

班 级：信工 1902
学 号：2019040148



北京化工大学

毕业设计(论文)

题 目 人体姿态数据的采集处理和无线传输设计

专 业 电子信息工程

学 生 庄梓博

指导教师 肖亮

2022 年 6 月 3 日

诚信声明

本人声明：

本人所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：_____ 日期： 2022 年 6 月 3 日

毕业设计(论文)任务书

设计(论文)题目: 人体姿态数据的采集处理和无线传输设计

学院: 信息科学与技术学院 专业 电子信息工程 班级: 信工 1902

学生: 庄梓博 指导教师: 肖亮 专业负责人: 尹婧

1. 设计（论文）的主要任务及目标

自行选择合适的硬件，设计一个基于 STM32 的姿态传感器，实时利用卡尔曼滤波算法读取和处理姿态，并且通过无线设备回传数据。

2. 设计（论文）的主要内容及要求

- (1) 每秒不低于 20 次采样。
- (2) 实时利用卡尔曼滤波进行数据处理。
- (3) 传输距离不小于 10m，同时信噪比不低于-60db。

3. 主要参考文献

[1] 《STM32 HAL 库开发实战指南--基于 F103 系列开发板》

4. 进度安排

	设计（论文）各阶段名称	起 止 日 期
1	阅读文献，阅读各个传感器 datasheet	2022.11.28-2022.12.31
2	设计硬件，焊接，制作实物	2023.01.01-2023.02.02
3	软件设计，调试传感器	2023.02.03-2023.03.03
4	姿态融合，优化性能	2023.03.04-2023.04.21
5	写论文	2023.04.21-结题

人体姿态数据的采集、处理与无线传输设计

摘 要

随着物联网和智能化的发展，人体姿态检测和分析在生物医学、健康监测、运动训练等领域得到越来越广泛的应用。但是随着近些年国际贸易冲突的加剧，芯片行业也受到了大范围的打压。一些 IMU 芯片的进口受到了限制。本文选择了一款由上海 QST 公司生产的惯性传感器 QMI8610，基于 STM32F411 平台，同时配备了 CC2500 无线传输芯片，提供了一套 QMI8610，用于人体姿态采集处理和无线传输的整体解决方案，要求该设计能够提供每秒不低于 20 次的计算并且同时可以进行不少于 10m 的无线传输。

方案包括 QMI8610 在电源、通信方面的硬件电路。软件方面提供了在不同的需求下 QMI8610 不同的寄存器配置。同时利用卡尔曼滤波对我们得到的传感器数据进行了融合和处理。我们设计并且生产出了我们的硬件，测试了我们的芯片和软件算法，均符合我们的设计预期。

关键词：人体姿态，QMI8610，STM32

HUMAN POSTURE DATA COLLECTION, PROCESSING AND WIRELESS TRANSMISSION DESIGN

ABSTRACT

With the development of the Internet of Things and intelligence, human posture detection and analysis have been more and more widely used in biomedicine, health monitoring, sports training and other fields. However, with the intensification of international trade conflicts in recent years, the chip industry has also been widely suppressed. The import of some IMU chips is restricted. This paper selects an inertial sensor QMI8610 produced by Shanghai QST Company, based on the STM32F411 platform, and equipped with CC2500 wireless transmission chip, providing a set of QMI8610, an overall solution for human attitude acquisition processing and wireless transmission, which requires that the design can provide no less than 20 calculations per second and can perform wireless transmission of not less than 10m at the same time.

The solution includes the hardware circuits of QMI8610 in power supply and communication. The software provides different register configurations for the QMI8610 under different requirements. At the same time, the Kalman filter was used to fuse and process the sensor data obtained by us. We designed and produced our hardware, tested our chips and software algorithms to meet our design expectations.

KEY WORDS: Human posture, STM32, QMI8610

目录

前 言	1
第 1 章 绪论	2
1.1 题目背景和意义	2
1.2 硬件设计思路	2
1.3 软件设计思路	4
第 2 章 硬件设计	5
2.1 总体设计参数	5
2.2 STM32 芯片周围电路	5
2.3 CP2102 串口转 USB 电路	7
2.3 开发板电源设计	8
2.4 锂电池充电电路	10
2.5 原理图设计	10
2.6 PCB 布线布局	11
2.7 PCB 工艺和制造	12
第 3 章 软件设计	13
3.1 软件设计概述	13
3.2 片内外设配置	13
3.3 外设配置	14
3.2.1 QMI8610 配置	14
3.2.2 CC2500 配置	17
第 4 章 算法设计	19
4.1 姿态算法	19
4.1.1 旋转矩阵的表述	19
4.1.2 姿态预测	20
4.2 卡尔曼滤波	21
第 5 章 实验结果	23
结 论	25
参考文献	26

前 言

随着物联网和智能化的发展，人体姿态检测和分析在生物医学、健康监测、运动训练等领域得到越来越广泛的应用。人体姿态检测是指通过采集人体关节角度等信息，实现对人体姿态状态的识别和分析。该技术可以帮助人们更好地了解自身身体状态，从而进行更有针对性的健康管理和运动训练。另一方面，随着国际贸易竞争的加大，国产的芯片事业得到了长足的发展，本设计正式基于此，我们基于一款国产的 IMU 芯片 QMI8610 设计了一套姿态传感系统。

第 1 章 绪论

1.1 题目背景和意义

随着物联网和智能化的发展，人体姿态检测和分析在生物医学、健康监测、运动训练等领域得到越来越广泛的应用。人体姿态检测是指通过采集人体关节角度等信息，实现对人体姿态状态的识别和分析。该技术可以帮助人们更好地了解自身身体状态，从而进行更有针对性的健康管理和运动训练^[1]。在人体姿态检测技术中，采集人体姿态数据是关键的一环。目前，常用的人体姿态采集设备主要包括传感器、摄像头和惯性测量单元(IMU)等。

在人工智能混合计算机视觉发展的大背景下，基于摄像头和神经网络的姿态采集方法得到了长足的发展，比如基于 Kinect 三维摄像头或者 Intel Realsense 双目视觉摄像头，结合神经网络进行姿态识别，但是这种方法一定有其局限性。一方面，计算机视觉的设备昂贵，体积较大，难以便携式携带而更适合在健身房等固定的场所使用；另一方面，计算机视觉很大程度上受限于外部环境比如环境光照等；除了这两点之外，神经网络由于其复杂性难以保证姿态判断的实时性。而 IMU 作为一种嵌入式的传感器，具有体积小，价格便宜，功耗低，稳定性高等特点，可以更好的弥补上述的不足。因此，在本文中我们选择使用 IMU 作为人体姿态采集设备。

我们采集人体的姿态数据，经过后续的神经网络等的处理，可以判断运动姿态，从而判断运动者的姿态是否正确，更好的指导运动；另一方面，不正确的运动姿态非但起不到健身的正面作用，反而会负面影响健身者，导致运动伤害的发生。另一个人体姿态的数据的应用是在养老和保健领域，我们通过采集行动不便的人的姿态并且集中发送到控制台，可以实时监测运动状态，比如是否摔跤等。从而可以在第一时间进行干预。

1.2 硬件设计思路

一般的姿态处理过程包括三个环节，即采集、传输、判断三个流程。

在采集阶段我们采用 MCU 和 IMU 相结合的方法，在第一阶段的处理过程中包括数据的采集和融合得到姿态^[2]，我们通过高速 IIC 总线采集由 IMU 测量出的 6DOF 数据，利用四元数^[3]或者欧拉旋转矩阵^[4]初步得到姿态^[5]，利用卡尔曼滤波^{[6][7]}将采集到的数据进行融合；在信号处理上我们会采用包括带通滤波器等，在姿态的处理上一般会采用卡尔曼滤波算法。本设计采用的 MCU 是 ST 公司的 STM32F411CEU6 处理器，采用的 IMU 是上海矽睿的 QMI8610。在信号传输上会使用无线传输的方式，因为我

们在检测运动姿态的同时不能影响日常活动。本设计使用的是 TI 公司的 CC2500 射频模块和 CC2592 低噪功放模块。

STM32F411CEU6 是 ST 公司推出的微控制器，其基于 ARM Contex-M4 内核，最高主频 100MHz 同时配备了 FPU 浮点运算单元和 DSP 数字信号处理指令集。在信号处理方面可以支持矩阵向量等运算，非常适合处理姿态传感器的信号。该 MCU 同时配备了硬件 IIC，硬件 SPI 等，可以在不利用或者很少利用 MCU 资源的条件下和外设进行高速通信。STM32F411CEU6 内置了 512Kbytes 的 Flash，在本设计上不需要在配备外部 Flash。

QMI8610 是上海矽睿公司生产的 6DOF 传感器，可以实时输出三周角速度和三周加速度。其内置了完整的惯性测量单元和姿态引擎，具有指定方向的传感器融合库，可以提供 $\pm 3^\circ$ 俯仰和横滚， $\pm 5^\circ$ 偏航/航向的精度。集成姿态引擎和运动协处理器可以以 1 kHz 执行传感器采样，同时将数据输出到主机处理器。我们利用 IIC 可以编辑其寄存器来改动其输出频率。包括是否启用姿态引擎，采样率等。相较于传统的 MPU6050^{[8][9]}，我们的传感器具有更小的封装，更低的功耗和更快的速度。我们将两个 IMU 在下面的表格中进行比较。

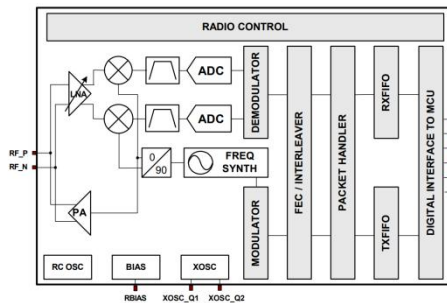
表 1-1 QMI8610 和 MPU6050 的比较

传感器型号	体积 /mm	通讯协议	运动引擎	卡尔曼滤波	功耗 /mA
QMI8610	3*3	SPI/IIC	是	是	3.74
MPU6050	4*4	SPI/IIC	是	否	3.9

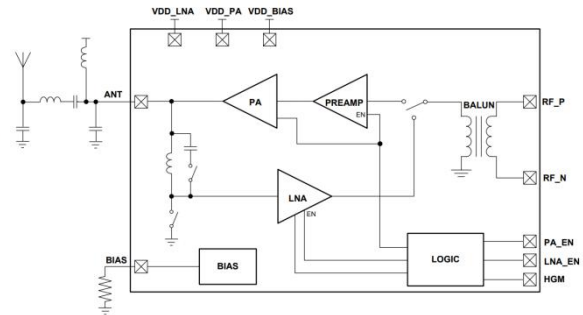
无线通讯芯片我们使用了 TI 公司的 CC2500 射频模块，该芯片为 2.4 GHz ISM 频带内的低功耗无线应用而设计的低成本、低功耗 2.4 GHz 射频收发器，可以支持 2-FSK,MSK,OOK 等多种解码方式。其在 -104dBm 的信噪比，104k 带宽的前提下，可以保证 1% 的误码率。通过内部寄存器的编程可以实现 1.4k-500k 的带宽。功耗上其最大休眠功耗电流仅为 400nA，在 +1dbm 发送功率增益的条件下功耗电流仅为 21.5mA。

在 CC2500 的基础上我们在其后端串联了一个 CC2592 低噪声功放模块。其在发射模式下可以提供最高 +22dBm 的功率增益。在接受模式下可以改善接收芯片的灵敏度并且降低噪声。CC2592 在 +22dBm 的发射增益下，其功耗电流在 3V 的电源下仅为 155mA；在高灵敏接收模式下功耗 4.9mA，在低灵敏接收模式下功耗电流 1.9mA。通过不同的配置，可以使 CC2500^[10]和 CC2592^[11]兼容不同的通讯协议。

CC2500 和 CC2592 的框图如下：



(a) CC2500 芯片简化方框图



(b) CC2592 芯片简化方框图

图 1-1 射频芯片内部框图

1.3 软件设计思路

软件设计主要包括两个方面，一个是利用 STM32 去驱动各个硬件单元，建立通信并且得到相关传感器数值的过程，另一个是算法单元，即利用各种算法对我们得到的数据进行处理。包括基本的信号处理和姿态融合等。第一部门我们利用 HAL 库来驱动各个硬件单元，通过 IIC/SPI 或者串口通信等方式得到传感器数值。第二个部分我们启用了 STM32 的 DSP 和 FPU 单元，加速浮点数运算并且让 STM32 支持向量运算，简化我们的程序。

在算法方面，考虑到我们的设计是针对人体运动而提出的，我们采用了带通滤波器，在满足奈奎斯特采样准则的前提下最大程度过滤噪声。在姿态融合上我们会采用卡尔曼滤波器。卡尔曼滤波器是鲁道夫·卡尔曼先生提出的一种系统最优状态估计系统。卡尔曼滤波器的核心在于预测和更新两个部分，这个滤波器将系统观测和系统模型结合起来，计算出系统的最优预测状态。

除了这两个之外，软件设计中其他辅助的部分包括但不限于 DMA、看门狗等。MCU 和 QMI8610 的通讯是使用的 IIC，因为这个通讯是一个双向的通讯。MCU 需要先向从设备发送地址信息，包括从机地址、读写位、寄存器地址等，所以在这个通讯过程中，我们不使用 DMA。在 MCU 和 CC2500 的通讯过程中，在软件初始化过程中是双向的数据传输，但是当寄存器配置完成后，这个通讯变成一个单向的通讯过程。所以我们在这个过程中使用 DMA 来优化 MCU 的性能。具体思路为我们配置 CC2500 的中断标志位，当发送完成后 CC2500 向 MCU 发出中断信号，当 MCU 接收到中断信号后复位 DMA，开启新一轮的传输并且发送传输指令。

第 2 章 硬件设计

2.1 总体设计参数

我们的硬件设计目标是在 Altium Designer 22 的开发环境下独立选择合适的硬件，设计原理图并且绘制 PCB，完成 PCB 硬件布局设计和布线。在 PCB 设计上，我们的设计遵守一般 PCB 设计标准，没有采用特殊生产工艺。在硬件的封装上也采用了通用的封装，没有采用异形封装。这样的设计便于我们的 PCB 在将来进一步大规模生产。PCB 设计的关键指标如下表所示：

表 2-1 PCB 设计中的关键指标

指标	参数
PCB 层数	4 层
铜箔厚度	顶层和底层 1oz，中间层 0.5oz
介质材料	FR-4 板材
最小打孔直径	15mil
最小线宽	7mil

2.2 STM32 芯片周围电路

我们的设计采用了 STM32F411CEU6 作为主控制器，这款处理器基于 ARM Contex-M4 内核，最高主频 100MHz，配备了 DSP 数字信号处理单元和 FPU 浮点计算单元。可以在信号处理时加速计算。MCU 配备了内置晶振，可以最小化外设电路减小体积。内部电路除了内核外，配备了 GPIO 模块、硬件 IIC 模块、硬件 SPI 等通信单元，可以在不占用 MCU 资源的情况下和外设进行通讯。处理器还内置了 DMA 控制器，可以在完全不占用 MCU 资源的情况下和外设进行数据交换。

我们设计的 MCU 以及周围的电路包括复位电路，晶振电路，去耦电路，电源电路等。本 MCU 的外部复位信号从 NRST 引脚输入，芯片高电平有效，低电平复位。ST 公司建议的复位电路以及芯片内部的复位框图如下图所示：

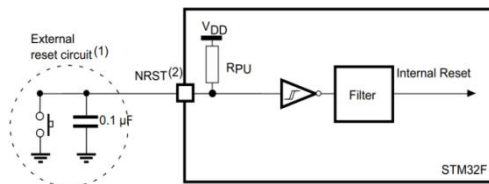


图 2-1 STM32F411CEU6 芯片内部复位框图

推荐的电路中包括了 Vcap 引脚的 $2.2\mu\text{f}$ 电容，和芯片各个供电引脚的 $0.1\mu\text{f}$ 去耦电容。其中去耦电容均匀分布在芯片的四周，并且在设计时尽量靠近芯片。

MCU 的晶振我们全部采用外部晶振输入，包括 32.768kHz 的低速外部晶振和 25MHz 的高速外部晶振。其中高速外部晶振通过内部倍频电路输出 100MHz 信号给芯片内核使用，对于其他的芯片内外设，我们均使用芯片允许的最大频率。我们最终的 STM32 的时钟树如下所示：

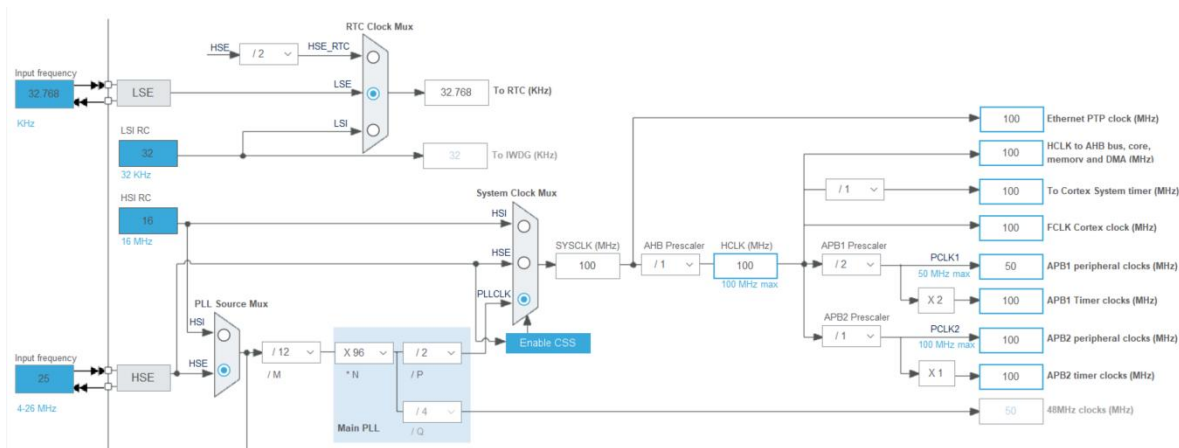


图 2-3 STM32F411CEU6 内部时钟树

为了直观地展示芯片和外设的工作状态，我们另外为芯片配备了 LED 指示电路。

2.3 CP2102 串口转 USB 电路

在实际开发和调试的过程中，如果我们仅仅使用 SWD 进行调试，过程太过复杂，UI 界面操作不方便以及数据不方便导出。为了解决这些问题简化我们的开发流程，我们在设计 SWD 调试接口前提下，为开发板设计了 USB 转串口电路。利用 USB 转串口电路，我们既可以通过 BOOT 的设置，通过串口下载程序，另一方面我们用串口也可以实时输出一些值来检测芯片的运行状态。我们使用 CP2102^[12]作为转串口芯片。

CP2102 是 Silicon Labs 推出的 USB 转串口电路。其可以支持全速(12Mbps)的 USB2.0 接口，芯片内集成了 USB 接收发送电路，只需要极少量的外部电阻电容就可以工作。在 UART 端口自适应波特率，不需要额外配置。在 300bps 的带宽下可以达到 1Mbps 的传输速率。电脑端驱动可以兼容 Linux, Windows 2000, Windows XP, Win11 等操作系统。此外芯片还可以支持 RS232 通讯协议。供电上，其可以用 USB 的 5V 电源进行供电，也可以利用外部 3.3V 电源进行供电。

在实际使用中，因为不使用 RS232，仅仅需要极少的连接和外部器件就可以进行工作。

CP2102 的功能框图如下图所示：

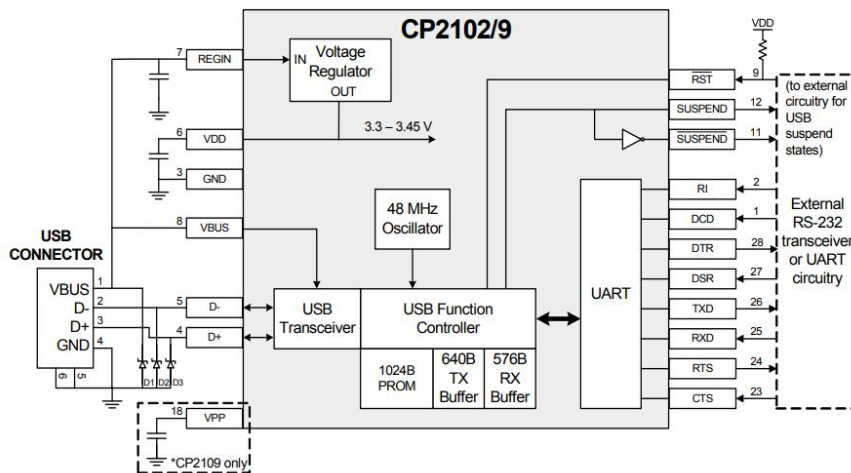


图 2-4 CP2102 功能框图

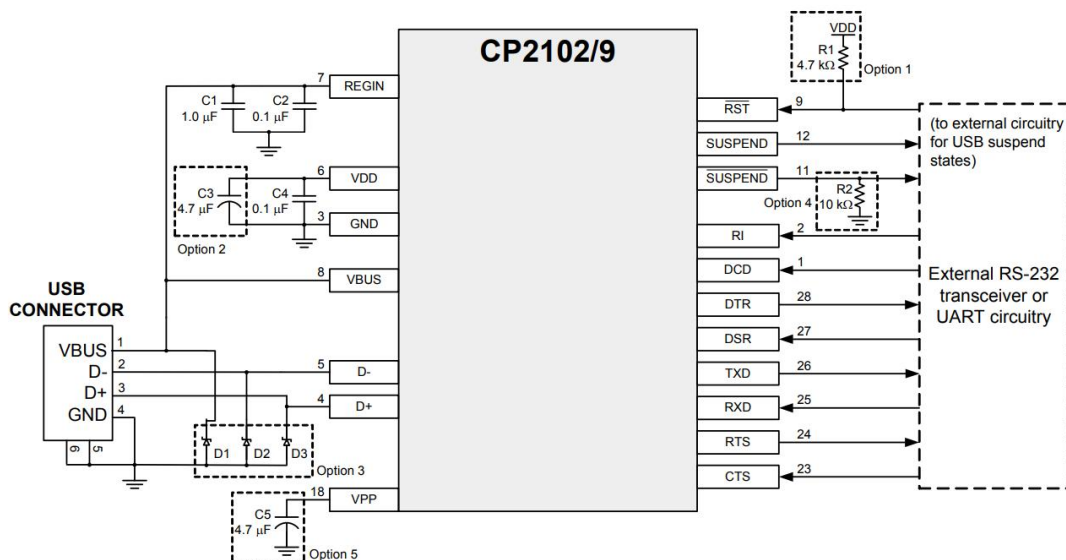


图 2-5 CP2102 典型应用框图

在实际使用上，我们采用 USB 的 5V 电源为其供电。由于我们不使用 RS-232 通信协议，我们只需要 RXD 和 TXD 一组通讯线。其他的通讯线可以悬空。

2.3 开发板电源设计

在实际设计中，我们的电源输入范围为 2.5V-5V。我们的供电需求均为 3.3V，因此我们只需要设计单路 3.3V 供电。我们需要选择一款 buck-boost 拓扑的电源芯片来给芯片供电。为此我们选择的是 TI 公司的 TPS63020 芯片，这是一款内置 4A 开关 MOS 的 buck-boost 拓扑电源芯片。此芯片可以支持 1.8-5.5V 的电源范围，工作频率固定在 2.4MHz，支持最高输出 3A 的电流。较高的工作频率可以很大程度减小

电感的感量，进一步减小整体的体积。芯片内部集成短路检测，不需要额外的检流电；内部集成温度检测，在高温时停止工作。芯片对外输出 PG 信号指示工作状态，外置使能端口。芯片采用 3mm*4mm 的 VSON 封装，芯片的内部功能框图如下所示：

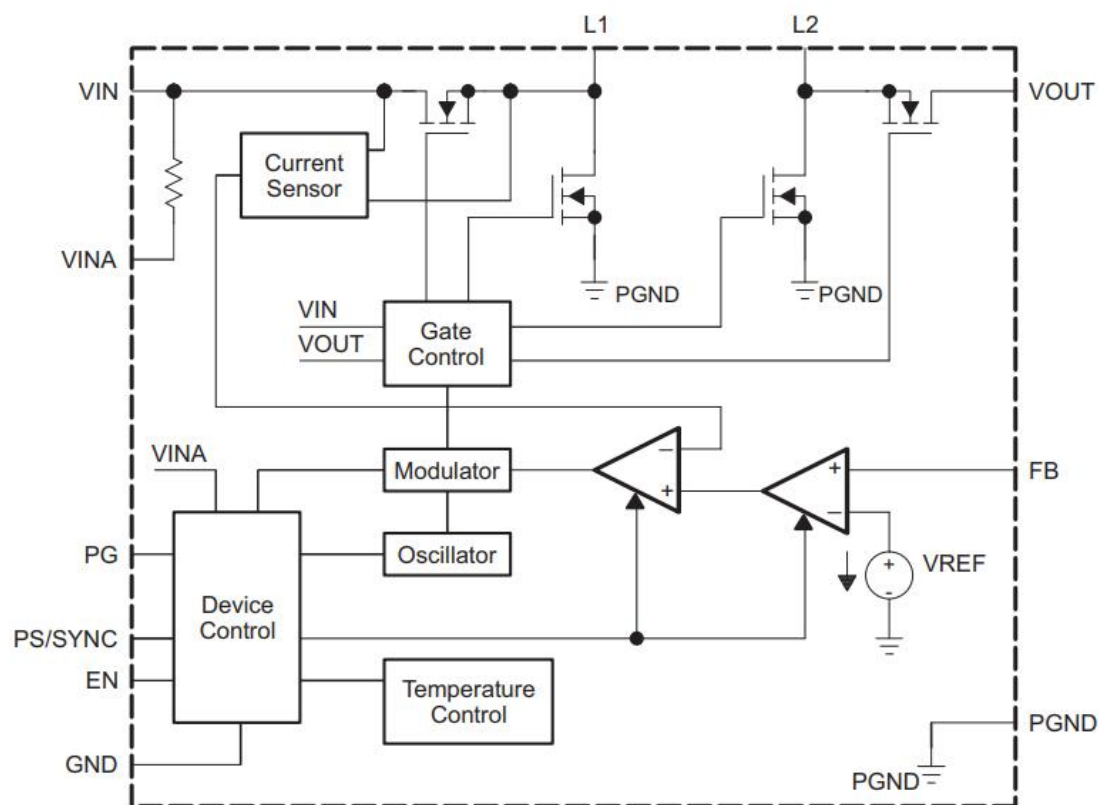


图 2-6 TPS63020 内部功能框图

STM32F411 最大功耗电流为 160mA，CC2500 射频芯片在+1dBm 增益的输出模式下最大电流消耗 21.5mA，CC2592 在+22dBm 的发射增益模式下最大电流消耗为 155mA，QMI8610 在最大功耗模式下电流消耗 3.68mA。考虑到其他外部电路包括 LED 等的电流消耗，我们设计的电流版整体电流消耗小于 400mA，我们设计电源电路时以 3.3V/500mA 输出能力作为指标。我们计算的理论参数如下表所示：

表 2-3-1 电源电路关键参数

指标	参数
输入电容	22uF 陶瓷电容
电感	1.5uH 额定电流 1.7A 饱和电流 2.3A
输出电容	3 个 10uF 陶瓷电容并联
反馈电阻	高端电阻 768K Ω 低端电阻 137K Ω

2.4 锂电池充电电路

我们选择一般锂聚合物电池作为开发板电源。充电最大电压可以达到 4.2V，额定工作电压 3.7V，最大放电电压不低于 2.5V。低于此电压继续放电会对锂电池造成不可逆损耗；类似地，高于 4.2V 继续充电会导致锂电池过热甚至爆炸。

我们设计的锂电池容量为 2200mah，在 90% 的电源转化效率下，可以支持开发板超过 5 小时的供电。充电方面我们选择 TP4054 作为锂电池充电芯片。TP4054 是一款国产的单片锂电池线性充电芯片。通过外部电阻可以使他的充电电流最高达到 500ma。芯片内部集成了开关 MOS，不需要额外的器件就可以工作。输入方面可以直接通过 USB 的 5V 输入进行充电。

2.5 原理图设计

我们最终设计的原理图如下图所示：

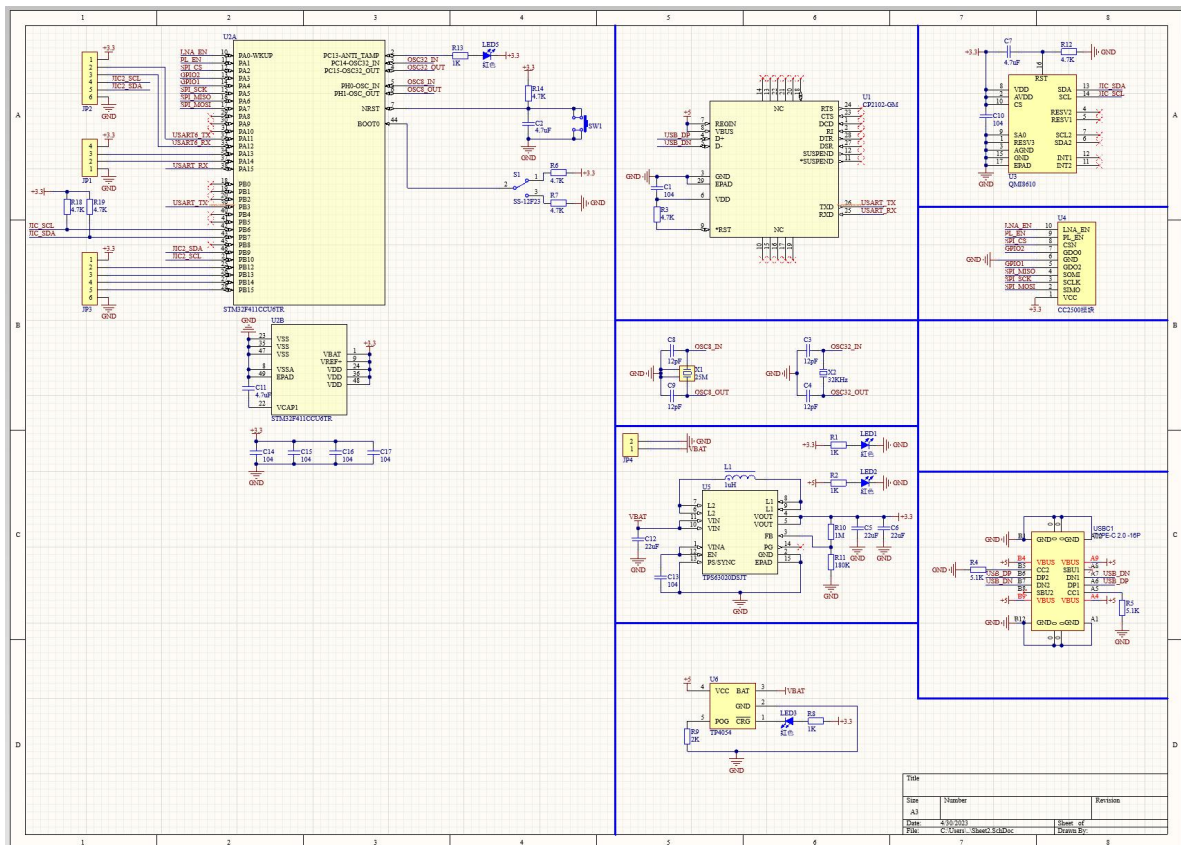


图 2-7 设计总原理图

我们的设计总体遵从了我们之前的分析，在此基础上，我们将 STM32 的多余 IO 口以插座的形似引了出来，此后可以利用这些通讯接口去扩展我们的设备。包括可能的外部传感器等。

USB 接口我们选择了 Type-C 接口, 在 CC1 和 CC2 接口通过 5.1K 的电阻接地, 在 USB 接口接入 PD 设备的时候兼容供电协议。锂电池接口选择了 2.0mm 间距的接口, 兼容了市面上大多数的小功率锂电池。我们为电源提供了两个 LED 指示灯, 分别是 3.3V 的指示灯来指示 PCB 板主供电以及 USB 输入的 5V 指示灯。STM32 芯片的 PC13 连接一个 LED, 可以通过编程的方式来指示芯片工作状态。锂电池供电芯片通过一个 LED 来指示锂电池的充电状态。

CC2500 和 CC2592 我们选择了直接使用成品的板子, 减少了射频电路开发可能带来的问题。

2.6 PCB 布线布局

我们 PCB 布线的最终效果如下图所示:

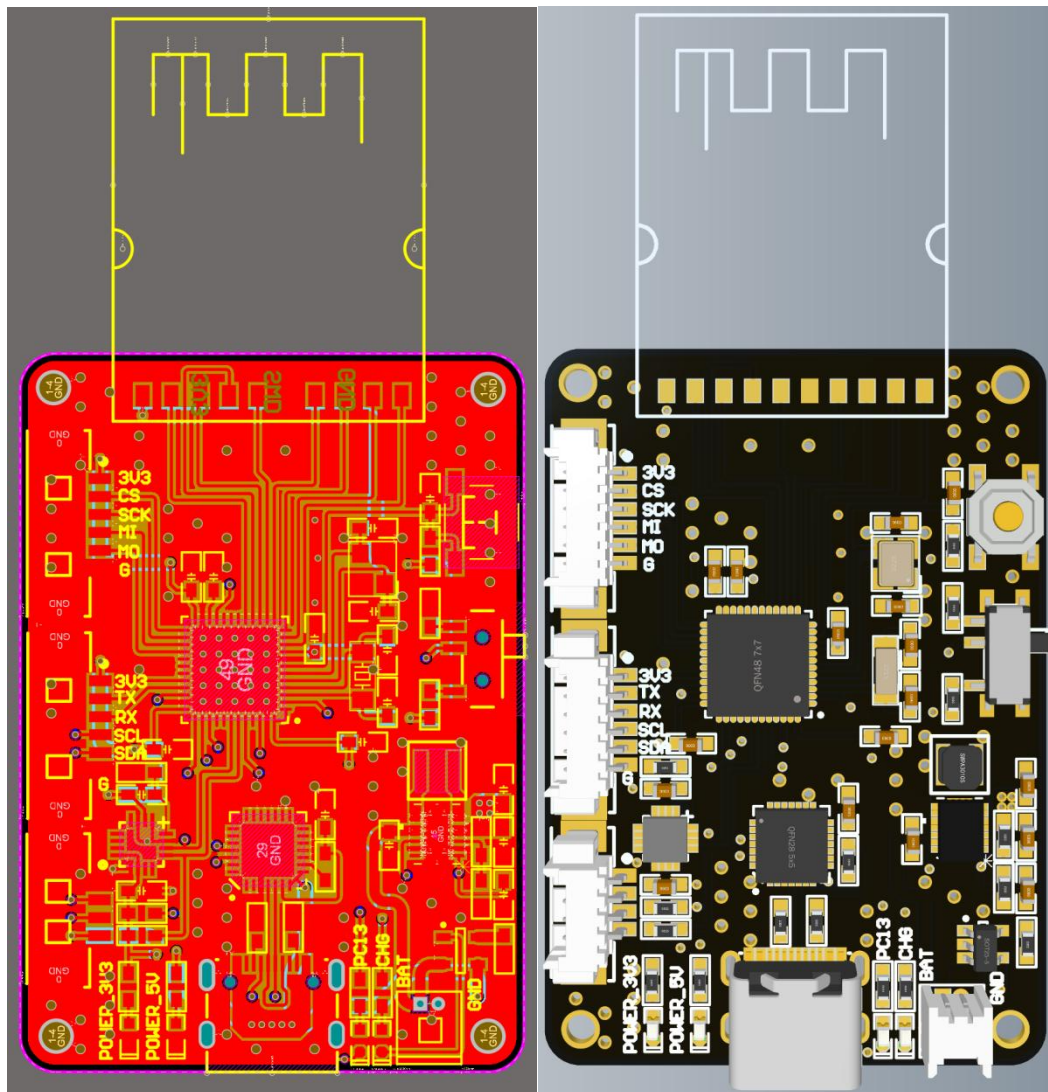


图 2-8 PCB 设计效果

PCB 布局上我们遵循各个部件的功能将 PCB 划分成不同的功能区进行元器件的排布和布线。主要包括主控及周围电路、传感器电路、接口电路、电源电路和最后的 CC2500 射频模块。

主控及其周围电路包括 STM32F411 芯片，晶振电路和负载电容，BOOT 选择电路等。芯片靠近板子中心放置，去耦电容均匀的排放在板子的四周并且保证每个或者每两个电源引脚都有一个去耦电容。晶振电路尽量摆放在靠近芯片近的位置，并且高速晶振的一组信号要保证尽量镜像的布线来减少不平衡的阻抗对高速信号的影响。BOOT 选择电路和复位电路放在板子的边缘便于按照我们的需求配置。

传感器电路也就是 QMI8610 的传感器芯片，我们将其摆放在靠近芯片的合适位置即可，IIC 的信号线和数据线需要用 $4.7K\Omega$ 的电阻拉高。

USB 接口和相关的电路我们放在板子一侧的正中间，便于 USB 拔插和充电。同时 CP2102 也被摆放在 USB 接口和 MCU 的正中间，我们通过布线的方式控制 USB 的一组差分信号的阻抗在 $75-100\Omega$ 之间。布线方式选择差分布线。同时我们将指示电路放在 USB 接口的两侧，分别由电源指示电路，充电指示和 MCU 工作指示。电源电路包括了电源芯片电路和锂电池充放电电路，我们将锂电池接口房子啊 USN 接口的同一侧，就近摆放电源芯片等芯片。接口电路放在另一个侧面，便于和 MCU 连接。CC2500 射频模块我们焊接在 USB 的对面，要注意的时候射频信号容易被其他的信号干扰，我们在设计时要保证射频模块和我们主板之间的点对点连接来最小化干扰。

2.7 PCB 工艺和制造

我们设计的 PCB 可以用一般工艺制造完成，我们将所有的元器件集中安装在 PCB 的一面，减少了 SMT 和回流焊的成本。我们最终生产出的 PCB 实物如下图：



图 2-9 PCB 实物

再简单的调试后，设计的 PCB 完全符合我们的要求。

第3章 软件设计

3.1 软件设计概述

在本项目中，除了硬件设计之外，软件设计也是很重要的一环。如何去协调我们的程序运行，如何去驱动我们设计的各个硬件，对最后我们性能的体现起到决定性因素。我们的软件开发使用 keil 和 Stm32CubeMX 来进行，辅助程序包括串口助手等。软件的调试采用 SWD 协议，利用 Keil 自带的工具进行调试。

软件设计的内容包括 STM32 基本电路的配置比如包括时钟复位等、外设的配置比如 GPIO 以及其他片内外设包括 IIC\SPI 的配置。我们整体的软件开发使用 HAL 库进行。

3.2 片内外设配置

正如上文所述的，我们时钟输入包括 32.768KHz 的外部低速时钟输入和 25MHz 的外部高速时钟输入。PC14 和 PC15 引脚为外部低速时钟的输入引脚，PH0 和 PH1 为外部高速时钟输入引脚。其中外部低速时钟输入到片内 RTC，外部高速时钟经过 PLL 倍频后输出 100MHz 的高速信号，输入到内核主频和 HCLK 时钟。APB1 外设时钟由 HCLK2 分频得到，为允许的最大时钟 50MHz；APB1 定时器时钟为 100MHz，是芯片允许的最大时钟频率。APB2 外设时钟和 APB2 定时器时钟均为 100MHz。时钟配置的函数由 CubeMX 自动生成。

片内 IIC 驱动器主要用于驱动 QMI8610 惯性传感器。我们启用内部 IIC1 控制器，PB6 为 IIC 时钟引脚，PB7 为 IIC 数据引脚，引脚通过外部电阻拉高。IIC 配置为高速模式，时钟 400KHz。IIC 设备分为从设备和主设备，其中一个主设备可以驱动多个从设备。IIC 地址由 7 位从设备地址和 1 位读写控制位组成。一个标准的 IIC 网络如下图组成：

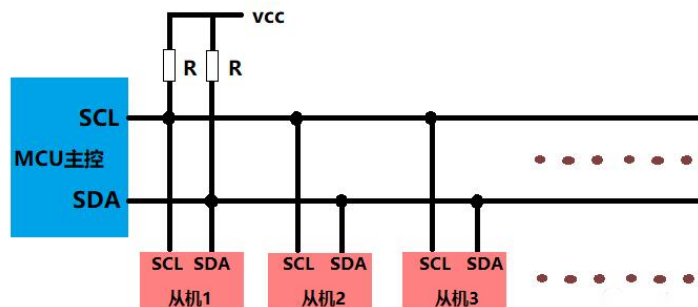


图 3-1 IIC 网络

主设备向从设备发送数据的流程包括，主设备发送起始（START）信号，随后发送设备地址到从设备，设备地址包括 7 位地址和 1 位写控制位，等待从设备响应（ACK），主设备发送数据到从设备，一般发送的每个字节数据后会跟着等待接收来自从设备的响应（ACK），数据发送完毕，主设备发送停止（STOP）信号终止传输。主设备向从设备读取数据的流程包括，设备发送起始（START）信号，主设备发送设备地址到从设备设备地址包括 7 位地址和 1 位写控制位，等待从设备响应（ACK），主设备接收来自从设备的数据，一般接收的每个字节数据后会跟着向从设备发送一个响应（ACK），一般接收到最后一个数据后会发送一个无效响应（NACK），然后主设备发送停止（STOP）信号终止传输。

片内 SPI 驱动器主要用于驱动 CC2500 射频芯片。我们启用内部 SPI1 控制器。因为只有一个 SPI 设备，我们选择了三线 SPI 方案，保证从设备片选引脚始终保持片选状态，其中 PA5 是 SPI 时钟线，PA6 为 SPI 的 MISO 数据线，PA7 为 MOSI 数据线。在 SPI 配置上，我们选择摩托罗拉架构的 SPI 通讯结构，数据位 8 位，大端模式高位优先。时钟 50MHz，CPOL=0，CPHA=1。表示数据在时钟下降沿有效。

我们在 SPI 协议中加入了 DMA 协议，DMA 协议可以直接访问内存，可以和外设在没有 MCU 干预的情况下进行数据交换。其中 SPI1 的 RX 属于 DMA2 控制器，DMA 方向为内存到外设，数据宽度为 33 字节，包括三个 double 类型的欧拉角数据和 1 字节校验位。

串口通讯我们启用片内 USART1 控制器，其中 PB3 引脚为 RX 引脚，PA15 引脚为 TX 引脚。片内 USART 控制器设置在异步模式，比特率 115200Bit/s，数据位 8 位，停止位 1 位。

定时器启动了内部 TIM11 定时器用于程序计时，给后续角速度的积分提供必要的积分数据。定时器时钟设置为 1 分频，预分频系数 250，计时器向上计数模式。重载周期为 40，自动重载。没两次进入计时器中断的时间差为 0.0001 秒，此定时器用于计时计算积分周期。

3.3 外设配置

3.2.1 QMI8610 配置

QMI8610 在上电后处于初始化状态，陀螺仪和加速度计均处于关闭状态，我们需要根据 datasheet 配置其配置寄存器。QMI8610 共有 8 个配置寄存器 CTRL1-CTRL9，其寄存器地址分别从 0x02-0x0A。其中 CTRL1 用于配置通讯方式和使能内部晶振。CTRL2 用于配置加速度计量程和数据输出速率。CTRL3 用于配置角速度计量程和

数据输出速率。CTRL4 用于配置可外接的磁力计，在本设计中不使用。CTRL5 用于配置加速度计和角速度计的高低通滤波器。CTRL6 用于配置姿态引擎。CTRL7 用于使能和失能传感器，磁力计和姿态引擎等。CTRL8 内部保存，不使用。CTRL9 用于执行预先配置好的相关命令。

我们在程序操作中需要到的寄存器如下表所示：

表 3-1 QMI8610 配置寄存器

寄存器	地址	寄存器类型	寄存器描述
WHO AM I	0x00	r	设备标识
CTRL1	0x02	rw	SPI 配置和时钟配置
CTRL2	0x03	rw	加速度计配置，输出速度，自检
CTRL3	0x04	rw	角速度计配置，输出速度，自检
CTRL6	0x07	rw	姿态引擎设置，输出速度
CTRL7	0x08	rw	传感器使能，同步

我们配置的传感器的数值如下表所示：

表 3-2 QMI8610 寄存器配置

寄存器	寄存器值	描述
0x03(CTRL2)	0x08	传感器范围±4g
0x04(CTRL3)	0x10	传感器范围±128dps
0x08(CTRL7)	0x03	启动六轴传感器

除此之外我们还提供了其他的寄存器配置方案：

表 3-3 QMI8610 寄存器配置方案(运动引擎)

寄存器	寄存器值	描述
0x03(CTRL2)	0x08	传感器范围±4g
0x04(CTRL3)	0x10	传感器范围±128dps
0x07(CTRL6)	0x00	运动引擎 20Hz 输出速度
0x08(CTRL7)	0x0b	启动六轴传感器和运动引擎

QMI8610 的加速度计数据寄存器地址从 0x19-0x1E，以此为 X 轴低八位和高八位，Y 轴低八位和高八位，Z 轴低八位和高八位。角速度计数据寄存器范围从 0x1F-0x24，依次为 X 轴低八位和高八位，Y 轴低八位和高八位，Z 轴低八位和高八位。运动引擎的输出数据范围从 0x2D-0x34，数据依次为 W 低八位和高八位，X 低八位和高八

位，Y 低八位和高八位，Z 低八位和高八位；X 轴速度低八位和高八位，Y 轴速度低八位和高八位，Z 轴速度低八位和高八位。要注意的是当我们启动运动引擎后，不能同时启动滤波器。QMI8610 数据寄存器表格如下：

表 3-4 QMI8610 数据寄存器

寄存器名称	寄存器地址	读写访问	寄存器描述
AX_L	0x19	r	加速度计 X 轴低八位
AX_H	0x1A	r	加速度计 X 轴高八位
AY_L	0x1B	r	加速度计 Y 轴低八位
AY_H	0x1C	r	加速度计 Y 轴高八位
AZ_L	0x1D	r	加速度计 Z 轴低八位
AZ_H	0x1E	r	加速度计 Z 轴高八位
GX_L	0x1F	r	角速度计 X 轴低八位
GX_H	0x20	r	角速度计 X 轴高八位
GY_L	0x21	r	角速度计 Y 轴低八位
GY_H	0x22	r	角速度计 Y 轴高八位
GZ_L	0x23	r	角速度计 Z 轴低八位
GZ_H	0x24	r	角速度计 Z 轴高八位

表 3-5 QMI8610 数据寄存器(数据引擎)

寄存器名称	寄存器地址	读写访问	寄存器描述
dW_L	0x2D	r	四元数微分 dW 低八位
dW_H	0x2E	r	四元数微分 dW 高八位
dX_L	0x2F	r	四元数微分 dX 低八位
dX_H	0x30	r	四元数微分 dX 高八位
dY_L	0x31	r	四元数微分 dY 低八位
dY_H	0x32	r	四元数微分 dY 高八位
dZ_L	0x33	r	四元数微分 dZ 低八位
dZ_H	0x34	r	四元数微分 dZ 高八位
dVX_L	0x35	r	速度微分 X 轴低八位
dVX_H	0x36	r	速度微分 X 轴低八位
dVY_L	0x37	r	速度微分 Y 轴低八位

续表

dVY_H	0x38	r	速度微分 Y 轴低八位
dVZ_L	0x39	r	速度微分 Z 轴低八位
dVZ_H	0x3A	r	速度微分 Z 轴低八位

在传感器上电复位后,我们有限读取 0x00 寄存器的数值和 QMI8610 建立通讯,如果找不到设备则返回硬件错误。在建立通讯后按照我们的配置向相关的寄存器写入数据,之后读取数据和我们的预设数值进行比较,配置成功后返回成功。在读取寄存器时我们采用顺序读取,按照地址大小顺序读取传感器数值。

3.2.2 CC2500 配置

CC2500 在上电后也处于初始化状态,我们需要去配置相关的寄存器来配置信道宽度,信道,编码方式等参数来配置通信来实现通讯。CC2500 的寄存器配置较多,对于大部分寄存器可以通过单字节或者多字节的方式进行访问。为了简化开发我们可以使用 TI 公司的射频软件按照我们的需求自动配置寄存器,导出寄存器表格后进行配置。我们选择 2-FSK 的编码方式,信道宽度 200KHz,基础频率 2433MHz,信道 0, 2.39Kbaud 通信速率。相比较于初始化状态,我们需要配置的寄存器如下:

表 3-6 CC2500 配置寄存器

寄存器	寄存器值	描述
0x02(IOCFCG)	0x06	配置 GPIO0
0x08(PKTCTRL0)	0x05	自动配置数据位
0x0B(FSCTRL1)	0x08	频率同步控制位
0x0D(FREQ2)	0x5D	频率控制位, 高八位
0x0E(FREQ1)	0x93	频率控制位, 中八位
0x0F(FREQ0)	0xB1	频率控制位, 低八位
0x10(MDMCFG4)	0x86	带宽配置
0x11(MDMCFG3)	0x83	数据配置
0x12(MDMCFG2)	0x03	2-FSK 配置
0x15(DEVIATN)	0x44	2-FSK 配置
0x18(MCSM0)	0x18	状态机控制
0x19(FOCCFG)	0x16	频率偏执配置
0x25(FSCAL1)	0x00	频率同步配置

续表

0x26(FSCAL0)	0x11	频率同步配置
(PA_TABLE)	0xFF	配置发射功率为+22dbm

CC2500 的可以通过在寄存器基地址上增加地址偏移的方式来对寄存器进行单字节读写或者连续读写。其地址偏移分别为，单字节写不偏移，连续写偏移 0x40，单字节读偏移 0x80，连续读偏移 0xC0。需要注意的是某些寄存器只能通过连续读取的方式访问，比如 PARTNUM 寄存器，其基地址位 0x30，但是只能通过连续读的方式访问。

在传感器上电复位后，我们通过 Burst Read 的方式读取 0x30 寄存器的数值和 CC2500 建立通讯，如果找不到设备则返回硬件错误。在读取信息后按照我们的寄存器表对 CC2500 进行配置。配置完成后读取寄存器进行校验，校验正确则返回正确。

CC2500 内置了 64 字节的发送缓存区，其基地址为 0x3F，访问时一般通过连续写入方式进行访问，也就是在基地址的基础上加上一个 0x40 的偏移。CC2500 发送的每一个数据包包括 6 个部分，其中前导码位占 $8 \times n$ 个 bit，同步位占 16/32bit，长度位 8bit，地址位 8bit，数据为占 $8 \times n$ 个 bit，CRC 校验位占 16bit。

其中长度位地址位数据位是我们需要去编辑的。长度位包含的信息是我们信息的长度；地址位是目标 CC2500 的 8 位地址，在实际过程中可以忽略；数据也就是我们需要发送的数据。CRC 校验位由 CC2500 自动生成。CC2500 的数据帧结构如下图所示：

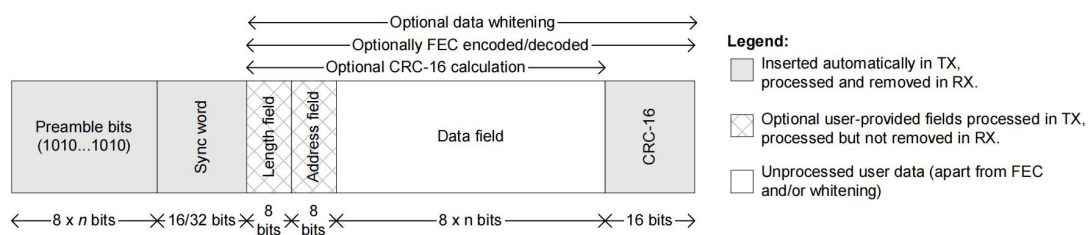


图 3-2 CC2500 数据帧结构

在本项目中，我们使用长度位不使用地址位。数据为 25 字节，包括三个 8 字节的欧拉角数据和一字节校验位。

第 4 章 算法设计

4.1 姿态算法

4.1.1 旋转矩阵的表述

姿态处理的最终目的是要得到用于描述物体姿态的旋转矩阵 R ，我们按照欧拉旋转定律，以欧拉旋转来推导旋转矩阵。

假设固定坐标系 $OXYZ$ 固连与大地，其中 OZ 轴指向垂直向下， OX 轴指向正东方向。假设动态坐标系 $oxyz$ 固连于硬件， ox 轴指向前进方向， oz 轴指向垂直硬件向下方向，在初始时刻两坐标系重合。假设在 $OXYZ$ 中有一绝对向量 \vec{P} ，其在 $oxyz$ 中的表述为 \vec{p} ，计算姿态的最终目的就是寻找一个矩阵 R ，使得 $\vec{P}=R\vec{p}$ 。按照欧拉旋转定理，我们需要规定旋转的次序和角度。在本项目中我们始终绕载体坐标系进行旋转，即按照固连硬件的坐标系 $oxyz$ 进行旋转；我们规定旋转顺序为 zyx 。三次旋转的角度分别为 o° 、 q° 、 p° ，依次为航向角 yaw ，俯仰角 $pitch$ ，翻滚角 $roll$ 。同时我们规定俯仰角的范围在 -90° 到 $+90^\circ$ 之间以保证姿态的正常运算。当俯仰角范围超过此数值时，我们可以通过传感器数值取相反数的方式来进行计算。则三次旋转的矩阵以此可以表示为：

$$R_z(o) = \begin{bmatrix} \cos(o) & \sin(o) & 0 \\ -\sin(o) & \cos(o) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$R_y(p) = \begin{bmatrix} \cos(p) & 0 & -\sin(p) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(p) & 0 & \cos(p) \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$R_x(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q) & \sin(q) \\ 0 & -\sin(q) & \cos(q) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

则三次旋转的叠加可以表示为三个矩阵的连乘：

$$R_{zyx}(o, p, q) = R_z(o) * R_y(p) * R_x(q) \quad (4-4)$$

我们令 $co=\cos(o)$ ， $so=\sin(o)$ ， $cp=\cos(p)$ ， $sp=\sin(p)$ ， $cq=\cos(q)$ ， $sq=\sin(q)$

则有：

$$\begin{aligned}
 & R_{zyx}(o, q, p) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(o) * \cos(p) & \cos(q) * \sin(o) + \cos(o) * \sin(p) * \sin(q) & \sin(o) * \sin(q) - \cos(o) * \cos(q) * \sin(p) \\ -\cos(p) * \sin(o) & \cos(o) * \cos(q) - \sin(o) * \sin(p) * \sin(q) & \cos(o) * \sin(q) + \cos(q) * \sin(o) * \sin(p) \\ \sin(p) & -\cos(p) * \sin(q) & \cos(p) * \cos(q) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} co * cp & cq * so + co * sp * sq & so * sq - co * cq * sp \\ -cp * so & co * cq - so * sp * sq & co * sq + cq * so * sp \\ sp & cp * sq & cp * cq \end{bmatrix} \quad (4-5)
 \end{aligned}$$

4.1.2 姿态预测

姿态的预测也就是利用角速度在前一刻姿态的基础上推导下一时刻的姿态^[13]，其在卡尔曼滤波中具有重要意义。旋转预测的意义在于我们利用数学物理方法，利用第 k-1 时刻的状态最优估计，推导 k 时刻状态的预测值。

在利用角速度推导的时候，我们有两种方法。第一种是在初始旋转矩阵 R 的基础上叠加另一个旋转矩阵 dR，第二种是我们将旋转分解到旋转之前的坐标系。当我们使用 dR 叠加 R 时，对空间中任意向量 P 有以下关系：

$$\vec{p1} = R * \vec{p0}$$

$$\vec{p2} = dR * \vec{p1}$$

所以我们有：

$$\vec{p2} = dR * R * \vec{p0}$$

我们得到：

$$R = dR * R \quad (4-6)$$

我们每两次角度更新的间隔在 20-50ms 左右，在这期间 MCU 转过的角度可以认为是一个小量。我们依旧规定旋转顺序位 zyx，三次旋转的角度分别为 do° 、 dq° 、 dp° 。在角度是小量的前提下，sin 值也可以认为是小量。我们忽略小量可以得到 dR 的表述形式。

$$dR = \begin{bmatrix} \cos(do) * \cos(dp) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(do) * \cos(dq) & 0 \\ 0 & 0 & \cos(dp) * \cos(dq) \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

所以我们可以基于此得到更新后的旋转矩阵 R。

但是我们要注意的，在忽略小量后的运算会破坏旋转矩阵的形式，持续的迭代运算会导致累计错误。所以我们只能在单词迭代的过程中利用公式来更新姿态矩阵。公式的形式比较复杂，但是在实际计算时涉及到的都是加法和乘法运算，不存在矩阵求逆等运算，对 MCU 的运算压力不大。

第二种是我们将旋转分解到旋转之前的坐标系，这种方法虽然不会导致累计误差，但是我们在运算过程中需要涉及到矩阵的求逆运算等，不能直接代入计算，需要利用合适的数学方法简化运算步骤。

我们设传感器角速度读数如下：

$$\text{Gyro} = \begin{bmatrix} \text{Gyro_x} \\ \text{Gyro_y} \\ \text{Gyro_z} \end{bmatrix}$$

其和航向角速度 Gyro_yaw，俯仰角速度 Gyro_pitch，翻滚角速度 Gyro_roll 的关系可以用下列的公式来描述：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \text{Gyro_x} \\ \text{Gyro_y} \\ \text{Gyro_z} \end{bmatrix} &= R_y(p) * R_x(q) * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{Gyro_yaw} \end{bmatrix} + R_x(q) * \begin{bmatrix} 0 \\ \text{Gyro_pitch} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Gyro_roll} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(p) * \sin(r) \\ 0 & \cos(r) & \sin(r) \\ 0 & -\sin(r) & \cos(p) * \cos(r) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Gyro_roll} \\ \text{Gyro_pitch} \\ \text{Gyro_yaw} \end{bmatrix} \quad (4-8) \end{aligned}$$

在计算过程中，yaw 角 pitch 角和 roll 角都是已知量，x 轴角速度 y 轴角速度 z 轴角速度是已知量，我们求姿态角角速度的充要条件是系数矩阵可逆。也就是矩阵的秩不为 0。

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(p) * \sin(r) \\ 0 & \cos(r) & \sin(r) \\ 0 & -\sin(r) & \cos(p) * \cos(r) \end{bmatrix} = \cos(p) * \cos(r)^2 + \sin(r)^2$$

事实上只有当俯仰角超过 90° 或者低于 -90° 时，才可能会发生这种情况。因此我们可以忽略这种情况。

4.2 卡尔曼滤波

我们主要利用卡尔曼滤波来进行姿态融合^{[14][15]}。

卡尔曼滤波(Kalman filtering)^{[16][17]}是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的影响，所以最优估计也可看作是滤波过程。数据滤波是去除噪声还原真实数据的一种数据处理技术，Kalman 滤波在测量方差已知的情况下能够从一系列存在测量噪声的数据中，估计动态系统的状态^{[18][19]}。由于它便于计算机编程实现，并

能够对现场采集的数据进行实时的更新和处理，Kalman 滤波是目前应用最为广泛的滤波方法，在通信，导航，制导与控制等多领域得到了较好的应用^[20]。

在本项目中我们分别对三个姿态角使用卡尔曼滤波。卡尔曼滤波包括了预测和更新两个过程。

我们以俯仰角为例，在 $t-1$ 时刻俯仰角的最优估计为 \tilde{x}_{t-1} 服从正态分布：

$$\tilde{x}_{t-1} \sim N(x_{t-1}, \sigma_{t-1}^2) \quad (4-10)$$

其中 x 为 $t-1$ 时刻俯仰角的真实值， σ_{t-1}^2 为估计的方差。

在 t 时刻对角度的估计可以认为是：

$$\hat{x}_t = \tilde{x}_{t-1} + \Delta t * dx \quad (4-11)$$

其中 Δt 我们固定为两次运算的时间间隔，在本例中为 50ms， dx 为角速度。 \hat{x}_t 也服从于正态分布。

$$\hat{x}_t \sim N(x_t, \sigma_{t-1}^2 + 0.0025 * \sigma_{dx}^2) \quad (4-12)$$

我们可以通过测量得到 σ_{dx}^2 的数，也就是角速度的方差。

同时我们基于加速度计的观测得到 t 时刻角度的观测值 z_t ，其也服从于正态分布，也就是：

$$z_t \sim N(x_t, \sigma_z^2) \quad (4-13)$$

其中 σ_z^2 为观测的协方差，也可以通过测量得到。

我们计算卡尔曼增益：

$$K = (\sigma_{t-1}^2 + 0.0025 * \sigma_{dx}^2) / (\sigma_{t-1}^2 + 0.0025 * \sigma_{dx}^2 + \sigma_z^2) \quad (4-14)$$

基于卡尔曼增益我们得到 t 时刻状态最优估计 \tilde{x}_t 和 t 时刻最优估计的方差：

$$\tilde{x}_t = \hat{x}_t + K * (z_t - \hat{x}_t) \quad (4-15)$$

$$\sigma_t^2 = (1 - K) * \sigma_{t-1}^2 \quad (4-16)$$

t 时刻最优估计 \tilde{x}_t 的表述为：

$$\tilde{x}_t \sim N(x_t, \sigma_t^2) \quad (4-17)$$

第 5 章 实验结果

经过实验，我们的硬件运行符合实验预期。电源电路在 3.0V-5V 的供电条件下都能输出 3.3V 为开发板供电，无啸叫等情况。MCU 和周围电路包括晶振，复位电路等工作正常；CP2102 可以正常和电脑和 MCU 通讯；与 QMI8610 的 IIC 通讯工作正常；与 CC2500 的 SPI 通讯也正常。锂电池充电电流实际为 800mA，充放电电路在设计的状态下工作并且 LED 可以正常指示。

软件设计方面，我们基于卡尔曼滤波的滤波算法可以比较完善地计算出我们设备的姿态。下图红色曲线是基于加速度计对姿态进行的观测结果，蓝色曲线是我们结合卡尔曼滤波对姿态进行处理完后的结果。我们的算法可以比较忠实地还原我们传感器的姿态，并且可以在很大程度减少由于外界干扰造成的误差。

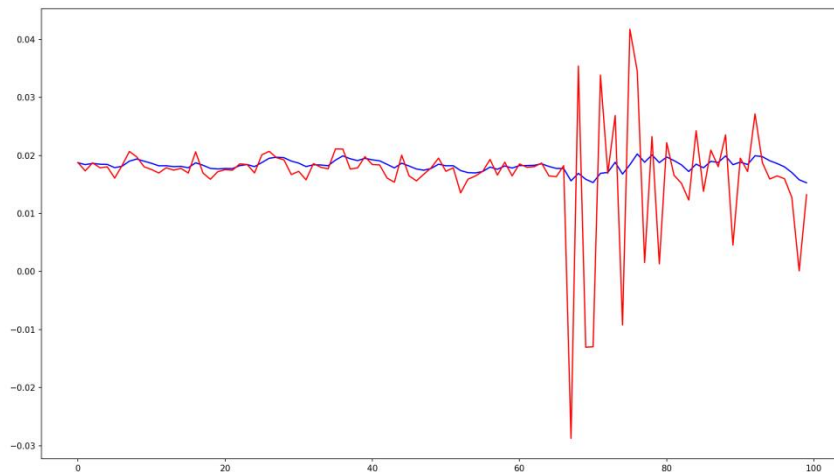


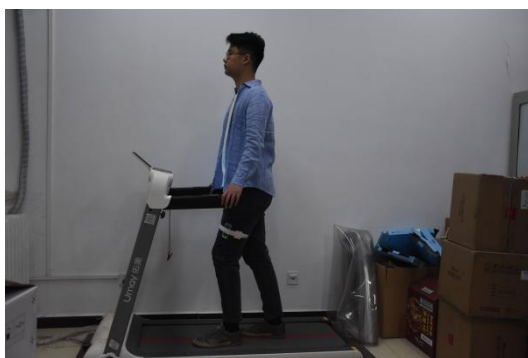
图 5-1 滤波效果网络

我们同时也测试了 QMI8610 内部自带的运动引擎，经过我们的测试，通过内部运动引擎积分的方式也可以较好的还原姿态。但是这种方式在实际过程中，随着积分时间的累加，会导致累计错误。

在无线传输上，我们在开阔地利用 TI 自带的软件进行了测试。在 10 米传输距离，+22dbm 发射增益下，我们传输信号的信噪比可以保持在-40dbm 以下。在 30 米传输距离，+22dbm 发射增益下，我们传输信号的信噪比可以保持在-70dbm 以下。对照 CC2500 所允许的-104dbm 的门限，传输距离符合我们的预期。

在运算速度方面，我们在 IIC 通讯上采用了 400KHz 的高速 IIC，SPI 采用 DMA 进行传输。经过实际测试，单周期运算的时间可以保证在 40ms 内，对比我们要求的 50ms，也就是 20Hz 的采样处理频率，我们的设计可以满足要求。

我们同时也进行了姿态的测试，在运动和静止的条件下，我们的传感器均可以比较良好的工作并且输出我们需要的数据。下图中红色为观测数据，蓝色为处理后数据。

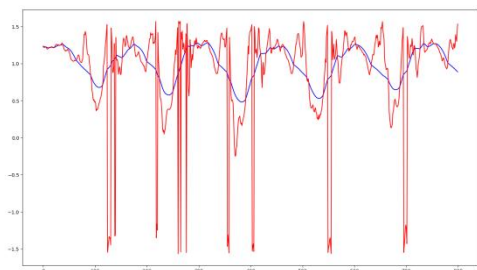


(a)踏步状态

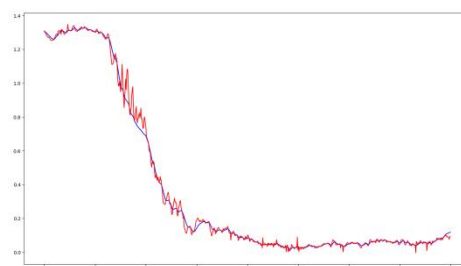


(b)深蹲状态

图 5-2 姿态测试



(a)踏步状态



(b)深蹲状态

图 5-3 姿态角度

结 论

本文在关键传感器的选择上，选择了一款由上海 QST 公司生产的惯性传感器 QMI8610，基于 STM32F411 平台，同时配备了 CC2500 无线传输芯片，提供了一套用于人体姿态采集处理和无线传输的整体解决方案，

我们的方案包括硬件和软件两个方面，经过我们的测试，我们的硬件能够很好地满足我们的设计需求，各项指标均很完善。我们的软件设计也可以很好地对传感器的数据进行处理，可以比较精准的得到我们的姿态。

参考文献

- [1]唐增. 人体姿态信息采集及其在平衡功能评价中的应用[D]. 杭州电子科技大学,2015.
- [2]徐甲栋, 陈强, 王洪杰. 基于姿态融合的实时跌倒检测系统研究[J].软件导刊,2022,21(04):144-150.
- [3]张荣辉, 贾宏光, 陈涛, 张跃. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J].光学精密工程,2008(10):1963-1970.
- [4]W. Cheng, L. Jiang, F. Liu, Y. Gan and N. Wei, "Vertical Attitude Measurement Based on Four Euler Rotations," 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Xiamen, China, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/GNCC42960.2018.9019057.
- [5]冯智勇, 曾瀚, 张力, 赵亦欣, 黄伟. 基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态角度测量 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2011,36(04):137-141.DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2011.04.023.
- [6]X. Lai, Q. Liu, W. Wang and L. -k. Li, "Research on posture recognition based on Kalman filter and quaternion," 2012 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Dalian, China, 2012, pp. 211-216, doi: 10.1109/ICSSE.2012.6257178.
- [7]M. A. Mousse, C. Motamed and E. C. Ezin, "A multi-view human bounding volume estimation for posture recognition in elderly monitoring system," International Conference on Pattern Recognition Systems (ICPRS-16), Talca, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1049/ic.2016.0026.
- [8]X. Pengfei, C. Shiwen and Y. Zhang, "Design of Pose measurement and Display system based on STM32 and MPU6050," 2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS), Chongqing, China, 2021, pp. 71-74, doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00021.
- [9]P. Xie, W. Wu and Y. Zhang, "Design of human-computer interaction gesture operation based on STM32 and MPU6050," 2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), Shenyang, China, 2022, pp. 420-423, doi: 10.1109/ICPICS55264.2022.9873595.

- [10]刘振文,邓毅华,彭友斌.基于 CC2500 的 2.45GHz RFID 系统设计[J].电子技术应用,2008,34(07):76-78+81.
- [11]宋玉琴,姬引飞,朱紫娟.基于 CC2530 和 CC2592 集群温室环境监测系统的设计[J].现代电子技术,2015,38(22):69-72.DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2015.22.020.
- [12]于波,胡毅,文江涛.基于 CP2102 的 USB 接口设计[J].国外电子测量技术,2007(03):40-42.DOI:10.19652/j.cnki.femt.2007.03.016.
- [13]原玉磊,蒋理兴,刘灵杰.罗德里格矩阵在坐标系转换中的应用[J].测绘科学,2010,35(02):178-179+119.DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2010.02.005.
- [14]张欣.多旋翼无人机的姿态与导航信息融合算法研究[D].中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2015.
- [15]刘春阳,徐军领,程洪涛,王东方,薛玉君.MPU9250 传感器的姿态检测与数据融合[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(04):14-17+22+5.DOI:10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2015.04.021.
- [16]陈航科,张东升,盛晓超,王凯.基于 Kalman 滤波算法的姿态传感器信号融合技术研究[J].传感器与微系统,2013,32(12):82-85+89.DOI:10.13873/j.1000-97872013.12.009.
- [17]卢艳军,陈雨荻,张晓东,张太宁.基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(09):281-288.DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2006656.
- [18]张栋,焦嵩鸣,刘延泉.互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J].传感器与微系统,2017,36(03):62-65+69.DOI:10.13873/J.1000-9787(2017)03-0062-04.
- [19]陆兴华.姿态融合滤波的无人机抗干扰控制算法[J].传感器与微系统,2016,35(07):116-119.DOI:10.13873/J.1000-9787(2016)07-0116-04.
- [20]李景辉.基于多传感器信息融合的人体姿态识别研究[D].山东大学,2014.

致 谢

欲买桂花同载酒，终不似，少年游。

感谢つぶらや えいじ以及ウルトラマンティガ，他们是光之巨人，在我童年时第一次赋予了我光；并且这一束光指引我到现在。

附录

无