

# 基于 FMQL 的多核 AMP 高可靠嵌入式实时操作系统研究

朱伟杰<sup>1</sup> 吕晨<sup>2</sup>

1 上海华元创信软件有限公司，上海，200062；

2 中国电子科技集团公司第三十二研究所，上海，201808；

**摘要：** 本论文深入探究基于多核 AMP 架构的高可靠嵌入式实时操作系统，详细阐释其设计理念，涵盖内存管理的优化策略与核间通信方式。通过一系列设计与实现工作，并经实验测试验证，证明该操作系统在确定性和可靠性方面具备显著优势，能够满足航空航天等领域的严苛需求。

**关键词：** 多核 AMP 架构；嵌入式实时操作系统；内存管理；核间通信

**DOI：** 10.69979/3041-0673.25.07.012

## 引言

在现代嵌入式系统应用范畴中，航空航天、工业控制等领域对系统的可靠性和实时性提出了极高要求。而通常处理器端运行的嵌入式实时系统处于 SMP 模式，业务处理采用任务的方式，存在调度抢占导致的时延不确定性<sup>[1]</sup>。AMP (Asymmetric Multiprocessing, 非对称多处理) 架构作为一种行之有效的多核处理模式，为构建高可靠嵌入式实时操作系统开辟了全新路径。本研究聚焦于基于 FMQL 平台的多核 AMP 架构，致力于设计并实现一款具有卓越确定性和可靠性的嵌入式实时操作系统。

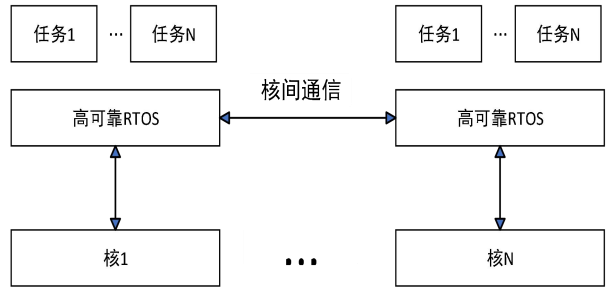


图 1 AMP 架构

AMP 架构的核心特征是每个核独立运行一个操作系统，借助配置蓝图对共享资源进行管理，应用程序被精准分配到特定核上运行<sup>[2]</sup>。其运行环境与传统单核系统相似度高，这使得它在应用移植方面具备显著优势。具体而言，AMP 架构继承性良好，操作系统和应用程序分别被指定在特定核上运行，应用的开发集成过程与单核模式基本一致，如图 1 所示。在多核 AMP 架构体系中，每个核运行独立的任务或操作系统实例，各自拥有不同的功能和资源分配方案。这种独立性极大地提升了系统的容错能力，某个核出现故障时，不易对其他核的

正常运行造成影响。同时，任务分配具备高度灵活性，可依据任务的实时性要求、可靠性需求以及计算复杂度等因素，将其合理分配到最为适配的核心上执行。

## 1 AMP 架构设计优化

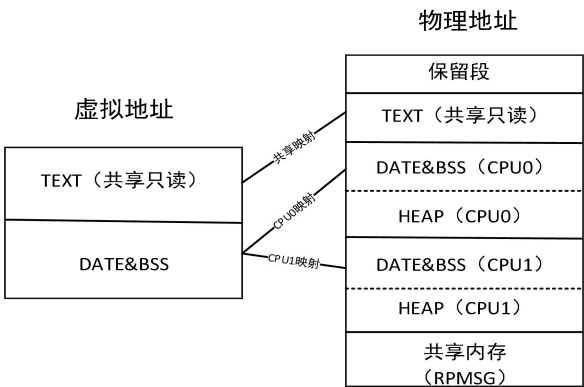


图 2 AMP 内存映射

AMP 架构下一般一个核对应一个系统镜像，但同时需要用户进行两次镜像的编译，增加了使用的复杂度。如图 2 所示，在本文设计中，通过 MMU 映射配置操作系统镜像代码段为只读共享段，每个 CPU 都可以共享 TEXT 段但无法修改，确保代码段的正确性，数据段、BSS 段及核心堆共用相同的虚拟地址但每个内核映射的物理地址不同，这种映射方式用户仅需编译一个镜像，同时降低了多核启动的复杂性。

## 2 AMP 启动过程分析

AMP 启动过程时每个核必须独立完成由处理器核地址、本地地址、I/O 控制器、外部设备地址的映射过程，通过修改配置寄存器，以保证两个核运行不同的引导程序，从而实现两个核的差异化启动。板级支持程序也

采用相互独立的方式进行操作系统资源的分配,即为每个核的操作系统建立相互隔离的板级驱动,其中包含的常规驱动都是独立的,尽可能保证资源分配时各个处理器核上运行的驻留应用程序只允许支配自己的硬件资源,而禁止支配其他未授权资源,从而保证核间资源的独立性。

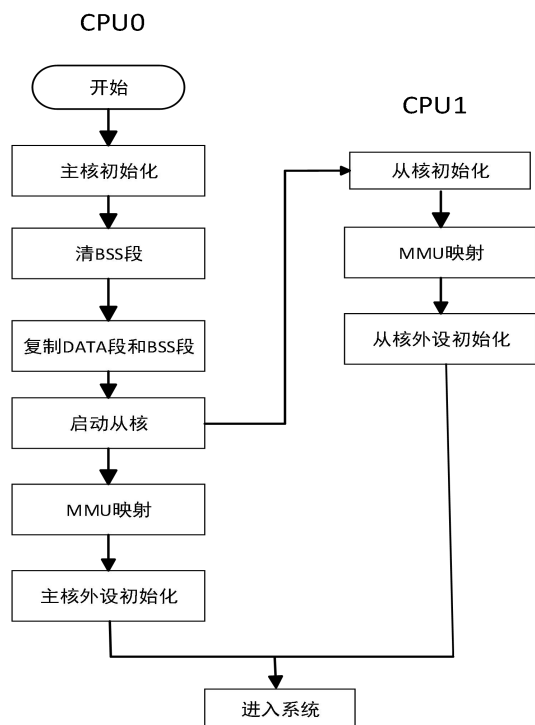


图 3 AMP 系统启动

### 3 核间通信机制设计及应用

在 AMP 系统中往往会形成主-从 (Master-Slave) 结构,先启动主核上的系统,让其负责准备好运行环境,然后根据需要或者一定规则启动从核并对其进行管理。主-从核心上的系统都准备好之后,它们之间通过 IPC (Inter Processor Communication) 方式进行通信,而 RpmMsg 就是 IPC 中的一种<sup>[3]</sup>。

RpmMsg, 全称 Remote Processor Messaging, 它定义了异构多核处理系统 (AMP) 中核与核之间进行通信时所使用的标准二进制接口。

RpmMsg-Lite 实现两个核之间的通信。RpmMsg-Lite 是一种轻量级的消息传递协议,基于共享内存和中断机制。主核和从核之间通过共享内存区域传递消息,发送方将消息写入共享内存,然后通过中断通知接收方。接收方在中断处理程序中读取消息并进行处理,处理完成后可通过相同机制返回结果。



图 4 RpmMsg 层级模型

RpmMsg-Lite 的适配层主要包括 porting(操作系统适配层)和 platform(硬件适配层),操作系统适配层主要实现 RpmMsg-Lite 所需的信号量、互斥量、消息队列及中断注册相关接口,硬件适配层主要实现核间中断初始化及核间中断触发接口,发送数据时通过触发核间中断唤醒其他进行数据接收。同时由于本文采用的操作系统是具有内存确定性的,因此需要改造 RpmMsg-Lite,在内存管理这部分把动态内存改成静态内存池的方式。

RpmMsg 使用流程如下:

1. 主核与从核约定一块地址一致的共享内存,并分配所需大小,分别通过 rpmMsg\_lite\_master\_init 和 rpmMsg\_lite\_remote\_init 进行初始化。
2. 主核与从核通过 rpmMsg\_queue\_create 创建一个 virtqueue 的队列。
3. 主核与从核通过 rpmMsg\_lite\_create\_ept 创建端点,地址参数要一致。
4. 主核与从核可通过 rpmMsg\_queue\_recv、rpmMsg\_lite\_send 进行消息通讯。

性能测试

为了评估 RpmMsg 通信机制的性能,在 FMQL 开发板上进行了以下测试:

创建主核和从核的核间通信,让主核在无阻塞模式下发送 512 字节大小的数据,记录发送开始时间,发送结束后记录结束时间,计算两者时间差作为发送耗时。循环 100000 次记录发送耗时的最大值,重复执行 10 次,得到的最大值分别为 30562ns、30375ns、29437ns、31875ns、31187ns、31812ns、31125ns、30750ns、29250ns、31562ns,均不大于 35us。

使用从核在无阻塞模式下持续发送 512 字节大小的数据,主核在无阻塞模式下接收。记录接收开始时间和结束时间,计算时间差作为接收耗时。同样循环 100000 次记录接收耗时的最大值,重复执行 10 次,最大值分别为 24875ns、24937ns、25062ns、24875ns、24875ns、25062ns、25000ns、25062ns、25250ns、24937ns,均不大于 30us。

测试结果表明,基于 Rpmmsg - Lite 的核间通信机制在数据传输延迟方面表现出色,能够满足实时性要求较高的应用场景。

#### 4 结论

本研究成功基于多核 AMP 架构设计并实现了一种高可靠嵌入式实时操作系统。通过独特的内存管理设计以及高效的核间通信机制设计,有效提升了系统的确定性和可靠性。实验测试结果有力证明了 AMP 架构在相关领域的显著优势,该系统能够切实满足航空航天等领域对嵌入式实时操作系统的严苛要求,为多核系统在高可靠应用中的进一步发展提供了重要的理论支撑和实践经验。未来研究可围绕进一步优化系统性能、拓展应用场景等方向展开,不断提高系统的适应性和可扩展性。

#### 参考文献

- [1] 郑竞秋. 面向 SMP 处理器的 RTOS 优化研究与实现[D]. 北京邮电大学, 2021.
- [2] 湛文韬, 朱恩亮, 杨柳, 等. 基于 AMP 架构的机载多核处理技术研究[J]. 电光与控制, 2023, 30(11): 76-79+104.
- [3] 高聪俐, 高博, 黄新阳, 付炎鑫. 基于 OpenAMP 的异构核间通信技术研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2023. 3: 168-170.

作者简介: 朱伟杰(1968-), 男, 汉, 江苏常州, 硕士, 技术总监, 工程师, 嵌入式基础软件及功能安全, 上海华元创信软件有限公司