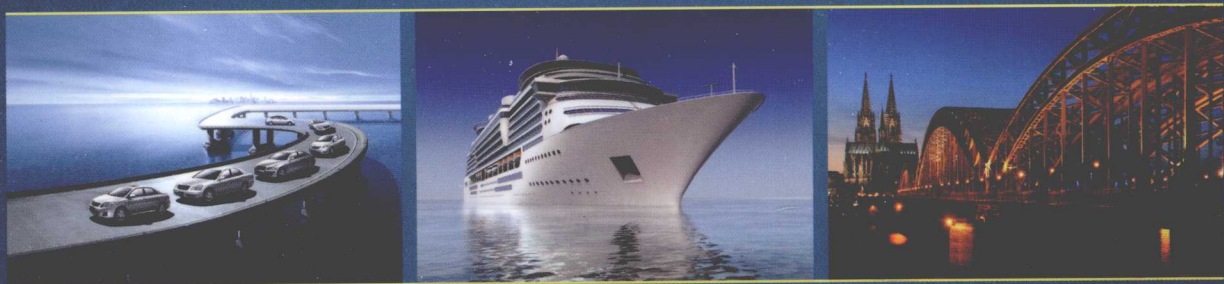


蔡建平 ◎ 编著

Practical Technology of
Embedded Software Testing

嵌入式软件测试
实用技术



- 第一本真正以嵌入式软件测试技术为核心内容的嵌入式软件测试书籍
- 作者多年学术研究、项目研发及专业咨询的成果和经验的提炼与总结
- 交叉开发、质量度量、测试验证、交叉调测、半实物及全数字仿真、虚拟仪器、虚拟样机、软硬件协同验证和FPGA测试
- 集各种嵌入式软件测试技术和工具应用于一体，理论与实践并重

清华大学出版社



嵌入式软件测试实用技术

蔡建平 编著

沈琦 谢会东 等编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年从事嵌入式软件测试研究、开发、咨询及培训经验的总结。全书共9章,分为3部分:第I部分(第1~4章)是对嵌入式软件开发技术的介绍,涉及嵌入式软件开发所用技术的一些基本概念和基础知识,如嵌入式应用的基础知识、嵌入式软件设计的各种方法、嵌入式应用开发的相关技术以及嵌入式软件开发的集成环境等;第II部分(第5、6章)是本书的重点,讲述了嵌入式软件测试的一些基本概念、重要技术和经典方法,包括嵌入式软件的静态测试、动态测试、测试过程、自动化测试、可靠性测试等嵌入式软件测试的基础知识,以及嵌入式软件测试仿真、虚拟仪器与虚拟样机应用、软硬件协同验证、FPGA测试等技术和方法;第III部分(第7~9章)是对嵌入式软件测试工具的全面介绍,覆盖了嵌入式软件测试各个方面的实际应用需求,书中的工具选型主要以嵌入式软件测试技术支撑、方法应用和在国内应用有其代表性为出发点,重点介绍了包括IBM Rational、Parasoft、Vector Software、FreeScale、领测科技、北航14系、NI、荷兰宇航和国家实验室(NLR)以及北京奥吉通等多家著名公司在内的嵌入式软件测试产品或工具,形成了一整套的嵌入式软件测试解决方案。

本书取材先进、设计新颖、内容翔实、知识面广、技术性强,特别具有实用性和指导性。本书覆盖了嵌入式软件测试技术的方方面面,介绍了各种各样的嵌入式软件测试工具,给出了大大小小的嵌入式软件测试案例,对读者从事嵌入式软件测试工作具有相当大的帮助作用。本书可作为高等院校高年级本科生及研究生的“嵌入式软件测试”课程的教材,同时也可作为嵌入式软件测试培训机构的培训用书或嵌入式软件测试人员的自学书籍。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式软件测试实用技术/蔡建平 编著;沈琦,谢会东 等编 —北京:清华大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-302-23231-5

I. 嵌… II. ①蔡… ②沈… ③谢… III. 软件—测试 IV. TP311.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127251 号

责任编辑:王 军 李维杰

装帧设计:康 博

责任校对:胡雁翎

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:30.25 字 数:716 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版 印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:68.00 元

序

嵌入式系统是先进的计算机技术、半导体技术和电子技术与应用领域业务相结合的产物。它把这些现代化技术带到了应用领域,在促进信息产业和传统产业的互动与融合,提高信息技术和信息服务对传统产业的改造,促进信息化带动工业化,使我国走上新型工业化道路的进程以及保障国家信息安全和经济安全、增强国防实力等方面都具有重要的战略意义。

嵌入式系统具有知识密集与技术密集、应用广泛以及灵活方便等优点,但同时嵌入式处理器又在功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等方面受到应用对象要求的制约。因此,嵌入式系统的硬件与软件都必须瞄准服务对象的业务目标量体裁衣、去除冗余,力争在有限面积的芯片上可靠地实现高效率运行,才能最终满足客户的要求,在技术与市场的竞争面前立于不败之地。

鉴于嵌入式系统的上述诸多特点,作为系统核心部分的软件,特别是在一些重要领域和关键领域中工作的软件必定在功能性、可靠性、效率、维护性等质量特性方面有着更为严格的要求。显然,为了达到这些质量要求,嵌入式软件的测试在其中承担了艰巨的任务。

嵌入式软件测试工作涉及嵌入式系统本身以及软件测试两方面的知识,包含了大量的专业性很强的理论和实践技术,在一本书里进行全面、系统地阐述绝非易事。北京工业大学软件学院的蔡建平教授编著的软件测试丛书就此难题做了有益而成功的尝试。已出版的《软件测试大学教程》和《软件测试实验指导教程》两书中已对软件测试技术和常用的方法进行了充分的论述或讲解。在此基础上,本书针对嵌入式系统应用的技术特点,对嵌入式软件测试做了系统而全面的论述。

蔡建平教授长期以来从事国防软件工程的实际工作,并且在软件测试及软件质量保证等方面开展了研究和教学工作。在这些工作中,他不仅积累了丰富的经验,也收集和整理了大量的有益资料,从而为本书的编写创造了良好的条件。本书在讲述嵌入式软件的交叉开发、质量度量及测试验证等基本概念、技术、方法和过程的基础上,特别针对嵌入式软件测试的一些特殊需求介绍了交叉调测、半实物及全数字仿真、虚拟仪器、虚拟样机、软硬件协同验证和 FPGA 测试等重要技术,同时对国内主流的嵌入式软件测试工具分门别类地进行介绍和应用举例,可以说这是一本集各种嵌入式软件测试技术和工具应用于一体的嵌入式软件测试专业书籍,有助于希望或已经从事嵌入式软件测试工作的读者学习和参考。

清华大学教授 郑人杰
2010年3月1日

前言

总算透了一口气，终于完稿了。压了我四年之久的担子，终于要摆脱掉了。尽管在过去的一年里完成了两个副产品——《软件测试大学教程》、《软件测试实验指导教程》，但与之相比，本书确确实实花费了我太多的心血和精力。远的不说，光本书编写团队就变更了几拨人。当然，本书是否受读者欢迎，是否令读者满意，我心里仍是忐忑不安。

由于嵌入式软件测试专业性太强、技术内容太多、知识体系太繁杂、基础条件太薄弱、从业人员太少等原因，造成了目前国内这一领域还处于萌芽和起步阶段，更不用说出现一本有关嵌入式软件测试方面的权威书籍。这是因为如果作者没有在这个领域里摸爬滚打多年，积累了很丰富的经验，有着很深刻的体会，具备很强的技术背景(如软硬件技术、嵌入式软件开发技术、嵌入式软件工程技术、软件测试技术以及嵌入式系统仿真技术等)，只是想当然地闭门造书或攒书，那么就会造成书的质量太差或文不对题等问题，最终贻害广大读者。

尽管本书因前两本教材对软件测试的基本原理、方法和技术进行了全面的介绍，而将主要篇幅放在了对嵌入式软件测试技术的全面论述上，但最终本书还是一本抛砖引玉的嵌入式软件测试专业技术书籍。书中涵盖了大量的技术内容和技术信息。限于篇幅、专业背景和知识水平，很难对它们非常详细地进行论述。但是这些技术如果深入地学习和研究下去，可以说是一个很好的学术研究项目或技术攻关课题。比如说我国大飞机研制项目中的机载控制软件，选择什么样的开发语言、开发环境、开发规范和开发过程，如何保证最终的机载控制软件的质量和可靠性，如何借鉴国际航空 DO-178B 标准，如何建立自动化测试环境，如何进行仿真验证和测试等都是要进行大规模投入的工程项目。

事实上，撰写本书的想法来源于 6 年前从事国防工业的嵌入式软件工程及软件测试的咨询和技术支持工作。当时深感国内缺乏一本真正的嵌入式软件测试专业书籍，供国防工业领域中从事嵌入式软件开发和测试的人员学习和参考。这样，我就有了编写嵌入式软件测试书籍的计划，也与有关出版社签订了编写协议，也组织起编写队伍，也收集了大量的资料，也起草了部分章节，但最终因该书的技术性太强，内容太多，编写人员素质不够，加之工作繁忙，无法按期完成编写任务而最终放弃。为此，我在这里向这些出版社表示歉意。

本书撰写的再一次启动并最终完稿首先要感谢学校质量工程建设任务的安排，作为工作我没有后退之路，必须完成；同时要感谢清华大学出版社对我编写本书过程中发生的一些变化所给予的理解和通融。

本书的完成得益于许多教师、学生的积极参与，如早期的何坚、王毅、涂良辉等。另外，北京奥吉通科技有公司总裁郑琪先生也为本书提供了一些素材。本书完全是由我主笔并进行内容设计和组织的，书中大部分的内容是由我撰写，全书也是由我审阅、修改和定稿的。书中部分内容是由沈琦老师和谢会东同学完成的，如第Ⅰ部分的部分章节内容是由沈琦老师负责资料收集、起草和编写的，第Ⅱ部分的部分章节是由谢会东同学进行资料收集和整理的，王以山和纪洪波也参与了第Ⅰ部分的资料收集和整理。本书很多内容是对学术期刊、学位论文以及互联网进行取材、改编的结果。读者可以从参考文献中发现：为了完成本书，我们阅读、参考、整理和引用了大量的文献。因为只有这样，才能将嵌入式软件测试的最新技术、最好的工具和最佳解决方案反映在书中。但我在这里要表示一点遗憾，很多网上资料由于转载或引用频繁找不到原创处，在参考文献中无法准确标注。最后，我要感谢我的家人，本书的撰写全部是利用寒暑假、节假日、周末和晚上的时间，没有家人的支持和照顾，本书也是很难完成的。

本书的完成，是学院开展的教育部及北京市软件工程特色专业建设及国家人才培养模式创新实验区建设的一项重要成果，也是学校质量工程建设的一项重要成果。目前国内关于嵌入式软件测试方面的书不多，仅有的几本也是翻译的、供培训用的，也有打着嵌入式软件测试教材的招牌、实际上讲的却是一般软件测试的内容，所反映的嵌入式软件测试技术内容很少。

本书是在本人长达二十多年国防软件工程、软件测试、软件质量保证及嵌入式应用开发与测试的科研经验及教学经验的成果基础上进行总结的，参考了当前国内外嵌入式软件测试技术、方法和实际工程的经验与成果。尽管如此，由于嵌入式软件测试技术性太强，覆盖面太大，应用周期太长，涉及领域太多，测试方法和技术太繁杂，加之时间紧、水平有限，一定有许多不周到、不准确或存在错误之处，恳请读者提出批评和建议，并争取再版时修正。

北京工业大学软件学院 蔡建平

2010年2月28日

作者简介



蔡建平，教授，北京工业大学软件学院院长助理、软件与网络工程系主任。在原总装备部某研究所工作十余年，一直从事该所负责的全军军用共性软件系统项目的论证和研究，并在其中发挥重要作用，得到有关领导和专家的认可和好评。获军队科技进步一等奖、二等奖、三等奖多项；发表各类学术论文 30 多篇，与他人合作著书一部。

在某公司任技术总监期间，除负责国防有关单位的软件工程、软件质量保证、软件测试以及嵌入式开发的技术咨询、提供解决方案和技术支撑外，还主持开发了一系列软件测试工具，并成功用于国防软件的测试。

2005 年 9 月在北京工业大学软件学院任职教授以来，除了多年讲授软件测试课程和多次对外开展嵌入式软件测试技术培训外，在学院的学科建设、专业建设，如实验室建设、实践教学改革与创新、数字艺术方向和数字媒体技术专业建设、“211 工程”建设、教育部和北京市特色专业建设，以及科研基地——科技创新平台建设等方面做了大量的工作，取得了突破性成果，获国家教学优秀成果二等奖一项(排名第三)。

目 录

第 I 部分 嵌入式软件开发技术

第 1 章 嵌入式应用基础	3
1.1 嵌入式系统的特点与分类	3
1.1.1 嵌入式系统的定义	3
1.1.2 嵌入式系统的特点	4
1.1.3 嵌入式系统的分类	5
1.2 嵌入式系统的体系结构	5
1.2.1 嵌入式处理器	6
1.2.2 嵌入式外围设备	6
1.2.3 嵌入式应用软件	7
1.3 嵌入式操作系统	7
1.3.1 应用与发展概况	8
1.3.2 实时理论	10
1.3.3 主流嵌入式操作系统举例	12
1.4 相关的硬件技术	17
1.4.1 EDA 设计技术	17
1.4.2 嵌入式 DSP 处理器	18
1.4.3 ARM	19
1.4.4 SoC	20
1.4.5 SoPC	20
1.4.6 FPGA	21
1.5 应用领域与发展趋势	22
习题与思考题	23
第 2 章 嵌入式软件设计方法	24
2.1 软件设计技术	24
2.2 实时 UML 设计	29
2.2.1 UML 概述	29

2.2.2 UML 的实时扩展	42
2.2.3 使用 Rational Rose RT	45
习题与思考题	52
第 3 章 嵌入式应用开发支持	53
3.1 嵌入式软件编程语言	53
3.1.1 实时嵌入式高级编程语言——Ada	54
3.1.2 嵌入式 C++ 语言——EC++	60
3.2 嵌入式应用开发基本支撑	61
3.2.1 实时编程及最小编程环境	61
3.2.2 板级支持包 BSP	61
3.2.3 实时内核和实时操作系统	62
3.2.4 实时数据库	63
3.2.5 嵌入式实时中间件	65
3.2.6 嵌入式 GUI	66
3.3 实时嵌入式软件应用模式	69
3.3.1 运行时系统结构	70
3.3.2 基于裸板系统与带操作系统的 应用模式	71
3.4 嵌入式软件开发过程	73
3.4.1 开发流程	73
3.4.2 嵌入式软件的交叉开发	73
3.5 嵌入式软件运行调试方法	76
3.5.1 “crash and burn” 的运行调试 方法	76
3.5.2 软件模拟的运行调试方法	77
3.5.3 目标机监控的运行调试方式	78
3.5.4 在线仿真的运行调试方式	80
习题与思考题	82

第4章 嵌入式软件开发环境	83
4.1 嵌入式软件集成开发环境.....	83
4.2 集成开发环境实例.....	85
4.2.1 基于 VxWorks 的 Tornado/Workbench.....	86
4.2.2 DDC-I 的 SCORE.....	108
4.2.3 Windows CE Platform Builder.....	110
4.2.4 Eclipse 平台.....	116
习题与思考题.....	119

第II部分 嵌入式软件测试技术

第5章 嵌入式软件测试基础	123
5.1 嵌入式软件静态测试.....	123
5.1.1 MISRA C 编程规范.....	124
5.1.2 嵌入式软件质量度量.....	139
5.1.3 嵌入式软件错误检测.....	153
5.1.4 静态测试.....	157
5.2 嵌入式软件动态测试.....	162
5.2.1 DO-178B 标准.....	164
5.2.2 程序插桩技术.....	174
5.2.3 嵌入式软件“白盒”测试.....	181
5.2.4 嵌入式软件单元测试.....	188
5.2.5 嵌入式软件“黑盒”测试.....	192
5.2.6 嵌入式软件“灰盒”测试.....	200
5.2.7 嵌入式软件运行时错误检测.....	203
5.3 嵌入式软件测试过程.....	207
5.3.1 软件测试过程模型.....	207
5.3.2 嵌入式软件结构化测试方法 ——TEmb.....	216
5.4 嵌入式软件测试自动化.....	220
5.4.1 嵌入式软件测试自动化过程 模型.....	221
5.4.2 嵌入式软件测试自动化工作 原理.....	222
5.4.3 嵌入式软件测试自动化框架.....	224
5.5 嵌入式软件可靠性测试.....	230

5.5.1 嵌入式软件可靠性的内涵.....	230
5.5.2 嵌入式软件可靠性测试方法.....	233
习题与思考题.....	237

第6章 嵌入式软件测试技术与方法... 239

6.1 全实物、半实物、全数字仿真 测试.....	240
6.1.1 各种仿真测试概念.....	240
6.1.2 基于仿真环境的测试策略.....	247
6.1.3 基于交叉调试的测试策略.....	250
6.2 基于虚拟仪器的嵌入式软件 测试.....	252
6.2.1 仪器仪表与虚拟仪器的概念.....	253
6.2.2 虚拟仪器技术在测试中的 应用.....	270
6.3 基于虚拟样机的嵌入式系统 仿真测试.....	274
6.3.1 虚拟样机技术的概念.....	274
6.3.2 虚拟样机及虚拟测试.....	276
6.4 嵌入式软硬件协同仿真验证与 测试.....	278
6.4.1 软硬件协同仿真.....	278
6.4.2 软硬件协同设计.....	279
6.4.3 软硬件协同仿真验证.....	284
6.5 基于 FPGA 的嵌入式系统 测试.....	293
6.5.1 FPGA 芯片介绍.....	293
6.5.2 FPGA 测试基础.....	295
6.5.3 FPGA 的“黑盒”测试.....	301
6.5.4 FPGA 的逻辑资源测试.....	303
6.5.5 FPGA 的互连资源测试.....	305
习题与思考题.....	306

第III部分 嵌入式软件测试常用工具

第7章 嵌入式软件静态分析工具	309
7.1 代码质量分析工具——Logiscope RuleCheck/Audit.....	309

7.1.1	软件质量分析工具——Audit	310
7.1.2	代码规范性检测工具 ——RuleChecker	317
7.2	代码缺陷分析工具	318
7.2.1	Mathworks PolySpace	319
7.2.2	Parasoft Insure++	323
7.2.3	IBM Rational Purify	335
	习题与思考题	336
第 8 章	嵌入式软件动态测试工具	337
8.1	嵌入式软件单元测试工具	337
8.1.1	Vector Software 公司的 VectorCAST	338
8.1.2	ParaSoft 公司的 C++test	345
8.2	嵌入式软件“白盒”测试工具	350
8.2.1	嵌入式软件测试与分析工具 CodeTEST	350
8.2.2	领测科技的“白盒”测试工具 ——VcTester	361
8.3	嵌入式软件“黑盒”测试工具	369
8.3.1	通用嵌入式系统测试环境	369
8.3.2	系统级自动测试设备 ADS-2	373
8.3.3	嵌入式系统实时仿真系统 ——dSPACE	376
8.4	嵌入式软件“灰盒”测试工具	380
8.4.1	荷兰 CHESSE Engineering 公司的 SHAM	380
8.4.2	德国 Lauterbach 公司的 TRACE32	385

8.5	全数字仿真测试工具	388
8.5.1	比利时 SPACEBEL 公司的 ERC- 32/1750 Target Simulator	389
8.5.2	北京奥吉通的 CRESTS 系列 产品	390
8.6	嵌入式应用仿真工具	408
8.6.1	NI 公司的 LabVIEW 虚拟 仪器	408
8.6.2	嵌入式仿真平台构造工具 ——EuroSim	414
8.6.3	仿真工作流程设计工具 ——SPINEware	423
	习题与思考题	428
第 9 章	嵌入式软件综合测试工具	
	——RTRT	429
9.1	RTRT 的测试过程及组件架构	430
9.1.1	测试过程	430
9.1.2	组件架构	431
9.2	RTRT 功能	433
9.2.1	RTRT 功能概述	433
9.2.2	RTRT 功能详述	433
9.3	RTRT 应用举例	452
9.3.1	RTRT 搭建单元测试环境的 基本过程	452
9.3.2	函数 code_int(int x, char *buffer) 的测试过程	454
	习题与思考题	463
	参考文献	465

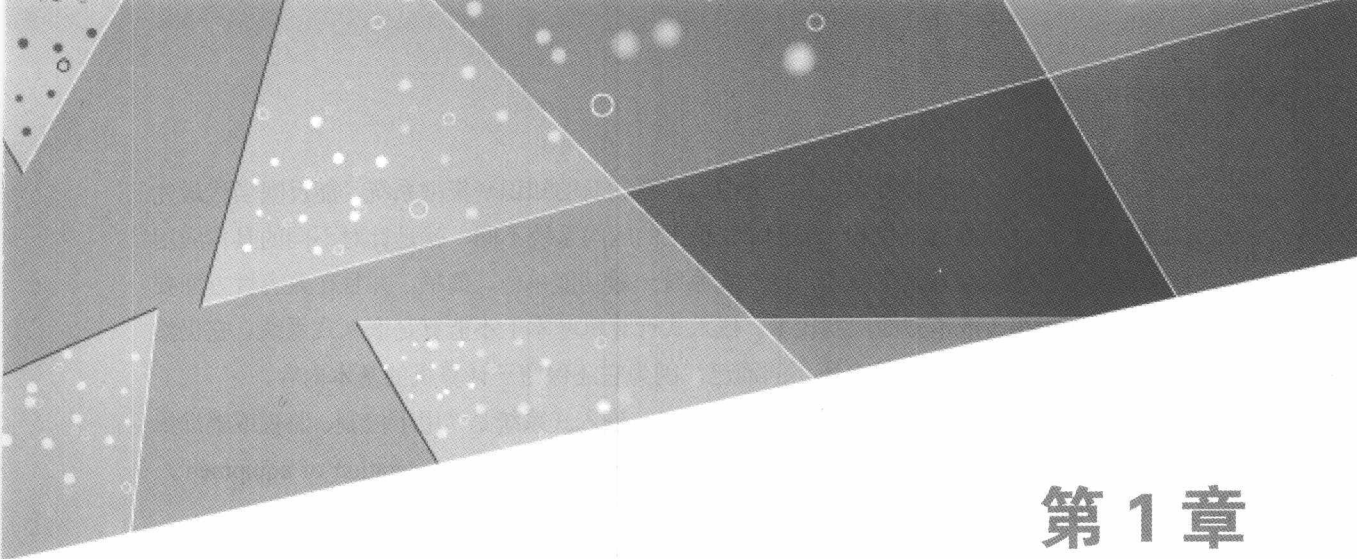
第1部分

嵌入式软件开发技术

在嵌入式领域，目标应用系统日趋复杂，而由于竞争要求产品快速上市，开发技术日新月异，同时硬件发展日益稳定，但软件故障却日益突出，软件的重要性逐渐引起人们的重视，越来越多的人认识到嵌入式系统的测试势在必行。

提到嵌入式软件测试，首先必须了解嵌入式系统的自身特点及其他的应用特点，如实时性(Real-Timing)，内存不大，I/O通道少。开发工具昂贵并且与硬件紧密相关，CPU种类繁多，可靠性、安全性要求较高，等等。由于这些特点，导致嵌入式软件开发所用到的方法和技术与一般商用软件相比有很大的差别和不同，而这些差别和不同又导致了嵌入式软件测试所用到的测试策略、方法和技术与一般的应用软件测试有很大的不同，可以说嵌入式软件是各类软件中最难测试的一种。

正因为如此，我们必须花较大的篇幅对嵌入式软件开发方法和技术做详细介绍，从而为后面的嵌入式软件测试的内容讲解作相关铺垫。



第 1 章

嵌入式应用基础

随着数字信息技术和网络技术的高速发展，我们已经进入后 PC 时代。所谓后 PC 时代是指：计算机无所不在，它渗透到我们工作和生活的方方面面。后 PC 时代的绝大多数计算机是以非计算机的电子设备形式出现的。这些设备的核心部分都有计算机，但大多是以嵌入式系统的形式存在，而不是以整机的形式出现。我们能够想象有人可能从来没有接触过计算机，但却无法想象他从来没有接触过嵌入式系统。因为嵌入式系统无处不在，从家庭的洗衣机、电冰箱、自行车、小汽车，到办公室里的远程会议系统等，这些都属于可以使用嵌入式技术进行开发和改造的产品。

嵌入式系统是计算机的一种应用形式，通常指嵌入在宿主设备中的微处理机系统。在嵌入式系统中，操作系统和应用软件常被集成于计算机硬件系统之中，使系统的应用软件与硬件一体化。这样，嵌入式系统的硬件与软件需要高效率地协同设计，以做到量体裁衣、去除冗余，在同样的系统配置上实现更高的性能。

1.1 嵌入式系统的特点与分类

1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统(Embedded System, ES)是计算机技术、通信技术、半导体技术、微电子技术、语音图像数据传输技术，甚至传感器等先进技术和具体应用对象相结合后的更新换代产品。因

此它往往是技术密集、投资强度大、高度分散、不断创新的知识密集型系统，能反映当代最先进的技术水平。嵌入式系统不仅和一般的 PC 机上的应用系统不同，就是针对不同的具体应用而设计的嵌入式系统之间差别也很大。嵌入式系统一般功能单一、简单，并且在兼容性方面要求不高，但是在大小、成本方面限制较多。嵌入式计算机基本上不能算是嵌入式系统。它仍然属计算机一类，不过是工作条件有所不同而已，因为它还保留了计算机的基本内容。

根据 IEEE(国际电气和电子工程师协会)的定义：嵌入式系统是“用于控制、监视或辅助操作机器和设备的装置”(devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。

可以看出，此定义是从应用角度考虑的，嵌入式系统是软件和硬件的综合体，还可以涵盖机电等附属装置。

嵌入式系统还可以定义为“以应用为中心、以计算机技术为基础、软件硬件可裁剪、功能、可靠性、成本、体积、功耗要求严格的专用计算机系统。”

1.1.2 嵌入式系统的特点

1. 系统内核小

由于嵌入式系统一般都是应用于小型电子装置，系统资源相对有限，所以内核较之传统的操作系统要小得多。比如 ENEA 公司的 OSE 分布式系统，内核只有 5KB，而 Windows 的内核则要大得多。

2. 专用性强

嵌入式系统的专用性很强，通常是面向用户、面向产品、面向特定应用的。其中软件系统和硬件结合非常紧密，一般要针对硬件进行系统的移植。嵌入式系统中的 CPU 与通用 CPU 的最大不同就是，前者大多工作在为特定用户群设计的系统中。通常，嵌入式系统 CPU 都具有低功耗、体积小、集成度高等特点，能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部，从而有利于整个系统设计趋于小型化。在对嵌入式系统的硬件和软件进行设计时必须重视效率，去除冗余，针对用户的具体需求，对系统进行合理配置，才能达到理想性能。与此同时，系统设计还受市场供求关系的影响。嵌入式处理器的发展也体现出稳定性，一个体系一般要存在 8~10 年的时间。一个体系结构及相关的片上外设、开发工具、库函数、嵌入式应用产品结合在一起，可以构成一套复杂的知识系统。

3. 系统精简

嵌入式系统一般没有系统软件和应用软件的明显区分，不要求其功能设计及实现上过于复杂，这样既有利于控制系统成本，同时也有利于实现系统安全。

4. 高实时性操作系统

为了提高执行速度和系统可靠性,嵌入式系统中的软件一般都固化在存储器芯片或单片机中,而不是存储于磁盘等载体中。由于嵌入式系统的运算速度和存储容量仍然存在一定程度的限制,并且还由于大部分嵌入式系统都必须具有较高的实时性,因此对程序的质量,特别是可靠性,有着较高的要求。

5. 嵌入式软件开发走向标准化

嵌入式系统的应用程序可以直接在没有操作系统的芯片上运行。通用计算机的开发人员通常是计算机科学或计算机工程方面的专业人士,而嵌入式系统开发人员却往往是各个应用领域中的专家,这就要求嵌入式系统支持的开发工具走向标准化、易学、易用、可靠、高效。

1.1.3 嵌入式系统的分类

因为嵌入式系统由硬件和软件两大部分组成,所以其分类也可以从硬件和软件两方面进行划分。

按表现形式(硬件范畴)分类,嵌入式系统分为芯片级嵌入(含程序或算法的处理器)、模块级嵌入(系统中的某个核心模块)和系统级嵌入 SoC(System on Chip)。

按实时性要求(软件范畴)分类,嵌入式系统分为非实时系统(如 PDA, Personal Digital Assistant, 个人数字助理)、软实时系统(如消费类产品)、硬实时系统(如雷达等工业和军工系统)。其中,“硬实时”是指系统对系统响应时间有严格的要求,如果系统响应时间不能满足,则会引起系统崩溃或发生致命错误;“软实时”是指系统对系统响应时间有要求,但是如果系统响应时间不能满足的话,不会导致系统出现致命的错误或崩溃。

此外,还有其他的分类方法,如:按嵌入式系统软件的复杂程度分类,嵌入式系统分为轮询、有限状态机、前后台、单处理器多任务和多处理器多任务等分类系统。

按应用分类,嵌入式系统分为信息家电类、移动终端类、通信类、汽车电子类和工业控制类等。

1.2 嵌入式系统的体系结构

嵌入式系统是软硬件于一体的可独立工作的“器件”,主要包括嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及应用软件系统 4 个部分。根据应用方式的不同,可将嵌入式系统分为知识产权(Intellectual Property, IP)级、芯片级和模块级 3 种不同的体系结构形式,它们均采用“量体裁衣”的方式,把所需的功能或模块嵌入到各种应用系统或 IT 产品中。一般而言,整个嵌入式系统的体系结构可以分成 4 个部分:嵌入式处理器、嵌入式外围设备、嵌入式操作系统和嵌入式应用软件,如图 1-1 所示。

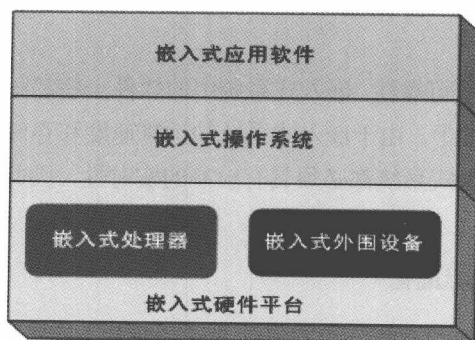


图 1-1 嵌入式系统的组成

1.2.1 嵌入式处理器

嵌入式系统的核心是各种类型的嵌入式处理器，嵌入式处理器与通用处理器最大的不同在于，嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中，它将通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成到芯片内部，从而有利于嵌入式系统在设计时趋于小型化，同时还具有很高的效率和可靠性。

嵌入式处理器的体系结构经历了从 CISC(复杂指令集)至 RISC(精简指令集)和 Compact RISC 的转变，位数则由 4 位、8 位、16 位、32 位逐步发展到 64 位。目前常用的嵌入式处理器可分为低端的嵌入式微控制器(Micro Controller Unit, MCU)、中高端的嵌入式微处理器(Embedded Micro Processor Unit, EMPU)、用于计算机通信领域的嵌入式 DSP 处理器(Embedded Digital Signal Processor, EDSP)和高度集成的嵌入式片上系统(System on Chip, SoC)。

目前几乎所有半导体制造商都生产嵌入式处理器，并且越来越多的公司开始拥有自主的处理器设计部门，据不完全统计，全世界嵌入式处理器已经超过 1 000 种，流行的体系结构有 30 多个系列，其中以 ARM、PowerPC、MC 68000、MIPS 和 DSP 等使用得最为广泛。

1.2.2 嵌入式外围设备

在嵌入式系统的硬件系统中，除了中心控制部件(MCU、DSP、EMPU、SOC)以外，用于完成存储、通信、调试、显示等辅助功能的其他部件，事实上都可以算作嵌入式外围设备。目前常用的嵌入式外围设备按功能可以分为存储设备、通信设备和显示设备三类。

存储设备主要用于各类数据的存储，常用的有静态随机存储器(RAM、SRAM)、动态随机存储器(DRAM)和只读存储器(ROM、EPROM、EEPROM、FLASH)三种，其中 FLASH(快闪)存储器凭借其可擦写次数多、存储速度快、存储容量大、价格便宜等优点，在嵌入式领域得到了广泛应用。

目前存在的绝大多数通信设备都可以直接在嵌入式系统中应用，包括 RS-232(串行通信接口)、SPI(串行外围设备接口)、IrDA(红外线接口)、I2C(现场总线)、USB(通用串行总线接口)、Ethernet(以太网接口)等。

由于嵌入式应用场合的特殊性，通常使用的是阴极射线管(CRT)、液晶显示器(LCD)和触

模板(Touch Panel)等外围显示设备。

1.2.3 嵌入式应用软件

硬件是支撑,软件是灵魂,几乎所有的嵌入式产品中都需要嵌入式软件来提供灵活多样、并且是应用特制的功能。

嵌入式应用软件是针对特定应用领域,基于某一固定的硬件平台,用来达到用户预期目标的计算机软件,由于用户任务可能有时间和精度上的要求,因此有些嵌入式应用软件需要特定嵌入式操作系统的支持。嵌入式应用软件和普通应用软件有一定的区别,它不仅要求在准确性、安全性和稳定性等方面能够满足实际应用的需要,而且还要尽可能地进行优化,以减少对系统资源的消耗,降低硬件成本。

由于嵌入式系统应用广泛,嵌入式软件在整个软件产业中占据了重要地位,并受到世界各国的广泛关注,如今它已成为信息产业中最为耀眼的“明星”之一。嵌入式软件产业发展迅猛,已成为软件体系的重要组成部分。嵌入式系统产品正不断渗透到各个行业,嵌入式软件作为包含在这些硬件产品中的特殊软件形态,其产业增幅不断加大,而且在整个软件产业的比重日趋提高。在中国,嵌入式软件产业一直保持高速增长态势,2008年中国嵌入式软件市场规模达到了2496.2亿元人民币。到2011年,其规模有望突破4650亿元人民币。

汽车、通信、信息电器、医疗、军事等行业新一轮的巨大的智能化装备需求拉动了嵌入式软件及系统的发展。同传统的通用计算机系统不同,嵌入式系统面向特定应用领域,根据应用需求定制开发,并随着智能化产品的普遍需求渗透到各行各业。随着硬件技术的不断革新,硬件平台的处理能力不断增强,硬件成本不断下降,嵌入式软件已成为产品数字化改造、智能化增值的关键性、带动性技术。

1.3 嵌入式操作系统

为了使嵌入式系统的开发更加方便和快捷,需要有专门负责管理存储器分配、中断处理、任务调度等功能的软件模块,这就是嵌入式操作系统。嵌入式操作系统是支持嵌入式系统应用的操作系统软件,它是嵌入式系统极为重要的组成部分,通常包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议、图形界面、标准化浏览器等。与通用操作系统相比较,嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的依赖性、软件固态化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。嵌入式操作系统的出现,大大提高了嵌入式系统开发的效率,在嵌入式操作系统上开发嵌入式系统将减少系统开发的工作量,增强嵌入式应用软件的可移植性,使嵌入式系统的开发方法更具科学性。

嵌入式操作系统根据应用场合可以分为两大类:一类是面向消费类电子产品的非实时系统,这类设备包括个人数字助理(PDA),移动电话,机顶盒(STB)等,如Symbian、Windows CE等;另一类则是面向控制、通信、医疗等领域的实时操作系统,如WindRiver公司的VxWorks、