

开放实时嵌入式软件平台 TOPPERS 研究现状

任慰, 何顶新, 赵金

摘要: 嵌入式系统开发趋势之一是基于平台的开发, 包括硬件平台和软件平台。开放实时嵌入式软件平台 TOPPERS (Toyohashi Open Platform for Embedded Real-time Systems) 为一个包含多种嵌入式实时操作系统、中间件以及软件开发工具在内的, 并可用于多个领域的综合性平台。本文对 TOPPERS 的历史、现状以及其下一个十年的发展计划和目标进行了介绍和分析。最后介绍了 TOPPERS 在国内的发展情况和目前基于 TOPPERS 成果物所在进行的工作。

关键词: 实时操作系统; TOPPERS; ITRON; 软件平台; 嵌入式系统

中图分类号: TP

文献标识码: A

文章编号:

A Review of TOPPERS Open Real-Time Embedded Software Platform

REN Wei, HE Ding-xin, ZHAO Jin

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Platform-based development is now a trend in the embedded systems. TOPPERS (Toyohashi Open Platform for Embedded Real-time Systems) is an open platform for embedded real-time systems providing different kinds of high quality real-time operating systems, middlewares and software tools. It can be applied in many fields of embedded systems. In this paper, we make a review of TOPPERS's history, present situation including achievements and key features, and future plan in next ten years. Finally, we make an introduction of TOPPERS's promotion in China and our current work based on TOPPERS.

Key words: Real-time operating system; TOPPERS; ITRON; software platform; embedded systems

1 引言

以汽车电子、消费电子为代表的各式各样的嵌入式系统在日常生活中扮演着越来越重要的角色。嵌入式系统的开发也在朝着大规模化和复杂化的方向发展。如何在质量、成本和交货期三者之间取得平衡是每一位嵌入式系统开发者所必须面临的问题。解决这一问题的方法之一是基于平台的开发 (Platform-based Development), 包括硬件上的和软件上的平台^[1]。由于硬件平台在设计 and 制造的复杂度、成本和时间上的限制, 在软件上进行平台开发更为灵活和流行。基于 Linux/Android 的软件平台在移动通信、网络通信等大型嵌入式系统中已经取得巨大的成功。

但是, 对于有成本限制、处理器能力不强和存储空间有限的, 或者对实时性有较高要求的中小型嵌入式系统而言, 基于嵌入式 Linux、WinCE 等大型通用操作系统的软件平台并不适用。在这样系统中更加合适的是基于实时操作系统 (Real-Time Operating System) 的软件平台。

狭义的实时操作系统一般特指实时操作系统内核 (后简称实时内核或者内核), 广义的实时操作系统是一个除实时操作系统内核外, 还应包括文件系统、网络协议栈等中间件在内的软件平台。

目前已经有许多基于实时操作系统的软件平台^[2], 包括商业平台和开源免费平台, 如国内广泛使用的 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 平台、完全由国人开发的 RT-Thread 平台、风河 VxWorks 平台

和广泛应用于航天领域的 RTEMS 平台等。商业平台在可靠性、系统优化、开发工具和技术支持上有优势, 但版权费用较高。开源免费平台往往不如商业平台完善, 并且如果遵循 GNU/GPL 许可证, 在具体应用尤其是商业应用上存在着较多限制。

开放实时嵌入式软件平台 TOPPERS (Toyohashi Open Platform for Embedded Real-time Systems) 为一个包含多种嵌入式实时操作系统、中间件以及软件开发工具在内的, 并可用于多个领域的综合性平台。本文对 TOPPERS 的发展历史、研究现状和下一个十年的发展计划和目标进行了介绍和分析, 一方面可以使 TOPPERS 的发展成果能够被更广泛地分享, 另一方面为国内类似嵌入式软件平台的发展提供参考。TOPPERS 的主要特色在于具有高质量的设计和较完善的体系, 开放源代码, 可免费使用, 灵活的许可证使得在商业应用上限制较少。

本文的主要内容如下。第二部分对 TOPPERS 发展历史、背景和主要理念进行介绍; 第三部分对 TOPPERS 的目前研究现状、主要成果物和主要特点进行介绍和分析; 第四部分对 TOPPERS 未来发展计划进行了介绍; 第五部分为结束语以及 TOPPERS 在国内的发展。

2 TOPPERS 的历史

由高田广章教授于 2000 年发起的 TOPPERS 工程 (TOPPERS Project, 后简称 TOPPERS) 旨在为嵌入式系统开发包括实时操作系统在内的各种高质量的嵌入式软件, 并

收稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金 (60874047) 资助

将其开发成果以开放源代码的形式向社会公开,以提高嵌入式系统的设计开发技术、振兴相关产业和培养高素质的嵌入式系统开发人员,其目标是中小型嵌入式系统构建如Linux那样广泛使用的平台。为了管理和推广TOPPERS,2003年成立了专门的非营利组织TOPPERS协会。任何个人或组织都可以加入该协会。截至2011年11月7日,TOPPERS协会共有来自产业界和学术界的团体会员或个人会员共207位,其中6位会员来自中国。

TOPPERS的历史并不长,但其起点是具有20多年历史的TRON(The Real-time Operating system Nucleus)和ITRON(Industrial TRON)项目。TRON项目由东京大学坂村健教授于1984年发起,宗旨是为全社会的需要开发一套理想的计算机结构和网络。ITRON为TRON诸多子项目之一,也是最成功的一个。ITRON规范为一系列关于实时操作系统的开发规范,而不是一个具体的实时操作系统地实现,迄今共发布4个版本^[3,4]。任何组织或者个人都可以按照ITRON规范开发自己的实时操作系统。ITRON规范的开放性和弱标准性使其取得了巨大的成功,在日本已经成为事实上的工业标准^[4]。

但也正是因为ITRON规范的弱标准性,符合ITRON规范的实时操作系统版本林立,彼此之间不能完全兼容,带来了过剩的多样性,造成过多重复开发^[5]。另外,随着嵌入式系统越发复杂,除了实时操作系统内核,其他中间件如文件系统、网络协议栈、设备驱动框架等也越发重要,而在这些方面,ITRON规范是比较薄弱的。

为了解决上述问题,适应未来嵌入式系统发展趋势,进入新世纪后,ITRON的发展在两个方向上继续进行,一个是由坂村健教授主导的T-Engine,另一个便是TOPPERS。TOPPERS和T-Engine不同点在于,TOPPERS是以 μ ITRON4.0规范为基础,主要针对硬实时系统,专注于工业控制领域,如汽车电子等;T-Engine由硬件上的T-Engine规范和软件上的以T-Kernel为代表的一系列实时内核以及相应的中间件,这两大部分组成^[6]。T-Kernel主要以 μ ITRON3.0规范为基础并采用了 μ ITRON4.0规范的部分成果,同时吸收了TRON项目其他子项目的成果,如针对个人计算机的BTRON(Business TRON),以信息化见长,推行泛在计算(Ubiquitous Computing)的理念。TOPPERS和T-Engine之间有重复的地方,但更多的是互补。

TOPPERS所有成果物都遵循TOPPERS许可证(TOPPERS License,类似BSD许可证),其精髓在于任何个人和组织都可以免费使用TOPPERS的成果物。但为了推动TOPPERS的自身发展,在把TOPPERS的成果物嵌入机器时,需要且仅需要向TOPPERS协会报告使用事实。TOPPERS协会称之为“报告软件”(Reportware)。

从2000年到2006年,TOPPERS陆续公布了以TOPPERS/JSP(Just Standard Profile)代表的第一代实时内核。第一代实时内核可以看作是符合 μ ITRON4.0规范的一系列标准实现。

与其他开源软件不同的是,TOPPERS在提供各种各样高质量的开源软件同时,十分注重高素质的嵌入式开发人才培养,或出版各类教材、或在线提供各种教程、或举办相关技

术培训、或支持相关嵌入式领域的竞赛等。

3 TOPPERS的现状

最近一次ITRON规范的发布要上溯至1999年的 μ ITRON4.0规范。进入新世纪后,一方面嵌入式系统相关技术的发展日新月异,另一方面ITRON规范十多年未作更新,已经无法满足未来嵌入式系统应用的需求。因此,从2006年开始,TOPPERS协会在 μ ITRON4.0规范基础之上开始制定新一代实时内核规范并加以实现,其大致路线图如图1所示。到2011年为止,该路线图中的绝大部分目标都已经达成,产生一大批成果物,并且在消费电子和汽车电子等领域中得到广泛应用。

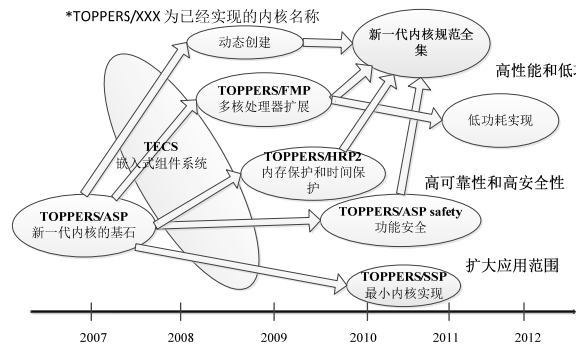


图1 TOPPERS新一代内核路线图

3.1 实时内核

TOPPERS/ASP(Advanced Standard Profile)内核是整个TOPPERS平台的基石和TOPPERS新一代实时内核的出发点,遵循 μ ITRON4.0规范标准功能集,并在TOPPERS/JSP内核基础上做了许多改进和扩展,包括可靠性和代码的可复用性,其内存占用较小,功能完善且有着不错的性能^[7]。通过扩展包的形式可以对该内核的功能进行扩展,如任务优先级可扩展到256级、支持优先级置顶协议的互斥量扩展和受限任务(类似FreeRTOS中的协程)扩展等。

TOPPERS/FMP(Flexible MultiProcessor)内核是TOPPERS/ASP内核针对多核处理器的扩展。该内核以静态的方式把任务分配给每个处理器,任务调度也在每个处理器上单独进行,任务可以在处理器之间灵活地进行迁移,并引入了自旋锁(spinlock),支持粗粒度锁和细粒度锁。该内核主要适用于对称性多核处理器系统,以应对嵌入式系统多核化的趋势,目前支持ARM系列的多核处理器和瑞萨SH系列多核处理器。

TOPPERS/ATK1(Automotive Kernel)内核为一个面向汽车电子领域遵循OSEK/VDX version 2.2.1规范的实时内核。该内核通过了车载软件的相关认证,并且在代码实现上遵循MISRA-C设计规范。车载软件是TOPPERS的优势所在。除了实时内核外,TOPPERS还提供面向车载网络的CAN/LIN中间件和FlexRay中间件。目前符合AUTOSAR规范的新一代车载实时内核TOPPERS/ATK2也正在开发中。

TOPPERS/HRP(High Reliable Profile)内核以 μ ITRON4.0规范的保护功能扩展为基础,带有内存保护和时间保护功能,适用于带有MPU(Memory Protection Unit)或者MMU(Memory Management Unit)单元的系统。该内核

主要应用于对可靠性有很高要求的领域,如航空航天等。内存保护主要包括防止对内存模块特定区域的访问,防止对特定系统数据的访问和防止分配过多内存等。时间保护主要指防止系统中某个任务或中断处理过程过多地占用处理器。

TOPPERS/ASP Safety 内核基于 TOPPERS/ASP 内核 1.3.1 版本,对内核进行了大量的功能安全分析,在文档、代码注释和部分功能上做了相应修改,符合功能安全规范 IEC61058 中 SIL3 的要求,主要应用于强调功能安全的领域,如核电、石化等。

TOPPERS/SSP (Smallest Set Profile) 以 TOPPERS/ASP 内核为基础,以尽可能的减少 ROM/RAM 使用量为目的,功能上遵循 μ ITRN4.0 规范中最低限度功能集。该内核主要针对资源非常有限的小规模嵌入式系统,如无线传感器应用等,删除了任务间通讯功能,精简了任务管理功能。在该内核中,每个任务优先级上只允许存在一个任务,最多允许 16 个任务存在,并且所有任务共享一个任务堆栈。该内核针对 ARM Cortex-M3 内核处理器的典型应用只需占用 3.5 KB 左右的 ROM,附加上时间管理扩展包后也只占用 5 KB 左右的 ROM。

3.2 中间件

TECS (TOPPERS Embedded Component System)^[6] 为一个针对嵌入式系统,将各种软件模块封装为组件,并将组件结合在一起以实现快速构建大规模嵌入式软件的规范和工具的集合。其目的在于通过组件化的开发方式降低嵌入式软件的开发难度,减少重复开发,提高设计的抽象度和嵌入式软件的可复用性。在 TECS 中,通过组件描述语言 CDL (Component Description Language) 来描述组件的接口和属性等,然后解析器将分析 CDL 并生成相应的 C 语言代码模板,最后用 C 语言实现相应的组件。由于 TECS 的底层是基于 C 语言的,且整个过程是静态的,所以其在代码大小和性能上开销很小,适合于嵌入式系统应用。TECS 支持远程过程调用 (Remote Procedure Call),可用于分布式嵌入式系统的开发。

TINET 为一个面向嵌入式系统的精简 TCP/IP 协议栈,遵循 ITRON TCP/IP API 规范,并同时支持 IPv4 和 IPv6 协议。TINET 的 IPv4 协议部分来源于 FreeBSD version 3.4 中的网络协议栈,IPv6 协议部分来源于著名的 IPv6 实现 KAME。TINET 中许多概念与 BSD 套接字的概念类似,但重点考虑嵌入系统各种限制中最为严格的内存容量的限制,删除了传统 BSD 套接字接口的 TCP/IP 协议栈中对于嵌入系统而言一些多余的功能。

SafeG^[9] 为一个基于 ARM TrustZone 技术的嵌入式虚拟机 (Embedded Hypervisor),支持在同一个处理器上同时运行实时操作系统 (运行在信任状态下) 和通用操作系统 (运行在非信任状态下) 并以硬件实现空间和时间上的隔离。SafeG 负责信任状态和非信任状态之间的切换,并监控中断的产生,通用操作系统作为实时操作系统的若干任务被调度。通过 SafeG,可以结合多种操作系统的特点于一体,带来更多的灵活性,同时保证安全性和可靠性。

3.3 其他成果物

TLV (TraceLog Visualizer) 为一个基于文本的可视化日志分析器,目前支持 TOPPERS/ASP 内核和 TOPPERS/FMP

内核。系统在运行过程可以通过文本形式的追踪日志 (trace log) 反映系统运行状况,如任务调度情况、任务的执行时间等。TLV 可以把文本形式的追踪日志以可视化的形式复现出来,并完成相应的统计工作,如 CPU 利用率等。TLV 主要用于完成硬件调试器所不能或者很难完成的系统级调试和分析的工作。

TTSP (TOPPERS Test Suite Package) 为一系列用于 TOPPERS 内核测试的代码和辅助工具的集合,也可以认为是一个针对 TOPPERS 内核的单元测试框架。TTSP 通过定义一种 YAML 格式脚本描述所要进行测试的场景,然后经由相应的解析器分析测试脚本并自动生成测试代码。测试结束后,测试结果以日志的形式保存。TTSP 目前只支持 TOPPERS/ASP 内核和 TOPPERS/FMP 内核,且通过 TTSP 的测试, TOPPERS/ASP 内核代码覆盖率达到 100%。

Skyeye for TOPPERS 基于指令级模拟器 Skyeye 1.2.4 版本,以 ARM7TDMI 内核的 at91 微控制器为目标系统,为一个可以模拟运行 TOPPERS 内核的仿真环境。该仿真环境相对于原生的 skyeye 做了大量的改进,如设计了名为 DeviceManager 的工具,用以连接多个 skyeye 实例并管理之间的通信,使得可以对多核处理器进行仿真,同时增加了指令计数器和运行日志等辅助功能。该仿真环境还可以和类似 System C 之类的工具配合,进行软/硬件协同设计和仿真。

3.4 TOPPERS 内核的主要特征

不同的 TOPPERS 内核覆盖不同的嵌入式系统领域,但以下两点几乎为所有 TOPPERS 内核的主要特征。

● 静态配置

常见的实时操作系统中,系统的配置通过 C 语言头文件中的宏定义来实现,系统资源是通过调用 C 语言 API 来创建的。在 TOPPERS 内核中,系统的配置和系统资源的创建是通过静态 API 来完成的。静态 API 的相关概念在 μ ITRON4.0 规范中引入。使用者通过编写由静态 API 组成的系统配置文件 (文件后缀为 .cfg) 来描述系统的组成和所需的系统资源。TOPPERS 内核配置器 (configurator) 将解析系统配置文件并依据事先定义好的模板文件生成相应的 C 语言具体实现。

以 TOPPERS/ASP 内核为例,对静态配置流程进行简要描述。如图 2 所示,静态配置可以分为三个阶段。

- 1) 配置器阶段 1。在该阶段中,配置器读取系统配置文件和符合取值表生成用于参数计算的 C 源文件,再经交叉 C 编译器编译链接生成包含具体参数的结果文件 (Motorola S 格式) 和对应的符号表。
- 2) 配置器阶段 2。在该阶段中,配置器依据上一阶段生成的符号表从参数计算结果文件中取得实际值,再依据事先定义好的模板文件,生成包含具体内核资源实现的内核构成与初始化文件和相应的头文件 (也可生成其他文件,由使用者自定义)。所生成的源文件与内核和应用一起编译链接,即可生成最终的目标文件和相应的符号表。
- 3) 配置器阶段 3。该阶段为一个可选的检查阶段。配置器依据定义在模板文件中的规则,结合符号表对最终的目标文件 (Motorola S 格式) 进行检查,如违反规则,输出相应错误信息。

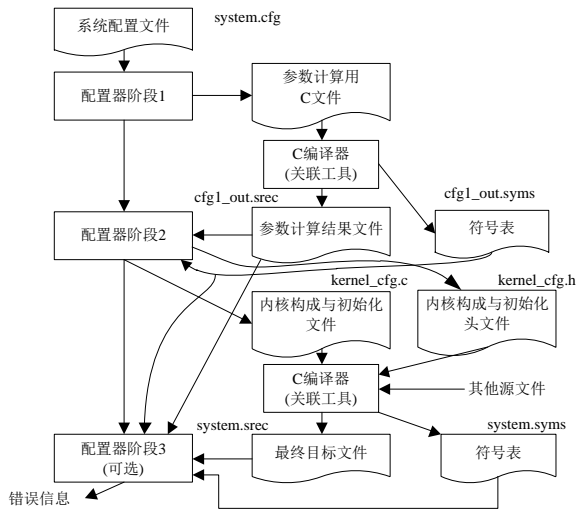


图 2 静态配置流程图

采用静态配置，可以自动化高效地实现对系统的配置和系统资源的创建和分配，减少系统资源的浪费。由于所有系统资源在编译时就已经创建完毕，不需要在运行时再进行创建工作，所以系统的启动过程也将得到加快。另外在静态配置过程中可以实现一些编译器所不能完成的复杂验证工作，如堆栈的起始地址是否对齐、堆栈的大小是否对齐等。

● TOPPERS 标准中断模型

由于中断处理是和硬件紧密相关的，常见的实时操作系统中，中断具体怎样处理没有过多的要求，而是留给移植时实现。在所有 TOPPERS 内核中，中断处理都遵循如图 3 所示的 TOPPERS 标准中断处理模型。

该模型旨在提高中断处理过程的抽象度，提升中断相关代码的复用性和可移植性。在该模型中，所有中断都具有相应的中断优先级，中断优先级（默认-1 至-7）和任务优先级（默认 1 至 15）之间过渡平滑，构成一个完整的优先级体系。在该模型中，每一个中断都有一条中断请求线接受一个或多个设备的中断请求。当一个中断请求发生后，经过相应的判断和比较之后，由中断处理函数处理。中断处理函数可以由使用者定义也可由配置器自动生成，在中断处理函数中调用由使用者定义的中断服务例程。在某个中断的处理过程中，可以允许被具有更高优先级的中断打断，即允许中断嵌套。

TOPPERS 标准中断处理模型中定义的所有环节都可以由硬件实现，大部分处理器的中断控制器也包含这些环节的功能，如 ARM Cortex-M3 架构处理器的嵌套向量中断控制器。若某个特定处理器无法硬件实现该模型中某个环节的功能，则可以通过软件的方式模拟实现。软件模拟的方式会带来相应的开销，如延长中断响应时间等。然而这种开销相对于该模型所带来的中断处理抽象度的提升是可以接受的。

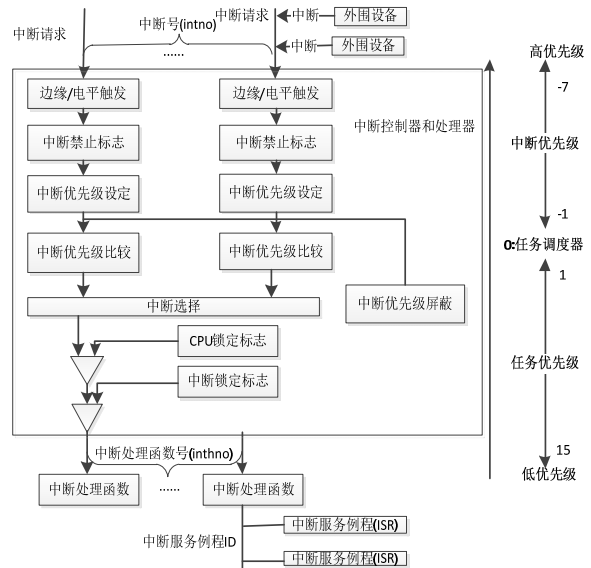


图 3 TOPPERS 标准中断处理模型概念图

4 TOPPERS 的未来：下一个十年活动方针

从 2000 年 TOPPERS/JSP 内核公开开始，TOPPERS 迄今已有超过 10 年的历史，TOPPERS 路线图图中大部分目标基本上都已经完成。

未来社会将变得越来越智能化，以物联网、智能交通系统和智能电网等为代表的新技术和新应用将成为未来社会的基础设施。在这些新技术和新应用中，各种各样的嵌入式系统扮演着至关重要的角色。为了应对未来社会智能化趋势对嵌入式系统所产生的需求，2011 年 TOPPERS 开始制定下一个十年的活动方针，具体内容如下。

4.1 开发面向智能社会的嵌入式系统技术

TOPPERS 把未来智能社会的景象称之为 Smart Future。嵌入式系统技术是构建 Smart Future 的诸多关键技术之一。TOPPERS 将在不断发展现有成果的基础上，把以下三点作为重点发展的课题：

- 1) 安全性 (Safety & Security)。这里安全性有两方面意思，一方面指功能上的安全性 (Safety)，另一方面指信息上的安全性 (Security)。随着越来越多的嵌入式系统将连入开放的网络中，发展构建可靠且安全的嵌入式系统的技术是十分必要的。
- 2) 环保性 (Ecology)。这里具体指高效的能源利用。相对于通用系统，虽然目前嵌入式系统的功耗一般比较低，但考虑到未来海量的应用数量，发展提高嵌入式系统能源利用效率的技术，在保持性能同时，进一步降低嵌入式系统功耗对于构建可持续发展的未来社会具有重要意义。
- 3) 互联性 (Connectivity)。嵌入式系统连入网络是一个趋势，发展面向嵌入式系统的低成本、低功耗和高可靠的网络互联技术也具有十分重要的意义。

4.2 以联合体的形式进行开源软件开发

嵌入式系统大规模化、复杂化的趋势越发强烈，对于开发者提出了更高的要求。有些嵌入式系统仅仅依靠单一组织

或个人是比较困难的,此时可以通过联合体 (Consortium) 的形式联合有关各方力量,如企业、研究机构和教育机构等共同完成并共享成果。TOPPERS 目前许多成果物都是以此种联合体的形式开发完成的,并且今后将进一步强化以此形式开发高质量的开源软件。

5 结束语

本文对开放实时嵌入式软件平台 TOPPERS 的发展历史、目前研究现状 (包括主要成果物和主要特点) 以及未来十年的发展方针进行了介绍和分析。其主要特色在于: TOPPERS 为一个相对完善的体系,覆盖了嵌入式系统的多个领域; TOPPERS 以 ITRON 项目 20 多年发展成果为基础,具有较高的品质和可靠性;灵活的许可证,使得可以自由使用 TOPPERS 的成果物 (包括商业应用),同时有较少的限制。

由于 TOPPERS 的开发性、成熟性和整个体系完整性,国内对 TOPPERS 的研究也逐渐增多,但尚处于初步阶段。TOPPERS 目前还存在一些有待改进的地方。一方面,虽然在实时操作系统方面有丰富的成果,但在中间件方面相对成熟的平台方面还比较欠缺,如不支持 POSIX 接口、没有嵌入式 GUI (Graphical User Interface)、没有一个合适的设备文件系统等;另一方面, TOPPERS 的国际化程度不足,即 TOPPERS 相关资料基本上都是日文资料, TOPPERS 的相关应用也基本上限于日本国内。

针对 TOPPERS 国际化程度不足的问题, TOPPERS 中国组已经翻译制作了部分 TOPPERS 相关资料,并正着手以 TOPPERS/ASP 内核为目标进行文档中文化和注释英文化的工作。同时,一个基于 TOPPERS 成果物的面向中小型嵌入式系统的软硬件平台也正在设计中,相关成果将以开源的形式公布。通过这些措施可以使得 TOPPERS 的发展成果被更广泛地分享。

参考文献:

- [1] Sangiovanni-Vincentelli A., Martin G. Platform-based design and software design methodology for embedded systems [J]. Design Test of Computers, IEEE, 2001, 18(6): 23-33.
- [2] Anh T., Tan S.-L.. Real-time operating systems for small microcontrollers [J]. Micro, IEEE, 2009, 29(5): 30-45.
- [3] Takada H., Sakamura K.. μ itron for small-scale embedded systems [J]. Micro, IEEE, 1995, 15(6): 46-54.
- [4] Takada H., et al. μ itron4.0 specification. TRON Association. 1999, June.
- [5] Takada H.. Introduction to the toppers project [C]. Proc. 6th IEEE Int. Object-Oriented Real-Time Distributed Computing Symp., 2003, 44-45.
- [6] Sakamura K., Koshizuka N.. T-Engine: the open, real-time embedded systems platform [J]. Micro, IEEE, 2002, 22(6): 48-57.
- [7] Ren W., He D.-X., Zhao J.. A performance evaluation of rtos for toppers/asp kernel [C]. Proc. 13th Joint International Computer Science and Information Technology Conference, 2011, 61-65.
- [8] Azumi T., Yamamoto M., Kominami Y., et al. A new specification of software components for embedded systems [C]. Proc. 10th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2007, 45-50.
- [9] Sangorin D., Honda S., Takada H.. Dual operating system architecture for real-time embedded systems [C]. Proc. 6th International Workshop on Operating Systems and Platforms for Embedded Real-Time Applications, 2010, 6-15.