

文章编号: 2095-4980(2023)01-0119-06

用于 3D 打印喷头的温控集成电路架构与设计

谢元禄¹, 张坤^{1,2}, 霍长兴¹, 刘璟¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 3D 打印技术作为新兴的增材制造技术领域的重要技术装备, 正在向各领域拓展其应用范围。在 3D 打印机的工作过程中, 需要对打印材料进行温度控制, 以确保打印质量和打印效果。对于微滴喷射式的阵列打印头的研发而言, 考虑到其体积、功耗等边界的严格约束条件, 传统的可编程阵列逻辑(FPGA)、单片机等电路实现方案不再适用, 需要开发与之配套的温控集成电路, 并以裸硅片的形式与其他控制电路等进行集成封装。本文基于阵列打印头研发的边界条件限制, 采用模块化集成电路设计方法, 提出一种打印头温控集成电路架构, 完成前端设计、原型验证、后端设计等开发工作。芯片版图面积 $740\ \mu\text{m} \times 740\ \mu\text{m}$, 符合设计需求, 满足 3D 打印头的系统开发需要。

关键词: 3D 打印机; 温度控制; 集成电路; 架构

中图分类号: TN40

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020467

Architecture and design of temperature controller ASIC applicable to 3D printers

XIE Yuanlu¹, ZHANG Kun^{1,2}, HUO Changxing¹, LIU Jing¹

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important technical equipment in the emerging field of additive manufacturing technology, 3D printer has been finding its way into more fields. In the working process of a 3D printer, the temperature control of the printing material ensures the printing quality and printing effect. For the development of a droplet jet array print head, considering the strict constraints in terms of device size, power consumption and other aspects, conventional methods with Field Programmable Gate Array(FPGA) or Microcontroller Unit(MCU) based architectures are no longer applicable, and the development of a temperature control Application-Specific Integrated Circuit(ASIC) becomes necessary, which will be included in an integrated package with other control circuits. Targeting the need of the development of an array print head, this paper proposes the architecture of a temperature control ASIC, and completes the front-end design, prototype verification, and backend design. The chip layout area is $740\ \mu\text{m} \times 740\ \mu\text{m}$, which meets the design requirements and is applicable for use in the 3D printing head.

Keywords: 3D printer; temperature control; Application-Specific Integrated Circuit; architecture

随着我国工业互联网和智能制造技术的发展, 3D 打印技术正在各个领域获得日益深入的应用^[1]。3D 打印能够应用多种原材料^[2-3], 其产品广泛应用于机械制造、航空航天、船舶、建筑工程、再生医学等领域^[4-8]。其中, 微滴喷射式 3D 打印头支持的材料范围广, 打印效果控制能力强, 打印质量优, 是增材制造领域一个重要的技术发展方向。

微滴喷射式打印头包括高压驱动器、状态检测电路、温度控制单元、流道喷嘴等组成部分。打印头将打印材料通过微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)流道并进行加热, 经喷嘴喷出, 形成最终的打印目标产品。在打印过程中, 需要将材料温度实时控制在理想的温度区间内, 以使其物理和化学特性满足打印控

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-12-03

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFB1102900)

制的要求, 避免过高或过低的材料温度导致打印出现拉丝或流道堵塞等故障。

在压电微滴喷射集成式阵列打印头的研发中, 考虑到集成式小型化封装的需要, 传统的基于 FPGA 或基于单片机的温控电路架构由于其芯片体积较大, 无法满足集成化封装的边界约束, 因而不适用。本文针对集成式打印头开发的特定约束条件, 提出一种温控集成电路的实现架构, 并完成了逻辑设计、原型验证、后端版图设计。验证结果表明, 该集成电路能够满足打印头系统需求。

1 3D 打印头温度控制系统

1.1 典型的温控电路架构

对目标工件进行温度控制是工业领域的常见问题, 此领域已经开展过大量的相关工作^[9-12]。针对 3D 打印机温度控制的特定需求, 也开展过大量的理论和实践研究工作^[13-17]。2 种常见的典型温控电路架构如图 1 和图 2 所示^[9,13]。

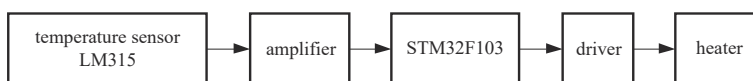


Fig.1 Temperature control circuit based on STM32 MCU
图 1 基于 STM32 微控制器的温控电路架构

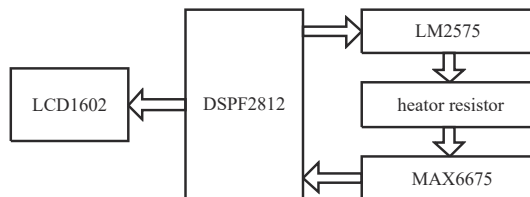


Fig.2 Temperature control circuit based on DSP
图 2 基于 DSP 的温控电路架构

上述基于微控制器、DSP 或 FPGA 的 3D 打印头温控电路, 均采用商用货架产品(Commercial Off-The-Shelf, COTS)搭建, 具有开发周期短、成本低的优点。但是, 在集成式微滴喷射阵列打印头的开发中, COTS 元器件受限于其封装体的物理尺寸限制, 无法小型化, 无法与驱动电路、检测电路等进行一体化集成封装, 因此, 需要设计开发专用集成电路, 以满足集成封装的需求。

1.2 3D 打印头的闭环温度控制

集成式打印头采用一体化封装技术, 将温控芯片与电平驱动模块、状态检测电路、小型控制电路封装在同一个封装体中。

温控芯片通过异步串口接受上位机的控制, 进行参数和数据的交互传递以及温度的显示。芯片本身和驱动电路、加热电阻、流道、传感器构成了一个温度控制的闭环系统, 如图 3 所示。

温控芯片对驱动电路的驱动脉宽进行调制, 流道中的打印材料被加热至预定的温度值, 同时由设置在流道上方的传感器对目标温度进行采集处理, 温控芯片完成通信、参数存储、温度采集和控制等工作。

1.3 集成式 3D 打印头的温控电路架构

针对集成式 3D 打印头的开发需求, 为了实现对 COTS 元器件的替代, 本文提出了一种温控专用集成电路, 其芯片架构如图 4 所示。

芯片内包括传感器接口模块(SENSC)、串行通信接口模块(UARTC)、参数控制模块(PARAMC)、参数存储模块(MEM)、脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)模块 PWMC、温控算法模块 ALGOR 和主控模块 SYSCTRL。

芯片经 UARTC 模块与上位机经过通用异步收发(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)也即异步串行总线进行通信, 进行数据和控制信息的交互。在芯片内部, 来自上位机的控制参数经主控模块解析之后,

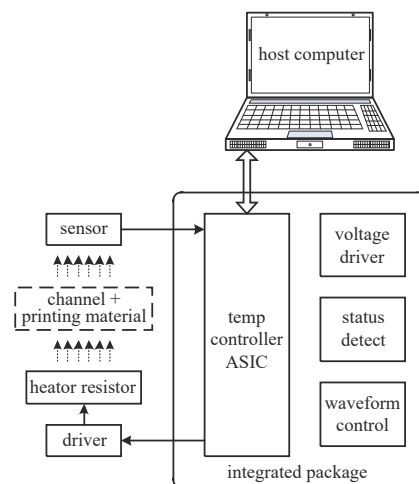


Fig.3 Closed-loop temperature control system in 3D printing head
图 3 3D 打印头中的温度闭环控制系统

由参数控制模块送参数存储模块进行存储。传感器接口模块对片外的温度传感器进行访问，在主控模块的控制下，传感器接口模块定期读取传感器输出的温度值。主控模块将温度值送给算法模块进行算法处理，根据算法运行的结果，控制 PWM 模块送出调制后的脉冲波形，推动片外的驱动电路，对加热电路进行控制。

1.4 主控模块的状态机方案

主控模块是芯片的控制核心，它负责控制芯片的工作流程，其状态机的状态转移图如图 5 所示。

主状态机与各子模块进行数据状态和控制信息的交互，其各步骤的功能说明如下：

- 1) IDLE：芯片复位后的空闲状态；
- 2) CMD_DECODE：收到串口指令，开始对指令进行解析操作；
- 3) EXTR_PARAM：参数提取，当从串口指令中检测到有效参数时，即进入此状态，对参数进行检测提取；
- 4) WR_PARAM：将提取出的参数值，写入参数存储器；
- 5) CMD_READY：串口指令解析完成后，温控参数已经就位，可以开始读取温度并运行温控算法；
- 6) READ_TEMP：读取传感器的温度值；
- 7) TEMP_DISPLAY：将读取到的温度值，经串口外发，由主机进行温度显示；
- 8) INIT_ALGOR：将传感器采集到的温度值以及温控参数送入算法模块，启动算法运行，并等待算法模块的运算结果；
- 9) CFG_PWM：根据算法模块的运算结果，设置 PWM 波形参数并启动脉宽调制波形的输出。

系统上电复位后，状态机进入空闲状态，等待上位机送来的配置指令，对指令进行译码得到温控参数，并将参数缓存。

参数写入完成后，状态机开始采集温度传感器的温度值，将温度值外送显示，启动温控算法，根据算法结果给出 PWM 脉宽调制输出，并视是否收到新的串口指令，决定后续的状态跳转。

1.5 温控算法的硬件实现

电路的温度控制采用 PID 算法。连续系统的 PID 算法表达式如下：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中： $u(t)$ 为控制输出； $e(t)$ 为误差值； K_p 为比例增益系数； K_i 为积分增益系数； K_d 为微分增益系数。为便于在数字系统中进行运算，对式(1)进行离散化处理，得到式(2)：

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d [e(n) - e(n-1)] = [K_p + K_d] e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) - K_d e(n-1) \quad (2)$$

式(2)的硬件运算电路实现架构如图 6 所示。

为了实现目标温度的快速收敛，在电路设计中采用分段控制方法^[13]，当实际温度与目标温度差值较大时，直接采用 100% 占空比的 PWM 波形进行满功率加热；当温度差值落入一定范围内时，才启动 PID 算法电路，由 PID 算法输出对 PWM 波形参数进行控制。分段式控制算法的流程如图 7 所示。

算法电路采用并行实现法，在主状态机的调度下，根据设定的温度值和实际测得的温度值，进行算法处理，其输出结果用于控制 PWM 波形参数。

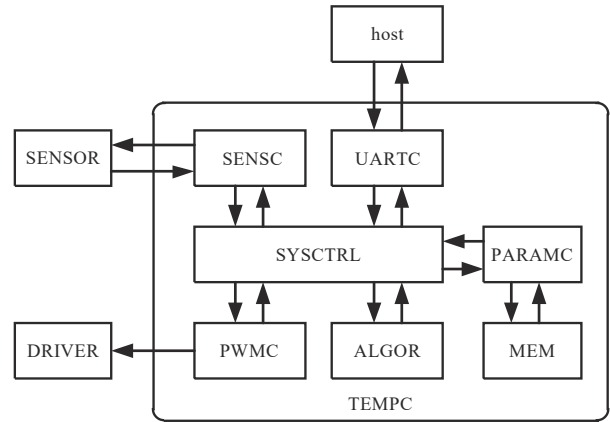


Fig.4 Architecture of temperature controller ASIC
图 4 温控专用集成电路架构

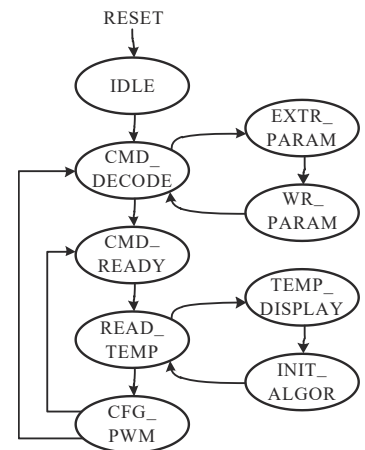


Fig.5 State transition of main state machine
图 5 主控状态机的状态转移图

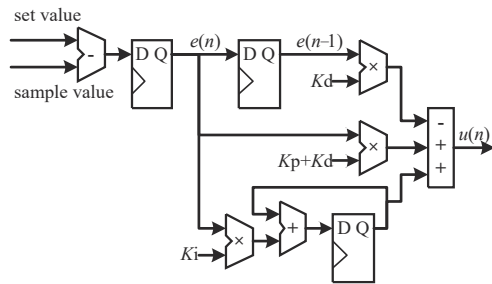


Fig.6 Hardware implementation of PID algorithm
图 6 PID 算法的硬件实现架构

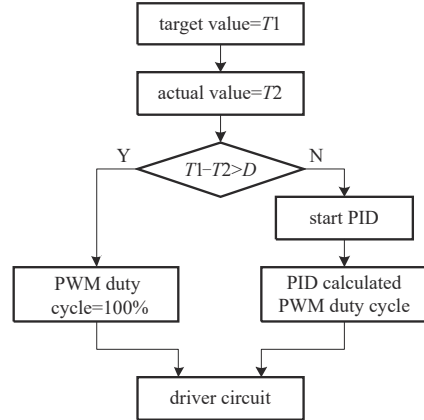


Fig.7 PWM algorithm of temperature controller
图 7 温控 PWM 算法流程

2 温控芯片的原型验证

温控芯片本质上是一个数字集成电路，可以使用 FPGA 对其进行原型验证。为此，设计了基于 Spartan-6 SLX45 FPGA 的原型验证系统，如图 8 所示。

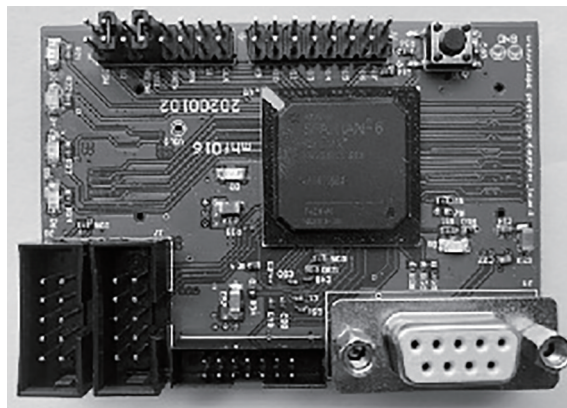


Fig.8 FPGA prototype board of temperature controller ASIC
图 8 温控集成电路的 FPGA 原型验证板

使用原型系统对系统的功能、性能进行了验证，原型验证中获得的超调量、调节时间等系统运行结果，汇总见表 1。

表 1 温控芯片原型验证板的测试结果
Table1 Test results of prototype board of temperature controller ASIC

#	overshoot/(%)	setting time/s	steady-state error/(%)
1	6.93	388	1.00
2	6.85	320	0.66
3	6.31	395	0.78
4	6.62	490	0.78
5	5.79	382	0.72

表 1 中的测试结果，能够满足集成式打印头的功能和性能需求。

3 芯片后端设计

在功能验证和原型验证完成后，对温控专用集成电路进行后端实现。芯片采用华虹宏力 0.13 μm EF130 嵌入式闪存工艺，得到的芯片版图如图 9 所示，其版图面积为 740 μm ×740 μm ，满足集成化封装的面积约束要求，典型工作电流为 2 mA。作为对比，文献[13]所使用的控制芯片为 DSP F2812，其典型外形尺寸为 14 mm×14 mm，典型工作电流超过 200 mA。相比较之下，本文所实现的温控集成电路在面积和体积、芯片功耗方面有明显优势。

4 结论

本文针对微滴喷射阵列打印头的集成化封装约束，分析了其对温度控制电路的特有需求，提出了一种满足打印头集成封装约束限制的温控专用集成电路设计架构。

本文完成了温控芯片的设计、原型验证和版图设计，原型验证结果表明，芯片功能满足打印头的功能需求，芯片性能、芯片面积均符合集成封装的约束要求。

参考文献：

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术—现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020,31(1):19–23. (LU Bingheng. Additive manufacturing—current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(1):19–23.)
- [2] 黄卫东. 材料 3D 打印技术的研究进展[J]. 新型工业化, 2016, 6(3): 53–70. (HUANG Weidong. Research progress of material 3D printing technology[J]. The Journal of New Industrialization, 2016,6(3):53–70.)
- [3] 史玉升,张李超,白宇,等. 3D 打印技术的发展及其软件实现[J]. 中国科学:信息科学, 2015,45(2):197–203. (SHI Yusheng, ZHANG Lichao, BAI Yu, et al. The development of 3D printing technology and its software implementation[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015,45(2):197–203.)
- [4] 朱艳青,史继富,王雷雷,等. 3D 打印技术发展现状[J]. 制造技术与机床, 2015(12):50–57. (ZHU Yanqing, SHI Jifu, WANG Leilei, et al. Current status of the three-dimensional printing technology[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(12):50–57.)
- [5] 孟令崇. 论 3D 打印在船舶制造领域的应用[J]. 中国设备工程, 2020(7):193–194. (MENG Lingdong. On the application of 3D printing in the field of shipbuilding[J]. China Plant Engineering, 2020(7):193–194.)
- [6] 杨建江,陈响. 3D 打印建筑技术及应用趋势[J]. 施工技术, 2015,44(10):84–88, 121. (YANG Jianjiang, CHEN Xiang. 3D printing building technology and its application trend[J]. Construction Technology, 2015,44(10):84–88,121.)
- [7] 尤完. 3D 打印建造技术的原理与展望[J]. 建筑技术, 2015,46(12):1081–1083. (YOU Wan. Principle and prospect on 3D printing construction technology[J]. Architecture Technology, 2015,46(12):1081–1083.)
- [8] 赵波,刘颖,邱晓文,等. 3D 打印技术在脊柱外科手术教学和训练中的应用[J]. 中国医学教育技术, 2015,29(5): 547–549. (ZHAO Bo, LIU Ying, QIU Xiaowen, et al. Application of 3D printing technology in the teaching and training of spine surgery[J]. China Medical Education Technology, 2015,29(5):547–549.)
- [9] 李香宇,任建存,王世功,等. 基于 LM35 的高精度温控系统的设计[J]. 电子设计工程, 2017,25(15):94–97. (LI Xiangyu, REN Jiancun, WANG Shigong, et al. Design of high-precision temperature control system based on LM35[J]. Electronic Design Engineering, 2017,25(15):94–97.)
- [10] 余东. 基于单片机的双模糊温度控制器设计[J]. 电子设计工程, 2012,20(10):64–66. (SHE Dong. Double fuzzy temperature controller design based on MCU[J]. Electronic Design Engineering, 2012,20(10):64–66.)
- [11] 李想. 基于单片机的温度控制系统关键技术研究[J]. 集成电路应用, 2020,37(9):92–93. (LI Xiang. Study on key technology of temperature control system based on MCU[J]. Application of IC, 2020,37(9):92–93.)
- [12] 唐志勇. 基于 PID 算法的高精度恒温混溶控制系统[J]. 电子设计工程, 2019,27(11):96–99, 105. (TANG Zhiyong. High precision thermostatic mixing control system based on PID algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(11): 96–99,105.)
- [13] 陈涵,陆蕴香,乔玉鹏,等. 基于 PWM 和 PID 对三维打印喷头的恒温控制[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015,33(2):72–75. (CHEN Han, LU Yunxiang, QIAO Yupeng, et al. Based on the PWM and PID temperature control of 3D printing head[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2015,33(2):72–75.)
- [14] 师庆峰. 基于 ARM 和 WiFi 通讯的 3D 打印控制系统的设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019. (SHI Qingfeng. Research and design of 3D printing control system based on ARM and WIFI communication[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.)

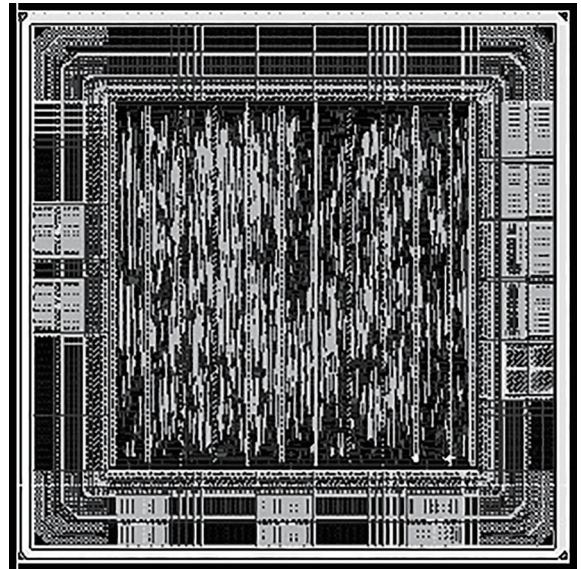


Fig.9 Layout of temperature controller ASIC
图9 温控专用集成电路的版图实现

- [15] 梁宪涛. 智能温控系统在 3D 打印机上的应用[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2016. (LIANG Xiantao. The application of intelligent temperature control system in 3D printer[D]. Anshan,China:University of Science and Technology Liaoning, 2016.)
- [16] 车军,赵娜,刘潇潇,等. 电子束 3D 打印模糊 PID 温度控制系统[J]. 机械制造与自动化, 2019(2):160–163. (CHE Jun,ZHAO Na, LIU Xiaoxiao, et al. Electron beam 3D printing fuzzy-PID temperature control system[J]. Machine Building & Automation, 2019(2):160–163.)
- [17] 程鑫,刘奔,余俊峰,等. 改进型积分分离 PID 的 3D 打印机喷头温度控制系统[J]. 数字技术与应用, 2018,36(8):1–4. (CHENG Xin, LIU Ben, YU Junfeng, et al. Sprinkler temperature control system of 3D printer based on improved integral separation PID[J]. Digital Technology & Application, 2018,36(8):1–4.)

作者简介:

谢元禄(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为存储器集成电路设计、FPGA 应用 .email: xieyuanlu@ime.ac.cn.

张 坤(1990-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为非易失存储器芯片数字电路设计优化.

霍长兴(1984-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为非易失存储器的电路设计优化.

刘 璟(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新型非挥发存储技术.