

# 基于地面试验系统的船舶动力多分支排气系统阻力特性模拟

孙海鸥, 叶楠, 王忠义

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为在地面单机试验系统上分别模拟出船舶动力多分支排气系统各个分支的阻力特性, 从而完成对应船舶动力每一个分支排气系统阻力特性下对动力装置总体性能试验研究的目的, 对船舶动力多分支排气系统和单机地面试验排气系统进行了阻力特性数值模拟, 根据相应的差异补偿需求, 优化出了船舶动力各分支排气系统阻力特性在地面试验排气系统上分别再现的附加阻力模拟结构方案。研究结果表明, 该阻力模拟结构可避免类似蝶阀等节流件阻力目标值难以精确调设的缺点, 配置阻力模拟结构的地面试验系统可对船舶动力各分支排气系统阻力特性实现高精度的模拟。

**关键词:** 船舶动力; 排气系统; 阻力特性; 阻力模拟

中图分类号: U672.7 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.11.016

## 引言

大型船舶所需的大推进动力可通过多机配置来满足, 多机配置所形成的多分支排气系统因流程和结构差异造成阻力特性各有不同。单机地面试验中的排气系统与船舶动力多分支排气系统存在阻力特性上的不同差异, 若实现对船舶动力各分支排气系统阻力特性下的单机地面试验, 需要对相应的排气阻力特性差异进行有效补偿。为达成该目标, 本文利用数值模拟方法对船舶动力多分支排气系统阻力特性和单机地面试验排气系统阻力特性进行了仿真计算, 通过阻力特性比较分析, 明确了阻力特性差异补偿的定量要求, 在此基础上, 通过数值优化试验给出了一种可精准控制其阻力特性的阻力模拟结构, 将其与单机地面试验排气系统相结合, 可对船舶动力各分支排气系统阻力特性实现高精度的模拟。

## 1 阻力特性差异补偿的定量计算

船舶多分支排气系统由排气管路、排气冷却装置、多层百叶窗构成, 其物理模型如图1所示。

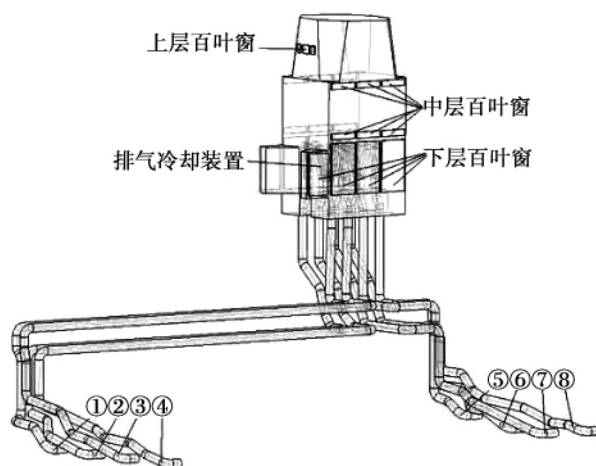


图1 船舶多分支排气系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the configuration of a marine multi-branch exhaust gas system

在对计算域进行网格划分时, 采用了结构化网格和非结构化网格相结合的方法。将计算域划分为若干小区域, 在结构规则的区域采用结构化网格以减少网格数量, 在结构复杂的区域采用非结构化网格以提高网格质量。在进行了网格无关性验证后, 计算采用的总网格数为1500万左右。

边界条件设定如下:

- (1) 排气管道进口: 按动力装置各工况排气条件给定质量流量和总温。
- (2) 百叶窗进口: 按环境条件给定总压和总温。
- (3) 烟囱出口: 按环境条件给定静压和回流。

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-04-15

作者简介: 孙海鸥(1962-), 男, 黑龙江讷河人, 哈尔滨工程大学教授。

温度。

(4) 百叶窗:按已知的阻力特性设定其为多孔介质模型。

(5) 固体壁面:除排气冷却装置设为耦合换热壁面外,其余固体表面设为绝热。

对船舶动力系统 8 个工况排气流量下的计算结果进行处理,得到了船舶排气系统 8 个分支的阻力特性数据。类似地,对图 2 所示的单机地面试验排气系统进行相应计算,得到了其阻力特性数据。单机地面试验排气系统与船舶各分支排气系统阻力特性的对比如图 3 所示。

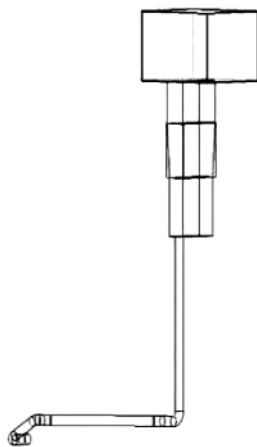


图 2 地面单支排气系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the configuration of a ground single-branch exhaust gas system

对比发现,单机地面试验排气系统与船舶各分支排气系统阻力特性差异明显,最大流量下,单机地面试验排气系统与管程最长的船舶动力第 4 分支排气系统阻力相差 13 kPa 以上。通过计算,确定了单机地面试验排气系统与船舶各分支排气系统阻力特性差异补偿的定量要求,为阻力模拟装置配置奠定了基础。

## 2 地面试验排气系统阻力模拟装置方案

地面试验排气系统含有圆直管道,因此很自然的一种考虑是选择同样直径的常用的蝶阀作为阻力模拟装置,通过调节蝶阀开度补偿地面试验排气系统与船舶各分支排气系统的阻力差异,达到模拟船舶各分支排气系统阻力特性的目的。蝶阀阻力系数

与蝶阀开度之间的对应关系如图 4 所示。

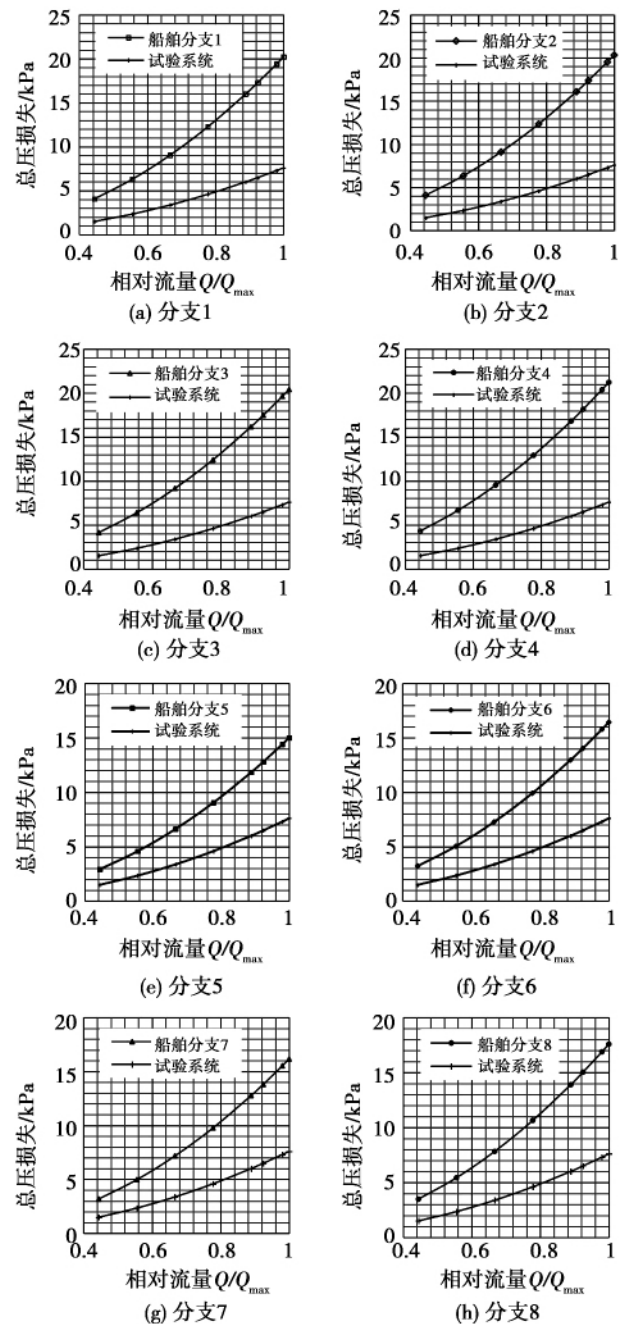


图 3 地面试验排气系统与船舶多分支排气系统阻力特性对比

Fig. 3 Contrast of the resistance characteristics of the ground experiment exhaust gas system with those of the multi-branch exhaust gas system

仔细研究蝶阀的阻力特性,发现实际操作会遇到难以克服的困难。按照试验工况要求,地面试验排气系统如果以蝶阀作为阻力模拟装置,蝶阀阻力系数需要在 1.7~3.0 之间调节,相应的蝶阀开度介

于 20 ~ 30° 之间,而在此开度范围内,蝶阀开度每变化 1° 蝶阀的阻力将变化 10% 以上,这种高变化率对于实际操作控制蝶阀开度值使蝶阀阻力满足预期值将是极其困难的。

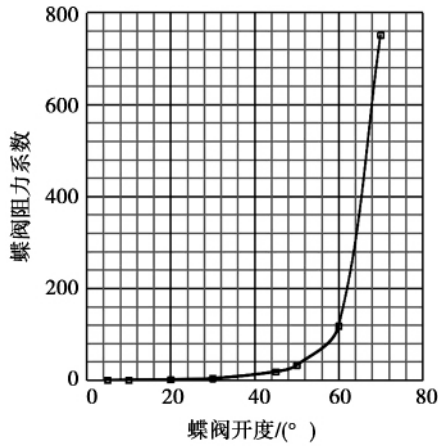


图 4 蝶阀阻力系数 - 开度特性  
Fig. 4 Resistance coefficient-opening characteristics of a butterfly valve

为满足阻力模拟装置可分别模拟船舶各分支进气系统的阻力特性,并且各工况下的阻力值相对误差绝对值平均不大于 10% 的要求,需要考虑设计便于实际操作控制的阻力模拟装置。

根据地面试验排气系统与船舶多分支排气系统阻力特性皆为二次曲线的特点,经一系列优化后的地面排气系统阻力模拟装置设计为内含 4 个可转节流板的圆管结构,如图 5 所示,其中各节流板断面结构相同,如图 6 所示。

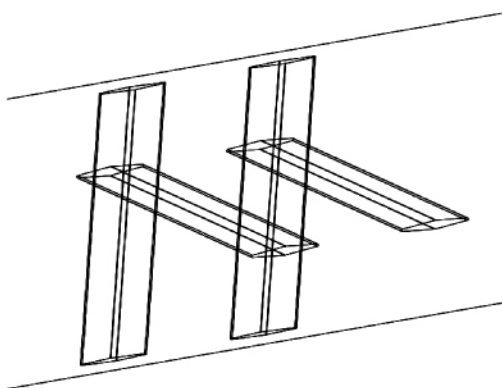


图 5 阻力模拟装置基本通流结构  
Fig. 5 Basic flow path configuration of the resistance simulation device

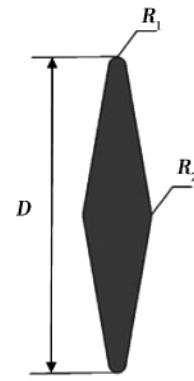


图 6 阻力模拟装置节流板断面结构  
Fig. 6 Structure of the cross section of the throttle plate in the resistance simulation device

圆管结构的阻力模拟装置通过法兰串接在地面试验排气系统的长直圆管段中部,其 4 个节流板以 90° 交叉顺序布置,为保持阻力特性恒定,每个节流板只设开、关两种状态,顺流开启时记为“0”,关闭时记为“1”,因此共有“0000”至“1111”即  $2^4 = 16$  种的开关状态,从而形成包含 16 种特定阻力特性的阻力特性谱。图 5 中为“0000”开关状态,图 7 给出了“1110”开关状态,其他开关状态依此类推。

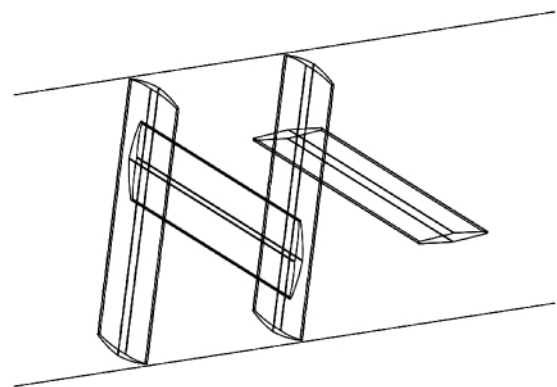


图 7 阻力模拟装置“1110”开关状态  
Fig. 7 “1110” on - off state of the resistance simulation device

### 3 阻力模拟装置阻力特性计算及试验验证

以两个节流板开启和两个节流板关闭的“0101”开关状态为例,地面排气系统阻力模拟装置的计算域网格划分如图 8 所示,延伸段采用六面体

网格,节流板周围采用四面体网格方案并进行加密。

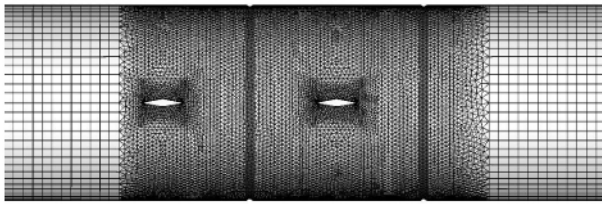


图 8 阻力模拟装置计算域网格划分

Fig. 8 Mesh division of the computational domain in the resistance simulation device

对节流板 16 个开关状态下的流场分别进行数值模拟,阻力模拟装置各开关状态下的阻力特性如图 9 所示。为了评估阻力模拟装置阻力特性数值模拟精度,利用风洞试验台进行了阻力模拟装置缩比模型试验,从图 10 所示的阻力模拟装置阻力系数数值模拟结果与试验结果的比较可知,两者吻合良好。

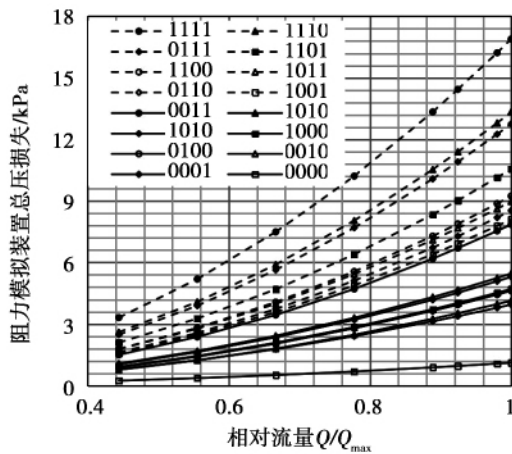


图 9 阻力模拟装置阻力特性计算结果

Fig. 9 Calculation results of the resistance characteristics of the resistance simulation device

#### 4 船舶动力多分支排气系统阻力特性模拟方案

事实上,前述的阻力模拟装置结构是根据地面试验排气系统与船舶多分支排气系统之间阻力特性的差异经一系列优化所确定,加装阻力模拟装置的地面试验排气系统阻力特性可由图 3 中的地面试验排气系统原阻力特性和图 9 的阻力模拟装置阻力特

性叠加获得,如图 11 所示。

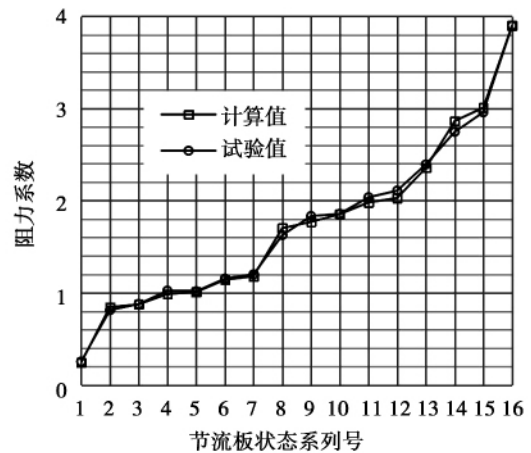


图 10 阻力模拟装置阻力系数计算与试验对比

Fig. 10 Contrast of the resistance coefficient calculated in the resistance simulation device with that tested

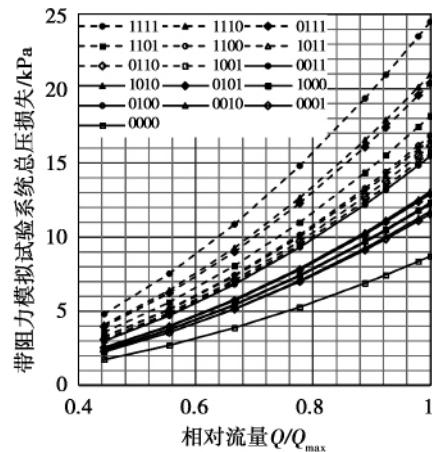


图 11 带阻力模拟装置试验系统阻力特性

Fig. 11 Resistance characteristics of the test system equipped with a resistance simulation device

根据船舶各分支排气系统工况阻力特性,加装阻力模拟装置后的地面试验系统选择相应的试验方案即可模拟船舶各分支排气系统开展试验研究,其模拟精度由表 1 给出的相对误差表征,可以看出,加装阻力模拟装置后的地面试验系统通过选择阻力模拟装置的节流板开关状态可高精度地模拟船舶各分支排气系统的阻力特性,满足以地面试验系统完成船舶各分支排气系统阻力特性状态下动力装置总体性能试验研究的精度要求。

表 1 船舶各分支排气系统模拟试验工况阻力相对误差

Tab.1 Relative errors of the resistances of various marine branch exhaust gas systems under the simulation test conditions

工况流量	船舶各分支排气系统对应的模拟装置开关状态							
	分支 1	分支 2	分支 3	分支 4	分支 5	分支 6	分支 7	分支 8
	0111 开关状态	0111 开关状态	0111 开关状态	1110 开关状态	0011 开关状态	1011 开关状态	0110 开关状态	1101 开关状态
$Q_1$	-2.11%	-3.01%	-3.58%	-4.77%	2.59%	1.63%	-2.17%	3.31%
$Q_2$	-1.10%	-1.88%	-2.39%	-3.55%	2.74%	1.37%	-1.44%	3.29%
$Q_3$	-0.42%	-1.12%	-1.58%	-2.73%	2.85%	1.20%	-0.96%	3.27%
$Q_4$	0.06%	-0.58%	-1.00%	-2.13%	2.92%	1.08%	-0.61%	3.26%
$Q_5$	0.43%	-0.17%	-0.57%	-1.68%	2.98%	0.99%	-0.36%	3.26%
$Q_6$	0.53%	-0.06%	-0.45%	-1.56%	2.99%	0.96%	-0.29%	3.25%
$Q_7$	0.67%	0.10%	-0.28%	-1.39%	3.01%	0.93%	-0.19%	3.25%
$Q_{max}$	0.72%	0.15%	-0.22%	-1.33%	3.02%	0.92%	-0.16%	3.25%

### 5 结 论

(1) 本文提出的阻力模拟装置配置于单机地面试验排气系统, 可对船舶动力多分支排气系统阻力特性实现高精度的模拟;

(2) 只设开关两种状态的多节流板布置的阻力模拟结构可避免类似蝶阀等节流件阻力目标值难以精确调设的缺点。

#### 参考文献:

[1] 杨卫国. 船舶主机特殊排气消音器及其排气系统流阻设计[J]. 船舶 2013 24(1):55-58.  
 YANG Wei-Guo. Design of the flow resistance of a marine main machine special exhaust gas silencer and its exhaust gas system [J]. Ship 2013 24(1): 55-58.

[2] 余思骞, 等. 基于 CFD 的船舶排气管系流场分析[J]. 船海工程 2015 44(2):67-70.  
 YU Si-qian et al. Analysis of the flow field in a marine exhaust gas

pipng system based on the CFD [J]. Ship and Oceanological Engineering 2015 44(2): 67-70.

[3] 王新全, 等. 基于 GA-BP 模型的船舶柴油机排气温度趋势预测[J]. 大连海事大学学报 2015 41(3):73-76.  
 WANG Xin-quan et al. Prediction of the tendency of the exhaust gas temperature of a marine diesel engine based on the GA-BP model [J]. Journal of Dalian Maritime University 2015 41(3): 73-76.

[4] 金盈利, 等. 烧结机余热锅炉多通道烟气流场数值模拟[J]. 热能动力工程 2015 30(2):242-247.  
 JING Ying-li et al. Numerical simulation of the flue gas flow field inside the multiple ducts in the heat recovery steam generator of a sintering machine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2015 30(2): 242-247.

[5] 徐筱欣. 船舶动力装置 [M]. 上海: 上海交通大学出版社 2008.  
 XU Xiao-xin. Marine power plant [M]. Shanghai: Shanghai Jiao-tong University Press 2008.

(刘 瑶 编辑)

test data and reflect to a certain extent the internal characteristics of the precipitator. The research results show that in a certain range , the collection efficiency will increase with an increase of the circulating water flow rate and at the meantime , at a high circulating water flow rate , the collection efficiency will increase with an increase of the particle diameter , however , at a low circulating water flow rate , the collection efficiency will first decrease and then increase with an increase of the particle diameter. **Key words:** wet type electrostatic precipitator , collection efficiency , circulating water flow rate , force in an electric field

**基于地面试验系统的船舶动力多分支排气系统阻力特性模拟 = Simulation of the Resistance Characteristics of a Marine Power Multi-branch Exhaust Gas System Based on the Ground Test System** [刊 汉]/SUN Hai-ou , YE Nan , WANG Zhong-yi ( College of Power and Energy Source Engineering , Harbin Engineering University , Harbin , China , Post Code: 150001 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ). - 87 ~ 91

To realize an aim of simulating respectively the resistance characteristics of various branches of a marine power multi-branch exhaust gas system on a ground single machine test system and fulfill an experimental study of the overall performance of the power plant corresponding to the resistance characteristics of each branch exhaust gas system in the marine power plant , a numerical simulation was performed of the marine power multi-branch exhaust gas system and the single machine ground test exhaust gas system. In compliance with the corresponding requirements for difference compensation , an additional resistance simulation configuration version was optimized , of which the resistance characteristics of various marine power branch exhaust gas systems reoccurred respectively to the ground test exhaust gas system. It has been found that the resistance simulation configuration in question can avoid a demerit difficult to precisely set the target values of the resistances of butterfly valves and similar throttling parts or components and the ground test system provided with the resistance simulation configuration can realize a high precision simulation of the resistance characteristics of various marine power branch exhaust gas systems. **Key words:** marine power , exhaust gas system , resistance characteristics , resistance simulation

**不同工况下漂浮式风力机整机动态特性对比分析 = Contrast and Analysis of the Whole Machine Dynamic Characteristics of a Floating Type Wind Turbine Under Various Operating Conditions** [刊 汉]/TANG Jin-hua , LI Chun , DING Qin-wei , YANG Yang ( College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ). - 92 ~ 99

To study offshore floating type wind turbines has become a focus and hot point in the domain of wind power. On the basis of a 5 MW floating type wind turbine on the OC<sub>3</sub>-Hywind Spar platform , a whole machine model was estab-