

文章编号: 1000-8055(2003) 01-0065-05

某型涡扇发动机进气畸变压力脉动分析

程邦勤, 陶增元, 李 军
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 由可移动插板式畸变发生器产生进气总压畸变流场, 采用幅值域和频域分析的方法对畸变流场的脉动压力进行统计分析, 得到了进气总压畸变流场中气流压力脉动的特征, 以及其与稳态总压畸变图谱的关系。进一步认识了压力脉动的特性。

关键词: 航空、航天推进系统; 总压畸变; 统计分析; 压力脉动; 紊流

中图分类号: V 231. 3 文献标识码: A

Pulsatile Analysis of Inlet Pressure Distortion in Turbofan Engine

CHENG Bang-qin, TAO Zeng-yuan, LI Jun
(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The distorted flow field is generated by a distortion generator with a moveable sliding board in the experiment. Statistical analysis of pulsatile pressure is presented based on methods of amplitude domain, time domain and frequency domain. The characteristics of pulsatile pressure in inlet distorted flow field are obtained. And the relations of pulsatile pressure and steady total pressure distortion charts and maximum instantaneous pressure distortion charts are also researched.

Key words: aerospace propulsion; pressure distortion; statistical analysis; pressure pulsation; turbulence

1 引言

气流的压力脉动是由于气流不规则的紊流运动产生的, 紊流的特征在于它具有随机性质的涡旋结构, 以及这些涡旋在流体中的随机运动, 从而引起流速、压力的脉动。为认识紊流场的内部特征, 在由可移动插板式畸变发生器对某型涡扇发动机进口产生总压畸变试验^[1]的基础上, 采用幅值域和频域分析方法对畸变流场的脉动压力进行统计分析^[2], 得到了进气总压畸变流场中气流压力脉动的特征, 及其与稳态总压畸变图谱的关系。流场主要分为未被扰流板遮蔽的高压区、扰流板

完全遮蔽的低压区以及高低压、过渡区。图 1 为某型涡扇发动机进口流场畸变的测量截面, 其中阴影部分为扰流板遮挡部分, A, B, C, D, E 和 F 为测量靶, 带括号的数字为动态压力测量点。其中稳态测量的截止频率为 400 Hz, 动态测量为 10 kHz。

2 压力脉动特性分析

2.1 脉动压力的概率密度函数分析

对杂乱无章的压力脉动和速度脉动进行足够长的压力或速度数据平均, 平均值都是稳定不变的, 在均匀的紊流中, 各点统计平均值都相同。瞬

时压力或流速的分布完全符合统计规律,基本上都可用高斯正态分布予以概括^[2],但是在靠近固体壁面或流体中障碍物壁面附近所形成的平均流速的梯度,有可能造成气流的分离,产生新的涡旋,使压力脉动不一定符合正态分布,而是可能会偏向一边。

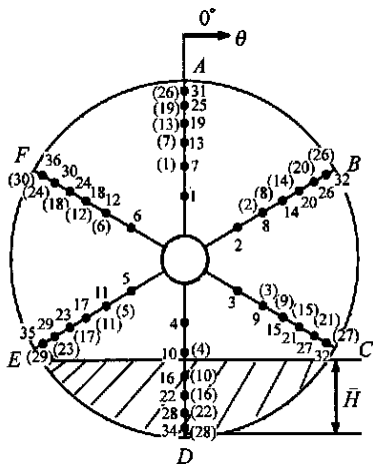


图 1 发动机进口截面总压测量点(逆航向)
Fig. 1 Total pressure measure points on inlet section in Engine

本文对试验中发动机的四个换算转速($\bar{n}_{l,cor}$ = 80% , 85% , 90% 和 95%) 在扰流板处于最大位置(即发动机失稳临界状态)时的压力脉动数据进行了幅值概率密度估计, 获得了各测点的概率密度分布函数。

从概率密度函数的特点看, 其变化可分为四种类型, 即:

- (1) 概率密度的峰值位于中间, 接近于正态分布。
- (2) 峰值左偏。
- (3) 峰值右偏。
- (4) 峰值不明显, 呈扁平状, 或中间略凹。

但又有特别之处:

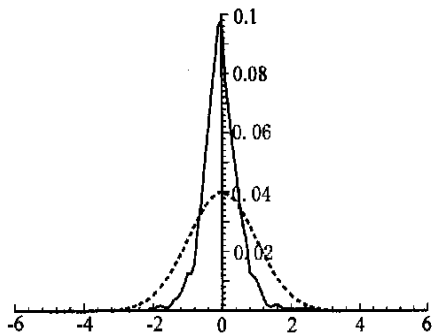
① 具有关于“A ”“D ”靶左右分布对称的特性, 即“B ”靶和“F ”靶、“C ”靶和“E ”靶, 概率分布近似于一致, 峰值偏转方向也一致。

② 幅值变化均是内环到外环, 逐渐增大然后减小。

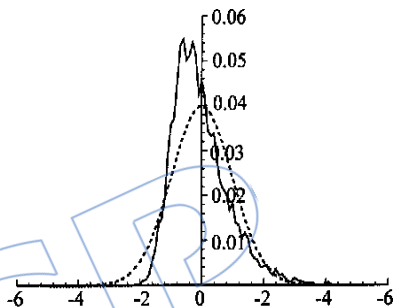
③ “A ”靶所在的主流区(高压区) 正态分布较明显, “D ”靶基本上近似于正态分布, 幅值均较小。

限于文章的篇幅, 本文仅选取了 $\bar{n}_{l,cor}$ = 95% , H_{α} = 42.9% 状态的四个典型点的概率密度分布

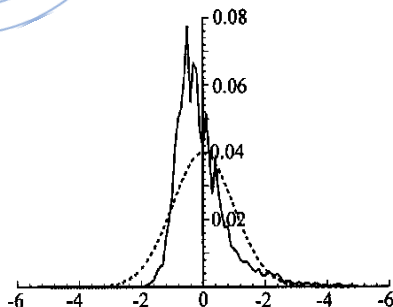
如图 2 所示。其中“A ”靶第 7 点和“D ”第 16 点分别反映高压区和完全遮蔽的低压区, 由于“B ”靶



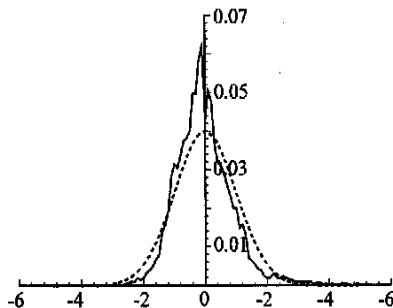
(a) “A”靶第 7 点



(b) “B”靶第 26 点



(c) “E”靶第 29 点



(d) “D”靶第 16 点

图 2 幅值概率密度估计

Fig. 2 Amplitude probability density estimate

与“F”靶以及“C”靶与“E”靶左右对称分布, 故而分别取了一点反映过渡区情形。

图 2 中实线为脉动压力的概率分布, 虚线为标准正态分布。

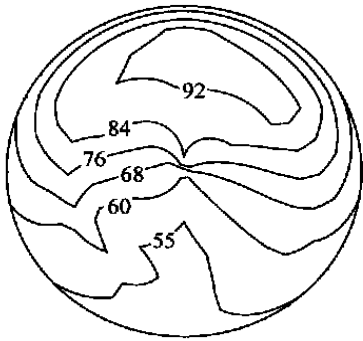


图 3 临界状态总压等值线图
Fig.3 Total pressure isoline at critical point

图 3 所示为同一状态下的总压畸变图谱, 将各测点位置及其特点分别与相应的稳态总压畸变图谱对照, 可得到以下规律:

在气流中上部分的高压区和其它稳态总压梯度较小的区域, 脉动幅值逐渐减小, 具有较好的随机性, 其处的压力脉动基本为各向同性。其幅值特性就如图 2(a) 所示, 呈现正态分布。从高压区向低压区过渡时, 由于扰流板引起的气流横向流动, 使气流总压和速度降低, 稳态总压和速度梯度逐渐增大, 开始出现分离的涡旋, 这时涡旋的产生是间断的, 有一定的方向, 这些位置的紊流流动就不是杂乱无章的随机状态, 因此其分布就偏向一侧, 远离了正态分布, 脉动幅值较大, 如图 2(b) 和 (c); 再继续向低压区过渡, 气流完全分离, 又成为近乎均匀的紊流, 其幅值特性又接近于正态分布, 但脉动幅值也减小了, 如图 2(d) 所示。

2.2 脉动压力的相关分析

相关分析主要包括: 自相关分析和互相关分析。相关分析主要是用于判定数据的相关性。

对于空间相关尺度 λ 有:

$$\lambda = \frac{\int R(x) dx}{R(0)} = \int \rho(x) dx$$

而对时间相关尺度有:

$$\tau = \frac{\int R(t) dt}{R(0)} = \int \rho(t) dt$$

如果气流的平均速度为 $\bar{v}$, 则 $\lambda = \bar{v}\tau$, 所以两者是等同的。紊流的积分尺度是紊流涡旋平均大小的度量。

对于具有各向同性紊流, 自相关系数函数可

以近似用指数函数表示^[2]。对于空间相关:

$$\rho(t) = e^{-x/\lambda}$$

而对于时间相关, 则可以表示为:

$$\rho(t) = \frac{R(t)}{R(0)} = e^{-t/\tau}$$

因此, 对于各向同性紊流, 如果确定了积分尺度, 则相关系数函数也可以确定。

本次试验在各换算转速状态所作的自相关系数曲线与涡喷发动机基本相同, 现将换算转速 $\bar{n}_{l,cr} = 95\%$, 插板相对深度 $H_{cr} = 42.9\%$ 状态下, 某一时刻各测点自相关函数系数按其在不同位置 θ (角度, 自“A”靶开始, 以下同) 的曲线如图 4 所示。

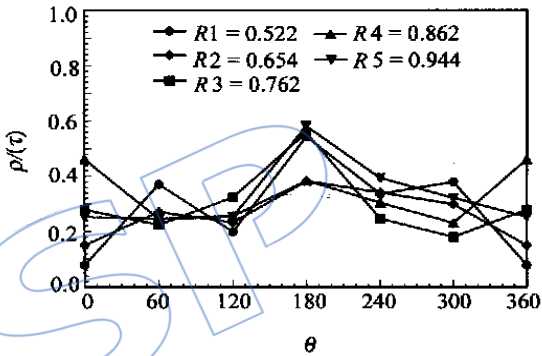


图 4 $t = 10\text{ ms}$ 时各测点自相关系数
Fig.4 Self-correlation coefficient when $t = 10\text{ ms}$

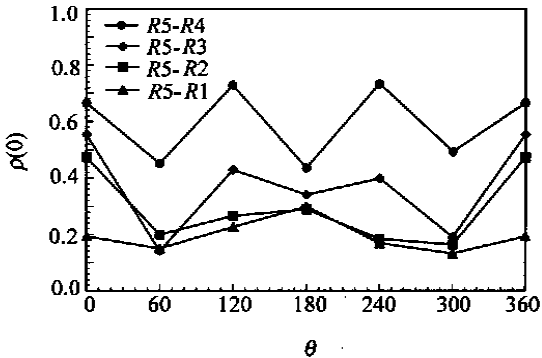


图 5 互相关系数沿周向分布
Fig.5 Circumferential distribution of cross coherence coefficient

从图中可以得知: (1) 自相关系数近似关于 180° 对称, 即“B”与“F”靶, “C”与“E”靶, 这说明流场可能关于“A”“D”靶左右近似对称分布。(2) 180° “D”靶处, 自相关性普遍较好, 这是因为“D”靶大部分区域一直处于遮蔽区, 紊流场较均匀, 故其自相关性较好。

试验数据所获得互相关函数曲线,以 $t=0$ 时刻为代表,作整个测量面上的互相关系数曲线如图 5 和图 6 所示。以最外环为基础,每两个测点间的相关性大小受距离的影响程度,曲线表明,随测点间距离的增大,相关性逐渐减小。

可知相隔较近的测点互相关系数偏大,说明各测点不是相互独立的,而是存在较大的相关性。

图 5 为互相关系数与间距的关系曲线。

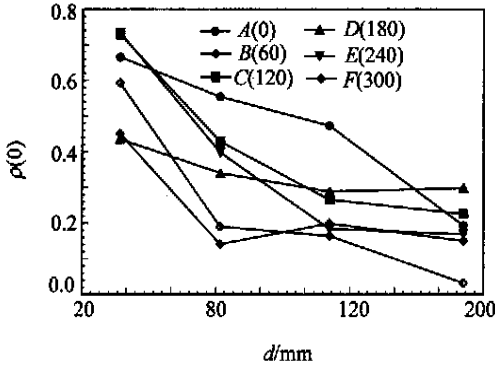


图 6 互相关系数与间距的关系

Fig. 6 Relation between cross coherence coefficient and distance

图 6 为互相关系数沿周向分布曲线。从图不难得到以下规律:

- (1) 相关性受距离的影响较大,相距越近,相关性越大。
- (2) 在压力梯度大的地方,相关性较大,这主要是因为压力梯度大的地方,形成气流涡旋较大的缘故,而在压力梯度小的地方,相关性则较小。
- (3) 相关系数有近似关于“A ”“D ”靶左右对称分布的特点。

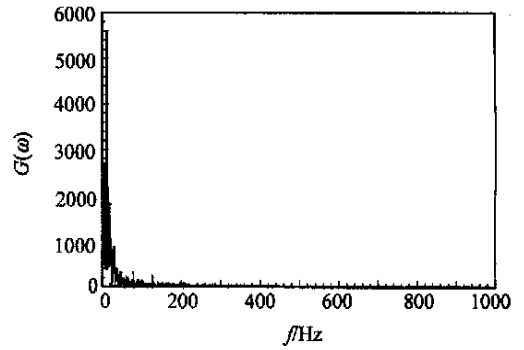
以上的分析从相关性的角度说明了气流流动情况的特征,沿靠近壁面的周边处,分布着较大尺寸的涡旋,因此其自相关函数也与主流区明显不同。

2.3 脉动压力的频域分析

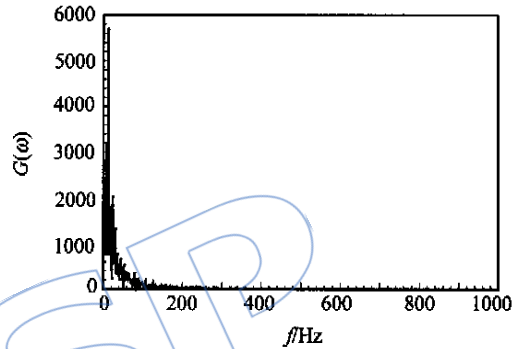
脉动压力数据的频域分析主要包括:功率谱密度函数分析和相干分析。

图 7 给出了试验在 $\bar{u}_{i,cor} = 95\%$, $\bar{H}_{cr} = 42.9\%$ 状态“A ”“B ”,“C ”,“D ”靶(“E ”与“C ”,“F ”与“B ”具有相似性)外环测点的脉动压力功率谱密度 $G(\omega)$ 随频率变化曲线。考查实际功率谱密度曲线可知,大部分测点的功率谱密度曲线的变化规律能基本满足式:

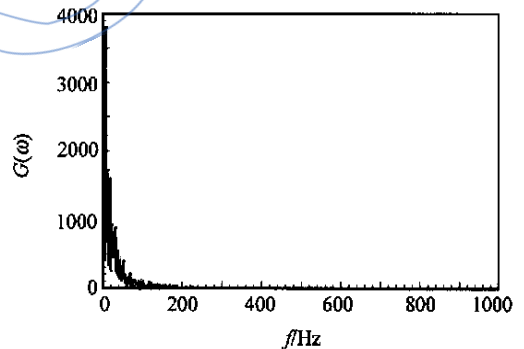
$$G(\omega) = \frac{\sigma}{\pi} \cdot \frac{1/\tau}{1/\tau^2 + \omega^2}$$



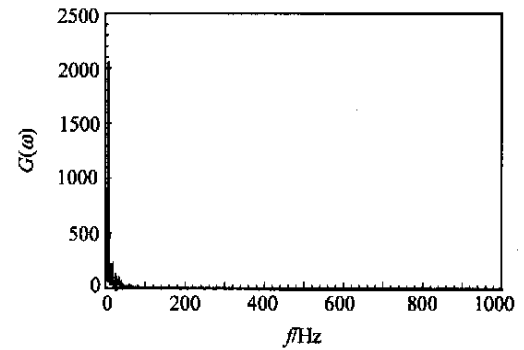
(a) “A”靶第 25 点



(b) “B”靶第 26 点



(c) “C”靶第 27 点



(d) “D”靶第 28 点

图 7 功率谱密度估计

Fig. 7 Power spectrum density estimate

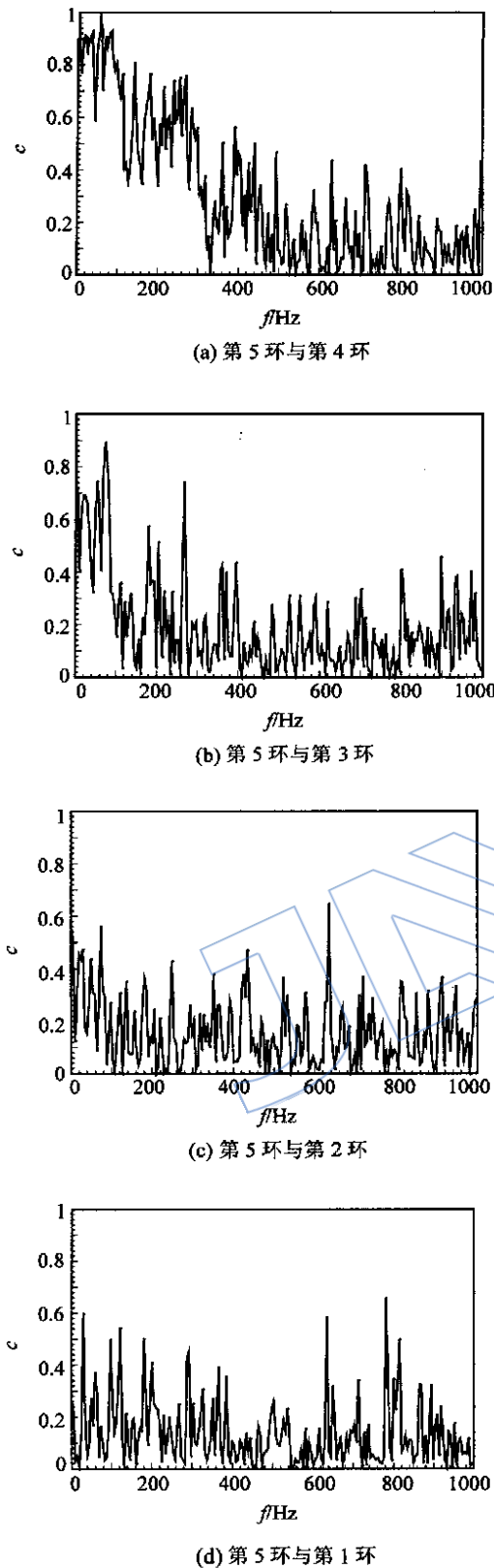


图 8 “A”靶互相干分析

Fig. 8 Cross Coherence Analysis to Harrow "A"

其特点是: 它们的曲线形状都基本相似, 且能量都主要集中在低频部分。

通过压力脉动的互相干分析, 可反应两测点之间主要在哪些频率成份上存在较大的相关性。图 8 是所选 $\bar{n}_i, c_{\alpha} = 95\%, H_{\alpha} = 42.9\%$ 状态几个测点之间的相干分析图。以 “A”靶(0°)为例, 以最外一环即第 5 环的点为标准, 分别与第 4, 3, 2, 1 环的点进行相干分析, 如图 8(a~d) 所示。其中: c 为互相干系数。

由图可知, 相邻两点间的相干主要集中在低频部分, 越靠近壁面的相邻测点, 低频相关量越大, 但随着两测点间的距离不断加大, 低频和高频的相关性都逐渐减小。

3 结 论

通过上述对压力脉动的统计分析, 无论是幅值域还是频域, 都得到了相当一致的结果。

(1) 高压区气流没有分离, 总压梯度小, 速度均匀, 紊流度较小, 幅值概率符合正态分布; 低压区气流完全分离, 速度也较均匀, 紊流度较高压区大, 幅值概率基本符合正态分布; 过渡区气流分离严重, 总压梯度较大, 速度不均匀, 紊流度较大, 幅值概率密度偏离正态分布, 幅值较大。

(2) 各测点之间不是独立而是相关的, 相关性随距离的增大而减小。

(3) 两测点之间的相干性主要集中在低频, 并且随距离的增大而减小。

(4) 具有连续频谱, 并且能量主要集中在低频段。

参考文献:

[1] 程邦勤. 某涡喷与涡扇发动机进气总压畸变实验研究与数值模拟[D]. 西安: 空军工程大学, 2000.

[2] 欣茨 J O, 黄永念, 颜大春. 湍流[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[3] Bendat J S, Picirol A G. 随机数据分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.

[4] 施阳, 李俊. MATLAB 语言工具箱—TOOLBOX 实用指南[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.