

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.08

航空发动机气动附加阻力修正测点布置与试验

任怡雪, 王毅, 常蕾

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 航空发动机室内试车台推力气动附加阻力的大小会因为试车台进气流场的差异产生不同, 而进气流场的状况很难直接观测, 测量位置的选定与试车间的流场状况相关, 因此本文通过对某型发动机的室内试车间的整场流场特性进行数值模拟研究, 得到发动机试车间内的流场状况, 分析了试车间内的气流速度、静压等物理量, 绘制整场流线, 针对试车间的气动附加阻力截面法修正方法, 研究了在不同截面下的速度、静压变化规律, 为气动附加阻力修正截面法在实际试车中的测量布点提供了依据, 并且做了某型发动机室内试车台的实测试验, 得到了测量及计算结果。结果表明, 数值模拟可以清晰的模拟出试车时的整场状态, 能得到实测不便测量的数据, 可以对试车间不便搭建测量的位置进行补充测量, 基于仿真得到的测点布局满足测量和计算的需求。

关键词: 数值模拟; 航空发动机; 测量方法; 气动附加阻力; 推力修正

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)06-0040-05

Arrangement and Test of Aeroengine Thrust Additional Aerodynamic Drag Correction Measuring Point

REN Yixue, WANG Yi, CHANG Lei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The aerodynamic additional resistance on the indoor test bed of an aeroengine will be different due to the difference in the inlet air field of the test bed, and the condition of the inlet air field is difficult to observe directly. The selection of measurement position is related to the flow field condition of the test room. Therefore, this paper through the indoor testbed of an engine numerical simulation research, the characteristics of the entire flow field was obtained. We analyzed the physical quantities such as velocity, static pressure and drawn the entire flow line. Aiming at the modification method of aerodynamic additional drag section method in the indoor testbed, the velocity and static pressure variation law under different sections are studied, which provides the basis for the measurement of the measurement points of aerodynamic additional drag section method in the actual test. The measurement and calculation results are obtained through the actual test of a certain engine. The results show that the numerical simulation can clearly simulate the whole field conditions during the test, and obtained the measured inconvenient data. It can supplement the inconvenient measuring positions in the indoor testbed, and obtain the layout of measuring points based on the simulation meet the requirements of measurement and calculation.

Key words: numerical simulation; aircraft engine; measuring method; additional aerodynamic drag; thrust correction

0 引言

发动机推力是航空发动机最主要的性能参数, 试车台是发动机推力测量中的重要试验平台。室内试车台在试车时, 由于发动机的进气和排气, 会在试车间内因为引射作用产生气流流动^[1], 进而在进气道处、发动机上以及发动机支架上产生气动附加阻力。气动附加阻力的大小会因不同试车台进气流场的差异存在较大的不同^[2-4], 但是, 流场状况很难直接监测, 现场测试会受到各种测量因素的影响, 测量难度较大。

在试车间的气动附加阻力修正中, 测量排架位置

的选定与试车间的流场状态相关。需要对发动机室内试车台的流场进行仿真研究, 用仿真流场的结果指导测量位置的选择, 同时, 起到补充测量结果的作用^[5-7, 11-12]。

本文通过利用航空发动机试车间虚拟仿真软件平台对整个试车间进行几何建模, 根据需要搭建一个完整的室内试车台模型, 再生成几何模型并进行参数设置, 然后进行数值模拟研究, 研究在不同截面处, 气流速度、静压、温度等物理量的变化, 以确定发动机试车时试车间内流场状态, 为现场实测试验方案提供支撑。

1 试车间气动附加阻力截面法

截面法是国内广泛使用的一种用于室内试车台的控制体划分方法,由流体力学的知识可知,在控制体上建立动量方程^[8-10],可表示为

$$\iiint_{\tau} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) d\tau + \oint_A (\vec{n} \cdot \vec{V}) \rho \vec{V} dA = \iiint_{\tau} \rho \vec{f} d\tau + \oint_A \vec{P}_n dA \quad (1)$$

式(1)可简化为

$$\oint_A (\vec{n} \cdot \vec{V}) \rho \vec{V} dA = \oint_A \vec{P}_n dA \quad (2)$$

设发动机轴向为 x , 则在 x 方向上的分量方程为

$$\left(\oint_A (\vec{n} \cdot \vec{V}) \rho \vec{V} dA \right)_x = \left(\oint_A \vec{P}_n dA \right)_x \quad (3)$$

根据不同的控制体划分方法,修正模型也会有所不同。截面法的控制体如图1所示。

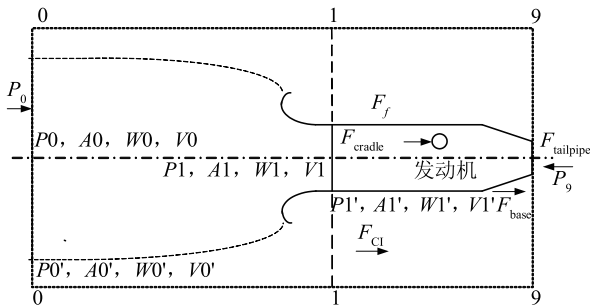


图1 截面法控制体划分示意图

由动量定理得到简化后的发动机真实推力 F_g 为

$$F_g = F_M + F_{\text{cradle}} + F_{\text{base}} + F_{\text{Cl}} + F_{\text{tailpipe}} + F_f \quad (4)$$

式中: F_M 为试车台推力测量系统测得的推力; $F_{\text{cradle}} =$

$\frac{1}{2} \rho \sum_i C d_i A_i V_i^2$ 为气流通过发动机支架产生的支架阻力,

其中, ρ 为旁路气流的气流密度, $C d_i$ 为单个部件的阻力系数, A_i 为单个部件的阻塞面积, V_i 为流经阻塞面积上的气流速度; $F_{\text{Cl}} = w_0 v_0 + w'_0 (v_0 - v'_1) - (p'_1 - p_0) A$ 为进气道附加阻力, 其中, w_0 为发动机的进气流量, w'_0 为二次流流量, v_0 为远前方0截面的速度, v'_1 为唇口后1截面的速度, p_0 为远前方0截面的静压, p'_1 为唇口后1截面的静压, A 为试车间横截面积;

$F_{\text{base}} = \int_8^9 (p - p_0) \delta A_{\text{eng}}$ 为发动机尾喷旁路气流加速产生的底部阻力, 其中, A_{eng} 为发动机尾喷管外表面面积; F_f 为气流对发动机表面的摩擦力, 一般可以对其忽略不计。

2 几何模型建立及边界条件设置

对发动机试车台进行几何模型搭建,完整的发动机室内试车台通常包括进气塔、导流板、主测试间、排气管、排气塔、发动机支架以及被测发动机。试车间组成如图2所示。

其中,进气塔几何模型设置为 $12 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 24 \text{ m}$; 导流板长为 12 m , 距地面角度 45° , 间隔 1.5 m , 共设置10片; 主测试间为 $24 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$; 被测发动机几何中心位置放置在 22 m 处; 发动机支架几何中心位置放置在 23 m 处, 并保证支架与发动机连接上; 排气管几何中心位置距地面为 3 m 。

整体模型较为复杂,分割出的面较多,因此需要进行面合并步骤,将非出入口面设置面合并。经过合并,试车间几何模型则分为试车间入口、试车间出口、发动机入口、发动机外涵、发动机内涵进行边界条件设置。其余面都设置为壁面,出入口面设置位置如图2所示。

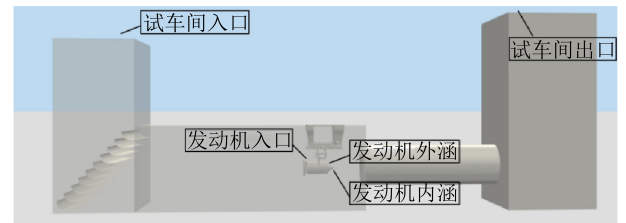


图2 试车间几何模型

根据实际发动机运行时的情况,将试车间入口进口流速不明的界面设置为压力进口,总压为 101325 Pa , 温度为 297.15 K ; 试车间出口和发动机入口要定义静压设置为压力出口,试车间出口表压为 101325 Pa , 温度为 297.15 K , 发动机入口表压通过发动机进气流量计算而来,设置为 87569 Pa , 温度为 388.2 K ; 发动机内涵和发动机外涵都需要有给定的质量流量设置为质量流量进口,根据实际质量流量进行设置,发动机内涵质量流率设置为 62 kg/s , 温度 950 K , 发动机外涵质量流率设置为 335 kg/s , 温度 347 K 。

边界条件设置结束后需对整场进行几何模型网格划分。

3 网格划分条件

设置面网格来确定网格尺寸函数,从而得到高质量的计算网格,主要的设置参数有最小值、最大值、增长因子、法向角度、网格层数。一般来说最小值和最大值都由模型几何尺寸决定,最小值设置不大于整

个试车台中最小尺寸的一半；最大值不大于试车间宽度的 1/20，面网格尺寸函数选用曲率算法，主要根据曲线法向角度划分网格。具体设置如下表 1。

表 1 面网格条件设置表

	最小值	最大值	增长因子	法向角度	网格层数
试车间入口					
试车间出口	4	400			
试车间壁面					
发动机入口					
发动机外涵			1.2	10	3
发动机内涵					
导流板	4	40			
发动机支架					
发动机表面					

网格划分结果如图 3 所示，根据设置尺寸较大的模型如进气塔、主测试间、排气管、排气塔，所划分的六边形网格面积则较大，对于尺寸较小模型如被测发动机与发动机支架，网格面积较小且密集。

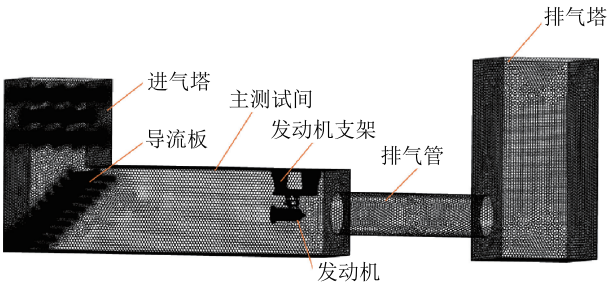


图 3 试车间网格划分结果

由此划分出的网格在流动变化大的地方分布了足够多的网格，在流动稳定处网格数减少，兼顾了计算时间和网格密度，使得整场流动计算速度加快且不会丢失重要点的流场数据。

细节处壁面网格与被测发动机和发动机支架网格大小对比，如图 4 所示。

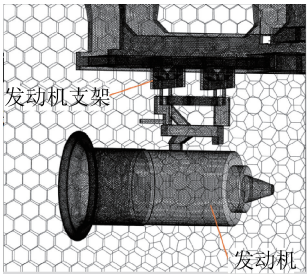


图 4 壁面网格与发动机网格大小对比

试车间壁面、进气道、排气塔等区域流动较为简

单，大网格也不会丢失重要的流动数据，因此不需要太密集的网格。而导流板、发动机、发动机支架结构较为精细，且细节处的流动也是研究中非常值得关注的部分，因此设置小网格，最大程度还原实际流动情况。

4 计算结果与分析

4.1 流场分析

经过数值模拟计算，试车间纵向截面速度云图和静压云图如图 5 所示。

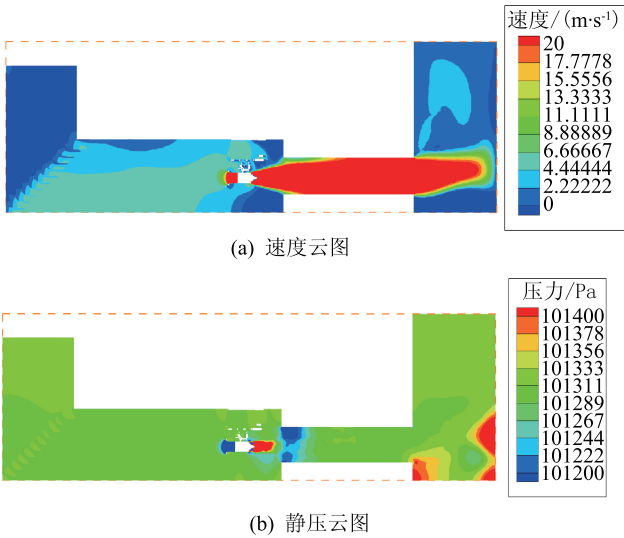


图 5 试车间纵向截面云图($Z=0\text{ m}$)

由图 5(a)可以看出，试车间下半部到发动机入口附近气流均匀，将要进入发动机时速度增加，气流经过发动机支架后变缓。由图 5(b)可看出，整场静压较为均匀，速度高的部分静压低，与速度云图趋势吻合。

4.2 气动附加阻力修正测点布置

在发动机气动附加阻力修正中，需要确定各个测点的位置，具体测点布置如图 6 所示，其中 0 截面测

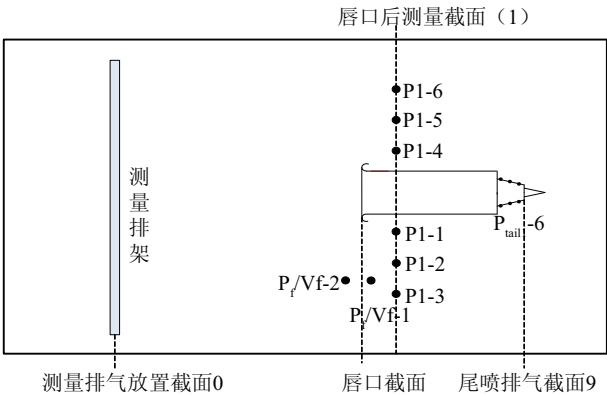


图 6 气动附加阻力修正测点布置示意图

量排架需要布置在气流相对均匀稳定的位置,唇口后测量截面需要避开唇口复杂流动部分,向后二次流稳定区域布置。因此测点位置的固定都需要提前对流场情况有了解。

图7(a)为发动机唇口的速度云图,可以看出,越靠中心速度越高,发动机上部因为支架阻挡速度较低,其余部分速度均匀。确定气流均匀处离唇口的距离,

即发动机作用不到的距离,便可得到测量排架放置截面距唇口的距离。

当距离唇口5 m处,可看到发动机对气流的影响,如图7(b)所示。在中心部有圆形速度较快区域;当在距唇口6 m处,可以看到气流基本均匀,如图7(c)所示。因此在选择0截面测量排架位置时,选在距离唇口6 m以上位置处,气流稳定均匀。

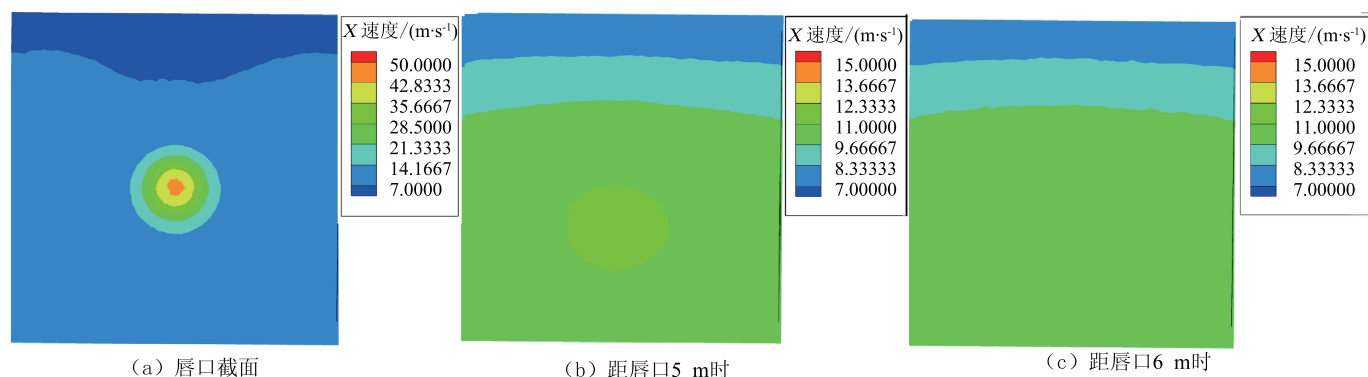


图7 截面流速云图

1截面测点布置在气流稳定的区域,需避开唇口后侧复杂流动区域。图8为试车间 $Y=5.7$ m截面,即发动机中心横截面,可以看出,气流在唇口受到阻隔,导致唇口后侧有一部分气流速度低。绘制唇口部分的流线,如图9所示,气流低速区域,气流方向复杂,因此1截面布点位置应在后侧气流稳定处,即唇口后1.5 m左右。

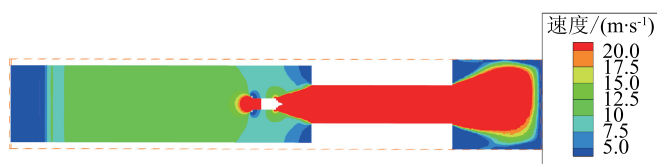


图8 试车间截面流速云图($Y=5.7$ m)

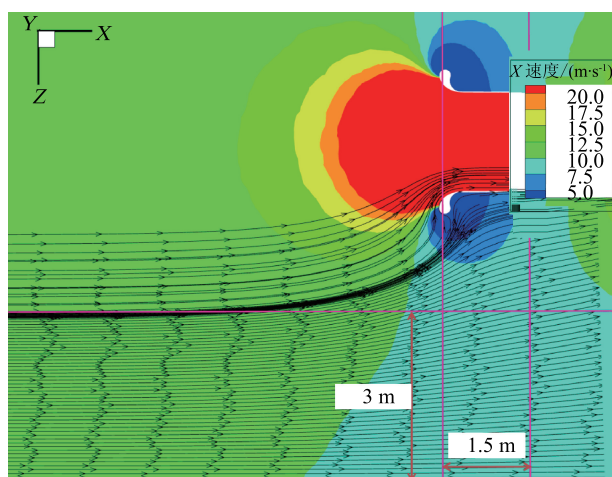


图9 唇口处局部流线分布图

4.3 现场试验计算结果

图10为基于以上仿真分析与试车台情况结合的布点图。

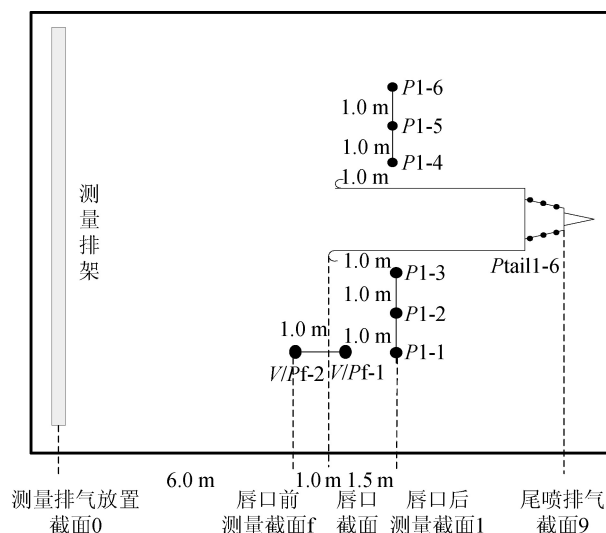


图10 基于仿真的试车间测点图

根据上述测试布点方案,对某型发动机室内试车台进行现场试验。将现场试车测试到的参与气动附加阻力修正流场参数与仿真的流场参数进行对比,如表2所示。

结果表明仿真结果与现场测试结果基本吻合,通过该平台计算的仿真结果可信,根据仿真来进行测点布局也是可信的。

表 2 仿真与实测流场参数对比表

流场参数	0 截面 速度均值/ (m·s)	0 截面 速度最大 值/(m·s)	0 截面 速度最小 值/(m·s)	0-1 截面 静压差 /Pa	1 截面 平均速度/ (m·s)
现场测试结果	9.60	11.10	8.40	14.25	7.35
仿真结果	9.89	10.80	8.20	16.00	7.70

以 0 截面测点为例,在同一试车状态下,状态稳定 4 min,在 4 min 内 0 截面同一测点的气流稳定性 $(V_{\max} - V_{\min})/V_{\text{ave}} = 0.12$,说明该截面气流速度较为稳定,符合布点的需求。

对试验结果进行计算分析,结果如表 3 所示。

表 3 各阻力分量占总推力百分比表 %

修正项	F_{Cl}	F_{cradle}	F_{base}	$F_{\text{总}}$
阻力占总推力百分比	2.85	0.001	0.026	2.88

由表 3 可得,进气道附加阻力 F_{Cl} 占总推力的百分比最大,达到 2.85%,支架阻力、底部阻力占推力百分比小,分别为 0.001% 和 0.026%,总阻力占总推力的 2.88%。

5 结论

通过对某型发动机的室内试车台进行几何建模和数值仿真研究,得到了发动机试车间整场的流动特性。通过分析试车间内各个截面的速度云图、静压云图和流线分布,得到了试车间气流的变化规律,并以此为发动机气动附加阻力修正所需的测点位置选择提供了参考意见,给予了测点布置可行的位置范围,并根据该测点布置进行了现场实测试验。

经试验证明,基于仿真的测点布局可以满足试验测量和计算的需求。实际布点时也可根据试车间布置情况与仿真建议布点情况结合进行调整。

参考文献

- [1] 吴大观. 关于航空发动机的动量修正问题[J]. 航空标准化与质量, 1984(2): 30-32.
- [2] 杜鹤龄. 航空发动机推力的测量和确定方法[J]. 航空动力学报, 1997, 12(4): 389-392.
- [3] 范静, 王光发, 荆卓寅, 等. 涡扇发动机试车台推力测量与校准技术概述[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 1-4.
- [4] 杨晓, 王欢. 航空发动机试车台推力测量系统的校准[J]. 现代机械, 2012(2): 18-20.
- [5] 王辰辰, 李新良, 李程, 等. 航空矢量发动机试车台推力校准技术综述[J]. 计测技术, 2015, 35(4): 14-18.
- [6] 张卫峰, 朱梭真. 基于 CFD 的航空发动机模型试车间设计研究[J]. 计测技术, 2018, 38(S1): 62-64.
- [7] 马昌, 王欢. 航空发动机室内试车台气动流场特性研究[J]. 工程与试验, 2015, 55(1): 26-29.
- [8] 郭昕, 刘涛, 文刚. 航空发动机试车台附加阻力修正方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 839-844.
- [9] 杨晓, 王欢. 航空发动机试车台推力测量系统的校准[J]. 现代机械, 2012(2): 18-20.
- [10] 常蕾, 王毅, 易卉. 航空发动机在室内试车台试车的真实推力测算方法[P]. 中国: CN201510020873.3, 2017.
- [11] 赵彬, 赵检. 超部速条件下基于 CFD 的压力探针校准特性数值模拟[J]. 计测技术, 2017, 37(2): 15-18, 36.
- [12] 赵彬, 王毅. 室内航空发动机进行流场流量测量数值模拟研究[J]. 计测技术, 2017, 37(3): 29-33.

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2020-12-08

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2017213b001)

作者简介



任怡雪(1996-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为控制科学与控制工程。