



独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 陈丽

签字日期： 2010 年 9 月 2 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名： 陈丽

导师签名：

陈丽

签字日期： 2010 年 9 月 2 日

签字日期： 2010 年 9 月 3 日

中文摘要

光纤传感作为一门新兴的传感技术,在航空航天、石油、电力、核工业、医疗、军事、科学研究等众多领域得到了广泛的应用。光纤传感器与传统的传感器相比具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀等独特优点,可以在高电压、大噪声、高温、强腐蚀性等特殊环境下工作。利用光纤传感器的不同特点,可以制成满足特殊要求的传感器,进行各种检测。利用光纤传感器的特性对液体介质特性进行检测也是光纤传感的重要应用之一。

液体的浓度是表征溶液特性的主要参量之一。对溶液浓度的测量与控制在生产、生活的各个领域中有广泛的应用,是保证产品质量和提高产品质量的重要手段。国内外已经对液体浓度的光学测量方法进行了大量的研究。

本文在深入研究光纤传感基础理论的基础上,提出了一种基于光纤端面回波的溶液折射率和浓度测量方法,搭建了液体特性检测系统,并通过大量实验验证了该检测方法的可行性,完成了以下工作:

1. 研究光波在光纤内部的传播机理以及在界面上与介质相互作用的特性,针对不同介质形成的界面会有不同的反射情况发生,可以从回波信号中提取出形成界面的介质特性,对不同介质形成的界面进行分析,为液体介质特性检测打下了理论基础。
2. 在深入研究光波与介质相互作用过程的基础上,提出一种基于光纤端面回波的液体介质特性测量方法,并对耦合损耗、微弯损耗、本征损耗以及偏振度等影响因素进行了分析。
3. 针对生产中液体介质特性检测的需要,设计并搭建了一套实验系统,为液体特性检测方法的验证提供了必要条件。实验系统主要由实验光路、光纤探头以及信号的获取与处理三部分组成。
4. 通过对纯净水、90#、93#、97#汽油和-10#柴油的检测验证了本文提出的折射率检测方法,通过对蔗糖溶液、NaCl 溶液和乙醇溶液的检测验证了本文提出的液体浓度检测方法,验证了基于光纤端面回波进行液体特性检测的可行性。

研究工作得到国家自然科学基金(60974110)、教育部博士点基金(200800560020)的资助。

关键词: 光纤传感 折射率 浓度 检测

ABSTRACT

As an emerging sensing technology, fiber sensing has been widely used in many fields such as aerospace engineering, oil domain, electricity field, nuclear industry, medical treatment, military and scientific research. Compared with the traditional sensors, fiber sensors have the unique advantages of anti-electromagnetic interference, electrical insulation and corrosion resistance. They can work normally in extreme environment of high voltage, high noise, high temperature and strong erosion. According to the characteristics of fiber sensors, optical fiber can be made into many kinds of special sensors in order to process the various testing. Liquid characteristics testing is one of the most important applications of fiber sensing.

Concentration is one of the main parameters of liquid solutions. The technology testing and controlling of concentration are wild used in many fields of production and life. They are the important technique means of improving and ensuring product quality. There have been many studies on optical testing methods of concentration at home and abroad.

On the basis of further studies on fiber sensing theory, a new method based on fiber echo signal is proposed to test the refractive index and concentration. An experimental system has been set, and a number of experiments have verified the feasibility of methods proposed. The major study of this dissertation covers the following aspects:

1. It involves the in-depth study on the mechanism of light propagation in fiber and the interaction of light and medium at the interface. The situations are very different from each other. The characteristics of medium can be found out by analyzing the echo signal. It can lay a theoretical foundation for liquid characteristics testing.
2. On the basis of further study on the interaction between light and medium, a method of liquid characteristics testing is proposed. The coupling loss, micro-bend loss, intrinsic loss and polarization fading have been discussed.
3. A set of experimental system has been put up in order to meet the need of liquid characteristics testing and apply the necessary requirement. The optical circuit, fiber probe and the acquisition device are the three main parts of experimental system.
4. A number of experiments have been held to test the performance of

experimental system. The experiments of pure water, gas90[#], gas93[#]、gas97[#] and diesel-10[#] have verified the refractive index testing method. The experiments of sucrose solution, NaCl solution and ethanol solution have verified the concentration testing method. The feasible basis for liquid characteristics testing based on fiber echo signal are proved.

KEY WORDS: Fiber sensing, refractive index, concentration, testing

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 光纤传感.....	1
1.2 光学传感在液体特性测量方面的应用.....	7
1.2.1 双波长光度法.....	7
1.2.2 光纤微弯法.....	8
1.2.3 临界角法.....	10
1.2.4 最小偏向角法.....	11
1.2.5 干涉法.....	12
1.2.6 布儒斯特角法.....	14
1.2.7 椭偏仪法.....	15
1.2.8 表面等离子体共振波法.....	16
1.2.9 光纤光栅法.....	16
1.3 课题的主要研究内容.....	18
第二章 液体的光纤端面回波检测.....	19
2.1 光纤端面反射效应.....	19
2.2 光纤传输损耗.....	25
2.2.1 耦合损耗.....	25
2.2.2 弯曲损耗.....	28
2.2.3 本征损耗.....	32
2.2.4 偏振衰落.....	33
2.3 本章小结.....	35
第三章 实验系统设计.....	36
3.1 实验光路.....	36
3.2 光纤探头.....	37
3.3 信号获取与处理.....	41
3.4 本章小结.....	44
第四章 实验研究.....	45
4.1 液体特性检测.....	45
4.2 实验结果.....	49
4.2.1 折射率检测.....	49
4.2.2 浓度检测.....	54
4.3 实验分析.....	59
4.4 本章小结.....	62

第五章 总结与展望.....	63
5.1 全文总结	63
5.2 工作展望	64
参考文献.....	65
发表论文和科研情况说明.....	70
致 谢.....	71

第一章 绪论

光纤传感是一门新兴的传感技术。光纤传感器的传感灵敏度要比传统传感器高很多，可以在高电压、大噪声、高温、强腐蚀性等特殊环境下工作，具有防电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀等特点^[1-2]。在航空航天、石油、电力、核工业、医疗、军事、科学研究等众多领域得到了广泛的应用^[3-8]。

1.1 光纤传感

根据不同的检测对象、检测环境和系统需求，光纤传感器分为多种类型^[9-12]。

传光型光纤传感器，利用其他元件作为敏感元件完成对被测量变化的感知。敏感元件置于光纤回路之中，光纤仅仅作为光的传播介质，将带有被测量变化信息的光信号传输回来，光纤在光纤传感系统中仅起到传输光信号的作用。

传光型光纤传感器也称非功能型光纤传感器或强度调制型光纤传感器，主要由光源、光纤、光调制器、敏感元件、光电探测器、检测电路等组成。传光型光纤传感器的基本原理是待测物理量引起光纤中的传输光光强变化，通过光强的检测实现对待测物理量的测量。强度调制简单、可靠，主要有反射式强度调制和透射式强度调制^[13-15]。

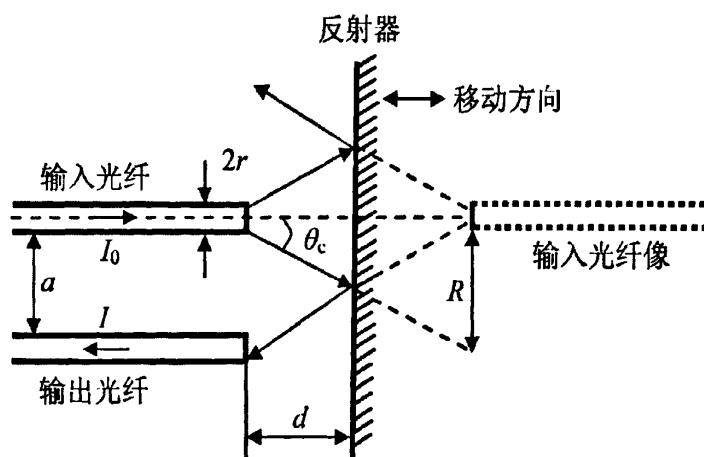


图 1-1 反射式强度调制原理图

反射式强度调制原理如图 1-1 所示，检测光通过输入光纤照射到反射器上，其中一部分光经过反射进入输出光纤，形成检测信号。反射接收信号的强度与反

射器和光纤之间的距离有关。通过计算分析可以得到检测信号与距离之间的确切关系，实现对位移的测量。实际应用中，一般在反射器表面镀一层反射膜或者使用反射镜。

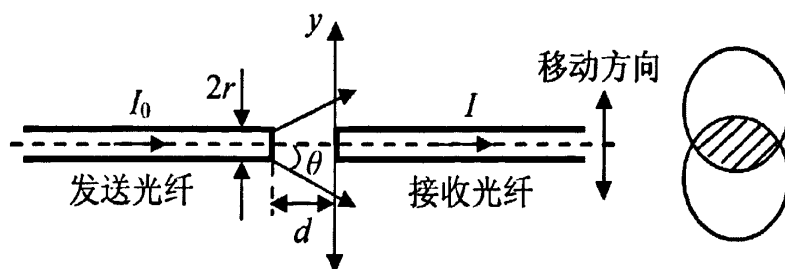


图 1-2 透射式强度调制原理图

透射式强度调制原理如图 1-2 所示，检测光通过发送光纤出射，经过一定距离的传播，其中一部分入射到接收光纤中，形成检测信号。接收光纤移动方向的变化可以改变接收光纤中的光强。当发送光纤与接收光纤纤芯共光轴时，接收光纤接收到的光强最强，光纤重合的面积与接收光纤中的光强成正比，重合面积越大，接收光纤中的光强越强，检测信号越强，反之则越小。

传感型光纤传感器利用对外界信息具有敏感能力和检测功能的光纤作为传感元件，兼具敏感元件和信号传输元件两种功能。这类光纤传感器，往往利用光纤的光学特性随外界因素变化而变化的特点完成传感，光信号的相位、频率、偏振态、光强等等均可以作为感受外界环境温度、光纤弯曲度及其受到的应力等因素向量^[16-20]。

传感型光纤传感器也称功能型光纤传感器，应用最多的是相位调制型光纤传感器或者干涉型光纤传感器，即外界因素使光纤中传输光的相位变化，进而改变出射光(干涉光)的强度变化来达到测量目的。常用的干涉型光纤传感器有 Michelson 干涉式光纤传感器、Mach-Zehnder 干涉式光纤传感器、Sagnac 干涉式光纤传感器、Fizeau 干涉式光纤传感器等。干涉型光纤传感器是高精度光纤传感与测量技术的最佳选择。

Michelson 干涉式光纤传感器如图 1-3 所示。

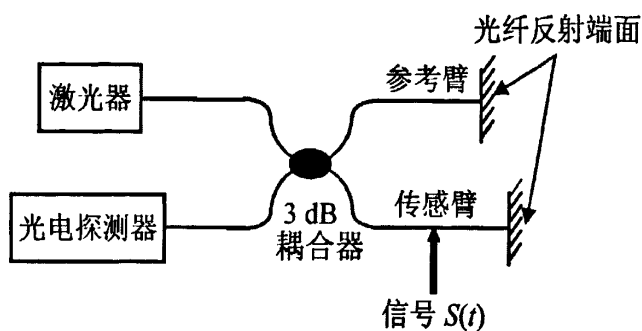


图 1-3 Michelson 干涉式光纤传感器

当被测物理量发生变化时，传感臂中检测光的相位发生变化，从而导致进入光电探测器内的干涉光强发生变化，从而实现位移、应变以及微振动等测量，测量精度高^[21-23]。光电探测器检测到的光强为：

$$I = \frac{1}{2} I_0 \alpha (1 + \cos \Delta \varphi) \quad (1-1)$$

其中 I_0 为激光器耦合到光纤中的光强， α 为系统光衰减系数， $\Delta \varphi$ 为参考臂与传感臂内光的相位差。

Mach-Zehnder 干涉式光纤传感器如图 1-4 所示。

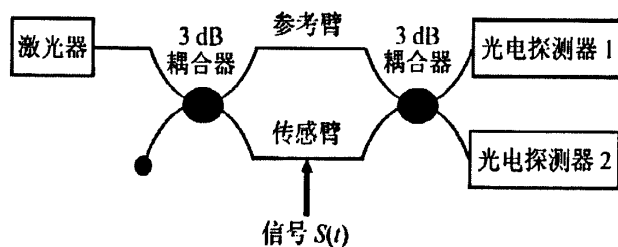


图 1-4 Mach-Zehnder 干涉式光纤传感器

结构上具有对称性，参考臂和传感臂位于两个耦合器之间。其中参考臂与被测物理量隔绝，传感臂感知被测信号源进行定位。被测物理量的变化可以导致传感臂内光信号的相位发生变化，参考臂内的光由于参考臂与被测物理量隔绝而保持原来的相位，光电探测器通过检测两臂输出的干涉光变化，进行被测物理量的测量^[24-25]。两探测器探测到的光强可以表示为：

$$I = \frac{1}{2} I_0 \alpha (1 \pm \cos \Delta \varphi) \quad (1-2)$$

若光电探测器 1 检测到的光强取“+”，光电探测器 2 检测到的光强取“-”，则两个光电探测器检测到的光强之和为 $I_0 \alpha$ 。

Sagnac 干涉式光纤传感器如图 1-5 所示。

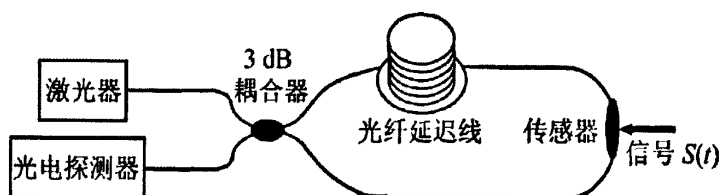


图 1-5 Sagnac 干涉式光纤传感器

由于仅使用一根光纤，可以避免外界其它因素产生的光相位波动所带来的串音。采用光纤中的一段作为传感器，形状上不受限制，可以利用外界因素导致的顺时针光的相位变化或者逆时针光的相位变化，进行温度、应力、应变、声波定位等测量^[26, 27]。光电探测器所检测到的干涉光光强可以表示为：

$$I = \frac{1}{2} I_0 \alpha (1 + \cos(\varphi - \varphi' + \pi)) \quad (1-3)$$

其中 φ 为逆时针光的相位， φ' 为顺时针光的相位， π 为逆时针光两次经过耦合器所产生的相位变化。

Fizeau 干涉式光纤传感器如图所示。

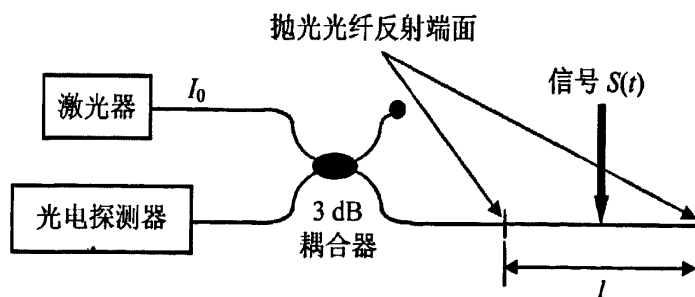


图 1-6 Fizeau 干涉式光纤传感器

传感部分只有一根光纤，但光纤中有两个反射端面，不仅受外界因素干扰小

而且结构简单。 l 为传感器的探测光纤长度。从耦合器出来的光到达第一个光纤反射端面时,一部分光反射回来,另一部分光穿透过去后沿着长为 l 的探测光纤传播到达第二个光纤反射端面,然后再反射回来^[28, 29]。这两束反射光产生干涉,光电探测器探测到的光强为:

$$I = 2I_0\alpha^2 R_f \sqrt{1 - R_f} \cos \Delta\phi \quad (1-4)$$

其中 I_0 为激光器耦合到光纤中的光强, α 为耦合器的耦合系数, R_f 为光纤端面反射率, $\Delta\phi$ 为反射光的相位差。

根据传感信号寄生的形式不同,光纤传感器可以分为强度调制、频率调制、相位调制、偏振调制和波长调制五种基本形式。

强度调制型光纤传感器通过检测光纤中光强的变化来检测与之相对应的外界物理量变化。光纤的弯曲损耗、散射损耗、耦合损耗、端面反射损耗、物质的吸收特性以及机械、化学、环境等激励都会一定程度上引起光纤内光强的变化^[30-31]。

频率调制型传感器利用检测光纤中光波频率变化反映出被测量的改变。通常光纤在其中只起到传光的作用,所以系统常采用传光型光纤传感器。利用光的散射、辐射以及多普勒效应,可以实现对速度、加速度、振动、压力、温度等物理量的传感检测^[32-34]。

相位调制传感器通过检测光纤中光波的相位变化来实现对相对物理量变化的测量。由于被测量的作用,使经过敏感元件的光波相位发生变化。通常利用干涉法来对这种相位的变化进行检测,从而得到被测对象的具体信息。可以利用光弹效应、磁致伸缩效应和电致伸缩效应等实现压力、振动、电场磁场等的测量^[35-36]。

偏振调制型光纤传感器利用光的偏振态变化不定期传递被测对象信息。常见的有利用光在磁场中介质内传播的法拉第效应制成的电流、磁场传感器;利用光在电场中压电晶体内传播的泡尔效应制成的电场、电压传感器;利用物质的光弹效应制成的压力、振动传感器;以及利用光纤双折射效应制成的压力、温度传感器等^[37-39]。

波长调制传感器常用于化学分析、辐射分析以及光学滤波器相关系统之中^[40, 41]。

五种类型光纤传感器特点如表 1-1 所示:

表 1-1 光纤传感器对比

传感器调制方式	传感原理	适用被测量	传感类型
强度调制	透射率变化、光纤微弯损耗、振动膜反射、分子吸收、光纤漏泄膜	温度、振动、压力、加速度、位移、液位、气体浓度、液体浓度	传光型
频率调制	多普勒效应、受激喇曼散射、光致发光	速度、流速、振动、加速度、温度、气体浓度、液体浓度	传光型
相位调制	磁致伸缩、电致伸缩、光弹效应、干涉	电流、磁场、电场、电压、振动、位移、压力、温度、加速度	传感型
偏振调制	法拉第效应、泡克尔斯效应、双折射效应、光弹效应	电流、电压、磁场、电场、温度、位移、振动、压力、加速度	传感型、传光型
波长调制	荧光辐射、黑体辐射、SPR 效应	温度、金属折射率、液体折射率、液体浓度、气体浓度、应变	传感型、传光型

与传统的传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀等独特优点,出众的安全性和可靠性使得光纤传感有效地应用于各种大型机电、石油化工、工矿场地等强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中。光纤传感器还具有重量轻、体积小、易弯曲的特点,可以利用光纤制成不同外形尺寸的各种传感器,适用于航空、航天、石油化工等环境特殊、对空间有特别要求的检测。利用光纤传感器灵敏度高的特性,可以制成测量加速度、辐射、磁场等物理量的化学传感器和生物传感器等。由于光纤的传输损耗很小,光纤传感技术易与遥测技术相结合,实现对被测现场的远距离监控。

目前,光纤传感在温度、压力等几个方面已经商业化。光纤温度传感器可以探测到 2000 摄氏度的高温,灵敏度达到 1 摄氏度。利用 GaAs、CdTe、GaP 等

半导体材料的吸收端温度变化制成的光纤温度传感器精度达到 0.5 摄氏度, 用于低温范围的光纤温度传感器, 可测 0.1 摄氏度甚至更小的温度变化。光纤振动传感器在 20~2000Hz 时, 可感知最小 $0.1\mu\text{m}$ 的振幅。光纤位移传感器分辨率可以达到 0.01mm, 而光纤微位移传感器可以测量 8nm 的微小位移, 动态范围达到 110dB。高灵敏度的光纤加速度传感器灵敏度达到 $5\times 10^{-10}\text{g}$, 测量精度优于 $1\mu\text{g}$ 。光纤测距仪测量范围不小于 30m, 而精度达到 1%。

1.2 光学传感在液体特性测量方面的应用

在生产、生活的各个领域, 液体的浓度是表征溶液特性的主要参量之一。对溶液浓度的测量与控制在造纸、化工、制糖、食品、制药等行业中有着广泛的应用, 是保证产品质量和提高产品质量的重要技术手段。国内外已经对液体浓度的光学测量方法进行了大量的研究。双波长分光光度法和光纤微弯折光法是其中比较有代表性的光学测量方法。

1.2.1 双波长光度法

双波长光度法的基本原理: 从光源发出的光分成两束, 通过各自的单色器, 成为具有任意波长差的两束单色光 λ_1 、 λ_2 , 通过切光器的调制, 两束单色光以一定的时间间隔交替通过盛有试样溶液的同一吸收池, 透射光经过监测系统, 在数字电压表上显示出在 λ_1 、 λ_2 处的吸光度差 ΔA , 根据朗伯-比尔定律:

$$\Delta A = A_{\lambda_2} - A_{\lambda_1} = (\varepsilon_{\lambda_2} - \varepsilon_{\lambda_1})bc \quad (1-5)$$

式中 ε_{λ_1} 和 ε_{λ_2} 分别表示在波长 λ_1 和 λ_2 处待测物的摩尔吸光系数, b 和 c 分别表示吸收池的光程和待测物的摩尔浓度。吸光度 ΔA 也可用 λ_1 、 λ_2 的透射光强度比与其入射强度比的对数之差值表示:

$$\Delta A = \log \frac{I'_{\lambda_1}}{I'_{\lambda_2}} - \log \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \quad (1-6)$$

式中 I'_{λ_1} 和 I'_{λ_2} 分别为 λ_1 、 λ_2 的透射光强度, I_{λ_1} 和 I_{λ_2} 分别为 λ_1 、 λ_2 的入射光强度。

在双波长分光光度法中, 波长 λ_1 和 λ_2 的组合, 即测量波长与参比波长的选择, 是测量的关键问题。双波长法的主要优点是抗干扰能力强, 当试样存在吸收和散射干扰物时, 能够进行区分, 检测出待测物的吸光度, 在一定程度上消除浑浊背

景的干扰, 进行样品分析^[42-43]。该检测法的缺点是由于双波长分光光度计光路结构和电路较为复杂, 仪器价格亦较昂贵。

此外, 还有原理相似的三波长分光光度法, 即选取三个波长测量吸光度, 推导出吸光度与浓度的关系式, 通过吸光度差值得到待测物浓度值。与双波长法相比较, 三波长法更能有效地消除散射干扰物的影响, 因而更适合复杂样品分析, 并且测量精度较双波长法高。但是在实际工作中, 三波长法中的波长选择、计算更加复杂, 仪器价格更为昂贵。

1.2.2 光纤微弯法

光纤微弯法采用光纤 U 型敏感元件进行测量, 如图 1-7 所示。

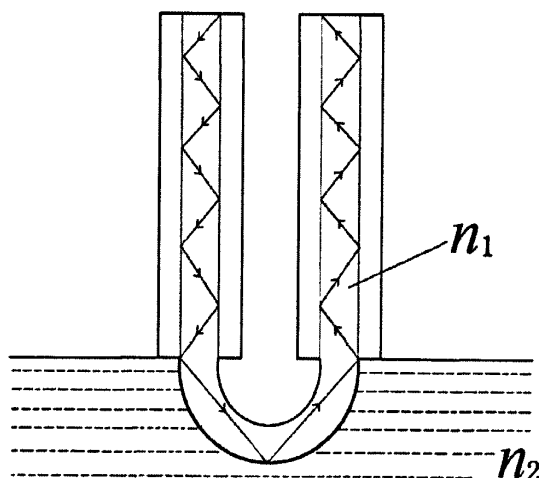


图 1-7 光纤 U 型敏感元件

将光纤 U 型敏感元件从空气放入液体中时, 由于液体的折射率大于空气的折射率, 致使光在纤芯中传播的光束模式发生变化, 部分光由低阶模式转化为高阶模式, 导致一部分入射光不再满足全反射的条件, 在光纤弯曲部分与被测液体的交界面处发生光的折射现象, 致使部分能量损失。在不满足全反射的条件下, 光波入射到光纤与被测液体的交界面时, 振幅反射系数为:

$$\rho_{\perp} = 1 - \frac{2n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (1-7)$$

$$\rho_{\parallel} = 1 - \frac{2n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (1-8)$$

式中振幅反射系数 $\rho_{\perp} < 1$, $\rho_{\parallel} < 1$, 由于入射光在交界面上的功率反射系数为:

$$R = \frac{1}{2}(\rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2) \quad (1-9)$$

则功率发射系数 $R < 1$, 说明一部分光从交界面出折射出去。

当 $n_2 \approx 1$ 时, 功率反射系数 $R \approx 1$, 说明在空气中光纤传感器在 U 型敏感元件部分几乎发生全反射, 仅有很少一部分光折射到空气中去; 而当 $n_2 \approx n_1$ 时, 功率反射系数 $R \approx 0$, 说明当与纤芯接触的被测液体介质折射率与纤芯的折射率相近时, 几乎没有光从 U 型敏感元件处发生全反射, 而是全部折射到被测液体介质中去, 在接收端光强微弱, 几乎没有信号。由于接收端信号的强弱正比于光纤中光信号的强度, 同时, 对于同一种液体来说, 液体的折射率与液体的浓度存在一定的关系, 这样就可以通过接收端的信号强弱得到被测液体的浓度变化^[44, 45]。

作为光纤传感器的一种应用, 在液体浓度测量的过程中, 光纤传感器在接触液体后, 光的反射量发生变化, 回波信号通过光纤传送到接收装置, 再进行相应的分析处理, 从而得到液体浓度的信息。反射光的变化源自被测液体折射率的变化, 而折射率又与浓度有着对应的关系。所以, 液体浓度的检测重点在于液体折射率的测量。

浓度检测多用于工农业生产、食品加工, 液体介质储运等行业之中, 对生产和储运过程中的液体进行实时监测, 以保证生产质量。生产过程中, 液体的输送多采用方便、快捷、经济的管道输送的方式, 在液体介质随管道输送的过程中, 要对管内介质进行实时监测, 所以生产过程中要求对管输液体的折射率进行快速准确的测量, 以实现对其浓度的检测。

采用光学测量方法对液体介质浓度检测多通过折射率测量来实现。折射率是

表征透明介质光学性质的重要参数之一，与介质的其他重要参量如温度、浓度、纯度、密度、色散、热光系数等有密切联系。因此，可以通过测定折射率的空间分布和随时间的变化，实现对物质材料的其他各种相关物理量的定性甚至定量分析。精确测定介质折射率具有重要意义^[46-48]。

目前，测量折射率的方法有许多种。传统方法有临界角法或阿贝折光仪、最小偏向角法、干涉法（如牛顿环法、劈尖干涉法、迈克尔逊干涉仪等）、布儒斯特角法等。近年来随着计算机信息技术、光纤传感、光谱分析、CCD测量等技术的飞速发展，新的折射率测量方法和测量仪器也随之产生，如光纤杨氏干涉法、光纤光栅法、光纤端面回波法、光纤表面等离子体共振波法等。从测量原理进行划分，可以主要归结为三类，即几何光学法、波动光学法和光纤传感法。

几何光学方法，即根据折射定律、反射定律并且通过测定有关角度来得到折射率，如临界角法、最小偏向角法等。波动光学法，即根据光波通过介质后其相位的变化或偏振状态的变化来得到折射率，如布儒斯特角法、干涉法、椭偏仪法等。光纤传感法，即将光纤传感器运用于介质折射率的测量，利用材料对光的反射作用，通过对入射光的光强进行调制，并测量材料的反射率，在已知周围介质折射率的情况下间接地测量材料的折射率，如光纤端面回波法等。下面对各类型的几种主要测定方法进行重点介绍和分析。

1.2.3 临界角法

光线从光密介质进入光疏介质，可发生全反射，此时的入射角称为临界角。反过来，如果光线自光疏介质进入光密介质时，当光线以 90° 角入射（掠射）时仍有光线进入光密介质，此时的折射角也称临界角。通过临界角测定折射率的方法称临界角法，亦称掠射角法，其原理如图 1-8 所示：待测液体和棱镜的折射率分别为 n 和 n_1 ，入射光线以 90° 入射角从棱镜 AB 端入射，经过两次折射后从 BC 端以出射角 i 射出。待测液体的折射率可以表示为：

$$n = \sin \varphi \sqrt{n_1^2 - \sin^2 i} - \cos \varphi \sin i \quad (1-10)$$

其中： φ 为棱镜夹角。由于棱镜折射率 n_1 和棱镜夹角 φ 均为已知，待测液体折射率仅与临界出射角有关，故可测量出射角，然后得到待测液体的折射率。

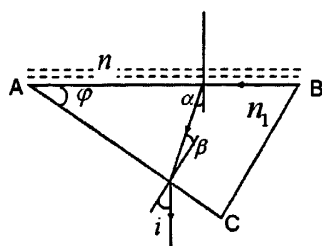


图 1-8 临界角法测量原理图

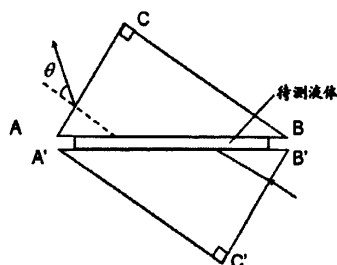


图 1-9 阿贝折射仪的棱镜图

阿贝折射仪就是基于这个原理设计的，主要部件由两个直角棱镜组成，如图1-9所示。照明棱镜 $A'B'C'$ 的 $A'B'$ 面磨砂，可提供漫射光源，折射棱镜 ABC 为标准直角棱镜，折射率为 N 。如果 $n < N$ ，入射到 AB 面上的光线，经棱镜 ABC 两次折射后，由 AC 面射出的光束，在望远镜视场中将看到半明半暗的视场，明暗分界线就对应于掠面入射光束，由此测定出 AC 面上的临界出射角。由于阿贝折射仪已经将待测液体的折射率 n 对应到刻度盘上，测量时只要将望远镜的叉丝对准明暗交界线，就可以从刻度盘上直接读出 n 的值。

利用临界角法或阿贝折射仪测量液体折射率所需液体量很少，操作简单，并且具有较高的精度，但是因为阿贝折射仪是根据全反射原理来测量的，它所用棱镜的折射率限制了它所能测量的范围，所以用阿贝折射仪测量液体的折射率范围一般为 $1.3\text{--}1.7$ [49, 50]。

1.2.4 最小偏向角法

最小偏向角法测量液体折射率，类似分光计测定玻璃棱镜折射率的原理，采用透明平板光学玻璃制成一个“三棱杯”，在其内充满待测折射率的透明液体，并将其看成一个没有玻璃包围、透明的“液体三棱镜”。

如图 1-10 所示，当入射光线 PD 以入射角 α 射入顶角为 A 的“液体三棱镜” AB 的侧面时，经两次折射后，沿 FP' 方向射出，光线 PD 与 FP' 之间的夹角称为偏向角 δ 。对顶角 A 固定的棱镜，偏向角 δ 大小随着入射角改变而改变，当 $\alpha = \varphi$ 时，偏向角有一极小值 $\delta_{\min}$ 与 α 对应，且偏向角最小的光线在镜内平行于等腰棱镜的底边，并对称的进入和射出棱镜。易推导出液体折射率的计算公式：

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin(\delta_{\min} + A)/2}{\sin A/2} \quad (1-11)$$

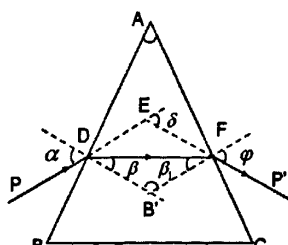


图 1-10 最小偏向法测量原理图

通过分光计可以测量出该“三棱杯”顶角 A 以及对某种单色光的最小偏向角, 代入即可算出透明液体对空气的相对折射率。

最小偏向法测量液体折射率, 测量方法简单, 精度也很高, 但对待测样品的要求较高, 它除了需将样品加工成三棱镜外, 还对所加工成的三棱镜顶角及其两个平面的平面度有较高的精度要求, 这样会增加测量成本^[51]。

1.2.5 干涉法

当入射光的一部分通过介质后, 光程发生改变, 和参考光有一定的光程差。当光程差满足一定的条件, 这两束光就发生相消干涉或相长干涉。而光程的改变与介质折射率有直接的关系, 由此可以通过测量干涉条纹的间距来测量介质的折射率, 这就是干涉法的测量原理。

干涉法测量介质折射率的应用非常多, 常用的有迈克尔逊干涉仪、瑞利干涉仪、牛顿环仪、劈尖干涉法、法布里—珀罗 (F-P) 干涉法、马赫—曾德干涉法等。下面主要介绍瑞利干涉仪法、牛顿环仪法、劈尖干涉法^[52-57]。

(1) 瑞利干涉仪法

该方法测量液体折射率的基本光路图如图1-11所示。在正常情况下, 光源 A 发出的光经过干涉仪以后, 经过 L_1 后成为平行光束, 分为二束, 通过狭缝后经过 T_2 、 D 、 L_2 和 T_1 、 C 、 L_2 到达 E (其中 C 、 D 为可调节补偿器)。若两束光光程相等, 则两光束在 B 点发生相长干涉, 0 级干涉条纹将出现在视场中央, 其左、右依次为暗、明相间的条纹。

测量时, T_2 装上蒸馏水作为标准液体, T_1 装上待测液体, 于是两光束由于所经过的液体不同, 出现了光程差, 导致干涉条纹侧移。调节补偿器使两光束的程差为0, 0 级条纹将回到视场中央。

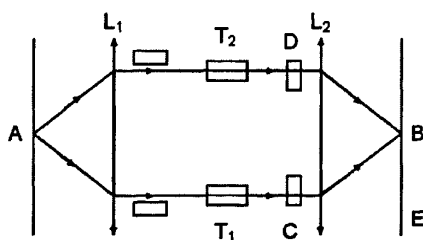


图 1-11 瑞利干涉仪测量液体的基本光路

通过增加或减小液室长度增大或减小光程差, 使得两光束的光程差在补偿

器的补偿能力范围内。每移动一级干涉条纹, 补偿器旋转补偿的光程差为 $\Delta = K\lambda$ (K 为干涉亮纹侧移的级数, λ 为所用光源的波长)。两束光的光程差为 $\Delta = L\Delta n$, 其中 L 为 T_1 、 T_2 室的长度, Δn 为二液体折射率之差, 于是 $\Delta n = K\lambda/L$, 分别用 n_1 、 n_2 表示待测液体和蒸馏水的折射率, 则由此得到待测液体的折射率为:

$$n_1 = n_2 + K\lambda/L \quad (1-12)$$

(2) 牛顿环仪法

由一个曲率半径相当大的平凸透镜与另一平面玻璃组成了利用牛顿环测量液体折射率的装置,即牛顿环仪,如图1-12所示。在两玻璃面之间,形成很薄的类似劈尖的空气层。单色光源S发出的光束,经透镜L准直后,再经倾斜 45° 的半透明平面镜M反射后,垂直地照射到平凸透镜的表面上。入射光在空气薄层的上下两表面反射后,其中一部分穿过平面镜M,进入显微镜T。在显微镜中可以观察到以O点为中心的环形干涉条纹,称为牛顿环,如图1-13所示。

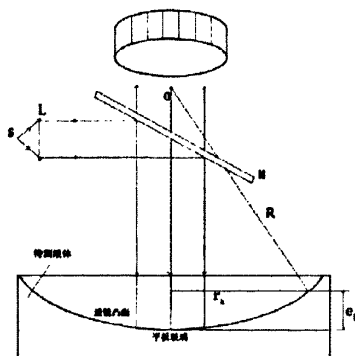


图 1-12 牛顿环仪

这是一种用分振幅法产生的干涉现象,其干涉条纹的形状取决装置空气的厚度。如果在透镜凸面和平板玻璃板间充满待测液体,形成一层液体薄膜,厚度从中心接触点到边缘逐渐增加。此时,同样会产生干涉条纹。

由牛顿环干涉原理知,与第 k 级条纹对应的两束相干光的光程差为 $\delta_k = 2Ne_k + \lambda/2$,其中 N 为待测液体的折射率。另

$R^2 = r_k^2 + (R - e_k)^2$, 因为 $e_k \ll R$, 所以 $e_k = r_k^2 / 2R$ 。所以, $\delta_k = (Nr_k^2 / R) + (\lambda/2)$ 。当 $\delta_k = (2k+1)\lambda/2$ 时,干涉条纹为暗纹,

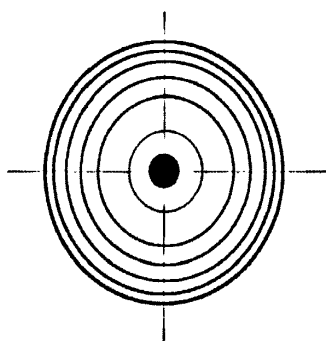


图 1-13 牛顿环

$$r_k^2 = kR\lambda / N \quad (1-13)$$

由于牛顿环中心不是一点,设附加光程差为 x ,则 $\delta_k = 2(Ne_k \pm x) + (\lambda/2)$,取 m 、 n 级暗条纹,测出直径分别为 D_m 、 D_n 。消去附加光程差 x ,得待测液体折射率为:

$$N = \frac{4(m-n)R\lambda}{D_m^2 - D_n^2} \quad (1-14)$$

(3) 劈尖干涉法

两块平面玻璃片A、B和铜质细丝组成劈角 θ 很小的透明劈尖,两玻璃片的交

线成为棱边，在平行于棱边的同一条直线上劈尖的厚度相等。当平行单色光入射两玻璃片时，在劈尖上下两个表面反射的光波将互相干涉，这种干涉为等厚干涉。利用劈尖干涉现象可以测量液体的折射率。

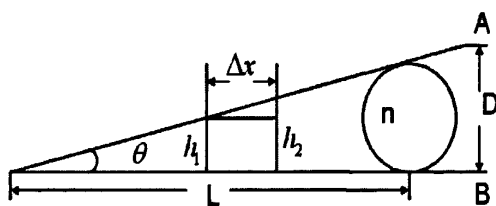


图 1-14 劈尖干涉原理图

如图 1-14 所示，波长为 λ 的单色光垂直照射到玻璃板上时，由液体膜或空气膜上、下表面反射光的光程差为： $\Delta = 2nh + \lambda/2$ ，其中 $\lambda/2$ 为光从光疏到光密媒介交界面反射时的附加光程差， h 为 k 级劈尖薄膜的厚度， n 为液体或空气的折射率。

又由相邻暗纹之间的光程差关系，可得相邻明条纹（或暗条纹）所在位置的薄膜厚度差为： $\Delta h = \lambda/2n$ ，设条纹间距为 $\Delta x_{\text{液}}$ ，则 A 、 B 板间的夹角可表示为 $\theta = \Delta h / \Delta x_{\text{液}} = \lambda/2n\Delta x_{\text{液}}$ ，劈尖膜角度为： $\theta = d/l$ ， l 为 A 、 B 板的交棱到细丝的距离， d 为细丝直径，则有 $\lambda = (2dn/l)\Delta x_{\text{液}}$ ；同理，若劈尖中间是空气，则 $\lambda = (2d/l)\Delta x_{\text{空}}$ ，于是： $n = \Delta x_{\text{空}} / \Delta x_{\text{液}}$ 。只要测出同一劈尖下的空气膜和液体膜的条纹宽度，即可求出液体的折射率。

1.2.6 布儒斯特角法

一束自然光在两种介质界面上发生反射和折射时，反射光和折射光的传播方向由反射定律和折射定律来确定，这两束光的偏振态由菲涅尔公式确定。除入射角为 0° 和 90° 两种情况以外，一般反射光和折射光都为部分偏振光。特殊情况下，当入射角和折射角之和等于 $\pi/2$ 时，反射光是平面偏振光且振动矢量垂直于入射面，入射光中平行于入射面的分量没有被反射，100% 透过，此时透射光的偏振度最高。这时入射角称布儒斯特角，表示为 i_B ，如图 1-15 示。

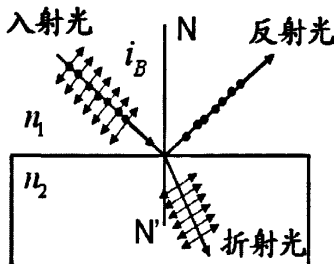


图 1-15 布儒斯特角测量原理

n_1 、 n_2 分别为入射光和折射光所在空间介质的折射率，根据布儒斯特定律，可知布儒斯特角与两种介质折射率的关系为： $\tan i_B = n_2 / n_1$ 。如果让振动方向平行于入射面的偏振光入射到两种介质分解面上，当入射角为 i_B 时，反射光强为 0；如入射空间介质为空气，布儒斯特定律简化为： $\tan i_B = n_2$ ，只要测得 i_B 即可计算该介质的折射率。

布儒斯特角法多用于测量不透明或半透明的晶体的折射率，它所需的仪器设备比较简单，对样品的要求也不高，但是其缺点也很明显，就是精度不高^[58]。

1.2.7 椭偏仪法

椭偏仪是基于椭圆偏振测量原理的测量仪器，常用于测量薄膜的厚度和折射率。如图 1-16，一束已知偏振态的信号光入射到薄膜表面，光束与薄膜发生作用，使出射光的偏振态发生变化(图 1-16 中由线偏振态变为椭圆偏振态)。因变化与薄膜的厚度、折射率等参量相关，通过测量偏振态的变化，即可反演获得薄膜的参量。

椭偏仪的测量值 Y 和 D 称为椭偏参量。椭偏参量描述了探测光束的偏振变化，其中 $\tan Y$ 代表光 p 分量和 s 分量复反射系数比的实数值， D 表示光 p 分量和 s 分量的相对相位变化。椭偏参量和菲涅耳反射系数的关系为：

$$r = R_p / R_s = \tan Y e^{iD} \quad (1-15)$$

其中 R_p 和 R_s 分别表示偏振光相对于入射面的平行分量和垂直分量。

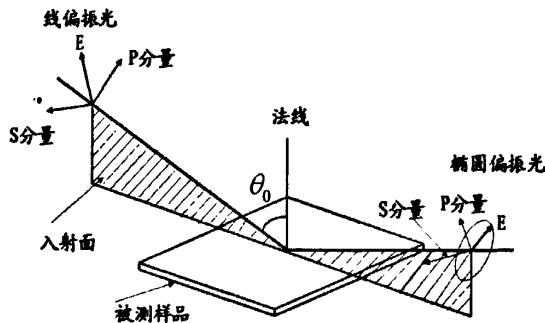


图 1-16 椭偏仪的测量光经过样品表面时偏振态的变化

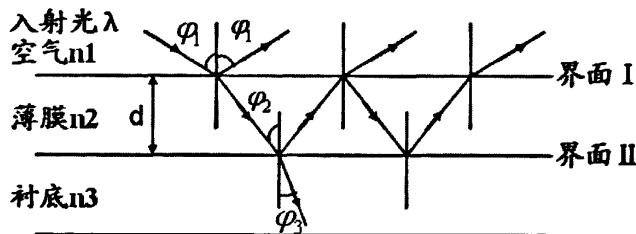


图 1-17 入射光在薄膜中传播示意图

对于如图1-17所示的单层薄膜, (1) 式可写成薄膜参量为变量的函数形式, 即椭圆方程:

$$\tan Y e^{iD} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-2i\delta}} \times \frac{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-2i\delta}}{r_{1s} + r_{2s} e^{-2i\delta}} = f(n_1, n_2, n_3, d, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \lambda) \quad (1-16)$$

其中 $n_1, n_2, n_3, d, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \lambda$ 的物理意义如图1-17所示; $r_{1p}, r_{2p}, r_{1s}, r_{2s}$ 由菲涅耳公式给出。由椭圆仪测出椭圆参量 Y 和 D 后, 通过数值反演计算即可求出薄膜参量。

椭圆仪优点明显, 可以实现非接触性测量, 测量灵敏度和精度都很高, 但也存在一定的局限性, 这主要是由于模型的任意性、变量之间的相关性以及数据分析过程的复杂性造成的^[59, 60]。

1.2.8 表面等离子体共振波法

表面等离子体共振 (SPR) 效应是一种发生在光密介质/金属/光疏介质三层结构之间的物理化学现象。当光线以大于临界角的入射角从光密介质向光疏介质传播时, 在界面处将会发生全内反射, 但此时光波的电场强度在界面处并不为零, 仍部分进入光疏介质形成消失波, 消失波的有效深度为 100-200nm。当金属膜厚度 (约 50nm) 小于消失波厚度时, 消失波可引发金属表面的自由电子产生表面等离子体波 (SPW)。表面等离子体共振是指有外来光照射且满足入射光水平传播常数与等离子体波的波矢量在数值上相等时, 金属薄膜中的等离子体激元和光波发生共振。这时, 入射光的部分能量转给等离子体波, 反射光强达到最小。表面等离子体波反射光光强对环境介质折射率的变化非常敏感, 当介质折射率发生变化是, 光谱特性就会发生变化, 通过对光谱特性的检测就可以得到所测介质的折射率。

基于 SPR 效应设计的传感器有棱镜型 SPR 传感器、光纤 SPR 传感器等。应用棱镜型 SPR 传感器测量折射率, 其结构简单, 分辨率高, 便于实时检测, 并且可以对具有不同浓度、不同属性的溶液进行测定, 但会受到其他磁场影响, 对某些物质测量不准确。与棱镜式 SPR 传感器相比, 光纤 SPR 传感器具有体积小、操作简单、抗电磁干扰能力强、易于集成和实现分布式传感、可在线检测、安全性高, 可远距离遥控遥测等优点^[61-64]。

1.2.9 光纤光栅法

光纤光栅是利用石英光纤的紫外光敏特性将折射率周期变化的结构做在光纤上的一种光学器件, 根据其周期的不同可以分为短周期光纤光栅 (FBG) 和长周

期光纤光栅(LPG)两种。研究表明, LPG的耦合谐振峰中心波长随外界折射率等参数变化的响应非常灵敏。当外界折射率等参数改变将引起纤芯和包层折射率以及纤芯和包层半径的变化, 从而影响光纤中的传输模式, 并改变光栅的周期。这将导致导模和包层模之间耦合的相位匹配波长及耦合系数改变, 并最终表现为光栅吸收峰中心波长和强度的变化。因此, 利用外界折射率变化与谐振峰中心波长移动量的对应关系, 在未知环境中, 就可以通过观察光栅谐振峰中心波长的移动来确定该环境折射率的改变, 从而达到传感测量的目的^[65-66]。

LPG的耦合峰中心波长的计算公式为 $\lambda_{LP} = (n_{co} - n_{cl})\Lambda$, 谐振峰中心波长移动量随外界折射率的变化关系式为:

$$\frac{\Delta\lambda_{LP}}{\lambda_{LP}} = \left[\frac{1}{n_{co} - n_{cl}} \frac{d(n_{co} - n_{cl})}{dn_{ex}} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dn_{ex}} \right] \Delta n_{ex}$$

(1-17)

其中, λ_{LP} 为LPG基模与包层模耦合时的谐振波长, n_{co} 、 n_{cl} 分别为基模和包层模的有效折射率, Λ 为光栅的周期, Δn_{ex} 为外界折射率变化量, $\Delta\lambda_{LP}$ 为LPG耦合谐振峰中心波长的移动量。

LPG的折射率传感测量原理就是通过仿真计算和实验的方法找到中括号内的折射率敏感系数, 然后建立起外界折射率变化 Δn_{ex} 与谐振峰中心波长移动量 $\Delta\lambda_{LP}$ 的对应关系。

不同的测量方法有其各自的优点和局限性, 要根据实际情况和要求进行选择。

表 1-2 几种代表性折射率测量方法比较

测量方法	测量对象	优点	缺点
临界角法	液体、晶体	器件简单, 操作方便, 需要液体少, 测量成本低, 测量精度较高, 能测到4位有效数字	测量范围受限 (适合折射率 1.3-1.7), 不适合有毒、易挥发、刺激性液体测量
最小偏角法	液体、晶体	测量精度高, 一般能测到5位有效数字	对待测样品要求高, 对所需三棱镜加工精度要求高, 测量成本高
布儒斯特角	不透明或半透明晶体	仪器简单, 对样品要求不高,	精度较低
干涉法	气体、液体晶体	干涉图像稳定、不易受外界干扰, 分辨清晰	光路调整相对复杂, 手工操作强度大, 测量过程时间长, 自动化程度较差, 实际操作困难人, 重复性差, 结果精度不高

椭圆仪法	薄膜	实现非接触性测量, 测量灵敏度和精度很高	模型建构随意性较大, 变量相关性及数据分析过程较复杂
表面等离子体共振波	液体、固体	结构简单, 分辨率高, 精度高, 便于实时在线检测	传感探头易受环境介质腐蚀, 影响测量稳定性和重复性; 外界各种场的影响
光纤光栅法	气体、液体	体积小, 灵敏度高, 抗电磁干扰, 精度高, 操作简单, 可实时在线检测	外界多参数交叉敏感问题较严重

1.3 课题的主要研究内容

目前, 众多的研究领域涉及到液体浓度的检测, 而快速准确地液体特性检测也发挥着更加突出的作用。本文提出了一种基于光纤端面回波的液体介质特性检测方法, 通过对光纤端面回波的检测, 测量液体折射率, 从而获得被测液体的浓度信息。论文从原理上进行了深入的分析, 为液体介质的浓度检测提供了理论依据, 并且通过大量实验对本文提出的基于光纤端面回波的液体特性检测方法进行可行性验证, 主要工作包括以下几方面:

1. 研究光波在不同介质界面上以及光纤内部的传播机理等特性, 为液体介质浓度测量打下理论基础。
2. 在深入研究光波与介质相互作用过程的基础上, 提出一种基于光纤端面回波的液体介质浓度测量方法, 并对耦合损耗、微弯损耗、本征损耗以及偏振度等影响因素进行了分析。
3. 针对生产中液体浓度的检测需要, 搭建了一套液体浓度在线检测系统, 并通过大量实验验证了利用光纤端面回波检测液体介质特性的可行性。

第二章 液体的光纤端面回波检测

在对各种折射率检测方法进行深入研究的基础上,本课题采用一种光学的方法,利用光纤对液体折射率进行快速检测。通过对光纤端面的回波信号进行处理,可以计算分析得到液体的折射率。光纤端面与被测液体接触形成一个特殊的界面,当测量光传输到这个界面的时候,会有一部分光被反射回来,另一部分透射出界面,继续传播。反射光强度与测量光强度之比为测量光在该界面处的反射率,在光纤纤芯折射率一定的情况下,该反射率与被测液体的折射率有着密切的关系。不同被测液体与检测光纤所形成的界面相互区别,可以产生不同的反射率。而端面的回波信号对这种变化非常灵敏,可以准确地捕捉到被测液体的信息。此外,测量光和反射光在耦合和传播过程中不可避免的会产生损耗,对检测结果产生影响,所以要对各种因素造成的损耗进行分析,以保证检测的准确性。

2.1 光纤端面反射效应

如图 2-1 所示,将光纤端面浸入被测液体之中,端面与被测液体间形成一个界面,光源通过光纤将光入射到液体中时,会在这个界面上发生反射和折射现象,一部分光进入被测液体之中,一部分光则反射回光纤^[67, 68]。

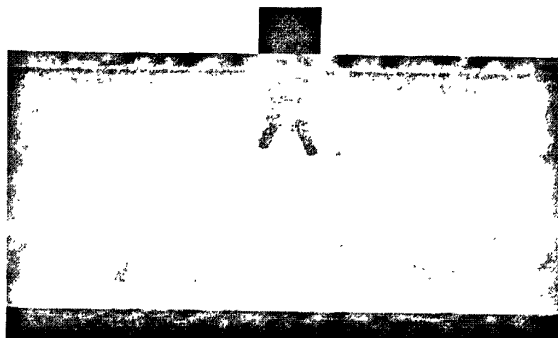


图 2-1 液体检测示意图

考虑平面电磁波从折射率为 n_1 的介质 1 传输到折射率为 n_2 的介质 2,如图 2-2 所示,即光从光纤中传输到被测液体中,并且被测液体折射率 n_2 小于光纤纤芯的折射率 n_1 ,如图 2-2。 $\vec{k}_i$, $\vec{k}_r$ 和 $\vec{k}_t$ 分别表示入射光、反射光和折射光波的波矢量,

由于入射光和反射光均在同一介质内, 所以 $k_i = k_r$ 。 θ_i 、 θ_r 和 θ_t 分别表示入射光、反射光和折射光波方向与两介质边界法线的角度。

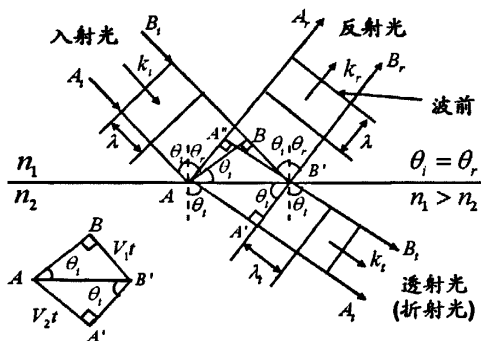


图 2-2 平面电磁波在界面上的传播

入射光在界面反射时, 只有 $\theta_r = \theta_i$ 的反射光因相长干涉而存在, 因为 A_i 波与 B_i 波同相, 所以反射波 A_r 与 B_r 必然同相, 而其他角度的反射光都因不同相而相消干涉。

折射光 A_t 与 B_t 在介质 2 中传播, 因为 $n_1 > n_2$, 所以光在介质 2 中的速度要比光在介质 1 中的大。当波前 AB 从介质 1 传输到介质 2 时, 由于同一波前上的点相位相同, B_i 波上的相位点 B 经过一段时间到达 B' , 同时 A_i 波上的相位点 A 到达 A' 。波前 $A't$ 波与 $B't$ 波仍然具有相同的相位, 并且只有折射光 A_t 和 B_t 以一个特别的折射角 θ_t 折射时, 在波前上的 A' 点与 B' 点才可同相。

如果经过时间 t 相位点 B 以相速度 v_1 传输到 B' , 此时:

$$BB' = v_1 t = ct / n_1 \quad (2-1)$$

同时相位点 A 以相速度 v_2 传输到 A' :

$$AA' = v_2 t = ct / n_2 \quad (2-2)$$

波前 AB 与介质 1 中的波矢量 k_i 垂直, 波前 $A'B'$ 与介质 2 中的波矢量 k_t 垂直, 可以得到:

$$AB' = \frac{v_1 t}{\sin \theta_i} = \frac{v_2 t}{\sin \theta_t} \quad (2-3)$$

即:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-4)$$

考虑反射波, 波前 AB 变成 $A'B'$, 在时间 t 内, B 移动到 B' , A 移动到 A'' 。由于构成反射波的相位要求, BB' 必须等于 AA'' , 由于:

$$BB' = AA'' = v_1 t \quad (2-5)$$

可以得到:

$$AB' = \frac{v_1 t}{\sin \theta_i} = \frac{v_1 t}{\sin \theta_r} \quad (2-6)$$

从而有 $\theta_i = \theta_r$, 表明光波的入射角和反射角与介质的折射率相关, 并且入射角与反射角相等。光波可以被分解为与入射平面相垂直的电场分量 $E_{\perp}$ 和平行的磁场分量 $H_{\parallel}$, 入射波、反射波和折射波的电场和磁场分量分别为 $E_{i,\perp}$, $E_{r,\perp}$, $E_{t,\perp}$, $H_{i,\parallel}$, $H_{r,\parallel}$ 和 $H_{t,\parallel}$, 见图 2-3。

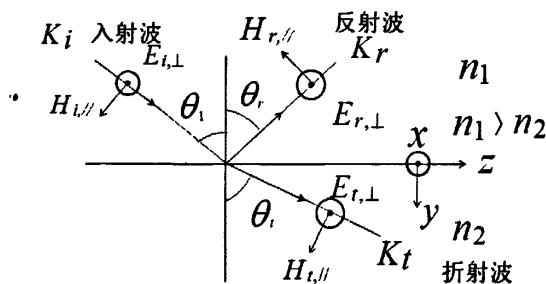


图 2-3 光波在界面上的反射与折射

入射波、反射波和折射波可以描述为:

$$\begin{aligned} E_i &= E_{i0} \exp j(\omega t - \vec{k}_i \cdot \vec{r}) \\ E_r &= E_{r0} \exp j(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r}) \\ E_t &= E_{t0} \exp j(\omega t - \vec{k}_t \cdot \vec{r}) \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中 $\vec{r}$ 是位置矢量, E_{io} , E_{ro} 和 E_{to} 是幅度。利用电磁波从介质 1 传播到介质 2 的边界条件和菲涅尔方程, 可以得到电场 $E_{\perp}$ 的反射和折射系数为:

$$r_{\perp} = \frac{E_{ro,\perp}}{E_{io,\perp}} = \frac{\cos \theta_i - [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}}{\cos \theta_i + [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}} \quad (2-8)$$

$$t_{\perp} = \frac{E_{to,\perp}}{E_{io,\perp}} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + [n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2}} \quad (2-9)$$

磁场 $H_{\parallel}$ 的反射和折射系数为:

$$r_{\parallel} = \frac{E_{ro,\parallel}}{E_{io,\parallel}} = \frac{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} - n^2 \cos \theta_i}{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} + n^2 \cos \theta_i} \quad (2-10)$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{to,\parallel}}{E_{io,\parallel}} = \frac{2n \cos \theta_i}{[n^2 - \sin^2 \theta_i]^{1/2} + n^2 \cos \theta_i} \quad (2-11)$$

其中, $n = n_2 / n_1$, 当入射光线接近法线时, 入射角很小, 可以近似认为 $\theta_i = 0$, 由于光强 I 与光波传播的速度 v 和电场幅度 E_o 有关:

$$I = \frac{1}{2} v \epsilon_r \epsilon_o E_o^2 \quad (2-12)$$

其中, $v = c/n$, $\epsilon_r = n^2$ 。则作为反射光强度与相应入射光强度之比的反射率 R , 分别用平行于和垂直于入射平面的电场 $R_{\perp}$ 和 $R_{\parallel}$ 表示:

$$R_{\perp} = \frac{|E_{ro,\perp}|^2}{|E_{io,\perp}|^2} = |r_{\perp}|^2 \quad (2-13)$$

$$R_{\parallel} = \frac{|E_{ro,\parallel}|^2}{|E_{io,\parallel}|^2} = |r_{\parallel}|^2 \quad (2-14)$$

根据电场 $E_{\perp}$ 和磁场 $H_{\parallel}$ 的反射系数, 可以得到法线入射的反射率为:

$$R = R_{\perp} = R_{\parallel} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2-15)$$

可以判断, 反射率 R 只与介质的折射率有关。与反射率相对应的透射率是透射光强度与相对应入射光强度的比值, 但是区别在于反射光与入射光处于同一种介质中, 而透射光与入射光分属不同介质之中, 所以透射率可以表示为:

$$T_{\perp} = \frac{n_2 |E_{io,\perp}|^2}{n_1 |E_{io,\perp}|^2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) |t_{\perp}|^2 \quad (2-16)$$

$$T_{\parallel} = \frac{n_2 |E_{io,\parallel}|^2}{n_1 |E_{io,\parallel}|^2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) |t_{\parallel}|^2 \quad (2-17)$$

根据电场 $E_{\perp}$ 和磁场 $H_{\parallel}$ 的折射系数, 可以得到法线入射的透射率为:

$$T = T_{\perp} = T_{\parallel} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2-18)$$

可以判断法线入射的透射率仅与介质的折射率有关, 并且反射率与透射率之和等于 1, 即, $R + T = 1$ 。

由于单模光纤的传输特性, 在光纤纤芯与被测溶液的界面上的反射情况如图 2-4 所示:

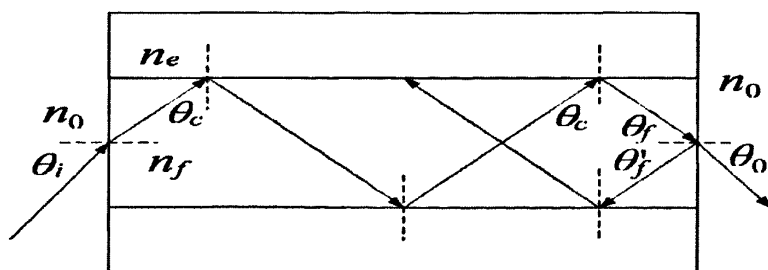


图 2-4 光在单模光纤中的传播

设光纤与液体界面处的入射角、反射角和折射角分别为 θ_f 、 θ'_f 和 θ_o , 其中 $\theta_f = \theta'_f$ 。

n_f 、 n_o 分别为光纤纤芯和被测液体的折射率。

$$\sin \theta_f = \cos \theta_c = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (2-19)$$

$$\cos \theta_f = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_f} \quad (2-20)$$

其中： θ_c 为 n_f/n_e 界面的临界角，有 $\sin \theta_c = n_e/n_f$ ， n_e 为光纤包层的折射率，有 $n_e < n_f$ ，可得：

$$\sin \theta_f = \sqrt{1 - n'^2} \quad (2-21)$$

$$\cos \theta_f = n' \quad (2-22)$$

其中 n' 为包层和纤芯的相对折射率， $n' = n_e/n_f$ ，在纤芯与被测液体的界面上，根据菲涅尔定律有：

$$n_f \sin \theta_f = n_o \sin \theta_o \quad (2-23)$$

可以得到：

$$\sin \theta_o = n \sqrt{1 - n'^2} \quad (2-24)$$

$$\cos \theta_o = \sqrt{1 - n^2 (1 - n'^2)} \quad (2-25)$$

当 $\theta_i = \theta_o$ 时，电场 $E_{\perp}$ 的反射系数为：

$$r'_{\perp} = \frac{E_{ro,\perp}}{E_{io,\perp}} = \frac{\left[1 - n^2 (1 - n'^2)\right]^{1/2} - n \left[1 - (1 - n'^2)\right]^{1/2}}{\left[1 - n^2 (1 - n'^2)\right]^{1/2} + n \left[1 - (1 - n'^2)\right]^{1/2}} \quad (2-26)$$

磁场 $H_{\parallel}$ 的反射系数为：

$$r'_{\parallel} = \frac{E_{ro,\parallel}}{E_{io,\parallel}} = \frac{n[1-(1-n'^2)]^{1/2} - n^2[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2}}{n[1-(1-n'^2)]^{1/2} + n^2[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2}} = r'_{\perp} \quad (2-27)$$

其中： n 为纤芯和被测液体的相对折射率， $n = n_f/n_o$ ，则 $\theta_i = \theta_o$ 时的反射率 R' 可以表示为：

$$R' = |r'_{\parallel}|^2 = |r'_{\perp}|^2 = \left[\frac{[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2} - n[1-(1-n'^2)]^{1/2}}{[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2} + n[1-(1-n'^2)]^{1/2}} \right]^2 \quad (2-28)$$

则单模光纤的反射率为：

$$R(n, n') = \frac{1}{2} \left[\left[\frac{[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2} - n[1-(1-n'^2)]^{1/2}}{[1-n^2(1-n'^2)]^{1/2} + n[1-(1-n'^2)]^{1/2}} \right]^2 + \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \right] \quad (2-29)$$

对于某一单模光纤，其包层折射率 n_c 和纤芯的折射率 n_f 一定，则光纤端面处的反射率 $R(n, n')$ 仅与被测介质的折射率有关。

2.2 光纤传输损耗

光在光纤中传输时会产生损耗，主要包括光纤耦合损耗、弯曲损耗、光纤内的吸收和散射损耗等，影响检测光的强度，从而影响液体折射率和浓度测量结果^[69]。对光在光纤中的传播理论进行研究有助于采取措施减小光纤传感系统的损耗，对测量结果进行适当修正，提高测量精度。

2.2.1 耦合损耗

光纤的耦合根据不同的需要常采用光纤连接器、光纤耦合器等方式耦合。光纤连接器是光纤系统中应用最广泛最基本的光无源器件，它是把两个光纤端面结合在一起，以实现光纤与光纤之间可拆卸连接的器件。对这种器件的基本要求是使发射光纤输出的光能量最大限度耦合到接收光纤。在满足反复插拔重复性要求的同时，不可避免地产生连接损耗。产生连接损耗的机理有两方面。一部分是由于光纤公差引起的固有损耗。这是由光纤制造公差，即纤芯尺寸、数值孔径、纤

芯和包层的同心度以及折射率分布失配等因素产生的。另一部分是由连接器加工装配引起的外部损耗。这是由于连接器加工装配公差，即端面间隙、轴向倾角、横向偏移和端面加工粗糙等因素产生的^[70, 71]。

连接器的结构多种多样，其中采用套管结构对中和微孔结构插针光纤固定效果最好，连接有 FC 型、SC 型和 ST 型。本系统选用的是目前许多光纤系统中所采用的 FC 型连接器，采用的是套管对中和微孔插针配合的凸球面接触结构，如图 2-5 所示。

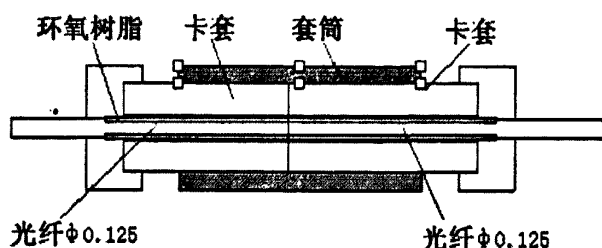


图 2-5 套管对中和微孔插针配合的凸球面接触结构的 FC 型连接器

这种结构由一只套筒和两只带光纤的插针组成。插针是一只套管，其直径 $\phi = 2.499(\pm 0.0005)mm$ ，内孔直径 $\phi = 0.125(+0.001)mm$ ，把直径 $\phi = 0.125(-0)mm$ 的光纤固定于插针内孔。套筒与两只带光纤的插针精密配合，完成两根光纤的对中。其最大插入损耗 0.3dB，平均插入损耗不大于 0.2dB。

光纤耦合器是光纤系统中应用最多的光无源器件之一，是一种用于传送和分配光信号的光纤无源器件，其主要特点：一是器件的主体是光纤，属于全光纤型器件；二是该器件通过模式耦合来实现光的耦合功能；三是光信号的传输方向是固定的，及光传输具有定向性。

两根光纤之间的耦合分为平行光纤之间的耦合、弯曲光纤之间的耦合以及熔锥光纤之间的耦合。为了简化分析过程，只考虑两根平行直光纤之间基模的耦合。当两根平行直光纤相互接近时，它们各自传输的基模场将引起对方光纤介质的极化，并激励其传导模，导致双方基模场的相互渗透和交叠。

设两根光纤纤芯的折射率分别为 n_{c01} 、 n_{c02} ，包层折射率为 n_c ，基模场的传播常数分别为 β_1 、 β_2 ，场分布分别为 $E_1(r)$ 、 $E_2(r)$ ，则两根光纤中的导模场分布可表示为：

$$E_1(r, t) = A_1(z)e^{-i\beta_1 z} E_1(r)e^{i\omega t} \quad (2-30)$$

$$E_2(r, t) = A_2(z) e^{-iz\beta_2} E_2(r) e^{i\omega t} \quad (2-31)$$

其中 $A_1(z)$ 、 $A_2(z)$ 为模场振幅。由耦合模方程可得：

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = A_2(z) \xi_{12} e^{-i2\delta z} \quad (2-32)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = A_1(z) \xi_{21} e^{i2\delta z} \quad (2-33)$$

其中 $\delta = (\beta_2 - \beta_1)/2$ 是两根光纤基模传播常数之差，令 $\beta = \beta_1 + \delta = \beta_2 - \delta$ ，横向折射率的微扰为 δn^2 ，则模式耦合系数 ξ_{12} 、 ξ_{21} 可定义为：

$$\xi_{12} = -\xi_{21}^* = -i\xi = -i \frac{k_0^2}{2\beta} \iint \delta n^2 E_2^* E_1 dx dy \quad (2-34)$$

再定义前向波 $A_1(z)$ 和后向波 $A_2(z)$ 分别为：

$$A_1(z) = R(z) e^{-i\delta z} \quad (2-35)$$

$$A_2(z) = S(z) e^{i\delta z} \quad (2-36)$$

其中 $R(z)$ 、 $S(z)$ 分别为两根光纤中场的复振幅，带入可得：

$$\frac{dR(z)}{dz} - i\delta R(z) = -i\xi S(z) \quad (2-37)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} + i\delta S(z) = -i\xi^* R(z) \quad (2-38)$$

利用边界条件 $R(0) = 1$ 和 $S(0) = 0$ 可以得到：

$$R(z) = \cos(\sqrt{\xi^2 + \delta^2} z) + i \frac{\delta}{\sqrt{\xi^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{\xi^2 + \delta^2} z) \quad (2-39)$$

$$S(z) = -i \frac{\delta}{\sqrt{\xi^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{\xi^2 + \delta^2} z) \quad (2-40)$$

将输出光功率归一化, 则两根光纤的耦合效率可以表示为:

$$\eta = (\xi L)^2 \left[\frac{\sin(\sqrt{(\xi L)^2 + (\delta L)^2})}{\sqrt{(\xi L)^2 + (\delta L)^2}} \right]^2 \quad (2-41)$$

此式决定了耦合器的分光比, 即耦合比, 当两根光纤为相同光纤时, 有 $\beta_1 = \beta_2$, 即 $\delta = 0$, 于是 $\eta = \sin^2(\xi L)$ 。这时耦合效率只与光纤的长度 L 以及耦合系数 ξ 有关。在弱导阶跃型光纤近似下, 其耦合系数 ξ 可表示为:

$$\xi = \frac{\lambda_0}{2\pi n} \cdot \frac{U^2}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0\left(W \frac{d}{a}\right)}{K_1^2(W)} \quad (2-42)$$

其中 λ_0 为真空中的光波波长, n 为纤芯的折射率, a 为纤芯半径, d 为两光纤中心距, K_m 为第二类虚宗量贝塞尔函数。当耦合作用的光纤长度 L 等于耦合长度 L_c 的奇数倍时, 可获得 100% 的功率耦合, 此时所需的最小光纤长度 L_c 与耦合系数 ξ 成反比, 于是, 定义光纤耦合长度 L_c 为:

$$L_c = \frac{\pi}{2\xi} \quad (2-43)$$

可以通过改变平行光纤的长度以及两根光纤之间的距离来控制耦合比。

对于光纤的固定连接部分, 可以使用光纤熔接机, 采用热熔连接方式来减小损耗。光纤熔接机可以方便地处理接头, 实现光纤与光纤的永久性连接, 在减小损耗的同时, 提供足够的机械强度以及长期的可靠性和稳定性。光纤熔接机用微调器使纤芯精确对中, 用高压电弧加热把两个光纤端面熔合在一起, 用热缩套管和钢丝加固形成接头。使用热熔连接, 光纤接头平均损耗为 0.05~0.07dB, 标准偏差为 0.03~0.04dB。

2.2.2 弯曲损耗

光纤在实际使用中不会始终处于笔直的状态, 时常处于弯曲状态。如图2-6所示, 光线由光纤直部和弯部的界面上X点进入弯部, 点O在分界面光纤轴线上, $OC = R$ 为弯部的曲率半径, d 为纤芯的直径。 Φ_0 、 Φ_1 、 Φ_2 : 分别为光线在直部、弯部外表面和弯部内表面的入射角。

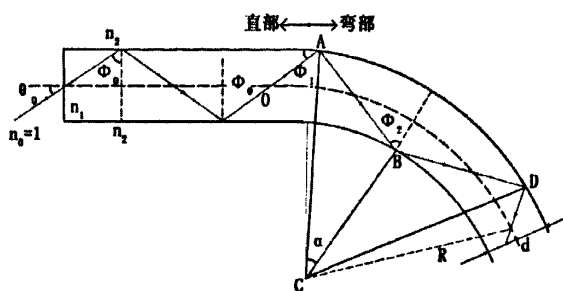


图 2-6 光在光纤弯曲处的传播

设 X 点坐标为 x ，则 $-\frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2}$ 。在 $\triangle AXC$ 中，有 $\Phi_1 \leq \Phi_0$ 。根据正弦定理有：

$$\sin \Phi_1 = \frac{R+x}{R+\frac{d}{2}} \sin \Phi_0 \quad (2-44)$$

同理，在 $\triangle ABC$ 中有：

$$\sin \Phi_2 = \frac{R+\frac{d}{2}}{R-\frac{d}{2}} \frac{R+x}{R+\frac{d}{2}} \sin \Phi_0 = \frac{R+x}{R-\frac{d}{2}} \sin \Phi_0 \quad (2-45)$$

可以得到：

$$\sin \Phi_2 \geq \sin \Phi_0 \quad (2-46)$$

则同为锐角的情况下， $\Phi_2 \geq \Phi_0$ 。可知，随着曲率半径 R 的较小， Φ_1 减小， Φ_2 增大。入射角较小的光在弯曲部分外表面发生折射，从而进入光纤包层。光纤弯曲时的数值孔径表达式为：

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \left(\frac{R+d/2}{R+x} \right)^2} \quad (2-47)$$

由于 $\frac{R+d/2}{R+x} > 1$ ，可知弯曲光纤的数值孔径变小。光纤弯曲的最小半径 $R_{\min}$

可以表示为：

$$R_{\min} = \frac{x \sin \Phi_0 + d/2}{1 - \sin \Phi_0} \quad (2-48)$$

当光纤弯曲半径 $R < R_{\min}$ 时, 原来在只部能产生全反射的子午光线, 到了弯部不经内表面反射, 从纤芯弯曲侧面逃逸, 从而造成弯曲损耗。

光纤弯曲损耗包括两个方面: 辐射损耗和模式耦合损耗。辐射损耗是光能量从光线弯曲处辐射到周围空间中而引起的损耗; 模式耦合损耗是由于光波从直光纤部分进入弯曲部分光纤时芯模耦合成包层模所引起的模式耦合损耗。光纤在弯曲状态下的损耗是辐射损耗和模式耦合损耗共同作用的结果^[72, 73]。

微弯会引起基模和其它模式的耦合, 这就是模式耦合带来的损耗^[74]。在弱波导条件下, 从光纤波导中电磁场方程可以推出理想波导模式耦合的振幅方程:

$$\frac{dc_\mu}{dz} = \sum K_{\mu\gamma} c_\gamma \exp[j(\beta_\mu - \beta_\gamma)z] \quad (2-49)$$

其中 $K_{\mu\gamma}$ 是模式 μ 和 γ 之间的耦合系数, β 是模的传播常数, c 是模的场振幅,

$$K_{\mu\gamma} = \frac{\omega \epsilon_0}{4j\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n^2 - n_0^2) \bar{e}_\mu \cdot \bar{e}_\gamma dx dy \quad (2-50)$$

$\bar{e}$ 为各模式的横向电场矢量; n_0 为波导折射率; n 是畸变后的折射率, 考虑微小畸变的近似解。

假定波导中有一个模式的幅度 c_i 远大于其它模式, 有:

$$\frac{dc_\mu}{dz} = K_{\mu i} c_i \exp[j(\beta_\mu - \beta_i)z] \quad (2-51)$$

如果畸变或者折射率的变化是有规则的, 耦合系数可以是常数, 则耦合系数 $K_{\mu\gamma}$ 用一般式表示为:

$$K_{\mu\gamma}(z) = \bar{K}_{\mu\gamma} f(z) \quad (2-52)$$

式中 $f(z)$ 为畸变函数, 表示畸变的状态。如果近似认为能量交换很少, 可以认为在整个传输中输入的模式的幅度 c_i 保持不变, $c_i(z) \approx c_i(0)$, 考虑正向传输模式

可以得到耦合模式幅度

$$c_{\mu}^{+}(z) \approx \bar{K}_{\mu} c_i^{+}(0) \int_0^z f(u) \exp[-j(\beta_i - \beta_{\mu})u] du \quad (2-53)$$

设 $z = l$, 则:

$$c(l) \approx \sqrt{l} c_i^{+}(0) \bar{K}_{\mu} F(\Delta\beta) \quad (2-54)$$

式中 $F(\Delta\beta)$ 为畸变函数 $f(z)$ 对 $\Delta\beta = \beta_i - \beta_{\mu}$ 的傅里叶变换

$$F(\Delta\beta) = \frac{1}{\sqrt{l}} \int_0^l f(z) \exp[-j(\beta_i - \beta_{\mu})z] dz \quad (2-55)$$

$$\text{同理, 考虑反向耦合模式 } c_{\mu}^{-}(z), \text{ 则有 } c_{\mu}^{-}(l) = 0 \quad (2-56)$$

$$c_{\mu}^{-}(z) \approx \sqrt{l} c_i^{-}(0) \bar{K}_{\mu} F(\beta_i + \beta_{\mu}) \quad (2-57)$$

其中

$$F(\beta_i + \beta_{\mu}) = \frac{1}{\sqrt{l}} \int_0^l f(z) \exp[-j(\beta_i + \beta_{\mu})z] dz \quad (2-58)$$

波导场所传输功率

$$P_T \approx P \left[\sum_{\gamma} (|c_{\gamma}^{+}|^2 - |c_{\gamma}^{-}|^2) + \sum_0^{k_0 n_2} (|c_{\rho}^{+}|^2 - |c_{\rho}^{-}|^2) d\rho \right] \quad (2-59)$$

式中 $\rho = \sqrt{(k_0^2 n_2^2 - \beta^2)}$, k_0 为真空中的波数。如果只考虑长度为 1 的畸变部分波导, 由于导模与辐射模的耦合而造成的功率损失为:

$$\Delta P \approx P \sum_0^{k_0 n_2} (|c_{\gamma}^{+}(l)|^2 - |c_{\gamma}^{-}(0)|^2) d\rho \quad (2-60)$$

式中 $|c_{\gamma}^{+}(l)|^2$ 为正向辐射模在 $z = l$ 处流出的功率; $|c_{\gamma}^{-}(0)|^2$ 为反向辐射模在 $z = 0$ 处

流出的功率。通过积分变换： $d\rho = |\beta| \frac{d\beta}{\rho}$ 得：

$$\Delta P = P \sum \int_{-k_0^2 n_2^2}^{k_0^2 n_2^2} |c_i^+(l)|^2 |\beta| \frac{d\beta}{\rho} \quad (2-61)$$

设入射模式 i 所携带的功率为 $|c_i^+(0)|^2 P$ ，则功率损耗系数可以表示为：

$$2\alpha_i = \frac{\Delta P}{|c_i^+(0)|^2 Pl} \quad (2-62)$$

最终功率损耗系数可以表示为：

$$2\alpha_i = \sum \int_{-k_0^2 n_2^2}^{k_0^2 n_2^2} |K_{pi}|^2 F(\Delta\beta) |\beta| \frac{d\beta}{\rho} \quad (2-63)$$

2.2.3 本征损耗

光在光纤中的吸收和散射与光纤本身的特性联系紧密^[75, 76]。光源输出端的光功率 p_0 发送到光纤中，有一部分光功率 Δp 会损失掉，只有 $p_0 - \Delta p$ 的功率进入光纤中，这部分光会在光纤中遭受吸收和散射，这些损耗与光纤长度有关，设单位长度上的吸收损耗和散射损耗分别为 α 和 s ，则剩余部分的光所占比例为 $(1 - \alpha - s)$ ，光纤在单位长度上的衰减为吸收和散射之和 $(\alpha + s)$ ，光在光纤中传输距离 D 后，剩余的功率为：

$$p(D) = (p_0 - \Delta p) [1 - (\alpha + s)]^D \quad (2-64)$$

设光纤的长度为 L ，在光纤与溶液界面处反射而回到光纤中的功率可以表示为：

$$p_r(L) = p(L) R(n, n') = R(n, n') (p_0 - \Delta p) [1 - (\alpha + s)]^L \quad (2-65)$$

当反射光回到光电转换模块时的光功率为：

$$p_b(L) = p_r(L) [1 - (\alpha + s)]^L - \Delta p' = R(n, n') (p_0 - \Delta p) [1 - (\alpha + s)]^{2L} - \Delta p' \quad (2-66)$$

其中： $\Delta p'$ 为光从光纤中耦合到光电转换模块时损失的光功率。

则光纤与被测液体界面处的反射比可以通过对返回功率的检测得到：

$$R(n, n') = \frac{p_b(L) + \Delta p'}{p_0 - \Delta p} [1 - (\alpha + s)]^{-2L} \quad (2-67)$$

当检测光路固定下来，其光纤长度、损耗都可以确定下来，反射比与检测到的功率值的关系可以简化为：

$$R(n, n') = \frac{k}{p} p_b + \frac{kk'}{p} \quad (2-68)$$

其中： p_b 为检测到的光功率， p 为光源耦合进光纤的功率， k 、 k' 为常数， $k = [1 - (\alpha + s)]^{-2L}$ ， $k' = \Delta p'$ 。由测得的界面反射率 $R(n, n')$ ，就可以得到被测介质的折射率。

2.2.4 偏振衰落

当一束光入射到从空气中入射到介质和空气所形成的界面上时，一部分光发生反射返回空气中，一部分光发生折射进入液体中。光与介质界面的入射角为 α ，折射角为 β ，反射角为 γ ，入射光、反射光、折射光构成入射面。可以将入射光分解为垂直于入射面的垂直分量 $E_{10\perp}$ 和平行于入射面的平行分量 $E_{10\parallel}$ ；将相应的反射光分解为 $E_{20\perp}$ 和 $E_{20\parallel}$ ；将相应的折射光分解为 $E_{30\perp}$ 和 $E_{30\parallel}$ 。根据菲涅尔公式可知，垂直分量与平行分量的振幅反射强度分别为：

$$E_{20\perp} = E_{10\perp} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2-69)$$

$$E_{20\parallel} = E_{10\parallel} \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (2-70)$$

如果不考虑矢量方向，则有：

$$\frac{E_{20\parallel}}{E_{10\parallel}} = \frac{E_{20\perp}}{E_{10\perp}} \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha - \beta)} \quad (2-71)$$

当光纤垂直入射时, $\alpha = 0^\circ$, 可以得到:

$$\frac{E_{20\parallel}}{E_{10\parallel}} = \frac{E_{20\perp}}{E_{10\perp}} \quad (2-72)$$

已知入射光的垂直分量与平行分量相等, 即 $E_{10\parallel} = E_{10\perp}$, 可以证明反射光中的垂直分量与平行分量算数值相等, 且不具有相干性, 可以得出, 垂直入射情况下, 反射光没有偏振特性。

当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, 有 $|\cos(\alpha + \beta)| < \cos(\alpha - \beta)$, 则:

$$\frac{E_{20\parallel}}{E_{10\parallel}} < \frac{E_{20\perp}}{E_{10\perp}} \quad (2-73)$$

可以推知, 反射光中平行分量的值总是小于垂直分量的值, 从内部结构分析, 两个分量的方向和振幅均不相同, 且不具相干性, 可知反射光为部分偏振光。在入射光为非偏振光的情况下, 经过界面的反射, 使反射光具有偏振成分。因此, 可以利用反射光的偏振特性变化, 对构成界面的介质进行检测, 从而确定相应介质的特性^[77]。

偏振度作为常见的标志介质偏振现象的量化指标, 它的定义为:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2-74)$$

偏振度为互相垂直的两个分量的光强差与其光强和的比值, 根据光强的定义, 还可以将偏振度表示为:

$$P = \frac{E_{20\perp}^2 - E_{20\parallel}^2}{E_{20\perp}^2 + E_{20\parallel}^2} \quad (2-75)$$

当入射光垂直入射面和平行入射面振动的电矢量相等, 即 $E_{10\perp}^2 = E_{10\parallel}^2$ 时, 偏振度可以简化表示为:

$$P = \frac{2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} \quad (2-76)$$

根据光的折射定律，其相对折射率可以表示为：

$$N = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2-77)$$

代入到偏振度的表达式中，可以得到：

$$P = \frac{2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{N^2 - \sin^2 \alpha}}{N^2 - \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha \tan^2 \alpha} \quad (2-78)$$

$$N = \frac{\tan \alpha \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - P^4 \cos^2 2\alpha - P^2 \sin^2 2\alpha}}}{P} \quad (2-79)$$

可见，折射率是物质的固有属性，而偏振度是描述光与介质相互作用的特征参数，光与不同折射率的介质相互作用，介质的特性不同程度地影响和改变着光的偏振特性，其偏振度也会有相应的反映，介质的折射率和偏振度之间有着一定的联系。

2.3 本章小结

本章详细介绍了液体折射率检测的基本理论，主要包括以下几方面：

1. 阐述了光纤端面回波的基本原理，光在光纤端面处与介质相互作用产生回波信号的过程以及回波信号在光纤中传播的过程，揭示了回波信号与介质折射率的联系；
2. 阐述了光纤的传播特性，主要包括光纤的耦合特性、微弯特性、光纤的本征损耗以及介质折射率与偏振度的关系，为液体介质折射率测量提供了理论依据。

第三章 实验系统设计

实验系统由实验光路、光纤探头和信号处理三部分组成。实验光路由光源、光环形器、光缆、检测光纤和光电探测器组成；光纤探头包括由单模光纤制成的探头及其固定密封结构；信号处理包括光源、光电转换器、数据采集卡、锁相放大器。实验中利用 LabView 编程对数据采集、分析等进行控制。实验测试系统示意图如图 3-1 所示：

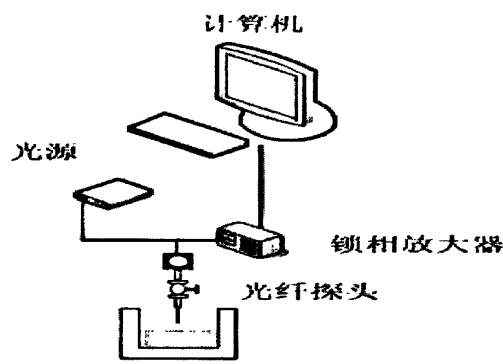


图 3-1 实验系统示意图

3.1 实验光路

实验光路如图 3-2 所示，将光源发出的光通过光环形器耦合到检测光纤之中，在探头端面发生反射。反射光再通过检测光纤，经过光环形器进入到光电探测器转换电信号进行处理。

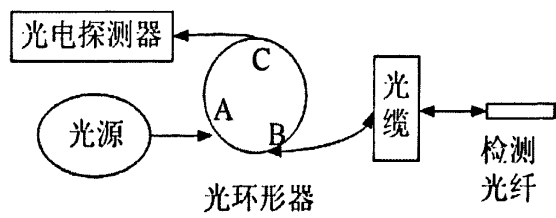


图 3-2 实验光路

为了进一步减小损耗和干扰，系统选用光环形器。光环形器是一种多端口输入输出的非互易性器件，它的作用是使光信号只能沿规定的端口顺序传输，如 A-B-C-A，当光信号的传输顺序变更时，其损失很大，可以实现信号的隔离。由于系统中不需要这种顺序传播构成闭合的回路，如 A-B-C，不需要 C-A 的传播，所以准确的说系统中用的是准光学环形器，其插入损耗一般为 0.5~1.5dB，反射损耗和方向性均大于 50dB。

环形器 A、B、C 分别连接分路器、检测光纤以及光电探测器。即发射光经分路器后，通过光环形器进入检测光纤，通过端面的反射，检测光沿检测光纤回到光环形器，并进入光电探测器，而光电探测器端口与分路器端口隔离，发射光不会耦合进入光电探测器，从而不会对检测结果造成影响。

由于光缆长度以及熔接光纤的损耗差异等原因，在系统安装调试期间，需要对检测信号进行校正，以达到检测溶液折射率的最佳效果。

3.2 光纤探头

实验装置的探头部分主要由光纤探头和固定密封结构组成。光纤探头如图 3-3 所示，主要由内部光纤和外部套管组成，内部光纤为多根 1550nm 单模光纤，并选用不锈钢套管，以提高对内部光纤的保护和探头的机械强度。光纤探头由北玻科技公司加工制作，探头长为 2000mm，直径 10mm，光纤均匀分布在中心，直径为 1mm 的范围内。

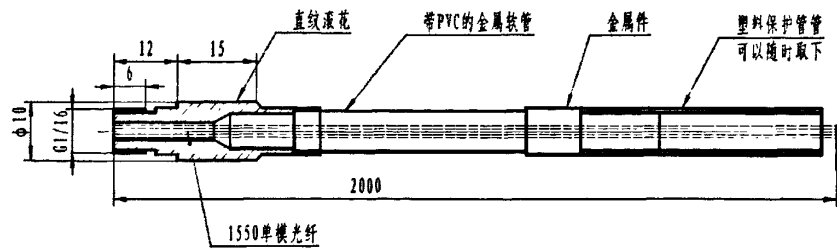


图 3-3 光纤探头设计图

考虑到光纤传感器在今后的推广应用中需要安装在运行的管道之上，所以需要特别注意其装卸过程中和工作期间的密封保护，提供对管道和工作人员的安全保障。光纤探头的固定密封结构如图 3-4 所示，主要由法兰短管、高压法兰连接钢制闸阀和卡套式直通液压管接头光纤探头等组成。法兰短管焊接于待测管道之上，长度按照现场需要定制，其法兰端通过六角螺栓与闸阀的法兰相连接，闸阀

的另一端连接着法兰、短管和卡套式直通液压管接头。光纤探头先后通过卡套式直通液压管接头、闸阀和法兰短管进入管道内与被测溶液相接触进行检测。

安装光纤探头时，闸阀处于关闭状态，首先将光纤探头插入卡套式直通液压管接头。当光纤探头通过接头内部密封圈时，将慢慢开启闸阀，让光纤探头顺利通过。直到光纤探头到达检测位置时，将卡套锁死，完成安装。

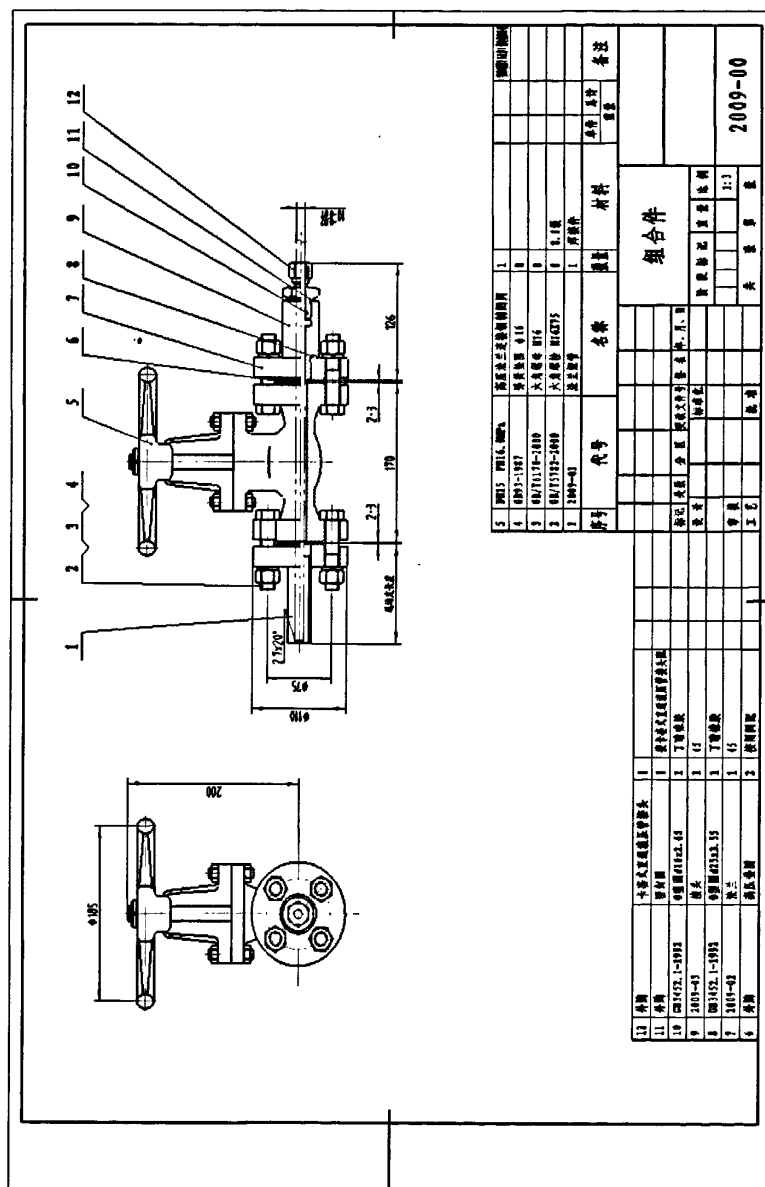


图 3-4 光纤探头的固定密封结构机械图

系统长期运行后，需要定期对光纤探头进行清洁，将探头拆卸下来。这时候闸阀处于开启状态。首先将卡套松开，缓慢撤出光纤探头，当探头到达闸阀与卡套式直通液压管接头密封圈之间的位置时，将闸阀关闭，然后将光纤探头拆卸下来。

整个装卸过程都要考虑管道内液体压力的因素，所以根据管道实际情况和光纤探头安装、使用中的需要，系统采用卡套式密封结构和密封圈对光纤探头进行固定和密封，如图 3-5 所示。

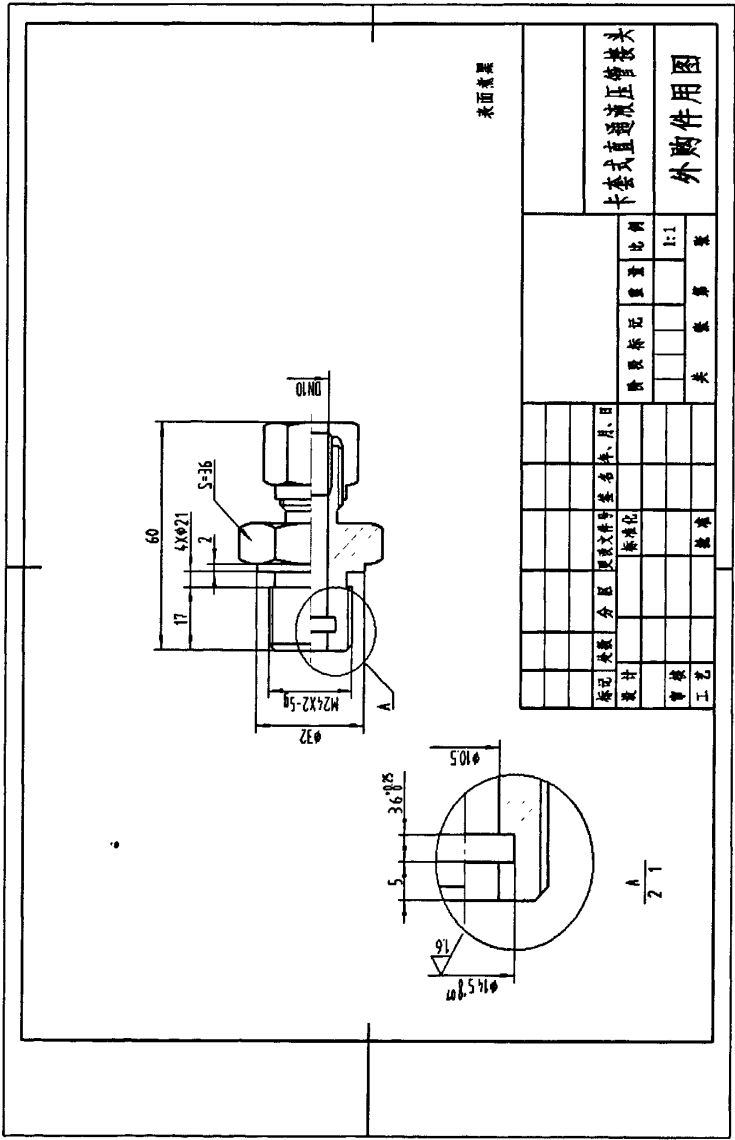


图 3-5 卡套部分机械图

卡套式连接元件,适用于油、气及一般腐蚀介质的管路系统,工作压力最大可达 40MPa。由于卡套有弹性,因此可承受较大的冲击,起到防松的作用。在起到密封作用的同时还可以固定探头的位置。

由于卡套式密封结构不具有动密封性,无法在探头装卸过程中保证管道和操作人员的安全,所以在卡套结构中加入了 O 形密封圈进行拆装过程中的动密封。

O 形密封圈是一种自动双向作用密封元件。安装时其径向和轴向方面的预压缩赋予 O 形密封圈自身的初始密封能力。选用 O 形密封圈除了因为它双向密封、装卸简单和价格低廉的特点,主要原因是其兼具静密封和动密封,并且动摩擦阻力很小,非常适合传感器的安装与运行的需要。

在传感器光纤探头的装拆过程中, O 形密封圈可以完成在探头移动中的动密封,保障装卸过程中的安全。O 形密封圈还具有静密封的作用,在光纤探头安装完毕后,与卡套接头一起对传感器进行密封,具有双重密封可保证光纤探头长期运行于管道之上的安全。

此外,考虑到不同检测对象的特点,对于管道内压力不高,不需要对开启和关闭阀体过程中进行流量控制的情况下,系统中可以使用球阀来代替闸阀。

光纤探头要伸入管道,使探头端面与被测溶液相接触,但是在光纤探头固定的高度上,要考虑管道要定期清管和管道内其它检测操作,探头固定的高度不能低于管壁,将探头伸出管壁会造成与管道内其它设备的相互损伤,所以探头的固定高度应稍高于管壁,距离管道内壁的高度大于管道壁厚的 10%是安全合理的安装位置,如图 3-6 所示。

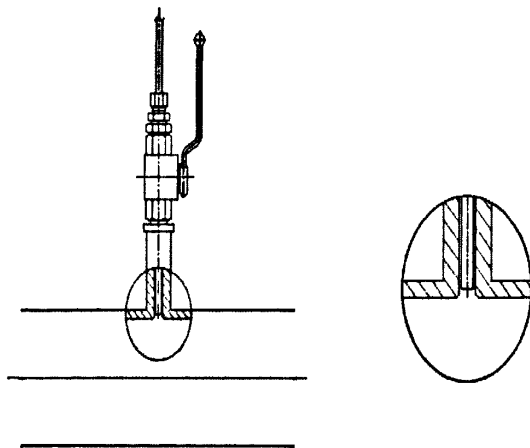


图 3-6 光纤探头安装位置示意图

实验系统采用卡套和球阀配合的方式对光纤探头进行固定，如图 3-7 所示。

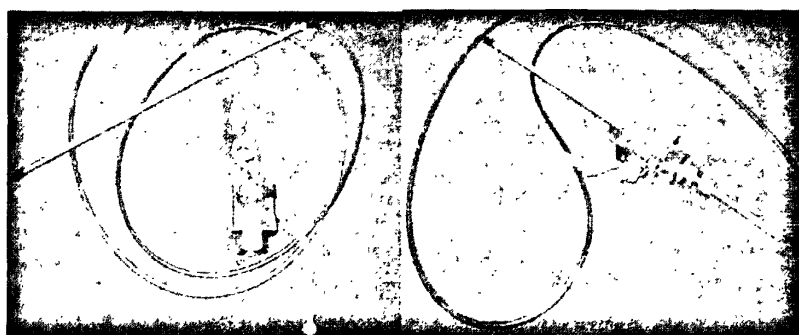


图 3-7 光纤探头与卡套结构的固定关系

固定光纤探头时，首先将卡套接头与球阀通过螺纹连接，再将球阀打开，将光纤探头依次穿过卡套锁紧螺母、卡套、接头和球阀，当光纤探头到达预定位置时将锁紧螺母锁紧，通过挤压卡套对光纤探头进行固定。

3.3 信号获取与处理

测试系统中的光源采用金飞博光电通讯有限公司订制外调制光源，通过单模光纤尾纤耦合输出，保证极高的耦合效率，并且具有良好的稳定性和可靠性。

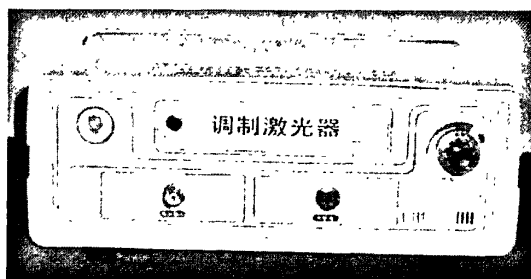


图 3-8 调制光源

基本性能参数如下：

- 最大调制频率：1MHz；
- 波长：1550nm；
- 稳态最大输出功率：10mw；
- 输出功率稳定度：<1%；

光电探测器采用美国 THORLABS 公司的光电探测器 DET01CFC, 使用材料为 InGaAs 的 pin 光电二极管前置放大部分选用与 DET01CFC 配套的精密电阻前置放大器, 实现最大 1000 倍的放大输出。由光电探测器和前置放大部分组成的光电探测模块如图 3-9 所示。

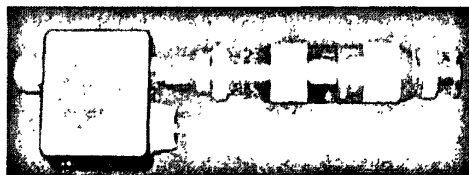


图 3-9 光电探测模块

基本性能参数如下:

- 光谱响应范围: 800~1700 nm;
- 最高灵敏度时光波波长及灵敏度: 0.95A/W (1550 nm);
- 最大暗电流: 1 nA;
- 最大带宽: 2GHz;
- 上升时间: 100ps

系统 A/D 转换采用美国国家仪器公司(NI)生产的 PCI-6120 数据采集卡, 如图 3-10 所示。该卡基于 PCI 总线, 支持 NI 出色的软件集成性能, 支持 Labview, Labwindows/CVI 与基于 VB 与 VisalStudio.NET 的 Measurement Studio 开发环境。

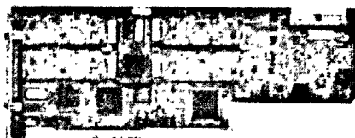


图 3-10 PCI6120

主要性能指标包括以下几点:

- 同步采集 4 路差分输入的模拟信号;
- 每通道采样速度最高可达到 1 MS/s;
- 分辨率达 16 位;
- 板载 64M 存储器;

由于检测信号的信噪比很低, 严重影响检测效果, 需要减小检测环境和检测系统中各种噪声带来的影响。因此在测试系统中引入锁相放大部分, 通过锁相放

大器电信号调制的正弦波输出调制光源激光器的输出,将检测信号进行频率锁定放大,保证测试系统的稳定性和精确度。系统中使用的锁相放大器为美国斯坦福公司生产的双通道 SR850 锁相放大器,如图 3-11 所示。

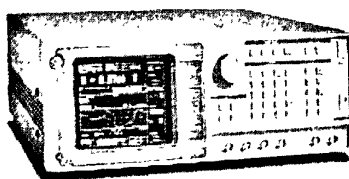


图 3-11 SR850 锁相放大器

该放大器采用数字信号处理技术,位相稳定性出色,主要应用于低信噪比探测系统的微弱信号重现,主要性能指标包括以下几点:

- 具有较宽的频率调节范围: 1MHz-102.4KHz;
- 灵敏度达: 2nV;
- 时间常数调节范围宽: 10 μ s-30ks;
- 增益精确度达: $\pm 1\%$;

噪声干扰会对系统的检测结果造成很大的影响,而且由于光纤探头端面的反射很弱,使得回波信号的信噪比非常低,有用信息淹没在噪声信号之中,严重影响后续的信号处理工作。系统采用锁相放大的方法提高回波信号的信噪比,将信号中的检测信息从噪声中分离出来,提高系统的检测精度。

锁相放大技术是在利用频率变换的外差技术的基础上发展起来的。实现频率变换可以通过两个不同频率的正弦波信号相乘,从而产生它们的和与差的正弦波:

$$\sin A \times \sin B = -\frac{\cos(A+B) - \cos(A-B)}{2} \quad (3-1)$$

如果令信号 A 与信号 B 具有相同的频率,则有:

$$\sin A \times \sin B = \sin A \times \sin A = \frac{1 - \cos 2A}{2} \quad (3-2)$$

表明,当频率相同的信号相乘时,可以产生直流以及 2 倍频率的交流信号,如果进一步引入相位和频率,则可以表示为:

$$\sin(\omega t + \alpha) \times \sin(\omega t + \beta) = \frac{\cos(\beta - \alpha) - \cos(2\omega t + \alpha + \beta)}{2} \quad (3-3)$$

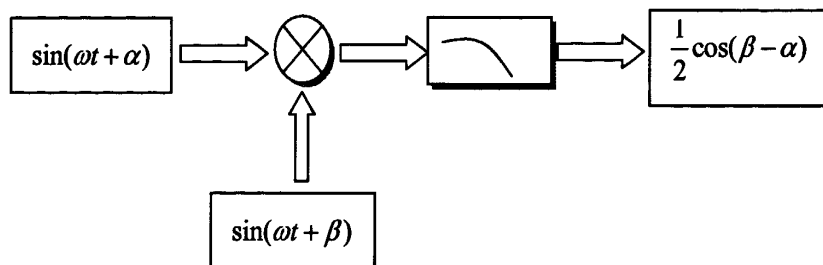


图 3-12 信号处理过程

如果信号 A 与信号 B 的频率和相位都是相同的，则直流变为最大；如果频率相同，相位相差 90° ，则直流变为 0。

如图 3-12 所示，当检测信号与同频率的参考信号相乘，再用低通滤波器检出直流并调整相位，就会得到与输入信号振幅成正比的直流电压。而与参考信号不同的检测信号成分最终都会成为交流信号而被低通滤波器除去。应用这样的原理就可以对特定频率的信号进行检测，而噪声则被有效地清除掉了。

3.4 本章小结

本章对实验系统进行了系统的介绍，主要包括实验光路、光纤探头以及信号的获取与处理三部分。

实验光路由光源、光环形器、光缆、检测光纤和光电探测器组成，检测光由光源耦合进入光纤，通过光环形器 A-B 端进入光缆，最终在检测光纤端面处发生反射，反射光再经光环形器 B-C 端进入光电探测器转换成电信号进行处理。

光纤探头包括由单模光纤制成的探头及其固定密封结构，光纤探头内 1550nm 单模光纤由外层不锈钢套管保护，固定密封结构采用 O 型圈和卡套式密封结构，在保证检测过程中密封的同时实现装卸过程中的密封，提高系统的安全性。

信号的获取与处理利用现有设备包括光源、光电转换器、数据采集卡、锁相放大器，完成实验系统的搭建，为液体特性检测方法的验证提供了必要条件。

第四章 实验研究

4.1 液体特性检测

根据光纤端面的反射情况和光纤内光波的传输特性,可以得到接收光功率和发射光功率与被测液体折射率之间的关系

$$p_b(L) = R(n, n')(p_0 - \Delta p)[1 - (\alpha + s)]^{2L} - \Delta p' \quad (4-1)$$

其中, $p_b(L)$ 为反射光回到光电转换模块时的光功率, $R(n, n')$ 为单模光纤的反射率, n' 为包层和纤芯的相对折射率, n 为被测液体和纤芯的相对折射率, p_0 为光源输出端的光功率, Δp 为光从光源耦合到光纤过程中的耦合损耗, α 和 s 分别为单位长度上的吸收损耗和散射损耗, $\Delta p'$ 为光从光纤耦合到光电探测器的耦合损耗, L 为光纤长度。定义光纤的回波强度为:

$$I_R = 10 \lg \frac{p'}{p} \quad (4-2)$$

其中, 耦合到光纤中的发射光功率 $p = p_0 - \Delta p$, 接收光功率 $p' = p_b(L) + \Delta p'$, 在保证光纤耦合质量的情况下, 耦合损耗 Δp 和 $\Delta p'$ 远远小于相应的光功率, 可以近似忽略。则光纤回波强度可以表示为:

$$I_R = 10 \lg \frac{p_b(L)}{p_0} = 10 \lg R(n, n')[1 - (\alpha + s)]^{2L} \quad (4-3)$$

当光纤及其长度确定时, $[1 - (\alpha + s)]^{2L}$ 为一常数, 即: $[1 - (\alpha + s)]^{2L} = \eta$, 则光纤回波强度为:

$$I_R = 10 \lg \eta R(n, n') \quad (4-4)$$

对于系统中使用的单模光纤, 包层和纤芯的相对折射率 n' 一定, 反射率 $R(n, n')$ 仅与被测液体和纤芯的相对折射率 n 有关, 纤芯折射率同样一定, 则光

纤回波强度 I_R 仅与被测液体折射率有关。可以通过检测液体的回波强度定量地推测该液体的折射率。

在光纤纤芯折射率为 1.52 的情况下, 被测液体折射率与入射光功率和回波信号功率的关系如图 4-1 所示:

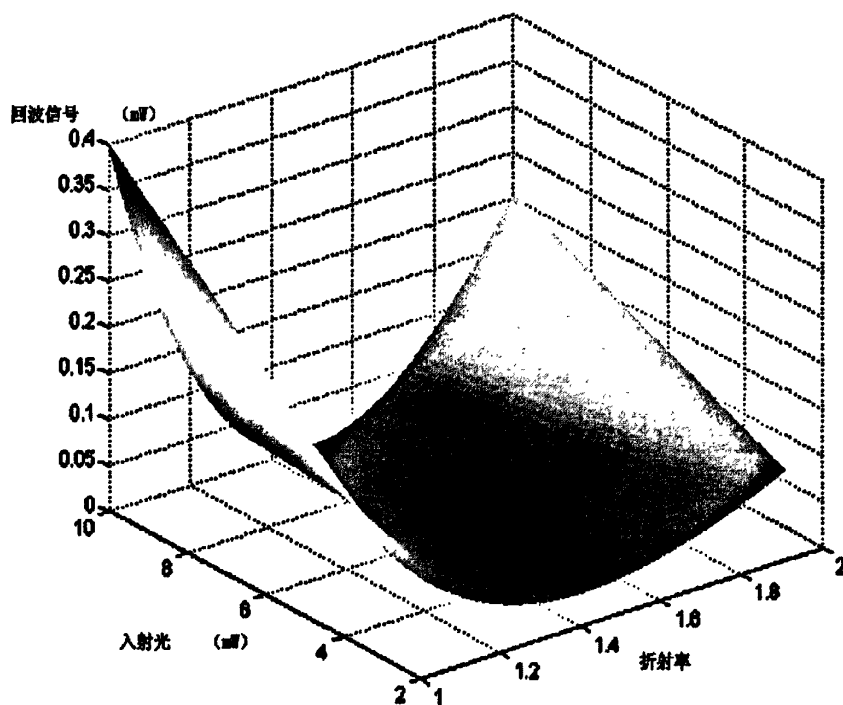


图 4-1 液体折射率与入射光功率、回波信号功率关系

由于光纤回波强度

$$I_R = 10 \lg \frac{p'}{p} = 10 \lg \eta R(n, n') \quad (4-5)$$

当被测液体发生变化时, 其折射率也随之发生改变, 与之对应的回波信号的功率也会发生改变, 设折射率变化前后的接收光功率分别为:

$$p'_1 = R(n_1, n') p \eta \quad (4-6)$$

$$p'_2 = R(n_2, n') p \eta \quad (4-7)$$

则接收光功率变化量可以表示为:

$$p'_1 - p'_2 = (R(n_1, n') - R(n_2, n')) p \eta \quad (4-8)$$

即

$$p'_{\Delta n} = p \eta f(\Delta n) \quad (4-9)$$

其中 $f(\Delta n) = R(n_1, n') - R(n_2, n')$, Δn 为被测液体折射率的变化量。

对于不同折射率的液体, 回波信号的变化量随被测液体折射率变化量而改变, 在一定入射光功率的条件下, 回波信号变化量与折射率变化量的关系如图 4-2 所示。

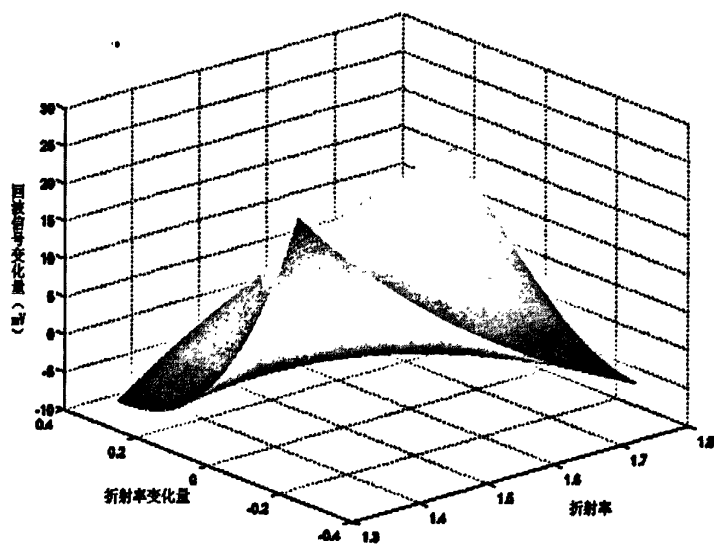


图 4-2 液体折射率变化量与回波信号变化量关系

设折射率变化前后的光纤回波强度分别为:

$$I_1 = 10 \lg \frac{p'_1}{p} = 10 \lg R(n_1, n') \eta \quad (4-10)$$

$$I_2 = 10 \lg \frac{p_2'}{p} = 10 \lg R(n_2, n') \eta \quad (4-11)$$

则光纤回波强度的变化量 ΔI 则可以表示为:

$$\Delta I = I_1 - I_2 = 10 \lg \frac{p_1'}{p_2'} = 10 \lg \frac{R(n_1, n')}{R(n_2, n')} \quad (4-12)$$

光线回波强度变化量与折射率变化量如图 4-3 所示。

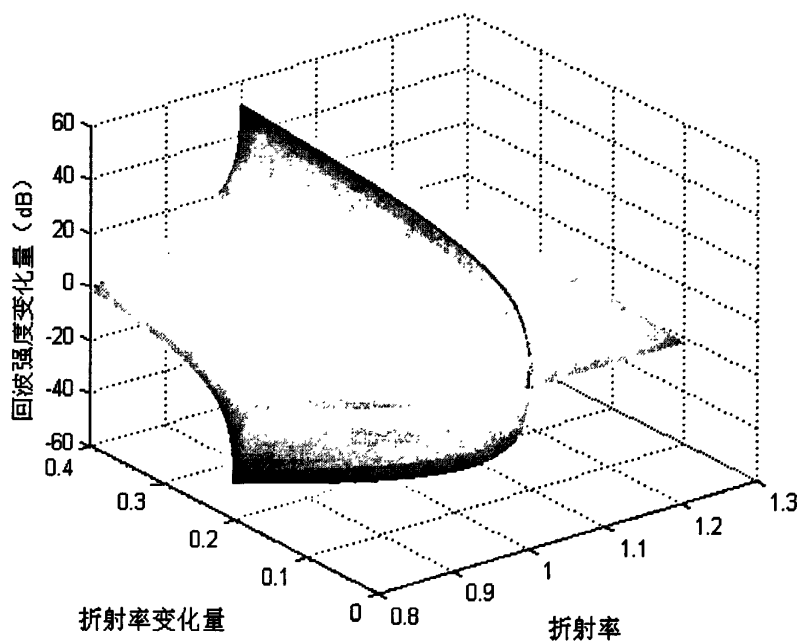


图 4-3 回波强度变化量与折射率变化量关系

理论证明, 恒温下液体的折射率与其浓度之间存在某种对应关系^[78-81]。以两种不同浓度的液体混合为例, 设实验用两种待配液体的折射率分别为 n_H 和 n_L , 且 $n_H > n_L$, 混合溶液中折射率为 n_H 的液体浓度为 α_H , 可以得到混合溶液的折射率 n_x 的表达式为:

$$n_x = \alpha_H(n_H - n_L) + n_L \quad (4-13)$$

则混合溶液与光纤纤芯的相对折射率 n_x 可以表示为:

$$n_x=\frac{n_x}{n_f}=\alpha_H(n_h-n_l)+n_l \tag{4-14}$$

其中， n_f 为光纤纤芯的折射率， n_h 和 n_l 为两种不同浓度的待配液体与检测光纤纤芯的相对折射率， $n_h=\frac{n_H}{n_f}$ ， $n_l=\frac{n_L}{n_f}$ ，且 $n_h>n_l$ 。则光纤的回波强度可以表示为

$$I_R=10\lg \eta R(n_x,n') \tag{4-15}$$

表示可以通过测量溶液的回波损耗，定量地推测该溶液的浓度。

4.2 实验结果

4.2.1 折射率检测

4.2.1.1 对纯净水进行检测

被测液体样本采用纯净水。对被测样本分别测量 10 组数据，每个数据为 1000 个采样点的均值。每组数据测量间隔 5 分钟。检测数据如表 4-1 所示。

表 4-1 检测数据

项目\数据样本	1	2	3	4	5
折射率测量值	1.3302	1.3301	1.3297	1.3303	1.3299
折射率误差	0.02%	0.08%	-0.02%	0.02%	-0.08%
项目\数据样本	6	7	8	9	10
折射率测量值	1.3301	1.3302	1.3296	1.3295	1.3304
折射率误差	0.08%	0.02%	-0.03%	-0.04%	0.03%

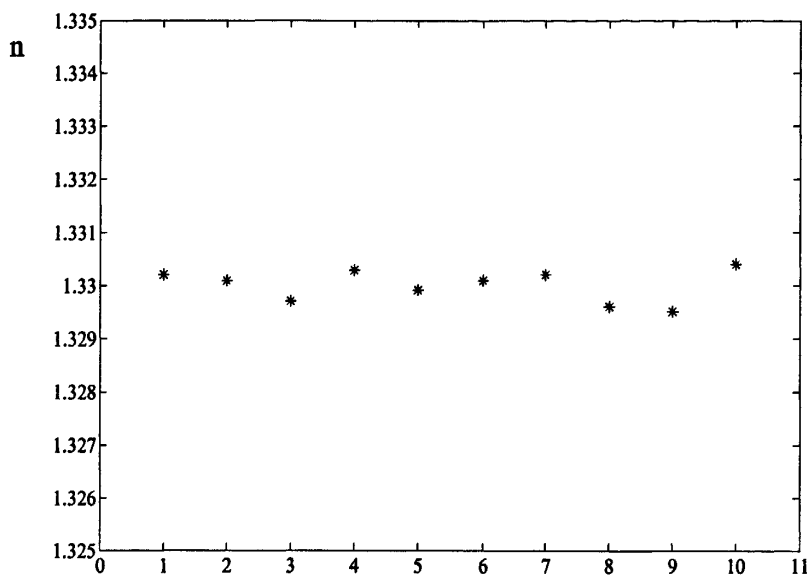


图 4-4 纯净水折射率测量结果

对于纯净水的测量重复性误差不超过 0.1%，说明搭建的折射率检测系统工作稳定。

4.2.1.2 90#汽油

被测液体样本采用 90#汽油。对被测样本分别测量 10 组数据，每个数据为 1000 个采样点的均值。每组数据测量间隔 5 分钟。检测数据如表 4-2 所示。

表 4-2 检测数据

项目\数据样本	1	2	3	4	5
折射率测量值	1.4152	1.4138	1.4156	1.4133	1.4135
折射率误差	0.05%	-0.05%	0.08%	-0.09%	-0.07%
项目\数据样本	6	7	8	9	10
折射率测量值	1.4158	1.4132	1.4157	1.4154	1.4135
折射率误差	0.09%	-0.09%	0.09%	0.06%	-0.07%

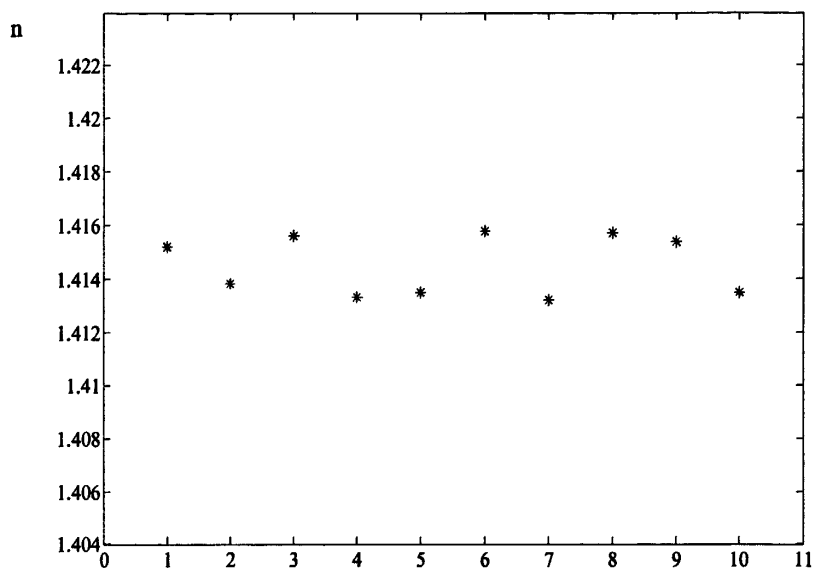


图 4-5 90#汽油折射率测量结果

对于 90#汽油的测量重复性误差不超过 0.1%，说明搭建的折射率检测系统对于 90#汽油的测量工作稳定。

4.2.1.3 93#汽油

被测液体样本采用 93#汽油。对被测样本分别测量 10 组数据，每个数据为 1000 个采样点的均值。每组数据测量间隔 5 分钟。检测数据如表 4-3 所示。

表 4-3 检测数据

项目\数据样本	1	2	3	4	5
折射率测量值	1.4258	1.4275	1.4259	1.4281	1.4283
折射率误差	-0.08%	0.04%	-0.07%	0.08%	0.10%
项目\数据样本	6	7	8	9	10
折射率测量值	1.4256	1.4262	1.4283	1.4256	1.4278
折射率误差	-0.09%	-0.05%	0.10%	-0.09%	0.06%

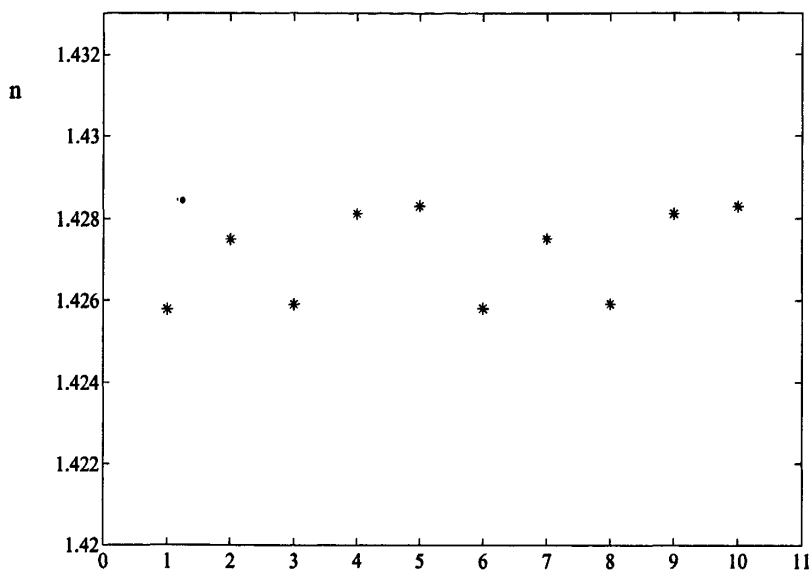


图 4-6 93#汽油折射率测量结果

对于 93#汽油的测量重复性误差不超过 0.1%，说明搭建的折射率检测系统对于 93#汽油的测量工作稳定。

4.2.1.4 97#汽油

被测液体样本采用 97#汽油。对被测样本分别测量 10 组数据，每个数据为 1000 个采样点的均值。每组数据测量间隔 5 分钟。检测数据如表 4-4 所示。

表 4-4 检测数据

项目\数据样本	1	2	3	4	5
折射率测量值	1.4335	1.4316	1.4338	1.4318	1.4343
折射率误差	0.05%	-0.08%	0.07%	-0.07%	0.10%
项目\数据样本	6	7	8	9	10
折射率测量值	1.4337	1.4321	1.4335	1.4320	1.4318
折射率误差	0.06%	-0.05%	0.05%	-0.06%	-0.07%

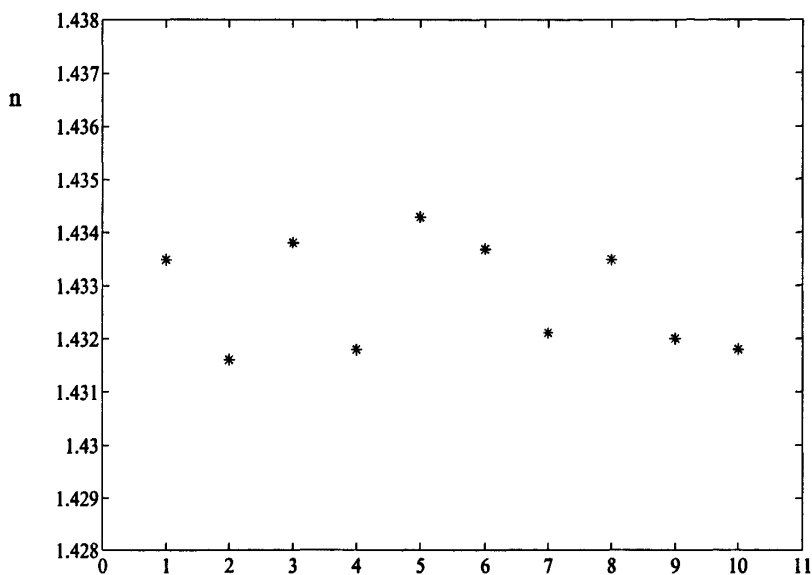


图 4-7 97#汽油折射率测量结果

对于 97#汽油的测量重复性误差不超过 0.1%，说明搭建的折射率检测系统对于 97#汽油的测量工作稳定。

4.2.1.5 -10#柴油

被测液体样本采用-10#柴油。对被测样本分别测量 10 组数据，每个数据为 1000 个采样点的均值。每组数据测量间隔 5 分钟。检测数据如表 4-5 所示。

表 4-5 检测数据

项目\数据样本	1	2	3	4	5
折射率测量值	1.4793	1.4827	1.4795	1.4823	1.4798
折射率误差	-0.12%	0.11%	-0.11%	0.08%	-0.09%
项目\数据样本	6	7	8	9	10
折射率测量值	1.4794	1.4829	1.4825	1.4798	1.4830
折射率误差	-0.12%	0.12%	0.10%	-0.09%	0.13%

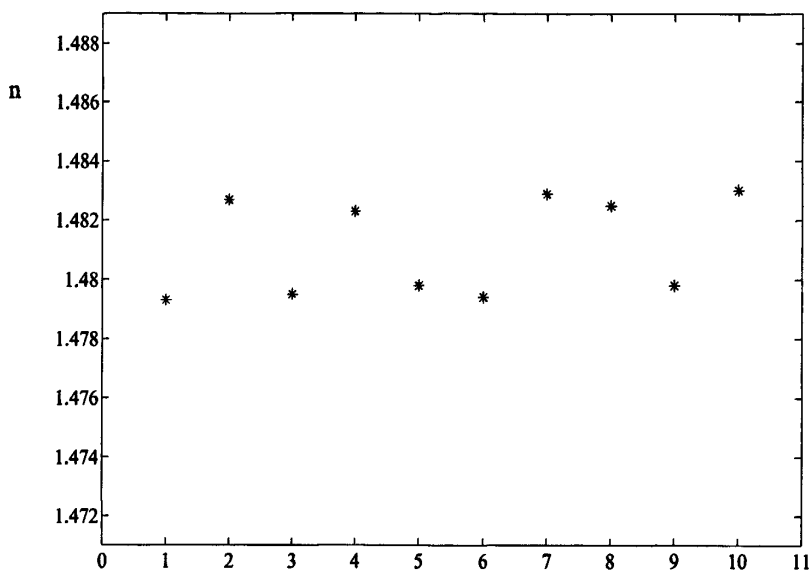


图 4-8 -10#柴油折射率测量结果

对于-10#柴油的测量重复性误差不超过 0.2%，说明搭建的折射率检测系统对于-10#柴油的测量工作稳定。

4.2.2 浓度检测

4.2.2.1 蔗糖溶液

被测液体样本采用不同浓度的蔗糖溶液。配置浓度 5%、10%、15%、20%和 25%的蔗糖溶液，形成 5 种被测样本，对每个样本分别测量，每个数据为 1000 个测量值的均值。检测数据如表 4-6 所示。

表 4-6 检测数据

项目\样本	1	2	3	4	5
浓度	5%	10%	15%	20%	25%
浓度测量值	3.20%	8.73%	13.93%	19.13%	24.40%
浓度误差	-1.80%	-1.27%	-1.07%	-0.87%	-0.60%
折射率	1.3405	1.3480	1.3555	1.3630	1.3705

折射率测量值	1.3378	1.3461	1.3539	1.3617	1.3696
折射率误差	-0.20%	-0.14%	-0.12%	-0.10%	-0.07%

结果显示：折射率测量误差不超过 0.2%，其理论值与测量值对比如图 4-9 所示。蔗糖溶液浓度测量误差不超过 2%，其理论值与测量值对比如图 4-10 所示。

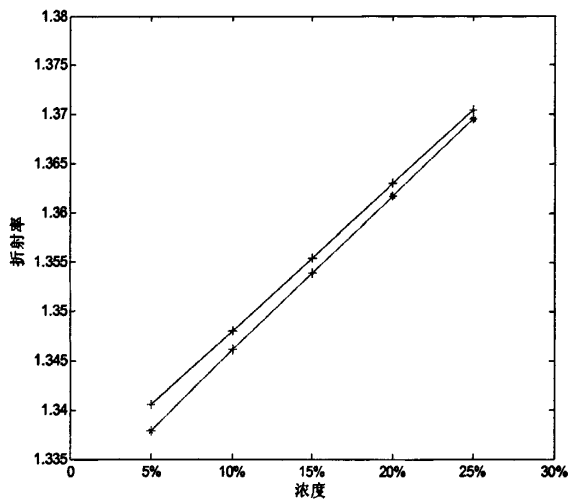


图 4-9 蔗糖溶液折射率理论值与测量值对比

其中蓝色曲线代表蔗糖溶液折射率的理论值曲线，绿色曲线代表蔗糖溶液折射率的测量值曲线。

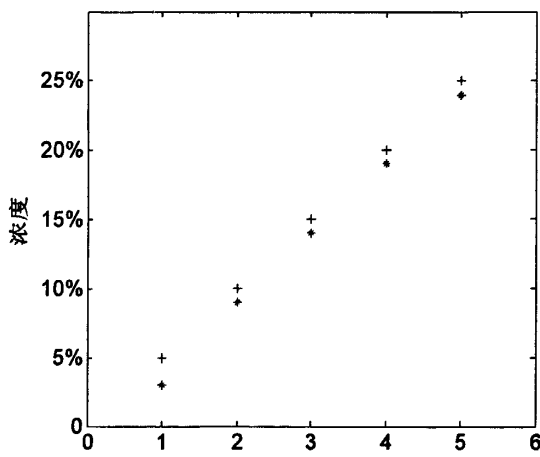


图 4-10 蔗糖溶液浓度的理论值与测量值对比

其中“+”表示蔗糖溶液浓度的理论值，“*”表示蔗糖溶液浓度的测量值。

4.2.2.2 NaCl 溶液

被测液体样本采用不同浓度的 NaCl 溶液。配置浓度 5%、10%、15%、20% 和 25% 的 NaCl 溶液,形成 5 种被测样本,对每个样本分别测量,每个数据为 1000 个测量值的均值。检测数据如表 4-7 所示。

表 4-7 检测数据

项目\样本	1	2	3	4	5
浓度	5%	10%	15%	20%	25%
浓度测量值	3.20%	8.95%	14.11%	19.17%	24.47%
浓度误差	-1.80%	-1.05%	-0.89%	-0.83%	-0.53%
折射率	1.3426	1.3541	1.3646	1.3752	1.3858
折射率测量值	1.3398	1.3519	1.3628	1.3735	1.3847
折射率误差	-0.21%	-0.16%	-0.13%	-0.12%	-0.08%

结果显示: 折射率测量误差不超过 0.3%, 其理论值与测量值对比如图 4-11 所示。

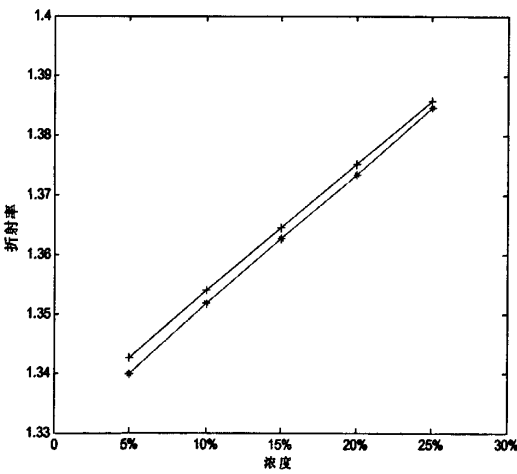


图 4-11 NaCl 溶液折射率理论值与测量值对比

NaCl 溶液浓度测量误差不超过 2%, 其理论值与测量值对比如图 4-12 所示。

其中，蓝色曲线代表 NaCl 液折射率的理论值曲线，绿色曲线代表 NaCl 溶液折射率的测量值曲线。

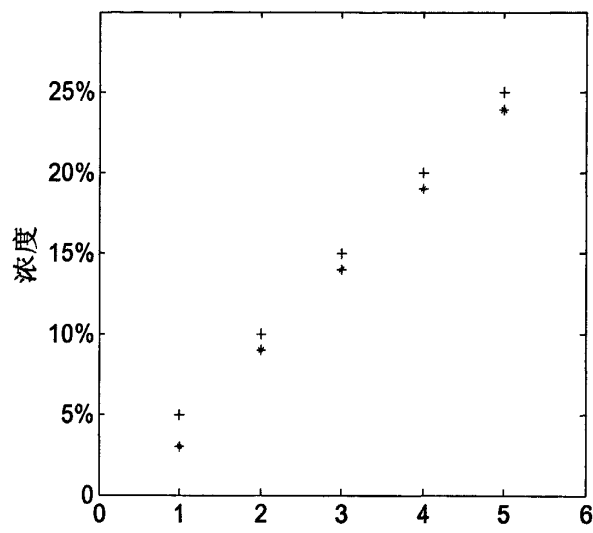


图 4-12 NaCl 溶液浓度的理论值与测量值对比

其中“+”表示 NaCl 溶液浓度的理论值，“*”表示 NaCl 溶液浓度的测量值。

4.2.2.3 乙醇溶液

被测液体样本采用不同浓度的乙醇溶液。配置浓度 5%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、50%、60%和 70%的乙醇溶液，形成 10 种被测样本，对每个样本分别测量，每个数据为 1000 个测量值的均值。检测数据如表 4-8 所示。

表 4-8 检测数据

项目\样本	1	2	3	4	5
浓度	5%	10%	15%	20%	25%
浓度测量值	3.13%	8.68%	13.19%	18.40%	23.61%
浓度误差	-1.87%	-1.32%	-1.81%	-1.60%	-1.39%
折射率	1.3344	1.3359	1.3373	1.3388	1.3402
折射率测量值	1.3339	1.3355	1.3368	1.3383	1.3398
折射率误差	-0.04%	-0.03%	-0.04%	-0.04%	-0.03%

项目\样本	6	7	8	9	10
浓度	30%	40%	50%	60%	70%
浓度测量值	28.47%	38.54%	48.96%	61.46%	71.53%
浓度误差	-1.53%	-1.46%	-1.04%	1.46%	1.53%
折射率	1.3416	1.3445	1.3474	1.3503	1.3532
折射率测量值	1.3412	1.3441	1.3471	1.3507	1.3536
折射率误差	-0.03%	-0.03%	-0.02%	-0.03%	-0.03%

结果显示：折射率测量误差不超过 0.1%，其理论值与测量值对比如图 4-13 所示。
乙醇溶液浓度测量误差不超过 2%，其理论值与测量值对比如图 4-14 所示。

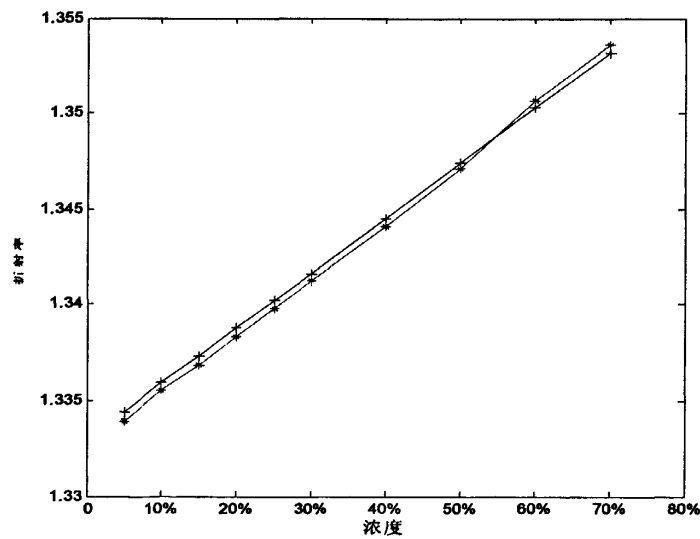


图 4-13 乙醇溶液折射率理论值与测量值对比

其中，蓝色曲线代表乙醇液折射率的理论值曲线，绿色曲线代表乙醇溶液折射率的测量值曲线。图 4-14 中，“+”表示乙醇溶液浓度的理论值，“*”表示乙醇溶液浓度的测量值。

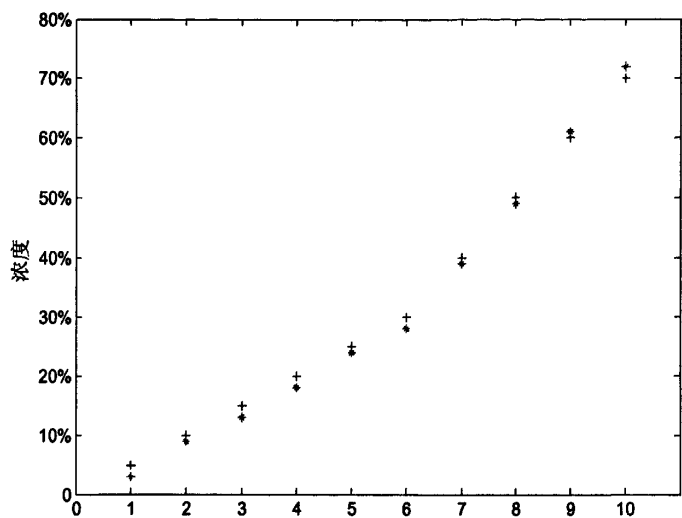


图 4-14 乙醇溶液浓度的理论值与测量值对比

4.3 实验分析

通过实验，可以看到对于实验中所有的样品，包括纯净水、不同浓度的蔗糖溶液、NaCl 溶液、乙醇溶液，以及成分相对复杂的 90#、93#、97#汽油和-10#柴油，实验结果与理论结果是一致的。从结果上分析，蔗糖溶液和 NaCl 溶液的测量误差要稍大于纯净水和乙醇溶液的测量误差。这种差别一部分原因来源于溶质在溶液中的状态的不同。溶液中溶质的状态又会影响到光的传播特性，进而影响到折射率的测量。相溶较好的溶质与溶剂构成的溶液更加均匀稳定，而这也是纯净水和乙醇溶液测量误差较小的原因之一。

此外，在浓度较低时测量误差较大，经过分析得出溶质溶解扩散得不均匀是可能造成这种现象的原因之一。在测量过程中，由于测量时间过长以及测量时间间隔的存在使得被测样本会产生微量的沉淀或挥发，这些因素在一定程度上影响到测量结果的准确性。

对于成分相对复杂的 90#、93#、97#汽油和-10#柴油的折射率测量实验结果表明，本文所提出的测量方法对于这四种液体同样适用，而且可以对其进行区分，测量结果对比如图 4-15 所示。

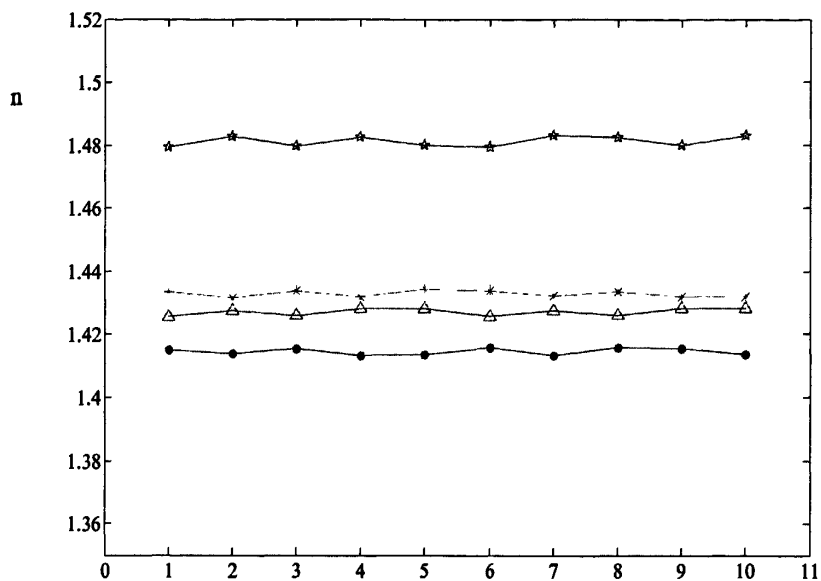


图 4-15 测量结果对比

其中，五角星紫色线表示-10#柴油折射率的测量结果，由于柴油与汽油的折射率差异较大，-10#柴油的折射率曲线明显远离三种汽油的折射率曲线，容易区分。三种标号的汽油由于成分相似，其折射率曲线比较接近，蓝色星形曲线为97#汽油折射率曲线、红色三角型曲线为93#汽油折射率曲线、绿色圆点曲线为

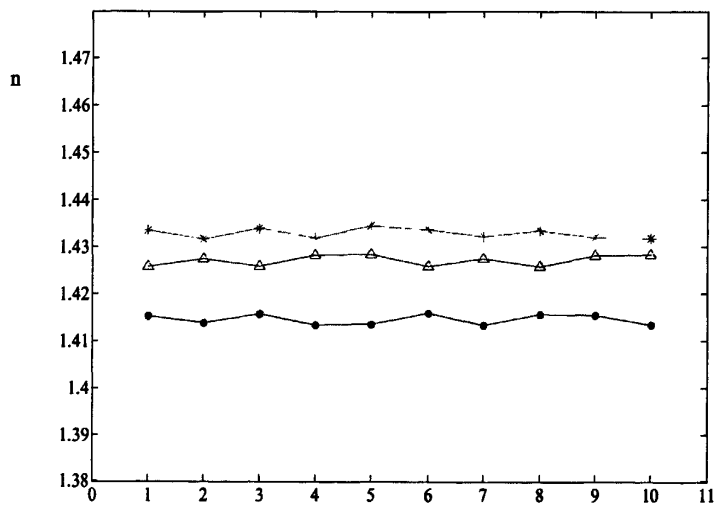


图 4-16 汽油测量结果对比

90#汽油折射率曲线。三种标号汽油折射率较为接近，依次相差约 0.01，所以其折射率曲线也较为接近。单独对比 90#、93#、97#汽油折射率曲线，如图 4-16 所示。

可以发现三种汽油的折射率曲线没有重叠，说明本文提出的折射率测量方法可以对三种相似汽油进行测量，并加以区分。进一步说明本文提出的测量方法可以对折射率相近的液体进行区分测量。

通过对比汽油和柴油的测量结果可以发现，汽油的测量误差不超过 0.1%，而柴油的测量误差不超过 0.2%。柴油的测量误差要大于汽油的测量误差。这是由于实验中所使用的柴油的折射率为 1.4811，比较接近检测光纤 1.52 的折射率。当检测光纤折射率为 1.52 时，被测液体折射率与反射强度如图 4-17 所示。

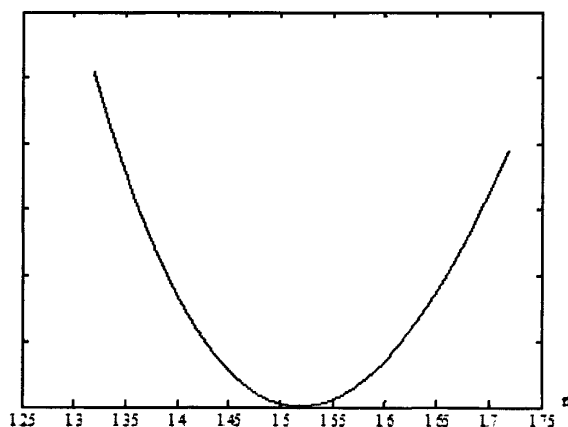


图 4-17 反射强度对比

与汽油相比，柴油的折射率更接近于检测光纤的折射率，造成对柴油进行检测时，回波信号强度明显偏小，信噪比更低，容易收到噪声的干扰，所以测量误差要大于汽油折射率测量误差。如果被测液体折射率与检测光纤折射率一样时，理想情况下，界面会非常不明显，几乎所有的光都沿介质继续传播，除了杂质散射回来的光，很难有光因为界面反射回来。所以，被测液体折射率越接近检测光纤折射率，测量误差越大。

对于被测液体折射率的测量值存在着一个二选一的问题。由反射比公式可知，对于一定的反射强度，可以得到两个折射率的测量值，一个大于检测光纤的折射率，另一个则小于检测光纤的折射率。对于这个问题，可以分为两种情况考虑。

对于一种已知成分的溶液，选择测量值的时候可以根据该溶液在同种条件下的典型值来选取，由于溶液浓度的变化所造成的折射率变化很小，所以不同浓度

该种溶液的折射率不会过多的偏离其典型值,据此可以对已知成分溶液的测量值进行选取。

对于一种未知溶液,无法得知其折射率典型值的情况下,需要采取一定的措施来指导测量结果的选择。可以通过对不同浓度溶液测量结果的比较进行选取,如果对该种溶液进行一定的稀释,发现其回波信号逐渐增强,可以判断该种溶液的折射率小于检测光纤的折射率;如果经过稀释发现其回波信号逐渐减弱,可以判断该种溶液的折射率大于检测光纤的折射率。对于溶液浓度连续变化的情况,则可以根据其回波信号的强弱变化进行判断。

4.4 本章小结

本章详细介绍了实验的原理和方法,并分别对折射率测量方法和浓度测量方法进行了实验,主要包括以下几方面:

1. 阐述了液体特性测量原理,溶液浓度变化会引起折射率的变化,体现在回波信号强度的改变,浓度、折射率与回波信号存在着一定的对应关系,通过对光纤回波信号的强度进行检测,可以实现对溶液折射率和浓度的测量。
2. 设计并进行了大量折射率测量实验,通过对纯净水、90#、93#、97#汽油和-10#柴油的检测,对本文所提出的折射率测量方法进行了验证。
3. 设计并进行了大量溶液浓度测量实验,通过对蔗糖溶液、NaCl 溶液和乙醇溶液的检测,对本文所提出的液体浓度测量方法进行了验证。
4. 对实验结果进行了处理,对实验中出现的一些现象做出了分析。

第五章 总结与展望

5.1 全文总结

作为一门新兴的传感技术,光纤传感在航空航天、石油、电力、核工业、医疗、军事、科学研究等众多领域得到了广泛的应用。与传统的传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀等独特优点,可以在高电压、大噪声、高温、强腐蚀性等特殊环境下工作。

利用光纤传感器重量轻、体积小、易弯曲的特点,可以将光纤制成不同外形尺寸的各种传感器,适用于航空、航天、石油化工等环境特殊、对空间有特别要求的检测。利用光纤传感器灵敏度高的特性,可以制成测量加速度、辐射、磁场等物理量的化学传感器和生物传感器等。由于光纤的传输损耗很小,光纤传感技术易与遥测技术相结合,实现对被测现场的远距离监控。利用光纤传感器的特性对液体介质特性进行检测也是光纤传感的重要应用之一。

在生产、生活的各个领域,液体的浓度是表征溶液特性的主要参量之一。对液体浓度的测量与控制在造纸、化工、制糖、食品、制药等行业中有着广泛的应用,是保证产品质量和提高产品质量的重要技术手段。国内外已经对液体浓度的光学测量方法进行了大量的研究。

本文在深入研究光纤传感基础理论的基础上,提出了一种基于光纤端面回波的溶液折射率和浓度测量方法,搭建了液体特性检测系统,并通过大量实验验证了该检测方法的可行性,完成了以下工作:

1. 研究光波在光纤内部的传播机理以及在界面上与介质相互作用的特性,针对不同介质形成的界面会有不同的反射情况发生,可以从回波信号中提取出形成界面的介质特性,对不同介质形成的界面进行分析,为液体介质特性检测打下理论基础。
2. 在深入研究光波与介质相互作用过程的基础上,提出一种基于光纤端面回波的液体特性测量方法,并对耦合损耗、微弯损耗、本征损耗以及偏振度等影响因素进行了分析。
3. 针对生产中液体介质特性检测的需要,设计并搭建了一套液体浓度在线检测实验系统,为液体特性检测方法的验证提供了必要条件。实验系统主要由实验光路、光纤探头以及信号的获取与处理三部分组成。

4. 通过大量实验验证系统的性能, 通过对纯净水、90#、93#、97#汽油和-10#柴油的检测验证了本文提出的折射率检测方法, 通过对蔗糖溶液、NaCl 溶液和乙醇溶液的检测验证了本文提出的液体浓度检测方法, 为基于光纤端面回波的液体特性检测提供了可行性证明。

5.2 工作展望

本课题的研究工作为液体介质特性检测提供了一种新的手段, 也为下一阶段的研究工作打下了基础。研究工作虽然取得了可喜的成果, 但还有许多需要改进和完善的地方。

1. 由于本系统为接触式测量, 光纤探头长期与被测液体接触, 不可避免地在探头表面结垢, 长时间的积累会造成一定程度上的影响。所以, 研究如何去除或者减小由于结垢所带来的影响是今后工作任务之一。
2. 本文完成的针对不同浓度的蔗糖溶液、NaCl 溶液、乙醇溶液实验表明对此类成分简单的溶液浓度测量可行。但是对于 90#、93#、97#汽油和-10#柴油等成分相对复杂的液体只是进行简单的折射率测量和区分, 对其混合物进行测量是否可行还缺乏理论依据, 需要进行深入研究。

参考文献

- [1] 刘铁根, 刘琨, 江俊峰等, 天津大学光纤传感技术研究部分最新进展, 光电工程, 2010, (03):1~6, 38
- [2] Culshaw b., Fiber optics in sensing and measurement, IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 6(6):1014~1021
- [3] Grattan K.T.V., Sun T., Fiber Optic Sensor Technology: An Overview, Sensors and Actuators, 2000, 82(1-3):40~61
- [4] Kobayashi T., Kasashima M., Iwashima H., Jian Cao, Micro-bend optical fiber sensor for high-spatial resolution measurement of strain distribution, SICE 2003 Annual Conference, 2003,2:2068~2071
- [5] Jae Jeon, Cheol Woo Jung, Won Zoo Park, Kwang Sik Lee, Jung Bae Kim, Optical current sensor using magneto-optic effects, Plasma Science, 2003, ICOPS 2003. IEEE Conference Record The 30th International Conference on, 2003, Jeju, Korea:350
- [6] 倪玉婷, 吕辰刚, 葛春风等, 基于 OTDR 的分布式光纤传感器原理及其应用, 光纤与电缆及其应用技术, 2006, (01): 1~4
- [7] 胡晓东, 胡小唐, 刘文晖, 基于布里渊放大结构的分布式光纤温度传感技术的研究, 天津大学学报, 1999, v32(06): 678~681
- [8] 刘引, 光纤传感器在电力系统中的应用, 魅力中国, 2009, (13): 55~57
- [9] Chuan Li, Yi-Mo Zhang, Hui Liu, Sheng Wu and Cai-Wen Huang, Distributed fiber-optic bi-directional strain-displacement sensor modulated by fiber bending loss, Sensors and Actuators A: Physical, 2004,111(2-3):236~239
- [10] 孙素梅, 陈洪耀, 尹国盛, 光纤传感器的基本原理及在医学上的应用, 中国医学物理学杂志, 2008, v25 (05): 846~850
- [11] 张巍, 吕志涛, 光纤传感技术用于桥梁监测, 公路交通科技, 2003, v20(03): 91~95
- [12] 杨帅, 丁勇, 左晓宝, 光纤传感器在岩土工程中的应用, 常州工学院学报, 2008, v21 (B10): 245~248
- [13] 张森, 王臻, 刘孟华等, 光纤传感技术的发展及应用, 光纤与电缆及其应用技术, 2007, (03): 1~3, 8
- [14] 杨华勇, 反射式强度型光纤传感器强度调制特性的数学模型与关键技术的研究: [博士学位论文], 长沙, 国防科学技术大学, 2002

- [15] 张朋, 王宁, 陈艳等, 光纤传感器的发展与应用, 现代物理知识, 2009, (02): 35~36, 37~38
- [16] 唐宇, 刘传菊, 光纤传感器及其研究现状, 科技资讯, 2009, (07): 17~18
- [17] 朱启荣, 杨国标, 曾伟明, 新型多功能光纤传感器研究及应用, 现代科学仪器, 2008, (05): 17~19
- [18] 赵育良, 李开端, 光纤传感器在测量领域的发展与应用, 航空计测技术, 2001, v21(06): 22~25, 41
- [19] 吴洁, 薛玲玲, 光纤传感器的研究进展, 激光杂志, 2007, v28(05): 4~5
- [20] 黄民双, 梁大开, 袁慎芳等, 应用于智能结构的光纤传感新技术研究, 航空学报, 2001, v22(04): 326~329
- [21] Narayanamurthy C.S., ATF Campus, Analysis of the localization of Michelson interferometer fringes using Fourier optics and temporal coherence, European Journal of Physics, v 30, n 1, p 147-155, 2009
- [22] Yuan Libo, Yang Jun, Liu Zhihai, compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer, IEEE Sensors Journal, v 8, n 7, p 1114-1117, July 2008
- [23] Frazão O., Silva S.F., Viegas, J., Baptista J.M., Santos J.L., Roy P., A hybrid fabry-perot/Michelson interferometer sensor using a dual asymmetric core microstructured fiber Measurement Science and Technology, v 21, n 2, 2010
- [24] Nguyen, Hoang M. E.W.J.M., Rogge S., Salemink H.W.M., Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer operating in the self-collimation mode of light, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 7609, 2010
- [25] Kawanishi, Tetsuya, Integrated lithium niobate Mach-Zehnder interferometers for advanced modulation formats, IEICE Transactions on Electronics, v E92-C, n 7, p 915-921, 2009
- [26] Kolkiran, Aziz, Agarwal, Heisenberg limited Sagnac interferometry, Optics Express, v 15, n 11, p 6798-6808, May 28, 2007
- [27] Shahriar M.S., Salit M., Anomalous-dispersion enhanced active sagnac interferometry for gravitational wave detection, Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, v6906, 2008, Quantum Electronics Metrology
- [28] Vidal Josep, Nicolas Josep, Campos Juan, Methods to improve the accuracy of the surface reconstruction with a fizeau interferometer, Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering, v7448, 2009, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components IV

- [29] Bitou, Youichi, Ueki, High-precision, low-coherence Fizeau interferometer using a pulsed laser diode for measurement of transparent plates, *Measurement Science and Technology*, v 21, n 7, 2010
- [30] Chakraborty Arup Lal, Ruxton Keith, Johnstone Walter, Suppression of intensity modulation contributions to signals in second harmonic wavelength modulation spectroscopy, *Optics Letters*, v35, n14, p2400~22402, July 15, 2010
- [31] Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi, Frequency shift characteristics analysis of LiNbO₃ waveguide electro-optic intensity modulator, *Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers*, v 36, n 4, p 901-905, April 2009
- [32] Bian.Lin, Effects of low-frequency biasing on spontaneous otoacoustic emissions: Frequency modulation, *Journal of the Acoustical Society of America*, v 124, n 5, p 3009-3021, 2008
- [33] Lazzarini.Victor, Timoney.Joseph, Lysaght, The generation of natural-synthetic spectra by means of adaptive frequency modulation, *Computer Music Journal*, v 32, n 2, p 9-22, 2008
- [34] Zheng,Jesse, Differential all-birefringent-fiber frequency-modulated continuous-wave Sagnac gyroscope, *Optical Engineering*, v 45, n 5, May 2006
- [35] Fleischhaker Robert, Dey Tarak N, Evers Jorq, Phase modulation induced by cooperative effects in electromagnetically induced transparency, *Physical Review A-Atomic, Molecular, and Optical Physics*, v82,n1,july 14, 2010
- [36] LI Deng-ke, CAO Zi-zheng, DONG Ze,SHAO Yu-feng,ZHANG Chao-li, CHEN Lin., A novel scheme of optical label switching technology using phase modulator, *Journal of Optoelectronics.Laser*, 2010, (01)
- [37] Komanduri, Ravi K. , Jones, W. Michael, Oh.Chulwoo,Escuti, Michael J.,Polarization-independent modulation for projection displays using small-period LC polarization gratings, *Journal of the Society for Information Display*, v 15, n 8, p 589-594, August 2007
- [38] Huang Lirong ,Huang Dexiu, Miao Qingyuan ,Wavelength conversion based on cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers, *Pan Tao Ti Hsueh Pao/Chinese Journal of Semiconductors*, v 24, n 8, p 882-886, August 2003
- [39] Chew Khain-hooi, Iwata Makoto, Shin Frankin G, Polarization modulation profiles in ferroelectric superlattices, *Ferroelectrics, Letters Section*, v36, n1~2, p12~19,2009
- [40] Chen Gang, Martini Rainer, Park Seong-Wook, Bethea Clyde G., Chen I. Chun A, Grant P.D., Dudek R, Liu H.C., Optically induced fast wavelength modulation in a quantum cascade laser

- [41] Nq B.P., Luen S.H., Zhang Y., Soh Y.C., Optical detection using multi-wavelength modulation, Key Engineering Materials, v381~382, P325~328, 2008
- [42] 郑刚, 孙浩, 黄廷磊, 虞先煌. 颗粒浓度在线监测的双波长消光法[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21 (5): 533~535
- [43] 赵海燕, 数字色度法检测不透明液浓度的研究: [硕士学位论文], 北京, 中国农业大学, 2006
- [44] 张娜, 光纤传感器液体浓度检测系统的研究: [硕士学位论文], 山东, 山东大学, 2005
- [45] 焦佳, 强度调制型光纤传感器液体浓度检测系统的研究: [硕士学位论文], 天津, 天津大学, 2008
- [46] 辛督强, 测量液体折射率的几种方法, 大学物理, 2007, 26 (1), 34-37
- [47] 俞世钢, 液体折射率测定方法分析, 光学仪器, 2007, 29 (4), 1-6
- [48] 王彦, 梁大开, 欧启标等, 测量液体折射率与浓度的光纤光栅传感器, 传感器与微系统, 2007, 26 (7), 24-26
- [49] 李凡, 萧泽新, 光学临界角法在啤酒生产过程浓度检测中的应用, 桂林电子工业学院学报, 2003, 23 (6), 87-90
- [50] 张庆, 王小怀, 掠射法测液体折射率时折与介质折射率的关系, 韩山师范学院院报, 2005, 26 (3), 24-26
- [51] 李明溪, 用最小偏向角法测量液体折射率, 华南师范大学学报(自然科学版), 2005, 2, 117-120
- [52] 柯瑞金, 利用迈克尔孙干涉仪测定液体折射率, 物理实验, 2000, 20 (2), 10-11
- [53] 孙家军, 高峰, 液体折射率的干涉法测量, 辽宁科技大学学报, 2008, 31 (2), 113-114
- [54] 雷华, 鲁阳, 潘勤敏, 用干涉原理测定液体折射率的新方法, 光学技术, 2001, 27 (5), 441-444
- [55] 江国海, 利用瑞利干涉仪测定不同浓度液体的折射率, 大学物理实验, 2004, 17 (2), 4-6
- [56] 花世群, 骆英, 洪云, 基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法, 中国激光, 2006, 33 (11), 1542-1545
- [57] 王彦方, 吴俊林, 用等厚干涉测液体折射率, 陕西师范大学学报(自然科学版), 2007, 35, 57-58
- [58] 郭秀芝, 陈若辉, 用布儒斯特角法测量各向同性固体的折射率, 吉林师范大学学报(自然科学版), 2006 (3), 81-82
- [59] 杨坤, 王向朝, 步扬, 椭圆偏振的研究进展, 测量与计量, 2007, 44 (3), 43-47

- [60] 余平, 张晋敏, 椭偏仪的原理和应用, 合肥学院学报(自然科学版), 2007, 17(1), 87-90
- [61] 曾捷, 梁大开, 曹振新, 棱镜型表面等离子体波传感器测量液体折射率的研究, 应用激光, 2003, 23(2), 97-99
- [62] 曾捷, 梁大开, 曾振武, 杜燕, 基于 SPR 光谱分析的液体折射率测量研究, 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4), 723-726
- [63] 朱彩莲, 吴乐南, 杨洋, 光纤表面等离子体波传感器测量液体折射率的研究, 传感技术学报, 2004, 4, 675-678
- [64] 邱浩等, 应用于折射率检测的光纤表面等离子体波传感器的研究, 激光杂志, 2001, 22(1), 26-27
- [65] 李志全, 黄丽娟, 王莉, 吴飞, 朱丹丹, 不同折射率调制的光纤光栅的特性及其应用, 光学技术, 2003, 29(6), 730-734
- [66] 贾宏志, 光纤光栅传感器的理论和技术研究: [博士学位论文], 西安, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001
- [67] Jeff Hecht, 光纤光学, 北京: 人民邮电出版社, 2004
- [68] 郁道银, 谈恒英, 工程光学, 北京: 机械工业出版社, 2000
- [69] 饶云江, 光纤技术, 北京: 科学出版社, 2006
- [70] 虞丽生, 光导纤维通信中的光耦合, 人民邮电出版社, 1979
- [71] 刘德明, 向清, 黄德修, 光纤光学, 国防工业出版社 1995
- [72] 李学金, 光纤微弯传感器及反射式强度调制光纤传感器研究, 博士学位论文, 天津大学, 2005
- [73] 游善红, 郝素君, 殷宗敏, 李新碗, 单模光纤中弯曲损耗的测试与分析, 光子学报, 2003, 32(4): 409~412
- [74] 郝素君, 游善红, 李晓东, 陈志勋, 单模光纤弯曲损耗的测量与分析, 光纤与电缆及其应用技术, 2003, (1): 12~15
- [75] 廖延彪, 光纤光学, 北京: 清华大学出版社, 2000
- [76] 孙圣和, 王廷云, 徐影, 光纤测量与传感技术, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000
- [77] 李钟铭, 偏振度反演液体密度研究——以盐水为例: [硕士学位论文], 长春: 东北师范大学, 2008
- [78] 张涛, 光在介质中的折射, 中国科学 G 辑, 2007, 37(2): 137~145
- [79] 张涛, 光与电子之间能量交换的一个诱因, 物理学报, 2009, 58(1): 234~237
- [80] Zhang Tao, Refraction of light in media, Science in China Series G, 2007, 50(5): 591~600
- [81] Zhang Tao, Effect of magnetic field of light on refractive index, Chinese Physics, 2004, 13(8): 1358~1364

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 诸葛晶昌, 曾周末, 陆丽, 李健, 张宇, 基于光学传感器的成品油识别方法, 光学精密工程, 2009, 17 (6): 1479~1484, 核心期刊 (EI: 20093112227870)
- [2] 诸葛晶昌, 曾周末, 陆丽, 张宇, 封皓, 基于电子云导体模型的成品油识别系统, 传感器与微系统, 2009(10): 91~94, 核心期刊

参与的科研项目:

- 1. 国家自然科学基金项目(No.60974110): 基于电子云导体模型的成品油管道混油监测系统及关键技术研究
- 2. 教育部博士点基金项目(No. 200800560020): 基于电子云导体模型的油品识别技术与系统研究

致 谢

真挚地感谢我的导师曾周末教授。本论文是在导师曾周末教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。导师广博的学识、严谨的治学态度和尊生爱教的情怀深刻地影响着我。在我这几年在职攻读硕士的过程中，导师不仅在学习上答疑解惑、科研上引路指航，更重要的是给予我生活和精神上莫大的关心和支持，并以言传身教不断激励和鞭策我做好人、行对事、为良师。桃李不言，下自成蹊。能得到导师辛勤的培育和无私的帮助，是我最大的荣幸和收获。导师将是我一生的良师益友。在此谨对曾周末老师致以最衷心的感谢和深深的敬意！

真诚感谢课题组靳世久教授、李健副教授、陈世利副教授、李一博副教授、张宇博士，他们博学、睿智、勤勉、谦和，一直以来使我深受感染，是我前进的楷模，谢谢他们给予我的真诚关心和指导！

特别感谢本课题组的诸葛品昌博士。诸葛博士从课题确立、方案设计、现场试验到论文完成都给予了我充分的指导和热情的帮助，使我受益匪浅。在此表示深深谢意！

在完成学业过程中，得到了郭青老师、李清老师、李金荣老师、张晓洁老师、陈峯老师、罗钢老师、魏耀林老师等热心的帮助和支持，让我无比的温暖和感动，在此向他们表示感谢！

感谢国家自然科学基金(60974110)，教育部博士点基金(200800560020)对课题研究工作的支持。

感谢家人和朋友默默的支持和理解！