

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416808

# 基于 ATmega32U4 单片机的液体变焦透镜控制系统\*

党嘉祎<sup>1</sup> 赵瑞<sup>1</sup> 代俊<sup>2</sup> 任驹<sup>2</sup> 王杨<sup>2</sup>

(1.南京邮电大学微流控光学技术研究中心 南京 210023; 2.西南技术物理研究所 成都 610041)

**摘要:** 针对传统液体透镜控制系统成本高及不能满足个性化定制等问题,开发了一款用于液体透镜自动调焦的控制系统。系统选择 ATmega32U4 单片机为主控芯片,选择 LTC2662 芯片和 H 桥电路作为电流输出模块用于控制液体透镜实现变焦,并提供手动和自动两种操作模式供用户选择。该系统电流输出模块可输出 DC -300~300 mA 的稳定工作电流,平均误差 0.64%,电流稳定性为 0.327 7%;而焦距控制软件的自动调焦平均耗时约 1.3 s,图像分辨率可达 45.3 lp/mm。与现有的液体透镜控制系统相比,该系统实现了对液体透镜焦距的自动调节,操作简单、性能稳定、成本较低,为液体透镜提供了更加灵活和个性化的定制选项。

**关键词:** 液体变焦透镜;自动调焦;ATmega32U4 单片机

**中图分类号:** TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Liquid zoom lens control system based on ATmega32U4 microcontroller

Dang Jiayi<sup>1</sup> Zhao Rui<sup>1</sup> Dai Jun<sup>2</sup> Ren Ju<sup>2</sup> Wang Yang<sup>2</sup>

(1. Center of Optofluidic Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Aiming at the high cost of the traditional liquid lens control system and the inability to meet the problems of personalised customisation, a control system for automatic focusing of liquid lenses is developed. The system selects ATmega32U4 microcontroller as the main control chip, LTC2662 chip and H-bridge circuit as the current output module for controlling the liquid lens to achieve zoom, and provides two operation modes, manual and automatic, for users to choose. The current output module of this system can output a stable working current of DC -300~300 mA, with an average error of 0.64% and a current stability of 0.327 7%; and the average time consumed by the auto-focusing of the focus control software is about 1.3 s, with an image resolution of up to 45.3 lp/mm. Compared with the existing liquid lens control system, this system realizes the automatic adjustment of the focus of the liquid lens, which is simple in operation, stable in performance, and low in cost. Compared with the existing liquid lens control system, this system can automatically adjust the focal length of the liquid lens with simple operation, stable performance and lower cost, providing more flexible and personalised customisation options for liquid lenses.

**Keywords:** liquid zoom lens; automatic focusing; ATmega32U4 microcontroller

## 0 引言

近年来,随着民众生活水平日益提升,人们对高性能智能化成像镜头的需求越来越多。为了克服传统机械变焦镜头的缺陷,国内外科研工作者研发了多款液体变焦透镜,主要包括基于液晶折射率变化的变焦透镜化<sup>[1-2]</sup>、基于电润湿效应的液体透镜<sup>[3-4]</sup>及基于压力驱动的液体变焦透镜<sup>[5-6]</sup>。基于液晶折射率变化的变焦透镜,在电场或者超声波作用下,引起液晶折射率变化,实现透镜焦距变化<sup>[7]</sup>,例如

LensVector 公司生产的渐变折射率液体透镜,已被成功应用在机器视觉中<sup>[8]</sup>。然而,这种透镜存在可调焦范围较小,可控精度不够高等问题。基于电润湿效应的液体透镜,通过操控电压促使液-液界面曲率发生变化,进而实现透镜焦距变化<sup>[9]</sup>,例如 Corning<sup>®</sup> Varioptic<sup>®</sup> 可变焦液态镜头系列,已在长焦距、大幅面传感器以及激光中得到应用<sup>[10]</sup>。由于基于电润湿效应的液体透镜有效孔径较小(<6 mm),使得其应用范围受到一定的限制。基于压力驱动的液体可变焦透镜,通过压力驱动液体使薄膜发生形变,实现对透镜焦距变

收稿日期:2024-09-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(12273085)项目资助

化的控制<sup>[11]</sup>，例如荷兰 Optotune 公司制作的填充式液体变焦透镜产品，已初步应用在工业和医疗领域<sup>[12]</sup>。但是该透镜产品也存在诸如有效孔径不大 (<10 mm) 及光焦度变化能力有限等问题。在液体透镜变焦控制系统方面，Optotune 公司开发了一款遵循开放串行协议的液体透镜驱动器，而 Varioptic 公司则设计了一款 Maxim 14574 驱动器。尽管上述两款液体透镜控制系统能够实现液体透镜焦距的调节，但均不具备自动调焦功能，难以满足个性化定制。

为了解决上述液体透镜产品存在的问题，课题组研制了一款大口径变焦范围的液体透镜。本文为该大口径液体透镜个性化开发了一款基于 ATmega32U4 单片机的液体变焦透镜控制系统。设计并制作了液体变焦透镜硬件控制电路；开发了自动调焦软件，通过计算图像清晰度评价值，借助爬山算法确定最佳工作电流值，并通过串口发送至硬件控制电路，最终完成 DC - 300 ~ 300 mA 范围内的稳定电流输出。该系统实现了液体透镜的自动调焦，性能稳定，操作简单，满足了液体透镜个性化定制的要求，在机器视觉<sup>[13]</sup>、显微成像<sup>[14-15]</sup>及生物医疗检测<sup>[16-18]</sup>领域将具有极高的潜在应用价值。

## 1 系统总体结构

基于 ATmega32U4 单片机的液体变焦透镜控制系统整体框架如图 1 所示，包括自动调焦功能软件、硬件控制电路和液体透镜。在本文设计中，液体变焦透镜的通光口径 20 mm，工作电流 DC - 300 ~ 300 mA，变焦范围  $(-\infty, -46.25 \text{ mm}) \cup (44.5 \text{ mm}, \infty)$ ；自动调焦功能软件主要包括串口配置、图像显示、自动调焦模块及手动调焦模块；硬件控制电路则由 ATmega32U4 微处理器、调试接口、复位电路、时钟电路、电流转换电路及电流换向电路组成，其中，ATmega32U4 微处理器主要用于解析自动调焦功能软件的数据并通过 SPI 总线控制电流转换电路；电流转换电路对 LTC2662 芯片的相关寄存器进行配置，输出驱动电流；电流换向电路通过控制 MOS 管的通断实现电流换向，满足了液体透镜曲率双向变化的需求。自动调焦软件和硬件控制电路通过串口通信连接，经过程序逻辑编程，实现改变液体透镜焦距的目的。

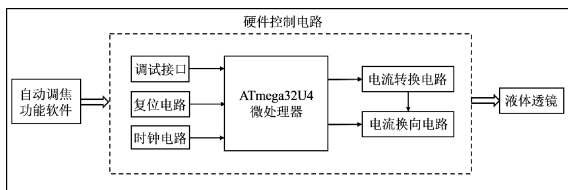


图 1 系统整体框架

Fig.1 Overall system framework

## 2 硬件设计

### 2.1 单片机最小系统

选取 Microchip 公司的 ATmega32U4 微处理器<sup>[19]</sup>作

为系统的主控芯片，其最小系统原理图如图 2 所示。

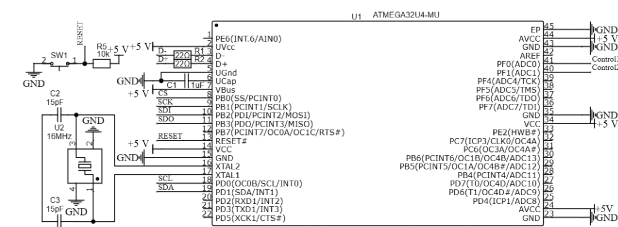


图 2 单片机最小系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of microcontroller minimum system

### 2.2 电流转换电路

图 3(a)为电流转换电路的设计原理图，SPI 通信接口接收主控芯片发送的数据信号，完成芯片寄存器的配置，进而控制电流输出。每路电流输出峰值为 300 mA，满足液体变焦透镜驱动电流的要求。

### 2.3 电流换向电路

电流换向电路原理图如图 3(b)所示，采用两片六引脚 MOSFET 芯片 FDC6420 构成 H 桥电路，实现电流换向功能。通过设置主控芯片 ATmega 32U4 的输出端口 Control1/Control2 的高低电平，实现对 H 桥中电流流向的控制。

### 2.4 电源及接口电路

电源及接口电路设计原理图如图 3(c)所示，采用 USB TYPE-C 接口输出 +5 V 电源供单片机和电流转换模块使用。由于 ATmega32U4 微处理器内置 USB 通信，无需二级处理器，可直接通过 USB 接口与上位机通信。

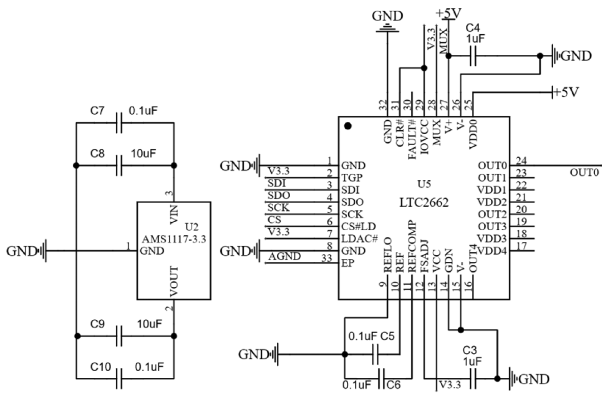
## 3 软件设计

基于 Qt creator 开发平台<sup>[20]</sup>开发了一款液体变焦透镜的自动调焦软件，控制液体透镜变焦及实时显示图像信息。图 4 给出了液体变焦透镜自动调焦软件的功能模块示意图，分为 4 个功能模块：串口配置模块、图像显示模块、手动调焦模块及自动调焦模块。

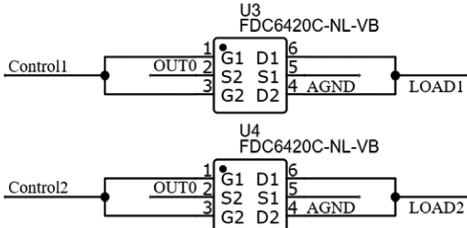
该自动调焦软件采用多线程设计，即线程 1 和线程 2。线程 1 包括图像显示模块，负责读取液体透镜图像信息并显示在软件界面；而线程 2 包括串口配置模块、手动调焦模块和自动调焦模块，其程序流程图如图 5 所示。

当选择手动调焦模式时，自动调焦模式关闭。当用户移动软件界面上的滑动条时，程序获取滑动条控件的位置值并通过串口发送给单片机。单片机对数据进行处理后，并通过 SPI 总线与电流输出模块通信，完成改变输出电流的功能，进而实现对液体透镜焦距的控制。

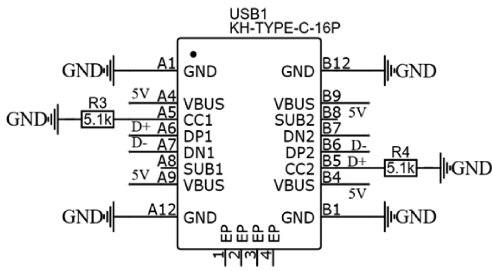
当选择自动调焦模式时，自动调焦功能软件通过串口改变硬件控制电路输出电流值并计算图像清晰度。借助爬山搜索算法对最清晰图像进行搜索，若未达到正焦位置，则继续改变电流值，直至搜索到正焦图像即最清晰图像，确定最佳工作电流值，并通过控制硬件电路完成工作电流的输出，从而实现系统的自动调焦功能。



(a) 电流转换电路  
(a) Current conversion circuit



(b) 电流换向电路  
(b) Current commutation circuit



(c) 电源及接口电路  
(c) Power supply and interface circuits

图 3 电流输出模块

Fig. 3 Current output module

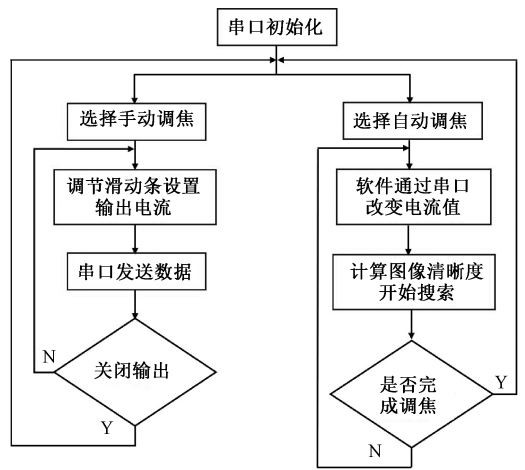


图 5 线程 2 程序流程图

Fig. 5 Flowchart of Thread 2 programme

值为 0~4 095 范围,输出电流曲线如图 6 所示,其中灰色曲线代表理论计算电流值,而红色曲线则代表实验测量的输出电流值。比较图 6(a)中正向输出电流与图 6(b)反向输出电流曲线可以发现,理论电流值与实验测量的输出电流值几乎完全重合,最大差值为 1.16 mA。根据输出电流线性度公式<sup>[22]</sup>计算,硬件控制电路的输出电流线性度为 0.39%,具有良好的线性度。图 6(c)、(d)分别给出了正向和反向输出电流误差的百分比随预设电流值的变化关系,实际输出电流值与预设电流值最大误差为 2.64%,最小误差为 0.09%,平均误差为 0.64%,精确度较高。

为测试驱动电流的稳定性,将电流输出码值设定为 2 000,此时理论输出电流值为 146.48 mA。每隔 5 min 记录一次实际输出电流值,连续测量 100 min。图 7 给出了驱动电流的稳定性曲线,从图 7 可以发现:在 100 min 持续时间内,输出电流最大波动值为 0.48 mA。根据输出电流稳定度公式<sup>[23]</sup>计算,输出驱动电流稳定度为 0.327 7%,表明该驱动电路能够提供稳定可靠的电流输出。

### 4.2 调焦性能

图 8(a)为测试液体透镜控制系统调焦功能所需的测试平台,其中液体透镜采集的图像经摄像头模组传输至 PC 机,硬件驱动板与 PC 机连接用于接收上位机数据,而硬件驱动板的电流输出端与液体透镜连接,用于控制液体透镜变焦;图 8(b)、(c)、(d)为手动调焦模式下不同正向输出电流对应的目标物成像序列图。当驱动电流为 0 mA 时,目标物处于离焦状态。调节正向电流使其增大至 60 mA,此时图像清晰度值最大,对应的透镜焦距为 230.32 mm。继续增大输出电流,目标物将再次处于离焦状态,图像清晰度值逐渐降低。

一旦启动自动对焦模式,自动调焦软件将根据清晰度值连续调整输出电流,直至图像最清晰,从而实现自动调焦。图 9 为自动调焦模式下系统成像,其中图 9(a)为自动调焦界面,此时目标物图像清晰度最佳,对应驱动电流值为

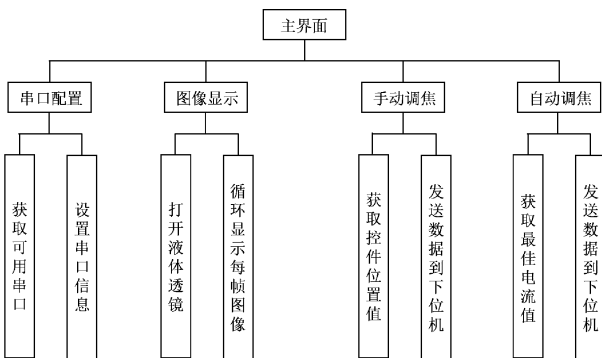


图 4 液体变焦透镜自动调焦软件功能模块

Fig. 4 Liquid zoom lens auto-focus software function module

## 4 性能测试

### 4.1 电流输出特性

通过在 Arduino 软件<sup>[21]</sup>中编写程序,控制电流输出码

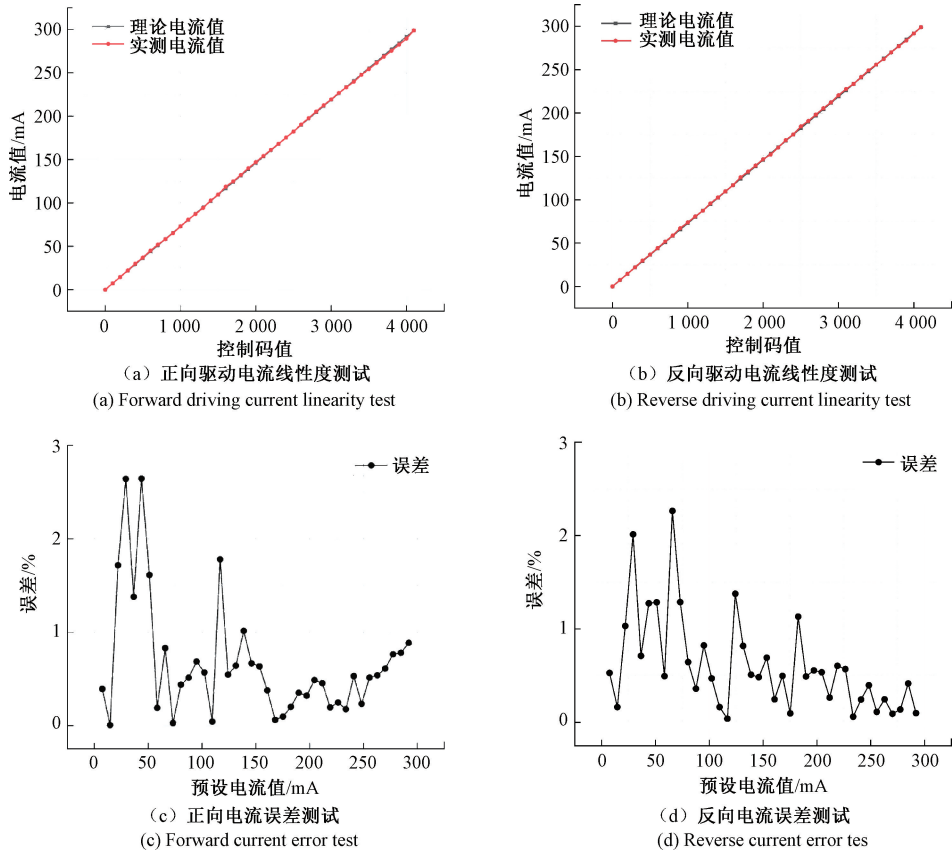


图 6 驱动电流测试图

Fig. 6 Driving current test graph

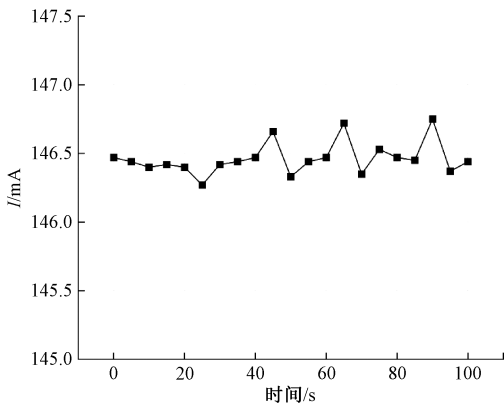


图 7 驱动电流稳定性曲线

Fig. 7 Driving current stability curve

-25.5 mA, 清晰度评价值为 18 010.9, 耗时 1.2 s。图 9(b)、(c)、(d) 分别给出了  $t=0$ 、0.4 以及 0.8 s 时捕捉的关键帧图, 可以清晰地观察到: 目标物体从模糊逐渐变得清晰, 直至最佳的视觉清晰度。

为评估控制系统自动调焦功能的实时性和稳定度, 对不同位置的 6 个目标物进行了 50 次重复对焦实验。表 1 给出了 6 个目标物自动调焦平均耗时及失败次数数据。

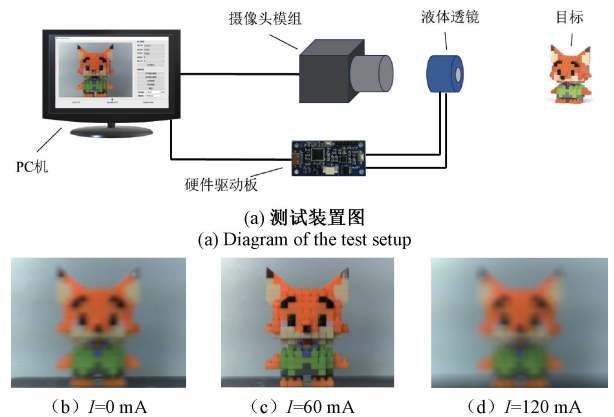


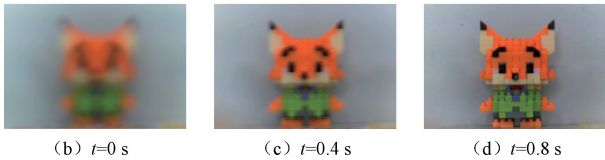
图 8 手动调焦模式下不同正向输出电流对应的目标物成像序列图

Fig. 8 Imaging sequence diagrams of targets corresponding to different forward output currents in manual focusing mode

从表 1 数据看出: 自动调焦控制系统对不同位置处物体自动对焦平均耗时为 1.31 s, 成功率为 97.6%, 优于胡新宇等<sup>[24]</sup>基于 YOLOv5s 调焦方法的 1.6 s 平均耗时。优化清晰度评价算法, 可进一步缩短系统自动调焦时间, 提高系统的实时性和稳定性。



(a) 调焦界面  
(a) Focusing interface



(b)  $t=0\text{ s}$  (c)  $t=0.4\text{ s}$  (d)  $t=0.8\text{ s}$

图 9 自动调焦模式下系统捕捉到的图像

Fig. 9 Images captured by the system in autofocus mode

表 1 控制系统自动调焦耗时及稳定度测试

Table 1 Control system autofocus time consuming and stability test

位置	调焦平均耗时/s	调焦失败次数
1	1.25	0
2	1.28	2
3	1.38	1
4	1.42	0
5	1.20	1
6	1.32	1

## 5 结 论

本文设计并制作了驱动液体透镜变焦的电流控制系统,开发了一种液体透镜调焦系统,包括手动调焦和自动调焦两种模式。详细阐述了硬件电路设计、调焦软件的功能设计,并对其进行了测试与分析。研究表明:该硬件控制电路能够稳定输出 $-300\sim 300\text{ mA}$ 直流电流,而调焦软件可完成对液体变焦透镜的手动调焦和自动聚焦,其中自动调焦耗时约 $1.3\text{ s}$ ,图像分辨率可达 $45.3\text{ lp/mm}$ 。该控制系统具有结构简单及操作便捷等优点,将为液体透镜在机器视觉、显微成像、安防监控、工业扫描、生物医疗检测等领域的广泛应用提供更广阔的发展空间,对液体变焦透镜成像技术发展具有重要的应用价值。

## 参考文献

[1] YIHSIN L, WEICHENG C, VICTOR R, et al. Electrically tunable gradient-index lenses via liquid

crystals: beyond the power law[J]. Optics Express, 2023, 31(23): 37843-37860.

- [2] RUI L, FAN C, LAN L T, et al. Liquid crystal lenticular lens array with extended aperture by using gradient refractive index compensation [J]. Liquid Crystals, 2021, 48(3): 378-384.
- [3] 王琼华, 袁荣英, 刘超. 基于电润湿液体透镜的显微成像技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1774-1781.  
WANG Q H, YUAN R Y, LIU CH. Microscopic imaging technology with electrowetting liquid lens[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1774-1781.
- [4] XU J B, YUAN R Y, ZHAO Y R, et al. Three-phase electrowetting liquid lens with deformable liquid iris[J]. Optics Express, 2023, 31(26): 43416-43426.
- [5] 程阳, 曹杰, 王营博, 等. 介电弹性体驱动液体透镜的设计与分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522004.  
CHENG Y, CAO J, WANG Y B, et al. Design and analysis of liquid lens driven by dielectric elastomer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522004.
- [6] LI H T, CHEN Y J, WANG Y, et al. Compact electromagnetically driven liquid-filled lens with bidirectional wide range focus tuning capability[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 349: 113950.
- [7] SHIMIZU Y, KOYAMA D, FUKUI M, et al. Ultrasound liquid crystal lens [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(16): 161104.
- [8] 黄翔, 林四英, 谷丹丹, 等. 液体变焦镜头的研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1179-1194.  
HUANG X, LIN S Y, GU D D, et al. Review on progress of variable-focus liquid lens [J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1179-1194.
- [9] 徐荣青, 李雷, 孔梅梅, 等. 电润湿液体透镜暂态过程的测试与分析[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 222-229.  
XU R Q, LI L, KONG M M, et al. Measurement and analysis of transient process of electrowetting liquid lens[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 222-229.
- [10] JIA L, CJ C K. Current commercialization status of electrowetting-on-dielectric (EWOD) digital microfluidics[J]. Lab on A Chip, 2020, 20(10): 1705-1712.
- [11] AGARWALA R, DECHANT M, SAUER Y, et al. Feasibility of eye tracking to control a prototype for presbyopia correction with focus tunable lenses [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2023,

- 64(8): 2503-2503.
- [12] 张祥翔. 基于液体透镜的显微镜自动调焦技术[J]. 光电工程, 2015, 42(10): 37-42.  
ZHANG X X. Autofocus technology based on liquid lens in microscopic imaging system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(10): 37-42.
- [13] DIESING G. AI and machine vision lenses: Enhancements, trends, and evolution[J]. Quality, 2023, 62(12): 33-33.
- [14] GILINSKY D S, JUNG N D, FUTIA L G, et al. Tunable liquid lens for three-photon excitation microscopy[J]. Biomedical Optics Express, 2024, 15(5): 3285-3300.
- [15] YUAN R Y, MA X L, ZHENG Y, et al. 3D microscope image acquisition method based on zoom objective[J]. Optics Express, 2023, 31(10): 16067-16080.
- [16] 李红帝, 张红霞, 宋晓敏, 等. 基于液体变焦透镜和透镜的三维光片显微成像系统[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 58-68.  
LI H D, ZHANG H X, SONG X M, et al. Three-dimensional light-sheet microscopy imaging system with liquid zoom lens and galvanometer mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(2): 58-68.
- [17] JEN T H, CHANG Y C, TING C H, et al. Locally controllable liquid crystal lens array for partially switchable 2D/3D display [J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(10): 839-844.
- [18] LIU C, ZHENG Y, LI N, et al. Real scene acquisition and holographic near-eye display system based on a zoom industrial endoscope [J]. Optics Express, 2022, 30(18): 33170-33181.
- [19] WEI C, LIN W, WANG L, et al. Conformal human-machine integration using highly bending-insensitive, unpixelated, and waterproof epidermal electronics toward metaverse [J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15(11): 148-164.
- [20] 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.  
MING Y, FENG R P, PIAO Y J. The RT-qPCR temperature control system based on COVID-19 fluorescence detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(6): 18-23.
- [21] BI H L, KONG M. Design of a logistics automated guided vehicle [J]. Instrumentation, 2022, 9 (1): 1-11.
- [22] 王硕, 王国臣, 高伟. 光纤电流互感器用半导体激光器数字驱动电路设计[J]. 半导体光电, 2020, 41(5): 711-716.  
WANG SH, WANG G CH, GAO W. Design of all digital drive circuit of semiconductor lasers for fiber optical current transformer [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 711-716.
- [23] 李永康, 朱兴邦, 喻一凡, 等. 可调谐激光器多闭环控制驱动系统设计 [J]. 电光与控制, 2024, 31 (4): 98-102120.  
LI Y K, ZHU X B, YU Y F, et al. Design of a Multi-loop control drive system for tunable laser [J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31 (4): 98-102120.
- [24] 胡新宇, 刘锡阳, 张骏巍, 等. 基于 YOLOv5s 的精密视觉检测系统快速调焦方法 [J/OL]. 中国机械工程, 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.th.20240926.1724.009.html>.  
HU X Y, LIU X Y, ZHANG J W, et al. A fast focusing method for precision vision detection system based on YOLOv5s [J/OL]. China Mechanical Engineering, 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.th.20240926.1724.009.html>.

### 作者简介

党嘉祎, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与图像处理。

E-mail: 1223024814 @njupt.edu.cn

赵瑞(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为光电信息检测技术、流体光电子器件及微流控技术等。

E-mail: zhaor@njupt.edu.cn