

TDLAS 气体检测系统仿真与影响因素分析

王国水¹, 郭 奥², 刘晓楠¹, 丰 雷¹, 常鹏浩¹, 张李明¹, 刘 龙¹, 杨晓涛^{1*}

1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要 船舶运输作为大宗货物的重要流通手段, 为我国经济社会发展做出了巨大贡献, 但与此同时船用柴油机带来了严重的污染排放问题。在全球排放限制日益严峻的背景下, 实现对其排放参数的实时监测, 对环境保护、节能减排、优化柴油机控制策略与燃烧性能等都具有重要意义。近年来可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术因其精度高、响应快等优点逐渐受到青睐, 该技术的广泛应用对其的研究提出了更高要求, 因此利用数学软件对其进行仿真模拟, 对测试系统的开发、参数调整都具有一定价值。结合目前的船舶排放检测问题, 以其中最具代表性的污染物 NO 为目标气体, 利用软件制作了气体浓度测量仿真模型。检测系统仿真模型主要由光源调制、线型函数拟合、模拟气体吸收、线强函数 $S(T)$ 拟合、锁相放大器等各部分组成。采用波长调制的方法对浓度测量过程进行仿真, 将高频正弦波和低频锯齿波相叠加用以调谐激光, 激光经过气室进行模拟吸收后, 信号经过锁相放大器调解得到各阶谐波信号。将二次谐波比一次谐波的峰值点作为信号, 采用最小二乘法进行浓度-信号幅值曲线拟合并以此进行浓度反演和误差计算, 反演误差在 2.5% 以内。分析了温度、压力等环境因素对信号幅值的影响并绘制了谐波图线, 通过引入参考气室来消除环境波动对结果造成的影响, 在环境变动时不需要重新拟合浓度-峰值曲线, 可直接得到结果。尝试了不同的正弦波频率和调制系数等参数, 分析了调制参数对信号幅值的影响, 选取了较为合适的参数范围。为柴油机在线排放测试系统的构建和参数选择提供了一定参考。

关键词 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS); 谐波检测; NO 浓度测定; 仿真建模

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3262-07

引 言

船舶运输在我国运输行业中占据重要地位, 为我国的经济发展做出了巨大贡献^[1]。但与此同时, 船用内燃机排放物也带来了严重的环境问题, 其中尤以氮氧化物(NO_x)污染较为严重, 但我国对于船舶大气污染物排放的评价、管理以及限制标准、政策还不够完善^[2]。开展对船舶污染物排放的量化研究和特征分析, 对于船用柴油机燃烧过程的优化研究、减少废气排放、切实提高环境空气质量、保障公众健康以及对排放限制标准的制定都有着重要意义。

自可调谐激光器用于污染物检测开始^[3], TDLAS 技术就在不断进步。如今在调制信号产生、信号检测、降噪以提高信噪比等等各方面都进行了改进^[4], 并在增加检测气体的种类、提高检测精度等方面有了长足的进步, 检测方式和可

以检测的参数越来越多样化^[5-6], 并对于环境因素产生的影响提出了补偿方法^[8]。相比于传统测量方法, TDLAS 技术具有抗干扰性好、精确度高、响应时间短、能够实现实时动态测量等优点, 前景广阔。而 TDLAS 的广泛应用也对其研究提出了更高的要求, 因此利用数学软件对检测过程进行模拟具有很重要的意义, 通过模拟对检测过程进行研究, 可以为其后的实际测量奠定基础。

对于目前实际存在的船舶排放问题, 赵婧欣^[9]以 NO 为目标气体, 利用二次谐波信号进行了浓度反演, 通过三段式温度划分进行配分函数拟合, 探究了温度、压力对吸收系数和谱线峰值的影响, 用福依特线型不断计算温度、压力以进行修正。构建了气体浓度检测模型, 用二次谐波比一次谐波作为检测信号以消除激光器和放大器的影响, 对气体浓度进行了反演并计算误差。采用 4 次多项式进行配分函数拟合。除温度、压力外, 还重点探究了波长调制法的波形设置参

收稿日期: 2020-10-03, 修订日期: 2021-02-06

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(JQ2020E005)资助

作者简介: 王国水, 1997 年生, 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院硕士研究生 e-mail: xiaohedejieri@163.com

* 通讯作者 e-mail: yangxiaotao@hrbeu.edu.cn

数、调制系数等对信号的影响,通过引入参考气室的方法消除温度、压力波动为测试结果带来的误差,直接得到待测参数,不再进行不同环境条件下的浓度-信号幅值曲线拟合。

1 TDLAS 检测系统基本原理

1.1 比尔-朗伯定律

当一定频率的激光照射气体时,其与气体分子内部的电子、原子核等相互作用,气体分子吸收辐射的能量 ΔE ,从低能级的基态跃迁到高能级的激发态,从而产生吸收光谱。

假设入射光强 I_0 , 穿透光强为 I_t , 则根据比尔朗伯定律

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp[-S(T)N\phi(\nu)cL] \quad (1)$$

式(1)中, $S(T)[\text{cm} \cdot \text{mol}^{-1}]$ 是气体吸收特征谱线的强度; $L[\text{cm}]$ 是有效光程长; $\phi(\nu)[\text{cm}]$ 是谱线的线型函数; $N[\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}]$ 为气体分子密度; c 为气体的浓度,用体积浓度表示。

1.2 波长调制光谱技术

由于直接吸收技术存在一些不足,因此在直接吸收技术的基础上,发展出了波长调制光谱技术(WMS)和频率调制技术(FMS)^[7-8]。波长调制技术的主要工作原理:在低频扫描信号的基础上叠加高频调制信号对激光器的注入电流进行调谐,激光器的输出频率可以表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(\omega_m t) \quad (2)$$

式(2)中, $\bar{\nu}(t)$ 为激光器的中心频率, a 为调制深度, ω_m 为调制频率。当不考虑频率调制与强度调制间的相位差以及非线性调制因素时,透射光强可表示为

$$I(\nu) = I_0 [1 + i \cos(\omega_m t)] \exp[-\alpha(\nu)cL] \quad (3)$$

式(3)中, I_0 和 $\alpha(\nu)$ 分别为入射光强和气体吸收系数, i 为强度调制系数。对 $\alpha(\nu)$ 进行傅里叶级数展开后,得到

$$\alpha(\nu) = S(T)N \frac{\gamma_L}{\pi[(\nu - \nu_0)^2 + \gamma_L^2]} = S(T)N \sum_n H_n \cos(n\omega_m t) \quad (4)$$

式(4)中, ν_0 为谱线中心频率,则可得到 H_n

$$H_n = \frac{1}{S(T)N} \int_{-\pi}^{\pi} \alpha(\nu) \cos(n\omega_m t) d(\omega_m t) \quad (5)$$

若定义 $A_n = H_n S(T) N c L$, 则透射光强的二次谐波、一次谐波可分别表示为式(6)和式(7)

$$I_{2f} = I_0 G \left[-\frac{i}{2} (A_1 + A_3) - A_2 \right] \quad (6)$$

$$I_{1f} = I_0 G \left[i(1 - A_0) - A_1 - \frac{i}{2} A_2 \right] \quad (7)$$

式中, G 为探测系统光电放大系数。在中心频率处阶数 n 为奇数时 $A_n = 0$, 而 A_0 和 A_2 相对 1 很小,可以将其忽略,因此得到

$$S_{2f/1f} \approx -\frac{A_2}{i} = -\frac{H_2 S(T) N L c}{i} \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, $S_{2f/1f}$ 在一定环境条件下与浓度具有线性关系,且与激光器光强和放大倍数无关。

2 TDLAS 检测系统仿真及浓度反演

2.1 检测系统仿真

使用波长调制法进行浓度检测时,激光器经过电流调谐后,发出的激光传输到气室,激光经过气室后被光电探测器接收,光电探测器将光信号转化为电信号,然后经过前置放大器放大滤波再经锁相放大器调解得到各阶谐波信号,通过谐波信号可以将气体的参数信息反演出来。TDLAS 检测系统仿真主要由以下几个部分组成:光源调制、线型函数拟合、模拟气体吸收、线强函数 $S(T)$ 拟合、锁相放大器各部分。

本工作利用软件对波长调制的测量过程进行模拟。

首先对光源调制部分进行仿真,对激光器进行调谐,用来调谐的电流信号由低频锯齿波和高频正弦波叠加而成,低频锯齿信号用以调制激光使其波长来回扫描选定的 NO 气体的吸收中心波数。所选的中心波数为 1900.076 cm^{-1} 。调制后的激光波数如图 1 所示。

对于吸收谱线,采用洛伦兹线型函数来描述。其所需数值都可以从 HITRAN 数据库中查到。经过调制的激光在透射

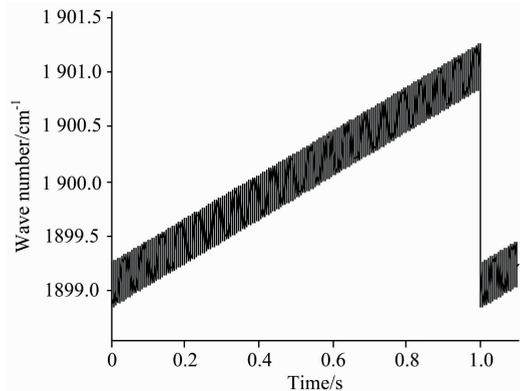


图 1 调制激光波数变化

Fig. 1 Wave number variation of modulated laser

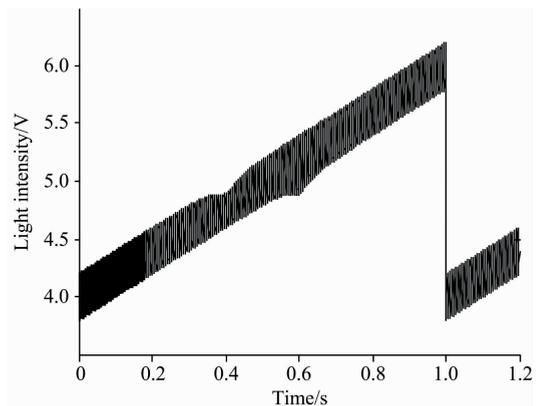


图 2 经气室吸收后的光强

Fig. 2 The light intensity after being absorbed by the air chamber

过吸收气室后, 光强明显降低, 光电探测器接收后生成电信号, 经过气室吸收后的光强如图 2 所示。

光电探测器将接收到的信号输入锁相放大器, 由锁相放大器从中提取各次谐波。研究中采用正交型锁相放大器, 采用两个频率相同, 相位相差 $\pi/2$ 的正弦信号作为参考信号。输入信号与参考信号分别相乘, 得到混频信号, 混频信号经过低通滤波, 得到谐波信号的 X 和 Y 分量^[9], 其中一倍频和二倍频的 X 和 Y 分量分别如图 3(a,b) 所示。

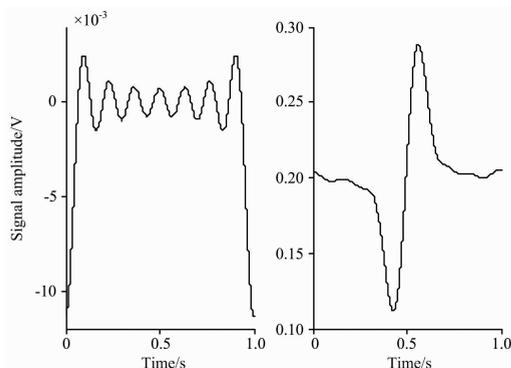


图 3(a) 一倍频 X 和 Y 滤波分量

Fig. 3(a) The X and Y filtering components of the first harmonic

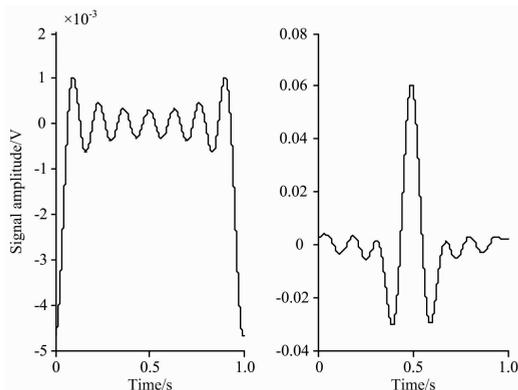


图 3(b) 二倍频 X 和 Y 滤波分量

Fig. 3(b) The X and Y filtering components of the second harmonic

谐波信号 R 见式(9)

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (9)$$

选择的浓度反演方案为峰值拟合法, 采用 $S_{2f/1f}$ 信号在中心频率处的峰值与浓度的关系来反演浓度, 仿真中得到的 $S_{2f/1f}$ 如图 4 所示。

对于线强函数 $S(T)$ 的拟合, 其中的配分函数 $Q(T)$ 用多项式拟合的方法得到近似值

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 \quad (10)$$

式(10)中, 系数 a, b, c, d, e 均值与待测气物质的参数有关。由于在选定的中心频率附近有多重吸收, 所以吸收线强是多个效果的叠加, 从 HITRAN 数据库查询的数据如表 1。

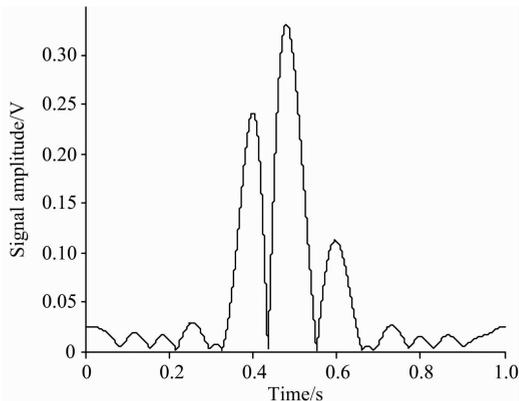


图 4 $S_{2f/1f}$ 信号

Fig. 4 $S_{2f/1f}$ signal

表 1 选取的吸收线强数据

Table 1 The date of line strength

频率/ cm^{-1}	$S(T_0)/(\text{cm} \cdot \text{mol}^{-1})$
1 900.081 64	2.027×10^{-20}
1 900.070 58	2.028×10^{-20}
1 900.070 59	2.322×10^{-20}
1 900.081 59	2.322×10^{-20}
1 900.081 63	1.768×10^{-20}
1 900.070 60	1.770×10^{-20}

在 1900.076 cm^{-1} 的中心频率附近, 选取吸收较强频率的线强来计算总的线强。

2.2 气体浓度反演

最终从锁相放大器得到信号 $S_{2f/1f}$, 应用峰值点法, 在一定的温度、压力条件下, 气体浓度与信号 $S_{2f/1f}$ 的峰值正相关。在设定的条件下进行浓度的拟合: 设定温度为 300 K, 压力为 1 atm, 光程 20 cm, 利用模型测定不同浓度下的信号峰值。浓度与信号峰值关系如表 2 所示。

表 2 不同浓度(体积分数)对应的信号峰值

Table 2 Signal peaks corresponding to different concentrations (volume fraction)

浓度/ $(\times 10^{-6})$	信号峰值/V
0	4.5172×10^{-4}
50	0.083 3
100	0.165 2
150	0.245 4
200	0.324 1
250	0.401 1
300	0.476 7
350	0.550 7
400	0.623 3
450	0.694 4
500	0.764 1

设已知 NO 气体浓度为 A , 对应浓度测定的峰值为 B , 采用最小二乘法, 得到拟合公式: $B = 1.51 \times 10^{-3} A +$

0.016 95, 绘制散点图和拟合曲线, 如图 5 所示。

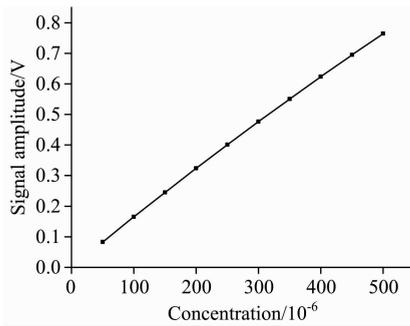


图 5 浓度-信号峰值拟合曲线

Fig. 5 Concentration-signal peak fitting curve

可以利用拟合曲线来检测未知浓度, 一般采用插值法来检测未知浓度。设定的气体浓度及反演结果如表 3。

表 3 反演气体浓度(体积分数)及误差
Table 3 Measurement of gas concentration (volume fraction) and its error

设定的气体浓度/ 10^{-6}	反演得到的气体浓度/ 10^{-6}	误差百分比/%
80	79.173 6	1.03
120	121.63	1.36
160	163.415 6	2.13
200	204.524 4	2.49
240	244.975 3	2.07
280	284.780 4	1.72
320	323.950 6	1.23
360	362.496 8	0.69
400	400.429 8	0.11
440	437.759 1	0.51
480	474.494 3	1.15

当设定的浓度比较低时, 拟合反演所得到的结果误差比较大, 说明依照这种方法不能检测过低的浓度。而在几十到几百 ppm 的范围内, 反演的误差相对小一些, 说明在这个浓度范围是比较合适的拟合范围。降低误差的方法主要有两种, 一是采用更多的标定得到拟合曲线, 二是选取更多的信号峰值点并取平均值, 以得到更加贴切的拟合曲线。

3 参数对波形影响的分析

利用谐波信号来对气体进行检测, 信号幅值决定了结果的精确性。而气体吸收谱线中的一些参数会随环境变化而变动, 因此谐波信号的幅值会受到环境因素影响。需要分析环境因素对测量结果产生的影响并对其进行修正。

3.1 压力对谱线的影响

气体介质的压强是对谐波波形产生影响的因素之一, 气体线宽和分子密度会随着压强增大而增大, 同时, 只有在一定的温度、压强、调制系数的条件下, $S_{2f/1f}$ 信号峰值与浓度成正比关系。因此, 设定在温度 300 K 时, 改变气压值, 观

察气压对波形的影响。设定的气压值为 0.6, 0.8, 1, 1.2 和 1.4 atm, 所得二次谐波波形如图 6。

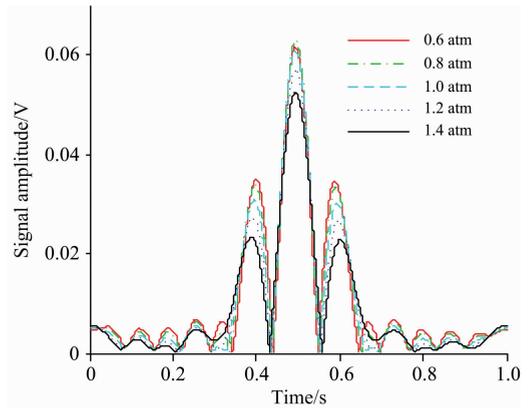


图 6 不同气压下的二次谐波

Fig. 6 Second harmonic at different pressures

从图 6 可以看出, 在设定的范围内谐波信号峰值随压强增加先增大而后减小。若将 A_n 表示为式(11)

$$A_n = \frac{S(T)NL_c}{\pi\gamma_L} K_n \quad (11)$$

谐波信号与 A_n 成正比, A_n 中的系数 N/γ_L 消除了压强的影响, 但是由于 γ_L 会随压强增大而增大, 从而导致 K_n 的值发生变化, 因此谐波信号会随之改变。

3.2 温度对谱线的影响

气体吸收谱线中的参数如线强、线宽、分子密度数等都与温度有关, 在温度变化时会产生改变。设定在压强为 1 atm 时, 改变温度值, 观察其对波形的影响。设定温度为 300, 350, 400, 450 和 500 K, 绘制的谐波图如图 7。

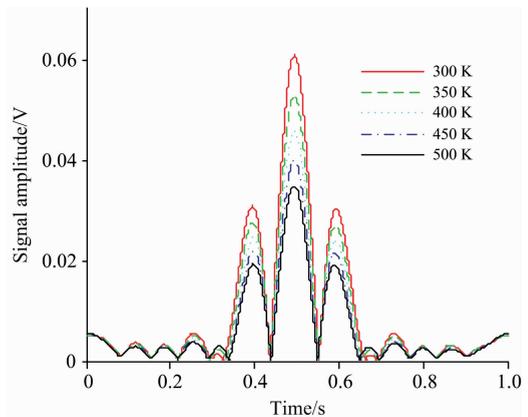


图 7 不同温度下的二次谐波

Fig. 7 Second harmonic at different temperatures

从图 7 中可以看出, 二次谐波信号幅值随温度升高而减小。温度变化会对 $S(T)$, $\gamma_L(T, P)$, $N(T, P)$ 都产生影响。从 HITRAN 数据库中的数据可以看到, 随着温度的增加 $S(T)$ 是非线性减小的。二次谐波幅值在中心频率处与傅里叶级数 A_2 成正比, 在中心频率处 A_n 随温度上升而减小, 因此二次谐波幅值也按照这一趋势变化, 这将导致测量的浓度值减小, 使结果出现偏差。因此需要采取措施来减小或消除温

度变化对测量结果的影响。

因此在本仿真系统中,再设计增加一个参考气室,设定其中充入的是浓度确定的标准气体,之后设置参考与待测的气室所处的环境条件一致,以此来消除温度、压强变化带来的影响。将从两个气室当中得到的谐波信号相除,得到式(12)和式(13)

$$S_{2f/1f,t} = -\frac{S(T)NC_tL}{i\pi\gamma_L}K_{2,t} \quad (12)$$

$$S_{2f/1f,r} = -\frac{S(T)NC_rL}{i\pi\gamma_L}K_{2,r} \quad (13)$$

式中,角标 t 表示吸收气室,角标 r 表示参考气室。由于 $K_{2,t} \approx K_{2,r}$, 则

$$c_t = \frac{S_{2f/1f,t}}{S_{2f/1f,r}}c_r \quad (14)$$

由此,消除了 $S(T)$, N 以及线宽的影响,可以一定程度上提高测试的精度。采用这种温度补偿方案可以在温度压力波动时测定浓度,并且在参考气室中的气体浓度已知的情况下,可以直接得到待测的气体浓度,而不再需要进行峰值-浓度曲线拟合标定。按照式(14)计算待测浓度值以直接得到结果如表 4 所示。

表 4 反演气体浓度(体积分数)及误差
Table 4 Measurement of gas concentration
(volume fraction) and its error

设定的气体浓度/ 10^{-6}	反演得到的气体浓度/ 10^{-6}	误差百分比/%
50	49.93	0.14
100	100.00	0.00
150	149.66	0.23
200	198.91	0.55
300	296.20	1.27

柴油机在实际工作中排放,温度、浓度会产生一定波动,这一方法对如何解决这一问题提供了思路。

3.3 调制深度对谱线的影响

在波长调制法中,低频锯齿波和正弦波的波形选择会对得出的一次谐波、二次谐波波形产生影响,因此需要进行调试选择一个合适的波形来进行研究。

定义调制系数 m

$$m = \frac{a}{\gamma_L} \quad (15)$$

式(15)中, a 为调制深度, γ_L 是洛伦兹线型的半宽。测量浓度需要一个尽量明显的谐波信号,因此需要探究不同的调制系数和 $2f$ 信号的关系。在调制系数 $m=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$ 和 4 时,绘制二次谐波图,结果如图 8。

从图 8 可以看出,调制系数 m 直接影响二次谐波信号,随着调制系数 m 的增大,二次谐波信号的线型变得越来越宽,而峰值则是先增大后减小。提取与调制系数对应的二次谐波峰值,绘制调制系数与 $2f$ 峰值拟合曲线,如图 9。

从图 9 可以看到,在 $m=2.2$ 附近时,吸收谱线的 $2f$ 信号峰值最大,与 Reid 等和 Liu 等^[10-11] 的结论相符合。因此通常情况下,为了得到更明显的吸收信号,选择 $m=2.2$ 时的

调制深度。但当有邻近谱线干扰时,可以适当选取较小一些的调制深度,减小谐波的宽度以减少干扰。

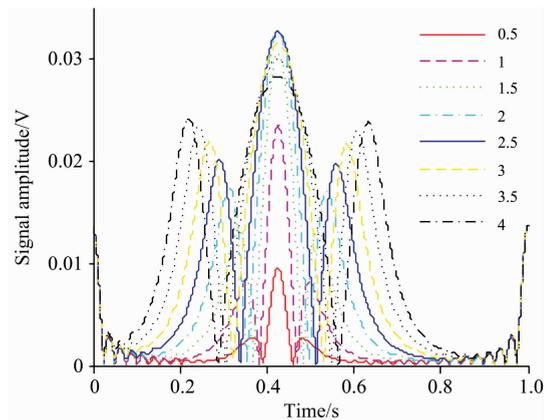


图 8 不同调制系数下的二次谐波

Fig. 8 Second harmonic at different modulation factors

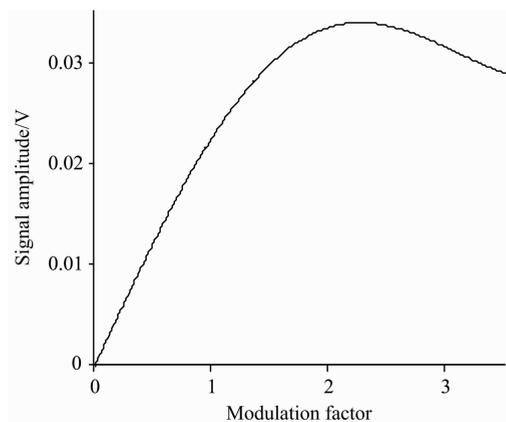


图 9 调制系数 m 与 $2f$ 峰值的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of modulation factors and second harmonic peak

3.4 调制频率对波形的影响

调制光谱技术可以分为波长调制和频率调制技术,相较于频率调制,波长调制技术的调制幅度大,频率范围一般在 kHz 数量级,比较容易实现但是同时也会造成噪声比较大的问题,可能影响测量精度,而频率调制技术一般调制幅度小,调制频率很高,为 MHz 到 GHz 数量级,信号噪声小,但同时也会产生实现技术复杂,成本高的问题。以下对调制信号的调制频率对波形的影响进行探究。

设定高频正弦调制频率分别为 1 000, 2 000, 4 000 和 6 000 Hz。二次谐波图形如图 10 所示。

从图 10 可以看出,调整频率后各次谐波的峰值没有明显变化,在二次谐波当中,频率较低时系统噪声较大,图像毛刺较多,而高频下噪声较小,毛刺较少。考虑到实际实验当中可能使用几万 Hz 的高频信号,但是在仿真中这可能会造成仿真时间延长或者波形产生一定失真,因此在仿真中选用几千 Hz 的正弦频率即可。

对于低频扫描信号,根据王琳琳等^[12] 的研究,正弦波频

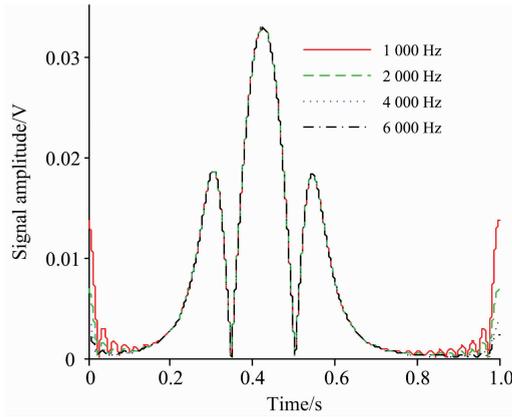


图 10 不同调制频率下的二次谐波

Fig. 10 Second harmonic at different modulation frequencies

率和锯齿波频率的调制比在 6 000 附近时信号幅值最大。对于扫描信号的幅值,一般需要能够覆盖吸收峰附近的波数,但是也不宜太大。

4 结 论

针对于船舶低速机排放检测问题,根据波长调制技术原理,利用软件构建了一个 NO 气体浓度测量模型,利用模型进行了气体浓度反演,反演的气体浓度误差在 2.5% 以内。分析了环境因素包括温度和压力波动对谱线幅值造成的影响,采用了参考气室的补偿办法,不需要重新进行峰值-浓度曲线拟合,且可以直接得到结果。通过设置不同的调制参数,分析了调制参数对信号幅值的影响,选取了合适的参数范围。本研究结果为柴油机在线排放测试系统的构建提供了一定的参考价值。

References

- [1] SUN Si-qi, SUN Jia-hui, YU Si-qin(孙司琦, 孙佳会, 余思勤). Navigation of China(中国航海), 2020, 43(3): 118.
- [2] LI Bo-wen, DENG Jian, WANG Li-zheng, et al(李博文, 邓 健, 王丽铮, 等). Ship & Ocean Engineering(船海工程), 2020, 49(3): 87.
- [3] Reid J, Shewchun J, Garside B K, et al. Applied Optics, 1978, 17(2): 300.
- [4] WANG Biao, CHEN Yue, HUANG Shuo, et al(王 彪, 陈 越, 黄 硕, 等). Laser Journal(激光杂志), 2019, 40(7): 10.
- [5] WANG Xiao-mei, ZHANG Yu-jun, LIU Wen-qing, et al(王晓梅, 张玉钧, 刘文清, 等). Optical Technique(光学技术), 2006, (5): 717.
- [6] NIE Wei, KAN Rui-feng, YANG Chen-guang, et al(聂 伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2018, 45(9): 9.
- [7] Gustafsson U, Somesfalean G, Alnis J, et al. Applied Optics, 2000, 39(21): 3374.
- [8] Avetisov V G, Kauranen P. Applied Optics, 1996, 35(24): 4705.
- [9] HE Yi-fan, XU Heng-chang, TANG Liang-liang, et al(何毅帆, 徐恒昌, 汤亮亮, 等). China Measurement & Test(中国测试), 2020, 46(3): 84.
- [10] Reid J, Labrie D. Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry, 1981, 26(3): 203.
- [11] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Applied Physics B, 2004, 78(3-4): 503.
- [12] WANG Lin-lin, JIA Ming(王琳琳, 贾 明). Laser Journal(激光杂志), 2020, 41(3): 25.

Simulation and Influencing Factors Analysis of Gas Detection System Based on TDLAS Technology

WANG Guo-shui¹, GUO Ao², LIU Xiao-nan¹, FENG Lei¹, CHANG Peng-hao¹, ZHANG Li-ming¹, LIU Long¹, YANG Xiao-tao^{1*}

1. School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China

2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China

Abstract As a necessary means of circulation of bulk cargo, ship transportation has made significant contributions to our country's economic and social development. However, at the same time marine diesel engines have brought severe problems of pollution emissions. In the context of increasingly stringent global emission limits, real-time monitoring of its emission parameters is of great significance to environmental protection, energy conservation, emission reduction, optimization of diesel engine control strategies and combustion performance. In recent years, tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology has gradually been favored due to its high accuracy and fast response. The wide application of this technology puts forward higher requirements for its research, so using mathematical software to simulate it has a certain value for this test system's development and parameter adjustment. Combining the current ship emission detection problems, taking the most representative pollutant NO as the target gas, a simulation model of gas concentration measurement was made using software. The simulation model of the detection system is mainly composed of a light source modulation part, a line type function fitting part, a simulated gas absorption part, a line strength function $S(T)$ fitting part, and a lock-in amplifier. The method of wavelength modulation is used to simulate the concentration measurement process. The high-frequency sine wave and the low-frequency saw tooth wave are superimposed to tune the laser. After the gas chamber absorbs the laser, the signal is adjusted by the lock-in amplifier to obtain the harmonic signals. The peak point of the value of the second harmonic divided by the first harmonic is used as the signal. The least-square method is used to fit the concentration-signal amplitude curve, and then the concentration inversion and error calculation are performed. The inversion error is within 2.5%. Analyzed the influence of temperature, pressure and other environmental factors on the signal amplitude and drew the harmonic graph. By introducing a reference gas chamber to eliminate environmental fluctuations on the results, there is no need to refit the concentration-signal curve when the environment changes. The result can be obtained directly. Tried to use different sine wave frequency, modulation coefficient and other parameters. Analyzed the influence of modulation parameters on signal amplitude and selected a suitable parameter range. It provided a certain reference for the construction of a diesel engine online emission test system and the selection of parameters.

Keywords Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); Harmonic detection; NO concentration determination; Simulation modeling

(Received Oct. 3, 2020; accepted Feb. 6, 2021)

* Corresponding author