光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112401

基于分布反馈激光器的局部放电监测系统研究

初凤红，张　政，卞正兰*，孔明阳，樊　融

（上海电力大学 电子与信息工程学院，上海 201306）

摘　要： 电力设备的局部放电监测是发现设备的绝缘缺陷、维护电网安全运行的重要手段。文章基于分布反馈(DFB)激光器线宽窄、噪声低、相干长度长等优点，设计了一种用于局部放电监测的振动传感系统。系统采用粘接在悬臂梁上的DFB激光器作为传感头，利用光纤迈克尔逊干涉仪将DFB激光器波长变化转换为干涉仪的输出光强变化，采用相位生成载波(PGC)算法进行局部放电信号解调。设计并仿真分析了悬臂梁的振动响应特性，得到其一阶谐振频率为876 Hz。研究了迈克尔逊干涉仪臂长差与系统灵敏度的关系。实验选取脉冲点火器作为局部放电源进行放电检测，验证了系统用于局部放电检测的可行性。结果表明，该系统能够检测到800～900 Hz放电信号，灵敏度可达－74.67 dB re rad/Pa。

关键词： 局部放电；DFB激光器；光纤迈克尔逊干涉仪；PGC解调算法

中图分类号： TP212.9　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0299－08

Research on Partial Discharge Monitoring System Based on Distributed Feedback Laser

CHU Fenghong, ZHANG Zheng, BIAN Zhenglan, KONG Mingyang, FAN Rong

(College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, CHN)

Abstract: Partial discharge (PD) monitoring is an important way to find the insulation defects of power equipment and maintain the safe operation of power grid. Based on the advantages of Distributed Feedback (DFB) laser, such as narrow line width, low noise and long coherence length, a vibration sensing system for partial discharge monitoring was designed. The DFB laser glued on the cantilever beam was used as the sensing head, the wavelength change of DFB laser was converted into the output intensity change of the interferometer by using the fiber Michelson interferometer, and the Phase Generated Carrier (PGC) algorithm was used to demodulate partial discharge signals. Cantilever was designed and vibration characteristics were simulated, and its first order resonant frequency was 876 Hz. The relationship between the arm length difference of Michelson interferometer and the system sensitivity was studied. The pulse igniter was used as the partial discharge source for discharge detection, which verified the feasibility of the system for partial discharge detection. The results show that the system can detect the discharge signal of 800～900 Hz with the sensitivity of －74.67 dB re rad/Pa.

Key words: partial discharge; DFB laser; fiber optic Michelson interferometer; PGC demodulation algorithm

0　引言

电力设备绝缘部分发生故障的初期会产生局部放电(Partial Discharge，PD)现象[1]。如果对局部放电不采取相应措施，局部放电区域将会进一步扩大，并最终导致绝缘击穿[2]。为确保电力系统安全

收稿日期：2022－11－24.

* **通信作者：**卞正兰　**E-mail：**bianzhenglan@shiep.edu.cn

运行，应对电力设备局部放电进行在线监测，及早发现潜在问题，排除可能发生的故障。根据局部放电时产生的脉冲电流、光信号、声信号以及一些化学物质等，局部放电检测方法有脉冲电流法[3]、特高频检测法[4]、光测法[5]、化学检测法[6]以及声测法[7]等。

声测法根据所用的传感器不同主要分为压电式传感器检测法和光纤传感器检测法[8]。压电式传感器检测法主要是使用锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)作为传感元件，利用 PZT 的压电效应将声压转换为电信号，这种传感器操作简便，技术成熟，但检测灵敏度较低[9]。相比于 PZT 传感器，光纤传感器利用光纤干涉等原理对声波信号进行检测，具有灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰等优点，有望植入电力设备内部实现高灵敏度局部放电检测[10]。

局部放电发生时，放电区域的分子之间产生剧烈的撞击，这种撞击在宏观上产生一种压力，使局部放电发生的同时伴随有声波的出现。对局部放电来说，所产生的就是声脉冲，它具有非常宽的声波频带(10^1～10^7 Hz)，其中以频率为 20～300 kHz 范围内的超声波为主，因此现有的声测法大多选择超声频段测量局部放电[11-13]。然而由于膨胀气体遇冷缓慢收缩，局部放电信号还会产生频率范围为 20 Hz～20 kHz 的可闻声波[14]，考虑到高频信号对光电探测器和数据采集卡等硬件的性能要求较高，本文设计并搭建了对可闻声波频段进行检测的光纤局部放电检测系统。该系统采用分布反馈(DFB)激光器作为敏感元件，利用光纤迈克尔逊(Michelson)干涉仪将受振动信号调制的 DFB 激光器的波长变化转换为相位变化，采用相位生成载波算法完成了局部放电信号解调。设计了三角形悬臂梁结构并利用 Comsol 软件仿真了悬臂梁的振动特性，分析了系统灵敏度并优化了光纤 Michelson 干涉仪臂长差。实验选取脉冲点火器作为局部放电源，验证了系统用于局部放电检测的可行性。

1 基于 DFB 激光器的局部放电检测原理

1.1 DFB 激光器工作原理

图 1 为 DFB 激光器结构示意图，通过将 π 相移光栅刻写在 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺有源光纤上，且 π 相移位于光栅的中间位置即可形成 DFB 激光腔。与普通光纤布拉格光栅相比，π 相移光栅的纵向折射率调制在光栅的中间位置发生了一个 π 相位突变，其反射谱阻带中心处存在一个线宽极窄的透射窗口，因此相移光栅具有非常好的纵模选择特性[15]。在 980 nm 泵浦光作用下，产生 1 550 nm 附近的激光。

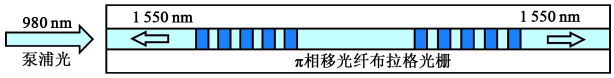


图 1 DFB 激光器结构示意图

DFB 激光器作为传感单元，其输出波长为：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B 为布拉格波长，n_{eff} 为光纤有效折射率，Λ 为光栅周期。

当振动作用于 DFB 激光器时，光纤材料的弹性形变会导致谐振腔长度发生改变，同时弹光效应会使光纤有效折射率发生改变，这都会引起激光器输出波长的漂移[16]。假设振动信号仅对 DFB 激光器产生轴向应力作用，对公式(1)两边同时微分可得：

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff}\Lambda + 2n_{eff}\Delta\Lambda \tag{2}$$

将式(2)与式(1)进行相除可得：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \tag{3}$$

在弹性范围内 $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \varepsilon$，其中 ε 表示光纤的轴向应变。Butter 等[17]推导出光纤产生应变时的折射率变化为：

$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = -\frac{n_{eff}^2}{2}[(1-\mu)P_{12} - \mu P_{11}]\varepsilon = -P_e\varepsilon \tag{4}$$

式中，$P_{ij}(i=1,j=1,2)$为光纤弹光系数，μ 为泊松比，P_e 为有效弹光系数。

对于典型的石英光纤，$n_{eff}=1.456$，$\mu=0.16$，$P_{11}=0.12$，$P_{12}=0.27$，则 $P_e=0.22$。由此可得[18]：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\varepsilon = 0.78\varepsilon \tag{5}$$

式(5)即 DFB 激光器输出波长与光纤有源区轴向应变的公式。

1.2 局部放电振动监测系统原理

图 2 为局部放电振动监测系统原理图，系统采用刻有 π 相移光栅的分布反馈激光器作为敏感元件。工作原理为 980 nm 半导体激光器作为 DFB 激光器的泵浦源，通过波分复用器后耦合到 DFB 激光器中，DFB 激光器粘接在悬臂梁上。当由局部放电产生的振动信号通过悬臂梁作用于 DFB 时，DFB

激光器的激射波长将发生变化，携带振动信息的后向散射激光信号通过波分复用器的 1 550 nm 端再经过光纤隔离器进入到干涉仪中，干涉仪两臂末端均有一个法拉第旋转镜用来消除偏振衰落。若对相位变化进行直接测量，外界环境噪声的随机相位漂移和解调电路的直流漂移都会对解调结果造成影响。因此，通过引入高频载波大信号对待测信号进行调制，使待测信号位于调制信号的上下边带，相位生成载波(PGC)调制就是基于这一原理实现的。干涉后的光信号经光电探测器转化为电信号，再通过数据采集卡进行模数转换，最后由上位机中的 PGC 算法完成振动信号解调。

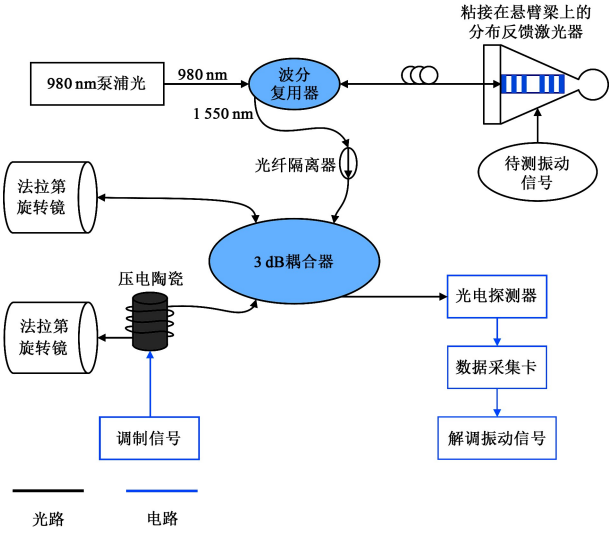


图 2　局部放电振动监测系统原理图

1.3　局部放电振动监测系统搭建

图 3 所示为局部放电振动监测实物图，其中包括 980 nm 泵浦激光器、粘接在悬臂梁上的 DFB 激光器、光纤 Michelson 干涉仪、压电陶瓷、光电探测器、数据采集卡等设备。

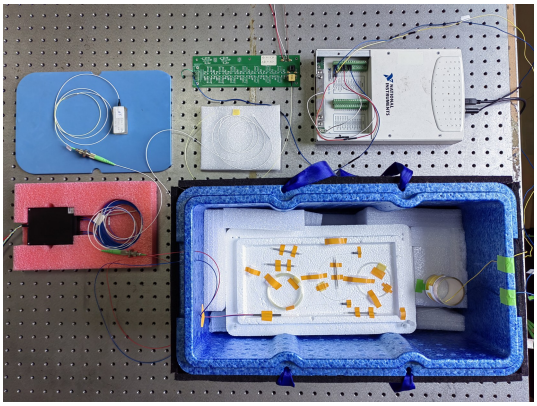


图 3　局部放电振动监测系统

2　PGC 算法原理

2.1　PGC 调制

本文采用 PGC 相位解调算法，其调制原理为在干涉仪的某一臂中加入一个 PZT 作为相位调制器，在调制信号的作用下，因 PZT 具有电致伸缩效应，干涉仪臂长差改变导致两臂相位差改变从而实现相位调制。假设调制信号驱动 PZT 产生的信号为 $\Delta l\cos(\omega_0 t)$，则干涉仪两臂的相位差 $\varphi(t)$ 可表示为[19]：

$$\varphi(t)=\frac{4\pi\cdot n}{\lambda}[l+\Delta l\cos(\omega_0 t)]=\varphi_0+C\cos(\omega_0 t) \tag{6}$$

式中，n 为光纤纤芯折射率，λ 为入射光波长，l 为干涉仪两臂初始臂长差，Δl 为调制信号产生的臂长差，φ_0 为干涉仪初始相位差，C 为调制深度，ω_0 为调制信号频率。由于外界噪声会对干涉仪造成干扰，则经过光电探测器转换后的干涉信号为：

$$I(t)=A+B\cos[C\cos(\omega_0 t)+D\cos(\omega_s t)+\psi(t)] \tag{7}$$

式中，A 为直流量，正比于激光器的输出光功率；B 为干涉信号幅度且 $B=\kappa A$，$\kappa\leqslant 1$，K 为干涉条纹可见度。$C\cos(\omega_0 t)$ 为调制信号，$D\cos(\omega_s t)$ 为待测振动信号，$\psi(t)$ 为干涉仪初始相位差以及外界环境噪声等引起的相位漂移之和。令 $\Phi(t)=D\cos(\omega_s t)+\psi(t)$，则式(7)可表示为：

$$I(t)=A+B\cos[C\cos(\omega_0 t)+\Phi(t)] \tag{8}$$

2.2　PGC 解调算法实现

传统的 PGC 解调算法包括微分交叉相乘(DCM)算法和反正切(arctan)算法，PGC-DCM 解调算法是形成最早、发展最为成熟的 PGC 算法，本文所研究的解调系统便是建立在该算法的基础上[20]，式(8)用贝塞尔函数展开可得：

$$\begin{aligned}I(t)=A+B\Big\{&J_0(C)+2\sum_{n=1}^{+\infty}(-1)^n J_{2n}(C)\cdot\\&\cos(2n\omega_0 t)\cos\Phi(t)+2\sum_{n=1}^{+\infty}(-1)^n J_{2n-1}(C)\cdot\\&\cos[(2n-1)\omega_0 t]\sin\Phi(t)\Big\}\end{aligned} \tag{9}$$

式中，$J_k(C)$ 表示 C 的 k 阶贝塞尔函数。将 $I(t)$ 分别与基频 $G\cos(\omega_0 t)$ 和二倍频 $H\cos(2\omega_0 t)$ 进行混频，将其携带的振动信号搬移到调制信号的奇次谐波或偶次谐波的边带上，再通过低通滤波器滤除基

频及谐波成分，得到 $\Phi(t)$ 的正弦项和余弦项。将这两项进行 DCM 运算得到两个正交信号的平方项，利用 $\sin^2[\Phi(t)]+\cos^2[\Phi(t)]=1$ 消除正交项，经过积分运算再通过高通滤波器滤除缓变的环境噪声，最终得到的解调信号为：

$$I(t)=B^2GHJ_1(C)J_2(C)D\cos(\omega_s t) \quad (10)$$

式中，G，H 分别为载波信号基频与二倍频的幅值。通过上式可以看出，最后的解调输出信号与待测信号之间成线性关系，由此便可实现对待测信号的解调。该解调算法原理如图 4 所示。

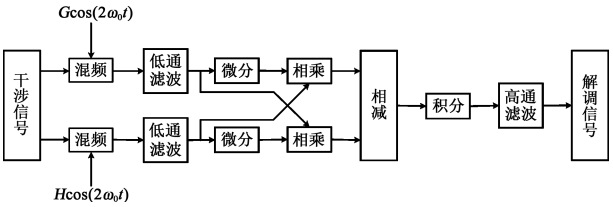


图 4 PGC-DCM 解调算法原理图

3 局部放电振动监测系统设计、优化及分析

3.1 悬臂梁设计

本文设计了一种悬臂梁结构传感头，如图 5 所示，DFB 激光器置于凹槽中并进行固定，当外界振动作用于悬臂梁外表面时，弹性材料将振动转换为形变并产生应力作用于 DFB 激光器的光纤光栅上，引起光栅的轴向应变，从而起到增敏的效果。

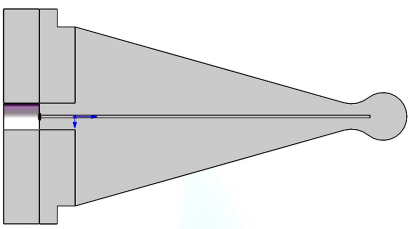


图 5 悬臂梁结构传感头示意图

理论分析表明，提高声压灵敏度的途径主要是增大声压作用导致的 DFB 激光器谐振腔轴向形变量，悬臂梁的轴向形变量可以表示为：

$$\varepsilon=\frac{(2\mu_f-1)}{E}P \quad (11)$$

式中，μ_f 为悬臂梁的泊松比，E 为其杨氏模量。由式(11)可知，轴向形变量的大小主要与悬臂梁的杨氏模量和泊松比有关，采用杨氏模量较小而泊松比较大的弹性材料可以有效地提高振动监测灵敏度。

悬臂梁采用高强度的聚砜(Udel P-1700 polysulfone，PSU)材料，该材料杨氏模量 $E=2.69\times10^9$ Pa，泊松比 $\mu_f=0.42$，在 1 Pa 的声压作用下，其一阶特征频率下最大形变量如图 6 所示。已知 z 轴方向最大形变量为 5.24×10^{-5} mm，计算可得 DFB 激光器谐振腔轴向形变量 $\varepsilon=1.00\times10^{-9}$ mm，该悬臂梁一阶特征频率为 876 Hz。

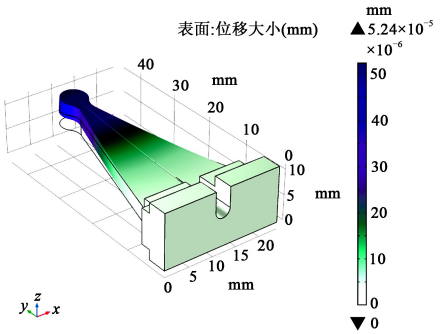


图 6 悬臂梁一阶特征频率下最大形变量

3.2 声压灵敏度

对于局部放电振动监测系统，声压灵敏度本质上指声压作用导致 DFB 激光器输出波长变化的情况，然而在该系统中采用非平衡 Michelson 光纤干涉仪进行信号解调，因此系统的工作性能与光纤干涉仪的性能密切相关。相位声压灵敏度 M_P 指声压作用导致的 DFB 激光器波长漂移通过非平衡 Michelson 干涉仪后产生的相位变化 $\Delta\varphi$ 与声压 P 的比值[21]，即：

$$M_P=\frac{\Delta\varphi}{P} \quad (12)$$

其中相位变化 $\Delta\varphi$ 与 DFB 激光器输出波长变化 $\Delta\lambda$ 的关系为：

$$\Delta\varphi=\frac{4\pi nl}{\lambda^2}\Delta\lambda \quad (13)$$

将式(5)代入式(13)可得：

$$\Delta\varphi=0.78\frac{4\pi nl}{\lambda}\varepsilon \quad (14)$$

将式(11)代入式(14)中，再将所得结果代入式(12)中可得：

$$M_P=0.78\frac{4\pi nl}{\lambda}\frac{(2\mu_f-1)}{E} \quad (15)$$

采用声压灵敏度级 M 来表示局部放电振动监测系统灵敏度：以 1 Pa 声压所导致的干涉仪相位变化为基准，并对相位声压灵敏度 M_P 取对数，单位为 dB re rad/Pa，即：

$$M=20\log M_P \quad (16)$$

本文设计的悬臂梁在 1 Pa 声压作用下谐振腔

轴向形变量 $\varepsilon=1.00\times10^{-9}$ mm，将其代入式(16)可得声压灵敏度级 $M=-74.67$ dB re rad/Pa。

3.3 迈克尔逊干涉仪臂长差选择

由式(15)可知，在 DFB 激光器封装确定后，灵敏度的主要影响因素为干涉仪臂长差 Δl，利用 Matlab 对式(16)进行仿真，研究干涉仪臂长差与系统灵敏度之间的关系。取谐振腔光纤的泊松比 $\mu_f=0.23$，杨氏模量 $E=7.2\times10^{10}$ Pa，臂长差 Δl 在 0～100 m 进行取值。仿真结果如图 7 所示。

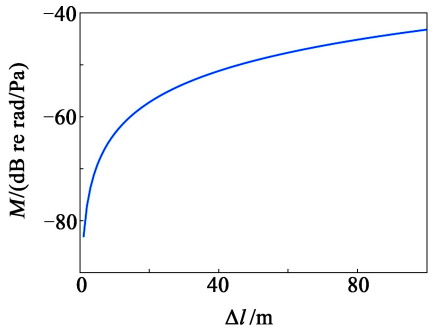


图 7　干涉仪臂长差与灵敏度关系

由图 7 可知，随着光纤干涉仪臂长差的增加，局部放电振动监测系统的灵敏度不断升高。当臂长差处于 0～30 m 时，灵敏度随臂长差的增加上升较快，当臂长差超过 30 m 后，灵敏度的增长趋势变缓。

DFB 激光器的频率噪声以及环境噪声最终都会通过光纤干涉仪转化为相位噪声，对于非平衡 Michelson 光纤干涉仪，若各种噪声造成 DFB 激光器的频率波动为 $\Delta\nu$，则经过干涉仪后相位波动为：

$$\Delta\varphi=\frac{4\pi nl}{c}\Delta\nu \tag{17}$$

由式(17)可知，经过干涉仪后产生的相位噪声与频率噪声成正比，干涉仪臂长差越长，系统中的相位噪声越大。总体而言，干涉仪臂长差的增加会使系统的灵敏度升高，同时会使系统的相位噪声增大，降低信噪比。因此需要结合局部放电振动监测系统灵敏度要求和系统整体的噪声水平选择合适的干涉仪臂长差。

3.4 PZT 的选择

PZT 在加载驱动信号后，由于电致伸缩效应使得缠绕在其上的光纤受到周期性径向应力的作用，干涉仪臂长差将发生周期性变化。假设驱动信号为 $U_0\cos(\omega_0 t)$，则干涉仪臂长差变化 Δl 可表示为：

$$\Delta l=\pi N d_{33}U_0\cos(\omega_0 t) \tag{18}$$

式中，N 为 PZT 上缠绕光纤圈数，d_{33} 为压电应变常数，U_0 为驱动电压。对调制信号而言，其引起干涉仪两臂的相位差可表示为：

$$\Delta\varphi=C\cos(\omega_0 t) \tag{19}$$

同时，

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}n\Delta l \tag{20}$$

联立上述三式可得：

$$C=\frac{2\pi^2}{\lambda}nNd_{33}U_0 \tag{21}$$

本系统所用 PZT 如图 8 所示，为管状结构，外径 40 mm，内径 36 mm，高 40 mm，电极处于内外壁，内正外负，材料为 P-51。式(21)中 $N=100$，$d_{33}=460\times10^{-12}$ m/V，当取最佳调制度 $C=2.37$ 时，可求得 $U_0=2.78$ V。

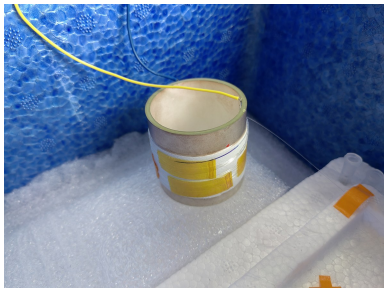


图 8　缠绕有光纤的 PZT 实物照片

4 局部放电检测及实验结果分析

4.1 单一频率信号检测

为验证局部放电振动监测系统的可行性，使用如图 9 所示的小型振动台给定已知振动信号，验证该系统能否解调出正确信号。

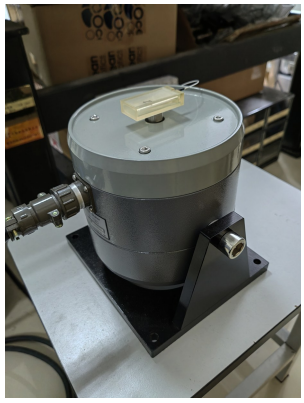


图 9　小型振动台

将信号发生器与振动台相连，信号发生器生成一个幅值为 1 V，频率为 600 Hz 的标准余弦信号输出到振动台，粘附在振动端上的 DFB 激光器接收到振动信号后通过系统完成解调，结果如图 10～13 所

示。图 10、11 分别为经光电探测器探测后由数据采集卡采集回的干涉信号 $I(t)$的时域、频域波形图，图 12、13 分别为振动信号解调后的时域、频域波形图。可以看出，解调后信号幅值虽有波动，但信号基本不失真，为标准余弦信号，解调信号频率为 600 Hz。

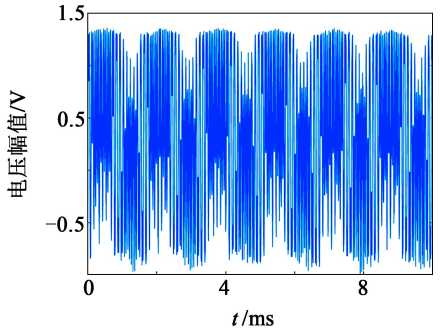


图 10 干涉信号 $I(t)$时域波形

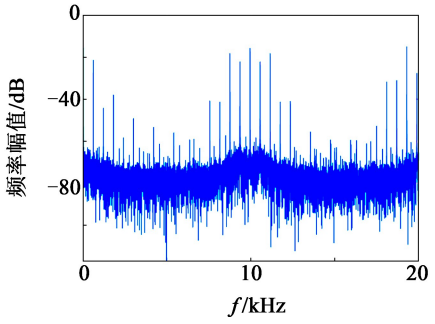


图 11 干涉信号 $I(t)$频域波形

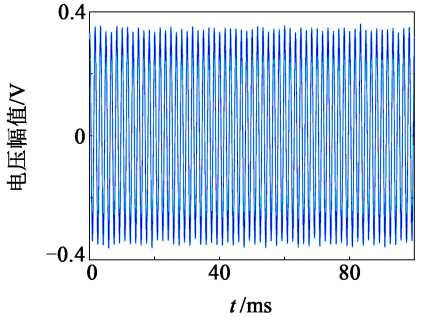


图 12 振动信号解调后时域波形

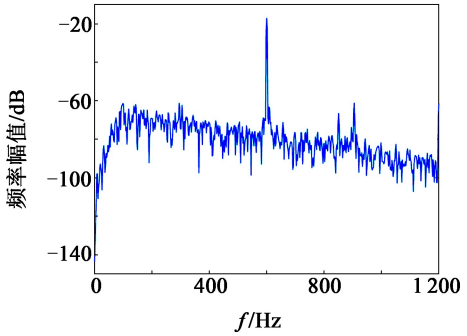


图 13 振动信号解调后频域波形

4.2 局部放电信号检测

经上述实验验证，本系统可完成振动信号的检测，接下来对模拟局部放电信号进行检测。局部放电根据其放电位置及现象等，可以主要分为三种类型：内部放电、沿面放电和电晕放电[22]。脉冲点火器通过脉冲高频振荡器所产生的高频电压经升压变压器产生高电压，进行尖端放电，它属于一种电晕放电，所以本文使用脉冲点火器作为模拟局部放电源，如图 14 所示，通过传感头对局部放电振动信号进行检测。

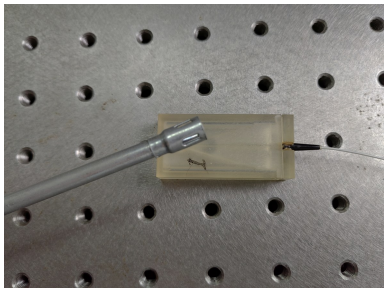


图 14 脉冲点火器模拟局部放电信号

图 15、16 分别为模拟局部放电信号解调后的时域、频域波形图。可以看出，时域信号为脉冲振荡形式，符合局部放电信号特征，该信号频率集中在 800～900 Hz。

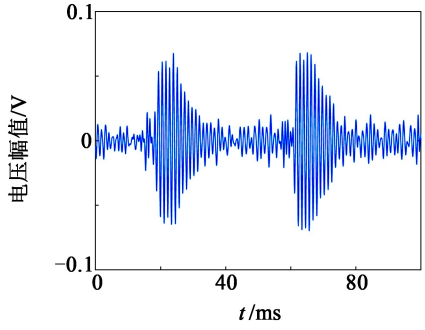


图 15 模拟局部放电信号解调后时域波形

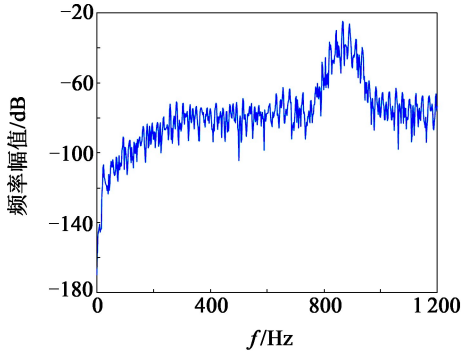


图 16 模拟局部放电信号解调后频域波形

5　结论

本文基于 DFB 激光器与光纤 Michelson 干涉原理搭建了局部放电振动监测系统，鉴于裸光纤形式的 DFB 激光器难以得到实际应用设计了悬臂梁结构作为传感头，仿真得到其一阶特征频率为 876 Hz，声压灵敏度级可达－74.67 dB re rad/Pa。光纤 Michelson 干涉仪的臂长差与系统灵敏度密切相关，通过仿真可得灵敏度随臂长差的增加而升高，但相位噪声也会随臂长差的增加而增大，因此需要综合灵敏度与相位噪声来选择干涉仪臂长差。

在 PGC-DCM 解调算法中调制深度的选择直接影响解调结果的好坏，本文根据最佳调制深度与 PZT 性能指标计算驱动电压，实验时再根据操作环境进行调整。本文选用脉冲点火器作为局部放电信号源，经系统解调后时域波形符合局部放电信号特征，且频率集中在 800～900 Hz，实现了局部放电振动信号的无失真解调。

参考文献：

[1] 李军浩，韩旭涛，刘泽辉，等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2583-2601.
Li Junhao，Han Xutao，Liu Zehui，et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering，2015，41(8)：2583-2601.

[2] 谭定彩，邓声华，江福章，等. 电气设备局部放电检测和信号去噪技术综述[J]. 电线电缆，2020，(4)：4-8.
Tan Dingcai，Deng Shenghua，Jiang Fuzhang，et al. Review on detection and signal de-noising technology of partial discharge in electrical equipment[J]. Electric Wire & Cable，2020，(4)：4-8.

[3] 刘宏亮，丁　斌，高树国，等. 基于宽频带脉冲电流法的变压器局部放电多端检测技术研究[J]. 高压电器，2018，54(11)：233-238，244.
Liu Hongliang，Ding Bin，Gao Shuguo，et al. Multi-terminal PD detection technology of transformer based on wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Apparatus，2018，54(11)：233-238，244.

[4] 李端姣，唐志国. GIS 局部放电特高频检测系统标定研究[J]. 高电压技术，2015，41(10)：3348-3354.
Li Duanjiao，Tang Zhiguo. Research on the calibration of UHF partial discharge detection system in GIS[J]. High Voltage Engineering，2015，41(10)：3348-3354.

[5] 庄　函，齐月静，李　兵，等. 基于 SiC 基光电传感器的局部放电探测系统设计[J]. 半导体光电，2018，39(5)：712-715，721.
Zhuang Han，Qi Yuejing，Li Bing，et al. Design of partial discharge detection system using SiC based photoelectric sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(5)：712-715，721.

[6] 张晓星，任江波，肖　鹏，等. 检测 SF_6 气体局部放电的多壁碳纳米管薄膜传感器[J]. 中国电机工程学报，2009，29(16)：114-118.
Zhang Xiaoxing，Ren Jiangbo，Xiao Peng，et al. Multi-wall carbon nanotube films sensor applied to SF_6 PD detection[J]. Proc. of the CSEE，2009，29(16)：114-118.

[7] 高自伟，郑哲钰，周威勇. 基于声测法的 GIS 局部放电测试及故障分析[J]. 东北电力技术，2010，31(7)：1-3.
Gao Ziwei，Zheng Zheyu，Zhou Weiyong. GIS partial discharge testing and fault analysis based on sound detecting method[J]. Northeast Electric Power Technology，2010，31(7)：1-3.

[8] 张宇鹏，杨永明，杨承河，等. 电气设备局部放电的超声波检测方法[J]. 压电与声光，2010，32(3)：414-416.
Zhang Yupeng，Yang Yongming，Yang Chenghe，et al. The study on ultrasonic measure in partial discharge of electric equipment[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2010，32(3)：414-416.

[9] N'cho J S，Fofana I. Review of fiber optic diagnostic techniques for power transformers[J]. Energies，2020，13(7)：1789.

[10] Ma G，Wang Y，Qin W，et al. Optical sensors for power transformer monitoring：A review[J]. High Voltage，2020，6(3)：367-386.

[11] 张伟超，董青青，赵　洪，等. 液-固复合介质对光纤法-珀局部放电超声响应强度影响分析[J]. 电工技术学报，2019，34(10)：2230-2238.
Zhang Weichao，Dong Qingqing，Zhao Hong，et al. Impact of liquid-solid composite medium on fiber Fabry-Perot response induced by ultrasound from partial discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(10)：2230-2238.

[12] 周宏扬，马国明，张　猛，等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：8016-8025.
Zhou Hongyang，Ma Guoming，Zhang Meng，et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the Michelson optical fiber interferometer [J]. Proc. of the CSEE，2022，42(21)：8016-8025.

[13] Posada-Roman J，Garcia-Souto J A，Rubio-Serrano J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems[J]. Sensors，2012，12(4)：4793-4802.

[14] Markalous S，Tenbohlen S，Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals[J]. IEEE Trans. on Dielectrics & Electrical Insulation，2008，15(6)：1576-1583.

[15] 谭　波，黄俊斌，何　琳，等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性[J]. 光学精密工程，2009，17(8)：1832-1838.
Tan Bo，Huang Junbin，He Lin，et al. Dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser[J]. Optics and

Precision Engineering, 2009, 17(8): 1832-1838.

[16] 鲍吉龙, 章献民, 陈抗生, 等. FBG 传感网络技术研究[J]. 光通信技术, 2001, (2): 84-89.
Bao Jilong, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng, et al. FBG sensor network technology [J]. Optical Communication Technology, 2001, (2): 84-89.

[17] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge[J]. Appl. Opt., 1978, 17(18): 2867-2869.

[18] Hill D J, Hodder B, Freitas J D, et al. DFB fibre-laser sensor developments[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5855: 904-907.

[19] Wang G Q, Xu T W, Fang L. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(23): 2093-2096.

[20] Fand G, Xu T, Feng S, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(13): 2811-2816.

[21] 倪 明, 张仁和, 胡永明, 等. 关于光纤水听器灵敏度的讨论[J]. 应用声学, 2002 (6): 18-21, 17.
Ni Ming, Zhang Renhe, Hu Yongming, et al. A discuss on the sensitivity of fiber-optic hydrophone[J]. J. of Appl. Acoustics, 2002 (6): 18-21, 17.

[22] 白 鹭, 李小婧, 董理科, 等. 基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 42-48.
Bai Lu, Li Xiaojing, Dong Like, et al. Study on the partial discharge types of ring network cabinets based on ultrasonic method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 42-48.

作者简介:

初凤红(1979—),女,黑龙江省哈尔滨市人,博士,教授,主要从事光纤传感技术、光电检测技术方面的研究;

张 政(1997—),男,山西省忻州市人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究;

卞正兰(1984—),女,江苏省盐城市人,博士,讲师,研究方向包括光纤传感、光电检测与控制。