

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.05.041

空间受限对航空发动机室内试车台的气动影响

刘凯¹,周伟²,林山²,陈杰¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;

2. 中国航发沈阳发动机研究所,辽宁 沈阳 110015)

摘要:室内试车是航空发动机研制的关键试验手段之一。试车台空间受限等诸多实际因素使得被试发动机周围气动环境偏离理想条件,导致直接测量推力中包含有附加气动力等误差。针对墙壁及排气管形成的空间约束建立室内试车台简化几何模型,运用数值模拟方法分析空间约束对发动机近周流场的影响,并结合理论分析方法研究关联流动特征变化形成的附加气动力。

关键词:航空发动机;室内试车台;空间受限;附加气动力;数值模拟

中图分类号:V23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)05-0195-04

Aerodynamic Effects of Space Constraint on Engine Enclosed Test Cell

LIU Kai¹,ZHOU Wei²,LIN Shan²,CHEN Jie¹

(1. College of Energy and Power Engineering,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China;

2. AECC Shenyang Engine Institute,Shenyang 110015,China)

Abstract:Enclosed test is one of the key test means for aero-engine development, but many practical factors such as space limitation of indoor test stand may deviate the distribution of flow field around the tested engine from the ideal condition, which leads to the errors caused by additional aerodynamic force and so on in the direct measurement result of thrust. A simplified geometric model for the enclosed test cell is established regarding the spatial constraints formed by the wall and exhaust pipe, the influence of spatial constraints on the engine near-circumference flow field is analyzed by numerical simulation method, and by combination of theoretical analysis, the mechanism of additional aerodynamic drag caused by the change of associated flow characteristics is studied.

Keywords:aero-engine;enclosed test cell;space constraint;aerodynamic additional resistance;numerical simulation

0 引言

航空发动机推力是评判发动机动力性能的关键指标之一,发动机在研制、生产或返厂检修中都需要经过台架试验来检验其推力等性能指标^[1]。国内外都以海平面标准大气环境、无风条件下航空发动机在露天基准试车台上测试的性能作为发动机的真实性能。露天试车台建设维护的难度大,成本高,而且实际开展试验的气动环境受天气、风向、温度变化等因素影响,难以随时达到理想的露天试验条件,不能满足研制过程对发动机测试的需求。相比之下,室内试车台建设成本小,易于操作。因此,大量发动机整机测试是通过室内试车台进行的^[2-3]。

由于实际的室内试车台结构复杂,尺寸有限,试车间的受限空间内发动机排气产生的引射作用

使得发动机周围流动偏离理想情况,进而产生环境气流对发动机的附加气动作用力;同时因测量系统自身存在不可避免的精度问题,使测量推力不等于真实推力^[4]。气动力引起的误差是影响室内试车台推力测量精度的重要因素之一^[5-6]。罗尔斯·罗伊斯公司在其申请的关于推力修正的专利^[7]中引入了室内试车台气动附加阻力的测量推力修正方法;英国 Cranfield 大学开展了室内试车台的数值模拟和实物模拟,获得了室内相关部件对推力测量的影响趋势^[8]。

室内试车台的被试发动机周围空间受限是与理想露天试验环境的显著差异,是环境气流对发动机产生气动力的基础因素。为了进行针对性研究,本文针对室内试车台墙壁及排气管形成的空间约束条件建立了简化几何模型,运用数值模拟方法分析了空间约束对发动机近周流场的影响,

基金项目:国家科技重大专项项目(J2019-V-0011-0106)

第一作者简介:刘凯(1994—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为内流气体动力学,kingcarlfranklin@163.com。

并结合理论分析方法研究关联流动特征变化形成气动附加阻力的机制及各项气动力的主要特征。

1 数值模拟方案

1.1 几何模型与计算方法

相比于露天试验台,航空发动机室内试车台包含进排气塔、消音设备、导流板、双轨吊车、升降台、多层测试平台、排气管等。为了聚焦研究受限空间的影响,本文以航空发动机典型室内试车台为参照,建立了尽量排除其他影响因素的简化几何模型,主体由光顺修型的试车间壁面和排气引射筒两部分组成,略去了进、排气塔部分和试车间内其他构件。此外,为了在计算资源可承受的范围内获得更准确的流场数值模拟结果^[9],匹配详细试验研究的模型尺度,将数值模拟对象的尺寸缩小至实际试车间的1/10,得到如图1(a)所示计算模型。为了开展与理想试验条件的对比分析,对单独发机构建无约束空间计算模型,数值模拟对象为发动机孤立悬于理想大气环境中。为了更好地与室内试车台计算结果作比较,取外部流场域尺寸为 $5.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$,整体尺度与前述试车台计算模型保持一致,发动机位置相对保持不变,如图1(b)所示。

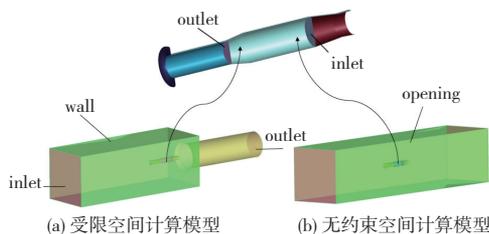


图1 简化计算域模型和边界条件

由于需要关注的是发动机的外部流场,本文采用简化方法,对计算模型中发动机内部流动、外形结构进行简化处理,以提高数值模拟速度和精度。该处理方法约束进气道出口流量和喷管入口流量以确定发动机工作状态,在保证发动机进出口流动参数符合基本守恒原理的前提下,不考虑发动机内部的具体气动热力过程。同时,忽略发动机内部燃烧使得空气转化为燃气的变化过程,将工质均以理想气体对待。

对前述两种计算域内的三维流场分析运用基于雷诺平均的 $N-S$ 方程的数值计算方法。方程的离散均选择二阶迎风格式,湍流模型选择 $k-\epsilon$ 模型。

室内试车台进出口采用了压力进、出口边界条件,发动机为流量进、出口边界条件,无空间约束时计算域为远场(opening)边界,其余为无滑移绝热固壁。

1.2 网格

为节约计算资源和便于开展工作,本文将试车台模型采用混合网格划分,如图2所示。发动机近周区域(尺寸为 $1.2\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$)使用非结构化网格;其余计算域为结构化网格。

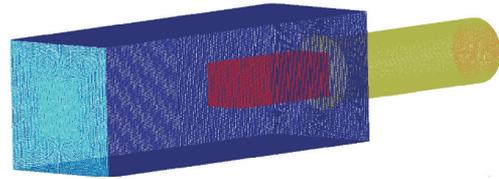


图2 计算域网格结构示意图

为减小网格对计算结果的影响,比较了疏密程度不同的3套网格计算结果,根据试车间流场结构和主要流动特征的差异,选用了网格数约950万作为计算网格。

对于无空间约束计算模型,整个计算域均采用了非结构化网格。在发动机周围对流动影响较大的区域,进行了网格加密。为了减少计算量,发动机远前方及喷管出口下游较远区域的网格设置为较大的尺寸,网格平滑过渡,总网格量约700万。

2 发动机周围流场结构

无约束空间计算域对称面速度云图和流线图如图3所示。可以看出发动机孤立理想大气中工作时,自由来流从四周被吸入发动机,除进气道入口周围存在速度梯度外,外围速度大小的变化不明显,且距离入口大于 $3D$ (D 为进气道直径)时其量值已小于 1 m/s 并逐渐趋于0。发动机主体段周围气流速度变化很小,保持着不大于 1 m/s 的低速流动。接近喷管出口时,发动机周围气流受到发动机排气射流引射等因素的影响,速度从射流边界到环境大气呈现出快速减小的局部梯度,射流核心区外流速很快降低且逐渐趋于0。

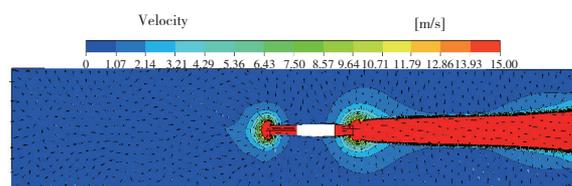


图3 无约束空间计算域对称面速度云图和流线图

室内试车台空间约束下发动机近周流场对称面速度云图和流线图如图4所示,该截面上 Ma 分布如图5所示。相较于单独推进流道处于理想大气中工作时,在室内试车台存在墙壁约束的受限空间中,发动机远前方来流速度接近 10 m/s ,明显高于自由来流条件;在进气道及机身周围,气流速度超过了 5 m/s ;至喷管上游,在室内试车台排气筒入口流道面积突然收缩的影响下,出现了更加明显的主流引射次流现象,喷管周围气流速度快速增加,这一梯度相较于无约束时,发展得更早、径向空间更大,并在引射筒入口形成了一个高速区。在发动机对气流的吸入作用下,气流加速进入进气道;亚声速气流在拉瓦尔喷管内加速,气流在尾喷管出口截面附近超过声速。进入引射筒后,气流体现出明显的分层流动现象,高速气流在掺混后流速降低。

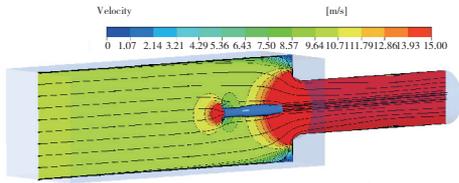


图4 室内试车台空间约束下发动机近周流场对称面速度云图和流线图

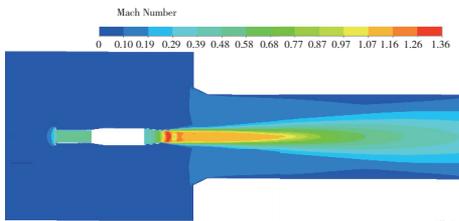


图5 发动机室内试车台对称面 Ma 分布

3 空间约束引发的气动附加阻力

3.1 气动附加阻力的产生机理

从物理意义上来看,航空发动机的安装推力是在安装条件下所有流过发动机以及在外部绕流在发动机工作表面上的压力与摩擦力在轴向分力的合力^[10],一维条件下其计算方法可表示为

$$F_{ef} = W_9 V_9 - W_0 V_0 + (p_9 - p_0) A_9 - \int_0^1 (p - p_0) dA - \int_1^9 (p - p_0) dA - D_f \quad (1)$$

航空发动机在理想静止环境总推力 F_G 为排气动量与发动机出口剩余压力之和,即

$$F_G = W_9 V_9 + (p_9 - p_0) A_9 \quad (2)$$

在室内试车时,基于推力流线控制体法以及如图6所示的室内试车台控制体,结合安装推力和总推力的表达式,发动机在室内试车台的测量推力 F_{me}^{test} 可由下式计算。

$$F_G^{in} = F_{me}^{test} + F_0^{Mom} - \int_0^1 (p - p_0) dA + \int_1^9 (p - p_0) dA + D_f + F_{cradle} \quad (3)$$

式中: F_{me}^{test} 为试车台推力测量系统测得的推力,可见其相对发动机真实总推力存在有如下的附加气动力; F_0^{Mom} 为进气冲量阻力,由发动机进口上游气流流速产生; F_{cradle} 为气流通过发动机台架时产生的气动力; $\int_0^1 (p - p_0) dA$ 为进气附加阻力,因发动机进气管与周围气流压力差产生; $\int_1^9 (p - p_0) dA$ 为发动机受到的压差阻力,因发动机周围流速变化导致的外壁上压力分布形成; D_f 为发动机外壁受到的摩擦阻力。

基于上一节的流场分析,以上各气动力在无空间约束时,其值趋近于0,可忽略不计。

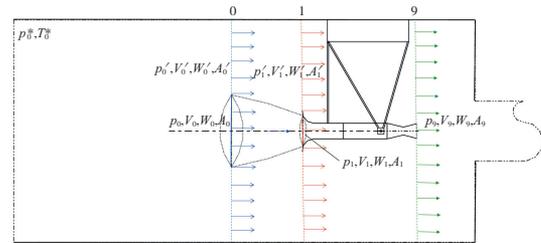


图6 控制体划分示意图

3.2 空间约束对气动附加阻力的影响

气动附加阻力中进气冲量阻力积分形式表达式为

$$F_0^{Mom} = \int \rho_0 V_0 V_0 dA_0 \quad (4)$$

式中: ρ_0 是来流密度; V_0 表示发动机上远前方截面气流速度; A_0 为推进流道远前方进气管的截面积。进气管近似为回转体,向上游逐渐呈圆柱状。取发动机进气道入口上游远前方 $5D$ 处为0截面,截取进气管应为圆形截面(称为0-0截面),根据其于推进流道之间的流量守恒,可得该圆截面直径为 0.172 m (约 $3.6D$),如图7所示。在该截面上运用式(4)积分获得进气冲量阻力为 12.2 N 。该力与推力方向相反,可见室内试车台的约束空间形成了进气冲量阻力。

在0-0截面取进入发动机的一条边缘流线,以该流线为基准生成流管,利用进气管表面气

流压力 p 与试车间环境压力 p_0 的差值在其表面的积分获得进气附加阻力为 1.77 N, 因流管收缩, 故其方向与推力相反。

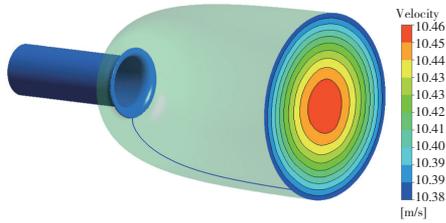


图7 发动机进口流管与0-0截面速度云图

如图8所示,压差阻力包括发动机进气道、机身和喷管几部分外壁阻力,可分别利用气流压力 p 与试车间环境压力 p_0 的差值在各段外壁面上的积分获得。压差阻力中,进气道外壁最大(1.35 N),主要集中在喇叭口卷边区域,但该力与推力方向相同;机身阻力约为 0.19 N,与推力方向相反;本文中喷管阻力数值较小(约 0.04 N),主要由于拉瓦尔喷管喉道前后两段外壁受力方向相反导致相互削弱。

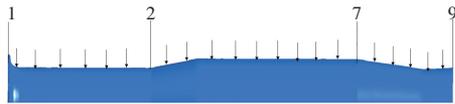


图8 压差阻力示意图

根据式(2)获得发动机总推力为 1 180 N, 图9所示为所研究约束空间下发动机各部分附加气动力与总推力的相对百分比。由图可知:受限空间下进气冲量对所研究试车台气动附加阻力中占比最大,这与公开文献[11]中关于室内发动机试车台推力校准的试验结果相符;其次是进气附加阻力;压差阻力中,进气道阻力占比最大,喷管阻力的比重较低。更严格的计算准确性检验将在对所研究发动机试车台气动附加阻力的校准试验结束后进行。

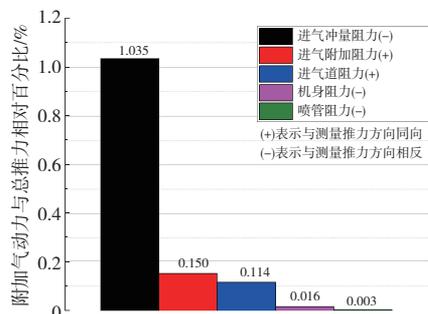


图9 各部分附加气动力的相对比重

4 结语

本文运用数值模拟与理论分析相结合的方法研究了关于发动机试车间受限空间对气动附加阻力的影响,得出以下主要结论。

1) 室内试车台形成的受限空间使得发动机上游来流速度增加,机身周围存在明显的速度梯度,尾喷口高速排气引射的影响区域更大。

2) 相较于无空间约束,发动机周围流动特征的改变导致了室内试车台测量推力中包含有进气冲量阻力、进气附加阻力、压差阻力等。

3) 在简化几何模型条件下,空间约束影响形成的气动附加阻力中,进气冲量阻力在所研究试车台气动附加阻力中占比最大,超过了发动机总推力的 1%;其次是进气附加阻力;底部阻力的比重较低。

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,1984(2):32-34.
- [2] 廉小纯,陈辅群,沈韶瀛,等.飞机飞行中发动机推力的测定[J].航空动力学报,1994,9(1):1-4.
- [3] 艾延廷,朱亚强,张巍,等.基于流截法的航空发动机室内试车推力校准[J].沈阳航空航天大学学报,2019,36(4):1-9.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 杨福刚,陈宇,常诚.航空发动机室内台架推力测量修正方法研究[J].航空发动机,2011,37(6):31-33,42.
- [7] PARFITT R N, TURVILLE M R, BRISTOW M C, et al. Thrust correction; US7565269[P]. 2009-07-21.
- [8] GULLIA A, LASKARIDIS P, RAMSDEN K, et al. A preliminary investigation of thrust measurement correction in an enclosed engine test facility[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 1128.
- [9] 邢菲,吴松霖,周伟,等.自然风条件下露天试车台推力修正的数值模拟研究[J].推进技术,2022,43(8):358-365.
- [10] 葛宁.航空燃气涡轮发动机原理[M].北京:科学出版社,2019.
- [11] PARFITT R N, WHITTLE C A, TURVILLE M R. Method of determining thrust; US6851303[P]. 2005-02-08.

收稿日期:2023-03-13