嵌入式系统

An Introduction to Embedded System

嵌入式实时操作系统

嵌入式实时系统

- 嵌入式系统往往对实时性提出较高的要求。
- 实时系统：指系统能够在限定的响应时间内提供所需水平的服务。（**POSIX 1003.b**）
- 嵌入式实时系统可分为：
  - 强实时型：响应时间μs～ms级，如数控机床、医疗仪器；
  - 一般实时：响应时间ms～s级，如打印机、电子菜谱；
  - 弱实时型：响应时间s级以上，如工程机械控制。

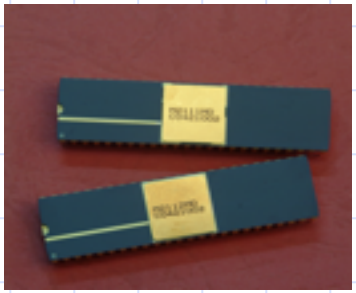
背景分析

- 早期嵌入式系统：硬件所限
  - 汇编语言
  - 基本不采用操作系统
- 基础条件成熟
  - 硬件的提升

    ——微处理器性能提高、存储器容量增加
  - 软件技术快速发展

    ——编译器、操作系统、集成开发环境



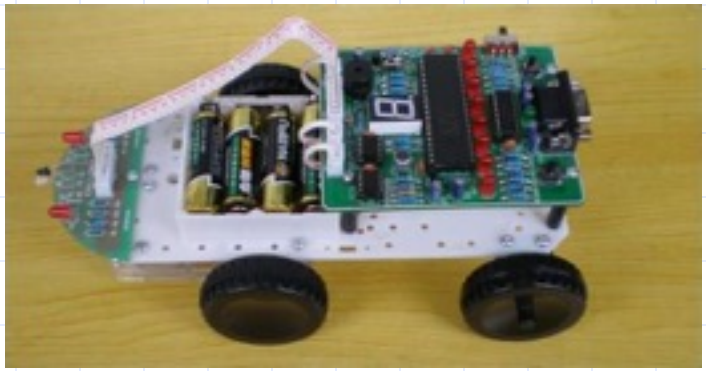



嵌入式操作系统概述－发展阶段（1/4）

- 嵌入式操作系统的发展主要经历了以下四个阶段：
- 无操作系统的阶段
  - 单芯片为核心
  - 具有与一些监测、伺服、指示设备相配合的功能
  - 一般没有明显的操作系统支持
  - 通过汇编语言编程对系统进行直接控制。
  - 主要特点
    - 系统结构和功能都相对单一，针对性强
    - 无操作系统支持
    - 几乎没有用户接口

嵌入式操作系统概述－发展阶段（2/4）

- 简单监控式的实时操作系统阶段
  - 以嵌入式处理器为基础
  - 以简单监控式的操作系统为核心
  - 主要特点：
    - 处理器种类繁多，通用性比较弱；
    - 开销小，效率高；
    - 一般配备系统仿真器，具有一定的兼容性和扩展性；
    - 用户界面不够友好，主要用来控制系统负载，以及监控应用程序



- 八十年代初：出现了以**VRTX**(1981)、**pSOS**等为代表的第一代系统（实时内核），提供了实时操作系统基本功能。

嵌入式操作系统概述－发展阶段（3/4）

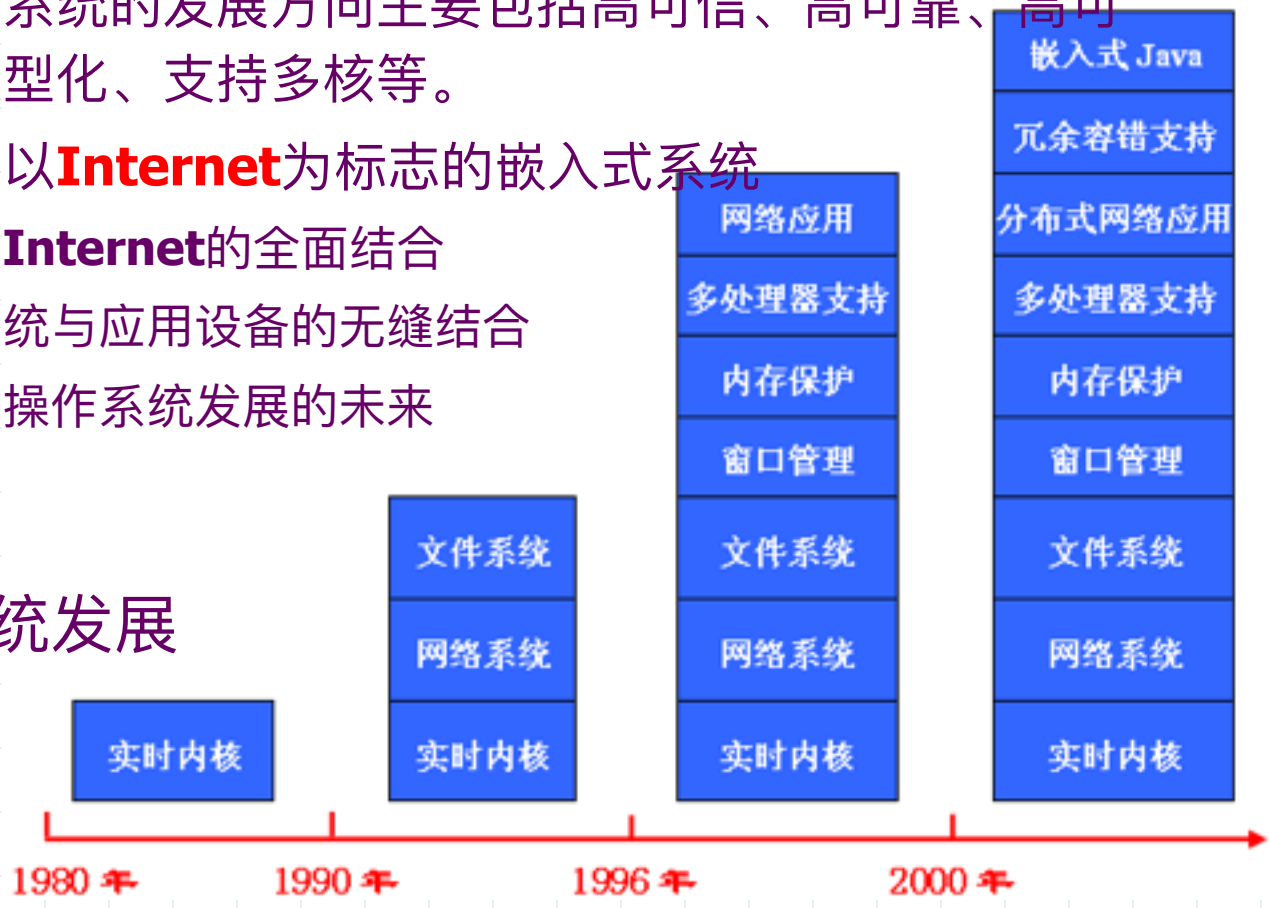
- 通用的嵌入式实时操作系统阶段
  - 以通用型嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统
  - 主要特点：
    - 运行在不同的微处理器
    - 具有强大的通用型操作系统的功能
      - 文件和目录管理
      - 多任务
      - 设备驱动支持
      - 网络支持
      - 图形窗口
      - 用户界面
    - 具有丰富的API和嵌入式应用软件

▪八十年代后期到九十年代初期，出现以**VxWorks**、**RTEMS**、**Nucleus PLUS**、**QNX**、**OSE**为代表的第二代系统。

嵌入式操作系统概述－发展阶段（4/4）

- 二十世纪末，出现了以**Integrity**为代表的第三代系统，进一步在实时性、高可靠性、高可用性等方面提供了强有力的支持。
- 新一代实时操作系统的发展方向主要包括高可信、高可靠、高可用、高安全、微型化、支持多核等。
- 近年来，出现了以**Internet**为标志的嵌入式系统
  - 嵌入式系统与**Internet**的全面结合
  - 嵌入式操作系统与应用设备的无缝结合
  - 代表着嵌入式操作系统发展的未来

嵌入式实时操作系统发展

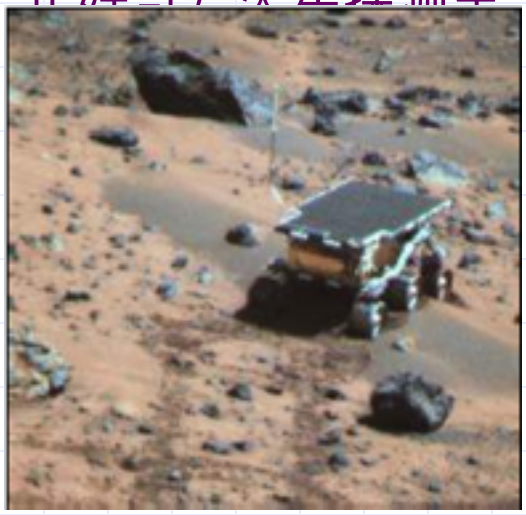


典型的嵌入式实时操作系统

- 嵌入式实时操作系统数量众多，如：
  - VxWorks
  - Windows CE
  - pSOS
  - QNX
  - PalmOS
  - Nucleus
  - Android
  - RT-Linux
  - Symbian
  - uc/OS
  - RTEMS
  - T-Kernel
  - Integrity
  - ThreadX
  - 如：
  - SkyOS
  - RT-Thread
  - DOOLOO RTOS
- 国产嵌入式实时操作系统，
  - HOPEN
  - DeltaOS
  - SmartOS

嵌入式实时操作系统－VxWorks

- VxWorks操作系统是美国WindRiver公司于1983年设计开发的嵌入式实时操作系统，具有高性能、稳定的内核以及友好的用户开发环境，是世界第一大嵌入式操作系统提供商，应用于航空航天、工业控制、网络设备、汽车电子等领域。
- 经典应用：1997年火星探路者、2007年凤凰号火星探测器、2012年好奇号火星探测车



在火星沙丘前进

在火星上拍摄的日落全景

嵌入式实时操作系统－Integrity

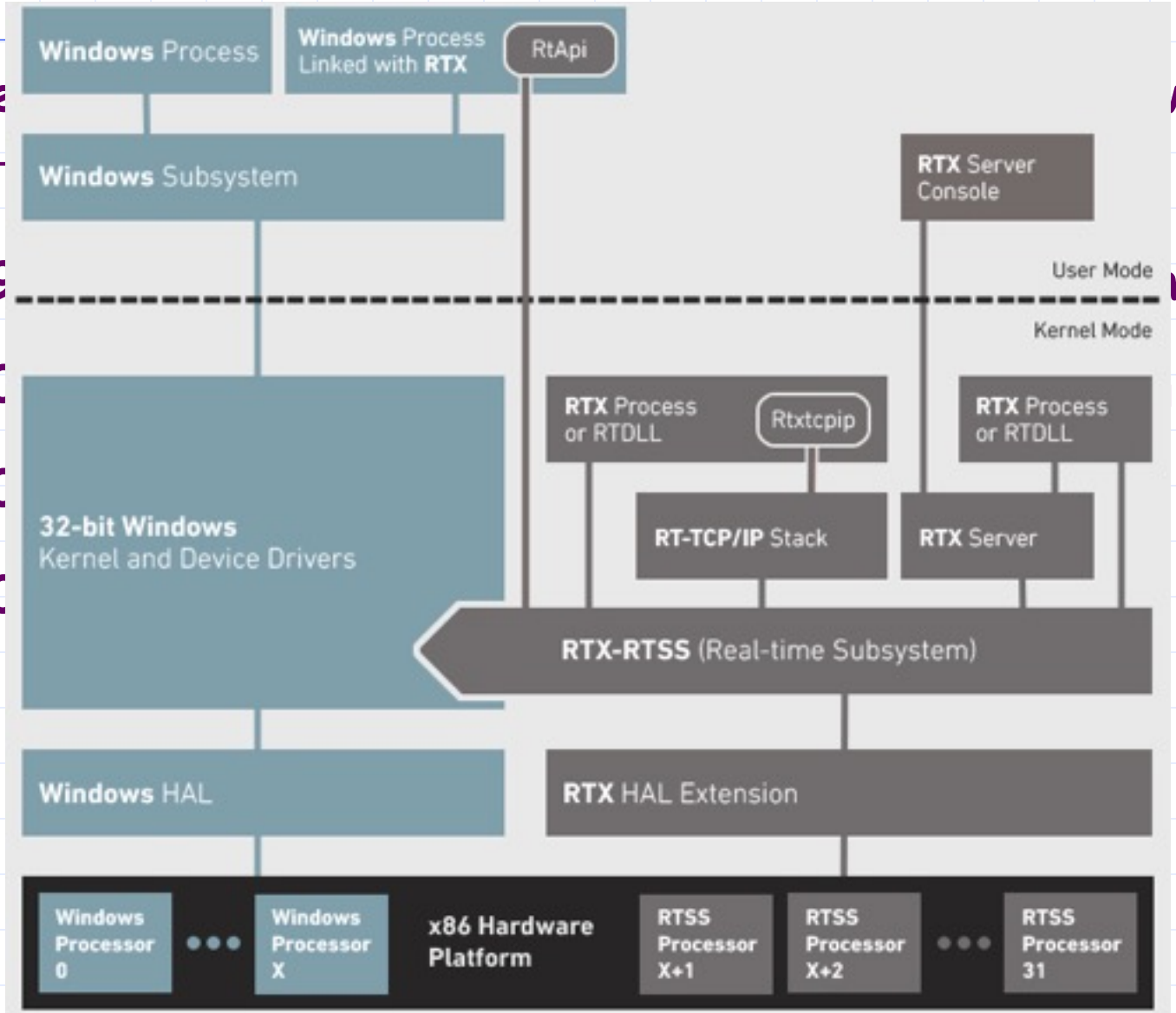
- 美国Green Hills公司是世界排名第二的嵌入式操作系统提供商，Integrity是Green Hills公司的RTOS产品，代表了目前最先进的RTOS技术，被NASA JPL选中用于测试在太空中的新技术。
- 分为普通Embedded RTOS和关键应用中使用的DO-178B实时操作系统两类。
- 系统技术优势突出
  - 内核服务优化，系统调用的开销降至最小。
  - 复杂的系统调用可以被抢占。
  - 系统的调度器是一个真正的实时调度器。
  - 具有快速中断处理能力，内核从不阻塞某些中断。
  - 具有一流的集成开发环境MULTI®支持。

Windows实时化改造－RTX/RTX64

- Realtime Extension(RTX) for Windows是对Windows的实时扩展
- 1980 年，麻省理工的几位工程師联合成立VenturCom
- 2004 年，更名为Ardence，研发了实时Windows产品RTX
- 2006年，Citrix Systems收购Ardence
- 2008年，IntervalZero购入了Citrix的Ardence部分

Windows实时化改造－RTX/RTX64

- Re…s的实时…
- 19…
- 20…RTX
- 20…
- 20…



Linux实时化改造－实时Linux

- 嵌入式系统追求数字化、网络化和智能化，要求系统必须是开放的、提供标准的**API**，并能够方便地与众多第三方软硬件沟通。尤其是处于核心地位的操作系统。
- **Linux**是开放源码的，不存在黑箱技术，遍布全球的众多**Linux**爱好者是其开发的强大技术后盾。
- 对**Linux**进行实时性改造与裁剪，形成：
  - **μClinux**
  - **Embedix**
  - **RTLinux**
  - **RTAI**
  - **Monta Vista Linux**

开源嵌入式实时操作系统－μC/OS-II/III

- **μC/OS-II/III**是一种基于优先级抢占式、可移植、可裁剪的多任务实时操作系统。绝大部分源码是用**ANSI C**写的，与硬件相关的那部分汇编代码被压缩至最低限度，使得系统移植性强。
- **μC/OSII**诞生于**90**年代初，最初名称是**μC/OS**，由**Jean J.Labrosse**开发，并在网络上开源，其特点为短小、精悍。
- **μC/OSII**经裁剪最小可达**2KB**，最小数据**RAM**需求**10KB**。
- **μC/OS-II/III**可以在**8**位～**64**位，超过**40**种不同架构的微处理器上运行，在世界范围内得到广泛应用，包括：手机、路由器、集线器、不间断电源、飞行器、医疗设备及工业控制上。

开源的嵌入式实时操作系统－ThreadX

- ThreadX是一款强实时操作系统，以内核小（最小内核为2K，最小RAM 500byte）、实时性强、高可靠性、源代码开放，免收产品版权费而闻名。由美国Express Logic提供解决方案，适于深度嵌入的系统，有功能强大的开发调试环境MULTI®支持。
- 典型应用：2005年7月4日，美国NASA实施"深度撞击"号宇宙飞船对坦普尔1号彗星的准确撞击，关键任务由ThreadX完成

开源的嵌入式实时操作系统－T-Kernel

- 由日本东京大学的坂村健教授主持开发，具有执行效率高、实时性好等特点。
- 1984年提出计算机操作系统规范TRON（The Real-time Operating system Nucleus）构想，先后推出了ITRON、JTRON、BTRON、CTRON等规范。
- 其应用从汽车、移动电话、传真机到电视机、家电等领域，主要用户包括：丰田、松下、日立、富士通、东芝、索尼、佳能、理光、NEC等，装机量超过30亿。
- IBM、Microsoft、ARM、MIPS、Sun、Oracle等企业相继加入其开放式系统架构

开源的嵌入式实时操作系统－RT-Thread

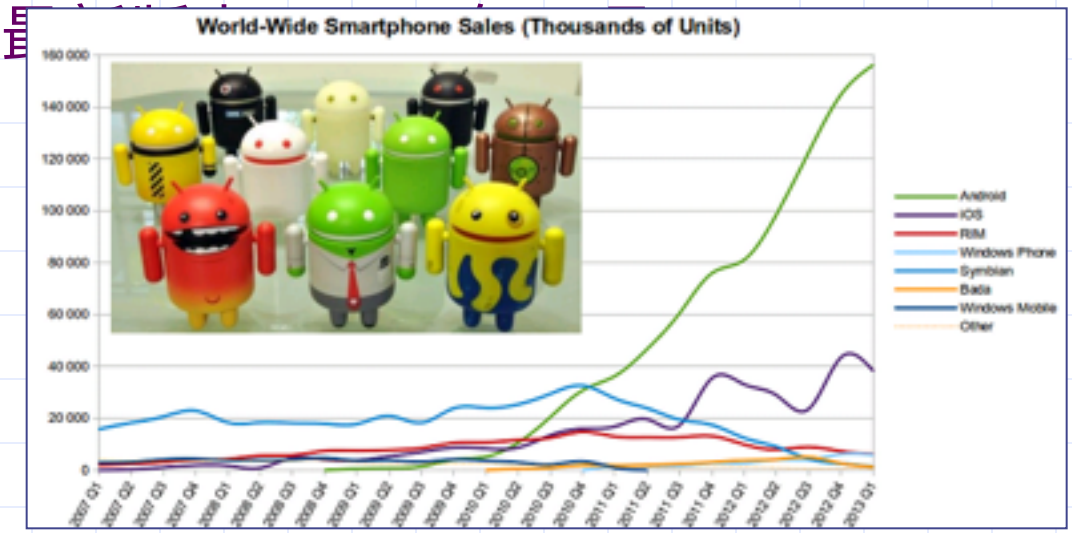
- DOOLOO RTOS开发人员，于2006年开发了RT-Thread基础内核，2012年1月发布1.0.0版本。
- RT-Thread获得2011年中日韩开源软件竞赛技术优胜奖，中国共三个（淘宝OceanBase、红旗Qomo Linux）。
- RT-Thread功能特点：小型、实时、可剪裁，核心能够小到4K ROM，1K RAM，支持精细裁剪。
- RT-Thread支持ARM7、ARM9、Cortex-M3、 M4、MIPS、AVR32、V850E，以及SH的16位MCU。

手机嵌入式操作系统－IPhone OS

- iPhone OS 或 OS X iPhone是由苹果公司为iPhone开发的操作系统
  - iPhone、iPod touch以及iPad
  - 以Darwin为基础
- 系统架构分为四个层次
  - 内核操作系统层（the Core OS layer）
  - 内核服务层（the Core Services layer）
  - 媒体层（the Media layer）
  - 可轻触层（the Cocoa Touch layer）
- 系统操作占用大概512MB的内存空间
- 源码模式：封闭源
- 最新版本
  - 2013-11

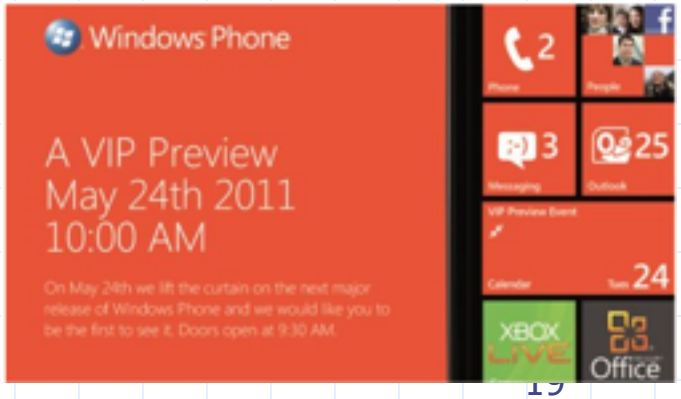
手机嵌入式操作系统－Android

- Android是Google开发的基于Linux平台的开源手机嵌入式操作系统。
- Android的特点
  - 融入Web应用，如：Gmail、Google Maps、YouTube、Google日历、Google Talk
  - Android操作系统免费向开发人员提供
- 最



手机嵌入式操作系统－Windows phone

- 2010年2月，微软公司正式发布Windows Phone 7智能手机操作系统，Windows Mobile系列彻底退出了手机操作系统市场。
- 2011年2月，诺基亚在英国伦敦宣布与微软达成战略合作关系。诺基亚手机将采用Windows Phone系统，并且将参与系统开发。
- Windows phone把网络、个人电脑和手机优势集于一身，提供良好的用户体验：
  - 仪表盘主屏
  - 桌面定制
  - 图标拖拽
  - 滑动控制



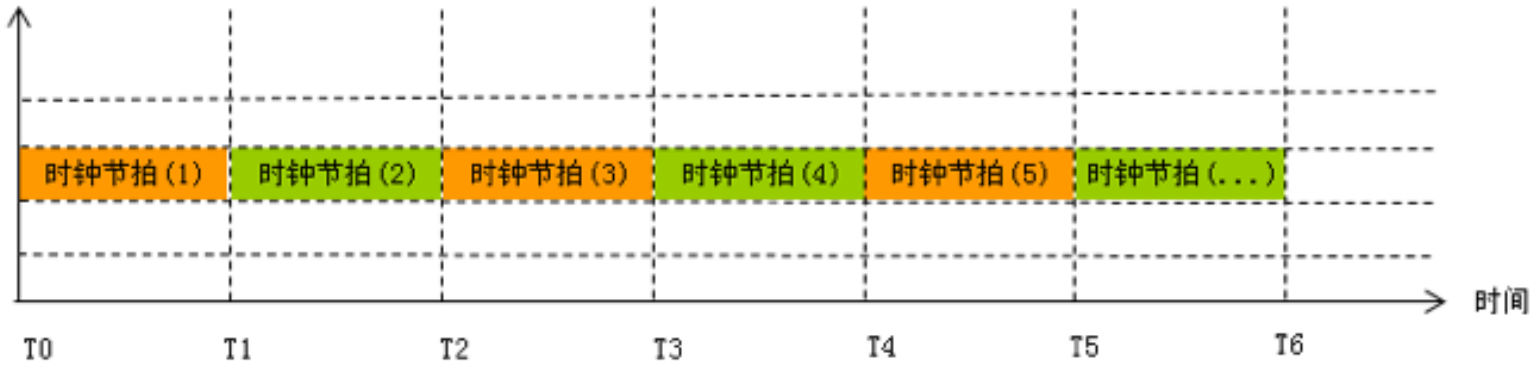
其它嵌入式操作系统

- 玉兔号操作系统——SpaceOS

- 机器人操作系统——ROS

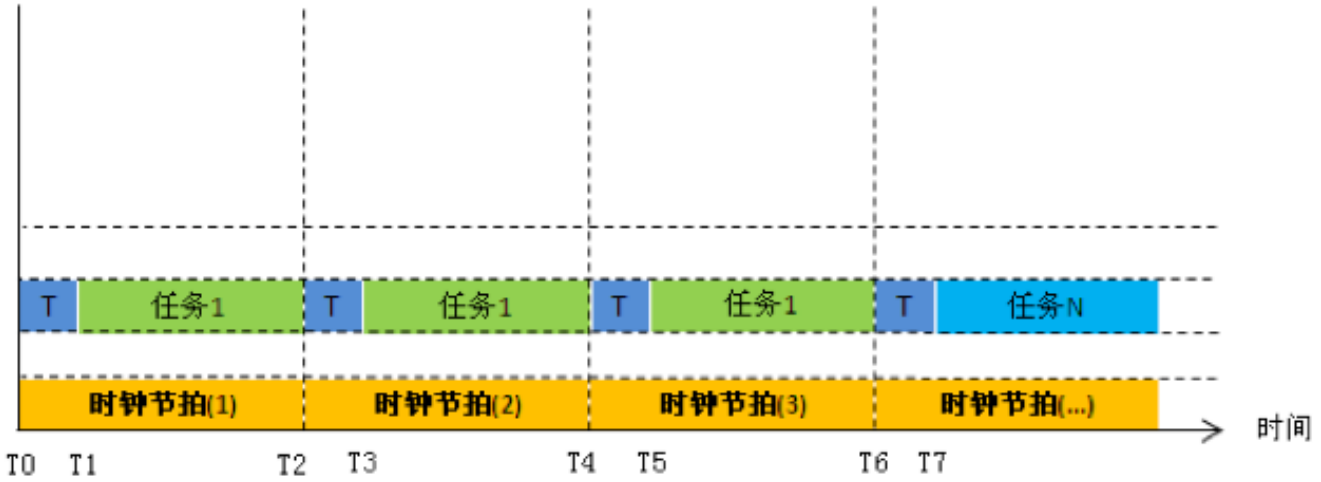
多任务机制概述

时钟节拍



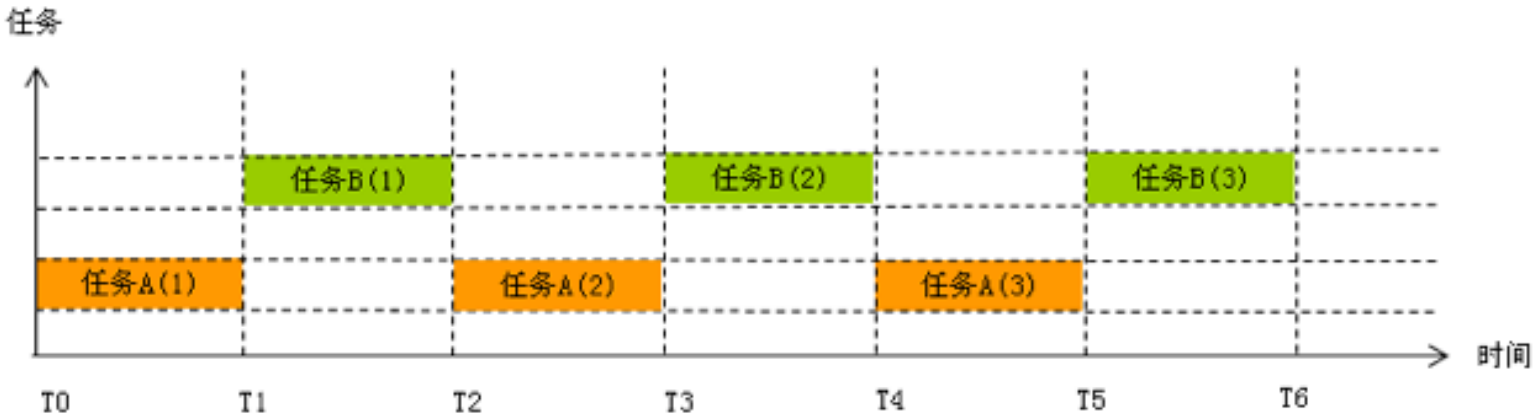
- 时钟节拍是多任务系统的基础，它指明了把处理器时间以多大的频率分割成固定长度的时间片段。作为多任务系统运行的时间尺度，时钟节拍是通过特定的硬件定时器产生的。硬件定时器会产生周期的中断，在相应的中断处理函数中，内核代码得以运行，从而进行任务调度和定时器时间处理等内核工作

定时器间隔



- 硬件定时器中断的时间间隔取决于不同的内核设计，一般是毫秒级的。时钟节拍越快，内核函数介入系统运行的几率就大，中断响应次数越多，内核占用的处理器时间越长。相反，如果时钟节拍太慢，则任务的切换间隔时间过长，进而影响到系统对事件的响应效果

多任务机制



- 在单处理器的计算机系统中，在某一具体时刻处理器只能运行一个任务，但是可以通过将处理器运行时间分成小的时间段，多个任务按照一定的原则分享这些时间段的方法，轮流加载执行各个任务的方法，从而使得在宏观上看，有多个任务在处理器上同时执行

任务切换机会

- 定时轮换
- 不同任务的运行路径不同，在某一时刻有些任务可能需要等待一些资源，这时可以通过某种方案，使得当前任务让出处理器

进程 vs 线程

- 通用操作系统一般以“进程”、“线程”等为单位来管理用户任务。在相关资料中，也会明确指出“进程”与“线程”的区别。但在很多嵌入式操作系统中，并没有区分进程和线程，只是把整个操作系统当作一个大的运行实体，其中运行着很多任务。任务通常作为调度的基本单位

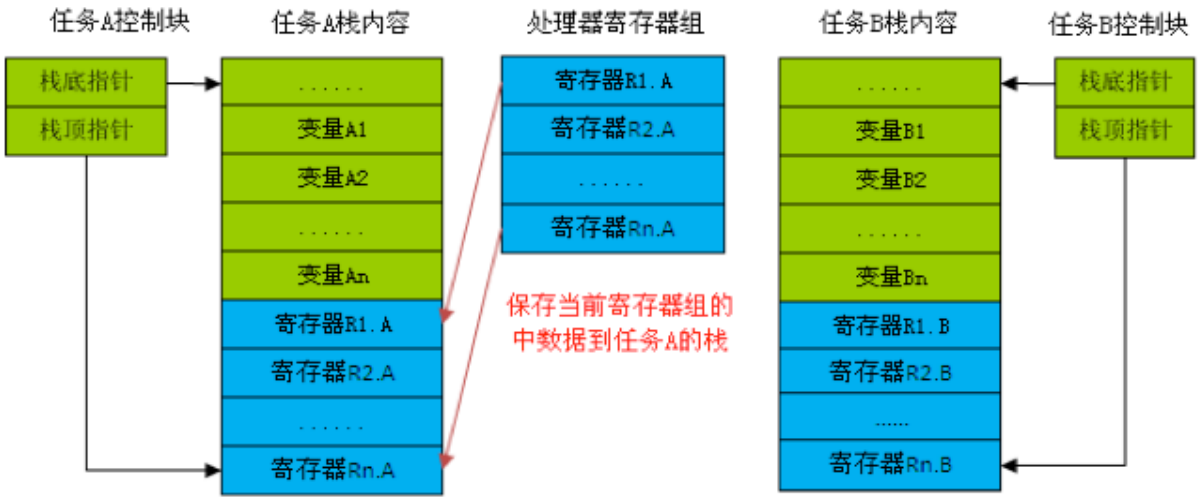
任务上下文

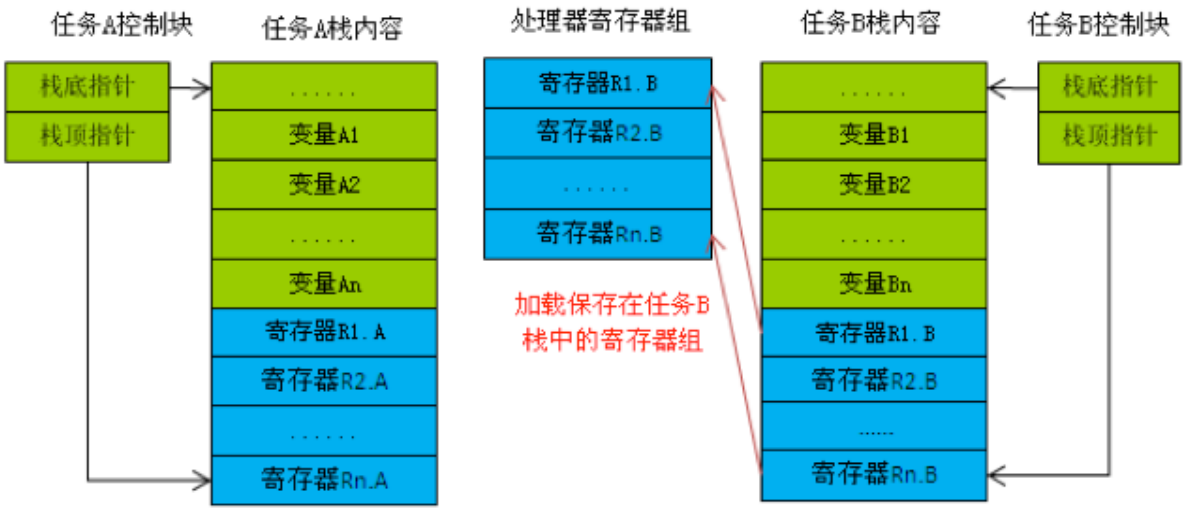
- 任务可以看作是用户程序在处理器等硬件上的运行，是一个动态的概念。任务在处理器上运行的某一时刻，有它自己的状态，即处理器所有的寄存器的数据，这个叫做任务的上下文，可以理解为是处理器的“寄存器数据快照”。通过这些数据，操作系统可以随时打断任务的运行或者加载新的任务，从而实现不同任务的切换运行

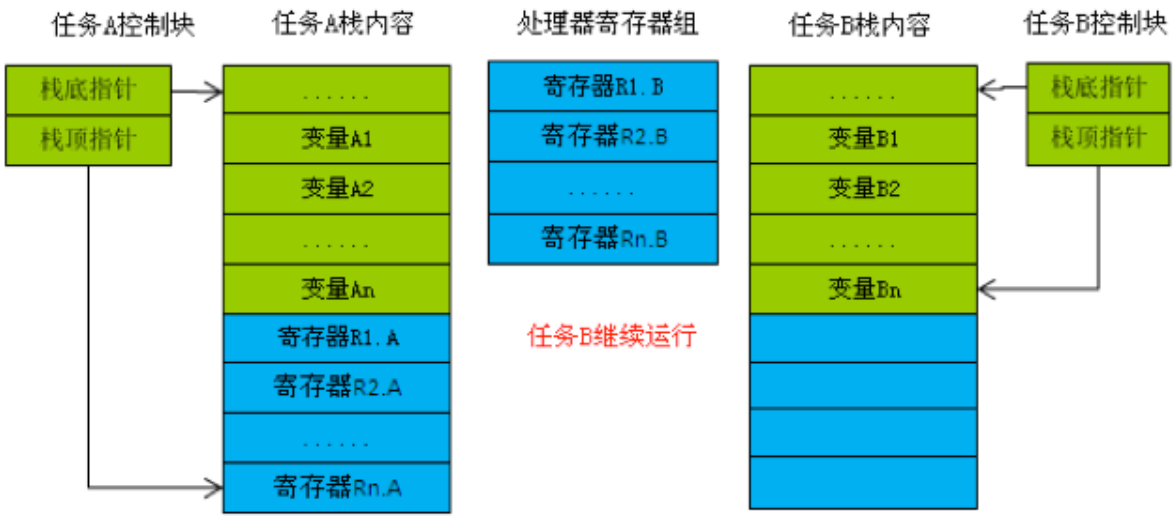
任务切换

- 当操作系统需要运行其它的任务时，操作系统首先会保存和当前任务相关的寄存器的内容到当前任务的栈中；然后从将要被加载的任务的栈中取出之前保存的全部寄存器的内容并加载到相关的寄存器中，从而继续被加载任务的运行。这个过程叫做任务切换


任务A控制块
任务A栈内容
处理器寄存器组
任务B栈内容
任务B控制块
栈底指针
栈顶指针
.....
变量A1
变量A2
.....
变量An
寄存器R1.A
寄存器R2.A
.....
寄存器Rn.A
任务A在运行
.....
变量B1
变量B2
.....
变量Bn
寄存器R1.B
寄存器R2.B
.....
寄存器Rn.B
栈底指针
栈顶指针


任务A控制块
任务A栈内容
处理器寄存器组
任务B栈内容
任务B控制块
栈底指针
栈顶指针
.....
变量A1
变量A2
.....
变量An
寄存器R1.A
寄存器R2.A
.....
寄存器Rn.A
寄存器R1.A
寄存器R2.A
.....
寄存器Rn.A
保存当前寄存器组的
中数据到任务A的栈
.....
变量B1
变量B2
.....
变量Bn
寄存器R1.B
寄存器R2.B
.....
寄存器Rn.B
栈底指针
栈顶指针

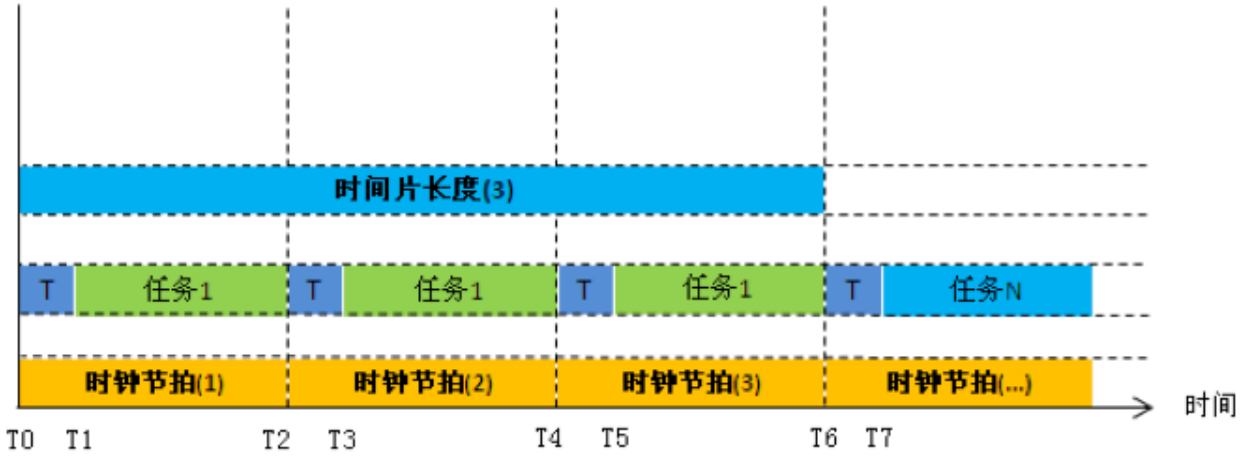

任务A控制块
任务A栈内容
处理器寄存器组
任务B栈内容
任务B控制块
栈底指针
栈顶指针
.....
变量A1
变量A2
.....
变量An
寄存器R1.A
寄存器R2.A
.....
寄存器Rn.A
寄存器R1.B
寄存器R2.B
.....
寄存器Rn.B
加载保存在任务B
栈中的寄存器组
.....
变量B1
变量B2
.....
变量Bn
寄存器R1.B
寄存器R2.B
.....
寄存器Rn.B
栈底指针
栈顶指针


任务A控制块
任务A栈内容
处理器寄存器组
任务B栈内容
任务B控制块
栈底指针
栈顶指针
.....
变量A1
变量A2
.....
变量An
寄存器R1.A
寄存器R2.A
.....
寄存器Rn.A
寄存器R1.B
寄存器R2.B
.....
寄存器Rn.B
任务B继续运行
.....
变量B1
变量B2
.....
变量Bn
栈底指针
栈顶指针

问题

- 保存在任务B的栈中的最初始的寄存器组的内容从哪里来的?
- 保存在最先执行的任务的栈中的寄存器组的数据是如何加载到处理器寄存器组的?

任务的时间片



- 时间片指的是任务一次投入运行，在不被抢占或者中断的情况下，能够连续执行的最长时间（以时钟节拍计数）。时间片的长度由具体操作系统规定，有些操作系统中不同任务可以有不同的时间片长度，或者是在运行过程中可以动态改变时间片长度。

- 时间片长度是时钟节拍的整数倍。

任务的优先级

- 任务的优先级用来安排系统中各个任务的执行次序，它说明了任务的重要性，任务越重要，它的优先级应越高，越应该获得处理器资源。任务优先级的安排有两种方式：静态优先级和动态优先级

- 因任务时间片运行完毕而引起的任务调度可以理解为时间片调度，而因为操作系统中最高就绪优先级的变化而引起的调度则为优先级调度

任务调度

- 任务调度是操作系统的主要功能之一，在任务需要调度的时候，操作系统会根据具体的调度算法和策略选择合适的任务，替换当前任务占有处理器等硬件资源。根据调度原理的不同，任务调度方式可分为可抢占调度和不可抢占式调度两类

调度类型

- 对于基于优先级的系统而言，可抢占型调度是指操作系统可以剥夺正在运行任务的处理器使用权并交给拥有更高优先级的就绪任务，让别的任务运行。

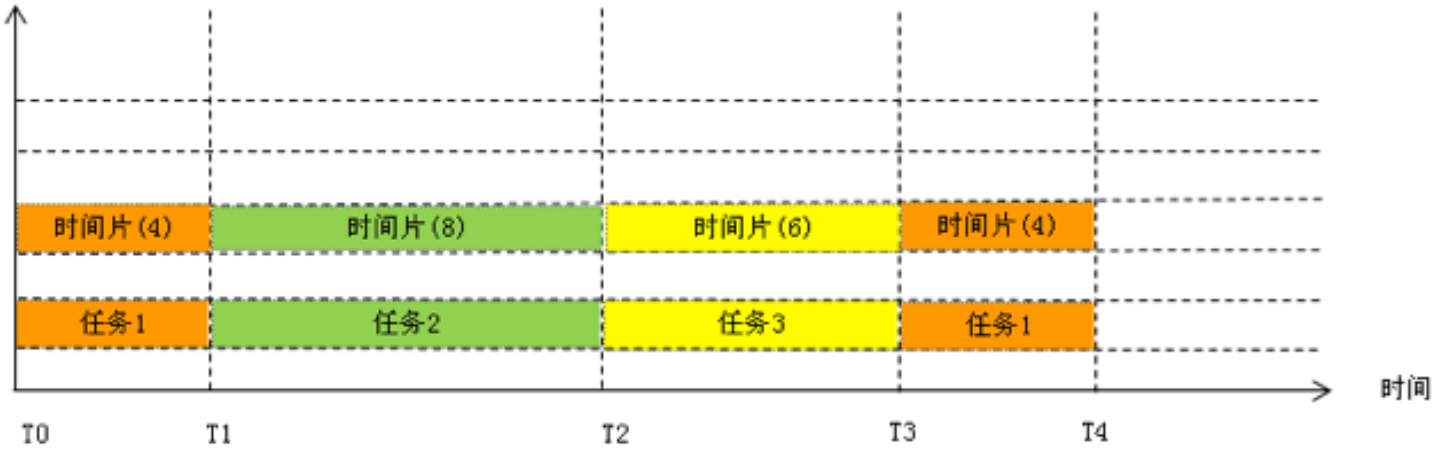
- 对于基于分时机制的系统而言，每个任务都能持续占用处理器一段时间，每轮时间用完之后操作系统就剥夺处理器给别的任务来执行。可以把这种调度方式理解为时间引起的抢占。

- 在不可抢占型调度方式下，如果某任务占有了处理器，那它就一直执行，直到它主动将处理器控制权让给别的任务使用。操作系统不会强制它释放处理器资源

任务调度算法

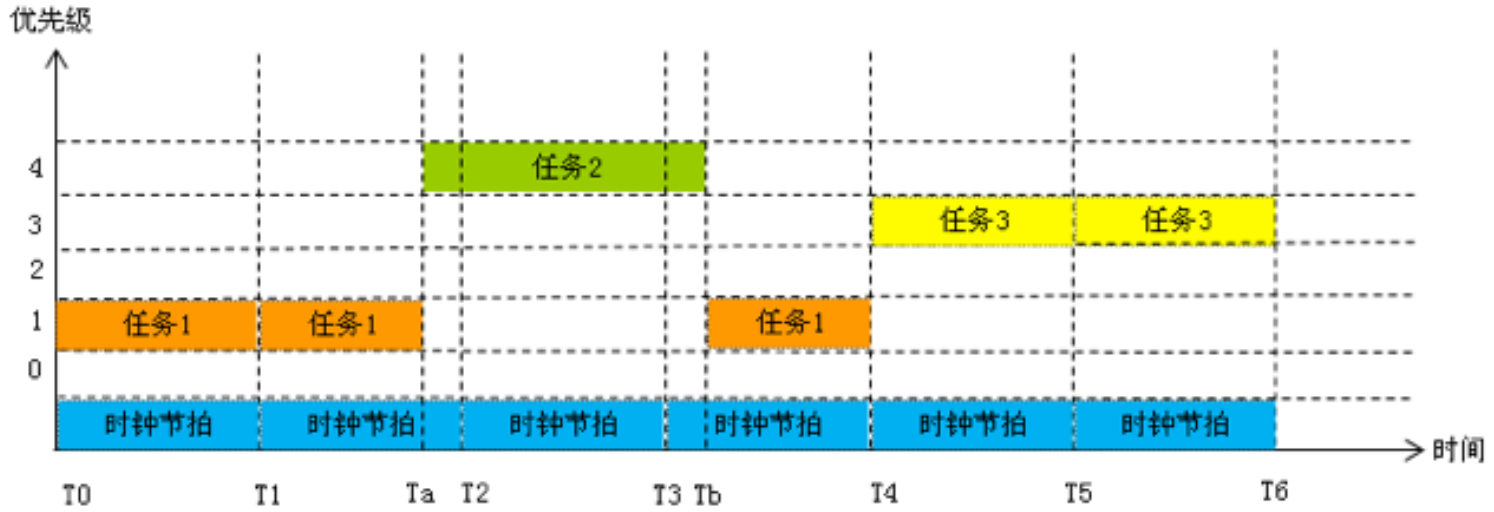
- 时间片调度算法
- 优先级调度算法
- 基于优先级的时间片调度算法

时间片调度算法



- 让某个任务运行一个时间片（多个时钟节拍），然后再切换给另一个任务。这种算法保证每个任务都能够轮流占有处理器。因为不是在每个时钟节拍都做任务调度，对处理器资源的消耗又做到了最少。时间片调度算法缺点是在任务占有处理器的时间段内，即是有更紧急任务就绪，也不能立刻执行它

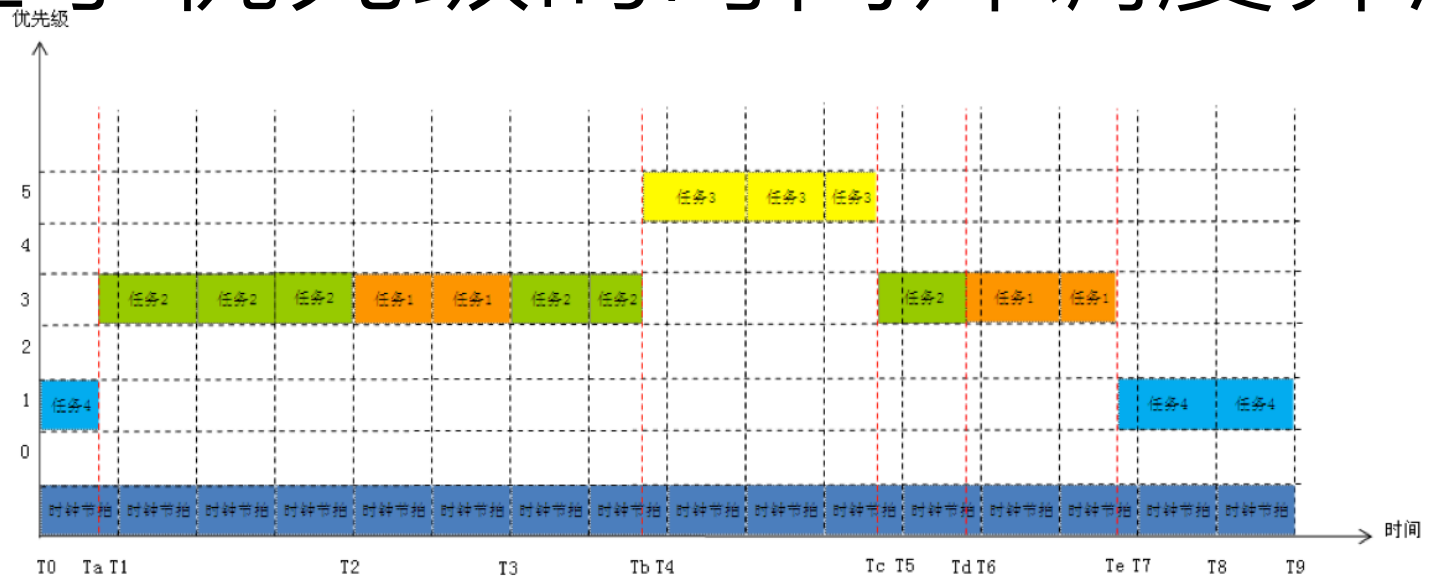
优先级调度算法



- 总是让具有最高优先级的就绪任务优先运行。即当有任务的优先级高于当前任务优先级并且就绪后，就一定会发生任务调度，这种操作系统最大的提升了系统的实时性

- 优先级调度算法的缺点是，当最高优先级任务在运行时，它将持续占有处理器直到任务结束或者阻塞，否则其它任务无法获得运行的机会

基于优先级的时间片调度算法



- 为每个任务都安排了优先级和时间片。在不同优先级的任务间采用优先级调度算法，在相同优先级的任务间使用时间片轮转调度算法。任务调度策略首先考虑任务的优先级，优先级高的任务必定会抢占低优先级的任务。相同优先级的任务则按照时间片长度比例共享处理器时间。这样既保证了能够尽快响应紧急任务，又保证相优先级的任务都有机会轮流占有处理器

任务状态

- 就绪状态 任务已经获得除处理器之外的一切需要的资源，等待任务调度
- 运行状态 任务正在运行中，它得到了所有需要的资源
- 等待状态 任务缺少某些必须的运行条件或资源而不能参与任务调度

任务间关系

- 在多任务系统中，在任务间、ISR和任务间必然存在着处理器交替抢占，轮流执行的情况。除此之外，这些可执行对象也存在着其它关系，仔细观察这些对象，它们总是要“走走停停、互相照应”，这也正是多任务系统的特点，只有这样设计系统才能使得硬件资源得到最大的利用

- 同步、互斥和通讯

同步、互斥和通讯

- 共享资源的竞争：任务或者ISR访问共享资源时是互相竞争的，只能被一个任务或者ISR访问，并且操作时不能被打断。强调的是“互斥”的概念。

- 运行同步：任务间或者任务和ISR间互相协作，按照规定的路线执行，也就是对它们的执行步骤和顺序有要求。强调的是“同步”的概念。同步可以是单向的也可以是双向的。

- 数据通信：任务间或者任务和ISR间的数据传输，常见的模式是一方提供数据，另一方处理数据，共同完成某些功能。强调的是“通信”的概念

通信

- 任务间的数据传输，可以是直接的，也可以是间接的。
  - 在直接数据传输方式下，一个任务可以把数据直接发给指定的任务，发送过程很明确的说明了哪个任务把数据传给了那个任务。
  - 间接方式指的是数据交互的双方，约定一个数据缓冲区，发送数据的任务首先会把数据发往该缓冲区，然后通知接收数据的任务则从该缓冲区取得数据。从操作系统角度来考虑，操作系统不关心这些数据的含意，只当普通的数据来处理

任务等待和唤醒机制

- 当任务在试图访问IPC对象时候，经常会因为运行条件不足而失败，被迫返回或者阻塞在该IPC对象的任务阻塞队列。而当有任务释放资源从而使得资源条件可以满足时，操作系统将会唤醒IPC对象上的阻塞任务，使得被唤醒任务继续运行。

- 不同的访问等待机制和唤醒机制是各种操作系统的重要区别

等待机制

- 直接返回结果：任务直接返回访问结果，或者成功或者失败；注意因为ISR不像任务那样能够被阻塞，所以ISR必须采用本模式。

- 阻塞等待模式：任务如果访问IPC对象失败，则进入该IPC对象的等待队列，直到明确得到处理。

- 时限等待模式：任务如果得不到IPC对象，则进入等待状态并开始计时。如果在等待期间得到了IPC对象则返回操作成功；如果当计时结束的时候任务仍然没有成功，那么它并不会继续等下去，而是返回失败的结果

唤醒机制

- 当资源可以可使用时，唤醒该资源的全部等待任务。让这些任务与系统中的其他任务平等竞争资源。这种策略会使系统瞬间繁忙，在参与竞争资源的所有任务中，最终只有一个任务获取到资源，没有得到资源的任务将再次进入资源的等待队列。

- 将该资源等待队列中的一个合适的任务唤醒。这个任务将和系统中可能访问该资源的其他任务一起竞争这个资源。如果这个任务最终没有竞争到资源，它会再次进入该资源的等待队列。

- 操作系统从等待队列中找到一个最佳的任务并立刻把资源交给它，这样该任务直接从释放资源的那个任务那里获得资源

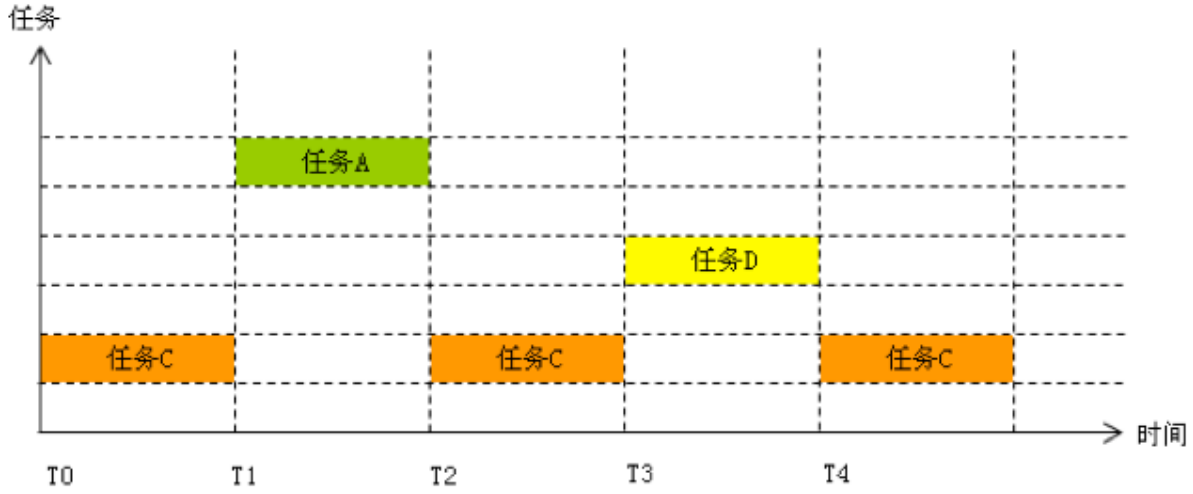
任务互斥

- 有些资源必须是独占使用的，多个任务对这样的资源的并发访问将导致错误的发生。一般来说，对需要独占使用的资源必须使用互斥方法来将对其的并发访问串行化

优先级反转

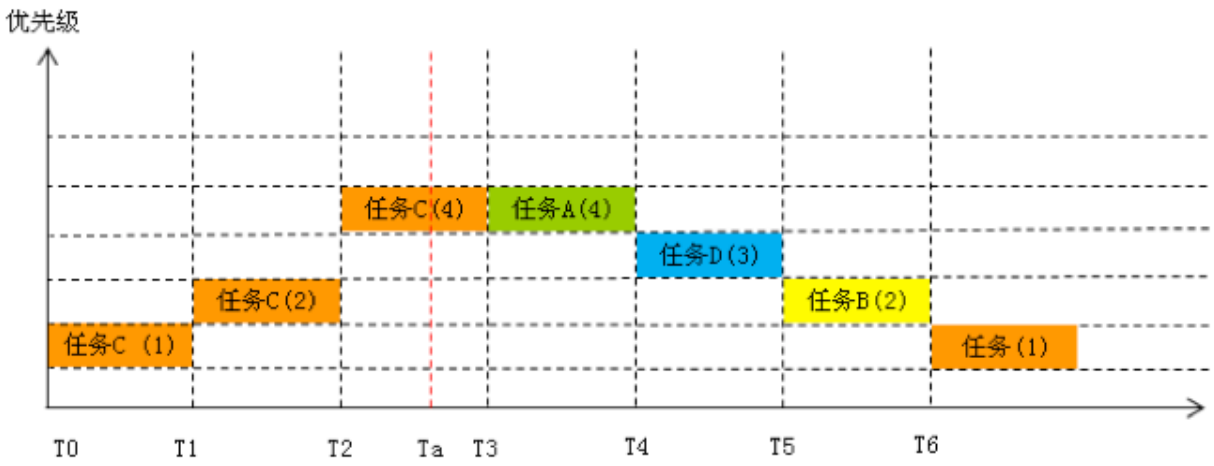
- 在优先级多任务系统中引入互斥方案，会导致任务优先级反转的问题：假如某时低优先级的任务占有资源，然后又有高优先级的任务申请资源，但因为不能满足而被挂起了，即低优先级任务阻塞了高优先级任务的运行。假如这时又有一个中优先级任务，那么它会把低优先级任务抢占。最终高优先级任务会间接的被中优先级任务抢占了

优先级反转



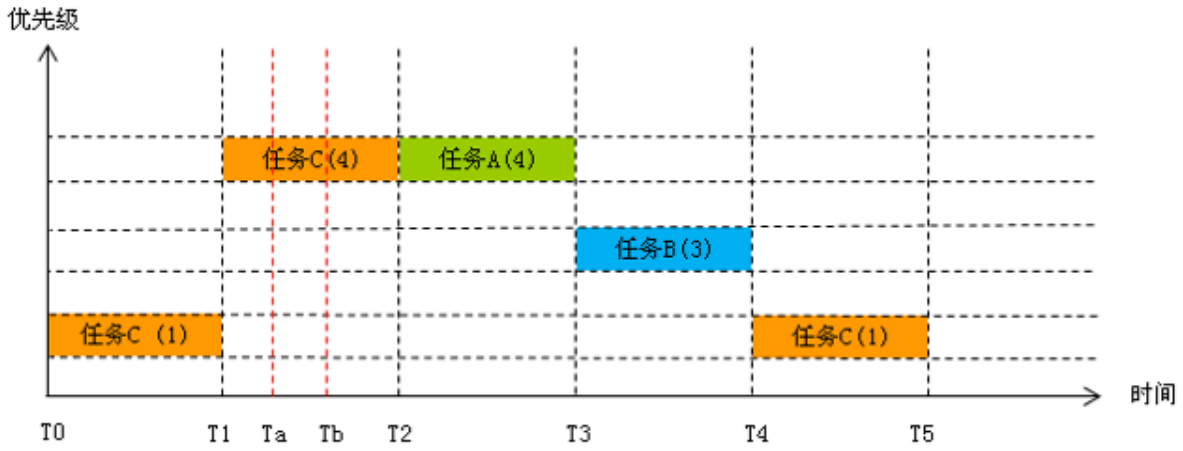
- 在基于优先级调度的系统中，处理器资源是按照优先级分配给任务的，就绪的高优先级任务必须实时获得处理器。系统中的各种资源，如果采用按照任务优先级分配的原则，那么高优先级的任务应该是首先被考虑的。优先级反转的问题则将打乱这些原则

优先级继承



- 当一个任务占有了资源并且随后阻塞了其他申请该资源的任务的时候，该任务将临时改变它的优先级为所有申请该资源的任务中的最高的优先级。并以这个临时优先级在临界区执行。当任务释放资源后，则恢复它原有的优先级

优先级天花板



- 优先级天花板是指将申请（占有）资源的任务的优先级提升到可能访问该资源的所有任务的最高优先级。(这个最高优先级称为该资源的优先级天花板)

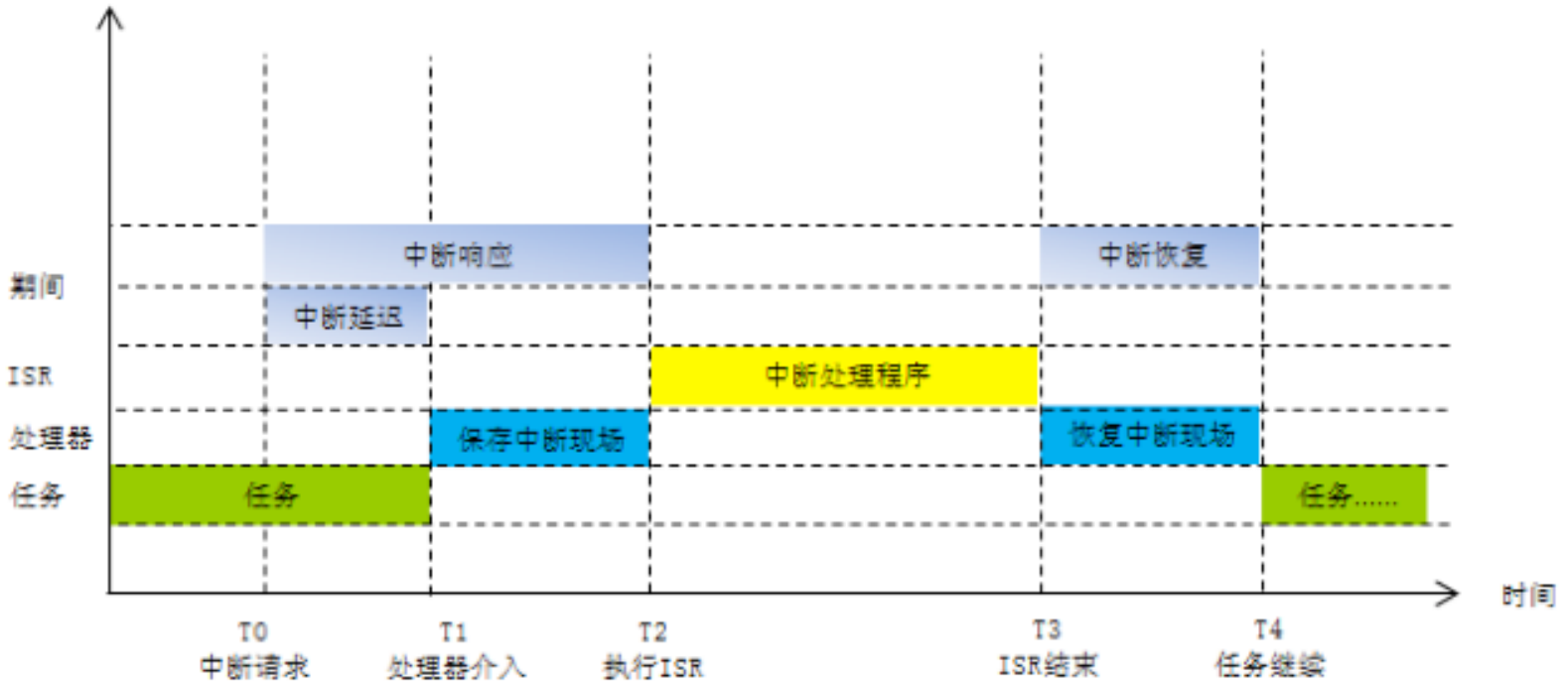
中断机制

- 外部中断：一般是指由系统外设发出的中断请求，如：串口数据的接收、键盘的敲击、打印机中断、定时器时间到达等。外部中断大多是可以屏蔽的，程序可以根据具体需要，通过中断控制器来屏蔽这些中断请求。

- 内部中断：指因处理器自身的原因引起的异常事件，如非法指令，总线错误（取指）或者运算出错(除0)等。内部中断基本是不可屏蔽的中断。

- 软件中断：这是一种特殊的中断，它是程序通过软件指令触发的，从而主动引起程序流程的变化。比如在用户级运行的程序在某时刻需要访问处理器中受到保护的寄存器，则可以通过软件中断进入系统级，实现权限的提升

中断流程


期间
ISR
处理器
任务
中断响应
中断延迟
中断处理程序
中断恢复
保存中断现场
恢复中断现场
任务
任务.....
时间
T0
中断请求
T1
处理器介入
T2
执行ISR
T3
ISR结束
T4
任务继续

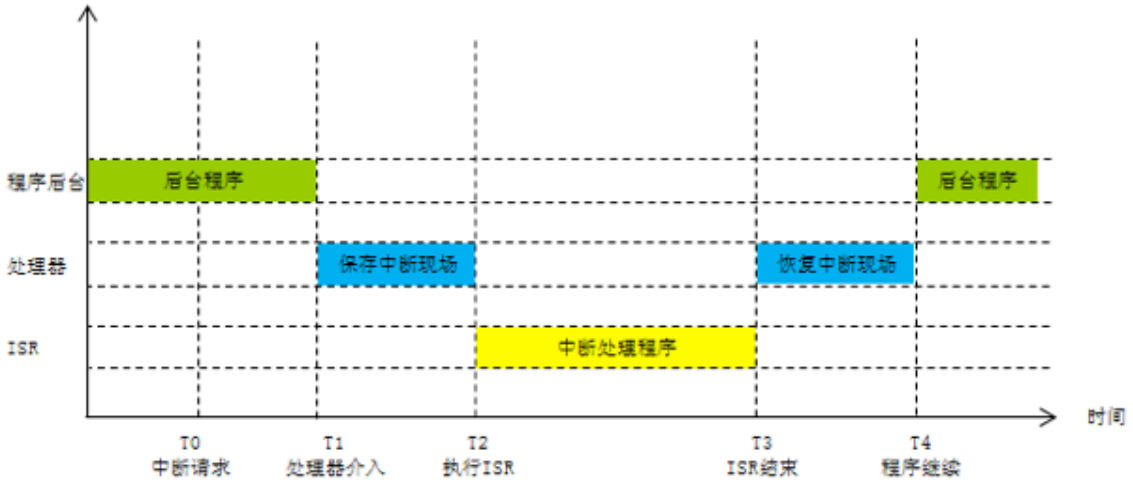
中断优先级

- 当几个中断同时产生的时候，首先响应那个中断就是个值得考虑的问题。当前绝大多数的处理器都支持中断优先级的概念，也就是说，为不同的中断源配置不同的优先级，优先级是固定的或者可以通过软件配置的。当多个中断同时产生(或者说需要处理)的时候，首先响应优先级高的中断，这样就能优先处理高优先级的事件。不同的处理器可能有不同的中断优先级策略

中断嵌套

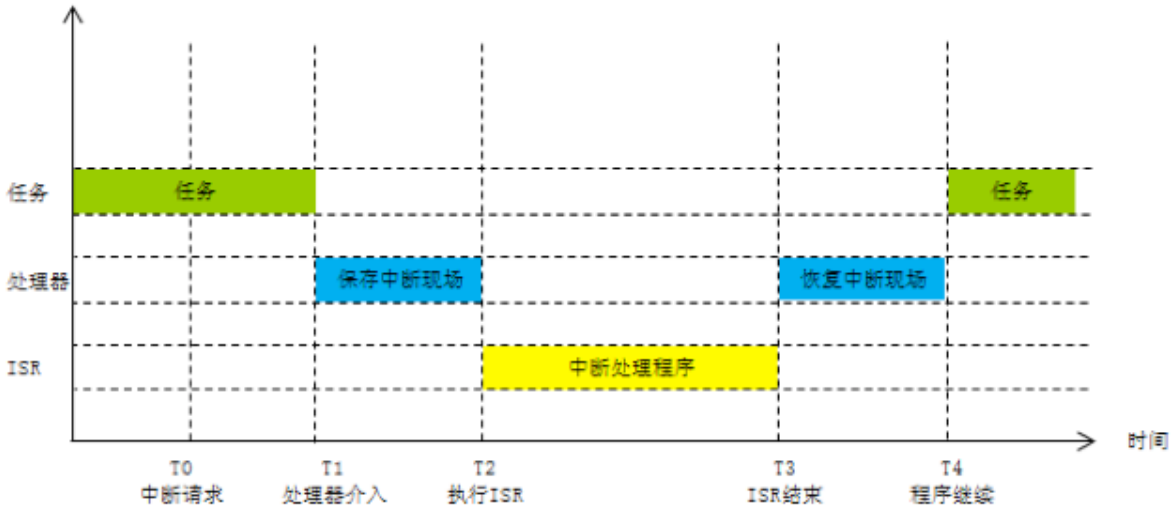
- 当处理器正在处理某个中断的时候，如果有其他中断发生，那么就得仔细考虑如何处理新的中断。对于简单的处理器来说，可能本身并不支持中断嵌套，在中断响应阶段就把中断给关闭了。而当前大多数的处理器是支持中断嵌套的，方案基本是结合中断优先级的嵌套方式，原则是：
  - 高优先级中断可以抢占低优先级中断
  - 同级中断不可抢占（包括自身）
  - 不能被立刻响应的中断会被悬挂(Pending)，等待高优先级中断退出后才执行
  - 同一个中断通常不能被悬挂

前后台系统的中断时序



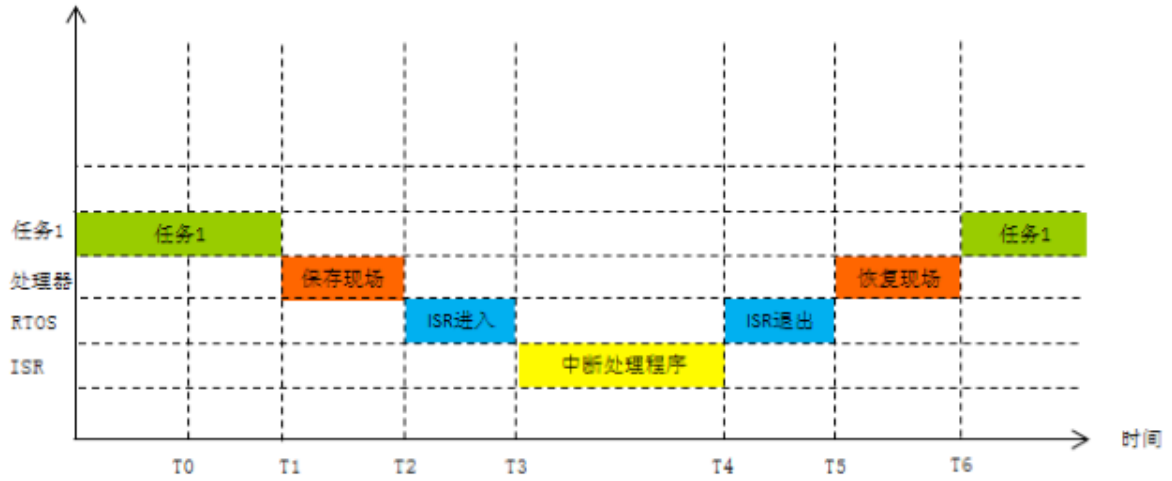
- 前后台的特点：实时响应事件，轮询处理事务

不可抢占操作系统的中断处理流程



- 不可抢占操作系统的多任务系统则有很多任务，每个任务都可能被中断打断

可抢占操作系统的中断处理流程



- 在可抢占内核中，当从中断返回时会处理任务抢占的问题，所以在每次中断进入时都要对中断嵌套计数做加法；在每次中断退出时都要对嵌套计数做减法，然后再继续检查中断嵌套计数是否为0，如果是，则说明中断彻底退出了，需要进行任务调度的处理

课程大纲

- 嵌入式实时操作系统概况
- 嵌入式实时操作系统特点
- 嵌入式实时操作系统功能简介

课程大纲

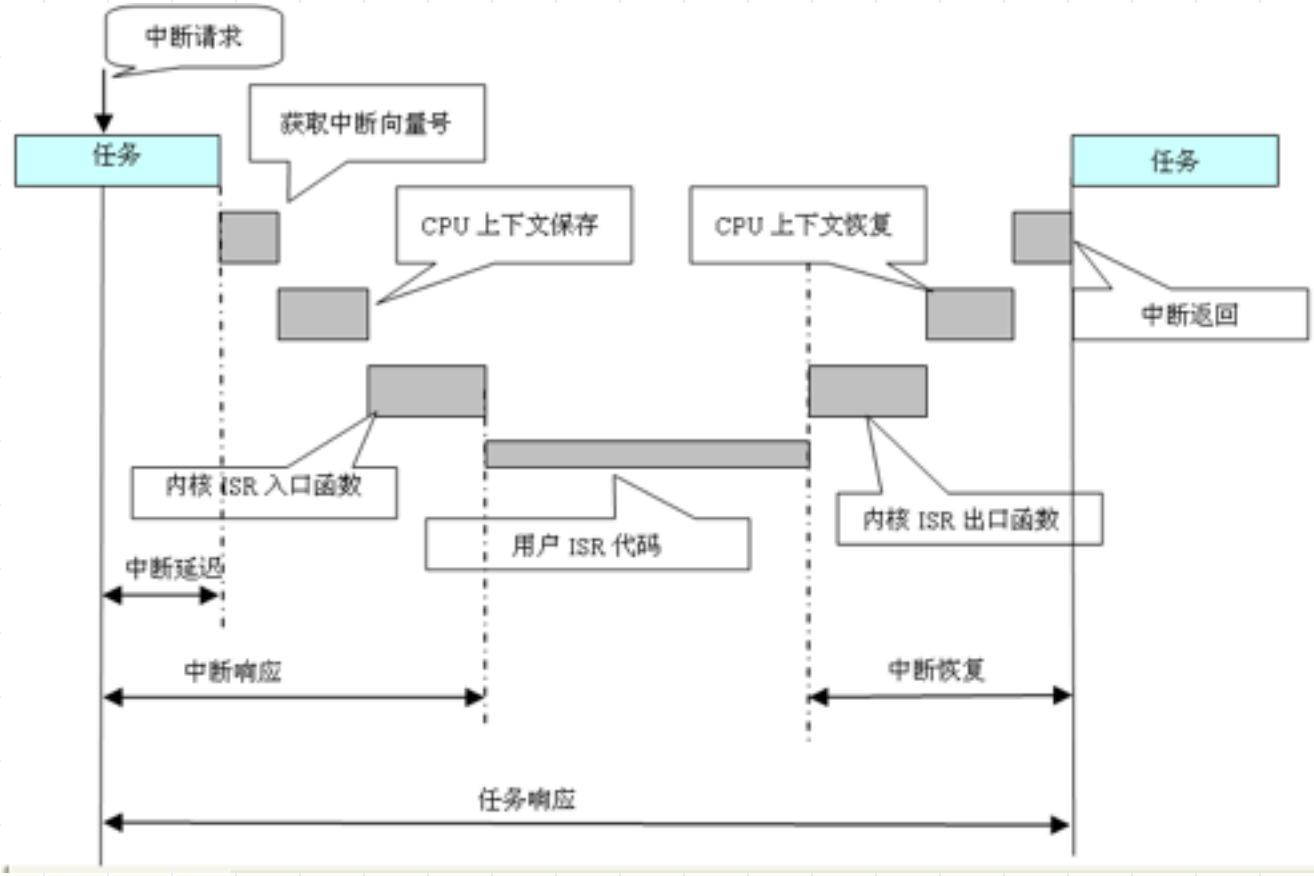
- 嵌入式实时操作系统概况
- 嵌入式实时操作系统特点
- 嵌入式实时操作系统功能简介

嵌入式实时操作系统内核重要特性

- 嵌入式实时操作系统内核的重要特性
  - 实时性
  - 可裁剪、可配置性
  - 可靠性支持
  - 应用编程接口支持
  - 可移植性

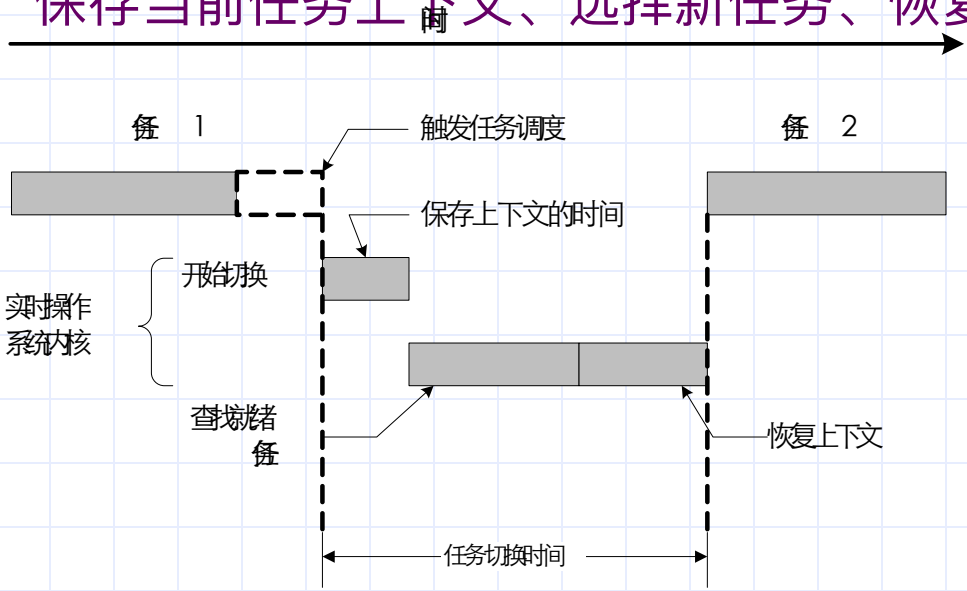
嵌入式实时操作系统内核实时性能指标

- 嵌入式实时操作系统内核的实时性能定量指标包括
  - 任务上下文切换时间
  - 中断延迟时间
  - 中断响应时间
  - 中断恢复时间
  - 任务响应时间



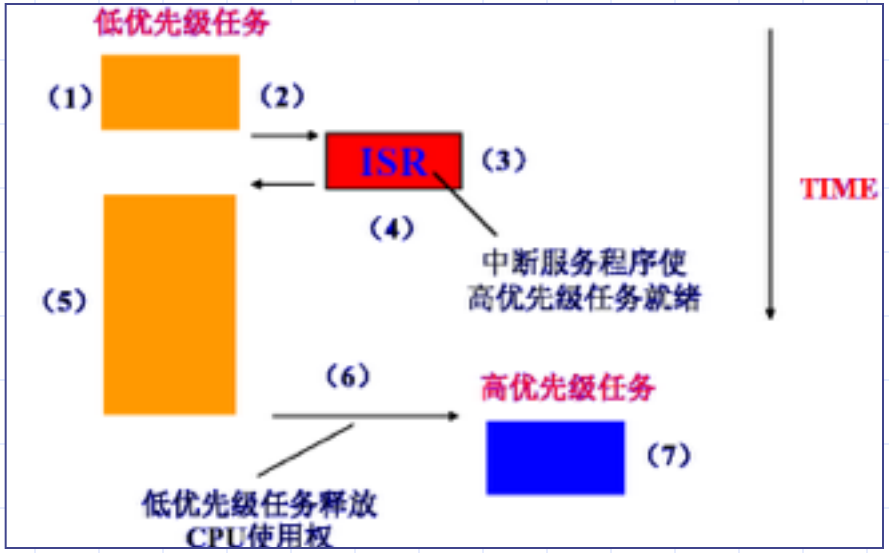
嵌入式实时操作系统内核实时性能关键指标

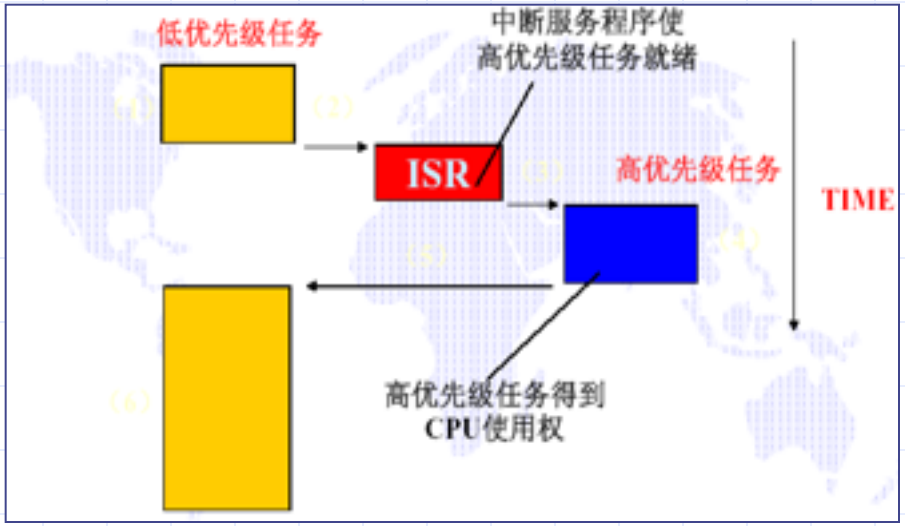
- 最大中断禁止时间
  - 反映内核对外界停止中断响应的最长时间
- 任务上下文切换时间
  - 系统中最频繁发生的动作，影响整个系统性能
  - 包括：保存当前任务上下文、选择新任务、恢复新任务上下文



提高内核实时性的方法－任务调度算法

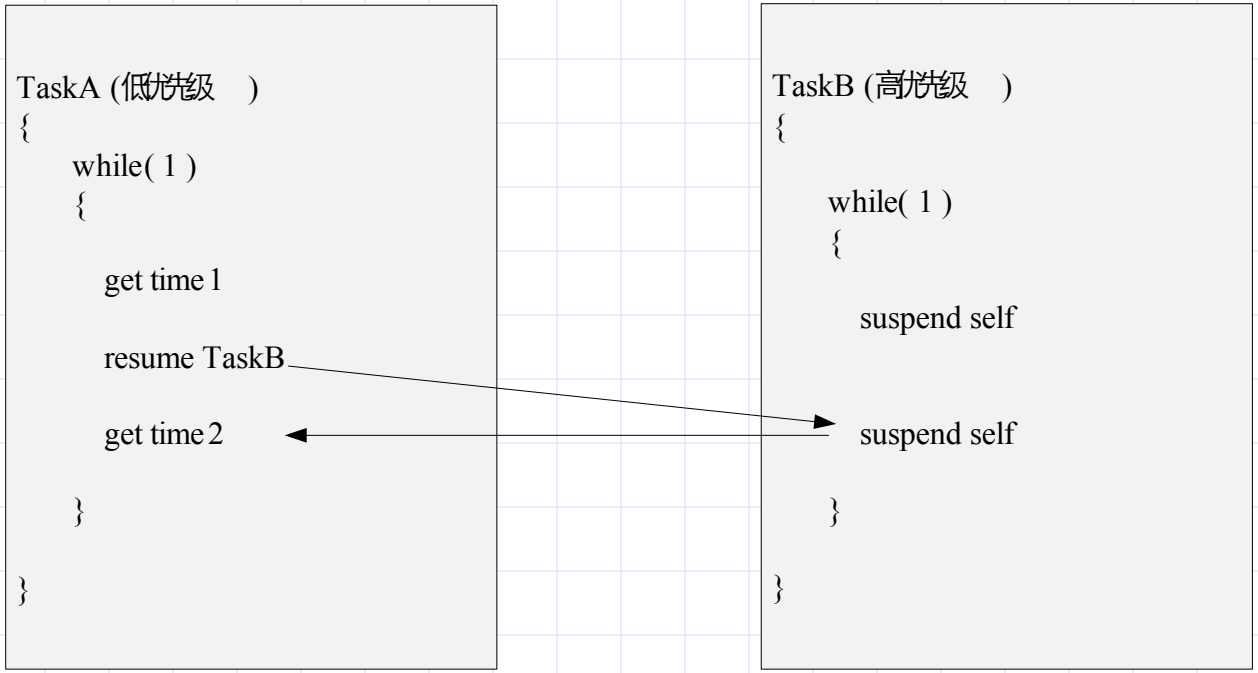
- 通用操作系统－非抢占式调度
  - 公平和最小化任务平均响应时间
  - 提高系统吞吐率
- 嵌入式实时操作系统－抢占式调度
  - 提高对关键性任务响应
  - 关注最坏执行时间
  - 函数的可重入性设计





任务上下文切换时间——两次悬挂法（1/2）

- 任务上下文切换时间举例



$$T_1 = t_2 - t_1 = t_{taskresume} + t_{tasksuspend} + 2 * t_{ctxsw}$$

任务上下文切换时间——两次悬挂法（2/2）

- 任务上下文切换时间举例

```
TaskA (低优先级    )
{
    while( 1 )
    {
      //do something
      //do something
      //do something
    }
}
```

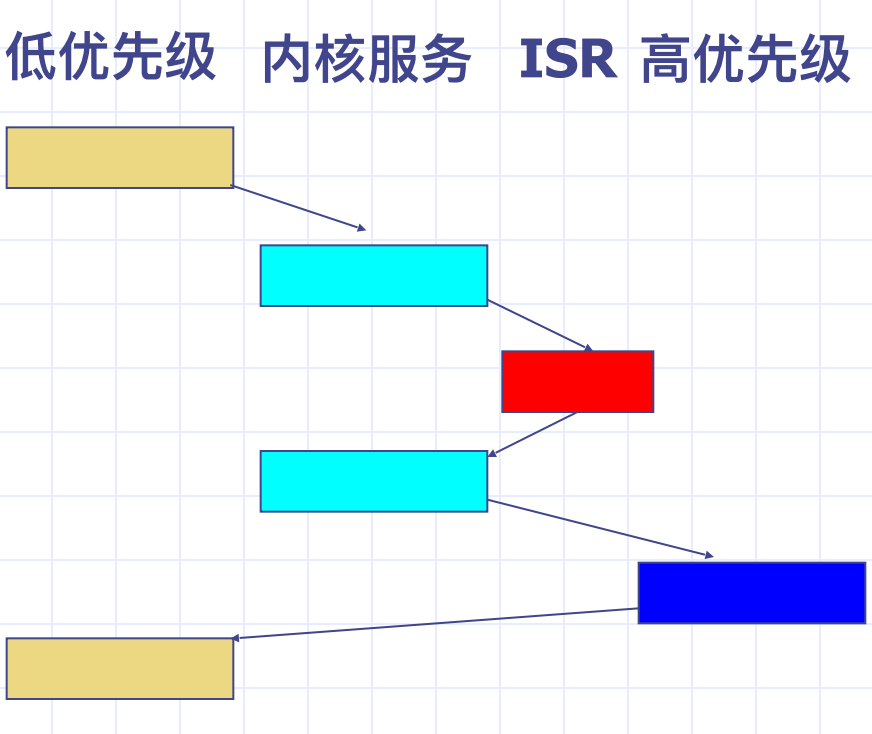
```
TaskB (高优先级    )
{
    while( 1 )
    {
      get time 1
      suspend TaskA
      resume TaskA
      get time 2
    }
}
```

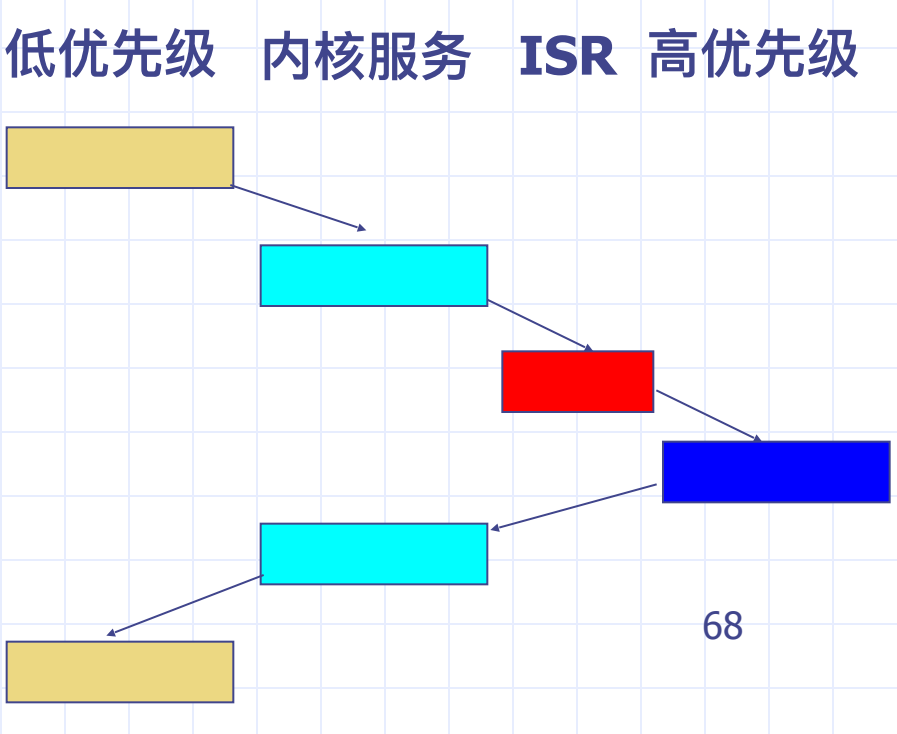
$$T_2 = t_2 - t_1 = t_{taskresume} + t_{tasksuspend}$$

$$t_{ctxsw} = (T_1 - T_2) / 2$$

提高内核实时性的方法－可抢占内核

- 通用操作系统－不可抢占内核
  - 内核服务不能被中断
  - 内核服务可中断，但不调度
- 嵌入式实时操作系统－可抢占内核
  - 内核服务可响应中断
  - 中断退出后可进行调度





提高内核实时性的方法－内核关中断时间

- 通用操作系统
  - 内核规模大
  - 中断禁止时间长
- 嵌入式实时操作系统
  - 小内核、微内核
  - 内核抢占点等技术

提高内核实时性的方法－内核关中断时间

- 通用
  - 内
  - 中

三种RTOS的系统调用对比分析

uC/ OSII 系统调用代码示例

```
OSTaskResume
{
   ……
   // 关闭中断
   OS_ENTER_CRITICAL() ;

   // 访问内核数据结构，完成系统调用处理
   ……

   // 开启中断
   OS_EXIT_CRITICAL() ;
   ……
}
```

巨型内核锁模型

RTEMS系统调用代码示例

```
_Thread_Resume
{
   ……
   // 关闭中断
   _ISR_Disable () ;
   // 访问内核数据结构，完成部分系统调用处理
   ……
   // 设置内核抢占点，可响应外部中断
   _ISR_Flash() ;
   // 继续完成系统调用处理
   ……
   // 开启中断
   _ISR_Enable() ;
  ……
}
```

内核抢占点模型

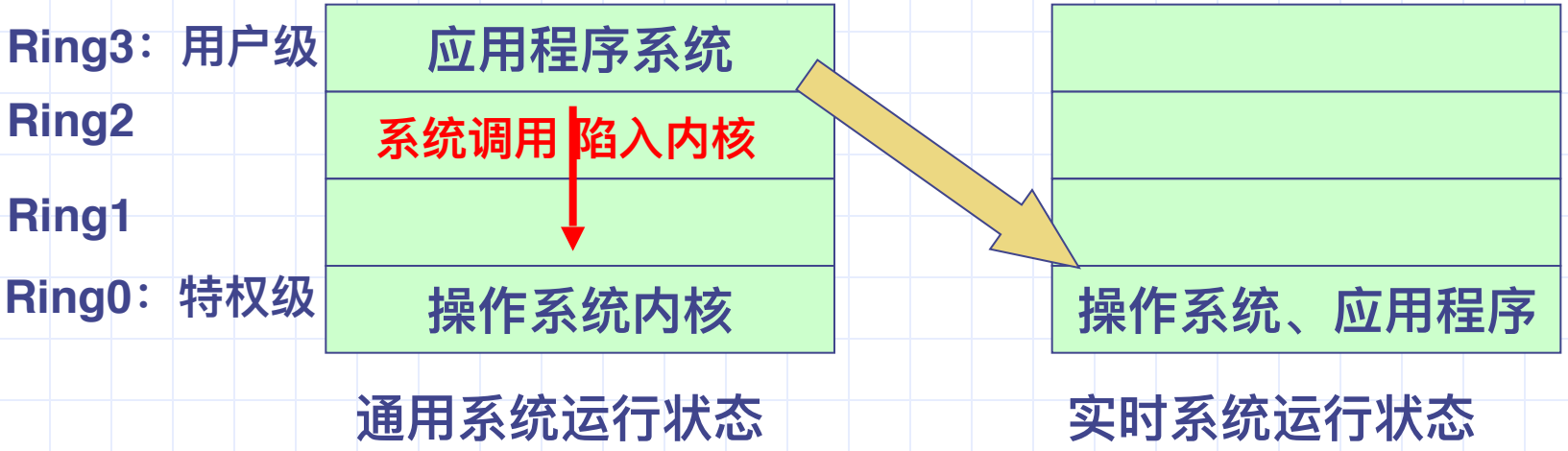
VxWorks 系统调用代码示例

```
taskResume
{
   ……
  //  是否处于内核态
   if ( kernelLock )
   {
     // 已处于内核态，将系统调用处理加入工作队列后退出
        workQAdd(dcall ) ;
    }
    else  // 未处于内核态
    {
   //    设置内核态标记
        kernelState =True;
      // 完成系统调用处理
        vxSysCall () ;
    }
}
```

基于延迟工作队列的内核可重入模型

提高内核实时性的方法－系统运行状态

- 许多嵌入式操作系统不划分"系统空间"和"用户空间"，如**VxWorks**、**RTEMS**等，操作系统内核与外围应用程序之间不再有物理的边界，系统中"进程"实际上都是内核线程。
- 操作系统、应用程序均运行在特权级别的优缺点：
  - 优点：减少由于空间切换导致的执行开销，提高实时性。
  - 缺陷：应用程序可破坏操作系统内核，导致系统崩溃。



提高内核实时性的方法－存储管理机制

- 不支持虚拟存储：如果采用虚存技术，一个实时任务执行的最坏情况是每次访存都需要调页，如此累计起来的该任务在最坏情况下的运行时间是不可预测的，因此实时性无法得到保证。许多嵌入式操作系统不直接支持虚拟存储管理技术。
- 不支持动态内存分配：由于动态内存分配具有时间及分配结果的不确定性，因而在强实时型系统（OSEK）中采用静态内存分配方法，即在系统初始化时，为每个实时任务划分固定的内存区域，系统运行只使用内存，而不再分配内存和释放内存。

提高内核实时性的方法－任务互斥、同步

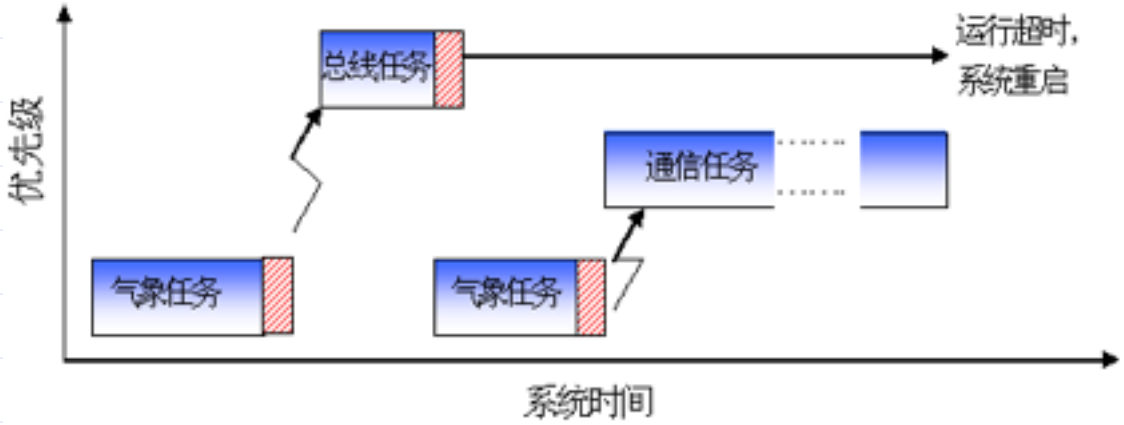
- 资源有限等待：任务没能获得需要的资源会被阻塞。如果资源不是任务继续运行必备的，任务可选择有限等待该资源。
- 优先级逆转问题解决—抢占式任务调度中的资源竞争：

1997年**7**月**4**日，火星探路者在火星表面成功着陆并进行观测，发回了各种火星表面全景图，被大肆宣称为"完美"。但是在着陆后的第**10**天，也就是开始采集气象资料后不久，探路者开始犯傻，反复无规律地重启，每次重启都造成了数据丢失，在每天的记者招待会上这都是记者们不会放过的最热门的话题。

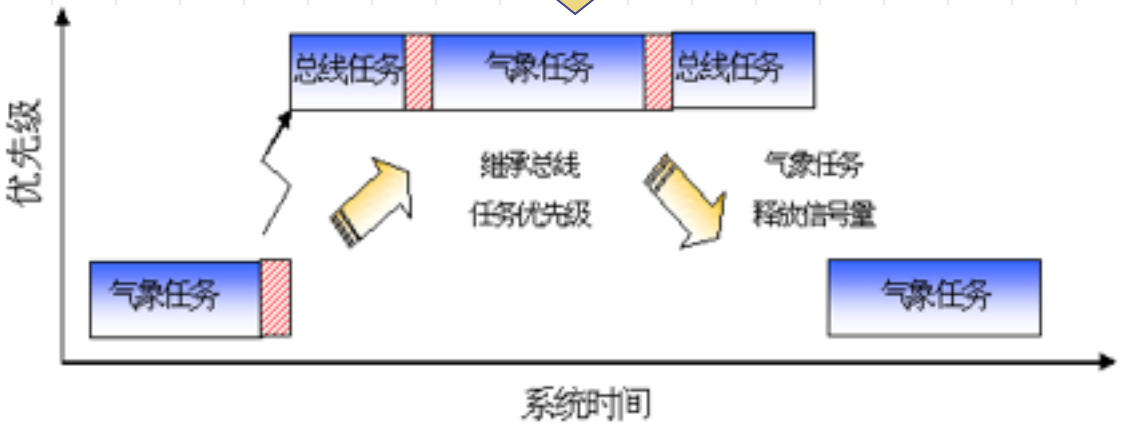
JPL（美国国家航空航天局喷气推进实验室）的工程师们花了相当多的时间在实验室仿真，希望能够再现引起重启的情况。几天过去了，一个清晨，几乎所有的工程师都走了，只剩下最后一位**Mr. So-So**的时候，火星上那台探路者兄弟身上发生的重启情况终于被再现了。经过数据分析，得出了原因——优先级逆转。

提高内核实时性的方法——优先级逆转问题

- 嵌入式实时操作系统——优先级逆转现象

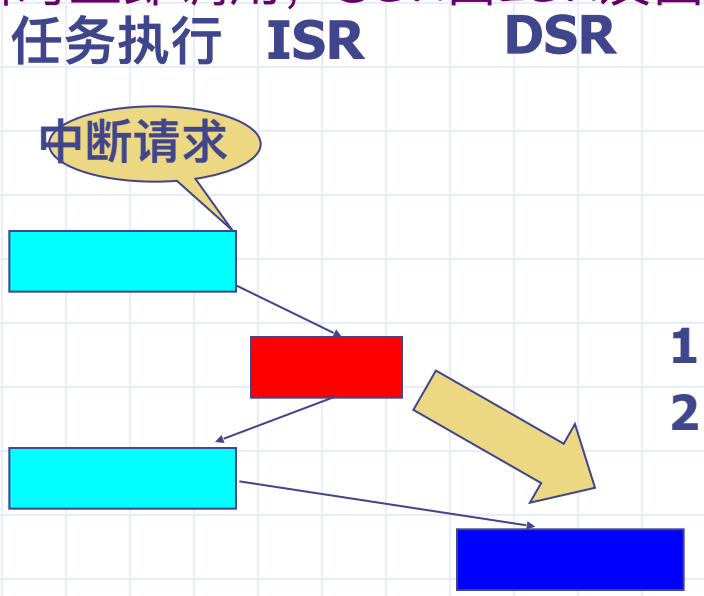


采用优先级继承协议消除



提高内核实时性的方法－中断处理

- 中断嵌套处理：确保高优先级的中断能及时处理。
- 中断服务层次化：对中断的处理，不需要完全由中断服务程序（ISR）进行处理，采用ISR与任务相结合的方法处理，如eCos系统，分为两个层次进行：ISR、中断滞后服务程序DSR。ISR在响应中断时立即调用，DSR由ISR发出请求后调用。



1、ISR促使DSR就绪
2、ISR退出DSR参与调度

嵌入式实时操作系统内核的可裁剪、可配置性

- 可裁剪性：用以满足不同复杂程度的应用需求。嵌入式环境资源配置及需求情况各异，一般只要求嵌入式操作系统的功能子集，因而需要裁剪掉部分功能，并保证功能的相对完整性。内核的可裁剪程度取决与模块之间的耦合程度。
- 裁剪方法：模块级裁剪、函数级裁剪、代码级裁剪
- 一个最小的多任务嵌入式软件包括：
  - **Bootloader**
  - 具有任务管理及定时功能的基本内核
  - 一个初始化任务
- 可配置性：可根据应用需求，配置系统任务数目、调度算法、任务堆栈等。

嵌入式实时操作系统内核的可靠性

- 可靠性对于实时系统比非实时应用系统更为重要。
- 嵌入式实时操作系统内核提供诸多机制进行保障：异步信号、定时器、异常处理、用户扩展、内存保护等。
- 典型内核可靠性增强技术：
  - 内存释放清理
  - 冗余内存分配
  - 内存冗余编码
  - 内存保护增强
  - 看门狗支持增强

嵌入式实时操作系统内核的应用编程接口

- 每一个嵌入式操作系统提供的应用编程接口（系统调用）的功能和种类都不相同，种类越多、功能越强越好。
- 应用编程接口的标准化：
  - **POSIX(a Portable Operating System Interface based on Unix)**实时系统标准，**POSIX1003.1c**、**1003.1d**
  - 汽车电子标准：**OSEK**
  - 航空电子标准：**ARINC653**（**APEX**接口）
  - 电气电子标准：**IEC61508**
  - 信息家电规范：**T-Kernel**

嵌入式实时操作系统的安全性认证

- **EAL/CC**：**CC**安全评估是**1999**年起效的一项国际安全标准，共分为**7**级安全评估。**VxWorks**、**Integrity**均通过了**EAL6+**认证。

- **DO-178B/ED-12B**：美国航空无线电技术委员会（**RTCA**）提出，被美国联邦航空局/欧洲航空管理部门接受的机载软件适航认证。**VxWorks**、**Integrity**、**µC/OSII**均得到**Level A**认证。

- **OSEK/VDX**：欧共体汽车产业联盟规定的汽车电子嵌入式系统标准。风河的**MotoWorks**、微软的**Windows Automotive**、**Nucleus OSEK**、**OSEKturbo**均得到认证。

课程大纲

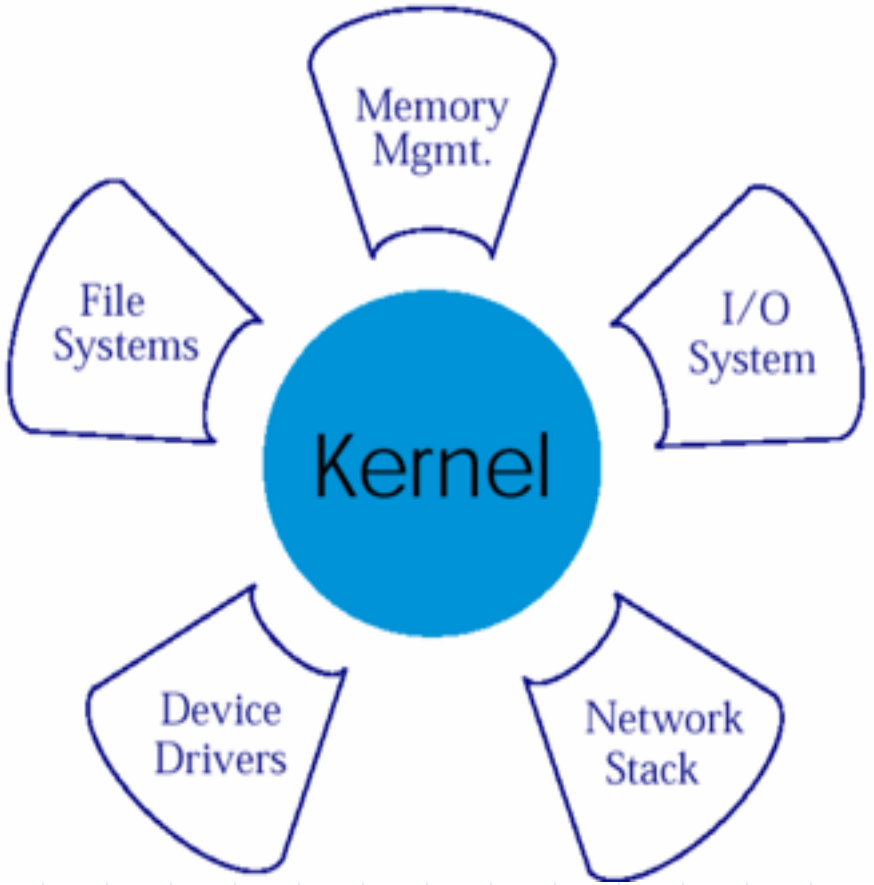
- 嵌入式实时操作系统概况
- 嵌入式实时操作系统特点
- 嵌入式实时操作系统功能简介

课程大纲

- 嵌入式实时操作系统概况
- 嵌入式实时操作系统特点
- 嵌入式实时操作系统功能简介

嵌入式实时操作系统内核基本功能

- 嵌入式实时操作系统内核的基本功能
  - 实时多任务管理
  - 中断与异常管理
  - 共享资源互斥管理
  - 多任务同步与互斥
  - 内存管理
  - 时钟定时器管理
  - 电源管理

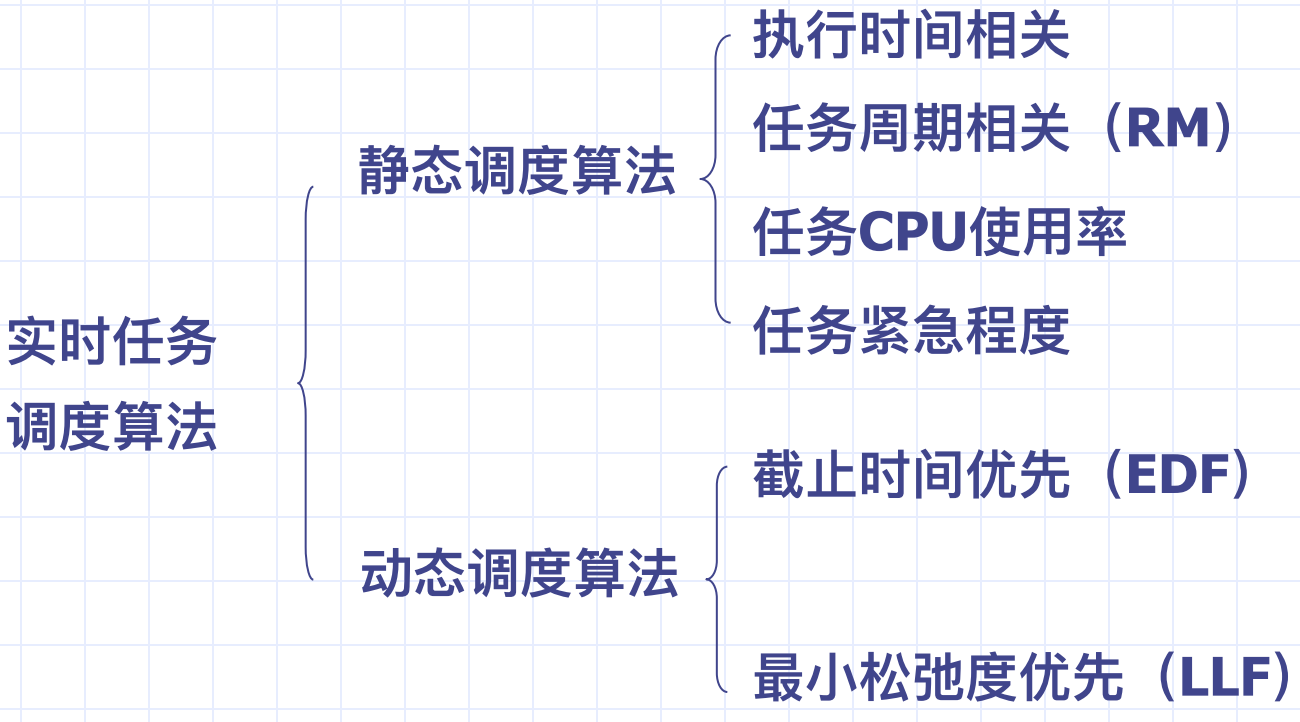


实时内核基本功能－任务调度

- 1970年，美国UIUC大学的C.Liu、Jane教授建立了RTSL（real time system lab）实验室。
- 1973年，C.Liu、Layland在ACM杂志上，提出并分析了单调速率调度算法（Rate Monotonic，RM）和时限调度算法（Deadline），开辟了实时系统抢占式任务调度算法、可调度性分析领域的先河。

实时内核基本功能－实时任务调度算法分类

- 在实时任务抢占式调度算法中，根据任务的优先级确定时机，实时任务调度算法可分为静态调度和动态调度两类。



实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

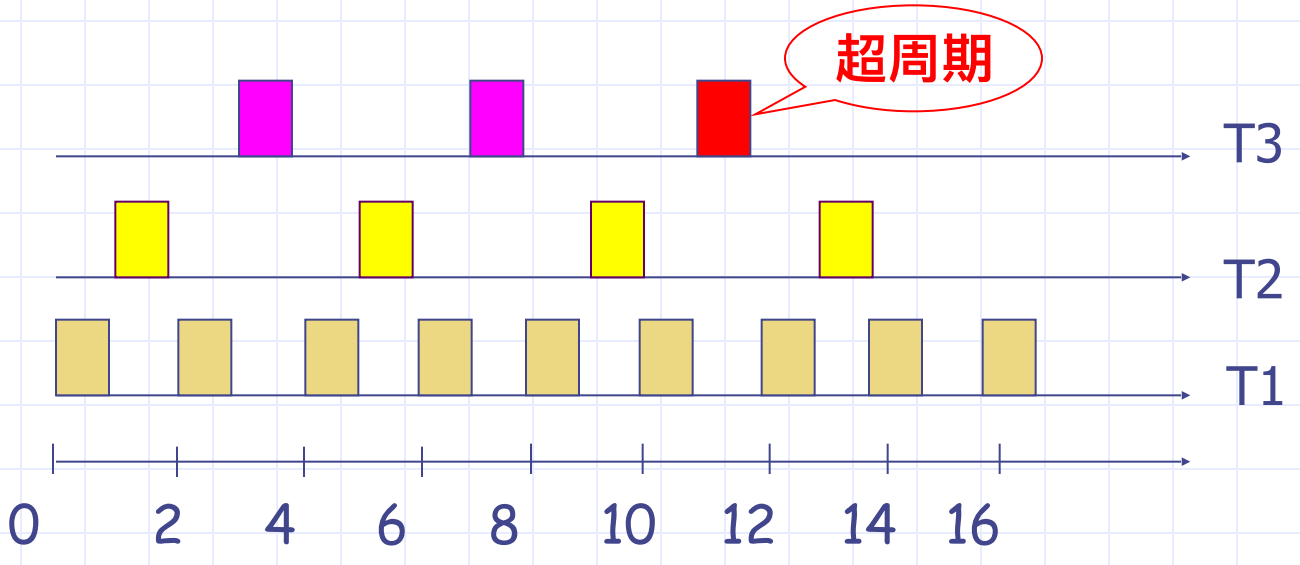
- 单调速率调度算法（C.Liu、Layland；ACM，1973）
  - ✓ 现代实时系统任务调度的理论基础
  - ✓ 最佳的静态调度算法
  - ✓ 算法建立在下述假设基础上
    - 所有任务都是周期任务
    - 每个任务执行截止期等于该任务的周期
    - 每个任务在周期中，执行时间固定，保持常量
    - 任务之间不通信，也不同步
    - 任务可以在任何位置被抢占，不存在临界区

不可调度：指某一个任务在周期内无法完成任务，即：

实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

- 不可调度情况举例
- 假设系统存在任务、执行时间及运行周期如下

任务	执行时间	周期	优先级
T1	1	2	1
T2	1	4	2
T3	3	8	3



实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

- RM算法规定：任务的优先级与任务的周期表现为单调函数，任务周期越短，优先级越高。
- 对RM算法研究的贡献在于
  - ✓ 提出了临界时间概念，用于判定调度过程中的最坏情况；
  - ✓ 证明了RM算法是静态调度算法中的最优性；
  - ✓ 提出了一个RM算法中任务可调度性分析的充分条件。
- 临界时间：一个任务响应所需的最大时间称为临界时间。
- 如果所有任务的临界时间均小于任务周期，则任务可调度。

一个任务什么时候到达其临界时间?

- 定理：任何任务在与比其优先级高的所有任务同时被触发时，将

实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

- 定理：如果一个任务集能够被其他静态算法调度，那么**RM**算法就一定能调度这个任务集，即**RM**调度是最优的静态调度算法。
- 证明：交换法
  - ✓ 假设一个任务集**S**采用其他静态优先级算法可以调度，设**ti**和**tj**是其中两个优先级相邻的任务，**Ti > Tj**，而**Pi < Pj**（即长周期任务的优先级高），将**ti**和**tj**的优先级互换，可以证明这时**S**仍然可以调度：
    - ➢ 交换这两个任务优先级，不会影响其它任务的完成时间；
    - ➢ **Tj**执行时间提前，因而必定不会超过截止时间；
    - ➢ **Ti**的执行时间＝高优先级任务的执行时间＋**tj**执行时间＋**ti**执行时间 **< Tj < Ti**，因而，**Ti**执行也不会超过截止时间。
  - ✓ 按照上述交换方法，任何静态优先级调度最终都可以转换成

实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

- RM算法中任务可调度性分析的一个充分条件：

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{C}{T} \le n \times (2^{\frac{1}{n}} - 1)$$

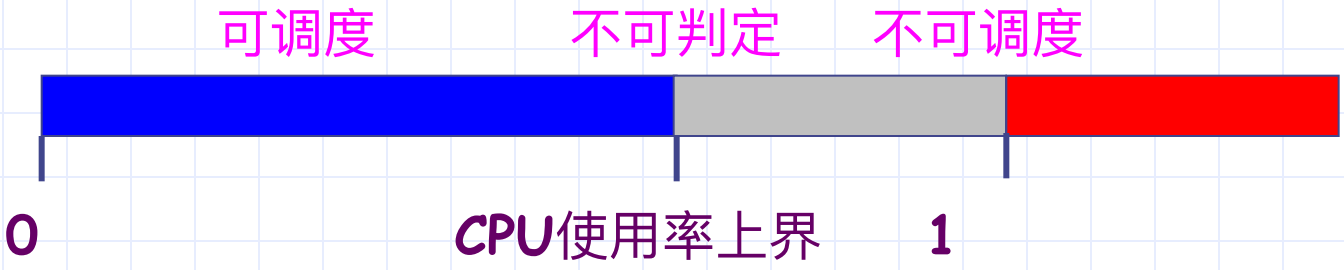
CPU使用率上界

其中，C为任务执行时间，T为任务周期

任务数量	可调度的CPU	任务数量	可调度的CPU
1	1	5	0.743
2	0.828	6	0.735
3	0.780	……	……
4	0.757	∞	ln2≈0.6931

实时内核基本功能－任务调度经典算法举例

- 调度可判定性物理意义：



任务	执行时间	周期	优先级
T1	1	2	1
T2	1	4	2
T3	3	8	3

- 可调度性判定举例：

1/2＋1/4+3/8 ＝ 1.125 > 1 > 0.780，不可调度！

实时内核基本功能－中断管理

- 中断是一种异步机制，中断服务程序（**ISR**）不需要内核的调度就可以执行。
- 但**ISR**要和其他应用任务之间协作，以快速、合理响应外部事件。
- 内核提供与中断相关的功能：
  - 挂接**ISR**：中断向量与处理函数关联
  - 获取**ISR**入口地址
  - 获取中断嵌套层数
  - 开/关中断

实时内核基本功能－中断管理

中断服务程序代码示例

```
__interrupt double compute_area (double radius)
{
double area = PI * radius * radius;
printf(" Area = %f", area);

return area;
}
```

实时内核基本功能－中断管理

中断服务程序代码示例

```
__interrupt double compute_area (double radius)
{
double area = PI * radius * radius;
printf(" Area = %f", area);

return area;
}
```

- 不能传递参数
- 不能提供返回值
- 不能调用printf函数
- 尽量不要在ISR中进行浮点运算

实时内核基本功能－中断管理

- 中断服务程序设计中需特别注意中断冲突问题：
  - 当**ISR**、**ISR**之间，或**ISR**、任务之间共享变量，或调用含有共享变量的函数时，需防止共享变量冲突；
  - 当**ISR**、**ISR**之间，或**ISR**、任务之间共享寄存器，或调用含有共享寄存器的函数时，需防止寄存器冲突。
  - **ISR**不允许执行**I/O**操作，或调用含有**I/O**操作的函数。
  - **ISR**不允许申请信号量（但可以释放信号量！），或调用含有申请信号量操作的函数（如**malloc**）。

实时内核基本功能－共享资源互斥

p 实现共享资源互斥的方法很多，不同之处在于互斥的影响范围和程度不同，常用的方法包括：

- p关中断：互斥力度最强，但可能降低系统实时性
- p测试并置位标志key和用其全局变量判断资源互斥

```
lock = 0; key = 1;
……
_asm(" xchg(&lock, &key) ");
if(key == 0)
  进入临界区代码；
```

- p禁

```
OSSchedLock();
……
OSSchedUnlock();
```


- p使用信号量：对共享资源上锁，比关中断，禁止任务抢占粒度

实时内核基本功能－共享资源互斥方法比较

	关中断	测试并置位	禁止抢占	信号量
锁定范围	所有可屏蔽中断事件	所有使用该指令的代码	所有任务	竞争共享资源的任务
响应时间影响	如果时间长，影响较大	较小	如果时间长，影响较大	可能导致优先级反转
系统开销	小	小	小	较大
注意事项	时间尽量短	可能影响可移植性	时间尽量短	避免过度使用

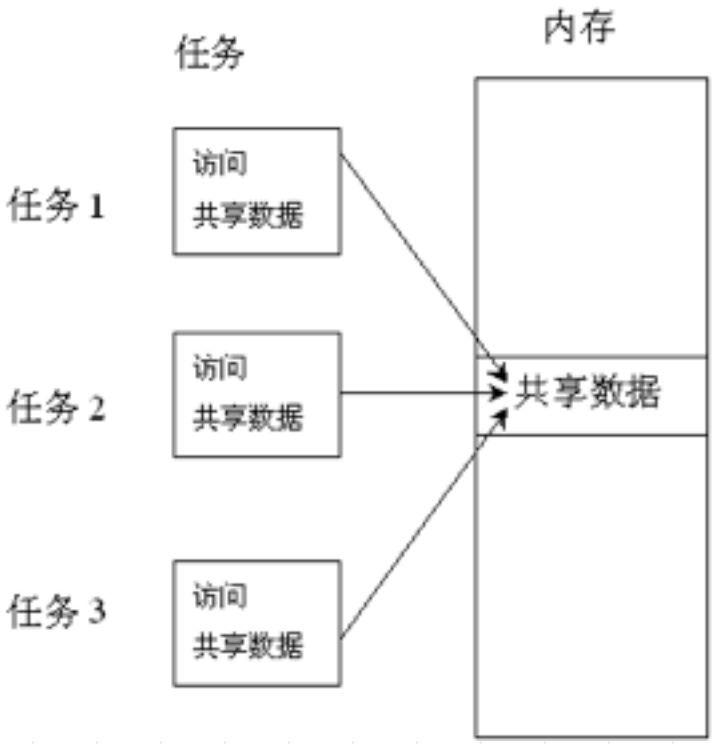
- 共享资源互斥的设计原则：
  - 当任务之间互斥，可使用所有方法，测试/置位、信号量方法，对其他任务运行的干扰小；
  - 当**ISR**之间互斥，只能使用关中断法；
  - 当**ISR**与任务之间互斥，只能使用关中断法。

实时内核基本功能－同步与通讯

- 同步与通讯的需求
  - ✓ 任务～任务之间：单向、双向
  - ✓ **ISR**～任务之间：单向
- 常用的同步、通讯机制：
  - ✓ 共享内存
  - ✓ 信号量
  - ✓ 消息：邮箱、消息队列
  - ✓ 事件
  - ✓ 信号
  - ✓ 管道

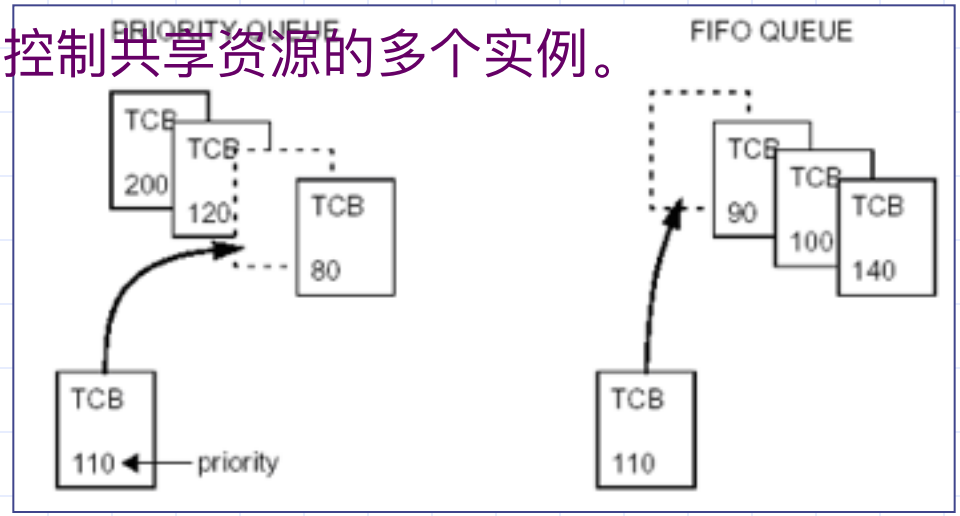
实时内核基本功能－通讯

- 共享数据结构
  - ✓ 最直接的任务间通信方式
  - ✓ 全局变量、线性缓冲区、循环缓冲区、链表，可以被不同上下文环境中运行的代码直接访问
  - ✓ 需采用互斥方法进行保护



实时内核基本功能－同步、互斥

- 信号量：解决任务间同步与互斥的主要手段。
- 常用信号量分类
  - ✓ 二元信号量（**binary**）：快速、通用，对互斥与同步做了优化。
  - ✓ 互斥信号量（**mutex**）：针对互斥问题进行优化的二元信号量。
    - 递归资源访问：如递归调用包含获取信号量的函数体
    - 安全删除问题：已获取信号量的任务不被意外删除
  - ✓ 计数信号量（**counting**）：控制共享资源的多个实例。
- 被信号量阻塞的任务排队策略
  - ✓ **FIFO**
  - ✓ 优先级排序



实时内核基本功能－通讯

- 消息
  - ✓ 是内存空间中一段长度可变的缓冲区。
  - ✓ 是一种在任务之间、**ISR** ～任务之间的通讯机制，注意：**ISR** 只可以写消息，但不能读消息！
- 常用消息分类：
  - ✓ 邮箱（**mailbox**）：传递简单消息
  - ✓ 消息队列（**message queue**）：传递可变长的复杂消息
    - 消息进入队列的策略
      - ➢**FIFO**
      - ➢优先级排序

实时内核基本功能－同步与通讯

- 管道
  - ✓ 管道是一个虚设备，提供了通过**I/O**设备接口访问消息队列的一个界面。任务可以使用标准的**I/O**接口**open**、**read**、**write**，以及**ioctl**调用。
- 事件
  - ✓ 用于实现任务之间、**ISR**～任务之间多对一、多对多的同步操作，通讯数据量小，主要动作分为接收事件、发送事件。
- 信号
  - ✓ 用于实现任务之间、**ISR**～任务之间的异步操作。

实时内核基本功能－用户扩展管理

- 在不更改内核代码的情况下，在内核调用点扩展用户功能。
- 内核可提供的扩展点包括：
  - ✓ 任务创建、任务启动、任务删除、任务上下文切换、任务退出
- 例如：在任务上下文切换时扩展增加功能