

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104547

面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统*

李昊业^{1,2} 张 雯^{1,2} 宋言明^{1,2} 董明利^{1,2} 祝连庆^{1,2}(1. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学
光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100016)

摘 要:针对航天器微小碰撞产生的冲击能量检测问题,设计了一种面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统,并对冲击能量进行检测。建立飞秒光纤光栅应变传感及边沿滤波解调模型。使用有限元分析软件对微小碰撞产生的冲击能量分布情况进行理论模拟。搭建冲击检测系统,对飞秒光纤光栅进行冲击能量感知特性测试,利用时域包络提取法分析能量传递特性。实验数据表明,质量为10、20、40、60、80 g的小球分别在同一位置下落时,光栅系统检测到的碰撞信号呈线性增长趋势,经边沿滤波算法反演冲击电压最高可达30.8 mV;同一质量小球在不同位置下落时,光栅系统检测到的碰撞信号呈线性下降趋势,检测到的冲击电压可低至16.5 mV。该系统可实现对微小碰撞产生的冲击能量的检测,对航天器微小碰撞检测问题有一定的参考意义。

关键词:飞秒光纤光栅;微小碰撞;冲击检测;边沿滤波;包络提取

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Impact detection system of femtosecond fiber bragg grating for spacecraft micro-collisions

Li Haoye^{1,2} Zhang Wen^{1,2} Song Yanming^{1,2} Dong Mingli^{1,2} Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to detect the impact energy generated by spacecraft micro-impact, a femtosecond fiber grating impact detection system for spacecraft micro-impact was designed and the impact energy was detected. The strain sensing model and edge filtering demodulation model of femtosecond fiber grating are established. The finite element analysis software is used to simulate the impact energy distribution of micro-collisions. An impact detection system was built to test the impact energy sensing characteristics of femtosecond fiber grating, and the energy transfer characteristics were analyzed by using the time-domain envelope extraction method. Experimental results show that when the balls with the mass of 10, 20, 40, 60 and 80 g fall at the same position, the collision signals detected by the grating system show a linear increasing trend, the maximum impulse voltage retrieved by edge filtering algorithm is 30.8 mV. When the same mass ball falls at different positions, the collision signals detected by the grating system show a linear downward trend, the detected impulse voltage can be as low as 16.5 mV. The system can detect the impact energy generated by the micro-collision, which has a certain reference significance to the problem of spacecraft micro-collision detection.

Keywords: femtosecond fiber grating; micro-collision; impact detection; edge filter; envelope extraction

0 引言

随着人类航天活动不断增加,空间碎片对在轨航天器运行安全的威胁日渐凸显^[1]。相对于高强度冲击所造成的穿透损伤而言,微小冲击具有很大的潜在危害性,为能够及时发现和修复航天器遭受空间碎片微小碰撞造成的损伤,亟需开展碰撞冲击研究^[2]。目前,航天器在轨碰撞主要采用红外成像、电阻薄膜、超声探测^[3-5]等检测技术,探测精度高,且具有较高的成熟度。然而,航天器工作在太空环境,具有强磁强噪特性,且漂浮有带电粒子,对传统检测系统提出了较大挑战。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)是 20 世纪 70 年代发展起来的新型光学无源器件,因其具有响应速度快、抗电磁干扰强、灵敏度高等优点而被广泛地应用于航空航天领域^[6-9]。陆观等^[10]利用光纤光栅传感器受到低速冲击后光栅中心波长随应力变化这一特性对复合材料结构受到的低速冲击能量给出了判别。Lu 等^[11]利用 FBG 传感器的中心波长迁移由复合材料结构在低速冲击期间和之后的应变和残余的特性,提出了一种识别低速冲击能量特征的方法。周萌^[12]基于振动检测原理,设计了一种基于悬臂梁式结构的 FBG 低频振动传感器,通过实验测试得到悬臂梁式 FBG 振动传感器在 0.1~10 Hz 频率范围内具有良好的幅频响应。周建明等^[13]利用边缘滤波法对板材进行了冲击能大小的测量研究,利用峰值大小解调,拟合度达到 0.988,最高灵敏度为 0.744 76 mV/g。然而,利用光纤光栅传感器检测冲击,需要快速的解调方式,以上研究均基于紫外曝光刻写的光纤光栅传感器,需要纤芯掺铈来提高光纤光栅特性,铈是稀土元素,在太空强磁环境中会使光栅退化,导致传感器失效。飞秒激光具有超短的脉冲宽度和超高的瞬时功率,能够实现超高精度的微纳加工,轻松突破衍射极限,飞秒激光作用于光纤时,多光子效应引起的雪崩电离,使得光纤发生永久性的损伤,进而形成的光纤光栅不会退化^[14]。

基于上述问题,本文设计了一种面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统,针对飞秒光纤光栅动态传感系统展开碰撞信号的探测与解调研究,并针对此问题的理论、仿真、实验做了相关研究工作。

1 FBG 传感及解调原理

1.1 FBG 传感原理

FBG 是通过飞秒激光照射在光纤纤芯上,照射区域的折射率被周期性调制,进而形成的一种光纤传感结构。当宽带光源发出的连续宽带光通过光纤射入时,在光栅

处满足布拉格条件的光会被反射,而其余光则会继续透射过去,其基本原理如图 1 所示。

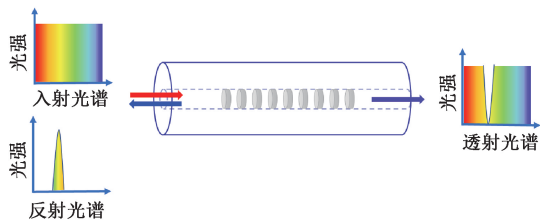


图 1 光纤布拉格光栅传感原理

Fig. 1 FBG sensing schematics

根据光纤耦合模理论,当一束入射光在 FBG 中传播时,会产生模式耦合,符合布拉格条件的光被反射,即:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式(1)为光纤布拉格光栅方程,其中 λ_B 为 FBG 中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。对式(1)求全微分可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2)$$

式(2)表明,光纤光栅周期或有效折射率会引起 FBG 中心波长的漂移。当外界环境中温度和应变改变时,FBG 中心波长将发生改变。

当外界温度不变时,因应变引起的光栅周期发生变化,变化量为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon\lambda_B \quad (3)$$

式中: ε 为 FBG 的轴向应变; $1 - P_e$ 为 FBG 的相对轴向应变灵敏度系数^[15]。

1.2 边沿滤波解调原理

碰撞过程中,会使被碰撞物体中产生应力波,进而产生微应变,微应变会引起 FBG 中心波长的变化,通过解调系统,实时捕获应变变化。FBG 作为传感元件,对应变的灵敏度高且响应速度快,能够准确且及时地捕获应变变化情况,而要保证检测系统的精确性和可靠性,高速、准确的信号解调系统尤为重要。针对现有光纤布拉格光栅解调系统存在响应速度慢的问题,本文截取光纤光栅线性敏感区域作为边沿滤波器,提出了基于边沿滤波的解调方法。采用光电探测实现光信号向电信号的转化,通过光功率的相对变化计算出中心波长的漂移^[16]。

采用边沿滤波法实现 FBG 波长解调原理如图 2 所示。虚线为边沿滤波器的传递函数曲线,由归一化光谱透射率曲线 $H(\lambda)$ 表示;实线为窄线宽 FBG 的功率谱密度 $R(\lambda)$,则通过边沿滤波器后的光功率信号 $I(\lambda)$ 为:

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda')H(\lambda')d\lambda \quad (4)$$

其中, $H(\lambda)$ 在某一特殊波长区间内近似线性变化,当这一波长区间范围远大于 $R(\lambda)$ 的谱线宽度时, $I(\lambda)$

也近似线性变化,则:

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda = H(\lambda) \cdot I_1(\lambda) \quad (5)$$

式中: $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda$ 为 FBG 的反射总功率,波长信息可以通过计算 $I(\lambda)/I_1(\lambda)$ 获得^[17]。

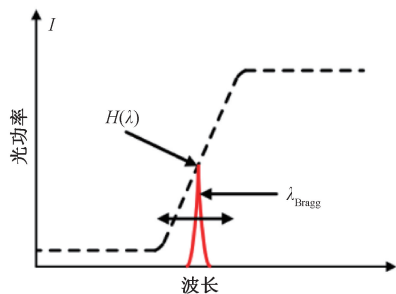


图2 边沿滤波原理

Fig. 2 Edge filtering principle

2 仿真分析

使用有限元仿真软件对小球撞击铝板后的能量分布情况进行分析。航天环境中,微小碰撞发生频繁,其产生的冲击信号频率约为 0.5 MHz^[2],仿真中使用中心频率为 0.5 MHz 的高斯窗函数作为激励源,垂直激励到 600 mm×600 mm×3 mm 的铝板中。为了保证仿真精度的前提下,提高运算效率,利用二维轴对称特性将铝板模型简化,观察信号在其切面的传播特性。选取距板中央 5、10、15、20、25 cm 处的 5 个位置,观察激励源对铝板作用产生的声波信号在板中的传播情况,如图 3 所示。

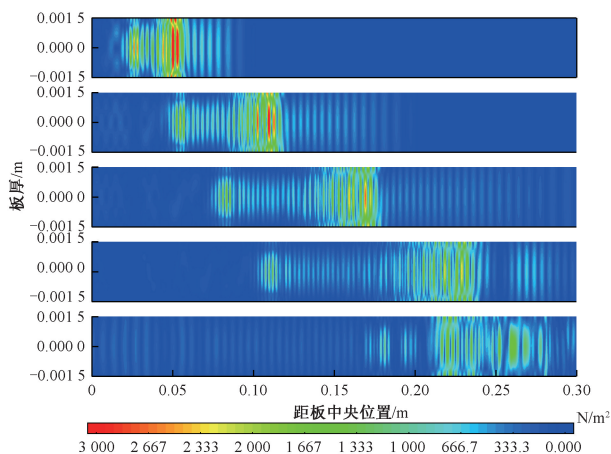


图3 板内声波信号传播云图

Fig. 3 In-plate acoustic signal propagation contour

由图 3 可知,激励源对铝板作用产生的声波信号依次传播至 5、10、15、20、25 cm 处时,铝板受到的能量逐步减小。为了进一步直观地分析每一个位置所受冲击能量

情况,利用声波对板内造成的微小位移量来表示当前位置受到的冲击能量大小。绘制了距声源 5、10、15、20、25 cm 的 5 个位置的板内位移变化情况,如图 4 所示。

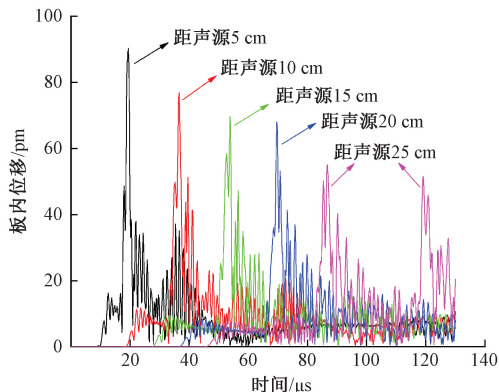


图4 各个位置的板内位移

Fig. 4 In-plate displacement at each position

由图 4 可知,监测点位移逐渐增大时,声波传递引起板内位移的变化量越来越少,所携带的能量也逐渐减小。特别地,在距激励源 25 cm 处,监测点先后出现两次峰值,这表明此处能量复杂,同时包含正向传播的声能量以及由板边缘反射回来的部分能量。图 5 所示为各个位置位移衰减图,声波引起的板内位移为 pm 量级。

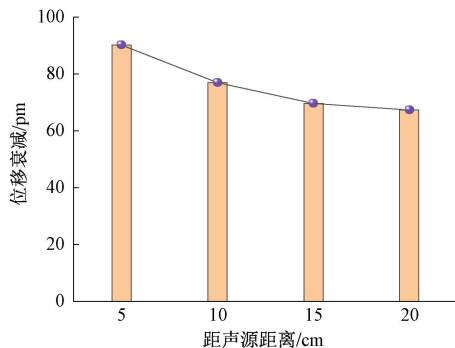


图5 各个位置位移衰减

Fig. 5 Displacement attenuation at each position

经以上仿真分析可知,距声源越远,声波信号能量越小,但因板边缘的反射情况,会对测试结果产生影响。因此,实验中,选取距声源 5、10、15、20 cm 作为测试点,利用飞秒光纤光栅传感器对碰撞引起的板内能量变化进行测量。

3 实验与分析

3.1 系统搭建

实验系统如图 6 所示,由飞秒光纤光栅传感器、可调谐激光光源(安捷伦 8164A 型)、数字示波器(泰克

MDO3054 型)、环行器、光电探测器组成。可调谐激光光源发射的光经环行器传至 FBG,当小球与铝板发生碰撞时,产生的声波信号传至 FBG,导致 FBG 中心波长发生变化,其中满足光栅方程的反射光再次经环行器后传输至光电探测器,经光电转换,由示波器显示光栅所感知到的电压信号。

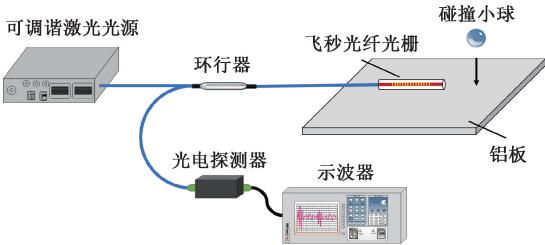


图 6 测试系统原理
Fig. 6 Test system schematic

3.2 光电转换设计

开始实验前,需要利用可调谐激光光源对光纤光栅进行标定实验。可调谐激光光源发出的光经环行器后抵达光纤光栅,满足光栅方程的反射光再次经环行器后传播至光功率计,得到 FBG 中心波长与光功率的关系,实现光功率与可调激光波长的变化分析。利用边沿滤波器,将传感光纤光栅特定波长范围内的线性反射光谱作为边沿滤波器,通过分析光功率的变化可计算出施加在光纤光栅上的应变量大小从而实现对波长的解调。图 7 所示为经过数据处理后得到的波长-功率曲线。

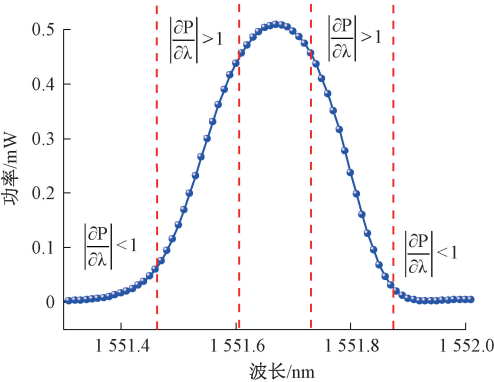


图 7 FBG 波长-功率曲线
Fig. 7 Wavelength-power curve of FBG

本文实验系统中,光电探测器的转换系数为 $\eta = P/I = 0.95$, 1 mW 功率对应 0.95 mA 电流。图 7 中, $\left|\frac{\partial P}{\partial \lambda}\right| < 1$ 的区域为光纤光栅传感器反射谱平缓区, $\left|\frac{\partial P}{\partial \lambda}\right| > 1$ 的区域为反射谱线性区域,由边沿滤波原理可知,需要选择处于线性上升区 1 551.49 ~1 551.61 nm 的

参数作为边沿滤波器。实验中,选取 1 551.53 nm、10 mW 作为可调谐激光光源的输出波长及功率,经标定后,传感器输出功率为 0.224 mW,对应电流为 0.24 mA,光电探测器电阻为 50 Ω ,示波器探测到的电压为 11.79 mV。

3.3 FBG 传感实验研究

基于上述理论及仿真分析,搭建碰撞冲击检测实验系统,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 室温环境中,将飞秒光纤光栅传感器粘贴至尺寸为 600 mm×600 mm×3 mm 的铝板中央,并在其轴向一侧 5、10、15、20 cm 处布置 4 点。文献[13]中,最小检测到的碰撞能量为 100 mJ,为了降低检测阈值,提高检测精度,本文使用质量为 10、20、40、60、80 g 的小球在距离 4 个点 5 cm 高的平台处自由下落,保持冲击能量在 50 mJ 的范围内。研究每个质量的小球对板产生冲击的能量分布情况并记录实验数据。

实验数据的后处理方式采取时域包络提取法,将冲击信号以包络提取的形式进行去噪,经时域包络提取法处理前后的波形如图 8 所示。

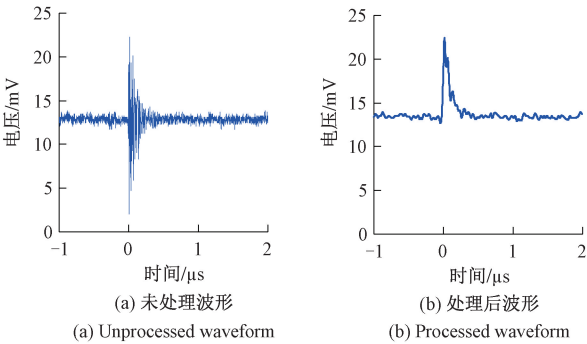


图 8 时域包络提取法处理波形
Fig. 8 Waveforms processed by time domain envelope extraction

将所有波形数据进行时域包络提取法处理,得到的峰值电压数据如表 1 所示。

表 1 碰撞实验数据
Table 1 Collision test data

序号	小球质量/g	距光栅不同位置处峰值电压/mV			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	10	20.7	20.3	19.6	16.5
2	20	24.6	22.6	22.5	18.9
3	40	27.2	24.7	23.1	20.6
4	60	28.1	27.5	26.1	23.5
5	80	30.8	29.2	28.4	27.1

由表 1 得到 10、20、40、60、80 g 的小球分别从距光栅 5、10、15、20 cm 处下落时的冲击信号波形,如图 9 所示。

由图 9 可知,5 个质量不同的小球分别在同一位置

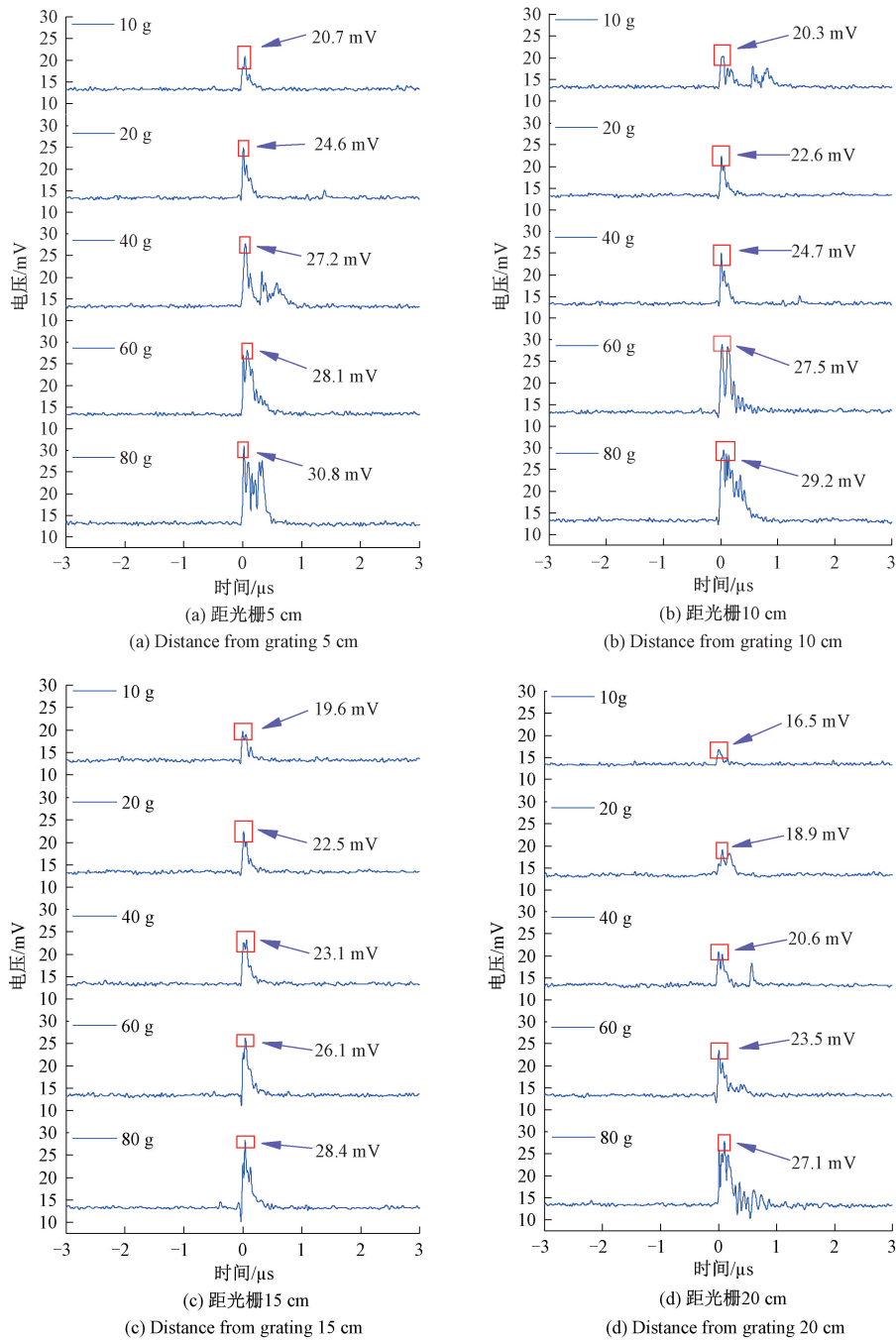


图9 冲击信号波形

Fig. 9 Waveforms of impact signal

下落时,碰撞产生的冲击信号呈线性增长趋势。在距光栅 5 cm 处,幅值电压由 20.7 mV 增长至 30.8 mV;距光栅 10 cm 处,幅值电压由 20.3 mV 增长至 29.2 mV;距光栅 15 cm 处,幅值电压由 19.6 mV 增长至 28.4 mV;距光栅 20 cm 处,幅值电压由 16.5 mV 增长至 27.1 mV,与仿真分析相吻合。同时,为了进一步得到冲击信号的变化趋势,利用表 1 数据对同一质量小球在不同位置处下落时的情况进行分析,如图 10 所示。

由图 10 可知,同一质量小球在不同位置下落时与铝板发生碰撞产生的冲击信号呈线性下降趋势。通过对表 1 数据分析可知,不同质量小球在同一位置下落时,随着小球质量的增加,碰撞产生的冲击能量也呈增长趋势,最大能量处的电压峰值为 30.8 mV;同一质量小球在不同位置下落时,随着下落距离的增加,碰撞产生的冲击能量呈下降趋势,最小能量处的电压峰值为 16.5 mV。

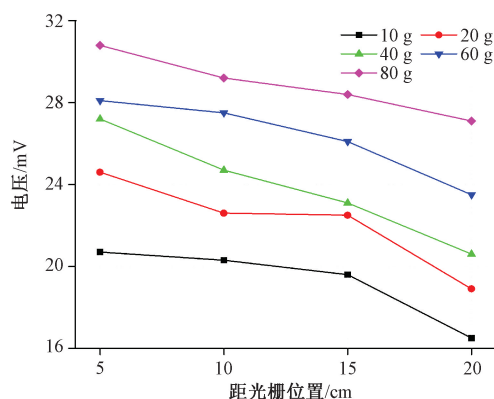


图 10 质量-位置能量变化

Fig. 10 Mass - position energy change

4 结 论

本文针对航天强磁环境中,能量小、速度快的微小碰撞信号检测难度大的问题,结合光纤光栅传感原理和边沿滤波解调原理,设计并实现了一种面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统。采用边沿滤波的解调方法解决了冲击信号快、难以捕捉的问题,实现了冲击信号的采集;通过有限元仿真软件对实验过程中的布点问题进行探究;采用时域包络提取法对信号波形进行去噪处理。通过理论推导、仿真分析和实验验证相结合的研究方法,利用飞秒光纤光栅传感器对小球与铝板碰撞产生的冲击信号进行检测。研究表明,在 25℃ 室温环境下,飞秒光纤光栅传感器对冲击信号的检测结果良好,不同质量小球在同一高度从同一位置下落时,幅值电压呈线性增长趋势,在 80 g 小球下落至距传感器 5 cm 位置处得到最高幅值电压 30.8 mV;同一质量小球在同一高度从不同位置下落时,幅值电压呈线性下降趋势,在 10 g 小球下落至距传感器 20 cm 处得到最小幅值电压 16.5 mV。该系统利用飞秒光纤光栅实现了对微小碰撞能量的检测,后续也可通过改善传感器封装方式来提高检测精度。

参考文献

- [1] EWALD R. Is it worth the risk? An astronaut's approach to risk awareness[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 161: 368-372.
- [2] 张宇, 岳桂轩, 李欣颖, 等. 基于互相关碰撞强度谱的航天器碰撞定位技术[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(1): 7-16.

- [3] FRANCESCO C, POOYA M, FULVIO P, et al. Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 609.
- [4] ERIK J B, MAX V, ELIZABETH A K, et al. Structural health management technologies for inflatable/deployable structures: Integrating sensing and self-healing[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7-8): 883-903.
- [5] KUNDU T. Acoustic source localization [J]. *Ultrasonics*, 2014, 1(54): 25-38.
- [6] 向洋, 孙世政, 党晓圆, 等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(4): 15-22.
- [7] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 93-98.
- [8] 王鹏, 张苗苗. 碳纤维复合材料受热应变测试方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(08): 6-10.
- [9] 梁晨, 倪克琦, 常素良, 等. 轨道交通监测用光纤光栅解调设备设计[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(8): 154-158.
- [10] 陆观, 梁大开, 曾捷, 等. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6): 261-264.
- [11] LU G, LIANG D K, ZENG J. et al. Impact energy on composite material layer based on grating sensors[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6): 261-264.
- [12] LU J Y, WANG B F, LIANG D K. Wavelet packet energy characterization of low velocity impacts and load localization by optical fiber Bragg grating sensor technique[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2346-2352.

[12] 周萌. 大量程高灵敏度的光纤 Bragg 光栅低频振动传

感器研究[D]. 长春:吉林大学, 2020.

ZHOU M. Research on large range and high sensitivity fiber Bragg grating low frequency vibration sensor [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

- [13] 周建明, 陶维俱, 胡君辉, 等. 基于边缘滤波和阻尼衰减的FBG板材冲击能测量研究[J]. 光通信技术, 2020, 44(3): 22-26.

ZHOU J M, TAO W J, HU J H, et al. Research on impact energy measurement of FBG plate based on edge filtering and damping attenuation [J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(3): 22-26.

- [14] 梁博兴. 980 nm 皮秒光子晶体光纤激光器及光纤激光相干合成技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2016.

LIANG B X. 980 nm photonic crystal fiber picosecond laser and fiber laser coherent combine technical study [D]. Beijing: Beijing University Of Technology, 2016.

- [15] YANG Z, WANG F, LIU Z, et al. Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24521-24530.

- [16] KONG P W, CHAN C C, HENG M L, et al. Fiber Bragg grating sensors for clinical measurement of the first metatarsophalangeal joint quasi-stiffness [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(3): 1322-1328.

- [17] 张浩田. 用于超弱光纤光栅解调的光电检测电路的研制[D]. 北京:北京交通大学, 2017.

ZHANG H T. Research on photoelectric detection circuit for ultra weak fiber Bragg grating demodulation [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University, 2017.

作者简介



李昊业, 2018 年于上海理工大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感及光纤器件。

E-mail: lhy1582226@126.com

Li Haoye received the B. Sc. degree from the University of Shanghai for Science and Technology in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber optic sensing and fiber-based devices.



张雯 (通信作者), 分别在 2009 年和 2012 年于中国计量大学获得学士学位和硕士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为光纤传感与光纤微结构。

E-mail: wenzhang@bistu.edu.cn

Zhang Wen (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees from China Jiliang University in 2009 and 2012, respectively, and Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. She is an associate professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and microstructure.