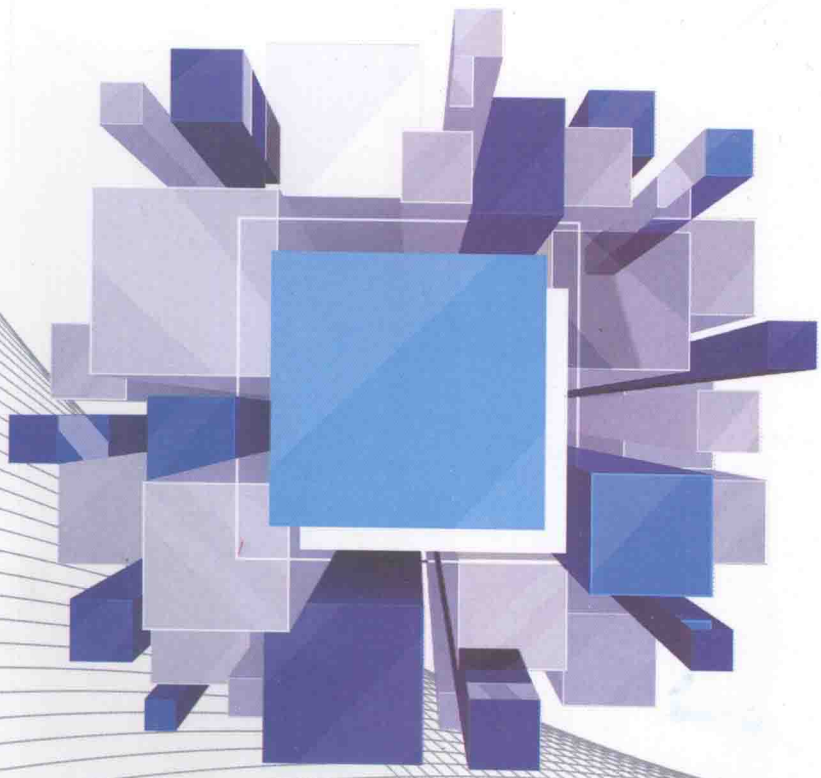
中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

TinyOS操作系统开发技术及实践

TinyOS Technology Development and Practice

青岛东合信息技术有限公司　编著



西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

TinyOS 操作系统开发技术及实践

青岛东合信息技术有限公司　编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

TinyOS 操作系统是无线传感器网络中最为流行的操作系统，已成为无线传感网领域事实上的标准平台。

本书从 TinyOS 操作系统的应用开发角度出发，基于 CC2530 硬件平台，深入地讲解了 TinyOS 的体系结构、nesC 编程、TinyOS 在 CC2530 平台上的移植、TinyOS 网络编程，TinyOS 高级应用及开发等技术。

本书展示了 TinyOS 开发技术的来龙去脉，并在此基础上注重实战技能，重在讲解 TinyOS 在开发过程中的实际操作。

本书语言精练，内容描述讲求理性、准确性与严格性。本书可作为本科或高职高专物联网计算机科学与技术、网络、通信等专业的技术开发应用教材。

图书在版编目(CIP)数据

TinyOS 操作系统开发技术及实践/青岛东合信息技术有限公司编著.
—西安：西安电子科技大学出版社，2014.1
普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5606-3315-2

Ⅰ. ① T… Ⅱ. ① 青… Ⅲ. ① 无线电通信—传感器—网络操作系统—系统开发—高等学校—教材
Ⅳ. ① TP212 ② TP316.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 001034 号

策　　划　毛红兵
责任编辑　阎　彬　王　涛　毛红兵
出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)
电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　　编　710071
网　　址　www.xduph.com　　电子邮箱　xdupfxb001@163.com
经　　销　新华书店
印刷单位　陕西天意印务有限责任公司
版　　次　2014 年 1 月第 1 版　　2014 年 1 月第 1 次印刷
开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印　张　15
字　　数　349 千字
印　　数　1～3000 册
定　　价　36.00 元
ISBN 978-7-5606-3315-2/TP
XDUP　3607001-1

普通高等教育物联网工程专业
“十二五”规划教材编委会

前　言

随着物联网产业的迅猛发展，企业对物联网工程应用型人才的需求越来越大。“全面贴近企业需求，无缝打造专业实用人才”是目前高校物联网专业教育的革新方向。

本系列教材是面向高等院校物联网专业方向的标准化教材，教材内容注重理论且突出实践，强调理论讲解和实践应用的结合，覆盖了物联网的感知识别、网络通信及应用支撑等物联网架构所包含的关键技术。教材研发充分结合物联网企业的用人需求，经过了广泛的调研和论证，并参照多所高校一线专家的意见，具有系统性、实用性等特点，旨在使读者在系统掌握物联网开发知识的同时，具备综合应用能力和解决问题的能力。

该系列教材具有如下几个特色。

1. 以培养应用型人才为目标

本系列教材以应用型物联网人才为培养目标，在原有体制教育的基础上对课程进行深层次改革，强化“应用型技术”动手能力，使读者在经过系统、完整的学习后能够达到如下要求：

- 掌握物联网相关开发所需的理论和技术体系以及开发过程规范体系；
- 能够熟练地进行设计和开发工作，并具备良好的自学能力；
- 具备一定的项目经验，包括嵌入式系统设计、程序编写、文档编写、软硬件测试等内容；
- 达到物联网企业的用人标准，实现学校学习与企业工作的无缝对接。

2. 以新颖的教材架构来引导学习

本系列教材分为四个层次：知识普及、基础理论、应用开发、综合拓展，这四个层面的知识讲解和能力训练分布于系列教材之间，同时又体现在单本教材之中。具体内容在组织上划分为理论篇和实践篇：理论篇涵盖知识普及、基础理论和应用开发；实践篇包括企业应用案例和综合知识拓展等。

- **理论篇**：最小学习集。学习内容的选取遵循“二八原则”，即重点内容占企业中常用技术的20%，以“任务驱动”方式引导80%的知识点的学习，以章节为单位进行组织，章节的结构如下：
  - ✓ 本章目标：明确本章的学习重点和难点；
  - ✓ 学习导航：以流程图的形式指明本章在整本教材中的位置和学习顺序；
  - ✓ 任务描述：以“案例教学”驱动本章教学的任务，所选任务典型、实用；

✓ 章节内容：通过小节迭代组成本章的学习内容，以任务描述贯穿始终。

■ **实践篇**：以任务驱动，多点连成一线。以接近工程实践的应用案例贯穿始终，力求使学生在动手实践的过程中，加深对课程内容的理解，培养学生独立分析和解决问题的能力，并配备相关知识的拓展讲解和拓展练习，拓宽学生的知识面。

本系列教材借鉴了软件开发中“低耦合、高内聚”的设计理念，组织架构上遵循软件开发中的 MVC 理念，即在保证最小教学集的前提下可根据自身的实际情况对整个课程体系进行横向或纵向裁剪。

3. 以完备的教辅体系和教学服务来保证教学

为充分体现“实境耦合”的教学模式，方便教学实施，保障教学质量和学习效果，本系列教材均配备可配套使用的实验设备和全套教辅产品，可供各院校选购。

■ **实验设备**：与培养模式、教材体系紧密结合。实验设备提供全套的电路原理图、实验例程源程序等。

■ **立体配套**：为适应教学模式和教学方法的改革，本系列教材提供完备的教辅产品，包括教学指导、实验指导、视频资料、电子课件、习题集、题库资源、项目案例等内容，并配以相应的网络教学资源。

■ **教学服务**：教学实施方面，提供全方位的解决方案(在线课堂解决方案、专业建设解决方案、实训体系解决方案、教师培训解决方案和就业指导解决方案等)，以适应物联网专业教学的特殊性。

本系列教材由青岛东合信息技术有限公司编写，参与本书编写工作的有韩敬海、李瑞改、张玉星、孙锡亮、李红霞、卢玉强、刘晓红、袁文明等。参与本书编写工作的还有青岛农业大学、潍坊学院、曲阜师范大学、济宁学院、济宁医学院等高校的教师。本系列教材在编写期间还得到了各合作院校专家及一线教师的大力支持和协作。在本系列教材出版之际要特别感谢给予我们开发团队大力支持和帮助的领导及同事，感谢合作院校的师生给予我们的支持和鼓励，更要感谢开发团队每一位成员所付出的艰辛劳动。

由于水平有限，书中难免有不当之处，读者在阅读过程中如有发现，请通过公司网站(http://www.dong-he.cn)或我公司教材服务邮箱(dh_iTeacher@126.com)联系我们。

高校物联网专业项目组

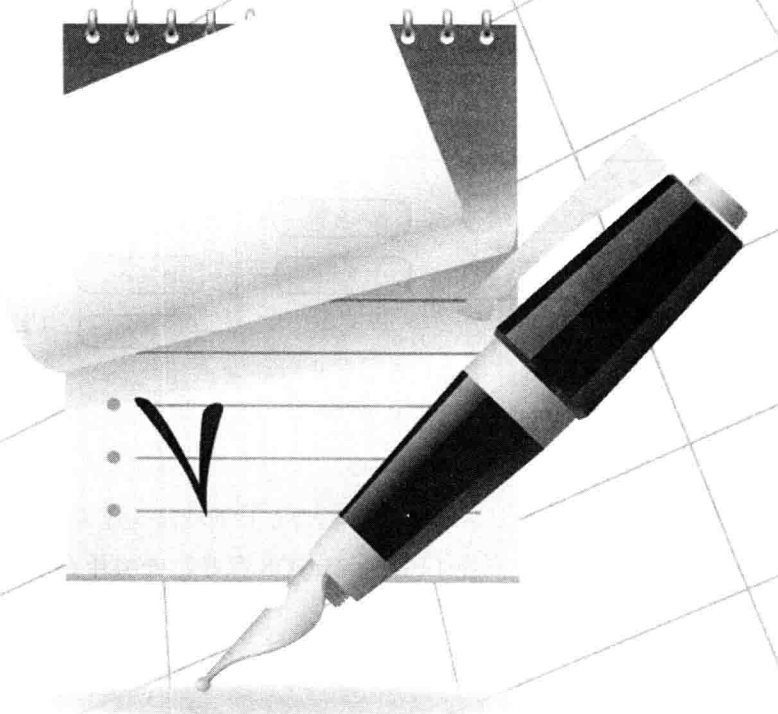
2013 年 11 月

目　录

理　论　篇

实　践　篇

理论篇

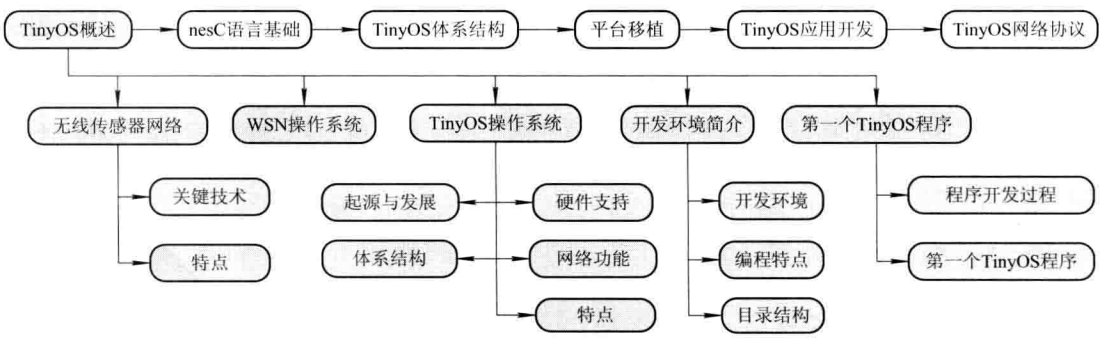


第 1 章 TinyOS 概述

本章目标

- 了解无线传感器网络的关键技术和特点
- 了解几款流行的 WSN 操作系统的特点及编程模型
- 了解 TinyOS 主要版本变化情况
- 了解 TinyOS 的体系结构
- 了解 TinyOS 所支持的硬件及网络协议
- 了解 TinyOS 的优缺点
- 熟悉 TinyOS 的编程特点
- 掌握 TinyOS 程序的一般开发过程

学习导航



任务描述

➢【描述 1.D.1】

编写一个开机点亮 LED 的 TinyOS 程序，并编译和下载运行。

1.1　无线传感器网络

无线传感器网络(Wireless Sensor Network，英语简称 WSN，中文简称为无线传感网)，是大量静止或移动的传感器节点以自组织和多跳的方式构成的无线网络。其目的是协作地感知、采集和处理传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息，并报告给用户。

1.1.1　关键技术

当前无线传感网研究热点主要集中在以下几个方面，它们也被普遍认为是无线传感网的关键技术：

✧　时间同步：是完成实时信息采集的基本要求，并且是提高定位精度的关键手段。

✧　拓扑控制：在满足网络覆盖度和连通度的前提下，通过功率控制或层次拓扑控制，最小化网络的能量消耗。

✧　定位技术：包括节点自定位和网络区域内的目标定位跟踪。

✧　网络安全：密钥管理、身份认证和数据加密方法、攻击检测与抵御、安全路由协议和隐私问题。

✧　网络通信：核心问题是能量有效性或能力节省。主要热点集中在网络层和链路层，例如链路层 MAC 协议如何节省能力，网络层新路由协议提出或路由协议改进。

✧　系统软件：WSN 是深度嵌入的网络系统，因此要求操作系统既要能完成网络系统要求的各项功能，又不能过于复杂。目前看，TinyOS 是最成功的 WSN 专用系统。

✧　数据管理：包括分布式动态实时数据管理以及信息融合。

✧　能量供给：包括能量的获取和存储。

1.1.2　特点

无线传感网与传统的无线网络(如 Ad hoc 网络、GSM、CDMA、3G、Beyond3G、4G、WLAN 和 WMAN 等)有着不同的设计思想，它的特点主要表现在以下几方面：

✧　节点规模：节点数目庞大，可以达到成千上万。

✧　节点部署：节点在部署完成之后大部分节点不会再移动，网络拓扑结构是静态的。

✧　工作模式：多对一通信，路由协议以数据为中心。

无线传感网的详细特点介绍请参见本书所属系列教材《无线传感器网络技术原理及应用》的第一章。

1.2　WSN 操作系统

无线传感器网络操作系统(简称为 WSN 操作系统或 WSNOS)是无线传感器网络的关键支撑技术之一(即系统软件技术)。WSN 操作系统可以有效地管理硬件资源和执行任务，降低传感器网络的应用开发难度，提高软件的重用性。

当前比较流行 WSN 操作系统有 TinyOS、Contiki、MANTIS、SOS，它们的特点及对比如表 1-1 所示。

表 1-1 几款 WSN 操作系统对比

WSN 操作系统	研发机构	开发语言	主要特点	编程模型
TinyOS	美国加利福尼亚大学伯克利分校	nesC	基于组件，由事件驱动的操作系统	基于组件的连接和接口式编程
Contiki	瑞典计算机科学研究所	C	提供多任务和内建 TCP/IP 支持，支持进程及可选的抢占式多任务	模块化结构式编程
MANTIS	美国科罗拉大学	C	支持基于优先级的多线程调度	模块化结构式编程
SOS	美国加州大学洛杉矶分校	C	事件驱动，动态内存管理	模块化结构式编程

1.3 TinyOS 操作系统

TinyOS 操作系统目前被业界认为是最成功的无线传感器网络操作系统，已成为这一领域事实上的标准平台。本节从 TinyOS 的起源说起，具体介绍它的版本情况、体系结构、硬件和网络支持、源码目录结构以及编程特点，目的是对其有较为清晰的总体认识，这也是学习本书后续章节的基础。

1.3.1 起源与发展

1. 项目产生

TinyOS 最初是由美国著名的加利福尼亚大学伯克利分校(UCB)专门为无线传感器网络定制研发的嵌入式操作系统。事实上它也是 UCB 的科学家 David Culler 领导的 UCB 研究小组与 Intel Research 合作实验室的杰作。

2. 项目发展

TinyOS 是开源项目，目前已不再由 UCB 单独开发和维护，从 0.4 版到 2.0 版，TinyOS 由 SourceForge.net(全球最大开源软件开发平台和仓库)的一个开放项目，逐渐演变成了一个国际合作项目。从 2012 年 12 月开始，TinyOS 的开发和维护(包括开发邮件列表和 BUG 跟踪记录)逐渐过渡到 GitHub(一个逐渐流行起来的分布式版本控制系统)上，至 2013 年 1 月项目迁移完毕。TinyOS 在 GitHub 上的虚拟主机地址是：https://github.com/tinyos。

TinyOS 官方网站是：http://www.tinyos.net，其产品标志如图 1-1 所示。

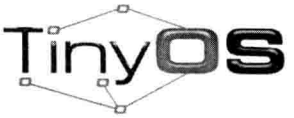


图 1-1 TinyOS 产品标志

3. 版本变化

从 1999 年 TinyOS 平台(官方取名为 WEC)由 UBC 开发后，到 2003 年 8 月 TinyOS 的

最新版本 2.1.2，TinyOS 不断改进。其中，在 1.0 版本以前 TinyOS 都是由 C 语言写成(混合少量 Perl 脚本)的，后来用 nesC 语言重新编写。其重要版本变化情况如表 1-2 所示。

表 1-2　TinyOS 的版本变化

版本	时间	说　明
0.4.3	2000 年	通过 Sourceforge.net 向公众开放
0.6.x	2001	支持 mica 平台，期间 UBC 发布了支持 1000mica 平台的 TinyOS 项目，2002 年 4 月 UCB 与 Intel 研究进行 nesC 语言开发合作
1.0	2002 年 9 月	使用 nesC 语言重新编写并改进了 TinyOS
1.1.x	2003 年 8 月	nesC 增加部分新功能(如支持并发模型)；TinyOS 增加新的 UART 通信协议等
2.0 Beta	2006 年 2 月	2.0 Beta1 发布，2.0 与 1.x 不再兼容，后者编写的代码将无法在 2.0 上编译通过；2.0 硬件抽象遵循 3 级结构；改进了任务调度策略；2.0 提供了比 1.x 更丰富的定时器接口
2.0.1	2007 年 4 月	增加 CC2420 低功耗协议栈；改进组件和接口的资源管理；增加 lib/printf 库；增加 lib/net/lqi 库；修复部分 BUG
2.0.2	2007 年 7 月	重新实现了 CC2420 低功耗协议栈；修复部分 BUG
2.1.0	2008 年 8 月	增加对 IRIS 和 shimmer 平台的支持；增加对 802.15.4 T-Frames 帧的支持；增加低功耗应用开发指导
2.1.1	2010 年 4 月	增加对 shimmer2、mulle、epic 平台的支持；增加 6LoWPAN/IP 协议栈；改进 python SDK
2.1.2	2012 年 8 月	增加 RPL 协议栈；增加对 ucmini、ATMega128RFA1、Zolertia Z1 平台的支持；增加 CoAP 协议栈

1.3.2　体系结构

TinyOS 操作系统采用组件式分层体系结构，这种体系结构可以快速地实现各种应用，详细内容请参见本书第 3 章。

1.3.3　硬件支持

TinyOS 可运行于不同的硬件平台和微处理器上，并支持多款射频芯片，且支持 NOR Flash 设备。以 2.1.1 版为例的 TinyOS 支持以下硬件：

✧　硬件平台：TinyOS 支持多达十几种不同的硬件平台(每种平台代表着一类处理器、射频、存储和 IO 引脚的组合)。TinyOS 支持的硬件平台有：telos 家族(包括 telosa 和 telosb)、micaZ、IRIS、shimmer、epic、mulle、tinynode、span 以及 iMote2 等。

✧　微处理器：TI 公司的 MSP430、Atmel 公司的 ATMega128、Intel 公司的 px27ax 微处理器。

✧　射频芯片：TI 的 CC1000 和 CC2420(经过移植后还可支持 CC2430 和 CC2530)、Atmel 公司的 RF212 和 RF230、Infineon 公司的 TDA5250、Semtech 公司的 XE1205。

✧　Flash 芯片：TinyOS 支持两款 NOR Flash 芯片，即 Atmel 公司的 AT45DB 芯片和

STMicroelectronics 公司的 STM25P 芯片。

1.3.4 网络功能

TinyOS 有较为丰富的网络支持，主要包括多跳路由协议和最新的 IPv6 协议：

✧ 多跳路由协议，主要包括数据分发协议和汇聚协议。

● 分发协议：用于网络中数据共享，网络中每个节点都保存一份数据的副本。TinyOS 主要支持两种分发协议库，即 Drip 和 DIP。

● 汇聚协议：用于将网络中的数据收集到某个点(称为 root 或根节点)，典型的用法如将通过 root 传输给 PC。TinyOS 支持的标准汇聚协议叫“汇聚树协议”(英语简称 CTP)。

✧ IPv6，即用于无线通信网络的 6LoWPAN(2.1.1 版本以后)。

1.3.5 特点

1. 优点

TinyOS 的优点体现在以下几方面：

✧ TinyOS 有成千上万的用户，现有的体系结构已有 5 年以上的历史，代码可靠、有效，错误极少，这对工程项目来说至关重要。

✧ 支持低功耗和并发执行模型，因此特别适合于无线传感器节点。

✧ 支持技术上优异的网络协议，如汇聚协议 CTP 和 6LoWPAN 协议(用于无线网络的 IPv6 协议)等。

2. 缺点

TinyOS 有两大弱点：

✧ 它的组件式编程模型对于新手来说需要一段时间来适应。

✧ 对于计算密集型程序需要程序员将计算分成若干小部分，逐个执行，即需要使用 TinyOS 的“分阶段作业”机制(Split Phase)，此类程序比较难写。

1.4 开发环境简介

在实际进行 TinyOS 开发之前，首先需要熟悉 TinyOS 开发环境的安装、配置以及目录结构，并掌握它的一般开发过程，建议读者结合本书的实践篇学习本节。

1.4.1 开发环境

TinyOS 本质上是一个编程框架，它的完整开发环境包括以下内容：

✧ 操作系统：TinyOS 需要在 Linux 环境下进行开发，如果要在 Windows 上进行开发，需要安装模拟 Linux 操作系统的 Cygwin 程序包。

✧ JAVA JDK：TinyOS 部分工具命令需要 JAVA 支持，另外 JAVA 还可用于某个硬件平台(如 mote)与 PC 机进行数据交互的模拟程序编写，以方便用户观看运行结果。

✧ TinyOS 操作系统：TinyOS 编程框架本身。

✧ 编译工具链：当前官方发布的是三个工具，包括 nesC 语言编译器、Deputy 工具

和 tinyos-tools。

✧　GraphViz 可视化工具：TinyOS 编译工具包括一个 nesdoc 工具，可以将用户 nesC 源码中的组件调用关系生成 HTML 文档，期间用到的 GraphViz 工具可绘制“调用关系图”。

✧　本地编译器：nesC 编译器生成的 C 程序最终还需要特定硬件平台的编译器编译成硬件可运行的二进制代码，例如若使用 CC2530，可安装 IAR For 51 编译器。

✧　代码编辑器：在 Linux 下可以使用 vim、emacs、gedit 等，如果是在 Windows 下使用 Cygwin 进行 TinyOS 开发，推荐使用 EditPlus。

本书使用的开发环境如下：

✧　硬件平台：与本书配套的 Zigbee 开发套件。

✧　操作系统：基于 Windows 的 Cygwin。

✧　TinyOS 操作系统：tinyos-2.1.0-2.cygwin.noarch.rpm。

✧　TinyOS 工具链：nesc-1.3.0-1.cygwin.i386.rpm、tinyos-deputy-1.1-1.cygwin.i386.rpm、tinyos-tools-1.3.0-1.cygwin.i386.rpm。

✧　本地编译器：IAR For 51。

✧　代码编辑器：EditPlus 3.30。

✧　其他工具：jdk1.6、graphviz-1.10。

开发环境的详细安装过程，请参见本书实践篇。

1.4.2　编程特点

TinyOS 操作系统由 nesC 语言写成，从程序员角度看，它的基本作用就是提供了一组 API 接口(包括可调用的组件库、部分 C 语言结构体和数据类型)，以及一些编程规则。具体来说，基于 nesC 语言的 TinyOS 编程行为具有以下特点：

✧　平台化编程：实际开发时，首先要根据用户选定的硬件平台移植 TinyOS，后续开发都在这个“特定平台”上进行工作(本书所有示例是基于 TI CC2530 芯片的代号为 mytinyos 的开发平台)。

✧　兼容 C 语法：使用 nesC 进行 TinyOS 编程时可以使用 C 语言中几乎所有的结构体、函数等语法。事实上，nesC 仅仅是在较高的层次上增加了一些新的数据结构(即接口和组件)和并发执行模型。

✧　组件式编程：组件类似于面向对象语言(如 C++或 JAVA)的类对象，可以提供或使用接口(interface)，并且有自己的内部实现(implementation)，程序员使用代码确定组件之间的连接关系。与 C++或 JAVA 不同的是，组件对象的实例化是在编译时进行的。

✧　任务式编程：TinyOS 提供一个简单的延期任务机制，即用 task 关键字修饰的任务函数使用 post 关键字投递后，可以被 TinyOS 的任务调度程序调度执行。任务可以使组件在“后台”运行，而不是立即执行。

✧　分阶段作业编程：当编写一个需要长时间运行的作业代码时，将其分为两个阶段，即调用和完成调用。例如一个读传感器工作，可以写成两个函数，read 和 readDone 函数，当 read 函数读完时，在函数内部通过任务给调用者激发一个 readDone 事件。

✧　事件驱动编程：事件机制导致代码的执行路径是不可预知的，不同的事件执行不同的代码片段。TinyOS 有两种事件：硬件中断事件和程序事件(由程序本身使用 signal 关键

字来激发的事件)。

✧ 并发执行模型：nesC 将代码区分为同步(sync)代码和异步(async)代码。其中同步代码仅由任务来执行；异步代码可被任务和中断处理程序执行，nesC 编译器检查并确保这个规则被执行。

关于 TinyOS 详细编程语法(即 nesC 编程语法)请参见本书第 2 章。

⚠ 注意：由于 nesC 语言就是为 TinyOS 而产生的，大多数情况下在提到“TinyOS 编程特点或语法”时，其实指的是 nesC 的“编程语法或特点”。

1.4.3 目录结构

本书是在 Cygwin 下进行 TinyOS 开发的，下面分别介绍安装和配置成功后的 Cygwin、TinyOS 以及本书所移植平台 mytinyos 的目录结构。

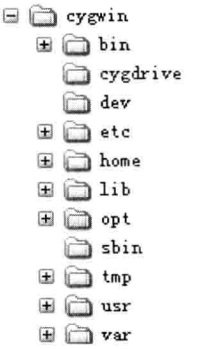


图 1-2 Cygwin 目录结构

1. Cygwin 目录

Cygwin 是一个在 Windows 操作系统上运行的 UNIX/Linux 模拟环境，它对于 Windows 用户学习 UNIX/Linux 操作或开发非常有用。由于 Cygwin 是模拟 UNIX/Linux，因此它的目录结构与真实的 UNIX/Linux 非常相似。Cygwin 在 Windows 下安装完毕后，在资源管理器中看到的目录结构如图 1-2 所示。

各子目录的说明如表 1-3 所示。

表 1-3 Cygwin 子目录说明

目录	用 途	Windows 下访问说明
bin	二进制(binary)目录，存放系统必备的可执行命令或程序	可在 Windows 下直接访问，但一般不进行修改
cygdrive	在 Cygwin 运行时该目录映射了当前 Windows 系统的整个文件系统，通过该目录可以访问诸如 C、D、E 等磁盘分区	此目录在 Windows 下打开后是空的，并且不要直接修改它
dev	设备驱动目录，存放链接到计算机上设备的对应文件	可在 Windows 下直接访问，但一般不进行修改
etc	存放和特定主机相关的文件和目录，例如系统配置文件，这个目录下的文件主要由管理员使用；普通用户对大部分文件只有读权限	可在 Windows 下直接访问，但一般不进行修改
home	用户主目录，存放所有普通系统用户的默认工作目录	可在 Windows 下直接访问，可以修改其中的“.bashrc”文件，增加环境变量、添加启动脚本等
lib	存放系统运行时的共享库文件	可在 Windows 下直接访问，但一般不进行修改
opt	用来安装附加软件包，TinyOS 源码以及移植后的平台源码一般安装在此目录下	可在 Windows 下直接访问，需要时可以修改或编辑该目录