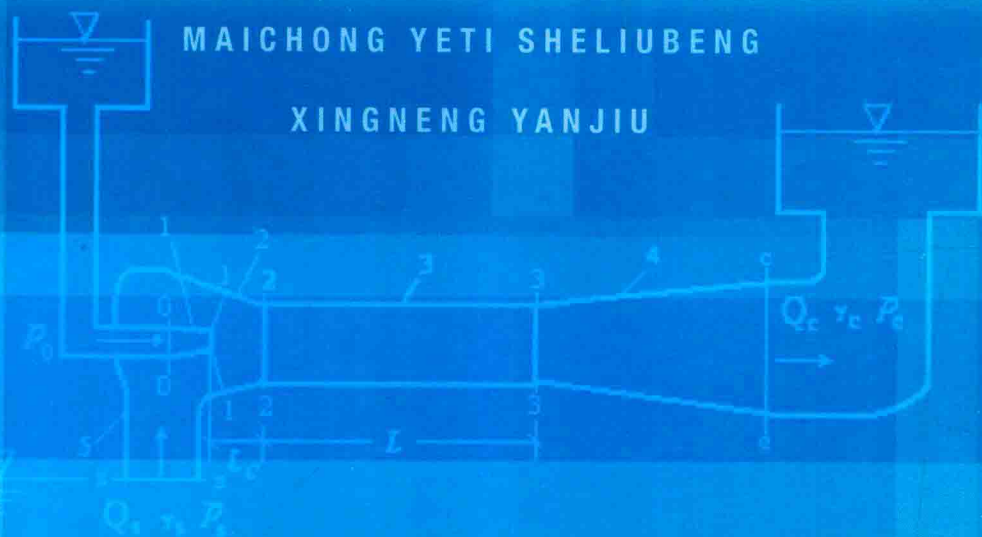


脉冲液体射流泵性能研究

王玲花 杨泽明 尚华 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

脉冲液体射流泵性能研究

王玲花 杨泽明 尚华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

脉冲液体射流泵是一种特殊的流体机械,以其结构简单、可靠性好、应用方便、效率较恒定射流泵高等特点,在各行各业逐步得到使用,但因脉冲射流泵的内部流动机理尚不清楚而使得其优化设计带有经验性,一直是本领域的研究热点。本书系统总结了已有的研究成果,对脉冲液体射流泵的性能进行了深入的理论与试验研究。主要内容包括脉冲液体射流泵研究发展概况、时均值性能基本方程中流速系数的理论分析、主要过流部件的能量转换、脉冲液体射流泵性能的计算模型、性能的数值模拟与试验研究、性能的对比分析等。

本书内容系统、新颖,可作为高等院校有关流体机械、能源动力、水利水电工程类专业的教学科研参考书,也可供相关行业的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲液体射流泵性能研究 / 王玲花, 杨泽明, 尚华
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5170-2794-2

I. ①脉… II. ①王… ②杨… ③尚… III. ①液压泵
—喷射泵—研究 IV. ①TH38

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第309230号

书 名	脉冲液体射流泵性能研究
作 者	王玲花 杨泽明 尚华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.5印张 157千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

PREFACE

射流泵是一种利用湍射流的湍动扩散作用来传递能量与质量的流体机械及混合反应设备。在一些无法近距离操作和维修或检修工序十分复杂的特殊场合,尤其在水下、高温、高压、易燃、易爆、有毒、真空、放射等特殊工作条件下,射流泵更显示出其独特的优越性。在水电站与泵站的供、排水方面,在水利工程基坑施工中,在取水建筑物清淤、多泥沙河流水库排沙以及河道、海港疏浚施工及水下采沙等方面,射流泵都具有广泛的应用。目前,射流泵在许多工艺流程中具有显著的优越性和不可替代性,但恒定射流泵有一个明显的缺点,就是其传能与传质效率较低。20世纪70年代以来,国内外学者在相同的射流泵装置上,采用脉冲射流来提高射流泵的效率,对此进行了大量的试验研究。脉冲射流泵已成为目前最有发展前途的免维修设备。但由于射流泵内部流体流动属于高雷诺数的强剪切湍流射流,对该流动特性认识的不充分性,导致射流泵的设计理论具有很大的局限性和经验性,至今脉冲射流泵的研究仍处于试验研究阶段,多为根据试验中发生的现象进行初步的理论分析,对其机理和理论方面的研究文献报道甚少,没有根本性的突破,但大量试验结果证明了脉冲射流技术确实是提高射流泵效率的一种有效途径。我国脉冲液体射流泵的工程应用实例尚少,在水利水电工程中的应用实例鲜见报道。随着脉冲射流泵技术的不断发展与完善,除了对水电站技术供水质量要求较高外,在水利水电工程的其他方面,脉冲液体射流泵将以其效率较高的优越性逐步得到应用。

本书结合当前清洁生产,为实现节能、降耗、减污、增效的综合效益要求,对脉冲液体射流泵的性能特性进行深入系统的理论与试验研究,为进一步完善其设计理论和制造性能优良的脉冲液体射流泵提供依据,最大限度地提高脉冲液体射流泵的工作效率。

本书得到华北水利水电大学高层次人才资助项目和中国水利水电科学研究院农村水电站风水互补项目的支持，华北水利水电大学王玲花撰写第3章，中国水利水电科学研究院天津水利电力机电研究所杨泽明撰写第1、2章，华北水利水电大学尚华撰写第4、5章及参考文献和附录，本书在华北水利水电大学高传昌教授的指导下完成，在此表示衷心的感谢。此外，本书还参阅了国内外大量著作与文献资料，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不当之处，欢迎使用本书的广大读者给予指正。

编者

于华北水利水电大学

2014年6月

符号一览表

a	空间法放大率 (第 1 章中参考文献 [6])
A	射流核心的无因次半径 (第 1 章中参考文献 [132])
B	面积比
c	脉冲相速度 (第 1 章中参考文献 [6])
c	吸入面积比 $c = f_{s2} / f_{s1}$ (第 2 章中)
c_1	喉管进口段壁面反力修正系数
c_j	喷嘴流速系数
d	管径
f	脉冲频率
f_1, f_2, f_3, f_s	喷嘴出口、喉管入口与出口、被吸入口断面面积
F	外力
g	重力加速度
G	重量流量
G'	重量流量导数
h	压力比 $h = \Delta p_c / \Delta p_0$
\bar{h}	时均压力比
h_a	射流泵理想压力比
h_f	水力损失压力比
H_0	工作泵扬程
H_c	射流泵扬程
H_f	水力损失
H_j	惯性水头
k	脉冲波数 (第 1 章中参考文献 [6])
k_1, k_2	时间常数 (第 1 章中参考文献 [142])
k_1, k_2, k_3	动量修正系数
k'_1, k'_2	与动量修正系数 k_1, k_2 有关的系数
l	长度
L	喉管长度
L_c	喉嘴距

L_k	最优喉管长度
m	面积比 $m = f_2/f_1$
M	流速比
M_{pj}	脉冲液体无因次惯性力
M_{hpi}	脉冲液体无因次惯性水头
n	与面积比有关的参数 $n = m/(m - 1)$
n	脉冲信号谐波数
N	功率
p	压力
p_0 、 p_s	断面 0—0 工作流体压力、断面 $s-s$ 被吸流体压力
p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4	断面 1—1、2—2、3—3、 $c-c$ 混合流体压力
P_j	惯性力
q	流量比 $q = Q_s/Q_0$
q_0	恒定部分流量比
$q(\omega t)$	脉冲部分流量比
Q	体积流量
Q_0 、 Q_s 、 Q_c	工作、被吸、混合流体流量
Re	复数的实部
r	半径
$r_{0.5u}$	时均速度一半的点到中心线的距离
R	射流场内任一点的无因次半径
R_0	喷嘴出口直径
R_k	喉管的摩阻力
s	过流面积
t	时间
T	脉冲周期
u	流速
\bar{u}	任意一点的时均速度
\bar{u}_0	射流中心线的时均速度
v	速度
x	笛卡儿横坐标
z	位置高度
α_t	喉管进口函数
$\bar{\alpha}_t$	喉管进口函数时均值
β	喉嘴距收缩半角

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	能量修正系数
$\gamma_0, \gamma_s, \gamma_c$	工作、被吸、混合流体容重
$\bar{\gamma}_s$	容重比
δ	动量修正系数
ϵ	相对误差
η	效率
λ	脉冲波长 (第 1 章中参考文献 [6])
λ	沿程阻力系数 (第 2 章中)
ξ	阻力系数
ρ	液体密度
$\bar{\rho}_s$	密度比
τ	切应力
φ	脉冲信号相位角
ϕ	脉冲运动参数
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$	流速系数
ω	脉冲圆频率
Ω	时间尺度 (第 1 章中参考文献 [142])
脚标	
c, s	分别表示扩散管出口、射流泵吸入口
y	最优参数

目 录

前言

符号一览表

第 1 章 绪论	1
1.1 本课题研究背景	1
1.2 国内外研究概况	3
1.2.1 射流泵的应用概况	3
1.2.2 恒定射流泵研究概述	6
1.2.3 脉冲射流泵研究进展	11
1.3 尚存在的主要问题	17
1.4 本书的主要内容	18
第 2 章 脉冲液体射流泵基本性能及参数的理论研究	20
2.1 射流泵主要部件及参数	20
2.1.1 无量纲几何参数的定义	21
2.1.2 无量纲工作参数的定义	22
2.1.3 脉冲射流参数	23
2.2 脉冲液体射流泵时均值基本方程中流速系数的理论研究	23
2.2.1 脉冲液体运动参数的表达式	23
2.2.2 脉冲液体射流泵一维动量与能量方程	24
2.2.3 脉冲液体射流泵基本性能时均值表达式	25
2.2.4 喉管摩阻损失系数 ξ_2 及水力损失的计算式	26
2.2.5 喉管流速系数 φ_2 的计算式	28
2.2.6 喉管进口段摩阻损失系数 ξ_n 及水力损失的计算式	29
2.2.7 喉管进口段摩阻损失系数 ξ_s 与流速系数 φ_s 的计算式	31
2.3 脉冲液体射流泵能量损失的数学表达式	34
2.3.1 理想压力比 $\overline{h_a}$ 表达式的推导	34
2.3.2 实际压力比 $\overline{h(t)}$ 表达式的推导	37
2.3.3 水力损失具体表达式的推导	38
2.3.4 基本性能时均值方程	41

2.4	脉冲液体射流泵能量损失的对比分析	42
2.4.1	与有关文献中脉冲液体射流泵时均值基本方程的不同点	42
2.4.2	与有关文献中恒定液体射流泵基本方程的不同点	43
2.4.3	能量损失分析	44
2.5	脉冲液体射流泵最优参数方程的推导	46
2.5.1	脉冲液体射流泵效率公式的推导	46
2.5.2	脉冲液体射流泵最优工作参数方程的推导	47
2.6	本章小结	48
第3章	脉冲液体射流泵时均性能的数值计算	50
3.1	脉冲液体射流泵时均性能的数值计算模型	50
3.2	程序设计的特点	52
3.3	采用本书推导的基本性能方程的数值计算结果及对比分析	55
3.3.1	计算误差分析及其修正	55
3.3.2	射流泵基本性能计算结果及分析	56
3.3.3	射流泵最优参数计算结果及分析	58
3.3.4	射流泵喉管流速系数 φ_2 计算结果及分析	59
3.3.5	射流泵喉管进口段流速系数 φ_5 计算结果及分析	60
3.3.6	流速系数 φ_1 、 φ_3 、 φ_4 计算结果及分析	61
3.3.7	流速比 M 与动量修正系数 k_1 、 k_2 计算结果及分析	61
3.3.8	动量修正系数 δ 与喉管进口函数 $\bar{\alpha}_i$ 计算结果及分析	67
3.3.9	脉冲频率对性能影响的计算结果及分析	69
3.3.10	时均惯性力 \bar{M}_{pj} 与时均惯性水头 \bar{M}_{nj} 计算结果及分析	70
3.4	采用文献 [26] 推导的 φ_2 与 φ_5 的性能计算结果及对比分析	71
3.4.1	恒定液体射流泵的计算结果比较	72
3.4.2	脉冲液体射流泵的计算结果比较	72
3.5	本章小结	73
第4章	脉冲液体射流泵性能特性的试验研究	75
4.1	试验装置系统概述	75
4.1.1	试验装置系统组成及工作原理	75
4.1.2	试验仪器的测试精度及误差分析	76
4.1.3	试验方案	76
4.2	试验成果及分析	79
4.2.1	射流泵性能特性试验结果及分析	79
4.2.2	脉冲频率对射流泵性能影响的试验结果及分析	85

4.2.3	射流泵最优参数的试验结果及分析	89
4.2.4	面积比 $m=1.93$ 时的试验结果说明	91
4.3	试验与数值计算结果的比较与分析	91
4.3.1	性能特性的比较与分析	91
4.3.2	脉冲液体射流泵时均性能方程简化式的拟合	94
4.3.3	最优参数的比较与分析	95
4.4	本章小结	98
第5章	结论	99
	参考文献	101
附录 A	脉冲液体射流泵基本性能方程中有关 参数的公式	110
附录 B	部分压力与流量实时波形图	114

第 1 章 绪 论

1.1 本课题研究背景

射流泵是利用流体（液体或气体）来输送介质的动力设备，与其他叶片泵相比，具有结构简单、紧凑、轻便，运行可靠，无泄露，免维修等优点，有利于输送有毒、易爆、易燃和放射性介质，因此射流泵又被称为“无运动部件的泵”。它常用于免维修或少维修的场合，特别适用于水下、高压、高温、真空、放射、腐蚀等环境，因此在水利、电力、核能利用、冶金、航空航天、石油、化工、环境保护等国民经济各部门中得到了一定应用，已取得了巨大的经济效益。如射流泵与离心泵组成深井提水装置；水电站利用射流泵给机组技术供水和水轮机尾水管和蜗壳检修排水；火电厂利用射流泵进行冷凝器抽真空；核工业中射流泵用于大型沸水反应堆流量再循环系统，在反应堆乏燃料的后处理工艺中，脉冲液体射流泵用来输送各种中、高放射性溶液；石油开采中当油井压力下降不能自喷时，可以使用深井射流泵采油；化工中利用它组成喷射环流反应器；污水处理厂利用它进行射流曝气等等。以上应用实例充分说明了射流泵在安全可靠、环保、节能增效等方面发挥着巨大作用，具有重要的经济效益和社会效益。

射流泵是一种利用湍射流的湍动扩散作用来传递能量与质量的流体机械及混合反应设备。其本身没有运动部件，主要由喷嘴、喉管入口、喉管、扩散管及吸入室等部件组成。其工作原理是利用有压工作流体 Q_1 在喷嘴喷出后流体质点或微团的紊动扩散作用，与被吸流体 Q_2 发生质量和能量交换，从而带动被吸流体。这两股流体在喉管入口段及喉管内混合，进行能量和质量传递，工作流体的速度减小，被吸流体的速度增大，两者的速度在喉管出口处渐趋一致。流体的压力在喷嘴出口处到喉管入口断面是逐渐降低的，以后又逐渐增高。通过扩散管将混合流体的动能转换为压能，压力得到进一步升高，从而使混合后的流体 Q_3 沿排出口被输送到用户去。

射流泵内部的流体有两种：一种为压力较高的工作流体，另一种为压力较低的被吸流体。射流泵的工作流体一般为液体（也可为液体混合流体或气体），而被吸流体则可以是液体、气体、液固混合物（如泥浆等）、气固混合物（如

烟气或灰尘等)。根据工作流体与被吸流体的状态,射流泵分为:液体射流泵(工作流体与被吸流体均为液体)、固体输送射流泵或泥浆射流泵(工作流体为液体,被吸流体为散状固体或泥浆)、液气射流泵(工作流体为液体,被吸流体为气体)、射流混合器(工作流体为液气混合流体,被吸流体为液体)。有时按射流泵工作流体和被吸流体的介质特点又分为单相射流泵和多相射流泵,按射流泵的喷嘴形式分为固定式射流泵和可调式射流泵。可调式射流泵在变工况时可保持较高的传能效率。

射流泵内部流动特性相当复杂,有时甚至是两相流(如泥浆泵或液气射流泵)。目前,对单相流体流动问题的研究已日臻完善,但对两相或多相流的传能与传质问题的研究还有待进一步深入。由于两相流与单相流相比,存在很大差别,它比单相流的流体性质复杂得多,因而对两相流的传能与传质问题的研究也困难得多。因射流泵内部的流体为两种流体,存在着能量与质量的交换与传递,其理论涉及液、气、固多相流体的传能、传质甚至化学反应过程,这给理论研究和设计具有高效性能的射流泵带来了一定困难。

射流泵除了作为流体输送机械外,还可兼作传能与传质及化学混合反应设备。各种有压能源(废水、废气)都可作为它的动力,直接加以利用,不需增加很多辅助设备,因此综合效益较高。它可以使整个工艺流程和设备大为简化,并提高工作可靠性,尤其是在水下、高温、高压、真空、放射等特殊工作条件下,采用射流泵更显示出其独特的优越性。但是,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,因此射流泵的传能与传质的效率低于叶片类型泵。提高射流泵传能及传质效率,一直是国内外学者所关注的问题。由于泵型的不同,内部两种混合流体的不同,结构与使用条件的不同,其效率有较大差异。在某些条件下,它的效率并不低,所以如何合理利用射流泵以得到尽可能高的综合效益是一个很值得研究的问题。

人们在研究射流泵时,发现普通单喷嘴射流泵由于本身结构的限制,要大幅度地提高其工作性能是非常困难的,另外由于射流泵的应用场合不同,又对射流泵的结构型式提出了不同的要求。因此,继英国学者 Witt 于 1965 年提出多喷嘴液气射流泵以来,各国学者都将大量的精力放在寻求射流泵的最优结构方面,除较成熟的单级单喷嘴射流泵外,国内外学者又相继提出了各种型式的射流泵,如单级多喷嘴、多级单喷嘴、多级多喷嘴、预旋式、脉冲式、环形喷嘴等型式的射流泵^[1-5],这些型式各异的射流泵在某些特定的场合,有其独特的优点。

1971 年,法国学者 Crow S. C 和 Champaghe F. H^[6]在射流装置上进行了脉冲射流的试验研究,研究表明,在距离喷嘴出口 4 倍于喷嘴直径点处,测得脉冲射流的传能与传质效率比恒定射流提高了 32%,各国学者当时就对

此研究结果非常关注。在以后的几十年里,各国学者对脉冲射流进行了大量的研究^[7-11],研究结果均表明,脉冲射流泵在提高效率方面的作用更为显著,在相同的射流泵装置上,采用脉冲射流比恒定射流的传能与传质效率可提高20%~30%,甚至更高^[12,13],并且已在水利电力、航空航天、核工业、化工与热力、环境保护等实际工程中得到了应用^[14-25],取得了较大的社会效益和经济效益。因此,在射流泵的研究方面,逐步完善其设计理论,改善其内部流态,减少内部流动损失,改善其内外特性,提高其传能与传质效率等问题,一直是本领域关注的热点。由于脉冲液体射流泵装置优良的工作特性,使它已成为目前最有发展前途的免维修设备,英、加、俄等国在核动力工程领域已开始使用这种装置^[19,20],并对其技术加以保密。

本书结合当前清洁生产,为实现节能、降耗、减污、增效的综合效益,建设资源节约和环境友好型和谐社会的要求,基于射流泵的以上诸特点,对脉冲液体射流泵的内外特性进行深入系统的理论分析、数值计算与试验研究,在大量试验工作的基础上,通过研究其内部传能与传质的过程与外部性能的联系,从理论与试验上深入分析和研究其传能与传质机理,为进一步完善其设计理论和制造性能优良的脉冲液体射流泵提供依据,最大限度地提高脉冲液体射流泵的工作效率,以推动脉冲液体射流泵在我国的应用。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 射流泵的应用概况

射流泵在国外应用较早且较广泛,而在国内的研究和应用却比较慢。射流技术在国外大规模应用,始于20世纪的30~40年代,70年代已得到普遍应用,目前已遍及各个生产部门,主要应用于喷射输送,喷射切割、焊接及喷涂,喷射燃烧及冶炼,喷射传质、制冷及干燥,喷灌、喷洒及消防、喷射钻探及固结,喷射推进,喷射纺织,射流控制等^[26,27]。

在水电站,射流泵作为一种重要的辅助设备之一,主要用于水轮发电机组的技术供水与排水、调相压水^[28-33]、水轮机虹吸进水管抽气启动及尾水管强制补气等方面,在水电站厂房中可用水喷射制冷装置进行空气调节,还可直接用水库压力水作为工作动力以减少水能与电能之间转换的能量损失。实践证明射流泵供水比其他水泵供水更为可靠和节省费用,适用于50~250m的水头范围,特别是对大容量的机组,采用喷嘴面积可调的射流泵供水,经济效益更好。原苏联于1986年就明文规定,凡有应用条件的水电站,均要用射流泵作为电站机组的技术供排水泵。国内外大中型水电站如美国大古力水电站、原苏

联的布拉茨克、奇耳克伊、萨扬-舒申斯克等水电站,我国的龙羊峡、白山、东江、鲁布革、漫湾、西洱河、大寨、腊庄、大峡等水电站,都采用射流泵作为机组技术供排水系统中的主机。

在水电站,尤其是径流式水电站,用射流泵代替普通水泵作机组的技术供、排水泵具有十分明显的经济效益。由于直接利用水电站上游库水,不需多次能量转换,采用射流泵不仅具有造价低、检修工作少、可靠性高、占地面积小、易布置、不用电力作动力、工作不受厂用电源可靠性的影响、不怕受潮与水淹、无需日常维护、汛期可充分利用弃水等优点外,而且每年还可节约大量的厂用电和维修费,具有十分明显的经济效益和社会效益。如云南大寨水电站属径流式电站,该电站汛期存在大量弃水,安装6台射流泵对水轮发电机组进行技术供排水,用射流泵代替普通水泵,每年可节约厂用电216万kW·h。云南漫湾水电站亦为径流式电站,安装供排水射流泵17台,用射流泵代替水泵后,节约水泵设备投资20余万元,每年可节约厂用电1200万kW·h。万安水电站,厂内检修集水井和渗漏集水井内各设置一台射流泵进行排污,排污效果很好。浙江金溪干流上的范厝水电站,用射流泵作为轴流式水轮机顶盖上的排水泵,克服了以前普通水泵运行不可靠的缺点。因此,射流泵在水电站中的一些场合,具有其他水泵不可替代的作用,但目前射流泵在我国水电站的普及率仍较低,除射流泵在我国被应用于水电站的历史还相对较短,用户对其了解较少外,主要是其本身尚存在某些缺点,如效率不高,至今尚无定型产品系列供用户选用,工作水头较高的一些电站存在泵的噪声较大,空蚀剥蚀严重等问题。

在泵站,尤其对于下游水位变幅较大的泵站,利用射流泵与离心泵串、并联以增加离心泵的吸程,可以提高其工作可靠性,降低工程造价。对于上下游水位变幅较大、扬程较低(1~3m)而流量较大的泵站^[34],采用射流泵与离心泵(或轴流泵)并联以增加泵站的流量,这种装置较单独采用离心泵或轴流泵的单位提水成本要低。射流泵还可用于对离心泵抽气充水和对轴流泵虹吸式出水管抽气以辅助起动、泵房排水等。

在水电站与泵站取水建筑物(如前池及取水口)清淤、多泥沙河流水库排沙方面,以及河道、海港疏浚施工及水下采沙等方面,可用射流式泥浆泵挖泥船^[35-37],比离心式泥浆泵的有效作业时间长。为解决小浪底水库高水位排沙问题,黄委会于2006年12月召开了小浪底水库泥沙处理关键技术及装备研讨会,其泥沙易淤难冲的根源在于启动悬浮问题,虽然潜水泵抽吸输送排沙效率较高,但工作可靠性较差,专家们提出了振荡脉冲射流与气举排沙方案与抽吸输送方案(包括潜水泵抽吸输送排沙、射流泵抽吸输送排沙两种方式)。目前深水条件下水库泥沙处理的难度极大,国内外均缺乏可供借鉴的经验、技术和



设备。因此，脉冲射流泵在这方面的应用有待深入研究。

此外，利用水库上游压力水，通过射流泵抽吸下游尾水对船闸充水，可缩短出水时间，增加船闸通过能力，减少下泄流量还可增加水电站的发电量。利用射流泵对船闸排泥，如葛洲坝水利枢纽在大江和三江航道上分别设有1号及2号、3号船闸，每座船闸均布置有4个检修排水井，以便船闸检修时能抽干整个闸室或输水廊道内局部阀门段的水体，为了排除深井中的淤泥，保证井内长轴深井泵的正常运转，在各泵井内设置了以射流泥浆泵为主体的排泥系统，射流泵还可作为船舶舱底排水泵，可直接排除污水和泥浆。

在无电源地区，射流泵可供水及井灌，为农牧服务。射流式井泵装置适用于井径80mm以上与井动水位10~150m的深井提水，其效率与长轴离心式深井泵装置效率接近，但成本却降低1/3~1/2，工作可靠，特别适用于含沙的水井提水。在井渠结合的灌区，还可以井泵出口的剩余水头为动力，用射流泵来提高渠道水位，以满足高地灌溉的要求，该装置结构简单，投资少。

在水利工程基坑施工中，以上游围堰水头作为动力，用射流泵排水，能连续工作，很少耗用电力。此外，在给排水工程中，射流泵可用于投药进行水净化消毒和沉淀，也可作为下水道排污用泵和便器冲洗器。在火电站，射流泵可作为燃料燃烧系统的气体喷燃器，在蒸汽锅炉给水系统中作为增压泵，在汽轮机冷凝器中抽不凝气，汽轮发电机组轴承和调节系统的供油，锅炉的排渣、水处理等。在核电站，射流泵被应用于大型沸水反应堆流量再循环系统。在磁流体发电方面，可用射流泵输送高温而且腐蚀性很强的钾盐溶液。在供热、采暖方面，射流泵用于调节室内、外热力网的温度，还可用于抽吸冷凝器集水系统集水等。在消防中，用液气射流泵吸入泡沫剂和空气后再喷射进行消防。在航空及航天方面，在喷气式飞机发动机的喷管内，增加喷射器可以加大发动机推力，并可作为增加推力装置，供垂直起飞用，此外飞机上的供油系统已广泛采用射流泵；在火箭发动机内，射流泵与高速高压燃料泵串联，可以改善后者的吸入性能，防止空蚀的产生；人造卫星上的空间发电装置，也采用射流泵作为增压泵。在建筑施工、矿山与冶金、石油与地质勘探及天然气采集等方面，射流泵都有广泛的应用^[38-43]。

目前，射流泵在许多工艺流程中具有显著的优越性和不可替代性，但射流泵有一个明显的缺点，就是其传能与传质效率较低。国内外研究表明：采用脉冲流体作为其工作动力是提高射流泵传能效率的有效途径之一。脉冲射流泵适合于深井提水进行喷滴灌及供水、深井采油、水下挖泥及化工流体输送等场合。

在我国，目前脉冲射流泵仍处于试验研究阶段，实际工程应用实例尚少，在水利水电工程中应用实例鲜见报道，主要原因是目前对其内部流动机理、脉

冲流体的控制技术尚未完全了解和掌握, 脉冲射流引起的振动等问题尚未完全解决。随着脉冲射流泵技术的不断完善与发展, 除了对水电站技术供水质量要求较高外, 在水利水电工程的其他方面, 脉冲液体射流泵将以其效率较高的优越性逐步得到应用。

1.2.2 恒定射流泵研究概述

自 1852 年英国詹姆斯 (James) 发明了射流泵至今, 对射流泵技术的研究已有 100 多年的历史^[26]。在 19 世纪 60 年代, 德国学者 G. 佐伊纳 (Zeuner) 根据动量定理建立了射流泵的设计理论, 1870 年他和 M. 兰金 (Rankin) 进一步发展并完善了该理论, 但 Zeuner 和 Rankin 的理论还不能解决射流泵及喷射器的计算问题。1922 年, K. 罗菲 (Hoefler) 进行了液气射流泵对冷凝器抽真空试验。直到 20 世纪 30 年代, 由于流体力学及空气动力学的发展, 推动了射流泵及喷射器的应用和研究工作。在 1933~1934 年间, J. E. 高斯 (Gosline), M. P. 奥必宁 (Obrine) 进行了液体射流泵试验的系统研究工作, 建立了基本性能方程。在 1939 年, G. V. 福劳格对射流泵及喷射器的计算方法进行了研究。在 1942 年, J. A. 霍夫 (Coff)、C. H. 霍根 (Coogan) 提出了用二元方法计算气体喷射器。在 1948 年, D. 斯立林 (Citriani) 通过分析射流泵的阻力损失, 提出了提高射流泵效率的途径。在 1951 年, T. W. 劳德斯 (Rodes) 研究了用液体射流泵抽送泥沙的问题。在 1952 年, J. W. 麦科纳基 (Maconaghy), 提出了射流泵装置性能的计算方法。在 1953~1954 年间, R. G. 寇宁汉 (Cunningham) 研究了抽吸高黏滞性液体的射流泵性能。在 1955~1956 年间, R. 科格劳 (Vogel) 研究了射流泵的基本性能最优设计参数问题, 指出射流泵效率可以达到 40%。1956 年, S. T. 波宁顿 (Bonnigton) 在对水及水气射流泵进行了详细试验后, 提出了射流泵各部件的合理尺寸并指出采用多喷嘴可缩短喉管尺寸。1960 年 H. E. Weber^[44] 对射流泵喷嘴内部流动进行了试验与理论分析。1964 年 J. H. 威特 (Witte) 提出了 19 孔多喷嘴液气射流泵, 使该泵的等温压缩率效率超过了 40%。1964 年, A. L. Addy^[45] 对火箭发动机上的射流系统进行了试验研究。1965 年, A. G. 汉森 (Hansen) 提出了液体射流泵的设计方法。1974 年, R. G. 寇宁汉 (Cunningham) 对长喉管液气射流泵进行了深入研究。1973~1975 年, B. J. 希劳 (B. J. Hill) 及 G. B. 吉尔伯特 (G. B. Gilbert) 等人用二元流的方法对液体射流泵性能进行了分析, 并用有限差分方法求出其数值解。Rao Singamsetti 等对射流泵特性曲线进行了深入研究, 给出了不同结构参数射流泵的特性曲线, 为射流泵的应用提供了良好的设计依据^[46]。1980 年, Brown K. E. 和 Petrie H. 对射流泵的工作原理、系统组成、水力特性等进行了系统地阐述, 但仍局