

· 电路与控制 ·

## 用于面曝光快速成形系统的光照度测量系统研究

谭东才, 胥光申, 罗声, 金京

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 面曝光快速成形工艺中, 视图平面上的光照度大小严重影响着零件的制作精度, 为控制面曝光快速成形工艺中的制作精度, 需要准确测量视图平面上的光照度, 为此开发了基于硅光电池的光照度测量系统. 系统采用硅光电池接收光信号并转换成微弱的电流信号, 经 I/V 转换和放大后以电压信号传送至 MCU 进行 A/D 转换, 再根据数字信号和硅光电池的线性灵敏度计算出实际光照度值. 为能动态调整放大电路的增益, 系统采用了数字电位器作为反馈元件. 利用该系统测量了面曝光快速成形工艺中视图平面上的光照度, 对测量数据用 MATLAB 进行 3 次曲线拟合, 建立了光照度与灰度的模型关系, 利用该关系, 可方便地通过改变灰度来调整视图平面上的光照度.

**关键词:** 面曝光快速成形; 光照度测量; 硅光电池; 灰度

中图分类号: O432.2; TP332

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)03-0053-05

## Research on Illumination Measuring System for Mask Projection Stereolithography

TAN Dong-cai, XU Guang-shen, LUO Sheng, JIN Jing

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In the process of Mask Projection Stereolithography (MPS), the value of illumination on the view surface of MPS has serious influence on building accuracy. In order to improve the building accuracy of MPS, it is necessary to measure the illumination accurately. An illumination measuring system with Silicon Photocell is designed and developed. The system uses photocell to convert light signal into weak current signal, which is then sent to micro control unit in the form of voltage signal to carry out A/D conversion after I/V switching and amplification, and then the system calculates the actual illumination value according to the digital value and the linear sensitivity of Silicon Photocell. For adjusting gain of the amplification circuit automatically, the system adopts digital potentiometer as feedback element. The illumination value on the view surface of MPS is measured by the system, measured data is fit with MATLAB, and the relationship between illumination and gray is established in order to adjust illumination distributing on the view surface of MPS by changing gray.

**Key words:** mask projection stereolithography; illumination measurement; silicon photocell; gray

快速成形(rapid prototyping)技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种新型制造技术,其基本思想是离散/堆积成形<sup>[1]</sup>.传统的快速成形技术多数以激光作为光源,为深入研究激光对零件固化质量

的影响,需要测量激光的能量,而对激光能量的测量主要靠激光功率计.目前已发展成熟的激光功率计有光电型,热释电型和量热型等<sup>[2-4]</sup>.面曝光快速成形技术能以可见光作为光源,其原理为:将计算机

收稿日期:2010-05-10

基金项目:国家自然科学基金(50745017;50875194);陕西省教育厅专项科研项目(08JK305).

作者简介:谭东才(1984-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事光机电一体化方面的研究;胥光申(1964-),男,博士,教授,主要从事新型快速成形技术方面的研究.

上制作的三维零件模型进行分层,并存储分层数据,再根据各层的数据信息在计算机上生成对应层的二维轮廓,二维轮廓通过光路中的视图发生器,在树脂表面形成零件截面视图,曝光后便可实现对树脂的选择性固化<sup>[5]</sup>.通常激光器以及激光功率计的成本均较高,相比之下,面曝光快速成形工艺不仅成本低,且能实现整层一次曝光固化,显著缩短制作时间,提高制作效率.

面曝光固化工艺对整个零件截面视图同时曝光固化,单层的翘曲变形比较严重<sup>[6]</sup>,影响了制作精度,而单层的翘曲变形与截面视图的辐照度分布有关.同时辐照度的不均匀分布也将导致零件的固化深度存在差异,致使制作精度降低.为高精度地制作微小结构,必须准确测量截面视图的辐照度大小,为后续优化曝光工艺提供数据依据和理论模型.因此,需要研发能用于面曝光快速成形系统中的光照度测量系统.

由于可见光的波长分布范围是 390~780 nm,因此不便直接测量其辐照度大小.对于可见光而言,辐照度与光照度之间存在一定关系<sup>[7]</sup>,可通过测量光照度来间接反映其辐照度的大小及其分布.文中以硅光电池作为光信号探测元件,开发了用于面曝光快速成形系统的光照度测量系统.

## 1 光照度测量系统总体设计

针对面曝光快速成形技术的需求,开发了光照度测量系统.该系统主要由 MCU、硅光电池、增益调整电路、I/V 转换及放大电路、通信接口 RS-232、LCD 模块和键盘等组成.系统的结构框图如图 1 所示.

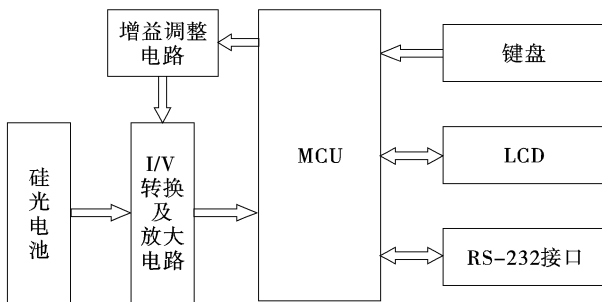


图 1 系统结构框图

由图 1 可知,硅光电池将接收到的光信号转换成微弱的电流信号输出,电流信号经过 I/V 转换和放大后以电压信号传送至 MCU 进行处理.选用的

MCU 内部自带 10 位 A/D 模块,可以直接将接收到的模拟电压信号转换为相应的数字信号,同时根据数字信号和硅光电池的线性灵敏度计算出实际光照度值,测量结果通过 LCD 显示或通过 RS-232 接口发送到上位机,以满足实时测量和记录的需求.为扩大光照度的测量范围、提高 A/D 的利用率,采用可编程数字电位器作为放大电路的反馈元件,根据弱信号用高增益,强信号用低增益的原则,由 MCU 自动调整放大电路的放大增益.

## 2 硬件设计

### 2.1 光电检测器选择

目前,光照度测量系统主要采用的光信号探测器有硅光电池和集成光照度传感器.集成光照度传感器的优势主要体现在其响应的波长范围宽,内部自带 A/D,输出为数字量,便于操作.但其成本较高、不能实现增益自动调整,应用范围受限.硅光电池不需要外加电源便可直接将光信号转换成电信号,并且产生的短路电流和光照度成线性关系;同时它有响应时间短、性能稳定、光谱范围宽、频率特性好、转换效率高、耐高温辐射、价格低廉等优点.通过比较,硅光电池是理想的光信号探测器件.故选用 OSRAM 公司的 BPW34B 硅光电池作为该系统的光信号检测器件.BPW34B 可测的波长范围为 350~1100 nm,而面曝光快速成形工艺中的光源波长范围为 400~720 nm,且 BPW34B 输出的短路电流与光照度有良好线性关系,因此能满足光照度测量系统的需求.

### 2.2 主控模块

主控模块由 ATMEL 公司的高性能、低功耗单片机 ATmega16L 构成,主要完成放大电路增益调整、A/D 转换、软件滤波、标尺转换、数据显示及发送等工作.该微处理器采用了先进的 RISC 结构,数据吞吐率高达 1 MIPS/MHz,大多数指令执行时间为单个时钟周期.内部有 16 K 字节的可编程 Flash,10 位 A/D 等丰富的内部资源.此外,该微处理器支持 ISP 下载,可以方便地对终端软件进行更新<sup>[9]</sup>.

### 2.3 放大电路设计

放大电路主要由运放和可编程数字电位器组

成.考虑到 BPW34B 硅光电池输出的是弱电流信号,因此应选用超低失调、超低温漂、高增益、高输入阻抗、共模抑制比高、噪声小的运算放大器.系统中选用 ICL7650 作为运算放大器,ICL7650 是采用 CMOS 工艺集成的斩波稳零高精度运放,25℃ 时输入失调电压为 0.7  $\mu\text{V}$ 、偏置电流为 1.5 pA,失调电压的温漂为 0.01  $\mu\text{V}/\text{C}$ ,输入电阻为  $10^{12} \Omega$ ,共模抑制比为 130 dB.

弱电流信号由 ICL7650 的同相端输入,反相端接地,这样根据运算放大器“虚短”的理论,硅光电池恰好被短接,就保证了输入放大电路的电流信号与光照度成线性关系.通过反馈电阻将输入的电流信号转换为电压信号输出,即实现 I/V 转换,这样放大电路输出的信号便可直接被 MCU 使用.

反馈元件的选择将直接影响到整个放大电路的放大增益.通常要求测量系统既能测量弱信号,又能测量较强信号,这就需要采用弱信号选用高放大倍数、强信号选用低放大倍数的策略来实现.因此系统选用了 Intersil 公司的可编程数字电位器 X9C104P 作为反馈元件,其最大阻值为 100 k $\Omega$ .根据信号强弱,通过 MCU 控制 X9C104P 的输出电阻,动态地调整放大增益<sup>[8]</sup>.电路原理图如图 2 所示.

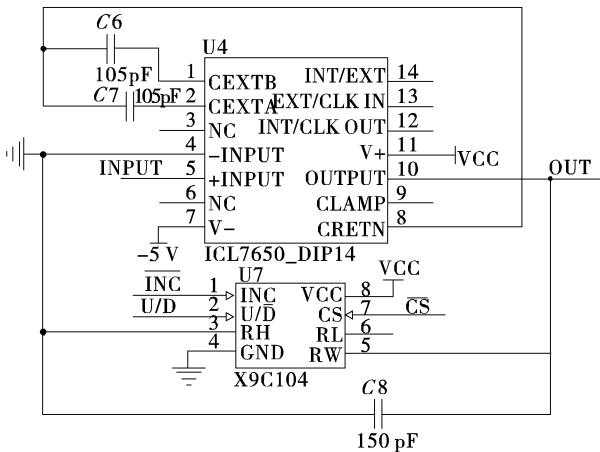


图 2 放大及增益调整电路

在图 2 中, $\overline{\text{CS}}$ 是 X9C104P 的片选端,低电平有效,由单片机的 PC5 脚控制. $\text{U}/\overline{\text{D}}$ 是电阻增长方向选择端,若为高电平,则正向增长;若为低电平,则负向增长,由单片机的 PC6 脚控制. $\overline{\text{INC}}$ 是电阻变化信号端,下降沿有效,由单片机的 PC7 脚控制.当 $\overline{\text{CS}}$ 为低电平时,根据  $\text{U}/\overline{\text{D}}$  端所决定的增长方向,每给  $\overline{\text{INC}}$  端一个下降沿,X9C104P 的输出电阻就增大或减小 1 k $\Omega$ .

### 2.4 LCD 模块

考虑到系统采用电池和 USB 可选方式供电,因此采用低功耗的 1602LCD 作为显示屏.1602LCD 可显示 2 行、每行 16 个字符,支持对比度可调、黄绿色背光、功耗低、体积小、质量轻等其他显示模块无法比拟的优点.

### 2.5 系统供电模块

该系统要求电源提供稳定的  $\pm 5 \text{ V}$  电压.为使该系统能灵活使用,设计了电池(9 V)和 USB(5 V) 可选供电方式.若采用 9 V 电池供电,则由稳压芯片 LM7805(输入电压范围为 7~20 V)将输出电压稳定在 +5 V.再通过 Intersil 公司的电压反相芯片 I-CL7660SCAP 将 +5 V 电压转换成 -5 V 电压.

## 3 软件设计

整个系统的软件部分由增益调整程序、A/D 转换程序、标尺转换程序、LCD 显示程序、数据发送程序 5 部分组成.所有的数据处理都在主控 MCU 中完成,软件采用单片机 C 语言编写<sup>[9]</sup>.软件流程如图 3 所示.

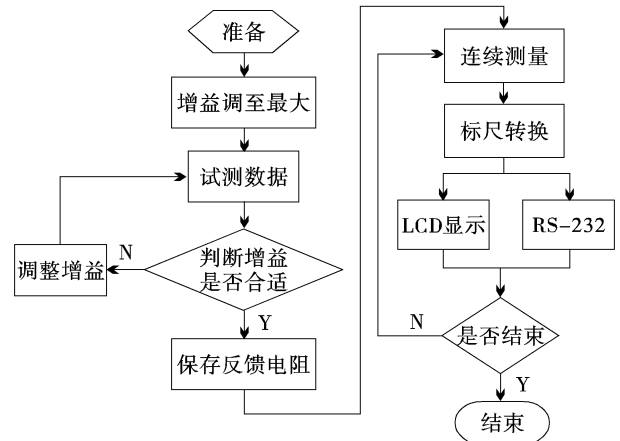


图 3 软件流程图

系统启动时先将放大增益调整到最大,再进行试测,根据试测数据调整数字电位器的输出电阻,进而改变放大增益直到合适为止.判断增益是否合适的依据是:输入 A/D 的信号值应落在 A/D 的线性特性区之内,并尽可能在 1/2 满刻度与接近满刻度的区域内;若增益最大时,输入 A/D 的信号值仍不在 1/2 满刻度与接近满刻度的区域内,则就在增益

最大时进行测量;若增益最小时,输入 A/D 的信号值仍大于 A/D 的满刻度值,则由系统发出错误提示,并停止运行.增益调整合适后可编程数字电位器 X9C104P 保存输出电阻,进而确定增益.

确定增益后便可以连续测量,为确保测量数据比较稳定,在软件设计中采用了中位值平均滤波,即连续测量多次,保存每次的测量结果,再将测量结果按由小到大顺序排列,然后去掉最小和最大数据,对剩下的数据取平均值.根据放大增益和 BPW34B 的线性灵敏度可以直接将 A/D 转换的数字量转换成对应的光照度值,即标尺转换.最后再将实际照度值在 LCD 上显示或通过 RS-232 发送到上位机.

#### 4 照度测量及模型建立

光照度的大小与视图发生器的灰度有直接关系.若建立了光照度与灰度的模型关系,就可通过调整视图平面上的灰度改变相应视图上的光照度,进而调整曝光量.灰度调整可通过对视图颜色的 RGB 值的设置来实现. R、G、B 3 个分量相等时均为灰色,分量值不同,灰度就不同<sup>[10]</sup>.

BPW34B 硅光电池的感光面积为  $2.73 \text{ mm} \times 2.73 \text{ mm}$ ,因此在实际测量过程中以视图平面上的某一固定位置为测量点,把测量点的灰度值  $Z$  设置成不同值,依次测得不同  $Z$  值下对应的光照度值  $E_e$ .考虑到视图发生器光源存在微小的波动,测得的光照度值不会很稳定,因此,在  $Z$  值一定时,对测量点的光照度值连续进行  $n$  次读数(本次测试中  $n = 7$ ),以测量数据的平均值  $\overline{E_e}$  来反映测量点的光照度大小.

灰度值  $Z$  取不同值时,测量点的平均光照度值  $\overline{E_e}$  ( $\overline{E_e}$  的单位是勒克斯 LX)如表 1 所示.

表 2  $Z$  与  $\overline{E_e}$  的对应测量结果 单位: LX

$Z$	138	151	164	177	190
$\overline{E_e}$	2 492.5	2 504.6	2 576.4	2 651	2 744.1
$Z$	203	216	229	242	255
$\overline{E_e}$	2 893.1	2 976.1	3 008.8	3 080.2	3 137.1

利用 MATLAB 中的 cftool 命令对表 1 中的测量数据进行 3 次曲线拟合,得到式(1)所示的平均光照度  $\overline{E_e}$  与灰度  $Z$  的模型关系

$$\overline{E_e} = -7.131 \times 10^{-4} Z^3 + 0.419 Z^2 - 74.16 Z + 6 615 \quad (1)$$

其中,拟合相关系数( $R$ )为 0.993.  $\overline{E_e}$  与  $Z$  的拟合曲线如图 4 所示.

根据平均光照度  $\overline{E_e}$  与灰度  $Z$  的模型关系式(1),可以很方便地通过调整视图平面上该测量点的灰度来改变该位置的光照度,进而调整曝光量,这对优化曝光工艺和深入研究固化深度与光照度的关系有着极其重要的意义.

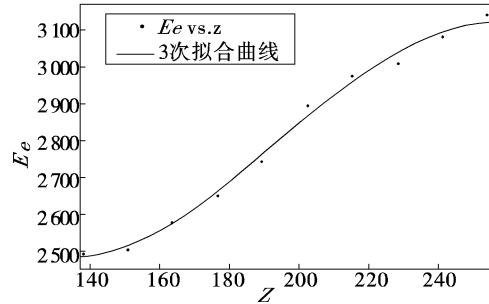


图 4  $\overline{E_e}$  与  $Z$  的拟合曲线

#### 5 结 束 语

针对面曝光快速成形工艺,开发了基于硅光电池的光照度测量系统.该系统具有放大增益自动调整、测量精度较高、操作简单、成本低廉等优点.利用该测量系统对面曝光快速成形工艺中不同灰度时的光照度进行测量,建立了光照度与灰度的模型关系,为通过灰度调制来控制光照度和优化曝光工艺提供了理论依据.

#### 参考文献

- [1] 刘伟军.快速成形技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2005:1-6.
- [2] 杨照金,王雷.激光功率和能量计量技术的现状与展望[J].应用光学,2004,25(3):1-4.
- [3] 王雷,黎高平,杨照金,等.激光功率能量计量方法研究[J].应用光学,2006,27(特刊):42-45.
- [4] 杨照金,南瑶,黎高平,等.激光参数计量测试[J].应用光学,2002,23(1):44-48.
- [5] 胥光申.用于高精度小尺寸零件制作的光固化快速成型技术的现状与发展[J].机械科学与技术,2004,23(10):1223-1225.
- [6] Arnaud B, Paul B, Christian V. Rapid prototyping of small size objects[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 6(4): 259-266.
- [7] 张以谟.应用光学[M].3版.北京:电子工业出版社,2008:128-130.
- [8] 周胜海,王栋臣,马建中.可变增益放大器的实现方法

[J]. 仪表技术与传感器,2001(7):32-34.  
 [9] 海涛. ATmega 系列单片机原理及应用—C 语言教程 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.6-310.

[10] 潘焕,罗声,胥光申,等. 面曝光快速成形系统中紫外光辐照度分布研究[J]. 西安工程大学学报,2009,23(6):53-57.

(上接第 52 页)

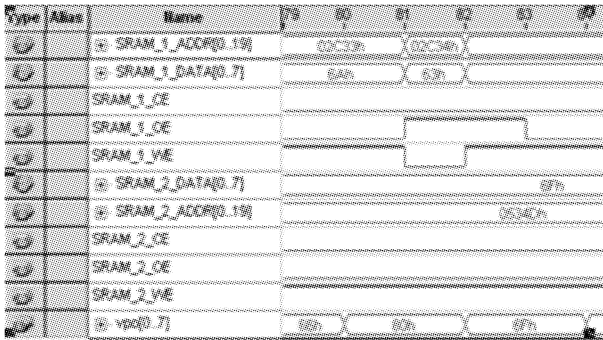


图 4 总线交换前仿真图

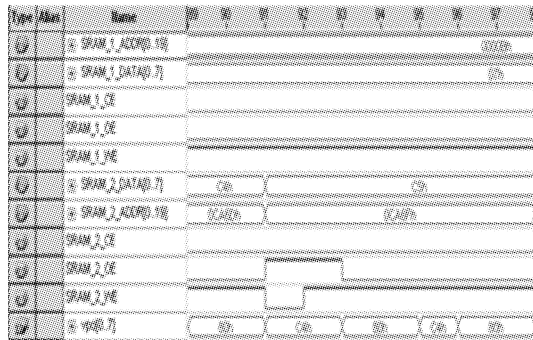


图 5 总线交换后仿真图

文中选择 IO 读写. 在采用 IO 读写的时候,PC104 主机的 PC104 接口有固定的 IO 口地址,文中的是 0x300. 读取 SRAM 的内存地址由 FPGA 中的 PC104 接口模块产生,并控制地址的递增. 然后将读来的数据送给 PC104 接口,PC104 主机就可以通过固定的读操作语句读到 PC104 接口模块的数据,在

Vxworks 系统下,PC104 接口的读操作语句为 Sys-InByte(0x300). PC104 接口的 IO 读写时序如图 6 所示.

### 3 系统建立及结果分析

在宿主机上裁剪 Vxworks 内核,加载 WindML 图形处理组件. 通过网线下载到 PC104 主机上,建立 Vxworks 系统. 视频采集卡和 PC104 主机通过 PC104 接口堆叠连接,组成嵌入式视频采集系统.

测试结果表明,视频采集卡和 PC104 主机可以正常通信,可以实现对视频图像的采集、显示和保存. 其中保存的图片效果如图 7 所示. 在分辨率为 256×256 的情况下,可以达到视频的实时采集和显示. 该设计方便灵活,功能可扩展,具有很好的借鉴和推广价值.



图 7 存储的图像

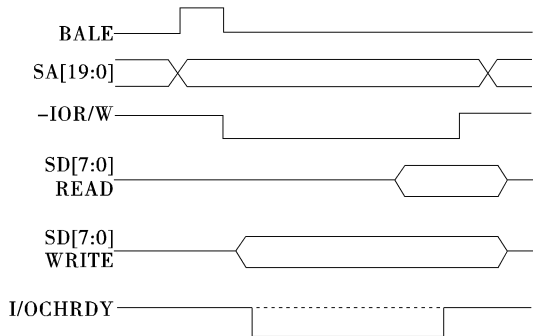


图 6 PC104 的 IO 读写时序

### 参考文献

[1] 付宁,邓立宝,杨易. 基于 PC104 和 Vxworks 的某导引头测控台的设计[J]. 仪器仪表学报,2008(29): 590-593.  
 [2] Philips Semiconductors. DATA SHEET SAA7113H 9-bit video input processor,1999:47-73.  
 [3] 孔祥刚,诸静,阳涛. SAA7113H 在视频采集接口设计中的应用[J]. 电子技术,2003: 26-28.  
 [4] 齐本胜,付富壮,杨书生,等. 一种有效的视频数据提取方法[J]. 工矿自动化,2007(6):27-29.