



**天津中德应用技术大学**  
**Tianjin Sino-German University of Applied Sciences**

## **本科生毕业设计**

**基于 MPU6050 的机器人末端抖动测量系统设计**  
**Design On End Jitter Measurement System Of Robot Based**  
**On MPU6050**

姓 名	<u>李思远</u>
学 院	<u>智能制造学院</u>
专 业	<u>自动化</u>
指导教师	<u>张兴会、刘通</u>
职 称	<u>教授</u>
完成时间	<u>2021.06.04</u>



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计

基于 MPU6050 的机器人末端抖动测量系统设计

姓 名	李思远
学 院	智能制造学院
专 业	自动化
指导教师	张兴会、刘通
职 称	教授
完成时间	2021.06.04

**天津中德应用技术大学**  
**本科生毕业设计（论文）的声明**

本人郑重声明：所提交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，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，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

年 月 日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

年 月 日

## 摘 要

随着智能制造的不断发展，工业机器人逐渐代替了手工劳动者，成为工业生产中的主角，同时在生产任务中对其精度要求也越来越高。随着工业机器人作业环境日趋复杂，通过穷尽外界影响因素并对其修正很难实现，而通过测量工业机器人末端姿态对其抖动进行补偿，则是一种较为便于实现的方法。

本文主要设计了一种工业机器人末端抖动测量系统，该系统以 STM32F407 作为下位机的控制核心，以 MPU6050 作为姿态测量传感器，对机器人末端轴向加速度和角速度进行测量，并通过姿态融合算法导出欧拉角数据；下位机通过 ESP8266 将轴向加速度、角速度和欧拉角数据发送至上位机，基于 LabVIEW 开发的上位机程序对采集数据进行显示，为减小测量误差，结合 MATLAB 混合编程，加入卡尔曼滤波函数，对采集数据进行再处理与显示。

最后选择固高控制器和川崎机器人本体作为实验对象，结合空载、模拟带负载，以及在无滤波、加入卡尔曼滤波情况下，设计对比观测实验，实验结果验证了系统功能的正确性，并验证了在加入卡尔曼滤波后，标准差相应减小，测量曲线更平滑。

**关键词：**机器人；抖动测量；MPU6050；LabVIEW；卡尔曼滤波

## ABSTRACT

Along with the developing intelligent manufacturing industry, manual laborers are gradually replaced by industrial robots, which are slowly taking over the dominant position in industrial production. In the process of carrying out production tasks, the requirements for its accuracy in work are becoming higher and higher. In terms of methods to improve the accuracy of robot work, it is relatively easier to achieve by measuring and compensating the jitter at the end of an industrial robot than by exhausting external influences and making corrections.

This paper focuses on the design of an industrial robot end-jitter measurement system in which the STM32F407 is used as the control core of the lower computer. The posture measurement sensor in this system is MPU6050, which can measure the axial acceleration and angular velocity at the end of the robot, and can also derive Euler angular data by executing the posture fusion algorithm. The nine data, axial acceleration, angular velocity and Euler angular data, are sent from the lower to the upper computer by the ESP8266. The collected data are displayed by the LabVIEW-based part of the upper computer program. In order to minimise environmental and measuring device errors, the upper computer program is programmed in a hybrid way combining LabVIEW and MATLAB. The collected data can be reprocessed and displayed in the Kalman filter function developed based on MATLAB.

Finally, the controller of Googol and the robot body of Kawasaki were used as experimental objects. The experimental design was a combination of no-load and simulated with load, as well as a combination of no filtering and the addition of Kalman filtering, and a comparative observation experiment was designed by combining the results of different experimental processing. The correctness of the system functionality is verified by the experimental results, and the Kalman filter is verified to be effective in reducing the environmental and measuring device errors, with the Kalman filter smoothing out the data curve.

**Keywords:** Robotics; Jitter Measurement; MPU6050; LabVIEW; Kalman Filtering

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 本课题研究的的意义.....	2
1.4 本文的主要研究内容及结构安排.....	2
第二章 总体设计方案.....	4
2.1 系统整体功能介绍.....	4
2.2 系统整体设计架构.....	5
2.3 测量系统工作原理.....	5
第三章 系统硬件设计.....	7
3.1 ARM 控制器.....	7
3.2 WiFi 模块.....	9
3.3 MPU6050 模块.....	10
第四章 系统软件设计.....	12
4.1 ARM 项目工程设计.....	12
4.1.1 抖动测量函数.....	12
4.1.2 数据传输函数.....	15
4.2 上位机程序设计.....	16
4.2.1 MATLAB 卡尔曼滤波函数.....	16
4.2.2 LabVIEW 界面设计.....	18
第五章 系统运行调试与结果分析.....	19
5.1 系统实物与运行调试.....	19
5.2 系统运行结果及分析.....	20
第六章 总结与展望.....	32
6.1 系统设计总结.....	32
6.2 系统设计展望.....	32

参考文献.....	34
致谢.....	35

## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究背景

随着工业机器人的研究水平不断提升,其在汽车制造、机械加工、码垛、搬运、装配、喷涂等作业任务中得到了更加广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于加工成品精度的需求提高,部分工种又工作于有毒、有害的恶劣环境需要机器代替,同时为了提升生产效率,在这些外部条件的驱使下,企业开始采用工业机器人代替工人进行工业生产,致使工业机器人在这二十年内发展迅速。而随着工业机器人技术的发展,也伴随着大量外国厂商的崛起产生了一众在其地区内富有影响力的工业机器人公司,成为了地方支柱性产业。

但同时也由于工业机器人具有更广阔的应用前景,对其工作条件的要求变得更加严苛,客户对产品的质量要求也有所提升,这就使得工业机器人不得不在某些极端工作条件下进行工作,而在这种情况下就有可能导致其工作精度下降,使之无法完成高精度的焊接、激光切割、打磨、抛光等精细工作。为了提升工业机器人可工作范围,就需要实现机器人在末端夹具过重、运行速度超出调节范围等极端条件下的应用。而这样就需要提高工业机器人工作精度,从机器人本身入手<sup>[2]</sup>,对工业机器人末端的抖动信号进行采集、接收、处理,由此便可为工业机器人运动控制算法优化提供数据基础,实现对抖动的抑制,使之工作范围得以提升。

### 1.2 国内外研究现状

作为新兴的加工、制造业大国,我国更是面临着千载难逢的机遇。长期以来,我国都面临着人口众多、劳动力价格低廉、生产技术水平相对落后的情况,但随着工业机器人及其相关技术的发展<sup>[3]</sup>,加之人口老龄化对我国劳动人口数量带来的影响,使得人工成本增加,工作环境改变,市场竞争日趋多元化,这样的条件都促使着生产方式向现代化发生转变,最集中的体现便是工业生产自动化体系的形成,这其中起到主要作用的便是工业机器人的发展<sup>[4]</sup>。

随着对工业机器人研究的深入,在工业机器人位姿测量的研究上,已经有了一些行之有效的手段和方法。自动经纬仪作为一种具备较高精度的测量设备,的确能够实现位姿的测量,但也由于其所具备的高精度,设备体积较大,自动经纬仪的成本自然也并不低,并且安装测量的步骤也显得比较繁琐,再加之其只能测量静态数据,导致在位姿测量时并不能高效地实现目的<sup>[5]</sup>。球杆仪相对而言操作就显得较为简便,成本也相对较低,能够实现

对距离进行高精度地测量<sup>[6]</sup>。光栅尺可以对直线位移或角位移进行检测，并能够输出数字信号，方便对数据进行处理，同时其还具有响应速度快，测量精度高的优点，但本体体积较大，在测量位姿时对工作空间范围要求较大<sup>[7]</sup>。三坐标测量机（CMM，Coordinate Measuring Machine）作为一种空间测量的仪器，能够对待测量的各点坐标进行测量，且其具有高精度和高可靠性，但也由于其体积过大，同时不能对动态数据进行测量，降低了位姿测量的效率<sup>[8]</sup>。激光跟踪仪能够对机器人末端位姿进行跟踪，因其测量精度高，抗干扰性好，在位姿测量上得到了广泛的应用，但由于其只能测量单轴数据，且研究成本较高，就当下的研究情况而言难以普及<sup>[9-10]</sup>。通过测量电机编码器值和力矩反馈值，经过计算得到末端位姿的状态，但由于数学模型较为复杂，提高了数据处理的难度<sup>[11]</sup>。六轴传感器作为一种测量三轴加速度和三轴角速度的器件，在具备一定精度的同时还具有采集频率高，体积小成本低，输出数据丰富等优点，这些特点都满足了系统对姿态测量装置的要求。

### 1.3 本课题研究的目及意义

该系统作为一个基于 ARM 的机器人末端抖动测量系统，以 STM32 开发板为核心，通过姿态测量模块测得工业机器人三轴方向上的加速度变化和角速度变化，并通过其内置的相应算法将变化量转化为其当下姿态状态，将以上数据送至姿态融合解算库就能够将测得数据进行转换，形成姿态矩阵，并将该数据经由工作在站点模式的收发模块发送至上位机，上位机将数据存储至相关文件，上位机软件从文件中将数据进行读取，读取后的数据经过卡尔曼滤波脚本进行数据处理<sup>[12]</sup>，处理后的数据通过人机交互界面将数据进行显示。

本设计以测量工业机器人末端抖动量为目的，采用了相较于其他精度标定仪器，体积更小、成本更低、测量轴向更多的姿态测量模块进行测量，旨在提高工业机器人的工作精度，使之能够在更多的场合进行作业，提高生产效率和产品质量。该系统还能够在成本相对较低的前提下提供较高的测量精度和丰富的数据，人机交互界面的波形显示也使得用户能够更直观的对工业机器人末端抖动量进行观测，为分析调试提供了便利。通过对数据的实时接收采集，用户能够更便捷的对目的信息进行读取。在工业机器人工作精度的研究上通常以数学模型和动力学的方法入手，该系统的测量将能够为二者的融合提供数据支撑，使得工业机器人工作精度能够得以提升<sup>[13]</sup>。

### 1.4 本文的主要研究内容及结构安排

该系统将姿态传感器采集到的三轴加速度数据和三轴角速度数据通过姿态融合实现

数据形式的转换，并编写数据传输函数完成已有数据的传输，完成对整体机器人末端抖动测量系统的搭建后，在保证其稳定运行的前提下，通过编写算法将其数据进行处理，并对系统出现的问题加以改进，使其得以完善、优化，由此便可使得该系统的应用价值得到更大提升。

本文的内容安排如下：

第一章，绪论部分。简述课题研究背景、目的及意义，国内外研究现状，论文主要贡献及结构安排。

第二章，机器人末端抖动测量系统的总体设计方案。主要对系统的设计思路进行介绍，并对该测量系统原理进行简要说明。

第三章，机器人末端抖动测量系统的硬件选型。主要是对硬件选型方案以及硬件原理功能进行说明，其中主要是对 ARM、姿态模块、收发模块等进行介绍。

第四章，机器人末端抖动测量系统的软件设计。主要是对系统软件设计进行具体描述，以 ARM 为控制核心对姿态测量、姿态融合、无线传输、数据处理等函数进行编写，以及上位机的混合编程。

第五章，机器人末端抖动测量系统的实物制作与调试及抖动数据测量实验结果及分析。主要是对整个系统的实物图介绍和调试过程进行说明，设计机器人末端抖动测量实验，并对机器人末端抖动测量系统所采集数据在上位机进行读取并分析。

第六章，机器人末端抖动测量系统设计总结与展望。主要是对已完成的设计中存在的不足和完善的方向进行说明。

## 第二章 总体设计方案

### 2.1 系统整体功能介绍

本系统将对机器人末端抖动数据进行采集、接收和处理。为实现对抖动信号的采集，采用了 MPU6050 姿态测量模块，该模块将机器人末端各轴向上的加速度变化量和角速度变化量进行采集，将抖动量转换为数字量信号，并通过相应程序进行姿态解算，将数据整理成便于运算和理解的形式。为实现上位机对抖动信号的接收，采用了收发模块，该模块与上位机建立连接，以实现上位机对该测量系统所得数据的接收，收发模块将数据以组的形式发送至上位机，并且将原始数据和经简单处理后的数据一同发送至上位机，上位机将数据存储至相应文件中。为实现对系统测量得到数据的处理，上位机先将文件中的数据读取，通过 MATLAB 进行脚本编程，再利用 LabVIEW 软件对脚本进行调用，同时将处理后的数据进行显示，实现系统的人机交互，对抖动数据进行可视化分析。

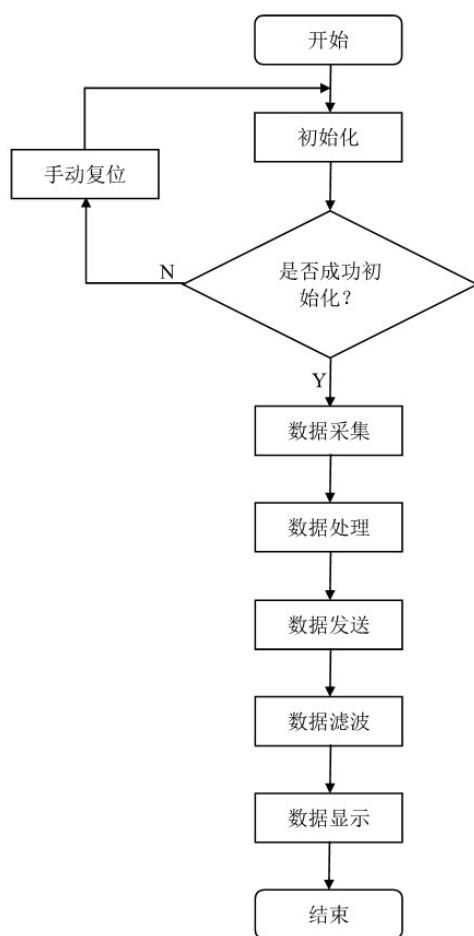


图 2-1 系统运行流程图

## 2.2 系统整体设计架构

该测量系统在软件层面上先对上电后的各器件进行复位以实现硬件初始化，并将各参数状态设置为工作状态，然后通过姿态测量模块对机器人末端抖动量进行采集，采集到的数据通过内置的模数转换器实现转换，得到便于处理的数据形式，将数据经 IIC 总线进行数据传输至 ARM，随后 ARM 就能进行数据处理，再将数据进行打包分组经 USART 串口发送至收发模块，收发模块就会将打包后的数据发送至上位机，经网络调试软件将数据存储至文件中，使之能通过脚本进行数据处理，并进行显示在上位机的人机交互界面中，用户将采集到的数据进行直接观测，同时通过上位机人机交互界面所呈现的数据对机器人末端抖动进行分析。

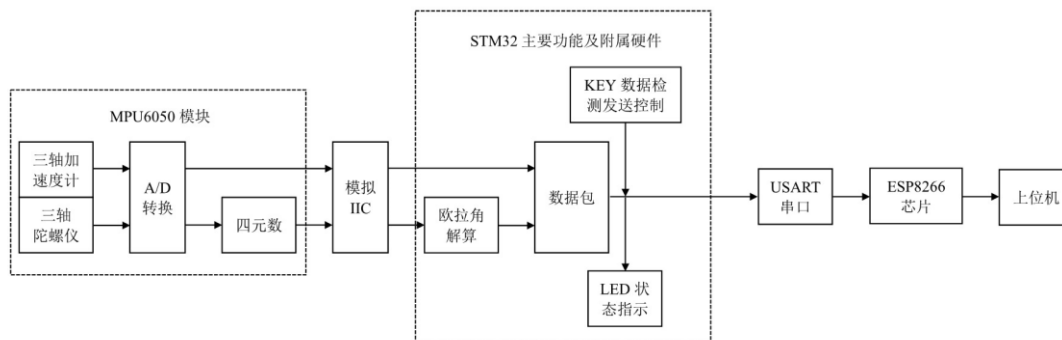


图 2-2 系统整体架构图

## 2.3 测量系统工作原理

该测量系统通过 MPU6050 内部集成的一个三轴加速度计对机器人末端的 X、Y、Z 三轴方向上的加速度变化进行测量，为通过对三轴上加速度变化量的测量，其内部还集成有一个三轴陀螺仪，负责将 X、Y、Z 三轴的角速度变化进行测量，其集成的可扩展的数字运动处理器可以进行姿态融合解算，其内部还附带有六个 16 位模数转换器将测量到的模拟量转换为数字量，方便后续处理，由于 MPU6050 采用的是 16 位有符号数作为原始数据的数据类型，所以该数据最小为二进制数的-7FFF，即-32767，最大为二进制数的 7FFF，即 32767，通过显示数值和量程进行换算转换为实际数值，通过各个方向上的实际数值进行矢量合成，得到实际三维空间上的加速度和角速度的方向和大小。随后通过数据收发模块与上位机建立无线通讯，将数据发送至上位机，并由上位机将所得数据进行保存，通过上位机算法对数据进行处理，经 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程后的人机交互界面进行显示，混合编程包含 MATLAB 内编写好的卡尔曼滤波脚本和 LabVIEW 内编写的人机交互

互界面，分别将得到的数据进行滤波处理和显示。通过对显示的数据的读取，对机器人末端抖动情况进行判断。

### 第三章 系统硬件设计

姿态角的精确解算是该机器人末端抖动测量系统能够实现功能的关键。系统硬件的选型就显得尤为重要,这就要求姿态传感器检测精度要相对较高,且测量频率应相对较高,以保证数据上的连贯性和精确度,这样才能为姿态解算提供有效的数据支撑。同时还要求在传输数据时能有较好的及时性,这样在数据传输至上位机展示给用户时就能够保证其抖动量的呈现相对及时。除此之外还应保证其具有一定的抗干扰能力和较低的功耗,在数据传输中,不可避免的会由器件间或其他设备发出的电磁波干扰而出现数据受影响的情况,虽然不能保证完全避免扰动,但可以尽量降低其影响,在降低其影响的同时不免会增加系统功耗,这就要求系统硬件功耗相对较低,以保证其能够支持系统正常运行。

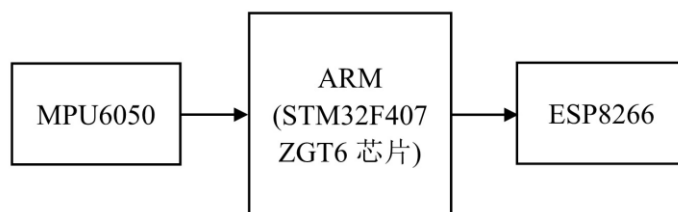


图 3-1 下位机硬件架构图

#### 3.1 ARM 控制器

ARM 作为该机器人末端抖动测量系统的核心,负责接收姿态传感器测得的抖动信号并将其传送至收发模块使得其可以完成数据的发送,所以在系统运行过程中为保证能够得到理想的结果,对 ARM 的性能就有所要求,在保证采集数据准确的前提下,还应保证其具备较快的运行速度和较低的功耗。

STM32 是意法半导体集团推出的系列产品,该系列中的产品基于 ARM Cortex-M0, M0+, M3, M4 和 M7 内核,并以其使用用途非常广泛的 ARM 内核、丰富的模块接口、多样的开发工具、丰富的资料、较低的功耗和极强的实时性成为了当下较为主流的嵌入式开发板之一。由于该系统运行须保证采集数据准确这一前提,所以在选择上更偏重于以 Cortex-M4 为内核的 STM32F4 系列,其采用了自适应实时存储器加速器 (ART, Adaptive Real-Time Memory Accelerator) 技术,使得其在工作频率小于 168MHz 时可实现零等待执行,而工作频率达到 168MHz 时就意味着系统可以获得 210DMIPS (每秒执行百万条整数运算指令, Dhrystone Million Instructions executed Per Second) 的处理能力,这就大大提升

了程序的执行效率，满足了该系统对控制核心高性能的要求，同时其集成了单周期数字信号处理指令（DSP，Digital Signal Processing）和浮点运算单元（FPU，Float Point Unit），对计算能力进行了极大的提升，其内置的可变静态存储控制器（FSMC, Flexible Static Memory Controller）采用 32 位多重高级高性能总线（AHB，Advanced High performance Bus）矩阵，明显提高了访问速度，外加更快的模数转换速度，满足了系统对数据处理的要求，极低的模数转换（ADC，Analog Digital Converter）/数模转换（DAC，Digital Analog Converter）工作电压和极低的功耗，其功耗约为 238uA/MHz。该测量系统在 ARM 的选型上便选择了 STM32F407，开发板主芯片为自带 1M 字节 FLASH（闪存，Flash Memory）的 STM32F407ZGT6，并且还外扩有 1M 字节 SRAM（静态随机存取存储器，Static Random-Access Memory）和 16M 字节的 FLASH，由于模块测量得到的原始数据和姿态解算后的数据量较为庞大，有了这样的硬件配置就满足了对该机器人末端测量系统对内存的需求和对数据的存储要求。

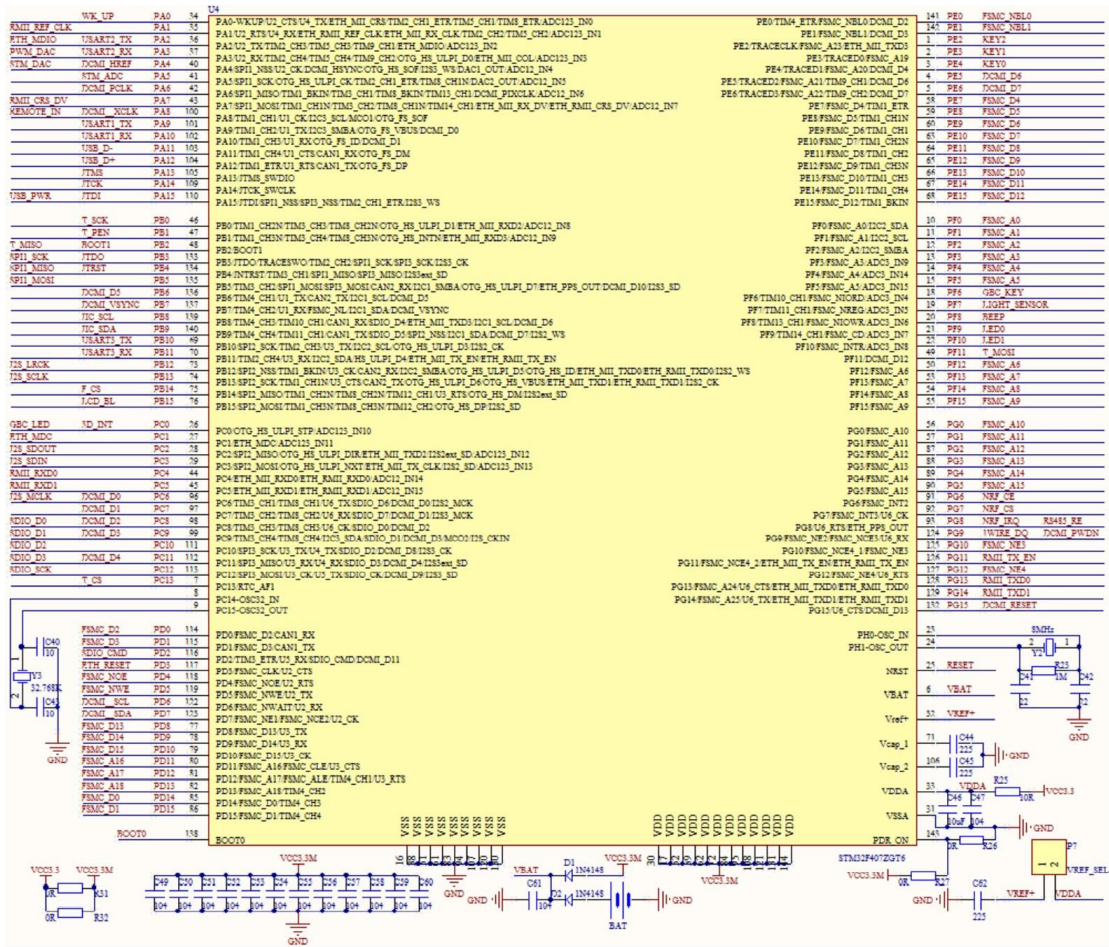


图 3-2 STM32F407ZGT6 芯片外围电路图

## 3.2 WiFi 模块

WiFi 模块作为该机器人末端抖动系统的收发模块，负责将数据发送至上位机，所以在系统运行过程中收发模块应具备较好的实时性和数据传输能力。

WiFi 模块通常分为三类，通用 WiFi 模块、路由器方案 WiFi 模块和嵌入式 WiFi 模块，通用 WiFi 模块由于其 WiFi 协议栈和驱动是在 Android、Windows、IOS 系统中运行的，并不适合该测量系统的要求，而路由器方案 WiFi 模块则要求采用 Linux 系统并对硬件要求较高，所以路由器方案 WiFi 模块也不可行。嵌入式 WiFi 模块中的 ESP8266 模块作为一款串口-无线（UART-WiFi）透传模块，因其兼具超低功耗和高性能，使得其在众多嵌入式 WiFi 模块中脱颖而出，成为了当下较为主流的收发模块，并且随着其不断发展，模块支持的功能也逐渐丰富。ESP8266 模块采用能够与 STM32F407ZGT6 芯片进行串口通讯的连接方式，其中模块的 RXD（接收数据引脚，Receive External Data）与 STM32F407ZGT6 芯片的 PB10 引脚相连接，PB10 引脚作为 STM32F407ZGT6 芯片的 TXD 功能引脚，模块的 TXD（发送数据引脚，Transmit External Data）与 STM32F407ZGT6 芯片的 PB11 引脚相连接，PB11 引脚作为 STM32F407ZGT6 芯片的 RXD 功能引脚，模块的 VCC 引脚与 5V 电源相连接。该模块所支持的透传即透明传输（Pass-through）是指在通讯过程中不对传输内容进行任何改变，内置的 TCP/IP（传输控制/网际协议，Transmission Control Protocol/Internet Protocol）协议栈能够保证其能够同时实现传输和互联网的功能，外加 IEEE 802.11b、IEEE 802.11g、IEEE 802.11n 三种无线标准能够实现模块最高可达 108M 的数据传输速度，该模块同时还支持三种 WiFi 工作模式，WiFi STA（Station）模式、WiFi AP（Access Point）模式和 WiFi STA+ WiFi AP 模式，其中在 WiFi STA 工作模式下是指模块作为站点通过路由器连接互联网，由手机或电脑实现与模块的数据传输，而 WiFi AP 工作模式下则是指模块本身作为热点通过与手机或电脑进行连接，实现局域网内的数据传输，WiFi STA+ WiFi AP 工作模式下则会使上述两种情况并存。在上述三种工作模式中还有三种子工作模式可供选择，分别是 TCP Server 模式、TCP Client 模式、UDP 模式，TCP Server 模式以有向连接协议进行连接并作为服务器等待来自客户端的请求后传回结果，TCP Client 模式以有向连接协议进行连接并作为客户端发送连接请求后等待服务器响应，这二者数据传输都以数据流的方式进行通讯，而 UDP 模式下进行无向连接协议，并且可以见数据以数据包的形式直接发送。同时 ESP8266 模块通过 AT（Attention）指令集进行操作，AT 指令集主要包含四种指令结构，测试指令结构为 AT+<CMD>=?，测试指

令可以对已设置的指令参数进行测试，查询指令结构为 AT+<CMD>?，这种指令可以对已设置的指令参数或模块内指定信息进行查询，设置指令结构为 AT+<CMD>=<...>，<...>，...，设置指令可以对模块内用户可自定义的参数的部分进行设置，以实现目的功能，执行指令结构为 AT+<CMD>，该类型指令与设置指令功能的使用条件相反，可以对模块内无参数部分的功能进行设置，而对于不同的指令，其对应的四种指令结构的适用性也不同，这就极大的丰富了指令操作的灵活性。AT 指令是一种不需要具体编程的开发方式，可以使用电脑给模块发送相应的指令就可以进行控制，这样就能够实现在系统运行时的无线传输和控制，提高了系统的适用范围和系统的可操作性。综上所述，ESP8266 模块在大大提高了在保障传输速度的同时还能够保证高性能低功耗，ESP8266 就成为了收发模块的不二之选。

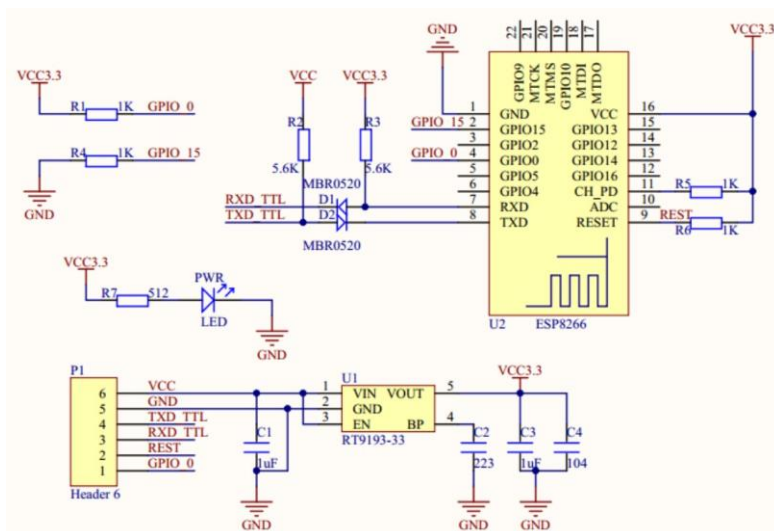


图 3-3 ESP8266 芯片外围电路图

### 3.3 MPU6050 模块

MPU6050 模块作为该测量系统的姿态测量模块，如果将 ARM 比作该测量系统的“心脏”，那么将 MPU6050 模块比作该测量系统的“大脑”也毫不为过，毕竟没有数据作为支撑，整个测量系统的设计便毫无意义。想要胜任该测量系统的“大脑”，对数据进行全面且精确的检测是极为关键的，而 MPU6050 作为全球首款整合性 6 轴运动处理组件并能够活跃至今，和它全面且强大的功能是离不开的。该模块的 IIC\_SCL 引脚与 STM32F407ZGT6 芯片的 PB8 引脚相连接，STM32F407ZGT6 芯片的 PB8 引脚作为 IIC 总线的 SCL（串行时钟线，Serial Clock Line）信号线，IIC\_SDA 引脚与 STM32F407ZGT6 芯片的 PB9 引脚相连接，STM32F407ZGT6 芯片的 PB9 引脚作为 IIC 总线的 SDA（串行数据线，Serial Data

Line) 信号线, MPU\_INT 引脚与 STM32F407ZGT6 芯片的 PC0 引脚相连接, VCC 引脚与 3.3V 电源相连接, MPU\_AD0 引脚与 GND 相连接, 这样就将 MPU6050 模块的 IIC 从机地址设置为 0x68。MPU6050 模块内部整合了一个三轴加速度计和一个三轴陀螺仪可以对被测物体各个方向上的加速度和角速度变化进行测量, 其中加速度计量程范围为  $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$  和  $\pm 16g$ , 也就意味着 MPU6050 模块对三轴加速度测量范围最高可达  $\pm 156.8m/s^2$ , 而陀螺仪也同样具有  $\pm 250^\circ/s$ 、 $\pm 500^\circ/s$ 、 $\pm 1000^\circ/s$  和  $\pm 2000^\circ/s$  的广阔量程, 在能够涵盖机器人末端抖动变化范围的前提下, 三轴加速度计和三轴陀螺仪仍旧分别能提供最高 16384LSB/g (最低有效位, Least Significant Bit) 和 131.072LSB·s/° 的测量精度, 搭配其自带的数字运动处理器 (DMP, Digital Motion Processing) 可以降低系统在进行融合数据时的计算量, 并且自带 1024 字节的 FIFO (先进先出式存储器, First Input First Output) 能够在系统运行时降低功耗, 该模块还移除了加速度器与陀螺仪轴间敏感度, 降低了参数设定时对数据测量的影响, 同时也能够对传感器的漂移进行一定遏制, 模块内部还内建运作时间偏差与磁力感测器校正演算技术, 使得测得数据后免除了校正的操作, 大大节省了开发的复杂度, 外加其高达 400KHz 的 IIC 通信接口, 使得该系统的检测数据更加连贯, 进一步提升了系统的可信度。由此 MPU6050 模块就可以实现低功耗的同时减小误差, 为该机器人末端抖动检测系统的测量提供更高的可信度。

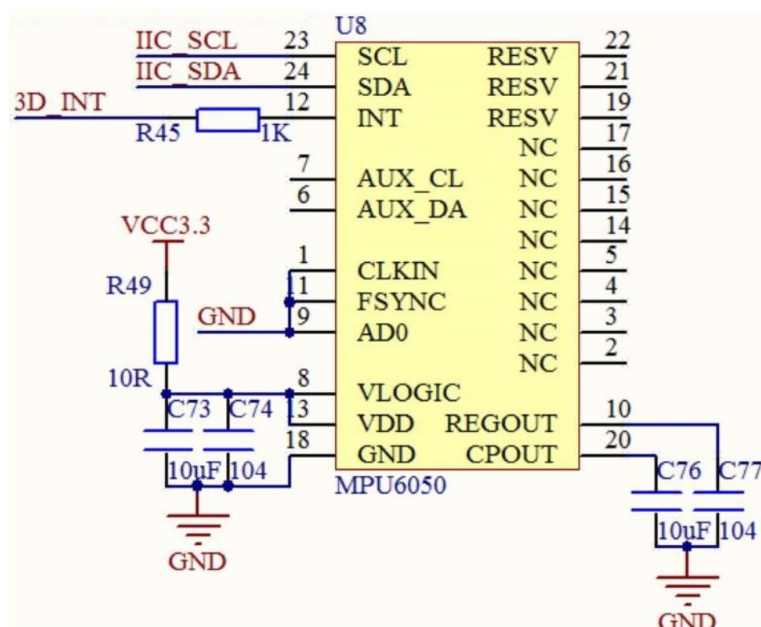


图 3-4 MPU6050 芯片外围电路图

## 第四章 系统软件设计

本章着重于实现系统运行和相应代码的说明，保证系统能够成功运行，包括数据的采集并且能够实现其顺利传输，以及上位机的处理及呈现。系统软件设计包括 ARM 项目工程设计和上位机交互界面程序，驱动硬件实现系统功能，完成机器人末端抖动数据采集和数据呈现。

### 4.1 ARM 项目工程设计

ARM 项目工程设计时采用的工具是 MDK5 软件，通过 C 语言完成对项目的编写，其中最主要的是抖动测量函数和数据传输函数。

#### 4.1.1 抖动测量函数

抖动测量函数主要实现的是通过 MPU6050 模块对机器人末端抖动数据进行测量并将数据进行提取，便于数据传输函数的执行。

先将 MPU6050 模块进行初始化，对模块的参数进行设置。首先将 IIC 总线进行初始化，将 MPU6050 模块进行复位，再对 MPU6050 模块进行唤醒，将其内置的位于 0x1C 的三轴加速度计配置寄存器的第 3 位和第 4 位设置为 0，配置加速度计工作在 $\pm 2g$  量程范围内，将其内置的位于 0x1B 的三轴陀螺仪配置寄存器的第 3 位和第 4 位设置为 0，配置陀螺仪工作在 $\pm 250^\circ/s$  量程范围内，将采样率设置为 50Hz，并关闭所有中断和 IIC 主模式的工作模式，将位于 0x23 的 FIFO 使能寄存器设置为 0x00，使得 FIFO 被关闭，把位于 0x37 的 INT 引脚/旁路有效使能配置寄存器设置为 0x80，即 INT 引脚的逻辑电平为低电平，通过位于 0x75 的设备地址标识寄存器对地址进行读取，由于硬件连接时 AD0 引脚被赋予了低电平，故该模块地址为 0x68，将位于 0x6B 的电源管理寄存器 1 设置为 0x01，这样就将 X 轴陀螺仪作为系统时钟源参考，最后再将位于 0x6C 的电源管理寄存器 2 设置为 0x00，使得各轴加速度计和陀螺仪处于工作状态。

姿态解算函数会使得 ARM 进行初始化状态并开始进行数据采集，并把数据进行融合解算。这一部分函数中先将数据检测和发送标志位设定为开启状态，并对相应变量进行声明，随后设置系统时钟，初始化延时函数，将 USART 串口波特率初始化为 115200，再将 LED 和按键进行初始化，执行 MPU6050 初始化函数，使得其工作在目标状态，将 MPU6050 的 DMP 进行初始化，若其处于正常状态则正常执行后续程序，反之则会使得工作状态指示灯发出警报状态。扫描标志位设定为按键处理函数的返回值，使得开发板上的按键能够

对系统抖动测量和发送的标志位进行设置，进而对系统的工作状态进行控制，当 KEY0 被按下时，将会开启系统抖动的测量和发送，当 KEY1 被按下时，将会关闭系统抖动的测量和发送。进入工作状态后会进行 DMP 工作状态的判断，若 DMP 工作状态正常且上报标志位开启则会进行 DMP 处理后数据的读取，即欧拉角的读取。首先将 DMP 输出的四元数转换为浮点数，计算公式如下：

$$Q_0 = \text{quat}[0] \div 2^{30} \quad (\text{式 4-1})$$

$$Q_1 = \text{quat}[1] \div 2^{30} \quad (\text{式 4-2})$$

$$Q_2 = \text{quat}[2] \div 2^{30} \quad (\text{式 4-3})$$

$$Q_3 = \text{quat}[3] \div 2^{30} \quad (\text{式 4-4})$$

欧拉角计算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{ROLL} = \arctan2(2 \times Q_2 \times Q_3 + 2 \times Q_0 \times Q_1 \\ , 1 - 2 \times Q_1 \times Q_1 - 2 \times Q_2 \times Q_2) \times 57.3 \end{aligned} \quad (\text{式 4-5})$$

$$\text{PITCH} = \arcsin(2 \times Q_0 \times Q_2 - 2 \times Q_1 \times Q_3) \times 57.3 \quad (\text{式 4-6})$$

$$\begin{aligned} \text{YAW} = \arctan2(2 \times (Q_1 \times Q_2 + Q_0 \times Q_3) \\ , Q_0 \times Q_0 + Q_1 \times Q_1 - Q_2 \times Q_2 - Q_3 \times Q_3) \times 57.3 \end{aligned} \quad (\text{式 4-7})$$

式中，ROLL 为横滚角，PITCH 为俯仰角，YAW 为航向角，quat[0]、quat[1]、quat[2]、quat[3]为四元组，57.3 为弧度转角度系数。随后进行原始数据的读取，该部分先对 IIC 连续读取功能状态进行判断，先是产生 IIC 起始信号，再将器件地址进行发送，同时写入指令，等待 IIC 总线应答信号，写入寄存器地址后继续等待应答信号，再次产生 IIC 起始信号，重复发送器件地址并读取命令，等待应答信号后，就会从 IIC 总线中读取需要长度的数据，并产生一个停止条件完成数据读取，读取成功后就会对数据进行整合，三轴加速度数值组成由两个字节构成，前一个字节为高八位，后一个字节为低八位，三轴顺序分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴，三轴角速度的读取同理。

数据打包函数，将实现数据从 MPU6050 模块发送至 ARM 并进行数据打包处理。该部分函数首先将三轴加速度计和三轴陀螺仪测得的原始数据发送至 ARM，再将经处理后得到的欧拉角数据发送至 ARM。每次发送 22 个字节的数据，在发送原始数据时，第 1 个字节作为帧头，用来标志数据的起始位置，并将帧头设置为 0xAA，第 2 个字节为数据长度，共 18 个数据，故值为 0x12，传输原始数据时数据长度为 12 个字节，第 3 个字节至第 14 个字节就是原始的三轴数据，其中第 3 个字节和第 4 个字节为 X 轴向上的加速度数

据，高八位存储在第 3 个字节中，低八位存储在第 4 个字节中，同理，每两个字节存储单个轴向上的加速度或角速度数据，依次为 X 轴加速度、Y 轴加速度、Z 轴加速度、X 轴角速度、Y 轴角速度、Z 轴角速度，欧拉角数据占 6 个字节，所以第 15 个字节至第 20 个字节为欧拉角数据，欧拉角数据存储也为 2 个字节前高后低存储一个欧拉角，欧拉角发送顺序依次为 ROLL、PITCH、YAW，第 21 个字节则会将数据进行累加，计算出校验和，防止数据遗漏丢失，第 22 个字节为帧尾，用来标志数据的结束位置，这里将其也设置为 0xAA。

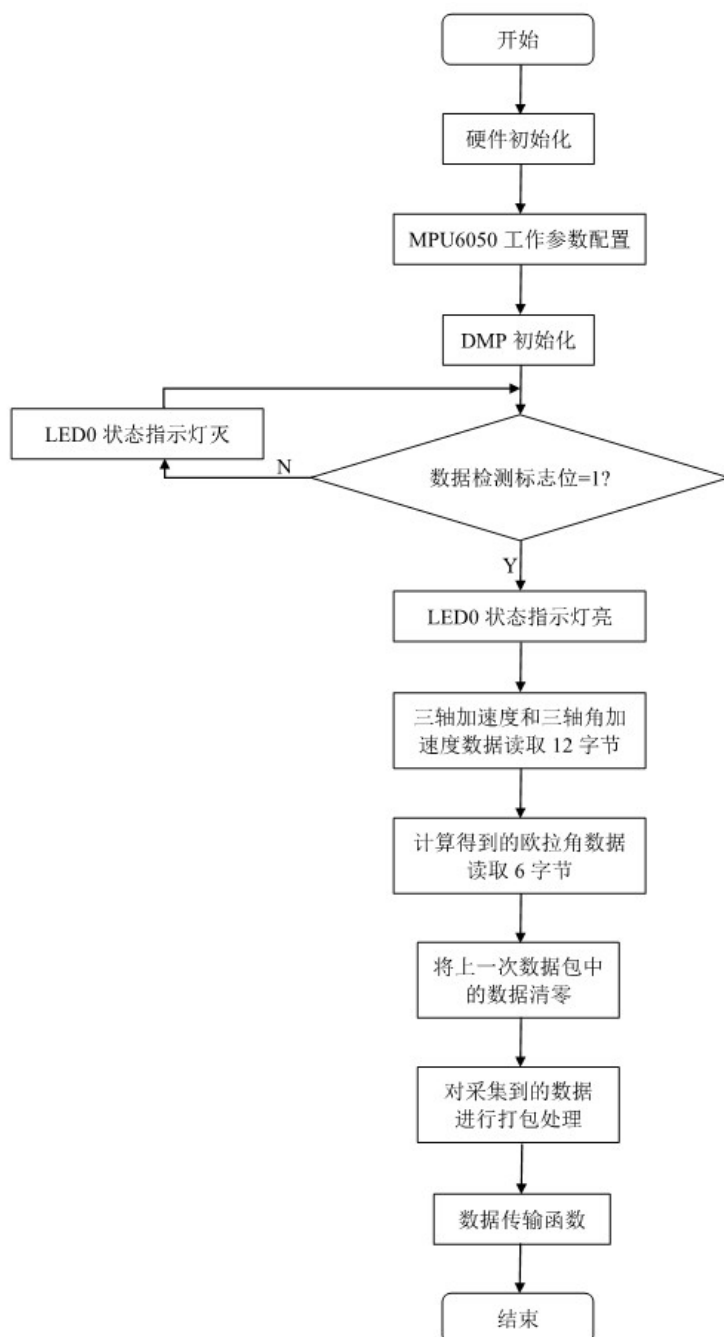


图 4-1 系统抖动测量函数流程图

### 4.1.2 数据传输函数

数据传输函数主要是实现将数据通过已建立的连接上传至网络调试软件，并储存为适合的文件，方便上位机软件的调用。在这部分函数的编写中，通过 AT 指令对 ESP8266 模块进行控制，实现对网络的配置和数据的发送。

收发模块工作模式配置函数主要是对模块的工作模式进行设置，在该系统中 ESP8266 模块可以工作在 WiFi AP 模式下作为热点给上位机提供连接。先通过采取执行指令结构的 AT 测试指令检查 ESP8266 模块是否在线，如果检测到 ESP8266 模块处于离线状态，则会通过 USART 串口发送“+++”退出透传，并采取设置指令结构的 AT+CIPMODE 指令将模块传输模式设置为非透传模式，而如果检测到 ESP8266 模块处于在线状态，则会使用设置指令结构的 AT+CWMODE 指令将 WiFi 应用模式设置为 AP 模式，并采用执行指令结构的 AT+RST 指令对模块进行重启，由于对 WiFi 应用模式设置会将参数存储在 Flash 系统参数区，所以重启后该设置并不会被清除，而由于该系统需要对抖动数据进行较高频率采集，所以将采取执行指令结构的 ATE 指令执行关闭回显操作，这样就会使得无效数据在数据传输过程中被去除，提高系统工作效率，采取设置指令结构的 AT+CWSAP 指令进行 AP 模式下的参数设置，通过设置指令结构的 AT+CIPMUX 指令启动多路连接模式，采取设置指令结构的 AT+CIPSERVER 指令开启 SERVER 模式并对端口号进行设置。

数据发送函数主要是将待发送数据发送至 USART 串口，并通过与 USART 串口相连接的 ESP8266 模块 RXD 和 TXD 将数据发送至上位机。该部分采取设置指令结构的 AT+CIPSEND 指令对即将发送的数据长度进行设置，由于该系统的数为 22 个字节，故该设置指令参数为 22，随后将数据发送至 USART 串口，通过与之相连接的 RXD 和 TXD 发送至上位机，由于每次发送 22 个字节，所以在上位机接收时能够很轻易地保证每组数据能够完整且互不干扰地发送，并有序地存储于相应文件中。

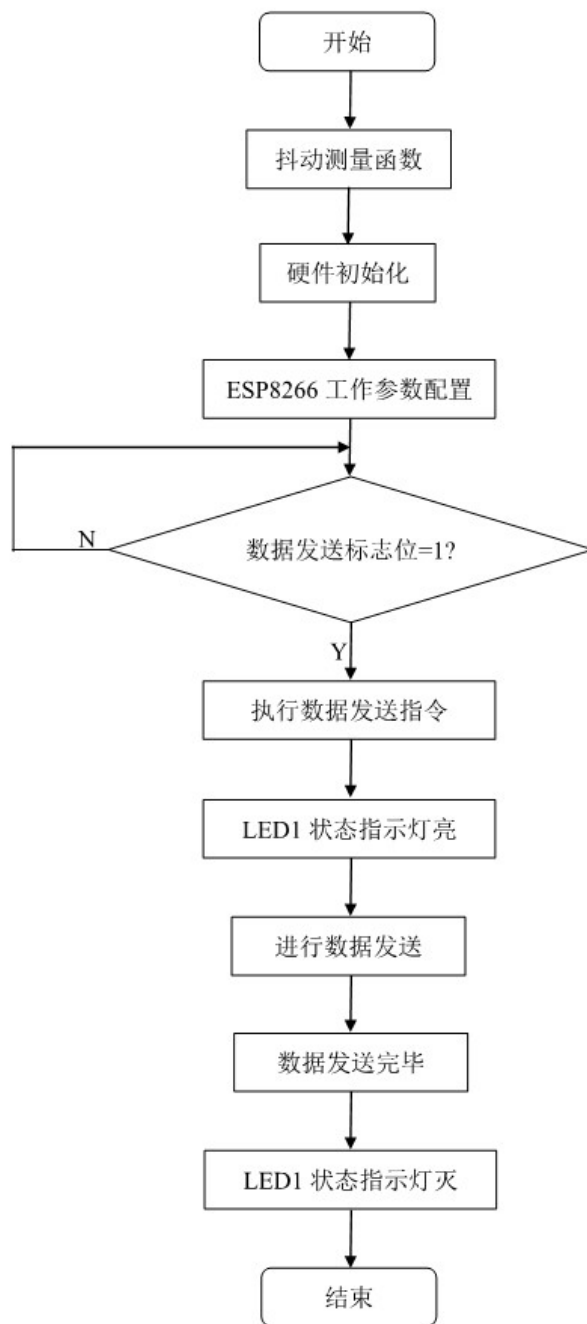


图 4-2 系统数据传输函数流程图

## 4.2 上位机程序设计

上位机程序设计主要在 LabVIEW 中进行编写，先是将文件中的数据通过 LabVIEW 中调用 MATLABScript 节点模块，在该模块中进行滤波处理，再将滤波后的数据传输至显示界面，从而实现系统功能。

### 4.2.1 MATLAB 卡尔曼滤波函数

考虑到在工业机器人的实际运行过程中，存在如地壳运动或风振效应等自然因素引

起的机器人工作环境振动，也存在人类活动或大规模机组工作等人为因素导致的机器人工作环境振动，这些影响因素在机器人运行过程中被统称为环境噪声，同时作为测量系统，需要对机器人末端姿态变化数据进行测量，MPU6050 在测量过程中在一定程度上也不可避免地存在误差，这种由于测量仪器本身产生的误差称为测量装置噪声，卡尔曼滤波作为一种基于统计学的滤波方法，能够通过计算得到数学模型中的各部分统计学参数，即正态分布标准差，并通过滤波算法结合测量值，在保证最大限度降低影响数据准确性因素的前提下对测量中的实际值进行估计，以求最大程度上实现对机器人末端抖动实际值的测量。

该部分函数作为工业机器人末端抖动测量系统的数据处理部分，会将采集到的数据通过卡尔曼滤波的方式对原始数据进行滤波处理，减小噪声等外界因素对系统测量结果的影响。

滤波函数在 LabVIEW 中的 MATLABScript 节点模块中进行编写，该模块中的函数虽然在 LabVIEW 中进行编写，但其函数编写却符合 MATLAB 的语言规则，并且在 MATLABScript 节点模块中编写的函数也会在 MATLAB 中运行，模块的输入输出节点则依旧满足 LabVIEW 的编程规则。

在该部分函数中，通过处理采集到的数据得到滤波参数，并将参数代入滤波函数中。滤波函数中主要有如下几个公式：

$$\hat{x}_k^- = A \times \hat{x}_{k-1} \quad (\text{式 4-8})$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k \times (z_k - H \times \hat{x}_k^-) \quad (\text{式 4-9})$$

$$P_k^- = A \times P_{k-1} + Q \quad (\text{式 4-10})$$

$$K_k = \frac{H \times P_k^-}{H \times P_k^- + R} \quad (\text{式 4-11})$$

$$P_k = (1 - K_k \times H) \times P_k^- \quad (\text{式 4-12})$$

式中， $\hat{x}_k^-$  为第 k 次的先验估计值， $\hat{x}_k$  为第 k 次的后验估计值， $P_k^-$  为第 k 次的先验误差， $K_k$  为第 k 次的增益值， $P_k$  为第 k 次的更新误差， $z_k$  为第 k 次的测量值， $Q$  为环境噪声标准差， $R$  为测量装置噪声标准差， $A$  和  $H$  均别为测量传递系数，其中  $Q$  和  $R$  均通过对测得数据的处理得到， $A$  和  $H$  则通过测得数据间传递关系进行确定。首先函数会对接收到的数据进行分组读取，即三轴加速度数据、三轴角速度数据、欧拉角数据进行分组，再通过对不同数据组对滤波参数进行计算，将参数代入函数中，随后将各组数据输入 MATLABScript 节点模块中编写好的函数并运行该节点模块，就能够实现对采集数据的滤

波处理。

#### 4.2.2 LabVIEW 界面设计

LabVIEW 作为一款支持图形化编程的软件，不仅操作便捷，编程方式简单，还能够实现数据的图形化显示，并且界面内的模块组合具有极高的灵活性，能够根据系统需要对界面进行配置，极大地降低了程序设计的复杂度。

作为机器人末端抖动测量系统的显示界面，该部分程序设计将对系统原始数据和滤波数据进行分别显示，在对数据进行图形化显示的同时，也降低了后续数据分析的难度。由于数据的采集发送过程是以组的方式进行的，在数据滤波和显示之前会对数据进行分组，将不同的数据存放于不同的数组中。在进行数据分组之后，将数据作为输入发送至滤波节点模块，并保存至新的数据数组中，将原始数据数组和滤波后的数据数组在波形图和数据输出节点模块上进行显示，通过切换按钮节点的切换将能够在不同波形图内不同数据的同时显示，方便进行数据对比和分析。

## 第五章 系统运行调试与结果分析

### 5.1 系统实物与运行调试

机器人末端抖动测量系统的运行调试，采用固高控制器和川崎六轴工业机器人本体作为测量对象，在空载测量实验中将机器人末端抖动测量系统固定在工业机器人末端，在带负载测量实验中，由于机器人末端带负载能力较强，只有在大负载情况下抖动才较明显，现有实验条件带大负载较难实现，所以带负载实验是通过人为对系统施加外力干扰进行模拟，实验现场如图 5-1 所示。通过将机器人设定为在世界坐标系下沿 Y 轴从 100 运行至-200，分别测量机器人空载和模拟带负载情况下，其末端抖动量变化，对测得结果数据类型进行转换后，在上位机界面以波形图显示，更直观的对抖动量进行观察，进而对机器人末端抖动情况进行分析。



图 5-1 机器人末端抖动测量系统

在系统运行之前，通过对 STM32 中的采集频率进行调整，将数据采集周期配置为 300ms，采用串口程序下载软件把写好的 ARM 程序烧录进 STM32F407ZGT6 芯片，再通过 STM32 的 RS232 串口与上位机 USB 接口相连接，搜索相应串口后，将串口调试软件的串口号进行匹配，并设置串口波特率为 115200bps，使得 ARM 和上位机串口波特率匹配，从而实现正常通信，完成机器人末端抖动测量系统的调试准备工作。

采集阶段，将 MPU6050 模块固定在机器人末端，上位机连接至 ESP8266 模块，在运行机器人的同时按下 KEY0，开始进行抖动数据的采集和传输，待机器人沿设定好的直线

路径运行并停止运行后按下 KEY1, 停止抖动数据的采集, 运动过程中的相关抖动数据通过 ESP8266 模块发送至上位机, 并通过 LabVIEW 内编写好的程序对相应的数据文件进行读取解包, 随后将十六进制数转化为浮点数, 通过卡尔曼滤波函数对数据进行滤波处理后, 将滤波前后数据显示在 LabVIEW 前面板上。通过对带负载状态下机器人的相关抖动数据进行卡尔曼滤波, 在上位机界面波形图中对滤波前后的曲线进行显示, 由于带负载情况下末端抖动较空载情况下相对更明显, 就能够对滤波效果具有更直观的认知。

在进行卡尔曼滤波算法的编写中, 需要对环境误差和测量装置误差进行测定计算。对环境误差进行测定时, 采用水平静置的方式将系统保持水平静置于测量现场的机器人工作站的工作台上, 对环境中的振动情况进行测定, 测得 5500~6000 组数据后, 将十六进制数据转换为浮点数, 并通过 MATLAB 对其计算标准差, 由于不希望环境中存在干扰, 故环境误差期望为 0, 分别计算九组数据的标准差, 并代入卡尔曼滤波函数中。对测量装置误差进行测定时, 采取悬挂静置的方式, 将系统通过鱼线进行调至水平后悬挂在屋内, 在该过程中为使得结果尽量准确, 保证测量过程中室内无空气流通, 无大幅度振动, 同样在测得 5500~6000 组数据后, 将十六进制数据转换为浮点数, 通过 MATLAB 计算数据标准差, 由于不希望测量仪器存在误差, 故测量装置误差期望为 0, 分别计算九组数据的标准差, 带入卡尔曼滤波函数中。完成上述参数测定, 卡尔曼滤波函数就已然完成。最后将空载情况下的卡尔曼滤波数据和带负载情况下的卡尔曼滤波数据在上位机界面波形图中进行显示, 即可最大程度拟合机器人末端抖动数据实际值及其变化情况, 从而提高机器人末端抖动情况分析的准确性。

## 5.2 系统运行结果及分析

通过测量六轴机器人空载和带负载情况下的姿态数据, 分别在空载和带负载, 以及无滤波和加入卡尔曼滤波函数情况下, 将生成的三轴加速度、三轴角速度和欧拉角多组图像在 LabVIEW 前面板进行显示, 并重点针对 3 组图像进行对比分析。

图 5-2 为空载实验下，三轴加速度、三轴角速度和欧拉角变化情况的实验结果图，该图记录空载运行中六轴姿态及欧拉角变化，在实验图像中呈现了从机器人静止（0-3s）到机器人开始运行（3s），再到平稳运行（3-16s），最终机器人停止运行（16s）并保持静止（16-19s）这一过程的各数据变化过程。

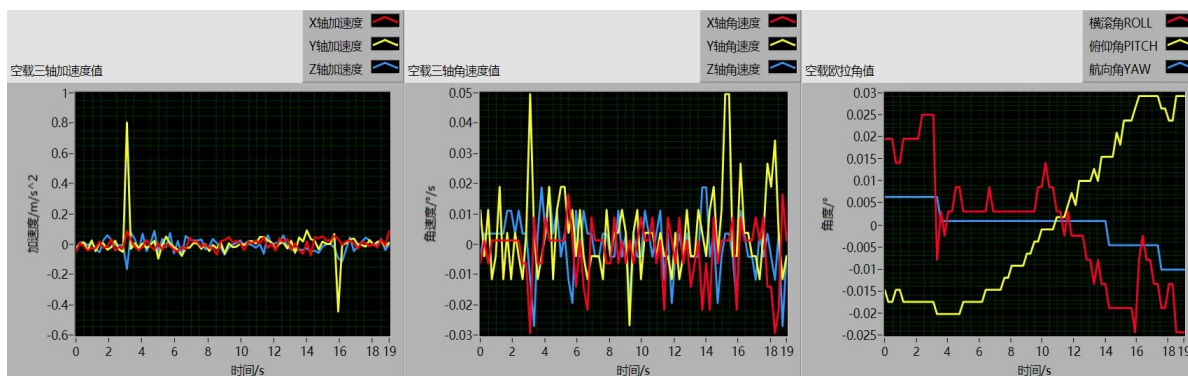


图 5-2 空载情况下姿态图像

图 5-3 为带负载实验下，三轴加速度、三轴角速度和欧拉角变化情况的实验结果图，该图记录带负载运行中六轴姿态及欧拉角变化。

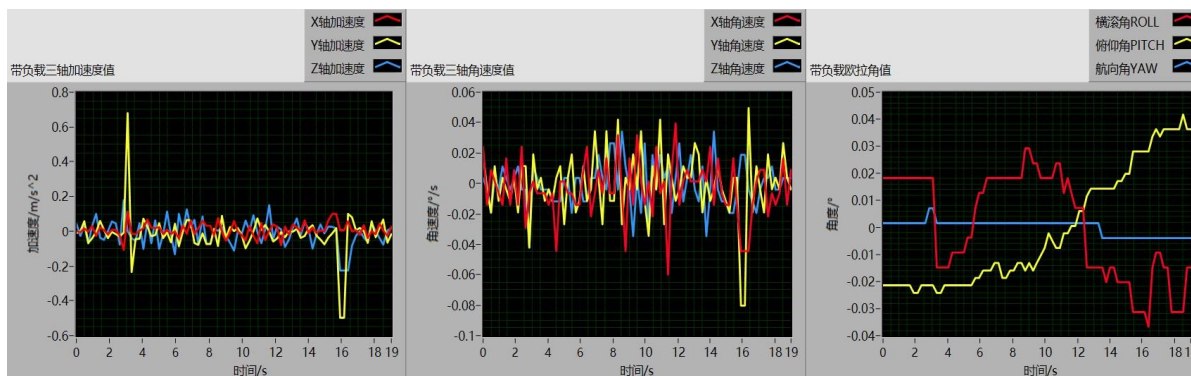


图 5-3 带负载情况下姿态图像

图 5-4 为空载与带负载情况下，各轴向上加速度实验结果对比图。在该图像中，各轴向上所采集到的机器人末端加速度变化情况，静止状态（0-3s 和 16-19s）和平稳运行状态期间，加速度变化呈现小幅波动，且平稳运行状态期间波动幅度略大于静止状态，而在机器人开始运行和停止运行时，测量系统所生成的图像出现了短暂而剧烈的抖动。由于 X 轴和 Z 轴所在轴线与机器人运行路径所成夹角较大，故在机器人运行状态发生改变时，X 轴和 Z 轴图像中的抖动幅度相对较小，略大于静止和平稳运行状态；Y 轴图像中则出现了幅度较大的抖动，这是由于 Y 轴所在轴线于机器人运行路径所成夹角较小，机器人的启

停过程中需要通过改变加速度实现运行速度的增减。在各轴加速度变化图像中，空载运行时各轴向上的加速度变化较小，带负载运行变化情况均略大于空载运行，可以得知机器人在运行期间，负载对机器人末端各轴方向上的加速度变化出现了影响。

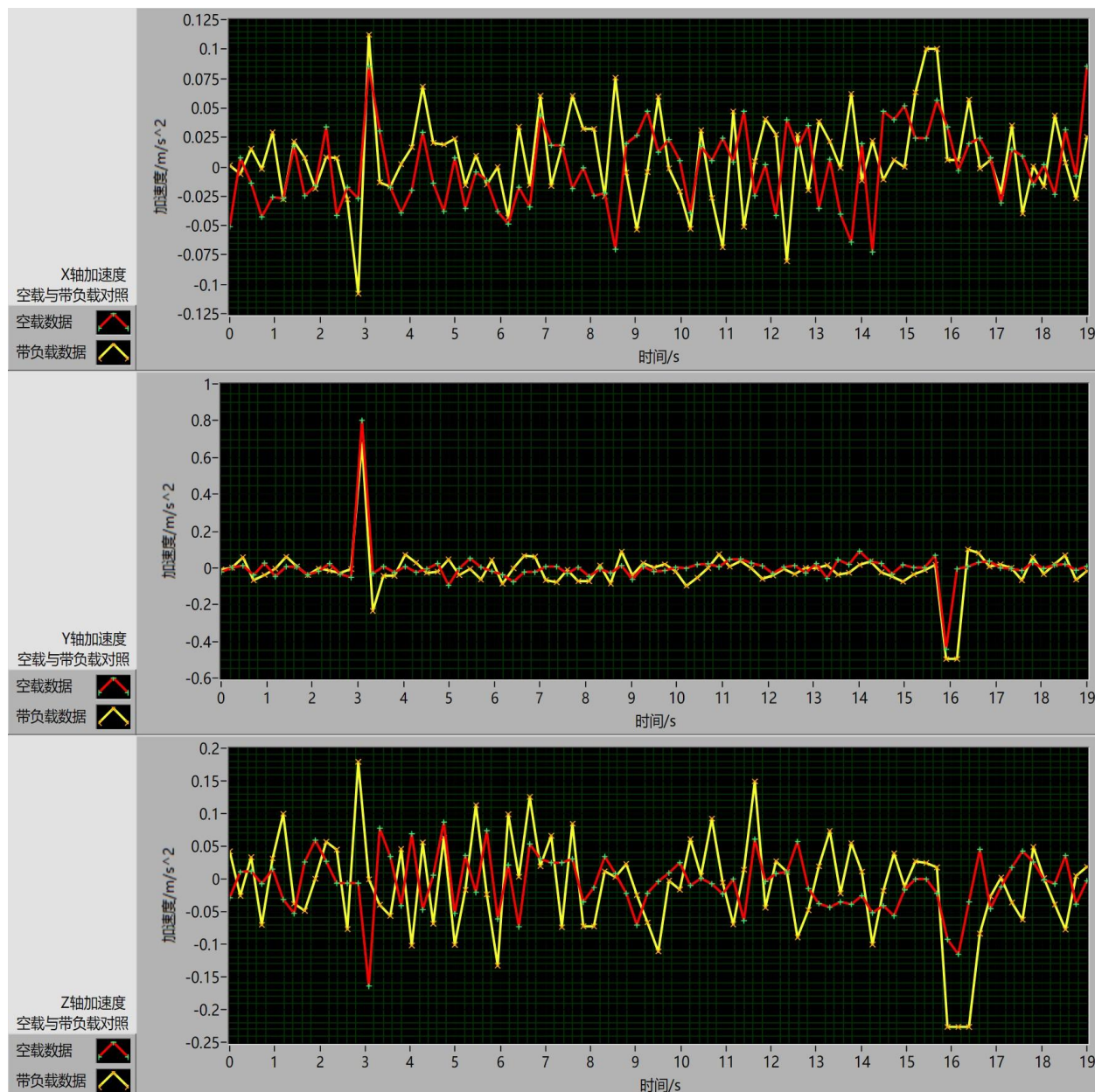


图 5-4 空载和带负载情况下三轴加速度对比图像

图 5-5 为空载与带负载情况下，各轴向上角速度实验结果对比图。在这一组对比图像中，机器人在空载运行状态下，静止状态（0-3s 和 16-19s）和平稳运行状态阶段的各轴角速度变化幅度较小，两个阶段角速度变化幅度基本相同，机器人开始运行时和停止运行时出现了幅度略大于静止和平稳运行阶段的角速度变化。而在带负载运行状态下，机器人处

于静止阶段时，各轴角速度数据均出现了小幅波动，处于运行阶段时，产生了相较静止阶段幅度较大的波动。在各轴角速度图像中，带负载角速度变化情况均略大于空载条件下的变化情况，可以得知负载对机器人运行期间的角速度变化产生了影响。

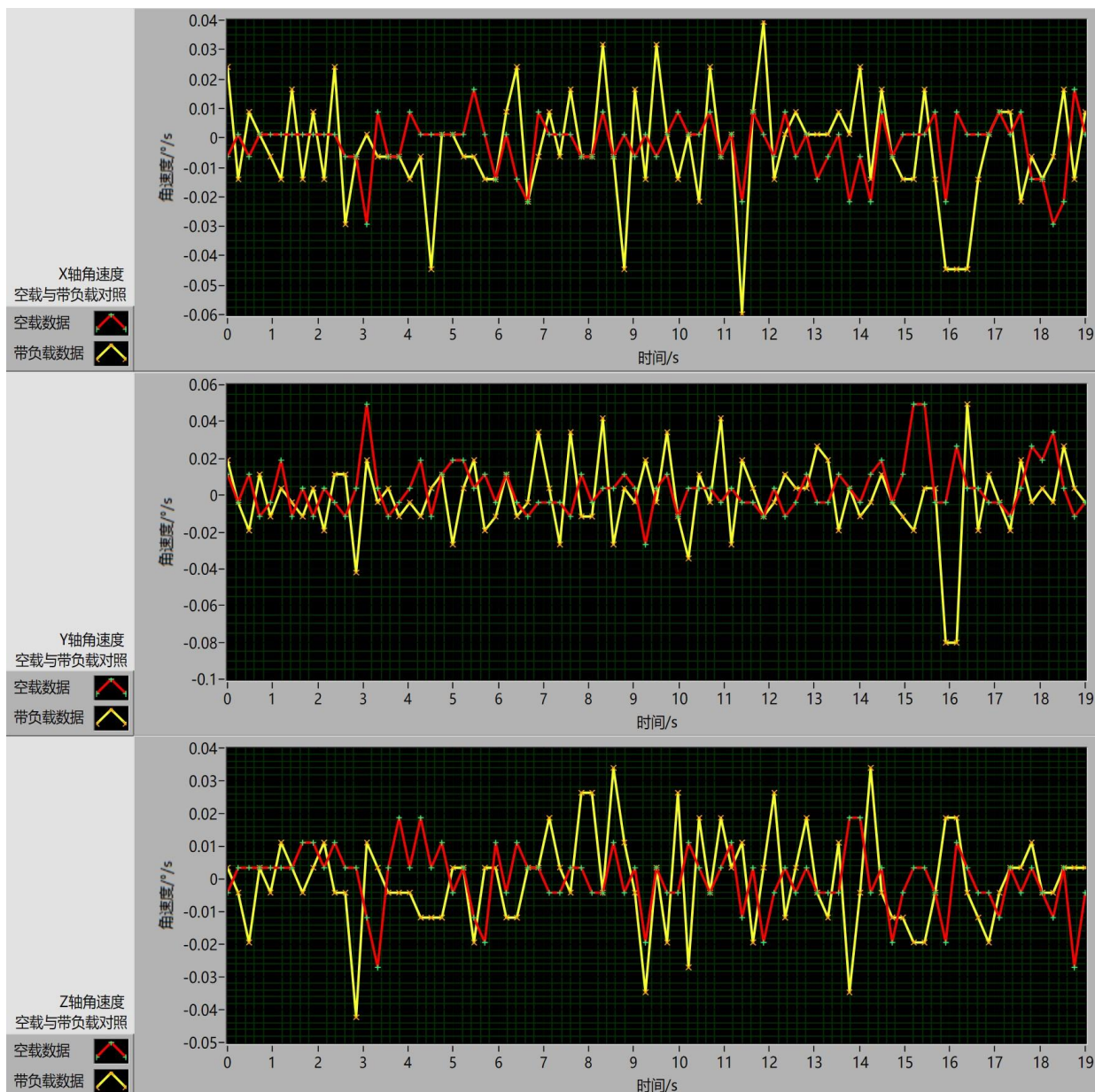


图 5-5 空载和带负载情况下三轴角速度对比图像

图 5-6 为空载与带负载情况下，欧拉角实验结果对比图。横滚角 ROLL 图像在静止状态（0-3s 和 16-19s）期间空载和带负载变化曲线变化相对较稳定，而在运行状态期间，空载运行图像中呈现了幅度较小的角度变化，带负载运行图像中角度变化相对较大，且在该图像中机器人启停时出现的抖动最为剧烈。俯仰角 PITCH 图像中，静止状态期间空载与带负载曲线均较为稳定，运行状态期间空载曲线呈现均匀上升，而带负载曲线呈现波动上

升。航向角 YAW 图像中，静止状态和平稳运行状态期间，空载和带负载曲线均无变化，在机器人启动和停止时，空载和带负载曲线出现了较大波动。该组图像说明，机器人静止状态期间能够保持较好的稳定性，不会出现较大程度的抖动，在空载运行过程中，抖动程度相对较小，在带负载运行过程中，抖动程度相对较大。

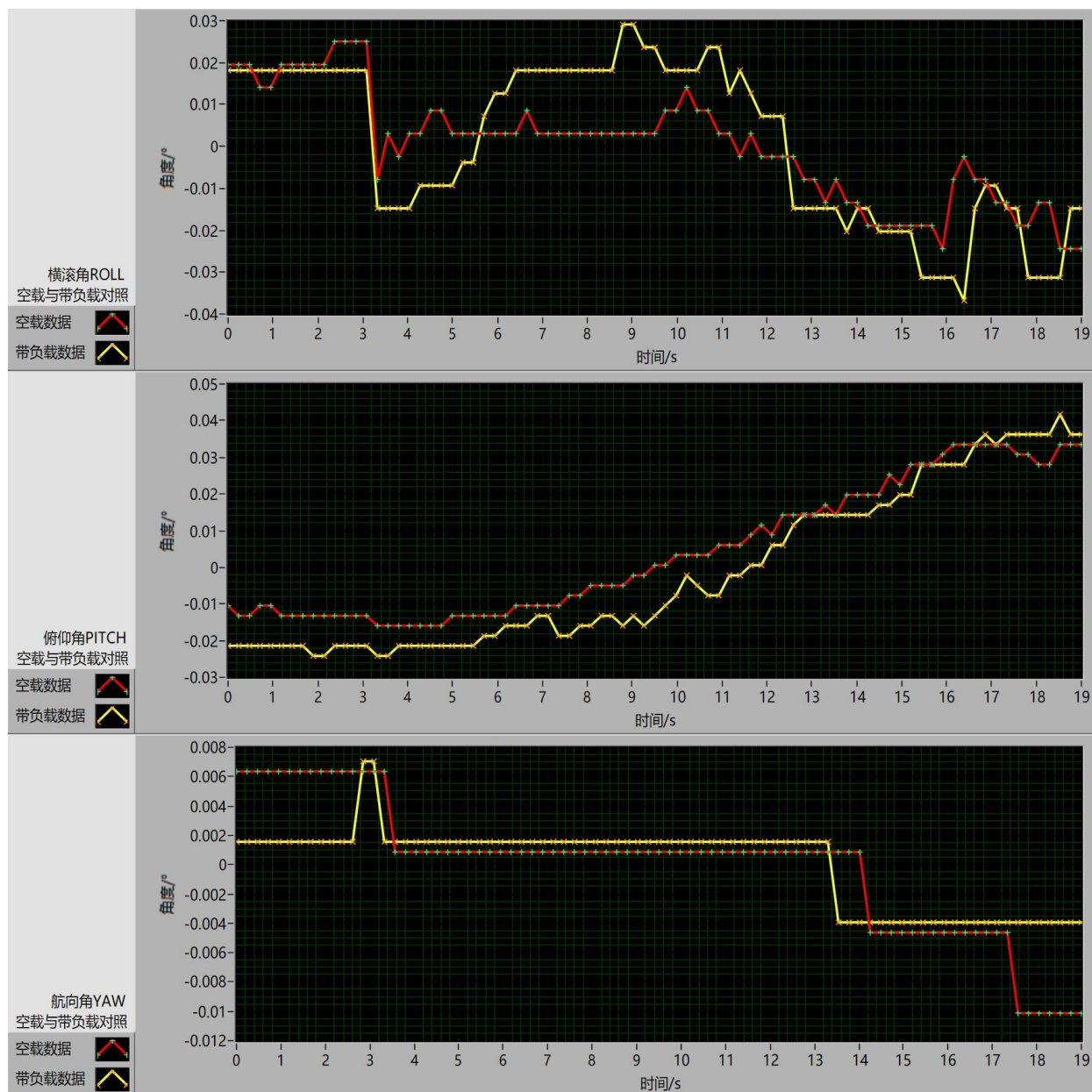


图 5-6 空载和带负载情况下欧拉角对比图像

进而分析可知，虽然机器人在带负载情况下运行会出现相较于空载情况下更为明显的抖动，但由于机器人各轴关节伺服电机共同作用使得末端的抖动被迅速抑制，且将机

机器人末端三轴加速度变化量保持在较小的范围之内，能够保证其工作期间能够沿设定好的路径平稳运行。

图 5-7、图 5-8、图 5-9 分别为带负载情况下，卡尔曼滤波前后各轴向上加速度、角速度、欧拉角实验结果对比图。为消除干扰因素对系统测量结果的影响，采用了卡尔曼滤波对原始数据进行处理，去除了环境误差和测量装置误差，生成了如下图像。

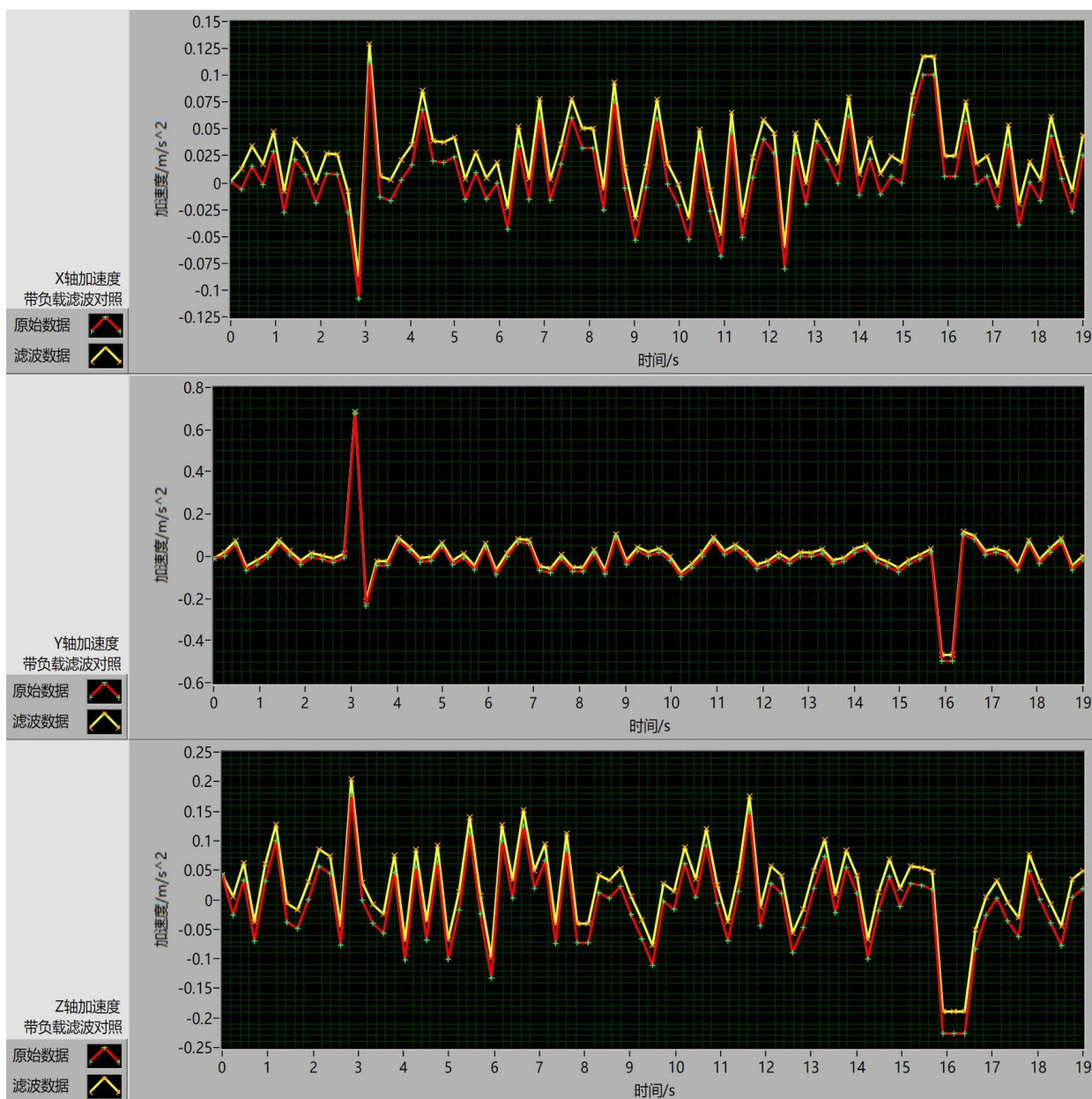


图 5-7 带负载情况下卡尔曼滤波前后三轴加速度对比图像

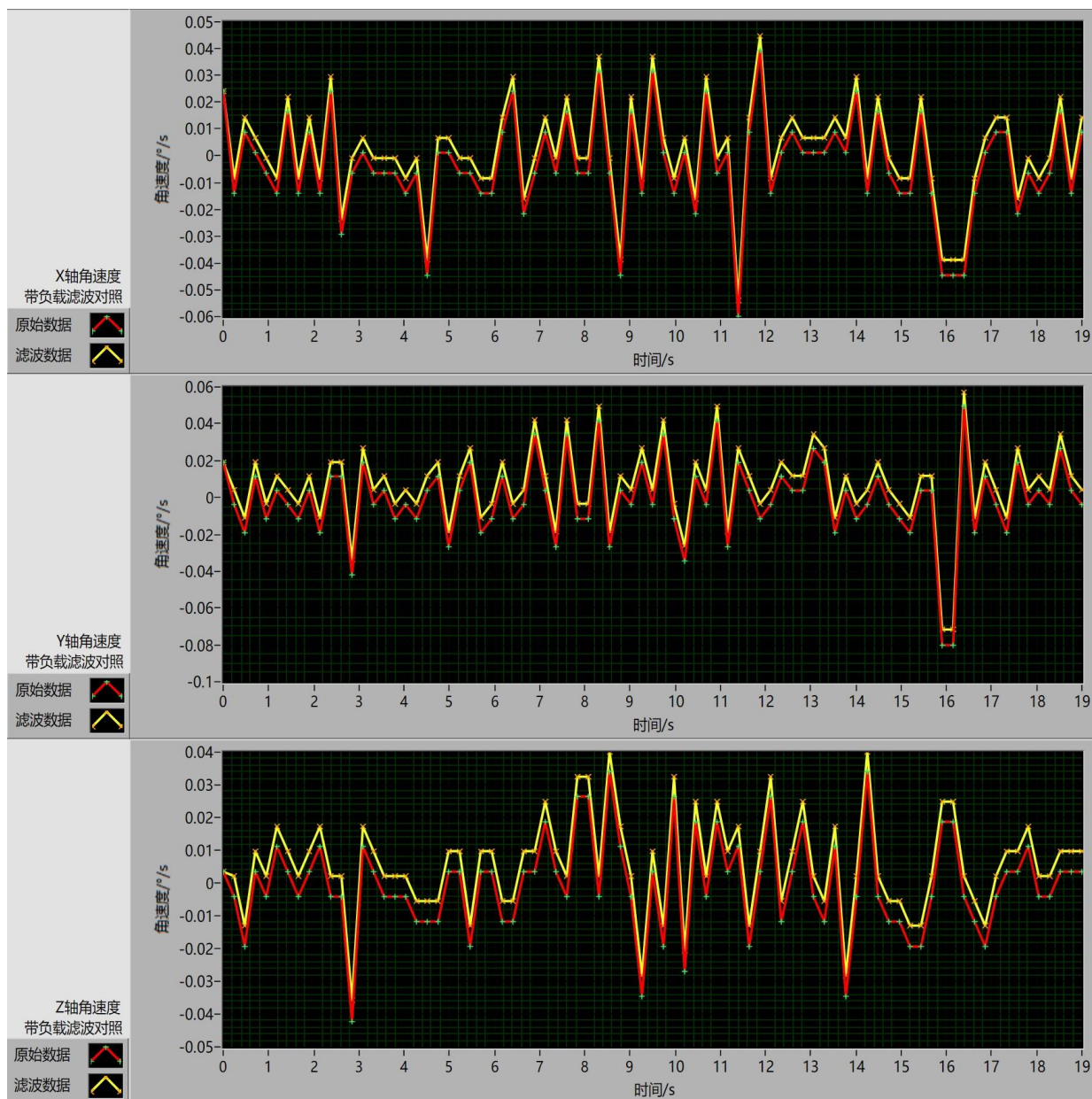


图 5-8 带负载情况下卡尔曼滤波前后三轴角速度对比图像

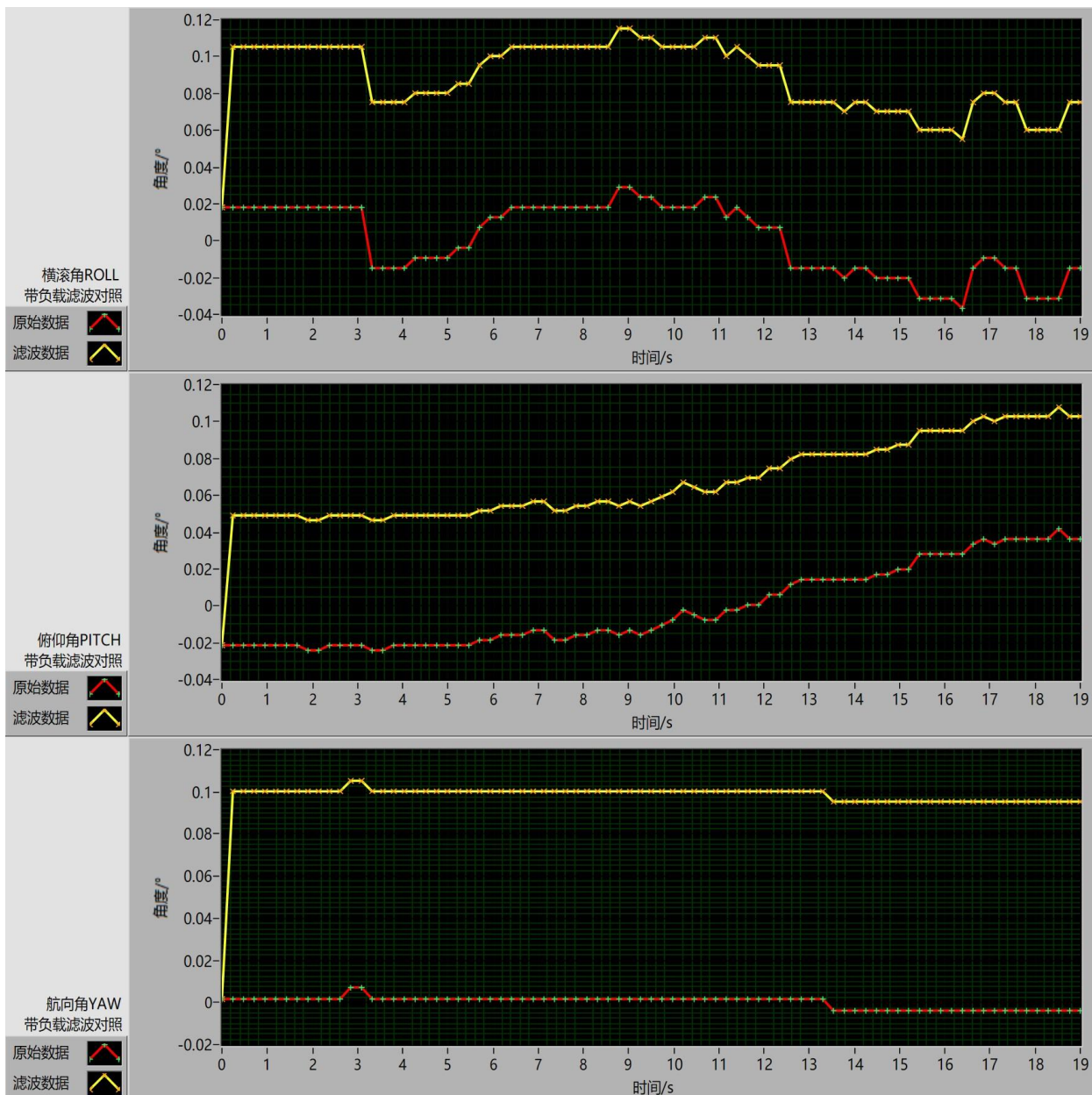


图 5-9 带负载情况下卡尔曼滤波前后欧拉角对比图像

总体而言，在带负载情况下，卡尔曼滤波为测量值提供了不同程度的偏差校正，完成了对原始数据的处理。

图 5-10 为加入卡尔曼滤波后，空载与带负载情况下各轴向上加速度实验结果对比图。该组图像由于为滤波后的空载与带负载对比图像，对原数据进行了修正，图像中所呈现出的三轴加速度变化情况与滤波前基本相同。

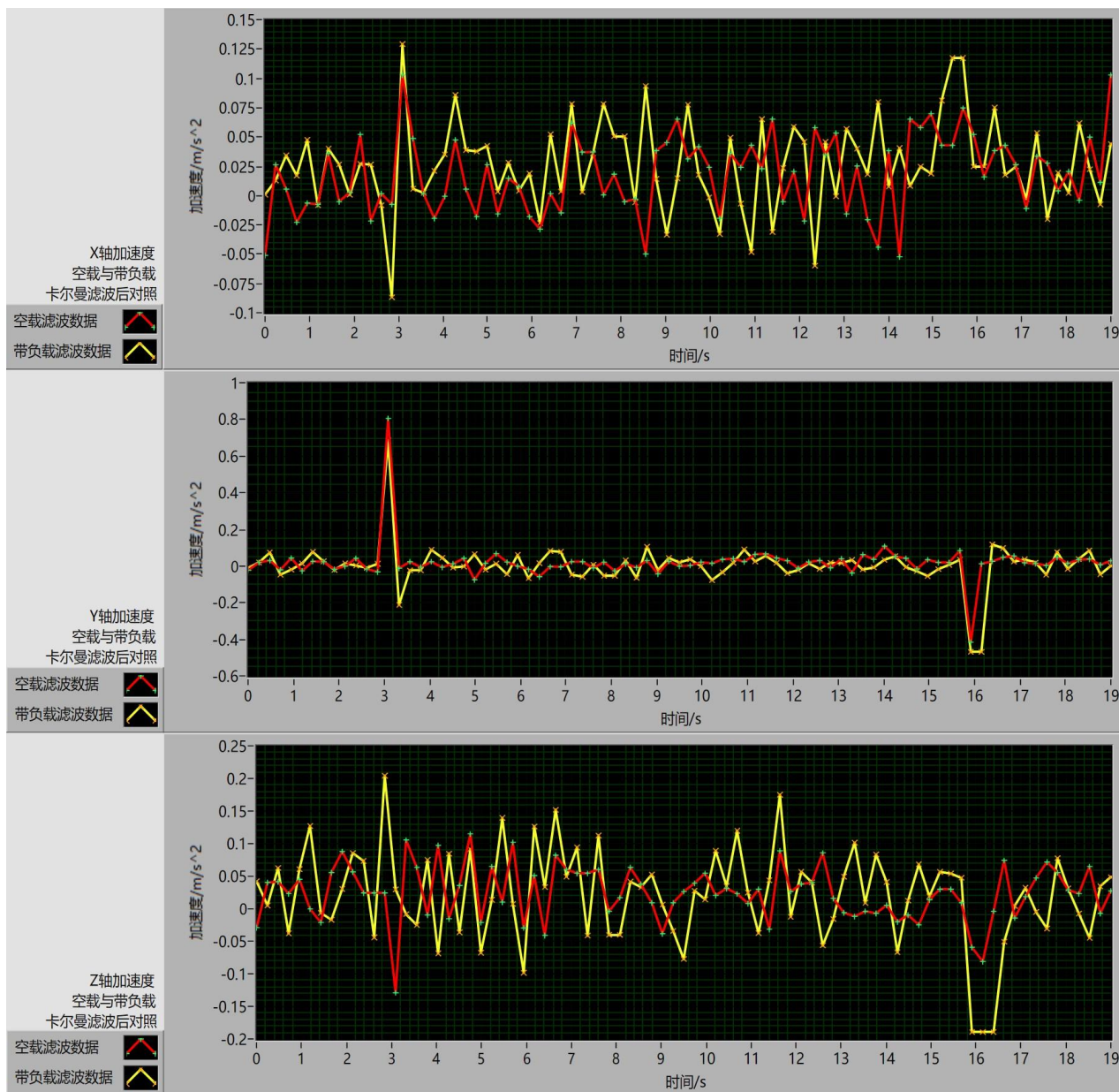


图 5-10 卡尔曼滤波后空载和带负载情况下三轴加速度对比图像

图 5-11 为经过卡尔曼滤波后，空载与带负载情况下各轴向上角速度实验结果对比图。在该组图像中，滤波函数对原始数据进行了小幅修正，并未对整体变化趋势产生影响。

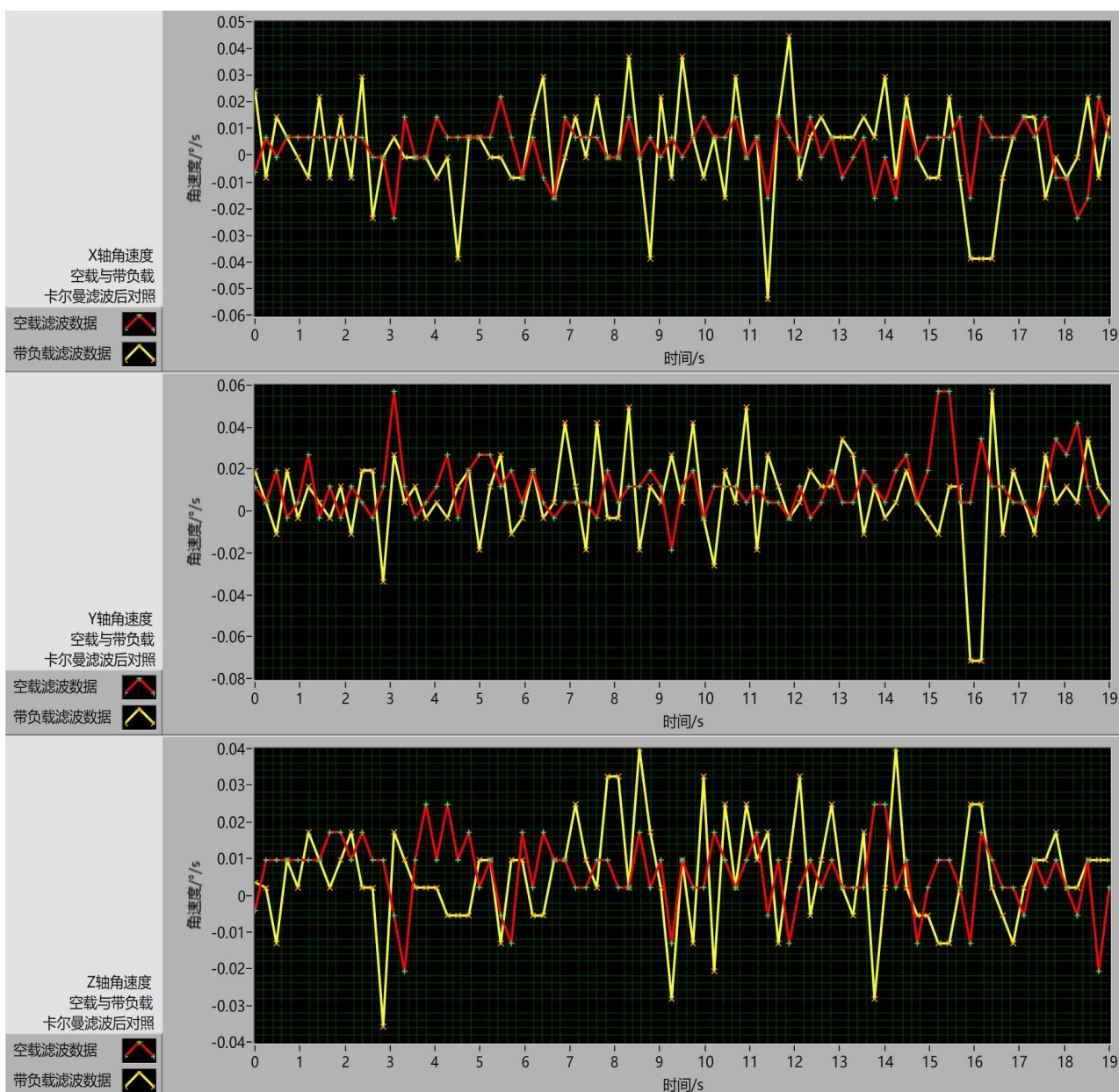


图 5-11 卡尔曼滤波后空载和带负载情况下三轴角速度对比图像

图 5-12 为经过卡尔曼滤波后，空载与带负载情况下欧拉角实验结果对比图。在该部分图像中，滤波函数对原始数据的横滚角 ROLL 值进行了 0.09 的偏差修正，对俯仰角 PITCH 进行了 0.07 的偏差修正，对航向角 YAW 进行了 0.09 的偏差修正，在原数据变化趋势的前提下对欧拉角数据进行了校正。



图 5-12 卡尔曼滤波后空载和带负载情况下欧拉角对比图像

经过卡尔曼滤波后，空载与带负载情况下的对比曲线与未经滤波的空载与带负载对比曲线变化情况大致相同，但由于增加了卡尔曼滤波，空载与带负载曲线都更加平滑，且曲线的上下差值也普遍减小，极大的减弱了与现场环境有关的环境误差和与测量仪器有

关的测量装置误差对测量结果的影响。

表 5-1 空载与带负载数据标准差

	空载标准差	带负载标准差	空载滤波标准差	带负载滤波标准差
X 轴加速度	0.0333	0.0387	0.0331	0.0381
Y 轴加速度	0.1065	0.1196	0.1046	0.1174
Z 轴加速度	0.0434	0.0749	0.0424	0.0724
X 轴角速度	0.0096	0.0185	0.0096	0.0183
Y 轴角速度	0.0139	0.0216	0.0138	0.0213
Z 轴角速度	0.0096	0.0147	0.0096	0.0146
横滚角 ROLL	0.0133	0.0191	0.0141	0.0190
俯仰角 PITCH	0.0178	0.0215	0.0189	0.0222
航向角 YAW	0.0045	0.0027	0.0110	0.0110

表 5-1 为实验数据作为样本，计算得出的 4 组标准差。通过横向、纵向观察对比得出 3 个结论：

1.将空载标准差与带负载标准差两列，以及空载滤波标准差与带负载滤波标准差分别进行纵向对比，发现规律相近，空载标准差普遍低于带负载标准差，可以得知带负载情况下的抖动数据波动更大。

2.对空载滤波前、后，以及带负载滤波前、后数据分别进行纵向对比，发现规律相近，滤波后标准差普遍低于滤波前标准差，可以得知滤波使得原始数据生成的曲线更加平滑。

3.对 4 列数据进行横向对比发现，Y 轴加速度标准差明显高于其他测量值标准差，这是由于 Y 轴与机器人运行轨迹所在直线夹角较小，所以 Y 轴加速度标准差普遍较大，可以得知机器人在直线运行时，运行轨迹所在直线轴向上的加速度波动较大。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 系统设计总结

机器人末端抖动测量系统通过 MPU6050 芯片对机器人末端姿态变化进行测量,经 IIC 总线传输至控制核心 STM32F407ZGT6 芯片,将数据打包发送至串行通信接口,采取 AT 指令控制 ESP8266 芯片的工作状态,为上位机提供可接入站点,并将数据通过 WiFi 发送,上位机通过 LabVIEW 程序将十六进制数据转换成浮点数,通过在 MATLAB 中运行的卡尔曼滤波算法进行滤波处理,随后显示在 LabVIEW 前面板。该系统的设计与实现过程中,在 ARM 程序中,对 MPU6050 工作状态设定,以及 MPU6050 与 ARM 之间通信函数编写,相对于其他部分函数的编写更为重要;在上位机程序中,对数据解包和数据形式转化,以及卡尔曼滤波对环境误差和测量装置误差的数据处理,是该部分编程核心。

实验部分,通过对空载和带负载情况下抖动的测量,结合卡尔曼滤波处理数据,并在上位机以图像形式直观显示。通过对比各项测量参数滤波前、后曲线,并进一步计算、比较标准差,得出卡尔曼滤波能有效减小测量误差(主要包括环境误差和测量装置误差),使得曲线变化更平滑。通过分别对比空载与带负载滤波前、后各项数据曲线,得出在三轴加速度曲线中空载与带负载均有波动,在带负载情况下波动更大,且在机器人开始和停止运行时波动幅度最大;在三轴角速度曲线中,带负载情况下波动幅度稍大于空载状态,静止状态波动幅度小于工作状态;在欧拉角曲线中,无论是空载还是带负载情况下,航向角 YAW 曲线最为平滑,无明显波动,横滚角 ROLL 在静止状态下曲线较为平滑,运行状态下变化幅度较大,俯仰角 PITCH 在静止状态下较为稳定,工作状态下空载时呈现均匀上升,而在带负载时呈现波动上升。

### 6.2 系统设计展望

虽然完成了该系统的设计与实现,也通过实验验证了系统功能,并对数据进行分析处理,但还存在一些不足,可供未来继续研究:

- 1.受实验条件所限,应用本系统做抖动测量前,缺少更高精度可作为基准测量系统的标定环节,因此所做数据分析多侧重对比分析,说服力不足。
- 2.受实验条件所限,没有配置大负载进行抖动实验,而是采取外力干扰模拟带负载抖动,这种方法不严谨,并没有真正的测量出实际带负载的抖动情况。
- 3.本系统采集了各轴向上的加速度数据,下一步可以通过对加速度值做积分处理,计

算出各轴直线位移量，构建机器人末端运动位移模型，从而通过改进控制算法，进一步提高机器人定位精度。

4.本系统仅通过一个姿态传感器采集机器人末端抖动数据，在此基础上，可以在机器人各轴进一步加装姿态传感器，对机器人抖动数据进行更全面的测量，以更好的改进控制算法。

## 参考文献

- [1] 段海龙. 堆垛机械手控制算法研究与设计[D]. 内蒙古科技大学,2017.
- [2] 李峰. 基于 MDH 模型的工业机器人标定及视觉引导方法研究[D]. 天津工业大学,2017.
- [3] 李俊渊. 基于 QPSO 算法的双机器人协调装配多目标轨迹规划研究[D]. 湘潭大学,2016.
- [4] 陈勇明. 五自由度工业机器人运动学分析与仿真[D]. 安徽理工大学,2017.
- [5] 刘尚国. 基于三角法测量系统的工业设备形位检测技术研究[D]. 山东科技大学,2011.
- [6] 徐良. 三维激光球杆仪误差分析与补偿[D]. 大连理工大学,2019.
- [7] 高永亮. 移动式铣削机器人作业精度优化策略研究[D]. 北华航天工业学院,2019.
- [8] 刘志芳. 工业机器人手眼标定及目标追踪方法研究[D]. 天津科技大学,2018.
- [9] 倪华康. 基于激光位移传感器的机器人工具校准系统研究[D]. 华中科技大学,2019.
- [10] LUBIN HANG, CHENGWEI SHEN, JUN WANG, et al. Research on Robot Calibration Based on Laser Tracker[C]. 2016 中国机构与机器科学国际会议. 2016:1475-1488.
- [11] 张铁,张爱民,覃彬彬,等. 柔体动力学模型的机器人柔性力矩前馈控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(8):1509-1516.
- [12] GUANGLONG DU, PING ZHANG, DI LI. Online robot calibration based on hybrid sensors using Kalman Filters[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing: An International Journal of Manufacturing and Product and Process Development,2015,3191-100.
- [13] Benjamin Arnold, Daniel Wohlrab, Christoph Meinecke, Danny Reuter, Jan Mehner. Design, Manufacturing and Test of a High-Precision MEMS Inclination Sensor for Navigation Systems in Robot-Assisted Surgery[J]. International Journal of Biomedical Science and Engineering,2018,6(1).

## 致谢

行文至此，不禁想到这短短的致谢不仅代表着毕业设计的相关工作处于收尾阶段，也意味着在天津中德应用技术大学的校园生活即将结束，更是标志着未来新生活的开始，心中就有万千感慨难以言说。

回想这短短的七个月时间，从课题的确定到前期工作的准备，从论文的框架到程序的编写，再从测量系统的实现到论文的完成，都离不开张兴会老师、张志利老师和刘通老师的悉心指导。这期间各位老师对我的毕业设计都提出了改进的意见和自己撰写论文时的一些经验，这些指导都让我受益匪浅，但是让我感触最深的是老师们对我的信任。不论是对于系统的框架结构设计还是对于我自己执行工作进度的方式方法，老师们都会在提出自己的建议的同时，倾听我对这些问题的看法，通过这样的讨论过程不断完善毕业设计。就这样，一篇虽算不上完美但也算得上凝聚了本人心血的论文在各位老师的帮助下就产生了。

但能完成这样一篇论文在我刚踏入天津中德应用技术大学的校门时是无法想象的，所以在这里也不得不感谢陈愚老师、史艳霞老师、王鹏老师、徐琤颖老师、韩广琳老师对我专业课程的传授和教导，通过在课上的学习和课下对相关知识的探索，才使得我在这四年的时间里在提升了知识水平的同时提高了自身的学习能力，在临别之际呈现了一份让自己满意的毕设作品。四年时光转眼间就过去，能够通过自己的努力掌握这略显浅薄的知识，也能勉强说服自己这四年算不上虚度光阴。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索，虽然过去的自己并没有那么努力，但毕竟东隅已逝，桑榆未晚，把握当下才能不辜负当初的自己，在这里也要感谢陪伴我一路走来的父母亲朋和同窗挚友，这条不算很长的人生路却也装满了你们的陪伴。虽然我本人也没有什么鸿鹄之志，但也愿奉献自己的微薄之力实现自我价值，尽管这条路荆棘丛生，远离舒适安逸的生活，但也愿尽自己微不足道的力量，在这世界上留下自己来过的痕迹。千言万语都化作春风，愿能迎着炎炎的烈日和呼啸的寒风，抵达彼岸，收获丰收的硕果。

道阻且长，行则将至。至此，再次感谢以上提到的师长亲友，谢谢。