

基于间歇非稳态方法的溶氧装置增氧能力检测

张宇雷^{1,2}, 倪琦¹, 刘晃¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092)

摘要: 针对常用溶氧装置增氧能力试验操作随意性和试验误差较大的缺点, 通过试验研究, 提出了一种基于间歇非稳态法的试验方法。从所需设施、设备, 试验过程和计算方法几个方面进行了具体的说明。使用该方法对 DP18-Y 型多腔喷淋式溶氧装置进行了验证试验: 在气液比 (G/L) 1:100 和 1.5:100 两种条件下, 系统稳定运行约 130 和 220 min, 池内的平均溶解氧质量浓度达到 17 mg/L (接近理论饱和溶解氧浓度), 3 个测量点示值误差在 ± 0.78 mg/L 范围内; 在两种气液比条件下重复进行 3 次试验, 增氧能力计算结果分别为 (206.1 ± 5.7) 和 (248.5 ± 11.3) kg/h; 不同区间段计算结果表明, 试验起始点以越接近 0 mg/L 越好, 结束点应大于理论饱和浓度的 70%。该试验方法的稳定性和重现性良好, 可为检验溶氧装置的工作性能提供一种切实可行的试验方法。

关键词: 溶氧装置, 试验, 供气, 氧质量转移系数, 增氧能力, 间歇非稳态方法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.026

中图分类号: S951

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0145-06

张宇雷, 倪琦, 刘晃. 基于间歇非稳态方法的溶氧装置增氧能力检测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 145—150.
Zhang Yulei, Ni Qi, Liu Huang. Evaluation of oxygen transfer rate of oxygenator based on intermittent non-steady state method[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 145—150. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着国内工厂化养殖技术的不断提高, 为满足高密度生产的需要, 工业氧气 (O_2 体积分数 $\geq 99.2\%$) 在实际生产中的应用已经越来越普遍^[1-3]。由于使用工业氧气相对于空气源增氧价格偏高, 因此, 大部分生产机构都会选择使用合适的溶氧装置来提高氧利用率, 节省生产成本^[4-6]。

对于空气源增氧, 国内已经有了统一的试验方法和标准, 如: SC/T 6009—1999《增氧机增氧能力试验方法》和 CJ/T 3015.2—1993《曝气器清水充氧性测定》等。但是, 对于如何检测溶氧装置的增氧能力尚没有相关的报导, 生产厂家和研究机构都按照各自的方法进行试验。陈有光^[7]等在对氧气锥的试验研究中, 通过分别测量装置进、出水中的溶解氧浓度, 分析了氧气进气量与出水溶解氧浓度和氧利用率的关系。杜守恩^[8]等报道了管道溶氧器的氧利用率为 99%, 水中溶解氧可达 10~20 mg/L。张宇雷^[9]等报道了一种低能耗纯氧混合装置, 在额定条件下其进出水溶氧增量可达 9~10 mg/L, 理论动力效率 6.63 kg/(kW·h)。从中可以看出, 各研究机构和企业单位对于溶氧装置的试验方法和引用的性能参数都不尽相同, 同类型产品之间也无法进行可靠的比较。因此, 建立一个严谨的、科学的、合理的试验方法对于进一步规范企业生产行为, 促进其在工厂化、现代化养殖中的推

广应用, 是具有重要意义的。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验基于间歇非稳态法^[10], 即使用溶氧装置对一定量的经过消氧处理后的水体进行连续增氧, 试验系统内的水体不进不出, 溶解氧浓度随时间而变。根据试验数据, 通过非线性拟合方法计算出氧质量转移系数 $K_L a$ 、理论饱和溶解氧浓度 C_∞ 和初始溶解氧浓度 C_0 , 进而获得该纯氧混合装置的增氧能力 Q_s 。

1.2 设施设备

试验系统如图 1 所示, 水池选用直径 6.3 m, 池深 1.15 m 的圆形试验池, 池底向心坡度 1:20, 注水深度 40 cm。试验装置选用 DP18-Y 型多腔喷淋式溶氧装置, 额定水处理量 18 m³/h。使用一个 200 L 的工业用低温液氧罐供气 (O_2 体积分数为 99.2%), 气量大小通过一台 D07-11C 型质量流量控制器 (量程范围为 0~10 L/min, 测量准确度为满量程的 $\pm 1\%$) 进行调控。潜水泵固定在水

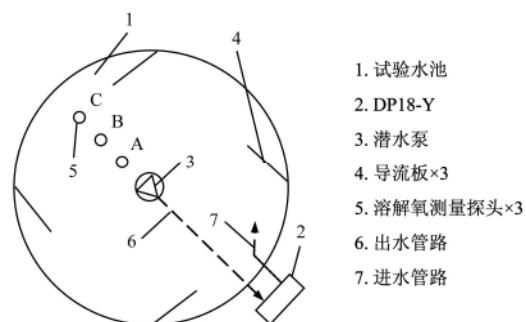


图 1 试验系统
Fig.1 Testing system

收稿日期: 2010-08-16 修订日期: 2010-09-15

基金项目: 国家鲜鳞类产业技术体系 (nycytx-50); 农业部公益性行业科研专项 (nyhyzx07-46)

作者简介: 张宇雷 (1980—), 男, 主要从事渔业设施设备研究。上海 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 200092。

Email: Zhangyl121@hotmail.com

池中央,通过管路将水提送至 DP18-Y 进行气液混合,由出水管路自流回试验水池,流量大小使用变频器调节。溶解氧的测量使用 YSI pro 系列手持式溶氧仪,如图所示在试验水池半径范围内线性均匀布置。

1.3 试验步骤

- 1) 在试验水池内注入清水至设定深度;
- 2) 安装溶氧仪探头至预定位置(测试探头深度为水面下 20 cm);
- 3) 使用氯化钴(CoCl_2 , 分析纯)和无水亚硫酸钠(Na_2SO_4 , 工业纯)进行消氧处理^[11],静置一段时间待用;
- 4) 打开氧气阀通入纯氧,并调节至设定气流量;开启潜水泵,并调节变频器将流量控制在 $18 \text{ m}^3/\text{h}$;
- 5) 待溶氧仪读数开始上升后,每 1 min 记录 1 次读数。

1.4 数据计算

1.4.1 非线性拟合计算 C_∞ 、 C_0 和 K_La

根据双膜理论,两流体相之间的氧传递基本方程可描述为式(1)^[12]

$$C_t = C_\infty - (C_\infty - C_0)e^{-K_La \cdot t} \quad (1)$$

式中, C_t 为 t 时刻溶解氧质量浓度, mg/L ; t 为时间, min ; C_∞ 为理论饱和溶解氧质量浓度($t=\infty$ 时,水体中的溶解氧质量浓度), mg/L ; C_0 为初始溶解氧质量浓度($t=0$ 时的溶解氧浓度), mg/L ; K_La 为氧质量转移系数, min^{-1} 。

通过试验方法,每 1 min 测定水中溶解氧浓度,即可得到一系列 C_t-t 数据。然后使用 Matlab 7.0 软件对该组数据进行非线性拟合得到 3 个未知数 C_∞ 、 C_0 和 K_La 的拟合值。

1.1.2 增氧能力计算

标准状态下的增氧能力 Q_s 指在标准条件下(20°C 水温, 1 个标准大气压),单位时间内水体中溶解氧的增加量^[13],按式(2)^[14]计算

$$Q_s = K_La_{(20)} \cdot V \cdot C_{\infty(20)} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

式中 $K_La_{(20)}$ 为 20°C 水温条件下的氧质量转移系数, h^{-1} ,按式(3)^[15]计算

$$K_La_{(20)} = K_La_{(T)} / 1.024^{(T-20)} \quad (3)$$

式中, $K_La_{(T)}$ 为试验条件下的氧质量转移系数,使用非线性拟合法计算获得, h^{-1} ; T 为试验水温, $^\circ\text{C}$; V 为试验水体体积, m^3 ; $C_{\infty(20)}$ 为标准状态下的理论饱和溶解氧浓度($t=\infty$ 时溶解氧浓度), mg/L ,按式(4)^[15]计算

$$C_{\infty(20)} = C_{\infty(T)} / (\tau \cdot \Omega) \quad (4)$$

式中, $C_{\infty(T)}$ 为试验条件下的理论溶解氧饱和度; τ 为温度修正系数,按式(5)^[15]计算

$$\tau = \rho(\text{O})_{s(T)} / \rho(\text{O})_{s(20)} \quad (5)$$

式中, $\rho(\text{O})_{s(T)}$ 为标准大气压(101.325 kPa)下,相对湿度 100%,水温为 T ($^\circ\text{C}$)时,氧在被空气饱和的水中的溶解度, mg/L ; $\rho(\text{O})_{s(20)}$ 为标准状态下(20°C 水温, 1 个标准大气压,相对湿度 100%),氧在被空气饱和的水中的溶解度, mg/L ; Ω 为压力修正系数,按式(6)^[15]计算

$$\Omega = P_b / P_s \quad (6)$$

式中, P_b 为试验条件下的大气压力, kPa ; P_s 为标准大气

压力(101.325 kPa)。

2 结果与分析

2.1 气液比影响试验

气液比(gas liquid ratio, G/L)指溶氧装置在工作状态下单位时间内进气量与其水处理量的体积比值。DP18-Y 型多腔喷淋式溶氧装置额定水处理量为 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在 G/L 1:100 和 1.5:100 两种条件下,其进气量分别为 3.0 和 4.5 L/min。如图 2 所示为两次试验过程中,试验池内 3 个溶解氧测量点均值随时间变化的曲线图,标准偏差分别在 0.09~0.78 和 0.06~0.61 范围内(为表示清晰,图表中只给出了每 5 min 记录的溶解氧数值,实际试验过程中为每 1 min 记录 1 次)。

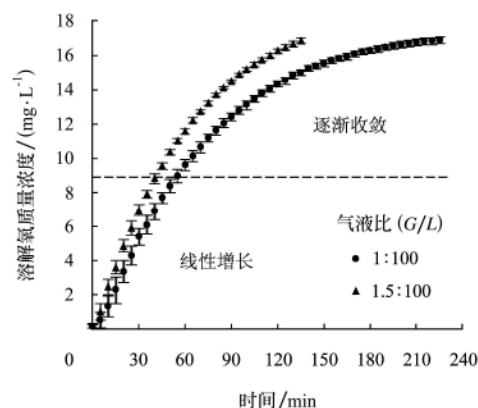


图 2 试验池内平均溶解氧质量浓度随时间变化情况

Fig.2 Changes of average dissolved oxygen concentration vs time in the testing pool

从图 2 中可以看出,溶解氧在 0~9 mg/L 范围内基本呈线性增长,9 mg/L 以后增长变缓,并逐步收敛在 18 mg/L 左右。在 G/L 1.5:100 工作条件下,溶解氧增长速度较快,使用约 130 min 达到 17 mg/L ;而在 G/L 1:100 条件下则需要约 220 min。根据公式(1)分别对 3 个测量点溶解氧随时间增长(C_t-t)曲线进行非线性拟合即可得出曲线方程,如表 1 所示。(其中 R^2 为拟合曲线方程与实际 C_t-t 曲线的决定系数)

表 1 曲线拟合方程

Table1 Fitted regression equation

气液比(G/L)	测量点	拟合方程	决定系数 R^2
1:100	A	$C_t = 18.08 - 18.50e^{-0.0134t}$	0.934
	B	$C_t = 17.60 - 18.02e^{-0.0142t}$	0.929
	C	$C_t = 17.83 - 18.01e^{-0.0142t}$	0.931
1.5:100	A	$C_t = 19.56 - 19.54e^{-0.0154t}$	0.967
	B	$C_t = 18.77 - 18.93e^{-0.0161t}$	0.964
	C	$C_t = 19.48 - 20.12e^{-0.0153t}$	0.967

注: C_t 为溶解氧质量浓度, mg/L ; t 为时间, min 。

根据拟合方程和式(1)即可得出 $C_{\infty(T)}$ 、 C_0 和 $K_La_{(T)}$,再根据公式(2)~(6)进行换算即可得出被检测装置的标准增氧能力,具体数据如表 2 所示。

从两次试验结果可以看出,当气液比(G/L)从

1 : 100 提高到 1.5 : 100 后, 理论饱和溶解氧质量浓度 $C_{\infty(20)}$ 上升了 1.2 mg/L, 标准增氧能力 Q_s 从 208.7 g/h 提高到了 245.8 g/h。3 个测量点的计算结果比较吻合, 均值误差 (绝对值) 最大值为 2.76%。

表 2 标准增氧能力
Table 2 Standardized oxygen transfer rate

项 目	气液比 (G/L) 1 : 100				气液比 (G/L) 1.5 : 100			
	测量点 A	测量点 B	测量点 C	均值	测量点 A	测量点 B	测量点 C	均值
水温(T)/ $^{\circ}\text{C}$	19.8				20.4			
气压(P_b)/kPa	100.5				101.5			
水体体积(V)/ m^3	13.8				13.8			
理论饱和浓度(C_x)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	18.20	17.72	17.96	18.0	19.5	18.74	19.44	19.2
氧质量转移系数($K_L a$)/ h^{-1}	0.81	0.86	0.86	0.84	0.91	0.95	0.91	0.93
标准增氧能力(Q_s)/($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)	202.93	210.09	213.06	208.7	246.36	246.91	244.14	245.8
均值误差(绝对值)/%	2.76	0.67	2.09		0.23	0.45	0.67	

2.2 试验稳定性和重现性

在两种气液比条件下, 分别重复进行 3 次试验, 水体中溶解氧均值变化情况如图 3 所示 (为表示清晰, G/L 1 : 100 仅给出了每 4 min 记录的数据, G/L 1.5 : 100 仅给出了每 3 min 记录的数据, 而实际试验和计算过程中都是每分钟记录 1 次数据)。试验按照前文所述方法进行, 但

是缩短了试验时间, 仅运行 40~60 min, 待溶解氧最低点上升到 9 mg/L 时结束。从图中可以看出, G/L 1.5 : 100 条件下池内 3 个溶解氧测量点示值相对于 G/L 1 : 100 更加稳定, 标准差范围在 0.10~0.42, 而 G/L 1 : 100 条件下要达到 0.04~0.78。

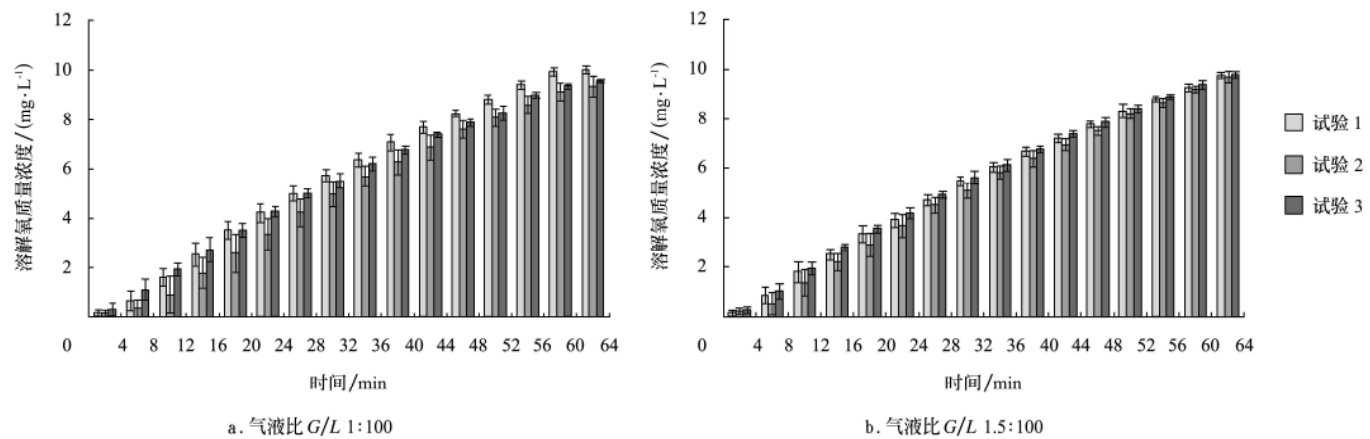


图 3 不同气液比条件下试验池内平均溶解氧质量浓度随时间变化情况
Fig.3 Changes of average dissolved oxygen concentration in the testing pool vs time with different G/L ratios

根据 3 个测量点的 C_t-t 试验曲线, 分别计算其标准增氧能力的结果如表 3 所示。 G/L 1 : 100 条件下 3 次试验标准增氧能力均值误差不超过 3.2%, G/L 1.5 : 100 时不超过 5.2%。

表 3 标准增氧能力重复性试验计算结果
Table 3 Standardized oxygen transfer rate by repeated tests
 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$

测量点	气液比(G/L) 1 : 100			气液比(G/L) 1.5 : 100		
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 1	试验 2	试验 3
A	213.8	196.7	200.6	240.7	245.7	260.6
B	211.9	194.5	207.0	232.4	246.0	262.4
C	205.3	207.6	217.9	256.1	231.0	261.5
3 点均值	210.3	199.6	208.5	243.1	240.9	261.5
标准差	4.5	7.1	8.7	12.0	8.6	0.9
3 次试验均值	206.1 \pm 5.7			248.5 \pm 11.3		

2.3 试验起始点的影响

由于使用化学方法消氧, 试验池水体内的溶解氧水平在试验正式开始以后仍需要一段“苏醒”时间。所以, 此处试验起始点指记录下来作为曲线拟合原始数据的第一个溶解氧数据, 而不是试验开始时池内的平均溶解氧浓度。在 2.1 气液比影响试验中试验池内溶解氧水平从 0 mg/L 左右提升到了 16 mg/L 以上。现以该组数据作为依据, 选择不同试验起始点 (0、1、3 和 6 mg/L) 的数据段进行非线性曲线拟合, 计算其标准增氧能力。所得结果如表 4 所示。

数据显示, 不同起始点的计算结果没有明显的规律, 随着试验起始点趋近于 0 mg/L, 有的测量点计算出的标准增氧能力逐渐增大, 向上收敛; 有的逐渐减小, 向下收敛。但是, 总体来说与 0~16 mg/L 区间计算结果之间的误差变小。

表 4 不同试验起始点的标准增氧能力

Table 4 Standard oxygen transfer rate with different starting points $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$

气液比 (G/L)	测量点	计算区间/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
		6~16	3~16	1~16	0~16
1:100	A	202.1(1.0%)	203.7(1.8%)	203.7(1.8%)	200.1
	B	216.2(4.3%)	213.9(3.2%)	212.9(2.7%)	207.3
	C	218.7(4.2%)	214.9(2.4%)	213.8(1.9%)	209.8
1.5:100	A	251.7(2.7%)	245.7(0.2%)	243.7(0.6%)	245.2
	B	241.4(3.7%)	246.0(1.9%)	248.4(0.9%)	250.7
	C	229.7(5.3%)	230.9(4.8%)	234.4(3.4%)	242.6

注：括号内数字为该区间计算出的标准增氧能力与 0~16 mg/L 区间计算出的标准增氧能力之间的相对误差（绝对值）。

2.4 试验结束点的影响

试验结束点指记录下来作为曲线拟合原始数据的最后一个溶解氧数据。它决定了整个试验所需要的时间，因此合理降低试验结束点水平对于节省试验用时有很大作用。为了考量试验结束点对于标准增氧能力计算结果的影响，同样以 2.1 气液比影响试验的数据作为依据，分别选择 6、10、13 和 16 mg/L 作为试验结束点的几个数据段进行非线性曲线拟合，计算其标准增氧能力。结果如表 5 所示。

表 5 不同结束点计算出的标准增氧能力

Table 5 Standard oxygen transfer rate with different end points $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$

气液比 (G/L)	测量点	计算区间/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
		0~6	0~10	0~13	0~16
1:100	A	187.7(6.2%)	196.7(1.7%)	200.3(0.1%)	200.1
	B	177.3(14.4%)	194.5(6.2%)	200.7(3.2%)	207.3
	C	195.0(7.1%)	207.6(1.1%)	207.1(1.3%)	209.8
1.5:100	A	251.7(2.7%)	245.7(0.2%)	243.7(0.6%)	245.2
	B	241.4(3.7%)	246.0(1.9%)	248.4(0.9%)	250.7
	C	229.7(5.3%)	230.9(4.8%)	234.4(3.4%)	242.6

注：括号内数字为该区间计算出的标准增氧能力与 0~16 mg/L 区间计算出的标准增氧能力之间的相对误差。

从表 5 中可以看出除 G/L 1.5:100 中的 A 测量点有所区别外，随着计算区间的扩大（试验结束点趋近于 16 mg/L ），试验计算出的标准增氧能力也逐渐增大，向上收敛。当试验结束点达到 13 mg/L 时与 0~16 mg/L 区间计算出的标准增氧能力已经没有什么很大的区别，最大点误差在 3.4%。很明显，试验结束点越接近于理论溶解氧饱和度，计算出的标准增氧能力也越接近于真实值。

3 讨 论

3.1 试验方法的选择

溶氧装置增氧能力试验的常用方法一般是通过分别测量装置进、出水中的溶解氧浓度来完成（以下简称为差值法）。差值法操作简单，容易理解，能够比较方便地计算出装置的增氧能力。但缺点在于实际操作时的随意性和受环境因素影响很大，无法作出比较精确的判断。

其中，试验池池形的选择、水体量与装置处理量的匹配、探头的数量与位置都没有统一的规则可循，而且试验得出的结论无法进行温度、压力修正，缺乏可比性。

相对于差值法测量误差影响较大的两点测量（源水池和取样池），本文论述的试验方法基于间歇非稳态试验方法（试验系统内的水体不进不出，池内溶解氧浓度随时间而变），使用多探头、长时间连续测量，采用非线性方法进行最优化拟合，将测量误差的影响降到最低。虽然操作和计算过程相对复杂，但所有步骤都有据可循，计算结果可以在试验状态和标准状态（20℃，1 个大气压）间相互转换，便于横向对比和实现标准化。

根据 Timmons^[16]等人的研究结果表明：标准条件下（大气压力 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，水温 20℃，氧气体积分数 99%），low head oxygenator (LHO) 在气液比 (G/L) 1:100 的工作条件下的氧利用率约为 80%，1.5:100 时约为 66%。该结论与前文所述试验结果基本一致，进一步证明了本试验方法的可靠性和准确性。

3.2 回归方法的选择

对于回归方法的选择，目前主要有两种：线性回归和非线性回归。在增氧机和曝气器性能检测方法中，由于使用空气源增氧，饱和浓度可作为已知条件，因此完全可以使用线性拟合进行计算，计算过程较为简便。而溶氧装置，如前文所述以工业氧气作为氧源，其理论饱和浓度会随着气温、水温和混合腔内的氧分压等工作条件产生变化，无法进行预估，因此不能再使用线性方法进行拟合。非线性拟合通过不断的迭代使得拟合方程无限趋近于实际曲线。虽然计算过程相对复杂，但是计算精度比线性拟合更高，对未知数个数没有限制条件，更适合于本文所述的试验。而且随着计算机技术的发展，人为计算过程完全可以由计算机来替代，计算过程几乎可以忽略不计。因此，建议使用。

3.3 试验过程中水体混合均匀度的影响

间歇非稳态试验方法以整个试验池内水体溶解氧的增长情况作为考量对象，因此其基础前提就是试验池内的水体能充分混合，溶解氧均匀分布^[17]。

常用的叶轮式（水车式）增氧机等对于水体溶解氧具有很强的调控作用^[18]，使一定范围水体内的溶解氧能迅速扩散传递，达到基本均匀。正因为如此，增氧机性能试验方法中溶氧仪测量探头采取圆周布置，用 3 个探头的示值来表征整个水体内的溶解氧水平。溶氧装置一般应用在循环水养殖系统中，不同于增氧机，水流通过管道流入装置与氧气充分接触混合，完成气液混合后再流入养殖池。由于其一点进水一点出水的工作方式，对于水体的搅拌能力是相当差的，如何实现水体溶解氧的均匀分布是关键。

针对这一问题本方法中使用了多种手段来予以解决：首先，降低试验水深至 40 cm，试验池进水采用切线方向，使池内水体形成一定涡流，加速溶解氧混合而；其次，将试验用水泵放置在水池中央。由于涡流中央部分的水体与其他部分水体的交换较少，溶解氧的增长相对较慢，因此，将水泵放在中央可以有效的避免这个问题。

题; 再次, 在试验池四周放置导流板, 改善水体混合情况。前期的试验结果表明, 如没有导流板的辅助, 池内水体溶解氧的分布会沿着四周向中心方向呈梯度降低, 严重影响了试验结果的准确度。增加导流板, 引导水流向池中心方向扩散, 对改善水体混合均匀度起到了很好的效果。通过以上这些手段, 使得池内溶解氧浓度能够基本保持一致。

3.4 试验起始点和结束点的选择

试验起始点和结束点的选择对于控制试验时间长短、保证试验准确度都会起到重要影响。在空气源增氧试验方法中试验一般从水体消氧开始, 到溶解氧浓度达到 $7\sim 9\text{ mg/L}$, 也就是饱和体积分数的 $75\%\sim 100\%$ 即可结束。李伟杰^[19]等人通过对多种微孔曝气器的试验提出, 可以采用 $4/(K_L a)$ 来估算测试时间。但是, 由于本试验方法针对的溶氧装置使用工业氧气作为氧源, 在高浓度氧源条件下, 池内的理论饱和溶解氧浓度 C_{∞} 远远大于以空气曝气所能达到的标准饱和浓度, 而且不同装置根据其气液混合腔工作状态的不同所能达到的饱和值也不尽相同, 所以该规则并不适用。对于试验起始点, 根据前文所述试验结果表明, 如果试验时间足够长, 起始点在 $0\sim 6\text{ mg/L}$ 范围内对于试验结果并不会造成很大的影响, 最大误差为 4.8% 。但是, 当试验时间不足以让试验池水体内的溶解氧达到理论饱和度, 起始点造成的误差还是比较大的。因此, 仍建议使用消氧后的水进行试验。对于试验结束点, 如果从试验准确性角度来考虑, 如前文所述应以越接近于理论饱和溶解氧浓度越好。但是, 考虑到试验时间的关系, 建议采用理论饱和溶解氧体积分数的 70% 作为试验结束点。前提是必须在前期作一些基础试验来获得被检测装置的理论饱和溶解氧浓度。如以 DP18-Y 为例, 其理论饱和溶解氧质量浓度为 $18\sim 19\text{ mg/L}$, 因此, 试验结束点设定为 $12\sim 13\text{ mg/L}$ 即可。

4 结 论

本文提出了一种基于间歇非稳态试验的适用于检测溶氧装置增氧能力的试验方法。通过试验证明, 该方法能够真实的反映装置实际工作能力, 结果可以在试验状态和标准状态之间相互转换, 便于横向比较。试验用水应经过消氧处理, 起始点以越接近 0 mg/L 越好, 结束点应大于理论饱和溶解氧浓度的 70% 。试验的稳定性和结果的重现性都非常良好。

[参 考 文 献]

- [1] 李玉全, 张海艳, 李健, 等. 液态氧在对虾工厂化养殖中的增氧效果[J]. 水产科学, 2008, 27(8): 401—403.
Li Yuquan, Zhang Haiyan, Li Jian, et al. Utilization of liquid oxygen in intensive shrimp aquaculture[J]. Fisheries Science, 2008, 27(8): 401—403. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李玉全, 张海艳, 李振东, 等. 液态氧增氧技术养殖大菱鲶的效果分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 456—458.
Li Yuquan, Zhang Haiyan, Li Zhendong, et al. Studies on efficiency of pure oxygen in turbot (*Scophthalmus maximus*) farming[J]. Fisheries Science, 2008, 24(3): 456—458. (in

Chinese with English abstract)

- [3] 徐勇, 曲克明, 马绍赛. 过饱和溶氧对大菱鲶生长及消化酶的影响[J]. 渔业现代化, 2008, 35(4): 24—27.
Xu Yong, Qu Keming, Ma Shaosai. Effects of hyperoxic dissolved oxygen levels on growth and digestive enzyme of turbot, *Scophthalmus maximus*[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(4): 24—27, 23. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李光霞, 许哲, 张丽珍, 等. 压力式氧溶解装置在凡纳滨对虾养殖方面的应用[J]. 渔业现代化, 2007, 34(5): 11—12, 14.
- [5] 辛乃宏, 于学权, 吕志敏, 等. 石斑鱼和半滑舌鳎封闭循环水养殖系统的构建与运用[J]. 渔业现代化, 2009, (3): 21—25, 40.
Xin Naihong, Yu Xuequan, Lü Zhimin, et al. Setup and operation of recirculation aquaculture system for Malabar grouper and half-smooth tongue-sole[J]. Fishery Modernization, 2009, (3): 21—25, 40. (in Chinese with English abstract)
- [6] 韩世成, 曹广斌, 蒋树义, 等. 工厂化水产养殖中的水处理技术[J]. 水产学杂志, 2009, 22(3): 54—59.
Han Shichen, Cao Guanbin, Jing Shuyi, et al. Water treatment technology in recirculating aquaculture system[J]. Chinese Journal Fisheries, 2009, 22(3): 54—59. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈有光, 段登选, 陈秀丽, 等. 工厂化养鱼中氧气锥的增氧规律[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 26—30.
Chen Youguang, Duan Dengxuan, Chen Xiuli, et al. Study on the oxygen increasing law of oxygen cone in industrialized fish farming system[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(3): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜守恩, 曲克明, 桑大贺. 海水循环水养殖系统工程优化设计[J]. 渔业现代化, 2007, 34(3): 4—7.
- [9] 张宇雷, 倪琦, 徐皓, 等. 低压纯氧混合装置增氧性能的研究[J]. 渔业现代化, 2008, 35(3): 1—5.
Zhang Yulei, Ni Qi, Xu Hao, et al. Research on the performance of Low Head Oxygenator[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周箴, 吴菊珍. 环境监测实验[Z]. 四川: 成都电子科技大学校内出版, 2005.
- [11] CJ/T 3015.2—1993. 曝气器清水充氧性能测定[S].
- [12] 羊寿生. 曝气的理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [13] SC6001.2—2009. 渔业机械基本术语[S].
- [14] 丁志强, 曹瑞钰. 非线性回归法计算曝气设备清水氧传递系数[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(1): 63—71.
Ding Zhiqiang, Cao Ruiyu. Estimate the apparent oxygen transfer coefficient in clean water by nonlinear regression method[J]. Environmental Pollution and Control, 2004, 26(1): 63—71. (in Chinese with English abstract)
- [15] ASCE/EWRI 2-06. Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water[S].
- [16] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, et al. Recirculating Aquaculture Systems 2nd Ed[M]. Ithaca, NY: Northeastern Regional Aquaculture Center, 2002.
- [17] Abusam A, Keesman K J, Meinema K, et al. Oxygen transfer

- rate estimation in oxidation ditches from clean water measurements[J]. *Water Research*, 2001, 35(8): 2058—2064.
- [18] 顾兆俊, 刘兴国, 吴娟, 等. 养殖池塘水体溶解氧调控效果研究[J]. *水产科技情报*, 2009, (6): 297—299.
- [19] 李伟杰, 丁志强. 曝气设备清水充氧性能测试时间的控制[J]. *工业用水与废水*, 2005, 36(4): 39—41.
- Li Weijie, Ding Zhiqiang. Time control in testing of clean water oxygenation capacity of aerators[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2005, 36(4): 39—41. (in Chinese with English abstract)

Evaluation of the oxygen transfer rate of oxygenator based on intermittent non-steady state method

Zhang Yulei^{1,2}, Ni Qi¹, Liu Huang¹

(1. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;*

2. *Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China)*

Abstract: According to the shortcomings of general method such as nonstandard operation and big test errors, a testing method based on intermittent non-steady state method was put forward to evaluate the standard oxygen transfer rate of the oxygenator. The paper introduced the facilities needed for the test, the testing step and the calculation method in detail. Using this method, DP18-Y, a multi-stage trickling oxygenator was tested. With two different G/L ratios 1:100 and 1.5:100, after about 130 min and 220 min running period separately, dissolved oxygen concentration (DO) in the testing pool had reached 17 mg/L, standard deviations at three DO probe positions were less than ± 0.78 . To verify the repeatability of the method, the test was repeated three times with the two G/L ratios, and the standard oxygen transfer rate calculated as a result was (206.1 ± 5.7) kg/h and (248.5 ± 11.3) kg/h, respectively. Calculated by different ranges, it was found that the calculation result would be more precision with the start point closer to 0 mg/L and the end point over 70% of theoretical DO saturation concentration. The results show that the method has good stability and repeatability and is feasible to evaluate the oxygen transfer rate of any oxygenator.

Key words: oxygenator, testing, oxygen supply, oxygen mass transfer coefficient, oxygen transfer rate, intermittent non-steady state method