北京邮电大学

硕士研究生学位论文开题报告

学号: 2020110864

姓名: 李维然

学院: 计算机学院（国家示范性软件学院）

专业(领域): 软件工程

研究方向: 物联网与智能系统

导师姓名: 邝坚

攻读学位: 工学硕士

2021年12月06日

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 论文题目 | RT-Thread在RISC-V平台SMP系统的研究与实现 | | |
| 选题来源 | 其他 | 论文类型 | 应用研究 |
| 开题日期 | 2021-12-06 | 开题地点 | 北京邮电大学 |
| 1. **立题依据（包括研究目的、意义、国内外研究现状和发展趋势，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）（不少于800字）**   1.研究目的  本课题的研究目的是，基于RT-Thread操作系统在多核环境下实现SMP(对称多处理SymmetricalMulti-Processing)系统，并根据RISC-V指令集特性进行整体设计与研究，最后在硬件平台HiFive Unmatched开发板上进行实验成果的验证，同时与多核Linux系统、单核RT-Thread进行性能对比，验证实验结论的有效性及本课题研究的意义。本课题将参考已有的嵌入式多核操作系统相关的研究，充分结合RISC-V指令集架构的特点，设计与实现RT-Thread在RISC-V平台上的SMP系统解决方案。对于SMP系统的实现，需要考虑操作系统引导与启动，多核之间的任务调度，同步与互斥机制，中断处理机制，核间通信等方面，使操作系统能够充分发挥多核处理器与RISC-V模块化指令集的性能优势，本课题将在上述几个方面进行研究，期望能为开源的RT-Thread操作系统与RISC-V在多核环境的发展做出一份贡献，并能够在硬件平台上对研究的可行性与实验的意义加以验证。   1. 研究意义   多核处理器已成为桌面PC的主流，但在嵌入式尤其是实时嵌入式方向研究还并不成熟，随着嵌入式领域应用的不断发展，多核处理器芯片在嵌入式领域不断深入，鉴于多核处理器高性能低功耗，高集成度等优势，被应用于嵌入式各种场景下已是大势所趋[1]RISC-V架构已有多核处理器，但更多的只是在功能上实现了多核，或者为了适配多核Linux操作系统所作的研究，在实时嵌入式操作系统领域，对多核的支持并不多，多核环境下想要充分发挥多个CPU协作的潜力，需要相应的操作系统提供充分的支持。[2]  RT-Thread,全称是RealTime-Thread,它是一个嵌入式实时多核操作系统,相较于Linux操作系统,RT-Thread体积小,成本低,功耗低、启动快速,除此以外RT-Thread还具有实时性高、占用资源小等特点,非常适用于各种资源受限(如成本、功耗限制等)的场合。[3]RT-Thread目前已经得到了广泛的应用，是一款十分优秀的国产操作系统。但是目前在多核环境下的研究并不多，希望能够为国产开源社区贡献一份力量。  RISC-V指令集也同样十分“年轻”，有望与当前近乎垄断嵌入式尤其是移动终端领域的ARM指令集架构相抗衡，在未来十年或者二十年间与x86，ARM三足鼎立，ARM在手机平板等移动终端的地位几乎是无可撼动的，但是对于长尾场景丰富的嵌入式领域，一种开源、模块化、可扩展的指令集，可以根据实际场景做更好的适配与扩展，例如智能穿戴设备等领域。对多核环境下的RISC-V处理器方向做操作系统方面的研究，是单核处理器性能达到瓶颈的必经之路。  3.国内外研究现状和发展趋势  美国加州大学伯克利分校研发的RISC-V（第五代精简指令集）因其模块化、硬件实现简单并且完全开源开放的优点[4]，适用于各种不同场景满足其不同的个性化需求，这也是笔者基于RISC-V研究的意义所在。当前对于RISC-V的多核环境下的进展更多的是在处理器方面，对于多核操作系统尤其是嵌入式实时环境下的研究还并不多。当前对于ARM处理器上的多核操作系统已经踊跃而出，从Linux的多核操作系，到FreeRTOS等实时操作系统对SMP的支持，许多优秀的研究人员和学者都做出了贡献。本文也将参考学习前辈的研究成果与研究方法，在RISC-V指令集处理器的基础上实现多核RT-Thread操作系统。  4.主要参考文献目录  [1]]许璐璐.支持对称多核处理器的嵌入式实时操作系统研究与实现[D].中国航天科技集团公司第一研究院,2016.  [2]申建晶.嵌入式多核实时操作系统研究及实现[D].电子科技大学,2011.  [3]刘帅,朱洪海.基于RT-Thread的海洋环境监测站的设计[J].数字技术与应用,2021,39(05):172-174+205.  [4]胡振波.手把手教你设计CPU———RISC－V处理器篇［M］.人民邮电出版社，2018.  [5]章承科. 基于多核处理器的实时操作系统的扩展[D]. 电子科技大学, 2006.  [6]任强. VxWorks SMP内核调度、信号量和中断机制的设计与实现[D].国防科学技术大学,2009.  [7]彭正文,徐新爱.基于SMP的Linux内核自旋锁分析[J].江西教育学院学报(综合),2005(03):23-25+28. | | | |

|  |
| --- |
| **二、研究内容和目标（说明课题的具体研究内容，研究目标和效果，以及拟解决的关键科学问题。**此部分为重点阐述内容）（不少于25**00字）**  1.具体研究内容  本课题的具体研究内容将分为三个主要部分，第一部分是研究RT-Thread操作系统在RISC-V处理器上的移植与部署，第二部分也是最关键的部分是依靠RISC-V指令集的特点，实现RT-Thread的方案。第三部分是设计合理详细的测试方案对实现系统进行性能测试，并与单核RT-Thread操作系统、FreeRTOS多核操作系统，以及ARM处理器做对比实验，验证研究的意义。  接下来将从这三个关键部分详细介绍具体研究内容。   1. RT-Thread操作系统在RISC-V处理器上的移植与部署   本论文选择RISC-V架构处理器作为硬件平台，当前RT-Thread实时操作系统已有在RISC-V架构处理器的支持，首先选择在单核处理器RISC-V STAR开发板上移植RT-Thread操作系统，并能进行启动与任务的处理，通过实验加以验证在RISC-V处理器上运行RT-Thread的可行性。这将作为多核操作系统研究与SMP方案实现的基础。   1. RT-Thread操作系统在RISC-V处理器上SMP系统的研究与实现   对于RT-Thread操作系统在RISC-V处理器上多核操作系统的实现，需要考虑以下方面：   1. 多核系统启动   操作系统的引导和初始化是指从系统上电到所有CPU可以平等调度任务的全过程[5]，虽然对于SMP系统，每个CPU的地位是平等的，但是在启动的初始化阶段，通常都是先启动一个核，这个核被称为主核，其他的核被称为次核。CPU之间的协同初始化是SMP系统实现的基础。   1. 多核任务调度   RT-Thread使用与任务相似的概念-线程，线程的调度分为几个重要的环节，线程创建、线程删除、线程挂起、线程执行、线程唤醒等内容。在RT-Thread操作系统中，线程的存储和控制可以通过TCB（Thread Control Block）完成。但是在多核场景下，多个线程需要被分配到多个CPU中共同执行，那么基于多核环境的更加复杂的和能够充分发挥多核性能的调度策略将是十分有必要的，也是本课题研究的重点。   1. 中断处理机制   中断机制的设计是为了使处理器能够处理异步事件，异步事件触发后，会通过硬件向处理器发送终端请求。处理器在响应中断请求后会保存当前各个寄存器的值，记录处理器的当前状态。在处理完此次中断请求后对之前保存的状态进行恢复，继续之前执行的任务。区别于ARM指令集的三个中断模式（FIQ-Fast Interrupt Request，IRQ-Interrupt Request，SWI-Software Interrupt），RISC-V也有相应的中断模式，与ARM架构中断原理类似但具体实现又有所不同，RISC-V中断被分为两类，局部中断和全局中断。标准定义了两种局部中断，中断timer和软件中断software。全局中断是其他外设等引起的外部中断，外部中断连接在Platform-Level Interrupt Controller (PLIC)上。根据RISC-V 中断的特性，来合理设计RT-Tread多核操作系统的中断处理机制，充分发挥SMP系统的性能，也是研究重要内容之一。   1. 多核之间的同步与互斥   在多核场景下设计同步与互斥机制也是多核操作系统研究与实现的重要一环，这是为了使多个CPU在对同一数据进行操作时不会出现错误，同一时间对同一数据进行写入操作时，会引发异常导致数据出现预期之外的值。为了避免这一情况，就需要使用一种同步互斥的机制对共享数据进行保护。在单核模式下，通过加锁或者使用原子操作对共享数据进行保护。多核环境下对此有了更高的要求，即不仅同一个CPU中对共享数据的访问与修改不能被打断，多个核同时共享内存时，同一个内存地址的数据在同一时间只能有一个核进行修改。针对这一问题，已有的多核系统的研究通常使用自旋锁的机制来实现核间同步与互斥[6][7],本课题将对比几种不同的多核同步互斥机制的实现方式，并在RISC-V指令集处理器及RT-Thread操作系统的基础上进行适配或尝试提出一种创新方案。   1. 核间通信   内核之间信息的传递与通信，既是多核任务调度在多核环境下需要考虑的一方面，也涉及到中断机制。在多核环境中，当前核没有办法控制其他核的执行路径，所以需要通过中断的方式对其他核进行打断，让其他核在中断中捕获消息。除此之外，还可以考虑通过共享内存的方式进行通信，通过数据准备并触发中断还是通过定期检查共享内存状态的方式或者其他方式，需要进一步衡量SMP系统性能与实时性的代价。   1. 设计详细的测试方案验证研究意义与成果   测试方案的设计是验证研究意义与研究成果的重点，研究意义在一定程度上有赖于测试方案设计的好坏。本课题期望通过三个方面的测试结果来验证课题的研究意义。一是通过单核RT-Thread操作系统与多核之间的性能对比验证多核对于性能提升的意义，而是设计任务分别在多核Linux操作系统与本课题设计的RT-Thread多核操作系统分别验证对比性能。三是对比ARM指令集处理器下的多核操作系统处理任务的能力与本文设计的多核SMP系统做对比。  同时，在对其他多核或者单核系统做对比之前，首先要验证系统本身功能的完整性，拟在QEMU模拟多核处理器环境下，以及Hifive Unmatched四核开发板上，分别对系统引导和初始化，核间同步与互斥，核间通信与中断处理，多核任务调度进行测试。  2.研究目标和效果  本课题的研究目标是设计实现一种RISC-V处理器环境下的多核RT-Thread操作系统。  RISC-V指令集的出现打破了ARM指令集对IP的封锁，是一个由社区共同维护的完全开源的指令集，并且由于其模块化、可扩展的优秀特性，对于物联网及嵌入式环境下多种多样的个性化需求，可以方便对指令集作出有针对性的个性化扩展，来对不同的场景进行优化。当前主流的RISC-V处理器大多是单核处理器，目前也已经有了多核RISC-V处理器的实现和流片，但是对于多核处理器对应的多核SMP操作系统的研究还并不充分，其创新性甚至可行性当前还并没有得到充分的实验验证。  本课题希望通过研究对RT-Thread操作系统的SMP方案实现，对RISC-V多核处理器的多核操作系统方向做出一定的研究贡献，同时也对RT-Thread的多核版本的实现上有一定的研究进展。最后期望通过设计合理的测试方案，来充分验证本课题的研究意义，对于已有的SMP系统实现方案，以及在RISC-V环境下操作系统的性能对比，能够在一定程度上提高性能。综上所述，本课题在RISC-V指令集处理器场景下对于嵌入式多核操作系统具有一定的研究意义。   1. 拟解决的关键科学问题   在多核环境下充分发挥处理器的性能，是多核操作系统或者说SMP系统研究的意义所在，在新兴的RISC-V指令集架构上，对于多核操作系统的研究还尚不充分和成熟，但是基于已有的实验结果来看，RISC-V指令集在多种嵌入式环境和场景下，均有不输于ARM指令集处理器的性能，并且在一些个性化需求十分明确的场景下，例如个人智能穿戴设备领域，RISC-V能够表现出更显著的优势。  本课题拟解决的关键科学问题就是在RISC-V指令集的处理器基础上，设计并实现多核SMP系统，同时选用一款优秀的国产RTOS操作系统RT-Thread，对RT-Thread在多核操作系统方面尤其是基于RISC-V指令集的处理器作出一定的研究贡献。  在多核操作系统的设计与实现过程中，不仅需要对系统初始化，多核任务调度策略，核间通信，多核同步与互斥，中断处理机制上考虑实现和创新，同时也必须充分考虑处理器及指令集的特性，对所期望实现的操作系统进行一定程度的优化和兼容。如何发挥RISC-V指令集在多核操作系统研究上的优势，如何解决以上在设计多核操作系统需要重点考虑的问题，将是本课题研究的关键，也是本课题拟解决的关键科学问题。 |

|  |
| --- |
| **三、研究方案设计及可行性分析（包括：研究方法，技术路线，理论分析、计算、实验方法和步骤及其可行性等）（不少于800字）**  1.研究方法  1）阅读资料、查阅文献  在本课题的研究过程中需要通过阅读大量的资料去学习关于多核操作系统及RISC-V处理器相关知识。同时，也需要查阅相关文献去了解最前沿的多核任务调度算法，核间通信、同步与互斥的相关知识进行研究和参考。另外，对于RT-Thread操作系统的源码也需要仔细研读与分析,了解其特性和各种实现细节。  2）模拟实验与测试  系统设计过程中需要在QEMU模拟处理器环境下进行测试和实验的设计，可以在部署开发板之前辅助进行实验测试。  3）硬件运行测试  在完成在处理器模拟器上的模拟实验与测试之后，或者在拿到RISC-V多核处理器开发板之后，期望将系统部署到实际开发板中，通过运行设计好的多任务程序来测试开发板在实际环境中的表现，评估整个SMP系统的性能与运行效果。  2.技术路线  1）首先要查阅文献，研究现有的多核操作系统实现方案，以及成熟的SMP系统例如Linux开源代码中对于多核操作系统的实现，为接下来的系统设计以及实验做积累。同时，也需要仔细研读近年来主流的嵌入式操作系统尤其是RTOS对于多核环境下的实现所做的研究工作，从之前研究者的工作和论文之中汲取灵感，学习严谨的实验及测试方法。  2）目前已有单核环境下的RISC-V处理器，需要首先在单核处理器上移植RT-Thread操作系统并能够实现简单的任务调度，验证RT-Thread操作系统在RISC-V处理器上的部署。并在此过程中，充分熟悉RISC-V指令集的特性，以及RT-Thread操作系统的实现细节。  3）设计实现在多核RISC-V处理器环境下的多核RT-Thread操作系统，并通过模拟环境下及实际开发板环境下的运行测试，验证系统的完整性及系统性能。  4）根据上述过程中的结果，进行不断迭代改进，最终得到满意结果，撰写结题论文。  3.可行性分析  在传统的单核RT-Thread操作系统应用到各种嵌入式场景下已经十分成熟的当下，设计多核环境下的RT-Thread操作系统需要考虑多核场景与单核场景的不同，单核环境下在任务调度、同步互斥方面的设计，仍然具有参考意义，同时也需要保持RT-Thread操作系统原有的优点并在此基础上进行开发和创新。  在多核场景下，已有比较充分的研究可供学习和参考，例如主流的开源操作系统Linux已有十分成熟的多核环境下的设计，另外对FreeRTOS等嵌入式操作系统也有不少研究工作者在多核场景下的做过相关的研究。这些在多核操作系统方面的研究经验和研究成果，都可以为本课题提供学习资料和研究参考。  对于RISC-V指令集处理器，已有大量的研究工作者实现操作系统的移植方案并与ARM处理器做性能对比，相关处理器模拟器和完整的编译调试开发工具目前已经逐渐成熟，并有相关资料和数据可供参考。  综上所述，RT-Thread在RISC-V平台SMP系统方案的研究与实现具备可行性。 |

|  |
| --- |
| **四、本研究课题可能的创新之处（不少于500字）**  本课题可能存在的创新之处在于：   1. 基于已有的RT-Thread单核操作系统实现方案和源代码，实现多核环境下的RT-Thread的SMP系统。充分发挥多核处理器的性能优势，通过合理设计多核启动和初始化、中断机制、多核任务调度策略、核间通信、核间同步互斥，实现RT-Thread SMP系统，并通过实验验证系统的完整性和研究的可行性。 2. 以往的研究大多是基于ARM指令集处理器进行研究与设计，本课题将基于近年来发展较好的完全开源的RISC-V指令集处理器，改进RT-Thread操作系统来充分发挥RISC-V指令集的优势，同时在当前RISC-V环境的多核操作系统研究不充分的情况下，设计实现基于RISC-V的SMP系统，来充分发挥处理器和指令集的性能优势，在对RISC-V指令集和处理器充分研究与学习的基础上，设计与其适配的多核操作系统 3. 在多核RT-Thread操作系统的研究与实现过程中，一些需要考虑的方面例如中断处理机制，是与具体的处理器和指令集相关联的，期望能够在实现系统完整可行的基础之上，充分发挥RISC-V指令集的优势，作出一定的创新，带来一定的性能提高并通过合理严谨的实验方案加以验证。   本课题可能存在的创新之处，均基于充分调研的情况，阅读当前已有的研究工作论文，并对当前RISC-V指令集开源社区（https://riscv.org）和相关公司提供的硬件支持做了大量研究，在此基础上总结思考研究方向及课题创新之处。 |
| **五、研究基础与工作条件（1.与本项目相关的研究工作积累基础2.包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决途径）（不少于500字）**  1.与本项目相关的研究工作积累基础  本人从本科后期到研究生入学以来，一直学习嵌入式相关基础知识，并调研当前嵌入式操作系统，指令集、处理器相关研究报告和论文。对于RISC-V指令集及处理器方面阅读了大量相关文献和相关书籍。对于本课题中需要掌握的技术，本人已经打下了良好的基础，并且对于前沿的文献资料，有着很好的资料收集检索能力及学习能力。  2.已具备的研究实验条件  1）实现技术方面  目前对于RT-Thread操作系统，已有成熟的开源社区和非常广泛的使用者及应用场景，也有大量的资料和研究过程可供参考和学习。这将为设计多核RT-Thread操作系统提供充分的支持。另外之前已有相关的资料介绍FreeRTOS操作系统在RISC-V处理器的移植，目前笔者正在做RT-Thread操作系统在单核RISC-V操作系统的移植和部署，实验进展良好。  2）硬件方面  目前已有多核RISC-V处理器模拟器可供前期学习使用，已经经过前人研究使用验证。对于多核RISC-V多核开发板，目前已有国内外均有销售途径可以购买，目前打算使用Hifive Unmatched 开发板作为硬件平台。  综上所述，本课题需要的技术工具、硬件条件以及理论依据均已满足。下一步首先应当充分熟悉RT-Thread操作系统源码及其特性，并实现在RISC-V处理器上的移植，并在此过程中熟悉RISC-V指令集特点，同时思考后续多核操作系统SMP方案的实现。 |

**学位论文工作计划**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 时间 | 研究内容 | 预期效果 |
| 2021.09-2022.11 | 课题调研，准备开题 | 完成开题报告 |
| 2021.12-2022.02 | RT-Thread操作系统移植 | 完成RT-Thread操作系统在RISC-V处理器的移植 |
| 2022.03-2022.06 | 设计多核RT-Thread操作系统在多核RISC-V处理器的实现方案 | 通过实验验证系统的运行效果和完整性测试 |
| 2022.07-2022.10 | 根据实际实验效果思考改进方案并实现 | 基于改进方案设计之后在一定程度上带来性能的提升 |
| 2022.11-2023.03 | 总结实验结果，撰写论文 | 完成毕业论文 |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 评  定  小  组  成  员 | 姓名 | 职称 | 单位名称 | 职务 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| 导师意见： | | | | |
|  | | | | |
| 导师（签名）：  日期：年月日 | | | | |
| 开题报告小组意见： | | | | |
| 组长（签名）：  日期：年月日 | | | | |
| 学院意见（签章）： | | | | |
| 负责人：  日期：年月日 | | | | |