

# 超高压汞灯数字电子镇流器设计与实现

赵 鹏

广州软件学院, 广东 广州

收稿日期: 2022年11月21日; 录用日期: 2022年12月16日; 发布日期: 2022年12月28日

## 摘 要

超高压汞灯是投影仪、舞台光束灯和探照灯中广泛使用的一种绿色光源。本文以AVR单片机为控制核心, 以BUCK变换电路与全桥逆变电路为驱动电路, 以LC谐振电路为点火电路, 采用三级式电路拓扑结构进行了软硬件设计与实现, 研发了一款330 W超高压汞灯电子镇流器, 并阐述了设计思路、工作原理、样机研发与实验实测结果。结果显示, 该电子镇流器启动过程平稳、输出功率恒定、光输出特性稳定、温度特性良好、无声共振现象, 技术性能及环境适应性均达到实际使用要求, 在工业生产中具有广泛的应用前景。

## 关键词

电子镇流器, 超高压汞灯, 数字控制, 功率控制

# Design and Implementation of Digital Electronic Ballasts for Ultra-High Pressure Mercury Lamps

Peng Zhao

Software Engineering Institute of Guangzhou, Guangzhou Guangdong

Received: Nov. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Ultra-high pressure mercury lamp is a green light source widely used in projectors, stage beam lamps and searchlights. This paper develops a 330 W electronic ballast for the ultra-high pressure mercury lamp with AVR micro-controller as the control core, BUCK converter circuit and full-bridge inverter circuit as the driving circuit, LC resonant circuit as the ignition circuit, and three-stage circuit topology for software and hardware design and implementation, and elaborates the design idea, working principle, prototype development and experimental measurement results. The results show

that the electronic ballast has a smooth starting process, constant output power, stable light output characteristics, good temperature characteristics, and no acoustic resonance phenomenon, and the technical performance and environmental adaptability meet the practical requirements, which has a wide application prospect in industrial production.

## Keywords

Electronic Ballasts, Ultra-High Pressure Mercury Lamps, Digital Control, Power Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

超高压汞灯(Ultra-High Pressure Mercury Lamp)是新一代高效电光源,具有优越的性能。传统镇流器不仅存在着功率因数低、浪费电能的问题,而且由于声共振现象与光输出特性不稳定,会对人体组织及神经系统造成损害。为了解决传统电感式镇流器的上述问题,本文设计研究了功率因数高、无频闪、易于调光控制并且工作效率高的超高压汞灯电子镇流器[1]。该装置使用 AVR 单片机为控制核心,以 BUCK 变换电路与全桥逆变电路为驱动电路,以 LC 谐振电路为点火电路,采用成熟的三级式电路拓扑结构,根据超高压汞灯从启动开始到正常工作的各个阶段不同控制模式,进行了相应的软硬件设计,研发了一款 330 W 的超高压汞灯电子镇流器[2] [3]。此款电子镇流器的主要技术性能及环境适应性均达到实际使用要求。

## 2. 电子镇流器工作原理

电子镇流器工作原理如图 1 所示,电路采用三级拓扑结构。第一级整流与功率因数校正电路,通过集成数字芯片实现,对交流市电进行功率因数校正,输出 380V 直流电压为镇流器提供稳定输入;第二级 BUCK 电路,用来实现对镇流器功率的控制;第三级全桥逆变电路,将第二级的直流电转化成交流电,满足灯泡负载的用电要求[4] [5]。同时,在电路第三级后,串联 LC 谐振电路,作为点火启动电路。

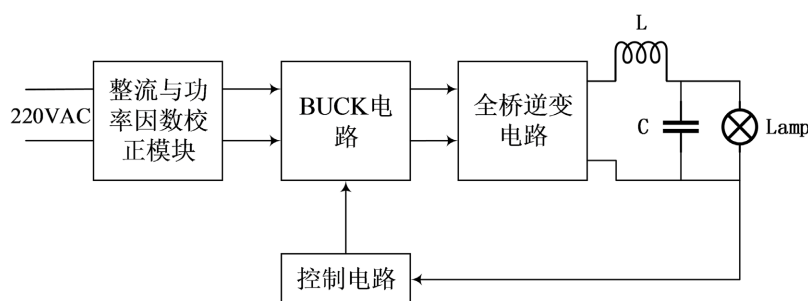


Figure 1. Schematic diagram of three-stage topology electronic ballast

图 1. 三级拓扑结构电子镇流器原理图

## 3. 系统硬件设计

### 3.1. 功率电路

电子镇流器结构框图如图 2 所示,通过前级电路对市电交流电进行功率因数校正,输出 380 V 直流

电为镇流器提供稳定的电压输入。而第二级和第三级的 BUCK 电路和全桥逆变及谐振电路则在灯泡不同工作阶段中，由单片机控制实现相应的运行状态。在灯泡未点亮前，即灯泡处于冷态未发光状态，灯泡两电极间为兆欧级别的断路状态。镇流器启动点火后 BUCK 电路工作在恒流状态，全桥电路工作在高频状态，LC 谐振电路产生高压击穿灯中气体放电发光[6] [7] [8]。在灯泡点火成功后，其两极间阻抗骤减为几十欧。单片机通过检测 BUCK 电路负载电流判断灯泡是否被点亮，点亮后全桥电路降频至正常工作频率，BUCK 电路进入短暂的恒流过渡期。过渡期后全桥电路恒定在灯泡额定工作频率，此时频率远离 LC 电路谐振点而不再产生谐振，作为滤波电路使用，BUCK 电路进入较低功率运行一段时间。当灯泡稳定后，BUCK 电路功率逐渐升至额定功率并保持恒功率状态[9] [10] [11]。

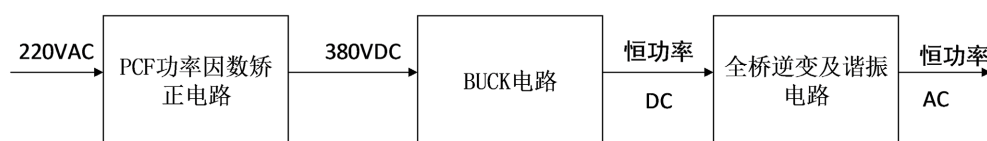


Figure 2. Structure block diagram of electronic ballast  
图 2. 电子镇流器结构框图

由于 PFC 功率因数校正电路的输出为 380 V 直流电压，其电压高于灯泡额定电压，所以采用降压式变换电路 BUCK 电路作为镇流器的功率控制级[12]。本设计中使用的超高压汞灯为市面常规的 330 W 灯泡，其启动电压为高达 2600 V。由于 BUCK 输出电压即全桥电路输入电压约为 150 V，因此，全桥电路输出将为 150 V 幅值的方波，所以需要 LC 电路产生谐振高压进行点火发光。

## 3.2. 控制电路

### 3.2.1. 平均电流控制电路

平均电流控制能有效地控制电感的平均电流，无需谐波补偿，电路抗噪性能优越[13]。本设计中的平均电流控制电路如图 3 所示，正常运行时，单片机给 PNP 管提供 5 V 电压使其关闭，BUCK 电路的输出电流经过 R1 进行采样，与运放正端的单片机输出的 DAC 信号经电阻分压后的值进行运算。其中，R1 的采样信号为反馈信号，DAC 信号经电阻分压后的值为给定信号，经过 R9 和 C4 构成的补偿网络，对其做平均之后传送到下一级运放 Q5 作为输出电流，Q5 和单片机的 PSC 功能构成 PFM 控制器将偏差信号转化为 PFM 控制信号。

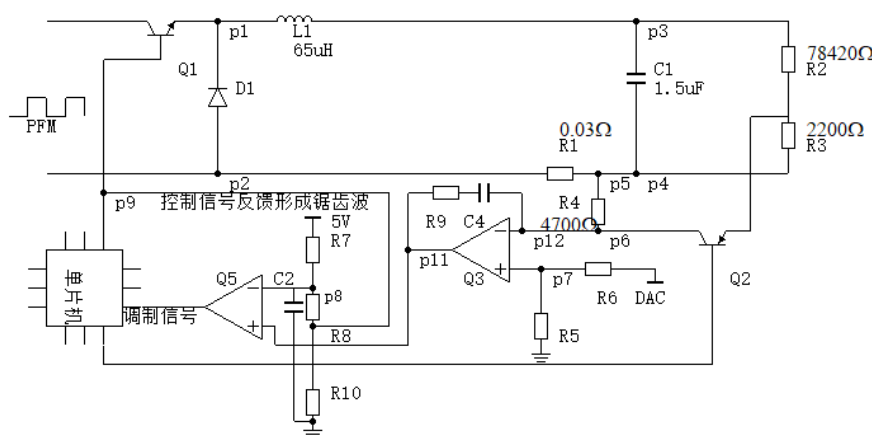


Figure 3. Circuit diagram of BUCK average current control  
图 3. BUCK 平均电流控制电路图

PFM 控制器主要由比较器和单片机及其外围 RC 电路组成, 该 PFM 控制器的输入为经过补偿网络平均后的偏差信号, 输出为 PFM 控制信号。PFM 控制器电路原理如图 4 所示, 电路刚开启时输入偏差电压大于负端电压, 比较器输出为高电平, 由于单片机为低电平调制, 那么单片机输出的 PFM 信号为最大占空比信号, 该信号反馈至点 p3, 与 R1 上端的 5V 偏置信号共同作用, 根据戴维宁定理, 叠加出三角波, 作用于 Q1 的负端, 由于单片机在未被调制的情况下输出最大占空比不变, 则在偏差电压大于负端三角波最大值时, p2 点的三角波形保持不变。

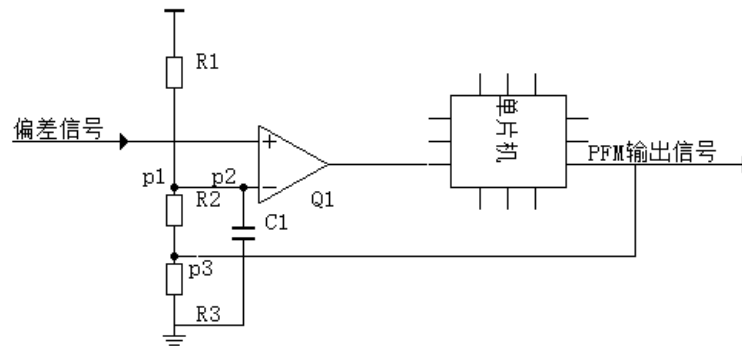


Figure 4. Circuit schematic diagram of PFM controller  
图 4. PFM 控制器电路原理图

PFM 调制分时波形如图 5 所示, 当偏差信号的平均值触及并低于三角波顶端时, 在比较器末端产生低电平, 该低电平传递到单片机的 PSC 模块, 根据所选模式, 将占空比电平拉低, 进入低电平, 经过一定时间再次将电平置高。调制过程中低电平的时间相同, 即  $t_2$  和  $t_4$  相同, 高电平时间不同, 即  $t_1$  与  $t_3$  不同。由于一个周期内高电平时间可能不同, 低电平时间相同, 导致其周期可能也不同, 所以该调制方法为定宽调频法。

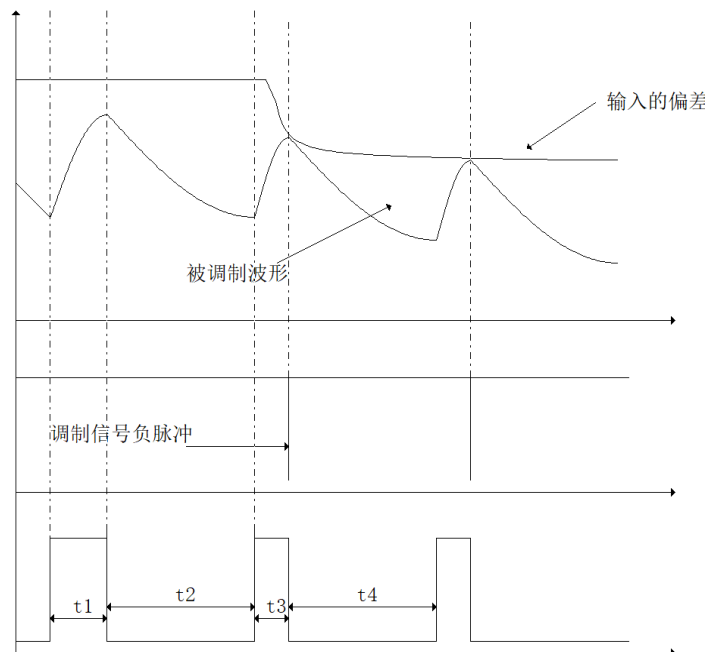


Figure 5. Waveform diagram of PFM modulation time-sharing  
图 5. PFM 调制分时波形图

### 3.2.2. 功率控制环节

超高压汞灯镇流器的控制方式众多, 但最能延长灯泡寿命并使其工作在额定功率的控制方法为恒功率控制的方法。

在本设计中, 灯泡正常启动之后, 全桥电路的工作频率降为 60 Hz, 不再起到谐振的作用, 其作用为将 BUCK 电路的输出电压和电流从直流变为交流, 以达到灯泡交流供电的要求。在正常启动后, BUCK 电路起到了控制功率作用[14]。而 BUCK 电路的功率控制方面, 采用了双闭环控制的方法, 将上述所讲的平均电流控制器作为控制的内环, 将功率环作为控制的外环, 双环控制系统的基本控制框图如图 6 所示。

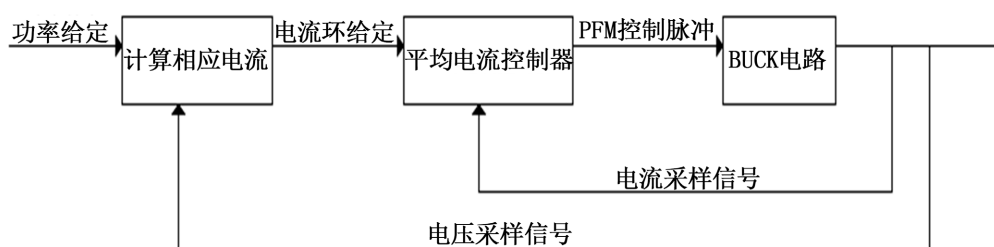


Figure 6. Block diagram of power-current dual-loop control

图 6. 功率电流双环控制框图

由于电流环为纯硬件电路控制, 因此其响应速度极快, 其控制周期相对于外环的电压控制的控制周期而言非常小, 因此可认为在外环给定电流之后, 内环便可将电流立即调节为设定值。因此, 可根据采样回来的电压和设定的功率代入公式(1), 得到电流设定值的给定。

$$I = P/U \quad (1)$$

由公式(2)可知, 在功率一定的情况下, 电流与阻抗成负相关。若在阻抗较小时运行于额定功率, 会造成很大的设定电流。由于超高压汞灯在启动后阻抗很低, 随后会逐渐变大稳定。故而本设计采取的恒功率方法为: 在正常开启后, 先在较低功率下运行, 再逐渐升功率至设定功率值。

$$I = \sqrt{P/R} \quad (2)$$

以 330 W 功率为例, 若灯泡开启时阻抗为 3  $\Omega$ , 则电流应该设定为 10.48 A。如此, MOS 管和二极管的耐流值要求将会极大增加, 从而导致成本增加。除此之外, 为防止电流过大, 本设计中将电流限幅于 6.7 A 保证了电路工作安全性。

单片机设定的功率控制策略如图 7 所示, 在启动成功前期, 让灯泡工作在 120 W 的功率以下, 此时的灯泡阻抗很低(图示 R0), 由于刚启动电压很低, 并未达到稳定工作的范围内, 于是继续以 4 A 的限流使灯泡逐渐升温, 其过程如图 P6 点。升温后电阻增加, 假设升到 R1, 当电压再升高时, 功率被限制在 120 W (图示 P1 点), 持续约几十秒后逐渐升功率至 330 W。相对而言功率上升比电阻上升速率高, 当功率已经升到 330 W 时, 阻抗只缓慢上升至 R1, 由于将电流限制在 6.7 A (图示 P5 点), 此时功率约为 315 W, 而不会超功率烧坏灯泡。等到灯泡阻抗逐渐上升并稳定在 R2 时, 灯泡将稳定地运行于额定功率[15]。

## 4. 系统软件实现

根据超高压汞灯从启动到正常工作各阶段不同控制模式, 控制变量转变, 确定模式转换是软件设计的关键所在, 合理选择控制变量, 使得电子镇流器的输出特性与超高压汞灯的动态特性匹配一致。

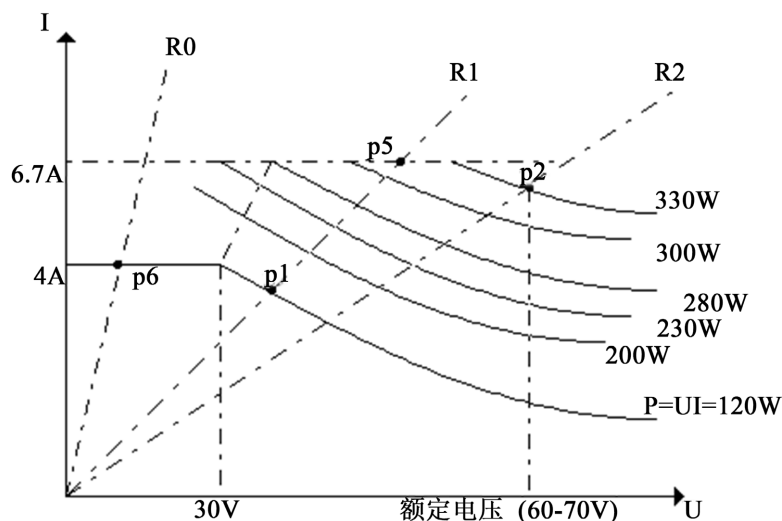


Figure 7. Plot of voltammetric characteristics for program setting  
图 7. 程序设定的伏安特性曲线图

本文设计的超高压汞灯电子镇流器软件流程图如图 8 所示，谐振阶段单片机控制电路产生高频方波驱动全桥电路，电流控制器对 BUCK 电路设定了较低的电流给定值，为全桥电路谐振提供所需能量，并起到过流保护作用。当负载改变后，谐振峰将会消失，电路充当滤波功能，所以短时间内仍用高频方波驱动输出不会有较大的影响。故而本装置可以采用了开环检测方法，定时检测灯泡是否被点亮。当低功率阶段的功率逐渐提升到额定功率时，此时软件控制其功率不再升高，维持在额定功率值，其电流值的给定方法与低功率阶段相同。恒功率阶段和低功率阶段都有过热保护措施，在各个运行周期内，AVR 单片机的 ADC 模块采样热敏电阻值，若低于实际设定阈值则表示系统过热，单片机控制镇流器进入待机状态。

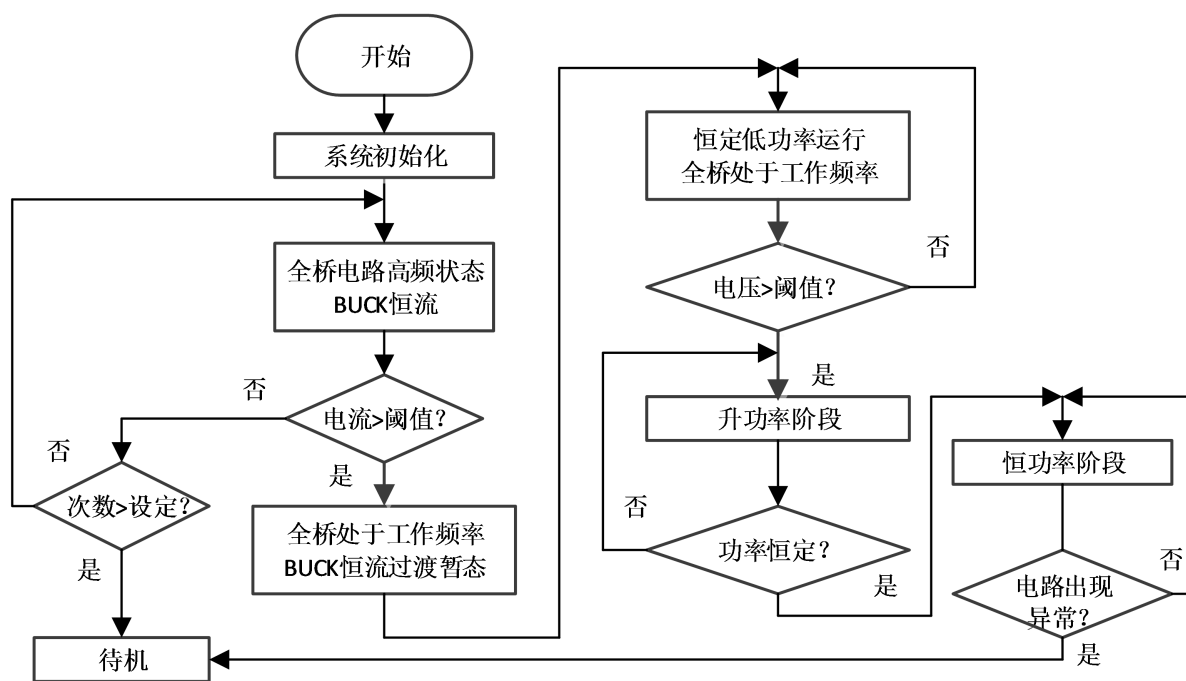


Figure 8. Overall flow chart of software implementation  
图 8. 软件实现整体流程图

## 5. 样机实验与测试

本文设计制作了 AVR 单片机控制的 330 W 超高压汞灯电子镇流器，其样机如图 9 所示，下面接入 220 V、50 Hz 交流市电进行测试与分析。由于功率控制中有合适的限流，功率的提升速率缓慢而稳定，不会引起过较大的电流波动，因此在多种不同特性的灯泡实验中，本设计也可以正常运行，并使其工作在设定功率。

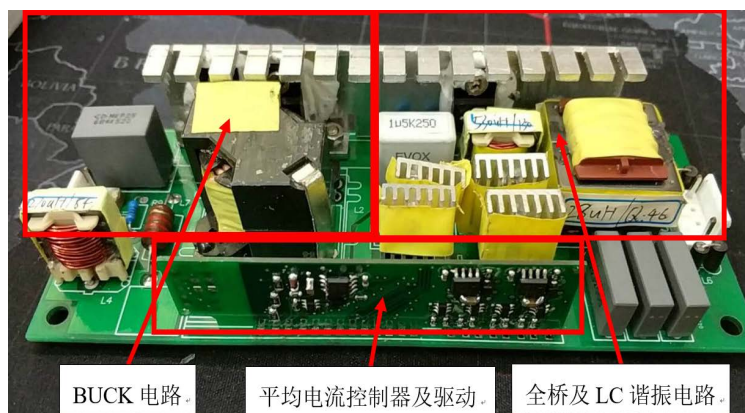


Figure 9. Prototype diagram of digital electronic ballast for ultra-high pressure mercury lamp  
图 9. 超高压汞灯数字电子镇流器样机图

### 5.1. 谐振阶段工作波形

谐振阶段工作波形如图 10 所示，黄色波形为输出电压经过四分之一分压后的波形，由此可见在谐振电路开启瞬间，输出端电压可达到千伏级别，产生了高压尖峰，此时灯泡被击穿点亮。之后单片机检测采样电阻值是否达到设定阈值之上，若达到则说明灯泡成功点亮。全桥电路的频率降至正常工作频率，持续两秒进行过渡。过渡阶段后全桥电路进入额定频率的功率运行阶段。绿色波形为 BUCK 电路输出电压，在谐振阶段，BUCK 电路工作在轻载状态，在低功率运行阶段，LC 电路不再谐振，此时，BUCK 电路相当于接入了负载，从而电压下降，输出电流变大。

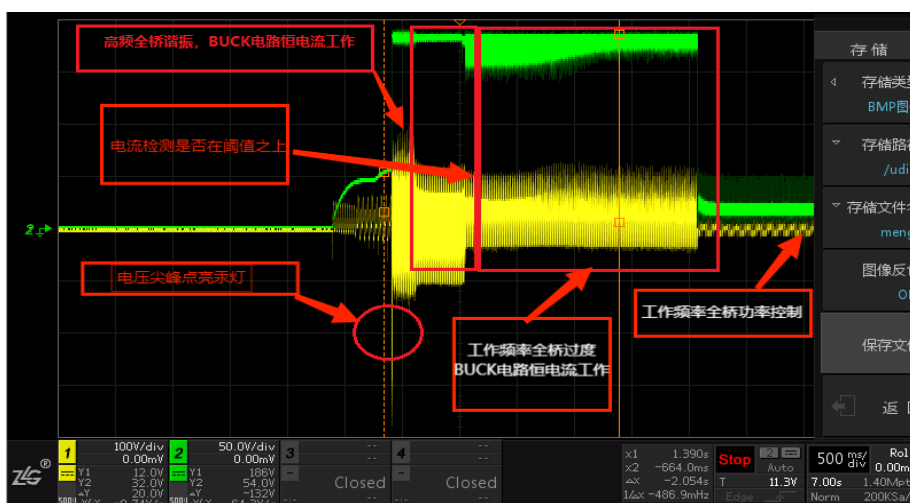


Figure 10. Operating waveform diagram of resonant phase  
图 10. 谐振阶段工作波形图

## 5.2. 低恒功率运行到恒功率运行阶段

低恒功率阶段到恒功率阶段波形如图 11 所示，在谐振结束后，首先进入低恒功率阶段，然后再进入升功率阶段，到达额定功率后便稳定在恒功率阶段。

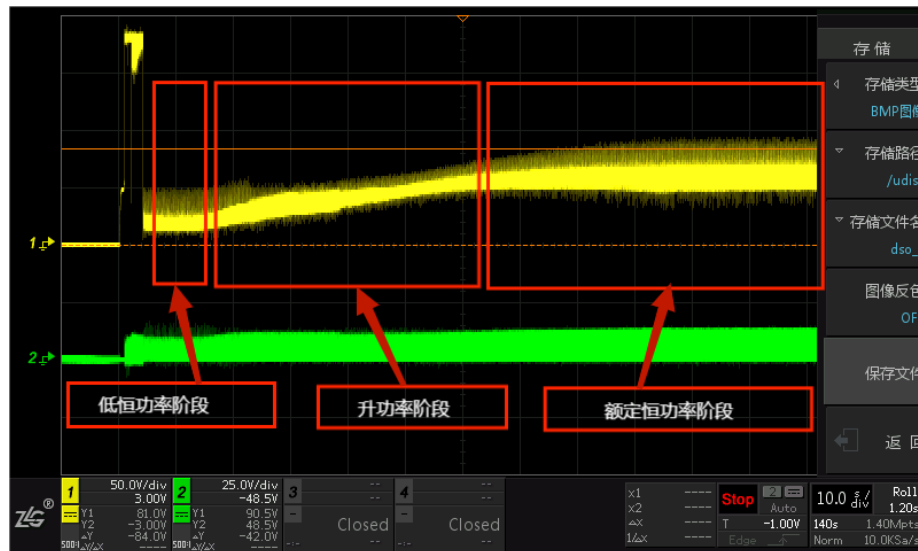


Figure 11. Waveform diagram from low constant power stage to constant power stage  
图 11. 低恒功率阶段至恒功率阶段波形图

BUCK 电压与全桥输出电流如图 12 所示，本设计中，功率控制方面，有低恒功率和升功率两个过渡阶段，两个过渡过程电流均在 5 A 左右，与直接恒功率方法相比，电流在整体阶段不存在过大的峰值，从而减小了器件选取难度，提高了系统稳定性。

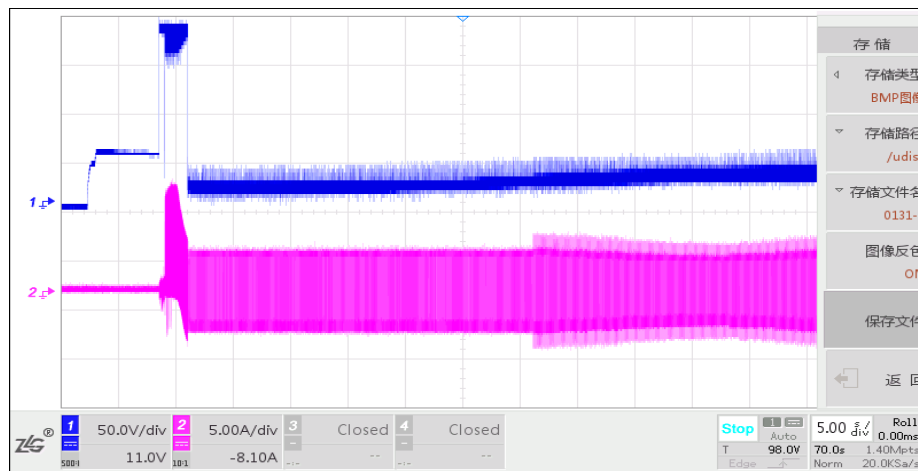


Figure 12. BUCK voltage and full bridge output current diagram  
图 12. BUCK 电压与全桥输出电流图

## 5.3. 平均电流控制器相关波形

占空比及其调制波形如图 13 所示，其中紫色部分为调制脉冲，蓝色部分为输出占空比。调制波的低电平将占空比波形拉低，可减小占空比。



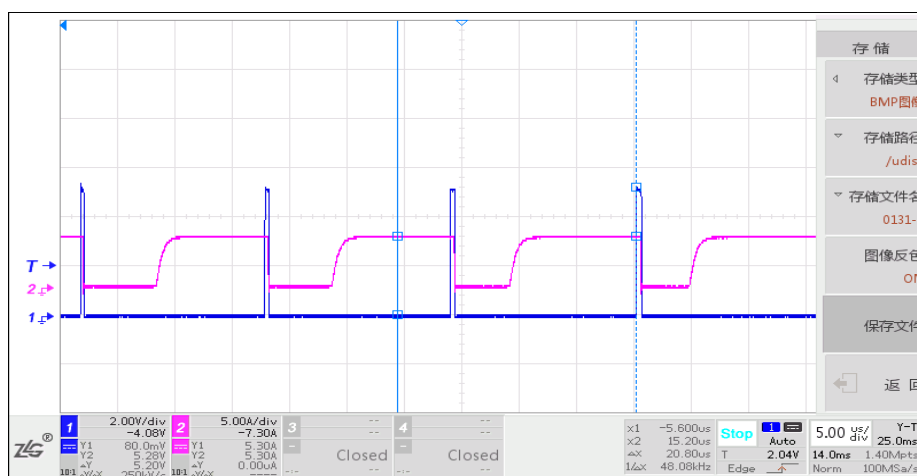


Figure 13. Duty cycle and its modulation waveform diagram

图 13. 占空比及其调制波形图

占空比及其形成的三角波波形图如图 14 所示, 紫色为占空比波形, 蓝色为其在电容上形成的三角波, 由于占空比是动态变化的, 三角波随着占空比变化而变化, 所以其频率也随之改变, 占空比逐渐增大时三角波幅值也在逐渐增大。软件设定占空比的低电平值与高电平值, 此种方式为 PFM 调制。

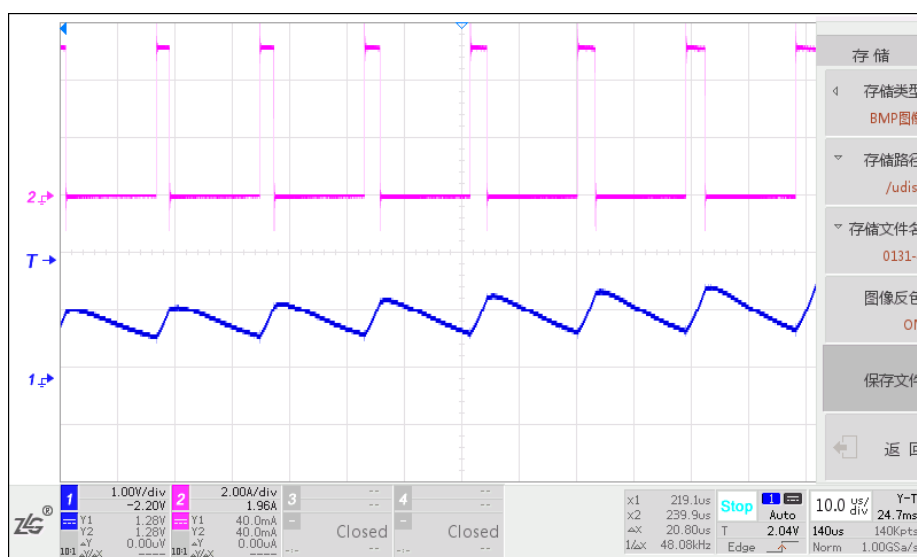


Figure 14. Duty cycle and its formed triangle waveform diagram

图 14. 占空比及其形成的三角波波形图

## 6. 总结

本文在深入研究与分析电子镇流器的相关技术基础上, 研发出了一款 330 W 的超高压汞灯电子镇流器, 实现了对超高压汞灯启动过程以及恒功率的控制, 并能够实现长期稳定工作的标准, 主要完成了以下几项研究工作:

- 1) 有源功率因数校正部分采用了集成数字芯片单独实现, 使得设备效果极佳性能优越。
- 2) 对 BUCK 降压电路进行了研究, 实现了对镇流器不同工作阶段的功率控制。同时, 本设计采用 DCM 模式的 BUCK 电路, 使得镇流器在具备优良性能时, 也尽可能地拥有更小的体积, 从而降低了镇

流器成本。

3) 对全桥逆变电路和 LC 谐振点火电路进行了研究。本文设计了全桥逆变电路, 逆变产生的脉冲耦合至 LC 谐振回路, 形成谐振产生高压, 使得汞灯完成放电发光。

4) 加入了过压保护、过流保护、过热保护等各种保护电路, 确保设备安全可靠地运行。

本文研发的电子镇流器使用 AVR 单片机为控制核心, 以 BUCK 变换电路与全桥逆变电路为驱动电路, 以 LC 谐振电路为启动电路, 采用成熟的三级式电路拓扑结构, 根据超高压汞灯从启动过程到正常工作的各个阶段不同控制模式, 进行了相应的软硬件设计, 研发了一款 330 W 的超高压汞灯电子镇流器。经过对样机的大量试验与测试, 该电子镇流器主要技术性能及环境适应性均达到实际使用要求。

## 参考文献

- [1] 夏飞凤, 鲍钰文, 柴荔英. 金卤灯数字电子镇流器设计与研制[J]. 光电子, 2017, 7(2): 43-49.  
<https://doi.org/10.12677/OE.2017.72007>
- [2] 刘卫平. 论超高压汞灯特性和控制方式[J]. 电子工业专用设备, 2012, 41(8): 35-39.
- [3] 陈亚爱, 薛颖, 周京华. 基于 HID 灯的电子镇流器控制技术综述[J]. 照明工程学报, 2012, 23(4): 112-118.
- [4] 左壮. 小功率金属卤化物灯数字化电子镇流器的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程系, 2008.
- [5] 孙德, 徐宁博, 窦祥. 高强度气体放电灯镇流器关键技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(6): 109-113.
- [6] 孔维功, 李丽荣, 贾耀华. 基于数字控制 Buck 电路的 DC-DC 电源变换器仿真研究[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 33-38.
- [7] 陈涛, 彭政达. 高性能升压型 DC-DC 电源变换器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 55-58+66.
- [8] 王卫, 张伟强. 电子镇流器谐振型负载电路的研究[J]. 中国照明电器, 2000(7): 3-7.
- [9] 吴其昆, 马皓, 祁丰. 基于 ARM 微控制器的金卤灯用电子镇流器[J]. 电力电子技术, 2006, 40(4): 6-8.
- [10] 罗繁, 张保平. 基于 PIC16C711 的智能电子镇流器研制[J]. 电力电子技术, 2003, 37(5): 64-67.
- [11] 张健. 基于 PIC12F675 的智能电子镇流器的设计[J]. 福建电脑, 2010, 26(7): 135-136.
- [12] 陈岚峰, 邓玉福, 张亚琴, 张志美, 崔崧. DC-DC 开关变换器的研究及仿真[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 530-532.
- [13] 毛兴武, 祝大卫. 电子镇流器原理与制作[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
- [14] 彭端, 彭璐丽. 高压钠灯电子镇流器的研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(3): 47-49.
- [15] 林国庆, 陈大华, 陈和平. 车用金卤灯电子镇流器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 138-142.