

分类号\_\_\_\_\_

学号 M200972818\_\_\_\_\_

学校代码 10487\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

華中科技大學

# 硕士学位论文

煤矿瓦斯光纤传感器的研究

学位申请人： 满 堂

学 科 专 业： 光学工程

指 导 教 师： 胡必春 副教授

答 辩 日 期： 2011.12.31

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering**

# **Research on Optical Fiber Coal Mine Gas Sensor**

**Candidate : Man Tang**

**Major : Optical Engineering**

**Supervisor : Associate Prof. Hu Bichun**

**Huazhong University of Science & Technology**

**Wuhan 430074, P. R. China**

**December, 2011**

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本论文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 ☐ 保密， 在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。  
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 摘要

近年来煤矿瓦斯爆炸频发,对人们的生命和国家的财产都造成了严重危害,甲烷是瓦斯的主要成分,因此对煤矿甲烷气体检查已经成为了科研领域的重点。传统非光学式甲烷气体传感器可以检查到较低浓度的甲烷气体,但是传感器的响应慢、易受污染、寿命短等缺点,并且难以实现在大规模区的连续实时监测。本论文研究了基于光谱吸收原理的甲烷光纤气体传感系统,其结合了光纤技术和弱光电信号处理技术,实现了对甲烷气体的实时、快速、高效检测,另外如果改变系统光源和对应光电器件,还可以实现对多种气体的实时分布式检测。

本论文第一章介绍了瓦斯探测的重要意义、非光学式与光纤式气体传感器的特点以及煤矿瓦斯传感器的研究现状等;第二章介绍了气体分子选择吸收特性、吸收线型和吸收线宽,并对甲烷气体的吸收谱线进行了分析;第三章研究了光谱吸收型的几种检测技术方案的原理及特点,确定了差分检测方案,并给出了甲烷光纤传感器的单点和多点检测系统架构;第四章对单点光纤甲烷传感系统的各部分进行了设计,给出了各部分的设计原理和器件的选择;第五章对传感系统进行了实验测试,分析了实验结果;第六章则是对本论文的总结,指出了系统的不足之处,并对本技术的应用进行了展望。

本论文第五章的实验测试结果显示,本系统在浓度低于 5% 时,检测误差在 0.3% 以下,满足低浓度检测要求;在浓度高于 5% 时,由于参考光对甲烷气体的吸收,以及滤波片受环境因素的影响,使得测试误差增大,最大测试误差为 5%。实验测试还显示本系统具有良好的稳定性和灵敏度,系统分辨率为 620ppm。

**关键词:** 差分检测    光纤气体传感    宽带滤波器    梳状滤波器    气室

## Abstract

In recent years, the coal gas explosion occurs frequently, people's lives and property of the country has caused serious harm. Because methane gas is the main ingredient in the coal gas, so detecting methane gas has become the key area of scientific research. The traditional anoptical type of methane gas sensor can check to a low concentration of methane gas, but they have many shortcomings such as the response of the sensor slow, vulnerable to pollution, short life and hard to monitor continuously in real-time in the large scale. This paper studies methane gas sensor system based on the optical fiber absorption spectrum, which combines optical fiber technology and weak photoelectric signal processing technology, realizes real-time, rapid and efficient testing. And if we change the light source and the corresponding photoelectric devices, it can also achieve the real-time distributed to many kinds of gas detection.

The first chapter presents the significance of gas detection, the characteristic of anoptical type and optical fiber type gas sensor and research status of mine gas sensor; The second chapter presents the choiced absorption characteristics of the gas molecular, absorption linear and absorption width, and analyzes the absorption of methane gas spectrum line; The third chapter researchs the principle and characteristic of the scheme of several detection technology based on spectrum absorption, and gives single point and more detection system framework of the optical fiber methane sensor; The fourth chapter designs all the parts of the single point optical fiber methane sensing system, given the design principle of the various parts and choiced devices; The fifth chapter tests the sensing system and then analyzes the experiment results; The sixth summarizes this article, points out the defects of the system and discusses the application of this technology .

The experimental results of the fifth chapter show that this system in concentration below 5%, 0.3% was the biggest error detection; in concentration higher 5%, the testing error increases, 5% was the maximum error. The experiment test also shows that the system has a good stability and sensitivity, system resolution was 620 PPM.

**Key word:** Differential detection    Optical fiber gas sensor    The broadband filter  
The comb filter    The gas chamber

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 引言 .....	(1)
1.2 气体传感技术概况 .....	(1)
1.3 煤矿瓦斯气体检测的研究及应用现状 .....	(3)
1.4 本论文主要研究工作 .....	(4)
2 光谱吸收型光纤气体传感理论基础	
2.1 气体分子选择吸收特性 .....	(5)
2.2 气体分子的吸收线型和线宽分析 .....	(6)
2.3 甲烷吸收光谱研究 .....	(10)
2.4 本章小结 .....	(13)
3 光谱吸收型光纤气体传感检测技术探究	
3.1 单波长检测技术 .....	(14)
3.2 差分检测技术 .....	(15)
3.3 谐波检测技术 .....	(17)
3.4 光纤环形腔衰荡检测 .....	(19)
3.5 甲烷单点传感系统结构设计 .....	(21)
3.6 甲烷多点传感网络结构设计 .....	(24)
3.7 本章小结 .....	(25)

# 华中科技大学硕士学位论文

---

4 甲烷单点传感系统的研究设计	
4.1 光源及控制设计 .....	(26)
4.2 多波长滤波分光器设计 .....	(29)
4.3 传感气室设计 .....	(32)
4.4 光电信号检测 .....	(34)
4.5 信号处理系统 .....	(38)
4.6 声光报警设计 .....	(41)
4.7 本章小结 .....	(43)
5 光纤甲烷气体传感研究	
5.1 光谱曲线测试 .....	(44)
5.2 系统损耗测试 .....	(48)
5.3 系统标定 .....	(48)
5.4 系统性能测试 .....	(51)
5.5 本章小结 .....	(55)
6 总结与展望 .....	(57)
致 谢 .....	(59)
参考文献 .....	(60)

## 1 绪论

### 1.1 引言

随着现代工业的发展,对易燃易爆、有害有毒气体的及时准确地监控已经成为煤炭、石油、化工、电力等产业亟待解决的重要问题。同时,随着人们生活水平的提高,人们开始更多的关注生态环境的问题,对危险有害有毒气体的实时检测也已经成了人们关注的焦点。

大量易燃易爆气体在煤矿开采过程中会产生,如果发生事故将对经济造成巨大损失并严重危及矿工生命安全。近年来由于经济发展需要煤矿开采规模逐年扩大,事故发生数量也在增加,而由于煤矿瓦斯爆炸造成的人员伤亡占有所有重大事故的 50% 以上<sup>[1~2]</sup>。因此,研制应用于矿井下瓦斯检测的气体传感系统,已成为现代传感领域的一个重要课题。

瓦斯是在特定环境中各种有害气体的总称,在矿井瓦斯中甲烷含量约占 83%~89%,爆炸限为 5%~15%<sup>[3]</sup>。由于甲烷气体是瓦斯的主要成分,因此对瓦斯的检测转化为对甲烷气体的检测。另外甲烷也是多种液体燃料的主要成分,是温室效应的主要气体。为了有效的保证煤矿安全运行以及保护自然环境,迫切需要实时准确的监控甲烷气体产生源和泄漏源处的气体浓度。

### 1.2 气体传感技术概况

#### 1.2.1 非光学式气体检测技术

常见的非光学式气体检测技术主要有:半导体检测、电化学检测和气相色谱法检测技术。

半导体检测法的原理是半导体气敏材料遇到检测气体发生反应,反应会引起半导体元器件电信号的变化,通过检测电信号的变化特性或者电信号的变化量识别检测气体的成分或者浓度<sup>[4]</sup>。利用半导体检测原理制成的传感器灵敏度比较高,结构简单价格便宜,应用广泛,但是半导体传感器响应速度一般,稳定性不好。

电化学检测法的原理是当气体与元件接触式会发生化学反应,并产生与气体浓度



成线性关系的化学电位差，通过检测电位差可以得知气体浓度大小。大部分的有毒有害、易燃易爆气体具有电化学活性，并且不同气体电化学特性不同，这样电化学检测法还可以分辨检测气体的成分。这种检测方法应用比较广泛，但是容易受到气体的干扰，会导致误报警。

气相色谱法是一种分离技术，检测物质成分按照吸附能力不同层析在吸附剂上，吸附剂就是所谓的色谱柱。将待测气体装入玻璃管内静止不动的一相称为固定相，这根玻璃管子称为色谱柱。流动的一相称为流动相，流动相载气体进入色谱柱，当两相相对运动时，经过一段时间，待检测气体的各组分会彼此分离。出色谱柱后进入热传导池，通过桥式检测电路可以检测出气体组分的浓度。这种检测方法灵敏度很高，也不会受其他气体干扰，但是检测设备复杂，实用性不强。

## 1.2.2 光纤气体传感技术

光纤气体传感器根据传感原理可以分为两大类<sup>[5]</sup>：一类是传光型光纤传感器，光纤只传输光波的作用；另一类是传感型光纤传感器，光纤既传输光波又做气体探头。常见的传感型光纤传感器为消逝场型光纤传感器，常见的传光型光纤传感器有折射率变化型、染料指示型和光谱吸收型。

消逝场型光纤传感器通过检测光纤表面的消逝场被气体的吸收程度来检测气体的浓度。光在光纤纤心和包层的界面上发生全反射时，一部分光会露出光纤纤心在包层中产生消逝场，如果包成部分被待测气体代替，消逝场就将被待测气体吸收衰减，这样只要检测透射光强度的衰减量就可以分析出气体的浓度。但是这种裸露光纤的做法光纤容易被污染，实用意义不大。

折射率变化型光纤传感器是将对气体敏感的材料涂覆于光纤表面，这将导致光纤波导有效折射率、双折射率和损耗的变化，再通过测量马赫泽德干涉仪输出的光强度的变化获取待测气体的浓度。目前国内煤矿下普遍使用这种检测方法，但是这种检测受环境温度、湿度的影响较大，稳定性较差。

染料指示型光纤传感器的原理是气体与染料发生化学反应时，染料的光学性质发生变化，测出光学性质的变化就能得知被测气体的浓度。这种检测方法要求被测气体在光纤传输窗口没有很强的吸收峰，另外受化学作用速度的限制，检测系统也复杂。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

光谱吸收型光纤传感器理论基础是比尔-朗伯定律，即气体对石英光纤传输窗口的近红外光产生吸收，光纤输出的光强会衰减，通过检测光强衰减量就可以得到待测气体的浓度。这种光学检测表现出很多优点，如灵敏度高、响应速度快、寿命长、抗干扰能力强等。

## 1.3 煤矿瓦斯气体检测的研究及应用现状

目前矿井中常用的检测装置大都是采用催化燃烧式传感技术或电化学式传感技术，这类传感器虽然能实现比较低的检测限，达到 ppb 量级（Part Per Billion）<sup>[6]</sup>，但容易受到其他气体影响，敏感膜表面容易被污染，响应不灵敏，使用寿命短，难以进行实时在线多点监测。就目前情况，如果在大规模工程区搭建实时分布式监测网络时采用传统的非光学气体传感器，代价将会十分昂贵。

对于易燃易爆的瓦斯气体来说，基于光谱吸收的光纤气体探测技术与非光学式气体探测技术相比技术上更可靠，没有表面污染的问题，响应速度快，检测灵敏，抗干扰能力强，易于组成分布式测量网络等优点。因此，光谱吸收型光纤传感器已成为当前极具价值和前途的气体传感检测技术。

二十世纪八九十年代，国外在光谱吸收式光纤传感器方面做大量研究，并取得了很多有意义的研究成果<sup>[7-9]</sup>。1979 年，日本 Tohoko University 的 Humio Inaba 等开创了利用长距离光纤对大气污染气体的研究<sup>[10]</sup>，1984 年，其利用 LED 作为宽带光源，在波长 1660nm 对甲烷浓度进行检测，检测灵敏度达到 400ppm。1993 年，Jin.W 和 Stewart 等研究了宽带光源 LED 和梳状滤波器结合的甲烷浓度检测方法，该方法采用二次谐波检测方法，检测灵敏度达到 10ppm。1998 年，英国 Strathclyde University 的 G.Stewart 等研制了多点光纤气体传感系统<sup>[11]</sup>，采用空分复用方式，实验精度跟单点系统相当。2003 年，英国 Strathclyde University 的 Gillian.W 等研制成 64 点甲烷气体传感系统<sup>[12]</sup>，单点测量精度达到 50ppm。2008 年，加拿大多伦多大学的 F.Ye 等研制出基于频率偏移干涉技术的光纤传感器<sup>[13]</sup>，此技术可以串接很多的气室实现多点检测，检测灵敏度达到 70ppm。

国内在光纤传感器方面的研究起于二十世纪八十年代末。由于国内实验条件落后，早期主要进行了一些理论研究，如 1989 年西安光机所郭栓运等介绍了差分光谱吸收光

纤传感器的原理<sup>[14]</sup>。随着经济技术的发展, 光纤气体传感器的研究发展也比较迅速。1998 年, 大连理工大学刘文琦等采用 LED 光源在波长 1331nm 处对甲烷气体进行了光纤传感研究<sup>[15]</sup>。气室采用纳米级多孔透射膜大大增加了气体的传感长度, 该传感器达到了较高的灵敏度。2000 年, 燕山大学王玉田等研制出能同时测量甲烷和乙炔的光纤气体传感仪<sup>[16]</sup>。检测微弱信号采用锁相放大技术, 该仪器检测结果误差小, 实验线性好。2001 年, 吉林大学王一丁等研制出一种便携式甲烷光纤传感器<sup>[17]</sup>。该传感器设计采用新型光路和电路, 具有智能化, 低功耗等特点。2005 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所董凤忠等研制出可以检测空气中甲烷浓度的光纤传感器<sup>[18]</sup>, 检测限达到 100ppb。传感器若采用可调谐激光器作为光源, 可实现对多种痕量气体(硫化氢、二氧化碳等)的实时监测。2007 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所阙瑞峰等研制出便携式甲烷光纤传感器<sup>[19]</sup>, 设备已经在北京奥运会上得到应用, 该仪器采用谐波检测技术和多次反射池技术, 能对甲烷气体进行长时间实时监测。2009 年, 武汉理工大学赵磊等研制出能在矿井下试用的甲烷光纤传感器<sup>[20]</sup>, 测量精度达到 217ppm。

从上面国内外发展动态来看, 光纤气体传感器商业使用的产品不是很多, 主要由于成本和工艺问题。但是光纤气体传感器在实验中一直在演进, 宽带光源到可调谐光源, 单点到多点检测, 单种气体到多种气体检测, 测量精度不断地提高, 系统成本不断降低, 相信不久的将来光纤气体传感器一定会大规模使用。

## 1.4 本论文主要研究工作

本论文的研究内容主要有以下几个方面:

- (1) 分析气体检测技术及优缺点。介绍煤矿瓦斯检测的研究和应用现状。
- (2) 分析气体吸收特性。研究甲烷气体的吸收线型和吸收光谱。
- (3) 光谱吸收型检测技术分析。确定甲烷检测的系统方案。
- (4) 系统方案中各模块的选择、设计及性能测试。
- (5) 系统实验测试, 数据分析算法研究。

## 2 光谱吸收型光纤气体传感理论基础

### 2.1 气体分子选择吸收特性

气体分子吸收光子时只能吸收那些能量大小等于分子某两能级之差的光子，这种吸收特点就是气体分子的选择吸收特性。由于不同的气体具有不同的分子结构，不同的分子结构决定不同的能级，所以不同的气体会表现出不同光子吸收。气体分子光谱图反映的就是气体在不同波长下被吸收的能量大小的谱图<sup>[21]</sup>。反之，通过检测特定波长的吸收情况，就可以对气体进行定性定量的分析了。

气体分子的纯转动能级跃迁产生的光谱一般出现在远红外光区和微波区，气体分子的电子能级跃迁产生的光谱一般出现在可见光区和紫外光区，气体分子的振动-转动能级跃迁产生的光谱一般出现在红外光区。红外按照波长又可以分为三个区， $0.78\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$  为近红外区， $2.5\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$  为中红外区， $25\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$  为远红外区。石英光纤的传输窗口在  $0.7\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ （近红外区），所以在光谱吸收型光纤气体检测系统中只研究近红外波段即可<sup>[22]</sup>。分子在近红区的能量跃迁包括基频跃迁、倍频跃迁和合频跃迁。表 2-1 是一些常见气体在近红外波段的特征吸收波长。

表 2-1 常见气体在近红外区的吸收峰

气体种类	吸收波长	可能的污染来源
二氧化氮 $\text{NO}_2$	$3.44\mu\text{m}$	工业废气
甲烷 $\text{CH}_4$	$1.665\mu\text{m}$	煤层气体
硫化氢 $\text{H}_2\text{S}$	$1.578\mu\text{m}$	工业废气
二氧化碳 $\text{CO}_2$	$1.573\mu\text{m}$	发动机废气
一氧化碳 $\text{CO}$	$1.567\mu\text{m}$	发动机废气
氨气 $\text{NH}_3$	$1.544\mu\text{m}$	工业废气
乙炔 $\text{C}_2\text{H}_2$	$1.530\mu\text{m}$	发动机废气
水蒸气 $\text{H}_2\text{O}$	$1.365\mu\text{m}$	
氧气 $\text{O}_2$	$0.761\mu\text{m}$	

## 2.2 气体分子的吸收线型和线宽分析

光通过气体介质后，由于气体分子的吸收作用，输出光强会减弱。根据比尔-朗伯（Beer-Lambert）定律<sup>[23]</sup>，入射光  $I_0$  与出射光强  $I$  的关系为：

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL] \quad (2-1)$$

式（2-1）中， $\alpha(\nu)$  为气体吸收系数，即气体在频率  $\nu$  处的吸收线性； $L$  为气体吸收的长度， $C$  为气体的浓度。气体的吸收系数  $\alpha$  随着光波波长的变化的曲线我们称之为气体吸收光谱。气体吸收光谱由很多条清晰狭窄的吸收线组成，而吸收线的频率对应气体发射光谱的频率，这是气体光谱吸收的主要特点。另外气体的压力、温度等也会对气体吸收光谱造成影响<sup>[24]</sup>。

由于气体分子处在不断运动碰撞的状态中，气体分子的两能级之差并不是固定的，因此从基态跃迁至激发态所吸收的谱线（吸收线）并不是绝对单色的几何线，而是具有一定的宽度，这就是气体吸收光谱有增宽效应。吸收谱线的强度在中心频率  $\nu_0$  附近的分布函数  $I(\nu)$  称我们称之为吸收线型，如图 2-1 所示。谱线强度的  $I(\nu_0)/2$  处，频率间隔  $\Delta\nu$  我们称之为谱线的半高宽度（FWHM, Full Width at Half Maximum），即线宽。一般情况下线型函数用  $g(\nu)$  来表示， $g(\nu)$  定义为：

$$g(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} \quad (2-2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = 1 \quad (2-3)$$

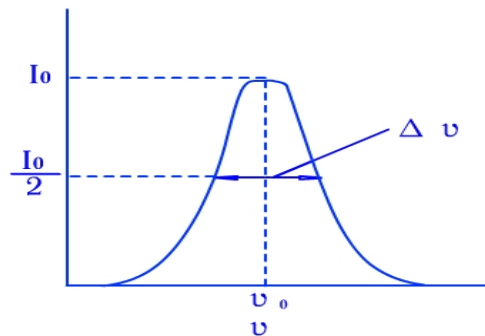


图 2-1 谱线线型函数示意图

## 2.2.1 Lorentzian 线型

我们为了找到气体分子吸收与气体吸收系数的关系，先假设气体浓度  $C=1$ ，光强为  $I(w)$  的平面波通过气体，由比尔-朗伯吸收定律得出

$$I = I_0 \exp(-\alpha \cdot L) \quad (2-4)$$

若入射波为  $E_0 \exp(iwt)$ ，则式 (2-4) 变为

$$E = E_0 \exp[i(w \cdot t - \beta \cdot l)] \quad (2-5)$$

其中  $\beta$  为传播系数， $w$  为平面波角频率。

气体折射率  $n = (n_r, -ik)$ ，其中  $n_r$  和  $k$  分别为气体折射率的实部和虚部，若光波波长为  $\lambda$ ，则  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ，自然我们表示出  $\beta$  的表达式为

$$\beta = k_0 n = k_0 (n_r, -ik) \quad (2-6)$$

带入式 (2-5) 中可以得到

$$E = E_0 \exp\left(\frac{-2\pi k l}{\lambda}\right) \exp[i(wt - k_0 n_r l)] \quad (2-7)$$

可以看出  $k$  反映了光波的吸收，光强与振幅的平方关系为  $I \propto |E|^2$ ，对比式 (2-7) 与式 (2-4) 可以得到

$$\alpha = \frac{4\pi \cdot k}{\lambda} = 2k_0 \cdot k \quad (2-8)$$

通过以上假设，我们找到了气体吸收系数跟气体折射率虚部的关系。根据量子力学和电动力学理论，气体折射率  $n$  的表达式表示为

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2\varepsilon_0\mu(w_0^2 - w^2 + i\gamma w)} \quad (2-9)$$

其中  $q$  为光波通过气体时的极化电荷， $N$  为极化分子数目， $\gamma$  为阻尼系数， $\mu$  为折合质量， $\varepsilon_0$  为真空介电常数。

一般情况下气体的折射率  $n \approx 1$ ，故  $n^2 - 1 = (n+1)(n-1) \approx 2(n-1)$ ，代入式 (2-9) 得

# 华中科技大学硕士学位论文

---

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2\varepsilon_0\mu(w_0^2 - w^2 + i\gamma w)} \quad (2-10)$$

由于气体折射率  $n = (n_r, -ik)$ ，将式 (2-10) 展开后我们可以得出

$$k = \frac{Nq^2}{2\varepsilon_0\mu} \cdot \frac{\gamma w}{(w_0^2 - w^2)^2 + \gamma^2 w^2} \quad (2-11)$$

$$n_r = 1 + \frac{Nq^2}{2\varepsilon_0\mu} \cdot \frac{w_0^2 - w^2}{(w_0^2 - w^2)^2 + \gamma^2 w^2} \quad (2-12)$$

以上两个公式便是我们熟知的色散关系，若本征频率为  $w_0$ ，在  $|w - w_0| \ll w_0$  范围内，以上两个公式可以变为

$$k = \frac{Nq^2}{8\varepsilon_0\mu} \cdot \frac{\gamma}{(w_0 - w)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \quad (2-13)$$

$$n_r = 1 + \frac{Nq^2}{8\varepsilon_0\mu} \cdot \frac{w_0 - w}{(w_0 - w)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \quad (2-14)$$

我们知道气体的吸收系数  $\alpha = 4\pi \cdot k / \lambda = 2k_0 \cdot k$ ，在本征频率  $w_0$  附近，将式 (2-13) 代入吸收系数，并用 Lorentzian 线型描述，则气体的吸收系数可以表述为

$$\alpha = \frac{4\pi \cdot k}{\lambda} = \alpha_0 \cdot g_L(w - w_0) \quad (2-15)$$

其中  $\alpha_0 = (\pi Nq^2) / (2c\varepsilon_0\mu)$  为常数。 $g_L(w - w_0)$  是气体分子在本征频率上的 Lorentzian 吸收线型

$$g_L(w - w_0) = \frac{\delta w_L}{2\pi \cdot \left[ (w_0 - w)^2 + \left(\frac{\delta w_L}{2}\right)^2 \right]} \quad (2-16)$$

其中  $\delta w_L$  为 Lorentzian 吸收线型的半高全宽<sup>[25]</sup>。式 (2-16) 是在静态阻尼振子假设下推导出来的，深层次上讲，根据量子力学和电动力学理论，Lorentzian 吸收线型  $g_L(w - w_0)$  的宽度是由海森伯测不准原理决定的，分子从能级  $E_i$  跃迁至能级  $E_j$  具有能

级差  $\Delta E$  和跃迁时间差  $\Delta \tau$  的不确定性，这两个部分对 Lorentzian 线宽产生影响，这种由激发态寿命决定的线宽就是自然线宽，但是在近红外光谱中，这种线宽很难被仪器发现。实际情况下，分子的吸收线展宽主要是由分子热运动频移和分子碰撞产生，其中分子热运动频移产生的展宽为多普勒展宽，分子间碰撞产生的展宽就是 Lorentzian 线型<sup>[24]</sup>。

通常在压力很低时自然展宽占主导，而在一般情况下，碰撞展宽要远远大于自然展宽。一般采用经验公式计算 Lorentzian 半高全宽，经验公式如下

$$\delta \nu_L = 2 \left( \frac{T_0}{T} \right)^{T_n} \left[ \frac{p_1}{p_0} \gamma_a + \frac{p_2}{p_0} \gamma_s \right] \quad (2-17)$$

$$\delta w_L = 2\pi \cdot \delta \nu_L \quad (2-18)$$

其中  $\gamma_s$  和  $\gamma_a$  分别为自然展宽系数和压力展宽系数， $T$  为环境绝对温度， $T_0=237.16\text{K}$ ， $T_n$  为温度系数， $p_0$  为标准状态下的压强， $p_1$  为样品气体分压强， $p_2$  为加宽气体分压强，最后得出  $\delta \nu_L$  的单位是  $\text{cm}^{-1}$ 。另外在一个大气压情况下，Lorentzian 展宽约为多普勒展宽的十倍。

## 2.2.2 Gaussian 线型

在气体浓度比较低的情况下，分子碰撞展宽是可以忽略，即 Lorentzian 展宽忽略，这是多普勒展宽占主导，谱线线型表现为 Gaussian 线型<sup>[25]</sup>，其表达式为

$$g_G(w - w_0) = \exp \left[ - \left( \frac{w - w_0}{\delta w_G} \right)^2 \cdot \ln 2 \right] \quad (2-19)$$

$$\delta w_G = 2 \cdot \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{w_0}{c} \left( \frac{2\kappa T}{m} \right)^{1/2} \quad (2-20)$$

其中  $\delta w_G$  为多普勒展宽的半高全宽， $\kappa$  为波尔兹曼常数， $T$  为绝对温度， $m$  为气体分子质量， $w_0$  为本征频率。

## 2.2.3 Voigt 线型

在低压下，多普勒展宽占主导，谱线线型为 Gaussian 线型；在高压下，碰撞展宽占主导，谱线线型为 Lorentzian 线型；在常温常压下，谱线线型为 Voigt 线型，表示为



$$g_v(\nu - \nu_0) = \frac{2}{\delta\nu_G} \left( \frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\mu}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{\mu^2 + (\zeta - t)^2} dt \quad (2-21)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{\ln 2} \delta\nu_L}{\delta\nu_G} \quad (2-22)$$

$$\zeta = \frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0)}{\delta\nu_G} \quad (2-23)$$

$$\delta\nu_v = 0.5346\delta\nu_L + 2 \left[ 0.2166 \left( \frac{\delta\nu_L}{2} \right)^2 + \left( \frac{\delta\nu_G}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2-24)$$

其中  $\delta\nu_L$  和  $\delta\nu_G$  分别为 Lorentzian 和 Gaussian 线型的半高全宽,  $\delta\nu_v$  为 Voigt 线型的半高全宽。

气体分子吸收线型跟压强和温度有密切关系。常温下, 压强在  $<0.03\text{atm}$  时谱线为 Gaussian 线型, 压强  $>2\text{atm}$  时谱线为 Lorentzian 线型, 压强  $0.03\text{atm} \sim 2\text{atm}$  之间时, 随着压强增大, 碰撞展宽逐渐占优, Gaussian 线型向 Lorentzian 线型过渡, 谱线线型为 Voigt 线型。

## 2.3 甲烷吸收光谱研究

### 2.3.1 甲烷吸收谱线的选择

甲烷分子具有四个固有振动<sup>[26]</sup>,  $\nu_1=2913.0\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu_2=1533.3\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu_3=3018.9\text{cm}^{-1}$ ,  $\nu_4=1305.9\text{cm}^{-1}$ , 这四个固有振动分别对应一个吸收光谱区。虽然这四个吸收光谱区没有落在近红外区, 但近红外区却有许多泛频带和联合带的吸收。根据比尔-朗伯吸收理论  $I = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL]$ , 在  $\alpha(\nu)$  和  $L$  已知情况下, 如果一定强度的入射光通过气体后能继续检查出出射光强大小, 就可以检测出气体的浓度  $C$ 。我们知道石英光纤在近红外区具有低损耗低色散特性, 在一定光源强度下如果配合弱信号检测技术, 是可以检测出出射光强度的, 进而实现对气体浓度的检测。

我们根据专业的光谱数据库 HITRAN (high-resolution transmission molecular absorption database) 得到甲烷在近红外区的吸收谱, 发现在光纤传输窗口  $1330\text{nm}$  和  $1650\text{nm}$  处, 甲烷均有较强的吸收, 吸收谱如图 2-2。

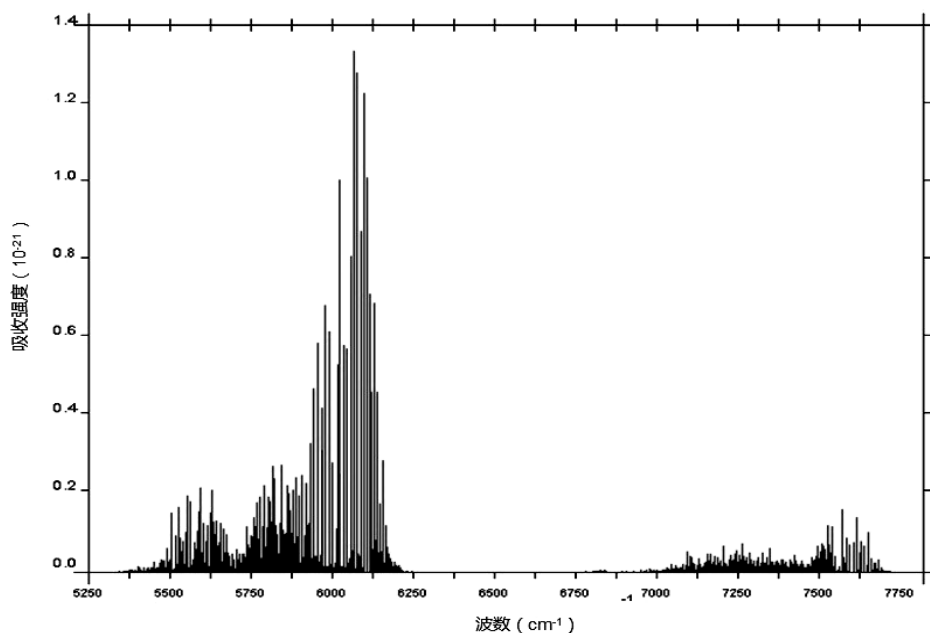


图 2-2 甲烷在近红外区线吸收强度和波数的关系图

但是在 1330nm 窗口水分子的吸收十分明显，而在 1650nm 窗口处，水分子的吸收可以忽略不计，因此我们选择 1650nm 附近的波段研究，1650nm 窗口处的吸收谱如图 2-3。

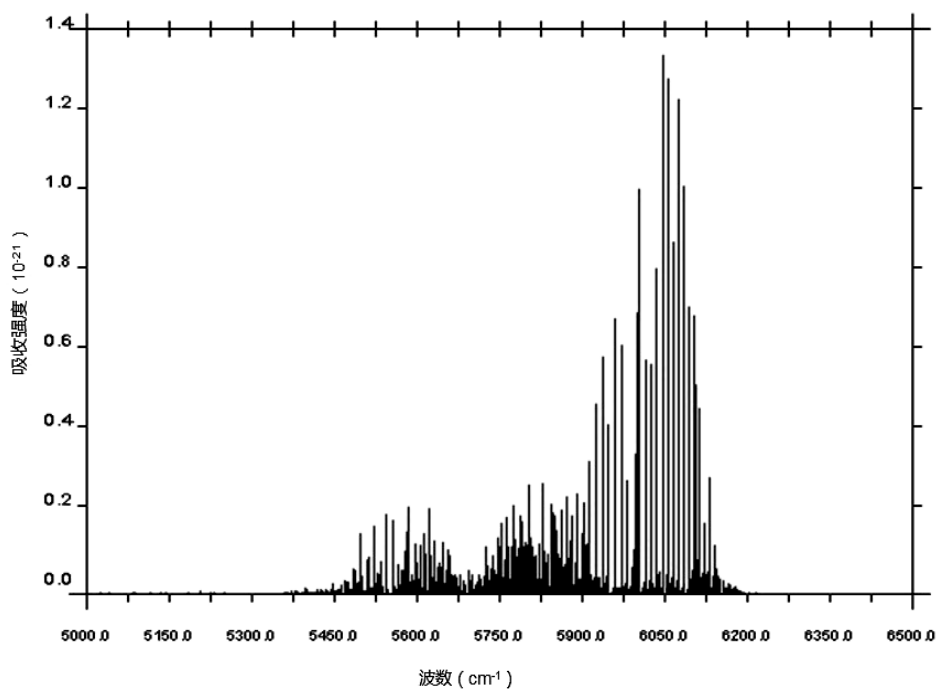


图 2-3 甲烷在 1650nm 附近线吸收强度和波数的关系图

## 2.3.2 甲烷吸收系数的研究

根据 2.2 章节的分析, 我们知道在一个标准大气压和室温附近 Lorentzian 线型占主导, 所以甲烷的吸收谱的用 Lorentzian 线型函数做近似计算

$$\alpha(\nu) = \sigma(\nu) \frac{N}{p_1} = S g_L(\nu - \nu_0) \frac{N}{p_1} \quad (2-25)$$

$$N = 2.686754 \times 10^{19} \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p_1}{p_0} \quad (2-26)$$

其中  $S$  为谱线吸收线强,  $N$  为分子数密度,  $p_1$  气体分压强,  $T_0$  为绝对温度,  $\sigma(\nu)$  为吸收截面,  $g_L(\nu - \nu_0)$  为 Lorentzian 吸收线形函数<sup>[27]</sup>。我们在甲烷浓度为 100% 的情况下研究甲烷的吸收谱线, 则  $p_1 = p_0 = 1 \text{ atm}$ 。在  $p_0 = 1 \text{ atm}$ 、 $T = 293 \text{ K}$  时,  $N = 2.6868 \times 10^{19} (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3})$ , 所以在  $p_0 = 1 \text{ atm}$ 、 $T = 296 \text{ K}$  时,

$$N = \frac{293}{296} \times 2.6868 \times 10^{19} = 2.6596 \times 10^{19} (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}) \quad (2-27)$$

由此可得

$$\alpha(\nu) = 2.6596 \times 10^{19} \cdot S g_L(\nu - \nu_0) \quad (2-28)$$

式中谱线线强  $S$  我们可以从 HITRAN 数据库中得到, 然后我们用 matlab 模拟了 1630nm~1680nm 的甲烷吸收谱线, 如图 2-4。

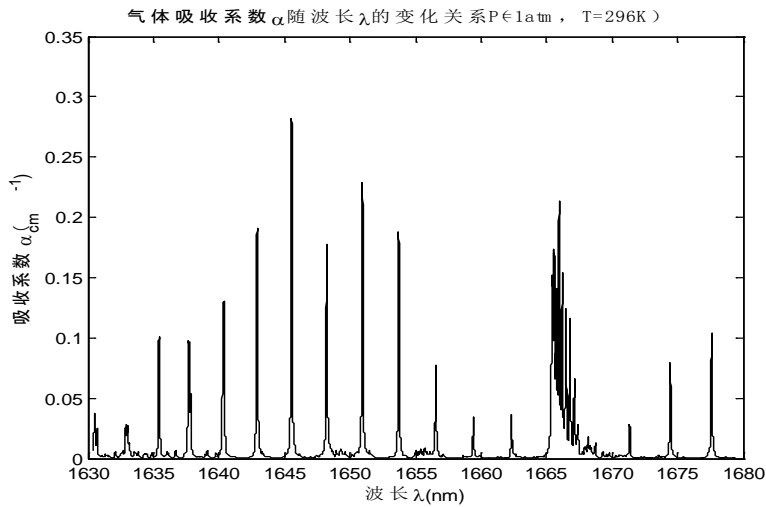


图 2-4 1630nm~1680nm 甲烷吸收系数与波长的关系

从上图看出, 甲烷在 1630nm~1660nm 处的吸收间隔非常均匀, 如果采用梳状滤波检测技术在此波段进行检测, 将大大提高系统检测灵敏度。另外我们发现在 1665nm~1670nm 处吸收则显得十分密集。通过实验研究我们得到了此波段的吸收光谱, 发现实验吸收光谱特性跟 matlab 模拟出的吸收光谱特性一致, 实验吸收光谱如图 2-5。

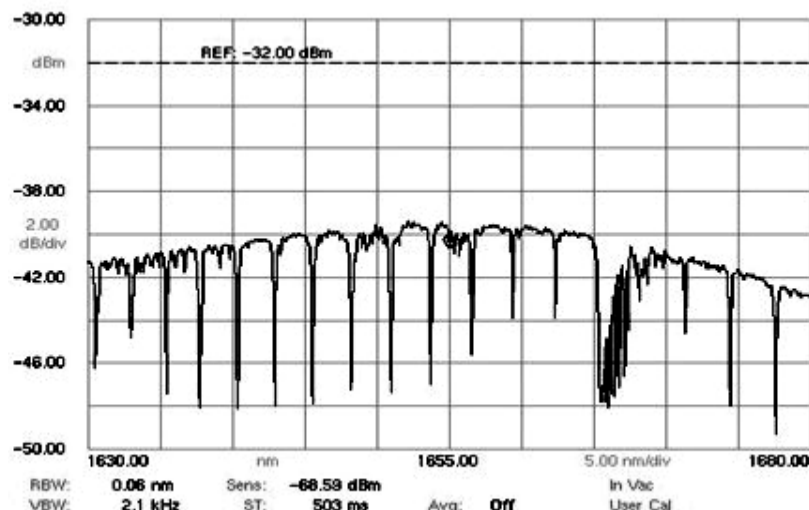


图 2-5 甲烷在 1630nm~1680nm 处的实验吸收光谱

## 2.4 本章小结

本章首先介绍了气体分子选择吸收特性和气体分子的吸收线型, 并进行了理论推导, 我们发现气体分子的吸收系数与线型的关系, 也发现气体吸收线型与气体所处的压强、温度的关系。根据这些理论, 对检测甲烷气体所用的谱线进行了选择, 并用 matlab 模拟了甲烷气体在 1630nm~1680nm 处的吸收谱线, 模拟结果跟实验测得的吸收谱线特征保持一致, 并提出了在 1630nm~1660nm 处采用梳状滤波检测技术的假设。

## 3 光谱吸收型光纤气体传感检测技术探究

通过测量待测气体在光纤窗口（0.8 $\mu\text{m}$ ~1.7 $\mu\text{m}$ ）内的吸收峰的光强衰减，便可以推演出待测气体的浓度，这是光谱吸收型光纤气体传感器的基本原理。但是，一般气体在近红外波段的吸收十分微弱，通过气体后的光强容易被噪声淹没很难被直接探测。另外，系统中的光源、光探测器、耦合器、连接器、光纤等光器件也会引起光强的变化，对系统的灵敏对造成影响。为了提高系统的实用性，提高系统的灵敏度，减小系统的测量误差，下面将讨论光谱吸收型光纤气体传感器的不同检测方案<sup>[28]</sup>，并确定了本论文的检测方案和系统结构。

### 3.1 单波长检测技术

在常温常压下，一般气体的折射率约为 1，折射率的虚部  $k$  远远小于  $10^{-4}$ ，式 (2-8) 知道，吸收系数正比于折射率的虚部  $k$ ，所以  $\alpha(\lambda)CL \ll 1$ ，当单一频率的光通过待测气体时，则比尔-朗伯定律可以写为

$$C \approx \frac{1}{\alpha(\lambda) L} \frac{I_0 - I(\lambda)}{I_0} \quad (3-1)$$

如果知道  $\alpha(\lambda)$  和  $L$  的大小，通过测量出射光强的大小就可以计算出气体的浓度  $C$ 。

单波长检测技术的光谱吸收型传感器结构简单，一般系统的结构如图 3-1。但是这种检测容易受光源光强波动、光器件的不稳性影响，会带来很大的测量误差，精度只能达到百分级别<sup>[29]</sup>。

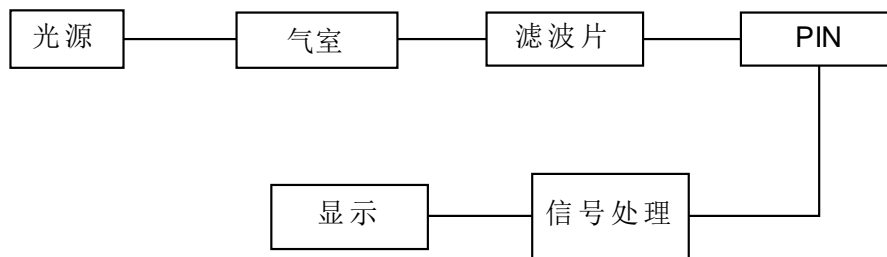


图 3-1 单波长光谱吸收检测结构示意图

## 3.2 差分检测技术

### 3.2.1 宽带光源的差分吸收检测

光波通过气体时，考虑各种吸收因数的影响，比尔-朗伯定律写为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)CL + \beta(\lambda)] \quad (3-2)$$

其中  $I(\lambda)$ 、 $I_0(\lambda)$  分别为出射光强、入射光强， $\alpha(\lambda)$  为气体吸收系数， $C$  为待测气体浓度， $L$  为待测气体与光的相互作用长度， $\beta(\lambda)$  为光路其他吸收系数，是个随机量。当波长相近，但吸收系数有很大差别的两个单色光  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  通过待测气体，则有

$$I(\lambda_1) = I_0(\lambda_1) \exp[-\alpha(\lambda_1)CL + \beta(\lambda_1)] \quad (3-3)$$

$$I(\lambda_2) = I_0(\lambda_2) \exp[-\alpha(\lambda_2)CL + \beta(\lambda_2)] \quad (3-4)$$

通过上面两个公式表示出气体浓度为

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \left\{ \ln \frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)} - \ln \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} - [\beta(\lambda_2) - \beta(\lambda_1)] \right\} \quad (3-5)$$

如果两光同时通过待测气体，可以认为  $\beta(\lambda_2) = \beta(\lambda_1)$ ，因此上式可以化简为

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \ln \frac{I_0(\lambda_1)I(\lambda_2)}{I_0(\lambda_2)I(\lambda_1)} \quad (3-6)$$

通过调节光路使  $I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2)$ ，波长  $\lambda_1$  对应待测气体的吸收谱线，波长  $\lambda_2$  不被气体吸收，那么  $I(\lambda_1)/I(\lambda_2) < 1$ ，对上式进行泰勒展开可以简化为

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \frac{I(\lambda_2) - I(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \quad (3-7)$$

从上式看出，如果我们知道两个波长下的吸收系数  $\alpha(\lambda_1)$ 、 $\alpha(\lambda_2)$ ，那么气体的浓度  $C$  就可以测出。

宽带光源 LED 的光谱谱宽要远远大于气体吸收峰的线宽，可以采用滤波片选择两种波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ， $\lambda_1$  为气体某一吸收峰的中心波长， $\lambda_2$  为偏离该吸收峰处于吸收谷的波长，实现差分吸收检测。

图 3-2 是采用 SLED 作为宽带光源的双波长单光路的差分吸收检测结构图。SLED 发出的光通过气室后，经过两个滤波片滤波，得到相邻的两个波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ，两个波长

分别被两个光电探测器接受，根据式（3-7）得到待测气体浓度<sup>[30]</sup>。

图 3-2 SLED 双波长单光路的差分吸收系统结构图

这种检测设计有效的避免光源波动、光纤传输的变化、光电元器件的抖动等因素的影响，可以获得准确的探测信息。

### 3.2.2 窄带光源的差分吸收检测

分布反馈式半导体激光器（DFB）具有输出频率可调节性，通过改变光源的驱动电流就可以获得不同的波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ， $\lambda_1$  为气体某一吸收峰的中心波长， $\lambda_2$  为偏离该吸收峰处于吸收谷的波长，因此也可以实现差分吸收检测。

图 3-3 是采用双电极 DFB 作为光源的双波长差分检测结构图。改变 DFB 两个电极的电流比率可以输出  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。光源发出的光由耦合器分成两束，一束进入参考气室由 PIN 接受，输出信号用于反馈控制激光器的输入电流，实现激光器的稳频。另一束光进入测量气室，通过检查 PIN 输出信号的幅值的大小就能确定待测气体的浓度。

图 3-3 DFB 双波长差分吸收系统结构图

这种检测的灵敏度很高可以达到 1ppm，但是由于电极电流比率的控制和调节很难做到，另外 DFB 激光器造价也比较昂贵。

## 3.3 谐波检测技术

### 3.3.1 窄带光源谐波检测

谐波检测方法广泛应用于微弱信号检测。谐波检测的理论基础是傅里叶变换，如果被测物质满足一定的数学模型，利用谐波检测技术就可以得到与理论十分吻合的计算结果。气体的吸收可以用 Lorentzian, Gauss, Voight 模型分析，如果我们知道气体的吸收系数时，就可以利用谐波检测技术分析出气体的浓度。

当光源光谱带宽小于气体吸收线带宽时，我们可以调制光源的输出频率  $\nu$ ，输出光强也受到相应的调制

$$\nu = \nu_0 + \nu_m \sin \omega t \quad (3-8)$$

$$I(t) = I_0 (1 + \eta \sin \omega t) \quad (3-9)$$

式中  $\nu_0$  是未经调制的光源中心频率， $\nu_m$  表示频率调制幅度， $\eta$  代表光强调制系数， $\omega = 2\pi f$ ， $f$  是电流调制频率。如果比尔-朗伯用式(3-8)和式(3-9)表示将变为

$$I(t) = I_0 (1 + \eta \sin \omega t) \exp[-\alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t)CL] \quad (3-10)$$

上面说明过气体在近红外吸收系数很小， $\alpha(\nu)CL \ll 1$  时， $I(t)$  可以近似为

$$I(t) = I_0 [1 + \eta \sin \omega t - \alpha(\nu_0 + \nu_m \sin \omega t)CL] \quad (3-11)$$

在一个标准大气压下，如第二章节分析可知气体的吸收线型可以用 Lorentzian 线型描述

$$\alpha(\nu) = \frac{\alpha_0}{1 + \left( \frac{\nu - \nu_g}{\delta_\nu} \right)^2} \quad (3-12)$$

式中  $\alpha_0$  为气体吸收线中心处的吸收系数， $\nu_g$  为对应吸收线的中心频率， $\delta_\nu$  为吸收线半宽，将式 (3-12) 代入式 (3-11) 变为

$$I(t) = I_0 \left[ 1 + \eta \sin \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + \left( \frac{\nu_0 - \nu_g + \nu_m \sin \omega t}{\delta_\nu} \right)^2} \right] \quad (3-13)$$



如果光源输出中心波长正好为气体吸收峰  $\nu_0 = \nu_g$ ，则式 (3-13) 变为：

$$I(t) = I_0 \left[ 1 + \eta \sin \omega t - \frac{\alpha_0 CL}{1 + x^2 \sin^2 \omega t} \right] \quad (3-14)$$

其中  $x = \nu_m / \delta_\nu$ 。对上式进行傅里叶变换，得到一次谐波(f)和二次谐波(2f)的系数

$$I_f = I_0 \eta \quad (3-15)$$

$$I_{2f} = -k \alpha_0 CL I_0 \quad (3-16)$$

其中

$$k = \frac{2 \cdot \left[ 2 + x^2 - 2(1 + x^2)^{1/2} \right]}{x^2 (1 + x^2)^{1/2}} \quad (3-17)$$

可以看出一次谐波分量与光强调制系数有关，幅度正比于光源的平均功率；二次谐波分量与气体吸收系数、气体浓度、光路长度有关，幅值也正比于光源的平均功率。通过式 (3-15)、式 (3-16) 之比，可以获得气体的浓度

$$\frac{I_{2f}}{I_f} = -\frac{2k}{\eta} \alpha_0 CL \quad (3-18)$$

我们看到两者的比消除了光源波动的干扰，这种检测可以得到很高的灵敏度<sup>[31~33]</sup>。

一般情况下选用 DFB 激光器作为窄带光源进行谐波检测，系统结构如图 3-4。

图 3-4 DFB 窄带光源谐波检测结构图

### 3.3.2 宽带光源谐波检测

根据谐波检测原理我们知道如果气体的吸收线宽度比较窄，吸收强度比较小，那

么光强度的变化也会很小，这样检测起来比较难。有些气体（如甲烷和乙炔）的吸收峰具有间隔相等的特性，如果采用一个跟气体吸收峰对应的梳状滤波器，将宽带光源覆盖的所有气体吸收峰全部滤出，就可以得到比较大的光强度变化，那么检测将会变得很容易。

图 3-5 是基于宽带光源的谐波检测系统<sup>[34]</sup>。系统中的滤波器为 Fabry-Perot 干涉仪，为了保证系统的稳定性，需要滤波器的透射波长锁定在气体的吸收峰上。通过一个小正弦信号调制滤波器的腔长，这样滤波器的透射波长也相当于进行了调制。透射波长的调制，也导致透射光强的调制。如果滤波器的透射波长跟气体的吸收波长对应，那么强度调制中一次谐波忽略不计，主要包括二次谐波。如果滤波器的透射波长跟气体吸收峰有偏差，会产生一次谐波，一次谐波信号可作为误差信号用来调节 Fabry-Perot 腔长，以保证滤波器的中心透射波长锁定在气体吸收峰上。当滤波器透射波长稳定后，输出的二次谐波分量将正比于气体浓度，从而实现气体浓度检测。

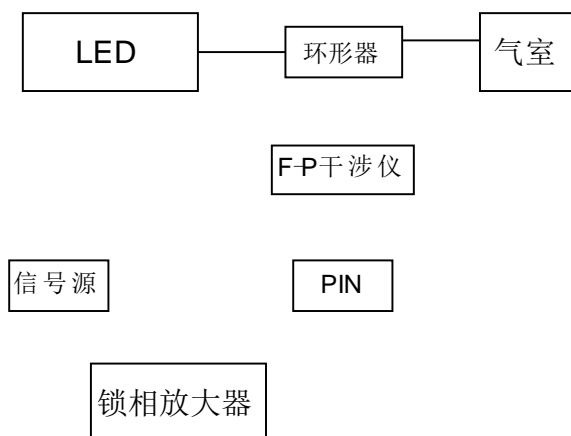


图 3-5 宽带光源谐波检测结构图

## 3.4 光纤环形腔衰荡检测

光纤环形腔衰荡(FLRD Fiber loop ringdown)由两个耦合器和单模光纤组成，如图 3-6。

图3-6 光纤环形腔衰荡原理图

在环形腔中放置一个吸收气室,当一束脉冲激光经耦合器进入光纤环形腔,会在腔内循环。每循环一次都会由光输出,输出光再由探测器检测。由于每次循环中,腔内的气体吸收以及光纤和耦合器等导致的光损耗会将使输出光强呈指数形式衰减,如果能够测出光衰荡时间,就可以推算出气室中气体的浓度<sup>[35~39]</sup>。

脉冲激光在环形腔中的衰荡呈单指数形式衰减,如果入射光脉冲的初始强度为  $I_0$ , 假设腔内没有吸收物质,光强随时间的变化有

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{IAc}{nl} \quad (3-19)$$

其中,  $I$  为  $t$  时刻的光强,  $c$  为光在真空中的速度,  $n$  为纤芯折射率,  $l$  为腔长,  $A$  为光循环一周的总损耗(光纤的吸收损耗, 光纤耦合器的插入损耗, 光纤连接器的连接损耗及光纤的散射损耗),  $A$  可以看作是一个常数。对式(3-19)积分可得

$$I = I_0 \exp\left(\frac{-cAt}{nl}\right) \quad (3-20)$$

当光强  $I$  衰减到初始光强  $I_0$  的  $1/e$  时, 所需要的时间  $\tau$  即为衰荡时间 (ring down time), 衰荡时间为

$$\tau = \frac{nl}{cA} \quad (3-21)$$

很明显损耗越低, 衰荡时间越长。当在光纤环路里接入气室时, 就会引入额外的光学损耗  $B$ , 使得光脉冲在环路里循环时造成衰荡时间的变化

$$\tau_0 = \frac{nl}{c(A+B)} \quad (3-22)$$

由式(3-21)、式(3-22)两式得

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{c}{nL} B \quad (3-23)$$

可见接入气室和没有接入气室的衰荡时间的倒数差与  $B$  存在线性关系。对于气体浓度的测量，根据比尔-朗伯定律  $B = \alpha LC$ ，我们可以得到气体的浓度

$$C = \frac{nl}{c\alpha L} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (3-24)$$

光纤环形衰荡腔技术通过测量衰荡时间来实现，是一种时域测量技术。其探测灵敏度的提高可通过增加光脉冲在光纤环路里循环的圈数来实现。光源强度的变化对测量不造成影响。

## 3.5 甲烷单点传感系统结构设计

### 3.5.1 系统检测技术确定

上面几节我们具体讨论了四种检测方案，这些方案各有优缺点。单波长检测技术的传感器结构简单，但是容易受光源光强波动、光器件的不稳性影响，测量误差大，而且精度只能达到百分级别。谐波检测技术消除的光源光强波动的影响，在探测低浓度气体时，可以达到很到的灵敏度，但是光源波长容易受到外界干扰产生漂移，偏离气体吸收峰值，这样检测结果会产生很大的误差。另外谐波检测技术在理论推导时有个前提条件，即  $\alpha(\nu)CL \ll 1$ ，如果气体的吸收系数一般为  $1/10$  量级，光路一般为  $5\text{cm}$ ，那么气体的浓度就不能太高。因此要实现  $0-100\%$  的全量程测量，谐波检测技术就不适用了<sup>[40~42]</sup>。光纤环形衰荡腔技术对光源强度的变化反映不灵敏，而且是一种时域测量技术，很容易实现光纤复用组网，但是在检测中要求光源波长精确锁定在气体吸收峰，这就需要对光源的精密控制，成本将大大高。差分检测能实现全量程测量，传感器结构设计简单，可以消除光源波动的影响，但是在探测低浓度时，受系统固有噪声的干扰，很难准确反映出当前气体浓度的大小<sup>[43]</sup>。

为了设计出全量程测量且结构简单的甲烷气体的传感器，我们选择了差分吸收检测技术，并进行了改进。根据 2.3.2 小节提供的甲烷吸收谱线，甲烷在  $1635\text{nm}-1650\text{nm}$  波长范围内，有 6 个吸收峰，而且这一族吸收峰几乎是等间隔的，间距大约  $2.6\text{nm}$ 。我们可以设计一个跟气体吸收峰对应的梳状滤波器，将一定数量的吸收峰滤出，这样使

得因气体吸收引起的光功率变化大大提升，系统的固有噪声相对减小，所得的检测效率将会显著提高<sup>[44]</sup>。图 3-7 显示了梳状滤波器对宽谱光源的滤波效果。

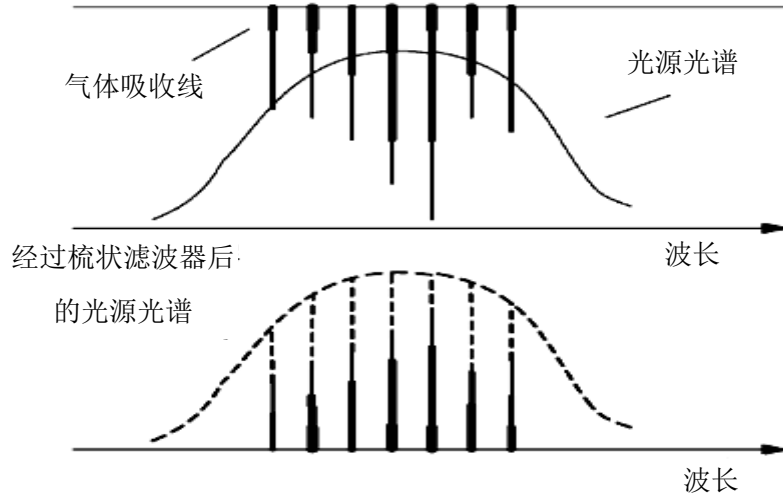


图 3-7 梳状滤波器滤出吸收峰波长

假设 1635nm-1650nm 间的吸收峰为  $\lambda_i$ ，则有

$$I_i(\lambda) = I_{0i}(\lambda) \cdot \exp[-\alpha_i(\lambda)CL + \beta_i(\lambda)] \quad (3-25)$$

每个吸收峰附近选择一个相应的参考波长  $\lambda_j$ ，则有

$$I_j(\lambda) = I_{0j}(\lambda) \cdot \exp[-\alpha_j(\lambda)CL + \beta_j(\lambda)] \quad (3-26)$$

由于  $\lambda_i$  与  $\lambda_j$  相近，光路干扰  $\beta_i(\lambda) \approx \beta_j(\lambda)$ 。从整体考虑，如果吸收系数可看成平均吸收系数，那么光强为总的光强，式 (3-25)、式 (3-26) 两式相消有

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \left[ \ln\left(\frac{\sum I_{0i}}{\sum I_{0j}}\right) - \ln\left(\frac{\sum I_i}{\sum I_j}\right) \right] \quad (3-27)$$

式中  $\bar{\alpha}_i$  为信号光平均吸收系数， $\bar{\alpha}_j$  为参考光平均吸收系数， $\sum I_{0i}$  为信号光输入总光强， $\sum I_{0j}$  为参考光输入总光强， $\sum I_i$  为信号光输出总光强， $\sum I_j$  为参考光输出总光强。

如果将光强信号转变为电压信号，式 (3-27) 变为

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \left( \ln \frac{V_{0s}}{V_{0r}} - \ln \frac{V_s}{V_r} \right) = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \ln \frac{V_{0s}V_r}{V_{0r}V_s} \quad (3-28)$$

式中,  $V_{0s}$  为信号光输入电压,  $V_{0r}$  为参考光输入电压,  $V_s$  为信号光输出电压,  $V_r$  为参考光输出电压。

令实际探测到的初始输入信号光和参考光的电压值比值  $V_{0s}/V_{0r} = K$ , 则式 (3-28) 变为

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \ln \frac{KV_r}{V_s} \quad (3-29)$$

在测量中, 由于信号光吸收气体信号电压降低, 参考光基本不吸收气体参考电压不变, 所以  $V_s/KV_r < 1$ 。对  $\ln(KV_r/V_s)$  进行泰勒展开

$$\ln \frac{KV_r}{V_s} = -\ln \left[ 1 + \left( \frac{V_s}{KV_r} - 1 \right) \right] \approx 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{V_s}{V_r} \quad (3-30)$$

代入式 (3-29) 有

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \left( 1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{V_s}{V_r} \right) \quad (3-31)$$

由此可见, 如果知道  $\lambda_i$ 、 $\lambda_j$  下甲烷气体的平均吸收系数  $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_j$ , 只需探测出信号光参考光的输出电压  $V_s$ 、 $V_r$ , 就能得到气体的浓度。

### 3.5.2 系统结构设计

结合 3.2.1 和 3.5.1 章节的分析, 系统采用了带有梳状滤波器的 SLED 双波长单光路的结构, 如图 3-8。SLED 宽谱光源发出的光首先进行 CWDM 宽带滤波, 滤出波长范围为 1635nm-1650nm, 滤出的光波通过气室, 输出光信号由两个被梳状滤波器分别滤出信号光和参考光, 这两路光分别被光电探测器探测放大, 放大信号在数据处理系统中采集处理, 并计算出气体的浓度, 由显示器显示, 当浓度超出检测阈值时, 向报警系统发出信号报警。

图 3-8 系统结构设计图

## 3.6 甲烷多点传感网络结构设计

分布式光纤传感可以实现甲烷的多点测量,其本质就是将多个分立式光纤传感器复用。分布式光纤传感的大致思路是,将具有一定空间分布的调制方式相同的光纤传感器耦合到一根光纤总线上,通过寻址、解调,可以得到被测量的空间分布和大小。寻址方式不同,传感器的复用技术分为波分复用、空分复用、时分复用、频分复用和偏分复用等,不同的复用技术还能组合成混合复用系统。目前空分复用、波分复用和时分复用比较成熟<sup>[45]</sup>,应用比较广泛,下面对空分复用、波分复用和时分复用原理进行简单介绍。

### (1) 空分复用

空分复用是将每个传感器的输出光纤按照空间位置编码,通过光开关扫描选址。采用空分复用时应合理布置开关网络和信道间隔,以确保开关打开时只有一个传感器通道相联。其优点就是能够准确的空间选址。

### (2) 波分复用

波分复用是通过每个传感器的特征波长来寻址。当宽带光束注入光纤时,各传感器特征波长不同,通过滤波、解调可以测出被测信号的位置和大小。但波分复用容易受到部件的限制,在光纤上耦合的传感器数目不能太多。

### (3) 时分复用

时分复用是利用光纤对光波的延迟效应来寻址。传感器距离脉冲光源的距离不同，当一束脉冲光输入时，会在输出端会得到多个脉冲，每个脉冲光将对应一个传感器，光脉冲的延迟反映出传感器在光纤上的位置，光脉冲的强度变化反映对应点被测量的大小。光脉冲脉宽越窄允许复用的传感器个数越多，对解调系统要求比较高。

在上述的复用方式中，时分复用虽然只需要一个脉冲光源和一个光电探测器就能实现多点检测，但是各个传感器的信号容易产生干扰，对检测系统要求很高。空分复用虽然要有很多根光纤连接，但是能够实现准确定位且无信号之间的串扰，所以本论文甲烷多点传感网络系统采用单个光源及光电探测器的空分复用方式，如图 3-9。

图 3-9 甲烷多点传感网络结构图

## 3.7 本章小结

本章分析了光谱吸收型气体光纤传感器的几种检测技术，给出了每种检测技术的基本原理和数学模型，并列出了相关的系统框图。为了达到甲烷测量系统的要求，选择了差分吸收检测技术，给出了改进后的差分检测数学模型和系统结构图，最后探讨了分布式传感器的复用技术，并设计了甲烷多点传感网络系统。



## 4 甲烷单点传感系统的研究设计

### 4.1 光源及控制设计

#### 4.1.1 光源的选择

上章 3.5 节给出了甲烷单点传感系统的结构，系统光源的选择要满足如下要求：

- (1) 覆盖 1635nm~1650nm 波段，在该范围内具有均匀功率分布
- (2) 光源输出功率大，光纤耦合性好
- (3) 低噪声，稳定性好，寿命长
- (4) 体积小便于维护

光纤系统中常用的半导体激光器（LD）输出功率高，但是输出光谱窄且输出相干光，半导体二极管（LED）输出光谱宽，但是输出功率低光纤耦合性差，所以系统中这两种光源都不能使用。超辐射发光二极管（SLED Superluminescent Light Emitting Diode），具有发射光谱宽、输出功率高和高耦合等特点，所以被选为系统光源。

系统中我们选择了 DenseLight 半导体公司型号为 DL-CS65M8A 的 SLED 宽谱光源。该光源基于内部超辐射模式，与基于 ASE 的传统 SLED 相比，在更高驱动下具有带宽更宽，功率更高和噪声更小等优点。该型号 SLED 为 14 管脚蝶形封装，带尾纤，中心波长为 1650nm，3dB 带宽大于 45nm，输出光功率大于 10mW，内部集成 TEC（热电制冷器）和热敏电阻。图 4-1 为该型号 SLED 光源封装图。图 4-2、图 4-3 和图 4-4 分别表示该光源在常温（25℃）下的电流-功率曲线、电流-电压关系和发光光谱。表 4-1 为该光源在常温下的主要技术参数。

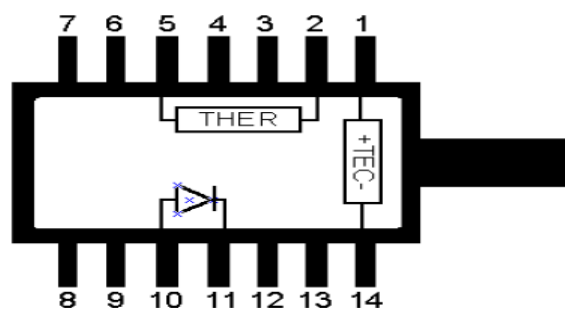


图 4-1 SLED 光源封装图

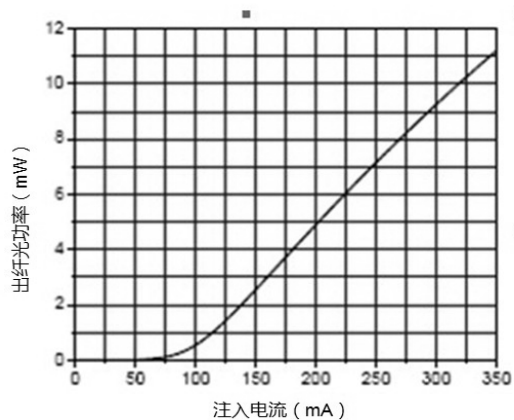


图 4-2 电流-功率曲线

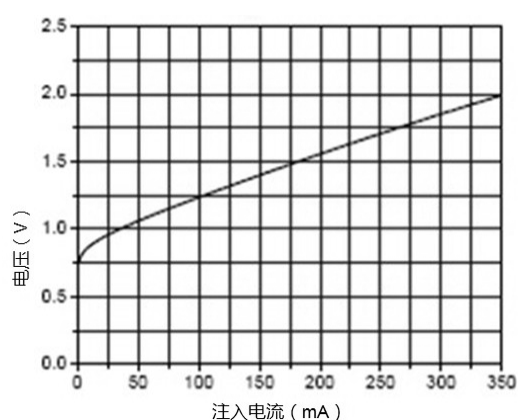


图 4-3 电流-电压曲线

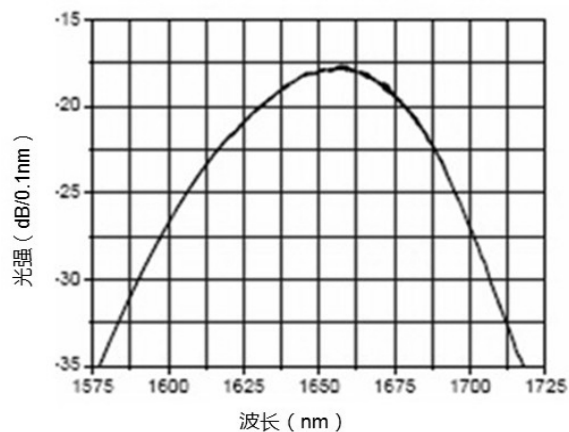


图 4-4 发光光谱

表 4-1 常温下光源主要技术参数

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating current	$I_{op}$				350	mA
Forward voltage	$V_F$	$I_{op}$			2.5	V
Power in SMF	$P_0$	$I_{op}$	10			mW
Central wavelength	$\lambda$	$I_{op}$	1635	1650	1665	nm
Bandwidth	$B_{FWHM}$	$I_{op}$	45			nm
Spectrum modulation	R	$I_{op}$			0.45	dB
Thermoelectric cooler voltage	$V_{TEC}$	$I_{op}$			2.5	V
Thermoelectric cooler current	$I_{TEC}$	$I_{op}$			1.1	A

## 4.1.2 光源控制设计

差分检测技术可以减小光源波动的影响，但是如果光源波动很大也会对检测精度造成影响，因此必须采取有效的方法控制光源的稳定性。SLED 光源的基本性能包括波长的稳定性、偏振稳定性和光功率稳定性，这些性能与 SLED 的制造工艺有关，也与光源的控制电路有关。由于出厂后制造工艺对性能的影响已经确定，所以光源的稳定性主要受光源温度和光源电流的影响。

参考常温下 SLED 主要技术参数设计了一套光源控制电路，最大驱动电流 1A，电流稳定度优于 0.2%，并具有短路、开路、过流和过压等多重保护功能，图 4-5 为控制电路结构图。

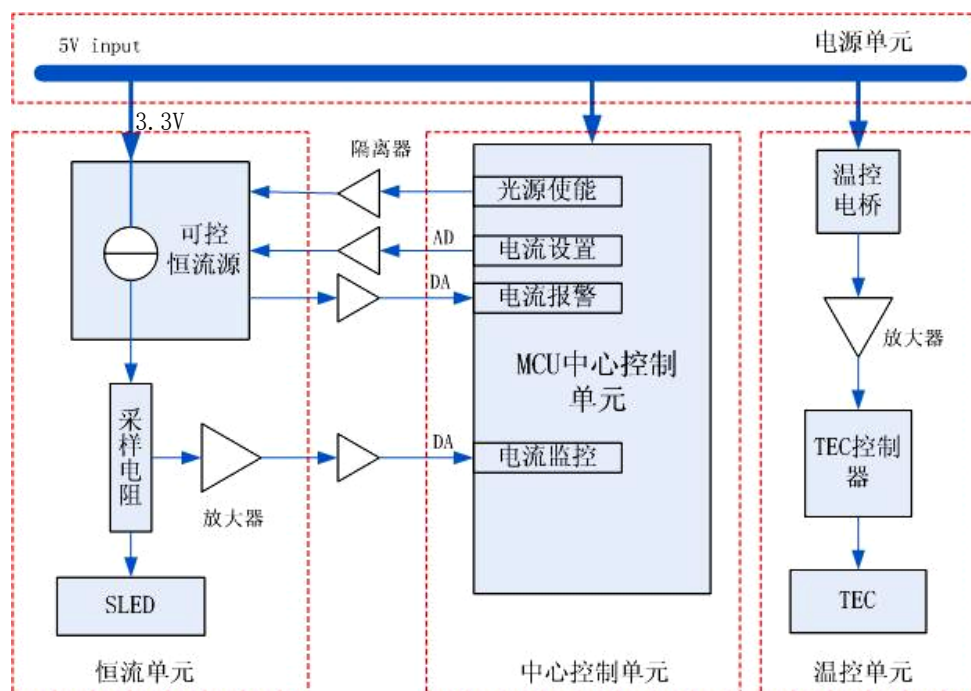


图 4-5 SLED 控制电路结构图

电源单元采用+5V 直流开关电源供电，在恒流源部分对主供电系统采用线性电源降压芯片 MIC29502BT 降压，以减小电流纹波，提高光源的稳定度。恒流源单元采用压控恒流源模式，便于控制和调节。压控恒流源的本质就是对电流进行反馈，动态调节光源的供电电压，使得电源的工作电流趋于稳定。恒流源部分核心芯片为 OPA569，该芯片是一款大电流低损耗精密运算放大器，具有热保护功能，具有限流、温度报警引脚，在关闭状态下没有输出，这些特点可以对光源起到驱动和保护作用。SLED 光源

内部集成了热敏电阻和 TEC（热电制冷器），TEC 是利用帕尔贴效应进行制热或制冷的半导体器件。直流电流从 TEC 的一端输入一端流出，会是 TEC 的一端发热一端制冷，如果电流反向加热制冷的两端也将反向，另外转移热量的大小跟电流量有关。由此分析可知温控单元的思路：热敏电阻感知 SLED 的温度变化，然后驱动 TEC 工作来维持光源温度的稳定性。温控单元核心芯片为 TI 公司的 DRV591，可以实现输出正负电流来改变 TEC 的热流向，另外该芯片输出电流可以达到 3A。中央控制单元的作用是监控驱动电路，核心芯片为 ADUC842 单片机。该单片机具有丰富的引脚，8 通道高精度 12 位 ADC 和两路电压输出 DAC，为监控提供了方便，此具有 64K 片上 FLASH 程序存储器，为程序开发提供方便。图 4-6 为 SLED 光源和控制电路实物图。

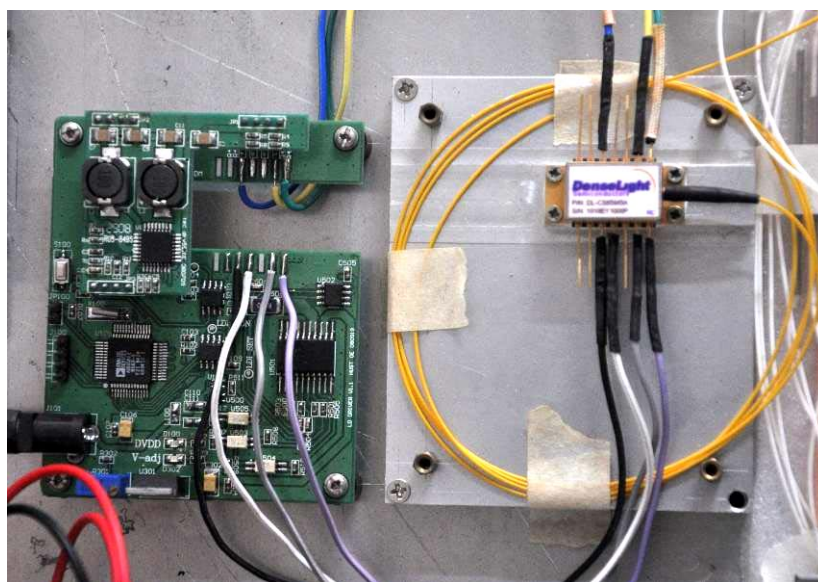


图 4-6 SLED 光源和控制电路实物图

## 4.2 多波长滤波分光器设计

采用改进后的差分检测技术，需要我们提取 1635nm-1650nm 波长范围内的 6 条吸收峰和每条吸收峰附近的非吸收峰，为此我们设计了多波长滤波分光器件。该器件由稀疏波分复用器（CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing）和梳妆滤波器组成。

### 4.2.1 CWDM 宽带滤波器

SLED 宽谱光源 3dB 带宽为 1635nm~1665nm，但是我们只用到 1635nm~1650nm 波段的甲烷吸收峰，所以我们需要一个带通滤波器截取所需要的波段。CWDM 是一种

波分复用器，但是它的波长间隔达到 20nm，密集波分复用器（DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing）的波长间隔为 0.2nm~1.2nm，波长间隔的差距主要由滤波器镀膜层数决定。DWDM 的镀膜层数大概是 CWDM 的 3 倍，再加上镀膜成功率的影响，CWDM 的成本要远小于 DWDM 成本，因此我们选择 CWDM 宽带滤波器。图 4-7 为 CWDM 宽带滤波器的输出光谱图。

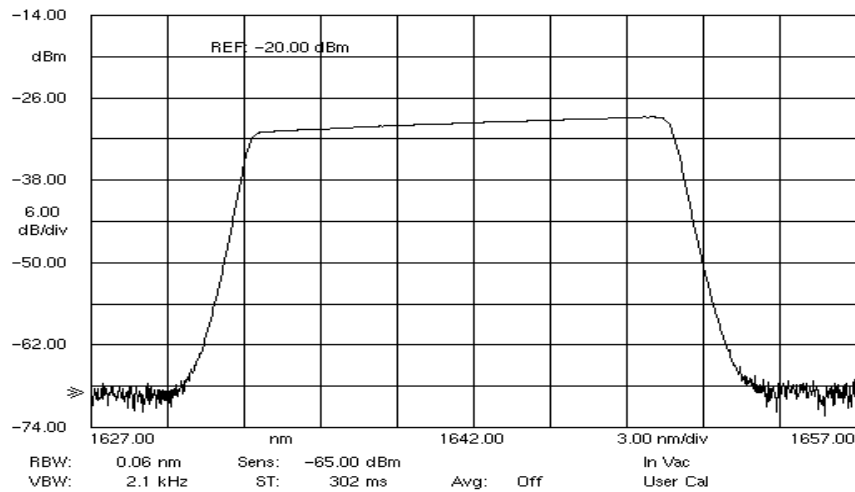


图 4-7 CWDM 宽带滤波器输出光谱图

## 4.2.2 梳妆滤波器

我们要利用梳状滤波器选出甲烷的多条吸收峰，但是在 1635nm~1650nm 处的吸收峰看似间隔相等，但实际上并不均匀，因此我们设计了一种非等间距的梳状滤波片，表 4-2 为滤波片透射峰值波长及甲烷吸收中心波长。

表 4-2 梳状滤波器透射峰值与甲烷吸收波峰值对比

甲烷吸收中心波长 $\lambda_1$ (nm)	梳状滤光片透射中心波长 $\lambda_2$ (nm)	两中心波长之差 $\lambda_2 - \lambda_1$ (nm)	$(\lambda_2 - 0.53)$	$(\lambda_2 - 0.53) - \lambda_1$
1635.402	1635.67	0.268	1635.14	-0.262
1637.670	1638.25	0.58	1637.72	0.05
1640.292	1640.86	0.568	1640.33	0.038
1642.884	1643.44	0.556	1642.91	0.026
1645.516	1646.05	0.534	1645.52	0.004
1648.195	1648.69	0.495	1648.16	-0.035

表 4-2 中的  $\lambda_2 - 0.53$  意思是可以调节滤光片的透射波峰位置（蓝移 0.53nm），但是各个透射波峰之间的间隔却是固定的。图 4-8 为梳状滤波器的输出光谱图。

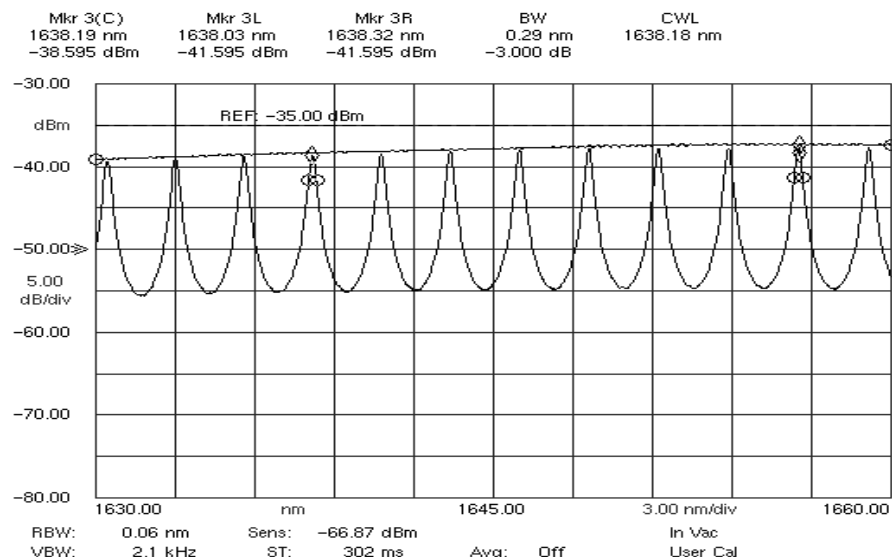


图 4-8 梳状滤波器的输出光谱图

## 4.2.3 多波长滤波分光器

我们将 CWDM 宽带滤波器和梳状滤波器组合形成多波长滤波分光器。其具体结构如图 4-9。

图 4-9 多波长滤波分光器

SLED 光源发出的光首先通过 CWDM 滤出 1635nm~1650nm 波段的波长，滤出的光进入一双纤准直器，通过滤波片滤出信号光，干涉相消的光通过准直器进入第二个滤波片滤出参考光。其实这两个梳状滤波片是一样的，由于波长对角度很敏感，通过调节滤波片的放置角度就能得到不同的波长。图 4-10 为多波长滤波分光器封装实物图（一只为 CWDM 宽带滤波器封装，另外两只为波分复用器封装）。



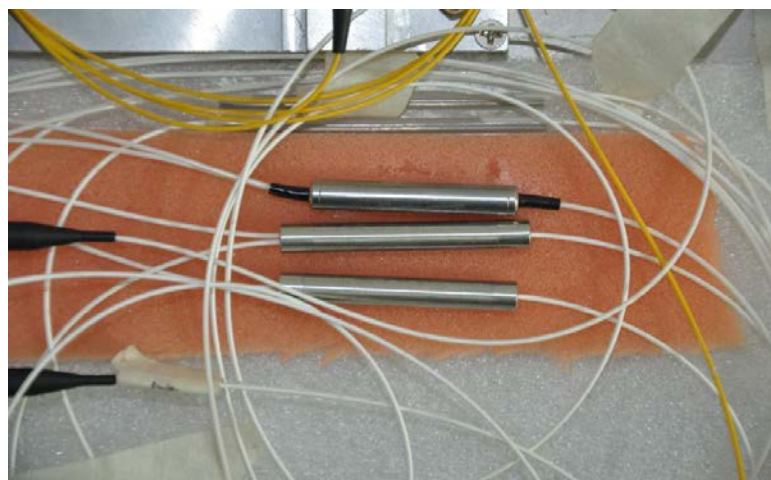


图 4-10 多波长滤波分光器封装实物图

## 4.3 传感气室设计

应用于光纤气体传感器的气室根据光束在气室中的传播路径大致可以分为两类：一类是透射型气室，一类是反射式气室。常规的透射式吸收气室由于存在光纤和分立光学元件的耦合问题，准直复杂，温度稳定性和抗震性能差。反射式气室常见的是 White 气室和 Herriott 气室，以及两者的各种变体，如圆柱腔气室结构，仿 Ring-down 腔气室结构和基于积分球的气室结构等，虽然这些多路吸收气室能够获得更长的传感长度，但是存在结构设计复杂、生产难度高、成品率低等弊端。为了克服上述气室存在的问题，我们研制出了两种传感气室。

### 4.3.1 多次反射腔型传感探头

多次反射腔型传感探头包括一对准直器、一对侧面镀有高反膜的玻璃板（一端有角度约  $3^\circ$  的斜面，一端为平面）和一块玻璃板，具体做法是：

- (1) 将两块反射玻璃板平行的固定在玻璃板的两边，将第一只准直器平行的胶合在反射玻璃板的斜面上。
- (2) 用红光激光器接入这只准直器，在另一反射玻璃板上贴一张白纸，描出红光斑点的位置，确定第二只准直器的大致位置。
- (3) 使用光源和光功率计分别接入第一只准直器和第二只准直器，精确调节第二只准直器的位置使光耦合损耗至最小时，胶合第二只准直器。

图 4-11 为本传感探头的示意图，图 4-12 为气室实物图。设计的多次反射腔型探头

光路反射次数为 15 次，光程为 30cm，整个器件损耗为 1.5dB，具有损耗小、体积小和结构简单等优点。



图 4-11 多次反射腔型探头示意图

图 4-12 多次反射腔型探头实物图

## 4.3.2 新型多次反射腔型探头

为了进一步提高探头的传感长度，我们设计了带有环形器的单光纤输入输出传感探头。新型多次反射腔型传感探头，包括一只光纤环形器 1、一只光纤准直器 2、一块镀有高反膜的小玻璃板、一对侧面镀有高反膜的玻璃板和一块玻璃板，具体做法是：

- (1) 将准直器和环形器的一端连接，将准直器水平胶合在带有斜面反射板的一端。
- (2) 将两块反射玻璃板平行的固定在玻璃板的两边。
- (3) 红光激光器接入环形器，是输出光线大致跟小反射玻璃板垂直。

(4) 光源和光功率计分别接入环形器的输入输出端，精确调节小反光板的位置使光耦合输出最大，然后胶合小反光板。

图 4-13 为新型多次反射腔型探头的示意图，该探头具有传感长度加倍和单光纤输入输出等优点。

图 4-13 新型多次反射腔型探头示意图



## 4.3.4 气室设计

上面两节我们完成了气室传感探头的设计，这一节我们将对气室整体进行设计。我们需要气室容积尽可能的小，以缩短甲烷扩充整个气室的时间，另外气室还应具有一定的机械强度、防尘、防潮等特性，以保护内部的光学器件。

图 4-14 为设计气室的结构俯视图，图 4-15 为气室实物图。气室外形为长方体设计，长 13cm、宽 6cm、高 8cm，外壳采用铝合金制作。在气室上表面的一端接有两个法兰盘，用于连接内部探头的输入和输出光纤，上表面的另一端接有入气端口，在与入气端口位置对应的下表面开有出气端口，但是出气端口面积远远小于入气端口面积。由于甲烷气体具有易爆性，为了防止实验过程中出现意外，气室上表面在封装时放置了橡胶密封垫，使气室具有了良好的密封性。



图 4-14 气室俯视图

图 4-15 气室实物图

## 4.4 光电信号检测

经过气室的光信号需要转换成电信号才能采集处理，光电信号检测部分包括两个部分：一是利用光电探测器将光信号转换成电信号，二是将微弱电信号进行放大，获得我们需要的电压信号。

### 4.4.1 光电探测器

根据本系统设计的要求，光电探测器需要满足一下要求：

- (1) 在工作波长 1635nm~1665nm 内，光电探测武器有较大的光电流输出。

(2) 在工作波长范围内响应度高，工作稳定性好，线性度好。

(3) 光电转换过程中引入的附加噪声小，电路设计简单。

PIN 光电二极管和雪崩光电二极管 (APD) 能满足上述要求，这两种光电探测器在光纤通信领域应用比较广泛，都是利用光电效应原理制成，即当一定波长入射到半导体 PN 结时，价带中产生空穴导带中产生电子，使 PN 结中产生光生载流子的一种现象。下面将对这两种光电探测器进行简单介绍。

PIN 光电二极管在位于 P 区和 N 区之间的区域有一层很厚的本征半导体材料，称为 I 区，其结构如图 4-16。本征半导体层中几乎没有自由电荷，所以它的电阻很高，绝大部分的电压落在这一层。当外加反向电压与 I 区自建电场相同时，内部电场增强，当有光入射后，在 I 区由于本征层较厚，因此入射光子在这里吸收的概率远大于在很薄的 P 区和 N 区被吸收的概率，光生载流子在 I 区电场作用下，光生电子加速向 N 区漂移，光生空穴加速向 P 区漂移，形成光电流。P 区和 N 区的间距加大使得电容减小，PIN 光电二极管的检测效率高，响应速度快，线性好等优点。

图 4-16 PIN 光电二极管

APD 光电二极管在  $P^+$  区和  $N^+$  区有两层本征半导体材料 I 区和 P 区，其结构如图 4-17。I 区较厚为耗尽区作为光子的主要吸收区，P 区为高电场区作为碰撞电离区。当反向电压升高到一定程度后，高电场对光生载流子的加速使得载流子获得很高的动能，碰撞激发另外的高能量电子，这个电子又可以碰撞激发更多的电子，如此连锁反应使得光电二极管内产生雪崩似的载流子倍增效应。APD 光电二极管是有增益的，虽然它的探测精度可以很高，响应速度很快，但是在光电转换的过程中会产生倍增噪声，而且为了保证 APD 光电二极管的稳定工作，电路设计也比较复杂。

图 4-17 APD 光电二极管

基于上面的分析，为了满足设计要求我们采用了 PIN 型光电二极管，具体型号为

北京海特光电公司生产的 FC 系列 InGaAs 型 PIN 光电探测器,图 4-18 为探测器的光谱响应图,从图中看出该光电探测器在 1000nm~1665nm 波段具有很高的响应度。表 4-3 为探测器的主要参数,从表中看出该探测器也具备很好的响应度和线性度。

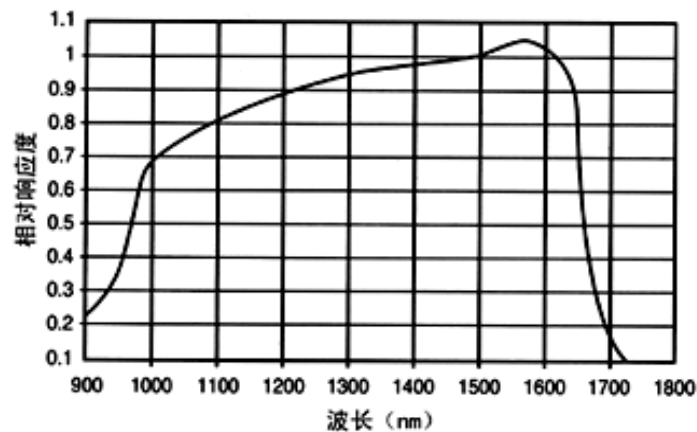


图 4-18 PIN 光谱响应曲线图

表 4-3 FC 型光电探测器的主要参数

封装	FC	
波长响应范围 (μm)	1.0~1.65	
响应度 A/W (0V)	850nm	≥0.20
	1310nm	≥0.75
	1550nm	≥0.80
线性范围 dBm (0V)	-70~+10	
工作电压(V)	0~-10	
线性度 (dB)	±0.15	

## 4.4.2 信号检测电路设计

光电探测器将光信号转换后的电信号十分微弱,不能直接进行数据处理,我们采用了两级信号放大的高灵敏度信号检测电路,将电信号转变为我们需要的电压信号。

前级放大采用 Intersil 公司的斩波稳零高精度运算放大器 ICL7650,该芯片采用动态较零技术和 CMOS 工艺设计,居于输入偏置电流小、增益高、失调小、响应速度快、漂移低、共模抑制比强、性能稳定和价格便宜等优点。我们采用的 ICL7650 为 8 脚金属壳封装,引脚功能结构如下图 4-19。各引脚功能: CEXTB: 外接电容 CETXB; CETXA: 外接电容 CETXA; CRETN: CETXA 和 CEXTB 的公共端; -IN: 反向输入

端； +IN：同向输入端； V-：负电源端； V+：正电源端。

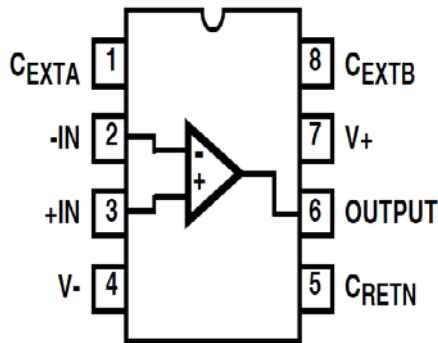


图 4-19 ICL7650 引脚功能结构

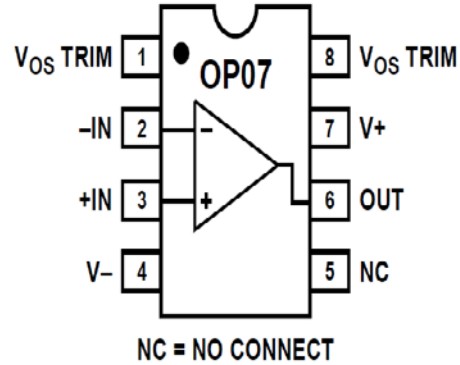


图 4-20 OP07C 引脚功能结构图

二级信号放大采用 TI 公司的 OP07C 非斩波稳零双极性运算放大器。该运算放大器具有较低输入偏置电流、高开环增益、输入电压范围大及很高的共模抑制比，因此能在同相电路组态中提供很高的精度，在高闭环增益中保持良好的线性和增益精度。另外该芯片不需要额外的调零措施。该芯片也采用 8 脚金属壳封装，引脚功能结构如图 4-20。各引脚功能：Vos：调零端；-IN：反向输入端；+IN：同相输入端；V-：负电源端；V+：正电源端；OUT：输出端；NC：悬空。

通过上面器件的选择最终我们设计了微弱信号检测电路，图 4-21 为信号检测电路原理图。

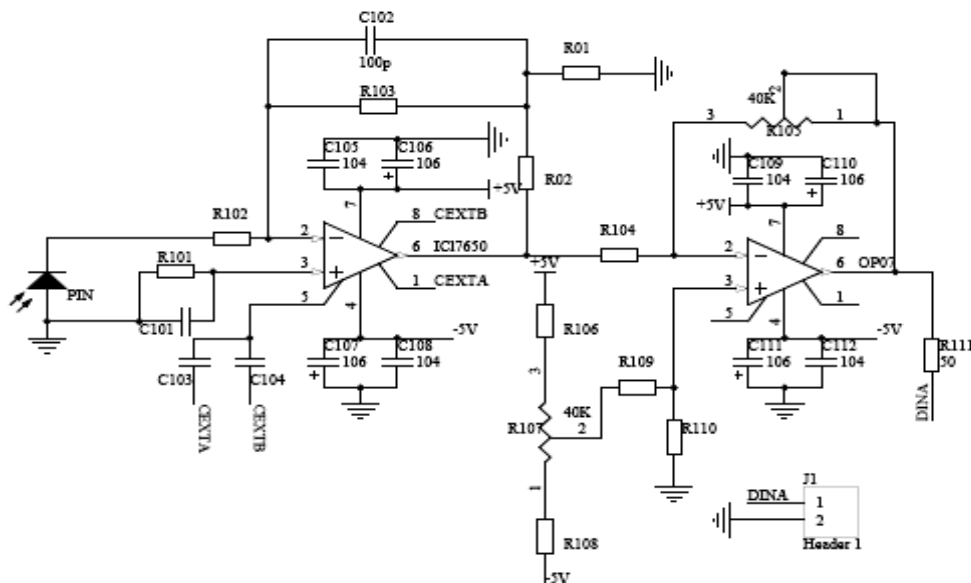


图 4-21 信号检测电路原理图

# 华中科技大学硕士学位论文

本电路采用 $\pm 5\text{ V}$ 电源供电，图中 PIN 为 FC 系列 InGaAs 光电探测器，前级放大器 ICL7650 将 PIN 转换的微弱电流信号进行初步放大，并通过电阻 R203 将电流转换成电压信号传输给下一级放大电路。R203 和 C202 组成负反馈降低带宽。ICL7650 输出电压

$$v_{01} = -I_s(R203 + R04 + \frac{R203 \cdot R04}{R03})$$

式中  $I_s$  为 PIN 输出的电流。实际应用中我们没有采用 R03 和 R04，所以输出电压  $v_{01} = -I_s \cdot R203$ 。由于探测器探测到的信号变化在 nA 量级，信号需要很大的放大倍数，本电路中 R203=33K，即前级放大倍数为 33K。前级放大后的信号进入 OP07C 进行二级放大，OP07C 输出电压

$$v_{02} = -v_{01} \cdot \frac{R205}{R204}$$

在二级放大电路中我们调节 R205 的大小，使二级放大倍数达到 1.2 倍，因此通过整个信号检测电路后信号放大了 39.6K 倍。

本系统中的信号光和参考光将采用相同的信号检测电路，最后二级放大后的电压信号将送往信号处理系统。图 4-22 为光电信号检测电路实物图。

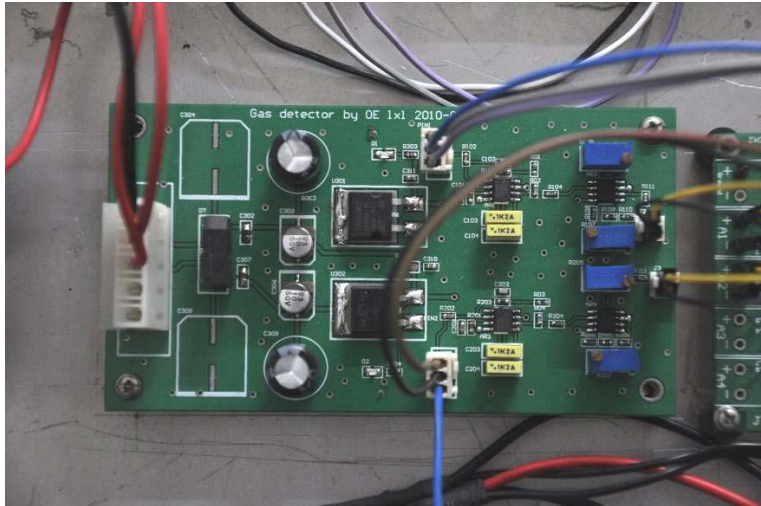


图 4-22 光电信号检测电路实物图

## 4.5 信号处理系统

### 4.5.1 信号处理系统设计

信号处理系统由信号采集和信号处理两个部分组成。光电检测电路输出的信号为

连续变化的模拟信号，首先通过模数转换器 ADC 将模拟信号转变成数字信号，然后数字信号送至处理器计算出气体浓度。

ADC 模数转换一般有四个过程：取样、保持、量化、编码。取样信号的频率必须大于输入模拟信号最高频率的两倍，取样得到的信号需要一定的时间才能转化成数字信号，所以取样电路的输出需要保持一段时间，另外取样和保持同时完成。量化过程就是对采样信号的模数转化过程，转化误差跟采集信号的精度、位数有关，将量化结果以二进制表示出来的过程是编码过程。ADC 模数转换器的主要性能指标为转换精度和转换速度，其中转换精度跟编码的位数有关。

常见的 ADC 转换器有并行比较型、逐次比较型、双积分型和  $\Delta$ - $\Sigma$  型四种类型，每种类型的 ADC 的转换精度和转换速度都不同。并行比较型转换速度最高，但是转换精度提高需要集成的比较强非常多；逐次比较型的转换速度介于并行比较型和双积分型之间，但是制作成本高；双积分型转化精度高、抗干扰能力强、成本低，但适应于精度高但是速度不是很高的情况； $\Delta$ - $\Sigma$  型抗干扰能力强，在转换精度为 16-24 位时，转换速度和成本均优于其他类型的转换器。本信号处理系统采用集成在处理器上的 ADC 转换器，处理器型号为 C8051F350，其内部集成了精度为 24 位的  $\Delta$ - $\Sigma$  型 ADC，具有 8 通道输入选择、单端输入或差分输入可以编程控制和线性度好等优点，另外采用集成 ADC 还可进一步减小系统设计的复杂度。C8051F350 其他特性如下：

- (1) 高速、流水线结构的 8051 兼容的 CIP-51 内核（可达 50 MIPS）
- (2) 高精度可编程的 24.5MHz 内部振荡器
- (3) 硬件实现的 SMBus/ I<sup>2</sup>C、增强型 UART 和 SPI 串行接口
- (4) 全速、非侵入式的在系统调试接口
- (5) 具有 3 个捕捉/比较模块和看门狗定时器功能的可编程计数器/定时器阵列
- (6) 768 字节片内 RAM
- (7) 两个 8 位电流输出 DAC
- (8) 片内电压比较器
- (9) 8KB 在片 FLASH 存储器
- (10) 片内上电复位、VDD 监视器和温度传感器

(11) 4 个通用的 16 位定时器

(12) 17 个端口 I/O（容许 5V 输入）

本系统使用 C8051F350 主要实现：ADC 模数转换、气体浓度计算并显示以及利用串口通信向报警终端发射报警信号等。图 4-23 为利用信号处理系统的原理图，图 4-24 为信号处理系统的实物图。

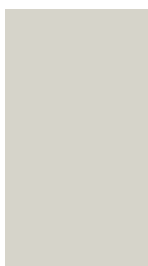


图 4-23 信号处理系统原理图

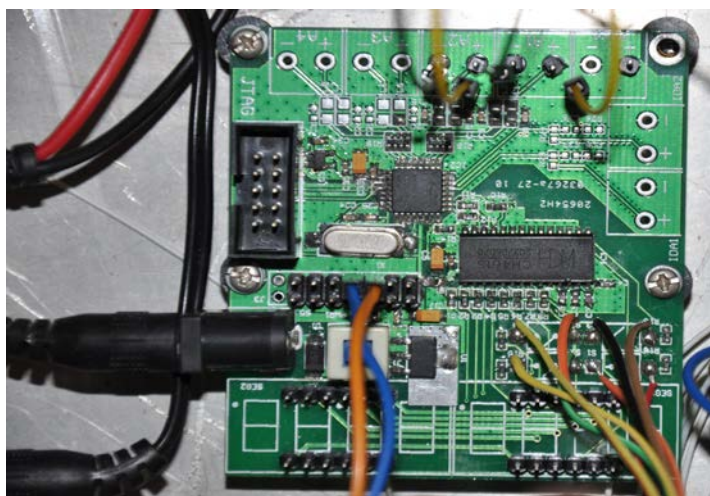


图 4-24 信号处理系统实物图

## 4.5.2 信号处理程序设计

图 4-25 ADC 中断服务程序框图

图 4-26 信号处理系统工作流程框图

信号处理系统的软件主要实现如下功能：C8051F350 处理器初始化、ADC 模数转换、浓度计算、数据显示和报警终端串口通信等。图 4-25 为 ADC 中断服务程序框图，图 4-26 为信号处理系统工作流程框图。

## 4.6 声光报警设计

本系统需要对煤矿甲烷气体进行实时监测：当甲烷浓度达到或超过系统设定的警戒值，系统该信息传给监控室，监控室控制矿井通风系统，直到甲烷浓度降为警戒值一下，在这个过程中，检测系统还需要提醒作业人员进入应急程序。为了达到报警效果，本系统在检测终端采用了声光报警，当甲烷浓度达到设定的警戒值时，蜂鸣器发出警鸣，同时红色 LED 以一定频率闪烁。

报警系统由两个部分组成：一是光猫，其作用是进行光电信号转变；二是终端报警



# 华中科技大学硕士学位论文

---

显示装置。

光猫是一种调制解调器，也称为单端口光端机。主机发出的报警信号首先通过光猫转变成光信号，通过光纤传输到报警终端，然后再通过光猫将光信号转变成电信号，电信号经报警终端处理后报警显示。本系统采用北京博科未来科技有限公司型号为 BOK-341S-FC 单纤猫，该型号猫具有 RS232/RS485 接口，支持多级通信、组网方便和误码率低等优点。终端报警显示装置我们采用宏晶科技有限公司型号为 STC-89C52RC 单片机控制系统，该装置具有红外遥控功能、8 位 LED 显示和报警电路。图 4-27 为发射端光猫实物图，图 4-28 为终端报警显示装置实物图（包括终端光猫和终端报警显示装置）。

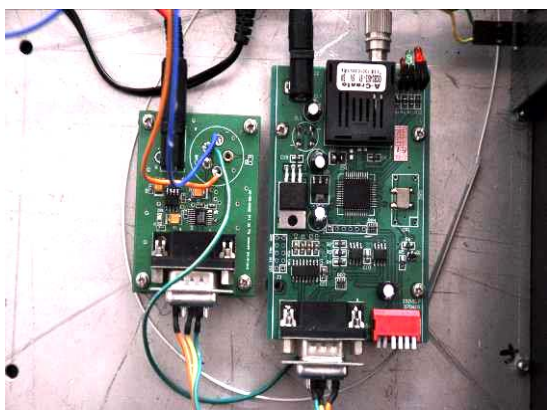


图 4-27 发射端光猫实物图



图 4-28 终端报警显示装置实物图

到此为止我们已经设计完成了系统的各个部分，包括光源的控制电路设计、多波长滤波分波器设计、气室设计、光电信号检测电路设计、信号处理电路硬件软件设计以及声光报警显示设计，图 4-29、图 4-30 分别为系统主机部分的实物图和整个系统的实物图。

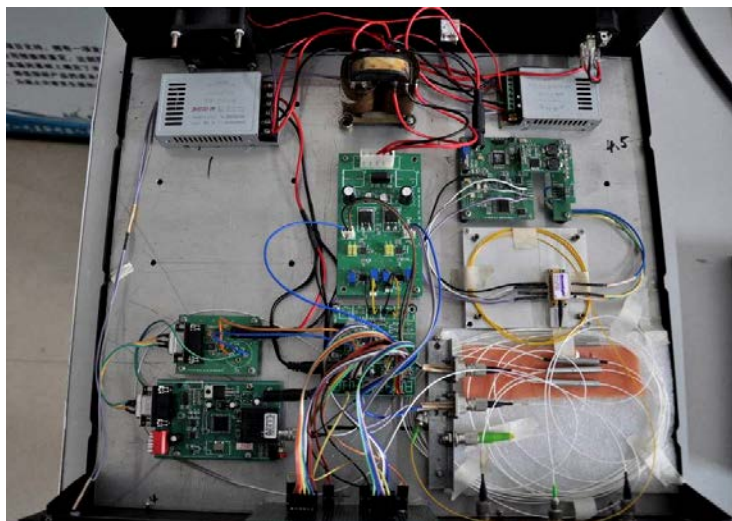


图 4-29 系统主机部分实物图



图 4-30 系统实物图

## 4.7 本章小结

本章首先根据系统的要求选择了 SLED 宽带光源作为系统光源，并设计了光源的控制电路；为了配合改进后的差分检测技术，设计了由 CWDM 和梳状滤波器组成的多波长滤波分波器，实现了对多条甲烷吸收峰和非吸收峰的分离；气室部分设计了两种传感探头多反射腔型探头和新型多反射腔型探头，并设计了满足实验要求的气室装置；信号检测部分选择了 PIN 光电二极管，设计了用于微弱信号检测的二级放大电路；信号处理部分设计了系统的硬件结构，并给出了系统的程序设计；最后介绍了系统声光报警装置的设计。

## 5 光纤甲烷气体传感研究

### 5.1 光谱曲线测试

#### 5.1.1 SLED 宽谱光源光谱测试

测试时选定光源的驱动电流为 300mA，光谱仪型号为 MS9710C，其探测波段为 600nm~1750nm，最低分辨率为 0.06nm，探测精度可达-90dBm。图 5-1 为 SLED 在 1630nm~1670nm 的光谱分布。由图看出，光源在此波段分布比较均匀，光功率高且无衰减现象，达到了甲烷吸收实验的要求。

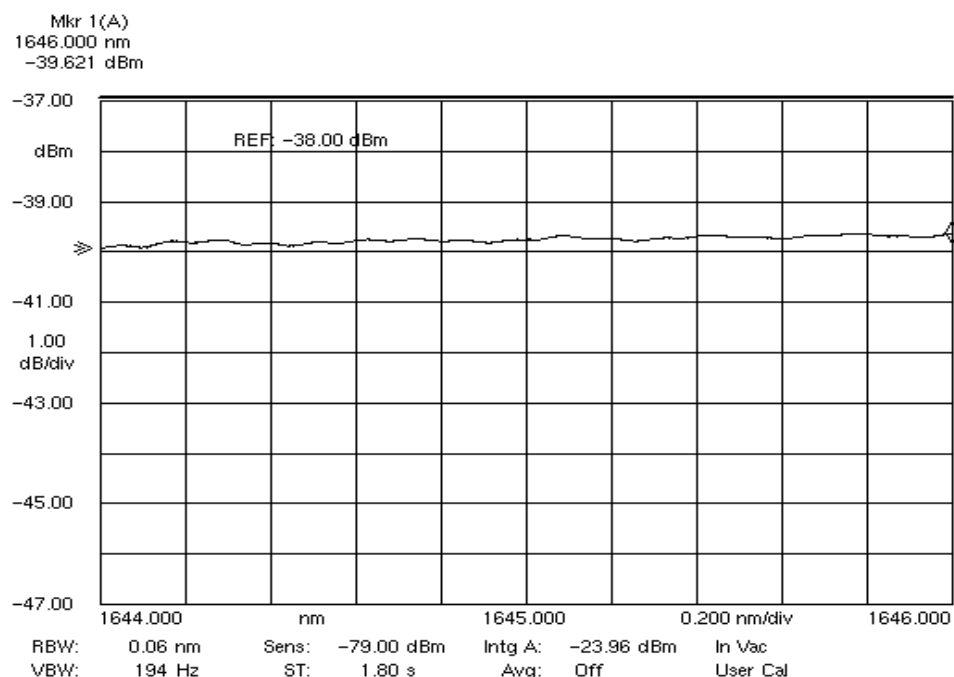


图 5-1 SLED 宽谱光源光谱图

#### 5.1.2 甲烷气体吸收谱测试

将光源与传感气室连接，通过光谱仪观察的传感气室输出光强变化即是甲烷气体的吸收光谱。测试时保持光源的功率恒定，向气室内充入 100%浓度的甲烷气体，测得的甲烷吸收光谱如图 5-2。可以看出，甲烷在 1635nm~1660nm 处的吸收谱线比较均匀，在 1665nm 附近吸收谱线十分密集，通过测试本系统最终选择了 1637.670nm、1640.292nm、1642.884nm、1645.516nm、1648.195nm 五条谱线做为检测对象。

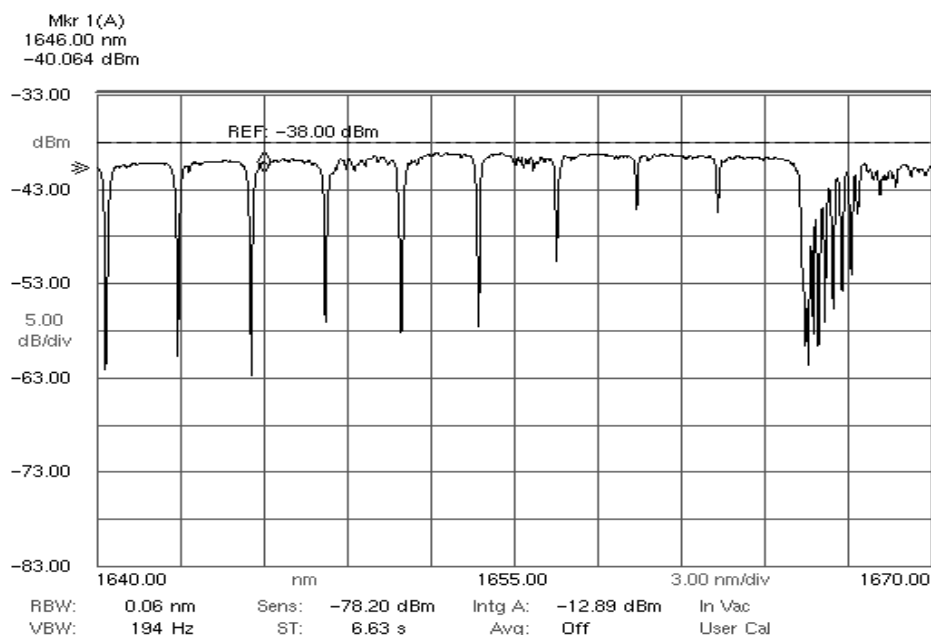


图 5-2 甲烷气体吸收谱

## 5.1.3 多波长滤波分波器光谱测试

多波长滤波分波器由宽带滤波器和梳状滤波器组成，本系统在宽带滤波器和梳状滤波器之间加入了传感气室。光源输出光首先经过宽谱滤波器滤出中心波长为 1642nm, 3dB 带宽为 16.5nm 的光，本系统选定的五条吸收谱线均包含在此波段，测试得到宽带滤波器的光谱图 5-3。

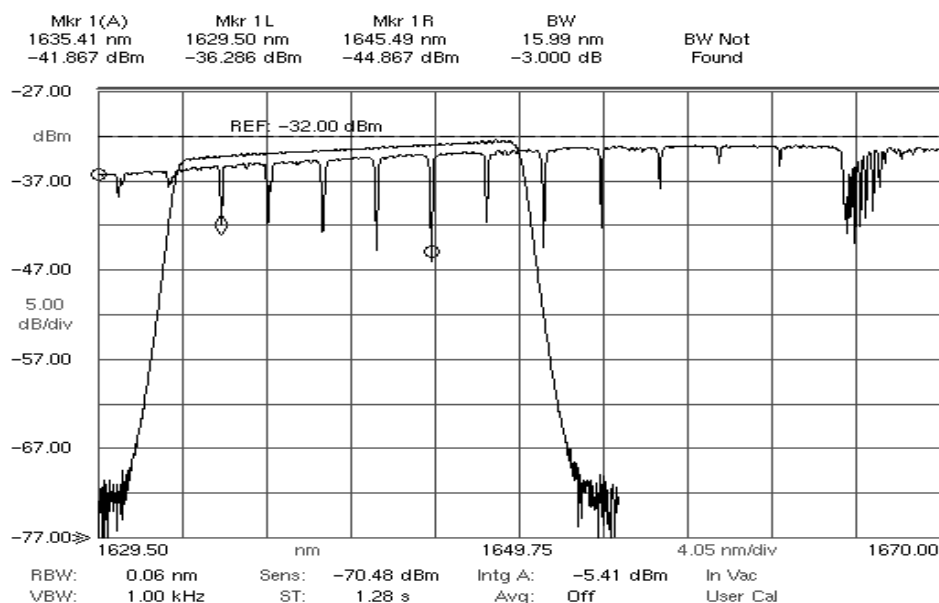


图 5-3 宽带滤波器光谱图

宽带滤波器输出光输入传感器室被气体吸收后，再被梳状滤波器滤波得到一族信号光和一族参考光。图 5-4 为传感气室未注入甲烷时的信号光和参考光光谱。

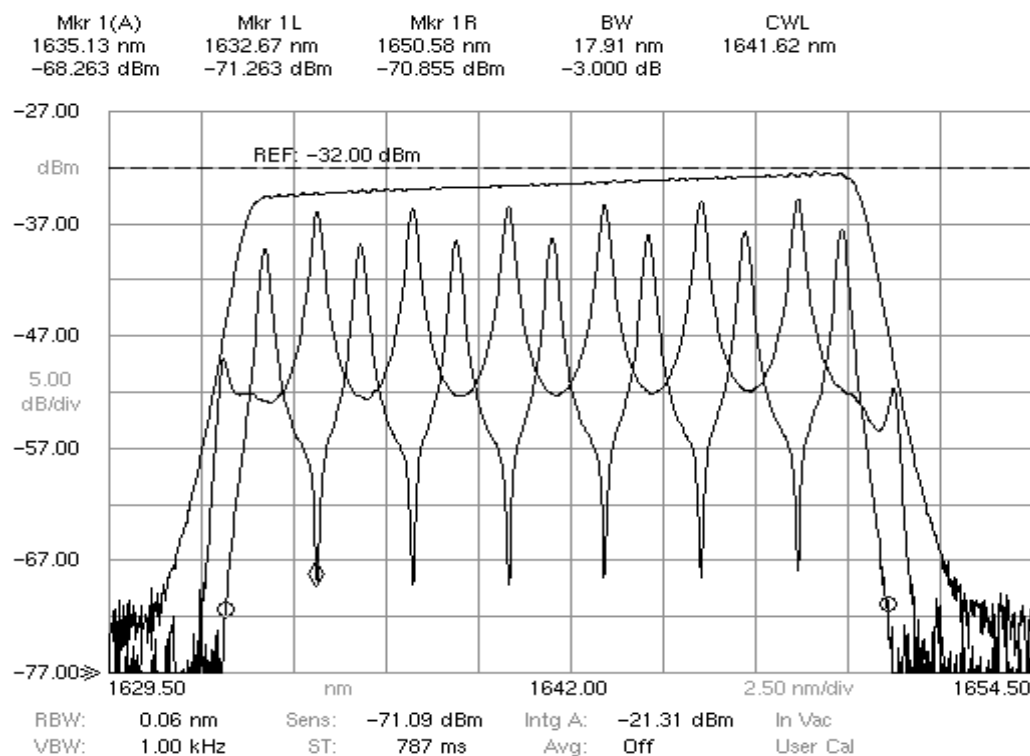


图 5-4 信号光和参考光光谱图

可以看出，信号光的波峰正好对应参考光的波谷，参考光的波峰对应信号光的波谷，信号光与参考光相错，有气体时参考光对气体的吸收可以忽略。测试时发现参考光比信号光多出一条透射峰，由于这条透射峰不与甲烷气体的吸收峰对应，所以对系统结果不会造成影响，表 5-1 为信号光与参考光的对应波长。

表 5-1 信号光与参考光的对应波长

信号光峰值 (nm)	1635.13	1637.71	1640.32	1642.90	1645.51	1648.15
参考光峰值 (nm)	1633.65	1636.23	1638.84	1641.42	1644.03	1646.67

当传感气室通入甲烷气体后，通过光谱仪得到信号光和参考光光谱如图 5-5、图 5-6。通过气体吸收前后发现信号通道光强有明显的减弱，参考通道的光强基本不变，也进而验证了采用双通道差分检测法的可行性。

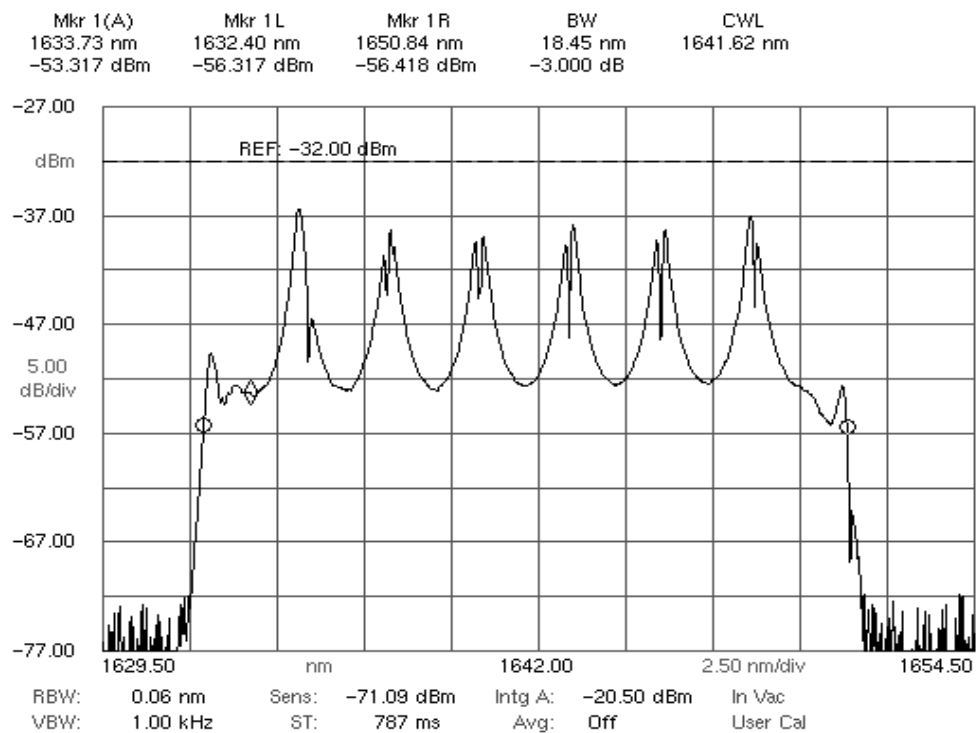


图 5-5 经气体吸收后的信号光

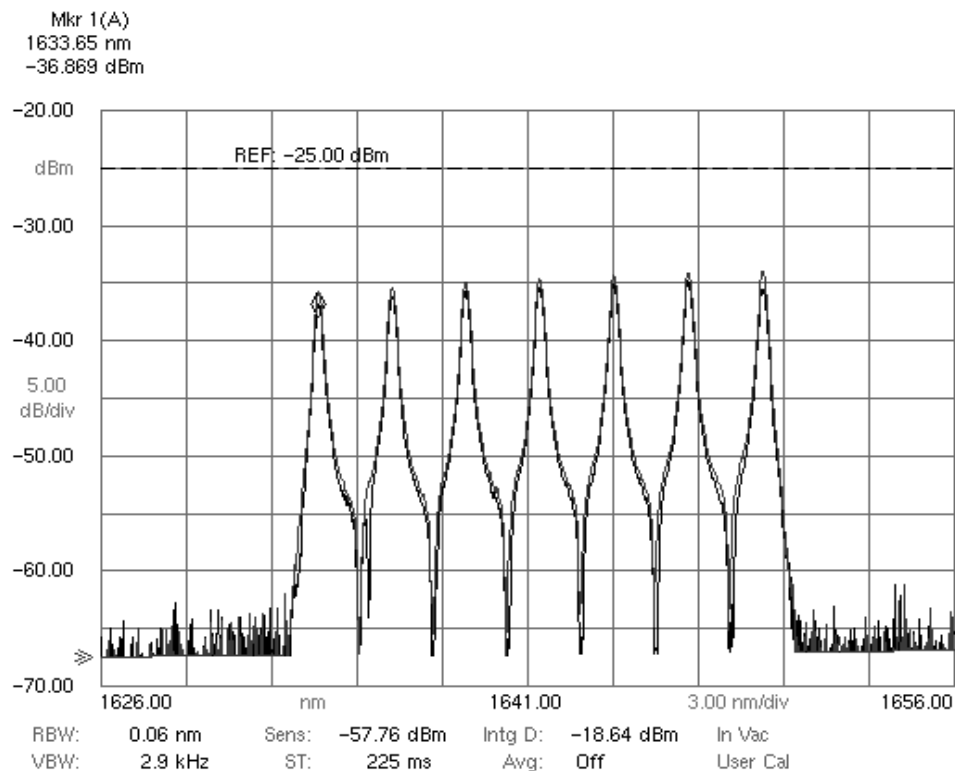


图 5-6 经气体吸收后的参考光

## 5.2 系统损耗测试

系统的损耗主要是 PIN 与光纤、光纤与气室的活接头以及滤波片和反射腔的散射吸收引起的，表 5-2 为系统的损耗测试结果。在系统中采用的是单模光纤，光路中各接点和耦合点是产生干扰的主要来源，这种干扰随着环境的变化而表现为随机性的，虽然差分检测可以避免这种干扰的影响，但是在实际应用中还是应该控制光路中的接点数，同时提高光路耦合工艺。

表 5-2 系统损耗测试结果

传输单元	损耗 (dB)
CWDM 宽带滤波器	3.5
传感探头	1.5
气室接头线路	1.5
光解复用器	2.8
总计	9.3

## 5.3 系统标定

系统标定的过程就是通过实验获得的浓度与电压信号，确定两者之间的关系。本系统定标中使用了 0.5%、1.0%、2.0%、5.0%和 100%五种标准浓度的甲烷气体，并采用英国 Dynament 公司的 Premier 甲烷气体传感器进行浓度的实时检测。通过实验测量了甲烷浓度在 0-100%范围内的浓度值和对应电压比值，实验数据如表 5-3。

表 5-3 浓度值和对应电压比值

浓度 C	比值 R	浓度 C	比值 R	浓度 C	比值 R
0	1.5811	30.2	1.3616	83.3	1.1983
0.5	1.5755	35.7	1.3381	88.4	1.1868
1	1.5689	53.2	1.2747	89.7	1.1836
2.02	1.5578	57.4	1.2629	91.1	1.1808
4.96	1.5277	61.3	1.2532	94.1	1.175
6.56	1.5127	65.2	1.2434	95.8	1.172
11.5	1.4697	69.4	1.2332	97	1.1687
21.5	1.4041	72.6	1.2249	100	1.1604
26.5	1.3797	80.7	1.203		

利用 Matlab 绘出表 5-3 中浓度与对应电压比值的关系曲线，如图 5-7。

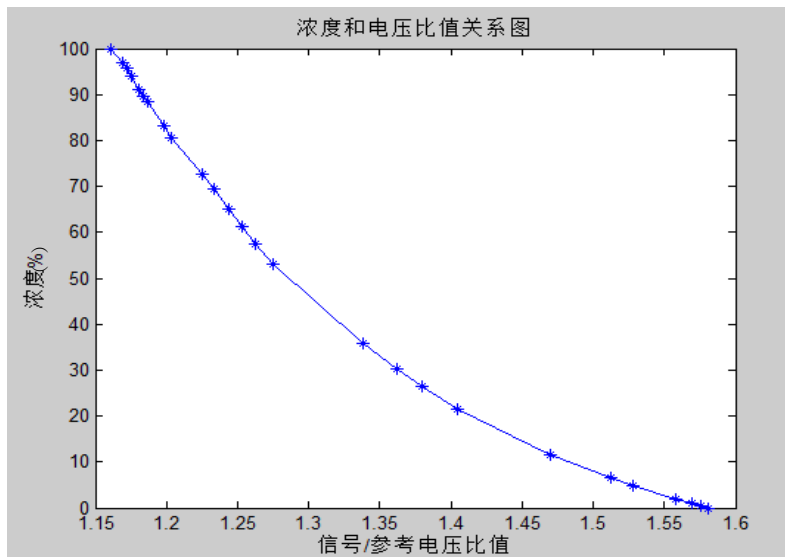


图 5-7 浓度与电压比值关系曲线图

可以看出，在低浓度（0-5%）时浓度和电压比值具有很好的线性关系，但是随着浓度的升高，线性关系越来越不明显，究其原因：一是参考光的吸收系数不为零，低浓度下参考光对甲烷气体的吸收不明显，高浓度下参考光会对甲烷气体的吸收很明显；二是系统滤出信号光与参考光的滤波片是两个，环境因素如温度等对他们的影响不一样，这就可能造成测试结果的误差。图 5-8 即为实验获得的参考信号与浓度之间的关系图，从图中可以看出参考光对甲烷气体的吸收随着浓度的变化而变化。

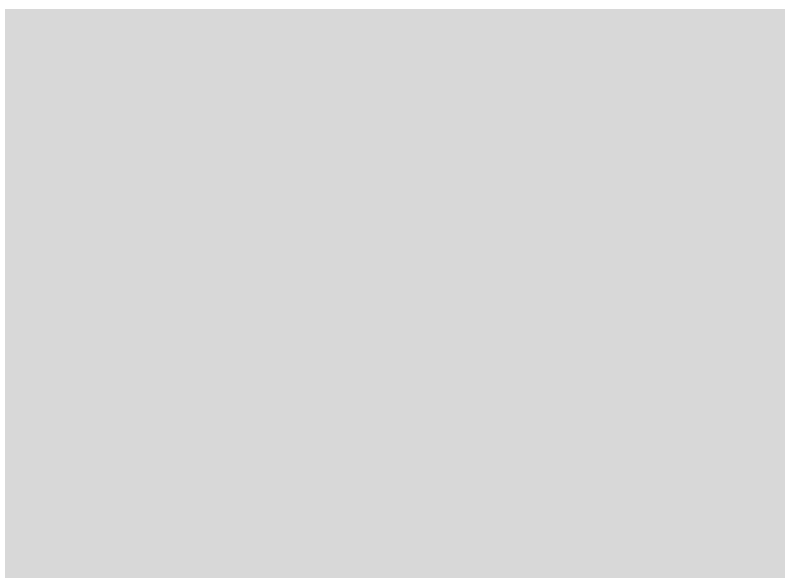


图 5-8 浓度与参考电压关系曲线图



# 华中科技大学硕士学位论文

由于低浓度时浓度与电压比值具有很好的线性关系，而随着浓度增加线性关系变得越来越差，为了实现甲烷气体的全量程测量，系统采用查表插值的算法。根据式（3-31）我们知道

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{V_s}{V_r}\right) \quad (5-1)$$

其中  $K = V_{0s}/V_{0r}$ ， $V_{0s}$  为信号光输入电压， $V_{0r}$  为参考光输入电压， $V_s$  为信号光输出电压， $V_r$  为参考光输出电压。

令  $R = V_s/V_r$ ， $ZERO = K$ ， $M = 1/\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L$  则上式变为

$$C = M \cdot \left(1 - \frac{R}{ZERO}\right) \quad (5-2)$$

其中  $M$  为已知量， $K$  可以测得，根据实验获得浓度和对应的电压比值数据，计算得到查表插值算法的数据库，查表数据如表 5-4。

表 5-4 查表数据

1-R/ZERO	0	0.0037	0.0079	0.0151	0.0343	0.0433	0.0705	0.1119	0.1274
C	0	0.5	1	2.02	4.96	6.56	11.5	21.5	26.5
1-R/ZERO	0.1388	0.1537	0.1938	0.2013	0.2074	0.2136	0.22	0.2253	0.2391
C	30.2	35.7	53.2	57.4	61.3	65.2	69.4	72.6	80.7
1-R/ZERO	0.2421	0.2494	0.2514	0.2532	0.2568	0.2587	0.2608	0.2661	
C	83.3	88.4	89.7	91.1	94.1	95.8	97	100	

将  $1 - K_i/K$  作为自变量  $x$ ，浓度  $C$  作为因变量  $y$ ，得到两者之间的曲线关系如图 5-9。计算时从  $x$  查出测量值所在的区间  $(x_1, x_2)$ ，再根据  $y$  值对应区间  $(y_1, y_2)$  进行插值计算计算出浓度大小。

$$C = y = y_1 + (x - x_1) \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (5-3)$$

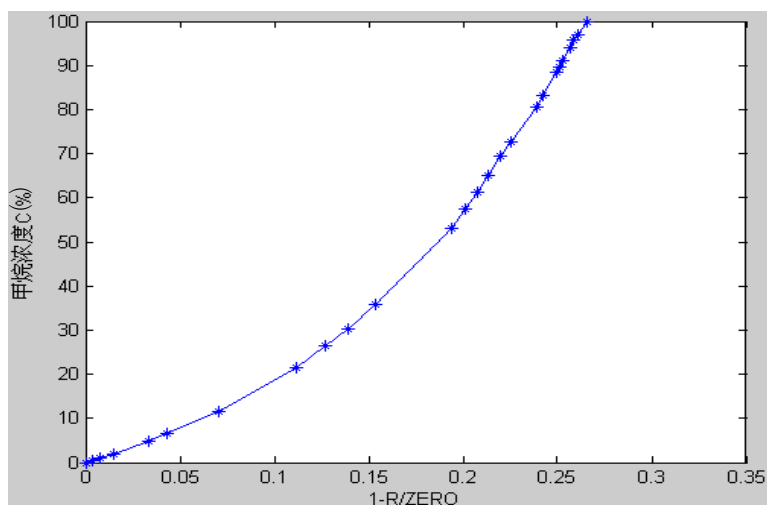


图 5-9 浓度与1-R/ZERO的关系

## 5.4 系统性能测试

### 5.4.1 系统示值对比测试

在示值对比测试前需要将系统调零，即记录  $K$  值大小，然后向气室内充入标准气体，记录对应浓度下的系统读数。系统示值对比测试我们采用低浓度（0-15%）对比和高浓度（15%-100%）对比，表 5-5 为示值对比实验数据，图 5-10 为示值对比实验图。

表 5-5 示值对比实验数据

实际值	测试值	实际值	测试值	实际值	测试值	实际值	测试值
0.5	0.58	8.82	9.13	55.7	57.34	85.3	88.4
1	1.04	15.1	15.67	61.8	65.07	92.4	93.87
2.02	2.06	19.6	20.70	68.3	72.17	100	100
4.96	5.01	31.7	33.17	78.8	81.65		

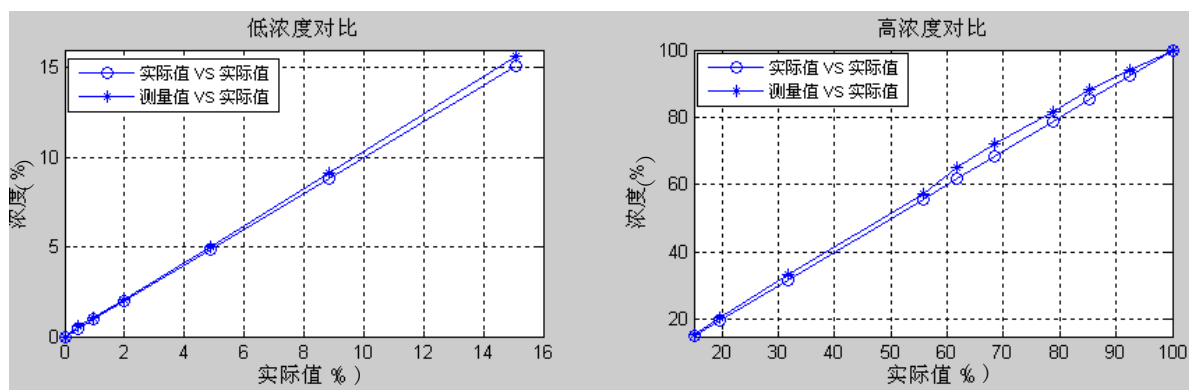


图 5-10 示值对比实验图

# 华中科技大学硕士学位论文

通过示值对比实验图发现，在低浓度时误差很小，尤其是在 0-5%浓度范围内，测试曲线几乎和标准曲线重合；在高浓度的误差明显增大，这一现象的主要原因是设计的滤波片会受温度的影响，使输出波长漂移进而造成测试结果的误差，但是测试结果显示最大误差小于 5%，仍能够满足系统检测要求。

## 5.4.2 系统重复性测试

重复性测试需要向气室内充入标准气体，然后记录对应系统读数，并重复做多次。表 5-6 中数据为甲烷浓度在 0-5%范围内的重复性测试数据，图 5-11 为其重复性测试曲线，测试了五条曲线，图 5-12 为甲烷浓度在 0-100%范围内的重复测试曲线，测试了两条曲线。

表 5-6 浓度在 0-5%范围的重复性测试数据

第一次	标准浓度	0	0.36	0.92	1.96	4.77
	测试浓度	0	0.35	0.92	1.95	4.82
第二次	标准浓度	0	0.35	0.94	2.0	4.9
	测试浓度	0	0.38	0.94	2.0	4.89
第三次	标准浓度	0	0.4	0.94	2.02	4.94
	测试浓度	0	0.37	0.93	1.99	4.88
第四次	标准浓度	0	0.36	0.92	1.99	4.92
	测试浓度	0	0.35	0.91	1.98	4.96
第五次	标准浓度	0	0.42	0.96	1.98	4.88
	测试浓度	0	0.46	0.97	2.02	4.92

图 5-11 浓度在 0-5%范围的重复性测试曲线

从图中可以看出，五次测量曲线基本吻合，说明系统的重复性比较好。

图 5-12 浓度在 0-100% 范围内的重复测试曲线

从上图可以看出，实测甲烷气体浓度与充入的标准甲烷气体在 0-100% 范围内的重复性误差都非常小，表明本系统在测量甲烷气体时，可以提供大范围、高精度、稳定的测量结果。

### 5.4.3 系统稳定性测试

系统稳定性测试时每隔五分钟向气室充入标准气体，连续监测半小时记录气体浓度的读数。图 5-13 到图 5-16 分别为为充入 0.5%、1%、2.02% 和 5% 标准气体后测得的系统稳定性曲线。

图 5-13 0.5% 稳定性测试曲线

图 5-14 1.0%稳定性测试曲线

浓度 (%)

时间 $t$ (min)

图 5-15 2.02%稳定性测试曲线

图 5-16 5%稳定性测试曲线

# 华中科技大学硕士学位论文

从图中可以看出，测试时最大值和最小值差值分别为 0.03%、0.06%、0.05%和 0.04%，均能满足系统测试要求。

## 5.4.4 系统灵敏度

系统灵敏度为系统输入微小变量下产生的输出变化，理论上低浓度下精确的灵敏度更值得研究，本系统在低浓度下可认为参考光强保持不变，因此系统灵敏度为信号光与气体浓度微分。根据式（3-31）可知

$$C = \frac{1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \cdot \frac{I_s}{I_r}\right) \quad (5-4)$$

将上式进行微分后得到

$$\Delta C = \frac{-1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \frac{\Delta I_s}{KI_r} \quad (5-5)$$

所以系统的灵敏度为

$$\frac{\Delta I_s}{\Delta C} = -\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)LKI_r \quad (5-6)$$

$1/\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L \approx 97.9611$ ，即  $\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L \approx 1/97.9611$ ， $K=1.126$ ，甲烷气体浓度为零时，

测得参考光光强为-18.17dBm，即 0.0152mW，所以灵敏度为  $1.55 \times 10^{-5} \text{ uW/ppm}$ 。

## 5.4.5 系统分辨率

系统分辨率为系统所能检测到气体浓度的最小变量，将式（3-31）两边进行微分后得到

$$\Delta C = \frac{-1}{\left(\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_j\right)L} \cdot \frac{\Delta V_s}{KV_r} \quad (5-7)$$

由于电压能检测到的最低幅度为 0.001V，当甲烷气体浓度为零时， $V_r = 1.5758V$ ，所以本系统的分辨率  $\Delta C_{\min} = 97.9611 \times 0.001 / (1.126 \times 2.117) = 0.062$ ，即系统理论最低分辨率为 620ppm。

## 5.5 本章小结

本章完成了对系统的整体测试并对测试结果进行了分析。首先对系统中的光谱部

分进行了测试，包括光源光谱测试、甲烷吸收光谱测量和多波长滤波分波器光谱测试，测试结果均符合设计要求；其次测量了系统光路个元件的损耗，对系统损耗的定量测试可以计算出系统复用传感气室的个数；然后通过向气室输入不同标准气体浓度，利用插值算法对系统进行标定，最后对标定后的系统性能进行了测试，测试结果表明系统达到了预期标准。

## 6 总结与展望

本论文分析了目前气体传感器的各种检测方法和研究动态，最后采用了可实现实时分布式、低检测限、高灵敏度的气体光纤检测。光纤检测采用改进后的差分吸收检测技术，根据系统要求设计实现了系统的整体架构，并通过气体实验对系统进行标定和性能测试。本论文的主要工作内容包括以下几个方面：

(1) 分析了传统与非传统的气体传感技术的原理和优缺点，对光纤传感技术的国内外研究动态进行研究，指出了在甲烷光纤气体检测技术的巨大优势。

(2) 推理了几种常见的气体吸收谱模型，分析了各种光谱吸收检测的原理，结合甲烷吸收谱特点和差分检测优势，提出了甲烷宽带差分检测方案。

(3) 设计了多波长滤波分波器，通过宽带滤波器和梳状滤波器的有效组合可以有有效的分离信号光和参考光。

(4) 设计了能够满足系统实验要求的传感气室，其结构简单高效，并申请了国家专利。

(5) 对系统进行了实验研究，处理分析了实验数据，标定了系统参数，测试了系统的性能。

系统实验数据显示系统在低浓度时有很好的准确度和稳定度，系统分辨率也达到了系统要求，但是系统还存在着很多不足，例如系统对外界的干扰能力不强，光纤的摆动可以影响到检测结果，如果系统在数据处理部分采用双通道同步检测技术，可能会减小外部对系统的干扰。

由于实验条件限制只实现了甲烷单点检测的设计，且测试样机还没有正式进入煤矿应用，今后的工作还有：

(1) 研制出适应煤矿中的粉尘和水汽的传感气室将是一个设计难点。

(2) 采用更强大的处理器，不但可以同步双通道 AD 转换，减少外界对系统的干扰，还能提高系统的处理速度，使系统复用更多传感点数，组建更庞大的系统检测网络。

(3) 如何充分利用现有的光纤通信技术和网络技术，设计甲烷监测网络，实现对甲烷的多点实时在线检测有待研究。



(4) 本论文只对甲烷进行了研究，如何构建能够同步测量多种气体和其他参数如温度、湿度等的传感系统有待研究。

总之，基于光谱吸收型光纤气体传感器在技术上的优势是其他传感器无法比拟的，灵敏度高、成本低，并且能够与光纤通信技术结合实现多点多种气体多种参量的大规模检测网络，光纤气体传感产品具有广阔的应用前景。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 致 谢

两年半的研究生学习生涯即将结束，时光短暂，但老师的教导，同学的关爱却让我感悟许多收获许多，这些感悟与收获都将使我终生受益。

首先感谢我尊敬的导师胡必春副教授，在学习上不论是课题难关还是研究方法，胡老师都能给予我热情悉心的指导，感动之余，潜移默化的也让我学习了很多做人做事的道理；在生活上不论我谈及生活困难还是职业规划，胡老师总能和蔼可亲的认真聆听，并帮我解惑，这些都让我铭记心间，由衷感谢胡老师的悉心培养，在论文完成之际，在此金象我的导师胡老师致以最诚挚的谢意。

感谢刘德明老师对课题的大力支持，使我们的研究工作后顾之忧；感谢刘端博士后给予技术上的支持和帮助，使我们的课题取得很大的进展。

感谢课题组成员林江、姜捷、王涛、柴航、张鹏程等对课题组做出的贡献，没有大家的共同努力就没有项目的成功。

感谢我的父母在学习期间提供给我的物质和精神鼓励，让我无忧的学习生活，让我找到前进的更大动力。

最后由衷感谢身边的所有支持关心我的同学和朋友！

## 参考文献

- [1] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术. 北京: 煤炭工业出版社, 2011. 1~2
- [2] 孙继平. 瓦斯综合防治方法研究. 工矿自动化, 2011, (2): 1~5
- [3] 吕光杰. 光谱吸收式煤矿瓦斯红外检测技术的应用研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2009
- [4] Crawford Massie, George Stewart, George McGregor, et al. Design of A Portable Optical Sensor For Methane Gas Detection. Sensors and Actuators B, 2006, (113): 830~836
- [5] 廖延彪, 黎敏, 张敏. 光纤传感技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2009. 328~330
- [6] W.Jin, G.Stewart, B.Culshaw, et al. Pinchbeck Absorption Measurement of Methane Gas with a Broadband Source and Interferometric Signal Processing Optics Letters, 1993, (18):1364~1366
- [7] H. Tai, K. Yatnatnoto, S. Osawa. Remote Detection of Methane using a 1.66 $\mu$ m Diode Laser in Combination with Optical Fibers. Proceedings 7<sup>th</sup> OFS, 1990, (8): 51~54
- [8] D. T. Cassidy, J. Reid. Harmonic detection with tunable diode lasers--two-tone modulation. Appl. Phys., 1982, (29): 279~285
- [9] J. Silver. Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods. Appl. Opt., 1992, (31): 707~717
- [10] K. Chan, H. Ito, H. Inaba. Remote Sensing System for Near-Infrared Differential Absorption of CH Gas Using Low-Loss Optical Fiber Link. Applied Optics., 1984, (19): 3415~3420
- [11] Stewart G, Mencaglia A, Philip W, et al. Interferometric signals in fiber optic methane sensors with wavelength modulation of the DFB laser source. Journal of Lightwave Technology, 1998, (16): 43~53
- [12] Wangbao Yin, Weiguang Ma, Lirong Wang, et al. Research on The Distributed Optical Remote Sensing of Methane Employing Single Laser Source. Chinese Optics Letters, 2004, (2): 80~88
- [13] Ye Fei, Li Qian, Qi Bing. Multipoint Chemical Gas Sensing System Based on

# 华中科技大学硕士学位论文

---

Frequency-Shifted Interferometry. Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. 1~3

- [14] 刘瑾. 光谱吸收式光纤甲烷气体传感系统的研究: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004
- [15] 倪家升, 宋志强, 刘统玉等. 光纤痕量气体检测系统的研究. 山东科学, 2008, (6): 13~18
- [16] 王艳菊. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006
- [17] 郭增军. 基于光谱吸收光纤甲烷气体传感系统的研究: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2002
- [18] 张学典. 差分吸收光谱技术在环境监测中的理论和应用研究: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2005
- [19] Jia-Sheng Ni, Jun Chang, Tong-Yu Liu, et al. Fiber Methane Gas Sensor and Its Application in Methane Outburst Prediction in Coal Mine. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, (64): 373~376
- [20] 赵磊, 煤矿瓦斯光纤传感检测仪的研制: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009
- [21] 孙晓峰. 利用LED检测甲烷浓度的实验研究: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2004
- [22] H. Riffs, C. Carlisle, L. Cart, et al. Design of an open path near-infrared diode laser sensor: application to oxygen, water, and carbon dioxide vapor detection. Appl. Opt., 1994, (33): 7059~7066
- [23] 李成. 瓦斯气体检测中全光纤梳状滤波器研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2008
- [24] 马维光, 尹王保, 黄涛等. 气体峰值吸收系数随压强变化关系的理论分析. 光谱学与光谱分析, 2004, (2): 135~137
- [25] 兰心钜, 黄国标, 张渝楠. 激光技术. 长沙: 湖南科学出版社, 1981. 25~28
- [26] Takaya Iseki, Hideo Tai, Kiyoshi Kimura. Aportable Remote Methane Sensor Using A Tunable Diode Laser. Meas. Sci. Technol, 2000, (11): 594~602

- [27] Sanguo Li, Thomas Koscica, Yan Zhang, et al. Optical Fiber Remote Sensing System of Methane At 1645nm Using Wavelength-modulation Technique. Proc. of SPIC, 2005, (1): 1~9
- [28] 吴兵兵, 吕矗, 戴基智. 光纤气体传感检测技术研究. 激光与红外, 2009, (7): 707~712
- [29] Miha Zavrsnik, G. Stewart. Coherence Addressing of Quasi-distributed Absorption by the FMCW Method. JLT, 2000, (18): 57~65
- [30] 张学典. 差分吸收光谱技术在环境监测中的理论和应用研究: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2005
- [31] T.Iseki. Aportabel Remote Methane Detector Using An InGaAsP DFB Laser. Environmental Geology, 2004, (46): 1064~1069
- [32] Zhang Y, Zhang M, Jin W, et al. Multi-point fiber optic gas detection with intra-cavity spectroscopy. OPT COMMU, 2003, (220): 361~364
- [33] H. Riris, C. Carlisle, L. Carr, et al. Design of an open path near-infrared diode laser sensor: application to oxygen, water, and carbon dioxide vapor detection. Appl. Opt., 1994, (33): 7059~7066
- [34] G Velasco, J-Ph Schnell. Gas sensors and their applications in the auto motive industry. J.Phys E: Sci. Instrum, 1983, (16): 973~977
- [35] Chuji Wang, Susan T. Scherrer. Fiber Loop Ringdown for Physical Sensor Development: Pressure Sensor. Applied Optics, 2004, (35): 6458~6464
- [36] R. Stephen Brown, Igor Kozin, Zhaoguo Tong, et al. Fiber-loop Ring-down Spectroscopy. Journal of Chemical Physics, 2002, 117(23): 10444~10447
- [37] Chuji Wang, Susan T. Scherrer. Fiber Ringdown Pressure Sensors. Optics Letters, 2004, 29(4): 352~354
- [38] Chuji Wang. Fiber Loop Ringdown—a Time-Domain Sensing Technique for Multi-Function Fiber Optic Sensor Platforms: Current Status and Design Perspectives. Sensors, 2009, (9): 59~62
- [39] K. Atherton, G. Stewart, B. Culshaw. Gas Detection By Cavity ring-down Absorption with A Fibre Optic Amplifier Loop. Proceeding of SPIE, 2002, (5): 25~31
- [40] 尚明丽. 高分辨率光纤甲烷气体检测系统的研究: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009

# 华中科技大学硕士学位论文

---

- [41] 徐振峰. 瓦斯浓度二次谐波检测相关技术研究: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2007
- [42] 田磊. 光纤甲烷气体传感系统的研究: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006
- [43] 张静. 基于红外吸收原理的甲烷浓度检测仪: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- [44] 李成. 瓦斯气体检测中全光纤梳状滤波器研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2008
- [45] 凤珍, 于长泰. 光纤传感技术与应用. 浙江: 浙江大学出版社, 1992. 281~290