

自激脉冲射流技术研究与应用进展

李君^{1,2}, 高传昌²

(1. 西安理工大学, 西安 710048; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450011)

摘要: 射流泵因具有结构简单、成本较低等一系列优点而被广泛应用于水利和航天等领域,但传质和传能效率较低的问题一直制约其快速发展和进一步应用。不过近些年来的大量试验研究表明,自激脉冲射流技术产生的脉冲射流具有更大的冲击力,并可明显提高射流泵的效率。在分析大量文献的基础上,介绍了脉冲射流产生的方法和他源式脉冲射流研究进展,重点阐述了自激脉冲射流的研究与应用进展、存在的主要问题和下一步的研究方向。最后,针对目前我国水库清淤的现状和存在的问题,分析了将自激脉冲射流技术和人工异重流相结合,进行射流清淤等工程实践应用之前的研究工作重点。

关键词: 射流泵;效率;冲击力;脉冲射流;自激振荡;射流清淤;人工异重流

中图分类号: TV 136.2; TP69 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0187-05

Research and Application Progress of Self excited Pulsed Jet Technology

LI Jun^{1,2}, GAO Chuang²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Due to the advantages of simple structure and low cost, jet pump is widely used in the fields of water conservancy and aerospace. However, the problems of low efficiency in mass and energy transfer hinder its the rapid development and further application of jet pump. A large number of experimental studies in recent years showed that the efficiency of jet pump can be strengthened with the application of self excited pulsed jet because it can generate the pulsing jet with higher impact force. In this paper, the generation method of pulsed jet and the research progress of external excited pulsed jet were introduced, and the research and application progress, main problems, and further research interests of self excited pulsed jet were discussed. Furthermore, in view of the current situations and problems of reservoir dredging in China, the self excited pulsed jet technology can be combined with artificial density flow to carry out the engineering practice of cleaning by pulsed jet.

Key words: Jet pump; Efficiency; Impact force; Pulsed jet; Self excited oscillation; Jet dredging; Artificial density flow

射流泵^[1]是利用射流紊动扩散作用来传递能量、质量的流体机械和混合反应设备,已发展成为高新技术产业,且形成了一门新的学科——喷射技术^[2]。由于射流泵内两股不同压力的流体混合时产生较大的能量损失,因此射流泵的效率要低于叶片类型泵的效率^[3]。射流泵整体效率不高的问题一直制约着它的广泛应用,如何提高其传能与传质效率,一直以来都是国内外研究人员所关注的课题。20世纪70年代以来,国内外研究人员主要通过两种途径来提高射流泵的效率:一是研制新型结构的射流泵,试验表明可以明显提高其效率,但结构复杂、工艺要求较高,并且制造和安装也比较复杂,所以发展比较缓慢;二是在射流泵装置上增加脉冲发

生装置,采用非恒定射流来提高其传能与传质效率,比如“脉冲射流”、“振荡射流”等,研究人员对脉冲射流进行了大量的试验研究,结果表明采用脉冲射流比恒定射流的传能及传质效率提高了20%~30%,所以采用脉冲射流是提高射流泵效率的一种有效途径。

1 脉冲射流概述

产生脉冲射流的方法多种多样,从动力源来看有他源式和自激式。他源式脉冲射流的类型有挤压式、冲击式和阻断式。纯挤压式依靠活塞的往复运动形成水的间断脉冲喷射;冲击挤压式依靠气体的膨胀作用来实现脉冲射流;冲击聚能

收稿日期: 2013-03-28 修回日期: 2013-05-13 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1309.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(90410019); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201085); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A570003)

作者简介: 李君(1979-),男,河南商丘人,讲师,博士,主要从事水利水电工程的教学与科研工作。E-mail: unijun@126.com

式利用高速运动的柱塞冲击喷嘴中的静止水团来产生脉冲射流,通常又称为自由柱塞冲击水炮或冲击增压器;阻断式利用射流间断器将连续射流隔断成非连续射流段,它简便易行,但能量损失大、装置磨损快、噪声大。

自激脉冲射流是一种新型的高效脉冲射流,是综合运用流体力学、流体弹性学、流体共振及水声学等原理发展起来的,不需外加激励源,仅靠流体本身在特殊结构中产生的自激振荡,将连续水射流转变成振荡脉冲水射流。自激脉冲射流装置是在射流泵的基础上发展而来的,是一种特殊的射流泵^[4],自激脉冲射流技术成为近来国内外学者研究的世界前沿性新课题。廖振方根据边界层理论和涡旋理论,提出了自激振荡脉冲射流的高压小直径的波涡作用机理理论。李江云提出了用一种非常空化模型来模拟自激振荡腔内流动的“空气弹簧”机理理论。自激脉冲射流能产生连续大结构的涡流环,脉冲喷嘴射流的瞬时冲击压力峰值比柱形喷嘴高出 47.5%,瞬时冲击压力脉动差值比柱形喷嘴高出 220%^[5]。可见,自激脉冲射流对物体的冲击力远远大于连续射流的滞止压力,并使冲击力分布在更宽的表面上,大大增强了射流的冲蚀性能。

2 他源式脉冲射流的研究进展

自詹姆斯·汤姆森 1852 年发明射流泵以来,人们对射流泵技术的研究已有 100 多年的历史。以陆宏圻为首的科研人员建立的“液—液、液—固、液—气、液—液”等多相射流泵理论新体系,以及出版的专著《射流泵技术的理论与应用》和《喷射技术理论及应用》,标志着国内恒定射流理论迈入了世界先进行列。

脉冲射流的研究最早始于 1858 年,Le Conte 发现气灯火苗会随着大提琴的音调不断有节奏的跳动。但直到 20 世纪 70 年代初,能源危机才使人们对脉冲射流产生了浓厚的兴趣。S. C. Crow^[6]发现脉冲射流的卷吸率比恒定流提高了 32%,这立刻受到了各国学者的高度重视,也正式揭开了脉冲射流研究的序幕。K. Bremhorst^[7]指出,正是由于脉冲射流的流场分布不同于恒定流,才导致射流的卷吸率和混合率有了较大的提高。在国内,陆宏圻从 1986 年就开始脉冲式离心射流真空泵的研制工作;龙新平的研究表明脉冲液体射流泵效率明显高于恒定流射流泵;汪志明的研究表明脉冲射流可提高石油钻机的效率达 30% 左右^[8];在长达 10 余年的时间里,高传昌和他的研究生对脉冲液体射流泵的装置性能进行了大量的理论和试验研究,取得了丰硕的成果,进一步验证了脉冲液体确实可以提高射流泵的性能。2009 年,高传昌综合多年的研究成果出版了专著《脉冲液体射流泵技术理论与试验》。

液气射流泵是通过液体射流对气体进行抽吸和压缩的^[1]。在国外,Huffer 首先提出了液气射流泵的概念;Ramming en 首先发现了喉管内液气的快速混合和压力突然升高现象;美籍学者 Jiao 博士建立了液—液气射流泵的数学模型。在国内,陆宏圻推导了液—液两相流体射流泵的基本方程,并通过试验对理论结果进行了验证;廖定佳通过试验研究了液气射流泵的特性;王玉川对脉冲液气射流泵的基本性能进行了相关的理论和试验研究;黄细彬的研究表明通过控制吸

气量形成的空蚀流可提高水射流的切割效率;龙新平^[9]发现不同空化阶段在喉管任何位置补气,均可以降低射流泵的空化噪声和振动,且随补气量的增加,空化噪声和轴向振动加速度降低的程度也越明显。

3 自激振荡脉冲射流的研究与应用进展

振荡腔内部的流动是人们尚未完全掌握规律的液气两相湍流,因此试验就成了目前研究自激振荡脉冲射流的主要手段。

3.1 理论研究

自激振荡脉冲射流最早由 Conn 和 Johnson 提出,同时 Johnson 还探讨了流道结构参数、流体参数等对自激振荡的影响。根据流体诱发自激振荡的原因,Rockwell^[10]将流体的自激振荡分为流体动力学激励、流体共振激励和流体弹性激励三类,实际上它们往往是一起发生的。唐川林提出了利用流体的自激振荡产生射流的理论,并分析了泵源脉动对自激振荡脉冲射流振荡特性的影响,表明当来流脉动频率小于或等于喷嘴装置的固有频率时,能提高射流的振荡、冲蚀效果。张炎应用瞬变流理论得到了自激振荡脉冲喷嘴腔室中波动压强的计算方法,并与廖振方利用经典流体力学理论的保角变换法得到的精确解基本符合。廖振方认为扰动的产生、放大和反馈这一过程的不断重复,还有剪切层分离迹线与腔室内壁所围空气团的脉动,是引起自激振荡的必要条件,腔室几何参数和碰撞壁形状在自激振荡中起重要作用。李晓红建立了自激振荡脉冲射流装置的相似网络模型,提出了应使喷嘴装置的固有频率接近来流脉动主频的自激振荡脉冲喷嘴设计准则。杨林认为自激振荡喷嘴的频率特性是非线性的,结构参数对固有频率特性影响很大。蒋海军在水电比拟的基础上建立了自激振荡脉冲射流的数学模型,并采用现代自组织的有关理论分析了脉冲射流的形成机理。曲延鹏对自激振荡脉冲射流发生的物理过程进行了分析,解释了低压大流量自激脉冲射流的发生机理。范晓红对淹没条件下射流的速度场和压力场进行了数值分析,以探究自激脉冲射流的发生机理。

可见,对自激脉冲射流产生的机理理论,学者们采用了不同的研究方法,虽没有建立统一的理论体系,但其理论的统一奠定了坚实的基础,也为开展不同的试验研究提供了重要的技术支持。人们的共识是振荡腔的结构是自激振荡脉冲射流产生的决定性因素,当来流脉冲频率和振荡腔的固有频率接近时振荡效果最好,因此如何从理论上找到其结构参数与自激脉冲射流之间的最优关系是下一步的研究重心。另外,应加大和有效利用数值模拟的研究成果,以用于支持理论研究的发展。

3.2 试验研究

在理论验证方面,汝大军探讨了自激振荡腔的固有频率特性与相关参数之间的关系,并通过试验进行了初步验证。王乐勤通过对上喷嘴直径分别为 8 mm 和 10 mm 的低压大流量自激振荡系统的试验研究,得到了其结构参数的最佳配比关系,而王嘉松则通过试验发现腔长对自激振荡脉冲射流装置的频率影响是最明显的。

在射流破岩方面,易灿^[11]对淹没条件下锥形喷嘴射流破岩效率进行了试验研究,表明射流破岩存在两个最优喷距,且第2个最优喷距破碎岩石体积较大,锥形喷嘴入口角为30°破岩效果最佳。冯云春^[12]对超高压淹没射流破岩规律进行了试验研究,结果表明200 MPa时最优喷距达到32.5倍喷嘴直径,150 MPa时破岩效率最高,喷射角在12.5°时破岩效果最好。廖华林^[13]就围压对射流破岩特性的影响规律进行了试验研究,结果表明围压对常规连续射流和空化射流破岩效果影响明显,破碎体积随围压的增大而减小;围压对射流基本结构特性影响不明显;当围压小于15 MPa时,磨料射流射孔深度随围压的增大而近似呈线性减小。李根生、王宗龙等对水射流作用下岩石的应力分布规律、破岩速度、影响因素等进行了分析。杜玉昆^[14]提出了空流体吸入式脉冲射流技术理论并进行了大涡模拟研究,结果表明吸入式能比非吸入式脉冲射流产生更加剧烈的振荡,这大大提高了破岩能力。

在石油钻进方面,西南石油大学研制的石油钻井振荡脉冲喷嘴,工作效率是普通连续射流的数倍,大大提高了钻井速度。W. E. Johnson 成功地把自振气蚀射流用于石油钻井,同时还利用自激共振脉冲射流喷嘴对船身进行了清洗。李根生研制的自振空化射流钻头喷嘴,经现场试验表明比普通中长喷嘴钻头钻井速度提高了10.5%~49.3%、平均机械钻速提高31.2%^[15]。大连理工大学和吉林油田钻采院利用自激振荡脉冲射流共同开发研制的振动水嘴,根据中原和大庆等8个油田的试验统计资料表明,相同条件下自激振荡脉冲喷嘴钻头比普通喷嘴钻头的机械钻速可提高33.5%~70%^[16]。

在淹没射流及其冲蚀效果方面,王建生的研究表明水下脉冲射流的穿透性能明显优于连续射流,王希勇则通过在自激脉冲射流喷嘴装置腔壁上开孔实现了井下水力增压,效果不错。易灿^[17]对围压下自激空化射流冲蚀性能进行了试验研究,结果表明冲蚀能量基本与射流压力成正比,存在最优喷距和围压使得充实效果最佳。蒋或澄提出了实验室模拟水下切割的构想。张德斌在围压作用下对自振空化射流脉动特性进行了试验研究,得到了围压对自振空化射流脉动幅度、最优喷距及脉动频率的影响规律。高传昌一直致力于脉冲射流的研究,在确定了水下脉冲装置的吸气方式的同时,通过对淹没条件下不同水深的脉冲射流进行的一定的实验室试验研究发现,脉冲射流装置在自吸气后平均打击力明显提高。高传昌^[18]通过试验证明了淹没条件下自激脉冲射流的冲蚀效果明显好于连续射流。黄晓亮^[19]进行了自激吸气脉冲射流的浅水淹没及深水淹没试验研究,得到了最佳吸气方式的选取方法,同时分析了不同参数对装置性能的影响规律。杨明磊对非淹没条件下脉冲射流喷嘴的脉冲效果进行了理论和试验研究,并采用随机振动分析的方法处理了试验数据。赵谱研究了不同围压下自激吸气脉冲射流的性能,分析了不同结构参数、围压、工作压力等参数对吸气量、相对吸气量的影响关系。陈豪指出了影响低压大流量自激振荡脉冲射流喷嘴频率特性的参数,对振荡腔的内部流场进行了数值模拟,并通过试验得出了打击力和打击范围性能曲线。雷霆对淹没条件下低压大流量自激脉冲射流喷嘴装置的最佳性能参数进行了研究,并给出了其配比范围。王好锋试验研

究了低压大流量浅水自激脉冲射流喷嘴装置的性能参数,并探讨了结构参数和运行参数在非淹没与浅水淹没条件下对装置性能的不同影响。赵礼通过数值模拟探讨了水下自激吸气脉冲射流装置的机理,并通过试验研究了深水条件下该装置的冲蚀性能。此外,王莉^[20]进行了淹没射流清洗试验,得出了淹没水射流对叶类、豆类、根茎类及瓜果类蔬菜的破损率低、清洗效果教好的结论。

目前,国内外主要用普通的喷嘴进行油罐清淤,而自激振荡喷嘴在这方面还处于试验阶段。浙江大学对自激脉冲喷嘴进行的两次试验验证了采用脉冲射流装置清洗油泥的可行性。焦磊通过脉冲射流打击油泥的试验,找到了油泥屈服的最小打击力。李春峰^[21]结合一个5万m³油罐的清洗实例,利用脉冲高度聚能的特点,完成了喷射系统的设计。

可见:(1)部分学者通过试验验证了理论研究达成的共识,为进一步完善理论研究提供了部分素材,但仍没形成统一的理论体系。(2)在射流破岩、石油钻进、淹没射流及其冲蚀效果和油罐清淤方面等取得了大量的试验研究成果,但其成果和理论研究没有紧密结合,缺乏理论总结和归纳,当然这与试验的复杂性及其归纳概括的难度有关,因此下一阶段的研究重点应该是如何简化试验,充分发挥数值模拟在试验研究中的作用,以及找到试验与理论结合的新方法,从而通过大量的试验研究结果完善理论体系,进而用来指导试验研究。(3)国内外对于自激脉冲射流用于清淤的研究较少,尤其是淹没射流,应该加大这方面的研究。

4 自激脉冲射流清淤研究展望

我国的河湖水库淤积普遍存在,致使水库库容丧失、泄洪能力下降,带来了极为严重的社会和经济问题。目前,国内外多采用空库排沙、机械排沙、管道排沙、异重流排沙和射流排沙等技术进行水库清淤。空库排沙适用于山区天然河流比降大的水库,但后期效果不明显;机械排沙利用各种挖泥船、吸泥泵等机械设备进行开挖和疏浚,但造价高、受限大;管道排沙利用水库上、下游的水头差进行水库水力吸泥清淤,但受管路系统影响较大。异重流排沙与库区地形关系极为密切,出库流量、含沙量、泥沙粒径等对其也有较大影响。黄委会通过科学调度和人工塑造异重流使大量泥沙排沙出库,但这种方法只能在汛前调水调沙期间和汛期上游来洪水时采用,排出的泥沙只能是由异重流运行至坝前或在坝前滞留的泥沙,且排沙量受制于异重流的持续动力。

目前,自激振荡脉冲射流泵主要运用在材料切割、石油钻井、油罐清淤、渔业充氧等领域,国内外对于脉冲射流用于清淤的研究较少,尤其是淹没射流。射流排沙是通过在清淤船上配置的一系列射流喷嘴将河底泥沙冲起,然后由河道水流将冲起的泥沙送往下游,包括连续射流排沙和脉冲射流排沙。射流清淤主要表现在两个方面:一是利用射流的冲刷能力冲击河床,制造高含沙浑水,然后由水泵抽吸、输送,排往他处;二是利用射流冲击配合水流驱赶泥沙。何亮提出了适用于中小型水库利用水力学清淤的设想。昆明勘测设计院提出了利用水库上下游水位差的虹吸作用吸送水库淤沙至大坝下游的水力虹吸清淤方法,但对所需水头、淤积物形态和建筑物等方面要求较高,且有一定的局限性。董慧迪

提出引进挖泥船进行河道疏浚和水库清淤,但工作耗时较长,仅对库深较浅的水库或河道有一定的工程应用价值。B. 阿布纳加^[23]在对阿斯旺水库进行清淤时,提出了用输浆管抽走底沙的方法,但受到输送泥浆浓度的严重限制。卡艾玮^[23]进行了利用恒定射流开挖沟槽进行海底电缆、管道铺设的研究,工程应用价值很高,并在台湾海峡成功铺设了海底电缆,为开展脉冲水下射流清淤提供了技术指导。宁锋^[24]提出了采用脉冲射流冲泥沙实现人工异重流的方案,以期达到长期产生人工异重流的目的,但缺乏进一步的论证和试验支持。

张原锋通过进行的室内水槽静水、动水条件下的射流冲刷试验,以及潼关河段的现场试验都表明,射流清淤具有广阔的应用前景。相比其他排沙方式,自激脉冲射流排沙在水库清淤方面具有结构简单、造价和能耗低等一系列优点,若应用于工程实践,必将产生巨大的经济和社会效益。但在付诸于工程实践之前,还有以下研究工作需要开展。

(1) 利用多种方法夯实自激脉冲射流理论,结合大量淹没条件下的试验研究,探寻其在不同水深条件下的规律。

(2) 在增大自激脉冲射流装置过流量的同时,进一步优化其性能。

(3) 在适当的时候开展现场排沙试验,检验研究成果,为工程应用打好基础。

(4) 开展自激脉冲射流在石油与煤炭开采等其他方面的研究,丰富其应用领域。

参考文献(References):

- [1] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989. (LU Hong qi. Theory and Application of Jet Pump Technique[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1989. (in Chinese))
- [2] 高传昌. 脉冲液体射流泵技术理论与试验[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (GAO Chuangchang. Theory and Experiment of Pulsating Liquid Jet[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 王常斌, 林建中. 射流泵湍流场的数值模拟与试验研究[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(2): 175-179. (WANG Changbin, LIN Jianzhong. Numerical Simulation and Experiment on the Turbulent Flow in the Jet Pump[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2006, 20(2): 175-179. (in Chinese))
- [4] 张晋华, 程鹏, 高传昌. 脉冲液体射流泵能量平衡的数值研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 136-139. (ZHANG Jinhua, CHENG Peng, GAO Chuangchang. Numerical Study of Energy Balance of Pulsed Liquid Jet Flow Pump[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3): 136-139. (in Chinese))
- [5] 王玲花, 高胜建, 高传昌, 等. 射流泵流速比与动量修正系数的数值研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 134-136. (WANG Linghua, GAO Shengjian, GAO Chuangchang, et al. Numerical Study on Velocity Ratio and Momentum Correction Factor of Jet Flow Pump[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 134-136. (in Chinese))
- [6] S. C. Crow, F. H. Champagne. Orderly Structure in Jet Turbulence[J]. Fluid Mechanics, 1971, (3), 48-52.
- [7] K. Bremhorst, G. Hollis. Velocity Field of an Axisymmetric Pulsed Subsonic Air Jet[J]. AIAA. Journal, 1990, 28(12): 354-361.
- [8] 汪志明, 沈忠厚, 朱益. 风琴管喷嘴外端射流流场的数值模拟[J]. 石油大学学报, 1996, 20(2): 36-39. (WANG Zhiming, SHEN Zhonghou, ZHU Yi. Numerical Simulation of Turbulent Jet Flow-field of Organ Pipe Nozzle[J]. Journal of University of Petroleum, 1996, 20(2): 36-39. (in Chinese))
- [9] 龙新平, 关运生. 补气位置对改善射流泵空化性能的试验[J]. 江苏大学学报, 2009, 30(3): 270-273. (LONG Xinping, GUAN Yunsheng. Experiment on Air Supplying Position for Improvement of Jet Pump Cavitation Performance[J]. Journal of Jiangsu University, 2009, 30(3): 270-273. (in Chinese))
- [10] D. Rockwell. Review Self Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities[J]. Transactions of the ASME, 1978, 100(9): 152-165.
- [11] 易灿, 李根生. 淹没条件下锥形喷嘴射流破岩效率试验研究[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(1): 10-12. (YI Can, LI Gensheng. Experiment Study on Rock Erosion Efficiency with Conical Nozzles under Submerged Condition[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(1): 10-12. (in Chinese))
- [12] 冯云春, 徐依吉, 赵付国. 超高压淹没射流破岩规律试验研究[J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 66-70. (FENG Yunchun, XU Yiji, ZHAO Fuguo. Experimental Study on the Breaking of Rock by Ultrahigh Pressure Water Jetting[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 66-70. (in Chinese))
- [13] 廖华林, 李根生, 易灿. 围压对射流破岩特性影响的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 46-48. (LIAO Hualin, LI Gensheng, YI Can. Experimental Study the Impacts of Ambient Pressure on Rock Breaking by Water Jet[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 46-48. (in Chinese))
- [14] 杜玉昆, 王瑞和, 倪红坚. 环空流体吸入式自激振荡脉冲射流大涡模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(4): 455-462. (DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian. Large Eddy Simulation of Self oscillation Pulsed Water Jet Drawing in Annulus Fluid[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(4): 455-462. (in Chinese))
- [15] 李根生, 沈忠厚. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 11-13. (LI Gensheng, SHEN Zhonghou. Development and Field Tests of Self Resonating Cavitating Water Jet Nozzle for Oilwell Drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 11-13. (in Chinese))
- [16] 王嘉松, 蒋世全. 石油钻井中自激脉冲喷嘴的应用研究[J]. 中国海上油气(工程), 1999, 11(4): 51-55. (WANG Jiasong, JIANG Shiruan. Application Research of Self excited Pulsed Nozzle on Oil Drilling[J]. China Offshore Oil and Gas(Engineering), 1999, 11(4): 51-55. (in Chinese))
- [17] 易灿, 李根生, 陈日吉. 围压下自振空化射流冲刷性能试验研究[J]. 试验力学, 2005, 20(2): 291-296. (YI Can, LI Gensheng, CHEN Rijie. Experimental Study on Self Oscillating Cavitating Jet Erosion Ability under Ambient Pressure[J]. Journal of experimental Mechanics, 2005, 20(2): 291-296. (in Chinese))
- [17] 高传昌, 赵礼. 淹没条件下自激脉冲射流冲刷试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 53-56. (GAO Chuangchang, ZHAO Li. Experiment Research on Erosion of Self excited Irr

- spired Pulsatile Jet in Submerged Conditions [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 53-56. (in Chinese)
- [18] 黄晓亮. 自激吸气脉冲射流装置的吸气性能研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012. (HUANG Xiaoliang. Research on Inspiration Performance of Self-excited Inspiratory Pulsed Jet Device [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2012. (in Chinese))
- [19] 王莉. 淹没水射流清洗机清洗蔬菜的作用原理与运动分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6), 130-135. (WANG Li. Working Principle and Kinematic Analysis of Submerged Jet Vegetable Washer [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6), 130-135. (in Chinese))
- [20] 李春峰. 用于油罐清洗的自激脉冲喷嘴研究[D]. 济南: 山东大学, 2007. (LI Chunfeng. Research on the Self-excited Pulse Nozzle Used in the Cleaning of Oil Tank [D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese))
- [21] B. 阿布纳加. 阿斯旺水库清淤[J]. 水利水电快报, 2004, 25(16): 11-13. (B. Abe Naja. Dredging of Aswan Reservoir [J]. Express Water Resource & Hydropower Information, 2004, 25(16): 11-13. (in Chinese))
- [22] 卡艾玮, 彭子轩. 水下移动式射流引致输沙及水跃现象[D]. 台北: 国立台湾大学, 2006. (KA Aiwei, PENG Zixuan. Phenomenon of Sediment Transport and Hydraulic Jump Caused by Moving Underwater Jet [D]. Taipei: National Taiwan University, 2006. (in Chinese))
- [23] 宁峰, 高传昌. 基于脉冲射流的小浪底水库人工异重流输沙方法探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2): 75-77. (NING Feng, GAO Chuanchang. Research of Manpower Density Flow in Xiaolangdi Reservoir Based on Pulsed Jet [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(2): 75-77. (in Chinese))

· 书讯 ·

《中国水科学研究进展报告》首个白皮书出版

中国水科学研究进展报告
Report on advances in water science research in China
2011—2012

左其亭 主编

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

由左其亭教授主编、近 20 位专家学者参与编写的《中国水科学研究进展报告 2011—2012》一书, 已于 2013 年 6 月由中国水利水电出版社正式出版, 全书共 66 4 万字。该书是在全面收集最近两年有关水科学研究成果的基础上, 系统展示水科学 2011—2012 年的最新研究进展。根据主编左其亭教授的介绍, 自 2011 年起组织编撰该书, 计划每两年发布一本水科学研究进展报告。

全书共分 11 章。第 1 章首先阐述水科学的范畴及学科体系, 介绍了本书的总体框架; 其次重点对 2011—2012 年水科学研究进展总体情况进行介绍, 是研究进展综合报告; 最后简要介绍水科学发展趋势与展望。第 2 章至第 9 章是对 2011—2012 年水科学 8 个分类的研究进展进行专题介绍, 分别包括有关水文学、水资源、水环境、水安全、水经济、水法律、水文化、水信息共 8 个方面的研究进展, 是研究进展专题报告。第 10 章、第 11 章分别介绍了 2011—2012 年水科学方面的学术交流、学术专著情况。

本书是一本汇聚有关水科学研究最新进展的工具书, 可供高等院校和科研院所科研人员开展相关研究时参考。