

激光与光电子学进展

机械振动对光学火灾预警系统的影响与改进措施

王俊博^{1,2}, 马卓^{1,2}, 李亚飞^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}¹吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;²吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 吉林 长春 130012

摘要 由于火灾阴燃过程会产生二氧化碳(CO₂)气体,故采用基于非色散红外(non-dispersion infrared, NDIR)原理的火灾预警系统来监测 CO₂浓度来预防火灾事故。该预警系统基于中红外吸收光谱技术,利用 CO₂气体分子在 4.26 μm 处的基频吸收带,结合红外宽带热光源和双通道热释电探测器,实现了中红外 CO₂的高灵敏检测。利用配备的 CO₂气体样品,研究了该系统对 CO₂气体的传感特性。由于需要将火灾预警系统放在农业机械上工作,机械振动会影响系统光路结构,因此需要对装置进行减振处理。基于杜哈梅积分模型及其在求解振动系统响应问题上的应用,设计了一种减振装置,并对该装置进行了建模仿真,结果显示振动幅度减少了 82%。将该减振装置进行室外振动测试,结果显示仪器振动幅度减小了 86%~87%,采用减振装置时 CO₂测量浓度的方差相较未采用减振装置时减小了 50.01%,不确定度降低了 29.52%。仿真分析及室外振动实验结果表明,该减振系统的减振效果良好,具有性价比高、减振结构简单等优势,具有工程应用价值。

关键词 光谱学; 中红外吸收光谱; CO₂检测; 减振设计; 系统稳定性

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2330002

Influence of Mechanical Vibration on Optical Fire Alarm System and Its Improvement Measures

Wang Junbo^{1,2}, Ma Zhuo^{1,2}, Li Yafei^{1,2}, Zheng Chuantao^{1,2*}, Wang Yiding^{1,2}¹State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,

Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

²Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Carbon dioxide (CO₂) is produced during the fire smoldering process; thus, a fire alarm system based on non-dispersive infrared (NDIR) is employed to monitor the CO₂ concentration to prevent fire accidents. Using the fundamental absorption band of CO₂ molecules at 4.26 μm and mid-infrared absorption spectroscopy, the early fire alarming system uses an infrared broadband heat source and dual-channel pyroelectric detector to achieve highly sensitive CO₂ detection. Using prepared CO₂ gas samples, the sensor characteristics of the CO₂ sensor system are studied. Early fire alarm system must work with agricultural machinery; thus, the sensor must be damped. Based on the model and application of the Duhamel integral in solving vibration system response, a vibration damping module is designed, and the damping structure is modeled and simulated. The results demonstrate that the vibration amplitude is reduced by 82%. The outdoor vibration test of the damping module demonstrates that, when using the damping module, the vibration amplitude of the instrument is reduced by 86%~87%, and the measurement variance of CO₂ concentration is reduced by 50.01% and the uncertainty is reduced by 29.52% compared to the case when

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-03-17; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700101)、国家自然科学基金(61775079, 61627823, 61960206004)、吉林省科技发展计划(20180201046GX, 20190101016JH, 20200401059GX)

通信作者: *zhengchuantao@jlu.edu.cn

the damping module is not used. Simulation analysis and outdoor vibration experiment results demonstrate that the damping module provides good vibration reduction effect with the advantages of high cost-performance, simple vibration reduction structure, etc., and is of obvious value in engineering applications.

Key words spectroscopy; mid-infrared absorption spectroscopy; CO₂ detection; vibration reduction design; system stability

OCIS codes 300.6340; 300.6360; 040.3060

1 引言

可燃物燃烧时一般经历吸热、热解、发烟、火焰扩散、全燃、衰减 6 个阶段^[1]。在热解阶段,材料表面处于不完全燃烧的状态而产生一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂),热量继续积累,CO₂生成速率增大,烟雾增加。在发烟阶段,开始产生大量烟雾,CO和CO₂的浓度继续增大^[2]。在这 3 个阶段内火灾尚未发生,因此一般的探测器如感温探测器和感烟探测器无法实现报警。而特征气体 CO 与 CO₂ 却有非常显著的浓度变化,因此探测农田中的 CO 与 CO₂ 浓度,对于早期火灾探测具有非常重要的意义^[3-4]。

监测 CO₂ 气体浓度的方法主要有两种:使用固体电解质气体传感器或红外气体传感器。而高干旱的环境会影响固体电解质气体传感器的使用寿命^[5]。红外光谱吸收技术具有响应速度快、检测范围广、灵敏度高、可靠性高、分辨率高等优点,且对不同气体分子的选择性也较好,具有较好的针对性^[6-7],因此可用于农业火灾的预警。

在实际情况中由于农田面积过大,需要将火灾预警系统放置在农业作业机械上进行移动测量。农业机械在移动过程中,路况与车况会对车载光学设备造成影响^[8]。拖拉机以不同车速行驶在农田中时所产生的振动频率范围及谱峰值分布差异不大,振动频率主要集中在低频范围(1.18~5.11 Hz),振动功率谱峰值主要集中在 3 Hz 左右^[9]。但是,车辆运动所带来的振动会损坏仪器的电路结构与光路结构。有鉴于此,本文建立了一种用于火灾检测系统的减振装置,并开展了气体检测实验,分析了系统的灵敏度、稳定性、检测下限性能指标。通过仿真与实验,在极大程度上降低了外界振动对 CO₂ 检测仪的影响,提高了 CO₂ 检测仪的测量精度。

2 机械振动对光学火灾预警系统的影响

2.1 CO₂ 吸收线

分子的红外光谱并不是由一条或几条谱线构

成,而是呈现带状,具有一个波长范围^[10]。根据 HITRAN 数据库提供的数据,CO₂ 气体分子在 2275~2400 cm⁻¹ 波数范围的吸收光谱如图 1 所示,其中温度为 296 K,压强为 1.01×10⁵ Pa,体积分数为 5000×10⁻⁶。同时,有学者仿真了在同样条件下的水汽(H₂O)的吸收谱,体积分数为 2×10⁻²^[11]。从图 1 可以观察到,在该波段内,与 CO₂ 的吸收量相比,H₂O 的吸收量很小,不会对 CO₂ 检测造成干扰,这就确保了检测气体的可选择性^[12]。

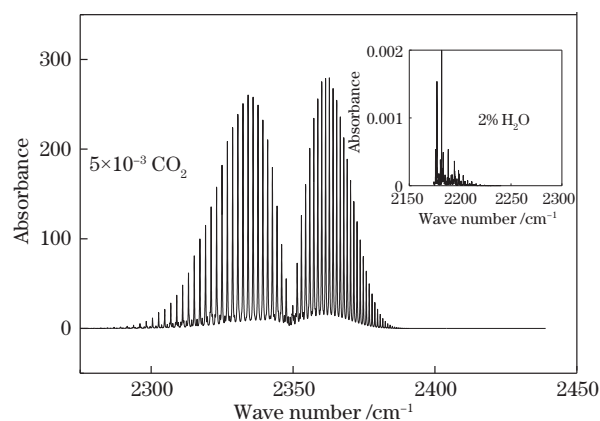


图 1 CO₂和 H₂O 在 4.26 μm 处的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectra of CO₂ and H₂O at 4.26 μm

2.2 基于 CO₂ 检测的火灾预警系统

农业火灾 CO₂ 气体检测系统主要由光学系统与电学系统组成,如图 2 所示。光学系统由两个球面反射镜、凸透镜与分光镜组成。热光源(IR-55, HawkEye Technology)发出的红外光经凸透镜(convex lens)会聚后在分光镜(beam splitter, BS)上反射进入气室(gas cell),经过两个球面反射镜共 5 次反射后从入光口出射,总光程约为 1.8 m^[13]。电学系统包括前置放大电路、信号调理电路、基于数字信号处理器(DSP)的主控电路(main control circuit)、信号采集电路和基于 DSP 的数字锁相放大电路(lock-in amplifier)。主控电路包含恒流源电路、串口通信电路和气泵驱动电路。主控 DSP 利用脉冲宽度调制方式(pulse width modulation, PWM)

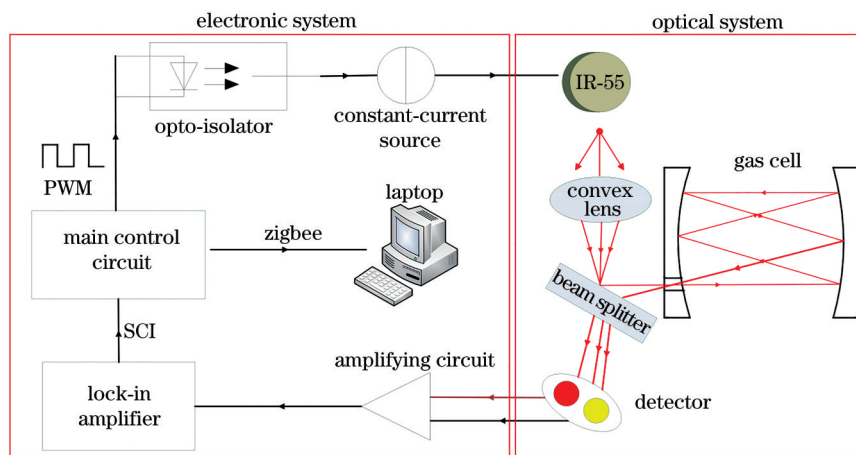


图2 红外火灾 CO₂ 预警系统示意图

Fig. 2 Schematic of infrared fire CO₂ alarming system

产生 4 Hz 信号,经光隔离(opto-isolator)后,驱动恒流源电路(constant-current source),使得热光源工作。从气室出射的红外光经过分光镜折射,最终由双通道热释电探测器(detector; LMM-242-TH, InfraTec)采集并转换为电信号,送入前置放大电路与信号调理电路处理,经过数模转换后送入数字锁相放大电路。锁相放大器可以有效抑制背景噪声,提高信噪比和检测灵敏度的特点,故采用锁相放大器提取被测信号与参考信号的一次谐波幅值,并将其送入上位机进行比值处理后,代入朗伯-比尔定律,即可计算出气体浓度^[14]。锁相放大电路与主控电路采用串行通信接口(serial communication interface, SCI)的方式通信,主控电路经由 Zigbee 方式与上位机(laptop)通信。

2.3 气体标定实验

利用 Environics 气体混合系统,用 N₂ 气冲洗气室,配备步长为 200 × 10⁻⁶,浓度范围为 0~1800 × 10⁻⁶ 的 CO₂ 气体样品,将气体样品通入气室,利用锁相放大器提取检测通道和参考通道的电压幅值,并作比值处理。对每种浓度的气体样品的实验时间为 5 min,测试结果如图 3 所示。

对测得的电压比值(y)与 CO₂ 浓度(x)之间的关系进行拟合,得到的曲线方程为

$$y = 0.020303 \exp(-x/365.05796) + 0.89717. \quad (1)$$

利用该拟合曲线,就可以确定测得的 CO₂ 浓度,从而预警火灾。

2.4 机械振动实验

在石板路面上,将红外火灾预警系统分别处于静止与振动状态下检测大气 CO₂ 浓度,结果如图 4 和图 5 所示。静止状态下测得的 CO₂ 浓度均值为

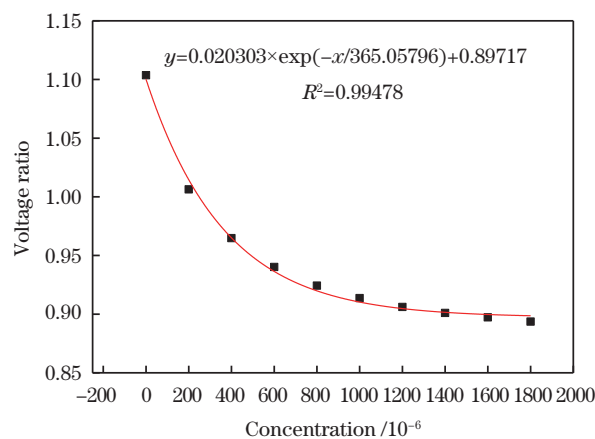


图3 电压比与 CO₂ 气体浓度的关系曲线

Fig. 3 Relationship between voltage ratio and CO₂ gas concentration

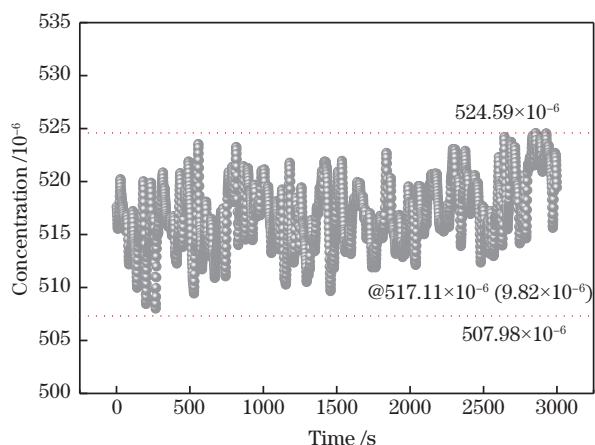


图4 静止状态测得的 CO₂ 浓度曲线

Fig. 4 Measured CO₂ concentration curve at static state

517.11 × 10⁻⁶, 方差为 9.82 × 10⁻⁶。在振动情况下,测得的 CO₂ 浓度为 520.08 × 10⁻⁶, 方差为 47.35 × 10⁻⁶。

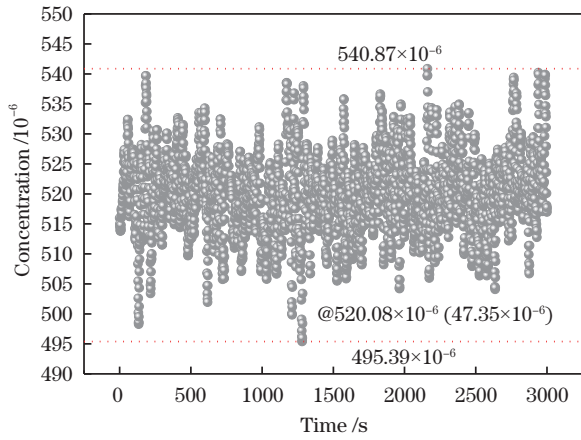


图 5 振动状态下测得的 CO₂ 浓度曲线

Fig. 5 Measured CO₂ concentration curve at vibrational state

因此,振动影响系统的稳定性,需要对系统进行减振处理。

3 系统减振设计与仿真分析

3.1 减振结构

首先将光学系统与电路系统集成在防水防尘等级为 IP68 的铸铝防水箱内。减振底座的长、宽与箱子相同,底部有 6 个圆柱孔,用于放置减振弹簧。固定结构侧面有 2 个孔,可与防水箱通过防水螺丝进行固定,内部中间有圆柱形槽,用于放置减振弹簧。固定结构与减振底座通过连接块固定在一起,并可上下滑动,如图 6 所示。

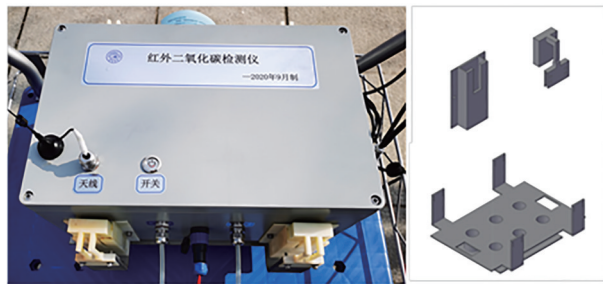


图 6 火灾预警系统及减振组件

Fig. 6 Fire alarming system and vibration reduction module

利用钢弹簧隔振器具有性能稳定、承载能力强的优点^[15],在系统静置时,底座的弹簧发生形变,产生向上的支持力,使得装置稳定。系统向下振动时,底座弹簧起减振作用;系统向上振动时,侧面弹簧会产生向下的弹力,阻碍箱子向上运动,起到缓冲、减振的作用。由于底座质量较大,底座的重力使得侧面弹簧的向下弹力增大,箱子向下运动,从而使得箱子尽快恢复稳定状态。测量 IP68 防水箱

的尺寸与系统质量,根据弹簧胡克定律,计算弹簧的刚度系数范围,然后仿真系统振动,防止形变量过大导致振动幅度增大,或形变量过小导致减振效果变差。

3.2 减振模型

将装置简化成单自由度动力学模型,如图 7 所示^[16]。对于一个低阻尼单自由度体系,在外部激励 $f(t)$ 的作用下,若载荷的变化规律在时间间隔 Δt 内可以用一个确定的函数来描述,则低阻尼单自由度体系的运动方程为

$$m\mu'' + c\mu' + k\mu = f(t), \quad (2)$$

式中: m 为系统的等效集中质量; k 为刚度; c 为黏性阻尼系数; μ 为振动位移。

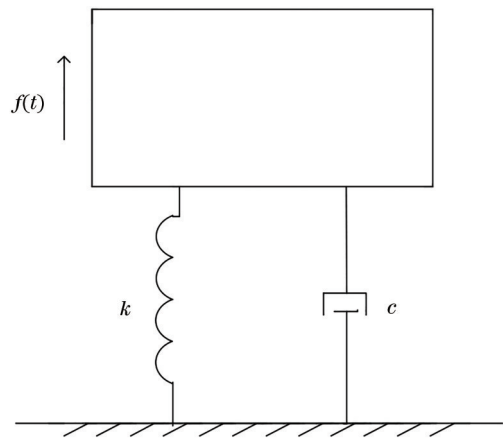


图 7 单自由度动力学模型

Fig. 7 Dynamic model with single degree of freedom

3.3 杜哈梅积分计算

在振动理论中,杜哈梅积分是求解任意外载激励下线性系统响应的一种方法^[17-19]。借助杜哈梅积分的解析解,通过迭代求解减振耦合系统的动力响应,其运动微分方程的解析解可以通过杜哈梅积分得到^[20-21]。进一步整理,可以得到

$$\mu'' + 2\omega\xi\mu' + \omega^2\mu = F(t), \quad (3)$$

式中: $\omega^2 = k/m$; $\xi = c/(2m\omega)$; $F(t) = f(t)/m$ 。通过杜哈梅积分运算可以得到

$$\mu(t) = A + \int_0^t \frac{F(\tau)}{\omega_D} \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \times \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau, \quad (4)$$

$$\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}, \quad (5)$$

$$A = \exp(-\omega\xi t) \left\{ \mu(0) \cos(\omega_D t) + \left[\frac{\mu'(0) + \mu(0)\omega\xi}{\omega_D} \right] \sin(\omega_D t) \right\}. \quad (6)$$

3.4 MATLAB 仿真计算

以东方红-LX754 拖拉机和淮丰 1LS-740 拖拉机为例,拖拉机行驶在农田中时,垂直振动的峰值频率范围为 1.36~2.12 Hz,因此拖拉机产生的振动比其他车辆更为剧烈^[22]。假设车辆振动满足正弦变化规律,外载激励 $f(t) = 0.05 \sin(3\pi t)$ 。仪器总质量包括铸铝防水箱的质量(3.6 kg)、气室的质量(3.2 kg)与电路板的质量(0.2 kg),合计 7.0 kg。

利用在线压簧计算软件计算得到弹簧的刚度系数 $k_1=360 \text{ g/mm}$, $k_2=290 \text{ g/mm}$ 。 $\mu(0)$ 为系统静止时弹簧压缩长度 0.01 m, $\mu'(0)$ 为系统初始速度,为拖拉机运动方程的一阶微分值 0.05 m/s。

减振结构中选用普通钢制弹簧,因此在不考虑弹簧阻尼的情况下,将计算与测量得到的初始值代入(4)~(6)式,并在 MATLAB 软件中进行仿真^[23]。在外部激励下,火灾预警系统经过减振结构后的振动幅度为 0.009 m,相较于外部激励振幅减少了 82%(图 8)。

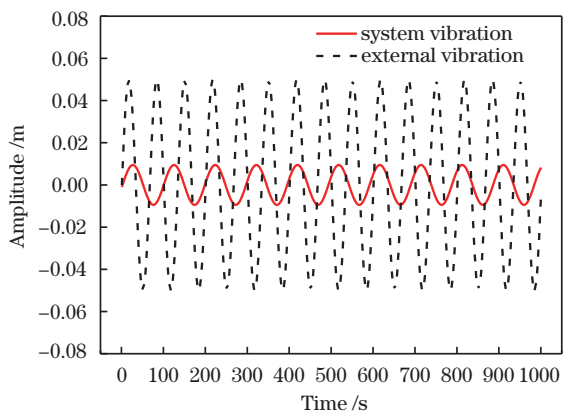


图 8 MATLAB 软件仿真的振动波形
Fig. 8 Simulation vibration waveform by MATLAB software

4 振动试验

4.1 振动装置的室外测试

CYT9200 一体化振动变速器内部集成磁电式振动传感器,精密的测量电路构成了高精度振动测量系统。振动传感器可测量风机、车辆、水泵等相关设备的振动速度^[24]。将 CYT9200 一体化振动传感器固定在箱子一侧,通过 485 转 USB 通讯模块传输到上位机的 LabVIEW 界面。通过 LabVIEW 界面,可设置串口信息、波特率以及接收数据频率^[25]。

首先将系统放置在推车上,在粗糙公路路面上以正常步速行驶(速度与农业机械作业速度相当),实测

得到的振动情况如图 9 所示。可以看到:车辆振动速度的平均值为 25.94 mm/s,标准差为 2674.0;减振后仪器振动速度的平均值为 3.17 mm/s,数据标准差为 399.8。仪器振动的平均速度减小了 87.76%,振动速度标准差减小了 68.5%。

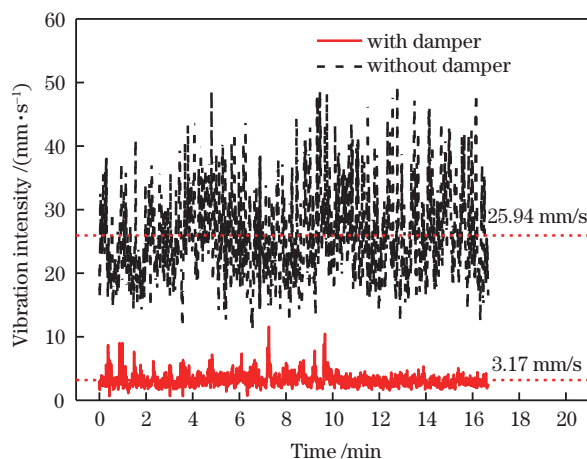


图 9 在粗糙公路路况下测得的振动速度
Fig. 9 Measured vibration speed on highway under rough road conditions

其次在正常的公路上推行,测得的振动情况如图 10 所示。车辆振动速度的平均值为 20.08 mm/s,标准差为 1679.12;减振后仪器振动速度的平均值为 2.46 mm/s,数据标准差为 286.07。仪器振动的平均速度减小了 87.74%,振动速度标准差减小了 82.96%。可以看出公路路况复杂,使得车辆振动激烈程度增大,但减振效果稳定。

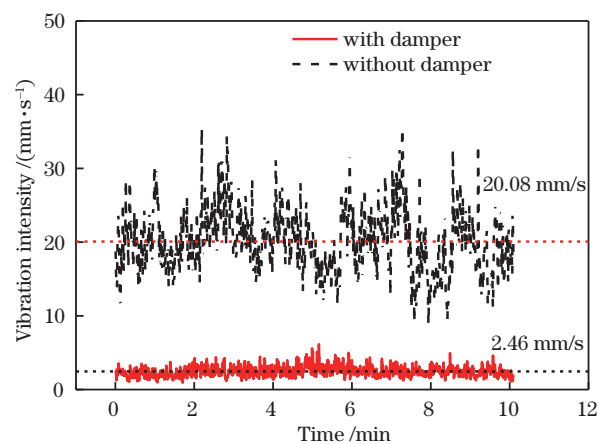


图 10 在公路路况下测得的振动速度
Fig. 10 Measured vibration speed on highway

最后在较为平整的石板路上推行,测得的振动情况如图 11 所示。车辆振动速度的平均值为 12.77 mm/s,标准差为 1682.81;减振后仪器振动速

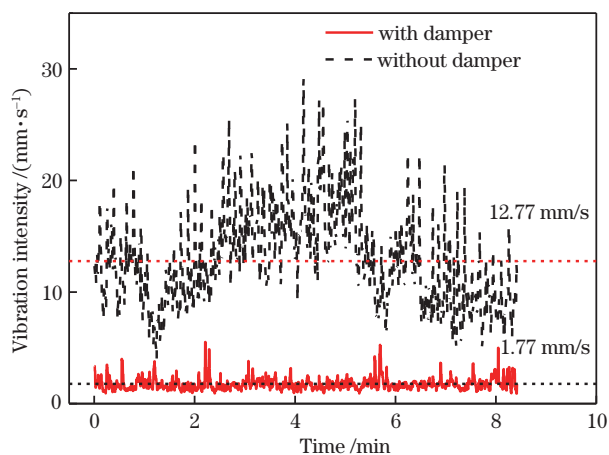


图 11 在石板路路况下测得的振动速度

Fig. 11 Measured vibration speed on stone road

度的平均值为 1.77 mm/s, 数据标准差为 232.73。仪器振动的平均速度减小了 86.14%, 振动速度标准差减小了 86.17%。

在 3 种不同路面上, 推车的垂直振动速度与采用减振装置后测得的垂直方向速度、振动减少的比例如表 1 所示。

表 1 不同路面下减振前、后的振动速度

Table 1 Vibration speed before and after vibration reduction under different roads

Pavement	Mean vibration velocity / (mm·s ⁻¹)		Reduce proportion / %
	With damper	Without damper	
Stone road	1.77	12.77	86.17
Highway	2.46	20.08	87.74
Rough road	3.17	25.94	87.76

4.2 CO₂检测实验

将减振装置安装在红外火灾预警系统上, 并对其施加与图 5 相同的振动效果, 在相同情况下测量大气 CO₂ 浓度, 结果如图 12 所示。在减振情况下测得的空气 CO₂ 平均浓度为 524.26×10⁻⁶, 浓度标准差为 23.68×10⁻⁶。

利用红外火灾预警系统在静止、振动与减振情况下测得的浓度标准差分别为 9.82×10⁻⁶、47.35×10⁻⁶ 和 23.68×10⁻⁶, 不确定度分别为 0.057、0.126 和 0.0888。采用该减振装置后, 对比系统在静止情况下, CO₂ 的浓度标准差增加了 4.8 倍, 不确定度增加了 2.2 倍; 相较于不采用减振装置的情况下, CO₂ 的浓度标准差减少了 50.01%, 不确定度减少了 29.52%。

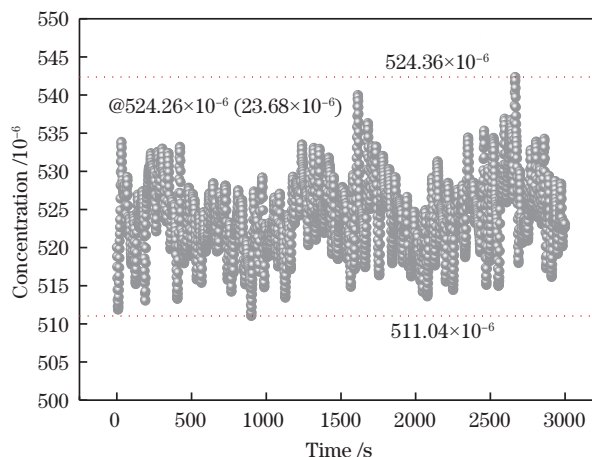


图 12 减振状态下 CO₂ 的浓度曲线

Fig. 12 CO₂ concentration curve at damping state

5 结 论

提出一种基于红外 CO₂ 检测的农业火灾预警系统, 分析了机械振动对光学火灾预警系统的影响, 并提出了改进措施。标定后, 农业火灾预警系统拟合曲线的拟合优度为 0.9993。对减振结构建立了单自由度振动模型, 利用 MATLAB 软件合成振动的信号, 并通过杜哈梅积分计算进行仿真计算。结果表明, 所设计的减振模型在外部激励下, 振幅可减小 82%。在此基础上开展农业火灾预警系统的室外振动实验, 在 3 种路况下的实验结果表明, 实际振动效果保持在 86%~87%, 系统所测得的 CO₂ 浓度均值保持不变, 浓度方差在减振情况下相较于振动情况减少了 50.01%, 不确定度降低了 29.52%。该减振系统的减振效果良好, 可有效减小外界振动对精密系统的影响, 具有工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ding Y M, Zhang X T, Du W Z, et al. Combustion simulation of carbonized combustibles based on multi-component pyrolysis gas[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9): 155-163.
丁彦铭, 张雪婷, 杜文州, 等. 基于多组分热解气体的炭化可燃物燃烧模拟[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(9): 155-163.
- [2] Du J H, Zhang R C, Huang X Y, et al. Research on early fire detection with CO-CO₂ FTIR-spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(5): 899-903.
杜建华, 张认成, 黄湘莹, 等. CO 和 CO₂ 气体红外光谱技术在火灾早期探测中的应用研究[J]. 光谱学

- 与光谱分析, 2007, 27(5): 899-903.
- [3] Dang J M, Yu H Y, Song F, et al. Development of a CO sensor for early fire detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1876-1881.
党敬民, 于海业, 宋芳, 等. 应用于早期火灾探测的 CO 传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1876-1881.
- [4] Zhang Y Q, Wang F, Cui H B. Temperature measurement of carbon dioxide using fixed-wavelength absorption spectroscopy technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 193001.
张雅琪, 王飞, 崔海滨. 基于固定波长法吸收光谱技术的 CO₂ 温度测量[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 193001.
- [5] Dong M, Zhong G Q, Miao S Z, et al. CO and CO₂ dual-gas detection based on mid-infrared wideband absorption spectroscopy[J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14(2): 119-123.
- [6] Dong M. The development of multi-gas detector based on infrared light source[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
董明. 基于红外热光源的多气体检测仪的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [7] Zhou Y W, Miao S Z, Yao D, et al. Laser methane remote sensor system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0611001.
周言文, 苗澍苗, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0611001.
- [8] Wang Y Q. Analysis and optimization of vibration isolation Stewart platform for the on-board precision instrument[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
王宇谦. 车载精密仪器 Stewart 减振平台的性能分析及参数优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [9] Wu C, Kong D G, Zhang Y, et al. Six degrees of freedom of the tractor-person chair system vibration simulation research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 223-228.
吴灿, 孔德刚, 张韵, 等. 六自由度拖拉机-人椅系统振动特性仿真研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 223-228.
- [10] Li G L, Dong M, Song N, et al. Carbon monoxide gas detection system based on mid-infrared spectral absorption technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2839-2844.
李国林, 董明, 宋楠, 等. 基于中红外光谱吸收技术的一氧化碳气体检测系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2839-2844.
- [11] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0514003.
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514003.
- [12] Qu D S, Fan H J, Liu L W, et al. Measurement of gas parameters in supersonic combustion field based on near-infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0330001.
屈东胜, 樊宏杰, 刘连伟, 等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0330001.
- [13] Zhong G Q. Development and application of multipass cell for infrared gas detection[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
钟国强. 面向红外气体检测的多通池研制与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [14] Zhai B, He Q X, Huang J Q, et al. Design and realization of harmonic signal orthogonal lock-in amplifier used in infrared gas detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(11): 1125001.
翟冰, 何启欣, 黄渐强, 等. 红外气体检测中谐波信号正交锁相放大器设计与实现[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 1125001.
- [15] Li J. Application of spring damped vibration isolator to vibration reduction of reciprocating natural gas compressor on offshore platform[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(15): 232, 235.
李洁. 弹簧阻尼隔振器在海上平台往复式天然气压缩机减振上的应用[J]. 广东化工, 2017, 44(15): 232, 235.
- [16] Chang Y F. Research on nonlinear vibration characteristics of single degree of freedom vehicle suspension system[J]. China Water Transport, 2019, 19(2): 122-123.
常一帆. 单自由度汽车悬架系统非线性振动特性研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(2): 122-123.
- [17] Zhu D Y, Zhang Y H. A methodology based on FEM and Duhamel integration for bridges subjected to moving loads[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(12): 1287-1298.
朱丹阳, 张亚辉. 基于有限元和 Duhamel 积分的移动力问题分析方法研究[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(12): 1287-1298.

- [18] Nakamura N. Basic study on the transform method of frequency-dependent functions into time domain: relation to Duhamel's integral and time-domain-transfer function[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(3): 276-285.
- [19] Mei D Q, Gang X Y, Chen Z C. A fast precise algorithm for Duhamel integrals[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(8): 1152-1155.
梅德庆, 刚宪约, 陈子辰. 一种快速高精度 Duhamel 积分算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(8): 1152-1155.
- [20] Wu J K, Bai M S, Zhang Y. The Danamic load identification for a single-degree-of-freedom vibration system[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(2): 136-140.
武江凯, 白明生, 张永. 一种单自由度振动系统动态载荷识别方法[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 136-140.
- [21] Qiao H, Xia H, Du X T. Analytical method for calculating dynamic response of coupled train-bridge system based on Duhamel integral[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(5): 766-771.
乔宏, 夏禾, 杜宪亭. 基于 Duhamel 积分的车桥耦合动力分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(5): 766-771.
- [22] Ni W Q, Jiang Q, Xu L Y, et al. Effects of suspension parameters on vibration characteristics of tractor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 175-181.
倪伟强, 江庆, 许良元, 等. 悬挂装置参数对拖拉机振动特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 175-181.
- [23] Xu G, Zhu S H, Nie X T, et al. Natural frequencies calculation for vibrating systems of tractors made in China[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 157-161.
徐刚, 朱思洪, 聂信天, 等. 国产拖拉机振动系统固有频率研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 157-161.
- [24] Xu J W, Jiang Y Q, Cai X W, et al. Vibration test system of DTH hammer based on wireless network [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(8): 101-108.
徐靖雯, 蒋玉强, 蔡晓炜, 等. 基于无线网络的潜孔锤振动测试系统 [J]. 中国测试, 2020, 46(8): 101-108.
- [25] Yang S. Research on signal processing algorithm of infrared gas sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
杨硕. 红外气体传感信号处理算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.