

阳极导杆电流智能感知

系统设计开发

铝电解工艺在现代工业中扮演着重要的角色,广泛应用于铝的生产和加工过程中。然而,当前的铝电解工艺仍然面临一些挑战,其中之一就是阳极导杆电流的监测和控制。

阳极导杆电流是指通过阳极导杆的电流,它直接影响到铝的产量和质量。在铝电解过程中,阳极导杆电流的稳定性和准确性对于保证铝的生产效率和产品质量至关重要。然而,目前的阳极导杆电流监测方法存在一些问题,如数据采集不准确、实时性差、无法提供有效的数据分析和反馈等。

国内对阳极电流分布的掌握大多采用人工离线的方法,使用万用表连接自制的等距压降测量仪(俗称电压叉)上,人工读取电压数据。这种方法存在误差大、实时性差、工人劳动强度大等缺点。郑州经纬实业有限公司等企业开发的阳极电流在线检测装备,虽实现了数据的实时采集,但成本高、体积大,难以推广。杨勇、铁军等人基于等距压降测量原理,运用无线通信技术开发了阳极导杆电流的无线检测系统,完成了数据的接收、转换、保存、查询等功。李安金等人开发了霍尔元件测量方法,采用安装霍尔电流传感器的方法实时监测电流分布情况,并建立了磁场分布模型,提出在霍尔元件外部施加定向电磁屏蔽来消除干扰磁场的影 响的方法。但是在强磁场情况下测量精度较低,并且霍尔电流传感器价格较贵,同样无法实现大面积推广。贵阳铝镁设计研究院有限公司同样基于等距压降原理研发了几代阳极电流分布在线检测装置,第一代采用高温屏蔽导线沿槽上部结构铺设,数据采集仪及其支撑机构安装在每根阳极导杆上,虽然很好地实现了阳极电流分布的实时在线检测,但这种方式安装工作量大,导线多,而且对导线的要求较高,成本优势不明显。第二代采用无线传输技术,并解决了采用温差电源供电的工程化问题,不需要线缆和额外的电源就能实现对采集模块、无线传输模块等的稳定持续供电,成本低,但在换极时仍然需要人工拆卸和重复安装,不太适宜大规模推广。

因此,设计一种高效、准确、可靠的阳极导杆电流智能感知系统变得迫切而必要。这样的系统可以通过智能感知技术实时监测和分析阳极导杆电流的变化,从而提供准确的数据支持和反馈,帮助工作人员及时发现和解决问题,优化铝电解过程的稳定性和效率。

通过引入智能感知技术,阳极导杆电流智能感知系统能够实时采集和处理大量的数据,包括电流大小、波动情况以及与其他工艺参数的关联等。这些数据可以用于建立模型和算法,实现对阳极导杆电流的准确预测和控制。同时,系统还可以提供实时的监测和报警功能,及时发现异常情况并采取相应的措施。

设计一种高效、准确、可靠的阳极导杆电流智能感知系统对于优化铝电解工艺具有重要

意义。它可以提高铝的生产效率、降低能源消耗,并且可以减少因电流变化不稳定导致的产量波动和产品质量问题。此外,该系统还可以为工作人员提供更可靠的数据支持和决策依据,帮助他们更好地管理和控制铝电解过程。

5.1 阳极导杆电流感知系统需求分析

5.1.1 阳极导杆电流感知系统功能分析

阳极导杆电流感知系统是在铝电解工艺中广泛使用的一种关键技术。它通过实时监测和记录阳极导杆的电流变化,提供了对工艺参数的即时了解,并为操作人员提供了优化和调整工艺的依据。在铝电解工艺中,阳极导杆扮演着至关重要的角色。它们是将电流引入电解槽中的关键组件,用于控制铝的电解过程。阳极导杆的电流状态直接影响着电解过程的稳定性、效率和产品质量。因此,准确地监测和控制阳极导杆的电流变化对于保持良好的工艺控制至关重要。

阳极导杆电流感知系统的功能是通过传感器和监测设备,实时监测和记录阳极导杆的电流变化。这些设备能够准确地采集和记录电流数据,并将其传输到系统中进行分析和处理。通过对电流数据的处理和分析,系统能够提取出有用的信息和指标,帮助操作人员了解电流的趋势、周期性和异常情况。

除了实时监测功能,阳极导杆电流感知系统还可以提供数据处理和分析、预测和预警、可视化界面、报表和数据导出,以及远程监控和控制等功能。这些功能的综合应用,使得操作人员能够更好地理解电流的变化规律,及时调整和优化工艺参数,确保生产过程的稳定性和质量。

因此,阳极导杆电流感知系统的功能应包括以下几部分。

(1) 多通道监测:系统可以支持多通道的电流监测,以同时监测多个阳极导杆的电流变化。这样可以更全面地了解整个工艺过程中的电流情况,并进行比较和分析。

(2) 跨平台监控:系统可以提供跨平台的监控功能,使操作人员可以通过多种设备(如手机、平板电脑、计算机)随时随地访问和监控电流数据。这样可以增加操作人员的灵活性和便利性。

(3) 实时报警:系统可以设置实时报警功能,当电流超过预设范围或出现异常情况时,系统能够及时发送警报通知操作人员。这样可以帮助操作人员及时采取措施,避免潜在的安全风险和生产问题。

(4) 数据推送和远程访问:除了提供可视化界面,系统还应支持数据推送和远程访问功能。这样,操作人员可以订阅特定的电流数据,通过电子邮件或短信等方式接收实时数据更新。同时,他们也可以通过远程访问系统,在没有可视化界面的情况下查询和监控电流数据。

(5) 数据存储和历史记录:系统可以提供数据存储和历史记录功能,将采集到的电流数据进行持久化存储,并为操作人员提供历史记录查询和分析的能力。这样可以帮助操作人员进行长期的数据分析、趋势分析和工艺优化。

(6) 数据处理和分析功能:系统应具备数据处理和分析的能力,能够对采集到的电流数据进行清洗、滤波和特征提取等处理过程。通过算法和模型的运算,系统能够分析电流数

据的趋势、周期性和异常情况,提取出有用的信息和指标。数据处理和分析功能可以帮助操作人员更好地理解电流的变化规律,为工艺调整和优化提供依据。

(7) 可视化界面功能:系统应具备直观易懂的可视化界面,以便操作人员能够直观地了解电流数据的变化和趋势。通过图表、曲线和指标的展示,系统能够清晰地呈现电流的实时状态和历史记录。可视化界面功能可以帮助操作人员快速判断电流的变化情况,及时采取相应的措施。

(8) 报表和数据导出功能:系统应能够生成报表和导出数据,以使用户进行进一步分析和决策。通过报表和数据导出功能,用户可以查看电流数据的统计信息、趋势分析和异常检测结果等。报表和数据导出功能可以帮助用户进行深入的数据分析和工艺优化,提升生产的效率和质量。

5.1.2 阳极导杆电流感知系统性能分析

阳极导杆电流感知系统是一种高度可靠和精确的技术,用于实时监测和记录阳极导杆的电流变化。它具有许多突出的性能特点,使其在铝电解工艺中得到广泛应用,并为工艺控制和优化提供了重要的支持。阳极导杆电流感知系统应该具备以下性能。

(1) 阳极导杆电流感知系统应具有高精度的数据采集和测量能力。通过先进的传感器和监测设备,系统能够准确地采集和记录阳极导杆的电流数据。这些数据具有极高的精度和稳定性,可以有效地反映电解过程中的电流变化,为工艺分析和优化提供可靠的依据。

(2) 阳极导杆电流感知系统具有实时性和快速响应能力。它能够快速地采集、处理和传输电流数据,以实现电解过程的实时监测和控制。这种实时性和快速响应能力使操作人员能够及时了解电流的变化情况,并迅速采取相应的措施,以维持工艺的稳定性 and 效率。

(3) 阳极导杆电流感知系统具有高度可靠的性能。它采用了先进的故障检测和容错机制,能够及时发现和处理传感器或监测设备的故障,并确保系统的正常运行。这种高度可靠的性能保证了系统在长时间运行和恶劣环境下的稳定性和可靠性。

(4) 阳极导杆电流感知系统具有灵活性和可扩展性。它可以根据不同的工艺需求和设备配置进行定制和扩展,以适应不同规模和复杂度的铝电解工艺。系统提供了灵活的参数设置和界面配置选项,使操作人员能够根据实际需求进行定制和调整。

5.1.3 阳极导杆电流感知系统可靠性分析

可靠性是任何工程系统的关键要素,对于阳极导杆电流感知系统来说尤其重要。在阳极导杆电流感知系统的设计过程中,应尽量确保系统在长期运行和恶劣环境下的稳定性和可靠性。因此,阳极导杆电流感知系统应具备以下机制。

(1) 故障检测和容错机制:阳极导杆电流感知系统应采用先进的故障检测和容错机制,以及多重保护措施,以确保系统能够及时发现和处理传感器或监测设备的故障。系统中的传感器和监测设备会定期进行自检和校准,以验证其工作状态和准确性。如果发现故障或异常情况,系统会立即发出警报,并采取相应的措施,如切换备用传感器或启动备用监测设备,以确保系统正常运行。

(2) 数据冗余和备份:为了防止数据丢失和系统故障,阳极导杆电流感知系统应采用数据冗余和备份的机制。系统会对采集的电流数据进行实时备份,并存储在多个独立的存

储设备中。这样,即使一个存储设备出现故障,系统仍然可以从其他备用存储设备中恢复数据,确保数据的完整性和可用性。

(3) 温度和环境适应性: 阳极导杆电流感知系统在设计上需要考虑不同温度和环境条件下的适应性。系统中的传感器和监测设备具有广泛的工作温度范围和环境适应性,能够在高温、低温、潮湿和腐蚀等恶劣环境条件下正常工作。此外,系统还应采用防尘、防水和防腐蚀的设计,以保护传感器和监测设备免受外部环境的影响。

(4) 定期维护和保养: 为了确保系统的长期稳定性和可靠性,阳极导杆电流感知系统需要定期进行维护和保养。系统操作人员需要按照制订的维护计划进行定期检查、清洁和校准工作。这些维护措施能够及时发现和修复潜在的问题,保持系统的正常运行和性能表现。

5.1.4 阳极导杆电流感知系统可持续发展分析

阳极导杆电流感知系统对于生产过程的稳定性和效率具有重要意义,还间接关系到能源消耗和环境保护。因此,为了确保系统长期有效运行并与未来发展保持一致,有必要对其可持续发展需求进行深入分析和探讨。因此,阳极导杆电流感知系统应具备以下可持续发展性。

(1) 环境可持续性: 阳极导杆电流感知系统在环境可持续性方面具有显著的影响。首先,该系统采用先进的传感器技术和监测设备,能够准确地测量和记录阳极导杆的电流变化,从而实现了对电解过程的实时监测和控制。这种实时监测和控制能力可以通过避免阳极效应等方式帮助减少能源消耗和碳排放,最大限度地减少对环境的负面影响。其次,系统的高精度测量和数据分析功能,可以帮助优化工艺参数和流程,从而提高能源利用效率和减少环境污染。这种环境可持续性的影响使得阳极导杆电流感知系统成为铝电解工艺实现绿色和可持续发展的重要工具。

(2) 经济可持续性: 阳极导杆电流感知系统在经济可持续性方面也发挥着重要作用。该系统的高精度测量和实时监测能力,可以帮助提高生产过程的效率和质量,减少生产成本。通过实时监测和控制电流变化,系统可以及时发现和纠正潜在的问题,提高生产线的稳定性和效率。

5.2 阳极导杆电流感知系统总体设计

针对铝电解工业特性,为了方便、快捷、可靠、有效地测量阳极导杆电流,采用如下的设计方案。以下分布式测量系统主要由阳极导杆电流感知系统和主控台两部分组成,阳极导杆电流测量系统框图如图 5-1 所示。

阳极电流测量仪安装在阳极导杆上,每个导杆上的阳极电流测量仪是相互独立的,每个测量仪均有一个唯一的地址,便于上位机对每个测量仪进行控制和采样数据的分类存储。可以通过上位机对测量仪进行地址修改和各种参数设置。

铝电解现场处于强磁场环境,信号干扰严重,为了保证通信的稳定性,保证数据准确传输,采用工业级 RS-485 总线进行信号传输。从阳极导杆电流感知系统引出的信号线汇集到槽控机旁边的集线器内,再通过集线器与上位机通信并进行显示与控制。

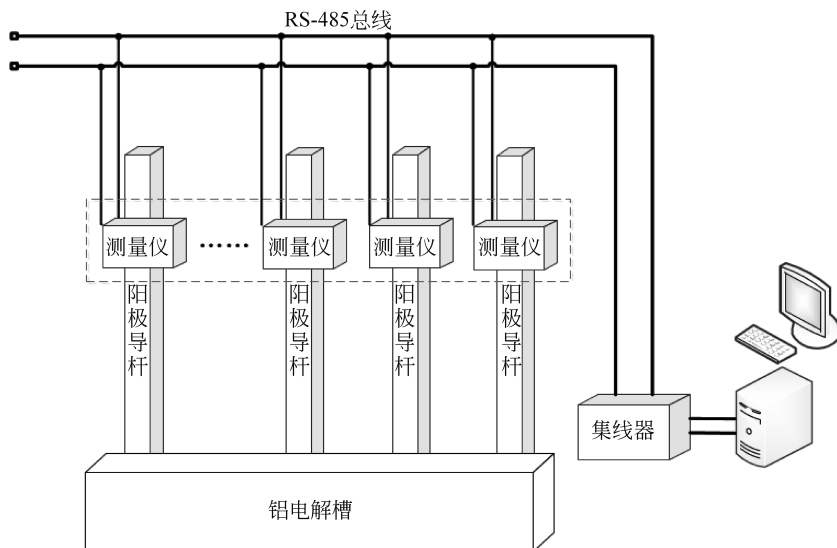


图 5-1 阳极导杆电流感知系统框图

5.3 阳极导杆电流感知系统硬件设计

根据 5.1 节所述的需求分析,设计的阳极导杆电流感知系统硬件系统框图如图 5-2 所示,铝电解阳极电流感知系统硬件部分主要包括信号调理电路、A/D 采样模块、温度采集模块、微控制器、RS-485 通信模块、数据存储和电源模块。

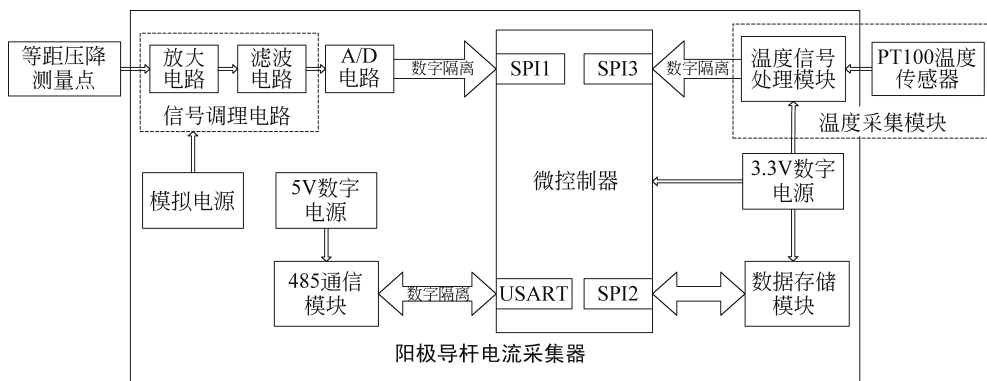


图 5-2 阳极导杆电流感知系统硬件框图

信号调理电路由自校准、放大和滤波电路组成,用于处理阳极导杆的等距压降信号,经过处理后信号输入至 A/D 模块,将模拟信号转换为数字信号,作为微控制器的输入。温度采集模块包括 PT100 温度传感器和信号处理模块,后者将传感器信号转换为与 RTD 阻值对应的数字电压信号,作为微控制器的第二输入。微控制器处理这些数字信号,计算阳极导杆电流并将结果存储到数据模块,同时通过 RS-485 通信模块传输至上位机。各模块由同电压等级的电源供电。其中各主要模块的硬件设计如下。

5.3.1 信号调理电路设计

阳极导杆电流感知系统所测量的电压信号在 2mV 左右,对于如此小的信号,A/D 转换器是不能识别的,需要通过运算放大器对其进行放大,采用 600 倍左右的放大倍数。根据模拟电子技术相关理论,如果要获取最小的输出噪声,采用一级运算放大器是最合适的,但是,对于如此大的增益,采用一级运算放大器时不能保证获取较宽的输出摆幅,为了保证高增益下实现较宽的频带输出,并使放大器能够满足良好的线性度与不失真的要求,本阳极导杆电流感知系统采用二级放大器。从芯片的增益带宽积、线性度和噪声等多角度考虑,选取前置放大增益为 100,二级运算放大器增益为 6。

根据文献资料以及现场经验介绍,阳极电流信号的频率为 0.5Hz 左右,并且该频率是变化的,为了更好地滤除高频干扰并且完整地复现阳极电流信号,设置滤波器的截止频率为 5Hz。

若要满足测量精度小于 2%,输入信号最小为 1mV,以 600 倍的放大倍数计算,则检测电路的输出噪声应小于 12mV。根据放大器的噪声模型与放大电路的各级增益值,并考虑一定的裕量,设计各级电路的等效输入噪声应满足如表 5-1 所示的范围要求。

接下来,以表 5-1 为参考,对信号调理电路各级电路进行设计,并逐级分析电路的噪声,计算所设计电路的总噪声。

表 5-1 信号调理电路各级输出噪声

电 路	等效输入噪声/nV
前置放大电路	40~500
二级运算放大器电路	100~1000
滤波电路	300~1000

1. 放大电路的设计

在二级放大电路中,由于前置运放的噪声增益等于整个放大电路的增益,所以其对整个检测电路的噪声影响最大,因此前置放大器的选择尤为重要,对其性能指标的要求也更加苛刻。前置放大器的基本性能要求如下。

- (1) 内部噪声小,且不易受外界噪声的影响。
- (2) 输入阻抗高,应远远高于传感器的输出阻抗。
- (3) 线性增益好,失真小。
- (4) 温度失调小。

在高温、强磁场等恶劣环境下,一般的运算放大器很难满足要求,为了抑制共模干扰,减小噪声引入,采用高精度仪表放大器作为前置运算放大器。此种运算放大器的选择很多,例如,TI 公司的 INA129、INA333、AD 公司的 AD8421、AD620 等。从输入噪声、温漂、高增益下的线性度、价格等多角度考虑,选用 TI 公司的 INA129 精密仪表放大器。

INA129 采用差分式结构,将三个运算放大器集成于一个芯片中,电阻配对精度高,保证了差分运算放大器在结构上的完全对称性,可有效地抑制共模信号的干扰,并且在电路设计时,可得到正确的输入阻抗和增益特性,其内部结构如图 5-3 所示。该仪表运算放大器具有低失调电压(最大为 50 μ V)、超低偏置电流(最大为 5nA)、超低温度漂移(最大为

0.5μV/℃)、高共模抑制比(最小为 120dB)、失真小、线性度好等优点。只需一个增益电阻 R 即可调节放大倍数范围从 1~10 000 变化。INA129 的电阻-增益计算公式如式(5-1)所示。

$$G = 1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{R} \quad (5-1)$$

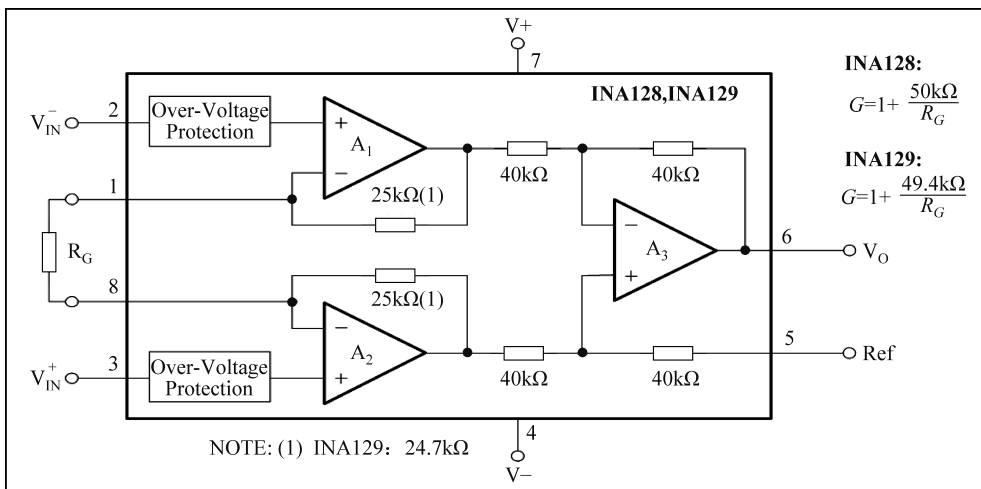


图 5-3 INA129 内部结构图

参考噪声优化的结果以及电阻的系列值,采用 499Ω,0.1%高精度电阻作为前置放大器的增益调节电阻,设计前置放大器的放大倍数为 100 倍。参考《INA129 仪表放大器数据手册》可知,当其增益为 100 时,带宽为 200kHz,满足设计要求。前置放大电路图如图 5-4 所示,由于检测的阳极导杆电压信号浮空,为防止运算放大器饱和,在放大器正负输入端分别设计电阻 R_1 、 R_2 接地回路,用来为输入偏置电流提供返回路径。

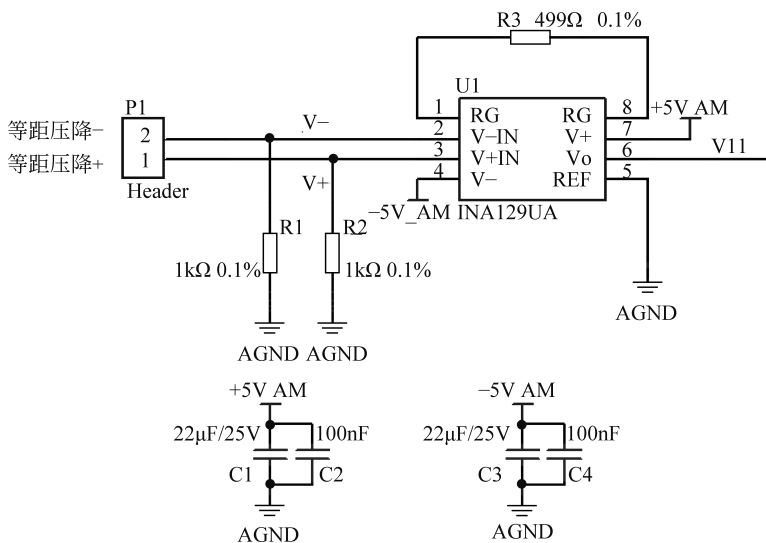


图 5-4 前置放大电路原理图

前置运算放大器由于带宽的限制,增益不能满足要求,需要设计二级运算放大器。在二级运算放大器的选型时,应满足输入噪声低、频带宽等要求,并且二级运算放大器的输出阻

抗应尽量小,以提高电路驱动负载的能力。其中第二级运算放大器选用 Analog Devices 公司的 AD8638,该运算放大器为自稳零、轨到轨输出的运算放大器。其各种性能指标如下:具有极低的失调电压,典型失调电压仅 $3\mu\text{V}$;具有极低的温度漂移,仅为 $0.01\mu\text{V}/^\circ\text{C}$;输出阻抗较低,闭环输出阻抗典型值为 4.2Ω ;具有超低输入噪声,该运算放大器的输入电流噪声为 0,电压噪声中无 $1/f$ 噪声, $0.1\sim 10\text{Hz}$ 电压噪声峰值仅为 $1.2\mu\text{V}$,在设计电路时不需要外部再并联滤波电容,也可达到低噪声的要求。

二级放大电路采用同相比运算放大器电路,电路的放大倍数为 6。二级放大电路的原理图如图 5-5 所示。放大电路产生的热噪声主要包括电阻 R_5 的热噪声、反馈电阻 R_6 与电阻 R_4 并联电阻产生的热噪声。如果减小 R_6 的阻值,为保证电路的增益不变, R_4 和 R_5 的值可随之减小,以此可达到减小电路的噪声的目的。但是 R_6 也可看作运算放大器 AD8638 的负载,若 R_6 的值太小,运算放大器的输出电流就变大,最终导致运算放大器发热和失真,因此需综合各种因素,选取 R_6 的值。

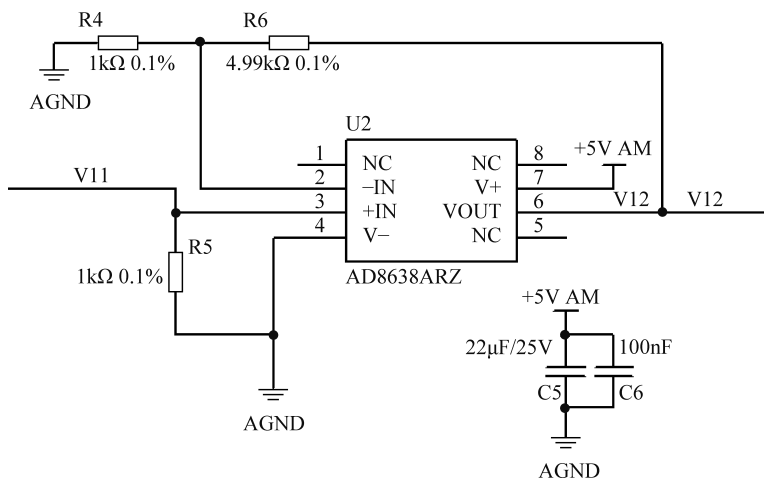


图 5-5 二级放大电路原理图

2. 滤波电路的设计

在使用 A/D 转换器对模拟信号进行量化处理时,如果转换的信号中含有高于采样频率 $1/2$ 以上的频率成分时,就会产生混叠效应,出现量化误差,并且在使用放大电路对微弱信号进行放大时,电路内部器件产生的噪声同时也会被放大。基于此原因,在对低频信号进行处理时,在放大电路与 A/D 转换器之间常会设置抗混叠低通滤波器(LPF),一方面用于防止混叠效应,另一方面也可以有效地滤除高频噪声。目前,大多数的抗混叠滤波器采用有源滤波电路来实现,有源滤波器由运算放大器和 RC 构成,各级滤波器的输出阻抗与截止频率无关,因此,各级滤波器的输出阻抗可以设计得很小。有源滤波器采用集成运算放大器,只需少量的电阻电容就可达到设计需要,使电路结构紧凑,各级之间可以相互独立地设计参数。在进行滤波电路阶数的选取时,应根据电路实际需要具体分析,不可将滤波阶数设计得太高,这样容易导致参数的不稳定。

在保证滤波器各个参数稳定的基础上,为了使滤波器的输出信号在高频段以较快的速度下降,从而提高滤波器的滤除噪声的能力,设计三阶低通滤波器。采用 AD 公司的 ANALOG FILTER 工具,设计了三阶二级巴特沃斯(Butterworth)有源低通滤波电路,电路

的 Multisim 仿真图如图 5-6 所示。该电路主要由两部分组成：一阶低通滤波电路和二阶低通 Sallen-Key 电路。滤波电路中运算放大器选用 AD 公司的 AD8512 芯片,该芯片内置双通道高精度 JFET 低噪声运算放大器,只需一个芯片即可达到设计要求,节省了电路板的空间,电路设计时在连接电源处增加了 100nF 的旁路电容,用来滤除电源的交流噪声。

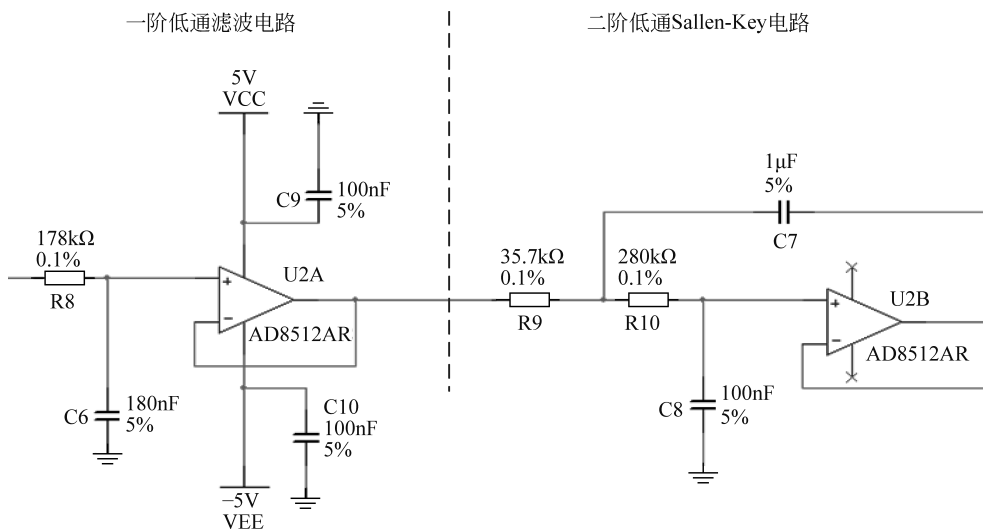


图 5-6 抗混叠滤波电路 Multisim 仿真图

铝电解阳极电流采集系统的采样频率为 10Hz,为了有效滤除高频干扰,同时减小 A/D 转换过程中产生的量化误差,该信号调理电路中设计的滤波器截止频率为 5Hz,阻带截止频率为 50Hz,增益为 0dB,滤波电路的幅频特性曲线如图 5-7 所示。

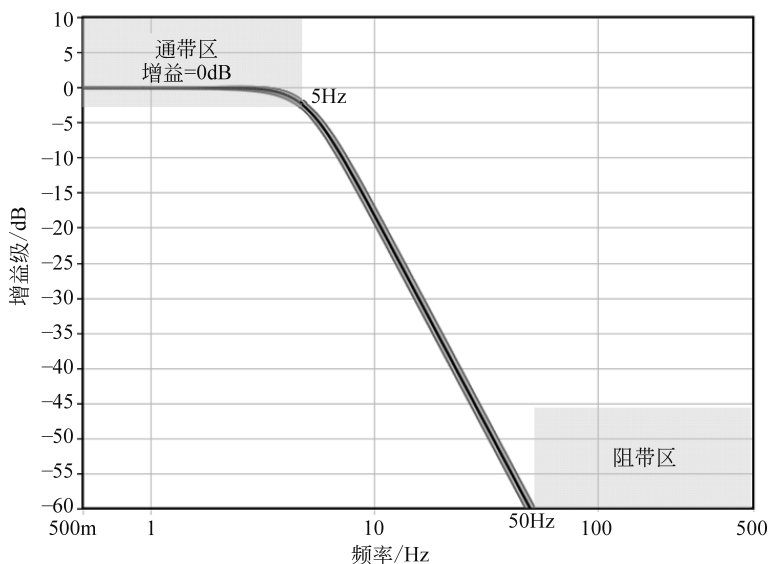


图 5-7 滤波电路幅频特性曲线

3. 阳极导杆电流感知系统信号调理电路的噪声分析

本节主要针对设计的信号调理电路,对各级电路进行噪声计算,进而推导出整个电路的

总噪声。

仪表运算放大器主要由两部分组成：差分增益级(输入级)和差分运放级(输出级)，输入级的增益等于仪表运算放大器的增益，输出级的增益为 1。根据上述结构可得到三运放仪表放大器的简化噪声模型，如图 5-8 所示。

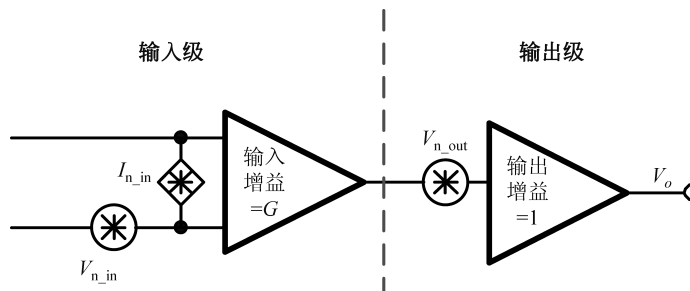


图 5-8 三运放仪表放大器简化噪声模型

将输出级的噪声等效到输入端，并与输入级噪声进行线性叠加，可得仪表放大器输入端的等效噪声 V_{n_RTI} 的计算见式(5-2)。

$$V_{n_RTI} = \sqrt{\left(\frac{V_{n_out}}{G}\right)^2 + (V_{n_in})^2} \quad (5-2)$$

由式(5-2)可以看出，对于不同的增益等效到放大器输入端的噪声是不相等的，参考 INA129 官方数据手册，该放大器的等效输入噪声频谱密度图如图 5-9 所示。图中黑色的实线为不同增益下的等效输入电压噪声频谱密度曲线，黑色的虚线为等效输入电流噪声频谱密度曲线。

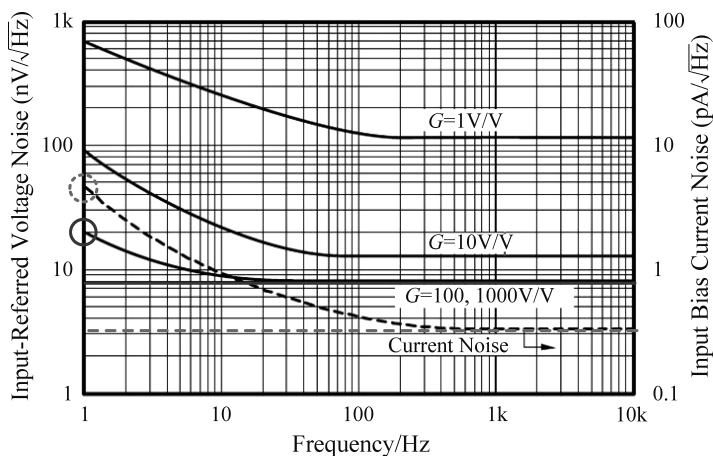


图 5-9 INA129 等效输入噪声频谱密度图

图中仪表放大器的放大倍数为 100，选择 $G=100$ 的电压噪声频谱曲线，从图中可以看出，放大器输入端的噪声由 $1/f$ 噪声和宽带噪声两部分组成，在宽带区域等效输入电压噪声密度为 $e_{nB_RTI} = 8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，等效输入电流噪声密度 $i_{nB_RTI} = 0.3\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；在 $1/f$ 区域，1Hz 时的电压噪声频谱密度值为 $20\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，计算可得 1Hz 归一化电压噪声为 $e_{norm} = 20\text{nV}$ ；在 $1/f$ 区域，1Hz 时的电流噪声频谱密度值为 $4.4\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，计算可得，1Hz 归一化电