

基于互相关定位法的干涉仪分析与仿真^①

曾羽琚¹, 陈明辉²

¹(长沙环境保护职业技术学院 信息技术系, 长沙 410005)

²(湖南商学院 教务处, 长沙 410205)

摘要: 首次提出用时域互相关法处理 Sagnac/Mach-Zehnder 分布式光纤传感系统的干涉输出信号, 对扰动进行检测和定位. 首先对 Sagnac/Mach-Zehnder 分布式光纤传感系统进行了扰动检测和定位的理论分析, 推导出扰动引起的干涉输出信号的表达式, 利用 Bessel 函数展开, 确定了该系统的两路干涉输出满足时域互相关的特性. 在此基础上进一步分析了两路干涉信号的表达式, 提出基频定位法和微分定位法两种时域互相关方法处理干涉信号, 确定扰动位置. 对两种扰动定位方法进行了 Matlab 仿真, 并通过实验在多个扰动位置多次验证了两种方法的正确性.

关键词: Sagnac/Mach-Zehnder 分布式光纤传感系统; 互相关; 扰动; 定位

Research of Interferometer Based on Cross-correlation Location Method Computer Engineering and Applications

ZENG Yu-Ju¹, CHEN Ming-Hui²

¹(Changsha Environmental Protection College, Changsha 410005, China)

²(Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China)

Abstract: This paper proposes to process the interference outputs of the Sagnac/Mach-Zehnder interferometer by using time-domain cross-correlation method, which is a distributed optical fiber sensing system, to detect and locate the disturbance. Firstly, it gives the theoretical analysis of Sagnac/Mach-Zehnder interferometer, derives the expression for the interference outputs and uses Bessel function to expand the expression, demonstrates the two interference outputs of the system meet the time-domain cross-correlation properties. Based on further analysis of two interference signals, it proposes two time-domain cross-correlation method by the baseband positioning method and differential positioning method to approach the interference signal to determine the disturbance location.

Key words: Sagnac/Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system; cross-correlation; disturbance; location

随着科技的不断发展以及人们对安全防护的迫切需要, 周界安全防范系统一直以来都备受人们关注. 传统的“电子围栏”, 如主动红外报警器、微波墙式报警器、泄露电缆式周界探测报警系统系统等, 存在探测距离短、误报率高, 部分设备不隐蔽, 受环境影响大等诸多不足. 而基于光纤传感技术的光纤围栏系统作为一种新的入侵检测与定位系统则有着更多的优势. 本论文旨在提出一种新的 Sagnac 干涉仪光纤围栏系统的定位方法, 解决传统 Sagnac 干涉仪光纤围栏系统在定位距离受限和定位精

度上的不足. 在综合 Sagnac 干涉仪和 Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感系统各自优缺点的基础上, 我们提出一种新的用于 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感系统的时域互相关扰动定位方法.

1 系统结构

Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感系统结构^[1]如图 1 所示. 该系统由连续激光器, 光隔离器, 三个 3dB 耦合器和两个光电探测器用单模光纤连接而

① 基金项目:长沙环境保护职业技术学院教育教学课题(12JY009)

收稿时间:2013-06-09;收到修改稿时间:2013-09-09

成。其中光隔离器用来对系统中的反射光进行隔离^[2]，以避免对光源产生影响；耦合器 C1 和耦合器 C2 以及两耦合器间的单模光纤 L1、L2 构成了 Sagnac 干涉仪，耦合器 C1 和耦合器 C3 以及两耦合器间的单模光纤 L1、L2、L3 和 L4 经耦合器 C2 的耦合效应构成 Mach-Zehnder 干涉仪。在该系统中，Sagnac 干涉仪的输出用于检测是否有扰动发生，光纤 L1 作为传感光纤，它和非传感光纤 L2 等长，且非传感光纤 L2 需要进行声隔离，以减小环境噪声对扰动定位的不利影响；Mach-Zehnder 干涉仪的输出用于辅助定位，光纤 L1 和 L4 作为传感臂，光纤 L2 和 L3 作为参考臂，光纤 L3 和 L4 为耦合器 2 和耦合器 3 尾纤长度。

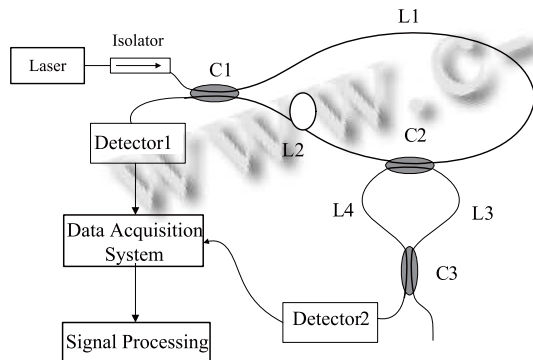


图 1 基于 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪的分布式光纤传感系统

2 系统定位原理

Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感系统的基本原理是：从光源发出的光经光隔离器注入耦合器 1。光经耦合器 1 被均分成两路光后，将沿以下四条路径传播：

路径 1: C1 → L1 → C2 → L2 → C1.

路径 2: C1 → L2 → C2 → L1 → C1.

路径 3: C1 → L1 → C2 → L4 → C3.

路径 4: C1 → L2 → C2 → L3 → C3.

在 Sagnac 环中光分别沿顺时针和逆时针方向沿路径 1 和路径 2 传播。由于这两路光的光程相等，当没有扰动作用于该系统时，根据 Sagnac 环的互易效应，两路光在耦合器 1 处相遇后其干涉输出为零。而在 Mach-Zehnder 干涉仪中，光沿路径 3 和路径 4 传播，由于传感臂(L1 和 L4)和参考臂(L2 和 L3)等长，当无扰动作用于该系统时，两路光在耦合器 3 处相遇后干涉输出亦为零。两路干涉信号分别到达光电

探测器 1 和光电探测器 2 后，进入信号处理系统作相关运算。

当传感光纤 L1 上某点发生扰动时，扰动信号对路径 1、路径 2 和路径 3 三路光的相位进行调制。由于扰动信号到达耦合器 1 的时间不同，路径 1 和路径 2 两路光之间存在非零相位差，而路径 3 和路径 4 两路光因为一路存在相位调制而另一路无相位调制故亦存在非零相位差，于是在耦合器 1 和耦合器 3 输出端均产生由扰动引起的时变干涉信号。

由于任意信号都可分解为正弦信号集合的形式，所以可先考虑最简单的情况，设扰动引起的相位调制为

$$\Phi(t) = \varphi_0 \sin(\omega_s t) \tag{1}$$

其中 φ_0 和 ω_s 分别为扰动引起的相位信号的幅度和角频率；则 Sagnac 环中顺时针和逆时针传播的光电场可分别表达为

$$E_1 = E_{10} \exp\{j[\omega_c t + \Phi_1(t) + \theta_1]\} \tag{2}$$

$$E_2 = E_{20} \exp\{j[\omega_c t + \Phi_2(t) + \theta_2]\} \tag{3}$$

其中 E_{10} 和 E_{20} 分别为两束相干光电场的幅度； ω_c 为光载波的角频率； θ_1 和 θ_2 为任意光载波相位角度； $\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$ 分别为扰动引起的两路光相位的变化，可表达为

$$\Phi_1(t) = \varphi_0 \sin \omega_s (t - \tau_r - \tau) \tag{4}$$

$$\Phi_2(t) = \varphi_0 \sin \omega_s (t - \tau_l) \tag{5}$$

τ 为光通过光纤 L2 一次所需的时间； τ_l 和 τ_r 分别为 Sagnac 环中沿逆时针和顺时针方向传输的两束光由扰动位置传输到传感光纤 L1 两头所需的时间，令 L 为扰动点到耦合器 1 的长度，于是有：

$$\tau_l = \frac{nL}{c} \tag{6}$$

$$\tau_r = \frac{n(L_1 - L)}{c} \tag{7}$$

$$\tau = \frac{nL_2}{c} = \frac{nL_1}{c} = \tau_l + \tau_r \tag{8}$$

则到达探测器的总光强为

$$\begin{aligned} I &= (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^* \\ &= E_1 E_1^* + E_2 E_2^* + 2\text{Re}(E_1 E_2^*) \end{aligned} \tag{9}$$

上式中 $2\text{Re}(E_1 E_2^*)$ 为干涉项。

对于一个 2×2 的耦合器，直通输出端的相位超前于耦合输出端的相位 $\pi/2$ ，把式(2)、式(3)、式(4)和式(5)

代入到式(9), 可以得到:

$$I = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos \left\{ \varphi_0 \left[\begin{matrix} \sin W_s(t - \tau_r - \tau) \\ -\sin W_s(t - \tau_l) \end{matrix} \right] + \theta_1 - \theta_2 + \pi \right\} \quad (10)$$

因为耦合器 1 和耦合器 2 均为 3dB 耦合器, E_{10} 与 E_{20} 相等. 令 $E_{10}=E_{20}=E_{s0}$, $\Delta\phi_1=\theta_1-\theta_2$, 则 Sagnac 环干涉输出项为:

$$\begin{aligned} I_{Sagnac} &= 2\text{Re}(E_1E_2^*) \\ &= -2E_{s0}^2 \cos[2\varphi_0 \cos w_s(t - \frac{\tau_l + \tau_r + \tau}{2}) \sin w_s \frac{\tau_l - \tau_r - \tau}{2} + \Delta\phi_1] \\ &= -2E_{s0}^2 \cos[\Delta\phi_1 - 2\varphi_0 \cos w_s(t - \tau) \sin w_s \tau_r] \end{aligned} \quad (11)$$

由于光纤 L3 和 L4 的长度仅仅是耦合器 2 和耦合器 3 的尾纤长度之和, 相对于长距离传感光纤 L1, 其长度可忽略不计. 因此, 可类似地把 Mach-Zehnder 干涉仪传感臂和参考臂中传播的光电场分别表达为:

$$E_3 = E_{30} \exp\{j[w_c t + \varphi_0 \sin w_s(t - \tau_r) + \theta_3]\} \quad (12)$$

$$E_4 = E_{40} \exp\{j[w_c t + \theta_4]\} \quad (13)$$

由于耦合器 1、耦合器 2 和耦合器 3 均为 3dB 耦合器, 则 E_{30} 与 E_{40} 相等. 令 $E_{30}=E_{40}=E_{m0}$, $\Delta\phi_2=\theta_3-\theta_4$, Mach-Zehnder 干涉输出项可表达为:

$$\begin{aligned} I_{M-Z} &= 2\text{Re}(E_3E_4^*) = 2E_{30}E_{40} \cos[\varphi_0 \sin W_s(t - \tau_r) \\ &\quad + \theta_3 - \theta_4 + \pi] \\ &= 2E_{m0}^2 \cos[\varphi_0 \sin w_s(t - \tau_r) + \pi + \Delta\phi_2] \\ &= -2E_{m0}^2 \cos[\varphi_0 \sin w_s(t - \tau_r) + \Delta\phi_2] \end{aligned} \quad (14)$$

令 $C = -2\varphi_0 \sin w_s \tau_r$, $B_1 = -2E_{s0}^2$, 则 I_{Sagnac} 可改写为如下形式:

$$I_{Sagnac} = B_1 \cos[C \cos w_s(t - \tau) + \Delta\phi_1] \quad (15)$$

该式可用贝塞尔函数展开为:

$$\begin{aligned} I_{Sagnac} &= B_1 \{ [J_0(C) + 2\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(C) \cos(2nw_s(t - \tau))] \times \cos \Delta\phi_1 - \\ &\quad [2\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \cos((2n+1)w_s(t - \tau))] \times \sin \Delta\phi_1 \} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $B_1 J_0(C)$ 与时间 t 无关, 是直流项.

令 $B_2 = -2E_{m0}^2$, 则 I_{M-Z} 可改写为如下形式:

$$I_{M-Z} = B_2 \cos[\varphi_0 \sin w_s(t - \tau_r) + \Delta\phi_2] \quad (17)$$

该式同样可用贝塞尔函数展开为

$$\begin{aligned} I_{M-Z} &= B_2 \{ [J_0(\varphi_0) + 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\varphi_0) \cos(2nw_s(t - \tau_r))] \times \cos \Delta\phi_2 - \\ &\quad [2\sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\varphi_0) \sin((2n+1)w_s(t - \tau_r))] \times \sin \Delta\phi_2 \} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $B_2 J_0(\varphi_0)$ 与时间 t 无关, 是直流项.

因为 Sagnac 环的相位偏置的时间平均值为 $\pi/2$ ^[3], 而我们通过多次实验证明 Mach-Zehnder 干涉仪通常存在 $\pi/2$ 的相位偏置, 所以 Sagnac 环干涉输出项和 Mach-Zehnder 干涉输出项可分别表达为

$$I_{Sagnac} = 2B_1 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \cos((2n+1)w_s(t - \tau)) \quad (19)$$

$$I_{M-Z} = 2B_2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\varphi_0) \sin((2n+1)w_s(t - \tau_r)) \quad (20)$$

在式(19)和式(20)基础上, 我们提出基于时域互相关的两种定位方法: 基频定位法和微分定位法.

① 基频定位法

将式(19)做等效变换, 可展开为

$$\begin{aligned} I_{Sagnac} &= 2B_1 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \sin((2n+1)w_s(t - \tau + \frac{\pi}{2(2n+1)w_s})) \\ &= 2B_1 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \sin((2n+1)w_s(t - (\tau - \frac{1}{4(2n+1)f_s}))) \end{aligned} \quad (21)$$

比较式(20)和式(21), 可以发现 Sagnac 干涉仪和 Mach-Zehnder 干涉仪干涉输出满足时域互相关. 两路信号的时延 Δt 可通过互相关算法精确获得.

时延 Δt 可表达为:

$$\Delta t = (\tau - \frac{1}{4(2n+1)f_s}) - \tau_r = \tau_l - \frac{1}{4(2n+1)f_s} \quad (22)$$

输出信号包含无穷多个奇数倍频分量, 各倍频分量的幅度由贝塞尔函数 $J_{2n+1}(C)$ 和 $J_{2n+1}(\varphi_0)$ 决定; 当扰动信号幅度 φ_0 很小时, 高阶贝塞尔函数项可以忽略. 此时, 式(22)可表达为

$$\tau_l = \Delta t + \frac{1}{4f_s} \quad (23)$$

故扰动位置可算得为:

$$L = \frac{c}{n} \tau_l = \frac{c}{n} (\Delta t + \frac{1}{4f_s}) \quad (24)$$

其中, c 为光在真空中的传播速度; n 为光纤纤芯折射率. 若设计两个低通滤波器对两路干涉输出信号进行低通滤波处理, 仅保留低频分量进行互相关运算, 扰动幅度 φ_0 将不再受限制.

② 微分定位法

将式(20)对时间 t 求微分, 有

$$\frac{dI_{M-Z}}{dt} = 2B_2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\varphi_0) (2n+1)w_s \cos((2n+1)w_s(t - \tau_r)) \quad (25)$$

比较式(19)和式(25)可以发现 Sagnac 干涉仪干涉输出和 Mach-Zehnder 干涉仪干涉输出的时间微分满足时域互相关.

可求得时延

$$\Delta t = \tau - \tau_r = \tau_l \tag{26}$$

进而可得到扰动距离第一个耦合器的距离 L :

$$L = \frac{c}{n} \tau_l = \frac{c}{n} \Delta t \tag{27}$$

在理想情况下, 即不考虑环境噪声影响的情况下, 此定位方法无需低通滤波器对干涉项处理, 扰动幅度 ϕ_0 不受限制.

3 系统定位原理的仿真

我们使用 Matlab 软件对时域互相关方法进行数值分析^[3]. 仿真中使用的参数设置如下:

- 1) 传感光纤 $L_1 = 301.5$ m;
- 2) 光纤 $L_4 = 1.5$ m;
- 3) Mach-Zehnder 干涉仪传感臂 303 m;
- 4) 光纤纤芯折射率 $n = 1.48$;
- 5) 扰动信号频率 f_s 和幅度 ϕ_0 分别为 20 kHz 和 1;
- 6) 采样率为 125 MHz.

由于信号幅度对扰动定位^[4]没有影响, 所以在仿真中我们将干涉信号幅度做了归一化处理^[5]. 定义扰动发生在传感光纤 L_1 上距离耦合器 1 为 $L = 51.75$ m 的位置, 则 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪的输出如图 2 所示.

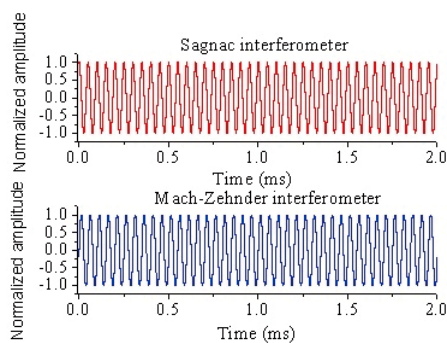


图 2 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪输出

从图 2 可以看到两路干涉信号具有相同的波形, 只是初始相位不同. 这表明两路信号确实满足时域互相关关系. 下面先研究基频定位法的有效性. 两路干涉信号时域互相关波形如图 3 所示.

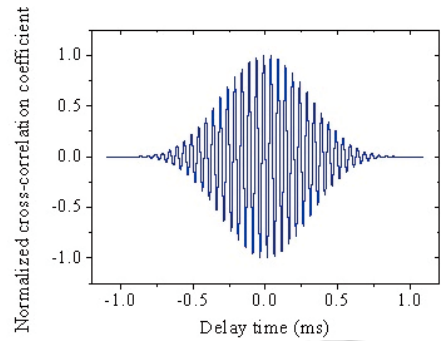


图 3 两路干涉信号的时域互相关波形

图 4 是图 3 峰值区域的放大图形. 从图 4 可以获得时延 Δt 为 $-12.24 \mu s$. 根据式(24)可得扰动位置为 52.70 m, 绝对误差为 0.95 m, 相对误差为 1.84%. 故基频定位法在此扰动位置具有很高的定位精度.

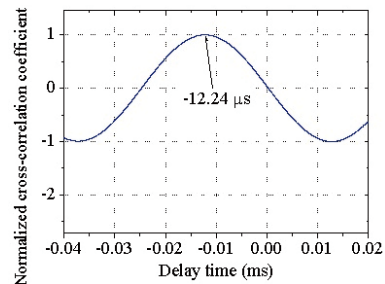


图 4 峰值区域放大图

在同样的参数设置情况下, 我们研究相同扰动位置微分定位法的有效性. 图 5 为 Sagnac 干涉仪输出和 Mach-Zehnder 干涉仪输出的微分.

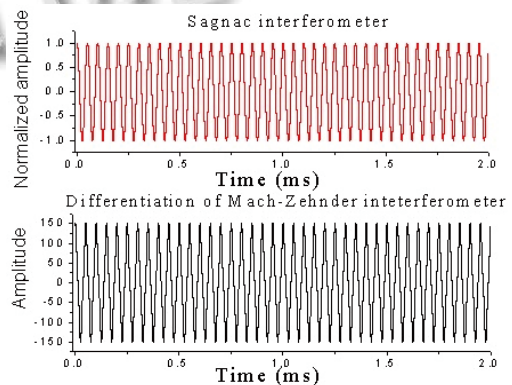


图 5 Sagnac 干涉仪输出和 Mach-Zehnder 干涉仪输出的微分

将 Sagnac 干涉仪输出和 Mach-Zehnder 干涉仪输出的微分信号做互相关运算, 其时域互相关波形如图 6

所示。

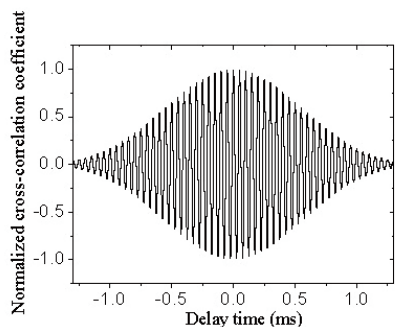


图 6 Sagnac 干涉仪输出和 Mach-Zehnder 干涉仪输出的微分信号的时域互相关波形

将图 6 峰值区域放大成如图 7。从图 7 可得时延 Δt 为 $0.256 \mu s$ 。根据式(27)计算出扰动位置为 51.89 m, 绝对误差为 0.14 m, 相对误差达到 0.27%。所以微分定位法在此扰动位置亦具有很高的定位精度。

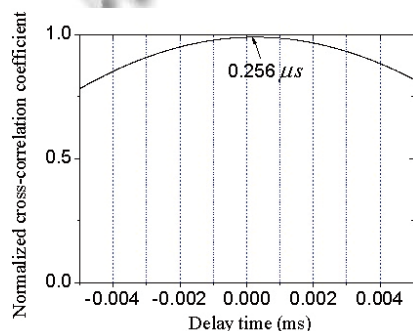


图 7 峰值区域放大图

在其它参数设置不变的情况下, 改变扰动位置。我们在传感光纤上距离耦合器 1 为 101.75 m, 151.75 m, 201.75 m 和 251.75 m 的位置分别进行了基频定位法和微分定位法的仿真。

两种定位方法在各扰动位置的定位结果列于表 1 和表 2。

表 1 基频定位法在 5 个扰动位置的定位结果

实际位置 (m)	探测位置 (m)	绝对误差 (m)	相对误差 (%)
51.75	52.70	0.95	1.84
101.75	102.97	1.22	1.20
151.75	151.62	0.13	0.09
201.75	201.89	0.14	0.07
251.75	252.16	0.41	0.16

表 2 微分定位法在 5 个扰动位置的定位结果

实际位置 (m)	探测位置 (m)	绝对误差 (m)	相对误差 (%)
51.75	51.89	0.14	0.27
101.75	102.16	0.41	0.40
151.75	152.43	0.68	0.45
201.75	202.70	0.95	0.47
251.75	252.97	1.22	0.48

表 1 和表 2 显示探测位置和实际位置基本一致, 在 Matlab 仿真中基频定位法和微分定位法在不同扰动位置均有非常高的定位精度。

仿真证明, 把时域互相关定位法用于 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感, 使得该系统既保留了 Sagnac 干涉仪对环境温度不敏感^[6]的特性, 排除了由于温度变化造成误判的可能性, 又结合传统 Mach-Zehnder 时域定位法的优点, 避免了 Sagnac 干涉仪频域定位法在定位长度上的局限性^[7], 且只需一个激光器, 降低了系统成本, 是一种取 Sagnac 和 Mach-Zehnder 各自之所长, 补各自之所短的新的干涉仪分布光纤传感系统。

4 结语

本文主要对 Sagnac/Mach-Zehnder 干涉仪分布光纤传感系统进行了理论分析和数值研究。详细阐述了系统结构和扰动定位原理, 推导出扰动引起的干涉输出信号的表达式, 利用 Bessel 函数展开, 确定了系统的两路干涉输出信号是时域互相关的。在此基础上进一步分析了两路干涉信号的表达式, 提出了基频定位和微分定位两种时域互相关定位方法。对于单频扰动该系统不必再用 PZT 调制器和繁琐的相位生成载波技术对入侵信号进行解调。定位仿真证明此两种方法均具有非常高的定位精度。

参考文献

- 1 Tackmannl G, Berg P, Schubert C, Abend S, Gilowski M, Ertmer W, Rasel EM. Self-alignment of a compact large-area atomic Sagnac interferometer. *NEW journal of physics*, 2012, 2.
- 2 Bravo M, Pinto AMR, Lopez-Amo M, Kobelke J, Schuster K. High precision micro-displacement fiber sensor through a suspended-core Sagnac interferometer. 2012, 37(2):202-204.
- 3 刘波, 杨亦飞, 张键, 罗建花, 刘艳格, 开桂云. 基于 M-Z 干涉的

(下转第 77 页)

高校实验教学管理信息系统

系统应用

系统维护

消息中心

实验中心

- ▶ 实验室管理
- ▶ 我的实验
- ▶ 个人预约
- ▶ 预约应答
- ▶ 班级预约

教学中心

预约应答
帮助?

目前操作功能: 实验预约列表

实验预约列表

序号	实验名称	下单时间	预约人	实验时间	预约状态	操作
1	aa	2013年4月14日(星期日) 20:42:10	管理员	2013年4月18日(星期四) 第一二节	审核中	同意 ✕ 拒绝
2	AAA	2013年4月14日(星期日) 17:38:54	student	2013年4月18日(星期四) 第一二节	审核中	同意 ✕ 拒绝
3	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:05:29	Teacher	2013年4月10日(星期三) 第七八节	审核通过	审核通过
4	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:05:13	Teacher	2013年4月10日(星期三) 第五六节	审核中	同意 ✕ 拒绝
5	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:04:57	Teacher	2013年4月10日(星期三) 第一二节	审核中	同意 ✕ 拒绝
6	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:04:44	Teacher	2013年4月10日(星期三) 第三四节	审核中	同意 ✕ 拒绝
7	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:04:28	Teacher	2013年4月9日(星期二) 第七八节	审核中	同意 ✕ 拒绝
8	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:04:13	Teacher	2013年4月9日(星期二) 第五六节	审核中	同意 ✕ 拒绝
9	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:03:58	Teacher	2013年4月9日(星期二) 第三四节	审核中	同意 ✕ 拒绝
10	测试班级分页	2013年4月6日(星期六) 11:03:42	Teacher	2013年4月9日(星期二) 第一二节	审核中	同意 ✕ 拒绝

总记录: 26 页码: 1/3 每页: 10
首页 上一页 1 2 3 下一页 尾页

图 7 “预约审核”模块的实现界面

动态生成算法, 可满足开放式实验管理的复杂需求, 具有较高的实用价值. 后续研究包括改进页面设计、完善异常处理、添加实验预约的撤销功能等.

参考文献

- 1 刘琴. 开放式实验教学研究现状及展望. 实验室科学与技术, 2010, 8(4): 81-82.
- 2 蒋清锋, 陈惠欢, 郑建立. 基于门禁的高校开放式实验教学管理系统. 计算机系统应用, 2013, 22(3): 51-54.

- 3 徐玉莲. 高校开放式实验教学管理平台的构建. 实验室科学, 2011, 14(4): 163-166.
- 4 肖利梅, 李策, 袁桂慈. 开放式实验管理系统的设计与实现. 电气电子教学学报, 2010, (9): 150-152.
- 5 闫丽, 崔素萍, 左豫虎, 等. 基于 UML 的高校开放性实验教学管理系统的开发. 实验室科学, 2010, 13(1): 173-175.
- 6 Supesoft. 权限管理系统(FrameWork) 1.0.9 Release. <http://framework.supesoft.com/>, 2013-05-10.

(上接第 102 页)

- 光纤围栏系统实验研究. 光子学报, 2007, 36(6): 1013-1017.
- 4 孙琪真, 刘德明, 王健. 基于环结构的新型分布式光纤振动传感系统. 物理学报, 2007, 56(10): 5903-5906.
- 5 Xu WY, Zhang CX, Liang S, et al. Fiber-Optic Distributed Sensor based on a Sagnac Interferometer with a Time Delay Loop for Detecting Time Varying Disturbance. Microwave

- and Optical Techonology Letters, 2009, 51(11): 2564-2567.
- 6 Hoffman PR, Kuzyk GM. Position Determination of an Acoustic Burst Along a Sagnac Interferometer. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(2): 494-498.
- 7 单超, 方捻, 王陆唐, 黄肇明. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法. 光学学报, 2010, 30(2): 335-339.