嵌入式软件实时性能测试与计算机仿真验证技术研究

刘泽宇
洛阳电光设备研究所　河南 洛阳　471000

摘　要　嵌入式软件的响应时延、任务调度效率与运行稳定度，均会对设备整体运行的安全可靠性产生影响。传统实物测试方式存在硬件成本高、测试场景单一、极限工况无 法复现等问题，无法全面检验嵌入式软件的实时性能。本文从计算机测试与仿真技术的角度出发，分析嵌入式软件实时性能的核心指标与测试难点，梳理传统测试技术存在的不足，构建系统的实时性能测试体系，研究计算机仿真验证的技术路线，搭建仿真测试平台并开展实测对比分析。通过仿真技术对各类复杂运行工况进行模拟，可克服实物测试的不足，提升嵌入式软件实时性能测试的全面性与精确性，为嵌入式软件的性能优化与可靠性验证提供技术支持。

关键词　嵌入式软件；实时性能；性能测试；计算机仿真

Research on Real-Time Performance Testing and Computer Simulation Verification Technology for Embedded Software

Liu Zeyu
Luoyang Electro-Optical Equipment Research Institute, Luoyang 471000, Henan Province, China

Abstract　The response latency, task scheduling efficiency, and operational stability of embedded software all affect the overall operational safety and reliability of equipment. Traditional physical testing methods suffer from problems such as high hardware costs, limited test scenarios, and the inability to reproduce extreme operating conditions, making it impossible to comprehensively verify the real-time performance of embedded software. From the perspective of computer testing and simulation technology, this paper analyzes the core indicators and testing difficulties of embedded software real-time performance, reviews the shortcomings of traditional testing techniques, constructs a systematic real-time performance testing framework, studies the technical roadmap for computer simulation verification, builds a simulation testing platform, and conducts comparative analysis with actual measurements. By simulating various complex operating conditions through simulation technology, the shortcomings of physical testing can be overcome, the comprehensiveness and accuracy of embedded software real-time performance testing can be improved, and technical support can be provided for performance optimization and reliability verification of embedded software.

Key words　Embedded Software; Real-Time Performance; Performance Testing; Computer Simulation

嵌入式软件担负着数据采集、指令执行、设备控制、数据交换等主要工作，如果出现响应滞后、调度混乱、时序错乱等情况，很容易造成设备故障和安全隐患。传统的性能测试依靠实体硬件来创建测试环境，受限于硬件参数、运行场景、工况条件等各方面的影响，无法满足全部的场景测试要求。计算机仿真技术可以利用虚拟建模创建全维度的测试环境，实现工况复刻、极限测试、批量迭代测试，较好地克服了传统测试的不足。对嵌入式软件实时性能测试与仿真验证技术进行深入的研究，对于提高嵌入式软件运行的可靠性，适应复杂的工业场景的应用有着十分重要的意义。

1　嵌入式软件实时性能核心指标与测试难点

1.1 实时性能核心评价指标

嵌入式软件的实时性能用于评价系统任务执行的时效性，主要评价指标包括任务响应时延、任务调度耗时、系统吞吐率、任务抖动率、资源占用率。任务响应时延是系统从接收指令到执行完成所耗费的时间，是衡量系统实时性最直接的指标。任务调度耗时反映系统多任务分配与任务切换的整体表现，会直接影响多任务并行运行的效果[1]。系统吞吐率指单位时间内系统处理的数据量与完成的指令执行次数，是体现软件运行速度的核心指标。任务抖动率用于表征任务执行周期的稳

定性，抖动值越小，系统运行越平稳。资源占用率通过CPU、内存的占用情况，衡量软件长时间稳定运行的能力。

1.2 嵌入式软件实时运行基本特征

与通用计算机软件相比，嵌入式软件具有强实时性、任务耦合性、资源受限性、工况动态性这4个特点。嵌入式系统大多属于硬实时系统，任务的执行有严格的时限要求，一旦超时就会造成系统失灵。系统多任务并行运行，存在优先级差别以及资源抢占关系，任务耦合度比较高。嵌入式硬件的算力、内存资源都有限，软件要在这样的环境下快速运行。设备在运行时任务负荷、数据流量、外界环境的变化都会造成实时性能测试的困难。

1.3 实时性能测试现存技术难点

根据嵌入式软件运行特点，其实时性测试存在着很多的技术难点。一是复杂的工况没有被覆盖，实物测试只能再现正常的场景，不能模拟出极端的负载、突发的任务以及异常的数据等特殊的工况。二是数据采集精度低，传统的测试工具采样频率不够高，不能准确地捕捉到微秒级的时延和瞬时性能变化，微小的性能缺陷也很难被发现。三是耦合干扰很难剥离，同时进行的并行任务之间互相干扰，不能准确找到性能损耗的来源。四是测试成本高、迭代效率低，硬件损耗大、场景搭建繁杂，不能满足软件高频迭代的快速测试要求。

2 传统嵌入式软件实时性测试模式及弊端分析

2.1 实物硬件平台测试模式

实物硬件测试是传统嵌入式软件性能测试的主要方式，依靠真实的嵌入式硬件设备搭建测试环境，将编译好的软件程序烧录到硬件终端上，用外接测试仪器检测软件运行状态。测试人员对设备运行工况进行人工调节、对任务数量进行调整、对数据输入量进行改变，从而得到软件的各项性能指标数据。该模式依靠真实的硬件运行环境来开展测试工作，测试结果具有一定的真实性，适合于软件基础性能的检验以及常规工况的测试，是早期嵌入式软件测试的主要方法。

2.2 传统测试模式核心弊端

两类传统的测试模式在实际使用中存在着明显的不足，不能满足高实时性嵌入式软件的测试要求。全实物测试硬件依赖性大，测试场景的扩展性差，极限负载、突发干扰等特殊场景不能模拟出来，测试覆盖范围小。半实物仿真模式仿真程度低、模型精度不够，虚拟模块与实物硬件的数据交互有误差，测试结果的准确度得不到保证。传统测试模式数据自动化分析能力不足，主要依靠人工统计研判来完成，测试效率低下，容易出现错误，不能达到性能缺陷精准追溯的目的，无法支撑高精度嵌入式软件性能改进迭代[2]。

3 计算机仿真验证技术体系与运行原理

3.1 计算机仿真测试整体架构

本文创建全计算机仿真测试架构，摆脱实物硬件依赖，用虚拟建模来实现嵌入式系统全部要素仿真，整体分为三层架构。底层为硬件虚拟建模层，正确模拟嵌入式CPU、内存、总线、外设接口等核心硬件参数，创建出标准的虚拟硬件运行环境。中层为软件运行仿真层，加载嵌入式软件程序，对软件任务调度、数据处理、指令执行全过程进行完整的仿真模拟。顶层为测试分析层，集成工况配置、数据采集、指标分析、缺陷研判、结果输出等功能，形成闭环自动化仿真测试体系。

3.2 核心仿真建模技术

计算机仿真测试的核心在于高精度虚拟建模，主要包含硬件参数建模、任务场景建模、外部工况建模三类关键技术[3]。硬件参数建模依据真实硬件的运行指标，复刻算力水平、资源分配、数据传输等核心参数，保证虚拟环境与实物环境的运行状态趋近一致；任务场景建模根据软件功能需求构建多优先级、并行化、突发性的典型任务运行场景；外部工况建模通过对各类外部运行工况建模，模拟工况波动、高频输入、交互异常等情况，完成完整测试环境的搭建。

3.3 实时性能数据采集与分析原理

计算机仿真系统配有高精度采集模块，采用微秒级高频采样方式，对软件时延、调度、资源占用、任务抖动等主要性能指标进行全方位的采集。系统自带标准化评价算法，可以自动比较各项指标与设计阈值、行业标准之间的差异，准确找出性能超标、运行卡顿、调度紊乱的问题。依靠数据溯源技术，准确找到造成性能损耗的代码模块和任务环节，为嵌入式软件性能改善提供精确、有效的数据支撑。

4 嵌入式软件实时性能测试与仿真验证实施流程

4.1 仿真测试环境搭建与参数配置

根据待测嵌入式软件的硬件适配要求和功能特点，搭建仿真环境并进行参数初始化设置。首先，录入嵌入式硬件核心参数，创建虚拟硬件平台，对总线传输速率、内核调度规则、硬件资源上限等主要参数进行校准，保证虚拟环境的真实性。其次，按照软件设计指标来设定性能测试阈值标准，确定时延、吞吐量、资源占用率等指标的合格范围。最后，对基础测试工况进行划分，分为常规工况、高负载工况和极限工况3种测试场景，做好仿真测试的前置工作。

4.2 多场景实时性能自动化测试

利用计算机仿真平台开展多场景的自动化测试，依次进行基础性能测试、负载性能测试、稳定性测试、极限性能测试。基础性能测试模拟常规运行工况，对软件正常工作时的各项实时性能指标进行检测[4]。随着负载性能测试任务的增多、数据处理量的增大，软件高负载状态下的调度效率和响应速度被逐渐纳入测试范围。稳定性测试就是用长时间连续运行来检验软件长时间运行时的时延抖动和资源泄漏问题。极限性能测试突破常规的运行参数，对软件极限工况下的实时性能阈值和容错能力加以检验。

4.3 测试数据整理与性能缺陷研判

仿真测试结束之后，系统会自动汇总全场景测试数据，生成标准的性能测试报告，清楚地呈现出各个工况下软件各项性能指标参数。测试人员按照事先设定的标准以及行业规范来对比分析指标的达标状况，找出响应超时、调度卡顿、资源占用过多、抖动率过高等缺陷。同时利用仿真平台的溯源功能来确定缺陷产生的根本原因，将缺陷分为代码逻辑缺陷、任务调度算法缺陷、硬件兼容性缺陷等不同类型，为后续的软件优化提供准确的依据。

4.4 迭代优化与二次仿真验证

对测试出的性能缺陷联合软件开发人员进行代码优化、调度算法调整、任务优先级重新安排等工作。优化后又启动计算机仿真测试流程，复现相同的测试工况，比较优化前后性能指标的变化，检验优化措施的有效性。经过多次的迭代测试和优化，不断改善嵌入式软件的实时性，直到所有的指标达到设计标准以及行业应用的要求为止，然后做最后的仿真验证工作[5]。

5 仿真测试与传统测试技术成效对比分析

为了直观地体现计算机仿真验证技术的优势，选择同一个工业控制嵌入式软件作为测试对象，在传统的实物测试和计算机仿真测试之间做对比试验，统计核心测试效能和性能指标的数据，定量分析技术优化的效果，见表1。

表1 测试效能数据

测试效能指标	传统实物测试模式	计算机仿真测试模式
单轮测试耗时	48 h	12 h
可覆盖测试场景数量	12 类	36 类
数据采样精度	毫秒级	微秒级
人工干预频次	高频干预	全自动运行

如表1所示，计算机仿真测试技术可显著提升嵌入式软件性能测试的测试效率与覆盖范围。仿真测试无须依托实物硬件开展调试，可实现全流程自动化运行，能够大幅压缩测试周期，降低人工操作产生的误差。同时该技术可模拟诸多传统测试模式无法实现的极限工况与复杂交互场景，测试场景覆盖范围可扩大3倍以上，能够精准捕捉细微的性能波动，有效解决传统测试模式测试精度不足、适用场景受限的问题。

性能验证数据（见表2）体现出仿真技术的优点，常规工况下两种测试模式的主要指标基本一致，证明了仿真建模的正确性、可靠性。高负载、极限工况下计算机仿真测试可以发现传统测试中忽略的隐性性能缺陷，有效地降低任务运行抖动率，显著提高极限工况适应性，使其能够胜任复杂多变的工业运行环境。

表2 性能验证数据

软件性能验证指标	传统实物测试模式	计算机仿真测试模式
任务平均响应时延	8.6 ms	8.5 ms
高负载任务抖动率	3.2%	1.1%
极限工况测试通过率	75.0%	98.6%
性能缺陷识别率	82.3%	99.2%

6 结束语

嵌入式软件的实时性能是保证智能设备、工业控制系统稳定运行的关键因素，传统的实物测试、半实物仿真测试存在场景有限、精度不高、效率低等问题，不能满足高实时性嵌入式软件的测试要求。本文利用计算机仿真技术，建立全虚拟仿真测试系统，确定硬件建模、工况模拟、数据采集、迭代优化的全过程。实测数据表明，计算机仿真验证技术可以有效地扩大测试场景，提高测试精度，缩短测试时间，准确找到软件的隐性性能问题，明显改善嵌入式软件的实时运行稳定性。

参考文献

[1]刘如松,王辉.关于嵌入式软件测试关键技术的研究[J].电脑编程技巧与维护,2024(3):27-29.

[2]甘玉涛,夏莫戛.基于嵌入式的计算机软件测试技术探析[J].数字技术与应用,2024,42(11):161-163.

[3]郭延鹏.计算机仿真技术在汽车工程中的应用探讨[J].汽车知识,2024(12):245-247.

[4]张松,佟昭龙,任栋栋.基于计算机仿真技术的机械制造过程优化[J].计算机应用文摘,2025,41(18):202-204.

[5]王立伟.计算机仿真技术在包装机械设计制造中的应用[J].现代制造技术与装备,2024,60(8):216-218.

（本文编辑 曹 阳）