

# 一种差分电荷振动信号调理电路设计与验证

张佳亮<sup>1,2</sup>, 卿宗胜<sup>1</sup>, 颜秀文<sup>1,2</sup>, 陆运章<sup>1</sup>, 周 蒙<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第四十八研究所, 湖南 长沙

<sup>2</sup>高性能智能传感器及检测系统湖南省重点实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年7月8日; 发布日期: 2024年7月16日

## 摘 要

航空发动机工作过程中存在较大振动, 对这些振动信号的准确采集是实现航空发动机状态监视、故障诊断及故障预测的基础。差动式压电式加速度传感器能将振动信号转换成微弱的电荷信号, 该信号需要准确可靠的采集。本文提出了一种差分电荷振动信号调理电路的设计方案, 并进行了仿真及测试验证, 结果表明该电路测量精度可达2%, 可实现航空发动机振动信号的准确采集。

## 关键词

差分电荷, 加速度传感器, 振动信号调理

# Design and Verification of a Differential Charge Vibration Signal Conditioning Circuit

Jiali Zhang<sup>1,2</sup>, Zongsheng Qing<sup>1</sup>, Xiuwen Yan<sup>1,2</sup>, Yunzhang Lu<sup>1</sup>, Meng Zhou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The 48<sup>th</sup> Research Institute of CETC, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Hunan Key Laboratory of High Performance Intelligent Sensor and Detection System, Changsha Hunan

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 16<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

There are large vibrations in the process of aero-engine operation. The accurate acquisition of these vibration signals is the basis of condition monitoring, fault diagnosis and fault prediction of aero-engine. The differential piezoelectric acceleration sensor can convert the vibration signal into a weak charge signal, which needs accurate and reliable acquisition. In this paper, a design scheme of differential charge vibration signal conditioning circuit is proposed, and the simulation and test results show that the measurement accuracy of the circuit can reach 2%, which can realize the accurate acquisition of aeroengine vibration signal.

文章引用: 张佳亮, 卿宗胜, 颜秀文, 陆运章, 周蒙. 一种差分电荷振动信号调理电路设计与验证[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(4): 638-645. DOI: 10.12677/jsta.2024.124069

## Keywords

### Differential Charge, Acceleration Sensor, Vibration Signal Conditioning

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

振动故障是航空发动机的主要故障模式之一，是航空发动机故障诊断亟需解决的重大问题。航空发动机在实际工作中振动环境复杂，只能通过机匣间接测量通过复杂机械声学传输路径传出的振动信号[1]。这些振动信号微弱，频带范围宽，频率分量复杂[2]，给采集处理带来了很大的困难。为准确获取发动机的振动信号，常使用压电式加速度传感器，该传感器可靠性高、安装方便，可覆盖发动机工作产生的振动信号频率范围。

近几年国内外相关的新产品不断出现，国内的像深圳微精艺电子有限公司 ICA10x 精密电荷放大器 and 远东测振(北京)系统工程技术有限公司 DHF 系列电荷放大器等均具有高精度，超低噪音的特点。国外的像瑞士奇石乐集团(Kistler) 5015A 实验室电荷放大器、美国恩德福克公司的 2721B 电荷放大器和日本株式会社小野测器电荷放大器 CH-1200A 等高性能电荷放大器。但这些电荷放大器大多价格昂贵，不利于推动压电加速度传感器的广泛应用。

本文在分析差动式压电加速度传感器工作原理及输出特性的基础上，提出了差分电荷振动信号调理电路的设计方案，并对该方案进行了硬件电路仿真分析及实物验证。分析和验证结果表明，该电路能准确采集差动式电荷型信号，可实现对发动机振动信号的采集。

## 2. 差动式压电加速度传感器工作原理

压电加速度传感器利用压电效应“在加速度变化时”将敏感材料表面的压力变化转换为输出电荷的变化[3]。差动式压电加速度传感器的内部结构剖面图如图 1 所示。其中，隔离基座提高了传感器抗应变变的能力，降低了其自重；采用单个质量块对加速度信号的差动测量，降低了传感器自重，提高了固有频率。预紧螺母通过隔离基座给压电元件施加预紧力，增强了传感器抗外部干扰的能力。当传感器受到向

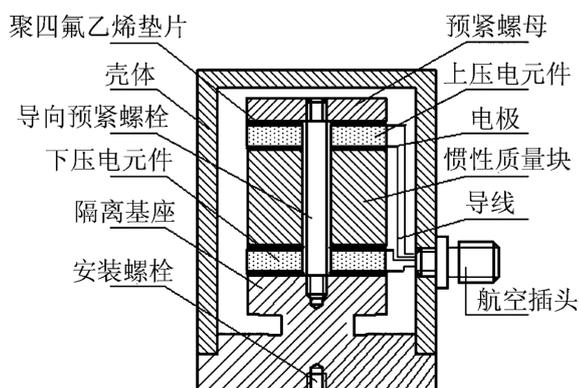


Figure 1. Structure diagram of differential piezoelectric acceleration sensor

图 1. 差动式压电加速度传感器结构示意图

下的加速度时, 惯性质量块将产生向上的惯性力, 这时上压电元件受压, 由于预紧力的原因, 下压电元件相当于受拉, 结果在两个压电元件的表面上产生正负变化的电荷; 反之, 当传感器受到向上的加速度时, 惯性质量块将产生向下的惯性力, 由于预紧力的原因, 这时上压电元件相当于受拉, 下压电元件受压, 结果在两个压电元件的表面上产生负正变化的电荷。将上下压电元件输出的两组信号通过导线引出, 就可以实现对被测振动加速度的差动式测量。

差动式压电加速度传感器的两个压电单元在同一个方向受力时, 表面产生正负变化反向的电荷[4], 将两组压电元件输出的电荷信号引入差动式测量电路, 就可以实现对被测振动加速度的测量, 航空发动机中常见的差动式压电加速度传感器的灵敏度范围为(10~50) pC/g, 发动机振动的采集范围为(0~500) g, 频率的采集范围为(2~10 k) Hz, 测量精度一般要求在 3% 以上。

### 3. 差分电荷信号调理电路设计

由于差动式压电加速度传感器输出的是微弱的电荷信号, 常规采集电路无法抑制背景噪声, 信号测量偏差大, 因此需根据信号特点, 设计差分电荷信号调理电路, 才能准确测量出被测振动加速度。差分电荷信号调理电路主要由电荷放大单元、低通滤波器、高通滤波器、运算放大单元和 A/D 采集电路等组成, 如图 2 所示[5]。调理电路首先通过电荷放大电路将电荷信号转换为电压信号, 再通过滤波器将发动机频谱范围以外的信号滤除, 运算放大电路将信号放大后通过高速 A/D 进行采集, 为配合系统多任务的运行, 将振动数据存储在 FIFO 存储器中供系统软件调用, 处理后输出振动信号的加速度、速度或位移等信息。

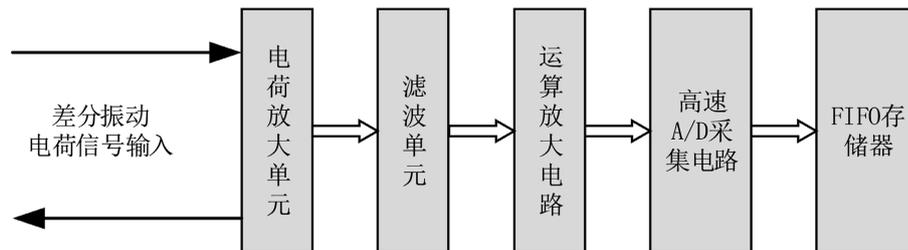


Figure 2. Differential charge signal acquisition principle block diagram  
图 2. 差分电荷信号采集原理框图

#### 3.1. 电荷放大单元

电荷放大器在测量系统中最明显的优点是电缆分布电容的变化不会影响测量结果。传统的电荷放大器一般采用单端放大, 然后经过滤波处理的测量方法, 这种测量方法容易受到共模信号的干扰, 且为满足测量频率范围和精度的要求, 所选择的反馈电阻较大, 使得电荷放大器的温漂和偏移电压较大, 影响整个放大器的测量精度。本文采用差分高精度低温漂低偏移电荷放大器, 可以避免由于共模信号干扰、以及温漂和偏移电压较大等诸多因素带来的影响, 提高测量精度[6]。

压电式传感器与电荷放大器联接的实际等效电路如图 3 所示, 其中:  $C_f$  为电荷放大器的反馈电容;  $C_a$  为压电传感器的电容;  $C_c$  为连接电缆的电容;  $C_i$  为放大器的输入电容;  $R_a$  为压电式传感器的绝缘漏电阻;  $R_i$  为运算放大器的输入阻抗;  $R_f$  为并联在反馈电容两端的漏电阻;  $K$  为运算放大器的开环增益;  $Q$  为压电式传感器的输出电荷量;

其中反馈电容  $C_f$  折合到放大器的输入端的有效电容  $C'_f$  为:

$$C'_f = (1+K)C_f \quad (1)$$

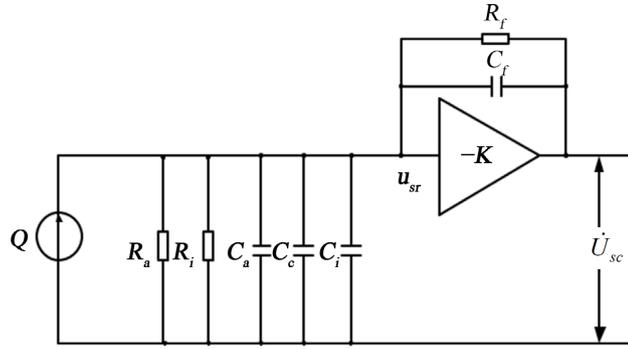


Figure 3. Charge amplifier equivalent circuit

图 3. 电荷放大器等效电路

反馈电阻  $R_f$  等效到放大器的输入端的有效电阻  $R'_f$  为:

$$R'_f = \frac{R_f}{1+K} \quad (2)$$

考虑到反馈电容  $C_f$  的泄放和加入直流负反馈用以稳定原算放大器直流工作点减小零漂的需要, 在  $C_f$  的两端并联上反馈电阻  $R_f$ 。设压电传感器自身的供电角频率为  $\omega$ , 由图 3 可以看出, 压电式传感器的压电晶片产生的电荷不仅对反馈电容  $C_f$  充电, 同时也对  $C_a$ 、 $C_c$  和  $C_i$  充电, 因此实际的电荷放大器的输出  $\dot{U}_{sc}$  可由下式表示:

$$\dot{U}_{sc} = -\frac{j\omega KQ}{\left[\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'_f}\right] + j\omega[C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f]} \quad (3)$$

由于压电式传感器的绝缘电阻  $R_a$  和运算放大器的输入阻抗  $R_i$  均在  $T\Omega$  级以上, 为此我们可以将(3)式简化为:

$$\dot{U}_{sc} = -\frac{j\omega KQ}{\left(\frac{1}{R'_f}\right) + j\omega[C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f]} \quad (4)$$

选用的运算放大器的开环增益  $K \gg 1$ , 一般  $K$  为  $6^{10}$  以上, 故有:

$$C_a + C_c + C_i \ll (1+K)C_f \quad (5)$$

此时  $C_a$ 、 $C_c$  和  $C_i$  均可以忽略不计, 放大器的输出电压可以表示为:

$$\dot{U}_{sc} = -\frac{j\omega KQ}{\left(\frac{1}{R'_f}\right) + j\omega(1+K)C_f} = -\frac{j\omega KQ}{\left[\frac{(1+K)}{R_f}\right] + j\omega(1+K)C_f} \quad (6)$$

由式(6)可以看出电荷放大器的输出电压可由下式表示:

$$\dot{U}_{sc} = -\frac{j\omega KQ}{(1+K)\left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_f\right)} \approx -\frac{Q}{C_f} \quad (7)$$

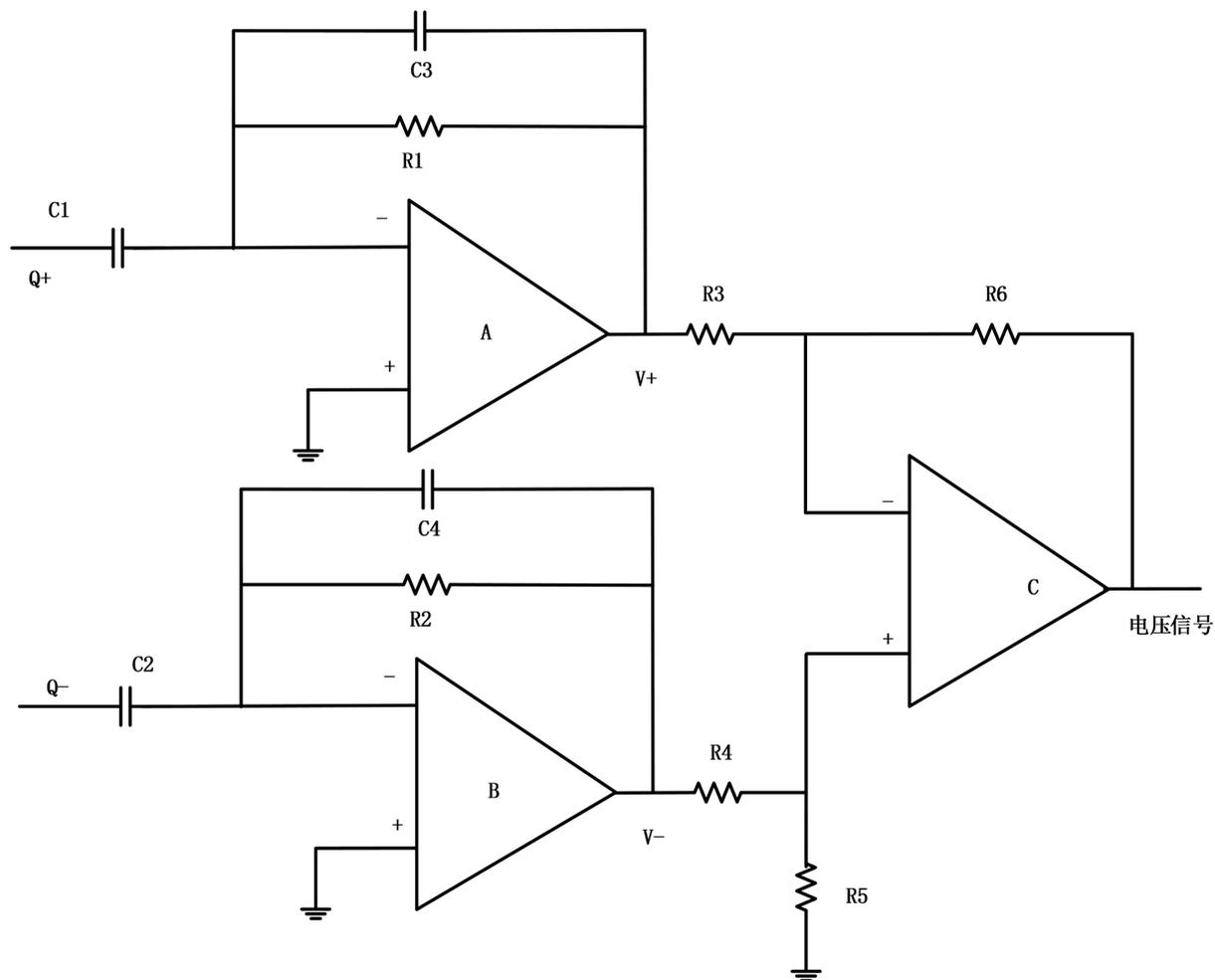
式中, 负号表示放大器的输出信号与输入信号相反, 很容易可以看出电荷变换级的输出电压仅与传感器的产生的电荷量及电荷放大器的反馈电容  $C_f$  有关, 电缆电容等其它因素的影响可以忽略不计[7]。电荷放大器设计作为前置变换电路, 固有频率可达 100 kHz 以上, 设计下限频率低于  $10^{-3}$  Hz, 足以覆盖被测信号的频率范围, 可测量准静态信号[8]。

本设计差动式压电加速度传感器的输出分别为电荷信号正( $Q_+$ )和电荷信号负( $Q_-$ ),  $Q_+$ 和  $Q_-$ 接入到电

荷放大器的正负端如图 4 所示，基于上述分析  $Q_+$  与  $V_+$  的关系近似为

$$V_+ = -\frac{Q_+}{C3} \quad (8)$$

输出电压  $V_+$  与电荷信号正  $Q_+$  成正比，同理，输出电压  $V_-$  与电荷信号负  $Q_-$  成正比，电容  $C3$  和  $C4$  决定放大倍数，本设计中选用精度为 0.5%，2.2 nF 的陶瓷电容。放大器  $C$ 、 $R3$ 、 $R4$ 、 $R5$  和  $R6$  组成的差分比例放大电路，本设计中比例系数为 1。电荷放大单元消除了电荷信号的共模干扰，提高了电路的输入阻抗。



**Figure 4.** Differential charge amplifier  
**图 4.** 差分电荷放大器

### 3.2. 后级电路

#### 1) 滤波电路

航空发动机振动状态的输出有效频率范围一般为 2~10,000 Hz，本设计采样频率为 40 kHz，设计的滤波电路如下：

a) 低通滤波器通过两个二阶低通滤波电路级联成四阶低通滤波器，选用 AD822 双通道运放，两个低通滤波电路的截止频率  $F_{c1}$  为 30 kHz；

b) 高通滤波器通过两个二阶高通滤波电路级联成四阶高通滤波器，选用 AD822 双通道运放，两个高通滤波电路的截止频率  $F_{c2}$  为 0.3 Hz，主要滤除直流分量；

2) 运算放大电路

振动信号为交流信号，调理电路没有对信号叠加直流偏置，因此，运算放大电路采用  $\pm 15$  V 双电源供电。考虑电荷放大单元、振动传感器灵敏度以及 A/D 转换芯片的电压采集范围等因素，放大电路设计为反向比例放大电路，放大比例系数为 4，可控制 A/D 转换芯片采集到的振动信号电压值在  $\pm 10$  V 内，电阻均采用 0.1% 高精度电阻，提高运算放大电路的精度。

3) 采集与存储

A/D 转换芯片可采集 6 路振动信号输入，通过 16 位并行数据线将数据提供给处理器。由于处理器须同时处理多项任务，为配合系统使用，单路振动数据设置深度为 4 K 的 FIFO 存储器用于缓存 100 ms 的振动数据。处理器内部通过总线读取 FIFO 中数据供系统软件调用处理，系统软件对数据的调用及处理不在本文详细描述。

### 4. 仿真实证

本文主要对电荷放大单元进行仿真实证，如图 5 所示，用 V1、C12 组成的电压源电路等效差分电荷源的正端，V2、C13 组成的电压源电路等效差分电荷源的负端，两个电荷源产生差分电荷信号。R5、C6、R6 与 R1、R2、R3、R4 组成 T 型网络，可补偿电荷放大单元的温度漂移和电压偏差。

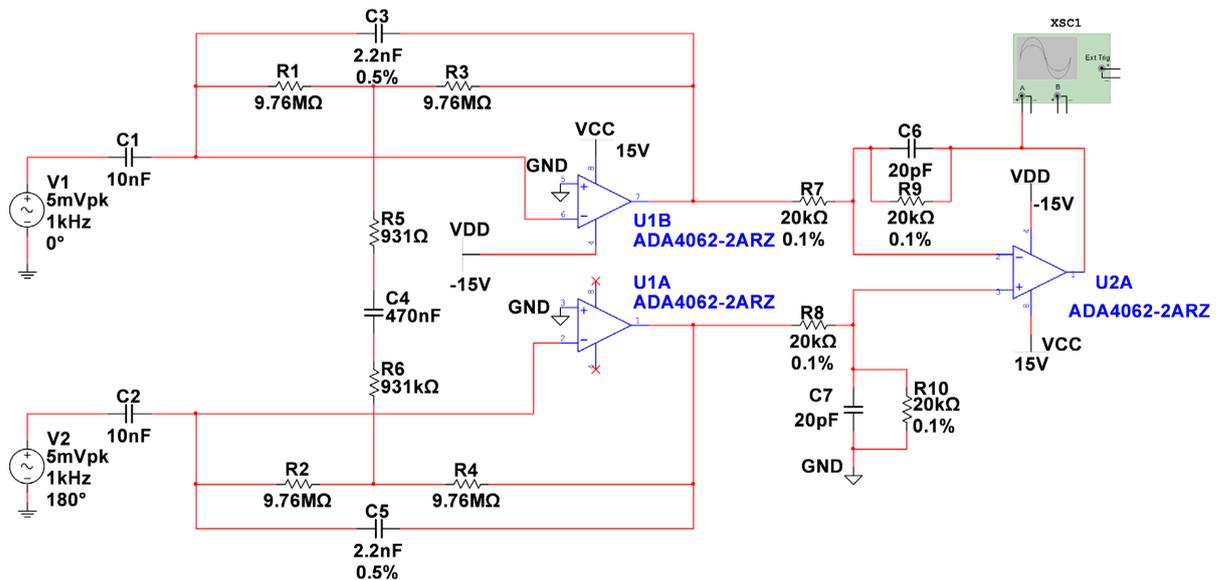


Figure 5. Schematic diagram simulation of charge amplification unit

图 5. 电荷放大单元仿真原理图

测试时，首先设置 V1 峰值电压 250 mV，频率 1 kHz，相位为 0°，C1 取 10 nF，则此时传感器输出的电荷量为 5000 pC，取传感器的灵敏度为 10 pC/g，即相当于输出发动机最大振动值 500 g，此时电荷放大单元的输出仿真结果输出电压最大值为 2.23 V，与理论值  $5000 \text{ pC} / 2.2 \text{ nF} = 2.27 \text{ V}$  一致，电荷放大单元对差分输入电荷信号进行了准确放大。

设置电荷源的频率范围、振动幅值为边界值和中间值进行测试，仿真结果见表 1。

仿真结果表明，振动幅值(0~500) g，频率范围为(2~10 k) Hz 的电荷信号测量精度在 2% 以内，满足振

动信号的测量精度要求。可知，本文设计电荷放大单元准确有效的将差分振动电荷信号转换为对应的电压信号，实现差动式压电加速度传感器信号的采集功能。

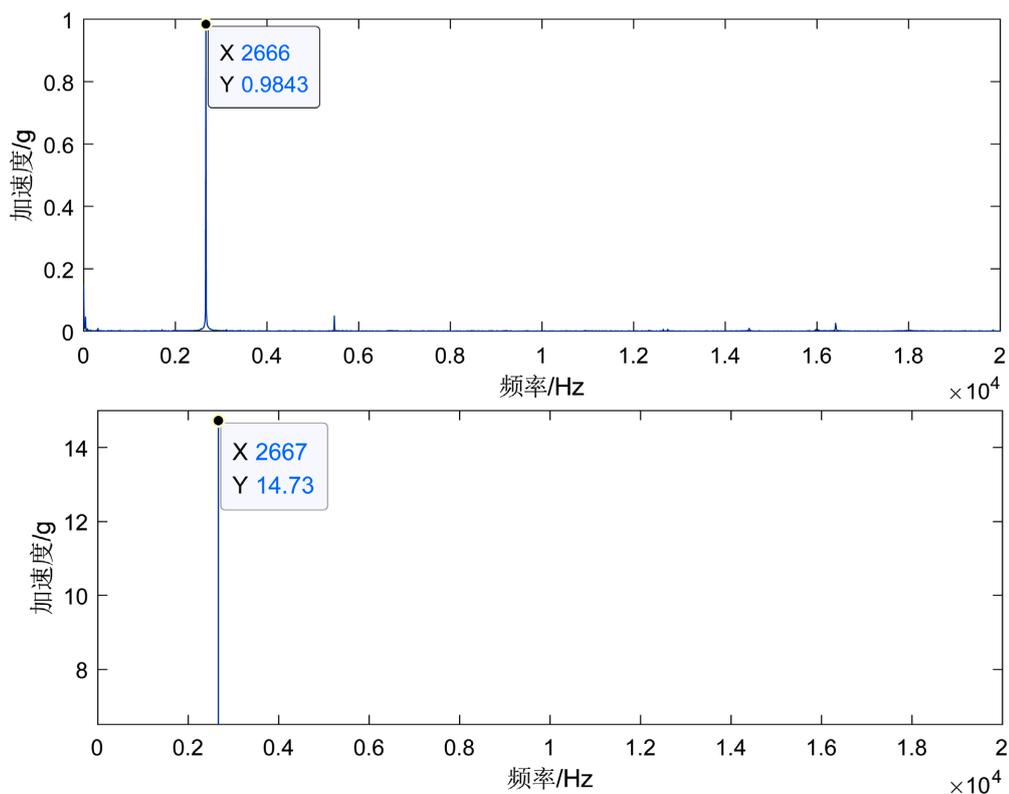
**Table 1.** Simulation result

**表 1.** 仿真结果

激励信号	调理电路响应	相对误差
1 g, 2 Hz	0.985 g, 2 Hz	1.5%
100 g, 2 Hz	98.9 g, 2 Hz	1.1%
500 g, 2 Hz	494.3 g, 2 Hz	1.14%
1 g, 1 kHz	0.989 g, 1 kHz	1.1%
100 g, 1 kHz	99.8 g, 1 kHz	0.2%
500 g, 1 kHz	491.9 g, 1 kHz	1.62%
1 g, 10 kHz	0.987 g, 1 kHz	1.3%
100 g, 10 kHz	99.1 g, 1 kHz	0.9%
500 g, 10 kHz	490.6 g, 1 kHz	1.88%

## 5. 实物测试验证

根据上述设计，研制出调理电路，并搭建了试验环境进行验证，用加速度模拟器 4830B 模拟差分电荷信号，分别输入 1 g 2667 Hz、15 g 2667 Hz 和 50 g 400 Hz 信号对应的电荷量，读取到的振动数据的信号频谱分析如图 6 所示。



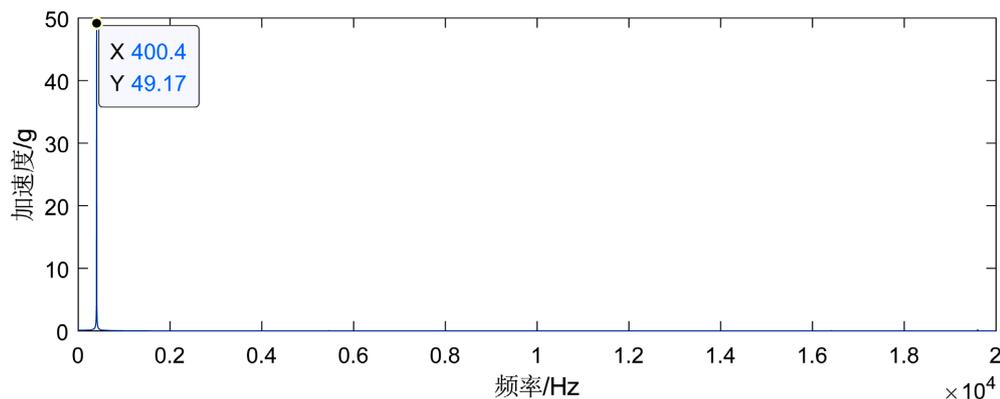


Figure 6. Vibration data FFT result

图 6. 振动数据 FFT 结果

经过调理电路后的数据为 0.9843 g 2666 Hz、14.73 g 2667 Hz 和 49.17 g 400.4 Hz，与输入信号保持一致，测量精度达到 2%。进一步验证了差分电荷信号调理电路的设计合理性与可行性，可以用于实际的航空发动机振动信号测量。

## 6. 结论

本文在差动式压电加速度传感器输入信号的基础上，设计了一种差分电荷振动信号调理电路，经过仿真验证及测试验证，振动数据采集准确可靠。仿真和实验结果证明：差分电荷振动信号调理电路在航空发动机工作的频率范围及振动量级范围内的测量精度为 2%，优于 3%，达到预期效果，可满足航空发动机振动传感器的使用要求。本设计可为航空发动机振动信号研究、发动机状态监控、故障诊断，以及飞机维修等提供可靠的数据保障。

## 参考文献

- [1] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 战立光, 冯悦. 航空发动机预测与健康管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 31.
- [2] 杨旭, 张瑞. 航空发动机健康管理振动监测技术研究[J]. 价值工程, 2019, 38(23): 215-217.
- [3] 傅成城, 高成, 黄姣英, 等. 压电加速度传感器有限元仿真方法研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(1): 5-9+15.
- [4] 刘俊, 秦岚, 刘京诚, 等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. 光学精密工程, 2007(6): 903-909.
- [5] 曹恒, 秦颖硕, 王春, 等. 两线制 IEPE 传感器前置信号调理电路[J]. 仪表技术与传感器, 2012(11): 160-162.
- [6] 张炳毅, 郑爱建, 付强. 压电振动传感器用差分电荷放大器的校准方法研究[J]. 电子工业专用设备, 2020, 49(6): 46-51.
- [7] 李照华. 压电加速度传感器前置变换电路的研究及设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [8] 邓维礼, 秦岚, 刘俊, 许斌. 基于 Multisim 的准静态电荷放大器仿真分析[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(4): 24-26+35.