



# 实时系统软件基础

郑宗汉 编著

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书叙述了实时系统软件的基础知识及设计方法,并把实时多任务操作系统、实时控制局域网协议以及分布式实时系统,作为一个有机整体来进行叙述。全书从实践出发,首先介绍了实时系统是如何建立的,叙述了实时任务管理、时钟管理、内存管理、设备管理以及文件系统等的实现机制;接着说明了实时系统中局域网软件的若干设计问题,介绍了三个不同风格的局域网协议,进而介绍了一个用于实时控制的局域网协议——PROWAY C 协议的实现过程,并在此基础上介绍了分布式系统中任务通信的实现机制;最后介绍了分布式系统中的若干设计问题。

本书可作为大学计算机专业本科生、研究生的参考教材,也可供从事实时控制系统设计和研制的工程技术人员参考。

**版权所有,翻印必究。**

**本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。**

### 图书在版编目(CIP)数据

实时系统软件基础/郑宗汉编著. -北京:清华大学出版社, 2002

ISBN 7-302-06118-1

I. 实... II. 郑... III. 实时操作系统 - 基本知识 IV. TP316.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 093662 号

**出 版 者:** 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

**责任编辑:** 许存权

**印 刷 者:** 世界知识印刷厂

**发 行 者:** 新华书店总店北京发行所

**开 本:** 787×1092 1/16 **印 张:** 33.25 **字 数:** 762 千字

**版 次:** 2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

**书 号:** ISBN 7-302-06118-1/TP·3654

**印 数:** 0001~4000

**定 价:** 52.00 元

# 前 言

出版社约我写一本有关实时操作系统方面的书籍。目前关于操作系统的书籍和教材，理论方面的偏多，如何设计和实践的偏少。因此，本书就围绕着模拟一个实时操作系统的设计和实现这一内容来叙述。目前，已经很少用一台处理器组成实时系统，因此，书中又增添了有关局域网软件的设计和分布式系统的一些内容。

第1章简单地介绍实时系统的一些特点，叙述引入分布式实时系统的必要性和必然性。第2章叙述实时操作系统的一些基本概念，从实现的角度出发，着重说明计算机的执行，是如何从用户的应用程序，进入实时操作系统，又如何从后者返回到前者。实时任务的管理，是实时操作系统的核心，第3章叙述实时任务的分解和调度原则，介绍了实时任务的管理、通信以及同步和互斥的问题。在这里，叙述了消息传递、邮箱通信、信号量、事件控制等功能的设计和实现。它是后面各章的基础。时钟设备是实时系统的重要设备，在第4章叙述了各种软件定时器的设计和实现问题。第5章从实时系统的角度出发，来讨论内存管理器的管理问题。第6章叙述设备的管理，介绍了有关设备管理软件的设计原则，也涉及到如何实现对打印机、串口输入输出、控制台输入输出等设备的管理。第7章介绍文件系统的设计和实现，叙述了磁盘的调度、缓冲技术，以及如何使用这些技术来实现一个文件系统。第8章简单地介绍死锁原理和某些对策。第9章介绍局域网软件设计的一些问题，叙述了三个不同风格的局域网软件的设计。第10章介绍一个用于实时控制的局域网协议以及实现它的一些细节。第11章在第10章的基础上，进一步介绍在分布式系统中，任务之间的通信是如何实现的。第12章简单地介绍了分布式实时系统中的若干问题，包括分布式系统中事件的因果关系、逻辑时钟和物理时钟、时钟同步、分布式系统中的互斥、死锁、容错以及负载分配和调度等问题。

本书是在许存权编辑的大力支持和努力下，才得以出版的；王淑娟同志为本书做了大量的录入工作，在这里一并表示诚挚的谢意。

由于水平有限，书中不当的地方，敬请读者指正。

作者

2002年8月

# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 什么是实时系统.....	1
1.2 实时系统的特点.....	3
1.3 分布式实时系统的引入.....	4
1.4 分布式实时系统的优点.....	5
1.5 分布式实时系统存在的问题.....	6
1.6 实时操作系统是实时系统软件的基础.....	7
第 2 章 实时操作系统概述.....	8
2.1 实时操作系统的功能.....	8
2.1.1 系统资源的管理者.....	8
2.1.2 硬件功能的扩充.....	9
2.2 系统调用命令.....	10
2.2.1 实时操作系统与实时任务的接口.....	10
2.2.2 监控态与用户态.....	10
2.2.3 中断和中断处理.....	11
2.2.4 系统调用命令的实现.....	11
2.3 用户实时应用系统的建立和启动.....	14
2.3.1 “ROOT”任务和“IDLE”任务.....	14
2.3.2 “BACKGROUND”任务和“IDLE”任务.....	16
2.4 实时操作系统的内部结构.....	17
2.4.1 整体式模型.....	17
2.4.2 客户/服务器模型.....	18
第 3 章 实时任务管理.....	21
3.1 实时任务的概念.....	21
3.1.1 用顺序执行的程序实现实时应用系统.....	21
3.1.2 用并发执行的任务实现实时应用系统.....	22
3.1.3 实时任务的分解.....	24
3.1.4 实时任务的状态.....	25
3.1.5 任务控制块 TCB.....	27

3.1.6	操作任务队列和任务状态的几个函数	29
3.2	实时任务的调度	31
3.2.1	速率单调算法	31
3.2.2	截止期最早优先算法	34
3.2.3	可达截止期最早优先算法	35
3.2.4	最小裕度算法	37
3.2.5	其他的实时调度算法	40
3.2.6	实时任务的可调度性	40
3.3	实时任务的管理	43
3.3.1	实时任务的建立	43
3.3.2	实时任务的启动	47
3.3.3	实时任务的重新启动	49
3.3.4	实时任务的暂停运行	50
3.3.5	实时任务的恢复运行	52
3.3.6	实时任务的退出运行	54
3.3.7	返回码的处理	56
3.3.8	其他任务管理的系统调用命令	57
3.4	实时任务的通信、同步和互斥问题	58
3.4.1	临界区	58
3.4.2	生产者-消费者问题	58
3.5	信号量	59
3.5.1	信号量的数据结构	59
3.5.2	信号量的建立	61
3.5.3	信号量的操作	63
3.5.4	信号量的删除	66
3.5.5	利用信号量进行互斥控制	68
3.5.6	利用信号量解决生产者和消费者问题	70
3.6	消息传递和邮箱通信	72
3.6.1	消息的数据结构	73
3.6.2	消息的发送	75
3.6.3	消息的接收	77
3.6.4	邮箱和邮箱通信	79
3.6.5	邮箱的建立	81
3.6.6	邮件的发送和接收	82
3.6.7	撤消邮箱	85
3.6.8	利用邮箱通信解决生产者-消费者问题	86
3.7	事件	88

---

3.7.1	事件和事件组.....	88
3.7.2	事件及事件组的建立和撤消.....	90
3.7.3	事件的接收和发送.....	93
3.7.4	事件的应用例子.....	96
3.7.5	事件中断.....	100
3.7.6	事件中断的实现机制.....	101
3.7.7	事件中断服务程序及中断屏蔽的设置.....	103
3.7.8	事件中断的发生及从事件中断服务程序返回.....	106
<b>第 4 章</b>	<b>时钟管理.....</b>	<b>109</b>
4.1	定时器硬件.....	109
4.2	时钟管理功能.....	111
4.3	时钟中断和时钟任务.....	112
4.3.1	时钟中断处理程序.....	112
4.3.2	时钟任务.....	112
4.4	系统日历时间的维护.....	113
4.4.1	日历时间的获取.....	113
4.4.2	日历时间的维护.....	114
4.4.3	系统日历时间的实现.....	115
4.4.4	系统时钟和实际时钟的同步.....	117
4.4.5	时钟同步时的时间补偿.....	117
4.5	软件定时器.....	120
4.5.1	软件定时器的组织.....	120
4.5.2	时钟任务中的消息传递.....	122
4.5.3	时钟任务的实现.....	125
4.5.4	内核的处理.....	131
<b>第 5 章</b>	<b>存储器管理.....</b>	<b>136</b>
5.1	内存管理概述.....	136
5.2	存储器空间的管理和分配算法.....	138
5.2.1	使用位图的内存管理.....	138
5.2.2	使用链表的内存管理.....	138
5.2.3	使用链表的内存空间分配算法.....	139
5.3	实时任务的数据段.....	143
5.3.1	实时任务的数据段管理.....	143
5.3.2	数据段的分配.....	144
5.3.3	数据段的释放.....	148
5.4	分页存储管理.....	151

5.4.1	分页原理.....	151
5.4.2	分页存储管理的实现.....	151
5.4.3	分页管理的虚拟存储器.....	156
5.4.4	先进先出的页面交换算法.....	157
5.4.5	最近最久未用的页面交换算法.....	158
5.5	分段存储管理.....	159
5.5.1	分段原理.....	159
5.5.2	分段存储管理的实现.....	160
5.5.3	段页式的存储管理.....	164
<b>第 6 章</b>	<b>设备管理</b> .....	<b>167</b>
6.1	外部设备概述.....	167
6.1.1	外部设备的操作.....	167
6.1.2	外部设备的分类.....	168
6.2	外部设备的软件结构.....	169
6.2.1	设备管理软件的设计问题.....	169
6.2.2	设备描述符.....	171
6.2.3	用户空间中的数据输入输出处理程序.....	171
6.2.4	设备分派程序.....	172
6.2.5	设备管理程序.....	172
6.2.6	设备驱动程序.....	173
6.2.7	设备中断程序.....	173
6.2.8	设备输入输出的缓冲.....	174
6.3	设备管理的实现过程.....	175
6.3.1	系统调用命令的执行过程.....	175
6.3.2	设备分派程序.....	176
6.4	打印机输出.....	178
6.4.1	打印机接口.....	179
6.4.2	有关打印机的数据结构.....	180
6.4.3	打印机管理任务.....	182
6.4.4	打印机输出任务.....	187
6.4.5	打印机中断处理程序.....	190
6.4.6	打印机 Spooler.....	191
6.4.7	Spool 收容任务.....	191
6.4.8	Spool 输出任务.....	196
6.5	串口输入输出管理.....	199
6.5.1	RS-232 接口.....	199
6.5.2	流控制和数据帧格式.....	203



---

6.5.3	串口输出的管理.....	204
6.5.4	串口输出中断处理程序.....	209
6.5.5	有关串口输入的数据结构.....	210
6.5.6	串口输入管理任务.....	213
6.5.7	串口输入任务.....	218
6.5.8	串口输入中断处理程序.....	221
6.6	控制台输入输出管理.....	222
6.6.1	键盘控制器和视频显示卡.....	223
6.6.2	原始输入方式和加工输入方式.....	225
6.6.3	键位映射表.....	226
6.6.4	特殊字符的处理.....	227
6.6.5	字符输入的回显.....	228
6.6.6	控制台参数表和键盘输入缓冲池.....	229
6.6.7	键盘输入管理.....	233
6.6.8	控制台管理任务.....	235
6.6.9	键盘输入任务.....	244
6.6.10	键盘中断处理程序.....	252
6.6.11	CRT 输出任务.....	253
<b>第 7 章</b>	<b>文件系统.....</b>	<b>263</b>
7.1	文件.....	263
7.1.1	文件的命名.....	264
7.1.2	文件的内部结构.....	264
7.1.3	文件类型.....	265
7.1.4	文件属性.....	266
7.1.5	文件描述符.....	266
7.1.6	有关文件操作的系统调用命令.....	267
7.2	目录.....	267
7.2.1	目录的内部结构, 目录登记项.....	268
7.2.2	文件系统的组织、根目录.....	268
7.2.3	文件的路径名.....	269
7.3	磁盘.....	271
7.3.1	磁盘的寻址方式, 柱面、磁道和扇区.....	271
7.3.2	磁盘控制器接口.....	272
7.3.3	磁盘空间的管理.....	274
7.3.4	磁盘调度算法.....	277
7.3.5	提前读和滞后写.....	278
7.3.6	磁盘缓冲算法.....	279

7.4	文件系统的实现.....	281
7.4.1	有关文件系统的数据结构.....	281
7.4.2	文件系统的实现过程.....	290
7.4.3	文件服务任务.....	291
7.4.4	目录和文件的建立、文件路径名检索.....	294
7.4.5	工作目录的设置.....	308
7.4.6	文件的打开和读写.....	310
7.4.7	磁盘任务.....	322
7.4.8	磁盘驱动程序和中断处理程序.....	327
<b>第 8 章</b>	<b>死锁.....</b>	<b>331</b>
8.1	死锁原理及处理策略.....	331
8.2	死锁的检测和恢复.....	332
8.2.1	单个资源类型的死锁检测.....	333
8.2.2	多个资源类型的死锁检测.....	336
8.2.3	死锁的恢复.....	338
8.3	死锁的避免和预防.....	339
8.3.1	任务的运行轨迹和不安全区.....	339
8.3.2	安全和不安全状态.....	340
8.3.3	单种资源的银行家算法.....	341
8.3.4	多种资源的银行家算法.....	342
8.3.5	死锁的预防.....	342
8.4	鸵鸟策略.....	342
<b>第 9 章</b>	<b>实时系统的局域网.....</b>	<b>344</b>
9.1	局域网的拓扑结构.....	344
9.1.1	总线型结构.....	344
9.1.2	环型结构.....	345
9.1.3	星型结构.....	345
9.1.4	实时系统中主机与通信网的连接.....	346
9.2	实时系统中局域网软件的设计问题.....	347
9.2.1	局域网协议的分层.....	347
9.2.2	服务、接口和协议.....	349
9.2.3	面向连接的服务和无连接服务.....	350
9.2.4	服务原语.....	351
9.2.5	实时系统对局域网的需求.....	352
9.3	局域网的存取控制.....	353
9.3.1	集中式轮询的存取控制.....	353

9.3.2	静态分配信道的存取控制.....	354
9.3.3	令牌存取控制.....	354
9.3.4	ALOHA 协议和载波侦听多路存取协议.....	355
9.4	IEEE 802 局域网标准的体系结构.....	356
9.5	IEEE 802.2 标准: 逻辑链路控制子层 LLC 协议.....	357
9.5.1	LLC 子层提供的服务和接口.....	357
9.5.2	LLC 协议数据单元 PDU 的结构.....	360
9.5.3	LLC 的无连接协议.....	362
9.5.4	LLC 的面向连接的协议.....	363
9.6	IEEE 802.3 标准: 带检测的载波侦听协议.....	367
9.6.1	IEEE 802.3 的帧格式.....	368
9.6.2	解决冲突的算法.....	369
9.6.3	802.3 MAC 子层协议的实现.....	370
9.7	IEEE 802.4 标准: 令牌总线协议.....	372
9.7.1	IEEE 802.4 标准的体系结构.....	372
9.7.2	IEEE 802.4 标准的帧格式.....	373
9.7.3	令牌总线协议.....	374
9.8	IEEE 802.5 标准: 环型网协议.....	375
9.8.1	IEEE 802.5 标准的符号编码和帧格式.....	376
9.8.2	环路优先级调度算法.....	381
9.8.3	环路建立和维护.....	383
9.9	三种协议的比较.....	386
<b>第 10 章</b>	<b>用于实时控制的局域网协议.....</b>	<b>387</b>
10.1	PROWAY C 概述.....	387
10.2	PROWAY C 协议的服务规范.....	389
10.2.1	PLC 子层提供给 PLC 用户的服务.....	389
10.2.2	PLC 的协议数据单元格式.....	392
10.2.3	MAC 子层提供给 PLC 子层的服务.....	393
10.2.4	通信节点的管理实体提供给用户的服务.....	395
10.3	PROWAY C 逻辑链路控制子层.....	397
10.3.1	PLC 子层和 PLC 用户的接口.....	398
10.3.2	共享存储器的存取控制.....	400
10.3.3	PLC 子层、MAC 子层及管理实体的接口.....	402
10.3.4	PLC 子层启动站的操作过程.....	406
10.3.5	PLC 子层响应站的操作过程.....	414
10.4	PROWAY C 的介质存取控制子层.....	419
10.4.1	PROWAY C 的符号编码.....	419

10.4.2	MAC 子层的帧格式.....	421
10.4.3	MAC 子层功能概述.....	423
10.4.4	时间片和响应窗口.....	424
10.4.5	令牌逻辑环路的初始化、令牌发布和竞争.....	425
10.4.6	令牌逻辑环路的建立、争用下一站.....	427
10.4.7	新节点入环和老节点退环.....	428
10.4.8	令牌传递和聋站的处理.....	430
10.4.9	优先级存取控制.....	431
10.4.10	存取控制机的工作过程.....	434
<b>第 11 章</b>	<b>分布式实时系统中任务的通信.....</b>	<b>439</b>
11.1	任务通信概述.....	439
11.2	面向连接的通信.....	440
11.2.1	信口和虚链路.....	440
11.2.2	信口的动态分配、信口控制块.....	441
11.2.3	网络通信的系统调用命令.....	443
11.3	网络通信的实现.....	446
11.3.1	主机系统中的网络管理程序.....	447
11.3.2	参数传递和数据封装及卸装过程.....	449
11.3.3	网络控制任务的实现.....	452
11.3.4	网络发送任务的实现.....	466
11.3.5	网络接收任务的实现.....	470
11.3.6	任务的通信与同步过程.....	477
<b>第 12 章</b>	<b>分布式系统设计的若干问题.....</b>	<b>480</b>
12.1	分布式系统中事件的因果关系.....	480
12.1.1	“早于 (happens before)” 关系.....	480
12.1.2	事件的时空视图.....	481
12.1.3	事件的交叉视图.....	482
12.2	分布式系统中的全局状态.....	483
12.2.1	时空视图中的全局状态.....	484
12.2.2	全局状态的形式定义.....	485
12.2.3	全局状态的“快照”算法.....	485
12.3	逻辑时钟和物理时钟、时钟同步.....	487
12.3.1	标量逻辑时钟.....	488
12.3.2	向量逻辑时钟.....	490
12.3.3	物理时钟.....	491
12.3.4	Cristian 时钟同步算法.....	492

---

12.3.5 Berkeley 的时钟同步算法 .....	493
12.3.6 分布式的平均算法 .....	493
12.4 分布式系统中的互斥 .....	494
12.4.1 集中式的互斥算法 .....	494
12.4.2 分布式的互斥算法 .....	495
12.5 分布式系统中的死锁检测 .....	497
12.5.1 集中式的死锁检测 .....	497
12.5.2 分布式的死锁检测 .....	498
12.6 协调者的选举 .....	500
12.6.1 Bully 算法 .....	500
12.6.2 环算法 .....	501
12.7 容错 .....	503
12.7.1 组件和处理器故障 .....	503
12.7.2 同步系统和异步系统 .....	503
12.7.3 冗余 .....	504
12.7.4 主动复制冗余和主机备用冗余 .....	504
12.7.5 拜占庭将军问题 .....	507
12.8 分布式实时系统的负载分配和调度 .....	508
12.8.1 分布式系统的负载分配 .....	509
12.8.2 实时系统中任务的组织和划分 .....	509
12.8.3 任务的实时调度 .....	510
12.8.4 任务优先图和甘特图 (Gantt Chart) .....	511
参考文献 .....	514

# 第 1 章 引 言

从 1945 年第一台计算机问世以来,虽然只有半个世纪,但在这半个世纪里,计算机工业的发展速度,远远超过了其他工业。计算机技术的突飞猛进,使得在当今的社会里,计算机变得无所不在。在家庭中,带有计算机芯片控制的电冰箱、微波炉,给人们的生活带来了极大方便;人们出门旅行时,使用计算机预订机票和旅馆,使得旅行更为舒适;在工厂里,用计算机控制系统控制着各种各样的装置,给工厂带来了极大的经济效益;国民经济各个部门,使用各种各样的计算机管理各种事务,帮助进行各种重大的决策;宇宙飞船的飞行,精确制导的导弹,都离不开计算机的控制。

计算机有着如此巨大的威力,离不开计算机软件。人们曾经说过,没有软件的计算机,硬件只不过是一堆破铜烂铁。计算机硬件提供了灵活的躯壳和无所不能的四肢,而软件是指挥整个计算机活动的大脑。在软件的指挥控制下,计算机才可以显示出上天入地、上刀山、下火海的惊人本事。但是,也正是因为计算机硬件技术突飞猛进的发展,才给计算机软件提供了如此巨大的舞台。本书将集中讨论计算机实时系统软件设计的一些基本问题。

## 1.1 什么是实时系统

对很多计算机系统来说,人们满足于计算机的正确性,而正确性仅仅取决于所执行指令的逻辑顺序,和执行此逻辑顺序所花时间的多少无关。但对于实时系统来说,正确地执行指令的逻辑顺序,只是问题的一个方面。另一方面,实时系统和外部世界的交互,与时间的关系十分密切。在出现一个外部事件时,系统必须以一种特定的方法,在一个特定的时间内响应和处理它。如果超过了这个特定的时间,尽管它所提供的答案十分正确,系统却认为它所提供的答案已失去了时效而不予理睬。在这种系统里,答案是什么时候产生的,和产生什么样的答案同等重要。

例如,考虑市场上一种十分普通的产品,家用计算机芯片控制的自动豆浆机。在豆浆机通电时,自动加热豆浆机中的水,当水温达到一定温度,启动电机高速旋转豆浆机中的叶片 30 秒,然后停止一个特定时间,如此重复四次,把豆浆机中的大豆绞成粉碎,使豆浆机中的水成了豆浆。此后,又继续加热。因为豆浆在未煮熟时就沸腾,为了防止豆浆在沸腾时溢出,豆浆机的顶部安装了测头,检测豆浆沸腾时上升所到达的高度。当此检测头检测到沸腾的豆浆将近到达豆浆机的顶部时,停止加热,使沸腾的豆浆缓缓降落下来,到一定时候又继续加热,如此反复进行,直到豆浆达到预期温度,豆浆机发出嘟嘟声音,告知

豆浆煮熟为止。

当把计算机用于飞行器飞行、导弹发射等自动控制时，要求计算机能把测量系统测得的数据，及时地进行加工处理，以便不失时机地对飞行器或导弹进行控制。或者，当把计算机用于工业生产的过程控制时，要求计算机能及时地处理由传感器送来的数据，然后去控制相应的执行机构，以便使某个参数（温度、压力、流量）按一定的规律变化或保持不变。通常，把这种情况称为实时控制，用于实时控制的系统，就称为实时系统。在这里，所谓实时，是指在一个确定的时间里，对外部产生的事件做出响应，并在确定的时间里，完成这种响应及处理。

但是，这个确定的时间有多长呢？例如，对飞行器控制系统来说，以 ms 级的时间做出响应，不能认为太快。假如两个飞行器互相迎面飞来，如果不在 ms 级或更短的时间里作出响应，必将撞得粉身碎骨。又如轧钢机以每秒 20 多米的速度轧制钢材，如果钢材厚度发生了偏差，能在 100ms 级的速度范围里调整轧辊高度，或许是可以认可的。锅炉的温度控制系统，由于温度的滞后特性很大，用几分钟时间控制温度上升一度，可以认为是很快的了。

这样，对于实时响应时间，不同的应用系统有不同的要求，即使是在同一个应用系统内部，不同的应用场合也有不同的要求。例如，在同一个系统里，可能有紧急事故处理，也有类似上面的温度控制问题。紧急事故处理，必须在 ms 级的时间里予以响应并处理完毕，否则将发生重大的人身事故或财产损失。而对温度控制，则允许在若干分钟内完成控制任务。

在实时系统里，除了实时响应外，人们关心的另一个问题，是系统的流通量或吞吐量。实时系统的吞吐量，可定义为每单位时间，系统可以处理的事件个数。当然，吞吐量与响应事件时所需处理的运算量有关，响应事件所需的运算量大，将使吞吐量降低；运算量小，吞吐量则可以提高。

有时，人们把在机票预订系统前订购机票，到拿到机票这段时间为止，也称为实时响应时间。通常，把这种系统称为实时事务系统。由于在这种系统里，对实时响应时间没有太高的严格要求。所以，本书主要考虑的是实时控制系统。

对于实时系统，人们曾经存在着一些误解，Stankovic 就曾经指出其中的一些错误的看法。例如，有些人认为，实时计算必须是一种快速的计算。其实不然，计算机控制的望远镜，可以实时地跟踪星星或银河。但是，地球的自旋每小时只有 15 弧度，不是特别地快。在这里，主要考虑的是准确性问题。又例如，有人认为，随着计算机主频的提高，计算机的运算速度，已达到如此高的速度，以致有足够的速度，去响应外部的任何事件，从而使实时系统失去意义。但是，事实并非如此。正是更高运算速度的计算机的出现，鼓舞着人们去建立以前的工艺状态所无法达到的实时系统。心脏病专家希望有一个心脏扫描仪，去实时地观察病人的心脏跳动情况。他们希望这种仪器具有三维、全色、放大和缩小的功能，而这是必须以时间为代价的。此外，多处理器系统或分布式系统的使用，使整个系统达到了更高的可靠性和更高的速度。但是，同时也引进了新的问题，例如它们之间的通信、同步、调度等问题，这些问题都需要额外的时间开销。

## 1.2 实时系统的特点

实时系统的第一个特点是：任务具有截止期。实时系统在响应外部事件时，处理该外部事件的实时任务，必须在一个确定的时间里完成，这个“确定的时间”，就是任务的截止期。根据应用场合的不同，不同的处理任务，截止期有长有短。如果响应该事件的实时处理任务，其响应时间超过了截止期，则根据它所造成的后果，把截止期分成三种情况。

第一种情况称为硬截止。超过截止期将导致严重后果，可能造成人身安全事故或环境灾难。例如，原子能反应堆中的事故处理。

第二种情况称为软截止。虽然响应及处理的时间超过了截止期，但是，这种响应可能还有一定价值。例如上述自动豆浆机的例子中，当豆浆将熟未熟，而又沸腾到豆浆机顶部时，由于响应超过截止期，导致豆浆继续往上沸腾外溢。但它毕竟停止了加热，使豆浆沸腾程度慢慢降低下来，虽然未能完全防止豆浆外溢，但为防止它继续外溢，还是起了作用。

第三种情况称为固截止。超过截止期才响应处理，已经完全没有价值。例如：传送带上的汽水瓶，到达灌装汽水的喷嘴下部时，实时任务应该打开喷嘴出口，把汽水装入汽水瓶里。如果执行该任务的实时任务超过了截止期，在汽水瓶已离开喷嘴出口时，才执行该动作，则该动作的执行，已经没有任何意义。

实时系统的第二个特点是：实时任务具有结构上的内在联系。它和传统计算机的计算任务不同，后者是相互无关、自成一体的独立计算任务。而实时系统则不然，如果把豆浆加工过程中的每个实时任务所执行的内容加以放大，它完全类似于制药工序中的某种加工过程和化工生产中的某种顺序控制过程。水的持续加热控制、电机的周期启停控制以及豆浆的断续加热控制，在结构上互相关联，成为一体。有时，一些实时任务可以分裂成多个任务执行，有时多个任务可以合并成一个任务，共同完成某种控制目标。

第三个特点，在实时系统中，任务的活动具有各种要求和限制，如计算时间要求、资源要求、通信上的要求、执行次序的限制、执行时间的限制等。

第四个特点，实时任务是可预测的，实时系统要求事先知道，即任务在最坏情况下的执行时间以及所需数据与资源，要求对最坏情况的预测与实际的差别尽可能小。系统的实时任务，甚至在峰值负载时，都应该满足它的截止期。在实时系统里，经常的情况是：当检测到事件 E 时，就知道应该运行任务 X，接着并行地或顺序地运行 Y 和 Z，并且知道，这些实时任务，在最坏情况下的工况怎样。例如，如果知道 X 需要运行 50ms，Y 和 Z 每一个都需要 60ms，任务的启动需要 5ms，那么，可预先保证，系统在没有任何其他工作的情况下，对事件 E，每秒可以处理 5 个周期。这种类型的分析和模拟，可以导致一种确定性的，而不是偶然性的系统。



第五个特点，实时系统里所有的实时任务，都是由外部事件所激发的。这种外部事件，可以由计算机的定时器发出，也可以是外部设备或装置对计算机随机发出的某种信号。例如，操作员按某个电钮、执行某种操作或某个行程开关到达某个位置等。由定时器所激发的实时任务，往往具有周期性执行或定时执行的特点。例如周期性地测量某个容器的温度，然后进行 PID 运算；输出一个调节量给执行机构，去控制阀门的开关；定时地在每日零时打印日报表。

第六个特点，实时系统的任务具有合作性，它们互相关联，共同完成某个控制任务。

第七个特点，在实时系统中，任务的活动是不可逆的。火箭点火起飞了，就不可能让它再恢复原状了。

综上所述，在实时系统中，被控对象是一个并发活动的有机整体，对被控对象进行监视和控制的任務，也经常是并发执行的，它们之间存在着各种复杂的逻辑关系。有时，它们是顺序执行的，表现为一个任务执行结束后，激发另一个任务执行；有时，它们是周期性的以连续反复的方式执行；有时，一个任务执行到一定程度，必须延时某个时刻才继续执行；有时，是几个任务协同并发地执行，这些协同任务，存在着各种逻辑联系，它们之间必须进行各种通信、同步和互斥控制，以便共同完成对某个被控对象的监视和控制。

### 1.3 分布式实时系统的引入

实时系统从一开始就和过程控制紧密相关。20 世纪 50 年代，工业自动化仪表以气动仪表为主流，出现了集中式的气动仪表控制系统。气动调节仪、指示仪，集中安装在控制室的仪表盘上。成百上千的气体管路，把现场检测装置送来的气体信号，输入到仪表盘上的气动调节仪、指示仪、记录仪中，同时也把调节仪输出的气动信号，送到气动执行机构，对现场进行控制。

20 世纪 60 年代，随着电动单元组合仪表的发展，过程控制系统主要由电动单元组合仪表组成。由于其功能更强，应用范围更广，组成系统的规模更大，控制室中集中安装的电动调节仪、指示仪和记录仪更多，仪表盘面越来越大，有更多的连线把控制器和现场的传感器及执行机构相连接。

随着生产过程的规模日益扩大和复杂化，控制系统既要处理大量数据，又要求有高级控制功能，于是，逐渐引入了计算机控制。中央控制室安装一个计算机装置，用线路把现场传感器、执行机构和计算机相连接。计算机采集生产过程的现场数据，进行运算处理，发出控制信息，构成了集中式控制系统。

集中式系统有一些缺点，首先，是危险高度集中。一个系统有上百个控制回路，主计算机发生故障，全系统都得停运。给生产带来了严重的威胁，有时一个小小故障，都能危及整个系统。

集中式系统的第二个缺点是：主机系统价格高，投资大。成千上万条连线与计算机相