

滨海核电站取水口精细流场测量的设计与实例

史文奇,袁帅,刘永青,曹雪峰,邢传玺

(国家海洋环境监测中心 大连 116023)

摘要:冷源取水安全是核电运行安全的重要部分,会受到多种海洋堵塞物的威胁。为科学支撑滨海核电站取水口堵塞物防治工作,亟须掌握取水口的精细流场。走航和定点相结合的测量方式可同时获取流场的时空变化特征,适用于滨海核电站取水口精细流场的测量;走航测量宜采用具有底跟踪功能的 ADCP,该设备具有测量精度高和数据处理简便的优点,然而在使用中应注重规范性以减少测量误差;以潮流为主的海域在涨急和落急时段的流场较稳定,在这段时间内进行走航数据插值可得到涨急和落急时段的精细流场;应用该方案获取某滨海核电站取水口的精细流场,测量结果显示取水口的流场较复杂,小范围流场受取水影响显著,呈现非潮流特征。

关键词:滨海核电站;取水口;流场;走航;数据插值

中图分类号:P731.21;P71;P75;TM623.9

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2021)08-0082-07

Design and Example of Fine Flow Field Measurement for Coastal Nuclear Power Plant Water Intake

SHI Wenqi, YUAN Shuai, LIU Yongqing, CAO Xuefeng, XING Chuan'xi

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: The water intake of cold resource is an important part of the safety for nuclear power operation, and it could be threatened by different blockages from the sea. In order to scientifically support the prevention and control of blockages at nuclear power intakes, it is necessary to master the fine flow field structure in the sea area near the intakes. The observation method combined with underway and fixed point proposed in this paper can simultaneously obtain the spatio-temporal characteristics of the flow field, which is suitable for fine flow field measurement at the water intake of coastal nuclear power plant. ADCP with bottom tracking function should be used for navigation observation. The device has the advantages of high measurement accuracy and simple data processing. But the use of ADCP should be regulated to reduce observation errors. At tidal current dominated sea area, which the flow field is relatively stable during the flood tide and the ebb tide, the interpolation of the navigation data during this period can obtain precise flow

收稿日期:2020-09-14;修订日期:2021-07-31

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41806219、41806002)。

作者简介:史文奇,副研究员,博士,研究方向为物理海洋学

通信作者:袁帅,副研究员,博士,研究方向为近海海洋过程

field during the flood tide current and ebb tide current. By this method, the currents in a sea area around a coastal nuclear power plant intake were measured, and the time-varying curve of the fixed-point currents and the flow field during rising and falling times were obtained. Analysis of the observation data showed that, the flow field near the nuclear power plant intake was more complex, and the tidal field in some areas was significantly affected by water intake, reflecting non-tidal characteristics.

Keywords: Coastal nuclear power plant, Water intake, Flow field, Underway, Data interpolation

0 引言

滨海核电运行须抽取大量海水作为冷却剂,其对冷源的依赖性强,且自身具有高危性,因此冷源取水安全受到高度重视^[1]。然而日益增加的海洋垃圾、海洋生物、泥沙和海冰等都能被大量抽入滨海核电站取水口,从而堵塞取水构件,影响取水效率,严重威胁冷源取水的正常工作,对滨海核电运行造成巨大的安全隐患^[2-6]。大部分堵塞物的自主运动能力差,基本随流运动,易由海流携带至滨海核电站取水口附近,并在巨大的抽水水流作用下进入取水口。

为避免堵塞物的影响,多数滨海核电站采用拦网和打捞等方式防治堵塞物^[7-8]。掌握滨海核电站取水口附近海域的水动力特征尤其是精细流场是科学布置拦网和高效打捞的重要前提,然而目前针对滨海核电站取水口精细流场的研究很少,且多为数模或物模结果^[9-13],与实际流场有所偏差。因此,有必要对滨海核电站取水口小范围的海流开展实际测量,以获取真实的流场情况,并根据真实流场有的放矢地开展堵塞物防治工作。

目前我国尚无成熟测量滨海核电站取水口精细流场的案例报道。本研究从实际需求出发,提出适用于滨海核电站取水口精细流场测量的方案,并介绍该方案在某滨海核电站的应用情况和测量结果。

1 海流测量方案

1.1 测量方法

海流是具有时空变化特征的变量,因此滨海核电站取水口的拦网和打捞工作须同时关注海流的时空分布。采用定点测量方法可获取海流的时间分布,而采用走航测量方法可获取一段时间内海流的空间分布。因此,为满足滨海核电站取水口的流场测量需求,宜采用定点和走航相结合的综合测量方法。

目前定点测量方法已被广泛应用且技术相对简单,本研究重点分析走航测量技术及其数据处理方法。

1.2 设备选择

走航测量设备通常包括测流设备和定位设备:测流设备用于获取流速和流向信息,常采用走航 ADCP;定位设备用于获取位置信息,常采用 GPS 等定位系统。

走航 ADCP 可直接测量海流相对于 ADCP 的速度,将此速度扣除船速即海流相对于地球坐标系的绝对速度。船速主要采用底跟踪或 GPS 跟踪定位的方式获取;如果测量海区的水深较浅且满足底跟踪的条件,首选采用底跟踪的方式,否则须采用 GPS 跟踪定位的方式;由于 GPS 的定位精度有限,须校正 GPS 误差和系统误差,过程较为繁琐^[14-15]。

目前 ADCP 技术已发展成熟,主要由 RDI 公司、Sontek 公司和 Nortek 公司生产,这 3 家公司针对不同的应用场景研发多种高精度和高专业化的 ADCP 产品。以 RDI 生产的 Workhorse Mariner ADCP 为例,频率为 150 kHz、300 kHz、600 kHz 和 1 200 kHz 的 ADCP 的最大测量底跟踪深度分别为 323 m、165 m、70 m 和 24 m,其他品牌与其相差不大。

我国滨海核电站通常分布在水深较浅的近海,宜采用底跟踪测量方式。高频率 ADCP 具有较小的采样盲区和采样层厚,可获取更高垂向分辨率的海流数据,因此在满足底跟踪深度的情况下应尽可能选择高频率 ADCP。

1.3 走航测量

开展走航测量前应参考设备说明书以及《声学多普勒流量测验规范》(SL 337—2006)等相关标准,以减少测量误差。

由于 ADCP 内部的罗盘受环境磁场影响较大,测船宜使用木船等非磁性材质船;如果测船是铁船,须外接电罗经、光纤罗经或 GPS 罗经,以取代受磁场影响的 ADCP 罗盘。由于近海走航测量多使用临时测船,须临时安装 ADCP。ADCP 探头宜安装在船舷中部;换能器应尽可能垂直,纵摇和横摇的偏角控制在 2° 以内;换能器的正向(通常为 3 号换能器的指向)为船首方向,并尽可能与测船中轴线平行;换能器的入水深度约为 0.5 m,避免船体摇晃时探头露出水面而发生空蚀现象^[16]。

应选择海况较好时进行走航测量。当海况较差时,波浪破碎产生的气泡在船体摇晃时易进入船底约 1 m 厚的水层内,气泡流经过换能器时会对声波产生反射,从而降低测量精度^[17]。此外,恶劣海况会使船体摇晃过于剧烈,并会在 ADCP 表面产生较大的瞬时线速度和角速度,从而出现多种测量误差^[18]。除海况外,测船的航行状态对测量精度也存在影响。例如:船体在突然转向、加速和减速时,罗经会产生冲击误差,造成流速误差过大,且该误差无法校正^[19],因此在走航测量的过程中测船应尽可能保持匀速且避免急转弯。

此外,测船在航行时会产生机械噪声、水动力噪声和螺旋桨噪声等噪声,ADCP 换能器表面也会产生流噪声,船速越快则噪声越大,而噪声增大必然导致 ADCP 回波信号的信噪比降低。海流测量精度通常为船速的 $\pm 0.2\%$ 或 ± 5 cm/s,船速太快会降低测量精度,而船速太慢会降低测量效率即不能在短时间内测量更大范围^[20-21]。滨海核电站取水口的海流测量范围通常较小,适合使用小型测船,且船速保持在约 5 kn 为宜;如果测量范围较大且海况较好,可适当提高船速,但不宜超过 12 kn;如果测量范围过大,可考虑增加测船即多船同步测量。

1.4 数据质量控制

在使用走航 ADCP 时难免产生各种误差,因此在应用测量资料前须进行数据质量控制,即系统误差校正、GPS 船速误差校正和常规检验。对于 ADCP 底跟踪测量的海流数据,由于船速误差已在数据处理过程中被消除,海流流速误差接近于 0,仅剩余非常小的方向误差^[15]。

一般而言,走航 ADCP 的数据质量控制主要包括:检验 4 波束的完好率,并剔除完好率低于 90% 的数据;剔除海流东分量和北分量中的无效数据;剔除设备摆动角度过大的数据;剔除流速较大的异常值;剔除 GPS 信号中断、正常航行时底跟踪船速为 0 以及换能器测量水深差异明显的的数据;对比测船 GPS 航迹与底跟踪航迹,校正船首方向与 3 号换能器方向的偏差,并校正流速方向^[18,22]。

1.5 数据插值

走航海流数据是包含时间和水平空间变化的三维变量,且通常在空间上分布不规则,须采用数据同化方法得到规则流场^[23-24],但该方法较为复杂,有时须引入专业数值模式,不利于在核电行业推广。以潮流为主的海域涨急和落急时段的海流较为平稳,利用该时间窗口内走航数据的简单插值,可得到滨海核电站取水口附近海域涨急和落急时段的精细流场,可基本满足堵塞物防治工作对流场空间分布特征的需求。

根据《海洋调查规范 第 2 部分:海洋水文观测》(GB/T 12763.2-2007),海流测量的准确度为 5% 或 5 cm/s,因此可选取流速变化小于 5% 或 5 cm/s 的时段作为涨急和落急的时间窗口。根据平衡潮理论,潮流变化是规则的正弦曲线,经简单计算,在潮流最大时流速变化为 5% 的时间窗口长度为潮周期的 10%,即对于半日潮和全日潮分别约为 1.2 h 和 2.5 h。然而受地形等因素的影响,实际的近海存在潮波变形和多种潮波叠加的情况,潮流变化并不是规则的正弦曲线,因此实际的时间窗口长度会有所差异,可根据定点海流测量结果选取。由于时间窗口长度有限,在测量时应综合考虑空间分辨率和空间范围,合理规划船速和航线,以满足工作要求。基于测量海区的范围,应确保走航数据在涨急和落急的时间窗口内覆盖全部测量海区,否则须考虑增加测船,以保证测量的准同步性。

2 方案应用实例

2.1 测量海区

受取水的影响,某滨海核电站曾发生大量海洋生物涌入取水口并导致取水通道堵塞的事件。为更好地开展堵塞物防治工作,须掌握取水口的精细

流场。基于此,应用上述方案于 2016 年春季在该滨海核电站开展精细流场测量。

该滨海核电站有 4 组取水口,口门朝向为 NW 向;取水口的 NE 向有导流堤,围成的取水湾呈半开口状,开口朝向为 W 向;取水湾内地形平坦,水深约为 10 m;每组取水口的设计取水量约为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$;在正常取水的情况下,取水口的抽水流速约为 0.6 m/s 。

在开展走航测量前,在取水湾口门外 300 m,取水湾口门两侧以及取水湾内依次投放 4 台电磁海流计,采用浮球锚锭的方式进行定点测量,这些设备待走航测量结束后依次回收。

取水口和定点测量的位置如图 1 所示。

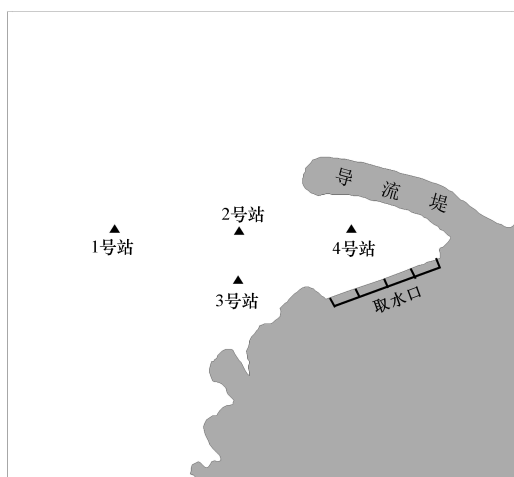


图 1 取水口和定点测量的位置

2.2 测量设备

该滨海核电站所在海域以半日潮为主,因此时间窗口长度约为 1.2 h,以 5 kn 的船速在时间窗口内可行驶约 10 km。由于走航测量范围较小 ($500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$),采用单个走航设备即可充分覆盖测量范围。采用美国 RDI 公司生产的 WHS 600 k ADCP,流速精度为水流速度的 $\pm 0.25\%$ 或 $\pm 2.5 \text{ mm/s}$,流向精度为 $\pm 2^\circ$;采用美国 Trimble 公司生产的 DSM 232 型差分 GPS(DGPS),水平定位精度优于 1 m。定点测量采用日本亚力克 AEM-USB 电磁式流速流向仪,测量精度为流速 $\pm 1\%$ 或 $\pm 1 \text{ cm/s}$,流向精度为 $\pm 2^\circ$ 。

2.3 测量实施

在 2016 年 4 月的大潮期开展海流测量,测量前了解测量海区的周边环境,同时确认现场海况和气象

等是否符合海上测量作业条件。取水湾口门的宽度约为 200 m,水深约为 10 m,故采用小型木质渔船进行测量作业。利用不锈钢支架将 ADCP 固定于船侧,换能器入水深度不小于 0.5 m,探头向下发射,沿测量断面来回连续走航测量整个水层剖面的海流状况。测船回旋掉头的半径控制在 5~10 m,以减少冲击误差。在连续走航测量期间,测船按既定航线尽可能保持匀速直线航行,航速控制在 6 kn 以内。

定点海流数据的采样间隔为 10 min,对原始数据进行 1 h 的滑动平均处理,以去除海流计自身运动引起的高频噪声部分。走航 ADCP 的盲区为 0.5 m,探头的入水深度约为 1 m,因此最靠近表层的测流层为水面下约 1.5 m,本研究选取该层进行分析。定点海流计的投放深度为水面下 2 m,与走航 ADCP 最上层测流层的深度基本一致。

定点测量时间为 4 月 20 日 13:40 至 4 月 22 日 18:10,共 52.5 h;走航测量覆盖取水湾及其外侧半径 500 m 范围的海域,包含滨海核电站取水可能影响的范围,测量时间为 4 月 22 日 9:06—18:31,期间共测量 4 次,实际测量时长共 7.0 h。

走航 ADCP 测量的频次为 10 s/次,定位 GPS 测量的频次为 1 s/次,通过时间匹配的方式得到 ADCP 测量时的位置并绘制走航轨迹图(图 2);航迹上的点为走航 ADCP 的测量数据点,数据点的间距为 20~30 m。

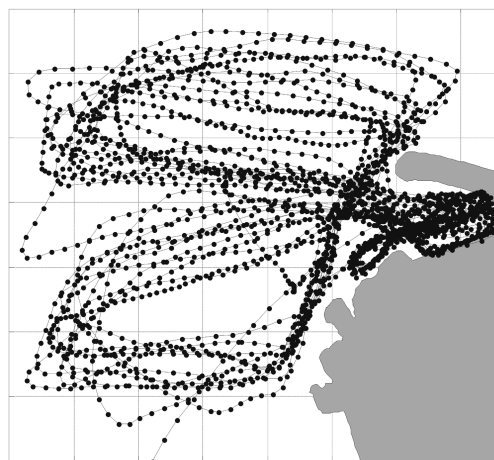


图 2 走航轨迹

2.4 时间变化特征

本次测量得到丰富的实测数据。4 个定点海流

计分别获取超过 52 h 的连续高频海流数据,可用于分析各站海流的时间变化特征。根据各站海流流速和流向的变化曲线(图 3),取水口的流场受取水的影响而呈现不同的时间变化特征。

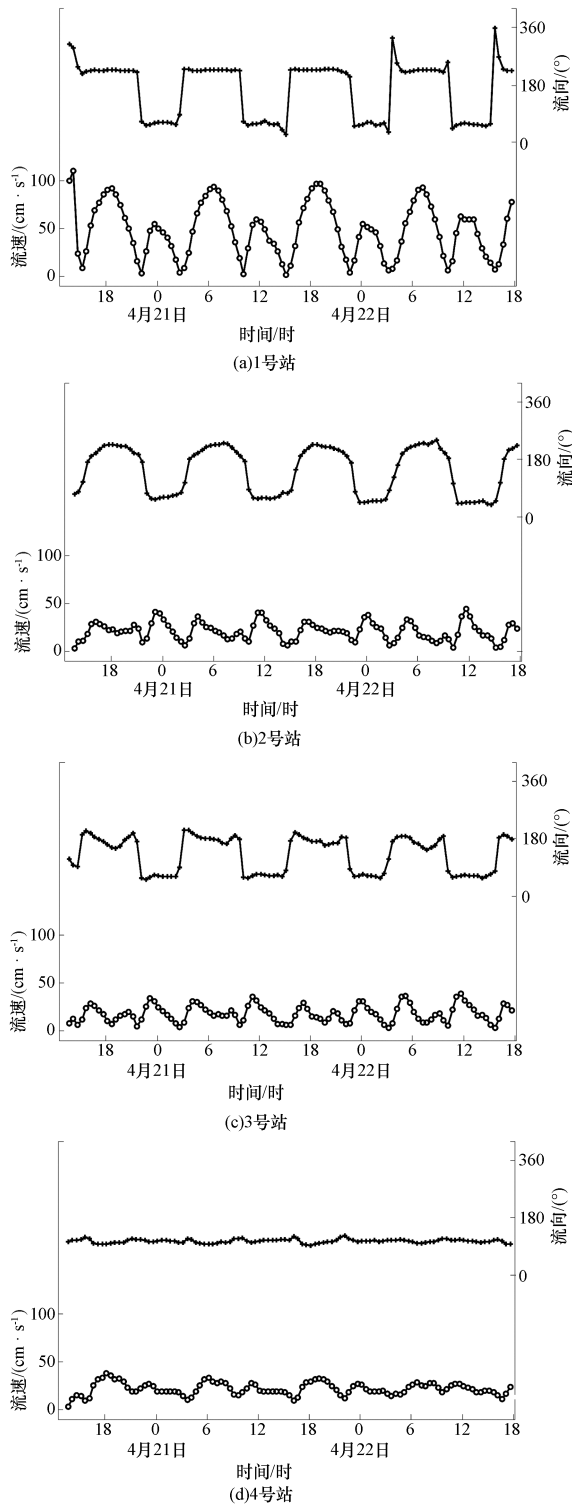


图 3 定点测量的流速和流向变化曲线
(数据间隔为 0.5 h)

(1)取水湾口门外的 1 号站受取水影响较小,主要受潮流系统的控制,呈规则潮流特征。在 1 个周期(日)内,流速有 4 个波峰和波谷,流向转向 4 次,呈半日潮变化特征。潮流的流速较大,落潮流最大约为 100 cm/s,涨潮流最大约为 60 cm/s,且落潮流明显大于涨潮流。潮流的流向呈显著的往复流动特征,涨潮流方向为 NE 向,落潮流方向主要为 SW 向。由于测量数据的长度大于 2 个周期(日),可采用不引入差比关系的调和分析得出主要分潮参数。

(2)取水湾口门两侧的 2 号站和 3 号站呈非规则潮流特征,其流向有周期性变化,而流速并非潮流波动特征。潮流的流向仍呈往复流动特征,其中 2 号站的主流向为 NE—SW 向,与 1 号站基本一致,而 3 号站的主流向为 NE—S 向;涨潮的流向与 1 号站一致,而落潮的流向与 1 号站略有不同,这可能是取水和局地岸线形状所致。涨潮时的流速有较明显的潮流变化特征,即涨急时的流速较大;落潮时的流速变化非余弦曲线,而呈类似“驼峰”状的分布,即存在 2 个极大流速值,且落急时的流速较小。

(3)取水湾内的 4 号站已没有潮流特征而呈准定常流特征。海流主要受取水口取水的影响,流向基本稳定并指向取水湾口门;流速波动较小,平均流速约为 20 cm/s。

2.5 空间变化特征

通过潮流特征明显的 1 号站可确定涨急和落急时段。根据 1 号站的海流变化曲线,同时利用潮流周期变化特征外推,4 月 22 日白天的涨急时段应为 11:30—13:20,落急时段应为 18:00—20:00。然而由于测量方案的设计受潮流预测偏差以及多种不可抗力因素的影响,走航测量数据无法完全覆盖上述时段。因此,涨急时的流场采用 12:33—13:21 的走航数据和 4 个定点测得的最大涨急海流数据插值得到,落急时的流场采用 17:45—18:31 的走航数据和 4 个定点测得的最大落急海流数据插值得到(图 4)。

虽然选取的走航数据时间窗口无法完全涵盖涨急和落急时段,然而在选取的时间窗口内潮流的流向稳定且流速变化较小,且用于插值的走航数据量较充足,可充分覆盖测量海区。

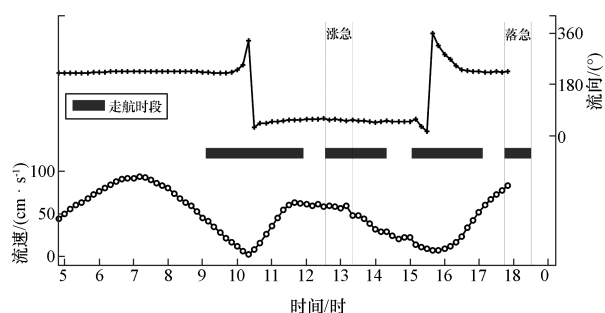


图 4 涨急和落急的时间窗口(4月22日)

采用内插方法将提取的走航海流数据和定点海流数据线性插值到规则网格中,得到取水口附近海域涨急和落急时段的流场(图 5)。

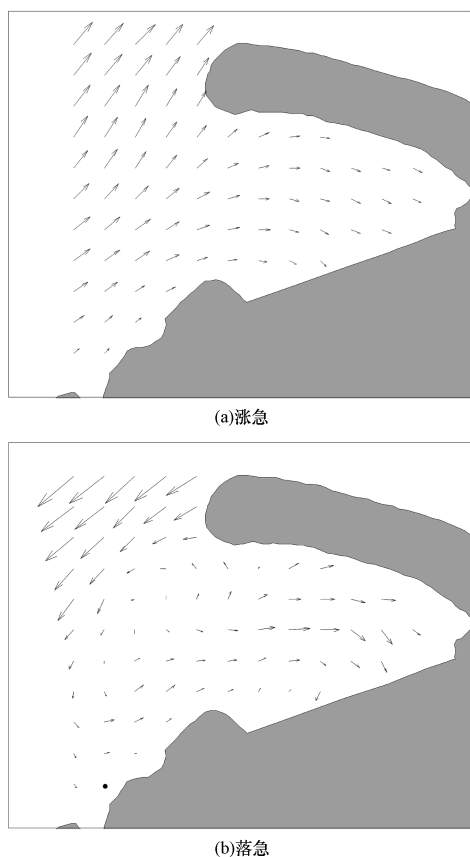


图 5 取水口附近海域涨急和落急时段的流速矢量

由图 5 可以看出:①取水湾口门外的流场较为均一。涨急时的流向基本为 NE 向,部分海域的流速较小,整体流场的空间差异较小;落急时的流向基本为 SW 向,流场的空间差异较小,且在取水湾口门处存在明显的涡旋。②取水湾内的流场较为复杂。涨急时的流向由 NE 向转为取水口方向,且流

速变化不大,整体流场的空间差异较小;落急时的流向由 SW 向转为 E 向,因此形成 1 个逆时针的涡旋。

2.6 结果和讨论

从拦网设置和打捞实施的角度来看,涨潮和落潮时取水湾口门南侧的流向均指向取水湾内,因此海洋生物从该处进入取水口的概率较大,须重点防范。涨潮时取水湾内的流向与取水口的抽水方向一致,因此流速较大,更易导致海洋生物大量涌入。取水湾口门外海域主要受潮流系统控制,主流向基本与海岸线平行,不会引起海洋生物向取水口聚集的情况;然而当盛行向岸风时,潮流叠加向岸的风生海流,就会引起海洋生物大量涌入。

通过在涨急和落急时段海流平稳的时间窗口内对走航数据的简单插值,可得到取水口附近海域涨急和落急时段的精细流场。但该插值方法无法考虑走航数据的时间变化,且在走航数据不能充分覆盖的海域难免出现流速失真的情况。因此,走航数据越丰富且数据分布越均匀,插值所得流场的准确度越高。

目前充分的走航测量存在 2 个困难。①近海走航测量通常使用小型测船,其续航能力较差,获取的走航数据数量有限;针对此问题,可通过对涨急和落急时段的准确预测,尽可能增加时间窗口内的数据量。②受海岸线形状和水深等因素的影响,测船无法在浅滩和岸边航行,必然存在测量数据无法覆盖的海域;针对此问题,可使用更小型的搭载平台,尽可能扩大浅滩和岸边的走航覆盖范围。然而走航测量必然存在测量“死角”,尤其是在流速切变较大的边界海域;此外,受多种因素的影响,测量时间无法与时间窗口完全吻合。因此,更加科学的方法是采用数据同化的方式,更好地融合走航数据和定点数据,对缺测海域进行合理织补,从而得到更符合实际情况的流场。

3 结语

海流是具有时空变化特征的变量,滨海核电站取水口采取拦网和打捞等措施时须同时关注海流的时空差异。目前我国滨海核电站以人工定点海流测量为主,其空间分辨率、时间频次和精度都不

能完整刻画取水口的精细流场,无法满足取水口堵塞物防治的工程需求。通过定点测量与走航测量相结合的方式,可较好地获取取水口流场的时空变化特征。值得一提的是,走航 ADCP 在使用中会因安装或操作不规范而产生较大误差,在实际测量作业时须多加关注。

根据实测数据,受取水和局地海岸线的影响,滨海核电站取水口的流场复杂,部分海域可形成涡旋。海流呈准定常流、非规则潮流和规则潮流 3 种特征:准定常流的流向基本不变,而流速小幅波动;非规则潮流的流向周期性大幅波动,而流速非潮流波动特点。距离取水口越近的海域受取水的影响越明显。

本研究提出适用于滨海核电站取水口精细流场测量的方案,并从实用角度提出走航数据的简单处理方法。根据应用实例,该方案实施简便且测量效果较好,可在相关工程领域推广应用。对于将不规则走航数据进行更科学的插值或同化为规则流场数据的课题,仍须专门的研究和论述。

参考文献

- [1] 颜国呈,吕文婷.基于电厂取水外来物堵塞的预防管理[J].科技创新与应用,2016(14):119.
- [2] 陈锋.中国滨海核电厂取水明渠口门布置原则[J].核安全,2009(2):25—29.
- [3] 刘诗华,侯树强.寒区核电厂取水口防冰设施设计研究[J].人民黄河,2015,37(5):112—115.
- [4] 王娟.潮汐水域火/核电厂取水口水流特性及泥沙淤积试验研究[D].太原:太原理工大学,2007.
- [5] 张朝文,关春江,徐鹏,等.辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J].海洋环境科学,2019,38(1):41—45.
- [6] 魏新渝,熊小伟,王一川,等.美国滨海核电厂取水设施及生态影响分析和启示[J].海洋工程,2017,35(6):143—154.
- [7] 于梅,刘毅.核电厂防冰与拦污设施设计研究[J].港工技术,2016,53(3):44—48.
- [8] 阮国萍.核电厂取水口堵塞原因分析与应对策略[J].核动力工程,2015(S1):151—154.
- [9] 蔡体菁,秦素娣,范家骅,等.潮汐河道与核电站取水口区域水流特性的数值模拟[J].计算物理,1988(2):129—138.
- [10] 康君峰,范敦敦,周存露,等.针对核电冷源取水安全的海流特征分析[J].海洋环境科学,2018,37(1):70—77.
- [11] 赵骞,郭威,陈元,等.红沿河核电站邻近海域海流特征观测与分析[J].海洋工程,2018,36(6):130—136.
- [12] 李孟国,李文丹,时钟,等.田湾核电站海域潮流泥沙数值模拟研究[J].泥沙研究,2008(2):16—23.
- [13] 刘赞强,段亚飞,张强,等.波浪对蘑菇头式取水口作用的试验研究[J].中国港湾建设,2017,37(10):53—56.
- [14] 宋政峰,席占平.走航式 ADCP 流量测验主要误差来源及其控制[J].水文,2016,36(1):58—65.
- [15] 杨锦坤,相文玺,韦广昊,等.走航 ADCP 数据处理与质量控制方法研究[J].海洋通报,2009,28(6):101—105.
- [16] 蒋建平,段云雁.ADCP 流量测验时底跟踪失效的解决方案[J].水利水电快报,2008(S1):190—195.
- [17] NEW A L. Factors affecting the quality of shipboard acoustic doppler current profiler data[J]. Oceanographic Research Papers, 1992, 39(11/12): 1985—1996.
- [18] 夏永水,廖世智.珠江口外走航 ADCP 资料的系统误差订正与质量控制[J].海洋学报,2010,32(3):1—7.
- [19] POLLARD R, READ J. A method for calibrating ship-mounted acoustic doppler profilers and the limitations of gyro compasses[J]. J Atmos Oceanic Tech, 1989, 6(6): 859—865.
- [20] 李占桥,田志光,吴宝勤.两种型号 RDI ADCP 测速精度分析[J].海洋测绘,2012,32(6):57—59.
- [21] 秦伟,周庆,李靖,等.走航 ADCP 原理及误差分析[J].海洋开发与管理,2014,31(6):45—49.
- [22] 张凤烨.非规则采样资料的调和分析方法及其在胶州湾口水交换研究中的应用[D].青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2011.
- [23] EROFEEVA S Y, PADMAN L, EGBERT G. Assimilation of ship-mounted ADCP data for barotropic tides: application to the Ross Sea[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2005, 22(6): 721—734.
- [24] 马寨璞.海洋流场数据同化方法与应用的研究[D].杭州:浙江大学,2002.