

基于 FPGA 的压电变压器驱动控制及 无线监控电路设计

孙 琦 朱孔军 周岸卿

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘 要:压电变压器具有功率密度高、升压比高、稳定性好等优点,但由于其温度效应过于明显、理论与实际性能差距较大等问题受到了许多应用限制。设计制作了基于 FPGA 的驱动控制电路,最大化发挥了压电变压器的效率、升压比等优势,同时通过无线 WiFi 模块对电路的实时监控、控制,满足了对压电变压器热性能分析、摩擦损耗分析及使用寿命等方面需要长时间监控实验的需要,在特定需求下该系统可以简单升级至远程控制,为压电变压器的驱动控制研究提供了新监控思路。

关键词:压电变压器;驱动控制电路;远程监控;FPGA

中图分类号: TN303 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Design of a piezoelectric transformer controller and a wireless monitoring circuit based on FPGA

Sun Qi Zhu Kongjun Zhou Anqing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Piezoelectric transformers have the advantages of high power density, high step-up ratio and good stability, etc. However, their applications are limited due to the obvious temperature effect, large gap between the theoretical and practical performances. This paper specially designed a driving controller based on FPGA, maximized the converted efficiency and the voltage ratio of the piezoelectric transformer. Besides, the WiFi wireless module for real-time monitoring and control circuit of the piezoelectric transformer was also developed. The system realized the thermal performance analysis, friction loss analysis and long lifespan via the requirements of the real-time monitoring, the demand can be remotely controlled, which provides a new approach for research and monitoring components.

Keywords: piezoelectric transformer; driver control circuit; remote monitoring; FPGA

1 引 言

压电变压器是一种具有效率高、升压比高、能量密度大等优点的新型电子元器件。相比于传统变压器,其利用机电耦合的方式实现升压以及以陶瓷为主要制作原料的特点让其具有更加稳定而高效的输出能力^[1]。压电变压器主要应用在需要高升压比的场合,但是由于其具有温度效应明显、高功率密度与高升压性能无法同时满足等问题,在各类电路中的应用受到了较多限制^[2]。另外,压电变压器所需的驱动控制电路也比较复杂、体积大、安装要求高。由于压电变压器相对于电磁式变压器工作频率范围非常窄,一般仅在几千赫兹附近,而且只有当工作频率

接近或匹配其谐振频率时,才会最大化输出电压。一旦工作频率偏离其谐振频率,电压增益下降明显。而且压电变压器的谐振频率会随着温度和负载的变化而发生相应的偏移,这样的变化更加需要一套能够跟踪谐振频率微小变化的驱动控制电路^[3],根据反馈电路提供的相关数据及时调整输入信号的频率及电压,保证压电变压器工作在一个高效、满足负载需求的状态下。目前使用较为广泛的控制方法是脉冲宽度调制法(pulse width modulation, PWM)和脉冲频率调制法(pulse frequency modulation, PFM)两种^[4-5]。

由于压电变压器独特的工作原理,其热性能分析、摩擦损耗分析及使用寿命等方面的研究需要不断尝试。这

些需要长时间跟踪、实时检测的研究项目,就要求电路具备智能数据采集、数据整理、数据发送等功能。本文根据实际项目的设计需要,设计制作了基于 FPGA 控制的压电变压器驱动控制电路及其无线检测电路,实现了监测反馈信号的实时无线接收及控制信号的无线发送,保证了压电变压器在负载变化的情况下始终以较高效率进行升压转换。

2 压电变压器驱动控制方法介绍

压电变压器只有在固定负载条件下,工作在谐振频率处,其效率和增益才可以同时达到较高的数值。目前主要有 3 种控制方式实现上述工作状态。

1)如图 1 细实线所示,调整工作频率到谐振频率附近,即采用 PFM 控制方法对压电变压器输入信号进行频率控制。这种直达目的的控制方法会出现瞬间电压超过预定值的情况,如果情况严重会造成其他元器件不可逆的击穿损伤;

2)如图 1 虚线所示,引入 PWM 脉宽调整的方法,及时地调整输入电压的值,保证输出电压及时控制在阈值范围内。但这样仍然会有明显的误差影响和过载现象;

3)如图 1 粗实线所示,在 PFM 和 PWM 方法中快速

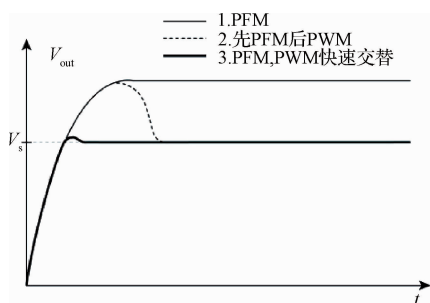


图 1 3 种控制方法对输出电压调整曲线

交替调整、判断,PFM 通过频率调整的方法调整输出电压,一旦出现超过阈值的情况,快速切换到 PWM 控制方法降低输入电压到安全范围后再继续使用 PFM 调节频率,以此往复实现稳定的输出^[6-7]。

3 系统硬件模块介绍

系统硬件电路模块主要是包含了控制器、电源电路、逆变控制电路、反馈传感电路、无线 WiFi 模块电路等。这些电路的设计过程主要包含功能元件的电路连接方式和元器件参数的选择。基本的电路设计框架如图 2 所示。本文主要借助了 Spartan-6 系列开发板设计开发系统的控制器^[8]。

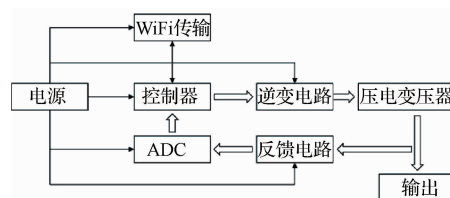


图 2 硬件电路设计框架

3.1 电源电路设计

压电变压器的驱动控制系统的电源,涉及到多块芯片和多个功能电路的运转工作,特别是 WiFi 模块需要的是 3.3 V 直流电压,与控制电路其他部分 5 V 的供电电压不一致。本文选用普通的 220 V 转 12 V、额定电流 2 A 的适配器为整个电路供电。另外为最终获得符合系统要求的标准直流供电电压,选用了 TPS5430 和 SPX3819 两款稳压芯片分别为驱动控制电路和 WiFi 传输模块供电,同时还设置了预留电源接口。电源电路基本原理如图 3 所示。

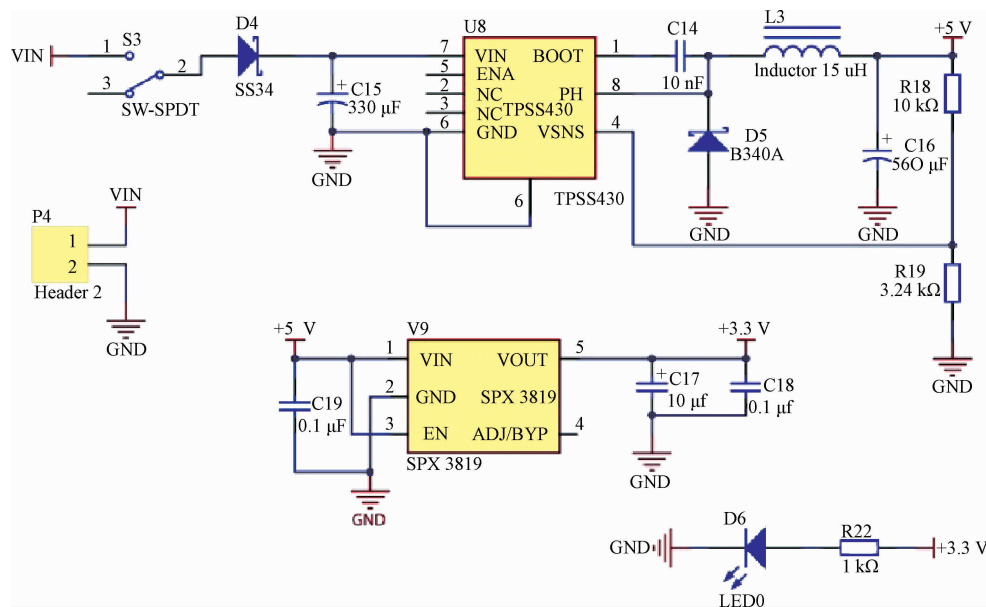


图 3 电源电路

3.2 逆变电路设计

本文选用的是全桥逆变电路将电源电路提供的直流电压转换为压电变压器工作需要的正弦交流电压,其原理如图4所示。实际电路中,使用一种同时集成有P型、N型MOSFET开关管的NTHD3102,该型号封装体积小,而且无铅环保具有良好的热性能,且具有较好的开关响应时间,大大降低了自身损耗。同时采用TC4427驱动器,控制MOSFET的开关时间,增强了电路对MOSFET开关的驱动控制能力。由于逆变电路输出的是方波,压电变压器工作电压要求是正弦波,利用压电变压器的输入端有输入电容 C_{in} 与电感 L 形成 L - C 振荡电路,将输入电压转换为正弦电压还能实现滤除高次谐波的功能。逆变电路如图5所示。

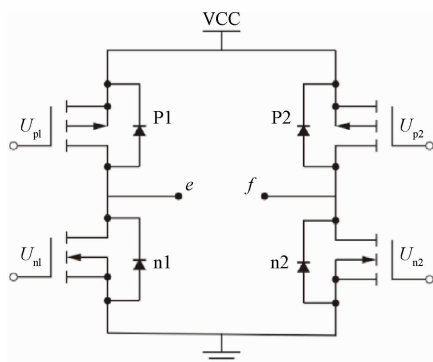


图4 全桥逆变电路原理

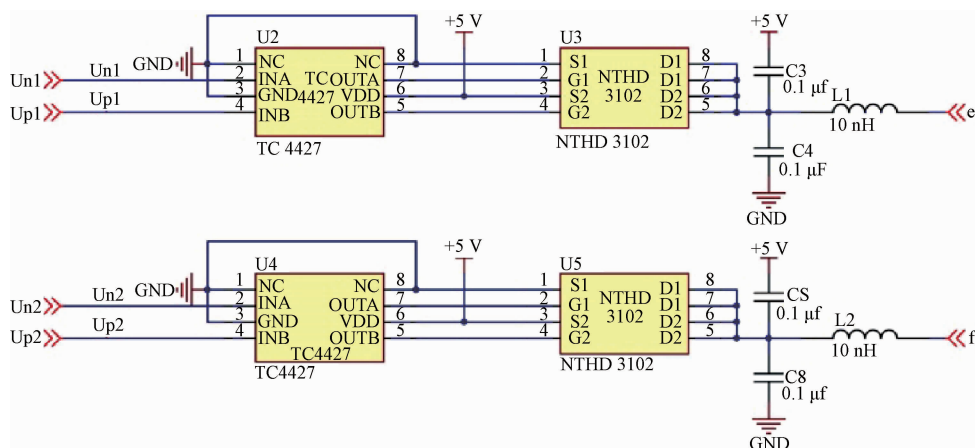


图5 逆变电路

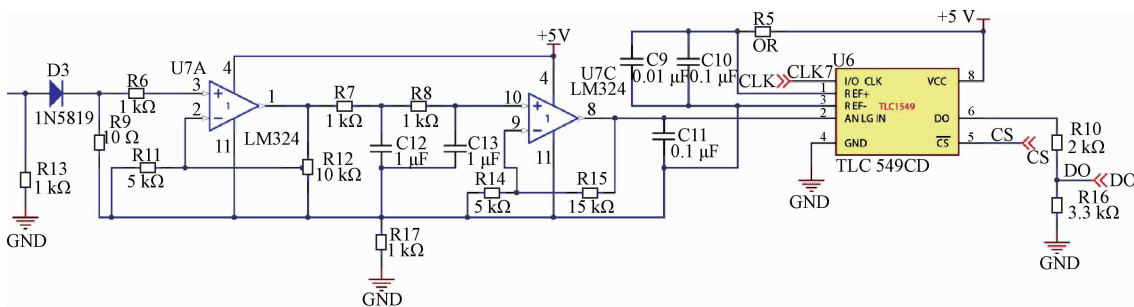


图6 反馈电路及ADC模数转换电路

3.3 反馈电路及ADC模数转换电路

反馈电路主要包括:信号采集、调理以及模数变换电路。本文选用电流采集电路的设计思路对负载电路进行电流采集。二极管 $D3$ 和一个泄流电阻 $R9$ 组成整流电路将负载电路交流信号转换为直流信号, $R7$ 和 $C12$ 、 $R8$ 和 $C13$ 组成一个二阶低通滤波电路,选用LM324运算放大器实现电路信号放大的功能。通过以上的信号整理,最后输入到TLC1549模数转换芯片的输入端,将反馈模拟信号转换成数字信号输入到控制器中进行分析判断。反馈电路及模数转换电路如图6所示。

3.4 WiFi无线传输电路设计

本文选用的是USR-WIFI232-S模组,该模组内置天线,作为STA(无线站点)接入无线局域网中完成对信号的接收、信号解析、信号发送等功能。WiFi无线传输电路设计如图7所示。

3.5 FPGA管脚配置

选用XILINX公司Spartan-6系列FPGA芯片设计控制器,结合前文相关电路介绍,FPGA管脚配置如图8所示。

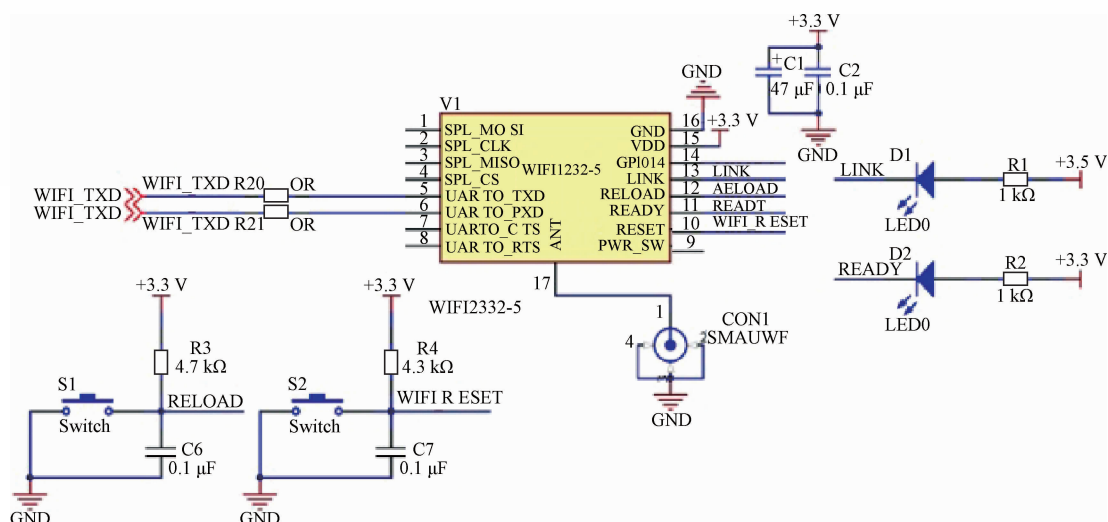


图7 WiFi无线传输电路

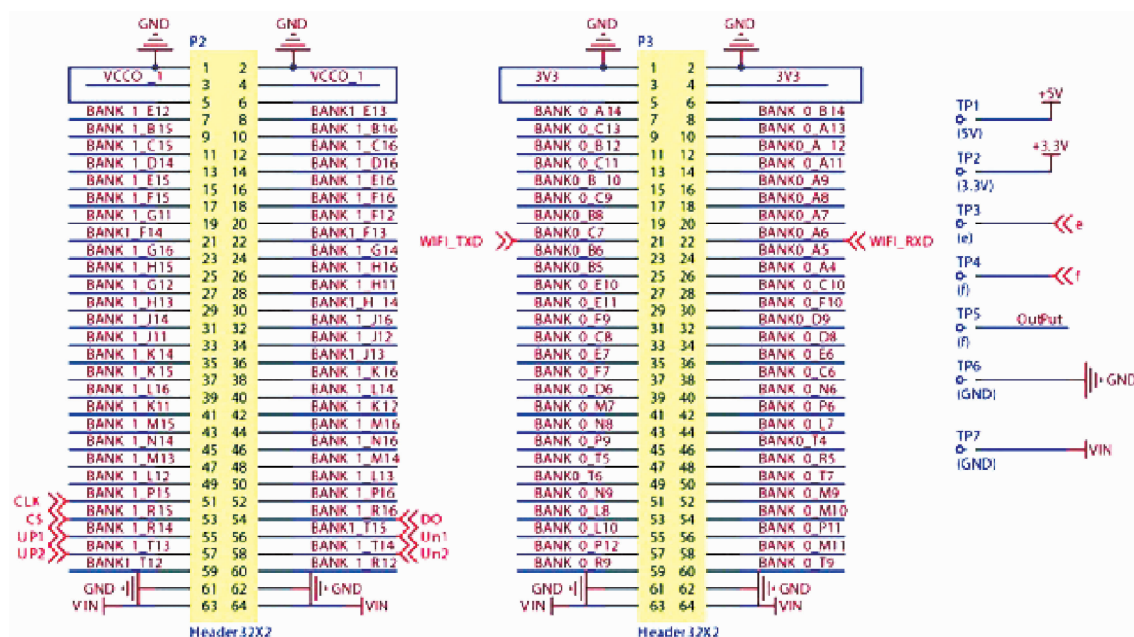


图8 FPGA管脚配置

4 驱动控制电路程序设计

逆变电路采用的MOSFET,如果同为一侧的P型、N型MOSFET同时达到导通状态,会出现自身损耗的情况,所以在逆变电路控制书序时添加 T_d 死区时间来避免同时导通,其时序图如图9所示。

对压电变压器输入信号的调整主要是采用PFM和PWM两种控制方式相结合的方法进行。其控制过程主要分为信号调整阶段和信号保持阶段,这两个阶段分别为通过使用PWM和PFM相结合的方式寻找最佳工作频率和通过PWM调节占空比调节输出功率,以实现保持一个较为稳定的输出信号。本文里设置初始输入信号占空比

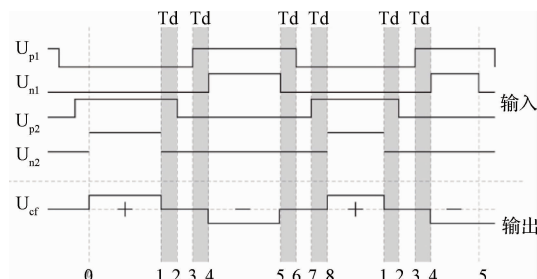


图9 逆变电路时序图

为45%,通过比较工作频率取点处的工作效率来查询最佳工作频率。图10所示为压电变压器的控制流程。

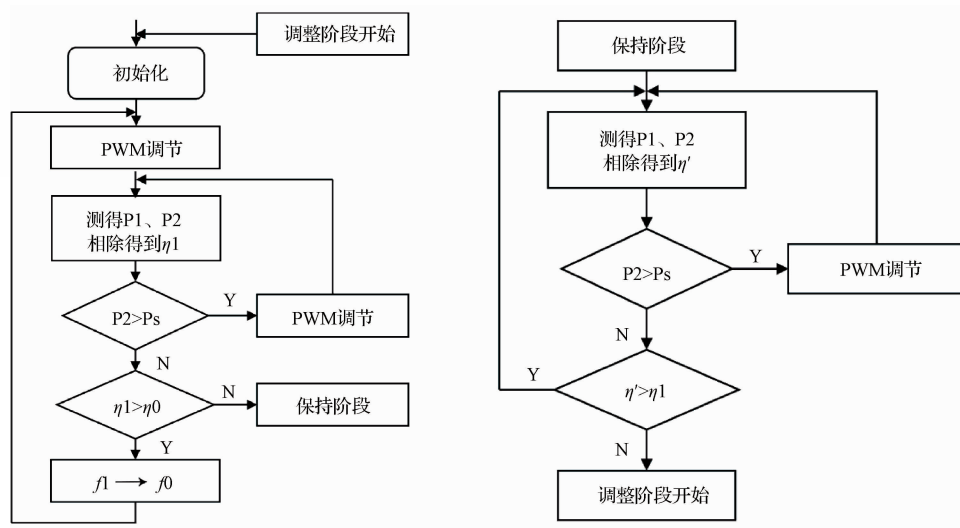
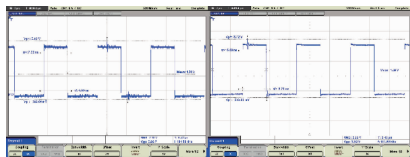


图10 压电变压器控制流程

5 系统调试

系统的控制芯片是 XILINX 公司的 Spartan-6 系列的 FPGA, 选用 Verilog HDL 进行硬件设计仿真, 软件调试选用的是 ISE 集成软件环境。本文选用的负载为 CCFL (冷阴极荧光灯管), 由于其驱动及正常工作状态内阻变化较大, 可以很好的检测本文设计的驱动控制电路在变负载及变化环境下的工作能力。选用的压电变压器为实验室自制的径向压电变压器, 其谐振频率为 66.9 kHz。

本文首先测试了驱动控制模块的工作性能, 通过对 U_{n1} 和 U_{p1} 两端端逆变控制信号的测量得到如图 11 两通道的方波图, 符合本文设计要求。

图11 U_{n1} 和 U_{p1} 两端端逆变控制信号

由于设置巡查步长较短, 为节省重复的调制时间, 提高驱动效率, 本文选用的起始驱动频率为 70 kHz。驱动 CCFL 使其点亮, 如图 12 所示, 同时通过对压电变压器输入输出端的取样电阻的电压取样测得输入输出的功率为 4.8 W 和 3.7 W, 即转换效率为 77.1%, 主要原因之一是电路没有处于最佳负载状态。通过该验证实验可认为本控制电路已基本满足设计要求^[9-10]。

本文使用 USR-WIFI232-S 模组提供的配置软件 Set-up V1.2.0 进行 AT 指令参数配置。其中相关 AT 指令设置和相关的功能介绍如表 1 所示, 选择 WiFi 操作模式为无线站点模式 STA; 协议类型 TCP, 网络模式选择客户端 CLIENT, 10 进制数, IP 地址为 192.168.1.230; 波特率

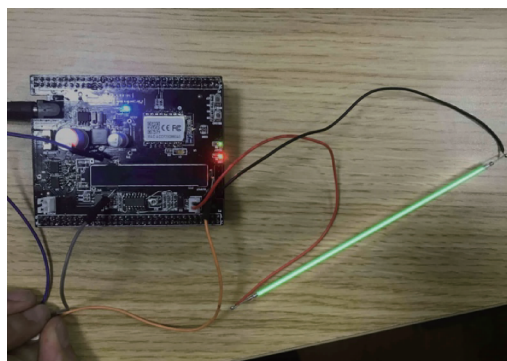


图12 驱动 CCFL 实验过程

115 200, 数据位 8, 停止位 1, 检验位为空, 无硬件流控; 最后设置保存/重启。由于本文只做了局网的配置调试, 所以 AT+WSSSID 部分为空, 不作配置。

连接驱动控制电路的 WiFi 模块到局域网中, 使用 USR-TCP232 串口转网络调试助手对无线模块进行数据接收和指令发送。本文采用 16 进制编译指令, 传输字节数为 1, 第一位表示增(1)减(0), 第二位表示停止工作(1)和正常工作(0), 剩余 6 位表示需要指令增减的数值。此处的指令是通过程序对 PWM 波占空比进行控制, 以达到调整输入电压, 从而实现对输出电流大小的调整。无线接收信号为模数模块反馈电流信息, 每次通过上位机发送指令 00 即正常工作并要求反馈此时工作电流, 经过测试反馈信息为 2000 为 CCFL 正常发光时的反馈信号值, 图 13(a) 所示为正常工作无线接收信号指令和反馈信息; 图 13(b) 所示为当指令为 24 即正常工作并减小 4% 的占空比时, 反馈结果为 1F94, 输出电流下降; 图 13(c) 所示为当指令为 8A 即正常工作并增加 10% 的占空比时, 反馈结果为 201E, 输出电流增加。同时通过以上的实验, 通过无线远程指令查看、增加、减小压电变压器的输出电流达到调整 CCFL 发光亮度的功能, 达到了实验目的。

表 1 AT 指令参数设置

指 令	功 能	设 置
AT+WMODE	设置/查询 WiFi 操作模式(STA)	AT+WMODE+<STA><CR> +ok<CR><LF><CR><LF>
AT+WSSSID	设置/查询关联 AP 的 SSID	/
AT+NETP	设置/查询网络协议参数	AT+NETP=<TCP,CLIENT,8000,192.168.1.230><CR> +ok<CR><LF><CR><LF>
AT+UART	设置/查询串口操作	AT+UART=<115200,8,1,NC,NFC><CR> +ok<CR><LF><CR><LF>
AT+CFGTF	保存/重启	/

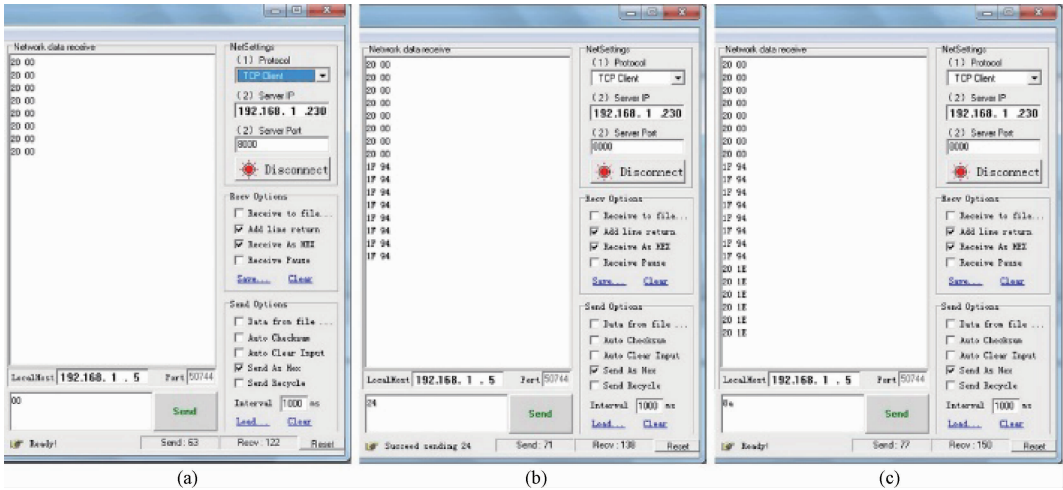


图 13 串口转网络调试结果

6 结 论

本文设计制作了用于压电变压器的驱动控制电路,实现了对压电变压器的高效控制。最终完成了对变负载 CCFL 的驱动点亮实验,测得稳定状态下压电变压器的工作效率为 77.1%。同时设计制作的 WiFi 无线传输电路,完成了压电变压器输出信号的实时监测功能,实现了局域网中通过 WiFi 无线传输输入的上调或下调占空比命令的控制,并反馈控制后的输出电流,达到了调整 CCFL 亮度的目的。

参 考 文 献

[1] 张福学. 现代压电学(下册)[M]. 北京:科学出版社, 2001: 310-336.

[2] 李培洋. 带有接触散热装置压电变压器关键技术的研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.

[3] LOY K, PAI K J, CHIU H J. Trans-admittance control for eliminating the temperature effect of piezoelectric transformer in the CCFL backlight module[J]. International Journal of Circuit Theory & Applications, 2008, 36(8):939-952.

[4] JU B, SHAO W, FENG Z. Piezoelectric filter module used in harmonics elimination for high-efficiency piezoe-

lectric transformer driving[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1):524-532.

[5] 王爽, 胡冬旭. 基于 FPGA 的分布式测控装置设计与应用[J]. 国外电子测量技术, 2015,34(10):11-13.

[6] 管要宾. 基于 PFM/PWM 的高效同步升压型 DC-DC 转换器的设计[D]. 西安:电子科技大学, 2014.

[7] 王飞. 基于 FPGA 的全数字化峰值时刻检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(6):914-919.

[8] RYU M, CHOI S, LEE S, et al. A new piezoelectric transformer driving topology for universal input AC/DC adapter using a constant frequency PWM control[C]. IEEE Xplore, 2006:4.

[9] 田冠枝, 黄玉平, 司宾强. 新型 PWM 波故障保护与诊断电路设计[J]. 电子测量技术, 2015,38(9):125-127.

[10] ALLIES L, BLAMPAIN E, M' JAHED H, et al. Modeling of a wireless SAW temperature sensor and associated antenna[J]. Instrumentation, 2014,1(1):8-14.

作 者 简 介

孙琦,1991 年出生,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器、压电变压器的制备及其驱动控制电路设计等。
E-mail:heliussq@foxmail.com