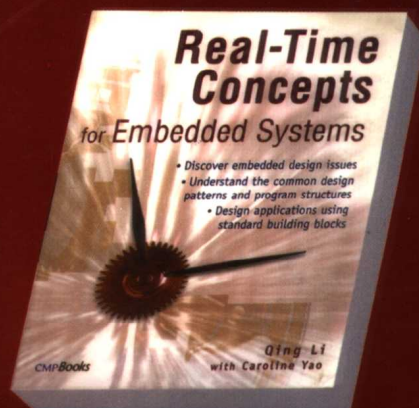


嵌入式系统译丛

[美] Qing Li 著 Caroline Yao 助编
王安生 译

嵌入式系统的 实时概念

Real-Time Concepts
for Embedded Systems



CMPBooks



北京航空航天大学出版社
<http://www.buaapress.com.cn>

嵌入式系统译丛

嵌入式系统的实时概念

Real - Time Concepts for Embedded Systems

[美] Qing Li 著 Caroline Yao 助编

王安生 译

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内 容 简 介

本书首先从真实世界入手介绍了实时和嵌入式系统的概念及未来的发展趋势、嵌入式系统开发的基础知识和初始化问题;接着,介绍了实时操作系统,详细论述了实时操作系统中的任务、信号灯、消息队列、其他内核对象以及RTOS服务。其中,深入讨论了异常和中断、计时器和计时器服务、I/O子系统以及内存管理问题,并给出了这些服务的典型操作和使用方式。本书依据由表及里的方法,讲述了分解实时嵌入式应用系统中并发模块的方法;从通信和同步角度论述了资源的使用以及普遍使用的实际设计模式;从理论角度论述了实时中死锁发生的原因和解决死锁的方案。本书对于国内软件企业中将要和正在从事实时嵌入式系统开发和管理的技术人员具有较高的参考价值;对于计算机工程与技术、电子、信息及通信等相关专业的师生,特别是软件学院有意从事实时嵌入式系统开发的学生,也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统的实时概念 / (美)李(Li, Q.)等著;
王安生译. —北京:北京航空航天大学出版社, 2004. 6

书名原文: Real - Time Concepts for Embedded Systems

ISBN 7 - 81077 - 360 - 7

I. 嵌… II. ①李…②王… III. 微型计算机… 系统设计 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 037914 号

本书英文版原名: Real - Time Concepts for Embedded Systems

Copyright © 2003 Wind River Systems, Inc., except where noted otherwise.

Published by CMP Books, CMP Media LLC, 4601 West 6th St, Suite B

Lawrence, KS 66049, USA All rights reserved.

本书中文简体字版由美国 CMP Books 公司授权北京航空航天大学出版社在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区)独家出版发行。版权所有。

北京市版权局著作权登记号: 图字: 01 - 2003 - 4691

嵌入式系统的实时概念

Real - Time Concepts for Embedded Systems

[美] Qing Li 著 Caroline Yao 助编

王安生 译

责任编辑 刘晓明

责任校对 戚爽

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82347024 传真:(010)82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:17.75 字数:398 千字

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7 - 81077 - 360 - 7 定价:32.00 元

To my wife , Huaying , and my daughter , Jane , for their love , understanding , and support .

*To my parents , Dr . Y . H . and Dr . N . H . Li , and my brother , Dr . Yang Li ,
for being the exemplification of academic excellence .*

“该书在实时嵌入式系统设计的理论和实践之间进行了非常良好的折衷。大多数实时系统方面的书要么集中在理论方面,而缺乏实践经验;要么集中在设计实例上,而缺乏理论背景。”

—Jun-Ichiro Itojun Hagino, Ph. D., Research Laboratory, Internet Initiative Japan Inc., IETF IPv6 Operations Working Group(v6ops)Co-Chair

“清晰、简洁、全面地介绍了嵌入式和渗透式计算。对于进入和窥视逐步增长的嵌入式市场的工程师或产品经理,应当要求他们读这本书。无论刚进入嵌入式领域的新手具有何种程度的要求或者希望探索的兴趣有多深入, Qing Li 都从基本概念入手,提供了特别的细节。Qing Li 介绍了嵌入式设计的概念,并且清晰地列举了非实时、软实时和硬实时需求上的差别;从部件结构(例如,调度器、对象和服务)入手介绍了 RTOS,对每个子部件进行了更详细的分析;从 I/O、异常处理和协议栈的视觉上,为嵌入式的新手以及中等水平开发者建立了全面的景观。”

—Jerry Krasner, Ph. D., MBA., Vice-President, Industry Analyst, and Consultant, Embedded Market Forecasters

“该书为实时嵌入式计算机系统提供了全面的、实践性的、最新的以及通俗易懂的内容。我坚信该书中解释的知识、理论和概念不仅对于设计实时系统的工程师和计算机科学与机器人工程系的学生,而且对于每个实时嵌入式系统的使用者,特别是通信网络的操作员、系统管理员和机器工程师都是相当重要的。”

—Dr. Shin Miyakawa, Senior Research Manager, IPv6 Group, Innovative IP Architecture Center, NTT Communications Corporation

译者序

十几年前,提起实时嵌入式软件系统,人们会认为只有在重要的国防或工业控制设备中才会使用。现在,实时嵌入式软件已深入到我们生活的每个角落,从航空、航天、国防、工业控制到家庭消费电子设备,包括我们的手机、MP3 播放器等,实时嵌入式软件已经是无处不在。实时嵌入式软件的开发已经成为专门的领域。

嵌入式软件系统的开发,要求开发者具有多种技术领域的知识,包括从底层的硬件、交叉编译技术、交叉调试技术、实时系统分析和实时操作系统原理,到多线程应用的设计。几乎所有的嵌入式系统,都具有实时性能的要求,其中许许多多的概念交织在一起。由于实时嵌入式软件的开发与习以为常的软件开发过程的巨大差异,使得许多具有良好软件开发经验的人员在嵌入式软件的开发方面感到为难。那些具有硬件知识而缺乏软件经验的工程师,或者开发过大量程序而缺乏硬件知识的工程师,或者具有单片机开发经验而缺乏实时系统概念的人员,或者软件项目的管理者们,对实时嵌入式软件开发存在许多疑惑。

市面上经常看见的书,要么是在实时系统方面或在面向对象开发理论性方面非常强,而在实践方面有所不足;要么是非常注意底层的软件和硬件的开发使用方法,而缺乏理论性的归纳和指导。对于企业界的开发人员或大学里的学生来讲,希望寻找到的能



将实践和理论密切结合的书。2003 年春(SARS 期间),通过 Wind River 中国区经理韩青先生,从作者手里得到了刚刚出版的这本书。与此同时,北京航空航天大学出版社的马广云博士等也希望出版一本能够在理论和实践方面很好结合的书。

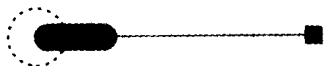
在这本书中,李庆及他的同行们将多年的开发经验和相关的理论进行了很好的总结。许多困惑的概念,在本书中得到了清晰的解释。本书对国内企业界的同行具有较高的参考价值;对计算机工程与技术、电子、信息及通信等相关专业的师生,特别是软件学院有意从事实时嵌入式系统开发的学生,是一本很好的参考书。

考虑到一些英文的名词术语在汉语中还没有以国家标准的形式发布,因此,译文中将必要的原文保留下来,便于读者参阅,也便于在校学生的学习。借此机会,希望能与国内的同行们建立广泛的联系。译文中的不足之处,请通过 Email(wangansheng@vip.sina.com)指正。

王安生

2003 年 11 月 26 日

于北京邮电大学软件学院



致中国读者

从 20 世纪 70 年代开始,嵌入式系统长期以来在工业、电信、航空及军事领域得到了广泛的运用。微处理器的运用和普及推动了编译程序、链接程序及调试程序的进步。嵌入式系统也跟着迅速地成长和更新。嵌入式系统在发展经历了巨大的演变:从汇编语言到 C 语言编程;从自用开发的操作系统到商用现成的嵌入式操作系统;从监控器和电路仿真器到单片调试电路以及其他不胜枚举的转变。

嵌入式系统的开发常常使生疏的程序员感觉摸不着门。早期的嵌入式系统研究人员也经历了各种艰难才获取了相关的信息。由于所需的信息在那时虽然存在,却分散在各种硬件手册、编译程序手册及电路板图册里,这样一来要收集确切的信息就十分困难。面对挑战却不知从何下手,程序员为此大伤脑筋。而软件程序员对硬件设计手册又通常是敬畏三分(其实不少从事嵌入式系统开发的人员都是硬件工程师,而非软件程序设计员),所以许多人是经过无数次跌跌撞撞才解开谜团,肃清谬误,走出编程和设计的重重圈套的。近来关于嵌入式系统的资料虽然较容易获得,但是对于一个才开始起步研发嵌入式系统的程序员来说,这些资料大都还不足以提供真正切实可行和通俗易懂的帮助。

我希望我的书能弥补这个不足。我把实用的资料以容易理解的方式给读者显现出来。也许这本书不可能回答读者所有的问题,但我希望它能使大家在阅读之后,可以对嵌入式系统增进



了解,从而能够结合实际提出相应的问题,并且朝着正确的方向寻找答案。这也是我从一开始计划写这本书时想努力达到的目标之一。

在为嵌入式系统设计开发应用软件的过程中,存在各种各样的挑战,比如在处理获取有局限条件的资源、并行运行的约束、运行先后次序、时间调度及任务分配方面,程序员都会遇到不少难题。尤其是许多嵌入式系统对实时性的要求非常高,因此增加了设计和编程的难度。另外,设计时的安全分析和任务调度分析也要做好,才能使整体系统正常运行。所以要设计好实时嵌入式系统实在是一项专门的科学和艺术。许多嵌入式系统程序员情愿避开实时性上的一些难题而在技术质量上妥协,就是因为对这门科学和艺术不够精专。

我在这本书里提出了许多嵌入式和实时性设计上特有的问题。我希望能引起大家对这类问题的注意,加强对项目设计和分析阶段重要性的认识。

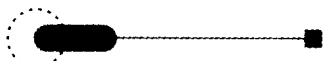
现在嵌入式系统在各个领域越来越普及,对这项技术的认识也进一步深入。随着全球互联网推动的电信设备的发展、电子产品消费市场的不断扩大、对汽车设计的安全性和节能性要求的提高、航空控制系统的精密复杂及军事应用技术的日新月异,嵌入式系统的发展前景十分广阔。巨大的应用消费市场迫切需要新一代的嵌入式系统产品,有的尖端产品甚至会先进到让人感觉像是在看科幻小说。从需求来看,优秀的嵌入式系统工程师现在仍很缺乏。

通过这本书,我也想和您分享自己的一些经验。希望我的书能助您一臂之力,帮您成功涉足嵌入式系统领域。欢迎您通过电子邮件(qingli@speakeasy.net)与我分享您相关的知识、经历及阅读心得。我衷心期待您的来信。

李 庆

2003 年 11 月 26 日

于美国硅谷



序

在我们生活的世界中,软件扮演着关键的角色。大多数关键软件不是运行在大系统和 PC 上;相反,它运行在我们日常所使用的基础设施和设备中。如果包含在汽车、电话、路由器和发电厂中的嵌入式软件崩溃,那么我们的交通工具、通信系统和能源系统将不能工作。

这种不可见的、嵌入式软件的设计对于我们是决定性的。特别是对于千变万化的世界,仍然缺乏优秀的而且能够提供有效的设计和实践的信息。毫无疑问,与传统程序相比,设计嵌入式软件的确有所不同,并且更加困难。时间和多个任务的相互作用必须实时地得到管理。看上去神秘的概念,如优先权倒置,当将那些设备放到膝盖上的时候,立刻变得非常具体。有效性——非常小的内存印记和运行在低费用硬件的能力,成为设计考虑的关键因素,因为它们直接影响到费用、电源使用、尺寸大小和电池的寿命。当然,就许多因素——公司和产品信誉、关键的基本功能,有时,甚至是对生命而言,可靠性是第一位的。

李先生做了令人惊异的工作,将这些相关的信息集合到一块。他展开了问题、判断和设计过程,并介绍了可使用的工具和方法。本书后面部分提供的应用开发、普遍的设计问题和解决方案,是非常有价值、有洞察力的实践经验。本书对于任何从事嵌入式设计项目的人都是有帮助的,尤其是对于那些具有软件开发



经验,但是还没有进行过实时和嵌入式软件开发的工程师特别有帮助;对于学术界,也是一本非常好的教科书或参考文献。

在我们周围到处渗透着的、不可见的软件的质量将决定当今创立的世界。这本书对这些软件的质量具有积极的意义,也是一本工程书架上的受欢迎的常备书。

Jerry Fiddler

Chairman and Co-Founder, Wind River



前 言

嵌入式系统无所不在,并且在现代日常生活中扮演着重要的角色。嵌入式系统也是多样化的,在消费类电子产品中,如数码相机、DVD播放器和打印机;在工业机器人中;在先进的航空航天器中,如导弹制导系统和飞行控制系统;在医疗设备中,如强心剂无节律监视器和强心剂心律调整器;在汽车设计中,如燃料加注系统和自动刹闸系统,到处可以找到嵌入式系统。嵌入式系统深深地改变了我们今天的生活方式,也将继续改变我们明天的生活方式。

嵌入式系统编程是一门特殊的学科,要求嵌入式系统的开发者具有多种技术领域的工作知识。这些领域覆盖从低层的硬件设备、编译技术和调试技术,到实时操作系统的内部工作和多线程应用设计。这些要求可以难倒新进入嵌入式世界的程序员,学习过程很长而且强度很大。这样,我感到有责任通过实践的讨论和演示,分享我的知识经验,使你跳过嵌入式系统项目的起始阶段。

有些书用更传统的方法,主要集中在控制基本硬件设备的低层的驱动程序和软件上。另一些书提供使用面向对象的方法和建模语言的高层抽象方法。然而,本书架起了嵌入式系统开发的高层抽象建模概念和低层的基本编程方面的桥梁。贯穿本书的讨论来自于多年商业嵌入式系统的设计和实现、从先前的错误中学到的经验、从他人处获得的才智以及学术研究的结果。这些因素聚在一起,形成了非常有用的且可以在实时嵌入式项目中实际应用的洞察力、指导和建议。

本书用详细的实例说明了实时嵌入式系统的关键概念,并提供了与设计问题和解决方案相关的工业化知识。本书提供了丰富的可立即用于嵌入式建



造的模块集合,以便加快你的开发工作和提高生产效率。

我希望当你开始着手开发时,《嵌入式系统的实时概念》一书能成为你的一本关键参考书。

如果你希望通过 E-mail 得到消息的更新,请发 E-mail 到:rtconcepts@news.cmp-books.com。如果对本书有建议、纠错或其他问题,请发 E-mail 到:qingli@speakeasy.net。

本书的读者

本书主要面向工作在嵌入式计算领域的高级到中级的软件开发者。

如果你是一个有经验的开发者而面临新的实时嵌入式系统的开发,你也可以发现本书中的设计方法是非常有用的;如果你是一个积极从事实时嵌入式系统软件的设计评审技术管理者,你可以参考本书,从而对设计和实现阶段有更好的了解;如果你是工程或者计算机科学的学生,本书也可以作为补充参考材料。

在使用本书前,起码应当是一种编程语言的高手,也应对软件开发过程有相当的了解。

致 谢

衷心感谢 CMP Books 的小组,特别是 Paul Temme, Michelle O'Neal, Marc Briand, Brandy Ernzen 和 Robert Ward。

表示对评审者 Jerry Krasner, Shin Miyakawa, Jun - Ichiro Itojun Hagino 和 Liliana Britvic 所做贡献的谢意。

感谢最初参加本项目的 Nauman Arshad。

同时感谢 Anne - Marie Eileraas, Salvatore LiRosi, Loren Shade 和 Wind River 公司的许多其他同事的支持。

最后,感谢我们的家庭成员 Huaying 和 Jane Lee, Maya 和 William Yao 对我的爱和支持。



目 录

第1章 引 论

1.1 现实生活中的嵌入式系统实例.....	2
1.1.1 家庭环境中的嵌入式系统.....	2
1.1.2 工作环境中的嵌入式系统.....	3
1.1.3 娱乐活动中的嵌入式系统.....	3
1.1.4 定义嵌入式系统.....	5
1.1.5 嵌入式处理器和应用意识.....	5
1.1.6 硬件和软件协同设计模型.....	7
1.1.7 交叉平台开发.....	7
1.1.8 软件存储和升级性.....	8
1.2 实时嵌入式系统.....	9
1.2.1 实时系统	10
1.2.2 实时系统的特性	12
1.2.3 硬和软实时系统	13
1.3 嵌入式系统的未来	15
1.4 记住的要点	15

第2章 开发嵌入式系统的基础

2.1 引 言	16
2.2 链接器和链接过程概貌	17
2.3 可执行和链接格式	20
2.4 可执行映像映射到目标机嵌入式系统	23

2.4.1 链接器命令文件	24
2.4.2 映射可执行映像	27
2.4.3 实践中的例子	28
2.5 记住的要点	30

第3章 嵌入式系统初始化

3.1 引 言	31
3.2 目标机系统工具和映像传输	32
3.2.1 嵌入式装载器	33
3.2.2 嵌入式监视器	34
3.2.3 目标机调试代理	35
3.3 目标机自举案况	35
3.3.1 数据用RAM从ROM执行	37
3.3.2 映像从ROM传输后从RAM上	39
3.3.3 从宿主机传输映像后从RAM上	40
3.4 目标机系统软件初始化顺序	42
3.4.1 硬件初始化	43
3.4.2 RTOS 初始化	44
3.4.3 应用软件初始化	45
3.5 片上调试	45



3.6 记住的要点	46
-----------------	----

第4章 实时操作系统介绍

4.1 引言	47
4.2 操作系统的简要历史	48
4.3 定义 RTOS	49
4.4 调度器	50
4.4.1 可调度实体	50
4.4.2 多任务	51
4.4.3 上下文切换	51
4.4.4 分发器	52
4.4.5 调度算法	52
4.5 对象	54
4.6 服务	54
4.7 RTOS 的关键特性	55
4.7.1 可靠性	55
4.7.2 可预测性	56
4.7.3 性能	56
4.7.4 紧凑性	56
4.7.5 可剪裁性	57
4.8 记住的要点	57

第5章 任务

5.1 引言	58
5.2 定义一个任务	59
5.3 任务状态和调度	60
5.3.1 就绪状态	62
5.3.2 运行状态	64
5.3.3 阻塞状态	64
5.4 典型的任务操作	65
5.4.1 任务创立和删除	65
5.4.2 任务调度	66
5.4.3 获得任务信息	68
5.5 典型的任务结构	68

5.5.1 运行到完成的任务	68
----------------------	----

5.5.2 无限循环任务	69
--------------------	----

5.6 同步、通信和并发	69
--------------------	----

5.7 记住的要点	70
-----------------	----

第6章 信号灯

6.1 引言	71
6.2 定义信号灯	71
6.2.1 二值信号灯	72
6.2.2 计数信号灯	73
6.2.3 互相排斥(互斥)信号灯	74
6.3 典型的信号灯操作	76
6.3.1 创立和删除信号灯	76
6.3.2 获取和释放信号灯	77
6.3.3 清除信号灯的任务等待列表	78
6.3.4 获取信号灯信息	78
6.4 典型的信号灯使用	79
6.4.1 等待和信号同步	79
6.4.2 多任务等待和信号同步	80
6.4.3 信用跟踪同步	81
6.4.4 单一共享资源访问同步	82
6.4.5 递归共享资源访问同步	84
6.4.6 多个共享资源访问同步	85
6.5 记住的要点	87

第7章 消息队列

7.1 引言	88
7.2 定义消息队列	89
7.3 消息队列状态	90
7.4 消息队列内容	91
7.5 消息队列存储	92
7.5.1 系统池	92
7.5.2 私有缓冲区	92

7.6 典型的消息队列操作	92	第9章 其他 RTOS 服务	
7.6.1 创立和删除消息队列	92	9.1 引 言	121
7.6.2 发送和接收消息	93	9.2 其他建造块	122
7.6.3 获得消息队列信息	96	9.2.1 TCP/IP 协议栈	123
7.7 典型的消息队列使用	96	9.2.2 文件系统部件	123
7.7.1 非互锁的单向数据通信	96	9.2.3 远程过程调用部件	124
7.7.2 互锁的单向数据通信	97	9.2.4 命令壳	125
7.7.3 互锁的双向数据通信	99	9.2.5 目标机调试代理器	126
7.7.4 广播通信	100	9.2.6 其他部件	126
7.8 记住的要点	101	9.3 部件配置	127
第8章 其他内核对象		9.4 记住的要点	128
8.1 引 言	102	第10章 异常和中断	
8.2 管 道	102	10.1 引 言	129
8.2.1 管道控制块	103	10.2 什么是异常和中断	130
8.2.2 管道状态	104	10.3 异常和中断的应用	131
8.2.3 命名和无名管道	105	10.3.1 内部错误和特殊条件的管理	131
8.2.4 典型的管道操作	105	10.3.2 硬件并发与服务请求管理	132
8.2.5 典型的管道使用	108	10.4 近距离看异常和中断	132
8.3 事件寄存器	108	10.4.1 可编程中断控制器和外部中断	132
8.3.1 事件寄存器控制块	109	10.4.2 一般异常的分类	134
8.3.2 典型的事件寄存器操作	110	10.4.3 一般异常的优先权	135
8.3.3 典型的事件寄存器使用	111	10.5 处理一般的异常	136
8.4 信 号	112	10.5.1 安装异常处理程序	137
8.4.1 信号控制块	113	10.5.2 保存处理器状态	137
8.4.2 典型的信号操作	114	10.5.3 装入和调用异常处理程序	139
8.4.3 典型的信号用法	115	10.5.4 嵌套异常和栈溢出	140
8.5 条件变量	116		
8.5.1 条件变量控制块	117		
8.5.2 典型的条件变量操作	118		
8.5.3 条件变量的典型使用	118		
8.6 记住的要点	120		



10.5.5 异常处理程序	142
10.6 虚假中断的特性	147
10.7 记住的要点	148

第 11 章 计时器和计时器服务

11.1 引 言	149
11.2 实时时钟与系统时钟	150
11.3 可编程间隔计时器	151
11.4 计时器中断服务例程	152
11.5 实现软计时器功能的模型	154
11.5.1 可能的处理延迟	156
11.5.2 实现考虑	157
11.6 时间车轮	158
11.6.1 议 题	160
11.6.2 分层的时间车轮	161
11.7 软计时器和与软计时器相关的操作	163
11.8 记住的要点	165

第 12 章 I/O 子系统

12.1 引 言	166
12.2 基本 I/O 概念	167
12.2.1 端口映射与内存映射 I/O 和 DMA	167
12.2.2 字符模式与块模式设备	170
12.3 I/O 子系统介绍	171
12.3.1 标准 I/O 函数	172
12.3.2 映射通用函数到驱动程序函数	173
12.3.3 设备与设备驱动程序的关联	175
12.4 记住的要点	176

第 13 章 内存管理

13.1 引 言	177
13.2 嵌入式系统中的动态内存分配	178
13.2.1 内存碎片和紧凑	178
13.2.2 malloc 和 free 的一个例子	180
13.2.3 快速发现空闲块	182
13.2.4 free 操作	183
13.3 嵌入式系统中固定尺寸的内存管理	185
13.4 阻塞与非阻塞的内存函数	186
13.5 硬件内存管理单元	188
13.6 记住的要点	188

第 14 章 用并发将应用模块化

14.1 引 言	189
14.2 由表及里分解应用的方法	190
14.3 标识并发的指导原则和建议	192
14.3.1 并发单元	192
14.3.2 伪与真并发执行	193
14.3.3 某些指导原则	194
14.4 可调度性分析和速率单调性分析	200
14.4.1 基本 RMA 可调度性测试	200
14.4.2 扩展的 RMA 可调度性测试	201
14.5 记住的要点	203

第 15 章 同步和通信

15.1 引 言	204
----------------	-----

