

文章编号 1004-924X(2007)04-0478-08

光纤生物量浓度在线检测传感器

赵明富^{1,2}, 廖强¹, 陈艳², 钟年丙²

(1. 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044;

2. 重庆工学院电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

摘要:建立了一种新的生物量浓度测量方法,并对传感器的设计进行了研究,介绍了传感器的组成原理、光路、理论分析和相关实验。基于光的吸收和散射与介质的浓度、通过介质的光程和入射光强有关,生物量浓度的变化会引起吸收和散射的变化,从而导致接收光能量的变化这一物理现象和理论,将接收光能量的大小与具有实用意义的生物量浓度测量联系起来,建立了一种新的生物量浓度测量方法。实验选用了760 nm近红外光源,在20℃恒温情况下,对生物量浓度测量进行了实验研究。结果表明,这种方法用于测量微生物菌液浓度具有很好的对应函数关系,测量的最大相对误差 $<0.2\%$,具有生物量浓度在线测量准确、灵敏高、使用寿命长等优点。传感器的设计原理和方法具有一定的普遍意义,是一种有实用价值的生物量浓度传感器,可实现对含有微生物的菌液进行生物量浓度在线测量。

关键词:生物量浓度;在线检测;光纤传感器;吸收;散射

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Fiber sensor for biomass' online testing

ZHAO Ming-fu^{1,2}, LIAO Qiang¹, CHEN Yan², ZHONG Nian-bing²

(1. *Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

2. *Department of Electronic Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China*)

Abstract: The sensor design, structure theory, light path, theory analysis and experiment are introduced. The light absorption and scattering are related to the light distance and incidence energy, and the change of the biomass concentration makes the changes of the light absorption and scattering, and leads to the change of the receiving energy. Based on the physical phenomena and theory, a new method to measure the biomass concentration is set up. Under the constant temperature (20℃) circumstance, the biomass concentration is tested using a 760 nm lamp-house. The result indicates that the method is good for testing the bacterium liquid concentration; the maximum relative error is less than 0.2%. It is advantage in precise on-line testing, high sensitivity and long life etc and can be used in testing microbial bacterium liquid on-line.

Key words: biomass concentration; online testing; optical fiber sensor; absorption; scattering

收稿日期:2006-07-31;修订日期:2006-12-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50006015);高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20050611004);重庆市自然科学基金项目(No. CSTC,2006BB2408);教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-04-0845)

1 引言

生物法滴滤塔处理低浓度有机废气过程中,由于生物废气处理的生化反应过程非常复杂,影响废气处理效率的因素很多,如含有微生物和营养物质的菌悬液的成分、生物量浓度、pH值、循环速度(循环液流量)、塔内温度等,在上述因素中,生物量浓度是重要的工艺参数,它的在线检测技术对生化反应过程控制显得尤其重要。文献[1]研究认为生化反应过程中生物量浓度的在线检测技术尚不成熟,目前对生物量浓度的在线检测的传感器研究引起了当前世界各国的重视^[2-5]。

生物量的传统测量方法分为离线测量和在线测量技术。离线测量方法主要有:干重法、光密度法和亚甲基染色法等^[2],这些方法测量生物量浓度既费时又费力,还必须不断地从反应塔中抽取样品,在取样过程中极易带进杂菌而感染反应塔,采用离线方法的另一个缺点是不易实施自动化控制。生物量浓度的在线测量技术还处于理论和实验阶段,目前只有文献[2]研究论文发表,文中采用电容率分布测量的方法,理论和实验还存在一定的差距。而文献[3]介绍的液体浓度测量方法,采用光学反射原理测量液体浓度,对反射光临界角改变的物理现象做了研究,具有较高的理论和实验价值。但研究仅限于对普通液体浓度测量,这种以光反射能量变化为基础的测量方法已经引起更多的重视和研究^[6,7],但是目前尚未出现性能优良的在线生物量浓度检测传感器。

生物法处理低浓度有机废气的环保技术进入工程应用阶段后,在工业生化反应处理过程中如何对过程参数,特别是生物量浓度进行在线检测与控制,是目前该技术进入工程应用阶段的技术难题和关键。

本文针对这一技术难题和关键,通过对光散射和吸收物理现象的研究,设计了一种新型光纤反射式液体生物量浓度测量传感器,并通过对传感器的设计原理和方法、光路的理论分析,得出了接收光的能量与浓度的函数关系。在此基础上,通过参考文献[3]的实验研究方法,深入研究了生物菌悬液浓度在近红外光情况下对浓度的影响。实验结果及理论分析表明:这种方法用于测量生物菌悬液浓度是可行的,具有生物量浓度测量准

确、反应灵敏、使用寿命长等优点,该液体浓度传感器的设计原理和方法具有一定的普遍意义,是一种很有实用价值的新型液体生物量浓度传感器,具有良好的应用前景。

2 传感器组成结构原理

如图1所示,光纤反射式液体生物量浓度传感器系统由光源、光探测器、信号处理和光纤探头中的光耦合部分组成。

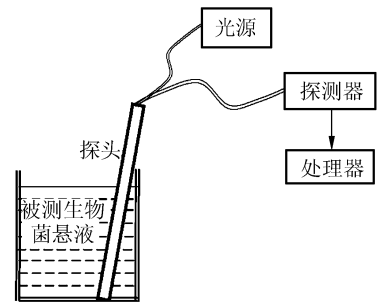


图1 光纤反射式传感器装置框图

Fig.1 Equipment frame of fiber reflecting sensor

对光反射物理现象的研究表明:光在介质中经反射镜传输,反射光能量的大小与多个因素有关。本文研究的是光在不同浓度菌液中的传输,实验表明随着菌液浓度的不断增加,出射光强不断减弱。

光纤浓度传感器探头结构原理如图2所示,包含入射光纤、接收光纤和反射面1、2部分组成,被测溶液将侵入到入射光纤、接收光纤和反射面1、2部分的所有光路,因此,生物菌液浓度对传感器的光耦合光程为 $l=2D_1+D_2$ 。光纤端口处采用不同透镜进行聚焦准直,使得传输光为平行光束,便于光路分析,从而使生物量浓度传感器对被测生物菌悬液有较高灵敏度和较好的线性特性。

出射光强减弱的原因一般可分为吸收作用和散射作用两种情况,传感器中引入了光学反射镜,反射镜互呈 90° ,无任何介质影响的情况下,入射光纤的光能够到达能反射镜面,与反射面呈 45° ,经全反射后到达另一个反射面,光线也与该反射面呈 45° ,同样会形成全发射现象,将光线反射回到接收光纤。根据反射光振幅随反射界面液体变化而引起反射光变化的物理现象,设计了在线检

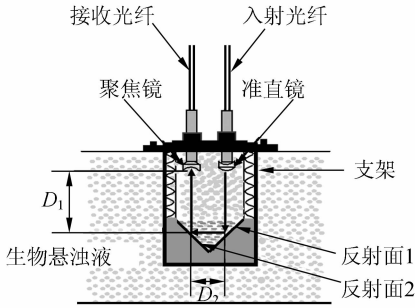


图 2 光纤浓度传感器探头结构原理图

Fig. 2 Structure principle of fiber concentration sensor

测传感器,测试发射的光线经过介质先后到达两面反射镜的两次反射过程中液体生物量浓度对反射光线的影响和衰减,传感器还在光学上具有对生物量浓度信号放大的作用。

3 传感器原理的理论分析

3.1 传感器测量原理

对光吸收和散射是物质所具有的特性。当光纤外部的液体浓度发生改变时,液体的光吸收系数以及散射系数都会随之变化。光在生物菌液中的传播特性非常复杂,其中吸收和散射作用是生物菌液测量过程中需要考虑的重要因素。光通过媒质时,使接收光减弱的因素有两个:光的吸收和光的散射(如图 3)。前者是入射光能转化为媒质的热能等其它形式的能量,后者使光能量的空间分布改变了。但实际测量中,很难区分它们对接收光的影响。如果考虑到介质对光能的削弱,则光能的振幅将随着波的传播过程逐渐减小。为反映这一事实,把介质折射率视为一复数,即复折射率 \tilde{n} 表示为:

$$\tilde{n} = n + \alpha, \quad (1)$$

其中实部 n 是表征介质影响光传播的相位特性的量,即通常所说的折射率;虚部 α 表征光在介质中传播时振幅(或波长)衰减的快慢,称为消光系数,该量可以描述光在介质中传播的吸收特性。

$$I = I_0 \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)l] = I_0 \exp(-\alpha l)^{[16]}, \quad (2)$$

其中 α_a 为吸收系数, α_s 为散射系数, α 为总消光系数,它们之间满足 $\alpha = \alpha_a + \alpha_s$,实际测量中得到的都是总的消光系数。 l 为光束在菌液中经过的有效光程,且 $l = 2D_1 + D_2$,如图 3 所示。

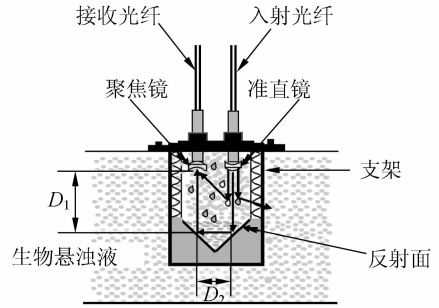


图 3 入射光线的散射

Fig. 3 Incidence light scattering

吸收系数与消光系数有如下关系

$$\alpha_a = 2k\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \alpha, \quad (3)$$

由此可见,吸收系数也是波长的函数

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda} \alpha l\right), \quad (4)$$

对于气体或溶解于不吸收光的溶剂中的物质,吸收系数 α_a 正比于单位体积中的吸收分子数,即正比于吸收物质的浓度 c ,有

$$\alpha_a = Ac, \quad (5)$$

这里, A 是与浓度无关的常数,它只取决于吸收物质的分子特性。

当物质的浓度大到一定程度时,存在重叠散射效应,则此时散射作用占主导地位。一般按散射粒子的大小把散射分成两类:一类是散射粒子的直径在 $\lambda/5 \sim \lambda/10$ 以下的散射,称为分子散射或瑞利散射;另一类是散射粒子的直径与光波波长接近甚至更大的散射,称为大粒子散射或米氏散射。

对于生物菌液中复杂的分散体系而言,被测生物菌液中细菌常用于生化降解有机废气(苯、甲苯、二甲苯等),菌属细菌特性为:单细胞,直或弯杆短杆菌(假单胞菌属 *Pseudomonas* sp.),如图 4。

通过 2 000 倍的显微观察,这种杆短杆菌为圆柱型杆体,一般直径约为 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$,杆体长度约为 $2.6 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 。由于被测生物菌液中的微生物颗粒远远大于入射光的波长,所选菌液中的菌体(较大颗粒)属于米氏散射的范畴,培养液中小尺寸微量菌种属于瑞利散射范畴。

米氏散射光强随波长的变化规律与波长 λ 的较低幂次成反比:

$$I(\theta) \propto \frac{1}{\lambda^n}, \quad (6)$$

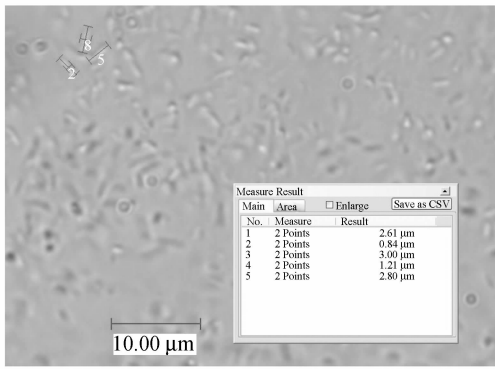


图 4 生物菌液显微照片(×2 000)

Fig. 4 Bacterium liquid micrograph(×2 000)

其中, $n < 4$, n 的值取决于微粒尺寸。

散射光的偏振度随 d/λ 的增加而减小, 这里 d 是散射粒子的直径, λ 是入射光波长。散射光强度的角分布也随 d/λ 而变, 和瑞利散射相比, 其前向散射加强, 后向散射减弱。

瑞利散射光强度与入射光波长的 4 次方成反比, 即:

$$I(\theta) \propto \frac{1}{\lambda^4}, \quad (7)$$

其中, $I(\theta)$ 为相应于某一观察方向(与入射光方向成 θ 角)的散射光强度, θ 称为散射角。该式说明: 光波长愈短, 其散射光强度愈大。

综上所述, 光散射系数 α_s 的大小在很大程度上取决于颗粒粒径、折射率、光波长以及散射角。其中, 对于相当大的颗粒(粒径大于光线波长许多倍), 散射截面已与颗粒的几何截面成正比, 此时光散射系数 α_s 接近 $2^{[17]}$ 。对于粒径与光波长接近或略大些的颗粒, 可用摩尔理论进行计算。由“不规则衍射”近似法进行计算时

$$\alpha_s = 2 - (4/\rho) \sin \rho + (4/\rho^2)(1 - \cos \rho), \quad (8)$$

$$\rho = 2\beta(m-1), \quad (9)$$

$$\beta = 2\pi r/\lambda, \quad (10)$$

式中 m 为相对折射率, 取 $m=1.2$; β 为粒径参数; r 为颗粒半径, 关系如图 5 所示。

本次实验, 采用了固定频率波长的光源, 故波长因素引起的变化可视为常数, 另外, 由于光纤探头的结构, 入射光纤与接收光纤之间的机械距离较近, 故散射角也可忽略, 光程在本次实验中与探头结构有关也是固定的常数。由式(9)、(10)得:

$$\rho = k \cdot r(m-1) (k \text{ 为常数}), \quad (11)$$

实验中采用单一菌种(假单胞菌), 其直径约

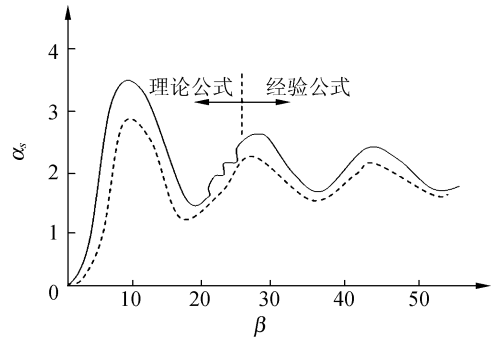


图 5 光散射系数与粒径参数的关系

Fig. 5 Relationship between the light scattering coefficient and particle size parameter

为 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$, 杆体长度约为 $2.6 \sim 3.0 \mu\text{m}$, 且菌液的相对折射率与其浓度有关, 故 ρ 是一个与菌液浓度有关的函数, 所以式(8)可写为

$$\alpha_s = 2 - \rho(c), \quad (12)$$

将式(5)、(12)代入式(2)得到关于吸收和散射对入射光影响的综合式:

$$I = I_0 \exp[-(\alpha_a + \alpha_s) \cdot l] = I_0 \exp\{-Acl + [2 - \rho(c)] \cdot l\},$$

将上式写成光电转换后的输出电压形式:

$$U = U_0 + I_0 \exp[-Acl + \rho(c)l], \quad (13)$$

U_0 表示光电转换后输出电压的初始值, 可以通过调节信号调理电路的放大倍数改变初始值, 也可以通过调零电路, 将 U_0 调为 0; A 是与浓度无关的常数, 它只取决于吸收物质的分子特性; c 为被测菌液浓度; l 为光束在菌液中(如图 2、3)经过的有效光程, 且 $l = 2D_1 + D_2$; ρ 是一个与菌液浓度 c 有关的函数, 可以表达为 $\alpha_s = 2 - \rho(c)$ 。

3.2 传感器光源波长的选择

在散射的影响中, 除了不均匀物质的散射外, 均匀物质也有散射, 即分子散射, 文献[12]对纯净水在不同波长下吸收、散射系数的相互影响做了研究, 如表 1 所示, 表中 λ 代表波长, α_a 代表吸收系数, α_s 为散射系数。

由表看出, 当所测物质为均匀透明纯净水时, 波长越长, 纯净水的散射对吸收的影响越小, 在 650 nm 附近, 散射相当于吸收的 1/500, 完全可以忽略不计, 而在波长为 400 nm 时, 散射与吸收的数值相当, 这时必须考虑散射因素。为了排除生物菌液中溶剂水的散射影响, 光源波长 λ 最好选择大于 800 nm。因为被测生物菌液中细菌常

表 1 不同波长下的吸收、散射系数相互影响数据表

$\lambda(\text{nm})$	$\alpha_a (\text{m}^{-1})$	$\alpha_s (\text{m}^{-1})$
400	0.005 8	0.005 3
450	0.011 4	0.003 3
500	0.023 8	0.002 1
550	0.058 8	0.001 4
600	0.222 4	0.001 0
650	0.331 5	0.000 7
700	0.572 2	0.000 5
750	2.733 4	0.000 4
800	2.293 2	0.000 3

用于生化降解有机废气(苯、甲苯、二甲苯等),菌属细菌特性为:单细胞,直或弯杆短杆菌(假单胞菌属 *Pseudomonas sp.*)。通过显微观察,这种杆短杆菌为圆柱型杆体,直径约为 $0.8\sim 1.2 \mu\text{m}$,杆体长度约为 $2.6\sim 3.0 \mu\text{m}$ 。由于被测生物菌液中的微生物颗粒远远大于入射光的波长,需考虑现有单波长光源实际情况。综合上述各种因素的影响,本传感器在设计时选择了近红外单波长 760 nm 的光源。

4 实验结果与分析

为探讨不同浓度对待测液体的光吸收度以及结果产生的影响,对浓度为 $4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 \text{ ml}$ 时的反射光能量(用 OD 值表示)的测量做了对比实验。下面是几种情况的测量结果、分析及比较。

4.1 光密度(OD 值)法测量结果及分析

实验选取了多个不同浓度的生物菌液(同体积),使其之间的浓度差为 4 ml ,对 $4\sim 40 \text{ ml}$ 的生物菌悬液浓度进行重复测量实验。利用分光光度计测试出了随菌液生物量浓度变化下的吸光度($\text{OD}_{620 \text{ nm}}$ 值),其变化曲线如图 6。(温度 $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,光源波长 $\lambda = 620 \text{ nm}$)。

实验曲线表明,生物菌液的 OD 值随生物量浓度的变化而变化,其趋势是随着生物量浓度的增大,菌液的 OD 值也越大,这表明生物菌体的吸光度也就越大,其变化呈明显的上升趋势,并且随着浓度的上升,相邻浓度之间的 OD 值差值也有增加。该实验表明生物菌液浓度对于菌体的光吸

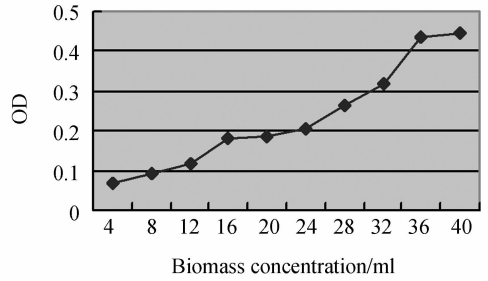


图 6 菌液 OD 值随生物量浓度的变化曲线

Fig. 6 Biological liquid's OD value vs biomass concentration

收度有着显著的影响,可以通过测量接收光的能量来较准确地反映生物菌液浓度的测量,进一步实现生物量浓度的在线检测。

4.2 传感器电压输出测量结果及分析

选取不同浓度生物菌液(期间差值为 4 ml)对处理电路的电压值进行重复测量,图 7 给出菌液浓度分别为 $4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 \text{ ml}$ 时,传感器输出的衰减电压随生物量浓度的变化曲线(温度 $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)。

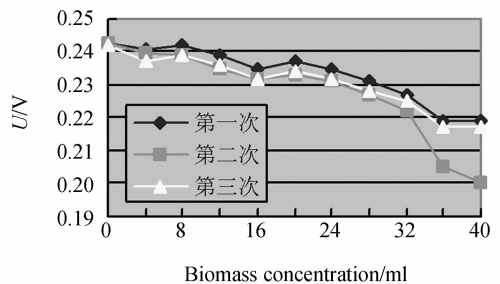
图 7 反射光能量的衰减随生物量浓度的变化曲线
Fig. 7 Attenuation voltage vs biomass concentration

图 7 的实验曲线表明:对同一曲线,在浓度较小时线性较好,浓度较大时衰减曲线明显下降。三条曲线相比较,初始角度差别越小,线性区域越明显,测量灵敏度越高。浓度较大时,由于菌体颗粒对于入射光的散射作用较明显,出现了明显的接收光能量的减弱,表现在被测电压值的迅速下降。

4.3 经过补偿处理后的测量结果误差分析

在应用中采用(1)光纤传感器部分(包括:2个结构性能完全相同的光纤探头、反射面、光源和光电转换部分)、(2)信号调理部分、(3)A/D 转换

部分、(4)ARM 计算机及数字参数显示部分等四部分组成测量系统,测量系统对测量信号进行非线性补偿,表2是经过标定处理后的测量数据和已知浓度的比较。

表2 标准菌液浓度和测量值比较表

Tab.2 Comparison of theory bacterium liquid concentration to testing result

序号	标准菌液浓度(ml)	测量系统测量数据(ml)	绝对误差(ϵ)
1	0	0.019	-0.02
2	4	4.018	-0.02
3	8	8.025	-0.03
4	12	12.03	-0.03
5	16	16.03	-0.03
6	20	20.01	-0.01
7	24	24.00	0.004
8	28	27.94	0.061
9	32	31.95	0.046
10	36	35.95	0.048
11	40	39.97	0.031

从表2可看出:经过神经网络模型处理后的浓度值与实验测量的浓度值的最大绝对误差为 $\epsilon \leq 0.06$;最大相对误差为 $(0.06 \text{ ml}/28 \text{ ml}) \cdot 100\% = 0.2\%$,可以满足生物量浓度在线测量的精度要求。

4.4 测量结果的比较分析

从测量原理看,对不同浓度菌液所采用的实验方法的出发点是不同的,但从实验结果分析来看,这两种方法有共同点,即随着菌液浓度的增加,对光的吸收度在增大,接收光能量会逐渐减小。通过理论分析可知其主要原因是:分别利用待测物的复折射率的实部(折射率)和虚部(光吸收)以及菌体对光的散射作用来实现测量。

(1)从接收光能量的衰减程度看,如果都对低浓度的实验数据分析比较,在浓度4~28 ml,曲

线接近线性,这个范围内,主要是菌液对光的吸收起主要作用。此时电压值能够比较灵敏地反映出生物量的浓度。在浓度高于28 ml时,菌体对光的散射作用占主导地位,其规律有待于进一步改进。

(2)从线性范围看,在浓度4~28 ml,线性好,在28 ml以上衰减变陡,非线性现象明显。

(3)从线性斜率看,在线性区间内,曲线斜率较小,在非线性区内,斜率突然增大。从实验误差看,在线性响应部分,菌液浓度较小时的测量值偏离曲线的程度要小于其较高浓度时的情况。

5 结 论

本文根据生物法降解有机废气(苯、甲苯、二甲苯等)过程中需要对生物量浓度进行在线测量的要求,依据生物量浓度变化会引起吸收和散射的变化,从而导致接收光能量变化的原理,将接收光能量的大小与具有实用意义的生物量浓度测量联系起来,提出了一种新的生物量浓度测量方法,并对传感器的设计、组成原理、光路、理论分析进行了研究。通过实验深入地研究了传感器的特性,实验中选用了近红外波长为760 nm光源,在20℃恒温情况下,对生物量浓度测量进行了光密度(OD值)法测量和传感器输出电压测量实验,并对实验结果进行了对比分析。最后对传感器输出测量结果进行非线性和误差补偿,经过处理后的测量结果能达到工业应用测量精度要求。实验结果表明:这种方法用于测量微生物菌液浓度具有很好的对应函数关系,测量的最大相对误差小于0.2%,具有生物量浓度在线测量准确、灵敏高、使用寿命长等优点。传感器的设计原理和方法具有一定的普遍意义,是一种有实用价值的生物量浓度传感器。

参考文献:

- [1] 王贻俊,樊育. 生物量浓度时实在线检测方法的研究[J]. 生物化学与生物物理进展,2000,27(4):387-390.
WANG Y J, FAN Y. The study of the on-line testing method of the biomass concentration [J]. *Prog. Biochem. Biophys.*, 2000,27(4):387-390. (in Chinese)
- [2] 张季熊,蒋明刚. 一种测量浓度的光纤传感系统[J]. 仪器仪表学报,2000,25(10):9-11.

- ZHANG J X, JIANG M G. Optical fiber sensor system of liquid density measurement [J]. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 2000,25(10):9-11. (in Chinese)
- [3] 范世福,陈莉,肖松山,等. 多用途光纤生化传感器的设计与研制[J]. 仪器仪表学报,1999,20(1):52-56.
FAN SH F, CHEN L, XIAO S SH, *et al.*. Design and development of optical fiber sensor for multipurpose biochemical sensing [J]. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 1999,20(1):52-56. (in Chinese)
- [4] 李锐峰,赵明富. 一种新型光电式液位传感器[J]. 大学物理实验,1999,(6):46-49.
LI R F, ZHAO M F. A new photoelectric liquid-level sensor [J]. *Phys. Exp. Coll.*, 1999,(6):46-49. (in Chinese)
- [5] 吴坚. 生物工程中检测技术的需求和发展趋势[J]. 计量学报,2002,23(4):315-319.
WU J. Requirements and development trends of the examination technology in bio-engineering [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002,23(4):315-319. (in Chinese)
- [6] GARCIA V A, DIAZ U R. Detection limits of an internal-reflection sensor for the optical beam deflection method [J]. *Appl. Opt.*, 1998,37(4):456-463.
- [7] JOEL V, GARCIA V A. Measuring optical power transmission near critical angle for sensing beam deflection [J]. *Appl. Opt.*, 1998,37(6):648-653.
- [8] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社,1984.
ZHAO K H, ZHONG X H. *Optic*[M]. Beijing: Peking University Press, 1984. (in Chinese)
- [9] 方俊鑫,曹庄琪,杨傅子. 光波导技术物理基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,1988.
FANG J X, CAO ZH Q, YANG B Z. *The Physical Basis of the Guided-waveoptics*[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese)
- [10] 密勒 R, 斯特斯 B. 红外光谱学的实验方法[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
MILLER R G J, STACE B C. *The Experiment Method of the Infrared Spectroscopy*[M]. Beijing: China Machine Press, 1985. (in Chinese)
- [11] 张雪中,赵霞,章先楼. 光纤微生物浓度传感器的开发及应用[J]. 仪器仪表学报, 1997,18(1):89-92.
ZHANG X SH, ZHAO X, ZHANG X L. The exploitation and application of the animalcule concentration sensor based on the fiber [J]. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 1997,18(1):89-92. (in Chinese)
- [12] 黎勇. 差比光吸收率的研制[D]. 电子科技大学, 1999.
LI Y. The study of the different absorptive rate [D]. *Graduate University of UEST*, 1999. (in Chinese)
- [13] 钟丽云,杨奇民,吕晓旭,等. 折射率调制型光纤传感器在溶液浓度测量中的应用[J]. 光子学报,1998,27(5):445-448.
ZHONG L Y, YANG Q M, LV X X, *et al.*. Application of refractive index modulation type optic-sensor to the solution density measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998,27(5):445-448. (in Chinese)
- [14] 度有康,陈希明. 光波长在 2 种介质界面放射时的半波损失[J]. 重庆邮电学院学报,2004,16(6):36-38.
TUO Y K, CHEN X M. Half-wave loss when light waves are reflected at interface of two mediums [J]. *J. Chongqing Univ. Posts Telecommun.*, 2004,16(6):36-38. (in Chinese)
- [15] 高德文,廖延彪,赖淑蓉,等. 用红外光纤传感技术测量液体的浓度[J]. 传感器世界,2004,(10):25-27.
GAO D W, LIAO Y B, LAI SH R, *et al.*. Infrared optical fiber sensor for the measurement of solution concentration [J]. *Res. & Dev.*, 2004,(10):25-27. (in Chinese)
- [16] 叶玉堂,饶建珍,肖峻,等. 光学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
YE Y T, RAO J ZH, XIAO J, *et al.*. *Optics Tutorial*[M]. Beijing: Qinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 李星,杨艳玲,李虹,等. 透光率脉动检测凝胶投药控制技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
LI X, YANG Y L, LI H, *et al.*. *Research on coagulant dosage auto control technique of fluctuation in transmitted light detecting*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [18] 马军山,侯琳琳,付东翔,等. 双荧光标记生物芯片激光共聚焦检测系统[J]. 光学 精密工程,2005,13(6):727-734.
MA J SH, HOU L L, FU D X, *et al.*. Two-laser scanning co-focal system for microarray analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):727-734. (in Chinese)
- [19] 崔敦杰. 关于红外探测器与红外焦平面阵列探测器性能参数描述方法的商榷[J]. 光学 精密工程,2003,11(3):265-269.

CUI D J. How to define noise and associated performance parameters for infrared detector and infrared focal plane array detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(3):265-269. (in Chinese)

- [20] 王慧,向阳,禹秉熙,等. 线列光纤传像束的调制传递函数评价方法及检测[J]. *光学精密工程*,2005,13(2):185-190.
WANG H, XIANG Y, YU B X, *et al.*. Comprehensive estimating and measuring method of line-array fiber-optic image bundles based on the modulation transfer function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):185-190. (in Chinese)

作者简介:赵明富(1964—)男,重庆人,教授,博士生,研究方向为生物化学过程中测量与控制问题,先后承担国家自然科学基金、重庆市科技攻关、重庆市应用基础研究项目关于生物废气处理技术等课题多项,获省部级自然科学三等奖 1 项,专利 10 项,在国际权威学术刊物发表论文 60 余篇。E-mail: zmf@cqit.edu.cn

廖强(1965—)男,重庆人,教授,博士后,博士生导师,研究方向为环境治理中的热物理问题。E-mail: lqzx@cgn.edu.cn(通信作者)