基于水下滑翔机平台的湍流观测方法研究

谷有铭1,2,3

(1. 天津大学 机构理论与装备设计教育部重点实验室,天津 300350; 2. 天津大学 机械工程学院,天津 300350;3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋观测与探测联合实验室,山东 青岛 266237)

摘 要:海洋微结构湍流作为常见的海洋运动,对海洋中溶解质扩散、能量转移有显著作用,对海水运动及其温盐 特性等有重要影响。作为低能耗、无动力的海洋观测平台,水下滑翔机具有噪声低、航时长,易回收等优点,使得长 期不间断低成本观测湍流成为了可能。在本文中,从湍流观测原理的维度出发,研究分析滑翔机运动特性对湍流 数据的影响;通过解析滑翔机在垂直面内运动方程,获得适合湍流观测的滑翔机运动参数;利用傅里叶变换从时域 与频域分析了滑翔机的振动特性;最后通过海试,验证了基于水下滑翔机的湍流观测平台长时间不间断观测海洋 湍流的能力。

关键词:水下滑翔机;海洋微结构湍流;振动特性;信号处理;海试

中图分类号:TP242 文献标识码:A 文章编号:1002-3682(2019)04-0261-11

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2019.04.002

引用格式: GU Y M. Study on the turbulence measurement based on underwater glider platform[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(4): 261-271. 谷有铭. 基于水下滑翔机平台的湍流观测方法研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(4): 261-271.

海洋湍流是指海水中任一点运动速度大小与方向都随机的流动,是海水运动的微观表现,能够促进溶解 质扩散与能量转移。随着湍流的运动,其尺寸逐渐减小、强度逐渐减弱,影响溶解质的分布、海水运动以及温 盐特性。海洋湍流与海洋气候、海洋环流,甚至海洋微塑料等研究关系密切,因此研究海洋湍流对认识海洋 有重要意义[1-2]。

传统的湍流观测是利用垂直剖面仪进行的,易受外界振动干扰,观测效果不佳。近些年来海洋观测技术 不断发展,逐渐从过去的人员实地测量转向自动化和智能化。随着水下滑翔机技术的成熟,已经有多种海洋 传感器成功搭载至水下滑翔机,可实现海洋数据自动化采集。2012-05,Peterson 将搭载湍流仪搭载至 Slocum 水下滑翔机上并与垂直剖面仪进行对比测试实验,实验结果表明滑翔机的测量精度与垂直剖面仪相 当^[3];2015-06,Kongsberg 海事公司将 MicroPod 搭载至 Seaglider 水下滑翔机并进行湖试,观测的湍动能耗 散率最低达 1.3×10⁻⁸ W/kg^[4];2015年,天津大学研制的搭载湍流测量系统的滑翔机,完成海上试验,可测 量的湍动能耗散率达 10⁻¹⁰ W/kg 数量级^[5];同年,中国海洋大学研制出了基于水下滑翔机的湍流观测仪并 完成湖试,虽然平台振动引起的噪声对湍流观测有一定的影响,但观测到的剪切波数谱与理论谱吻合良好, 初步证明了滑翔机作为湍流观测平台的可行性^[6]。

收稿日期:2019-07-31

作者简介:谷有铭(1992-),男,硕士研究生,主要从事水下滑翔机相关技术方面研究. E-mail: guyouming@tju.edu.cn

(王佳实 编辑)

资助项目:国家重点研发计划项目──长航程水下滑翔机研制与海试应用(2016YFC0301100)和海洋滑翔机改造与协作观测技术 (2017YFC0305902);国家自然科学基金项目──水下滑翔机设计理论与方法(51722508)和可变翼水下滑翔机动力学与控制方 法研究(51475319);山东省重点研发计划──深海水下滑翔机产业化技术与应用示范(2016CYJS02A02);青岛海洋科学与技 术国家实验室问海计划项目──大深度滑翔机研制与海试应用(ZR2016WH03);青岛海洋科学与技术国家实验室主任基 金──柔性可变翼水下滑翔机设计与应用(QNLM201705);青岛海洋科学与技术国家实验室"鳌山人才"培养计划 (2017ASTCP-OS05,2017ASTCP-OE01)

传统的海洋湍流观测设备均需借助母船进行定点布放,耗费船时长、费用高,观测范围受限,获得数据少。水下滑翔机采用浮力方式驱动,能耗低、航行范围广,运行平稳且相对其他海洋观测平台噪声低,因此水下滑翔机是目前湍流观测的理想平台,利用水下滑翔机开展海洋湍流观测是未来的发展趋势。本 文以基于水下滑翔机的湍流观测平台为核心,进行海试研究,以期获得南海附近海域的湍动能耗散率分 布情况。

1 湍流观测型滑翔机约束分析

湍流观测仪(MicroRider)简称湍流仪,是一款自容式湍流测量仪,自身不含电源,需要滑翔机为其提供 电源并控制采样开关,如图1所示。结合文献[5]中的关于湍流仪与滑翔机相对位置的研究,湍流仪与滑翔 机集成如图2所示。随着我国海洋设备的发展,天津大学研制出"海燕"水下滑翔机,其可作为海洋观测平 台。湍流仪集成在"海燕"水下滑翔机(简称滑翔机)上,会与滑翔机同步进行剖面运动,由于湍流仪轴线与滑 翔机轴线平行安装,故二者运行速度和攻角相同。



图 1 MicroRider 湍流观测仪 Fig.1 Turbulence observation instrument MicroRider (MR)



图 2 集成湍流仪的"海燕"水下滑翔机 Fig.2 'Petrel' underwater glider integrated with MR

1.1 滑翔机速度约束分析

在湍流中,海水速度在空间中波动,并随时间不断演化。柯尔莫哥洛夫微尺度是湍流的最小尺度,其空间尺度 $l_s = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$,约 0.1~10 mm,式中 ν 代表海水黏性系数;时间尺度为 $\tau_s = (\nu/\epsilon)^{1/2}$,约为 0.01 s^[7]。利用滑翔机进行湍流观测,类似于走航,即在滑翔过程中开展湍流观测,根据泰勒冻结假定的要求,当滑翔机运动速度足够快时,流场处于相对冻结状态^[8]。湍流耗散的时间周期为(ν/ϵ)^{1/2},绝大多数湍流的尺度大小为 1.5 l_s ~70 l_s 。为了观测到整个湍流变化的情况,湍流仪需在一个时间周期内完成尺度为 70 l_s 的湍流的穿越^[9],即湍流仪速度 U:

$$U \gg \frac{70(\nu^3/\epsilon)^{1/4}}{(\nu/\epsilon)^{1/2}} = 70(\nu\epsilon)^{1/4} \,. \tag{1}$$

在开放海域中,式(1)等号右侧速度一般小于 0.07 m/s。当湍流仪速度太小时,垂直于湍流仪方向速度 波动对会影响观测效果,因此,为了更好地观测湍流,可以适当增大湍流仪速度。同时由参考文献[11]中基 于水下滑翔机观测湍流的研究,得知当水下滑翔机速度为 0.1 m/s 时湍流观测效果最好。

1.2 滑翔机攻角约束分析

剪切传感器又称"翼型"传感器,当其在海水中运动时,受到海水的阻力作用。剪切传感器头部的探针将 垂直于轴线方向的分力通过压电效应转换为电信号,之后通过一系列放大电路转换为可测量的电压信号。 当攻角 α 很小时,电压信号与垂直于剪切传感器轴线上的分力呈线性关系,其输出电压(U)为

$$U = 2\sqrt{2} S v^2 \sin(2\alpha) C^{-1}, \qquad (2)$$

式中:v 为作用在传感器上海水速度,S 为传感器灵敏度,C 为传感器电容。

由剪切流传感器的工作原理可知,攻角的大小变化会直接影响湍流仪观测效果。Osborn 对剪切流传感器的风动实验表明,在水流速为 0.7~0.8 m/s,雷诺数 Re = 64 的条件下,只有 $\alpha < 20^{\circ}$ 时,流过剪切流传感器的海水为层流,传感器才可正常工作^[8-10]。Wolk 的研究结果表明,水下滑翔机平均攻角大小在±4°范围内时,观测湍流效果最好^[11]。

2 湍流观测型滑翔机运动性能分析

2.1 垂直面内动力学模型

对滑翔机速度和攻角约束分析可知,湍流仪的速度和攻角会影响湍流的观测效果,当攻角大小在±4°范 围内、垂直速度等于 0.1 m/s 时湍流仪观测效果最好。本节以湍流观测型水下滑翔机为研究对象,分析其运 动性能,在垂直面内 *x* 轴、*y* 轴、*z* 轴的正方向,以及滑翔机主要受浮力(*B*),重力(*G*),升力(*L*)及阻力(*D*) (图 3)。通过分析动力学方程,求解适合湍流观测的滑翔机参数。



图 3 滑翔机在垂直面内动力分析图 Fig.3 Dynamic analysis of the glider within a vertical plane

在滑翔机稳定滑翔过程中,其滑翔角(ξ)、攻角(α)以及俯仰角(θ)三者之间满足如下关系:

$$=\theta + \alpha \,\, (3)$$

根据滑翔机受力平衡[12],可得

$$D\cos\xi - L\sin\xi = 0 \tag{4}$$

$$\left(B + L\cos\,\xi + D\sin\,\xi - G = 0\right)^{\circ} \tag{4}$$

阻力(D),升力(L)根据如下公式计算:

$$\begin{cases} D = (K_{D_0} + K_D \alpha^2) V^2 \\ L = (K_{L_0} + K_L \alpha) V^2 \end{cases},$$
(5)

其中,K_{D0},K_D为滑翔机的诱导阻力系数;K_{L0},K_L为滑翔机的诱导升力系数;V代表滑翔速度。

综合式(3)~式(5),将净浮力 $\Delta B = B - G$ 代入公式,可得

$$\begin{cases} (K_{L_0} + K_L \alpha) V^2 \sin \xi - (K_{D_0} + K_D \alpha^2) V^2 \cos \xi = 0\\ (K_{L_0} + K_L \alpha) V^2 \cos \xi + (K_{D_0} + K_D \alpha^2) V^2 \sin \xi + \Delta B = 0 \end{cases}$$
(6)

由式(6)计算可求得攻角α及滑翔速度(V):

$$\begin{cases} \alpha = \frac{K_{L}\sin(\theta + \alpha) \pm \sqrt{\left[K_{L}\sin(\theta + \alpha)\right]^{2} - 4K_{D}\cos(\theta + \alpha)\left[K_{D0}\cos(\theta + \alpha) - K_{L0}\sin(\theta + \alpha)\right]}}{2K_{D}\cos(\theta + \alpha)} \\ V = \sqrt{\frac{-\Delta B}{\cos(\theta + \alpha)(K_{L0} + K_{L}\alpha) + \sin(\theta + \alpha)(K_{D0} + K_{D}\alpha^{2})}} \end{cases}$$
(7)

垂直速度 V, 为滑翔速度 V 在垂直方向上的分量,即

$$V_{y} = V\sin(\theta + \alpha) , \qquad (8)$$

联合式(7),(8),可得到垂直速度的表达式:

$$V_{y} = \sqrt{\frac{-\Delta B}{\cos(\theta + \alpha)(K_{L_{0}} + K_{L}\alpha) + \sin(\theta + \alpha)(K_{D_{0}} + K_{D}\alpha^{2})}} \cdot \sin(\theta + \alpha) \quad (9)$$

2.2 滑翔机运动性能分析

根据式(7)可知,在滑翔机平稳滑翔时,攻角(α)大小由俯仰角(θ)决定。由图4可知,滑翔机下潜过程中,随着俯仰角绝对值增大,攻角逐渐减小。为了保证滑翔机处于攻角α < 4°状态,其俯仰角大小需满足 θ >16°。



Fig.4 The relationship between pitch angle and attack angle

根据式(9)可知,滑翔机垂直速度由净浮力、俯仰角以及攻角共同决定。在垂直速度 $V_y = 0.1 \text{ m/s}$ 下,俯仰角与净浮力之间的关系, 如图 5 所示。在湍流仪最优垂直速度 $V_y =$ 0.1 m/s 的条件下,由图 4 和图 5 可以得到相应 的滑翔机运动参数,如表 1 所示。



图 5 垂直速度 $V_y = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,俯仰角与净浮力之间的关系 Fig.5 The relationship between pitch angle and net buoyancy under the vertical velocity $V_y = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

表1 在 V, =0.1 m · s⁻¹条件下,适合湍流观测的滑翔机参数

 Table 1
 Glider parameters suitable for turbulence

observation under the condition of $V_y = 0.1$ m/s			
$\Delta B/N$	$\theta/^{\circ}$	α/°	
- 4	28	2.23	
- 5	25	2.53	
<u> </u>	22	2.91	
-7	20	3.21	

3 振动噪声来源分析

滑翔机内部的振动会传递到湍流观测仪 中,严重地影响湍流数据的准确性。图 6 为湍流观测滑翔机振动测试系统工作原理,滑翔机将振动信号传递 给湍流仪,加速度传感器检测 *x*,*y* 两个方向振动信号,并对其进行预处理并存储,最后下载振动信号数据, 将各振源信号分离,进行振动信号频谱分析^[13]。 为了分析不同状态下滑翔机振动情况,本节将滑 翔机在水池内静止状态作为振动频率分析的基准,截 取海试中不同状态下时长 100 s 的湍流数据进行对比 分析。利用傅里叶变换获得不同状态下时域和频域下 的频率特性曲线,将其与基准状态对比,各工作状态设 定如下:1)水池中静止状态:水池中始终保持机身静 止;2)平稳滑翔状态:滑翔机平稳滑翔,且自身无其他 任何动作;3)滑翔中仅调整俯仰状态:滑翔过程中,仅 俯仰电机开启;4)滑翔中仅调整滚转状态:滑翔过程 中,仅横滚电机开启;5)海试中仅排油工作状态:海试 中,仅排油处于工作状态。



3.1 振动特性时域分析

对不同状态下湍流数据进行傅里叶时域分析,得到加速信号(A)随时间变化曲线,如图 7 所示。经分析 可得知,平稳滑翔状态下,受外界环境噪声及滑翔机自身电气噪声的影响,A_x,A_y方向的加速度较水池静止 状态下略高。滑翔中仅调整俯仰状态下,在第 70 s时,俯仰电机开启引起强烈的振动,加速度信号出现尖 峰。滑翔中仅调整滚转状态下,在第 75 s时,滚转电机开启引起剧烈振动,加速度信号出现尖峰。排油泵开 启状态下,在 20~40 s,初级增压泵开启,加速度信号出现连续峰值,40 s 后高级增压泵开启,2 个振动信号 叠加,A_x,A_y方向加速度信一直处于峰值。

加速度计作为常见的传感器,会通过压电效应将图 7 中观测到的振动信号 A_x,A_y 转换为以 m/s² 为单位的物理量,如表 2 所示。

Table 2 Acceleration values of the gluer at uniferent working states			
滑翔机工作状态	加速度/ (m・s ⁻²)		
	Ax	Ay	
水池静止状态	0.108	0.126	
稳定滑翔状态	0.756	0.373	
俯仰电机开启状态	33.688	22.122	
横滚电机开启状态	2.796	3.650	
排油泵开启状态	8.810	7.338	

表 2 滑翔机不同工作状态下加速度值

Table 2 Acceleration values of the glider at different working states

为了直观的对比不同状态下加速度大小情况,将表 2 数据用柱状图表示出来,如图 8 所示。根据图 8 与 表 2 的结果,将水池静止状态作为对比基准,对不同状态下的加速度信号进行分析,可得结论:1)当滑翔机稳 定滑翔时,加速度信号强度极小,说明滑翔过程运行平稳,几乎不产生振动噪声,不会对湍流信号产生干扰; 2) 当俯仰电机开启时,加速度信号强度最大,剧烈振动会污染湍流观测数据。由滑翔机工作原理可知,其仅 在"锯齿形"剖面运动拐点开启俯仰电机,平稳滑翔阶段无动作,因此分析湍流数据时应剃除拐点处的数据; 3) 当横滚电机或排油泵开启时,加速度信号强度较大进而造成湍流信号失真,因此为了减小湍流信号失真, 应降低滑翔机横向调整频率。分析湍流数据时应剔除排油泵开启状态下的数据。



图 7 不同状态下加速度时域分析 Fig.7 Time domain analysis of acceleration under different states



图 8 水下滑翔机不同工作状态下的加速度大小

Fig.8 Acceleration values of the underwater glider at different working states

3.2 振动特性频域分析

在时域范围内我们可以看到振动随着时间变化的信息,但无法获知振动的频率组成情况。傅里叶分析 法可将信号进行频域分析,通过傅里叶快速变换可获得不同状态下的振动频谱。其中 A_x 表示在 x 轴方向 上的加速度, A_y 表示在 y 轴方向上的加速度。对图 9~11 中振动频谱对比分析,可以得出各状态下振动频 率分布情况,如表 3 所示。



图 9 俯仰电机开启状态下振动信号频谱分布 Fig.9 The spectrum distribution of vibration signal under the running state of pitching motor



图 10 横滚电机开启状态下振动信号频谱分布 Fig.10 The spectrum distribution of vibration signal under the running state of rolling motor



图 11 排油泵开启状态下振动信号频谱分布

Fig.11 The spectrum distribution of vibration signal under the running state of oil pump

表 3 3 种状态下振动频谱分析

```
Table 3 Vibration spectrum analysis at 3 different working states
```

状 态	振动频率分布/Hz	振动频率分析
俯仰电机开启	5.5,18	俯仰电机转速为 20 rad • s ⁻¹ ,转速与观测到振动频率 18 Hz 较为一致
横滚电机开启	7.8,11,13,42	横滚电机转速为 8.5 rad · s ⁻¹ ,转速与观测到振动频率 7.8 Hz 较为一致
排油泵开启	42,71,98	初级排油泵转速为 $65 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,高级排油泵转速为 $36.7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 转速分别与振动频率 $42,71 \text{ Hz}$ 较为一致

为了验证"海燕"水下滑翔机作为湍流观测平台的能力,项目组于 2016-08-22 在南海附近布放湍流观测

型水下滑翔机。海试位置及海试现场如图 12 所示。

 (a) 海球位置
 (a) 海球位置

 图 12 "海燕"滑翔机的海试位置和海试现场

Fig.12 The sea test location and site of the 'Petrel' glider

本次海试中湍流观测型滑翔机共完成8个完整的剖面,其海水深度和姿态等信息随时间变化如图13所示,整个海试过程中俯仰角保持在±20°附近;在下潜及上浮过程中,滑翔机运行姿态以及速度保持平稳,可 作为理想的湍流观测平台。



Fig.13 Information about seawater depth and glider attitude during the sea tests

本文中选择第1个剖面数据进行湍动能计算,其俯仰角为±20°,净浮力为±7N,下潜过程中垂直速度、俯仰角以及滚转角如图14所示。湍流仪共配置两只剪切流探头和两只快速温度探头,将获得的数据处理分析,如图15所示。为了消除水下滑翔机自身振动以及海浪等低频噪声的影响,将剪切探头 sh1,sh2全带宽(Band Pass,BP)数据高通滤波(High Pass,HP,截止频率为0.4 Hz)处理,得到图中深蓝色、橘红色两条曲线。

结合图 14、图 15 分析可知,滑翔机姿态调整过程及排油过程对湍流观测数据影响较大。湍流信号的频 段一般小于 30Hz,因此再对高通滤波后的数据进行低通滤波(Low Pass,LP,截止频率为 30 Hz)处理,与全 带宽剪切流数据对比,前者较好的消除了滑翔机姿态调整以及排油引起的振动造成的影响。如图 15 中 $\partial T_1/\partial z$, $\partial T_2/\partial z$ 曲线代表了温度梯度,温度梯度是由海水波动引起的,故其可以证实海水中存在湍流。





注:所有的垂直梯度数据平均值接近于 0,为了更好的进行对比分 析,在绘制图形的时候将 sh2 高通滤波、sh1 带通滤波、sh2 带通滤 波、 $\partial T_1/\partial z$ 低通滤波、 $\partial T_2/\partial z$ 低通滤波、T2 六组数据在各自单 位基础上附加 5,10,15,20,25,5 的偏置

图 15 不同深度下湍流数据分析



根据该剖面获得的湍流数据计算湍动能耗散率,得到下潜过程和上浮过程湍动能耗散率随深度的变化 情况,如图 16 所示。图中 ϵ_1 和 ϵ_2 分别代表剪切探头 sh1,sh2 观测的湍动能耗散率,可获得如下结论:

1) 在不同海水深度下, ε1 和 ε2 大小处于同一量级, 证明湍流真实存在;

2) 在排油泵工作状态下,由于受到振动影响,湍流观测数据异常波动,数值大小从 10^{-9} W/kg 陡增 10^{-5} W/kg;

3) "海燕"水下滑翔机集成湍流观测仪后,湍流观测效果良好,可观测的湍动能耗散率最低达 10⁻¹⁰ W/kg 数量级。



图 16 剖面 1 湍动能耗散率随深度变化的曲线

Fig.16 Change of the dissipation rate of turbulence kinetic energy with water depth along Profile 1

5 结 论

本文利用基于滑翔机的湍流观测平台在南海海域进行湍流观测实验,通过对实验获得的数据的分析,研 究了该平台相关技术问题。

1) 基于湍流仪的观测原理,分析了水下滑翔机速度以及姿态对观测结果的影响,得到如下结论:a. 攻角 小于 10°,等于 4°时最优;b. 垂直速度等于 0.1 m/s 最优。通过建立垂直面内运动学方程,分析滑翔机的运 动性能,得到了适合观测湍流的不同的运动参数。

2)基于傅里叶分析方法分别对水中静止、稳定滑翔、海中俯仰、海中滚转、海中排油五种工作状态进行 时域和频域分析,结果表明在稳定滑翔状态观测效果良好,验证了"海燕"滑翔机观测湍流的能力。

3) 在海试实验中,连续平稳运行,观测到最小湍动能耗散率值为 10⁻¹⁰ W/kg 数量级。

参考文献(References):

- [1] FAN Z S. Research fundamental of ocean interior mixing[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002: 2-3. 范植松. 海洋内部混合研究基础 [M]. 北京:海洋出版社, 2002: 2-3.
- [2] WUJP, FUXQ, LONGBS. Preliminary study of exchange of turbulent momentum and heat in stable stratified atmospheric boundary layer near the sea surface[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1985(2): 35-45. 武建平, 傅新权, 龙宝森. 近海面稳定大气边界层湍流动量、热量交换的初步研究[J]. 黄渤海海洋, 1985(2): 35-45.
- [3] PETERSON A K. Microstructure measurements using a glider in the Faroe Bank Channel Overflow[D]. Norway: University of Bergen, 2013.
- [4] CREED E, ROSS W, LUECK R, et al. Integration of a RSI microstructure sensing package into a Seaglider[C] // Institute of Electrical and Electronics Engineers. OCEANS 2015-MTS/IEEE. Washington, DC: IEEE, 2015: 1-6.
- [5] MA W, WANG Y H, XU T Y. Design and trials of the underwater glider for micro-structure turbulence measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 22-29. 马伟, 王延辉, 徐田雨. 微结构湍流测量水下滑翔机设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 22-29.
- [6] SONG D L, ZHANG C L, NIE Y L, et al. Research on the turbulence observation platform based on underwater glider[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(5): 1-5. 宋大雷,张成伦, 也云利,等. 基于水下滑翔机的湍流观测平台研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34 (5): 1-5.
- [7] LANDAHL M T, MOLLO-CHRISTENSEN E, KORMAN M S. Turbulence and random processes in fluid mechanics[M]. Cambridge:

- [8] CALZAVARINI E, HUANG Y X, SCHMITT F G, et al. Propelled micro-probes in turbulence[J]. Physical Review Fluids, 2018, 3(5): 105-128.
- [9] LUECK R G, WOLK F, YAMAZAKI H. Oceanic velocity microstructure measurements in the 20th century[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58(1): 153-174.
- [10] OSBORN T R, CRAWFORD W R. Turbulent velocity measurement with an airfoil probe[R]. British: The University of British Columbia, 1977.
- [11] WOLK F, LUECK R G, LAURENT L S. Turbulence measurements from a glider[C] // OCEANS 2009. MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, 2009: 281-289.
- [12] WANG S X, SUN X J, WU J G, et al. Motion characteristic analysis of a hybrid-driven underwater glider[C]//IEEE. OCEANS 10. Sydney: IEEE, 2010: 1-9.
- [13] GOODMAN L, LEVINE E R, LUECK R G. On measuring the terms of the turbulent kinetic energy budget from an AUV[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2006, 23(7): 977-990.
- [14] WANG Y F. Research on analysis method of shear turbulence data in time, frequency and wavenumber domain[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. 王永芳. 时,频,波数域下剪切湍流数据分析方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.

Study on the Turbulence Measurement Method Based on Underwater Glider Platform

GU You-ming1,2,3

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tian University, Tianjin 300350, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

Tanjin 600000, Cinia, 2. Center of International Engineering, Tanjin Onteering, Tanjin 600000, Cinia,

3. The Joint Laboratory of Ocean Observian and Exploration, Pilot National Laboratory for Marine Science and

Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: As a common form of seawater motion, marine micro-structural turbulence plays a significant role in dissolved matter diffusion and energy transfer in the sea, and has an important influence on the characteristics of movement, temperature and salt of seawater. As a marine observation platform with low energy consumption and no power, underwater glider has the advantages of low noise, long navigation time and easy recovery, so that the long-term uninterrupted and low-cost observation of the sea turbulence becomes possible. In the present paper, effects of the glider motion characters on the turbulence data are analyzed from the dimensions of turbulence observation principle. By solving the glider motion equation within a vertical plane, the glider motion parameters satisfying the requirements of sea turbulence observation are obtained. By Fourier transform, the vibration characteristics of the underwater glider are analyzed from both time domain and frequency domain. The ability of the long-term uninterrupted sea turbulence observation by using the underwater glider as the platform has been verified through sea tests.

Key words: underwater glider; marine micro-structural turbulence; vibration characteristics; signal processing; sea test

Received: July 31, 2019