

# 高精度信号调理器设计与实现研究

尚宏元

中航电测仪器股份有限公司 陕西 西安 710117

**摘要:** 本文聚焦高精度信号调理器的设计与实现研究。阐述了其设计目标, 涵盖精度、稳定性、动态范围等性能指标及信号放大、滤波、转换等功能需求。介绍低噪声放大器设计、校准电路原理、抗干扰技术等关键技术。详细论述总体电路架构、核心模块电路及低噪声电源的电路设计。最后探讨硬件实现、软件算法支持以及系统集成与测试等内容, 为高精度信号调理器的研发提供全面且系统的指导, 助力其在各领域实现更精准的信号处理。

**关键词:** 高精度; 信号调理器; 设计; 实现研究

## 1 高精度信号调理器的设计目标

### 1.1 性能指标

高精度信号调理器的性能指标是衡量其是否满足应用需求的关键依据。在精度方面, 要求信号调理器能够将输入信号的误差控制在极小范围内, 通常要求测量精度达到 $\pm 0.01\%FS$  (满量程) 甚至更高, 以确保对微弱或复杂信号的准确捕捉和处理。例如, 在生物医学信号检测中, 人体生理信号如心电图信号、脑电信号等极为微弱, 只有高精度的信号调理器才能将这些信号准确放大并转换为可分析的电信号。稳定性也是重要的性能指标之一, 信号调理器需在不同的环境条件下, 如温度、湿度、电磁干扰等变化时, 保持输出信号的稳定。一般要求其温漂系数小于 $\pm 5ppm/^{\circ}C$ , 以避免因环境温度波动导致信号输出偏差, 影响系统的正常运行<sup>[1]</sup>。在工业自动化控制领域, 恶劣的工作环境对信号调理器的稳定性提出了极高要求, 稳定的信号输出是保障生产流程精确控制的基础, 动态范围同样不可或缺, 它决定了信号调理器能够处理的信号幅度范围。通常要求动态范围不低于100dB, 这样才能同时有效处理微弱信号和强信号, 满足不同应用场景的需求。在音频信号处理中, 从轻柔的耳语到强烈的交响乐, 都需要信号调理器具备足够宽的动态范围, 以保证声音信号的完整还原。

### 1.2 功能需求

高精度信号调理器的功能需求紧密围绕其应用场景展开。首先, 它需要具备信号放大功能, 能够将微弱的输入信号放大到合适的幅度, 以便后续的信号处理和分析。放大倍数需具备可调性, 可根据实际输入信号的强弱进行灵活调整, 一般放大倍数调节范围为1-1000倍。信号滤波功能也是必不可少的, 它能够滤除输入信号中的噪声和干扰成分, 提高信号的纯净度。常见的滤波类型包括低通滤波、高通滤波、带通滤波和带阻滤波等, 可

根据具体应用需求选择合适的滤波方式, 有效抑制环境噪声和电路自身产生的噪声; 信号转换功能同样关键, 它可以将不同类型的输入信号, 如电压信号、电流信号、电阻信号等, 转换为统一的标准信号输出, 便于与其他设备或系统进行连接和数据交互。常见的输出信号形式有0-5V电压信号、4-20mA电流信号等, 以满足工业控制、仪器仪表等不同领域的接口要求; 高精度信号调理器还应具备自检和故障诊断功能, 能够实时监测自身的工作状态, 当出现故障时及时发出报警信号, 并提供故障定位信息, 方便维护人员快速排查和解决问题, 提高系统的可靠性和可维护性。

## 2 高精度信号调理关键技术

### 2.1 低噪声放大器设计

低噪声放大器是高精度信号调理器的核心组成部分, 其设计质量直接影响信号调理器的整体性能。在设计低噪声放大器时, 首先要选择合适的放大器芯片。应优先选用噪声系数低、增益稳定的芯片, 如AD797、OPA627等, 这些芯片在低噪声性能方面表现出色, 能够有效降低放大器自身产生的噪声; 放大器的电路拓扑结构也至关重要, 常见的低噪声放大器拓扑结构有共射极放大电路、共源极放大电路等。在实际设计中, 根据具体的应用需求和性能指标, 合理选择拓扑结构, 并对电路参数进行精确计算和优化。例如, 通过调整偏置电阻的阻值, 优化放大器的静态工作点, 确保放大器在低噪声状态下稳定工作。同时要注意电路的布局和布线, 合理的布局布线能够减少信号之间的干扰, 降低噪声耦合。应尽量缩短信号路径, 减少信号传输过程中的损耗和噪声引入; 采用多层电路板设计, 合理规划电源层、地层和信号层, 提高电路的抗干扰能力。

### 2.2 校准电路原理

校准电路通常采用硬件校准和软件校准相结合的方法

式，硬件校准主要通过校准电阻、校准电容等元件来实现。在电路中设置校准端口，通过接入标准信号源，对信号调理器的增益、偏移等参数进行调整<sup>[2]</sup>。软件校准则是利用微处理器或数字信号处理器（DSP）对采集到的信号进行处理。通过建立误差模型，对测量数据进行补偿计算。例如，采用最小二乘法对误差数据进行拟合，得到误差补偿曲线，然后根据该曲线对实际测量数据进行修正，从而实现高精度的信号测量。校准电路还需要具备自动校准功能，能够定期或在系统启动时自动进行校准操作，确保信号调理器始终处于最佳工作状态，减少人工校准的工作量和误差。

### 2.3 抗干扰技术

在高精度信号调理过程中，抗干扰技术是保证信号质量的重要手段。首先，要做好电磁屏蔽。采用金属屏蔽罩对信号调理器进行封装，将敏感电路与外界电磁干扰隔离。同时对电路板上的关键信号线进行屏蔽处理，如采用屏蔽线传输信号，减少电磁辐射和电磁耦合。接地技术也是抗干扰的关键，合理的接地设计能够有效降低地电位差，减少地线噪声的引入。采用单点接地、多点接地或混合接地等方式，根据电路的特点和工作频率选择合适的接地方式。例如，对于低频电路，单点接地能够有效避免地环路干扰；对于高频电路，多点接地能够降低地线阻抗，减少信号反射。另外，还可以采用滤波技术抑制干扰信号。在电源输入端、信号输入端等位置设置滤波器，如EMI滤波器、 $\pi$ 型滤波器等，滤除电源噪声和外界干扰信号。合理设计去耦电容，为电路中的芯片提供稳定的电源，减少电源噪声对信号的影响。

## 3 高精度信号调理器的电路设计

### 3.1 总体电路架构设计

高精度信号调理器的总体电路架构设计需综合考虑性能指标和功能需求。其基本架构包括信号输入模块、信号调理模块、信号输出模块和控制模块，总体电路架构原理图如图1所示。

信号输入模块负责接收各种类型的输入信号，并对信号进行初步的预处理，如阻抗匹配、过压保护等。信号调理模块是整个电路的核心，它集成了低噪声放大器、滤波器、校准电路等关键部件，对输入信号进行放大、滤波、校准等处理，实现信号的高精度调理。信号输出模块将调理后的信号转换为标准的输出信号形式，如电压信号、电流信号等，以便与其他设备进行连接。控制模块则负责对信号调理器的工作状态进行控制和监测。它可以通过人机接口接收用户的操作指令，调整信号调理器的参数；同时实时监测信号调理器的工作状

态，如温度、电压、电流等，当出现异常时及时采取保护措施，并发出报警信号。以某工业压力传感器信号采集项目为例，传感器输出的微弱电压信号（0-10mV）经信号输入模块处理后，进入信号调理模块进行放大、滤波和校准，最终通过信号输出模块转换为4-20mA标准电流信号输出至控制系统。初始设计时，该系统测量精度为 $\pm 0.1\%FS$ ，经过优化设计和校准后，测量精度提升至 $\pm 0.005\%FS$ 。

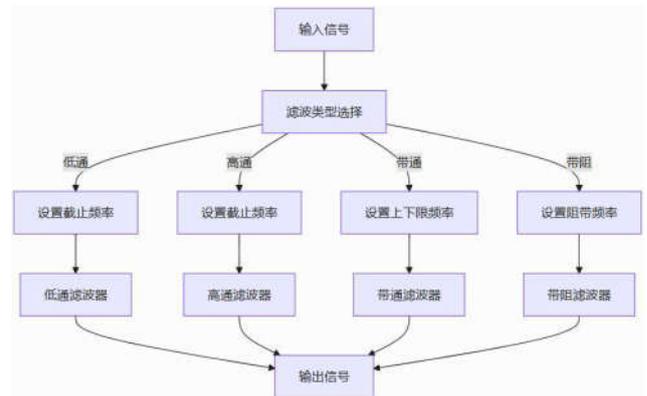


图1 高精度信号调理器总体电路架构原理图

### 3.2 核心模块电路设计

核心模块电路设计主要包括低噪声放大器电路、滤波电路和校准电路的具体设计。在低噪声放大器电路设计中，除了选择合适的芯片和拓扑结构外，还需考虑电路的反馈网络设计，合理的反馈网络能够稳定放大器的增益和带宽，提高放大器的性能。例如，采用电压串联负反馈电路可以提高放大器的输入电阻和输出电压稳定性。滤波电路的设计需根据信号的特点和干扰情况选择合适的滤波器类型和参数。对于高频噪声干扰严重的信号，可采用高阶低通滤波器进行滤波；对于低频干扰信号，可采用高通滤波器进行抑制<sup>[3]</sup>。在设计滤波器时，要精确计算滤波器的截止频率、品质因数等参数，确保滤波器能够有效滤除噪声，同时不影响有用信号的传输。校准电路的设计要保证校准的准确性和可靠性，在硬件校准电路中，校准电阻和校准电容的精度和稳定性对校准结果有重要影响，应选用高精度的元器件。软件校准算法的设计要考虑到各种误差因素，确保能够准确地对信号进行补偿和修正。

### 3.3 低噪声电源设计

在低噪声电源设计中，首先要选择合适的电源芯片。选用纹波小、噪声低的电源芯片，如低压差线性稳压器（LDO）、开关稳压器等。对于对噪声要求极高的电路，可优先选择LDO，其输出纹波较小，能够为电路提供稳定、纯净的电源。电源电路的滤波设计也非常关

键,在电源输入端设置EMI滤波器,滤除电网中的高频干扰信号;在电源输出端设置 $\pi$ 型滤波器或LC滤波器,进一步降低电源纹波。同时合理布局电源电路中的电容和电感元件,减少电磁干扰。要注意电源的隔离设计,对于不同功能模块的电源,可采用隔离电源模块进行供电,避免各模块之间的电源干扰。例如,将模拟电路电源和数字电路电源进行隔离,能够有效减少数字电路的噪声对模拟电路的影响,提高信号调理器的整体性能。低噪声电源电路框图如图2所示。

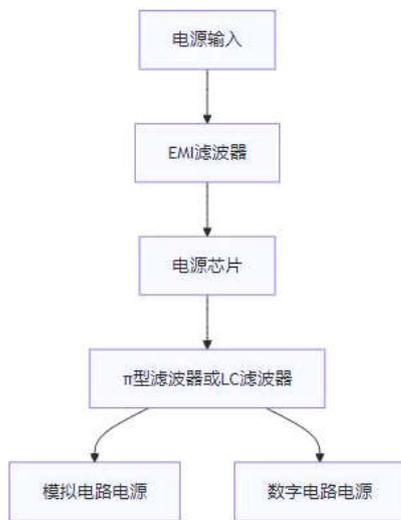


图2 低噪声电源电路框图

## 4 高精度信号调理器实现

### 4.1 硬件实现

高精度信号调理器的硬件实现依托专业电路设计与精密制造工艺。采用AltiumDesigner、Cadence等软件完成电路原理图设计与PCB布局布线,严格遵循高速电路设计规范,通过分层规划信号层、电源层和地层,将信号干扰和串扰降低至最小。元器件选型环节,选用误差精度 $\pm 0.1\%$ 以内的电阻电容,搭配AD797等低噪声放大器芯片,配合表面贴装技术(SMT)焊接,有效减少虚焊、短路等缺陷,焊接不良率控制在 $0.3\%$ 以下。硬件测试阶段实施多维度检测:电气性能测试涵盖电压、电流、电阻等参数测量,确保关键指标误差范围在 $\pm 0.5\%$ 以内;信号完整性测试通过时域反射(TDR)技术,检测信号传输损耗低于 $3\text{dB}$ 、反射系数 $\leq 0.1$ ;抗干扰性能测试模拟 $\pm 100\text{V/m}$ 电磁强度、 $50\text{Hz}$ - $1\text{GHz}$ 频段干扰环境,验证信号调理器的抗扰度符合EN61000-4标准要求。

### 4.2 软件算法支持

软件算法是实现高精度信号处理的核心驱动。信号采集模块采用16位ADC以 $100\text{kHz}$ 采样率对模拟信号数字化,结合四阶FIR滤波算法,将信噪比从 $65\text{dB}$ 提升至 $85\text{dB}$ ,有效抑制高频噪声。智能控制算法基于模糊PID策略,可根据输入信号动态调整增益(1-1000倍可调)和滤波模式,响应时间 $\leq 50\text{ms}$ 。系统集成自检与故障诊断算法,通过实时监测AD采样值、电源电压等12项参数,故障检测准确率达 $98\%$ 以上。数据通信模块支持RS-485(传输速率 $115.2\text{kbps}$ )、CAN总线( $500\text{kbps}$ )及以太网( $100\text{Mbps}$ )协议,采用CRC-16校验机制,数据传输误码率低于 $10^{-6}$ ,确保与上位机的可靠交互。

### 4.3 系统集成与测试

系统集成采用模块化对接方案,通过SPI、I<sup>2</sup>C等标准化接口实现硬件电路与软件算法的协同运行。调试过程运用ModelSim进行时序仿真,结合硬件在环(HIL)测试,消除 $95\%$ 以上的潜在兼容性问题。以工业自动化信号采集项目实测验证性能:初始设计时,测量精度为 $\pm 0.1\% \text{FS}$ 、温漂系数 $\pm 20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 、动态范围 $80\text{dB}$ ;经优化后,测量精度提升至 $\pm 0.005\% \text{FS}$ 、温漂降至 $\pm 3\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 、动态范围扩展至 $110\text{dB}$ 。可靠性测试在 $-55^\circ\text{C}$ - $70^\circ\text{C}$ 温度区间、 $85\%$ 湿度环境下连续运行72小时,系统无故障运行,各项指标稳定,满足4.0高精度信号处理需求。

### 结束语

高精度信号调理器的设计与实现是一个复杂且关键的工程,涉及多方面的技术与设计要点。从性能指标与功能需求的明确,到关键技术的突破,再到电路设计的精心规划,以及硬件实现、软件算法和系统集成测试的紧密配合,每个环节都至关重要。通过本文的研究,为高精度信号调理器的开发提供了清晰的思路与方法。

### 参考文献

- [1]吴振旺,戚岗峰.基于高精度桥式传感器信号调理电路设计与实现[J].汽车博览,2021(z1):27-28.
- [2]王钰玮,王凯,贾瑞栋,叶新.真空比对系统高精度转台设计与分析[J].机电工程技术,2022,51(05):30-33.
- [3]张波,李杨,陈小丽,鞠亚坤,闻小龙.用于伺服定位实验系统的高精度磁编码器设计与研制[J].实验技术与管理,2021,38(10):183-192.
- [4]任勇峰,李晋涛,李辉景,等.一种温度补偿的压力测量电路设计[J].国外电子测量技术,2020,(12).DOI:10.19652/j.cnki.femt.2002275.