

## PWM 方式控制能量输出问题研究

李 硕 孙四通

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266061)

**摘 要:**对于控制电能的输出电路,在工程中一般是通过调整脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)的占空比来控制流向负载的能量。但在实际应用中,如果在控制输出电路时不考虑能源的交直流形式,可能会出现占空比变化晶闸管的输出不发生变化,从而导致被控负载失控的问题。为解决此问题,分别研究了 PWM 控制直流负载和交流负载方式,分析了不同 PWM 周期和占空比下负载获取交流电压的情况,提出了 PWM 控制晶闸管电路有关参数的配置方法。最后,通过水循环温度控制系统进行测试,测试结果表明,该方法实现了温度精准稳定的控制,能够为该领域内从事相关工作的工程师提供参考。

**关键词:**PWM;能源的交直流形式;晶闸管电路;失控

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.410

## Research on energy output control by PWM method

Li Shuo Sun Sitong

(School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Pulse width modulation is commonly used in engineering to control the energy flow to the load by adjusting the duty cycle of pulse width modulation (PWM) for controlling the output circuit of electrical energy. However, in practical applications, if the AC and DC forms of energy are not considered when controlling the output circuit, there may be a problem where the duty cycle changes and the output of the thyristor does not change, resulting in the controlled load losing control. To solve this problem, PWM control of DC load and AC load modes were studied, and the situation of obtaining AC voltage under different PWM cycles and duty cycles was analyzed. A configuration method for the relevant parameters of PWM control thyristor circuit was proposed. Finally, the water circulation temperature control system was tested, and the test results showed that the method achieved precise and stable temperature control, which can provide reference for engineers engaged in related work in this field.

**Keywords:** PWM; AC and DC forms of energy; thyristor circuit; be out of control

### 0 引 言

电能控制是指通过控制电路来控制电能的输出,用于电能控制的方法有很多种,如电流限制控制、电压变换控制、电容和电感控制、PWM 控制等<sup>[1-2]</sup>。其中脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制是一种通过改变信号脉冲宽度来改变电路输出的平均功率以控制电路输出能量的方法,该方法可以实现高效、精确、可靠的控制和调节,因此在现代电子技术中应用广泛<sup>[3]</sup>。

Wei<sup>[4]</sup>通过单片机输出的 PWM 波控制信号,控制晶闸管功率单元实现了加热器和冷却器平均功率的控制,实

现了“温室智能化”。Wisudo 等<sup>[5]</sup>设计了一种基于单片机的捕捞工具光照度控制系统,其原理是使用 PWM 来控制高功率 LED 的功率实现对光的强度控制,现场实验表明了其控制系统能够有效提高捕捞的效率。Liu 等<sup>[6]</sup>针对现有直流电机控制和测速方法不能满足复杂应用场景需要的问题,采用 PWM 控制方法控制电机电枢电压实现调速的目的,实验结果表明整个控制系统具有较高的稳定性,实现了电机转子转速的稳定调节。任思敏等<sup>[7]</sup>设计了一种波浪能测控系统,该系统的核心是通过 PWM 控制金属氧化物半导体场效应管的通断实现调节发电线圈对储能元件的充电电流的大小,经过初步验证和测试证明了该

系统在一定程度上实现了最大功率点跟踪,相比传统采集控制系统保证了采集过程中的实时性。戴冬冰等<sup>[8]</sup>在分析对比了几种均衡充放电系统的结构和优缺点的基础上,提出了 PWM 控制和 PID 控制均衡器。该均衡器的原理是通过 PWM 控制 MOSFET 的开关导通时间实现动力电池放电和充电过程中的电池电量快速均衡。刘群等<sup>[9]</sup>提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的色选机喂料器震动方法,该方法通过配置 PWM 参数实现晶闸管导通角的延迟设计,实现了振动量大小的同步调节。

上述利用 PWM 控制电能的应用,虽然能实现控制,但是并未考虑负载的交直流不同形式对 PWM 控制的影响,如采用双向晶闸管驱动电路驱动交流负载时,容易出现调节 PWM 占空比变化但负载获取功率未能按设想规律变化甚至没有变化的现象,即 PWM 占空比与负载获取的功率呈现不相关关系的问题。在科研和生产实践中,如果考虑不到这些细节问题并加以修正,会导致被控对象失控甚至发生严重的生产质量事故。为此,本文分别研究了 PWM 控制直流负载和交流负载方式,分析了不同 PWM 周期和占空比下负载获取交流电压的情况,提出了 PWM 控制双向晶闸管电路有关参数的配置方法,得到了 PWM 周期的最佳设定范围。最后通过水循环温度控制系统对所得结论进行了验证,并把这一成果应用到了水暖床垫控制器产品之中,实现了精准稳定的控制目标。

## 1 PWM 控制直流负载方式

PWM 控制直流负载方式是通过改变 PWM 波的脉冲宽度控制场效应管、三极管等电子器件的导通和关断调整直流负载平均电压或平均电流,来实现对负载功率的有效调节<sup>[10-12]</sup>。

PWM 直流调功基本原理是在确定的时间周期  $T$  内,控制负载两端直流电压得失时间的比值,实现负载功率的调节。假设在周期  $T$  内负载两端有直流电压的时间为  $t_h$ ,负载两端无直流电压的时间为  $t_L$ ,则负载功率控制的占空比如下:

$$D = \frac{t_h}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D$  为占空比。PWM 控制直流负载基本原理如图 1 所示,由图 1 可知,在 PWM 直流调功方式中,PWM 占空比发生变化,负载获取的功率也随之变化,PWM 占空比与负载获取的功率呈一定的正相关关系。

## 2 PWM 控制交流负载方式

### 2.1 双向晶闸管驱动电路原理

双向晶闸管驱动电路如图 2 所示。本文所使用的交流电频率为 50 Hz 周期为 20 ms。图 2 中 OC 为光电耦合器,TRIAC 为双向晶闸管,G 为双向晶闸管的门级,T1、T2 为双向晶闸管的两个主电极,TRIAC 作为执行器件用来控制阻性负载  $R_L$ 。双向晶闸管驱动电路原理为当 IO

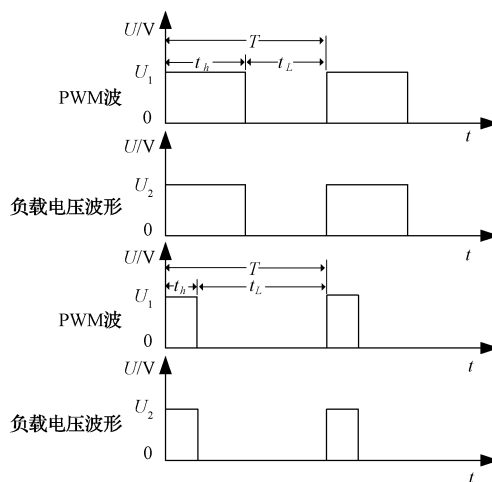


图 1 PWM 控制直流负载基本原理

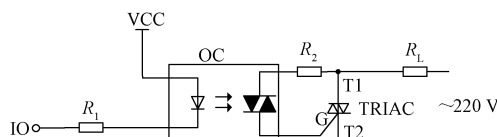


图 2 双向晶闸管驱动电路

口输入低电平时,触发 TRIAC 导通,阻性负载  $R_L$  进入工作状态,反之当 IO 口输入高电平时,OC 输入回路因没有工作电流促使 TRIAC 关断,阻性负载  $R_L$  停止工作。

### 2.2 分析

为更好的进行分析,对双向晶闸管驱动电路进行了简化,并用 TINA-TI 电路仿真软件进行仿真<sup>[13]</sup>,简化的仿真电路如图 3 所示。图 3 中 PWM 波为高电平时 TRIAC 导通, $R_L$  为阻性负载。

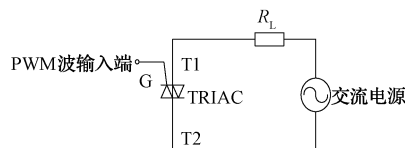
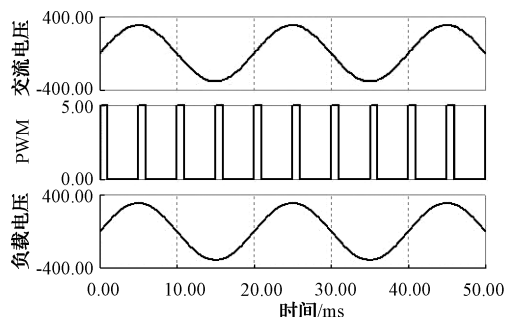


图 3 双向晶闸管功率驱动电路仿真

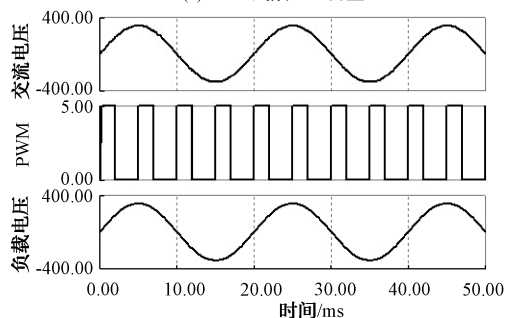
为对不同 PWM 周期和占空比下负载获取交流电压的情况进行分析,以交流电的一个周期时间为基准,分两种情况进行讨论;当 PWM 周期小于等于一个交流电周期时,设置其占空比为 20%、40%、60%;当 PWM 周期大于一个交流电周期时,设置其占空比为 20%、50%、80%。

#### 1) PWM 周期小于等于一个交流电周期

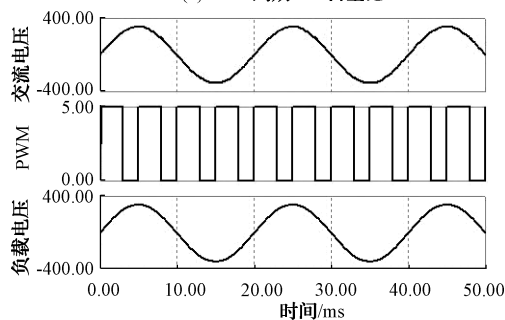
为满足 PWM 周期小于等于一个交流电周期分别以 PWM 周期 5、10、15、20 ms 占空比为 20%、40%、60%为例进行分析。PWM 周期 5 ms 时 PWM 波与交流电压的对应关系如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着占空比变大负载获取的交流电压并未随着占空比的改变而变化,PWM 并没有起到控制作用,加在负载上的电压为全部的



(a) PWM周期5 ms占空比20%



(b) PWM周期5 ms占空比40%



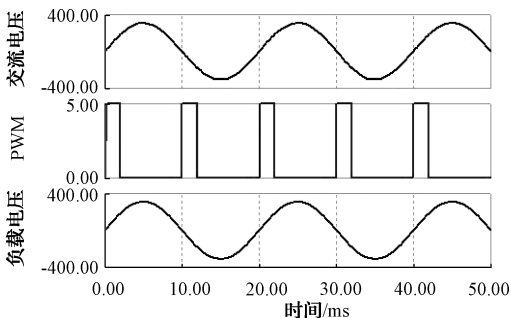
(c) PWM周期5 ms占空比60%

图4 PWM周期5 ms占空比20%、40%、60%

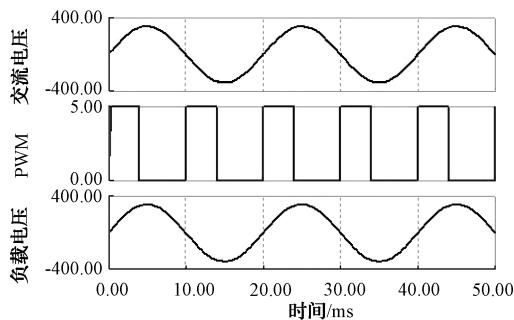
交流电源电压。

PWM周期10 ms时PWM波与交流电压的对应关系如图5所示。与图4类似,PWM占空比变化,负载获取的交流电压并未改变,PWM未能起到控制作用。

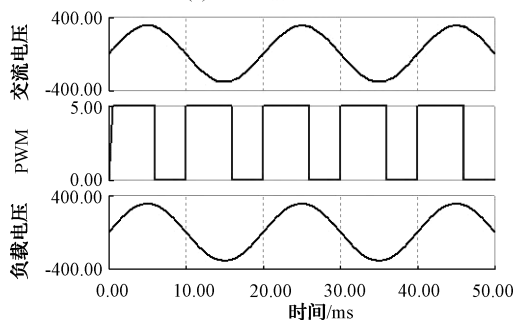
PWM周期15 ms时PWM波与交流电压的对应关系如图6所示。从图6可以看出,占空比20%~40%负载获取电压发生了变化,但是从40%~60%负载获取电压是相同的并没有发生变化。



(a) PWM周期10 ms占空比20%

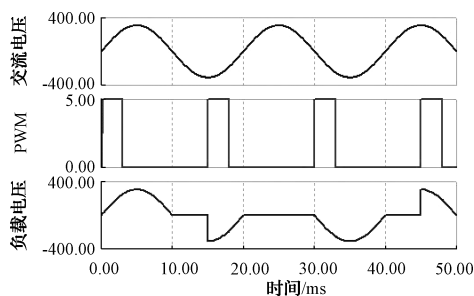


(b) PWM周期10 ms占空比40%

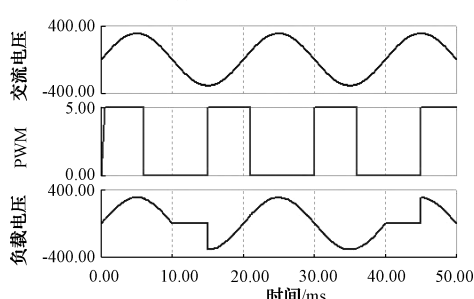


(c) PWM周期10 ms占空比60%

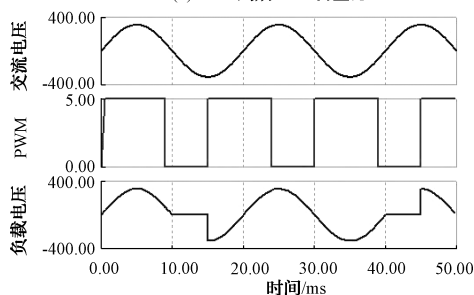
图5 PWM周期10 ms占空比20%、40%、60%



(a) PWM周期15 ms占空比20%



(b) PWM周期15 ms占空比40%



(c) PWM周期15 ms占空比60%

图6 PWM周期15 ms占空比20%、40%、60%

PWM 周期 20 ms 时 PWM 波与交流电压的对应关系如图 7 所示。从图 7 可以看出, 占空比 20%~40% 负载获取的电压未变化, 但是从 40%~60% 负载获取电压发生了变化。

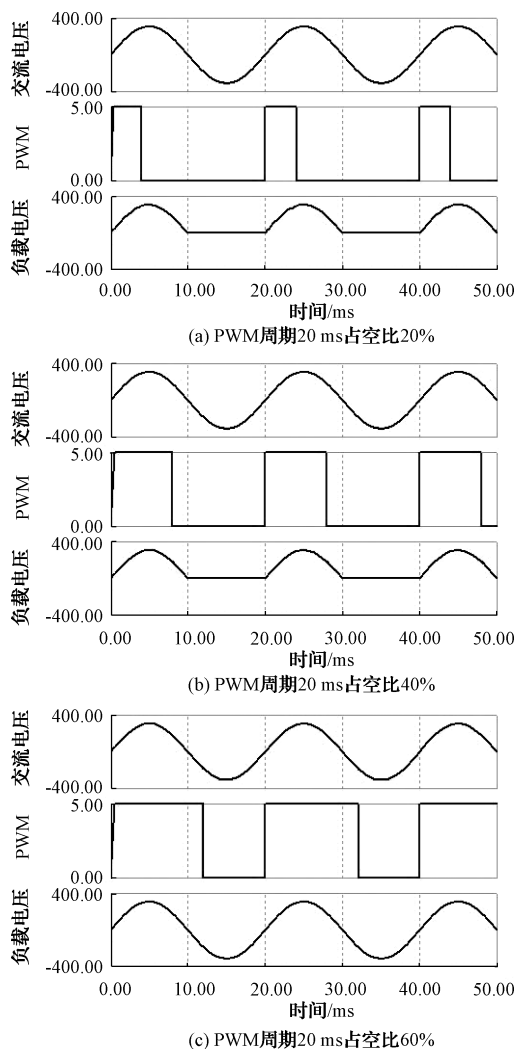


图 7 PWM 周期 20 ms 占空比 20%、40%、60%

由上述分析可知, 设置 PWM 周期小于等于一个交流电周期时可以得出如下结论。

(1) PWM 周期小于等于半个交流电周期时 PWM 失去控制作用, 会出现 PWM 调控失败的现象。

(2) PWM 周期大于半个交流电周期且小于等于一个交流电周期时 PWM 占空比与负载获取的功率可能呈现出不相关关系。

2) PWM 周期大于一个交流电周期

为满足 PWM 周期大于一个交流电周期, 分别以 PWM 周期为 40、60、80 ms 占空比为 20%、50%、80% 为例进行分析。从图 8~10 可以看出, 随着 PWM 占空比的增大, 负载获取的交流电压也随着增大。从图 9(a) 和 (c) 可以看出, 在 PWM 占空比为 20%、80% 时 PWM 的高电

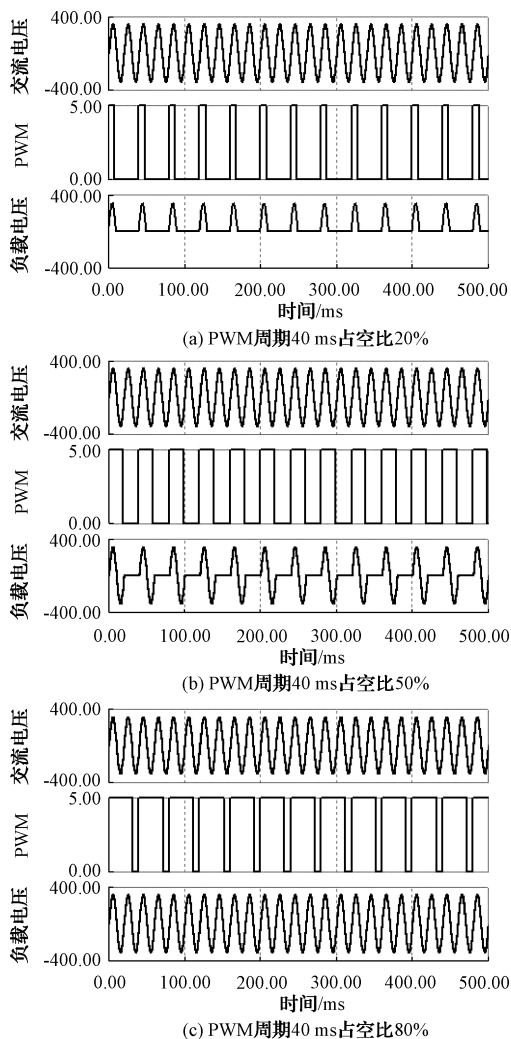
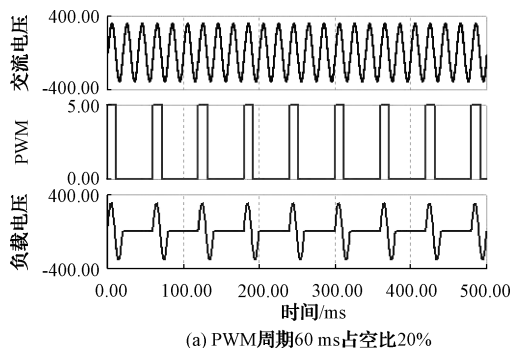


图 8 PWM 周期 40 ms 占空比 20%、50%、80%

平时间为 12 和 48 ms, 但是此时负载获取的交流电压为 1 个周波和 2.5 个周波, 负载获取的交流电周波数与高电平持续时间并不是对应关系。从图 9(b) 可以看出, 占空比为 50% 时 PWM 高电平时间为 30 ms, 此时负载获取的交流电压为 1.5 个周波, 恰好与高电平持续时间是对应关系。图 8、10 同样出现负载获取的交流电压周波数与高电平持续时间可能是对应关系也可能不是对应关系的现象。



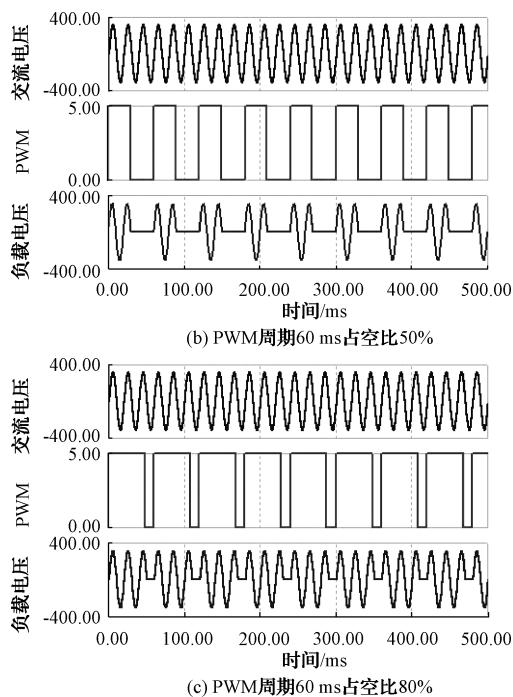


图9 PWM周期60 ms占空比20%、50%、80%

由分析可知设置PWM周期大于一个交流电周期可以得出如下结论。

(1)设置PWM周期大于一个交流电周期PWM占空比与负载获取功率呈现出的是正相关关系。

(2)PWM调控可能会使高电平持续时间与负载获取交流电压周波数不成对应关系,造成能量传递误差的问题。

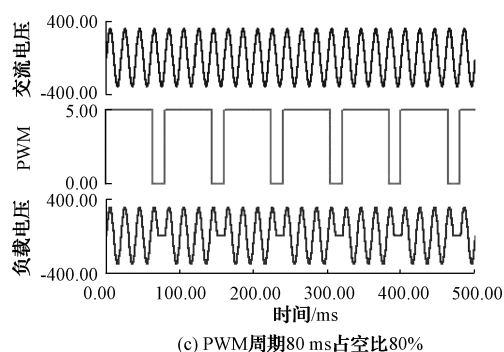
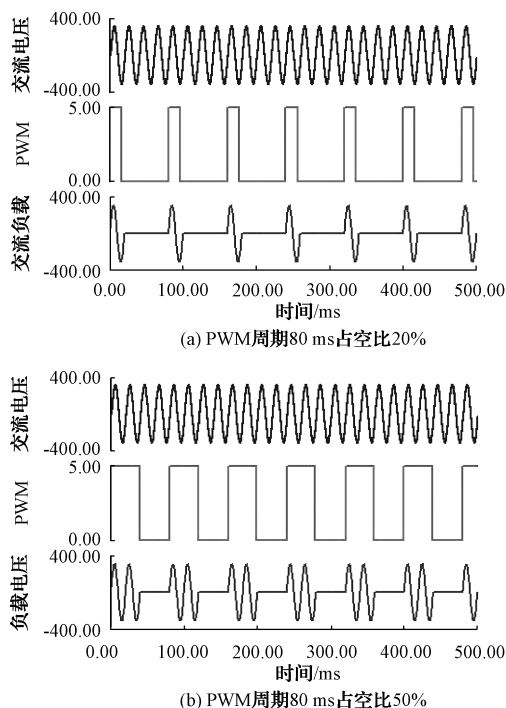


图10 PWM周期80 ms占空比20%、50%、80%

### 2.3 PWM控制晶闸管驱动电路参数的配置方法

由已得出结论可知,设置PWM周期小于一个交流电周期时PWM达不到调控的作用,设置PWM周期大于一个交流电周期时虽然PWM能达到调控效果,但是会出现一定的能量传递误差。PWM周期大于一个交流电周期时出现的能量传递误差,是因为PWM的高电平持续时间作为双向晶闸管门极的触发时间,如果当触发时间在交流电过零后截止,此时双向晶闸管两主电极间的电流仍大于其维持电流,导致双向晶闸管依然处于导通状态,即使PWM为低电平负载仍在获取能量,由此造成了能量传递的误差。由于PWM高电平持续时间为负载获取交流电压的时间,因此能量传递的误差可由负载获取交流电压的时长误差表示。

由双向晶闸管的特性<sup>[14-15]</sup>可知,PWM周期大于一个交流电周期时负载获取的交流电压时长最大误差为0.5个周波的交流电压。由于负载获取功率的大小是通过调节PWM占空比的大小实现的,PWM周期设置的大小必定会影响负载获取交流电压时长的误差。PWM不同周期下的数据比较如表1所示,其中 $T$ 为一个交流电周期。

表1 PWM不同周期下的数据

PWM 周期/ms	负载获取交流 电压时长最大 误差/ms	负载获取交流 电压时长平均 误差/ms	负载获取交流 电压时长相对 误差/%
10 $T$	10	1	5
30 $T$	10	0.33	1.7
50 $T$	10	0.2	1
70 $T$	10	0.143	0.7
80 $T$	10	0.125	0.6
100 $T$	10	0.1	0.5

从表1可以看出,随着PWM周期的增加,负载获取交流电压时长的相对误差与平均误差都在减小,也就是说PWM周期设置足够大时,负载获取交流电压的相对误差与平均误差就会足够小。但是不能为了减小误差,而盲目的增大PWM周期,因为设置周期过大可能会使PWM达

不到控制作用。在实际应用中 PWM 周期的设定要根据负载自身的特性和其他相关因素去选择。

由此可以得出 PWM 控制双向晶闸管驱动电路参数的配置方法如下。

1) PWM 周期设置应该大于一个交流电周期。

2) 在 PWM 周期设定大于一个交流周期的前提下 PWM 周期不能设置无穷大,具体设定要根据负载自身的特性和其他相关因素进行考虑。

### 3 测试与验证

为验证本文所研究内容的有效性,依托水暖床垫项目进行测试。水暖床垫是一种通过水循环温度控制系统进行温度控制的产品,其工作原理是将水箱里的水通过电加热管加热,然后由水泵电机经水管输送到床垫内达到加热的目的。水暖床垫中的水循环温度控制系统示意图和实物如图 11 和 12 所示。

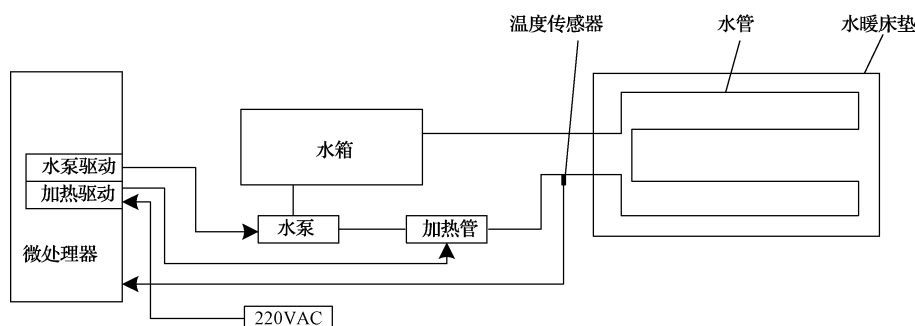


图 11 水循环温度控制系统示意图

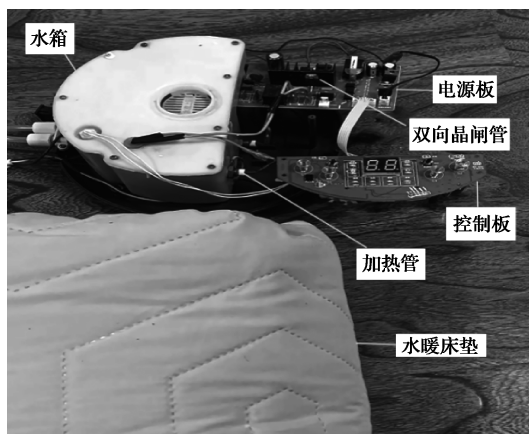


图 12 水循环温度控制系统实物

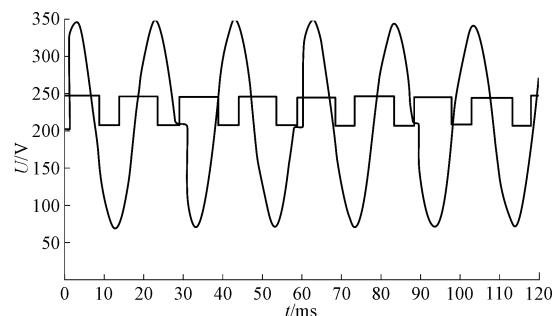
为了提高控制精度高,提高控制品质,控制系统采用了 PID 控制算法<sup>[16-17]</sup>。采用 PID 算法控制 PWM 占空比的方式进行负载功率的调节,从而实现温度的控制。

为测试不同 PWM 周期下温度控制的情况,分别设置 PWM 周期为 15、1 000、2 000 ms。PWM 周期设定为 15 ms 是对应于 PWM 小于一个交流电周期。设置 PWM 周期为 2 000 ms 是对应于 PWM 周期大于一个交流电周期的情况,以减小误差为目的并且不考虑负载特性及其他相关因素。设置 PWM 周期为 1 000 ms,是考虑到 PID 计算出的控制量最终要以改变 PWM 的占空比使得负载功率发生改变为目的,如果 PID 的控制周期与 PWM 周期相差太大,容易造成 PID 计算出的控制量失效,改变不了 PWM 的占空比<sup>[18-19]</sup>。虽然 PID 控制周期的设定周期越小越能反应温度偏差的变化情况,但是水暖床垫作为水循

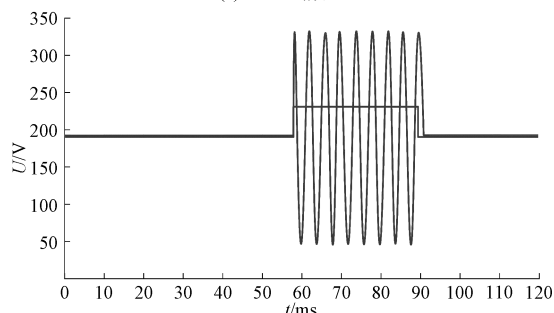
环温控设备,其温度调控具有一定的滞后性,使得相邻温差几乎没有什么变化,并且设定周期太小会增加微处理器的运算工作量,所以将 PWM 周期设置在 1 000 ms。

系统运行时水暖床垫的初始温度为室温 25℃,系统设定温度为 45℃,在 PID 参数一定时,相同实验条件下系统运行过程中示波器捕捉到的加热器两端电压波形与 PWM 波形如图 13 所示,记录的不同 PWM 周期下温度控制曲线如图 14 所示。

从图 14 可以看出,PWM 周期设置 15 ms 时与设定温度最大相差 4℃并且在设定温度上下波动,不能稳定在设



(a) PWM 周期 15 ms



(b) PWM 周期 1 000 ms



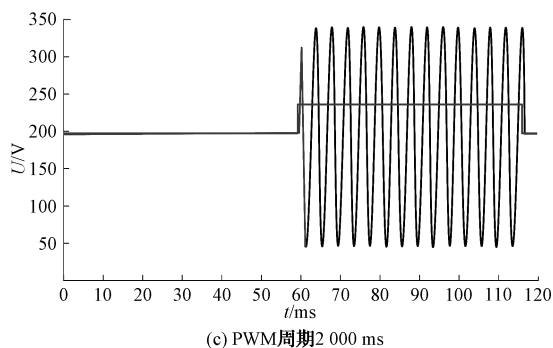


图13 加热器两端电压波形与PWM波

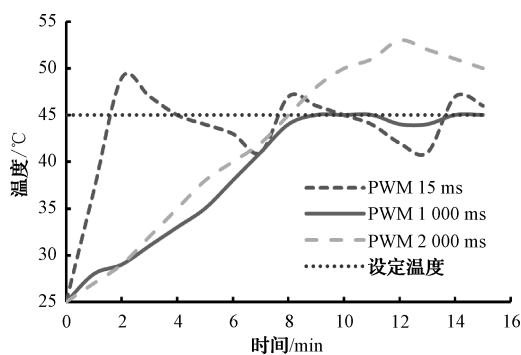


图14 不同PWM周期下温度控制曲线

定温度,PWM周期设置2000ms时温度误差最大可相差8℃,同样不能稳定在设定温度,在PWM周期设置1000ms时可以看出在较短的时间内温度能稳定在设定值。

#### 4 结论

本文根据在实际应用中采用双向晶闸管驱动电路进行PWM控制负载功率时出现的占空比变化晶闸管的输出不发生变化,PWM占空比与负载获取的功率呈现不相关的问题,对PWM控制直流负载方式和交流负载方式进行了分析,提出了PWM控制晶闸管电路PWM周期最佳设定范围的方法。此方法说明PWM周期和被控制的交流电周期存在着一个匹配原则,PWM周期不应设置小于一个交流电周期,在设置PWM周期大于一个交流电周期时应考虑负载特性及相关因素,不能为了减小能量传递误差盲目增大PWM周期。

#### 参考文献

- [1] 陈继开, 逯成龙, 李浩茹, 等. 适用于镁海水电池的能量变换系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 267-276.
- [2] 周大林, 陈昊, ORABI M, 等. 一种前端级联DC/DC变换器的开关磁阻电机驱动拓扑[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 45-52.
- [3] 明焱, 冯汝鹏, 朴永杰. 基于新冠病毒荧光检测的RT-qPCR温控系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6):

18-23.

- [4] WEI X. Intelligent temperature control system of greenhouse based on STM32 single chip microcomputer[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2254(1): 012046.
- [5] WISUDO S H, MAWARDI W, BASKORO M S. Light intensity design as a fishing tool on liftnet, with pulse width modulation system based on microcontroller[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1477(5): 052041.
- [6] DEFANG L, XIANCHAO W. Research on control of DC motor based on TMS320VC5509A[C]. 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE). IEEE, 2021: 903-906.
- [7] 任思敏, 陈仁文, 刘宋祥. 基于LabVIEW的波浪能测控系统的设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(14): 43-51.
- [8] 戴冬冰, 冯冬梅, 张军, 等. 动力电池均衡充放电系统的研究和设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 111-115.
- [9] 刘群, 洪占勇, 贾星明. 色选机喂料振动器的FPGA控制方法与实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 88-93.
- [10] IZCI D. Design and application of an optimally tuned PID controller for DC motor speed regulation via a novel hybrid Lévy flight distribution and Nelder-Mead algorithm[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(14): 3195-3211.
- [11] TAHAN M, HU T. Multiple string LED driver with flexible and high-performance PWM dimming control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9293-9306.
- [12] 杨馥华, 康婷霞. 无刷电机PWM调速系统设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(7): 124-128, 133.
- [13] 张冰洋, 黄霞. 基于TINA-TI的心音听诊电路实验教学仿真研究[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(3): 165-168.
- [14] 杨志凌. 一种晶闸管状态和极性的检测方法及其应用[J]. 现代信息科技, 2022, 6(20): 56-59.
- [15] 王亚林. 双向晶闸管原理及在交流调压电路中的应用[J]. 信息通信, 2012(1): 80-81.
- [16] 韦宏利, 周建波, 王晴悦, 等. 基于模糊PID的温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 111-116.
- [17] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control tuning methods and applications[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021(9): 818-827.

- [18] 狄小冬,王熙.玉米中耕变量施肥电控液压驱动系统设计[与试验[J].农机化研究,2021,43(5):47-54.
- [19] 曾海林,余高翔,陈平松,等.钢轨打磨控制系统设计[J].机车电传动,2018(4):79-82.

## 作者简介

李硕,硕士研究生,主要研究方向为测控技术与仪表、

控制科学与工程。

E-mail: 1278381623@qq.com

孙四通(通信作者),副教授,主要研究方向为测控技术与传感器、工业物联网。

E-mail: sunsitong@qust.edu.cn