

文章编号:1672-3031(2018)05-0487-08

火/核电厂冷却水研究回顾与展望

纪平, 赵懿珺, 袁珏

(中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 本文全面回顾了中国水利水电科学研究院60年来持续开展火、核电厂冷却水研究的发展历程, 分阶段总结了冷却水专业的创新思路 and 重要成果。结合行业需求变化, 从以下四个方面重点阐述了近十年的创新性成果及实践经验, 主要包括: (1)冷却水相似理论完善及精细化模拟技术; (2)环境友好型取排水工程; (3)新型测控技术在冷却水研究中的应用; (4)专业拓展及交叉学科发展。文章结合当前我国火、核电发展趋势以及日趋严格的水生态环境保护要求, 展望了本领域未来的发展方向及其应对策略。

关键词: 冷却水; 相似理论; 数值模拟技术; 取排水工程; 水生态保护

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.019

1 引言

火/核电作为我国电能的主要来源, 在国民经济建设中占有举足轻重的地位。囿于电厂热效率较低, 大量“废热”需通过循环冷却水系统带出并排入环境水体或散失至大气中。作为采用直流冷却系统的电厂, 温排水携带大量废热排入接纳水体, 可能造成自身取水温度升高, 降低电厂运行效率, 甚至可能威胁电厂安全运行。为此, 自1950年代起, 我院在国内率先开展了电厂冷却水相关专题研究工作, 历经了水利水电科学研究院水工研究所、冷却水研究所直至今天的中国水利水电科学研究院水力学研究所等不同阶段, 期间先后完成了四百余项火/核电工程冷却水相关研究工作, 研究内容贯穿电厂厂址规划选择至后期运行评估等不同阶段的冷却水工程及其所涉及的专业基础理论研究等问题。通过“冷却水人”近60年的刻苦努力, 我院在火/核电厂冷却水研究方向已经建立起完备的、达到国际先进水准的专业基础理论、工程试验以及数值模拟计算等研究体系, 培养了一批高素质的专业人才, 为我国火/核电厂的安全、经济、环保、可持续发展起到了重要的推动作用。

2 冷却水专业历史回顾(1958—2008)

2.1 初创时期(1958—1966) 建国初期, 我国的电厂冷却水工程基本遵循前苏联的贝尔纳斯基平面流理论来规划设计^[1], 即不考虑温排水排放的温差浮力效应。为了增加水体冷却面积, 一般需加大顺水流方向取、排水口的平面间距, 这种取排水口布置方式一般称为“分隔式”布置。1958年, 在我国首座装机超百万千瓦的辽宁清河电厂取排水工程布置设计中出现了大的争议, 当时电厂拟利用清河水库冷却, 但按照前苏联的平面流理论, 排、取水口必须拉开距离, 要求开凿大量隧道, 工程浩大。为此, 当时尚在东北电力设计院工作的岳钧堂教授提出异议, 认为排放的热水会上浮水面, 取水口设在水下深处, 可利用此温差浮力效应有效地避免“热水短路”而无需大幅度增加取排水口间距, 进而可大量地节约工程投资。但此想法因有违前苏联的经典理论而备受质疑, 最后此争议转到当时的水利科学院(我院前身)水工研究所。在分析冷却水运动特点、相似条件等基础上, 我院开展

收稿日期: 2018-05-31

作者简介: 纪平(1964-), 男, 吉林人, 教授级高级工程师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: jiping19641213@126.com

通讯作者: 赵懿珺(1975-), 女, 山西忻州人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境水力学研究。

E-mail: yijunzhao2012@163.com

了国内外第一个直接采用温差水体作为试验介质并计及水面散热效应的冷却池模型试验并取得了成功，自此开始了我国的冷却水专业试验研究工作。

依据清河电厂等项工程冷却水模型试验成果及其理论基础的总结分析，陈惠泉教授于1964年提出并建立了冷却池水流运动的模型相似理论^[2]，其区别于前人的关键核心在于提出了“综合参数”的概念。此概念可归结为：放弃参与某个物理现象各个物理因素相似的要求，而仅求能综合体现这些因素对该物理现象所起作用的“综合参数”的相似，从而便可大大松弛相似要求。在冷却池模型试验中，提出了临界流量 Q_{cr} 的综合参数的概念^[3]，既采用模型流量 $Q_m > Q_{cr}$ 来替代水池整体的雷诺相似要求(Q_{cr} 由先行系统试验或已有经验确定)，进而近似实现模型水体整体水流运动相似的要求。与此同时，针对水面热交换问题，许玉林教授首次提出了可综合反映水面对流、蒸发、辐射三种不同散热机理效应的综合散热系数 K ^[4]的概念，据此概念(K)给出了水面散热相似准则。上述冷却水相似准则在太原电厂(晋阳湖)、沧县电厂冷却池模型试验与原型观测结果对比中得到了较好的印证^[5-6]，继后我国大量的电厂冷却池模型试验据此进行，为电厂冷却池及其取排水工程设计提供了重要的技术支撑。

鉴于温排水与环境水体间存在密度差，在一定条件下会出现密度分层流动，此时接纳水域的水力热力特性与平面流情况存在很大差异，各物理量沿水深方向的变化对水域整体流动性能起主导作用。依据此温差异重流的理论，岳钧堂教授提出了平面位置相同(或相近)表层排水、底层取水的“重叠式”取排水口的概念并在天津军粮城电厂成功应用^[7-8]。温差异重流试验水槽见图1，军粮城电厂取排水布置见图2。



图1 温差异重流试验水槽

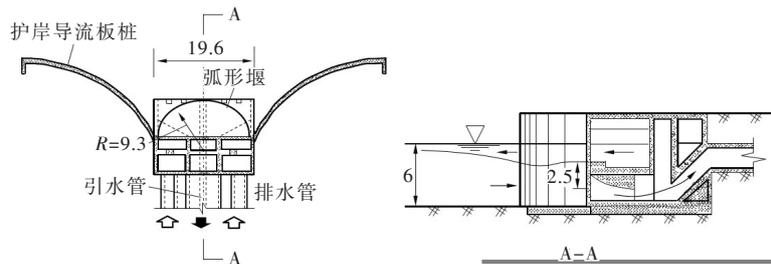


图2 军粮城电厂重叠式取排水口布置

2.2 “文革”期间(1966—1976) “文革”期间，科研工作受到很大冲击，我院曾被迫暂时解散。但由于电力建设在整体上没有中断，我院从事冷却水研究工作的人员得以保留并继续开展相关课题的科研工作。在此期间先后完成四十余项电厂冷却水模型试验、原型观测工作。其中，良山门电厂利用杭州护城河水冷却，夏季时效率低，课题组通过模型试验为该电厂设计了跨河的挡热工程并取得良好的效果^[9]，成为冷却水研究历史上值得铭记的典范之一。

在此期间，我院举办了全国性的冷却水学习班。学员除听课外，直接参与了冷却水模型的规划、设计和试验，同时还进行了现场原体观测，收效显著，为国家培养了一批冷却水方向的专业人才。

2.3 发展时期(1976—2008) 伴随着文革结束，国家建设逐渐转移到“以经济建设为中心”的正确轨道上来。为满足国家经济建设快速发展的需求，我国电厂建设迎来了高速发展时期，电厂规模大幅度增加，厂址布置也自内陆湖泊、河流逐渐向滨海厂址发展。与此同时，我国滨海核电工程也逐渐走上快车道。

随着电厂规模的不断增大以及电厂温排水接纳水体环境保护要求的提出，基于排口温差浮力效应的“重叠式”取排水口布置原则已逐渐难以适应要求。为此，对于大取排水流量条件下的无温差或弱温差分层接纳水域提出了“差位式”取排水口布置形式^[7,10]，既在有环境流水域利用其自然地形、环境流等条件，促成电厂取、排水各行其道，形成冷、热水不同流路，避免或大幅度削弱电厂温排水对其自身取水的影响(见图3)。如：在台山电厂、秦山核电、岭澳核电、大亚湾核电、香港南丫电厂等工程中进行了应用。其中大亚湾核电充分利用工程海域“辐散辐合”流特征，采取将取排水口分置于不同“流路”的明渠取排水方案，改变了法方(大亚湾核电规划建设由法国EDF全面负责)的长距离

海底隧洞排水方案^[11]，为国家节省了约3000万美元的直接投资，该项目获得了冷却水研究方向迄今为止唯一的1个国家科技进步一等奖。

在此期间，我院于1977年开始，组织了全国范围内内陆不同水域水面蒸发与散热系数的系统观测研究工作，并同时利用风洞开展了蒸发散热室内系列实验，据此提出了切实可行的环境水体综合散热系数(K)通用计算公式，该计算公式被国家“工业循环冷却设计规范”等相关标准、规程等采纳推广。

1995年，依托近40年的冷却水研究成果，系统地总结分析了不同模拟对象及其关注点、不同水域条件下冷却水模型设计的基本原则，与此同时也总结分析了考虑风吹效应、冰冻现象等情况下的冷却水运动模拟要求^[12-13]。在此基础上，首次编制了《冷却水工程水力、热力模型试验规程》(SL160-95)并在全国推广应用。

2.4 数模发展回顾 数学模型是解决冷却水问题的重要手段之一，具有可以兼顾考虑更多影响要素、更大模拟范围、更加经济便捷、不存在模型缩尺影响等优点。早期囿于计算手段等限制，关于温排水排放影响计算基本采用高度概化的经验公式、估算方法等^[14-16]。

随着计算机的逐步发展，1970年代数学模型被应用到冷却水研究工作中来。我院冷却水数学模型基本与国内外同行同步发展，从1970年代至1990年代研发了一系列水力热力数学模型。

我院在1960年代提出了冷却水运动水域急变区、缓变区即“近区”和“远区”的概念。为此，早期的数学模型也是分区(近区、远区)建立，其中远区模型有《大型冷却池水力热力的数值模拟》等；近区模型有射流积分模型等^[17-18]，该模型曾应用于辽宁核电、沙角C厂等的冷却水研究。

1980年代开始，兼顾近区侧重远区的数学模型逐渐被引入、开发。1980年代初在美国麻省理工学院MITEMP程序基础上，我院范乐年、柳新之教授开发了适用于深水库、湖泊及冷却池等水域水温预报的“湖温一号”数学模型^[19]，并成功应用于大港电厂、太原第一热电厂等项目温排水计算。

伴随着电厂温排水接纳水体由湖泊向河道、海域的转移，能够更好地反映对流扩散效应以及水体表层散热效应的数学模型成为冷却水研究的迫切要求。1982年，我院朱咸教授等与北京大学联合开发了二维浅水环流水力热力数学模型^[20]，并广泛用于冷却池、湖泊、宽浅河道、近岸海域的温排水计算。其中经过不断优化、改进的分步杂交法模型^[21]应用至今，已成功地应用于岭澳核电、台山电厂等数十个火、核电厂温排水、液态流出物排放模拟计算，取得了丰硕的研究成果。

我院针对冷却水特点在湍流模型开发及应用方面也开展了大量的工作。其中，倪浩清教授提出了冷却水温差水体的湍流全场二维数学模型^[22]，并成功地应用于营口、陡河、嵩屿等电厂温排水计算工作。

在此期间，我院还开展了三维数学模型的开发与应用工作，其中在二维模型基础上引入垂向坐标变换开发的分层三维模型^[23-25]曾成功用于南京新厂等工程。

3 近十年(2008—2018)冷却水研究成果

近十年，伴随着国家电力建设的高速发展，火、核电厂与水生态环境保护的矛盾日益突出。冷却水问题研究出现了新变化，主要体现在以下4个方面：(1)电源结构调整，火电装机占比逐年下降，沿海核电建设加速发展，内陆核电规划提上议事日程。(2)取排水工程布置着眼点有所改变，确保取水与水环境安全成为冷却水研究的两个重要目标。(3)沿海核电已运行机组温排水环境影响后评估研究逐渐得到高度重视。(4)冷却水输运过程模拟更加重视准确化、精细化，模拟技术进一步改进完善。与此同时，随着国家“一带一路”发展战略的实施，冷却水研究工作也加快了走出国门的步伐。围绕新形势下冷却水专业发展的需求和挑战，“冷却水人”通过刻苦努力，取得了丰硕的研究成

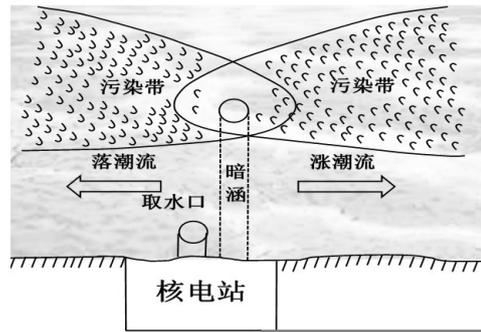


图3 差位式取排水示意图

果,其中与清华大学合作完成的“泥沙、核素、温排水耦合输移关键技术及其在沿海核电工程中应用”课题成果获得了2017年度国家科技进步二等奖。近十年取得的创新性成果总结如下。

3.1 冷却水相似理论完善及精细化模拟技术发展 2008年之后,我院冷却水专业的服务对象重点转向核电领域。近十年,我院承担了国内85%以上已建、在建及其规划中核电站的冷却水研究工作。核电建设过程中日趋严格的安全与环保标准,对冷却水模拟提出了更高的要求。

2011—2012年我院开展了“冷却水工程水力、热力模拟技术规程”的修编工作,首次将数学模型及其相应控制条件、应用原则等纳入规程^[26],极大促进了数学模型在冷却水工程中更加广泛的应用。可控温湿度实验室建成,据此开展了更加系统、可靠的温排水相似理论研究工作,提出了物理模型几何比尺、变态率等的定量选取原则,以及试验室气象条件、模型几何变率等对试验成果影响的修正原则、方法,为进一步提高物理模型模拟精度奠定了良好的基础^[27-30]。

随着计算能力与数值模拟技术的不断进步,数学模型在冷却研究中的作用日益增强。垂向平均二维数学模型在冷却水研究工作中得到大量且成功的推广应用,已经成为电厂规划阶段取排水方案初选的首选技术手段。在此基础上,我院结合工程需要对模型进行了改进,如建立了融冰水温模型,并成功应用于辽宁红沿河核电、山东石岛湾核电冬季结冰条件下的温排水输运过程模拟^[31-32];建立了潮间带热量累积效应水温模型,更好地反映了滩涂等(防城港核电、江苏田湾核电等)对厂址海域温度场的影响^[33-34]。

近年来,三维数学模型的工程应用逐年增多并已被纳入相关规程、规范,但现有工程应用的三维数模基本为分层模型,尚难以准确模拟排口近区的射流卷吸掺混及温差浮力效应。为此,我院在系统地开展对比研究工作基础上,研发了基于CORMIX模型(近区射流模型)和DELFT3D模型耦合求解的近、远区耦合模型并在实际工程中成功应用^[35],较好地解决了现有潮汐水域温排水数学模型无法准确模拟近区射流卷吸掺混效应的难题,提高了冷却水模拟预报的精度及运算效率。

随着国家对已运行核电厂温排水排放环境影响重视程度的不断提高,我院自2008年开始,陆续开展了江苏田湾核电、辽宁红沿河核电、海南昌江核电已运行机组温排水环境影响测试、评估研究工作,初步形成了核电厂温排水后评估研究的思路和方法,自主开发了能够反映水文、气象过程影响的大范围海域本底水温模拟数学模型^[36],为今后建立核电厂温排水环境影响后评估技术体系以及相关导则、规范的编制奠定了良好的基础。

我国内陆核电规划建设从2007年开始,大约经历了4年左右的快速发展期,我院承担完成了湖北咸宁核电、湖南桃花江核电、江苏盱眙核电、湖南常德核电等一系列重要核电厂址的液态流出物排放模拟研究工作。2011年日本福岛核事故之后,内陆核电发展进入停滞期,但我院的相关技术储备工作一直未停止。为了更准确地模拟内陆水域核素输运过程,我院以OpenFOAM开源程序为基础,开发了湍流、热浮力效应、泥沙沉降与再悬浮、吸附与解吸附以及自身衰变等因素作用下河道中核素输运的多场耦合三维紊流模型^[37],为今后建立科学、严谨的水资源管理与保护体系提供了技术保障。

3.2 环境友好型取排水工程 随着国家生态文明建设和生态环境保护重大战略推行实施,取排水工程布置理念也逐步调整变化。如何处理好电厂安全、经济地取排水与水资源、水生态环境之间的矛盾已成为本领域研究的重点。现阶段环境友好型取排水工程主要围绕两方面问题展开:温排水的热影响问题;冷源安全及取水卷吸效应对海生物的损伤问题。

我院结合大量的电厂取排水工程研究及工程实践经验,从确保核电安全、减少温排水环境影响原则出发,结合工程海域地形、潮流特点,进一步归纳总结并提出了远排差位式、远排分隔式及混合式取排水工程布置方法和适用条件。与此同时,系统地开展了深水区底层排放排口布置原则及其初始掺混稀释度估算方法^[38-39]。针对模块式多用途小型压水堆系统研究了温排水和核素在环境水域中的分布形态及其稀释扩散规律,提出了针对小型堆的水域稀释能力快速评估方法^[40-41],为小型堆及其类似工程厂址选择提供了科学依据。

近些年,我国滨海核电厂因漂浮物(包括海生物)堵塞取水滤网造成的机组冷源丧失、被迫停堆

事件频发,这不仅严重危及核电运行安全,而且取水卷吸效应还造成大量生物资源的损耗。我院曾在1990年承担完成了国电公司电厂取水“三防(防沙、防杂物、防污)”重点科技项目研究工作,对河道、水库等恒定流水域电厂取水防漂浮物问题有较深入的认识,但滨海核电取水防漂浮物问题因海域水动力条件的非恒定性、防护对象的多样性等更趋复杂。核电取水安全问题已经引起国家层面的高度重视,但目前相关研究尚属起步阶段,我院与工程设计单位相互配合,在全面调研分析国内外电厂取水堵塞事件基本情况的基础上,在国内率先开展了核电厂取水口自清洁浮式拦污方案基础研究工作,分类识别了核电取水堵塞的海洋生物内源因素及环境外源因素,系统地进行了明渠内部及其取水口门前缘布设拦污网的自清洁效应模拟研究,提出了利用水动力条件大幅度提高拦污网自清洁效果的方法,并给出了拦污网布设基本原则,为明渠内部拦污网工程布置设计提供了科学依据^[42]。

3.3 新型测控技术在冷却水研究中的应用 量测技术在冷却水研究中一直发挥着非常重要的作用,很大程度上影响着研究人员对物理现象的认知与把握。过去十年,冷却水专业结合自身发展需求,积极加强相关仪器设备的研发力度,推动量测新技术在研究中的应用。

为满足核电厂液态流出物模型试验浓度场示踪、检测需求,我院于2011—2013年自主研制了光电式浓度测量系统并成功应用于十余项核电厂液态流出物试验研究工作,对推动核电厂特别是内陆核电液态流出物排放环境影响研究具有重要意义,对自然水域污染物浓度场的示踪检测也具有重要参考价值。2014—2015年,我院研发了大范围、高帧频PIV-PLIF流场与浓度场同步测量系统,并成功用于排口近区污染物出流掺混、稀释特性研究。该系统对于深入研究冷却水近区紊动扩散机理和初始稀释特性具有重要的实用价值,同时在环境水力学领域大范围标量物质输运实验研究中也具有广泛的推广应用前景。

随着国家对水环境安全问题重视程度的不断提高,对核电厂温排水环境影响的监测、评估已成为投入运行核电机组考核的必备环节,而完整、准确的温排水环境影响原型观测结果是后评估的重要依据。温度场原型观测通常采用航天航空红外遥感测量与取排水工程海域走航水温实测相结合的方法。2017年我院在红沿河核电项目中首次将更具灵活、便捷、经济优势的无人机红外遥感测温技术引入大范围开阔海域温度场测量工作,并辅以海面船舶及浮标定点同步测温进行温度校正,获得了高精度的温度场原型资料。无人机在红沿河核电原型观测中的成功应用及经验积累对于后续温排水后评估项目具有重要的推广应用价值。

3.4 专业拓展及交叉学科研究的发展 火、核电站冷却水研究的核心问题涉及两个方面:其一是电厂安全、经济取水问题;其二是电厂排水(主要是温排水)对环境水体的影响。此两方面问题中主要涉及取水量与水温两个核心要素。

影响电厂取水量的主要因素中,其一是泥沙淤堵,其二是包括水生物在内的漂浮物淤堵。对于泥沙以及非生命体的漂浮物等对取水口淤堵问题可通过采取适当工程措施加以防范,但对于作为生命体的海生物爆发引起的取水口淤堵问题一直是难以有效解决的难题,且国内外均少有成功经验可以借鉴。2017年,我院完成的滨海核电厂取水安全防范及海生物保护调研成果^[43]表明:海生物爆发、聚集与水动力条件以及水质(包括水温)等密切相关。故此,防范海生物淤堵应从海生物与水动力、水质(水温)的响应关系着手进行,结合海生物保护的需求,研究推求海生物防范的措施、方法。

水温是冷却水问题研究的另一个核心要素。电厂温排水对环境水体影响主要体现在作为保护对象的海生物对水温等的水质条件的适应性,但我国现阶段尚缺乏对电厂温排水环境影响更为具体、可操作性强的标准,对于电厂温排水影响问题评估基本仍处于“一事一议”状态。故此,研究并明确海生物对水温等的适应性同样也是构建更为符合实际的温排水对环境水体影响评价标准等的重要基础。

电厂冷却水研究最根本、核心的问题在于明确海生物与环境水体水动力、水温间的响应关系。为此,近年来我院紧密跟踪国际前沿理论、技术,开展了环境水体中最基础的生物-“藻类”与水动力、水质(水温)间响应机制的探索研究^[44-45],并拟在此基础上结合藻类与高等级生物之间的“食物链”理论,进一步开展高等级海生物基本习性与环境水体水动力、水温间的关联性研究,以期最终提出

并建立“水生物因子”与水环境之间的响应模型，为电厂冷却水取水安全以及水环境保护研究、评估提供切实可行的技术支撑。

4 未来重点关注的问题及研究方向

随着我国生态文明建设的大力推进，未来的电力建设将更加注重节约资源、保护环境，实现绿色、健康发展。我院的电厂冷却水研究工作也必须与时俱进、直面问题、开拓进取，以适应国家发展需要并引领本专业的发展方向。结合过去60年的科研成果与实践经验，我院冷却水专业未来亟待解决的主要问题及其面对的研究领域如下。

4.1 冷却水基础理论的完善及模拟技术新方向 随着计算技术的飞速发展，可反映各种复杂因素影响的数学模型已成为冷却水研究工作未来的主要发展方向。为此，一是进一步完善冷却水基础理论，开发更适用于海域潮汐、波浪环境条件下的水、气热交换以及可反映潮间带热量转换关系的温排水计算模型；二是开展深水区水体底层排水扩散器出流的紊动扩散机理、稀释特性模拟研究，开发更为适宜的可兼顾反映排口近区污染物出流掺混、稀释特性以及远区输移扩散特性的高精度、自适应计算模型；三是开发可真实反映电厂运行以及水文、气象条件实时变化条件的温排水环境影响监测、预报平台，为电厂运行机组的监测、评估提供重要的技术支撑。

4.2 电厂取排水与工程海域生态安全的和谐性研究 依据国家长期发展战略要求，在电厂发展过程中取排水安全及其相关联的生态安全均属于不可或缺的重要因素，具有“一票否决”地位。为此，我院未来拟着手加快开展以下几方面工作：一是深入开展水生态与水动力、水质(水温)间的关联性研究，明确并建立我国不同海区典型海洋动、植物基本习性与环境水体水动力、水温间的关联性关系数据库。基于保护性海洋动、植物对水动力、水质(水温)基本要求，结合其他海洋环境保护等方面要求，确立我国相应海域的环境容量控制指标。二是基于海域环境容量控制指标等要求，借助遥感监测、水面实测以及海洋大数据分析手段，建立我国近海大范围温排水环境影响评估、预报平台。在此基础上，开展我国近海热环境容量模拟预报，为我国近海更为切实可行的“生态红线”确立提供基础依据。结合热环境容量、“生态红线”等控制要求，开展我国近海电厂总体规划及已运行电厂温排水环境影响总体评估工作，为我国近海新建电厂、宜退役电厂的总体规划以及生态修复规划制定等提供基础依据。三是从保障电厂冷源安全、减少海生物卷吸损伤角度出发，深入开展基于水动力特性的取水优化研究，研发海域典型致灾动、植物迁移、聚集路径预报模型，建立电厂取水安全预警预报平台。研究成果为电厂取排水设计、海洋生态环境影响评估、海洋生物保护及电厂冷源安全防控提供技术支撑。

4.3 加快成果转化研究 首先加快具有自主知识产权的冷却水相关计算软件的市场转化和推广应用。目前我院已经拥有自主开发的大范围水域环境水力学计算软件、河道多因素(水流、水温、泥沙、核素)作用的耦合三维模型、温差异重流环境中藻类游动的动力学模型以及核电厂厂区地表洪水与地下管网实时耦合模型等，并均已成功用于工程实践，后续我院将进一步从算法优化、并行计算、模块化设计、软件封装等方面对现有软件进行完善。与此同时，未来我院还将结合冷却水专业发展需求研发水动力、水环境、水生态动态耦合模拟软件，并逐渐实现自主软件商用化、产品化。其次是加快我院自主创新成果、专利技术(如：电厂排水消能消泡技术以及取水拦漂网技术等)的成果转化工作。

参 考 文 献：

- [1] 陈惠泉, 岳钧堂, 覃宗善, 等. 火力发电厂水工工艺学习班讲义: 冷却设备与水面冷却[R]. 北京: 水利水电科学研究院, 1978.
- [2] 陈惠泉. 冷却池水流运动的模型相似性问题[J]. 水利学报, 1964(4): 14-26.

- [3] 陈惠泉,许玉林.水流运动相似的临界流量[R].北京:水利水电科学研究院,1960.
- [4] 许玉林.杨柳青电厂冷却水试验研究报告[R].北京:水利水电科学研究院,1962.
- [5] 陈惠泉.太原冷却池原体观测及模型印证[R].北京:水利水电科学研究院,1959.
- [6] 陈惠泉,岳钧堂.沧县冷却池研究[M]//水利水电科学研究院论文集.第3集.北京:水利出版社,1963.
- [7] 陈惠泉,岳钧堂,陈艳茹.中国的电厂排取水口规划特色及其水力热力特性[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [8] 许玉林,仇隹.军粮城电厂河道冷却模型试验终结报告[R].北京:水利水电科学研究院,1967.
- [9] 陈惠泉.良山门电厂冷却水降温工程规划设计及效果验证[R].北京:水利水电科学研究院,1968.
- [10] 岳钧堂.差位式理论及工程应用[J].水利学报,1993(12):10-17.
- [11] 岳钧堂,陆跃辉,林佑金.大亚湾核电站排、取水口布置的试验研究[R].北京:水利水电科学研究院,1984.
- [12] 陈惠泉.考虑风吹影响的冷却水模型相似性问题[R].北京:水利水电科学研究院,1983.
- [13] 陈惠泉.考虑冰冻效应的冷却水模型相似性问题[R].北京:水利水电科学研究院,1983.
- [14] 柳新之.水力热力数学模型的研究(热影响研究的综合分析报告)[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [15] 水电部科学研究所水利室.冷却水学习班讲义浅水型冷却池的水力热力计算[R].北京:水电部科学研究所水利室,1974.
- [16] 赵永明,慕京.一种热扩散的简易估算方法[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [17] 朱咸,刘兰芬.温差射流积分模型及其在冷却水排取水口近区计算的应用[M]//水利水电科学研究院科学论文集.第33集.北京:水利电力出版社,1990.
- [18] 朱咸.辽宁核电站可行性研究阶段排水口近区的数学模型计算报告[R].北京:水利水电科学研究院,1985.
- [19] 柳新之,范乐年.《湖温一号》深水库、湖泊与冷却池水温预报通用程序的程序说明及使用手册[R].北京:水利水电科学研究院,1984.
- [20] 朱咸,吴江航,刘兰芬.浅水型冷却池中环流和温度分布瞬间数学模型的有限元分析[M]//水利水电科学研究院论文集.第17集.北京:水利电力出版社,1983.
- [21] 吴江航,陈凯麒,韩庆书.核电站冷却水远区热、核污染数值计算的一种新方法[R].北京:水利水电科学研究院,北京大学,1985.
- [22] 倪浩清.湍流模型在浮力回流中的应用及其发展[R].北京:水利水电科学研究院,1989.
- [23] 陈凯麒.温排水、污染物排放水域中的三维多层数值模拟(热影响系列研究报告之五)[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [24] 李振海,李平衡,吴江航.电厂温排水接纳水域水力热力特性的三维数学模型(热影响系列研究报告之九)[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [25] 赵振国,文建刚.温排水、冷却池三维异重流计算(热影响系列研究报告之七)[R].北京:水利水电科学研究院,1991.
- [26] 纪平,袁珏,赵顺安,等.冷却水工程水力、热力模拟技术规程:SL 160-2012[S].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [27] 纪平,赵懿珺.大型先进压水堆核电站国家科技重大专项CAP1400安全审评关键技术研究温排水的物理影响范围模拟研究成果报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2015.
- [28] 周静.模型几何变态对温排水输移扩散影响研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.
- [29] 蔡瑜春,纪平,陈小莉.温排水变态模型的水平扩散相似问题[J].水利学报,2016,47(11):1456-1464.
- [30] 段亚飞,赵懿珺,纪平,等.温排水水槽试验与平面二维、准三维及三维数值模拟的比较[J].水力发电学报,2017,36(9):100-110.
- [31] 袁珏.辽宁红沿河核电厂一期工程冬季温排水数模计算报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2008.
- [32] 袁珏,段亚飞.石岛湾核电厂址海工工程(南取水)取水防冰数值模拟计算成果报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [33] 赵懿珺.广西防城港核电厂温排水数值模拟计算成果报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2010.
- [34] 袁珏.田湾核电站5、6号机组温排水及液态流出物数值模拟计算报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2014.

- [35] 陈小莉, 张海文, 赵懿珺. 滨海核电厂深水温排放近远区动态耦合模拟[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 497-506.
- [36] 陈小莉, 纪平, 赵懿珺. 辽宁红沿河核电厂周边海域温度场原型观测及数模计算综合分析报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [37] 纪平, 曾利. 复杂三维水流的模拟理论及新方法-多重因素下放射性核素在河道中的输运模拟研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [38] 纪平, 秦晓, 曾利. 核电厂排水深层排放试验研究成果报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012.
- [39] 赵懿珺. 潮流环境下垂直浮射流实验研究与三维数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [40] 纪平, 张海文. 模块式多用途小型压水堆厂址适应性研究内陆厂址水力弥散(温排水)模拟研究成果报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [41] 纪平, 张海文. 模块式多用途小型压水堆厂址适应性研究内陆厂址水力弥散(液态放射性流出物排放)模拟研究成果报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [42] 纪平, 赵懿珺, 韩瑞, 等. 核电厂取水口自清洁浮式拦污方案物模试验研究成果报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [43] 韩瑞. 滨海核电厂取水安全防范及海生物保护工作调研报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [44] ZHAO Y J, ZENG L, ZHANG A L, et al. Response of current, temperature, and algae growth to thermal discharge in tidal environment[J]. Ecological Modeling, 2015(318): 283-292.
- [45] CHEN X, ZENG L, WU Y H, et al. Swimming characteristics of gyrotactic microorganisms in low-Reynolds-number flow: Chlamydomonas reinhardtii [J]. Energ. Ecol. Environ., 2017, 2(5): 289-295.

Review and prospect of study on cooling water of thermal/nuclear power plants

JI Ping, ZHAO Yijun, YUAN Jue

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: This paper gives a comprehensive review of the development history of the research on cooling water of thermal and nuclear power plants in China in the past 60 years, and summarizes the innovative ideas and important achievements in the specialty of cooling water at different stages. In combination with the change of industry demand, the innovative achievements and practical experience in the past 10 years are mainly elaborated in the following four aspects: (1) improvement of the similarity theory of cooling water and fine simulation technology; (2) environmentally friendly intake-outfall projects; (3) applications of new measurement and control techniques in the cooling water study; (4) specialty expansion and interdisciplinary development. Combined with the current development trend of China's thermal and nuclear power, and the increasingly strict requirements for the protection of water ecological environment, the future development direction and the corresponding countermeasures in this field are prospected in the paper.

Keywords: cooling water; similarity theory; numerical simulation technology; intake-outfall project; water ecology protection

(责任编辑: 李福田)