

第5章

变送器硬件系统

为了实时实现电磁流量计的数字励磁控制方法和数字信号处理方法,本章以 DSP 芯片为控制和处理核心,研制电磁流量计变送器硬件系统。硬件系统主要包括励磁控制模块、信号调理采集模块、偏置调整模块、信号处理模块、输出模块、通信和人机接口模块^[1-7]。由于第 2 章和第 3 章介绍了励磁控制模块,所以,本章具体介绍信号调理采集模块、偏置调整模块、信号处理模块、输出模块、通信和人机接口模块。

5.1 硬件系统框图

变送器硬件系统框图如图 5.1.1 所示,其中的具体细节将在本章后面介绍。

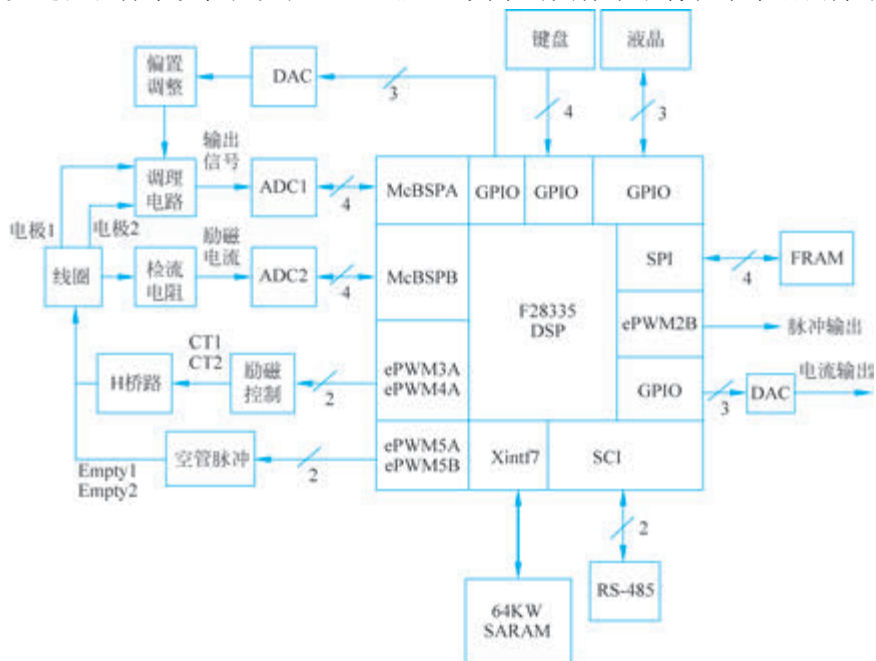


图 5.1.1 变送器硬件系统框图



5.2 信号调理采集模块

5.2.1 方案设计

由于电磁流量计电极输出的感应电动势信号非常微弱,干扰成分较复杂,信号阻抗变化范围较大,信号幅值直接受到磁场变化的影响,不满足 ADC 采样的要求,因此,需要进行信号调理。低噪声、低温漂与高精度采样的信号调理采集方案框图如图 5.2.1 所示,主要由传感器输出信号调理采集部分与励磁电流信号调理采集部分组成。前一部分主要包括 DAC 调偏置电路、空管侦测电路、差分放大电路、滤波电路以及 ADC 采样电路。后一部分主要包括仪用放大电路、滤波电路、ADC 采样电路。其他周边电路包括电源电路、基准与晶振电路等。

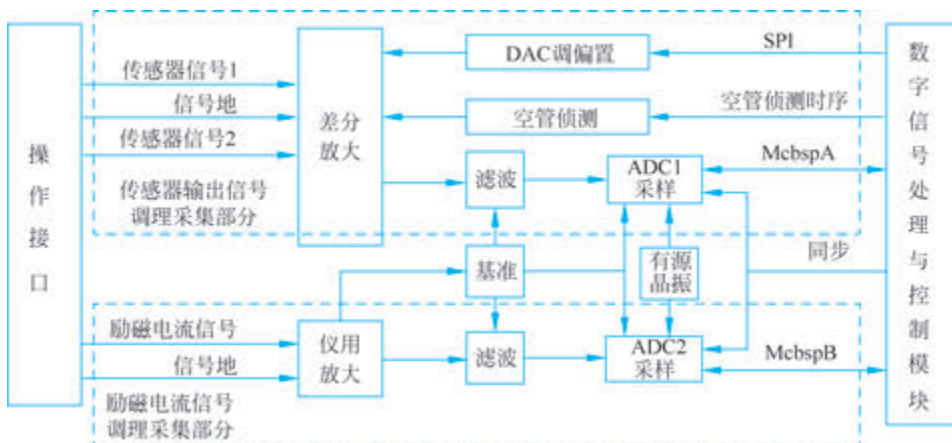


图 5.2.1 信号调理采集方案框图

5.2.2 工作流程

传感器输出信号调理采集部分的工作流程:在交变励磁电流的激励下,励磁线圈在管道垂直方向产生交变磁场,具有一定流速的导电液体切割磁力线,在传感器电极两端感应出电动势信号。该输出信号为差分信号,幅值微弱,约为数十微伏至数毫伏;经过差分放大电路放大至约为数百毫伏;再经过滤波电路,滤除高频噪声;最后经过 ADC 采样和转换,将数字量传输给 DSP 计算。由于传感器输出信号中含有直流偏置,且该偏置为一变化量,具有随机性,当信号发生漂移时,受到运放电源轨的限制,容易导致信号出现畸变。同时,为了保证后续 ADC 的线性采样段,此时就需要将信号调整至零基准的附近。DAC 调偏置电路就是用于当偏移产生



时,将信号调回至零基准附近。当测量管道内部由于某种原因变成空管状态时,电磁流量计无法正常工作,空管侦测电路通过发出空管检测(侦测)脉冲进行检测,以反映测量管道内部的情况。

励磁电流信号调理采集部分的工作流程:通过电阻采样获取励磁电流信号,采样后的电流信号经过仪用放大电路放大,再通过滤波电路滤除高频噪声,送入ADC采样电路,转换成数字信号后送给DSP处理。

5.2.3 电路研制

1. 前置差分放大电路

前置放大电路是测量电路中重要的组成部分之一。它需要解决流量信号测量中的高输入阻抗和高共模抑制比以及低噪声、高增益等问题^[8-9]。采用同相端输入的差分放大结构可以提供较高的输入阻抗,具有很强的抑制零点漂移及抑制噪声与干扰的能力。下面分析传感器输出信号的特点,并提出解决问题的方法与途径。

1) 阻抗匹配

传感器信号输出电极两端产生的流量信号电压,其信号源内阻是由被测电解质与电极共同形成的。内阻 R_s 可用式(5.2.1)表示。

$$R_s \approx \frac{1}{\sigma d} \quad (5.2.1)$$

式中, σ 为被测电解质的电导率,单位为S/m; d 为电极直径,单位为m。

在通常情况下,电磁流量计测量电解质的电导率在 2.5×10^{-3} S/m左右,按照电极直径为0.01m计算,其信号内阻可达40k Ω 。在测量电路中,由于信号源内阻的存在,导致拾取的信号出现衰减。按照全电路欧姆定律计算可知,如要满足 $\pm 0.1\%$ 的测量准确度,变送器的输入阻抗应在40M Ω 以上。为了测量低至 10^{-5} S/m电导率的流体,变送器甚至需要 10^{12} Ω 以上的输入阻抗。因此,在选取前置放大电路中的运算放大器芯片时,应尽量选取具有高输入阻抗特性的JFET型运放,其共模与差模输入阻抗一般为 $10^{12} \sim 10^{13}$ Ω 左右。

当信号源输出阻抗很高时,就必须考虑运放的输入偏置电流。如果选择有很大输入偏置电流的运放,会对信号源形成负载效应,反映在信号源输出上,会看到一个比预想要低的信号源输出电压。例如,如果选择的运放的偏置电流为1nA,信号源输出阻抗为40k Ω ,则信号衰减在输出阻抗上的电压为40 μ V。这对于原本就微弱的传感器输出信号会产生较大的影响。因此,应尽量选择具有低输入偏置电流的运放^[10]。



2) 信号基准点

任何电压信号的测量都要有一个零电平基准点,测量点与零电平基准点之间的电位差就是测量的电压。电磁流量计电极以流体作为信号基准点,通过两电极与流体电解质相等的信号阻抗,把流量信号分成大小相等、极性相反的差分流量信号。传感器差分信号输出如图 5.2.2 所示, $r/2$ 为信号源的内阻, $\pm e/2$ 为两个信号源输出, r 为接地点的电阻。差分信号有利于去除共模噪声信号^[11]。

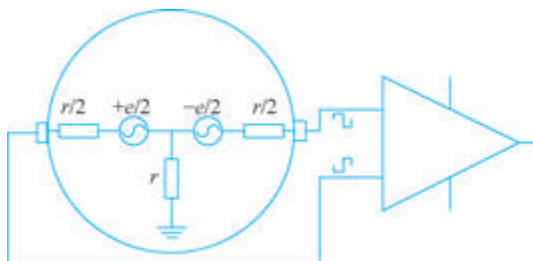


图 5.2.2 传感器差分信号输出示意图

3) 串模干扰噪声抑制

串模干扰是指有用信号与干扰电压信号串联叠加后作用在变送器的模拟输入端。其主要来源是电磁干扰和静电干扰。串模干扰等效示意图如图 5.2.3 所示,传感器附近有大功率磁场设备存在时,由于设备的漏磁,在设备周围产生较强的交变磁场,当该磁场穿过由 A、B、C 和 D 信号线组成的封闭回路时,会在回路中感应出电动势,形成串模干扰。

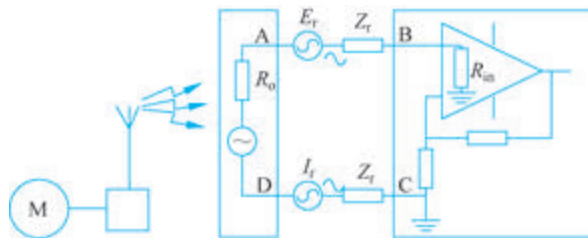


图 5.2.3 串模干扰等效示意图

对于交变磁场造成的串模干扰,主要采用以下措施进行克服。

(1) 将导线远离强电设备以及电网,调整信号线的走线方向,减小导线的环路面积,这能够将干扰电压降为原来的 1/10~1/100。

(2) 将两根信号线做成双绞线的形式,双绞线的绞距越小、线距越近,则抑制串模干扰的能力越强;同时,可以使两根信号线到干扰源的距离大致相等,使信号回路所包围的面积大为减小,从而使电场通过信号线耦合进回路的串模干扰大为减少。



(3) 在前置运算放大器的前端设置 2~3 级 RC 低通滤波器,可以抑制进入放大器的高频噪声,或采用内阻较低的双 T 型滤波器,其效果更好。

对于静电干扰,可以通过静电屏蔽与良好的接地克服。可将信号线用金属网包裹,或直接采用屏蔽线,屏蔽层单端接地。由于非磁性屏蔽层对 50Hz 工频磁场的抗干扰效果不明显,此时就需要将信号线放入管壁较厚的铁管中,使得信号线得到磁屏蔽。采取静电屏蔽后,可以使噪声感应电动势减小到原来的 $1/100 \sim 1/1000$ 。

传感器虽然采用双端信号输出,但是,两个单端信号输出的回路中同样存在串模干扰。而且干扰主要为工频干扰,由于差分电路器件参数不对称等原因,差分后的信号中仍会含有该噪声,且与反映流速的有用信号叠加后,一同被传输到后续调理电路中。可以通过选取工频干扰噪声频率整数倍的采样频率消除这一干扰。

4) 共模干扰噪声抑制

共模干扰是指相对于公共电位基准点,在运算放大器的两个输入端子上同时出现的干扰。虽然它不会直接影响测量结果,但是,当运算放大器的输入参数不对称时,它会转换成串模干扰影响测量结果。为了消除这一干扰的影响,除选择具有高共模抑制比的运放外,还应该注意运放反馈电阻的选取,以及良好的接地与静电屏蔽处理等^[12]。

前置差分放大电路如图 5.2.4 所示。采用 TI(德州仪器)公司的运算放大器 OPA4140 搭建。该款运放为 4 封装 JFET(场效应晶体管)型,输入偏置电流最大仅有 10pA,供电范围宽,具有轨至轨输出能力,边沿上升速度为 $20\text{V}/\mu\text{s}$,带宽增益积为 11MHz。在噪声方面,等效输入噪声电压为 $5.1\text{nV}/\text{Hz}$,0.1~10Hz 的 $1/f$ 噪声为 250nV_{pp} ,如图 5.2.5 所示。由于电磁流量计传感器的输出信号频率较低,一般在 6.25~75Hz 左右,而且幅值微弱,因此该款运放能够将自身干扰降至最低,保证较高的测量准确度。

另外,为了保证高准确度,还应该考虑运放周边器件的配置,尽量减少噪声的引入。首先,在运放的电源入口处放置退耦与旁路电容,由于电容本身不是理想器件,含有寄生电感,当噪声频率在谐振频率以下时,电容表现为容性。但是,当噪声频率远大于谐振频率时,电容则表现为感性,导致运放电源输入端波动严重。为了避免这一现象,采用能够覆盖不同频段高频噪声的不同容值的陶瓷电容并联,在 PCB(印制线路板)上放置电容时应尽量靠近电源入口处。其次,在运放输入端放置 RC 低通滤波器,以防止高频噪声影响运放的频率响应性能。最后,运放的反馈电阻应采用精密低温漂电阻,图 5.2.4 中的 J7~J10 的精度为 0.1%,温漂系数为

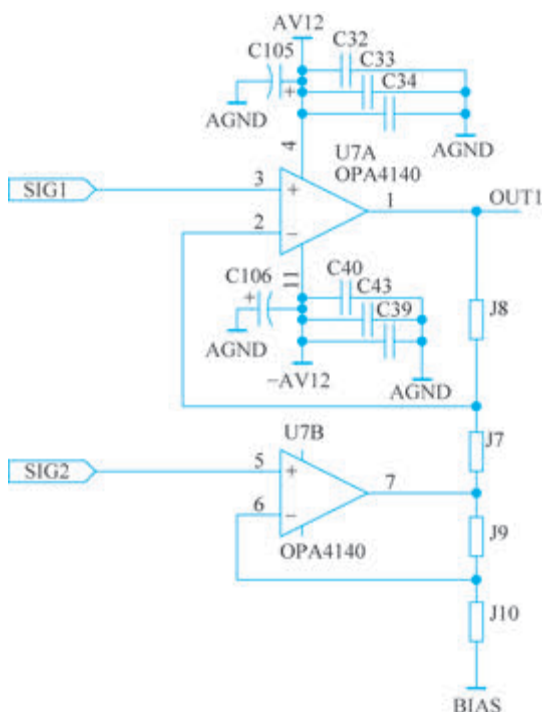


图 5.2.4 前置差分放大电路

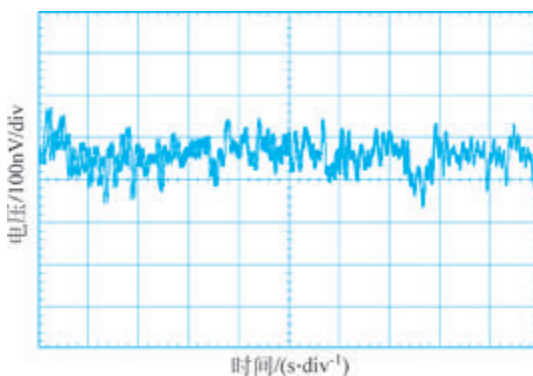


图 5.2.5 0.1~10Hz 噪声

10ppm,而且阻值不应过大,这样可以减小电阻对噪声的拾取以及约翰逊热噪声的影响。

在拾取传感器输出信号时,应采用带有屏蔽层的传输导线,屏蔽层单端接地;输入 PCB 之前的连接导线应采用双绞线形式,且无环状缠绕;PCB 上信号线的周围应以地线包围,两根差分信号线之间的距离应保证在 20 倍线宽以上。在实验



中,为了防止周边大功率设备的电磁干扰,应将信号传输线放置在钢制套管中,表壳应密闭关合。

2. 空管侦测电路

电磁流量计用于测量满管的导电液体流量。当液体充满测量管道且液体流速为零时,流量计显示零流量。但是,当测量管道内没有液体时,即测量管道内液体为空时,测量电极对暴露在空气中,由于变送器中调理电路的差分输入级阻抗非常高,因此,极易拾取周围的噪声信号,流量计的显示值可能非常大或者出现大的跳变。为了检测空管状态,及时做出报警,采用在差分电路结构前端耦合高频矩形波侦测信号的方法。当满管时,后级 ADC 采样电路采样得到的为一系列尖峰脉冲;当空管时,采样得到的是与原侦测信号同波形的矩形波信号。为了不干扰电磁流量计的测量,采用每隔固定励磁周期,发送空管侦测信号一次的方法。

空管侦测电路框图如图 5.2.6 所示。侦测信号 EMPTY1、EMPTY2 叠加在前置差分放大电路的同相输入端。为了与输出信号频率段区分,同样还要考虑滤波器的截止频率,选择空管侦测信号的频率为 500Hz 矩形波。由于输入结构对称,选择其中一路分析:电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ,电容 C_1 以及传感器内阻 R_0 构成空管侦测电路,其中, $R_1=R_4$, $R_2=R_3$, $C_1=C_2$ 。由于运放带宽增益积有限,为了提高运放性能, R_4 与 C_2 构成前置差分电路的第一级 RC 滤波,截止频率设为 10kHz 左右。

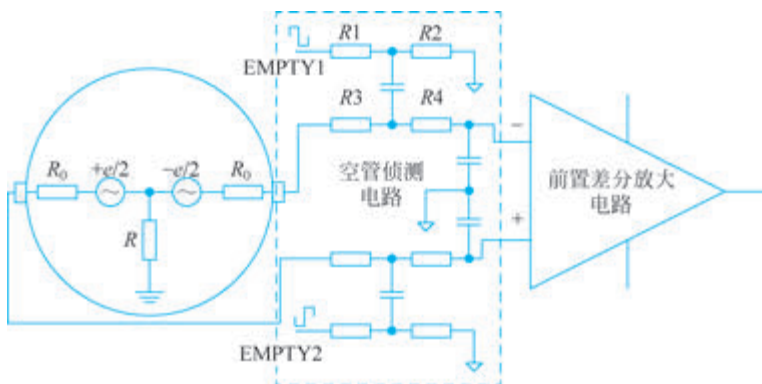


图 5.2.6 空管侦测电路框图

为了进一步说明工作原理,将其中一路空管侦测电路进一步简化为图 5.2.7 所示(原图标号不变), R_L 为运放的同相端输入阻抗,其数值可达 $10^{13} \Omega$ 。当开关 S 接通时,表示测量管道内充满液体,此时 R_3 与 R_0 串联后接入电路(R_0 一般为 80k Ω 左右, R_3 的电阻值可忽略不计),与 R_4 和 C_2 构成的低通 RC 滤波电路(设定其截止频率为 10kHz)并联, R_3 、 R_0 、 C_1 形成一个高通滤波电路(设定其截止频

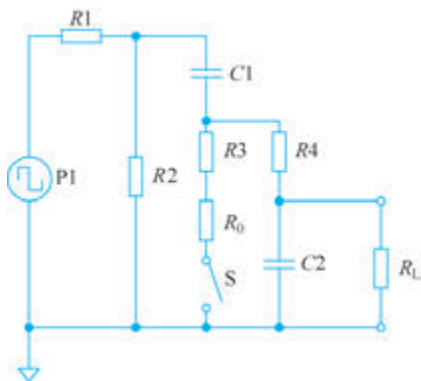


图 5.2.7 空管侦测电路简化图

率为 1kHz)。P1 经过 R1、R2 分压后，侦测信号中的高频分量通过 C1 耦合，叠加在 R3 的输入端，再经过低通滤波，滤除影响运放工作特性的高频信号，最终输入运放的为频率落在 1~10kHz 通频带的尖峰信号。当开关 S 断开时，表示测量管道为空管，此时 R₀ 与 R3 不接入电路。R1 与 R2 分压得到的信号先后经过 C1、R4、R_L 组成的高通滤波电路，R4、C2 组成的低通滤波电路，进入运放同相输入端，由于输入电阻 R_L 非常大，所以，高通滤波电路的截止频率非常小，信号波形近似矩形波输入。最后被采样，经过算法处理，通过判断输入侦测信号的波形，可以判断是空管还是满管。

3. 励磁电流放大电路

经过采样电阻得到的励磁电流信号，被送入图 5.2.1 所示的励磁电流信号调理采集电路。由于采样电阻阻值小，因此，作为信号源，其输出电阻不大、幅值较高，对运放的技术参数要求不高。为了减小温度带来的影响，可采用精密仪用运放放大信号，然后经过多重反馈低通滤波电路滤除噪声，最后送入 ADC 采样电路。具体电路如图 5.2.8 所示。仪用运放 INA121 是一款 FET 型输入运放，偏置电流非常低，共模抑制比达 106dB，供电范围宽，非线性误差最大为 0.001%，放大倍数 G 通过精密电阻 R11 改变， $G = 1 + (50k\Omega/R11)$ 。励磁电流信号 CUR 进入 INA121 的正输入端，从励磁板上选取地 (GND) 作为参考电平进入负输入端。2.5V 基准经过精密电阻 J17 与 J18 分压后提供基准抬升电平。

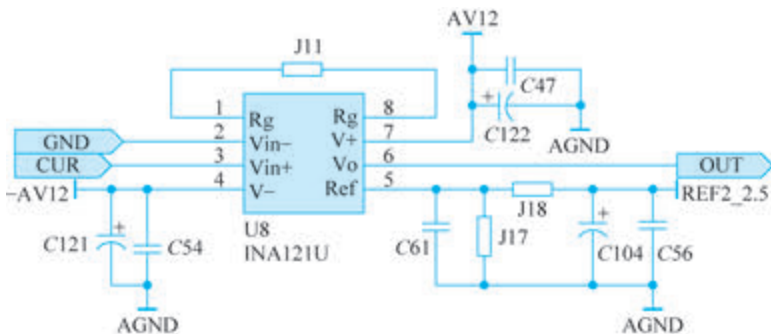


图 5.2.8 励磁电流放大电路

4. 多重反馈低通滤波电路

经前置差分放大电路放大后的传感器输出信号中，除含有有用的低频信号外，



还含有无用的高频噪声信号,为了防止后级 ADC 采样时出现混叠,需要低通滤波器滤除高频噪声。在此选择巴特沃斯低通滤波器。选定滤波器后,再选择其电路实现结构。实际应用中,考虑到现场温度变化较大,会导致滤波器参数配置电阻与电容出现温度漂移,从而导致幅值变化,进而影响测量精度与重复性。多重反馈结构低通滤波器结构具有参数漂移灵敏度较小的特性,并且实现的电路规模适中,如图 5.2.9 所示。采用它作为巴特沃斯滤波器的拓扑结构,可以在一定程度上克服温度带来的影响。由于传感器输出信号最大频率小于 150Hz,考虑到能够最大限度地保留原始信号波形,设置滤波器截止频率为输出信号最大频率的 10 倍,即 1.5kHz。

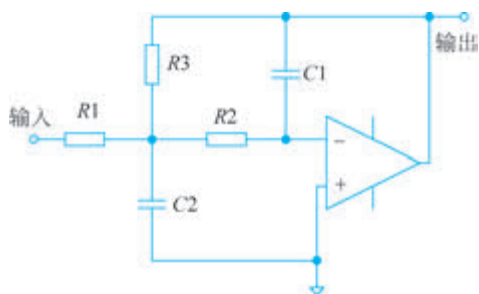


图 5.2.9 多重反馈结构低通滤波器结构

在理想情况下,低通滤波器能够让低于截止频率的信号通过,而让高于截止频率的信号被无限地衰减,因而在幅频特性曲线上截止频率附近,表现为斜率为负无穷的曲线,但是,理想的特性曲线很难达到,只能试图逼近。采用两级二阶滤波电路串联构成四阶多重反馈低通滤波电路,在把不需要的信号进行衰减的同时,将前级输出的信号放大,但是,应保证低 Q 值。具体电路如图 5.2.10 所示,图中, $J1$ 与 $J3$ 、 $J2$ 与 $J6$ 用来配置放大倍数。

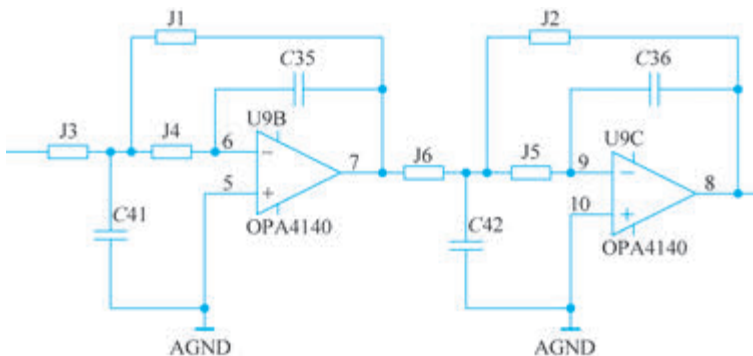


图 5.2.10 四阶多重反馈低通滤波电路



5. DAC 偏置调整电路

除串模干扰与共模干扰噪声外,传感器(电极)输出信号中,还含有直流噪声干扰^[13-15]。该噪声来源于测量电解质时的电化学反应。接触液体的部件(接地环、接地电极或者金属管道)和金属材料的电极均与电解质液体相接触,电解质液体中的离子作定向移动,在接触液体的部件、电极与导电电解质之间形成一定的电位差,称其为极化电压。如果电极对、接触液体部件的电位相等、方向相同,则电极对之间的电位差为零。当电极对表面状态有差异时,两电极之间就产生电位差。或者,当接触液体部件与电解质液体之间出现一个波动大的极化电压时,该电压会反映在电极对上,表现出一个电位差。

电极与接触液体的部件的材质不同,使得接触液体的部件与电解质液体之间形成的极化电压大小与极性也不相同。如图 5.2.11 所示,极化作用形成在传感器(电极)对流体上的电压为 e_1 、 e_2 ,形成在金属管道对流体上的电压为 e_3 。可以看到 e_3 是共模电压状态,与差动的流量信号叠加,共模干扰转变为串模干扰进入差分放大电路。

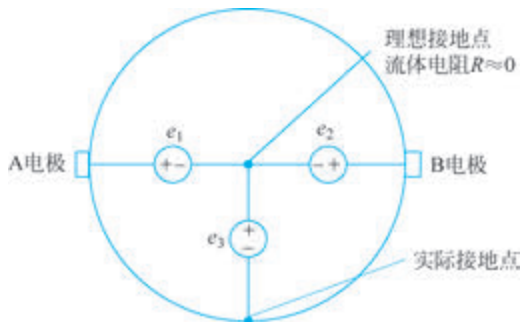


图 5.2.11 极化电压与接地点

由于叠加的共模电压是漂移变化的,所以,流量信号的输出摆动较大,甚至可能朝单方向漂移,直至到达运放非线性放大区,或是运放输出电源轨,造成输出信号失真或饱和。因此,为了减小极化噪声造成的干扰,在差分放大电路的信号等电位端引入偏置调整电路,电路框图如图 5.2.12 所示,并通过软件设置调整阈值。当信号漂移至该调节阈值时,DSP 控制 DAC 输出,将信号调节至零基准附近。

在实际应用时,调节操作可能会影响流量处理结果,为了减少调节次数,调理电路中的运放电源均采用 $\pm 12\text{V}$ 双电源供电,且使用轨至轨输入输出运放,这样可以选择较大的调整阈值,从而允许信号在较大范围内漂移,而不必频繁调节,并能够保证较宽的信号线性放大区。DAC 偏置调整电路如图 5.2.13 所示,TLC5615 是 DAC。由于偏置调整的输出对精度不作要求,只需在信号漂移出设定阈值时进行调整,因此,选择 10 位输出精度的 DAC。DAC 输出经过由 OPA4140 构成的减法滤波电路与 2.5V 基准相减,获得一个可以在 $\pm 2.5\text{V}$ 值附近变化的直流偏置调整信号(BIAS)。

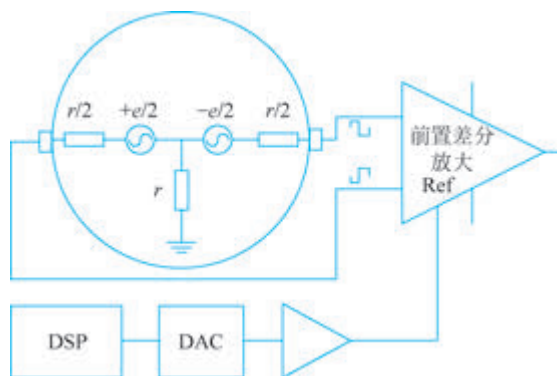


图 5.2.12 偏置调整电路框图

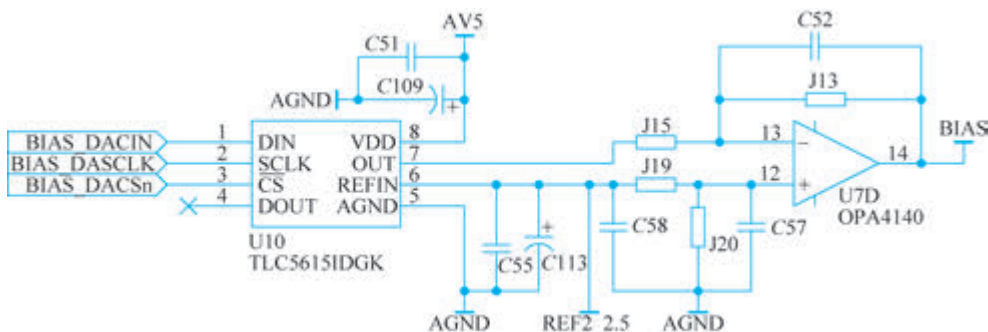


图 5.2.13 DAC 偏置调整电路

6. ADC 采样电路

经过滤波后的信号,已经滤除了大部分高频噪声,但是,此时仍不能直接用于 ADC 采样。由于调理电路采用 $\pm 12\text{V}$ 双电源供电,其电源轨大于 ADC 采样芯片的 $+5\text{V}$ 电源轨,因此,需将该信号缩小,以匹配 ADC 对采样输入信号的要求。另外,由于滤波后的输出信号含有负电平值,所以,需在该信号中加入直流偏置量,将信号平移至正电平值。通过运放搭建加法电路实现信号的缩小与平移。

经过匹配的输出信号被 ADC 采样。ADC 芯片作为模拟量与数字量之间转换的桥梁,如果其本身的特性参数不够理想,即使调理电路部分的精度再高,也会导致采样得到的数据出现失真。考虑到调理后的输出信号仍然较小(约为数百毫伏),为了减小采样带来的误差,选取高分辨率,且具有好的线性度与小的量化误差的 $\Sigma\text{-}\Delta$ 型 ADC 芯片。由于滤波器截止频率最大为 1.5kHz 左右,因此,应选择大于 3kHz 的转换速率。

ADC 采样电路如图 5.2.14 所示,励磁电流信号的采样电路与传感器输出信号的采样电路相似,只是分立器件参数有略微差别,这里仅对后者进行介绍。

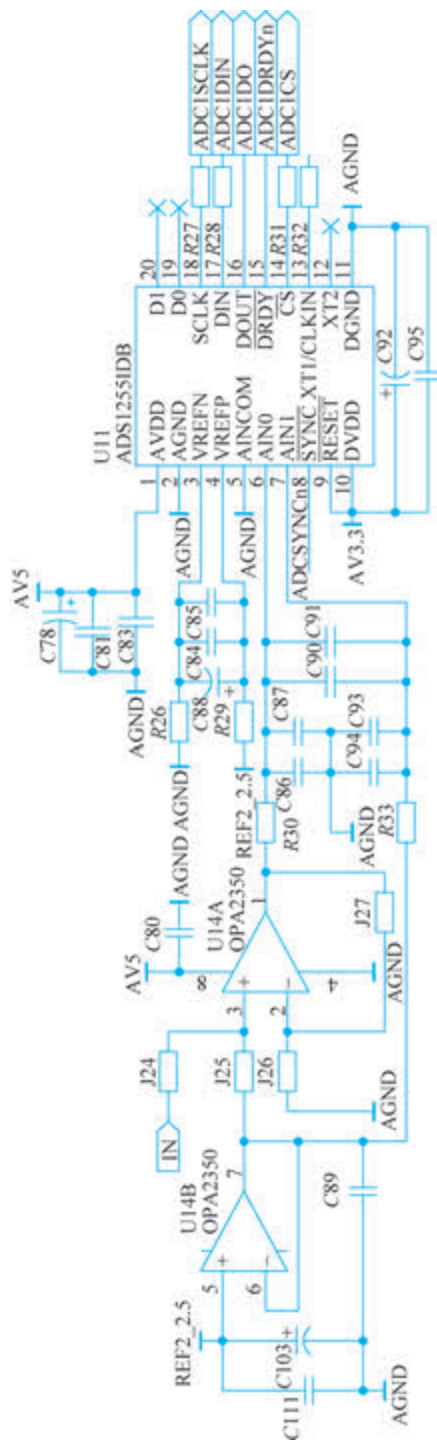


图 5.2.14 ADC 采样电路



采用 TI 公司生产的一款 24 位 Σ - Δ 型 ADC 芯片 ADS1255。其非线性误差仅为 $\pm 0.0010\%$ ，数据输出速率高达 30kSPS(采样次数每秒)，输入端包含可以提高输入阻抗的缓冲器，内部集成了低噪声可编程增益放大器和可编程数字滤波器。ADS1255 的内部功能框图如图 5.2.15 所示，具有两个输入 AIN0 与 AIN1 和一个公共端 AINCOM，支持一对差分输入或者两路单端信号输入，内部采用 4 阶 Σ - Δ 调制器，采用 SPI 通信协议。

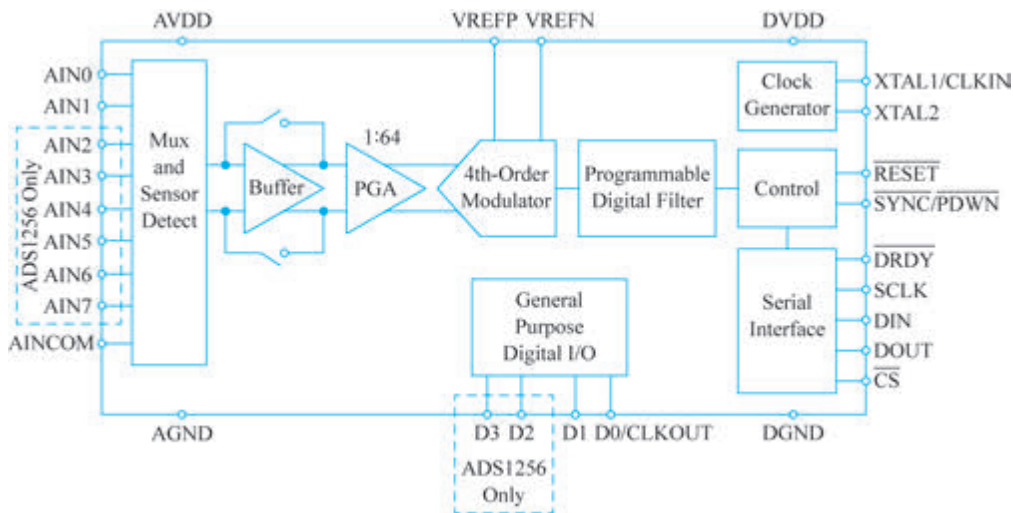


图 5.2.15 ADS1255 的内部功能框图

在图 5.2.14 中，经过前面调理滤波后的信号 Sig 进入 ADC 采样电路的前级驱动电路，经过 J24、J25 配置两者的放大系数后叠加，再经过 OPA2350 组成的同相放大电路放大，被送入 ADC 的 AIN0 采样输入端，AIN1 为 2.5V 基准输入，公共基准端 AINCOM 接参考地，ADC 被配置成伪差分采样模式。当 AIN0 输入为 2.5V 时，ADC 输出为 0；当 AIN0 输入为 0 时，ADC 输出为 -2.5V。

为了降低 ADC 芯片的输入噪声，提高其采样精度，由图 5.2.14 可以看到，在 ADC 的电源与基准部分放置了滤波电容，并且在两个信号输入端加入了共模与差模滤波电容。这些均保证了输入 ADC 的信号是纯净的。不仅如此，在 PCB 设计时，以 ADC 芯片为分界线，进行模拟地与数字地的划分，把为 ADC 提供工作时钟的晶振电路作为高频工作器件放置在数字地部分，将 ADC 芯片的模拟地引脚与数字地引脚在模拟地部分一点相接，然后通过磁珠将模拟地部分与数字地部分相接。



5.3 数字信号处理与控制模块

5.3.1 方案设计

数字信号处理与控制模块是电磁流量计变送器的处理与控制核心,它不仅需要对励磁模块进行控制,而且需要对信号调理采集模块采样得到的数字信号进行处理。处理所得的流量结果可以通过液晶显示或是通过通信输出电路传送到监控室。系统内部的参数与功能可以通过人机接口进行设置与调整。在模块掉电时,能够及时保存掉电前的重要数据与设置参数。

基于 TMS320F28335 (简称 F28335)DSP^[16]的数字信号处理与控制模块主要由 DSP 核心处理器部分、人机接口与通信输出部分以及模块监测部分组成,如图 5.3.1 所示。其中,DSP 核心处理器部分包括 DSP 处理器电路、外扩 SARAM (单周期存取随机存储器)电路、工作晶振电路以及 JTAG(直译为联合测试工作组,意译为片内扫描仿真接口)调试口电路组成;人机接口与通信输出部分包括 4~20mA 输出电路,脉冲输出电路,RS485 通信电路以及按键、液晶与指示灯电路;模块监测部分包括电源掉电监测电路、铁电存储电路。

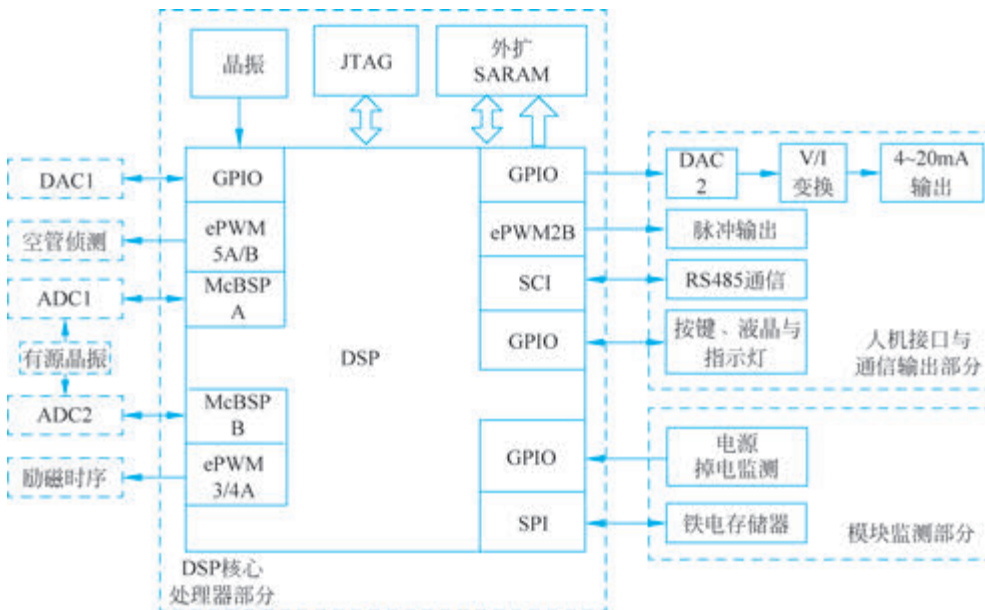


图 5.3.1 数字信号处理与控制模块框图



5.3.2 工作流程

如图 5.3.1 所示,DSP 通过内部 ePWM(增强型脉冲宽度调制)单元的 ePWM 3A 与 ePWM 4A 引脚发出励磁时序,送给高频励磁模块,用以控制励磁方式与励磁频率,对一次仪表中的线圈进行激励。传感器输出的模拟信号经过信号调理采集模块采样后,变成数字信号,通过 DSP 内的 McBSP A(多功能缓冲串口 A)与 McBSP B 单元传送至数字信号处理与控制模块。当信号调理采集模块中的信号需要调整偏置时,DSP 通过 GPIO 口将调整数字量送给 DAC,由 DAC 完成相应模拟量的输出操作。空管侦测信号通过 DSP 片上 ePWM 外设中的 ePWM 5A 与 ePWM 5B 引脚发出,该单元发出的信号为互补信号。DSP 内部对传送上来的数字信号进行运算处理,然后将输出结果通过液晶显示,该结果同时可以通过脉冲输出、4~20mA 输出或 RS485 通信,传送给上位机,实时监控流量。当该模块由于未知原因掉电时,电源掉电监测电路检测到电源轨下降,将掉电信号通过不可屏蔽中断引脚传送给 DSP,DSP 立即将该点的重要实时数据与参数保存至铁电存储器中。

5.3.3 电路研制

本节主要介绍数字信号处理与控制模块中的 DSP 核心处理器部分电路、人机接口与通信输出部分电路、模块监测部分电路。DSP 引脚资源分配见图 5.3.2。



图 5.3.2 DSP 引脚资源分配图

1. DSP 核心处理器部分电路

该部分电路由晶振电路、外扩 SARAM 电路、JTAG 接口电路和 DSP 芯片电路组成。晶振电路为 DSP 提供外部工作时钟;由于实时处理的数据量大,需要较



大的存储空间,外扩一片 SARAM 用来弥补 DSP 内部 RAM 存储的不足; JTAG 接口电路用来接仿真器调试 DSP; DSP 芯片电路为本模块的核心,用来处理数据与发送控制指令。

1) DSP 芯片

TI 公司的 C2000 系列 MCU 采用 32 位架构,满足各种实时控制应用需求,32 位内核具有单周期原子指令执行能力以及单周期 32×32 位硬件乘法器。为了确保内核、存储器以及外设接口的高效性,采用改进的哈佛架构、外设总线和 32 位数据。高级中断管理系统可确保快速的中断响应。C2000 片上有多达 16 个通道的 12 位分辨率的 ADC,其转换速率高达 12.5MSPS;独立运行的 PWM 模块支持高频率和死区控制;通信外设可使 MCU 通过 SPI、SCI、McBSP、CAN 或 I²C 接口实现与系统的其他组件相连。因此,C2000 系列 MCU 特别适合工业自动化领域的应用。

选用 TI 公司的 283xx 浮点系列中的 28335 作为数字信号处理与控制中心。TMS320F28335 的运算速度为 150MHz,单指令周期为 6.67ns。改进的哈佛总线结构使得指令操作和数据读取并行进行,CPU 可以进行单周期指令操作,即在读取指令和数据的同时通过总线同时写数据,且内部有 6 条独立的地址/数据总线,保证在一个周期内对任何内存地址完成读取、修改、写操作,使得效率及程序代码达到最佳。内建了八级流水线,一个周期就可以完成一次乘加运算,特别适合要求实时运算及对精度要求高的数字信号处理算法。内部还集成了一个单精度浮点核,配合浮点库,大大减少了采用定点核进行浮点运算的时间,提高了代码的执行效率。F28335 高速率与高效率的数据处理能力,使其能够胜任高性能电磁流量计的实时性要求,并且能够用于算法更加复杂的浆液信号处理。

F28335 片上还集成了丰富的外设,对于扩展仪表功能,减少系统外部器件,降低 PCB 布板规模,降低成本和提高系统可靠性等起到了重要的作用。例如,6 个独立的 ePWM 模块,每个都有自己独立的时基,但不同的模块之间可以同步,根据时基的模式可以灵活地配置成多种中断模式并请求中断事件,并且对死区的控制也非常方便,在电磁流量计变送器中适用于产生两路互补对称的励磁驱动控制信号和空管侦测信号;多种串行通信接口如 McBSP、SCI(串行通信接口)、SPI(串行外设接口)、I²C(集成电路总线)等,可灵活实现多种不同数据传输格式的要求。此外,还有独立的 eCAP(增强型捕获单元)、eQEP(增强型正交编码器)、16 位通用定时器、32 位 CPU(中央处理器)定时器、看门狗等。内部集成有 256KB 的闪存、34KB 的 SRAM(静态随机存取存储器)。

2) DSP 外设引脚资源分配

由于 F28335 内部硬件外设资源有限,为了满足设计要求,需要对 DSP 的引脚



资源进行分配,具体分配如图 5.3.2 所示。

(1) DSP 的多通道缓冲串行接口 McBSP 允许 DSP 与其他具有该通信接口的数字器件进行通信,通过该接口可以同步传输或者接收 8 位、16 位、32 位的串行数据。使用 McBSP A 和 McBSP B 与信号调理采集模块中的两个 ADC 电路进行通信,保证了传感器输出信号与励磁电流信号同步采样。

(2) 每个 ePWM 模块都有自己独立的时基,不同的模块之间可以同步,根据时基的模式可以灵活地配置成多种中断模式并请求中断事件,并且对死区的控制也非常方便。用 ePWM 3A/4A 产生励磁控制信号,ePWM 5A/B 产生互补的空管检测信号。ePWM 2B 用来产生脉冲输出。

(3) DSP 的串行外围接口(SPI)用于 MCU 与各种外围器件进行全双工、同步串行通信。SPI 只需 4 根线就可以完成 MCU 与各种外围器件的通信。这 4 根线分别为串行时钟线(CSK)、主机输入/从机输出数据线(MISO)、主机输出/从机输入数据线(MOSI)、从机选择线(CS)。当 SPI 工作时,在移位寄存器中的数据逐位从输出引脚(MOSI)输出(高位在前),同时从输入引脚(MISO)接收的数据逐位移到移位寄存器(高位在前),SPI 可以同时发出和接收串行数据。为了保证掉电时重要数据能够可靠地保存在铁电存储器中,将 SPI 资源给铁电存储器单独使用。

(4) DSP 的通用输入输出 GPIO 最大的输入输出频率为 25MHz,可以采用 GPIO 口模拟 SPI 通信接口与其他功能器件进行数据交换,用于检测键盘的输入、控制液晶的显示、4~20mA 的输出幅值以及对信号调理与采集模块中的 DAC 进行操作。

2. 人机接口与通信输出部分电路

该部分包括 4~20mA 输出电路,脉冲输出电路,RS485 通信电路和按键、液晶与指示灯电路。4~20mA 输出、脉冲输出与 RS485 通信电路主要用于电磁流量计变送器与外界设备通信交换数据,按键、液晶指示灯电路主要方便操作人员与变送器进行交互。

1) 4~20mA 输出电路

4~20mA 电流传输信号不容易受到外界干扰,由于电流源的内阻无穷大,因此,可以忽略传输线的电阻,普通双绞线可以长达数百米。电流环的上限为 20mA,主要是基于防爆的要求,因为 20mA 电流通断引起的火花能量不足以引燃瓦斯;下限没有取为 0,主要是为了能够检测断线。正常工作时环路电流不会低于 4mA;当传输线因故障短路时,环路电流降为 0。常取 2mA 作为断线报警值。

4~20mA 输出电路由片外的 DAC 和 V/I(电压/电流)转换电路组成,如图 5.3.3 所示,通过将测量的瞬时流量转换成数字量,然后写入 DAC7513 输出电压

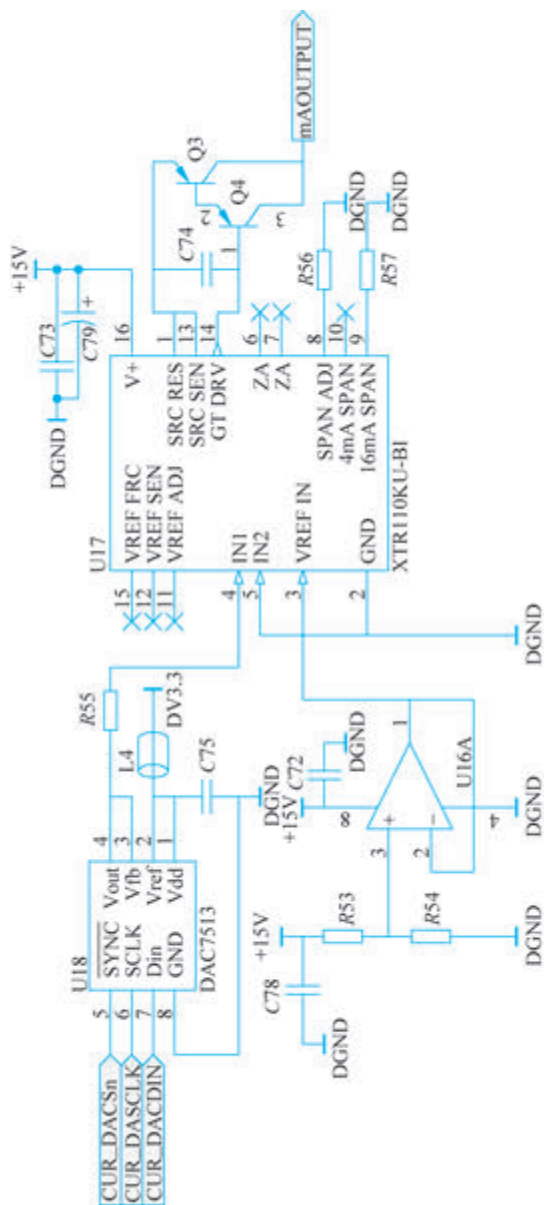


图 5.3.3 4~20mA 输出电路



信号,最后通过 V/I 转换芯片 XTR110 变换为 4~20mA 电流输出。XTR110 芯片是 BB 公司(现属 TI 公司)生产的一款高精度电压-电流变换芯片,其控制信号电压输入与电流信号输出范围较宽,并且支持多种电流输出范围,供电电压从 13.5V 到 40V 均可。

2) 脉冲输出电路

脉冲输出电路通过脉冲进行输出通信,将电磁流量计变送器实时流速或者流量结果以一定频率的矩形波输出,其高电平为 24V,低电平为 0V,矩形波频率高低与流量大小有关。通过在监控界面输入预先设定的脉冲当量(即一个脉冲代表的流量),即可显示实时流量。

脉冲输出电路如图 5.3.4 所示,DSP 输出的脉冲时序通过高速光耦 6N136 进行隔离输出,进而控制 MOSFET(金属-氧化物半导体场效应晶体管)Q1 的通断,P+为外部供电电压,现场大多采用 24V 供电,因此,最终产生 24V 的脉冲输出。本电路无失真输出的频率最高可达 10kHz。

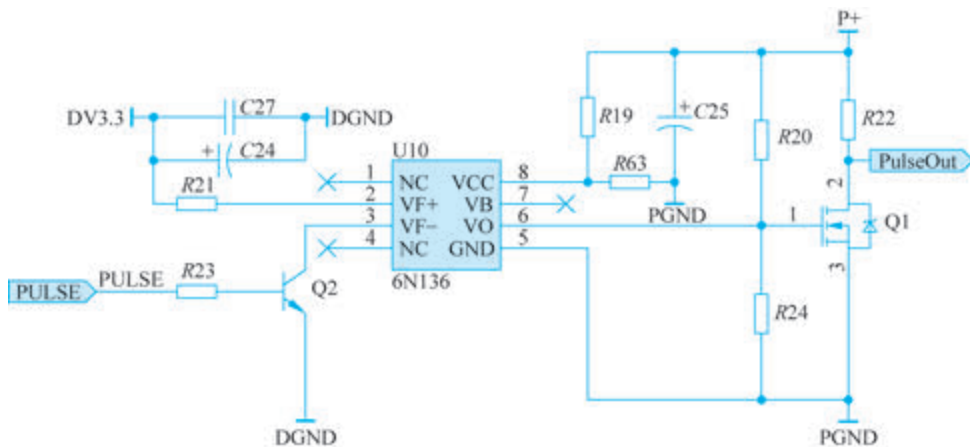


图 5.3.4 脉冲输出电路

3) RS485 通信电路

RS485 是典型的串行通信方式,采用平衡驱动器和差分接收器的组合,使得 RS485 抗共模干扰的能力增强,逻辑“1”以两线间的电压差为 +2~+6V 表示,逻辑“0”以两线间的电压差为 -2V~-6V 表示。接口信号电平比 RS232 低,因此不易损坏接口电路的芯片,而且该电平能够与 TTL(晶体管-晶体管逻辑)电平兼容。RS485 通信的最高传输速率为 10Mbps,传输距离最大可达 3000m。RS485 通信电路如图 5.3.5 所示,SP485 为半双工通信方式芯片,RO 为其数据输出引脚,/RE 为数据接收使能,DE 为数据发送使能,DI 为数据输入引脚。出于工业应用可靠性考虑,采用隔离芯片 ADUM1301 将 DSP 的输入输出信号与负责外界通信的 RS485 芯片进行隔离;同样,供电电源也采用隔离式电源。设计中,将 /RE 引脚与



DE 引脚短接,通过 DSP 的一个 GPIO 引脚控制接收数据或发送数据。

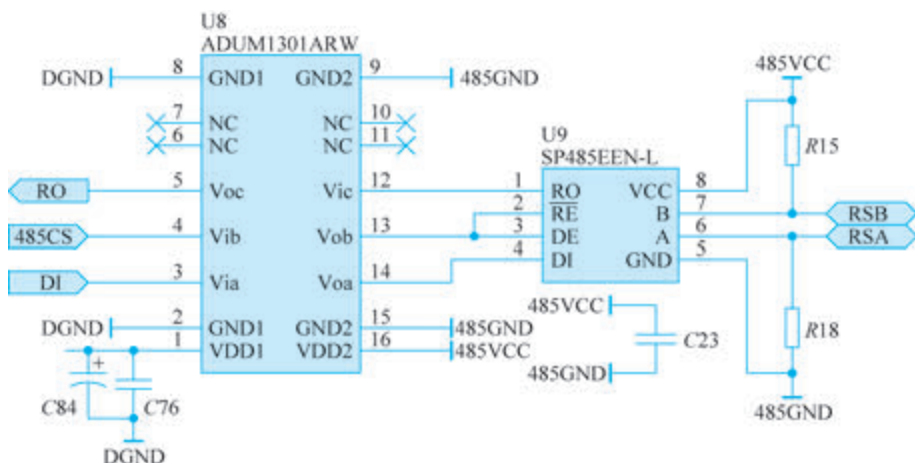


图 5.3.5 RS485 通信电路

4) 按键、液晶与指示灯电路

电磁流量计变送器实时计算的结果可以通过液晶显示,在需要对变送器功能以及参数进行设置时,则通过按键进行操作。

按键、液晶与指示灯电路如图 5.3.6 所示,采用 4 个按键作为人机操作接口,

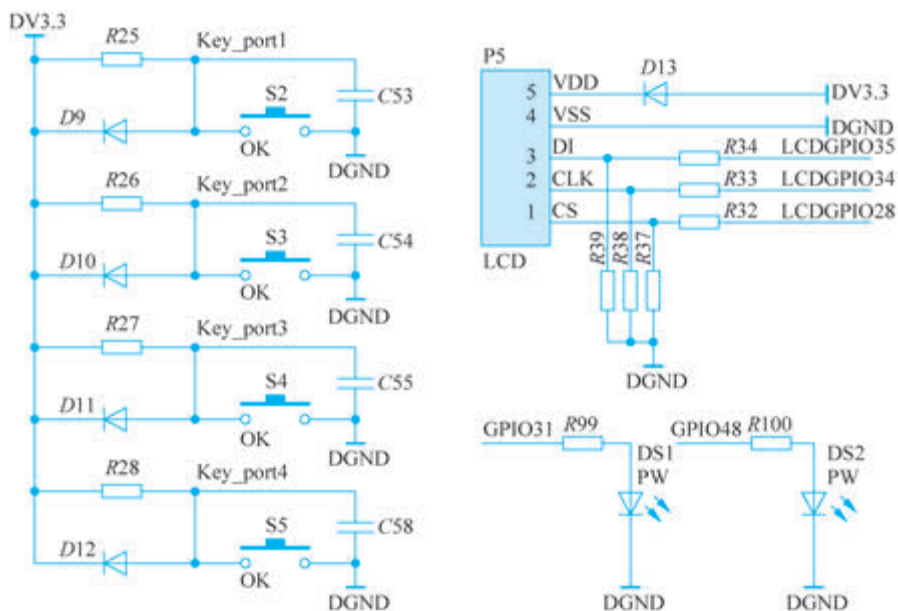


图 5.3.6 按键、液晶与指示灯电路



通过按键操作可以对变送器的仪表系数、通信模式、空管报警等功能进行设置。由于显示数据内容较为简单、数据显示刷新频率低,因此,采用串行通信接口的液晶,可以简化接口、缩小布板面积,功耗也相对较小。在设计中放置了 2 个指示灯,用以指示励磁工作状态与通信输出状态,便于外界观察。

3. 模块监测部分电路

该部分包括电源掉电监测电路与铁电存储电路。电源掉电监测用于检测模块电源输入,当掉电发生时输出一个低电平给 DSP。铁电存储用于保存电磁流量计变送器的重要参数与变送器掉电前的重要数据。

1) 电源掉电监测电路

电源掉电监测电路如图 5.3.7 所示。MAX706 为一款监控芯片,具有电源监测、看门狗复位、手动复位、上电与断电复位四个功能。 $\overline{\text{MR}}$ 为手动复位引脚,当该引脚为低时,RESET 复位引脚输出一个低电平,作为 DSP 的复位触发。PFI 为电源掉电监测引脚,内部有一个 1.25V 的电压基准源用以与 PFI 输入电压进行比较,当该引脚上的电压小于 1.25V 时, $\overline{\text{PFO}}$ 输出变为低,表示被监测电源掉电。将该模块的总输入电源 +15V 作为监测对象,触发电压可以通过电阻 R41 与 R42 来设置。WDI 为片上看门狗的喂狗引脚,喂狗时间间隔为 1.6s,翻转 WDI 引脚输入电平即可完成喂狗操作,当大于 1.6s 未对 WDI 操作时,表示 DSP 内部程序跑飞, $\overline{\text{WDO}}$ 引脚产生一个 200ms 宽度的复位脉冲对 DSP 进行复位操作。

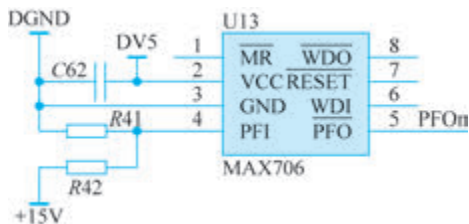


图 5.3.7 电源掉电监测电路

2) 铁电存储电路

铁电存储芯片是一种特殊工艺的非易失性的存储器,具有 RAM(随机存取存储器)和 ROM(只读存储器)的优点,读写速度快,并可以像非易失性存储器一样使用,其访问次数最大可达 100 亿次,断电后数据可保存长达 10 年,因此,其可靠性非常高。

铁电存储电路如图 5.3.8 所示。该芯片为 SPI 通信接口, $\overline{\text{CS}}$ 为片选引脚、SCK 为时钟引脚、SI 为外部向芯片写入数据引脚、SO 为外部读取芯片存储数据引脚、 $\overline{\text{HOLD}}$ 为状态暂停保持引脚、 $\overline{\text{WP}}$ 为写保护引脚,芯片内部存储空间为 8KB。在写数据时,先发送写使能控制指令,再发送写指令,然后依次将待写数据的地址和



数据按高低字节逐个串行写入存储器单元。读数据时类似,先发送读指令,再发送要读取单元的地址,然后,要读取的数据就在串行移位时钟作用下按高低字节移出。

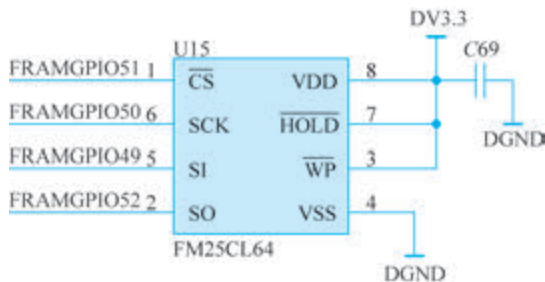


图 5.3.8 铁电存储电路

在变送器发生掉电时,该电路与电源掉电监测电路一同工作,将 DSP 片内设定的关键参数保存至铁电内部,重新上电后再读取掉电前参数。

参考文献

- [1] 张振,徐科军,杨双龙,等.具有快速响应的电磁流量计高低压励磁系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(6):562-571.
- [2] 张振.基于 DSP 的高频励磁电磁流量变送器硬件的研制[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- [3] 徐科军,杨双龙,王刚,等.一种基于 DSP 的电磁流量计信号处理系统:ZL201010215831.2 [P].2012-07-11.
- [4] 徐科军,杨双龙,王刚,等.一种基于线性电源的单/双频电磁流量计励磁控制系统:ZL200910144878.1 [P].2011-02-02.
- [5] 徐科军,杨双龙,王刚,等.基于双电源切换的电磁流量计励磁控制系统:ZL200910251461.5 [P].2011-04-20.
- [6] 徐科军,张振,杨双龙,等.具有旁路和能量回馈电路的电磁流量计高低压切换励磁系统:ZL201110350132.3 [P].2013-09-04.
- [7] 徐科军,许伟,杨双龙,等.一种功耗较低的高低电压切换励磁控制系统:ZL201410515971.X [P].2017-07-18.
- [8] 顾志祥.浆液型电磁流量计:CN200710171406.6 [P].2007-11-30.
- [9] 卢国峰,王保良,杨丽明,等.电容式电磁流量计信号处理新方法研究[J].传感技术学报,2008,21(9):1551-1555.
- [10] 刘可昌,李霞,李斌.永磁式电磁流量传感器及其信号处理[J].微纳电子技术,2007(7/8):213-216,221.
- [11] Gorgenyi A, Sujbert L, Bogar I, et al. DSP-based electromagnetic flowmeter with sinusoidal excitation [C]. 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Ottawa, 2005, 1023-1026.
- [12] Kuromori K, Gotoh S, Matunaga Y. An electromagnetic flowmeter with dual frequency



- excitation [J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1994, 30(9): 1020-1026.
- [13] 高小鹏,杜鸿雁,郑贵堂. 电磁流量计的干扰产生及其抑制和消除[J]. 计量技术, 2007(3): 72-74.
- [14] 李飞,王保良,黄志尧. 对电磁流量计中干扰问题的讨论[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S2): 727-729.
- [15] 张涛,李斌. 电磁流量计中的抗工频干扰问题[J]. 测控技术, 2003, 22(2): 65-67.
- [16] 侯其立,石岩,徐科军. DSP 原理及应用: 跟我动手学 TMS320F2833x [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.