

脉冲液体射流泵技术 理论与试验

高传昌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



脉冲液体射流泵技术 理论与试验

高传昌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是论述脉冲液体射流泵技术理论与试验的一部专著，由水利水电重点科技专著出版经费资助出版。

全书共分8章，主要内容包括：脉冲液体射流泵的理论研究，性能的数值研究和试验研究，脉冲液气射流泵的基本性能研究，以及射流泵内部流场的数值模拟和液体射流泵装置流体过渡过程研究。

本书可作为从事或涉及流体机械及工程，尤其是脉冲射流技术的科技人员和高等院校教师及研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲液体射流泵技术理论与试验 / 高传昌著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-5084-6927-0

I. ①脉… II. ①高… III. ①液压泵: 喷射泵 IV. ①TH38

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第195569号

书 名	脉冲液体射流泵技术理论与试验
作 者	高传昌 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	35.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

射流泵是利用射流紊动扩散作用来传递能量和质量的流体机械和混合反应设备。它被广泛应用于水利电力工程、热能与动力工程、化工与环境工程、煤炭与石油开采工程、城镇给水排水工程、核动力工程和航空航天工程等实际工程，已发展成为高新技术产业，且形成了一门新的学科——射流泵技术（喷射技术）。

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，因此射流泵的效率低于叶片类型泵。提高射流泵的传能及传质效率，一直是国内外学者所关注的课题。20世纪70年代以来，国内外学者主要以两种途径来提高射流泵的效率。一种途径是研制新型结构的射流泵，如采用“多级射流”、“多股射流”等，在提高射流泵效率方面取得了一定的进展。另一种途径是在相同的射流泵装置上，采用非恒定射流来提高射流泵的传能及传质效率，例如“脉冲射流（Pulsating Jet）”、“振荡射流（Oscillating Jet）”等则属此类。而在这一类研究中，脉冲射流受到各国学者的高度重视，并对脉冲射流进行了大量的试验研究。研究结果表明，在相同的射流泵（喷射器）装置上，采用脉冲射流比恒定射流的传能及传质效率提高了10%~20%。这一研究成果已被应用到航空航天工程、核动力工程、石油钻探工程和水利电力工程等工程中，取得了显著的经济效益。

脉冲液体射流泵内部流动状况属于有限空间伴随脉冲射流，其流动状况极其复杂，至今对脉冲射流的研究仍处于试验研究阶段，对其理论方面的研究成果较少。虽然脉冲射流流场的分布规律目前尚不完全清楚，但大量的试验研究结果表明，脉冲射流是提高射流泵效率的有效途径之一。由于脉冲液体射流泵内部流场分布不同于恒定液体射流泵内部流场分布，因此不能将恒定液体射流泵的研究成果用于脉冲液体射流泵。针对这一问题，作者近十几年来一直致力于脉冲液体射流泵的理论及试验研究，取得了一些研究成果。本书就是这些研究成果的总结，共分8章。第1章和第2章简单讲述了射流泵的基本概念以及有关的流体力学、紊流射流和脉冲液体运动的基本理论；第3章至第5章论述了脉冲液体射流泵技术的基本理论、数值计算和试验研究；第6章是关于脉冲液气射流泵基本性能方程和试验研究，由王玉川负责编写；第

7章是对脉冲液体(液气)射流泵内部流动的数值模拟研究;第8章是关于瞬变射流的研究,阐述了射流泵的全特性理论和试验以及射流泵装置的流体过渡过程。本书附录列出了恒定液体射流泵的部分理论研究成果。

本书的编写得益于武汉大学博士生导师陆宏圻教授的启发、指导和帮助。本书引用的资料有一部分是作者所在单位——华北水利水电学院流体机械及工程研究所的同事们(包括王玲花教授和王松林、张晋华、尚华、王玉川、秦海霞、宁锋等)和几届研究生的劳动成果,没有他们多年来的合作和辛勤劳动,这本书是不能编写成的。在本书编写过程中,尚宏琦教授级高工、冯立杰教授级高工、杨武洲教授级高工给予了热情的支持、鼓励和指导,也得到了华北水利水电学院电力学院和水利学院老师的支持和帮助。在此一并谨向他们表示衷心的感谢!

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(50379013)、水利部公益性行业科研专项经费(200801011)和河南省教育厅自然科学基金(2004570003)项目的资助,中国水利水电出版社为本书的出版付出了辛勤的劳动。特此向支持和关心作者研究工作的单位和个人表示衷心的感谢!

至今,国内外对脉冲液体射流泵的基本理论,特别是脉冲射流的流速分布规律缺乏深入、系统的研究。脉冲液体射流泵要广泛用于实际工程,还有许多理论和试验研究需要进一步的深入与完善。本书在脉冲液体射流泵基本理论与试验研究方面做了一些工作,但由于作者水平有限,开展此项研究时间不长,也缺乏经验,很多问题属于探索性内容,定会存在不少缺点以及不当与不成熟之处,敬请有关专家多加批评指正,也希望今后能在全中国汇集更强的技术力量,针对脉冲液体射流泵的基本理论与应用开展研究。

作者

2009. 6. 21

于郑州

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 射流泵的基本概念	1
1.2 国内外研究与应用概况	4
第 2 章 射流泵理论基础	10
2.1 流体力学的基本方程.....	10
2.2 紊流射流的理论概述.....	25
2.3 脉冲射流.....	37
第 3 章 脉冲液体射流泵理论研究	40
3.1 脉冲液体射流泵基本性能方程.....	40
3.2 脉冲液体射流泵能量平衡分析.....	46
3.3 脉冲液体射流泵基本性能方程参数确定.....	53
3.4 脉冲液体射流泵汽蚀性能.....	64
3.5 脉冲液体射流泵装置性能.....	68
3.6 脉冲液体射流泵装置效率方程.....	80
第 4 章 脉冲液体射流泵性能数值研究	87
4.1 脉冲液体射流泵基本性能的数值计算.....	87
4.2 脉冲液体射流泵装置性能的数值计算	102
4.3 脉冲液体射流泵最优参数的计算结果及分析	108
4.4 脉冲液体射流泵能量平衡的数值计算	110
第 5 章 脉冲液体射流泵性能试验研究	117
5.1 试验装置	117
5.2 试验仪表与误差分析	118
5.3 脉冲液体射流泵基本性能试验	120
5.4 脉冲液体射流泵最优参数试验	136
5.5 脉冲液体射流泵装置性能试验	139
5.6 脉冲液体射流泵能量平衡试验	141
第 6 章 脉冲液气射流泵基本性能研究	151
6.1 液气射流泵国内外研究应用概况	151
6.2 液气射流泵概念	155

6.3	脉冲液气射流泵基本理论方程	159
6.4	脉冲液气射流泵基本性能方程	161
6.5	脉冲液气射流泵基本性能试验研究	170
第7章	射流泵内部流场数值模拟	178
7.1	计算流体力学 (CFD) 概述	178
7.2	控制方程及算法	181
7.3	Eulerian 模型	183
7.4	液体射流泵内部流场的数值模拟	187
7.5	液气射流泵内部液气两相流场的数值模拟	194
第8章	液体射流泵装置流体过渡过程研究	198
8.1	概述	198
8.2	射流泵全特性理论分析	198
8.3	液体射流泵装置过渡过程研究	205
8.4	液体射流泵反常工况试验	217
附录	223
附录 1	恒定液体射流泵基本性能方程	223
附录 2	恒定液体射流泵装置性能方程	225
附录 3	恒定液体射流泵装置效率方程	228
附录 4	恒定液体射流泵顶点效率方程	228
参考文献	230

第 1 章 绪 论

1.1 射流泵的基本概念

1.1.1 射流泵的组成

通常用的射流泵，主要由喷嘴、喉管、扩散管、喉管入口段、吸入室等部件组成，如图 1-1-1 所示。射流泵一般采用铸造、焊接和车制 3 种，在总装时要保证喷嘴、喉管和扩散管的同心度。其他部件的结构形式参见文献 [1]。

1.1.2 工作原理

射流泵是利用射流紊动扩散作用来传递能量和质量的流体机械和混合反应设备。射流泵的工作原理如图 1-1-1 所示。具有一定压力的工作液体沿压力管路 B 引入喷嘴 1，在喷嘴出口处由于射流和空气之间的黏滞作用，把喷嘴附近空气带走，使喷嘴附近形成真空，在外界大气压力作用下，被抽送液体经吸入室 5 被吸上来，并随同高速工作液体一同进入喉管 2 内，在喉管内两股液体发生动量交换，工作液体将一部分能量传递给被抽送液体。这样，工作液体速度减慢，被抽送液体速度加快，到达喉管末端时两股液体的速度渐趋一致，混合过程基本完成。该液体然后进入扩散管 3，在扩散管内流速逐渐降低、压力上升，最后从排出管 C 排出。

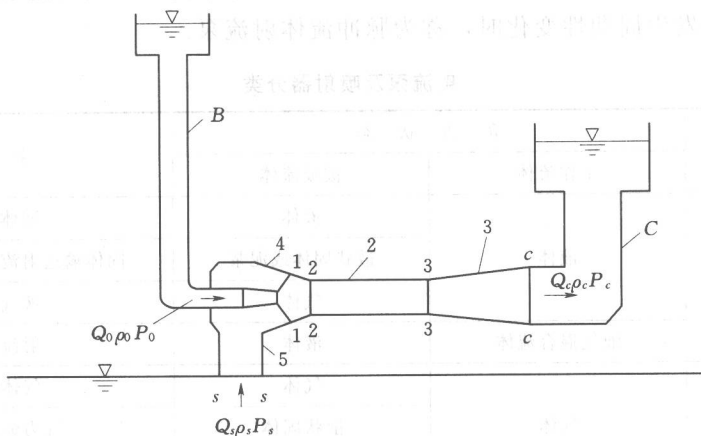


图 1-1-1 射流泵工作原理图

1—喷嘴；2—喉管；3—扩散管；4—喉管入口段；5—吸入室

1.1.3 射流泵的特点

由射流泵的工作过程看出，射流泵内没有运动部件，所以它具有结构简单，加工容易，工作可靠，安装维护方便，无泄漏，密封性好，便于综合利用等优点。在很多技术领

域内，采用射流泵技术可以使整个工艺流程和设备大为简化，并提高其工作可靠性，特别是在高温、高压、真空、强辐射及水下等特殊工作条件下，更显示出其独特的优越性。

由于射流泵内两股不同压力的液体混合时产生较大的能量损失，因此射流泵的效率较低，特别是在小型或输送高黏度液体时效率更低，一般情况下射流泵的效率不超过 30%，这是它的缺点。但由于射流泵的使用条件不同，它的效率也不一样，在有些情况下，它的效率不低于其他类型泵。如何合理使用射流泵，以便得到尽可能高的效率是一个很重要的问题。采用脉冲射流是一种提高射流泵效率的有效途径。

1.1.4 射流的分类及定义

根据射流流动状况中任一点的运动参数（如压力、流速）是否随时间不断的发生变化，分为恒定射流和非恒定射流。非恒定射流按运动参数随时间变化的特征，又可分为周期脉冲射流（称脉冲射流）和瞬变射流。脉冲射流是指流动状况中任一点的运动参数每隔一个称为脉冲周期的固定时间间隔重复出现时，或者说任一点的运动参数随时间发生周期性变化的射流；当流动状态中任一点的运动参数随时间不发生周期性变化时，称为瞬变射流。

本书的第 2 章至第 7 章研究脉冲射流，瞬变射流的研究见第 8 章。

1.1.5 射流泵的分类

目前射流泵还没有统一的分类方法。常用的方法是按工作流体及被吸流体的性质和物理状态分类：工作流体是液体（不可压缩流体）的称为射流泵，工作流体是气体（可压缩）的称为喷射器。根据被抽介质的物理状态，其分类见表 1-1-1^[1]。当射流泵内流体任一点的运动参数不随时间发生变化时，称为恒定流体射流泵；当射流泵内流体任一点的运动参数随时间发生周期性变化时，称为脉冲流体射流泵。

表 1-1-1 射流泵及喷射器分类

类别	介质状态		名称
	工作流体	被吸流体	
射流泵	液体	液体	液体射流泵
		散状固体或泥浆	固体输送射流泵或泥浆射流泵
		气体	液气射流泵
	液气混合流体	液体	射流混合器
喷射器	气体	气体	气体喷射器
		散状固体	气力输送喷射器
		液体	蒸汽热水喷射器

1.1.6 射流泵的基本参数

射流泵的基本参数包括几何参数和基本性能参数。

1.1.6.1 射流泵的几何参数

由射流泵的基本结构可知，射流泵的主要几何参数有：喷嘴进口直径 d_0 、喷嘴进口

直径 d_{01} 、吸入管直径 d_s 、喉管进口直径 d_2 和出口直径（扩散管进口直径） d_3 、扩散管出口直径 d_c 、喷嘴出口断面到喉管入口断面的距离喉嘴距 L_c 、喉管长度 L_k 、扩散管长度 L_p 、喉管进口收缩角 β 和扩散管的扩散角 α 等参数。影响射流泵性能的几何参数较多，但影响射流泵基本性能方程的主要是以下 3 个无量纲的几何参数。

1. 面积比

$$m = \frac{f_3}{f_{01}} = \left(\frac{d_3}{d_{01}} \right)^2 \quad (1-1-1)$$

式中 f_{01} 、 f_3 ——喷嘴出口收缩断面面积和喉管出口断面面积。

2. 吸入面积比

$$c = \frac{f_{s2}}{f_{s1}} \quad (1-1-2)$$

$$f_{s2} = f_2 - f_{02} = f_3 - f_{02} = f_3 - \lambda f_{01} = f_{01}(m - \lambda) \quad (1-1-3)$$

$$f_{s1} = f_1 - f_{01} \quad (1-1-4)$$

$$\lambda = \frac{f_{02}}{f_{01}} = \left(\frac{d_{02}}{d_{01}} \right)^2 \quad (1-1-5)$$

式中 f_{s2} ——吸入流体在 2—2 断面的过流面积；

f_{s1} ——吸入流体在 1—1 断面的过流面积；

f_{02} ——工作流体在 2—2 断面的过流面积；

f_1 ——工作流体和被吸流体在 1—1 断面的过流面积之和；

f_2 ——工作流体和被吸流体在 2—2 断面的过流面积之和。

3. 混吸面积比

$$n = \frac{f_3}{f_{s2}} = \frac{m}{m - \lambda} \quad (1-1-6)$$

1.1.6.2 射流泵的基本性能参数

射流泵内流体的运动参数主要包括流量 Q_i 、压力 p_i 、密度 ρ_i 和流速 u_i 等， $i=0$ 、 s 、 c 分别表示工作流体、吸入流体和混合流体。由于运动参数较多，在研究射流泵的性能时，通常采用无因次的参数表征射流泵的基本性能。

1. 流量比

$$q = \frac{Q_s}{Q_0} = \frac{\text{吸入流体流量}}{\text{工作流体流量}} \quad (1-1-7)$$

2. 压力比

$$h = \frac{\left(p_c + \rho_c g z_c + \frac{u_c^2}{2} \rho_c \right) - \left(p_s + \rho_s g z_s + \frac{u_s^2}{2} \rho_s \right)}{\left(p_0 + \rho_0 g z_0 + \frac{u_0^2}{2} \rho_0 \right) - \left(p_s + \rho_s g z_s + \frac{u_s^2}{2} \rho_s \right)}$$

$$= \frac{\Delta p_c}{\Delta p_0} = \frac{\text{射流泵扬程}}{\text{工作扬程}} \quad (1-1-8)$$

3. 密度比

$$\bar{\rho}_s = \frac{\rho_s}{\rho_0} = \frac{\text{吸入流体的密度}}{\text{工作流体的密度}} \quad (1-1-9)$$

4. 效率

射流泵的效率 η 与射流泵的装置型式有关, 不同装置型式的射流泵效率计算方法见本书 3.6 节。

对于脉冲射流, 上述式中的基本性能参数和流体运动参数都是时间 t 和脉冲频率 ω 的函数, 即

$$\phi_i = \phi_i(x_i, \omega_i, t) \quad (1-1-10)$$

式中 ϕ ——不同的基本性能参数或流体运动参数。

1.2 国内外研究与应用概况

对射流泵的研究方法到目前为止, 主要有理论、试验与数值计算 3 种方法。在发现射流现象的初期, 首先对其工作原理及设计理论进行研究, 随着射流泵的不断应用, 逐步认识到其内部流态复杂, 通过理论与试验研究, 逐步建立与完善射流泵的流动数学模型, 寻找提高射流泵性能的途径。随着流体力学、计算机技术的不断发展, 射流流场数值计算技术也在不断的发展与完善。3 种研究方法相得益彰, 进一步加强对射流泵性能的研究力度。

1.2.1 恒定射流泵研究综述

早在 16 世纪人们就已经发现两股流体的混合现象, 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^[1]。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, 并已将射流泵应用在烟道的强制通风上。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。1933~1934 年, 美国学者 J. E. 高斯 (Gosline), M. P. 奥必宁 (Obrine) 对液体射流泵的设计和理论进行了 786 次大规模的试验研究, 建立了基本性能方程, 并应用于油井抽油。1939 年, G. V. 福劳格建立了射流泵及喷射器的计算方法。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。1948 年, D. 斯立林 (Citirini) 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。20 世纪 40 年代初, 美国内政部开始制造射流泵用于基坑排水。1951 年, T. W. 劳德斯 (Rodes) 研究了用液体射流泵抽送泥沙。1952 年, J. W. 麦科纳基 (Maconaghy), 提出了射流泵装置性能计算方法。20 世纪 50 年代随着冶金工业的发展和钢液真空处理新技术的出现, 机械泵不能满足和适应新技术所需的真空度较高、抽气量较大的要求, 而蒸汽射流泵却呈现出其独特的优越性。1956 年, 美国把它应用在 220t 钢液真空处理设备, 并得到世界各国的重视。1953~1954 年, R. G. 寇宁汉 (Cunningham), 研究了抽吸高黏滞性液体的射流泵性能。1955~1956 年, R. 科格劳 (Vogel) 研究了射流泵的基本性能最优设计参数, 提出射流泵效率可以达到 40%。1956 年, S. T. 波宁顿 (Bonnigton) 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^[3]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) 提出利用 19 孔的多喷嘴液气射流泵, 使该泵的等温压缩率效率超过 40%。1964 年, A. L. Addy^[4] 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) 提出液体射流泵设计方法。1974 年, R. G. 寇宁汉 (Cunnigham) 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^[5] 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。1980 年, K. E. Brown 和 H. L. Petrie 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, 但仍局限于等密度体系。1983 年, H. L. Petrie 等^[6] 给出了非等密度体系中的模型, 并对射流泵几何尺寸进行了初步研究。B. Tjondrodiputro 等^[8] 对远距离水力射流泵进行了研究。B. Jiao 等^[9] 对两相水力射流泵的效率与压力恢复问题进行了研究。S. H. Winoto 等采用一维模型得到了射流泵的效率方程, 通过理论分析和试验, 说明圆形喷嘴在其喷嘴面积与喉管面积之比为 0.3 时具有最高的效率。2004 年, Iran Eduardo Lima Neto 和 Rodrigo de Melo Porto^[11] 对微型液体射流泵 (标称直径为 25mm 和 32mm) 进行效率试验研究, 标称直径为 25mm 的液体射流泵最高效率达 30.5%。

前苏联在射流泵的研究上, 投入了大量的人力、物力。1930 年, B. H. 冈察洛夫利用流体力学阐明射流泵计算原理。1931~1940 年, K. K. 巴乌林在中央流体力学研究所和 Л. Я. 波劳曼在全苏热工研究所, 根据研究成果, 整理了射流泵的设计方法, 并推导出在变工况下射流泵的性能方程。1931~1950 年, П. Н. 卡勉涅夫总结了 20 年的研究成果, 于 1950 年发表了射流泵专著。1945 年以来, Е. Я. 索科洛夫在全苏热工研究所对射流泵进行了理论与试验研究, 1960 年出版了射流泵专著 (第 1 版), 他又与 H. M. 津格尔对射流泵的设计理论和计算方法进行比较全面系统的研究, 于 1970 年再版了射流泵专著^[12]。

我国在中华人民共和国成立以后, 一些科研院所、高等学校和设计单位等开始进行射流泵的研究工作。1958 年, 淮北煤矿建井公司采用射流泵进行竖井排水。1961~1964 年, 中国农业机械化研究院结合华北地区深井提水需要设计研制了 SLB 系列射流泵。1960 年以来, 武汉大学陆宏圻教授^[1,2] 运用流体力学和紊流射流理论系统的研究了液体射流泵的基本性能方程、汽蚀性能方程、装置性能方程和最优参数方程, 于 1989 年出版了专著《射流泵技术的理论与应用》, 2004 年又出版了专著《喷射技术理论与应用》。与此同时, 金锥、胡湘韩等^[13-15] 分别对射流泵进行了设计理论与计算方法的研究。

1.2.2 脉冲射流泵研究进展

由于射流泵两股不同压力的流体混合时产生较大的能量损失, 因此射流泵的效率低于叶片类型泵。提高射流泵的传能及传质效率, 一直是国内外学者所关注的问题。20 世纪 70 年代以来, 国内外学者主要从两种途径来提高射流泵的效率。一种途径是研制新型结构的射流泵, 如采用多股射流、多级射流等^[1,2,37-39], 在提高射流泵效率方面取得了一定的进展。另一种途径是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, 这一研究受到了各国学者的高度重视, 并进行了大量的试验研究。试验结果均表明, 采用脉冲射流确实可较大的提高射流泵的效率^[40-76]。

脉冲射流现象最早发现于 19 世纪中期。1858 年, Leconte 是一名医生但他对声学很有研究, 在一次音乐晚会上, 他发现气灯火苗随着大提琴的音调变化而不断地作有节奏的跳动, 因此他发表一篇题为《a deaf man might have seen the harmony》的文章。1867 年, Tyndall 指出火苗的跳动是由于通过气灯喷嘴孔将要变成紊动的燃气射流对各种乐调敏感引起的。1896 年, Rayleigh 指出脉冲射流柱面上的涡街不稳定, 因此当声波通过射流出口就会在射流柱面上不断产生表面波, 而这些表面波加速射流成为脉冲射流, 并增加射流的混合率, Rayleigh 当时没有给出这些波的准确表达式。直到 1962 年, 雷诺 (Reynolds) 在轴对称射流试验研究中才解决了该问题。20 世纪 70 年代初, 人们对研究脉冲射流产生了浓厚的兴趣。1971 年, 法国学者 S. C. Crow 和 F. H. Champagne^[40] 揭开了对脉冲射流泵研究的序幕。1972~1975 年, G. Binder 和 M. Favre - Marinet^[41,42,69] 在气体工作管路上安装了一个旋转蝴蝶阀来产生脉冲气体, 然后对脉冲气体射流及其在航空助推器中的应用进行了试验研究。研究表明, 脉冲气体射流喷射器的推动力是恒定射流喷射器的 1.4 倍, 并指出这是由于脉冲射流轴线上的紊动强度比恒定流大, 因此具有较高的扩散率和吸卷率, 并已研制出推力比普通喷射器增加 25% 的脉冲喷射器。1972~1973 年, B. Quinn^[49,53,76] 对脉冲气体射流助推气体喷射器的应用进行了试验研究, 结果表明, 助推气体喷射器的推力直接与射流出口卷吸率和混合率成正比, 他指出射流混合率的增加有助于减小航空助推喷射装置的尺寸和重量。1974~1975 年, H. Viets^[46,55] 在飞机助推动力装置的反馈射流回路上安装了一个脉冲射流喷射器, 脉冲频率由反馈回路的长度来确定, 结果增加了射流的混合率和扩散能力, 对飞机的垂直和短距起飞 (V/STOL) 产生了显著的影响。20 世纪 70 年代初期, R. M. Curter 和 J. P. Girard、L. J. S. Bradburg 和 A. H. Khaden、G. E. Mattingly 和 C. C. Chang 等各国学者^[43,54,70] 对脉冲气体射流进行了试验研究, 得出了与上述结论相同的结论, G. E. Mattingly 结合试验, 经理论分析给出了脉冲射流平均流速分布表达式。

1977 年, W. G. Hill 和 P. R. Greene^[47] 研制了一种利用喷嘴合理的几何结构自激产生脉冲气流的装置, 称为气笛喷嘴 (Whister nozzle), 研究表明, 当气笛喷嘴发出清脆悦耳的声音时, 脉冲射流的混合率就迅速增加, 而脉冲射流中心线上的流速衰减较快, 并就喷嘴的几何尺寸对脉冲频率的影响进行了简单的分析。1979~1981 年, K. Bremhorst 等^[44,45] 分别对全脉冲射流 (full pulsed) 和脉冲中心射流 (pulsed core) 进行试验研究和理论分析, 得到脉冲射流的时均速度、射流扩展率和平均雷诺应力分布的表达式, 并指出全脉冲射流的卷吸率和混合率大于脉冲中心射流的卷吸率和混合率, 但没有进行脉冲频率和泵的主要几何尺寸对脉冲射流基本性能影响的研究。1981 年, M. Favre - Marinet 和 G. Binder^[52] 也研制了一种利用喷嘴的不同几何结构产生脉冲气流的装置 (与气笛喷嘴结构完全不同), 用不同的几何参数和气体动力参数对喷嘴出口处的脉冲气流特性的影响进行试验, 结果表明, 喷嘴出口的气流摆角对脉冲气流的紊动速度影响较大, 其紊动速度基本上按正弦变化。1982 年, P. G. Parikh 和 R. J. Moffot^[50] 对有限空间脉冲射流和恒定射流进行了试验研究, 当脉冲频率等于有限空间试管 (confinement tube) 的自然频率 (或称风琴管频率) 时, 射流的卷吸率和混合率比恒定射流提高了 20%~37.5%, 但没有对脉冲射流的传能及传质的机理进行研究。P. G. Parikh 等人^[50,65] 分别对脉冲射流和恒定射

流的酒精燃烧进行了试验,结果对比表明,脉冲燃烧不仅比恒定燃烧提高了燃烧值,而且燃烧的灰尘大大减少,有利于环境保护。1990年,K. Bremhorst 和 G. Hollis^[57]指出正是由于脉冲射流流场分布不同于恒定流,才导致射流的卷吸率和混合率有较大的提高。20世纪80年代初,由AGA和LENNOX公司共同研究开发的LENNOX民用脉冲燃烧暖风机在商业上大获成功。1995年,国内学者秦朝葵、张同等^[77-79]对脉冲燃烧运用于暖风机、热水器、人工煤气燃烧器上进行了试验研究。

在脉冲液体射流泵研究方面,1967~1972年英国通用电力公司中心实验室的A. J. Walkden等^[89],为了提高磁流发电机的效率,研制了用于输送华氏1500°K高温熔化钾盐的脉冲式双级射流泵。20世纪80年代初,在英国核燃料公司(BNFI)的支持下,Grant等与Sheffield和Cardiff大学合作,利用脉冲射流理论,研制出了一种无运动部件的可输送放射性液体的装置(RFD)(即气液活塞式脉冲液体射流泵装置),并成功地在Dowreag快堆后处理厂和Sellefield的高放废料大罐进行了试验,现已普遍应用于英国热铀后处理厂,取得了巨大的经济效益^[90-92]。1981年,J. R. Trippetts和G. H. Priestman对RFD流体提升装置的效率和稳定性进行了理论研究^[177],并在假定脉冲压力不变的情况下,导出了脉冲压力发生器及脉冲液体射流泵的效率计算公式。2001年,美国的Mark D. Morgan^[93]利用气液活塞式脉冲液体射流泵装置将液体与泥浆进行混合射流,并成功地应用于工程中。

在国内,陆宏圻教授从20世纪80年代中期开始对脉冲射流泵进行研究。1986年,他与北京重型机械厂合作,进行了脉冲离心射流真空泵的研制工作,并对其运行机理进行了研究,提出了基本方程。1996年,陆宏圻、高传昌等^[95]对气液活塞式脉冲发生器和脉冲液体射流泵进行了理论与试验研究,提出了相应的设计理论和计算方法。1999年以来,高传昌等^[96-109]对脉冲流体在组合管路中的运动特性、脉冲液体射流泵的基本性能方程、装置性能方程、装置效率方程和装置稳定性方程以及方程中的有关参数进行了理论与试验研究,研究表明,脉冲液体射流泵及其装置的基本性能高于恒定液体射流泵及其装置的基本性能。郭彦华等^[128]对气动式脉冲液体射流泵性能进行了试验研究。

1.2.3 射流泵流场的数值计算

20世纪70年代以来,随着计算流体力学及其计算机技术的进步,射流泵内部流场的数值计算发展很快,这也是深入研究射流泵性能的有效途径之一^[129-146]。1987年,陆宏圻等^[2,129]用有限容积法及 $k-\epsilon$ 湍流模型对射流泵的流场及温度场进行了数值计算,并用弱可压缩流理论及湍流的大尺度漩涡模拟模型对射流泵二维平面流场进行了数值计算。郭金基(1992)^[130]采用有限元法对等直径喉管内流场进行了数值模拟。倪福生等^[131]对射流泵内部有限空间射流的有限元分析。廖定佳(1997)^[133,134]对不规则区域射流泵内的流动进行了数值模拟,但他的侧重点在液—气两相射流泵方面。此外,还有如Habib(1980)、罗卫民(1988)、Elghobashi(1977,1989,1999)、路仲麓(1989)、陈正文(1992)、朱劲木(2001)等^[143-145]也采用了有限控制容积法及有限分析法对射流泵进行了数值模拟。沈忠厚、汪志明等^[146,147]对脉冲射流流场进行了数值研究,并将脉冲射流应用于石油钻机,大大提高了钻井的速度。

随着流动可视化技术 (flow visualization) 的发展^[148-165], 又开辟了研究射流泵内部流场的一种全流场测试的新的研究方法。1993 年, 国外研究人员用 LDV (Laser Doppler Velocimetry) 对自由液体射流喷嘴内的流场进行了测试^[152,153]。据有关资料知, 文献 [155, 161] 分别对水射流泵内流场进行了 LDA 测试, 由于没有采用实时信号处理系统, 因而仅测出了时均流场的分布。文献 [96] 采用 LDA 技术对水—空气射流泵渐缩锥形混合室内蒸汽流流速进行了测试。刘成文等^[156]介绍了 LDV 测试水射流流场的技术和方法。姬忠礼等^[157]用 PIV (Particle Image Velocimetry) 技术对振荡射流流场进行了测试。2004 年, 何培杰等^[158,159]采用 PIV 流场测试技术对液体射流泵的内部流场进行了初步的试验研究。

1.2.4 射流泵的应用概况^[166-188]

射流泵技术的大规模应用, 始于 20 世纪的 30~40 年代, 70 年代已得到普遍应用, 目前已遍及各个国民经济行业。射流泵技术主要应用于水利电力工程、交通运输工程、环境保护工程、城镇给排水及消防工程、矿山冶金工程、石油及地质勘探工程、航空航天工程和核动力工程等实际工程领域。如对于在上、下游水位变幅较大或扬程较低 (1~3m) 而流量较大的泵站, 可采用离心泵或轴流泵与射流泵并联以增加泵站的流量, 也可用于对离心泵抽气充水和对轴流泵虹吸式出水管抽气辅助起动, 泵房排水、前池及取水口淤积等。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。在灌溉和排水方面, 在井渠结合的灌区, 用射流泵可提高渠道水位。在机坑排水中, 利用射流泵可保持基坑干燥而能连续工作, 很少耗用电力与燃料。在水电站水轮发电机组的技术供水与排水、调相压水, 尾水管强制补气等方面, 实践证明射流泵供水比其他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。如 20 世纪 40 年代美国大古力水电站技术供水系统就采用了射流泵, 我国在较多的大型电站技术供水系统中也成功地应用了射流泵。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, 提高了设备的安全和经济性。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。在河道、海港疏浚施工及水下采砂方面可用射流式泥浆泵挖泥船; 射流泵可作为船舶舱底排水泵, 可直接排除污水和泥浆; 在舰艇与潜艇上喷射器用于冷凝器抽气和排热。在轻工和化工中射流泵主要用于真空干燥、升华、蒸馏、结晶、提纯、过滤、运输、浓缩、灭菌、回潮等工艺过程, 因其良好的密封性, 有利于抽吸和输送有毒、易爆、易燃和放射性介质, 另外射流泵还可作为混合化学反应设备。在环境保护方面, 由液气射流泵组成的射流曝气装置, 通过液体射流的紊动扩散作用, 使空气中的氧溶解于污水, 为分解有害物质的活性污泥提供能量, 还可用液气射流泵组成的喷射浮选装置, 通过液体射流把空气粉碎为小气泡, 这些小气泡与污水中的乳化油结合, 浮升到水面, 达到除油的目的。在分建式叶轮曝气生化处理工艺中, 射流泵可用于曝气池及沉淀池之间活性污泥回流; 在污泥消化处理过程中可用于对消化池污泥进行搅拌; 利用气体

喷射器把高温尾气（煤气）吸入燃烧室内燃烧，将能量回收用于加热炉料；利用液气射流泵可吸收一些工厂排除的有害气体；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；利用水气射流泵对水进行充氧除铁，在水力加速澄清池中射流泵作为加速水循环用泵，也可用于给水泵站大、中型水泵起动前抽气充水，还可作为下水道排污用泵和便器冲洗器；在通风降温方面，蒸汽喷射制冷空气调节装置可用于厂房通风降温，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；在供热、采暖方面，射流泵用于调节室内、外热力网的温度，将汽暖改为水暖，节能效果显著，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，可以产生大量泡沫达到灭火目的；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，防止汽蚀的产生，人造卫星上的空间发电装置也采用射流泵作为增压泵；在无电源地区，可供水及井灌为农牧服务；因射流泵内部无运动部件，不会损伤鱼类，可作为鱼类输送和增氧设备。此外，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。

第2章 射流泵理论基础

2.1 流体力学的基本方程^[200-202]

实际流体在流动时应当遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。其相应的方程为连续方程、运动方程和能量方程。这些方程可以写成矢量形式、直角坐标形式、张量形式和矢量积分形式。

2.1.1 矢量形式的微分方程

2.1.1.1 可压缩流体的流体力学基本方程组

1. 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (2-1-1)$$

或

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2-1-2)$$

2. 运动方程

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{F} + \nabla \cdot [\tau] \quad (2-1-3)$$

或

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot \left(-\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{u} \right) + \nabla \cdot (2\mu [s]) \quad (2-1-4)$$

3. 能量方程

$$\rho \frac{de}{dt} = [\tau] \cdot [s] + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q \quad (2-1-5)$$

或

$$\rho \frac{de}{dt} = -p \nabla \cdot \vec{u} + \phi + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q \quad (2-1-6)$$

$$\rho \frac{dh}{dt} = \frac{dp}{dt} + \phi + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q \quad (2-1-7)$$

$$\rho T \frac{ds}{dt} = \phi + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q \quad (2-1-8)$$

$$\phi = \lambda (\nabla \cdot \vec{u})^2 + 2\mu [s]^2 \quad (2-1-9)$$

4. 本构方程

$$[\tau] = (-p + \lambda \nabla \cdot \vec{u}) [I] + 2\mu [s] \quad (2-1-10)$$

在流体运动时，若流体的膨胀率不是很大，可用 $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 代入式 (2-1-10)，则得式 (2-1-11)。