

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416117

# 用于多气象传感器的模拟前端集成电路设计<sup>\*</sup>

华文浩<sup>1,2</sup> 张加宏<sup>1,2</sup> 蒋相龙<sup>2</sup> 张波<sup>2</sup> 卢光林<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;

2.南京信息工程大学集成电路学院 南京 210044)

**摘要:**设计了一款适用于多气象传感器的模拟前端集成电路,主要包含LDO、可编程增益放大器、SAR ADC以及湿度测量电路。可编程增益放大器采用全差分轨对轨运放作为主体结构来抑制噪声,同时采用连续时间Auto-Zero校准技术来降低其输入失调电压。对于14位SAR ADC,为降低DAC电容阵列的平均功耗和面积,设计了基于 $V_{CM}$ -based开关切换策略的分段式差分DAC电容阵列。最后基于湿度传感器电容值与矩形波频率之间关系的原理,设计了湿度测量电路,湿度测量电路频率误差为0.03%。该模拟前端电路基于华虹0.18  $\mu\text{m}$  CMOS工艺,并通过Cadence Spectre软件进行电路设计、版图绘制以及仿真实验。后仿真结果表明,电路整体可以实现从输入模拟信号的放大,到最终输出数字码的功能,其有效数(ENOB)为11.40 bit, SINAD为70.37 dB, SNR为71.05 dB, SFDR为83.85 dBc, THD为-78.55 dB。

**关键词:**模拟前端;线性稳压器;可编程增益放大器;逐次逼近型模数转换器;湿度测量电路

**中图分类号:** TN492 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1035

## An Analog front-end IC for multiple meteorological sensors

Hua Wenhao<sup>1,2</sup> Zhang Jiahong<sup>1,2</sup> Jiang Xianglong<sup>2</sup> Zhang Bo<sup>2</sup> Lu Guanglin<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** An analog front-end circuit for multi-meteorological sensors which mainly includes LDO, programmable gain amplifier, SAR ADC, and humidity measurement circuit was designed. The programmable gain amplifier uses all-difference rail to orbit as the main structure to suppress the noise, and the continuous-time Auto-Zero calibration technology is adopted to reduce its input imbalance voltage. For the 14-bit SAR ADC, in order to reduce the average power consumption and area of CDAC, a segmented differential DAC capacitor array based on the  $V_{CM}$ -based switching strategy was designed. Finally, based on the principle of the relationship between the capacitance value of the humidity sensor and the frequency of the rectangular wave, a humidity measurement circuit was designed. The frequency error of the humidity measurement circuit is 0.03%. The analog front-end circuit is based on Hua Hong's 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS process, and the circuit design, layout drawing and simulation verification are carried out through Cadence Spectre software. The post-simulation results show that the circuit as a whole can realize the function of amplifying the input analog signal and finally outputting the digital code, its effective number of bit (ENOB) is 11.40 bit, SINAD is 70.37 dB, SNR is 71.05 dB, SFDR is 83.85 dBc, and THD is -78.55 dB.

**Keywords:** analog front end; linear regulator; programmable gain amplifier; successive approximation ADC; humidity measurement circuit

## 0 引言

气象智能传感器系统作为连接人类和大自然环境信息

的高新技术,可应用在气象、农业、林业、交通运输、汽车电子以及国防军事等领域。目前多气象传感器系统在气象探测及灾害预警中已受到广泛关注,尤其是在强调智能化、信

收稿日期:2024-05-27

<sup>\*</sup> 基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3205902, 2022YFB3205903)项目资助

息化的“工业 4.0”中有着极为重要的作用<sup>[1]</sup>。模拟前端电路作为现实世界与数字电路之间的纽带,在许多复杂高性能的传感器电路系统中都存在。近些年,研究人员针对传感器模拟前端电路进行了一系列探索和研究。例如, Solar 等<sup>[2]</sup>采用 0.35  $\mu\text{m}$  互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺设计了一款基于压阻式桥式压力传感器的模拟前端电路,其包括仪表放大器、二阶切比雪夫有源低通滤波器和一阶增量模数转换器(analog to digital converter, ADC)。Jun 等<sup>[3]</sup>设计了一款用于桥接测量系统的模拟前端电路。该电路基于电容耦合仪表放大器(capacitively-coupled chopper instrumentation amplifier, CCIA)、二阶增量 Delta-Sigma( $\Sigma-\Delta$ ) ADC 和串行接口的可重构数字滤波器实现。车来晟<sup>[4]</sup>设计了一款用于压阻式压力传感器的模拟前端电路,采用双通道设计,其中每个通道分别包含一个可编程增益放大器(programmable gain amplifier, PGA)和一个 10 位的逐次逼近(successive approximation register, SAR) ADC。Jiang 等<sup>[5]</sup>采用 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺设计了一款温度和湿度二合一传感器,单个模拟前端电路连接两个片上传感器。周毓<sup>[6]</sup>设计了一款用于压阻式微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)压力传感器的专用集成电路,包括信号处理部分的仪表放大器、二阶单环 1 bit 结构的  $\Sigma-\Delta$  ADC 和低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO)的电源部分。

从以上研究可以看出,传统的传感器模拟前端电路大部分只包含可编程增益放大器和 ADC,并且绝大多数模拟前端电路都是针对单一功能传感器而设计,且没有将稳压电路进行片上集成,然而在有些应用场景下,外部供电系统并不能提供一个干净且稳定的电源,所以也需要考虑低压差线性稳压器的设计,以满足不同应用场景的需求。针对以上问题,本文提出了一种适用于多气象传感器的模拟前端电路,该电路具有 3 种不同的测量通道,可处理压阻式压力传感器、电阻式温度传感器及其电桥结构、电容式湿度传感器的输出信号;并且在功耗、采样率、精确度等性能上具有优势;本设计还将 LDO 进行了片上集成,具有更高的集成度。

### 1 模拟前端电路分析与设计

本文设计的多气象传感器模拟前端电路的应用系统结构如图 1 所示,包括:1 个 LDO、2 个 PGA、2 个 SAR ADC 以及 1 个湿度测量电路。

其中,LDO 为可编程增益放大器、SAR ADC 以及湿度测量电路提供稳定电源;2 个 PGA 分别放大压阻式压力传感器和电阻式温度传感器及其电桥结构输出的低频电压信号,使得它们可达到后续模数转换器量化的电压范围;2 个 SAR ADC 分别负责将 2 个 PGA 放大后的信号转化成数字信号,并送入微控制器进行处理;湿度测量电路则负责

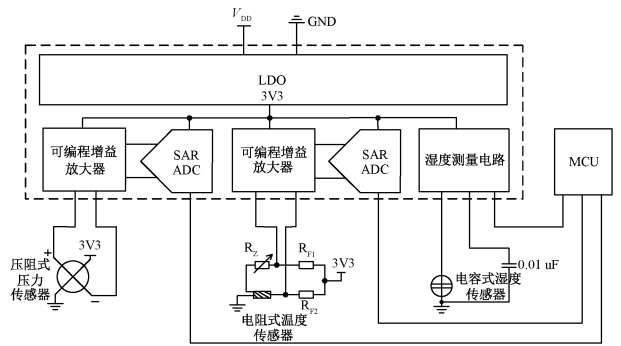


图 1 模拟前端电路应用系统结构

Fig. 1 The structure of the analog front-end circuit for application system

将电容式湿度传感器电容值的变化转换为频率变化的矩形波信号,并送入微控制器进行处理。为保证良好的共模抑制能力,PGA 和 ADC 都使用了全差分结构。

#### 1.1 LDO 设计

本文设计的 LDO 整体结构如图 2 所示,包括电压基准电路、误差放大器、缓冲级、功率输出级、电阻反馈网络、频率补偿电路以及保护电路。

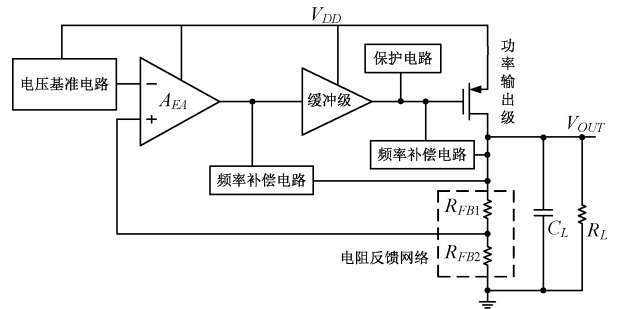


图 2 LDO 整体结构

Fig. 2 LDO monolithic construction

在该电路中,控制电压由误差放大器、电阻反馈网络和基准电路产生,其基本原理是通过  $R_{FB1}$  和  $R_{FB2}$  构成的负反馈网络对输出电压  $V_{OUT}$  进行采样,得到采样电压  $V_{FB}$ ,并将其与基准电压  $V_{REF}$  进行比较,通过误差放大器产生控制电压,用来调节功率管  $M_{pass}$  的工作状态,通过这一反馈环路,输出电压  $V_{OUT}$  不断与基准电压  $V_{REF}$  进行比较,最终得到一个稳定的输出电压  $V_{OUT}$ 。

下面来推导输出电压  $V_{OUT}$  的表达式:

$$V_{OUT} = A_v g_{m, pass} R_{OUT} (V_{REF} - V_{FB}) V_{OUT} \quad (1)$$

$$V_{FB} = \left( \frac{R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} \right) \times V_{OUT} \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)可得:

$$V_{OUT} = \frac{(R_{FB1} + R_{FB2}) V_{REF}}{R_{FB2} + \frac{1}{A_v g_{m, pass} R_{OUT}}} \quad (3)$$

当  $A_v \rightarrow \infty$  时:

$$V_{OUT} = \left( \frac{R_{FB1} + R_{FB2}}{R_{FB2}} \right) \times V_{REF} \quad (4)$$

其中,  $A_V$  为误差放大器的低频增益;  $g_{m,pass}$  为功率管的跨导;  $R_{OUT}$  为 LDO 的输出阻抗。

图 3 为本文设计的电压基准电路。

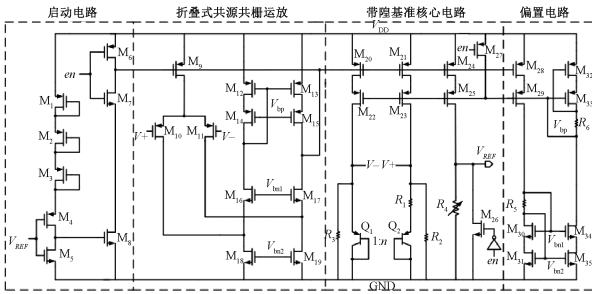


图 3 带隙基准结构

Fig. 3 Band gap reference structure

主要包含 4 个部分,分别为启动电路、折叠式共源共栅运放、带隙基准核心电路以及偏置电路。另外,本文采用 PMOS 作为功率管,使用了嵌套式密勒补偿,并添加了过温保护电路和过流保护电路。

1.2 可编程增益放大器分析与设计

可编程增益放大器整体结构如图 4 所示。传感器根据应用场景的不同,输出大小也不同,通常在 mV 级别,并且传感器的输出信号夹杂着失调、共模噪声、以及其他非理想因素,所以相较于单一功能传感器的电路设计,本文的可编程增益放大器需要在大的共模干扰情况下对微弱差分信号精确放大,并稳定在特定值。本文采用仪表放大结构<sup>[7]</sup>作为可编程增益放大器的第一级输入以便尽可能地将输出信号传递到后级电路,为了提高可编程增益放大器的共模噪声抑制能力和电源扰动抑制能力,采用轨对轨自动调零全差分运放<sup>[8-9]</sup>作为可编程增益放大器的第二级输入,同时它也是可编程增益放大器的增益可调级。

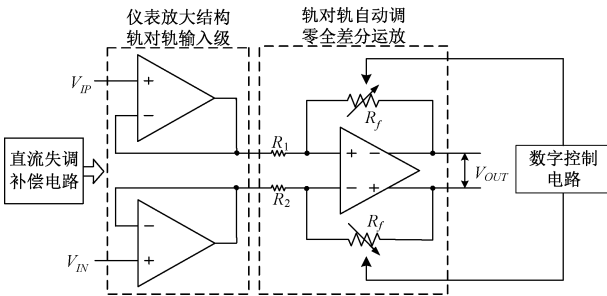


图 4 可编程增益放大器结构

Fig. 4 Programmable gain amplifier structure

本文引入了自动调零(Auto-Zero)校准技术<sup>[10]</sup>用于减小由于器件在版图和生产中的失配产生随机失调。基本原理是使用电容来存储放大器的输入失调电压,然后将存储的失调电压通过放大器的增益来缩小。图 5 为主全差分放大器(调零全差分放大器)的电路结构。

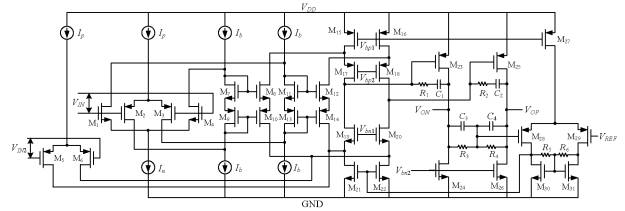


图 5 轨对轨全差分放大器

Fig. 5 Rail-to-rail fully differential amplifier

对于增益可调网络,本文采用闭环电阻反馈网络和自定义增益步进的方式,搭配数字控制电路来实现增益可调。其中数字控制电路采用带使能端的三八译码器和二四译码器从而分别控制增益区间 1~128 倍和 256~2 048 倍。另外还引入直流分量消除电路以消除由与传感器而在输出端产生的直流分量<sup>[11]</sup>。

1.3 SAR ADC 分析与与设计

因为可编程增益放大器为全差分结构,并且为了提高 ADC 自身的转换精度和共模噪声抑制能力,所以 SAR ADC 也采用差分结构。图 6 为设计的 SAR ADC 的整体结构,其中包括栅压自举开关、差分 DAC 电容阵列、全差分比较器及 SAR 逻辑电路<sup>[12]</sup>。

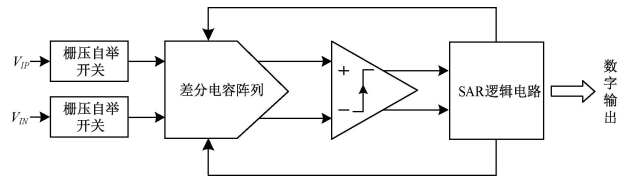


图 6 SAR ADC 整体结构

Fig. 6 Overall structure of SAR ADC

1) 比较器设计

设计的比较器如图 7 所示,包括预放大电路和动态比较器<sup>[13]</sup>,其中在动态比较器的输入与输出之间加入预放大电路<sup>[14]</sup>,将输入与输出隔离,用以减小动态比较器的回踢噪声。

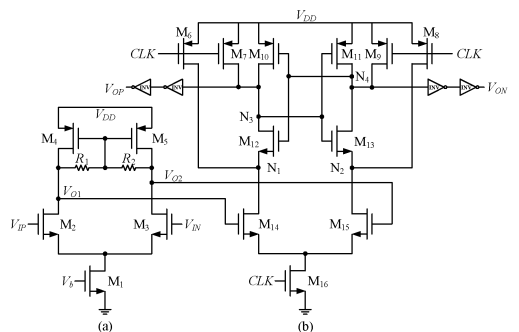


图 7 比较器电路结构

Fig. 7 Comparator circuit structure

2) DAC 设计

采用基于  $V_{CM}$ -based 开关切换策略<sup>[15]</sup>的差分 CDAC,

图 8 为设计的差分 DAC 电容阵列,采用分段二进制<sup>[16]</sup>用于减小整体电容,电容阵列 MSB 与 LSB 均为 7 位。

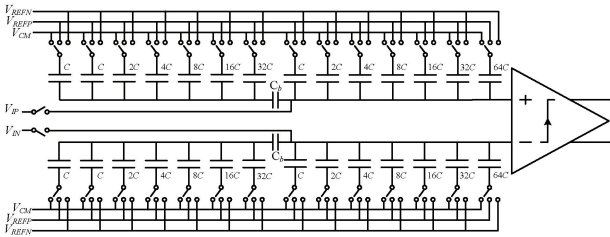


图 8 DAC 电路结构

Fig. 8 DAC circuit structure

### 3) SAR 逻辑电路设计

图 9 给出了设计的 SAR 逻辑电路,采样阶段,比较器处于复位状态,SAR 逻辑电路也处于复位状态,DAC 电容阵列所有电容的下极板都接至  $V_{CM}$ 。

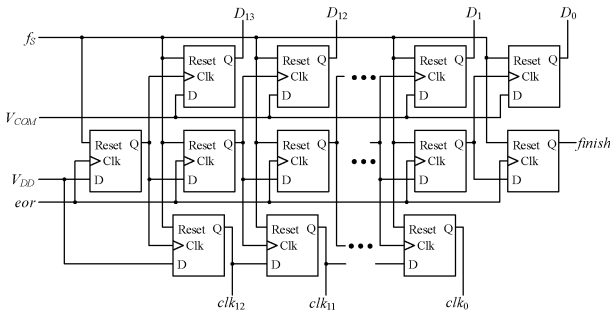


图 9 SAR 逻辑电路结构

Fig. 9 SAR logic circuit structure

采样阶段结束后进入转换阶段,比较器在对应的时钟信号  $f_c$  控制下,在高电平时进行比较输出,在低电平时进行复位,使输出为高电平;SAR 逻辑电路则生成控制信号  $clk_{12}$  至  $clk_0$  反馈回 CDAC 来控制开关阵列进行切换,同时将数字码  $D_{OUT}$  并行输出。以此类推,不断重复整个采样转换周期。

### 1.4 湿度测量电路分析与设计

图 10 展示了湿度测量电路整体结构,将电容式湿度传感器由环境湿度变化引起的电容值变化转换成频率变化的矩形波信号,并送入微控制器进行处理,通过计算矩形波信号的周期和频率,从而可以求得湿度传感器的电容值,再根据湿度传感器电容值和环境湿度的关系,最终得到相应的数据。

## 2 模拟前端关键电路仿真分析

利用华虹  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 工艺仿真模型和 Cadence Spectre 仿真软件对设计的电路进行仿真,得到模拟前端关键电路的仿真结果,并对仿真结果进行简要的分析与总结。

### 2.1 LDO 仿真

图 11 为 LDO 的负载电流从轻载(1 mA)突变到重载(100 mA)和从重载(100 mA)突变到轻载(1 mA)条件下,

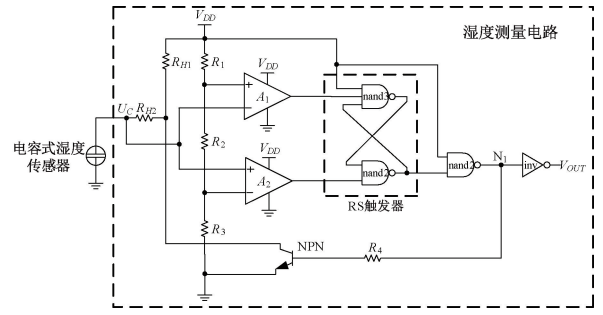


图 10 湿度测量电路结构

Fig. 10 Humidity measurement circuit structure

进行瞬态仿真得到的 LDO 输出电压随负载电流的变化关系。从图中可以看出,负载电流从 1 mA 突变到 100 mA 时,输出电压的下冲电压为 29.8 mV,回归到稳定状态且建立误差小于 0.1% 需要 7.1  $\mu\text{s}$ ;负载电流从 100 mA 突变到 1 mA 时,输出电压的上冲电压为 23.7 mV,回归到稳定状态且建立误差小于 0.1% 需要 7.2  $\mu\text{s}$ 。

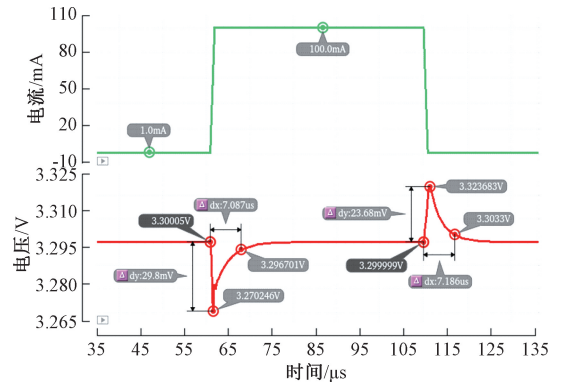


图 11 LDO 瞬态响应曲线

Fig. 11 LDO transient response curve

### 2.2 可编程增益放大器仿真

图 12 为可编程增益放大器在 0.1 Hz~1 MHz 范围内,设置不同增益档位条件下仿真得到的放大倍数,从图中的增益曲线可以看出,可以实现对应的放大倍数。

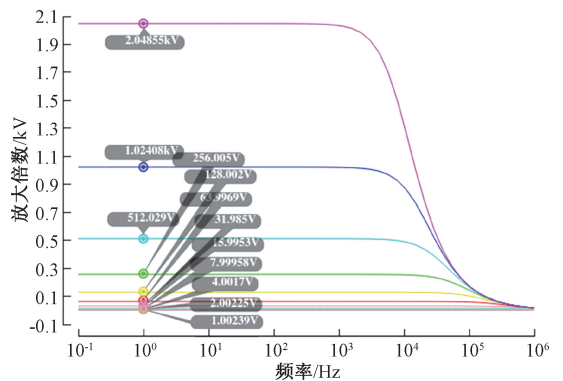


图 12 不同增益档位的放大倍数

Fig. 12 Magnification factor at different gain levels



### 2.3 SAR ADC 仿真

在 SAR ADC 的输入端给入频率为 36.133 kHz, 0~3.3 V 满摆幅的正弦波信号, SAR ADC 对输入信号进行采样、保持、量化和编码, 最后将 SAR ADC 输出的数字码转换成与之对应的离散模拟信号。图 13 对比了输入模拟信号与数字码转换后的离散正弦波信号。

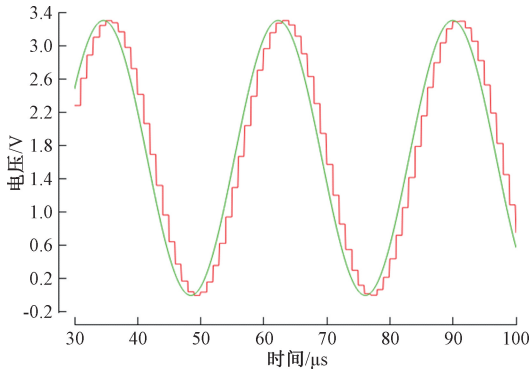


图 13 输入模拟信号与离散模拟信号对比

Fig. 13 Comparison between input analog signal and discrete analog signal

### 2.4 湿度测量电路仿真

图 14 为湿度测量电路工作波形的仿真结果。本文设计的湿度测量电路中的  $R_{H1}$  和  $R_{H2}$  分别为 10 k $\Omega$  和 100 k $\Omega$ , 当湿度传感器的电容值为 160 pF 时, 输出矩形波的频率理论值为 42.94 kHz。从图 14 中可以看出, 输出矩形波的周期为 23.280 823  $\mu$ s, 则频率为 42.953 8 kHz, 频率误差约为 0.03%。

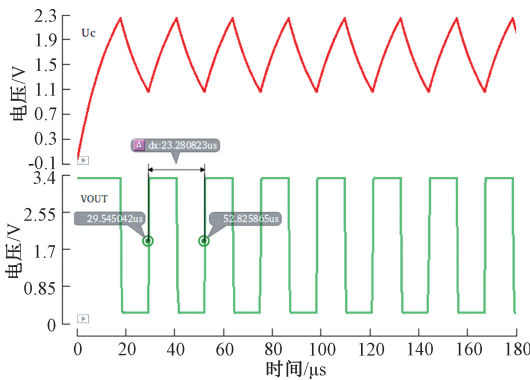


图 14 湿度测量电路工作波形

Fig. 14 Working waveform of the humidity measurement circuit

## 3 版图设计与模拟前端电路整体仿真

### 3.1 整体版图设计

基于华虹 0.18  $\mu$ m CMOS 工艺完成了可编程增益放大器的版图设计, 图 15 为多气象传感器模拟前端电路的整体版图, 其大小为 1 354  $\mu$ m $\times$ 972  $\mu$ m。在进行整体版图布局时, 由于 LDO 的功率管可能会在工作过程中出现温度升高的情况, 因此将其放在整个版图边缘以便更好地进行散

热; 在进行版图设计时, 以对称的方式进行布局布线, 并且适当增加走线宽度用以减小低频信号的共模噪声的影响。

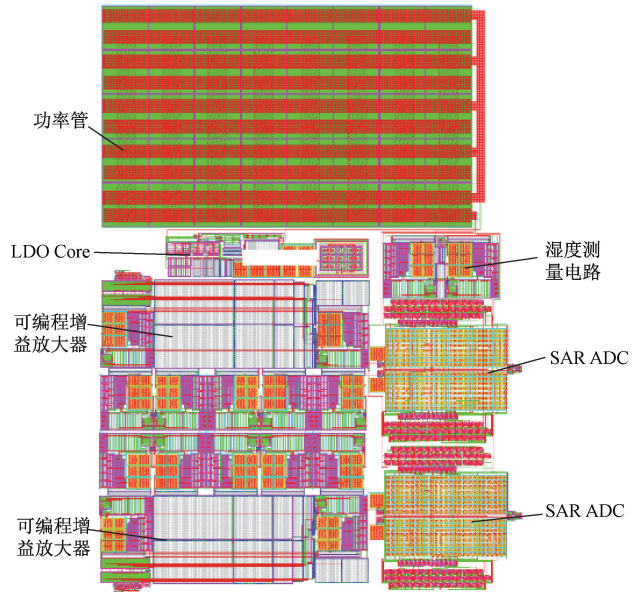
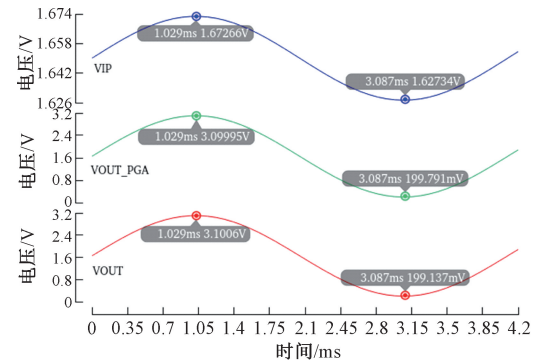


图 15 模拟前端整体版图

Fig. 15 Simulate the overall layout of the front-end

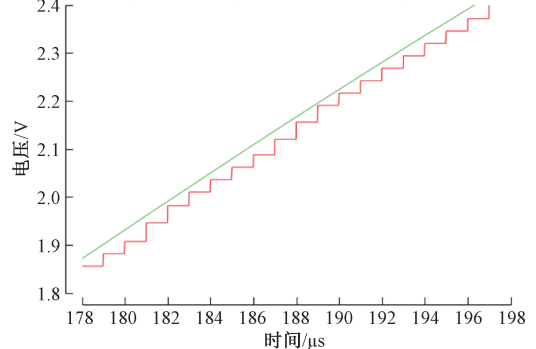
### 3.2 整体功能仿真

图 16 为前端电路的整体仿真结果。如图 16(a) 所示,



(a) 输入、PGA 输出以及离散模拟信号

(a) Input, PGA output, and discrete analog signals



(b) 局部放大  
(b) Fractionated gain

图 16 模拟前端关键电路整体功能仿真

Fig. 16 Overall functional simulation of key circuits in the analog front-end

在可编程增益放大器的输入端给入频率为 244.1406 Hz, 幅度较小的低频正弦波信号, 并将其放大至最大输出摆幅 0.2~3.1 V, 再通过 SAR ADC 进行采样、保持、量化和编码, 最后将 SAR ADC 输出的数字码转换成与之对应的离散模拟信号。如图 16(b)所示, 绿线和红线分别为图 16(a)中 PGA 的输出信号和经过 ADC 转化后的离散信号的局部放大, 二者基本保持一致。可以看出, 模拟前端关键电路整体可以实现从输入模拟信号的放大, 到最终输出数字码的功能。

### 3.3 动态性能仿真

图 17 所示为将模拟前端关键电路整体输出数字码转换后的离散模拟信号, 取 4 096 个点进行快速傅里叶变换的频谱图。其有效位数(effective number of bit, ENOB)为 11.40 bit, 信纳比(signal to noise and distortion ratio, SINAD)为 70.37 dB, 信噪比(signal to noise ratio, SNR)为 71.05 dB, 无杂散动态范围(spurious free dynamic range, SFDR)为 83.85 dB, 总谐波失真(total harmonic distortion, THD)为-78.55 dB。

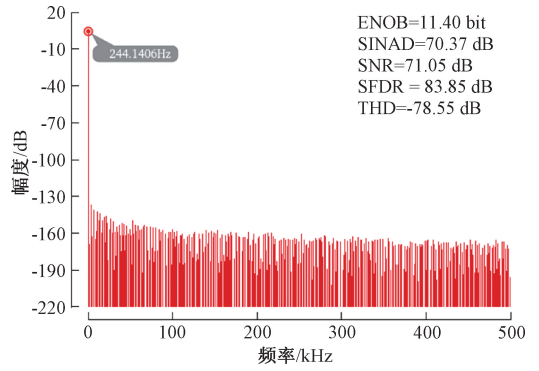


图 17 模拟前端关键电路整体输出信号 FFT 频谱图

Fig. 17 FFT spectrum of the overall output signal of the key circuit in the analog front-end

如表 1 所示为将本文设计的模拟前端电路与近几年在相关领域的研究成果进行了对比, 并且从本文的后仿真结果来看, 实现了用于多气象传感器的模拟前端电路功能, 整体的性能指标良好。

表 1 本文与其他文献对比

Table 1 compares this article with other literature

参数指标	对比文献	本文(后仿真)	文献[4]	文献[6]
工艺/ $\mu\text{m}$		0.18	0.18	0.18
有无 LDO		有	无	有
LDO 稳定性		PM>74°	—	PM>34°
电源电压/V		3.3	2.8	3
测量通道数		3	2	1
增益调节范围		1~2 048	1~1 024	1~128
电源抑制比		100.4 dB@1 kHz	—	—
共模抑制比		107.5 dB@1 kHz	—	—
ADC 类型		SAR ADC	SAR ADC	$\Sigma-\Delta$ ADC
采样率/kSPS		1000	116	0.5
平均电流/ $\mu\text{A}$		282	445	—
有效位数/bit		11.40	9.99	16.6(only ADC)

## 4 结 论

本文基于华虹 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺设计了一种用于多气象传感器模拟前端电路。本设计片上集成了 LDO, 并加入缓冲级和嵌套密勒补偿来保证其环路稳定性。为了更好的放大传递各个通道的信号, 采用了由仪表放大结构轨对轨输入级、轨对轨自动调零全差分运算放大器、数字控制电路以及直流失调补偿电路构成的全差分可编程增益放大器, 并采用连续时间 Auto-Zero 校准技术来降低输入失调电压。设计了基于  $V_{\text{CM}}$ -based 开关切换策略的分段式差分 DAC 电容阵列用以减小 SAR ADC 的面积及能量

损耗。将 LDO、可编程增益放大器以及 SAR ADC 连接为整体进行了后仿真分析, 输出信号的有效位数为 11.40 bit。后仿真结果表明, 电路整体可以实现从输入模拟信号的放大, 到最终输出数字码的功能。基本满足了用于多气象传感器模拟前端电路的性能指标要求, 该研究结果对于多气象传感器模拟前端电路的相关设计具有一定的参考价值。

### 参考文献

[1] 刘进长, 刘振忠, 张建. MEMS 传感器技术发展现状与趋势[J]. 科技中国, 2018(6): 8-10.  
LIU J CH, LIU ZH ZH, ZHANG J. Development

- status and trend of MEMS sensor technology[J]. Science and Technology of China, 2018,(6): 8-10.
- [2] SOLAR H, BERIAIN A, JIMENEZ-IRASTORZA A, et al. A CMOS sensor signal conditioner for an automotive pressure sensor based on a piezo-resistive bridge transducer[C]. 2016 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems(DCIS). IEEE, 2016: 1-5.
- [3] JUN J, RHEE J, KIM M, et al. A 21.8 b sub-100  $\mu$ Hz 1/f corner 2.4  $\mu$ V-offset programmable-gain read-out IC for bridge measurement systems[C]. 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). IEEE, 2018: 330-332.
- [4] 车来晟. 基于压力传感器的模拟前端电路设计[D]. 成都:电子科技大学, 2019.  
CHE L SH. An analog front-end circuit design for pressure sensors [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [5] JIANG H W, HUANG C C, CHAN M R, et al. A 2-in-1 temperature and humidity sensor with a single FLL wheatstone-bridge front-end[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(8): 2174-2185.
- [6] 周毓. 压阻式 MEMS 压力传感器专用集成电路设计[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2020.  
ZHOU Y. Design of the application specific integrated circuit of piezoresistive MEMS pressure sensors[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020.
- [7] 汪瑞,余晗卿,司峻峰,等. 一种仪表运放与高通滤波相融合的前置放大器增强方案[J]. 电子测量技术, 2014, 37(7):10-13.  
WANG R, YU H Q, SI J F, et al. An enhancement scheme of bioelectricity preamplifier combining an instrumentation amplifier with a high-pass filter[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(7): 10-13.
- [8] 王程,张加宏,刘祖韬,等. 一种用于传感器模拟前端的可编程增益放大器[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(2): 230-237,245.  
WANG CH, ZHANG J H, LIU Z T, et al. A programmable gain amplifier for analog front-end of a sensor [J]. Electronic Components and Materials, 2024,43(2): 230-237, 245.
- [9] 谢海情,陈玉辉,王振宇. 一种低压低功耗恒跨导轨到轨运算放大器设计[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(10):65-69.  
XIE H Q, CHEN Y H, WANG ZH Y. Design of a rail-to-rail operational amplifier with constant transconductance under low-voltage and low-power [J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(10): 65-69.
- [10] PHAM X T, VU T K, NGUYEN T D, et al. A 1.2- $\mu$ W 41-dB ripple attenuation chopper amplifier using auto-zero offset cancelation loop for area-efficient biopotential sensing[J]. Electronics, 2022, 11(7): 1149.
- [11] 陈就,王小松,张海英,等. 一种低噪声、宽输入摆幅仪表放大器[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(12): 40-44.  
CHEN J, WANG X S, ZHANG H Y, et al. A low-noise, high input-swing instrument amplifier [J]. Microelectronics & Computer, 2017,34(12): 40-44.
- [12] 陈磊,李天望. 应用于生物电信号检测的低功耗 SAR ADC 电路设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11):64-66,70.  
CHEN L, LI T W. Low power consumption SAR ADC circuit design for bioelectrical signal detection [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 64-66,70.
- [13] SANGEETHA R, VIDHYASHRI A, REENA M. An overview of dynamic CMOS comparators[C]. 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems(ICACCS), IEEE, 2019: 1001-1004.
- [14] 石蓝,居水荣,丁瑞雪,等. 一种逐次逼近寄存器型模数转换器[J]. 半导体技术, 2020, 45(12):916-923.  
SHI L, JU SH R, DING R X, et al. A successive approximation register analog-to-digital converter[J]. Semiconductor Technology, 2020, 45(12): 916-923.
- [15] JIAN M CH, ZHENG J W, KONG X J, et al. A 12-bit SAR ADC with a reversible  $V_{cm}$ -based capacitor switching scheme[J]. Microelectronics Journal, 2022, 129: 105588.
- [16] 杨臻. 10 位低功耗逐次逼近型模数转换器的设计[J]. 中国集成电路, 2021, 30(10):18-21,26.  
YANG ZH. Design of 10-bit low-power successive approximation analog-to-digital converter [J]. China Integrated Circuit, 2021,30(10): 18-21,26.

## 作者简介

华文浩,硕士研究生,主要研究方向为模拟集成电路设计的研究。

E-mail: 3045879342@qq.com

张加宏(通信作者),教授,博士,主要研究方向为微电子技术、集成电路设计的研究。

E-mail: jhzhang@nuist.edu.cn