中国科技论文在线 http://www.paper.edu.cn

第21卷 第1期 核科学与工程 Vol.21 No.1
2001年 3月 Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering Mar. 2001

脉冲液体射流泵装置效率的理论研究

高传昌[1],陆宏圻[2],王世诚[3],程明川[3]

(1 华北水利水电学院水利系,郑州 450045;2 武汉水利电力大学;3 北京核工程研究设计院)

摘 要:对影响气液活塞式脉冲液体射流泵装置效率的主要因素进行分析,导出了脉冲液体射流泵装置效率理论方程及其理论方程的时均解。结果表明,在相同的液体射流泵装置上,采用脉冲射流比恒定射流的传能及传质效率有较大的提高。脉冲液体射流泵时均效率的计算结果与国内外的试验结果基本一致。

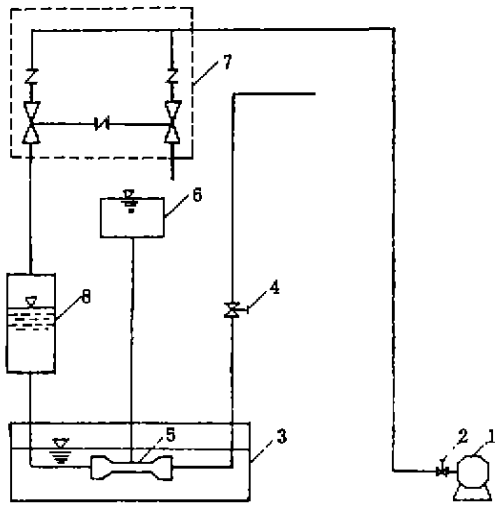
关键词:脉冲液体;射流泵;装置效率

1 引 言

气液活塞式脉冲液体射流泵装置主要用于核电站后处理厂中输送放射性液体[1]。它由动力源、脉冲发生装置(由脉冲压力发生器7、气液活塞筒8及管路系统组成)和脉冲液体射流泵装置(由供液箱6、脉冲液体射流泵5及其管道系统等组成)三大部分组成,如图1所示。其装置效率可由下式定义

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \qquad (1)$$

式中的 η_1 为脉冲发生装置效率,其计算公式见文献[2,3]; η_3 为动力源的效率,动力源常为空气压缩机,其效率由厂家或样本提供; η_2 为脉冲液体射流泵的装置效率,它是本文研究的主要内容。



1. 空气压缩机;2. 闸阀;3. 循环水箱;
4. 闸阀;5. 脉冲液体射流泵;6. 供液箱;
7. 脉冲压力发生器;8. 气液活塞筒

图1 气液活塞式脉冲液体射流泵装置

Fig. 1 Pulsed gas and liquid jet pump device

2 装置工作原理

气液活塞式脉冲液体射流泵装置工作原理分压液和排气与反吸两个工作过程。

2.1 压液工作过程

打开脉冲压力发生器中的压缩空气阀,压缩气体经气体管道,直接作用于气液活塞筒内的液体之上,形成有压液体,该液体经液体管道

收稿日期:2000-4-29

作者简介:高传昌:1997年毕业于武汉水利电力大学流体机械及流体动力工程专业,博士。

陆宏圻:1964年研究生毕业于武汉水利电力学院流体机械及流体动力工程专业。长期从事喷射技术的理论及应用研究工作 教授、博士生导师。

转载

通过脉冲液体射流泵喷嘴射出，并从供液箱内吸入部分液体，两者在喉管内混合后，通过排液管输送到下一级液料箱。

2.2 排气与反吸过程

当气液活塞筒内的液体压缩到设计标准时，关闭压缩空气阀，打开抽气阀和通气阀，气液活塞筒内的压缩空气瞬间排出，筒内压力降低，同时真空喷射器抽吸活塞筒内的气体，使压力降低到供液箱和排液管中部分液体能被反吸到气液活塞筒内，当筒内的反吸液体上升到设计值时，关闭通气阀和抽气阀，打开压缩空气阀，再将筒内液体压缩到设计标准，如此反复循环。由此可见，装置的工作过程就如同"活塞泵"工作过程，筒内的液体随着"活塞"不断的压出和反吸，形成了脉冲液体，而形成脉冲过程的动力为脉冲压缩气体，故此称为气液活塞式脉冲液体射流泵装置。

由装置工作原理可知，在压液过程中，脉冲液体射流泵处于泵的工作运行状况，而在排气与反吸过程中，脉冲液体射流泵并非泵的工作运行状况。脉冲压力发生器的型式不同，压液过程用的时间(压液时间)和反吸过程用的时间(反吸时间)不同，它将影响脉冲液体射流泵的装置效率。

3 脉冲液体射流泵装置效率

3.1 脉冲液体射流泵效率及其装置效率的定义

脉冲液体射流泵的效率是射流泵输出的有效功与输入功的比值。由脉冲液体射流泵装置组成可知，其装置效率为脉冲液体射流泵的效率与管路系统效率的乘积，即

$$\eta_2 = \eta_{jp}\eta_{ps} \tag{2}$$

式中的 η_{ps} 为管路系统效率，它是管路系统的水力损失和液体射流泵的总扬程的函数；下面着重研究脉冲液体射流泵效率 η_{jp} 的计算公式。

3.2 脉冲液体射流泵效率公式

由气液活塞式脉冲液体射流泵装置工作原理可知，在压液过程中，通过脉冲液体射流泵喷嘴的工作流量，在进入喉管的同时，要卷吸供液箱中一部分液体进入喉管混合均匀后，一起经出液管输送到下一级储液罐。在反吸过程中，经喷嘴反吸到气液活塞筒内的液体有两部分，一是供液箱中的液体在反吸压力作用下供给气液活塞筒的液体(主要部分)，二是出液管倒泄供给气液活塞筒的液体(比例很小)，倒泄液体的多少取决于供液箱的液位。由此可见，脉冲液体射流泵的输出有效功 N_e 为

$$N_e = (Q_{op} + Q_{sp})t_p \frac{\Delta p_{op}}{\rho_0 g} - q_w \forall \frac{\Delta p_{op}}{\rho_0 g} \tag{3}$$

输入功 N 为

$$N = Q_{op}t_p \frac{\Delta p_{op}}{\rho_0 g} + Q_{os}t_s \frac{\Delta p_{os}}{\rho_0 g} \tag{4}$$

由于

$$Q_{op} + Q_{sp} = (1 + q)Q_{op} \tag{5}$$

$$\forall = Q_{op}t_p \tag{6}$$

$$Q_{op}t_p = Q_{os}t_s \tag{7}$$

将式(5)，(6)和式(7)分别代入式(3)和式(4)，经整理得到脉冲液体射流泵效率计算公式

$$\eta_{jp} = \frac{[(1 + q) - q_w]h}{1 + K_{ps}} \tag{8}$$

其中

$$q = \frac{Q_{sp}}{Q_{op}} \tag{9}$$

$$h = \frac{\Delta p_{op}}{\Delta p_{op}} \tag{10}$$

$$K_{ps} = \frac{\Delta p_{os}}{\Delta p_{op}} \tag{11}$$

式(9)～式(11)中液体运动参数均是脉冲频率 ω 和时间 t 的函数[1,4]，因此，脉冲液体射流泵效率计算式(8)也是脉冲频率 ω 和时间 t 的函数。由于脉冲液体射流泵基本方程 $h = f(q, \omega, m, t, \overline{\rho_s})$ 中的某些参数，目前尚无法确定[4]，所以下面研究脉冲液体射流泵时均效率的计算方法。

3.3 脉冲液体射流泵时均效率的计算

脉冲液体射流泵时均基本性能的简化经验公式为[4]

$$h(\omega) = (\varphi_1^2 + \omega A)\frac{h_0}{q_0}[q_0 - q(\omega)] \tag{12}$$

$$q(\omega) = \overline{q} + \omega\overline{q(\omega)} \tag{13}$$

式中的 h_0 和 q_0 由下式计算[5]：

$$\left.\begin{aligned} q_0 &= (5m - 0.944\,5)^{0.5} - 1.75 \\ h_0 &= 2.667 - 0.002\,53(m + 26.07)^2 \end{aligned}\right\}$$

$$(m = 1.5 \sim 3.0, \overline{\rho_s} = 1) \quad (14)$$

$$\left.\begin{aligned} q_0 &= (5m - 0.94)^{0.5} - 1.7 \\ h_0 &= 1.45m^{-0.892} \end{aligned}\right\}$$

$$(m = 3 \sim 25, \overline{\rho_s} = 1) \quad (15)$$

式(12)中的 A 为一个与射流泵面积比和脉冲频率等有关的数值。

式(11)反映了脉冲液体射流泵在反吸和压液两个不同工作过程中,作用于喷嘴的反吸工作压力与压液工作压力的比值。在不计管路水头损失和惯性水头时,由下面的式子给出 K_{ps} 的时均值计算公式[1,3]

$$K_{ps} = \frac{Z_o\rho_o g - E_{xs}}{E_{xp} - Z_o\rho_o g} \quad (16)$$

$$E_{xj} = p_{xj} + Z_{xj}\rho_o g + \frac{u_{xj}^2}{2}\rho_0 \quad (17)$$

$$p_{xj} = p_{xjo} + \frac{1}{t_j\omega} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p_{xjn}(x)}{n}[\sin(n\omega t_j + \alpha_{pjn}) - \sin\alpha_{pjn}] \quad (18)$$

$$u_{xj} = u_{xjo} + \frac{1}{t_j\omega} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_{xjn}(x)}{n}[\sin(n\omega t_j + \alpha_{ujn}) - \sin\alpha_{ujn}] \quad (19)$$

$$Z_{xj} = t_j u_{xjo} - \frac{1}{t_j\omega^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_{xjn}(x)}{n^2}[\cos(n\omega t_j + \alpha_{ujn}) - \cos\alpha_{ujn}] - \frac{1}{\omega}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_{xjn}(x)}{n}\sin\alpha_{ujn} \quad (20)$$

上述式中的下标 j 为 s 时表示反吸工作过程中的运动参数,下标 j 为 p 时表示压液过程中的运动参数,而式(20)中的时间 t_j 为一个确定的已知数。

由式(12)~(20)可以看出,脉冲液体射流泵时均值基本性能 h 和 q 及工作压力比值 K_{ps} 仅是脉冲频率 ω 的函数。将式(12)和式(13)代入式(8)后,得到脉冲液体射流泵效率理论时均的计算表达式。

$$\eta_2 = h_0(\varphi_1^2 + \omega A)[1 + \overline{q} + \omega\overline{q(\omega)} - q_w] \cdot [q_0 - \overline{q} - \omega\overline{q(\omega)}]/[q_0(1 + K_{ps})] \quad (21)$$

如果将脉冲液体射流泵处于恒定流状况工作时,即脉冲频率 $\omega = 0$,此时 $q_w = 0$, $K_{ps} = 0$,式(21)就与陆宏圻教授推导的第 I_a 装置的恒定流液体射流泵效率计算公式[5]完全相同

$$\eta_{0p} = (1 + q)h \quad (22)$$

式(22)中的 h 和 q 为恒定流液体射流泵的基本性能,其计算式为[5]

$$h = \varphi_1^2\frac{h_0}{q_0}(q_0 - q) \quad (23)$$

h_0 和 q_0 的计算公式同式(14)和(15)。

4 试验与验证

4.1 试验装置与方法

试验是在武汉水利电力大学喷射技术试验室进行,试验装置如图 1 所示。试验开始前,首先向循环水箱和供液箱充水达到设计要求,然后根据试验设计要求的脉冲频率,打开脉冲频率控制仪,脉冲压力发生器按设计频率开始工作。此时气液活塞式脉冲液体射流泵装置按设计要求进入工作运行状态。当工作运行状态稳定以后,试验数据采集系统采集一定时间段的试验数据,经计算机进行数据处理,给出试验结果。

4.2 试验结果

试验在两种脉冲压力发生器(单喷射器和双喷射器)和不同脉冲频率作用下,分别对不同面积比的脉冲液体射流泵基本性能和装置效率进行试验。根据试验结果,经整理得到图 2 和图 3 所示的不同脉冲频率下两种面积比($m_1 > m_2$)的脉冲液体射流泵时均效率试验数据。图中按式(21)绘制了不同脉冲频率下的脉冲液体射流泵的时均值理论效率曲线,同时也按式(22)将恒定流的液体射流泵理论效率曲线绘于图 2 和图 3 中(粗实线)。从图 2 和图 3 可得如下分析结果:

(1) 时均效率试验点与时均效率理论曲线基本吻合,这说明本文导出的脉冲液体射流泵时均效率理论计算公式基本正确。

(2) 在相同面积比的液体射流泵装置上,采用脉冲射流比恒定射流的效率有较大的提高,这与文献[6~8]所做的试验结果基本相同。

(3) 脉冲压力发生器为单喷射器作用时,两种脉冲频率的液体射流泵的效率曲线重合,

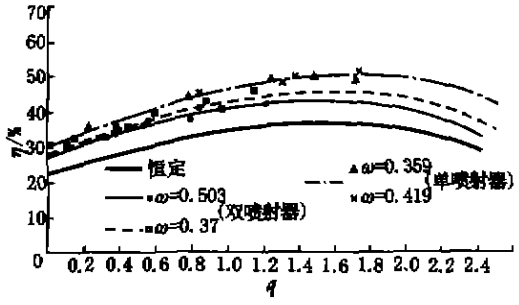


图 2 脉冲液体射流泵时均效率曲线
(面积比 m_1)

Fig. 2 Curve of the time-averaged efficiency of pulsed liquid jet pump (section ratio m_1)

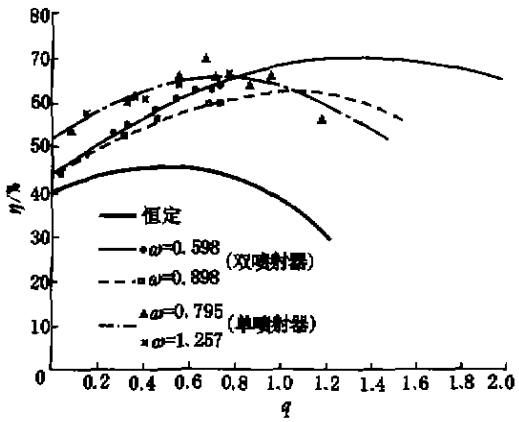


图 3 脉冲液体射流泵时均效率曲线
(面积比 m_2)

Fig. 3 Curve of the time-averaged efficiency of pulsed liquid jet pump (section ratio m_2)

而在双喷射器作用下的两种脉冲频率的效率曲线不重合。这是由于在单喷射器作用的两种脉冲频率下形成的压液时间很短,致使液体射流泵的引射效应接近,也就是其卷吸的流量基本相同;但在双喷射器下作用的两种脉冲频率形成的压液时间比较长,各自的引射效应不同。因此就造成了单喷射器作用时的效率曲线重合,而在双喷射器时效率曲线不重合。

(4)无论在单喷射器还是在双喷射器作用下,面积比大的液体射流泵(图 2)高效区间的流量比范围基本相同,而且单喷射器作用下的效率随着流量比的增加始终高于双喷射器作用下的效率。这是由于单喷射器作用下的脉冲液体射流泵的基本性能高于双喷射器下的基本性能所引起的[3,4]。面积比小的液体射流泵(图 3)在单喷射器作用下其脉冲基本性能曲线的斜率比双喷射器作用下的基本性能曲线的斜率陡[3],因而引起单喷射器作用下的高效区间的流量比范围小于双喷射器作用下高效区间的流量比范围,因此,单喷射器作用下的效率随流量比的增加不会始终大于双喷射器作用下的效率。由此可见,对面积比小的脉冲液体射流泵,脉冲压力发生器在采用双喷射器时,只有加大其流量比,才能使脉冲液体射流泵的效率达到最高。

5 结 语

本文导出的脉冲液体射流泵装置效率理论方程的时均解与时均试验结果基本吻合,同时也与国外文献[6-8]所做的脉冲射流能较大的提高其卷吸率(效率)的试验结果基本一致。但由于有限脉冲射流的流动机理目前尚不清楚,脉冲液体射流泵基本方程中的某些参数还不能确定[4],所以,本文未能得到脉冲液体射流泵效率方程的理论解。由文献[5]可知,不同的射流泵装置将具有不同的液体射流泵效率方程。由此可见,本文导出的效率方程是特定装置下的方程,无疑是不全面和不完善的。因此,今后随着脉冲射流研究的不断深入和脉冲液体射流泵基本方程的不断完善,不同装置下的脉冲液体射流泵装置效率理论方程及其数值解将逐步得到解决,使脉冲射流这一新技术在核动力工程、航空航天工程、化工与环境工程和水利水电等实际工程中发挥更大作用。

符号说明

Q_{op}——压液过程中,通过喷嘴的流量

Q_{sp}——压液过程中的被吸流量

Q_{os}—— 反吸过程中,通过喷嘴的流量

t_p——压液时间

t_s——反吸时间

Δp_{cp}——压液过程中,射流泵出口 c 断面与吸入 s 断面液体总压差

Δp_{op}——压液过程中,射流泵进口 o 断面与吸

入 s 断面液体总压差

Δp_{os}——反吸过程中，射流泵吸入 s 断面与进口 o 断面液体总压差

q_w——反吸过程中，出液管倒泄液体的体积与 $\forall$ 的比值

$\forall$——气液活塞筒的平均液体容积

q——射流泵的流量比

h——射流泵的压力比

φ——喷嘴流速系数

ω——脉冲频率

$\bar{q}$——平均流量比

$\overline{q(\omega)}$——与 ω 有关的流量比

m——射流泵的面积比

$\overline{\rho_s}$——密度比，$\overline{\rho_s}=\frac{\rho_s}{\rho_o}$

ρ_s——吸入液体的密度

ρ_o——工作液体的密度

Z_a——供液箱液面的位置高度

p_{xj}——脉冲液体的压力

u_{xj}——脉冲液体的流速

Z_{xj}——脉冲液体液面的位置高度

p_{xjo}——脉冲液体压力振幅的平均值

p_{xjn}——脉冲液体压力第 n 阶谐量的振幅

α_{pjn}——脉冲液体压力第 n 阶谐量的相位

u_{xjo}——脉冲液体流速振幅的平均值

u_{xjn}——脉冲液体流速第 n 阶谐量的振幅

α_{ujn}——脉冲液体流速第 n 阶谐量的相位

下标 x 表示气液活塞筒内的脉冲液体；j 为 s 时表示反吸工作过程中的运动参数，j 为 p 时表示压液过程中的运动参数。

参 考 文 献

1 高传昌，陆宏圻，王世诚等．气液脉冲流体在管道-容器-管道组合管路中的运动特性的研究．核科学与工程．1999，19(3)：234～240

2 Tippetts J R, Priestman G H. Factors Controlling the Efficiency and Performance of Gas Driver Fluidic Pumps. York 7th Technical Conference of the British Pump Manufacturers' Association, April 1981. 85～100

3 高传昌．非恒定射流泵装置的理论及试验研究：[博士学位论文]．武汉：武汉水利电力大学，1997

4 高传昌．脉冲液体射流泵基本性能的研究．水利学报，2000，277(1)：28～34

5 陆宏圻著．射流泵技术的理论及应用．北京：水利电力出版社．1989．35～101

6 Crow S C, Champagne F H. Orderly Structure in Turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 48(3): 547～591

7 Hill W G, Greene P R. Increased Turbulent Jet Mixing Rates Obtained by Self-Ex-cited Accoustic Oscillations. ASME Journal of Fluids Engineering, September 1977, 99: 520～525

8 Parikh P G, Moffat R J. Resonant Entrainment of a Confined Pulsed Jet. ASME Journal of Fluids Engineering, December 1982, 103: 482～488

Theoretical Study on Device Efficiency of Pulsed Liquid Jet Pump

GAO Chuanchang[1], LU Hongqi[2], WANG Shicheng[3], CHENG Mingchuan[3]

(1 North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045;
2 Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering; 3 Beijing Institute of Nuclear Engineering)

(Manuscript received April 29, 2000)

Abstract: The influence of the main factors on device efficiency of pulsed liquicd jet pump with gas-liquid piston is analysed, the theoretical equation and its time-averaged solution of pulsed liquid jet pump device efficiency are derived. The theoretical and experimental results show that the efficiency of transmission of energy and mass to use pulsed jet is greatly raised, compared with steady jet, in the same device of liquid jet pump. The calculating results of time-averaged efficiency of pullsed liquid jet pump are approximately in agreement with the experimental results in our and foreign countries.

Key words: pulsed liquid; jet pump; device efficiency