

自动化与智能化技术

激光切割高精度 Z 轴调高随动控制系统设计

西大驰¹, 李中凯^{1,2}, 张志峰^{2,3}, 洪兆溪^{2,3}

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027;

3. 湖州绿产智能制造有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: **目的** 设计一种基于 STM32 主控制器芯片与 FPGA 从控制器芯片的激光切割高精度 Z 轴调高随动控制系统。**方法** 介绍该控制系统的工作原理、硬件设计、软件设计以及微电容测量电路的仿真实验。同时, 针对系统随动过程中存在干扰的现象, 提出基于滑动平均值滤波算法的改进滤波算法。**结果** 经过上机切割测试验证, 该随动控制系统动态跟随精度为 0.01 mm, 最大跟随速度为 500 mm/s。**结论** 该随动控制系统能够使激光切割机床实现高速高精度的切割。

关键词: STM32 主控制器; 激光切割; Z 轴调高; 微电容测量电路; 随动系统

中图分类号: TB486; TP275 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)03-0131-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.03.016

Design of Servo Control System for Laser Cutting Z-axis Height Adjustment

XI Da-chi¹, LI Zhong-kai^{1,2}, ZHANG Zhi-feng^{2,3}, HONG Zhao-xi^{2,3}

(1. School of Mechatronics Engineering, China University of Mining & Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Huzhou Lvchan Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Zhejiang Huzhou 313000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a high-precision servo control system of Z-axis height adjustment for laser cutting based on an STM32 master controller chip and an FPGA slave controller chip. The principle, hardware design, software design and simulation experiment of micro capacitance measuring circuit of the control system were introduced. Aiming at the interference of servo control system, an improved filtering operator based on moving average filtering algorithm was put forward. Laser cutting test was conducted to verify the proposed method. The dynamic following accuracy of the servo control system was 0.01 mm, and the maximum following speed was 500 mm/s. The servo control system enables laser cutting machines to achieve high speed and high precision cutting effect.

KEY WORDS: STM32 main controller; laser cutting; Z-axis height adjustment; micro capacitance measuring circuit; servo system

由于激光切割技术具备可控性强、切割速度快、切割精度高、切割热影响区和热畸变小、材料适应性强等优点, 使得激光切割技术近年来得到快速发展,

逐渐取代线切割、火焰切割、等离子切割、冲床和数控剪床等传统切割加工技术。相比传统切割技术, 使用激光切割技术进行板材切割, 不仅大大降低了企业

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(51475459, 52105281); 浙江省重点研发计划(2022C01196)

作者简介: 西大驰(1996—), 男, 硕士生, 主攻机电一体化系统设计。

通信作者: 李中凯(1980—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要研究方向为现代设计方法和智能设计。

生产成本、提高了产品加工质量,而且无须二次加工,符合绿色发展理念,因此,激光切割技术被广泛应用于汽车制造、工程机械、船舶制造、航空航天等领域,成为主流的切割加工技术^[1-7]。伴随着激光加工技术的兴起,在平面切割中,激光切割机床对随动系统在Z轴方向的跟随精度和跟随速度要求也越来越高。在激光切割过程中,要求激光切割头与切割工件之间始终保持一定的间距,间距过大或者过小都会影响激光切割产品的质量。为了解决该问题,相关技术人员提出了Z轴调高随动控制系统的解决方案。

李建新^[8]基于差动式电桥和相敏检波电路设计了一种跟随精度为0.2 mm的激光切割调高系统。陈和平等^[9]设计了一种接触式弹性定距随动系统,但该随动系统测距装置结构复杂,难以加工表面变化幅度大的板材且测距装置存在磨损问题。孙玉国等^[10]设计了一款基于STC15单片机和AD7746电容转换器的Z轴随动控制系统,跟随精度为0.1 mm。刘爱伟^[11]设计了一种基于ET8010运动控制器的激光切割随动系统,并通过实验验证该系统的跟随误差为0.1 mm。张振华^[12]基于STM32与FPGA设计了一款激光切割电容调高系统,但该系统跟随精度仍然停留在0.1 mm。由此可以看出,目前国内激光切割Z轴调高随动控制系统跟随精度低,仅适应于中低速激光切割场合。

针对上述问题,文中设计了一种适合国内工业生产现状,接口少且易标定的高速高精度激光切割Z轴调高随动控制系统。该随动控制系统动态跟随精度为0.01 mm,最大跟随速度为500 mm/s。通过配备该随动控制系统,激光切割机床不仅能够快速准确地加工出各种用于产品外观包装的高质量金属饰品,而且能够在产品的包装外壳上快速准确地加工出各种形状复杂的外观图形,满足消费者的个性化审美需求,对于产品包装具有重要意义。

1 工作原理

图1所示为本次激光切割高精度Z轴调高随动控制系统设计的工作原理图。该系统通过微电容测量模块将激光切割头喷嘴与待加工工件表面的位置信息转化为电容频率值,然后通过专用的通信线缆发送给调高控制器。调高控制器将接收的电容频率转化为位置信息,通过控制器内部的运动控制,信号处理模块处理之后输出控制指令到伺服驱动模块。伺服驱动模块将控制器输出的速度控制指令发送给伺服驱动器,由伺服驱动器控制伺服电机转动。最后通过滚珠丝杠副丝杠滑台将伺服电机的旋转运动转化为切割头在Z轴方向的垂直运动,使切割头在待加工工件表面垂直上下移动,实现激光切割时切割头在Z轴的高度跟随运动。

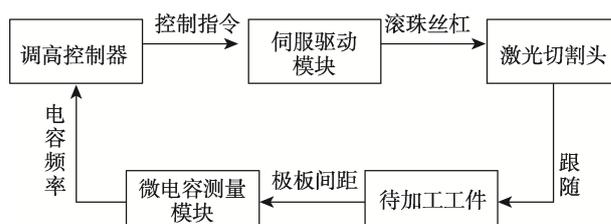


图1 Z轴调高随动控制系统工作原理
Fig.1 Working principle of Z-axis height adjustment servo control system

2 系统总体设计

激光切割高精度Z轴调高随动控制系统主要由微电容测量模块、调高控制器和伺服驱动模块组成。

1) 微电容测量模块用来实时检测切割头喷嘴与待加工工件表面形成的平行板电容值,电容值的变化引起电容三点式LC振荡电路输出正弦波的频率变化。

2) 调高控制器在接收到频率值后将其转化为距离信息,并输出运动控制指令到伺服驱动模块。

3) 伺服驱动模块主要由伺服驱动器和伺服电机组成。通过伺服驱动器控制伺服电机调节激光切割头与待加工工件表面之间的距离,从而保证切割时切割头与待加工工件表面之间的高度保持为最佳恒定值。

系统总体结构见图2,其中调高控制器主要由STM32F407芯片、FPGA芯片、伺服驱动电路、差分转单端电路、人机交互模块和电源模块组成。微电容测量模块主要由电容三点式LC振荡电路与单端转差分电路组成。

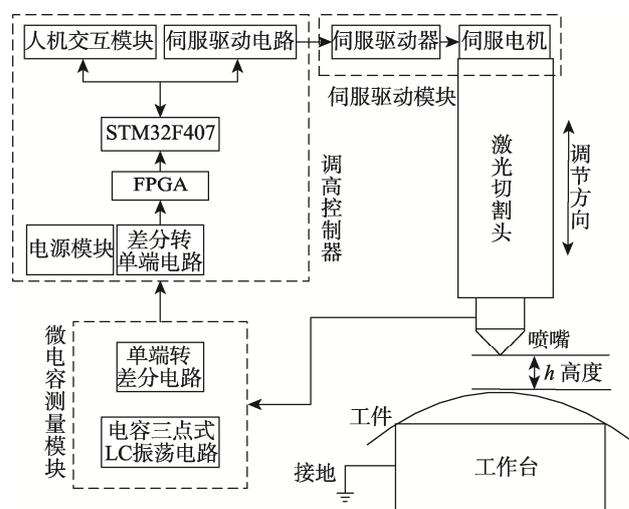


图2 激光切割头随动系统的体系结构
Fig.2 Architecture of servo system for laser cutting head

2.1 系统硬件设计

如图 3 所示, 系统硬件以 STM32F407 芯片和 FPGA 芯片为核心。其中, 伺服驱动电路包括伺服电机速度环控制的模拟量输出、编码器的反馈输入以及其他控制端口。为了提高系统的稳定性, 伺服驱动电路与 FPGA 芯片之间采用了光耦隔离电路与数字隔离电路进行隔离。人机交互模块采用传统的人机交互技术进行单片机与人之间的信息交互, 信息交互设备有 LCD 液晶显示屏与机械按键, 通过机械按键设置系统的标定距离、标定速度、随动速度等参数, 同时也通过机械按键控制系统的回零、回中、标定、随动等功能。机械按键接口、微电容测量模块的输出接口均通过 I/O 接口与 FPGA 芯片连接, D/A 通过 SPI 由 FPGA 芯片发送给伺服驱动模块, LCD 液晶显示屏通过 I/O 接口与 STM32F407 芯片连接。STM32F407 芯片采用 FSMC 的方式与 FPGA 芯片进行信息交换, 此种信息交换方式使得数据传送的实时性效果更好。综上所述, 本设计利用 FPGA 芯片协调同步 I/O 接口与 STM32 单片机之间的数据交换, 以此减小调高器内存占有率, 使系统具有高实时性、高精度的特点。

2.2 微电容测量电路

设计的 Z 轴调高随动控制系统通过电容三点式

LC 振荡电路对切割头喷嘴与加工工件之间的电容值进行连续采样。从结构上讲, 电容三点式 LC 振荡电路是一个自带选频网络且没有输入信号的正反馈放大电路, 由放大电路、正反馈网络、选频网络和稳幅环节 4 部分组成。其中, 放大电路采用一定放大倍数的三极管对某一频率的输出信号进行放大处理; 正反馈网络用来将输出的正反馈信号引入到输入端, 使电路产生自激振荡; 选频网络用来筛选出指定频率信号, 保证电容三点式 LC 振荡电路实现单一频率振荡; 稳幅环节用来稳定振荡电路输出信号的幅值, 使振荡电路输出波形维持等幅振荡。

电容三点式 LC 振荡电路见图 4, 放大电路为单级放大电路, 由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 , 电容 C_1 和三极管 Q_1 组成。 Q_1 的基极与 C_1 相连使得三极管基极接地, 实现了正反馈电压从三极管发射极输入和集电极输出的目的, 此外, 三极管 Q_1 的非线性特性实现了微电容测量电路的稳幅效果。电容 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 与电感 L_1 串联组合构成 LC 选频电路, 为了保证 LC 环路的准确度, 所选电容为 NPO 电容, 电阻与电感也为温度稳定性较好的高频元器件, 由于输出频率高, 电容参数在 1 000 pF 以下。电容 C_5 为激光切割头喷嘴与待加工工件的简化模型, 电路中将其简化为一个极距变化型电容传感器, 因此 C_5 大小不固定,

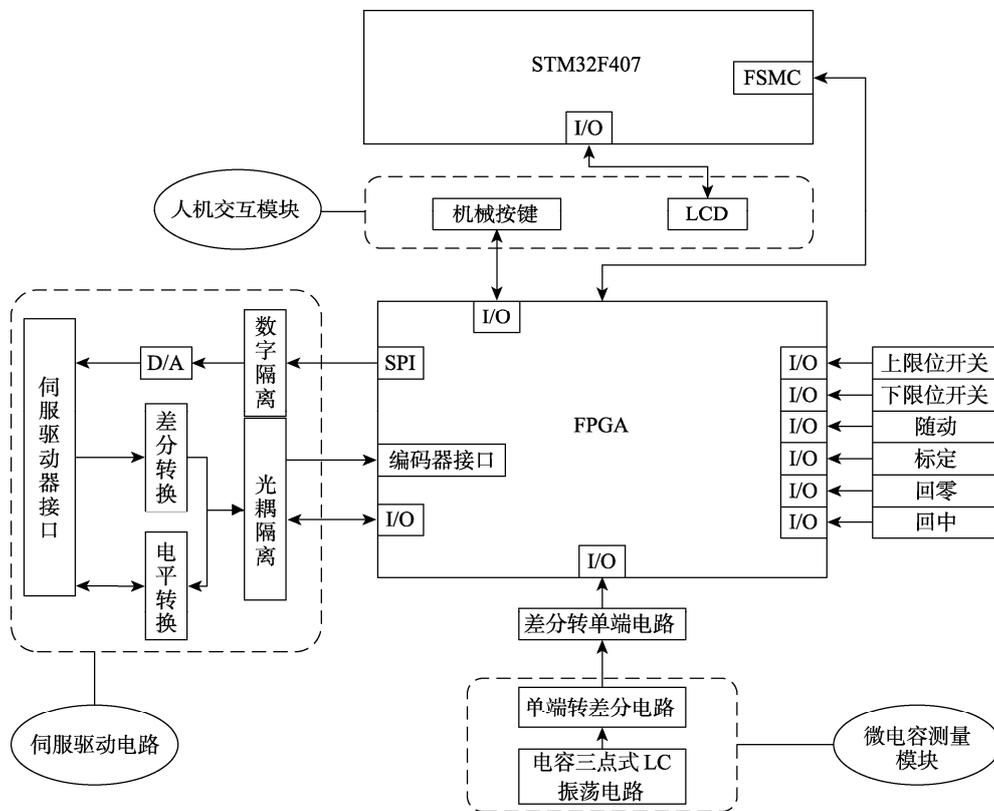


图 3 系统硬件结构
Fig.3 Structure of system hardware

经过实际测试，当 C_5 取值范围为 $10 \sim 50 \text{ pF}$ 时，电路输出高频信号。该简化模型使得切割头喷嘴与待加工工件之间的高度变化转化为电容极板间距的变化，从而引起振荡电路输出信号频率的变化。输出的频率信号经过差分芯片 max485 滤波后，通过双绞线发送给调高控制器。调高控制器内部通过差分芯片 max485、串联磁珠与并联小电容的方式再次对接收到的输出信号进行滤波处理。

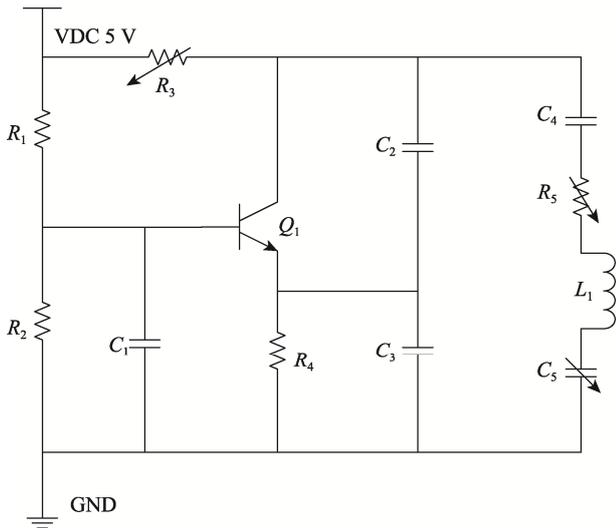


图4 电容三点式 LC 振荡电路
Fig.4 Capacitance three-point LC oscillation circuit

将三极管的输入电容简化为 C_1 ，输出电容简化为 C_0 ，可以得到式 (1)：

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_3 + C_1} + \frac{1}{C_2 + C_0} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} \quad (1)$$

式中： C_s 为微电容测量电路的总电容； C_2 、 C_3 、 C_4 为电容； C_5 为可变电容； C_1 为三极管的输入电容； C_0 为三极管的输出电容。

在设计微电容测量电路中， $C_1 \ll C_3$ ， $C_0 \ll C_2$ ， $C_5 \ll C_3$ ， $C_5 \ll C_2$ ， $C_5 \ll C_4$ ，因此式 (1) 可简化为：

$$\frac{1}{C_s} \approx \frac{1}{C_5} \quad (2)$$

式中： C_s 为微电容测量电路的总电容； C_5 为可变电容。

由式 (2) 可得微电容测量电路的总电容 $C_s \approx C_5$ ，由此可以得到微电容测量电路所测频率 f 为：

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_5}} \quad (3)$$

式中： f 为电容频率值； L_1 为电感； C_5 为可变电容。

微电容测量电路所用元器件多为非线性元件，不便于解析，因此主要采用 Multisim 仿真软件对电容三点

式 LC 振荡电路进行元器件参数调试和仿真实验，通过调试元器件参数使该微电容测量电路输出的频率范围为 $1.665 \sim 4.053 \text{ MHz}$ 。图 5 为该微电容测量电路仿真时产生的波形图，可以看出，在测量过程中，输出的正弦波维持等幅振荡，波形稳定且无高次谐波出现，能够达到预期设计目的。

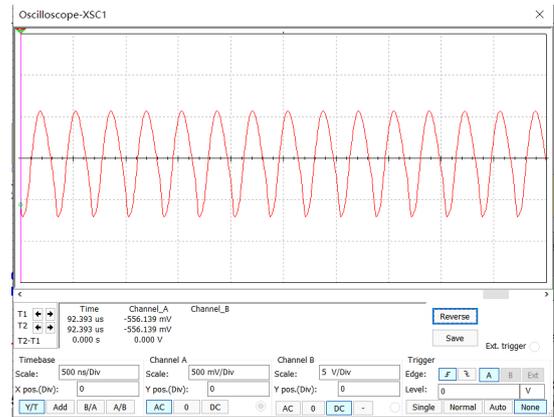


图5 微电容测量电路输出信号波形
Fig.5 Output signal waveform of micro capacitance measuring circuit

3 随动系统软件设计

在 STM32 单片机的开发中存在 3 种常用的软件架构，分别为顺序执行的前后台系统、时间片轮询系统和多任务操作系统。在逻辑清晰且功能单一的系统多采用顺序执行的前后台架构，时间片轮询系统多应用在对系统可靠性要求较高且单片机资源缺乏的情况下，对功能复杂、逻辑控制较为困难的系统多采用多任务操作系统进行设计。

基于 STM32 主控制器开发的 Z 轴调高随动控制系统逻辑清晰，且只需完成高度跟随控制的单一功能，因此，采用简单的前后台顺序执行架构进行系统软件设计。如图 6 所示，随动系统正常工作时共调度 4 个任务：人机界面信息处理任务、电容传感器数据处理任务、伺服电机控制任务、系统状态监控任务。此外，为了便于系统的试用管理，系统软件也提供了基于 STM32F407 芯片 ID 的加密认证服务。前台包括电容传感器数据处理任务、伺服电机控制任务，由于前台操作对系统实时性要求较高，将其置于优先级较高的中断器中执行；而对于人机界面信息处理任务、系统状态监控任务实时性要求较低的后台部分，则将其置于优先级较低的主循环中执行。

3.1 传感器数据处理模块

由于切割头喷嘴与待加工工件之间的距离是变化的，导致 LC 振荡电路输出信号的频率值随之发生变化，系统将微电容测量电路输出的电容频率信号经

过放大与单端转差分处理之后得到电容频率差分数字信号, 通过双绞线将其传送给调高控制器, 调高控制器对接收到的电容频率差分数字信号进行差分转单端处理, 将处理之后得到的滤波信号传送给 FPGA 芯片, 此时, FPGA 对被测信号进行频率测量, 确定被测信号的频率值。任务结束之后, FPGA 芯片将处理好的数据信息通过 FSMC 的方式传送给 STM32F407 芯片。

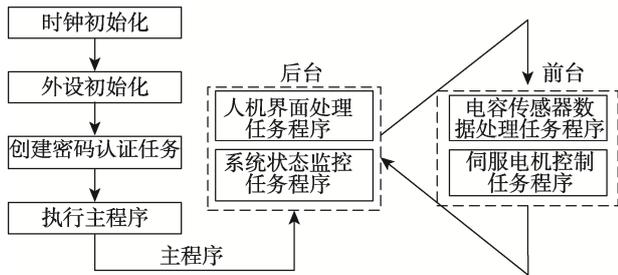


图 6 系统软件启动流程
Fig.6 Startup process of system software

3.2 电容值转化为距离

电容传感器测量切割头喷嘴与待加工工件表面之间的距离是基于平行板电容数学模型与 LC 振荡电路频率数学模型:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r s}{d} \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; s 为电容传感器极板面积; d 为电容传感器两极板之间距离; L 为振荡电路电感; C 为测量的电容值; f 为电容频率值。

由于实际计算距离时不能直接依据此理论模型, 在 Z 轴调高随动控制系统正常运行前, 调高控制器首先控制激光切割头运动, 进行标定处理。

本次设计将激光切割头在 Z 轴方向的标定距离设置为 0~10 mm, 由于系统每次间隔 1 ms 采集一个标记点, 为了每次间隔 0.01 mm 的距离采集一次标定点, 利用调高控制器将系统的标定速度设置为 10 mm/s。理想状态下, 系统会标定 1 000 个采样点, 若标定过程获得的标定点数越接近 1 000, 随动时系统精度越高。标定结束后, 系统生成电容频率-高度数据表, 并把标定数据存储在 STM32 芯片内部。当系统处于随动状态下, 获取电容频率值之后, 将标定的数据表作为参考, 采用二分法查表得到切割头与待加工工件之间的实时高度值。利用 Matlab 软件处理采集到的标定数据, 得到图 7 所示的标定曲线。

3.3 滤波算法设计

由于采集的电容值很小, 仅为几十皮法, 而工业

现场环境复杂, 周围环境中的电磁干扰以及切割过程产生的碎屑都会对采样信号产生干扰。为了保证采样信号的准确度, 需要采用数字滤波技术削弱或滤除随机干扰信号。数字滤波技术的原理是通过科学判断和精确计算减小采样信号中存在的干扰信号, 以实现在程序中过滤和削弱干扰信号的目的。常用的数字滤波算法有防脉冲干扰滤波、滞后滤波和滑动平均值滤波等数学计算方法^[13]。与其他滤波方法相比, 滑动平均值滤波算法测量速度快、数据计算速率高、实时性高, 因此, 采用滑动平均值滤波算法对系统采集的数据进行滤波处理^[14-15]。

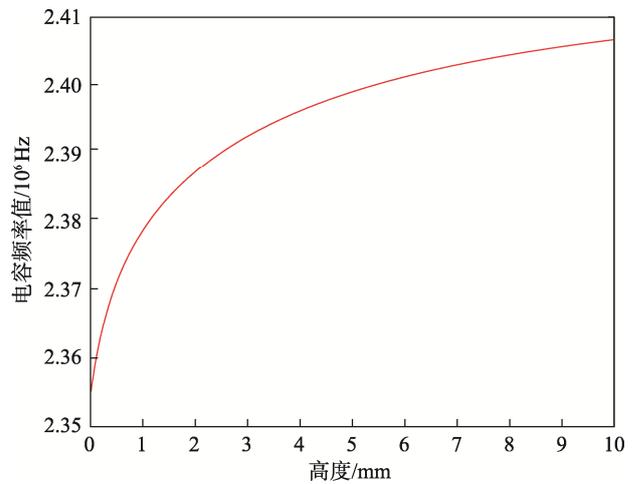


图 7 标定曲线
Fig.7 Calibration curve

如图 8 所示, 滑动平均值滤波首先在 STM32 单片机 RAM 中建立一个长度为 N 的数据缓冲区, 然后将得到的 N 个采样数据按照顺序依次存放到数据缓冲区, 每接收一个新数据, 就将最早接收到的数据丢掉, 然后求包括新数据在内的 N 个数据的算术平均值或加权平均值, 每接收一次数据, 便可计算出一个新的平均值, 该滤波方法大大提高了系统数据处理速度。计算公式为:

$$y(n) = \frac{1}{2k+1} \times \sum_{i=-k}^{i=k} x(n+i) \quad (6)$$

式中: $x(n)$ 为输入; $y(n)$ 为输出; N 为滑动窗口的宽度, $N=2k+1$, 其中 k 为正整数。

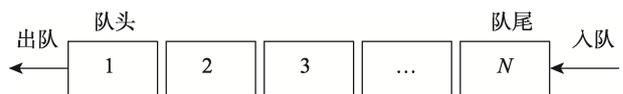


图 8 数据缓存区
Fig.8 Data buffer

为了得到更加精确的数据, 对此算法进行改进。如图 9 所示, 该算法分为 6 个步骤。

1) 首先在 STM32 单片机的 RAM 区建立一个长度为 N 的队列。

- 2) 利用电容传感器采集电容频率值，将采样值依次写入长度为 N 的队列。
- 3) 当队列满时，对队列中的采样数据进行求和运算。
- 4) 当队列满时，筛选出队列中采样数据的最大值与最小值，并将得到的最值做求和运算。
- 5) 步骤 3 得到的运算结果与步骤 4 得到的运算结果相减。
- 6) 将步骤 5 得到的运算结果与 $N-2$ 相除得到采样数据的平均值，获得更为准确的滤波结果。

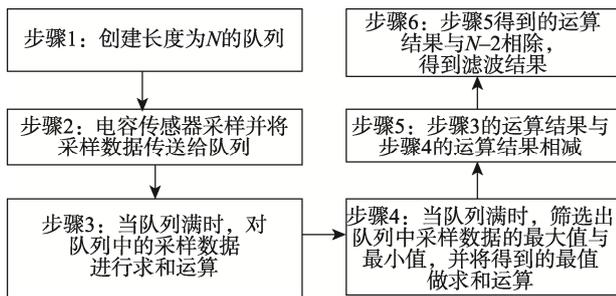


图 9 传感器数据处理流程图
Fig.9 Flow chart of sensor data processing

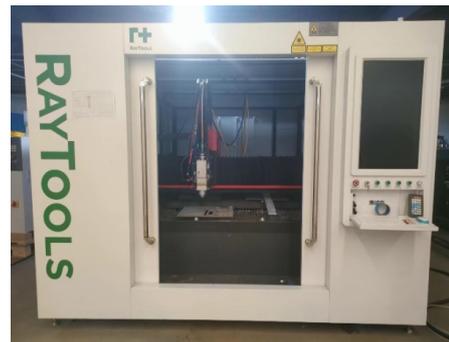
3.4 实验验证

为了检验滤波算法的准确性及 Z 轴调高随动控制系统的跟随效果，在图 10 所示的激光切割机床上对设计的 Z 轴调高随动控制系统进行实验。实验分为 2 种情况，即分别在随动控制系统采用滑动平均值滤波算法和改进滑动平均值滤波算法的情况下进行激光切割实验。实验步骤如下。

- 1) 通过调高控制器在机床上对激光切割头进行标定处理。
- 2) 设置机床切割板材时的随动高度和随动速度。目前，在实际工业加工中，激光切割板材时的随动高度通常设定在 0~1 mm 内，设定的随动高度越高，系统反应越快，随动误差越小。本次实验将随动高度设置在 0~1 mm 内，随动速度设置为 500 mm/s。
- 3) 设置切割图形，进行激光切割实验并通过示波器采集实验反馈的随动高度。

实验结束后，利用 Matlab 软件处理示波器采集到的实验数据，处理后的实验结果见图 11。当采用滑动平均值滤波算法时，随动状态下系统反馈的高度与系统设定的高度之间的最大误差为 0.03 mm；当采用改进后的滑动平均值滤波算法时，随动状态下系统反馈的高度与系统设定的高度之间的最大误差被限制在 0.01 mm 内。观察图 11 可以看出，当系统处于随动状态时，系统反馈得到的滤波高度在大部分情况下均大于系统设定的高度，此种现象是为了避免切割头在系统设定值附近来回跳变，导致切割头切割时产生抖动，影响板材切割质量。分析表 1 中的 5 组随动

实验数据，可以看出，滑动平均值滤波绝对误差的最大值为 0.033 357 mm，改进后滑动平均值滤波绝对误差的最大值为 0.009 783 mm，小于 0.01 mm，达到设计目的。由表 1 可以看出，随着设定高度的增加，系统绝对误差逐渐减小，主要归因于随动高度越高，系统响应速度越快，误差越小。对比图 11 的滤波高度曲线与表 1 中的实验数据，得到如下结论：在相同的实验条件下，当采用改进滑动平均值滤波算法进行激光切割时，系统产生的随动误差较小，该算法显著提高了 Z 轴调高控制系统的跟随精度。



a 为实验机床



b 为激光切割头

图 10 激光切割实验机床
Fig.10 Experimental machine tool of laser cutting

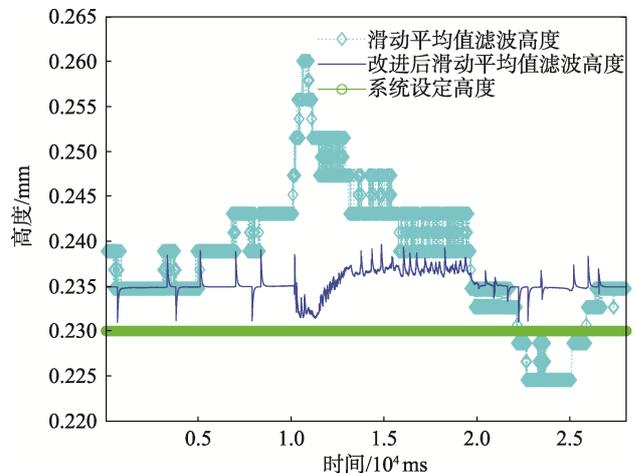


图 11 随动控制系统上机实验结果
Fig.11 Test results of servo control system

表 1 随动实验数据
Tab.1 Data of servo test

系统设定 高度/mm	滑动平均值滤波 高度/mm	滑动平均值滤波 绝对误差/mm	改进后滑动平均值滤波高度/mm	改进后滑动平均值滤波 绝对误差/mm
0.1	0.131 454	0.031 454	0.108 934	0.008 934
0.3	0.333 357	0.033 357	0.290 217	0.009 783
0.5	0.470 778	0.029 222	0.508 649	0.008 649
0.7	0.723 619	0.023 619	0.707 361	0.007 361
0.9	0.920 191	0.020 191	0.893 294	0.006 706

4 结语

文中设计了一种基于 STM32 与 FPGA 的激光切割高精度 Z 轴调高随动控制系统, 该系统采用变极距电容传感器, 以 STM32F407 作为随动系统的控制核心, 同时 STM32F407 通过 FSMC 与 FPGA 芯片连接。FPGA 芯片通过 I/O 接口连接各种外设, 处理接收到的数字信号, 节省了 CPU 的占用空间, 提高了单片机的运行速度, 从而快速实现激光切割头对待加工工件切割高度的跟随运动。通过实验验证, 该随动系统动态响应精度能够达到 0.01 mm, 静态响应精度为 0.001 mm, 最大随动速度达到 500 mm/s。系统满足激光切割机床加工板材时高速高精的加工要求, 有效解决了加工板材表面弯曲不平造成的切割质量问题, 提高了切割产品的合格率与产品竞争力, 安全可靠。文中设计的系统对产品外观包装设计具有重要意义, 具有广阔的市场应用前景。

参考文献:

- [1] 陈城洋, 玄兆丰. 激光加工技术在机械制造中的应用研究[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(12): 103-105.
CHEN Cheng-yang, XUAN Zhao-feng. Research on the Application of Laser Processing Technology in Mechanical Manufacturing[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(12): 103-105.
- [2] HE Ying-yong, XIE Hong-hu, GE Yong-jun, et al. Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy[J]. Processes, 2022, 10(4): 732
- [3] HOU H L, ZHAO Y Q, WU C, et al. Effect of Laser Cutting on the Mechanical and Fatigue Properties of Aircraft Skin Material[J]. Lasers in Engineering (Old City Publishing), 2020, 46: 51-62.
- [4] 张恩铭, 张新星, 陈叶叶, 等. 智能采摘机视角下的切割技术研究现状及展望[J]. 南方农机, 2021, 52(5): 12-14.
ZHANG En-ming, ZHANG Xin-xing, CHEN Ye-ye, et al. Research Status and Prospect of Cutting Technology from the Perspective of Intelligent Picker[J]. South Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 12-14.
- [5] WANG H J, YANG T. A Review on Laser Drilling and Cutting of Silicon[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(10): 4997-5015.
- [6] XU Wei-dong, WANG Jing-yi, DENG Yong, et al. Advanced Cutting Techniques for Solid Food: Mechanisms, Applications, Modeling Approaches, and Future Perspectives[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1568-1597.
- [7] SIVARAO S, ALI A, KU AHMAD K Z, et al. RSM Modelling for Laser Cutting of Shore Wood to Replace Traditional Manufacturing Method[C]// Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2022, 908: 526-534.
- [8] 李建新. 激光切割机切割头位置检测与调高控制系统设计[J]. 激光杂志, 2012, 33(4): 33-34.
Li Jian-xin. Design of the Cutting Head Position Detection and Control System of Laser Cutting Machine[J]. Laser Journal, 2012, 33(4): 33-34.
- [9] 陈和平, 石敏, 王晓晖. 激光切割 Z 轴弹性定距随动系统的设计与实现[J]. 制造业自动化, 2014, 36(19): 112-114.
CHEN He-ping, SHI Min, WANG Xiao-hui. The Design and Realization of the Laser Cutting Elastic Fixed-Focus Servo System of Z-Axis[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(19): 112-114.
- [10] 孙玉国, 刘慧颖. 激光切割 Z 轴位置随动控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2018, 47(12): 16-18.
SUN Yu-guo, LIU Hui-ying. Design of Z-Axis Position Servo Control System for Laser Cutting[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(12): 16-18.

- [11] 刘爱伟. 激光切割随动系统的研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53(3): 60-62.
Liu Ai-wei. Research of Follow-up System in Laser Cutting Process[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2018, 53(3): 60-62.
- [12] 张振华. 用于激光切割的高精度电容调高系统研究和设计[D]. 济南: 山东大学, 2020: 4-6.
ZHANG Zhen-hua. Research and Design of High Precision Capacitance Height Adjustment System for Laser Cutting[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 4-6.
- [13] 陈旭, 张雯雯. 关于单片机应用系统抗干扰技术的分析[J]. 数字通信世界, 2019(9): 75-76.
CHEN Xu, ZHANG Wen-wen. Analysis on Anti-Interference Technology of Single Chip Microcomputer Application System[J]. Digital Communication World, 2019(9): 75-76.
- [14] 余东. 单片机数字滤波程序设计与实现[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(9): 78-80.
SHE Dong. Design and Implementation of Single Chip Microcomputer Digital Filter Program[J]. Journal of Sichuan Ordnance Industry, 2012, 33(9): 78-80.
- [15] FANG L, OU Q L. Design of Weighing System Based on Improved Moving Average Filter Algorithm[J]. Journal of Artificial Intelligence Practice, 2021, 4(2): 74-77.

责任编辑: 曾钰婵