

Practical teaching case design of embedded development based on RISC processor

Nan Li Ling Zhang

Computer School, North China Institute of Astronautic Engineering, Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

Based on the ESP32 series processors with RISC instruction set architecture and the domestic open-source real-time operating system RT-Thread, a practical teaching case for the development of a smart home system is constructed. Firstly, the RT-Thread system is transplanted onto the ESP32-S2 development board, and on this basis, the application of the smart home system is designed and developed. The design and specific implementation process of this practical teaching case are introduced, covering environment setup, system transplantation, functional analysis, driver development, application development and test optimization. This case features three major characteristics: software-hardware collaboration, system integration and innovative application, and is both innovative and practical. The effect of practical teaching shows that students' system development ability has been significantly improved.

Keywords

Teaching Case; RISC Processor; ESP32; RT-Thread; Smart Home

基于 RISC 处理器的嵌入式开发实践教学案例设计

李楠 张玲

北华航天工业学院计算机学院, 中国 · 河北 廊坊 065000

摘要

基于采用RISC指令集架构的ESP32系列处理器和国产开源实时操作系统RT-Thread, 构建一个智能家居系统开发实践教学案例, 首先在ESP32-S2开发板上移植RT-Thread系统, 并在此基础上设计开发智能家居系统的应用。介绍了该实践教学案例的设计和具体实施过程, 涵盖环境搭建、系统移植、功能分析、驱动开发、应用开发与测试优化。本案例具有软硬协同、系统集成与创新应用三大特色, 兼具创新性与实用性。实践教学效果表明, 学生的系统开发能力得到了明显提升。

关键词

教学案例; RISC处理器; ESP32; RT-Thread; 智能家居

1 引言

随着物联网、智能制造和人工智能等新兴技术的快速发展, 嵌入式系统作为连接物理世界与数字世界的核心载体, 其技术需求呈现指数级增长。特别是在国家“十四五”规划中, 信创产业(信息技术应用创新)被列为重点发展领域, 对具备嵌入式系统开发能力的复合型人才提出了更高要求^[1]。在此背景下, 一些高校逐步将实时操作系统(RTOS)纳入教学体系, 旨在通过理论与实践相结合的方式, 培养适应产业需求的工程型人才^[2]。

以ESP32为代表的采用类RISC和RISC-V指令集的低功耗硬件平台因其高性价比、丰富的外设接口及开源生态,

成为教学实践的理想载体^[3]。基于此, 课程内容聚焦于轻量级RTOS(如RT-Thread)的系统移植、硬件驱动开发、多任务调度与资源管理等关键技术路线。这一教学设计不仅突破了传统课程对单一硬件功能的验证式学习, 更通过引入RTOS内核移植、任务优先级划分、中断处理机制等模块化设计思想, 强化学生对系统架构设计的全局认知^[4]。嵌入式开发的工程实践性要求, 决定了教学必须突破传统“代码实现”层面的局限。通过设计物联网设备开发、多传感器数据融合与控制等综合性实验项目, 课程将系统移植、驱动开发与应用层逻辑整合为完整的工程闭环, 使学生在解决复杂问题的过程中, 深入理解RTOS底层原理与系统协同优化策略。这种以“平台+系统+应用”为核心的实践模式, 不仅契合信创产业对软硬件协同开发能力的需求, 也为高校嵌入式人才培养提供了可复制的教学范式。

2 RISC 指令集处理器

Xtensa® 32 和 RISC-V 均为可配置的处理器架构, 通

【基金项目】2023年河北省高校创新创业课程立项课题(项目编号: CXCCKC-2023-07), 负责人: 李楠。

【作者简介】李楠(1976-), 男, 中国河北张家口人, 硕士, 讲师, 从事计算机应用、机器学习应用研究。

过可扩展的基础指令集加扩展模块,支持从超低功耗微控制器到高性能计算单元的全场景覆盖。这一特性削弱了专利授权限制,降低了芯片设计成本,同时通过精简指令集和流水线优化技术,显著提升了能效比^[9]。在相关处理器方面,我国乐鑫科技公司设计的ESP32多个系列处理器基于类RISC和RISC-V指令集设计,已成为国内RISC-V生态的典型代表。以ESP32-S3为例,该处理器集成了Wi-Fi 802.11 b/g/n模块及蓝牙5.0协议,支持多任务并行处理与无线通信。其512KB SRAM和2MB内置Flash的存储配置,结合丰富的GPIO接口与ADC/DAC模块,为传感器数据采集与边缘计算提供了硬件基础^[3]。

ESP32系列的核心开发框架ESP-IDF,通过统一API抽象层实现对 Xtensa 与 RISC-V 双架构的无缝支持,构建了覆盖C/C++、MicroPython等多语言的开发体系。在工具链层面,乐鑫构建了基于xtensa-esp32s3-elf-gcc的全流程开发工具^[9]。RISC-V指令集架构与ESP32系列处理器的结合,不仅推动了开源指令集在工业控制、智能家居等领域的应用,也为高校嵌入式教学提供了实践平台。例如,基于ESP32-P4处理器的设计案例,通过SystemVerilog代码实现寄存器组、ALU控制单元等模块,进一步验证了开源架构的灵活性与教学价值。

3 RT-Thread 操作系统

RT-Thread是一个国内团队自主研发的开源RTOS,以其轻量级内核、模块化设计和跨平台兼容性著称。其核心功能包括任务调度、内存管理、中断处理及通信机制,适用于资源受限的嵌入式场景。RT-Thread的设计目标是通过可裁剪的组件化架构,支持从超低功耗微控制器到高性能处理器的广泛硬件平台。在指令集架构的支持方面,RT-Thread已实现对ARM Cortex-M系列和RISC-V的深度适配。这种跨指令集的兼容性得益于RT-Thread对底层硬件抽象层的封装设计,开发者只需适配特定处理器的寄存器配置与中断机制,即可快速完成移植。

RT-Thread的开源特性与模块化架构,使其成为高校嵌入式教学和工业开发的理想选择。通过在RISC-V或ARM平台上的实践,学生能够深入理解RTOS的底层原理与系统移植方法,而开发者则可借助其丰富的组件库,如RT-Thread的命令行组件FinSH、设备驱动框架,加速产品开发进程^[6]。

4 教学案例设计

在物联网技术的快速发展的背景下,智能家居系统对实时性、稳定性和低功耗的需求日益提高。ESP32-S2作为乐鑫科技推出的高性能Wi-Fi/BLE双模SoC,凭借其RISC-V架构、丰富的外设接口和低功耗特性,成为智能家居设备的核心控制器。然而,裸机开发难以满足复杂任务的多线程管理需求。这里以RT-Thread实时操作系统(RTOS)

为基础,提出一种在ESP32-S2上移植RT-Thread并开发智能家居系统的完整流程,涵盖环境搭建、系统移植、功能开发与测试优化。

4.1 案例操作流程设计

ESP32-S2处理器上移植RT-Thread操作系统并开发智能家居系统的主要流程如下。

4.1.1 环境准备

首先,安装工具链。安装ESP-IDF;官方开发工具RT-Thread Studio,用于RT-Thread项目创建与调试;配置Python、CMake和交叉编译工具链,如Xtensa®32位LX7和RISC-V工具链。其次,准备ESP32-S2开发板,如ESP32-S2-Kaluga 1或ESP32-S2-WROOM;连接调试器,如J-Link、乐鑫的开发调试工具ESP-Prog,以及其他必要的外设。

4.1.2 RT-Thread 移植

RT-Thread移植包含以下三步:①BSP(Board Support Package)的适配。下载RT-Thread源码,这里推荐使用RT-Thread Studio提供的模板;适配ESP32-S2的硬件抽象层(HAL),包括时钟初始化,即配置系统时钟源(如XTAL或RC振荡器);通过调用rt_hw_interrupt_install()函数实现RT-Thread的中断管理接口;适配ESP32-S2的UART接口,用于调试输出;实现基本外设驱动,支持LED控制、按键输入等。②系统配置。在rtconfig.h文件中启用RT-Thread核心组件,如线程管理、内存管理、FinSH调试工具;通过在esp32_s2_port.c中实现任务调度与中断绑定,来配置RT-Thread与ESP-IDF的接口。③编译与烧录。使用RT-Thread Studio编译工程,然后通过ESP-IDF工具将镜像烧录到ESP32-S2开发板。

4.1.3 智能家居应用开发

应用开发阶段主要包含以下四步:①功能需求分析。首先确定智能家居功能,如温湿度监测、灯光控制、安防报警等;然后需设计相关的通信协议,如Wi-Fi连接路由器、MQTT协议实现远程控制等。②驱动开发。主要涉及以下三方面,传感器驱动,如集成温湿度传感器、空气质量传感器等;执行器驱动,实现继电器控制,如空调、窗帘、LED驱动等;Wi-Fi/BLE驱动,调用ESP-IDF提供的Wi-Fi/BLE API,实现设备联网与远程通信。③RT-Thread应用开发。首先创建多个线程,如传感器采集线程、网络通信线程、用户交互线程;其次实现线程间通信,如传感器数据传递到主控线程;接着通过串口命令调试系统状态;最后配置TCP/IP协议栈,实现设备联网功能。④用户界面与远程控制。这一阶段主要涉及以下2方面,开发Web服务器或手机App,比如基于MQTT协议的远程控制界面;集成RT-Thread的命令行组件FinSH或小型开源的TCP/IP协议栈LWIP提供的HTTP服务。

4.1.4 测试与优化

这一阶段包含以下三方面:①功能测试。验证传感

器数据采集、设备控制逻辑、网络通信稳定性；使用 RT-Thread 的 FinSH 工具调试线程状态和内存占用。②性能优化。优化任务优先级分配，减少上下文切换开销；调整内存池大小，避免内存碎片；优化 Wi-Fi/BLE 功耗模式。③安全性增强。加密敏感数据，如用户身份认证、MQTT 通信；实现固件 OTA 升级功能。

通过以上流程，开发者可以在 ESP32-S2 上快速完成 RT-Thread 的移植，并构建一个功能完善的智能家居系统。

4.2 案例操作关键注意事项

在本案例的操作流程中，有以下几个环节需要重点关注：① ESP32-S2 的 RISC-V 架构适配。在 RISC-V 处理器上移植 RT-Thread 时，需确保与 ESP-IDF 的底层接口兼容，尤其是中断向量的配置。②多线程并发管理。在基于 RT-Thread 时开发应用时，要注意避免高优先级线程阻塞低优先级任务，在代码中需及时响应传感器采集线程。③开源生态利用。在 RT-Thread 系统之上开发应用程序时，有意识地利用 RT-Thread 的软件包生态，如小型开源的 TCP/IP 协议栈 LWIP 和 LFS 文件系统等，从而加速开发。④ Wi-Fi/BLE 功耗优化。ESP32-S2 支持多种省电模式，需结合 RT-Thread 的任务调度策略优化功耗。

5 教学案例实施目标和要求

本教学案例旨在通过在 ESP32-S2 处理器上移植 RT-Thread 操作系统并开发智能家居系统，帮助学生了解各种微控制器、处理器的优缺点，从而具备一定的硬件选型能力；掌握嵌入式实时操作系统（RTOS）的移植方法；掌握物联网硬件开发流程及多线程应用设计能力。通过实践操作，学生需完成从底层系统适配到上层功能实现的全流程开发，培养其对硬件资源管理、任务调度优化及复杂系统集成的综合能力。

5.1 实施目标

首先，达成理论与实践的结合。通过 RT-Thread 的移植过程，理解 RTOS 的核心机制，如任务调度、中断管理、内存分配等，并掌握 ESP32-S2 的硬件特性与驱动开发方法。其次，使学生具备系统开发能力。以智能家居为应用场景，基于 RT-Thread 构建系统，实现多种传感器数据采集、设备控制、Wi-Fi 通信及远程交互功能，提升学生对物联网系统的整体设计和实现能力。最后，使学生遵循工程规范、掌握调试技能。要求学生在设计和实现过程中，遵循软件工程规范，完成代码版本管理、文档编写及系统测试；掌握调试工具的使用方法。

5.2 实施要求

案例的具体实施要求如下：首先在基础能力方面，学生需具备 C 语言编程基础、嵌入式开发环境配置能力及基本硬件接口知识，如 GPIO、UART 的相关知识。其次，项

目成果的具体要求方面，要完成 RT-Thread 在 ESP32-S2 的移植（含 BSP 适配），实现至少 3 类传感器（温湿度、光照、人体红外）的数据采集与 LED/继电器控制，并通过 Wi-Fi 实现远程指令交互；第三，在团队协作方面，学生以小组为单位分工协作，明确需求分析、模块开发、系统集成及测试优化等环节，提交完整的设计文档与演示视频；最后，在项目的创新拓展方面，鼓励学生结合开源生态，如 MQTT 协议、OTA 升级等扩展相关功能，如语音控制、异常报警或能耗优化，体现系统实用性与创新性。

6 案例特色

本教学案例以 ESP32-S2 为核心，结合 RT-Thread 实时操作系统，突出“软硬协同、系统集成与创新应用”三大特色。首先在软硬协同设计上，通过在 RISC 处理器上移植 RT-Thread 系统的过程，学生深入理解 RTOS 内核机制（如任务调度、中断管理），并掌握 ESP32-S2 的硬件驱动开发，实现从底层系统到上层应用的无缝衔接。其次，在系统实践能力的培养方面，围绕智能家居场景，集成温湿度、光照等传感器，结合 Wi-Fi/BLE 通信与 MQTT 协议，构建多线程交互系统，强化学生对复杂嵌入式系统的架构设计与调试能力；最后，本案例项目体现了创新性与实用性并重，案例支持动态环境感知，贴近真实智能家居需求，鼓励学生拓展语音识别、能耗优化等创新模块。

7 结语

本案例已经在院计算机科学与技术专业的相关实践课程教学过程中使用。教学实践表明，大部分学生感到实践内容具有挑战性、符合现实需求，自己的系统开发能力得到了提升。尤其是以往理论课学习过的线程管理、中断和协议等知识，一方面通过实践加深了理解，另一方面也具备了多线程任务调度、Wi-Fi 通信等的实战经验。

参考文献

- [1] 秦磊华,谭志虎.信息产业自主可控人才培养问题研究[J].科技管理研究,2016,36(01):37-41.
- [2] 张晓华,姚淑霞.面向嵌入式系统教学的助学PCB尺的设计[J].中国现代教育装备,2023,(17):33-36.
- [3] 乐鑫科技. ESP32-S3-DevKitC-1 v1.1 [Z]. 2025. https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/zh_CN/latest/esp32s3/get-started/index.html
- [4] 王睿,燕彩蓉,方志军等.面向泛在操作系统课程的实践教学改革路径探索[J].计算机教育,2025,(05):128-132.
- [5] 乐鑫科技.ESP-IDF 编程指南[Z].https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/zh_CN/latest/esp32s2/index.html
- [6] RT-Thread. RT-Thread document center[Z]. <https://www.rt-thread.io/document/site/>