

学校代号 10532

学 号 S2209W0732

分 类 号 TN384

密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

工程硕士学位论文

减速器内部应变监测系统 设计与实现

学位申请人姓名 丁心怡

培 养 单 位 电气与信息工程学院

导师姓名及职称 欧阳博 副教授 蒋锋 高工

学 科 专 业 电子信息

研 究 方 向 智能仪器仪表

论文提交日期 2025 年 4 月 18 日

学校代号： 10532

学 号： S2209W0732

密 级： 公开

湖南大学工程硕士学位论文

减速器内部应变监测系统 设计与实现

学位申请人姓名： 丁心怡

导师姓名及职称： 欧阳博 副教授 蒋锋 高工

培 养 单 位： 电气与信息工程学院

专 业 名 称： 电子信息

论文提交日期： 2025 年 4 月 18 日

论文答辩日期： 2025 年 5 月 11 日

答辩委员会主席： 唐求 教授

**Design and Implementation of a System Monitoring Internal
Strain of Reducers**

by

DING XinYi

B.E. (East China University of Technology) 2022

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Electronic Information

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor OUYANG Bo

Senior Engineer JIANG Feng

April, 2025

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。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后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密□，在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密☑。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

谐波减速器和旋转矢量(Rotary Vector, RV)减速器是工业装备的核心部件, 广泛应用于数控机床、智能制造装备等需要高精密传动系统的领域, 其内部结构的应变状态信息是反映减速器运行精度与可靠性的重要参数。由于内部结构紧凑, 谐波减速器的柔轮、RV 减速器的曲柄轴等内部薄弱环节的应变的准确获取缺乏有效手段。因此本文针对减速器内部结构的应变信息的高精度采样和无线数据传输与处理方案展开研究。将无线通信技术与应变传感技术相结合, 有效克服了传统有线监测方式中布线复杂、适用范围有限等弊端。本文开展了以下研究:

(1) 针对减速器内应变信号的精准测量问题, 设计了高精度应变信号采集模块, 分析了采集模块的核心信号调理电路的误差与噪声, 并针对系统误差和随机误差的消除提出了解决方案。针对内部结构紧凑、金属构件形状不规则等问题, 选取柔性压电材料作为敏感元件。信号调理电路设计为电荷放大和电压放大两级级联结构, 以满足高精度、宽范围的应变测量要求。通过分析信号调理电路中的运放失调电压、电阻电容热噪声等系统误差和环境干扰、传输线串扰等随机误差, 针对性提出传感器标定、过采样和滑动平均滤波等消除方法。实验结果表明, 本文设计的传感系统能够测量 $0\sim 2000\mu\varepsilon$ 的应变信号, 且测量误差小于 1% F.S.。

(2) 针对传感系统中无线数据传输系统低功耗与数据传输速率的矛盾, 引入先入先出(First In First Out, FIFO)缓存机制, 提出了突发通信策略和直接内存访问(Direct Memory Access, DMA)控制的综合性解决方案。FIFO 缓存机制的引入, 能减少射频模块启停频率, 将少量多次的数据传输转换为批量少次的数据传输过程, 减小电路功耗的同时不降低总体数据传输效率。此外, 为进一步减小电路功耗, 提出了一种自适应休眠机制, 使系统在未检测到信号时进入长时间休眠、低频次苏醒以检测信号变化的状态, 在检测到信号后恢复工作状态, 以最大化延长电路工作寿命。选用集成无线数据传输模块的 CC430 系列芯片作为电路的主控芯片, 设计了无线传输电路, 将前述低功耗技术在嵌入式软件中进行了实现。实验结果表明, 系统平均功耗约为 32mW, 平均传输速率约为 57.9kbps。

(3) 对无线应变监测系统进行了集成, 开发了上位机软件并开展了应用测试。将所开发的无线应变传感器在减速器内进行了部署, 实现了应变信号高速高精度、高效率采集及传输, 完成了应变信号的可视化监测, 为将来进一步实现减速器内部薄弱环节的故障诊断奠定了基础。

关键词: 应变监测; CC430; 无线数据传输; 减速器

Abstract

Harmonic reducers and RV reducers are core components of industrial equipment, widely used in fields that require high-precision transmission systems, such as CNC machine tools and intelligent manufacturing equipments. The strain information of their internal structures is a critical parameter that reflects the operational precision and reliability of the reducers. Due to the compact internal structure, the accurate acquisition of key state parameters such as the strain of the internal weak links such as the flexible wheel of the harmonic reducer and the crank shaft of the RV reducer lacks effective methods. Therefore, this thesis investigates high-precision sampling, wireless data transmission, and processing solutions for the strain information of the reducers' internal structure. By integrating wireless communication technology and strain sensing technology, the disadvantages of traditional wired monitoring methods such as complex wiring and limited applicability are effectively overcome. The research presented in this thesis includes the following:

(1) To address the accurate measurement of strain signals within the reducer, a high-precision strain signal acquisition module is designed. The core signal conditioning circuit of the acquisition module is analyzed for errors and noise, and solutions for eliminating both system and random errors are proposed. To overcome challenges posed by the compact internal structure and irregular metal construction, flexible piezoelectric materials are selected as the sensitive element. The signal conditioning circuit is designed with a two-stage cascaded structure, combining charge amplification and voltage amplification, to meet the requirements for high-precision, wide-range strain measurement. By analyzing system errors such as op-amp offset voltage, thermal noise from resistors and capacitors, and random errors from environmental interference and transmission line crosstalk, specific methods for sensor calibration, oversampling, and sliding average filtering are proposed to eliminate these errors. Experimental results show that the designed sensor can measure strain signals from 0 to 2000 $\mu\epsilon$, with a measurement error of less than $\pm 1\%$ of full scale.

(2) To address the contradiction between low power consumption and data transmission rate in the design of the wireless data transmission system within the monitoring system, a FIFO buffering mechanism is introduced, along with a comprehensive solution involving burst communication strategies and DMA. The FIFO buffering mechanism reduces the frequency of RF module startup and shutdown,

converting multiple small data transmissions into fewer, bulk transmissions, thereby reducing power consumption without compromising overall data transmission efficiency. Additionally, to further reduce circuit power consumption, an adaptive sleep mechanism is proposed. This mechanism allows the system to enter long-term sleep with infrequent wake-ups to detect signal changes when no signal is detected, and resume operation when a signal is detected, thereby maximizing the circuit's operational lifespan. By selecting the CC430, which integrates RF modules, as the main control chip of the circuit, a wireless transmission circuit is designed, and the aforementioned low-power techniques are implemented in embedded software. Experimental results show that the system's average power consumption is approximately 32mW, with an average transmission rate of around 57.9kbps.

(3) Finally, the wireless strain system is integrated, and upper-level software is developed and tested. The developed wireless strain sensor is deployed inside the reducer to achieve high-speed, high-precision, and efficient acquisition and transmission of strain signals. This enables the visualization of strain signals, laying the foundation for future fault diagnosis of weak components within the reducer.

Key Words: Strain Monitoring; CC430; Wireless Data Transmission; Reducer

目 录

学位论文原创性声明	I
学位论文版权使用授权书	I
摘 要	II
Abstract	III
目 录	V
插图索引	VII
附表索引	IX
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 应变监测系统研究现状	2
1.2.1 应变监测方法现状	2
1.2.2 无线应变监测国内外研究现状	3
1.3 论文主要研究内容及创新点	5
1.4 文章结构安排	6
第 2 章 减速器内部应变监测系统关键技术	8
2.1 应变定义及其在反映结构健康状态中的重要性	8
2.2 压电效应及压电式传感器理论	9
2.3 基于压电传感器的高精度应变测量技术	9
2.4 应变传感系统低功耗设计理论	11
2.4.1 硬件低功耗设计原则	11
2.4.2 软件低功耗设计原则	11
2.5 射频无线通信技术基础	12
2.6 本章小结	13
第 3 章 高精度应变信号采集系统设计	14
3.1 高精度应变信号采集电路设计要求	14
3.2 敏感元件选型	14
3.3 高精度应变信号采集电路设计	15
3.3.1 压电传感器前置放大电路	15
3.3.2 信号调理电路设计方案及芯片选型	16
3.3.3 应变信号采集电路原理图	17
3.4 信号调理电路误差分析	19
3.5 误差处理方法研究	23

3.5.1 系统误差处理方法设计	23
3.5.2 基于过采样和滑动平均滤波的随机误差处理方法设计	24
3.6 信号调理电路仿真分析	26
3.7 应变信号采集系统性能测试	27
3.7.1 应变信号采集系统功能验证	27
3.7.2 应变信号采集系统应变测量范围测试	28
3.7.3 应变信号采集系统测量误差测试	29
3.8 本章小结	31
第 4 章 低功耗无线数据传输系统设计	32
4.1 无线数据传输系统设计要求	32
4.2 无线数据传输系统电路设计	32
4.3 低功耗的高效无线数据传输系统设计	35
4.3.1 高效率数据传输机制设计	35
4.3.2 低功耗休眠机制设计	39
4.4 无线数据传输系统性能测试分析	40
4.4.1 无线数据传输速率测试	40
4.4.2 功耗及数据传输速率结果分析	41
4.5 本章小结	42
第 5 章 无线应变监测系统集成	43
5.1 减速器内部无线应变监测系统部署与集成	43
5.2 基于 LabVIEW 的监测程序设计	44
5.3 应变数据处理系统设计	47
5.4 LabVIEW 应变监测系统功能测试	48
5.5 本章小结	49
结 论	50
参考文献	52
附录 A 攻读学位期间所参与的科研项目	56
致 谢	57

插图索引

图 1.1 论文研究思路.....	7
图 3.1 柔性压电复合材料.....	15
图 3.2 压电传感器两类前置放大电路等效模型.....	16
图 3.3 信号采集模块整体原理图.....	18
图 3.4 信号调理电路.....	18
图 3.5 电荷放大器噪声模型.....	22
图 3.6 同相放大电路图.....	23
图 3.7 等效电荷源电路.....	26
图 3.8 信号调理电路仿真电路.....	26
图 3.9 信号调理电路仿真结果.....	27
图 3.10 应变信号采集系统测试装置图.....	27
图 3.11 接入压电片时示波器波形显示.....	28
图 3.12 采集端应变测量范围指标测试装置示意图.....	28
图 3.13 无线应变传感器测试装置及测试结果曲线.....	29
图 3.14 应变信号采集端测量误差指标测试装置实物图.....	30
图 4.1 无线数据传输电路硬件框图.....	33
图 4.2 无线数据传输电路原理图设计.....	33
图 4.3 巴伦电路拓扑.....	34
图 4.4 射频匹配电路.....	34
图 4.5 无线数据传输系统关键环节.....	35
图 4.6 CC1101 无线收发软件流程图.....	36
图 4.7 自定义的协议帧格式.....	38
图 4.8 数据位比特位含义.....	38
图 4.9 休眠机制软件流程图.....	39
图 4.10 无线数据传输速率测试.....	40
图 5.1 无线应变监测系统整体框图.....	43
图 5.2 无线应变监测系统电路实物图.....	43
图 5.3 测试装置连接示意图.....	44
图 5.4 测试装置实物图.....	44
图 5.5 减速器应变信号输出.....	44
图 5.6 LabVIEW 软件流程图.....	45
图 5.7 串口模块配置说明.....	46

图 5.8 数据解析流程图	46
图 5.9 接入压电片未振动	48
图 5.10 压电片振动时的输出电压波形	49

附表索引

表 2.1 几种常见射频无线通信技术比较.....	12
表 3.1 AD8606 主要参数	17
表 3.2 电路部分元件参数	19
表 3.3 应变及电压峰峰值数据	29
表 3.4 应变信号采集端测试误差结果.....	30
表 4.1 无线数据传输速率测试结果	41

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

旋转矢量(Rotary Vector, RV)减速器与谐波减速器（以下二者统称减速器）作为工业装备的核心部件，被广泛应用在数控机床、智能制造装备、航空航天等高精密传动系统领域，其健康状态直接决定了装备的运行精度与可靠性^[1-2]。而减速器内结构的应变信息能够直接反映减速器的传动性能和健康状态。如何对减速器内部应变进行监测，以实时了解和掌握减速器内部健康信息变化是亟需解决的问题。

在信号采集方面，由于减速器内部结构紧凑，传感器布置与信号传输难，造成柔轮、曲柄轴、轴承等内部薄弱环节应变状态信息的获取缺乏有效手段，智能运维与故障诊断技术的应用受到极大限制。传统针对减速器等精密机械结构内部状态的监测主要通过外部部署的传感器来间接获取，采集的信号以振动、噪声、温度为主，获取的数据对反映减速器健康状态的有效性存疑。将传感器嵌入减速器内部待测部位，形成“减速器+传感器”的智能化组合，对于实现减速器健康状态监测是一种新途径。

在数据传输方面，传感器的粘贴部位位于减速器内部，需要将实时应变数据传输给上位机。由于减速器在运行过程中处于旋转、振动等状态，常规采用的有线动滑环数据传输形式，在运行过程中极易发生疲劳、断裂等情况。显然，在这种复杂工作环境下有线数据传输方案并不能满足实际需求。与有线数据传输方式相比，无线数据传输方式显著优点在于减少了连接线缆数量，大大降低布线复杂度，减少了线缆电阻对传输信号的干扰，进一步提高了信号传输的准确性和可靠性。且数据传输存在多个环节，需要多环节高效协同作用使得系统高效可靠工作。

在低功耗设计方面，由于系统采用电池供电方案且减速器内部空间有限，无法携带大容量电池工作。那么如何设计方案降低系统的功耗，对于延长系统寿命，减少电池更换次数来说至关重要。

综上所述，将高精度的应变信号采集技术和低功耗高效率的无线数据传输技术相结合，对实现减速器内部的应变监测具有重大意义。本文开发的面向减速器内部应变状态监测的无线应变监测系统，具备微型化和高集成度的优点，在信号采集方面能实现应变的高精度测量；在数据传输方面，先入先出（First In First Out, FIFO）缓存机制和休眠机制的引入为功耗和数据传输效率的冲突提供了解决方案。

无线应变监测系统将解决减速器内部结构应变监测难的问题，给传动结构健康监测的探索与研究提供了新的思路 and 方向。

1.2 应变监测系统研究现状

1.2.1 应变监测方法现状

当外力作用于连续介质上时，该介质产生变形，进而产生应力和应变。材料在承受应力时的单位长度变形即为应变，应变是一个无量纲的物理量^[3]。应变直接表征结构的应力状态，能否准确获取结构的应变信息对于工程安全有重大意义。现阶段常见的应变监测技术有基于光纤光栅的应变监测技术、基于振弦的应变监测技术、基于电阻应变片的应变监测技术、基于压电传感器的应变监测技术。

(1) 光纤光栅式应变监测技术

光纤光栅式应变监测技术以光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)为基础，当有入射光信号射入布拉格光栅时，只有特定波长的光能够被反射，该波长被称为布拉格波长，而其他波长的光会被透射。

当外力作用于光栅，光纤会发生应变，使光栅的周期长度发生变化，折射率也随之变化，于是布拉格波长发生漂移。测量出布拉格波长的偏移量，就可以根据波长漂移与应变的对应关系，反推出应变的大小，从而实现应变测量。

光纤光栅式应变测量技术凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等优点适用于对恶劣环境、高精度、长距离、分布式监测需求较高的应用场景，如桥梁、隧道等大型土木结构的长期健康监测^[4-5]。但其制造工艺复杂，成本较高，且安装和维护复杂，限制了其使用。

(2) 振弦式应变监测技术

振弦式应变监测技术的测量原理基于弦振动原理。在金属管内将钢弦两端固定并施加预张力，当钢弦受到外力作用时，内部激励线圈驱动其产生一定幅度的振动，且自振频率与外力大小呈特定函数关系。通过监测自振频率的变化，即可反算张力，再由此得到应变值^[6-7]。

振弦式应变传感器能够实现应变的稳定测量，并且具有结构简单、无零漂的优点。但其响应速度较慢，不适用于动态测量场合，且钢弦随工作时长的累计会发送松弛，也不适于长期监测使用。

(3) 电阻式应变监测技术

电阻应变式测量技术基于金属材料的应变电阻效应。当金属受到某外力作用时，会产生机械变形，其电阻值会随机械变形而发生变化，通过测量电阻的变化量就可以推出应变量的大小^[8]。

当金属导体受到拉伸时,其长度增加、横截面面积减小,阻值增大;反过来,当导体受到压缩时,其阻值会减小。

电阻应变片具有成本低、安装简单、响应速度快等优点,广泛应用于工业设备监测、机械振动分析、桥梁内部结构的健康监测等领域^[9-10]。但其存在零漂大的弊端,引线过长时会产生较大的干扰信号;若被测结构处于恶劣环境下,应变片稳定性差,不能适应结构的长期测量需求。

(4) 压电式应变监测技术

压电式应变监测技术是一种基于压电效应的动态应变测量技术,利用具有压电特性的材料,如石英、钛酸铅陶瓷等,在受力作用下产生与应变成正比的电荷。电荷经前置放大电路换为电压信号,通常为电荷放大器,通过测量电压信号的大小,再根据电压与电荷的对应关系推出应变的大小。

压电式应变监测技术具有高灵敏度、频带宽、结构简单、动态范围大、重量轻等优点,特别适用于动态或快速变化的应变监测,如振动、冲击和瞬态载荷等场合。压电式应变监测技术的一个重要应用领域即为结构的健康监测。压电材料的输出信号为电荷信号,引线长度不会对信号造成很大影响,并且不存在零点漂移的问题,具有良好的稳定性。然而,压电式应变监测方法具备一定局限:其输出信号为电荷形式,若不及时放大或转换,可能导致信号衰减或漂移,因此需要高输入阻抗的电荷放大器来处理信号。

在近几十年中,智能材料作为新兴领域发展十分迅速,而压电材料作为当前智能材料领域应用最广泛的材料之一,有兼具传感和驱动功能的优点^[11]。其中,压电复合材料凭借其良好的压电特性在航空航天、汽车工业、结构健康监测、机器人技术等领域得到广泛应用。将压电复合材料与传感技术相结合实现结构的应变状态监测具备广泛应用前景^[12-17]。

综上所述,压电式应变传感器凭借其安装简单、高灵敏度、低成本等优点在工业领域得到广泛应用,而压电复合材料也凭借其高灵敏度、良好的压电性能在传感领域崭露头角。因此本文采用压电式应变监测方法采集减速器内部应变信号,以柔性压电复合材料作为敏感元件,其延展性高、体积轻便的特点使得粘贴到待测部位时,不会对其工作状态产生影响,能进一步提高测量精度。

1.2.2 无线应变监测国内外研究现状

在传统的应变测量方法中,为精准监测结构各个位置的应变,通常需要在结构上安装大量传感器,采用集中式测量,并通过信号传输线连接至应变测量仪。测点数量的增加直接导致传输线的增加。

随着无线技术的发展,无线传感器网络在工业自动化、定位追踪、参数监测等领域的应用愈发广泛^[18-19]。许多研究人员正积极探索将无线通信与传感技术相

结合。射频通信作为一种利用电磁波实现数据传输的通信技术,广泛应用于工业自动化、无线传感器网络、智能家居等领域。随着集成电路技术的发展,大多数射频芯片内部已经集成了配套的外围电路,这极大降低了开发难度,只需按照提供的接口进行操作,就能实现基本的数据无线传输功能。射频通信凭借其低功耗、低开发难度的优势,在无线通信领域占据了重要地位。目前,市面上也有多款成熟射频芯片,能满足多种场景下的通信需求。

将射频通信技术应用在传感领域,能有效减少物理环境对系统的限制,提高系统的灵活性。目前大多数系统采用有线方式,其布线复杂、效率低下、适用范围有限,尤其是在线应变状态监测方面存在较大局限性。在军用和民用市场,基于无线通信技术的应变监测系统展现出广阔的应用前景。无线应变测量系统结合了传统应变测试方法与无线通信技术,具有较高的实用价值、创新性研究意义,能够有效克服有线测量系统的诸多弊端。

1995年,美国联邦公路局为了诊断钢结构桥梁由于长期疲劳而产生的损伤问题,设计并开发了一款便携式无线应变测量系统。该系统采用电池供电设计,支持最10个无线节点同步运行^[20]。其监测中心计算机部署了无线接收端用于获取桥梁应变数据,荷载试验的工作量大幅减少,同时还能迅速评估钢桥结构的损伤情况、疲劳趋势,以及在车载荷载和环境因素共同作用下的应变变化。

2009年,Hiroshi Ide等人开发了一个紧凑型基于ZigBee的无线应变测量传感器系统,该系统专为结构应变监测设计,具有非常高的应用价值,尤其适用于实时监测和远程数据传输。该无线应变测量系统的核心组成部分是现有的应变片传感器、模数转换器/放大器和ZigBee无线电芯片。通过将这些组件结合,系统不仅大大降低硬件成本,还提升了数据传输的准确性和可靠性。系统通过应变片传感器捕获应变数据,然后通过模数转换器将模拟信号转化为数字信号,并利用ZigBee无线电芯片将处理后的数据通过无线协议传送到远程设备,如个人数据助手或笔记本电脑、台式计算机等。一旦接收到数据,可以转发到远程计算机,借助传统的蜂窝通信、卫星通信或以太网等基础设施进行更高级别的数据分析。这个过程实现了结构健康监测的自动化和智能化^[21]。

2010年,中北大学的孟立凡教授团队基于单片机和射频模块,设计并开发了基于射频的无线收发模块,将无线射频技术与应变电测技术的结合,搭建了基于射频技术的无线应变监测系统^[22]。

2012年,Jo等人设计了一种高精度应变传感器板,并对其进行了验证,最终成功应用于斜拉桥的结构健康监测。该传感器板通过精确的自动平衡惠斯通电桥放大信号至2507倍,并结合温度补偿和分流校准技术,确保了测量信号的准确性和稳定性。与传统箔式应变计相比,传感器板还创新性地设计了摩擦型磁式应变传感器,便于快速部署。这些设计使得应变传感器具备了更高的适应性和部署效

率,尤其是在大型、复杂的工程项目中,可以极大地提高监测的灵活性和操作性。实验室规模的测试验证了该系统的高精度性能,随后在全尺寸斜拉桥的应用中得到了实际验证,证明了其良好的性能和可靠性^[23]。

2014年,华东理工大学的蒋飞设计了一套无线应变测量系统,用于测量岸桥起重机拉杆的应变。该无线应变测量系统以电阻式应变片作为传感器的敏感元件,以仪表放大器 AD8428 为核心设计了放大电路进行信号放大,AD8428 具有共模抑制比高、稳定性强且低温漂的优点,微控制器型号为 TI 公司的 CC2530,其负责数据处理和无线通信功能的实现。该系统实现了自动调零、数据采集及自动组网等诸多功能^[24]。

2018年,天津工业大学的董攀浩开发了一个吊塔金属结构疲劳损伤监测系统。该系统的数据采集基于电阻应变法,设计了应变信号调理电路进行信号调理,最终通过无线局域网技术实现数据的无线传输功能。经静态和动态应变测试,验证了该无线应变采集系统具有高精度的应变测量能力^[25]。

同年,华东理工大学的郭彤设计了一种多通道的微型无线应变监测系统。在该系统中,硬件电路的设计和分析通过 Arduino 平台实现信号测量与显示端之间的数据处理。最终,通过静态应变实验和旋转构件的应变测试,证明了该系统的可行性与可靠性^[26]。

2022年,华中科技大学的李函坤将 ZigBee 无线通信技术与柔性传感器结合,设计了一种小型无线医疗导管形变监测系统。该系统能有效地采集医疗导管外壁柔性传感器的数据,通过调试后的各项信号采集传感器实现了远距离测量与数据快速收集^[27]。

综上所述,本文将综合压电式应变监测和无线射频技术优势实现减速器内部应变信号的高精度采集处理和高效传输,有效解决减速器内部应变监测难题,准确获取减速器内部的应变状态信息,实现高精度、低功耗、高数据传输效率的应变监测系统设计,有效提高减速器内部应变监测系统的测量范围,降低系统测量误差。

1.3 论文主要研究内容及创新点

本文主要的研究工作是设计一种适应减速器内部环境的无线应变监测系统。围绕减速器内部应变信号的采集和无线数据传输问题展开研究。系统通过设计高精度低功耗小体积的信号采集电路实现对减速器被测部位小微应变信号的采集,使用集射频功能和单片机于一体的高性能微控制器实现信号的 A/D 转换以及无线数据发射功能,最后开发上位机用于数据的可视化显示以及数据处理工作。具体研究内容如下:

(1) 减速器内部高精度应变信号采集系统设计, 尤其是高精度低噪声的信号调理电路设计, 重点分析信号调理电路的误差和噪声, 并分别针对系统误差和随机误差提出解决方案。

(2) 减速器内部无线数据传输系统及上位机监测系统开发, 基于 CC430 系列微控制器完成低功耗的高效无线数据传输系统的开发, 基于 LabVIEW 开发上位机数据处理系统实现数据存储、可视化、线性回归等功能。

(3) 开展减速器内部无线应变监测系统集成测试, 针对应变监测系统的测试范围, 测量精度, 数据传输速率等指标分别设计实验开展性能测试。

本文的研究工作具有以下创新点:

(1) 在对减速器内部应变信号采集的技术研究中, 针对应变信号的高精度采集设计信号调理电路, 对信号调理电路的电路拓扑结构进行优化处理。信号调理电路具有高精度低功耗微型化的显著优点, 电荷放大器与电压放大器的协同工作模式, 在维持系统低功耗特性的同时, 实现应变信号的灵活放大, 为后续数字化处理提供可靠的基础。

(2) 在对减速器内部应变信号的无线数据传输系统研究中, 引入 FIFO 缓存机制对系统中低功耗和数据传输速率的冲突提供了解决方案, FIFO 机制的引入将显著减少中断触发频率, 其与直接内存访问(Direct Memory Access, DMA)结合释放了 CPU 资源, 进一步减小系统功耗。此外, 提出一种智能休眠机制方法进一步降低电路功耗。

1.4 文章结构安排

论文研究思路如图 1.1 所示。论文研究思路分为高精度应变信号采集电路设计、低功耗的高效无线数据传输系统设计、无线应变监测系统集成三部分。其中应变信号采集电路包括高精度信号调理电路设计、误差分析及处理以及应变采集系统的性能测试。无线数据传输系统设计包括系统硬件设计、数据传输机制设计以及系统性能测试。无线应变监测系统集成包括谐波减速器和 RV 减速器内部的系统集成以及基于 LabVIEW 的上位机设计。全文分为 5 章, 主要内容如下:

第 1 章: 绪论。主要介绍了减速器内部应变监测的研究背景及意义, 分析无线应变传感器当前研究现状, 提出本文主要研究方向。

第 2 章: 减速器内部应变传感系统关键技术介绍。介绍了适应于减速器内部环境的无线应变监测系统的关键技术研究。首先是压电式传感器理论, 对压电元件特性和压电效应做了介绍, 接着对高精度测量技术和低功耗技术理论进行阐述。最后介绍了无线射频通信技术, 并对几种常用的射频通信技术作了比较。

第3章：应变信号采集系统设计。对应变信号采集端的系统设计进行阐述，包括应变信号采集电路的设计及分析，包括电路的各个模块单元，并对电路功能进行仿真验证。接着对信号调理电路原理及电路误差和噪声进行分析，并针对误差的消除提出解决方案。最后开展实验对应变信号采集端的测量范围以及测量误差进行测试。

第4章：无线数据传输系统设计。对无线数据传输系统设计进行阐述，包括系统的硬件设计和软件实现，针对数据传输速率和功耗的冲突提出了解决方案，并设计了自定义的协议帧格式用于高效数据传输。提出了一种智能休眠机制进一步减小系统功耗，延长工作寿命。最后设计实验对系统的无线数据传输速率进行测试。

第5章：无线应变监测系统集成。本章为无线应变监测系统的集成，基于减速器搭建了整套测试系统进行系统集成测试。为第3、4章设计的下位机系统开发了上位机系统实现数据的处理、存储以及可视化操作。

结论。对本文的研究工作进行了总结与展望，对研究过程中的重难点与成果进行归纳总结，并对减速器内部结构应变监测系统的未来工作进行了展望。

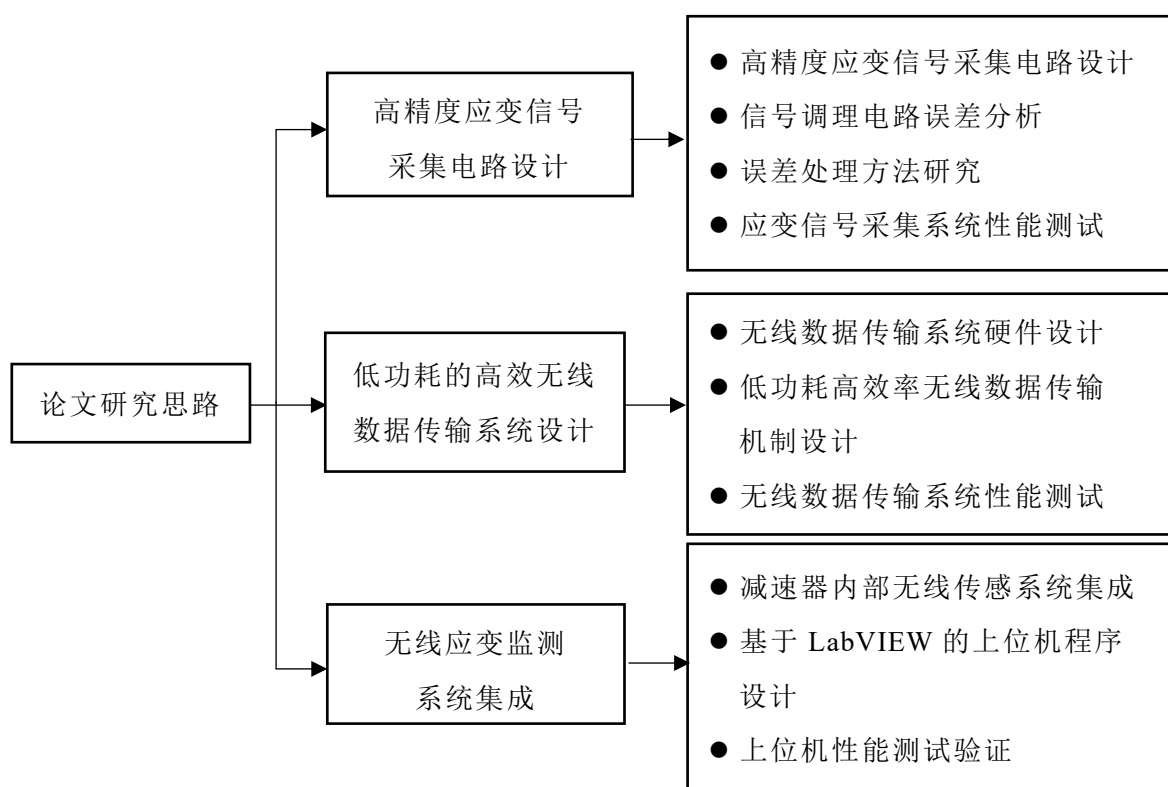


图 1.1 论文研究思路

第2章 减速器内部应变监测系统关键技术

本文设计的无线应变监测系统分为应变信号采集系统、无线数据传输系统，以及上位机信号处理系统。应变信号采集系统主要功能是实现应变信号的高精度采集及信号调理，无线数据传输系统主要功能是实现低功耗的数据传输，上位机系统主要功能是实现数据存储、数据可视化、数据处理等。本章将对减速器内部无线应变监测系统的关键技术理论进行分析阐述。

2.1 应变定义及其在反映结构健康状态中的重要性

应变是描述材料在外力作用下产生变形程度的重要物理量，定义为单位长度的变形量。应变反映了结构在载荷、疲劳、环境变化等因素作用下的物理响应，是结构健康监测中不可或缺的参数。应变分为轴向应变、剪切应变和主应变三类。

轴向应变是指结构在拉伸或压缩载荷作用下，沿某一方向的长度变化。轴向应变定义为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

式中， ε 为轴向应变； ΔL 为长度的变化量； L 为原始长度。

剪切应变是指结构在剪切力作用下发生角度变化的程度，定义为变形前后直角夹角的变化量，剪切应变定义为：

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad (2.2)$$

式中， γ 为剪切应变； Δx 为剪切位移； h 为剪切面高度。

主应变是指结构在某点处的最大和最小应变值，与主应力方向对应，用于综合分析结构应力状态。

在结构健康监测中，应变的变化往往是结构损伤、疲劳、裂纹等问题的直接表现。相比位移或加速度等宏观响应，应变能够反映材料微观层面的局部损伤。因此，在高精度监测中，轴向应变最常被用于关键评估指标，尤其在桥梁、航空航天结构、建筑结构健康监测中广泛应用。轴向应变对于结构安全状态的反映最为直接，适合与压电传感器结合，实现对结构载荷变化和潜在损伤的实时监控。

应力是外力作用在单位面积上的力，记作 σ 。在弹性阶段，应力与应变之间满足胡克定律：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.3)$$

式中， E 为杨氏模量，表征材料的刚度，单位为 Pa； ε 为应变。

在使用压电传感器时,应变与输出电荷、电压信号之间存在明确的对应关系,从而使应变成为连接物理变形与电信号响应的桥梁。

2.2 压电效应及压电式传感器理论

压电材料具有受外力后表面产生电荷的特点,产生的电荷经测量电路放大和阻抗变换后成为电压输出,电压输出正比于所受外力的电量输出^[28-31]。压电式传感器可以将力这种非电量转换为电量,能够用于测量力的大小。

1880年,雅克·居里和皮埃尔·居里发现对石英,电气石等晶体施加压力会产生电荷,该现象被命名为压电效应^[32]。当压电晶体受到某个方向外力作用时,其内部出现正负电荷和中心发生相对位移的现象,从而产生极化,随后在压电晶体的某两个表面上将产生极性相反的电荷,若外力被撤除,晶体又将恢复到不带电的状态,如果外力方向改变,电荷的极性也将随之改变。

压电陶瓷由无数细微的电畴组成^[33],电畴是自发电极化的小区域,由于自发极化的方向不规则,当压电陶瓷没有经过极化时,各个电畴的自发极化不尽相同,极化会相互抵消。要使得压电陶瓷具有压电效应,必须对其施加一定方向的电场时,使得压电材料内部的电畴排列成外部电场的方向,当外部电场消失时,由于压电材料自身特性,大部分电畴在电场消失后并不会复原,而是根据之前所施加的外部电场的方向进行组合,这个过程就称为极化。极化处理后的压电材料内部会出现极化强度,尽管材料两端有电荷,但外部的自由电荷会因为材料的内部电荷而吸引,整个材料对外不显电性。要使压电陶瓷展现出压电效应,要在特定方向上对其施加外力才能显示出压电效应。一般来说,取Z轴方向作为压电陶瓷的极化方向,压电陶瓷的压电常数矩阵^[34]为:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

式中, $d_{31}=d_{32}$; $d_{15}=-d_{24}$ 。

当仅给压电陶瓷片施加一个平行于极化方向的压力 F 作用时,压电陶瓷片由于压电效应而释放的电荷表示为:

$$q = d_{33}F \quad (2.5)$$

2.3 基于压电传感器的高精度应变测量技术

高精度测量技术作为传感领域的核心研究方向,其理论体系与技术方法深刻影响着现代工业制造、科学研究与民生应用的发展进程。该技术以误差控制理论为基础,通过多学科交叉融合构建起精密测量系统,在微米级乃至纳米级尺度上

实现对物理量的精确表征。其理论框架包含测量系统建模、误差传播分析、噪声抑制机制等核心要素，技术实现涉及传感器设计、信号处理算法、环境补偿策略等多维度创新。广泛应用于航空航天、精密制造、电子信息等需要高精度测量的领域中。

减速器在机械传动系统、重载齿轮机构和工程机械结构中广泛应用，其内部应变状态的精准测量对于系统安全性、寿命评估及结构健康监测具有重要意义。随着科学技术的发展，传统的测量手段已难以满足高精度、高稳定性和高可靠性的工程实际需求。在应变监测系统中，原始应变信号往往带有噪声、漂移和非线性失真，难以直接用于精确分析与决策。为提高测量精度与可靠性，需要采用一系列软硬件相结合的信号调理与误差抑制技术。接下来分别介绍硬件设计和软件处理方法。

（1）硬件设计方法

在高精度压电式应变测量系统的硬件设计中，核心在于构建低噪声、高灵敏度的物理信号转换链路。为此，在信号调理电路设计上，系统通常采用高输入阻抗的电荷放大器或电压缓冲器作为前端，将压电传感器输出的高阻抗微弱信号转换为低阻抗电压信号；放大器器件则选用低噪声、低偏置电流且具备温漂补偿功能的精密运算放大器，以确保极小电荷变化能够被可靠感知。针对环境电磁干扰与传输链路噪声，在 PCB 布局中严格分离模拟与数字地线、使用多层屏蔽及去耦电容，降低开关噪声和地回路干扰对测量通道的侵入。为了将信号精确数字化，系统选用高分辨率模数转换器，高精度 ADC 模块选用 $\Sigma\text{-}\Delta$ 架构，凭借过采样与噪声整形技术将有效位数提升至 12bit 以上，配合稳定的参考电压源和差分输入结构，进一步抑制量化误差和共模干扰。硬件设计旨在从传感器输出到数字信号进入处理器的全过程中，最小化每一个环节的噪声和漂移，为高精度测量奠定坚实基础。

（2）软件设计方法

在软件设计中可以多级滤波与自适应补偿算法进一步提高测量精度并消除残余误差。首层为实时信号平滑模块，结合滑动平均、加权平均等滤波算法在时域中去除随机高频干扰，而对周期性或突变特征，可以利用小波变换或带阻滤波在频域内精准剔除特定频段噪声。

高精度测量技术的理论根基建立在误差分析与补偿机制之上。测量系统本质上可抽象为输入信号经过传递函数作用后输出量化结果的动态过程，其数学模型通常由确定性分量与随机性分量复合构成。系统误差来源于系统硬件的非线性、温度漂移、机械迟滞等固有特性，可通过多项式拟合、神经网络建模等参数辨识方法建立补偿函数。随机误差则表现为测量噪声的随机波动，需运用概率统计理

论分析其分布特征，采用卡尔曼滤波、小波阈值去噪等时频域处理技术实现噪声抑制。

2.4 应变传感系统低功耗设计理论

在减速器内无线应变监测系统设计中，低功耗是非常重要的设计目标。由于系统采用电池供电，功耗的优化直接关系到系统性能、续航等。功耗从来源上分为动态功耗和静态功耗^[36]。动态功耗是电路处于活动期间的功耗，动态功耗与时钟频率、负载电容及电压平方呈正相关关系。静态功耗则指电路处于稳定状态时的功耗，主要由晶体管漏电流引起。根据无线应变监测系统结构，将从硬件和软件两方面完成系统低功耗设计。

2.4.1 硬件低功耗设计原则

硬件低功耗设计是降低系统总功耗的核心环节，其核心是通过多层级功耗管理机制实现能量消耗的精准控制。无线应变监测系统包括微控制器和外围功能电路。一些微控制器采用极低功耗的静态设计，支持多个工作模式，能根据应用需求灵活切换。微控制器的低功耗模式能够关闭一部分外设模块以降低功耗。场效应管、运放等有源器件是系统主要功耗来源。由于电路存在跳变沿，在电路翻转的瞬间会产生较大的电流，从而产生较大的动态功耗。因此在设计相关功能电路时，尽量采用功耗更低的 CMOS 器件，同时使用集成度高的器件代替分立元件，减少电路元件数量。比如在设计运放电路时采用集成式芯片的设计方案。

2.4.2 软件低功耗设计原则

除在硬件设计上实现的低功耗设计，软件低功耗设计同样是实现系统低功耗的核心环节。微控制器的低功耗特性需要在软件层面进行精细化控制，软件层面的低功耗实现需要构建事件驱动的智能调度体系。轮询是嵌入式系统中常见的操作，但是轮询需要消耗大量 CPU 资源来检查外设状态，是一种低效的操作方式，且会额外增加功耗。中断机制则可以在外设状态改变时自动触发，通过精确配置中断控制器，将 ADC 采样完成、FIFO 阈值触发、定时器溢出等事件映射为唤醒源。通过合理配置中断源和中断优先级，使 CPU 仅在必要时刻激活从而降低系统功耗。

此外，低功耗的实现还可以通过软件算法进一步优化。嵌入式系统中外设模块的启停是很大的功耗来源之一，通过软件算法的优化减少模块启停频率也能够降低系统功耗。比如在需要频繁采集信号和数据传输过程中，引入 FIFO 缓存机制就能减少射频模块的唤醒频率。

在程序设计过程中，结合微控制器本身提供的低功耗模式，设计智能休眠机制也能进一步降低系统功耗。对于无线应变监测系统来说，可以通过监测 ADC 的采集通道有无应变信号输入来判断电路是否需要进入工作状态。对于不需要进行信号采集及传输的情况，将系统置于深度休眠模式；当需要进行信号采集及传输时，唤醒系统，进入工作模式。

2.5 射频无线通信技术基础

射频是高频交流变化电磁波的简称。射频通信是建立在麦克斯韦的电磁场理论之上。振荡的电场会产生振荡的磁场，振荡的磁场又会引发电场的变化，二者在空间中不断相互作用并传播，从而形成电磁波。

射频无线通信技术的核心在于利用射频信号，即 300kHz~30GHz 的电磁波进行数据的发送和接收。射频无线通信技术具有宽频带与高信息容量，体积小，成本低，抗干扰能力强等特点，因此在无线通信中被广泛应用。射频收发系统是无线通信系统的核心，主要包括射频发射机，射频接收机以及天线三部分，射频发送机用于将信号处理并加载在射频电磁波上，射频接收机用于接收并还原射频信号，天线作为信号的收发媒介。随着微电子技术的快速发展，射频电路的集成度和性能不断提升。Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、LoRa 以及 433 MHz ASK/OOK 都属于常见的射频通信技术。几种射频通信技术的比较见表 2.1。

表 2.1 几种常见射频无线通信技术比较

技术类型	频段	优点	缺点
蓝牙	2.4 GHz	低功耗、易集成	穿透力差，高频易被金属屏蔽；
Wi-Fi	2.4/5 GHz	速率高、带宽大，易组网	功耗高；高频信号在金属环境中多次反射和衰减，可靠性受限
ZigBee	868/915 MHz, 2.4 GHz	低功耗、支持组网、可靠性好	常用的 2.4 GHz 频段与 Wi-Fi、蓝牙等多种技术共用，容易遭受同频干扰，降低链路可靠性。
LoRa	433/868/915 MHz	超远距离、强穿透； 低功耗 低频穿透力强、小型	低带宽，实时性和数据速率有限。
433 MHz ASK/OOK	433 MHz	天线；协议简单、低功耗；抗多路径衰落能力强	速率较低，需专有编码提高抗干扰性。

综上所述，433MHz 通信在金属环境下的穿透衰减小，硬件实现复杂度低，能在有限功率预算下实现高效通信，且天线尺寸设计简单。433MHz 的电磁波在金属屏蔽、功耗、可靠性和尺寸上实现了最佳平衡，十分适用于减速器内部的无线数据传输。

2.6 本章小结

本章涵盖了压电式传感器理论、高精度测量技术、低功耗技术、无线射频通信等技术。由于本系统的敏感元件采用压电元件，所以首先介绍了压电式传感器的工作原理。接着基于系统设计需求，介绍了高精度测量技术和低功耗技术。然后介绍了射频无线通信技术。本章对减速器内部无线应变监测系统的关键技术的介绍和分析，为后续系统设计和优化提供了理论基础。

第3章 高精度应变信号采集系统设计

减速器内部结构的应变信息是反映结构疲劳和损伤发展,进而反映减速器整体健康状态的重要指标。获取减速器内部结构实时应变信号,对掌握和监测减速器的运行可靠性至关重要。但是,减速器内部结构紧凑,传感器布置与信号传输难;除谐波减速器中柔轮为柔性结构外,减速器内其它结构均为刚性的金属结构,应变信号非常微弱,精确测量难度大。本章将提出一个适应减速器内部应变信号采集的方案。针对内部结构紧凑,传感器部署困难的问题,采用微型、柔性压电敏感元件;针对应变信号微弱的问题,设计高精度低噪声的信号调理电路实现应变信号的采集和放大,并对系统的误差进行详细分析并提出降低误差的解决方案。

3.1 高精度应变信号采集电路设计要求

减速器内部无线应变监测系统的信号采集系统设计要求如下:

(1) 微型化

减速器内部待测部位能够用于传感器粘贴的空间十分狭小,如果采集系统电路体积过大则无法贴合待测部位结构,无法进行应变测量。

(2) 高精度

减速器内部待测部位应变信号十分微弱,为准确监测减速器内部应变信号,需要实现高精度的应变测量。因此电路设计时要尽可能减小干扰,减少分立元件的使用,尽量采用高集成的芯片和模块完成电路设计,同时在器件选型时要考虑其噪声,以提高系统的抗干扰性。此外,需要建立误差和噪声分析模型,并对误差进行消除,实现应变信号的高精度测量。

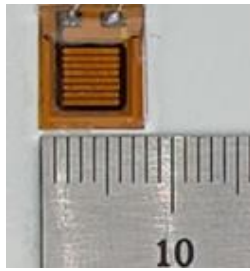
(3) 宽范围

由于谐波减速器中柔轮的变形大至数百甚至上千微应变,保守估计,采用 $2000\mu\varepsilon$ 作为满量程作为对应变测量范围的要求。

3.2 敏感元件选型

减速器内的待测部位包括柔轮、曲柄轴等结构,一方面,这些结构表面形状不规则,存在曲面且结构紧凑等情况,导致传感器部署的空间位置有限;另一方面,减速器内部的金属结构导致应变信号十分微弱,采集难度大。这对传感监测系统的敏感元件选型提出了挑战,系统的敏感元件需要具备体积小、灵敏度高、柔性好等特点才能适应被测部位的结构。于是柔性压电复合材料作为采集系统敏感元件。

柔性压电复合材料将压电陶瓷与聚合物复合，其压电相是压电陶瓷，柔性相是聚合物，柔性压电复合材料克服了压电陶瓷的脆性缺点，具有更高的柔性和灵敏度，在一定程度的弯曲载荷下仍然可以保持较为优秀的压电特性。因此适用于弯曲等不规则形状结构上。由于柔性压电纤维复合材料能保持良好的压电活性，且具有重量轻、厚度薄、柔性好、耐疲劳等特性^[42]。本文将柔性压电复合材料与无线应变监测系统相结合，开展减速器内部无线应变监测系统的设计和研究，对其输出的电荷信号实现高精度信号调理。柔性压电复合材料（后文称压电片）的体积和柔性如图 3.1 (a)所示，其压电常数 d_{33} 能达到 440.3pC/N ^[42]，灵敏度高、体积小且具备柔性的特点非常适用于紧凑空间环境下的应变测量。图 3.1 (b)展示了该材料的柔性特性。



(a) 柔性压电复合材料尺寸



(b) 柔性压电复合材料柔性

图 3.1 柔性压电复合材料

3.3 高精度应变信号采集电路设计

3.3.1 压电传感器前置放大电路

压电传感器输出的电荷信号微弱，需要设计信号调理电路用于压电传感器的输出信号。低频条件下信号调理电路的设计要考虑到压电传感器自身具有较高的输出阻抗且输出能量较低，在测量系统中，前置放大器常选用高输入阻抗类型。前置放大器除了将传感器的高输出阻抗转换为低输入阻抗，完成阻抗变换外，还能对传感器输出的微弱信号进行放大，以便后续处理^[43]。

在电路中，压电元件输出信号可以采用等效电路的方式来分析。根据戴维南等效定理，可以将其等效为一个和电容并联的电荷源，也可以将其等效为和电容串联的电压源。压电传感器的输出信号常见放大电路有两种：电荷放大电路和电压放大电路^[44]。图 3.2 给出了这两种电路，为了分析方便，在这两种电路中对压电放大器进行了不同的电路等效。

(1) 电荷放大电路分析

在图 3.2 (a)中， Q 和 C_a 是压电元件的等效电路， C_e 、 C_i 分别为线缆分布电容、运放输入电容。 C_f 为电荷放大电路反馈电容， R_f 为反馈电阻。

不难分析得到，当 R_f 非常大时（通常选用数 $M\Omega$ 的电阻），电荷放大电路的输出电压表达式为：

$$U_o \approx -\frac{Q}{C_r} \quad (3.1)$$

（2）电压放大电路分析

在图 3.2 (b)中， U_i 和 C_a 是压电元件的等效电路， C_e 、 C_i 分别为线缆分布电容、运放输入电容。电压放大电路的输出电压表达式为：

$$U_o = \frac{QA}{C_r + C_e + C_i} \quad (3.2)$$

由公式(3.1)，电荷放大器的输出电压仅与压电传感器的电荷灵敏度系数和反馈电容有关，连接电缆的电容对输出电压的影响可忽略不计。由公式(3.2)，若改变传感器和电压放大器之间的电缆长度，电缆的分布电容将随线缆长度发生变化，从而对灵敏度产生影响。目前，这种方式更适用于实验室的实验测试，实际工程应用的相对较少。

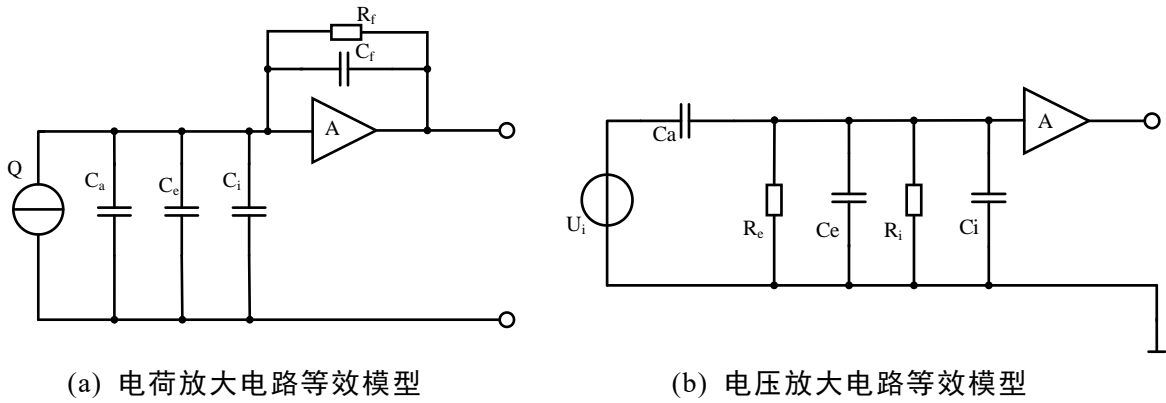


图 3.2 压电传感器两类前置放大电路等效模型

综上所述，电荷放大器和电压放大器相比，其输出电压仅和反馈电容的大小有关，而与线缆电容、运放输入电容都无关，测量精度更高，线性度更好。因此本文将采用电荷放大器作为前置放大器，将压电片输出的微弱电荷信号转换为电压信号，以提高信号质量并优化测量效果。

3.3.2 信号调理电路设计方案及芯片选型

（1）信号调理电路设计方案

信号调理电路为两级级联结构。核心功能是将减速器内部待测部位的机械应变转化为可处理的电压信号并实现高精度放大。当减速器发生机械形变时，贴附于检测部位的压电片将产生相应的电荷信号。信号输入电荷放大器，通过电荷-电压转换获得与应变大小成正比的电压信号。同时，在电荷放大器同相输入端设置了 1.25V 直流偏置电压，使得运放输出与 ADC 的输入范围 0~2.5V 匹配，在压电

片无电荷时，使得输出信号中心电平位于 ADC 量程中点。第二级放大电路采用同相放大电路对前级输出信号进行二次增益调节，接入负反馈机制以改善电路的非线性失真现象，提高电路稳定性，且增加输入阻抗减少输出阻抗。通过精确配置反馈网络的电阻参数，实现电压信号的可控放大，确保系统整体增益满足测量精度要求。

（2）芯片选型

前置放大电路的作用是采集微弱电荷信号，实现电荷信号的高精度放大。由于敏感元件的输出为微弱电荷，要求前置放大器满足高输入阻抗，低偏置电流等要求，次级同相放大电路用于对电荷放大电路的输出信号二次放大。信号调理电路选核心放大器选用双运放芯片 AD8606，是一款由 ADI 公司生产的运算放大器，具有高精度，低功耗，低偏置电流的优点，十分适用于信号调理电路高精度和低噪声的需求。AD8606 主要参数如表 3.1 所示。

表 3.1 AD8606 主要参数

参数	典型值
输入失调电压	20 μ V
输入偏置电流	0.2pA
共模抑制比	95dB
输入失调电流	0.1pA
温漂	1 μ V/ $^{\circ}$ C
共模输入电压	1/2 V_{CC}

3.3.3 应变信号采集电路原理图

应变信号采集系统电路整体原理图如图 3.3 所示。包括电源保护、基准电压、开关电路、信号调理电路模块。用于实现电荷信号的采集和高精度调理，最终输出为一个电压模拟量。

（1）信号调理电路设计

信号调理电路采用两级级联结构，第一级为电荷放大电路，第二级为同相电压放大电路，对压电片输出的电荷信号实现两级放大。其中，POS2 和 NEG2 与压电片连接，为应变信号输入端， $U_{8.1}$ 为运放芯片 AD8606 的第一级运放， $U_{8.1}$ 、积分电容 C_{28} 、反馈电阻 R_{39} 构成电荷放大电路。 V_{O1} 为电荷放大器的输出信号，同时也是第二级同相运算放大器的输入信号， $U_{8.2}$ 为二级运放，反馈电阻 R_{14} 和 R_{12} 构成同相放大电路，通过调节 R_{14} 和 R_{12} 的阻值可以调节电路放大倍数。电阻 R_{26} 和电容 C_{37} 构成一个 RC 滤波器。信号调理电路的级联结构，既保证了电荷转换环节的线性度，又兼顾了电压放大过程的灵活性，有效解决了减速器内高精度应变监测的难题，为后续数字化处理提供了可靠的基础。信号调理电路设计见图 3.4。

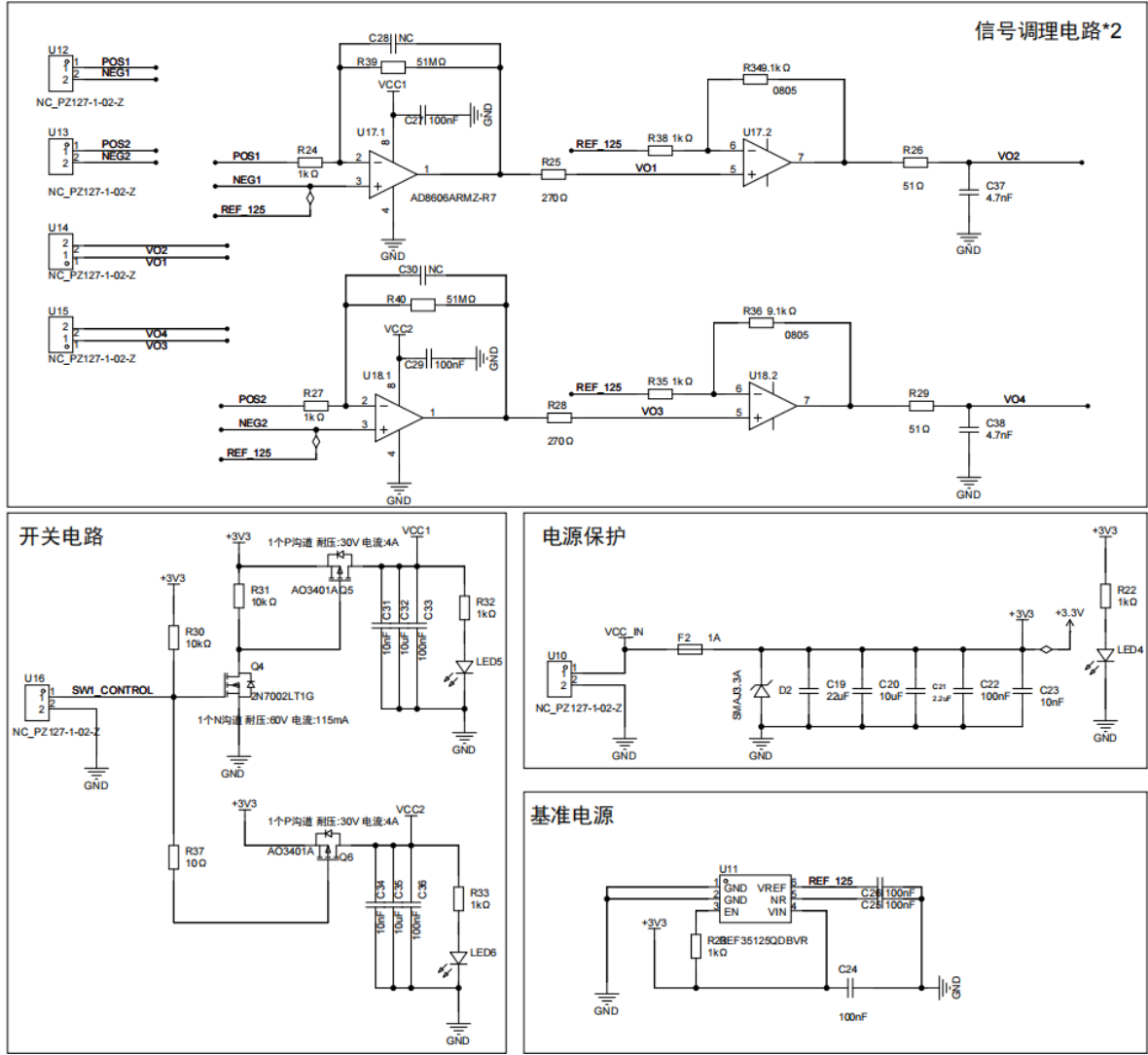


图 3.3 信号采集模块整体原理图

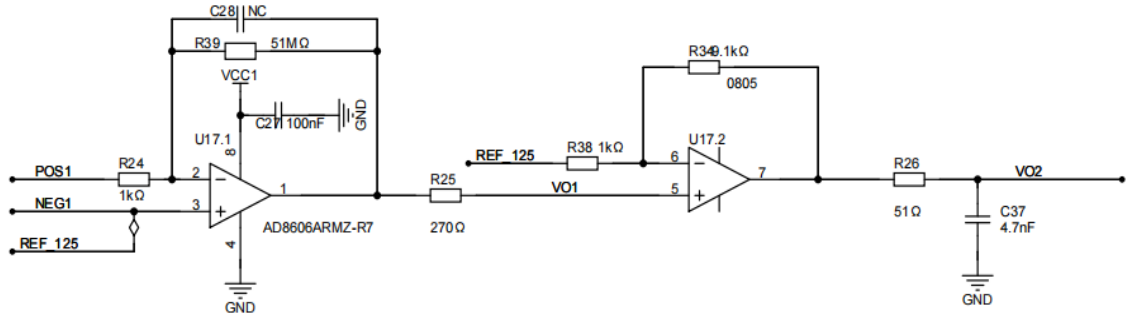


图 3.4 信号调理电路

根据式(3.1), 电荷放大器的输出电压为:

$$V_{o1} = -\frac{Q}{C_{28}} \quad (3.3)$$

在信号调理电路中, 电荷放大电路承担采集和放大原始压电信号的功能, 积分电容和反馈电阻对于作为放大器的关键元件, 对减少电路噪声, 提高电路工作稳定性至关重要, 因此, 要谨慎选择电阻和电容的参数。积分电容 C_{28} 的选取对信号质量的影响尤为显著。当反馈电阻值保持不变时, 较小的积分电容会使信号

幅值增大，但噪声也更为突出；而较大的积分电容能够更好地抑制噪声，但信号幅值减弱，影响后续放大电路的信号采集与处理。

理论上，电荷放大电路不需要反馈电阻也能正常工作，但其稳定性和抗噪声能力会下降。在直流工作状态下，电容负反馈支路相当于断路，电路容易受线缆电容影响，从而产生噪声干扰，导致放大器零漂。在电容支路并联反馈电阻，为电容提供直流反馈能有效解决这个问题，提高电路稳定性。

信号调理电路的第二级为同相放大电路。其输出电压和输入电压同相，运算放大器的增益由反馈电路上的两个电阻共同决定，反馈控制是通过将一小部分的输出电压通过反馈电路上的电阻分压返回到运放反相端来实现的，这种闭环配置具备极好的稳定性和极高的输入阻抗。同相电压放大器的输出电压为：

$$V_{o2} = (1 + \frac{R_{34}}{R_{38}})V_{o1} \quad (3.4)$$

电路部分元件参数见表 3.2。

表 3.2 电路部分元件参数

电路元件	值
C ₂₈	1.8nF
R ₃₉	51MΩ
R ₃₈	1kΩ
R ₃₄	9.1kΩ

(2) 其它辅助电路设计

电源保护电路：为保护电路免受短时间突发电压的损伤，选择瞬态电压抑制二极管(TVS)SMAJ3.3A 对电路电源进行保护，其最大反向工作电压为 3.3V，在电压超过 3.3V 时快速切换到导通状态，从而吸收和排除过电压，确保电路安全。

开关电路：为了实现模块单元复用、缩小电路尺寸，每个信号采集模块上共有两路压电信号调理电路，以实现多路应变信号的采集。开关电路用于实现对不同信号调理电路的选通。开关电路采用推挽式设计。电路工作时，两只对称的开关管每次只有一个导通，所以导通损耗小、效率高、既提高电路的负载能力，又提高开关速度。NMOS 管 Q_1 起到开关作用，用于切换通路，由主控芯片输出一个控制信号控制。当控制信号为高电平时，PMOS 管 Q_2 导通，当控制信号为低电平时，PMOS 管 Q_3 导通。

3.4 信号调理电路误差分析

在应变信号采集系统中，信号调理电路具有提高系统的信噪比和信号传输时抗干扰能力的作用，该电路性能的优劣直接决定着整个系统的测量精度及稳定性。

按照前述设计要求，应变的测量要精度达到 1% F.S.。信号调理电路中的误差分为系统误差和随机误差两大类。接下来从这两个方面对电路中引起误差的因素进行分析。

(1) 信号调理电路系统误差分析

信号调理电路以运算放大器为核心设计，理想的运算放大器具备以下特征：输入阻抗无限大，即“虚断”特性；输出阻抗趋近于零；开环增益无限大；共模抑制比无穷大，带宽无限大。然而，实际运算放大器都是非理想运算放大器。失调、漂移和共模电压等变化会引起输出误差。由于上述非理想特性造成的误差具有确定性和可重复性，因而归为系统误差。

如果在运算放大器输入之间接入一电压源使得集成运放输出端电压为零，两个输入端之间所加的补偿电压就是输入失调电压。影响失调电压的主要因素包括：偏置电流和失调电流、共模偏移、热漂移。接下来将从上述三个因素进行分析。

1) 输入偏置电流、输入失调电流造成的误差分析

运算放大器的输入偏置电流定义为运放同相端输入偏置电流 I_{B+} 和反相端输入偏置电流 I_{B-} 的平均值，即 $(I_{B+} + I_{B-})/2$ 。输入偏置电流是流入运放输入端的电流，可以等效为连接到每个输入端的电流源。理想情况下，两个输入偏置电流应该相等并相互抵消。然而，现实是不平等的，输入端电流的差值被定义为输入失调电流。结合表 3.1，考虑由偏置电流和失调电流带来的误差时：

$$\frac{I_{B+} + I_{B-}}{2} = 0.2\text{pA} \quad (3.5)$$

$$I_{B+} - I_{B-} = 0.1\text{pA} \quad (3.6)$$

联立式(3.5)及(3.6)可得， $I_{B+}=0.25\text{pA}$ ， $I_{B-}=0.15\text{pA}$ ，因此可得偏置电流和失调电流带来的误差：

$$V_{OS1} = I_{B-} * R_{11} = 7.65\text{mV} \quad (3.7)$$

2) 共模偏移造成的误差分析

共模抑制比(Common Mode Rejection Ratio, CMRR)是运放的另一个重要参数，它表示运放抑制共模信号对运放输出影响的能力，定义为差模增益 A_c 与共模增益 A_d 的比值，通常以 dB 表示，见公式(3.8)。CMRR_{linear} 是 CMRR 的线性值，是将 CMRR 转换为线性比例得到，转换关系见公式(3.9)。理想的运算放大器应具有无限大的 CMRR，当运放的两个输入端电压相同时，放大器的输出应该为零。但由于运放的差分输入级中晶体管参数的不匹配，导致输入电压相同时，在运放的差分输入级中也会产生偏移电压，偏移电压的计算见公式(3.10)。经过电路放大，会在运放输出端产生较大的输出偏移电压。

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_c}{A_d} \right) \quad (3.8)$$

$$CMRR_{\text{linear}} = 10^{\frac{CMRR}{20}} \quad (3.9)$$

$$V_{os} = V_{CM} \times (CMRR_{\text{linear}}) \quad (3.10)$$

共模抑制比有限所引起的误差称为共模偏移，结合公式(3.8)、(3.9)和(3.10)，代入表 3.1 中 AD8606 的参数可得：

$$V_{os2} = 16.5 \mu V \quad (3.11)$$

3) 热漂移造成的误差分析

运算放大器内部晶体管差分结构的固有失配及其输入端与其他节点之间的温差，会引起热漂移。输入失调电压的温度漂移指在一定温度范围内，输入失调电压随温度变化的比值。该参数作为对输入失调电压的补充，便于估算放大电路在工作温区内因温度波动产生的漂移幅度。温度漂移量计算公式如下：

$$\frac{\Delta V_{os}}{\Delta T} = \frac{V_{os}(T) - V_{os}(25^\circ C)}{T - 25^\circ C} \quad (3.12)$$

结合电路运行环境，假设电路工作环境温度范围从 $0^\circ C$ 至 $100^\circ C$ ，将表 3.1 中 AD8606 的参数代入公式(3.12)可得：

$$V_{os3} = 95 \mu V \quad (3.13)$$

将偏置电流和失调电流、共模电压、温漂引起的失调电压相加，即可得到运放在减速器内部运行时的失调电压误差约为 $7.76 mV$ 。

(2) 信号调理电路随机误差分析

随机误差主要由运放上的噪声、电阻上的热噪声引起。

运放是一个集成电路，其中存在低频噪声、散弹噪声、热噪声等多种噪声源。其低频噪声通常难以分析，而散弹噪声、热噪声属于白噪声，可以通过等效到运放输入端的噪声电压源和噪声电流源来进行分析。在运放的数据手册上可以查到等效电压源和电流源的大小（等效噪声电压密度、等效噪声电流密度，通常是通过实验手段测得的），由于这两个参数体现的是运放内部所有白噪声的总和，计算结果需要乘以电路工作频率范围（带宽）。

1) 运算放大器噪声

电荷放大器的噪声模型如图 3.5 所示，其中电路符号分别表示为： I_{sensor} 为压电传感器产生的电流， C_d 为传感器寄生电容， C_a 为运算放大器输入电容， R_{FB} 、 C_{FB} 分别为反馈电阻和反馈电容， I_{NA} 、 E_A 和 E_{RFB} 分别表示运放的输入偏置电流、输入失调电压以及反馈电阻 R_{FB} 的热噪声。

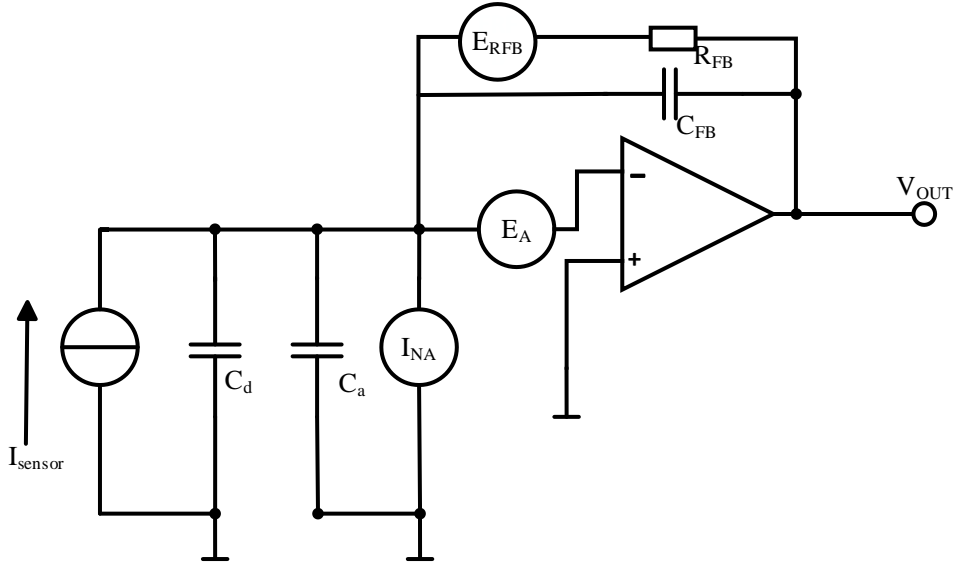


图 3.5 电荷放大器噪声模型

输出电压的电压噪声密度 $e_{n,total}$ 可以由公式(3.14)得出：

$$e_{n,total} = \sqrt{I_{NA}^2 |Z_{FB}|^2 + E_A^2 \left| 1 + \frac{Z_{FB}}{1} \right|^2 + E_{RFB}^2 \left| \frac{1}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2} \quad (3.14)$$

其中， Z_{FB} 和 s 的含义分别见式(3.15)和式(3.16)：

$$Z_{FB} = \frac{R_{FB}}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \quad (3.15)$$

$$s = 2\pi f j \quad (3.16)$$

在公式(3.14)中，由于 C_a 通常比 C_d 小得多，从而公式可以简化为：

$$e_{n,total} = \sqrt{I_{NA}^2 \left| \frac{R_{FB}}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2 + E_A^2 \left| 1 + \frac{R_{FB} C_d s}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2 + E_{RFB}^2 \left| \frac{1}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2} \quad (3.17)$$

如果工作频率远高于高通滤波器的下限截止频率，公式(3.17)第二项可以进一步简化为：

$$e_{n,total} = \sqrt{I_{NA}^2 \left| \frac{R_{FB}}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2 + E_A^2 \left| 1 + \frac{C_d}{C_{FB}} \right|^2 + E_{RFB}^2 \left| \frac{1}{R_{FB} C_{FB} s + 1} \right|^2} \quad (3.18)$$

同相放大电路拓扑如图 3.6，同相运算放大器的噪声为：

$$e_{n_amp} = \sqrt{e_{nv}^2 G^2 + e_{ni}^2 G^2} \quad (3.19)$$

式中， G 为电路增益 $(1 + R_2 / R_1)$ ； e_{nr1} 和 e_{nr2} 为电阻 R_1 和 R_2 的热噪声。

2) 电阻热噪声

电阻的 E_{SR} 会引入热噪声。阻值为 R 的元件上的热噪声的有效值如下：

$$V_{noise} = \sqrt{4kTR} \quad (3.20)$$

式中， k 为玻尔兹曼常数； B 为等效噪声带宽。

代入电路参数可得反馈电阻 R_{14} 的热噪声约为 $919\mu V/\sqrt{Hz}$ 。

同相放大电路电阻噪声为：

$$e_{n_out} = \sqrt{e_{nr1}^2(G-1)^2 + e_{nr2}^2G^2} \quad (3.21)$$

式中， G 为电路增益 $(1 + R_2/R_1)$ ， e_{nr1} 和 e_{nr2} 为电阻 R_1 和 R_2 的热噪声。

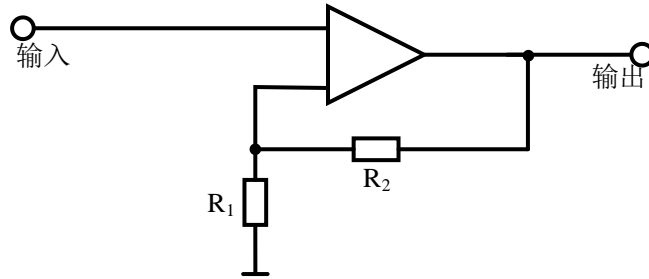


图 3.6 同相放大电路图

代入电路参数可得同相放大电路的热噪声约为 $54.5\mu V/\sqrt{Hz}$ ，信号调理电路电阻总的热噪声为 $973.5\mu V/\sqrt{Hz}$ 。

综合上述电路误差及噪声分析，当电路工作频率为 $5Hz$ 时，结合电路元件参数计算可得系统的总误差为约为 $7.65mV$ ，系统的满量程电压为 $2.5V$ ，计算可得电路总误差约为 0.3% 。

3.5 误差处理方法研究

3.5.1 系统误差处理方法设计

系统误差具有确定性和可重复性，通常来源于元器件本身的非理想特性，如运算放大器的输入偏置电流、输入失调电压、共模抑制比不完全、热漂移等；电阻、电容的阻值和容值误差也会造成测量输出的偏移。结合上述分析，信号调理电路中各类电子元器件所引入的系统误差对整个测量系统的精度与稳定性具有直接影响。对于系统误差的抑制，可从硬件设计优化与软件补偿校正两方面解决。在硬件设计中，选用低漂移、低噪声、高温度稳定性的精密运算放大器，此外，选用高精度、低温漂的薄膜电阻，避免使用温度系数较大的元件，也可以减小温度变化带来的误差。在绘制 PCB 时合理布线，也是控制系统误差的重要手段，电路 PCB 布线时，避免了长电源线、信号线和地线，使信号路径尽量短、稳。在软件设计中，系统误差的处理方法可结合传感器标定过程，建立应变与信号调理电

路输出电压之间的线性关系模型，然后将模型嵌入到程序中，对测得的应变值进行修正，从而有效消除运放失调、电阻阻值误差等因素所带来的静态偏移。本文设计系标定过程如下：

(1) 测量应变采集系统在标准应变输入信号下的输出，标准应变信号范围 $1500\mu\epsilon$ 到 $2500\mu\epsilon$ ，每次输入量的增量为 $100\mu\epsilon$ 。

(2) 对应变数据进行多次采样，分析输出电压峰峰值变化规律。

(3) 通过前述分析，可以将输出电压与输入应变值的关系建模为 $U_o=a\sigma+b$ ，其中 σ 是输入的应变值， a 、 b 是线性系数， b 反映了静态误差的大小。通过对所采集的数据进行最小二乘分析，可建立信号调理电路输出信号与输入信号之间的关系模型。

(4) 补充采集 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C 四种温度下的应变数据，以温度、应变、输出电压做多元线性回归，从而实现信号采集系统的关系模型的修订，消除温度对系统误差带来的影响。

综上所述，合理的硬件设计能够从源头减少误差的产生。而在软件设计中，通过传感器标定、数据校正等手段，可以进一步消除由于硬件不足和外界环境变化带来的系统误差。硬件和软件的有机结合，系统的精度和稳定性可以得到显著提高，从而实现更为准确可靠的应变测量。

3.5.2 基于过采样和滑动平均滤波的随机误差处理方法设计

与系统误差相比，随机误差具有不确定性，主要来源于电磁干扰、器件内部热噪声、传输线串扰等外部因素。与系统误差不同，随机误差具有难以预测与重复的特点，通常表现为信号在时间或空间上的随机波动，无法通过标定进行直接修正。消除随机误差除了在硬件设计时加入滤波环节外，更多的依赖于软件算法。本文的应变信号采集系统使用过采样及滑动平均滤波的方法对随机误差进行消除。过采样是指是指在单位时间内对同一信号进行多次采样，从而在信号处理阶段以平均值代替单次采样值。滑动平均滤波通过对一组连续采样点求平均值，有效抑制高频噪声，但存在一定的响应延迟。采用该方法消除误差依赖于以下两个过程。

(1) 过采样

在信号处理中，过采样是指以明显高于奈奎斯特速率的采样频率对信号进行采样。如果以奈奎斯特速率或更高的速率进行采样，则可以完美地重建带宽受限的信号。奈奎斯特采样定理指出：若连续信号 $x(t)$ 为有限带宽，其频谱的最高频率为 f_c ，对 $x(t)$ 采样时，若保证采样频率 $f_s \geq f_n$ ，其中 $f_n=2f_c$ 为奈奎斯特采样频率，那么就可由采样信号恢复出 $x(t)$ 。

过采样消除噪声的核心思想是通过多次采样平均来减少信号中的噪声成分，并利用统计特性获得更加精确的信号估计。若信号高频噪声的频谱呈现特定分布，

每次采样会将噪声分散在更宽的频率范围内。通过对采样数据进行平均，噪声的平均值趋向于零，而信号的主要成分则得以保留。每次采样过程中，信号包含的噪声会随机变化，因此，当多次采样的结果进行平均处理时，噪声的影响将得到显著抑制。假设采样信号的频率为 f_s ，过采样时采样频率为 f_{os} ， $f_{os} \gg f_s$ ，经过 N 次采样后的平均值为：

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \quad (3.22)$$

式中， $x(t_i)$ 为每次采样得到的信号值； N 为过采样次数。通过增加 N ，可以显著降低噪声的影响，从而获得更高的测量精度。

（2）滑动平均滤波

当采集的信号数据达到一定数量，通过数据平滑处理能进一步减少信号中的噪声。其消除随机误差的核心思想是对一段时间内的采样数据进行滤波，以消除噪声成分的高频部分，保留信号的低频成分。常见的平滑方法包括滑动平均滤波和加权移动平均滤波。

滑动平均滤波是简单有效的平滑处理方法。其基本原理是利用一组连续采样点的平均值来替代每个采样点的原始值，从而有效平滑信号中的随机噪声。滑动平均滤波通过滑动窗口的方式对数据进行平滑处理，窗口大小根据实际情况设置，窗口每次移动一个数据点，计算窗口内数据的平均值，形成新的输出数据。见公式(3.23)。该方法能有效消除高频噪声，对于信号的短期波动或尖锐噪声具有显著的抑制效果。

$$y_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i-(k-1)/2}^{i+(k-1)/2} x_j \quad (3.23)$$

式中， x_1, x_2, \dots, x_n 为数据； k 为窗口的大小，通常选取为奇数，以保证窗口两侧的数据平衡； y_i 为平滑后的数据输出。

系统设计时为保证达到最佳去噪性能，根据不同阶段的应变信号特征，灵活选取不同窗口值对应变信号进行分段去噪，从而实现准确高效的应变信号滤波处理，减小随机噪声对系统测量结果的影响，提升系统性能。

在无线应变监测系统中，将过采样技术和滑动平均滤波技术相结合。过采样用于提高信号采集精度，通过多次采样的平均值降低噪声对单次采样的影响，平滑处理则可以在多次采样基础上进一步去除突发性噪声或高频干扰。减速器内应变信号十分微弱，容易受到各种干扰的影响，二者协同作用，可以在保证信号实时性的同时，极大限度地降低误差对结果的影响，提高系统精度。

3.6 信号调理电路仿真分析

应变信号采集系统作为整个无线应变监测系统的核心部分，要求其具备高测量精度，信号调理电路决定了测量精度的高低，在信号调理电路设计完成后，基于电路仿真软件 PSpice 进行电路仿真实验，验证电路设计准确性。敏感元件的输出信号为电荷信号，在电路仿真时，通过以下方式产生电荷信号：已知电容两侧的电压符合公式(3.24)，采用电压发生器产生方波信号，再经过等效电容，就得到等效电荷源。等效电荷源电路如图 3.7 所示。由于压电传感器输出的电荷信号十分微弱，在设置等效电荷源时同样输出微小信号，设置输入电压为 100mV，等效电容值为 1nF，代入公式可得等效电荷源为 0.1nC。

$$Q = C \times U \quad (3.24)$$

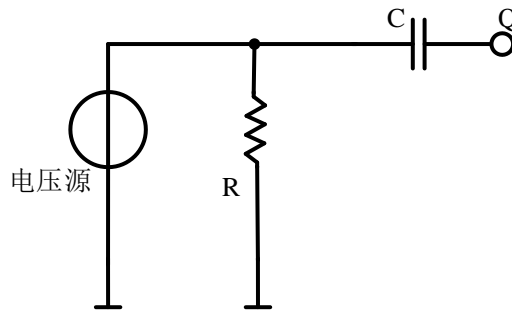


图 3.7 等效电荷源电路

电路仿真图如图 3.8 所示。经仿真实验，在输入电荷为 0.1nC 时，电路初级电荷放大电路的输出电压峰峰值为 56mV，次级同相放大电路的电压峰峰值为 550mV，而根据理论值，初级放大电路的放大倍数为 5.5×10^8 倍，次级放大电路的放大倍数为 10 倍，仿真结果见图 3.9。仿真结果与理论值相同，所设计的信号调理电路满足高精度的放大要求。

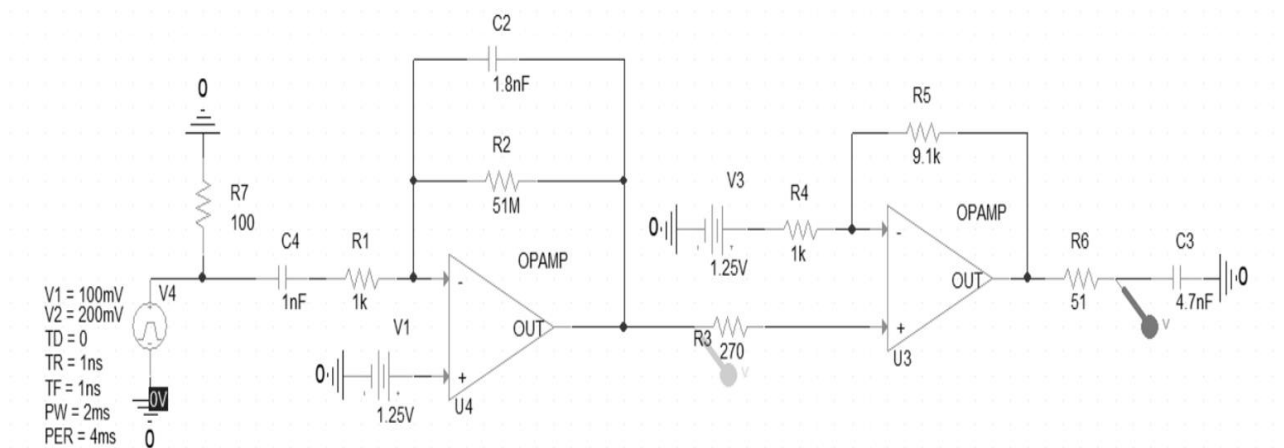


图 3.8 信号调理电路仿真电路

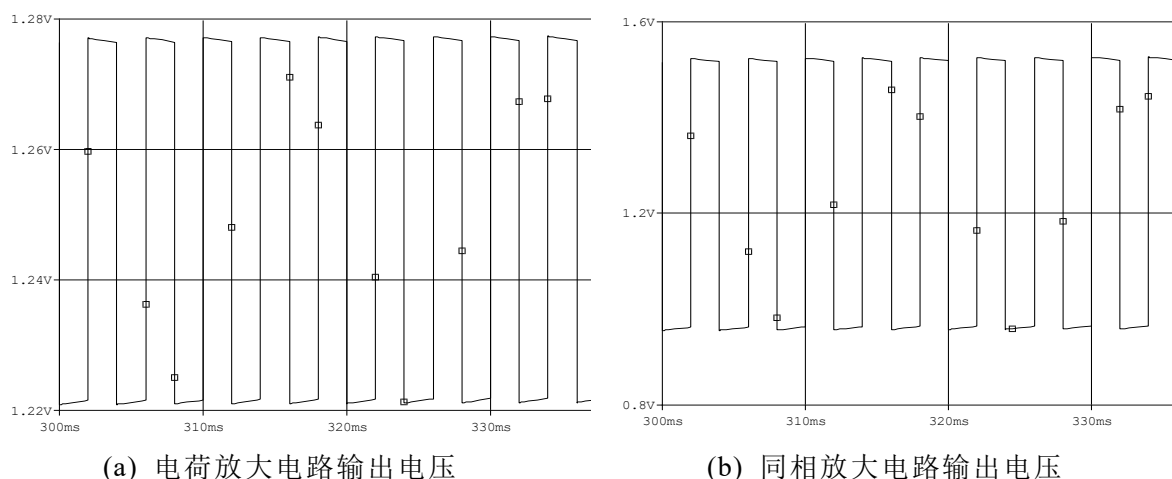


图 3.9 信号调理电路仿真结果

3.7 应变信号采集系统性能测试

3.7.1 应变信号采集系统功能验证

为验证应变信号采集系统能否正常工作，设计实验进行电路功能验证，实验装置如图 3.10 所示，将压电片接入电路，并用示波器观察电路的输出信号。

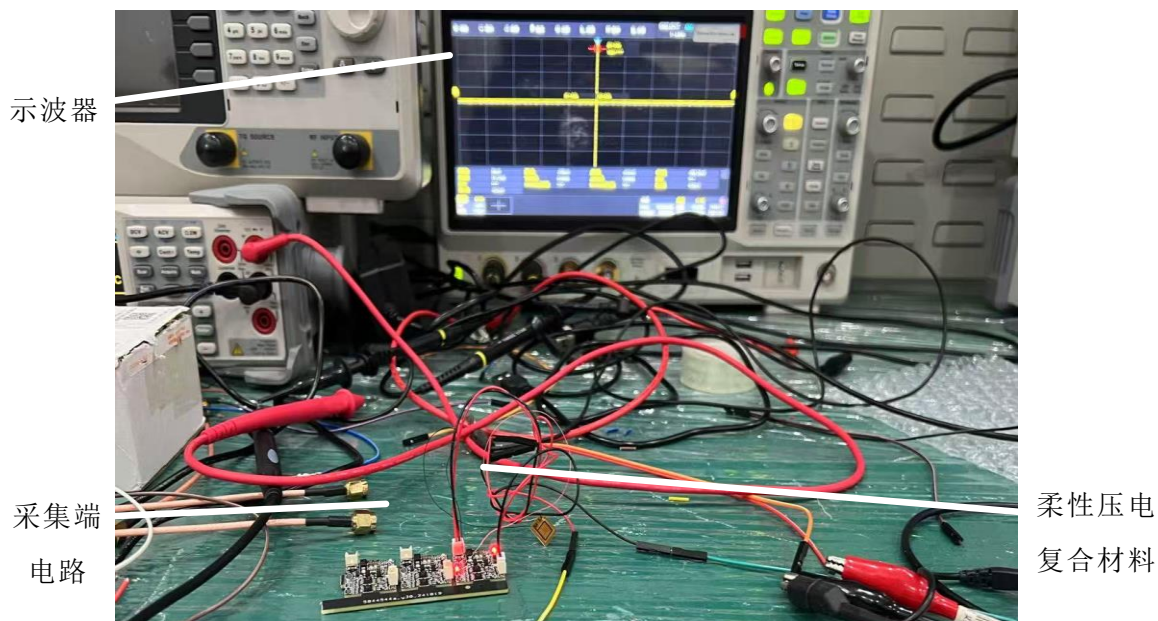
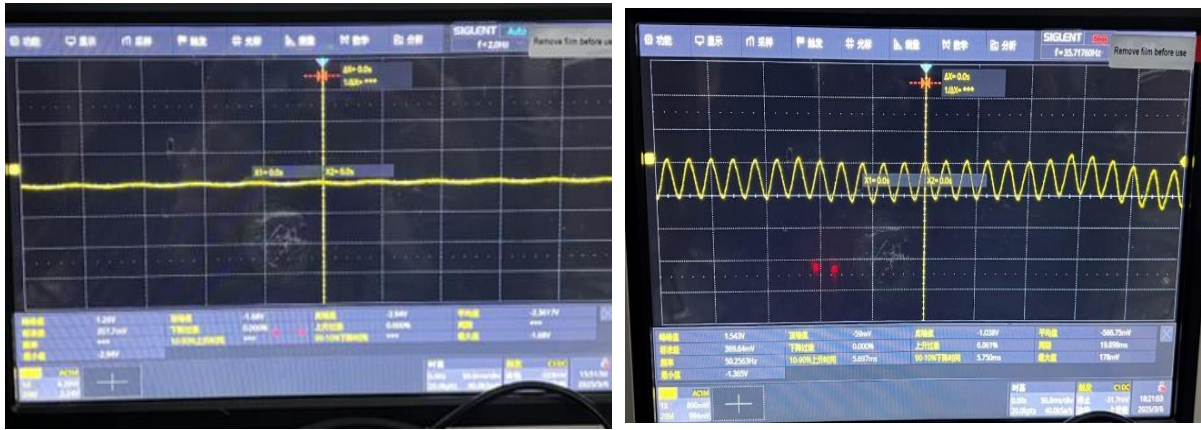


图 3.10 应变信号采集系统测试装置图

当接入的压电片未振动时，示波器显示波形如图 3.11 (a)所示，输出为一条 1.25V 左右的直流信号，当压电片发生振动时，波形输出如图 3.11 (b)所示，输出一个峰峰值为 1.54V 左右的信号。经过实验验证，应变信号采集系统能够实现对应变信号的采集以及放大功能。



(a) 压电片未振动

(b) 压电片振动

图 3.11 接入压电片时示波器波形显示

3.7.2 应变信号采集系统应变测量范围测试

无线应变监测系统的测量范围主要受到柔性压电复合材料和应变信号采集系统的影响，因此，对无线应变监测系统的柔性压电材料和应变信号采集模块输出的信号范围进行测试，采集系统应变测量范围指标测试装置示意图如图 3.12 所示。将柔性压电复合材料一端固定，另一端固定在低频台面上，通过低频振动台产生水平振动，使器件产生不同程度的应变，通过振动台系统自带的光栅尺测量振动台的水平位移量峰值，即为器件的总变形量。将总变形量除以器件的有效长度，获得器件的标准应变量 P_0 。分别调节标准应变量为 $10\mu\epsilon$ 、 $20\mu\epsilon$ 、 $50\mu\epsilon$ 、 $100\mu\epsilon$ 、 $200\mu\epsilon$ 、 $400\mu\epsilon$ 、 $60\mu\epsilon$ 、 $800\mu\epsilon$ 、 $1000\mu\epsilon$ 、 $1200\mu\epsilon$ 、 $1500\mu\epsilon$ 、 $2000\mu\epsilon$ 、 $2500\mu\epsilon$ 、 $3000\mu\epsilon$ 。通过信号采集系统采集应变信号，通过上位机读出对应的电压峰峰值。

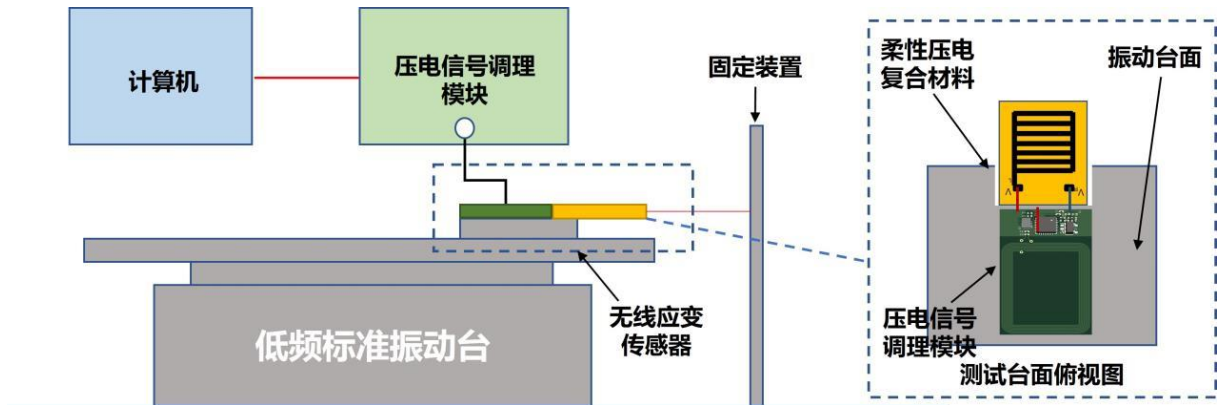
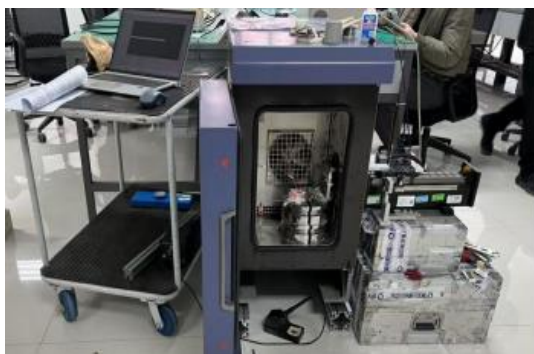


图 3.12 采集端应变测量范围指标测试装置示意图

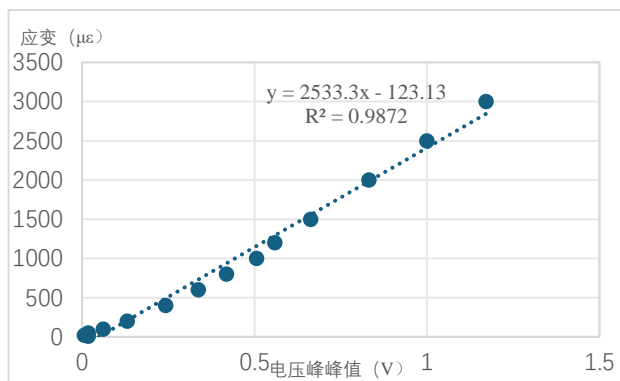
测量范围指标测试装置实物图如图 3.13 (a) 所示，将温箱设置为常温，将无线应变传感器中的柔性压电复合材料一端固定，另一端固定在低频台面上，通过低频振动台产生水平振动，使器件产生不同程度的应变，通过上位机读取不同应变下的输出电压，并使用最小二乘法拟合出电压和应变的对应关系。应变及电压峰峰值拟合曲线如图 3.13 (b) 所示，数据见表 3.3。拟合曲线的方程为：

$$y = 2533.3x - 123.13 \quad (3.25)$$

曲线的 R^2 为 0.9872, 说明曲线具有良好的线性度, 此外, 应变值和电压的峰峰值的关系理论上为过原点的线性关系, 然而无线应变监测系统的误差在曲线表现为偏置量。



(a) 测量范围测试装置实物图



(b) 应变-电压峰峰值关系曲线

图 3.13 无线应变传感器测试装置及测试结果曲线

表 3.3 应变及电压峰峰值数据

Vpp(V)	Strain(με)	Vpp(V)	Strain(με)
0.017398022	10	0.418921053	800
0.00630495	20	0.505828947	1000
0.017583718	50	0.558353684	1200
0.061453173	100	0.663126316	1500
0.130794737	200	0.831985263	2000
0.242031579	400	0.999849231	2500
0.336784211	600	1.171756	3000

3.7.3 应变信号采集系统测量误差测试

无线应变监测系统的测量误差主要受到柔性压电复合材料和信号调理模块的影响, 因此, 对无线应变监测系统的柔性压电材料和应变信号采集模块输出的信号进行误差测试。本指标的测试装置和测量范围指标采用同一套装置, 将柔性压电复合材料一端固定, 另一端固定在低频台面上, 通过标准低频振动台使器件产生应变, 调节标准应变量为 $2000\mu\epsilon$, 应变信号采集端采集并通过上位机读取应变 P_I 值, 每组重复测量三次。分别在环境温度为 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C 下完成以上测试, 得到四个不同温度下的应变 P_0 、 P_I 数据。测量误差计算方式为:

$$|P_0 - P_I| / \text{总测试应变范围} \times 100\% \quad (3.26)$$

应变信号采集系统测量误差指标测试装置实物图如图 3.14 所示。按照图 3.12 所示安装柔性压电复合材料以及采集系统电路模块, 分别调节温箱温度为 10°C , 20°C , 30°C , 40°C , 通过上位机读取 $2000\mu\epsilon$ 时的电压值。



图 3.14 应变信号采集端测量误差指标测试装置实物图

以应变值、传感器输出电压值、温度三个变量拟合电压与应变对应关系。经测试，传感器在不同工作温度下都能实现高精度应变监测，应变信号采集端测试误差结果如表 3.4 所示。经测试，应变信号采集系统与柔性压电复合材料配合使用，能够实现应变信号的采集功能，且满足采集系统测试范围达到 $0\sim 2000\mu\epsilon$ ，测量误差小于 1% F.S 指标要求，实现了应变信号的高精度测量。

表 3.4 应变信号采集端测试误差结果

测试次数	温度($^{\circ}\text{C}$)	应变标准值($\mu\epsilon$)	应变测量值($\mu\epsilon$)	误差
1	10	2000	1982.963881	-0.85%
2	10	2000	1983.618092	-0.82%
3	10	2000	1983.743597	-0.81%
1	20	2000	2016.048968	0.80%
2	20	2000	2015.823347	0.79%
3	20	2000	2016.089029	0.80%
1	30	2000	2011.748702	0.59%
2	30	2000	2007.784219	0.39%
3	30	2000	2004.842663	0.24%
1	40	2000	2016.288951	0.81%
2	40	2000	2014.630063	0.73%
3	40	2000	2014.360341	0.72%

3.8 本章小结

本章围绕减速器内部实时在线监测系统的数据采集系统设计要求，完成了应变信号采集系统的设计，为确保系统能够稳定、准确地采集和放大应变信号，实现高精度应变测量。首先，对应变信号采集电路的信号调理部分进行了需求分析，明确了系统需要满足的关键性能指标，如低功耗、高精度等。同时，对核心器件进行了选型，并对器件的主要参数及其在电路中的作用进行说明，确保电路的性能符合设计要求。通过实际测试，在信号采集系统电路工作时，其工作电压为 3.3V，电路电流为 1.83mA，电路总功耗约为 6mW，满足低功耗设计要求。其次，针对信号调理部分，重点分析及阐述了两级放大电路的设计，应变信号的流向依次经过压电传感器、第一级电荷放大电路和第二级电压放大电路。为进一步提高信号测量精度，对电路的误差进行了深入分析，包括运算放大器的失调误差、反馈电路的容差影响等，并提出了误差消除方法。最后，为了验证系统的功能，设计实验对应变信号的采集过程进行测试，实验结果表明，应变信号采集系统能够稳定实现信号的采集和放大功能，测试范围达 0~2000 $\mu\epsilon$ ，测量误差小于 1% F.S.，满足高精度、宽范围的设计要求。

第4章 低功耗无线数据传输系统设计

当减速器处于工作状态时，内部待测部位处于运动状态，若采用线缆进行数据传输会发生线缆缠绕、断裂等情况，因此必须采用无线方式进行数据传输。同时，减速器内空间有限，传感器无法携带大容量电池工作，因而无线数据传输系统需采用低功耗设计方案，尽可能延长电池工作寿命。最后，为保障系统采样率，对数据传输速率提出要求。本章针对无线数据传输速率和低功耗设计展开研究，提出低功耗休眠机制、FIFO 缓存机制、自定义协议帧等方法为数据传输速率与低功耗的冲突提出优化方案。

4.1 无线数据传输系统设计要求

减速器内部实时应变监测系统的无线数据传输系统设计要求如下：

（1）微型化

减速器内部电路粘贴的空间十分狭小，如果电路设计体积过大则没有足够空间用于无线数据传输电路部署，无法进行信号处理以及无线数据传输。

（2）低功耗

无线数据传输电路目前采用的是电池供电方案，为了尽可能的延长电路工作寿命，减少电池更换次数，电路所用模块和芯片均需要考虑其功耗。

（3）较高的数据传输效率

为了实现减速器内部多部位实时应变监测，及时发现减速器异常运行状态，要求无线传输系统要有较高的无线传输效率。

4.2 无线数据传输系统电路设计

高精度低功耗无线应变监测系统对于主控芯片的处理速度、存储空间、通信接口以及便携稳定性都有一定要求，且对整体性能及功耗要求较高。微处理器作为无线数据传输电路的核心，控制着整个系统，因此监测系统的微处理器必须具备低功耗特性。

综合考虑性能、功耗、开发难度等因素，选用 TI 公司生产并推出的微处理器 CC430F6137 作为主控芯片。该芯片集成了射频模块，且具备低功耗特性^[45]，CC430F6137 提供多种低功耗模式(LPM0-LPM4)，对于系统的低功耗设计需求来说十分重要，在程序设计时可以根据实际使用需求设置对应的低功耗模式，延长无线应变监测系统的工作时间，减少电池更换次数。

无线数据传输电路主要由 CC430F6137 及射频外围电路构成，核心功能是对信号采集电路采集的信号进行高精度的 A/D 转换、较高速率的无线数据传输以及基于串口建立和上位机的通信通道。无线数据传输电路框图如图 4.1 所示。无线数据传输电路整体原理图如图 4.2 所示。接下来对各模块单元进行说明。

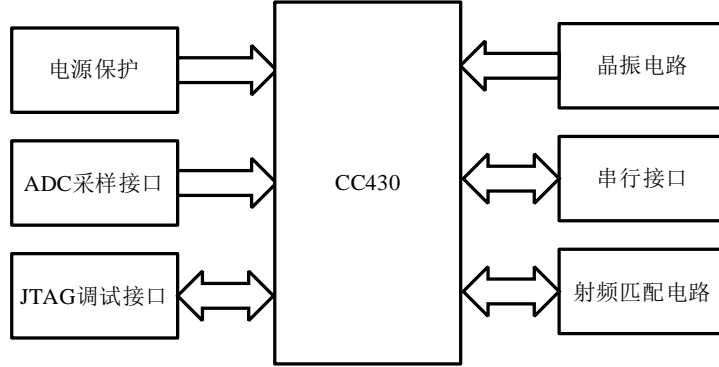


图 4.1 无线数据传输电路硬件框图

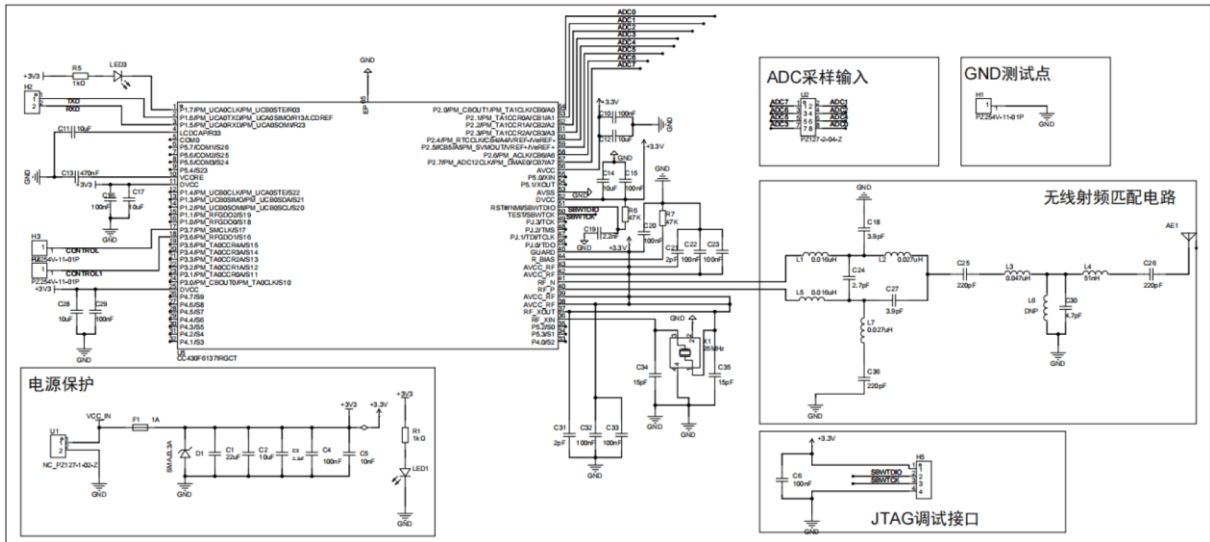


图 4.2 无线数据传输电路原理图设计

(1) 射频匹配电路

射频匹配电路作为无线数据传输系统电路的核心，包含差分低通滤波电路、巴伦电路以及 T 型滤波电路。首先，为尽可能减小谐波反射，在 CC1101 和巴伦电路之间加入差分低通滤波器，只允许基频通过，使得输入到巴伦电路的谐波电平降低，以减小电磁辐射。CC430 的射频接口采用双端口差分输出设计（RF_P 和 RF_N），而射频部分选用天线单端传输，因此设计了巴伦电路将双端输出整合为单端信号，实现阻抗匹配。

巴伦电路的拓扑结构为格子型，如图 4.3 所示。由公式(4.1)和(4.2)：

$$U_{o1} = \frac{U_i / j\omega C}{1 / j\omega C + j\omega L} = \frac{U_i}{1 - \omega C \times \omega L} \quad (4.1)$$

$$U_{o2} = \frac{U_i \times j\omega L}{1/j\omega C + j\omega L} = \frac{U_i}{\omega C \times \omega L - 1} \quad (4.2)$$

当信号从端口 1 输入时，经过上半部分的低通滤波电路和下半部分的高通滤波器电路，端口 2, 3 的两个输出信号就被调制成幅值相同，相位相差 180° 的差分信号。反之，当从端口 2, 3 分别输入幅值相同，相位相反的两个信号，端口 1 的输出信号就被合成为单端信号。

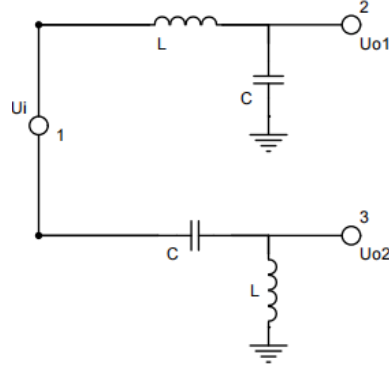


图 4.3 巴伦电路拓扑

滤波电路能对环境信号进行过滤，保留传输频率信号，避免信号产生非线性失真，在匹配电路中设计了 T 型滤波电路。T 型滤波电路由两个串联电感并联一个电容组成，对谐波的抑制效果好。

射频匹配电路整体原理图如图 4.4 所示，电感 L_1, L_5, C_{24} 组成差分低通滤波电路，电容 C_{18}, C_{27} ，电感 L_2, L_7 组成巴伦电路，电感 L_3, L_4 以及电容 C_{30} 组成 T 型滤波器电路。

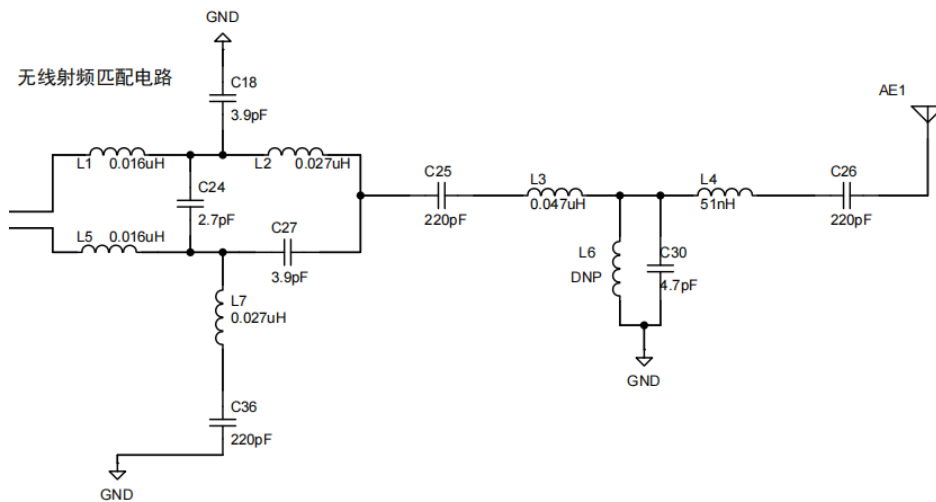


图 4.4 射频匹配电路

(2) 其他辅助电路

SMAJ3.3A 是一个瞬态电压抑制二极管，用于吸收和排除过电压，保护电路免受短时间突发电压的损伤。

JTAG 接口电路：系统各模块功能验证由程序完成，设计 JTAG 接口与复位电路模块用于下载调试程序。TI 公司定义 SBW-JTAG 接口，通过 SBWTCK 和 SBWTDIO 两条线就能实现端口连接。

晶振电路：本设计给外部高频时钟源 XT2CLK 外接了一个 26MHz 的晶振，用于给 CC430 的 RF 模块提供时钟。

串行接口：射频收发电路的其它部分基本一致，射频发射端用于采集应变信号并将其通过射频发送出去，接收端用于接收射频信号，并将其传输到上位机进行处理。因此，在射频接收端还有一个串口电路，用于将应变数据发送到上位机。

ADC 采样接口：ADC 采样接口提供最多 8 个接口对应应变信号采集端输出的模拟量进行采样和 A/D 转换。

4.3 低功耗的高效无线数据传输系统设计

4.3.1 高效率数据传输机制设计

在数据传输系统中，高效数据传输的实现依赖于多个环节的协同工作，包括数据采集、数据处理、无线数据收发和串口数据传输等。各环节之间的数据传输效率及速率都会影响到整个系统，这无疑对高效数据传输系统设计提出了挑战。数据传输过程的关键环节如图 4.5 所示。

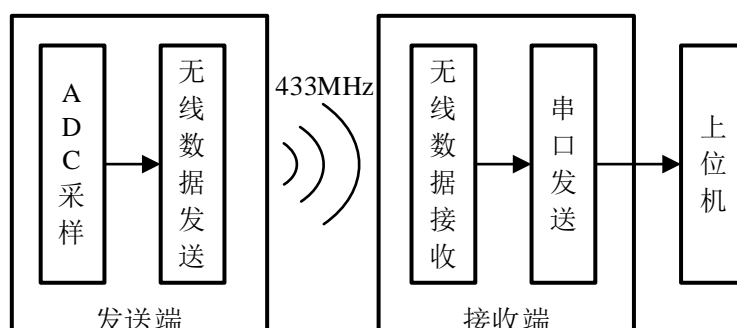


图 4.5 无线数据传输系统关键环节

在数据采集环节，ADC 模块的采样率是系统设计的关键参数。CC430ADC 模块最大采样率可达到 200ksps。若采样速率超过无线数据传输速率，数据将会丢失。因此，必须确保数据采集的速率与无线数据传输速率相匹配。

在无线数据传输过程中，由于发送端和接收端之间的传输机制不同，接收端的接收能力往往低于发送端的发送速率，无法及时接收所有数据，导致数据丢包。因此，在程序设计时需平衡采样速率和数据传输速率，确保数据完整性和可靠性。

在串口通信过程中，数据的丢包风险也不可忽视。串口通信的速度较低，且通信过程中的数据传输频率较高，因此，当系统需要高速传输数据时，串口的带宽可能成为瓶颈。为了提高数据传输速率，系统需要优化串口协议，减少数据包

的冗余，增加数据传输的效率。接下来针对上述数据传输环节，分为两部分对数据传输机制进行阐述。

(1) 发射端-接收端数据传输机制设计

在无线数据传输环节中，无线发送端承担高精度 ADC 采样和无线数据发送功能，而接收端则承担无线数据接收以及与上位机通信功能。首先简单说明系统 A/D 转换和无线通信的实现过程。CC430F6137 芯片的外围设备中包含数转换功能模块 ADC12_A。ADC 内核支持快速的 12 位模/数转换，并将其结果存储到转换存储寄存器中。该内核使用两个可编程选择的电压等级（ V_{R+} 和 V_{R-} ）确定转换的上限和下限。ADC 的转换结果 N_{ADC} 的计算为：

$$N_{ADC} = 4095 \times \frac{V_{in} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}} \quad (4.3)$$

CC1101 射频模块是数据传输过程的核心模块，CC1101 的收发逻辑流程图如图 4.6 所示。图 4.6 (a)为发射端流程，4.6(b)为接收端流程。

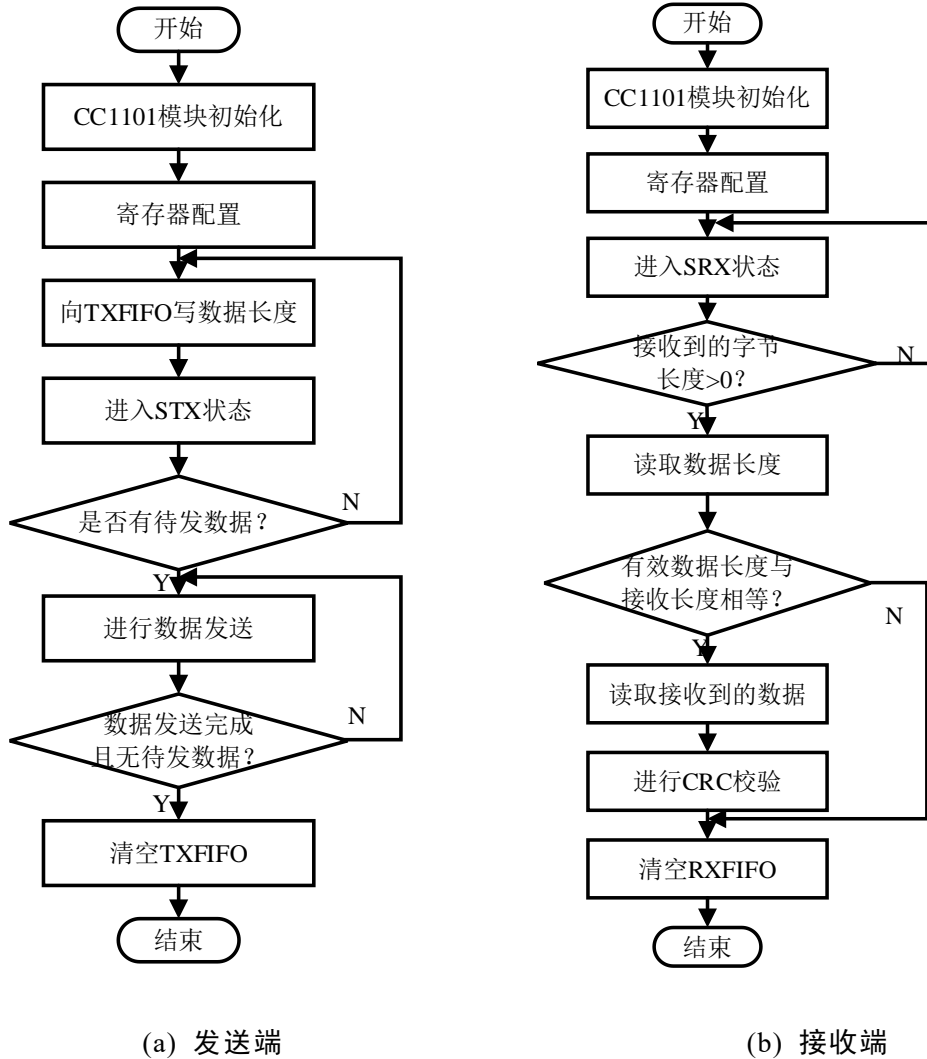


图 4.6 CC1101 无线收发软件流程图

发送端流程大致分为三个部分，第一部分是对 CC1101 模块进行初始化，如配置 RF1A 的参数，配置 FIFO 以及设置数据包格式等，第二部分是加载数据并进入到数据发送模式 TX，最后是检测发送是否完成。接收端流程同样分为三个部分，第一部分是初始化 CC1101 模块；第二部分是进入数据接收模式，等待射频信号；第三部分是数据接收存储以及 CRC 校验。

在无线通信系统中，数据传输层负责实现数据的可靠传输与流控制。为提高系统数据传输效率，在数据发送端程序设计中提出了突发通信策略，用于提高系统数据传输效率。此外，在数据链路层，为确保数据的正确传输与接收，本设计采用了自定义的协议帧格式，并引入 CRC16 校验机制进行误码检测。接下来对上述机制提高数据传输速率及效率的原理及实现方式做详细阐述。

1) 突发通信策略

突发通信策略的核心是将少量多次的无线数据传输过程变为批量少次的传输过程，避免频繁启停射频模块，提高数据传输速率和效率的同时减小电路功耗。ADC 模块最高采样率能达到 200ksps，高采样率会产生大量需要无线传输的数据，导致无线收发模块的中断被频繁触发，增加电路功耗。为了解决上述问题，本文提出将 FIFO 缓存机制用于数据传输过程中，FIFO 是一种队列结构，按照数据进入系统的顺序依次输出，确保数据的有序处理，避免了由于数据传输不及时或过快造成的数据丢失或混乱，该结构在处理流式数据时尤为重要。本系统需要连续采集应变信号时，FIFO 可以避免因数据量大而导致的丢包问题。FIFO 实际上是一个大容量数组，ADC 的每次转换结果暂存于 FIFO 中，当缓存区的数据达到设置的阈值后，系统才唤醒 CPU 以及射频模块进行无线数据传输。突发通信策略优化了每次 ADC 采样结束后都需要唤醒射频模块进行无线数据传输的问题，这样一来，在数据传输量相同的情况下大大减少了射频模块的唤醒频率，而无线射频模块的启停恰恰是系统功耗最大的操作之一。突发通信策略使得系统在提高数据传输速率和效率的同时减小了电路功耗。

2) 自定义协议帧格式

突发通信策略在缓解功耗与传输速率之间的冲突方面发挥了重要作用，但通信过程中，数据传输的准确性与协议的完整性更为重要。为确保接收端能够准确识别和解析不同通道的采样数据，必须对原始 ADC 数据进行标准化封装，并遵循特定的数据通信协议，数据与协议密不可分，通常将数据根据协议打包成一帧再进行后续流程。定义数据帧的核心目的是区分来自不同采集通道的数据以及合理高效的利用数据比特位。自定义帧格式如图 4.7 所示，数据位的各比特位含义如图 4.8。

CC430 的 ADC12_A 模块转换结果为 12bits 数据，且来自不同的采样通道，采样通道数至少为 2 个，最多为 8 个。而数据传输是以字节为单位，即 ADC 转

换结果传输必然占据 2 个字节，若按传统方法给数据添加帧头帧尾区分不同通道数据，需为每组通道数据附加至少 2 个非数据字节，数据帧长度的增加将导致传输效率和速率下降。自定义的协议帧格式，能够高效利用字节的比特位，提高数据传输速率。接下来以 8 通道采样数据为例对自定义帧格式进行讲解。每帧数据由通道号，A/D 转换结果以及校验位组成。已知单独添加帧头帧尾会额外增加无效字节，因此将通道序列号嵌入转换结果字节中，通道序列号和结果共同占据 2 个字节，第 1 个字节的高 3 位代表通道序列号，低 4 位代表 ADC 转换结果的高 4 位；第 2 个字节代表转换结果的低 8 位数据。数据帧的最后 2 个字节为校验位，这里采用 CRC16 校验。数据长度由具体程序设计决定，但不会超过 FIFO 长度。

数据1	数据2	数据3	数据4	数据n	CRC校验
-----	-----	-----	-----	-------	-----	-------

图 4.7 自定义的协议帧格式

15~13	12	11~8	7~0
通道序列号	0	转换结果（高4位）	转换结果（低8位）

图 4.8 数据位比特位含义

（2）接收端-上位机数据传输机制设计

无线数据接收端的功能及实现过程在前文中已经说明，在此不再赘述。数据接收端和上位机之间的通信通道基于串口实现。串口作为无线数据接收端与上位机间的连接通道，进行应变信号的传输，其数据传输效率对系统性能至关重要。为了提高串口通信的效率和实时性，本文提出将 DMA 机制与 FIFO 缓存机制相结合的串口数据传输方案，FIFO 缓存机制在数据接收过程中起到缓冲作用，确保数据的有序存储；而 DMA 则实现数据的高效传输，减少 CPU 的干预，从而提高系统的整体性能与响应速度。接下来对二者在串口通信中的实现方式进行阐述。

在传统的串口通信中，数据发送需要 CPU 频繁介入，这不仅增加了 CPU 的负担，也导致系统的功耗增加。于是引入 FIFO 缓存机制用于临时存储接收到的数据，减少 CPU 唤醒频率，同时为数据传输提供缓冲区，使得系统能够更高效地处理大量数据。

然而，仅靠 FIFO 缓存机制仍然需要 CPU 频繁读取缓存区数据并进行后续处理。为进一步减少 CPU 干预，DMA 机制被引入到串口通信中。DMA 控制器是一种能够在外设和内存之间直接传输数据的硬件模块，不占用 CPU 即可完成数据传输，CC430 集成的 DMA 能有效降低 CPU 功耗，尤其是在高频数据采集与高速通信场景中。传统串口通信过程中，CPU 需要从内存中读取待发送的数据，并将其写入串口发送寄存器。通过 DMA 机制，系统待发送的数据将直接从 FIFO 缓存区传输到串口发送寄存器，无需 CPU 参与。

在 CC430 系统中引入 DMA+FIFO 联合机制后，串口通信中的数据传输过程变得更加高效和稳定，进一步释放 CPU 资源的同时，降低了系统功耗，提高了数据传输速率和效率。在长时间运行的情况下，能有效延长系统的使用寿命。

4.3.2 低功耗休眠机制设计

数据传输过程中各环节高效协同工作会增加系统的功耗，使低功耗设计与数据传输速率之间的矛盾更加突出。尽管 FIFO 缓存机制的引入已经在一定程度上解决了这个问题，但减速器内部空间狭小，无法部署大容量电池，为了延长电池寿命，需要对系统功耗的进一步降低展开研究。本文针对低功耗的设计需求提出了休眠机制，减小电路功耗，延长系统使用寿命。休眠机制流程图如图 4.9 所示。

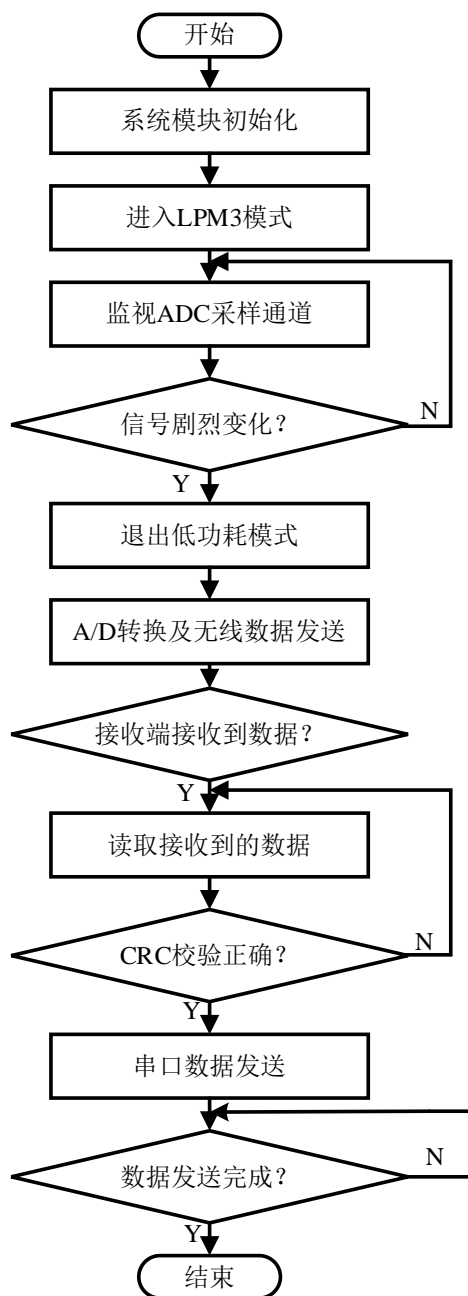


图 4.9 休眠机制软件流程图

休眠机制的核心思想是通过将系统分为多个模块并智能控制各模块的工作状态，避免系统空闲时的能量消耗。休眠机制能有效降低数据传输系统的功耗，延长系统工作寿命。休眠机制的实现依赖于芯片提供的多种低功耗模式，系统在空闲时进入休眠状态，最大限度地减少不必要的能量消耗。只有当对应的中断事件发生时，才会从休眠状态被唤醒，执行对应的中断响应函数。休眠机制的目的是在系统不需要工作的情况下处于低功耗状态，数据传输系统由发送端和接收端组成，分别承担应变信号的 ADC 采集及无线发送和无线接收及串口发送功能。整个系统的工作模式需要通过智能的休眠机制来控制，只有当 ADC 采集通道数据剧烈变化时才工作，最大程度地降低功耗。

对于发送端，系统首先监测 ADC 采样通道信号变化。ADC 采样作为发送端首个环节，当信号发生剧烈变化时，系统认为有信号需要传输，从而唤醒发送端电路进入工作模式。工作模式下系统根据前文设计的突发通信策略机制进行高效数据传输。当信号无变化时，发送端电路进入休眠状态。休眠状态下，系统会保持低功耗状态，减少能量消耗。ADC 模块和射频模块在休眠状态下将不参与任何处理过程。对于接收端，系统的工作逻辑与发送端类似。接收端电路通过射频模块接收来自发送端的数据。当接收到数据时，系统从休眠状态被唤醒，开始接收应变数据，通过 FIFO+DMA 联合机制进行和上位机的通信，数据传输完成后，接收端电路会再次进入休眠状态，最大限度地延长系统的工作时间。

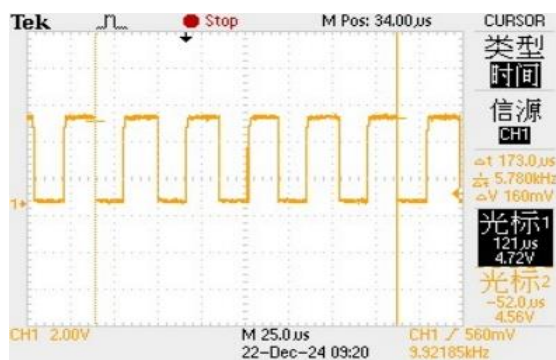
4.4 无线数据传输系统性能测试分析

4.4.1 无线数据传输速率测试

制定减速器内部无线应变监测系统指标时，为确保系统具备良好的实时性，要求无线应变监测系统有较高的采样率以及数据传输速率，为验证无线数据传输系统的性能，设计实验对无线数据传输系统的数据传输速率进行测试。实验装置如图 4.10 (a)所示。图 4.10 (b)为第 10 次无线数据传输速率测试结果图。



(a) 无线数据传输速率测试装置



(b) 无线数据传输速率测试结果

图 4.10 无线数据传输速率测试

数据传输速率的定义为每秒传输的比特数，实验系统由无线数据发送端，无线数据接收端，上位机三部分组成，发送端发送数据，接收端接收来自发送端的数据，并通过示波器接收数据。金属罐体用于模拟减速器内部金属环境，将无线数据收发端置于罐体内进行无线数据传输，通过示波器测量传输 10bits 数据所经历的时长，测试重复进行 15 次。从图 4.10 (b)可以看到传输 10bits 数据的时间为 173.0 μ s，即每个比特传输的时间为 17.3 μ s，传输速率为：1/17.3 μ s 为 57.8kbps，15 组测试的平均传输速率为 57.9kbps，测试结果见表 4.1。

表 4.1 无线数据传输速率测试结果

测试次数	传输 10bits 的时长(μ s)	数据传输速率(kbps)
1	174.0	57.47
2	174.0	57.47
3	174.0	57.47
4	174.0	57.47
5	171.0	58.48
6	171.0	58.48
7	171.0	58.48
8	172.0	58.14
9	172.0	58.14
10	173.0	57.80
11	173.0	57.80
12	173.0	57.80
13	173.0	57.80
14	173.0	57.80
15	173.0	57.80

4.4.2 功耗及数据传输速率结果分析

经实验测试，本系统工作的平均功耗约为 32mW，平均传输速率约为 57.9kbps。根据 CC430 数据手册，射频模块在工作频率为 433MHz 时的功耗约为 56.1mW，而本系统的平均功耗仅为 32mW，说明本文提出的系统功耗优化方案能有效降低系统功耗。57.9kbps 的数据传输速率对于无线通信系统来说并不算高速，然而低功耗与数据传输速率之间的内在冲突使得提高数据传输速率面临多方挑战。射频模块的高功耗特性、数据采集与传输的速率匹配问题、协议与调制方式的优化等都需要在系统设计中精细的调控。本文提出的 FIFO 缓存机制、突发通信策略、DMA 控制、智能休眠机制等优化手段，使得系统在保证低功耗的前提下能够

达到较高的数据传输速率，在解决功耗与数据传输速率与效率的冲突上取得显著成效。

4.5 本章小结

本章围绕减速器内部无线应变监测系统设计要求，完成了无线数据传输系统的硬件电路及软件程序设计，系统在器件选型和软件设计上均采用低功耗方案。本章首先完成硬件电路的设计，重点说明了射频匹配电路设计；接着针对无线数据传输系统低功耗和数据传输速率的冲突，引入 FIFO 缓存机制，在发送端到接收端的数据传输过程中减少中断触发频率，将少量多次的数据传输转换为批量少次的数据传输过程，并提出了自定义的数据帧格式提高数据传输效率。在接收端与上位机的数据传输过程中，将 DMA 与 FIFO 相结合，进一步释放 CPU。然后提出了一种智能休眠机制进一步降低了系统功耗。最后设计了实验对无线数据传输速率进行了测试，实验结果表明，无线数据传输速率能达到 57.9kbps。

第5章 无线应变监测系统集成

本章将阐述无线应变监测系统的系统集成测试以及上位机系统设计。集成系统包括减速器、应变信号采集系统、无线数据传输系统以及上位机系统。基于各个子系统搭建的集成系统，实现了信号采集、高精度处理、高效数据传输、可视化的全流程应变监测。无线应变监测系统的下位机主要功能是实现应变信号的采集以及数据传输功能，上位机则实现应变数据的存储、处理、可视化功能。

5.1 减速器内部无线应变监测系统部署与集成

减速器内部无线应变监测系统的整体框图如图 5.1 所示。

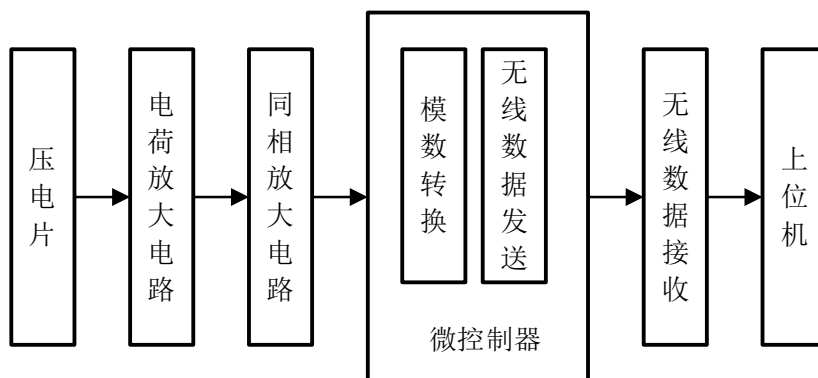
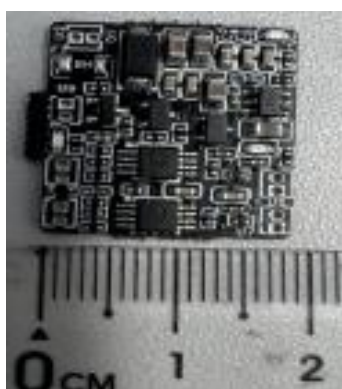


图 5.1 无线应变监测系统整体框图

无线应变监测系统的电路实物图如图 5.2 所示。应变信号采集端电路尺寸约为 $1.9\text{mm} \times 2.1\text{mm}$ 。无线数据传输电路为贴合减速器内部结构设计为异形电路，电路最短处约为 2mm ，最长约为 9mm 。适用于减速器内紧凑结构的传感器部署。



(a) 应变信号采集端电路



(b) 无线数据传输电路

图 5.2 无线应变监测系统电路实物图

分别完成无线应变监测系统的信号采集和无线数据传输功能测试验证后，搭建了完整测试系统对无线应变监测系统进行集成测试。测试装置连接示意图如图 5.3 所示。无线应变监测系统部署图如图 5.4(a)所示，测试系统由减速器，应变信

号采集端，无线数据收发端，上位机组成。减速器内部的电路模块部署图见图 5.4(b)。图 5.5 示的是减速器内部被测结构的应变输出结果。

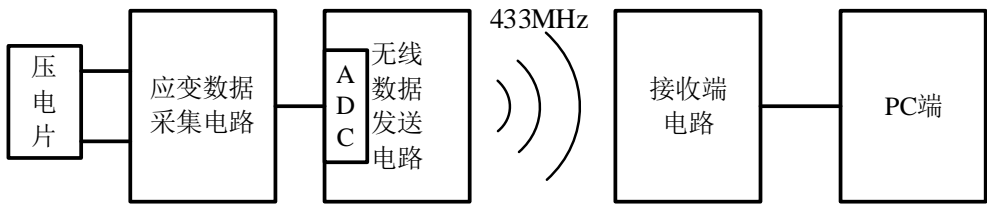


图 5.3 测试装置连接示意图

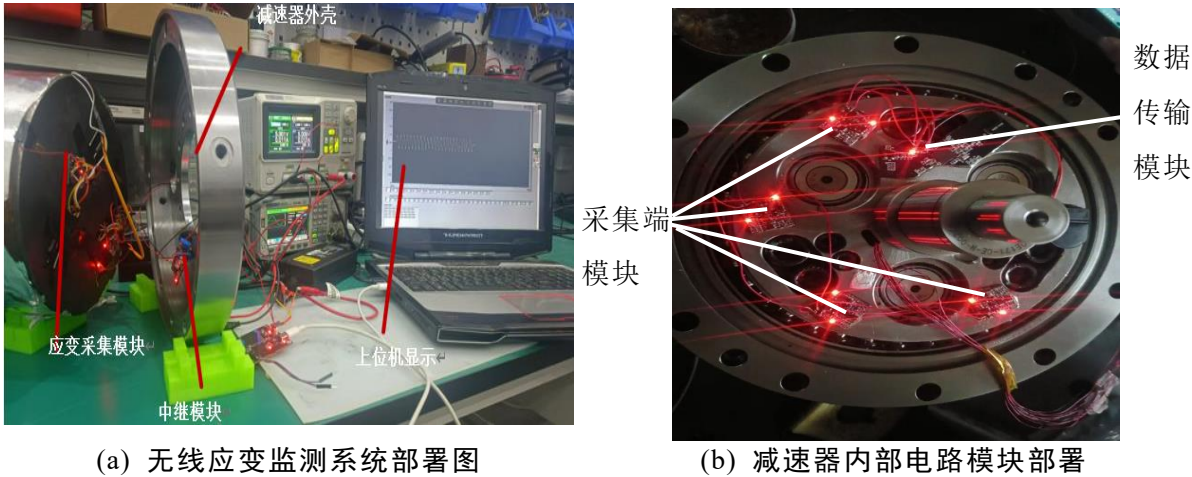


图 5.4 测试装置实物图

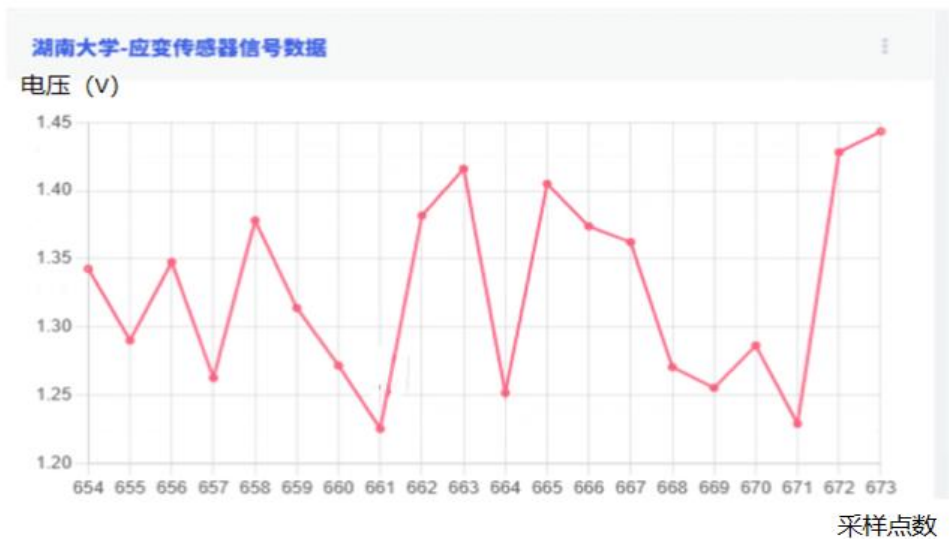


图 5.5 减速器应变信号输出

5.2 基于 LabVIEW 的监测程序设计

LabVIEW 是一种非常强大的虚拟仪器开发平台，可以与各种硬件设备，如数据采集卡、示波器、信号发生器等连接，支持实时数据采集、信号处理、分析、可视化和存储。广泛应用于信号处理、图像处理、音频处理、传感器数据采

集等领域。

本文根据减速器的结构和工作特点，利用 LabVIEW 建立减速器内部应变采集模型，即建立多处应变传感器检测通道。基于应变监测需求，采用 LabVIEW 软件开发一款应变监测系统，动态实时显示应变数据值。可对相关数据采集参数进行设置并显示应变数据波形，实现 LabVIEW 的实时数据显示与存储。基于 LabVIEW 的应变监测系统主要分为串口数据接收以及多通道应变数据解析两个模块。本系统设计的 LabVIEW 程序能够实现多通道的应变数据可视化界面，针对不同通道的应变信号进行波形显示，直观看到减速器内部待测部位的应变情况，从而实现对减速器结构的工作状态的在线监测。其软件流程图如图 5.6 所示。

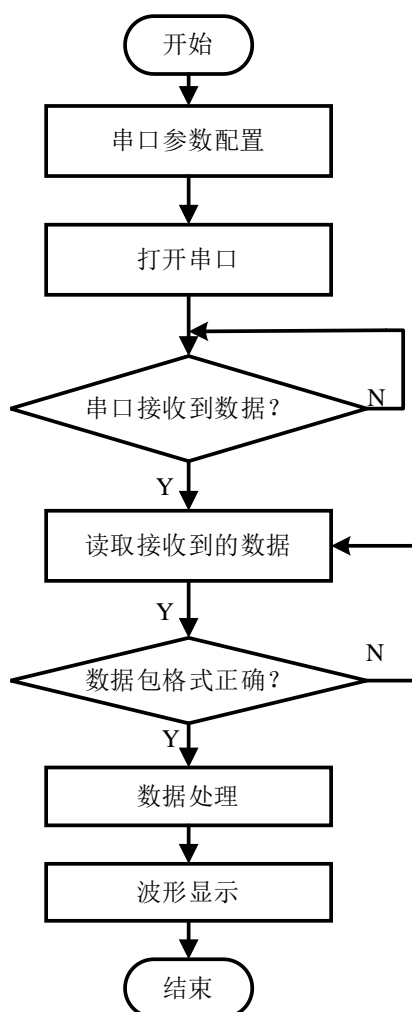


图 5.6 LabVIEW 软件流程图

(1) 串口数据接收

串口数据接收模块是整个可视化监测系统的核心之一，用于连接上位机和下位机，通过串口接收来自下位机的应变数据。在 LabVIEW 中，通过 VISA 中的串口能够实现和上位机的通信。串口模块配置说明见图 5.7，配置串口控件的参数包括：启用终止符，终止符，超时时间，COM 口设置，波特率，数据位数，奇偶校验位设置，停止位等。串口通讯的各个参数在前面板中进行设置。

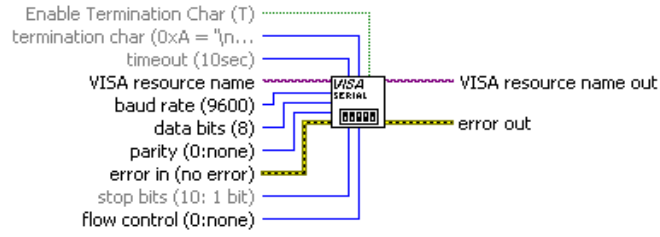


图 5.7 串口模块配置说明

(2) 数据帧解析及波形显示

数据包解析的子程序设计流程图如图 5.8 所示。

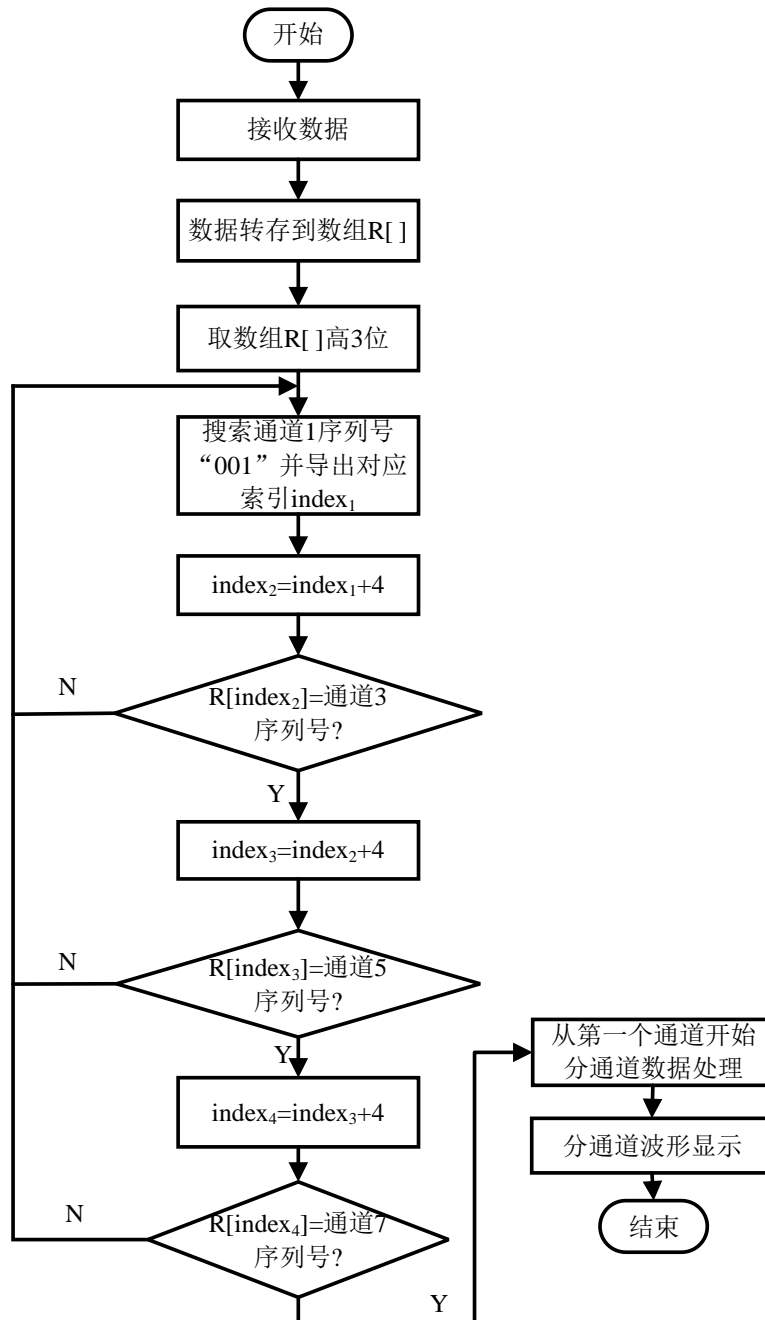


图 5.8 数据解析流程图

无线应变监测系统的应变数据在 ADC 采集时来自最多 8 个采样通道，因此上位机接收到数据后需要解析数据帧。接下来以 8 个通道为例解释解析过程。首先将接收到的数据存储在数组里，取接收数据高 3 位，通过数组元素搜索函数搜索元素“001”，即通道 1 序列号，接着每隔 4 个字节判断数组元素是否分别为通道 3，通道 5，通道 7 序列号，若以上判断结果均为是，则说明接收数据为应变数据，开始分通道对接收数据进行处理及可视化显示。

5.3 应变数据处理系统设计

为了对减速器被测部位的应变状态进行可靠评估，设计程序对采集到的应变数据进行分析，核心目的是对应变数据进行详细处理，并通过一系列的算法提取出数据中的关键特征，从而分析数据的趋势，建立应变与电压之间的关系曲线。该程序包括数据峰值检测、异常值剔除、数据回归分析等多个重要环节，以下将对程序中涉及的关键算法和原理进行详细解析。

(1) 峰值检测

应变数据的峰值和谷值通常代表了减速器内部待测部位在受力过程中的关键点，尤其是在减速器运行出现故障的时候，峰值和谷值点通常对应为应变的极限值，表征应变信号的重要特征和变化趋势。且在线性回归过程中是以输出电压的峰峰值作为自变量进行建模。因此需要对输出的信号完成峰值检测。

峰值和谷值的检测，能够在噪声信号中准确地识别出峰值和谷值。基本原理是通过比较每个数据点与其前后邻域的值，判断该数据点是否为局部极大值或极小值。若当前数据点大于其邻域中的所有点，则认为该点为峰值；若小于邻域中的所有点，则认为该点为谷值。除峰值和谷值的识别外，程序还去除了数据序列两端的值，因为这些值处于信号边缘，误差较大，不能反映真实数据趋势，去除后能提高数据准确性。峰值和谷值的正确提取，揭示了应变数据的关键特征，为后续的应变分析以及测试结果的建模提供有力的支持。

(2) 数据线性回归

数据回归分析是探索两个或多个变量之间关系的常用统计方法。在无线应变监测系统中，线性回归的主要目的是研究应变与电压之间的定量关系，这里采用的是最小二乘法，最小二乘法是一种用于数据拟合的标准统计方法，其通过最小化误差的平方和，从而量化应变与电压之间的关系，拟合出一条直线方程，使得拟合的直线尽可能的靠近实际数据点。线性回归模型如下：

$$y = a + bx \quad (5.1)$$

式中， y 为应变； x 为电压； a 为截距； b 为斜率，表示单位电压变化引起的应变变化量。

为了衡量拟合的好坏，最小二乘法定义了误差函数，即实际观测值与拟合值之间的差距的平方和。希望找到一个 a 和 b ，使得误差函数的值最小化。误差函数见公式(5.2)：

$$S(a,b) = \sum (y_i - (a + b x_i))^2 \quad (5.2)$$

程序设计时通过计算给定数据的斜率、截距、相关系数、标准误差等统计量，量化应变与电压间的关系。

在第 3 章的应变信号采集系统的范围和误差测试过程中，基于上述两种算法进行了曲线拟合，峰值检测算法用于提取电压信号的波峰和波谷，从而得到输出电压的峰峰值；线性回归则拟合出应变和输出电压之间的关系曲线，从而根据电路的输出电压反推出应变值。拟合结果表明，其线性度 R^2 为 0.987，说明系统具备良好的线性度。

5.4 LabVIEW 应变监测系统功能测试

为验证无线应变监测系统能否准确采集和传输应变信号并在上位机进行显示，设计实验进行测试。按照电路原理图，当电路接入压电片但未让其振动时，理论上输出的电压为 1.25V，单片机 ADC 为 12 位，输出的数字量范围为 0~4095，对应的电压范围为 0~2.5V，当电压值达到 2.5V 或 0V，表明测量的电荷量达到正向或反向饱和。

图 5.9 是接入压电片未振动时，LabVIEW 波形图表显示的电压波形，理论上输出电压应为 1.25V，对应 LabVIEW 波形图表上的数字量为 1.25V，实际显示的数值中点约为 1.26V，与 1.25V 相比有一定的误差，外界环境的噪声使得波形不是一条直线，而是在 1.25V 附近呈现微小波动。接入压电片后，使其产生一定振动，输出电压的波形如图 5.10 所示，上方为通道 1 的波形，是电荷放大器的输出信号，下方为通道 2 的波形，是同相运算放大器的输出信号，同相放大器的反馈电阻阻值分别设置为 1k Ω 和 2k Ω ，即电压放大倍数为 3 倍。观察系统输出波形可以看出，输出电压以 1.25V 为基准，在同一时刻，通道 2 的幅值约为通道 1 幅值的 3 倍，符合电路参数设计。

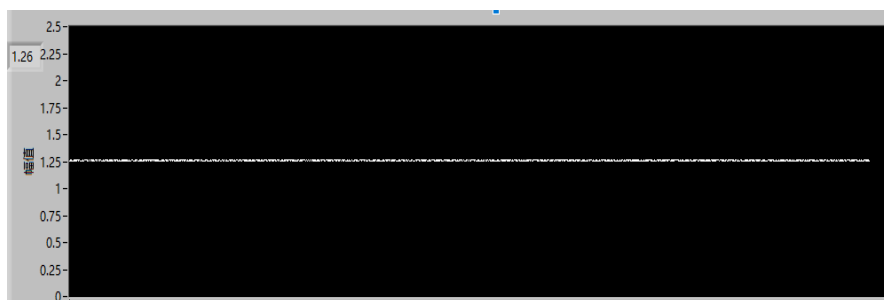


图 5.9 接入压电片未振动

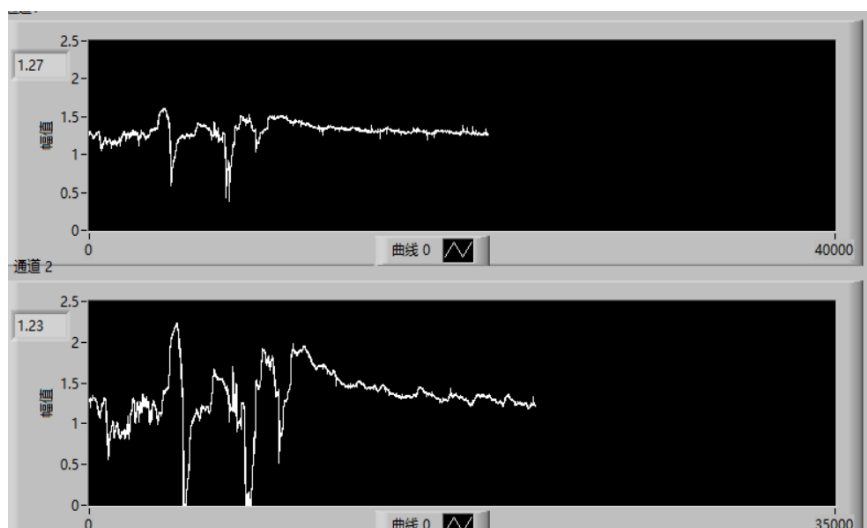


图 5.10 压电片振动时的输出电压波形

5.5 本章小结

本章首先设计实验对减速器内部无线应变监测系统进行系统集成测试，搭建了测试系统，测试结果表明，无线应变监测系统能实现对应变信号的采集、处理、发送、显示等功能。随后介绍了无线应变监测系统上位机系统设计，上位机包含 LabVIEW 应变监测程序和数据处理程序，前者用于实现数据的可视化及存储，后者用于实现数据峰值检测和线性回归。接下来设计实验对监测系统进行测试验证。结合第 3 章应变信号采集端测量范围及误差测试结果以及第 4 章无线数据传输速率的测试结果，无线应变监测系统实现了应变信号的高精度采集和高速率无线数据传输。本文设计的无线应变监测系统能够满足减速器内应变监测的需求。

结 论

减速器的健康状态对于工业机器人的运行精度和可靠性至关重要，其中应变是提示健康状态的重要指标之一，由于减速器内部紧凑空间和复杂结构导致减速器的应变状态监测缺乏有效手段，本文针对减速器内部应变状态信息的采集处理和传输问题，经理论分析、方案设计和实验验证等研究步骤，设计了一种适应减速器内部结构的无线应变监测系统。高精度的信号采集系统与低功耗的高效数据传输系统以及数据处理上位机系统集成于一体能实现减速器内部结构的应变信号精准高效监测。具体研究成果如下：

(1) 本文从减速器内部应变采集需求出发，完成了应变信号采集系统的设计制造，综合考虑低功耗和高精度的需求，选择低功耗低漂移的运算放大器芯片 AD8606 完成采集系统核心信号调理电路设计，对系统的误差及噪声来源做了详细分析并提出误差消除方法，有效提高系统测量精度，实现了应变信号的高精度低噪声放大。1.9mm*2.1mm 的电路尺寸满足微型化设计需求。

(2) 本文基于 TI 公司的 CC430F6137 型号微控制器完成了无线数据传输系统设计，CC430F6137 集 MSP430 单片机和射频模块 CC1101 于一体，满足低功耗和无线数据传输的需求。无线数据传输系统用于实现高精度模数转换，无线数据传输，以及与上位机的通信功能。针对无线数据传输系统存在的低功耗和数据传输速率冲突问题，在程序设计时引入 FIFO 缓存机制，提出两种解决方案，突发通信策略能显著降低中断触发频率，将少量多次的数据传输过程转为批量少次的数据传输，提高数据传输速率的同时减小功耗；将 DMA 与 FIFO 机制相结合，进一步释放 CPU 资源，减小系统功耗，提高数据传输速率。此外，为进一步降低系统功耗，提出一种智能休眠机制方法使系统在不工作时进入休眠状态，最大化的延长系统工作寿命。

(3) 为了方便直观迅速的监测到减速器内部应变状态，本文开发了上位机程序实现应变数据可视化以及数据处理功能，针对多通道应变数据采集需求，完成了基于 LabVIEW 的多通道应变数据监测系统设计。此外，设计了数据处理程序实现峰值检测和线性回归等功能。

(4) 对减速器内部无线应变监测系统实验对系统功能进行集成测试，实验使用柔性压电复合材料采集应变信号，经应变信号采集系统和无线数据传输系统采集处理后在 PC 端的上位机程序中进行可视化显示和数据处理，实验结果表明无线应变监测系统满足减速器内应变监测需求。此外，分别针对系统指标要求，测试了无线应变传感器的测量范围和测量误差以及无线数据传输速率。测试结果

表明，无线应变监测系统实现测量范围达到 $0\sim 2000\mu\epsilon$ ，测量误差小于 1% F.S.，数据传输速率达到 57.9kbps 的指标要求。

本文搭建的减速器内部无线应变监测系统，能实现应变信号的高精度采集测量以及低功耗的高效数据传输，同时具备体积小的优点。但随着未来减速器内部应变监测要求的提高，本文提出的整个系统还存在提升空间，在系统测试过程中，发现一些地方还可以继续提升与改进：

（1）目前整个系统采用电池供电方案，电池的更换在操作上存在不便，为了优化这个问题，可以考虑传感器自供电方案，彻底解决电池更换问题。

（2）工业环境下存在环境噪声，电磁干扰等问题，可以通过进一步优化电路设计，器件选型以及 PCB 布局等方法提高电路的抗干扰能力从而提高整个系统的精度及可靠性。

（3）智能终端还存在优化空间，目前只实现了上位机的可视化显示和数据存储以及部分数据处理功能，可以进一步增加上位机系统功能，使减速器内部的应变监测变得更直观高效。

参考文献

- [1] Tao Y, Liu H, Wu M, et al. The effect of cycloid gear wear on the transmission accuracy of the RV reducer[J]. *Machines*, 2024, 12(8): 511.
- [2] Capolino G A, Antonino-Daviu J A, Riera-Guasp M. Modern diagnostics techniques for electrical machines, power electronics, and drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(3): 1738-1745.
- [3] 彭杰, 杨世廷, 黄宁, 等. 工程结构变形和应变监测技术研究综述[J]. *智能建筑*, 2022, (8): 47-50.
- [4] Guo Y, Zhang D, Fu J, et al. Development and operation of a fiber Bragg grating based online monitoring strategy for slope deformation[J]. *Sensor Review*, 2015, 35(4): 348-356.
- [5] 郭永兴, 李志雄. 增敏型光纤布拉格光栅锚索测力传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 0506001.
- [6] 张心斌, 纪强, 张莉. 振弦式应变传感器特性研究[J]. *传感器世界*, 2003, 8: 19-21.
- [7] Peng L, Jing G, Luo Z, et al. Study on the Mechanism of Static Comparison between Vibrating String Strain Gauge and Fiber Grating Strain Gauge for Bridge Structure Monitoring[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 686(1): 012018-012026.
- [8] Ștefănescu D M, Anghel M A. Electrical methods for force measurement—A brief survey[J]. *Measurement*, 2013, 46(2): 949-959.
- [9] Inaudi D. Application of civil structural monitoring in Europe using fiber optic sensors[J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2000, 2(3): 351-358.
- [10] Martinez-Luengo M, Kolios A, Wang L. Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 91-105.
- [11] 袁晰, 王晓宇, 王浩威, 等. 电压特性对压电纤维复合物驱动性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(2): 343-349.
- [12] PANDEY A, AROCKIARAJAN A. Fatigue study on the sensor performance of macro fiber composite (MFC): theoretical and experimental approach[J]. *Composite Structures*, 2017, 174: 301-318.

- [13] DE CASTRO B, BRUNINI D, BAPTISTA F, et al. Assessment of macro fiber composite sensors for measurement of acoustic partial discharge signals in power transformers[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(18): 6090-6099.
- [14] MAŃKA M, MARTOWICZ A, ROSIEK M, et al. Tunable interdigital transducers made of piezoelectric macro-fiber composite[J]. Smart Material and Structures, 2016, 25(11): 115022.
- [15] PŁACZEK M, WRÓBEL A, BUCHACZ A. An analysis of the possibility of macro fiber composite transducers application in modernized freight wagon[C]//ModTech International Conference-Modern Technologies in Industrial Engineering IV. IOP Publishing. 2016, 145(7): 072012.
- [16] LU F, LIN X J, MA Y P, et al. Fabrication of piezoelectric fiber composites by the double cutting-filling method and properties characterisation[J]. RSC advances, 2016, 6(51): 45624-45629.
- [17] NAGATA Y, PARK S, MING A. Structural sensing and actuation utilizing macro fiber composite[C]//2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE. 2006, 1275-1280.
- [18] Samsuri S F M, Ahmad R, Hussein M, et al. Wireless System for Monitoring Environmental Variables of Rain Shelter House (RSH)[C]//2009 First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2009, 119-124.
- [19] Wang W, Cao S. Application research on remote intelligent monitoring system of greenhouse based on ZIGBEE WSN[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2009, 1-5.
- [20] 铁志杰. 21 世纪桥梁管理的无损检测[J]. 国外桥梁, 1999, (4): 48-51.
- [21] Ide H, Abdi F, Miraj R, et al. Wireless Zigbee strain gage sensor system for structural health monitoring[C]//Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace II. SPIE, 2009, 7314: 19-30.
- [22] 王华斌, 孟立凡, 孟凡勇, 等. 基于 ADuC841 的无线应变测试数据采集系统设计[J]. 电子测试, 2009, (8): 39-42.
- [23] Jo H, Park J W, Spencer Jr B F, et al. Design and validation of high-precision wireless strain sensors for structural health monitoring of steel structures[C]//Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. SPIE, 2012, 8345: 328-340.
- [24] 蒋飞. 岸桥起重机拉杆无线应变测量系统研究[D]. 上海:华东理工大学, 2014.

- [25] 董攀浩. 基于应变测量的塔吊疲劳监测系统研究与设计[D]. 天津:天津工业大学, 2018.
- [26] 郭彤. 无线应变测量的关键技术研究[D]. 华东理工大学, 2018.
- [27] 李函坤. 针对医疗导管上无线传感网络系统的设计[D]. 华中科技大学, 2022.
- [28] Eum J M, Kim E J, Kim D S, et al. Developing a face-shear lead-free piezoelectric transducer through anti-parallel co-poling and its application to an omnidirectional piezoelectric transducer[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(5): 7556-7565.
- [29] 徐兴盛, 李映君, 王桂从, 等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2655-2664.
- [30] 张军, 胡沛锴, 马奕萱, 等. 压电式力传感器三向分载研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2022, 11: 123-126.
- [31] Stutzer D, Hofmann M, Wenger D, et al. Characterization and modeling of a planar ultrasonic piezoelectric transducer for periodontal scalers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 351: 114131.
- [32] Stutzer D, Hofmann M, Wenger D, et al. Characterization and modeling of a planar ultrasonic piezoelectric transducer for periodontal scalers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 351: 114131.
- [33] Davis M. Picturing the elephant: Giant piezoelectric activity and the monoclinic phases of relaxor-ferroelectric single crystals[J]. *Journal of Electroceramics*, 2007, 19: 25-47.
- [34] 周继明, 江世明. 传感技术与应用[M]. 中南大学出版社, 2005.
- [35] 邵维维. 压电变压器接触散热装置的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
- [36] 温淑慧. 一种高精度超声液位测量系统的研究[J]. *压电与声光*, 2002, 24(6):494-496.
- [37] 贺秀玲. 高频电子线路的 Multisim 实现[M]. 清华大学出版社, 2023.
- [38] Studt T. National Instruments: NI LabVIEW 7 Express Delivers Measurement and Control Productivity to Every Engineer[J]. *Scientific Computing*, 2004, (10):46.
- [39] 于广艳. 虚拟仪器的现状及发展趋势[J]. *中国新通信*, 2017, 19(9): 21-21.
- [40] 刘娜. 虚拟仪器的技术特征与发展探析[J]. *电子制作*, 2014, (10X): 105-105.
- [41] 王新波, 朱维杰. 虚拟仪器的现状及发展前景[J]. *科技创新导报*, 2011, 8(30): 108-108.

- [42] 肖志达. 柔性压电复合材料的结构设计及电输出性能研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
- [43] 陈阳正, 邢亚敏, 李玉凤, 等. 基于压电传感器的放大电路分析[J]. 电子世界, 2018, (6): 94-95.
- [44] 徐森林, 刘学飞, 孙攀, 等. 压电传感器前置放大电路分析[J]. 物联网技术, 2013, 3(2): 27-29.
- [45] 贾灵,王薪宇,郑淑军. CC430 无线传感网络单片机原理与应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2011.

附录 A 攻读学位期间所参与的科研项目

- [1] 国家重点研发计划，工业机器人减速器状态监测传感器关键技术
(2021YFB2012102)