

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.03.021

# 滨海火、核电厂温排放数值模拟研究进展

张长宽<sup>1,2</sup>,姚 静<sup>1,2</sup>,陶建峰<sup>1,2</sup>

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098 ;  
2.河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** 回顾近年来国内外滨海火、核电厂温排放数值模拟研究的进展,着重讨论现有温排放数值计算模型的发展以及存在的问题,主要包括温排放系统模式的选取和模型边界控制等。认为三维数值模型在一定程度上代表温排放数值模拟的发展方向,并应考虑斜压效应,且将水动力场与物质扩散场耦合求解。

**关键词** 水环境 温排放 热污染 数值模拟

**中图分类号** :TK124      **文献标识码** :A      **文章编号** :1006-7647(2010)03-0084-05

*Advances in numerical simulation of thermal discharge of heat or nuclear power plants in coastal areas//ZHANG Chang-kuan<sup>1,2</sup>, YAO Jing<sup>1,2</sup>, TAO Jian-feng<sup>1,2</sup> (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)*

**Abstract** : The advances in numerical simulation of thermal discharge of worldwide heat or nuclear power plants in coastal areas in recent years were reviewed. The development situations and some basic issues of the existing numerical models for the thermal discharge were highlighted, mainly including selection of turbulent modes of the thermal discharge and control of model boundaries. A conclusion is drawn that 3D numerical models are regarded to represent the development tendency of those for the thermal discharge to a certain extent. The oblique pressure effects should be considered. The hydrodynamic fields and the diffusion fields of matters should be coupled for the solution.

**Key words** : water environment ; thermal discharge ; thermal pollution ; numerical simulation

随着国民经济的发展,我国的火、核电力建设发展迅速。根据工艺流程的要求,火、核电厂必须连续不断大量供应机组冷却水,同时向环境水体(湖泊、水库、河流、海洋等天然水域)排放等量的超温热水,即温排放,超温热水称之为温排水<sup>[1]</sup>。温排水排入受纳水体后,经过掺混和扩散,使得一定范围内的受纳水体水温高于自然水温 2 ~ 14 ℃,改变了原有水体的物理、化学性质以及生态环境,使水生生态系统平衡失调,水生生物的生存受到威胁,水产资源受到破坏。另一方面,就火、核电厂自身而言,从天然水体中抽取的冷却水温度直接关系到机组的效率,炎热季节冷却水温度每升高 2 ℃,机组效率降低 1%,当水温超过一定限度时,还会形成水循环短路,影响发电机组的安全。因此,对火、核电厂温排水在受纳水域中的时空分布规律进行深入了解非常必要,进行温排水扩散研究不仅具有重要的学术价值,而且

对防止受纳水体热污染、生态环境保护、海洋环境预测以及电厂选址和方案比选等都具有重要的实际意义。

影响滨海火、核电厂温排水时空分布的因素包括 温排水流量、流速、初始温度以及排放口附近海域动力条件等。为方便起见,根据温排水的物理特性和运动机理,人们从环境水力学角度将受纳水域分为近区和远区。温排水排放口附近,受出流初始动量的影响,温排水与环境水体之间发生卷吸和剧烈掺混,同时受浮力作用,温排水上浮。一般把受紊动及浮力双重控制的区域称为近区。近区之外,随着温排水沿程扩散和向大气散热,初始动量和浮力衰减殆尽,以对流、扩散作用为主,不受动量、浮力影响,此区域称为远区。在滨海水域,水下地形变化剧烈,水体流动主要表现为非恒定性、非均匀性、斜压性及其三维特征,其运动尺度在时空上相差甚大,决

定了水动力特征的区域异常可变性和随机性。电厂温排水使近岸天然水体中增加了温度变量以及由温差引起的浮力、传质、传热等各种效应。由于有广阔的受纳条件,滨海电厂温排水多采用深取浅排的直接排放方式,深层高盐冷却水经过电厂机组后,高温高盐温排水直接排放到海洋表层,并与周围较冷海水混合,呈现出复杂的温差密度分层和紊流流动特性。温差引起的浮力效应、天然水体的复杂动力条件以及密度层结效应成为影响温排水排放口近区流场的重要因素,这也使得滨海水域温排水运动规律变得更为复杂。因此,适用于水动力条件相对简单的受纳水体近、远区划分概念已不再适用于滨海水域。为叙述方便,下文中将温排水排放口附近温升影响水域统称为温排水排放口近区。

温排水以及由此引起的水质、生态环境变化研究已成为世界各国海洋环境学家十分关注的重要课题。国内外海洋环境学家们从 20 世纪 70 年代开始就有关电厂温排水对附近海域的影响进行调查和研究。1984 年联合国海洋污染专家组 (GESAMP) [2] 对世界各国科学家前十几年在该领域取得的研究成果进行总结。王丽霞等 [3-4] 从确定温排水与环境水温的变化关系出发,详细分析了多种影响海洋水温变化的因素,并对近年来热扩散预测方法的研究现状做了回顾。蒋爽等 [5] 给出了近年来海水热扩散研究进展的主要文献目录。20 世纪中后期,电厂温排水研究大多以数学模型解析解 [6-9] 和物理模型试验 [10] 为主。随着电子计算机技术和数值计算方法的发展,数值模型计算已成为电厂温排水研究的重要手段。但因为温排放力学机理的复杂性以及滨海动力条件的复杂性,滨海温排放数值模型仍处在发展过程中,笔者主要针对滨海火、核电厂温排放数值模型的发展进行回顾和评述。

## 1 温排放数值模型

描述温排水运动一般规律的理论为时均化的 N-S 方程和温度输移扩散方程,其控制方程有 2 种,即二维模型方程和三维模型方程。电厂温排水数值模拟研究起始于 20 世纪 70 年代中期,数值模型具有投资小、周期短且不存在物理模型中模型相似问题等优越性。多年来人们系统地开展了温排水输移扩散的数学模型研究,提出了多种较为实用、有效的理论模型和计算方法。但针对自然条件复杂的滨海水域,其模式选取、模型边界控制等问题一直成为能否精确反映温排水排放口近区温升分布规律的关键。

### 1.1 紊流模式的选取

紊流模式能诠释很多水动力现象,诸如射流、异重流、浮力流和回流等。当电厂温排水的受纳水域为水库、湖泊、直流河段等天然水域时,环境水体的动力条件单一,温排水主要受其初始动量和浮力控制,在排放口附近形成紊流状态。随着动量和浮力沿程衰减殆尽,温排水随环境水体运移。在滨海水域,远离排放口不受温排水初始动量影响的水流仍表现为复杂的紊流状态。因此,紊流模式的正确选取对数值模拟精度相当重要。模拟温排水运动的紊流模式主要有  $k-\epsilon$  双方程模式、雷诺应力方程模式 (DSM) 和代数应力模式 (ASM)。

#### 1.1.1 $k-\epsilon$ 双方程模式

$k-\epsilon$  双方程模式采用紊流动能  $k$  和能量耗散率  $\epsilon$  双方程对时均化的 N-S 方程进行封闭模拟,多年来已得到广泛应用。McGuirk 等 [11] 较早用深度平均的  $k-\epsilon$  双方程模式模拟温水侧排问题,成功模拟了温排水在明渠中的流场和温升场,并能较好地处理回流区,而后又发展了三维模式 [12],用来模拟静水中的温排水。阳昌陆等 [13] 根据  $k-\epsilon$  模型建立完全三维计算,超越了传统的准三维近似,成功地预测了重叠式取排水口的三维湍流流动。

在工程实践中,温差引起的浮力作用不可忽视,浮力有助于形成稳定的分层,对紊动有抑制和削弱作用,运用紊流模式时应考虑浮力影响。由于浮力使紊流导热减少的程度比使紊流黏性减少的程度更甚,Rodi [14] 分别在  $k$  和  $\epsilon$  方程中添加浮力源项以修正  $k-\epsilon$  方程,对紊流 Prandtl 数采用 Munk-Anderson 公式 [15] 进行进一步的修正。倪浩清等 [16] 在动量方程和  $k$  方程及  $\epsilon$  方程中均引入浮力项,同时假设温跃层中热交换系数与速度和温度的垂向梯度有关,提出了一个半经验公式对紊流 Prandtl 数加以修正,建立了浮力修正的  $k-\epsilon$  模式,成功模拟了温差异重流的温跃层现象以及突扩湍浮力回流问题,但经多次检验计算, $\epsilon$  方程中计及密度项的作用并不明显。

浮力修正使得标准  $k-\epsilon$  模式无法反映浮力作用这一问题得以解决,但针对参数的修正关系式往往具有一定的经验性,缺乏通用性,对某些各向异性的紊动特性依然无能为力。

#### 1.1.2 雷诺应力方程模式

雷诺应力方程模式从各向异性的前提出发,直接封闭求解雷诺应力的输运方程,计算应力分量。Pathak 等 [17] 分别用雷诺应力方程模式和标准的  $k-\epsilon$  模式模拟垂直于横向来流的热射流,结果表明雷诺应力方程模式的模拟效果要优于  $k-\epsilon$  模式的模拟效果。范丽丽等 [18] 采用考虑浮力的雷诺应力紊流模

式对不同长宽比的排放口进行三维模拟,得到扩散宽度和排放口的长宽比相关关系。从实际应用角度来讲,雷诺应力方程模式虽然精度高,但十分复杂,计算量过于庞大,在工程实践中难以普及。

### 1.1.3 代数应力模式

代数应力模式是雷诺应力方程模式的一种简化,保留了紊流各向异性的特征,但计算量比雷诺应力方程模式大幅度减少,而精度比  $k-\epsilon$  模式高,结合了前者的通用性和后者的经济性。倪浩清等<sup>[19]</sup>基于 Rodi<sup>[14]</sup>提出的代数应力模式,通过简化,将部分源项人为地置入到扩散项中进行计算,建立了简化的紊流代数应力模式,较好地反映了温排水各向异性的特性。江春波等<sup>[20]</sup>基于代数应力模式,改进了求解流场的变量分割解法和求解对流扩散方程的流线迎风有限元格式,模拟了明渠中的二次流及温跃层。金海生等<sup>[21]</sup>用一个简化的应力代数模式,成功地模拟了同时存在温度和盐度梯度的密度分层流动,并用水槽试验结果进行验证,结果吻合良好。虽然代数应力模式仍然存在收敛速度受限<sup>[22]</sup>的问题,但能够较好地反映密度跃层这类各向异性的紊流流动现象,特别是在分层流的流速、密度梯度不大时,可给出精确的结果。因此,代数应力模式是当前较为实用的模式。

### 1.2 时均模型的选取

如前所述,描述温排水运动一般规律的数值模型有二维模型和三维模型。在宽浅型水域,水体分层不明显,二维模型基本上能够反映出水流的水平运动规律和温升分布,已在许多工程实际问题中取得一定效果<sup>[23-24]</sup>。河海大学<sup>[23]</sup>在大亚湾核电站的远区模拟中,为同时反映大洋潮波控制下的近区水力特性,首次通过嵌套耦合技术从大水域推算到局部水域。

温排水与受纳水体的掺混及传热过程是一个三维过程。在温排水排放口附近水域,温差引起的浮力效应是影响温排水排放口近区流场和温升场的重要因素,滨海水域复杂的海底地形、潮汐动力条件以及明显的盐度层结效应亦使得水域的温排水在环境水体中的扩散过程异常复杂,二维模型难以反映出水流和温排水的时空分布规律。要了解温排水垂向水流特性和温度分布,必须进行三维模拟。黄平<sup>[25]</sup>建立了汕头港三维温排放对流扩散模型,用特征差分法求解,并用水槽试验结果进行验证。王丽霞等<sup>[26]</sup>根据一阶湍流封闭理论建立了三维热扩散预测模型,模型中引入了计算网格无法分辨的次网格能量密度,将均匀流体的湍黏性与局部能量联系起来,使湍流黏性系数的模拟较一般扩散模型更加精确。

因此,三维数值模型在一定程度上代表了温排放数值模拟的发展方向。

现有的滨海三维温排放数值模型中,控制方程大多采用 Blumberg 等<sup>[27]</sup>提出的基于静水压强假定和 Boussinesq 假定的三维水流动力学和热力学原始方程组。模型将动力学和热力学方程组耦合求解,并考虑海水密度变化所引起的斜压项。实际工程应用中,人们在对流场及温升场进行模拟时,大多先模拟水动力场,然后在水动力场模拟的基础上模拟温升场,并且忽略由密度差异引起的密度梯度和斜压效应,即正压模型。这对水库、湖泊等水动力场相对较弱、密度均匀的环境水体来说,其计算精度是可以接受的。但是,淡盐水交汇的滨海水域,水动力场非常复杂,盐度在水平方向和垂向上的分布不均匀,使得环境水体产生斜压效应,而温排水和环境水体的温差亦会产生密度分层。研究表明,0.4% 盐度差的等温海水所具有的密度差,大体上相当于 10℃ 温差的等盐度海水所产生的密度差。由此可知,盐度差引起的密度差大幅度超过温差引起的密度差。因而,对于深取浅排的电厂取、排水口布置方案而言,温排水的垂向分布状态受盐度的垂向梯度影响很大,导致温排水不一定只存在于水体上层,也有可能在水体下层<sup>[28]</sup>。因此,在三维温排水模型中,考虑斜压效应尤为重要,且需要将水动力场和物质扩散场耦合求解。

在实际应用中,三维温排水模型的许多计算参数的选取都与垂向坐标系的选取直接相关。目前国内三维模型主要采用等平面( $z$ )坐标和地形拟合( $\sigma$ )坐标,如国际上较为流行的 TRIM3D, POM, EFDC, DELFT-3D, FVCOM 等。近年来,国内已有多家科研单位引进了这些模型和商业软件进行温排水数值模拟研究,取得了一些成果<sup>[29-32]</sup>。但这些模型并不能很好地适用于地形变化剧烈、密度分层明显的水域。陶建峰等<sup>[33]</sup>对三维水流数值模型中的多种垂向坐标模式进行了评述,同时指出, $\sigma$  坐标系下的三维模型在处理水平斜压梯度力时会引入较大计算误差,容易引起局部流态的失真。针对这一问题,陶建峰等<sup>[34]</sup>在垂向引入双  $\sigma$  坐标变换,对地形拟合坐标系下的水平斜压梯度力的计算误差改进进行了尝试。

### 1.3 模型边界的处理

温排放数值模型的边界处理主要分为控制边界处理和自由面散热边界处理 2 种。

#### 1.3.1 控制边界处理

控制边界主要涉及 2 个方面,一是远区模型的外边界控制,二是近区、远区模型的耦合边界。近

区、远区模型在运用上简单方便,但忽视了两区之间的相互作用,近区模型往往忽略了远区回流的影响,而远区模型也无法精确反映排放口近区的特性。因此耦合模型和全场模型应运而生。

耦合模型是指在近区、远区采用不同的模型,通过一定的方法将两者连接、耦合。早期耦合模型往往在近区采用射流或浮射流积分模型,远区则采用浅水环流对流扩散模型。Kaufman 等<sup>[35]</sup>建立的耦合模型在近区采用 S-H 模型,远区采用二维有限元数学模型 CAFE 和 DISPER,但网格尺寸和时间步长都较小,比较耗机时,成本较高。Adams 等<sup>[36]</sup>在其基础上用潮汐海湾分析模型 TEA 代替 CAFE 模型计算二维水流,用欧拉-拉格朗日分析模型 ELA 代替 DISPER 模型计算温度场,成功地用于 2 座电厂的温排放模拟。近区、远区模型在范围划定上存在一定的困难,如何衔接也具有一定的难度,因而衔接方法的选取就变得十分关键。Zhang 等<sup>[37]</sup>针对近、远区衔接方法做了很好地阐述。Zhang<sup>[38]</sup>用粒子追踪法耦合近区 RSB 模型和远区 ECOMSI 模型,将粒子密度转化为浓度,并考虑两区之间的相互作用。Suh<sup>[39]</sup>用高斯 puff 算法耦合近区 CORMIX 模型和远区 TEA 模型以及 ELA 模型。Maderich 等<sup>[40]</sup>用 DESA 法在近区拉格朗日积分模型 JETLAG 和远区 THREETOX 模型之间建立双向水动力连接。纪平等<sup>[41]</sup>采用湍射流模型计算近、远区交界上的速度值,同时将其作为远区二维浅水环流模型的边界进行耦合计算。

全场模型避免了分区模型带来的划分及衔接问题,使流场和温升场的预测结果更为合理。20 世纪 90 年代初,倪浩清等<sup>[42-43]</sup>通过引入考虑速度、温度垂向分布不均匀性的流散系数,建立深度平均的  $k-\epsilon$  紊流全场模式,不仅模拟了大水域冷却池,而且对室内冷却池的模拟效果也较好。梁书秀等<sup>[44-45]</sup>提出了深度平均的代数应力全场模式,假设流体不可压缩,且不考虑浮力、表面风应力及柯氏力作用,对明渠和潮汐水域的侧排问题进行模拟,与深度平均的  $k-\epsilon$  紊流模式的计算结果对比,该模式优势显著。Yu 等<sup>[46]</sup>建立了深度平均的  $\tilde{k}-\tilde{w}$  模式,用 3 个温排放算例进行检验,并与深度平均的  $k-\epsilon$  紊流模式比较,结果表明当排放口尺寸相对较小或排放速度相对较小时,前者要优于后者。

### 1.3.2 自由面散热边界处理

温排水排入到滨海水域后,通过近区掺混稀释、远区对流扩散,其废热直接进入到天然海水中,通过水温升高的自由水面蒸发、对流和辐射 3 种机制散失于大气中。因此,水面散热系数的选取直接关系

到水面散热能力和环境水体受热容量的计算精度。

水面散热机制十分复杂,陈惠泉等<sup>[47]</sup>、毛世民等<sup>[48]</sup>根据气象可控专用风洞系统试验研究成果和全国各地代表性水域(以湖泊和水库为主)现场实测数据,通过分析气温、水面风速、水温及水汽温差等各因子对水面蒸发系数的相关关系,提出了充分考虑温差效应的全国通用水面蒸发散热系数公式,统一了自由、强迫对流的散热机理,已推荐成为《电力工程水文技术规程》及《工业循环水冷却设计规范》等规范公式。国外学者将水体表面热通量考虑为短波辐射、长波辐射、感热通量和潜热通量之和,并给出了相应的计算公式<sup>[49]</sup>。目前大多数温排放研究工作中,水面蒸发散热系数通常采用规范公式计算甚至用常数代替,这对于湖泊、水库等水域的温排放数值模拟,其计算精度是可以接受的,但对于河口海岸水域,其海洋性气候条件与湖泊、水库等的气候条件差异较大,水面上时有波浪发生,波浪条件下的散热问题变得十分复杂,在此条件下规范公式的通用性存在不少值得推敲之处,需接受实测资料的进一步检验。

## 2 结 语

迄今为止,温排放数值模型的研究为海洋水环境的实用性研究提供了许多宝贵的经验和方法,但温排水三维数值模拟方法研究仍处于探索阶段,滨海电厂温排水的扩散规律已引起国内外学者的极大重视。滨海水域岸线曲折,海底地形变化剧烈,水动力条件复杂且密度层结效应明显,加之温排水与环境水域温差引起的斜压效应,使得温排水排放口近区的局部流态和温升分布变得非常复杂。我国滨海火、核电厂建设发展迅速,针对现有温排放数值模式的不足,尝试建立滨海水域温度、盐度大梯度水体高精度三维斜压温排水数值模型,探求更加符合实际的紊流模型和有效的计算方法,也许是今后的研究方向。但由于需要同时考虑海水斜压效应和温差引起的斜压效应,其理论推导和数值算法实现也较湖泊、水库、河流等温排放模型更为复杂。因此三维温排放数值模式的发展将是一个十分漫长的过程。

## 参考文献:

- [1] 金岚. 水域热影响概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [2] GESAMP. Thermal discharges in the marine environment [R]. Roma: UHEP Regional Seas Reports and Studies, 1984: 1-44.
- [3] 王丽霞, 孙英兰, 田晖. 热扩散预测方法研究概况. 影响

- 海洋水温的因素[J]. 海洋科学, 1997, 5: 24-25.
- [4] 王丽霞, 孙英兰, 田晖. 热扩散预测方法研究概况. 热扩散的研究现状[J]. 海洋科学, 1997, 6: 16-17.
- [5] 蒋爽, 端木琳, 王树刚. 海水热扩散研究进展与新问题分析[J]. 能源环境保护, 2006, 20(5): 5-9.
- [6] 张书农, 孔佩文. 温差重流运行长度的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1987, 15(2): 1-11.
- [7] 蒋春风. 感潮河段电厂温排水热影响范围的特征分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1990, 18(6): 114-121.
- [8] JIRKA G H, DONEKER R L, HINTON S W. User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters [M]. Washington D. C.: U.S. EPA, 2006.
- [9] STOLZENBACH K D, HARLEMAN D R F. An analytical and experimental investigation of surface discharges of heated water [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [10] 陈惠泉, 许玉麟, 贺益英. 火、核电厂冷却水试验研究 50 年的进展和体验[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(4): 288-298.
- [11] McGUIRK J J, RODI W. A depth-averaged mathematical model for the near field of the side discharge into open-channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 86(4): 761-781.
- [12] McGUIRK J J, RODI W. Mathematical modeling of three-dimensional heated surface jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 95(4): 609-633.
- [13] 阳昌陆, 倪浩清. 完全三维湍流数值模拟及其在冷却水工程中的应用[J]. 水利学报, 1993(5): 12-22.
- [14] RODI W. Turbulent model for environmental problem [C]// Prediction Methods for Turbulent Flows. Von Karman: Hemisphere Publishing Cooperation, 1980: 260-349.
- [15] MUNK W H, ANDERSON E R. Notes on a theory of the thermocline [J]. Journal of Marine Research, 1948, 7: 276-295.
- [16] 倪浩清, 贺益英, 王能家, 等. 明渠温差重流中湍浮力回流的数学模型[J]. 中国科学: A 辑, 1987, 2(4): 437-448.
- [17] PATHAK M, DEWAN A, DASS A K. Computational prediction of a slightly heated turbulent rectangular jet discharged into a narrow channel crossflow using two different turbulence models [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 3914-3928.
- [18] 范丽丽, 沙海飞, 杨海燕, 等. 热污水表面侧排的近区特性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 151-155.
- [19] 倪浩清, 王能家, 周力行. 应力代数模型在各向异性湍浮力回流的应用[J]. 力学学报, 1989, 21(1): 26-34.
- [20] 江春波, 许协庆. 各向异性湍浮力流的三维有限元计算[J]. 水利学报, 1991(7): 8-18.
- [21] 金海生, 张书农. 同时存在温度和盐度的分层流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1991, 6(4): 72-78.
- [22] 张云, 杨永全, 吴持恭. 混合  $k-\epsilon$  模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1992, 7(增刊): 571-576.
- [23] 河海大学. 大亚湾核电站排放的废热水对远区的影响 [R]. 南京: 河海大学, 1988.
- [24] 中国水利水电科学研究院水力学所. 泰山核电站冷却水排放数学模型研究 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1990.
- [25] 黄平. 汕头港水域温排水热扩散的三维数值模拟[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 59-65.
- [26] 王丽霞, 孙英兰, 郑连远. 三维热扩散预测模型[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(1): 29-35.
- [27] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in three-dimensional coastal ocean models [C]// HEAPS N. Coastal and Estuarine Sciences. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1987: 1-16.
- [28] 李瑞生, 刘长贵. 盐淡水交汇水域电厂温排水及航道取水的试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 11(6): 661-671.
- [29] 汪一航, 魏泽勋, 王永刚, 等. 潮汐潮流三维数值模拟在庄河电厂温排水问题中的应用[J]. 海洋通报, 2006, 25(1): 8-15.
- [30] 周巧菊. 大亚湾海域温排水三维数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2007(4): 37-46.
- [31] 朱军政. 强潮海湾温排水三维数值模拟[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 56-60.
- [32] 曹颖, 朱军政. 基于 FVCOM 模式的温排水三维数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(4): 432-439.
- [33] 陶建峰, 张长宽. 河口海岸三维水流数值模型中几种垂向坐标模式研究述评[J]. 海洋工程, 2007, 25(1): 133-142.
- [34] 陶建峰, 张长宽. 河口海岸三维双  $\sigma$  坐标斜压水流数值模型研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(1): 71-76.
- [35] KAUFMAN J T, ADAMS E E. Coupled near and far field thermal plume analysis using finite element techniques [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory, 1981.
- [36] ADAMS E E, COSLER D J. Predicting circulation and dispersion near coastal power plants: applications using models TEA and ELA [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory, 1987.
- [37] ZHANG Xue-yong, ADAMS E E. Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(3): 233-241.
- [38] ZHANG Xue-yong. Ocean outfall modeling-interfacing near and far field models with particle tracking method [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995.

(下转第 94 页)

- [42] CONTRAFATTO L, CUOMO M. A framework of elastic-plastic damaging model for concrete under multiaxial stress states[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(12): 2272-2300.
- [43] LIGNON S, JÉZÉQUEL L. A robust approach for seismic damage assessment [J]. Computers and Structures, 2007, 85(1/2): 4-14.
- [44] SIMA J F, ROCA P, MOLINS C. Cyclic constitutive model for concrete [J]. Engineering Structures, 2008, 30(3): 695-706.
- [45] HÄUBLER-COMBE U, KITZIG M. Modeling of concrete behavior under high strain rates with inertially retarded damage [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(9): 1106-1115.
- [46] EIBL J, SCHMIDT-HURTIGNE B. Strain-rate-sensitive constitutive law for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(12): 1411-1420.

(收稿日期 2009-05-22 编辑 高建群)

(上接第 61 页)

# 参考文献：

- [1] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 477-596.
- [2] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [3] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- [4] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究 [J]. 水利学报, 2003, 34(1): 21-27.
- [5] GRIFFITH D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite element [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [6] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫明, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [8] 赵尚毅. 用有限元强度折减法及其在土坡与岩坡中的应用 [D]. 重庆: 后勤工程学院, 2004.
- [9] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552-3558.
- [10] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626-628.
- [11] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 406-411.
- [12] 栾茂田, 武亚军, 年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用 [J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1-8.
- [13] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- [14] 周桂云, 李同春. 饱和-非饱和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析 [J]. 水电能源科学, 2006, 24(5): 79-82.
- [15] 姚纬明, 李同春, 任旭华, 等. 带软弱结构面的弹塑性有限元分析 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 34-38.
- [16] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论 [J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345-1348.
- [17] 李同春, 卢智灵, 姚纬明, 等. 边坡抗滑稳定安全系数的有限元迭代解法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 446-450.
- [18] 张丹. 边坡稳定及抗滑桩内力分析方法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.

(收稿日期 2009-07-17 编辑 高建群)

(上接第 88 页)

- [39] SUH S W. A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 43(7/8/9/10/11/12): 225-233.
- [40] MADERICH V, HELING R, BEZHENAR R, et al. Development and application of 3D numerical model THREEOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters [J]. Hydrological Processes, 2008, 22: 1000-1013.
- [41] 纪平, 秦晓, 袁珏, 等. 冷却池近区湍射流与远区环流耦合计算模型 [J]. 水利水电技术, 2006, 37(9): 23-26.
- [42] 倪浩清, 龙中林, 周力行. 深度平均的紊流全场水环境新模型及其在大水域冷却池中的应用 [J]. 水利学报, 1991(9): 7-13.
- [43] 倪浩清, 沈永明, 陈惠泉. 深度平均的  $k-\epsilon$  紊流全场模型及其验证 [J]. 水利学报, 1994(11): 8-17.
- [44] 梁书秀, 沈永明, 孙昭晨. 深度平均的应力-通量代数全场模型及其验证 [J]. 海洋环境科学, 1999, 18(3): 33-38.
- [45] 梁书秀, 沈永明, 孙昭晨. 潮汐水域中污水侧向排放的数值模拟 [J]. 海洋学报, 2000, 22(2): 113-119.
- [46] YU Li-ren, RIGHETTO A M. Depth-averaged turbulence  $k-\bar{w}$  model and applications [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(5): 375-394.
- [47] 陈惠泉, 毛世民. 水面蒸发系数全国通用公式的验证 [J]. 水科学进展, 1995, 6(2): 116-120.
- [48] 毛世民, 陈惠泉. 超温水体蒸发系数通用公式的研究与应用 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 85-89.
- [49] SIMPSON J J, DICKEY T D. Alternative parameterizations of downward irradiance and their dynamical significance [J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(6): 876-882.

(收稿日期 2009-10-21 编辑 骆超)