

服务器板卡 LED 指示灯状态自动化 检测系统设计

罗希望, 孙连震, 金 冉, 夏纪永, 陈冉冉, 陈金龙

(浪潮电子信息产业股份有限公司, 山东 济南 250101)

摘要:针对传统 LED 指示灯检测方式过度依靠人工观察存在的测试效率低下、测试准确度不足、智能化程度受限等问题, 设计了一种 LED 指示灯状态自动化检测系统。该系统以 STM32F103R8T6 单片机为主控核心, 集成 VEML6040 颜色传感器、通讯模块等硬件组件, 搭建外围硬件控制电路, 配合基于离散傅里叶变换的频域幅值分析算法, 实现对 LED 闪烁光源信号的精准采集与高效处理, 并通过 USB 总线协议将数据传输至服务器端, 随后启动自动化检测程序, 将采集值与预设参数对比分析以评估测试数据的合理性, 从而实现 LED 指示灯的自动化功能性检测。最后对所设计功能进行验证测试, 结果表明 LED 颜色参数误差控制在 10° 以内, 闪烁频率误差控制在 2 Hz 以内, 展现出较高的稳定性和可靠性。

关键词:LED 指示灯; 自动化检测系统; STM32; 颜色传感器; 硬件设计

中图分类号:TP368.1; TP274

文章编号:1000-0682(2025)05-0024-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.05.005

Design of automated detection system for server board LED indicator status

LUO Xiwang, SUN Lianzhen, JIN Ran, XIA Jiyong, CHEN Ranran, CHEN Jinlong

(IEIT SYSTEMS Co., Ltd., Shandong Jinan 250101, China)

Abstract: Aiming at the problems of low test efficiency, inadequate test accuracy, and limited intelligence caused by the excessive reliance on manual observation in traditional LED indicator light detection methods, an automated detection system for LED indicator light status is designed. The system uses the STM32F103R8T6 microcontroller as the main control core and integrates the VEML6040 color sensor, communication modules, and other hardware components. It also constructs peripheral hardware control circuits and implements the frequency domain amplitude analysis algorithm based on the discrete Fourier transform to achieve precise acquisition and efficient processing of LED flickering light source signals. The data are transmitted to the server via the USB bus protocol. Subsequently, the automated detection program is initiated to compare and analyze the collected values against preset parameters, in order to evaluate the rationality of the test data, thereby achieving automated functional detection of LED indicator lights. Finally, the designed functions are validated and tested. The results show that the LED color parameter detection error is controlled within 10° and the flicker frequency detection error is controlled within 2 Hz, exhibiting high stability and reliability.

Keywords: LED indicator light; automated detection system; STM32; color sensor; hardware design

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 陕西省省级一流线下课程(陕教[2021]107号)

第一作者: 罗希望(1982—), 男, 河南通许人, 本科, 工程师, 研究方向为服务器生产测试技术。

通信作者: 夏纪永(1991—), 男, 山东临沂人, 硕士, 研究方向为服务器 PCBA 精密测试和测试装备开发。

0 引言

随着当前算力的高速发展和大数据的盛行, 服务器已逐渐实现普及化。服务器行业的蓬勃发展主要得益于其卓越的性能表现, 如运行速度快、承载负载高、CPU 运算能力强等。为保证服务器稳定运

行并充分发挥其性能优势,测试验证环节不可或缺。在服务器 PCBA(Printed Circuit Board Assembly)生产过程中,需历经一系列测试流程,如 AOI(Auto Optical Inspection)测试、ICT(In - Circuit Tester)测试、BSI(Boundary Scan Inspector)测试和 FCT(Functional Circuit Test)测试等,其中,FCT 测试处于最终测试工站,产品完整性高,若质量缺陷无法及时发现,不良品流入整机组装厂,将造成返修工作量加大,进而对整个生产线的效率和成本控制造成影响。由此可见,FCT 测试在 PCBA 产品整个生产流程中占据着举足轻重的地位,对于保障产品的最终品质起着至关重要的作用^[1-3]。

FCT 即功能测试,为 PCBA 施加特定激励和负载,使其工作于各种设计状态下,通过获取负载的工作状态参数以间接反馈功能的正常与否^[4-7]。在 PCBA 产品中,通常会集成设计大量 LED 指示灯,以直观反映产品的实时运行状况及相应功能模块工作状态是否正常,因此,LED 指示灯检测是 FCT 测试过程中的关键一环。然而,传统的测试方法过度依赖于人工操作,通过作业员肉眼观察 LED 状态来评估产品性能,单一重复性工作,不仅检测效率低下,自动化程度低,而且极易受人工检查主观因素、操作疲劳度的影响而出现漏测、误测等问题,测试结果可信度低,容易造成异常板卡流出,产生不良影响。

该文针对传统检测方式的弊端,构建了一种能够快速检测、准确识别 LED 指示灯异常的自动化检测系统。综合应用软硬件技术,以 STM32F103 单片机为主控核心,以 VEML6040 颜色传感器为感应部件,搭载电源模块、通讯模块等组件,配合辅助电路及相应的数据处理算法,如基于离散傅里叶变换的频域幅值特征提取算法,实现 LED 闪烁光源信息的实时采集、高效运算与传输,并配合自动化测试程序,执行测试用例,在设定好的程序中根据指定的命令完成既定的要求,以达成 LED 颜色、闪烁频率等信息自动化识别、分析与检测评估的目的,实现 LED 指示灯的智能化、高效化、精确化检测。

1 系统总体设计

LED 自动化检测系统总体设计框图如图 1 所示,硬件部分主要由 STM32 单片机模块、传感器模块、电源模块、通讯模块、设备级联扩展模块、显示及地址设置模块以及相应的控制电路组成。系统启动后,传感器按照预设频率对 LED 光源 RGB 数据进行批量采样,单片机通过 I²C 总线协议访问传感器以获取数

据,利用单片机内置的控制系统和算法,对原始 RGB 数据进行频域分析、数据格式转换及色域转换等,实现对 LED 光源信息的实时加工处理。最后通过 USB 通讯协议将前端数据信息推送至服务器端,结合产品 LED 设计要求,配合产品测试程序,以此评估 LED 指示灯的颜色、闪烁频率等信息是否符合预期逻辑,达成 LED 自动化测试的目标。软件方面配合自研的轻量版 Linux 操作系统,系统本身不足 350 MB,具备稳定性高、灵活性强、易于转移和维护等特点。

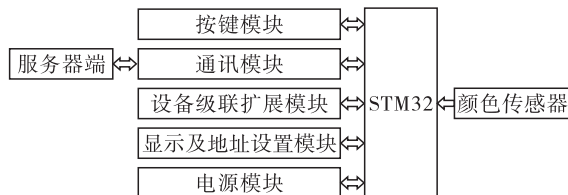


图 1 系统总体设计框图

2 系统硬件设计

2.1 单片机模块

该文选用 STM32F103R8T6 芯片作为主控单元进行硬件平台的搭建,协调管理各功能模块协同工作。该芯片是一种基于 ARM Cortex - M3 内核的高性能 32 位微控制器,主频高达 72 MHz,内置 64 KB Flash、20KB RAM 存储空间,外设接口资源丰富,涵盖 I²C、CAN、USB 和 USART 等通信接口,可满足多样化功能扩展需求,具有优秀的运算处理能力和灵活的功耗管理功能,成本低廉,易于编程,广泛应用于工业控制、消费电子等领域^[8-11]。

2.2 通讯模块

通信模块集成 CH340C、SP3485EN 和 TJA1050 等芯片,如图 2 所示,实现服务器端、单片机及级联设备间的通讯。CH340C 作为 USB 总线转 UART 串口协议芯片,内部自带晶振,省去额外配备过程,Linux 环境兼容性良好,便于在服务器中部署配置,实现服务器端与单片机的串口通信功能。单台设备配备 16 个光源采集通道,为扩展通道,采用 RS485 和 CAN 通讯技术,将主从设备 J1/J2 接口通过固定线缆相连。RS485 通讯用于大数据流交互,从设备通过 SP3485EN 芯片将单片机输出的 UART 信号转换为 RS485 标准差分信号,并通过 J1/J2 接口将数据传送至主设备 J1/J2 接口,主设备则通过 SP3485EN 芯片将接收到的 RS485 差分信号转换为 UART 信号,以供单片机或服务器端进行数据处理。SP3485EN 具备电流限制、短路保护等特性,可实现稳定可靠的差分信号长距离传输。设计时将 RE、

DE 引脚相连,由单片机串口控制数据传输方向,实现数据自动收发。CAN 总线用于控制命令交互,单片机内置 CAN 控制器,外配 TJA1050 CAN 收发器及相应外围电路,为物理总线提供差分信号发送与接收能力。由于主从设备均通过主设备的 CH340C

芯片与服务器端进行数据交互,系统初始化后, BL155 芯片被配置以将通讯权限交给主设备,此后主设备可控制 BL155 芯片将通讯权限移交至从设备,并可通过 CAN 通讯中断从设备数据传输,重新获取通讯控制权。

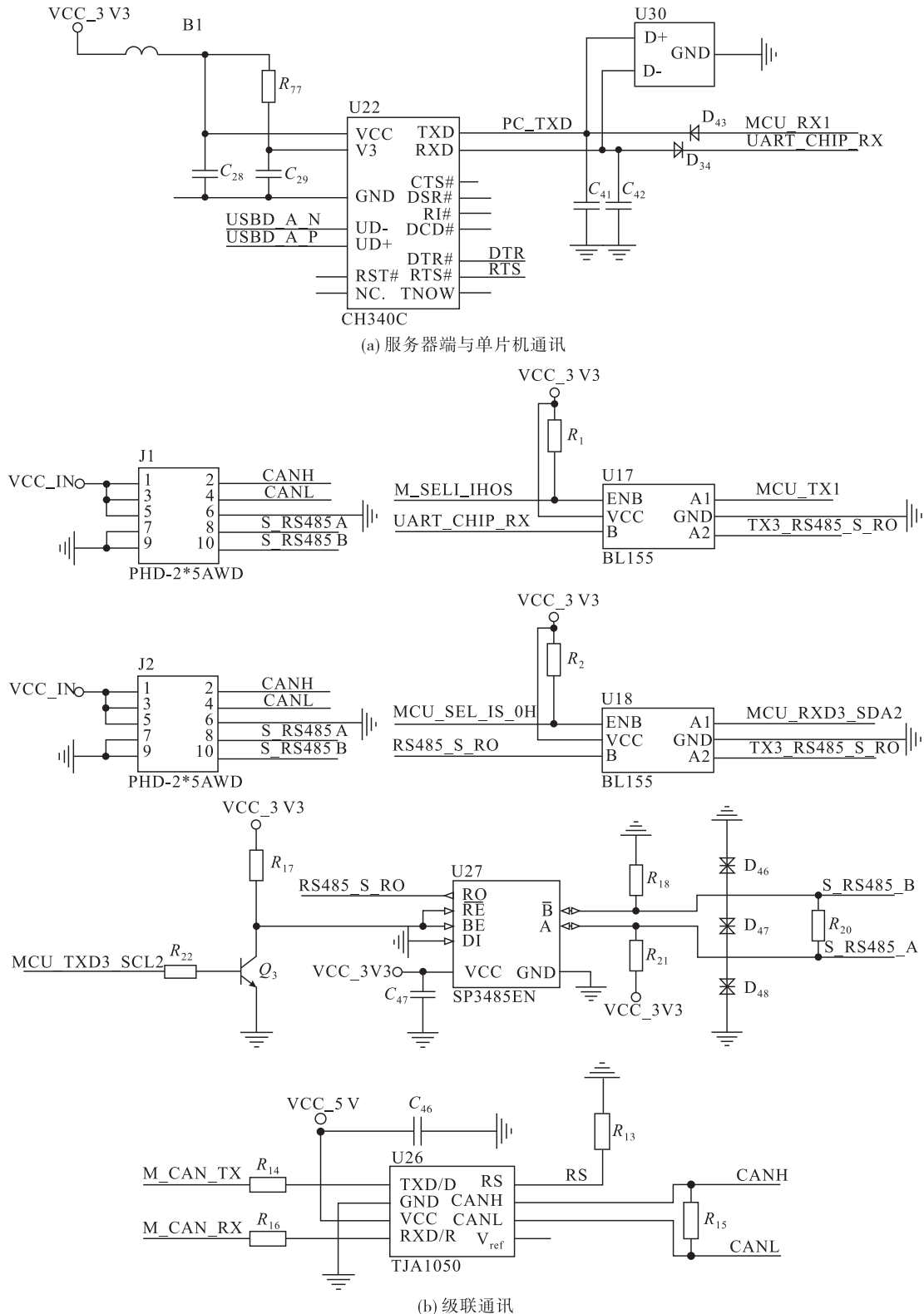


图 2 通信模块原理图

2.3 传感器模块

为实时获取检测数据,选用威世科技制造的 VEML6040 颜色传感器,通过 CMOS 工艺将模拟/数字电路、放大器、光电二极管集成于单个芯片中,可感知 RGB 和白色,功耗低,温度补偿稳定性高。单片机可通过 I²C 总线协议读取 LED 光源采集参数。由于 VEML6040 传感器不支持 I²C 地址独立设置,故采用两块 PCA9548 I²C Switch 芯片进行 I²C 总线

扩展,通过配置寄存器选择不同的传感器进行通信。为避免传感器长期运行受损,配备三色 RGB 灯协助自检。硬件布局上,RGB 灯紧邻传感器,16 个采集模块各自拥有独立腔室,避免相互干扰。由单片机控制 RGB 灯显示特定颜色,通过比对光源采集信息与预设标准,以判断传感器状态正常与否,确保后期数据检测的准确性。硬件电路设计如图 3 所示。

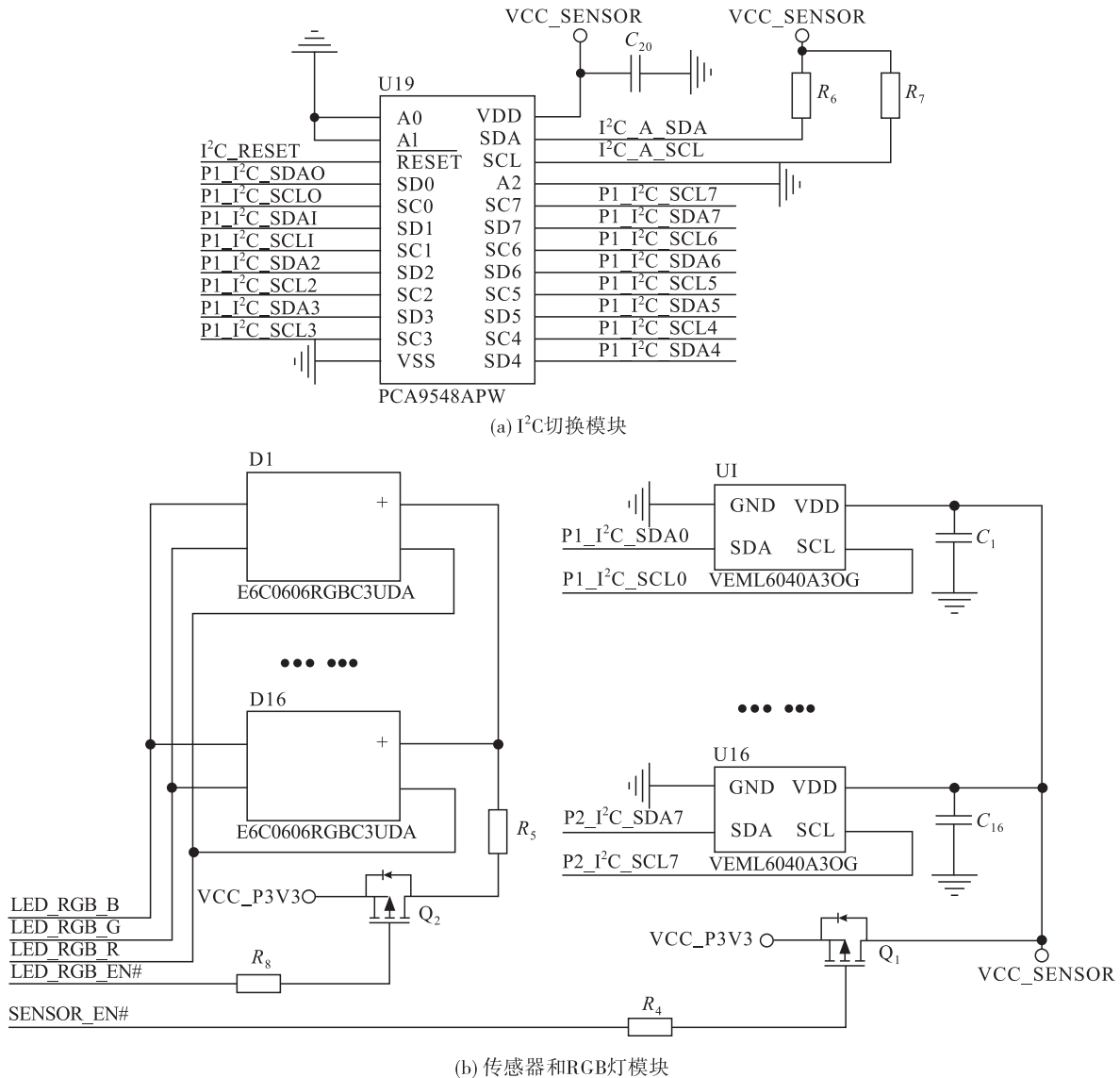


图 3 传感器模块原理图

2.4 电源模块

单设备运作场景下,通过 USB 接口对主控电路板与外设模块进行供电。由于单片机对电源质量要求较高,易受噪声及电压波动干扰而表现工作异常,选用低噪声、低压差的线性稳压器 AZ1117H 将 USB 5 V 电源转换为系统所需 3.3 V,输出电压稳定,可

满足整个系统供电需求。当设备级联使用时,USB 供电能力不足,需通过 DC 电源插孔外设输入供电。为适配现场供电环境,采用 JW5026 降压转换芯片进行供电转换,支持 4.7 ~ 40 V 电压输入,转换效率高,并集成短路保护、软启动等功能,为系统提供稳定的电源支持。

3 系统软件设计

软件设计需针对特定单片机型号、开发环境及应用需求进行定制化配置,并编写底层 C 语言控制程序,LED 自动化测试系统软件设计实现流程如图 4 所示。

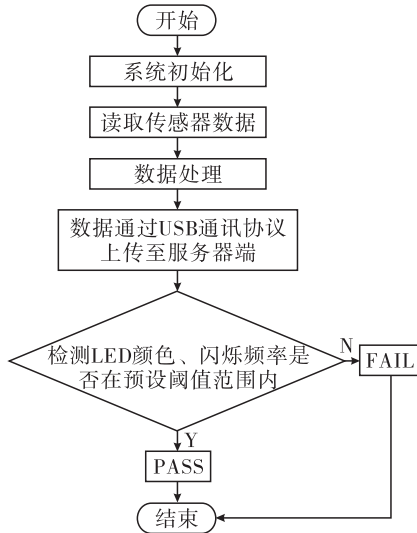


图 4 软件实现流程图

(1) 系统初始化:系统启动后,首先执行初始化程序,进行各芯片、外设等硬件模块的初始化配置,确保各组件能够正常协作运行以及各项功能准备就绪。

(2) 读取传感器数据:服务器端通过 USB 通讯协议向单片机发送控制指令,单片机通过 I²C 通讯协议获取传感器采集的原始 RGB 数据。

(3) 数据处理:对 RGB 数据进行频域分析、数据格式转换及色域转换等,以得到 LED 光源的颜色、闪烁频率等信息。具体如下:

光源的光照度 E 可通过公式(1)得到,其中,颜色传感器的配置参数 A 为 0.251 68。

$$E = A \cdot G \quad (1)$$

LED 光源在闪烁时通常呈周期性变化,具有固定频率。本测试系统采样率 f_s 为 100 Hz,总数据量 N 为 300,取采样数据 E 值的数据集合,记为函数 $x(n)$,通过离散傅里叶变换公式(2)将周期性时域信号 $x(n)$ 转换为频域信号 $X(k)$ 。利用欧拉公式展开得到公式(3),以便程序处理。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

$$X((k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos \frac{2\pi kn}{N} - j \cdot \sin \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (3)$$

式中: $k = 0, 1, \dots, N - 1$,对于 $X(k)$ 函数,可得 $X(k) = R(k) + j \cdot V(k)$,其中 $R(k)$ 为实部, $V(k)$ 为虚部,取模运算得到信号幅值 $A(k)$,即 $A(k) = \sqrt{R(k)^2 + V(k)^2}$ 。将 $A(k)$ 与 k 建立坐标如图 5 所示,横坐标表示每个采集点 $k(0 \leq k \leq N/2 - 1)$,纵坐标表示每个采集点对应的幅值 $A(k)$ 。设当 $k = K_a$ 时, $A(K_a)$ 为最大值,此时 K_a 所对应的真实频率即为 LED 光源闪烁频率 f :

$$f = K_a \cdot \frac{f_s}{N} = \frac{K_a}{3} \quad (4)$$

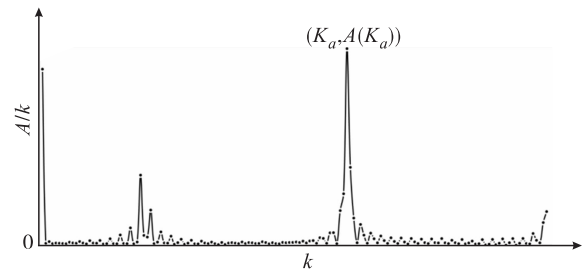


图 5 频域信号幅值图

所采集的 RGB 数据, R 、 G 、 B 各分量均为 16 位,为优化存储并进行色域转换,需压缩至 8 位。为避免直接截断低 8 位而导致颜色失真,采用补偿算法,以最大限度保留原始颜色信息。

$$X = \frac{\max(R, G, B)}{255} + 1 \quad (5)$$

其中: X 为补偿分量; $\max(R, G, B)$ 为 RGB 数据中 R 值、 G 值和 B 值的最大值。

$$N(R, G, B) = \begin{cases} R/X \\ G/X \\ B/X \end{cases} \quad (6)$$

其中: $N(R, G, B)$ 为补偿后的 RGB 数据。

以 30 作为调节点,若 $N(R, G, B)$ 各分量大于 30,则减去 30,否则数据保持不变,压缩得到 $N_1(R, G, B)$ 。

对 $N_1(R, G, B)$ 进行线性压缩,得到 $N_2(R, G, B)$ 。

$$N_2(R, G, B) = N_1(R, G, B) \cdot 255/225 \quad (7)$$

若 $N_2(R, G, B)$ 各分量大于 255,则取 255,否则数据保持不变,最终获得 $N_3(R, G, B)$ 。

在单色 LED 闪烁过程中, H 值在稳定波动,将 $N_3(R, G, B)$ 带入公式(8)与公式(9),可获得 L 值最大时,即 LED 最亮时的颜色参数 H 。

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \text{if } \max(R, G, B) = \min(R, G, B) \\ 60^\circ \cdot \frac{G - B}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + \\ 0^\circ, & \text{if } \max(R, G, B) = R \text{ and } G \geq B \\ 60^\circ \cdot \frac{G - B}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + \\ 360^\circ, & \text{if } \max(R, G, B) = R \text{ and } G < B \\ 60^\circ \cdot \frac{B - R}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + \\ 120^\circ, & \text{if } \max(R, G, B) = G \\ 60^\circ \cdot \frac{R - G}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} + \\ 240^\circ, & \text{if } \max(R, G, B) = B \end{cases} \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{2} (\max(R, G, B) + \min(R, G, B)) \quad (9)$$

(4)数据通讯:将经单片机程序解析处理后的数据通过 USB 通讯协议传输至服务器端。

(5)数据检测:最终调用自主开发的智能诊断程序,将 LED 颜色、闪烁频率与预设阈值进行匹配度分析,评估 LED 是否符合设计要求。若超出阈值,测试程序显示 FAIL,表明测试失败,状态异常,随后故障排查;反之,测试程序显示 PASS,表明测试成功,状态正常,此后流入下一工站。

4 设备结构设计

设备由固定顶板、电路板(图6)、固定底板、传感器盖板和压铆螺栓部分组成,如图7所示,整体尺寸为 110 mm × 80 mm × 30 mm,体积小,设计简洁,便于在测试装备有限空间内灵活化部署。端部设置 16 个光纤通道,测试员只需将待测板置于指定位置,将 LED 光源经光纤传导至设备的 LED 采集端,完成硬件连接并开机后,启动自动化测试程序即可实现对 LED 光源信息的实时采集、处理、传输及检测。

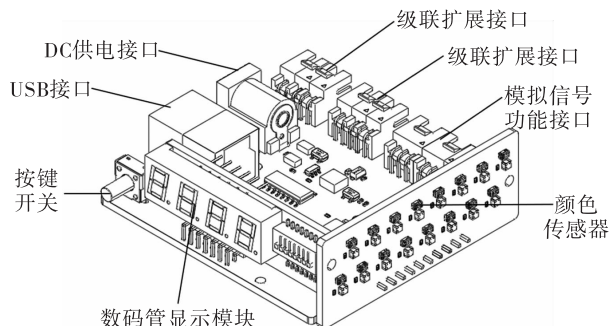


图6 电路板各器件分布图

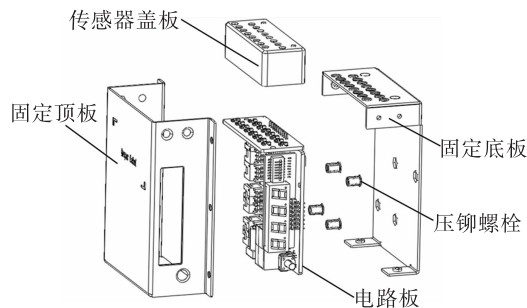


图7 LED 光源采集设备 3D 爆炸图

5 系统测试

在系统软硬件设计完成后,为验证 LED 自动化测试系统功能是否符合要求,搭建验证平台,对功能模块进行充分的测试验证。

系统初始化配置后,由程序触发设备采集两组特定光源:一组为由频率为 5 ~ 30 Hz 的方波点亮的 H 值为 0° 的光源;另一组为由频率为 20 Hz 的方波点亮的 H 值为 $0 \sim 300^\circ$ 的光源。采样后的 RGB 数据经频域分析、数据转换、色域转换等,得到测试结果如表 1 和表 2 所示。对比分析可知,经测试系统分析处理得到的光源数据与特定光源标准值之间的误差分别在 0.7 ~ 2 Hz、 $6 \sim 9^\circ$ 范围内,最大误差分别为 2 Hz、 9° ,误差较小。由此可见,该 LED 自动化检测系统能够稳定地测量 LED 颜色及闪烁频率参量,与设计理论具有较好的一致性,功能正常,可满足预期的功能设计要求。

表1 LED 闪烁频率测试数据

组号	标准频率值/Hz	采集频率值/Hz	误差/Hz
1	5	5.7	0.7
2	10	10.7	0.7
3	15	16	1
4	20	21.3	1.3
5	25	27	2
6	30	32	2

表2 LED 颜色测试数据

组号	标准 H 值/ $^\circ$	采集 H 值/ $^\circ$	误差/ $^\circ$
1	0	8	8
2	60	69	9
3	120	127	7
4	180	188	8
5	240	246	6
6	300	309	9

6 结束语

该文以服务器 PCBA 为出发点,完成了 LED 指

示灯自动化检测系统的软硬件电路设计与实现,最后对系统功能进行了验证测试,结果表明该系统能够对闪烁 LED 信号参数进行有效测量,程序稳定、性能可靠,测试准确度高,测试过程易于控制,配合良好的软件开发支持,适用于服务器、汽车电子、消费电子产品等多种场景的 LED 检测。该系统为传统人工检测存在的问题提供了一种实时、有效、可靠的解决方案,使板卡测试装备更加智能、完善,有助于推动工业检测技术领域更加高效、快速的发展,提升工业制造的智能化水平,具有良好的应用前景及实用价值。

参考文献:

- [1] 宋迪,郝伟琦,罗丹. 基于三层结构及多任务队列的电路板 FCT 系统设计[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2024,24(05):101-106.
- [2] 华伟,刘焱,张英军. 一种中央空调主控板 PCBA 全自动在线功能测试平台的开发[J]. 机电工程技术, 2020,49(03):33-35+90.
- [3] 付磊,冀苗苗,张柯,等. 核电 DCS 板卡 FCT 自动化测试工装系统设计[J]. 核电子学与探测技术,2023,43(06):1250-1254.
- [4] 尹文阳,龚依民,杨阳,等. 功能电路测试系统的改进[J]. 电子元器件与信息技术,2021,5(06):111-112.
- [5] 朱肖谣. 基于 WinCC 的 PCBA 自动测试平台研究[D]. 青岛:青岛大学,2020.
- [6] 王浩钧,陈突然,胡恒清. DCS 系统硬件功能检测、故障诊断、维修和管理平台的研究[J]. 东方电气评论, 2023,37(04):83-88.
- [7] 赵迪. 基于像素扩展的 PCBA 检测装置研制[D]. 成都:西华大学,2023.
- [8] TONG J P, ZOU Y H. Design of a fuse-time testing system on STM32[J]. IEEE Computer Society, 2013: 406-407.
- [9] YU H J, ZHOU Z W, Chen C B, et al. Design of locomotive energy consumption monitoring system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 960-961: 1325-1330.
- [10] 卢颀. 基于 STM32 的低成本 PLC 控制器设计[J]. 电子测试, 2020(10):22-24.
- [11] 罗铮,宋海正. 基于模糊 PID 的磁柱式断路器温度控制系统[J]. 电工技术, 2024(10):82-85.
- [12] 曹青正,李茜铭,汤小红,等. 基于改进去雾算法的 FPGA 设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(2): 144-147+161.
- [13] 安昕辰. DSP 处理器二级缓存的结构优化研究[J]. 计算机工程与科学, 2025, 47(1):10-17.
- [14] 王东,贾思辉,朱伟. 基于光纤+CAN 总线的 10 kV 馈线自动化技术研究[J]. 农村电气化, 2024(11): 1-4.
- [15] 柳柳青,赵国帅,韩素敏. 基于 CSSA-LSTM 的 IGBT 模块退化趋势预测[J]. 电子科技, 2024, 37(8): 60-67.
- [16] 刘杰,郑洋. 基于 LSGAN-LSTM 的齿轮故障诊断[J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(4):436-441.
- [17] 张霞峰,柳畅,单业奇,等. 基于 PID 控制的智运机器人关键技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(1):176-178.
- [18] 姚程翔. 基于卧式数控车床的自动上下料装置设计与研发[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
- [19] 司明,胡灿,郭伯藩,等. PID 控制与性能评价仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 100-105+209.
- [20] 孙良海,郑沧海,余玉洋,等. 输灰系统杆驱机构双缸闭环同步模糊 PID 控制[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(4):501-505.

(上接第 6 页)

系统稳定性等方面均表现更优,能够满足高精度自动上下料装置的控制需求,增强了系统的稳定性,为自动化制造提供了新的技术思路。

参考文献:

- [1] 王海平,金燕,陈小敏,等. 基于工业机器人的多台数控机床自动上下料系统[J]. 机电工程技术, 2024, 53(6):56-60.
- [2] 陈振国. 基于 ANSYS 的卧式数控车床自动上下料装置结构设计研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(5):27-29.
- [3] 王晓东,杨娇,付强,等. 基于工业机器人的全自动上下料系统设计与应用[J]. 辽宁科技学院学报, 2022, 24(3):22-24.
- [4] 田凯. 一种制丝主机设备多模拟量 PID 控制实现方法和系统[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(4):41-42.
- [5] 高威,葛广言,杨赞,等. 基于前馈灰色预测和模糊控制的恒功率切削控制方法[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(3):147-151.
- [6] 崔朝臣,张翔,熊丹,等. 空间软体机械臂的两阶段神经网络控制方法[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2257-2264.
- [7] 王立强,罗开成,李国威. 基于机器视觉的煤矿井下皮带输送机自适应控制方法[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(10):47-51.