

测点布局对航空发动机总压畸变指数的影响

张海灯, 吴云, 李军, 李应红
(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 为了阐明测点布局对航空发动机进气总压畸变测试结果的影响, 利用旋转总压测量耙对5种畸变流场的稳态和动态总压畸变成分进行了测试, 计算了旋转总压测量耙位于不同位置时畸变流场的稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数, 分析了不同测点布局下总压畸变指数计算结果的偏差。结果表明: 测量耙/测点与畸变流场的相对周向位置对总压畸变指数计算结果的准确性至关重要, 对于所分析的5种畸变流场, 增加测量耙/测点周向数目并不能使总压畸变指数计算结果的偏差单调减小, 但可降低其对测量耙/测点周向位置的敏感度。基于畸变区域周向分布设计稳态总压畸变测量耙的周向位置, 组合使用不同相对半径处测点对动态总压畸变进行监测, 可提高总压畸变指数计算结果的准确性。

关键词: 总压畸变; 测点布局; 畸变流场; 周向位置; 结果偏差; 航空发动机

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.06.016

Influences of Sensor Location on Total Pressure Distortion Descriptor of Aeroengine

ZHANG Hai-deng, WU Yun, LI Jun, LI Ying-hong

(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To elucidate the influences of sensor location on testing results of aeroengine inlet total pressure distortion, a rotating total pressure rake was used to measure both the steady-state and time-variant components of five kinds of distorted flow fields. Steady-state circumferential as well as time-variant total pressure distortion descriptors at different circumferential rake locations were calculated. Then the influences of sensor location on the total pressure distortion descriptor were analyzed. The results show that the accuracy of the total pressure distortion descriptor is highly dependent on the relative circumferential location of the rake/sensor. For the five kinds of distorted flow fields, increasing the number of circumferential measurement locations does not always monotonously reduce the deviation of total pressure distortion descriptor calculation results, but can reduce the sensitivity of the total pressure distortion descriptor to the circumferential location of the rake/sensor. Determining the locations of steady-state total pressure distortion rake based on the characteristics of the distorted flow field and using a combination of time-variant total pressure measuring points at different radial locations to monitor time-variant total pressure distortion are effective methods to improve the accuracy of total pressure distortion descriptor calculations.

Key words: total pressure distortion; sensor location; distorted flow field; circumferential location; result deviation; aeroengine

0 引言

飞机机动飞行、侧风等会在进气道中引起流动分离、在航空发动机进口产生总压畸变, 进而使压缩部件稳定裕度降低, 严重时甚至会诱发发动机喘振^[1-3]。因此, 总压畸变试验是发动机试验测试的重要组成部分^[4-6]。中国主要是利用插板的方式在发动机进口产生总压畸变, 利用测量耙对所产生的总压畸变流场进行测试并计算稳态/动态总压畸变指数, 进而将总压

畸变指数与压缩部件稳定裕度进行关联^[5-6]。相关技术标准^[7-8]建议: 在稳态总压畸变试验过程中使用6支周向均布的测量耙, 每支测量耙上布置5个测点; 在动态总压畸变试验过程中使用6支周向均布的单点总压测量耙, 测点位于相对半径0.9处。实际上, 测点布局对总压畸变的测试结果有着显著影响。黄熙君等^[9]研究指出, 测量耙相对于总压畸变区的位置不同, 可引起畸变指标10%~30%的偏差, 而当周向总压畸变范围为 $\pi/6$ 时, 使用6支测量耙可引起畸变指

收稿日期: 2022-01-12 基金项目: 国家级基金项目资助。

作者简介: 张海灯(1991), 男, 博士, 讲师。

引用格式: 张海灯, 吴云, 李军, 等. 测点布局对航空发动机总压畸变指数的影响[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 99-108. ZHANG Haideng, WU Yun, LI Jun, et al. Influences of sensor location on total pressure distortion descriptor of aeroengine[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 99-108.

标 25%~40% 的偏差;齐亦农等^[10]针对 2 种总压畸变形式,分析了测量耙数目对总压畸变测试结果的影响,表明采用 6 支包含 5 个测点的测量耙时,试验测试结果的误差基本在允许范围内。国外基于旋转总压测量耙研究分析了测点布局对总压畸变测试结果的影响^[11-13],结果表明为了获得满足要求的总压畸变流场,周向至少布置 8 支测量耙,每支测量耙上至少布置 5 个测点;Pecinka 等^[14]利用 4 支旋转测量耙对流场的总压和静压进行测量,测量耙单次旋转 15° 等价于使用了 25 支固定测量耙、单次旋转 30° 等价于使用了 13 支固定测量耙,根据其提供的试验数据,单次旋转 15° 和 30° 的总压测试结果仍存在差异。上述研究主要涉及稳态总压畸变的测试,而测点布局对动态总压畸变测试结果的影响研究还比较缺乏。

为了进一步阐明测点布局对航空发动机总压畸变测试结果的影响,本文设计了旋转总压测量耙,在直流风洞中测试了不同类型总压畸变的稳态和动态成分,对不同位置处的测试数据进行分析。

1 试验系统

1.1 直流风洞

本文所使用的直流风洞结构如图 1 所示。主要包含试验段、扩张段和离心风机。试验段包括进气段、畸变发生器安装段、过渡段、测量耙安装段和出气段。进气段和出气段分别安装有皮托管,对风洞气流速度进行测量;畸变发生器安装段用于安装各种形式的畸变发生器、测量耙安装段用于安装旋转测量耙,二者之间装有过渡段,通过更换过渡段可改变测量耙与畸变发生器的距离,在本文试验过程中,测量耙安装段和畸变发生器安装段的距离为直径的 1.5 倍,根据数值仿真结果,该距离下测量耙处畸变流场的气流角不大于 25° (当地速度与试验段轴向的夹角)。直流风洞由 110 kW 的离心风机驱动,最大空气流量为 18.2 kg/s,风洞试验段直径为 380 mm,对应的最大进气速度为 130 m/s。

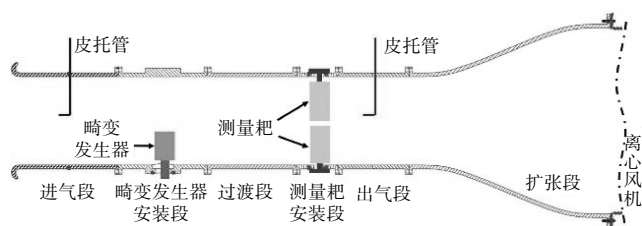


图1 直流风洞结构

1.2 畸变发生器与测量耙

本文所使用的畸变发生器和测量耙在风洞中的安装如图 2 所示。从图中可见,畸变发生器由完全相同的 I 和 II 两个组件组成,每个组件均由平板和圆柱两部分组成,在试验过程中 I 和 II 可绕圆柱部分轴线同步或异步旋转,进而获得不同的畸变流场,当平板部分与来流完全平行时定义畸变发生器角度为 0°,当平板部分绕圆柱轴线旋转角度为 α 时,定义其角度为 α (逆时针旋转时角度为正)。



图2 畸变发生器和测量耙在风洞中的安装

本文所采用的畸变发生器 I 和 II,圆柱部分直径为 100 mm,伸入风洞中部分沿径向长度为 190 mm,平板部分的形状保证畸变发生器可在风洞中自由转动,为了避免进气畸变过强对离心风机的工作产生太大影响,畸变发生器 I 和 II 的角度均为 90° 时,其边缘与风洞内壁仍留有一弧形间隙(图 2)。

试验采用的旋转总压测量装置由 4 支总压测量耙组成,每支测量耙包含沿径向均匀分布的 8 个测点,每个测点上均直接安装动态压力传感器(头部直径为 6 mm,频响为 10 kHz,量程为 ± 10 kPa,精度为 $\pm 0.25\%$ FS),可直接测量总压畸变动态成分和稳态成分,32 支动态压力传感器为同步测量,采集频率为 5 kHz,单次采集时间为 10 s。4 支测量耙沿周向均匀分布,安装于可绕风洞外壁旋转的旋转环上,试验过程中单次旋转角度为 10°,测量 1 个截面等价于使用了 36 支测量耙。根据校准结果,在 $\pm 30^\circ$ 气流角度内,测量耙总压测量误差不大于 0.65%。

2 畸变发生器状态

本文共构造了 5 种畸变流场,对应的畸变发生器状态见表 1。1#~4# 试验对应的畸变发生器 I、II 的角度由 0° 逐渐增大到 90°,5# 试验对应的畸变发生器 I 角度为 0°、畸变发生器 II 角度为 90°。试验过程中

表1 畸变发生器状态

1#	2#	3#	4#	5#
I - 0°	I - 30°	I - 60°	I - 90°	I - 90°
II - 0°	II - 30°	II - 60°	II - 90°	II - 0°

保持风机功率不变,1#~5#试验对应的进气速度分别为61.1、52.7、40.0、36.5、47.6 m/s。

中国技术标准主要用综合压力畸变指数来评定总压畸变对发动机性能及稳定性的影响,其定义是稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数的线性叠加。因此,本文主要对稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数进行计算分析,这里仅简要介绍其定义,有关细节可查阅GJB/Z 64A-2004。

$$\sigma(\bar{r}, \theta) = \frac{P_{t2}(\bar{r}, \theta)}{P_{t0}} \quad (1)$$

式中: $\bar{r}$ 为任一环半径与轮缘半径之比; θ 为极角; σ 为流场中点的总压恢复系数; P_{t2} 为流场中点的总压; P_{t0} 为畸变发生器前未扰动气流总压。

$$\sigma_{r,av}(\theta) = \frac{\int_{\bar{r}_{hu}}^1 \sigma_r(\bar{r}, \theta) 2\bar{r} d\bar{r}}{1 - \bar{r}_{hu}^2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{r,av}$ 为极角一定时径向平均总压恢复系数; $\bar{r}_{hu}$ 为轮毂半径与轮缘半径之比。

$$\sigma_{av} = \frac{\int_0^{360} \sigma_{r,av}(\theta) d\theta}{360} \quad (3)$$

式中: σ_{av} 为面平均总压恢复系数。

$$\Delta\bar{\sigma}_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{av}} \quad (4)$$

式中: $\Delta\bar{\sigma}_0$ 为稳态周向总压畸变指数; σ_0 为畸变区(低压区)内平均总压恢复系数,其定义为

$$\sigma_0 = \frac{1}{\theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma_{r,av}(\theta) d\theta \quad (5)$$

式中: θ 为畸变区周向范围; θ_1 和 θ_2 为畸变区的起始角度与终止角度。

动态总压畸变指数表示流场总压不均匀度随时间的变化,用面平均紊流度 ε_{av} 表示。其定义为

$$\varepsilon_{av} = \frac{1}{360} \int_0^{360} \varepsilon(\theta) d\theta \quad (6)$$

式中: ε 为固定极角下流场的紊流度

$$\varepsilon = \frac{(\Delta P_{t2})_{RMS}}{\bar{P}_{t2}} \quad (7)$$

式中: $(\Delta P_{t2})_{RMS}$ 为采集时间内总压脉动均方根; $\bar{P}_{t2}$ 为采集时间内总压时均值。

3 测点布局对稳态周向总压畸变指数的影响

试验过程中测点的分布如图3所示。如前文所述,本文等价使用了36支测量耙,相邻测量耙的周向夹角为 10° 。

不同试验中径向平均总压恢复系数沿周向的分布如图4所示。根据

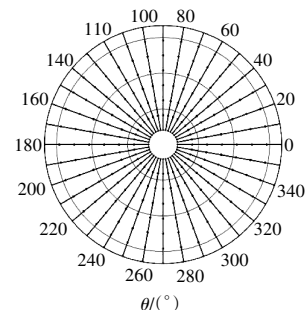


图3 测点分布

式(4)计算可得1#~5#试验的稳态周向总压畸变指数分别为0.0156、0.0207、0.0246、0.0213、0.0292。下面具体分析测量耙数目和位置对不同试验稳态周向总压畸变指数的影响。

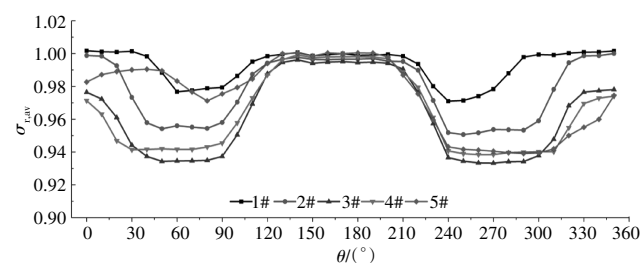


图4 不同试验中径向平均总压恢复系数沿周向的分布

3.1 测量耙数目的影响

分析了4种测量耙数目对应的稳态周向总压畸变指数,不同数目测量耙的位置分布见表2。

表2 不同数目测量耙的位置分布

方案编号	测量耙数目	测量耙所处角度/(°)
①	6	0、60、120、180、240、300
②	9	0、40、80、120、160、200、240、280、320
③	12	0、30、60、90、120、150、180、210、240、270、300、330
④	18	0、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、240、260、280、300、320、340

使用不同测量耙数目时稳态周向总压畸变指数的计算结果见表3。

表3 不同测量耙数目下稳态周向总压畸变指数的计算结果

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
①	0.0203	0.0249	0.0278	0.0236	0.0334
②	0.0141	0.0253	0.0284	0.0221	0.0309
③	0.0174	0.0233	0.0271	0.0244	0.0304
④	0.0151	0.0248	0.0281	0.0218	0.0295

将表3中结果与使用36支测量耙的测量结果进行对比,可获得不同测量耙数目下稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差(见表4)。

表4 不同测量耙数目下计算结果的偏差

方案编号	稳态周向总压畸变指数计算偏差				
	1#	2#	3#	4#	5#
①	30.1	20.3	13.0	10.8	14.4
②	-9.6	22.2	15.4	3.8	5.8
③	11.5	12.6	10.2	14.6	4.1
④	-3.2	19.8	14.2	2.3	1.0

概括而言,对于畸变流场为一集中区域的3#~5#试验,测量耙数目对于稳态周向总压畸变指数的计算结果影响相对较小,与36支测量耙的计算结果相比,使用6~18支测量耙计算得到的稳态周向总压畸变的最大偏差都在20%以下。对于5#试验,畸变流场为一集中的低压区,与常规插板畸变试验结果更为接近,使用6支测量耙计算得到的稳态周向总压畸变指数与36支测量耙结果相比,偏差为14.4%,而当测量耙数目增大到9支时,偏差即可降到10%以下。

在实际飞行过程中发动机承受的总压畸变流场是多种形式的,对于畸变区域周向尺度相对较小的1#和2#畸变流场,使用6支测量耙计算得到的稳态周向总压畸变指数可能存在30%以上的偏差,而当测量耙数目增大到18支时,稳态周向总压畸变指数仍可能存在近20%的偏差。

需要指出的是,稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差并不一定随着测量耙数目的增大而减小。以4#试验为例,使用12支测量耙计算得到的稳态周向总压畸变指数与36支测量耙的结果相比,偏差达到14.6%,而使用9支测量耙对应的偏差仅为3.8%。这是由于在9支测量耙和12支测量耙方案中,测量耙位置并不相同(表2)。

3.2 测量耙位置的影响

针对表2中的4个测量方案,通过选取图8中不同角度处测量耙,分析测量耙位置对稳态周向总压畸变指数计算结果的影响。测量耙变换位置具体方案见表5。

(1)6支测量耙测试结果分析

针对①号方案选取了5种测量耙位置,见表5,①-1~①-5方案对应测量耙位于不同周向位置,其计算得到的稳态周向总压畸变指数见表6。

①-1~①-5方案计算得到的稳态周向总压畸变指数与使用36支测量耙计算结果的偏差如图5所示。从图中可见,使用6支测量耙时,测量耙的位置对稳

表5 测量耙变换位置的方案

方案编号	测量耙数目	测量耙所处角度/(°)
①-1	6	10、70、130、190、250、310
①-2	6	20、80、140、200、260、320
①-3	6	30、90、150、210、270、330
①-4	6	40、100、160、220、280、340
①-5	6	50、110、170、230、290、350
②-1	9	10、50、90、130、170、210、250、290、330
②-2	9	20、60、100、140、180、220、260、300、340
②-3	9	30、70、110、150、190、230、270、310、350
③-1	12	10、40、70、100、130、160、190、220、250、280、310、340
③-2	12	20、50、80、110、140、170、200、230、260、290、320、350
④-1	18	10、30、50、70、90、110、130、150、170、190、210、230、250、270、290、310、330、350

表6 不同测量耙位置下①号方案的计算结果

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
①-1	0.0201	0.0293	0.0297	0.0243	0.0337
①-2	0.0185	0.0299	0.0324	0.0189	0.0301
①-3	0.0146	0.0261	0.0305	0.0260	0.0273
①-4	0.0081	0.0247	0.0287	0.0262	0.0251
①-5	0.0138	0.0235	0.0282	0.0235	0.0258

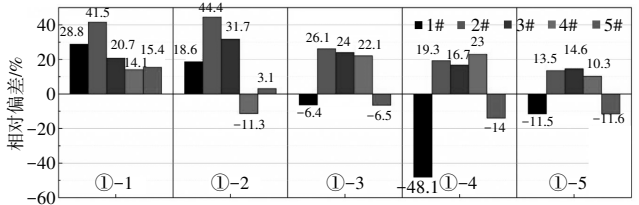


图5 ①-1~①-5方案计算得到的稳态周向总压畸变指数与使用36支测量耙计算结果的偏差

态周向总压畸变指数的计算结果有明显影响。

对于1#试验,考虑到①方案下稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差为30.1%,从①方案到①-5方案,测量耙的周向转动使得稳态周向总压畸变指数计算偏差呈现减小(①~①-3)、增大(①-3~①-4)、减小(①-4~①-5)的变化规律,其中①-3方案对应的偏差最小,为-6.4%。

对于 2# 试验,考虑到①方案下稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差为 20.3%,从①方案到①-5 方案,测量耙的周向转动使稳态周向总压畸变指数计算偏差呈现先增大(①~①-2)再减小(①-2~①-5)的变化规律,到达①-5 方案时偏差最小,为 13.5%,而①-1 和①-2 方案对应的偏差均在 40% 以上。

对于 3# 试验,考虑到①方案下稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差为 13%,从①方案到①-5 方案,测量耙的周向转动使稳态周向总压畸变指数计算偏差同样呈现先增大(①~①-2)再减小(①-2~①-5)的变化规律,到达①-5 方案时偏差最小,为 14.6%。其中①-2 方案对应的偏差最大,为 31.7%。

对于 4# 试验,考虑到①方案下稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差为 10.8%,从①方案到①-5 方案,测量耙的周向转动并没有使稳态周向总压畸变指数计算偏差呈现出明显的单调增大或减小的变化规律,而是使计算偏差分布于 2 个区间,①~①-2 和①-5 方案下计算偏差分布在 10%~15% 之间,①-3~①-4 方案下计算偏差则分布在 20%~25% 之间。其中①-5 方案对应的偏差最小,为 10.3%,①-4 方案对应的偏差最大,为 23%。

对于 5# 试验,畸变流场引起的低压区最为集中,测量耙位置对稳态周向总压畸变指数的计算结果影响最小。与 36 支测量耙结果对比,①-1~①-5 方案计算得到的 5# 试验稳态周向总压畸变指数偏差均在 20% 以下,其中①-2 方案对应的偏差最小,仅为 3.1%,而①-1 方案对应的偏差最大,为 15.4%。

综合分析,对于使用 6 支测量耙的方案,稳态周向总压畸变指数计算结果对测量耙位置较为敏感。以①-1 和①-2 方案为例,2 个方案下 6 支测量耙的周向位置相差 10°,而 5# 试验稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差从 15.4% 变为了 3.1%。另一方面,以稳态周向总压畸变指数计算偏差最小为目标,对于不同的畸变流场,很难找到普适的测量耙最优分布方案,对于 1#~5# 试验,偏差最小的方案分别为①-3、①-5、①-5、①-5 和①-2,且在测量耙周向转动过程中,1#~5# 试验对应的稳态周向总压畸变指数计算偏差变化规律也有很大差异。

(2)测量耙数目对测试结果的影响

下面进一步分析测量耙数目增加后,测量耙位置对稳态周向总压畸变指数计算结果的影响。不同测

量耙位置下②~④方案计算得到的稳态周向总压畸变指数见表 7。

表 7 测量耙位置不同时②~④号方案计算结果

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
②-1	0.0218	0.0266	0.0301	0.0261	0.0305
②-2	0.0185	0.0243	0.0279	0.0254	0.0281
②-3	0.0149	0.0152	0.0230	0.0221	0.0274
③-1	0.0133	0.0181	0.0245	0.0252	0.0294
③-2	0.0161	0.0254	0.0222	0.0207	0.0224
④-1	0.0110	0.0188	0.0257	0.0208	0.0248

测量耙位置不同时②~④方案计算得到的稳态周向总压畸变指数与使用 36 支测量耙计算结果的偏差如图 6 所示。从图中可见,测量耙数目为 9 支时,在改变测量耙位置的过程中(②-1~②-3 方案),5# 试验稳态周向总压畸变指数计算结果的偏差均维持在 10% 以下,而对于 1#~4# 试验,稳态周向总压畸变指数计算结果偏差仍存在显著变化:对于 1# 试验,最大偏差为 39.7%、最小偏差则为-4.5%;对于 4# 试验,最大偏差为 22.5%、最小偏差为 3.8%。

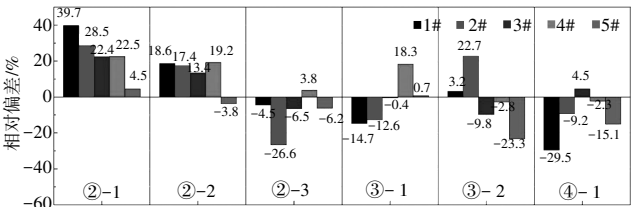


图 6 测量耙位置不同时②~④方案计算得到的稳态周向总压畸变指数与使用 36 支测量耙计算结果的偏差

对比图 5 和图 6,9 支测量耙对应的最大偏差小于 6 支测量耙对应的偏差(分别为 39.7%、-48.1%),测量耙数目增大到 12 支和 18 支时,稳态周向总压畸变指数计算结果的最大偏差进一步减小(分别为 22.7%、-29.5%),这说明增大测量耙数目可在一定程度上减小测量耙位置对稳态周向总压畸变指数计算结果的影响。

综合图 5 和图 6,对于 1# 和 2# 试验的畸变流场,当测量耙数目增大到 12 支甚至以上时,不合适的测量耙位置仍会使稳态周向总压畸变指数计算结果出现 20% 以上的偏差,而当仅使用 6 支测量耙时,合适的测量耙位置亦可以使稳态周向总压畸变指数计算偏差维持在 10% 甚至以下。因此,在测量耙数目有

限时,测量耙与畸变区域的相对位置对于总压畸变指数计算结果的准确度至关重要。

对于图 6 中方案③-2 和④-1 的计算结果,值得注意的是,5#试验对应的偏差明显大于其它试验的,这与图 5 中 5#试验稳态周向总压畸变指数计算偏差较小的现象不同。分析发现,③-2 和④-1 方案计算得到的截面平均总压恢复系数均为 0.975,而 350°位置处的测量耙位于畸变区域边缘,测量得到的径向平均总压恢复系数为 0.974,略低于截面平均总压恢复系数。根据定义,将 350°位置计入畸变低压区,导致畸变区总压恢复系数的数值比实际值偏高,从而使计算得到的稳态周向总压畸变指数偏小,出现了-23.3%和-15.1%的偏差。根据这一结果,当使用有限数目测量耙对畸变流场进行测试时,测量耙位于畸变区域边缘的情况有可能引起稳态周向总压畸变指数计算结果的异常。

4 测点布局对动态总压畸变指数的影响

如前文所述,本文等效使用了 36 支测量耙对流场进行测试,每支测量耙上有 8 个测点,可对流场的动态压力直接进行测量,因此单次试验可获取 288 个点的动态压力信息。根据式(6)、(7),通过面积加权平均,计算得到 1#~5#试验的动态总压畸变指数分别为 0.00155、0.00231、0.00262、0.00265、0.00227。

4.1 测点位置的影响

中国技术标准 GJB/Z 64A-2004 建议动态总压畸变试验过程中使用 6 个周向均布的单点总压,测点位于相对半径 0.9 处。受限于动态压力传感器的尺寸和安装,本试验过程中与风洞内壁距离最近的测点位于相对半径 0.88 处,其它 7 个测点依次位于 0.77、0.66、0.55、0.44、0.33、0.22、0.11 相对半径处。

(1)测点径向位置的影响

首先选取 6 个周向均布的测点(周向分别位于图 8 中 0、60、120、180、240、300°位置处),计算其沿径向分别位于 0.88、0.66、0.44、0.22 相对半径处时的动态总压畸变指数,进而分析测点径向位置对动态总压畸变指数的影响。

测点位于不同相对半径处时,计算得到的动态总压畸变指数见表 8。

将表 8 中结果与使用 36 支测量耙结果进行对比,

可获得不同测点位置下动态总压畸变指数计算结果的偏差,见表 9。

表 8 不同测点位置下动态总压畸变指数计算结果

相对半径	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
0.22	0.00244	0.00285	0.00419	0.00417	0.0030
0.44	0.00178	0.00309	0.00309	0.00310	0.00256
0.66	0.00137	0.00255	0.00268	0.00240	0.00218
0.88	0.00133	0.00187	0.00180	0.00213	0.00193

表 9 不同测点位置下计算结果的偏差

相对半径	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
0.22	57.4	23.4	59.9	57.4	32.2
0.44	14.8	33.8	17.9	17.0	12.8
0.66	-11.6	10.4	2.3	-9.4	-4.0
0.88	-14.2	-19.0	-31.3	-19.6	-15.0

从表 8、9 中可见,6 个周向均布的测点位于 0.66 相对半径处时计算得到的动态总压畸变指数偏差最小,1#~5#试验对应的偏差均未超过 12%。比较而言,测点位于 0.22 相对半径处时计算结果偏差最大,位于 0.44 相对半径处时次之,其原因主要是由于相对半径较小的测点捕捉到的流场信息有限,难以准确反映整个截面的流场特征。

(2)测点周向位置的影响

下面针对 0.66 和 0.88 相对半径处的 6 个周向均布测点,分析其周向位置改变时动态总压畸变指数计算结果的变化,测点的周向分布方案为表 5 中的①-1~①-5。相应的计算结果见表 10、11。

表 10 不同周向位置下 0.66 相对半径处测点计算结果

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
①-1	0.0012	0.00241	0.00230	0.00208	0.00193
①-2	0.00112	0.00224	0.00230	0.00215	0.00191
①-3	0.00115	0.00264	0.00244	0.00240	0.00200
①-4	0.00093	0.00237	0.00359	0.00332	0.00220
①-5	0.00107	0.00227	0.00366	0.00340	0.00276

表 11 不同周向位置下 0.88 相对半径处测点计算结果

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
①-1	0.00126	0.00219	0.00200	0.00200	0.00181
①-2	0.00129	0.00214	0.00247	0.00261	0.00206
①-3	0.00161	0.00207	0.00194	0.00200	0.00243
①-4	0.00218	0.00203	0.00230	0.00223	0.00226
①-5	0.00190	0.00204	0.00217	0.00240	0.00249

测点位于0.66和0.88相对半径处时,测点周向位置变化过程中动态总压畸变指数计算结果的偏差分别如图7、8所示。

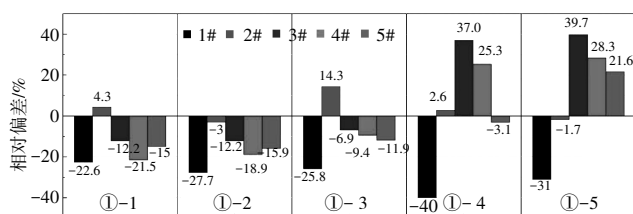


图7 测点位于0.66相对半径处、周向位置不同时动态总压畸变指数计算结果的偏差

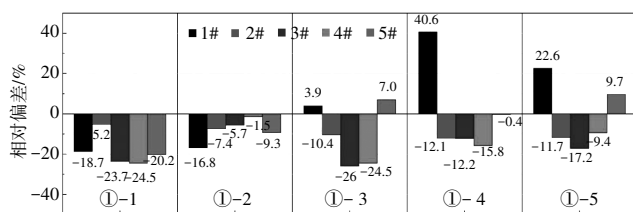


图8 测点位于0.88相对半径处、周向位置不同时动态总压畸变指数计算结果的偏差

对于1#试验,在①-1~①-3方案下,测点位于0.88相对半径处时动态总压畸变指数计算偏差相对较小(最小值为3.9%),但需要注意的是,在①方案下,测点位于0.66相对半径处时动态总压畸变指数计算偏差要小于测点位于0.88相对半径处的计算偏差。从变化规律上来看,畸变流场保持不变、测点位置周向转动,0.66相对半径处测点计算得到的动态总压畸变指数偏差绝对值呈现增大(①~①-1)、基本不变(①-1~①-3)、增大(①-3~①-4)、减小(①-4~①-5)的变化趋势;0.88相对半径处测点对应的动态总压畸变指数偏差绝对值呈现基本不变(①~①-2)、减小(①-2~①-3)、增大(①-3~①-4)、减小(①-4~①-5)的变化趋势。

对于2#试验,测点位于0.66和0.88相对半径处时,在测点周向位置改变过程中动态总压畸变指数计算结果的偏差均在15%以下,说明其对测点位置周向的变化并不敏感,这与稳态总压畸变指数分析结果存在较大差异。从变化规律上来看,畸变流场保持不变、测点位置周向转动,0.66相对半径处测点计算得到的动态总压畸变指数偏差绝对值在①-3方案下出现1个极大值,为14.3%,而①-1~①-2、①-4~①-5方案下偏差绝对值均不超过5%;0.88相对半径处测点对应的动态总压畸变指数偏差绝对值则分布在2个

区间,①-1~①-2方案下偏差绝对值在10%以下,其它方案偏差绝对值分布在10%~15%之间。

对于3#~5#试验,测量靶位置改变过程中稳态周向总压畸变指数计算结果的最大偏差均小于2#试验的(图5)。与之相反,图7、8中3#~5#试验动态总压畸变指数计算结果的最大偏差分别为39.7%、28.3%、21.6%,均大于2#试验的14.3%。3#~5#试验畸变流场中的总压脉动分布于畸变发生器边缘且较为集中,当有限数目测点均位于或偏出强总压脉动区时,即会引起动态总压畸变指数计算结果的较大偏差。

对于3#试验,在畸变流场保持不变、测点位置周向转动过程中,0.66相对半径处测点计算得到的动态总压畸变指数偏差绝对值分布在3个区间,①~①-2方案下,偏差绝对值维持在12%附近,①-3方案下偏差绝对值达到最小,为6.9%,①-4~①-5方案下偏差绝对值则达到35%以上;0.88相对半径处测点对应偏差绝对值没有呈现出明显的单调增或减的变化规律,在①-2方案下偏差绝对值达到最小,为5.7%,在①-3方案下偏差绝对值达到最大,为26%。

对于4#试验,在畸变流场保持不变、测点位置周向转动过程中,0.66相对半径处测点对应的偏差,在①~①-3方案下为负值,在①-4~①-5方案下为正值,且从①-3到①-4方案,偏差绝对值大小也出现突跃,从11.9%增大到37%;0.88相对半径处测点对应的偏差,在①~①-5方案下均为负值,绝对值大小没有呈现明显的单调增或减的变化规律,在①-2方案下偏差绝对值达到最小,为1.5%,在①-3方案下达到最大,为26.5%。

对于5#试验,在畸变流场保持不变、测点位置周向转动过程中,0.66相对半径处测点计算得到的动态总压畸变指数偏差绝对值存在2个极小值点(4.0%、3.1%),分别为①方案和①-4方案,①-1~①-3方案下偏差绝对值维持在10%~15%之间,而①-5方案对应的偏差为最大值,达到26%;0.88相对半径处测点对应偏差绝对值则分布在3个区间,①~①-1方案下维持在15%~20%之间,①-2~①-3、①-5方案下维持在5%~10%之间,①-4方案下偏差绝对值达到最小,为0.4%。

与稳态周向总压畸变指数分析结果类似,从图7、8中可知,使用6个周向均布的测点对动态总压畸变进行测试,动态总压畸变指数的计算结果对测点周

向位置较为敏感,且以动态总压畸变指数计算偏差最小为目标,对于不同的畸变流场,很难找到普适的最优测点分布方案。以5#试验为例,测点位于0.66和0.88相对半径处时,①-4方案计算得到的动态总压畸变指数偏差分别为-3.1%和-0.4%,而将测点转动 10° ,①-5方案计算得到的动态总压畸变指数偏差分别增大到21.6%和9.7%;测点位于0.88相对半径处时,对于1#~5#试验,动态总压畸变指数计算结果偏差最小的方案分别为①-3、①-1、①-2、①-5、①-4,且在测点周向转动过程中,1#~5#试验对应的动态总压畸变指数计算偏差变化规律也有很大差异。

与稳态周向总压畸变指数分析结果不同,3#~5#试验稳态总压畸变区域周向尺度较大,而动态总压脉动主要分布在周向尺度较小的区域,因此使用6个周向均布测点对其动态总压畸变进行测试,获得的动态总压畸变指数往往存在较大偏差。

4.2 测点周向数目的影响

进一步分析周向测点数目变化对动态总压畸变指数计算的影响,动态总压测点周向数目变化方案见表12。

表12 动态总压测点周向数目变化方案

方案编号	测点相对半径	测点数目	方案编号	测点相对半径	测点数目
I-1	0.88	12	II-1	0.66	12
I-2	0.88	18	II-2	0.66	18
I-3	0.88	36	II-3	0.66	36

表12中12、18支测量耙的周向位置与表2中的③、④方案相同。不同测点周向数目下的动态总压畸变指数见表13。表13中1#~5#试验动态总压畸变指数与288个测点面积加权平均结果相比的偏差如图9所示。

表13 不同测点周向数目下的动态总压畸变指数

方案编号	稳态周向总压畸变指数				
	1#	2#	3#	4#	5#
I-1	0.00214	0.00231	0.00227	0.00234	0.00238
I-2	0.00193	0.00214	0.00223	0.00229	0.00217
I-3	0.00159	0.00206	0.00216	0.00223	0.00216
II-1	0.00207	0.00252	0.00250	0.00245	0.00235
II-2	0.00170	0.00233	0.00256	0.00245	0.00218
II-3	0.00114	0.00241	0.00283	0.00263	0.00217

对于1#试验,测点周向数目增大到36个时,0.88相对半径处测点对应的动态总压畸变指数的偏差小

于10%,而使用12个和18个测点时,相应的偏差均在20%以上。测点位于0.66相对半径处、测点周向数目为18个时,动态总压畸变指数的偏差小于

10%,而使用12个和36个测点时,相应的偏差绝对值均在20%以上。这说明1#试验动态总压畸变指数的测量存在很大挑战。

对于5#试验,在测点周向数目由12个增大到36个的过程中,0.66和0.88相对半径处测点获得的动态总压畸变指数偏差绝对值均维持在5%左右,结合第3.1节6个测点的分析结果,可以认为常规的动态总压畸变测试方案可以相对准确地获得5#试验动态总压畸变指数,但不合适的测点位置也可能引起动态总压畸变指数20%以上的偏差(如图7中①-5结果所示)。

对于2#~4#试验,在测点周向数目由12个增大到36个的过程中,0.66和0.88相对半径处测点获得的动态总压畸变指数偏差绝对值均维持在20%以下。整体来看,与0.88相对半径处的结果相比,0.66相对半径处测点获得的动态总压畸变指数偏差绝对值相对较小,但二者计算结果的差异有限,其中2#试验最大偏差绝对值相差最大,仅为9.5%。结合第3.1节①方案分析结果,测点位于0.66相对半径处时,计算得到的动态总压畸变指数似乎能更加准确地反映截面总压脉动情况,但需要注意的是,如前文所述,6个测点位于0.66相对半径处时,测点周向位置的变化亦可能引起动态总压畸变指数计算结果的极大偏差。

从图9中可见,动态总压畸变指数计算结果的偏差并不随测点周向数目的增加单调下降。以3#试验为例,在测点位于0.88相对半径、测点周向数目为12时动态总压畸变指数偏差绝对值最小,而测点周向数目为36时动态总压畸变指数偏差绝对值最大;在测点位于0.66相对半径处、测点周向数目为18时动态总压畸变指数偏差绝对值最小,而测点周向数目为36时动态总压畸变指数偏差绝对值最大。

这里进一步分析测点数目增加是否会改变动态总压畸变指数计算偏差对测点周向位置的敏感度。针对0.88和0.66相对半径处周向均匀布置12个测点的情况,分别计算测点周向分布遵循表2中③-1和

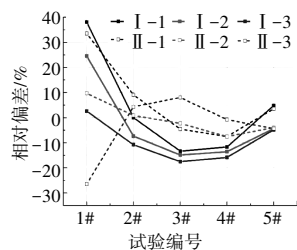


图9 不同测点数目对应的动态总压畸变指数计算偏差

③-2方案时的动态总压畸变指数。

对于③-1方案,在12个测点位于0.66相对半径处时,1#~5#试验的动态总压畸变指数分别为0.00183、0.00267、0.00245、0.00237、0.00216;在12个测点位于0.88相对半径处时,1#~5#试验的动态总压畸变指数分别为0.00204、0.00217、0.00219、0.00218、0.00215。

对于③-2方案,在12个测点位于0.66相对半径处时,1#~5#试验的动态总压畸变指数分别为0.00184、0.00222、0.00246、0.0024、0.00225;在12个测点位于0.88相对半径处时,1#~5#试验的动态总压畸变指数分别为0.002、0.00217、0.00224、0.00231、0.00223。

在③~③-2方案下测点位于0.66和0.88相对半径处时,1#~5#试验动态总压畸变指数计算结果的偏差如图10所示。

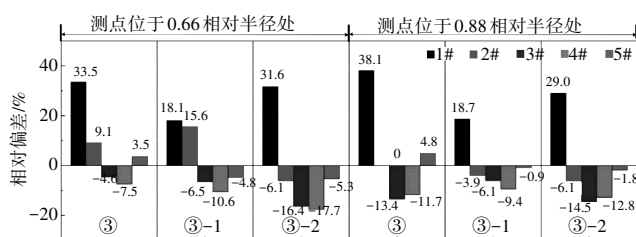


图10 测点数目为12时不同测点周向位置对应的动态总压畸变指数计算结果偏差

从图中可见,除1#试验外,在测点周向位置改变过程中,动态总压畸变指数计算偏差均维持在20%以下。从图10和图7、8中可见,在测点位置改变过程中,测点位于0.66相对半径处时,12个和6个测点对应的1#~5#试验动态总压畸变指数计算结果的偏差最大值分别为33.5%、15.6%、-16.4%、17.7%、-5.3%和-40%、14.3%、39.7%、28.3%、21.6%;在测点位于0.88相对半径处时,12个和6个测点对应的1#~5#试验动态总压畸变指数计算结果的偏差最大值分别为38.1%、-6.1%、-14.5%、-12.8%、4.8%和40.6%、-12.1%、-26%、-24.5%、-20.2%。因此,增加测点数目可以明显减小动态总压畸变计算结果的最大偏差,即降低其对测点周向位置的敏感度。

从图10中还可见,在测点数目为12个时,在③~③-2方案下,0.66相对半径处测点计算得到的1#试验动态总压畸变指数最大偏差较小,0.88相对半径处测点计算得到的2#~5#试验动态总压畸变指数最大

偏差较小。对于2#试验,0.66相对半径处测点和0.88相对半径处测点最大偏差绝对值相差9.5%,在其它4组试验中,二者对应的动态总压畸变指数最大偏差绝对值相差均在5%以内。结合图9对比分析结果,难以直接判定哪种测点径向位置可以更加准确地获得动态总压畸变指数。

5 结论

(1)在稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数测试计算过程中,测量耙与畸变流场的相对周向位置对于结果的准确性至关重要,当测量耙数目增加到12支时,不合适的测量耙周向位置同样会导致稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数计算结果出现20%和15%以上的偏差。

(2)单纯增加测量耙数目不能保证稳态周向总压畸变指数和动态总压畸变指数计算结果的偏差较小,但可以在一定程度上降低稳态周向总压畸变指数对测量耙周向位置的敏感度,提高试验结果的可靠性。

(3)在动态总压畸变指数测试过程中,测点位于0.5相对半径以下时结果偏差较大,而在0.66和0.88相对半径时,可获得较为准确的结果。

参考文献:

- [1] Fenn D B, Sivo J N. Effect of inlet flow distortion on compressor stall and acceleration characteristics of a J65-B-3 turbojet engine[R]. NA-CA-RM-1955-E55F20.
- [2] 刘大响,叶培梁,胡骏,等.航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M].北京:航空工业出版社,2004:131-340.
LIU Daxiang, YE Peiliang, HU Jun, et al. Aero gas turbine stability design and assessment technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004:131-340. (in Chinese)
- [3] 王宝坤,林山,张帅,等.大涵道比涡扇发动机侧风试验方法研究[J].航空发动机,2020,46(1):70-74.
WANG Baokun, LIN Shan, ZHANG Shuai, et al. Study on crosswind test method of high bypass ratio turbofan[J]. Aeroengine, 2020, 46(1): 70-74. (in Chinese)
- [4] SAE. Inter total-pressure-distortion considerations for gas turbine engines: AIR1419C[S]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2017:28-35.
- [5] 国防科学技术工业委员会.航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机进口总压畸变评定指南:GJB/Z 64A-2004[S].北京:国防科学技术工业委员会,2004:1-19.
National Defense Science, Technology and Industry Commission. Aero-turbojet and turbofan engine inlet total-pressure-distortion assessment guidelines: GJB/Z 64A-2004[S]. Beijing: National Defense Science,

- Technology and Industry Commission, 2004: 1-19. (in Chinese)
- [6] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机进气压力畸变试验方法: GJB 9891-2020[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2021: 1-12.
- National Defense Science, Technology and Industry Commission. Test methods for aero-turbojet and turbofan engine inlet pressure-distortion: GJB 9891-2020[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2021: 1-12. (in Chinese)
- [7] 钟亚飞, 马宏伟, 郭君德, 等. 航空发动机进气总压畸变地面试验数据处理方法综述[J]. 航空发动机, 2021, 47(1): 72-85.
- ZHONG Yafei, MA Hongwei, GUO Junde, et al. Review of ground test data processing method of aeroengine inlet total pressure distortion[J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 72-85. (in Chinese)
- [8] 钟亚飞, 马宏伟, 郭君德, 等. 航空发动机进气总压畸变地面试验测试技术进展[J]. 航空发动机, 2020, 46(6): 62-77.
- ZHONG Yafei, MA Hongwei, GUO Junde, et al. Technological progress of ground test measurement of aeroengine inlet total pressure distortion [J]. Aeroengine, 2020, 46(6): 62-77. (in Chinese)
- [9] 黄熙君, 李怀娣, 丁雨秋, 等. 进气道畸变指标的分析和模拟[J]. 推进技术, 1986(2): 42-58.
- HUANG Xijun, LI Huaidi, DING Yuqiu, et al. Analysis and simulation of inlet distortion index[J]. Journal of Propulsion Technology, 1986(2): 42-58. (in Chinese)
- [10] 齐亦农, 赵刚, 李承辉. 某型发动机进气总压畸变试验稳态流场数值分析[J]. 航空发动机, 2003, 29(1): 9-13.
- QI Yinong, ZHAO Gang, LI Chenghui. Steady flow field numerical analysis on engine inlet total pressure distortion test [J]. Aeroengine, 2003, 29(1): 9-13. (in Chinese)
- [11] Schweikard W G. Test techniques instrumentation and data processing [R]. AGARD-LS-72.
- [12] Pecinka J, Bugajski G T, Kmoch P, et al. Jet engine inlet distortion screen and descriptor evaluation[J]. Acta Polytechnica, 2017, 57(1): 22-31.
- [13] Rademakers R P M, Bindl S, Niehuis R. Effects of flow distortions as they occur in duct inlets on the performance and stability of a jet engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(2): 022605.
- [14] Peinka J, Bugajski G T, Jílek A, et al. Small engine inlet distortion testing device [C]//International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015. Brno: IEEE, 2015: 1-6.
- [15] Zhang H D, Wu Y, Sun E B, et al. Experimental investigation on the correlation between total pressure and swirl distortions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2023, 145(11): 111007.
- (编辑: 刘 静)