

摘要

本文以船体气泡流为研究对象，使用实物模型探究船体空泡减阻的影响因素。。

分析了船体与水流相对速度、船体形状，垂直通气孔数量、位置与空泡减阻效率的影响。

通过模型制进行实验得出数据结果，通过Matlab对数据进行线性回归，得到了船体与水流相对速度对空泡减阻效率的定量关系；通过观察法结合实验数据得出垂直通气孔数量、位置与空泡减阻效率的定性关系。

选题目的

根据IMO“2023战略”，设定两种场景，分别对应减排战略中“力争（striving for）”和“至少（at least）”表述的目标。

图2-15 基于IMO“2023战略”的减排场景

各型船舶上已有较广泛应用。目前，业界正在开展空气润滑、风力助航等减排潜力较高的技术措施的研发及应用。

图片来源：航运低碳发展展望2023-2024

原理分析

空泡减阻的主要机理是将固/液界面转变为固/气界面，从而使黏度降低，摩擦阻力也随之大幅减小并且，气相速度梯度越小，切应力也越小。 [5]

图1 空气泡减阻示意图^[6]

实验目的

1. 探究相对速度对空泡减阻效率影响

2. 探究出气口位置数量对空泡减阻效率影响

3. 探究垂直出气口大小对减阻率的影响

4. 探究船体形状对空泡减阻率影响

通过自主设计建模，制作了针对空泡减阻率影响因素的实验用具。并基于此开展了多变量物理实验。

运用Matlab对实验数据进行拟合，得到关系式。

通过绘制族状柱状图并运用观察法，得到变量与减阻效率在不同情况下的定性关系。

创新点

数据处理

假设在理想状态下，航行体运动方向与水流方向在同一直线上，通过合成 相对速度，将航行体运动转换为水流运动，公式为

$$\Delta v = u - w$$

其中u为来流流速，w为航行体航速，单位均为m/s

根据牛顿第三定律

$$F = -F'$$

将航行体所受流体阻力等效为在静止状态下对航行体的拉力。

通过减阻率计算公式

$$\Delta R_f = \frac{R_{f0} - R_f}{R_{f0}} \cdot 100\%$$

其中 R_{f0} 表示喷气前阻力， R_f 表示喷气后阻力，其在数值上均等于拉力 F ，单位均为N。

最后通过使用Matlab利用对数据进行线性回归，得出不同影响因素与减阻率关系式。

实验准备

数据分析

相对速度对空泡减阻效率影响

拟合后关系式如下
 $\Delta R_f = -0.0088\Delta v^3 + 0.1937\Delta v^2 - 1.6634\Delta v + 14.1185$

表2 风速为半时相对速度对空泡减阻效率影响相对速度对空泡减阻效率影响^[7]

实验编号 ^[8]	Δv (m/s) ^[9]	R_f ^[10] (N) ^[11]	R_{f0} (N) ^[12]	ΔR_f (N) ^[13]
1 ^[14]	1 ^[15]	18.65 ^[16]	21.35 ^[17]	12.64 ^[18]
2 ^[19]	5 ^[20]	33.52 ^[21]	37.06 ^[22]	9.55 ^[23]
3 ^[24]	10 ^[25]	47.56 ^[26]	51.75 ^[27]	8.10 ^[28]
4 ^[29]	15 ^[30]	66.53 ^[31]	68.73 ^[32]	3.20 ^[33]

图2 拟合后关系式图像

垂直出气口位置数量对空泡减阻效率影响

垂直出气口位置数量对空泡减阻效率影响^[34]

实验编号 ^[35]	出气口数量 ^[36]	Δv (m/s) ^[37]	R_f (N) ^[38]	R_{f0} (N) ^[39]	ΔR_f (N) ^[40]
1 ^[41]	3 ^[42]	1 ^[43]	17.33 ^[44]	21.74 ^[45]	25.45 ^[46]
2 ^[47]	4 ^[48]	5 ^[49]	32.09 ^[50]	36.57 ^[51]	12.71 ^[52]
3 ^[53]	5 ^[54]	10 ^[55]	48.02 ^[56]	49.97 ^[57]	4.06 ^[58]
4 ^[59]	1, 2, 3 ^[60]	1 ^[61]	18.75 ^[62]	20.85 ^[63]	9.58 ^[64]
5 ^[65]	4 ^[66]	5 ^[67]	34.59 ^[68]	37.59 ^[69]	8.47 ^[70]
6 ^[71]	5 ^[72]	10 ^[73]	50.01 ^[74]	55.72 ^[75]	7.42 ^[76]
7 ^[77]	2, 3, 4 ^[78]	1 ^[79]	19.26 ^[80]	22.57 ^[81]	17.18 ^[82]
8 ^[83]	4 ^[84]	5 ^[85]	30.06 ^[86]	35.61 ^[87]	16.38 ^[88]
9 ^[89]	4 ^[90]	10 ^[91]	59.05 ^[92]	51.79 ^[93]	5.38 ^[94]

实验数据记录及表示意图

图18 出气口位置数量对空泡减阻效率影响族状柱状图^[95]

垂直出气口大小对减阻率的影响

表3 垂直出气口大小对减阻率的影响^[96]

实验编号 ^[97]	出气口数量 ^[98]	孔径大小 (mm) ^[99]	R_f (N) ^[100]	R_{f0} (N) ^[101]	ΔR_f (N) ^[102]
1 ^[103]	3 ^[104]	0.1 ^[105]	50.44 ^[106]	50.91 ^[107]	0.93 ^[108]
2 ^[109]	4 ^[110]	1 ^[111]	52.80 ^[112]	53.72 ^[113]	1.72 ^[114]
3 ^[115]	4 ^[116]	10 ^[117]	48.76 ^[118]	49.05 ^[119]	0.59 ^[120]
4 ^[121]	1, 2, 3 ^[122]	0.1 ^[123]	43.36 ^[124]	49.78 ^[125]	12.89 ^[126]
5 ^[127]	4 ^[128]	1 ^[129]	46.47 ^[130]	50.63 ^[131]	8.21 ^[132]
6 ^[133]	4 ^[134]	10 ^[135]	52.86 ^[136]	53.67 ^[137]	1.51 ^[138]
7 ^[139]	2, 3, 4 ^[140]	0.1 ^[141]	47.56 ^[142]	51.75 ^[143]	8.10 ^[144]
8 ^[145]	4 ^[146]	1 ^[147]	48.67 ^[148]	51.79 ^[149]	6.03 ^[150]
9 ^[151]	4 ^[152]	10 ^[153]	50.36 ^[154]	51.01 ^[155]	1.27 ^[156]
10 ^[157]	小孔出气量 ^[158]	0.1 ^[159]	46.54 ^[160]	49.78 ^[161]	6.50 ^[162]
11 ^[163]	4 ^[164]	1 ^[165]	46.34 ^[166]	48.07 ^[167]	3.59 ^[168]
12 ^[169]	4 ^[170]	10 ^[171]	48.34 ^[172]	49.69 ^[173]	2.72 ^[174]

图20 孔径与减阻率图像^[175]

船体形状对空泡减阻率影响

表4 船体形状对空泡减阻率影响^[176]

实验编号 ^[177]	船体形状 ^[178]	Δv (m/s) ^[179]	R_f (N) ^[180]	R_{f0} (N) ^[181]	ΔR_f (%) ^[182]
1 ^[183]	平板型 ^[184]	1 ^[185]	19.98 ^[186]	22.01 ^[187]	9.21 ^[188]
2 ^[189]	4 ^[190]	5 ^[191]	35.59 ^[192]	38.06 ^[193]	6.50 ^[194]
3 ^[195]	4 ^[196]	10 ^[197]	49.62 ^[198]	50.98 ^[199]	2.67 ^[200]
4 ^[201]	一般船体型 ^[202]	1 ^[203]	19.77 ^[204]	21.67 ^[205]	8.75 ^[206]
5 ^[207]	4 ^[208]	5 ^[209]	35.10 ^[210]	37.53 ^[211]	6.47 ^[212]
6 ^[213]	4 ^[214]	10 ^[215]	49.17 ^[216]	50.73 ^[217]	3.04 ^[218]

图21 船体形状对空泡减阻率影响^[219]

误差分析

在本次研究实验中，由于场地限制，无法避免受到无法被风力计检测到的风的影响，所得出的受力可能会因此产生误差

由于气泵在使用中可能因水流波动或电压不稳而出气不均匀，在多气孔的实验中可能产生误差

表1 相对速度对空泡减阻效率影响相对速度对空泡减阻效率影响^[220]

实验编号 ^[221]	Δv (m/s) ^[222]	R_f (N) ^[223]	R_{f0} (N) ^[224]	ΔR_f (%) ^[225]
1 ^[226]	1 ^[227]	20.71 ^[228]	9.04 ^[229]	-129.09 ^[230]
2 ^[231]	5 ^[232]	35.64 ^[233]	42.59 ^[234]	16.32 ^[235]
3 ^[236]	10 ^[237]	95.03 ^[238]	73.14 ^[239]	-29.93 ^[240]
4 ^[241]	15 ^[242]	15.13 ^[243]	84.30 ^[244]	82.05 ^[245]

实验结论

实验1 相对速度对空泡减阻效率影响

空泡减阻效率与船体相对来流的速度有关，且相对速度越大，空泡减阻效率越低，并按照以下关系式
 $\Delta R_f = -0.0088\Delta v^3 + 0.1937\Delta v^2 - 1.6634\Delta v + 14.1185$

实验2 垂直出气口位置数量对空泡减阻效率影响

在低速状态时单一垂直出气口的减阻率最高，而在高速状态下多个横向出气口的减阻率最高。

实验3 垂直出气口大小对减阻率的影响

垂直出气口较为密集时孔径大小对减阻率影响较小，当垂直出气口较为分散时，其孔径大小越小，减阻率越大。

实验4 船体形状对空泡减阻率影响

在该模型中，船体形状对其减阻率的影响较小。

研究结论

1. 横向出气口的减阻效率较为稳定，受出气口孔径（气体流速）及相对速度的影响较小；单一出气口较易受相对速度的影响。

2. 在相对速度较高的情况下空泡减阻无显著效果；在相对速度较低时，单一出气口效果减阻显著。

3. 通过出气口孔径较小的气体可以显著提高空泡减阻效率；随孔径增加，不同气孔位置展示出不同的趋势。

展望

1. 对不同影响因素的影响因子进行探究

2. 比较不同比例模型对实验结果的影响

3. 计算不同条件下减少碳排放的具体数值

参考文献

0.参考文献

[1] 曹伟, 魏英杰, 王聪, 邹振祝, 黄文虎. 超空泡技术现状、问题与应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 571-579

[2] MCCORMICK M E, BHATTACHARYYA R. Drag reduction of a submersible hull by electrolysis [J] Naval Engineers Journal, 1973, 85(2):11-16

[3] 汤维斌, 钟诚文. 空化、超空化流动的数字模拟方法研究[J]. 力学学报, 2005, 37(5):640-644

[4] 蒋星敏. 高景主编: 物理选择性必修(第三册)[M], 上海, s 上海科学技术出版社, 2023年, 第34页。

[5] Savchenko Y N. Super cavitation-problems and perspectives[C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation, California, 2001:20-23.

[6] MAKIHARJU S A, CECCIO S L. Air lubrication drag reduction on great lakes ships [J]. University of Michigan

致谢

感谢创新实践工作站开展的系列科创活动，感谢学校, 科学社的老师指导