

嵌入式系统的研究进展与趋势

CCF 微机（嵌入式系统）专业委员会

摘 要

过去一年嵌入式系统技术发展迅速，嵌入式系统在我国电子信息产业中的占比显著加大。在国家 and 地方科技计划等项目的支持下，产学研协同创新，嵌入式微处理器与操作系统、嵌入式系统设计和应用技术等方面涌现了一批高水平的研究成果。本专题报告对嵌入式系统的研究热点和国内研究现状进行了调研和分析，重点对嵌入式微处理器、嵌入式操作系统、软硬件协同设计方法、动态电源管理技术、信息物理融合系统，以及智能电网、智能家居、汽车电子、智能手机等嵌入式系统应用技术的代表性工作做了介绍，此外，还讨论了嵌入式系统技术的发展趋势和对我国嵌入式系统产业的展望。

关键词：嵌入式微处理器，嵌入式操作系统，软硬件协同设计，动态电源管理，信息物理融合系统

Abstract

Over the past year, the embedded system technology grew very fast. The ratio of embedded system to electronic information products is increased observably in China. With the support of national science and technology programs, and collaborative innovation of the enterprises, universities, and institutes, a lot of high level research achievements were emerging in the fields of system-on-chip, intelligent terminal, and internet of things. This report gives the investigation and analysis of the hot areas and domestic situation of embedded system research, and focuses on some representative research work in the fields of embedded microprocessors, embedded operating system, hardware-software co-design, dynamic power management, cyber physical system, and embedded applications including intelligent grid, intelligent home, automobile electronics, smart phone. In addition, the development trend of the embedded system technology and the prospects of the embedded system industry of our country are discussed in the report.

Keywords: embedded microprocessor, embedded operating system, hardware-software co-design, dynamic power management, cyber physical system

1 引言

在当今后 PC 时代和物联网时代，嵌入式系统技术及其应用得到迅速发展。在应用需求的驱动下，嵌入式系统技术已广泛应用在智能手机、平板电脑、汽车电子、数字电视、数码相机、微波炉、空调等消费电子产品，交换机、路由器、中继器等网络设备，卫星导航、航天飞机、月球探测仪等航天电子产品，以及其他电子设备上。嵌入式系统已成

为市场规模最大的计算机系统。

过去一年,嵌入式系统技术发展迅速,在国家和地方科技计划等项目的支持下,企业、高校和科研院所紧密合作、协同创新,在微处理器、操作系统、设计方法、电源管理、信息物理融合系统,以及嵌入式系统应用等方面开展了卓有成效的研究工作,涌现了一批高水平的成果。

本专题报告首先对嵌入式系统进行了概述,接着调研和分析了当前嵌入式系统研究的热点问题,介绍了我国高校、科研院所和企业的研究现状和代表性研究工作。最后讨论了嵌入式系统技术发展趋势和嵌入式系统产业展望。

2 嵌入式系统概述

嵌入式系统是一种以微处理器为基础,软硬件协同工作,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。下面将从嵌入式微处理器、嵌入式操作系统、信息物理融合系统和嵌入式系统应用四个方面进行概述。

2.1 嵌入式微处理器

微处理器是嵌入式系统硬件的核心,差异化的应用需求使得嵌入式微处理器的发展呈现多样性,从4位到64位,从MCU到SoC,从ARM到Atom,从单核到多核。嵌入式系统,特别是移动嵌入式系统,要求微处理器具有高性能、低功耗的特点。通过提高主频和优化结构来提升单核微处理器性能的手段已经遇到了瓶颈,近年来嵌入式微处理器的发展主要集中在多核、可重构、低功耗和混合SoC等方面。

嵌入式微处理器具有计算速度快、I/O功能强、封装小、功耗低等特点,主要包括:微处理器单元(MPU)、微控制器(MCU)、数字信号处理器(DSP)和片上系统(SoC)四类。

1) MPU。典型的MPU包括X86、Power PC、68000、MIPS等。当前MPU的主要发展方向是在单芯片上集成更多的处理器核。2011年AMD发布了45nm工艺的FX Bulldozer 8-Core处理器;Intel发布的i7-2600K则采用32nm工艺,拥有4-Core/8-Thread;IBM POWER-710处理器采用45nm工艺,具有8-Core。三款微处理器的主频都在3.0~4.0GHz。

2) MCU。比较有代表性的MCU产品包括8051、ARM Cortex-M等。面向应用、低功耗和高性能是当前MCU发展的方向。在高性能方面,Microchip公司的PIC18FXXJXX系列处理器集成了以太网接口,用以实现以太网控制器;Holtek公司的HT49RXX系列芯片集成了LCD接口,直接驱动LCD;Cypress公司的CY8C27XXX系列芯片集成了滤波、运放、A/D和D/A,用单芯片实现模拟信号预处理与数字转换。在低功耗方面,TI公司的产品MPS430工作时功耗小于100 μ A/MHz。

3) DSP。DSP通过改进内部总线结构、增加并行运算单元提高信号处理的性能。

2011 年 TI 公司发布了 8-Core 架构的 TMS320C66X, DSP 进入了多核时代, 多核成为 DSP 提高处理能力的重要发展方向。

4) SoC。SoC 是当前嵌入式微处理器发展的重点。TI 公司的 TMS320DM368 是典型的多媒体处理 SoC, 它将 ARM9 内核与视频编解码模块以及其他外设集成在一起, 以支持高清晰度视频的获取、增强和编解码, 并实现网络传输。iPhone 4 中的 A4、Samsung Galaxy S3 中的 Exynos 均是针对智能手机应用开发的 SoC。

随着微处理器技术的发展, 不同嵌入式处理器种类之间的界限愈加模糊。一些计算能力强、接口丰富、面向应用设计的 MCU 已很难与 SoC 相区分, 如 Cortex-M 系列 MCU; 而一些嵌入式微处理器扩展了信号处理功能模块, 实现了 DSP 的功能, 如 ARM 9E 处理器。

2.2 嵌入式操作系统

操作系统是嵌入式系统软件的核心, 居于嵌入式硬件和嵌入式应用程序之间, 负责管理嵌入式系统中的软、硬件资源和任务调度。嵌入式系统的资源限制及实时性要求, 使得定制嵌入式操作系统成为必然。从 1981 年 Ready System 推出的第一个商业嵌入式实时内核 VRTX32, 到现在的 Windows Phone、Android、VxWorks、eLinux 等, 嵌入式操作系统在发展中一方面追求稳定性和实时性, 另一方面追求系统的高度集成。嵌入式操作系统通常可以分为两类, 一类是面向控制、通信等领域的实时操作系统, 另一类是面向消费电子、智能终端等应用的非实时操作系统。

在 20 世纪 80 年代, 嵌入式操作系统只是一个实时内核, 仅支持一些 16 位的微处理器, 当时的代表性产品主要有 Ready System 公司 (1995 年与 Microtec Research 合并) 的 VRTX32、IPI 公司的 MTOS 以及 ISI 公司 PSOS 等。进入 90 年代, 微内核和模块化等现代操作系统设计思想开始渗透到嵌入式操作系统中。当时的主流产品除了 Ready System 公司的 VRTXsa 实时内核外, 还有美国风河 (Wind River) 公司的实时操作系统 VxWorks, 其核心是一个高效的微内核。

进入 21 世纪, 随着互联网技术的迅速发展, 网络终端设备要求嵌入式操作系统提供图形界面以及网络接口。这个时期的代表性产品包括 Vxworks、嵌入式 Linux、WinCE 和 QNX 等。最近几年, 随着移动互联网的兴起, 智能终端成为移动互联网接入的主要载体, 涌现出了多款针对移动平台的嵌入式操作系统, 代表性产品有: Symbian、Windows Phone、Android、iOS 等。

2.3 信息物理融合系统

近些年, 以信息物理融合系统 (Cyber Physical Systems, CPS) 为代表的网络化嵌入式系统已成为重要发展方向。

CPS 最早由美国国家基金委员会在 2006 年提出, 是一种大规模异构化深度嵌入式的

复杂实时系统^[38]。2007 年,美国总统科技顾问委员会的报告《挑战下的领先:竞争世界中的信息技术研发》将 CPS 列为 8 个优先发展领域的首位。

CPS 是建立在嵌入式计算、无线传感器网络、网络化控制等技术融合基础上的新一代系统,被认为是当今信息技术领域的前沿交叉研究方向,具有重要而广泛的应用前景。CPS 应用涵盖的范围小到智能家居,大到工业控制系统乃至全国性的智能交通、智能电网系统等。更为重要的是,这种涵盖并不仅仅是现有嵌入式设备的简单互联,而是要催生出计算、通信、控制一体化,具有协同、融合、自治的新型复杂系统,使系统更加可靠、高效、实时协同。

近年来,CPS 不仅成为国内外学术界和科技界研究开发的重要方向,也将成为工业界优先发展的重要领域。CPS 系统技术将在国家实施工业化与信息化融合,提升优势传统产业核心竞争力、发展新兴战略产业等方面发挥重要作用,同时也将提升我国信息技术自主创新能力,促进新型工业化核心竞争力的形成,以推动相关产业更好更快地发展。

2.4 嵌入式系统应用

嵌入式系统涉及消费电子、通信电子、航空航天电子、智能交通、工业控制、医疗仪器、地震监测等众多应用领域,产业规模巨大。由于口径不一致,不同角度给出的统计数据差别较大。嵌入式微处理器及相关芯片的半导体厂商的市场销售数据可以从一个侧面反映嵌入式系统产品的总体市场规模。根据高德纳(Gartner)的最新统计数据^[1],2011 年全球半导体销售额达 3 068 亿美元,较 2010 年增长 54 亿美元,涨幅 1.8%。其中排名前十的公司分别为 Intel、三星、东芝、德州仪器、瑞萨电子、高通、意法半导体、海力士半导体、美光科技和博通。在各主要器件中,微型元件(Microcomponent)市场表现最好。由于受微处理器发展的带动,2011 年微型元件的市场销售额增长率为 14.2%。通常嵌入式系统产品价格是所用元器件总价格的 10~20 倍,且嵌入式系统产品增长与元器件市场的增长总体一致。由此可见,每年嵌入式系统产品的全球市场规模达数万亿美元,且一直保持高速增长的态势。

3 嵌入式系统的研究热点

嵌入式系统研究涉及计算机、电子、通信、控制,以及航空、电力、汽车、机械等众多学科。本节将从嵌入式微处理器、嵌入式操作系统、软硬件协同设计、电源管理、信息物理融合系统、嵌入式系统应用等方面介绍嵌入式系统领域的当前研究热点。

3.1 嵌入式微处理器

近些年,嵌入式微处理器的性能迅速提高,Intel 公司的 Atom 处理器 Z670 主频达

1. 66GHz, ARM 公司的 Cortex-A15 内核主频达 2GHz, 已接近台式机的 CPU。提高主频、降低功耗、优化性能是嵌入式微处理器研究的主要目标。当前的热点包括多核处理器、可重构处理器、软核处理器等。

(1) 多核处理器

提高微处理器性能的两个途径是提高主频和改进体系结构。在过去三十年中, 提高处理器工作频率、改进数据和指令的并行性, 一直是提升微处理器性能的有效途径^[2]。然而, 散热问题制约着微处理器时钟频率的增加, 并且基于单核的数据和指令并行技术已非常成熟, 优化空间有限。

借鉴 CPU 中的多核技术来提高嵌入式微处理器的性能成为新的发展方向。多核处理器就是将多个处理器核封装在 1 个芯片中, 每个处理器核包括计算单元和高速缓存 (Cache)^[3], 通过并行执行多个任务, 改进总体性能^[4]。通常每个处理器核可以独立工作, 任务少时可以关闭部分核, 从而节省功耗。根据不同应用需求, 多核处理器有不同的实现方式, 包括异构多核、同构多核和混合多核三种。在同构多核架构中, CPU 中所有的处理器核完全一样, 执行时将计算复杂度高的应用分拆开, 然后在多个核上并行执行^[5]。同构多核处理器设计简单, 验证时间短。异构多核架构由不同结构的处理器核构成, 它们具有不同的特性, 处理应用中的不同任务。混合架构中包含多个结构相同和结构不同的处理器核^[6]。嵌入式系统中常采用异构多核和混合多核处理器。

TI 公司 2011 年发布的 OMAP5X 是典型的嵌入式多核处理器, 它包括 2 个相同的 ARM Cortex-A15 核、1 个 C64X DSP 核以及 1 个专用的图像处理器, 主要应用于智能手机等嵌入式智能系统。

嵌入式多核处理器在设计过程中有两个方面的挑战, 一是如何保证处理器核之间, 以及处理器核与内存之间快速进行数据交换; 二是如何减少不同处理器核访问外设发生的冲突及由此引起的延迟。将网络通信的原理和方法应用于 SoC 中 IP Core 之间通信的片上网络技术 NOC (Network on a Chip) 是解决上述问题的有效手段^[7]。

(2) 可重构处理器

与通用处理器相比, 面向应用定制的专用处理器由于采用专有硬件单元和删除了无关部件, 在特定工作环境下具有更高的性能和更低的功耗。但专用处理器缺乏灵活性, 应用发生变化时, 必须重新设计, 因此周期长、成本高。可重构处理器技术可以根据应用的变化重新配置处理器结构, 扩展指令, 既具有专用处理器高性能、低功耗的特点, 又具有通用处理器应用的灵活性。

可重构处理器由处理器内核和具有处理能力的功能单元 (PE) 组成, 通过将数据下载到芯片内部的 PE, 控制内部互联总线, 配置内部各单元之间的连接方式, 实现所定制的功能。根据重构时系统的状态, 重构分为静态重构和动态重构两种。前者先断开已有的电路功能, 然后重新将存储器中的数据下载到 PE 中, 改变目标系统逻辑功能; 后者则在改变电路功能的同时仍然保持电路的动态接续。动态重构具有实时性, 是可重构处理器的主要发展方向^[8]。

最简单的重构方式是将不同状态配置数据分组, 并保存在芯片内的存储模块中, 通

过将新的一组数据写入功能单元的配置空间,控制内部单元及总线间的重建连接,以实现新的功能。XPP、D Fbris 和 S5 使用这一种方式^[9, 10]。另一种动态配置的方式称为多线索 (Multi-context) 配置。这种方式下,所有组配置数据中与各个 PE 相关的数据存放在对应 PE 的存储单元中,用线索号 (Context Number) 表示不同的组。只要将线索号在整个芯片中广播,PE 就可用它作为该组配置数据的指针,从存储单元中获取一组数据,对 PE 进行配置实现新的功能。整个过程只需一个时钟周期^[8]。

实时自适应可扩展处理器是动态可重构处理器的一种形态。可扩展处理器通过开放的指令集架构,使用户通过自定义指令调用系统内定制的单元,实现特定应用功能^[11]。面向程序员的自定义指令为处理器功能的扩展提供了灵活性。目前市场上主要的可扩展处理器产品有 Xtensa、LX、ARC configurable core、OptomoDE 等。其中 Xtensa 系列产品在 2011 年的出货量超过 10 亿片,可见动态可重构处理器的重要地位。

动态可重构处理器是嵌入式微处理器的一个极具前景的发展方向,目前的主要挑战是如何根据应用程序实时、自动地自定义指令并实现重构,以及如何实现对程序员透明的自动扩展。

(3) 软核处理器

软核处理器是基于 IP 的系统设计的基础。随着嵌入式系统复杂度的不断增加,传统的从元件开始的设计方法已不可取,用已设计并经过验证的 IP 核来集成一个新的系统,不仅可以加快设计速度而且能够保证质量。

软核处理器用硬件描述语言 (HDL) 完全描述一个处理器的结构和行为,使用它可以使嵌入式系统的设计更方便、灵活。目前主要的商用软核处理器包括 Nios II、MicroBlaze 和 Xtensa。它分别由 Altera、Xilinx 和 Tensilica 公司发布,其中前两个软核处理器用于 Altera 或 Xilinx 公司 FPGA 平台上的系统设计,而 Xtensa 灵活性更强,可用于不同平台的系统设计。三种软核处理器的主要参数如表 1 所示。

表 1 不同软核处理器性能对照表

参数 产品	Nios II	MicroBlaze	Xtensa XL
最大频率	300MHz	300MHz	1GHz
指令集	32 RISC	32 RISC	32 RISC
缓存	最高达 64K	最高达 64K	最高达 64K
浮点功能	IEEE-754	IEEE-754	IEEE-754
流水线	6	3	5
自定义指令	最高达 256	无	无限制
寄存器	32	32	32 或 64
实现手段	FPGA	FPGA	FPGA/ASIC

开源软核是开源社区免费提供的 IP 处理器内核,主要有 UT Nios、OpenSPARC、LEON、LEON2、LEON3 和 Open RISC1200,这些处理器一般采用 32 位指令,采用多级流水

线和缓存技术, 拥有 32 个通用寄存器^[12]。

3.2 嵌入式操作系统

嵌入式操作系统的研究热点主要集中在: 操作系统的实时性、安全性, 以及操作系统对可重构、传感器网络的支持。

(1) 嵌入式实时操作系统

实时系统已广泛应用于航空航天、工业控制、汽车电子等领域。对于这些系统而言, 实时性是最为关键的系统性能之一。目前很多嵌入式系统采用了实时操作系统。但如何设计出满足高可靠性要求的实时操作系统挑战较大, 一直是嵌入式操作系统的研究重点^[13]。

实时操作系统主要有 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、VxWorks 以及 QNX 等。Vxworks 是美国风河 (Wind River) 公司推出的一种嵌入式强实时操作系统。自 20 世纪 80 年代问世以来, 不断推出升级版本。LynxOS 是一个微内核硬实时操作系统, 它提供任务调度、底层内存管理、中断处理等基本功能, 可以小到 28K。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统是一个源代码公开的实时操作系统, 其可靠性、实时性足以胜任很多要求苛刻的嵌入式系统, 现已广泛应用于医疗器械、工业控制等领域。

(2) 高可信嵌入式操作系统

一个可信赖的操作系统是保障嵌入式系统安全、可靠的根基。随着嵌入式系统市场逐步扩大、应用越来越复杂, 安全和隐私问题日益突出, 满足一种“更高级别”安全需求的高可信嵌入式操作系统逐步成为研究热点^[14]。

近些年, 各大厂商纷纷推出高可信嵌入式操作系统, 如 Green Hills 公司推出的 INTEGRITY 和 INTEGRITY-178B ARINC-653-2 平台^[15], Wind River 公司推出的 VxWorks 653 Platform 2.2, Lynx 公司推出的 LynxOS-SE 系统, 以及国内的麒麟安全操作系统、途胜安全操作系统等。

(3) 嵌入式操作系统对可重构、多核的支持

可重构和多核是当前嵌入式微处理器的主要发展方向, 因此, 研究嵌入式操作系统对可重构和多核的支持成为当前的热点问题^[16]。国外关于这方面的研究比较活跃, 如日本东京大学、新加坡国立大学、新加坡南洋理工大学、澳大利亚昆士兰大学、比利时布鲁塞尔大学等。

(4) 嵌入式操作系统对传感器网络的支持

无线传感器网络是当前备受关注的、多学科交叉的前沿研究领域。无线传感器网络的节点设备由于具有计算能力有限、带电量小、体积小、内存有限等特点, 对嵌入式操作系统提出了更为苛刻的要求, 因此, 研究嵌入式操作系统对传感器网络的支持成为当前的热点问题^[17]。国外关于这方面的研究包括 UC Berkeley 的 TinyOS^[18]、UCLA 的 SOS、科罗拉多大学的 MANTIS OS^[19]、首尔大学的 SenOS^[20]、CMU 的 Nano-RK^[21] 以及弗吉尼亚大学的 t-kernel^[22] 等。

3.3 软硬件协同设计

随着计算机和电子通信技术的发展,嵌入式系统产品的更新周期越来越短。嵌入式系统设计涉及软件设计、硬件设计以及系统综合等方面,协调过程复杂、开发周期较长。为了适应快速变化的市场,及时开发出满足用户需求的高质量产品,需要研究嵌入式系统设计方法。

嵌入式系统设计面临以下几个方面的挑战:1)如何在功耗、计算能力和系统资源受限的情况下提高系统性能?2)如何在软件与硬件之间进行功能划分以实现系统的高性价比?3)如何缩短系统开发周期并同时保持产品的质量?4)如何在复杂系统中保证事件的实时响应?

为解决上述问题,嵌入式系统设计方法一直在改进和演化^[23]。20世纪80年代,嵌入式系统硬件和软件各自独立进行设计。这种分开设计的方法使得软、硬件设计过程之间缺乏交互和协同,软、硬件设计任何一方的错误均需要到系统综合阶段才能发现,风险很大。为了克服这一风险,出现了软硬件协同设计方法,以便在系统设计的整个周期中保持软硬件设计过程间的交互和协同。

随着嵌入式软件复杂度的不断增加,在嵌入式软件设计中引入软件工程思想成为发展方向之一。通用软件工程中的结构化程序设计方法、面向对象程序设计方法已经在嵌入式软件设计中得到广泛应用,当前研究的一个热点是将模型驱动、构件化思想应用到嵌入式软件设计中。采用构件化技术可以大大提高嵌入式软件的可定制、可裁剪性;采用模型驱动的思想,既可以提高嵌入式软件设计的效率,又能够方便地进行可靠性验证。

文献[24~27]中提到的 PECOS、VEST、Metropolis、Ptolemy、DESERT 等在基于模型的构件化设计与验证方面取得了重要进展。飞利浦公司针对消费电子类的嵌入式系统提出了 Koala 组件模型,ABB 等公司提出了 PFCOS 组件模型,美国风河公司提出了 VxD-COM 分布式组件模型。

基于模型驱动的软硬件协同设计方法,使嵌入式系统设计者从纷繁的技术细节中解脱出来。在这种方式下,采用系统模型语言对系统进行软硬件建模和协同仿真,例如采用 UML (Unified Modeling Language) 对系统的结构和功能进行描述,然后利用自动工具生成软件源代码和硬件逻辑设计,再进行系统综合与验证。美国机动车工程师学会提出了 AADL (Architecture Analysis & Design Language) 建模语言。国外针对 AADL 的研究已经取得了一些成果,如卡耐基梅隆大学在 Eclipse 平台上提供了一个用于 AADL 模型编辑、编译和前端分析的集成开发环境。欧洲 Ellidiss Software 公司开发的 stood 工具也是一个开源的 AADL 建模工具。法国 TELECOM ParisTech 公司开发了一个模型处理工具 ocarina。

3.4 电源管理技术

电源管理的目标是延长电池的使用寿命。对智能终端、传感器节点等靠电池供电的

嵌入式系统来说, 电池的使用寿命是一个非常重要的设计指标, 它直接影响嵌入式系统的实用性和用户体验。电源管理技术是指在不影响系统性能和功能的情况下, 有效地将系统能源分配给系统的不同组件, 从而减少系统总体功耗的方法。

电源管理技术研究对嵌入式系统至关重要, 同时也比较复杂, 它不仅涉及微处理器、外围电路及元器件, 还与指令集、操作系统以及应用程序密切相关。

电源管理可分为静态和动态两种。静态电源管理将系统状态分为不同的功耗状态, 通过改变功耗模式优化嵌入式系统的功耗。常见的静态电源管理系统状态有 On、Stand-by、Suspend、Hibernate。动态电源管理是一种通过系统运行时动态重配置最少数量的活动组件, 使这些活动组件的最低负荷达到所要求性能的技术。

嵌入式系统的电源管理可以从硬件和软件两个方面进行优化。硬件优化主要通过优化器件的结构和制造工艺, 以减少单个器件的功耗。软件功耗优化的常用方式有: 1) 源程序结构功耗优化, 即在保持源程序功能不变的前提下, 对源程序的结构、执行顺序、数据存储过程和方式进行调整, 找到功耗较低的工作状态。2) 使用中断方式的功耗优化。为了降低功耗, 在处理器空闲时让微处理器处于深度休眠状态, 需要时通过外中断方式唤醒微处理器。另外, 在程序进行状态检测时用中断替代查询以降低处理器的功耗。3) 使用软件控制器的功耗模式进行优化。微处理器以及各种接口控制器都有不同的功耗模式, 在系统设计过程中利用这些功耗模式, 可以降低系统的功耗。

电源管理技术是嵌入式系统的一个研究热点, 当前的主要方法包括:

(1) 基于预测的方法

基于预测的方法是指根据系统组件过去的历史对其未来行为进行预测, 可分为静态预测方法和自适应方法两类。静态预测方法包括固定超时预测、组件关闭预测和组件唤醒预测。最常见的预测策略是固定超时预测, 通过组件过去经历的空闲时间来预测当前的空闲持续时间。组件关闭预测方法是指组件空闲时将其关闭的方法, 组件唤醒预测方法是指组件空闲时间片过后唤醒组件的方法。

静态预测不能适应系统的动态变化, 因此出现了自适应方法。文献[28]设置一组超时值, 每个超时值跟一个索引关联以表示该值的有效性。文献[29]设置一组候选超时列表, 每个值分配一个权重, 实际超时值由所有候选值及其权重的加权得出。文献[30]提出了一种在线关闭策略, 预测的超时值等于带权重的最近过去超时值和最近预测值之和。

(2) 随机控制方法

基于预测的方法难以适应系统随机模型。首先, 预测是基于两个状态的系统模型, 而现实生活中的系统往往有多个状态; 其次, 预测是启发式的, 只能通过比较模拟来计算最优解, 这在多参数状态下比较困难。此外, 预测的目标是为了达到最小功耗, 但却导致不能很好地控制性能损失。随机控制方法能较好解决上述问题, 它将上述不确定条件下的优化问题转化为明确的公式表达。例如, 文献[31,32]将系统视作可控制的马尔可夫过程 (Controlled Markov processes), 并对其建模。文献[33]中马尔可夫模型包括服务申请者、服务提供者、电源管理者和代价标准。

随机控制方法可分为静态方法、自适应随机方法和随机学习混合状态机等。静态方

法将服务请求者和服务提供者组成全局的可控马尔可夫链,以获得一个全局性的受控马尔可夫链,将问题转换为线性规划(LP)问题,从而达到最小功耗下的最佳性能;自适应随机方法^[34]由策略参数化、参数学习、参数修改三个阶段组成;随机学习混合状态机由离散状态、自动机状态、连续动态变量和控制每个状态的连续变量的差分方程组成。用混合状态机对动态电源系统建模,并设计随机学习混合状态机的反馈学习算法。

此外,考虑到设备反应时间的分布、设备不同状态的功耗和不同状态转换的能量消耗,出现了一些其他随机模型,如离散时间马尔可夫链 [Paleologo98]、连续时间马尔可夫链^[35]、基于 Petri 网的随机模型^[35]、有限状态机的随机模型^[36]等。

(3) 基于应用的系统级电源管理方法

近年来,随着片上多核系统、传感器网络等的发展,出现了一些新的电源管理方法,如基于应用的片上多核系统电源管理方法、无线传感器网络的动态电源管理方法^[37]。

3.5 信息物理融合系统

CPS 具有计算过程和物理过程深度融合的特征,物理过程和计算过程之间通过传感器、作动器、计算软件和网络通信等部件构成反馈环。在该反馈环中,物理过程和计算过程间相互影响和作用。CPS 与传统嵌入式系统相比,具有以下几个显著特点:1) 异构混成性:连续物理过程与离散计算过程异构混成,运行环境异构集成。2) 系统行为动态不确定性:CPS 中的物理过程具有并发性以及行为不确定性,系统无全局统一状态、网络通信具有不确定。3) 时空依赖性:CPS 具有典型的时空特性,事件的响应不仅和时间相关,也和空间信息密切相关,系统设计的正确性依赖于时空特性。4) 系统开放性:具有网络多样性(无线网络、有线网络、领域专用网络等),系统构件多样性(物理构件、计算构件、控制构件、网络构件)等。5) 性能需求多样性:不少 CPS 属于任务关键或安全关键应用,具有鲜明的时间敏感性、运行可靠性以及行为可信性等需求。

CPS 的上述特性给系统设计和实现带来了以下理论与技术方面的挑战。

1) 为了刻画 CPS 的计算过程与物理过程的交互与融合,需要建立系统的结构模型与功能模型。模型构建中需要深化计算模型的物理化、物理模型的信息化,需扩展显式的时间与空间属性,并研究和确定合适的模型集成框架,实现多模型的有机集成和一体化建模。

2) 为了适应 CPS 的强时空性、可预测性以及强交互性等特征,需要研究面向时空特性的基于模型的 CPS 软件设计方法,安全攸关场景非确定性的预测、判定和控制方法,面向时空特性的 CPS 系统监控信息实时采集与在线分析方法,面向非确定性预测和控制的主动监控方法与资源调度策略,以及基于监控驱动的 CPS 系统演化技术。

3) CPS 实时性、可靠性、安全性等非功能特性比一般的嵌入式系统更为复杂,相关参数与物理过程的关系更加紧密,与通信延迟直接相关,所建模型如何支持这些非功能特性的分析是新的技术问题。

4) CPS 具有鲜明的领域特点,不同领域的 CPS 应用系统具有不同的具体需求与特

点,其模型构建、分析方法以及实现,既要考虑多领域的公共特点,也要具有面向具体领域的扩展与定制能力,同时为了验证技术原理,需要搭建实验床。

3.6 嵌入式系统应用

随着计算机和电子通信技术的迅猛发展,智能电网、智能家居、汽车电子、智能手机等嵌入式系统应用技术得到越来越广泛的关注,成为研究热点。

(1) 智能电网

智能电网技术起源于早期的电子控制、计量和监测等技术。2000 年启动的意大利 Telegestore 系统是最早的商业智能电网系统,该项目总投入 2.1 亿欧元^[39]。2003 年,美国德克萨斯州奥斯汀市开始构建智能电网系统,其目标是支持 50 万个设备,为 1 亿消费者和 43 000 家企业提供服务。继意大利、美国之后,加拿大、澳大利亚、德国、葡萄牙、荷兰等国家纷纷开始建设和部署智能电网。

智能电网通过建立一个数字化信息网络系统将电力系统中的各种电子、电气设备和耗能设施连接起来,通过智能化控制手段,实现供电的精准调度,提高用电效率和供电安全水平。智能电网的快速发展引起了各个相关领域的广泛研究,其中嵌入式系统在智能电网中发挥着重要的作用,直接关系到智能电网中可再生能源生产和转换^[40]、测量和监测^[41, 42]、本地和远程控制^[43]等关键问题的解决^[44]。

(2) 智能家居

智能家居是指通过网络连接家居内的各种电子电器设备,并由个人电脑或通过远程网络进行控制和监测,从而实现家居环境、各种家电和系统的相互协调,为人们提供一个舒适、节能和安全的家。随着微处理器技术的不断发展,微处理器已经被嵌入到了我们熟悉的各种家电、终端和传感器中,并使得这些物体具有感知环境和执行命令的能力。同时,网络通信和智能控制技术的不断发展,使得用户能够更加方便、有效地控制这些设备。

智能家居涉及人们日常生活的各个方面,目前广受关注的应用包括:健康监测、家居安全和能耗控制^[45]。智能家居能够提供自动的健康监测、评估和干预。由于人体运动模式的变化和一些病症(如老年痴呆症)之间有紧密联系,因此可以通过监测人体的运动来对人体健康状态进行估计,并在出现异常时及时报警^[46]。家居作为人们的生活场所,安全是最基本的需求。智能家居系统通过多种传感器(运动传感器、压力传感器、视觉传感器等)来监视家居环境,实时地对各种异常行为(如非授权的侵入行为、煤气泄漏、火灾等)进行检测并报警。监测家中的能耗也越来越重要,在大多数国家,家用能源消耗已占总消耗量的 40% 以上。智能家居已成为智能电网一个不可或缺的组成部分,通过智能控制灯光、空调及其他各种家用电器,并实时反馈用电负荷及电量需求,从而更有效地利用电能^[47]。

(3) 汽车电子

汽车电子的出现始于 20 世纪 60 年代。1967 年,集成电路元件被应用到汽车中。

1971 年,微型计算机首次被用于引擎点火系统的正时控制中(美国通用汽车公司的 MIS-AR 车)。1978 年,美国对汽车排放制定了严格的控制标准,美国通用汽车公司开始使用基于微处理器的引擎控制系统(Engine Control Unit, ECU)。在此之后,汽车中的其他子系统也相继开始采用各种传感器和电子控制器,实现了自动变速、制动和转向等功能。1987 年,日本丰田公司的皇冠轿车上开始使用车载 GPS 导航装置,这开启了车辆信息系统化的时代。1991 年,平均每辆汽车消耗电子产品的费用只占到整车的 10%,1998 年则接近 15%,2003 年提高到 20%,到 2011 年已提高到 30% 以上。

目前,电子技术的应用几乎已经涵盖汽车的所有系统,包括:引擎控制系统、变速控制系统、底盘系统、下坡行驶辅助系统、紧急刹车系统、盲点监测系统、自动导航系统、和多媒体系统等,一些豪华轿车的电子产品占到整车成本的 50% 以上。汽车电子技术的应用一方面有利于节能减排,提高汽车的动力性、经济性和安全性,改善汽车行驶的稳定性 and 舒适性;另一方面,随着汽车电子系统的日渐复杂,也带来了大量的问题和挑战,仅 2010 年,就有 2000 多万辆汽车因为各种电子系统缺陷而被召回^[48]。

(4) 智能手机

近年来,智能手机等具有通信能力的嵌入式智能系统发展迅速。智能手机作为移动互联网的主要接入终端之一,其地位已经不亚于 PC 对传统互联网发展的作用。iResearch 咨询公司统计结果表明,2011 年全球智能手机出货量达 4.91 亿台,超过了 PC 出货量(3.53 亿台),较 2010 年增长了 61%。

当前,智能手机的研究热点包括:多媒体与通信技术整合的 SoC、对嵌入式多核处理器的支持、开放平台的差异化和应用程序框架、GUI 与人机交互、开放平台带来的安全问题等。

4 我国在嵌入式系统领域的研究现状

4.1 国内嵌入式微处理器的研究现状

在国家和地方科技计划项目以及市场的推动下,国防科技大学、北京大学、清华大学、浙江大学、航天部 771 研究所等一批科研机构以及方舟科技、君正科技、苏州国芯、华为海思、新岸线等一批企业推出了拥有自主知识产权的嵌入式微处理器产品。一些产品已经在嵌入式系统中得到规模应用。

国防科技大学是国内最早开展嵌入式微处理器研究开发的单位之一,早在 2001 年就设计了 32 位 RISC 处理器——银河 TS-1 嵌入式处理器,后来通过结构改进和性能提升发展成高性能的嵌入式处理器 Estar。近年来,在国家自然科学基金面上和重点项目资助下开展了异构多核 SoC 系统设计研究^[49],2011 年设计了包含一个 32 位 RISC 嵌入式处理器核(Estar)和两个 SIMD 多媒体协处理器的异构多核处理器,并用 0.13 μm 工艺实现了

流片。北京大学微处理器研究中心研发的众志 CPU PKUnity-3 系统芯片采用 32 位 UniCore-II 微处理器体系结构, 主频为 600MHz ~ 1GHz, 内部集成 USB2.0 OTG 控制器、IDE 控制器、10M/100M/1000M 以太网 MAC、DDR-II 存储器控制器和 AC'97 控制器等功能部件, 具备 MPEG1/2/4 和 H.264 编解码等多媒体加速能力。

JZ4770 是北京君正公司于 2011 年推出的一款 32 位 MIPS 处理器, CPU 主频达 1GHz, 支持 SIMD 和浮点指令, 集成了 2D 和 3D 图形加速功能, 能实现 1080P 编解码。它支持 Android、Linux、WinCE、RTOS 等多种操作系统, 支持 WiFi/3G/BT/TV 模块。其主要参数和性能能够满足多媒体和网络设备的需求。新岸线公司最近推出的 NS115 系统芯片 (SoC) 采用 32 位的 ARM Cortex-A9 处理器核, 主频达到 1.5GHz, 集成了 2D 和 3D 图形加速功能, 支持 500 万像素双摄像头和双屏显示, 同时还支持 HDMI Tx 1.4、SD 3.0、SDIO 2.0、MMC/eMMC 4.41、USB2.0、I2C、SPI、UART、I2S 等接口。其性能和功能已达到国外同类产品的水平。

可见, 我国在面向应用的 SoC 方面的研究紧跟国际水平, 有些产品已得到了规模应用。但总体上来说, 嵌入式微处理器的研究水平与国外相比还有较大差距, 特别体现在多核、可重构、低功耗电源管等方面。国防科技大学、清华大学、浙江大学等单位已开展多个项目进行多核技术和低功耗、可重构方面的研究。国家自然科学基金 2011 年部署了重点项目“片上多核处理器验证理论与关键技术”。

4.2 国内嵌入式操作系统的研究现状

近几年, 国内涌现出一批拥有自主知识产权的嵌入式实时操作系统, 如凯思公司的“女娲 Hopen”操作系统、科银公司与电子科技大学联合研制的 Delta OS (道系统)、中科院北京软件工程研制中心研制的 CASSPDA 以及浙江大学自行研制开发的嵌入式操作系统 Smart OS 等。科银公司的嵌入式软件开发平台 DeltaSystem 不仅包括 DeltaCore 嵌入式实时操作系统, 而且还包括 LamdaTools 交叉开发工具套件、测试工具和应用组件等。

在国家“十二五”科技规划中, 可信计算被明确列为重点任务。国内对可信嵌入式操作系统的研究一直比较重视, 如“麒麟”安全操作系统、“途胜”安全操作系统均已达到国标第四级安全标准。2011 年针对 Android 操作系统安全的研究引起了国家“核高基”重大专项的高度重视, 专门设置课题开展产学研联合攻关。国家自然科学基金“可信软件基础研究”重大研究计划在 2011 年也部署了“可信嵌入式软件系统试验环境与示范应用”集成项目。

国内关于支持可重构和多核的嵌入式操作系统的研究目前还处于起步阶段, 国防科技大学、复旦大学、中科院计算所以及西安电子科技大学等单位已做了一些工作。国内关于无线传感器网络操作系统方面的研究还比较少, 目前较有代表性的工作有中科院计算机所的 GOS 和浙江大学的 Senspire OS。

4.3 国内软硬件协同设计的研究现状

国内一些高校和研究机构对软硬件协同设计方法开展了研究,取得了一些成果。华东师范大学的栾静等^[50]采用 DCDM (Distributed Co-Design Model) 模型描述系统的基本结构和行为,并进行功能验证,然后利用 SystemC 实现平台相关的建模,并完成了一款电话机原型系统的设计与验证;西北工业大学计算机学院扩展了 AADL 的网络化嵌入式系统结构设计以及可靠性、安全性 (Safety) 等非功能属性形式化分析能力;国家数字交换工程中心的马钊坤等^[51]对 UML 进行扩展,并成功应用于 SoC 的建模与验证。文献[52]研究了软硬件协同验证方法及其在 FPGA 芯片测试中的应用,提出并验证了一种 SoC 软硬件协同验证系统的四层架构模型和软硬件通信协议。

国内企业近几年也完成了一些拥有自主知识产权的软硬件协同设计工具。例如,由科银京成公司开发的 LambdaPro 工具中加入了自主研发的模型验证工具、模型开发工具和其他的第三方工具,实现了一个包含建模、仿真、验证、代码生成、测试等嵌入式软件开发全过程的开发平台。

4.4 国内在动态电源管理方面的研究

我国在电源管理研究上已取得一些进展。如文献[53]提出了一种嵌入式系统静态电源管理方法,在动态电源管理方面提出了动态自适应策略,包括指数平均自适应算法和分类滑动窗口自适应算法;文献[54]设计并实现了一种基于嵌入式 Linux 的电源管理方案;文献[55~57]提出了一种通过软件优化系统功耗的方法。

国内企业在电源管理芯片市场进行了积极的探索^[58]。如深圳长运通光电技术有限公司设计了去源化 LED 驱动解决方案;深圳华芯邦科有限公司设计了移动电源控制管理芯片;深圳芯智汇科技有限公司开发了便携式电子产品 PMU。

4.5 国内在信息物理融合系统方面的研究

CPS 的研究已引起国内学术界和工业界的高度关注。2008 年在北京召开的 IEEE 嵌入式研讨会上,信息物理融合系统被列为今后嵌入式系统技术发展的重要方向。2010 年,国家 863 计划信息技术领域专家组在上海举办了信息物理融合系统 (CPS) 发展战略论坛,对这项技术给予了高度关注。信息物理融合系统 (CPS) 的研究不仅得到国家自然科学基金重点项目和国际合作项目的支持,而且列入了 2010 年或 2011 年的国家重点基础研究发展计划、国家重大科学研究计划和国家高技术发展计划中。这些项目的研究内容涉及 CPS 建模理论、体系结构和设计方法, CPS 系统的可信性、有效性、协同性和安全性,以及 CPS 的应用示范。

CPS 研究比较有代表性的工作是华东师范大学何积丰院士领导的团队,在 2010 年国

国家自然科学基金国际合作项目“信息物理融合系统的基础研究”和 2011 年国家 863 计划先进计算主题“十二五”重点项目“面向信息-物理融合的系统平台”的支持下,与国防科技大学、清华大学、西北工业大学、浙江大学多家科研机构合作开展 CPS 的研究,取得了多项成果^[59, 60]。

4.6 我国在嵌入式系统应用方面的研究

在我国,嵌入式系统在汽车电子、工业控制等行业的应用起步较晚、基础比较薄弱,目前主要还是引进和借鉴国外先进技术,自主研制方面相对比较落后。但在一些新型嵌入式系统应用领域,如智能电网、智能家居等,则处于国际领先地位。一方面,我国正处于发展建设阶段,相比于发达国家(如美国),在构建和实施一些新的技术方面(如智能电网和智能家居)成本较低。另一方面,我国政府越来越重视对这些领域的投资和资助。

(1) 智能电网

清华大学于 1999 年提出了“数字电力系统”的概念,2005 年国家电网公司实施“SG186”工程,开始进行数字化电网和数字化变电站的框架研究和示范应用;同年,中国南方电网委托清华大学开展“数字南方电网”研究;2007 年 10 月,华东电网正式启动了智能电网可行性研究。2009 年 2 月,华北电网稳态、动态、暂态三位一体安全防御及全过程发点控制系统在北京通过专家组的验收。2010 年 6 月,国家电网公司正式对外发布了《智能电网关键设备(系统)研制规划》和《智能电网技术标准体系规划》。2012 年 5 月,科技部发布了《智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划》。

(2) 智能家居

智能家居在我国的起步比较晚,但是发展却非常快,相关生产厂家和产品非常多,遍布智能家居生产的各个环节。在外观和产品质量上,与国外产品还有差距,但有些产品,比如家庭智能终端,联想、海尔、TCL 等厂家已生产出外观、功能不逊于国外品牌的产品。自 20 世纪 90 年代末智能家居控制系统引入国内以来,经过十余年的孕育与发展,我国智能家居产业发展迅速。2010 年 3 月,ISO/IEC 接受由我国家电生产商发起成立的“闪联标准”正式成为国际标准,标志着我国智能家居标准得到国际上的认可。到 2011 年已经涌现出海尔 U-home、上海索博等数十家智能家居系统厂商。

(3) 汽车电子

2004 年以来,随着汽车工业的飞速发展,我国汽车电子产业进入快速发展时期,汽车已经由普通的机械产品逐步向机电一体化方向演化。电动汽车(含混合动力车)和智能汽车的发展,以及移动网络、数字电视、卫星导航等 IT 技术在汽车上的应用,使得电子装置占整车的价值比不断提高。《2011 中国汽车产业发展报告》报告认为,下一个十年,汽车产业全球化发展的趋势没有改变,中国必须继续坚持走“在开放中确立大国竞争优势”的发展道路,在坚持开放的同时推动自主创新和自主品牌的发展。

(4) 智能手机

为推动智能手机等移动互联网智能终端产业的发展,2008 年底,科技部、工信部正式启动了“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项,侧重移动应用软件和智能终端整机研发。“十二五”期间安排了 5 个课题研究,分别是“LTE 及 LTE-Advanced 研发和产业化”、“移动互联网及业务应用研发”、“新型无线技术”、“宽带无线接入与短距离互联研发和产业化”以及“物联网及泛在网”5 个研究课题。2011 年,“核高基”重大专项也部署了“移动智能终端操作系统研发专题”,并安排了“面向移动智能终端的芯片 IP 核设计”和“面向移动互联网的 Web 中间件研发及应用”2 个研究课题。

在国家科技重大专项计划的支持下,国产智能手机近两年得到了快速发展。2012 年 3 月在西班牙巴塞罗那举办的移动通信大展上,华为公司推出了采用自主研发 1.5GHz 四核处理器的 Ascend D 系列智能手机。中兴公司发布了采用 1.5GHz 四核 Tegra AP30 处理器的超薄智能手机 Era。这两款智能手机的推出标志着拥有价格优势的国产智能手机正开始进入主流市场,并将全面开启国产智能手机的多核时代。

5 嵌入式系统的发展趋势和展望

5.1 嵌入式系统技术发展趋势

嵌入式系统将朝着高性能、低功耗、智能化、网络化和高可信等方向发展。

1) 高性能。嵌入式微处理器技术的发展以应用为导向,不同应用领域的需求差别很大。除了多核处理器以外,超低功耗处理器、混合 SoC 以及面向应用的可重构处理器等成为高性能嵌入式微处理器技术的发展方向。此外,随着微处理器技术的发展,不同类型的微处理器架构出现相互融合、借鉴的趋势。例如,MIPS 和 ARM 指令有许多相似之处;X86 和 ARM 均扩展了 DSP 运算指令;而随着 MCU 计算能力的增强以及面向应用的特性,其与 SoC 的边界日益模糊。

2) 低功耗。低功耗涉及制造工艺、软硬件设计、电源管理等方面。低功耗的一个直接目标是可以延长电源寿命。其重点是研究嵌入式微处理器制造工艺、软硬件协同设计方法和嵌入式操作系统等层面,综合考虑低功耗设计和电源管理技术,是嵌入式系统研究的一个重要方向。

3) 智能化。从智能终端到智能家庭、智能城市、智能电网等,嵌入式系统应用技术正朝着智能化的方向发展。这些应用采用各种传感器和其他嵌入式设备收集信息,然后利用这些信息,为人们提供更加智能、有效的服务。

4) 网络化。要实现智能化,嵌入式设备首先要能够通过传感器网络感知当前环境的信息,然后通过物物互联、物人互联或是直接和互联网相联,最终实现信息物理融合系统的发展目标。

5) 高可信。航天、工控、通信等关键应用对嵌入式系统提出了安全、可靠等要求, 基于可信计算理论和技术, 从软、硬件层面和系统整合等方面设计并实现高可信嵌入式系统是当前的一个重要发展方向。

5.2 嵌入式系统产业展望

嵌入式系统在我国拥有巨大的发展潜力和市场需求。近年来, 我国嵌入式系统的应用需求增长迅速, 在通信、网络、消费电子、工业控制、交通、医疗和航空航天等领域的需求尤为突出。我国嵌入式系统产业的三大主要领域是: 消费电子类嵌入式系统、通信类嵌入式系统和工业控制类嵌入式系统。其中消费电子领域占据着最大的市场份额, 根据市场研究公司 GfK 和消费电子产品协会 CEA 的预计, 2012 年, 全球消费电子产品的销售额将达到 1.038 万亿美元, 较 2011 年增长 5%。而中国消费电子产品市场占全球市场的比例约占 15%。这主要得益于我国强大的电子信息产品制造业和巨大的消费电子市场, 国内的代表性企业有海尔、联想、华大、华虹等公司。而通信类嵌入式系统主要的生产企业有华为、中兴、大唐等通信公司, 这些企业依托我国强大的信息通信业和历经二十多年的不断创新, 已发展成为在国际上有较强市场竞争力的著名企业。在工业控制类嵌入式系统方面, 也涌现了研华工控等国际知名品牌。

我国嵌入式系统产业无论从市场规模还是应用领域都已跨入了一个全新的时代。随着我国工业化与信息化融合进程的加快, 嵌入式系统产业作为国家战略性新兴产业的重要组成部分, 正面临着前所未有的发展机遇。未来智能电网、智能家居、汽车电子等将成为我国嵌入式系统应用市场的发展重点。

我们也应该看到, 我国的嵌入式系统产业起步较晚, 嵌入式系统技术和产业发展很不平衡, 在通信、家电、工控等嵌入式系统应用技术方面处于国际先进水平, 有较强的国际竞争能力; 但在嵌入式微处理器与芯片设计、嵌入式操作系统和中间件等领域, 虽然也有若干技术达到了国际先进水平, 但其市场竞争力明显低于国外的成熟产品, 并且缺乏平台化的商业运作模式, 企业规模普遍较小、原始创新能力不足, 绝大多数企业停留在中低端产品上, 缺乏高端产品的设计能力。

随着嵌入式系统技术和市场的不断变化, 在经历了多次结构调整之后, 嵌入式系统产业已经逐渐由原来的“大而全”演化成目前的“专而精”。企业向分工细化与专业化方向发展, 导致同一产业领域内企业之间以产业链为纽带, 实现企业之间的分工协作。如, 嵌入式芯片产业形成了设计业、制造业、封装业、测试业相对独立的格局, 嵌入式软件产业逐渐出现独立的嵌入式操作系统、中间件与应用软件提供商。同时, 随着经济全球化趋势的不断加快, 企业的分工将在全球范围内根据资源和市场配置进行, 并且向纵深发展。一个嵌入式设备的制造将涉及全球上百家企业。

因此我国亟待构建一个完整的嵌入式系统产业链, 拓展产业链的上游空间, 提升产业经济效益。一方面要立足应用, 在嵌入式系统“软件化”和“服务化”趋势的带动下, 打造嵌入式软件和应用服务的价值链高端环节, 提高嵌入式系统产品的附加值; 另

一方面要从芯片做起,提升高端芯片的设计能力,将嵌入式芯片与嵌入式软件打造为一个系统,真正实现产业链的完整。

参考文献

- [1] Worldwide Semiconductor Revenue Reached \$ 307 Billion in 2011. According to Final Results by Gartner [EB/OL]. <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1986016>, April 17, 2012.
- [2] J Goodancre, and A N Sloss, Parallelism and the ARM Instructions Set Architecture [J]. Computer, 2005, 28(7): 42-50.
- [3] L Wang, J Tao, G Laszewski, and H Marten. Multicores in Cloud Computing: Research Challenges for Application [J]. Journal of Computers, 2010, 5(6): 958-964.
- [4] D Geer. Chip Makers Turn to Multi-core [J]. IEEE Micro, 2005, 38: 11-13.
- [5] G Blake. T G Dreslinski, and T Mudge. A Survey of Multicore Processors [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26: 26-37.
- [6] J Parkhurst, J Darringer, and B Grundmann. From Single Core to Multi-Core: Preparing for a New Exponential [C]. IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD'06), 2006: 67-72.
- [7] Y Hoskote, S Vangal, A Singh, et al. A 5-GHz Mesh Interconnect for a Teraflops Processor [J]. IEEE Micro, 2007, 27: 51-61.
- [8] H Amano. A Survey on Dynamically Reconfigurable Processor [J]. IEICE Trans. Commu., 2006, E89-B(12): 3179-3187.
- [9] M Petrov, T Murgan, F May, M Vorbach, P Zipf, and M Glesner. The XPP Architecture and Its Co-Simulation Within the Simulink Environment [C]. Proc. FPL, 2004: 61-770.
- [10] J M Arnord. S5: The Architecture and Development Flow of a Software Configurable Processor [C]. Proc. ICFPT, 2005: 121-128.
- [11] H Phung and T Mitra. Runtime Adaptive Extensible Embedded Processors-A Survey [C]. SAMOS 2009, LNCS 5657, 2009: 214-2224.
- [12] J G Tong, I D L Anderson and M A S Khalid. Soft-Core Processors for Embedded Systems[C]. The 18th International Conference on Microelectronics (ICM'06), 2006: 170-173.
- [13] 邱卫东. 实时操作系统协同设计中的若干问题研究[D]. 博士学位论文, 复旦大学, 2005.
- [14] 杨霞. 高可信嵌入式操作系统体系架构研究[D]. 博士学位论文, 电子科技大学, 2009.
- [15] Green Hills Inc. Green Hills Software Announces Compliance with Latest ARINC-653-2 Part1 Standard for the INTEGRITY-178B RTOS [EB/OL]. http://www.ghs.com/news/2006_0501_arinc653-2.html. May 1, 2006.
- [16] 梁樑. 可重构嵌入式系统快速原型方法及任务调度算法研究[D]. 博士学位论文, 复旦大学, 2007.
- [17] 董玮. 面向无线传感网络的嵌入式操作系统设计[D]. 博士学位论文, 浙江大学, 2010.
- [18] J Hill, R Szewczyk, A Woo, et al. System Architecture Directions for Networked Sensors[C]. In Proceedings of ACM ASPLOS 2000, 2000: 93-104.
- [19] S Bhatti, J Carlson, H Dai, et al. MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless

- Micro Sensor Platforms [J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications Journal (MONET), 2005, 10: 563-579.
- [20] S Hong, T H Kim. SenOS: State-driven Operating System Architecture for Dynamic Sensor Node Reconfigurability [C]. Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Computing (ICUC), 2003: 201-203.
- [21] A Eswaran, A Rowe, R Rajkumar. Nano-RK: An Energy-Aware Resource-Centric RTOS for Sensor Networks[C]. In Proceedings of 26th IEEE Real-Time System Symposium, (RTSS'05), 2005: 256-265.
- [22] L Gu, J A Stankovic. t-kernel: Providing Reliable OS Support to Wireless Sensor Networks[C]. In Proceedings of 4th ACM International Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'06), 2006: 1-14.
- [23] T A Henzinger, J Sifakis. The Discipline of Embedded Systems Design [J]. Computer, 2007, 40(10): 32-40.
- [24] J A Stankovic. Vest: A Toolset for Constructing and Analyzing Component Based Embedded Systems [C]. In Proceedings of EMSOFT 2001, 2001: 390-402.
- [25] G Gossler, A L Sangiovanni-Vincentelli. Compositional Modeling in Metropolis[C]. In Proceedings of the EMSOFT 2002, 2002, 2491: 93-107.
- [26] E A Lee. Overview of The Ptolemy Project [R]. Technical Memorandum UCB/ERL M01/11, 2001.
- [27] S Neema, J Sztipanovits, G Karsai, and K Butts. Constraint-Based Design-Space Exploration and Model Synthesis [C]. In Proceedings of the EMSOFT 2003, 2003, 2855: 290-305.
- [28] P Krishnan, P Long, J Vitter. Adaptive Disk Spindown via Optimal Rent-to-Buy in Probabilistic Environments[C]. Int. Conf. Machine Learning (ICML'95), 1995: 322-330.
- [29] D P Helmbold, D E E Long, B Sherrod. A Dynamic Disk Spin-Down Technique for Mobile Computing[C]. IEEE Conf. Mobile Computing, 1996: 130-142.
- [30] F Douglass, P Krishnan, B Bershad. Adaptive Disk Spin-Down Policies for Mobile Computers[C]. 2nd USENIX Symp. Mobile and Location-Independent Computing, 1995: 21-137.
- [31] E Chung, L Benini, A Bogliolo, and G D Micheli. Dynamic Power Management for Nonstationary Service Requests[C]. Design and Test in Europe Conf., 1999: 77-81.
- [32] S Ross. Introduction to Probability Models[M]. 6th ed. New York: Academic, 1997.
- [33] L Benini, A Bogliolo, G Paleologo, and G D Micheli. Policy Optimization for Dynamic Power Management [J]. IEEE Trans. Computer-Aided Des. Integr. Circuits Syst., 1999, 18(6): 813-833.
- [34] Q Qiu, M Pedram. Dynamic Power Management Based on Continuous-Time Markov Decision Processes[C]. Proc. Design Automation Conf., 1999: 555-561.
- [35] Q Qiu, Q Wu, M Pedram. Dynamic Power Management of Complex Systems Using Generalized Stochastic Petri nets[C]. Proc. Design Automation Conf., Jun. 2000: 352-356.
- [36] Q Qiu, Q Wu, M Pedram. Stochastic Modeling of A Power-Managed System: Construction and Optimization[C]. Proc. Int. Symp. Low Power Electron. Design, 1999: 194-199.
- [37] W Dargie. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 1518-1528.
- [38] CPS Steering Group. Cyber-physical Systems Executive Summary [EB/OL]. <http://precise.seas.upenn.edu/events/iccps11/doc/CPS-Executive-Summary.pdf>, March, 2008.
- [39] Modern Grid Benefits, Modern Grid Initiative—Powering Our 21st-Century Economy, United States Department

- of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. p. 17. [EB/OL]. [http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/Modern%20Grid %20Benefits_Final_v1_0. pdf](http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/Modern%20Grid%20Benefits_Final_v1_0.pdf) , 2008.
- [40] E C dos Santos, C Jacobina, G A de Almeida Carlos, I S de Freitas. Component Minimized AC-DC-AC Single-Phase to Three-Phase Four-Wire Converters [J]. IEEE Trans. Ind. Electron. , 2011, 58(10): 4624-4635.
- [41] V Calderaro, C N Hadjicostis, A Piccolo, P Siano. Failure Identification in Smart Grids Based on Petri Net Modeling[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. , 2011; 58(10): 4613-4623.
- [42] F Benzi, N Anglani, E Bassi, L Frosini. Electricity Smart Meters Interfacing the Households[J], IEEE Trans. Ind. Electron. , 2011, 58(10): 4487-4494.
- [43] S Paudyal, C A Cañizares, K Bhattacharya. Optimal Operation of Distribution Feeders in Smart Grids[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. , 2011, 58(10): 4495-4503.
- [44] J Beyea. The Smart Electricity Grid and Scientific Research[J]. Science, 2010, 328: 979-980.
- [45] D J Cook. How Smart Is Your Home[J], Science, 2012, 335: 1579-1581.
- [46] B Das, D Cook. An Automated Prompting System for Smart Environments[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Smart Homes and Health Telematics, 2011: 9-16.
- [47] J Paradiso, P Dutta, H Gellersen, E Schooler. Guest Editors' Introduction: Smart Energy Systems[J]. IEEE Pervasive Comput. 2011, 10: 11-12.
- [48] U Drolia, Z Wang, S Vemuri, M Behl, R Mangharam. Demo Abstract: AutoPlug—An Automotive Test-Bed for ECU Testing, Validation and Verification[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 131-132, 2011.
- [49] 严明. 面向应用领域的异构多核系统结构设计与优化[D]. 博士学位论文, 国防科技大学, 2011.
- [50] 栾静. 模型驱动的系统级软硬件协同设计若干关键技术研究[D]. 博士学位论文, 华东师范大学, 2006.
- [51] 马钊坤, 韩国栋. 基于 UML 的 SoC 层次化设计模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(24): 5265-5268.
- [52] 廖永波. SOC 软硬件系统方法及其在 FPGA 芯片测试中的应用研究[D]. 博士学位论文, 电子科技大学, 2010.
- [53] 陈俊杰. 嵌入式系统电源管理的研究与实现[D]. 硕士学位论文, 南京理工大学, 2012.
- [54] 李晨明. 嵌入式电源管理设计与开发[D]. 硕士学位论文, 电子科技大学, 2009.
- [55] 罗刚, 郭兵, 沈艳等. 源程序级和算法级嵌入式软件功耗特性的分析与优化方法研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(9): 1869-1875.
- [56] 郭兵, 沈艳, 邵子立. 绿色计算的重定义与若干探讨[J]. 计算机学报, 2009, 32(12): 2311-2319.
- [57] 周宽久, 迟宗正. 嵌入式软硬件低功耗优化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 423-425.
- [58] 杨碧玲. 本土芯片企业在电源管理市场的探索[J]. 集成电路应用, 2012, 2: 36-39.
- [59] 黎作鹏, 张天驰, 张菁. 信息物理融合系统(CPS)研究综述[J]. 计算机科学, 2011, 38(09): 25-31.
- [60] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.

作者简介

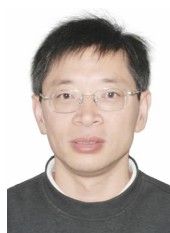
吴中海 博士，北京大学软件与微电子学院教授、博士生导师、副院长，中国计算机学会微机（嵌入式系统）专业委员会秘书长。主要研究方向包括：嵌入式软件与系统、情境感知服务、云存储服务与安全、多媒体与人机交互。



周兴社 西北工业大学计算机学院教授、博士生导师，陕西省嵌入式系统技术重点实验室主任，CCF 常务理事、中国计算机学会微机（嵌入式系统）专业委员会副主任。主要研究方向包括：网络化嵌入式计算与分布式计算、传感器网络与普适计算。



林金龙 博士，北京大学软件与微电子学院教授、博士生导师，嵌入式系统系副系主任，中国计算机学会微机（嵌入式系统）专业委员会委员。主要研究方向包括：嵌入式系统及其应用、数字图像分析。



刘宏志 博士，北京大学信息科学技术学院博士后，中国计算机学会会员。主要研究方向为物联网信息融合、信息检索和数字图像分析。

