

V型液压阀口节流特性多目标优化

周玲君,殷晨波,叶 仪,袁峰峰

(南京工业大学 车辆与工程机械研究所,江苏 南京 211816)

摘要:提出了用来衡量V型节流阀口节流特性指标:等效水力直径曲线 D_{h2} 的斜率 d_{v2} 、阀口压降分配系数 k 、节流空化指数曲线 σ_2-X 的值 σ_{2lin} 、 σ_{21out} 。利用正交试验设计结构参数样本,运用模糊隶属度分析方法得到了节流特性较优的节流阀口结构参数组合。与初始的节流阀口结构相比较,其中 d_{v2} 相对初始结构提高了177.19%;阀口压降分配系数 k 增加了149.98%,使阀口压降过分集中得到了缓解;空化集中截面 A_2 附近的空化指数 σ_{2lin} 、 σ_{21out} 分别下降了0.31%和14.99%,在一定程度上减轻了V型节流阀口的空化现象。

关键词:液压阀口;节流特性;空化;优化;正交试验

中图分类号:TH16;TH137 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2014)05-0166-04

Multi-Objective Optimization for Throttling Characteristics of V-Notch

ZHOU Ling-jun, YIN Chen-bo, YE Yi, YUAN Feng-feng

(Institute of Automobile and Construction Machinery, Nanjing University of Technology, Jiangsu Nanjing 210009, China)

Abstract: Several parameters to evaluate the throttling characterization at the V-throttle outlet are presented here, including the slope d_{v2} of the equivalent hydraulic diameter curve D_{h2} , pressure drop distribution coefficient k at the valve outlet, σ_{2lin} and σ_{21out} of throttling index curve σ_2-X . The orthogonal experiment is designed to establish structural parameters of samples, and fuzzy membership analysis is employed to obtain optimum structural parameter combinations for throttle opening. Compared with the original structure of throttle opening, d_{v2} improves up to 177.19%, k increases 149.98%, which releases the exceeding focus of pressure drop at the notch. Also, σ_{2lin} and σ_{21out} reduce 0.31% and 14.99%, respectively. Consequently, the cavitation decreases to some degree at the V-throttle notch.

Key Words: Hydraulic Notch; Throttling Characteristic; Cavitation; Optimize; Orthogonal Experiment

1 引言

随着液压传动技术的不断完善进步,尤其在最近的十几年时间里,液压传动技术在机械设备上的应用取得了惊人的发展,为机械现代化的实现做出了突出的贡献。对于机械液压系统已有很多的学者研究了其特点,并得出了不少的研究成果^[1-5];不单是国内学者,国外也有很多的学者研究了液压系统^[6-9],并得出了很多有益的结论。然而目前对于以单个液压阀为对象的研究还不是很多,对于阀芯节流阀口节流特性的研究就更少了。

以V型节流槽为研究对象,将V型分压节流阀口节流特性的几个表征参数:水力直径变化曲线 $D_{h2}-X$ 的斜率 d_{v2} 、节流阀口压降分配系数均值 k 、过流截面 A_2 上的空化数 σ_{2out} 、 σ_{2in} 作为设计目标参数;并结合正交试验结构参数设计分发,得出了V型节流槽在不同阀口结构参数时的节流性能表征参数数值。由此可计算出了各组阀口结构节流特性参数的模糊隶属度,从而为判断具有相对最优节流特性的阀口结构有了依据,由此得到了具有相对最优节流特性的V型节流槽阀口结构参数组 L_i, H_i, θ_i ,从而可快速地计算所设计的节流阀口结构的节流特性表征参数,降低了节流阀口节流特性表征参数的计算难度。

2 V型节流阀口节流特性表征参数

V型节流槽由换向阀芯台肩与两个轴线与阀芯轴线正交的圆锥面相贯而成,其节流阀口几何构造,如图1所示。

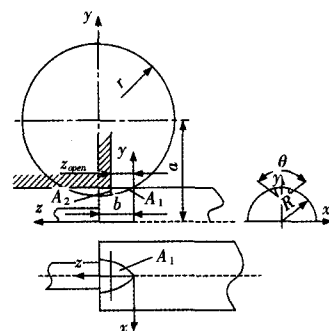


图1 V型节流槽几何构造

Fig.1 Geometric Structure in V Throttling Port

图1中所示的V型节流阀口,其节流边界曲线是比较复杂的,由于圆锥曲线相贯的特点可以知道,其边界曲线往往只能用隐式函数 $f(x,y)=0$ 表示,因此求V型节流阀口的过流截面面积的解析解是相当困难的。由于一般的节流阀,其节流阀口的尺寸

来稿日期:2013-10-04

基金项目:国家自然科学基金(50875122);江苏省科技支撑项目(BE2011187)

作者简介:周玲君,(1987-),女,江苏盐城人,硕士,主要研究方向:液压元件基础性研究;

殷晨波,(1963-),男,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:过程装备控制

相较于节流阀芯本身的几何尺寸是很小的,因此可以将图 1 中 V 型节流阀口的边界线简化,如图 2 所示。

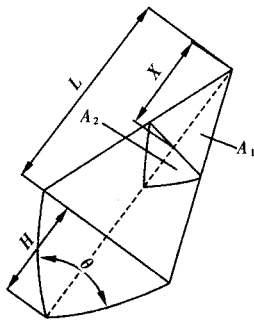


图 2 V 型节流阀口几何简化形式

Fig2 Simplified Geometric Structure in V Throttling Port

从图 2 可以看出,经几何结构简化后的 V 型节流阀口,其可以由节流槽长度 L , 节流槽最大深度 H , 和节流阀口两侧节流面夹角 θ 确定。且由图 2 可以知道, V 型节流槽的主要节流截面有 A_1 和 A_2 。作为节流阀口节流特性的衡量标准之一的通流能力,往往用节流截面的等效水力直径 D_h 表征,其数学定义为 $D_h=4A/P_{wetted}$ 。按图 2 所示结构,其过流截面 A_1, A_2 上的等效水力直径 D_{h1}, D_{h2} 为式(1)。

$$\begin{cases} P_{wetted1}(X_i) = 2\left(\frac{H}{L} \tan \frac{\theta}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{H}{L} \tan \frac{\theta}{2}\right)^2}\right) X_i \\ P_{wetted2}(X_i) = 2\frac{H}{L} \left(\sec \frac{\theta}{2} + \tan \frac{\theta}{2}\right) X_i \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)以及水力直径 D_h 定义 $D_h=4A/P_{wetted}$ 可知道 V 型节流阀口节流截面等效水力直径 D_{h1}, D_{h2} , 如图 3 ($L=5\text{mm}, H=1\text{mm}, \theta=80^\circ$) 所示。

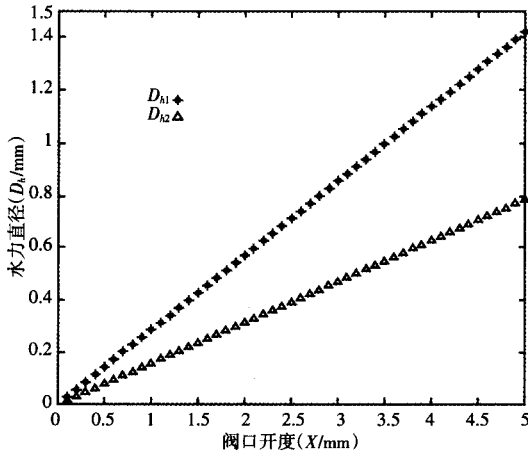


图 3 V 型节流阀口等效水力直径

Fig3 Equivalent Hydraulic Diameters

D_{h1} and D_{h2} in V Throttling Port

型节流阀口等效水力直径,如图 3 所示。由于 D_{h1} 和 D_{h2} 是串联关系,从图 3 中可以看出 V 型节流阀口的通流能力主要是由 D_{h2} 决定的。另外在图 3 中可以看出,等效水力直径为一直线,且 $D_{h2}-X$ 的斜率 d_{v2} 越大,则在相同的阀口开度范围内可获得的阀口流量范围也越广,因此将等效水力直径直线 $D_{h2}-X$ 的斜率 d_{v2} 作为衡量 V 型节流阀口节流性能的指标是合理的。

另外在文献^[1]中已经探讨了适用于分压节流阀口节流空化特性指数 σ_1, σ_2 的计算式(2)。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_{q2}A_2}{C_{q1}A_1}\right)^2}}{1 - \frac{p_k}{p_1}}, \sigma_2 = \frac{1 - \left(1 + \left(\frac{C_{q2}A_2}{C_{q1}A_1}\right)^2\right) \frac{p_3}{p_1}}{1 - \left(1 + \left(\frac{C_{q2}A_2}{C_{q1}A_1}\right)^2\right) \frac{p_k}{p_1}} \\ \sigma_1 &= \frac{1 - \left(1 + \left(\frac{C_{q1}A_1}{C_{q2}A_2}\right)^2\right) \frac{p_3}{p_1}}{1 - \left(1 + \left(\frac{C_{q1}A_1}{C_{q2}A_2}\right)^2\right) \frac{p_k}{p_1}}, \sigma_2 = \frac{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_{q1}A_1}{C_{q2}A_2}\right)^2}}{1 - \frac{p_k}{p_1}} \end{aligned} \quad (2)$$

在节流阀口外部流场确定以后,等效过流截面面积 $C_{q1}A_1, C_{q2}A_2$ 之间的比值 $C_{q2}A_2/C_{q1}A_1$ 的变化对节流特性会产生较大影响,将 $C_{q2}A_2/C_{q1}A_1$ 记作 k ,对 V 型节流阀口而言 $k=C_{q2}H/C_{q1}L$ 。依据式(2),得到 V 型节流阀口的空化特性指数,如图 4 所示。

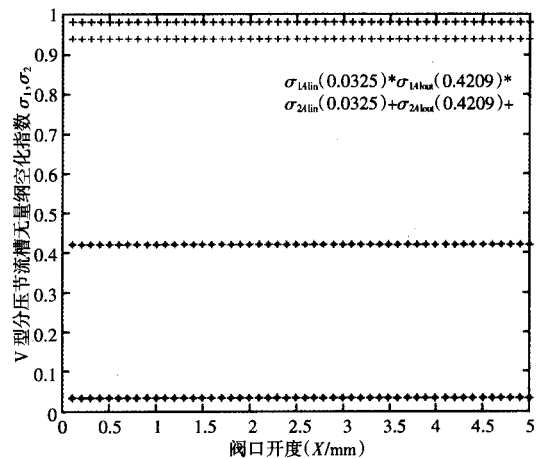


图 4 V 型节流阀口空化特性指数

Fig4 Cavitation Indexes σ_1 and σ_2 in V Throttling Port

从图 4 中可以看出,对于 V 型节流阀口其相对的节流空化剧烈区保持不变。对于阀口流量相反的两种情形,过流截面 A_2 附近的节流空化指数 σ_{2A1in} 和 σ_{2A1out} 始终要大于过流截面 A_1 附近的空化特性指数 σ_{1A1in} 和 σ_{1A1out} 。因此取 σ_{2A1in} 和 σ_{2A1out} 作为 V 型节流阀口节流特性的评价指标。

3 V 型节流阀口节流特性指标正交设计样本

V 型节流阀口的四个节流特性评价指标 $d_{v2}, k, \sigma_{2A1in}$ 和 σ_{2A1out} 能够较为可观的表述 V 型节流阀口的节流特性。为尽可能全面的反应节流阀口结构参数的变化对节流特性的影响,依据正交试验试验原理,设计了 V 型节流阀口不同结构因素的组合,如表 1 所示。

表 1 V 型节流阀口优化因素水平
Tab.1 V Port Structural Parameters Factors

水平	样本结构因素		
	L/mm	H/mm	$\theta/^\circ$
1	4	0.5	70
2	5	1	80
3	6	1.5	90
4	7	2	100

按正交试验原理,表1中对三个阀口结构因素分别取了四个水平,由此得到16组不同V型节流阀口结构,如表2所示。

表2 V型节流槽结构因素水平正交表
Tab.2 V Port Structural Parameters Orthogonal Design

样本	样本结构因素		
	L/mm	H/mm	θ/°
1	4	0.5	70
2	4	1	80
3	4	1.5	90
4	4	2	100
5	5	0.5	80
6	5	1	90
7	5	1.5	100
8	5	2	70
9	6	0.5	90
10	6	1	100
11	6	1.5	70
12	6	2	80
13	7	0.5	100
14	7	1	70
15	7	1.5	80
16	7	2	90

表2中V型节流阀口的不同节流结构,包含了丰富的阀口节流特性变化信息;在此基础上可得到这些不同节流结构的节流特性参数数值,如表3所示。

表3 V型节流槽不同结构因素水平下的节流特性指标
Tab.3 V Groove Throttling Indexes under Different Structural Factors and Levels

样本	样本结构因素			节流特性指标表征值			
	L/mm	H/mm	θ/°	d_{v2}	k	σ_{2A1in}	σ_{2A1out}
1	4	0.5	70	0.0911	0.1268	0.9827	0.9601
2	4	1	80	0.1956	0.2536	0.9821	0.9232
3	4	1.5	90	0.3107	0.3804	0.9809	0.8675
4	4	2	100	0.4338	0.5072	0.9794	0.7996
5	5	0.5	80	0.0783	0.1014	0.9828	0.9647
6	5	1	90	0.1657	0.2029	0.9824	0.9406
7	5	1.5	100	0.2603	0.3043	0.9817	0.9028
8	5	2	70	0.2916	0.4058	0.9807	0.8547
9	6	0.5	90	0.0690	0.0845	0.9828	0.9672
10	6	1	100	0.1446	0.1691	0.9826	0.9502
11	6	1.5	70	0.1823	0.2536	0.9821	0.9232
12	6	2	80	0.2609	0.3382	0.9814	0.8878
13	7	0.5	100	0.0620	0.0725	0.9829	0.9687
14	7	1	70	0.1041	0.1449	0.9827	0.9562
15	7	1.5	80	0.1677	0.2174	0.9828	0.9359
16	7	2	90	0.2367	0.2899	0.9818	0.9089

4 V型节流阀口最优多目标优化

对于节流阀口的节流特性优化,需要使节流特性指标参数 $d_{v2}, k, \sigma_{2A1in}$ 和 σ_{2A1out} 尽可能地得到提高,然而实际情况是随着节流阀口结构参数的改变,很难使每个节流特性指标的变化趋势一致,且一般节流阀口具有多个结构参数,它们的同步变化使选择节流特性最优的阀口结构的困难程度大大增加了。为了得到使节流特性得到优化的V型节流槽结构,引入了模糊隶属度的概念,通过模糊理论得出各组节流特性参数隶属度,如表3所示。由此得到了使节流阀口节流特性得到优化的阀口结构参数组。

对于V型节流阀口的节流特性参数 $d_{v2}, k, \sigma_{2A1in}$ 和 σ_{2A1out} ,等效水力直径 d_{v2} 和 k 是越大越好,其余几个指标则是越小越好,对于这种节流特性变化不一致的情形,需要分别对待。对于V型节流阀口,其寻优模型可归结为:

$$\begin{cases} \max flow=(D_{h2}, k) \\ \min cavitation=(\sigma_{2A1in}, \sigma_{2A1out}) \end{cases}$$

为了将V型节流阀口的节流特性寻优转换为单目标优化问题,引入了模糊隶属度。对于节流指标越大越好和越小越好这两种情形,需要建立它们的模糊隶属函数 μ_{A_i} 。

对于V型节流槽节流特性评价指标,可分别建立如下的模糊隶属度函数:

$D_{h2}-X$ 的斜率 d_{v2} 与 k 的模糊隶属度函数:

$$\mu_{A_{d_{v2}}} = \frac{f_{d_{v2}}}{\bar{f}_{d_{v2}}}$$

$$\mu_{A_k} = \frac{f_k}{\bar{f}_k} \tag{4}$$

而节流特性评价指标 σ_{2A1in} 和 σ_{2A1out} 的模糊隶属度函数则定义为:

$$\mu_{A_i} = \frac{f_i}{\bar{f}_i} \tag{5}$$

式中: f_1, f_2 —表3中每组揭露特性指标节流特性评价指标 σ_{2A1in} 和 σ_{2A1out} 的具体数值。

式(3)和式(4)中的 $\bar{f}_{d_{v2}}$ 和 \bar{f}_k 则按下式计算:

$$\bar{f}_{d_{v2}} = \max\{d_{A2j}\}$$

$$\bar{f}_k = \max\{k_j\}$$

$$\bar{f}_i = \min\{f_{ij}\}$$

for $j=1, 2, 3 \dots 16$ (6)

结合表3中节流特性指标的具体数值,得到了 $\bar{f}_{d_{v2}}, \bar{f}_k$ 和的数值为0.4338, 0.5072, 0.9794, 0.7996。且V型节流槽节流特性表征指标 $d_{v2}, k, \sigma_{2A1in}$ 和 σ_{2A1out} 的隶属度函数矩阵 R 为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.2100 & 0.2500 & 0.9966 & 0.8328 \\ 0.4509 & 0.5000 & 0.9973 & 0.8661 \\ 0.7162 & 0.7500 & 0.9985 & 0.9217 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.1805 & 0.1999 & 0.9965 & 0.8289 \\ 0.3820 & 0.4000 & 0.9969 & 0.8289 \\ 0.3832 & 0.4000 & 0.9969 & 0.8501 \\ 0.6000 & 0.6000 & 0.9977 & 0.8857 \\ 0.6722 & 0.8001 & 0.9987 & 0.9355 \\ 0.1591 & 0.1666 & 0.9965 & 0.8267 \\ 0.3333 & 0.3334 & 0.9967 & 0.8415 \\ 0.4202 & 0.5000 & 0.9973 & 0.9661 \\ 0.6014 & 0.6668 & 0.9980 & 0.9007 \\ 0.1429 & 0.1429 & 0.9964 & 0.8254 \\ 0.2400 & 0.2857 & 0.9966 & 0.8362 \\ 0.3866 & 0.4286 & 0.9965 & 0.8544 \\ 0.5456 & 0.5716 & 0.9976 & 0.8797 \end{pmatrix}$$

为了比较节流特性指标组之间的相对最优性,需要确定各个节流特性指标参数的共同标准,显然在节流特性指标组的公共

比较指标向量 f^0 为: $f^0=(1,1,1,1)$ (7)

为了确定 V 型节流槽节流特性指标组与 f^0 之间的相对远近, 需要求出他们之间的空间距离。定义隶属度函数矩阵 R 中每个行向量 $R(:, i)(i=1, 2, 3, \dots, 16)$ 与节流特性指标组公共比较指标向量 f^0 之间空间距离为:

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (r_{i,j} - f_j^0)^2 w_j}$$

for $i=1, 2, 3, \dots, 16$ (8)

式中: $r_{i,j}$ —隶属度函数矩阵 R 中第 i 行第 j 列元素; f_j^0 — f^0 中的第 j 个元素; w_j —每个节流特性指标的权重系数。结合隶属度函数矩阵 R 和式(8), 得到了 V 型节流槽节流特性指标组与 f^0 之间的相对距离 d 。

$$d = \begin{pmatrix} 0.1672 \\ 0.1339 \\ 0.0783 \\ 0.0000 \\ 0.1711 \\ 0.1499 \\ 0.1143 \\ 0.0645 \\ 0.1733 \\ 0.1585 \\ 0.1339 \\ 0.0993 \\ 0.1746 \\ 0.1638 \\ 0.1456 \\ 0.1203 \end{pmatrix} \quad (9)$$

相对距离 d 是选取具有较优节流特性节流阀口的依据, 由 d 的计算过程可知对于每组节流阀口结构, 其相对距离的数值越小越好。结合表 3, 从(9)中判断出第四组阀口结构具有较好的综合节流特性, 其结构为 $L_4H_2\theta_{100}$ 。

将 V 型节流阀口的初始结构与优化后结构相比较, 发现经过模糊隶属度分析后所得的节流阀口结构确实能够提高 V 型节流阀口的节流特性。

从表 4 中可以看出相对于 V 型节流阀口的初始结构参数 $L_5H_1\theta_{80}$, 经优化后的结构 $L_4H_2\theta_{100}$ 其节流特性有了明显提高, 其中: 等效水力直径 D_{h2} 的斜率 d_{v2} 提高了 177.19%, 即通流能力得到了明显提高; 阀口压降分配系数 k 提高了 149.98%, 更加接近于 1, 使阀口压降的分配趋向合理, 减小了压降过分集中; 空化集中过流截面 A_2 上的空化数 $\sigma_{2A_{1in}}, \sigma_{2A_{1out}}$ 分别下降了 0.31% 和 14.99%。

表 4 V 型节流槽初始结构和优化后结构节流特性表征值比较
Tab.4 Initial Structure and Optimal Structure's Throttling Performance Indexes in V Groove

样本方案	d_{v2}	k	$\sigma_{2A_{1in}}$	$\sigma_{2A_{1out}}$
$L_5H_1\theta_{80}$	0.1565	0.2029	0.9824	0.9406
$L_4H_2\theta_{100}$	0.4338	0.5072	0.9794	0.7996
节流特性	+177.19%	+149.98%	-0.31%	-14.99%

5 结论

(1) 从 V 型节流的结构特性出发, 获得了表征节流阀口节流特性的指标, 分别为等效水力直径曲线 D_{h2} 的斜率 d_{v2} ; 阀口压降分配系数 k , 节流空化指数曲线 σ_2-X 的值 $\sigma_{2A_{1in}}, \sigma_{2A_{1out}}$ 。

(2) 将 V 型节流阀口的节流特性评价指标 $d_{v2}, k, \sigma_{2A_{1in}}, \sigma_{2A_{1out}}$ 作为 V 型节流阀口节流特性优劣的评价指标, 利用正交试验构造了 V 型节流阀口 16 组正交样本, 并求得了每组阀口结构参数的节流特性。

(3) 利用模糊隶属度分析得到了综合节流特性较优的节流阀口结构参数组 $L_4H_2\theta_{100}$ 。与初始的节流阀口结构相比较, 其中 d_{v2} 相对初始结构提高了 177.19%; 阀口压降分配系数 k 增加了 149.98%, 使阀口压降过分集中得到了缓解; 空化集中截面 A_2 附近的空化指数 $\sigma_{2A_{1in}}, \sigma_{2A_{1out}}$ 分别下降了 0.31% 和 14.99%, 即在一定程度上减轻了 V 型节流阀口的空化现象。

参考文献

- [1] 袁士豪, 殷晨波, 刘世豪. 液阻阀口二级节流[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 716-720.
(Yuan Shi-hao, Yin Chen-bo, Liu Shi-hao. Study on properties of valve port two-stage throttling[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(6): 716-720)
- [2] 冀宏, 张继环, 王东升. 滑阀矩形节流槽阀口的流量系数[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(3): 47-50.
(Ji Hong, Zhang Ji-huan, Wang Dong-sheng. Flow coefficient of rectangular notch throttle orifice in spool valve [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(3): 47-50.)
- [3] 冀宏, 王东升, 刘小平. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 198-202.
(Ji Hong, Wang Dong-sheng, Liu Xiao-ping. Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 198-202.)
- [4] Li Z, Jing L, Yuan R B. The CFD analysis of twin flapper-nozzle valve in pure water hydraulic[J]. Procedia Engineering, 2012(31): 220-227.
- [5] Fu X, Du X W, Zou J. Simulation and experiment of bubbly flow inside throttling groove [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(5): 37-41.
- [6] Masjedani J, Rahimzadeh H. Waveform analysis of cavitation in a globe valve[J]. Ultrasonics, 2009(49): 577-582.
- [7] Catania A E, Ferrari A, Spessa E. Temperature variations in the simulation of high-pressure injection-system transient flows under cavitation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008(51): 2090-2107.
- [8] Dasgupta K, Karmakar R. Modeling and dynamics of single-stage pressure relief valve with directional damping [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2002(10): 51-67.
- [9] Choi in -Keun, Jayaprakash A, Georges L. Scaling of cavitation erosion progression with cavitation intensity and cavitation source[J]. Wear, 2012 (279): 53-61.