

第一篇 操作系统的基本原理

第 1 章 操作系统概论

1.1 操作系统的组成和设计目标

1. 计算机系统的组成

随着计算机技术的迅速发展，计算机系统的硬件和软件资源愈来愈丰富。从功能上，可把整个计算机系统划分为硬件、操作系统、实用程序和应用程序四个层次，如图 1.1 所示。这四层的关系表现为一种单向调用关系，即外层的软件必须以事先约定的方式调用内层软件或硬件提供的服务。通常把这种约定称为界面或接口 (Interface)。下面简单介绍各个层次的特点。

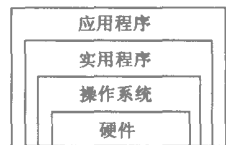


图 1.1 计算机系统的组成

(1) 硬件

硬件层由计算机的硬件资源组成。它包括中央处理机 (简称 CPU, 也称处理机) 存储器 (包括主存储器和辅助存储器) 和输入/输出设备。其中, 辅助存储器又称外存储器, 包括磁盘、磁带、光盘等; 输入设备有卡片或纸带输入机、键盘、鼠标、图形扫描仪等; 输出设备有卡片或纸带输出机、显示器、打印机、绘图仪等。这种不加任何扩充的计算机称为裸机。一个裸机的功能即使很强, 用户也很难使用, 因为这些裸机的部件是通过执行机器指令来实现计算和输入/输出功能的。

(2) 操作系统

操作系统是整个计算机系统的管理和控制中心。一个计算机如果没有操作系统, 整个系统将无法工作。

(3) 实用程序

实用程序层包括下面一些程序, 且它们通常是驻留在磁盘上的。

各种语言编译程序。语言编译程序包括高级语言和汇编语言编译程序。

文本编辑程序。文本编辑程序用来建立和修改用户的源程序或其他文本数据。这类程序种类繁多, 功能各异, 有面向行的和面向全屏幕的。

调试程序。调试程序又称排错程序。它用来帮助用户调试程序, 从而方便地找出程序中的逻辑错误。

连接装配和装入程序。连接装配程序把用户分别编译好的各目标程序连接装配成一个可执行的程序。装入程序则负责将一个可执行程序装入主存运行。还有一些实用程序, 如

标准过程和函数、系统诊断程序、分类合并程序、文件加密 / 解密程序等。总之，这些实用程序为用户使用计算机系统提供一个良好环境。

(4) 应用程序

应用程序是计算机系统的最外层软件，主要负责解决用户的实际问题。这些程序通常由用户或专门的软件公司编制。这类软件比较丰富，如各种数据库管理软件、计算机辅助设计软件及各种事务处理软件等。

2. 操作系统的定义和设计目标

从宏观上讲，操作系统的设计目标是使用计算机的整个系统；从微观上讲，是使用计算机的各种硬件资源，用存储器保存程序和数据，用 CPU 完成各种操作运算，通过外围设备实现计算机与外部世界的信息交换，即完成输入 / 输出工作，用辅助存储器保存大量的信息文件。另外，还要用到各种软件资源，如上述的各种实用程序和应用程序，完成用户程序的计算工作。由谁来组织和管理这些软、硬件资源，使之协调一致并高效地完成用户的计算工作呢？这就是操作系统。

操作系统究竟是什么，该如何定义它？为了深入、全面地理解操作系统的含义，从以下两方面来阐述。

从计算机系统设计者的角度看，操作系统是由一系列程序模块组成的一个大的程序，它依据设计者设计的各种管理和调度策略，对计算机的软、硬件资源进行管理和调度，合理地组织计算机的工作流程，从而提高资源的利用效率。由此可以认为，操作系统是计算机软、硬件资源的管理和控制系统。

从用户角度看，配上操作系统的计算机是一台比裸机功能更强、使用更方便简单的虚拟机，它是用户与计算机裸机之间的一个接口界面，用户通过它来使用计算机。

从上述两个角度可以总结出，设计操作系统的目标有两个：一个是使用户方便简单地使用计算机系统，另一个就是使计算机系统高效地运转。故操作系统是现代计算机系统不可缺少的关键部件。计算机系统越复杂，操作系统越显得重要。为此，有必要了解操作系统的组成和功能，以便更好地利用计算机进行系统和应用开发。这正是本书要讨论的主题。

1.2 操作系统的形成与发展

1.2.1 顺序处理 手工操作 阶段

早期的计算机（从 20 世纪的 40 年代 ~ 50 年代中期），程序员直接与计算机硬件打交道，没有操作系统。计算机由 CPU、主存、某种类型的输入设备（卡片输入机）、一台打印机，以及装有显示灯、乒乓开关的操作控制台组成。用机器代码编写的程序通过输入设备装入计算机，再由程序员从控制台上通过设置乒乓开关启动程序运行。程序处理过程中，如果出现错误，则通过控制台上的指示灯指示错误产生的条件并停止运行。这时，程序员检查寄存器和主存单元，找出引起错误的原因，经修改后可以再次运行。如果程序正常完成，将输出结果送打印机

打印。

这种早期的计算机存在两个问题。

(1) 人工负责计算机的调度

各用户将需要使用计算机各种资源的时间登记在一张纸上，由机房负责人为用户安排上机时间。如果一个用户预约 1 小时，结果用 45 分钟就完成了，剩余的 15 分钟被浪费掉。另一方面，用户程序运行过程中如果出现问题，由于需要检查错误原因，解决问题而被迫暂停，等待下一次预约后才能运行。

(2) 人工负责编排作业的运行顺序

在操作系统中，通常把用户在一次算题过程中要求计算机所做工作的集合叫做一个作业。以执行一个作业为例，用户在计算机上进行算题时，通常要经历以下几步：

采用某种高级语言按算法编写源程序，将源程序通过某种手段（键盘输入或卡片输入等）送入计算机内；

调用某语言的编译程序，对源程序进行编译，产生目标代码程序；

将目标代码及调用的各种库代码连接装配成一个可执行程序；

提供程序运行时所需数据，运行程序并产生计算结果。

由此可见，一个算题的完成通常要经历“建立”、“编译”、“连接装配”和“运行”才能得到计算结果。把相对独立的每一个步骤叫做作业步。一个作业的各作业步之间总是相互联系的，在逻辑上是顺序执行的。下一作业步能否执行，完全取决于上一作业步是否成功完成。比如，编译失败，则不可能进行连接装配。

一次运行可能只是编译一个程序。为此，要将编译程序和一个用高级语言编写的源程序装入主存，保存被编译好的目标程序；然后，连接和装入目标程序和公共函数库。其中每一步都涉及安装和卸下磁带或卡片叠等。如果在该次处理中出现错误，则用户不得不返回编排序列的开始，重新运行。因此，大量时间用在编排程序运行上。这种操作方式叫做顺序处理。

1.2.2 简单的批处理系统 (Simple Batch System)

早期的计算机造价昂贵，上述人工调度和编排作业的方式浪费了大量的计算机时间。因此，要使计算机得到充分利用，必须改进使用方式，从而产生了操作系统的概念。简单的批处理系统正是在 20 世纪的 50 年代后到 60 年代中期伴随着第 2 代计算机的出现而研制成功的。

简单的批处理模式的中心思想是使用一种监控程序软件。在这种软件控制下，用户不再直接与计算机打交道，而是将自己的一个作业的卡片叠或纸带交给机房的操作员，再由操作员将多个作业的卡片或纸带按序、成批地放在一个输入设备上，由监控程序自动控制输入设备，将各个作业读入磁带。之后，监控程序开始顺序地装入一个个作业，进行处理。

这时监控程序常驻主存，工作非常简单，就是将 CPU 的控制权自动地从一个作业转换到另一个作业。很明显，手工操作阶段的两个问题已得到圆满解决：一方面由监控程序处理调度问题，各作业以尽可能快的速度执行，从而不存在空闲的机器时间；另一方面由监控程序处理作业编排问题。为了能用监控程序代替用户完成对作业的编排控制，系统向用户提供一套作业控制命令。每当用户提交作业时，将对作业的控制意图以作业控制卡或作业说明书的形式

提交给监控程序。图 1.2 给出以卡片形式提交作业的一个简单例子。在这个例子中，用户提交一个用 FORTRAN 语言编写的程序及程序所用数据；还有控制作业执行的控制指令卡，以“\$”开头。图 1.2 是一个典型的监控程序所使用的几个控制卡：

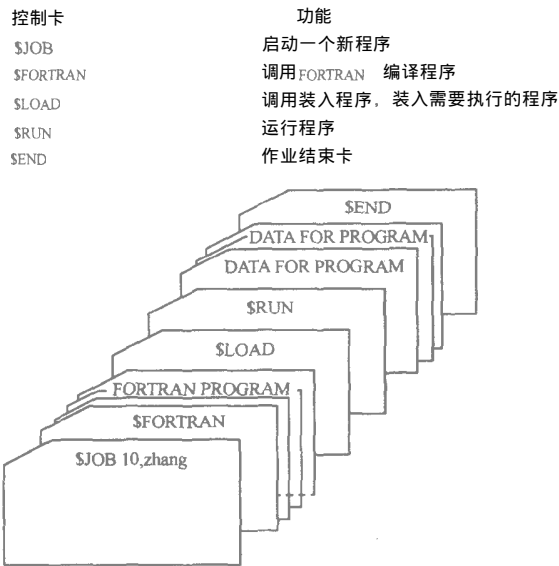


图 1.2 一个典型的输入作业的结构

为了执行这个作业，监控程序读入 \$ FORTRAN 控制卡，从磁带装入 FORTRAN 编译程序。编译程序翻译用户程序为目标代码，并存入主存储器或磁带上。如果它存入主存，这个操作叫做“编译、装入和执行”。如果它存入磁带（即只编译不装入执行），那么当要装入时还需要读入一个 \$ LOAD 卡。监控程序读入该卡片后，通过执行装入程序将目标程序及其调用的标准函数装入主存。接着，读 \$ RUN 卡启动执行用户程序。在用户程序执行期间，用户程序的每个输入指令都读一张数据卡。一个用户作业的成功或错误完成，都引起监控程序扫描输入卡，直到遇到下一个作业的控制卡 \$JOB 为止。

当计算机运行中发生错误或意外时，监控程序通过控制台打字机输出信息，向操作员报告。这种输出信息不仅比亮灯显示所表达的内容更为丰富，而且便于操作员理解。总之，用这种半自动方式控制计算机不仅提高了效率，而且方便了使用。这种简单的批处理在硬件结构上有两种不同的控制方式。

1. 早期的联机批处理

早期的联机批处理的硬件控制方式是：作业的输入、计算和输出都在 CPU 直接控制下进行。图 1.3 给出了联机批处理的模型。

由于输入或输出是在 CPU 直接控制下进行的，在输入或输出过程中，主机的速度降低为慢速的输入或输出设备的速度。为了提高 CPU 的利用率，引入早期的脱机批处理方式。

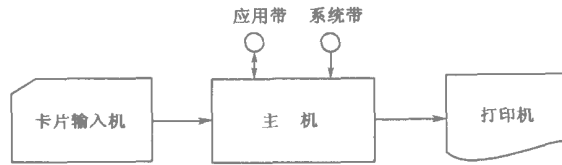


图 1.3 联机批处理的模型

2 早期的脱机批处理

为使 CPU 能从慢速的外设控制中解脱出来，增设一台小型卫星机，专门用来控制外部设备的输入/输出。其模型如图 1.4 所示。

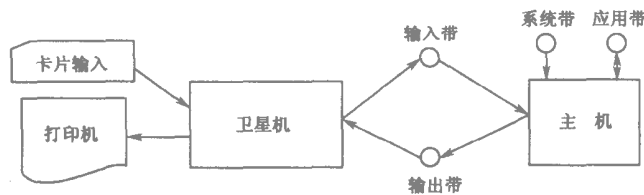


图 1.4 早期的脱机批处理模型

在这种模型中，小型卫星机的作用表现为如下两个方面。

把卡片输入机上的作业逐个地记到输入磁带上，以便主机执行。

把主机送入输出磁带的作业执行结果控制在打印机上打印输出。

由此可见，采用这种脱机技术后，主机的所有输入/输出都是通过磁带进行的，而且主机与慢速外部设备可以并行，从而提高了主机运行效率。从 20 世纪 50 年代后期到 60 年代中期，脱机批处理运行得相当成功。脱机技术的实质是用快速的输入/输出设备代替慢速的设备。

1.2.3 多道成批处理系统 (Multiprogrammed Batch System)

1. 多道程序设计

进入 20 世纪 60 年代中后期，计算机硬件技术有了突飞猛进的发展，产生了硬件通道、中断和缓冲技术。通道、中断的出现，使得计算机在组织结构上发生重大变革，使原先以 CPU 为中心的体系结构，转变为以主存为中心，其结构模型如图 1.5 所示。

所谓通道，实际上是一种比 CPU 速度较慢、价格较便宜的硬件。它是比小型卫星机更经济的、独立于 CPU 的、专门用于控制输入/输出设备的 I/O 处理机。通道连接着主存和外设，具有与主存直接交换数据的能力。当需要输入/输出时 CPU 只要向通道发一个命令，通道就能独立地控制相应的外部设备，完成指定的传输任务。通道通过中断机构向 CPU 报告其完成情况。这样，通道控制完成输入/输出传输任务，使 CPU 与外设的操作可以并行执行，提高了 CPU 的利用率。缓冲技术的引入使得 CPU 与外设能更充分地并行执行。有关通道和缓冲技术，将在以后章节介绍。

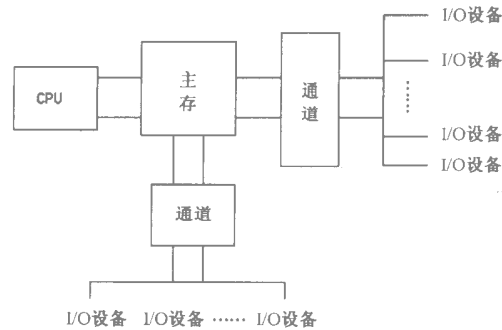


图 1.5 多道程序系统的结构模型

简单的批处理系统提供了作业自动顺序处理。通道和中断的出现，使 CPU 摆脱了对慢速设备的控制，从而提高系统的处理效率。由于主存只存放一个用户作业，当作业请求输入/输出时，CPU 将空闲等待输入/输出完成。如果能在主存同时存放多个用户作业，当一个作业等待数据传输时，CPU 转去执行其他作业，从而保证 CPU 与系统中的输入/输出设备并行操作。

这种在主存中同时存放多个作业，使之同时处于运行状态的程序设计方法叫做多道程序设计。对于一个单处理机的系统来说，“作业同时处于运行状态”是从宏观上理解的。其含义是指每个作业都已开始运行，但都尚未完成。从微观上看，在任何特定时刻，只有一个作业在处理机上运行。

引入多道程序设计技术的根本目的是提高 CPU 的利用率，充分发挥系统设备的并行性。这包括程序之间，CPU 与设备之间，设备与设备之间的并行操作。为了更好地理解引入多道程序的好处，下面用两个例子进行说明。

主存只有一道程序。这个程序每处理文件中的一个记录，平均需要执行 100 条指令的计算。其处理情况如下：

- 读一个记录 0.0015 秒 执行 100 条指令的计算 0.0001 秒，写一个记录 0.0015 秒。
- 平均处理一个记录的时间： $0.0015 + 0.0001 + 0.0015 = 0.0031$ （秒）。
- 处理一个记录 CPU 的利用率：

$$\text{处理机执行 100 条指令时间} / \text{处理一个记录的时间} = 0.0001 / 0.0031 = 3.2\%$$

由这个例子看出，处理一个记录时，CPU 的利用率仅为 3.2%。也就是说，CPU 有 96.8% 的时间等待 I/O 设备进行记录的读和写，这显然是对 CPU 的极大浪费。

② 主存同时存放三个程序。当主存容量足够大时，为了提高 CPU 的利用率，应在主存存放足够多的作业，以便当一个作业等待 I/O 时，处理机转去执行其他作业。下面这个例子是，假设一个计算机系统，它有 256KB 主存（不包含操作系统）、一个磁盘、一台终端和一台打印机。主存装有三个作业，分别命名为 JOB1、JOB2、JOB3。各作业运行时间分别为 5 分钟、15 分钟和 10 分钟。它们对资源的使用情况如表 1.1 所示。

假定 JOB2 和 JOB3 需要较少的 CPU 时间。JOB2 主要使用终端进行作业的输入，JOB3 主要使用磁盘和打印机。对于简单批处理，这些作业将按顺序执行。JOB1 运行 5 分钟完成；JOB2 等待 5 分钟再用 15 分钟完成；20 分钟后，JOB3 开始执行，30 分钟后三个作业全部完成。

表 1.1 三个作业对资源的使用情况

作业编号	JOB1	JOB2	JOB3
类型	计算型	I/O 型	I/O 型
占用主存(B)	50K	100K	80K
需要磁盘情况	NO	NO	YES
需要终端情况	NO	YES	NO
需要打印机情况	NO	NO	YES
运行时间	5 分钟	15 分钟	10 分钟

如果采用多道程序设计技术，让三个作业并行运行。由于它们运行中几乎不同时使用同类资源，故三个程序可以同时运行。在 JOB1 进行计算的同时，JOB2 可在终端上进行输入/输出，JOB3 使用磁盘和打印机。这样，JOB1 仍需 5 分钟完成，但在 JOB1 结束时，JOB2 完成三分之一而 JOB3 完成一半。这样，这三个作业在 15 分钟内将全部完成。显然整个系统处理效率明显提高。

为了更好地理解引入多道程序的好处，下面先解释衡量批处理计算机系统性能指标的三个重要概念。

- 资源利用率：指在给定时间内，系统中某个资源，如 CPU、存储器、外部设备等实际使用时间所占的比率。显然，若要提高资源利用率，就必须使资源尽可能地忙碌。
- 吞吐量 (Throughput)：指单位时间内系统所处理的信息量。它以每小时或每天所处理的作业个数来度量 (这里以小时作为度量单位)。
- 周转时间 (Turnaround Time)：指从作业进入系统到作业退出系统所用的时间；而平均周转时间是指系统运行的几个作业周转时间的平均值。

依据上述定义的三个概念，计算上述的单道和多道运行作业时，处理机和存储器等资源的利用率分别计算如下。

三个作业单道运行时，只有 JOB1 占有处理机，三个作业运行完成需要 30 分钟。处理机的利用率为：

$$5/(5+15+10)=17\%$$

存储器的利用率为：

$$(50/256+100/256+80/256)/3=30\%$$

多道时，15 分钟三个作业都完成，其中处理机使用 5 分钟。处理机的利用率为：

$$5/15=33\%$$

多道时，由于三个作业共享主存，主存利用率为：

$$(50+100+80)/256=90\%$$

三个作业单道运行和多道运行时平均资源利用率情况见表 1.2。

表 1.2 单道运行与多道运行时平均资源利用率情况对比

	单 道	多道(三个作业)
处理机利用率	17%	33%
存储器利用率	30%	90%
磁盘利用率	33%(10/30)	67%(10/15)

续表

	单 道	多道(三个作业)
打印机利用率	33%(10/30)	67%(10/15)
消耗时间(三个作业完成)	30分钟(5+15+10)	15分钟
吞吐量	6jobs/小时(3/0.5)	12jobs/小时(3/0.25)
平均周转时间	18分钟((5+20+30)/3)	10分钟((5+15+10)/3)

由上表可知，多道程序运行，使得系统资源的利用率、吞吐量和作业的平均周转时间大大优于单道程序运行，系统性能的改善是明显的。因此，将多道程序设计技术用于批处理系统就构成多道成批处理系统。

2. 多道程序设计技术的实现

与简单批处理系统相比，多道成批处理的实现必须解决好三个问题：存储器的分配和存储保护，处理机的管理和调度，系统其他资源的管理和调度。

(1) 存储器的分配和存储保护

采用多道程序设计技术，主存储器为几道程序所共享。因此，必须提供存储分配手段，使各个程序在主存拥有自己的一个区域。同时，各程序在运行时，硬件必须提供必要的存储保护手段，使得它们只能访问自己所占区域，以避免相互干扰和破坏。特别不能破坏操作系统，否则，整个系统将无法运行。

现在的微型计算机中，有些系统，如 MS-DOS 没有存储保护技术，致使计算机的病毒泛滥成灾，系统遭受严重破坏。

随着程序道数的不断增加，会出现主存容量不够用的问题。为此，必须了解存储器的扩充技术。这就是以后将要介绍的覆盖与交换技术、虚拟存储技术等存储器管理技术。

(2) 处理机的管理和调度

在单处理机系统中，系统中的多道程序都要竞争使用处理机，处理机管理的主要任务就是实施处理机的分配和调度，以便解决多道程序之间的转接和有效的运行。现代的计算机系统虽然广泛采用多 CPU 技术，但使用最多的还是集中式处理系统，即系统中只有一个功能强大的主 CPU，由它完成系统主要的处理任务。因此，处理机管理主要涉及对处理机的分配调度策略、实施具体的分配等问题。

(3) 系统其他资源的管理和调度

采用多道程序设计技术，系统的资源为多道程序所共享。系统资源除上面提到的存储器、处理机之外，还有外部设备资源和一些软件，即文件资源。因此，多道程序运行时，也要解决好这些资源的管理和调度问题，以使各道程序都能有条不紊地运行下去。

多道程序设计技术的出现，标志着操作系统渐趋成熟，具备了相应的作业管理、处理机管理、存储器管理、外部设备和文件管理等功能。

1.2.4 分时系统 (Time-Sharing System)

批处理系统使用多道程序技术后，卓有成效地提高了机器的利用效率。但这样的系统仍

存在以下两个问题。

不能直接控制作业运行。用户一旦把其作业提交给计算机系统，便失去对作业的控制能力。因此，必须以作业控制卡或作业说明书的形式把自己对作业的控制意图提供给系统，这增加了用户负担。因此，对于许多作业，如事务处理和一些短小作业的修改，用户希望提供直接控制作业运行的能力。

作业的周转时间太长。在批处理系统中，用户提交作业后通常要经过几个小时甚至几天的延迟才能得到所需的结果。这样的系统对于仅需计算很短时间的作业是不利的，应当缩短作业的周转时间，以吸引更多小作业的用户。

目前，交互计算设施，特别是微型计算机已经能满足这种要求。但在 20 世纪 60 年代则不然，那时的大多数计算机都很大，价格非常昂贵，代之的是开发分时系统。

分时系统是这样一种操作系统，它提供了多个用户通过交互方式分享使用同一台计算机的环境。一台分时计算机系统连有若干台远近终端（通常终端是带有 CRT 显示的键盘输入设备），多个用户可在各自的终端上以交互方式联机使用计算机。分时系统又称多用户操作系统，它可同时与多个终端的用户交互作用，随时响应多个终端用户的服务请求，并且每个用户在该系统上都有其特定的使用环境及对资源的控制权限（如对文件的访问、对设备的使用等）。

1. 分时概念

在引入多道程序技术时就已经有了分时的概念，它是以 CPU 与通道，通道与通道，通道与设备并行操作作为条件的。并行操作又是以分时共享系统资源为基础的：CPU 与通道并行是通过分时使用主存和数据通道等来实现的，通道与通道并行是分时使用 CPU、主存及通道的公用控制部分，同一通道控制的多台 I/O 设备又是分时共享使用主存及通道的。这种分时是分时使用硬件，属于硬件设计技术。

这里的分时，是指多个用户分时使用 CPU 的时间。将 CPU 的单位时间（比如 1 秒钟）划分成若干个时间段，每个时间段称为一个时间片（Time slice）。并按时间片轮流把 CPU 分配给各联机用户使用。这样，每个用户都能在很短时间内得到计算机的服务，彼此感觉不到别的用户存在，好像整个系统为他独占。这样的系统叫做分时系统。

早期的分时系统之一是兼容的分时系统（CTSS）。与后来的分时系统相比，CTSS 非常简单，它的操作控制很容易理解。当 CPU 的控制分配给一个交互用户时，用户的程序和数据装入主存每 0.2 秒钟（时间片）产生一个时钟中断。每个时钟中断产生时，操作系统获得控制，将处理机分配给另一个用户使用。这样，以规定的时间间隔，当前用户被抢占，另一个用户被装入。为使被抢占用户以后能恢复运行，它的程序和数据被写到磁盘后才装入新用户的程序和数据。利用交换技术，使各作业在主存与外存之间换入/换出。将多道程序技术应用于分时系统就是功能完善的多道分时系统。

2. 分时系统的特点

分时系统允许多个用户同时共享计算机，它具有以下四个特点。

同时性。若干终端用户可以同时使用一台计算机。

② 独立性。各用户之间彼此独立地占有一台终端工作，互不干扰。

交互性。所谓交互性就是指用户从终端键盘上输入各种控制作业的命令，系统响应和处理这些命令，且将处理结果输出显示；用户根据系统显示结果继续输入，亦即采用一问一答形式控制作业运行。

及时性。用户的请求能在较短时间内得到响应。分时系统的响应时间是指用户发出终端命令到系统响应，做出应答所需要的时间。它是衡量分时系统的主要性能指标。通常的响应时间为 $2\sim 3s$ 。

以上的四个特点为程序设计人员提供了比较理想的开发环境。他们可以直接使用计算机，边开发，边调试，边思考，边修改，从而显著地提高程序开发及调试效率。

批处理系统与分时系统又称为作业处理系统，即用户以作业为单位提交系统进行处理。分时系统与批处理系统以多道程序为基础，管理调度系统资源，为用户作业提供服务。分时系统与批处理系统是为适应不同需要而开发的。

批处理系统的目标是提高机器的使用效率。该系统处理的作业具有如下性质：需要耗费较长处理时间才能完成比较成熟的大型作业。为了充分利用系统资源，它可以将各种不同类型的作业进行合理的安排并送入系统。

分时系统的目标是对用户请求的快速响应。对于要求在几分钟内获得结果的短小作业适合采用这种系统。它适合进行各种事务处理，且为进行软件开发提供一个良好环境。

1.2.5 实时系统 (Real-Time System)

随着计算机应用领域的日益广泛，它不仅用于科学计算、数据处理等方面，还广泛地用于工业生产中的自动控制（军事上的飞机运行、导弹发射、民航机票的预订、查询、有关航班、航线、票价等），银行系统的借贷，以及情报信息检索等系统。通常，把上述系统称为实时控制和实时信息处理系统，这两个系统统称为实时系统。显然，实时系统对处理机的操作有着严格的限制。

所谓实时，是指计算机对随机发生的外部事件能够做出及时的响应和处理。这里的及时是指系统对特定输入做出反应所具有的速度，足以控制发出实时信号的那台设备。

实时系统不同于作业处理系统。作业处理系统以作业为处理对象；而实时系统则以数据或信息作为处理对象，它既不接收用户作业，也没有作业的概念，只有几个由外部事件触发的任务。实时系统是一个专用系统，尤其是过程控制系统，它是较少人为干预的现场监督和控制系统。仅当系统内的计算机识别到了违反系统规定的限制，或计算机本身发生故障时，才需要人为干预。人为干预时可以重置参数和调整监督设备。用于实时控制的计算机系统要确保在任何时候，甚至在满负载时都能及时响应。因此，设计实时系统时，先要考虑响应的实时性，其次才考虑资源的利用率。

实时操作系统能够在限定的时间内执行完所规定的功能，并且能在限定的时间内对外部的异步事件做出响应。执行规定的功能和响应外部异步事件所需时间的长短是衡量实时操作系统实时性强弱的一个指标。有两种类型的实时系统：硬实时和软实时。在硬实时系统中，系统的所有可能的延迟是一定的。对于关键的任务，必须在指定时间范围内完成，否则，可能出现不可预知的错误和危险。在软实时系统中，即使任务没有在规定时间内完成，也还是允许

的，例如多媒体、虚拟现实就属于这一类。

1. 实时系统具有的主要特点

(1) 实时性

由于实时系统接收来自现场的事件，对这种事件的响应速度直接影响现场过程控制的质量或服务的质量。与分时系统相比，实时系统对响应时间有更严格的要求。分时系统的响应时间通常以人们能够接受的等待时间来确定（2~3s），而实时系统则以被控制过程或信息处理时能够接受的延迟来确定，通常可能是秒的数量级，也可能是毫秒级甚至微秒级。也就是说，系统的正确性不仅依赖于计算的逻辑结果的正确性，而且依赖于结果产生的及时性。

(2) 可靠性

因为实时系统控制和处理的对象往往是重要的经济和军事目标，而且又是由现场直接控制处理的。任何故障（控制失败或信息错误）都可能造成巨大的经济损失，甚至导致灾难性的后果。因此在实时系统中，必须采取相应的硬件和软件措施提高系统的可靠性。凡是重要的实时控制系统，往往采用双工机制。一台作为主机，用于实时现场控制或实时信息处理；另一台作为后备机与主机并行运行；一旦主机发生故障，后备机便立即代替主机继续工作，以保证系统不间断运行。

(3) 可确定性

可确定性是指系统可以按照固定的、预先确定的时间或时间间隔执行指定的操作。其可确定性主要取决于系统响应中断的速度，其次取决于系统是否有足够的能力在要求的时间内处理完指定的请求。

2. 实时系统具有的功能

(1) 实时时钟管理

实时系统的主要设计目标是提供对实时任务进行实时处理的能力。通常，实时任务分两类：一类是定时任务，它是根据用户规定的时间启动该任务的执行，并且按照规定的循环周期重复启动、执行该任务。另一类是延迟任务，这类任务是推迟一个规定时间后再执行。这两类任务的控制时间，是由实时时钟进行计时控制的。

(2) 简单的人机对话

由于实时系统是专用系统，其交互能力不及分时系统，它一般仅允许与系统中的特定实时任务进行有限制的交互能力，允许操作员通过终端访问有限的专用软件，不允许对现有系统软件进行修改。

(3) 过载处理

虽然实时系统设计时，考虑了系统对所有实时任务的实时处理能力，但由于被处理任务进入系统时带有很大的随机性，使得某一时刻系统中的任务数超过它的处理能力，而产生过载。为此，系统应按照任务的紧急程度排成一个队列，优先处理紧急的任务，以保证系统即使出现过载时，仍能正常运行。

1.2.6 嵌入式系统 (Embedded System)

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的系统，可以定义为以应用为中心，以计算机

技术为基础，软件、硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。凡是计算机的主机嵌埋和应用系统或设备之中，不为用户所知的计算机应用方式都是嵌入式应用。

1. 嵌入式系统的技术特点

嵌入式处理机的应用软件是实现嵌入式系统功能的关键。软件要求固化存储，具有高质量、高可靠性，操作系统的高实时性是基本要求。嵌入式计算机主要应用在制造业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等领域。

2. 嵌入式系统具有的功能

嵌入式系统通常包括构成软件的基本运行环境的硬件和操作系统两部分。嵌入式系统的运行环境和应用场合决定了嵌入式系统具有区别于其他操作系统的一些特点。

大多数嵌入式操作系统通常是一个多任务、可抢占式的实时操作系统核心，只提供基本的功能，比如任务的调度、任务之间的通信与同步、主存管理、时钟管理等。其他的应用组件，比如网络功能、文件系统、图形用户界面 GUI 系统等均在用户态，以函数调用的方式工作。因而系统都是可裁剪的，用户可以根据自己的需要选用相应的组件，构造自己的专用系统。

1.3 操作系统的功能和特性

批处理系统、分时系统和实时系统是大、中、小型计算机上的操作系统所具有的三种形式。由于这些机器价格昂贵，如何有效地使用这些机器则是系统设计应重视的主要问题。所以，这些机器的操作系统往往是通用的，即一个系统兼有批量处理、分时处理和实时处理三种或其中的两种功能，形成通用操作系统。如分时和批处理相结合，将分时任务作为前台任务，将批处理作业作为后台任务，便是分时批处理系统。通用操作系统不仅能够满足用户的特殊要求，且能提高资源的利用率，因此得到广泛的应用。

1. 操作系统的功能

从资源管理的观点来看，操作系统的功能应当包括处理机管理、存储器管理、设备管理、文件管理和作业管理。

(1) 处理机管理

在单道作业或单用户系统中，处理机为一个作业或一个用户独占，对处理机的管理非常简单，处理机主要在用户程序和操作系统之间进行控制转接。在多道程序或多用户系统中，由于处理机数目远远少于运行的作业数，因此，对中央处理机的调度就成为关键问题。特别是在单处理机的情况下，多个程序的并行运行是宏观上的。微观上，处理机在某时刻只能执行一个作业。因此，不同类型的操作系统将针对各种不同情况采用不同的调度策略，如 FCFS(先来先服务)优先级调度、分时轮转等。

(2) 存储器管理

存储器管理是指计算机的主存管理。主存是计算机硬件中除 CPU 之外的又一个宝贵的资源。如何对主存资源进行统一管理,使多个用户分享有限的主存资源,以及存取在主存中的程序和数据,则是存储器管理的主要任务。其次,要负责对用户存入主存的程序和数据提供存储保护,保证各用户程序和数据彼此不被破坏。另外,多用户共享主存,还要解决主存扩充问题,以便多用户能方便地共享主存。

(3) 设备管理

设备管理涉及对系统中各种输入设备、输出设备等的管理和控制问题。这些设备是用户与计算机进行交互的硬件。用户程序和数据及各种命令通过输入设备送入计算机内,计算机完成对用户程序的执行后,要通过输出设备将运行结果告诉用户。由于这些设备种类繁多,操作特性各不相同,因此,对这些设备的管理和控制变得十分复杂。设备管理的主要任务是负责为多用户运行提供方便的运行环境。其中包括分配设备,并且按照用户要求控制实现设备的数据传输,完成实际的 I/O 操作。

(4) 文件管理

文件管理又称信息管理。现代计算机系统中,将程序、数据及各种信息资源(包括操作系统及各种实用程序等)组织成文件,长期保存在计算机的磁盘或磁带上。文件管理就是负责对这些复杂、庞大的软件资源进行存储、检索和保护,以使用户能方便、安全地访问它们。

(5) 作业管理

按照用户观点,操作系统是用户与计算机系统之间的接口。用户是通过操作系统来使用计算机的。因此,作业管理的任务是提供用户与操作系统之间实现通信的各种手段,从而向用户提供一个使用计算机系统的良好环境。作业管理还要对所有进入系统的作业进行管理和调度,以提高整个系统的运行效率。

2 操作系统的特性

由上述的操作系统功能组成可见,操作系统是一个相当复杂的系统软件。特别是多道程序的引入,为分析和理解操作系统带来了非常大的困难。为了深入地研究操作系统,有必要了解操作系统的特性,它表现在如下两个方面。

(1) 并发性 (Concurrency)

所谓并发性是指为了增强计算机系统的处理能力而采用的一种时间上重叠操作的技术。并发是指系统中存在若干逻辑上相互独立的程序或程序段,它们都被启动执行,而且都还没有完成执行。在单处理机计算机系统中,这种并发执行是宏观上的概念。例如,系统中同时有三个程序在运行,它们可能以交叉方式在 CPU 上执行,也可能一个在执行计算,一个在进行数据输入,另一个在进行计算结果的打印。为使这些并发活动有条不紊地进行,操作系统必须有效地对其进行管理和控制。

(2) 共享性 (Sharing)

支持系统并发性的物质基础是资源共享。资源若不能共享,多任务并发就不能实现;同样,若没有多任务并发,也就无所谓资源共享。资源共享是操作系统追求的主要目标之一。为

了提高计算机系统的资源利用率，更好地共享系统资源，操作系统的各部分功能设计中采用了各种各样的分配调度算法。

由于操作系统的并发性和资源共享性，使系统变得复杂和不可确定。这些问题将在以后各章中研究。

1.4 操作系统的进一步发展

进入 20 世纪 70 年代中期以后，大规模集成电路技术的飞速发展，计算机系统结构发生了重大变化，微型计算机（又叫个人计算机）、多处理机的相继出现和发展，使计算机大发展、大普及，之后计算机网络、分布式系统、巨型机更是发展快速，促使操作系统技术也有了进一步的发展，产生了各具特点的操作系统。

1. 个人计算机操作系统

20 世纪 70 年代的个人计算机的操作系统既不是多用户系统，也不是多任务系统，不再追求系统资源的最大利用，而是考虑极大地方使用户使用和最快的响应速度。它是一个单用户的交互式操作系统。MS-DOS 就是该时代的代表。个人计算机结构简单，规模小，它以磁盘文件管理为主，配有简单的设备管理，并向用户提供一组功能丰富的键盘操作命令。20 世纪 80 年代个人计算机上最流行的操作系统是 MS-DOS 和图形工作站上 UNIX 系列的操作系统。20 世纪 80 年代之后，产生了与 DOS 兼容的具有图形用户界面的新型单用户多任务操作系统：Windows NT, Windows 95, Windows 98, Windows Me 和 Windows 2000 等。

20 世纪 90 年代，多媒体技术成为个人计算机的重要发展方向。多媒体计算机技术是计算机综合处理多种媒体信息（文本、图形、图像和声音），使多种信息建立逻辑连接，为用户提供一个具有交互性的集成环境，使计算机的应用更为直观、容易。这样的系统要求处理机具有高速的信息处理能力，大容量的主存和海量的外存，高速大容量光缆传输且为声音和图像的同步提供所需的实时多任务处理能力。总之，多媒体技术是 20 世纪 90 年代计算机的又一次革命，没有多媒体技术的计算机就不是真正的个人计算机。

UNIX 操作系统具有很多版本，如 AT&T 公司的 UNIX 系统 V, Sunsoft 公司的 Solaris, HP 的 UNIX 等，是与 Windows 相抗衡的主流操作系统。最近几年迅速发展的类 UNIX 的 Linux 系统备受用户欢迎。由于 Linux 源代码公开，从而吸引了更多的软件开发参与者参与开发、改进，使得该系统具有了更大的发展前景。

2. 多处理机操作系统

现在的大多数个人计算机和 workstation 都只包含一个通用的处理机。随着对处理机的性能要求的不断增加和它的价格的不断降低，产生了多处理机的计算机，各处理机采用紧耦合方式进行连接，共享主存。这样的系统叫做多处理机系统。

多处理机操作系统有非对称多处理和对称多处理两种模式。

(1) 非对称多处理 (ASymmetric MultiProcessing, ASMP) 操作系统

通常指定一个处理机运行操作系统, 其他处理机运行用户作业。运行操作系统的处理机为其他处理机分配和调度任务, 这是一个主从模式。ASMP 操作系统特别适合在非对称硬件上运行, 例如一个处理机带一个附属的协处理器, 或者两个并不共享所有可用主存的处理机一类的硬件。这种系统中, 一旦运行操作系统的处理机出现故障, 整个系统将崩溃。

(2) 对称多处理 (Symmetric Multi-Processing, SMP) 操作系统

在对称多处理系统中, 操作系统和用户程序可安排在任何一个处理机上运行, 或者同时在所有处理机上运行, 各处理机共享主存和各种 I/O 设备。对称多处理机比单处理机具有更多的潜在的优势。

增加了系统的吞吐量。多个作业可以分配在任何一个处理机上执行, 大大增加了系统的吞吐量。

增加了系统的可靠性。一个处理机的失效, 只是性能的降低, 不会影响整个系统。

3. 计算机的网络操作系统

计算机网络是通过通信设施将地理上分散的具有自治能力的多台计算机系统连接起来的一种网络。在计算机网络中的用户可以不受地理位置的限制, 共享网络系统中的资源, 彼此进行通信和信息交换。

网络操作系统是为计算机网络配置的操作系统, 网络中的各台计算机配有各自独立的操作系统, 网络操作系统把它们有机地联系起来。其主要功能是为网络中各台计算机间提供通信和网络资源的共享。因此, 网络操作系统除了具有常规操作系统所应具有的处理机管理、存储器管理、设备管理、信息管理和作业管理的功能外, 还具有网络管理功能。

提供高效、可靠的网络通信能力。除了支持终端与计算机之间的通信外, 还应支持网络中各计算机之间的通信。

在网络协议控制下提供多种网络服务, 各计算机之间可以协同工作。例如, 文件传输服务: 用于将一个计算机上的文件传输到另一个计算机上, 以便共享; 分时系统服务: 使网络上的远程用户也能像本地用户一样, 使用其上的分时系统; 远程作业录入服务; 远程打印服务; 电子邮件服务等。

因此, 用户可以利用上述服务设施, 灵活地访问网络中各计算机上的文件系统、分时系统和批处理系统等, 方便地共享网络中的各种软、硬件资源。

4. 分布式操作系统

分布式计算机系统是由多个分散的计算机经互连网络连接而成的统一的计算机系统。其中的各计算机既高度自治又相互配合, 能在整个系统范围内实现资源管理与共享、信息交换和协同执行任务。粗看起来, 分布式系统与计算机网络系统没有多大区别, 但就其实现功能来讲, 仍具有明显的区别。

计算机网络有国际标准化组织 (ISO) 制定的网络互连体系结构及一系列标准通信网络协议, 而分布式系统没有制定标准协议。

② 分布式计算机系统是多机系统的一种新形式，它强调资源、任务、功能和控制的全面分布。就资源分布而言，既包括处理机、辅助存储器、输入/输出系统、通信接口等设备资源，也包括程序、数据、文件等软件资源，它们分布在各个物理上分散的场地（Site）上。各场地经互连网络相互通信，构成统一的计算机系统。这种系统的工作方式也是分布的，分布的原则有任务分布和功能分布两种。

所谓任务分布是指把一个计算任务分成多个可以并行执行的子任务，分配到各场地协同完成。

所谓功能分布，是指把系统的总功能划分成若干子功能，由各场地分别承担其中的一部分或几分子功能。

由此可见，分布式系统要求连网的多机有一个统一的操作系统，实现系统的统一操作性。为把数据处理系统的多个通用部件合成一个具有整体功能的系统，必须引入分布式操作系统。为了保持各机的自治性，各处理机有自己的私有操作系统。对于系统中各物理资源的管理，分布式操作系统与各机的私有操作系统之间，不允许有明显的主从管理关系。

总之，分布式计算机系统是由若干分离的、自治的小型或微型计算机用互连网络连成的一种新型计算机系统。各计算机彼此间相互通信，并协同完成同一任务。它既能利用原单机软、硬件功能进行分布处理，又能互连成一个整体，协同配合实现并行处理。其基本特征是：软、硬件结构上具有模块性，工作方式上具有自治性，系统功能上具有协同并行性，对用户具有透明性，系统的容错性和坚固性。

分布式操作系统是负责分布式计算机系统资源分配和调度、任务划分、信息传输、控制协调工作的软件。其目的是向用户提供一个使用方便、友好的分布式用机环境。同时，尽可能地提高整个系统的利用效率。

1.5 操作系统的设计规范

一个高质量的操作系统具有高效性、可靠性、易维护性、可移植性、安全性、可伸缩性和兼容性等特征。到目前为止，还没有一个统一的标准来衡量一个操作系统。下面从六个方面描述操作系统的设计规范。

系统效率。系统效率是操作系统的一个重要性能指标。体现系统效率的指标在前面已经陈述，它包括资源利用率、吞吐量、周转时间及响应时间等。

② 系统可靠性。系统可靠性是指系统发现、诊断和恢复硬件与软件故障的能力。通常用下面三个指标进行说明。

可靠性 R (Reliability)：通常用系统的平均无故障时间 $MTBF$ (Mean Time Between Failures) 来度量。指系统能正常工作的平均时间值。 R 越大，系统可靠性越高。

可维护性 S (Serviceability)：通常用平均故障修复时间 $MTRF$ (Mean Time to Repair Fault) 来度量。指从故障发生到故障修复所需要的平均时间。 S 越小，可修复性越高。

可用性 A (Availability)：指系统运行的整个时间内，能正常工作的概率。它由下面公式计算：

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTRF})$$

可移植性。可移植性是指把一个操作系统从一种硬件环境移植到另一种硬件环境时系统仍能正常工作的能力。移植时，代码修改量越小，效率越高。

可伸缩性。可伸缩性是指操作系统对添加软、硬件资源的适应能力，尤其指可添加到硬件中的 CPU 资源的能力，也即操作系统可运行在不同种类的计算机上，从单处理机到多处理机的系统上。

⑤ 兼容性。它主要指软件的兼容性，是操作系统执行为其他操作系统或为同一系统的早期版本所编写的软件的能力。

⑥ 安全性。安全性是指操作系统应具有一定的安全保护措施，诸如账号检查、系统接入检测、各用户资源分配和资源保护、用户的资源不受他人侵犯等。

1.6 小 结

1. 操作系统的三种基本类型

批处理系统。它是在解决人机矛盾和 CPU 与 I/O 设备速度不匹配的矛盾过程中形成的，其特点是提高系统资源的利用率，增加系统吞吐量。其缺点是用户无法控制作业，作业的平均周转时间长。

分时系统。它克服了批处理系统的缺点，使用户及其作业和系统直接进行交互，其特点是具有同时性、独立性、交互性、及时性，但其系统资源利用率不如批处理系统高。

实时系统。它的主要特点是计算机能够在限定的时间内执行完所规定的功能，并且能在限定的时间内对外部的异步事件做出响应。它具有实时性、高度的安全可靠。嵌入式系统实际是实时系统的一个分支。

2 从资源管理的观点来看，操作系统具有如下功能

处理机管理。它包括进程管理、进程控制、同步和进程调度。

存储器管理。它包括存储器的分配、扩充、存储器的保护和共享。

设备管理。它包括设备的分配、设备输入/输出控制及缓冲技术等。

文件管理。它包括对文件存储空间、文件目录、文件的共享和保护，以及各种文件操作的管理。

⑤ 作业管理。它包括作业的提交、输入、调度和控制等。

3. 多道程序的概念及特点

多道程序指主存存放多个用户程序，使这些程序同时处于运行状态。其特点是主存有多个道、宏观上并行、微观上串行。

4. 批处理操作系统的性能指标和操作系统的两个基本特征

批处理操作系统的性能指标指资源利用率、系统吞吐量和作业的平均周转时间等。