

燃气轮机进气系统阻力特性修正方法

刘美伊¹, 杨连峰², 刘家兴³, 沈启航², 李中柱², 孙涛²
(哈尔滨工程大学 南安普顿海洋工程联合学院¹, 动力与能源工程学院²: 哈尔滨 150001;
3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 由于燃气轮机进气系统部件的试验环境、测试方法、进出口边界条件等和整机的试验环境存在差异, 导致部件在单独试验条件下获取的工作特性不完全等同于整机环境下的部件工作特性。为了解决这一问题, 针对燃气轮机进气系统各部件, 基于已有部件试验和整机缩比试验数据, 采用试验验证和数值仿真的方法, 开展了各因素对于部件工作特性的影响机理研究。通过分析单独试验和整机试验环境条件下试验器结构、边界条件和测试方法等因素的差别, 总结了各因素对于部件流动特征、阻力损失的作用规律, 建立部件在整机环境下的考虑多因素耦合影响的工作特性修正方法。结果表明: 燃气轮机进气系统修正模型主要基于进气百叶窗的进气不均匀度、进气蜗壳的雷诺数以及进气风速风向等因素进行修正, 修正所得到的阻力特性与整机仿真吻合较好。修正误差基本都在 1% 以下, 修正模型计算精度较高。

关键词: 进气系统; 阻力特性; 修正方法; 燃气轮机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.01.004

Gas Turbine Intake System Resistance Characteristics Correction Method

LIU Mei-yi¹, YANG Lian-feng², LIU Jia-xing³, SHEN Qi-hang², LI Zhong-zhu², SUN Tao²

(College of Southampton Joint Educational Institute¹, College of Power and Energy Engineering², Harbin Engineering University:
Harbin 150001, China; 3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Due to the differences in test environment, test method, and inlet and outlet boundary conditions between the component test of the gas turbine intake system and the entire marine propulsion system test, component performance characteristics obtained under the individual component test conditions do not fully match those obtained under the marine application environment. To solve this problem, based on the existing component test data and the scaled-down entire marine propulsion system test data, a study of the influence mechanisms of various factors on component performance characteristics was conducted for each component of the gas turbine intake system by means of experimental verification and numerical simulation. By analyzing the differences in test rig structure, boundary conditions, and test methods between individual component tests and the environment of the entire marine propulsion system tests, the influence laws of various factors on the flow characteristics and pressure losses of the intake system components were summarized, and the components performance characteristics correction methods in the marine application environment, taking into account the multi-factor coupling influences, were established. The results show that the correction model of the gas turbine intake system is mainly based on factors such as the intake louver non-uniformity, the intake volute Reynolds number, and the intake wind speed and direction, etc. The corrected resistance characteristics show good agreement with the simulation under the marine application environment, with correction errors typically less than 1%, indicating high accuracy.

Key words: air intake system; resistance characteristics; correction method; gas turbine

0 引言

目前, 由于燃气轮机进气系统部件试验的环境、测试方法、进出口边界条件等和整机的试验环境存在

差异, 导致部件在单独试验条件下获取的工作特性不完全等同于整机环境下的部件工作特性^[1-2]。由于舰船燃气轮机的进气系统尺寸较大, 一般采用合适的缩比模型对舰船燃机进气部件进行阻力特性、流场分布

收稿日期: 2024-05-15 基金项目: 国家级研究项目资助

作者简介: 刘美伊(2003), 女, 在读本科生。

引用格式: 刘美伊, 杨连峰, 刘家兴, 等. 燃气轮机进气系统阻力特性修正方法[J]. 航空发动机, 2025, 51(1): 33-39. LIU Meiyi, YANG Lianfeng, LIU Jiaying, et al. Gas turbine intake system resistance characteristics correction method[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 33-39.

的试验测量^[3-5]。另外,由于风速、风向、温度、盐雾等环境的测试差异也会导致进气系统的工作特性发生偏移,进而影响整机的工作性能和运行状态^[6]。因此,目前亟需对舰船燃机进气系统部件的试验特性进行修正,消除缩放因子、试验台架运行环境等因素造成的部件试验与整机试验工作特性的偏差^[7],建立进气系统整机环境下的部件特性修正方法,提高舰船燃气轮机整机性能预测精度。

国内外学者对燃气轮机进气系统的研究一般集中于部件的性能优化,而对其工作特性修正的研究较少。喜静波等^[8]分析了进气过滤系统的影响因素,引入多个影响因子,通过将实际运行工况折合到标准工况,对压降损失进行修正,可实现对过滤系统堵塞失效的评估;杨宝轩^[9]同时考虑了中国燃机机组多处于部分负荷运行的实际情况,采用折合标准工况的压降损失与过滤器在线过滤效率监测相结合的方法,评价了过滤器的健康状态;韩彭锐等^[10]和马启新等^[11]对船舶燃气轮机进气系统滤清器进行了设计研究,研究结果为船舶燃气轮机进气系统的设计提供了相应参考;马启新等^[12]采用流量自动分配处理方法探索了双通道进气的流量分配规律,进行全流场特性分析和系统性能的评估;王建华等^[13]根据燃气轮机等大流量动力装置装船应用需求,给出了大尺度复杂进气系统功能配置与气动布局典型方案;JIN等^[14]为了评估进气系统中过滤器的健康状况,创建了过滤器压力损失模型,其中包含过滤器的定义健康指数和5种外部环境和控制因素;Khorsand等^[15]通过流型仿真来改善燃气轮机压气机入口的压力损失和流动特性;Corsini等^[16]在具有风机管道耦合的燃气轮机通风系统研究中,用压力突变模拟风机能够获得可靠的研究结果;Mudge等^[17]采用试验测试与数值仿真相结合的方式进行了船舶燃气轮机进气系统的设计与改型工作;刘美伊等^[18]对排气系统整机环境下的部件特性修正方法进行了研究。

综上所述,目前国内外学者大多围绕某个具体部件或者进气系统整体开展其工作特性研究,但是很少有综合考虑缩放因子、部件与整机试验台架运行环境、海洋环境等多因素共同影响下,部件试验测量结果与舰船实机运行之间的进气系统工作特性差异。本文通过分析缩放、模化等试验条件下进气系统部件阻力特性,与受到不同风速、风向影响的舰船实机运

行环境下进气系统阻力特性之间的差异,提出了适用于部件试验数据的全工况修正方法。

1 物理模型

本文以大型舰船进气系统为研究对象,选取整个进气系统为研究的物理模型。舰船进排气系统物理模型如图1所示。

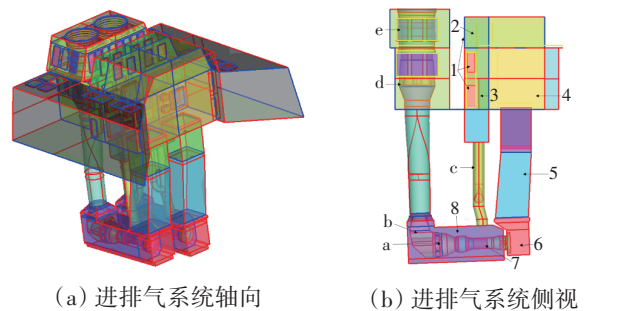


图1 舰船进排气系统物理模型
1—百叶窗;2—进气舱室;3—燃机进气滤清器;4—稳压室;5—进气竖井;6—进气蜗壳;7—燃气轮机;8—箱装体;a—涡轮出口;b—排气蜗壳;c—箱装体引射冷却管;d—一分四排气引射装置;e—多级引射器。

图1 舰船进排气系统物理模型

1.1 部件试验

获取进气部件阻力特性试验数据的试验台如图2所示。试验模型为1:4的缩放模型,主要由用于模拟百叶窗阻力特性的多层丝网阻力件、百叶窗后舱室、用于模拟滤清器特性的多层丝网阻力件、滤清器后舱室、消音器、进气竖井、箱装体、压气机入口、导流段、直管段、挡板阀、稳压箱、风机、箱装体冷却通道等组成。分别针对百叶窗、进气滤清器、消音器、进气竖井、进气蜗壳部件与整个进气系统开展阻力特性测量试验。

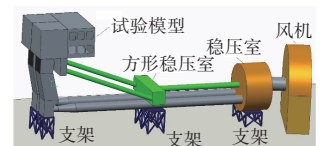


图2 进气系统试验台

1.2 进气系统海洋环境数值模拟方法

由于系统模型比较大,且为了模拟真实海洋环境运行工况,需要在进气道外设置大空间来模拟外界环境,较真实地反映进气系统在受到外界环境干扰下的流场特性,使用ICEM CFD网格划分工具对计算域网格进行划分。由于模型结构较为复杂,难以进行结构化划分,因此采用非结构网格划分,并在重点考察部分及结构尺寸较小的部分进行了网格加密处理,网格总数为2440万,进排气系统网格划分如图3所示。网格质量在0.31以上。

为了保证计算结果的有效性,在对模型进行计算

之前先进行网格的无关性验证。选定全速(1.0)工况下的算例进行验证计算。网格无关性验证共选用 3 种尺度的网格文件进行验证,其网格数量分别为 1880 万、2440 万和 4000 万。不同网格数量下的计算模型数据对比见表 1。

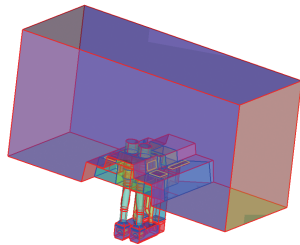


图 3 进排气系统网格划分

表 1 网格无关性验证

网格数/万	1880	2440	4000
单侧进气流量/(kg/s)	169.94	172.25	172.68
压气机进口总压/Pa	-1358.53	-1530.40	-1530.51

从表中可见,当网格数量大于 2440 万时,各项关键参数基本不再发生改变,故为了在保证计算准确度的同时缩短计算所需时长,本文选用 2440 万网格数量的网格进行计算。

不同影响因素的考察方式则需要通过给定不同边界条件达到。边界条件具体设置方法如下。

(1)基于商业仿真软件,给定参考压力为 101325 Pa。

(2)进口边界条件。进气系统进口为大气进口,设置为压力入口。

(3)出口边界条件。进气系统出口为压气机进口及燃气轮机进口,给定压力出口条件,并给定燃气轮机目标流量,目标流量的值由燃气轮机的不同工况决定,温度为 300 K。

(4)针对不同风速、风向条件则需要在外界大环境给定大气速度进口,与相应的压力出口,以模拟环境因素影响。

(5)多孔介质。百叶窗、滤清器及消音器均设置为多孔介质(Porous Jump Boundary),相关参数及取值见表 2。表中 a 为表征介质表面渗透性的物理量; C_2 为压力阶跃系数。

表 2 多孔介质给定的相关参数

介质	a/m^2	C_2/lm^{-1}
甲板百叶窗	7.38×10^{-6}	19.25
进气百叶窗	8.32×10^{-6}	17.08
排气百叶窗	5.20×10^{-6}	27.33
燃烧空气滤清器	4.04×10^{-7}	27.88
冷却空气滤清器	2.60×10^{-6}	26.04
消音器	1.12×10^{-4}	1.04
固壁边界条件	绝热、速度无滑移	
湍流模型	标准 $k-\epsilon$ 模型	

主要影响因素与分析工况见表 3。其中模拟外界环境的不同风向角度设置如图 4 所示。

表 3 主要影响因素与分析工况

影响因素	分析工况
进气流量/(kg/s)	52、60、65、70、75、80、82.5
风向/ $^\circ$	0、45、90、135、180
风速/(m/s)	0、9、15、35

2 进气系统部件与整机试验测量数据修正

为了精确修正部件与整机试验中的测量数据,进而消除缩放因子和试验台架环境对整机测量数据因部件差异造成的影响,

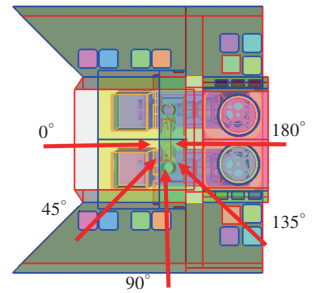
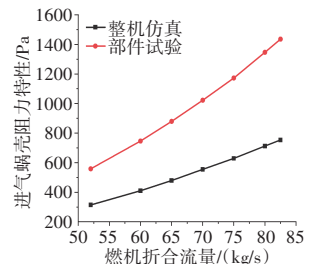


图 4 不同风向角度设置

首要任务是针对进气系统实施分部件的研究。本文将进气系统分为百叶窗、进气滤清器、消音器、进气竖井以及进气蜗壳 5 个关键组成部分,并逐一针对这些部件的阻力特性进行细致的修正处理,以期最终整合得出整个进气系统的全面修正特性。

2.1 修正部件选取

根据进气系统整机仿真和部件试验结果,对比其阻力特性可以发现,在整机仿真和部件试验条件下,进气蜗壳中阻力损失差别在 112 ~ 369 Pa,进气竖井阻力损失差别在 0.2 ~ 0.6 Pa,消音器阻力损失差别在 0.1 ~ 1.0 Pa,进气滤清器阻力损失差别在 0.2 ~ 1.0 Pa,百叶窗的阻力损失差别为 22 ~ 58 Pa。由于试验部件与整机之间保证了马赫数相似,所以在进气竖井、消音器以及进气滤清器中气流流动的速度大小和方向都没有发生变化,仅有与壁面的摩擦阻力。而在进气蜗壳和百叶窗中气流流动的速度大小和方向发生了变化,这就导致在这 2 个部件中试验与整机的阻力特性存在较大差距,所以只有进气蜗壳和百叶窗需要进行修正,其他部件的阻力特性并无明显区别,故不需要进行修正,其中进气蜗壳、百叶窗与进气系统整体的试验结果与仿真结果对比如图 5 所示。



(a) 进气蜗壳阻力特性

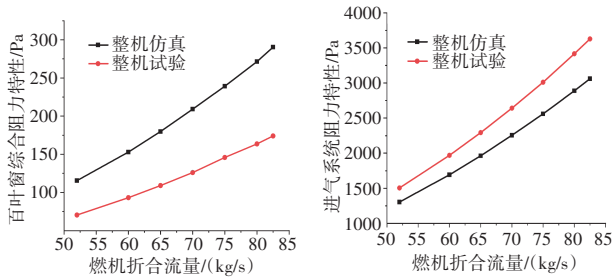


图5 进气系统关键部件与整机阻力特性对比

2.2 百叶窗阻力特性修正

进气百叶窗中由于各百叶窗分布的无规律性使得进气百叶窗中试验与整机的气流速度大小存在差异,从而导致百叶窗的阻力损失在试验和整机之间存在较大的差异。

$$\Delta P = am + bm^2 = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (1)$$

$$\Delta P_i = am_i + bm_i^2 \quad (2)$$

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad (3)$$

$$\Delta P = a \sum_{i=1}^n m_i + b \sum_{i=1}^n m_i^2 \quad (4)$$

$$\Delta P = am + b \sum_{i=1}^n m_i^2 = \quad (5)$$

$$am + bm^2 - 2b \sum_{i=1, j=1}^n m_i m_j \quad (6)$$

式中: ΔP 为百叶窗的修正值; ΔP_i 为无风时百叶窗的修正值; m 为进气流量; a 、 b 、 K_1 均为经验系数; σ_s 为试验部件进气百叶窗气流速度不均匀度; σ_{v_0} 为整机无风时百叶窗速度不均匀度。

气流速度不均匀度

$$\sigma = \frac{v_{\max} - \bar{v}}{\bar{v}} \quad (7)$$

式中: $v_{\max,s}$ 为试验部件进气百叶窗最大速度; \bar{v} 为百叶窗的平均速度。

计算得到 $b_1 = 0.0115$, $K_1 = 0.3178$ 。

输入 $v_{\max,s}$ 和平均速度 \bar{v}_s 、整机无风时百叶窗的最大速度 v_{\max,v_0} 和平均速度 \bar{v}_{v_0} ,即可得到试验部件进气百叶窗不均匀度 σ_s 、整机无风时百叶窗速度不均匀度 σ_{v_0} ,从而得到不同工况流量下无风时百叶窗的修正值 ΔP_1 。

百叶窗的修正值与试验和整机的阻力特性如图

6所示。从图中可见,预测值与整机的阻力特性具有良好的匹配效果。各工况下百叶窗的预测值与整机数值的计算结果以及修正模型的误差见表4。从表中可见,所有工况的误差

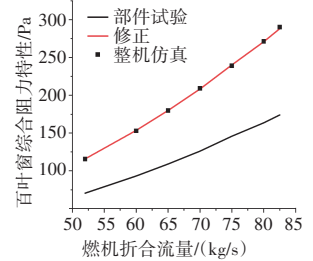


图6 百叶窗阻力修正对比

表4 百叶窗阻力特性修正误差

工况/ (kg/s)	百叶窗阻力特性/Pa		误差/ %
	整机仿真值	修正值	
82.5	290.31	288.28	0.68
80	271.37	271.02	0.10
75	239.16	240.25	0.46
70	209.15	208.35	0.38
65	179.91	179.96	0.03
60	152.98	153.61	0.39
52	115.49	115.83	0.41

2.3 蜗壳阻力特性修正

根据流体力学的基本原理,在进气蜗壳处试验部件与整机的阻力特性产生差异的主要原因为流速的大小和方向发生了变化,使得试验部件与整机在此处的局部阻力不一致。流体在管内流动时,管径越小,损失越大,所以试验所得到的损失比整机计算得到的阻力损失要大。流速的变化主要导致进气蜗壳雷诺数的变化,所以进气蜗壳的阻力修正基于雷诺数的修正。

建立弯管雷诺数与压力损失的拟合方程,添加修正系数

$$\Delta P_2 = \frac{1}{2} K_2 \rho_{s,2} V_{s,2}^2 \frac{Re_{v_0}}{Re_{s,2}} \quad (8)$$

式中: K_2 为雷诺数阻力修正系数; $\rho_{s,2}$ 为进气蜗壳气流密度。

$$Re = \rho V l / \mu \quad (9)$$

根据 $m = \rho V S$ 将雷诺数转换成与流量相关的量,得到

$$\Delta P_2 = \frac{1}{2} K_2 \frac{m_{s,2} m_{v_0} l_{v_0}}{\rho_{s,2} S_{s,2} S_{v_0} l_s} \quad (10)$$

式中: l_s 、 $S_{s,2}$ 、 $\rho_{s,2}$ 、 $m_{s,2}$ 分别为试验部件进气蜗壳的当量直径、面积、密度、流量; l_{v_0} 、 S_{v_0} 、 m_{v_0} 分别为整机进气蜗壳的当量直径、面积、流量。将各参数代入式(10)即可得到无风时进气蜗壳的修正值 ΔP_2 。

由于保证马赫数相似,黏度保持不变,所以整机与试验的当量尺寸之比即为缩比 4。计算得到 $K_2 = 0.0129$ 。

进气蜗壳基于试验数值修正后的拟合曲线与整机数值计算得到的阻力分布对比如图 7 所示。从图中可见,此方法具有较好的修正效果和较高的修正精度。各工况的数值模拟和预测的阻力数值以及预测误差见表 5。从表中可见,除了极个别低工况和高工况的预测精度大于 1% 之外,其他的预测误差都在 1% 以下。

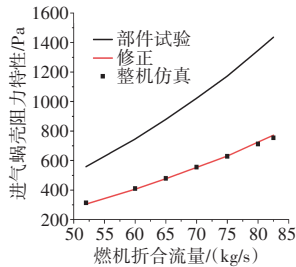


图 7 蜗壳阻力修正对比

表 5 蜗壳阻力特性修正误差

工况/(kg/s)	蜗壳阻力特性/Pa		误差/%
	整机仿真值	修正值	
82.5	753.85	761.04	0.95
80	712.58	719.14	0.92
75	628.97	630.48	0.24
70	554.96	553.62	0.24
65	479.15	477.41	0.36
60	410.36	407.04	0.81
52	314.11	311.06	0.97

2.4 进气系统阻力特性修正

进气系统修正后的阻力为试验值与进气蜗壳和百叶窗修正值的总和

$$P_{cor} = P_{exp} + \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (11)$$

式中: P_{exp} 为试验得到的进气系统阻力损失; ΔP_1 为百叶窗试验与整机的差值; ΔP_2 为进气蜗壳试验与整机之间的差值。

各工况数值计算和预测得到的阻力特性数值以及预测误差见表 6。从表中可见,所有工况的预测误差都在 1% 以下,证明修正模型具有良好的预测精度。

3 进气系统部件试验与海洋运行环境下阻力特性修正

为了模拟真实海洋运行环境,对不同风速与风向条件下进气系统的运行特性进行仿真分析,并对上文中得到的进气系统整机试验条件下阻力特性修正方法耦合风速、风向影响,得到真实海洋运行环境下进

表 6 进气系统阻力特性修正误差

工况/(kg/s)	进气系统阻力特性/Pa		误差/%
	整机仿真值	修正值	
82.5	3060.80	3078.70	0.58
80	2889.13	2902.92	0.48
75	2560.18	2563.46	0.13
70	2255.50	2254.79	0.03
65	1962.72	1962.30	0.02
60	1691.78	1689.29	0.15
52	1303.97	1296.24	0.59

气系统部件阻力特性的修正方法。

3.1 不同风速条件下进气系统的阻力特性修正

对 0° 风向条件下进气系统的阻力特性进行修正,考虑 0、9、15、35 m/s 4 种风速,不同风速主要会影响百叶窗之间的不均匀度。所以在有风条件下,只需对百叶窗的阻力特性进行修正。

根据无风条件下的百叶窗阻力特性计算式对有风条件下百叶窗的阻力特性进行修正。 0° 风向条件下百叶窗的阻力修正计算式为

$$\Delta P_{0.1} = b_2 K_{0.1} m (1 + \sqrt{V})^2 \frac{\sigma_v}{\sigma_{v_0}} \quad (12)$$

式中: $b_2 = 0.0223$; $K_{0.1} = 1.0462$ 。

输入参数风速 V 、不同工况流量 m 、整机无风时百叶窗速度不均匀度 σ_{v_0} 、整

机不同风速时百叶窗速度不均匀度 σ_v ,即可得到不同风速时百叶窗的修正值 $\Delta P_{0.1}$ 。 0° 风向有风条件下百叶窗实际阻力特性和根据计算式修正所得阻力特性的对比结果如图 8 所示并见表 7。

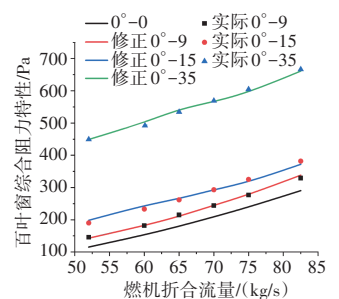


图 8 0° 风向时百叶窗不同风速阻力特性修正

表 7 0° 风向时百叶窗不同风速阻力特性修正误差

工况/(kg/s)	修正误差/%		
	风速=9 m/s	风速=15 m/s	风速=35 m/s
82.5	0.97	0.80	0.78
75	0.42	0.97	0.95
70	0.55	0.11	0.56
65	0.96	0.96	0.94
60	0.08	0.87	0.98
52	0.91	0.95	0.05

3.2 不同风向条件下进气系统的阻力特性修正

相同风速不同风向时,进气系统其他部件的阻力损失不受影响,不同风向只会影响进气百叶窗的阻力特性。在上文所述的 0° 风向不同风速的修正模型中加入速度变量。建立百叶窗的修正模型

$$\Delta P_4 = \Delta P_{0,1} K_4 (1 + |\sin 2\theta|) \quad (13)$$

式中: K_4 为风向修正系数; σ_v 为 0° 风向时不同风速的不均匀度; θ 为风向角度。

输入风向角度 θ ,即可得到不同风向时百叶窗的修正值 ΔP_4 。

不同风速时风向修正系数 K_4 随角度的变化如图9所示。从图中可见,曲线基本可以覆盖所有不同实际海况的风速,不同风速风向时的修正系数 K_4 可以根据该图插值得到。

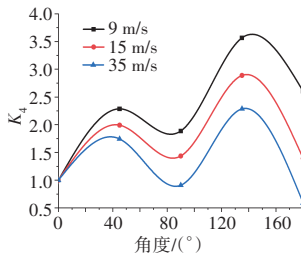


图9 不同风速时风向修正系数 K_4 随角度的变化

基于以上修正方法,得到风速分别为9、15、35 m/s时不同风向的阻力特性修正结果。风速为9 m/s时不同风向的阻力特性修正如图10所示。从图中可见,此时风向的变化对进气系统阻力特性的影响较小,不同风向的阻力特性修正值随流量的变化趋势与整机仿真具有一致性;从图中还可见,只有在个别进气流量较低或者较高时误差超过1%,绝大部分的修正误差都在1%以下。

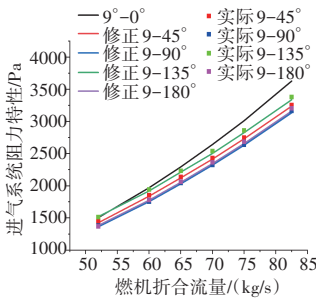


图10 风速为9 m/s时不同风向的阻力特性修正

风速为15 m/s时不同风向的阻力特性修正如图11所示。这时不同风向的影响相比9 m/s时略大。修正后的阻力特性依然能够明确地描述真实情况。总体而言,修正误差呈现出在低工况和高工况时误差较大、其他工况较小的趋势,但误差都基本保持在1%以下。

风速为35 m/s时不同风向的阻力特性修正如图12所示。从图中可见,高风速时进气系统阻力特性对风向的变化较敏感,其中尤以 45° 和 135° 时会发生急剧变化,相较于其他风向的阻力特性增加了2000 Pa左右;修正所得到的阻力特性与整机仿真吻合较好,修正误差基本都在1%以下,所提出的修正模型拥有良好的修正效果。

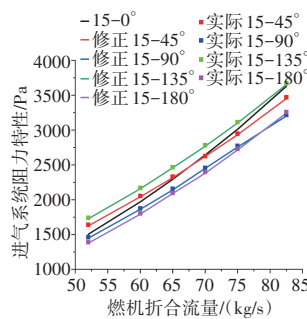


图11 风速为15 m/s时不同风向的阻力特性修正

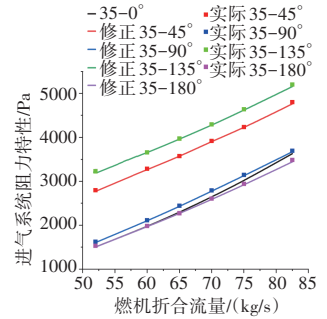


图12 风速为35 m/s时不同风向的阻力特性修正

3.3 海洋运行环境下进气系统阻力特性修正

综合燃气轮机进气系统各部件的修正方法,得到不同工况下进气系统不同风速风向的阻力特性

$$P = P_s + \Delta P_1 - \Delta P_2 + \Delta P_4 = P_s + 2b_1 K_1 m^2 \frac{\sigma_{v_0}}{\sigma_s} - \frac{1}{2} K_2 \frac{m_{s,2} m_{v_0} l_{v_0}}{\rho_{s,2} S_{s,2} S_{v_0} l_s} + b_2 K_{0,1} m (1 + \sqrt{V})^2 \frac{\sigma_v}{\sigma_{v_0}} K_4 (1 + |\sin 2\theta|) \quad (14)$$

表8 进气系统工作特性修正模型

输入参数	修正方法	输出参数
试验部件进气百叶窗的最大速度 $v_{max,s}$ 和平均速度 \bar{v}_s 整机无风时百叶窗的最大速度 v_{max,v_0} 和平均速度 \bar{v}_{v_0} 整机有风时百叶窗的最大速度 $v_{max,v}$ 和平均速度 \bar{v}_v	$\sigma = \frac{v_{max} - \bar{v}}{\bar{v}}$	试验部件进气百叶窗不均匀度 σ_s 整机无风时百叶窗速度不均匀度 σ_{v_0} 整机不同风速时叶窗速度不均匀度 σ_v
不同工况流量 m 试验部件百叶窗速度不均匀度 σ_s 整机无风百叶窗速度不均匀度 σ_{v_0}	$\Delta P_1 = 2b_1 K_1 m^2 \frac{\sigma_{v_0}}{\sigma_s}$ $b_1 = 0.0115, K_1 = 0.3178$	无风时百叶窗的修正值 ΔP_1
试验部件进气蜗壳的面积 $S_{s,2}$ 、当量直径 l_s 、流量 $m_{s,2}$ 、密度 $\rho_{s,2}$ 无风整机进气蜗壳的面积 S_{v_0} 、当量直径 l_{v_0} 、流量 m_{v_0}	$\Delta P_2 = \frac{1}{2} K_2 \frac{m_{s,2} m_{v_0} l_{v_0}}{\rho_{s,2} S_{s,2} S_{v_0} l_s}$ $K_2 = 0.0129$	无风时进气蜗壳的修正值 ΔP_2
风速 V 不同工况流量 m 整机无风时百叶窗速度不均匀度 σ_{v_0} 整机不同风速时叶窗速度不均匀度 σ_v	$\Delta P_{0,1} = b_2 K_{0,1} m (1 + \sqrt{V})^2 \frac{\sigma_v}{\sigma_{v_0}}$ $b_2 = 0.0223, K_{0,1} = 1.0462$	不同风速时百叶窗的修正值 $\Delta P_{0,1}$
风向角度 θ	$\Delta P_4 = \Delta P_{0,1} K_4 (1 + \sin 2\theta)$	不同风向时百叶窗的修正值 ΔP_4
试验部件不同工况的阻力特性 P_s	$P = P_s + \Delta P_1 - \Delta P_2 + \Delta P_4$	不同工况下进气系统不同风速风向的阻力特性 P

进气系统工作特性修正模型见表8。表中给出了各修正步骤的输入参数、修正方法和输出参数。

4 结论

(1)在部件仿真与整机无风的修正过程中,主要为进气百叶窗和进气蜗壳的修正,不同尺寸的进气百叶窗和进气蜗壳会导致不同的局部阻力损失,其他部件的阻力损失基本相似。

(2)在较低风速时,风速风向等因素对燃气轮机进气系统各部件的工作特性影响不明显;在较高风速时,风速风向等因素对工作特性的影响显著,其中 45° 和 135° 风向时的阻力损失急剧增大。

(3)燃气轮机进气系统修正模型主要基于进气百叶窗的进气不均匀度、进气蜗壳的雷诺数以及进气风速风向等因素进行修正,修正模型的精度较高。

参考文献:

- [1] Mohammadian P K, Saidi M H. Simulation of startup operation of an industrial twin-shaft gas turbine based on geometry and control logic[J]. *Energy*, 2019, 183: 1295-1313.
- [2] Jin Y F, Liu C, Tian X, et al. A novel integrated modeling approach for filter diagnosis in gas turbine air intake system[J]. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A-Journal of Power and Energy*, 2022, 236(3): 435-449.
- [3] 袁长龙. 气垫船燃气轮机进气系统性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
YUAN Changlong. Research on characteristics of hover-craft gas turbine air intake system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [4] 张涛, 付忠广, 刘志坦, 等. 燃气轮机进气过滤器性能及测试评价方法[J]. *汽轮机技术*, 2020, 62(6): 401-405, 433.
ZHANG Tao, FU Zhongguang, LIU Zhitan, et al. Performance and test evaluation method of gas turbine intake filter[J]. *Turbine Technology*, 2020, 62(6): 401-405, 433. (in Chinese)
- [5] Schwarz A D, Konig L, Meyer J, et al. Impact of water droplet and humidity interaction with soluble particles on the operational performance of surface filters in gas cleaning applications[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2020, 142: 105523.
- [6] Venkatesan G, Nkulasekharan N, Iniyan S. Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis[J]. *Desalination*, 2014, 354: 39-52.
- [7] Venkatesan G, Nkulasekharan N, Muthukumar V, et al. Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization[J]. *Desalination*, 2015, 370: 33-43.
- [8] 喜静波, 马赓, 窦磊, 等. 燃气轮机进气过滤系统性能在线计算方法[J]. *燃气轮机技术*, 2023, 36(1): 40-45.
XI Jingbo, MA Geng, DOU Lei, et al. On-line calculation method of gas turbine intake filtration system performance[J]. *Gas Turbine Technology*, 2023, 36(1): 40-45. (in Chinese)
- [9] 杨宝轩. 燃气轮机进气过滤系统健康状态监测方法[J]. *自动化博览*, 2022, 39(5): 76-79.
YANG Baoxuan. Gas turbine intake filtration system health monitoring method[J]. *Automation Expo*, 2022, 39(5): 76-79. (in Chinese)
- [10] 韩彭锐, 李翔宇, 王艳华, 等. 船舶燃气轮机气水分离器结构设计标准研究[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(12): 124-131.
HAN Pengrui, LI Xiangyu, WANG Yanhua, et al. Study on structural design standard of Marine gas turbine gas-water separator[J]. *Thermal Power Engineering*, 2022, 37(12): 124-131. (in Chinese)
- [11] 马启新, 潘涛, 刘艳明, 等. 船舶燃气轮机双通道进气系统流场特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(10): 2508-2516.
MA Qixin, PAN Tao, LIU Yanming, et al. Study on flow field characteristics of Marine gas turbine dual-channel intake system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(10): 2508-2516. (in Chinese)
- [12] 马启新, 刘艳明, 潘涛, 等. 船舶燃气轮机进气系统中过滤装置数值模型化处理研究方法研究[J]. *推进技术*, 2020, 41(11): 2475-2482.
MA Qixin, LIU Yanming, PAN Tao, et al. Study on numerical modeling treatment method of filter in Marine gas turbine intake system[J]. *Propulsion Technology*, 2020, 41(11): 2475-2482. (in Chinese)
- [13] 王建华, 林丹, 付宇, 等. 船舶大尺度复杂进气结构空气动力学设计研究[C]//2019年全国工业流体力学会议摘要集. 北京: 中国船舶工业系统工程研究院, 2019: 34.
WANG Jianhua, LIN Dan, FU Yu, et al. Study on aerodynamic design of large scale complex intake structures for ships[C]//2019 National Conference on Industrial Fluid Mechanics Abstracts, 2019: 34. (in Chinese)
- [14] Jin Y F, Liu C, Tian X, et al. A novel integrated modeling approach for filter diagnosis in gas turbine air intake system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2021, 236(3): 435-449.
- [15] Khorsand K, Karimian S M H, Varmaziar M, et al. Investigation of flow pattern and pressure loss of AV94.2.5 gas turbine air intake system using 3D numerical modeling[C]//International Conference on Continuum Mechanics. UK: University of Cambridge, 2010: 273-278.
- [16] Corsini A, Delibra G, Minotti S, et al. Numerical assessment of fan-ducting coupling for gas turbine ventilation systems[R]. ASME 2015-GT-42449.
- [17] Mudge R K, Hiner S D. Gas turbine intake systems: high velocity filtration for marine gas turbine installations[R]. ASME 2001-GT-0584.
- [18] 刘美伊, 孙涛, 刘家兴, 等. 燃气轮机排气系统整机环境部件特性差异[J]. *航空发动机*, 2023, 49(5): 100-107.
LIU Meiyi, SUN Tao, LIU Jiaying, et al. Modification of component characteristics of gas turbine exhaust system in complete machine environment[J]. *Aeroengine*, 2023, 49(5): 100-107. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)