

SPWM 控制算法的 Matlab 仿真和失真度分析

余乐咏, 张小妍, 范 明, 季国林

(中航工业航空动力控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 针对航空发动机数字电子控制器的实时性和高性能要求, 需保证数控系统中的传感器激励信号的高精度和低失真度, 使传感器提供更准确地反馈信号以参与航空发动机数控系统的控制。基于数字电子控制器的硬件实现, 分析和总结了在航空发动机数控系统中常见的传感器激励信号的发生方法, 计算出了几种方法中对应的开启和关闭时间, 并指出了各种方法的优缺点。最后提出了 1 种在硬件实现前的准确、可行的针对 SPWM 激励波形的仿真方法。详细描述了利用 SPWM 技术发生正弦信号的基本原理和几种常用方法中正弦信号的实际输出值对于理想输出值的逼近方法, 并着重阐述了利用 Matlab 数学工具仿真生成 SPWM 信号及计算其失真度的方法, 最后得出各种方法的实际输出效果。

关键词: 正弦波脉冲宽度调制; 可编程逻辑门阵列; Matlab; 谐波失真度; 数字电子控制器; 数控系统; 航空发动机

中图分类号: V247.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.05.006

Research on Matlab Simulation and THD Analysis for SPWM Control Algorithm

YU Le-yong, ZHANG Xiao-yan, FAN Ming, JI Guo-lin

(AVIC Aviation Motor Control System Institute, Wuxi Nanjing 214063 China)

Abstract: For the real time and high performance requirement of aeroengine digital control system, the output of the high precise and low Total Harmonic Distortion (THD) excitation signal of the transducer should be guaranteed to more accurately provide signal acquisition for the control of aeroengine digital control system. Based on the hardware realization of digital electronic controller analysis, several common relevant solutions of the transducer excitation in the engineering application of aeroengine digital control system were summarized. The opening time and the turn-off time were calculated and advantages and disadvantages of every method were performed. Finally, an accurate and feasible simulation method for the SPWM excitation waveform was proposed before the hardware implementation. It described the basic principles in the generation of SPWM in details and the approximate calculation method of the actual output value of the sine signal in methods which described above for the ideal output value, and emphatically expounded the Matlab simulation, THD calculation and the actual output effect by using mathematical tool of Matlab.

Key words: SPWM; FPGA; Matlab; THD; digital controller; digital control system; aeroengine

0 引言

正弦波脉冲宽度调制 (SPWM) 技术不仅在交流电机变频调速和直流电源逆变等场合有着广泛应用, 还经常用在航空发动机传感器成附件的激励信号发生上^[1]。特别是在小信号的处理电路中, 常利用逻辑处理单元完成 SPWM 激励信号发生, 并且在信号调理后通过高速 AD 采集给逻辑处理单元进行分析和监视。

本文介绍了 SPWM 的工作原理以及一些常用的 SPWM 波发生方法, 并给出开启和关断时间的计算方法。此外, 鉴于 Matlab 中的动态仿真工具 Simulink 可提供强大的计算分析和仿真功能^[2], 详述了具体的 Simulink 仿真实现方法, 并且通过仿真得出各方案的失真度。

1 原理

脉冲宽度调制技术 (PWM), 是指以面积等效原

收稿日期: 2016-03-01 基金项目: 国家重大基础研究项目资助

作者简介: 余乐咏 (1985), 男, 硕士, 工程师, 主要从事航空发动机数字电子控制器电子硬件研发工作; E-mail: 151433542@qq.com。

引用格式: 余乐咏, 张小妍, 范明, 等. SPWM 控制算法的 Matlab 仿真和失真度分析[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 32-37. YU Leyong, ZHANG Xiaoyan, FAN Ming, et al. Research on matlab simulation and THD analysis for SPWM control algorithm[J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 32-37.

理为基础理论,通过对一系列的宽度调制发生所要求的波形的技术。而正弦脉宽调制技术(SPWM)则是将每个周期内的多个脉冲作自然或规则的宽度调制,使其依次调制出相当于正弦函数值的相位角和面积等效于正弦波的脉冲序列,最后形成等幅不等宽的正弦化波形输出^[2]。通过改变 PWM 输出的脉冲宽度,使得输出电压的平均值可以无限逼近正弦波,在对传感器发生激励信号时多有应用。

当 SPWM 波的载波比有限提高时,其正弦量面积平均值的理论精度就会越高,谐波分量和输出波形的失真程度将随之减小,但过大的载波比也意味着极高的开关频率,随之带来的是开关管高功率损耗,甚至无法满足过高的开关频率。因此,载波比的选择要因需权衡而选择。

2 硬件实现及常用算法

随着计算机及芯片技术的发展,在航空领域对传感器成附件的控制要求也越来越高。如何更简单、实时性更好地完成对传感器的激励成为深入研究的方向。正弦脉宽调制的实现是基于冲量等效定理,即大小和波形不相同的脉冲变量作用于惯性系统时,只要其冲量即变量对时间的积分相等,其作用效果基本相同^[3-5]。若将 1 个带有偏置的正弦波分成 N 等分,每 1 等分所形成的面积都可以用 1 个与其面积相等的等幅值矩形脉冲代替。其中,该矩形脉冲的中点与对应的正弦波等分部分的中点重合,得到 1 组按正弦规律变化的脉冲宽度序列,即为 SPWM 波形。因此可以通过实时或者离线的方式,计算出各等分值并存储在波形 ROM 中,利用单位时间产生周期性变化的固定增益的特性,经查表后在输出端得到所需波形。根据采样控制定理可以指出,脉冲频率越高,SPWM 波形越接近正弦波。

目前,由于 FPGA(可编程逻辑门阵列)具有可靠性高、功耗低、设计灵活等特点,常用于传感器的控制和信号处理时 SPWM 激励信号的发生。利用 FPGA 实现 SPWM 波形合成和发生的硬件如图 1 所示。通过以上分析得出,可以将通过各种算法计算出的 SPWM 波形的开启和关断时间或者等效等分的冲量数值形成可查数表存于存储 Rom 中,当每个时钟脉冲来临时,在频率控制字和加法器的作用下,把累加结果送至寄存器的输入端,以便下一时钟脉冲可以临时

继续与频率控制字进行加法。由此,在单位时间内便可以产生周期性变化的固定增益,将其作为波形 ROM 的取样地址,经查表便可在其输出端得到给定时间上的储存 SPWM 波形的脉宽值。最后经过滤波环节得到所需波形。

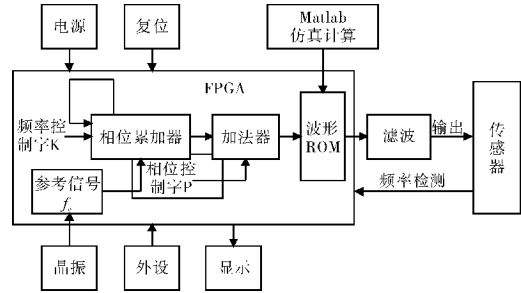


图 1 SPWM 波形合成和发生硬件

产生 SPWM 波形的算法是多种多样的,比较传统的方法有自然采样法、等效面积法和规则采样法等。下面将详述在 SPWM 技术中常用的几种方法。

2.1 自然采样法

由 SPWM 技术的基本原理可知,在正弦波和三角波的自然交点时刻控制功率开关器件通断的生成 SPWM 波形方法称为自然采样法^[3]。

自然采样法原理如图 2 所示。自然采样法根据正弦波与三角波的交点确定脉冲宽度。在不同相位角下,正弦波的幅值并不相同,且与三角波相交所得到的脉冲宽度也不同。此外,当正弦波频率变化或幅值变化时,各脉冲的宽度也相应变化。要准确生成 SPWM 波形,就应准确地算出正弦波和三角波的交点。但交点的求解涉及到多次三角函数的计算和迭代,计算量较大。而自然采样法实现简单、实时性好,但其参数漂移大、集成度低和设计不灵活,故更适合模拟电路来实现。

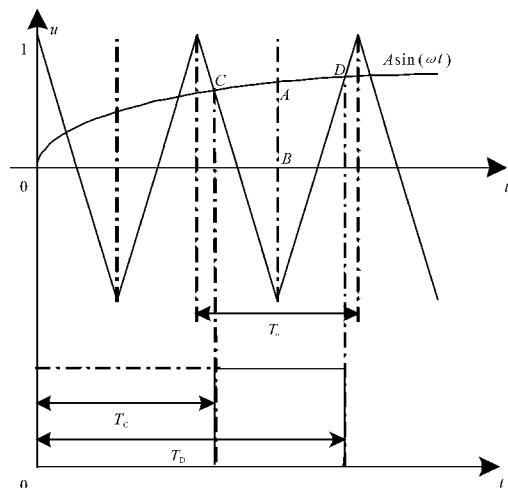


图 2 自然采样法原理

2.2 等效面积法

等效面积法根据冲量相等而形状不同的脉冲加在具有惯性的环节上时效果基本相同的原理,按面积相等的原则构成与正弦等效的一系列等幅不等宽的矩形脉冲波形^[5]。根据已知数据和正弦数值依次算出每个脉冲的宽度即可通过查表的方式实时控制。

等效面积法原理如图 3 所示,将 1 个周期的正弦函数波形均分为 N 等份,则 N 即为载波比。

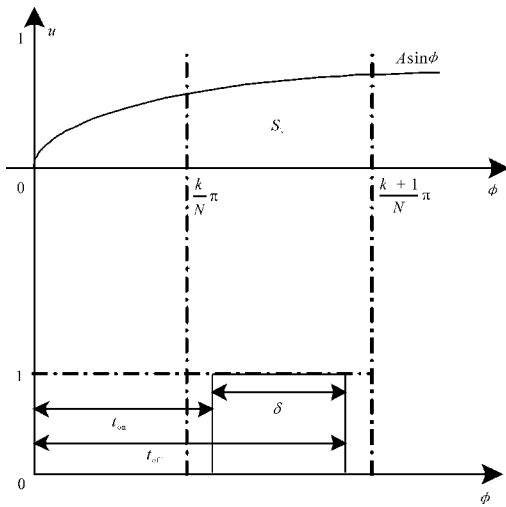


图 3 等效面积法原理

则可得

$$s_k = A \int_{\frac{k\pi}{N}}^{\frac{(k+1)\pi}{N}} \sin \theta d\theta$$

$$= A \left[\frac{\cos k\pi}{N} - \frac{\cos(k+1)\pi}{N} \right] = \delta \quad (1)$$

$$\begin{cases} t_{on} = \frac{k\pi}{N} + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{N} - \delta \right) = \frac{(2k+1)\pi}{2N} \frac{\delta}{2} \\ t_{off} = t_{on} + \delta = \frac{(2k+1)\pi}{2N} \frac{\delta}{2} \end{cases} \quad (2)$$

由于以上方法不利于硬件实现,可以进一步通过近似逼近的方法改进其实现方法,即当 N 等分值足够多时,等分点处的幅值可以近似等于冲量面积。而每个冲量面积都可以通过一系列等幅而不等宽的矩形脉冲所构成的波形与正弦半波等效^[6]。这样可以通过一系列相同数目的点描述出等分点处的幅值,得出所需的脉宽调制波形。该方法实现简单,形成的 SPWM 波能较好地逼近正弦波形,失真度较小。在后续介绍 Matlab 仿真分析时,将详述此改进方法的实现过程。

2.3 规则采样法

规则采样法是利用三角波对正弦波进行采样得

到的阶梯波与三角波的交点时刻控制开关器件的通断,从而实现 SPWM 波形的方法^[3-4]。原理如图 4 所示。从图中可见,当三角载波只在其波谷(或波峰)位置对正弦波进行采样时,由阶梯波与三角波的交点所确定的脉宽在 1 个载波周期(即采样周期)内的位置是对称的。其具体算法是以三角波对称轴与正弦波的交点做 1 条平行线,而平行线与三角波 2 边的交点即为 SPWM 波形的开启和关断时间。设三角载波的幅值为 1,正弦调制波的幅值为 A ,则调制比即为 A ,则 A 为调制比($A \in [0, 1]$),且 A 越大,输出的 SPWM 波形的幅值越高。

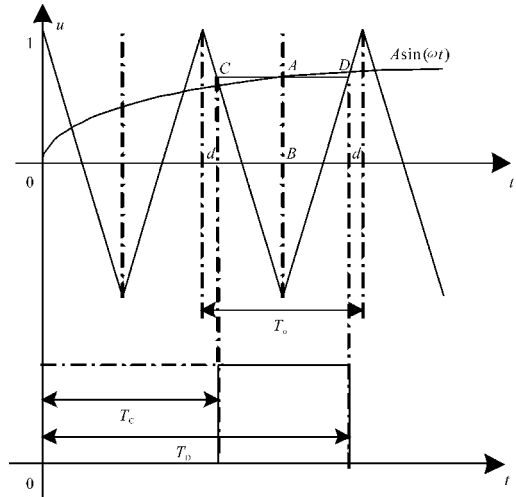


图 4 规则采样法原理

由相似定理可知

$$\begin{cases} \frac{1 + A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{\frac{T_n}{2} - t_d} = \frac{1}{\frac{T_o}{4}} \\ t_{cd} = T_o - 2t_d \end{cases} \quad (3)$$

得到

$$t_d = \frac{T_o}{4} - \frac{T_o}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (4)$$

则

$$\begin{cases} t_{on} = kT_o + \frac{T_o}{4} - \frac{T_o}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_{off} = kT_o + \frac{3T_o}{4} - \frac{T_o}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \end{cases} \quad (5)$$

该方法简化了迭代计算,但由于 SPWM 波与正弦波的逼近仍存在较大误差,在使用过程中可能引起较大谐波失真。

2.4 不对称规则采样法

不对称规则采样法是在每 1 个三角载波周期的

正峰值和负峰值点处,分别对正弦调制波进行采样,并以延长后与三角波的交点确定SPWM脉冲波的起始时间和关断时间^[5-6]。原理如图5所示。由于三角载波的频率应该远大于正弦调制波的频率,因此认为在1个三角波周期小区间内,正弦调制波为单调函数。

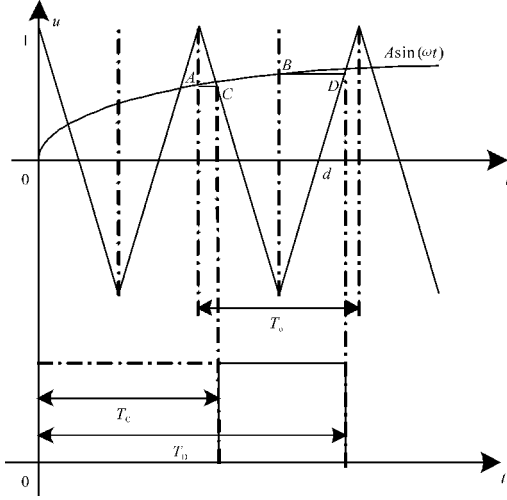


图5 不对称规则采样法原理

由相似定理可知

$$\begin{cases} \frac{1 - A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{t_{AC}} = \frac{1}{T_0/4} \\ \frac{A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right]}{t_d} = \frac{1}{T_0/4} \end{cases} \quad (6)$$

得出

$$\begin{cases} t_{AC} = \frac{T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_d = \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \end{cases} \quad (7)$$

则

$$\begin{cases} t_{on} = kT_0 + \frac{T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_{off} = kT_0 + \frac{2T_0}{4} + \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \end{cases} \quad (8)$$

由图5可知,不对称规则采样法在三角载波的正负峰值处同时采样,形成的SPWM波对正弦波的逼近具有较高精度,较对称规则采样也更接近于自然采样,谐波失真度THD也更小。

2.5 峰值型采样法

在不对称规则采样法的基础上,可进一步逼近正弦函数,使采样相交点更接近自然采样的交点。即在每个三角载波周期的正峰值上A、B点处对正弦调制

波进行采样,如图6所示。然后延长与时间轴平行的线,与三角载波交于C、D点和E、F点。从而确定出高电平脉冲的起始时间和关断时间,以及对应的高、低电平脉宽。从图中可见,采样点的水平延长线与三角载波的交点分别处于正弦调制波的两侧,因此与不对称采样法相比,利用峰值型采样法所得的SPWM高电平脉宽更接近于SPWM波,使得谐波分量更小^[4]。

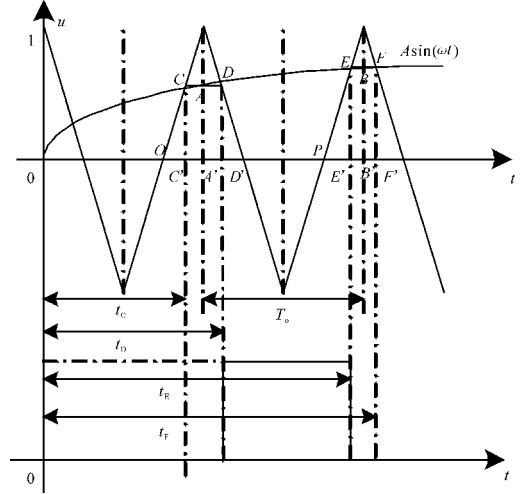


图6 峰值型采样法原理

由相似定理可知

$$\begin{cases} \frac{A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)}{t_{oc}} = \frac{1}{\frac{T_0}{4}} \\ \frac{\frac{T_0}{4} - t_{A'D'}}{\frac{T_0}{4}} = \frac{1}{A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \\ \frac{A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right]}{t_{PE}} = \frac{1}{\frac{T_0}{4}} \\ \frac{\frac{T_0}{4} - t_{B'F'}}{\frac{T_0}{4}} = \frac{1}{A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right]} \end{cases} \quad (9)$$

得出

$$\begin{cases} t_{oc} = \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_{A'D'} = \frac{T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_{PE} = \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \\ t_{B'F'} = \frac{T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \end{cases} \quad (10)$$

则

$$\begin{cases} t_c = -\frac{T_0}{4} + \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_b = \frac{T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_E = \frac{2T_0}{4} + \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \\ t_F = \frac{5T_0}{4} - \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] \end{cases} \quad (11)$$

即

$$\begin{cases} t_{on} = t_E - t_b = kT_0 + \frac{T_0}{2} + \frac{T_0}{4} A \sin\left[\frac{2\pi(k+1)}{N}\right] + \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ t_{off} = t_b - t_c = kT_0 + \frac{T_0}{2} - \frac{T_0}{4} A \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \end{cases} \quad (12)$$

3 Matlab 仿真

根据以上几种 SPWM 实现方法, 可以利用 Matlab 及其 Simulink 工具建立仿真模型, 利用这些实现方法中的开启和关断时间形成仿真波形数据, 通过 PowerGUI 工具对仿真波形数据进行 FFT 分析。下面以等效面积法为例, 在 M 文件中完成频率为 3000 Hz 的正弦波。设其采样频率为 384000 Hz, 采样点数为 1024, 并通过 256 个时间点所构成的矩形脉冲波形近似逼近等分后的正弦波面积, Matlab 程序如下

```
f = 3000; Fs = 384000;
N = 1024; M = 256;
t = [0:1:N-1]/Fs;
indata = 128+127*sin(2*pi*f*t);
for i = 1:1:N/(Fs/f)
    for j = 1:1:Fs/f
        for k = 1:1:M
            if indata((i-1)*(Fs/f)+j)>0
                outdata((i-1)*(Fs/f)+j,k) = 1;
                indata((i-1)*(Fs/f)+j) = indata((i-1)*(Fs/f)
+j) - 1;
            else
                outdata((i-1)*(Fs/f)+j,k) = 0;
            end
        end
    end
end
```

end

```
outdata1 = reshape(outdata,1,N*M);
```

将以上计算得出的 SPWM 波序列通过 RC 低通滤波环节得到所需的正弦波, 即

```
R=10e3;C=0.33e-6;j=sqrt(-1);
f1=Fs*(0.262144-1)/262144;
xn_jw=fft(outdata1,262144);
hw = 1./(j*2*pi*f1*R*C+1);
yn_jw = hw.*xn_jw;
yn = real(ifft(yn_jw,262144));
```

在 Simulink 中创建 1 个 .mdl 文件并添加 Power-GUI 和 Scope 模块。在 Scope 模块中的“Data History”选项里勾选“Save data to workspace”, 便可以在“Variable name”里设置变量名称 ScopeData。在“Format”中选择“Structure with time”后点击运行, 便可以在 Workspace 里看到变量 ScopeData。然后在 ScopeData 的 time 和 values(位于 signal 里)结构体赋值为导入的时间轴序列和正弦波数据序列, 就可以在“Powergui FFT Analysis Tool”工具的“Structure”里面选择变量 ScopeData 并分析波形数据的失真度 THD, 如图 7 所示。

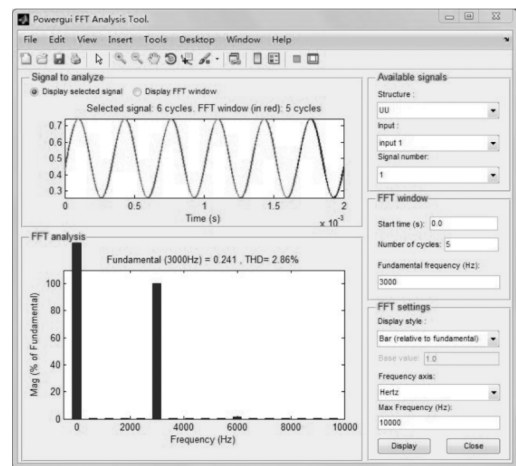


图 7 Matlab 工具仿真

利用同样的方法将上述几种 SPWM 波形算法形成的数据导入 Matlab 中, 通过仿真分析得到的分析结果见表 1。

表 1 SPWM 仿真波形失真度计算结果

序号	SPWM 波形算法	THD/%
1	等效面积法	2.86
2	规则采样法	1.17
3	不对称规则采样法	0.62
4	峰值型采样法	0.62

4 结束语

仿真试验结果表明,改进后的等效面积法谐波失真度最大,但在工程应用的可接受范围内。若要求进一步降低失真度,可增加所需发出的正弦波形的等分数量,并且由于其实时计算量小,实现简单的特性常用于 FPGA 硬件实现。采用规则采样法产生的 SPWM 波形失真度适中,实现速度快、变频方便。而峰值型采样法和不对称规则采样法都具有精度高、输出波形谐波小、对称性好等优点。峰值型采样法由于在逼近正弦波实际值时较不对称规则采样法处于波形斜率更小的位置,因此等效脉冲面积失真更小,波形失真度更小。但在采样频率很高的情况下,输出波形在 THD 计算时几乎相等,均可应用在 FPGA 发生 SPWM 波的实现。此外,随着对波形发生性能要求的提高以及微处理器技术的发展,可以进一步改进波形生成的算法,在提高波形质量和实时控制等性能中取得更好的平衡点。

参考文献:

- [1] 张润和. 电力电子技术及应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 87-89.
- [2] 张芳. 正弦脉宽调制算法技术的研究[J]. 火控雷达技术, 2008, 37(4): 105-107.
- [3] 董彦敏, 谭智力, 姜钰梁. 改进的正弦脉宽调制控制算法综述[J]. 电源技术, 2012(5): 764-767.
- [4] 王旭东, 潘广楨. Matlab 及其在 FPGA 中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 237-242.
- [5] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 23-40.
- [6] 阎飞, 颜德田. 基于 DDS 芯片的信号发生器及调制器的设计[J]. 北京: 微计算机信息, 2009, 25(2): 252-254.
- [7] 董金发, 王三武. 基于 DSP 正弦脉宽调制的单相逆变电源研究[J]. 通信电源技术, 2006, 23(4): 33-35.
- [8] 朱朝霞, 徐德鸿. 基于 DSP 单相 SPWM 逆变电源调制方式研究及实现[J]. 浙江理工大学学报, 2005, 22(2): 149-153.
- [9] 单庆晓, 潘孟春, 李圣怡. 采用 MATLAB 对 SPWM 进行辅助设计[J]. 电源技术应用, 2001(9): 472-474.
- [10] 柳凌, 钱祥忠. 基于 Matlab 的三相桥式 SPWM 逆变器建模与仿真[J]. 电子设计工程, 2014(14): 139-141.
- [11] 李荣高, 宁玉泉. SPWM 交流调速的 MATLAB 仿真[J]. 中小型电机, 2001, 28(3): 41-43.
- [12] 周卫平, 吴正国, 唐劲松, 等. SVPWM 的等效算法及 SVPWM 与 SPWM 的本质联系[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 133-137.
- [13] 胡赛纯, 李加升, 邱飏. 基于 Matlab 的 SPWM 电压型逆变器的谐波分析[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2011, 29(3): 391-394.
- [14] 梁巍, 马可. 基于 MATLAB 的 SPWM 控制系统仿真[J]. 华北科技学院学报, 2004, 1(2): 84-87.
- [15] 李鑫, 王达达, 田沛, 等. 基于 Matlab 嵌入式模块的三相 SPWM 生成[J]. 云南电力技术, 2013, 41(6): 80-83.

(编辑: 栗枢)