

基于 TDLAS 的城市天然气管道泄漏检测系统

祝玉泉, 乔利峰, 张启兴, 蔡廷力, 王进军, 张永明

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:将 TDLAS(tunable diode laser absorption spectroscopy)技术应用于城市天然气管道泄漏检测及定位. 阐述了天然气管道泄漏检测系统的设计原理, 介绍了所选用的二极管激光器和多次反射吸收池的特性. 实验测量给出了二极管激光器最优的参数设置, 得到了系统的最低检测限(2.7×10^{-6})、线性响应度和系统换气速率(9.3~11.3 次/min), 运用数值模拟方法得到了天然气管道泄漏后气体浓度沿管道的分布情况, 提出了对天然气管道泄漏定位的方法.

关键词: TDLAS; 天然气; 泄漏检测

中图分类号: X932 **文献标识码:** A

Design of a natural gas leak detection system with tunable diode laser absorption spectroscopy

ZHU Yu-quan, QIAO Li-feng, ZHANG Qi-xing, CAI Ting-li, WANG Jin-jun, ZHANG Yong-ming

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) was used for natural gas leakage detection, and its principle was analyzed. The selection of the diode laser and the photodiode for natural gas leakage detection system and the characteristics of the laser diode and photodiode were introduced. The measurement results show that the lowest gas detection level is 2.7×10^{-6} and gas change times per minute is 9.3~11.3 times/min. The gas concentration along the natural gas line with number modulation was obtained, and a natural gas line leakage detection method was proposed.

Key words: TDLAS (tunable diode laser absorption spectroscopy); natural gas; leakage detection

0 引言

城市天然气系统是现代化城市的“生命线”和城市建设的重要基础设施, 而天然气供应管道化更是城市现代化的主要标志之一. 天然气是一种无毒无色无味的气体, 其主要成分是甲烷(约 95% 以上), 同时含有少量的乙烷、丙烷、丁烷等烷烃. 天然气的爆炸极限为 5%~15%, 属甲类化学危险品, 稍有泄

漏, 很容易与空气混合形成爆炸性混合气体, 遇到火源就可能发生火灾爆炸事故, 甚至造成重大伤亡^[1].

目前, 国内外城市天然气管道泄漏检测和定位方法有: 探测球法^[2]、检漏电缆法^[3,4]、检漏光纤法^[5,6]、声发射技术法^[7]、瞬变模型法^[8]. 以上方法在测量灵敏度、定位精度、响应时间、适应能力等方面需要改进.

当前所应用的气体传感器中, 半导体传感器居

多,但它的气体选择性并不令人满意.于是研究人员试图将其他高灵敏度的气体检测方法应用到天然气管道泄漏检测定位领域.基于可调谐二极管激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)检测痕量气体技术是近年来的热门研究领域^[9~12]. TDLAS 系统利用激光二极管有很高的光谱分辨率和可调谐性,可以对特定分子在特定光谱范围内的一条振转线的光谱吸收进行测量而反演吸收气体浓度,而且能够把待测分子与背景的干扰区分开来. TDLAS 在实际使用中通常采用波长调制光谱(WMS)技术,可使系统测量气体组分的精度达到 10^{-9} .

1 TDLAS 原理

TDLAS 是一种利用半导体激光器可调谐性进行光谱测量的技术,利用待测气体分子的一条孤立的吸收谱线进行吸收光谱测量. TDLAS 根据调制方式不同,可以分为直接吸收光谱、波长调制光谱(WMS)和频率调制光谱(FMS).

本系统设计时采用波长调制光谱(WMS)技术,对比于频率调制光谱(FMS)技术,灵敏度可以满足痕量气体检测的要求,而费用低了很多;对比于直接吸收光谱测量,波长调制光谱可以更好的抑制测量过程中的噪声,并且数据处理算法简单.

强度为 I_0 , 频率为 ν 的单色激光,通过长度为 L 的吸收介质(气体)后,在接收端测得的强度为 I , 遵循 Lambert-Beer 定律^[13],如图 1 所示.

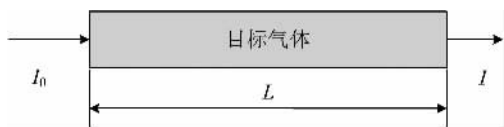


图 1 Lambert-Beer 定律原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Lambert-Beer law

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\sigma(\nu)NL) \quad (1)$$

其中, $\sigma(\nu)$ 为气体分子中心吸收截面, N 为气体的物质的量浓度.

当激光的中心频率 ν_c 受到振幅为 $\delta\nu$, 频率为 $\bar{\omega}$ 的正弦调制波调制时,激光频率可以表示为

$$\nu = \nu_c + \delta\nu \cos \bar{\omega}t \quad (2)$$

式(1)用 $I(\nu_c)$ 的余弦傅立叶级数可以写为

$$I(\nu_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cos(n\bar{\omega}t) \quad (3)$$

$$A_n(\nu_c) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu_c + \delta\nu \cos \bar{\omega}t) \cdot$$

$$\exp[-\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos \bar{\omega}t)NL] \cos n\bar{\omega}t d\theta \quad (4)$$

其中, $\theta = \bar{\omega}t$.

理想情况下 I_0 不是频率 ν 的函数;在测痕量气体时, N 为一极小值,因此 $\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos \bar{\omega}t)NL \ll 1$. 式(4)可近似写成:

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0NL}{\pi} \quad (5)$$

因此, n 次谐波分量与痕量气体浓度成正比.

2 系统设计

基于 TDLAS 天然气管道泄漏检测定位系统的原理如图 2 所示. 信号发生器产生 50 Hz 锯齿波信号输入到激光电流温度控制器,对二极管激光器进行调制. 同时锁相放大器参考输出高频正弦信号对激光器进行调制. 调节并控制二极管激光器温度,使激光器的中心频率 ν_c 等于要检测的气体的某条吸收谱线中心频率. 经调制输出的激光通过多次反射吸收池,被目标气体部分吸收后到达光传感器转换为电信号,经过锁相放大得到二次谐波信号,经 A/D 转换采集到计算机进行处理得到气体浓度值. 吸气探头上安装位移传感器,将吸气探头的位移数据送到计算机,从而得到时间、位置及气体浓度关系,进行天然气管道泄漏检测定位.

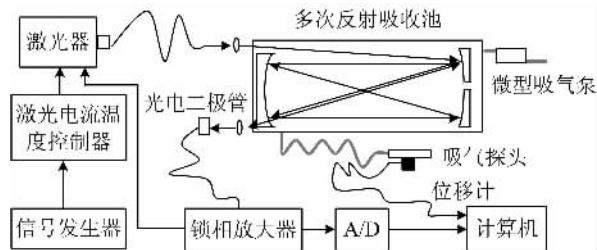


图 2 TDLAS 天然气管道泄漏检测定位系统原理框图

Fig. 2 Natural gas leak detection system with TDLAS

2.1 CH₄ 红外吸收光谱

图 3 所示为 Hitran 数据库中 CH₄ 近红外吸收光谱,从中可以看出,在 3 300 nm 附近 CH₄ 具有最大的吸收强度,其次是在 1 650 nm 附近 CH₄ 有较大的吸收强度. 但 3 300 nm 波长的快速可调谐激光器结构复杂、价格昂贵、不易获得;而 1 650 nm 的二极管激光器目前广泛应用于光纤通信领域,可工作于常温环境下、性能可靠、价格低廉,且 1 650 nm 激光比较接近通信光纤低损耗传输波长(一般在 1 550 nm),可以采用光纤导出激光,使用方便. 因此,可选择 1 650 nm CH₄ 吸收线.

表 1 激光二极管光电特性参数

Tab. 1 Diode Laser electrical/optical characteristics

$T_{case} = T_{laser} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

No.	parameter	symbol	condition	specifications			test results	units
				min	typ	max		
1	forward voltage	V_F	CW, $I_F=30\text{ mA}$		1.2	1.6	1.00	V
2	threshold current	I_{th}	CW		10	20	10.0	mA
3	fiber output power	P_f	CW, $I_F=100\text{ mA}$	10			20.3	mW
4	peak wavelength	λ_p	CW, $\Phi_e=10\text{ mW}$	1 652.74	1 653.74	1 654.74	1 654.09	nm
5	side mode suppression ratio	SMSR	CW, $\Phi_e=10\text{ mW}$	35			47	dB
6	monitoring current (PD)	I_M	CW, $\Phi_e=10\text{ mW}$	0.1			0.399	mA
7	tracking error	E_R	$I_M=\text{constant}$	-0.5		0.5	0.09	dB

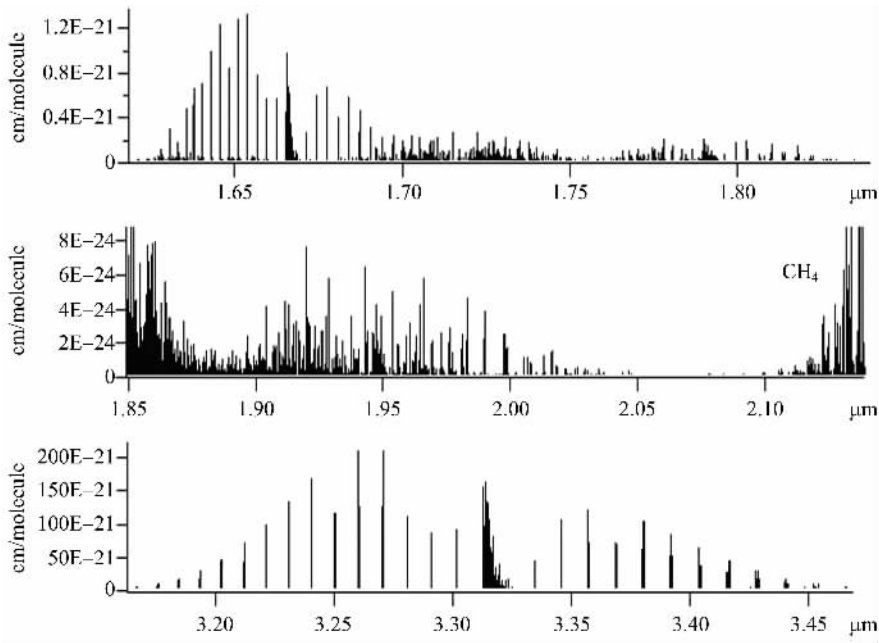


图 3 CH₄ 近红外吸收光谱

Fig. 3 Near IR spectroscopy of CH₄

2.2 二极管激光器

图 4 所示为本系统采用的 NTT Electronics 公

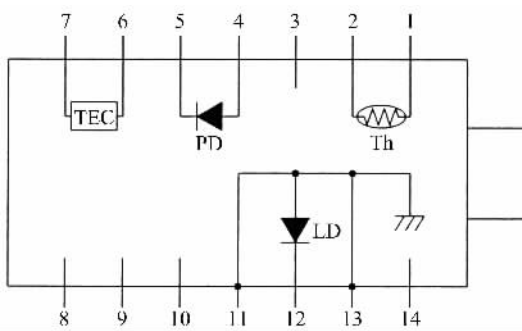


图 4 激光器模块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of diode laser

司的 14 管脚蝶型封装单模分布反馈式二极管激光器结构图,图中 Th 为测量激光器模块工作温度的热敏电阻(thermistor),PD 为测量激光二极管发光强度的光电二极管(photodiode),TEC 为热电温度控制器,LD 为激光二极管(laser diode),出射激光由带有 FC 接口的单模光纤导出。

激光器特性参数如表 1 所示. 典型波长为 1 653.74 nm,波长可调谐范围约为 2 nm,边模抑制比为 46.57 dB,驱动电压为 1 V,发射激光阈值电流为 10 mA. 激光器驱动电流 I_f 与激光器驱动电压 V_f ,光电二极管监测电流 I_m ,激光二极管输出功率 P_f 关系如图 5 所示. I_f 在 30 到 140 mA 范围内, $I_f - V_f$, $I_f - I_m$, $I_f - P_f$ 均保持较好的线性。

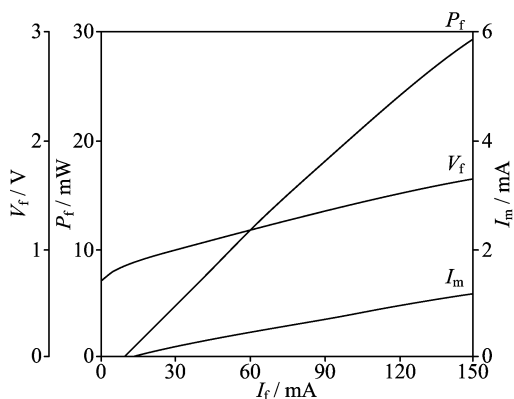


图 5 激光器驱动电流 I_f 与激光器驱动电压 V_f , 光电二极管监测电流 I_m , 激光二极管输出功率 P_f 关系
Fig. 5 The relation of diode laser forward current I_f with forward voltage V_f , monitoring current (PD) I_m and fiber output power P_f

2.3 多次反射吸收池

本系统采用了怀特式(White)多次反射吸收池,用于增加光程,提高系统测量灵敏度.图6为怀特式多次反射吸收池光学原理图.怀特式多次反射吸收池利用球面反射镜成像原理,多次反射样品池主要由一块主镜和两块副镜组成,主镜和副镜的曲率半径相同,主镜和副镜之间的中心距离和曲率半径相等,两块副镜光轴分开一定距离,这样主副镜之间就形成了共焦腔,光束在主副镜之间来回反射.通过调节两块副镜光轴距离,可以改变主镜上光斑之间的间隔,改变多次反射吸收池的反射次数,从而改变多次反射吸收池的光程.本系统所用怀特池长度为 20 cm,最大反射次数为 100 次,总光程可达 20 m,容积为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

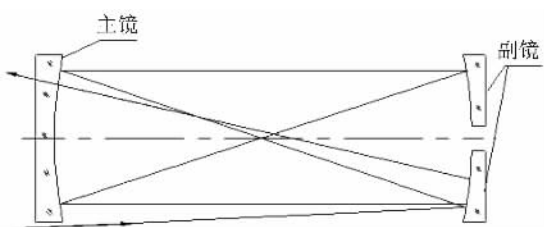


图 6 怀特式多次反射吸收池原理图
Fig. 6 The White cell sketch map

3 系统调试及标定

3.1 二极管激光器参数设定

通过调谐激光二极管的工作温度和驱动电流调谐激光二极管输出激光波长,使输出激光波长处于

CH_4 分子吸收线上,这时可以在数据采集系统上看到二次谐波信号.通过实验,得到在如表 2 所示温度、电流条件下,激光二极管输出波长处于 CH_4 分子吸收线上.从表 2 可以看出当设置激光器工作温度 32°C ,驱动电流为 118.26 mA 时,在二极管激光器输出波长可调谐范围内,激光器输出波长处于 CH_4 最强吸收线上.

表 2 激光二极管温度电流参数设置

Tab. 2 Diode laser characteristics setup

CH_4 分子吸收线编号	温度设置 / $^\circ\text{C}$	电流设置 /mA	相对吸收强度
1	-2.0	120.33	2.5
2	-2.0	107.65	4.6
3	-3.0	111.17	10.5
4	-3.0	95.14	3.4
5	30.0	126.20	6.0
6	32.0	118.26	13.0
7	33.0	105.14	8.2
8	34.0	127.54	10.7

3.2 气体换气速率

本系统采用微型吸气泵通过吸气采样方法进行气体浓度测量.吸气速率将影响多次反射池换气速率,从而影响系统测量的实时响应度.调节微型吸气泵的工作电压,测量吸气泵的流速.图 7 为实验测量的微型吸气泵驱动电压与流量关系,其流量范围在 $14 \times 10^{-3} \sim 17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$,换气速度为 9.3~11.3 次/min.通过调节微型吸气泵的驱动电压,来改变多次反射池换气速率.

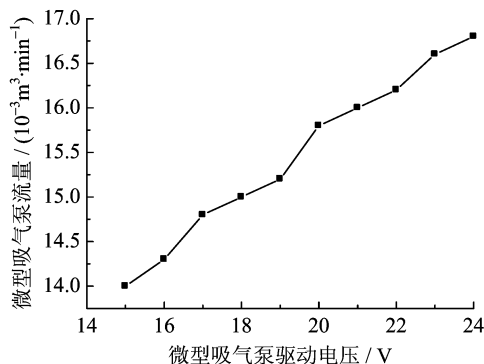


图 7 微型吸气泵电压—流量关系曲线
Fig. 7 Characteristic of micro-pump

3.3 系统标定

对于本系统,式(5)中激光输出光强 I_0 和光程 L 为常数.将已知浓度为 N_0 的 CH_4 通入多次反射吸收池,测得并记录二次谐波信号强度为 A_0 ,则测

量 CH_4 浓度 N_x 可表示为

$$N_x = \frac{N_0}{A_0} A_x \quad (6)$$

向多次反射池中充入已知浓度的国家二级标准气,测量其二次谐波强度值从而得到 $\frac{N_0}{A_0}$ 值。

对于浓度为 $1\ 020 \times 10^{-6}$ 的 CH_4 气体进行浓度测量,结果如图 8 所示。计算浓度样本标准偏差为 0.9×10^{-6} ,取置信概率为 99.7%,则系统检测下限为样本标准偏差的 3 倍,即 2.7×10^{-6} 。由此可见,本系统测量 CH_4 气体浓度灵敏度非常高,可以检测到由于天然气管道的泄漏所产生的泄漏点周围 CH_4 气体浓度微小变化。

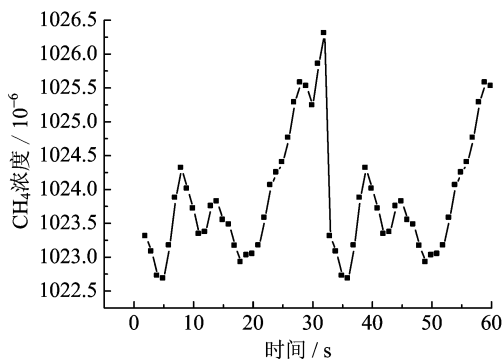


图 8 CH_4 浓度曲线

Fig. 8 The concentration of CH_4

系统的测量结果与真实数值保持线性关系的程度用线性度来表示。线性度是指系统的实际响应曲线接近拟合直线的程度,用非线性误差 δ 来度量:

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{I_2 - I_1} \quad (7)$$

式中, Δ_{\max} 为实际响应曲线与拟合直线之间的最大偏差; I_1, I_2 分别为线性区中的最小和最大响应值。向多次反射吸收池充入不同已知浓度 CH_4 气体,测量其浓度值。将已知浓度和测量值进行线性拟合,如图 9 所示,其非线性度 $\delta < 1\%$ 。

4 天然气管道泄漏数值模拟

我们采用 Fluent 软件,对天然气管道泄漏进行了模拟计算。因存在多点泄漏的情况比较少见,因此设置情况为天然气管道上某一点存在泄漏,在无风条件下模拟计算沿管线贴近地面处 CH_4 气体浓度分布。场景设置如图 10 所示,在一个 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的正方体空间,在底部中心为一条直径为 0.3 m 的天然气管道,从底面到距底面 1 m 处为多孔介

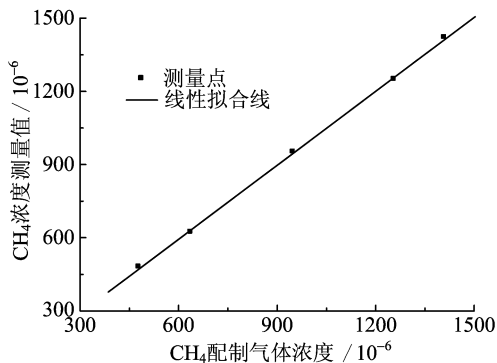


图 9 CH_4 测量值线性拟合线

Fig. 9 Linear fit line of CH_4

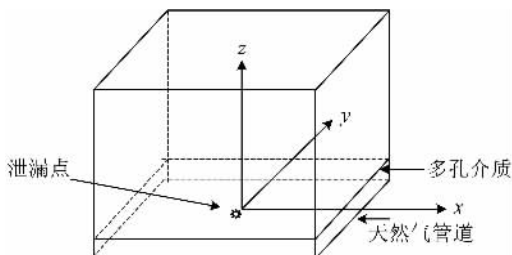


图 10 天然气管道泄漏场景设置示意图

Fig. 10 Natural gas line leakage sketch

质。泄漏孔尺寸为 $0.01\text{ m} \times 0.01\text{ m}$ 时,管道压强为 1.5 MPa , CH_4 浓度沿管道分布如图 11 所示。可以看出随着离泄漏位置距离增大,气体浓度迅速下降。因此,在实际应用中,安装了位移传感器的吸气探头沿天然气管道方向移动,测得气体浓度最高的位置即可认为是气体泄漏点位置。当然,实际情况更加复杂,地形、风向、风速等因素都会影响测量的准确度。

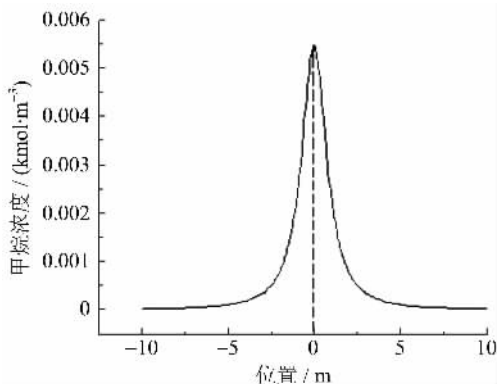


图 11 天然气管道泄漏浓度分布曲线

Fig. 11 CH_4 leak distributing

5 结论

基于 TDLAS 的天然气管道泄漏检测定位系

统,气体检测灵敏度高,最低检测限为 2.7×10^{-6} ,远远低于 CH_4 气体爆炸最低极限浓度 5%,气体采样换气速率为 9.3~11.3 次/min,具有很好的测量实时性.天然气管道泄漏浓度随位置变化梯度大,因而沿天然气管道测量 CH_4 气体浓度峰值所在的位置,就可以对泄漏点进行定位.实际使用中,还要考虑地形、风速、风向、管道埋藏深度等因素的影响.

参考文献(References)

- [1] 李静,汪彤,吕良海. 城镇天然气管道泄漏原因分析[J]. 安全,2005,26(4):33-34.
- [2] Hennigar G W. Advances in gas leak detection[J]. Pipeline & Gas Journal,1985,211(11):39-42.
- [3] [日]森村正直,山崎弘郎. 传感器技术[M]. 黄香泉,译. 北京:科学出版社,1988:40.
- [4] Sandberg C, Holmes J, McCoy K, et al. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25(5): 906-909.
- [5] Kurmer J P, Kingsley S A, Laudo J S, et al. Applicability of a novel distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [C]//Proc. SPIE. 1992, 1 797:63-71.
- [6] Hu Zhi-xin, Zhang Ling, Qiao Xue-guang, et al. Applications of distributed fiber bragg grating sensors in inspection of oil & gas pipeline[J]. Journal of Applied Optics, 2000,21(4):35-38.
- 胡志新,张陵,乔学光,等. 分布式光纤布拉格光栅在油气管道检测中的应用[J]. 应用光学,2000,21(4):35-38.
- [7] Jiao Jing-pin, He Cun-fu, We Bin, et al. Advance in acoustic emission techniques for pipeline leak detection [J]. Nondestructive Testing, 2003,25(10):519-523. 焦敬品,何存富,吴斌,等. 管道声发射泄漏检测技术研究进展[J]. 无损检测. 2003,25(10):519-523.
- [8] Al-Rafai W, Barnes R J. Underlying the performance of real-times software-based pipeline leak-detection systems [J]. Pipes&pipelines International, 1999, 44(6):44-51.
- [9] Blevins L G, Pitts W M. Carbon monoxide measurement using a near-infrared tunable diode laser [C]//Annual Conference on Fire Research. Gaithersburg: Nutional Institute of Standards and Technology, 1998:21-22.
- [10] Hayward J E, Cassidy D T, Reid J. High-sensitivity transient spectroscopy using tunable diode lasers [J]. Applied Physics B, 1989, 48(1): 25-29.
- [11] Gharavi M, Buckley S G. Single diode laser sensor for wide-range H_2O temperature measurements [J]. Applied Spectroscopy, 2004, 58(4): 468-473.
- [12] Gharavi M, Buckley S G. Diode laser absorption spectroscopy measurement of linestrengths and pressure broadening coefficients of the methane $2\nu_3$ band at elevated temperatures[J]. Journal of molecular spectroscopy,2005,229(1):78-88.
- [13] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社,1984.