Method for Compensating Unevenness of Vibration Sensor in Band*

GUO Tao[1*], *ZHANG Limei*[1], *FENG Yuzhi*[2], *CHANG Yanxiang*[3]

(1.*State Key Laboratory Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan Shanxi* 030051, *China*;
2.*Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing* 100076, *China*;
3.*A Representative Office of the Military Representative Office of the Army Equipment Department in Beijing, Beijing* 100076, *China*)

Abstract: With the development of aerospace technology in China, the measurement accuracy demand of vibration sensors in spacecraft structures is increasingly high, and the in-band unevenness is an important factor that affects the measurement accuracy. In view of the fact that the in-band unevenness of 1221L-1K0 model acceleration sensor does not achieve less than 1 dB at 4 kHz, a method of compensating in-band unevenness using first-order active low-pass filter circuit is proposed in this paper. The key parameters of four 1221L-1K0 acceleration sensors compensation circuit in 4 kHz are listed. Based on Multisim software, the compensated circuits are simulated and analyzed. And the frequency sweep of the compensated vibration sensor is calibrated and adjusted by the B & K 3629 sensor calibration system. The experimental results show that the compensated in-band unevenness of the sensor is less than 1 dB.

Key words: vibration sensor; 1221L-1K0; in-band unevenness; low-pass filtering
EEACC: 7230; 1280 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.017

一种振动传感器带内不平度补偿方法*

郭 涛[1*], 张丽梅[1], 冯玉志[2], 畅彦祥[3]

(1.中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
3.陆军装备部驻北京军事代表局某代表室, 北京 100076)

摘 要: 随着我国航天技术的发展, 航天器结构上使用的高精度振动传感器需求越来越迫切, 而带内不平度是影响测量精度的重要因素, 本文针对 1221L-1K0 型号加速度传感器在 4 kHz 的带内不平度无法满足小于 1 dB 的使用要求, 设计了一种使用一阶有源低通滤波电路进行带内不平度补偿的方法。列举了 4 只 1221L-1K0 加速度传感器在 4 kHz 内补偿电路的关键参数设计, 基于 Multisim 软件对补偿后的电路进行仿真分析, 并通过 B&K 3629 传感器校准系统对补偿调理后的振动传感器扫频标定, 测试结果表明, 补偿后的传感器带内不平度均小于 1 dB。

关键词: 振动传感器; 1221L-1K0; 带内不平度; 低通滤波
中图分类号: TP212.9; TN721.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0086-05

航天器在飞行过程中伴随着剧烈的振动, 而剧烈的振动会破坏航天器的运行状态甚至缩短设备的使用寿命。实时监测航天器的振动响应能够相对准确反映航天器的运行状态。因此, 采集必要的结构振动信息成为航天器飞行过程健康监测中的重要环节[1-4]。

作为航天器状态和性能监测的重要工具, 振动传感器的性能指标直接影响着航天器高精度的发展。振动传感器技术指标包括灵敏度、线性度、迟滞、重复性、频响范围、带内不平度等, 每一个指标的好坏都直接影响振动传感器的整体测量精度。传感器性能的优化可以通过传感器调理电路设计、传感器敏感芯体结构优化等方法来实现[5-8]。本文针对 1221L-1K0 型号加速度传感器在 4 kHz 附近频率“上翘”, 带内不平度不满足小于 1 dB 使用要求的问题, 提出一种带内不平度补偿方法, 补偿后的振动传感器经试验测试标定, 带内不平度小于 1 dB。

1 系统硬件组成

振动传感器系统由 1221L-1K0 加速度传感器、

项目来源: 2018 年度国防科技重点实验室基金项目(61424140101)
收稿日期: 2020-05-29 **修改日期**: 2020-06-28

放大电路、滤波电路、带内不平度补偿电路、输出饱和控制电路、电源电路以及输入输出接口电路构成,其系统框图如图 1 所示。

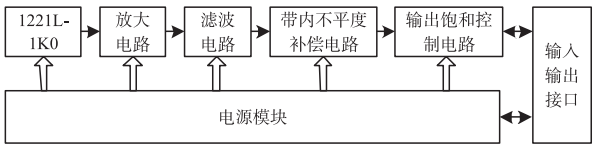


图 1　振动传感器系统结构

1221L-1K0 加速度传感器将感受到的加速度信号转化为电压信号,经过放大、滤波后再经过带内不平度补偿电路,将 4 kHz 附近上翘部分补偿平坦,使最终输出的信号在 4 kHz 通带内不平度小于 1 dB。当传感器输出异常时,输出饱和控制电路能保证其最终输出的电压在技术指标规定的范围内。

1.1　1221L-1K0 加速度传感器

1221L-1K0 加速度传感器是 SILICON DESIGN 公司研制生产的电容式加速度传感器,该传感器具有抗冲击能力高、噪声低、稳定性好的特点,量程为 ±1 000 g_n,灵敏度为 2 mV/g_n,抗冲击能力大于 2 万 g_n,具有从直流开始的极低频率响应,常被用于航空航天领域的振动测量[9]。

1221L-1K0 加速度传感器芯片的频率响应范围为 0~4 kHz 内小于 3 dB,随机选取其中 4 只传感器,如图 2 所示,编号分别为 506933、506935、506937 和 506917,依次记为样本(a)~(d),其频率响应曲线分别如图 3(a)~3(d)所示,部分频率点的带内不平度见表 1(参考频率 100 Hz),可见传感器在 4 kHz 频率点带内不平度在 1 dB~3 dB 范围内。为了满足航天某型号 4 kHz 内小于 1 dB 的使用需求,对其进行补偿设计。根据芯片资料[10],其外围电路如图 4 所示。

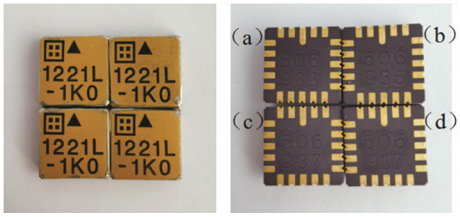


图 2　1221L-1K0 加速度传感器实物图

表 1　补偿前传感器带内不平度　　单位:dB

编号	频率/Hz						
	20	100	740	2 000	2 800	3 350	4 000
506933	0.00	0.00	0.01	0.30	0.47	1.04	1.18
506935	0.00	0.00	0.00	0.19	0.59	1.00	1.50
506937	0.00	0.00	0.02	0.25	0.66	1.02	1.31
506917	0.00	0.00	−0.02	0.10	0.42	0.74	1.12

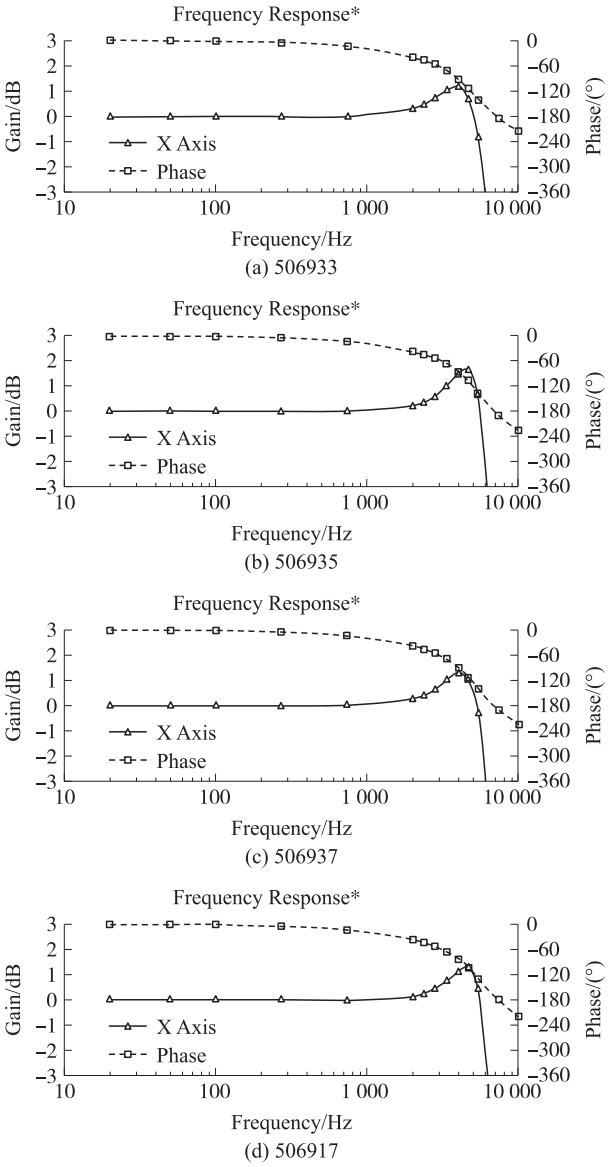


图 3　1221L-1K0 加速度传感器频响曲线

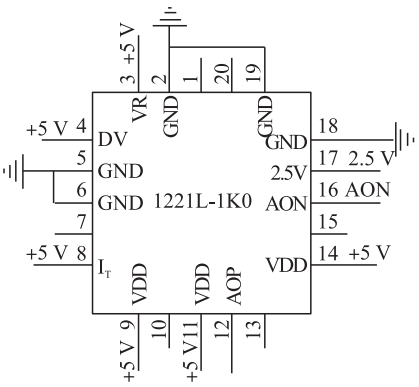


图 4　1221L-1K0 加速度传感器外围电路

1.2　信号调理模块部分电路设计

信号调理模块对 1221L-1K0 加速度传感器输出的信号进行处理,主要包括放大电路、滤波电路、输出饱和控制、电源电路等模块。

1.2.1 放大电路设计

1221L-1K0 加速度传感器为差分输出,所以使用 AD623 仪表放大器对信号进行放大,同时在仪表放大器的 V_{REF} 端提供 2.5 V 基准电压,将输出信号调整为 2.5 V 基准,满量程输出范围为 0~5 V 的信号。AD623 的放大倍数计算公式见式(1),1221L-1K0 本身的输出范围是 0.5 V~4.5 V,计算得放大倍数为 1.25 倍,放大电阻 R_G 选用 400 kΩ 精度为 1%的金属膜精密电阻。放大电路如图 5 所示[11]。

$$G=1+\frac{100\ \text{k}\Omega}{R_G} \tag{1}$$

式中:G 为放大倍数,R_G 是用来调节放大倍数的放大电阻。

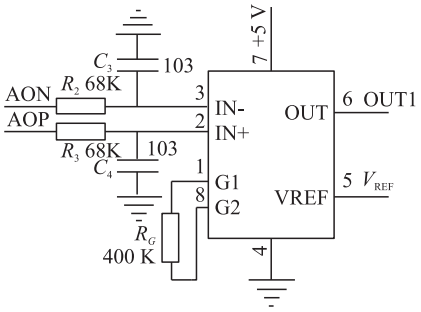


图 5 放大电路

1.2.2 滤波电路设计

滤波电路采取低通滤波对信号进行 4 kHz 低通滤波处理,滤除高频干扰成分。滤波芯片采用 MAXIM 公司的 MAX291,它为巴特沃斯八阶低通滤波器,该类型滤波器增益稳定,适用于整个通频带内增益恒定的场合[12],符合设计要求。图 6 为低通滤波电路,通过调节外部电容 C_{osc} 来调整其截止频率,计算公式为:

$$f_{clock}(\text{kHz})=\frac{10^5}{3C_{osc}(\text{pF})} \tag{2}$$

$$f_c=\frac{f_{clock}}{K} \tag{3}$$

式中:f_{clock} 为时钟频率,f_c 为截止频率,K 为时钟频率和截止频率之比,且 $K=100$。经过计算与实验,4 kHz 截止频率所需 C_{osc} 容值约为 80 pF,设计中使用 C_{O1} 和 C_{O2} 并联得到 80 pF。

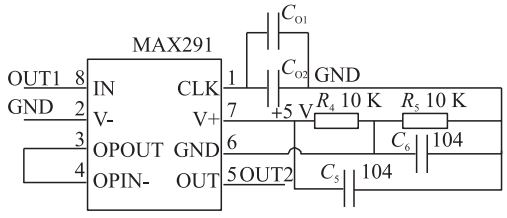


图 6 低通滤波电路

1.2.3 输出饱和控制电路

输出端使用 MM3Z5V6 稳压二极管进行钳位保护,当输出电压在大于 5.6 V 时,稳压二极管将输出电压稳到 5.6 V,使其不会对后续电路因电压过大而损坏。输出饱和控制电路如图 7 所示。

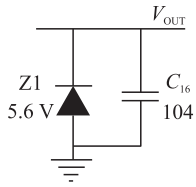


图 7 输出饱和控制电路

1.2.4 电源电路

系统所使用外部供电为+15 V 电压,用来给运放供电,AD623、MAX291 和 1221L-1K0 芯片均为 5 V 供电,故选用 LT1761-5.0 转为+5 V 给芯片供电,同时使用 LM136-2.5V 将电压转换为 2.5 V 给 1221L-1K0 和 AD623 提供基准电压。查询主要器件耗电电流,设计中使用 2 个 LT1761-5.0 芯片并联可满足系统供电。供电模块前后级均使用贴片陶瓷电容进行滤波,使电源抗噪声能力增加,系统寿命更持久。

1.3 带内不平度补偿电路设计

经过研究 1221L-1K0 加速度传感器的频率响应曲线,它在 1 kHz~4 kHz 呈缓慢上翘趋势,其上翘速度与一阶低通滤波电路的衰减速度接近,故选用一阶低通滤波器对其进行补偿,一阶无源 RC 滤波电路简单,但带负载能力差[13],故本设计采用一阶低通有源滤波电路,电路设计如图 8 所示,为了使其同时具有放大功能,把电压跟随器设计为同相比例运算电路。

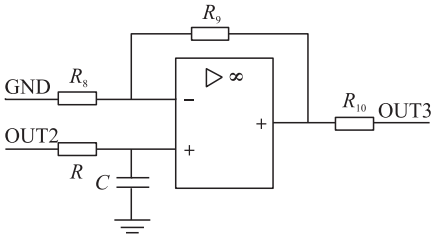


图 8 一阶低通有源滤波电路

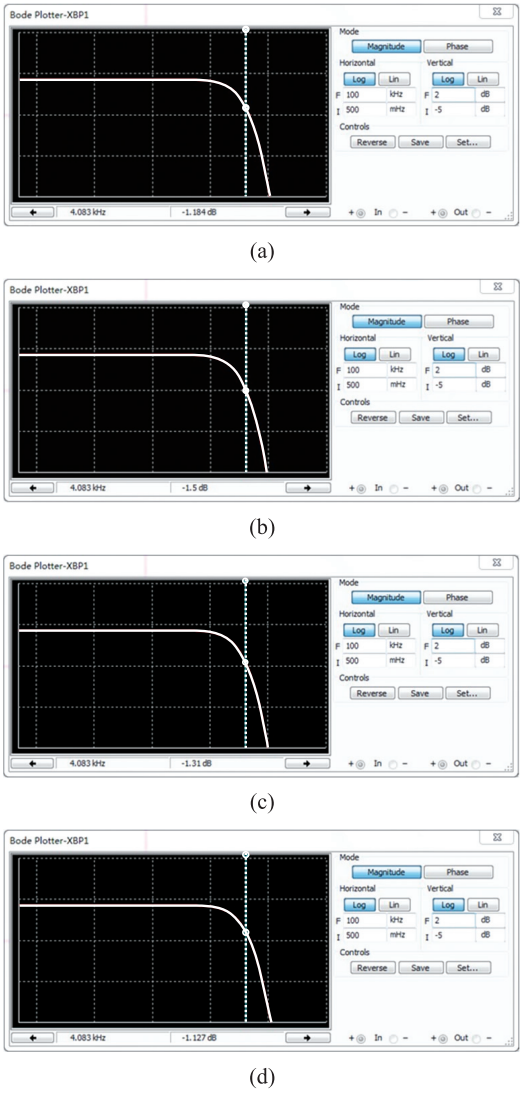
以上电路的传递函数为:

$$A_u(s)=\left(1+\frac{R_9}{R_8}\right)\frac{1}{1+sCR}=\frac{A_{up}}{1+s/\omega_0} \tag{4}$$

式中:$A_{up}=1+\frac{R_9}{R_8}$ 为同相比例运算电路的电压增益,$\omega_0=\frac{1}{RC}$ 为特征角频率,上限截止频率为:

$$f_P=\frac{1}{2\pi RC} \tag{5}$$

根据 1221L-1K0 传感器的补偿需求,截止频率在 4 kHz 下降 1 dB~3 dB,首先选取 C 的值,C 值不宜过大,一般≤1 μF,本设计中,选取 C 值为 0.01 μF,经过计算和仿真,要使 4 kHz 附近衰减 1.18 dB、1.50 dB、1.31 dB 和 1.12 dB,R 值的选取分别为 2.2 kΩ、2.52 kΩ、2.33 kΩ 和 2.14 kΩ,Multisim 软件中的仿真结果如图 9(a)~9(d)。本设计中因前端已有仪表放大电路,故该补偿部分不需要再次放大,设计中选用 R_9 为 1 kΩ,R_8 为 510 kΩ。

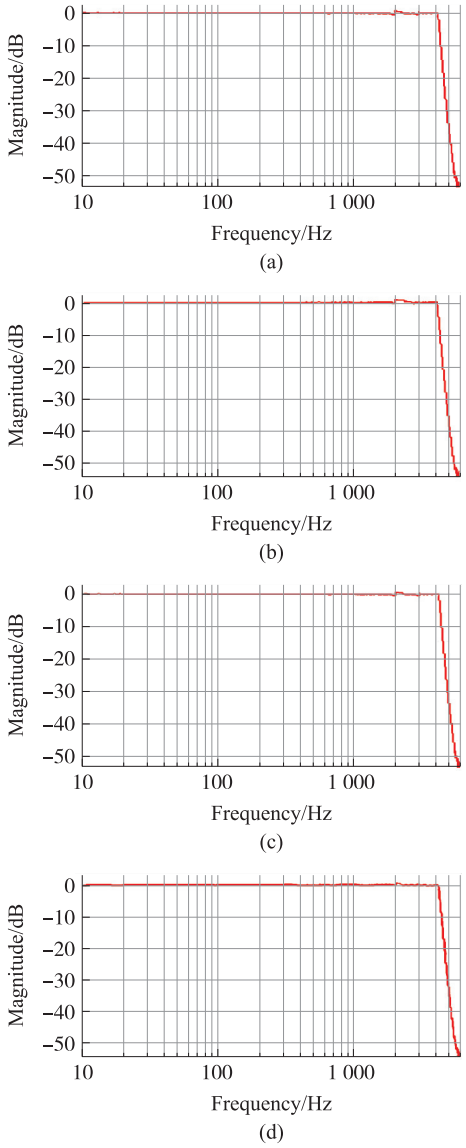


(a)　(b)　(c)　(d)

图 9　低通滤波电路仿真图

2　实验

使用 B&K 3629 传感器校准系统对四个调理补偿后的传感器进行 10 Hz~6 kHz 扫频标定,得到的扫频曲线分别如图 10(a)~10(d),选取部分频率点的带内不平度如表 2 所示,可见,补偿调理后的传感器在 4 kHz 内不平度小于 1 dB(参考频率 100 Hz),满足设计要求。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 10　补偿后的扫频曲线

表 2　补偿后传感器带内不平度　　单位:dB

编号	频率/Hz						
	20	100	740	2 000	2 800	3 350	4 000
506933	0.00	0.00	0.01	0.69	0.17	0.04	0.20
506935	0.00	0.00	0.00	0.62	0.06	0.18	0.05
506937	0.00	0.00	0.02	0.67	0.11	0.11	0.16
506917	0.01	0.00	-0.03	0.51	0.04	0.10	0.19

3　结语

本文以 1221L-1K0 加速度传感器为例,详细说明了它在 4 kHz 附近的带内不平度补偿方法。通过 Multisim 对补偿方法进行仿真验证,补偿设计只需根据 4 kHz 点的衰减情况进行分析计算,选取适当的阻容值,并根据传感器实际的“上翘”速度决定其补偿电路选用的阶数。对其中 4 只传感器进行试验测试,测试结果表明此方法有助于带内不平度补偿

的设计。同时,该方法同样适用于类似加速度传感器的带内不平度补偿。

参考文献:

[1] 王晓初,郭帅良,刘玉县,等. 机械振动应力下 IMU 内 MEMS 传感器的抗振研究[J]. 传感器与微系统,2020,39(6):33-36.

[2] 石建国. 在线振动监测系统在立磨减速机上的应用[J]. 新世纪水泥导报,2020,26(3):82-85.

[3] 张永芳,王霞,邢志国,等. 面向机械装备健康监测的振动传感器研究现状[J/OL]. 材料导报:1-17[2020-06-13]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20200519.1528.012.html.

[4] 孙玉香. 用于空间机械臂的力/力矩传感器关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.

[5] 刘健,马虎山. 基于多传感器数据融合的电机振动信号分析[J]. 电子世界,2019(24):103.

[6] 陈高华,闫献国,郭宏,等. 压电陶瓷振动传感器的迟滞非线性误差补偿研究[J]. 振动与冲击,2018,37(23):278-285.

[7] 翟宇鹏,张志杰,张浩. 振动测试用传感器低频特性分析与补偿(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2019,10(2):176-181.

[8] 崔妮,关咏梅,郭涛. 应用于航天器微振动信号检测的传感器[J]. 自动化与仪表,2015,30(9):14-17.

[9] 陈帅,郗小鹏,张勇. 电压型 BUCK 变换器环路补偿器设计及仿真[J]. 机电技术,2019(5):57-60.

[10] 王雷,庞观士,陈志列. 一种振动检测及抗振动应力设计系统及其方法[J]. 机电工程技术,2017,46(10):20-22.

[11] Silicon Design Corporation. 1221L-XXX datasheet. [2017-12-01]. https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/234451/ETC2/1221L-002.html.

[12] 张成研,孙梅. 振动传感器信号放大电路设计[J]. 农机使用与维修,2017(10):21-22.

[13] 郝建亮,宋文爱,杨录. 机械设备振动状态无线监测与故障分析系统[J]. 仪表技术与传感器,2013(10):50-52.



郭 涛(1971—),男,中北大学,教授,硕士生导师,通讯作者。主要研究方向为惯性测量系统、微器件的设计与制造,guotao6@nuc.edu.cn;



张丽梅(1991—),女,中北大学硕士研究生,主要研究方向为电路与系统,462005191@qq.com。