

文章编号: 0253-2239(2005)10-1343-4

基于法布里-珀罗干涉仪的液体浓度 实时检测系统的研究

杨秀芳¹ 王小明² 高宗海¹ 赵念念¹

(¹ 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)
(² 西安市政管理委员会, 西安 710068)

摘要: 设计了一种对透明液体浓度进行高精度测量的动态跟踪系统。该系统根据液体的浓度与折射率关系以及折射率与光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪干涉光波波长、级次之间关系,通过测量法布里-珀罗干涉仪干涉级次的变化量,获得液体浓度的变化量。系统中光源选用 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm,输出功率为 2 mW,法布里-珀罗干涉腔反射面的反射系数为 0.9~0.95,平行度为(1/10~1/20)光波波长,平面度为(1/20~1/100)光波波长,接收干涉条纹的器件采用电荷耦合器件(CCD),对电荷耦合器件输出的信号进行二值化处理时采用阈值浮动措施,消除光强波动带来的测量误差。通过对一组不同浓度酒精进行测量,该系统可识别出 0.01% 的浓度变化。

关键词: 光学测量; 液体浓度; 光纤法布里-珀罗干涉仪; CCD; 干涉级次

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Research on Liquid Concentration Real - Time Detecting System Based on Fabry-Pérot Interferometer

Yang Xiufang¹ Wang Xiaoming² Gao Zonghai¹ Zhao Niannian¹

(¹ College of Machinery and Precision Instrument, Xian University of Technology, Xian 710048)
(² Xian Municipal Administration Committee, Xian 710068)

Abstract: A kind of dynamic tracking system for conducting high-precious measurement of transparent liquid concentration is designed. In accordance with the relations between liquid concentration and refractive index as well as the relations among refractive index, interference light wavelength of optical-fiber Fabry-Pérot (F-P) interferometer and grade orders, the liquid concentration variable quantity is obtained by measuring the variable quantity of fringe interference order. In this system, light source is He-Ne laser. Wavelength is 632.8 nm. Output power is 2 mW. Reflectance of interference cavities is 0.90~0.95, the plane degrees of two reflective surfaces are 1/20~1/100 wavelength, and their parallel degrees are 1/10~1/20 wavelength. Linear charge coupled device (CCD) receives interference fringes. When the output signals by linear CCD are processed in two-valuation, the threshold floating measures adopted can eliminate measurement error. The detecting system can recognize or detect concentration variations of 0.01% via measuring a group of alcohol.

Key words: optical measurement; liquid concentration; optical fiber Fabry-Pérot interferometer; CCD; interference grade order

1 引 言

液体的折射率在温度不变时与液体浓度有一确定关系,通过测量液体折射率获得浓度值是一种常

用的方法。目前测量透明液体的常用方法有迈克耳孙干涉法^[1]、牛顿环法^[2]、法布里-珀罗(F-P)干涉法^[3]。迈克耳孙干涉法和牛顿环法是双光束干涉

作者简介: 杨秀芳(1965~),女,陕西乾县人,讲师,主要从事光学仪器、光电检测技术、光纤传感器的研究。

E-mail: yxf5078@xaut.edu.cn

收稿日期: 2004-12-28; 收到修改稿日期: 2005-03-16

法,条纹锐度差,不利于测量精度的提高。现有的采用法布里-珀罗干涉系统透射光谱的波长进行液体浓度的测量^[3],这种方法虽然降低了对光源稳定性的要求,但需要采用光谱仪进行光谱分析,这在实际使用中常常是不可行的。

目前基于光纤传感器的位移、应变、温度的测量活跃在各个研究领域^[4],本文提出了一种利用光纤法布里-珀罗干涉仪对液体浓度进行在线检测的方法,它除了具有光纤传感系统的抗电磁干扰、耐腐蚀、安全可靠等优点外^[5~7],还具有:1)用 CCD 接收干涉条纹,判别条纹移动的精度高^[8];2)系统是一个数字系统,被处理的信号可以较大距离传输,将测量现场与信号处理场所分开;3)可实现高精度动态跟踪测量;4)对 CCD 输出的信号二值化处理时采用阈值浮动措施,消除了光强波动带来的测量误差。

2 测量原理

2.1 法布里-珀罗干涉仪干涉波长与腔内折射率的关系

图 1 是该系统的传感器结构。 G_1 、 G_2 是两块互相平行的石英板,内表面镀有一层高反射膜,反射率 $R > 0.9$,为了获得细锐的干涉条纹,两反射面的平面度为 $1/20 \sim 1/100$ 波长,平行度为 $1/10 \sim 1/20$ 波长,腔内是被测液体,光源是 He-Ne 激光器,波长是 $0.6328 \mu\text{m}$, L_1 为准直透镜,透镜 L_2 将干涉条纹成像在其焦平面上,在焦平面中心处干涉条纹波长、级次与待测液体折射率有如下关系^[9]:

$$2nd = k\lambda, \quad (1)$$

其中 n 、 d 、 k 、 λ 分别为法布里-珀罗腔内介质折射率、法布里-珀罗干涉仪腔长、干涉级次和激光波长。

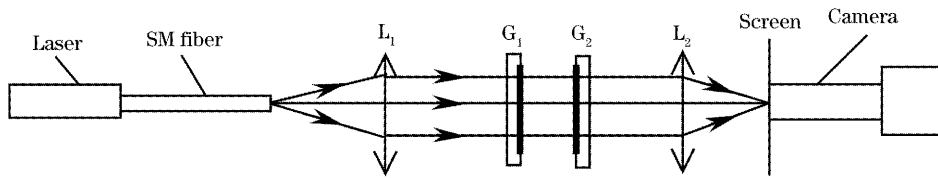


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

2.2 液体浓度与折射率之间的关系

在一定温度下,液体的折射率随液体浓度的变化而变化,如果将该溶液填充到法布里-珀罗腔内,其折射率的变化会使法布里-珀罗干涉仪的等倾同心圆环条纹移动。当折射率变大时,干涉条纹从中心向外冒出,条纹变密,当折射率变小时,条纹内陷,从中心一一消失,条纹变宽,通过测量条纹移动量,并判断它的移动方向,就可以获得液体折射率的变化量。

液体折射率与浓度的关系满足对数混合法则:

$$\lg n = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \lg n_1 + \frac{V_2}{V_1 + V_2} \lg n_2, \quad (2)$$

式中 V_1 、 V_2 分别为混合前溶质(乙醇)和溶剂(水)的体积, n_1 、 n_2 分别为溶质和溶剂的折射率, n 为混

合后液体的折射率。

若混合后液体的质量为 m ,溶质(乙醇)和溶剂(水)的体积为 V_1 、 V_2 ,体密度分别为 ρ_1 、 ρ_2 ,则有

$$m = V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2$$

液体的溶质质量分数为

$$c(n) = \frac{V_1 \rho_1}{V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2}, \quad (3)$$

由(2)式得

$$V_2 = V_1 \frac{\lg(n_1/n)}{\lg(n/n_2)}, \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得

$$c(n) = \frac{\rho_1 (\ln n - \ln n_2)}{\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2 + (\rho_1 + \rho_2) \ln n}, \quad (5)$$

对(5)式两边微分得

$$\Delta c(\Delta n) = \frac{\rho_1 [\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2 + (\rho_1 - \rho_2) \ln n] - (\rho_1 - \rho_2) \rho_1 (\ln n - \ln n_2)}{[\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2 + (\rho_1 - \rho_2) \ln n]^2} \Delta n, \quad (6)$$

对(1)式两边微分得

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2d} \Delta k, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得

$$\Delta c(\Delta k) = \frac{\rho_1 [\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2 + (\rho_1 - \rho_2) \ln n] - (\rho_1 - \rho_2) \rho_1 (\ln n - \ln n_2)}{[\rho_2 \ln n_1 - \rho_1 \ln n_2 + (\rho_1 - \rho_2) \ln n]^2} \frac{\lambda}{2d} \Delta k, \quad (8)$$

由上式可知,只要测得条纹干涉级次的变化量 Δk , 就可以获得浓度的变化量 Δc 。

若液体初始浓度为 c_0 , 则现在浓度为 $c = c_0 + \Delta c$ 。

现将 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.3816$, $n_2 = 1.3330$, $\rho_1 = 0.8000$, $\rho_2 = 1.0000$, $d = 20.0720 \text{ mm}$ 分别代入 (7) 式、(8) 式得

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2d} \Delta k = \frac{0.6328}{2 \times 20.072 \times 10^3} \Delta k =$$

$$1.576 \times 10^{-5} \Delta k,$$

$$\Delta c(\Delta k) = 34.383 \times 1.576 \times 10^{-5} \Delta k =$$

$$0.0542\% \Delta k.$$

干涉条纹级次每变化 1, 代表液体浓度变化

0.0542%, 在 CCD 数据采集和处理系统中, 对一个条纹间距在空间上实现 8 细分处理, 1/8 个条纹间距的变化量代表液体浓度变化量为 $0.0542\% \times (1/8) \approx 0.007\%$ 。

3 系统硬件设计

系统硬件主要包括信号采集与处理、微处理器和显示器, 如图 2 所示。信号采集与处理将采集到的干涉条纹信号转换成 CCD 上的位置信号, 然后经接口电路送入微处理器, 微处理器根据 (8) 式计算出 Δc , 将结果送入显示器显示。

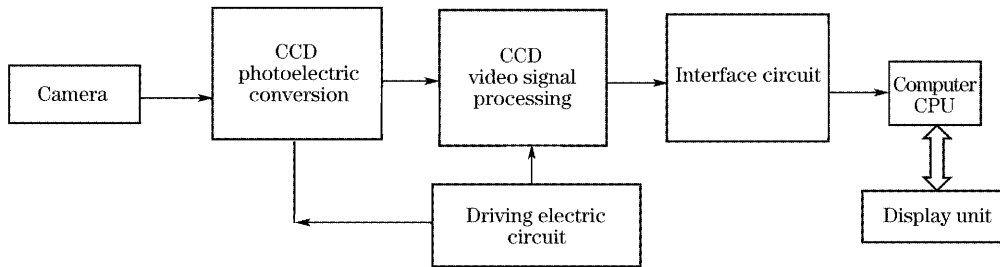


图 2 硬件系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of hardware

CCD 器件选用东芝公司生产的 TCD141C 型线阵 CCD, 它有 5144 个光电二极管, 分奇、偶两列, 其中前 128 个和后 16 个为虚设单元和暗电流检测单元, 中间 5000 个为光敏单元, 光敏二极管的尺寸为 $7 \mu\text{m}$, 相邻两二极管的中心距为 $7 \mu\text{m}$, 光敏阵列总长为 $35 \mu\text{m}$ 。在 CCD 视频信号的二值化处理中, 电压比较器的阈值电平不是固定的, 将测量信号送入两路放大器, 其中一路的输出作为电压比较器的输入信号, 另一路放大倍数小的输出经过滤波处理后作为比较器的基准电平, 而这一电平随着 CCD 的输出而浮动, 从而消除了由于光源强度的波动带来的测量误差。

4 实验装置与测量结果

实验用的传感器结构如图 1 所示。激光器用 He-Ne 激光器, 波长为 632.8 nm , 光纤选用单模石英光纤, 直径为 1 mm , L_1 、 L_2 是两片 $\phi 8 \text{ mm}$ 的微镜头, 成像镜头是焦距为 250 mm 的照相镜头。

利用该实验系统, 对配制浓度已知的酒精溶液进行了测量, 结果如表 1 所示。该表中的测量数据是 5 次测量平均值, 最大绝对误差不超过 0.01% 。

表 1 测量实验结果

Table 1 Testing data ($T=20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Normal mass fraction / %	Tested mass fraction / %	Absolute error / %
13.793	13.786	0.007
24.242	24.233	0.009
39.024	39.027	0.003
44.444	44.450	0.006
51.613	51.622	0.009
61.538	61.544	0.006
76.190	76.199	0.009
86.486	86.489	0.003
94.118	94.109	0.009
99.999	99.992	0.007

5 结 论

从测量结果看, 测量值与实际值吻合得很好, 绝对误差不超过 0.01% , 完全可满足实际应用要求, 说明该系统做到了消除光源强度波动的影响, 有较高的抗干扰能力。但从单次测量的数据来看误差有的达到 0.018% , 可能是由以下原因造成的: 1) 摄影

系统的成像误差,使干涉条纹的锐度降低产生测量误差;2)干涉条纹亮度和形状随空间变化不规则引起的测量误差。在后面的实验中将对比法布里-珀罗腔做进一步的优化设计,希望能在单次测量中达到这一精度。

参 考 文 献

- 1 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement with fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1294~1296 (in Chinese)
李毛和,张美敦. 用光纤迈克尔逊干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 2 Wang Yuping. The measurement of liquid refractive index by using interfered stripe of Newton ring[J]. *College Physics*, 2001, **20**(10): 29~30 (in Chinese)
王玉平. 用牛顿环产生的干涉条纹测量液体的折射率[J]. *大学物理*, 2001, **20**(10): 29~30
- 3 Wei Renxuan, Jiang Desheng. Solution concentration measurement with F-P interference wavelength [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(6): 655~656 (in Chinese)
魏仁选,姜德生. 基于 F-P 干涉波长的溶液浓度测量方法研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(6): 655~656
- 4 Guan Baiou, Tam H Y, Ho S L *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber bragg grating[J]. *Acta Optica sinica*, , 2000, **20**(6): 827~830 (in Chinese)
关柏欧, Tam H Y, Ho S L 等. 用一根光纤光栅实现温度与应变的同时测量[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 827~830
- 5 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhu Yong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 596~600 (in Chinese)
孙吉勇,陈伟民,朱永等. 光源光谱对光纤法布里-珀罗应变传感系统的影响[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 596~600
- 6 Li Shaohui, Ning Yanong. *Fiber Sensor* [M]. Wuhan: Publishing House of Huazhong University of Science and Technology, 1997. 8~9 (in Chinese)
李少会,宁亚农. *光纤传感器* [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997. 8~9
- 7 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 85~88 (in Chinese)
饶云江,曾祥楷,朱永等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 85~88
- 8 Deng Guangan, Cai Zhigang, Zhang Yunhua *et al.*. Refraction index measurement of transparent materials by using diffraction grating and CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 99~103 (in Chinese)
邓广安,蔡志岗,张运华等. 用衍射光栅和 CCD 测量透明材料折射率[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 99~103
- 9 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Project Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Machine Industry, 2001. 236~239 (in Chinese)
郁道银,谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 236~239