

超低功耗单片 无线系统应用入门

—— 基于2.4 GHz
无线SoC芯片nRF24LE1

黄智伟 杨案江 编著

源程序下载地址

<http://www.buaapress.com.cn>的“下载专区”



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

超低功耗单片无线系统应用入门

——基于 2.4 GHz 无线 SoC 芯片 nRF24LE1

黄智伟 杨案江 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

超低功耗无线收发系统应用范围广泛, 2.4 GHz 超低功耗无线 SoC 芯片 nRF24LE1 是专为超低功耗无线应用设计的单片无线收发系统。本书共分 6 章, 着重介绍 nRF24LE1 的主要特性、内部结构和最小系统设计, nRF24LE1 的 MCU 与应用, nRF24LE1 的接口与应用, nRF24LE1 的射频收发器与应用, nRF24LE1 与常用外围模块的连接及编程, 以及 Keil μ Vision4 集成开发环境和 ISP 下载。本书通过大量的示例程序说明 nRF24LE1 的应用方法与技巧, 所有程序都通过了验证, 具有很好的工程性和实用性。本书提供所有程序源代码, 读者可在北京航空航天大学出版社网站“下载专区”下载。

本书可作为电子工程技术人员进行超低功耗无线收发系统设计的参考书, 也可作为高等院校本科和高职高专院校电子信息工程、通信工程、自动化、电气、计算机应用等专业学习无线收发系统设计、电子设计竞赛、课程设计、毕业设计的培训教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超低功耗单片无线系统应用入门: 基于 2.4
GHz 无线 SoC 芯片 nRF24LE1 / 黄智伟, 杨案江编著. — 北
京: 北京航空航天大学出版社, 2011. 7
ISBN 978-7-5124-0425-0

I. ①超… II. ①黄… ②杨… III. ①单片微型计算
机②无线电通信—通信系统 IV. ①TP368.1②TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 078019 号

版权所有, 侵权必究。

超低功耗单片无线系统应用入门 ——基于 2.4 GHz 无线 SoC 芯片 nRF24LE1

黄智伟 杨案江 编著

责任编辑 王慕冰 王平豪 朱胜军

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:20.75 字数:465 千字

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-0425-0 定价:39.00 元

前 言

超低功耗无线收发系统可应用于无线鼠标、无线键盘、遥控游戏等 PC 机外设,以及音频/图像娱乐中心和家庭应用的遥控装置,货物追踪及监控的有源 RFID 和传感器网络,报警和访问控制的安全系统,可穿戴式传感器、运动手表,遥控智能玩具和装置等。而在这些应用中,无线收发系统的设计一直是无线应用的一个瓶颈。对于缺少无线收发系统设计经验的工程技术人员来说,单片无线发射与接收系统的出现,为解决这一难题提供了一个有效的途径。

2.4 GHz 超低功耗无线 SoC 芯片 nRF24LE1 是专为超低功耗无线应用设计的单片无线收发系统。芯片内部集成了与 8051 指令兼容的高性能 Flash 单片机、16 KB Flash 存储器、1 KB RAM、1 KB NV 非易失存储器、512 字节 NV 非易失数据存储器、实时定时器/计数器、AES 硬件加密器、16~32 位乘法/除法协处理器、随机数发生器等功能模块,以及为低功耗设计的多种电源模式,支持硬件调试;可以提供 SPI、2 线、UART、6~12 位 ADC、PWM、模拟比较器等外设接口;提供 3 种不同封装形式。nRF24LE1 具有高安全性、低功耗以及高抗干扰的优良性能,是一个较为理想的无线应用平台。

本书的特点是以应用和开发 nRF24LE 超低功耗单片无线系统所需要的知识点为基础,以示例为模板,通过大量的示例说明 nRF24LE1 的应用方法与技巧,所有示例程序都通过了验证,叙述详尽清晰,具有很好的工程性和实用性。

本书可作为电子工程技术人员进行超低功耗无线收发系统设计的参考书,也可作为高等院校本科和高职高专院校电子信息工程、通信工程、自动化、电气、计算机应用等专业学习无线收发系统设计、电子设计竞赛、课程设计、毕业设计的培训教材和教学参考书。

全书共分 6 章。各章的内容如下:

第 1 章为“超低功耗单片无线系统”,介绍 nRF24LE1 的主要特性和内部结构,24 引脚、32 引脚和 48 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统设计,nRF24LE1 与计算机串口的连接电路设计。

第 2 章为“nRF24LE1 的 MCU 与应用”,介绍 MCU 的内部结构与主要特性,存储器和 I/O 结构,MCU 的特殊功能寄存器,Flash 存储器特性、配置和编程,随机存储器(RAM)结构与功能和示例程序,定时器/计数器结构、特性、功能和示例程序,中断源、中断向量和中断用特殊功能寄存器以及示例程序,看门狗结构、功能和示例程序,器件工作模式、功耗和时钟管理功能及示例程序,电源监控系统的结构、功能和示例程序,16 MHz 晶体振荡器/RC 振荡器,

前 言

32.768 kHz 晶体振荡器/RC 振荡器,MDU(乘除法器单元)结构、功能和示例程序,加密/解密协处理器结构与功能,随机数发生器结构、功能和示例程序。

第 3 章为“nRF24LE1 的接口与应用”,介绍 GPIO 结构、功能和示例程序,SPI 结构、功能和示例程序,UART 结构、功能和示例程序,2 线接口的结构、功能和示例程序,ADC 结构、功能和示例程序,模拟比较器结构、功能和示例程序,PWM 结构、功能和示例程序。

第 4 章为“nRF24LE1 的射频收发器与应用”,介绍射频收发器内核结构与功能、工作模式、空中速率、射频通道频率、接收功率检测、PA 控制、增强型 ShockBurst、数据和控制接口。介绍射频收发器无线数据传输应用示例的系统结构,nRF24LE1 无线收发功能配置,nRF24LE1 单片机控制,液晶显示器驱动,MP3 语音模块控制等程序流程图和程序源代码。

第 5 章为“nRF24LE1 与常用外围模块的连接及编程”,介绍 nRF24LE1 与 LED 数码管和键盘模块的连接及编程,nRF24LE1 与液晶显示器模块的连接及编程,nRF24LE1 与 DAC 的连接及编程,nRF24LE1 与 DDS 的连接及编程,nRF24LE1 与超声波测距模块的连接及编程,nRF24LE1 与步进电机驱动模块的连接及编程。

第 6 章为“Keil μ Vision4 集成开发环境和 ISP 下载”,介绍 Keil μ Vision4 集成开发环境简介,工程的建立,程序的编译,HEX 文件的生成以及 ISP 下载。

本书所有示例程序都通过验证,相关程序清单可以在北京航空航天大学出版社网站“下载中心”下载。

本书在编写过程中,参考了国内外一些相关著作和资料,参考并引用了 Nordic Semiconductor 等公司提供的技术资料和应用笔记,得到了许多专家和学者的大力支持,听取了多方面的意见和建议。李富英高级工程师对本书进行了审阅,杨案江对本书中的示例进行了编程与验证,南华大学陈文光教授、王彦副教授、朱卫华副教授、李圣副教授、郝兴恒、杨必华、张翼、李军、戴焕昌、张强、税梦玲、欧科军、谭仲书、彭湃、尹晶晶、全猛、周望、黄政中和许俊杰等也为本书的编写做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,不足之处在所难免,敬请各位读者批评斧正。有兴趣的读者,可以发送邮件到 fuzhi619@sina.com,与本书作者进行沟通;也可以发送邮件到 emsbook@gmail.com,与本书策划编辑进行交流。

黄智伟

2011 年 2 月于南华大学

目 录

第 1 章 超低功耗单片无线系统	1
1.1 超低功耗单片无线系统 nRF24LE1	1
1.1.1 nRF24LE1 简介	1
1.1.2 nRF24LE1 主要特性	1
1.1.3 nRF24LE1 内部结构	3
1.2 nRF24LE1 最小系统设计	5
1.2.1 24 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统设计	5
1.2.2 32 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统设计	8
1.2.3 48 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统设计	11
1.2.4 nRF24LE1 与计算机串口的连接电路	13
第 2 章 nRF24LE1 的 MCU 与应用	16
2.1 MCU 内部结构与主要特性	16
2.1.1 MCU 内部结构	16
2.1.2 MCU 主要特性	17
2.2 存储器和 I/O 结构	18
2.2.1 存储器映射	18
2.2.2 PDATA 存储器寻址	18
2.2.3 MCU 特殊功能寄存器	19
2.3 Flash 存储器	24
2.3.1 Flash 存储器特性	24
2.3.2 Flash 存储器配置	25
2.3.3 MCU 对 Flash 编程	28

目 录

2.3.4	通过 SPI 对 Flash 编程	31
2.3.5	硬件支持固件升级	35
2.4	随机存储器 RAM	36
2.4.1	随机存储器 RAM 结构与功能	36
2.4.2	SRAM 示例程序流程图	38
2.4.3	SRAM 示例程序	38
2.5	定时器/计数器	42
2.5.1	定时器/计数器结构与特性	42
2.5.2	Timer0 和 Timer1 的功能与初始化	43
2.5.3	Timer2 的功能与初始化	47
2.5.4	定时器/计数器的特殊功能寄存器 SFR	48
2.5.5	实时时钟 RTC	49
2.5.6	定时器/计数器示例程序流程图	49
2.5.7	定时器/计数器示例程序	50
2.6	中 断	54
2.6.1	中断源和中断向量	54
2.6.2	中断用特殊功能寄存器 SFR	55
2.6.3	中断示例外接电路	55
2.6.4	中断示例程序流程图	56
2.6.5	中断示例程序	56
2.7	看门狗	61
2.7.1	看门狗结构与功能	61
2.7.2	看门狗寄存器 WDSV	62
2.7.3	看门狗示例程序流程图	62
2.7.4	看门狗示例程序	62
2.8	功耗和时钟管理	68
2.8.1	工作模式	68
2.8.2	功耗和时钟管理有关的寄存器	69
2.8.3	功耗和时钟管理示例程序	70
2.9	电源监控	79
2.9.1	电源监控结构与功能	79
2.9.2	电源监控示例程序流程图	82
2.9.3	电源监控示例程序	82
2.10	片上振荡器	86

目 录

2.10.1	16 MHz 晶体振荡器	86
2.10.2	16 MHz RC 振荡器	87
2.10.3	外部 16 MHz 时钟	87
2.10.4	32.768 kHz 晶体振荡器	87
2.10.5	32.768 kHz RC 振荡器	88
2.10.6	合成 32.768 kHz 时钟	88
2.10.7	外部 32.768 kHz 时钟	88
2.11	乘除法器单元 MDU	88
2.11.1	MDU 结构与功能	88
2.11.2	MDU 操作步骤	89
2.11.3	MDU 示例程序流程图	91
2.11.4	MDU 示例程序	91
2.12	加密/解密协处理器	99
2.13	随机数发生器	99
2.13.1	随机数发生器结构与功能	99
2.13.2	随机数发生器示例程序流程图	100
2.13.3	随机数发生器示例程序	100
第 3 章	nRF24LE1 的接口与应用	105
3.1	通用 I/O 端口 GPIO	105
3.1.1	GPIO 结构与功能	105
3.1.2	I/O 端口可编程寄存器	107
3.1.3	GPIO 与按键和 LED 的连接电路	113
3.1.4	GPIO 示例程序流程图	114
3.1.5	GPIO 示例程序	114
3.2	串行外设接口 SPI	117
3.2.1	SPI 结构与功能	117
3.2.2	SPI 主模式寄存器	117
3.2.3	SPI 从模式寄存器	119
3.2.4	SPI 时序	121
3.2.5	SPI 主设与 SPI 从设之间的互联	123
3.2.6	SPI 示例程序流程图	123
3.2.7	SPI 示例程序	124
3.3	UART	131

目 录

3.3.1	UART 结构与功能	131
3.3.2	UART 可编程寄存器	132
3.3.3	UART 示例程序流程图	133
3.3.4	UART 示例程序	134
3.4	2 线接口	138
3.4.1	2 线接口结构与功能	138
3.4.2	2 线接口主设发送/接收	138
3.4.3	2 线接口从设发送/接收	139
3.4.4	2 线接口时序	139
3.4.5	2 线接口特殊功能寄存器	140
3.4.6	2 线接口应用示例电路	143
3.4.7	2 线接口应用示例程序流程图	144
3.4.8	2 线接口应用示例程序	144
3.5	ADC	158
3.5.1	ADC 特性与结构	158
3.5.2	ADC 功能说明	159
3.5.3	ADC 特殊功能寄存器	161
3.5.4	ADC 模拟电压输入电路	164
3.5.5	ADC 示例程序流程图	164
3.5.6	ADC 示例程序	165
3.6	模拟比较器	169
3.6.1	模拟比较器特性与结构	169
3.6.2	模拟比较器功能	169
3.6.3	模拟比较器特殊功能寄存器	170
3.6.4	模拟比较器示例程序流程图	171
3.6.5	模拟比较器示例程序	171
3.7	PWM	178
3.7.1	PWM 结构与功能	178
3.7.2	PWM 特殊功能寄存器	178
3.7.3	电机控制和驱动电路	180
3.7.4	PWM 示例程序流程图	181
3.7.5	PWM 示例程序	181

第 4 章 nRF24LE1 的射频收发器与应用	185
4.1 nRF24LE1 的射频收发器	185
4.1.1 射频收发器内核结构与功能	185
4.1.2 射频收发器工作模式	186
4.1.3 射频收发器空中速率	189
4.1.4 射频收发器射频通道频率	190
4.1.5 接收功率检测	190
4.1.6 PA 控制	190
4.1.7 增强型 ShockBurst	191
4.1.8 数据和控制接口	195
4.2 射频收发器应用示例 1	199
4.2.1 无线传输结构形式	199
4.2.2 无线传输示例程序流程图	200
4.2.3 无线传输示例程序	200
4.3 射频收发器应用示例 2	224
4.3.1 系统结构	224
4.3.2 发送端电路	224
4.3.3 接收端电路	225
4.3.4 无线遥控 MP3 播放器示例程序流程图	228
4.3.5 无线遥控 MP3 播放器示例程序	228
第 5 章 nRF24LE1 与常用外围模块的连接及编程	263
5.1 nRF24LE1 与数码管和键盘的连接及编程	263
5.1.1 nRF24LE1 与 ZLG7289 的连接	263
5.1.2 nRF24LE1 与 ZLG7289 的编程示例	263
5.2 nRF24LE1 与液晶显示器模块的连接及编程	273
5.2.1 RT12864M 汉字图形点阵液晶显示器模块简介	273
5.2.2 nRF24LE1 与 RT12864M 的连接	274
5.2.3 nRF24LE1 与液晶显示器模块的编程示例	275
5.3 nRF24LE1 与 DAC 的连接及编程	279
5.3.1 nRF24LE1 与 DAC TLC5615 的连接	279
5.3.2 nRF24LE1 与 DAC 的编程示例	280
5.4 nRF24LE1 与 DDS 的连接及编程	285

目 录

5.4.1	nRF24LE1 与 DDS AD9850 的连接	285
5.4.2	nRF24LE1 与 DDS 的编程示例	286
5.5	nRF24LE1 与超声波模块的连接及编程	291
5.5.1	nRF24LE1 与超声波模块的连接	291
5.5.2	nRF24LE1 与超声波模块的编程示例	292
5.6	nRF24LE1 与步进电机驱动模块的连接及编程	301
5.6.1	nRF24LE1 与步进电机驱动模块的连接	301
5.6.2	nRF24LE1 与步进电机驱动模块的编程示例	303
第 6 章 Keil μVision4 集成开发环境和 ISP 下载		310
6.1	Keil μ Vision4 集成开发环境的使用	310
6.1.1	工程的建立	310
6.1.2	添加 C 语言文件	314
6.1.3	代码编辑	316
6.1.4	工程编译	316
6.1.5	生成 HEX 文件	316
6.2	ISP 下载	318
参考文献		320

第 1 章

超低功耗单片无线系统

1.1 超低功耗单片无线系统 nRF24LE1

1.1.1 nRF24LE1 简介

nRF24LE1 是低成本、高性能、内嵌入微处理器的射频收发器 nRF24 系列的家族成员之一。nRF24LE1 是为超低功耗无线应用设计的单片无线收发系统,芯片内部集成了高性能微处理器(与 8051 指令兼容)、16 KB Flash 存储器、1 KB 数据空间(片内 RAM)、1 KB NV 非易失存储器空间、512 字节 NV 非易失数据存储(扩展寿命)、低功耗振荡器、实时计数器、AES 硬件加密器、16~32 位乘法/除法协处理器(MDU)、随机数发生器等功能模块,以及为低功耗设计的多种电源模式,支持硬件调试,硬件支持固件更新。nRF24LE1 提供了一个理想的无线协议平台,具有协议的无缝连接、高安全性、低功耗以及高抗干扰的优良性能。nRF24LE1 提供了 SPI、2 线接口、UART、6~12 位 ADC、PWM 和一个低功耗的可作为系统电平唤醒的模拟比较器等外设接口,提供了 3 种不同封装形式:

- 具有 7 个通用 I/O 的超小型 4 mm×4 mm 24 引脚 QFN 封装;
- 具有 15 个通用 I/O 的紧凑型 5 mm×5 mm 32 引脚 QFN 封装;
- 具有 31 个通用 I/O 的 7 mm×7 mm 48 引脚 QFN 封装。

nRF24LE1 可以满足如无线鼠标、无线键盘、遥控游戏等 PC 外设,音频/图像娱乐中心和家庭应用的先进遥控装置,货物追踪和监控的有源 RFID 和传感器网络,报警和访问控制的安全系统,可穿戴式传感器、运动手表、遥控智能玩具和装置等的应用要求。

1.1.2 nRF24LE1 主要特性

nRF24LE1 的主要特性如下:

1. 高速 8 位处理器

芯片内部嵌入高速 8 位处理器,与 Intel 8051 指令兼容。它采用简化的指令周期,与传统

第 1 章 超低功耗单片无线系统

的 8051 相比,速度快 12 倍,具有 32 位乘除法单元。

2. 存储器

- 程序存储空间——带加密功能的 16 KB Flash 存储器(最少可擦/写 1 000 次);
- 数据存储器——1 KB 片内 RAM;
- 非易失数据存储器——1 KB;
- 可擦/写的非易失数据存储器——512 字节(最少可擦/写 20 000 次)。

3. 多功能 I/O 引脚端

具有 7~31 个多功能 I/O 引脚端(取决于不同的封装),许多片内的硬件资源可通过可编程的多功能 I/O 引脚端来实现,如 GPIO、SPI 主设、SPI 从设、主/从 2 线接口、全双工串行接口、PWM、ADC、模拟比较器、外部中断、定时器中断输入、32.768 kHz 晶体振荡器、调试接口。输入高电平为 V_{DD} ,输入低电平为 $0.3V_{DD}$ 。输出高电平为 V_{DD} ,输出低电平为 $0.3 V$ 。上拉/下拉电阻为 $11\sim 16 k\Omega$ 。

4. 2.4 GHz GFSK 射频收发器

具有单片高性能 2.4 GHz GFSK 射频收发器,接收灵敏度为 $-82\sim -94$ dBm,发射功率为 $0\sim 4$ dBm,工作频率范围为 $2.400\sim 2.525$ GHz,天线负载阻抗为 $(15+j88)\Omega$ 。硬件支持 OSI 的链路层和增强型 ShockBurst 链路层,包的装配/拆解,地址和 CRC 计算;自动 ACK(应答)和重发,空中数据速率为 250 kbps、1 Mbps 和 2 Mbps,数据接口(SPI)速率为 $0\sim 8$ Mbps,具有 125 个无线频道,其中 79 个频道($2.402\sim 2.81$ GHz)在 $2.400\sim 2.4853$ GHz 内,适合跳频应用的快速切换时间,无线收发特性与 nRF24Lxx 系列芯片完全兼容,兼容 nRF2401A、nRF2402、nRF24E1 和 nRF24E2 的 250 kbps 和 1 Mbps 模式。

5. ADC

ADC 具有 6 位、8 位、10 位和 12 位分辨率,14 路输入通道,单端或差分输入,可由内部基准、外部基准或 V_{DD} 设定满量程范围,单步模式的转换时间低于 $3 \mu s$,连续模式具有 2 kbps、4 kbps、8 kbps 和 16 kbps 的采样速率,低电流消耗(在 2 ksps 采样时,电流仅为 $0.1 mA$),具有测量电源电压模式。

6. 模拟比较器

模拟比较器可差分或单端输入,具有轨到轨输入范围,14 路输入的多路复用器。其单端的阈值电压可编程(可编程到 V_{DD} 的 25%、50%、75% 和 100%,或来自引脚端的外部基准电源电压),输出极性可编程,可以作为唤醒源使用,电流消耗也极低(典型值为 $0.75 \mu A$)。

7. 加密/解密器

加密/解密器具有优化的 AES 加密时间和功耗。

8. 随机数发生器

随机数发生器采用基于热噪声的非确定性结构,不需要种子值,非重复序列,校正算法确保统一的统计分布,数据速率达到 10 KBps,处理器在待机模式时仍可工作。

9. 系统复位和电源监控

具有片内上电复位和掉电、看门狗定时器、外部引脚复位功能。具有阈值可编程的电源失效比较器,并可产生中断到 MCU。

10. 片上定时器

具有在系统时钟下工作的 3 个 16 位定时器/计数器(源于片上 16 MHz 振荡器)和一个在低频时钟(32.768 kHz)下工作的 16 位定时器/计数器。

11. 片上振荡器

具有 16 MHz 晶体振荡器(XOSC16M)、16 MHz RC 振荡器(RCOSC16M)、32.768 kHz 晶体振荡器(XOSC32K)、32.768 kHz RC 振荡器(RCOSC32K)。

12. 电源管理功能

工作电压为 1.9~3.3 V,供电上升时间(0~1.9 V)最大值为 50 ms,电流消耗最大值为 13.3 mA。电源管理功能的低功耗设计支持全静态停机/待机,可编程的 MCU 时钟频率范围为 125 kHz~16 MHz,片上稳压器支持低功耗模式,看门狗和唤醒功能可以工作在低功耗模式。工作温度范围为-40~+85 ℃。

13. 调试工具

片上支持 FS2 或 nRFprobe 硬件调试工具,支持 Keil 开发工具。

14. 固件平台

可提供完全的固件平台,如硬件抽象层(HAL)函数、nRF24L01+ 库函数、AES HAL 以及应用实例。

1.1.3 nRF24LE1 内部结构

nRF24LE1 内部结构方框图如图 1.1.1 所示,主要由微控制器电路和射频收发器电路组成。

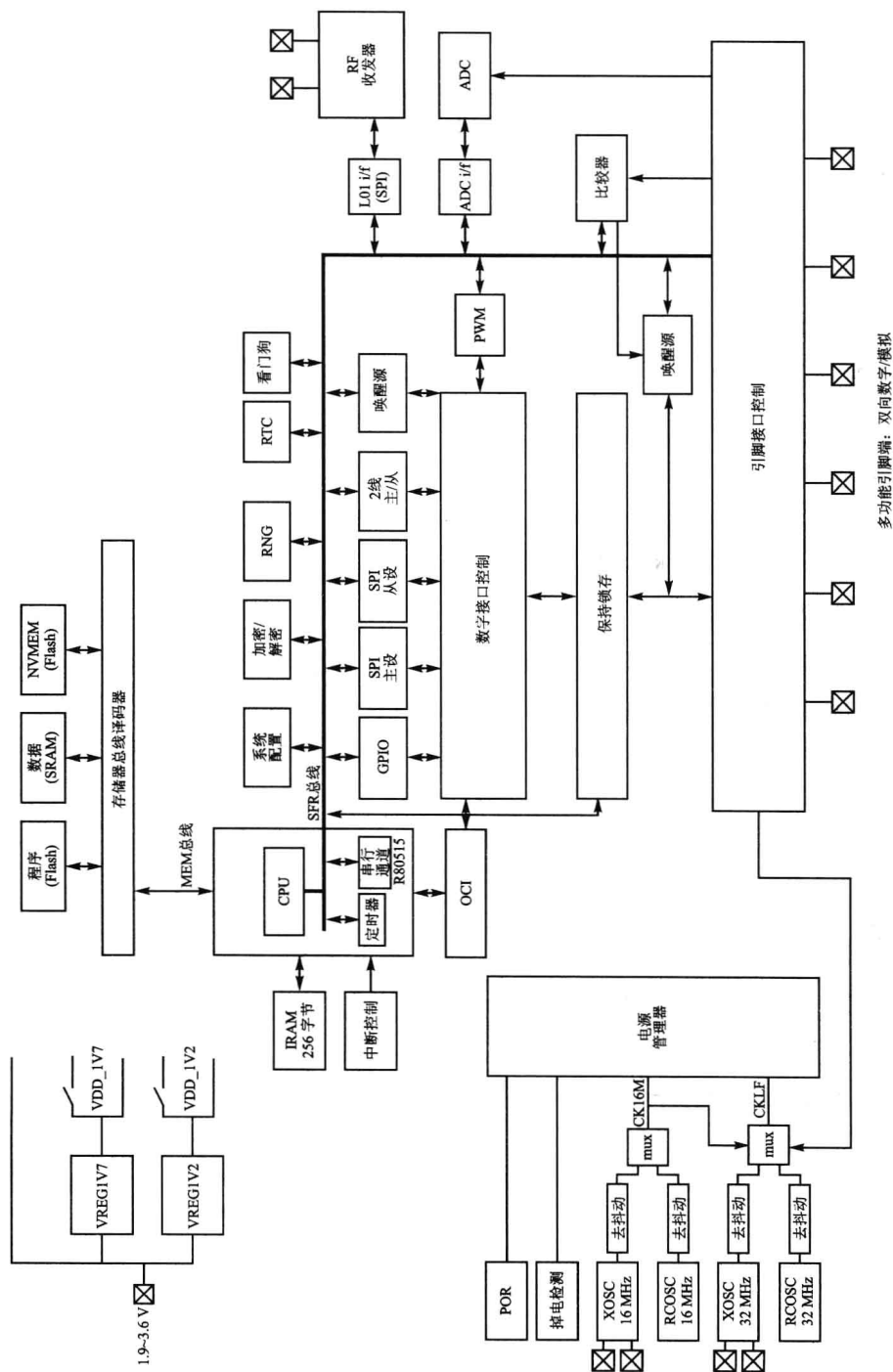


图 1.1.1 nRF24LE1内部结构方框图

1.2 nRF24LE1 最小系统设计

1.2.1 24 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统设计

采用 4 mm×4 mm 24 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 引脚封装形式如图 1.2.1 所示,引脚端功能如表 1.2.1 所列,其中引脚端 P0.0~P0.6 具有复用功能,P0.0~P0.6 的复用功能如表 1.2.2 所列。

注意: SMISO 引脚端仅在 SCSN 引脚端有效时被使能。

厂商推荐的 24 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 最小系统应用电路元器件布局和 PCB 图如图 1.2.2 和图 1.2.3 所示,电路元器件清单如表 1.2.3 所列。

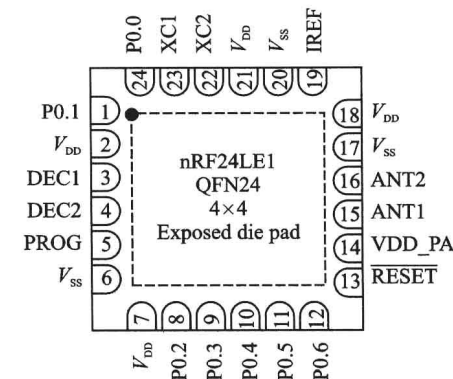


图 1.2.1 4 mm×4 mm 24 引脚 QFN 封装的 nRF24LE1 引脚封装形式

表 1.2.1 nRF24LE1 的引脚端功能

引脚端符号	类 型	功 能
V _{DD}	电源正端	+1.9~+3.6 V DC 输入
V _{SS}	电源负端	接地(0 V)
DEC1、DEC2	输出	电源退耦输出,连接 100 nF 电容器到 DEC1,连接 33 nF 电容器到 DEC2
P0.0~P3.6	I/O	数字或模拟 I/O,数量与封装形式有关
PROG	数字输入	使能 Flash 编程
RESET	数字输入	微控制器复位,低电平有效
IREF	模拟输入	器件的基准电流输出,连接基准电阻到 PCB
VDD_PA	电源输出	RF 功率放大器电源输出(+1.8 V)
ANT1、ANT2	RF 天线接口	RF 差分天线连接(TX 和 RX)
XC1、XC2	模拟输入	连接 16 MHz 晶振
Exposed die pad	裸露的焊盘,接地与散热	对于 QFN48 7 mm×7 mm 和 QFN32 5 mm×5 mm 封装的器件,连接该焊盘到 GND;对于 QFN24 4 mm×4 mm 封装的器件,不能够连接到地

表 1.2.2 引脚端 P0.0~P0.6 的复用功能

引 脚	默认连接		动态使能连接											
	输 入	输 出	XOSC32K	SPI 主设	从设/Flash SPI		HW 调试		2 线		PWM		ADC/ 比较器	
			优先级 1	优先级 2	优先级 3	优先级 4	优先级 5	优先级 6	优先级 7					
P0. 6	p0Di6	p0Do6				OCITO	输出	WS2DA	输入/ 输出	PWM1	输出	AIN6	模拟	
	UART/ RXD													
P0. 5	p0Di5	p0Do5			SCSN	输入	OCITDO	输出	W2SCL	输入/ 输出		AIN5	模拟	
		UART/ TXD			FCSN ^①									
P0. 4	p0Di4	p0Do4		MMISO	输入	SMISO	输出	OCITDI	输入			AIN4	模拟	
	TIMER0				FMISO ^①									
P0. 3	p0Di3	p0Do3		MMOSI	输出	SMOSI	输入	OCITMS	输入		PWM0	输出	AIN3	模拟
					FMOSI ^①									
P0. 2	p0Di2	p0Do2		MSCK	输出	SSCK	输入	OCITCK	输入				AIN2	模拟
	GPINT1				FSCK ^①									
P0. 1	p0Di1	P0Do1	CKLP ^②										AIN1	模拟
P0. 0	p0Di0	P0Do0	CKLF ^③	模拟									AIN0	模拟
	GPINT0													

① PROG 设置为高电平,仅 Flash SPI 接口有效,在运行操作时没有冲突。

② 连接取决于配置寄存器 CKLFCTL[2:0]

CKLFCTL[2:0]=3'b000: 晶振连接在引脚端 P0.0 和 P0.1 之间。

CKLFCTL[2:0]=3'b011: 低幅度的模拟时钟源连接到引脚端 P0.1。

CKLFCTL[2:0]=3'b100: 数字源。

③ 连接取决于配置寄存器 CKLFCTL[2:0]

CKLFCTL[2:0]=3'b000: 晶振连接在引脚端 P0.0 和 P0.1 之间。