

液体浓度光波导测量方法研究

周佐平 林 为

(华南理工大学应用物理系, 广东, 广州, 510641)

摘要: 对测量液体浓度用的各种不同形状的大直径玻璃光波导进行了研究, 理论计算了其测量灵敏度与弯曲半径的关系, 并建立了近红外的测试系统, 对各种弯曲的光波导进行了测量, 得到与理论分析相近的结果.

关键词: 光波导, 浓度, 测量.

引言

液体浓度测量是一项重要测量技术^[1], 目前实用的浓度计多为采样离线测量. 而在线测量用的机械重力方式结构复杂、灵敏度低; 一般光学方式灵敏度虽高, 但光学系统复杂、易受环境影响、现场安装条件要求高; 近年来发展的光纤浓度计^[2], 能用于远距离在线测量, 但光信号弱, 光源及探测要求高, 光纤易受振动、温度等环境影响. 因此, 我们致力于研究灵敏度高的大直径光波导, 配以近红外光电系统, 形成稳定可靠、结构简单、适合在线液体浓度监测的系统.

1 理论基础

液体浓度的光学测量方法之一是以浓度与折射率关系为基础, 一般混合液在浓度不是特别高的时候, 折射率与浓度成良好的线性关系. 在溶剂与溶质分子之间有缔合或化合时折射率不再与浓度成线性关系, 但只要有确定关系, 都可通过折射率来测量浓度:

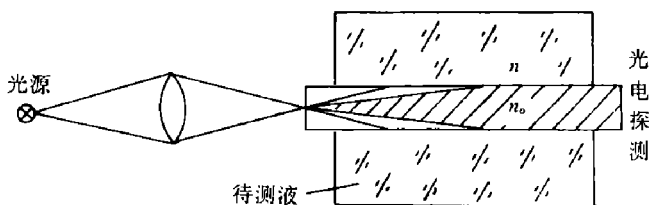


图1 液体折射率的测量
Fig. 1 Measurement of index
of refraction of liquid

液体折射率测量如图1所示, 折射率为 n_0 的玻璃棒浸在折射率为 n 的待测液中, 圆锥形光束入射到玻璃棒端面的中心, 于是所有的光线都可以当作子

午线处理^[3]。如果忽略光在入射及出射端面上反射损失以及光在玻璃棒内的吸收损耗，并认为不满足全反射条件的光全部泄漏到液体中，入射光锥的能量分布均匀，则辐射强度为

$$I(\theta) = I(0) = \text{常数}, \quad (1)$$

从玻璃棒出射的光能量为

$$E(n_0, n) = 2\pi I(0) [1 - (1 - n_0^2 + n^2)^{\frac{1}{2}}], \quad (2)$$

液体折射率 n 改变时，出射光能量变化的灵敏度为

$$S = \frac{dE(n_0, n)}{dn} = \frac{2\pi I(0)n}{(1 - n_0^2 + n^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

相对灵敏度为

$$r_s = \frac{S}{E} = \frac{n}{(1 - n_0^2 + n^2)^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - n_0^2 + n^2)^{\frac{1}{2}}]}. \quad (4)$$

如玻璃 $n_0 = 1.50$ ，5% 浓度糖液 $n = 1.3403$ ，设 $2\pi I(0) = 1$ ，从式 (4) 得 $r_s = -\frac{\Delta E/E}{\Delta n} \doteq 6.95$ ，在 20°C 时，糖浓度变化 1% 时 $\Delta n \doteq 1.50 \times 10^{-3}$ ，因此

$$\frac{\Delta E}{E} = r_s \cdot \Delta n \doteq 1\%;$$

这说明，如果光探测系统及电路系统能够分辨出 1% 的光能量变化，则该测量系统对糖溶液浓度的测量精度可达 1%。

提高测量灵敏度的主要方法是尽量使更多的光线在介面上以接近全反射临界角反射，根据菲涅耳反射定律可以证明，在界面上的反射率 r 与待测溶液折射率 n 在临界角时 dr/dn 有最大值，即对测量 n (浓度也相似) 有最高灵敏度。如果入射角比临界角小很多，经几次反射后，光很快就衰减掉，但是，如果入射角比临界角大很多， $dr/dn \doteq 0$ ，则对测量无贡献。

有效提高灵敏度的方法是让光波导弯曲。考虑实际使用的光源具有一定大小的发光面，所以斜射线占有相当大的部分，因此，计算时不能只考虑子午线。

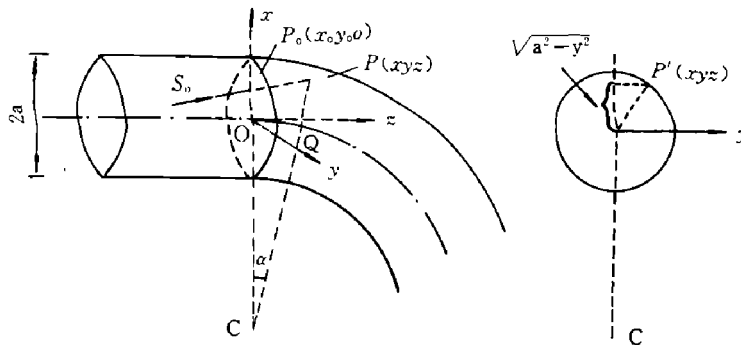


图 2 弯曲波导

Fig. 2 Bending waveguide

弯曲波导如图 2 所示, 设射线的单位矢量为

$$\vec{S}_0 = L_0 \vec{i} + M_0 \vec{j} + N_0 \vec{k}, \quad (5)$$

式 (5) 中 L_0 、 M_0 、 N_0 为斜射线方向余弦.

斜射线由光波导直部和弯部界面上的 $P_0(x_0, y_0, 0)$ 点进入弯部, 并与弯部界面交于 $P(x, y, z)$ 点, $QC = OC = R$ 为弯曲半径, a 为波导半径, 用归一化单位矢量 $\vec{r}_0 = \frac{\vec{QP}}{a}$ 表达, 可得到斜射线在 P 点的入射角 φ 的余弦为

$$\cos \varphi = \vec{S}_0 \cdot \vec{r}_0 = \frac{1}{a} \left\{ [x - R(\cos \alpha - 1)]L_0 + yM_0 + \sqrt{a^2 - y^2}N_0 \sin \alpha \right\}, \quad (6)$$

注意到

$$\cos \alpha = \frac{R + x}{R + \sqrt{a^2 - y^2}}, \quad (7)$$

及临界角 φ_c 与 n 、 n_0 关系

$$\cos \varphi_c = \left[1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

如果满足

$$\cos \varphi \leq \cos \varphi_c, \quad (9)$$

即

$$\frac{1}{a} \left\{ \frac{(R+x)\sqrt{a^2-y^2}}{R+\sqrt{a^2-y^2}} L_0 + yM_0 + \frac{\sqrt{a^2-y^2} \sqrt{2R(\sqrt{a^2-y^2}-x) + a^2-y^2-x^2}}{R+\sqrt{a^2-y^2}} N_0 \right\} \leq \left[1 - \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

则通过 P_0 点的斜射线在 P 点产生全反射.

为了求出光沿这个方向的导光率, 假定一束与 \vec{S}_0 平行的光均匀照射光波导直部和弯部的界面, 根据式 (10), 在这个界面上必然存在一个全反射区域. 全反射区域的面积 A_0 与界面总面积之比代表这个方向的导光率 T_0 .

为了求出全反射区域的面积, 可利用

$$\frac{x - x_0}{L_0} = \frac{y - y_0}{M_0} = \frac{z}{N_0}, \quad (11)$$

以及

$$z = (R + \sqrt{a^2 - y^2}) \sin \alpha, \quad (12)$$

可得

$$z^2 = 2R \left[\sqrt{a^2 - \left(y_0 + \frac{M_0}{N_0}z\right)^2} - \left(x_0 + \frac{L_0}{N_0}z\right) \right] + a^2 - \left(y_0 + \frac{M_0}{N_0}z\right)^2 - \left(x_0 + \frac{L_0}{N_0}z\right)^2. \quad (13)$$

现只计算与实验相配合时的情况，即只考虑入射光束与 y 轴垂直时的情况，也即 $M_0=0$ ， $y=y_0$ ， $N_0=(1-L_0^2)^{\frac{1}{2}}$ 时的情况。此时，可得满足全反射的条件为

$$\frac{1}{a} \left\{ \frac{(R+x)\sqrt{a^2-y_0^2}}{R+\sqrt{a^2-y_0^2}}L_0 + \frac{\sqrt{a^2-y_0^2} \cdot z}{R+\sqrt{a^2-y_0^2}}N_0 \right\} \leq \left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

根据式 (14)，给定 R 、 a 、 n_0 、 n 和 L_0 的值，便可利用计算机和梯形法计算全反射区域的面积。

改变溶液的折射率 n 的值，分别计算其全反射的面积，设 $n=n_1$ ，对应的面积为 $A_0(n_1)$ ； $n=n_2$ 对应的面积为 $A_0(n_2)$ ；则灵敏度

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta n} = \left| \frac{A_0(n_2) - A_0(n_1)}{n_2 - n_1} \right|. \quad (15)$$

图 3(a) 是对 $n_1=1.3388$ (4% 的糖液) 和 $n_2=1.3403$ (5% 的糖液)，波导 $a=2.5$ mm，入射光线与 z 轴平行时的计算结果。这为设计最佳弯曲半径提供了基础。图 3(b) 给出近似光纤半径 $a=0.25$ mm 时相应的计算结果，它表明光纤弯曲规律与大直径光波导弯曲规律相似，但灵敏度差两个数量级，这是因为大直径波导传输光能量大，所以灵敏度高。图 4 给出全反射区域 (阴影部分) 的结果。可见 R 增大，全反射区域增大。

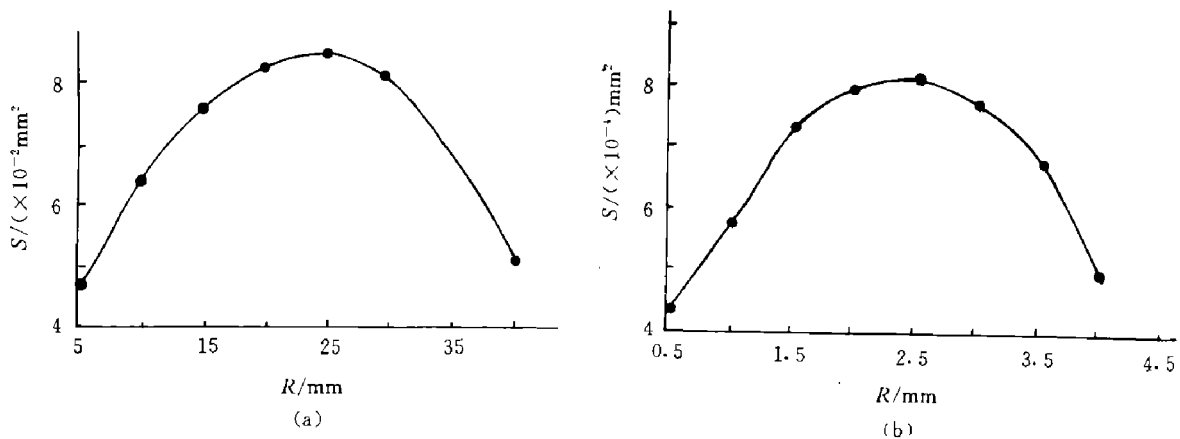


图 3 灵敏度与弯曲半径关系 ($L_0=0$)

(a) $a=2.5$; (b) $a=0.25$

Fig. 3 Dependence of sensitivity on bending radius ($a=0.25$ mm, $L_0=0$)

2 光波导测量系统与测试结果

为了用大直径光波导测量浓度，选择最佳结构，我们建立了近红外测试系统 (见图 5)。

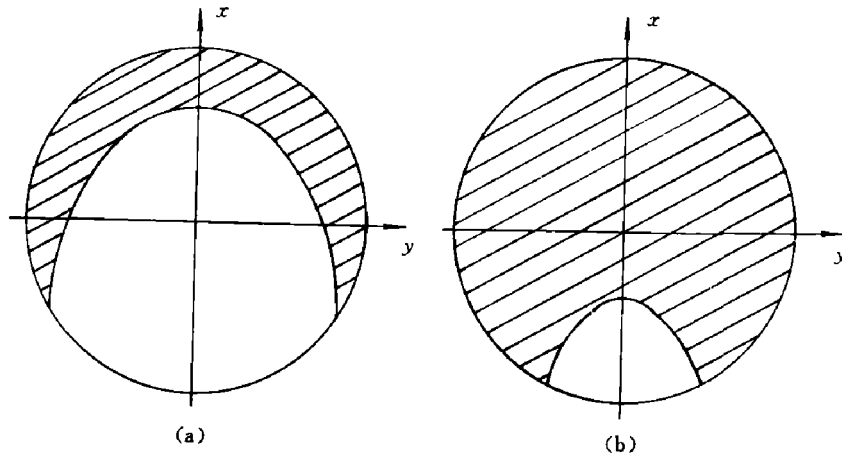


图 4 全反射区域 (a) $R=5\text{ mm}$, (b) $R=30\text{ mm}$
 Fig. 4 Total reflection region (a) $R=5\text{ mm}$, (b) $R=30\text{ mm}$

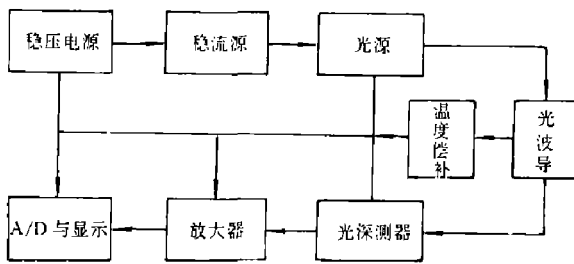


图 5 测量系统原理方框图
 Fig. 5 Block diagram of measuring system

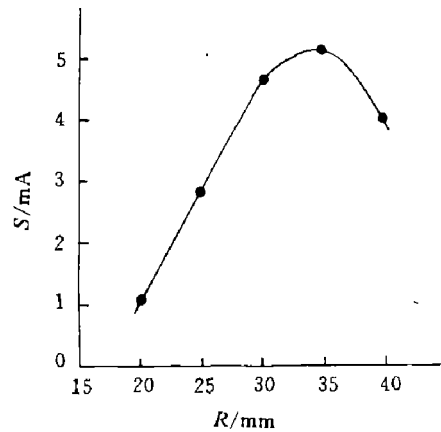


图 6 灵敏度与弯曲半径关系 ($c=5\%$)
 Fig. 6 Dependence of sensitivity on bending radius ($c=5\%$)

我们分别以近红外半导体激光管、发光管为光源作试验，采用脉冲调制光，并用不同方式导入大直径光波导，输出端用相应光电探测器探测，信号经放大后显示，并设置温度补偿装置。本系统输出不稳定性在 $\pm 0.2\text{ mV}$ 内。

为了与上述理论分析对照，我们用相应玻璃光波导弯成 20, 25, 30, 35 和 40 mm 五种半径的探头，分别对浓度 $C=0, 1\%, 2\%, 3\%$ 和 5% 的糖溶液进行测量，光的方向尽量调到沿 z 轴方向。

图 6 给出 $C=5\%$ 时灵敏度与弯曲半径的关系，最高灵敏度在 $R=35\text{ mm}$ 附近，这与理论分析相近。

为了探讨光波导的测量灵敏度与弯曲形状的关系，我们做了大量的实验。表 1 给出用峰值功率为 $140\text{ }\mu\text{W}$ 的发光管，用 $a=3.25\text{ mm}$, $R=35\text{ mm}$ 的探头对糖液测量的结果，测量精度约为 0.1% ，如果测量系统能够抗干扰，稳定性能进一步改善，测量精度还可以提高。

表 1 波导测量结果 ($a=3.25\text{ mm}$, $R=35\text{ mm}$)
Table 1 Measured results of the waveguide

$C(\%)$	输出 (mV)	灵敏度 S	相对灵敏度 r_s
0	181.7		
1	178.1	3.6	2.00
2	173.6	4.5	2.60
3	168.7	4.9	2.90
5	158.5	5.1	3.22
8	144.1	4.8	3.33

对弯曲形状如图 7 的波导进行测量, 结果说明它有良好的线性. 如用峰值功率为 $170\ \mu\text{W}$ 的发光管作光源, 其灵敏度 S 平均值为 3.6; 而用峰值功率为 $340\ \mu\text{W}$ 的激光管作光源, 其灵敏度 S 为 7.3, 这说明它有较高的灵敏度. 实验还对螺旋形波导进行测量, 它的灵敏度较低.

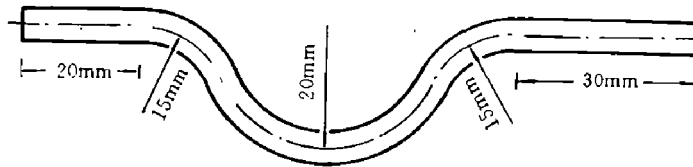


图 7 几个弯曲点的波导
Fig. 7 Waveguide of a few bending sections

3 结果分析与结论

(1) 在一定范围内, 光波导的直径越大, 耦合进入传输的光能越大, 这时采取最佳弯曲直径可得到比光纤传感更高的灵敏度. 如采用一定发散角的光源, 由于光方向的分散性, 只要设计合适, 能适应较大的测量范围和良好的线性度. 这时光波导直径可取与光源光斑线度相近, 使尽可能多的光耦合进入光波导.

(2) 如果大直径光波导设计增至两个弯曲点 (见图 7), 虽然光衰减大, 但相对灵敏度大, 只要增大光强 (如用激光二极管) 就能达到较高灵敏度. 探测管及相应电路有较小的静态, 可降低噪声, 避免饱和, 增大测量范围. 由于不同的弯曲半径可以适应不同的溶液浓度, 因而线性度也大为改善.

(3) 如果弯曲半径太小, 或者弯曲点过多 (如螺旋形), 则光衰减过大, 出射光能太小, 灵敏度反而降低.

从上可见, 用大直径光波导, 弯曲一定的形状, 可以取得较高的测量灵敏度, 并能适应较大测量范围并有良好的线性度. 如采用半导体光电器件, 可直接装在波导输入与输出端, 测量信号强, 探测电路简单, 而且这种波导取材与加工容易, 体积小, 结构简单, 比用光纤稳固可靠, 所以是一种很有发展前途的溶液浓度在线测量方法.

参考文献

- 1 Conrad H Hoepfner. *Chemical Engineering*, 1984;**91**(10):71-78
- 2 Arikawa J et al. *Electronic Engineering*, 1985;**22**(3):79-84
- 3 Kapany NS, Pike JN. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957;**47**(12):1109-1117

STUDY OF THE METHOD FOR MEASURING LIQUID DENSITY BY OPTICAL WAVEGUIDE

ZHOU ZUOPING, LIN WEI

(*Applied Physics Department, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510641, China*)

Abstract: The investigation of optical glass waveguides for liquid density measurement with large diameters in various shapes is reported. The dependence of sensitivity on the bending radius was calculated. The measurement system in the near infrared waveband was set up. Various bending waveguides were measured, and the results of measurement are nearly in agreement with the theoretical analysis.

Key words: optical waveguide, density, measurement.