

开河期冰坝预测方法研究进展

茅泽育¹, 许 昕¹, 王爱民¹, 张 磊¹, 岳光溪²

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要 对国际上现有各种冰坝预测模型进行分析比较, 并讨论了各自的优缺点。认为现有的大多数模型是针对某一特定河段建立的, 没有一种模型具有明显优势, 各种模型的预测结果均具有较大取伪误差, 模型中参数选择具有任意性。提出了进一步的研究方向: 为了减小预测误差, 应增加模型中的变量, 并采用统计方法如逐步回归法确定模型变量; 为了评价预报结果的可靠性, 应对预测误差(包括取伪误差和弃真误差)进行定量分析; 对冰坝形成及溃决的机理应进行深入研究。

关键词 河冰水力学; 开河冰坝; 冰坝预测; 预测模型; 综述

中图分类号 : P338⁺.5 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2007)03-0076-05

Advances in prediction methods for breakup ice-jams // MAO Ze-yu¹, XU Xin¹, WANG Ai-min¹, ZHANG Lei¹, YUE Guang-xi² (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : The existing breakup ice-jam prediction methods and their potential advantages and disadvantages were briefly reviewed. It is pointed out that most of the models used were developed for specific river reaches, none of them showing evident advantages, and that the predicted results by each model are of high false-positive error induced by arbitrary selection of model variables. Thus it is suggested that statistics methods, such as stepwise regression, should be adopted to determine the model variables and more variables should be included so as to decrease the prediction error, and that the prediction errors, including the false-positive error and false-negative error, should be quantitatively analyzed for evaluation of the reliability of the predicted results. Moreover, the mechanism of ice-jam formation and breakup should be emphasized in further study.

Key words : river-ice hydraulics; breakup ice-jam; ice-jam prediction; prediction model; review

河道解冻(或开河)是指封冻河道中冰盖消融破裂,自上而下流动的现象^[1-4]。当冰盖尚未充分解体,由于水力因素突变,冰层被迫鼓开,这种以水力因素为主的开河称为武开河。其特点是流量骤增,水位变化迅猛,流冰量大而集中,冰质坚硬。如果大量冰块在特定河段如河道束窄处、浅滩、急弯或连续弯道、多分叉河段、尚未解冻冰盖前缘等冰块宣泄障碍物附近发生堆积,则将形成冰坝。冰坝的形成会严重降低河道过流能力,引起的河道水位上涨远大于同流量下的明流水位,而且水位上涨急剧,类似于山洪暴发。与冰坝预测相比,对封河冰塞的预测相对容易。一旦封河冰塞形成,水面将迅速冻结,冰塞体向上游推进发展,其推进速度与上游来冰量及冰塞前沿的水力条件等有关。文献[5]根据 AFDD (accumulated freezing degree-days)和初冬严寒天气持续时间的历史资料及河道的几何特征等资料,对

Hannibal 和 Montgomery 河道上的冰塞推进发展进行了预测。文献[6]根据冰塞形成的机理及水动力学和热力学原理,建立了冬季河道冰塞形成及演变的冰-水耦合的综合动态数学及数值模型,并应用黄河河曲段原型观测资料进行了验证。

理想的冰坝预测模型应该对冰坝发生的可能性以及其导致的洪水行为给予定量描述。但是,冰坝形成受到水文、水动力和气象等众多因素的影响,远比开河复杂,至今对其认识了解甚少。事实上,冰坝的形成机制非常复杂,至今尚难以采用室内物理模型试验或数学模型描述,是今后河冰问题研究中的一个攻坚课题^[7]。由于缺乏建立在力学机制基础上的数学模型,建立普遍适用的开河冰坝预测模型比较困难。本文针对国内外特别是国际上现有的各种冰坝预测模型进行分析比较,并讨论它们各自的优缺点。

基金项目: 国家自然科学基金(50579030)

作者简介: 茅泽育(1962—),男,浙江绍兴人,副教授,博士,从事水力学研究。E-mail: imaozeyu@tsinghua.edu.cn

1 冰盖断裂破碎与冰坝形成

对河道开河过程中冰盖机械断裂破碎机理的初步研究表明^[4-9],冰盖形成后,水位的变化首先导致冰盖在岸边附近产生纵向裂缝,破坏冰盖与岸壁的冻结,并最终消除岸壁对冰盖移动的抑制作用。随着横向裂缝的出现,完整连续冰盖体最终断裂成尺寸较大的冰块。随着流量的进一步增加,冰块开始运动。当河段的冰流量超过河道的输冰能力时,冰块将集聚并逐渐形成冰坝。有许多因素导致河道输冰能力的减小,其中一个主要原因是下游河段存在强度较大的冰层或尚未解冻的固结冰盖。文献[2]根据结构力学、弹性力学及断裂力学的基本原理,提出了顺直河段边壁阻力的开河判别准则,并应用黄河河曲段的原型观测资料进行了验证;通过对弯曲河段冰盖的受力分析,提出了天然河道冰盖产生横向裂缝以至发生武开河的判别准则,并应用黄河昭君坟河段的原型观测资料进行了验证。

随着冰坝体的形成和释放,河道可能出现间歇性的开河现象。至今,对冰坝体的形成或释放过程,以及流冰块动态运动的研究成果较少,其主要原因是冰坝体释放和碎冰块在下游冰层中的推进机理仍不很清楚。由于涉及影响因素较多,关于武开河机理的研究成果很不系统,亟待进一步完善。

2 根据开河日期预测冰坝发生

20 世纪 80 年代,国际上关于河流开河日期的预报多采用相应的公式计算气温变化,然后结合河道地形等边界条件,分别以流量大小、气温高低和冰盖厚度进行预测。90 年代以后,更多的是采用高新技术如“3S”技术对河流冰情演变过程进行跟踪监测,结合中长期气候预报模型和热力、水力方程进行河流冰情演变中长期预报,其中一个很重要的内容是冰盖体厚度的热力消融计算,而这往往需要进行水流、冰层热平衡计算,涉及到众多气象、热传导及水温方面的资料。实际应用时多采用经验方法,即采用热力因素(如气温)与水力因素(如流量)进行相关分析,建立经验公式进行预报^[1]。

一般来说,晚冬期由于融雪导致开河和形成冰坝的大型河道,通常根据河道开河日期的预测结果预测冰坝的发生。例如,在 Alaska 的 Yukon 河道冰盖解体及随后冰坝形成通常发生在每年五六月份。Fountain^[10]通过对 Yukon 河上游河段和下游河段的开河观测资料的分析总结,发现不同年份河流开河模式有很大不同,但通常由东(上游河段)开始向西(下游河段)推进,并提出渐进开河、间歇性交错开河

及静态开河 3 种开河模式。对于交错开河和静态开河,在开河向下游显著推进前,有可能在河道几处不同位置同时发生开河现象。White^[11]对上述开河日期观测资料与 CRREL 实验室冰塞数据库中的有关资料进行了比较分析,发现除推进过程中有所差别,渐进式开河和交错式开河的发生日期,两者的统计特征值没有明显差别。应用这些开河观测资料,White 研制了冰坝发生的预报矩阵,用于对 Yukon 河有可能发生冰坝的河段的冰情进行局部或全面预测,但并没有对预测结果进行风险或不确定性分析,也没有给出置信区间。

若冰坝形成位置与晚冬融雪径流、冰盖断裂破碎基本一致,则冰坝预测主要取决于对冰盖初始破裂的时间和随后发展情况的预测。但是,有些河道的冰盖破裂可能发生在稳封期的任意时刻,如冰盖形成不久遭遇仲冬暖潮期就发生破裂。显然,对于这些情形,以及对冰盖开裂偶尔形成冰坝的情形进行预测相当困难。开河日期预测可以为实施冰害减灾措施提供应急时间,但是,至今各种开河预报方法通常具有不同程度的经验性。在研究开河预报模型时,除了应进一步研究开河机理及冰体破碎机理,还应将春季径流作为一个重要的影响因素加以考虑。

3 冰坝预测

如前所述,由于至今尚无描述冰盖断裂破碎、输运、堵塞等冰坝演变过程的分析模型,使得难以建立普遍的、以力学机制为基础的,并能方便地移用于其他河段或地点的冰坝预测数学模型。现有为数不多的冰坝预测模型大都是针对某一特定位置的经验型模型或随机型模型,预测模型中的参数选择具有任意性,随地点不同参数可能有很大不同。对于不常发生冰坝的河段,由于缺乏历史观测资料,进一步增加了建立冰坝预测模型的难度。另一方面,形成冰坝的规模及壅水高度受多种因素的影响,具有偶然性。关于冰坝壅水高度的计算,由于问题复杂,目前还没有较为成熟的计算方法,现在常用的是简单的经验方法。一般常考虑的相关因子有:上游站开河最高水位(或开河期水位涨差)、上游河道槽蓄水量、冰期降水(雪)量、开河前夕降水量、开河期气温、开河前冰盖强度、开河期流量等,可以单因素相关,也可多因素相关。

现有的预测模型大致可分为经验型预测模型、统计模型及人工智能模型 3 类。

3.1 经验型预测模型

经验型预测模型是根据对物理现象的观测结果,借助某一变量的临界值进行判别预测。这种类

型的预测模型常称为阈值模型,可分为单变量阈值模型、多变量阈值模型、加权多变量阈值模型。

3.1.1 单变量阈值模型

阈值(或临界值)常通过对相关水文参数历史观测资料的分析评估而得到,也可以通过对历史记录资料回归分析得到。最近有些学者^[4]指出某些参量如流量还存在一个附加上临界值,超过这一附加上临界值则不可能形成稳定冰坝。Shuliakovskif^[12]通过对俄罗斯 Yenesei 河下游 Krasnoyarsk 河段冰坝观测资料的分析,提出了单变量阈值模型,当 $H_f > T_u$ ($T_u = 300$ cm) 时发生冰坝,当 $H_f < T_l$ ($T_l = 185$ cm) 时不发生冰坝,其中 T_u 为上临界值, T_l 为下临界值, H_f 为稳封期最高水位。同时还给出了阈值间发生冰坝的概率分布。对于实际应用而言,这一类型的简单阈值模型较为理想,因为它定量给出了发生冰坝的可能性,且模型中所含参量易于量测或预测。但是,该模型未能对预测误差进行定量分析,需要进一步应用统计方法对模型预测结果的不确定性和风险进行分析。

3.1.2 多变量阈值模型

实际工程中,仅采用一个变量往往很难判别冰坝是否发生或形成。因此,一些研究者提出了多变量阈值模型^[13-15]。一般来说,建立多变量阈值模型的主要困难在于在针对某一特定地点的观测资料进行统计分析时,对应于冰坝是否发生和不发生,观测资料的统计特征值没有明显差别。即使其中一个或数个变量的观测数据的统计特征值存在明显差别,也很难区分这些变量如何组合才可用于判别冰坝是否发生。例如,文献[13]对位于 Nebraska 的 North Bend 河段的观测资料分析表明,对应于发生冰坝和不发生冰坝的年份,许多重要物理变量的统计特征值没有明显差别。又如文献[14]分析位于 Pennsylvania 的 Oil City 河段的观测资料时发现,对应于发生冰坝和不发生冰坝的年份,尽管 AFDD 值和河道流量的统计特征值存在明显差别,但据此很难判别是否发生冰坝。另一方面,现有的多重变量阈值模型其预测结果常常出现较大的取伪误差率,因为这些模型的出发点是减小预测结果的弃真误差。与取伪误差相比,弃真误差将导致预警时间的减少及更为严重事件的发生。为了减小预测结果的弃真误差而调整阈值,通常将导致取伪误差的增大。

尽管至今成功的阈值模型很少,但研究者们仍致力于研究并完善这些简单模型。为了改进阈值模型的预测性能,模型中还引入一些指数或参数。例如, Galbraith^[16]针对 Saint John 河道 New Brunswick 河段的冰坝,根据冰的物理特性及开河期冰块运动特

性,提出了一个复杂阈值预测模型。该模型中包含了 3 个反映冰层强度的指数:开河期 ATDD (accumulated thawing degree-days) 达到 50 的天数、热交换通量、融雪指数达到 90 mm 的总天数。但是,计算这些物理量非常耗时,且其计算精度取决于所涉及的大量气象及水文物理量的准确量测。另一方面, Galbraith 的预测模型同样也仅适用于某一特定河段。如果将其应用于其他河流,首先需要确定河道的开河日期。

对于某些河流,冰盖出现纵向裂缝和横向裂缝标志着河流的开河;对于另一些河流, AFDD 达到峰值可视为开河期的到来。但是,对于许多其他河流,冰块发生运动和堵塞与冰盖出现裂缝的间隔时间很短,因此,河流开河日期与冰坝形成两者在时间上很接近,使得冰坝的发生几乎没有任何征兆。在计算热交换通量和融雪指数时所涉及的众多变量,往往难以获得其观测资料,即使能够获得也往往在流域范围内有很大幅度变化。这种类型的预测模型或预测方法也许较为适用于可以获得详细气象资料的小型河道或气象条件变化不大的河道。

3.1.3 加权多变量阈值模型

为了克服上述模型所存在的不足,人们开始研究加权多变量阈值模型。如 Wuebben 等^[17]针对 Missouri 河位于 North Dakota 附近的 Williston 河段的冰情,综合考虑了水位、流量和气象等因素的影响,研究了加权多变量阈值预测模型。模型所含变量都和开河时的水位、冰厚及冰盖强度有关。根据对历史观测资料的分析研究,每个变量赋予不同的主观加权系数。该模型在后报模式的验证中,识别出发生于 1952 ~ 1991 年的 6 个冰坝事件及 2 个没有报道但实际发生的冰坝事件。如果模型所含变量值容易确定,并且预测结果可靠,则这一类阈值模型也许对于预测当地开河冰坝是最合适的。但是,和其他阈值模型一样,作者也没有对这一模型的预测结果进行误差分析。

3.2 统计模型

为了解决经验型模型中变量选取任意及冰坝发生的预测概率过高等缺点,有些研究者建议采用统计方法进行预测^[18]。应用统计方法可以对变量选取提供一个合理框架,有助于避免变量选取的任意性。如采用逐步回归法,可以剔除对因变量影响较小的自变量,使回归方程较为简洁,便于应用。至今,已有一些建立在统计理论基础上的冰坝预测模型或方法,如以多元线性回归、逻辑回归、判别函数分析等为基础预测模型。

3.2.1 线性回归模型

影响冰坝的各因素间存在一定关系,可分为确定性和非确定性两种。线性回归模型是对非确定性关系进行定量描述的一种数学模型,常用于对连续变量线性组合后所得的结果变量(连续变量)进行预测。Zhukova^[19]针对位于 Eastern Siberia 的 Baikal-Amur 流域上冰坝影响河段的水位预测,提出一种线性回归模型。经过分析,发现冰坝发生的主要影响因素有封冻期冰塞的形成、开河期冰块的厚度和强度。由于获取这些变量的实测资料较为困难,而估计这些变量又存在较大的不确定性,因此,Zhukova 将回归模型改为基于水位和流量的长期观测资料,采用当地低流量条件下多年平均水位作为参照水位值,选择冰情导致的水位增值和冰坝形成过程中流量增加导致的水位增值作为模型变量。根据发生在不同地点而情况相似的冰坝的大量观测资料,Zhukova 建立了以无量纲形式表示的多年平均相关关系,可用于该特定河段冰坝发生时水位变化范围的估计。

3.2.2 逻辑回归模型

当因变量是一个分类变量时,线性回归模型就不适用。有时人们对冰坝的预测更愿意将连续量度转换为类型划分,即“是”与“否”,只要选定一个分界点,连续变量便可以转换为二分类变量。分析二分类变量时,通常采用的统计模型是对数线性模型。当对数线性模型中的一个二分类变量被当作因变量并定义为一系列自变量的函数时,对数线性模型就变成了逻辑回归模型^[20]。逻辑回归模型具有以下几个优点:给出的是对生预测结果,比采用多元变量线性回归得到的连续预测结果好;估计的概率不会大于1或小于0;模型中既可有分类自变量,也可有连续自变量;与线性回归完全不同,逻辑回归模型中结果变量与自变量之间的关系为非线性关系,逻辑函数为S形曲线,这种非线性函数的形式有助于解决线性概率模型所不能解决的问题;不存在线性回归模型中的残差项。

White^[18]针对 Platte 河道上 North Bend 河段的冰坝,建立了逻辑回归预测模型。她采用逐步回归法,从众多的水文和气象变量中,确定具有重要统计特征的变量为最大 AFDD 的出现日期和最高水位。以36%的概率作为冰坝发生与不发生的分界点,模型对冰坝发生的可能性预测过高,其弃真误差率约为4%,取伪误差率约为27%。出现较高取伪误差率的部分原因可能是某些冰坝事件没有报道。如果对开河的实际情况进行进一步调查分析,则有可能降低预测结果的取伪误差率。也有可能是模型所含变量的取值精度不高导致预测结果的不确定性。

显然,对于该河段逻辑回归模型未能很好地预测冰坝发生时间,但应用逐步回归法选择变量的方法值得借鉴。其他河段冰坝预测有可能出现其他更为重要的影响因素或变量。另外,还应该进一步研究序次逻辑回归模型和由多项分类自变量构成的逻辑回归模型等。据笔者所知,至今尚未有其他逻辑回归模型应用于冰坝预测的实例。

3.2.3 判别函数分析模型

判别函数分析法为应用性很强的一种多元统计方法,应用于冰坝预测有助于确定判别冰坝发生的水文和气象等变量的组合方式。Zachrisson^[20]根据 Tornealven 河道上沿芬兰-瑞典边境河段的气象和水文资料的分析,选取开河前连续5d的流量变化 ΔQ_5 、气温指数 T_i (ATDD达到40的总天数)、总降水量 P_w 和4月份降水量 P_a 作为反映冰强度的最佳变量组合。期望得到冰坝发生风险较低、中度、较高3种预测结果。两个判别函数 X 和 Y 的表达式分别为 $X = 0.01(-527.2 - 0.54\Delta Q_5 + 9.33T_i + 2.93P_w - 5.98P_a)$ 及 $Y = 0.01(129.34 - 0.35\Delta Q_5 - 9.02T_i + 1.09P_w + 4.20P_a)$,采用直线划分判别法得到3个不相交的区域,用于确定新样本(观测值)的归类。该模型在1989年的试用中,取得了较好的预测结果;1990年该模型预测冰坝发生的概率较低,结果当年发生了冰坝,笔者认为造成这一不符的主要原因是模型中缺少有关冰的变量。研究结果表明,预测模型所含变量须全面、合理、正确,且易于量测或估计。

文献[14]应用判别函数分析法对 Oil City 河段上的冰坝进行了预测,研究结果表明,从预测结果的弃真误差率和取伪误差率的角度考虑,预测模型中必须包含河道水流流量变化及水温变化的变量。预测结果的取伪误差率由40%减至8%,但弃真误差率从2%增加到6%。作者进一步给出了预测误差的置信区间,从而提高了模型的实用性。

采用判别函数分析法的关键是正确确定在冰坝演变过程中具有重要影响的模型变量。最合适的方法是结合应用经验方法和统计方法,对观测结果进行分析研究。往往为了减小预测结果的取伪误差,但同时增加了弃真误差,使得预测结果更加严谨但准确性降低。为了提高预测模型的实用性,应进一步研究确定预测误差的置信区间,这样可根据主观判断及其他相关知识对预测误差进行估计分析。另外,还应对其他判别方法加以研究,如以曲线划分的判别法(包括以马氏距离为尺度导致的曲线判别法和一般多项式曲线划分的判别法)和费歇判别法等。

3.3 人工智能模型

近年来,计算方法和设备的发展促使冰情预测

的人工智能方法的研究与发展。人工智能技术如遗传算法、神经网络、决策树,以及模糊逻辑等,能再现复杂非线性系统中输入和输出变量之间的关系。人工神经网络作为智能方法的一种,具有信息的自学习能力、环境的自适应性、网络之间的非线性映射能力、信息处理的容错性和鲁棒性,在许多领域的非线性过程研究中具有独特的优势。冰坝的形成与发展极为复杂且是一个非线性过程,国际上已进行了这方面的尝试研究。

Massie 等^[21]针对 Oil City 河段的冰情(已存在阈值模型和误差函数分析预测模型),采用相同的观测资料(1933~2000 年的历史观测资料)构造了没有递归的多层前馈型神经网络。神经网络识别出冰坝事件发生的准确度为 94.1%,冰坝事件不发生的准确度为 92.6%。表 1 给出了各种模型预测结果精度的比较。显然,与经验方法和统计方法相比,神经网络方法在对该河段冰情预测的精度最高。进一步的工作是研究这种方法的普遍性或易移用性,即易于移用到其他河段的预测。同时,进一步完善其存储、并行协同处理及自适应等功能。

表 1 各种预测模型的精度比较

模 型	弃真误差率/%	取伪误差率/%
经验型模型	11.8	40.0
统计型模型	8.3	15.6
误差函数分析模型	6.0	8.0
神经网络模型	5.9	7.4

4 结 语

至今,为数不多的冰坝预测模型(包括经验型、统计型以及人工智能型等)仅适合于某一特定河段,并且预测结果具有较大的取伪误差,导致人们对预测结果产生怀疑。统计型模型预测结果的取伪误差率比经验型模型低,但其预测结果的取伪误差率仍很难接受。某些统计型模型采用逐步回归法确定模型变量,相对于经验型模型存在的变量选取任意性是一改进,在应用经验型预测方法时应加以采用。为了改进现有的各种预测模型,应增加模型所含变量,这些变量应是易于通过测量、估计或预测得到的,从而增强预测模型的实用性。人工神经网络系统具有较好的应用前景,但仍有待于进一步验证及完善。任何一种预测方法,应该对预测结果的误差风险采用某种方法加以量化,从而可对预测结果的弃真误差和取伪误差进行判别。

开河期的冰情受到周围气象、水文、水动力学等条件的影响。对这一问题的进一步研究,需要应用各种研究方法和手段,如野外现场观测、室内物理模型

试验、数值计算和理论分析等。应注重收集较为广泛、典型、完整的现场冰情观测资料。与此同时,还应该对冰盖断裂破碎机理及冰坝体溃决等进行深入研究。既要注重研究成果在工程实际中的应用可行性,也要对所涉及的每个物理现象进行基础性研究,并注重基础研究工作与工程实际相结合。需要说明的是,有些研究成果特别是国内的,没有包括在内。

参考文献:

[1] 茅泽育,吴剑疆,余云童.河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J].水力发电学报,2002(1):153-161.

[2] 王永填.河冰数值模拟及河渠冬季输水冰情特性研究[D].北京:清华大学,1999.

[3] 吴剑疆.河道中冰情形成演变机理分析及冰塞和水内冰数值模拟研究[D].北京:清华大学,2002.

[4] 张磊.江河春节开河机理及冰坝形成和演变研究[D].北京:清华大学,2004.

[5] JAIN S C, ETTEMA R, PARK I. Flow regulation for controlled river-ice formation[R]. Iowa: Iowa Institute of Hydraulic Research, 1993.

[6] 茅泽育,吴剑疆,张磊,等.天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J].水科学进展,2003,14(6):700-705.

[7] 李桂芬.国际冰研究与工程专业委员会及冰工程学术讨论会简介[J].冰川冻土,2003,25(S2):207-209.

[8] BELTAOS S. Fracture and breakup of river ice cover[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1990, 17(2):173-183.

[9] DALY S F. Fracture of river ice cover by river waves[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1995, 9(1):41-52.

[10] FOUNTAIN A G. Yukon River breakup: the 82-year record [J]. The Northern Engineer, 1984, 16: 20-24.

[11] WHITE K D. Forecasting systematic ice jam occurrence along the Yukon River[C]//Proceedings of the 10th Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers. Winnipeg: Canadian Geophysical Union, 1999: 30-43.

[12] SHULIAKOVSKII L G. Manual of forecasting ice-formation for rivers and inland lakes[R]. Jerusalem, Israel: Israel Program of Scientific Translations, 1966.

[13] WHITE K D, KAY R L. Ice jam flooding and mitigation: lower Platte River Basin[R]. Hanover: Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1996.

[14] WHITE K D, DALY S F. Predicting ice jams with discriminant function analysis[C]// Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2002: 23-26.

[15] TUTHILL A M, WUEBBEN J L, DALY S F, et al. Probability distributions for peak stage on rivers affected by ice jam[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(1): 37-57.

(下转第 94 页)

杭 J]. 合肥工业大学学报, 1998, 21(1): 65-70.

[37] 张明, 麦家煊, 吴清高. 随机边界元法及其在水工结构可靠度分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2002, 17(1): 46-53.

[38] 周建方, 李典庆, 李朝晖, 等. 水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 310-313.

[39] 莫慧峰. 水工钢闸门可靠度分析[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 30-32.

[40] 张兰, 邢广彦. 水工结构可靠度的置信区间研究[J]. 水利科技与经济, 2003, 9(3): 198-200.

[41] 李宗利, 王正中. 水工钢闸门可靠度分析有关问题探讨[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 63-65.

[42] 吴熊飞, 沈海尧. 大坝安全定期检查时的结构可靠度分析[J]. 大坝与安全, 1994, 2(1): 19-24.

[43] 王仲刚, 邓洪洲. 桅杆的非线性随机研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 153-157.

[44] 饶群, 芮孝芳. 完全混合系统总磷随机模型研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 21-25.

[45] 张芹芬, 索丽生, 郭文铸. 简单管水击随机分析再探[J]. 水力发电学报, 2000(2): 56-63.

[46] 朱永忠, 房玉亭, 索丽生. 调压室涌波最高水位随机分析的显式计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 650-653.

[47] 朱永忠. 水电站水击和调压室涌浪的随机数学模型及其求解[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[48] 周伟, 杨志鸿, 陈怀, 等. 随机微分方程的数值解[J]. 广西工学院学报, 1996, 7(4): 5-9.

[49] PETER E. K., ECKHARD P. Numerical solution of stochastic differential equation[J]. Application of Mathematics, 1984, 23: 181-187.

[50] 刘小清, 吴声昌. 随机微分方程计算方法及其应用[J]. 计算物理, 2002, 19(1): 1-7.

[51] 周功业, 王建. 一种求解非线性随机微分方程的算法及其实现[J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(2): 153-155.

[52] KLOEDEN P. E., PLATEN E. Numerical solution of stochastic differential equations[M]. New York: Springer-Verlag, 1992. 298-310.

[53] KLOEDEN P. E., PLATEN E. Numerical solution of stochastic differential equation[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

[54] KLOEDEN P. E., PLATEN E., SCHURZ H. Numerical solution of stochastic differential equations[M]. Berlin: Spring-Verlag, 1992.

[55] MILSTEIN G. N. Numerical integration of stochastic differential equation[M]. Revised Translation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.

[56] GAINES J. G., LYONS T. J. Random generation of stochastic area integral[J]. SIAM J Appl Math, 1994, 54: 1132-1146.

[57] SUSSMANN J. Product expansion of exponential lie series and the discretization of stochastic differential equations[C]// FLENNING W., LIONS P. L. Stochastic Differential System, Stochastic Control Theory and Application. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 563-582.

[58] GAINES J. G. The algebra of iterated stochastic integral[J]. Stochastics and Stochastics Reports, 1994, 49: 169-179.

[59] NEWTON N. J. Asymptotically efficient runge-kutta methods for a class of Itô and stratonovic equations[J]. SIAM J Appl Math, 1991, 51: 542-567.

[60] PROTTER P., TALAY D. The euler scheme for lévy driven stochastic differential equations[J]. Annals of Probability, 1997, 25: 393-423.

[61] LAMBERTON D. Introduction to stochastic calculus applied to finance[M]. London: Chapman Hall, 1996.

[62] TIAN Tian-hai, BURRAGE K. Implicit taylor methods for stiff stochastic differential equations[J]. Applied Numerical Mathematics, 2001, 38(3): 167-185.

(收稿日期: 2006-05-15 编辑: 骆超)

(上接第 80 页)

[16] GALBRAITH P. W. On estimating the likelihood of ice jams in the Saint John River using meteorological variables[C]// Proceedings of the 5th Canadian Hydrotechnical Conference. Fredericton: Canadian Society for Civil Engineering, 1981. 219-237.

[17] WUEBBEN J. L., GAGNON J. J., DECK D. S. Ice jamming near the confluence of the Missouri and Yellowstone Rivers: characterization and mitigation[R]. Hanover: U S Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1995.

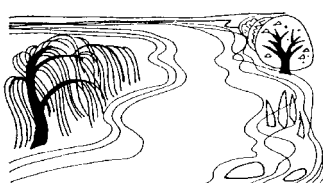
[18] WHITE K. D. Predicting breakup ice jams using logistic regression[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, (10): 178-189.

[19] ZHUKOVA M. A. Formation of ice jams and their distribution[J]. Soviet Hydrology, 1979, 18: 7-13.

[20] ZACHRISSON G. Severe break-ups in the River Torneälven: measures to mitigate damages from ice jamming[C]// Proceedings of the International Association for Hydraulic Research Ice Symposium. Espoo: IAHR, 1990. 845-857.

[21] MASSIE D. D., WHITE K. D., DALY S. F. Predicting ice jams using neural networks[C]// Proceedings of the 11th Workshop on River Ice. Ottawa: Canadian Geophysical Union, 2001. 209-216.

(收稿日期: 2006-09-18 编辑: 骆超)



· 94 ·

水利水电科技进展, 2007, 27(3)

Tel: 025-83786335

E-mail: jz@hhu.edu.cn

http://hkb.hhu.edu.cn