

嵌入式实时操作系统标准化策略研究

陈亚军 苗宗利

中国电子技术标准化研究院

DOI:10.32629/acair.v4i3.21373

[摘要] 嵌入式操作系统技术经过数十年发展,已形成极为繁多的技术分支与产品体系。这种“百花齐放”的格局虽在一定程度上满足了多样化应用需求,却也带来了重复开发、生态割裂、人才分散等深层问题,不利于高质量发展。本文从嵌入式操作系统的技术特征出发,系统分析了当前技术过度分散的成因与影响,梳理了国内外在操作系统内核接口标准化方面的经验,重点探讨了ARINC 653、POSIX等标准的应用价值。研究认为,站在汽车、飞机等重大装备角度,推动实时操作系统架构及内核接口的标准化,并通过合理的环境配置对操作系统裁剪适配多样化需求,是解决当前技术碎片化困境的有效路径。本文进而从标准体系构建、人才培养等方面提出了建议,以期嵌入式操作系统产业发展提供参考。

[关键词] 嵌入式操作系统; 实时操作系统; 标准化

中图分类号: TP316 **文献标识码:** A

Research on Standardization Strategies of Embedded Real-time Operating Systems

Yajun Chen Zongli Miao

China Electronics Standardization Institute

[Abstract] After decades of development, embedded operating system technology has formed a vast array of technical branches and product systems. Although this "diversity" pattern has to some extent met the diverse application needs, it has also brought about deep problems such as repeated development, fragmented ecosystems, and scattered talents, which are not conducive to large-scale development. This article starts from the technical characteristics of embedded real-time operating systems, systematically analyzes the causes and impacts of the excessive dispersion of current technical branches, sorts out the experiences of domestic and foreign countries in the standardization of operating system kernel interfaces, and focuses on discussing the application value of standards such as ARINC 653 and POSIX. The research suggests that from the perspective of major equipment such as automobiles and aircraft, promoting the standardization of real-time operating system architectures and kernel interfaces, and adapting the operating systems to diverse needs through reasonable environment configuration, is an effective path to solve the current fragmentation dilemma. The article then proposes suggestions from aspects such as standard system construction and talent cultivation, with the aim of providing reference for the further development of embedded operating system industry.

[Key words] Embedded Operating System; Real-time Operating System; Standardization

1 引言

操作系统作为连接计算机硬件与应用软件的纽带,是整个计算机系统的中枢。在操作系统的类型中,嵌入式操作系统因其面向特定应用场景、与硬件关联紧密等属性,在工业控制、航空航天、汽车电子、轨道交通等领域发挥着不可替代的作用。近年来,随着智能网联汽车、综合模块化航空电子(IMA)等技术的发展,嵌入式实时操作系统的战略地位持续提升。然而,与服务器操作系统Linux一统天下、移动操作系统Android与iOS两强并立的格局不同,嵌入式操作系统领域呈现出显著的过度分散特

征^[1]。从VxWorks、QNX等商业系统,到FreeRTOS、RT-Thread等开源系统,再到天脉等国产系统,以及各行业定制的专业系统,技术路线繁多、接口各异、生态互不兼容。

嵌入式操作系统技术分化虽然在一定程度上满足了不同场景的差异化需求,但也带来了软件复用难、研发投入重、人才流动受阻等问题。如何在保障多样化需求的前提下,通过合理的技术归并与标准化,推动嵌入式实时操作系统从“分散生长”走向“集约发展”,提升整体效益,成为当前值得探讨的关键方向。本文试着从现状和成因分析、关键路径分析和标

准化策略三个层面展开论述,并结合我国重大装备发展的战略需求提出建议。

2 嵌入式实时操作系统技术分支分散的现状与成因

2.1 技术分支的多样性现状。嵌入式实时操作系统技术分支繁多。从全球来看,既有VxWorks这类在航空航天占据主导地位的商业系统,也有QNX这类在汽车电子广泛应用的微内核系统;既有FreeRTOS这类被MCU厂商广泛采用的开源系统,也有Zephyr这类由Linux基金会支持的开源项目;此外还有embOS、ThreadX等众多系统。

在国内市场,嵌入式操作系统“百家争鸣”的格局非常明显。在工控领域,翼辉SylixOS可适配多种架构CPU,应用广泛;鸿道(Intewell)操作系统借助多模式部署优势,成功应用于数控、轨道交通等多型设备。在航空领域,天脉操作系统实现了分区调度与高可靠性保障,在数十型飞机中得到应用。在汽车领域,普华操作系统累计装机量已达千万量级。此外,RT-Thread占据更广泛的物联网嵌入式应用,持续保持装机量优势。

2.2 分散化的深层成因。嵌入式操作系统的过度分化有其深刻的技术、生态与需求根源。

需求差异催生定制。从机器人、车载主机到各类传感器,嵌入式系统的应用需求千差万别。有时需要OS支持高速计算和高等级安全认证,有时则仅能为OS提供数KB内存。巨大的场景和需求差异在客观上推动了技术分化。

门槛较低诱导“创新”。与Windows或Linux不同,仅包含任务、信号量以及消息队列等基本功能的RTOS内核,熟练工程师仅需花费数月即可搭建出初步可用的原型。如此低廉的技术门槛使得企业倾向于“自主创新”而不是完善已有系统。

缺乏标准导致生态割裂。该领域长期以来缺乏被严格执行的接口标准,各RTOS厂商为了实现最优性能倾向于提供原生API,这当然极大地牺牲了生态的互操作性。

2.3 分散化带来的产业代价。RTOS技术路线的无序分化,给嵌入式产业高质量发展埋下了诸多隐患。

从软件资产复用来看,由于接口不兼容,在基于某一款RTOS开发的应用几乎无法平滑迁移至其他平台,一旦RTOS更换,原有的软件代码往往需要重新编写和调试。

从研发资源投入来看,大量同质化的RTOS的落地,都需要研发团队完成架构设计、算法优化、驱动开发和配套工具链开发等工作,重复研发消耗了大量人力、物力和财力。

从产业协同发展来看,标准缺失使得产业链各环节的协作边界模糊。硬件研发企业、RTOS厂商、应用开发团队各自为战,无法形成专业化分工和闭环发展。

在行业人才培养来看,各个RTOS的编程模型和开发范式差异较大,开发者掌握的技术技能难以通用。这不仅抬高了企业的招聘培训成本,也导致行业人才资源被分散稀释。

3 破解分化困境的路径分析

3.1 标准化一般原理。一般认为,通过标准化建立公用的系统模型和编程抽象层是破解上述技术过度分化问题的关键,适

当的标准化在技术、产业和成效方面都有着可推理的效益。

在技术层面,标准化的价值体现为“双重统一”。系统模型提供基本设计范式,标准接口则提供了统一的对外“语言”,开发者可基于标准接口编写应用软件,从而使应用与RTOS解耦成为可能。

在产业层面,标准化降低了产业链之间的协作壁垒。硬件厂商、RTOS厂商、应用开发商可以围绕标准接口确定分工界面,专注于各自能力的提升,这有助于形成自驱进化的生态。

在成效层面,标准化可以提升整个产业的投入产出比。微观上,基于标准开发的应用软件可以在不同项目间复用;中观层面,行业的知识可以持续沉淀为公共标准;宏观层面,全社会的研发资源可以更有效地配置。

3.2 标准化实践分析。在过度分化的同时,嵌入式实时操作系统领域也存在不同的标准化尝试。

POSIX是由IEEE制定的另一重要标准,核心目标是提升应用软件在不同OS之间的可移植性^[2]。遵循POSIX标准的应用软件可以无需或仅需少量修改,在各种支持POSIX的OS上编译运行。POSIX.13针对实时系统定义了标准配置文件。

AUTOSAR已成为汽车控制器领域的主流标准。它定义了汽车电子控制单元(ECU)软件的标准化运行环境和接口,实现了汽车软件和OS厂商之间的解耦^[3]。

ARINC653全称“航空电子应用软件标准接口”,是航空电子领域最为核心的标准。ARINC653定义了分区操作系统的概念,通过空间分区和时间分区实现了高确定性、高可靠性的系统行为^[4]。ARINC653已被广泛应用于波音、空客等现代客机中,其影响力正在向航天、汽车、工业控制等领域扩展。

国家标准方面,GJB 5357《航空电子应用软件接口要求》等标准已在航空领域得到应用,GB/T 47689《网络安全技术嵌入式操作系统安全技术规范》等新标准也即将实施^{[5][6]}。这为国内嵌入式操作系统的规范化发展提供了基础。

3.3 标准化对象的选择。通过对已有标准化实践的分析可知:标准化并非要消灭多样性,而是要在多样性的底层建立一个统一的接口层。即嵌入式操作系统的具体实现可以千差万别——有的追求极致安全,有的侧重资源节约——但只要统一的对外接口存在,基于这些操作系统的应用软件迁移和产业链协作就有了基础。

4 基于装备需求的标准化策略

4.1 重大装备对OS的特殊需求。汽车、飞机、轨道交通等重大装备是我国“制造强国”战略的核心载体,嵌入式操作系统是各类装备控制系统核心底层软件。重大装备对嵌入式操作系统有着不同于普通消费电子的特殊要求。

安全合规认证是装备落地应用的前提。在汽车电子领域,安全气囊、整车动力控制等核心功能系统必须满足ISO 26262标准最高ASIL-D安全等级要求^[7];在航空领域,所有机载嵌入式软件及配套操作系统均需通过DO-178C适航认证;在轨道交通、核电等关键领域,控制系统软硬件需达到IEC 61508标准规定的SIL3、SIL4高安全完整性等级^[8]。这些合规认证的统一要求是,RTOS的运行行为应可分析、可验证,杜绝运行不确定性风险。

供应链安全可控是装备领域的战略诉求。RTOS作为装备产业的核心基础软件,在产业链中不可或缺。2023年QNX系统对俄罗斯停服导致其生产线瘫痪停产的案例,深刻揭示了单一依赖特定操作系统的巨大风险。当前我国装备产业快速发展,基于标准构建与国际接轨的产品和生态体系,既是发展需求,也是安全需求。

全生命周期成本管控是装备产业的关键诉求。重大装备的服役周期普遍长达数十年,若RTOS始终处于过度分化状态,随着装备型号迭代、品类增多,行业软件运维成本将呈指数级增长^[9]。同时,定制化的RTOS会形成供应锁定,压缩选型空间,不利于成本管控。

4.2 “一个底座、按需裁剪”的技术路径。基于上述分析,本文针对性提出“一个底座、多场景裁剪”的标准化发展路径。其核心是:推动建立统一的RTOS架构和内核接口标准,通过环境配置裁剪形成适配不同场景的实例。

首先,确立统一系统架构。参照ARINC 653的成功经验,在架构层面定义实时操作系统的核心模型——包括分区管理、任务管理、健康监控等核心机制,如图1所示。系统架构的需求来源应来自汽车、航空、轨道交通、航天、核电等所有对高可靠实时性有要求的领域。

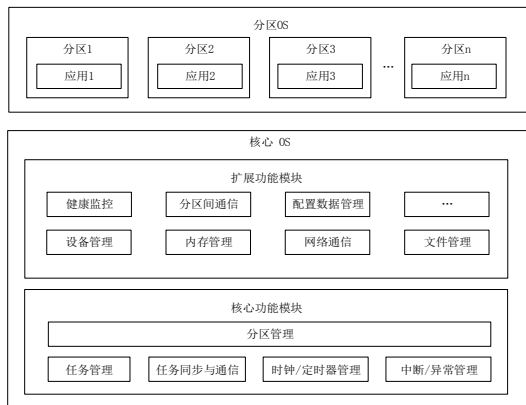


图1 嵌入式实时操作系统结构

其次,统一内核接口规范。在统一系统架构的基础上,定义标准化的内核接口。接口标准可充分借鉴POSIX、ARINC653等实践,规定任务管理、内存管理、中断处理、时间管理、分区管理等核心功能,通过接口定义RTOS的确定性行为边界。

再次,建立环境配置标准。在系统架构和接口一致的前提下,允许内核按需裁剪和加载。用于汽车动力控制器的OS可能需要兼容AUTOSARCP;用于航空电子系统的OS可能需要完整的分区支持;用于航天控制系统的OS可能更关注适应极端环境的超轻量级实现。这些都可以通过不同的环境配置来实现。

最后,构建标准认证体系。标准的价值在于实施,“有标不依”的现象必须扭转。应推动建立接口标准配套的测试和认证体系,并对进入装备市场的OS持续进行功能性、可靠性和安全性测试认证。

4.3产业生态的构建。标准制定只是第一步,围绕标准构建起完整产业生态才能真正解决问题,为此必须政策、组织和技术开放“多管齐下”。

在政策引导层面,装备重大专项应将RTOS的标准符合性作

为重要考量指标,引导操作系统向统一标准收敛。

在开源实现层面,应积极推动RTOS的参考技术实现。开源不仅可以降低开发门槛,更重要的是可以加速标准的验证和迭代。

在产业联盟层面,应组建由汽车、航空等领域的装备企业参与产业联盟。由联盟制定和维护标准,并执行互操作性测试、人才培养等市场任务。

5 结论与建议

基于需求和技术分析,本文提出以下建议:

第一,加快推进核心标准体系建设。建议由工业和信息化部相关单位牵头,联合交通、航天等骨干企业和科研机构,借鉴国内外经验,尽快制定实时操作系统框架和接口标准。

第二,构建标准符合性测试认证体系。依托电子信息行业检测检验权威机构,建立嵌入式操作系统标准符合性测试和认证平台,推动将标准认证结果作为重大装备采购和项目立项审查。

第三,推进标准开源参考实现与生态培育。鼓励开源社区和产业联盟实现标准接口的开源RTOS实现,以丰富标准验证环境,降低标准实施成本,并以此为纽带培育生态。

嵌入式实时操作系统的标准化,并非扼杀创新和多样性,而是要在多样性实现之上建立统一规则,让创新在更高的层面上开展。这既是提升产业整体效益的理性选择,也是保障重大装备供应链安全的战略需求。在全球操作系统产业格局深刻变革的当下,抓住标准这一关键抓手,推动我国嵌入式实时操作系统产业“集约发展”,正当其时。

【参考文献】

- [1]VDCResearch. IoT & Embedded Operating Systems Market Report[R].2025.
- [2]IEEE Std 1003.1:Standard for Information Technology—Portable Operating System Interface (POSIX)[S].IEEE,2024.
- [3]AUTOSAR Classic Platform Standard[S].AUTOSAR Development Partnership,2025.
- [4]ARINC 653:Avionics Application Software Standard Interface[S].Aeronautical Radio,Inc.,2025.
- [5]ISO 26262:Road Vehicles—Functional Safety[S].International Organization for Standardization,2018.
- [6]IEC 61508: Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems[S].International Electrotechnical Commission,2010.
- [7]GJB 5357:航空电子应用软件接口要求[S].中国人民解放军总装备部.2017.
- [8]GB/T 47689-2026:网络安全技术嵌入式操作系统安全技术规范[S].国家标准化管理委员会,2026.
- [9]RT-Thread Technology.RT-Thread Operating System Technical White Paper[R].2025.

作者简介:

陈亚军(1980--),男,江苏常州人,硕士,高级工程师,主要研究方向:文档处理技术及信息化应用,嵌入式操作系统等。