

Testing Embedded Software

嵌入式软件 测试

[美] Bart Broekman 著
Edwin Notenboom

张君施 张思宇 周承平 译
许菊芳 审校



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

嵌入式软件测试

Testing Embedded Software

[美] Bart Broekman 著
Edwin Notenboom

张君施 张思宇 周承平 译
许菊芳 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

随着软硬件技术的发展,嵌入式系统在生产、生活乃至军工的各个领域应用都日渐广泛,功能也越来越强大,但设备和软件也日趋复杂。本书立足于工业实践,旨在为有效控制复杂的嵌入式软件测试过程提供解决方案。书中全面讲述了嵌入式软件测试的一般过程,内容包括结构化测试和嵌入式系统的原理、测试生命周期、重要的应用技术、基础设施、测试组织形式和测试原则。本书在测试设计技术和测试组织方面的精辟论述,将会对软件测试的规范化和高效化大有帮助。

本书特别适合与嵌入式系统的软件打交道的人士以及嵌入式项目的管理人员,对嵌入式硬件开发和测试人员也很有裨益。

Authorized translation from the English language edition, entitled Testing Embedded Software, ISBN: 0321159861 by Bart Broekman, Edwin Notenboom, published by Pearson Education, Inc, publishing as Addison-Wesley, Copyright © 2003. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Simplified Chinese language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2004.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

本书中文简体专有翻译出版版权由Pearson教育集团所属的Addison-Wesley授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)发行与销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-3948

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式软件测试/(美)布鲁克曼(Broekman, B.)著;张君施等译.

-北京:电子工业出版社,2004.1

书名原文:Testing Embedded Software

ISBN 7-5053-9368-5

I. 嵌… II. ①布… ②张… III. 软件-测试 IV. TP311.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第106514号

责任编辑:赵红燕 贺瑞君

印 刷:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:20.25 字数:363千字

印 次:2004年1月第1次印刷

印 数:5000册 定价:35.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

译者序

嵌入式设备已经在工业市场、自控市场以及国防建设等领域得到了广泛应用，而且随着数字化产品时代的来临，大量硬件结构日趋复杂、功能日益强大的嵌入式系统正不断进入人们的工作和生活空间中，这为嵌入式软件产品创造了巨大的商业机会，同时也对嵌入式软件的开发技术和测试技术提出了新的挑战。面对时间和资源都很有限的情况，嵌入式软件测试的计划、组织和有效实施往往会更加困难。

尽管国内市场上有关软件测试的书籍多得让人眼花缭乱，但涉及嵌入式软件测试的却寥寥无几。本书的作者 Bart Broekman 和 Edwin Notenboom 在嵌入式软件测试方面都具有丰富的实践经验。本书对嵌入式软件测试进行了全面的介绍，并向读者提供了大量的工程实践指导内容。文中不仅给出了一种嵌入式软件结构化测试方法，还详细描述了测试生命周期、嵌入式软件的开发与测试过程，提供了测试生命周期不同阶段所采用的各种经典及现代测试技术，同时也覆盖了进行测试所需的基础设施以及测试组织方面的内容。

本书具有很强的实践性，不仅适用于专门从事嵌入式系统开发和测试的人员，也适用于那些负责嵌入式系统开发和测试的项目经理或团队领导。同时，本书对于其他系统的软件开发和测试人员也非常有参考价值。

本书的第 1 章~第 10 章由张君施翻译，第 11 章~第 20 章由张思宇翻译，附录 A~E 及以后部分由周承平翻译，全书由许菊芳审校和统稿。由于译者水平和实际工作经验有限，译文中的不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

序

近年来，在工业领域的各个方面，软件的重要性戏剧性地得到提升。在商业管理领域，软件也已经成为不可或缺的核心技术。而且在多数技术领域，越来越多的产品和革新都是基于软件的。一个典型的例子是，在汽车工业中，迅速出现的大量技术创新都是基于电子设备和软件的，这些产品和技术不仅增强了汽车的安全性，而且提高了乘坐者的舒适度，减少了能耗和废气排放。在现代高级豪华轿车的制造中，已经有大约 20%到 25%的费用是花在电子设备和软件上，而且在未来十年里，这一比例估计将提高到 40%。

软件对产品的质量有着实实在在的影响，同时也影响着企业的生产力。遗憾的是，实践告诉我们，不可能开发出一种复杂的、一蹴而就的软件系统。因此，需要找到一种全面的分析方法，来检测软件开发不同阶段的结果，以便尽可能早地发现系统中的错误，这样测试就成了最重要的分析技术。但是软件测试是一项非常复杂而耗时的工作，对于嵌入式系统更是如此。测试嵌入式软件的时候，不仅需要考虑到软件本身，而且需要考虑到和硬件部件的紧密关系，这种关系通常是条件苛刻的时间约束和实时要求，以及其他和性能相关的关系。

呈现在读者面前的这部作品，对嵌入式系统测试领域必将有重要的、实质性的贡献。它全面描述了嵌入式软件测试的整个领域，覆盖了各个重要的方面，比如测试生命周期、测试技术等，同时也提供了测试的基本方法和组织结构的内容。作者将内容浓缩在实践性的工业应用方面，使得该书对任何从事嵌入式软件测试的人员都具有参考价值。由于嵌入式软件的广泛应用，这本书将对许多工业领域都有用处。

在通往高效率嵌入式软件测试的漫漫长路上，对于如何经济地开发出高性能的嵌入式系统而言，该书的全面性和实用性使得它成为嵌入式软件系统开发和测试的里程碑，书中的一些观念已经成为 DaimlerChrysler 集团的基本工作准则。在许多不同工业领域里，可靠的嵌入式系统的开发已经成为核心业务的一部分。我也希望本书中的观念能为这些领域中数目庞大的测试者和软件开发人员所用，对他们有所裨益。

Klaus Grimm 博士

DaimlerChrysler AG 软件技术研究室主任

致 谢

想避免类似于“本书决不如何如何”这样的陈腐信息是件很不容易的事情，但是我们也不想忽略这样一个事实：我们从许多人那里得到了有价值的帮助。提到他们的贡献，这里略举一二：

当 Rob Dekker 和 Martin Pol 以极好的口才邀请我们参加一个欧洲 ITEA 项目时，我们得到了为嵌入式工业开发出一种测试方法的机会，这个项目是为汽车工业的嵌入式系统而设立的。Klaas Brongers 管理和激励着我们，这里充满了自由和创新的气氛。这个项目被证明是发展嵌入式软件测试方法的沃土，在这里，我们可以研究新的思想，测试新思想的实用价值。尤其是项目合作伙伴 Mirko Conrad、Heiko Dörr 和 Eric Sax，他们都是知识和经验的无价源泉，他们的鼎力支持和严格要求极大地提高了我们工作的效率。需要特别感谢 Mirko 和 Eric，他们提供了完整的一章，是专门讲述“混合信号”的。

很显然，ITEA 项目中发展出来的一些思想，对于其他从事嵌入式工业的人来说也是有用的。我们很幸运，有如此多的主管、经理拥有推进这一目标的远见和决心，他们是：Luciëlle de Bakker、Hugo Herman de Groot、Jan van Holten、Ronald Spaans 和 Wim van Uden，正是这些人提供了关键的管理支持。

决定了写一本这方面的书后，我们也从许多同事那里获得了支持，Bart Douven、John Knappers、Peter van Lint、Dre Robben、Coen de Vries 和 Paul Willaert 承担了输入和反馈工作。Peter 和 Coen 尤其必须被提及，是他们努力在嵌入式软件测试环境方面提出了大量有益的想法，这些想法形成了有关嵌入式软件测试环境相关章节的基础。在让文档变成书的过程中，Rob Baarda 也提供了大量的帮助，使得该书得以出版。在客户方面，Jack van de Corput 和 Boy van den Dungen 用他们的高度热情，使得我们的想法能够付诸实践。

当越来越多的章节完成时，“外部”的关注就显得越来越多，我们非常高兴，因为我们能够得到测试领域和嵌入式软件领域众多专家的帮助，他们是：Simon Burton、Rix Groenboom、Klaus Grimm、Norbert Magnusson、Matthias Pillin，特别是 Stuart Reid 和 Otto Vinter，他们两位审阅了最后的手稿。应当感谢的是，他们并没有迁就我们，而是给予我们真实的看法和建设性的批评，他们的许多批评和建议值得尊敬，而且在书中体现了出来。

衷心感谢那些给予这本书无价贡献的人，他们都会和我们一样，为这项工作而感到骄傲。

前 言

发展中的工业需要结构化的测试

嵌入式系统是一个快速成长的工业领域。在历史上，嵌入式系统由工程师和技术人员控制，这些工程师和技术人员都在各自的领域有技术专长，他们生产产品，同时完成测试任务，因为只有他们才最了解产品的工作原理。这在技术人员只和那些小的、单一的产品打交道的时候情形还好。然而嵌入式领域在快速变化着：系统变得越来越大，也越来越复杂和集成化。软件现在占系统的较大部分，经常替代硬件。以前只工作在孤立状态下的系统现在已经联系在一起，提供集成的功能。这些系统不可能由某个聪明人独自完成，而是需要有组织的集体智慧。同样，测试的过程也变得越来越庞大、复杂而难于控制。于是，能提供一种控制复杂测试过程的方法就成了现实的需求。

本书的范围

嵌入式系统必须依赖于高品质的硬件和高性能的软件，因此对于测试嵌入式系统而言，硬件测试和软件测试都是至关重要的部分。但是，本书更关心的是嵌入式系统的软件测试部分。本书会涉及到许多硬件，但是不会讨论测试单个硬件的技术细节，这是硬件本身的事情。通常在硬件测试时，技术人员能够处理复杂的技术细节。本书的目标读者是和嵌入式系统的软件打交道的人。书中会告诉这些人有关的工作环境，测试软件时遇到的具体问题，以及通常不会在软件教学中学到的技术。

本书目标是为“有效控制复杂测试过程”这个问题提供解决方案。在各种各样的软件和硬件环境工作里，本书将主要关注如何组织全面的测试过程这一较高层次。作者从“Software Testing, a Guide to The Tmap Approach”（《软件测试——TMap 方法指南》）一书中引用了一些概念和内容，但是已经修改成了适合嵌入式软件的形式。

本书的目标不是作为一篇研究性的论文，它具有很强的实践性，其目的是提供大量总结性的、深入的实践指导，而没有细节性的学术论证。

本书的结构

测试远不是试验系统和检验系统的正确性那么简单。测试还包括计划的制定、

设计测试用例、管理测试基础设施、建立测试组织、安排策略等。本书描述了一种称为 TEmb 的测试方法，其目的是对嵌入式软件进行结构化测试。TEmb 方法覆盖了测试过程中的一些关键步骤，回答了“做什么、什么时候做、如何做、用什么方法做和谁去做”的问题。TEmb 应用了在 TMap 中定义的结构化测试的 4 个要素：开发和测试的生命周期（“做什么、什么时候做”），测试过程中的技术（“如何做”）、基础设施（“用什么做”）和组织（“由谁做”）。这 4 个要素是本书结构的基础。

本书由六个部分组成：

第一部分讲述结构化测试和嵌入式系统的一般原理，提供 TEmb 方法的综述，指出如何为特定的嵌入式系统组织合适的测试步骤。

第二部分讲述嵌入式系统测试的生命周期，以及开发和测试嵌入式系统的过程。生命周期要素是测试过程的支柱，它提供应该在什么顺序下做什么的路线图。其他 3 个要素中的各种问题，都对生命周期要素中各个相关点。

第三部分提供对多数嵌入式软件测试项目都有用的几种技术，包括基于风险的测试策略、可测性审查、正式评审和安全性分析。这部分还提供各种不同的技术，用来设计可以适合于不同目标和不同环境的测试用例。

第四部分讲述的是基础设施，测试者需要它们才能完成测试工作。在测试过程的不同阶段，需要不同的测试环境，这一部分提供适用于各种不同测试行为和目标的工具的概述。在协助完成自动化测试任务的工作中，工具的运用已经非常普遍。这部分还讲解这种自动化测试中技术性的和组织性的问题。最后探讨的是各种具体问题，当测试者在一个环境中同时处理模拟和数字信号（即所谓“混合信号”）时，这些问题将会出现。

第五部分描述各种不同的测试组织形式，也就是在测试活动中，人员该如何各司其职，如何相互交流。此外还包括各种测试原则的描述，以及对管理和组织结构的描述。测试者该如何报告测试进度和系统质量的问题也在这部分讲解。

第六部分是一些附录，讲述一些主题的背景信息。比如风险级别、状态表模型等，此外还包括一个自动测试套件的设计方案和一个测试计划的例子。

目标读者

这本书的目标读者是与嵌入式系统开发和测试相关的人员，尤其是那些和嵌入式软件相关的人。书中提供嵌入式系统测试的组织和技术方面的指导原则，总体的和细节的都有。不同类型的读者有可能对不同的章节有所偏好，下面的这些建议将指出哪些章节最适合哪些读者。

对所有的读者，推荐阅读第一部分的介绍性章节，还有第 3 章、第 4 章和第 7 章等，这些内容是 TEmb 方法的精髓。

开发经理、测试项目经理，或者测试协调人和测试团队领导，将会从第二部分、第五部分以及第 7 章中受益最多。

测试人员、开发人员以及其他实际上从事主要的软件测试的人员将从第三部分和第四部分中发现许多具有实践价值的信息。如果读者要提交正式的进度和质量报告，则可以从第五部分中得到许多信息。

对于那些和开发、测试硬件相关的人员，建议阅读第 3 章和第 13 章，这两章阐述了对于嵌入式硬件和软件来讲二者协同作战达到一个共同目标的重要性。对于软件开发人员和测试人员来讲，这两章同样是他们应该感兴趣的。

从第 17 章和第 18 章里，人力资源管理者可以找到特别适合于他们的信息。

目 录

第一部分 介 绍

第 1 章 基础	2
1.1 测试的目标	2
1.2 什么是嵌入式系统	3
1.3 走近嵌入式系统测试	4
第 2 章 TEmb 方法	5
2.1 概览	5
2.2 TEmb 通用元素	8
2.3 组合专用测试方法的机制	12

第二部分 生 命 周 期

第 3 章 多 V 模型	21
3.1 介绍	21
3.2 多 V 模型中的测试活动	22
3.3 嵌套多 V 模型	25
第 4 章 制定主测试计划	27
4.1 制定主测试计划的要素	27
4.2 活动	30
第 5 章 由开发人员执行的测试	39
5.1 介绍	39
5.2 集成方法	40
5.3 生命周期	44
第 6 章 独立测试团队的测试	49
6.1 介绍	49

6.2	计划与控制阶段	49
6.3	准备阶段	59
6.4	细化阶段	62
6.5	执行阶段	64
6.6	完成阶段	67

第三部分 技 术

第 7 章	基于风险的测试策略	73
7.1	介绍	73
7.2	风险评估	74
7.3	主测试计划中的策略	76
7.4	测试层次中的策略	79
7.5	测试过程中的策略变更	83
7.6	维护测试的策略	84
第 8 章	可测性审查	86
8.1	介绍	86
8.2	规程	86
第 9 章	评审	89
9.1	介绍	89
9.2	规程	90
第 10 章	安全性分析	93
10.1	介绍	93
10.2	安全性分析技术	94
10.3	安全性分析生命周期	98
第 11 章	测试设计技术	102
11.1	概述	102
11.2	状态转换测试	109
11.3	控制流测试	122
11.4	基本比较测试	126
11.5	分类树方法	132

11.6	进化算法	138
11.7	统计使用测试	145
11.8	稀有事件测试	152
11.9	突变分析	153
第 12 章	审查清单	156
12.1	介绍	156
12.2	每个质量特性的审查清单	156
12.3	高层次测试的一般审查清单	162
12.4	低层次测试的一般审查清单	164
12.5	测试设计技术审查清单	165
12.6	测试过程审查清单	167

第四部分 基础设施

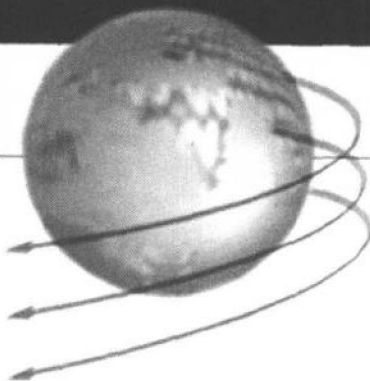
第 13 章	嵌入式软件测试环境	180
13.1	介绍	180
13.2	第一阶段：模拟阶段	182
13.3	第二阶段：原型阶段	185
13.4	第三阶段：临近生产阶段	191
13.5	开发后阶段	193
第 14 章	工具	195
14.1	介绍	195
14.2	测试工具的分类	196
第 15 章	测试自动化	203
15.1	介绍	203
15.2	测试自动化技术	204
15.3	实现测试自动化	208
第 16 章	混合信号	214
16.1	介绍	214
16.2	激励描述技术	218
16.3	测量和分析技术	228

第五部分 组 织

第 17 章 测试角色	235
17.1 一般技能	235
17.2 特定的测试角色	236
第 18 章 人力资源管理	246
18.1 人员	246
18.2 培训	247
18.3 职业前景	249
第 19 章 组织结构	253
19.1 测试组织	253
19.2 通信结构	256
第 20 章 测试控制	258
20.1 测试过程的控制	258
20.2 测试基础设施的控制	263
20.3 测试交付物的控制	265

第六部分 附 录

附录 A 风险级别	272
附录 B 状态表	274
附录 C 一个自动化测试包的设计方案	279
附录 D 进化算法的伪代码	290
附录 E 测试计划例子	293
词汇表	303
参考文献	309



第一部分 介绍

这一部分讲述嵌入式系统结构化测试的一般原理，提供 TEmb 方法的概览。

第 1 章介绍关于测试和嵌入式系统的基础知识，解释测试的目标以及结构化测试过程中的要素，提供了一个嵌入式系统的通用图例，用来解释“嵌入式系统”代表的意思。这个通用图例也将用在本书的其他部分，尤其是在第 17 章中。

第 2 章描述用来进行嵌入式软件结构化测试的 TEmb 方法，指出不存在一个能适用于所有嵌入式系统的测试方法。对于特定的嵌入式系统而言，TEmb 就是组成合适的测试步骤集合的方法，它由一些基本测试步骤组成，这些测试步骤提供几种特定的措施，以处理特定测试系统中的具体问题。本章还解释了如何用有限的系统特征来区分不同种类的嵌入式系统，从而能够在测试步骤中制定出相应的具体措施。在这一章里还提供这种“基本测试步骤”的综述，以及把系统特征和具体措施联系起来的一个矩阵。

第 1 章 基础

1.1 测试的目标

测试是一个过程，它的中心任务就是发现系统中的缺陷。对于每一个测试过程，从系统调试和可接受性的方面来说，发现缺陷是最为关键的部分。尽管所有人都承认预防缺陷总比发现和改正它们要好，但现实是我们现在还无法生产无缺陷的系统。在系统开发过程中，测试是个基本要素，它有助于提高系统的品质。

测试的最终目标是提供经常性的好建议，告诉组织该如何处理系统缺陷。提出建议的前提是发现和系统需求相关的缺陷（不管是明显的缺陷还是隐含的可能性），测试本身并不能直接提高系统的品质，而是通过发现系统缺陷，对组织的相关风险提出深入建议。这使得管理者能做出更好的决定，调配资源来提高系统性能。

为达到这些测试目标，每一个测试过程都包含这些项目：制定计划、列出测试清单和执行测试用例。有一个普遍规律：不可能发现所有的缺陷，也决不会有足够的时间（或者人力和财力）来测试每一件事情。为了最大限度地利用可用资源，必须做出选择。因为所有测试过程都有一些共同的东西，所以能够定义一些基本的、通用的结构化测试步骤，以组织一个可控的测试过程。

关于测试有一个非常简单的例子：一支圆珠笔。

假设某公司计划生产圆珠笔，他们将其中的一支交给我们的测试人员，要求测试。这支圆珠笔就被称为测试对象，测试者可以测试圆珠笔的许多方面，比如：它能用正确的颜色、合理的线宽写字吗？笔上面的标志是否符合公司的标准？咬嚼它是否是安全的（是否含有毒物质）？在 100 000 次按压之后，它的按压装置是否还起作用？在汽车碾过它之后，是否还能写？等等。

为了回答这些问题，测试者需要获得这支笔的预期信息，而“适合写字”这一信息，是决定测试哪些项目和结果是否可以接受的基础，这可以称为测试基础。

测试圆珠笔的墨水或其他部分是否有毒，需要高昂的设备和专家费用，测试 100 000 次的按压需要许多时间。在这些测试中，真的需要测试者投入这么多财力和精力吗？测试者将这些问题和相关人员进行研究，比如主管和圆珠笔的潜在用户，他们将决定测试的最重要部分以及该测试到何种深度，最后的结果就称为测试策略。

当测试者按照测试策略进行测试时，他可能会发现缺陷，这意味着圆珠笔没有按照期望的目标工作，依据缺陷的严重程度以及使用中可能存在的风险，测试者会估算出笔的质量，也会提供如何处理建议。

为执行测试，测试者除了一支笔之外，还需要测试有毒化学物质的设备。一定的基础设施是必需的。测试还需要其他有特定知识和技能的人，比如化学设备操作员，因此必须有合适的组织。

图 1.1 表明了测试过程中，上面提到的这些因素是如何与测试过程交互的。测试过程定义了必需的项目和在生命周期中如何组织它们。对复杂的项目来说，需要设计特定的技术，以便帮助完成测试任务。

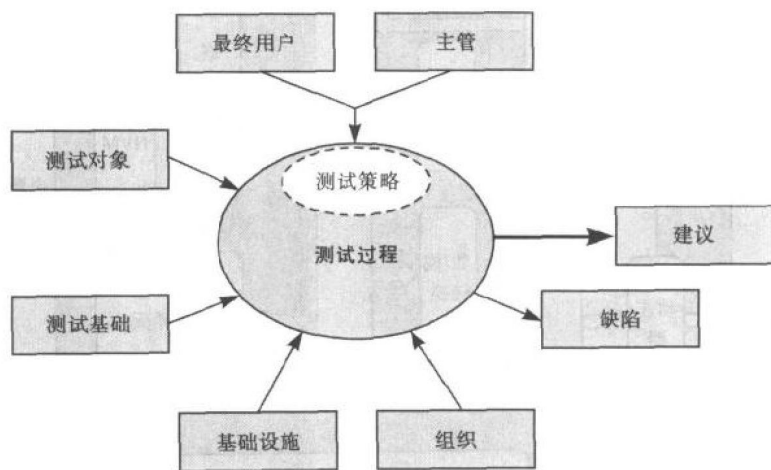


图 1.1 测试过程的通用元素

1.2 什么是嵌入式系统

“嵌入式系统”也是一个实际上并不能真正道出实质内容的广义通用术语，它包含蜂窝电话、铁路信号系统、听觉辅助和导弹跟踪系统等系统，但是所有的嵌入式系统都和现实的物理世界相结合，控制着某些特定的硬件。图 1.2 所示的结构实际上适合于所有的嵌入式系统，在这个图里包含了嵌入式系统的典型组成部分。

嵌入式系统和真实环境相互影响，通过传感器接收信号，给动作器发送输出信号，而动作器控制着环境，嵌入式系统的环境，包括动作器和传感器，经常被称为“物理环境”。

系统的嵌入式软件被存储在非易失性存储器（NVM）中，通常是 ROM，但

这些软件也可以保存在闪存卡、硬盘和 CD-ROM 中, 还可以通过网络或人造卫星下载。嵌入式软件被编译成适合特定的目标处理器, “处理单元” 通常需要一定数量的 RAM 来操作。因为处理单元只能处理数字信号 (暂且忽略模拟计算机), 而环境可能需要模拟信号, 因此数/模转换和模/数转换就产生了。处理单元通过专门的 I/O 层输入/输出所有的信号。通过特定的接口, 嵌入式系统能够和物理环境以及其他可能的 (嵌入式) 系统交互。嵌入式系统可以从普通电源获得电能供应, 还可以有自己的电力供应系统, 比如电池。

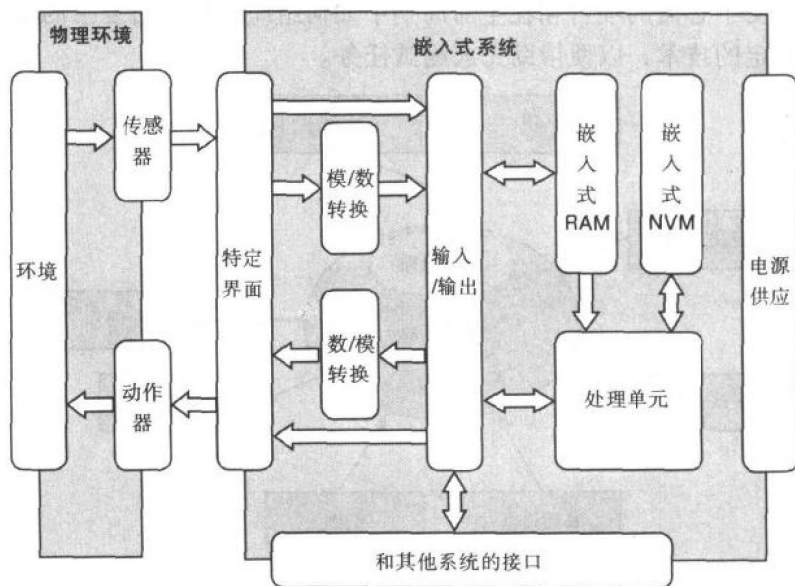


图 1.2 嵌入式系统的一般结构

1.3 走近嵌入式系统测试

很显然, 移动电话的测试会和视频机顶盒的测试或者汽车巡航测试完全不同。每一种测试方法都需要特定的标准来覆盖相关问题。因此寻找一个嵌入式系统的通用测试方法是不可能的。

尽管有许多理由说明为什么不同的嵌入式系统必须有不同的测试方法, 但是对于任何测试方法来讲, 仍然存在许多相似的问题和相似的解决办法。某些“基本测试原理”必定适合于所有的嵌入式测试项目。但这些原理也必须和特定的方法结合起来, 才能在特定的系统测试中解决具体的问题。

这就是为什么本书提供了一种方法, 它能帮助“组合”恰当的测试方法。在以后的章节里, 将有更进一步的解释。