

基于电阻型压力传感器的机械手夹持系统设计

龙 毓¹, 宋振宇²

(1. 成都市技师学院(成都工贸职业技术学院), 四川 成都 610000;

2. 成都运达科技股份有限公司, 四川 成都 611730)

摘 要 自动化与机器人技术迅猛发展, 机械手在工业生产与日常生活中扮演着越来越重要的角色。机械手的灵巧操作能力在很大程度上取决于其感知环境的能力和对力的精确控制。本文提出了一种基于压力传感器的机械手前端夹持力感应系统硬件电路设计方案及其对应的软件方案, 通过对机械手压力传感器前端模拟电路进行优化设计, 实现对抓取力的实时监控和精细测量, 通过数据修正系数, 对采样结果进行修正, 再通过算法处理, 得出有效的压力数据, 以期对相关研究人员提供参考。

关键词 机械手; 压力传感器; 压力采集; 自动化

中图分类号: TP241

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.02.001

0 引言

随着自动化技术的快速发展, 机械手在各种领域中得到了广泛应用。想要使机械手能够稳定、准确地执行夹持操作, 机械手前端夹持力数据的监控和采集是至关重要的一环。传统机械手主要依靠预设的固定程序来执行操作, 这种设计往往忽略了对抓取过程中细微力变化的感知, 导致在处理易碎或形状不规则物体时的灵活性和适应性受限。随着技术的不断发展, 越来越多的机械手具备压力感知功能, 但部分采用电容压力传感器作为加持力感应系统, 量程不大且因其是非线性压力传感器, 所以不能精确地感知力量大小^[1]。本文提出了一种基于电阻型线性压力传感器的机械手夹持力感应系统设计, 通过高精度模拟前级放大电路来增强机械手前端信号的感知能力, 从而实现对抓取力的精确监控。本文主要讲解其硬件及算法部分设计。

1 硬件系统概述

通过电阻型压力传感器、前级高频滤波单元、放大倍率可调节的高精度小信号放大单元、低通模拟滤波器、高精度模数转换器并配合外围监控电路、超低纹波电源、超低纹波的电源及通信单元共同组成高精度的(系统精度

1%) 压力采集系统。系统图如图 1 所示。

2 单元电路设计及分析

2.1 压力传感器信号处理及采样

2.1.1 压力传感器选型

压力传感器采用 100 公斤轮辐式高精度压力传感器, 采用带屏蔽线缆的四线制接法: V_{ex} 为 10 V 供电电源, V_o 为传感器差分输出^[2]。

2.1.2 电阻型压力传感器工作原理

传感器在受到外力作用的时候会产生形变, 引起紧贴在传感器内壁上的应变片电阻线性增加或减小, 在有外部供电(比如 10 VDC)的情况下, 输出的差分毫伏信号也随之线性增加或减小。传感器通过内部组桥、调零、配平灵敏度、温补之后, 输出的信号 = 供电电压 \times 灵敏度。

例如, 稳压电源是 10 VDC, 灵敏度是 1.5 mV/KN, 则传感器到满量程时输出的电压 = $10 \times 1.5 = 15$ mV。

2.2 高精度模拟前级放大电路

高精度模拟前级放大电路由前级高频滤波单元、放大倍率可调节的高精度小信号放大单元、低通模拟滤波器单元、高精度模数转换器组成。

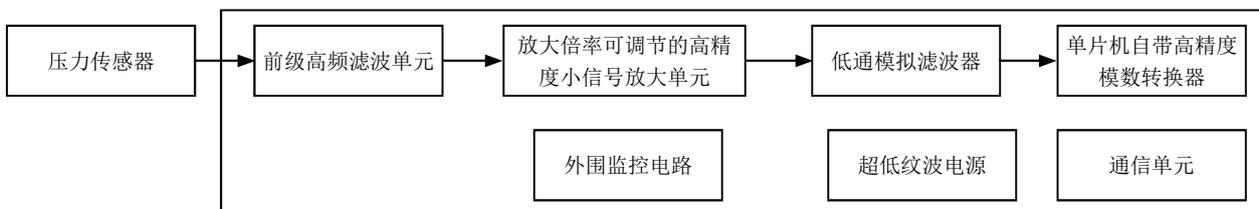


图 1 加持力感应系统硬件设计框图

2.2.1 前级高频滤波单元

前级高频滤波单元是一个三端无源滤波网络，用于二阶低通共模级差模 RC 滤波。前级高频滤波单元的主要作用为滤除空间射频耦合干扰，防止高能量的射频信号干扰系统运行。每个差分信号使用一个 10 M 欧姆电阻做保护性下拉，用于保护后级放大单元^[3]，具体见图 2。

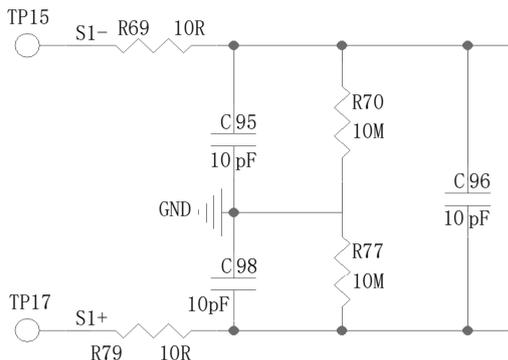


图 2 前级高频滤波单元电路原理图

2.2.2 放大倍率可调节的高精度小信号放大单元

使用仪器放大器 INA826 将信号从差分模式转化为单端模式，并将 0 ~ 15 mV 差分输入信号放大 100 倍左右到 0 ~ 1.5 V，放大器自带一个偏置电压输入引脚，在本设计中，我们把偏置设置到 ADC 采样的中心电压 1.5 V (见图 3)。

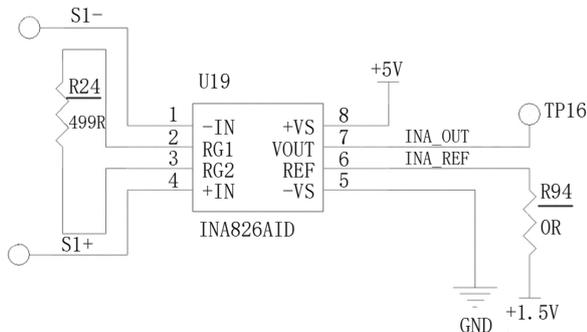


图 3 放大倍率可调节的高精度小信号放大单元电路原理图

2.2.3 低通模拟滤波器单元

采用一组七阶 Sallenkey 二级低通滤波器做信号滤波。该滤波器参数为巴特沃斯型，0 ~ 480 Hz 信号通带内无衰减，-3dB 转折频率 690 Hz。-40dB 阻带频率 1 350 Hz，阻带内单调无起伏。经过 Sallenkey 低通滤波器后和一级 RC 滤波后，输入到单片机 AD 输入脚。增设 Sallenkey 滤波器的主要作用是抗混叠及做低通滤波，防止高于 690 Hz 频率的信号干扰系统的正常运

行，并将不能滤除的高频电源噪声大大降低，从而提高压力传感器的采样精度。此单元是本设计系统的核心，能有效提高压力的采样精度^[4]。

2.2.4 高精度模数转换器

采用自带的 12 位 ADC 的单片机，其最大量化范围为 212 即 4 096，其参考电压为 3 V。当对 1.5 V 输入信号电压进行量化处理时，其采样结果为 $(1.5 \text{ V}/3 \text{ V}) \times 4 096 = 2 048$ ，经过 ADC 就可以将电压信号转化为对应的数值。

2.2.5 超低纹波电源

在模拟电路中，一个超低纹波的电源在提高压力传感器采样精度上有很大的帮助。在实际使用中，为保证采样精度和足够的分辨率，供给单片机模拟端及 AD 前级电路的电源纹波必须控制在 5 mV 以内。为达到这个目标，本设计在 +10 V 及其后级电路中全部使用高电源抑制比 (PSRR) 的 LDO 进行设计，每级 LDO 的电源抑制比不小于 70 dB。

该单元电路在接口输入 24 V 直流后，经过一组隔离开关电源转换为内部 +15 V 电源，内部 +15 V 电源给 DCDC 芯片转化为数字 3.3 V 输出供给单片机等数字部分电路使用。

内部 +15 V 电源经过一个线性稳压器 (LDO) 后转换为 +10 V 电源供给放大倍率可调节的高精度小信号放大单元、低通模拟滤波器单元使用，+10 V 电源再经过一级 π 型滤波器供给压力传感器使用。

+10 V 另经过一级 LDO 转化为模拟 3.3 V 供给单片机模拟部分使用，模拟 3.3 V 后级接基 3 V 准芯片，输出 3 V 基准电压供给单片机的 ADC 作为参考基准；模拟 3.3 V 后级接 1.5 V 基准供给高精度小信号放大单元作为信号偏置使用。

2.3 外围监控电路

外部电源监视网络主要是利用电阻分压网络及运放组成的分压网络单元，将外部 +10 V 电源、数字 +3.3 V 电源、模拟 +3.3 V 电源经过滤波分压等处理后，生成一个 0 ~ 3 V 的电压信号，输入单片机转化为电压值信号，从而判断系统电压是否在正常范围内。

2.4 通信电路

在 ADC 采集完数据后，必须将数据反馈给后台计算机进行实时计算。本设计使用带隔离的 485 通信电路，通信波特率 1 Mbps，隔离电压等级 500 V。隔离 485 通信电路的内部串口通过一个隔离器及一个 485 电平转换器实现 RS485 电气隔离，通信单元采用 3.3 V 的 485 收发器芯片 SP3485，隔离器使用 ADuM131E，隔离

电压 3 750 V, 通信速度 150 M. RS485 为 10 Mbps, 485 总线上采用 TVS 进行防护^[5]。

2.5 后台计算机

后台计算机安装有计算软件, 负责计算输出结果。

3 算法设计

3.1 信号提取

先将压力传感器通道数据前 50 个 ADC 值做均值, 设存储该数据的数列为 Z:

$$Z_{mean} = \frac{Z[1] + Z[2] + \dots + Z[50]}{50}$$

再将每个值对应减去均值:

$$Z[i] = Z_1[i] - Z_{mean}$$

根据计算结果的正负, 确定压力信号方向, 判断压力信号是否要取反, 若为 1 则取反, 否则不变, 取反过程如下:

$$Z[i] = -Z[i]$$

观察已有波形, 通过将压力传感器信号加权相加, 增强信号的上升沿与下降沿的梯度变化幅度, 有效屏蔽一些因复杂场景、个别信号源的因素影响有效波峰信号的提取。

3.2 峰值提取

对上下边的融合信号做峰值提取。

1. 压力融合数据:

$$K_i = \mu_i * (\alpha_i * Z) * (\beta_i * P_i)$$

其中 K_i 为压力数据的合成波; α_i 为当前压力数据的 Z 的校正系数; β_i 为压力当前传感器 P_i 的校正系数。

2. 提取波峰: 选取极值点作为波峰, 计算幅值的阈值, 因为存在机械手夹持货物与不夹持货物时, 幅值差异较大, 因此, α 选取较低的值, 此处选为 0.1:

$$\text{thresh1} = \min_val + \alpha(\max_val - \min_val)$$

为保证峰值的有效性, 在有效波峰阈值和时序阈值的范围内, 提取极大值点作为备选波峰, 为避免波峰位置的偏差, 将超过波峰 80% 的邻域范围内的信号值做均值作为有效波峰, 并且将超过波峰 80% 的时序点的中值作为有效波峰的时序点, 即机械手有效压力数据所在的时序点。获取有效压力数据。

3.3 传感器数据的量纲转换

将无量纲的传感器信号转换为以质量为量纲的信号, 存在一定的转换误差。在干扰较大和速度变化较大的情况下, 转化误差影响会较大。

为消除转化误差的影响, 将传感器信号转换为质量的参数字典化, 即将转换系数通过实验, 在不同压

力情况按限定范围分别计算, 从而实现最大限制的消除误差。

3.4 提取和筛选波峰

通过上述的波峰提取检测出压力峰值集合, 每个波峰包含数个峰值, 多次重复测量会得到同一个计量指标的一组值, 需要对同一个计量指标的一组测量值进行算法的有效性判定, 剔除异常结果, 结合标准差、均方误差等统计量, 输出计量指标的有效值。通过掩码方式, 将无效信号屏蔽, 不参与计算; 通过次重复统计方式剔除无效信号的波峰信息; 通过传感器的信号融合的方式, 计算有效波峰信息, 再将有效波峰信息提取和计算压力转换的结果。具体流程见图 4。

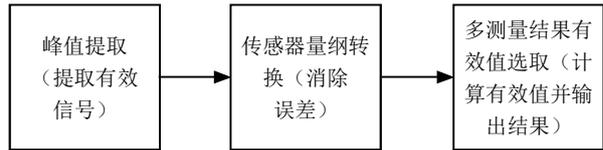


图 4 机械手加持力系统算法流程图

4 结束语

本文基于电阻型压力传感器的机械手夹持力感应系统设计为机械手的精准控制提供了一种新的优化路径, 经过试验, 其信号采样非常稳定, 压力与采样电压的对应关系为线性关系, 适用于机械手夹持力高精度采样, 较高的 ADC 采样精度及较低的电源噪声, 保证了 ADC 采样结果的准确性; 使用多阶 SALLENKEY 低通滤波器, 有效地消除了高频噪声, 有效提取出低频压力信号, 保证信号的真实性, 有效地防止信号混叠; 经过多次试验得出的压力校正系数和传感器校正系数, 保证了测量的准确性; 多次提取测量峰值及使用标准差、均方误差等计算手段提高了计算结果的准确性; 经过优化的算法及有效信号的多次提取, 保证了计算压力有效值的准确性。

参考文献:

- [1] 刘琪. 基于 STM32 的机械手夹持力控制系统设计 [J]. 电子制作, 2023(01):11-15.
- [2] 厉旻, 卢小霖, 李何良. 基于智能化管理的压力传感器计量检测方法 [J]. 自动化技术与应用, 2024(09):8-11, 20.
- [3] 陈冲锋, 潘露. 机械手夹持器的优化设计 [J]. 机械制造, 2020(10):15-16, 56.
- [4] 陈旭洋, 李文韬, 贾志鹏. 一种基于气动柔性驱动器的仿人机械手设计 [J]. 机器人技术与应用, 2023(02):12-15.
- [5] 吴德刚, 赵利平, 陈乾辉. 基于机器视觉的机械手夹持角自动化控制系统 [J]. 制造业自动化, 2022(02):187-190.