

文章编号: 2095-2163(2021)04-0049-05

中图分类号: TP211

文献标志码: A

# 一种混沌映射随机数在 IGBT 驱动模块中的应用

陈 航, 马家庆, 王 霄

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘 要:** IGBT 模块在现代工业技术上的应用十分广泛, 研究表明结温过高是影响其安全性与可靠性的主要原因之一。为了抑制运行中 IGBT 模块的温升, 本文运用 Logistic 混沌映射随机数算法, 通过对 DSP 芯片输出的 PWM 波周期的随机化, 探究其在 IGBT 模块运行时的温升抑制作用。经过实验验证, 在 IGBT 模块结温从 45 °C 升~53 °C 过程中, 随机周期 PWM 比正常 PWM 方式的温升时间增多了 88.8 s, 表明该方式对 IGBT 模块的温升抑制效果良好, 在现代工业技术领域中有较好的应用前景。

**关键词:** IGBT 模块; 温升; Logistic 混沌映射; PWM

## Application on a chaotic mapping of random numbers in IGBT Driver Module

CHEN Hang, MA Jiaqing, WANG Xiao

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**【Abstract】** IGBT module is widely used in modern industrial technology. Studies have shown that excessive junction temperature is one of the main reasons affecting its safety and reliability. In order to suppress the temperature rise of IGBT module in operation, Logistic chaotic map random number algorithm is presented in this paper to explore the temperature rise suppression effect of IGBT module in operation through uniform randomization of output PWM wave period and duty cycle from DSP chip. It is verified by experiment that, Compared with the normal PWM mode, the temperature rise time of random cycle PWM increased 88.8s, which shows that random cycle PWM has favorable effect on temperature rise suppression of IGBT module and is a befitting application prospect in the field of modern industrial technology.

**【Key words】** IGBT module; Temperature rise; Logistic chaotic map; PWM

## 0 引 言

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极晶体管)是由 BJT(双极型三极管)和 MOS(绝缘栅型场效应管)组成的复合全控型电压驱动式功率电力电子器件, 具有驱动功率小、饱和压降低的特点, 是能源转换与传输的核心控制器件, 其安全性与可靠性已成为电力电子技术研究领域的重点之一。据统计变流器中 31% 的故障是由功率模块引发, 60% 以上的模块故障是由热疲劳引起<sup>[1]</sup>。随着 IGBT 器件结温的升高, 其安全运行裕度越小。通常 IGBT 模块是由不同热膨胀系数的叠装材料组成, IGBT 模块在大功率状态运行下会产生大量的热量, 散热不足时, 结温升高致使 IGBT 模块主要散热材料焊料层失效, 导致 IGBT 模块不能正常工作, 对整个输电网络造成一定程度的破坏<sup>[2]</sup>。随着绝缘栅

双极晶体管向高功率和高集成度方向发展, 在高频传导和开合下不断产生大量的热, 热产生问题日益突出, 对 IGBT 模块内部结构优化设计, 散热属性分析和散热的要求越来越高<sup>[3]</sup>。因此, 研究 IGBT 的温升抑制方法对提高其寿命具有重大意义。

国内外学者对 IGBT 模块的散热效率进行了大量的研究工作。风力发电系统中 IGBT 模块长时间工作会使焊料层疲劳失效, 借助建立 IGBT 模块电-热-机械应力多物理场模型, 探究了焊料层空洞大小和位置对 IGBT 模块热-机械应力的影响规律, 同时对不同焊料层失效程度对温度梯度的影响规律进行了分析, 这对 IGBT 模块的寿命评估具有重要意义<sup>[4]</sup>。通过建立较为准确的 IGBT 模块通态损耗和开关损耗的计算方法, 考虑了温度对损耗的影响, 并采用等效热阻法推导出各点温度, 在此基础上设计了适用的强迫风冷散热系统<sup>[5]</sup>。一种利用有限元

**基金项目:** 国家自然科学基金(51867006, 61861007); 贵州省科技厅-贵大联合基金(黔科合 LH 字[2017]7229 号)7224; 黔科合平台人才[2017]5788)。

**作者简介:** 陈 航(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交流电机控制、电力电子器件能量传递效率; 马家庆(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 交流电机非线性控制及传感器非线性特性

**通讯作者:** 马家庆 Email: 357287962@qq.com

收稿日期: 2020-12-02

体积法研究并分析了翅片厚度和翅片间距对热管式散热器散热性能的影响的方法,对研制优化结构的散热器有一定意义<sup>[6]</sup>。通过在散热器进风侧和散热风扇之间加装导风板来改变冷却气流在翅片间风道分布的改进措施,一定程度上解决了安装有双IGBT模块的翅片式散热器通风不畅、冷却效率低的问题<sup>[7]</sup>。为满足CRH2高速动车组牵引变流器散热要求,通过改进传统铜热管建立一种阶梯状变截面热管结构,并设计出新型热管散热器<sup>[8]</sup>。根据散热系统热阻模型,获得散热器的热阻值和散热器的温度,并通过Icepak软件对散热器进行热仿真和热分析,设计了一种三相不平衡调节装置的IGBT模块散热装置,经实验验证其散热性能良好<sup>[9]</sup>。针对电子器件的散热问题,提出4种具有对称和等距凹槽的微通道,并通过三维数值模拟,研究了不同雷诺数下凹槽形状及布局对微通道性能的影响,实验表明三角凹槽在雷诺数为600时获得最优热性能,而在雷诺数为900时等距圆形凹槽的热性能超过三角凹槽<sup>[10]</sup>。对以电子散热为背景的竖通道自然对流强化换热进行分析并通过计算研究影响自然对流特征的热源布置、通道当量直径、气流物性变化等对壁温的影响,讨论了自然对流的流动阻塞特征以及影响因素,在一定情况下获取了热源最佳位置与最佳散热面积,为肋式散热片设计优化提供参考<sup>[11]</sup>。

上述文献中涵盖了IGBT模块在不同应用领域中的散热方式,普遍的散热方法有风冷,液冷,散热器结构优化设计以及IGBT模块内部散热材料(焊料层)的制作等,这些方法都在一定程度上保证了IGBT模块的工作效率以及提高了其使用寿命。然而,对于需要IGBT器件高频运行的应用领域,器件开关频率过大时,其累积热量在现有的散热方法下不能快速降低,同样会对功率器件造成损坏。通常可结合不同的散热方法以达到更快的散热效果,但是对上述传统的物理散热方式的结合并不是单纯的叠加效应,而且方法结合难度大,同时也耗费资源,甚至给原有的IGBT模块带来“负重”,影响正常的功能使用。所以,探索更高效的散热效率方式是十分迫切的。

本文分析了一种Logistic混沌映射随机PWM驱动方式,保证整体的IGBT模块输入功率不变时,对输出PWM波的周期及占空比随机化,在极短的导通时间里,可将IGBT等效成一般电阻<sup>[12]</sup>,随机PWM驱动下的IGBT导通时间是随机的,运用热传导理论,随机PWM作用下IGBT模块的整体温度梯

度大于无随机情况,散热增多模块温升得以抑制,导通损耗随之降低。本实验中通过IGBT模块安装散热片,引入随机PWM驱动的方式验证了IGBT模块的温升抑制效果,实验情况验证良好,这对设有外部散热器的功率模块在高强度工作环境中的应用中具有借鉴意义。

## 1 原理介绍

### 1.1 传统随机数算法介绍

服从均匀分布的随机数称为均匀随机数,若要生成某个数值范围内的均匀随机数,可利用传统线性同余算法(LCG)先产生 $[0,1]$ 均匀随机数<sup>[13]</sup>,公式(1)如下:

$$\begin{cases} x_n = (ax_{n-1} + c) \bmod M, \\ r_n = \frac{x_n}{M}, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

其中, $M, a, c, x_n$ 均为非负整数, $r_n$ 为 $[0,1]$ 的均匀随机数;再令 $\xi_n = (A - B)r_n + A$ ,则 $\xi_n$ 为 $[A, B]$ 之间的均匀随机数,其中 $A, B$ 均为整数。

当上述中的参数选择合适时,获得的随机数的均匀性更佳。

### 1.2 Logistic混沌映射

以Devaney定义的混沌如下<sup>[14]</sup>:

设 $(X, \rho)$ 为紧致的度量空间, $f: X \rightarrow X$ 是连续映射,则称 $f$ 在 $X$ 上是混沌的,且满足:

- (1) $f$ 对初始条件有敏感依赖性;
- (2) $f$ 在 $X$ 上拓扑传递;
- (3) $f$ 的周期点在 $X$ 中稠密。

利用混沌算法产生的随机序列具有非周期性和伪随机属性,敏感度依赖于初始参数,初始条件存在微小差别时的混沌系统的迭代轨迹也会自重合逐渐偏离,直至完全不同,该特质非常适合产生伪随机数序列。

Logistic映射是典型的一维非线性离散混沌系统,已成为广泛应用的混沌映射之一,其迭代方程如式(2)所示<sup>[15]</sup>:

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= \mu X_n(1 - X_n), \\ \mu &\in (0, 4], X_n \in (0, 1). \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mu$ 是控制参数, $X_n$ 是迭代状态值,随着控制参数 $\mu$ 改变,Logistic映射的迭代行逐渐发生明显变化。当迭代值散步在一定的区间内时,迭代映射进入混沌状态,在此状态下的Logistic映射的Lyapunov指数为正数,该指数是衡量混沌运动的数值特征,定

义如式(3):

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln |F'(x_i)|. \quad (3)$$

### 1.3 混沌序列的二值量化

二值量化是混沌序列最常用的量化方法之一, 主要目的是定义一个阈值  $t$ , 先取序列的理论均值, 然后将混沌实值序列量化成二值序列, 量化过程如式(4):

$$y_i = \begin{cases} 1, & x_i > t, \\ 0, & x_i \leq t. \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $x_i$  为混沌实值,  $y_i$  为二值序列, 当均值为 0 时, 阈值  $t$  取 0。

### 1.4 随机序列的生成方法

根据式(1)中产生一般随机序列方法, 加入扰动机制, 并由 Logistic 映射生成混沌实值序列, 经二值量化处理得到最终的随机数序列, 其生成图如图 1 所示。

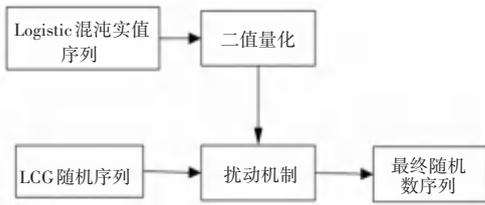


图 1 随机数序列生成图

Fig. 1 Random number sequence generation figure

### 1.5 热传导与温度梯度

#### 1.5.1 热传导

本次实验 IGBT 模块中的热量传导是从芯片核心位置逐渐向不同层级材料之间传递, 最后经过散热片传入外部环境。热传导可用傅里叶导热定律描述, 式(5)<sup>[16]</sup>:

$$Q = -vA \frac{dT}{dx}. \quad (5)$$

式中,  $-$  表示热量从高温处向低温处传递;  $Q$  为传导热量;  $v$  为材料导热系数;  $A$  为垂直于传热方向的截面积;  $\frac{dT}{dx}$  为温度  $T$  对传热  $x$  方向上的变化率。

#### 1.5.2 温度梯度

温度梯度是描述同种或不同介质之间热量从不同等温面传导的速率, 具有方向性, 可表示成式(6):

$$\text{grad } T = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta T}{\Delta l} \right) \boldsymbol{l} = \frac{\partial T}{\partial l} \boldsymbol{l}. \quad (6)$$

式中,  $l$  是等温面法线方向上的长度,  $\boldsymbol{l}$  表示该方向上的单位矢量, 即温度梯度  $\text{grad } T$  是一个矢量, 表

示沿着  $l$  方向上的温度变化率。

当  $\text{grad } T$  愈大时, 物体传热速度越快, 散热更多。不同等温面的热量流向如图 2 所示。

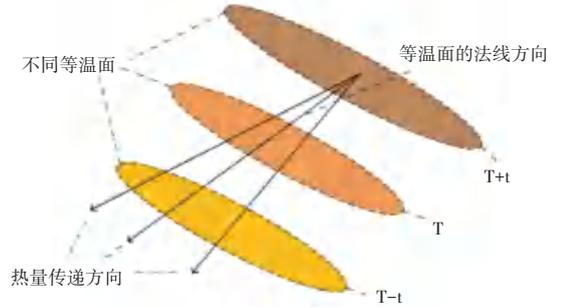


图 2 不同等温面的热量流向

Fig. 2 Heat flow at different isothermal surfaces

### 1.6 随机 PWM 波生成

借助 DSP 系统中的 epwm 模块生成一定频率的 PWM 波, 运用 Logistic 随机数算法在有关寄存器中的设置中添加随机数, 以此达到 PWM 波的周期随机化以及占空比随机化的目的。无随机 PWM 波, 随机周期 PWM 波和随机占空比 PWM 波的对比图如图 3 所示。

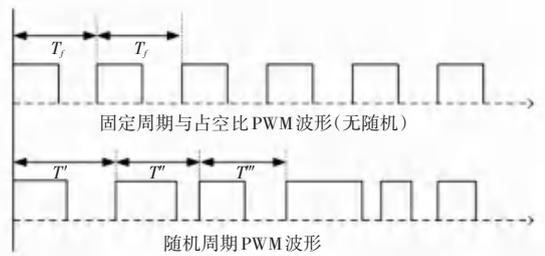


图 3 无随机、随机周期 PWM 波形

Fig. 3 Waveforms of nonrandom, random period PWM

## 2 实验验证

本实验在永磁同步电机 (PMSM) 平台上进行, 利用热电偶并通过万用表测得 IGBT 模块结温, 在 IGBT 模块上安装散热片, 主要目的是作为参照, 验证随机周期 PWM 的 IGBT 模块温升抑制, 同时观察永磁同步电机运作是否正常, 验证是否影响实际的工作状况, 实验平台如图 4 所示。



图 4 实验平台

Fig. 4 The experiment platform

## 2.1 无随机与随机周期 PWM 的温升抑制对比

设置无随机 PWM 波的占空比为 50%, 周期为 1/10 000 s, 两个实验的平均时间约为 400 s, 在此过程中产生的随机数约  $4 \times 10^6$  个, 为保证无随机与随机周期 PWM 的总体占空比基本保持不变, 则随机数的均匀性应良好。该实验随机数范围 (-5, 5) 的分布情况如图 5 所示。

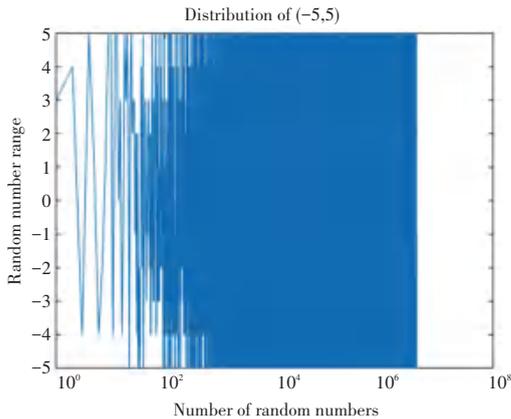


图 5 随机数分布情况

Fig. 5 Random number distribution

从图 5 中可知, 随机数数目在 100 以下的均匀性欠佳, 随机数数目达到 10 000 及以上时的均匀性效果好, 该实验随机数的均匀性更佳。

在相关寄存器中添加适当的随机数范围将 PWM 波随机化, 考虑 IGBT 死区时间, 随机 PWM 程度不宜过高, 在环境温度基本保持不变的情况下 (实际环境温度为 10.5 °C), 以 IGBT 模块运行至 45 °C 为起始温度开始测其运行至 53 °C 时的时间 (升高 8 °C 的运行时间), 同时将永磁同步电机作为驱动负载, 验证温升抑制效果, 将测得的 A, B, C 三相负载电流进行谐波失真分析并将实验数据和结果整理, 见表 1、表 2。

表 1 两种方式下三相负载电流的谐波失真比

Tab. 1 Three-phase load current harmonic distortion ratio in two ways

方法	A 相	B 相	C 相
实验一 无随机 PWM	17.57	18.58	23.71
实验二 随机周期 PWM	18.88	21.58	19.25

表 2 两种方式下 IGBT 模块 45 °C ~ 53 °C 的温升时间

Tab. 2 The temperature rise time of IGBT element at 45 °C to 53 °C in two ways

方法	温升时间/s	趋势对比	PMSM 运行情况
实验一 无随机 PWM	332.4	—	稳定
实验二 随机周期 PWM	421.2	↑	稳定

从表 1 及表 2 可知: 两种 PWM 方式作用下的

三相负载电流的谐波失真比无明显变化, IGBT 模块从 45 °C 升至 53 °C 的过程中, 永磁同步电机保持稳定运行, 随机周期 PWM 方法比无随机 PWM 情况延时了 88.8 s, 证明了随机周期 PWM 的温升抑制效果好于无随机 PWM。此外, 图 6 详细分析了这两种方式下的温升抑制趋势, 结果显示 IGBT 模块温度从 45 °C ~ 大约 45.9 °C 时, 随机周期 PWM 方式与无随机方式的时间随温度的变化率  $\frac{dt}{dT}$  基本保持不变, 从 45.9 °C 开始随机周期 PWM 方式的  $\frac{dt}{dT}$  逐渐大于无随机 PWM 方式, 在该时间段内随机周期 PWM 的温升抑制较明显, 直至温度升至 50.8 °C 二两者的  $\frac{dt}{dT}$  基本保持不变, 此后两种方式的温升抑制时间上升速率保持一致。

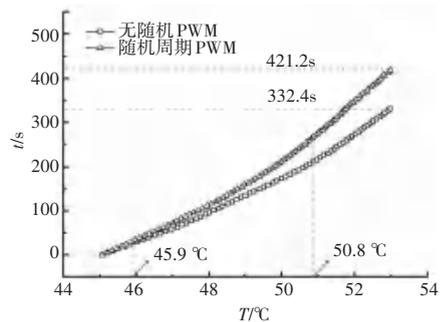


图 6 两种方式下的温升抑制趋势

Fig. 6 Temperature rise suppression trend in two ways

## 3 结束语

随机数算法一般多运用于软件类领域, 本文使用 Logistic 混沌映射随机数算法并结合软硬件, 研究其对 IGBT 模块的温升抑制作用, 同时加入参照物散热片, 对探究功率器件的多种散热方式的结合具有借鉴意义, 并且实验结果的良好, 证明了适用于工程技术领域。

## 参考文献

- [1] 孙鹏飞, 罗皓泽, 董玉斐, 等. 基于关断延迟时间的大功率 IGBT 模块结温提取方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (13): 3366-3372.
- [2] 陈一高, 陈民铀, 高兵, 等. 基于瞬态热阻的 IGBT 焊料层失效分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (10): 3059-3067, 3157.
- [3] 翟鑫梦, 李月锋, 李抒智, 等. IGBT 功率模块热管理研究 [J]. 应用技术学报, 2020, 20 (3): 211-219.
- [4] GAO B, YANG F, CHEN M, et al. A temperature gradient based condition estimation method for IGBT module [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32 (3): 1-10.

(下转第 56 页)