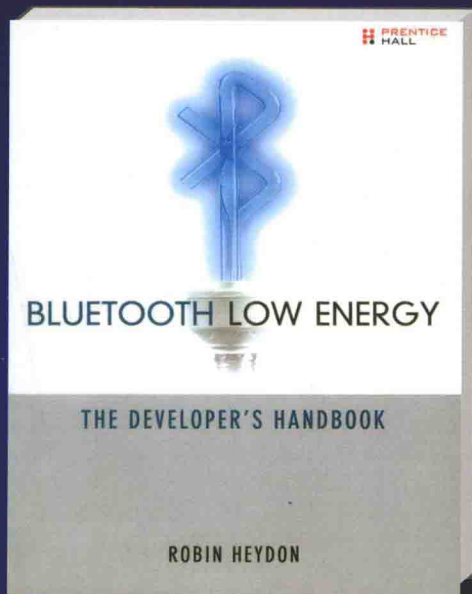




PEARSON



Bluetooth Low Energy
The Developer's Handbook

低功耗蓝牙开发 权威指南

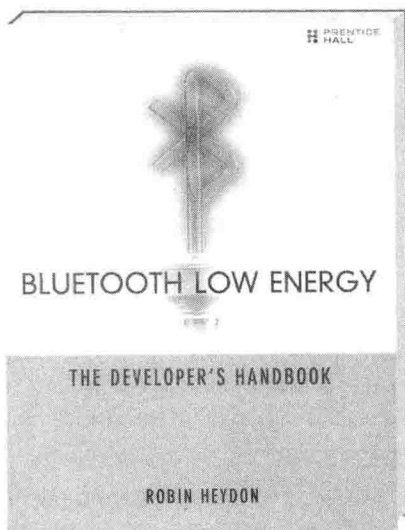
[英] Robin Heydon 著 陈灿峰 刘嘉 译



机械工业出版社
China Machine Press



电子与嵌入式系统
设计译丛



Bluetooth Low Energy
The Developer's Handbook

低功耗蓝牙开发 权威指南

[英] Robin Heydon 著 陈灿峰 刘嘉 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

低功耗蓝牙开发权威指南 / (英) 海登 (Heydon, R.) 著; 陈灿峰, 刘嘉译. —北京: 机械工业出版社, 2014.6

(电子与嵌入式系统设计译丛)

书名原文: Bluetooth Low Energy: The Developer's Handbook

ISBN 978-7-111-46921-6

I. 低… II. ①海… ②陈… ③刘… III. 短距离-无线电通信-移动通信-通信技术-指南 IV. TN929.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 116091 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-8305

Authorized translation from the English language edition, entitled *Bluetooth Low Energy: The Developer's Handbook*, 1E, 9780132888363 by Robin Heydon, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013.

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.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2014.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括中国台湾地区和香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书通过与经典蓝牙作对比, 详尽介绍了将深入影响下一次无线技术革命的低功耗蓝牙技术的产生、设计、工作原理及其良好的节能、抗干扰特性和灵活、简单的开发特点。本书分为四个部分, 分别阐述了低功耗蓝牙技术及其控制器、主机的工作原理, 以及应用程序的设计开发, 适合从事低功耗蓝牙产品开发工作的工程师、应用程序开发人员、设计师或市场营销人员等各类读者阅读。

低功耗蓝牙开发权威指南

[英] Robin Heydon 著

出版发行: 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 瑛

责任校对: 殷 虹

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm × 240mm 1/16

印 张: 15.5

书 号: ISBN 978-7-111-46921-6

定 价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有 · 侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

译者序

为了解除日益增多的连接线缆的烦恼，爱立信的一位工程师在 1994 年发明了一种名为蓝牙的短距离无线通信技术，时至今日，蓝牙已成为业界公认的连接智能移动设备与周边其他人机交互设备（如键鼠、耳机等）的最主要无线通信手段之一。自蓝牙技术联盟于 2001 年发布蓝牙 1.1 版本技术规范起，一群诺基亚的工程师就开始畅想，在若干年后，如何能够让智能移动设备与周边的嵌入式设备的连接时间更长，特别是各种传感器与执行器设备，从而使得智能移动设备成为与周边 10m 范围内各种电子产品通信的中枢。经过 10 年的努力，蓝牙技术联盟终于在 2011 年发布了里程碑版本的蓝牙 4.0 技术规范，其中最具吸引力的就是低功耗蓝牙技术规范。

与经典蓝牙相比，低功耗蓝牙不仅极大地降低了芯片的功耗，还以其连接的灵活性、良好的抗干扰性、简单的应用开发等特性，很快得到了智能手机与个人电脑厂商的认可，以及众多外设厂商和应用开发者的青睐。特别是自 2012 年以来，围绕智能手机打造的各种应用外设（**appcessory**）呈现出爆发式增长的态势，例如智能家居和车载电子设备，它们还可借助智能手机将数据发送至互联网，在云端得到进一步的分析处理，从而为消费者带来更加个性化的服务。许多互联网企业也加入可穿戴设备这样一轮新的移动互联网创新浪潮之中，为消费者带来各种集成了多种传感器的智能手环、手表等面向运动与健康的应用外设，并引发了一种称为“量化自我”的生活方式。

本书的作者 **Robin Heydon** 是 CSR 公司负责蓝牙技术标准化的标准架构师，蓝牙技术规范的每一个版本都有他的贡献，同时他也是制定低功耗蓝牙技术标准的超低功耗（**ULP**）工作组的联合主席，自 2007 年开始推动低功耗蓝牙技术标准的制定工作，并因其出色的工作于 2010 年入选蓝牙技术联盟名人堂。

译者所在的研发团队自 2009 年开始接触最早一批的低功耗蓝牙的工程样片，并陆续开发了基于低功耗蓝牙的端到端 **IPv6** 通信演示系统，以及基于低功耗蓝牙的高精度室内定位系统，并参与了其技术标准化工作。译者自接触低功耗蓝牙技术以来，就一直很希望能有机会与更多的同行分享这一设计出色的面向移动物联网的无线技术。就在译者翻译此书的过程中，蓝牙技术联盟又在 2013 年底发布了蓝牙 4.1 版，其中主要包含了面向物联网（**IoT**）的一些新技术特性，如允许建立面向连接的信道以

及未来可以承载 IPv6 报文的传输。另外，蓝牙 4.1 也进一步优化了连接的建立与保持过程，如允许两部已经配对的设备基于定向广播延长广播的周期，从而实现设备更长的待机时间。

低功耗蓝牙技术及其未来的演进版本将继续拓展蓝牙现有的生态系统，为移动互联网的应用及设备的创新创造出更多的机会，满足消费者从家里到手提包里，从汽车上到高尔夫球场上无处不在的无线连接需求。

陈灿峰 刘嘉

2014 年 3 月 10 日

前 言

有时候，一项难能可贵的新技术的出现能够改变世界，AM 广播、电视和无线互联网便是这样的例子。作为一项可广泛植入各类产品、围绕微型电池设计、可持续工作数年的技术，低功耗蓝牙已然站在了下一次无线技术革命的最前沿。

本书详尽地解释了这项技术是如何产生、如何设计以及如何工作的。作者 **Robin Heydon** 是低功耗蓝牙领域的顶尖专家，曾参与低功耗蓝牙的标准规范制定、互操作性测试以及培训工作。

本书适合从事低功耗蓝牙产品开发工作的各类读者，例如工程师、应用程序开发人员、设计师或者市场营销人员。

对工程师来说，这本书涵盖了系统工作的完整细节，从物理无线电到设备的发现、连接和提供接口。

对应用程序开发人员来说，这本书有助于其理解低功耗蓝牙对应用程序所施加的限制，此外本书还提供了关于设计目标和实现具体需求的详细介绍。

对设计师来说，本书包含的信息将让你了解关于设计低功耗蓝牙无线产品的特殊问题，比如产品需要如何工作，选择多大的电池才能实现你的想法等。

对其他想了解该技术的人来说，这本书提供了低功耗蓝牙的许多背景材料，包括为什么要设计该技术，试图实现的设计目标是什么，以及一些将会颠覆你对无线技术及其实现方式的看法的相关知识。

全书共分为四个部分：

第一部分为技术概述，包括用于指导低功耗蓝牙开发的基本概念，系统的体系结构（无线电、各种协议层、应用层），以及新技术带来的新使用模式。

第二部分详细介绍了控制器（无线电芯片）的工作原理。产品设计人员需要将该硅芯片植入自己的终端产品中。该部分涵盖了无线电、直接测试模式和链路层，此外还介绍了如何使用上层协议栈（或称主机）与控制器进行交互。

第三部分深入阐述了主机（软件栈）的工作原理，涉及各主要协议背后的概念和细节，这些协议

主要用于公开设备的属性。该部分还介绍了安全模型，以及两台设备之间如何进行连接、绑定或相互关联。

第四部分讨论了产品或应用程序开发人员需要考虑的所有设计因素。首先着眼于与中央设备有关的问题，接着是外围设备的问题，最后讨论了任何蓝牙产品上市前的最后一步，即测试和认证。

如果阅读本书后，读者还想了解更多关于低功耗蓝牙的相关知识，以下列出一些可供参考的资料。标准规范可以在蓝牙技术联盟网站 www.bluetooth.org 中找到。如果想查找有关低能耗蓝牙的开发信息，可以访问开发者网站 developer.bluetooth.org，上面有关于特性 (characteristic) 的详细信息。本书作者也有一个网站 www.37channels.com，在那里可以看到针对本书或者低功耗蓝牙的一些常见问题。

致谢

感谢以下各位的帮助和支持，使得本书得以顺利完成。Katherine Heydon 多次从头到尾翻阅全文，并就内容提出了建设性的批评意见。Jennifer Bray 第一个鼓励我撰写本书，并给了我时间和空间来完成此项工作。感谢 Addison-Wesley 出版团队的所有成员，尤其是 Bernard Goodwin、Elizabeth Ryan、Michelle Housley 和 Gary Adair，感谢文字编辑 Bob Russell 以及其他所有促成本书的幕后人员。感谢 Nick Hunn 多次与我讨论如何才能更好地交流低功耗技术的想法。Zoë Hunn 为本书设计了梦幻般的封面。Andy Glass 不断询问本书的完成时间，并提供了很好的审查意见。Steve Wenham 长期忍受我各种天马行空般的低功耗蓝牙的改进想法。英国航空公司几乎总是给我一个前排带有隔板的座位，让我得以在许多的长途航班中使用我的蓝牙键盘和鼠标。这本书可能是在 30 000 英尺的平均高度撰写完成的。感谢蓝牙技术联盟社区，他们在全员会议、蓝牙测试活动 (UnPlugFest) 和各种工作组会议中提出了许多问题，正是这些问题让我明确了哪些概念是最难解释的，本书的基本框架和内容也由此受益。

目 录

译者序
前言

第一部分 综 述

第 1 章 什么是低功耗蓝牙技术 2

- 1.1 设备类型 4
- 1.2 设计目标 5
- 1.3 术语 6

第 2 章 基本概念 8

- 2.1 纽扣电池 8
- 2.2 时间即能量 9
- 2.3 昂贵的内存 10
- 2.4 非对称设计 10
- 2.5 为成功而设计 11
- 2.6 凡事皆有状态 12
- 2.7 客户端 - 服务器架构 12
- 2.8 模块化架构 13
- 2.9 十亿只是个小数目 14
- 2.10 无连接模型 14
- 2.11 范式 14

- 2.11.1 客户端 - 服务器架构 14

- 2.11.2 面向服务的架构 15

第 3 章 低功耗蓝牙的体系结构 19

- 3.1 控制器 20
 - 3.1.1 物理层 20
 - 3.1.2 直接测试模式 20
 - 3.1.3 链路层 21
 - 3.1.4 主机 / 控制器接口 22
- 3.2 主机 22
 - 3.2.1 逻辑链路控制和适配协议 22
 - 3.2.2 安全管理器协议 23
 - 3.2.3 属性协议 23
 - 3.2.4 通用属性规范 24
 - 3.2.5 通用访问规范 25
- 3.3 应用层 25
 - 3.3.1 特性 26
 - 3.3.2 服务 26
 - 3.3.3 规范 26

3.4 协议栈划分	27	6.3.2 命令与事件	48
3.4.1 单芯片解决方案	27	6.4 使用 HCI 的直接测试模式	50
3.4.2 双芯片解决方案	28		
3.4.3 三芯片解决方案	28	第 7 章 链路层	51
第 4 章 新的使用模型	30	7.1 链路层状态机	51
4.1 存在检测	30	7.1.1 就绪态	52
4.2 广播数据	31	7.1.2 广播态	53
4.3 无连接模式	31	7.1.3 扫描态	53
4.4 网关	32	7.1.4 发起态	54
		7.1.5 连接态	55
		7.1.6 多状态机	55
		7.2 报文	57
		7.2.1 广播与数据报文	57
		7.2.2 白化	57
		7.3 报文结构	59
		7.3.1 比特序与字节	60
		7.3.2 前导	60
		7.3.3 接入地址	60
		7.3.4 报头	61
		7.3.5 长度	61
		7.3.6 净荷	63
		7.3.7 循环冗余校验	63
		7.4 信道	63
		7.4.1 跳频	66
		7.4.2 自适应跳频	66
		7.5 设备发现	68
		7.5.1 通用广播	69
		7.5.2 定向广播	69
		7.5.3 不可连接广播	70
		7.5.4 可发现广播	70
		7.6 广播	70
		7.7 建立连接	71
第二部分 控制器			
第 5 章 物理层	36		
5.1 背景	36		
5.2 模拟调制	36		
5.3 数字调制	38		
5.4 频段	39		
5.5 调制	40		
5.6 射频信道	41		
5.7 发射功率	41		
5.8 容限	42		
5.9 接收机灵敏度	42		
5.10 通信距离	42		
第 6 章 直接测试模式	45		
6.1 背景	45		
6.2 收发机测试	46		
6.2.1 测试报文格式	46		
6.2.2 发射机测试	47		
6.2.3 接收机测试	47		
6.3 硬件接口	48		
6.3.1 串口	48		

7.7.1	接入地址	72	7.12.3	低开销	95
7.7.2	CRC 初始化	72	7.12.4	确认机制	96
7.7.3	发送窗口	72	7.12.5	单信道连接事件	96
7.7.4	连接事件	73	7.12.6	亚速率连接事件	97
7.7.5	信道图	74	7.12.7	离线加密	98
7.7.6	睡眠时钟精度	74			
7.8	发送数据	74	第 8 章 主机 / 控制器接口	99	
7.8.1	数据报头	75	8.1	介绍	99
7.8.2	逻辑链路标识符	75	8.2	物理接口	99
7.8.3	序列号	76	8.2.1	UART	99
7.8.4	确认	76	8.2.2	3 线 UART	100
7.8.5	更多数据	77	8.2.3	USB	101
7.8.6	使用序列号和更多数据的 例子	77	8.2.4	SDIO	102
7.9	加密	79	8.3	逻辑接口	102
7.9.1	AES	79	8.3.1	HCI 信道	102
7.9.2	加密净荷数据	80	8.3.2	命令数据包	102
7.9.3	消息完整性校验	81	8.3.3	事件数据包	103
7.10	管理连接	82	8.3.4	数据包	104
7.10.1	连接参数更新	83	8.3.5	命令流控	105
7.10.2	自适应跳频	84	8.3.6	数据流控	106
7.10.3	启动加密	85	8.4	控制器的配置	106
7.10.4	重启加密	87	8.4.1	重置控制器为已知状态	106
7.10.5	版本交换	87	8.4.2	读取设备地址	107
7.10.6	功能交换	89	8.4.3	设置事件掩码	107
7.10.7	终止连接	90	8.4.4	读取缓冲区大小	108
7.11	鲁棒性	90	8.4.5	读取控制器支持的功能	109
7.11.1	自适应跳频	90	8.4.6	读取控制器支持的状态	109
7.11.2	强 CRC	92	8.4.7	随机数	110
7.12	为低功耗优化	93	8.4.8	加密数据	110
7.12.1	短报文	93	8.4.9	设置随机地址	111
7.12.2	高比特率	94	8.4.10	白名单	112
			8.5	广播和观察	112

8.5.1	广播	112	10.1.3	数据与状态	137
8.5.2	被动扫描	114	10.1.4	几种常见的状态	137
8.5.3	主动扫描	115	10.1.5	状态机	138
8.6	发起连接	116	10.1.6	服务和规范	139
8.6.1	与白名单设备发起连接	116	10.2	属性	142
8.6.2	与单一设备发起连接	118	10.2.1	属性概述	143
8.6.3	取消连接请求	118	10.2.2	属性句柄	143
8.7	连接管理	119	10.2.3	属性类型	143
8.7.1	更新连接	119	10.2.4	属性值	144
8.7.2	更新信道映射图	120	10.2.5	数据库、服务器和客 户端	145
8.7.3	交换功能列表	121	10.2.6	属性许可	145
8.7.4	交换版本信息	121	10.2.7	接入属性	147
8.7.5	加密连接	122	10.2.8	原子操作和事务	148
8.7.6	重启加密	123	10.3	分组	149
8.7.7	终止连接	125	10.4	服务	150
			10.4.1	扩展服务	151
			10.4.2	其他服务的重用	153
			10.4.3	结合服务	153
			10.4.4	首要还是次要	154
			10.4.5	即插即用的客户端应用	156
			10.4.6	服务声明	157
			10.4.7	包含服务	158
			10.5	特性	159
			10.5.1	特性声明	159
			10.5.2	特性数值	161
			10.5.3	描述符	161
			10.6	属性协议	164
			10.6.1	协议消息	165
			10.6.2	交换 MTU 请求	165
			10.6.3	查找信息请求	166
			10.6.4	按类型值查找请求	167

第三部分 主 机

第 9 章 逻辑链路控制和适配协议 128

9.1	背景	128
9.2	L2CAP 信道	130
9.3	L2CAP 数据包结构	130
9.4	低功耗信令信道	131
9.4.1	命令拒绝	132
9.4.2	连接参数更新请求和 响应	132

第 10 章 属性 135

10.1	背景	135
10.1.1	精简协议	136
10.1.2	无所不在的数据	136

10.6.5	按类型读取请求	168	11.2	配对和绑定	185
10.6.6	读取请求	168	11.2.1	配对	185
10.6.7	大对象读取请求	168	11.2.2	配对信息交换	185
10.6.8	多重读取请求	169	11.2.3	认证	186
10.6.9	按组类型读取请求	169	11.2.4	密钥分配	187
10.6.10	写入请求	169	11.2.5	绑定	188
10.6.11	写入命令	169	11.3	数据签名	188
10.6.12	签名写入命令	169	第 12 章 通用访问规范	189	
10.6.13	准备写入请求与执行 写入请求	170	12.1	背景	189
10.6.14	句柄值通知	171	12.1.1	初次发现	190
10.6.15	句柄值指示	171	12.1.2	建立初始连接	191
10.6.16	错误响应	171	12.1.3	服务特性	191
10.7	通用属性规范	173	12.1.4	长期关系	192
10.7.1	发现规程	174	12.1.5	重连	192
10.7.2	发现服务	174	12.1.6	私有地址	193
10.7.3	特性发现	175	12.2	GAP 角色	193
10.7.4	客户端发起规程	176	12.3	模式和规程	194
10.7.5	服务器发起规程	178	12.3.1	广播模式和观察规程	195
10.7.6	属性协议数据单元 (ATT PDU) 到 GATT 规程的 映射	178	12.3.2	可发现性	195
第 11 章 安全	180		12.3.3	可连接性	197
11.1	安全概念	180	12.3.4	绑定	199
11.1.1	认证	180	12.4	安全模式	200
11.1.2	授权	181	12.5	广播数据	201
11.1.3	完整性	181	12.5.1	标识	202
11.1.4	机密性	182	12.5.2	服务	202
11.1.5	隐私	182	12.5.3	本地名称	203
11.1.6	加密引擎	182	12.5.4	发射功率等级	203
11.1.7	共享机密	182	12.5.5	从设备连接间隔范围	203
			12.5.6	服务请求	203
			12.5.7	服务数据	203
			12.5.8	制造商指定数据	203

12.6	GAP 服务	204
12.6.1	设备名特性	204
12.6.2	外观特性	204
12.6.3	外围设备隐私标识	204
12.6.4	重连地址	205
12.6.5	外围设备首选连接 参数	205

第四部分 应用

第 13 章	中央设备	208
13.1	背景	208
13.2	发现设备	208
13.3	连接设备	209
13.4	这个设备能做什么	210
13.5	通用客户端	211
13.6	与服务交互	211
13.6.1	可读特性	212
13.6.2	控制点	212
13.6.3	状态机	213
13.6.4	通知和指示	214
13.7	绑定	214
13.8	变更服务	215
13.9	实现规范	216
13.9.1	定义规范	216
13.9.2	查找服务	217
13.9.3	查找特性	217
13.9.4	使用特性	217
13.9.5	规范安全	217

第 14 章	外围设备	219
14.1	背景	219
14.2	仅广播	219
14.3	可发现	220
14.4	可连接	220
14.5	公开服务	221
14.6	特性	221
14.7	安全事项	222
14.8	为低功耗优化	222
14.8.1	可发现广播	224
14.8.2	绑定	224
14.8.3	可连接广播	224
14.8.4	定向广播	225
14.8.5	已连接	225
14.8.6	保持连接还是断开	226
14.9	优化属性	227
第 15 章	测试和质量鉴定	229
15.1	启动项目	229
15.2	选择功能	231
15.3	一致性检查	232
15.4	生成测试计划	232
15.5	建立合规文件夹	232
15.6	鉴定测试	233
15.7	鉴定设计	234
15.8	合规声明	234
15.9	产品名录	234
15.10	结合组件	235

第一部分

综 述

- 第 1 章 介绍低功耗蓝牙技术及其设计目标。
- 第 2 章 讨论低功耗蓝牙体系结构的设计基础。
- 第 3 章 介绍低功耗的主要系统架构，包括控制器、主机及其之上的应用层。
- 第 4 章 描述低功耗技术使能新的使用模型。

第 1 章

什么是低功耗蓝牙技术

如果我能看得更远的话，那是因为我站在巨人的肩膀上。

——艾萨克·牛顿 (Isaac Newton)

低功耗蓝牙是一种全新的技术，是当前可以用来设计和使用的功耗最低的无线技术。作为经典蓝牙的扩展，低功耗蓝牙沿用了蓝牙商标，并且借鉴了很多父辈的技术，然而，由于针对的设计目标和市场领域均与经典蓝牙有所不同，低功耗蓝牙应被视为一种不同的技术。

经典蓝牙的设计目的在于统一全球各地的计算和通信设备，让手机与笔记本电脑互相连接。不过事实证明，蓝牙最为广泛的应用还是音频传输，比如将音频从手机传到蓝牙耳机。随着技术的成熟，越来越多的蓝牙应用进入人们的视线，包括立体声音频流、汽车从手机下载电子书、无线打印和文件传输。由于每一个新的应用都要求更多带宽，因此，随着时间的推移，越来越快的无线电技术不断地加入蓝牙系统中。1.0 版蓝牙为基本码率 (Basic Rate, BR)，最大物理层数据速率为 1 Mbps (兆比特每秒)；2.0 版本为增强码率 (Enhanced Data Rate, EDR)，其物理层数据传输率增至 3Mbps；3.0 版本引入 Alternative MAC[⊖] PHY[⊗] (AMP，交替射频技术)，利用 IEEE[⊕] 802.11 实现了高达数百 Mbps 的物理层数据速率。

低功耗蓝牙选择了完全不同的方向：并非只是增加可达的数据传输速率，而是从尽可能降低功耗方面进行优化。这意味着，也许你无法获得很高的传输速率，但是可以将连接保持数小时或数天的时间。这一选择非常有趣，显然，大部分有线和无线通信技术还在马不停蹄地提升速率，如表 1-1 所示。

对于那些由纽扣电池供电的设备，经典蓝牙并不能真正达到它们的低功耗要求。理解了这一点，就不难明白选择新方向的原因。然而，在充分考虑低功耗的相关要求时，还有一点必须考虑到，即低功耗蓝牙应被设计成满足极大规模部署的要求，以便用于迄今尚未装

⊖ MAC 指的是 Medium Access Control，确定一个收发器怎样通过 Physical Layer 与其他收发器通信。

⊗ PHY 指的是 Physical Layer。

⊕ IEEE 指的是 Institute of Electrical and Electronics Engineers。

备无线技术的装置。要实现极大的规模，就必须要有极低的成本。就好像射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）通过一个价格较高的扫描装置获得能量，然而其标签本身的成本极低，从而获得了大量的部署。

表 1-1 始终增长的速率

调制解调器		以太网		Wi-Fi		蓝牙	
V.21	0.3kbps	802.3i	10Mbps	802.11	2Mbps	V1.1	1Mbps
V.22	1.2kbps	802.3u	100Mbps	802.11b	11Mbps	V2.0	3Mbps
V.32	9.6kbps	802.3ab	1000Mbps	802.11g	54Mbps	V3.0	54Mbps
V.34	28.8kbps	802.3an	10 000Mbps	802.11n	135Mbps	V4.0	0.3Mbps

因此，从低成本的需求方面审视低功耗蓝牙的系统设计尤为重要。实现低成本的设计有三个关键因素：

1. ISM 频段

无论从设计的角度还是从使用的角度出发，2.4GHz ISM 频段对无线技术而言都是个糟糕的频段。该频段无线电传播特性差，能量极容易被各类物体吸收，尤其是水，而人体主要是由水构成的。尽管有许多显著的不利因素，但不可否认，该无线电频谱的优势是在全世界可以免许可、自由地使用。当然，“免交租金”的标志意味着其他技术一样能够使用该频段，包括绝大部分的 Wi-Fi 信号。不过，免许可并非等同于毫无约束，使用该频段仍然要遵守相当多的规则，主要是限制设备的输出能量和范围。当然，与许可频谱的高昂费用相比，这些限制就显得微不足道了。因此，选择使用 ISM 频段能够降低成本。

2. IP 许可

当 Wibree（超低功耗蓝牙）技术发展成熟，考虑将其并入已有的无线标准工作组时，诺基亚原本有多种选择方案。比如加入 Wi-Fi 联盟，该联盟也在 2.4GHz ISM 频段制定标准化技术。然而，鉴于蓝牙组织拥有较高的声誉和优厚的专利许可政策，他们最终选择了蓝牙技术联盟（Bluetooth Special Interest Group, BT SIG）。与其他采取 FRAND[⊖]政策的兴趣小组或联盟相比，蓝牙技术联盟的政策使得蓝牙设备的专利许可成本大为降低。而许可成本的降低使得每件设备的成本也显著降低。

3. 低功耗

设计一款低成本设备的最好方法就是减少制作这个设备所需的原料，比如电池。电池越大，电池盒就越大，这样又会增加成本。替换一节电池的花费，不仅指消费者需要购买新的电池，而且替换本身也包含了因设备暂时无法使用带来的机会成本。如果设备由第三方维护，比如作为家庭警备管理系统的一部分，换电池还需额外的劳动力成本。因此，设计有关低功耗的技术也是在降低各种成本。这里不妨做个脑力实验，如果只花一毛钱就能买一个兆

⊖ FRAND 是 Fair、Reasonable 和 Non-Discriminatory 的缩写，表示如果你发放技术许可，不管获得许可的对象是谁，你必须以同样的条件为大家提供一个相对公平的价格。

瓦特级的电池，那事情会变得多么不同？

很多设备能容纳更大的电池，例如键盘或者鼠标内部很容易装下几节 AA 电池。然而生产商们却倾向于使用 AAA 电池，并不是因为它们更小，而是因为它们的原料成本更低，降低了设备的总成本。

因此，低功耗的基础设计就是以纽扣电池——这种最小、最便宜并且最容易购买的电池类型作为能量来源。这意味着我们无法令低功耗蓝牙实现很高的数据传输速率，或是将其用于大量数据的传输或者数据流传输。这一点或许是经典蓝牙与低功耗蓝牙的最大区别。下一节将就该问题进行详细讨论。

1.1 设备类型

低功耗蓝牙技术可以构建两种类型的设备：双模设备和单模设备。双模设备既支持经典蓝牙又支持低功耗蓝牙。单模设备只支持低功耗蓝牙。当然，还有第三种类型——仅支持经典蓝牙的设备。

由于双模设备支持经典蓝牙，所以能与现有的数以亿计的蓝牙设备通信。双模设备是一类新的设备，要求为主机和控制器分别提供新的软件和硬件（包括固件）。因此，现有的经典蓝牙控制器或主机无法通过升级实现低功耗蓝牙。不过，大部分的双模控制器只是简单地替换了经典蓝牙的控制器的某些部分，这使得手机、电脑和其他设备的设计人员能够较快地用双模控制器替换现有的经典蓝牙控制器。

仅支持低功耗蓝牙的单模设备不支持经典蓝牙，无法与现有的蓝牙设备通信，但可以与其他单模设备或者双模设备通信。出于降低功耗的目的，这些新型的单模式设备进行了大量优化，可用于通过纽扣电池供电的元器件。由于单模设备不支持头戴式耳机、立体声音乐或较高的文件传输速率，无法将其用于当今经典蓝牙使用的大部分领域。

表 1-2 展示了彼此间能相互通信的蓝牙设备类型以及蓝牙设备连接之后使用的无线电技术。单模设备能够与其他的低功耗单模设备通信，也能与支持低功耗的双模设备通信。双模设备能够与其他双模设备或使用 BR/EDR 的经典蓝牙设备通信。单模设备无法与经典蓝牙设备通信。

表 1-2 单模、双模和经典蓝牙的兼容性

	单模	双模	经典
单模	LE	LE	无
双模	LE	经典	经典
经典	无	经典	经典