RT-Thread Global Tech Conference 2025

突破“多核困境”：操作系统技术的创新与嵌入式应用落地

ALLAN HE/何小庆

Allan@esbf.org

嵌入式系统联谊会 www.esbf.org

报告内容

① 产业背景与现状

② 多核硬软件架构与操作系统概述

③ 多核操作系统的虚拟化技术

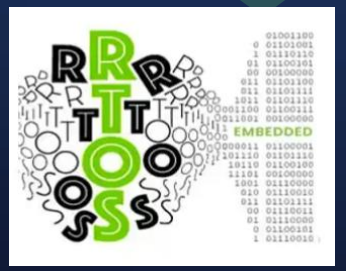
④ 嵌入式多核操作系统应用实例

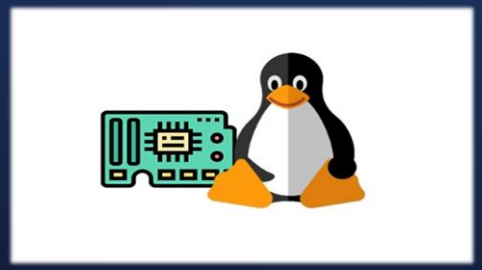
⑤ 嵌入式多核操作系统应用展望

① 产业发展大背景

伴随大模型应用、万物智联的高性能嵌入式系统蓬勃发展

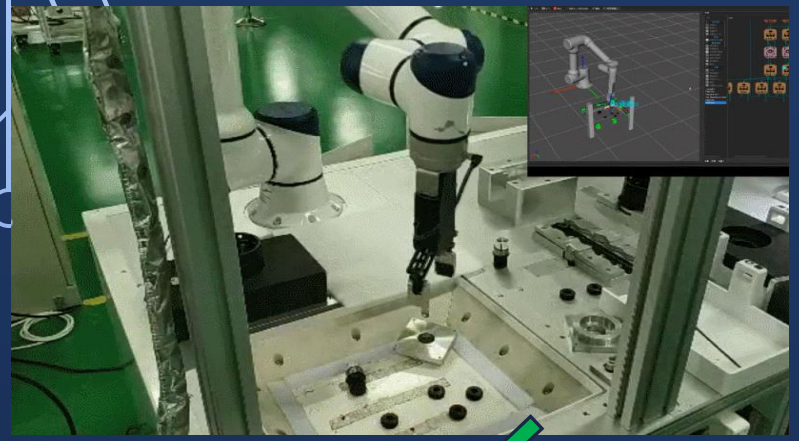
- **嵌入式设备性能提升**（MCU->SoC、ARM64 /RISC-V ）
- **嵌入式处理器芯片**（单核-同构多核-异构多核）
- **嵌入式系统功能升级**（实时控制+富功能应用）
- **嵌入式系统开发度增加**（功能安全+信息安全）





新一代嵌入式系统：高算力、高安全、高灵活以及自治的智能系统

多核嵌入式操作系统的应用



区域控制节点

vPLC vPLC vPLC vPLC

嵌入式OS

多核CPU

活跃的多核嵌入式处理器公司

- 海外芯片公司在高算力多核芯片和汽车智驾芯片上占有绝对的优势，配套的软件、工具和安全方案成熟。
- 国内在边缘和端侧智能芯片有成本和生态优势，在智驾领域正在积极跟进。

高算力多核处理器走人千家万户

NXP Infineon Rockchip 瑞芯微电子 ALLWINNER 全志科技

AMD intel STMicroelectronics 芯驰 SemiDrive 黑芝麻智能 BLACK SESAME TECHNOLOGIES siengine 芯擎科技

Qualcomm NVIDIA Phytium 飞腾 龙芯中科 LOONGSON TECHNOLOGY canaan

嵌入式多核芯片现状与应用困境

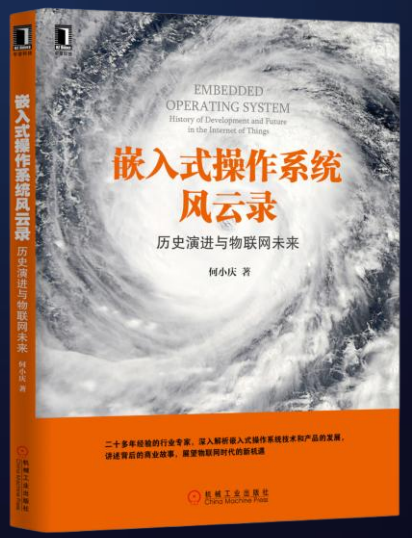
- 多核芯片在嵌入式系统中非常普及，X86/高通/NXP 和TI 典型 ,以瑞芯微和全志为代表国产芯片应用广泛。
- 汽车MCU 多核芯片历史悠久，比如 TI Hercules（Cortex-R）Infineon AURIX（TriCore架构）。
- ARM推出Cortex-M系列（M4/M7/M0+），支持多核异构设计， NXP/ST/国民技术/GD32/BL/Microchip/T1/Renase RA8 ， 应用不多!
- 多核芯片进入物联网消费端 如 Raspberry Pi Pico 和ESP32 。
- 多核操作系统普遍采用Linux （SMP)，或 Linux +RTOS(裸机）。
- 相当一部分双核MCU 仅仅使用单核。
- RTOS (SMP) 存在应用难点、使用还不多，多核虚拟化在汽车电子渐成趋势，工业应用刚刚开始。

微处理器芯片发展快于软件，软件定义系统时代远没有真正到来

② 多核发展简史与架构介绍

计算芯片走过了微处理器 - 多处理器 - 多核处理器- AI 处理器的50年

- 1971年 Intel公司设计出第一款微处理器 - 4004，很快Intel又推出了8位的8008处理器和16位的8086处理器。
- 8086是单核CPU，随着需求的提高和功耗问题出现，就有在一个芯片上建造两个或者多个核。
- 2009年 Intel i5（1代）4 核 CPU发布 应用在桌面电脑。
- 2011年 OMAP 4430（双核Cortex-A9）Mot Droid RAZR采用。
- 2012 年 NXP LPC4300发布首款双核Cortex-M4+M0 MCU。
- 2014年 视觉芯片Myriad 2 发布 16个SHAVE核心 应用在大疆无人机。
- 多核处理器具有更高的计算密度和更强的并行处理能力并且尺寸还很小，多核芯片适合嵌入式混合关键系统。



2026年再版（第二版）

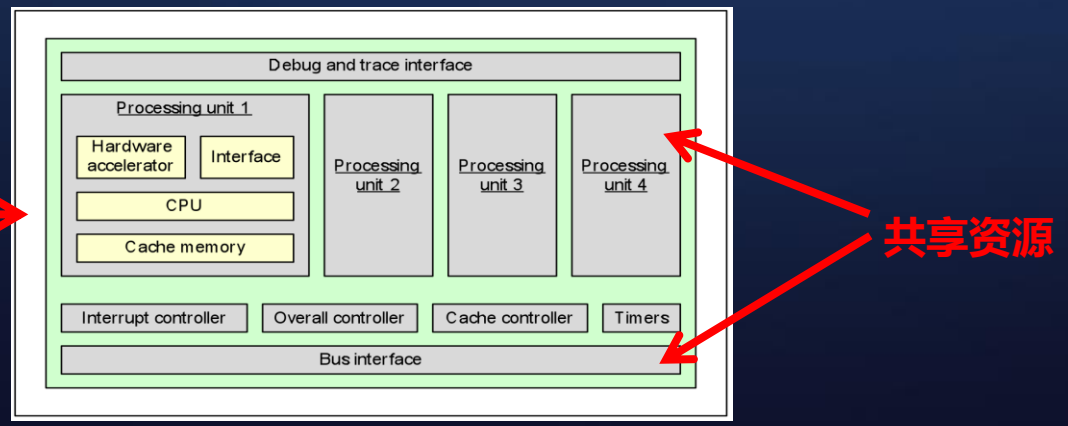
本报告在后面的讨论中：多处理器、多核处理器、多核MCU、多核芯片不加以区别

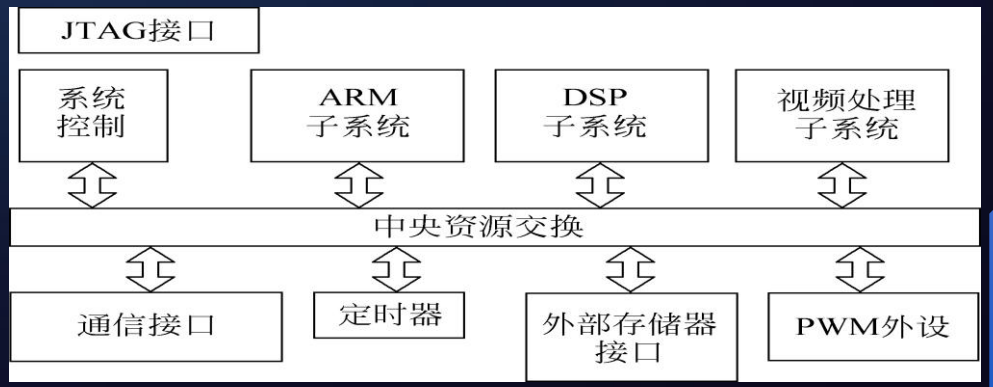
同构和异构的多核处理器硬件架构

从硬件的角度看，多核处理器可以分为同构和异构两种架构

- 同构 :所有的CPU的核心架构都一样。如瑞芯微RK3568、飞思卡尔的I.MX6D ， 它们有两个或者以上架构相同的ARM Cortex-A核 。
- RK3568 四核64位Cortex-A55 主频最高2.0GHz,内置1.0TOPS算力NPU。

- 异构: CPU核心架构不一样称为异构。如 TMS320DM8127有一个DSP C674x核和一个ARM Cortex-A8核。再如Xilinx的ZYNQ7000系列，有两个ARM 核和FPGA核。
- 异构多核CPU 可根据负载，平衡算力的使用，比如实时性计算需求可由M/R核完成，人机界面由A核完成。

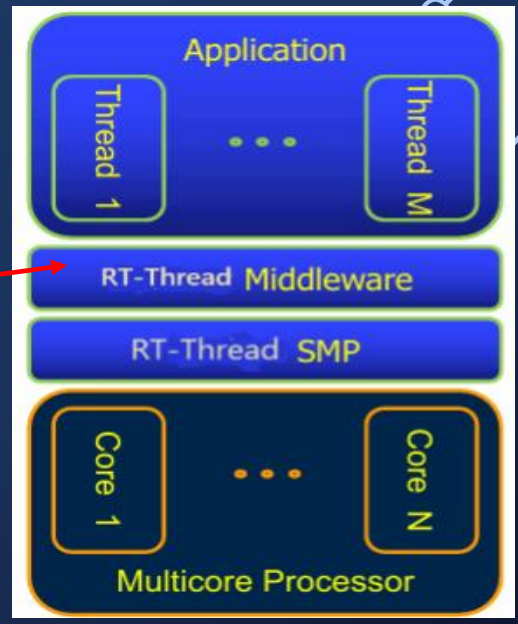


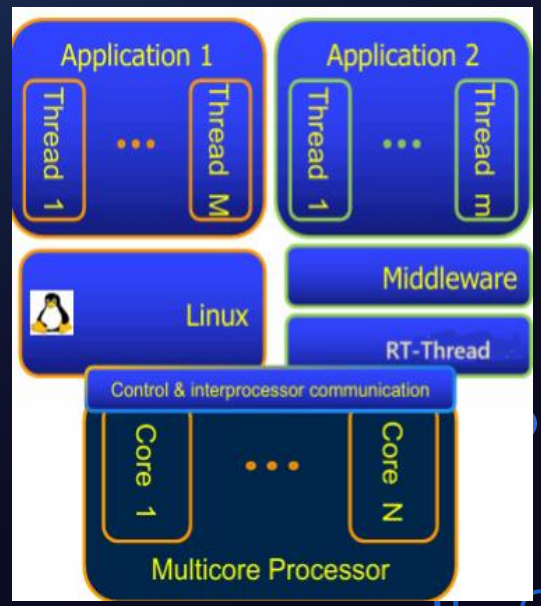


多核处理器软件架构 – SMP和AMP

- **从软件的角度看：多核处理器平台的架构：SMP（对称多处理）、AMP（非对称多处理）和BMP（绑定多处理）3种。**
- SMP是指只有一个OS运行在多个CPU上，一个OS管理各个CPU内核，为各个内核分配工作负载，系统中所有的内核平等地访问内存和外设资源。
- 一般运行在SMP结构下的都是同构处理器。Linux和RT-Thread 支持SMP结构。
- SMP结构下一个OS负责协调两个处理器，两个处理器共享内存，每个核运行的应用程序，通过MMU把它们映射到主存的不同物理位置上。

- 每个CPU内核执行专门的任务，操作与单处理器设计完全相同。
- 系统的行为和可预测性与单处理器设计相似。
- AMP特点是各个OS都有本身独占的资源，其它资源由用户来指定多个系统共享或者专门分配给某一个系统使用，系统之间通过共享的内存来完成通信。
- 在需要混合使用操作系统/调度方法的场景，在对称多处理器上使用同构AMP。
- 如果软件针对特定类型的硬件设计，在非对称多处理器上使用异构AMP。





SMP潜在的问题和解决方法

- 无法预测单个进程的执行顺序。
- 无法预测哪个CPU 核执行哪个进程。
- 对于某些进程，可能无法保证实时行为。
- 如果从现有的核设计移植到多核，可能会出现同步或互斥问题。
- 业界开发绑定多处理（BMP）以最大程度地减少此类问题。

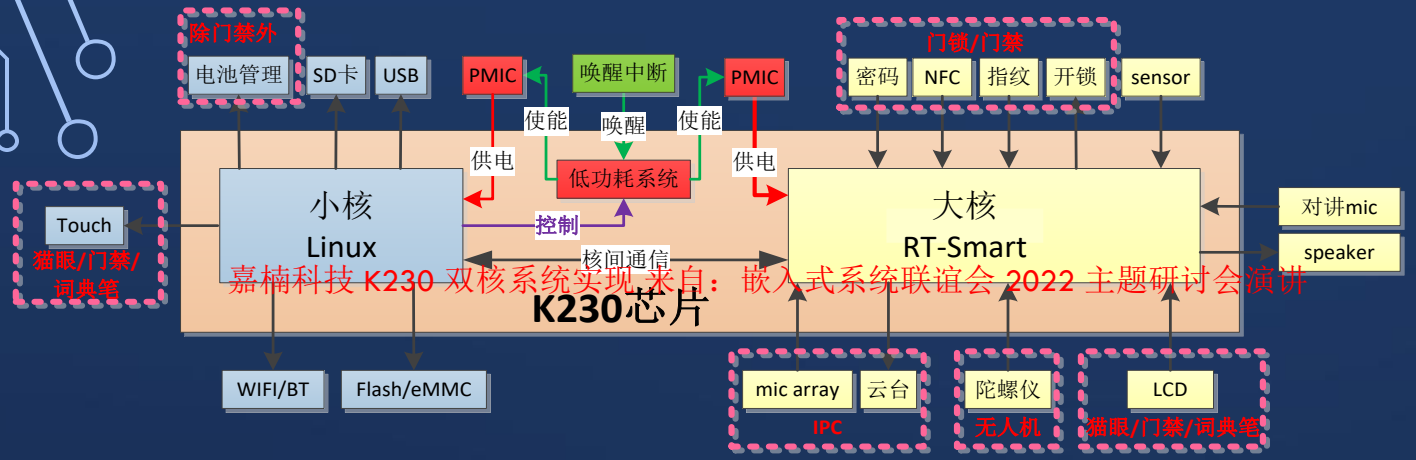
- BMP和SMP类似，也是由一个OS同时管理所有CPU内核，但是开发者可以指定某个任务在某个核中执行。
- BMP应用更多是在**AMP的混合的场景下**（hybrid），多个相同架构的内核被配置为一个SMP子系统，其他不同内核运行的是其它的OS，从整体来看就是AMP结构了。从逻辑上来分，这个SMP子系统看起来像是一个单核，可以把它包含在大的AMP系统中，这种混合模式即可以满足高性能需求、同时保证实时和安全性要求。

AMP

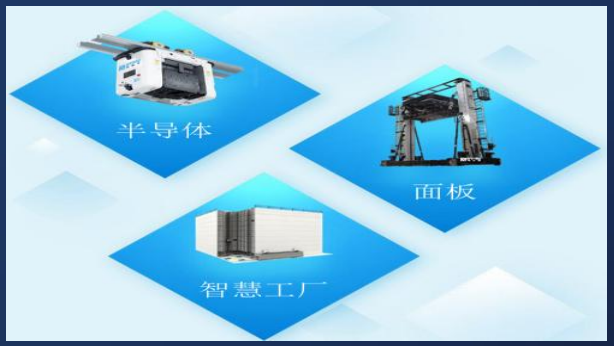
SMP

来自：《嵌入式实时操作系统-理论基础》

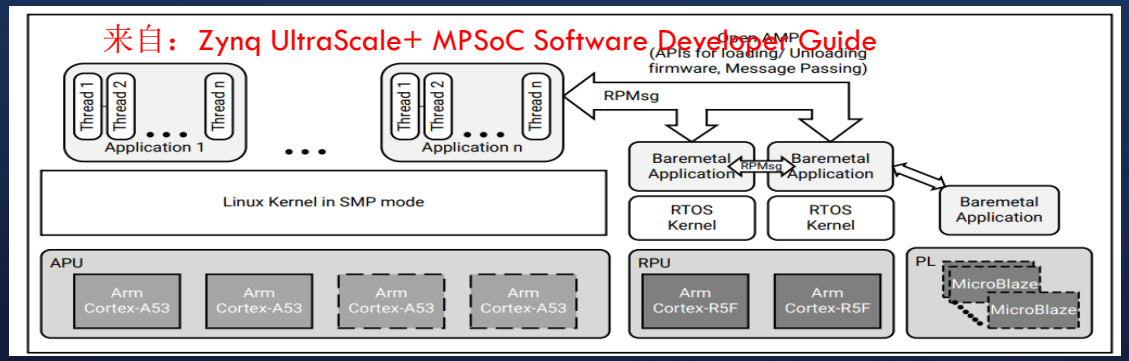
AMP/SMP 解决方案和实例

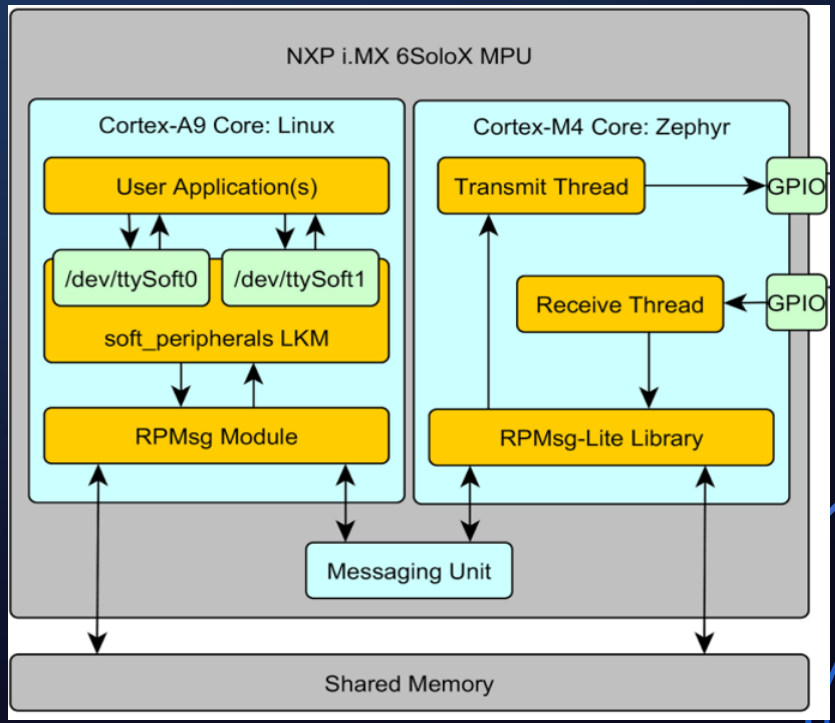


嘉楠科技 K230 双核系统实现 来自：嵌入式系统联谊会 2022 主题研讨会演讲



来自：国产操作系统在半导体AMHS 产业的应用 RT-Thread开发者大会演讲





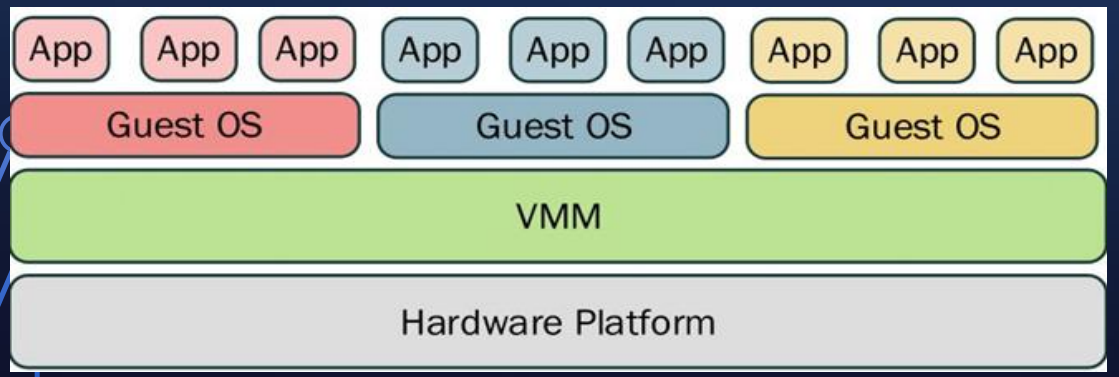
来自：Marek NOVAK 在 EW2019 演讲

RT-Thread
基于TriCore FreeRTOS/RT-Thread SMP 汽车电子应用
商业动态 | 支持车规级多核安全处理器

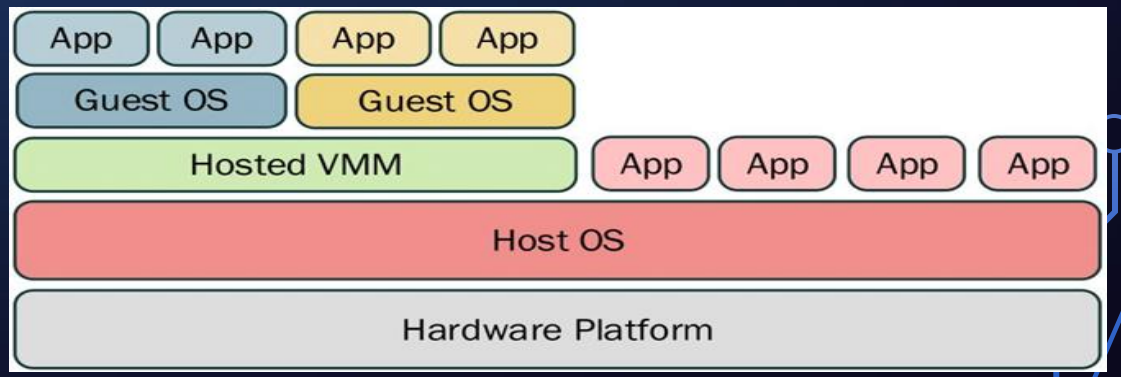
③什么是嵌入式虚拟化?

- 虚拟化是在硬件平台和/或操作系统 之上创建物理计算资源的软件抽象，它提供一个或多个独立的虚拟化 OS 环境（VM)。 虚拟机监视器(hypervisor –VMM 虚拟化管理器）是一种软件（含固件）负责创建和管理虚拟机，它有3类型：Type 1（裸机） 、Type 2（寄居）和 Tpye 1.5 （混合）。嵌入式虚拟化与企业或数据中心服务器不同，它需要支持各种处理器、操作系统和专用软件，丰富外设，实时性和低延迟、资源隔离等特点。

- 虚拟化实现可以采取两种路径：完全虚拟化或静态分区。全虚拟化模拟硬件环境，使得创建虚拟环境的软件分区不直接绑定到硬件分区。静态分区将任务隔离到现有硬件的某些部分，以模拟独立的系统更适合嵌入式。
- 除了VMM ，另一种计算机虚拟化隔离应用方案是容器，VMM虚拟化硬件运行多个操作系统，容器虚拟化操作系统以运行多个应用程序。



Tyep 1虚拟机监视器是在硬件上运行的专用软件



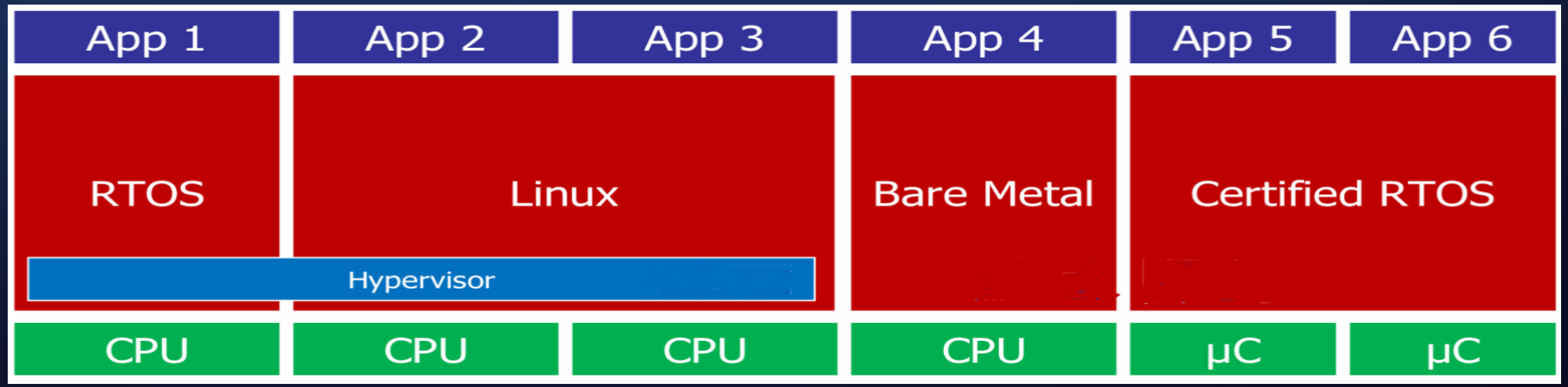
Type 2虚拟机监视器也称为客户操作系统虚拟化

虚拟化解决方案

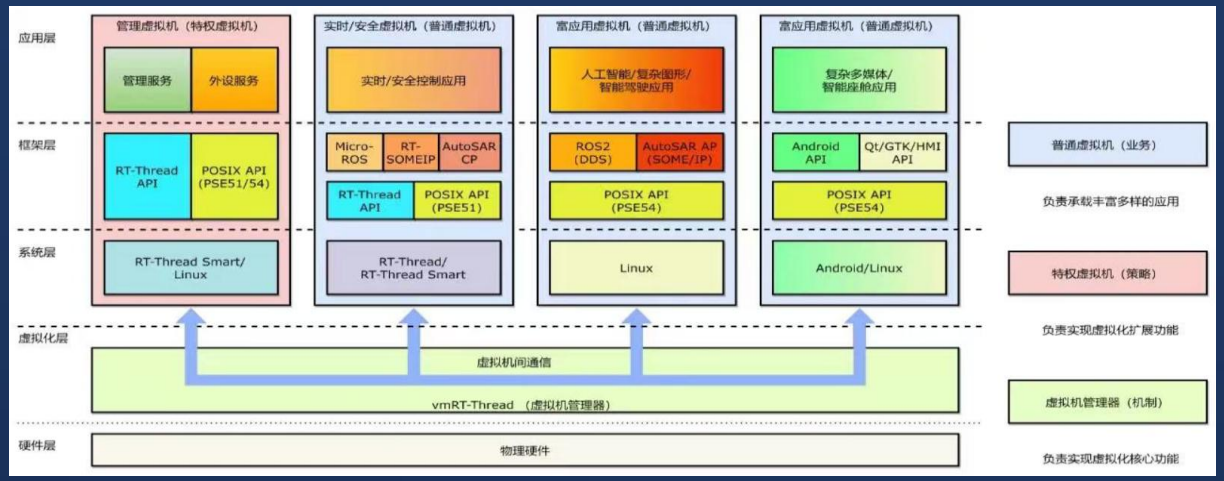
- 60年代IBM在大型机尝试虚拟化，企业和数据中心一直在使用虚拟化来最大限度地提高服务器性能，并在单台计算机上运行特定于作系统的应用程序（VMware 和 Redhad）。
- 常见的开源虚拟化解决方案包括KVM和Xen，嵌入式系统 Jailhouse和Bao。许多商业操作系统提供虚拟化解决方案，例如Wind River VxWorks的虚拟化，Green Hills INTEGRIT 的多虚拟机监视器。这些示例都属于全虚拟化与静态分区虚拟机，类型1（1.5）或类型2虚拟机。
- 国内的嵌入式虚拟化项目：vmRT-Thread 和Intewell-V、开源有 ZVM 和 Rust-Shyper

嵌入式虚拟化 - 混合关键系统的底座

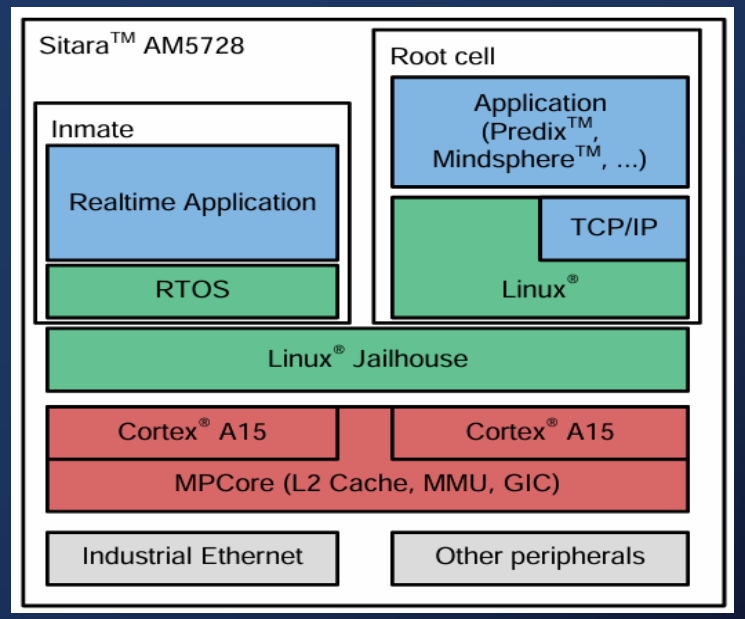
- 混合关键系统是指在一个系统中包含有多个不同关键性级别组件的系统。例如，安全关键、任务关键和非关键组件，该系统常见于汽车和航空电子等复杂嵌入式系统中。混合关键性系统实施是指通过部署、隔离和调度等技术手段，实现多系统混合部署，并实现系统间彼此隔离保护，通过调度提升资源利用率。
- 应对：实时与非实时的需求，安全认证的需要。
- 应用：工业（汽车）、军工和医疗。
- 认证：费用、时间、代码的考量，RTOS的预认证成熟。



嵌入式虚拟化案例和解决方案



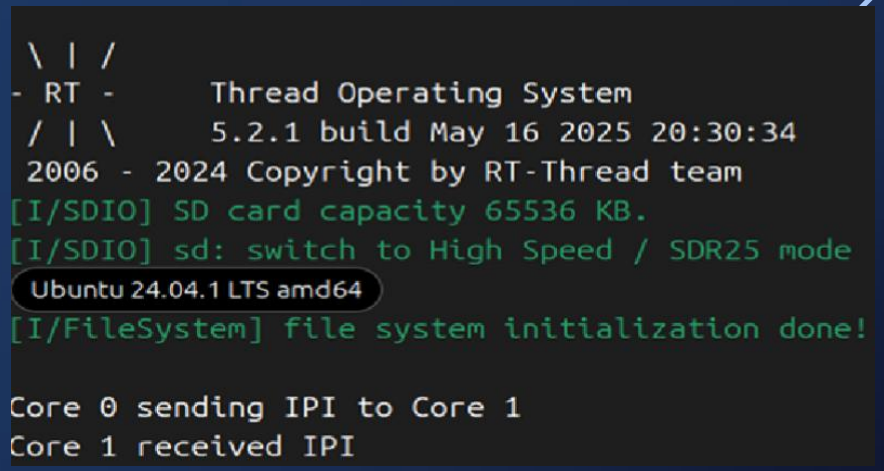
来自：通过vmRT-Thread和MCP赋能具身智能开发



来自：AM572x上的Jailhouse Hypervisor 工业参考设计

混合关键性系统架构

OpenEuler



嵌入式多核操作系统 SMP实例演示

在QEMU 上 通过RT-THREAD 5.2 实现 SMP的实例

RT-Thread SMP 实例代码

本实例由何灵渊完成
《嵌入式软件精解》和《嵌入式实时操作系统-理论基础》译者

```
Thread1 (cpu0): 1928
Thread2 (cpu0): 1928
message from linux: Hello, Zephyr!
Thread1 (cpu0): 1929
Thread2 (cpu0): 1929
```

多核操作系统嵌入式虚拟机实例演示

在 树莓派4B 上通过 BAO 实现虚拟机的实例

https://github.com/bao-project/bao-hypervisor

本实例由何灵渊完成
《嵌入式软件精解》和《嵌入式实时操作系统-理论基础》译者

⑤应用展望 - SMP/AMP/BMP的平衡原则

- 如果高性能是主要需要的应用场景，SMP模式是最佳解决方案。但是简单地将一个单处理器软件移植到多处理器平台上，可能无法很好完成这一任务。程序需要重新编写才能适应并行计算的环境，毫无疑问计算密集的应用适合于SMP模式的系统。
- AMP模式的特性让它广泛适应实时嵌入式系统，它将性能提升与可靠性完美匹配到一起。为单处理器编写的程序可以很好移植到多处理器，开发者不需要担心太多。
- 混合模式处理器，看起来是在SMP和BMP 之间的一个平衡，这样的实现适用于复杂的嵌入式系统应用，设计相对复杂、调试和部署有一定难度。

对称多处理（SMP）

- 一个RTOS在多个处理器核上运行多个任务
- 任务负载由多个核分担，任务动态调度
- 处理器核可以共享内存区域
- 多核调度的不确定性 （抢占/时间片轮转）
- 需要安全认证时的考量- 静态分配

非对称多处理（AMP）

- 每个处理器核上运行一个 GPOS/RTOS
- 每个核的行为和单核系统类似
- AMP进一步分为同构和异构AMP
- 虽有openAMP 开源协议架构, 核间通信不标准
- 多RTOS 或者 RTOS+ BareMetal 的 部署适合安全认证

从简原则：bearmetal – RTOS ， AMP- SMP –BMP/混合模式

混合关键部署软件栈比较

随着处理器芯片的算力提升和集成度提高、行业应用越来越复杂，基于虚拟化技术的开发平台，因其在解决实时、安全性同时，又能提供丰富软硬件支持，还具备一定的隔离性和更好灵活性，未来应用前景广阔，**选择哪种部署方案看你的实际情况！**

特性/解决方案	RTOS	Linux	硬件混合部署	软件混合部署	虚拟化混合部署
实时性	硬实时	软实时	硬实时	硬实时	硬实时
软硬件生态	支持较少	支持丰富	支持丰富	支持丰富	支持丰富
资源隔离	单一地址空间	多进程隔离	硬件隔离	OS间无隔离	硬件隔离
资源分配	N/A	N/A	无法迭代	后期迭代复杂	简单修改
资源共享	N/A	N/A	无法共享	无法共享	灵活共享

来自：熊谱翔"机器人上的虚拟化混合部署探索和实践

总结

多核是趋势、应用才开始，
需要平台和技术支持，
开源和教育可发挥重要作用。

- 多核芯片已经走进千家万户，芯片设计走在多核操作系统前面。
- 多核软件开发缺少有效的嵌入式系统实践，高校少见课程支撑。
- 多核编程门槛高，缺少方便实用开发工具（尤其针对传统嵌入式开发者）。
- 操作系统的AMP方案接近单核模式，但平台依赖性强灵活性差；SMP (RTOS) 多核多线程机制有一定复杂性。
- 汽车电子有针对行业软件解决方案 如Multi-Core AUTOSAR/VSEK。
- Hypervisor 是一个理想的方案，但存在兼容性、平台依赖、实时性、调试难以及投入大等难点问题。

Thanks 感谢聆听