

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.017

无人机在核电厂温排水监测中的应用

石功权

(辽宁红沿河核电有限公司, 大连 116319)

摘要: [目的]无人机的普及为核电厂温排水环境影响评估提供了新的解决思路。[方法]介绍了核电厂使用无人机对温排水进行监测涉及的监测技术、测区特征、监测时机、安全管控等方面的问题及解决方案, 阐述了一种基于无人机技术的温排水监测系统, 包括无人机系统平台、海域温度场数据采集流程、采用航空红外遥感对相关海域夏季大小潮温度场变化实时监测方法, 依据调查时间内的温升包络和规模展布数据分析了不同潮汐状况下的热水回流情况, 最后分析了实测的案例及结果。[结果]实践表明: 无人机系统工作稳定可靠, 可以实时准确地采集电厂温排水造成的温升数据。[结论]该方法弥补了目前人工进行监测的不足, 为后续对温排水影响环境的分析提供了有力参考。

关键词: 无人机; 核电站; 温排水; 航测

中图分类号: TL4; P23

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0094-05

Application of Drone Surveying on Heat Disposal to the Ocean from Nuclear Power Plants

SHI Gongquan

(Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd., Dalian 116319, China)

Abstract: [Introduction] The application of arial surveying on heat disposal to the ocean from nuclear power plants involves multiple issues. [Method] The article introduced the issues include surveying technics, characteristics of survey area, surveying situations, and safety control, then summarized the measure by four sections which were the drone system applied, how to gather maritime temperature data around the nuclear power plants, how to monitor the fluctuation of maritime temperature with arial spectral instruments in summer tides; analysis of heat expansion in different tide conditions based on the data gathered. Finally, the results based on the measured data were summed up in the paper. [Result] The practice shows that the procedure is approved reliable and can precisely gather information of temperature increment from power plant heat disposal in this task. [Conclusion] The arial surveying on heat disposal to the ocean from nuclear power plants has many advantages over manual surveying. It can provide powerful reference for future research in how heat disposal affect the environment.

Key words: drone; nuclear power plant; heat disposal; arial surveying

某核电厂规划建设六台百万千瓦级压水堆核电机组, 其中四台已投入商运。机组采用以海水为冷却水源的直流供水系统, 四台机组满发时温排水排放总量约 $190 \text{ m}^3/\text{s}$, 理论上冷凝器出口海水温度比本底温度升高不超过 7°C , 温排水交换水量对局部海洋环境不可避免的将会产生一定影响。如何确保影响区域和程度不超过监管部门批准的用海范围已

成为核电厂和监管部门共同关注的重大课题^[1-3]。核电厂为履行社会责任和自身发展的需要, 同时也为了满足监管部门的要求, 必须对运行机组满负荷运行状态开展电厂温排水对接纳水体环境影响原型观测工作, 为温排水环境影响后续评估提供技术支撑, 同时为工程海域本底水温模型以及温排水数学预报模型参数选取合理性更进一步的论证、必要的改进提供验证资料。

该核电厂位于滨海、区域海况复杂, 温排水影响范围较大, 为了控制测量精度, 需要尽可能多布

设不同温变区水上同步测温校验点，传统走船测量方式能获取的有效同步测点有限，而且效率低，也很难精准取得观测成果。无人机的普及为解决这一难题提供了新的出路^[4-7]。通过使用携带监测仪器的无人机，进行航空遥感海面温度场测量，可以全面、准确绘出遥感影像图及海表水温分布图。实践表明，引入无人机进行温排水监控取得了预期的效果。

1 无人机监测温排水的方法

鉴于温排水监测使用的是小型红外设备等仪器，对载重和飞行速度的要求并不高，要求更高的是续航能力，核电厂温排水监测范围较广，无人机连续飞行时间需要超过1 h。为保证连续、准确监测，我们选择了抗风能力强、续航时间长的混合垂直起降固定翼无人机(如图1所示)，该机型不需要一般固定翼所需的跑道，采用四旋翼的垂直起降方式，平飞时则通过控制舵机改变飞机的翼面来控制飞机的飞行姿态^[8]。同时使用云台对所搭载的测量设备进行增稳，以保证拍摄画面的稳定和清晰。



图1 航测中使用的混合垂直起降固定翼无人机

Fig. 1 Fixed wing drone used in air surveying that can take off and land vertically

在正式实施作业前，无人机红外遥感须通过前期预备工作的试飞行和室内试验，还应对所采用的无人机飞行稳定性和可靠性、红外热像仪精度和可靠性等进行验证。实测的红外遥感影像经过几何校正和温度反演，以及与同步船测进行校正后得到实际的表面绝对温度场，再扣除本底温度后得到温排水温升影响范围。无人机红外遥感规划测量海域为核电厂排水口向东西各延伸10 km，纵深为从海岸向外延伸约6 km，总共约120 km²的海域，如图2所示。

观测时间选择夏季大潮和小潮，进行航空遥感海面温度场测量，绘出遥感影像图及海表水温分布图。同时在取排水海域温排水主要影响区域进行环境水体表层、垂向水温、盐度直接观测。正式测量根据测区特征和无人机续航能力，将120 km²分为2个测区，两架飞机各负责一个测区，飞行高度为600 m。为避免漏扫发生，以及满足数据处理冗余度要求，设置旁向重叠率为20%，航线间距为620 m，每架飞机测量范围大于60 km²，同时根据PPK实时差分动态定位技术的需求以及避免同高度飞机间互相干扰，设置飞行航线方向为垂直于海岸向海内延伸，使飞机同步测量时互相隔离，如图3所示。

夏季是海域受温排水影响最大的工况，因此仅针对夏季大潮、中潮和小潮三个观测时段在取排水水域同步开展定点海流观测，收集厂址潮位站的潮位曲线；同步开展定点水温观测，绘出涨、落潮特征潮时(涨急、高平、落急、低平)的表层温度场分布以及有代表性位置的垂线温度分布。

2 原型观测水温结果

2017年无人机遥感测量一共进行了3次，7月中旬小潮开展了涨急、落急和低平测量，其中落急和低平完成了半个测区，7月下旬大潮进行了低平、涨急、高平、落急四个潮态观测，8月中旬小潮进行了高平、落急和低平补测。2018年7月至8月又进行了两次验证性遥感温排水观测。根据2017年实测温度场结果及2018年实测校正综合分析，可以得出如下结论：

1) 高温升区偏转方向受潮流控制，涨急时高温带往北贴岸展布，北侧存在不连续的紊动热团，在高平和低平潮时，高温带主要向西离岸展布，低平潮时往西南偏转，高平潮时往北偏转，落急时高温带向南展布，落急和低平潮往南展布的高温带呈现出一定的分岔现象和不连续长带状分布，如图4所示。

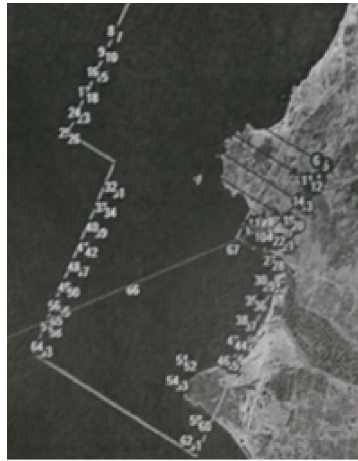
2) 大多数潮态，在厂址南侧一带出现相对高温带，在北侧浅湾近岸也出现一定高温区。

3) 温排水造成的温升场由实测温度场扣除本底水温后得到，综合分析结果表明：观测期间，4台核电机组均处于正常运行条件下，2017年夏季小潮和大潮实测温升包络4℃范围、1℃温升包络范围

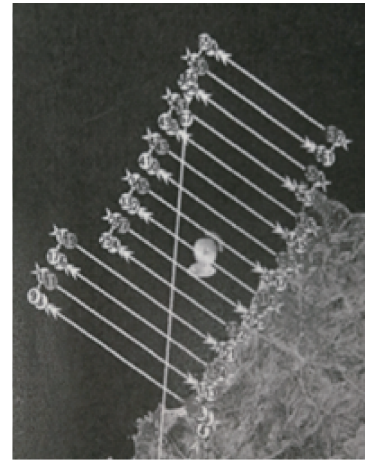


图 2 无人机飞行区域

Fig. 2 Flying area of the drone



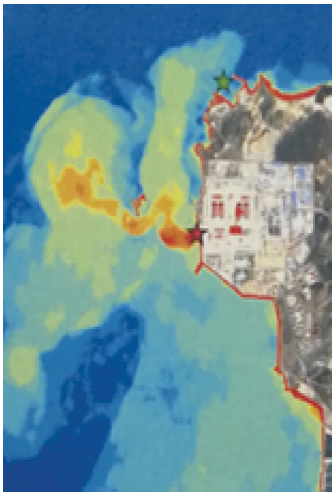
(a) 南测区



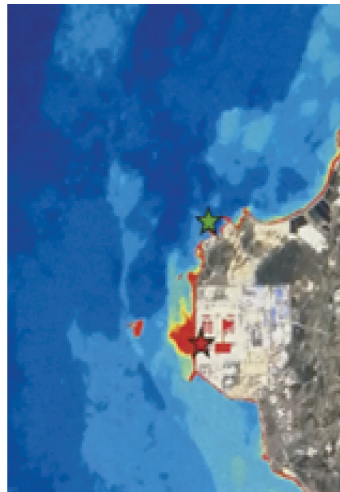
(b) 北测区

图 3 南测区航线与北测区航线

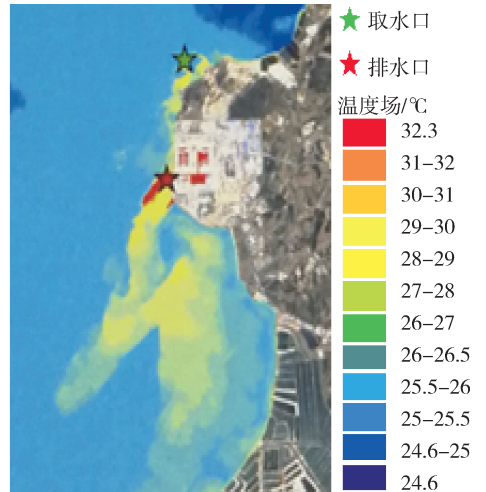
Fig. 3 Flying route in south survey area and north survey area



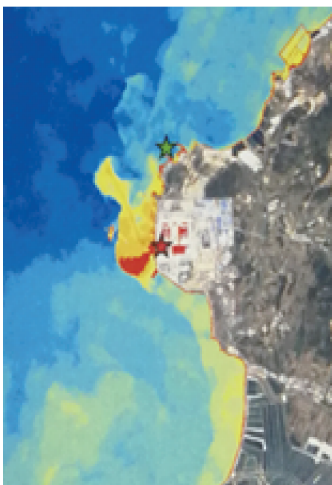
(a) 小潮低平



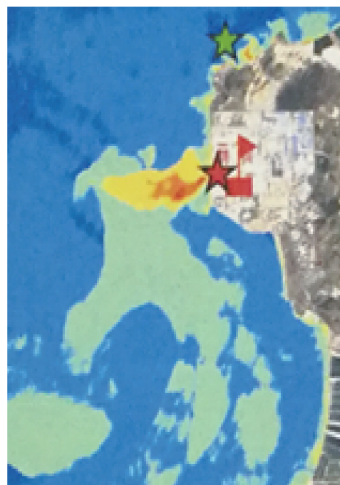
(b) 大潮涨急



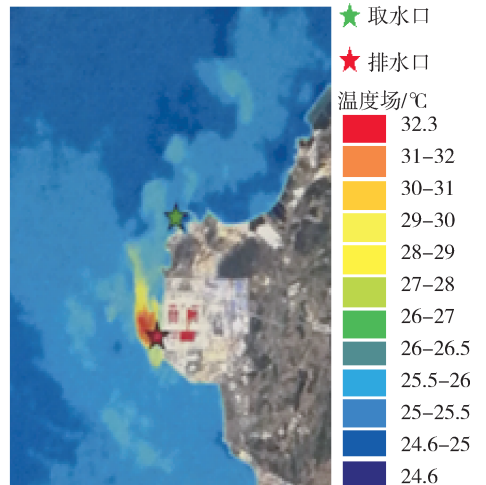
(c) 大潮落急



(d) 大潮高平



(e) 大潮低平



(f) 小潮急涨

图 4 利用无人机遥感测量的某核电厂温排水温度场分布

Fig. 4 The water temperature pattern surveyed with drone remote beside the nuclear power plant

均满足设计要求。

4) 水温同步测验期间 4 台核电机组均处于正常运行条件下, 电厂平均取水水温升、最大取水水温升均小于设计值, 涨急时段取水水温升最高, 落急时段取水水温升最低。

5) 从观测海域表面温度场整体来看, 温排水高温影响带展布方向受潮流涨落潮控制, 涨潮时向北, 落潮时向南, 高平潮和低平潮时主要向西, 小潮温升影响范围相比大潮更大。

6) 从无人机遥感温度场不同区域分布特征看, 在近排水口区域, 遥感温度场随涨落潮流变化呈现为自排水口向外较规律的连续分布, 温排水高温影响带边界清晰, 如图 5 所示。

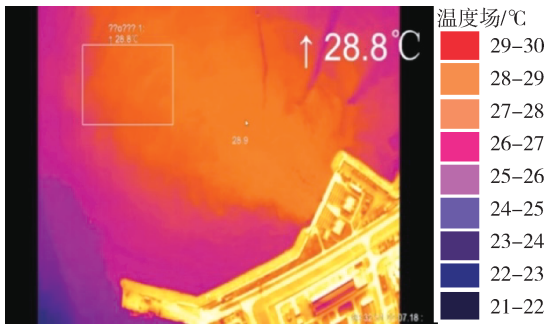


图5 无人机红外遥感温度场观测影像

Fig. 5 Aerial Infrared spectrum image of temperature field

3 无人机监测温排水须关注的问题

1) 安全方面。一是因核电厂所在地区的空气活动相当不稳定, 监测难度较大; 二是因核电厂属于国家敏感设施, 在高空飞行的飞行器对现场人员和设备的安全构成较大的威胁, 高速飞行的飞行器的动能和高空势能以及高速转动的飞行器旋翼会造成人员伤害, 因此必须选择可靠性高的飞行器, 对操作人员的技术水平和安全意识也应提出更高的要求。

2) 无人机选择问题。现有的以固定翼、单旋翼、多旋翼三种形态为主(如图 6 所示), 这三种类型的飞行器在载重、空速、应用形式等都有较大区别。从空气动力学角度来说, 普通固定翼飞行器受测区风速以及风向的影响较旋翼飞行器更大。但现有的电动旋翼飞行器在续航能力上相对固定翼飞行器较弱。而固定翼兼具垂直起降和高航速、长航时的能力^[9], 因此我们选择了更适合该项目需求的固

旋翼无人机(如图 1 所示)。



图6 现今常用工业无人机种类

Fig. 6 Commonly used industrial drone types

3) 无人机监测温排水技术问题。采用无人机搭载小型红外设备测量海域大范围变化温度场对红外设备的测温精度控制、无人机抗风性能、飞行稳定性、定位准确性及多机组协同测量等方面都有较高的要求, 需要在设备选型、测量控制流程和红外精度控制技术方法等方面进一步改进完善。夏季航空遥感大潮、中潮与小潮观测期间, 也应在工程海域同步开展定点海流观测, 选定大潮或小潮开展四个特征潮时(涨急、高平、落潮、低平)排水口温排水运移轨迹追踪测量工作。

4 后续建议和改进措施

1) 选择可靠性更高的无人机及配置, 确保核电厂人员和设备的安全。在飞行时应使用 GPS 模式, 并且宜使用地面站进行航线规划以及返航等工作。GPS 飞行模式可以自动修正飞行器平稳度, 限制固定旋翼无人机最大倾斜角度, 同时能够实现自动盘旋和自动降落, 减轻操控压力。

2) 严格执行操作人员的准入制度, 落实安全责任制。在所有飞行活动开始前, 飞行器的序列号、型号、空机重量、最大平飞空速、所有者等相关信息, 以及飞行单位执照(民航局颁发)、操作人员执照(行业协会颁发)、计划飞行航线等都应报核电公司安保部门审核并取得许可。

3) 提前做好技术准备, 确保监测高效、成果可信。在监测开始前应充分收集工程海域航天遥感数据, 并结合海面定点温度实测结果和温度场遥感图片进行深入分析, 以确定工程海域基准水温, 然后

进行反演计算, 给出核电周边海域 4 °C、3 °C、2 °C、1 °C、0.5 °C 等温升区域分布图及影响面积。依据这些调查数据形成调查时间内的温升包络和规模展布数据, 并分析不同潮汐状况下的热水回归状况。

4) 核电厂相关部门应积极配合, 提供及时、完整、准确的输入, 以保证实测和分析的结果与实际的匹配性。核电厂自身在周边建立了近岸和陆域的多个观测站点, 每天不间断收集数据, 包括潮位资料、气象资料, 如大小潮完整潮周、气温、湿度、风速、风向、降雨时段和降雨量等; 机组运行情况及各台运行机组的负荷曲线、循环水流量以及凝汽器进出水温等运行参数也是在线实时记录的。此外, 还应研究分析核电厂所在工程海域温排水影响之外的本底水温变化情况, 提出水温调查期间工程海域本底水温分布特征, 为工程海域核电温排水所带来温升场影响分析奠定基础。

5 结论

采用无人机航空红外遥感对核电厂温排水影响区域进行监测, 实测结果证明所采用的测量装置稳定性、全面性、可靠性达到技术要求, 也充分说明无人机在实施测量方面效率高, 具有灵活性、精确性、经济性优势, 推广应用的前景广阔。该方法弥补了目前人工进行监测的不足, 为后续对温排水影响环境的分析提供了有力参考。利用无人机对作业范围广、条件复杂的项目进行监测具有准确度高、可靠性强、实时性好、投入成本低的优势, 这些优势同样能够体现在航空电力巡线、管道巡检等其它监测作业中。

当然无人机在核电厂的应用安全始终是第一位的, 从业人员不仅仅需要全面的专业技能, 更需要极高的安全意识和极端认真的责任意识。任何飞行活动都应当遵守国家相关法律法规, 并且不对核电厂人员的工作和生活造成干扰。无人机在核电厂的业务范围只有在确保安全的前提下才能得到有效扩展。

参考文献:

- [1] 於凡, 姜子英. 我国滨海核电站温排水排放口的极端高温限值研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (增刊 1): 694-699.
YU F, JIANG Z Y. Study on extreme high temperature of cool-

ing water in Chinese coastal nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46 (Supp. 1): 694-699.

- [2] 张爱玲, 王韶伟, 赵懿珺, 等. 滨海核电厂温排水环评关键问题分析 [J]. 环境影响评价, 2015, 37(3): 57-60.
ZHANG A L, WANG S W, ZHAO Y J, et al. Analysis of key issues in environmental impact assessment of thermal discharge from coastal nuclear power plant [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(3): 57-60.
- [3] 张晓峰. 核电厂温排水环境影响评价及减缓措施 [J]. 海洋技术. 2010, 29(4): 38-43.
ZHANG X F. Assessment and mitigation to the environmental impact of thermal discharge from nuclear power plant [J]. Ocean Technology. 2010, 29(4): 38-43.
- [4] 汤坚, 杨骥. 无人机倾斜摄影技术在特高压输电线路路径优化中的应用研究 [J]. 南方能源建设. 2015, 2(增刊 1): 203-206.
TANG J, YANG J. Research and application of UHV transmission line optimization based on oblique photography of UAV [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (Supp. 1): 203-206.
- [5] 杨喆, 邓超怡. 无人机在特高压输电线路巡检中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊 1): 135-138.
YANG Z, DENG C Y. Research and application of UHV transmission line inspection based on unmanned aerial vehicle [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 135-138.
- [6] 刘正坤, 陈伦清, 王昊. 无人机辅助电网巡检作业的应用现状与思考 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 115-119.
LIU Z K, CHEN L Q, WANG H. Application status and reflections of electrical network inspection aided by unmanned aerial vehicle [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 115-119.
- [7] 龚崇辉. 各型无人机地质环境监测应用实践与探讨 [J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 156-160.
GONG C H. Application and discussion of geological environmental monitoring using various UAVs [J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(4): 156-160.
- [8] 祝小平, 王睿, 周洲. 垂直起降固定翼飞翼布局无人机过渡飞行纵向稳定性研究 [J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(4): 548-553.
- [9] 刘辉, 陈立业, 邹馨毅, 等. 混合翼无人机的设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(11): 92-92.

作者简介:



SHI G Q

石功权 (通信作者)

1990-, 男, 广东深圳人, 辽宁红沿河核电有限公司安全防护处工程师, 加拿大不列颠哥伦比亚理工学院机械设计专业, 主要从事无人机管控 (e-mail) 1018792006 @ qq.com.