

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.007

气力人工上升流对水体温度的影响研究*

冷金英,黄豪彩*,陈家旺,樊 炜,葛 晗,林 杉,刘明洲,杨 景,陈 鹰
(浙江大学 海洋学院,浙江 杭州 310058)

摘要:为解决气力人工上升流技术对周围水体温度和营养盐等分布的影响问题,将计算流体仿真技术应用到温度场的仿真中,开展了计算分析,建立了上升流过程与温度变化之间的关系,提出了利用VOF多相流模型对温度场进行仿真,研究了气力人工上升流对水体温度的影响。在仿真结果的基础上,对气力人工上升流的效果进行了评价,并进行了千岛湖试验。实验结果表明,试验结果和仿真结果基本吻合,该模型能够很好地指导以后的海试,为气力人工上升流系统的设计奠定了基础。

关键词: 气力人工上升流; 温度; 千岛湖试验; 仿真

中图分类号: TH766 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0442-04

Influence of air-lift artificial upwelling on water temperature

LENG Jin-ying, HUANG Hao-cai, CHEN Jia-wang, FAN Wei, GE Han,
LIN Shan, LIU Ming-zhou, YANG Jing, CHEN Ying
(Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to solve the problems of the influence of air-lift artificial upwelling on the surrounding water temperature and nutrient etc., computational fluid simulation was applied to the simulation of temperature. After the analysis of calculation, the relationship between upwelling process and the temperature change was established. A method was presented to use the VOF multiphase flow model to simulate the temperature, researching on air-lift artificial upwelling effects on water temperature. The effect of the air-lift artificial upwelling was evaluated on the basis of the results of simulation, the qiandao lake test was done. The experimental results show that, the simulation is basically accordant with the results of experiment. At the same time, this model can be a good guidance for the next sea trial and also builds up the base of the design of air-lift artificial upwelling system.

Key words: pneumatic artificial upwelling; temperature; qiandao lake test; simulation

0 引 言

自然上升流是一个关键的海洋物理过程^[1-2],它可以把海水下层的营养盐带到中上层,使上升流地区的海洋初级生产力达到大洋的6倍,鱼类生产量达到大洋的75倍,使上升流地区成为世界上海洋生产力较高的区域^[3-5]。海洋上升流是支持渔业生产的重要因素,能够很好地改善海洋生态环境^[6],一方面可为浮游植物提供足够的营养供其进行光合作用,从而产生出更

多的有机物供鱼类生长繁殖,世界主要渔场多数分布在上升流充沛的海域,如东海渔场、秘鲁渔场等^[7-8];另一方面可以降低上层海水的温度,缓解温室效应,为浮游生物提供一个适宜生长的温度范围,对环境起到良性的作用^[9-10]。但是在自然界中,自然上升流海域占世界海洋面积的比例很小。

人工上升流技术利用某种特殊装置,将温度较低且含有丰富营养盐的深层海水提升至真光层,提高其作用海域的初级生产力。本研究的人工上升流采用注

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金重大国际(地区)合作研究资助项目(51120195001);国家自然科学基金资助项目(41206079);海洋水下高端装备技术科技创新团队资助项目(2010R50036)

作者简介: 冷金英(1987-),女,山东临沂人,主要从事深海机电装备方面的研究. E-mail: lengjinying0520@163.com

通信联系人: 黄豪彩,男,博士后,讲师. E-mail: hchuang@zju.edu.cn

气的方式,称为气力人工上升流^[1]。目前人工上升流是国内外海洋科学研究的热点与前沿,其研究重点为在工程上实现海域研究,但在如何监测和评价人工上升流的环境效应(如温度场的监测)等方面的研究较少。目前日本在人工上升流方面处于世界领先水平,利用水泵抽水的方式提升营养盐,称为“拓海”装备,其中的监测系统能够监测温度和盐度曲线随距离的变化。

为给以后的海试做准备,本研究首先在千岛湖地区进行试验研究,主要研究注气式人工上升流的可行性,其中包括涌升管的设计、温度的变化以及注气量和液体提升量之间的关系。在千岛湖湖试的基础上,本研究利用试验中的背景数值(如湖水温度和密度随深度的变化)建立VOF多相流模型对温度场进行仿真。在仿真过程中忽略管壁的摩擦和管壁的热传递,水体温度场的仿真结果和试验结果基本吻合。

1 试验研究

1.1 试验装置

为验证气力人工上升流提升海水的可行性和效果,人工上升流项目组于2011年10月25日在浙江省淳安县千岛湖地区进行了为期3天的试验研究。试验所在方位为北纬29°33'51",东经119°11'9",试验水域水深40 m,湖水静止。双体试验船上有试验所需的电源、起重机、甲板作业单元等,保证了试验的顺利进行和人员的人身安全。

试验装置如图1所示,主要包括:试验船(双体船)、数据采集系统、空压机、流体控制阀、压力控制阀、气体流量计、注气管、起重机、注气口、电磁流量计、温度、压力传感器、配重块和涌升管等。其中试验所用涌升管管径为0.4 m,管长28 m。

空压机产生的气体依次经过气体控制阀、压力控制阀、气体流量计、注气管,通过喷嘴注入涌升管内;

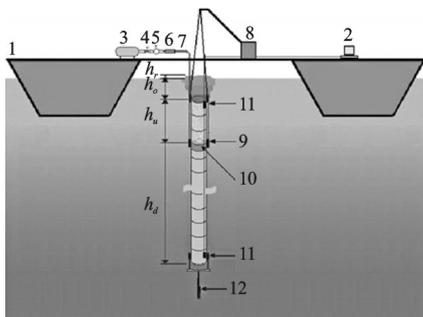


图1 试验装置图

1—试验双体船; 2—数据采集系统; 3—空压机; 4—流体控制阀; 5—压力控制阀; 6—气体流量计; 7—注气管; 8—起重机; 9—注气口; 10—电磁流量计; 11—温度和压力传感器

距管口8 m位置处安装电磁流量计;注气口位于电磁流量计上面0.5 m处;温度传感器共两个,分别位于涌升管管口的内部和管底的外部;数据采集器用于实时采集、显示和存储温度数据;计算机用于实时监测所测得的温度数据。

试验前,本研究对温度传感器和温盐深计(CTD)进行校准,然后进行设备组装,组装完成后进行数据采集,同时实时测量涌升管内温度随时间的变化,试验现场图如图2所示。

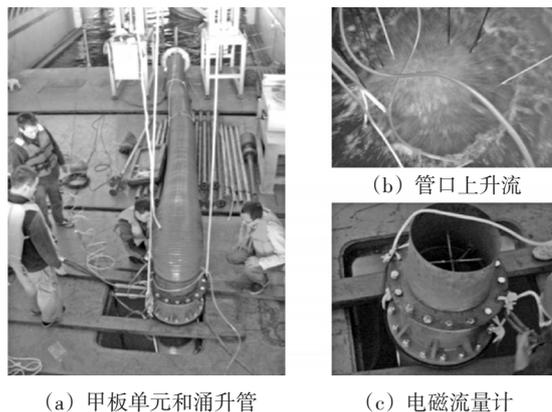


图2 试验现场图

1.2 温度监测系统

该实验采用温度传感器(如图3(b)所示)测量湖水的温度,温度传感器的探头由负温度系数热敏电阻组成,如图3(a)所示,其具有灵敏度高、体积小、质量轻、热惯性小、寿命长、温度特性波动小以及价格便宜等优点,可进行高灵敏度、高精度检测。对于负温度系数的热敏电阻来说,其阻值与温度之间的关系可表示为:

$$R_T = R_0 \cdot \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (2)$$

式中: R_T —温度 $T(\text{K})$ 时的电阻值; R_0 —热力学温度为 T_0 时的电阻值, $R_0 = 272.8 \text{ k}\Omega$; B —热敏电阻的材料常数; T_0 —基准温度,通常为 298.15 K ; T —测得的温度^[12]。

温度传感器测得的数据由传输电缆线传送到自主研发的数据采集器(如图3(c)所示)。数据采集器包含电源电路、处理传感器信号的调理电路、控制数据采集器循环操作和进行A/D转换的Flash存储器、通信接口。LabVIEW是一种多功能的图形化编程软件,计算机通过LabVIEW软件,可以在操作界面(如图3(d)所示)内实现数据的实时采集、显示和存储,从而实现系统的原位、实时监测^[13]。

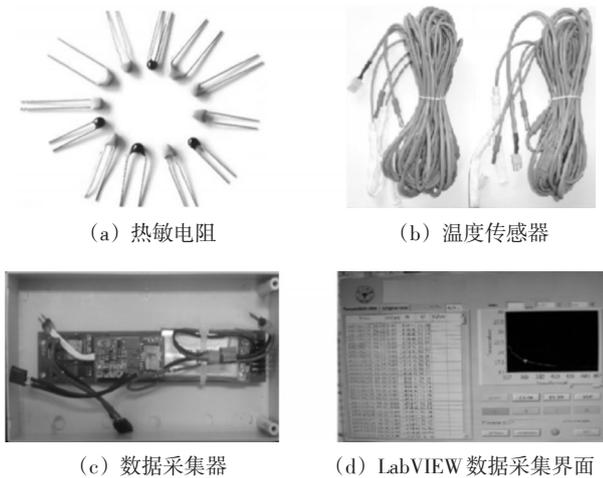


图3 温度监测系统的硬件部分和软件操作界面

1.3 试验结果

试验采用空压机进行注气,注气过程中速度的调节方式采用手动,气体速度随时间变化不规则,注气管的直径为10 mm,注气时的平均气流量在300 L/min~400 L/min,气体的输入速度和水体上下层的温度数据随时间的变化情况如图4所示,水体温度和密度随深度的变化如图5所示。

从图4可以看出,没有注气过程发生时,距湖水表层1 m处的上层温度和距湖水表层29 m处下层温度的变化都不大,温度分别维持在22 ℃和16.8 ℃左右;

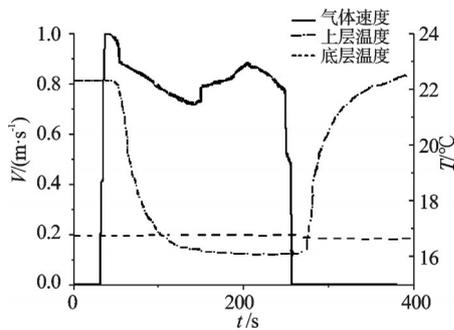


图4 气体输入速度和测得的温度数据随时间的变化

随着注气过程的开始,上层温度随着下降,在50 s的时间内,温度降低到16 ℃左右,并且低于涌升管底部温度,说明涌升管底部以下温度更低的湖水由于上升流效应被带至上层,涌升管底部温度保持不变;

随着注气过程的结束,在100 s时间内,上层温度又慢慢回升到22 ℃左右,说明由于湖水密度差的原因,密度高的低温湖水慢慢沉降,密度低的表层湖水仍在表层,底层温度不变。

从图5中可以看出,在0~17 m的范围内,湖水温度变化不大,为22 ℃左右,湖水密度为997.8 kg/m³左右;17 m~30 m的范围内湖水温度逐渐降低,降至14 ℃左右,湖水密度逐渐升高,最高可达最低999.4 kg/m³。

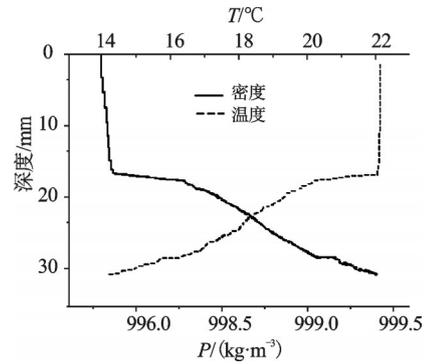


图5 湖水温度和密度随深度的变化(由CTD测得)

千岛湖位于钱塘江上游新安江主流上,是中国北亚热带地区的大型深水水体,水温具有明显的分层现象。17 m处为温跃层,湖水温度和密度急剧变化。在以后进行的试验中,研究人员可以控制稀释后的深层海水保持在这个深度不变,这样可以解决沉降问题,所以温跃层的存在可以很好地指导以后的试验。

2 温度场仿真

2.1 Fluent计算模型

在计算过程中,水做不可压缩处理。在上升流过程中,湖水的温度和速度都随时间变化,所以为非定常流动,湖水的雷诺数为:

$$Re = VD/\mu \tag{3}$$

式中: V —涌升管内水的运动速度,最小速度设为0.1 m/s; D —涌升管管径,0.4 m; μ —运动粘度,湖水的运动粘度可取为 $10.09 \cdot 10^{-6}$ 。

经计算得雷诺数为3 964,大于2 320,因此本研究采用湍流模型^[14-15]。

2.2 计算几何模型和边界条件设置

计算模型中湖水所在竖直截面区域宽度为20 m,深度为30 m;涌升管长度为28 m,直径0.4 m,涌升管口离水面的距离为1 m;本研究在离水面9 m处设置气体产生装置,气体发生装置长和宽分别为0.1 m,其中气体发生装置的上边界是气体的速度入口,其余边界为wall;网格个数:125 608。在计算模拟过程中,会用到千岛湖湖试测得的温度和密度随深度变化的背景数值如图5所示。气体入口处的温度约为22 ℃,涌升管底部水的速度入口,湖水速度入口处的温度约为16 ℃,湖水水面为出口,出口类型为压力出口。涌升管管壁,气体发生装置的外壁和整个流体区域的外壁的边界类型设为wall。由于涉及气液两相流,且气泡在水中的运动过程是一个动态的过程,在计算时笔者选取非稳态的计算方法,在求解过程中采用VOF模型和PISO压力-速度耦合格式,并保持所有变量的亚松

弛因子设置为默认^[16-19]。

2.3 温度场数值仿真结果

本研究运用Fluent对长为28 m,直径为0.4 m的涌升管内流体温度场进行仿真,气体输入速度如图4所示。仿真过程中,在离管口处设置温度监测点,监测点位置的温度仿真结果如图6所示。

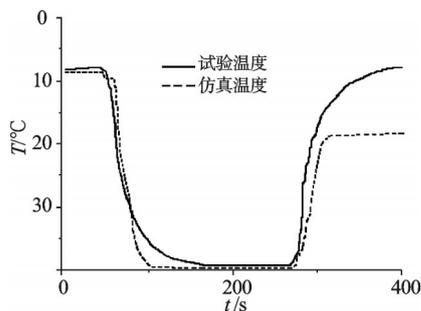


图6 仿真过程中气体速度和温度随时间的变化

从图6中可以看出,试验温度和仿真温度的趋势基本上吻合,温度开始下降的时间和下降的斜率吻合的很好,在温度回升阶段,仿真温度回升后的最大温度为20℃左右,试验温度为22℃左右。由于温度仿真模型中没有考虑大气辐射等因素,而且湖水内部实际是有流动的,试验区域是一个很大的开放区域等,温度场仿真的结果会和实际测量的温度数据有偏差,在以后的仿真中需继续对模型进行修正,使仿真结果更加接近实验数据。

3 结束语

研究表明,气力人工上升流可明显提升湖水,上升流过程中上层湖水的最低温度要低于涌升管底部的底层温度,说明上升流可将涌升管底端以下的湖水提升至上层,实现底部低温湖水和上部高温湖水的冷、热交换,同时也可将水底丰富的营养盐带到表层,供浮游生物食用,从而提高湖水的初级生产力。温度场仿真计算模型考虑千岛湖真实的密度和温度梯度,与实验基本吻合,能够很好地预测上升流对湖水温度的影响。考虑海水中洋流等因素,从而可以用该模型预测气力人工上升流对海水温度场的影响。研究人员可以在以后的计算中改变涌升管管径和长度等,从而指导涌升管的设计和注气量的控制等,以期找到最佳的涌升管设计方案和最佳的注气量,更好地指导注气式人工上升流系统的设计。

参考文献(References):

- [1] 唐启升,苏纪兰. 海洋生态系统动力学研究与海洋生物资源可持续利用[J]. 地球科学进展,2001,16(1):5-11.
- [2] 苏纪兰,唐启升. 我国海洋生态系统基础研究-发展国际趋势和国内需求[J]. 地球科学进展,2005,20(2):139-142.
- [3] 吕炳全,孙志国. 海洋环境与地质[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [4] OUCHI K, OTSUKA K, OMURA H. Recent Advances of Ocean Nutrient Enhancer "TAKUMI" Project [C]//Proc. 6th ISOPE Ocean Mining Symp., 2005:7-12.
- [5] AURE J, STRAND O, ERGA S R, et al. Primary production enhancement by artificial upwelling in a western Norwegian fjord [J]. *Marine Ecology-progress Series.*, 2007 (352): 39-52.
- [6] VAN G A, TAKESUE R K, GODDARD J, et al. Carbon and nutrient dynamics during coastal upwelling off cape blanco, oregon [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000,47(5):975-1002.
- [7] 彭海鲲. 注气提升式人工上升流之实验与理论[D]. 台北:台湾大学海洋研究所,1999.
- [8] LIANG N K, PENG H K. A study of air-lift artificial upwelling[J]. *Ocean Engineering*, 2005,32(5): 731-745.
- [9] 黄邦钦,洪华生,林学举. 台湾海峡微型浮游植物的生态研究[J]. 海洋学报,2003,25(4):70-79.
- [10] IKEDA T, HAYASHI M, OTSUKA K. Assessment of environmental effect and fertilization at deep seawater discharged area[C]//Proc 12th ISOPE., 2002 (12):480-485.
- [11] MCCLIMANS T A, HANDÅ A, FREDHEIM A, et al. Controlled artificial upwelling in a fjord to stimulate non-toxic algae [J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 42(3): 140-147.
- [12] 俞阿龙. 基于RBF神经网络的热敏电阻温度传感器非线性补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(5):899-902.
- [13] WEI Z, YING C, CAN J Y, et al. Design of low-power data logger of deep sea for long-term field observation [J]. *China Ocean Engineering*, 2009,23(1):133-144.
- [14] 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT流体分析及仿真实用教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [15] FAN W, CHEN J, PAN Y, et al. Experimental study on the performance of an air-lift pump for artificial upwelling [J]. *China Ocean Engineering*, 2013(59):47-57.
- [16] 韩占忠. FLUENT-流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- [17] LU L, PAN H, FAN W, et al. A preliminary study on efficiency of air-lift upwelling [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(422):424-429.
- [18] 白燕,毛洁,樊炜,等. 深海热液速度场测量重建算法比较[J]. 机电工程,2011,28(5):526-531.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

冷金英,黄豪彩,陈家旺,等. 气力人工上升流对水体温度的影响研究[J]. 机电工程,2014,31(4):442-445.

LENG Jin-ying, HUANG Hao-cai, CHEN Jia-wang, et al. Influence of air-lift artificial upwelling on water temperature [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(4): 442-445.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>