

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.04.03

# 发动机室内试车台流场品质研究

刘琳琳, 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:** 流场品质对航空发动机室内试车台的性能试验结果有重要影响, 高品质流场是室内试车台进行气动附加阻力准确修正的基础。本文对比介绍了国内外室内试车台气动流场参数要求差异, 分析了室内试车台进排气结构等因素对流场品质的影响, 提出了以试车间气流速度均匀性、引射比、进气道总压均匀性为核心参数的流场品质评价参数体系, 并针对未来国内室内试车台在提高流场品质方面需要开展的工作提出了建议。

**关键词:** 航空发动机; 室内试车台; 流场品质

**中图分类号:** TB937

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)04-0013-05

## Study on Quality of Flow Field of Indoor Engine Test Cells

LIU Linlin, WANG Yi, CHANG Lei

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

**Abstract:** The quality of the flow field has an important effect on the performance test of the engine in the indoor test bed, and the high-quality flow field is the basis of accurate correction of the additional aerodynamic resistance in the indoor test bed. This paper compared and analyzed the difference of parameter requirements of indoor test bed aerodynamic flow field at home and abroad, analyzed the influence of inlet and exhaust structure of indoor test bed on flow field quality, and proposed the flow field quality evaluation parameter system with the uniformity of air-flow velocity in test shop, injection ratio and total pressure distortion of inlet port as the key parameters. At the same time, some suggestions for improving the quality of flow field in domestic indoor test stand are put forward.

**Key words:** aircraft engine; indoor engine test cells; flow field quality

## 0 引言

涡喷和涡扇航空发动机在室内试车台进行试车时, 由于发动机吸气和排气扩压器引射作用, 试车间内产生气流流动, 形成气动流场<sup>[1]</sup>。发动机在地面试车遇到的许多问题都与缺乏对试车间内气动流场品质的理解和认识有关。较差的流场品质会导致发动机转速和推力不稳定, 甚至使风扇或其它核心部件失灵。普惠公司 JT9D 发动机的试车试验表明, 如果发动机进口流场不均匀, 空气流量在发动机进口截面上的最大差值可达 2.28 kg/s, 推力可减少 2280 N<sup>[2]</sup>。较差的流场品质还对室内试车台气动附加阻力修正造成很大困扰, 试车间内速度场的均匀性每下降 10%, 试车间内的平均流速会波动 0.3 ~ 0.5 m/s, 进气道附加阻力修正项的测量误差将增大 5% ~ 10%。流场品质的差异也是造成不同试车台试验数据不一致的一个重要原因。Freuler R J 等人的研究结果表明, 通过对大涵道涡扇发动机室内试车台试车间气流速度均匀性、进气道总压均匀

性、引射比等气动参数进行限制, 可以使发动机在一个稳定的环境中运行, 如: 转速波动小于  $\pm 5$  rad/min, 推力波动小于  $\pm 300$  lb ( $\pm 1.333$  kN), 相当于推力等级为 60000 lb (266.7 kN) 的发动机在最大额定起飞状态下, 推力测量误差不高于  $\pm 0.5\%$ <sup>[3]</sup>。为了在试车间内开展稳定、准确、可重复的发动机性能试验, 需要对某些气动参数加以限制。

本文梳理国内外有关室内试车台气动流场特性研究的文献和规范, 对比分析国内外气动流场参数要求的差异, 研究室内试车台进、排气结构等对流场品质的影响, 并对室内试车台流场品质评价体系的完善提出建议, 为提高试车台设计性能及提升试车台气动流场品质提供参考。

## 1 室内试车台流场参数特性分析

为保证发动机室内试车时的流场品质, 国内外对相关气动参数均有相应要求。表 1 为国内外试车台建设或校准时试车间内主要气动参数要求对比。

表 1 国内外试车台试车间主要气动参数要求对比

标准及其要求	试车间气流速度	试车间气流速度均匀性	进气道总压均匀性	引射比	试车间压降
GJB 5543 - 2006《航空发动机地面试车台通用要求》 <sup>[4]</sup>	小涵道比涡扇/涡轴发动机试车台, 试车间的平均气流速度不宜大于 10 m/s 大涵道比涡扇/涡桨发动机试车台, 试车间的平均气流速度不宜大于 15 m/s	/	/	/	试车间进气压力降不应大于 490 Pa 试车间内发动机进、排气截面的静压差不应大于 100 Pa
GJB 721 - 89《涡喷涡扇发动机试车台校准规范》 <sup>[5]</sup>	室内标准试车台试车间平均气流速度一般不大于 10 m/s	/	/	/	试车间进气压力降不应大于 500 Pa 试车间内发动机进排气截面的静压差不应大于 100 Pa
SAE AIR 4869A 《Design considerations for enclosed turbofan-turbojet engine test cells》 <sup>[6]</sup>	/	≤35%	≤0.0015	≥0.8	/

由表 1 可知国外与国内气动流场品质评价的要求完全不同, 国内规范缺乏真正涉及流场品质方面的评价参数。下面结合国内外研究成果, 详细分析试车间气流速度均匀性、进气道总压均匀性和引射比等参数对保证流场品质的重要性。

### 1.1 试车间平均气流速度

试车间平均气流速度是发动机上游截面速度测量值的平均值, 是随着试车台建设发展不断变化的一个参数。早期试车台设计的趋势是尽量降低试车间平均气流速度, 降低进气冲量这一项的修正量, 降低气流流动不稳定性对发动机性能造成的影响。罗罗公司对车台性能要求标准较高, 试车间平均速度不超过 20 ft/s (约 6.5 m/s)<sup>[2]</sup>; SAE ARP 741 - 1976 标准规定试车间内平均气流速度不大于 9.8 m/s; GJB 721 - 89《涡喷涡扇发动机试车台校准规范》中规定室内标准试车台试车间平均气流速度一般不大于 10 m/s; GJB 5543 - 2006 标准中规定小涵道比涡轮风扇发动机和涡轮涡轴发动机试车台, 试车间的平均气流速度不宜大于 10 m/s, 大涵道比涡轮风扇发动机和涡轮螺桨发动机试车台, 试车间的平均气流速度不宜大于 15 m/s; Freuler R J 等人的缩比模型及现场试验表明, 较大的试车间平均速度相比于低速低修正带来的好处更多<sup>[3,7]</sup>。所以 SAE AIR 4869A 建议, 根据现有的分析方法, 配合温度、压力、推力等参数的先进测试手段, 可准确对测量推力以及其他相关参数进行修正, 不需要再对试车间的平均气流速度进行限定。

### 1.2 试车间气流速度均匀性

试车间气流速度均匀性是根据发动机上游远前方截面速度测量值计算而来的。一般情况下, 发动机远前方测量截面位于试车间内距发动机唇口  $3D \sim 4D$  ( $D$  为发动机进气流量管直径) 的位置, 或者位于发动机唇口与进气段最后一个进气整流装置的中间位置, 截面按  $5 \times 5$  等分为 25 个矩形测量网格, 每个速度测点位于矩形中心。试车间气流速度均匀性定义式为

$$v_{\text{Dist}} = \frac{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}}{v_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $v_{\text{Dist}}$  为试车间气流速度均匀性;  $v_{\text{max}}$  为测试网格内速度测点的最大值, m/s;  $v_{\text{min}}$  为测试网格内速度测点的最小值, m/s;  $v_{\text{ave}}$  为测试网格内速度测点的均值, m/s。

SAE AIR 4869A 规定, 距发动机唇口  $3D \sim 4D$  的位置测得的发动机远前方速度畸变应不大于 35%, 此项数据可以作为评价试车间流场均匀性或质量的通用指标。GE (General Electric) 在其试车台设计标准中规定, 为保证试车间内流动平稳, 可接受的发动机远前方速度均匀性最大为 20%, 且不允许有涡流进入发动机进气道, 即使试车台受到 32 m/s 的侧风影响, 也不允许对发动机远前方速度均匀性造成较大影响<sup>[8]</sup>。

### 1.3 引射比

引射比是表征试车间内气动特性的一个重要参数, 与试车间气流速度的均匀性共同决定了是否会在发动机进气道内形成进气漩涡。引射比的定义式为

$$\alpha = \frac{W_{\text{FC}} - W_{\text{ENG}}}{W_{\text{ENG}}} \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为引射比； $W_{FC}$  为试车间进气流量，kg/s； $W_{ENG}$  为发动机进气流量，kg/s。

引射比的大小决定了气流与试车间墙壁附面层分离的位置，分离位置随着引射比增大向喷口方向移动，发动机进气截面为最佳分离位置。通常情况下，较低的引射比是造成发动机进气涡流的主要原因。Freuler R J 等人的研究表明，发动机远前方速度均匀性控制在约 30% 的基础上，引射比高于 0.8 时发动机进气道内不会有涡流产生<sup>[9]</sup>。SAE AIR 4869A 标准规定，为防止试车间内产生漩涡或燃气回流，引射比不能低于 0.8。SAE AIR 5436 标准中给出的数据为：大型航空发动机引射比一般在 1~2 之间，小型航空发动机，特别是军用发动机，引射比一般不大于 5。与国外相比，我国不管是大型航空发动机还是小型航空发动机，引射比都普遍偏高。引射比越高，气流速度越大，发动机运行的稳定性、气动附加阻力修正的准确性等受流场不均匀性的影响越大。

#### 1.4 试车间压降

试车间压降是表征试车间进气压力损失的参数，是衡量试车台防侧风能力的指标之一，其定义为

$$\Delta P = P_{amb} - P_s \quad (3)$$

式中： $\Delta P$  为试车间压降，Pa； $P_{amb}$  为大气压，Pa； $P_s$  为试车间内静压，Pa。

SAE ARP 741 - 1976 标准规定，为了降低大气压力和冲压比的修正系数，减轻对车台建筑结构的冲击，试车间压降应控制在约 1 英寸水柱（约 254 Pa）<sup>[10]</sup>；SAE AIR 4869A - 2015 标准建议合适的试车间压降为 2~4 英寸水柱（约 508~1016 Pa），有研究表明这一压降范围能够显著降低环境侧风对发动机性能的影响<sup>[8]</sup>。GB 5543 - 2006 标准规定试车间进气压降不应大于 490 Pa，试车间内发动机进气截面与排气截面的静压差不应大于 100 Pa，与 GJB 721 - 89 标准对室内标准试车台试车间压降的要求一致。目前看来，随着航空发动机向大流量、大涵道比发展，结合更加严格的流场品质和噪声控制要求，较多的整流装置势必会造成更大的进气压力损失，所以在发动机参数测试和换算水平提高的基础上，对试车间压降的要求应适当放宽。

#### 1.5 进气道总压均匀性

发动机进气道总压均匀性是用来判断发动机进气道内风扇入口端面流场均匀性的参数。通用的发动机进气道总压均匀性测量方法为：在进气道内均匀安装 8 个总压测量耙，每个测量耙安装 5 个测点进行测量。进气道总压均匀性的定义为

$$P_{Dist} = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{ave}} \quad (4)$$

式中： $P_{Dist}$  为进气道总压均匀性； $P_{max}$  为风扇入口端面总压测点的最大值，Pa； $P_{min}$  为风扇入口端面总压测点的最小值，Pa； $P_{ave}$  为风扇入口端面总压测点的均值，Pa。

SAE AIR 4869A 标准规定，发动机进气道总压均匀性应符合发动机制造商的性能测试要求，一般情况下要低于 0.0015。只有保证其它气动参数达到指标要求才能确保发动机进气道总压均匀性满足指标要求，所以这一指标对流场品质的判定起到决定性作用。

## 2 试车台结构设计对流场品质影响

试车台进排气系统的设计是影响试车间流场品质的主要因素，试车台主要由进气段、试车间和排气段组成，每一个结构都必须根据其不同的作用单独设计，同时必须与其它结构相配合，使整个试车台达到合适的空气动力学和声学性能。室内试车台结构简图如图 1 所示。

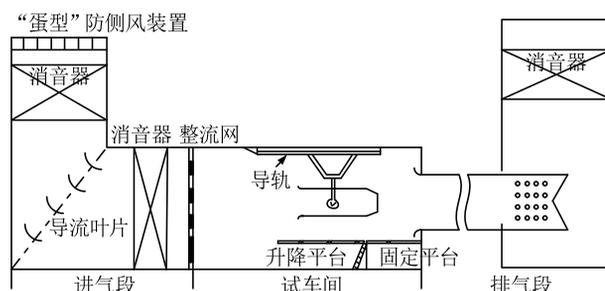


图 1 室内试车台结构简图

### 2.1 进气设计

我国室内试车台以垂直进气为主。进气系统的主要作用是为试车间提供足够且均匀的流动空气，衰减发动机产生的噪声，使试车间免受外界侧风的影响。进气整流单元如消音器、导流叶片、整流网等都会影响试车间流场的均匀性。进气塔顶部“蛋箱”结构的装置能够有效防止侧风对进气质量的影响。采用带有 90° 导流叶片的垂直进气形式不仅可以有效衰减噪声传播，还能避免试车间受外界侧风的影响，为试车间提供均匀的气流流动。某试车台改造前后流场测试结果表明，室内试车台加装导流叶片后，0 截面速度均匀性从 103% 提高到 64%，核心区速度均匀性从 92% 提高到 35%；合格的导流叶片除使气流平稳转向外，还要尽量减小压力损失。气流从最后一个进气整流装置到发动机入口的距离有严格要求，一般情况下，对于垂直进气方式，需要使整流网到发动机进气截面之间的距离大于试车间横截面对角线的距离<sup>[4]</sup>。

## 2.2 试车间

试车间的主要作用是提供支撑发动机所需的安装系统和发动机运行所需的其他设备。设计试车间时有两个重要参数需要考虑：一个是发动机直径与试车间截面面积的比值，另一个是引射比。这两者决定了试车间平均气流速度，如果满足试车间平均气流速度不大于 9.8 m/s 这一指标，则给定测试段的最大发动机流量近似满足

$$W_e \approx 12 \frac{A_{\text{cell}}}{\alpha + 1} \quad (5)$$

式中： $W_e$  为发动机最大空气流量，kg/s； $A_{\text{cell}}$  为试车间截面积， $\text{m}^2$ ； $\alpha$  为引射比。

以 12 × 12 截面的室内试车台为例，在引射比为 3 的情况下，可测试的发动机最大流量不超过约 432 kg/s。设计试车间时还需考虑其内部设施的位置，并尽可能确保结构的流线型；所有的辅助设备（行走平台等）应尽可能设计在发动机进气道唇口截面之后，防止产生进气涡流；试车间内部中的任何凸起（加热管道、照明装置、天车导轨、行走平台等）都可能导致产生涡流，影响航空发动机测试，因此，为了减小流过发动机的气流的压降，试车间内部各系统均应采用流线型设计。应借鉴国外试车台设计经验，借助 CFD 建模计算等手段，从细节上不断提高室内试车台流场品质。

## 2.3 排气设计

排气系统应保证不产生燃气回流，不产生排气反压振荡。引射筒尺寸和位置对试车间内的流场影响很

大。引射筒口径必须足够大，能够完全吸入从发动机尾喷口排出的主流和旁路气流，同时降低排气温度和速度，以免产生燃气回流。排气筒进口形状通常设计为喇叭形或锥形，平直进气或反锥形入口会导致进口损失增加，降低吸入能力<sup>[11]</sup>。排气筒直径与发动机尾喷管直径的比值对引射比的影响很大，引射比随二者比值的减小而减小<sup>[12]</sup>。引射比的变化近似等于排气总温与发动机进口总温之比的平方根<sup>[12]</sup>。军用发动机由于其较高的排气温度，导致了较高的引射比。排气筒长度影响发动机高温排气与旁路气流的混合效果，对于风冷式涡扇发动机试车台，通常建议排气筒长径比为 4.0 或更高。发动机尾喷口与排气筒间的距离对引射比的影响较小，两者间距主要影响发动机尾喷管出口的静压场，如果引射筒距尾喷口的距离过近，则旁路气流的速度很高，尾喷口处的静压较低，将影响发动机的推力，并增加推力修正因子，如果引射筒距尾喷口的距离过大，会使试车间内噪声较大，严重情况下会产生燃气回流。因此建议引射筒采用可移动式设计，确保引射筒和发动机尾喷口之间的距离最佳。

## 3 流场品质评价参数体系

综合国内外关于室内试车台气动流场的要求，并结合实际的测试经验，建议建立以试车间气流速度均匀性、引射比和进气道总压均匀性为核心的室内试车台流场品质评价参数体系，如表 2 所示。

表 2 室内试车台流场品质评价体系

测试位置	参数名称	室内标准试车台	室内工作试车台
进气段	进气消声装置内平均流速	涡喷发动机、小涵道比涡扇发动机试车台不大于 20 m/s	涡喷发动机、小涵道比涡扇发动机试车台不大于 20 m/s
		大涵道比涡扇发动机试车台不大于 40 m/s	大涵道比涡扇发动机试车台不大于 40 m/s
试车间	试车间平均流速	中小推力发动机试车台不大于 10 m/s	中小推力发动机试车台不大于 10 m/s
		大推力发动机试车台不大于 15 m/s	大推力发动机试车台不大于 15 m/s
	气流速度均匀性	不大于 35%	不大于 60%
	进气道总压均匀性	不大于 0.0015	不大于 0.01
	引射比	不小于 0.8	不小于 0.8
试车间进气压损	试车间进气压损	不大于 490 Pa	不大于 490 Pa
	试车间压降	不大于 100 Pa	不大于 100 Pa
排气段	排气筒中心流速	不大于 40 m/s	不大于 40 m/s

表 2 中除气流速度均匀性、进气道总压均匀性和引射比为新增项外，其他直接沿用 GJB 5543 - 2006 标准中相关规定，且适用于所有室内试车台。室内标准

试车台作为发动机性能评价以及参数传递的溯源车台，其流场品质比其他工作台要求更高，未来对其进行更深入的研究，对提高发动机性能评价的准确性及结合

实际陆续提高其他工作台流场品质具有重要意义。

#### 4 结论

从国内关于室内试车台气动流场参数要求的相关规程规范来看,我国室内试车台的流场品质要求相比于国外普遍较低,且规程规范中并没有真正评价试车间内流场品质的气动参数,这也使得不同室内试车台流场品质差异较大。为了提高我国室内试车台流场品质,建议从以下几个方面进行改进:

1)完善流场品质评价相关的规程规范。随着车台建设以及相关测试水平的发展,对室内试车台流场评价参数的要求也在不断变化,要与时俱进,合理制定。

2)试车间流场均匀性和引射比是保证流场品质的关键参数,发动机进气道总压均匀性直接反映了发动机进气道内流场均匀性,是检验流场品质好坏的重要参数,这三者应作为流场品质评价的核心参数纳入我国室内试车台流场品质评价参数体系中。

3)试车台的性能直接影响流场品质,设计试车台时应建立完整的气流控制单元,且每个控制单元应合理设计,使气流平稳过渡,尽量减少试车间内辅助部件对流场品质的影响。可借助国外经验,利用CFD仿真手段进行设计计算,不断优化试车台设计。

#### 参考文献

- [1] 张澄宇,周立江.航空发动机试车台的气动流场研究[J].航空科学技术,2006(1):37-39.
- [2] 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.

- [3] Freuler R J. Recent Successes in Modifying Several Existing Jet Engine Test Cells to Accommodate Large, High-bypass Turbofan Engines[C]//Aiaa Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1993.
- [4] 解放军总装备部. GJB 5543-2006 航空发动机地面试车台通用要求[S]. 2006.
- [5] 国防科学技术工业委员会. GJB 721-89 涡喷涡扇发动机试车台校准规范[S]. 1989.
- [6] Society of Automotive Engineers. AIR 4869A: Design Considerations for Enclosed Turbofan-Turbojet Engine Test Cells[S]. Warrendale, Pennsylvania: SAE International, 1995.
- [7] Lee J, Freuler R. Engine Simulator Techniques for Scaled Test Cell Studies[C]//Joint Propulsion Conference, 1985.
- [8] Society of Automotive Engineers. AIR5436: Test Cell Analytical Thrust Correction[S]. Warrendale, Pennsylvania: SAE International, 2012.
- [9] Freuler R J, Dickman R A. Current Techniques for Jet Engine Test Cell Modeling[J]. 1982.
- [10] Society of Automotive Engineers. ARP 741-1976: Gas Turbine Engine Test Cell Correlation[S]. Warrendale, Pennsylvania: SAE International, 1976.
- [11] Sapp C N, Netzer D W. Experimental Investigation of Turbojet Test Cell Augmentors[J]. 1978.
- [12] Hastings R R. A Simulation of a Jet Engine Test Cell Division of Mechanical Engineering[J]. 1983.

收稿日期:2021-02-02

基金项目:工信部民机重大专项(MJ-2015-J-98)

引用格式:刘琳琳,王毅,常蕾.发动机室内试车台流场品质研究[J].计测技术,2021,41(4):13-17.