发动机进气总压动态畸变流场测试及影响因素分析

王 勤 刘世官 李承辉 王振华
(中国航空工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:扼要介绍了发动机进气总压畸变流场的动态测试分析方法,并利用所获得的大量试验数据计算了进口畸变流场的总压脉动强度及其在流场中的周向分布,开展了动态测量方法及数据处理中滤波截止频率、取样分析时间等因素对总压脉动强度影响的研究,用统计方法分析了进口畸变流场的特点,进而总结了进气总压畸变试验动态流场数据的一些处理、分析技术。

关键词:动态压力 畸变流场 发动机 测量

Measurements of Dynamic Total Pressure Distortion for Engine Inlet and Analysis of Effective Factors

Wang Qin Liu Shiguan Li Chenghui Wang Zhenhua
(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: The measurements of total pressure and its data processing methods are described on the inlet dynamic distortion flow field. The total pressure fluctuation and its circumferential distribution are computed and the properties of time-varied total pressure are statistically analyzed in this paper. The effect of many factors, including measuring methods and cut-off filter frequency and number of samples, are discussed on the total pressure fluctuation. The techniques of data processing and analyzing are also summarized on the intet dynamic distortion flow field.

Key words: dynamic pressure; distortion flow field; engine; measurement

符号表

D	发动机进口直径,m
$P_{i\,cp}$	第 i 个动态总压测点的平均压力,Pa
ε_i	第 i 个动态总压测点的紊流度,%
ε_{CP}	总压脉动强度,%
N_1	发动机风扇换算转速百分比,%
N_2	发动机高压压气机换算转速百分比,%
M_{2m}	发动机进口测量气动界面平均马赫数
T	分析时间,s

1 引言

进气道/发动机相容性研究已成为现代发动机研制的一项重要内容。为了在飞机整个飞行包线内获得发动机的良好性能,要求进气道和发动机具有足够的相容性。足够的相容性是指进气道出口的流场品质始终应优于发动机可以容许的流场品质,流场品质用能代表流场畸变程度的某一畸变指数来评定,其中对影响流场品质的进气总压畸变的评定已被列为发动机设计定型的重要评定项目,并贯穿于整个推进系统研制过程的始终。

收稿日期:2001-12-27

第一作者简介:王勤,女,高级工程师,1965年出生,1993年毕业于西北工业大学,工学硕士,主要从事航空发动机动态参数测试研究。

在进气总压畸变的评定中,最重要的是获取总压畸变图谱和畸变指数,建立畸变指数与性能、稳定性裕度的关系,定量估计发动机剩余喘振裕度,从而进一步实现对发动机稳定性的评定。因此,在这项评定试验中,如何确定流场的畸变指数并实现对畸变指数的准确测量是至关重要的,而针对进口总压畸变流场选择合理的测量方法、测试系统和数据处理方法则是确保动态畸变测量取得成功的关键。国内在动态畸变流场的测量方法,尤其是数据处理方法上所积累的经验还很少,目前只能在借鉴国外经验的基础上加以总结和发展。英、美等国的进气总压畸变评定方法的主要优点是能获得比较精确的发动机进气总压畸变图谱(包括稳态和瞬态)及与压气机结构和动态响应密切相关的畸变指数,但试验费用昂贵。国内目前的进气总压畸变试验发展水平,尤其是分析水平与英、美等国的差距较大。而俄罗斯根据其畸变发生器的特点,对其测量系统进行了成功的简化,形成了一套成熟、可靠和完整的测试评定体系。

在某涡扇发动机与飞机的进气道/发动机相容性研究中,选择了根据飞机飞行包线的目标图谱研制的模拟板,在地面试车台进行了进气总压畸变试验。在试验中,对动态畸变流场采用了俄罗斯的测试及畸变指数计算方法,计算了进口畸变流场的总压脉动强度及其在流场中的周向分布,开展了测量位置、滤波截止频率、取样分析时间等因素对总压脉动强度影响的研究,用统计方法分析了进口总压畸变流场的特点,对进气总压畸变试验动态流场数据处理分析技术进行了总结。

2 测试方法及测试分析系统

2.1 测试方法

根据模拟板在高空台吹风试验中的测量截面(气动界面 AIP)位置,采用 6 支动态总压探针均匀分布在 $\bar{R}=0.9$ 处的环面上动态总压测量,在前几次畸变试验中,按进气道吹风试验的测量位置,将动态总压测量安排在距模拟板 $0.7D$。在后几次试验中稳态测量气动界面仍然保持不动,而动态总压测量与稳态测量改在同一气动界面上,距模拟板 $1D$,与模拟板高空台吹风试验相同,但动态测点分布与高空台吹风试验有所不同,其具体测点位置如图 1 所示。

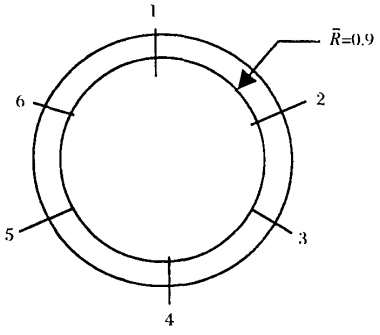

图 1 动态总压探针测点分布(逆航向)

2.2 测试分析系统

2.2.1 测试分析系统组成

动态参数测试分析系统由动态压力受感部(含动态压力传感器)、9355 信号调理器、VISION 高速数据采集分析系统、磁带机记录回放系统、数字电压表、示波器及转速表等组成,系统框图如图 2 所示。动态压力受感部将瞬态压力转变为电信号,经 9355 信号调理器放大后,由 VISION 高速数据采集系统及磁带机同时记录,并由 VISION 高速数据采集系统处理,得到 T 在 2,30s 时间内,在稳定状态下气动界面上的各测点、各滤波频率下的脉动压力均方根

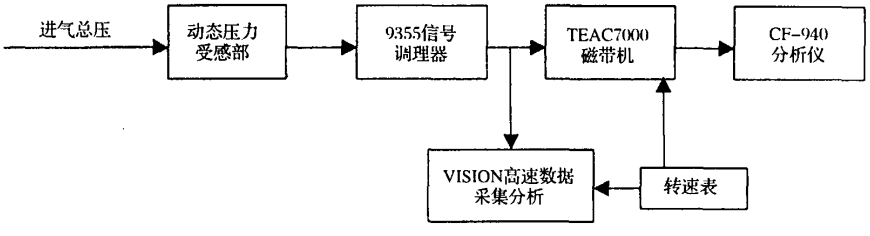

图 2 动态测试分析系统框图

值和平均值,并依此计算出总压脉动强度。

2.2.2 动态测试分析参数选择

动态数据测试前,首先要分析并确定测试对象的频率范围,从而合理地配置测试系统,以保证测试分析系统有足够的频率响应,对所分析信号的频率分量不会有明显的衰减。在某发动机进气总压畸变试验中,借鉴俄罗斯 AJI-31ΦH 发动机进气道/发动机试验经验,确定所关心的动态畸变流场频率范围应在 2~400Hz。

试验时,采用的传感器为 XCQ-062-25A 高频响动态绝对压力传感器,压力传压管道设计的自振频率为 5kHz 左右,因此,根据工程经验,这可以满足 1kHz 以下总压脉动强度的测量精度,9355 信号调理器滤波截止频率为 1kHz,稳态测试精度可达 0.2%。采样频率根据数字滤波器截止频率的不同,对数据分别选用了 2kS/s,5kS/s 进行了采集。计算总压脉动强度时,分析时间取 $T=30s$,同时为进一步考查 T 对总压脉动强度的影响,还采用了 $T=2s$ 进行了计算、分析和比较。

3 进气总压畸变流场总压脉动强度的计算

进气总压动态畸变指数用总压脉动强度来表示,即

$$\varepsilon_{CP}=\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}\varepsilon_i \tag{1}$$

式中:ε_i——$\bar{R}=0.9$ 处环面上各测点紊流度。

$$\varepsilon_i=\Delta P_{i\,RMS}/P_{i\,CP} \tag{2}$$

第 i 测点均方根值为

$$P_{i\,RMS}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(p_{ij}-p_{i\,CP})^2} \tag{3}$$

式中:n——分析时间 T 内的采样点数。

4 发动机进气总压畸变流场动态数据结果分析

以试验中使用的 2722#模拟板为例,动态畸变流场数据结果主要包括了发动机进口畸变流场总压脉动强度、总压脉动强度随换算转速的关系及其周向紊流度分布。动态数据处理时,选择了 400Hz 进行滤波,给出了数据结果。

4.1 2722#模拟板总压脉动强度

由于试验中没有模拟到高空台目标图谱试验状态,因此通过计算 2722#模拟板在各状态下的总压脉动强度,得到总压脉动强度随换算转速的变化趋势关系曲线,如图 3 所示。从图中可以看出,随 N_{1hs}的升高,总压脉动强度越来越大,并依此曲线估算出在模拟目标图谱试验状态 $N_{1hs}=1.0$ 时的总压脉动强度,见表 1。

表 1 2722#模拟板地面畸变试验总压脉动强度

状态		400(Hz)
N_{1hs}(%)	N_{2hs}(%)	ε_{CP}(%)
96.81	97.48	3.52
外推 $N_{1hs}=100.0$ 状态		4

4.2 2722#模拟板紊流度周向分布

2722#模拟板在各状态下的紊流度周向分布图如图 4 所示。为与模拟板形状进行更直接的对比,图 4 采用了极坐标形式,模拟板形状如图 5 所示。通过对图 4 与图 5 进行对比分析看出,按顺时针方向在 0°位置锯齿较大,紊流度最大,而在模拟板开孔、锯齿较小、相对堵塞较大的 120°左右位置,紊流度最小。

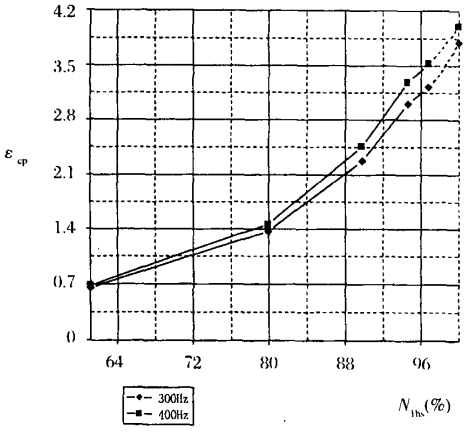

图 3 2722#板在 300,400Hz 滤波截止频率下 ε_{CP}随换算转速的关系曲线

图 4 中曲线由内向外分别为 M_C,换算转速 $N_{1hs}=61.1\%,79.9\%,89.8\%,94.6\%$,小加力和全加力时紊流度的周向分布。

5 进气总压畸变流场脉动压力的统计特性分析

为进一步考查总压畸变动态流场,在本次地面进气总压畸变试验中,以 2722#板在 $N_{1hs}=89.8\%$、$N_{2hs}=94.9\%$的稳定状态下,T 在 30s 内的数据为

例,获得了进气总压畸变流场脉动压力的概率密度函数和功率谱密度函数,从而分析了动态流场脉动压力的分布特点及主要频率成分,并判断其是否符合实际进气道出口流场脉动压力的分布特点。

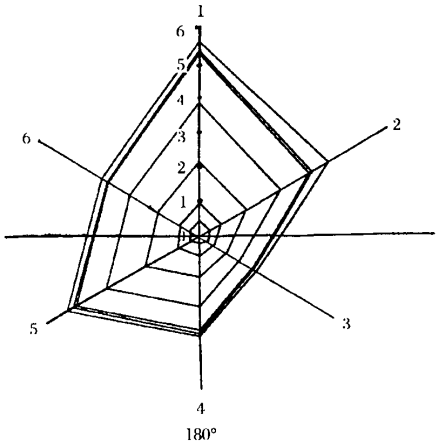

图 4 2722#板紊流度周向分布

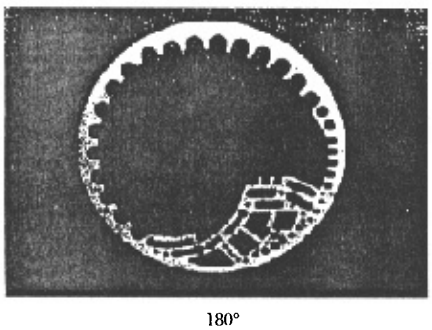

图 5 2722#模拟板

5.1 流场脉动压力的功率谱密度

功率谱密度分析可以反映流场中的主要频率成分,对总压脉动强度的计算有着直接影响。例如,滤波频率的选择和利用功率谱修正等对台架试验数据中不合理频率成分进行剔除。图 6 为流场中距板 1D 最大紊流度测点 1 处的功率谱密度。从图中可以看出,测量的流场中基本没有奇异的不合理频率成分存在,且 500Hz 以下的压力脉动频率成分所占能量较大。

5.2 流场脉动压力的概率密度函数

概率密度函数可以反映流场中脉动压力的幅值分布特征,根据国外的研究经验,飞机进气道出口流场中的脉动压力基本成正态分布,因此用概率密度函数可以考查进气总压畸变试验中发动机进口畸变流场的模拟情况。

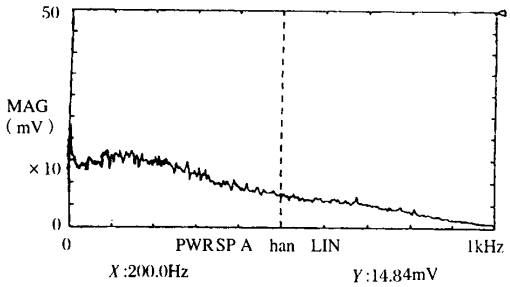

图 6 流场中测点 1 处的功率谱密度

图 7 和 8 分别为距板 1D 处紊流度最大位置测点 1、紊流度最小位置测点 3 的概率密度函数。从图中可以看出,两者基本满足正态分布,基本符合进气道出口流场脉动压力的分布特点,其区别是测点 1 处的概率密度函数比测点 3 处的扁且宽,这正说明测点 1 处的紊流度比测点 3 处的紊流度大,与紊流度的计算结果相吻合。

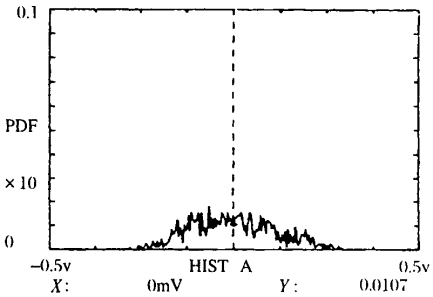

图 7 距板 1D 处测点 1 概率密度函数

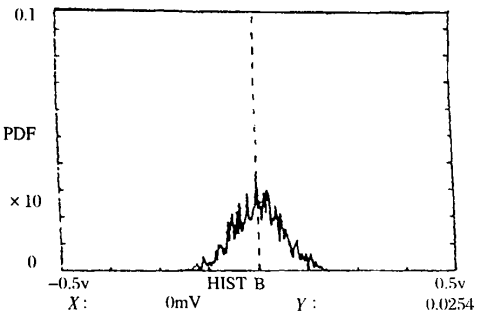

图 8 距板 1D 处测点 3 概率密度函数

图 9 为 0.7D 时测点 1 的概率密度函数。从图中可以看出,脉动压力的幅值分布对正态分布有较

大偏离,不符合进气道出口的实际流场特点,这主要是由动态测量界面距模拟板较近引起的。

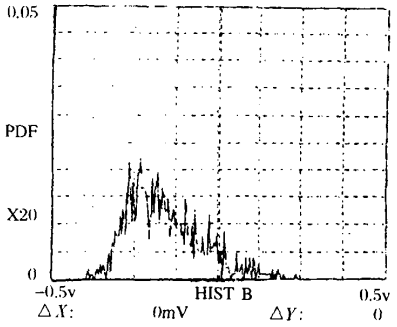

图9 0.7D 时测点1的概率密度函数

6 测量及数据处理方法对总压脉动强度的影响

6.1 动态测量位置对总压脉动强度的影响

在本次畸变试验中,模拟板距稳态测量气动界面1D,动态测量位置分别采用了距稳态测量气动界面0.3D和与稳态测量在同一气动界面上两种测量方案,并对两组数据进行了对比分析。总压脉动强度受此位置和换算转速的影响如图10所示。从图中可以看出,总压脉动强度在 $N_{1hs}=80\%$ 以下,两种位置的影响不大;而在换算转速80%以上,随着换算转速的升高,影响越来越大,在 $N_{1hs}=95.5\%$ 时,距稳态测量气动界面0.3D,比在同一气动界面相对大20%左右,但随着模拟板距发动机进口测量气动界面距离越远,这种影响将越小。

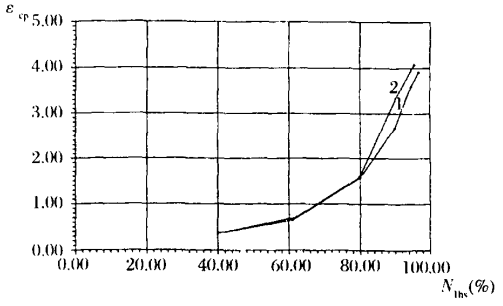

图10 总压脉动强度受不同位置和换算转速的影响

图10中曲线1为与稳态测量在同一气动界面上,曲线2为距稳态测量气动界面0.3D。

6.2 测点布置对总压脉动强度的影响

动态受感部的测点布置对总压脉动强度的计算有重要影响,测点如何分布应建立在对进气总压畸变流场的研究基础之上。因为此次进气总压畸变试验所用模拟板模拟的基本是已有的俄罗斯飞机进气道的出口流场,所以依照进气道出口流场的特点,本次测量采用了俄罗斯的测点分布形式。

模拟板高空台吹风试验数据可说明测点布置对总压脉动强度的影响。为了进行比较,用与高空台吹风试验相同的截止频率300Hz又对数据进行了滤波,给出了总压脉动强度的对比,见表2。从表中可以看出,地面模拟高空台换算转速下的总压脉动强度比高空台吹风试验总压脉动强度偏大。分析原因,其测点布置为主要因素,模拟板高空台吹风试验中在 $\bar{R}=0.9$ 和 $\bar{R}=0.6115$ 处分别均布四点动态总压,由于周边紊流度较大,而越靠近中心主流区紊流度将明显减小,这样由于 $\bar{R}=0.6115$ 处的四点动态总压参与平均,而 $\bar{R}=0.9$ 处测点又较少,因此其总压脉动强度测量值比 $\bar{R}=0.9$ 且均布六点动态总压的测量值要小。

表2 相同滤波、两种试验条件下总压脉动强度对比

板号	高空台吹风试验状态 M_{2m}	地面模拟高空台 N_{1hs}	高空台吹风 ε_{CP} (300Hz)	地面模拟试验 ε_{CP} (300Hz)
2722#	—	96.81%	—	(实测)3.22%
	0.621	100%	1.63%	(外推)3.5%

6.3 测量系统的动态响应对总压脉动强度的影响

在动态参数测量中,由于动态测量系统响应在所需频率范围内的幅频特性不具一致性或有一定程度的衰减,从而给动态测量带来误差,因此对动态测量系统应进行动态校准,以便在数据分析处理时进行修正。例如,共振管和半无限长管测压系统的幅频特性在可用频率范围内都存在幅值衰减,且衰减程度不同,因此用这两套系统进行测量所获数据如不进行修正必然带来较大的误差。

6.4 滤波截止频率对总压脉动强度的影响

通过对进气总压畸变流场脉动压力数据采用200,250,500,1000Hz等多种滤波截止频率进行滤波,研究了滤波截止频率对总压脉动强度的影响,从而对滤波截止频率的选择起了一定的指导作用。滤波截止频率的选择对确定模拟板产生的总压脉动强度 ε_{CP} 有较大的影响。

以2722#板为例,图11清楚地描绘了滤波截止频率在不同 N_{1hs} 转速下对总压脉动强度的影响。

从图中可以看出,在换算转速为80%以上动态畸变流场中,滤波截止频率选在500Hz以下时对总压脉动强度影响较大,而当选在500Hz以上时则较小,这一结果与流场中存在的主要频率成分相符。

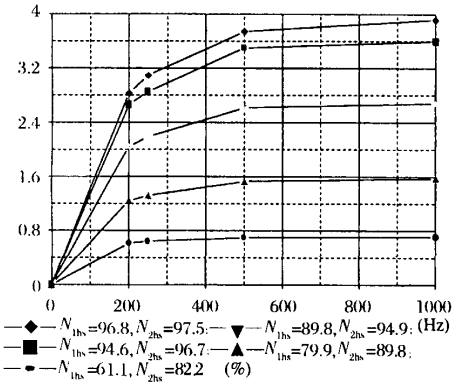

图11 滤波截止频率在不同 N_{1hs} 下对总压脉动强度的影响

6.5 试验状态对总压脉动强度的影响

以2722#板为例,如图3所示,发动机进口AIP处的总压脉动强度随发动机进口 M_{2m} 的升高而升高,发动机换算转速越高,M_{2m} 也越高,总压脉动强度随之升高,因此为了对发动机进行稳定性评定,获得在试验要求状态下的总压脉动强度,应对发动机进口流量或平均静压实现准确测量,得到较准确的 M_{2m} 值。

6.6 干扰频率成分对总压脉动强度的影响

在地面进气畸变试验中,往往由于地面台架振动等因素的影响,在所测的进口流场脉动压力数据中混入干扰频率占有一定能量、但在实际飞行中又不存在,需在数据处理时,利用功率谱分析将其剔除,以修正功率谱,实现总压脉动强度的计算,否则将增大总压脉动强度计算的误差。

6.7 分析时间 T 对总压脉动强度的影响

进口流场的脉动压力具有随机性,因此为了计算总压脉动强度和统计分析,数据处理中应保证在发动机稳定状态有一定的数据长度,即数据量,来减小随机误差,数据量一般应在几十K以上,在一定的采集速率下,T 就是对数据量的保证。以试验中2722#模拟板在1kHz滤波截止频率下的进口脉动压力数据为例,表3分别给出了 T 为2,30s时几个状态下的总压脉动强度,说明用 $T=2$s 的数据量计算出的总压脉动强度与用 $T=30$s 时误差很小,可以满足总压脉动强度的计算精度,因此,为简化数据处理,计算总压脉动强度时可以用 $T=2$s 来代替 $T=30$s,从而简化数据处理量。

表3 T 为2,30s时几个状态下的总压脉动强度

N_{1hs} (%)	N_{2hs} (%)	ε_{CP}(%) $T=2$s	$T=30$s	2s相对30s小
56.99	80.41	0.538	0.540	0.37
61.37	81.82	0.695	0.706	0.15
80.60	90.01	1.60	1.62	0.12
90.68	93.98	3.03	3.07	0.13

7 结论

通过对此次畸变试验动态畸变流场数据的分析和研究,得出以下几点基本结论:

(1) 测定的总压脉动强度的大小受多种因素的影响,其中动态测量位置、测点分布及滤波截止频率起主要作用,其选择是否合适将直接影响总压脉动强度的计算和对发动机稳定裕度的评估。

(2) 总压脉动强度随 N_{1hs} 换算转速 M_{2m} 的升高而升高,动态测量位置随 N_{1hs} 换算转速 M_{2m} 的升高而对测定的总压脉动强度影响越来越大,但随离模拟板位置的增加,这种影响将减小。

(3) 动态测试系统,在一定的精度范围内,各测量通道应具有一致的幅频特性,测试系统本身对测量信号的衰减程度对测试结果有很大的影响。

(4) 统计分析表明,距模拟板1D处畸变流场的脉动压力频率成分主要在500Hz以下,并呈正态分布,基本满足飞机进气道出口流场脉动压力随机分布的特点。

(5) 数据处理分析时,取样分析时间可用2s代替30s,简化数据处理量。

(6) 进气总压畸变试验应实现对进口流量的准确测量,以得到进口平均马赫数 M_{2m} 的准确值,建立 M_{2m} 与总压脉动强度之间的相互关系,从而准确确定目标图谱试验状态下的总压脉动强度。

参考文献(略)