



高新技术译丛

Optical Measurement Techniques
Innovations for Industry and the Life Sciences

光学测量技术

——工业与生命科学领域的革新

【芬兰】 Kai-Erik Peiponen Risto Myllylä 【俄】 Alexander V. Priezzhev 著
陈世同 徐 博 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer

光学测量技术

——工业与生命科学领域的革新

Optical Measurement Techniques

——Innovations for industry and the Life Sciences

Kai – Erik Peiponen

Risto Myllylä

Alexander V. Priezzhev

陈世同 徐博 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-036 号

图书在版编目(CIP)数据

光学测量技术:工业与生命科学领域的革新/(芬)
佩波宁(peiponen, k-e.), (芬)米吕莱(Myllyla. R.),
(俄罗斯)普里耶热夫(priezzhev, Al. V.)著;陈世同,
徐博译. —北京:国防工业出版社, 2016.4

书名原文:Optical measurement techniques
innovations for industry and the life sciences
ISBN 978-7-118-10406-6

I. ①光... II. ①佩... ②米... ③普... ④陈... ⑤徐
... III. ①光学测量 IV. ①TB96

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第071361号

Translation from English language edition:

Optical Measurement Techniques

by Kai - Erik Peiponen, Risto Myllylä and Alexander V. Priezzhev

Copyright© 2009 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 8½ 字数 145 千字

2016年4月第1版第1次印刷 印数 1—1500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

光学测量技术通过各种光学现象与光学特性可以得到测量对象的信息,因此具有广泛的应用领域。光学现象通常是指介质与光的相互作用,它们的相互作用可能是线性的,包括光的吸收、光的色散、荧光特性以及光的散射。通过介质中的光学特性(振幅、相位、偏振、波长和速度)可以得到测量对象的信息。如果光学现象是非线性的,则光强、振幅就是获得测量对象信息的关键因素。

本书给出了一些光学测量技术,特别是应用在工业与生命科学领域的技术。由于应用领域非常广泛,因此不可能涵盖所有方面,而是集中介绍光学光谱、机器视觉、激光测速仪、表面质量测量、位置测量、距离测量、位移测量等方面。

由于工业光学测量的最新科技发明通常很难应用到实际中,所以传统的测量方法受到青睐。然而,光源、光探测器、新型光学元件和 CCD 相机的迅速发展使得传统光学测量技术在工业领域经历了一次复兴。

生命科学的领域相当广阔,特别是纳米技术的发展开辟了新的领域,如纳米药物、光学断层成像技术。这些新技术将会有力地推动光学测量和光学成像技术在生命科学领域的应用。本书将介绍一些在生命科学领域中应用广泛的光学测量技术。

RM 要感谢芬兰科学院在本书创作过程中给予的经济支持。K-EP 感谢 Mikko Juuti 博士给这本书的技术建议及数据支持。AVP 感谢罗蒙诺索夫莫斯科国立大学国际激光中心的同事们提出的建设性意见。

芬兰约恩苏大学	Kai - Erik Peiponen
芬兰奥卢大学	Risto Myllyla
俄罗斯莫斯科国立大学	Alexander V. Priezhev
	2008 年 10 月

第 1 章	概述	1
第 2 章	应用光学光谱	2
2.1	透射光谱	3
2.2	液体浑浊度的测量	7
2.3	反射光谱	8
2.3.1	折射仪	9
2.3.2	波长扫描式反射仪	10
2.3.3	表面等离子体共振光谱仪	14
2.4	多孔介质的漫反射测量	19
2.5	多孔介质光学常数的估计	20
2.6	非线性光谱学	22
2.7	小结	24
第 3 章	机器视觉系统	25
3.1	手机塑料包装的检测	25
3.2	基于衍射光学元件的机器视觉技术在浮法玻璃厚度 测量中的应用	26
3.2.1	衍射光学元件	26
3.2.2	浮法玻璃	27
3.2.3	使用 DOE 在线测量浮法玻璃厚度	27
3.3	监测压缩纸的机器视觉系统	30
3.4	成像光谱仪	31
3.5	小结	33
第 4 章	表面粗糙度和光泽度的光学检验	34
4.1	表面粗糙度参数的定义	34
4.2	完成标记的光学检测	37
4.3	基于镜面反射激光探针的表面粗糙度测量	38

4.4	利用聚焦激光束进行表面粗糙度测量	43
4.5	表面粗糙度监测低相干性位置传感器	45
4.6	低相干性干涉仪作为多孔介质的表面轮廓测量仪	47
4.7	镜面光泽度	48
4.8	基于光泽计的衍射光学元件	50
4.9	光泽度评估的统计学参数	53
4.10	小结	56
第5章	位置、距离和位移测量	57
5.1	距离测量	58
5.1.1	激光脉冲飞行时间测距	62
5.2	激光雷达	67
5.3	选通成像	69
5.4	使用位置灵敏探测器(PSD)进行光束位置测量	70
5.4.1	分辨率和扰动	73
5.5	应用	75
5.5.1	交通控制应用	75
5.5.2	医学应用	77
5.5.3	工业应用	78
5.5.4	监测桥梁应用	81
5.5.5	铁路轨道测量和捣固机应用	83
5.5.6	射击训练应用	84
5.6	小结	86
第6章	激光速度测量	87
6.1	激光多普勒测速	87
6.2	远程测速与测风激光雷达	90
6.3	激光多普勒显微镜	93
6.4	多普勒光学相干层析成像仪	97
6.5	激光多普勒流量计和成像系统	105
6.6	粒子图像测速仪(包括毛细管显微镜和血管造影仪)	107
6.7	小结	114
	参考文献	115

概 述

光学测量技术在生命科学领域的临床研究以及工业测量方面都体现出很大的优势。其优势包括非接触、无损坏、快速性以及恶劣环境下测量的自适应性。当然,还有一些任务仅靠传统的电子传感器就能完成,此时就可以继续使用这种非光学技术。然而,当测量手段只有光纤,或者必须是非接触测量的情况下,光学测量技术就显得极其重要。典型的例子就是,在工业领域中制造商总是力求降低产品成本,而这通常会对测量系统的实现产生影响。虽然如此,一旦光学测量技术的优势变得明显(例如对于产品经理和质检工程师),对于新指标的要求会变得更低。通常,我们应该告诉使用者设备的精度、可靠性以及如何利用这些设备解决实际问题,而不是和工业人员讨论光学测量技术背后的科学。对于一个科学家来说,找到合作伙伴间的共同语言通常是从学术界到工业领域的一个飞跃。

举例来说,在生命科学的概念中,医生会很快地引进先进的光学测量设备并理解其背后的科学背景。这种趋势推动了先进的光学传感器及成像技术在生命科学领域中的发展。当涉及到用于生命科学领域的光学测量技术时,价格通常不是主要考虑的问题。

本书的目标是让读者了解一些已经应用在工业和生命科学领域的光学测量技术。此外,本书还讨论了光学测量技术的未来发展趋势。

应用光学光谱

长期以来,光学光谱^[1]一直是研究和检验材料的基本工具。光源、探测器、显示器等光电器件的基本原理都属于光谱学范畴。可以用不同方式描述光学光谱,如传播、反射、荧光、光谱。通常利用光谱区域来定义光谱的名称,如紫外光、可见光和近红外光谱。电磁辐射的波长有很大的作用,它可以感知介质的基本单位,包括电子、原子和检测电磁相互作用的分子。如今,可以将不同的光谱粗略地分成两类,即线性光谱和非线性光谱。光谱设备的使用说明(包括线性光学光谱测量)已经很完善,在设备齐全的实验室还可以见到分光光度计,用于医疗和工业样本检测。目前光谱设备可以检测大量的工业产品或临床样本。颜色是样品的一个基本属性。

根据简单的光电子学原理,已经建立起强大的测量系统,用于对固体、液体和气体样品的例行检查。市场上配有数据处理和显示软件的商业微型光谱仪种类很多,可以很容易地在网上查到最新的商业光谱仪信息。这些微型光谱仪可以为各种类型的实时测量提供相对较高分辨率的物质波长及浓度。其中,还有一些光谱仪用到光纤探针,例如用于产品的荧光检测或者是浑浊液体介质荧光监控的光谱仪。光谱的应用不仅局限于医疗或工业领域。随着全球化进程的加快,人类安全变得更加重要。因此,可以记录细菌和炸药等致命媒介的光谱仪已经研制出来,并且正朝着军民两用的方向发展。在法医研究领域,光谱仪已经成为不可或缺的设备。显微光刻法制造的微型机电系统(MEMS)决定了流程工业的微型光谱仪的未来发展趋势。由于微型光谱仪具有低价、耐用、抗热以及抗机械扰动的特性,所以将会在恶劣的工业流程环境中大量使用。

伴随着高功率激光器的发明和发展,非线性光谱学得到了快速发展。但目前激光和非线性光谱仪的光学组件相对昂贵。此外,据我们所知,由于材料检测系统的复杂性以及非线性光谱仪信号的微弱性,这已经能够引起了流程工业领域的极大兴趣。可能是因为非线性光谱学的理论背景对于实践者来说很难理

解。因此,即使它的应用可以解决许多问题,例如在调整工艺参数时出现的问题,但这种技术的应用在一定程度上受到了限制。幸运的是,由于市面上一种能量大、尺寸小的固体激光器的发展,可能使得非线性光谱学变得更加有用,特别是对于生物医学光学来说。

本章讨论了目前正在使用的或实验室正在开发的典型光谱,并且简要地论述了属于非线性光学领域的双光子诱导荧光的情况。本书省略了应用光谱的重要分支即傅里叶变换光谱。最近出版的著作讨论了这方面的问题^[2],并被强烈推荐用来作为光谱分支应用及物理背景的标准资源。这里我们只用傅里叶变换红外光谱(FTIR)用于分析和鉴定液体、气体及气体混合物的各种应用。便携式傅里叶变换光谱仪通过存储在计算机中的数据库,识别不同的气体成分。这对于工厂和发电厂烟囱排出的废气(包括造成空气污染的交通废气)的远程检测具有重要意义。同时,一些军事应用也和红外光谱技术相关。

2.1 透射光谱

材料检测的常规方法是利用一束准直光通过透明和彩色平面体,测量它的透射率,该透射率与波长有关。目前用于透射率测量的便携式光谱仪多数是商用的。许多应用利用分光光度计来监控产品的透射率。定义透射率的表达式为

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2.1)$$

式中: I_0 为入射光的强度; I 为探测器监测区域透射光的强度; λ 为光的波长。利用透射率可以获得产品的局部厚度(d)信息,并且通过朗伯—比尔定律假设介质是均匀的,即

$$I = I_0 \exp(-\mu(\lambda)d) \quad (2.2)$$

式中: μ 为一个材料参数,即介质与波长相关的吸收系数。需要强调的是,介质的吸收系数不仅取决于入射光的波长,还取决于样品的热力学条件。在测量对温度敏感的样品时,必须考虑样品的感温特性。通常样品可能会出现温度的波动,这是由外部热源的变化导致的(例如在工业环境中)。此时,建议使用温控型光谱仪。半透明薄片的厚度变化可从式(2.2)中获得。如果已经预先知道使用材料的特性,那么通常可以在实验室里,在一些适当的光谱范围内测到吸收系数。通常可以使用具有两个或多个检测器的系统,利用两个或两个以上不同的波长来监控样品厚度的变化,其中波长可以从白色光源滤波系统中滤波得到。另一个设备可能用两个或两个以上的激光作为平行光源,并且此光源的波长是

精确的。在工业现场,很多时候还会出现外部振动,例如由产品的输送带产生的振动。这意味着产品(如塑料薄膜)可能经历波动或其他类型的运动。为了得到“冻结”的探测厚度,探针波束通常是分段的。在使用两个探测波长的情况下,两种波长选择的方式通常是:在波长 λ_1 下有材料吸收,而在 λ_2 下的材料吸收可以忽略不计。从式(2.2)可以得到产品的厚度为

$$d = \frac{1}{\mu(\lambda_1)} \ln \frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \quad (2.3)$$

因为光源的老化问题不大,所以利用两个探测器检测到的强度比非常重要。如果产品是传送带上一张移动的金属薄片,并且探头位置固定,那么沿着线路就可以评估产品的厚度。如果一个扫描探头遍历整个机器方向,那么产品的厚度是沿着“Z”字形路径获得的。显然,用这种路径不能探测整个产品的厚度,但问题不大。产品的厚度和历史的统计分析通常存储在计算机里,这样在生产制造多年后仍可以检查到产品的属性。一般来说,这种存储每一产品生产历史的方式是很有意义的。特别是在购买的产品出现故障时,通常可以通过检查破碎产品的生产参数来判断损坏的原因。

在新产品的生产过程中以及再生塑料废弃物的分类方面,利用两个探测器系统进行传输测量都是非常可行的^[3]。

金属基础工业采用张或卷的形式来生产冷轧金属,并将这些产品卖给汽车行业公司。通常的要求就是要防止金属表面腐蚀,尤其是在金属的恢复时间相对较长的情况下。因此从客户角度考虑,就需要用薄油层来保护金属板或金属薄片。由于在洗涤剂做进一步处理之前薄油层通常会被磨损掉,所以优化油层厚度十分重要。为了优化油层的厚度,常在金属生产场所对其进行测量;并且客户在产品生产场所就可以检测到油层的厚度。优化的重要性在于不仅可用于适当的防锈保护,也可以减少洗涤剂的使用量。而后者对减少环境污染是至关重要的。此时就用到了测量技术,例如对防护油层上的红外辐射进行吸收,这里吸收单位是碳氢化合物。由于油层覆盖的是不透明金属,所以测量技术是基于透射原理的,即斜入辐射是通过石油层进行传播的,但却从金属衬底反射出来。可以根据式(2.1)分析油膜厚度。还有一些商业便携设备可用于监测油膜厚度。此时测量结果的可靠性在一定程度上取决于油膜下金属产品的表面粗糙度。图2.1给出了利用手持式测量系统对金属辊斑点透射的测量原理。

通过扫描从紫外区域到近红外区域的光谱范围,利用薄膜的反射和干涉原理来对薄膜厚度和几种固体层折射率的同步测量是可行的,厚度、薄膜衬底的吸

收率和折射率可以利用椭圆偏振仪获得。基于上述原理制造的设备已经在市场上销售。

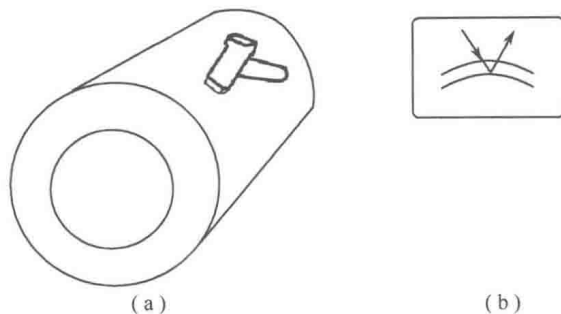


图 2.1 金属辊斑点透射测量原理图

(a) 钢板和辊的油层厚度检测示意图；

(b) 利用碳氢化合物组中的红外吸收进行油膜测量的原理示意图。

通常来说,需要测量光在由不同成分混合成的液体中传播,例如水。这种情况下我们利用厚度只有 1mm 或 1cm 的试管,试管的厚度取决于样品的的光密度。然后,液体的透明度或颜色可以利用透射率 T 在透射谱的帮助下进行估计。吸收光的液体的绝对折射率 n 及其变化 Δn 是另外一个特性参数,其提供了液体浓度的信息。利用传输测量技术不仅可以计算液体的吸收系数,也可以将折射率看作已测数据的波长函数。可以利用式(2.2)解出吸收系数,并通过下面给出的表达式得到液体的消光系数(k),即

$$k(\lambda) = \frac{\mu(\lambda)\lambda}{4\pi} \quad (2.4)$$

真实的折射率变化和消光系数是通过 Kramers - Kronig 关系耦合在一起的,并且受到它的限制^[4]。尤其当只使用带宽有限的传输数据时,一个有效的方法就是从单一的负的 Kramers - Kronig(SSKK)关系中提取与频率相关的实际折射率变化^[4],然后利用共轭的 SSKK 关系实现计算数据的交叉检验。两个 SSKK 关系需要一个光学常数已知的定位点。通常可以利用其他手段来衡量锚点处的信息,如在液体中利用反射计。SSKK 关系可表示为

$$n(\omega') - n(\omega_1) = \frac{2(\omega'^2 - \omega_1^2)}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega k(\omega)}{(\omega^2 - \omega'^2)(\omega^2 - \omega_1^2)} d\omega \quad (2.5)$$

$$\frac{k(\omega')}{\omega'} - \frac{k(\omega_1)}{\omega_1} = \frac{2(\omega'^2 - \omega_1^2)}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{n(\omega) - n_{\infty}}{(\omega^2 - \omega'^2)(\omega^2 - \omega_1^2)} d\omega \quad (2.6)$$

式中: ω_1 为锚点频率; P 为柯西主值; n_{∞} 为折射率的最高能量值。用于 SSKK 分

析的数值算法代码在 Lucarini 等出版的专著中给出^[4]。

图 2.2 展示了 12 种不同商业红酒产品真实的折射率变化和消光系数。首先,在室温下使用 1mm 试管测量红酒样品的透射率。利用式(2.4)计算消光系数,折射率的变化利用式(2.5)计算得到。葡萄酒生产商在进行红酒和其他品种葡萄酒的研究和开发时可以利用复杂的折射率数据。折射率数据的另一用处就是用于测试所购买到的葡萄酒的真实性,即检查瓶子和葡萄酒是否匹配。这是为了防止葡萄酒和其他饮料的造假。

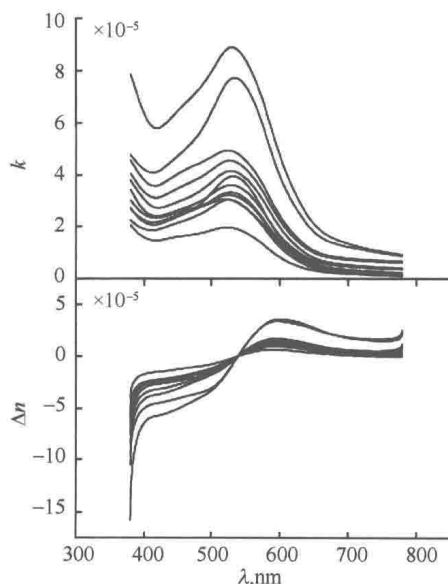


图 2.2 一些商业红酒的消光系数(上半部分)和真实折射率变化(下半部分)

在图 2.2 中由于强烈的光吸收,人们可以识别到 520nm 的花青素。这对于红酒颜色的形成是很重要的^[5]。颜色常被认为是衡量红酒质量的一个重要参数。可以利用透射谱计算红酒的颜色坐标(CIE Lab)。红酒的另一个品质因数是单柠酸的浓度,它可以在 280nm 的强光吸收下被识别。

在发酵过程中和发酵后的质量检验中可以使用葡萄酒产品的投射数据。在原位光学检验中,光纤传感器可以作为葡萄酒光学特性检测的手段^[6]。自然地,筛选威士忌和其他有色的酒精饮料就可以用到传输数据。

光谱分析表明 12 种红酒的种类互不相同。因此,通过研究光谱特性和红酒的颜色,就可以获取一定的信息,例如葡萄酒真实性的信息。这是一个用来防止伪造红酒和其他液体产品的重要方法。

密度取决于酒精和糖的浓度,红酒折射率的绝对值提供了酒的密度信息。

其绝对值可以通过折射计获得。2.3 节中将会讨论液体折射率的测量方法。

由于红酒或多或少都是浑浊的液体,所以散射光在真实透射率的检测过程中也会有一定的影响。选择细试管可以消除这种光散射。对浑浊葡萄酒和其他光散射液体的测量是这种液体的一个质量指标。下一节会详细讨论浑浊度的问题。

2.2 液体浑浊度的测量

米氏光散射原理^[7]是光与球形散射中心相互作用的基础,在气体或液体形态阶段,球形大小与入射光的波长相匹配。对于具有复杂折射率的单链球形散射,米氏原理仍然适用,其中球形散射在介质中占据相对较低的体积分数。如果散射体形状复杂,就不能应用米氏原理。此外,如果在探测光的散射体上同时出现不同类型的散射,且它们复杂的折射率都是未知的,那么可能无法对测得的信号进行严格地解释。然而,如果不想知道散射体具体的特性,而仅仅是希望获得液体浑浊度的信息(例如由不溶解的物质造成的液体透明度的降低),那就可以利用简单的几何测量来获得。目前进行浑浊度测量的设备称为浊度计。这个设备的设计目的是用来衡量有 90° 散射角的光散射,如图 2.3 所示。尽管信号是一个关于浑浊度的非线性函数,该结构仍会敏感来自粒子的散射光。

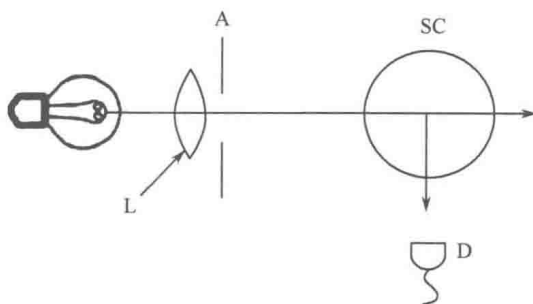


图 2.3 浊度计的原理图

L—镜头;A—孔径;SC—样品细胞;D—检测器。

这个设备的单位是浊度单位(NTU),介于 $0 \sim 10000$ 之间。刻度代表浊度标准。从图 2.3 中可以很明显看出,对散射光的检测不仅取决于散射的浓度(多重散射),还取决于液体本身和散射体的光吸收,以及空间散射介质的折射率变化。显然,很难得出用于信号分析的统一理论。因此,通常只利用在 90° 散射角下测到的光强度。当然,也可以利用其他散射角在一个更广泛的范围内评估浊

度^[8]。因为在生产过程中,通过记录葡萄酒的浊度,并将其作为波长的函数,已经能够证明它是葡萄酒。用于监测工业中水的质量或者是污水处理厂水质的多功能传感器现在已经投放市场,利用这种传感器可以获得浊度信息。现在已经设计和生产出用于过程监控的设备,可用于造纸产业溶液剂的浓度测量。通过在红外区域选择操作波长,就可以避免浑浊样品的颜色问题。在浑浊度很大的情况下,浊度传感器的反向散射测量模式就显得十分重要。在相同的测量模式中,可以利用正向和反向散射测量模式来处理浊度的大范围动态变化问题。当监测生物学液体或工业污水源头时,常见问题就是光学传感器探测窗口的污染。为了避免这种情况,可以在传感器探头上安装超声波清洗装置。目前无污染表面涂层技术正在快速发展,未来的趋势将会是利用具有纳米结构层的产品,如各种各样的窗口材料。

表 2.1 给出了 12 种商业红酒样品的浑浊度和折射率。显然,浑浊度波动强烈,与红酒样品的折射率无关。

表 2.1 生产国家、折射率、酒精含量% 以及 12 种商业红酒样品的一组浑浊度

样品	国家	折射率 ABBE	酒精浓度/(%)	浑浊度 NTU
1	意大利	1.3440	12	5.6
2	西班牙	1.3444	12.5	29
3	西班牙	1.3441	12.5	24
4	法国	1.3437	13	20
5	智利	1.3462	14	190
6	法国	1.3451	13	24
7	南非	1.3452	13.5	47
8	法国	1.3451	12	10
9	葡萄牙	1.3439	12.5	54
10	美国	1.3448	13	43
11	法国	1.3442	13.5	9.4
12	阿根廷	1.3452	14	64

2.3 反射光谱

本节将介绍反射测量方法在液体检测和多孔介质测量中的实际应用。在工

业现场的在线操作中,引入探测器窗口可以用来监测液体的过程参数。这种测量系统可产生反馈到处理器或中心计算机,来优化和控制过程参数。多孔介质的检测通常在工业实验室进行,根据对象不同也可安装在线设备。

2.3.1 折射仪

在液体环境中,折射率是一个质量检验的基本光学量。通过测量折射率可以识别不同的液体,得到关于糖、盐、蛋白质、氨基酸等溶于水,酒精溶于水,乳糖溶于牛奶等溶液的浓度信息。光的反射定律和折射定律已有应用,尤其在透明液体制剂和工业生产过程中工业液体的折射率检测。传统的折射仪是基于阿贝折射计的。该装置利用光的全反射定律,即

$$n = \sin \theta_c \quad (2.7)$$

式中: n 为相对折射率,且 $n = n_{\text{liquid}}/n_{\text{prism}}$; θ_c 为全反射临界角。由于棱镜的折射率是已知的,因此通过测量临界角就可以得到液体的折射率。典型棱镜材料的色散数据是可以得到的,如从销售光学元件的公司产品目录中获得。

目前多种类型的商用折射仪已用于实验室和工业环境。通常,它们用来测量食品工业中的果汁、饮料、软饮料、葡萄酒、啤酒以及奶制品的折射率,也用于化工、石油和制药工业领域。在折射仪的结构中,可以将 LED 或白光源作为光源。利用滤波器将光谱范围相对较宽的光源中的一些特定波长(通常相当于钠的发射谱线,在 589nm 附近)选来检测待测液体的实际折射率。还可以使用激光作为折射仪的光源。由于要找到在临界入射角时反射光的强度发生突变的临界值,所以光源的老化不是关键因素。这些信号可通过线性光电二极管阵列或 CCD 相机检测。在热的液体环境中,传感器敏感头通过水流循环冷却。为了测量高压液体的折射率,需要考虑传感器头的力学阻力问题。在监测高压流动液体中,探测窗可以通过选择蓝宝石作为棱镜材料来减小磨损。在工业过程的管道系统中,工业液体的在线监测装置有多传感头结构。这些折射率的测量精度约为 10^{-4} 。

浑浊或具有光吸收能力的液体中不能再应用全反射的概念。事实上,经典的阿贝装置是基于临界反射角时反射光强度的跳变原理来设计的。例如,对于有色液体,固定波长的入射光不会发生反射光强度突然跳变现象,这就意味着无法确定临界角。为了解决这个问题,可以把反射光强度记作光入射角的函数,并计算反射率的二阶导数,导数最大的地方就是产生临界角的地方。因此,在现代反射仪的设计和生产过程中,液体的颜色和浑浊度不再是个大问题。利用特殊加工的折射仪可得到折射率间隔,其精度取决于棱镜材料,在棱镜与液体交界面

会出现光的几何焦点。例如,用自聚焦激光束提供角度的分布构造一个设备,进而测量变化微小的液体折射率。商用折射仪的实用性可以在网上查到。

2.3.2 波长扫描式反射仪

为了估计泥浆等不透明介质的复折射率,可以利用反射计及其相关光谱分析方法在宽光谱范围内获得^[9]。另一种可选仪器是椭圆计,它能提供固体试验样品的复折射率信息,但通常光谱范围相对狭窄。椭圆测量技术的原理也可用于监控工业过程,但通常要用到激光光源。图 2.4 给出了一个多功能反射计,可用于分析纸浆造纸厂的工业用水。用这种棱镜反射计可以选择不同的测量方法,包括扫描入射角或波长。除此之外,也可以选择线偏振,如入射光的 s -偏振和 p -偏振。

最便捷的办法就是利用菲涅耳公式对 s -或 p -偏振光的反射率进行光谱分析,即

$$R_s(\omega) = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{N^2(\omega) - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{N^2(\omega) - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (2.8)$$

$$R_p(\omega) = \left| \frac{N^2(\omega) \cos\theta - \sqrt{N^2(\omega) - \sin^2\theta}}{N^2(\omega) \cos\theta + \sqrt{N^2(\omega) - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (2.9)$$

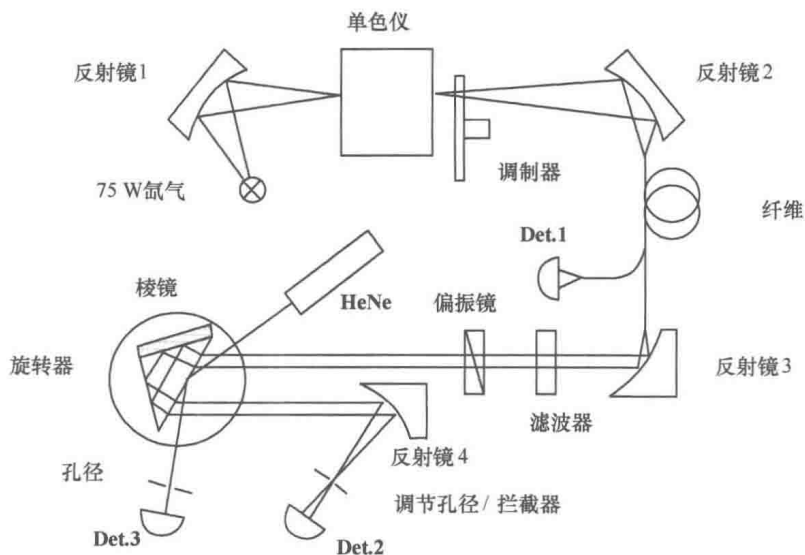


图 2.4 反射仪原理图

式中: θ 为入射角; N 为相对复折射率。当液体的消光系数很小以致可以忽略时,式(2.8)和式(2.9)的形式变得最简。图 2.5 给出了之前提到的 12 种红酒的反射率曲线图。光源导用 s -偏振光,以固定入射角入射,数据做为波长的函数保存下来。因为只有一个未知量也就是实折射率 n ,假设消光系数相对较小,利用式(2.8)便可以解出红酒的折射率。根据图 2.5 的数据,可给出 12 种红酒的色散曲线,如图 2.6 所示。从图 2.6 中可以观察到,通过对折射率曲线积分可以得到红酒浓度,并且这被证明是一种较好的检测方法。在某种程度上,用钠 D 线来区分这些葡萄酒的差异,灵敏度更低。

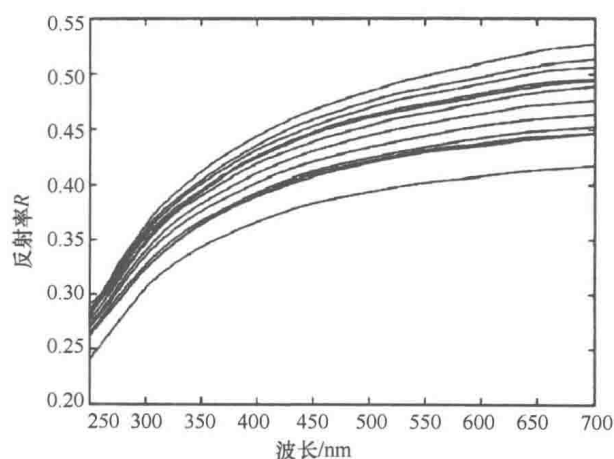


图 2.5 12 种红酒样品的反射率关于波长的函数(曲线由 s -偏振光反射计记录)

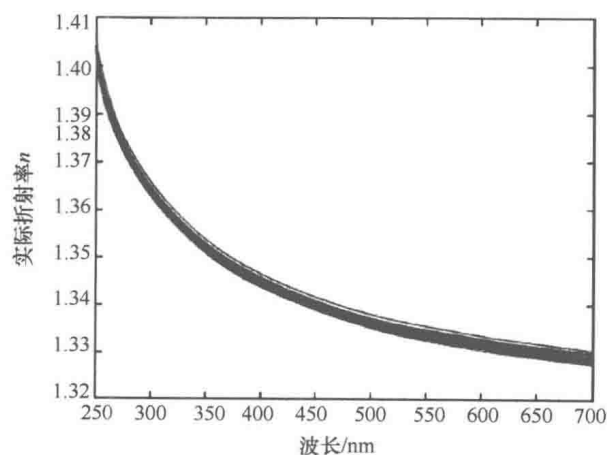


图 2.6 利用图 2.5 中的数据得到的 12 种红酒的实折射率