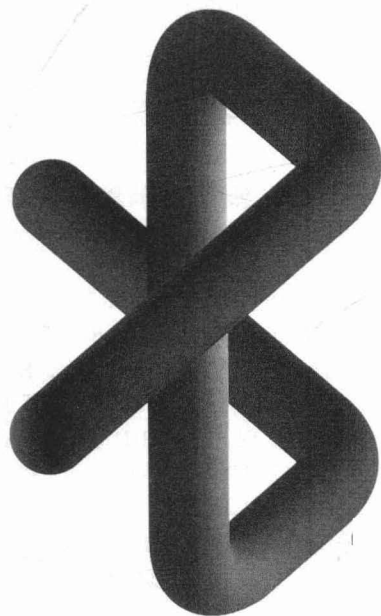


- ◆ **小米公司**联合创始人 **王川** 等人作序推荐
- ◆ 侧重于工程项目和开发实战，凸显 **实用性** 和 **通用性**
- ◆ 全面涵盖小米公司电视部门低功耗蓝牙技术的 **产品化细节**



低功耗蓝牙 谭康喜 著 智能硬件开发实战



低功耗蓝牙 智能硬件开发实战

谭康喜 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

低功耗蓝牙智能硬件开发实战 / 谭康喜著. -- 北京:
人民邮电出版社, 2018. 12
ISBN 978-7-115-49444-3

I. ①低… II. ①谭… III. ①蓝牙技术—通信设备—
开发 IV. ①TN926

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第219866号

内 容 提 要

低功耗蓝牙技术凭借着低功耗、低带宽、低成本、低复杂性、低时延、强抗干扰能力、强大的安全性、良好的拓扑结构等特点, 赢得了广大开发人员和用户的认可, 已经成为主流的低功耗、近距离无线通信技术。

本书共分为 25 章, 内容分别涵盖了蓝牙的发展历史、低功耗蓝牙的核心系统架构、几种短距离无线通信技术的简单介绍和选择方法、Bluetooth 协议栈的架构和功能模块的分析、SMP 的 3 个阶段介绍、LE 属性协议、LE 属性数据库的构建和查询方法及查询代码分析、BLE Hid 设备的连接过程、Find me 功能的实现、电池服务和电量的读取、LE 设备接近配对的实现、基于 LE 广播的无线电子设备的唤醒方法、基于 LE 广播的系统 Recovery 的操作实现、蓝牙 HID 设备 OTA 升级的设计和实现、加速度传感器在低功耗蓝牙设备上的应用、LE 系统快速更新连接参数的设计和实现、LE 语音编解码和传输、开发工具介绍、蓝牙系统 Bug 分析。

本书侧重于实战, 低功耗蓝牙体系结构及协议栈分析、开发实例讲解和蓝牙调试 3 方面的内容详细丰富, 适合蓝牙应用工程师、蓝牙协议栈工程师、蓝牙固件工程师阅读, 也适合对 BLE、人工智能、物联网和智能硬件感兴趣的读者阅读。

-
- ◆ 著 谭康喜
责任编辑 傅道坤
责任印制 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 26.5
字数: 555 千字
印数: 1—2 000 册
-

定价: 99.00 元

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

推荐序 1

在 2013 年下半年，公司集体决定在下一代小米电视和小米盒子上，标配由纽扣电池供电的低功耗蓝牙遥控器，主机端和遥控端使用不同芯片公司的蓝牙芯片。这是全世界首个跨芯片厂商的低功耗蓝牙遥控器系统技术方案的探索，技术难度非常高，以康喜为代表的蓝牙工程师团队在这个低功耗蓝牙系统技术方案的实施中，做出了不可磨灭的贡献。以此为契机，他们也开始研究低功耗蓝牙技术，并进行产品化的各种探索。

由于低功耗蓝牙属于新生的前沿技术，业界没有相关的产品化实践案例，因此康喜他们没有可以借鉴的经验，只能摸着石头过河。将低功耗蓝牙遥控器作为电视/盒子的控制终端，对主机端和控制端蓝牙系统的稳定性、健壮性、实时性以及系统间协同工作的要求非常高，这导致整个开发过程异常艰难曲折。为此，公司给蓝牙开发团队购买了业界最先进的仪器设备，并调动一切可以调配的资源来支援、保障蓝牙团队的工作。整个蓝牙团队在历经近一年时间的开发之后，实现了一个功能完备、总体达标的蓝牙软硬件系统技术方案。后来又经过一段时间的改进，整个技术方案才得以稳定下来。2014 年 4 月下旬，公司决定在即将发布的第 2 代小米电视上标配低功耗蓝牙遥控器。

从公司决定标配低功耗蓝牙遥控器到最终的落地实现，蓝牙开发团队以及相关合作伙伴为此付出了巨大的心血和努力，彻夜加班成为常态。之后，包括康喜在内的蓝牙团队又相继开发出了语音、体感、触摸以及红外机顶盒控制等依附于低功耗蓝牙技术的功能以及相应的硬件产品。在此我代表公司向蓝牙开发团队表示由衷的感谢！蓝牙开发团队代表了小米工程师对技术的执着追求和勇于创新的进取精神，他们不畏艰难、精益求精的态度值得我们每一个人学习。也希望小米公司的每一位工程师，都能够紧跟前沿技术并将其产品化，尽一切努力让用户用上技术先进而价格厚道的产品，提升用户体验，赢得用户的信任。

尽管本书是以小米电视蓝牙系统的开发历程为背景，介绍了低功耗蓝牙系统和小米电视蓝牙的一些技术方案，但是本书的内容也相当通用，而且书中的部分技术实现尚属业界首创。相信这本优秀的技术读物对同行也会有一定的借鉴作用。希望大家一起努力，用科技改变生活，让生活更美好！

——王川

小米联合创始人兼高级副总裁、迅雷董事长、雷石董事长



推荐序 2

小米作为一家不断追求用户体验的科技公司，不仅仅追求做高性价比的产品，更愿意让新的技术带给人们更多便利，让每个人享受科技的乐趣。

2014 年，小米电视成功量产了中国第一款 BLE 遥控器作为标配且没有红外的辅助，这种胆量和探索的精神其实是源于对于技术的不懈追求，源于公司内部每个员工心中的梦想和星辰大海。

谭康喜同学作为小米电视蓝牙的负责人，曾经为多款手机开发过蓝牙解决方案，但这一次小米电视的蓝牙遥控方案对于他来说是一个巨大的挑战，因为当时在业内根本就没有成熟的低功耗蓝牙遥控方案。而我们仅仅因为一个梦想，或者因为对于用户来说 360° 无需对准就可以控制电视的体验远好于红外遥控器。小米执着追求这一点，且相信这么好的用户体验一定对用户有价值，并坚信“宁愿我们多走 100 步，也不愿意让用户多走一步”。本着这样的信念，我们决定自研低功耗蓝牙遥控器。

在低功耗蓝牙遥控器的研发过程中，康喜他们经历了无数困难。首先需要是一个功耗够低的芯片，在找了无数蓝牙芯片厂商后最终选择了 Ti，但这个芯片没有做过跨平台的适配。在无数次的调试过程中，康喜同学几乎修改了小米电视整个蓝牙 BLE 的协议栈，并推动博通和 Ti 修改蓝牙芯片的固件的 Bug，以及协调几方的功能开发和配合事宜，并且率先实现了寻找遥控器的功能。当时，蓝牙协议栈中 Find Me 的功能从来没有人用过。一次开会时川总说，我们的遥控器设计虽然很漂亮但是太小了，经常掉在沙发缝里找不到。后来，我们就利用 BLE 中的 Find Me 功能来实现，通过敲击小米电视下方触摸板来发出信号，让遥控器以蜂鸣器发声的方式来定位。这个功能在发布会上雷总讲了一分钟，但是我们整整开发了 6 个月。中间因为功耗的问题、断连的问题，我们几乎要放弃了，但是康喜同学说，为了用户体验，我们应该坚持做并做好。最终我们做到了。

他们说每个小米人都是有梦想的。因为做了这么多年工程师，我们第一次发现我们离用户这么近，看到用户对我们的热爱，看到我们一点一滴的付出能得到用户的认可。看到米粉因为信任而购买小米产品的时候，我们觉得一切努力都是值得的。

希望这本书对所有从事蓝牙研发的工程师有所帮助。因为它凝结了康喜同学在小米电视蓝牙上的大量心血，后面是无数个通宵达旦的加班岁月，也是无数米粉的信任。感谢曾经努力的我们。

因为米粉，所以小米。

——茹忆

阿里巴巴 AI Labs 终端总经理

推荐序 3

科技日新月异，笔者不知不觉接触蓝牙已经快 20 载。蓝牙技术如今已经迈入 Bluetooth 5.0 时代。笔者一度在蓝牙技术联盟服务，发展到今日，互联网迈向物联网，一路走来感触良多。

经典蓝牙时代，屹立不倒的语音通信一直是蓝牙独占之地，如今更有了人工智慧的加持。蓝牙低功耗技术从 4.0 之后，逐渐引领不同的生态系统并延伸出无限的应用可能。

蓝牙 3.0 之前的中国市场，多为代工制造各类产品，强调制造硬功夫，这拉低了蓝牙硬件的准入门槛。各主流操作系统和嵌入式操作系统逐步完善对蓝牙的支持，市场规模持续攀升。但这段时间蓝牙应用创新不足。“金融海啸”过后，蓝牙生态岌岌可危，出路在哪里？蓝牙 4.0 的“光明灯”出现，指出低功耗的康庄大道。手机产业也应运而生，操作系统收敛为两大阵营，iOS 和 Android 将蓝牙推向短距离通信的霸主。纯蓝牙低功耗技术 BLE 的技术需求降低了蓝牙芯片的设计门槛，中国会员的芯片方案逐步涌现。读者可以从市场上发现许多国产芯片方案，譬如穿戴、自拍杆、遥控器，BLE 成为灵活的短距离应用最佳选择。

BLE 带动了智能硬件的发展，并实现了蓝牙在物联网的启蒙。您可能还记得应用配件 (Accessory) 这个词，接踵而来的是各种 App 充斥在平台和商品中。小米等公司是蓝牙技术联盟第一批中国手机生态链的会员公司，其创新的技术、概念及产品在这个世界上非常具有竞争力。

作者的文章内容涵盖技术的基本原理、项目的实作、知识与经验的分享，且协议工具佐之以图示，可加深读者的理解。作者谙熟不同的蓝牙芯片和方案，从小米的实际项目出发，结合自己的研发经历，深入浅出地表意达理，展现出深厚的功力，让人不禁感慨今日中国企业创新力道真的不同往日。

蓝牙低功耗应用和规格仍在蓬勃发展，各种智能生态 (Ecosystem) 与场景的导入也越来越多，期待作者能持续分享创新蓝牙的知识与概念。

好书值得推荐！对新手，它是入门的工具；对高手，是交流的园地；对产业，是传承的火种。祝阅读愉快，收获良多！

——Mike Lu (吕荣良)

Hyper-China 总监，前 Bluetooth SIG 大中国区技术事务经理

推荐序 4

在一个电视产品项目中，我有幸与康喜结识，他的专业技能给我留下很深的印象。作为芯片原厂的人，我接触过很多客户，但是很少遇到像他这样对蓝牙核心规范有着如此深刻理解的工程师。为了优化遥控器的用户体验，他甚至不惜修改蓝牙的标准流程。他在繁忙的工作之余抽出时间完成此书，令我十分钦佩。现在，低功耗蓝牙的开发需求越来越多，参与其中的公司和开发者也越来越多，尤其对于小公司和个人来说，往往会面临产品开发周期紧张、开发经验不足、可参考资料少等难题。本书是康喜及其团队的实践经验和智慧的结晶，它将小米产品的相关设计、开发经验毫无保留地贡献出来，是广大低功耗蓝牙开发者的福音。

目前，蓝牙 Host 端主流的开源协议栈包括 Bluez 和 Bluedroid，前者主要用在 Linux 等嵌入式操作系统上，后者主要是用在 Android 系统上。Bluez 与内核紧密联系，有移植烦琐以及安全隔离度低等问题，因为 Bluez 的部分协议运行在内核态，蓝牙的崩溃可能导致整个系统重启。而模块化设计的 Bluedroid 更方便被不同系统复用，只要保持接口兼容，就能更方便地被裁剪、移植到其他系统中。随着 Android 系统多次迭代更新，蓝牙稳定性已经有很大提升。由于 Bluedroid 的代码结构更复杂，内部结构体设计、模块之间函数调用以及回调、模块内的消息机制与状态机调度较为复杂，可供参考的中文资料很少，需要阅读协议栈源码，初学者在学习 Bluedroid 协议栈时很容易淹没在代码中而迷失方向。本书对 Bluedroid 协议栈各模块进行清晰的梳理，对各 C 文件进行详细讲解，对于学习协议栈很有帮助。此外作者还分析了 Bluedroid 中低功耗蓝牙连接的完整过程，对致力于低功耗蓝牙应用开发的人员大有帮助。

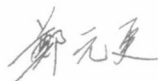
近年来，智能电视和 OTT 盒子随着价格下探而普及，低功耗蓝牙遥控器逐渐取代红外遥控器而成为标配，不仅按键稳定性得以延续，还增加了语音识别、重力感应等新功能。特别是遥控器的语音识别技术的加入，简化了内容搜索过程，显著提升了用户体验。其实语音识别功能并不是蓝牙技术联盟（SIG）的规范应用场景，它是由实际需求驱动的、广大蓝牙工程师的创新，是蓝牙低功耗应用的一个成功典范。相比经典蓝牙，应用的可扩展性是低功耗蓝牙的另一优势，可以利用低功耗蓝牙技术来实现新的功能，满足新的需求，如在共享单车、城市地铁支付等新兴场景中，都可以看到低功耗蓝牙发挥了不同的作用。我相信在未来的物联网大潮中，低功耗蓝牙技术会得到更为广泛的应用。本书的开发篇当中，作者不仅讲述了 SIG 标准应用

的实现细节，也介绍了自定义应用的设计与实现方法，这对于新需求的开发具有很高的参考价值。

问题调试是开发过程的重要环节。有时调试问题的过程会比设计、开发花费更多的时间和精力。本书还将介绍蓝牙问题的快速定位、各种日志的抓取方法，列举 4 个经典问题的出现现象、日志分析过程、调试手段和解决方法。这些方法是在长期项目实践中总结出来的，无论是对蓝牙开发的初学者还是有一定经验的开发者都有实际的借鉴意义。

——郑元更

原 CSR 大中华区销售副总裁



作者简介

谭康喜，小米公司高级软件工程师，从事 Android 应用、Linux 驱动、蓝牙、WiFi 和蓝牙外设的开发工作，目前的主要工作方向是低功耗蓝牙。作者是国内最早从事低功耗蓝牙研究和开发的一批人之一；申请国内外发明专利 120 余项，目前国内已授权 12 项，美国已授权 1 项；在 Android 平台上独立开发了文件管理、手机私人数据的本地备份和恢复两个千万级用户量的应用，开发过手机私人数据的云同步功能，维护过 Android 的联系人、通话、蓝牙等程序；在 Linux 内核上从事过 Uart、Sdio、Usb、I2C、Mmc 等总线类型的设备驱动的开发和手机电源的管理；在 Feature Phone 的时代从事过手机联系人、短信、游戏等应用的开发，系统 GUI 控件的开发和维护、Modem 的射频全自动化校准系统的开发、点阵字库的压缩存储和解压缩的设计和实现、手机内置资源管理系统的设计和实现等工作。

致谢

特别感谢博通的蓝牙专家罗光华、江苏惠通集团的龙涛主任以及他们背后的博通、Ti 的技术团队。很怀念大家在一起讨论功能需求、BLE 核心协议规范的漏洞、诸多描述不明确的技术点以及一些技术配合问题的情景。我们有时为分析解决一个问题，邮件来往几十次，争论激烈，但是对事不对人，都是为了解决问题。同时也感谢我的蓝牙相关的同事霍峰、常洋、王兴民和张再林，大家一起努力才使得项目得以顺利推进。同时也诚挚感谢管理层对新技术的认可、宽容和全力支持，川总（王川，小米联合创始人兼高级副总裁）好几次深夜拉着我在他家一起调试他发现的蓝牙问题，茹忆（前小米电视系统部副总裁）也陪我熬过几次通宵。最后，感谢何理、张军和王爱军近几年的大力支持。

前言

蓝牙技术联盟于 2010 年年中正式发布“蓝牙 4.0 核心规范”，并启动对应的认证计划。会员厂商可以提交产品进行测试，通过后获得蓝牙 4.0 标准认证。该技术拥有极低的运行和待机功耗，使用一粒纽扣电池甚至可连续工作数年之久。蓝牙 4.0 开始支持传统蓝牙、低功耗蓝牙和高速蓝牙的技术融合，具有低功耗、经典和高速 3 种模式，低功耗模式用于不需占用太多带宽、对功耗比较敏感的设备的连接和通信。

低功耗蓝牙在诺基亚的 Wibree 标准上发展而来，是诺基亚设计的一项短距离无线通信技术，其最初的目标是提供功耗最低的无线标准，并且专门在低成本、低带宽、低功耗与低复杂性方面进行优化。该技术最初考虑加入 WiFi 联盟，但蓝牙阵营提供了更为有利的条件，所以才加入了蓝牙标准。如果从两者的通信方式上来说，低功耗蓝牙和经典蓝牙除了名字叫蓝牙外，可以认为是两套系统，但两者在总体流程上是相似的。

小米电视部门从 2013 年下半年开始立项“小米电视 2 代”，决定在这代电视上标配由纽扣电池供电的低功耗蓝牙遥控器。电视蓝牙芯片用的是博通公司的 BCM43569 蓝牙/WiFi Combo 芯片，遥控器用的是 Ti 的 CC2541，电视 Android 版本是 4.4。本人也开始重点研究低功耗蓝牙技术。由于介入较早，技术过于前卫，市场上还没有出现任何搭载 BLE 技术的蓝牙外设，更不用说能有 BLE 遥控器作为参考对象了。BLE 的技术参考资料也处于空白状态，唯一的参考就是蓝牙核心协议规范，而协议规范只是描述技术和参数细节，并不会系统地讲述 BLE 技术，故一切都靠自己摸索。

由于 BLE 技术还没有商用化，电视蓝牙（博通芯片）和遥控器蓝牙（Ti 芯片）又是跨芯片厂商的，两边的协议软件堆栈也不成熟，又没有现成案例可参考，也从来没有电视厂商标配过低功耗蓝牙遥控器，使用纽扣电池对遥控器功耗要求非常高，这些因素导致了当时的技术难度极大地超乎预期，致使低功耗蓝牙项目几度面临生死存亡的问题。好在当时得到了博通、Ti 和江苏惠通集团的全力支持。几方人员在小米呆了半年多时间，每天工作 12 小时以上，周末休息半天，多方合力才勉强推出了一个 Feature Ready 的版本，使得小米 2 代电视能标配低功耗蓝牙遥控器，并于 2014 年 5 月 15 日得以发布。由于 BLE 技术商用上的不成熟，造成了小米电视 2 代上市后，经常有用户反馈蓝牙遥控器失灵、粘键、卡键、耗电快、无法控制电视开机、遥控损坏等问题。这使得电视团队压力非常大，蓝牙团队不断地统计、分析和解决各种蓝牙软件、硬件和结构问题，又经历近半年多时间才一点点地收敛和解决问题，蓝牙系统才算基本稳定。期间，笔者在小米论坛上发布了一个低功耗蓝牙的技术帖，用于跟米粉互动、讨论和解决问题，帖子的浏览量高达 5 万多次。

此后的几年，小米电视/盒子朝着语音识别、人工智能和集成传感器的方向发展，从语音、体感、触摸和蓝牙/红外二合一（红外用于控制红外机顶盒）等方向陆续推出了一系列低功耗蓝牙遥控器。

作为 BLE 产品化的先行者，小米为业界提供了很多的参考经验，解决了很多蓝牙芯片的协议软件问题，促进了 BLE 产业链的成熟。与小米电视合作过的蓝牙芯片厂商有：博通、高通、联发科、RealTek、Ti、Nordic、Dialog、Cypress。

在 2014 年年中的时候，由 Robin Heydon 写作、陈灿峰和刘嘉翻译的《低功耗蓝牙开发权威指南》的中文版出版，笔者买了一本，读后受益良多。此书讲述了低功耗蓝牙的产生背景和基本原理，是一本不可多得低功耗蓝牙技术的权威理论书籍。同时网络上讨论、研究 BLE 的技术帖子开始逐渐多了起来，但还是缺乏工程实践方面的系统讲述。故笔者有了写作本书来分享经验的想法，希望对读者能有所帮助。

蓝牙技术已经开始全面支持 Mesh 网状网络，这意味着蓝牙 Mesh 终于走入实用阶段。蓝牙 Mesh 将低功耗蓝牙无线连接功能扩展至消费产品、智能家居，以及工业物联网应用中的多节点应用。而相应更多支持 Mesh 组网的蓝牙解决方案与蓝牙模块正在紧锣密鼓地设计开发中。低功耗蓝牙又将迎来更快速的发展期。

本书组织结构

本书以笔者在低功耗蓝牙开发实践过程中的一些经验为背景，先介绍了低功耗蓝牙的体系结构、Android 5.1 Bluedroid 的架构和一些功能模块，简要讲述了 SMP 协议、BLE 属性协议、属性数据库的构建、查询以及服务和特性的使用，然后介绍了一些运用在小米电视/OTT 盒子/生态链投影仪的基于低功耗蓝牙的开发实战案例，最后介绍了 Ellisys 工具，讲述了蓝牙系统的调试，从 3 个方面列举并分析了 4 个典型 Bug。

本书分为 3 篇，总计 25 章，具体内容如下。

第 1 篇，系统篇（第 1~14 章）：首先介绍了蓝牙的发展历史和低功耗蓝牙的系统架构，然后介绍了 Bluedroid 协议栈的构架和功能模块，最后介绍了 BLE 的 SMP、属性协议、属性数据库的构造和查询方法、BLE Hid 设备的连接过程。

- 第 1 章，低功耗蓝牙简介：介绍了蓝牙的发展历史、蓝牙 4.0 的核心架构，以及 BLE、ZigBee 和 WiFi 的选择方法。
- 第 2 章，Android 蓝牙系统框架和代码结构：分析了 Android 蓝牙的系统框架和代码结构，较为详细地介绍了 Bluedroid 的代码结构。
- 第 3 章，GKI 模块简介：简要介绍了 Bluedroid 的 GKI 模块的事件原理、任务管理和消息/事件的传递函数。
- 第 4 章，Bluedroid 的消息传递机制：较为详细地介绍了 Bluedroid 的消息传递和处理机制，分析了消息的结构体，以及消息管理和内存管理的有机集合的机制。
- 第 5 章，TASK 简介：简单介绍了 Bluedroid 的 TASK 之间的消息传递和处理。

- 第 6 章, **Bluedroid 状态机简介**: 较详细地介绍了 Bluedroid 的状态机运行机制。
- 第 7 章, **HCI 接口层简介**: 详细介绍了 HCI 层及其与 Bluedroid、libbt-vendor 之间的接口调用关系, 也介绍了命令/数据的发送和接收, 分析了 H4 层接收函数, 简单解析了一帧 HCI 层的裸数据。
- 第 8 章, **L2CAP 简介**: 介绍了 L2CAP 层及其数据的收/发处理。
- 第 9 章, **Bluedroid 的初始化流程**: 详细介绍了打开蓝牙过程中 Bluedroid 协议栈的初始化过程, 包括前期初始化、蓝牙 Firmware 的加载和后期初始化 3 个阶段。
- 第 10 章, **蓝牙设备的扫描流程**: 详细介绍了蓝牙设备的扫描流程, 包括扫描入口、回调机制、Inquiry 过程、Discover 过程和设备信息的上报过程。
- 第 11 章, **SMP 简介**: 简要介绍了 SMP 的特征交换、配对、加密和密钥分发的过程。安全是无线传输系统最重要的考虑方向之一。
- 第 12 章, **LE 属性协议简介**: 介绍了 BLE 属性数据库的构成、服务和特性的构建方法及属性数据库的探查过程。
- 第 13 章, **LE 属性数据库扫描过程的代码分析**: 从代码角度详细介绍了 Bluedroid 探查 BLE 设备的属性数据库的过程, 探查内容包括服务、包含服务、特性和特性描述。最后介绍了探查到的服务的上报过程。
- 第 14 章, **低功耗蓝牙 HID 设备的连接过程分析**: 分析了 Bluedroid 针对 BLE Hid 设备的连接过程, 包括 Hid Report 的读取、存储过程、输入设备的创建、按键的上报过程。

第 2 篇, 开发篇 (第 15~23 章): 以小米电视/盒子/生态链投影仪的低功耗遥控器开发历程为背景, 介绍了小米在 BLE 领域做的一部分开发工作, 其中部分工作是开创性的, 申请了多项发明专利, 有些专利已经授权。

- 第 15 章, **Find Me 功能的实现**: 介绍了 Find Me 的功能。此功能在小米电视上用于寻找遥控器, 此功能获得了媒体和米粉的热烈欢迎, 因为大家都曾经有过寻找遥控器的痛苦经历。此功能也为低功耗蓝牙智能设备的控制提供了参考范例。
- 第 16 章, **低功耗蓝牙电池服务和电量的读取**: 介绍了 BLE 电池服务和电量的读取, 本案例可以为各种传感器数据的采集提供参考。
- 第 17 章, **LE 设备接近配对的实现**: 介绍了 BLE 设备的接近配对的原理和代码实现, 是一种设备间确定一对一的关系并进行关联的常用、快捷方法。此功能申请了多个发明专利。
- 第 18 章, **基于 LE 广播的无线电子设备的唤醒方法**: 详细介绍了基于解析 BLE 广播的无线电子设备的开机方法。用于小米电视/生态链投影仪的低功耗蓝牙遥控器控制电视/投影仪开机。此方法属于业界首创功能, 已被广泛借鉴, 可用于任何无线电子设备的无线控制其唤

醒开机的实现。此方法已申请发明专利并被授权，另外，还有多个相关发明专利在实审。

- **第 19 章，基于 LE 广播的系统 Recovery 的操作实现：**详细介绍了基于解析 BLE 广播、用低功耗遥控器控制 Android 设备进入 Recovery 系统和操控 Recovery 的功能。此功能应用于小米电视/小米盒子/小米生态链投影仪的 Recovery 系统，属于业界首创功能，已由王兴民申请发明专利，并被授权。
- **第 20 章，蓝牙 HID 设备 OTA 升级的设计和实现：**详细介绍了基于 Hid 的蓝牙设备的 OTA 升级的实现。此功能应用于小米低功耗蓝牙遥控器和小米蓝牙手柄（传统蓝牙）的空中升级，可作为蓝牙设备的无线升级的参考案例。
- **第 21 章，加速度传感器在低功耗蓝牙设备上的应用：**介绍了主机端实现接收、处理搭载加速度传感器的小米低功耗蓝牙遥控器的传感器数据的软件实现过程。小米蓝牙手柄也支持加速度传感器，代码实现是一致的。本章是传感器的无线数据传输和数据处理的一个典型案例。
- **第 22 章，LE 系统快速更新连接参数的设计和实现：**详细介绍了快速更新 LE 系统的连接参数的技术原理和实现方法。优化了低功耗蓝牙语音遥控器和主机之间在复杂 2.4G 无线环境的语音传输速率。该功能在复杂 2.4G 环境下能快速变更激进的连接参数和快速传输语音数据，传输完毕后再快速恢复连接参数，在按键实时传输、语音快速传输和无线负载均衡 3 个方面实现了一个平衡机制。此功能属于业界首创功能，已申请多个发明专利，有 1 个专利已授权。
- **第 23 章，LE 语音编解码和传输：**详细介绍了 ADPCM 语音编解码的软硬件技术原理和主机端的接收、解码的实现过程，以及编码数据的传输格式分析。本章是较大容量数据传输的一个典型案例，A2dp 的数据编码、传输、解码的过程也是类似的。

第 3 篇，调试篇（第 24、25 章）：首先简单介绍了蓝牙调试的一个常用工具，然后选取了开发过程中遇到的 4 个典型 Bug 进行详细讲解。

- **第 24 章，开发工具：**简要介绍了蓝牙调试的一个业界常用、被蓝牙 SIG 指定为官方使用工具的开发调试工具：Ellisys Bluetooth Analyzer。
- **第 25 章，蓝牙系统 Bug 分析：**从协议栈、总线传输、蓝牙协议规范 3 个方面列举了 4 个典型 Bug，以及详细的分析问题和解决问题的过程。

本书特色

本书是第一本在低功耗蓝牙、传感器、人工智能、物联网方向聚集了很多系统分析和实战经验的图书；案例具有通用性，分析和开发步骤齐全；多个功能深入到了蓝牙 Firmware 的定制、蓝牙

规范的标准流程的修改和系统间的联动；有几个案例具有开创性。

本书读者对象

本书尽量少地介绍理论知识，而多讲述工程实践，适合蓝牙应用开发工程师阅读，使他们可以较全面地了解蓝牙底层协议栈和蓝牙芯片的架构及运行机制，并能给蓝牙应用开发提供理论基础和参考案例；也适合蓝牙协议栈工程师阅读，对加深 Bluetooth 和 BLE 的了解有一定帮助；也适合蓝牙芯片固件工程师了解上层协议栈及应用程序；同样适合对 BLE、人工智能和物联网感兴趣的读者，有助于他们了解 BLE 相关的理论知识和实战案例，特别有助于思考、解决无线相关的软硬件系统的问题，甚至为创新提供一些实际经验。

本书强调的是低功耗蓝牙的开发实战，相应的理论知识相对来说不是很丰富。读者在阅读本书之前，最好具备低功耗蓝牙体系结构、物理层、链路层、控制器接口、属性协议、蓝牙核心协议规范和 Bluetooth 协议栈相关的知识。理论知识请参考蓝牙核心协议规范和《低功耗蓝牙开发权威指南》。

作者水平有限，外加时间紧迫，图书中难免存在诸多不当之处，欢迎读者批评指正。

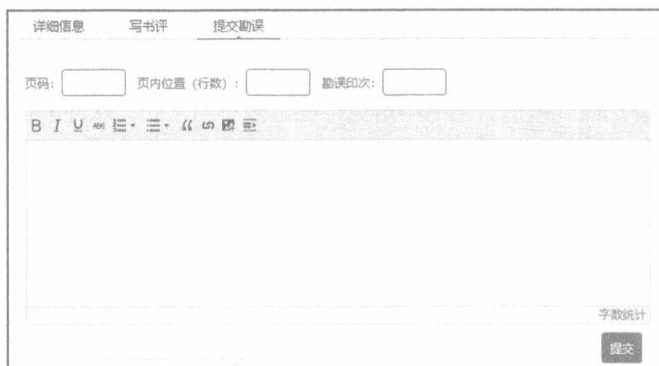
资源与支持

本书由异步社区出品，社区（<https://www.epubit.com/>）为您提供相关资源和后续服务。

提交勘误

作者和编辑尽最大努力来确保书中内容的准确性，但难免会存在疏漏。欢迎您将发现的问题反馈给我们，帮助我们提升图书的质量。

当您发现错误时，请登录异步社区，按书名搜索，进入本书页面，点击“提交勘误”，输入勘误信息，点击“提交”按钮即可。本书的作者和编辑会对您提交的勘误进行审核，确认并接受后，您将获赠异步社区的 100 积分。积分可用于在异步社区兑换优惠券、样书或奖品。



详细信息 写书评 提交勘误

页码: 页内位置 (行数): 勘误印次:

B I U

字数统计

提交

扫码关注本书

扫描下方二维码，您将会在异步社区微信服务号中看到本书信息及相关的服务提示。



与我们联系

我们的联系邮箱是 contact@epubit.com.cn。

如果您对本书有任何疑问或建议，请您发邮件给我们，并请在邮件标题中注明本书书名，

以便我们更高效地做出反馈。

如果您有兴趣出版图书、录制教学视频，或者参与图书翻译、技术审校等工作，可以发邮件给我们；有意出版图书的作者也可以到异步社区在线提交投稿（直接访问 www.epubit.com/selfpublish/submission 即可）。

如果您是学校、培训机构或企业，想批量购买本书或异步社区出版的其他图书，也可以发邮件给我们。

如果您在网上发现有针对异步社区出品图书的各种形式的盗版行为，包括对图书全部或部分内容的非授权传播，请您将怀疑有侵权行为的链接发邮件给我们。您的这一举动是对作者权益的保护，也是我们持续为您提供有价值的内容的动力之源。

关于异步社区和异步图书

“异步社区”是人民邮电出版社旗下 IT 专业图书社区，致力于出版精品 IT 技术图书和相关学习产品，为作译者提供优质出版服务。异步社区创办于 2015 年 8 月，提供大量精品 IT 技术图书和电子书，以及高品质技术文章和视频课程。更多详情请访问异步社区官网 <https://www.epubit.com>。

“异步图书”是由异步社区编辑团队策划出版的精品 IT 专业图书的品牌，依托于人民邮电出版社近 30 年的计算机图书出版积累和专业编辑团队，相关图书在封面上印有异步图书的 LOGO。异步图书的出版领域包括软件开发、大数据、AI、测试、前端、网络技术等。



异步社区



微信服务号

第 1 章 低功耗蓝牙简介 1	1.6 BLE、ZigBee 和 WiFi 的介绍 和选择..... 16
1.1 概述..... 1	1.6.1 ZigBee 技术介绍..... 16
1.2 蓝牙历史版本介绍..... 1	1.6.2 WiFi 技术介绍..... 17
1.2.1 蓝牙 1.1 标准和 1.2 标准..... 1	1.6.3 BLE、ZigBee 和 WiFi 的 选择..... 17
1.2.2 蓝牙 2.0 标准..... 2	第 2 章 Android 蓝牙系统框架和 代码结构 19
1.2.3 蓝牙 2.1+EDR 标准..... 2	2.1 概述..... 19
1.2.4 蓝牙 3.0+HS 标准..... 3	2.2 Application Framework..... 20
1.2.5 蓝牙 4.0 标准..... 3	2.3 Bluetooth Process..... 21
1.2.6 蓝牙 4.1 标准..... 3	2.4 Bluetooth JNI..... 21
1.2.7 蓝牙 4.2 标准..... 4	2.5 Bluetooth HAL..... 21
1.2.8 蓝牙 5.0 标准..... 5	2.6 Bluedroid Stack..... 21
1.2.9 蓝牙 2016 年技术蓝图..... 5	2.7 Bluedroid 的代码结构分析..... 22
1.2.10 蓝牙版本演进编年史..... 6	2.7.1 MAIN..... 22
1.3 蓝牙 4.0 概述..... 7	2.7.2 BTA..... 23
1.3.1 什么是蓝牙 4.0..... 7	2.7.3 BTIF..... 23
1.3.2 蓝牙 4.0 的架构..... 7	2.7.4 HCI..... 27
1.3.3 蓝牙 4.0 协议增加的新特性..... 7	2.7.5 STACK..... 29
1.4 蓝牙 4.0 核心架构分析..... 8	第 3 章 GKI 模块简介 31
1.4.1 低功耗蓝牙概述..... 8	3.1 概述..... 31
1.4.2 核心系统架构..... 10	3.2 GKI 事件的原理..... 31
1.4.3 核心构架模块介绍..... 13	
1.5 基于 Bluetooth 4.0 的新应用..... 14	