

基于小信号检测技术的电路设计与仿真研究

秦石明¹ 刘婷婷¹ 张子春¹

QIN Shiming LIU Tingting ZHANG Zichun

摘要

针对小信号采集电路设计过程中存在的问题,提出一种电路设计与仿真相结合的研究方式。首先,采用自顶而下、模块化设计、定制化研究的思路制定小信号采集方案;然后根据实际使用工况确定小信号的特征,通过理论计算得到适用于信号放大、滤波的电路参数;接着结合性能参数、市场价格等因素合理选用放大滤波、模数转换、微控制器等芯片;最后,将电路 Layout 形成 PCB 提取关键参数,通过仿真来评估电路的设计质量。通过理论计算电路增益、滤波参数等指标进行电路设计,再结合时钟、电源等电路仿真,结果表明此电路设计达到了预期指标,缩短了研发周期。通过此电路设计与仿真研究,期望为小信号检测技术发展提供一种合理的、适用于工程设计的解决方案。

关键词

小信号检测; 电路设计; 仿真技术; 仪表放大; 模数转换

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.037

0 引言

小信号检测技术研究是指将光、电、热、磁、机械振动等小信号进行采集、分析,最终应用于航空航天、通信医疗、天文地质等不同领域,由于小信号通常具有频率低、幅值弱、背景噪声大等特征,所以小信号采集电路设计通常存在输入阻抗大、共模抑制比高、数据传输快、开发周期长等难点。小信号检测技术电路与仿真技术已经成为现代电子领域中的重要组成部分,并在各种应用中发挥着关键作用。这些技术的发展为电子设备的性能优化和新产品的设计提供了强有力的支持。

小信号检测技术电路是指用于检测微小信号的电路,其中微小信号通常指的是具有较小幅度或低功率的信号^[1]。这些信号可能来自传感器、天线、收发器等各种源头。小信号检测技术电路可以将这些微弱信号放大、滤波和处理,以便进行进一步的分析和利用。它们通常包括放大器、滤波器、检波器等组件,以及对噪声和干扰进行抑制的技术^[2]。

随着通信、雷达、生物医学等领域对于微弱信号的需求不断增加,小信号检测技术电路的研究和应用也日益重要。目前,人们对小信号检测技术电路的要求已经不仅仅停留在性能的提升上,更加注重功耗、尺寸和成本的优化。因此,基于集成电路、微纳加工技术的创新在小信号检测技术电路中得到了广泛应用和发展。

此外,仿真技术的发展也为小信号检测技术电路的研究

和设计提供了关键支持。通过电路仿真软件,工程师们可以在计算机上模拟小信号检测电路的性能,加速设计和优化过程。仿真技术还可以帮助工程师们分析和优化电路中的各种参数,包括电压增益、带宽、噪声系数等,从而更好地满足实际应用的需求。

近年来,随着集成电路设计和仿真软件的不断完善,在小信号检测技术电路的研究和设计中,仿真技术正发挥着越来越重要的作用。通过仿真技术,工程师们可以更快速、更准确地评估和改进小信号检测技术电路的性能,为实际应用提供更好的支持。

总之,小信号检测技术电路与仿真技术的发展,不仅为现代电子设备的性能优化和新产品的设计提供了有力支持,也在通信、医疗、无线电等领域有着广泛的应用前景。随着技术的不断进步,相信它们将在未来发展出更多的创新应用,为人类社会带来更多的便利与进步。

1 小信号检测电路设计

1.1 电路设计的系统框图

本文中所描述的小信号放大与检测系统框图如图1所示,具体工作原理为:各类光、热、磁、机械信号等微弱小信号^[3]由传感器进行采集转换成为电信号,然后经过预留的接口电路流入本文所述的电路结构,经过静电防护电路将高频高压噪声进行泄放,信号流入仪表放大器进行放大,模拟电信号再流过滤波电路进行滤波,信号被模数转换电路采样、量化、编码并传输到主控电路,主控电路开始对信号进行处理。

1. 西安航空计算技术研究所 陕西西安 710065

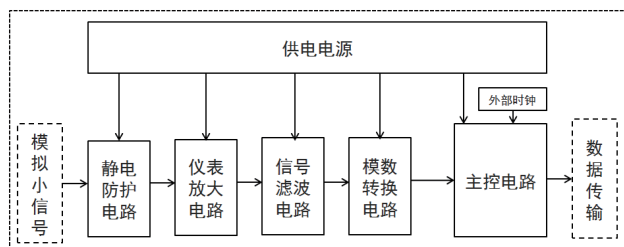


图1 系统框图

1.2 静电防护电路

静电产生的物理学原因是当自身携带不同静电电位的物体相互“感应”或者“接触”时就会发生电荷移动，产生静电放电现象（electro static discharge, ESD），静电的电压通常是在几毫伏至几千伏度不等的高压浪涌^[4]。在电子设备实际使用过程中，如果不对电路进行ESD防护处理，静电将进入印制板电路内部对设备造成毁灭性结果，本节简述USB Type-C常见的静电防护电路设计。

USB Type-C接口主要用于USB2.0、LVDS、SATA等总线接口的连接。为了保证信号实时、不失真传输，在此选用无源集成的ESD保护器件，这种器件接口电容大约只有0.8 pF，比较适合在低速模拟信号传输中做ESD防护^[5]。

此次ESD防护电路设计采用TPD4E1U06芯片，该芯片是一个具有四个通道的单项瞬态电压抑制静电放电保护二极管，等效电容较小，直流的击穿阈值电压最小值为6.5 V，具有最大值10 nA的极低漏电流，接触放电和气隙放电电压为±15 kV。

1.3 仪表放大器

本次设计主要考虑输入阻抗、增益、噪声、共模抑制比等参数，经过综合考量，选择三运放型仪表放大器^[6]。如图2所示为三运放型仪表放大器的电路结构，该电路结构分为前后两级，第一级由将运放A1的反向端和A2的同向端通过电阻R_g接起来，这样可以大幅度提高输入阻抗以及一级增益，同时也能提供一个较高的共模抑制比；运放A3是第二级，同时具备差分转单端、提供给后级额外的增益。

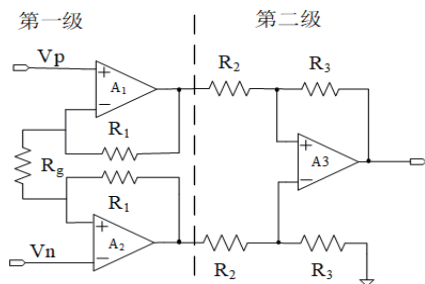


图2 三运放仪表放大器结构

三运放型仪表电路结构的缺点在于如果直流耦合结构与电路增益不匹配，就会引起放大器饱和^[7]，故在电路设计时应当根据增益计算公式和共模抑制比公式严格约束电路参

数，具体公式为：

$$\text{Gain} = \frac{2R_1 + R_g}{R_g} \times \frac{R_3}{R_2} \quad (1)$$

$$\text{CMRR} = 20 \lg \left[\frac{\text{Gain}}{2 \left(1 + \frac{R_2^2 - R_3^2}{R_2 R_3} \right)} \right] \quad (2)$$

为了实现增益可调，本次设计采用数字可编程高精度仪表放大器PGA281。PGA281具有极低的肖特基噪声（1/f噪声）、输入阻抗高、零点温漂可以达到 $0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ 、增益为128时失调电压只有5 μV等特点，最具特色的是该芯片提供一个硬件标志来表征过载检测^[8]。

1.4 滤波电路设计

本次采用压控电压源二阶低通滤波器电路设计，滤波器电路设计为四阶，该电路核心器件为一个运算放大器、四个电阻、两个电容。如图3所示为电路的拓扑结构，R_f是反馈电阻器，可以通过调节阻值增加电路增益，同相端R₁、R₃、C₁、R₂构成滤波网络。

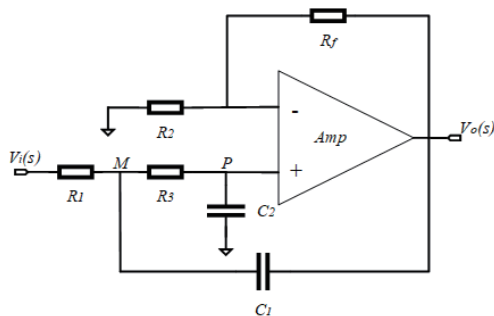


图3 压控电压源二阶低通滤波器

由电路基础中的基尔霍夫电压电流定律可得：

$$V_o(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_2} \right) \times V_p(s) = A_{vp} \times V_p(s) \quad (3)$$

式中：A_{vp}是放大器增益，V_p(s)是同相端电压。

$$V_p(s) = \frac{1}{1 + sR_3C_2} V_M(s) \quad (4)$$

$$\frac{V_i(s) - V_M(s)}{R_1} - \frac{V_M(s) - V_o(s)}{1/sC_1} - \frac{V_M(s) - V_p(s)}{R_3} = 0 \quad (5)$$

将式（3）、式（4）、式（5）进行推导整理可以得到电路系统的传递函数如下：

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{vp} \times \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_1} + \frac{(1 - A_{vp})}{R_3 C_2} \right) s + \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2}} \quad (6)$$

即可以得到电路的增益为：

$$A_{vp} = \left(1 + \frac{R_f}{R_2} \right) \quad (7)$$

通过分析电路的传递函数以及特性，可以知道在单位

增益时, 需要计算滤波网络 R_1 、 R_3 、 C_1 、 R_2 具体参数, 以 100 Hz 的小信号为例, 影响滤波器性能的实际只有截止频率、品质因数 Q 、电阻电容取值。

截止频率:

$$\omega_c = \frac{0.754}{\sqrt{R_1 R_3 C_1 C_2}} = 2\pi f_c = 2\pi \times 100 \quad (8)$$

选择贝塞尔型滤波器, 则 $Q = 0.56$ 。

为了避免电路引入过大的电路热噪声, 电阻电容取值不宜过大。

综上所述, 在单位增益时, 得到:

$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega, R_3 = 2 \text{ k}\Omega, C_1 = 1 \mu\text{F}, C_1 = 36 \text{ nF}$$

同理, 调整电路参数, 得到二级有源滤波器参数:

$$R_4 = 160 \text{ k}\Omega, R_5 = 16 \text{ k}\Omega, C_3 = 47 \text{ nF}, C_4 = 12 \text{ nF}$$

1.5 模数转换电路设计

本次设计选用的 AD4001 是一款高速高精度、单电源供电、低功耗的逐次逼近型 (successive approximation register, SAR) 16 位数差分模数转换芯片 (ADC), AD4001 的数据转换速率为 2 MSPS, 即每秒能完成 2 000 000 个数据的转换。值得一提的是, AD4001 的功耗与其吞吐量密切相关, 比如当芯片工作在采样频率为 10 kSPS 的模式下, 整个芯片功耗在 80 μ W, 此时可以通过可拆卸式电池供电。此外, 当芯片长时间处于断电状态时, 其仍然可以完成一次有效的首次转换。这种设计将进一步降低 ADC 芯片在低速转换状态中的功耗。为了进一步降低设计功耗, 在电路驱动代码设计阶段, 将采用 ADC 的高输入阻抗模式。该模式的突出优势在于芯片支持超低速率 (小于 10 kHz) 状态下持续输入低电流, 在输入频率范围到达 100 kHz 时, 电路具有更高的总谐波失真 (THD) 性能。由此, 在微弱信号检测系统的模数转换电路设计时, AD4001 是非常理想的选择。

1.6 主控电路设计

小信号的数字化处理是在微控制器中进行的, 本节所述小信号检测系统微处理器需满足: (1) 实时处理数据能力强; (2) 数据读写速率高; (3) 主控器电路设计简洁; (4) 控制器功耗较低、小电压弱电流供电; (5) 市场价格较低等特点^[9]。

分析上述需求, 本系统选择易法半导体公司的 STM32F4 系列单片机。该系列单片机性能较为可靠, 在中高端处理器中具备非常好的应用前景。STM32F4 系列单片机相较于 FPGA 和 CPLD 等逻辑处理单元具有许多优势。(1) STM32F4 单片机是基于 ARM Cortex-M4 内核的微控制器, 具有集成的处理器核心和外围设备, 因此可以直接执行编程逻辑和控制任务, 而 FPGA 和 CPLD 需要通过配置来实现特定的逻辑功能。(2) STM32F4 单片机具有简化的开发流程。(3) STM32F4 单片机具有更低的功耗和成本。FPGA 和 CPLD 通常需要大量的逻辑资源来实现复杂的功能, 因此在功耗和成

本上通常会比单片机高。而 STM32F4 单片机则可以通过优化的低功耗设计和集成的外围设备, 实现较低的功耗, 同时由于单片机通常在大规模生产中具有较低的单片价格, 因此在成本上也具有优势。(4) STM32F4 单片机具有较强的软件生态和技术支持。由于 ARM Cortex-M 系列的广泛应用和流行, 针对 STM32F4 单片机的开发工具、软件库、技术文档和社区支持非常丰富。所以, 相对于 FPGA 和 CPLD 等逻辑处理单元, STM32F4 系列单片机具有集成性强、开发成本低、功耗低、实时性能好、软件生态丰富等优势, 非常适合本文所述的小信号检测嵌入式系统等控制类应用。

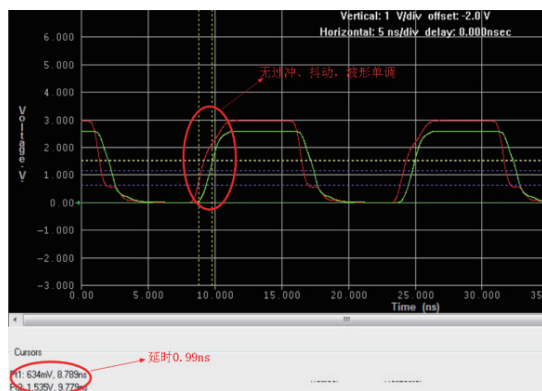
2 小信号检测电路仿真

本次设计电路结构不是特别复杂, 影响电路设计的核心因素为电源部分和数据传输部分, 故而通过仿真手段对 PCB 设计中的时钟电路、关键电源的流通情况进行评估。

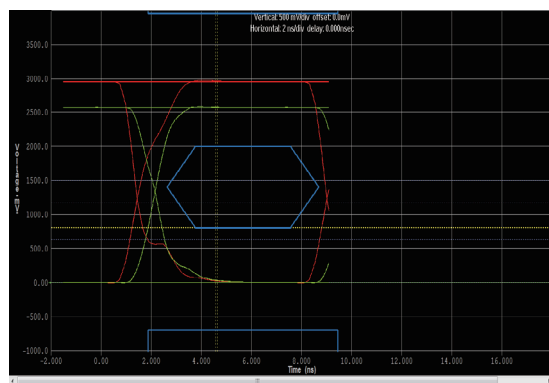
2.1 时钟电路仿真

本次电路设计时钟为单端“点对点”型, 发送端为 D14, 接收端为 D1。

图 4 (a) 中红色线为驱动端 D14, 绿色线分别为接收端 D1 的波形图以及眼图。由图 5 易得: 高电平符合门限 2.0 V、低电平门限 0.8 V; 时钟复位占空比 50%, 基本无抖动, 上冲幅度小于 3.96 V, 上冲时间小于 1.5 ns, 传输延时 0.99 ns, 符合数据手册中的相关要求。



(a) 驱动端波形



(b) 接收端眼图

图 4 驱动端、接收端波形图和眼图

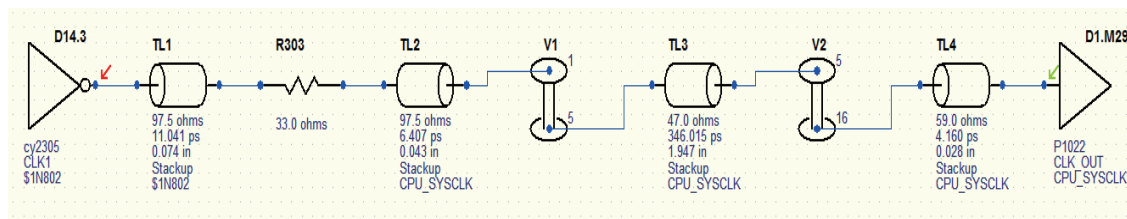


图5 拓扑结构前仿真图

2.2 电源直流仿真

由电源/地布线、平面及去耦电容等构成的电源分配系统,由于存在寄生电阻、寄生电感、寄生电容等寄生参数,其阻抗并不为零。当芯片工作电流由电源输出,流经电源分配网络到达芯片端时,就会在芯片端造成一定的直流压降。如果芯片全局直流压降过高,则逻辑门会发生功能故障,使芯片失效。同时,压降还会降低芯片速度,逻辑门单元上 5% 的 IR drop 将使正常的门速度降低 15%。倘若其发生在时序紧张的链路上,将会产生更为严重的后果^[10]。同时,电流密度过大造成温度升高,过高的温度会影响到芯片的正常工作,造成印制板和芯片的可靠性问题,甚至熔断 PCB 布线,造成风险。本方案在 PCB 进行设计时,按照基本规则进行电源布线,以满足通流及压降要求,但由于电源较多,且板上存在瓶颈区域,所以本设计对直流压降与电流密度进行了仿真验证。

电源的直流压降要求范围为 1% (即电压 0.990 ~ 1 V), PCB 电流密度根据相关标准,PCB 外层在 80 mA/mil² 以下,内层在 35 mA/mil² 以下,选用最恶劣条件电流最大 2.8 A。综上,仿真结果如图 6 所示,并且由仿真结果可以看出直流压降最大范围为 0.82% (即电压 0.992 V),PCB 外层电流密度最大为 5.5 mA/mil²,PCB 内层电流密度最大为 10.4 mA/mil²,结果满足要求。

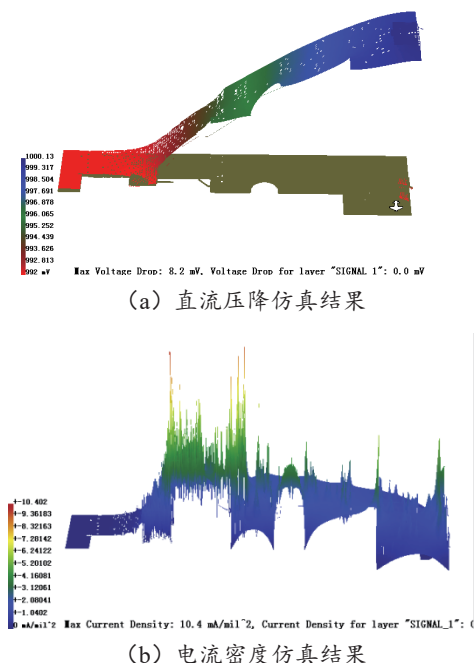


图6 电源电源直流仿真结果

仿真结果表明,电源直流仿真结果满足要求。

3 结语

未来,随着科学技术的不断

进步,小信号检测技术将会继续得到改进和拓展。基于人工智能算法和新型传感器技术的不断创新,小信号检测技术将更加精准地捕捉和解析微弱信号,为各个领域的应用带来更多的可能性。同时,人们也需要持续关注小信号检测技术在数据隐私和安全等方面的挑战,并寻求相应的解决方案,以确保其可持续发展和应用。本文提供的小信号检测电路设计与仿真方案经过实践可以广泛应用于各类微弱信号检测领域。

参考文献:

- [1] CHAR L. 用输入滤波器防止仪表放大器射频整流误差[J]. 电子设计技术,2004,11(6):104-105.
- [2] 闫晓慧. 航空座舱仪表采集 MV 级小信号的设计[J]. 电子世界,2018(3):110-111.
- [3] MICHEL F, LAUREN W, SABINA U, et al. An independent validation of the EEG-based complex trial protocol with autobiographical data and corroboration of its resistance to a cognitively charged countermeasure[J]. Applied psychophysiology and biofeedback,2021,46(3):287-299.
- [4] 魏文强. 基于双路 ADC 的数字化直接线性相位比对方法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.
- [5] 吴茂林. 基于嵌入式系统的纳安表的设计[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [6] DAVID P, MICHAEL N. Design and development of medical electronic instrumentation[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004: 1-3.
- [7] 范富轩. 微弱信号采集的前置放大器设计与研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [8] 沙一峰. 基于超高输入阻抗放大电路的生物传感器设计[J]. 传感器与微系统,2013,32(11):71-74.
- [9] 魏雪杰. 用于生物电信号检测的低噪声模拟前端设计[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [10] 李刚,张旭. 生物医学电子学[J]. 北京:电子工业出版社,2008.

【作者简介】

秦石明(1996—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:机载计算机信号/电源完整性、电磁兼容性。

(收稿日期:2023-12-14)