光纤振动传感器

陈梦怡 严文真 潘锦昊 郑晨 贾滨天 张天声 *
湖州师范学院理学院，浙江 湖州 313000

摘要：本文介绍了可以测量物体振动的频率以及振幅一种光纤测振动的新实验方法，和与该实验方法相配套的实验装置，以及计算标准。这一实验方法，使得数据的精确度得到了极大提升。同时，该实验具有原理易懂、现象明显等优点，且实验结果与事实较为符合，证明了实验方法的科学性与有效性。

关键词：光纤振动传感器；全反射原理；稳压电路；比较器放大电路

Fiber Optic Vibration Sensor

Chen Mengyi, Yan Wenzhen, Pan Jinhao, Zheng Chen, Jia Yitian, Zhang Tiansheng*

Huzhou University School of Science, Huzhou, Zhejiang, 313000, China

Abstract: This article introduces a new experimental method for measuring the frequency and amplitude of object vibrations using fiber optic technology, along with the corresponding experimental device and calculation standards. This experimental method greatly enhances the accuracy of the data. Additionally, the experiment has the advantages of being easy to understand and having clear phenomena, and the experimental results are relatively consistent with the facts, demonstrating the scientific validity and effectiveness of the experimental method.

Keywords: Fiber optic vibration sensor; Total internal reflection principle; Voltage regulator circuit; Comparator amplifier circuit

DOI: 10.62639/sspis01.20260301

引言

光纤振动传感器在地震勘探中扮演着关键角色，其性能直接影响到油气勘探的准确性[1]。随着地震勘探技术的进步[2]，振动传感器也在不断发展，追求更高的灵敏度、更广的测量范围和更强的抗干扰能力。振动检测技术自 20 世纪初以来经历了机械式、电气式和光学式三个阶段的演进[3]。机械式测振仪由于精度低、易损坏和信号传输限制等已被淘汰。电气式传感器虽然得到广泛应用，但需要绝缘处理并易受电磁干扰影响，不符合安全生产需求[4]。相比之下，光纤传感技术以其高精度、广泛测量范围、大容量传输和抗电磁干扰等优势成为新一代振动传感器的发展方向[5-6]。该技术已广泛应用于多个社会领域，包括地质灾害预警和水听声呐监控，展现出不可替代的潜力[7-8]。

一、应用前景

（一）学科教学方面

物理学和工程学教育：光纤振动传感器可以用来演示和教授振动和光学原理。学生可以通过实验理解光纤传感器的工作原理和应用。

光学和传感器技术：该装置融合了光学和电学知识，有利于增强学生对知识整体性的认识，故装置可应用于光纤测振动的理论学习及实验教学，帮助学生理解光学和传感器技术在实际中的应用。

（二）测量方面

我们设计的光纤振动传感器的位移精度在 90% 以上，周期精度在 99% 以上，在工程测量方面还存在些差距。相信经过改进与优化，其精密度会进一步提高，在以下几个方面有着广阔的应用前景。

结构健康监测：光纤振动传感器可以用于监测建筑物、桥梁等结构的振动和变形[9]，帮助提前发现潜在的结构问题。

机械振动分析：在工程领域，光纤振动传感器可以用来分析机械设备的振动特性，以优化设备性能和预测维护需求[10]。

地震监测：在地质学和地震学中，光纤振动传感器可以用于监测地震波和地壳运动，提供重要的地震数据。

（稿件编号：IS-26-1-1H003）

作者简介：陈梦怡（2005-），女，汉，籍贯：浙江省丽水市，学历：本科，研究方向：科学教育。
严文真（2004-），男，汉，籍贯：浙江省杭州市，学历：本科，研究方向：科学教育。
潘锦昊（2004-），男，汉，籍贯：浙江省金华市，学历：本科，研究方向：科学教育。
郑晨（2005-），女，汉，籍贯：浙江省浦江县，学历：本科，研究方向：科学教育。
贾滨天（2005-），男，汉，籍贯：浙江省义乌市，学历：本科，研究方向：科学教育。
通讯作者：张天声（1983-），女，蒙古族，籍贯：辽宁省阜新市，学历：工学博士，讲师，研究方向：半导体材料合成及应用。
基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目（项目编号：202510347018）。

二、实验原理

（一）光纤全反射原理

本实验采用的传光型光纤，它由两束光纤混合后组成，两光束混合后的端部是工作端亦称探头，它与被测体相距 b，由光源发出的光传到端部出射后再经被测体反射回来，由另一束光纤接收光信号经光电转换器转换成电量，而光电转换器的电量大小与间距 b 有关，因此可用于测量振动。

光从光源耦合到输入光纤射向被测物体，再被反射回另一光纤，由探测器接收。设两根光纤的距离为 d，每根光纤的直径为 2a，数值孔径为 N，如图 2 所示，此时

$$tg\theta = \frac{d}{2b} \quad (1)$$

由于 $\theta = \sin^{-1} N$，所以式可以写为

$$b = \frac{d}{2g\ (\sin^{-1} N)} \quad (2)$$

很显然，当 $b < \left[d / 2tg\left(\sin^{-1} N\right) \right]$ 时，即接收光纤位于光纤像的光锥之外。两光纤的耦合为零，无反射进入接收光纤；当 $b \geq \left[d / 2tg\left(\sin^{-1} N\right) \right]$ 时，即接收光纤位于光锥之内，两光纤耦合最强，接收光纤达到最大值。

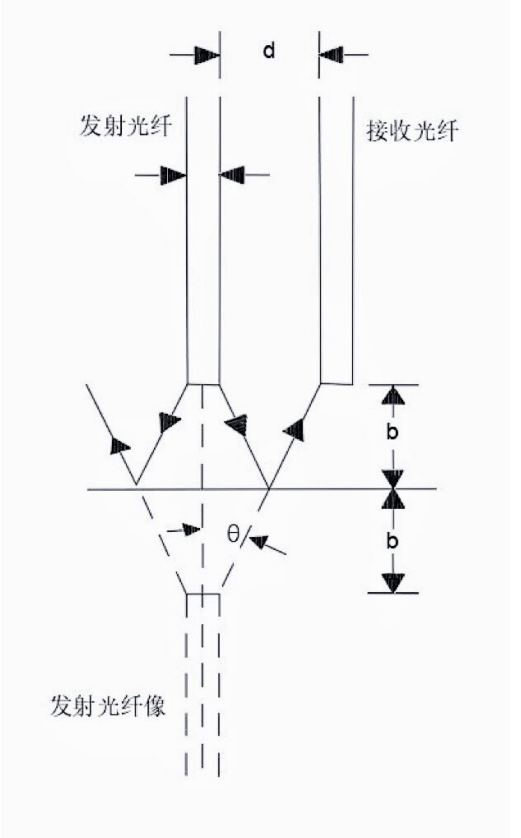


图 1 振动测量原理

（二）电路板原理 [11]

由 5.1V 稳压二极管、运算放大器 $U1$($HA17741$) 和驱动三极管 $S9014$ 及外围电路组成恒流驱动电路，为发光二极管提供恒定的驱动电流（发光二极管接 $J1$、$J2$ 端），可以保证发光二极管发出的光强恒定，从而保证整个光纤测量系统的稳定性及测量精度。

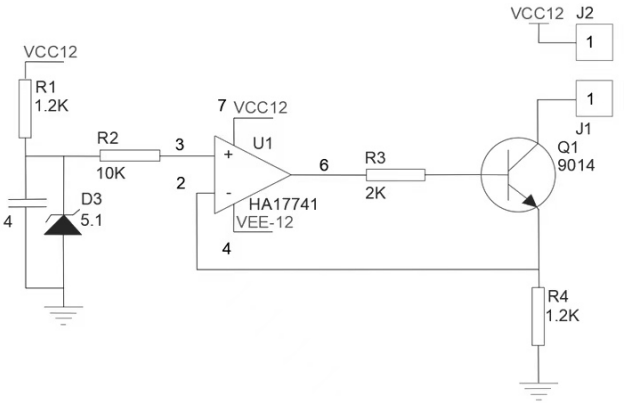


图 2 发光二极管驱动电路

如下图，光敏三极管（接 $J3$、$J4$ 端）接收到光纤传感器反射光后产生电流，该电流流过电阻 $R5$，产生压降，该电压压降随光强的改变而改变，然后由运算放大器 $U2$($HA17741$) 及外围电路构成第一级放大电路进行放大，放大后的电压信号经过运算放大器 $U3$($HA17741$) 及外围电路构成第二级放大电路再次进行放大，最后通过 $J9$、$J10$ 输出到示波器进行显示。由反相比例放大器原理可知，第一级电路方向放大一倍，第二级电路在此基础上反向放大十一倍，因此整个电路将 $J3$ 段的电信号正向放大了十一倍。

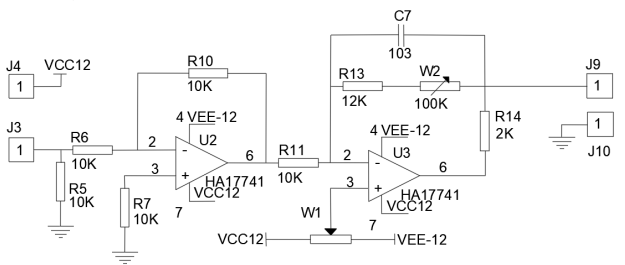


图 3 光敏三极管放大处理电路

三、设计方案

装置型号

本实验装置使用的仪器有：

表 1 仪器型号表

名称	型号	生产厂家
示波器	SDS1202X−E	鼎阳科技
锡箔纸	30cm*8m*0.01mm	捷瑞康科技
光电技术创新实训平台	GCGDCX−B	光驰科技
光纤传感器模块	GCGDCX−B	光驰科技
铁架台	物理支架（普通版）	好奇教学
螺旋测微器	SR−50BL	杰威德

四、实验步骤

（一）在 $J9$ 和 $J10$ 端接入示波器，使其初始波动的中间位置显示为 $0V$。

（二）将主机箱插头插入电源，电路板固定在主机箱，连接电路板，并将接收与发射光纤接入对应端口。组合光纤测位移装置测得电压与位移关系后，将光线探头固定在铁架台上用于振动的测量。使传感器探头与振动物体保持适当距离，打开主机箱开关，给电路板供电。

（三）在光纤测位移系统中，螺旋测微器表面贴有锡箔纸。首先，转动调零旋钮，使噪音波的中间位置准确显示为 $0V$。接着，通过调节螺旋测微器，改变其与光纤探头之间的距离（即螺旋测微器的位移 r），并记录下示波器显示的电压值 V，拟合数据得到电压 V 与位移 r 的函数关系。

（四）启动振动装置，调整示波器以获得清晰的振动图像，若电压变化过小或过大，则使用增益调节旋钮调整放大电路的放大倍数。观察示波器中的图像，记录其中的振幅数据。

（五）使用示波器多次测量不存在振动物体时的噪音波，同时为减小环境对实验造成的影响及误差，选择在无光环境下测量并记录此时示波器显示的峰值 R_0 及周期 T_0。

（六）使用示波器测量振动物体在不同振动情况下的峰值 R、及周期 T 各 3 次，并求平均值。为减小外部因素对实验的影响和误差，应从中减去噪音波的相关数据。

（七）多次测量振动装置各档位的振动数据，代入上述关系式，得到物体振动的振动范围、振动频率，计算其精密度，准确度和不确定度。

（八）对实验结果进行讨论和分析。

五、实验数据记录及处理

（一）光纤测位移

通过对位移－示波器电压数据进行拟合分析，我们得到了位移 r 和电压 V 之间的精确函数关系。这个关系式能够有效地转换位移和电压的对应关系，这适用于整个位移范围（从 r_{min} 到 r_{max}）。

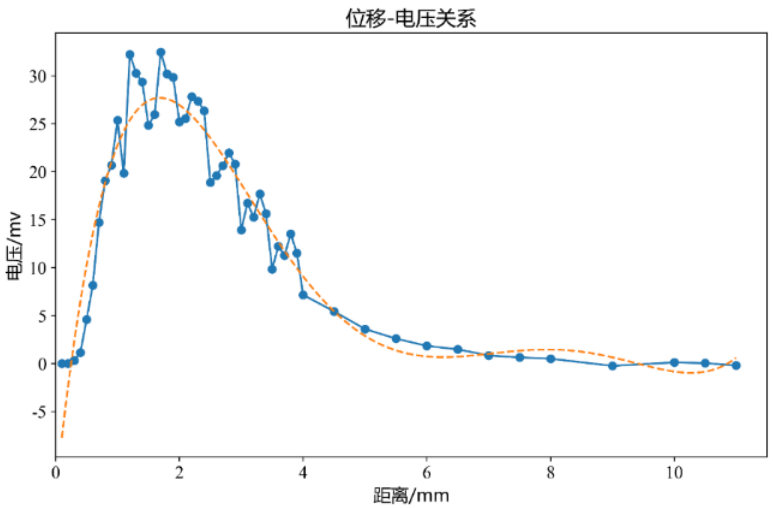


图 4 位移—电压函数图像

整合数据可以发现，光纤对由振动装置反射的光线接收在一定程度上呈现出随与振动装置间的距离增加先升高后降低的趋势，根据电压趋势变化，可将整体数据分为距离 ≤ 0.7、0.7 ≤距离 ≤ 2.5、2.5 ≤距离三部分。

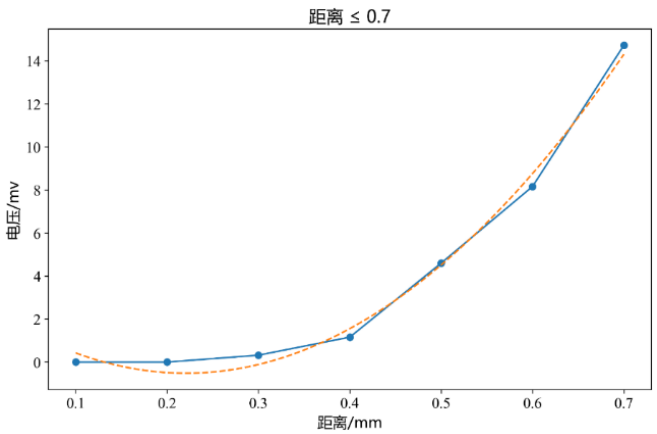


图 5 r ≤ 0.7mm 时的函数图像

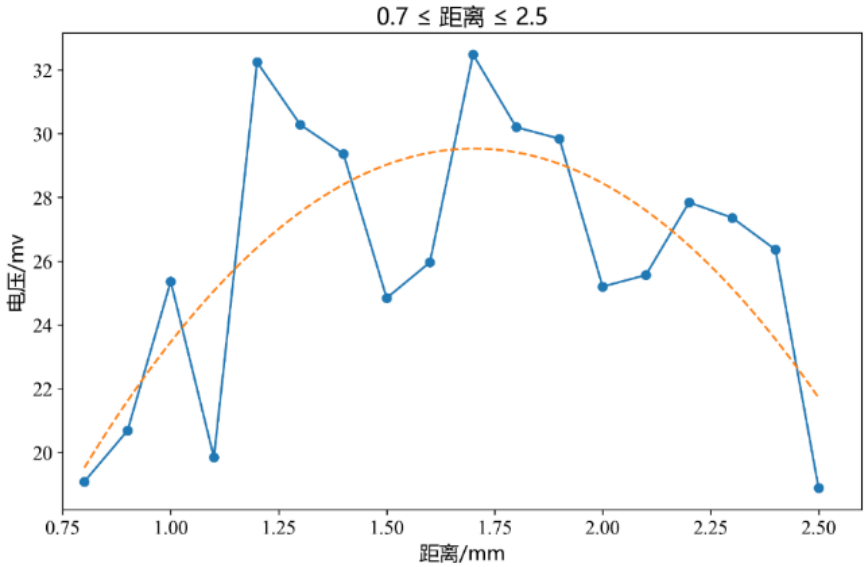


图 6 0.7 ≤ r ≤ 2.5 时的函数图像

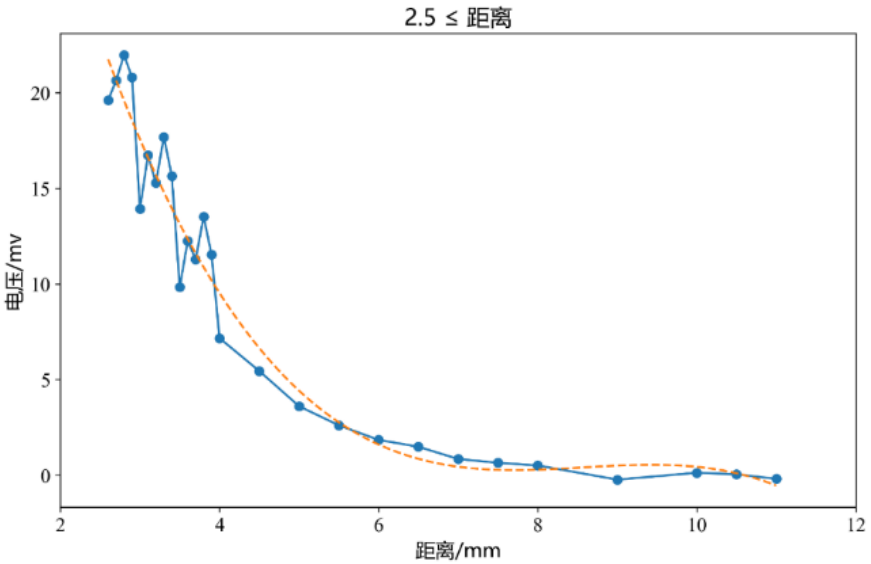


图 7 2.5 ≤ r 时的函数图像

$$V=\begin{cases}64.52r^2-28.49r+2.63, 0\le r\le 0.7\\ -13.22r^2+45.2r-8.94, 0.7\le r\le 2.5\\ -0.088r^3+2.33r^2-20.59r+60.25, 2.25\le r\end{cases} \quad (3)$$

（二）振动装置实验数据记录

表 2 一档数据记录表

项目	谷值（ mV ）	峰值（ mV ）	周期（ ms ）
无光对照组	−2.0	2.0	20.1
组一	2.9	19.9	21.0
组二	2.7	26.3	21.2
组三	2.8	23.5	21.2

表 3 三档数据记录表

项目	谷值（ mV ）	峰值（ mV ）	周期（ ms ）
组一	1.2	29.5	19.4
组二	2.7	27.5	19.4
组三	2.2	28.8	19.6

表 4 五档数据记录表

项目	谷值（ mV ）	峰值（ mV ）	周期（ ms ）
第一次	3.2	17.7	17.8
第二次	1.5	18.8	17.7
第三次	3.6	16.6	17.6

通过对比，可以发现随着振动装置振动强度的升高，振幅与周期呈降低趋势。

（三）数据分析

实验数据测量时，示波器有明显的噪音波，波幅为 V_0，我们取的光纤位移与电压对应曲线中的电压值是波形中间位置的电压值，当物体振动时，波幅变化，我们不能直接将波形中间值以及波峰、波谷值直接带入。根据位移曲线图，我们知道物体振动离探头的最近距离对应 b_{min} 一个最小电压 V_{min}，而最远距离 b_{max} 对应一个最大电压 V_{max}。V_{max}= 峰值 $-V_0$，V_{min}= 谷值 $+V_0$。

表 5 一档数据表

项目	V_{max}（mV）	b_{min}（mV）	V_{min}（mV）	b_{max}（mm）
组一	15.7	2.10	5.2	4.04
组二	16.8	1.96	3.5	4.66
组三	14.6	2.24	5.6	3.92

表 6 三档数据表

项目	V_{max}（mV）	b_{min}（mV）	V_{min}（mV）	b_{max}（mm）
组一	17.9	1.83	4.9	4.13
组二	24.3	1.16	4.7	4.20
组三	21.5	1.44	4.8	4.16

表 7 五档数据表

项目	V_{max}（mV）	b_{min}（mV）	V_{min}（mV）	b_{max}（mm）
组一	27.5	0.87	3.2	4.79
组二	25.5	1.05	4.7	4.19
组三	26.8	0.94	4.2	4.37

我组光纤振动传感器，位移精度约在 0.91 以上，周期精度约在 0.99 以上，不确定度约 0.1832 为，响应时间和示波器一页的横坐标量有关，可以测量类似筋膜枪的振动物体，对于振动较小的物体例如 100rad/s 的音叉，现象不明显，且无法测量，后续将持续改进。

（四）偏差及不确定度的计算

根据

$$\text{平均偏差：}\ \overline{\Delta x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i-\bar{x}\right|}{n} \quad (4)$$

$$\text{相对偏差：}\ \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \quad (5)$$

计算出数据如下表：

表 8 偏差数据表

项目	周期平均偏差	周期相对偏差
一档	0.089	0.422%
三档	0.089	0.456%
五档	0.033	0.186%

根据贝塞尔公式

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_n-\bar{x}\right)}{n-1}} \quad (6)$$

代入数据求得不确定度约为 0.1832

六、实验结果

实验测得振动装置不同档位振动范围为：

表 9 实验测得振动装置振动位移范围

项目	位移/mm	周期/ms
一档	2.19±0.51	21.1±0.1
三档	2.68±0.38	19.5±0.1
五档	3.53±0.39	17.7±0.1

经过测量和数据汇总，不难看出振动装置的振幅强度随着档位升高而显著增加，同时振动装置周期也随着档位的升高呈现明显的缩短趋势；通过比较各位移数据的相对误差，我们也不难总结出低强度振动更易受干扰的特点。

七、总结与展望

我组结合光学原理与电路设计，通过自主设计、实验光纤振动传感器，构建了一套完整的振动测量系统，展示了其在教学演示和工程测量中的应用价值。通过位移－电压标定曲线，我组实现了对振动振幅和频率的定量测量和数据可视化，同时加入偏差和不确定度分析，确保对数据的严谨处理。实验过程中观察到输出电压较小，为使结果更明显，我组将设计放大倍数更大的放大电路以减小实验误差；随着AI技术的不断成熟，我组计划在项目中引入人工智能，通过自主设计程序将电压曲线实时转换为直观的位移曲线并分析振动特征，达到判断振动类型的目的。

参考文献：

[1] 余玲玲．油气勘探中光纤光栅加速度传感器的研究 [D], 2019.
[2] 何阳．基于光纤光栅的地震检波技术研究 [D], 2024.
[3] 苑立波，童维军，江山等．我国光纤传感技术发展路线图 [J]. 光学学报，2022, 42(1):1-34.
[4] 杜志泉，倪锋，肖发新．光纤传感技术的发展与应用 [J]. 光电技术应用，2014, 29(6):7-12, 17.
[5] 杨帆，李斌，梅文博等．光纤传感技术在石油行业应用现状及发展趋势 [J]. 传感器技术与应用，2022, 10(4):501-508.
[6] 覃健文，韦焕华．光纤传感技术在安防领域的应用 [J]. 光通信技术，2013, 37(8):8-10.
[7] 侯俊芳，裴丽，李卓轩等．光纤传感技术的研究进展及应用 [J]. 光电技术应用，2012, 27(1):49-53.
[8] 安宁，尹保军，陈淑涵等．光纤传感技术研究进展 [J]. 燕山大学学报，2023, 47(5):441-457.
[9] 刘正勇，LIN, Htein 等．特种微结构光纤振动传感器及其铁路监测应用 [J]. 机械工程学报，2022, 58(8):63-70.
[10] 叶子帆．应用于汽轮发电机组振动监测的 F-P 光纤振动传感器特性研究 [D], 2024.
[11] 陈凯歌．微弱信号运算放大电路的设计研究 [D], 2025.