

文章编号:1001-9014(2011)02-0184-05

实用化机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达

李正文, 亓洪兴, 肖功海, 方抗美, 杨一德, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术与系统实验室, 上海 200083)

摘要: 针对日益严重的天然气管道泄漏问题, 研制了一台基于吸收光谱技术的实用化机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达. 介绍了该仪器的工作原理, 论述了该仪器的系统构成、设计方法, 探讨了高精度激光稳频, 实时定标系统等关键技术. 地面试验和机载试验数据的分析结果证明了该仪器的工程实用性.

关键词: 天然气管道泄漏; 机载; 吸收光谱技术; 高精度激光稳频; 实时定标

中图分类号: X851 **文献标识码:** A

Infrared laser radar for practical airborne natural gas pipeline inspection

LI Zheng-Wen, QI Hong-Xing, XIAO Gong-Hai, FANG Kang-Mei,
YANG Yi-De, SHU Rong

(Laboratory of Space Active Electro-optical Technology and System, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The problem of natural gas pipeline leak becomes increasingly serious. A practical airborne natural gas pipeline inspection laser radar which is based on tunable diode laser spectroscopy was developed. The operating principle of this instrument was introduced, the system configuration and method of design were discussed. The key technologies including high-accuracy laser frequency stabilization and real time calibration were further discussed. The analysis results of ground and airborne test proved that the instrument can be applied in practical project.

Key words: natural gas pipeline leak; airborne; absorption spectrometric method; high accuracy frequency stabilization; real time calibration

PACS: 07.07.Df

引言

据报道中国将在12年内建成30万公里天然气管道, 如此庞大的天然气管道网络必然会发生诸多泄漏问题, 天然气属于易燃性气体, 泄漏在给国家带来巨大经济损失的同时, 管道周边居民的生产生活安全也受到严重威胁. 世界各国纷纷着手研究高效实用的天然气管道泄漏监测手段^[1,2], 相比于传统的地面手持式监测方法, 基于机载平台的天然气管道泄漏监测方法具有高效、安全等优点. 目前国内基于地面的天然气监测仪器已有较大发展^[3], 但机载天然气管道泄漏监测技术尚属空白, 因此极有必要研制实用化机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达, 以应对当前和未来的应用需求.

1 工作原理

机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达的理论基础是基于气体分子对光谱的选择吸收特性, 其工作过程如图1所示, 直升机以一定的飞行速度沿着天然气管道飞行, 激光束扫过天然气管道地表覆盖物, 如果有天然气泄漏, 泄漏点周围形成的气体云团会吸收掉一部分激光能量, 根据激光的初始功率和回波功率就可以反演出天然气的浓度, 反演过程依据的是 Lambert-Beer 定理:

$$P = K \text{Sexp}[-D(\nu)] = K \text{Sexp}[-\alpha(\nu) \cdot 2C_R] \quad (1)$$

其中: P 是激光回波功率(W); S 是激光初始功率(W); ν 是激光频率(Hz); K 是光学接收效率(无气体吸收时回波功率与初始功率的比值); $D(\nu)$ 是光

收稿日期: 2010-05-28, 修回日期: 2010-10-22

基金项目: 国家863计划(2007AA06Z222)

作者简介: 李正文(1982-), 男, 吉林延边人, 博士研究生, 主要研究方向为机载激光遥感技术, E-mail: lizhengwen2012@gmail.com.

Received date: 2010-05-28, revised date: 2010-10-22

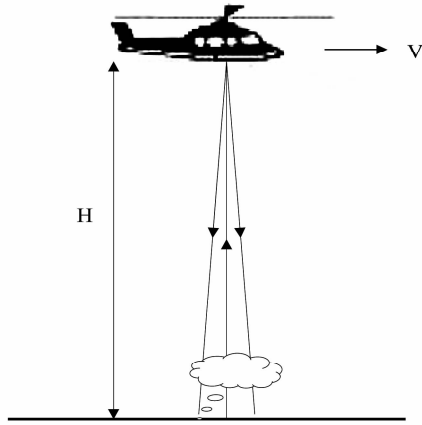


图 1 机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达工作示意图
Fig. 1 Working principle diagram of Airborne Natural Gas Pipeline Inspection Infrared Laser Radar

学路径上的吸收光程 (m); $\alpha(\nu)$ 是频率 ν 处单位浓度介质的吸收系数 ($\text{ppm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); C_R 是甲烷气体路径积分浓度 ($\text{ppm} \cdot \text{m}$).

基于上述原理检测天然气首先要考虑的是其主要成分甲烷气体吸收带的分布. 甲烷气体分子有多个吸收带^[4], 但是为了避免水汽等其它气体的干扰, 探测甲烷气体时使用的主要是 $3.3\mu\text{m}$ 和 $1.65\mu\text{m}$ 两个吸收带, 但是由于波长 $3.3\mu\text{m}$ 的窄带激光器采购困难, 操作复杂, 很难满足实际应用要求, 因此甲烷气体的探测技术主要集中在 $1.65\mu\text{m}$ 光谱区. 在 $1.65\mu\text{m}$ 光谱区甲烷气体的吸收线线宽非常窄, 常温常压下只有 $0.014\text{nm} \sim 0.015\text{nm}$, 而环境温度的变化会引起激光波长的变化, 因此把激光波长精确稳定在甲烷吸收线中心而不发生偏移很难实现, 所以最合理的做法是控制激光波长, 使其以吸收线为中心来回扫描, 每个扫描周期激光波长必定会经过吸收线中心, 这种方法叫做波长调制光谱 (WMS) 技术^[5], 如图 2 所示.

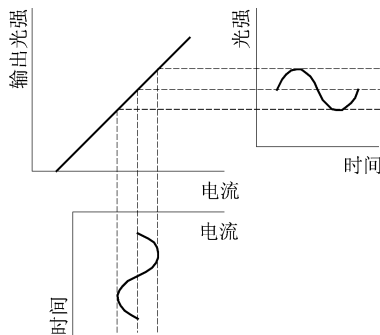


图 2 波长调制光谱技术
Fig. 2 Wavelength modulation spectroscopy

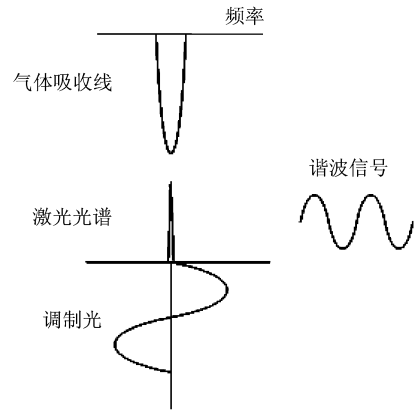


图 3 激光稳频技术
Fig. 3 Laser frequency stabilization

为了实现 WMS 技术系统采用了分布反馈式 (DFB) 激光器, 该激光器的特点是输出激光的波长与激光器温度和注入电流有关, 波长与温度关系为 $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$, 波长与电流关系为 $0.001\text{nm}/\text{mA}$, 当温度一定激光器输出激光的波长与注入电流成线性关系, 此时如果用周期信号调制注入电流就可以产生以固定波长为中心来回扫描的调制光信号. DFB 激光器的另一特点是线宽很窄约为 0.0002nm , 远小于甲烷气体的线宽, 所以可以利用激光稳频技术把 DFB 激光器中心波长稳定在甲烷气体吸收线中心附近, 如图 3 所示, 再调制激光波长, 最终就会输出与气体浓度有关的谐波信号, 通过检测谐波信号就可以确定气体的浓度值^[6].

一般使用相关检测技术^[7] 提取谐波信号, 提取出的一次谐波和二次谐波分量可表示为:

$$P_{1f} = K S_{DC} \beta \quad (2)$$

$$P_{2f} = K S_{DC} h \alpha_0 \times 2 C_R \quad (3)$$

其中 S_{DC} 是初始激光功率中的直流分量, β 是激光功率调制系数, α_0 是吸收线中心处的吸收系数, 把 (2) (3) 式相比就可以得到:

$$C_R = \frac{P_{2f}}{P_{1f}} \times \frac{\beta}{2 h \alpha_0} \quad (4)$$

$$\text{其中: } h = \frac{2[2 + m^2 - 2(1 + m^2)^{\frac{1}{2}}]}{m^2(1 + m^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

(4) 式中的常量可以通过系统定标确定, 可以看出用激光回波的谐波分量的比值确定待测气体的路径积分浓度值, 消除了光接收系统, 反射目标, 初始功率等因素的影响, 具有很强的抗干扰性.

2 系统设计

机载天然气泄漏监测红外激光雷达系统是融合

了光学、电子学、机械结构等多学科知识的复杂系统,因此需要从多方面综合考虑系统设计,而且还要兼顾机载平台的实际工作环境,如温度、气压、震动等因素。

由于系统中采用的激光波长为 1650nm,因此光学系统选择的探测器是 InGaAs 探测器,其光谱响应范围是 0.8 ~ 1.7 μm,在如此宽的光谱范围内必然会引入一部分太阳背景光,此太阳背景功率可表示为:

$$P_b = \frac{\pi \cdot \rho_b \cdot \beta_r^2 \cdot D_r^2}{16} [D(\lambda_2) - D(\lambda_1)] [W] \quad (6)$$

代入各参数: $\lambda_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.7 \mu\text{m}$, 太阳光谱辐照度为 $D(\lambda_1) = 758 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $D(\lambda_2) = 1221 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 背景反射率 $\rho_b = 0.4$, 接收视场角 $\beta_r = 2 \text{ mrad}$, $D_r = 280 \text{ mm}$, 算得 $P_b \approx 1.1 \times 10^{-5} \text{ W}$, 该值虽然小于探测器的动态范围 +8dBm, 探测器不会饱和,但是由于探测器响应率的平均值为 0.8 A/W, 设计前放的放大倍数为 10^6 , 算得前放输出的噪声电压为 7.1V, 该值大于前放工作电压, 前放输出肯定会饱和, 因此必须抑制太阳背景功率. 最有效的方法就是在探测器前加窄带滤光片, 把通带外的背景光都滤除. 系统中选择的滤光片带宽为 10nm, 在 1650nm 处的透过率为 65%, 图 4 是滤光片透过率测试曲线, 将 $\lambda_1 = 1.645 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.655 \mu\text{m}$, $D(\lambda_2) - D(\lambda_1) = 2.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 代入(6)式, 算得背景功率为 $P_b \approx 5.8 \times 10^{-8} \text{ W}$, 则前放输出的噪声电压为 $4.6 \times 10^{-2} \text{ V}$, 前放电路可以正常工作, 而且系统信噪比大大提高. 为了使系统结构更加紧凑, 光学系统中的反射系统采用了卡塞格伦系统, 该系统由抛物面主镜和双曲面次镜组成, 其中主镜口径大小决定了系统接收激光回波能量的多少. 假设系统回波功率等于探测器的噪声等效功率即系统最小可探测功率, 那么由此功率算得的主镜口径就是系统能正常工作的最小口径, 把各参数代入下式:

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4H^2 \cdot P_s}{P_t \cdot \rho_t \cdot \pi \cdot \eta \cdot \sigma \cdot T_f}} [W] \quad (7)$$

回波功率 $P_s = 3 \times 10^{-12} \text{ W}$, 传输距离 $H = 150 \text{ m}$, 激光

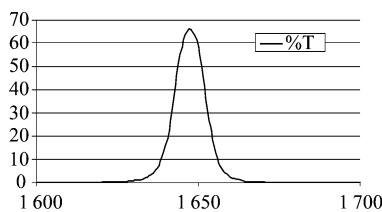


图4 窄带滤光片透过率测试曲线
Fig.4 Transmission curve of narrow band pass filter

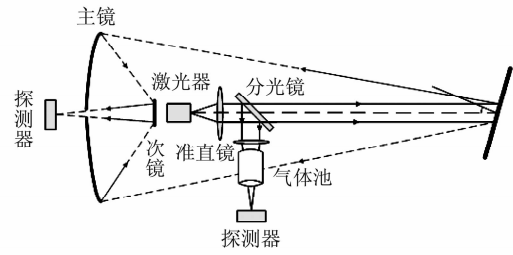


图5 系统光学结构示意图
Fig.5 Diagram of optical structure

发射峰值功率 $P_t = 15 \text{ mW}$, 目标反射率 $\rho_t = 0.3$, 光学效率 $\eta = 0.8$, 大气透过率 $\sigma = 0.9$, 滤光片透过系数 $T_f = 0.65$, 算得主镜口径最小值 $D_{\min} = 4.1 \text{ mm}$, 在此基础上为了尽可能多的接收激光回波功率并兼顾设计的可行性, 设计主镜口径为 280mm, 此时回波功率为 $P_s = 8.1 \times 10^{-9} \text{ W}$. 最后为了进行高精度激光稳频和实时系统定标, 在光学系统中专门设计了参考气体池, 其重要作用将在后面详细阐述. 综合考虑以上各因素, 系统的光学结构如图 5 所示.

电子学系统首先要考虑的是选择合适的激光器, 为了满足线宽小于甲烷吸收线宽的 1/10^[8] 的要求, 采用线宽 2MHz 的 DFB 激光器, 中心波长 1653.7nm. 为了使激光波长稳定在甲烷吸收线中心, 设计了包括高精度温控和电流驱动模块的激光控制器. 前置放大器设计的原则是增益要满足系统对探测灵敏度的要求, 同时还要保证足够的信号带宽, 使谐波信号不失真, 图 6 是前放频响测试曲线, 图中调制频率由 1kHz 增大到 100kHz, 一次谐波 (C) 和二次谐波 (B) 的频率响应较为平坦, 由于系统使用的调制频率只有 10kHz, 因此该前放电路设计满足系统要求. 由前面计算可知, 激光回波功率要远小于背景功率, 这是由于激光器峰值功率太小导致的, 因此为了

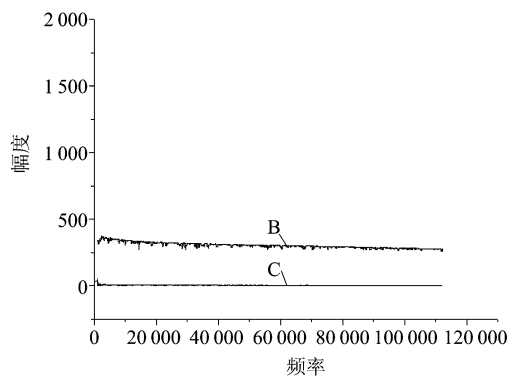


图6 前置放大器频率响应曲线
Fig.6 Frequency response curve of preamplifier

能在信噪比较差的情况下提取有用信号,系统引入了相关检测技术,该技术的特点是只提取特定频率的信号,而对其它频率的信号几乎不响应,具有极好的抗干扰特性,非常适用于弱信号检测。

机械结构设计考虑的主要问题是满足机载平台下的工作环境,如加减震垫减小飞机震动对仪器的影响,仪器在飞机上的安装位置、固定方式、仪器的重量限制等。

3 关键技术分析

3.1 激光稳频技术

为了使气体吸收效果最强,本系统要求激光的中心波长要始终稳定在甲烷气体吸收线中心处,因此必须对激光波长进行稳频,最基本的稳频方法就是对激光器进行温度控制。本系统中设计了高精度温控模块,温度稳定度可以达到 0.01°C ,即激光波长的抖动能够控制在 0.001nm 范围内,远小于甲烷吸收线线宽。但是这种稳频方法还无法满足系统实际要求,因为在机载平台下,仪器的工作环境时刻在变化,一旦甲烷吸收线中心位置因环境温度,气压的突变发生漂移时,激光的中心波长就会偏离吸收线中心。为了解决这一问题,本系统用参考气体池来监控甲烷气体吸收线中心位置,再实时调整激光波长,使激光波长时刻处在吸收线中心。采用这一方法的关键就是如何判断甲烷气体吸收线中心位置的变化。在常温常压下,选择洛伦兹线型来拟合甲烷的吸收系数,再展开成指数形式的傅里叶级数,可得到各次谐波的复数形式:

$$H_n^L(x, m) = \frac{\varepsilon_n i^n [(1 - ix)^2 + m^2]^{1/2} - (1 - ix)^n}{2m^n [(1 - ix)^2 + m^2]^{1/2}}, \quad (8)$$

分别取 $n = 1, n = 2$ 得到一次谐波,二次谐波幅度。当(8)中吸收系数取最大值时,奇次谐波幅度为零,偶次谐波幅度具有最大值。但是由于剩余幅度调制^[9]影响,即当二极管激光器输出光功率受调制时,会伴随着不同程度光功率起伏,导致各次谐波的基线并不为零,此时奇次谐波幅度实际值不为零,因此判断甲烷气体吸收线中心位置最有效的方法是用偶次谐波最大值来判断。激光稳频的具体过程是:首先控制激光器温度和电流,使激光波长稳定在甲烷吸收线中心,然后实时监测参考通道解调出的二次谐波信号,如果二次谐波幅度小于最大值,则调整激光器温度使二次谐波幅度恢复到最大值,就可以始终保持激光中心波长处在甲烷吸收线中心位置。

3.2 实时定标系统

为了能够确定待测甲烷气体的真实浓度,需要对测量结果进行定标,传统的定标手段一般是“先测量后定标”,这种方式往往会因为环境差异引入误差,例如定标时气压、温度等条件的不同会导致待测气体浓度不准确,因此并不实用。本系统采用了实时定标方法,即在每次测量的同时由已知浓度的参考气体池实时标定待测气体的浓度,区别于传统定标方法,这种实时浓度定标方法在准确性、抗干扰性、实时性等方面具有明显的优势。图5中的参考气体池长 85mm ,内部充满一个大气压的 20% 甲烷气体和 80% 氮气的混合气体该浓度,选择该浓度是为了接近待测气体浓度,方便定标。由(4)可知参考通道和分析通道的甲烷气体浓度分别为:

$$C_r = \frac{P_{2fr}}{P_{1fr}} \times \frac{\beta}{h\alpha_0}, \quad (9)$$

$$C_a = \frac{P_{2fa}}{P_{1fa}} \times \frac{\beta}{2h\alpha_0}, \quad (10)$$

参考通道只吸收一次,所以不用除以2。由于两个通道使用同一激光光源,所以以上两式中激光调制深度系数相同, 100m 高度可以认为参考气体池内气压和温度与地面相同,因此气体吸收系数相同,两式相比可以消去这些量,即:

$$C_a = C_r \times \frac{P_{2fa}}{2P_{1fa}} \times \frac{P_{1fr}}{P_{2fr}}, \quad (11)$$

由上式就可以实时确定待测甲烷气体的浓度值。

本系统中参考通道的引入意义重大,不仅使激光稳频技术更加行之有效,而且实现了实时定标,充分考虑了机载平台下的实际需要,是本系统设计中的关键。

4 远距离探测试验

4.1 地面 100m 探测试验

为了验证本系统的远距离探测能力,首先在室外 100m 距离进行了甲烷泄漏探测试验。用一个装满甲烷气体的储气瓶模拟天然气管道,气瓶上装有流量计,监控气体泄漏量始终小于 $1.5\text{L}/\text{min}$,把气瓶放在距离仪器 100m 的墙下,用墙体作为反射目标,反射率大概为 0.4 。首先在墙体上找到激光光斑位置,然后在光斑下方释放甲烷气体,测得的气体浓度如图7所示,图中横坐标代表采样点,纵坐标代表甲烷路径积分浓度,单位 $\text{ppm} \cdot \text{m}$ 。

4.2 机载 100m 飞行试验

地面试验完成后又开展了基于直升机平台的机

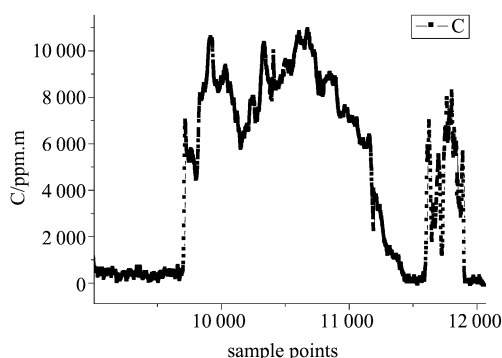


图7 地面 100m 探测试验
Fig.7 Ground 100 meters test

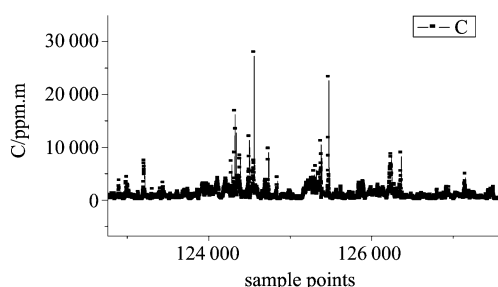


图8 机载 100m 飞行试验
Fig.8 Airborne 100 meters test

载天然气泄漏监测试验,试验环境如下:地点:山东蓬莱海滩(北纬 37°48'46",东经 120°48'37"),时间:2010 年 3 月 26 日 11 时,直升机平台:B-7126,气象条件:晴,气温 1~15℃,西风 5~6 级。在海滩上放置装有甲烷气体的储气瓶模拟天然气管道。当直升机在 100 米高度,以一定航速飞过泄漏点时,监测到气体泄漏量如图 8 所示。

为了估算系统的探测灵敏度,把无气体时测得的浓度值看作系统的本底噪声,那么只要有气体存在,系统就可以测到比本底噪声大的信号,因此就可以用该本底噪声的平均值来衡量系统的探测灵敏度,表 1 中列举了地面试验和机载试验测得的系统探测灵敏度。由于系统中采用了相关检测技术,因此在系统信噪比较差的情况下依然获得了良好的探测灵敏度,另外实时定标技术的引入也在一定程度上消除了外界环境因素的干扰。

表 1 系统探测灵敏度测试结果
Table 1 System detection sensitivity test result

试验环境	地面 100m 距离	机载 100m 高度
探测灵敏度(ppm·m)	535	897

相比于地面试验,机载试验的探测灵敏度较低,原因是整个仪器是吊挂在舱门外,受螺旋桨的巨大风力影响,环境温度变化过于剧烈,系统温控受到很大干扰,改进的方法是把仪器装在机舱内部或者飞机底部,即可大大改善系统探测灵敏度。

5 结论

针对日益严重的天然气管道泄漏问题,研制了一台实用化机载天然气管道泄漏监测红外激光雷达,对该仪器的工作原理,系统组成及设计方法做了详细介绍,在地面远距离试验的基础上完成了机载 100m 高度天然气泄漏监测试验,取得了较为理想的试验结果。为了实现更远距离的探测目标可以利用光放大器,把激光峰值功率从 15mW 提高到 5W,作用距离就可以提高至 1000m 以上,这样不仅可以增大激光在地面的扫描宽度,还可以使飞机避开地面建筑物。

REFERENCES

- [1] QI Hong-Xing, LI Zheng-Wen, YANG Yi-De, *et al.* Study on airborne natural gas pipeline inspection techniques[J]. *Infrared* (亓洪兴,李正文,杨一德,等.基于机载平台的天然气管道泄漏监测技术研究.红外),2009,30(3):1—6.
- [2] Karapuzikov A I, Ptashnik I V, Sherstov I V, *et al.* Modeling of helicopter-borne tunable TEA CO₂ DIAL system employment for detection of methane and ammonia leakages[J]. *Infrared Physics & Technology*,2000,41(2):87—96.
- [3] FAN Hong, GAO Xiao-Ming, BAO Jian, *et al.* Study on natural gas pipeline leakage tunable diode laser remote detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (樊宏,高晓明,鲍健,等.天然气管道泄漏可调谐二极管激光遥感探测的研究.光谱学与光谱分析),2006,26(8):1423—1427.
- [4] WANG Yu-Tian, LI Xiao-Xin, LIU Zhan-Wei, *et al.* Study of C₂H₂ Optic-fiber monitoring system based on spectrum absorption[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, (王玉田,李晓昕,刘占伟,等.基于光谱吸收式光纤乙炔气体监测系统的研究.传感技术学报),2004,17(4):619—622.
- [5] GAO Shan-Hu, LIU Wen-Qing, LIU Jian-Guo, *et al.* Methane detection research with tunable diode laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (高山虎,刘文清,刘建国,等.可调谐半导体激光吸收光谱学测量甲烷的研究),2006,23(3):388—392.
- [6] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane with a 1.66μm diode laser[J]. *Appl. Opt.* 1992,31(6):809—814.
- [7] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. *Appl. Phys.* 1981,26(3):203—210.
- [8] B. Culshaw, G. Stewart, F. Dong, *et al.* Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection - from concept to system realization[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1998,51(1-3):25—37.
- [9] Whittaker E A, Gehrtz M, Bjorklund G C. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. *Opt. Soc.*, 1985,2(8):1320—1326.