 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i1.9247

Research on Key Technologies of Embedded Software Performance Improvement

Likun Wang

China Electronics Technology Group Corporation, 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Embedded systems are extensively utilized in industrial control, smart manufacturing, automotive electronics, IoT, and defense equipment. The performance of their core—embedded software—directly impacts system real-time performance, reliability, and energy efficiency. With increasing device complexity and computational demands, software performance optimization has become a critical design consideration. This paper analyzes performance bottlenecks and focuses on key technologies including architecture optimization, scheduling mechanism improvements, memory management enhancement, parallel processing, and compilation optimization. Experimental validation on typical platforms demonstrates that multi-level optimization strategies significantly improve execution efficiency, reduce energy consumption, and enhance system stability. The study identifies software-hardware co-optimization, intelligent scheduling, and adaptive resource management as primary directions for future embedded software performance enhancement, providing theoretical foundations and technical support for the efficient and sustainable development of intelligent embedded systems.

Keywords

embedded software; performance optimization; scheduling mechanism; memory management; compilation optimization; system coordination

嵌入式软件性能提升关键技术研究

王立锟

中国电子科技集团有限公司第十研究所，中国 · 四川 成都 610000

摘　要

嵌入式系统广泛应用于工业控制、智能制造、汽车电子、物联网及国防装备等领域，其核心——嵌入式软件性能直接影响系统的实时性、可靠性与能效表现。随着设备功能复杂化与计算需求提升，软件性能优化成为设计关键。本文在分析性能瓶颈的基础上，重点研究体系结构优化、调度机制改进、内存管理强化、并行处理与编译优化等关键技术。通过典型平台实验验证，多级优化策略可显著提升执行效率、降低能耗并增强系统稳定性。研究指出，软硬件协同优化、智能调度与自适应资源管理是未来嵌入式软件性能提升的主要方向，为智能嵌入式系统的高效与可持续发展提供了理论依据与技术支撑。

关键词

嵌入式软件；性能优化；调度机制；内存管理；编译优化；系统协同

1 引言

嵌入式系统以高可靠性、低功耗和实时响应为特征，广泛应用于航空航天、工业控制、医疗设备及智能家居等领域。随着人工智能、物联网和边缘计算的发展，嵌入式设备的计算复杂度显著提升，传统静态设计与固定调度模式难以满足多任务并发与能效需求。当前系统发展呈“智能化、网络化、协同化”趋势，任务调度效率低、内存管理不足和硬件利用率不高成为主要瓶颈。本文从性能优化角度出发，系统分析嵌入式软件的性能制约因素与改进路径，探讨关键技术的实现机制与应用效果，为实现高效运算与低延迟响应提供理论支持与工程参考。

【作者简介】王立锟（1982–），男，中国山东泰安人，硕士，工程师，从事计算机应用及软件研发技术研究。

2 嵌入式软件性能瓶颈分析与影响因素

2.1 系统资源受限与硬件异构带来的挑战

嵌入式系统由于体积小、能耗低和成本控制严格，其硬件资源普遍受限。存储空间有限、处理能力不足以及功耗约束成为性能优化的核心瓶颈。随着多核 CPU、GPU 及 FPGA 等异构计算单元的引入，系统架构复杂度显著提升。不同计算单元的指令集体系、缓存访问方式和通信协议存在差异，任务在异构平台间迁移时容易产生数据同步延迟和资源竞争。若缺乏统一的任务调度与负载均衡机制，部分计算单元可能出现闲置或过载现象，从而降低整体系统吞吐率与

响应速度。如何在受限资源条件下实现异构计算单元间的高效协同，成为嵌入式系统优化的关键技术难点之一。

2.2 任务调度与实时性矛盾

嵌入式系统多任务并发常见，如数据采集、信号处理等。实时操作系统用基于优先级的抢占式调度保关键任务响应，但任务多或负载波动大时，频繁上下文切换与中断响应会产生额外延迟，高实时场景还易出现“优先级反转”。为平衡实时性与效率，需在任务划分等方面动态优化，引入自适应调度或 EDF 混合策略可提升响应确定性。

2.3 软件开发模式与编译链优化不足

传统嵌入式软件开发靠人工经验优化，手动调整代码难以适应复杂多核与异构平台。编译器优化层次不足，仅在语法和局部指令层面，未结合系统运行特征跨层次调优。同时，代码存在模块重复、算法低效等问题，导致 CPU 周期浪费和能耗上升。缺乏智能编译优化框架，代码无法精准适配硬件架构，成为性能提升的主要瓶颈。

3 体系结构与任务调度优化技术

3.1 多核架构下的任务并行化与负载均衡

多核架构提升了嵌入式系统计算并行性，让多任务实时处理得以实现。任务并行化把复杂计算拆成独立子任务，映射到不同核心执行，能缩短响应时间、提高系统吞吐率。但多核利用关键在于负载均衡，静态调度在系统初始化时划分任务，适用于任务模式固定的场景；动态调度则实时监控 CPU 占用率等参数，动态调整任务分配。近年提出的自适应任务迁移算法，通过检测线程状态与缓存一致性，在多核间迁移任务优化资源利用，可提升处理器平均利用率超 20%，降低任务响应抖动，保障系统高效运行。

3.2 实时操作系统的调度策略改进

实时操作系统（RTOS）是嵌入式系统实现任务可预测性和确定性的核心支撑。传统的基于优先级抢占调度（如 Rate Monotonic，RM）在高负载下易发生优先级反转与资源饥饿现象。改进方案引入最短截止时间优先（EDF）与能耗感知调度机制，依据任务的截止时间、执行时间与能耗模型动态调整优先级，从而在保持实时性的同时实现节能控制。部分 RTOS（如 FreeRTOS、RT-Thread）已在内核层集成自适应调度模块，能够根据任务特征与系统状态自动分配 CPU 时间片。实验数据显示，EDF 结合动态电压频率调节（DVFS）可在保证任务实时响应的前提下，将系统能耗降低约 15%，有效提升了系统整体的能效比与实时调度的灵活性。

3.3 任务通信与同步机制的轻量化设计

任务通信与同步机制直接关系到嵌入式系统的实时性与并行效率。传统的互斥锁与信号量机制虽能保证共享资源的访问安全，但频繁的任务阻塞与上下文切换会造成性能损失。为降低同步开销，现代嵌入式系统广泛采用无锁队列、环形缓存与基于事件驱动的通信模式，实现非阻塞式数据交互。此类机制通过原子操作与内存屏障技术，减少锁竞争与等待时间。结合软件流水线与数据流模型，可实现多任务间的流水化执行与并行数据传输，进一步提升系统整体并发性能。研究表明，在高频任务交互场景中，轻量化通信机制可降低系统延迟约 25%，有效提高实时性与资源利用率，为复杂嵌入式应用提供高效的任务协同基础。

4 内存管理与存储访问优化策略

4.1 内存分配机制的动态优化

嵌入式系统在资源受限的环境下运行，其内存管理效率直接决定系统性能与稳定性。传统的静态分配方式缺乏灵活性，难以应对多任务并发与动态负载变化。动态内存分配机制通过实时调整内存块大小，实现高效的空间利用与碎片控制。Buddy 系统通过分区分块的合并与分裂策略快速响应内存请求，TLSF（Two-Level Segregated Fit）算法则在时间复杂度与碎片率之间取得平衡，适用于实时性要求高的场景。引入内存池与对象复用机制后，系统能够减少频繁申请与释放造成的内存抖动，显著提升分配效率。实验数据显示，优化后的动态管理机制可提升约 15% 的可用内存空间，同时降低碎片率与内存分配延迟，为嵌入式系统的稳定运行提供了高效支撑。

4.2 缓存管理与数据局部性优化

缓存机制在嵌入式系统性能提升中具有决定性作用。多级缓存结构通过层次化管理数据访问路径，减少主存访问次数与延迟。结合预取策略与替换算法优化，可进一步提升缓存的命中率与带宽利用率。软件层面，数据局部性优化是关键路径之一，通过分析程序的访问模式与数据依赖关系，对数据结构进行重排与块化处理，可显著改善空间与时间局部性。例如在嵌入式 DSP 系统中，对循环数组进行块化存储与分块访问，使得缓存命中率提升 20% 以上，从而有效降低主存访问能耗。通过软硬件协同设计，缓存优化不仅提高了系统的响应速度，也实现了功耗与性能的双重平衡。

4.3 非易失性存储访问加速技术

随着嵌入式设备对数据可靠性与持久化的需求增强，NAND Flash 与 eMMC 等非易失性存储成为系统性能优化的重点。由于 Flash 存储存在写入延迟大、擦除次数有限等特点，优化其访问路径尤为重要。通过异步 I/O 队列、写入合并及批量提交机制，可显著减少写入次数与等待时间，提升整体吞吐率。文件系统层面，采用页缓存与日志型文件系统（如 JFFS2、UBIFS）能有效规避频繁擦写带来的寿命损耗，并改善随机读写性能。研究结果表明，基于该技术的存储优化方案在典型嵌入式应用中可提升读写速率 25% 以上，同时延长 Flash 寿命约 30%，实现了性能、可靠性与能效的系统级平衡。

5 编译优化与软硬件协同加速技术

5.1 基于静态与动态分析的编译优化

现代嵌入式系统的性能优化离不开编译阶段的智能分析与指令级调度。静态分析通过控制流图与数据依赖分析识别热点代码、消除冗余计算与死代码，从而优化指令序列和内存访问路径。动态分析则依托运行时反馈信息（如分支命中率、函数调用频率）对编译策略进行实时调整，实现性能的持续自适应提升。LLVM 框架中的反馈导向优化（PGO）技术可在跨平台环境下实现多轮性能迭代优化。实验证明，PGO 结合循环展开、寄存器分配优化和函数内联技术，可在典型嵌入式场景中提升 10% ~ 25% 的执行效率，为系统在功耗与性能间取得平衡提供了可行途径。

5.2 指令级并行与硬件特性利用

嵌入式处理器通常具备单指令多数据（SIMD）与超长指令字（VLIW）等并行执行特性，充分利用这些特性是性能优化的关键。通过矢量化计算与流水线调度，可显著提高指令执行并行度，减少处理延迟。软件层面可结合编译器内建函数、手写汇编指令与指令调度算法，对关键计算模块进行针对性优化，以提升缓存利用率与内存访问效率。以 ARM Cortex-A 系列平台为例，针对 DSP 类任务采用 SIMD 优化与手工指令重排后，执行时间平均缩短约 20%。这种深度结合硬件特性的编译与算法级协同优化，为嵌入式应用在性能与能效之间提供了最优解。

5.3 软硬件协同优化策略

软硬件协同优化代表着嵌入式性能提升的系统化发展方向。通过在硬件架构中集成特定任务的协处理单元（如加密引擎、信号处理加速器、AI 推理单元等），可将计算密集型操作从主处理器卸载，显著减少核心负载与功耗。软件层面通过驱动程序与 API 接口实现任务分配与并行调度，并利用协同仿真平台进行系统级性能预测与验证。联合编译策略进一步保证了软硬件接口的一致性与时序同步。研究表明，在复杂信号处理与深度学习推理任务中，协同优化可提升系统吞吐率 30% 以上，延迟下降 20% 左右，为嵌入式系统的高性能与低功耗设计提供了可持续的技术路径。

6 能耗优化与性能评估体系

6.1 功耗感知的任务调度与资源管理

在能源受限的嵌入式设备中，功耗与性能之间的平衡是系统设计的核心问题。功耗感知任务调度通过对系统负载的动态感知与能耗建模，实现资源的按需分配与功率自适应控制。动态电压与频率调节（DVFS）技术能够根据实时任务负载与优先级调整 CPU 频率和电压，以最小能耗满足性能要求。同时，引入基于任务重要性与截止时间的能耗优化模型，使关键任务优先获得高性能资源，而非关键任务采用低功耗模式运行。该策略可显著降低整体能耗 10%~30%，并避免系统因过度节能造成的性能退化，实现能效与任务时效性的双重最优。

6.2 性能监测与反馈调优机制

性能监测是嵌入式系统优化的基础环节。通过硬件性能计数器（PMC）采集缓存命中率、指令吞吐量、分支预测准确率等关键数据，结合 Perf、Valgrind 等软件分析工具，可实现系统性能的可视化与瓶颈定位。建立基于数据驱动的反馈调优机制，能够根据监测结果自动调整线程分配、缓存策略及功耗模式，形成“监测—分析—调优—验证”的闭环优化过程。该机制不仅提升了系统的自适应能力，也实现了在不同工作负载下的性能动态均衡，确保嵌入式设备在资源受限环境中持续保持高效运行。

6.3 面向场景的综合评估方法

嵌入式系统性能优化的科学性取决于场景化评估体系的构建。针对不同应用领域，应采用差异化指标体系：工业控制系统强调实时响应与可靠性；移动智能终端侧重功耗、热管理与续航能力；边缘计算节点需综合计算密度、通信延迟与能效比。通过引入层次化分析与多维指标加权模型，可实现从单指标性能向综合性能的量化评估。该方法不仅可准确反映优化策略的整体收益，还能为系统架构调整与算法改进提供数据依据，从而推动嵌入式系统在多样化应用场景下实现精细化、智能化和可持续优化。

7 结语

嵌入式软件性能优化是一项系统性工程，涵盖体系结构、调度机制、内存管理、编译优化与能耗控制等环节。研究表明，多层次协同优化可显著提升系统运行效率与稳定性。未来性能提升将依托人工智能驱动的自适应优化与软硬件协同设计，智能调度、能耗感知计算及安全可信机制的融合将推动嵌入式系统向高效、可靠、智能方向演进。实现性能与资源利用的动态平衡，不仅是技术创新的核心目标，也是支撑工业自动化、智慧城市与国防装备持续发展的关键路径。

参考文献

[1] 韩宝国,朱平芳.产品智能化、嵌入式软件与中国工业增长[J].南京社会科学,2022,(03):32-41.

[2] 刘维维.基于AADL的嵌入式软件可靠性建模与评估技术研究[D].南京航空航天大学,2017.

[3] 倪思如.嵌入式软件可信性建模与验证技术的研究及其应用[D].南京航空航天大学,2016.

[4] 栾图.嵌入式软件测试方法的研究[D].大连理工大学,2015.

[5] 郭旺.嵌入式软件覆盖测试通用技术研究[D].西南大学,2015.