

引文格式:

李德建, 杨小坤, 杨立新, 等. 面向片上系统的多区域温度控制系统设计 [J]. 集成技术, 2023, 12(6): 43-56.

Li DJ, Yang XK, Yang LX, et al. Design of multi-region temperature control system for system-on-chip [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(6): 43-56.

面向片上系统的多区域温度控制系统设计

李德建¹ 杨小坤¹ 杨立新¹ 沈冲飞¹ 邱宇航^{2*}

¹(北京智芯微电子科技有限公司 北京 100192)

²(中国科学院大学计算机科学与技术学院 北京 100049)

摘要 在片上系统(system-on-chip, SoC)芯片中, 由于各功能部件在频率、活跃度等方面存在差异, 导致产热分布不均的问题比较突出, 严重影响芯片的可靠性和使用寿命。针对这一问题, 该文设计了一种面向 SoC 芯片的多区域温度控制系统。首先, 通过片上总线技术进行分布式多区域温度采集, 以获取 SoC 芯片的多区域温度信息。然后, 设计了兼顾全局与局部温控的温度控制机制。该机制基于温度采集阶段的实时数据, 通过协调时钟降频、中断以及脉冲宽度调制散热等方式进行局部或全局芯片温度管理与控制。同时, 用户可以通过主控程序调整系统参数, 使系统与各种温度控制场景兼容。该文在一种大规模众核 SoC 平台上进行了温度控制系统的测试。实验结果表明, 该文提出的温度控制系统可有效减缓 SoC 工作时的芯片温度上升速度, 并将芯片区域最高温度控制在用户所设定的极高温临界值 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 表明该温度控制系统用于 SoC 芯片的温度控制是可行的。

关键词 芯片散热; 温度控制系统; 片上总线; 片上系统; 脉冲宽度调制

中图分类号 TP 332 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230616001

Design of Multi-region Temperature Control System for System-on-Chip

LI Dejian¹ YANG Xiaokun¹ YANG Lixin¹ SHEN Chongfei¹ QIU Yuhang^{2*}

¹(Beijing Smart-chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

²(School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

*Corresponding Author: qiuyuhang21b@ict.ac.cn

Abstract In system-on-chip (SoC) chip, due to the differences in frequencies and activities of various functional components, uneven heat generation distribution has become a serious problem, which adversely affects the reliability and overall lifespan of the chip. To address this concern, a multi-region temperature acquisition and

收稿日期: 2023-06-16 修回日期: 2023-08-11

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5700-202041264A-0-0-00)

作者简介: 李德建, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微控制器芯片开发; 杨小坤, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微控制器芯片开发; 杨立新, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微控制器芯片开发; 沈冲飞, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微控制器芯片开发; 邱宇航(通讯作者), 博士研究生, 研究方向为计算机体系结构, E-mail: qiuyuhang21b@ict.ac.cn.

control system for SoC chip is designed. Firstly, the on-chip bus technology is used for distributed multi-region temperature acquisition to obtain multi-region temperature information of SoC chip. Secondly, a temperature control mechanism is designed, which can both satisfy the need of both local or global temperature control. Based on the real-time data of the temperature acquisition stage, this mechanism coordinates the underclocking, interrupt, and pulse width modulation intelligent cooling system to manage and control the temperature of the chip. Additionally, users are allowed to adjust system parameters through the master control program, which makes the system compatible with various temperature control scenarios. In this study, the experiment was carried out in a large-scale multi-core SoC platform for temperature control system. The experimental results show that the proposed temperature control system can effectively slow down the chip temperature rise rate during SoC operation. Meanwhile, the maximum temperature of the chip area is controlled within the extreme high temperature critical value set by the user within the range of ± 3 °C, indicating that the temperature control system is feasible for SoC chip temperature control.

Keywords chip heat dissipation; temperature control system; on-chip bus; system-on-chip; pulse width modulation

Funding This work is supported by Technology Project of the State Grid Corporation of China (5700-202041264A-0-0-00)

1 引 言

随着半导体工艺、超大规模集成电路与片上系统技术的发展,芯片的集成度和计算速度日益提升。然而,由于 Dennard scaling 定律在如今已逐渐放缓和失效^[1],导致芯片单位面积产热随着集成度的提升而增大。对于超大规模 SoC 芯片^[2]来说,温度控制成为一个日渐突出的问题。据统计,当前高性能微电子芯片的热流密度已经超过 $190 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,且考虑到电子元器件的失效率随着温度升高呈指数增长^[3],因此,传统的芯片散热技术已经很难满足如今高性能芯片的散热需求。在此背景下,新的芯片散热技术应运而生,近年来的相关研究中提出的芯片散热技术主要包括多通道热沉技术^[4]、浸没液冷条件下强化沸腾换热技术^[5]、脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 智能风扇技术^[6]、基于航空发动机叶片结构的电子芯片散热器^[7]等。其中, PWM 智能风

扇技术可实现控制信号强度的多级调节,即可根据不同的温度状况动态控制风扇强度,比一般的 on/off 控制逻辑更加灵活。

构建合适的温度控制系统的前提是选取合适的温度传感器进行温度采集。目前,数字输出型温度传感器已成为温度传感技术研究的新趋势。数字输出型温度传感器具有高精度、低功耗,以及数字接口等优势,可与温度控制系统直接相连进行集成。基于以上优势,数字输出型温度传感器在温度控制系统的设计中展现了较强的优越性。近年推出的数字输出型温度传感器包括 AS6221^[8]、MAX30208^[9]等,已被广泛用于温度控制系统的设计中。

然而,对于一般电子芯片来说,其温度分布具有不均匀的特点^[10],特别是 SoC 芯片,由于各功能部件的功耗分布不平衡^[11],各区域的产热相应不同,这就要求芯片温度控制系统具备多区域采集与控制的功能。目前已有的相关研究无法

满足这个要求。例如: 文献[12]基于模糊比例-积分-微分算法设计的温度控制系统在 SoC 内部不具备模块可复用性, 只能实现单个区域控制; 文献[13]基于 ModBus 协议设计的多路温度控制系统仅实现了各路独立控制, 不具备全局管理调控机制。在温度控制系统中集成多个温度传感器, 并设定合适的控制逻辑, 以兼顾全局和局部的温度管理与控制是解决这一问题的有效方案。

为了适应芯片多区域温度管理与控制的需求, 本文提出一种基于数字输出型温度传感器, 高级微控制器(advanced microcontroller bus architecture, AMBA)片上总线协议和 PWM 智能风扇的多区域温度采集与控制系统。该系统应用 AMBA 片上总线协议在系统中集成多个温度传感器, 可以对芯片各个易发热的核心区域进行多区域实时温度采集, 协调局部的降频、中断以及全局的 PWM 风扇散热等操作。本文在一款大规模 SoC 环境下进行了多区域温度采集与控制系统的功能验证和性能测试, 证明了本文所设计的温度采集控制系统可以在超大规模 SoC 环境下对芯片进行多区域温度管理和控制, 提升了 SoC 芯片的稳定性。

2 相关原理与技术

2.1 脉冲宽度调制智能风扇技术

风扇散热是芯片散热的惯用方法, 传统的风扇采用开/关控制模式, 即在温度超过设定阈值时打开风扇, 低于阈值时则关断。在温度可变范围较大时, 这种控制方式易造成风扇冷却效果不足或过剩, 无法满足风扇系统的高效、节能需求。

PWM 通过调节电压脉冲的宽度和脉冲列的周期, 输出具有特定占空比的数字脉冲信号。使用 PWM 智能风扇技术调整风扇运行速率, 可实现风扇转速的多级调节, 有效应对超大规模 SoC 芯片的智能化散热需求。

2.2 数字输出型温度传感器

温度传感器利用热电阻、热电偶等材料物理性质随温度变化的特性采集环境温度信息, 并转化为可用的输出信号, 以表征环境温度情况, 是进行温度监测与管理的一种有效手段。数字输出型温度传感器将传感器模拟电路和模数转换接口集成在同一芯片内, 具有体积小、功耗低、测量精度高等优点。同时, 其温度输出形式为数字脉冲信号, 投入应用时无须使用前置放大器和模数转换电路, 在温度控制系统设计中具有优势。

温度传感器 METS 是一种数字输出型温度传感器, 具有数字接口, 可直接通过 I/O 线与温度控制系统芯片相连, 设定合适的控制逻辑即可控制 METS 的工作模式配置、采集温度、模数转换等操作。METS 的温度测量范围为 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 转换位数为 8~12 位。当转换位数设为 12 位时, 转换分辨率的测量精度为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足工业控制要求(精度 $<0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。以上特征使 METS 适用于芯片温度监测, 本次设计应用 METS 温度传感器进行 SoC 部件的温度监测工作。

2.3 高级微控制器片上总线协议

在目前的集成电路设计领域, 基于知识产权(intellectual property, IP)核复用的 SoC^[14]方法成为主流技术。片上总线协议是为了在芯片内实现各 IP 核与功能模块的相互通信而设置的统一传输通信规范, 增强了 IP 核的可复用性。在诸多片上总线协议中, AMBA 总线^[15]具有可复用性高、数据传输可靠性强等特点, 被应用于各类 SoC 的设计中。AMBA 总线主要包括高性能(advanced high performance bus, AHB)总线^[16]和先进外设(advanced peripheral bus, APB)总线^[17]。其中, AHB 总线主要是针对高效率、高频宽及快速系统模块所设计的总线, 它可以连接如微处理器、芯片上或芯片外的内存模块和直接内存访问(direct memory access, DMA)控制器等高效率模块; APB 总线则主要用于连接低速低频

率设备。系统设计中一般通过使用 AHB-APB 总线桥^[18]实现两种片上总线协议的相互转换。

在本研究设计的温度控制系统中，应用 AMBA 总线，实现了温度传感器 IP 的复用，以及与控制单元的通信。本设计允许在温度控制系统中集成多个温度传感器，达到使用单系统进行多区域温度采集与控制的效果，以满足 SoC 芯片的温度控制需求。

3 多区域温度采集与控制系统设计

本节介绍了多区域温度采集与控制系统设计方案：首先介绍整体架构与总线系统，然后对多区域温度采集方法及温度信息汇总进行说明，最后分析温度控制机制。

3.1 整体架构与总线系统

本研究应用数字输出型温度传感器 METS IP 和 AMBA 片上总线协议，针对芯片温度管理要求设计多区域温度控制系统。

多区域温度控制系统的整体架构及其与外部

的连接关系如图 1 所示。温度控制系统内部各个模块都设置 APB 与 AHB 总线接口，便于总线的挂载与读写操作。多区域温度控制系统通过总线读写操作轮询多个传感控制器。每个传感控制器控制一个温度传感器，进行初始化配置和各发热部件的温度信息采集。温度控制系统内设一个中心控制单元和若干局部控制单元，处理相关温度信息，输出对应控制信号，以进行局部/全局的风扇散热、降频、中断等温度控制操作。

为了能够高效地实现温度控制系统各模块之间的通信，同时避免通信不匹配的情况，本文将 AMBA 片上总线协议中的 AHB 和 APB 总线作为系统内核总线。在一般处理器芯片内，温度控制系统属于低速外设，与 DMA 相比，Flash 等核心模块对速度和主频的要求较低，因此将 APB 总线作为通信主干，挂载全局控制单元和若干局部控制单元，可以通过外部微控制器 (microcontroller unit, MCU) 控制 APB 总线写操作传递温度传感器的初始化配置信息。传感控制器作为与温度传感器直接相连的模块，挂载

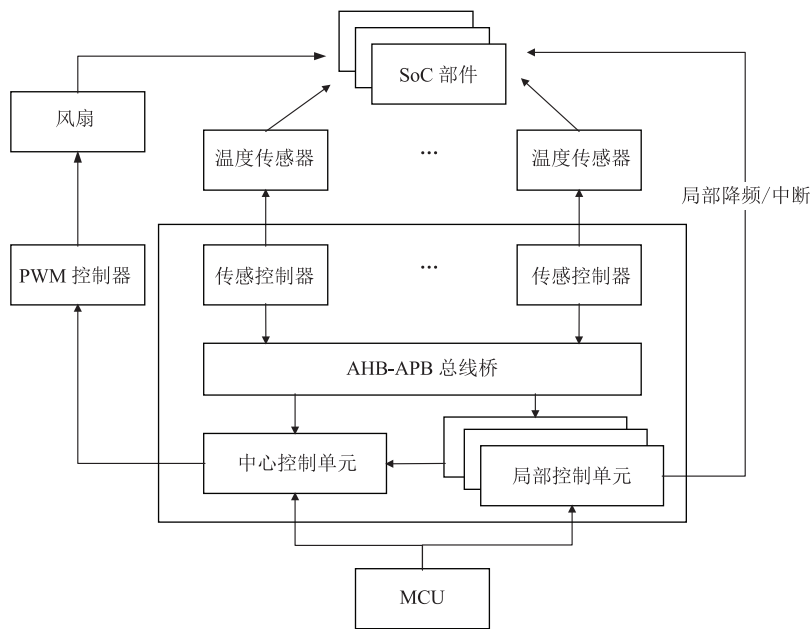


图 1 多区域温度控制系统整体架构

Fig. 1 Overall architecture of the multi-region temperature control system

在 AHB 总线上, 以实现更加快速的轮询温度采集。总线系统的设计层次如图 2 所示。

本文的温度控制系统的控制单元均挂载在 APB 总线上, 通过外部 MCU 控制总线读写寄存器的方式与传感控制器进行信息交互, 实现温度输出信息的读取与温度传感器的模式配置。在综合考虑温度控制系统本身特性与超大规模 SoC 的规模后, 将温度控制系统总线地址设为 11 位, 即为温度控制系统分配 2 kB 总线空间。其中, 地址高 3 位为各控制单元的标记, 低 8 位用于寻址

各单元内部寄存器, 即每个控制单元拥有 256 B 的总线空间。由于 APB 总线采用 32 位地址寻址 8 MB 空间, 因此, 温度控制系统所占据的这部分总线空间在一般的超大规模 SoC 内基本可忽略不计。图 3 为温度控制系统 APB 总线地址映射示意图。

3.2 多区域温度采集方法及温度信息汇总

本文设计的多区域温度采集与控制系统集成多个温度传感器, 用于同时监测芯片不同易发热区域的温度情况。为了设计逻辑合理的控制

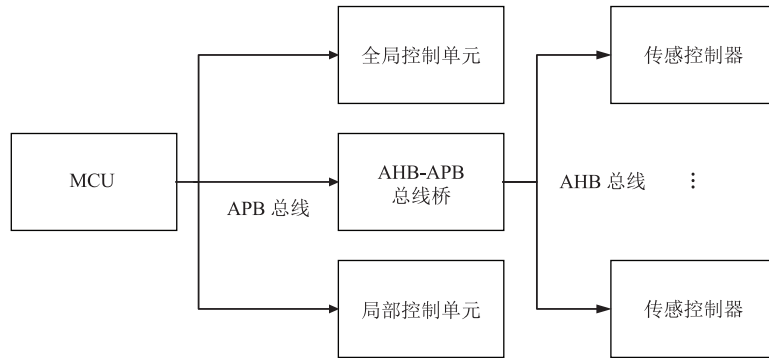


图 2 总线系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the bus system

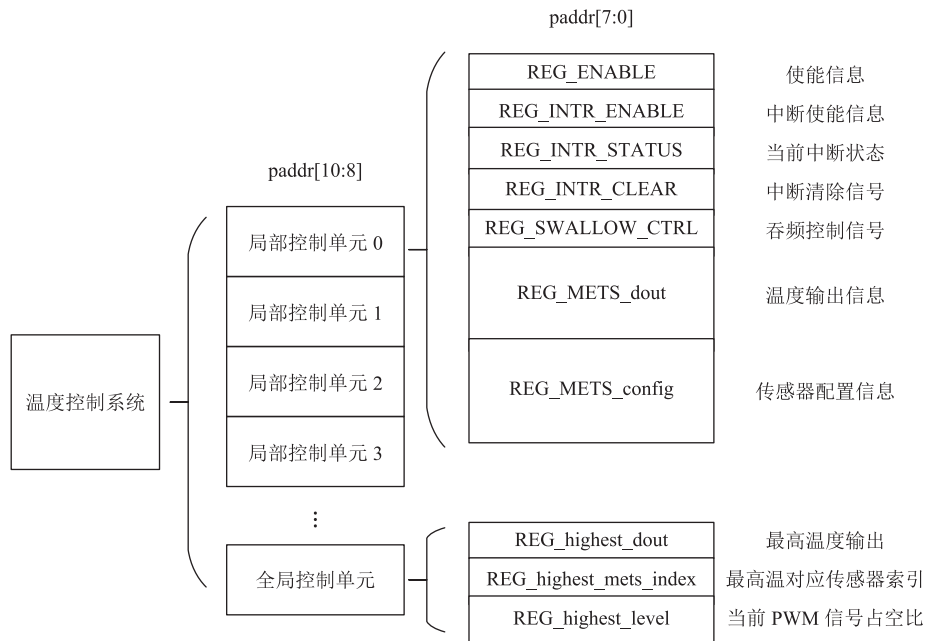


图 3 总线系统地址映射示意图

Fig. 3 Address mapping of the bus system

系统, 本文针对多个温度传感器的输出设计了多区域温度采集方法。该方法包括温度传感器的初始化与模式配置、区域温度信息的采集和存储工作。方案的具体流程如图 4 所示。其中, n 为对温度传感器进行模式配置的索引, k 为对温度传感器输出信息的轮询, 寄存工作的索引。温度采集系统在所有传感器初始信息配置完成后自动进入温度输出的轮询阶段, 该阶段若收到总线发出的初始化命令, 则重新初始化进程。

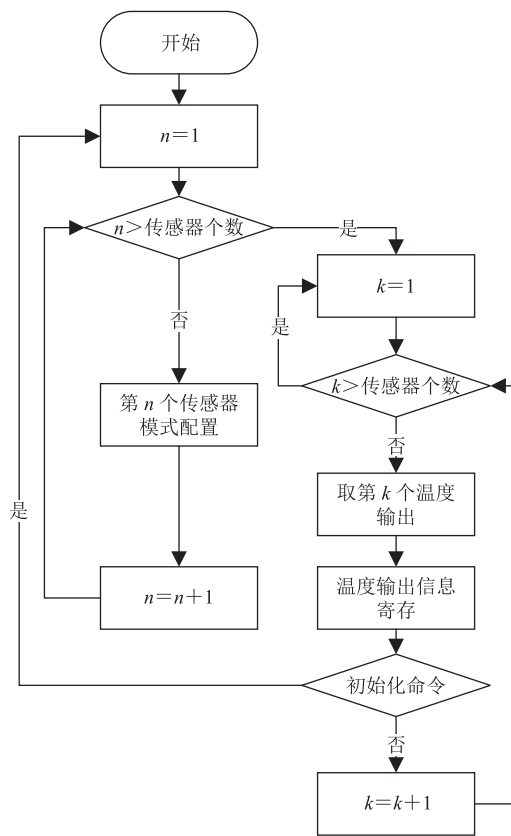


图 4 多区域温度采集流程图

Fig. 4 Flow chart of multi-region temperature sensing

在实际系统实现中, 利用 AHB 高速总线驱动传感控制器工作, 以进行温度传感器的模式配置及温度信息的采集与存储, 该方法允许系统以高频率驱动多区域温度采集系统运行, 确保控制系统可实时获取全部区域的温度信息。

温度采集系统获取的温度信息会实时存放在总线寄存器内, 可通过 APB 总线访问获取任意

温度传感器采集的温度信息, 系统控制单元也可通过访问寄存器获取局部/全局的温度信息, 并据此调整温度控制信号。

3.3 温度控制机制

为实现多区域温度控制, 温度控制机制分为局部和全局两种, 局部温度控制机制通过降频实现温度控制, 全局温度控制机制通过调整 PWM 占空比控制风扇运行, 两种控制机制均实现了可配置参数的系统控制。

3.3.1 局部温度控制机制

温度控制系统部分接收采集系统获取的区域温度信息后, 可协调区域降频、中断机制进行局部温度控制。在温度控制系统判定的各个温度范围内, 各区域的温度控制范围及操作如表 1 所示。当芯片的工作区域温度处于非正常温度级别时, 温度控制系统采取时钟降频的方式改善该区域的温度状态。通过降低高温核心区域的主频, 可以降低该区域功能部件的功耗, 进而降低芯片温度, 避免过热状况出现。

表 1 各温度范围与操作

Table 1 Temperature range and operation

温度级别	操作
正常	正常工作
高温	工作时钟频率降为 1/2
极高温	工作时钟频率降为 1/4
超过极高温	触发中断, 工作时钟频率降为 1/8

多区域温度控制系统将温度传感器的测量范围划分为 4 个温度等级, 温度控制系统中设置常温、高温、极高温 3 个局部温度阈值来划分 4 个温度等级, 其划定的温度范围在表 2 中示出。局部控制单元将各传感器的温度输出与临界值进行比较, 判定区域温度情况, 输出相应的降频控制信号, 控制与各发热部件相连的时钟管理单元对各温度区域的时钟进行降频操作。

当局部温度超过极高温范围后, 简单的时钟降频操作已不能有效规避电子元器件失效及芯片

表 2 局部温度范围与阈值设置

Table 2 Local temperature range and threshold setting

温度级别	阈值上限
常温	normal_dout(常温阈值)
高温	high_dout(高温阈值)
极高温	extremely_high_dout(极高温阈值)
超过极高温	>extremely_high_dout

烧毁的风险。为了尽可能保证芯片安全及正常工作, 温度控制系统对芯片上超出极高温限制的区域使用区域中断方案。由局部控制单元输出中断信号 `intr`, 每一个中断控制信号管理多个温度传感器所监控的区域, 只要该部分温度传感器中有一个温度输出超过极高温阈值, 就会触发中断。当中断信号置为有效时, 其管理的工作区域进入中断控制流程。

不同于时钟降频方案, 单个中断信号所管控的芯片区域更广, 触发时会中断较大区域的芯片工作, 如果仅由区域温度状况驱动中断信号, 则可能会因温度控制措施过激而对芯片的工作产生

负面影响。为了解决这个问题, 在温度控制系统的设计中设置中断使能和清除机制。

区域中断机制的流程如图 5 所示, 具体为: 只有管理区域出现温度过高的情况且中断使能有效时, 区域中断信号才会被置为有效。在这种情况下, 若系统接收到中断清除指令, 则会将对应的中断信号强行置为无效, 并在下一个时钟周期恢复原状态。

3.3.2 全局温度控制机制

本文设计的多区域温度控制系统兼顾全局与局部的温度控制。针对局部温控采用降频与中断措施, 针对全局温控采用最高温驱动 PWM 风扇系统散热方式。

在使用多区域温度采集方法收集的全部温度输出中, 最大值即全局最高温是芯片温度状况的重要表征。同时, 控制系统为了实现精准控制, 还需获取最高温度输出对应的温度传感器索引 (`index`)。本文的全局控制单元通过内置比较器的方式获取所有温度传感器的最高温度输出及最

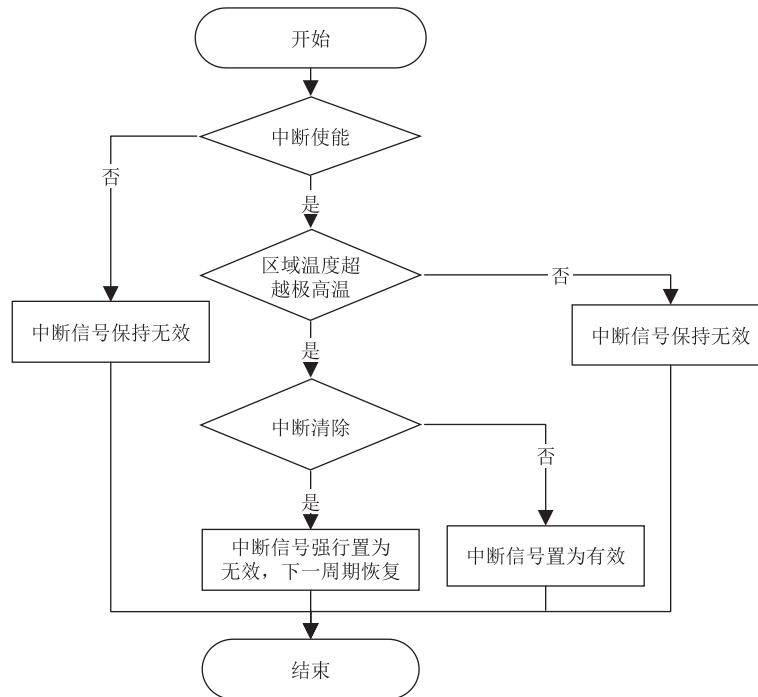


图 5 中断机制流程图

Fig. 5 Flowchart of the interrupt mechanism

高温对应索引，将索引值存放于总线系统中与最高温相关的寄存器内。

在获取全局最高温信息后，全局控制单元可驱动 PWM 风扇进行全局散热，以达到全局温度控制的目的。风扇的强度通过 PWM 信号的占空比来调整，系统根据全局最高温的等级调整 PWM 信号的占空比。类似于局部降频操作，系统设置 3 个 PWM 阈值，划分 4 个全局 PWM 温度等级，PWM 等级的配置方法如表 3~4 所示(括号内为默认值)。

表 3 PWM 温度阈值设置

Table 3 Setting of PWM temperature threshold

级别	PWM 占空比等级	温度阈值上限
0	level_0	PWM_start_dout
1	level_1	PWM_middle_dout
2	level_2	PWM_full_dout
3	level_3	>PWM_full_dout

表 4 PWM 占空比设置

Table 4 Setting of PWM duty cycle

PWM 占空比等级	PWM 占空比
level_0(0)	level_0/level_max
level_1(25)	level_1/level_max
level_2(64)	level_2/level_max
level_3(127)	level_3/level_max
level_max(128)	1

温度控制系统的全局控制单元通过比较收集到的芯片全局最高温和各温度阈值，调整 PWM 信号，实现风扇系统的多级调整，以进行全局温度控制。例如，当温度低于 PWM_start_dout 对应的温度时，认定此时的全局温度状况正常，全局控制单元输出占空比为 level_0/level_max 的 PWM 信号，以控制风扇系统运行，实现风扇强度的多级调节。

3.3.3 可配置参数的系统控制单元设计

本文设计的温度控制系统通过将温度传感器采集的温度信息与温度阈值进行比较的方法判定温度状况，依此输出局部或全局的温度控制信

号。在局部控制单元与全局控制单元中，涉及温度控制的参数包括局部温度阈值、全局 PWM 温度阈值和各等级 PWM 占空比等。若这些参数固定，则可能无法适应不同 SoC 的温度控制要求，导致温度控制系统不具备兼容性。因此，本文利用 APB 总线设计参数可变的局部控制单元和全局控制单元。

温度控制系统的局部控制单元和全局控制单元挂载在 APB 总线上，通过 APB 总线写操作的方式存储并传输配置信息。类似地，在图 3 的基础上，在局部控制单元和全局控制单元中添加一部分寄存器存放涉及温度控制的相关参数，具体映射关系如图 6 所示。添加后，每个单元所需要的总线空间都未超过原分配方案的限制，无须改变原先的地址映射方式。

添加相关参数寄存器后，类似于更新传感控制器中的配置信息，用户可通过外部主控程序控制 APB 总线写操作的方式更新寄存器(register, REG)数据、调整系统参数。局部控制单元与全局控制单元相应地会依据更新后的参数进行温度状况的判别及温控措施的调整。参数可变的系统控制单元允许用户根据 SoC 实际温控需求调整系统参数，使温度控制系统具有较强的兼容性，可适应不同的温度控制要求。

4 实验和结果

本节将第 3 节中提出的多区域温度控制系统方案进行了实例化，并将其集成到一种大规模众核 SoC 环境中，以进行功能验证与性能测试。

4.1 实验设置

4.1.1 大规模众核片上系统实验平台

本文涉及的温度控制系统面向 SoC 进行多区域温度控制，因此选取了一种大规模 SoC 进行系统级功能验证与性能测试。如图 7 所示，该 SoC 的核心部分拥有 4 个计算核、DMA 以及共享存

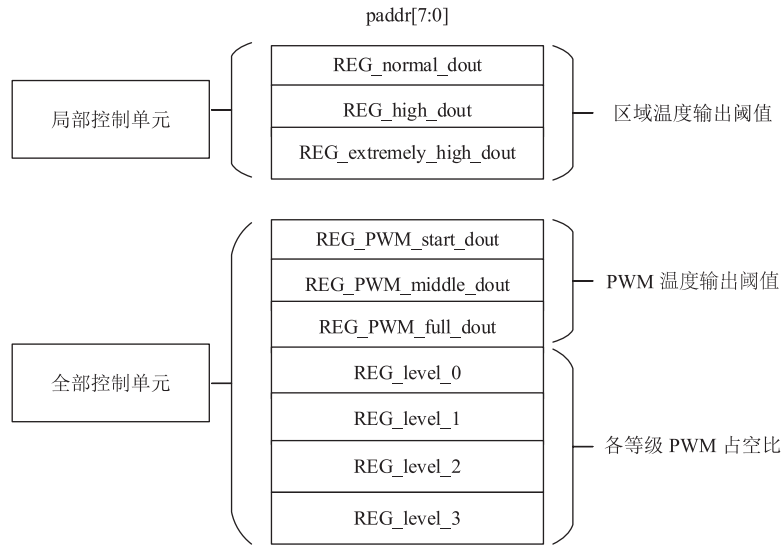


图 6 温度控制参数总线映射示意图

Fig. 6 Bus mapping of temperature control parameters

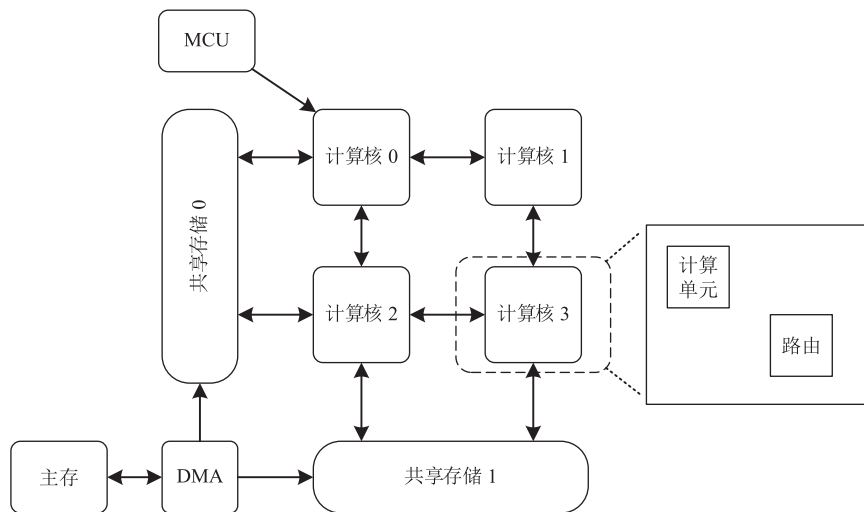


图 7 SoC 平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of SoC platform

储等部件。各部件在工作时主频较高, 产热较快, 以下的实验会针对这几个核心部件进行多区域温度控制。SoC 的具体配置信息在表 5 中列出。

4.1.2 温度控制系统初始化信息

本文设计的多区域温度控制系统实例化信息在表 6 中列出。依据表中的实例化信息, 使用

表 5 SoC 配置信息

Table 5 SoC configuration information

对象	配置信息
主频	1 GHz
主存	128 GB
计算核	4 浮点单元, 8 定点单元, 四向路由
共享存储	16 MB×2

Verilog HDL 语言实现温度控制系统的设计，生成寄存器传输级代码，便于后续在 SoC 环境中集成测试多区域温度控制系统的功能正确性与温度控制性能。

表 6 系统实例化信息

Table 6 System instantiation information

对象	初始配置信息
温度传感器	Moortec METS IP×5
局部控制单元	×5, 每个单元管理 1 个 METS, 降频模块×5, 中断模块×1
全局控制单元	×1

4.1.3 实验框架

为了能够对 SoC 芯片进行多区域温度控制以及证明温度控制系统设计的实用性，在实测环境中需要使用温度控制系统对 SoC 核心区域进行温度采集与控制。具体连接方法为：在 SoC 环境中将温度控制系统中的温度传感器 METS (index 为 0~4) 与 SoC 中易发热的核心区域相连，监测温度控制系统的输出信息与温度传感器的实时温度信息。SoC 上电测试场景与整体测试框架分别如图 8 和图 9 所示。

4.2 温度控制系统功能验证

按照 4.1.3 节中的实验框架将本文设计的多区域温度控制系统集成到 SoC 实验平台后，本研究进行了 SoC 环境下的温度控制系统功能验证。为了验证使用多区域温度控制系统进行 SoC 芯片

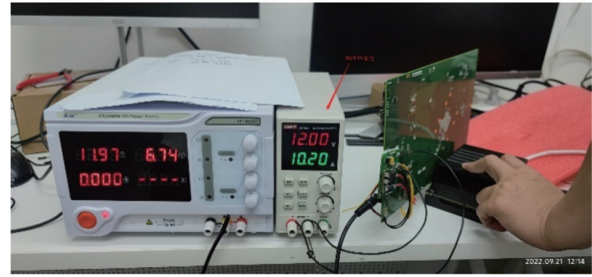


图 8 SoC 上电测试场景

Fig. 8 SoC integration test scene

温度控制的有效性，需验证 SoC 环境下温度采集功能、温度控制机制的正确性和系统兼容性。

4.2.1 温度采集功能验证

按照图 9 的测试框架将与 SoC 区域相连的 5 个温度传感器 METS 的虚拟温度均设置为 50 °C (对应 16 进制输出为 837)。但只有前两个配置为工作状态，以测试多区域温度控制系统中温度采集的效果，所得的测试波形如图 10 所示。

从仿真波形图可以看出，在多核 SoC 环境下进行初始测试条件设置后，温度控制系统中的各控制单元可正确更新系统状态及进行多路温度采集，并将温度信息存放在系统寄存器内。该实验证明了本文设计的多区域温度控制系统在 SoC 环境下，可以由用户通过主控程序配置温度传感器信息，进行温度采集与轮询工作。

4.2.2 温度控制机制功能验证

在 4.2.1 节的基础上，需要对温度控制系

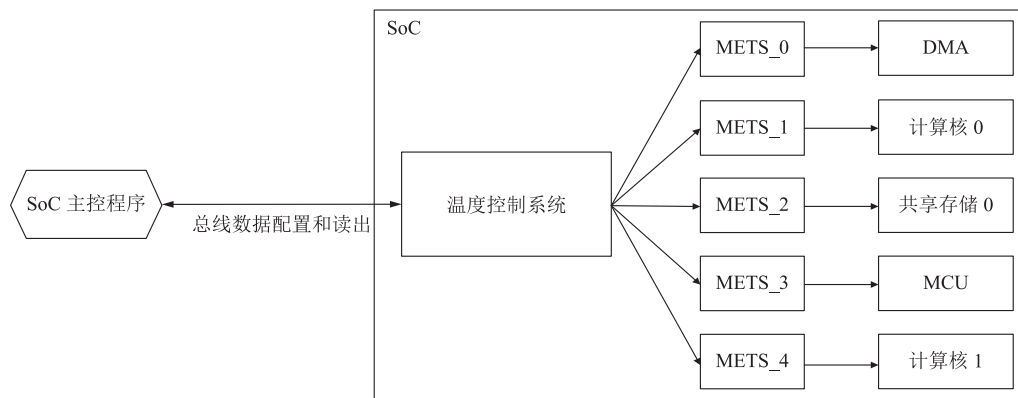


图 9 测试整体框图

Fig. 9 Overall test framework

时会出现运行出错和失效的情况。基于该因素，以温度阈值为变量设置 3 种测试场景，3 种场景的具体参数在表 7 中列出(3 种场景下均设置局部温度阈值与全局温度阈值完全相同)。

在性能测试中，本文按照表 7 中的温度阈值信息，通过主控程序配置系统中的相关寄存器值，进行 3 种测试场景的实测。此处，本研究团队统计了最高温在各个场景中的变化情况，将其作为芯片温度变化的表征。3 种场景下的实测温度曲线如图 13 所示。

表 7 温度测试场景

Table 7 Temperature test scenarios

测试场景	系统 on/off	温度阈值 (°C)
场景 1	off	
场景 2	on	60, 70, 80
场景 3	on	40, 50, 60

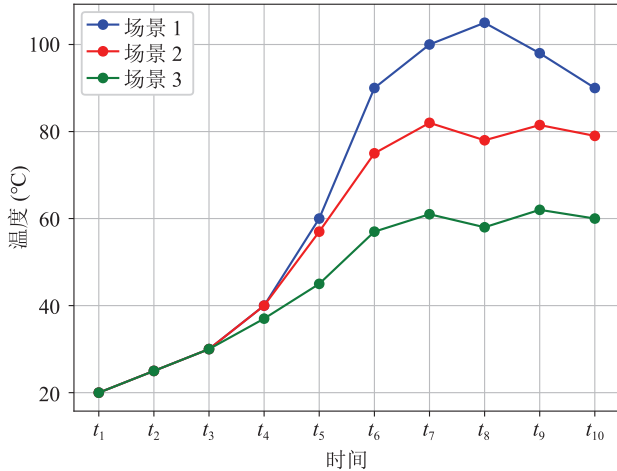


图 13 温度测试性能结果图

Fig. 13 Performance diagram of temperature test effect

如图 13 所示，在温度控制系统关闭时，SoC 温度快速升高至 100 °C 以上，出现运行错误和失效后温度逐渐降低。而在温度控制系统打开时，SoC 温度提升速度明显减小，且区域最高温度在所设定的极高温阈值 ± 3 °C 范围内波动，避免了运行错误和失效情况出现。

实验结果表明，本研究设计的温度控制系统

可有效提升 SoC 的稳定性，避免因温度升高过快而造成运行错误和芯片损坏，进而提升 SoC 的稳定性。同时，温度控制系统可通过设置不同的阈值兼容多种温度控制需求，具有较强的灵活性。

4.3.2 相关研究对比

表 8 展示了使用本文方法与文献[13]中的方法进行多路温度控制的实际效果。从中可以看出，本研究引入 AMBA 片上总线协议，最多可进行 32 路的温度控制，可实现独立和全局的温度控制，相比文献[13]中方法具有更大的容量和更高的灵活性。而在温度采集方面，本文方法具有约 2 倍的精度和更大的高精度温度范围。对比结果展示了本研究在进行多区域温度控制方面的优越性。

表 8 多路温度控制效果对比

Table 8 Comparison of multi-channel temperature

项目	control effect	
	文献[13]	本文方法
路(way)数	4 路	最多 32 路
控制机制	各路独立控制	允许独立控制和全局协调控制
测量精度	0.1 °C	0.05 °C
高精度温度范围	0~50 °C	-40~125 °C

5 结论

本文基于数字输出型温度传感器 METS、AMBA 片上总线协议、PWM 智能风扇技术，提出了一种支持多区域温度采集和控制的多区域温度控制系统。

本文关注的重点是设计能够进行多区域温度控制的温度控制系统，而 SoC 环境下集成与验证的成功为其应用提供了广阔的思路。这证明了用户可以通过软件操作的方法控制温度控制系统的工作及调整系统内的各个参数，为其成为一种兼容性更强的温度控制系统，从而应用于各种类型的芯片温度控制提供了可能。

目前的研究存在硬件资源利用率低、温度传感器工作模式单一等问题。接下来的研究可以聚焦于功能灵活性、提升资源利用率等方面,以及在温度控制系统中引入数字输出型温度传感器的更多工作模式,以增加整个系统的灵活性。随着研究的深入,希望本研究的成果可以为芯片多区域温度控制提供更多借鉴。

参 考 文 献

- [1] Hennessy J, Patterson D. A new golden age for computer architecture: domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development [C] // Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture, 2018: 27-29.
- [2] Chakravarthi VS. A practical approach to VLSI system on chip (SoC) design: a comprehensive guide [M]. Switzerland: Springer Cham, 2020.
- [3] 刘芳, 杨志鹏, 袁卫星, 等. 电子芯片散热技术的研究现状及发展前景 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(23): 163-169.
- Liu F, Yang ZP, Yuan WX, et al. Research status and development prospect of the chip cooling technologies [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(23): 163-169.
- [4] 唐晟, 赵耀华, 刁彦华, 等. 多孔挤压铝扁管电子芯片热沉的热性能研究 [J]. 山东科学, 2018, 31(3): 39-47.
- Tang S, Zhao YH, Diao YH, et al. Thermal performance of a new kind of heat sink fabricated by flat aluminum multipoint extruded tubes for electronic devices cooling [J]. Shandong Science, 2018, 31(3): 39-47.
- [5] 沙超群, 历军, 张鹏, 等. 超高热流密度强化沸腾换热技术研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37(8): 183-187.
- Sha CQ, Li J, Zhang P, et al. The technique of enhancing the ultra-high heat flux boiling heat transfer [J]. Computer Simulation, 2020, 37(8): 183-187.
- [6] Hu JY. Design of air-cooled temperature control system based on PWM regulation technology [C] // Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021: 1-6.
- [7] 何凯波, 冯鲁文, 王钧, 等. 基于航空发动机叶片结构的电子芯片散热器设计 [J]. 技术与市场, 2019, 26(1): 117+119.
- He KB, Feng LW, Wang J, et al. Design of electronic chip heat sink based on aero-engine blade structure [J]. Technology and Market, 2019, 26(1): 117+119.
- [8] 艾迈斯半导体. AS6221 数字温度传感器 [J]. 传感器世界, 2021, 27(5): 38.
- AMS. AS6221 digital temperature sensor [J]. Sensor World, 2021, 27(5): 38.
- [9] 美信半导体. MAX30208 数字温度传感器 [J]. 传感器世界, 2019, 25(8): 48.
- Maxim. MAX30208 digital temperature sensor [J]. Sensor World, 2019, 25(8): 48.
- [10] Hao XH, Peng B, Xie GN, et al. Efficient on-chip hotspot removal combined solution of thermoelectric cooler and mini-channel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 170-178.
- [11] 吴欣欣, 欧焱, 李文明, 等. 基于粗粒度数据流架构的稀疏卷积神经网络加速 [J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(7): 1504-1517.
- Wu XX, Ou Y, Li WM, et al. Acceleration of sparse convolutional neural network based on coarse-grained dataflow architecture [J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(7): 1504-1517.
- [12] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设计与仿真 [J]. 电子设计工程, 2020,

- 28(21): 51-55.
- Song L, Wei YB, Feng YP. Design and simulation of temperature control system based on fuzzy PID [J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(21): 51-55.
- [13] 徐道黎, 耿子贺, 矫越. 基于 ModBus 协议的多路温度控制系统设计 [J]. *科学技术创新*, 2021, (35): 70-72.
- Xu DL, Geng ZH, Jiao Y. Design of multi-channel temperature control system based on ModBus protocol [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021, (35): 70-72.
- [14] Pang XM, Yu DJ, Li JB, et al. Design and application of IP core in SoC technology [C] // *Proceedings of the 2010 3rd International Symposium on Information Science and Engineering*, 2010: 71-74.
- [15] Flynn D. AMBA: enabling reusable on-chip designs [J]. *IEEE Micro*, 1997, 17(4): 20-27.
- [16] Giridhar P, Choudhury P. Design and verification of AMBA AHB [C] // *Proceedings of the 2019 1st International Conference on Advanced Technologies in Intelligent Control, Environment, Computing & Communication Engineering*, 2019: 310-315.
- [17] Suan WH, Jambek AB, Isa MNBM, et al. Design and implementation of AMBA bridge protocol in system on chip design [J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2019, 14(2): 788-795.
- [18] Niharika BH, Ramesh S. The configuration and verification analysis of AMBA-based AHB2APB bridge [C] // *Proceedings of the 2022 IEEE 2nd International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications*, 2022: 1-5.