

基于 LC 谐振的超声电机驱动器的研究

李华峰, 赵淳生

(南京航空航天大学超声电机研究中心, 江苏省 南京市 210016)

RESEARCH ON THE ULTRASONIC MOTOR DRIVER BASED ON LC RESONANT

LI Hua-feng, ZHAO Chun-sheng

(Research Center of Ultrasonic Motors, NUA, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: According to the capacitive characteristic of ultrasonic motor, a non-transformer driver scheme for ultrasonic motor using LC resonant is proposed in this paper. The circuit is theoretically analyzed and verified by simulation. The relationships of the amplitudes and energy efficiency of the harmonic wave for the output voltage with the driving duty ratio and resonant cycle number are analyzed in details. Based on this, the design criteria of the circuit are established. The circuit is applied to a 5mm ultrasonic motor. The output voltage is above 200V(V_{p-p}), the motor works well. It is proved that this circuit is both feasible and reliable for the drive of small-power USM, which makes it easier for the driver to realize integration.

KEY WORDS: Ultrasonic motor; Driver; Resonant; Miniature; Coupled inductance

摘要: 根据超声电机的容性负载特性, 提出了利用 LC 进行谐振升压的无变压器式驱动电路。分析了输出信号中各次谐波幅值和能量比与驱动信号占空比和谐振周期之间的关系, 据此提出了驱动电路的设计准则。应用此电路驱动直径为 5mm 的超声电机, 输出电压峰值达 200V 以上, 电机运转良好, 证明了此电路对于驱动小功率超声电机的实用性和可靠性, 为驱动器的进一步集成化奠定了基础。

关键词: 超声电机; 驱动器; 谐振; 小型化; 匹配电感

1 引言

超声波电机 (UltraSonic Motor, USM) 是使用功能陶瓷材料构成的一种新型电机, 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]。由于其独特的运行机理, USM

具有传统电磁式电机不具备的优点: 结构简单紧凑, 低速大转矩, 不需减速机构、形式灵活多样等, 已在航空航天、机器人、工业自动化等领域得到了应用^[5-7]。有关专家预言: 超声电机将有可能部分取代微、小型的传统电磁电机, 而得到广泛的应用。

但是要驱动超声电机, 必须配备专用的驱动器, 这为超声电机取代传统的电磁电机设置了障碍。如果驱动器的体积过大, 将更加阻碍超声电机的推广。为此, 在保证满足驱动器基本要求的前提下, 应尽可能地缩小驱动器的体积, 以在更多领域充分发挥超声电机的独特优点^[8-9]。

由于驱动超声电机的电压幅值要求较高, 其峰值一般要达到 100V 以上, 因此目前常用的驱动器都使用如图 1 所示的变压器推挽电路^[10-11], 其中变压器的作用主要是隔离和升压, 而它的存在却极大地阻碍了驱动器的小型化, 影响了超声电机的推广应用。本文利用 LC 谐振技术获得了超声电机所需要的高电压, 极大地缩小了驱动器体积, 初步解决了这一工程问题, 并为驱动器进一步微型化和集成化奠定了基础。

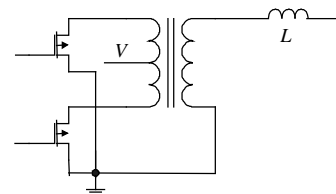


图 1 超声电机变压器推挽电路
Fig. 1 Push-pull circuit for USM

2 系统构成

超声电机在谐振频率附近, 可以用图 2(a)的等效电路来表示, L_m 、 C_m 和 R_m 构成动态支路, 参数的大小不仅考虑定子本身的因素, 还要包括转子对

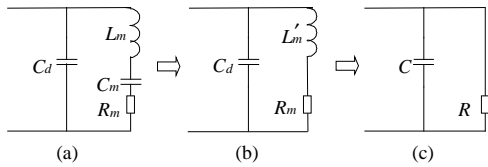
基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50235010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50235010).

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 2(c)所示的 RC 并联电路，其参数变换关系为

$$\begin{cases} L'_m = L_m - \frac{1}{\omega^2 C_m} \\ C = C_d - \frac{L'_m}{R_m^2 + (\omega L'_m)^2} \\ R = R_m + \frac{(\omega L'_m)^2}{R_m} \end{cases}$$

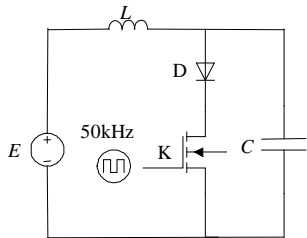
由于超声电机一般在机械谐振点和反谐振点之间运行，串联支路的阻抗很大，电机对外呈容性，因此可忽略串联电路的影响，略去图 2(c)中的 $R^{[12]}$ 。



注： C_d —压电陶瓷的夹持电容； R_m —一定子内机械损耗的等效电阻； C_m —弹性效应的等效电容； L_m —电机质量效应的等效电感。

图 2 电机等效电路的变换
Fig. 2 Transform of USM equivalent circuit

使用无变压器式的 LC 谐振升压电路如图 3 所示。



注： L —串联电感； K —开关； D —超快恢复二极管； C —超声电机电容。

图 3 无变压器驱动基本电路
Fig. 3 The non-transformer driving circuit for USM

电路工作原理为：当 K 导通时，电源向电感 L 储能；开关断开时，电感中的储能向电容 C 释放并与其谐振，整个电路为带初始条件的 LC 串联谐振电路。图中的开关 K 为可耐高压的 MOSFET。需要注意的是，文献[13]所提出的电路中没有二极管 D ，而由于 MOSFET 内部有一个反并联体二极管，在电容 C 电压反相时会通过此二极管放电，使得输出电压只有正半波。为了防止此种情况的出现，本文的电路中串联了一个超快恢复二极管 D ，使得在开关断开期间 LC 能形成完整的振荡，以获得高的输出电压，如图 4 所示。

电路的具体工作方式如下：

假设开关 K 的波形如图 5 所示。 $t=0$ 时开关闭

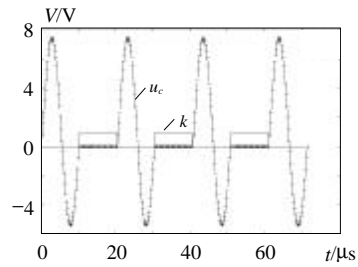


图 4 LC 谐振升压电路波形
Fig. 4 Simulation of voltage waveform for LC resonant circuit

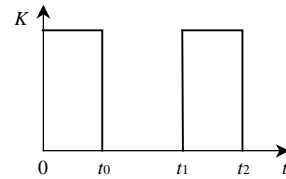


图 5 开关信号波形
Fig. 5 The waveform of switch signal

合； $t=t_0$ 时开关断开； $t=t_1$ 时开关再次闭合。开关周期 $T=t_2-t_0$ ，占空比 $D = \frac{t_0}{T}$ 。假设在开关断开期间，电感 L 与电容 C 的谐振设定正好为一个周期，则电感 L 可由 $L = \frac{(1-D)^2 T^2}{(2\pi)^2 C}$ 估算得到，其中 T 为开关信号的周期， D 为开关信号的占空比。

工作阶段 I（开关闭合）：

$t=0$ 时开关闭合，原电路可等效为图 6。电容 C 被开关短路，而电源通过开关与电感 L 构成回路，电流 i 线性增加，即 $i = i_0 + Et/L$ 。当电流不连续时 $i = Et/L$ 。

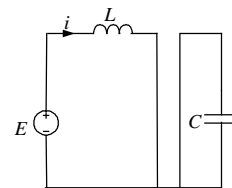


图 6 开关闭合时的等效电路
Fig. 6 Equivalent circuit when switch is ON

工作阶段 II（开关断开）：

$t=t_0$ 时，开关 K 断开， L 与 C 组成谐振电路，电路等效为图 7，此时的状态方程为

$$\begin{cases} C \frac{du_c}{dt} = i \\ L \frac{di}{dt} = E - u_c \end{cases} \quad (1)$$

当电流不连续时，方程的初始条件为 $i(t_1) = \frac{EDT}{L}$ ， $u_c(t_1)=0$ ，由此可得谐振阶段电容电压 $u_c(t)$ 和电感电

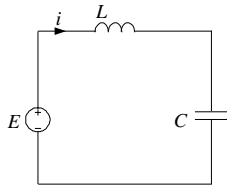


图7 开关断开时的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit when switch is OFF

流 $i(t)$ 为

$$\begin{cases} u_c = E[1 - \cos \omega(t - t_0) + DT\omega \sin \omega(t - t_0)] \\ i = EC\omega[\sin \omega(t - t_0) + DT\omega \cos \omega(t - t_0)] \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\omega = \frac{2\pi}{(1-D)T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 为谐振角频率。

令 $\frac{du_c}{dt} = 0$, 可得 u_c 的最大值为

$$u_c(t)_{\max} = E(1 + \sqrt{1 + (DT\omega)^2}) \quad (3)$$

以上分析是基于开关断开期间 L 与 C 只谐振一个周期而得出的。实际上, 可以选择不同的 L , 以在关断期间谐振 $k(k=1, 2, 3, \dots)$ 个周期, 此时的电感为

$$L = \frac{(1-D)^2 T^2}{(2\pi k)^2 C} \quad (4)$$

而谐振角频率应为

$$\omega = \frac{2\pi k}{(1-D)T} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)中, 可得

$$u_c(t)_{\max} = E(1 + \sqrt{1 + (\frac{2\pi k D}{1-D})^2}) \quad (6)$$

由此可得不同 k 下最大电压与占空比之间的关系, 如图8所示。由图可见, 同一占空比下, 随着关断期间周波数的增加, 最大输出电压也增加。因此, 应尽量选择多的谐振周波数, 以得到足够高的输出电压; 而在同一谐振周波数下, 最大电压随占空比的增加而增加。这是可以理解的, 因为占空比越大, 电感中的储能越多, 从而谐振时的电压越高。

然而, 由图4可以看出, 加载到电机两端的电压波形并不是一个正弦波, 其中含有丰富的谐波成分。

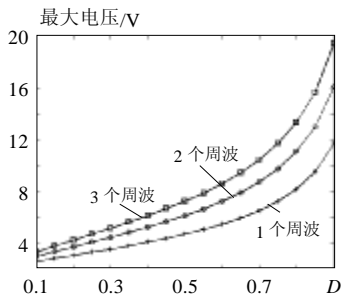


图8 不同周波下的最大电压

Fig. 8 Maximum voltage under deferent resonant cycles

分。为了高效地驱动超声电机, 需要选择合适的谐波, 因此有必要对输出电压进行傅立叶分析。

按照傅立叶变换, 输出信号可以写为

$$u_c = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) = a_0 +$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(kx + b) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} f_k(x) \quad (7)$$

令: $n = \frac{\omega T}{2\pi}$; $m = DT\omega$; $a = (1-D)2\pi$

则式(7)中的系数为

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_c \cos kx dx = \frac{E}{\pi} \left\{ \frac{1}{k} \sin ka - \frac{\sin(n+k)a}{2(n+k)} - \frac{\sin(n-k)a}{2(n-k)} + \frac{m}{2} \left[\frac{1 - \cos(n+k)a}{n+k} + \frac{1 - \cos(n-k)a}{n-k} \right] \right\}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_c \sin kx dx = \frac{E}{\pi} \left\{ \frac{1 - \cos ka}{k} - \frac{1 - \cos(n+k)a}{2(n+k)} - \frac{1 - \cos(n-k)a}{2(n-k)} + \frac{m}{2} \left[\frac{\sin(n+k)a}{n+k} - \frac{\sin(n-k)a}{n-k} \right] \right\}$$

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

由此可得不同占空比下各次谐波幅值的大小, 见图9、10。由图可见, 关断期间谐振周波数不同, 不仅各次谐波的幅值不同, 它们之间的比例关系也有很大的区别。为选择合适的线路参数, 有必要对输出信号进行更进一步的分析。

由于输出信号中谐波成分复杂, 各次谐波的能量在输出信号中的比例也会有很大的差别。而除了

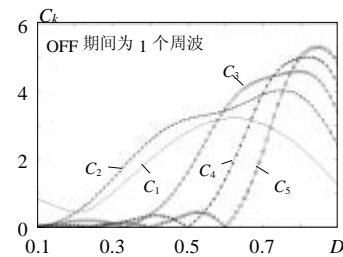


图9 谐波幅值与占空比的关系 (关断期间为1个周波)

Fig. 9 Relations of amplitudes of harmonic waves with driving duty ratio (1 resonant cycle when switch is OFF)

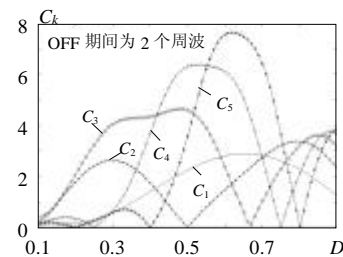


图10 谐波幅值与占空比的关系 (关断期间为2个周波)

Fig. 10 Relations of amplitudes of harmonic waves with driving duty ratio (2 resonant cycles when switch is OFF)

工作频率外的其他次谐波能量都被消耗掉了，因此，为有效选择合适的谐波以高效地驱动超声电机，有必要计算不同谐波的能量与输出信号能量的比例关系。

输出信号的能量为^[14-15]

$$W = \int_0^a u_c^2 dx = \int_0^a (1 - \cos nx + DTwsin nx)^2 dx \quad (8)$$

而谐波的能量为

$$W_k = \int_{-\pi}^{\pi} f_k^2(x) dx = (a_k^2 + b_k^2)\pi \quad (9)$$

定义谐波的能量利用率为

$$R = \frac{W_k}{W}$$

由此可得不同谐振周波数情况下各次谐波能量利用率与占空比之间的关系，见图 11、12。

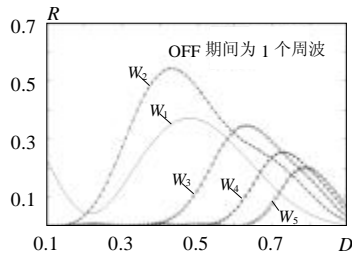


图 11 能量利用率与占空比的关系 (关断期间 1 个周波)
 Fig. 11 Relations of energy efficiency of harmonic waves with driving duty ratio (1 resonant cycle when switch is OFF)

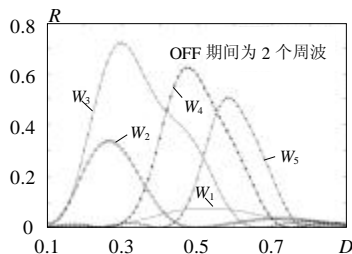


图 12 能量利用率与占空比的关系 (关断期间 2 个周波)
 Fig. 12 Relations of energy efficiency of harmonic waves with driving duty ratio (2 resonant cycles when switch is OFF)

由以上仿真结果可以看出，当关断期间为 1 个周波时，可选择占空比为 0.4 左右的 2 次谐波用以驱动超声电机，此时的谐波幅值和能量利用率都相对较高；而当 OFF 期间为 2 个周波时，宜选择占空比为 0.3 左右的 3 次谐波进行驱动，此时不仅其谐波幅值较高，能量利用率也是最高的。具体如何选择需要根据实际情况来确定。

3 实验结果

为验证所设计驱动器的合理性，本文以本研究中心自制的直径为 5mm 的超声电机为研究对象。

电机的夹持电容为 0.56nF，驱动频率为 75kHz，匹配电感选为 2.7mH。实验输出波形见图 13、14。实验证明这种驱动方式的输出电压峰峰值可达 200V 以上，足以驱动本超声电机，且运转良好，证明了这种驱动方式的有效性。

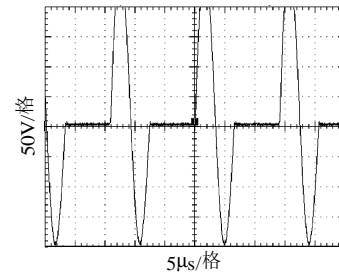


图 13 实际的驱动波形 (关断期间为 1 个周波)
 Fig. 13 Actual waveform (1 resonant cycle when switch is OFF)

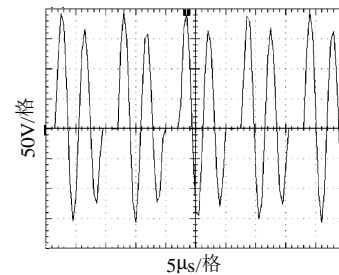


图 14 实际的驱动波形 (关断期间为 2 个周波)
 Fig. 14 Actual waveform (2 resonant cycles when switch is OFF)

此外，利用式(4)计算的电感只是个参考值，实验中应在其附近选择。电感值不同，关断期间产生的波形也不同，有时会形成稍多于完整谐波周期的波形，此时电机运转不好。因此，电感的选择应比式(4)的值稍大些，以形成完整或稍小于完整谐振周期的波形。

4 结论

根据超声电机呈容性的负载特性，本文给出了一个基于 LC 谐振的无变压器的驱动器。通过选择不同的电感和不同的驱动信号占空比，可以选用不同的谐波来驱动小功率超声电机，以获得足够高的驱动电压和最优的能量利用率。通过成功驱动一台两相 5mm 的杆式超声电机，证明了该驱动器结构简单，实用可靠，其体积较有变压器的驱动器至少减少了 1/2，为小功率超声电机的推广奠定了基础。

参考文献

[1] Ueha S, Tomikawa Y, Kurosawa M *et al.* Ultrasonic motors: theory and applications[M]. Oxford, 1993.
 [2] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜. 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. FEM Analysis on stator vibration of traveling-wave type contact ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 25-32.
- [3] 刘俊标, 黄卫清, 赵淳生. 圆柱-球体三自由度超声电机运动机理研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(4): 609-611.
Liu Junbiao, Huang Weiqing, Zhao Chunsheng. Study on the motion mechanism of a cylinder-sphere ultrasonic motor with three-degree of freedom[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(4): 609-611.
- [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.
- [5] 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.
- [6] 纪科辉, 郭吉丰, 刘晓. 超声波电机的步进特性和步进定位控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 71-75.
Ji Kehui, Guo Jifeng, Liu Xiao. Steeping characteristic of ultrasonic motor and its stepping-positioning control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 71-75.
- [7] 刘锦波, 陈永校. 超声波电机定转子接触的摩擦传动模型及其试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 59-63.
Liu Jinbo, Chen Yongxiao. Investigation on control model of ultrasonic motor and its experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 59-63.
- [8] Bai Dongzhe, Ishii T, Nakamura K. An ultrasonic motor driven by the phase-velocity difference between two traveling waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 51(6): 680-685.
- [9] Woo K H, Dong Shuxiang, Pitak L. Novel method for driving the ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2002, 49(10): 1356-1362.
- [10] 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 & Acoustooptics, 2003, 25(1): 36-38.
- [11] 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.
- [12] Sherrit S, Wiederick H D *et al.* Accurate equivalent circuits for unloaded piezoelectric resonators[J]. IEEE, Ultrasonics Symposium, Proceedings, IEEE, 1997, 2(2): 931-935.
- [13] 顾菊平, 胡敏强, 石斌, 等. 超声波电机谐振升压式驱动技术研究, 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 49-52.
Gu Juping, Hu Minqiang, Shi Bin *et al.* Research on the resonant booster of ultrasonic motor driving[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 49-52.
- [14] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [15] 秦曾煌. 电工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

收稿日期: 2005-09-29。

作者简介:

李华峰 (1974-), 男, 工学博士, 副教授, 从事超声波电机及其驱动控制系统的研究;

赵淳生 (1938-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事压电超声马达、机械设备故障诊断、模态实验和分析等研究。