

ESP32

技术规格表



版本 1.0
版权 © 2016

关于本手册

本文主要向用户介绍 ESP32 的技术规格，包括以下内容：

章	标题	内容
第 1 章	概述	概括描述 ESP32，包括主要的解决方案，MCU 和高级特征，协议以及应用。
第 2 章	管脚定义	介绍管脚的布局 and 描述。
第 3 章	功能描述	描述 ESP32 上的主要功能模块和协议，包括 CPU、闪存和存储、定时器和看门狗、时钟、射频、蓝牙，Wi-Fi 和低功耗管理。
第 4 章	外设接口	描述集成在 ESP32 上的外设接口。
第 5 章	电气参数	提供 ESP32 的电气参数。
第 6 章	封装信息	描述 ESP32 的封装细节。
第 7 章	支持资源	提供有关 ESP32 的参考文献和社区资源。
附录 A	触摸传感器	提供触摸传感器的设计和布局指导。
附录 B	声明	FCC / CE 符合性声明。

发布说明

日期	版本	发布说明
2016.03	V1.0	首次发布。

目录

1. 概述	1
1.1. 特色解决方案	1
1.1.1. 高度集成	2
1.1.2. 超低功耗解决方案	2
1.1.3. 自成体系的 Wi-Fi / 蓝牙网络解决方案	2
1.2. 基本特征	3
1.2.1. Wi-Fi	3
1.2.2. 蓝牙	3
1.2.3. CPU 和存储	3
1.2.4. 时钟和定时器	4
1.3. 高级特征	4
1.3.1. 高级外设接口	4
1.3.2. 安全机制	4
1.4. 应用	5
1.5. 开发支持	5
2. 管脚定义	6
2.1. 管脚布局	6
2.2. 管脚定义	7
3. 功能描述	10
3.1. 电源管理	10
3.2. 启动模式配置	10
3.3. CPU, 闪存和存储	11
3.3.1. CPU	11
3.3.2. 内置存储	12
3.3.3. 外部闪存和静态随机存储器 (SRAM)	12
3.3.4. 存储器映射	12
3.4. 定时器和看门狗	13
3.4.1. 定时器	13
3.4.2. 看门狗	14

3.5. 时钟	14
3.5.1. CPU 时钟.....	14
3.5.2. RTC 时钟.....	15
3.5.3. 音频 PLL 时钟.....	15
3.6. 射频	15
3.6.1. 2.4 GHz 接收器	15
3.6.2. 2.4 GHz 发射器	16
3.6.3. 时钟生成器.....	16
3.7. 蓝牙	16
3.8. Wi-Fi.....	17
3.9. 低功耗管理	19
4. 外设接口	21
4.1. 通用输入 / 输出接口 (GPIO)	21
4.2. 模 / 数转换器 (ADC)	21
4.3. 超低噪声模拟前置放大器.....	21
4.4. 霍尔传感器	21
4.5. 数 / 模转换器 (DAC)	22
4.6. 温度传感器	22
4.7. 触摸传感器	22
4.8. 超低功耗协处理器.....	23
4.9. 以太网 MAC 接口	23
4.10. SD / SDIO / MMC 主机控制器.....	23
4.11. 通用异步收发器 (UART)	24
4.12. I2C 接口.....	24
4.13. I2S 接口.....	24
4.14. 红外遥控器	24
4.15. 脉冲计数器	25
4.16. 脉冲宽度调制 (PWM)	25
4.17. LED PWM	25
4.18. 串行外设接口 (SPI)	25
5. 电气参数	26

5.1. 直流电特性	26
5.1.1. 绝对最大额定值	26
5.1.2. 建议工作条件	26
5.1.3. 射频功耗	27
5.2. 蓝牙射频	28
5.2.1. 接收器 - 基本数据速率	28
5.2.2. 发射器 - 基本数据速率	29
5.2.3. 接收器 - 增强型数据速率	30
5.2.4. 发射器 - 增强型数据速率	31
5.3. 蓝牙 LE 射频	32
5.3.1. 接收器	32
5.3.2. 发射器	33
5.4. Wi-Fi 射频	34
6. 封装信息	35
7. 支持资源	36
7.1. 相关文档	36
7.2. 社区资源	36
附录 - 触摸传感器	37
I. 电极图形	37
II. PCB 布局	38
附录 B - 声明	39
I. 联邦通讯委员会 (FCC) 通告	39
II. CE 符合性声明	40



1.

概述

ESP32 芯片提供了一套完整的 802.11 b/g/n/e/i 无线局域网 (WLAN) 和蓝牙 4.2 解决方案，具有最小物理尺寸。此款芯片专为低功耗和移动消费电子设备、可穿戴和物联网设备而设计，片上集成了 WLAN 和蓝牙的所有功能，具有低成本、布局友好的特点。ESP32 同时提供了一个开放的平台，支持用户灵活地自定义功能，用于不同的应用场景。

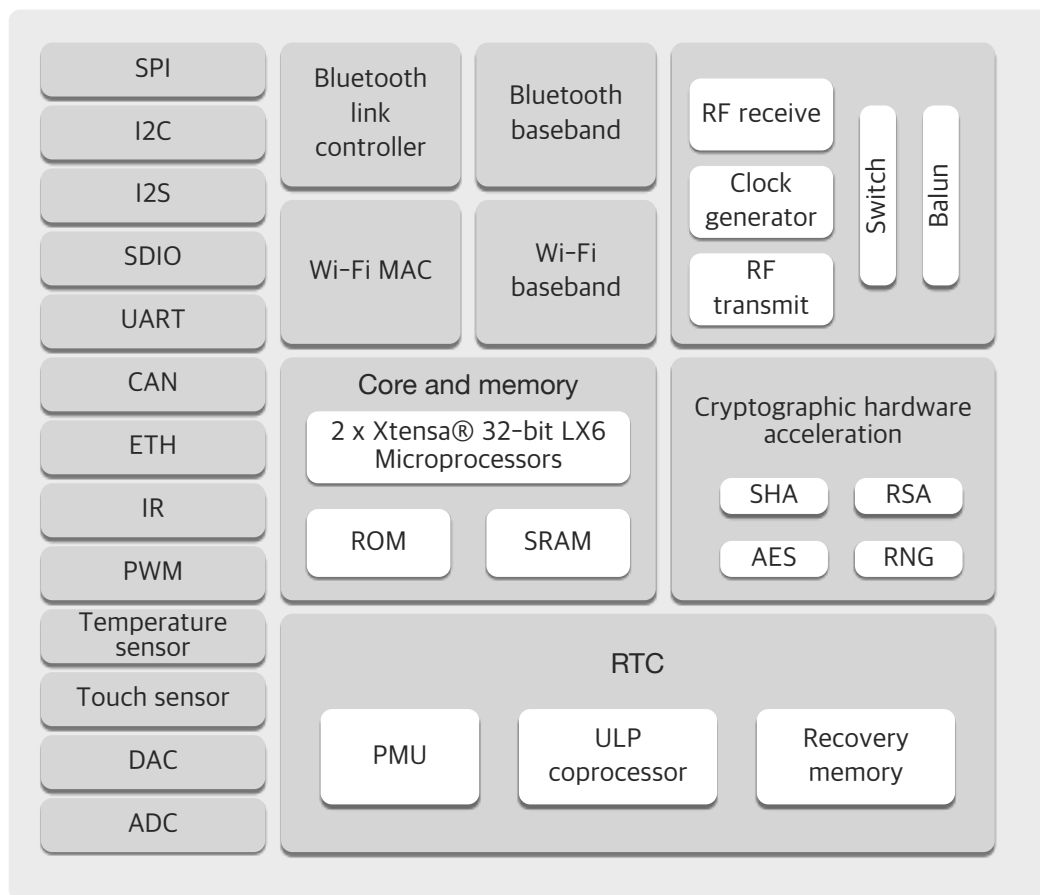


图 1-1. 功能块图

1.1. 特色解决方案

ESP32 是一款 Wi-Fi 和蓝牙系统级芯片 (SoC)，具有行业领先的射频性能、低功耗和高集成度的优势。ESP32 集成了丰富的外设和模拟功能，适用于传感设备和物联网应用。



1.1.1. 高度集成

ESP32 具有行业领先的高度集成，其外部元器件少于 10 个。ESP32 集成了完整的发射 / 接收射频功能，包括天线开关，射频 balun，功率放大器，低噪放大器，过滤器，电源管理模块和先进的自校准电路。自校准电路实现了动态自动调整以消除外部电路的缺陷。

ESP32 带有 2 个 32 位、LX6 CPU，主频高达 240 MHz，采用的是 7 级流水线架构。ESP32 还集成了丰富的模拟传感和数字接口。

ESP32 在集成了更多的技术特征和处理性能的同时减少了印刷电路板（PCB）的面积、物料清单（BOM）的成本并且缩短了上市时间。ESP32 的批量生产不需要昂贵的专用的测试设备。

1.1.2. 超低功耗解决方案

ESP32 的超低功耗射频架构和拥有专利的省电技术延长了实际应用中的电池续航时间。

ESP32 具有以下技术特征：

- 精细粒度的时钟门控；
- 多种低功耗模式；
- 自适应动态电压调整。

例如，在超低功耗 IoT 传感器集线器应用场景中，ESP32 只有在特定条件下才会被周期性唤醒。低占空比可以最小化 ESP32 芯片的能耗。射频功率放大器的输出功率也可以被调节，以实现通信范围、数据和功率之间的最佳平衡。

说明：

具体可见“第 3 章 低功耗管理”。

1.1.3. 自成体系的 Wi-Fi / 蓝牙网络解决方案

ESP32 完全符合 Wi-Fi 802.11n 和蓝牙 4.2 的标准，集成了 Wi-Fi / 蓝牙 / BLE 射频和低功耗技术，并且支持开放性的实时操作系统 RTOS。ESP32 所集成的高速缓存帮助提高系统性能并且优化系统存储。灵活的 RAM/ROM 划分架构则允许用户自定义以满足特殊要求和使用情况。

ESP32 可作为独立应用程序或是主机 MCU 的从设备。作为从设备，ESP32 通过 SPI / SDIO 或 I2C / UART 接口提供 Wi-Fi 和蓝牙功能。



1.2. 基本特征

1.2.1. Wi-Fi

- 802.11 b/g/n/e/i
 - 802.11 n (2.4 GHz) , 速度高达 150 Mbps
 - 802.11 i 安全特征: 预认证和 TSN
 - 802.11 e: 多队列管理, 充分利用 QoS 传输优先
 - 支持 WPA/WPA2 加密
 - 支持 WPS
- A-MPDU 和 A-MSDU 聚合技术
- 分片和重组
- 具有硬件加速器支持的 SSL 协议栈
- 自动信标监测 / 扫描
- 基础结构型网络 (Infrastructure BSS) 工作站 (Station) 模式 / Soft AP 模式
- Wi-Fi Direct (P2P), P2P 发现, P2P 群主模式和 P2P 电源管理
- UMA 认证标准
- 天线分集与选择
- WMM 节省功耗 U-APSD

1.2.2. 蓝牙

- CMOS 完全单片集成的射频和基带
- 蓝牙微微网和散射网
- 蓝牙 4.2 (BR/EDR/BLE)
- 自适应跳频 (AFH)
- SMP 协议
- 1 类, 2 类和 3 类发射器, 无需外部功率放大器
- +10 dBm 的输出功率
- 具有 -90 dBm 灵敏度的 NZIF 接收器
- 速度最大为 4 Mbps 的高速 UART HCI
- SDIO / SPI HCI
- CVSD 和 SBC 音频
- 低功耗
- 最少的外部元件

1.2.3. CPU 和存储

- Xtensa® 双核 32 位 LX6 微处理器, 最大处理能力为 400 MIPS
- 128 KB ROM
- 最多 4 个 QSPI 闪存 / SRAM, 每个闪存最大为 16 MB
- 电源供应: 2.5V 到 3.6V
- 416 KB SRAM



1.2.4. 时钟和定时器

- 2 MHz 至 40 MHz 的晶体振荡器
- 内置 8 MHz 的振荡器，支持自校准
- 支持外置 32 kHz 的时钟振荡器作为 RTC 睡眠时钟
- 内置 RC 校准振荡器
- 两个定时器群组，每组包括 3 个 64 位定时器和 1 个软件看门狗
- RTC 定时器精确度高达 0.1 秒 / 天
- RTC 系统看门狗

1.3. 高级特征

1.3.1. 高级外设接口

- 12 位 SAR ADC，多达 16 个通道
- 2 个 10 位 DAC
- 10 个触摸传感器
- 温度传感器
- 4 个 SPI
- 2 个音频总线 (I2S)
- 2 个集成电路总线 (I2C)
- 2 个 UART
- 1 个主机控制器 (SD/eMMC/SDIO)
- 1 个从机控制器 (SDIO/SPI)
- 带有专用 DMA 的以太网 MAC 接口，支持 IEEE 1588
- CAN 2.0
- IR (TX/RX)
- 电机 PWM
- LED PWM，多达 16 个通道

1.3.2. 安全机制

- 支持 IEEE 802.11 标准的安全特征，包括 WPA、WPA/WPA2 和 WAPI
- 安全启动
- 闪存加密
- 1024 位 OTP，用户可用的高达 768 位
- 加密硬件加速：
 - AES 128/192/256
 - HASH (SHA-2)
 - RSA
 - 随机数生成器



1.4. 应用

- 一般低功耗
 - IOT 传感器集线器
 - IOT 记录器
- 音频和视频
- 网络音乐播放器
- 音频耳机
- Wi-Fi 加蓝牙音频流媒体设备
- 摄像机视频流
- 支持 Wi-Fi 加蓝牙
 - OTT 电视盒 / 机顶盒设备
 - 智能设备
- 支持 Wi-Fi
 - 带数据上传功能的玩具
 - 接近感应玩具
 - 语音识别装置
- 家庭自动化
 - 智能插座
 - 智能照明
- 工业自动化
 - 工业无线控制
 - Mesh 网络
- 安全 ID 标签
- 传感器网络
 - Wi-Fi 位置感知设备
 - 可穿戴电子产品
 - 婴儿监控器
- 健康医疗
 - 接近运动监测触发装置
 - 温度感知计数器

1.5. 开发支持

- 支持快速线上编程的 SDK 固件
- 基于 GCC 的开源工具链

说明：

更多信息参考“第 7 章：支持资源”。



2.

管脚定义

2.1. 管脚布局

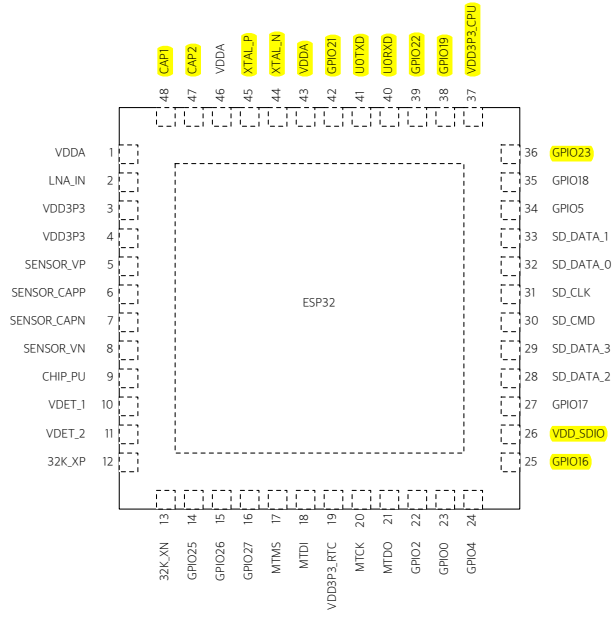


图 2-1. ESP32 管脚布局

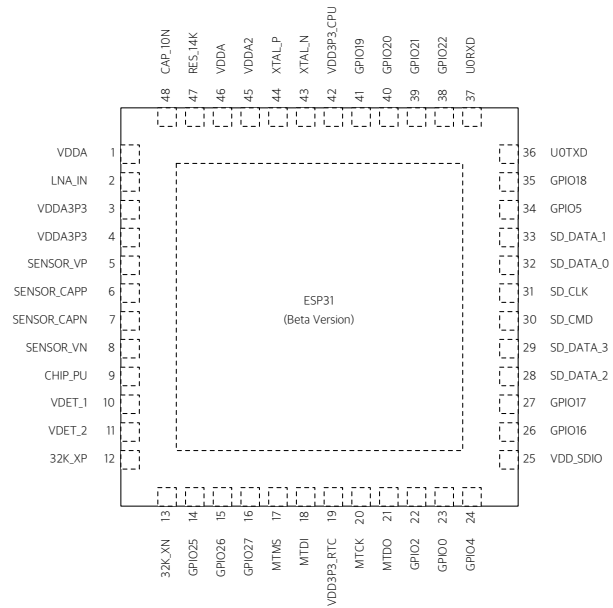


图2-2. ESP31（公共测试版）管脚布局



说明:

乐鑫向用户提供少量的 ESP31（公共测试版）样品。

2.2. 管脚定义

表 2-1. 管脚定义

名称	ESP32	ESP31	类型	功能
模拟				
VDDA	1		P	模拟电源 (2.3V ~ 3.6V)
LNA_IN	2	同 ESP32	I/O	射频输入和输出
VDDA3P3	3		P	放大器电源 (2.3V ~ 3.6V)
VDDA3P3	4		P	放大器电源 (2.3V ~ 3.6V)
VDD3P3_RTC				
SENSOR_VP	5		I	GPIO36, SENSOR_VP, ADC1_CH0, RTC_GPIO0 注意: 将 10nF 电容从 SENSOR_VP 连接到 SENSOR_CAPP 上。
SENSOR_CAPP	6	同 ESP32	I	GPIO37, SENSOR_CAPP, ADC1_CH1, RTC_GPIO1 注意: 将 10nF 电容从 SENSOR_VP 连接到 SENSOR_CAPP 上。
SENSOR_CAPN	7		I	GPIO38, SENSOR_CAPN, ADC1_CH2, RTC_GPIO2 注意: 将 10nF 电容从 SENSOR_VN 连接到 SENSOR_CAPN 上。
SENSOR_VN	8		I	GPIO39, SENSOR_VN, ADC1_CH3, RTC_GPIO3 注意: 将 10nF 电容从 SENSOR_VN 连接到 SENSOR_CAPN 上。
CHIP_PU	9		I	芯片使能 (高电平有效) • 高电平: 上电, 芯片正常工作; • 低电平: 断电, 芯片以最小功率工作 • 不能让 CHIP_PU 管脚悬浮。
VDET_1	10		I	GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
VDET_2	11		I	GPIO35, ADC2_CH7, RTC_GPIO5
32K_XP	12		I	GPIO32, 32K_XP (32.768 kHz 晶体振荡器输入), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
32K_XN	13		O	GPIO33, 32K_XN (32.76 kHz 晶体振荡器输出), >ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8
GPIO25	14		I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6



表 2-1. 管脚定义

名称	ESP32	ESP31	类型	功能
GPIO26	15	同 ESP32	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7
GPIO27	16		I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17
MTMS	17		I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK
MTDI	18		I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIQ
VDD3P3_RTC	19		P	RTC IO 电源输入 (1.8V ~ 3.3V)
MTCK	20		I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, U0CTS
MTDO	21		I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, RTC_GPIO13, MTDO, HSPICS0, U0RTS
GPIO2	22		I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPIWP
GPIO0	23		I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1
GPIO4	24		I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPIHD
VDD_SDIO				
GPIO16	25	26	I/O	GPIO16, HS1_DATA4
VDD_SDIO	26	25	P	1.8V 或 3.3V 电源输出
GPIO17	27	同 ESP32	I/O	GPIO17, HS1_DATA5
SD_DATA_2	28		I/O	GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD
SD_DATA_3	29		I/O	GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD
SD_CMD	30		I/O	GPIO11, SD_CMD, SPICS0, HS1_CMD, U1RTS
SD_CLK	31		I/O	GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS
SD_DATA_0	32		I/O	GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0
SD_DATA_1	33		I/O	GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1
GPIO5	34		I/O	GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6
GPIO18	35		I/O	GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7
GPIO23	36		I/O	GPIO23
VDD3P3_CPU				
VDD3P3_CPU	37	42	P	CPU IO 电源输入 (1.8V ~ 3.3V)
GPIO19	38	41	I/O	GPIO19, VSPIQ, HS2_DATA2
GPIO22	39	38	I/O	GPIO22, VSPIWP, HS2_CLK



表 2-1. 管脚定义

名称	ESP32	ESP31	类型	功能
U0RXD	40	37	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2, HS2_DATA0
U0TXD	41	36	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, HS2_DATA1
GPIO21	42	39	I/O	GPIO21, VSPIHD, HS2_CMD
VDDA	43	-	I/O	模拟电源 (2.3V ~ 3.6V)
				模拟
XTAL_N	44	43	O	外部晶体输出
XTAL_P	45	44	I	外部晶体输入
VDDA	46	46	P	PLL 电源 (2.3V ~ 3.6V)
CAP2	47	-	I	并联 3nF 电容和 20k 电阻到 CAP1
CAP1	48	-	I	串联 10nF 电容到地
VDDA2	-	45	P	第二电源 (2.3V ~ 3.6V)
GPIO20	-	40	I/O	GPIO20, VSPIID, HS2_DATA3
RES_14K	-	47	I	串联 14kΩ 电阻到地
CAP_10N	-	48	I	串联 10nF 电容到地



3.

功能描述

本章描述了 ESP32 的功能。

3.1. 电源管理

电源管理原理如图 3-1 和 3-2 所示。

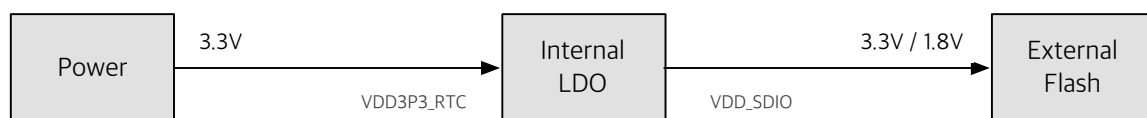


图 3-1. 电源管理 [1]

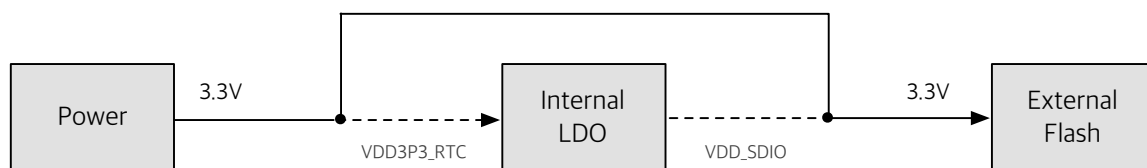


图 3-2. 电源管理 [2]

ESP32 的 GPIO 管脚分为三种，由三种电源管脚供电（见表 2-1），电源管脚具有下列功能：

VDD3P3_RTC	RTC 的供电电源 内置 LDO 的输入
VDD_SDIO	内置 LDO 的输出 当内置 LDO 如图 3-1 所示，可被配置为 1.8V 或与 VDD3P3_RTC 相同的电压 (3.3V)。 <ul style="list-style-type: none"> 在正常模式下，内置 LDO 保持稳定。 在深度睡眠模式下，内置 LDO 自动关闭。 当 VDD_SDIO 与 VDD3P3_RTC 连接在相同的 PCB 上，如图 3-2 所示，则内置 LDO 自动关闭。
VDD3P3_CPU	CPU 的供电电源。

3.2. 启动模式配置

ESP32 的复用管脚在系统重启时被采样。在通电状态时，复用管脚的上拉 / 下拉电阻配置设备进入特定启动模式并且设置 VDD_SDIO 的电压。没有上拉 / 下拉电阻，比如保持管脚悬空状态也是可行的。



更多关于复用管脚的启动模式配置，参考表 3-1。

表 3-1. 复用管脚列表

内置 LDO (VDD3P3_SDIO) 电压			
管脚	默认	3.3V	1.8V
MTDI	下拉	0	1
启动模式配置			
管脚	默认	SPI 启动模式	下载启动模式
GPIO0	上拉	1	0
U0TXD	上拉	1	悬空
GPIO2	下拉	悬空	0
GPIO4	下拉	悬空	悬空
MTDO	上拉	悬空	悬空
GPIO5	上拉	1	悬空

例如，如果 U0TXD、GPIO2 和 GPIO5 悬空，则 GPIO0 决定使用哪种启动模式。

如果 GPIO0 是高电平，则设备进入 SPI 启动模式。如果 GPIO0 是低电平，则设备进入下载启动模式。

3.3. CPU，闪存和存储

3.3.1. CPU

ESP32 包含两个低功耗 Xtensa® 32 位 LX6 微处理器，它们具有以下特征：

- 7 级流水线架构，支持 80 MHz 和 160 MHz 的时钟频率。
- 16/24 位指令集提供高代码密度。
- 支持 DSP 指令，例如 32 位放大器，32 位除法器 and 40 位 MAC。
- 支持来自 80 个中断源的 32 个中断向量。

ESP32 双核 CPU 包括以下接口。

Xtensa RAM/ROM	指令和数据
Xtensa DPort 局部总线	快速寄存器访问
带有 AHB-Lite 总线桥的处理器接口	访问外设
JTAG	调试
32 个中断	来自内外部中断源的中断



3.3.2. 内置存储

ESP32 内置存储包括：

- 128 kBytes 的 ROM，用于启动和核心功能。两个核具有专用的 ROM 模块。
- 416 kBytes 的片上 SRAM，被分成 13 个 32 kBytes 的模块。每个 SRAM 的模块都有判优器以消除来自不同 CPU 和 AHB 总线的访问冲突。
- RTC 中 8 kBytes 的 SRAM，被称作备份恢复存储，可以在深度睡眠模式下存储数据。
- 1 kbit 的 EFUSE，其中 256 位为系统所用（MAC 地址和芯片设置）；其他 768 位保留给用户应用，这些应用包括闪存加密和芯片 ID。

3.3.3. 外部闪存和静态随机存储器（SRAM）

ESP32 最多支持 4 个 16 MB 的外部 QSPI 闪存和 SRAM，它们具有基于 AES-256 的硬件加密功能从而保护开发者的程序和数据。

ESP32 通过高速缓存访问外部 QSPI 闪存和 SRAM。高达 8 MBytes 的外部闪存映射到 CPU 代码空间，支持 8, 16 和 32 位访问。支持代码执行。高达 1 MBytes 的外部闪存和 SRAM 映射到 CPU 数据空间，支持 8、16 和 32 位访问。支持在闪存和 SRAM 上读取数据。支持在 SRAM 上读 / 写数据。

3.3.4. 存储器映射

ESP32 的存储器和寄存器映射如表 3-2 所示。

表 3-2. 存储器和寄存器映射

模块	说明	开始地址	其他开始地址	大小 (字节)
存储器映射				
IROM	-	0x40000000	-	64k
IRAM	-	0x40040000	-	128k
DRAM	-	0x3FFD8000	-	160k
ICACHE	-	0x40080000	-	3.5M
DCACHE	-	0x3FE00000	-	512k
RTC 存储	-	0x60021000	0x3FF61000	8k
SoC 寄存器映射				
UART_BASE	UART0	0x60000000	-	4k 空间



表 3-2. 存储器和寄存器映射

模块	说明	开始地址	其他开始地址	大小 (字节)
HSPI_BASE	HSPI (SPI2)	0x60002000	0x3FF42000	4k 空间
SPI_BASE	SPI (SPI1)	0x60003000	0x3FF43000	4k 空间
GPIO_BASE	-	0x60004000	0x3FF44000	4k 空间
TIMERS_BASE	Legacy 定时器	0x60007000	0x3FF47000	4k 空间
RTCCNTL_BASE	RTC 寄存器	0x60008000	0x3FF48000	4k 空间
RTCIO_BASE	RTC IO Mux	0x60008400	0x3FF48400	4k 空间
IO_MUX_BASE	IO 多路复用	0x60009000	0x3FF49000	4k 空间
WDG_BASE	Legacy 看门狗	0x6000A000	0x3FF4A000	4k 空间
UHCI1_BASE	UART1 DMA	0x6000C000	0x3FF4C000	4k 空间
I2S_BASE	I2S	0x6000F000	-	4k 空间
UART1_BASE	UART1	0x60010000	-	4k 空间
UHCI0_BASE	UART0 DMA	0x60014000	0x3FF54000	4k 空间
RMT_BASE	红外遥控	0x60016000	0x3FF56000	4k 空间
PCNT_BASE	脉冲计数器	0x60017000	0x3FF57000	4k 空间
LEDC_BASE	LED PWM	0x60019000	0x3FF59000	4k 空间
EFUSE_BASE	Efuse	0x6001A000	0x3FF5A000	4k 空间
PWM_BASE	电机 PWM	0x6001C000	0x3FF5C000	4k 空间
TIMERGROUP_BASE	定时器组 1	0x6001D000	0x3FF5D000	4k 空间
TIMERGROUP1_BASE	定时器组 1	0x6001E000	0x3FF5E000	4k 空间
PRO_DPORT	CPU 配置	-	0x3FF00000	4k 空间
SDHOST_BASE	SD/SDIO 主机	0x61000000	-	1M 空间

3.4. 定时器和看门狗

3.4.1. 定时器

ESP32 具有三种定时器。

- CPU 内置定时器：每个 CPU 核有三个定时器。这些定时器都是 32 位自由运行的计数器。用户可以编程目标值以触发中断。



- 通用定时器：ESP32 包括 2 组 64 位定时器和 4 组 32 位定时器，这些定时器可被配置为独立运行，如下所示：
 - 累加并达到目标值以产生一个一次性中断。
 - 倒数并自动重载以产生周期性中断。
 - 8 位预分频器。
- RTC 定时器：RTC 集成了一个自由运行的、低功耗的 48 位计数器。电源接通，计数器随即开启。用户可以为计数器配置一个目标值以产生一个唤醒或中断信号。
 - 计数器可用于防止回滚攻击。

3.4.2. 看门狗

当系统由于软件错误或者外设的故障而出现故障时，看门狗定时器可用于再断言系统的控制。ESP32 有三个硬件看门狗——两个系统看门狗和一个 RTC 看门狗。

系统看门狗在总线时钟（通常为 80 MHz）上运行，RTC 看门狗在 RTC 时钟（通常为 32 kHz ~ 100 kHz）上运行。

这三个看门狗具有以下特征：

- 32 位倒数计时器，具有可编程的加载寄存器。
- 锁定寄存器：一旦配置了看门狗定时器，则锁定寄存器可写从而防止定时器配置被无意中更改。
- 三个可配置的阶段：看门狗定时器可以通过配置在第一次超时时向 CPU 产生一个中断，在第二次超时时产生一个局部复位信号，并且在第三次超时时产生一个全局复位信号。局部复位信号是用来复位一个或两个 CPU 核。全局复位信号会重启整个系统。
- 启动：在第三阶段中，一个系统看门狗和 RTC 看门狗会默认启动。如果在预定时间内，来自 SPI 闪存的启动过程没有完成，则看门狗会重启整个系统。

3.5. 时钟

3.5.1. CPU 时钟

一旦重启，一个外部晶体时钟源（20 MHz ~ 60 MHz）在进行 2 分频后被选为默认的 CPU 时钟。这个外部晶体时钟源也与 PLL 连接而产生一个高频时钟（通常约为 160 MHz）。

另外，ESP32 内置了一个 8 MHz 的振荡器，其高精度度在整个工作温度范围内都能保持稳定（1% 以内的精确度）。因此，应用可以从外部晶体时钟源、PLL 时钟和内置 8 MHz 的振荡器之间选择。根据应用程序，被选择的时钟源直接或在分频之后驱动 CPU 时钟。



3.5.2. RTC 时钟

RTC 时钟有五种可能的时钟源：

- 外部低速（32 kHz）晶体时钟
- 4 分频外部晶体时钟
- 内置 RC 振荡器（通常为 150 kHz，频率可调节）
- 内置 8 MHz 振荡器，以及
- 内置 31.25 kHz 时钟（由内置 256 分频的 8 MHz 振荡器生成）

当芯片处于正常功率模式并且需要一个快速 CPU 时钟的时候，应用可以选择 4 分频外部高速晶体时钟或者内置 8 MHz 振荡器。当芯片运行在低功耗模式下，应用选择外部低速（32 kHz）晶体时钟，内置 RC 振荡器，内置 8 MHz 振荡器，或内置 31.25 kHz 时钟。

3.5.3. 音频 PLL 时钟

音频时钟由超低噪声 fractional-N PLL 生成。根据下列公式，音频 PLL 的输出频率可被配置为 16 MHz 到 128 MHz：

$$f_{\text{out}} = \frac{f_{\text{xtal}} N_{\text{div}}}{M_{\text{div}} 2^{K_{\text{div}}}}$$

f_{out} 是输出频率， f_{xtal} 是晶体振荡器的频率， N_{div} 、 M_{div} 和 K_{div} 都是整数值，由寄存器配置。

3.6. 射频

ESP32 射频包含以下模块：

- 2.4 GHz 接收器
- 2.4 GHz 发射器
- 偏差和监管者
- balun 和收发开关
- 时钟生成器

3.6.1. 2.4 GHz 接收器

2.4 GHz 接收器把射频信号降频，变成正交基带信号，用 2 个高分辨率、高速的 ADC 将后者转为数字信号。为适应不同的信号频道，ESP32 还集成了 RF 滤波器、自动增益控制（AGC）、DC 偏移补偿电路和基带滤波器。



3.6.2. 2.4 GHz 发射器

2.4 GHz 发射器将正交基带信号升频到 2.4 GHz，使用大功率互补金属氧化物半导体 (CMOS) 功率放大器驱动天线。数字校准的使用进一步改善了功率放大器的线性，从而在 802.11b 传输中达到 +20.5dBm 的平均功率，在 802.11n 传输中达到 +17dBm 的平均功率，功能超强。

为了抵消无线电接收器的瑕疵，ESP32 还另增了校准措施，例如：

- 载波泄露
- I/Q 相位匹配
- 基带非线性
- 射频非线性
- 天线匹配

这些内置校准措施减少了生产测试所需的时间和设备。

3.6.3. 时钟生成器

时钟生成器为接收器和发射器生成 2.4 GHz 正交基带时钟信号，其所有部件均集成于芯片上，包括：电感器、变容二极管、闭环滤波器、监管者和分频器。

时钟生成器含有内置校准电路和自测电路。正交时钟相位和相位噪声通过拥有专利的校准算法在芯片上进行最优处理，以确保接收器和发射器达到最佳性能。

3.7. 蓝牙

ESP32 集成了蓝牙链路控制器和蓝牙基带，支持基带协议和其他低层链路协议，例如调制 / 解调、包处理、比特流处理、跳频等。

- 射频
 - 支持 1 类、2 类和 3 类发射输出功率和超过 30 dB 的动态控制范围
 - 支持 $\pi/4$ DQPSK 和 8 DPSK 调制
 - 接收器灵敏度高，动态范围超过 90 dB
 - 无需外部 PA 即可支持 1 类操作
- 基带
 - 内置 SRAM 支持全速数据传送，混合语音和数据以及完整的微微网运行
 - 用于前向纠错、信头差错控制、接入码相关、CRC、解调、加密比特流生成、白化和发送脉冲成形的逻辑电路
 - 支持 ACL、SCO、eSCO 和 AFH



- 支持在 PCM 接口中的 A-law、 μ -law 和 CVSD 数字音频编解码
- 支持 SBC 音频编解码
- 支持低功耗应用的电源管理
- 支持带有 128 位 AES 的 SMP
- 接口
 - 提供 UART HCI 接口，速度高达 4 Mbps
 - 提供 SDIO / SPI HCI 接口
 - 为主机提供 I2C 接口以进行配置
 - 提供 PCM / I2S 音频接口
- 蓝牙栈
 - 符合蓝牙 v4.2 BR / EDR 和 BLE 标准

3.8. Wi-Fi

ESP32 支持 TCP / IP 协议，完全遵循 802.11 b/g/n/e/i WLAN MAC 协议和 Wi-Fi Direct 标准。它支持分布式控制功能（DCF）下的基本服务集（BSS）操作，也支持符合最新的 Wi-Fi P2P 协议的 P2P 团体操作。

ESP32 的 **Wi-Fi 射频和基带**具有以下特征：

- 802.11b 和 802.11g 数据速率
- 802.11n MCS0~7，同时支持 20 MHz 和 40 MHz 带宽
- 802.11n MCS32
- 802.11n 0.4 μ s 保护间隔
- 数据速率高达 150 Mbps
- 接收 STBC 2x1
- 发射功率高达 21 dbm
- 可调节的发射功率
- 天线分集与选择（软件控制硬件）

ESP32 **Wi-Fi MAC** 自动采用低层协议功能，如下所示：

- 请求发送（RTS）/清除发送（CTS）和确认字符（ACK/BA）
- 分片和重组
- 聚合 AMPDU 和 AMSDU
- WMM 节省功耗 U-APSD



- 多队列管理，充分利用符合 802.11e 标准的 QoS 传输优先
- CCMP (CBC-MAC, 计数器模式), TKIP (MIC, RC4), WAPI (SMS4), WEP (RC4) 和 CRC
- 帧封装 (802.11h/RFC 1042)
- 自动信标监测 / 扫描

ESP32 的 **Wi-Fi 固件**提供以下功能:

- 基础结构型网络 (Infrastructure BSS) 工作站 (Station) 模式 / P2P 模式 / Soft AP 模式
- Wi-Fi Direct (P2P), P2P 发现, P2P 群主模式和 P2P 电源管理
- 支持 WPA/WPA2 PSK 和 WPS
- 802.11 i 安全特征: 预认证和 TSN
- 针对企业级平台的认证开放接口, 例如 TLS、PEAP、LEAP、SIM、AKA 或者用户自定义接口
- 时钟 / 电源门控与符合 802.11 标准的电源管理一起动态地适应当前连接条件, 实现最小的功耗
- 自适应速率回退算法基于实际信噪比 (SNR) 和丢包信息来控制最佳传输速率和发射功率
- MAC 上层的自动重传和回复以防止在慢速主机环境中的数据包丢弃

ESP32 拥有一个可配置的**包仲裁**, 支持灵活而精确的 Wi-Fi 和蓝牙共存模式。它是频分多路复用 (FDM) 和时分复用 (TDM) 的组合机制, 包括两个协议栈。

- Wi-Fi 最好工作在 20 MHz 带宽模式下以减少与蓝牙的干扰。
- BT 采用 AFH (自适应跳频) 来避免在 Wi-Fi 带宽内使用信道。
- Wi-Fi MAC 限制 Wi-Fi 数据包的持续时间, 也不以最低的数据速率发射长的 Wi-Fi 数据包。
- 一般来讲, BT 数据包的优先级高于正常的 Wi-Fi 数据包。
- 保护关键的 Wi-Fi 数据包, 包括信标的收发, ACK/BA 的收发。
- 保护最高优先级的蓝牙数据包, 包括查询响应、页面响应、LMP 数据和响应、信标、上一次轮询周期、SCO/eSCO 时段、BLE 事件序列。
- Wi-Fi MAC 采用 CTS-to-self 数据包来保护蓝牙传输的持续时间。
- 在 P2P 群主 (GO) 模式下, Wi-Fi MAC 采用缺席通知 (NoA) 数据包来关闭 Wi-Fi 传输从而为蓝牙预留时间。
- 在 STA 模式下, Wi-Fi MAC 通过带有 Power-Save 字节的 NULL 数据包来关闭 Wi-Fi 传输从而为蓝牙预留时间。



3.9. 低功耗管理

ESP32 拥有先进的电源管理技术，可以切换到不同的省电模式（见表 3-4）。

- 省电模式
 - 关闭：RTC 失效，所有寄存器被清除。芯片完全断电。
 - 激活模式：芯片射频处于工作模式。芯片可以接收、发射和侦听信号。
 - 部分睡眠模式：CPU 可运行，时钟可被配置。Wi-Fi / 蓝牙基带和射频失效。
 - 浅睡眠模式：CPU 暂停运行。RTC 和 ULP 协处理器运行。任何唤醒事件（MAC、主机、RTC 定时器或外部中断）都会唤醒芯片。
 - 深度睡眠模式：只有 RTC 处于工作状态。Wi-Fi 和蓝牙连接数据存储在 RTC 中。ULP 协处理器可以工作。
- 睡眠模式
 - 关联睡眠模式：省电模式在激活模式与浅睡眠模式之间切换。CPU、Wi-Fi、蓝牙和射频按照预定期被唤醒以保证 Wi-Fi / 蓝牙的连接。
 - 传感器监测深度睡眠模式：根据传感器测量到的数据，ULP 协处理器定期被开启或关闭。

表 3-3. 不同省电模式下的功能

省电模式	激活模式	浅睡眠模式	部分睡眠模式	深度睡眠模式	关闭模式
睡眠模式	关联睡眠模式	—	—	传感器监测深度睡眠模式	—
CPU	开启	暂停	开启	关闭	关闭
Wi-Fi / 蓝牙基带和射频	开启	关闭	关闭	关闭	关闭
RTC	开启	开启	开启	开启	关闭
ULP 协处理器	开启	开启	开启	开启 / 关闭	关闭

功耗随省电模式 / 睡眠模式以及功能模块的工作状态而改变（见表 3-4）。

表 3-4: 不同省电模式下的功耗

省电模式	描述	功耗
激活模式（射频工作）	Wi-Fi Tx packet 13 dBm ~ 21 dBm	160 ~ 260 mA
	Wi-Fi / BT Tx packet 0 dBm	120 mA
	Wi-Fi / BT Rx 和侦听	80 ~ 90 mA
	关联睡眠模式（与浅睡眠模式关联）	0.9 mA@DTIM3 1.2 mA@DTIM1



表 3-4: 不同省电模式下的功耗

省电模式	描述	功耗
部分睡眠模式	CPU 处于工作状态	最大速度: 20 mA 正常速度: 5 ~ 10 mA 慢速: 3 mA
浅睡眠模式	-	0.8 mA
深度睡眠模式	ULP 协处理器处于工作状态	0.5 mA
	传感器监测深度睡眠模式	25 uA @1% 占空比
	RTC 定时器 + 备份恢复存储	20 uA
	仅有 RTC 定时器处于工作状态	5 uA
关闭模式	-	2 uA

说明:

更多有关射频功耗的内容, 参考“5.1.3 射频功耗规格”。



4.

外设接口

4.1. 通用输入 / 输出接口 (GPIO)

ESP32 共有 36 个 GPIO 管脚，通过配置适当的寄存器可以给它们分配不同的功能。有如下几类 GPIO：只有数字功能的 GPIO，带模拟功能的 GPIO，带电容触摸功能的 GPIO 等等。带模拟功能的 GPIO 可以被配置为数字 GPIO。带电容触摸功能的 GPIO 可被配置为数字 GPIO。

每个带数字功能的 GPIO 都可以配置为内部上拉/下拉，或者被设置为高阻。当被配置为输入时，可通过读取寄存器获取输入值。输入也可以被设置为边缘触发或电平触发来产生 CPU 中断。简言之，数字 IO 管脚是双向、非反相和三态的，带有三态控制的输入和输出缓冲器。

这些管脚可以与其他功能复用，例如 SDIO 接口、UART、SI 等。在低功耗模式下，GPIO 管脚可被设定为保持状态。

4.2. 模 / 数转换器 (ADC)

ESP32 集成了 12 位 SAR ADC，支持 16 个通道（带模拟功能的管脚）上的测量。一些管脚可用来搭建一个测量模拟小信号的可编程增益放大器。ESP32 的 ULP 协处理器也可以在睡眠模式下以低功耗实现电压测量。CPU 可通过阈值调整或其他触发方式被唤醒。

通过适当的设置，ADC 和放大器可被配置用来测量最多达 16 个管脚的电压。

4.3. 超低噪声模拟前置放大器

ESP32 集成了一个输出给 ADC 的超低噪声模拟前置放大器。增益率由一对片外采样电容器的大小决定。通过一个更大的电容，采样噪声会减小，但是稳定时间会延长。增益大小还受到放大器的限制，放大器的最大电压增益约为 60dB。

4.4. 霍尔传感器

ESP32 集成了一个给 ADC 提供输入信号的霍尔传感器。霍尔传感器是基于空穴电阻设计的。当电磁场中有直流电，霍尔传感器会在电阻上横向产生一个小电压。这个小电压可被低功耗、超低噪声放大器放大并被 ADC 测量。



4.5. 数 / 模转换器 (DAC)

2 个 8 位 DAC 通道可以分别将 2 个数字信号转化为 2 个模拟电压信号输出。设计结构包括内置电阻串和一个缓冲器。这两个 DAC 可以作为特定电压的电源使用，具有一定的驱动能力，可以双路独立使用或关联使用。

4.6. 温度传感器

温度传感器生成一个随温度变化的电压。内部 ADC 将电压转化为一个数字量。

温度传感器的测量范围为 -40°C 到 125°C 。由于工艺差异，每个芯片上的温度传感器的补偿各不相同，而且 Wi-Fi 电路本身也产生热量（这影响了测量），因此内置温度传感器只适用于那些探测温度变化而不是绝对温度的应用，也适用于校准。

但是，如果用户校准了温度传感器并且在最低功耗的应用上使用传感器，结果将足够精确。

4.7. 触摸传感器

ESP32 提供了多达 10 个电容式传感 GPIO，这些 GPIO 通过手指或其他物品直接接触或接近而产生的电容差异来探测。此款设计的低噪声特性和电路的高灵敏度支持使用相对较小的管脚。也可以使用管脚阵列以探测更大区域或更多点。表 4-1 列出了 10 个电容式传感 GPIO。

表 4-1. ESP32 上的电容式传感 GPIO

电容式传感信号名称	管脚名称
T0	GPIO4
T1	GPIO0
T2	GPIO2
T3	MTDO
T4	MTCK
T5	MTD1
T6	MTMS
T7	GPIO27
T8	32K_XN
T9	32K_XP

**说明：**

关于触摸传感器的设计与布局的更多内容，参考“附录－触摸传感器”。

4.8. 超低功耗协处理器

ULP 处理器和 RTC 存储器在深度睡眠模式下仍保持工作状态。因此，开发者可以将 ULP 处理器的程序存放在 RTC 存储器中，使其能够在深度睡眠模式下访问外设、内置定时器和内置传感器。这有助于实现 CPU 需要被外部事件、定时器或者这些事件的组合来唤醒的场景下保持最低功耗。

4.9. 以太网 MAC 接口

ESP32 为以太网通信提供了一个符合 IEEE-802.3-2002 标准的媒体访问控制器（MAC）。ESP32 需要一个外部物理层设备（PHY）来连接物理的 LAN 总线（双绞线，光纤等等）。与 PHY 连接可以使用 17 个信号的 MII 接口、9 个信号的 RMII 接口、6 根信号线的 SMII 接口、8 根信号线的 SS-SMII 接口。以太网 MAC 支持以下特征：

- 10 Mbps 和 100 Mbps 的速率
- 专用的 DMA 控制器实现 MAC 与 SRAM 之间的高速传输。
- 带标记的 MAC 帧（支持 VLAN）
- 半双工（CSMA/CD）和全双工操作
- MAC 控制子层（控制帧）
- 32 位 CRC 自动生成和检验
- 物理和组播地址（广播和组地址）的多地址过滤模式
- 记录每个收发帧的 32 位状态代码
- 内部 FIFO 用来缓冲发射和接收帧。发送 FIFO 和接收 FIFO 都是 256 字节
- 符合 IEEE 1588 2008（PTP V2）标准的硬件 PTP（精确时间协议）
- 25 MHz/50 MHz 的时钟输出

4.10. SD / SDIO / MMC 主机控制器

ESP32 拥有一个 SD / SDIO / MMC 主机控制器，它支持：

- SD 卡（版本 3.0 和 3.01）
- SD I/O（版本 3.0）
- CE-ATA（版本 1.1）



- 多媒体卡 (MMC 版本 4.41, eMMC 版本 4.5 和版本 4.51)

控制器实现了高达 80 MHz 的数据传输速率, 并且支持三种数据-总线模式: 1 位、4 位和 8 位。它支持两个 4 位数据-总线模式中的 SD / SDIO / MMC4.41 卡。还支持一个以 1.8V 电平运行的 SD 卡。

4.11. 通用异步收发器 (UART)

ESP32 有两个 UART 接口, 即 UART0 和 UART1, 支持异步通信 (RS232 和 RS485) 和 IrDA, 通信速度达到 5 Mbps。UART 支持 CTS 和 RTS 信号的硬件流控和软件流控 (XON 和 XOFF)。两个接口可由 DMA 访问或者 CPU 直接访问。

4.12. I2C 接口

ESP32 拥有两个 I2C 总线接口, 根据用户的配置, 总线接口可以作为 I2C 主机或者从机。I2C 接口支持:

- 标准模式 (100 kbit/s)
- 快速模式 (400 kbit/s)
- 速度最大可达 5 MHz, 但是受制于 SDA 上拉强度
- 7/10 位寻址模式
- 7 位双寻址模式

用户可以配置指令寄存器来控制 I2C 接口从而实现更多的灵活性。TXFIFO 和 RXFIFO 用来同时支持多项指令。

4.13. I2S 接口

ESP32 拥有两个标准 I2S 接口。这两个接口可以以主机或从机模式, 以全双工或半双工模式工作, 并且可被配置为 8/16/32/40/48 位的输入输出通道, 支持频率从 10 kHz 到 40 MHz 的 BCK 时钟。当一个或两个 I2S 接口被配置为主机模式时, 主机时钟可以输出到外部 DAC/CODEC, 频率达到采样频率的 64 倍。

两个 I2C 接口都有专用的 DMA。支持 PDM 和 BT PCM 接口。

4.14. 红外遥控器

红外遥控器支持 8 个通道的红外发射和接收。通过编程脉冲波形, 遥控器可以支持多种红外协议。8 个通道共用一个 512 x 32 位的存储模块来存放收发的波形。



4.15. 脉冲计数器

脉冲计数器通过七种模式对脉冲边沿进行计数。它一次可同时捕捉四组脉冲。每组的输入包括两个脉冲信号和两个控制信号。当计数器达到一个设定的阈值，就会产生一个中断。

4.16. 脉冲宽度调制 (PWM)

脉冲宽度调制 (PWM) 控制器可以用于驱动数字马达和智能灯。该模块包含 PWM 定时器，PWM 子控制器和一个专用的捕捉子模组。每个定时器以同时或自由运行方式提供定时功能。每个 PWM 子控制器为一个 PWM 通道生成波形。专用的捕捉子模组可以精确捕捉外部定时事件。

4.17. LED PWM

LED PWM 控制器可以生成 16 路独立的数字波形，波形的周期和占空比可配置。

每路信号配有一个 20 位、运行在 80 MHz 的定时器。对于每个 20 位定时器，一个 20 位的寄存器用于配置周期，另外两个 20 位的寄存器决定脉冲的上升沿和下降沿。因此，PWM 的周期可设置为 1/80 s 到 1/40 μ s，在周期为 1ms 时，占空比的精确度可以高达 16 位。

软件可以立即改变占空比。另外，每路支持步进式自动地增加或减少占空比。这可以用于 LED RGB 彩色梯度发生器。

4.18. 串行外设接口 (SPI)

ESP32 拥有三种 SPI (SPI、HSPI 和 VSPI)，它们可以以主机或从机模式，以 1-line 全双工或 1/2/4-line 最简通信模式工作。这些 SPI 还支持：

- 4 种定时模式的 SPI 形式传输，取决于极性 (POL) 和相位 (PHA)
- 速度高达 80 MHz，80 MHz 的分流时钟
- 64 字节 FIFO

这个接口可以用来连接外部闪存 / SRAM 和 LCD。所有 SPI 可连接 DMA。



5.

电气参数

5.1. 直流电特性

5.1.1. 绝对最大额定值

表 5-1. 绝对最大额定值

参数	名称	最小值	最大值	单位
低输入电压	V_{IL}	-0.3	$0.25 \times V_{IO}$	V
高输入电压	V_{IH}	$0.75 \times V_{IO}$	3.3	V
输入漏电流	I_{IL}	-	50	nA
低输出电压	V_{OL}	-	$0.1 \times V_{IO}$	V
高输出电压	V_{OH}	$0.8 \times V_{IO}$	-	V
输入引脚电容	C_{pad}	-	2	pF
VDDIO	V_{IO}	1.8	3.3	V
最大驱动能力	I_{MAX}	-	12	mA
存储温度范围	T_{STR}	-40	150	°C

5.1.2. 建议工作条件

表 5-2. 建议工作环境

参数	名称	最小值	典型值	最大值	单位
电池稳压电源电压	V_{BAT}	2.8	3.3	3.6	V
I/O 电源电压	V_{IO}	1.8	3.3	3.6	V
工作温度范围	T_{OPR}	-40	-	125	°C
CMOS 低电平输入电压	V_{IL}	0	-	$0.3 \times V_{IO}$	V
CMOS 高电平输入电压	V_{IH}	$0.7 \times V_{IO}$	-	V_{IO}	V
CMOS 阈值电压	V_{TH}	-	$0.5 \times V_{IO}$	-	V



5.1.3. 射频功耗

下列功耗数据是基于 3.0 V 的电源、25°C 的周围温度测得的。测量是于天线接口处完成的。所有发射数据是基于 90% 的占空比，在持续发射的模式下测得。

表 5-3. 射频功耗

模式	最小值	典型值	最大值	单位
传送 802.11b, DSSS 1 Mbps, POUT=+19.5 dBm	-	225	-	mA
传送 802.11b, CCK 11 Mbps, POUT=+18.5 dBm	-	205	-	mA
传送 802.11g, OFDM 54 Mbps, POUT=+16 dBm	-	160	-	mA
传送 802.11n, MCS7, POUT=+14 dBm	-	152	-	mA
接收 802.11b, 包长 1024 bytes, -80 dBm	-	85	-	mA
接收 802.11g, 包长 1024 bytes, -70 dBm	-	85	-	mA
接收 802.11n, 包长 1024 bytes, -65 dBm	-	80	-	mA
接收 802.11n HT40, 包长 1024 bytes, -65 dBm	-	80	-	mA



5.2. 蓝牙射频

5.2.1. 接收器 - 基本数据速率

表 5-4. 接收器特征 - 基本数据速率

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
灵敏度 @0.1% BER	—	-	-90	-	dBm
最大接收信号 @0.1% BER	—	0	-	-	dBm
共信道 C/I	—	-	+7	-	dB
邻近信道抑制比	F=F0 + 1 MHz	-	-	-6	dB
	F=F0 - 1 MHz	-	-	-6	dB
	F=F0 + 2 MHz	-	-	-33	dB
	F=F0 - 2 MHz	-	-	-25	dB
	F=F0 + 3 MHz	-	-	-45	dB
	F=F0 - 3 MHz	-	-	-25	dB
带外数据带阻	30 MHz ~ 2000 MHz	-10	-	-	dBm
	2000 MHz ~ 2400 MHz	-27	-	-	dBm
	2500 MHz ~ 3000 MHz	-27	-	-	dBm
	3000 MHz ~ 12.5 GHz	-10	-	-	dBm
互调	—	-36	-	-	dBm



5.2.2. 发射器 - 基本数据速率

表 5-5. 发射器特征 - 基本数据速率

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
射频发射功率	-	-	+4	+4	dBm
射频功率控制范围	-	-	25	-	dB
20 dB 带宽	-	-	0.9	-	MHz
相邻信道发射功率	F=F0 + 1 MHz	-	-24	-	dBm
	F=F0 - 1 MHz	-	-16.1	-	dBm
	F=F0 + 2 MHz	-	-40.8	-	dBm
	F=F0 - 2 MHz	-	-35.6	-	dBm
	F=F0 + 3 MHz	-	-45.7	-	dBm
	F=F0 - 3 MHz	-	-40.2	-	dBm
	F=F0 + >3 MHz	-	-45.6	-	dBm
	F=F0 - >3 MHz	-	-44.6	-	dBm
$\Delta f_{1\text{avg}}$ 最大调制频率	-	-	155	-	kHz
Δf_2 最大调制频率	-	-	133.7	-	kHz
$\Delta f_{2\text{avg}}/\Delta f_{1\text{avg}}$	-	-	0.92	-	-
ICFT	-	-	-7	-	kHz
漂移率	-	-	0.7	-	kHz/50 μ s
偏移 (1 槽数据包)	-	-	6	-	kHz
偏移 (5 槽数据包)	-	-	6	-	kHz



5.2.3. 接收器 - 增强型数据速率

表 5-6. 接收器 - 增强数据速率

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
π/4 DQPSK					
灵敏度 @0.01% BER	-	-	-91	-	dBm
最大接收信号 @0.1% BER	-	-	0	-	dBm
C/I 共信道	-	-	11	-	dB
邻近信道抑制比	F=F0 + 1 MHz	-	-7	-	dB
	F=F0 - 1 MHz	-	-7	-	dB
	F=F0 + 2 MHz	-	-35	-	dB
	F=F0 - 2 MHz	-	-25	-	dB
	F=F0 + 3 MHz	-	-45	-	dB
	F=F0 - 3 MHz	-	-25	-	dB
8 DPSK					
灵敏度 @0.01% BER	-	-	-84	-	dBm
最大接收信号 @0.1% BER	-	0	-	-	dBm
C/I 共信道	-	-	18	-	dB
邻近信道抑制比	F=F0 + 1 MHz	-	2	-	dB
	F=F0 - 1 MHz	-	2	-	dB
	F=F0 + 2 MHz	-	-25	-	dB
	F=F0 - 2 MHz	-	-25	-	dB
	F=F0 + 3 MHz	-	-38	-	dB
	F=F0 - 3 MHz	-	-38	-	dB



5.2.4. 发射器 - 增强型数据速率

表 5-7. 发射器特征 - 增强型数据速率

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
最大射频发射功率	-	-	+2	-	dBm
相对发射控制	-	-	-1.5	-	dB
$\pi/4$ DQPSK max w_0	-	-	-0.72	-	kHz
$\pi/4$ DQPSK max w_i	-	-	-6	-	kHz
$\pi/4$ DQPSK max $ w_i + w_0 $	-	-	-7.42	-	kHz
8DPSK max w_0	-	-	0.7	-	kHz
8DPSK max w_i	-	-	-9.6	-	kHz
8DPSK max $ w_i + w_0 $	-	-	-10	-	kHz
$\pi/4$ DQPSK 调制精度	RMS DEVM	-	4.28	-	%
	99% DEVM	-	-	30	%
	Peak DEVM	-	13.3	-	%
8DPSK 调制精度	RMS DEVM	-	5.8	-	%
	99% DEVM	-	-	20	%
	Peak DEVM	-	14	-	%
带内杂散发射	F=F0 + 1MHz	-	-34	-	dBm
	F=F0 - 1MHz	-	-40.2	-	dBm
	F=F0 + 2MHz	-	-34	-	dBm
	F=F0 - 2MHz	-	-36	-	dBm
	F=F0 + 3MHz	-	-38	-	dBm
	F=F0 - 3MHz	-	-40.3	-	dBm
	F=F0 +/- > 3MHz	-	-	-41.5	dBm
EDR 差分相位编码	-	-	100	-	%



5.3. 蓝牙 LE 射频

5.3.1. 接收器

表 5-8. 接收器特征 – BLE

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
灵敏度 @0.1% BER	–	-	-92	-	dBm
最大接收信号 @0.1% BER	–	0	-	-	dBm
共信道 C/I	–	-	+10	-	dB
邻近信道抑制比	F=F0 + 1 MHz	-	-5	-	dB
	F=F0 - 1 MHz	-	-5	-	dB
	F=F0 + 2 MHz	-	-35	-	dB
	F=F0 - 2 MHz	-	-25	-	dB
	F=F0 + 3 MHz	-	-45	-	dB
	F=F0 - 3 MHz	-	-25	-	dB
带外数据带阻	30 MHz ~ 2000 MHz	-10	-	-	dBm
	2000 MHz ~ 2400 MHz	-27	-	-	dBm
	2500 MHz ~ 3000 MHz	-27	-	-	dBm
	3000 MHz ~ 12.5 GHz	-10	-	-	dBm
互调	–	-36	-	-	dBm



5.3.2. 发射器

表 5-9. 发射器特征 – BLE

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)					
射频发射功率	-	-	+7.5	+10	dBm
射频功率控制范围	-	-	25	-	dB
相邻信道发射功率	F=F0 + 1 MHz	-	-14.6	-	dBm
	F=F0 - 1 MHz	-	-12.7	-	dBm
	F=F0 + 2 MHz	-	-44.3	-	dBm
	F=F0 - 2 MHz	-	-38.7	-	dBm
	F=F0 + 3 MHz	-	-49.2	-	dBm
	F=F0 - 3 MHz	-	-44.7	-	dBm
	F=F0 + >3 MHz	-	-50	-	dBm
	F=F0 - > 3MHz	-	-50	-	dBm
$\Delta f_{1_{avg}}$ 最大调制频率	-	-	265	-	kHz
Δf_2 最大调制频率	-	-	247	-	kHz
$\Delta f_{2_{avg}}/\Delta f_{1_{avg}}$	-	-	-0.92	-	-
ICFT	-	-	-10	-	kHz
漂移率	-	-	0.7	-	kHz/50 μ s
偏移	-	-	2	-	kHz



5.4. Wi-Fi 射频

表 5-10. Wi-Fi 射频特征

说明	最小值	典型值	最大值	单位
通用规格 (如无特别说明, VBAT = 3.3V, TA = 27°C)				
输入频率	2412	-	2484	MHz
输入阻抗	-	50	-	Ω
输入反射	-	-	-10	dB
72.2 Mbps 下, PA 的输出功率	15.5	16.5	17.5	dBm
11b 模式下, PA 的输出功率	19.5	20.5	21.5	dBm
灵敏度				
DSSS, 1 Mbps	-	-98	-	dBm
CCK, 11 Mbps	-	-91	-	dBm
OFDM, 6 Mbps	-	-93	-	dBm
OFDM, 54 Mbps	-	-75	-	dBm
HT20, MCS0	-	-93	-	dBm
HT20, MCS7	-	-73	-	dBm
HT40, MCS0	-	-90	-	dBm
HT40, MCS7	-	-70	-	dBm
MCS32	-	-89	-	dBm
邻道抑制				
OFDM, 6 Mbps	-	37	-	dB
OFDM, 54 Mbps	-	21	-	dB
HT20, MCS0	-	37	-	dB
HT20, MCS7	-	20	-	dB



6.

封装信息

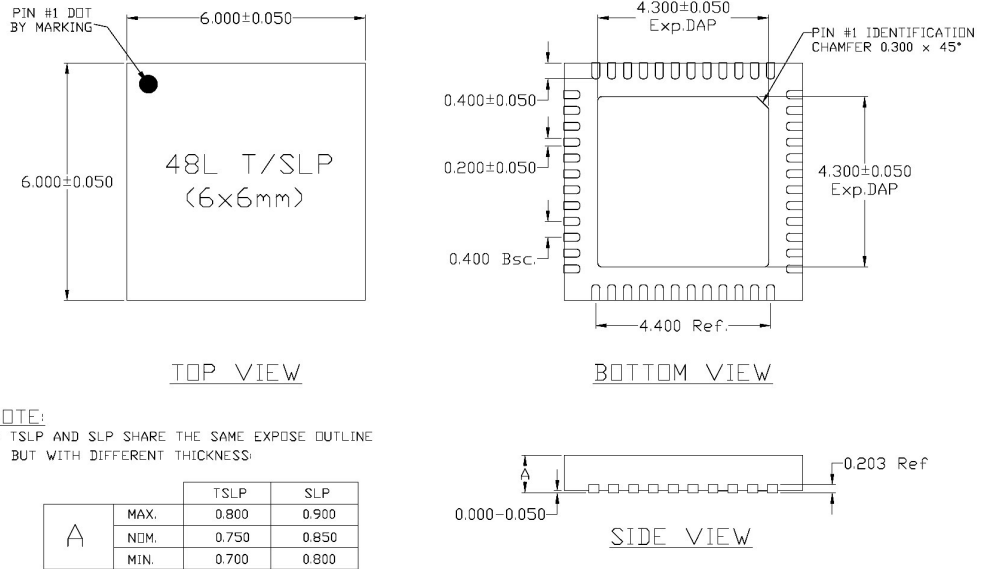


图 6-1. QFN48 封装



7.

支持资源

7.1. 相关文档

以下为有关 ESP32 的文档资料。

- [《ESP32 入门指南》](#)
如何下载 ESP32-LAUNCHER 固件并使用相关工具进行配置
- [《ESP32 编程手册》](#)
如何使用 ESP32 SDK 进行编程，提供一些相关的编程示例。
- [《ESP32 API 索引》](#)
关于 ESP32 应用程序设计接口（API）的详述

7.2. 社区资源

以下链接为有关 ESP32 的社区资源

- [ESP32 网上社区](#)
www.esp32.com 是一个工程师对工程师（E2E）的社区，用户可以在这里提出问题，分享知识，探索观点并且与工程师同行一起解决问题。
- [ESP32 Github](#)
乐鑫拥有 Github 的 MIT 许可证，ESP32 发展项目可以在 Github 上自由分布。
ESP32 Github 帮助开发者认识 ESP32、促进创新并且增加开发者对于设备周边软硬件的一般知识。



附录 - 触摸传感器

触摸传感系统建立在一个基底之上，这个基底带有电极并且连接一个平面保护层。当用户触摸保护层，就会触发电容变化，一个二进制信号会生成并显示触摸是否有效。

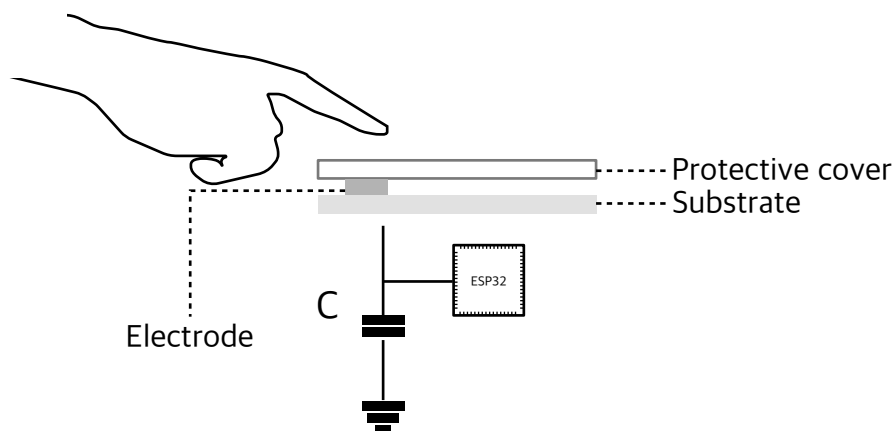


图 附-1. 典型的触摸传感器应用

为防止电容耦合和其他电干扰影响触摸传感系统的灵敏度，用户需要考虑一下因素：

I. 电极图形

适当大小和形状的电极能帮助提高系统灵敏度。常见的是圆形、椭圆形和与人的指尖形似的电极。过大或不规则形状的电极可能导致附近电极的错误反应。

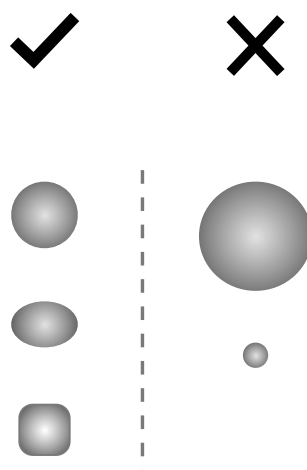


图 附-2. 电极图形要求



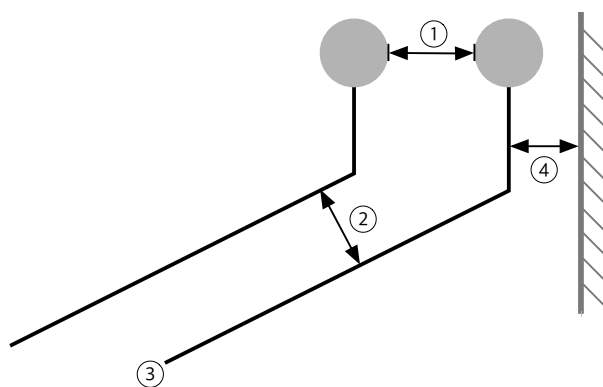
说明:

图 附-2 所示例子不是按照实际比例。建议用户用指尖作参考。

II. PCB 布局

如何正确地布局电极感应走线:

- 电极之间的过短距离会引起串扰和错误的触摸探测。建议距离至少是所使用主板的厚度的两倍。
- 感应走线的宽度影响寄生电容。走线越细，产生的电容耦合就越少。建议保持走线尽可能细，长度不要超过 10cm 以能容纳标准的 PCB 或 FlexPCB。
- 为避免高频信号的线间耦合，建议在同一层上平行布局传感走线并且保持走线之间的距离至少为走线宽度的两倍。
- 当设计一个触摸传感设备，不能有元件临近电极或在电极下面。只有电极对于触摸有敏感性。
- 不要让触摸传感设备接地。强烈建议不要在设备下面布局近地层，因为触摸传感器设备和地面之间产生的寄生电容会极大地降低敏感度。



- ① Distance between electrodes - Twice the thickness of the panel
- ② Distance between tracks - Twice the track width
- ③ Width of the track (electrode wiring) - As thin as possible
- ④ Distance between track and ground plane - 2mm at a minimum

图 附-3. 传感走线布局要求



附录 B - 声明

I. 联邦通讯委员会 (FCC) 通告

本设备经过测试，证实符合 FCC 规定第 15 部分关于 B 类数字设备的限制。这些限制旨在提供合理的保护，防止在住宅区安装时产生有害干扰。本设备会产生、使用和辐射射频能量，如果不按照说明安装和使用本设备，可能会对无线电通信造成有害干扰。然而，无法保证特定安装中不会发生干扰。可以通过打开和关闭本设备来确定是否对无线电或电视接收造成有害干扰，如果确实造成干扰，建议用户尝试通过以下一种或多种措施来消除干扰：

- 重新调整接收天线的方向或放置位置。
- 增加设备和接收器之间的距离。
- 将设备连接至与接收器不在同一回路上的电源插座。
- 咨询经销商或有经验的无线电 / 电视技术人员寻求帮助。

未经乐鑫授权，任何对于本设备的更改或修改可能会产生有害干扰，可能会使用户丧失操作本设备的权利。

本设备符合 FCC 第 15 部分的规定。操作应符合以下两个条件：(1) 本设备不会产生有害干扰，并且 (2) 本设备必须接受任何接收到的干扰，包括可能导致意外操作的干扰。

FCC 辐射暴露声明

本设备完全符合 FCC 针对非控制环境所提出的辐射暴露限制。用户在安装和操作本设备时应保持身体与辐射体的距离在 20 公分以上。



乐鑫 IOT 团队

<http://bbs.espressif.com>

免责声明和版权公告

本文中的信息，包括供参考的 URL 地址，如有变更，恕不另行通知。

文档“按现状”提供，不负任何担保责任，包括对适销性、适用于特定用途或非侵权性的任何担保，和任何提案、规格或样品在他处提到的任何担保。本文档不负任何责任，包括使用本文档内信息产生的侵犯任何专利权行为的责任。本文档在此未以禁止反言或其他方式授予任何知识产权使用许可，不管是明示许可还是暗示许可。

Wi-Fi 联盟成员标志归 Wi-Fi 联盟所有。蓝牙标志是 Bluetooth SIG 的注册商标。

文中提到的所有商标名称、商标和注册商标均属其各自所有者的财产，特此声明。

版权归© 2016 乐鑫所有。保留所有权利。



本发射器所使用的天线在同一地点不得存在有其它天线或发射器或是与之合并操作。

II. CE 符合性声明

本设备在相关的行政许可证下均可用于欧盟各成员国。

乐鑫——ESP32 的生产商，声明本产品符合欧洲理事会指令 1999/5/CE（1999 年 3 月 9 日）中第 3 条的规定。

