

1-8-2019

## A Novel Dual Random PWM Scheme and Its Simulation Analysis

Haopeng Wu

*The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Tinglong Pan

*The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Dinghui Wu

*The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Zhicheng Ji

*The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## A Novel Dual Random PWM Scheme and Its Simulation Analysis

### Abstract

**Abstract:** In the consideration that random pulse position pulse width modulation (PWM) still contains discrete spectral components, a novel strategy of dual randomized modulation is presented. The proposed method is based on dual zero vector random pulse position PWM, in which zero vector is selected as  $V(1\ 1\ 1)$  when  $M \geq 0.7$  and as  $V(0\ 0\ 0)$  when  $M < 0.7$ , and the *random variation of the pulse position and the switch frequency is realized by increasing the switch frequency randomization. To insure better random variation degree of dual random PWM, WELL algorithm is introduced to generate random number.* Simulation results show that the proposed scheme can reduce the dominant harmonic clusters of the output line voltages and the phase currents effectively, and has well-distributed spectrum in the whole frequency interval.

### Keywords

random PWM, switch frequency, WELL algorithm, harmonic suppression

### Recommended Citation

Wu Haopeng, Pan Tinglong, Wu Dinghui, Ji Zhicheng. A Novel Dual Random PWM Scheme and Its Simulation Analysis[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3451-3456.

# 新型双随机 PWM 方法及其仿真分析

吴豪鹏, 潘庭龙, 吴定会, 纪志成

(江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对随机脉冲位置脉宽调制(PWM)的功率谱密度中依然存在离散谱成分, 提出一种新的双随机 PWM 策略。该方法在调制比  $M \geq 0.7$  时, 采用  $V(0\ 0\ 0)$  作为零矢量,  $M < 0.7$  采用  $V(1\ 1\ 1)$  作为零矢量的双零矢量随机脉冲位置调制策略的基础上, 通过增加开关频率的随机化, 实现开关频率与脉冲位置分别随机变化。引入 WELL 算法生成随机数, 以增强双随机 PWM 输出的随机变化程度。仿真结果表明, 该方法可以有效抑制输出线电压和相电流的高次谐波, 在整个频域范围内具有更加均匀的频谱。

**关键词:** 随机 PWM; 开关频率; WELL 算法; 谐波抑制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018)09-3451-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809028

## A Novel Dual Random PWM Scheme and Its Simulation Analysis

Wu Haopeng, Pan Tinglong, Wu Dinghui, Ji Zhicheng

(The Internet of Things Technology Application Engineering Research Center of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In the consideration that random pulse position pulse width modulation (PWM) still contains discrete spectral components, a novel strategy of dual randomized modulation is presented. The proposed method is based on dual zero vector random pulse position PWM, in which zero vector is selected as  $V(1\ 1\ 1)$  when  $M \geq 0.7$  and as  $V(0\ 0\ 0)$  when  $M < 0.7$ , and the random variation of the pulse position and the switch frequency is realized by increasing the switch frequency randomization. To insure better random variation degree of dual random PWM, WELL algorithm is introduced to generate random number. Simulation results show that the proposed scheme can reduce the dominant harmonic clusters of the output line voltages and the phase currents effectively, and has well-distributed spectrum in the whole frequency interval.

**Keywords:** random PWM; switch frequency; WELL algorithm; harmonic suppression

## 引言

开关电源已被广泛应用于消费电子产品。开关电源变换器常用 PWM 技术进行控制。PWM 控制

的逆变器通常工作在恒定的开关频率下, 使得在开关频率整数倍处出现幅值较大的谐波, 这些谐波是造成电磁干扰、开关噪声以及电机机械振动的主要原因<sup>[1]</sup>。减小开关噪声辐射的最佳方式是使逆变器的开关频率达到 18 kHz 以上, 但这种方式极大地增加了逆变器的开关损耗。

随机脉宽调制策略(RPWM)将按某种概率规律分布的随机信号加入到开关信号, 使原本集中在



收稿日期: 2016-11-25

修回日期: 2017-02-07;

基金项目: 国家自然科学基金(61672266, 61572237);

作者简介: 吴豪鹏(1993-), 男, 浙江, 硕士生, 研究方向为电力电子及电力传动; 潘庭龙(1976-), 男, 江苏, 博士, 教授, 研究方向为风力发电控制技术、功率变换技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 3451 •

开关频率整数倍处的谐波幅值分摊到整个频域范围内,使功率谱呈现较连续的频谱特性<sup>[2]</sup>。使逆变器工作在相对较低的开关频率下达到减少开关噪声的目的。

随机 PWM 方法包括:随机脉冲位置调制、随机开关频率调制以及双随机调制(两者同时随机化处理)。其中,采用随机脉冲位置调制策略时,系统拥有恒定的开关频率和采样频率,在脉冲占空比不变的条件下,可随机地改变脉冲上升沿的起始位置<sup>[3-5]</sup>。而随机开关频率则是通过控制逆变器的开关频率在一定范围内随机地变化来实现 PWM 调制<sup>[6-8]</sup>。双随机调制是在保持有效矢量作用时间不变的前提下,同时对脉冲位置以及开关频率随机化处理<sup>[9-11]</sup>。与单随机技术相比,双随机调制能够更加有效得遣散能量谱<sup>[2]</sup>。文献[9]在变延时随机 PWM 的基础上,提出零矢量-变延时双随机 PWM 方法。但在调制比较高时,由于零矢量作用时间减少,谐波抑制效果变差。

文献[3]提出三相脉冲位置独立随机 PWM 策略(SRP-PWM),由于各相的脉冲位置可以独立地随机变化,SRP-PWM 具有比其它随机脉冲位置调制更好的频谱扩散以及开关噪声消除特性。文献[4]针对 SRP-PWM 在调制比较大时频谱连续性变差的问题,提出了双零矢量随机脉冲位置 PWM 方法,从而使得在任意调制比的情况下,都具有相对较好的频谱特性。

本文在文献[4]所提控制策略的前提下,提出一种新的双随机 PWM 策略。该策略通过增加开关频率的随机化,进一步提高能量谱的连续性以及均匀性。此外,采用随机性较高的随机数生成算法能使输出谐波分布更加均匀,为此,本文采用 WELL 算法生成随机数<sup>[12]</sup>。

## 1 双随机 PWM 方法

### 1.1 双零矢量随机脉冲位置 PWM 方法

图1为调制度  $M=0.3$ ,参考矢量位于第一扇区,

采用双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法时的三相脉冲波形。其中,图1(a)表示使用  $V(0\ 0\ 0)$  作为零矢量,图1(b)表示使用  $V(1\ 1\ 1)$  作为零矢量。此时的有效矢量为  $V_1$ 、 $V_2$ ,  $T_{RND1}$ 、 $T_{RND2}$ 、 $T_{RND3}$  分别表示 A、B、C 三相脉冲位置的随机变化范围。

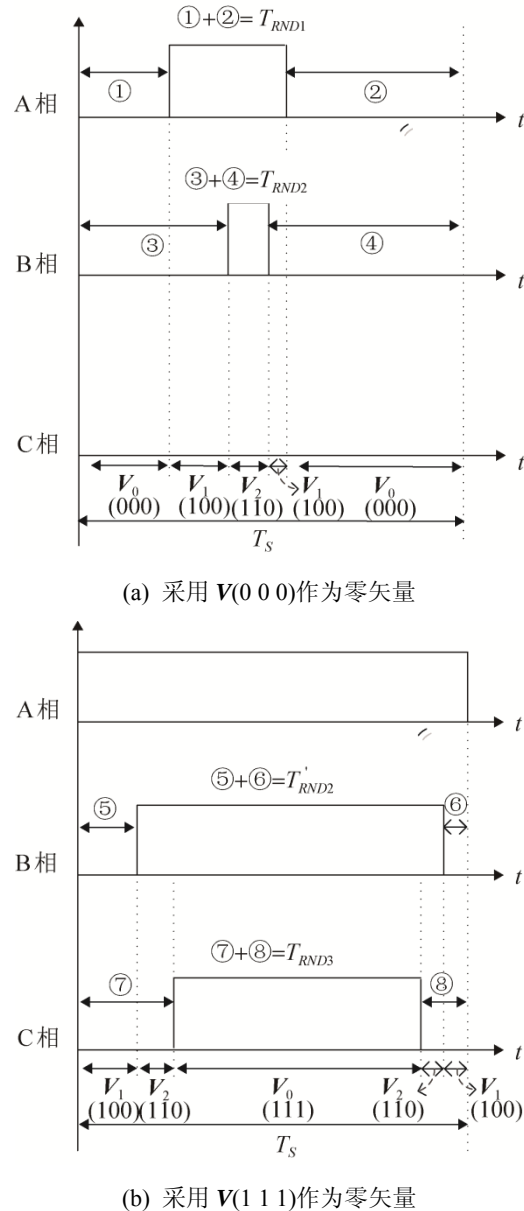


图1  $M=0.3$  时,双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法三相脉冲示意图

Fig. 1 Pulse pattern of two zero vector random pulse position PWM strategy in the case of  $M=0.3$  (a) Zero vector:  $V(0\ 0\ 0)$ ; (b) Zero vector:  $V(1\ 1\ 1)$

若此时参考矢量与扇区起始边的夹角为  $\theta$ 。则

选取  $\mathbf{V}(0\ 0\ 0)$  作为零矢量时的脉冲位置随机变化范围

$$R_1 = \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4} = 2T_0 + T_1 = T_s \left\{ 2 - M \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 2 \cdot M \cdot \sin\theta \right\} \quad (1)$$

式中:  $T_1$  为  $\mathbf{V}_1$  的作用时间;  $T_0$  为零矢量的作用时间;  $T_s$  为采样周期。选取  $\mathbf{V}(1\ 1\ 1)$  作为零矢量时, 脉冲位置的随机变化范围

$$R_2 = 2T_1 + T_2 = M \cdot T_s \left\{ 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sin\theta \right\} \quad (2)$$

式中:  $T_2$  为  $\mathbf{V}_2$  的作用时间; 当  $R_1 = R_2$  时, 选取任一矢量作为零矢量脉冲位置的随机变化范围相同, 相应的频谱扩散效果也相同。相应的表达式为

$$2T_0 + T_1 - (2T_1 + T_2) = T_s \left[ 2 - 3M \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \sin\theta \right\} \right] = T_s \left[ 2 - \frac{3}{2} M (\sqrt{3} \cos\theta + \sin\theta) \right] = 0 \quad (3)$$

将使等式(3)成立时的调制度定义为  $M_c$ , 求得  $M_c$  与  $\theta$  的关系如图 2 所示。

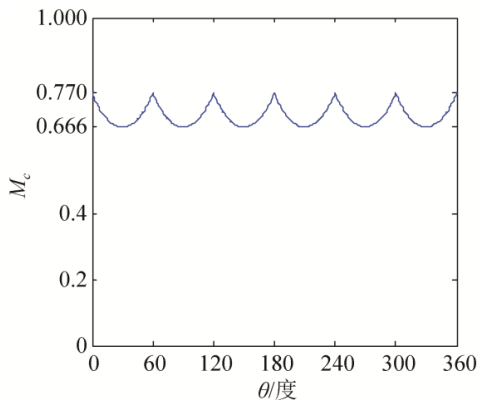


图 2  $M_c$  与  $\theta$  关系图  
Fig. 2 Variation of  $M_c$  in accordance with  $\theta$

从图 2 可以看出,  $\theta$  取不同值时, 对应的  $M_c$  变化范围为 0.66-0.77。如果参考矢量对应的调制度在曲线下, 则选取  $\mathbf{V}(0\ 0\ 0)$  作为零矢量, 反之, 选取  $\mathbf{V}(1\ 1\ 1)$  作为零矢量。在实际应用中, 可采用单片机计算和存储  $M_c$  与  $\theta$  的关系。此处, 为简化算法, 选取  $M_c$  为 0.7。在采用这种调制方法后, 使

得在任意调制度下, 脉冲位置随机程度最大化。

### 1.2 开关频率随机化

双零矢量随机脉冲位置 PWM 方法虽然能使脉冲位置随机程度最大化, 但从文献[4]的实验结果可知, 仍有一部分谐波集中在开关频率的整数倍处。为此, 在双零矢量随机脉冲位置 PWM 的基础上, 对系统的开关频率随机化处理, 随机开关频率的表达式为  $f = f_s + R\Delta f$ , 式中,  $f_s$  为中心开关频率,  $\Delta f$  为频带常数,  $R$  为  $[-1,1]$  之间变化的随机数。由于开关频率过低时, 会使低次谐波成分增加, 并有可能使电机出现不期望的机械振动, 开关频率过高时, 开关器件的损耗增大。因此将开关频率的上下限设置为

$$\begin{cases} f_{\min} = f_s - f_s/4 \\ f_{\max} = f_s + f_s/4 \end{cases} \quad (4)$$

这样在保证频谱具有较好扩散效果的同时不影响输出电压波形的质量。必须注意的是,  $f_{\max}$  还必须小于开关器件允许的最大频率。

## 2 随机数生成方法

双随机 PWM 的关键在于随机数  $T_{RND}$ , 以及  $R$  的产生, 一种理想的随机数生成算法应具备 1)能够产生均匀分布的随机数; 2)不可预测性; 3)较长的周期等特性。通常采用线性同余法生成随机数, 然而这种算法产生的随机数周期较短, 当观测时间大于一个周期时, 随机性消失。

WELL 算法是二进制线性( $F_2$ -Linear)随机数生成算法的一种类型。它具有比其它随机数生成算法更长的周期并且能够产生高质量的均匀分布随机数等优点。WELL 算法的随机数生成过程见图 3。

$T$  个状态向量 ( $\mathbf{S}[0]$  到  $\mathbf{S}[T-1]$ ) 共包含  $k = w \times T - p$  ( $0 \leq p < w$ ) 位。其中, 前  $T-1$  个状态向量均包含  $w$  位随机分布的二进制序列, 状态向量  $\mathbf{S}[T-1]$  的最后  $p$  位总为 0。在每轮随机数生成过程中,  $\mathbf{S}[0]$ 、 $\mathbf{S}[M1]$ 、 $\mathbf{S}[M2]$ 、 $\mathbf{S}[M3]$ 、 $\mathbf{S}[T-2]$ 、 $\mathbf{S}[T-1]$  等 6 个状态向量经过异或、与等位运算生

成两个新的  $w$  位状态向量  $FB1$  和  $FB2$ 。 $FB2$  作为本轮的随机数输出, 随后,  $S[1]$  到  $S[T-2]$  等  $T-2$  个状态向量分别按图示的方向移动  $w$  位, 并将  $FB1$  和  $FB2$  替代本轮的状态向量  $S[0]$ 、 $S[1]$ 。

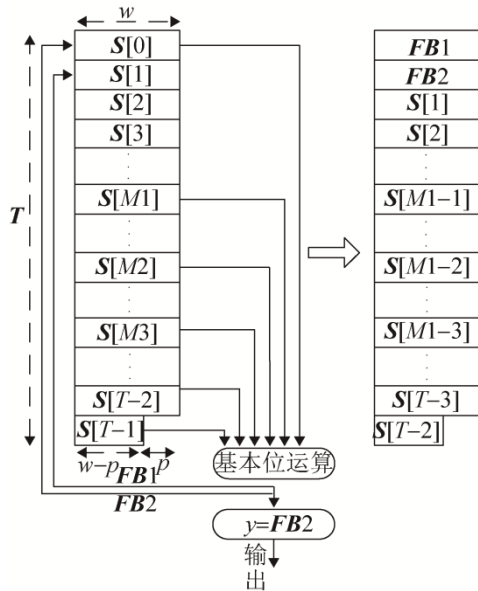


图3 WELL算法工作过程

Fig. 3 Random numbers generation process of WELL algorithm

本文采用 WELL1024 算法(周期为  $2^{1024} - 1$ ), 相应的参数为  $p=0$ ,  $T=32$ ,  $w=32$ ,  $M1=3$ ,  $M2=24$ ,  $M3=10$ 。

### 3 仿真

为了验证所提方法相对其他方法在谐波抑制方面的有效性, 下面对常规 SVPWM 算法、双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法以及本文所述双随机调制算法进行仿真分析。其中, 直流侧电压为 510V, 三相异步电机的参数为  $P_N=4\text{ kW}$ ,  $V_N=380\text{ V}$ ,  $I_N=8.6\text{ A}$ ,  $n_N=1440\text{ r/min}$ , 调制比  $m$  设为 0.9。常规 SVPWM 算法、双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法的开关频率为 5 kHz, 双随机 PWM 算法的开关频率变化范围为 3.5~6.5 kHz, 得到相应的仿真结果如图 4~6 所示。

图 4 为本文双随机 PWM 算法逆变器输出线电压和相电流的仿真波形。由图可知, 双随机 PWM 算法

控制下的逆变器电压、电流与常规 SVPWM 算法相似, 未发生明显的畸变, 证明了该算法的可行性。

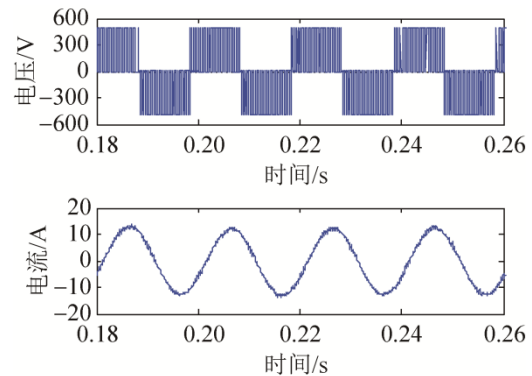
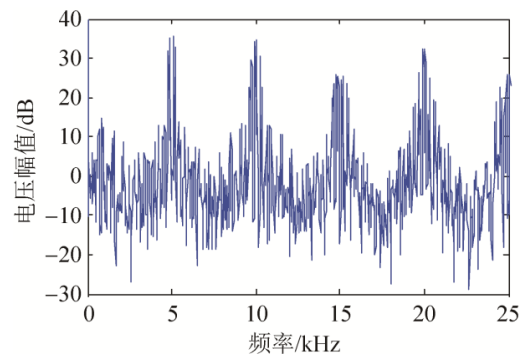
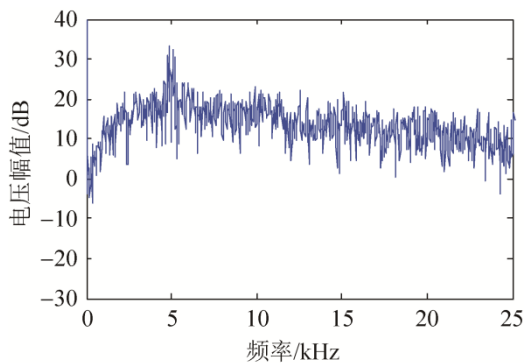


图4 本文双随机 PWM 算法的线电压和相电流仿真结果  
Fig. 4 Simulation results of line-to-line voltage and phase current for proposed strategy

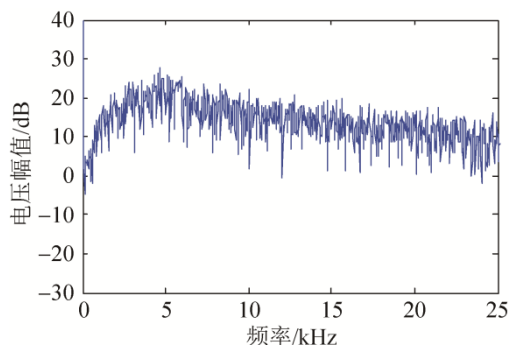
从图 5 可以看出, 由于常规 SVPWM 具有固定的开关频率, 因此在开关频率整数倍处具有较大的谐波幅值。采用双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法时, 10 kHz、15 kHz 附近的谐波幅值得到了有效的削弱, 然而在 5 kHz 附近电压谐波仍然存在较大的尖峰, 在采用本文的双随机 PWM 算法后, 频谱中的离散谱成分基本消失, 谐波频谱变得更加平滑。从图 6 可看出, 常规 SVPWM 波形中的高次谐波成分呈离散分布特征, 采用本文所述双随机 PWM 算法使高次谐波成分均匀分配到整个频域范围内, 相较于双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法, 开关倍频处的谐波尖峰得到明显的抑制, 仿真结果表明双随机 PWM 算法具有较好的抑制高次谐波的能力。



(a) 常规 SVPWM 算法

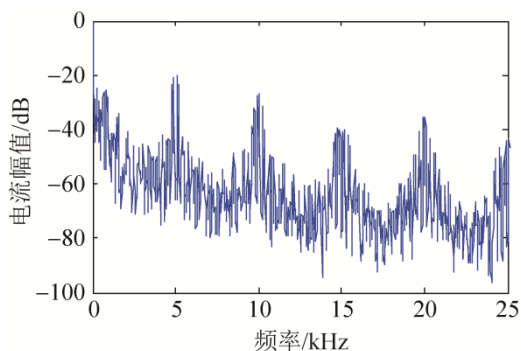


(b) 双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法

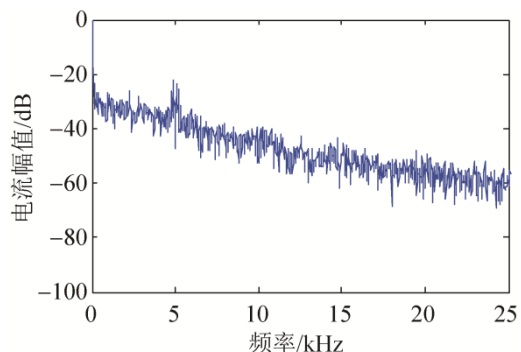


(c) 本文双随机 PWM 算法

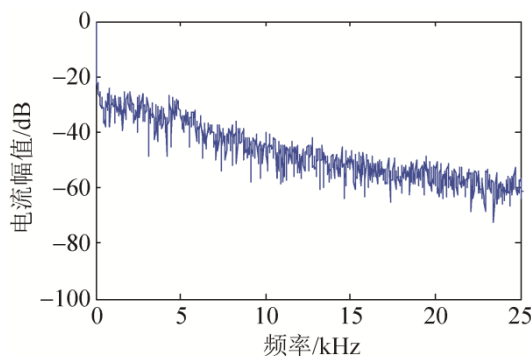
图 5 采用三种调制算法对应的线电压频谱仿真结果对比  
Fig. 5 Simulation results comparison of line-to-line voltage spectra for three strategies



(a) 常规 SVPWM 算法



(b) 双零矢量随机脉冲位置 PWM 算法



(c) 本文双随机 PWM 算法

图 6 采用三种调制算法对应的相电流频谱仿真结果对比  
Fig. 6 Simulation results comparison of phase current spectra for three strategies

## 4 结论

本文在双零矢量随机脉冲位置 PWM 的基础上, 通过增加开关频率的随机化, 提出了一种新的双随机 PWM 算法。通过对比频谱仿真结果可知, 本文提出的算法有效消除了频谱中的离散谱成分, 开关频率整数倍处高次谐波得到有效抑制, 具有较好的谐波分散效果。另外, 本文引入 WELL 算法生成随机数, 大大增强了随机变量的随机性, 保证双随机 PWM 输出具有较好的随机效果。

## 参考文献:

- [1] Bhattacharya S, Mascarella D, Joos G, et al. A Discrete Random PWM Technique for Acoustic Noise Reduction in Electric Traction Drives[C]// Energy Conversion Congress and Exposition. Quebec, Canada: IEEE, 2015: 6811-6817.
- [2] 王斌, 李兴源, Drissi K K. 双随机调制技术及其功率谱密度特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 97-101.  
Wang Bin, Li Xingyuan, Drissi K K. Analysis of Power Spectrum of a Dual Randomized Modulation[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(4): 97-101.
- [3] Kin J G, Jung Y G, Na S H. A New Random PWM (SRP-PWM) Technique for Decreasing Acoustic Noise Radiated from V/F Controlled Motor Drives[C]// Industrial Electronics Society. Busan, Korea: IEEE, 2004: 832-837.
- [4] Lim Y C, Jung Y G, Oh S Y. A Two-Phase Separately Randomized Pulse Position PWM (SRP-PWM) Scheme with Low Switching Noise Characteristics over the Entire

