

嵌入式系统系列教材

嵌入式软件测试

康一梅 张永革 李志军 胡江 吴伟 著



机械工业出版社
China Machine Press

嵌入式系统系列教材

嵌入式软件测试

康一梅 张永革 李志军 胡江 吴伟 著

TP311.5
K6-1



机械工业出版社
China Machine Press

本书重点讨论嵌入式软件测试的相关知识。主要包括：嵌入式软件测试的相关基本概念、嵌入式软件测试的生命周期、嵌入式软件测试的相关技术、嵌入式软件的测试过程、嵌入式软件测试环境的搭建以及常用的嵌入式软件自动化测试工具及管理工具。

本书从普通的软件测试入手来介绍嵌入式软件测试，并辅以实例说明嵌入式软件测试技术的具体应用。本书适合作为高等院校计算机、嵌入式及相关专业的本科生及研究生的教材，也可供广大嵌入式软件开发、维护领域的技术人员参考。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式软件测试/康一梅等著. —北京：机械工业出版社，2008.6
（嵌入式系统系列教材）

ISBN 978-7-111-23995-6

I. 嵌… II. 康… III. 软件—测试 IV. TP311.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 056362 号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：朱 劼 迟振春

北京市慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张

标准书号：ISBN 978-7-111-23995-6

定价：28.00 元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换
本社购书热线：（010）68326294

丛 书 序

二十世纪，以量子物理、信息科学、计算数学、控制科学等为基础的信息技术的迅速发展，对全世界的政治、经济、军事、科研、教育等领域都产生了巨大和深远的影响。其中，离散数字式计算、控制装置和各种通用工具性计算机商品是其杰出代表。随着技术的不断进步，应用领域的日益广泛，以及实际需求的不断扩大，以体积小、功耗低、可按需定制等特点为主的嵌入式系统被应用到越来越多的领域。从数控机床到航空航天，从汽车电子到智能家电，随处可见嵌入式系统的身影，嵌入式系统正在不断起到名符其实的嵌入作用。

在信息科学技术领域，我国和发达国家相比还存在着一定的差距，而嵌入式产品和技术广泛应用，为我们提供了一个“嵌入”发展的机会。从嵌入式技术的发展趋势来看，32位、64位微处理器的出现、嵌入式操作系统的广泛应用、硬件技术的不断进步……极大地推动着嵌入式系统朝着运行速度更快、功能更强大、开发方式更便利快捷等方向不断发展。同时，我国庞大的消费人群也为嵌入式技术的应用提供了广阔的市场空间；汽车、通信、智能家电等领域竞争的不断加剧，极大地激发了嵌入式技术的研发和创新能力；而传统产业的转型和提升也对嵌入式领域提出了更高的要求。因此，我国嵌入式系统的发展应着眼于科学技术并应用多层次并进的方针。

一切事业的发展除了其推动的必然因素和机遇外，人才因素是重要的基础条件，对高等学校而言，培养人才更是其本质工作，因此嵌入式领域人才的培养尤为重要和紧迫。作为肩负人才培养重任的国内各高等院校已经充分的认识到，在完善已有课程体系及授课内容的同时，还要时刻关注科学技术和相关产业的发展趋势，充分利用优秀的教学资源，力争培养出更多中华复兴所需要的优秀人才。正是在这种思想的指导下，北京航空航天大学软件学院结合实际教学及产业发展趋势，在总结已有教学经验及科研成果的基础上，邀请了国内众多嵌入式领域的专家，共同编写了这套嵌入式系统系列教材。本套教材的推出，在嵌入式技术普及和推广、相关人才培养及教学、科研体系建立等方面进行了有益的探索和尝试，同时也必将对国内嵌入式产业的发展起到积极的推动作用。

信息与通信系统专家

中国科学院院士

中国工程院院士

王越

2007.6.11

丛书前言

嵌入式系统技术已被广泛地应用于工业控制系统、信息家电、通信设备、医疗仪器、智能仪器仪表等众多领域,如手机、PDA、MP3、手持设备、智能电话、机顶盒等,可以说嵌入式系统无处不在。

市场对嵌入式系统的需求在飞速增长,企业在努力使开发嵌入式系统的速度跟上市场与竞争的需要。但是,与此同时,嵌入式系统开发的基础理论与方法的研究却严重滞后,这与嵌入式系统的特点有关。嵌入式系统与其他系统的差别主要体现在以下方面:

- 跨学科性:嵌入式系统融合了微电子、计算机硬件、通信、电子工程、软件工程与系统工程等多种技术。
- 非功能性需求要求更高:如近乎最优的运行效率、强实时性、稳定性、更高的可靠性与安全性、并发性、移动性等要求。
- 资源约束:如有限的CPU、内存、电源、显示窗口、按钮或键盘等。
- 面向应用:无论是软硬件的设计,还是系统的规模、开发过程等都与应用领域密切相关。

相应地,嵌入式系统设计开发的方法、技术、过程以及工具也都与通用计算机系统的开发设计不同。但由于其面向应用、跨学科等特点,相关研究成果也分散在各个学科中,没有系统、完整的集成跨学科成果的理论与方法来指导嵌入式系统的开发。

由于市场对嵌入式系统开发人员的大量需求,自2006年以来,许多学校期望设置嵌入式专业,现在都处于探索阶段,主要存在以下问题:

(1) 课程体系不健全。如果课程设置只是将现有不同专业的相关课程拼凑在一起,那么是不可能成为体系的。

(2) 没有教材。教材是支撑课程体系的基础,作为一个专业须有系统的教材,这些教材应将分散在各个学科的一些研究成果、理论与技术进行梳理整合。

目前对嵌入式软件开发人员的需求远远大于硬件系统开发人员的需求,这是因为嵌入式系统的功能越来越复杂,嵌入式软件是实现嵌入式系统功能的关键,是嵌入式系统设计创新和增值的关键因素。2005年,北航软件学院成立了嵌入式软件专业,主要是培养嵌入式软件工程硕士,为嵌入式软件产业输送软件开发人员。由于嵌入式系统开发人员必须有一定的硬件基础,所以嵌入式软件工程硕士要求学生本科是电子工程、通信、自动控制、仪器仪表和机电一体化等专业。经过两届嵌入式软件工程硕士的培养,我们总结出一套针对嵌入式软件人才的培养方案,并在教学实践中逐渐完成这套教材的编写。

下面分别简单介绍其中几本主要教材。

《嵌入式系统概论》是一本最基本的关于嵌入式系统开发的教材,这本书结合32位嵌入式微处理器和实时操作系统,介绍了嵌入式系统设计的基本原理与方法。主要内容包括实时系统基本原理、嵌入式系统的设计方法与开发工具、嵌入式微处理器体系结构、嵌入式操作系统基本原理、嵌入式系统软件编程和嵌入式系统应用等知识,每一部分都有相应的实验

环节相配合,着重培养学生的实际动手能力,充分体现了嵌入式系统设计“软硬结合,面向应用”的特点。

《嵌入式软件设计》首先从系统的角度出发,介绍在系统分析设计中的系统思想,以及嵌入式系统的软硬件协同设计方法。然后,针对嵌入式软件开发,按照软件开发过程,介绍嵌入式软件需求分析、系统设计和详细设计。书中全面介绍了嵌入式软件设计可能涉及的各种问题及解决方法,如BSP、可靠性、资源管理、界面等的设计与开发环境选择等。本书力图结合嵌入式系统的特点,将软件工程领域成熟的分析设计方法引入到嵌入式软件的分析设计中。由于嵌入式软件设计方面现有的研究成果较少,大多还不是很深入,本书主要是希望向读者传授一种能够全面考虑问题,尽可能利用各个学科已有的设计思想解决问题的思维方式。

《嵌入式软件测试》主要从嵌入式软件测试方法、测试管理和测试工具三个方面介绍嵌入式软件测试。嵌入式软件测试与通用软件测试有相通之处,也有很大差异。嵌入式系统测试与系统软硬件平台关系密切,测试环境的搭建、测试方法都有其特殊要求。本书将主要介绍软件测试的基本理论,嵌入式软件测试方法,嵌入式软件测试环境,嵌入式软件测试过程管理,嵌入式软件测试工具等。

《移动通信技术与嵌入式应用》以信息论为基础,以移动通信系统的3个主要问题——有效性、可靠性和安全性为主线,紧密结合移动通信的特点,系统介绍移动通信基本理论和定性分析结论,目前第二代(2G)和第三代(3G)移动通信技术体制和网络的结构与组成,移动通信系统的开发方式,以及移动通信系统网络各部分与用户终端处嵌入式软件的特点与应用。本书内容主要包括多址技术与扩频通信,无线信道与调制理论,信源编码与信道编码,第三代(3G)移动通信技术体制,移动网络的结构与组成,移动通信(GSM、CDMA2000与WCDMA等)系统通信协议,移动通信系统的解决方案与开发。

这套教材不仅仅面向软件工程硕士,还可作为本科相关专业的教材,以及有志于从事嵌入式软件开发、维护的专业技术人员的参考书。

这套教材的主要作者都是多年从事相关领域研究、开发的专业技术人员,但是由于嵌入式系统的开发涉及跨学科的知识与技术,将嵌入式系统作为独立学科进行的研究还很少,又受到时间和精力限制,这套书在深度与广度方面有一定局限性,不当及谬误之处,恳请读者批评指正,帮助我们改进、完善这套书。

下表是北航软件学院嵌入式软件专业的主要课程,这些课程可以作为硕士阶段或本科三四年级学习嵌入式软件开发的课程参考。

嵌入式专业课程
• 嵌入式系统概论 • 嵌入式操作系统 • 嵌入式软件设计 • 嵌入式软件测试 • DSP 嵌入式软件开发技术 • 嵌入式应用算法基础 • 移动通信技术与嵌入式应用 • 嵌入式数据库 • Windows CE 与嵌入式软件开发 • VxWorks 与嵌入式软件开发

(续)

嵌入式专业课程	
• 基于 J2ME 架构的嵌入式软件开发 • 可编程器件应用 • 工业数据通信与控制网络	
工程与管理	
• 软件工程 • 项目管理 • 软件开发过程	
实践	
• 课程设计 • C/C++ 程序设计实训 • 团队项目设计	

康一梅

2007年5月于北京

附录A 参考文献	
1. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
2. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
3. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
4. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
5. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
6. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
7. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
8. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
9. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	
10. 康一梅. 嵌入式系统开发. 北京: 机械工业出版社, 2007.	

前言

早期的嵌入式软件规模较小，嵌入式软件测试基本上是在软件调试中完成，在包括软硬件的整个系统调试与系统测试中进一步发现错误，然后修正错误，完善软件。随着嵌入式软件的规模越来越大，嵌入式软件也需要进行系统化的测试。

嵌入式软件测试也遵循软件测试的基本原则，但由于在嵌入式系统的开发过程中，软件与硬件始终相互依赖，且嵌入式系统对性能的要求较高，其开发模式、调试方法与桌面软件的开发模式、调试方法都有所不同，因此嵌入式软件测试也有其自己的特点。

本书第1章将介绍嵌入式软件及其质量保证的基本概念。测试是软件质量保证，尤其是软件的产品质量保证的重要手段。第2章和第3章将分别介绍软件测试与嵌入式软件测试的基础知识，说明嵌入式软件测试的特点。第4章讨论嵌入式软件测试的生命周期，包括嵌入式软件开发测试的V模型和多V模型，分别说明在嵌入式软件开发的各个阶段的测试重点和主要工作。第5章则详细介绍嵌入式软件测试技术，包括静态测试技术、动态测试技术，以及嵌入式软件特有的一些测试技术，并通过实例来说明各种测试技术的具体应用。第6章从工程的角度完整地说明嵌入式软件测试的过程，以及每个阶段的任务、文档模板等，这一章将测试的具体实施、过程管理与前面介绍的测试技术相结合，通过实例让读者掌握如何在工程中管理、实施测试工作。第7章详细介绍嵌入式软件测试的环境搭建，这是嵌入式软件测试中非常关键的工作。第8章会给出几种常用的嵌入式软件自动化测试工具及测试管理工具。

本书的读者对象主要定位于高等院校嵌入式软件、计算机及相关专业的硕士研究生与高年级本科生，还可作为有志于从事嵌入式软件开发、维护的专业技术人士的参考书。

本书由康一梅主笔，张永革参与了第2章、第4章、第6章的编写，李志军参与了第3章、第4章、第5章、第7章、第8章的编写。中国兵器工业集团公司软件评测中心的胡江、吴伟研究员对本书进行了审阅和修改，杨波同学在示例方面做了一些工作，在此谨表示诚挚的感谢。

由于时间和精力的限制，本书在深度与广度方面有一定局限性，不当及谬误之处，恳请读者批评指正，以帮助我们改进并完善本书。

8-0 (指基)	01-8	作者 康一梅 张永革 李志军 胡江 吴伟 杨波
8-0 (指基)	01-15	康一梅 张永革 李志军 胡江 吴伟 杨波

教学建议

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		计算机、嵌入式专业	其他专业
第1章 嵌入式软件概述	- 了解嵌入式系统的硬件基础与软件基础。包括硬件的基本组成、软件结构等。 - 了解嵌入式软件工程的各个阶段,以及各个阶段的目标、过程控制等。 - 了解嵌入式软件质量管理。首先弄清楚嵌入式软件开发的质量问题的来源,其次了解软件质量模型,了解软件测试在软件质量管理中的位置。	2~4	2
第2章 软件测试基础	- 掌握软件测试的基本概念、目的与作用,以及软件测试的原则。 - 了解软件测试的对象以及各个阶段的重点,了解软件测试的信息流。 - 掌握软件测试的分类。 - 了解软件测试技术,包括静态测试、动态测试的各种技术。 - 掌握软件测试的级别,清楚单元测试、组件测试、集成测试、确认测试、系统测试的定义、工作目标、方法等。	4~6	4~6 (选讲)
第3章 嵌入式软件测试基础	- 了解嵌入式软件测试的特点。 - 了解嵌入式软件测试模型。 - 了解嵌入式软件测试方法,尤其是目标环境与宿主环境测试的差异。 - 掌握嵌入式软件测试步骤。 - 了解嵌入式软件测试与普通软件测试的区别。	2~4	2~4 (选讲)
第4章 嵌入式软件测试生命周期	- 了解V模型和多V模型。 - 掌握需求阶段、概要设计阶段、详细设计阶段的测试目标、步骤等。 - 掌握编码与测试阶段的测试目标、步骤等。 - 掌握嵌入式软件的测试步骤与方法等。	4~6	4 (选讲)
第5章 嵌入式软件测试技术	- 了解静态测试技术,掌握代码检查、静态结构分析技术。 - 了解系统测试技术,掌握等价类划分、边界值分析、因果图法、猜错法。 - 了解白盒测试、黑盒测试技术,如性能测试、功能测试、压力测试、接口测试、安全性测试等。 - 了解嵌入式软件的特殊测试技术,掌握状态转换测试、控制流测试技术。	8~10	6~8 (选讲)
第6章 软件测试过程管理与实践	- 掌握测试需求分析。 - 掌握测试计划制定。 - 掌握测试设计。 - 掌握测试执行与缺陷管理。	10~12	6~8 (选讲)

(续)

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		计算机、嵌入式专业	其他专业
第7章 嵌入式软件测试环境	- 了解嵌入式软件测试仿真环境、测试环境体系结构、交叉测试、插桩技术。 - 了解各个阶段的测试环境要求。 - 掌握测试环境建立。	6~8	4~6 (选讲)
第8章 软件测试自动化	- 了解软件测试自动化。 - 以 Code Test 为例,介绍自动化测试工具的功能。若有工具可以增加实验。	2~4	2
教学总学时建议		38~54	30~40

说明:

1. 本书适合作为高等院校计算机、嵌入式专业“嵌入式软件测试”课程的本科生、研究生教材,理论授课学时数为38~54学时(相关配套实验另行单独安排),不同专业可根据不同的教学要求和计划教学学时数酌情对教材内容进行适当取舍。例如,嵌入式、计算机科学与技术等专业,教材内容原则上可全讲;其他专业可酌情对教材内容进行适当删减。
2. 其他相关专业使用本书教学时可适当降低教学要求。
3. 本书的理论知识授课学时数为38~54学时,其中包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。

目 录

丛书序	2.9 软件测试技术	35
丛书前言	2.9.1 静态测试	35
前言	2.9.2 动态测试	36
教学建议	2.10 软件测试的级别	36
第1章 嵌入式软件概述	2.10.1 单元测试	36
1.1 嵌入式系统概述	2.10.2 组件测试	37
1.1.1 嵌入式系统的组成	2.10.3 集成测试	37
1.1.2 嵌入式系统的特点	2.10.4 确认测试	37
1.1.3 嵌入式系统的分类	2.10.5 系统测试	38
1.2 嵌入式系统硬件基础知识	2.10.6 验收测试	38
1.3 嵌入式系统软件基础知识	第3章 嵌入式软件测试基础	39
1.3.1 嵌入式软件的分类	3.1 嵌入式软件测试的特点	39
1.3.2 嵌入式操作系统	3.2 嵌入式软件统一测试模型	40
1.4 嵌入式软件工程	3.3 嵌入式软件目标机环境测试和宿主机环境测试	40
1.4.1 可行性分析和需求分析阶段	3.4 嵌入式软件的测试步骤概述	41
1.4.2 设计阶段	3.4.1 系统平台测试	42
1.4.3 实现阶段	3.4.2 单元模块测试	42
1.4.4 测试阶段	3.4.3 集成测试	42
1.4.5 维护阶段	3.4.4 系统测试	43
1.4.6 嵌入式软件的开发	3.4.5 确认测试	43
1.5 嵌入式软件设计的质量	3.5 嵌入式软件测试和普通软件测试的区别	43
1.5.1 嵌入式软件开发的质量问题	第4章 嵌入式软件测试的生命周期	46
1.5.2 嵌入式软件的质量模型	4.1 V模型和多V模型	46
1.5.3 提高嵌入式软件的质量	4.1.1 软件开发V模型	46
第2章 软件测试基础	4.1.2 嵌入式软件开发V模型	48
2.1 软件测试的历史	4.1.3 嵌入式软件开发多V模型	49
2.2 软件测试的基本概念	4.2 需求分析阶段	51
2.3 软件测试的对象	4.3 概要设计阶段	53
2.4 软件测试的信息流	4.4 详细设计阶段	55
2.5 软件测试的目的和作用	4.5 编码和测试执行阶段	56
2.5.1 质量改进	4.5.1 单元/模块测试阶段	58
2.5.2 验证和确认	4.5.2 集成/系统测试阶段	59
2.5.3 可靠性评估	4.5.3 确认测试阶段	61
2.6 软件测试的特点	4.6 迭代模型	62
2.7 软件测试原则	4.7 嵌入式软件的测试步骤	63
2.8 软件测试的分类		

4.7.1 单元测试	64	6.5.4 测试执行日志	162
4.7.2 集成测试	68	6.5.5 测试执行报告	162
4.7.3 确认测试	72	6.5.6 测试总结报告	163
4.7.4 系统测试	75	6.6 软件测试缺陷管理	165
4.8 嵌入式软件测试策略总结	77	6.6.1 软件缺陷跟踪过程	165
第5章 嵌入式软件测试技术	78	6.6.2 软件缺陷报告	167
5.1 软件静态测试	79	第7章 嵌入式软件测试环境	169
5.1.1 代码检查	79	7.1 嵌入式软件测试环境综述	169
5.1.2 静态分析	81	7.1.1 嵌入式软件仿真测试环境	169
5.2 软件系统测试	83	7.1.2 嵌入式软件测试环境的体系结构	170
5.2.1 等价类划分	83	7.1.3 交叉测试方式	171
5.2.2 边界值分析	84	7.1.4 插桩技术	171
5.2.3 因果图法	84	7.2 各测试阶段需要的测试环境	172
5.2.4 猜错法	87	7.2.1 模型阶段	172
5.2.5 系统测试的策略	88	7.2.2 原型阶段	174
5.3 软件动态测试	89	7.2.3 临近生产阶段	176
5.3.1 典型的白盒测试技术	89	7.2.4 开发后阶段	178
5.3.2 典型的黑盒测试技术	93	7.3 嵌入式软件测试环境的建立	178
5.4 嵌入式软件的特殊测试技术	107	7.4 嵌入式软件测试环境建立实例	179
5.4.1 状态转换测试	107	第8章 软件测试自动化	182
5.4.2 控制流测试	110	8.1 LOGISCOPE	184
第6章 软件测试过程管理与实践	114	8.1.1 LOGISCOPE 概述	184
6.1 测试需求分析	114	8.1.2 LOGISCOPE 的优点	185
6.1.1 原始需求提取	115	8.1.3 LOGISCOPE 的使用	186
6.1.2 产品测试规格说明分析	116	8.2 CodeTest	191
6.1.3 测试规格说明分配分解	122	8.2.1 CodeTest 概述	191
6.2 测试计划	122	8.2.2 CodeTest Native	193
6.2.1 任务分解与工作量估计	122	8.2.3 CodeTest Software-In-Circuit	193
6.2.2 软件测试计划	124	8.2.4 CodeTest Hardware-In-Circuit	194
6.2.3 测试计划制定	131	8.2.5 CodeTest 的功能	195
6.3 测试设计	136	8.2.6 Tornado 环境中 CodeTest 的使用	202
6.3.1 软件设计评审	136	8.3 CRESTS/ATAT	206
6.3.2 测试设计	137	8.3.1 CRESTS/ATAT 概述	206
6.3.3 测试方案设计	142	8.3.2 CRESTS/ATAT 的功能	207
6.4 测试用例设计	147	8.3.3 CRESTS/ATAT 的设计原理	208
6.4.1 编写测试用例的步骤	148	8.3.4 CRESTS/ATAT 的使用	209
6.4.2 测试用例的编写要求	149	8.3.5 其他支持测试软件的介绍	215
6.4.3 测试用例编写/设计技术	150	8.4 TestManager	216
6.4.4 测试用例模板	157	8.4.1 TestManager 概述	216
6.5 测试执行	158	8.4.2 TestManager 的使用	217
6.5.1 编码阶段	159	参考文献	230
6.5.2 稳定阶段	160		
6.5.3 发布和验收阶段	161		

第 1 章

嵌入式软件概述

计算机系统可以处理并管理各种数据，这里所说的数据包括文字、数字、图片以及各种指令。人们希望能制造各种智能机器，这些机器需要一套“大脑”系统，对其中一些很小的机器（如数码照相机），需要给它们设计一套小小的可以嵌在里面的“大脑”系统，这个“大脑”有多聪明，就要看它的软件了。这一类隐藏在一些更大的系统中管理和控制这些系统并带有微处理器的专用软硬件系统称为嵌入式计算机系统，通常称为嵌入式系统。由于嵌入式系统本身是一个外延极广的名词，凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的控制系统都可以叫做嵌入式系统，所以很难给它下一个准确的定义。

IEEE（电气与电子工程师协会）对嵌入式系统的定义是：用于控制、监视或者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，此定义是从应用方面考虑的，即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。目前，国内普遍认同的定义是：嵌入式系统是指以应用为中心、以计算机技术为基础，软硬件可以裁减，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统。

1.1 嵌入式系统概述

1.1.1 嵌入式系统的组成

总体上，嵌入式系统可划分成硬件和软件两部分，硬件一般由高性能的微处理器和外围的接口电路组成，软件一般由硬件抽象层、操作系统、板级支持包、应用平台和应用程序几部分组成，如图 1-1 所示。

并非所有嵌入式系统都包含这些部分，有些系统没有操作系统，有些系统没有应用平台。更多时候设计人员是把这几种软件组合在一起的，即应用程序控制着系统的运作和行为，而操作系统控制着应用程序与硬件的交互。因为嵌入式系统本身考虑的是处理速度问题，所以这种设计方式更有利于程序与硬件、程序与程序的交互，从而提高整个系统的速度。嵌入式操作系统具有相对不变性，而不同的系统需要设计不同的嵌入式应用程序。如何简洁有效地使嵌入式系统能够应用于各种不同的应用环境，是嵌入式系统发展中所必须解决

的关键问题。



图 1-1 嵌入式系统的组成

1. 硬件层

硬件是整个嵌入式操作系统和应用程序运行的平台，包括输入输出接口/驱动电路、处理器、存储器、定时器、串行通信端口、中断控制器、并行通信端口、外设器件、图形控制器及相关系统电路等部分。

不同的应用通常有不同的硬件平台，硬件平台的多样性是嵌入式系统的一个主要特点。

2. 中间层

该层负责对各种硬件功能提供软件接口，包括硬件初始化、硬件时钟、中断板级支持包、计时器时钟、总线管理、内存地址的映射等。

它是一个介于硬件与软件之间的中间层次。如果有操作系统，则称之为硬件抽象层 (Hardware Abstract Layer, HAL) 它在硬件与操作系统之间，通过特定的上层接口与操作系统进行交互，主要是对系统基础硬件提供初始化和软件接口，而一些设备驱动则是在操作系统之上提供，这大大促进了嵌入式操作系统的通用化；如果没有操作系统，则称之为板级支持包 (Board Support Package, BSP)，它提供对所有硬件（包括各种设备）的初始化和驱动。

每个 HAL /BSP 包括一个 ROM 启动 (Boot ROM) 和其他启动机制。

3. 系统软件层

系统软件层包括以下几个部分：

- **嵌入式操作系统**：实现对资源的访问和管理，完成任务调度，支持应用程序的运行及开发。
- **板级支持包 (BSP)**：BSP 是针对某个特定嵌入式系统，提供与硬件相关的设备驱动。每个 BSP 包括一套模板，模板中有设备驱动程序的抽象结构代码、具体硬件设备的底层初始化代码等。通常，这些设备驱动是在系统初始化过程中由 BSP 根据操作系统中的设备驱动程序来与它们相关联的。随后，由通用设备驱动程序调用，从而实现对硬件设备的控制。另外，BSP 还参与了嵌入式系统初始化及硬件初始化的过程。BSP 是嵌入式应用开发中的关键环节。

虽然某些嵌入式操作系统包含了设备驱动,但有许多设备驱动仍需要开发者自己编写。因此,目前在嵌入式软件行业仍然存在一个争论:板级支持包究竟是不是嵌入式操作系统的一个部分?不管它是不是操作系统的一部分,都可以肯定的是,作为嵌入式软件中一个不可分割的部分,它在为整个嵌入式系统服务。

- **应用平台:** 为了提高开发速度与软件质量,应用提供商开发了一些可重用的应用平台,封装一些常用的功能,同时提供 API 接口,可以在此基础上进行二次开发。例如,在为开发手机应用提供的 BREW 平台中,不仅包括开发用的 SDK,还包括运行在操作系统之上的应用运行环境(AEE),为基于 BREW 平台开发的应用提供了一个全功能的实时运行环境。

4. 应用层

应用层(即应用软件层)位于嵌入式系统层次结构的最顶层,直接与最终用户交互,决定整个产品的成败。其质量及其可靠性信赖于应用软件的设计质量、资源使用情况以及与操作系统耦合的程度。

应用软件是嵌入式系统的核心部分,是根据特定的需求量身定做的,用于在相对固定的环境下完成特定的任务。这些处理过的指令代码和数据被放置到存储器中用于执行任务。产品的最终机器可以将软件嵌入在 ROM(或 PROM)中。所以,最终阶段软件也被称为 ROM 映像。

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统是一种针对特定任务、特殊环境而进行特殊设计的定制产品,所以与传统的计算机系统相比,它主要有以下几个方面的特征。

1. 嵌入式系统工业是不可垄断的高度分散的工业

从某种意义上来说,通用计算机行业的技术是垄断的,而嵌入式系统工业充满了竞争、机遇与创新,没有哪一个系列的处理器和操作系统能够垄断全部市场。即便在体系结构上存在着主流,各不相同的应用领域也决定了不可能由少数公司、少数产品垄断整个嵌入式系统工业。

2. 操作系统内核小,资源少

由于嵌入式系统主要应用在一些对成本、资源、占用空间有严格要求的环境,系统资源的需求在满足实际应用的要求下应尽可能少,所以嵌入式操作系统的内核要比传统的操作系统小得多,例如,ENE 公司的 OSE 分布系统的内核只有 5KB,这是无法与 Windows 的内核相比的。

3. 专用性强

嵌入式系统的设计、软件的开发、操作系统的裁减都是以满足特定的要求为目标,针对特定的应用量身裁衣、去除冗余,进行高效率的设计,力争在同样的硅片面积上实现更高的性能。

4. 系统稳定持久

与通用计算机软件不同,各个行业的嵌入式应用系统和产品很少发生突然性的跳跃,嵌入式系统中的软件也因此更强调可继承性和技术衔接性,发展比较稳定。嵌入式处理器的发展也具有稳定性,一个体系结构一般要存在 8~10 年的时间。体系结构及其相关的片上外设、开发工具、库函数、嵌入式应用产品是一套复杂的知识系统,用户和半导体厂商都不会轻易地放弃一种处理器。

5. 软硬件结合紧密

在嵌入式系统中,软硬件的结合尤为紧密。通常要针对不同的硬件平台进行系统的移

植,即使在同一品牌、同一系列的产品中也需要根据系统硬件的变化不断进行修改。同时,针对不同的任务,往往需要对系统进行较大更改,程序的编译下载要和系统相结合,这种修改和通用软件的“升级”是完全不同的概念。在编写应用软件的过程中要考虑到硬件资源的管理与使用,这一点尤为重要,它决定着软件的质量与效率。

6. 开发需专门的环境和开发工具

嵌入式系统的开发与传统 PC 上的开发存在较大的差别。嵌入式系统本身不具备自主开发能力,系统设计开发完成后,用户通常也不能对其中的程序功能进行修改。开发过程主要是由通用计算机上的软硬件设备模拟开发,并通过调试工具仿真调试,最终在目标设备上运行。用于程序开发的通用计算机称为主机(也称为宿主机),程序最终执行的目标设备称为目标机。

7. 软件要求固态化存储

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。

8. 实时性要求较高

多数嵌入式系统的应用对响应时间都有明确限制,否则极有可能产生灾难性的损失或引起系统的崩溃。例如,对于激光制导武器中的目标锁定系统,延迟 0.001 秒就有可能失去一次进攻的机会,甚至被对方摧毁。

1.1.3 嵌入式系统的分类

由于嵌入式系统的用途广泛、种类繁多,而且人们对嵌入式系统的理解也各不相同,所以其分类方法也有多种。以下列举几种常用的分类方法。

1) 根据嵌入方式,分为整机式嵌入、部件式嵌入和芯片式嵌入。

- **整机式嵌入**: 将一个带有专用接口的计算机系统嵌入到一个系统中,使其成为这个系统的核心部分。这种计算机的功能完整性比较强,用来完成系统中的关键工作,且有完善的人机界面和外部设备。

- **部件式嵌入**: 将计算机系统以部件的方式嵌入到设备中,用于实现某一处的功能。这种方式使计算机与其他硬件耦合得更加紧密,功能专一。

- **芯片式嵌入**: 将一个具有完整计算功能的芯片嵌入到设备中。这种芯片具有存储器和完整的输入/输出接口,能实现专门的功能。显示控制器和微波炉采用的就是这种方式。

2) 根据嵌入式软件类型,分为单线程程序方式嵌入和事件驱动程序方式嵌入。

- **单线程程序方式嵌入**: 这种方式没有主控程序,其优点是程序简单、执行效率高,缺点是一旦出现故障,系统无法自动控制和恢复,安全性差。

- **事件驱动程序方式嵌入**: 包括中断驱动系统和多任务系统两种方式,往往有嵌入式操作系统的参与。

3) 根据实时性,分为严格实时系统和非实时系统。

- **严格实时系统 (Firm Real-Time)**: 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,就会导致无法接受的低质量服务。

- **非实时系统 (Non Real-Time)**: 系统对系统响应时间没有实时要求。

嵌入式系统不一定是实时系统，但实时系统一般都是嵌入式系统。IEEE 定义实时系统为“那些正确性不仅取决于计算的逻辑结果，也取决于产生结果所花费的时间的系统”。实时嵌入式系统必须在一个可预测、可保证的时间段内对外部事件做出反应，如果没有达到这一要求，那么系统就会做出错误的操作。

POSIX Standard 1003.1 中定义实时操作系统为“操作系统有能力在限定响应时间范围内，提供满足需求的服务”。

衡量实时系统有以下 3 个指标：

- **响应时间 (Response Time)**：计算机识别一个外部事件到做出响应的的时间。
- **生存时间 (Survival Time)**：数据的有效等待时间，在这段时间里数据是有效的。
- **吞吐量 (Throughput)**：在一给定时间内，系统可以处理的事件总数。

实时系统到底有多快？实时系统的响应要“足够快”，这个“足够快”指满足要求即可。实时系统不一定是运行速度最快的代码，其对系统运行时间及响应时间的可预测性比速度本身更重要。

实时系统的正确性依赖于运行结果的逻辑正确性和运行结果产生的时间正确性，即实时系统必须在规定的时间范围内正确地响应外部物理过程的变化。实时系统根据实时性要求又可以分为：

- **强实时系统**：其系统响应时间在毫秒或微秒级（如数控机床）。
- **一般实时系统**：其系统响应时间在毫秒级或秒级。它对实时性的要求比强实时系统要差一些（如媒体播放）。
- **弱实时系统**：其系统响应时间约为数十秒或更长。

4) 根据嵌入式系统的复杂程度，分为单微处理器嵌入式系统、组件嵌入式系统和分布式嵌入式系统。

- **单微处理器嵌入式系统**是在应用系统中嵌入一个带有微处理器的计算机系统对应用系统进行控制，这种嵌入式计算机系统与应用结合密切。
- **组件嵌入式系统**是一个相对独立的嵌入式系统，作为一个组件嵌入到应用系统中，如电源。
- **分布式嵌入式系统**是由多个分立的嵌入式系统通过组网协同工作的一种模式。

1.2 嵌入式系统硬件基础知识

了解硬件基础知识是学习嵌入式软件设计与开发的一个基本环节。图 1-2 是嵌入式系统的硬件基本组成。

嵌入式软件测试与系统硬件有密切关系，测试必须考虑系统所使用的处理器及其指令集，以及存储器的类型，在测试中还有可能需要仿真输入/输出接口以及中断等。

1. 输入/输出接口

嵌入式系统的输入/输出接口主要有中断控制器、DMA、串行接口和并行接口、A/D、D/A、存储器接口、设备接口等。每个输入/输出接口都是通过地址来标识的，系统通过对地址的操作来完成输入/输出操作。

2. 存储器

根据处理器设计所采用的不同结构，程序和数据在存储器中的位置有着较大的不同。在冯·诺伊曼结构中，程序和数据放在同一存储器的不同段中。而在哈佛结构中，数据与程序