

绕回转体通气空泡试验正交设计与分析

孔德才, 翟章明, 尤天庆, 王占莹

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 航行体模型试验是获得其流体动力特性的重要手段, 针对绕回转体通气空泡模型试验工况多、关键参数影响复杂的问题, 通过开展绕回转体通气空泡模型试验的正交设计, 减少了模型试验次数, 节省试验经费, 缩短试验周期, 获得影响空泡特征参数的主要因素。研究成果能够指导后续试验研究工作, 具有良好的工程应用价值。

关键词: 回转体 空化; 正交试验; 极差分析; 方差分析

中图分类号: TJ765.2 **文献标志码:** A

文章编号: 2096-4080 (2017) 04-0046-06

Orthogonal Design and Analysis for Ventilated Cavitation Experiment Around Revolution Body

KONG De-cai, ZHAI Zhang-ming, YOU Tian-qing, WANG Zhan-ying

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Model experiment is an important method of hydrodynamic research. The ventilated cavitation experiment around revolution body always being extensive and complex, orthogonal design of ventilated cavitation experiment can reduce the amount of the cases, save expenditure and shorten the experiment cycle, obtain the main influence factors of the cavity characters based on the results analysis. This work was of a great engineering application value and effective guidance for following study in this field.

Key words: Revolution body; Cavitation; Orthogonal experiment; Range analysis; Variance analysis

0 引言

物体在水中高速运动过程中, 在物体表面局部形成流动负压, 当这一压力降低到当地饱和蒸汽压力以下时, 在流体内部或固、液界面发生汽(气)化, 称为空化或空泡现象。在常温条件下, 当局部压力低于约 3000Pa 时, 就会发生空泡现象。空泡现象普遍存在于流体机械、航天、船舶相关的各个专业领域, 空泡的产生、发展和溃灭都伴随着高温高压现象, 对产品的结构特性和工作效率等都会带来较大影响^[1-2]。

试验是开展空泡特性研究的重要手段, 但受

到试验经费、试验周期等外界条件的约束, 不可能将空泡特性参数影响因素下的试验全部完成, 需要基于一定的设计方法开展试验, 并对试验结果进行分析, 以节省经费、缩短周期。正交试验设计是经典的试验设计方法, 它基于试验结果, 采用极差分析和方差分析方法, 获得关键参数的主要影响因素, 获得最优的试验方案, 指导后续试验设计。富立、祁家毅、Kincaid R K 等国内外的研究人员基于正交试验设计, 开展了多因素下的试验, 获得了较好的研究效果^[3-5]。

水下航行体水下高速运动过程中, 附着空泡长度决定了航行体表面的压力分布特性, 对航行

收稿日期: 2017-09-15; 修订日期: 2017-10-30

基金项目: 装备发展部共用技术基金 (41406040402)

作者简介: 孔德才 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事空泡多相流动机理研究。Email: bigblue_bit@msn.com

体的受力具有重要影响。研究表明,向附着空泡内通气能够有效增加空泡长度,调节航行体表面的压力分布^[6-7]。本文通过确定空泡长度的主要影响因素,选定合理的正交表,并据表开展试验研究,得到不同因素影响下的空泡长度,开展试验结果分析。

1 正交试验设计方法

1.1 基本概念

正交试验设计(Orthogonal experimental design)是研究多因素多水平的一种设计方法^[8],它是根据正交性从全面试验中挑选出部分具有代表性的水平组合进行试验,这些有代表性的水平组合具备均匀分散、齐整可比的特点,正交试验设计是一种高效率、快速、经济的试验设计方法。

1.2 正交表

正交试验设计采用正交表来安排试验^[9]。通过代表性很强的少数试验,摸清各个因素对试验参数的影响情况。正交表是一个由数字构成的有若干行和列的特殊表格。在此以常用的 $L_9(3^4)$ 正交表为例对正交表进行说明,见表1。

其中, $L_9(3^4)$ 的含义为: L 为正交表的代号,9为9次试验次数,4为4个因素,3为3个水平。

表1 $L_9(3^4)$ 正交表
Tab.1 $L_9(3^4)$ Orthogonal table

试验次数	试验因素			
	H	V	S	D
1	$H1$	$V1$	$S1$	$D1$
2	$H1$	$V2$	$S2$	$D2$
3	$H1$	$V3$	$S3$	$D3$
4	$H2$	$V1$	$S2$	$D3$
5	$H2$	$V2$	$S3$	$D1$
6	$H2$	$V3$	$S1$	$D2$
7	$H3$	$V1$	$S3$	$D2$
8	$H3$	$V2$	$S1$	$D3$
9	$H3$	$V3$	$S2$	$D1$

正交表具有以下两个方面的特点:

1) 整齐可比性:在每一列中,各个不同的水平出现的次数相同,在 $L_9(3^4)$ 正交表中,每一列有3个水平,各个因素水平1、2、3各出现3次;

2) 均衡搭配性:表中任意两列并列在一起形成若干个数字对,不同数字对出现的次数也都相同,且各种数字对搭配都出现,是全面搭配。

以上两个特点称为正交性。

1.3 正交表的合理性解释

用正交表制定试验方案,可大大减少试验次数,且试验点具有很好的代表性。例如在绕回转体空泡测量试验中,假设只考虑3个因素——水深 H 、运动速度 V 、通气量 S (假定因素之间无交互作用)的影响,每个因素各取3个水平,分别记为 $H: H1, H2, H3; V: V1, V2, V3; S: S1, S2, S3$

若进行全面试验需做 $3^3=27$ 次试验,如图1所示,立方体上的各条线的交点表示了这27个试验条件。若用正交表安排试验,选 $L_9(3^4)$ 较合适。如用 $L_9(3^4)$ 的前3列分别安排因素 H 、 V 、 S ,则只需安排9次试验,且这9个试验点“●”很均匀地分布在立方体的各个部位,可以说是面面俱到、线线俱到。在上中下、左中右、前中后的9个面的每个面上均衡整齐地分布着3个试验点,在27条线上,每条线上分布一个试验点,非常均匀。这是正交表的两个特征决定的,可以说用正交表安排的这9个试验点能很好地代表27个试验点^[10]。

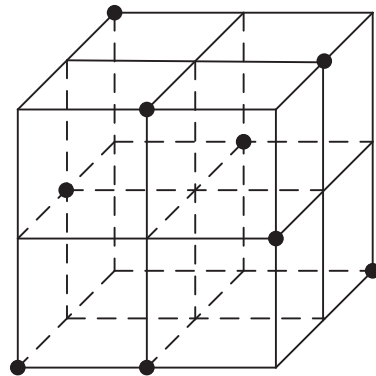


图1 $L_9(3^4)$ 正交表试验方案示意图

Fig.1 Schematic figure of experiment scheme based on $L_9(3^4)$ Orthogonal table

2 缩比模型试验的正交设计

2.1 模型试验

绕回转体空泡测量试验在北京理工大学跨自由液面通气空泡试验水箱中进行,根据试验水箱试验能力,试验中采用半球头回转体模型,回转体直径20mm,模型通过安装在水箱侧壁外的电机驱动获得运动速度,水箱可通过调节贮水量来调节液面高度及航行体初始水深,模型试验水箱装置示意图,如图2所示。

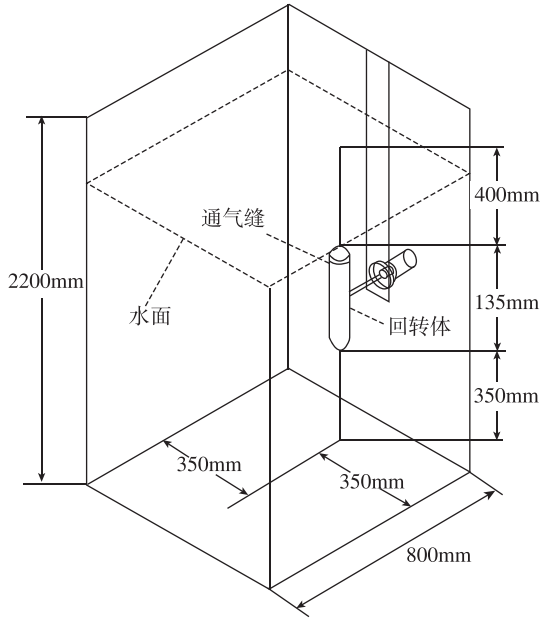


图 2 水箱几何尺寸及回转体安装位置示意图

Fig. 2 Size of the water tank and schematic figure of the revolution body installation site

2.2 试验方案的正交设计

试验主要关心绕回转体流动空泡尺度特征，这一特征参数与模型初始所处的环境压力（水深）、运动速度和通气量 3 个因素有密切关系，这 3 个因素之间相互独立，且每个因素具有 3 水平，如表 2 所示。为了找出影响空泡长度的主要因素，需要开展正交试验设计。

表 2 因素水平表

Tab. 2 Table of factors' level

因素 水平	水深 H/H_0	运动速度 V/V_0	通气量 S/S_0
1	0.86	0.84	0.60
2	0.93	0.92	0.80
3	1.00	1.00	1.00

1) 模型试验涉及问题的因素均为三水平，常用的三水平正交表中 $L_9(3^4)$ 所需开展的试验次数最少；

2) 问题涉及各因素相互独立，因素排列的位置可以是任意的，对 $L_9(3^4)$ 表头设计如表 3 所示，其中第 4 列为空；

表 3 模型试验表头设计方案

Tab. 3 Label design for the model experiment

列号	1	2	3	4
方案	水深 H/H_0	运动速度 V/V_0	通气量 S/S_0	—

3) 根据表 1 给出的 $L_9(3^4)$ 正交表，用实际各因素水平，即可确定缩比模型试验方案，如表 4 所示。依据表 4 开展试验，得到模型试验关心的关键技术参数量值。

表 4 $L_9(3^4)$ 试验方案

Tab. 4 Experiment plan of $L_9(3^4)$

列号	1	2	3
试验号	水深 H/H_0	运动速度 V/V_0	通气量 S/S_0
1	0.86	0.84	0.60
2	0.86	0.92	0.80
3	0.86	1.00	1.00
4	0.93	0.84	0.80
5	0.93	0.92	1.00
6	0.93	1.00	0.60
7	1.00	0.84	1.00
8	1.00	0.92	0.60
9	1.00	1.00	0.80

3 正交试验结果及分析

正交试验结果的常用分析方法有两种^[11-12]：极差分析法和方差分析法。极差分析法又称直观分析，是正交试验中设计结果分析中直观常用的分析方法，但过于粗糙，未能深入考虑试验误差的大小；方差分析能够将试验中由于试验条件改变引起的数据波动与试验误差引起的数据波动区分开来，实现对试验误差的估计，理论上更加深刻。

3.1 试验结果

按照选定的正交表试验方案开展不同水深、运动速度和通气量下的回转体通气空泡出水试验，试验结果中核心参数主要为空泡长度，试验结果如表 5 所示。

表 5 基于 $L_9(3^4)$ 正交表的试验结果

Tab. 5 Experiment results based on $L_9(3^4)$

列号	1	2	3	参数
因素	水深	运动速度	通气量	无量纲空泡
试验号	H/H_0	V/V_0	S/S_0	长度 C/C_0
1	0.86	0.84	0.60	0.99
2	0.86	0.92	0.80	0.96
3	0.86	1.00	1.00	0.99
4	0.93	0.84	0.80	0.88

续表

列号	1	2	3	参数
因素	水深	运动速度	通气量	无量纲空泡
试验号	H/H_0	V/V_0	S/S_0	长度 C/C_0
5	0.93	0.92	1.00	0.91
6	0.93	1.00	0.60	0.95
7	1.00	0.84	1.00	0.88
8	1.00	0.92	0.60	0.96
9	1.00	1.00	0.80	0.97

3.2 极差分析

将表 6 中模型试验中的参数（触水水面时刻的空泡长度）按每列的同水平求和，分别记作 I_j 、 II_j 、 III_j ，其中 I、II 和 III 代表了各因素的不同水平，j 代表了不同的列，即各因素。

$$I_H = C_1 + C_2 + C_3 = 0.99 + 0.96 + 0.99 = 2.94$$

$$I_V = C_2 + C_4 + C_7 = 0.99 + 0.88 + 0.88 = 2.75$$

.....

并计算各因素的极差：

$$R_j = \max\{I_j, II_j, III_j\} - \min\{I_j, II_j, III_j\}$$

得到缩比模型试验空泡长度的极差分析结果，如表 6 所示。

表 6 空泡长度的极差分析结果

Tab. 6 Range analysis results of the cavity length

列号	水深	运动速度	通气量	无量纲空泡
试验号	H/H_0	V/V_0	S/S_0	长度 C/C_0
1	0.86	0.84	0.60	0.99
2	0.86	0.92	0.80	0.96
3	0.86	1.00	1.00	0.99
4	0.93	0.84	0.80	0.88
5	0.93	0.92	1.00	0.91
6	0.93	1.00	0.60	0.95
7	1.00	0.84	1.00	0.88
8	1.00	0.92	0.60	0.96
9	1.00	1.00	0.80	0.97
I_j	2.94	2.75	2.90	—
II_j	2.74	2.83	2.81	—
III_j	2.81	2.91	2.78	—
R_j	0.20	0.16	0.12	—

I_H 反映因素水深 H 的“1”水平的 3 次作用及其他因素（运动速度 V、通气量 S）各水平的一次作用，即可以认为运动速度 V、通气量 S 两因素对 I_H 、 II_H 、 III_H 的作用大体相同， I_H 、 II_H 、 III_H 之间

的差异主要由因素 H 的不同水平导致， R_H 反映了 H 的水平变动对空泡长度的影响。

同理， I_V 、 II_V 、 III_V 之间的差异主要由因素 V 的不同水平导致， R_V 反映了 V 的水平变动对空泡长度的影响； I_S 、 II_S 、 III_S 之间的差异主要由因素 S 的不同水平导致， R_S 反映了 S 的水平变动对空泡长度的影响。

由 R_H 、 R_V 、 R_S 对比可知，水深对空泡长度的影响最大，运动速度次之，目前的通气量对空泡长度的影响最小。

为了直观显示各因素对空泡长度的影响，以各因素的水平作为横坐标，空泡长度为纵坐标，可得到因素与参数关系图（趋势图），如图 3 所示。由图 3 分析可知，1) 水深对空泡长度的影响呈非线性特征，在中间水深状态下空泡长度最短，这可能与空泡发展的非稳态特征有关，需要开展水动力学方面的进一步分析；2) 随着运动速度的增加，空泡长度明显呈线性趋势增加；3) 通气越晚，空泡长度变短，且变短的趋势减小。若想获得更长的空泡长度，可依据图 3 开展进一步试验。

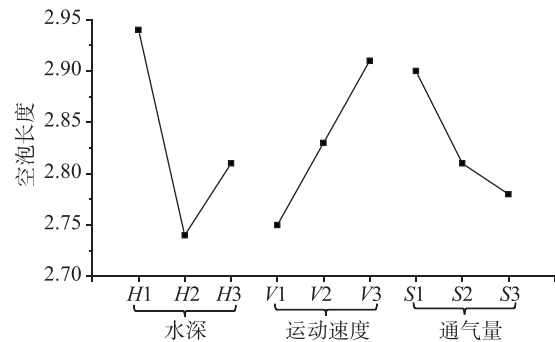


图 3 不同因素下的参数变化趋势图

Fig. 3 The factor and target

3.3 方差分析

极差分析简单直观，但这一方法并不能将试验中由于试验条件改变引起的数据波动与试验误差引起的数据波动区分开来，无法估计试验误差的大小。在方差分析中， I_j 、 II_j 、 III_j 的计算方法与极差分析一致。根据方差分析方法，计算得到以下数据：

T 为所有试验发次中空泡长度的总和：

$$T = \sum_{i=1}^9 C_i = 8.49$$

平均值：

$$\bar{C}_i = \frac{T}{9} = 0.9433$$

计算修正项:

$$C_T = \frac{T^2}{9} = 80.09$$

总偏差平方和:

$$S_T = \sum_{i=1}^9 (C_{li} - \bar{C}_l) = \sum_{i=1}^9 C_{li}^2 - \frac{T^2}{n} = Q_T - C_T = 0.15$$

总偏差平方和是所有数据与其总平均值的偏差平方和,反映计算结果数据的总波动情况,其自由度为 $f_T = n - 1 = 8$ 。

以因素 H (水深) 为例给出各因素偏差平方和、自由度与均方:

$$\begin{aligned} S_A &= 3 \sum_{i=1}^3 (\bar{K}_{ij} - \bar{C}_l)^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 K_{ij}^2 - \frac{T^2}{n} \\ &= Q_A - C_T = 0.0677 \\ f_A &= m - 1 = 2 \\ V_A &= \frac{S_A}{f_A} = 0.0338 \end{aligned}$$

其中, K_{ij} 为第 j 列因素第 i 个水平所对应的计算结果数据之和, n 为计算总次数, m 为第 i 列因素的水平数, r 为第 j 列因素每个水平出现的次数。

同理得到因素 V (运动速度)、 S (通气量) 以及误差的偏差平方和、自由度与均方:

$$\begin{aligned} S_B &= Q_B - C_T = 0.0427, f_B = m - 1 = 2, \\ V_B &= \frac{S_B}{f_B} = 0.0213 \\ S_C &= Q_C - C_T = 0.0260, f_C = m - 1 = 2, \\ V_C &= \frac{S_C}{f_C} = 0.0130 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_e &= S_T - S_A - S_B - S_C = 0.0117, \\ f_e &= f_T - f_A - f_B - f_C = 2 \end{aligned}$$

根据各因素及误差的方差平方和计算结果,可以计算得到各因素的 F 值:

$$\begin{aligned} F_A &= \frac{\frac{S_A}{f_A}}{\frac{S_e}{f_e}} = 5.8036; F_B = \frac{\frac{S_B}{f_B}}{\frac{S_e}{f_e}} = 3.6595; \\ F_C &= \frac{\frac{S_C}{f_C}}{\frac{S_e}{f_e}} = 2.2298 \end{aligned}$$

空泡长度对水深、运动速度和通气量等因素的方差分析结果见表7。由表7可知,水深对空泡长度的影响最大,运动速度次之,通气量影响最小,这与极差分析的结果一致。

显著性水平为 0.05 时的 $F_{0.05}(2, 2) = 19.00$, 3 因素的 F 值均小于 $F_{0.05}(2, 2)$, 说明水深、运动速度和通气量不是空泡长度的显著性水平。在本文的分析中并未考虑 3 因素的交互作用, 实际情况下 3 因素之间存在一定的影响, 但受到试验条件的制约, 试验发次少, 难以开展因素交互作用下的影响分析。后续可通过数值试验进行相关的验证和补充。

表7 空泡长度的方差分析

Tab.7 Variance analysis results of the cavity length

方差来源	方差平方和 S	自由度 f	均方 V	F 值	显著性
水深 H/H_0	0.0677	2	0.0338	5.8036	
运动速度 V/V_0	0.0427	2	0.0213	3.6595	
通气量 S/S_0	0.0260	2	0.0130	2.2298	
误差项	0.0117	2	0.0058		
T	1.4800	8			
$F_{0.01}(2, 2) = 99.00; F_{0.05}(2, 2) = 19.00$					

4 结论

本文根据影响模型试验空泡特征参数的主要因素水深 H 、运动速度 V 和通气量 S , 开展试验的正交表设计, 选用了 $L_9(3^4)$ 正交表开展试验, 并采用极差分析和方差分析方法对试验结果进行分析, 得到以下结论:

1) 基于本文设计的正交试验, 获得了影响绕回转体空泡长度的主要因素是水深, 其次是运动速度, 通气量影响最小, 给出了获得最大空泡长度的组合方式, 对于探索后续试验方向具有重要意义;

2) 方差分析结果表明, 水深、速度和通气量对空泡长度的影响不显著, 在此需要说明的是, 受试验条件的制约, 本文的分析中并未考虑 3 因素的交互作用, 后续可通过数值试验进行相关的验证和补充。

参考文献

- [1] 权晓波, 李岩, 魏海鹏, 等. 大攻角下轴对称航行体空化流动特性试验研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23 (6): 662-666.
- [2] 孔德才, 权晓波, 魏海鹏, 等. 锥柱航行体肩空泡界面效应对头锥面受力的影响研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2015, 30 (2): 201-207.

- [3] 富立,刘文丽. D-最优试验设计在动力调谐陀螺测试中的应用 [J]. 航空学报, 2008, 29 (2): 467-471.
- [4] 祁家毅,任顺清,王常虹. 用三轴转台辨识陀螺仪误差模型系数时的速率试验设计 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (3): 565-570.
- [5] Kincaid R K, Padula S L. D-optimal designs for sensor and actuator locations [J]. Computers & Operations Research, 2002, 29 (6): 701-713.
- [6] 刘筠乔,鲁传敬,李杰,等. 导弹垂直发射出筒过程中通气空泡流研究 [J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2007, 22 (5): 549-554.
- [7] 李国良,尚庆,田俊武,等. 航行体通气空泡发射方式对出水过程的影响 [J]. 气体物理, 2016, 1 (3): 39-46.
- [8] 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 庞善起. 正交表的构造方法及其应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [10] 胡庆军,王炯琦. 导弹武器射程评估的多因素正交试验设计方法 [J]. 大学数学, 2015, 31 (2): 66-71.
- [11] 魏泽,吴乘胜,倪阳. 基于正交设计和 CFD 模拟的 Spar 平台螺旋侧板水动力优化设计研究 [J]. 船舶力学, 2013, 17 (10): 1133-1139.
- [12] 方开泰,马长兴,李久坤. 正交设计的最新发展和应用 III-正交设计的 D-最优性质 [J]. 数理统计与管理, 1999, 18 (4): 43-52.