

百度智能手环硬件设计

模块名称	百度智能手环硬件
所属系统	
模块负责人	唐皓、赵阳
项目负责人	孙鹤飞
文档提交日期	2014 年 8 月
版本号	1.0

百度在线网络技术（北京）有限公司

目录

- 1. 硬件方案总体介绍.....3
- 2. MCU 和蓝牙模块.....5
- 3. G-sensor 模块7
- 4. 按键输入模块.....8
- 5. LED 显示模块.....8
 - 5.1 LED 灯控制模块.....8
 - 5.2 LED 点阵列控制模块.....9
- 6. 马达控制模块.....11
 - 6.1 普通马达模块.....11
 - 6.2 线性马达模块.....11
- 7. 电量检测模块.....12
- 8. 外部复位模块.....13
- 9. 充电电路模块.....14
- 10. 系统电源模块.....14
- 11. 电池保护模块.....15
- 12. 调试接口.....16
- 13. 手环 layout 建议.....16
 - 13.1 天线.....16
 - 13.2 射频电路.....17
 - 13.3 传输线阻抗匹配.....18
 - 13.4 晶振走线.....20
 - 13.5 地平面.....20
 - 13.6 电源.....20
 - 13.7 Buck 芯片走线.....22
- 附表 122

1. 硬件方案总体介绍

百度智能手环基于 Nordic 公司 nRF51822 芯片开发，芯片集成 BLE 蓝牙 4.0 协议。

使用 LIS3DH 作为加速度传感器，进行运动和睡眠监测。

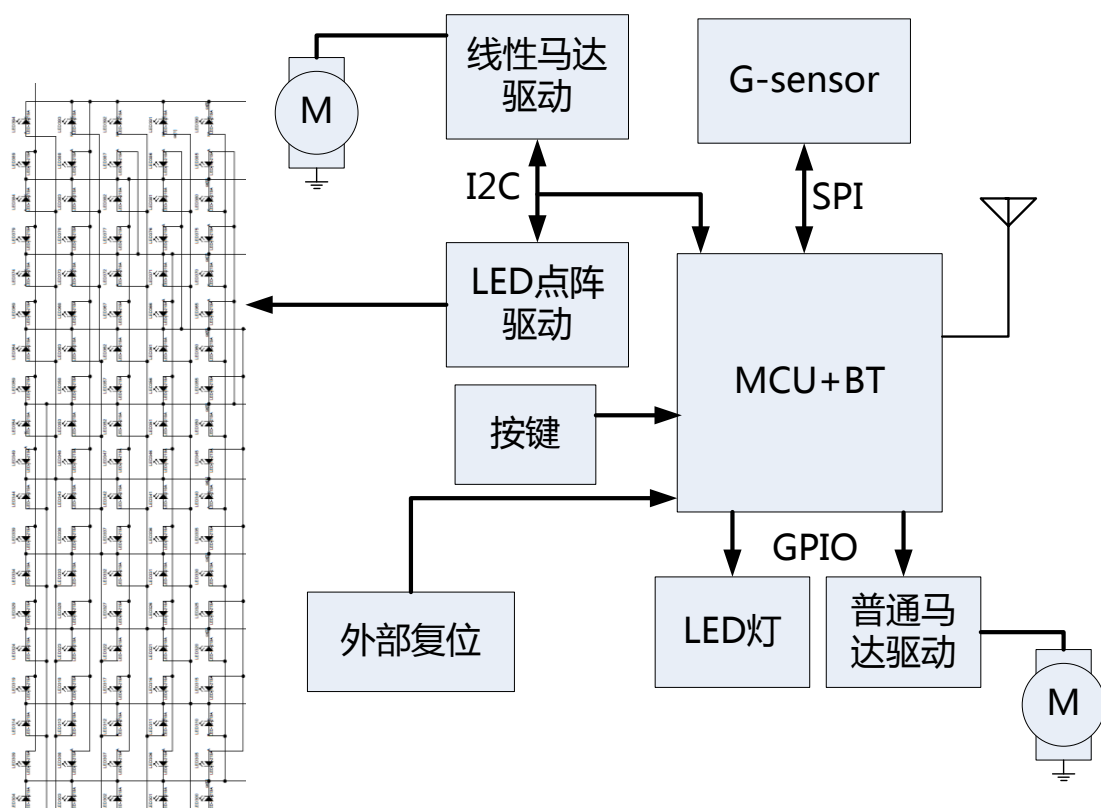
开源遵循 Apache License, Version 2.0, 详情参见：

<http://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>

手环硬件电路设计部分，包括一颗集成 BLE 功能的 MCU（nrf51822），和由 MCU 控制的各种外设：

- 蓝牙射频电路；
- 使用 SPI 接口的 G-sensor；
- 使用 I2C 接口的线性马达驱动电路；
- 使用 I2C 接口的 LED 点阵驱动，与线性马达共用总线；
- 使用 GPIO 的按键输入；
- 使用 GPIO 的 LED 灯；
- 使用 GPIO 的普通马达驱动电路；
- 外部复位电路。

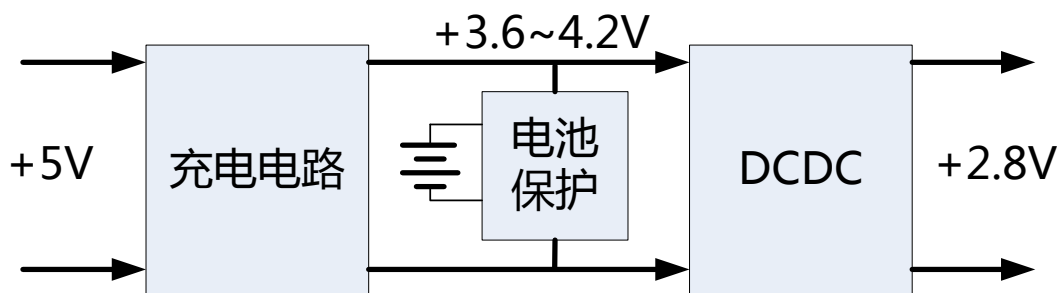
下图是百度智能手环公版的结构图：



在公版基础上，各家厂商可以根据自己的需求自定义版本，比如 LED 显示模块以及马达控制模块的选择。

除了上述公版结构图涉及的功能模块以外，手环电源部分的总体设计方案：

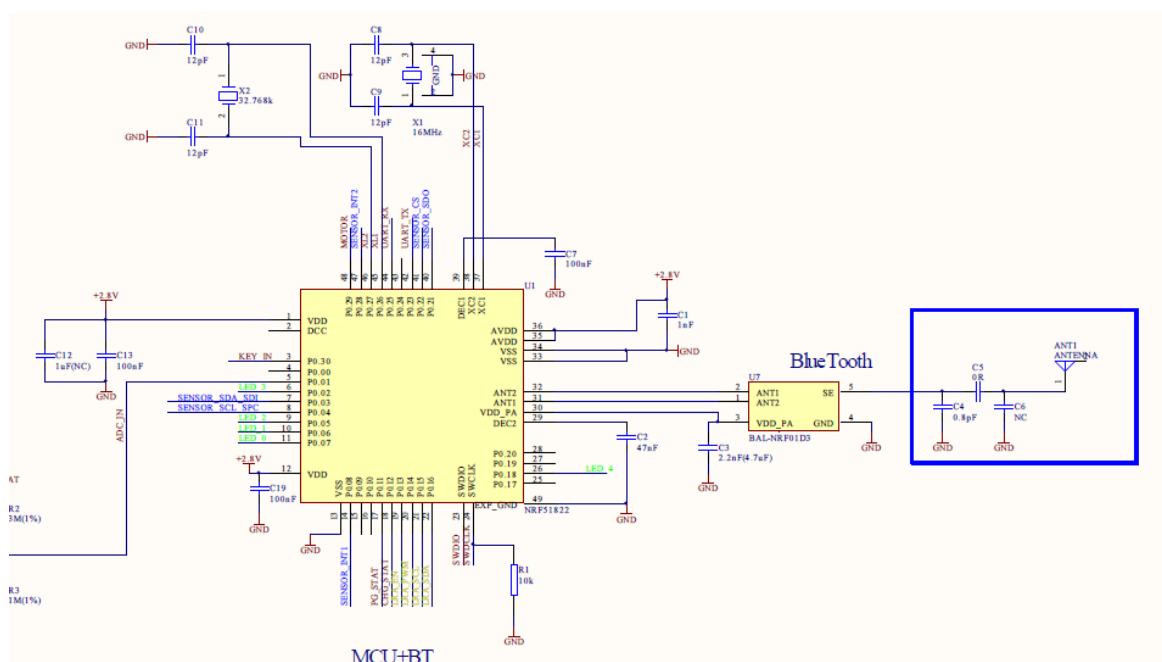
- 充电电路完成 5V 到电池电压的转换，不充电时保持低功耗；
- DCDC 完成高效率的电池电压到系统电压（2.8V）的转换；
- 电池保护电路用于完成过流关断、欠压保护等功能；



后面章节对 MCU 芯片以及其控制的外设模块的电路设计做出详细的介绍，以及设计中遇到的一些注意点。

2. MCU 和蓝牙模块

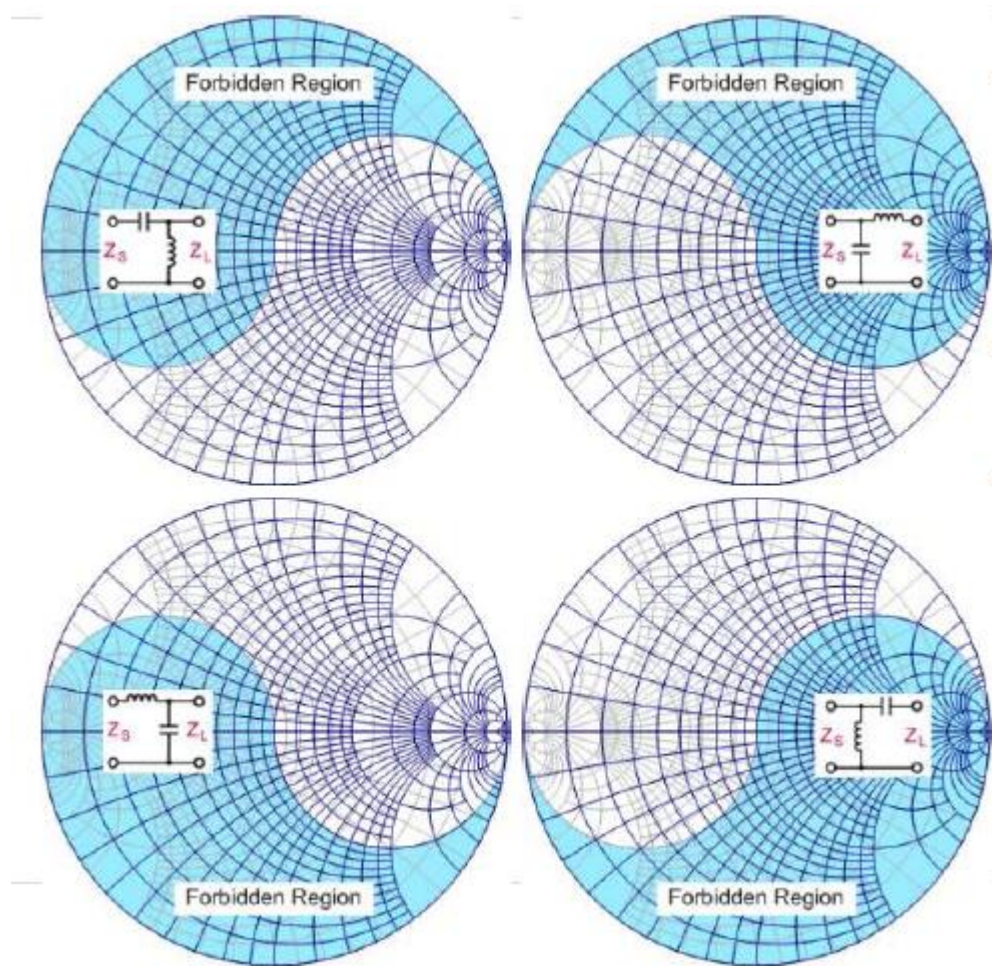
nRF51822 是一款为超低功耗无线应用(ULP wireless applications)设计的的多协议单芯片解决方案。芯片支持 BLE4.0 和 2.4GHZ 协议栈，整合了射频发射电路，一个 ARM Cortex M0 核以及 256KB 的 flash + 16KB 的 RAM。



- nRF51822 的 IO 配置十分灵活，除了 ADC 必须配置在 8 个规定的 PIN 脚上外，SPI、I2C 等功能可以灵活配置在 31 个 GPIO 上，便于设计接近尺寸极限的设备；
- nRF51822 内部电源工作在 LDO 模式下（虽然内置了 DCDC 模式，但是因为芯片本身的 bug，功耗过大，放弃使用），外部可以输入 1.8V 到 3.6V 供给芯片；
- nRF51822 使用一个 16MHz 的外置高频晶振和一个 32.768kHz 的外置低频晶振。芯片内部有 32.768KHZ 的 RC 振荡器，但是因为振荡器的精度无法满足计时要求（内部 RC 振荡器的精度如下图所示），所以我们加入了外部低频晶振，占用了 2 个 PIN 脚(P0.26、P0.27)；

Symbol	Description	Note	Min.	Typ.	Max.	Units	Test level
$f_{NOM,RC32k}$	Nominal frequency			32.768		kHz	N/A
$f_{TOL,RC32k}$	Frequency tolerance			± 2		%	3
$f_{TOL,CAL,RC32k}$	Frequency tolerance for 32.768 kHz RC oscillator after calibration	Calibration interval 4 s at constant temperature			± 250	ppm	1

- 内部 RC 振荡器的误差是 2% (30 分钟/天)，即使校准后只能达到 250ppm (22 秒/天)；
- 外部晶振，一般能达到 40ppm (3 秒/天)，误差非常小；
- 蓝牙 BALUN 可以使用分立器件，也可以使用 ST 定制的 BAL-01D3。设计中我们使用了定制器件 BAL-01D3，保证了信号的性能以及减小了的板卡尺寸。注意：如果更改 nRF51822 的封装，需要将定制器件型号改成 BAL-02D3；
- BALUN 电路输出端，需要一个 π 形电路（起到阻抗匹配的作用），需要根据实际情况在三个位置上增加电容或者电感。调整的依据是根据史密斯圆图(如下图所示)，把阻抗调整到中心点，达到最大的功率输出效果。

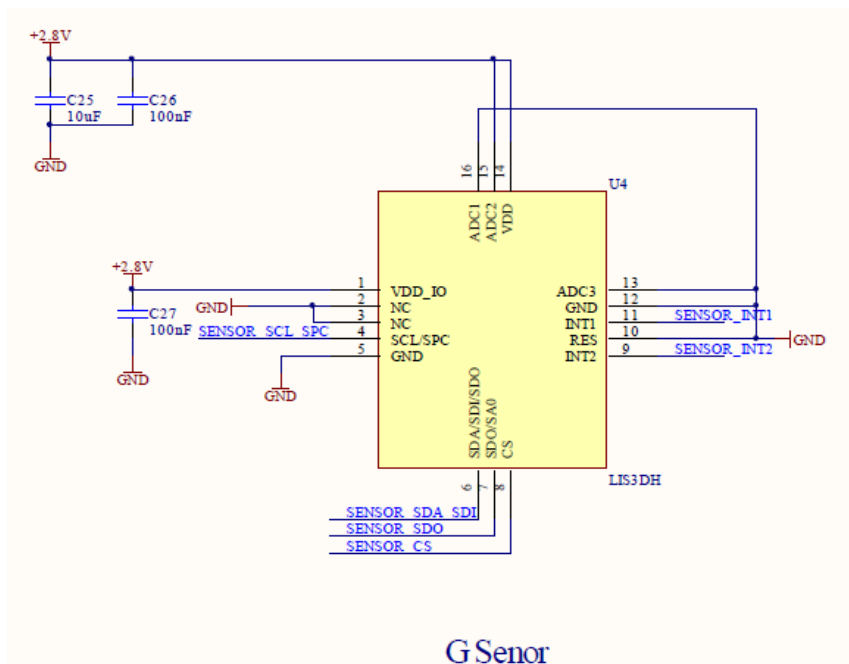


注：文档最后附录了 nRF51822 中 IO 口的使用表

3. G-sensor 模块

G-sensor 中文是重力传感器的意思（英文全称是 Gravity-sensor），它能够感知到加速力的变化，加速力就是当物体在加速过程中作用在物体上的力，比如晃动、跌落、上升、下降等各种移动变化都能被 G-sensor 转化为电信号，然后通过微处理器的计算分析后，就能够完成程序设计好的功能，比如 MP3 能根据使用者的甩动方向，前后更换歌曲，放进衣袋的时候也能够计算出使用者的前进步伐。

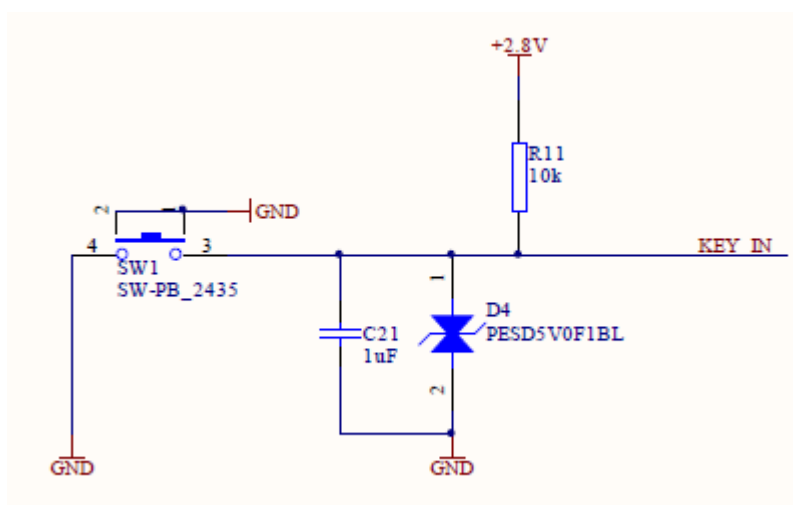
百度智能手环中使用的三轴加速度计是 ST 出品的 LIS3DH，输入电压支持 1.71V 到 3.6V。16bit 精度输出，内置数据 FIFO。



G-sensor 模块电路接口比较简单，需要注意以下几点：

- 芯片本身支持 SPI 或者 I2C 接口，实际使用时选择 SPI。因为 SPI 的速度远超过 I2C（目前 nRF51822 的 SPI 接口最高速率 8Mbps，I2C 是 400kbps），能减少 CPU 运行的时间，从而降低功耗；
- 芯片加速度部分的供电虽然和数字 IO 的供电电压相等。但是需要保证 IO 部分先于加速度部分工作，否则芯片初始化会有问题，因此 VDD 引脚(加速度部分的供电)另外并联了一个大电容保证足够的上电时间；
- ADC1 和 ADC2 脚不使用，需要接到固定电平。之所以分别接到不同的电平上，是为了和升级版 LIS3DSH（内置计步算法）保持引脚兼容，在升级版芯片中，这两个位置需要作为供电和参考地脚；

4. 按键输入模块



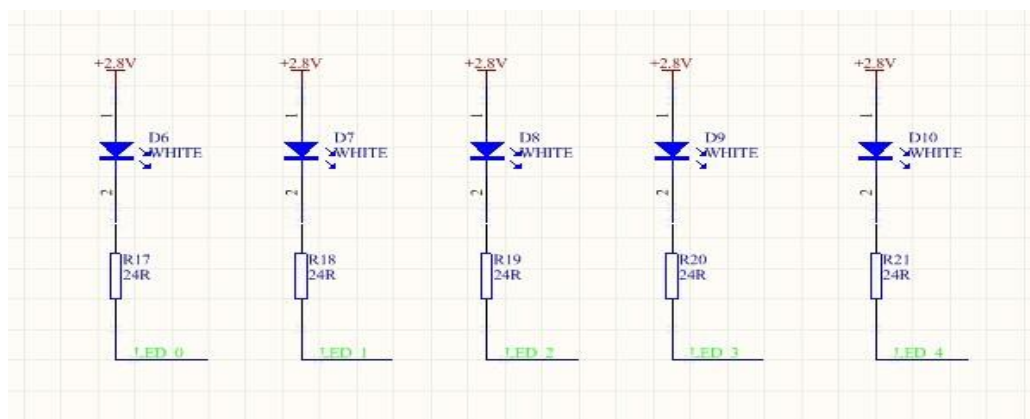
按键作为输入，只需要提供一个电平信号给 MCU 的 GPIO 口。电容是为了减缓电平下降的速度，避免有些 CPU 会因此卡死，TVS 管（D4）是为了防止静电对电路寿命的影响。

5. LED 显示模块

LED 显示是手环与用户之间进行数据交互的模块，主要用于数据显示以及用户交互。根据厂家的不同需求，提供了两种设计方案：

- 1、LED 灯控制显示：以多个 LED 指示灯的组合形式进行简单的信息呈现。
- 2、LED 点阵列显示：以 LED 点阵列的形式显示手环的数据信息：时间、步数、卡路里消耗等。

5.1 LED 灯控制模块



LED 控制十分简单，GPIO 输出电平就可以控制。输出低电平点亮 LED，输出高电平熄灭 LED。LED 的供电电压是 2.8V，这是白色 LED 点亮的极限电压。

以下为常用颜色单颗 LED 的驱动电压要求：

红色=1.8-2.2V；

蓝色=2.6-3.2V；

翠绿=2.6-3.2V；

黄色=1.8-2.2V；

黄绿=1.8-2.2V；

橙色=1.8-2.2V；

白色=2.6-3.2V；

粉色=2.6-3.2V；

紫色=3.0-3.4V；

5.2 LED 点阵列控制模块

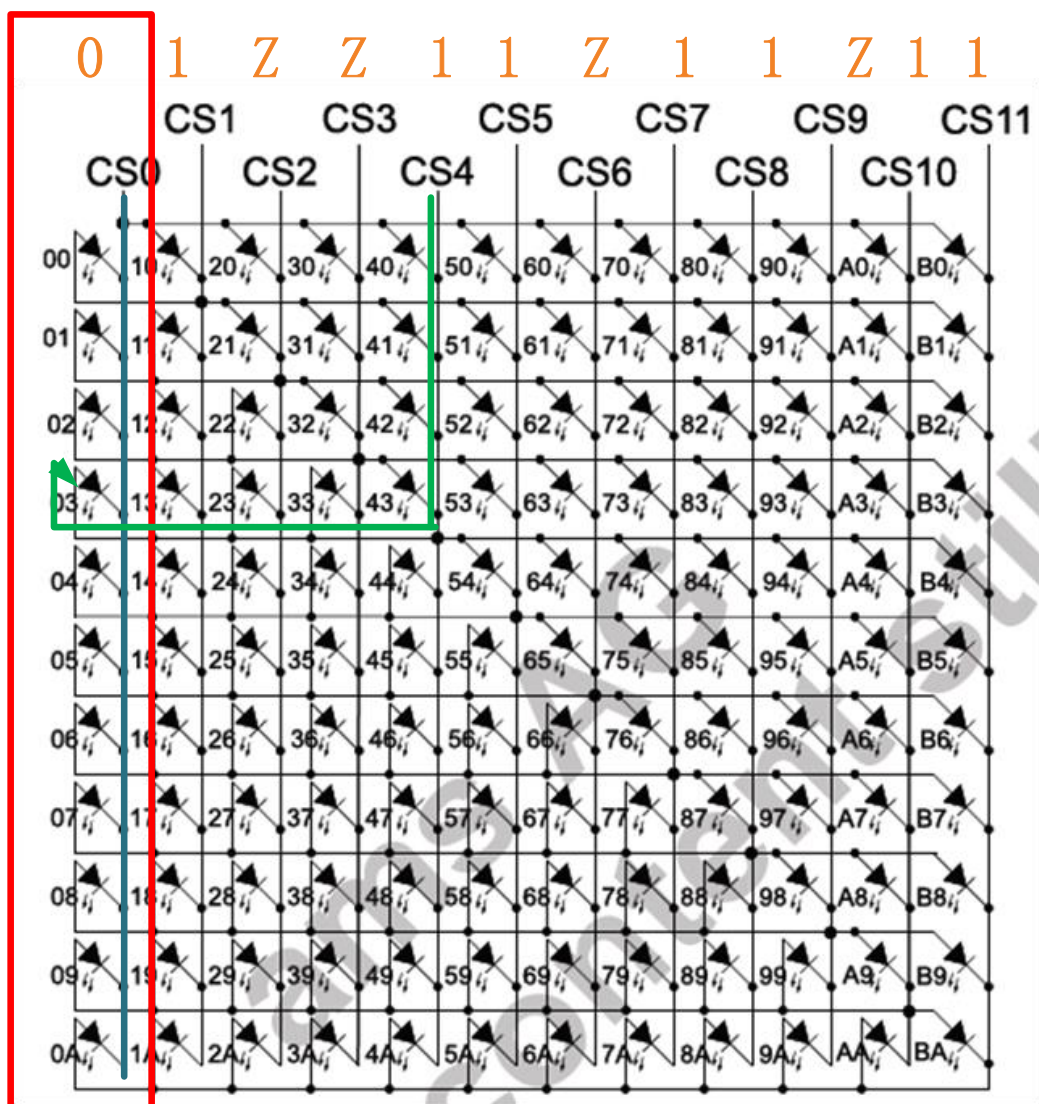
首先说明 LED 点亮的条件：LED 阳极接正电压，阴极接负电压，即可点亮。

所以

```
if (阴极==负电压)  
{  
    If (阳极==正电压) light=on;  
    Else light=off;  
}  
  
Else light = off;
```

即使阳极接负电压，阴极接正电压，这种 LED 反接的情况下，LED 不会点亮，也不会损坏灯。如果有一极是高阻（不输出能量），LED 也不点亮。

所以 LED 点阵按照下图这个巧妙的排列方法，132 个 LED 只需要 12 根线控制：



12 根线只有 CS0 为低电平，这样只有第一排“有可能”点亮；第一排的点亮与否，决定于其他 11 根线：其他 11 根线除了控制自己这一排的点亮“可能性”，也控制第一排这 11 个灯是否点亮：如果输出为高电平，对应的 LED 就必然点亮；如果输出为高阻，因为没有能量供给，LED 灭。

如此设计，除了减少控制引脚，更重要的是可以降低功耗：

因为每一排只点亮 1/12 的时间，利用人眼的视觉暂留，可以大大降低功耗。当然，为了保证人眼看起来亮度不是太暗，点亮瞬间的 LED 电流比长时间点亮的情況下略微增加。在点亮的瞬间，芯片通过 PWM 控制，不输出百分之百的高电平，进一步降低了功耗。具体细节和参数请参阅低功耗方面的介绍文档。

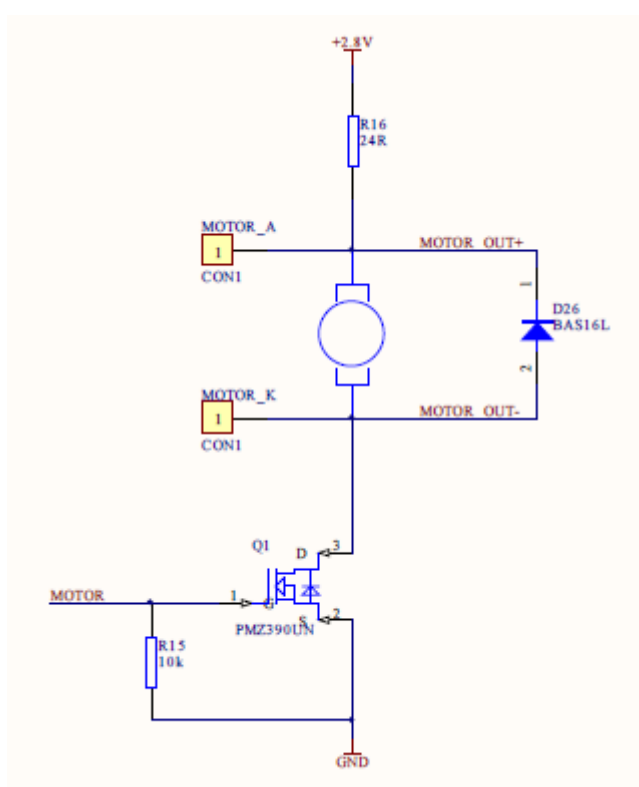
6. 马达控制模块

根据不同的体验需求，手环提供了两种马达控制电路：普通马达和线性马达。其中前者的电路设计简单，功耗低；后者的控制驱动电路复杂，但震动体验效果较佳。

6.1 普通马达模块

因为马达的导通电流可能高达 100mA，不能通过 GPIO 直接供电控制（驱动电流不够），所以使用一个 MOS 管作为功率放大电路。串联的 24 欧姆电阻用来调节马达震动强度，减少功耗。在 0 欧姆时，马达的启动电流为 100mA 左右，目前配置的实测电流为 36mA。

MOS 管输入端的下拉电阻是保证在重启瞬间马达保持静止，因为芯片上电后引脚为高电平，MOS 处于导通状态，从而使马达存在短暂的震动。



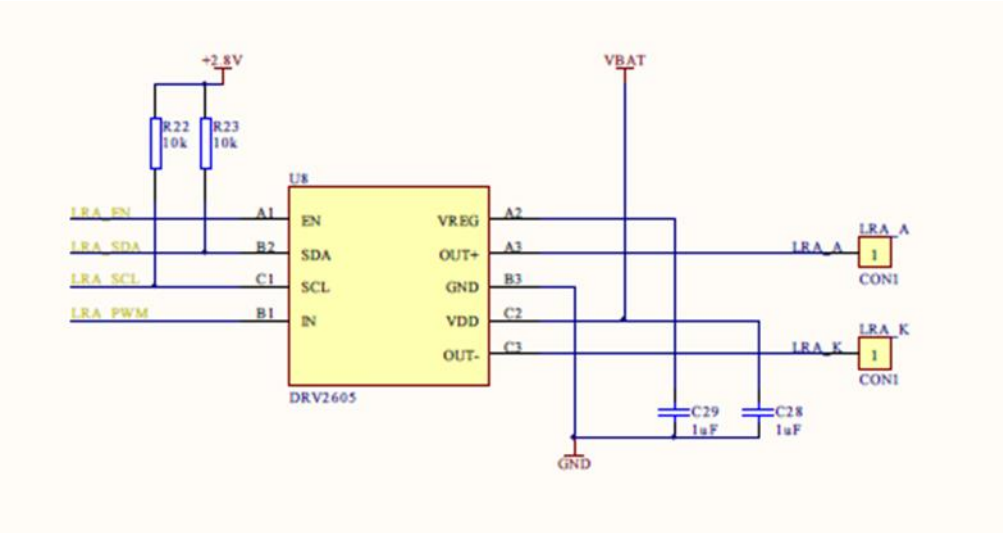
6.2 线性马达模块

线性马达控制复杂，需要用专用的芯片完成（设计中采用了 DRV2605 驱动芯片）。芯片与 MCU 通过 I2C 总线通信。线性马达的功能由驱动芯片控制，驱动芯片本身的输入电压范

围是 2.5V-5.5V。

给驱动芯片的供电电压，设计中使用的是电池供电，而不是 DCDC 输出的系统电压。

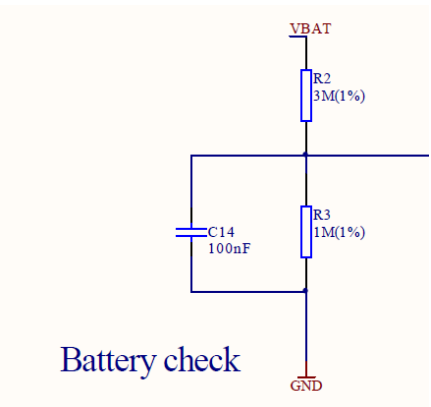
理由是：驱动芯片的工作电压是使用内部的 DCDC 完成电压转换。假设 DCDC 转换效率均为 90%，那么使用电池供电，能量效率为 90%；使用系统电压供电，效率为 $90\% \times 90\% = 81\%$ 。



7. 电量检测模块

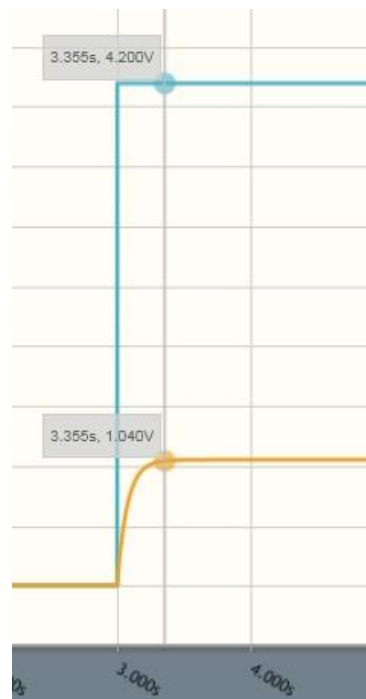
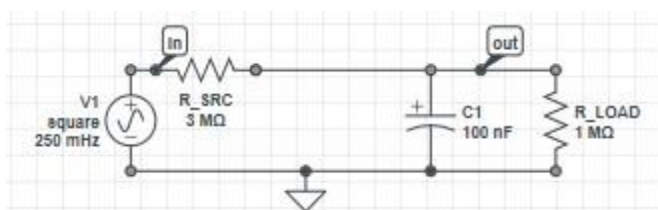
电池的电量和电压有对应关系，系统只要检测到电池电压，即可映射成电池剩余电量。

电路如下：



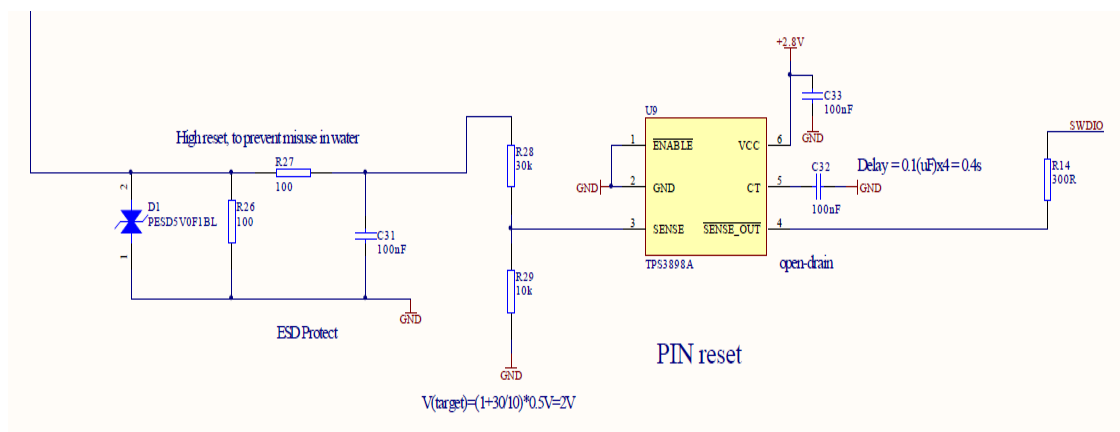
电池电压在 0-4.2V 之间变化，经过四分之一的分压电路，输出电压会在 0-1.05V 之间变化。充分利用了 nRF51822 的 ADC 量程 0-1.2V，并联的电阻用于稳定电压值。

通过仿真可知（蓝色—IN：电池电压、黄色—OUT：测量电压）：



电池接入瞬间，大约半秒时间即可完成电容充电，输出的测量电压才是稳定的正确值，所以 ROM 初始化代码中需要延时一秒后采集电池电压。

8. 外部复位模块



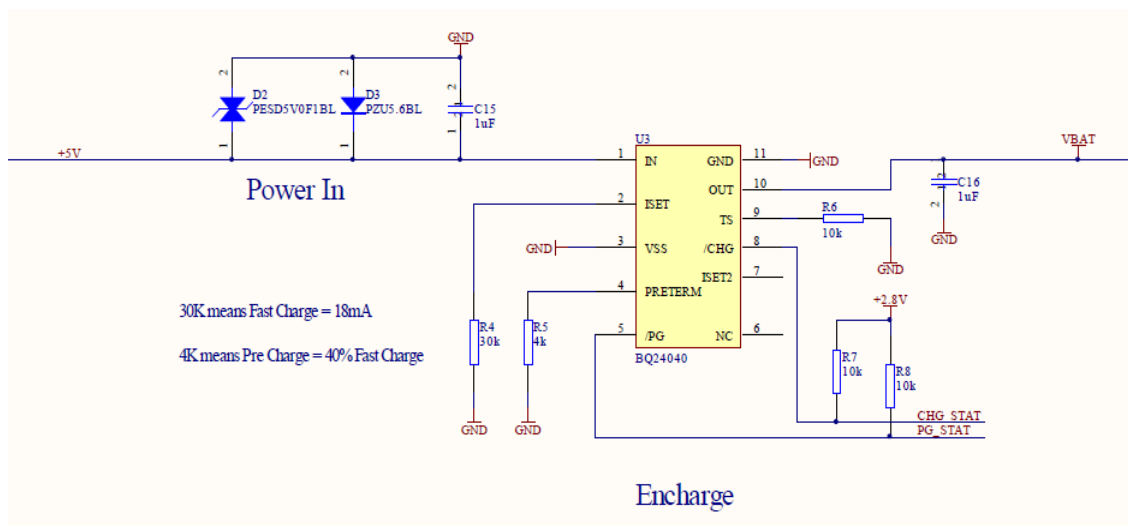
考虑到防水，外部的复位不能采用低电平复位，否则浸水（包括汗水）就会引起复位脚和系统地短路，触发系统复位。

所以外部复位的功能就是起到电平反转和静电保护。输入信号通过 TVS 管（D1）防止静电击穿电路，而后的电容电阻网络用于吸收静电未达击穿电压（6V 左右）时的能量。

而后接入的复位芯片完成复位信号延时：当复位信号保持 0.4s 以上，才向后端输

出复位信号，保证系统静电不复位。这恰恰利用了静电的特性：大电流，高电压，但是持续时间非常短。

9. 充电电路模块



充电芯片采用了 TI 的 BQ24040，选取该款型号的目的是，能够向 MCU 提供是否正在充电（CHG_STATE）和是否插入充电器（PG_STATE）的信息（大多数充电 IC 不提供后者信息）。充电电流可控，预充电与快速电流比例可控。

目前的参考方案按照 18mAh 的电池，预充电电流为快速充电电流的 40%设计。

充电电压的输入端的 TVS 管（D2）用于静电保护，齐纳二极管（D3）用于反插保护：一旦电源接反，电流从 D3 旁路出去，不损坏系统。

10. 系统电源模块

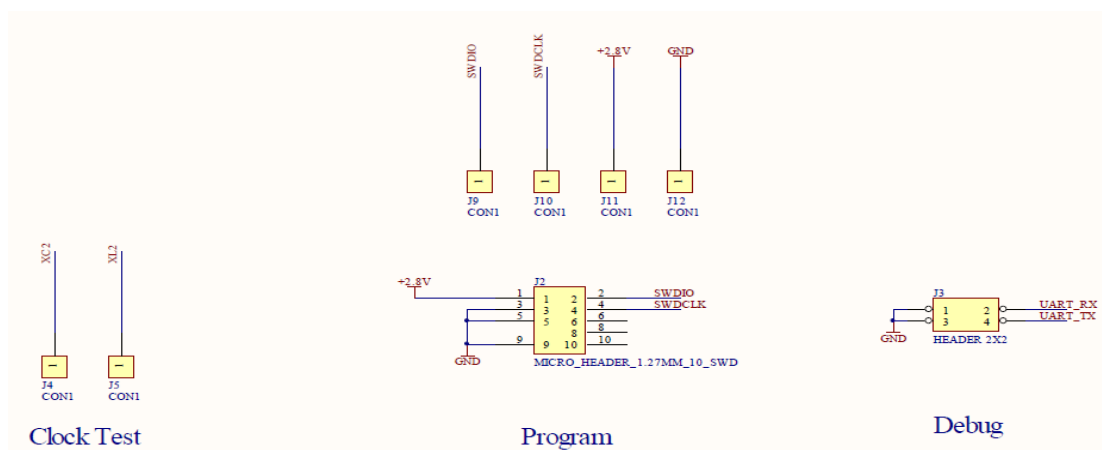
为了保证足够的电源效率，设计使用了高效率，带轻载优化的 DCDC 芯片 TPS62260，而不是传统的 LDO。因为 nRF51822 内部有 LDO，为了提高效率，系统电压应该越低越好，而马达的正常工作电压是 3V，白色 LED 最低工作电压是 2.8V，其他 IC 的最低系统电压是 1.8V。因此最终确定的系统电压是 2.8V。

电源芯片的选择：

- 传统 LDO 的静态功耗有优势，但是输入-输出压差越大，效率越低。电池电压如果是 3.9V，输出电压为 2.8V，效率为 $2.8/3.9=71\%$ ；

电池保护电路一般放置在电池中，因为手环的锂电池容量尺寸很小，放在电池中，对电池尺寸和整个手环尺寸影响很大。所以我们的设计中把保护电路放在 PCB 上，利用剩余空间。

12. 调试接口



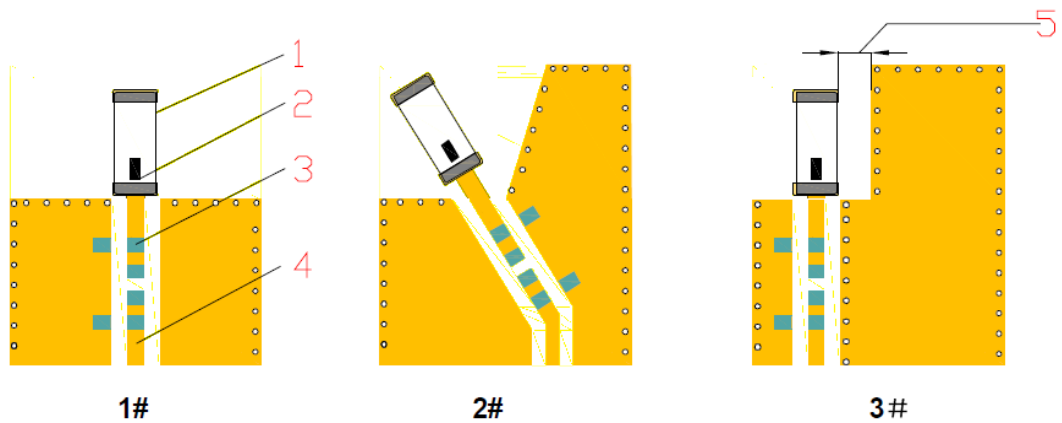
调试接口主要有：

- 时钟检测点：系统无法运行时，先检测时钟；也可以测试偏频等问题；
- 下载口：包括 2.54mm 间距（适合通用 JLINK 烧写器）和 1.27 间距（适合 Nordic 官方烧写器）；
- 串口：用于 LOG 输出等；

13. 手环 layout 建议

13.1 天线

- Layout 最先考虑摆放位置，而考虑天线的匹配电路
- 周围净空区尽量的大，下面是参考的三种方法：



(1——片式天线；2——天线馈端标记；3——匹配电路焊盘；4——50 欧姆传输线)

- 最小净空尺寸：

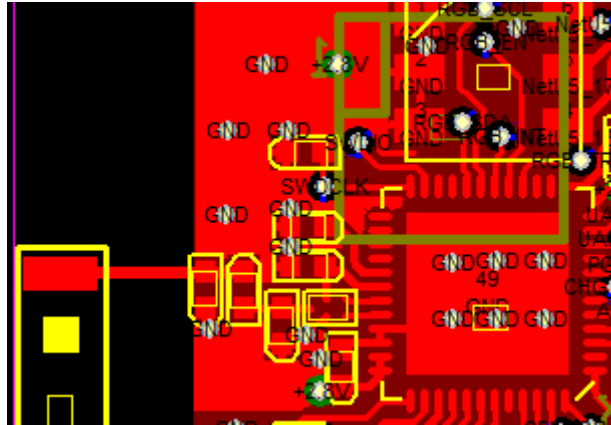
天线尺寸 (mm)	无敷地区域 (min) L×W(mm)	图示
3.2×1.6	3.6×6.8	
5.0×2.0	5.6×6.8	
6.0×2.0	6.4×6.8	
7.2×2.0	7.4×6.8	
8.0×1.0	8.4×6.8	
9.0×2.0	9.4×6.8	
35.0×5.0	35.4×9.8	

- 天线匹配电路附近的 GND 尽量多打过孔或者镭射孔

13.2 射频电路

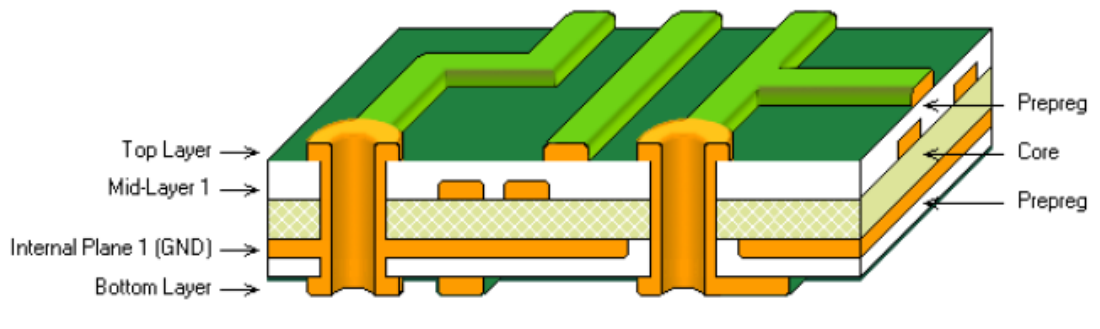
- 器件之间尽量近，减短走线（1mm 走线相当于 1nH 电感；更长的线会增加对地电容）
- 不要用过孔（过孔相当于电感）
- 匹配电路周围要被 GND 包裹以减小对地电容
- 匹配网络的下方不要走线或者放置器件，造成匹配网络和参考地之间的一个“黑洞”
- 建议板厚不超过 1.6mm，否则射频性能会下降
- 大功率和噪声源信号走线要与射频线垂直

- LED 相比射频是大功率信号，如果不是外观设计要求，强烈建议不要像该 PCB 方案把 LED 放置在天线附近（虽然 PCB 中 LED 走线已经尽量垂直于天线）
这是另一种 layout 方案，天线周围很干净：

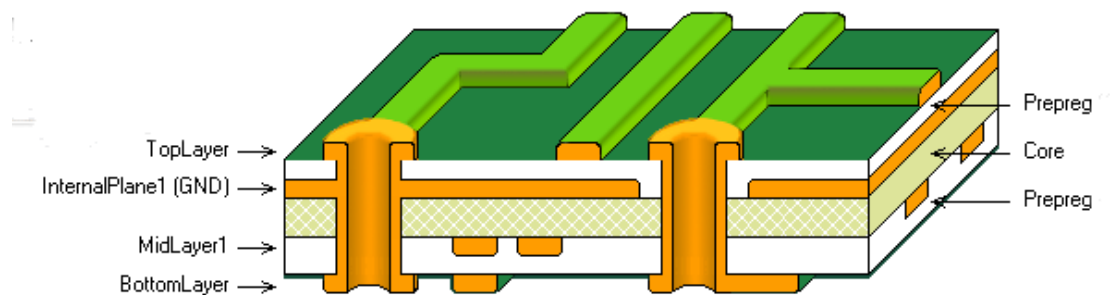


13.3 传输线阻抗匹配

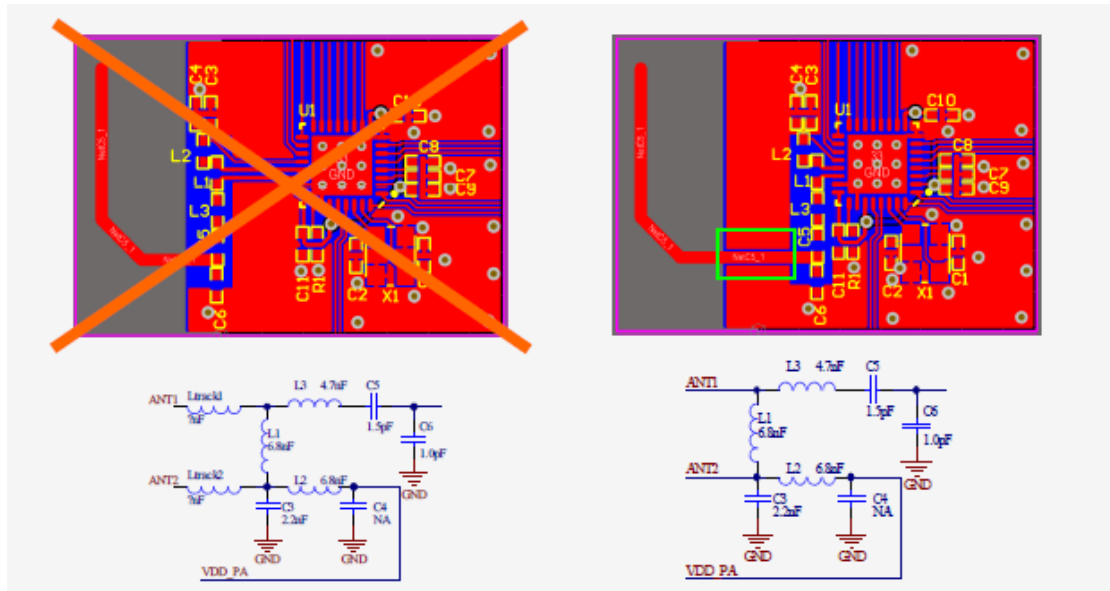
- 达到 50 欧姆
- HDI 工艺下，一二层之间太薄（0.1mm），如果第二层做参考地，那么达到 50 欧姆需要的走线太细（0.16mm）无法实现。所以参考 PCB 中的 Layer Stack 是：



- 普通 PCB 工艺，因为一二层厚度足够，可以使用第二层作为参考地



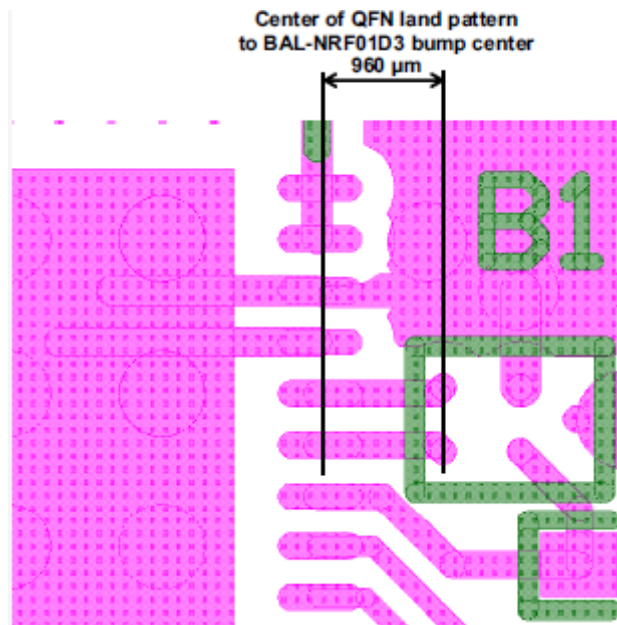
- 主芯片输出的差分信号走线必须严格对称
- 射频电路尽量和主芯片接近，减少寄生电感

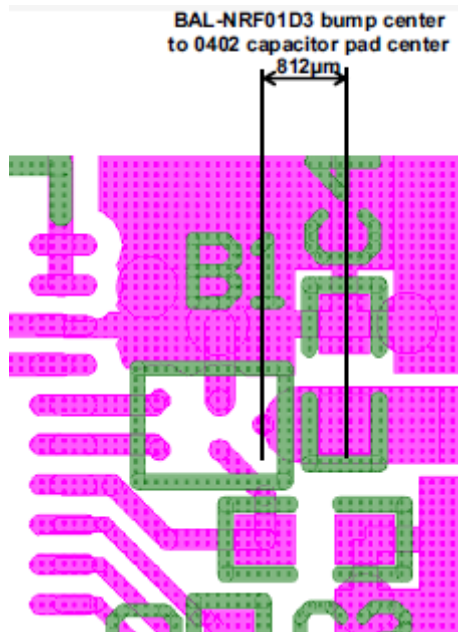


错误走线和等效电路

正确走线和等效电路

- 集成器件的参考尺寸：（注意，如果主控的封装改变，需要把 NRF01D3 换成 NRF02D3）





13.4 晶振走线

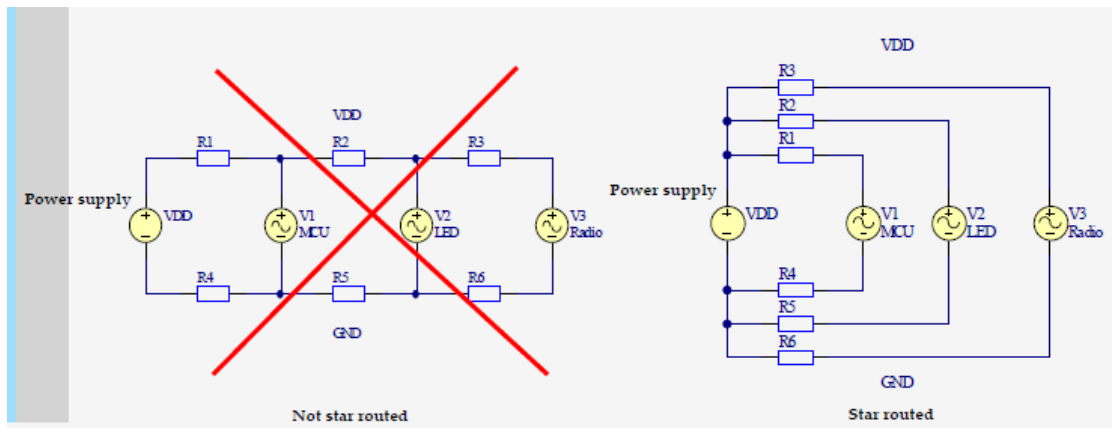
- 晶振走线不能与敏感线（射频）平行，最好是和敏感线垂直
- 晶振走线周围最好包地

13.5 地平面

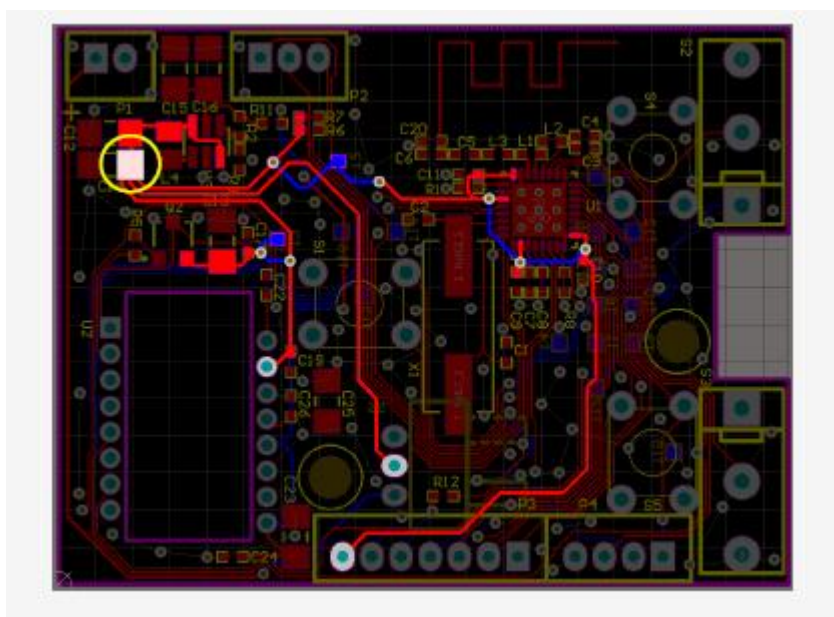
- PCB 工艺：信号线尽量走顶层和底层；第二三层 GND 和电源
- HDI 工艺：信号线尽量走第二层；第三层走 GND 和电源
- 必须有完整的地平面
- 多个地平面需要良好的连接。对于大面积铺地，每 0.5 到 1cm 需要一个过孔

13.6 电源

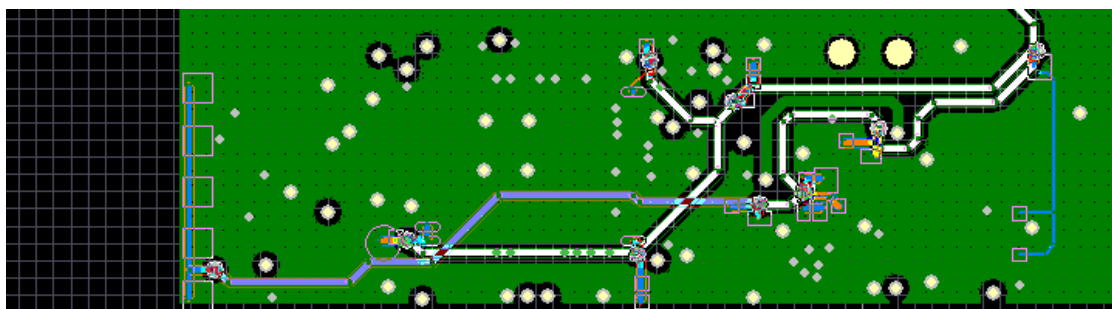
- 把噪声源（比如 LED 灯）分割，远离敏感电路（比如射频）；
- 在电源芯片输出端就开始分离：



建议走线方式：

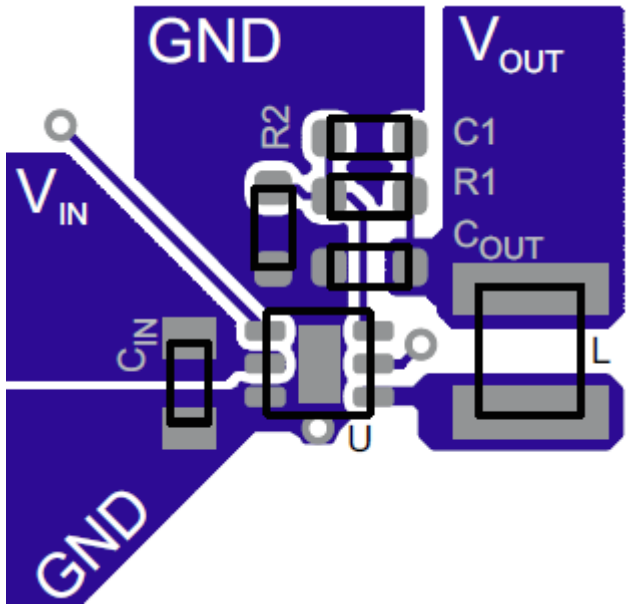


- 参考方案是把 LED 和偏心马达单独供电；MCU 另走一条线路：（线性马达电池供电）



- 其他常用途径：使用电阻（10ohm）或者磁珠隔离；去耦电容尽量接近芯片

13.7 Buck 芯片走线



- FB 信号取电处应该是在 2.8V 输出端的电容脚，同时走线尽量远离噪声源（SW 脚）
- 注意 GND 平面的质量和去耦电容

附表 1：nRF51822 中 IO 口的使用

参考设计 IO 定义表

功能	IO 名称	说明
NC	P0. 0	
电池电量检测	P0. 1	ADC 电压/电池电压=1/4
LED3	P0. 2	指示灯
SENSOR_SDA_SDI	P0. 3	SPI DATAIN
SENSOR_SCL_SPC	P0. 4	SPI CLK
LED2	P0. 5	指示灯
LED1	P0. 6	指示灯
LED0	P0. 7	指示灯

SENSOR_INT1	P0. 8	Gsensor 中断输出
NC	P0. 9	
NC	P0. 10	
PG_STAT	P0. 11	充电插入检测 (power good)
CHG_STAT	P0. 12	充电状态检测
LRA_EN	P0. 13	DRV2605 使能
LRA_PWM	P0. 14	DRV2605 外部模拟驱动效果输入
LRA_SCL	P0. 15	IIC 总线: DRV2605 CLK
LRA_SDA	P0. 16	IIC 总线: DRV2606 DATA
NC	P0. 17	
LED4	P0. 18	指示灯
NC	P0. 19	
NC	P0. 20	
SENSOR_SDO	P0. 21	SPI DATAOUT
SENSOR_CS	P0. 22	SPI CS
UART_TX	P0. 23	
NC	P0. 24	
UART_RX	P0. 25	
XL1	P0. 26	32. 768KHZ
XL2	P0. 27	
SENSOR_INT2	P0. 28	Gsensor 中断输出
MOTOR	P0. 29	普通马达的驱动接口
KEY_IN	P0. 30	