

串口通信在激光器监控系统中的应用

张雪莲, 杨鹏, 庞璐

(中国电子科技集团公司 第四十六研究所, 天津 300220)

摘要: 随着光纤激光器广泛应用与快速发展, 市场竞争与成本控制不断加强, 其光电系统的控制与保护成为光纤激光应用的关键; 为实现激光器的智能化控制和预报警保护, 降低生产和维护成本, 详细介绍了激光器监控系统的软、硬件设计及其测试结果; 通过 Visual Basic 编写 USB 转 RS232 的串口通讯软件, 以 STM32F407ZG 单片机为核心设计了激光器功率驱动、故障保护、数据采集等硬件电路, 完成 PC 端上位机软件对光纤激光器功率的控制 (0~100%), 实现对光纤激光器泵源温度、工作电流、工作状态等数据的实时采集和监测; 根据对 300 W 光纤激光器输出功率进行测试, 可得到系统光光转换效率高达 70.53%; 同时经过 72 h 整机老化后, 根据测试结果可得到激光器功率输出稳定度高达 96.6%。设计已广泛应用于切割、焊接、精密打孔、3D 雕刻等工业加工领域的实际生产中。

关键词: Visual Basic; USB; RS232; STM32F407ZG; 数据采集和监测; 70.53%; 96.6%

Application of Serial Communication in Laser Monitoring System

ZHANG Xuelian, YANG Peng, PANG Lu

(46th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

Optical Fiber Department, Tianjin 300220, China)

Abstract: With the wide application and rapid development of fiber laser, market competition and cost control are increasingly strengthened, the control and protection of its optical and electronic system have become the key to the application of fiber laser. To achieve the intelligent control of the laser and pre-alarm protection, reduce the production and maintenance costs, a design of the software and hardware for the laser monitoring system, and its test results has been introduced in detail in this paper. The serial port communication software of USB to RS232 was programmed by Visual Basic, and these hardware circuits of laser power drive, fault protection and data acquisition was designed with STM32F407ZG microcontroller as the core. The power (0 ~ 100%) of the fiber laser was controlled by PC software, and these data of pump source temperature, working current and state can be collected and monitored in real time. According to the measurement of the output power of the 300 W fiber laser, the optical conversion efficiency of the system is as high as 70.53%. At the same time, the power output stability of the laser reaches 96.6% after continuously worked about 72 hours. This design has been widely used in cutting, welding, precision drilling, 3D engraving and other industrial processing fields in the actual production.

Keywords: visual basic; USB; RS232; STM32F407ZG; data collected and monitored; 70.53%; 96.6%

0 引言

光纤激光器加工高反射材料产生大量返回光, 如果返回光吸收模块设计不完善, 则会对高精密的光源器件产生不可逆的损伤^[1]; 光纤激光器在将电能转换成光能的过程中, 会产生大量的热, 如果未开启冷却系统, 则在会造成光源本身的温升, 影响激光器光功率及光束质量^[2]。因此, 对激光器监测和预报警保护系统的设计能有效避免重大损失。随着 USB 接口日趋流行, 同时 RS232 串口作为一种传统的通信接口, 成本低, 数据传输可靠性高, 连线简单、通讯距离长等优点^[3]。基于两者优点, 将 USB 转 RS232 串口, 并利用 Visual Basic 编程实现串口通讯。尽管国内外已有关于光纤激光器工业应用的研究, 但是没有详细的介绍, 同时价格高, 兼容性低。为解决这些问题, 本文介绍了激

光器的监控系统软、硬件设计及其测试结果。本设计以国产化、模块化作为研究的根本目的, 具有实际应用意义。本文通过 Visual Basic 编写 USB 转 RS232 串口通讯的软件, 以 STM32F407ZG 单片机为核心设计激光器功率驱动控制电路, 泵源电流过大、温度过高、回光过大等故障保护硬件电路, 完成 PC 端上位机软件对光纤激光器功率控制 (0~100%), 实现对光纤激光器泵源温度、工作电流大小、激光器功率状态等数据实时采集和监测功能。

1 系统整体设计

激光器安全监测和控制系统设计结构如图 1 所示, 本系统主要分为 3 个结构: 控制层、数据层和信号传输层。驱动模块主要用于实现激光器功率电流大小控制。数据层将采集到的温度、回光、电流等信号送给控制层进行转换

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-23。

作者简介: 张雪莲(1989-), 女, 贵州毕节人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事光纤激光器电路控制系统方向的研究。

引用格式: 张雪莲, 杨鹏, 庞璐. 串口通信在激光器监控系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 146-151.

处理, 形成采集信号; 同时数据层与保护模块进行阈值比较, 如果大于设定值, 则产生报警信号。将采集信号及报警信号经过串口传输给 PC 端上位机完成激光器报警信号的实时监测及显示。上位机通过发送命令给主控模块实时采集报警信号, 修改过程参数, 控制光源启动, 实现对激光器的智能化控制; 并将采集到的数据进行复杂的数学计算及存储^[4-5], 实现更加优越的信息处理功能。

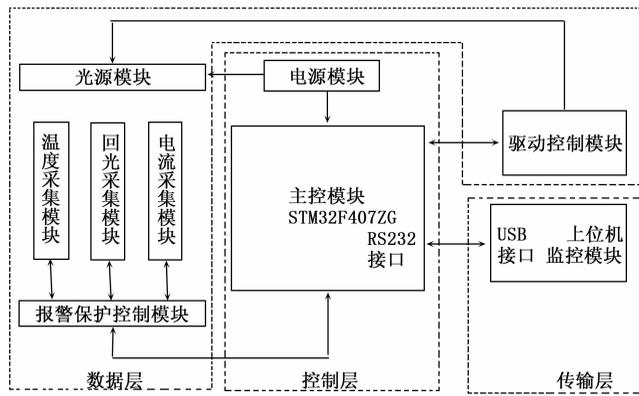


图 1 系统整体结构框图

1.1 控制层设计

控制层设计如图 2 所示, 整个系统通过意法半导体 ST 公司以 ARM Cortex™—M4 为内核的主控芯片 STM32F407ZG 及其外围控制电路, 结合外围信号的产生与中断, 实现激光器平均功率、峰值功率、脉冲频次和脉冲宽度等参数的调节^[6-7]。主控模块主要负责控制光纤激光器电流传输, 通过传感器采集温度、PD 返回光信号, 将采集到的电流、温度、返回光对应的电压信号经 STM32F407ZG 内部 PID 算法处理后^[8], 通过串口 MAX3232 与上位机通信, 实现对温度及电流信号的实时监测。

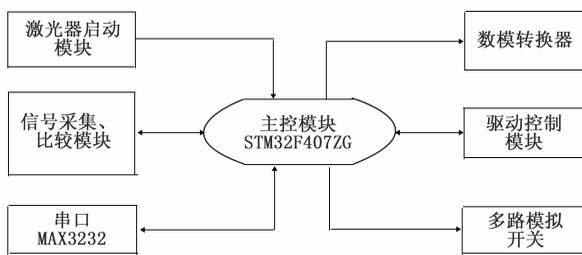


图 2 控制层结构框图

STM32F407ZG 芯片 I/O 端口 D 是 12bit 的 D0~D11, 依次对应功率大小 PD0~PD11, 设 Pin 口的输入范围为 0~4 095, 对应 0~100% 的标称功率值。上位机设置好激光器功率大小及工作模式, 通过 USB 转串口传输给主控模块, 主控模块配置好激光器工作模式, 将输入的功率二进制信号送给数模转换器 DAC, 得到对应功率电压大小 0~2 V。如果收到启动命令, 则选通多路模拟开关, 输出当前功率对应的电压大小, 控制驱动模块的恒流源电路, 驱动激光器的泵源工作。

1.2 数据层设计

激光器数据层主要分为泵源温度、电流、回光采集、保护模块如图 3 所示。

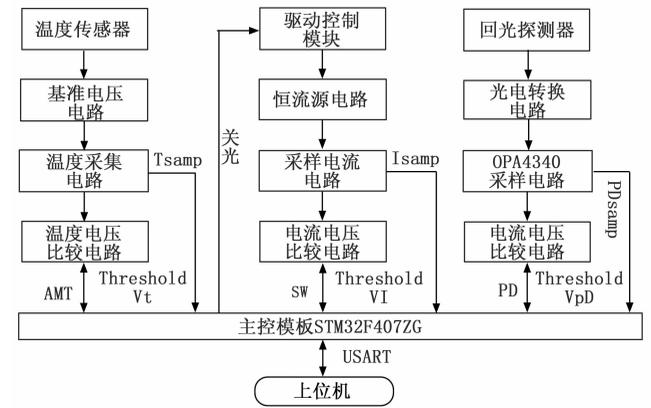


图 3 数据层结构图

在激光器泵源关键点设置温度传感器 (10 K 负温度系数热敏电阻), 通过基准电路采样温度电压, 将此传感采样电压经 OPA4340 运算放大器换算后送 STM32F407ZG 经 PID 计算, 得到相应温度值存储于寄存器, 然后经串口传输给上位机解码后, 实时显示激光器采样温度^[9]。同时设计通过电压比较器 LM2901 组成的电路为激光器提供温度比较保护, 上位机软件能设置温度报警门限, 下发给激光器主控模块, 当温度采集信号高于报警值, 则产生报警信号 AMT, 中断驱动电流输出, 避免激光器由于泵源或者熔点温度过高而导致光功率、光谱性能的下降^[10-11]。

驱动模块设有电流采集及保护电路, 如果调节的某组电流大小超过阈值, 则使 STM32F407ZG 芯片 I/O 口 F 的 0~7 bit 对应位置高。假设若为第二组过流, 则产生一个过流信号 SW 为 0X02 存储于寄存器中, 同时触发中断, 关闭激光器功率电压输出, 并产生过流信号通过串口传输给上位机实时显示当前报警, 执行软件关闭出光命令, 达到硬件和软件双重保护激光器工作的目的。

激光器回光采集、保护模块采用 InGaAs PIN 光电探测器 PD 将不同的功率的激光器返回光信号转换为电流信号, 经运算放大器 POA4340 组成 I-U 电路和电压跟随电路得到稳定的回光电压值, 然后输出给 LM2901 组成的比较电路, 上位机通过串口设置回光 PD 电压阈值, 下发给主控 STM32F407 模块, 经其内部 DAC 数模转换处理后, 与采集的回光电压值比较, 完成回光信号的实时采集和报警保护处理, 实现激光器回光过大保护功能^[12-13]。

2 串口通信模块设计

PC 端上位机软件串口通信模块主要由上位机作为主控制器, 运行底层串口通信程序和顶层的应用程序, 通过其 USB 接口与主控模块进行数据和指令的下发和上传, 控制激光器运行模式、功率、频率、占空比、电流、温度、回光等各种信号的监控和实时显示。USB 转 RS232 模块

采用英国 FTDI 的 FT232 专用转换芯片和一些外围的电阻和电容构成, 以实现 USB 数据和 RS232 数据的相互转换和双向传输^[14]。由 MAX 公司的 MAX3232 电平转换芯片和一些外围电容构成, 其主要工作是将 RS232 电平和 TTL/CMOS 电平进行相互的转换, 保证电气特性匹配, 实现与主控芯片 STM32F407ZG 的通信。此串口通信模块基于 MCU/PLD/FPGA 到 USB 口的工业控制, 兼容性强、高效稳定^[15]。

Microsoft Communications Control (MScComm) 是 Microsoft 公司提供的简化 Windows 下串行通信编程的 ActiveX 控件, 它为应用程序提供了通过串行接口收发数据的简便方法^[16]。本设计采用 MScComm 通信事件驱动方法, 通过 MScComm 控件的 output 属性给串口端发数据, 设置 Rthreshold 为 1。接收缓冲区收到每一个字符都会使 MScComm 控件产生 OnComm 事件。当接收缓冲区中有数据, OnComm 事件捕获并处理这些通讯事件, 程序响应及时, 可靠性高^[17]。串口通信模块初始化程序设计如图 4 所示, 设计思路如下:

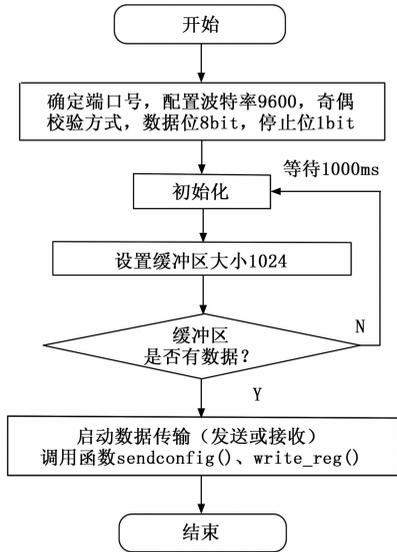


图 4 初始化配置流程图

1) 确定 USB 口输入的端口号 Comportnum = Val (Right (Cbo1. Text, 1)), 配置传输的波特率 9 600 bps, 校验位 (n, 无), 数据位 (8Bit)、停止位 (1Bit), FrmLasercontrol. Com1. Settings = " 9 600, n, 8, 1", 传递给 CmdPortset_Click () 函数打开对应端口。串口通信, 主从双方波特率须保持一致, 才能对数据进行有效的传输, 波特率高, 则有效传输距离短, 根据激光器实际应用情况, 5 m 左右即满足通信距离需求, 同时为兼顾数据传输速率, 本设计设置波特率为 9 600。

2) 串口初始化, 即串口超时设置, 设置 timer 的 enabled 属性为 true, 若缓冲区有数据, 则开始读写寄存器; 若设超时 port_timeout = 1 000 (毫秒级), 等待 1 000 ms 后串口初始化, 调用数据传输函数, 判断接收或输入区是否

有数据, 若缓冲区等待超时, 1 000 ms 后, enabled 属性为 false, 通信超时^[18];

3) 设置接收和发送缓冲区大小 FrmLasercontrol. Com1. InBufferSize = 1 024, FrmLasercontrol. Com1. OutBufferSize = 1 024, 调用函数 sendconfig ()、write_reg (), 启动数据传输。

3 串口读写数据程序设计

3.1 上位机串口发送数据程序设计

本系统上、下位机 (即主控模块) 通信一帧数据包包的 16 进制格式为:

02 10 00 01 00 06 00 0C ConfigurationH (1~6) ConfigurationL (1~6), 其中 02 为本机地址, 10 为功能码 (此处为给下位机发送激光器各参数命令码), 00 01 为寄存器 Configuration () 的起始地址, 00 06 为下发的数据个数, 00 0C 为下发数据字节数, ConfigurationH (0~6) ConfigurationL (0~6) 为给下位机发送的控制激光器运行的各类参数, 最后进行 CRC 校验 (数据低位在前), 完成此数据包的配置, 实现数据的可靠发送, 上位机串口发送数据流程如图 5 所示。

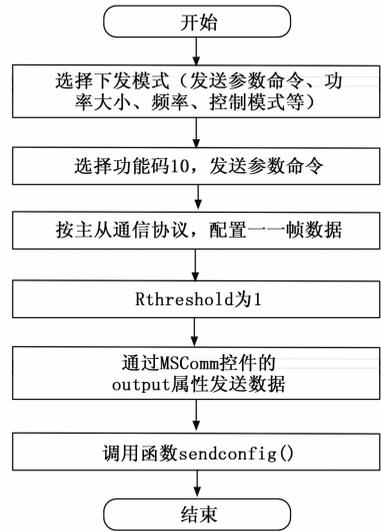


图 5 串口发送数据流程图

上位机串口数据发送代码如下:

```
Public Sub sendconfig()
Dim sbyte() As Byte
If paramerter_config = 1 Then 1 为下发功率
ReDimsbyte(20) As Byte
sbyte(0) = &H2
sbyte(1) = &H10
sbyte(2) = &H0
sbyte(3) = &H1 模式起始地址
sbyte(4) = &H0
sbyte(5) = &H6 数据个数 sbyte(6) = &HC 下发字节数
sbyte(7) = ConfigurationH(1) 光源控制方式
sbyte(8) = ConfigurationL(1)
```

```

sbyte(9) = ConfigurationH(2) '调制方式
sbyte(10) = ConfigurationL(2)
sbyte(11) = ConfigurationH(3) '电流控制方式
sbyte(12) = ConfigurationL(3)
sbyte(13) = ConfigurationH(4) '内部电流设置 1%~100%
sbyte(14) = ConfigurationL(4)
sbyte(15) = ConfigurationH(5) '内部脉冲频率值 1 000 ~
50 000 Hz
sbyte(16) = ConfigurationL(5)
sbyte(17) = ConfigurationH(6) '内部输出脉宽值 1~99%
sbyte(18) = ConfigurationL(6)
Call CRC16_Check(sbyte(), 18)
FrmLasercontrol.Com1.RThreshold = 1
FrmLasercontrol.Com1.Output = sbyte
Start_Addr = sbyte(3)
Num_word = sbyte(5)
    Num_byte = Num_word * 2
End If
End Sub

```

3.2 上位机串口接收数据写配置程序设计

本系统设计的电流、温度大小采集及其故障状态, 回光故障等存储于寄存器 StatusRegister() 中, 起始地址 Start_Addr 为 101, 而上位机对下位机参数、功率、频率、占空比等配置于寄存器 Configuration() 中, Start_Addr 为 0~100; 若 Start_Addr > 100, 则接收的为激光器光功率电流控制方式, 设置为外部 DA 控制 (0x0000: 内部 DA 控制功率输出; 0xff00: 外部 0~10 V 控制功率输出, 0~10 V 对应功率 0~100%), 系统采用构造简单、功能强大的 Modbus 协议作为上下层通信协议^[19], 首先进行 CRC 校验, 校验成功, 判断是本地地址 MOD_ADDR 即 02, 通信成功才开始判断寄存器地址码, 然后存入相应寄存器, 完成数据的写配置。通过 MSComm 控件的 Input 属性读串口端收到的数据^[20], 上位机串口接收数据流程如图 6 所示。

上位机串口数据接收代码如下:

```

Public Sub readconfig()
mbuf = Com1.Input ' 串口接收数据
If checkPack_CRC(mbuf) Then
If mbuf(0) = MOD_ADDR Then ' 本地地址 02
If mbuf(2) = Num_byte Then ' 下发数据个数
Call write_reg(mbuf)
End If
End If
End If
End Sub

Public Sub write_reg(buf() As Byte)
If Start_Addr < 101 Then
For i = 1 To Num_word
Configuration(Start_Addr + i - 1) = buf(2 * i + 1) *
CLng(256) + buf(2 * i + 2)

```

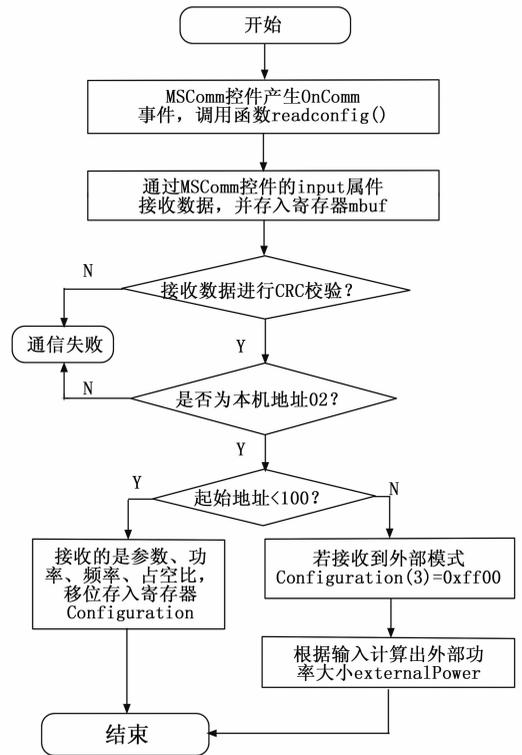


图 6 串口接收数据流程图

```

Next i
Else
If ConfigurationH(3) = &HFF And ConfigurationL(3) =
&H0 Then
externalPower = CLng(StatusRegister(12) * 100 / 3441) ' 外部
DA
If externalPower > 100 Then
externalPower = 100
End If
Poutset.Text = externalPower & "% "
End If
End If
End Sub

```

4 测试结果

通过本系统控制功率 300 W (本设计适用于 0~5 000 W 的激光器控制系统), 波长为 1 080 nm 的光纤激光器工作, 将上位机与激光器通过 USB 转串口通讯线连接, 启动激光器, 配置好通信端口, 进入上位机控制界面。使用内部使能, 内部功率, 内部调制模式 (即 Configuration 的 1~3 字节均为 0x0000), 并下发 100% 功率控制命令。主控模块按照协议接收并解压数据, 将输入的功率二进制信号送给数模转换器 DAC, 得到对应功率电压大小; 如果收到启动命令, 则选通多路模拟开关, 输出当前功率对应的电压大小, 控制驱动模块的恒流源电路, 驱动激光器的泵源工作, 实现连续控制激光器输出激光目的。实际测试时,

首先连接串口线，打开整机电源，然后选择全内部模式，选择对应功率后，点击上位机启动按键，即可控制激光器输出激光，从而得到所需测试数据，图 7 为上位机参数下界面图。为得到激光输出时泵源工作温度曲线，激光输出功率曲线，分别选择功率 20%、40%、60%、80%、100% 时进行测试。



图 7 上位机参数下界面图

将输出功率、泵浦温度等数据，利用 VB 的图象控件和曲线函数实现对采集数据的分析处理，直观地显示出所采集数据的变化趋势。测试结果如图 8 光纤激光器数据采集曲线所示，横坐标表示激光器电流大小 I (A)，即采样电流大小分别为 2、4、6、8、10，单位 A，0~10 A 电流对应控制的激光输出功率为 0~100%，可以看出随着功率升高，泵浦温度稳定。表 1 中泵浦功率为实际标称值，根据测试结果由： $效率 = (输出效率 / 泵浦功率) \times 100\%$ ，可计算出不同功率时激光输出效率，光纤激光功率输出转换效率曲线如图 9 所示，可读出当功率为 100% 时，激光输出效率高达 70.53%。对激光器整机经过 72 h 满功率连续激光输出，功率稳定性如图 10 所示，72 h 内的最大输出功率值为 300 W，最小为 290 W，平均功率为 295.28 W，根据测试结果由： $功率不稳定性 = (P_{MAX} - P_{MIN}) / P_{AVR} \times 100\%$ ，可计算 72 h 内激光功率输出不稳定性为 3.4%，即稳定度为 96.6%。

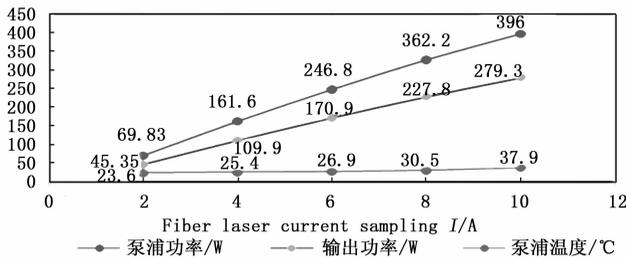


图 8 光纤激光器数据采集曲线

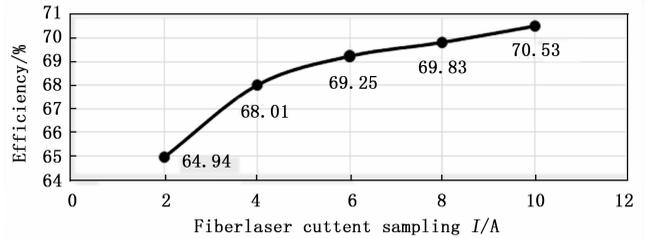


图 9 光纤激光功率输出转换效率曲线

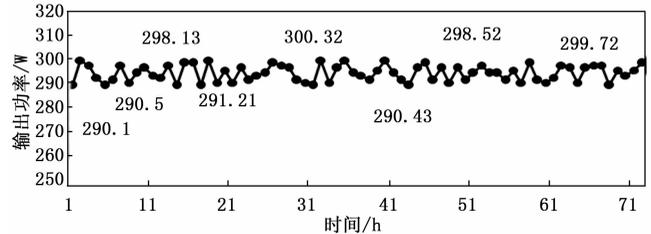


图 10 72 h 功率稳定性测试曲线

产时光路设计上可采用加强泵浦温度控制，提高光束质量，有效抑制光子暗化等方式更进一步改善输出功率稳定性^[21]。本文通过 Visual Basic 编写 PC 端上位机软件，控制以 STM32F407ZG 单片机为主控芯片设计的激光器功率驱动电路，可实现 0~100% 功率控制；整个系统具有泵源电流过大、温度过高、回光过大等故障保护功能，并能光纤激光器泵源温度、工作电流大小、激光器功率状态等数据实时采集和监测。

综上所述，本文设计的激光器安全监测和控制系统稳定，光光转换效率高达 70.53%，稳定度高达 96.6%。实时监测的 PC 端上位机软件操作方便，可视化强，串口通信传输可靠。激光器电路结构模块化，维护方便；整个系统具有故障保护，数据实时采集和监测等功能，已广泛应用于光纤激光器切割、焊接、精密打孔、3D 雕刻等工业加工领域。

参考文献:

[1] 赵 坡, 于振华, 廉昊童. 一种返回光处理装置及高功率光纤激光器 [P]. 中国: CN210576996U, 2020 (5): 19.
 [2] 顾 波. 激光加工技术及产业的现状与应用发展趋势 [J]. 金属加工 (热加工), 2020 (10): 37-42.
 [3] 石改辉. 基于 STM32F103 的 USB 接口数据通信设计 [J]. 信息通信, 2019 (11): 90-92.
 [4] 刘 董, 李京慧, 迟宗涛, 等. 基于模糊 PID 控制的控温箱设计 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (3): 73-75.
 [5] 杨小庆, 向超宗. 基于神经网络 PID 的拖拉机空调温控系统优化设计 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (12): 264-268.
 [6] 翟 瑞, 周静雷. 基于 STM32 的 USB 转串口通信端口设计 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (1): 92-94.
 [7] 方 旭. 基于 STM32 处理器的两种 USB 通信方法的实现 [J]. 科技信息, 2010 (21): 589-590.

5 结束语

经 72 h 老化后激光功率输出不稳定性为 3.4%，实际生

- [8] 刘吉名, 白小峰, 何世安. 基于位置式 PID 温控系统设计 [J]. 环境技术. 2020, 38 (6): 124.
- [9] 张海超, 张北伟. 基于 STM32 的多串口通信系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (2): 99-100.
- [10] 周丽, 梁大开, 曾捷, 等. 温度影响光纤栅传感器性能蜕化机理及实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39 (4): 123-128.
- [11] 谢璐. 1 018 nm 掺镱光纤激光器 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 8-33.
- [12] 张雪莲, 黄榜才, 张鹏, 等. 高功率光纤激光器回光探测及其保护电路 [P]. 中国: CN206695903U, 2017-12-01.
- [13] 郝震. 光纤激光器泵浦源驱动电路的设计 [J]. 数码世界, 2020 (4): 247-248.
- [14] 刘付永红, 谢再晋, 颜中杰. 基于 FT232RL 的 LED 内控护栏管设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (10): 30-33.
- [15] 李文峰, 顾金良, 李 建, 等. 基于 STM32F4 无阻碍弹丸破片信号采集技术研究 [J]. 电子测量技术. 2020, 43 (23): 149-153.
- [16] 王笑怡, 张 雷, 张海涛. 基于 VB 的程控仪器编程方法 [J]. 微处理机, 2020, 41 (6): 29-32.
- [17] 祁春, 毛小玲, 房瑾. 基于 MSCOMM 的雷情实时处理软件的设计 [J]. 电子设计工程, 2015, 23 (8): 35-37.
- [18] 梁新帅. 基于 VB 的串口通讯中设计延时方案 [J]. 电子世界, 2018 (8): 198-199.
- [19] 张永伟, 康兴无. 基于 STM32 和 Modbus 的串口服务器系统 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (16): 108-111.
- [20] 李邢凡, 陈培新, 郭 雷. 基于 MSCOMM 的 GPS 回传性能软件系统的设计 [J]. 科技创新与应用, 2020 (6): 18-20.
- [21] 赵楠. 高功率掺镱光纤激光器中光子暗化效应研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 96-98.

(上接第 61 页)

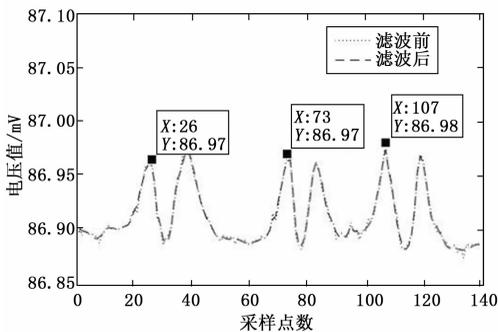


图 20 实验结果

根据图分析可知当金属中存在缺陷时检测线圈的电压值会有明显的变化, 当缺陷宽度不同时检测线圈电压值变化不同, 根据感应线圈的电压值的变化情况可以定性的分析金属中是否存在缺陷。

5 结束语

本文主要设计了一种基于 Zynq-7020 平台的电磁无损检测系统, 并通过实验验证了该设计的可行性。采用 Zynq-7020 片上系统代替传统的 DSP/FPGR+ARM 架构, 大大降低了系统的开发难度, 缩短了开发周期。采用 AXI DMA 的数据传输方式, 速度可达 250 MB/s, 满足系统的实时性要求, 提高了数据传输的稳定性。

参考文献:

- [1] 基于虚拟仪器的电涡流测距仪的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [2] 彭乐锋, 刘康, 刘继. 基于 ZYNQ 的涡流无损检测阻抗分解算法的实现 [J]. 微处理机, 2017, 38 (5): 65-69.
- [3] 梁世盛, 乔凤斌, 张燕. 基于 FPGA 的数字相敏检波算法实现 [J]. 自动化仪表, 2013, 34 (11): 13-16.
- [4] FUKUTOMI H, TAKAGI T, NISHIKAWA M. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam genera-
- tor tubes [J]. NDT and E International, 2001, 34 (1): 17-23.
- [5] POHL R, ERHARD A, MONTAG H J, et al. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection [J]. NDT and E International, 2003, 37 (2): 89-94.
- [6] HE Y Z, PAN M C, LUO F L, et al. Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation [J]. NDT and E International, 2011, 44 (4): 344-352.
- [7] 叶松. 阵列式涡流相位传感器及其成像方法研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [8] 徐涛. 基于阻抗分析法的电桥式涡流检测系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [9] DODD C, DEEDS W. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems [J]. J. Appl. Phys., 1968, 39: 2829-2838.
- [10] YIN W, BINNS R, DICKINSON S J, et al. Analysis of the liftoff effect of phase spectra for eddy current sensors [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2007, 56: 2775-2781.
- [11] YIN W, PEYTON A. Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors [J]. NDT Int., 2007, 40: 43-48.
- [12] 孟得东, 刘凯, 梁树甜, 等. 空芯电涡流传感器探头线圈特性的研究 [J]. 船电技术, 2011, 31 (1): 17-20.
- [13] MOTT L Z. The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing [J]. NDT & E international, 1990, 23 (1): 11-18.
- [14] 吴川环. 基于微信控制物联网设备的服务器系统 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [15] 梁新宇. 基于 ZYNQ 的行人检测系统软硬件协同实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [16] 孟庆琳. 基于 Zynq 的 CMOS 传感器接口逻辑电路优化设计及图像处理技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [17] 刘康, 彭乐锋, 刘继. 涡流检伤信号高速实时采集系统的研究 [J]. 微处理机, 2017, 38 (6): 86-89.