自然风条件下露天试车台推力修正的数值模拟研究*

邢 菲1, 吴松霖1, 周 伟2, 张 巍2

(1. 厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361005;2. 中国航发沈阳发动机设计研究所,辽宁 沈阳 110015)

摘 要:为研究自然风下露天试车台航空发动机推力修正的方法,针对典型结构露天试车台开展航 空发动机在不同自然风风速(0~5m/s),风向(0~90°)下试车流场的数值仿真研究。研究发现,自然风 条件明显影响露天试车发动机进气道周围回流区的分布,以往基于测量二次气流的室内试车台推力修正 方法无法用于露天试车台,因此推导出基于发动机内流参数的进气附加阻力计算和测量方法,并结合仿 真结果分析不同自然风对露天试车台各阻力修正量的影响。结果表明,对于进气附加阻力,随着风速增 大逐渐成正比例增加,最大占总推力1.09%;对于台架迎风阻力,当风向角小于45°时与进气方向风速 之间满足近似二次曲线关系,最大占总推力0.18%;无风时由于发动机排气射流对台架周围气流速度的 影响,仍有台架迎风阻力。

关键词:航空发动机;露天试车台;自然风;数值模拟;推力修正 中图分类号: V231.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2022) 08-210032-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210032

Numerical Simulation Study on Thrust Correction for Outdoor Test Stand in Natural Wind

XING Fei¹, WU Song-lin¹, ZHOU Wei², ZHANG Wei²

Department of Aeronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
 AECC Shenyang Engine Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the thrust correction method on the outdoor test stand of aero-engine, numerical simulation calculations of aero-engine test in the open-air under different natural wind speed (0~5m/s) and wind direction $(0~90^\circ)$ were carried out. It is found that the natural wind conditions obviously affect the distribution of the backflow area around the engine air-inlet on the outdoor test stand. The thrust correction method used in the indoor test cell based on measuring the second flow traditionally cannot be appropriate for the outdoor test stand. Therefore, a method for calculating and measuring the intake additional drag based on the internal flow parameters of the engine was derived. Combining the simulation consequence, the influence of different natural wind on each drag correction amount of the outdoor test stand was analyzed. The results show that with the increase of wind speed, it gradually increases proportionally and accounts for 1.09% of the total thrust for the additional drag of the intake air. For the windward drag of the stand, it satisfied the approximate quadratic curve relationship between the wind direction angle and the wind speed in the intake direction when the wind angle is less

^{*} 收稿日期: 2021-01-14;修订日期: 2021-05-06。

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0004-0028)。

作者简介: 邢 菲, 博士, 教授, 研究领域为航空动力系统流动燃烧基础与技术。

通讯作者:周 伟,硕士,高级工程师,研究领域为航空发动机整机试验测试。

引用格式: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):
 210032. (XING Fei, WU Song-lin, ZHOU Wei, et al. Numerical Simulation Study on Thrust Correction for Outdoor Test Stand in Natural Wind[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8):210032.)

than 45° and accounts for 0.18% of the total thrust. When there is no wind, there is still windward drag of the stand due to the influence of the engine exhaust jet on the airflow velocity around the stand.

Key words: Aero-engine; Outdoor test stand; Natural wind; Numerical simulation; Thrust correction

1 引 言

航空发动机推力是衡量发动机性能最重要的指 标之一。在发动机研制、生产、维修过程中都需要通 过大量地面试车试验对其进行测量,这些试验通常 都在室内试车台进行,并且通过和露天基准试车台 进行交叉标准试车得到的动量修正值来进行测量结 果校准^[1]。通常,认为航空发动机在露天试车时四周 没有像室内试车台那样有流动空气产生的阻力,不 需要进行推力修正,所测得的发动机推力被视为发 动机的实际推力[2]。因此在进行露天基准试车时对 自然风风速和风向有严格要求,需要尽量保证试车 时发动机周围无空气流动,以减小风速与风向对测 量的影响。根据GJB721-89《涡喷涡扇发动机试车台 校准规范》规定,露天基准试车台进行基准试车时, 风速不大于 2.5m/s, 逆风不得试车^[3]。在实际露天试 车试验中,这些数据仅供参考,合适的数据应在进行 大量试验工作中积累^[1],仍需具体分析研究自然风风 速和风向对试车台推力测量的影响规律。

国内外对于试车台气动修正量的研究都集中于 室内试车台:二次气流绕过发动机从而引起多个流 动现象。国外方面,Rios等[4]详细推导了室内试车中 发动机所受的各项阻力的积分公式,包括进气冲量 阻力、台架阻力和抽吸阻力等;Gullia等^[5]结合数值仿 真和试验研究,分析影响试车台推力测量结果的各 种因素;Robert等^[6]先是给出室内试车台阻力修正的 测量方案,随后又细化研究各个推力修正量的计算 方法,并给出台架迎风阻力的经验修正公式^[7];Laskaridis 等^[8]通过研究试车间旁路气流与发动机进气 气流关系,给出了进气附加阻力和喇叭口压差之和 与试车间引射比之间的函数关系;Neil等^[9]通过不同 测量方法对进气冲量阻力进行了测量,分析了两种 方法对测量结果的影响。国内学者[10-14]通常将推力 修正量简化为三个修正项,给出了地面台和高空台 三项附加阻力的确定方法,通过试验测量出各试车 台推力测量的不确定度和附加阻力修正系数;张章 等^[15]参考Laskaridis给出的进气阻力修正公式,通过 对室内试车台进行数值仿真,给出了阻力修正量随 发动机工况变化趋势和经验修正系数;艾延廷等[16] 提出截流法计算发动机进气道附加阻力的方法,并

通过数值仿真给出可靠的阻力修正结果。

国内外对于自然风对露天试车台影响的研究很 少发表在公开文献。仅有 NASA 刘易斯研究中心研 究通过试验研究风对露天试车推力测量和发动机进 气流量的影响,根据测量数据评估推力修正方法^[17]。 通过限制试验环境条件来排除环境气候条件对发动 机推力测量的影响,这种做法本身就提高了试车试 验的难度和成本,同时也不能保证完全测量结果完 全准确。通过研究不同环境自然风条件对露天试车 推力的影响规律并给出准确的推力修正方法,可以 提高露天基准试车试验效率,节约时间成本。

本文针对典型露天试车台在不同自然风下露天 试车过程进行数值仿真研究,分析试车发动机周围 气动流场分布规律;推导适用于露天基准试车的进 气附加阻力修正公式;根据数值仿真结果计算分析 不同风速风向对发动机进气阻力和台架迎风阻力的 影响,分析环境气流条件对发动机修正阻力的影响 规律。

2 数值计算方案

2.1 计算模型与边界条件

本研究参考 GE 公司典型航空发动机露天试车 台结构设计,如图1所示构建物理模型,模型包括试 车台支柱、静台架、动台架、试车发动机和周边厂房 建筑物,分别对台架和发动机外形结构进行简化处 理,忽略台架上孔、槽等结构,保证流体流动符合实 际物理状态,以保证建模的准确性。

数值模拟对象针对发动机露天试验外流场,忽 略发动机内部工作部件对气流的影响,取发动机进 气道出口位置设为压力出口,给定总压和流量控制,



Fig. 1 Computation model and boundary conditions of outdoor test facility

发动机内外涵出口位置设为流量入口,给定总温总 压和流量条件。

如图 2 所示,为了准确模拟露天试车台在不同自 然风条件气动流场分布,需要在试车台周围设置足 够大的外场。取计算域尺寸 200m×200m×80m,采用 混合网格划分,露天试车台周围的区域 Domain 1 使 用非结构四面体网格,其他计算域 Domain 2 采用结 构六面体网格划分方式,发动机远前方边界设为速 度入口,便于控制环境风条件,发动机远后方设为压 力出口。



Fig. 2 Computation domain and boundary conditions of far field

数值计算采用有限体积法,考虑试车台气流流动的特点,选用Standard k-ε方程湍流模型进行数值模拟计算,求解三维定常粘性的雷诺平均Navier-Stokes方程。空气为理想气体模型,采用SIMPLRC压力速度耦合方法,空间离散使用二阶迎风格式。

2.2 网格独立性验证

为验证网格独立性,将疏密程度不同的4套网格 计算结果与该型发动机在露天试车试验数据作对 比,如图3所示。取发动机进气唇口截面、水平方 向、距离发动机中心1.8~2.8m线段上速度参数进行 分析。图中横坐标为该点到发动机中心水平距离 L,纵坐标为该点速度v与进气道入口平均速度v 的 比值。

结果显示 300万和 900万网格数量的数值结算



Fig. 3 Results of the grid independence verification

结果与试验结果相差较大,1800万网格和2700万网 格都与试验测量数据相接近,最大相差分别为1.68% 和0.98%,不超过3%,都属于可以接受的误差范围。 表明在这两个数量网格都满足网格独立性条件,同 时也说明该露天台数值计算方法可靠。为节省计算 资源,选用1800万网格作为后续数值计算网格。

2.3 计算工况

参考国军标试车规范规定^[3],本文计算自然风的 顺风工况选取 $0m/s(无风状态) \sim 5m/s$ 不同风速 v_0 ,侧 风工况固定风速 2.5m/s,风向角 θ (定义如图 4 所示) 选取从 15°~90°之间 5 个典型侧风角度。



Fig. 4 Sketch for velocity and orientation of wind flow

3 数值计算结果分析

3.1 发动机外部流场分析

典型露天台大涵道比发动机露天流场速度云图 如图 5 所示,顺风来流风速 2.5m/s,发动机进气道从 四周吸收空气,对来流有明显吸入作用,发动机尾迹 由于流速较高,射流区会不断扩大。高速气流将周 围空气吸入主流中,喷口处低速气流包裹高速 气流。



Fig. 5 Velocity distribution in the radial aspect at outdoor test facility

图 6 为选取的 0, 2.5m/s, 5m/s 正向自然风中露天 试车发动机进气道周围流场俯视速度矢量云图。露 天试车过程中,由于环境来流速度较低,发动机进气 道外壁面附近气流大部分都流向发动机后方,但部 分气流会在壁面附近分离,通过卷吸作用倒流入发 动机进气道,并且在唇口位置后方形成回流区。图6 中给出发动机进气方向速度分量的0数值等值线,在 该等值线与发动机外壁面包围的部分就是回流区 域,以此方法观察回流区域范围。如图6所示,无风 时回流区域最大,此时发动机从四周吸气,进气气流 有很大一部分是从喇叭口后方被卷吸进入发动机进 气道,随着正向环境风速增加,越来越多气流被发动 机从正前方吸入,发动机唇口后方回流区域逐渐减 小,正向气流与回流气流分离点向发动机进气道入 口处靠近。环境风速达到5m/s时,回流区域基本集 中在进气道唇口附近,此时大多数进气都是由发动 机从进口前方来流吸入。



(c) $v_0 = 5.0 \text{m/s}$

Fig. 6 Velocity vector distribution of the intake flow under headwind

图 7 为从 15°~60°不同侧风条件下露天试车台发 动机进气道附近流场俯视速度矢量云图, 云图中靠 下部分为迎风侧。与顺风条件不同, 侧风结果中发 动机两侧的流场并不对称分布, 迎风侧气流分离点 相对于发动机背风侧要更靠近发动机唇口位置, 回 流区也较小。为量化分析风向对进气道周围流场的 影响规律,分别取云图中发动机进气道附加迎风侧 和背风侧面积S_w和S₁与发动机进气出口面积A的比 值作为比对回流区范围大小的无量纲指数,整理数 据如表1所示。



Fig. 7 Velocity vector distribution of intake flow under orientations of sidewind

Table 1	Area of backflow	around	inlet	under	various	wind
		angle				

Wind angle	$S_{\rm I}/A$	$S_{_{ m W}}/A$	$(S_{w} - S_{1})/A$
15	0.44	0.65	0.21
30	0.49	0.74	0.25
45	0.53	0.98	0.45
60	0.68	1.24	0.56
90	0.71	1.30	0.59

侧风角度从 15°增加到 90°,发动机两侧的回流 区都有增大,背风侧回流区面积指数从 0.44增加到 0.71;迎风侧回流区面积指数变化更大,从 0.65增加 到 1.30,两侧的流场分布也越来越不均匀。当风向增 加到 60°时,由于部分气流绕过发动机外表面在背风 侧汇集,背风侧的气流分离点离开壁面。在露天试 车过程中,相较于顺风条件,侧风给流场带来的分布 不均会使得对发动机周围旁路气流气动参数的测量 带来更大困难。

3.2 进气道内流场分析

露天试车过程中,发动机进气道的气动交界面 (Aerodynamic Interface Plane, AIP)的气动参数会受 到远端来流条件的影响,与期望的无风状态试车结 果产生偏差。为量化分析自然风对 AIP 界面气动参 数影响,参考数值分析研究中相对误差的定义,在此 引入相对偏差量 $\varepsilon(x)$,其公式为

$$\varepsilon(x) = \frac{x - x_0}{x_0} \tag{1}$$

式中x为不同自然风的 AIP 面气动参数,其中速度为 流量平均数v,压力面积平均数p;x₀为无风条件对应 参数的计算结果。

如图 8 所示为不同速度的顺风露天试车中发动机 AIP 面平均速度和压力的相对偏差量。随着顺风速度增加, AIP 面的平均速度逐渐增大, 平均压力逐渐减小, 其相对偏差量都在 5m/s 最大风速时达到最值, 分别为 1.34×10⁻⁴和-4.8×10⁻⁵, 可以将其看作不同风速 AIP 面平均速度和平均压力的相对偏差限。



Fig. 8 Velocity and pressure of AIP

4 推力修正研究

一般发动机试车测量得到的测量推力 F_M和发动 机实际总推力 F_c有区别^[2]

$$F_{\rm G} = F_{\rm M} + F_{\rm IAD} + F_{\rm C} + F_{\rm nozzle} \tag{2}$$

式中 F_{IAD} 为发动机进气附加阻力(Drag), F_{c} 为台架迎风阻力, F_{nozzle} 为发动机喷管阻力,这三个力组成试车台修正阻力。

对于露天试车台,由于没有室内台的引射管装置,发动机尾喷管处不会产生额外的尾部和底部阻力,大涵道比发动机因为外涵低速气流的保护不会

产生尾喷口阻力,因此修正阻力的关注对象为进气附加阻力F_{IAD}和动架部分的台架迎风阻力F_c。

4.1 进气附加阻力计算方法研究

如图9所示,选取发动机远前端自由面到发动机 进气道出口截面作为控制体来研究发动机进气附加 阻力,其中0截面为发动机远前端稳定来流截面,1截 面为发动机气动交界面,e截面为发动机进气道入口 截面,c截面为进气道唇口根部截面;由于发动机外 部流速较低,可以忽略发动机外壁面摩擦阻力的 影响。



图 9 在此定义截面冲压量 *I_i*,其数值包含该截面 冲量和压差量,计算公式为

$$I_i = w\bar{v}_i + \left(\bar{p}_i - p_0\right)A_i \tag{3}$$

式中*i*表示对应位置截面编号,*w*为流过该截面的气流质量流量,*v*_i为该截面速度流量平均值,*p*_i为该截面 压力面积平均值,*A*_i为截面面积。

以发动机进气方向为正方向,分别对发动机进 气流管内的气体和发动机旁流道气体使用动量定理

$$I_{1} - I_{0} = -\int_{0}^{e} (p - p_{0}) dA + \int_{e-\text{ interior}}^{c} (p - p_{0}) dA - F_{f}(4)$$
$$I_{1}' - I_{0}' = \int_{0}^{e} (p - p_{0}) dA - \int_{e-\text{ exterior}}^{c} (p - p_{0}) dA \quad (5)$$

式中*I*₀,*I*₁分别为发动机吸入气体在0,1截面的冲压 量;*I*₀',*I*₁分别试车台旁路气流在0,1截面的冲压量;*F*_f 为气流流过进气道内壁面所受摩擦阻力。公式等号 右边第一项是因发动机进气流管产生的压差阻力, 不直接作用在发动机上。

将公式(4)与公式(5)相加,得

$$F_{A} = \oint_{e-e} (p - p_{0}) dA - F_{f} = I_{1} + I_{1}' - (I_{0}' + I_{0})$$
(6)

式中F_A为进气道作用于进气气流的作用力。

无风状态下, $\overline{v_0} = \overline{v'_0} = 0$, $\overline{p'_1} = p_0$,公式(6)则转 化为

$$\left[F_{A}\right] = \left[\oint_{e-e} (p - p_{0}) dA\right] - \left[F_{e}\right] = \left[I_{1}\right]$$
(7)

式中[x]为公式(6)中某个参数 x 在无风工况下对应 参数。

传统计算发动机进气附加阻力的方法假设发动机进气道内气流参数不会随环境风速变化而改变,即 $I_1=[I_1]$,因此通过将无风和有自然风的进气道作用力 $[F_A]$, F_A 相减就可得到发动机进气附加阻力 F_{1AD} ,即

$$F_{\rm IAD} = \begin{bmatrix} F_A \end{bmatrix} - F_A = I_0 + I_0' - I_1' = w_0 v_0 + w_0' (v_0 - \overline{v_1'}) - (\overline{p_1'} - p_0) A_1'$$
(8)

由此在传统计算方法中,可以通过测量和计算 试车台旁路气流参数以及远端来流参数来确定发动 机进气附加阻力。对于室内试车台,由于车间总面 积确定,且总体车间气流方向固定,速度较高(一般 为10m/s左右)^[11],试车台旁路面积A'和旁路气流参 数都很容易确定,实际测量中测点位置也易于布置。 而对于露天试车台,如3.1节分析,不同风速风向的 环境风速下发动机进气道外部气流流场分布规律变 化很大,自然风速度大小会影响进气道喇叭口后回 流区的范围,侧风更会使发动机周围流场分布不均。 在无法事先确定露天试车时的气候条件时,这些因 素会使得确定露天试车台旁路气流的气动参数变得 十分困难。为寻找适用于露天试车台进气附加阻力 的计算方法,本文重新推导进气附加阻力的计算公 式,得到只需发动机进口附近气动参数的计算方法。

对发动机进气气流在 e~1 截面之间取控制体使用动量定理

$$I_{1} - I_{e} = \int_{e-\text{ interior}}^{e} (p - p_{0}) dA - F_{f}$$
(9)

由公式(5)和公式(7)可得

$$F_{\text{IAD}} = \left[F_A \right] - F_A = \left[I_1 \right] - \oint_{e-e} \left(p - p_0 \right) dA + F_f \left(10 \right)$$

由 3.2节可知,不同环境风速的露天试车中发动 机 AIP 界面的气动参数会有变化,所以有无自然风 AIP 界面冲压量 I_1 和 $[I_1$]之间会有区别,将其数值差 值记为 $\Delta(I_1-[I_1])$,可以得到

$$\Delta(I_1 - \begin{bmatrix} I_1 \end{bmatrix}) \leq \frac{\partial(\rho v^2 A)}{\partial v} \times v\varepsilon_r(v) + \frac{\partial(p - p_0)A}{\partial p} \times p\varepsilon_r(p) = 2\rho_1 A_1 \begin{bmatrix} v_1 \end{bmatrix}^2 \varepsilon_r(v) + A_1 \begin{bmatrix} p_1 \end{bmatrix} \varepsilon_r(p) = (11)$$

$$2 \times 1.10 \times 2.32 \times 150.2^2 \times 13.2 \times 10^{-5} + 2.32 \times 86128 \times (-4.9 \times 10^{-5}) = 5.8N$$

式中 ρ_1, A_1 分别为发动机进气道 AIP 界面气流密度和 进气面积; $[v_1], [p_1]$ 分别为无风时 AIP 界面平均速度 与平均压力。

即在公式(10)中,用 I_1 代替 $[I_1]$ 所造成最终修正 阻力计算结果误差不会超过 5.8N,远远小于发动机 总推力(占比小于 3 × 10⁻⁵),可以被忽略,因此可以认 为 $I_1 \approx [I_1]$,其误差也在可接受范围之内。

将公式(9)代入公式(10)得到下式,由此,对于 露天试车试验,在确定发动机工作状态(进气流量确 定)的情况下,对于不同速度与方向自然风条件,都 能通过测量发动机进气道入口截面的平均速度和平 均压力以及进气道唇口外侧的压差阻力来计算发动 机进气道附加阻力,并且喇叭口外侧附近的压力变 化梯度不大。对于同一款发动机,在确定进气道入 口截面和唇口外侧测点布置的情况下,这套方法理 论上可以适用于任何试车台,不用根据试车台结构 更改测量方案,因此也具有通用性。

$$F_{IAD} = I_e + \int_{e^- \text{ exterior}} (p - p_0) dA =$$

$$w\overline{v}_e + (\overline{p}_e - p_0)A_e + \int_{e^- \text{ exterior}}^{e^-} (p - p_0) dA$$
(12)

图 10 横坐标为顺风方向风速v₀,如图所示,除了 无风工况以外,发动机进气附加阻力与环境远端来 流风速近似成正比例关系,随着来流风速增大,进气 附加阻力也越来越大,顺风速度 5m/s时,进气阻力占 发动机总推力达到最大值 1.09%。



4.2 台架迎风阻力计算分析

台架迎风阻力 F_c是试车台测量阻力修正总量的 重要组成部分,这部分阻力是由于试车台旁路气流 流过试车台动架所造成的与发动机推力方向相反的 阻力,包含由于气流流动造成的压差阻力和气流摩 擦阻力,摩擦阻力由于整体气流速度不高可以忽略, 所以台架迎风阻力主要是压差阻力,理论上计算公 式为^[10]

$$F_{\rm c} = \frac{1}{2} \rho C_{\rm d} A v^2 \tag{13}$$

式中 C_a为台架阻力系数,实际一般通过实验测得,A为台架迎风面积,v为台架周围气流速度。

从式(13)中可以看到,台架迎风阻力大小与环 境气流速度二次相关,除此之外还与其试车台动架 结构有关系,因此对于台架迎风阻力修正的计算都 必须具体到确定台架结构的试车台。图11为不同风 速风向该型露天试车台的台架迎风阻力占发动机总 推力 F_c百分比,为研究风向变化对台架迎风阻力的 影响规律,将不同方向侧风所对应的进气方向速度 分量和其对应的台架迎风阻力也记入图中。由此可 以得出环境气流条件对露天试车台台架迎风阻力的 影响规律。



首先,随着环境顺风速度增加,露天台台架迎风 阻力也不断增加,在计算工况的最大风速5m/s时,台 架迎风阻力达到最大值,其占发动机推力为0.18%。 台架迎风阻力和顺风速度的关系近似在一条曲线。 由此给出 *F_c*/*F_c*与来流速度*v*₀的二次拟合关系公式见 下式,拟合公式的和方差 SSE 为7.054×10⁻⁶,接近于 零,表明拟合结果准确性高。

F_c/F_c = (2.09v₀² + 3.16v₀ + 115) × 10⁻⁵ (14) 其次,与传统观点认为露天试车台无风试车过 程中不会产生台架迎风阻力不同,计算结果表明即 使环境中没有自然风,台架阻力占总推力仍有 0.115%。图12为无风时露天试车台动架的相对压力 分布云图,可以看到动架后段靠近发动机短舱和尾 喷口的位置为低压区域,判断是因为受发动机尾部 高速气流引射作用的影响,区域气流速度增加造成 局部压差产生台架阻力。因此即使在无风情况下, 仍需要对测量的发动机推力进行修正才能保证测量 结果准确。



Fig. 12 Pressure cloud of cradle without wide

如图 11 所示,侧风角度为 15°,30°,45°时,露天 试车台台架迎风阻力与侧风在发动机进气方向速度 分量的关系满足公式(13),即此时侧风对台架阻力 的影响等同于其速度等于其进气方向分量的顺风对 台架阻力的影响,而其侧向分量的影响可以忽略。 但是随着侧风角度增大,在 60°和 90°侧风工况时的 台架阻力要明显小于对应顺风方向速度的台架阻 力,分别相差 6.2% 和 17%,说明上述规律只能用于侧 风角度不大于 45°的情况,一旦侧风角度大于 45°,其 侧向风量对试车台流场的影响就会增加,也会使流 场分布变得更加复杂。

4.3 修正推力分析

发动机总推力修正量记为ΔF,其公式为

$$\Delta F = F_{\rm IAD} + F_{\rm C} \tag{15}$$

图 13 横坐标为自然风顺风速度 v₀, 左纵坐标为 发动机进气附加阻力 F_{IAD}与 F_c占 ΔF 比例, 无风条件 下, 发动机进气附加阻力接近于 0, 此时推力修正总 量就等于台架迎风阻力, 随着环境风速增加, 环境风 速增加, 台架迎风阻力占比逐渐下降, 进气附加阻力 占比升高, 在 1m/s 顺风时进气附加阻力超过迎风阻 力, 随后两者差值逐渐拉大, 但所占比重也渐渐稳定 下来, 在风速 5m/s时, 进气附加阻力占总推力修正量 85.6%, 台架迎风阻力占总推力修正量 14.4%。



Fig. 13 Contrast of thrust correction

图 13 的右纵坐标 $\Delta F/F_c$ 为发动机总推力修正量 占实际总推力的比值,可以看到无风 $\Delta F/F_c$ 为 0.12%, 修正阻力几乎可以忽略,随着风速增加,推力修正总 量占比 $\Delta F/F_c$ 也在增加,且与风速接近正比例关系, 2.5m/s风速时为 0.63%,5m/s风速达到最大值 1.27%。 由此可以对不同自然风的露天试车台推力测量进行 修正,也能根据实际露天基准试车台测量精度要求 来决定试车条件的限用风速数据。

5 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)露天试车过程中发动机进气道外侧会形成 回流区,环境风速风向都对回流区的范围和形状产 生影响,这给露天试车台旁路气流的测量带来困难。

(2)不同环境风速会对发动机进气道 AIP 界面的 气动参数产生影响,对平均速度和平均压力的影响 相对偏差限分别为13.4×10⁻⁵和-4.8×10⁻⁵。

(3)传统用于室内试车台的推力修正方案并不适用于露天基准试验,通过重新推导公式给出可以 适应不同环境气候条件的进气道附加阻力修正方 法,分析计算出该计算方法的系统误差不超过5.8N。

(4)对于进气附加阻力,随着风速增大逐渐成正 比例增加,最大占总推力1.09%;对于台架迎风阻力, 当风向角小于45°时与进气方向风速之间满足近似 二次曲线关系,最大占总推力0.18%。无风时露天试 车台仍有台架迎风阻力。

致 谢:感谢国家科技重大专项的资助。

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] GJB 721-89, 涡喷涡扇发动机试车台校准规范[S].
- [4] Rios R M, Martin M R. Thrust Correction Jet Engine in Sea Level Test Facility[R]. AIAA 98-3109.
- [5] Gullia A, Laskridis P, Ramsden K, et al. A Preliminary

Investigation of Thrust Measurement Correction in an Enclosed Engine Test Facility[R]. *AIAA* 2005-1128.

- [6] Robert N P, Martin R T, Maurice C B, et al. Thrust Correction[P]. USA: 7565269, 2009-07-21.
- [7] Robert N P, Colin A W, Martin R T. Method of Determining Thrust[P]. USA: 68513032, 2005-02-08.
- [8] Laskaridis P, Gullia A, Ramsden K W. A Novel Method for Characterizing Indoor Gas Turbine Test Facilities Prediction and Control of Engine Cell Performance [R]. AIAA 2006-3153.
- [9] NeiL P, Maurice B. Derivation of Aerodynamic Thrust Correction for an Indoor Gas Turbine Engine Test Facility Using the "First Principle" Anemometer Method [C]. Hamburg: 25th International Congress of the Aeronautical Science, 2006.
- [10] 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.
- [11] 梁宝達,林 山. 航空发动机室内试车台推力修正的 一种方法[R]. 沈阳:航空发动机试车台建设与发展 研讨会, 2008.
- [12] Zhang S, Hou A, Chen Y, et al. Test and Numerical Analysis of Flow Distribution for Indoor Aero-Engine Test Bed[C]. Harbin: 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2015.
- [13] Wu F, Gong X Q, Su J Y. Aerodynamic Calibration and Thrust Correction Method with Inflow Separation in Indoor Sea Level Test Facility [C]. Düsseldorf: ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014.
- [14] 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.
- [15] 张 章,侯安平,脱 伟,等.室内发动机试车台推 力校准的数值研究[J].工程力学,2012,29(6):308-313.
- [16] 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, 2019,158(4):3-11.
- [17] Mcardle J G, Moore A S. Effects of Wind on Turbofan Engines in Outdoor Static Test Stands [R]. Lewis: NASA Technical Memorandum, 1983.

(编辑:朱立影)