

引用格式: 伍勇, 郭有松, 洪明. 基于正交设计的黏滞流体阻尼器性能仿真及参数分析[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(3): 164-169, 206.

WU Y, GUO Y S, HONG M. Performance simulation and parameter analysis of viscous fluid damper based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(3): 164-169, 206.

基于正交设计的黏滞流体阻尼器 性能仿真及参数分析



扫码阅读全文

伍勇¹, 郭有松², 洪明^{*1}

1 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024

2 江苏工邦振控科技有限公司, 江苏 常州 213000

摘要: [目的] 研究黏滞流体阻尼器工作时的内部流场分布规律、开孔半径、开孔长度、开孔个数以及活塞直径对阻尼系数和速度指数影响的敏感度。[方法] 通过正交设计得到参数设计方案, 采用 FLUENT 软件进行流场仿真计算, 以得到流场分布规律及各方案的阻尼系数和速度指数, 并计算各结构参数对两者的影响程度。[结果] 计算结果表明, 黏滞流体阻尼器的内部流场分布基本符合平行平板、圆管内的定常层流运动分布规律。各结构参数对阻尼系数和速度指数的影响程度依次为: 开孔半径>活塞直径>开孔个数>开孔长度; 开孔半径>开孔个数>开孔长度>活塞直径。[结论] 采用正交设计并结合 FLUENT 流场仿真的方法能够最大限度地减少设计方案的数量, 可以节约试验成本, 缩短设计周期, 具有很高的实际应用价值。

关键词: 黏滞流体阻尼器; 正交设计; FLUENT 流场仿真; 灵敏度分析

中图分类号: U664.84; TB535

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01872

Performance simulation and parameter analysis of viscous fluid damper based on orthogonal design

WU Yong¹, GUO Yousong², HONG Ming^{*1}

1 School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2 Jiangsu Gongbang Vibration Control Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China

Abstract: [Objectives] This paper investigates the flow field distribution inside a working viscous fluid damper (VFD), and the sensitivity of the hole radius, hole length, number of holes and piston diameter to the damping coefficient and velocity index. [Methods] Parameter design schemes are obtained through orthogonal design, and a FLUENT flow field simulation is applied to study the flow field distribution, and calculate the impact degree of structural parameter on the damping coefficient and velocity index of each scheme.

[Results] The results show that the internal flow field distribution basically conforms to the regular distribution of laminar flow in parallel flat plates and tubes, the impact degree of each factor on the damping coefficient and the velocity is obtained in descending order, i.e. hole radius>piston diameter> number of holes>hole length, and hole radius>number of holes>hole length>piston diameter. [Conclusions] The combination of orthogonal design and FLUENT flow field simulation can minimize the design scheme, shorten the design cycle, and reduce experimental cost, giving it great significance for practical engineering applications.

Key words: viscous fluid damper (VFD); orthogonal design; FLUENT flow field simulation; sensitivity analysis

0 引言

黏滞流体阻尼器(viscous fluid damper, VFD)

由缸筒、活塞头、活塞杆、密封件和黏性介质等部分组成,属于速度相关型阻尼器,具有结构简单、无刚度、速度快以及减振效果好等特点,被广

收稿日期: 2020-01-02

修回日期: 2020-08-03

网络首发时间: 2021-04-26 10:26

作者简介: 伍勇,男,1996年生,硕士生。研究方向:结构失效、振动和噪声机理、预报及控制。E-mail: wuy0511@mail.dlut.edu.cn

郭有松,男,1974年生,硕士,高级工程师。

洪明,男,1959年生,博士,教授。研究方向:结构失效、振动和噪声机理、预报及控制。E-mail: mhong@dlut.edu.cn

*通信作者: 洪明

泛应用于军事装备、航空航天、船舶、车辆等领域。目前, VFD的理论相对比较成熟, 而准确把握各结构参数对 VFD 阻尼性能影响的敏感度以用于指导设计仍是当前研究的难点, 与此同时, 其阻尼性能的设计和参数测定仍以大量的试验为主, 研发周期长、成本高。

国内外研究人员对于 VFD 的研究已取得诸多成果。Makris 等^[1]重点研究了 VFD 的流体动力学理论, 提出了力学模型, 该研究为 VFD 的应用设计奠定了理论基础, 但未研究 VFD 结构参数对阻尼性能的影响。美国国家地震研究中心和加州大学伯克利分校地震研究中心针对 VFD 做了大量的模型试验研究。此外, 美国国家科学基金会和美国土木工程学会也针对 VFD 组织了 2 次大型的联合测试: 美国旧金山金门大桥联合测试和美国高速公路创新技术评估中心对比试验 (HITEC)^[2-3]。这些试验测试旨在证明 VFD 用于结构抗振的可行性和可靠性, 而对于如何具体设计未做研究。对于 VFD 结构参数与阻尼性能间的关系, 欧进萍和丁建华^[4-5]构建了间隙式和孔隙式 VFD 的阻尼力计算公式, 但未能得出各结构参数对速度指数的影响程度。陈威^[6]通过控制变量法研究了 VFD 的结构参数对阻尼性能的影响, 但因研究方案太多, 效率较低, 无法得出各参数对阻尼性能的敏感度。刘晓飞^[7]重点研究了活塞开孔形式对 VFD 的速度指数的影响, 而其他结构参数对速度指数的影响则未予以研究。

从上述国内外研究情况来看, 对 VFD 的研究主要包括 2 类: 一类是研究理论基础及其实际应用的可行性; 另一类是研究各结构参数与阻尼性能间的关系。然而, 目前对于 VFD 各结构参数对阻尼性能的敏感度, 以及通过 FLUENT 仿真计算与理论对比分析来设计研究 VFD 阻尼性能的文章较为少见。

受前人启发, 本文拟采用正交设计方法, 研究 VFD 的结构参数对阻尼性能的敏感度, 并优化 VFD 的设计方法。首先, 确定各结构参数的选取范围; 然后, 运用正交设计表确定各参数组合, 得到最具代表性的不同设计方案, 通过 FLUENT 流场仿真计算得到各方案的阻尼系数和速度指数, 并与理论计算和实测结果进行对比, 验证仿真的准确性; 最后, 由正交设计原理得到各结构参数对阻尼性能影响的敏感度, 以用于优化结构参数。

1 正交设计原理

在 20 世纪 40 年代后期, 日本统计学家田口玄一 (Genichi Taguchi) 使用设计好的正交表 (正交

设计法中用于合理安排试验并对数据统计分析的一种特殊表格工具) 安排试验, 这种方法简单易行, 从此正交设计在世界范围内得以普遍推广和使用^[8]。正交设计是多因素的优化试验设计方法, 是从全面试验的样本点中挑选出具有代表性的样本点来做试验, 这些样本点具有均匀分散性和整齐可比性^[8]。具体的实际操作就是使用正交表得到这些样本点, 进而得到相应的试验方案。

以 $L_9(3^4)$ 正交表为例, L 为正交表代号, 9 表示该表共 9 行, 3 表示每个影响因素具有 3 个水平取值, 4 表示该正交表最多安排 4 个因素。以图 1 对 $L_9(3^4)$ 进行直观解释: 三维正方体由 3 个互相垂直的平面分割出 27 个交叉点, 每个维度代表一个影响因素; 将每个维度分割成 3 份代表每个因素的水平, 则全部 27 个交叉点代表 3 个因素、3 个水平所需的全部试验次数。

根据正交设计思想, 只需均匀分散的 9 个试验点。具体位置安排如下: 每个平面含 9 个交叉点, 能确保刚好有 3 个是正交试验点, 且每条横线及竖线上分布有 1 个正交试验方案。图 1 所示为得到的含 9 个标记的试验点方案。以三角形标记点为例, 其表示 $A_2B_2C_1$, 即 A 因素取 2 个水平, B 因素取 2 个水平, C 因素取 1 个水平。

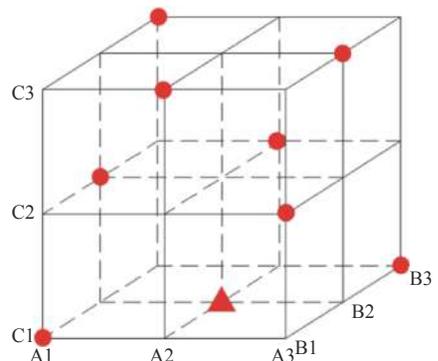


图 1 $L_9(3^4)$ 正交表试验分布

Fig. 1 Experimental distribution of $L_9(3^4)$ orthogonal array

正交试验设计方案制定与数据处理流程如图 2 所示。图中, K 为正交表中任一列相同水平号对应的试验结果之和, R 为各水平 K 的平均值中最大与最小值的差值 (极差), F 为阻尼力。

2 物理模型

本研究设计了组合式 VFD, 图 3 所示为构建的物理模型, 其由缸筒、活塞、活塞杆及内部二甲基硅油介质组成。分析中, 假设阻尼器内部的二甲基硅油均匀且不可压缩, 活塞杆和活塞头等为不变形的刚体, 且温度恒定。图中, D_0 为缸筒直径, D_1 为活塞直径, D_2 为活塞杆直径, L 为缸筒长

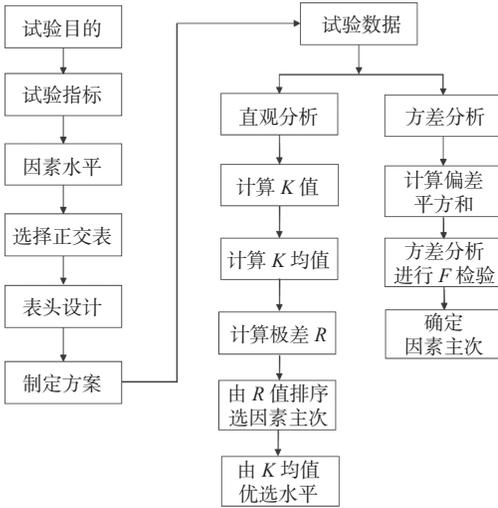


图2 正交设计流程

Fig. 2 Flowchart of orthogonal design

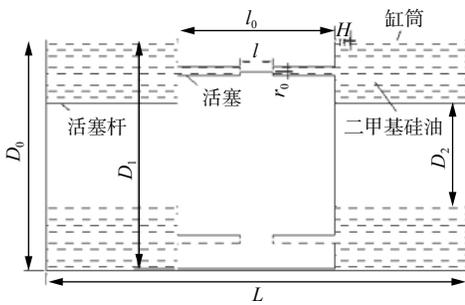


图3 黏滞流体阻尼器结构模型

Fig. 3 Structural model of viscous fluid damper

度, l 为开孔长度, l_0 为活塞厚度, r_0 为开孔半径, H 为缸壁与活塞间隙。

3 黏滞流体阻尼器正交试验方案设计

基于前人^[1,4-7,9]的研究分析, 活塞上的开孔半径 r_0 、开孔长度 l 、开孔个数 n 、活塞直径 D_1 等是影响 VFD 性能的主要因素。参考某工程 VFD 产品的结构参数, 固定因素取值如表 1 所示, 研究选取的 4 个影响因素取值如表 2 所示。

由 4 因素 4 水平所要求的全面试验次数 ($\geq 4^4=256$ 次) 可见, 其工作量过多, 需要采用正交设计来安排试验。具体思路如下: 每个方案的数据组合应保证 4 因素 4 水平的四维空间中各水平

表 1 固定因素取值

Table 1 Value of fixed factors

固定因素	固定取值
缸筒长度 L/mm	147
活塞杆直径 D_2/mm	56
缸壁与活塞间隙 H/mm	0.5
开孔位置距中心轴高度 h/mm	45

表 2 影响因素的取值范围

Table 2 Value range of influence factors

影响因素	取值
开孔半径 r_0/mm	1, 1.5, 2, 2.5
开孔长度 l/mm	60, 62, 64, 66
开孔个数 $n/\text{个}$	1, 2, 3, 4
活塞直径 D_1/mm	124, 128, 132, 136

分割平面上的方案数据相互正交, 每个选取的数据在统计学上具有不相关性, 且均匀分散, 整齐可比。具体而言, 本次试验为 4 因素 4 水平试验, 按正交试验思路只需安排 16 次试验, 故选取 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 把试验因素安排到列, 因素水平安排到行, 每列不同数字出现的次数相等, 任意两列及同一行中的数对出现次数相等, 得到 16 种方案组合, 并设置空列作为随机误差列。具体试验方案如表 3 所示。

表 3 正交设计方案表

Table 3 Schemes of orthogonal design

方案	影响因素				空列
	r_0/mm	l/mm	$n/\text{个}$	D_1/mm	
1	1	60	1	124	1
2	1	62	2	128	2
3	1	64	3	132	3
4	1	66	4	136	4
5	1.5	60	2	132	4
6	1.5	62	1	136	3
7	1.5	64	4	124	2
8	1.5	66	3	128	1
9	2	60	3	136	2
10	2	62	4	132	1
11	2	64	1	128	4
12	2	66	2	124	3
13	2.5	60	4	128	3
14	2.5	62	3	124	4
15	2.5	64	2	136	1
16	2.5	66	1	132	2

4 正交设计方案计算

VFD 的本构关系如式(1)所示, 其阻尼特性取决于阻尼系数 C 和速度指数 α 。为研究各参数变量影响阻尼特性的程度, 根据正交设计原理, C 和 α 需要作为正交设计的评价指标。将 FLUENT 计算得到的速度与阻尼力曲线进行乘幂函数拟合, 即可得到 C 和 α 。

$$F = C v^n \quad (1)$$

式中, v 为活塞运动速度。

4.1 仿真计算

4.1.1 计算方法与边界条件

仿真时, 根据相对运动原理, 保持活塞静止, 二甲基硅油以正弦位移由左端入口进入阻尼器内部做往复流动^[10]。VFD 内的流体(即硅油)为非牛顿幂律流体, 其本构关系^[11]表示如下:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^m \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力; k 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^m$, m 为流变指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。分析中, 选用 30 万 cSt 黏度硅油, 按文献 [9], $k=2\,600 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.275}$, $m=0.275$, 流体密度 $\rho=970 \text{ kg/m}^3$ 。仿真时, 硅油材料黏度采用非牛顿幂律模型。经式(3)^[12]及连续性方程计算, 得到试验方案中的最大雷诺数在间隙和孔隙处, 仅达到 1.355, 远远低于 2 300, 故选用了层流模型。

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

式中: D 为有效直径; μ 为液体介质的动力黏度。

为得到活塞面两侧压力变化, 采用非稳态计算, 分析中以余弦速度加载, 其速度为:

$$v = 0.04 \cos(2\pi t) \quad (4)$$

在 FLUENT 软件设置中: 与硅油接触的边界设为固壁, 即无滑移光滑边界条件; 出口为压力出口; 根据加载周期性, 迭代时间取 0.25 个周期; 考虑到计算速度, 迭代时间步长取 0.001 s。监测记录活塞两侧的瞬时绝对压力, 通过其与活塞面的有效面积的乘积得到每个时刻的瞬时阻尼力。

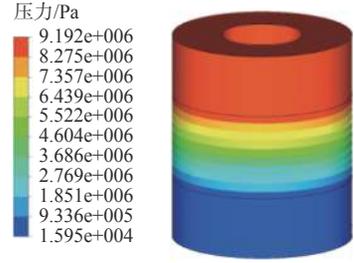
4.1.2 网格独立性检验

对流体域进行网格划分计算时, 不同网格大小对计算结果有一定的影响, 故选取了如表 4 所示的 4 组网格数的模型。根据稳态计算得到的压差阻力进行网格独立性检验, 结果如图 4 所示。随着网格数的增加, 压差阻力偏差较小, 可以认为达到了网格独立性要求。经综合考虑, 最终选取的是计算网格数为 2 091 891 的计算模型。

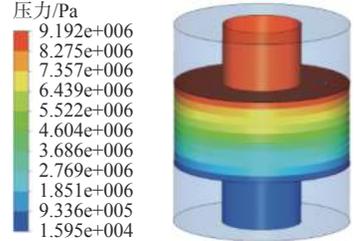
表 4 网格独立性检验

Table 4 Grid independence test

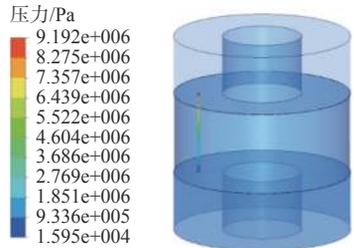
网格数	压差阻力/kN
1 396 233	87.13
1 944 179	88.57
2 091 891	89.13
4 499 032	88.16



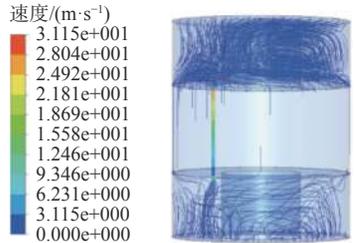
(a) 缸筒压力分布



(b) 活塞压力分布



(c) 开孔压力分布



(d) 流场速度分布

图 4 黏滞流体阻尼器性能仿真网格独立性检验结果

Fig. 4 Results of grid independence testing for property simulation of VFD

4.2 理论计算

根据流体控制方程, 欧进萍等^[4-5]构建了间隙式和孔隙式 VFD 的阻尼力计算模型, 推导了阻尼力计算公式。

为了防止拉缸, 在实际的 VFD 缸壁与活塞之间留有间隙。根据间隙式和孔隙式阻尼力计算公式进一步推导得到组合式(既有间隙又有孔隙)阻尼力的计算式为

$$F = kl \frac{[\pi(D_1^2 - D_2^2 - 4nr_0^2)]^{m+1}}{2^{2m+1} \left[\frac{m\pi H^{\frac{2m+1}{m}} (D_0 + D_1)}{4(2m+1)} + n \cdot \frac{m\pi r_0^{\frac{3m+1}{m}}}{3m+1} \right]^m} v^m \quad (5)$$

4.3 正交设计仿真、理论与试验结果分析

以方案 1, 8, 16 为例, 将仿真、理论与实测结

果的阻尼力和速度绘制成“力-速度”关系曲线,取0.85倍和1.15倍理论值进行对比分析,同时对“力-速度”进行乘幂函数拟合,如图5~图7所示。经比较,仿真结果与理论值的相对误差为±15%,且相比实测结果偏小,误差为±15%。

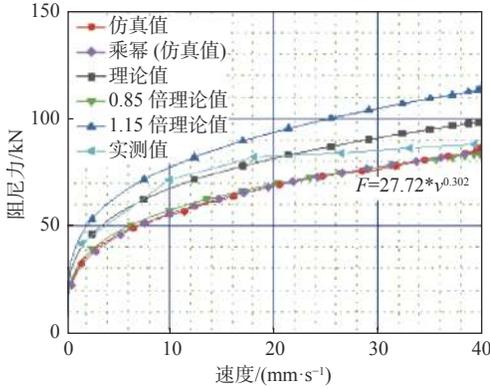


图5 仿真、理论和试验结果的力-速度曲线(方案1)

Fig. 5 Force-velocity curves of simulation, theoretical and experimental results in scheme 1

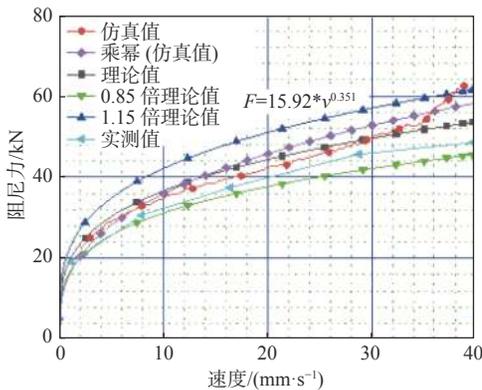


图6 仿真、理论与试验结果的力-速度曲线(方案8)

Fig. 6 Force-velocity curves of simulation, theoretical and experimental results in scheme 8

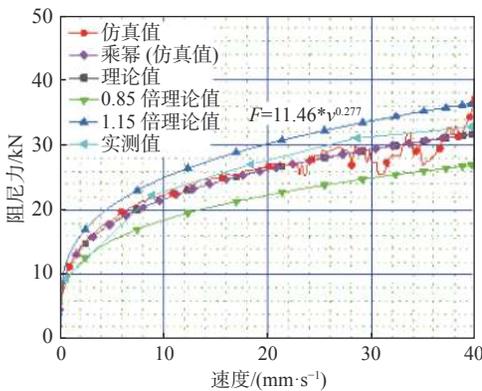


图7 仿真、理论与试验结果的力-速度曲线(方案16)

Fig. 7 Force-velocity curves of simulation, theoretical and experimental results in scheme 16

由正交设计方案计算得到的仿真与理论结果如表5所示。阻尼系数仿真结果与理论结果的相对误差为±15%,速度指数仿真与理论不同,主要在于理论推导中速度指数等于黏性介质的流变指

数,并且假设流体介质不可压缩,黏度不变。而仿真模拟幂律流体考虑了流体的黏度变化及可压缩性,因而会随结构的不同而发生变化。

表5 正交试验设计仿真与理论计算结果

Table 5 Simulation and theoretical calculation results of orthogonal design

方案	仿真结果		理论结果	
	阻尼系数 $C/(kN \cdot v^\alpha)$	速度指数 α	阻尼系数 $C/(kN \cdot v^\alpha)$	速度指数 α
1	27.72	0.302	35.75	0.275
2	28.38	0.323	37.07	0.275
3	31.72	0.299	39.21	0.275
4	32.87	0.325	41.89	0.275
5	19.25	0.345	21.69	0.275
6	22.60	0.373	29.34	0.275
7	14.22	0.297	15.78	0.275
8	15.92	0.351	19.46	0.275
9	12.28	0.280	12.72	0.275
10	11.17	0.262	11.06	0.275
11	13.56	0.325	15.19	0.275
12	10.80	0.320	11.71	0.275
13	6.61	0.258	6.45	0.275
14	6.80	0.255	6.53	0.275
15	10.06	0.276	10.10	0.275
16	11.46	0.277	11.51	0.275

4.3.1 以C为评价指标的仿真结果直观分析

对正交设计试验得到的数据结果进行分析存在2种方法:直观分析法和方差分析法,本研究采用直观分析法。对仿真结果以阻尼系数C为评价指标的直观分析结果如表6所示。表中, K_i 表示任一系列上水平号为*i*时所对应的试验结果之和; $\bar{K}_i = K_i/s$,其中*s*为任一系列上各水平出现的次数;极差*R*表示在任一系列上 \bar{K}_i 的最大值与最小值的差值,*R*越大,该因素的影响程度越大。

由各影响因素的均值 \bar{K}_i 随其取值变化趋势,可知在该取值范围内,阻尼系数C随 r_0, n 的增大而减小,随着 l, D_1 的增大而增大;当 $r_0=1.0\text{ mm}, l=66\text{ mm}, n=1, D_1=136\text{ mm}$ 时,阻尼系数C达到最大值。

根据表6中极差的大小排列,可知各影响因素在该取值范围内对阻尼系数C的影响程度由大到小为: $r_0 > D_1 > n > l$,其中阻尼孔半径 r_0 为主要影响因素,空白列极差较小,可以认为各因素之间无交互作用。

4.3.2 以α为评价指标的仿真结果直观分析

以速度指数α为评价指标的仿真结果直观分析如表7所示。

表6 以阻尼系数 C 为评价指标的直观分析Table 6 Visual analysis with the damping coefficient as the evaluation index C

影响因素	r_0/mm	l/mm	$n/\text{个}$	D_1/mm	空列
K_1	120.69	65.86	75.34	59.54	64.87
K_2	71.99	68.95	68.49	64.47	66.34
K_3	47.81	69.56	66.72	73.60	71.73
K_4	34.93	71.05	64.87	77.81	72.48
\bar{K}_1	30.17	16.47	18.84	14.89	16.22
\bar{K}_2	18.00	17.24	17.12	16.12	16.59
\bar{K}_3	11.95	17.39	16.68	18.40	17.93
\bar{K}_4	8.73	17.76	16.22	19.45	18.12
极差 R	21.44	1.30	2.62	4.57	1.90
排列	1	5	3	2	4
因素主次	$r_0 > D_1 > n > l$				

表7 以速度指数 α 为评价指标的直观分析Table 7 Visual analysis with the velocity index as the evaluation index α

影响因素	r_0/mm	l/mm	$n/\text{个}$	D_1/mm	空列
K_1	1.249	1.185	1.277	1.174	1.191
K_2	1.366	1.213	1.264	1.257	1.177
K_3	1.187	1.197	1.185	1.183	1.250
K_4	1.066	1.273	1.142	1.254	1.250
\bar{K}_1	0.312	0.296	0.319	0.294	0.298
\bar{K}_2	0.342	0.303	0.316	0.314	0.294
\bar{K}_3	0.297	0.299	0.296	0.296	0.313
\bar{K}_4	0.267	0.318	0.286	0.314	0.313
极差 R	0.075	0.022	0.034	0.021	0.018
排列	1	3	2	4	5
因素主次	$r_0 > n > l > D_1$				

由各影响因素的均值 \bar{K}_i 随其取值的变化趋势可知, 在表7中的取值范围内, 速度指数 α 是随 r_0 的增大先增后减; 随着 l, D_1 的增大, 则是先增大后减小然后再增大; 随着 n 的增加而减小; 当 $r_0=1.5 \text{ mm}, l=66 \text{ mm}, n=1, D_1=136 \text{ mm}$ 时, 速度指数 α 达到最大值。同理, 由表7中极差 R 的大小排列可知, 各影响因素在表中取值范围内对速度指数 α 的影响作用由大到小为: $r_0 > n > l > D_1$, 其中主要影响因素还是阻尼孔半径 r_0 , 空列极差较小可以认为是各因素之间无交互作用。

5 结论

本文基于正交试验设计的思想, 制定了多个VFD设计方案, 建立了仿真模型, 并通过FLUENT软件对VFD工作时的内部流场进行仿真计算, 得

到了压力和速度的分布规律及“力-速度”曲线。然后, 将仿真结果和理论计算与其中3个方案的实测数据分别进行对比, 验证了仿真模型的可行性, 得到了 r_0, l, n, D_1 对阻尼系数 C 和速度指数 α 的影响程度, 并得到如下结论:

1) 基于正交设计的仿真结果, 并以VFD的阻尼系数 C 和速度指数 α 为评价指标, 得到阻尼系数 C 的影响程度从大到小依次为 $r_0 > D_1 > n > l$, 对速度指数 α 影响程度从大到小依次为 $r_0 > n > l > D_1$ 。

2) 通过正交设计, 得到各因素在该范围内评价指标达到最大的最佳组合。当 $r_0=1.0 \text{ mm}, l=66 \text{ mm}, n=1, D_1=136 \text{ mm}$ 时, 阻尼系数 C 达到最大值; 当 $r_0=1.5 \text{ mm}, l=66 \text{ mm}, n=1, D_1=136 \text{ mm}$ 时, 速度指数 α 达到最大值。

3) 仿真计算结果与理论值和实测值的误差在 $\pm 15\%$ 以内。理论计算中, VFD的速度指数 α 等于硅油介质的流变指数 m , 而由实际数值模拟的设定和结果推知, VFD的速度指数除硅油参数外还主要取决于阻尼孔的大小, 故可以通过改变结构参数来改变速度指数。

4) 在本研究的基础上可对评价指标进行改进。例如, 取实际值与设计值的误差作为指标, 则可以通过正交设计确定评价指标最小, 即与设计值最接近的设计方案。将正交设计方法应用于VFD的设计开发, 可以显著减少设计方案, 缩短设计周期, 降低试验成本。

参考文献:

- [1] MAKRIS N, CONSTANTINOU M C, DARGUSH G F. Analytical model of viscoelastic fluid dampers[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(11): 3310-3325.
- [2] Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC) of a Service Center of the Civil Engineering Research Foundation (CERF). Summary of evaluation findings for the testing of seismic isolation and energy dissipation devices: report no. 40404.[R]. [S.l.]: CERF, 1999.
- [3] AIKEN I D, KELLY J M. Pre-qualification testing of viscous dampers for the golden gate bridge seismic rehabilitation project[R]. Berkeley, Richmond: Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1995.
- [4] 欧进萍, 丁建华. 油缸间隙式粘滞阻尼器理论与性能试验[J]. *地震工程与工程振动*, 1999, 19(4): 82-89.
OU J P, DING J H. Theory and performance experiment of viscous damper of clearance hydro-cylinder[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19(4): 82-89 (in Chinese).