超声电机驱动电源整流斩波电路设计

蒋侨，沈竞

78156 部队

摘　要： 超声电机(简称USM)是微型电机领域中的一种新型电机，具有控制精度高、体积小、响应快、转速低、不受电磁干扰等诸多优点，在微型机械、精密仪器、航空航天、汽车、医疗及军事等领域被广泛应用。但由于USM具有特殊的结构和运行机理，在USM驱动控制系统中，一般是通过控制斩波电路控制USM的运行速度，所以斩波电路的优劣直接影响电机的运行性能。本文根据USM驱动电源的特点，设计了USM驱动电源整流和斩波电路；最后通过电路仿真实验，满足了设计的要求。

关键词： USM驱动电源，整流和斩波电路，运行速度

Abstract: Ultrasonic motor (USM) is a new motor in the micro-motor field, with high control accuracy, small size, fast response, low revolving speed, anti-electromagnetic interference, and many other advantages. It is used in micro machinery, precision instruments, aerospace, automobile, medical and military fields widely. But USM has a special structure and operating mechanism. In the USM driving control system, the operation speed of the USM is controlled by controlling the chopper circuit, so the advantages and disadvantages of the chopper circuit have a direct impact on the performance of the motor. According to the characteristics of USM driving power supply, this paper designs the rectifier and chopper circuit of USM drive power supply; Finally, through the circuit simulation experiment, the requirement of the design is satisfied.

Keywords: USM driving power supply, Rectifying and chopping circuit, running speed

USM 工作原理是利用压电晶体的逆压电效应，把超声频段的电信号加到压电晶体构成的定子上，使定子表面产生一定轨迹的微幅机械振动，通过与转子间的摩擦作用来驱动转子宏观的运动。其驱动电源整流斩波电路一般需要输出一定范围内大小可调的直流电压；再经过谐振逆变最后输出峰 - 峰值在 200V~450V、频率为 40kHz 的正

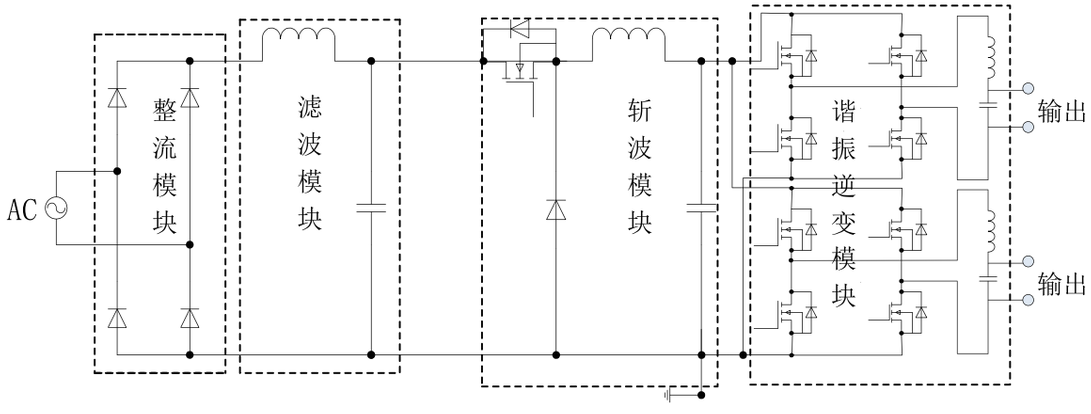


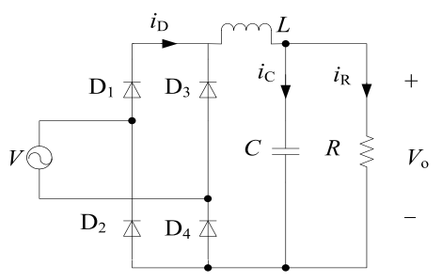
图 1　USM 功率变换电路原理图

Fig1　The principle diagram of USM power conversion circuit

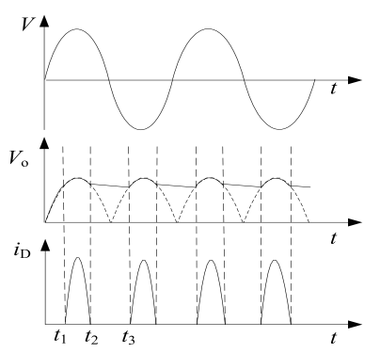
弦交流电压。如图 1 所示，主要由整流滤波模块、斩波模块和谐振逆变模块组成，这里主要对整流和斩波模块进行分析设计。其工作过程是：首先 220V/50Hz 交流市电经过不可控整流模块和低通滤波电路得到大约 310V 左右的不可控直流电压 [1]；然后不可控直流电压经过 PWM 信号控制的斩波调压模块，得到一定范围内大小可调的直流电压；最后可调直流电压经过两个负载型全桥逆变器作用，可得到两路高频正弦交流电压。控制方式上具体过程是通过 PWM 信号对斩波调压电路中开关管的控制来调整正弦交流电压输出幅值，从而实现对 USM 的速度控制 [2]。下面分别对整流滤波模块和斩波模块进行设计。

1 整流滤波电路

整流滤波电路的作用是把 220V 的交流电压转化为平稳的直流电压，以使电路可进行 DC-DC 调压变换 [3]。本文所用的整流滤波电路由四只整流二极管和一只电解电容构成，如图 2(a) 所示。其工作过程为：当 V 为正半周期时，整流二极管 D_1、D_4 导通，D_2、D_3 截止，当 V 在上升过程中，对电容进行充电，其两端电压 $V=V_C$；当 V 到达峰值下降过程中，最初一段时间内有 $V > V_C$，电压对电容继续充电，同时电容以 $\tau=R_LC$ 向负载供电，整流二极管、继续导通，其过程如 t_1~t_2 时刻所示；当 V 下降一段时间后，此时有 $V < V_C$，整流二极管 D_1、D_4 关断，电容不再充电，但继续放电，且放电速率小于输入电压 V 下降速率，其过程如 t_2~t_3 时刻所示。当 V 为负半周期时，整流二极管 D_2、D_3 导通，D_1、D_4 截止，其工作过程与正半周期类似，具体变化过程如图 2(b) 所示。在 t_1~t_2 时刻，二极管导通，电容既充电又放电，二极管中电流呈尖峰状；在 t_2~t_3 时刻，二极管关断，电容不充电只放电，电容电压 V_C 减小，并按指数曲线下降。为了使整流滤波后输出电压纹波更小，并防止尖峰电流对二极管的影响，实际电路中一般还需要在整流桥后串联一个电感。



（a） 整流滤波电路



（b） 整流滤波电路波形图

图 2 整流滤波电路及波形

Fig. 2 The circuit and circuit waveform of rectifier filter

根据电路设计性能指标要求，整流滤波输出约为 310V 左右电压，而电源功率相对较小，则电路中电流也较小。在理论计算基础上，充分考虑实际电路的特性，可选用耐压为 600V/1.5A 的二极管、100uH 的电感和 70uF/450V 的电容。

2 斩波电路

现有直流斩波电路按拓扑结构中有无变压器电气隔离，可将其分为不隔离型直流变换器和隔离型直流变换器。其中不隔离型直流变换器又可分为：降压 Buck 型、升压 Boost 型、降 - 升压 Buck-Boost 型、Cuk 型、Sepic 型和 Zeta 型变换器。由于降压 Buck 型电路结构简单，理论实践经验充分，所以选用 Buck 电路作为斩波电波电路。

(1) Buck 主要器件选择

高频开关电源系统频率受制于功率开关器件，而通过

表 1 GTR、MOSFET 和 IGBT 主要特性指数比较表

Tabl.1 The main characteristic index comparisons of GTR、MOSFET and IGBT

项目	GTR	MOSFET	IGBT
驱动模式	电流	电压	电压
驱动电路	复杂	简单	简单
驱动功率	高	低	低
输入阻抗	低	高	高
开关速度	慢	快	中
工作频率	较低	高	中
饱和压降	低	高	低

表 1 对常用的电力晶体管 GTR、绝缘栅型场效应晶体管 MOSFET 和绝缘栅双极晶体管 IGBT 对比[4]，以及结合现实需求及性价比，将选用 MOSFET 较为合理。具体可用 IRFP460、MUR460 分别作为 Buck 电路主开关管和续流二极管。

(2) Buck 变换电路结构和原理

图 3(a) 所示为 Buck 调压电路，电感 L 和电容 C 组成低通滤波器对输出进行滤波，以尽可能降低输出电压脉动；二极管 D 为续流二极管，用来消除电感储能对开关造成的不利影响。图 3(b) 给出了连续导电模式下的电流电压波形图，当开关管导通时，二极管 D 关断，电感上受到一正电压 $V_L=V_D-V_0$ 的作用，电感电流 i_L 线性增长，电感储能；当开关管断开时，电感储能使 i_L 继续流通，此时 i_L 流经二极管，线性下降，则有 $V_L=-V_0$。在稳态运行时，第二个周期的波形是重复的，所以在一个周期内对电感电压 V_L 的积分为零[5]。

由此可得：

$$\int_0^{Ts} V_L dt = \int_0^{Ton} V_L dt + \int_{Ton}^{Ts} V_L dt = 0 \tag{1}$$

其中，T_S 为一周期，T_{on} 为一周期中开关管导通时间。在 0~T_{on} 时间内，$V_L=V_D-V_0$，在 T_{on}~T_S 时间内，开关管关断，V_L~$-V_0$，代入 (1) 式可得：

$$T_{on}\left(V_D - V_0\right) = V_0\left(T_S - T_{on}\right) \tag{2}$$

化简得：$\dfrac{V_0}{V_D} = \dfrac{T_{on}}{T_S} = \delta$ (3)

其中为开关管接通时间占空比。

(3) Buck 变换电路参数计算

由的计算公式可得其范围为：

$$\frac{V_{O(\min)}}{V_{I(\max)}} < \delta < \frac{V_{O(\max)}}{V_{I(\min)}} \tag{4}$$

其中，V_I 为 Buck 电路输入电压，V_O 为 Buck 电路输出电压。根据整流滤波电路后输出 310V 左右电压，以及保留 50V 裕量，可得输入：$V_{I\ (\min)}$ =260V，$V_{I\ (\max)}$ =360V；同时再根据 USM 驱动电源要求输出电压峰 - 峰值为 200V~450V，设计 Buck 电路输出：$V_{O\ (\max)}$ =240V，$V_{O\ (\min)}$ =20V。由此得出：0.056 < δ < 0.92。

Buck 调压电路在临界状态下，其电感表达式为：

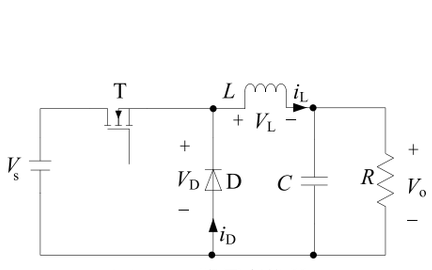
$$L_C = \frac{V_O}{2I_O f}(1-\delta_1) \tag{5}$$

其中，V_O 为 Buck 电路输出电压；I_O 为 Buck 电路输出电流；f 为开关频率；δ_1 为占空比。在临界状态下，取 V_O=20V，I_O=0.05A，δ_1=0.056 ，f=20kHz，代入式 (5)，可得：$L_C \approx 9$ mH。

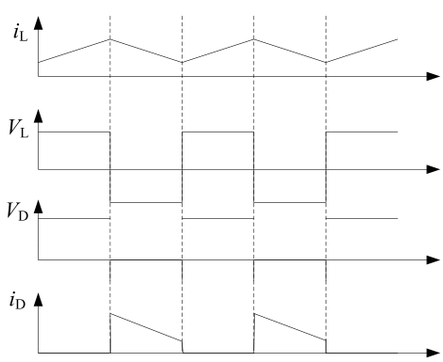
通过对 Buck 调压电路进行分析，计算出滤波电容为：

$$C = \frac{V_O(1-\delta_1)}{8L\Delta V_O f^2} = \frac{(1-\delta_1)}{8L(\Delta V_O/V_O)f^2} \tag{6}$$

其中，ΔV_O 表示纹波电压；可设置纹波系数 ΔV_O/



（a）Buck降压变换器



（b） Buck变换器CCM模式波形

图 3 Buck 电路图及波形

Fig.3 The circuit and circuit waveform of Buck converter

V_O=0.1%，并把数据 δ_1=0.056 ，f=20kHz，$L_C \approx$ 9mH 代入可得 C=30uF。

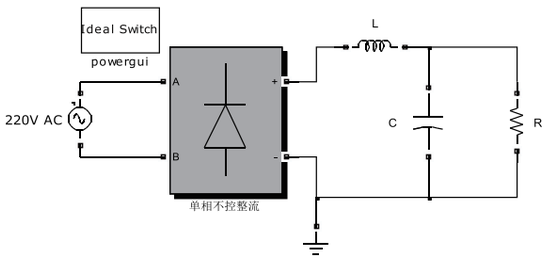


图 4 整流滤波器仿真电路图

Fig.4 The simulation diagram of rectifier filter circuit

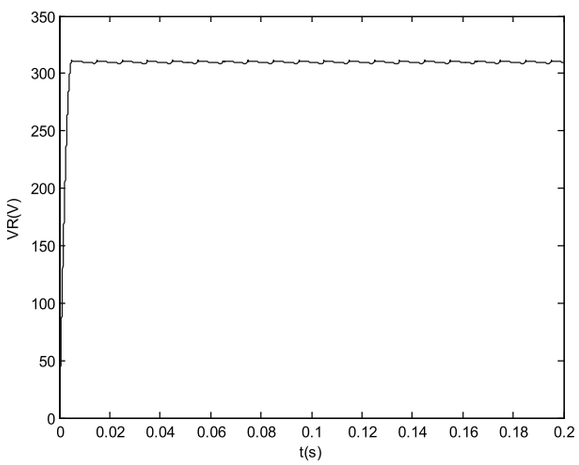


图 5 整流滤波仿真电路输出电压波形

Fig.5 The output voltage waveform of rectifier filter circuit

3 电路仿真

按照所设计的电路结构和元件参数，下面分别对整流滤波电路、Buck 调压电路进行仿真分析，以验证该电路设计的合理性和正确性。

(1) 整流滤波电路仿真

根据第一节对整流滤波电路的分析，搭建整流滤波器的仿真电路如图 4 所示，图中具体参数为：交流电压有效值 V=220V，f=50Hz，电感 L=300uH，电容 C=4700uF，等效负载 R=1000Ω。整流滤波后输出直流电压如图 5 所示。

由图 5 仿真电路输出电压波形可知，220V/50Hz 交流市电经过所设计的整流滤波电路后可得到大约 310V 的直流电压，满足设计要求。

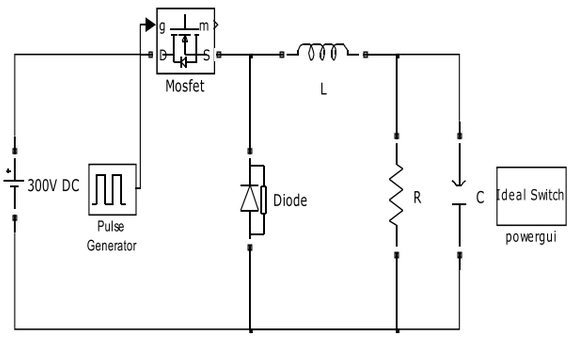


图 6 Buck 变换器的仿真电路图

Fig.6 The simulation diagram of Buck converter circuit

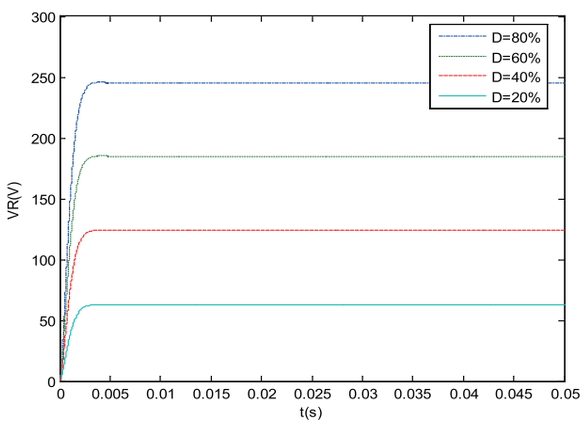


图 7 Buck 变换器不同占空比输出电压波形

Fig.7 The output voltage waveform of the Buck converter with different duty cycles

(2)Buck 调压电路仿真

根据第二节对 Buck 调压电路的分析，搭建其仿真电路如图 6 所示，图中仿真电路中的具体参数为：直流电压 V=300V，电感 L=9mH，电容 C=30uF，取等效负载 R=10Ω，当开关管的占空比 δ 分别取 20%、40%、60% 和 80% 时，由公式可以理论计算出负载两端输出电压幅值分别为 60V、120V、180V、240V，其仿真输出负载两端电压幅值如图 7 所示。

由图 7 可知，Buck 调压电路仿真输出电压分别为 60V、120V、180V、240V，与理论计算值相同。由此可知，通过对 PWM 信号的占空比进行控制，就可以实现对 Buck 电路输出电压幅值的调节；并且 PWM 控制信号分辨率越高，其输出电压精度就越高，满足电路工作的要求。

下转164页