。

超声电机驱动电路的供电电压一般较低(约为 12V), 而其正常工作所需的电压幅值较高, 因此超声电机的驱动电路需要变压器来实现隔离和升压。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875123, 50735002); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2011CB707602); 江苏省自然科学基金(Bk2009373)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50875123, 50735002); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2011CB707602); Project Supported by National Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Bk2009373).

驱动电路可以选用的拓扑有推挽、半桥和全桥等。文献[11]提出了半桥拓扑下的一种 LLCC 谐振网络, 以实现输出电压及相移为定值, 但文中没有研究不同负载对半桥电路的影响, 且采用该方案的输出电压相移较大。在推挽电路中, 开关管驱动是共地的, 不需隔离, 电路结构较为简单, 特别适合低电压供电的超声电机驱动器, 是目前最常用的拓扑形式^[12-13]。本文采用推挽电路作为超声电机的驱动电路, 分析负载性质对驱动电路工作情况的影响, 设计 LLCC 谐振电路, 以满足电压幅值和相角不随负载和驱动频率变化而改变的设计要求。电机输出电压不需反馈回路控制, 电路结构简单、效率较高。

1 超声电机的推挽驱动电路

超声电机在谐振频率附近的工况, 可以用图 1(a)所示的等效电路来近似表示^[14], 图中 C_d 为压电陶瓷的夹持电容, L_{m0} 为电机质量效应的等效电感, C_{m0} 为弹性效应的等效电容, R_{m0} 为定子内机械损耗的等效电阻。 L_{m0} 、 C_{m0} 和 R_{m0} 构成动态支路, 它们决定了电机机电耦合特性, 该支路参数的确定不仅要考虑定子本身的因素, 还要考虑转子对定子的预压力产生的等效效应。在不改变电路外特性的前提下, 可将电机等效电路变换成图 1(c) 所示的 RC 并联电路, 其参数变换关系为

$$\begin{cases} L'_{m0} = L_{m0} - 1/(\omega^2 C_{m0}) \\ C = C_d - L'_{m0} / [R_{m0}^2 + (\omega L'_{m0})^2] \\ R = R_{m0} + (\omega L'_{m0})^2 / R_{m0} \end{cases} \quad (1)$$

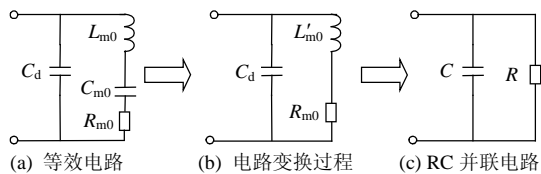


图 1 电机等效电路的变换

Fig. 1 Transformation of USM equivalent circuit

图 2 为超声电机推挽驱动电路的单相电路图。图中: D_1 、 D_2 、 C_1 、 C_2 分别为开关管 Q_1 、 Q_2 的体二极管和结电容; 图示虚框内为超声电机等效电路, 电机等效电容(C)和等效电阻(R)都随负载和驱动频率变化而改变, 由此可看出超声电机是非线性强容性负载; L_s 为目前常用的串联匹配电感, 为了获得较高的驱动电压及保证电机有较大的堵转转矩, L_s 的取值有一定限制。推挽驱动电路产生方波

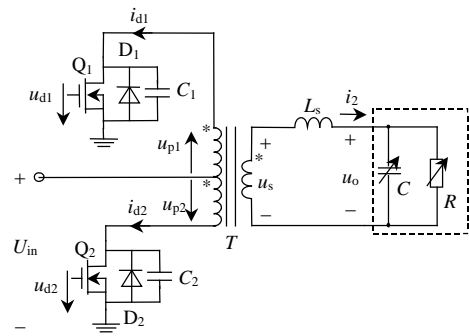


图 2 超声电机推挽驱动电路(单相)

Fig. 2 Push-pull driving circuit for USM (single phase)

电压, 该电压由变压器隔离并升压, 经过串联匹配电路谐振放大、滤波后得到正弦电压。该电压加到电机定子上, 激励电机工作。

从图 2 可以看出, 输出电压 u_o 为 L_s 和 C 谐振所得^[15], 因此 u_o 的幅值和相角因 C 的不同而改变。由于电机等效电容和等效电阻随负载和驱动频率的变化而改变, 因此电机电压幅值和相位无法保持恒定。由于材料和结构上的差异, 电机的两相电学特性无法完全一致, 致使两相电压幅值和相位不同。图 3 为使用 1.5 mH 串联电感驱动自制的 TRUM-60 型超声电机(电机电学参数见表 1)的两相电压波形。由图 3 可以看出, 不同频率下单相电压幅值相差很大, 两相电压幅值和相移都不同, 特别

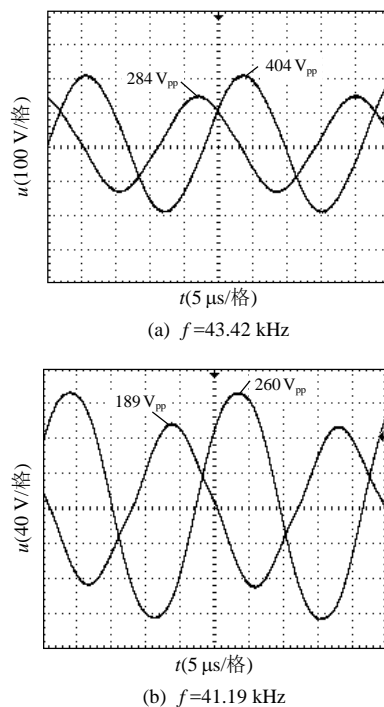


图 3 L_s 谐振时不同频率下两相电压

Fig. 3 Output voltages vs. frequency with L_s resonance

表 1 超声电机及谐振网络参数

Tab. 1 Parameters for USM and resonant network

f/kHz	C/nF	$R/\text{k}\Omega$	L_m/mH	L_s/mH	C_s/nF
38~42	6~7	2~6	2.6	1.0	15

是图 3(b)所示的两相电压相位差已远远超过了 90° ；这是使用单一串联电感谐振电路造成的，所以有必要研究其他形式的谐振电路。

2 负载特性对开关电路的影响

对驱动电路而言，阻性负载时的系统效率最高。超声电机为容性负载，因此需要谐振网络将其变为阻性，但由于电机本身的容性负载是变化的，固定结构和参数的谐振网络无法在全范围内都将其变为阻性，因此有必要分析感性和容性负载情况下驱动电路的工作情况^[16]。

图 4—5 分别给出了推挽驱动电路在容性和感性负载情况下的主要工作波形，各量的正方向如图 2 所示。图中： U_{in} 为驱动电路的输入电压； u_{d1} 、 u_{d2} 分别为开关管 Q_1 、 Q_2 的漏极电压。

图 4 中， t_0 时 Q_1 关断， i_{d1} 反向由 D_1 流通，因此 Q_1 为零电压关断； $[t_0, t_1]$ 死区时段内 i_{d1} 继续反向流动， $u_{d2}=2U_{in}+0.7$ (体二极管正向导通压降)； t_1 时刻开关管 Q_2 导通， $u_{d2}=0$ ，无论 Q_2 是否导通， $u_{p2}=U_{in}-u_{d2}$ 恒成立，因此在导通瞬间 u_{p2} 变化量为 $(2U_{in}+0.7)\text{V}$ ，该变化引起下方绕组中产生很大的脉冲电流，加剧了 Q_2 的开通损耗。同理， Q_1 导通时，上方绕组中也会产生很大的电流尖峰，开通损耗较大。

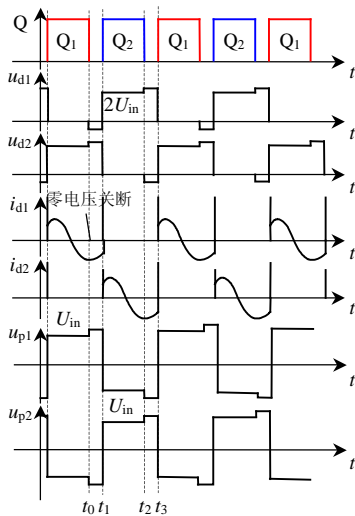


图 4 容性负载条件下电路主要工作波形
Fig. 4 Main waveform of circuit with capacitive characteristic load

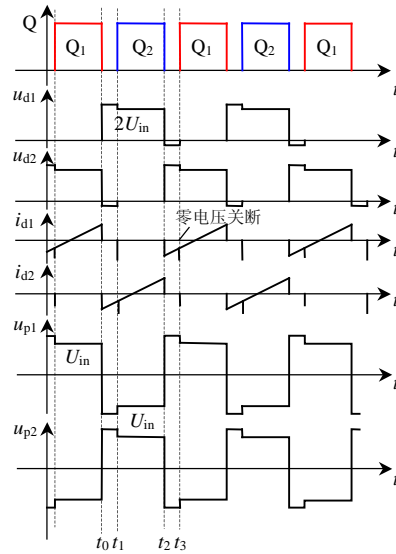


图 5 感性负载条件下电路主要工作波形
Fig. 5 Main waveform of circuit with inductive characteristic load

由以上分析可知，容性负载条件下，开关管在开通时存在很大的电流尖峰，开通损耗较大。

图 5 中， t_0 时 Q_1 关断， i_{d1} 由 D_2 续流； $[t_0, t_1]$ 死区时段内 i_{d1} 继续通过 D_2 续流，因此 $u_{d2}=-0.7\text{V}$ (体二极管正向导通压降)； t_1 时刻开关管 Q_2 导通，为零电压开通， $u_{d2}=0$ 。由于导通前后 $u_{p2}=U_{in}-u_{d2}$ ，因此在导通瞬间 u_{p2} 变化量为 0.7V ，该变化在下方绕组中引起的脉冲电流远远小于容性负载的情形，可以忽略不计。

对比以上 2 种负载情况可知，容性负载条件下，开关管在开通时存在很大的电流尖峰，开通损耗较大；因此，若谐振网络无法在全部工作区间内都使负载变为阻性，则应尽量匹配为感性，以减小开关管损耗，提高驱动器效率。

3 LLCC 谐振网络研究

由以上分析可知，在驱动电路和超声电机之间的谐振网络的功能为：使电机电压幅值和相位不随负载和驱动频率变化而改变；将驱动电路的负载变为阻性或感性。为此，本文提出图 6 所示的 LLCC

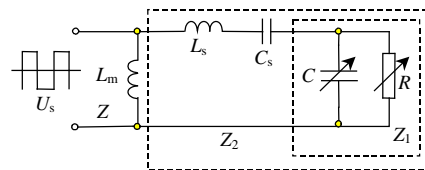


图 6 LLCC 谐振网络
Fig. 6 LLCC resonant network

谐振网络。图中： Z_1 表示超声电机阻抗，其等效电容和电阻可变； L_m 、 L_s 和 C_s 为外接无源元件，它们与电机电容 C 一起构成LLCC谐振网络，其中 Z_1 与 L_s 、 C_s 的总阻抗为 Z_2 。网络输入为高压方波信号 U_s ，输出为电机电压。

由此可得谐振网络电压增益及其相位：

$$G_V = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{(1 + \frac{C}{C_s} - \omega^2 L_s C) + j(\frac{\omega L_s}{R} - \frac{1}{\omega R C_s})} \quad (2)$$

$$\angle G_V = \arctg[(\frac{\omega L_s}{R} - \frac{1}{\omega R C_s}) / (1 + \frac{C}{C_s} - \omega^2 L_s C)] \quad (3)$$

由式(2)—(3)可知，当式(2)的分母虚部为0，而实部为1时，电压增益为1，此时谐振网络的相位为0，由此可得

$$\begin{cases} \frac{1}{R}(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}) = 0 \\ 1 + C(\frac{1}{C_s} - \omega^2 L_s) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

由于 R 一般较大(几kΩ)，而 C 较小(几nF)，因此当 L_s 和 C_s 在 ω 附近串联谐振时，式(4)近似成立，即电机电压的幅值和相位几乎不随频率和负载的变化而改变，尤其当 L_s 较小且 C_s 较大时，效果更明显。

谐振网络与超声电机的总阻抗为

$$Z = \frac{j\omega L_m Z_2}{j\omega L_m + Z_2} = \frac{Z_{up}}{Z_{down}} \quad (5)$$

其中，

$$\begin{cases} \angle Z_{up} = \arctg \frac{1 - \omega^2 L_s C_s}{\omega R (\omega^2 L_s C_s C - C - C_s)} \\ \angle Z_{down} = \arctg \frac{\omega R [C + C_s - \omega^2 C C_s (L_s + L_m)]}{1 - \omega^2 L_m C_s - \omega^2 L_s C_s} \end{cases} \quad (6)$$

当 $\angle Z_{up} = \angle Z_{down}$ 时，总阻抗虚部为0，驱动器负载为阻性，由此可得

$$C + C_s - \omega^2 C C_s (L_m + L_s) = 0 \quad (7)$$

由式(4)和式(7)可计算出满足上述谐振网络功能的网络参数，具体为

$$\begin{cases} \omega^2 L_s C_s = 1 \\ C + C_s - \omega^2 C C_s (L_m + L_s) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

为验证所提网络的正确性，本文使用表1所示的参数对谐振网络进行了仿真分析，结果如图7—8

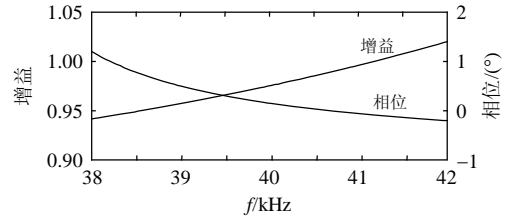


图7 电压增益及相位

Fig. 7 Voltage gain and phase of resonant network vs. frequency

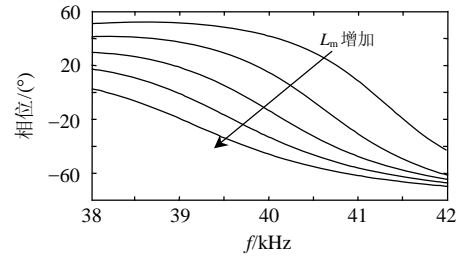


图8 总阻抗相角

Fig. 8 Phase of total impedance vs. frequency

所示，图7为电压增益及其相位与驱动频率的关系曲线，图8为 L_m 变化时总阻抗相角与驱动频率的关系曲线。

由图7可见，谐振网络的电压增益和相移都很小，满足了设计要求。由图8可见，总阻抗的相角随驱动频率变化而改变，且随着 L_m 的增加，总体向容性发展。由以上分析可知，应选择较小的 L_m ，以使总阻抗为阻性或感性。

4 实验结果

为验证以上分析的合理性，采用研究所自制的TRUM-60型超声电机进行实验验证。电机和谐振网络参数见表1。驱动电路输入电压 $U_{in}=12$ V，推挽电路变压器变比为1:15。实际上，可以利用变压器的副方主电感作为并联电感 L_m ，这样就可以省去 L_m 。为了得到感值与 L_m 相同的副方电感量，可以在变压器中加入一定气隙，本文在实验中采取了这种方法。

图9为不同频率下两相电压波形，表2为不同频率下单相电压的值。

由图9和表2可以看出，电机电压幅值和相移几乎不随驱动频率变化而改变，且两相电压大小能够保持一致，证明该LLCC谐振网络在电压幅值和相移与驱动条件解耦方面满足了设计要求。

图10为固定频率时电机输出电压与驱动器直

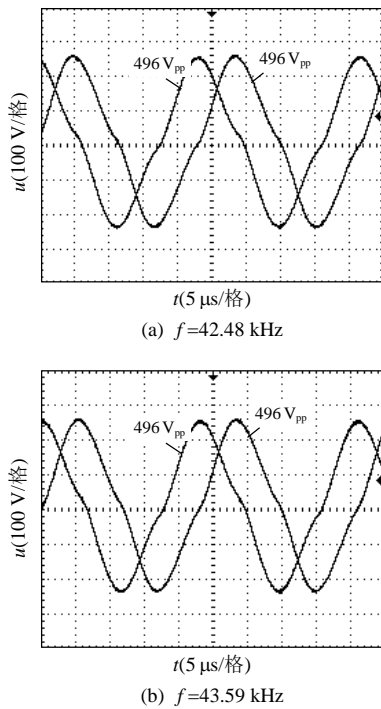


图 9 LLCC 谐振时不同频率下两相电压
Fig. 9 Output voltages vs. frequency with LLCC resonance

表 2 不同频率下的单相电压

Tab. 2 Output voltage vs. frequency

f/kHz	41.49	41.67	42.48	42.7	42.99	43.22	43.59
U_0/V_{pp}	496	492	496	496	492	496	496

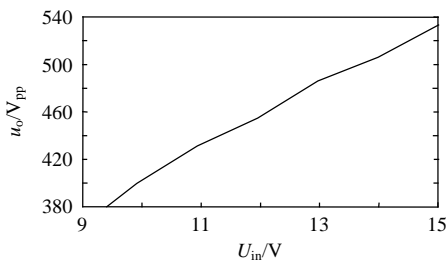


图 10 LLCC 谐振时输出电压与输入电压关系
Fig. 10 Output voltages vs. input voltage with LLCC resonance

流输入电压的关系。由图 10 可见，在排除测量误差后， U_{in} 和 u_o 之间呈现出较好的线性关系。

在本文提出的 LLCC 谐振网络中， L_s 和 C_s 两个参数主要影响输出电压的幅值及相移， L_m 影响驱动器负载性质从而影响驱动器效率。图 11 为电机空载时，谐振网络中有/无 L_m 两种情况下驱动器效率 η (即驱动器输出功率与驱动器输入功率之比) 随电机驱动频率的变化曲线。由图 11 可以看出，有 L_m 时 ($L_m=2.6\text{ mH}$) 驱动器效率明显提升，这主要是因为

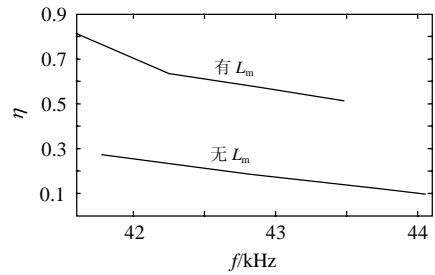


图 11 驱动器效率

Fig. 11 Efficiency of the driver

谐振网络中有了 L_m 后，驱动器阻抗由强容性变为近阻性，从而使得开关管的开关损耗减小以及功率因数提高所造成的。

5 结论

本文分析了超声电机推挽驱动电路在不同性质负载情况下工作过程，并针对传统串联电感谐振固有缺点，提出一种 LLCC 谐振网络，以实现电机驱动电压和相移与驱动条件的解耦，最后采用 TRUM-60 型超声电机进行了实验验证。所得结论如下：

- 1) 驱动电路负载为感性时可减小开关管的开关损耗，提高驱动器的可靠性和效率；
- 2) 理论分析表明该 LLCC 谐振网络可实现电机电压和相移与驱动条件的解耦，并给出参数计算方法；
- 3) 实验结果证明了本文所提方法的正确性。

参考文献

[1] Sashida T. Trial construction and operation of an ultrasonic vibration-driven motor[J]. Japan Applied Physics, 1982, 51(6): 713-720.

[2] Sashida T, Kenjo T. An introduction to ultrasonic motors [M]. London, UK: Oxford, 1993: 4-10.

[3] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜, 等. 行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-32.

Xia Changliang, Zheng Yao, Shi Tingna, et al. FEM Analysis stator vibration of traveling-wave type contact ultrasonic motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 25-32(in Chinese).

[4] 李华峰, 辜承林. 大转矩行波型超声波电机的研制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 67-70.

Li huafeng, Gu chenglin. Research on large torque travelling wave ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 67-70(in Chinese).

- [5] Ueha S, Tomikawa Y, Kurosawa M, et al. Ultrasonic motors theory and applications[M]. London, UK: Oxford Science Publications, 1993: 15-18.
- [6] 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 Chunsheng. Ultrasonic motor techniques for 21st century[J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 86-91(in Chinese).
- [7] 褚祥诚, 陈维山, 陈在礼. 超声波马达在美国的发展[J]. 压电与声光, 1999, 21(1): 37-40.
Zhe Xiangcheng, Chen Weishan, Chen Zaili. Development of ultrasonic motor in USA[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1999, 21(1): 37-40(in Chinese).
- [8] Izawa J, Shimizu T, Gomi H, et al. MR compatible manipulandum with ultrasonic motor for fMRI studies [C]/Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando: IEEE, 2006: 3850-3854.
- [9] Lin F J, Wai R J, Lin H H. An adaptive fuzzy-neural-network controller for ultrasonic motor drive using the LLC resonant technique[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 46(3): 715-727.
- [10] Li Rongyuan, Frohliche N, Bocker J. LLC-PWM inverter for driving high-power piezoelectric actuators[C]/2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poland: Poznan University of Technology & Polish Society for Theoretical and Applied Electrical Engineering, 2008: 159-164.
- [11] 林法正, 魏荣宗, 段柔勇. 超声波马达之驱动与智慧型控制[M]. 台中: 沧海书局, 1999: 73-89.
Lin Fazheng, Wei Rongzong, Duan Rouyong. Drive and intelligent control of ultrasonic motor[M]. Taizhong: Tsang Hai Publishing, 1999: 73-89(in Chinese).
- [12] 李华峰, 辜承林. 超声波电机的频率自动跟踪[J]. 压电与声光, 2003, 25(1): 36-38.
Li Huafeng, Gu Chenglin. Frequency tracking of ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25(1): 36-38(in Chinese).
- [13] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜. 行波型超声波电机 PWM 驱动控制系统研究[J]. 电力电子技术, 2001, 35(3): 14-16.
Xia Changliang, Zheng Yao, Shi Tingna. Study on PWM driving controlling system of traveling wave type ultrasonic motor[J]. Power Electronics, 2001, 35(3): 14-16(in Chinese).
- [14] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 226.
Zhao Chunsheng. Ultrasonic motors technologies and applications[M]. Beijing: Science Press, 2007: 226(in Chinese).
- [15] 史敬灼, 王海彦. 驱动超声波电机的推挽式变换器工作过程分析[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(1): 1-4.
Shi Jingzhuo, Wang Haiyan. Analysis of push-pull convertor used in ultrasonic motor drive[J]. Electrical machine and control application, 2009, 36(1): 1-4(in Chinese).
- [16] 颜佳佳, 阮新波, 李华峰, 等. 超声电机的软开关驱动电路[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 109-114.
Yan Jiajia, Ruan Xinbo, Li Huafeng, et al. Soft switching driving circuit for ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 109-114(in Chinese).



俞浦

收稿日期: 2010-09-21。

作者简介:

俞浦(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, ypu1983@yahoo.com.cn;

李华峰(1974), 男, 教授, 博士生导师, 从事超声电机及驱动控制系统的研究, lihuaf@nuaa.edu.cn;

黄卫清(1965), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超声电机技术及其应用研究。

(责任编辑 李婧妍)