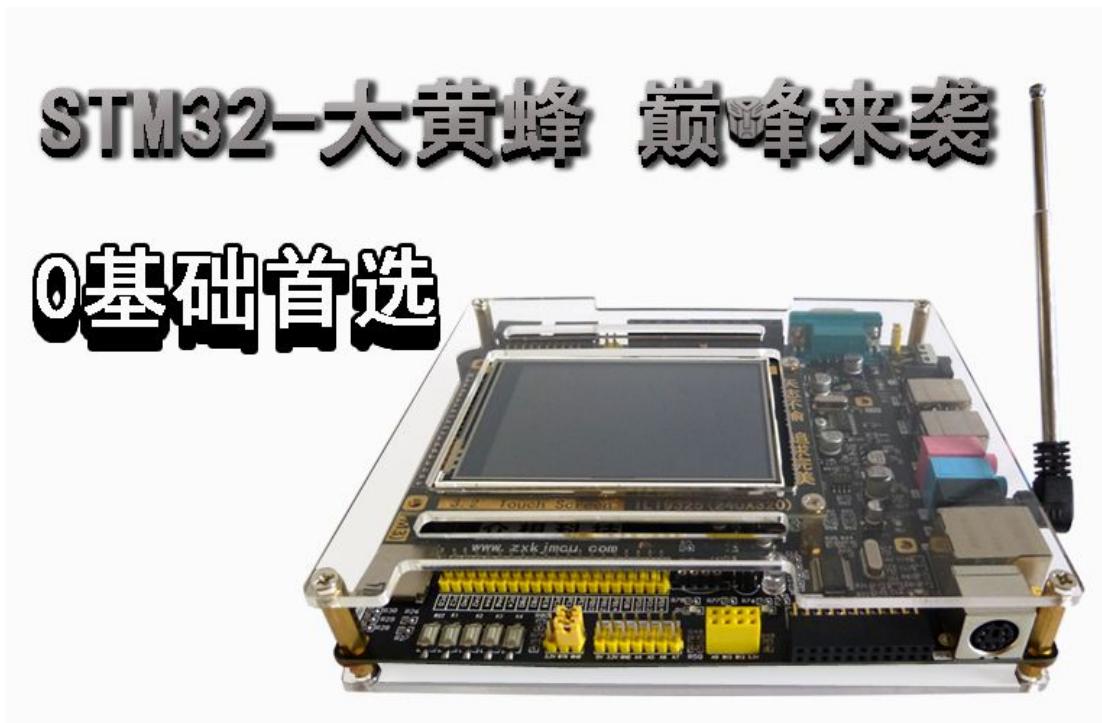


学 ARM 从 STM32 开始

STM32 开发板库函数教程--硬件篇



官方网站: <http://www.zxkjmcu.com>

官方店铺: <http://zxkjmcu.taobao.com>

官方论坛: <http://bbs.zxkjmcu.com>

刘洋课堂: <http://school.zxkjmcu.com>

目 录

1.1.1	大黄蜂 STM32 开发板主要功能介绍.....	3
1.1.2	大黄蜂 STM32 开发板接口介绍.....	4
1.1.3	开发板资源详细清单.....	5
1.2	开发板原理图详解.....	6
1.2.1	MCU.....	6
1.2.2	RS232 通讯功能.....	7
1.2.3	RS485 通讯功能.....	7
1.2.4	CAN 通讯功能.....	8
1.2.5	以太网通讯功能.....	9
1.2.6	红外线发送功能.....	10
1.2.7	红外线接收功能.....	11
1.2.8	USB 转 RS232 功能.....	11
1.2.9	2.4G NRF24L01 无线模块端口.....	12
1.2.10	TF 卡读写功能.....	13
1.2.11	I ² C-AT24C02 存储.....	13
1.2.12	外扩 FLASH 存储器.....	14
1.2.13	外扩 PS2 鼠标、键盘端口.....	15
1.2.14	外扩摄像头端口.....	16
1.2.15	外扩 JTAG 仿真端口.....	16
1.2.16	外扩 ST-LINK 跳线端口.....	17
1.2.17	外扩 GPIO-IIC-SPI-USART 跳线端口.....	18
1.2.18	外扩温度传感器功能.....	19
1.2.19	TFT 触摸屏接口.....	20
1.2.20	启动模式选择功能.....	21
1.2.21	CPU 管脚引出扩展端子.....	21
1.2.22	外扩蜂鸣器发声功能.....	22
1.2.23	ADC 模拟量输入功能.....	23
1.2.24	独立键盘输入功能.....	23
1.2.25	FM 收音机功能.....	24
1.2.26	MP3 音乐播放功能.....	25
1.2.27	FM 收音机功放功能.....	26
1.2.28	LED 发光二极管.....	27
1.2.29	STM32 开发板电源系统.....	27
1.2.30	STM32 开发板各种功能跳线描述.....	28
1.2.30.1	STM32 开发板 RS232 与 USB 转换跳线.....	29
1.2.30.2	STM32 开发板功放使用或断开转换跳线.....	29
1.2.30.3	STM32 开发板功 USB 供电选择跳线.....	29
1.2.30.4	STM32 开发板启动模式选择跳线.....	30
1.2.30.5	STM32 开发板 ST-LINK 仿真功能跳线.....	32

1.1.1 大黄蜂 STM32 开发板主要功能介绍

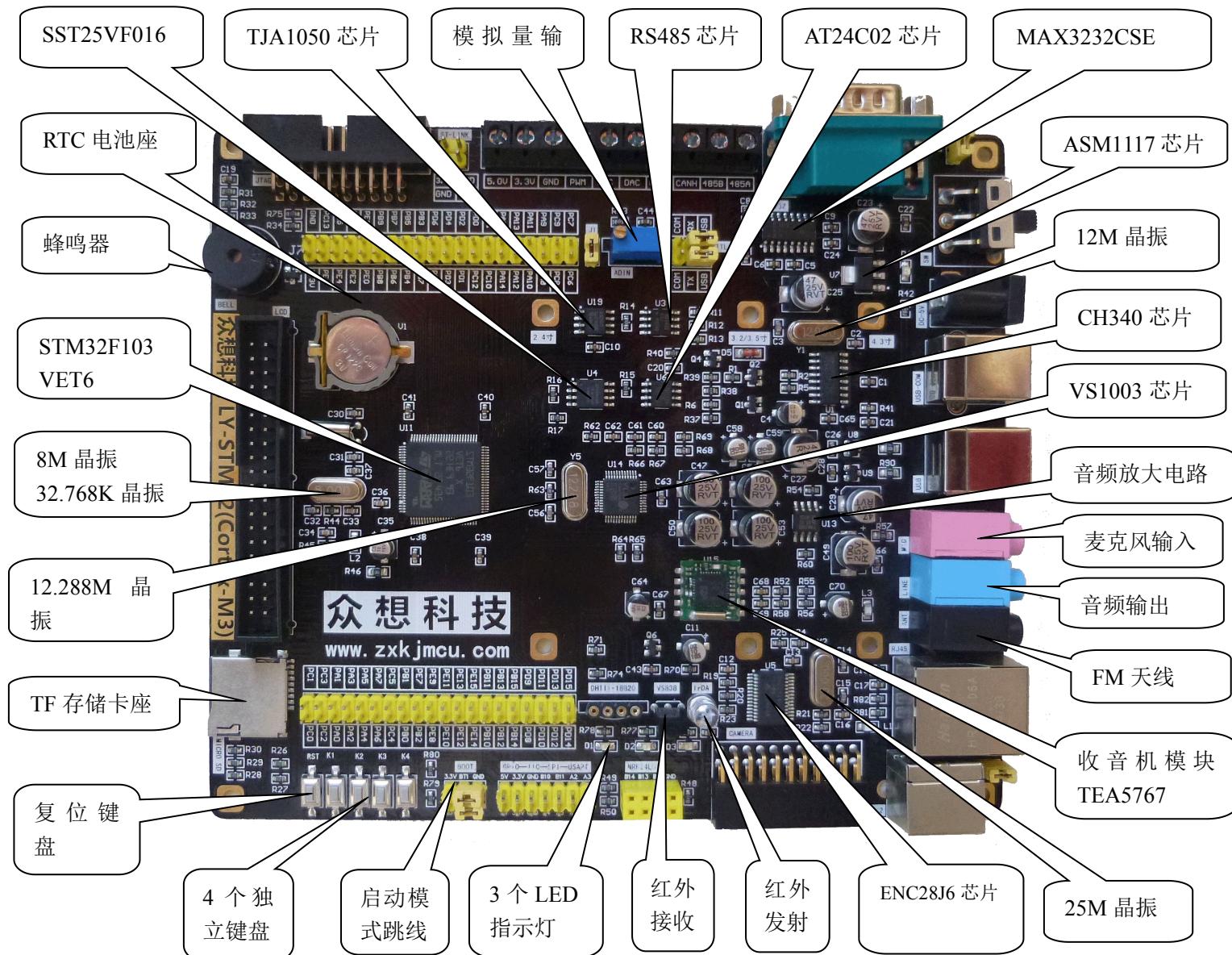


图 1.1

1.1.2 大黄蜂 STM32 开发板接口介绍

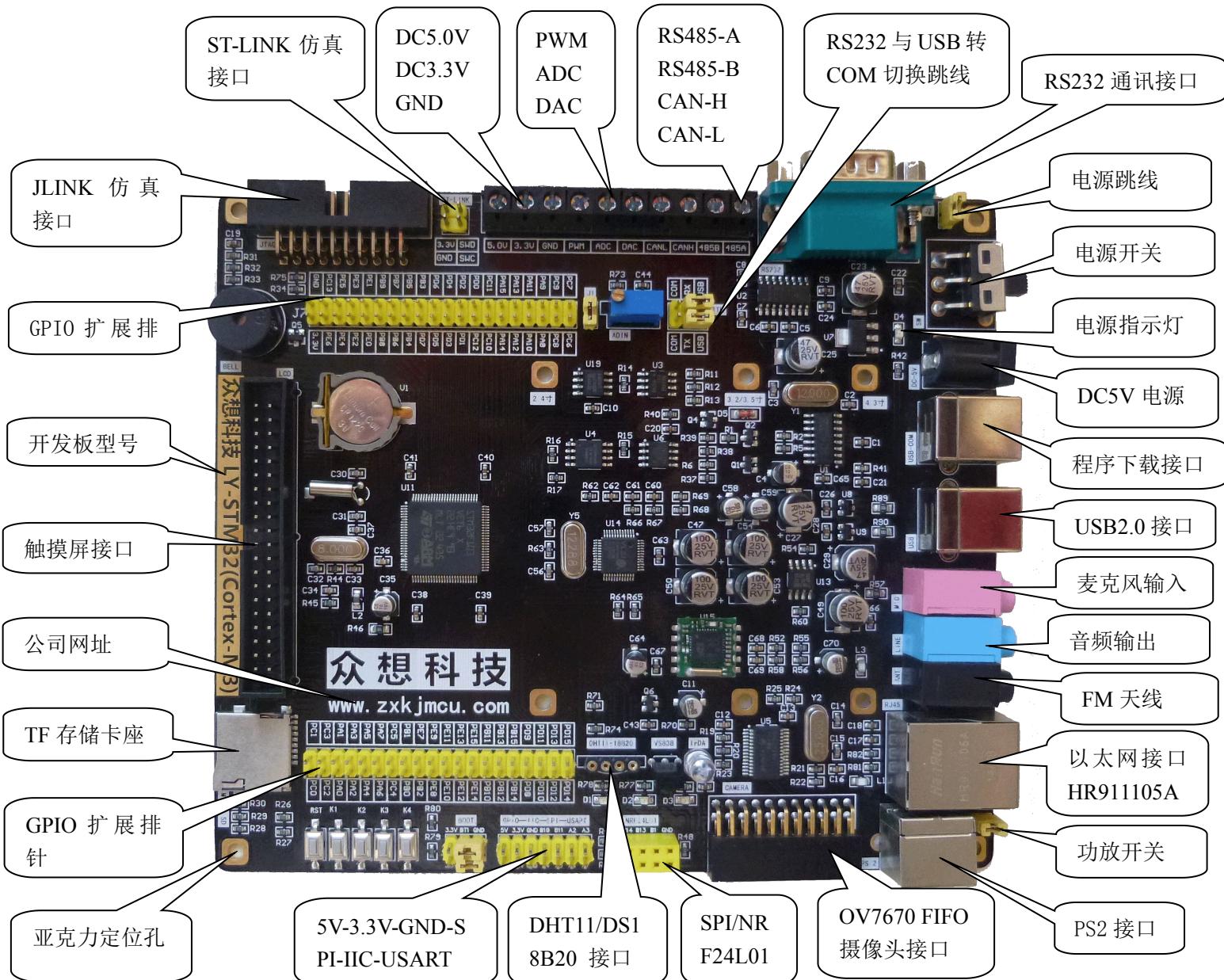


图 1.2

大黄蜂 STM32 开发板以 STM32F103VET6 为主 MCU，并且外扩了多种功能芯片。此开发板不但可以把主 CPU 的功能发挥到极致，而且还可以与其他的板载芯片实现更多的功能。比如人机界面交互、多媒体、物联网、自动化控制、智能家居等。开发板采用黑色沉金工艺设计，正面与背面都有亚克力保护，显得开发板很大气厚重。

1.1.3 开发板资源详细清单

◆ 板子外型:15cm *13cm 沉金工艺 过孔盖油 军工 A 级
◆ CPU:STM32F103VET6,LQFP100,FLASH:512K, SRAM:64K, 80 个 IO 口, 5 个串口, 3 个 SPI, 2 个 IIC, 3 个 12 位 ADC, 2 个 12 位 DAC, 8 个 16 位定时器, FSMC/SDIO/CAN/USB 等
◆ 多个供电接口: 1 个 DC5V 电源接口, 2 个 USB 取电接口, 5V、3.3V 电源接线端子
◆ 3 个 LED 指示灯(蓝色)
◆ 1 个外扩 SPI FLASH: 2MB SPI FLASH(SST25VF016B)
◆ 1 个 MICRO SD 存储卡座
◆ 1 个外扩 AT24C02 芯片
◆ 1 个复位按钮, 4 个独立键盘
◆ 1 个 USB 转 232 虚拟串口, 也可做 USB 转 TTL 串口
◆ 1 个 RS232 通讯接口(MAX3232 芯片)
◆ 1 个 RS485 通讯接口(MAX485 芯片)
◆ 1 个 CAN 通讯接口(TJA1050 芯片)
◆ 1 个 10Mbps 网络接口(ENC28J60 芯片)
◆ 1 个红外接收头
◆ 1 个红外发射头
◆ 1 个 USB-SLAVE 接口(CPU 内部集成)
◆ 1 个板载调频收音机模块 TEA5767
◆ 1 个板载 VS1003 MP3 解码芯片
◆ 1 个 MP3 麦克风输入接口
◆ 1 个收音机与 MP3 音频输出接口
◆ 1 个收音机天线接口
◆ 1 个有源蜂鸣器
◆ 1 个触摸屏接口。可接(2.4 寸、2.8 寸、3.2 寸、4.3 寸、5 寸、7 寸)触摸屏
◆ 1 个 PS2 接口
◆ 1 个 2.4G NRF24L01 无线通信接口
◆ 1 个摄像头接口
◆ 1 个电源指示灯 (红色)
◆ 1 个电源开关
◆ 1 个 RTC 后备电池座, 1 个纽扣电池
◆ 1 个标准的 JTAG/SWD 调试下载口(20PIN,2.54 间距)
◆ 1 个启动模式选择配置接口
◆ 1 个 ST-LINK 调试接口
◆ 1 路模拟量接线端子输入(可通过 CPU 引出的双排针扩展多路)
◆ 1 路模拟量接线端子输出(可通过 CPU 引出的双排针扩展多路)
◆ 1 路 PWM 接线端子输出接口(可通过 CPU 引出的双排针扩展多路)
◆ 1 个 DS18B20/DHT11 温湿度传感器预留接口
◆ CPU 所有管脚全部引出

1.2 开发板原理图详解

1.2.1 MCU

LY-STM32 增强版是以 STM32F103VET6 为核心，在以后的叙述中把外设设备管脚标号放在箭头左侧，CPU 对应的连接管脚放在箭头右侧，每一组外设功能说明都是如此顺序。

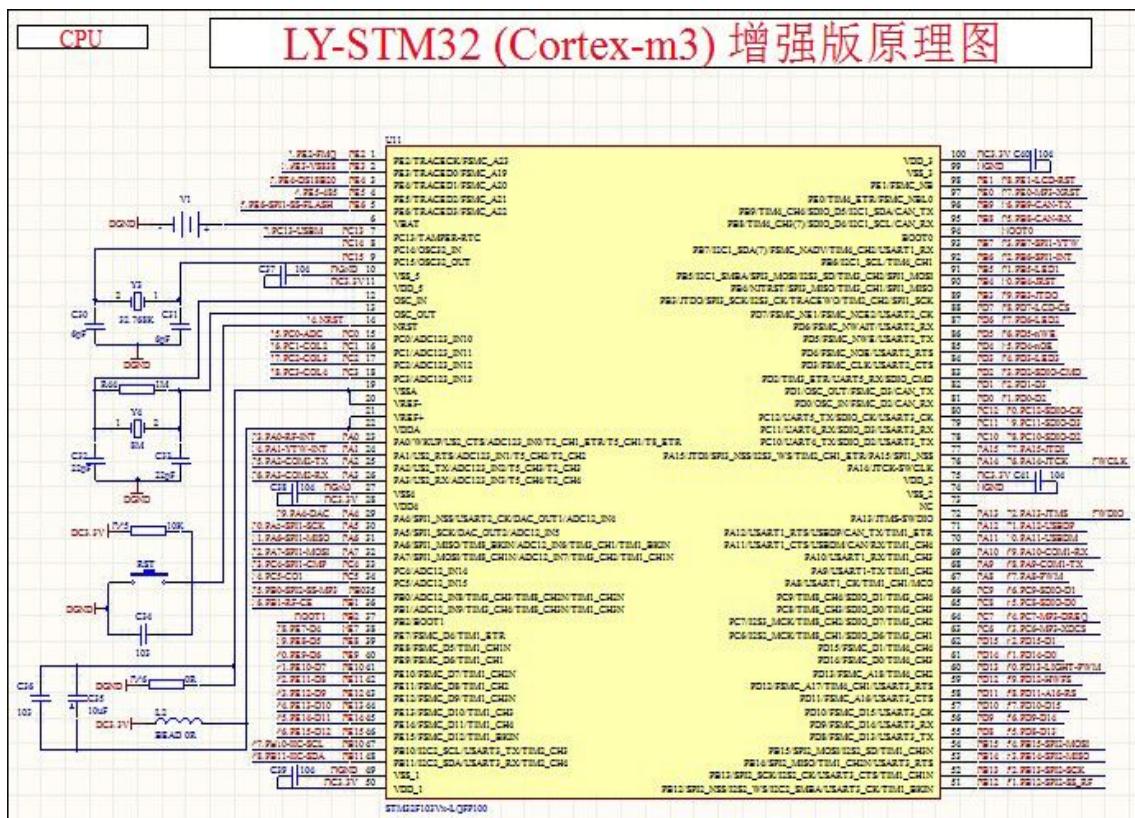


图 2.1

◆ CPU 内部功能说明

名称	说明及描述	名称	说明及描述
CPU	STM32F103VET6	SPI	3 个
封装形式	LQFP100	IIC	2 个
闪存FLASH	512K	12 位 ADC	3 个
SRAM	64K	12 位 DAC	2 个
IO 口	80 个	16 位定时器	8 个
串口	5 个	CAN	1 个

FSMC	1 个	USB	1 个
SDIO	1 个		

1.2.2 RS232 通讯功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 RS232 通讯功能，采用标准的 DB9RA/F 针接口，通讯芯片选用 MAX3232ESE 芯片，很方便与计算机或者其它的串口通讯。MAX3232、MAX3222 等收发器是采用专有的低压差发送器输出级，利用双电荷泵在 3.0V 至 5.5V 电源供电时能够实现真正的 RS-232 性能，MAX3232 供电电压 5v 或 3.3V，耗电 0.3mA。

11-T1IN → 68. PA9-COM1-TX

12-R1OUT → 69. PA10-COM1-RX

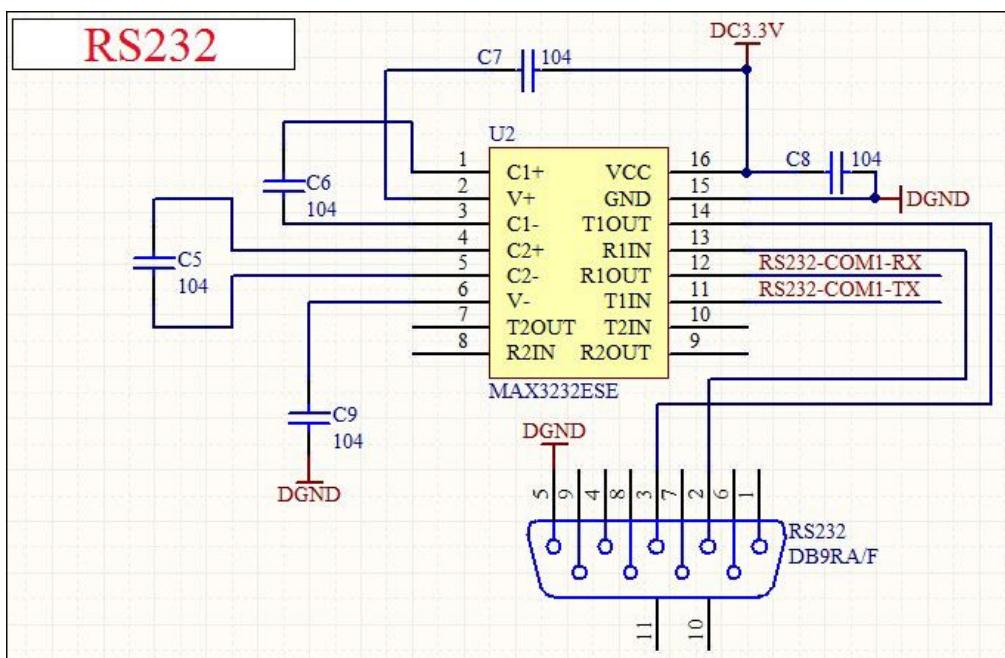


图 2.1

1.2.3 RS485 通讯功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 RS485 通讯功能，采用端子接线，方便

实用。主芯片选用 MAX485 芯片。

1-RXD → 26. PA3-COM2-RX

2-ENAB → 4. PE5-485

4-TXD → 25. PA2-COM2-TX

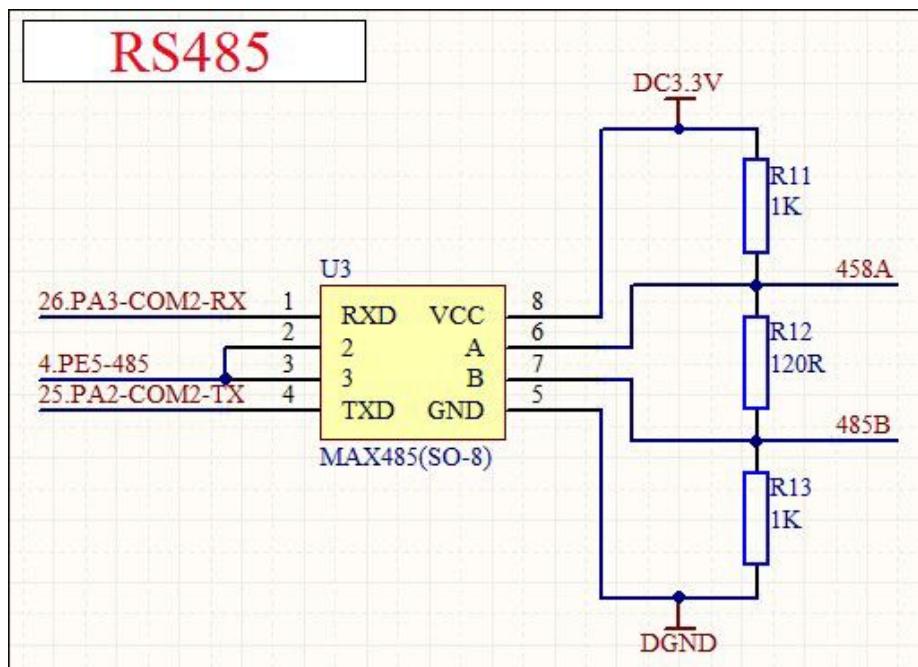


图 2.2

1.2.4 CAN 通讯功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 CAN 通讯功能，采用端子接线方式。方便实用。主芯片选用 TJA1050 芯片。

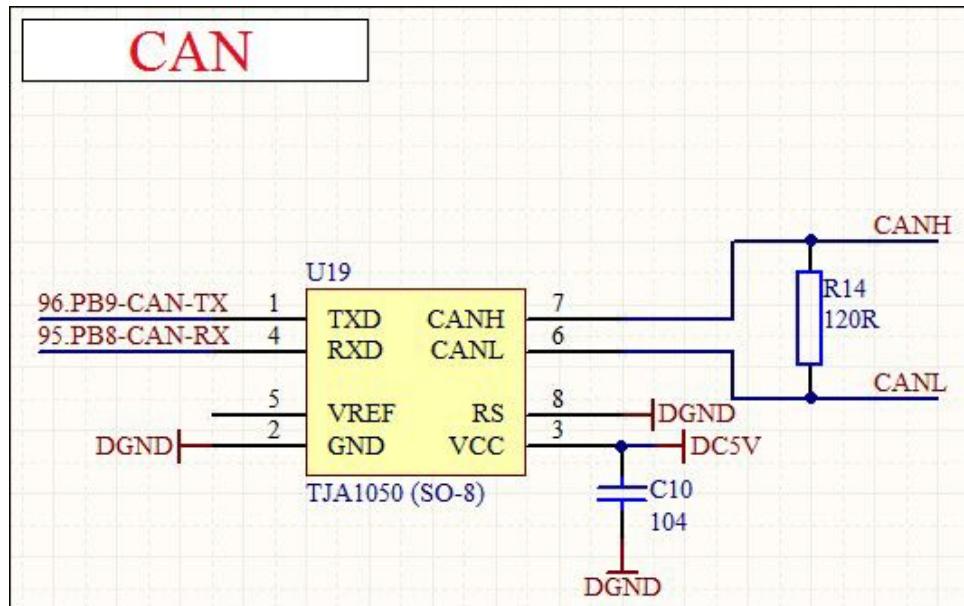


图 2.3

- 1-TXD → 96. PB9-CAN-TX
- 4-RXD → 95. PB8-CAN-RX

1.2.5 以太网通讯功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 10M 以太网通讯功能，采用标准的 RJ 接口。标准 RJ45 接头网线直接使用。主芯片选用 ENC28J60CSS 芯片。

- 4-INT → 24. PA1-YTW-INT
- 6-SO → 31. PA6-SPI1-MISO
- 7-SI → 32. PA7-SPI1-MOSI
- 8-SCK → 30. PA5-SPI1-SCK
- 9-CS → 93. PB7-SPI1-YTW
- 10-RST → 98. PE1-LCD-RST

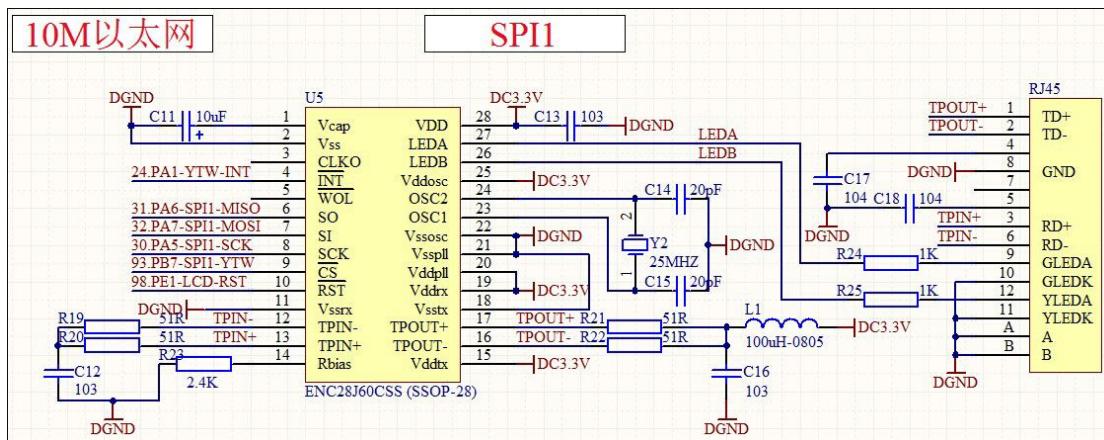


图 2.4

1.2.6 红外线发送功能

大黄蜂 STM32 开发板具备红外线发送功能，在实验板上有红外发送器件 IrDA。红外线直接发送。

R17 → 59. PD12-HWFS

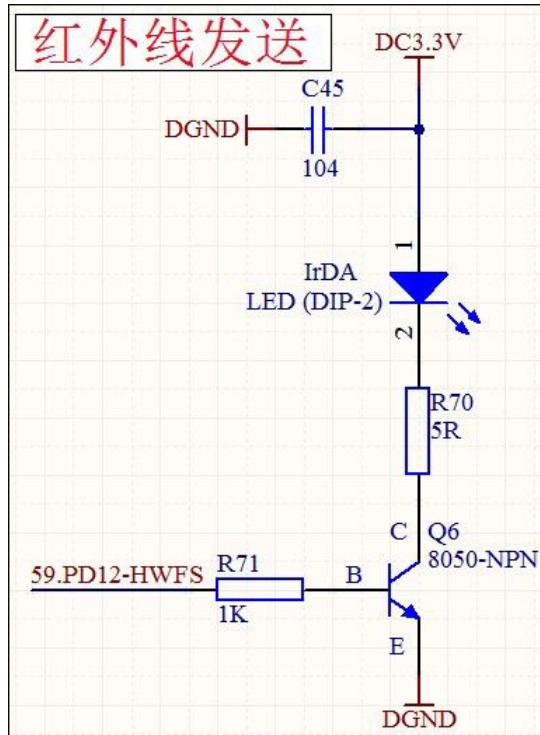


图 2.5

1.2.7 红外线接收功能

大黄蜂 STM32 开发板具备红外线接收功能，在实验板上有红外接收器件 VS838。当两块实验板互相配合就很方便实现红外发送和接收功能。

3. DQ → 2. PE3-VS838

2. GND → DGND

1. VCC → DC3. 3

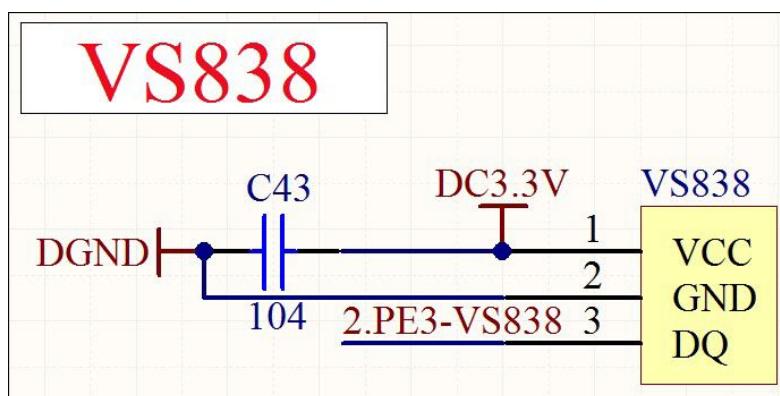


图 2.6

1.2.8 USB 转 RS232 功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 USB 转 RS232 功能，采用标准的 USB 方口。标准方口打印电缆直接使用。主芯片选用 CH340G 芯片。他和 RS232 公用一个 CPU 接口，使用此功能的时候采用跳线的方式把 RS232 断开。

2. USB-COM1-RX → CON6-1 → CON6-3 → 69. PA10-COM1-RX

3. USB-COM1-TX → CON6-2 → CON6-4 → 68. PA9-COM1-TX

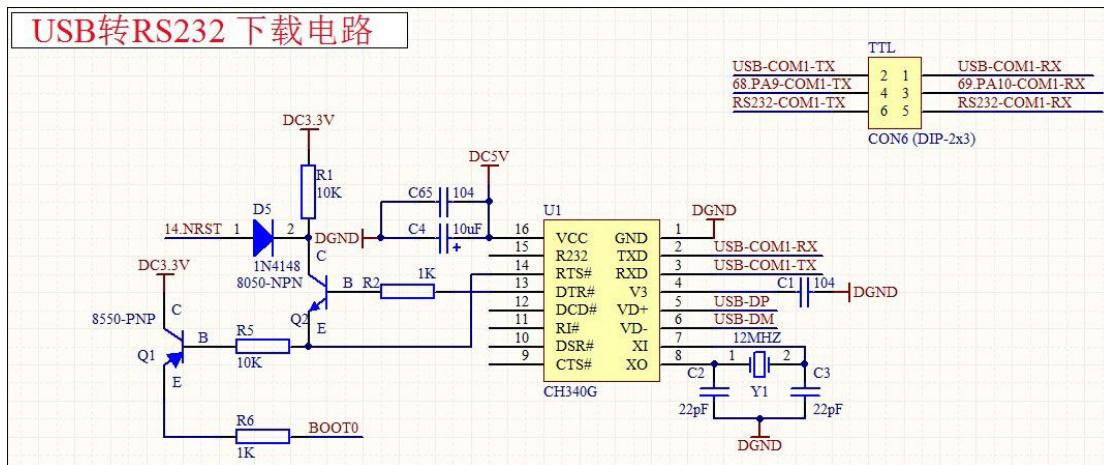
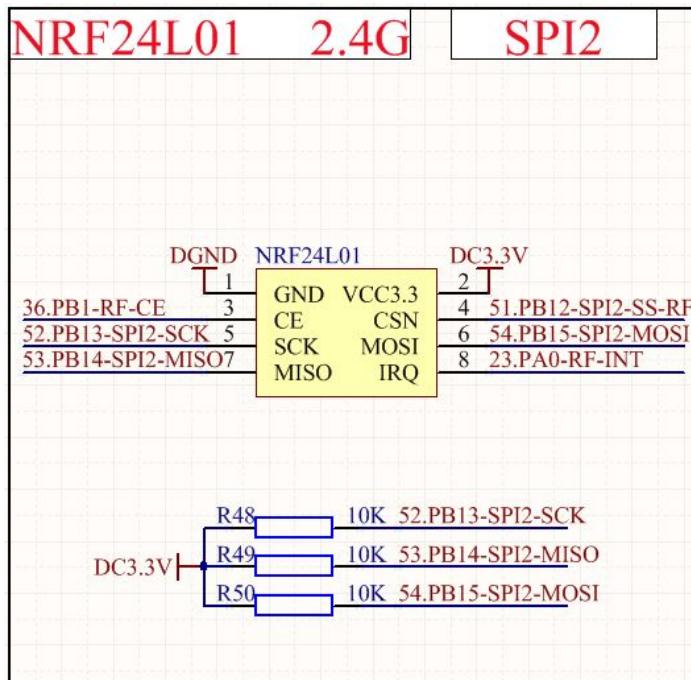


图 2.7

1.2.9 2.4G NRF24L01 无线模块端口

大黄蜂 STM32 开发板具备 2.4G 无线模块发射和接收功能，采用标准的无线模块。选用 NRF24L01 模块，使用时直接插在 8 位（黄色）双排针座上。请参考图 1.2 标注。

- 3. CE → 36. PB1-RF-CE
- 4. CSN → 51. PB12-SPI2-SS-RF
- 5. SCK → 52. PB13-SPI2-SCK
- 6. MOSI → 54. PB15-SPI2-MOSI
- 7. IRQ → 53. PB14-SPI2-MISO
- 8. MOSI → 23. PA0-RF-INT



1.2.10 TF 卡读写功能

大黄蜂 STM32 开发板集成了 TF 卡读写功能。采用标准 TF 卡座，很方便的使用现在流行的手机内存卡。

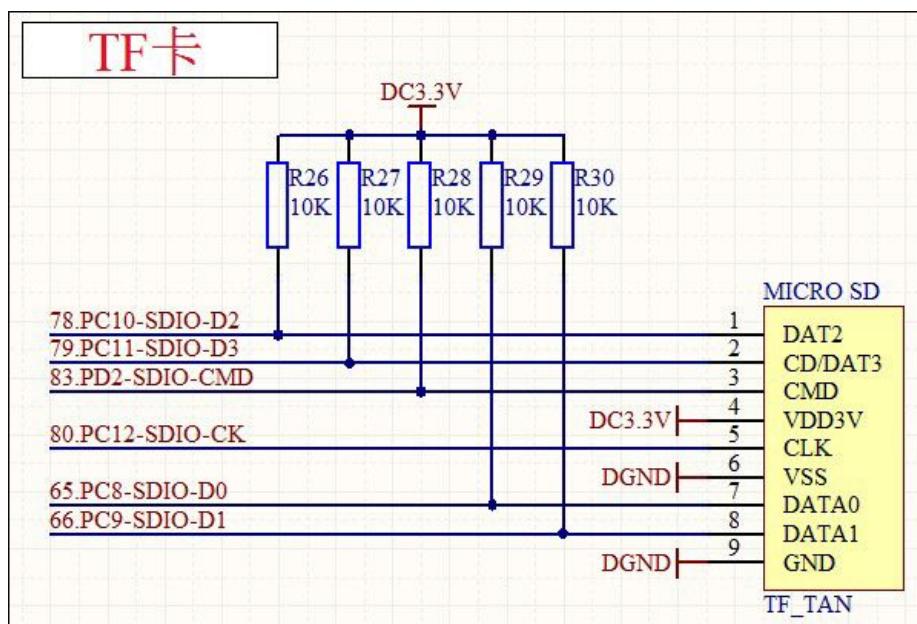


图 2.9

1. DAT2 → 78. PC10-SDIO-D2

2. CD/DAT3 → 79. PC11-SDIO-D3

- 3. CMD → 83. PD2-SDIO-CMD
- 5. CLK → 80. PC12-SDIO-CK
- 7. DATA0 → 65. PC8-SDIO-D0
- 8. DATA1 → 66. PC9-SDIO-DI

1.2.11 I²C-AT24C02 存储

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩的 RAM 读写功能。标准的 I²C 格式，主芯片选用 AT24C02 芯片。

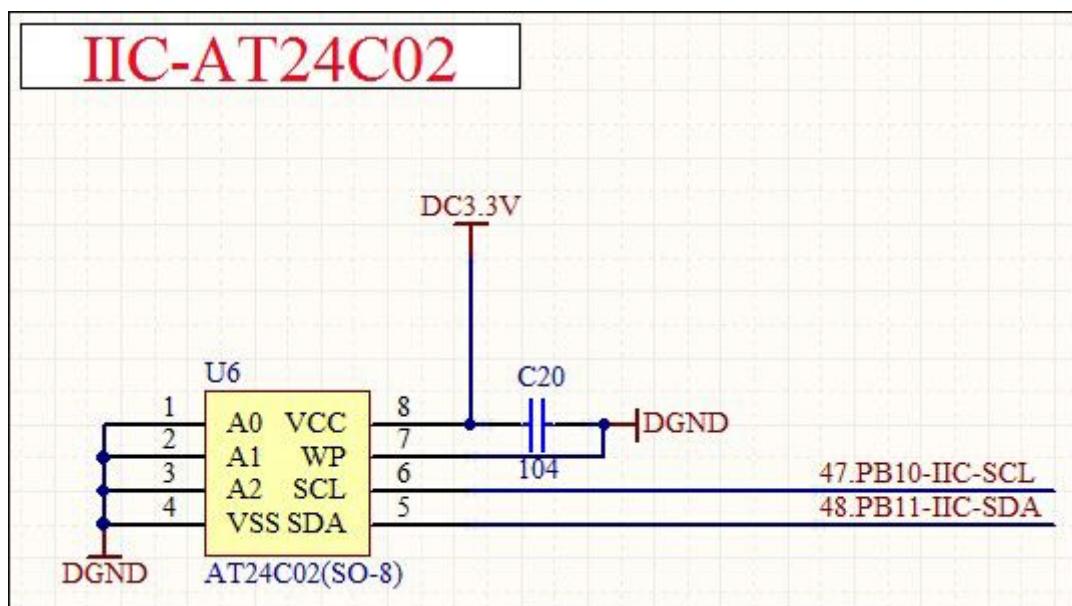


图 2.10

- 5. SDA → 48. PB11- I²C-SDA
- 6. SCL → 79. PB10- I²C-SCL

1.2.12 外扩 FLASH 存储器

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩的 FLASH 存储器。标准的 SPI 通讯方式，主芯片选用 SST25VF016B 芯片。

- | | | |
|----------|---|----------------------|
| 1. CS | → | 5. PE6-SPI1-SS-FLASH |
| 2. SO | → | 31. PA6-SPI1-MISO |
| 5. SI | → | 32. PA7-SPI1-MOSI |
| 6. SCK | → | 30. PA5-SPI1-SCK |
| 7. RESET | → | DC3. 3V |

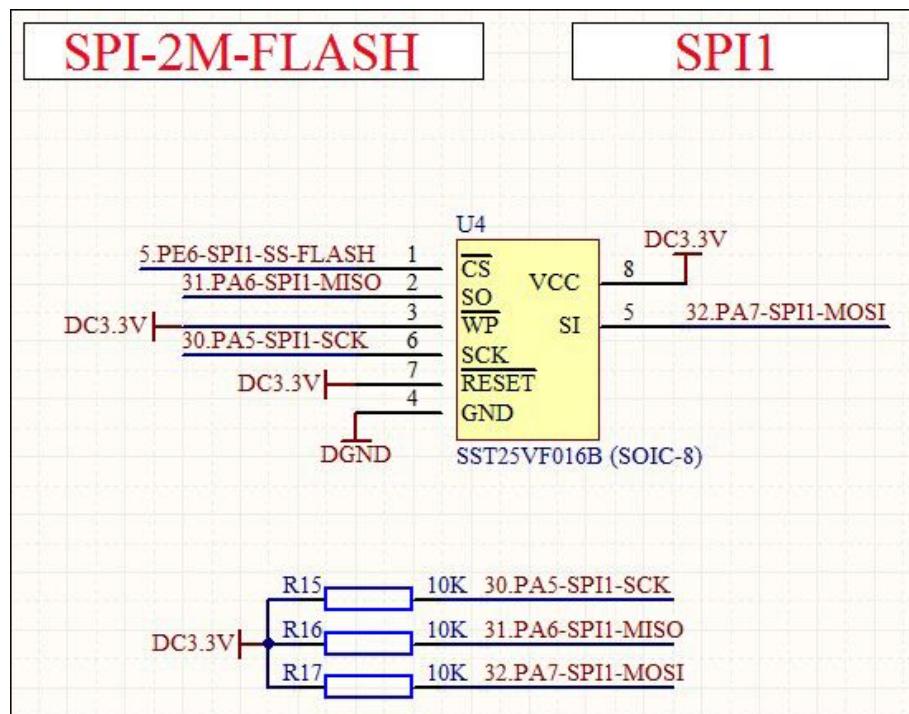


图 2.11

1.2.13 外扩 PS2 鼠标、键盘端口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩鼠标、键盘输入功能。标准的 PS2 接口，只要是圆口的键盘直接连接就可以使用。CPU 通过程序直接可以读取键盘值。

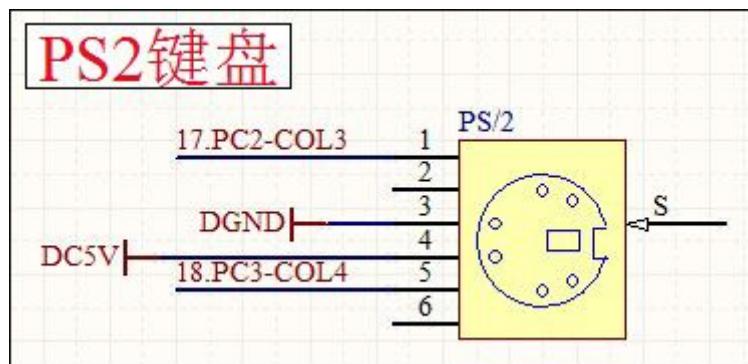


图 2.12

1. → 17. PC2-COL3
5. → 18. PC3-COL4

1.2.14 外扩摄像头端口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩摄像头录像功能。OV7670 FIFO 摄像头模块是独立的，使用时插入到 Camera 双排插针端口。

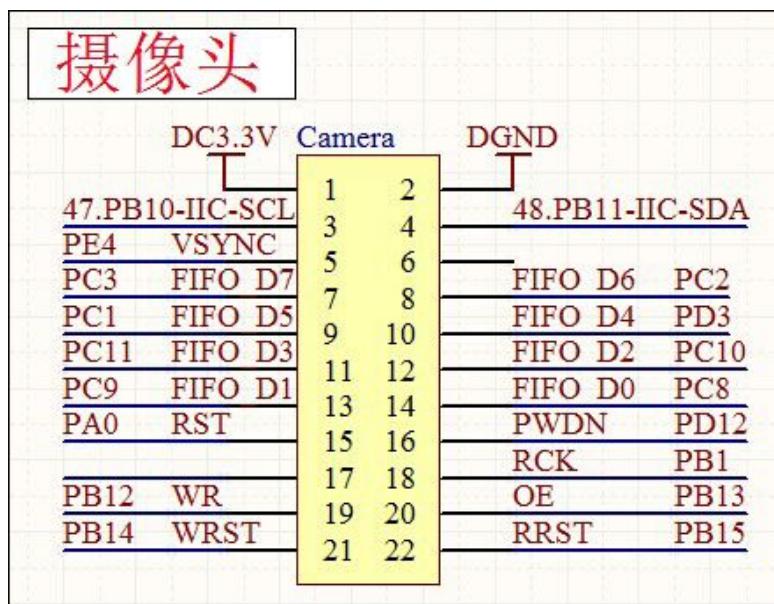


图 2.13

1. ** → 47. PB10-IIC-SCL
2. ** → 48. PB11-IIC-SDA

1.2.15 外扩 JTAG 仿真端口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩 JTAG 仿真功能。JTAG 仿真器需要单独购买，使用时插入到 JTAG 双排插针端口。

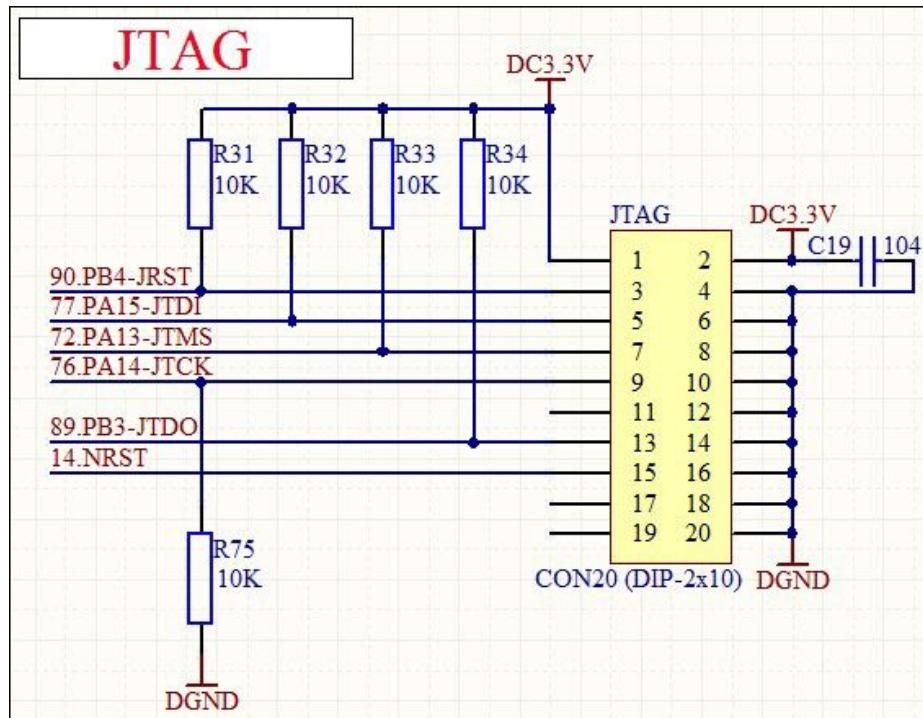


图 2.14

- 3. JRST → 90. PB4–JRST
- 5. JTD1 → 77. PA15–JTD1
- 7. JTMS → 72. PA13–JTMS
- 9. JTCK → 76. PA14–JTCK
- 13. JTDO → 89. PB3–JTDO
- 15. NRST → 14. NRST

1.2.16 外扩 ST-LINK 跳线端口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩 ST-LINK 仿真功能。在开发板的上

部靠左一些，由 4 位跳线插针组成。ST-LINK 采用杜邦线和外部设备连接，实现 ST-LINK 功能。

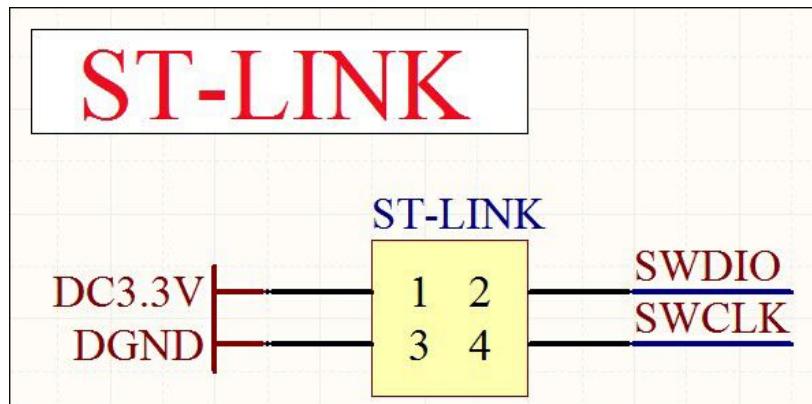
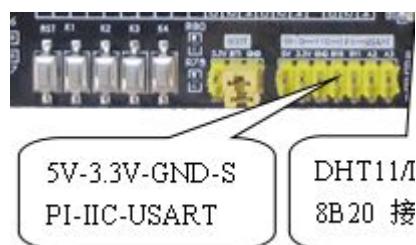


图 2.15

1. 3. 3V → DC3. 3V
2. SWD → SWDIO
3. GND → DGND
4. SWC → SWCLK

1.2.17 外扩 GPIO-IIC-SPI-USART 跳线端口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩 GPIO-IIC-SPI-USART 跳线端口。14 位跳线插针组成。使用时采用杜邦线跳接到外部扩展模块即可。在开发板上的位置见左图，7 对黄色跳线组成 GPIO-IIC-SPI-USART 跳线端口。



7. ** → 29. PA4-DAC
8. ** → 47. PB10-IIC-SCL
9. ** → 30. PA5-SPI1-SCK
10. ** → 48. PB11-IIC-SDA

11. ** → 31. PA6-SPI1-MISO
12. ** → 25. PA2-COM2-TX
13. ** → 32. PA7-SPI1-MOSI
14. ** → 26. PA3-COM2-RX

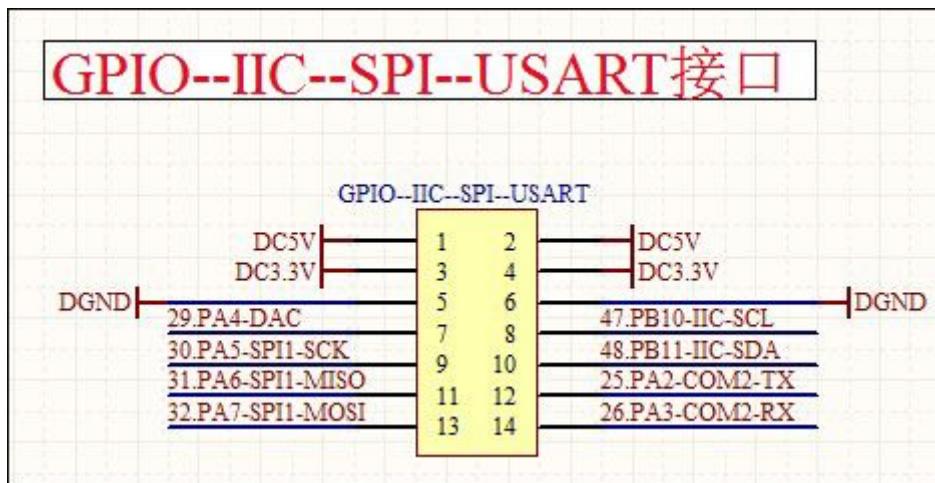


图 2.16

1.2.18 外扩温、湿度传感器功能

大黄蜂 STM32 开发板预留 DS18B20 和 DHT11 温、湿度传感器接口。

1. ** → DGND
3. ** → 3. PE4-DS18B20
4. ** → DC3. 3V

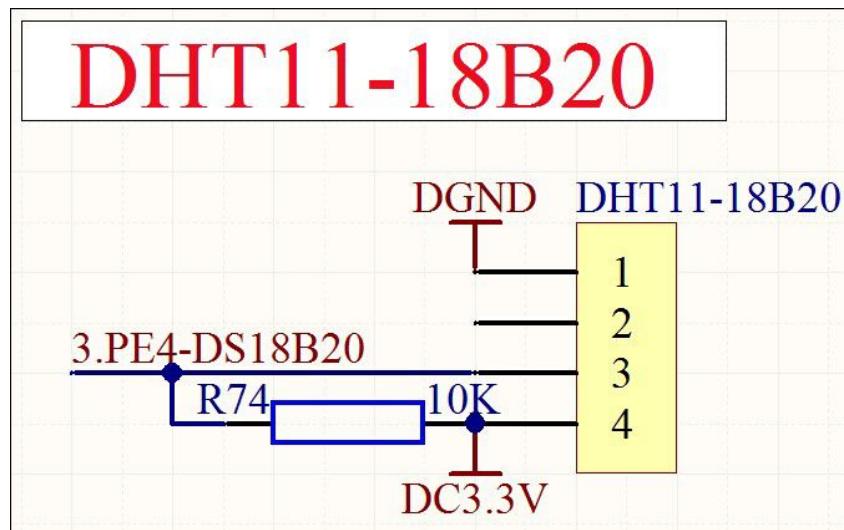


图 2.17

1.2.19 TFT 触摸屏接口

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩触摸屏功能，触摸屏是现在最流行的人机对话界面，操作方便，显示直接，使人一目了然。

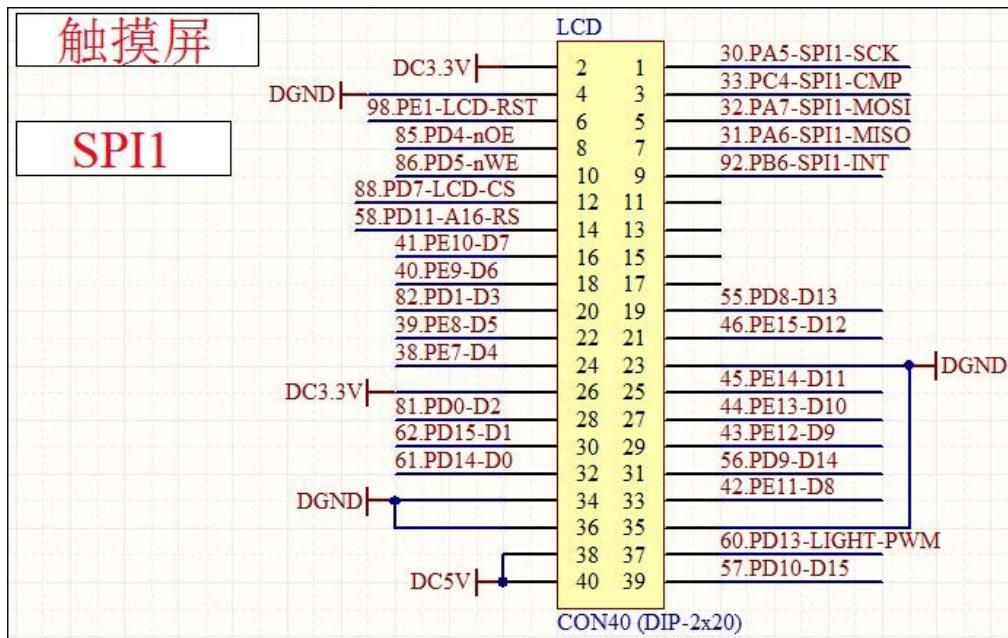


图 2.18

触摸屏属于外扩设备，在开发板上预留了 40 脚黑色的简易牛角插座接口，位于开发板左侧边缘，连接简单牢固。想使用触摸屏的时候只要插接牢固送电即可。在这里就不列出管脚连接箭头，在后续的

硬件篇中会有详细讲解，具体参考《触摸屏说明》。

1.2.20 启动模式选择功能

大黄蜂 STM32 开发板支持 BOOT0 启动和 BOOT1 启动模式选择功能，转换功能通过 BOOT 跳线来实现。

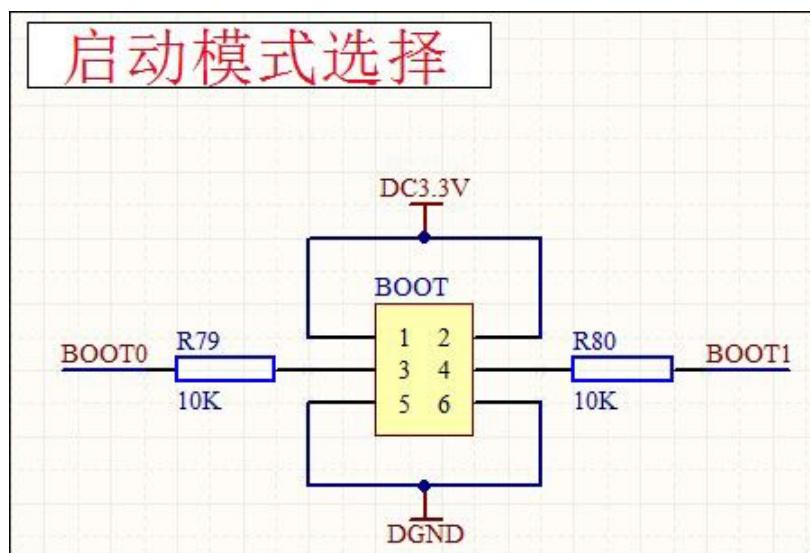


图 2.19

1. ** → DC3.3V
3. ** → R79 → BOOT0
4. ** → R80 → BOOT1
5. ** → DGND

1.2.21 CPU 管脚引出扩展端子

大黄蜂 STM32 开发板支持 GPIO 所有端口全部引出到双排跳线上，支持学习者方便使用这些跳线实现自己想要的功能。全部采用 40 位双排插针，排布在 CPU 芯片上下两端。在这里就不列出管脚连接箭头，在后续的硬件篇中会有详细讲解，具体参考《CPU 扩展端子说明》。

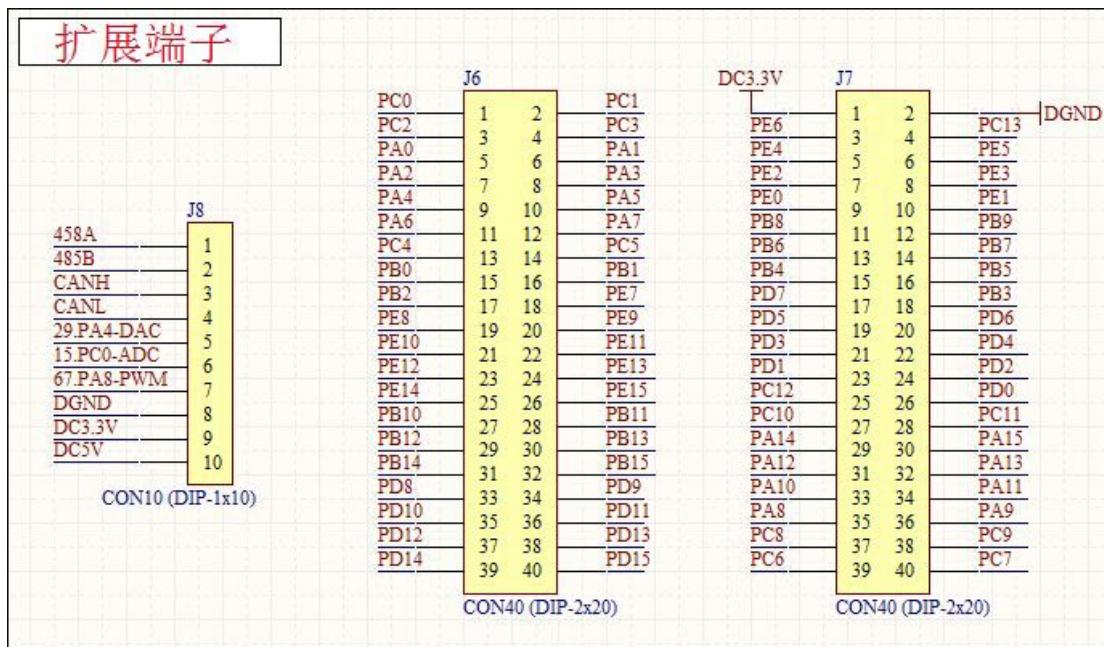


图 2.20

1.2.22 外扩蜂鸣器发声功能

大黄蜂 STM32 开发板具备外扩蜂鸣器发声功能。蜂鸣器是最常用的警报发声器件，广泛适用于计算机、通讯、工控等行业。

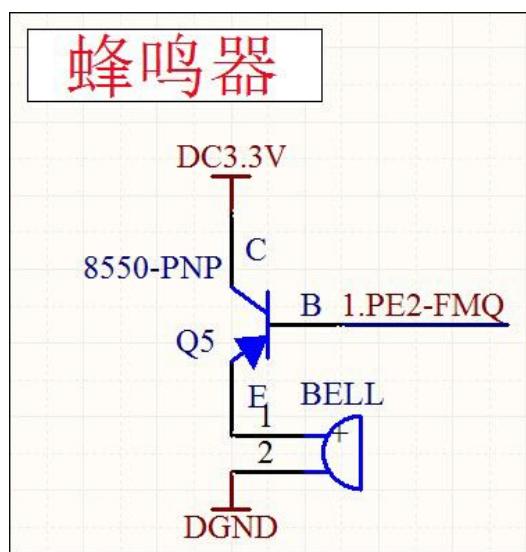


图 2.21

1.2.23 ADC 模拟量输入功能

大黄蜂 STM32 开发板具备 ADC 模拟量输入功能。通过一个精密电位器改变电阻值，使 CPU 得到不同电压值。通过跳线 J1 选择和 CPU (15. PC0-ADC) 是否产生物理连接。

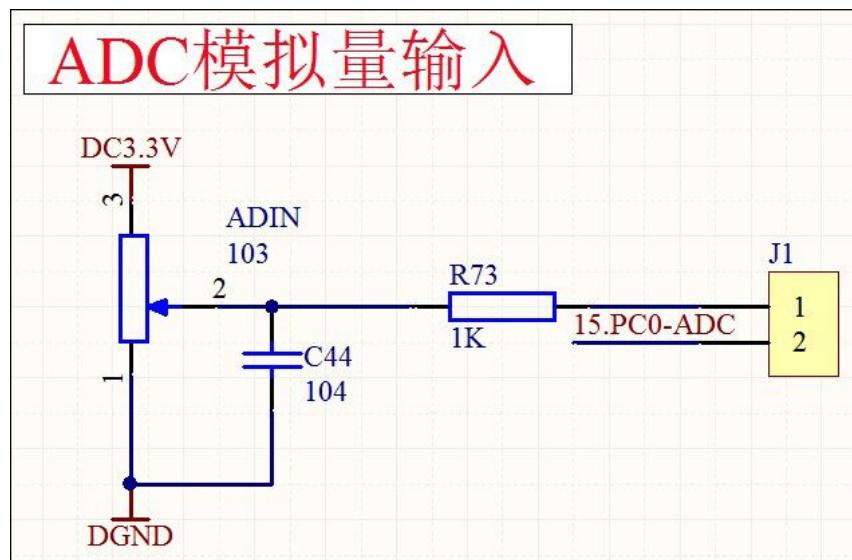


图 2.22

1.2.24 独立键盘输入功能

大黄蜂 STM32 开发板具备独立键盘输入功能。开发板上集成了 4 个独立键盘 (K1/K2/K3/K4)。可实现键盘控制功能。

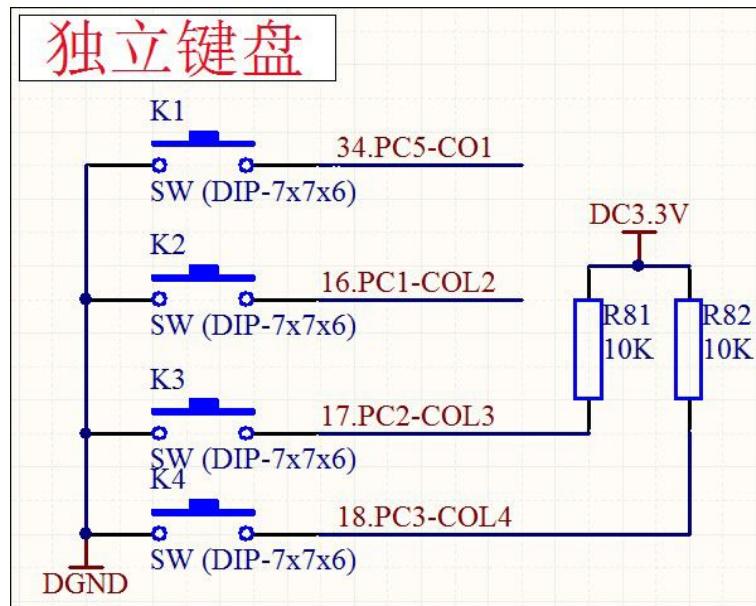


图 2.23

K1. ** → 34. PC5-C01

K2. ** → 16. PC1-COL2

K3. ** → 17. PC2-COL3

K4. ** → 18. PC3-COL4

1.2.25 FM 收音机功能

大黄蜂 STM32 开发板集成了 FM 收音机功能。FM 收音机独立模块直接焊接在开发板上。通过程序很方便的打开或者关闭 FM 收音机功能。

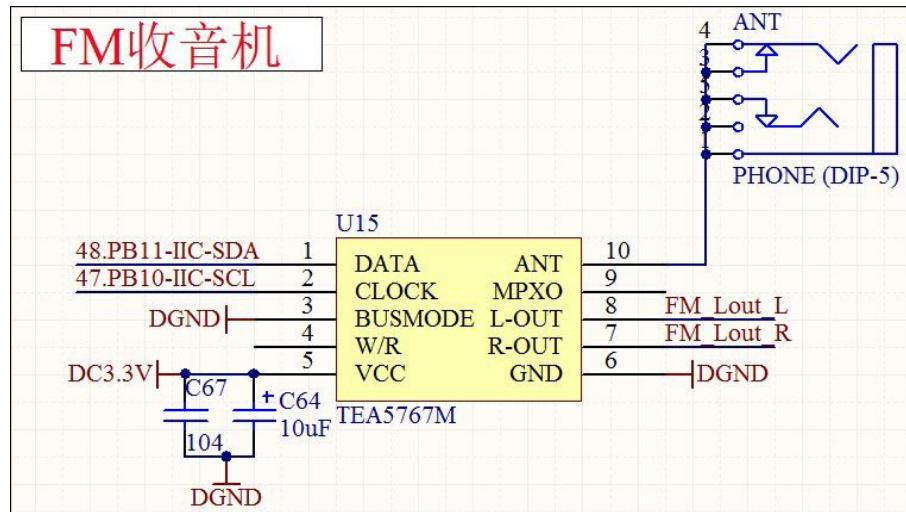


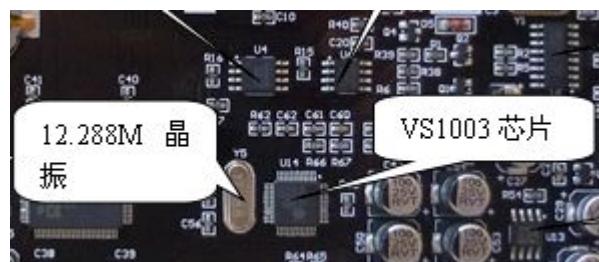
图 2.24

1. DATA → 48. PB11-IIC-SDA

2. CLOCK → 47. PB10-IIC-SCL

1.2.26 MP3 音乐播放功能

大黄蜂 STM32 开发板集成了 MP3 音乐播放功能。采用 VS1003 音乐解码芯片，可以把 TF 卡中存储的歌曲直接播放出来。在开发板上中部偏下，正方形 (LQFP) 封装。配 12.288M 晶振。参考右侧照片截图。VS1003 音乐解码芯片需要特殊供电电压；由 RT9166-2.8 产生 2.8V 和 RT9166-2.8 产生 2.5V 两种电源电压供给解码芯片使用。



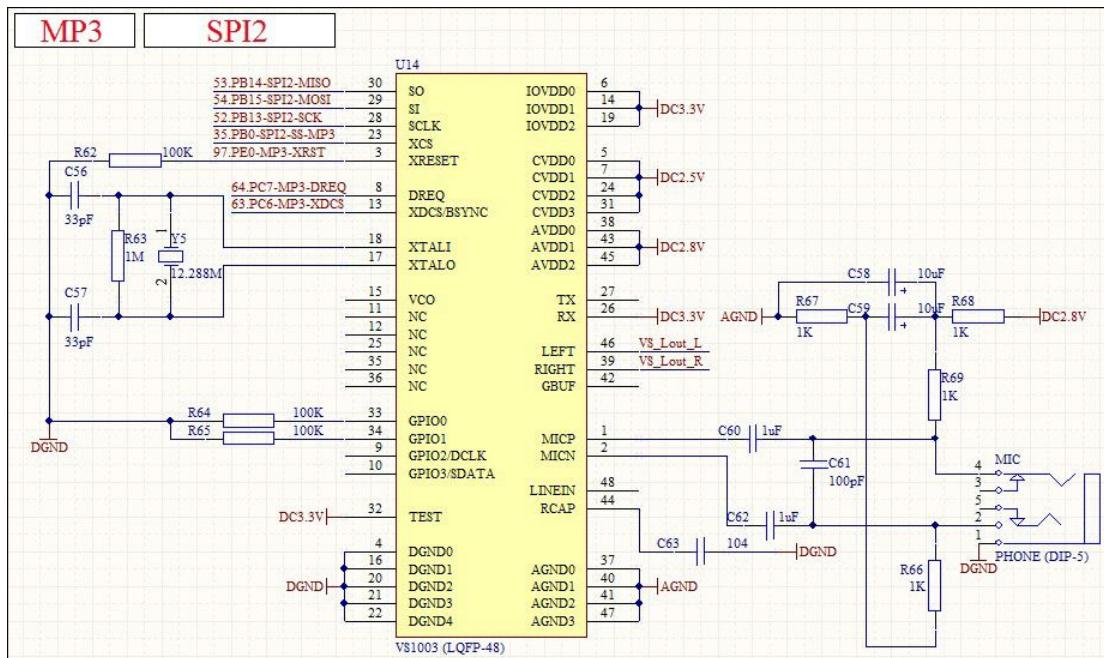


图 2.25

- 3. XRESET → 97. PE0-MP3-XRST
- 8. DREQ → 64. PC7-MP3-DREQ
- 13. XDCS → 63. PC6-MP3-XDCS
- 23. XCS → 35. PB0-SPI2-SS-MPS
- 28. SCLK → 52. PB13-SPI2-SCK
- 29. SI → 54. PB15-SPI2-MOSI
- 30. SO → 53. PB14-SPI2-MISO

1.2.27 FM 收音机扩展功放

大黄蜂 STM32 开发板为了配合 FM 调频收音机，集成了功放功能。

采用 TDA1308T 专用芯片。

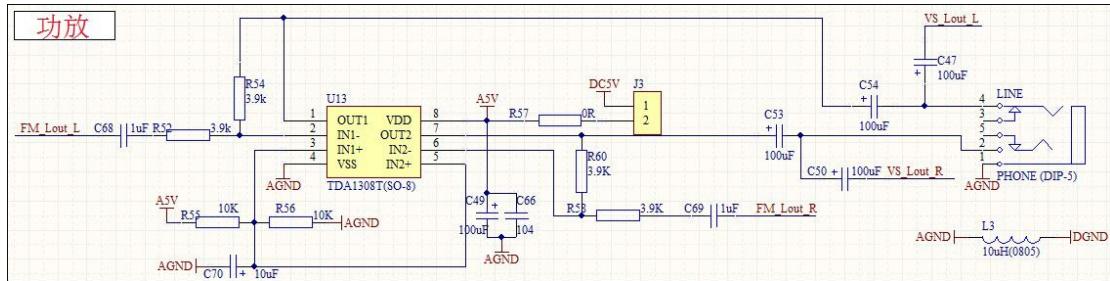


图 2.26

1.2.28 LED 发光二极管

大黄蜂 STM32 开发板也一定具备最简单的显示功能，集成发光二极管 3 片，通过上拉电阻方式低电平使之发光。

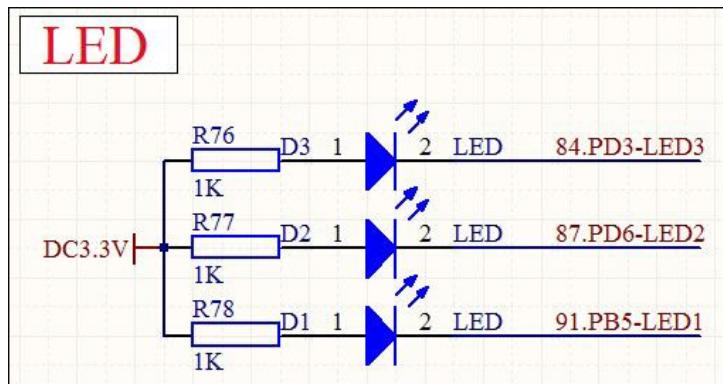


图 2.27

LED1. 2 → 84. PD3-LED3

LED2. 2 → 87. PD6-LED2

LED2. 2 → 91. PB5-LED1

1.2.29 STM32 开发板电源系统

大黄蜂 STM32 开发板电源系统相对复杂一些，在实验板内部有稳压芯片和 3.3V 电压转换模块。RT9166 模块输入是 DC5V 输出是 DC2.8V；RT9166A 模块输入是 DC5V 输出是 DC2.5V；ASM1117 模块输入是 DC5V 输入是 DC3.3V；整个实验班有三种供电方式：

1、直接插进入实验板自带的 5.0VDC 焊接母头内，通过开关 SW 供电；

2、USB-COM1 端口供电方式；

3、USB 端口供电方式；

学习者可以根据自己的习惯和喜好来选择方式。

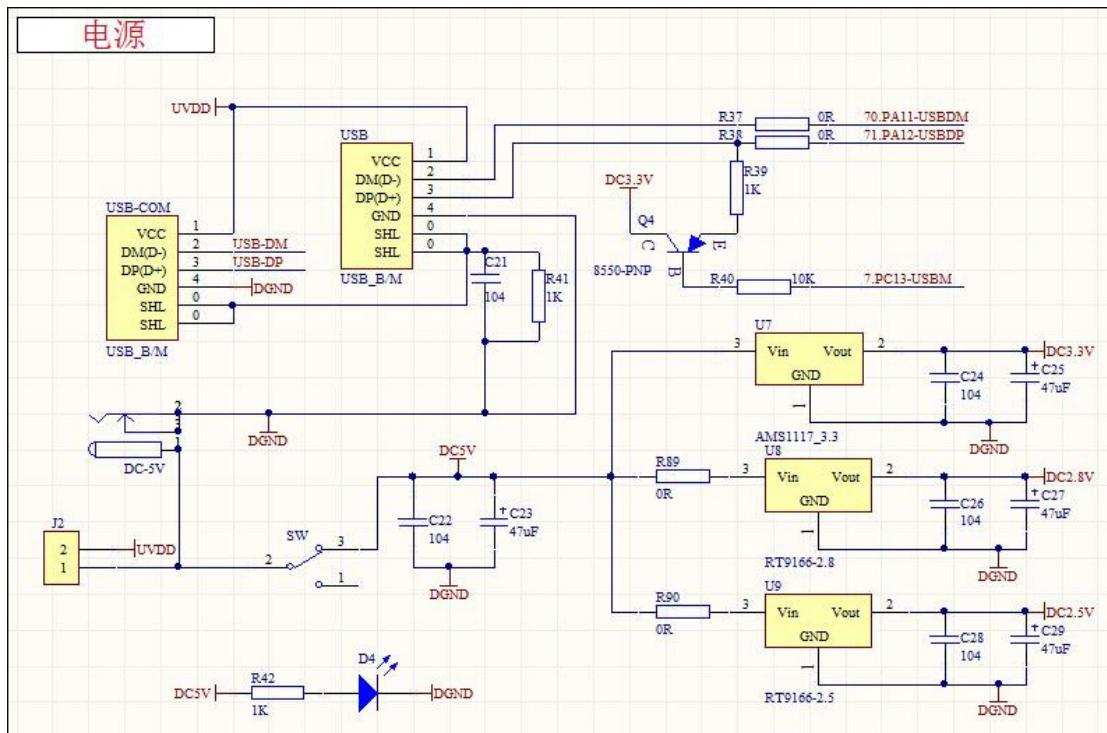


图 2.28

1.2.30 STM32 开发板各种功能跳线描述

大黄蜂 STM32 开发板为了更多的实现各种功能，采用跳线的方式实现功能转换，下面是各功能跳线详细的描述。

1.2.30.1 STM32 开发板 RS232 与 USB 转换跳线

大黄蜂开发板上 CPU 的 68 管脚和 69 管脚公用 RS232 功能和 USB 功能，这就要求功能选用的唯一性，在开发板上采用跳线的方式实现功能切换。

在开发板中部靠上位置有三位置黄色跳线，水平方向上按三根针脚一组，一共两组，上下两层。每一组中中间的插针是直接和 CPU 管脚相连接，当跳线帽插到靠左侧两个针脚上，实现 RS232 功能；当跳线帽插到靠右侧两个针脚上实现 USB 功能功能。如右图所示真实电路板截图位置。



1.2.30.2 STM32 开发板 FM 收音机功放开关

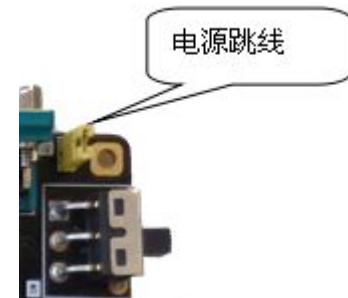
在开发板右下方部靠板边位置有一组黄色跳线。当跳线帽插上时功放是正常工作状态；当跳线帽拔掉时功放是停止使用状态。如右图所示真实电路板截图位置。



1.2.30.3 STM32 开发板功 USB 供电选择跳线

大黄蜂开发板上设计了三种供电方式，当采用 USB 供电时，就要使用 USB 电源跳线。

在开发板右上方部靠板边位置有一组黄色跳线 J2。当跳线帽插上时可以使用 USB



为电路板供电；当跳线帽拔掉时 USB 就不能给实验板供电（详细参考原理图）。如右图所示真实电路板截图位置。

1.2.30.4 STM32 开发板启动模式选择跳线

大黄蜂开发板上设计了三种启动模式，大黄蜂实验板通过“启动模式跳线” J5 实现此功能。

在 STM32F10xxx 里，可以通过 BOOT[1:0]引脚选择三种不同启动模式。系统复位后，SYSCLK 的第 4 个上升沿，BOOT 引脚的值将被锁存。用户可以通过设置 BOOT1 和 BOOT0 引脚的状态，来选择在复位后的启动模式。从待机模式退出时，BOOT 引脚的值将被重新锁存；因此，在待机模式下 BOOT 引脚应保持为需要的启动配置。在启动延迟之后，CPU 从地址 0x0000 0000 获取堆栈顶的地址，并从启动存储器的 0x0000 0004 指示的地址开始执行代码。因为固定的存储器映像，代码区始终从地址 0x0000 0000 开始(通过 ICode 和 DCode 总线访问)，而数据区(SRAM)始终从地址 0x2000 0000 开始(通过系统总线访问)。Cortex-M3 的 CPU 始终从 ICode 总线获取复位向量，即启动仅适合于从代码区开始(典型地从 Flash 启动)。STM32F10xxx 微控制器实现了一个特殊的机制，系统可以不仅仅从 Flash 存储器或系统存储器启动，还可以从内置 SRAM 启动。根据选定的启动模式，主闪存存储器、系统存储器或 SRAM 可以按照以下方式访问。

从主闪存存储器启动：主闪存存储器被映射到启动空间(0x0000

0000), 但仍然能够在它原有的地址(0x0800 0000)访问它, 即闪存存储器的内容可以在两个地址区域访问, 0x0000 0000 或 0x0800 0000。

- 从系统存储器启动: 系统存储器被映射到启动空间(0x0000 0000), 但仍然能够在它原有的地址(互联型产品原有地址为 0x1FFF B000, 其它产品原有地址为 0x1FFF F000)访问它。
- 从内置 SRAM 启动: 只能在 0x2000 0000 开始的地址区访问 SRAM。

附表 启动模式

启动模式选择引脚		启动模式	说明
BOOT1	BOOT0		
x	0	主闪存存储器	主闪存存储器被选为启动区域
0	1	系统存储器	系统存储器被选为启动区域
1	1	内置 SRAM	内置 SRAM 被选为启动区域

在开发板左下部靠板边位置有三位置黄色跳线, 水平方向上按三根针脚一组, 一共两组, 上下两层。每一组中间的插针是直接和 CPU 管脚相连接, 当第一组跳线帽插到靠左侧两个针脚上, 实现 BOOT0 置高, 当第一组跳线帽插到靠右侧两个针脚上, 实现 BOOT0 置低; 当第二组跳线帽插到靠左侧两个针脚上, 实现 BOOT1 置高, 当第二组跳线帽插到靠右侧两个针脚上, 实现 BOOT1 置低。如右图所示真实电路板截图位置 (详细请参考原理图)。



1.2.30.5 STM32 开发板 ST-LINK 仿真功能跳线

大黄蜂开发板上集成了 ST-LINK 仿真接口，是以跳线的形式扩展出来。当用户采用 ST-LINK 仿真接口实现仿真功能，可以通过杜邦线连接到这个扩展接口，实现仿真功能。如右图所示真实电路板截图位置（详细请参考原理图）。

