

微小容差检测系统中基准源的设计与应用

陈禹竺,汪龙祺,于涛,隋延林,陈泳锟,刘鑫,薛科
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130000)

摘要: 为进一步提高 fF 级微小容差数据采集系统精度,满足 $10^{-4} \sim 1$ Hz 测量频带内 μV 级电路噪声测试需求,采用平均值电路形式的 AD780 基准源电路,替代原有采集系统中模数转换芯片 AD7712 的内部电压基准。仿真分析 AD780 基准源的频域噪声满足指标要求,实测对比 AD780 与 AD7712 内部电压基准的时域、频域噪声,以及 2 种基准源下系统的采集精度与频域本底噪声。实测结果表明:在 AD780 提供外部电压基准的条件下,指标频点处噪声分辨率为 $0.5 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,对比内部基准条件下提高了 3.34 倍。该设计进一步提高了系统检测精度,为分析测试微小容差检测电路的低频噪声特性及提高电容传感分辨率提供了必要条件。

关键词: 微小容差检测; 频域噪声; 高精度数据采集; 基准源

中图分类号: TN98 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2023)05-0025-05

Design and Application of Reference Source in Tiny Capacitance Difference Detecting System

CHEN Yu-zhu, WANG Long-qi, YU Tao, SUI Yan-lin, CHEN Yong-kun, LIU Xin, XUE Ke
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract: In order to further improve the accuracy of fF level capacitance difference detection data acquisition system and meet the demand of μV level circuit noise in $10^{-4} \sim 1$ Hz measurement frequency band, the AD780 reference source circuit in the form of average circuit was adopted to replace the internal voltage reference of AD7712 in the original acquisition system. The frequency domain noise of AD780 reference source met the requirements of the index by simulation analysis, and the time and frequency domain noise of AD780 and AD7712 internal voltage reference were measured and compared, as well as the acquisition accuracy and frequency domain background noise of the system under the two reference sources. The measured results show that the noise resolution at the index frequency point is $0.5 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ under the condition AD780 provides external voltage reference, which is 3.34 times higher than that under the condition of internal reference. The design further improves the performance index of the system and provides a necessary condition for analyzing and testing the low-frequency noise characteristics of the capacitance difference detection circuit and improving the resolution of capacitance sensing.

Keywords: tiny capacitance difference detection; frequency domain noise; high precision data acquisition; reference source

0 引言

高精度数据采集系统在各领域内应用广泛,它将决定系统所能达到的最终检测指标。用于微小容差检测的传感电路需要在测量频带 $10^{-4} \sim 1$ Hz 内,对 fF 级容差进行精确测量,并在时频域上具备 μV 级别的电路噪声的测试能力,这也就对其数据采集系统提出了极高的要求。AD7779、AD7712 等 $\Sigma-\Delta$ 架构的模数转换芯片在高精度采集系统中应用广泛,其中 AD7712 是 24 位的模数转换芯片,因其具有较好的动态响应与较高的采集精度从而得到大量应用。以

AD7712 为例,结合指标要求,在 AD7712 ± 2.5 V 的测量范围内,需要对应电容传感共计 ± 120 pF 容差变化量程,电路整体增益需小于 $20 \mu\text{V}/\text{fF}$ 。而由于 AD7712 其自身内部电压基准在时域上存在 $30 \mu\text{V}$ 的电压波动,因此难以满足微小容差检测系统中对 fF 级容差变化的读出,以及传感电路在 $10^{-4} \sim 1$ Hz 频带内 μV 级本底噪声的检测需求。本文设计一种高稳定的外部基准源用以替代 AD7712 内部基准,以提高系统数据采集精度,满足系统要求,为分析测试微小容差检测传感电路的低频噪声特性及提高电容传感分辨率提供必要条件^[1]。

1 基准源的分类与选型应用

根据基准源的实现原理,电压基准源共分 4 种,分

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFC2200604)

收稿日期: 2022-10-24

别为齐纳二极管基准源、带隙基准源、掩埋式基准源、和 XFET 基准源^[2-3]。

齐纳二极管基准源由稳压二极管和普通二极管组成,工作时稳压管反向击穿,处于雪崩状态,此时电压具有正温度系数与正向导通的二极管的负温度系数相抵消,即可得到与温度无关的稳定电压。但由于此种设计易受到外部环境的影响,因此出现了一种掩埋式齐纳基准源。将稳压管的 PN 结通过工艺处理掩埋于硅半导体的下方,降低了此类基准源的温度系数,使其具有高稳定、噪声低等优点^[4-6]。但其供电电压较高,工作电流大,自身功耗较大,且长期漂移指标一般,在一定程度上限制了其应用与发展。

带隙基准源是一种研究较深入且应用广泛的基准源。主要设计思路是利用一个正温度系数的电压与一个负温度系数电压进行匹配,最后得到一个不受温度变换影响的电压基准进行输出。由于带隙基准源对标准的 CMOS 工艺兼容性极高,因此随着相关工艺的发展,带隙基准源被更加广泛且深入的研究,并被大量应用在高精度的模数转换、数模转换及线性稳压器系统中^[7-9]。

XFET 基准源是利用结型场效应管的夹断电压的性质,利用其不同的夹断电压,差分得到一个稳定的基准电压。并通过电阻的正温度系数补偿结型场效应管的栅源电压,来得到一个具有零温度系数的参考电压。

结合以上分析,齐纳基准源优点在于其较好的初始精度、温度系数及噪声,但其长期稳定性不佳,且供电电压高。带隙基准源的种类较多,其性能指标也较为宽泛。总体来看是一种性能优良,价格适中的基准源^[10-11]。XFET 基准源在各方面性能上都处于良好水平,但其对工艺要求较高,价格昂贵,在齐纳基准源与带隙基准源性能指标覆盖性较广的情况下,XFET 并不具备明显优势。

对于电压基准源的性能评价一般有温度系数、基准源噪声、长期漂移、热迟滞、导通建立时间、输入电压调整率、负载调整率等 7 个方面^[4]。在本系统中基准源的温度稳定性和基准源噪声对性能指标影响最关键,即电压基准随着温度变化改变的程度,和基准源电压输出噪声。但一般情况下手册指标给出的是 0.1~10 Hz 的窄带噪声,在微小电容检测敏感的低频频带,手册中并没有给出基准源在此频带下的详细数据。

2 基准源低频噪声仿真

AD7712 是一款 $\Sigma-\Delta$ 架构的 24 位高分辨率模数转换芯片,其电压基准的稳定性决定了其采集结果的准确性。基准源波动将导致模数转换结果产生不希望的误差,因此提高用于 AD7712 的基准源的稳定性,是提高系统采集精度的核心。

AD780 是一款高精密的带隙基准电压源,有着良好的温度系数和较低的输出噪声。AD780 共分为 AD780AN/AD780AR、AD780CR、AD780BN/AD780BR 3 个质量等级。各质量等级主要性能指标如表 1 所示,其中 AD780BN/AD780BR 有着 0.4% 的输出准确度和 3 ppm/°C 温度系数最优性能指标(1 ppm = 10^{-6}),更有利于采集系统数据的准确读出,和降低系统长时间工作产生的温度漂移。

表 1 AD780 各质量等级主要参数对比

型号	输出准确度 /V	温度稳定性 /(ppm · °C ⁻¹)	输出噪声 /μV
AD780AN/AD780AR	2.495~2.505	7	4
AD780CR	2.498 5~2.501 5	7	4
AD780BN/AD780BR	2.499~2.501	3	4

由于相关基准源的技术手册通常只在 0.1~10 Hz 内给出基准源的噪声指标,而微小电容检测的传感电路在低测量频带的特殊性,在其敏感的 10^{-4} ~1 Hz 频带内,技术手册并没有相关数据。对 AD780 基准源芯片进行仿真,以获取其在 10^{-4} ~1 Hz 频带内的频域噪声指标,同时也为整体设计缩减设计时间和成本。选取 AD780BR 搭建噪声仿真电路,并选用平均值电路^[12-13]进一步提高基准源输出的温度稳定性,降低基准源的热噪声。根据图 1 仿真结果,经计算 AD780BR 在 10^{-4} ~1 Hz 低频频带内的均方根噪声由 1.18 μV 降低为 590 nV。

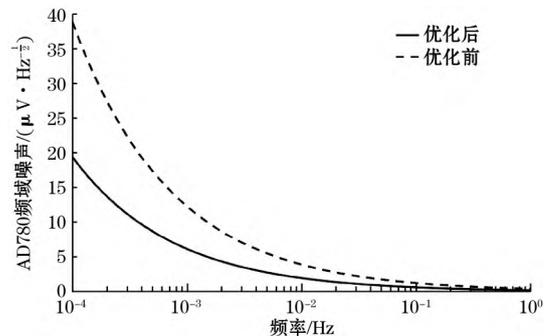


图 1 AD780 频域噪声仿真结果

采用平均值电路的 AD780 基准源在 10^{-4} ~1 Hz 频带内均方根噪声为 590 nV,满足微小电容检测传感电路在此频带下对电路 μV 级频域噪声的测量要求,

同时其温漂仅为 3 ppm/°C ,更有利于系统在温度变化时 ,基准源输出电压的稳定。因此选取 AD780 作为微小容差检测的基准源 ,并以此进行实际电路的验证与评价。

3 实验与分析

为了验证仿真结果 根据图 2 在实验室搭建测试环境。由于实验室环境电磁环境不稳定 ,同时因空气对流带来的温差变化较大 ,实验过程中采用了专用铝制屏蔽盒对实验电路进行电磁屏蔽。为了排除实验过程中环境温度对实验的影响 ,对实验过程中所用到的设备进行充分预热 ,并充分避免了空气对流 ,并在输出处理过程中 ,选用测试时间居中 ,较为平缓处进行数据判读^[12]。

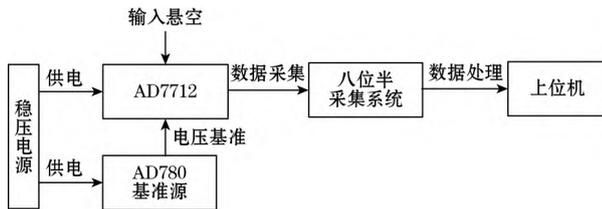


图 2 实验测试框图

3.1 基准源对比测试

首先对 AD7712 原有的基准源的输出电压进行了测试 实验供电电源选用 KEYSIGHT E3612A 提供电源电压 输出结果由 KEITHLEY 2002 八位半电压表进行采集 采集速率为 10 Hz ,数据采集结果如图 3、图 4 所示。AD7712 自身基准源的电压基准时域波动范围在 30 μV 左右 频域电压谱密度显示在容差检测传感电路指标要求的 10 mHz 频点处的频域噪声为 14 μV/Hz^{1/2}。

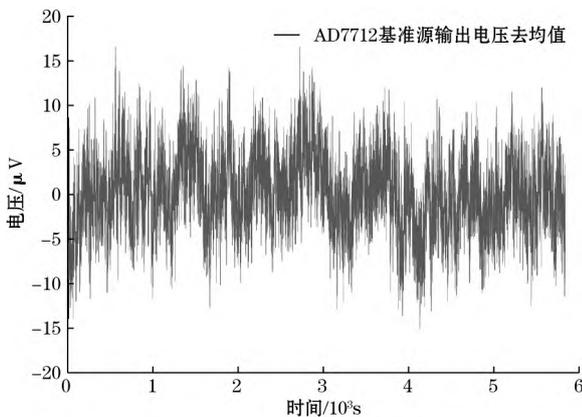


图 3 AD7712 内部基准源输出时域噪声

在相同实验环境下 ,对 AD780 外部基准源输出的 +2.5 V 电压基准进行了 12 h 测试 ,测试结果如图 5、图 6 所示。实验结果表明 AD780 在输出 +2.5 V 直流电压的情况下 ,12 h 内的电压波动极值约为 6 μV ,时域稳定性为 2.4 ppm。经过频域处理分析 ,在指标要

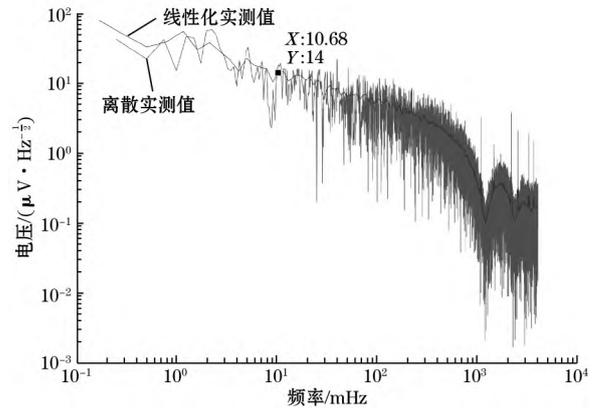


图 4 AD7712 内部基准源输出频域噪声

求 10 mHz 频点处 ,AD780 的频域噪声为 1.96 μV/Hz^{1/2}。

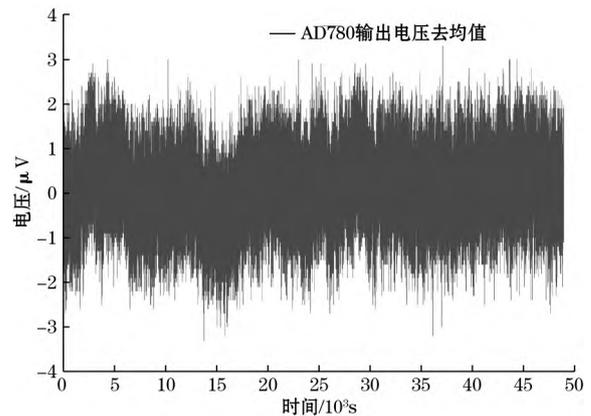


图 5 AD780 外部基准源输出电压时域噪声

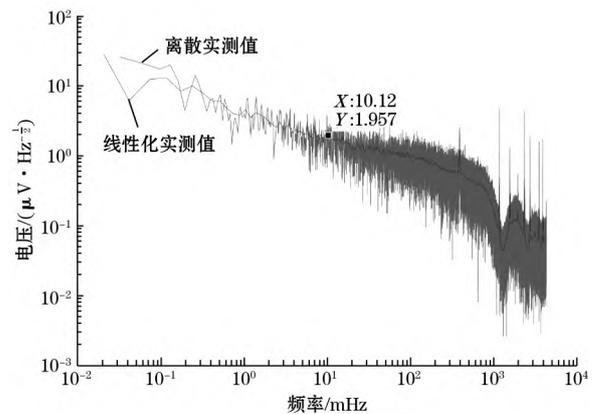


图 6 AD780 外部基准源输出电压频域噪声

实验结果表明在相同的实验条件下 ,AD780 基准源相较于 AD7712 自身的基准源 ,其时域噪声波动降低为原有噪声的 1/5。在容差检测传感电路指标要求的 10 mHz 频点 ,频域噪声降低了 7.14 倍 ,且在 12 h 内 ,电压输出较稳定。

3.2 AD7712 底噪对比测试

在 AD7712 原有基准源的情况下 ,将 AD7712 输入端悬空 ,测量 AD7712 高精度检测系统的电路底噪

如图 7、图 8 所示,在时域上,电压波动极值为 $20 \mu\text{V}$,频域上在 10 mHz 频点处的噪声为 $1.67 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。显然在此条件下无法满足微小容差检测电路在 $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$ 频带内对于 μV 级电路底噪的测试要求。

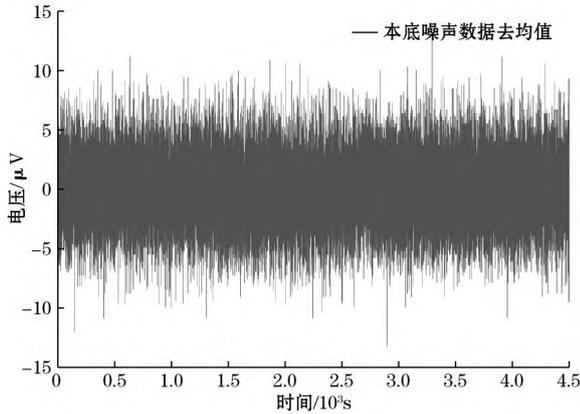


图 7 AD7712 自身基准源本底时域噪声

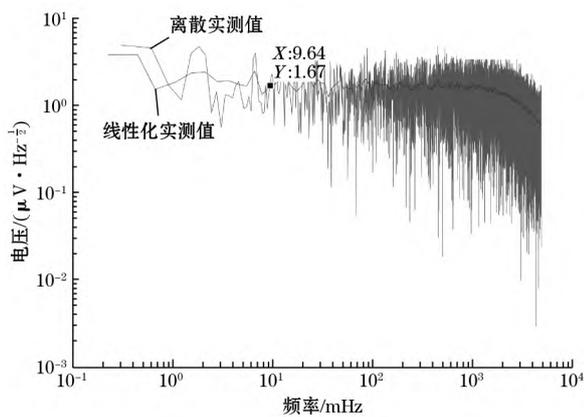


图 8 AD7712 自身基准源本底频域噪声

将 AD780 基准源替代原有 AD7712 的自身基准源,在屏蔽、滤波等实验条件相同的情况下将 AD7712 输入端悬空,进行 AD7712 本底噪声的测量,测量结果如图 9、图 10 所示。在 AD780 提供外部 $+2.5 \text{ V}$ 电压基准时,AD7712 采集的时域本底噪声波动约为 $6 \mu\text{V}$,在指标要求的 10 mHz 频点处,频域噪声为 $0.5 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,满足 $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$ 频带内对于 μV 级电路底噪的测试要求。

综上,当 AD7712 使用自身基准源进行数据采集时,因其自身基准源带来的波动影响,使得其自身时域本底噪声波动较大,从而导致其频域噪声较大,无法满足对 μV 级电路底噪的测试。通过使用平均值电路优化的 AD780 基准源电路,进一步提升了基准源的稳定性。通过对 AD7712 不同基准源条件下的对比测试,优化后的采集系统的时域噪声波动极值约为 $6 \mu\text{V}$,在指标要求的 10 MHz 频点处,由 $1.67 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 降低至 $0.5 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,满足频域上 μV 级电路底噪的测试

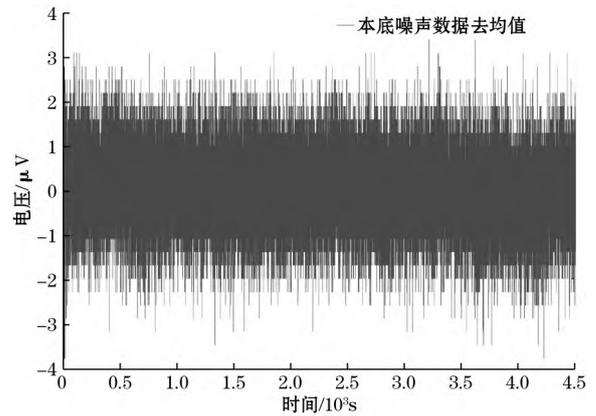


图 9 AD7712 自身基准源本底频域噪声

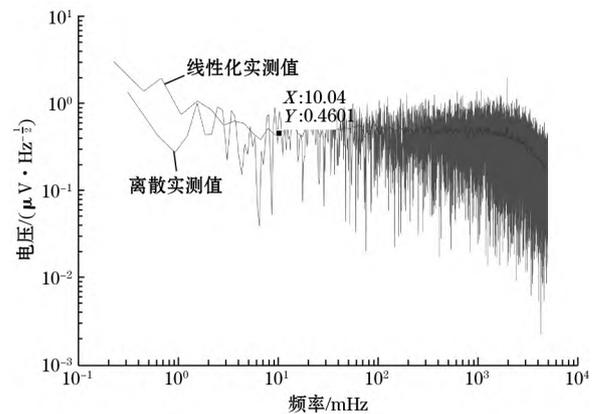


图 10 AD7712 自身基准源本底频域噪声

要求。

4 结束语

通过对 AD780 基准源 $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$ 低频带内的噪声进行了仿真分析,验证了其在低频范围内对 μV 级电压检测的能力,并采用平均值电路的形式进一步降低了低频带内噪声。选用 AD780 作为微小容差检测传感电路数据采集系统的外部基准源,通过实验对比分析,AD780 输出的基准电压在时域下达电压波动极值为 $6 \mu\text{V}$,输出 2.5 V 电压的条件下,稳定性为 2.4 ppm 。在微小容差检测指标要求的 10 mHz 频点处,时域噪声为 $1.96 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。对比 AD7712 原有基准源 $30 \mu\text{V}$ 的时域波动, $14 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 的频域噪声,在时域上提高 5 倍,频域上提高 7.14 倍。通过 AD780 提供外部基准, 10 mHz 频点处噪声分辨率为 $0.5 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,相较于内部基准 $30 \mu\text{V}$ 时域波动条件下 $1.67 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 的噪声分辨率,提高了 3.34 倍。该设计进一步提高了 fF 级微小容差检测数据采集系统精度,实现了频域下 μV 级电路噪声测试能力,为分析测试容差传感电路的低频噪声特性,及提高电容传感分辨率提供了必要条件。

参考文献:

- [1] LI J L, ZHANG T. Study of acceleration measurement in gravitational wave detection [J]. *Classical and Quantum Gravity* 2022, 39(5) : 055007.
- [2] 赵晨曦. 低功耗带隙基准电压源的研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学 2022.
- [3] 崔佳旭, 李志远, 孙艳梅. 一种高 PSRR 带隙基准电压源的设计 [J/OL]. *黑龙江大学自然科学学报*: 1-7 [2022-11-18]. DOI: 10.13482/j.issn1001-7011.2022.04.01.
- [4] 王树君, 谢江. 测量仪表中电压基准的选择 [J]. *衡器*, 2009, 38(9) : 1-4.
- [5] BUCUR V, BANARIE G, MARINCA S, et al. A zener-based voltage reference design compensated using a ΔV_{BE} stack [C]//2018 25th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and System" (MIXDES). IEEE, 2018: 116-120.
- [6] 仲召扬, 李严, 王伟光, 等. 低功耗高精度基准源研究综述 [J]. *微电子学与计算机* 2022, 39(2) : 1-8.
- [7] 崔建国, 宁永香. 基准电压源电路的设计与研究 [J]. *电子世界* 2018(23) : 145-147.
- [8] 程勇钢. 多功能校准源总体设计及精度提升策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2021.
- [9] LI X J, HUANG Q F. Design of a new voltage reference source [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1827(1) : 012024.
- [10] 樊旭尧. 低温漂高电源抑制比带隙基准电压源的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学 2019.
- [11] 李飞, 陈娜. 一种基于 JFET 差分输入对的电压基准源设计 [J]. *微电子学与计算机* 2020, 37(4) : 80-85.
- [12] 才滢, 张雨. 利用平均值电路提高直流电压基准器件的稳定度 [J]. *计量技术* 2008(9) : 22-25.
- [13] 谢洁意, 叶凌云, 魏彬. 利用平均值电路提高直流电压基准源的温度特性 [J]. *传感器与微系统* 2012, 31(8) : 66-68.
- [14] RATHORE T S. Digital-to-analog converters with arbitrary radix and a single reference source [J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing* 2020, 39(8) : 3759-3769.
- 作者简介: 陈禹竺 (1996—) 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为空间引力波探测惯性传感器。
E-mail: Chenyz_mail@163.com
- 通信作者: 汪龙祺 (1978—) 研究员, 博士, 研究生导师, 主要研究方向为空天遥感, 光电探测及微弱信号检测。
E-mail: fygoal@aliyun.com
- (上接第24页)
- [2] BAE K M, LEE J M, KWON K B, et al. High-shock silicon accelerometer with suspended piezoresistive sensing bridges [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(4) : 1449-1454.
- [3] HU X D, MACKOWIAK P, BAUSCHER M, et al. Design and application of a high-G piezoresistive acceleration sensor for high-impact application [J]. *Micromachines*, 2018, 9(6) : 266.
- [4] KAZAMA A, AONO T, OKADA R. High shock-resistant design for wafer-level-packaged three-axis accelerometer with ring-shaped beam [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(2) : 355-364.
- [5] 揣荣岩, 刘升阳, 张晓民, 等. 高 g 值加速度敏感芯片性能优化的结构分析 [J]. *仪表技术与传感器*, 2018(6) : 11-14; 48.
- [6] 许高斌, 花翔, 杜林云, 等. 新型高 g 值压阻式加速度计设计 [J]. *仪表技术与传感器* 2020(10) : 42-46; 83.
- [7] JIA C, MAO Q, LUO G X, et al. Novel high-performance piezoresistive shock accelerometer for ultra-high- g measurement utilizing self-support sensing beams [J]. *Review of Scientific Instruments* 2020, 91(8) : 085001.
- [8] 张娟娟, 石云波, 赵锐, 等. 基于多目标优化的高量程加速度传感器小型化设计 [J]. *传感技术学报*, 2021, 34(9) : 1152-1157.
- [9] 张华. MEMS 高 g 值加速度传感器的结构分析与电路设计 [D]. 北京: 北京理工大学 2017.
- [10] 王鹏, 赵瑞杰, 王楠, 等. 正交十角环式切削力传感器设计与仿真分析 [J]. *传感技术学报* 2020, 33(8) : 1197-1203.
- [11] WANG P, ZHAO Y L, ZHAO Y, et al. An improved structural design for accelerometers based on slotted eight-beam structure [J]. *Sensor Review* 2018, 38(1) : 1-8.
- [12] 杨雨君, 王鹏, 陈曼龙, 等. 高 g 值压阻式加速度传感器仿真设计 [J]. *传感器与微系统* 2022, 41(6) : 78-81; 85.
- [13] WANG P, WANG N, ZHANG C M, et al. Research on micro-piezoresistive accelerometer with slotted beams [J]. *Sensors and Materials* 2020, 32(12) : 4067-4076.
- [14] 尚思瑶, 刘岩, 莫舒婷. 压阻式加速度传感器封装应力隔离结构分析 [J]. *导航与控制* 2019, 18(4) : 59-64.
- 作者简介: 王鹏 (1987—) 博士, 讲师, 主要研究方向为传感器设计与制造。E-mail: wangpeng1851@163.com
- 通信作者: 杨雨君 (1995—) 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 传感器设计。E-mail: 1551107173@qq.com