

全垫升气垫船垫升系统风机性能模型试验研究

习琪航, 吴如坤

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266042)

摘要 在全垫升气垫船模型试验中, 垫升系统研究的工作量很大, 目前国内相关研究较少。因此, 本文针对气垫船垫升系统中的风机性能进行模型试验, 探究风机转速、气孔开孔位置、气孔开孔总面积等参数对风机性能特性曲线的影响。实验发现, 当流量在一定范围时会出现喘振现象, 且在风机转速和开孔区域相同的情况下, 开孔面积越大, 其喘振区越小, 风机的有效工作区间越大。而风机自身转速和气孔的开孔位置则对风机性能曲线的影响不大。

关键词 全垫升气垫船; 垫升系统; 风机性能; 模型试验

中图分类号: U664

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)07-0013-03

全垫升气垫船是一种能够高速航行的特种船舶, 最大航速可超过 100 节, 它可以克服大多数不利的环境航行, 具有其他一般舰船无法比拟的优势^[1]。全垫升气垫船之所以能够具有这样的优势, 是由于它有一套常规船舶不具备的系统——垫升系统。

在垫升系统中有专门使气垫船能浮在接触面上的垫升风机, 其将产生的高压气流持续注入气垫船底部的围裙中, 使气垫船底部有一层薄薄的空气层, 船体不再与航行面接触, 通过船尾部的空气螺旋桨提供推力供船舶高速航行。气垫船结构特殊, 功能优异, 能够适应多样化的环境, 非常适合海上兵力和补给的快速运输, 具有重要的经济和军事价值^[2-3]。虽然国内外对气垫船的研究都做了不少, 但是全垫升气垫船模型试验中垫升系统的研究难度和工作量很大, 国内相关的研究较少, 很难满足全垫升气垫船模型试验对垫升系统的相似性要求。本文基于相似性理论, 针对全垫升气垫船模型试验中垫升系统的风机性能进行试验, 为进一步研究全垫升气垫船模型试验垫升系统的相似性问题提供一种可行性方案。

1 试验条件

1.1 垫升风机相似性要求

垫升系统包括垫升风机、风道、围裙三个部分, 要进行风机性能模型试验, 模型风道要与实船风道满足几何尺寸和形状的相似, 即相似性要求。这样模型风道内空气流的流量和压力与实船的大致相同, 在雷诺数超过某一值时, 风道在突扩部分的损失和弯头部分的损失可看作与雷诺数无关。

垫升风机的性能特性曲线决定了气垫船的飞升特

性, 根据气垫船模型试验的基本相似准则中的压长比和流量系数相似, 垫升风机应该满足在风机工作区域附近的风机压头和流量无因次特性曲线相似。

风机压头系数: $\overline{p}_f = p_f / \rho_a n_f^2 D_f^2$, p_f 为风机总压, ρ_a 为空气密度, D_f 为风机叶轮直径。

风机总压与垫升比: $p_f / p_c = p_f p_b / p_b p_c$, 这个指标决定气道效率。

风机流量系数: $\overline{Q}_f = 4Q_f / \pi n_f D_f^3$, Q_f 为风机流量, n_f 为风机转速。

1.2 垫升风机的选取

根据几何相似, 模型垫升风机的叶轮直径可直接由缩尺比计算得到, 实船所采用的风机叶轮直径是 2.5m, 根据缩尺比计算出模型应选取叶轮直径为 125mm 的风机。但在实际过程中, 因为气垫船内部气道空气的雷诺数无法达到相似条件, 再加上风扇的叶片形式、驱动轴形式、风道粘性也无法做到完全一致, 模型中垫升风机的压头、流量与气道效率都会偏低^[4]。根据第 16 届 ITTC 国际水池会议的建议, 对风机转速进行了必要的修正来满足模型流量压头的相似性要求。采用穆迪公式模型与实船风机效率的关系 $1 - \eta_m / (1 - \eta_s) = \lambda^{0.2}$, 式中下标是 s、m 分别代表实船和模型, 该式在最高效率点流量的 $\pm 25\%$ 范围内是比较正确的。为了解决由于雷诺数无法达到相似条件而引起的气道效率降低的问题, 必须把模型风机转速提高 5% 左右, 即 $n_m = 1.05 \lambda^{0.5} n_s$ ^[5]。同时, 目前已有的试验风机没有叶轮直径为 125mm 的, 若要满足叶轮直径完全按缩尺比计算得出的尺寸则需要定制, 定制成本很高, 生产制造时间较长, 不太满足经济性要求。叶轮直径太小也无法

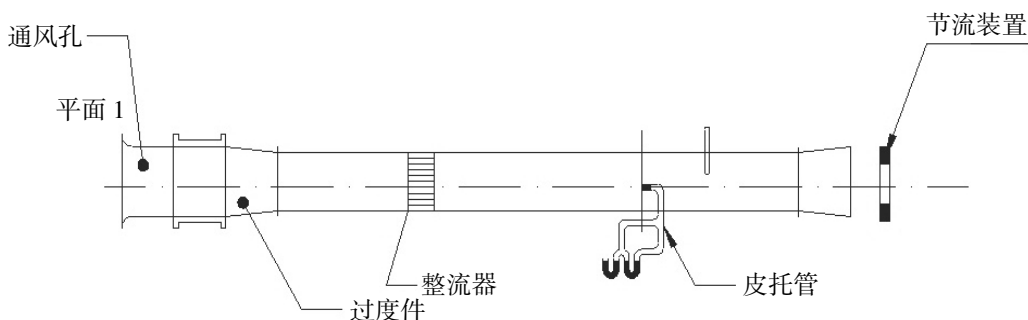


图1 试验所参照的装置图

提供与实船相当的进气量，因此我们采用现有的叶轮直径为148mm的风机进行试验。

本次模型试验所依照的实船采用四个垫升风机将重约80千克的船体垫起，每个垫升风机流量为 $250\text{m}^3/\text{s}$ 。风机叶轮直径2.5m，转速1285r/min。在前文已经说明了本次模型试验会选择现有叶轮直径为148mm的风机，而单个现有的风机条件无法满足测试的工作条件，为进一步提高风机的全压，可以采用将两台相同风机串联的方式来实现。从理论上来说，两台风机串联后的特性曲线相当于一台风机在相同体积流量时，将压力提高两倍。但实际上由于第一台风机提供的气流在第二台风机处密度增大了，气体体积流量会有所减少，风机性能特性曲线越平缓串联的效果就越差。对于本次试验来说，风机性能曲线在流量变化较大时，压力的变化也较大，因此可采用将两台风机串联的方式进行试验^[6]。

1.3 风机性能测试试验装置的选取

根据工业通风机标准化风道性能试验中所提供的一些实验装置图，选取出一个能固定住风筒且连接简单的实验总体装置图作为参照^[7]。考虑到串联风机的使用和测点的位置等因素，确定本次风机性能特性测试试验的装置图和连接方式。

2 试验设计与实施

先测试初始条件数值，即用密封胶带封住所有开孔，待风机转速稳定在5600r/min附近，记录此时的频率和转速，用风速仪和流量计测出此种情况下的压力和流量，记录在表格中。

将试验变量依次设置为风机的转速、风孔的位置、风孔的总面积（即风孔数量）和风孔的密集程度。每次控制单一变量，采用不同直径的挡风板放置在风筒尾部，保证挡风板开孔圆心和风筒截面圆心在一条直线上。记录每次试验条件下的压力和流量。

将所有实验数据进行曲线绘制，挑选出误差较大和

存在异常的数据，重新测量这些数据并进行对比修正。

3 试验数据对比分析

将试验的所有数据进行归类，可分为在相同开孔位置和面积下，转速为4800、5200和5600r/min时的流量和压力；在相同转速和开孔面积下，不同区域内开孔时的流量和压力；在相同转速和开孔区域下，不同开孔面积时的流量和压力。将各组数据整理绘制对应的风机特性曲线，探究其规律。

3.1 风机转速对风机性能特性的影响

在相同排气面积和区域情况下，对比数据探究风机转速对风机性能特性曲线的影响。具体实施为在区域2分别开两圈孔，转速设置成4800、5200和5600r/min。

分析曲线图可以发现，在开孔位置和开孔面积相同的情况下，风机转速越大，在相同流量下压力越大，曲线走势也基本相同，但是风机转速对有效工作区间的影响并不明显，在转速越大时，有效工作区间会稍大一点。

3.2 风孔位置对风机性能特性的影响

在风机转速和相同排气面积情况下，对比数据探究风孔位置对风机性能特性曲线的影响。具体实施为将转速设置为4800r/min，三个区域分别开一圈孔。

分析发现，凡是进行开孔所测的数据，其有效工作区间都要比未进行开孔时的初始状态下有效区间长。且在转速相同时，无论在哪个区域开孔，开孔面积越大，其喘振区越小，有效工作区间越大。而在相同转速和开孔面积的情况下，开孔位置离风机的距离对风机性能的影响并不明显，它们的性能曲线走势基本相同。

3.3 风孔面积对风机性能特性的影响

在开孔区域和风机转速相同的情况下，对比数据探究不同排气面积对风机性能特性曲线的影响。具体实施为将转速设置为4800r/min，在区域1分别开1、2和3圈孔。

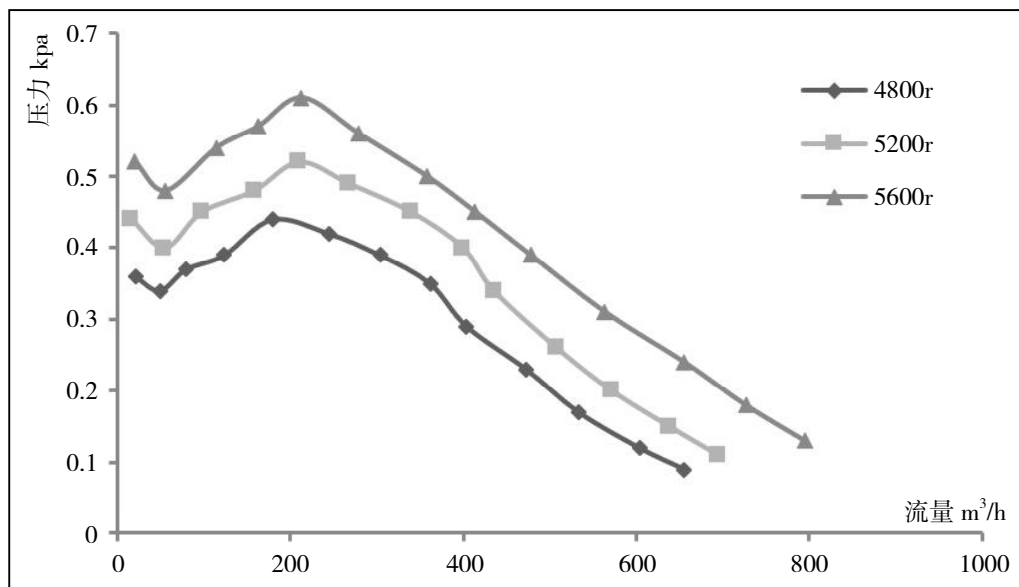


图 2 开孔面积相同区域 2 处两圈开孔时风机性能特性曲线图

分析发现,在风机转速和开孔位置相同的情况下,开孔面积越大,其喘振区越小,风机的有效工作区间越大,可调控的流量范围越大。

4 结论

当流量增大时,压力会有减小的趋势,这符合流体力学中气体流速越快压力越小的规律。但当流量增大到一定程度后,压力会出现增大的现象,之后再按符合流体力学规律的情况继续减小。这种在一定范围内流量增大压力不降反升的现象被称为喘振,喘振是因为气流发生倒流,在整个过程中产生了周期性振动^[8]。

在实际气垫船垫升过程中,要避免喘振区的出现,若把所绘曲线压力随着流量增大,第二次减小的点默认为是喘振结束的点,之后压力随流量增大而减小的区间则完全符合流体力学的一般规律,我们把这个区间看作风机在对应转速下的有效工作区间。分析性能曲线可以看出:

1. 气道的开孔面积对风机性能特性曲线中的喘振区和有效工作区的范围有明显的影响,开孔面积越大,有效工作区间越大,其他三个参数对曲线的喘振区和有效工作区基本没有影响。

2. 风机转速对风机性能特性曲线中的相同流量时的压力大小有较大影响,风机转速越大,相同流量下的压力越大。

3. 风筒开孔位置、气孔密集程度对风机性能特性曲线整体几乎无影响,在所设置的几种情况中所得到的曲线基本重合。

本次试验以风机为研究对象,对气垫船垫升系统的设计有一定参考作用,为进一步研究全垫升气垫船模型试验关键的垫升系统相似性问题提供思路和可行性方案。在实船设计过程中,风机为额定转速下且气孔位置确定时,可增大气孔面积来提高有效工作区间的调控范围。然而垫升系统还包括气道和围裙结构,从气道结构优化和围裙的材料特性等角度着手进行气垫船模型垫升系统的研究,也是日后可以探究的方向。

参考文献:

- [1] 上海飞浪气垫船有限公司. 气垫船在抗洪抢险中的应用 [J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(05): 81.
- [2] 潘金宽. 国外气垫船的发展现状 [J]. 中国军转民, 2019 (02): 79-84.
- [3] 江军. 中国气垫船的发展 [J]. 舰载武器, 2004(10): 34-36.
- [4] 张平, 陈海涛, 鲍文倩, 等. 气垫船波浪载荷预报方法研究 [J]. 船舶工程, 2016, 38(12): 10-13.
- [5] 马涛, 邬成杰. 气垫船总体性能与围裙气垫系统流体动力设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [6] 续魁吕, 王洪强, 盖京方. 风机手册第 2 版 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 国家质量技术监督局. 工业通风机用标准化风道进行性能试验 [S]. 2000-09-26.
- [8] 李克, 刘建亭, 卢金会. 离心风机喘振现象原因分析及治理 [J]. 科技创新与生产力, 2016(10): 72-74.