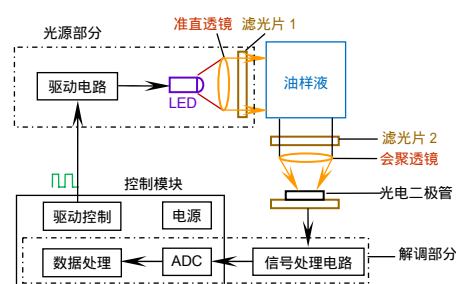


DOI: 10.12086/oe.2019.180338

脉冲调光与方波调光方法噪声模型的建立与分析

陈竞韬, 段发阶*, 蒋佳佳, 黄婷婷, 马凌

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072



摘要: 在利用紫外荧光法对油含量小于 10 mg/L 的油田回注水进行检测时, 光源热功率过大会降低测量结果的精度。为减小光源热功率, 提出了光源的脉冲调光方法(占空比小于 50%), 替代原有的方波调光方法(占空比为 50%)。分别建立了基于脉冲调光方法与方波调光方法的噪声分析模型, 比较了两种方法的测量结果信噪比(SNR), 并推导了测量结果信噪比与光源功率的关系, 在信噪比相同的情况下, 可以得出脉冲调光方法的电流幅值与占空比的最优选择方案。结果表明, 当测量结果信噪比相同时, 脉冲调光方法光源功率不足方波调光方法的 21%。最后通过 MATLAB 软件对两种调光方法的信号解调过程进行仿真, 比较了两种方法的测量结果信噪比, 仿真所得信噪比关系与理论推导结果一致。

关键词: 方波调光方法; 脉冲调光方法; 信噪比; 光源功率

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 陈竞韬, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 脉冲调光与方波调光方法噪声模型的建立与分析[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 180338

The establishment and analysis of noise model for pulse modulation dimming method and square-wave modulation dimming method

Chen Jingtao, Duan Fajie*, Jiang Jiajia, Huang Tingting, Ma Ling

State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: When measuring the oil concentration lower than 10 mg/L in reinjection water based on ultraviolet fluorescence method, high thermal power of the light source will reduce the accuracy of measurement results. To reduce the thermal power of light source, pulse modulation dimming method (duty ratio less than 50%) was proposed to replace square-wave modulation dimming method (duty ratio equal to 50%). Two noise analysis models for pulse modulation and square-wave modulation dimming method were built. Signal-to-noise ratio (SNR) of measurement results for two methods were compared. The relationship between SNR and light source power was derived. The optimum choices of current amplitude and duty ratio for pulse modulation dimming method were proposed under the

收稿日期: 2018-06-22; 收到修改稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0204800); 国家 863 计划资助项目(2013AA102402); 国家自然科学基金资助项目(61501319); 天津市自然科学基金资助项目(17JQCQNJC01100); 光电信息与仪器北京市工程研究中心开放课题资助项目(GD2015007); 海洋经济创新发展区域示范项目资助项目(cxsf2014-2); 教育部博士基金资助项目(20130032110054); 微光机电系统技术教育部重点实验室(天津大学)开放基金资助项目(MOMST2015-7)

作者简介: 陈竞韬(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事油污水光学检测技术的研究。E-mail: 2016202197@tju.edu.cn

通信作者: 段发阶(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事测试计量技术及仪器、激光及光电测试技术、计算机视觉检测技术、光纤传感技术、自动控制技术等方面研究。E-mail: fjduan@tju.edu.cn

condition of the same signal-to-noise ratio. Results show that the light source power for pulse modulation dimming method is less than 21% of that for square-wave modulation dimming method under the condition of the same signal-to-noise ratio. Finally, signal demodulation models of two dimming methods were simulated by MATLAB software. The simulated relationship of SNR for two methods is consistent with the theoretical analysis results.

Keywords: square-wave modulation dimming method; pulse modulation dimming method; signal-to-noise ratio; power of the light source

Citation: Chen J T, Duan F J, Jiang J J, *et al.* The establishment and analysis of noise model for pulse modulation dimming method and square-wave modulation dimming method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180338

1 引言

在生产合格的油、气产品时,需要将石油中的水与油、气进行分离,产生的水中仍然含有一定量的杂质,这些含有杂质的水被称为含油污水。油田普遍将含油污水进行处理后回注地下。回注水的油分以小颗粒的形式均匀分布在回注水中^[1]。为避免回注水中过量的油分影响地下水源,需要监测回注水中的油浓度,确保其中油浓度低于指标要求。

油分检测方法有红外分光光度法、浊度法、紫外分光光度法和紫外荧光法等^[2-5]。其中,紫外荧光法利用芳香烃的荧光效应测量水中油分浓度,无需化学试剂,具有实时性、高精度的优点,被广泛用于水中油分的在线检测。但传统荧光检测设备体积大,不利于嵌入安装^[6-8]。为了将测量设备小型化,可以采用紫外发光二极管(LED)作为光源,光电二极管作为接收器,取代传统的高压汞灯、激光光源和光电倍增管^[9-12]。

为了便于区别信号与噪声以提高信噪比,许飞等人^[12]使用占空比为 50%的方波电流对 LED 调光(以下简称“方波调光”),采用提取荧光信号中基波分量振幅的解调方式,有效限制了噪声带宽,并准确测量了油分浓度在 100 mg/L~1000 mg/L 的含油污水,但并未建立噪声分析模型。

处理后的回注水油分浓度较低,通常油含量小于 10 mg/L^[1,13]。为准确测量其浓度,需要足够大的 LED 发射功率,使受激产生的荧光足以被检测。若采用方波调光的方法测量油浓度,LED 会因辐射功率过大而使芯片温度过高,从而导致 LED 发光效率急剧下降,中心波长漂移,甚至损坏 LED 器件^[14-16]。针对该问题,本文采用脉冲宽度调光(PWM)与脉冲幅度调光(PAM)相结合的方法(以下简称“脉冲调光”),降低脉冲电流占空比,提高脉冲电流幅度,并利用数字解调算法提取荧光光强。脉冲调光方法使 LED 产生更高的瞬态

光强,缩短单位时间内的通电时间,从而降低 LED 平均功率,并保证信噪比不降低。本文建立了基于方波调光与脉冲调光方法的噪声分析模型,比较了两种方法的测量结果信噪比(SNR),并推导了测量结果信噪比与光源功率的关系,得出了脉冲调光方法的电流幅值与占空比的最优选择方案。在该方案中选用的 LED 所能承受的脉冲电流越大,越有利于脉冲调光方法降低 LED 平均功率。最后通过 MATLAB 软件对两种方法的解调过程进行仿真,将仿真得到的 SNR 与理论推导得到的 SNR 进行对比。

2 基本原理

当使用特定波长的光照射荧光物质时,物质的电子吸收光的能量发生跃迁,并迅速回到低能级,发出波长较激发光更长的光,这种现象称为荧光效应。在样液的油浓度测量中,使用中心波长为 360 nm 的紫外光照射油样液,油分中的芳香烃吸收紫外光并产生 400 nm~550 nm 波段的荧光^[12]。根据 Lambert-Beer 定律,在油浓度较低的情况下,荧光光强 I_F 与油浓度 c_{oil} 的关系可以近似为^[12]

$$I_F = k_F \cdot I_L \cdot c_{oil}, \quad (1)$$

其中: I_L 为紫外 LED 光强, k_F 为油的荧光系数。

基于紫外荧光法的水中油分浓度测量系统如图 1 所示,两种方法均采用该测量系统结构,其中包含控制模块、紫外 LED、滤光片 1、准直透镜、滤光片 2、会聚透镜、光电二极管及相关电路。滤光片 1 为中心波长 360 nm 的窄带滤光片,滤光片 2 为 410 nm~550 nm 的带通滤光片。控制模块通过控制信号对紫外 LED 进行调光,产生的激发光通过准直透镜生成平行光,再经过滤光片 1 入射至油样液,使得油样液中芳香烃受激产生荧光。为避免光电二极管接收到的荧光被激发光淹没,光电二极管被固定在与激发光方向呈 90° 夹角位置。荧光经过滤光片 2 滤除杂散光,再由会聚

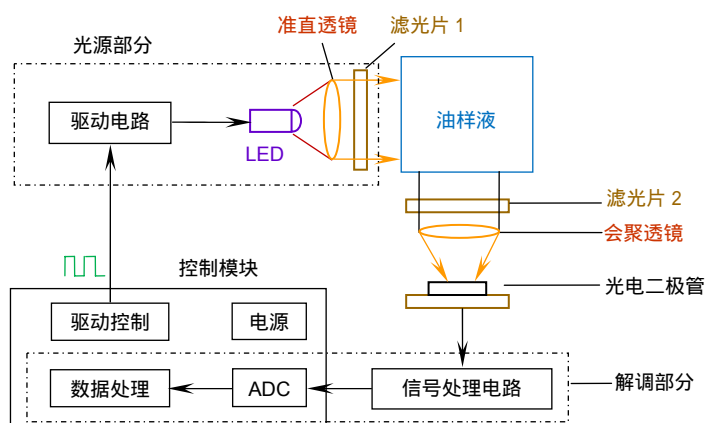


图 1 测量系统结构原理

Fig. 1 Principle of measurement system structure

透镜会聚至光电二极管处。光电二极管检测到的荧光光强经过信号处理电路，而后通过模数转换器(ADC)采样。采样所得数据经过处理和计算，可获得油浓度信息。该测量过程可以被理解为调幅解调过程。

在光源部分，采用方波调光方法时，控制模块控制驱动电路生成 50%占空比的方波电流以驱动 LED；采用脉冲调光方法时，控制模块控制驱动电路生成占空比更低、幅度更高的脉冲电流以驱动 LED。

在解调部分，当处理 50%占空比的方波信号时，采用带通滤波器与全波检波电路提取基波分量的振幅，并由带通滤波器限制噪声带宽。当处理脉冲信号时，由于脉冲信号频谱“更宽更矮”，提取基波分量振幅的方法因基波振幅的减小而不再适用。为更限度地保留有用信号，通过模数转换电路(ADC)对信号的波峰波谷采样，采用将波峰值与波谷值作差的方式提取脉冲信号的峰峰值。

由于两种方法采用了不同的调制解调方式，为研究两种方法的光源功率与信噪比的关系，需要建立两种调制解调方法的噪声模型，对比分析二者在不同情况下的优劣。

测量系统的噪声主要由三部分组成：光源部分引入的噪声、测量过程中的杂散光和信号处理电路引入

的噪声。设系统噪声为高斯白噪声，且各部分噪声之间是不相关的，其功率谱密度为 $N_0^2(A/Hz)$ ，因此光电二极管输出端的电流有效值 D 为

$$D = S + N \quad (2)$$

其中： S 为荧光在光电二极管处产生的光电流有效值， N 为系统噪声在光电二极管输出端的有效值。

易知 S 与 I_F 成比例关系，由式(1)可知，对测量油浓度的信噪比分析即为对 D 的信噪比分析。

3 噪声分析模型

3.1 方波调光方法的噪声分析模型

紫外 LED 经占空比 50%的方波电流驱动，产生的激发光照射被测样液产生荧光，光电二极管接收荧光，并由信号处理电路提取荧光中的基波振幅，以获得与油浓度有关的信息。方波调光方法的解调流程如图 2 所示。

信号处理电路包括带通滤波器和全波检波电路，其中带通滤波器的中心频率为载波频率 f_0 ，带宽为 Δf ，以提取荧光中的基频分量；全波检波电路用于提取基频分量的振幅，其低通滤波器的截止频率设为 f_c ，且 $f_c < \Delta f$ 。

光电二极管输出的电流信号为 $i_1(t)$ ，周期为

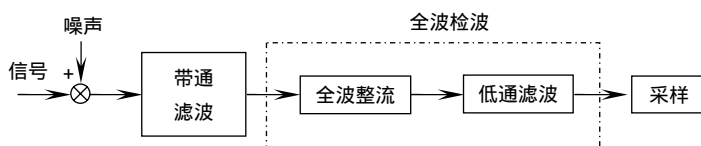


图 2 方波解调示意图

Fig. 2 Diagram of square-wave signal demodulation

$T_0 = 1/f_0$ ，幅值为 A_1 ，易知 A_1 包含了油浓度信息。一个周期内的电流信号 $i_1(t)$ 及其傅里叶级数展开为

$$i_1(t) = \begin{cases} A_1, & 0 \leq t < \frac{T_0}{2} \\ 0, & \frac{T_0}{2} \leq t < T_0 \end{cases}$$

$$= A_1 \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2i-1} \sin 2\pi f_0 (2i-1)t \right) \quad (3)$$

为提取电流信号的有效值 S_1 ，带通滤波器提取 $i_1(t)$ 的基频分量 $(2/\pi)A_1 \sin(2\pi f_0 t)$ ，全波检波电路提取基频分量的振幅，等效比例系数为 $2/\pi$ 。因此方波调光方法提取电流信号的有效值 S_1 为

$$S_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot A_1 = \frac{4}{\pi^2} A_1 \quad (4)$$

信号中的噪声同样经过了带通滤波器和全波检波电路，噪声带宽可以近似为检波电路中低通滤波器的带宽。设低通滤波器的过渡带很窄，近似为理想情况。噪声功率谱密度为 N_0^2 (A/Hz)，则系统噪声在光电二极管输出端的有效值 N_1 为

$$N_1 = \sqrt{P_{n1}} = \sqrt{\int_0^{f_c} N_0^2 df} = N_0 \sqrt{f_c} \quad (5)$$

由式 (4) 与式 (5) 得到测量信号的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为

$$R_{SNR1} = 20 \log \left(\frac{S_1}{N_1} \right) = 20 \log \left(\frac{4A_1}{\pi^2 N_0 \sqrt{f_c}} \right) \quad (6)$$

3.2 脉冲调光方法的噪声分析模型

采用脉冲调光方法，降低电流占空比 w_2 ，提高电流幅度，紫外 LED 经该电流驱动，产生的激发光照射被测样液产生荧光，光电二极管接收荧光，并经过低通滤波后被采样。利用数字解调算法提取信号幅值，以获得油浓度的信息。脉冲调光方法的解调流程如图 3 所示。

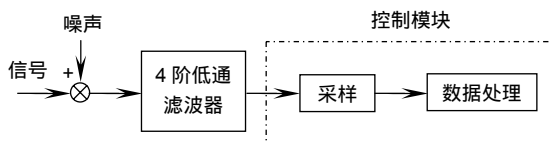


图 3 脉冲解调示意图

Fig. 3 Diagram of pulse signal demodulation

为得到信号的幅值，在信号每个周期的高电平和低电平中点进行采样。采样得到的序列包含信号每个周期的波峰值与波谷值，将两者作差，并经 FIR 低通滤波器限制噪声带宽，最后提取信号每个周期的幅值。数字解调算法如图 4 所示。易知采样频率 f_{s2} 是载波频率 f_0 的两倍。

信号处理电路只包含截止频率为 f_{c2} 的低通滤波器，作用是在采样前限制噪声带宽并保证脉冲信号幅值不衰减，因此 f_{c2} 远大于 f_{s2} 。设光电二极管产生的电流信号 $i_2(t)$ 周期为 $T_0 = 1/f_0$ ，幅值为 A_2 ，一个周期内的电流信号 $i_2(t)$ 为

$$i_2(t) = \begin{cases} A_2, & 0 \leq t < w_2 T_0 \\ 0, & (1-w_2)T_0 \leq t < T_0 \end{cases} \quad (7)$$

同样，设电流噪声 $i_{n2}(t)$ 为理想的白噪声，易知其功率谱密度 $S_{nc2}(f)$ 为

$$S_{nc2}(f) = \begin{cases} N_0^2, & 0 \leq f < f_{c2} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

采样得到的序列为 $y_2(m) = i_2(m) + i_{n2}(m)$ ，其中 $i_2(m)$ 为电流信号， $i_{n2}(m)$ 为电流噪声。由于采样频率 f_{s2} 小于输入噪声带宽 f_{c2} ，噪声频谱发生混叠，由于白噪声的功率与采样频率无关，采样之后的噪声 $i_{n2}(m)$ 功率谱密度 $S_{n2}(f)$ 为

$$S_{n2}(f) = 2lN_0^2, \quad -\frac{f_{s2}}{2} \leq f < \frac{f_{s2}}{2} \quad (9)$$

其中：

$$l = \frac{f_{c2}}{f_{s2}} = \frac{f_{c2}}{2f_0} \quad (10)$$

在利用序列 $y_2(m)$ 计算信号的幅值时，产生了一组新的序列 $y'_2(m)$ ，其中：

$$\begin{aligned} y'_2(m) &= y_2(2m) - y_2(2m-1) \\ &= i_2(2m) - i_2(2m-1) + i_{n2}(2m) - i_{n2}(2m-1) \\ &= i'_2(m) + i'_{n2}(m), \quad m = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

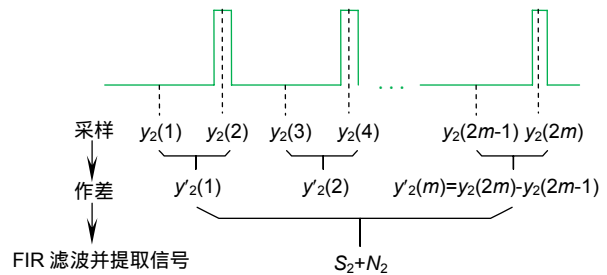


图 4 数字解调算法示意图

Fig. 4 Diagram of digital demodulation algorithm

$i_2(m)$ 的幅值即为提取的电流信号的有效值 S_2 :
 $S_2 = i_2'(m) = i_2(2m) - i_2(2m-1) = A_2$ 。 (12)

$i_{n2}'(m)$ 为经作差计算后的噪声, 且:
 $i_{n2}'(m) = i_{n2}(2m) - i_{n2}(2m-1)$ 。

为求得 $i_{n2}'(m)$ 的功率谱密度, 设 $x(m) = i_{n2}(m) - i_{n2}(m-1)$, 等式两边取 z 变换, 有:

$$H(z) = \frac{X(z)}{I_{n2}(z)} = 1 - z^{-1} \quad (13)$$

由 $f_{s2} = 2f_0$, $z = e^{-j2\pi f/f_s} = e^{-j\pi T_0 f}$, 则式(13)可改写为

$$H(e^{j\pi T_0 f}) = 1 - e^{-j\pi T_0 f} \quad (14)$$

由式(9)与式(14)知, $x(m)$ 的功率谱密度为

$$S_x(f) = S_{n2}(f) |H(e^{j\pi T_0 f})|^2 = 2IN_0^2(2 - 2\cos(\pi T_0 f)), \quad -\frac{f_{s2}}{2} \leq f < \frac{f_{s2}}{2} \quad (15)$$

由于 $i_{n2}'(m) = x(2m)$, 所以序列 $i_{n2}'(m)$ 可视为 $x(m)$ 的降采样, 其采样频率为 $f_{s2}/2 = f_0$ 。噪声电流 $i_{n2}'(m)$ 的功率谱密度 $S_{n2}'(f)$ 即为 $S_x(f)$ 关于 f_0 周期延拓的叠加:

$$\begin{cases} S_x(f + kf_0) = 2IN_0^2[2 - (-1)^k 2\cos(\pi T_0 f)], \\ \quad - (1+k)f_0 \leq f < (1-k)f_0, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ S_{n2}'(f) = S_x(f - f_0) + S_x(f) + S_x(f + f_0) \\ \quad = 8IN_0^2, \\ \quad -\frac{f_0}{2} \leq f < \frac{f_0}{2} \end{cases} \quad (16)$$

为了降低噪声功率, 用截止频率同样为 f_c 的数字低通滤波器对 $i_{n2}'(m)$ 滤波, 则系统噪声在光电二极管输出端的有效值 N_2 为

$$N_2 = \sqrt{P_{n2}} = \sqrt{\int_0^{f_c} S_{n2}'(f) df} = N_0 \sqrt{8f_c l} \quad (17)$$

由式(12)与式(17)得到测量信号的信噪比 R_{SNR2} :

$$R_{SNR2} = 20\log\left(\frac{S_2}{N_2}\right) = 20\log\left(\frac{A_2}{N_0 \sqrt{8f_c l}}\right) \quad (18)$$

3.3 分析与比较

相较于方波调光方法, 脉冲调光方法的噪声带宽更大, 得到的信号有效值也更大。本节通过比较两种方法的信噪比与 LED 平均功率, 推导脉冲调光方法的占空比与振幅的最优取值范围, 以提高脉冲调光方法的信噪比, 降低 LED 平均功率。

为比较两种方法的信噪比, 将式(18)与式(6)相减可得:

$$R_{SNR2} - R_{SNR1} = 20\log(\beta) \quad (19)$$

其中:

$$\beta = \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} \cdot \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{l}} = \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{l}}, \quad \alpha = \frac{A_2}{A_1} \quad (20)$$

在采样前使用 4 阶低通滤波器对脉冲信号滤波, 当 $f_{c2} \geq 0.8f_0/w_2$ 时, 可以保证脉冲幅值不衰减。 f_{c2} 的取值原则在第 3 节 MATLAB 仿真中讨论。令 $f_{c2} = 0.8f_0/w_2$ 并代入式(10)可得:

$$l = \frac{f_{c2}}{2f_0} = \frac{0.4}{w_2} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得比值 β 为

$$\beta = \frac{\sqrt{5}\pi^2}{16} \times \alpha \sqrt{w_2} \quad (22)$$

下面计算两种方法的功率关系, 矩形波平均功率计算公式:

$$\bar{P} = UIw \quad (23)$$

其中: U 是 LED 正向导通电压, I 是电流幅值, w 是电流占空比。

因 A_1 、 A_2 与电流幅值 I 具有相同的比例关系, 可得两种方法的 LED 平均功率比值 K_p 为

$$K_p = \frac{\bar{P}_2}{\bar{P}_1} = \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{w_2}{0.5} = 2\alpha w_2 \quad (24)$$

其中: \bar{P}_1 为方波调光的 LED 平均功率, \bar{P}_2 为脉冲调光的 LED 平均功率。

在实际情况下, 紫外 LED 有最大正向脉冲电流的限制, 因此 A_2 取值不能无限大。令 $A_2 \leq \alpha_m A_1$, 其中系数 α_m 需要根据 LED 的最大正向脉冲电流确定。则有:

$$\alpha \leq \alpha_m \quad (25)$$

为提高测量信号信噪比, 降低 LED 平均功率, 则脉冲调光方法应当使 α 与 w_2 取值满足 $\beta \geq 1$, $K_p \leq 1$ 。由式(22)、式(24)与式(25)得到:

$$\begin{cases} \alpha \sqrt{w_2} \geq 16 / \sqrt{5}\pi^2 \\ \alpha w_2 \leq 0.5 \\ \alpha \leq \alpha_m \end{cases} \quad (26)$$

图 5 展示了 $\alpha_m = 5$ 的情况下, α 与 w_2 的取值范围。易知, 当 α 与 w_2 取值落在图 5 的阴影范围内时, 在直线 $\alpha = \alpha_m$ 上总可以找到一点, 使得在取相同 K_p 值的情况下得到的 β 更大, 因此直线 $\alpha = \alpha_m$ 为脉冲调光方法的最优解。直线 $\alpha = \alpha_m$ 与曲线 $K_p = 1$ 的交点即为脉冲调光方法的最大信噪比点, 与曲线 $\beta = 1$ 的交点即为脉冲调光方法的最小功率点。

当采用方波调光方法时, 其被测信号信噪比满足

要求。为降低 LED 平均功率，改用脉冲调光方法。此时 $\beta=1$ ，可以令 $\alpha=\alpha_m$ ，由式(22)得：

$$w_2 = \frac{51.2}{\pi^4 \alpha_m^2}$$

得到 LED 平均功率：

$$\bar{P}_2 = \frac{102.4}{\pi^4 \alpha_m} \bar{P}_1$$

例如，若选用的 LED 最大脉冲电流是方波调光方法中电流振幅的 5 倍，令 $\alpha=5$ ， $w_2=0.021$ ，同样可以满足信噪比要求，并且脉冲调光方法的 LED 平均功率 $\bar{P}_2=21\% \cdot \bar{P}_1$ 。因此选用的 LED 所能承受的脉冲电流越大，越有利于脉冲调光方法降低 LED 平均功率。

4 MATLAB 仿真验证

4.1 f_c 的取值原则

脉冲调光方法中，需要以 $f_{c2}=2f_0$ ，采样频率对检测到的荧光信号采样。为限制噪声带宽，需要在 ADC 采样前对荧光信号进行低通滤波，如图 2 所示。为仿真电路滤波效果，采用 4 阶 IIR 数字滤波器，令截止频率 $f_{c2}=k \cdot f_0 / w_2$ (Hz)。通过选择不同的 k 值，对占空比为 w_2 ，载波频率为 f_0 的脉冲信号滤波，考察截止频率 f_{c2} 对脉冲波形的影响。令 $w_2=10\%$ ， $f_0=1$ kHz， $A_2=1$ ，分别取 $k=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ，得到滤波后的信号波形如图 6 所示。表 1 对比了滤波器

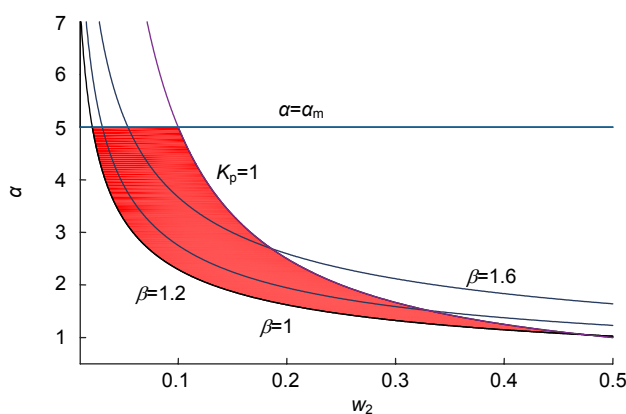


图 5 α 与 w_2 的取值范围
Fig. 5 Value range of α and w_2

取不同 k 值时滤波后的信号幅值。

易知当 $f_{c2} \geq 0.8f_0 / w_2$ 时，可以保证脉冲信号幅值不衰减，并有一定的超调，该超调量取值与低通滤波器的幅频特性有关。为限制噪声带宽，故取：

$$f_{c2} = 0.8f_0 / w_2 \text{ (Hz)} \quad (27)$$

4.2 信噪比计算

本文通过在频域上分析噪声模型，得到噪声功率谱密度，进而计算被测信号的信噪比。为验证噪声分析模型的推导结果，通过 MATLAB 仿真，构建荧光信号与噪声，在时域上计算方波调光方法与脉冲调光方法的信噪比，并进行分析比较。

测量模型噪声 $i_n(t)$ 设置为高斯白噪声，其均方根设为 0.1。分别以不同占空比构建电流信号，计算相应信噪比，并与方波调光方法的被测信号信噪比进行比较。由式(19)与式(22)可知，两种方法的信噪比之差仅与信号振幅的比值 α 及占空比有关，与振幅量级无关。令 $\alpha_m=5$ ， $A_2=\alpha_m A_1$ ，信号归一化参数设置见表 2，脉冲调光方法的参数取值落在图 5 中直线 $\alpha=\alpha_m$ 上。

4.2.1 方波调光

根据 3.1 的信号处理电路参数设计数字滤波器，对方波调光方法的解调流程进行仿真。带通滤波器选择 FIR 滤波，滤波器阶数为 200，通带为 950 Hz~1050 Hz。低通滤波器选择 FIR 滤波，过渡带为 10 Hz~100 Hz，通带纹波为 0.2 dB，阻带衰减量为 80 dB。

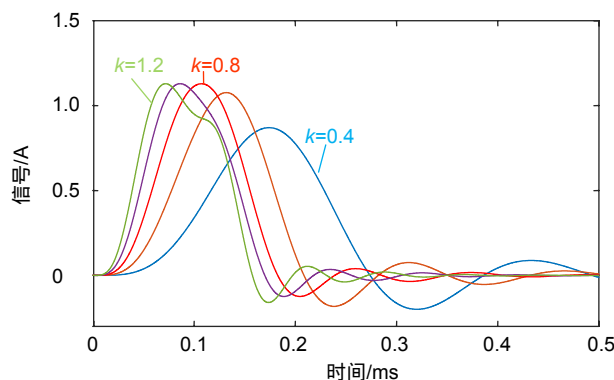


图 6 滤波后的脉冲波形
Fig. 6 Waveform of pulse after filter

表 1 滤波后的脉冲幅值

Table 1 Pulse amplitude after filter

k	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4
幅值	0.870	1.077	1.129	1.129	1.129	1.129

表 2 电流信号参数

Table 2 Current signal parameter

	方波调光		脉冲调光		
占空比/%	50	30	20	10	5
信号振幅/A	1	5	5	5	5
载波频率/Hz	1000	1000	1000	1000	1000

电流噪声 $i_n(t)$ 与电流信号 $i_1(t)$ 相加, 得到光电二极管输出端电流 $i_{D1}(t)$:

$$i_{D1}(t) = i_1(t) + i_n(t) \quad (28)$$

$i_{D1}(t)$ 经过 FIR 带通滤波器, 提取信号基波并滤除部分噪声, 得到含噪声的正弦信号。对正弦信号进行半波整流后, 经低通滤波器提取正弦信号的振幅并进一步限制噪声带宽, 得到解调部分输出端电流 $i'_{D1}(t)$ 。 $i_{D1}(t)$ 与 $i'_{D1}(t)$ 波形如图 7 所示。信噪比 R_{SNR1} 为

$$R_{SNR1} = 20 \log \left(\frac{\overline{i'_{D1}}}{\sigma_1} \right) \quad (29)$$

其中: $\overline{i'_{D1}}$ 是 $i'_{D1}(t)$ 的平均值, 即电流信号的有效值 S_1 ; σ_1 是 $i'_{D1}(t)$ 的标准差, 即系统噪声在光电二极管输出端的有效值 N_1 。

4.2.2 脉冲调光

同样, 根据 3.2 小节的脉冲幅值提取过程设置等效的滤波器, 对脉冲调光方法的解调流程进行仿真。一级低通滤波器选择 IIR 滤波, 滤波器阶数为 4, 由式(27)知, 截止频率 $f_{c2} = 800 / w_2$ (Hz), 通带纹波为 0.2 dB。数据处理中的数字低通滤波器选择 FIR 滤波, 过渡带为 10 Hz~100 Hz, 通带纹波 0.2 dB, 阻带衰减 80 dB。

将电流噪声 $i_n(t)$ 与电流信号 $i_2(t)$ 相加, 得到光电二极管输出端电流 $i_{D2}(t)$:

$$i_{D2}(t) = i_2(t) + i_n(t) \quad (30)$$

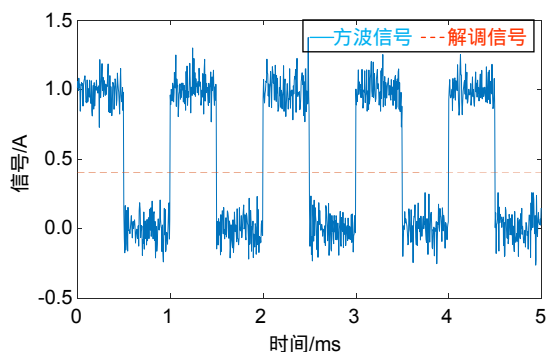


图 7 光电二极管输出信号与电路解调后信号
Fig. 7 Photodiode output signal and signal after demodulation

$i_{D2}(t)$ 输入 IIR 抗噪低通滤波器, 滤波后的信号为 $i'_{D2}(t)$ 。取 $i'_{D2}(t)$ 每一个周期的波峰处和相邻 $T/2$ 的低电平处采样并相减, 得到序列 $i''_{D2}(m)$, 输入 FIR 低通滤波器得到解调部分输出端电流序列, 图 8 为占空比为 5% 时 $i_{D2}(t)$ 与 $i''_{D2}(m)$ 的波形。信噪比 R_{SNR2} 计算公式如下:

$$R_{SNR2} = 20 \log \left(\frac{\overline{i''_{D2}(m)}}{\sigma_2} \right) \quad (31)$$

其中: $\overline{i''_{D2}(m)}$ 是 $i''_{D2}(m)$ 的平均值, 即电流信号的有效值 S_2 , σ_2 是 $i''_{D2}(m)$ 的标准差, 即系统噪声在光电二极管输出端的有效值 N_2 。

为比较两种方法的信噪比, 将式(31)与式(29)相减得:

$$R_{SNR2} - R_{SNR1} = 20 \log(\gamma) \quad (32)$$

其中:

$$\gamma = \frac{\overline{i'_{D1}}}{\sigma_1} \cdot \frac{\sigma_2}{\overline{i''_{D2}}} \quad (33)$$

根据式(22)与式(33)可以得到 $\alpha_m = 5$ 时, 不同占空比下 γ 与 β 的值, γ 与 β 数据见表 3。

可以发现 γ 略大于 β , 主要原因是取 $f_{c2} = 0.8 f_0 / w_2$ (Hz) 时, 滤波后的信号具有一定的超调, 即 $\overline{i''_{D2}(m)}$ 略大于 A_2 。因此, 可以认为噪声分析模型的推导结果与时域仿真的计算结果一致。利用噪声分析模型推导结果 β 计算得到的 α 与 w_2 的最优解具有一

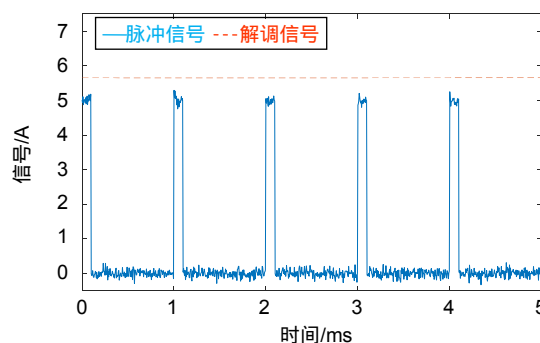


图 8 光电二极管输出信号与数字解调后的序列
Fig. 8 Photodiode output signal and sequences after digital demodulation

定的指导意义。

表3 不同占空比下 γ 与值 β

Table 3 Value of γ and β in different duty ratio

w_2	5%	10%	20%	30%	40%
β	1.542	2.181	3.084	3.777	4.362
γ	1.611	2.315	3.347	3.877	4.65
γ/β	1.044	1.062	1.085	1.026	1.066

5 结论

在测量回注水油浓度时,保证 LED 光源的稳定性是必要的。本文提出了针对 LED 光源的脉冲调光方法,取代原有的方波调光方法。建立了两种方法的噪声分析模型,通过 MATLAB 仿真,从频域和时域两个角度,计算了测量信号信噪比,并进行比较。理论推导与仿真结果表明,脉冲调光方法相较于方波调光方法,可以有效降低 LED 的平均功率,并维持原有的被测信号信噪比。若 LED 光源最大脉冲电流是方波调光方法中电流振幅的 5 倍,可以采用脉冲调光方法令脉冲电流幅值提高 5 倍,占空比取 0.021,可以使功率降低至方波调光方法的 21%,并保证信噪比不衰减。推导结论对驱动 LED 电流的占空比与幅值选择具有一定的指导意义。

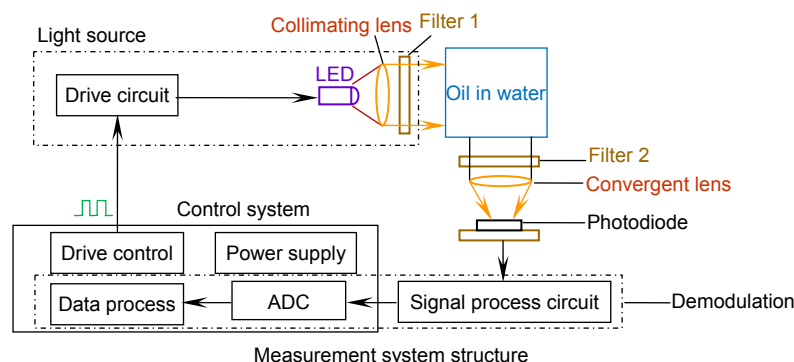
参考文献

- [1] Zhu L N. Research on the causes of injection water quality deterioration and treatment technology[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
朱丽娜. 油田注水水质劣化因素与处理技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- [2] Zhao Y Q, Yu H B, He F. Research on the online detection of oil concentration in water[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(11): 2949–2952.
赵友全, 于海波, 何峰. 水中油浓度在线检测方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(11): 2949–2952.
- [3] Wang L R, Yang J H. Measurement of micro oil in water by using ultraviolet fluorescence spectrum technology[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 2007: 3-556–3-559.
- [4] Cai X H, Cai S W, Cheng Q, et al. Determination of petroleum substance in groundwater by infrared spectrophotometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2014, **23**(4): 14–16.
蔡小虎, 蔡述伟, 程青, 等. 红外分光光度法测定地下水中的石油类物质[J]. *化学分析计量*, 2014, **23**(4): 14–16.
- [5] Qian G J, Wang X L, Zhang X Q. Research and design of the oil content concentration sensor based on scattering-transmission ratio method[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2017, **38**(2): 86–88, 92.
钱贵军, 王学磊, 张小芹. 散射透射比值法油分浓度传感器的研究和设计[J]. *自动化仪表*, 2017, **38**(2): 86–88, 92.
- [6] El Hussein A, Marzouk A. Characterization of petroleum crude oils using laser induced fluorescence[J]. *Journal of Petroleum & Environmental Engineering*, 2015, **6**(5): 1–6.
- [7] Sharikova A V, Killinger D K. LIF detection of trace species in water using different UV laser wavelengths[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2007, **17**(4): 689–695.
- [8] Li D. Study on the measuring technology and experiments of oil in water using UV fluorometry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
李丹. 紫外荧光法水中油检测技术和实验的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [9] Sharikova A V, Killinger D K. Laser- and UV-LED-Induced fluorescence detection of drinking water and water-dissolved organics[C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, 2008.
- [10] Zhao G L, Feng W W, Fu W L, et al. Research on a submersible oil-in-water detection probe based on ultraviolet fluorescence analysis technique[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, **33**(1): 77–83.
赵广立, 冯巍巍, 付龙文, 等. 基于紫外荧光法检测水中油含量的浸入式传感装置的研究[J]. *海洋通报*, 2014, **33**(1): 77–83.
- [11] Xu F. Study on the oilfield injection water online detection system using scattering and fluorescence[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
许飞. 散射和荧光法油田注水在线检测系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [12] Si R, Lu Y L, Deng X F, et al. Content indicators and control technology of suspended solid and oil of reinjection water in Weibei oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2016, **6**(2): 51–53, 59.
斯容, 卢瑜林, 邓学峰, 等. 渭北油田回注水中悬浮物和油含量指标及控制技术[J]. *油气藏评价与开发*, 2016, **6**(2): 51–53, 59.
- [13] Wu Y X, Shang J, Wang X H, et al. A light emitting diode driver based on pulse width modulation and pulse amplitude modulation diming[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0922003.
吴玉香, 尚俊, 王孝洪, 等. 一种基于脉冲宽度调制和脉冲幅度调制的发光二极管驱动器[J]. *光学学报*, 2015, **35**(9): 0922003.
- [14] Mei Y, Chen Y Y, Yuan C, et al. Measurement of LEDs' temperature characteristics[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2007, **18**(1): 17–20.
梅毅, 陈郁阳, 袁川, 等. LED 温度特性的测试[J]. *照明工程学报*, 2007, **18**(1): 17–20.
- [15] Wang J, Huang X, Liu L, et al. Effect of temperature and current on LED luminous efficiency[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, **29**(2): 358–362.
王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光 LED 发光效率的影响[J]. *发光学报*, 2008, **29**(2): 358–362.

The establishment and analysis of noise model for pulse modulation dimming method and square-wave modulation dimming method

Chen Jingtao, Duan Fajie*, Jiang Jiajia, Huang Tingting, Ma Ling

State Key Lab of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China



Overview: When using crude oil for producing qualified oil and gas production, we need to separate the water from the crude oil which is called oil sewage. The oil sewage contains a certain amount of oil and other impurities. The oil sewage is usually reinjected back under the ground after multiple processes. To avoid the excess oil of reinjection water affecting the quality of underground water source, it is important to ensure that the oil concentration is lower than requirement. Oil concentration measurement methods include infrared spectrophotometry, nephelometry, ultraviolet spectrophotometry and ultraviolet fluorescence. The ultraviolet fluorescence method has the advantages of real-time and high precision. The oil concentration of purified reinjection water is usually lower than 10 mg/L, so the ultraviolet fluorescence method is more suitable in this situation. To accurately measure the concentration of reinjection water based on ultraviolet fluorescence method, high transmission power of light emitting diode (LED) is required, so that the fluorescence of aromatics in oil is sufficient to be detected. In early experiments, the oil concentration is measured by square-wave dimming method (duty ratio equal to 50%). The chip temperature of LED will be higher than requirement because of the high transmission power of LED, thereby, LED luminous efficiency will be drastically reduced, and LED devices will be even damaged. To solve this problem, this paper proposed the pulse modulation dimmer method (duty ratio less than 50%) to reduce the LED average power and increase instantaneous power, which could ensure high signal-to-noise ratio (SNR). Pulse modulation dimming method makes LED produce higher transient light intensity and shortens the amount of conduction time in unit time. Two noise analysis models for pulse modulation and square-wave modulation dimming method were built. The discussion focused on wideband limiting in square-wave dimming method and the influence of noise aliasing in pulse modulation dimmer method. Signal-to-noise ratio of measurement results for two methods were compared under several condition. The relationship among SNR, light source power and duty ratio was derived. The optimum choices of current amplitude and duty ratio for pulse modulation dimming method were proposed under the condition of the same signal-to-noise ratio. Results show that the light source power for pulse modulation dimming method is less than 21% of that for square-wave modulation dimming method under the condition of the same signal-to-noise ratio. Finally, signal demodulation models of two dimming methods were simulated by MATLAB software. The simulated relationship of SNR for two methods is consistent with the theoretical analysis results.

Citation: Chen J T, Duan F J, Jiang J J, *et al.* The establishment and analysis of noise model for pulse modulation dimming method and square-wave modulation dimming method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180338

Supported by the National Key Research and Development Program (2017YFF0204800), National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2013AA102402), National Natural Science Foundation of China (61501319), Tianjin Natural Science Foundation (17JCQNJC01100), Photoelectric Information and Instruments Beijing Engineering Research Center Open Project (GD2015007), Regional Demonstration Project for Innovative Development of Marine economy(cxsf2014-2), the Doctoral Program Fund of the Ministry of Education (20130032110054), and Microlight Electromechanical System Technology Ministry of Education Key Laboratory Open Fund (MOMST2015-7)

* E-mail: fjduan@tju.edu.cn