

发动机进气动态畸变测量系统与数据处理

梁德旺 张世英

摘 要

本文介绍了动态畸变测量系统及其数据处理方法。进一步提高采样频率后可将该系统用于飞机和发动机的研究中。

主题词: 发动机进气道, 流场畸变, 测量方法, 数据统计

一、引 言

进气道出口流场畸变对发动机的性能和工作稳定性的影响是新机研制过程中较难解决的问题之一。早期遇到的主要是稳态畸变问题。随着飞机飞行速度和对机动性要求的提高以及涡扇发动机的广泛应用, 动态畸变问题在发动机和进气道的匹配中愈加突出。一般动态畸变可由瞬时畸变代表。在上述情况下, 各种扰动源产生的发动机进口压力脉动可以造成一种与稳态畸变不同, 数值却大得多的瞬时畸变。这样, 即便稳态畸变小于引起喘振的临界值, 瞬时畸变峰值却可能超过了临界值, 而导致发动机喘振。因此研究动态畸变对发动机的性能和工作稳定性的影响时, 要求确定瞬时畸变的峰值。最早用来确定瞬时畸变峰值的方法是测量时变压力数据, 计算瞬时畸变并找出其最大值(为了区别于估算方法, 该方法又称为确定性方法)。

由于测量瞬时畸变峰值的成本较高, 周期也较长, 近十几年来, 又提出了用统计方法去估算最大瞬时畸变值。虽然统计法可以缓和费用高, 周期长的矛盾, 但是统计法的估算精度还没有达到较高的程度, 尚只能用于初步设计和早期研制中, 而在新飞机和发动机匹配考验的后期仍需用确定性方法来证实其相容性。

本文对动态畸变测量和数据处理方法进行了介绍, 并以一个实例给出了动态测量系统测得的稳态畸变、紊流度分布和瞬时峰值畸变图谱、脉动压力的随机统计特性(幅值概率密度分布、自功谱、自相关函数、互功谱、互相关系数)和瞬时畸变的随机统计特性等。

二、动态畸变测量系统

图1为实验设备示意图。如图所示, 在一带有导流盆的 $\phi 150$ 毫米吸气管道中, 装有产生动态畸变流场的模拟板(图2), 在此后一定距离(150毫米)装有“米”字耙(图3)。稳态压力和脉动压力的测量分开进行, 而后在计算机中合成动态压力。脉动压力的测量系用 Kulite 高频响固体压阻式传感器, 其平衡管通大气。稳态压力的受感部采用普通稳压探头, 由导管将气体引到远处的扫描阀。图4则为动态畸变测量系统的框图。

1. 脉动压力测量

24个动态传感器测得的脉动压力信号经放大, 低通滤波后输入A/D接口。接口的采样

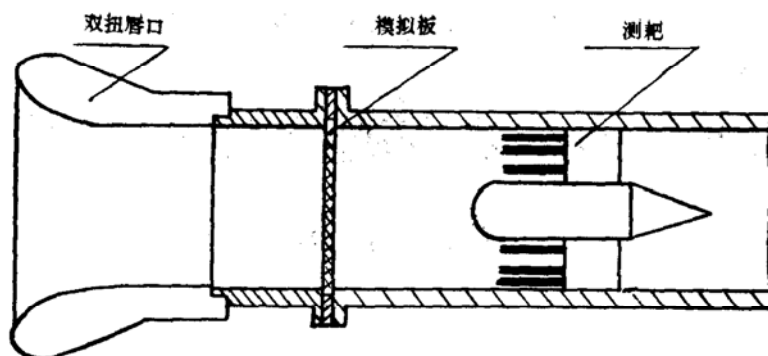


图1 实验装置

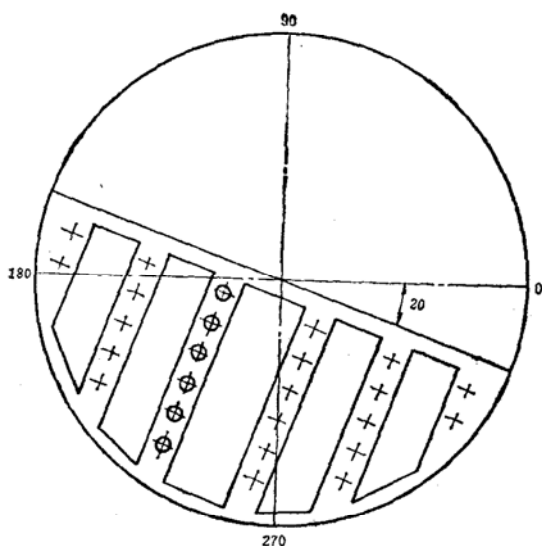


图2 模拟板

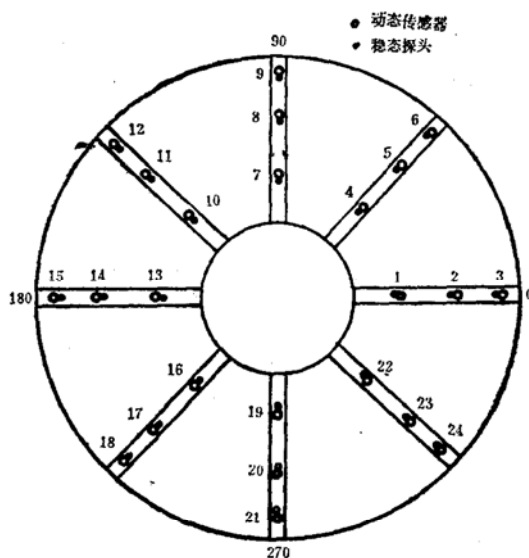


图3 测靶示意图

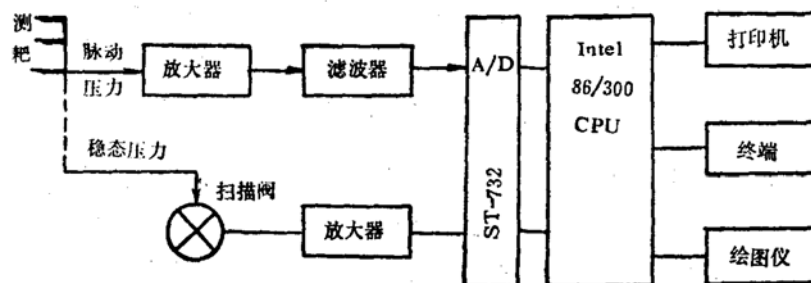


图4 动态测量系统框图

频率 f ，为400次扫描/秒（信号的低通滤波截止频率 f_c 为100赫）。接口是顺序扫描工作方式，相邻通道间的采样间隔约为20微秒，因而一次扫描时间约为480微秒。采样时间长短可以任选，

本文所选采样时间为45秒。采集到的数据以二进制码直接存入计算机软盘，待实验后处理。

2. 稳态压力测量

稳态压力由扫描阀换成电讯号，放大后的电讯号直接输到A/D接口。

3. 测量精度评述

所用A/D板(ST-732)的转换器是12位。其采样精度为 $0.07\% \text{FSR} \pm \frac{1}{2} \text{LSB}$ 。测量脉动压力时，选量程为 ± 1.25 伏，测量稳态压力时，量程为 ± 5 伏。

动态测量系统的测量精度除了与采样精度、传感器的精度有关外，还与系统的信噪比有关。图4示动态测量系统通过采用屏蔽各通道信号，适当接地，干电池供桥压，增大信号放大倍数等措施来提高信噪比。在所测流场的平均紊流度为2%时，系统的信噪比约46分贝。

稳态压力测量中所用扫描阀的测量精度约为0.5%。此外，稳压测量中的噪声用数字滤波和其他措施来消除。

三、数据 处理

1. 稳态数据

由于所测压力本身的脉动和测量系统的噪声等原因，重复采集所获得的稳态压力数据在某一值附近摆动，并近似于正态分布。为了获得稳态的真值，本系统采用了非线性数字滤波的“排队取中值”法，即以50次/秒进行采样，采样时间为2秒。尔后，从大到小排队，取中间60点的平均值作为稳态真值。

2. 动态数据的预处理

Kulite动态传感器测得的是动态表压，减去时均量方可得到脉动压力。另外，传感器的零漂和周期大于测量时间的低频分量也会给脉动压力测量带来误差。因此需进行预处理^[4]。本文采用最小二乘法来消除这些项。

令 $\{u_n\} (n=1, 2, \dots, N)$ 为 h 间隔的数据采样值，假定用如下定义的式子拟合这些数据

$$\hat{u}_n = b_0 + b_1 nh \quad n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

经最小二乘法拟合可得：

$$b_0 = \frac{1}{N(N-1)} \left[2(2N+1) \sum_{n=1}^N u_n - 6 \sum_{n=1}^N nu_n \right] \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{6}{hN(N-1)(N+1)} \left[2 \sum_{n=1}^N nu_n - (N+1) \sum_{n=1}^N u_n \right] \quad (3)$$

于是可得脉动压力为

$$\Delta P_n = u_n - \hat{u}_n \quad n=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

另外，脉动压力服从随机分布规律，通常有

$$P(|\Delta P_n| > K \cdot P_{rms}) \approx 0 \quad (5)$$

其中 P_{rms} 为脉动压力 $\{\Delta P_n\} (n=1, 2, \dots, N)$ 的均方根值， P 为概率， K 为常数。然而，测量中由于多方面的原因可能出现个别点的采样值 ΔP_i 有

$$|\Delta P_i| \gg K \cdot P_{rms} \quad (6)$$

因此，预处理中还需进行极值修正。若有 $|\Delta P_i| \gg K \cdot P_{rms}$ ，则用修正值 $\Delta P'_i$ 代替 ΔP_i 。

$$\Delta P'_i = \begin{cases} (2\Delta P_{i-1} + \Delta P_{i-2})/3 & i \in (2, N) \\ 2(\Delta P_{i+1} + \Delta P_{i+2})/5 + \Delta P_i/5 & i = 1 \end{cases} \quad (7)$$

当脉动压力服从正态分布时, 取 $K = 4.5$ 。而当脉动压力为非正态分布时, 则根据具体分布确定 K 值, 如为常出现的对数正态分布时取 $K = 7$ 。

3. 数据处理

数据处理在计算机中以数字量的形式进行, 全部处理工作由软件程序来执行。本系统已有软件的功能为:

- (1) 计算各种稳态畸变指数 (K_θ , K_{RAD} , K_{A2} , K_{DM} , K_D , DC_{60} , DC_{90} , DC_{120} 等)
 - (2) 估计各测点脉动压力的均方根值。
 - (3) 计算瞬时畸变值, 找出峰值及出现峰值的时刻。
 - (4) 估计各测点脉动压力的幅值概率密度分布, 自功谱分布, 自相关函数 $R_{x(t)}$ 。
 - (5) 估计脉动压力间的互相关函数 $C_{xy(t)}$, 互相关系数 $C_{xy(t)}/X_{rms}/Y_{rms}$ 及互功谱分布。
 - (6) 估计瞬时畸变的幅值概率密度分布, 自功谱分布, 自相关函数。
 - (7) 在 X - Y 绘图仪上将实验结果绘出, 如稳态畸变图谱, 紊流度分布图谱, 最大瞬时畸变图谱, 概率密度分布曲线, 功谱分布曲线等。
- 处理时, 可根据需要将其中的一个或部分软件调用。

四、实 例

本测量系统的实测是在图 1 示吸气式风洞中进行的。畸变流场由安装在试验装置前段的模拟板产生(图 2)。从图 8-10 可见, 图 2 示模拟板产生的动态畸变的随机统计特征与进气道出口流场的随机统计特征相似。

由于篇幅的限制, 本文仅给出测得的部分结果。

1. 稳态畸变及紊流度分布

图 5、6 分别为动态测量系统测得的图 2 示模拟板后的稳态畸变图谱和紊流度分布图谱。图中 P_{tss} 为稳态总压, P_a 为大气压, P_{avss} 为整个测量面上的稳态平均总压, $\bar{T}_u$ 为平均紊流度 $\bar{T}_u = \bar{P}_{rms}/P_a$ 。

2. 峰值畸变

图 7 为畸变指数 K_{A2} 为峰值时的压力分布图谱。图中 P_i 为峰值时刻各测点的压力值, P_{av} 为该时刻测点压力的平均值, K_{A2av} 为瞬时畸变的时均值, $\sigma_{K_{A2}}$ 为瞬时畸变的均方根值, K_{A2max} 为畸变峰值。

3. 脉动压力的随机统计特性

图 8—10 给出了测点 20 处所测得的脉动压力的随机统计特性。图 8 为脉动压力的幅值概率密度分布, 经拟合优度法检验证实其基本服从正态分布。图 9、10 分别为自功谱分布和自相关函数 $R_{x(t)}/R_{x(0)}$ 。图中 P_{r00} 为概率密度, f 为频率, t 为延迟时间, 从图 8、9 可以看出, 所得结果与文献〔5〕给出的模拟量的结果相同。

图 11, 12 分别为测点 20, 21 处测得的脉动压力的互功谱和互相关系数 $C_{xy(t)}/X_{rms}/$

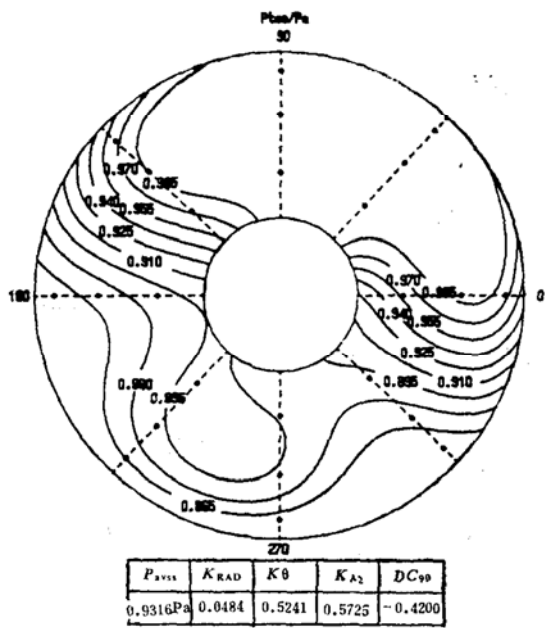


图5 稳态畸变图谱

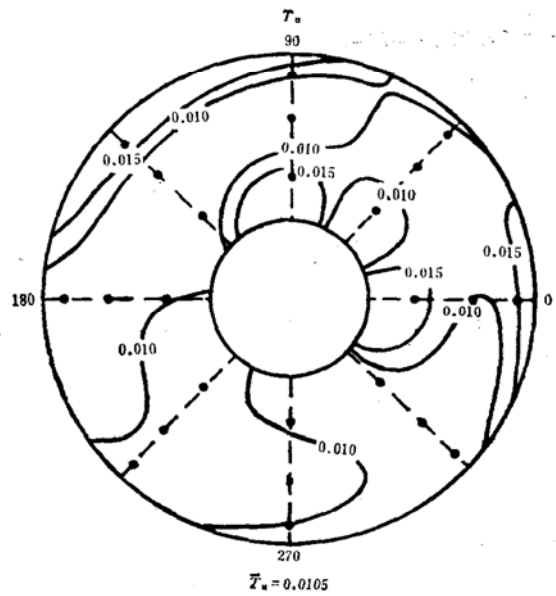


图6 紊流度分布图谱

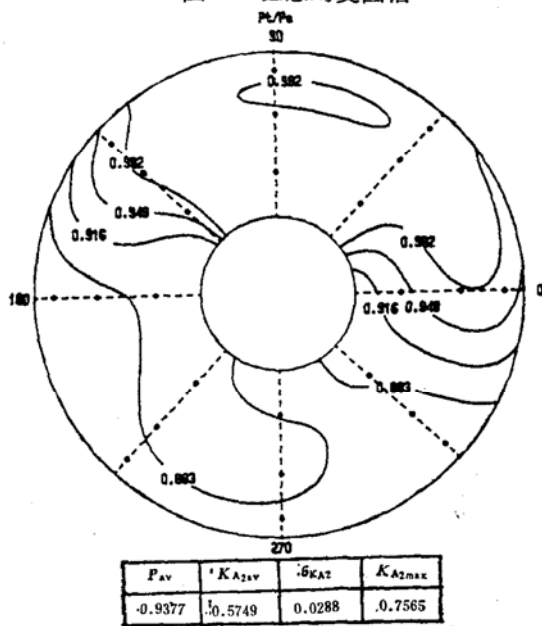


图7 峰值畸变时的压力分布图谱

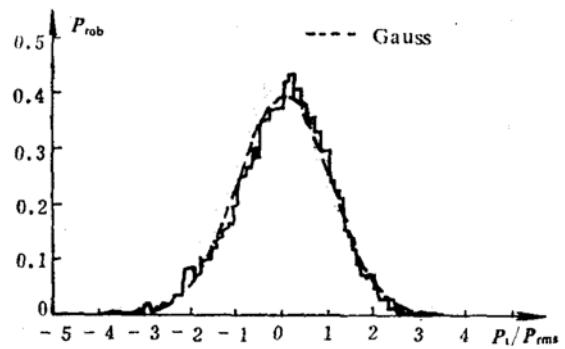


图8 脉动压力幅值概率密度分布

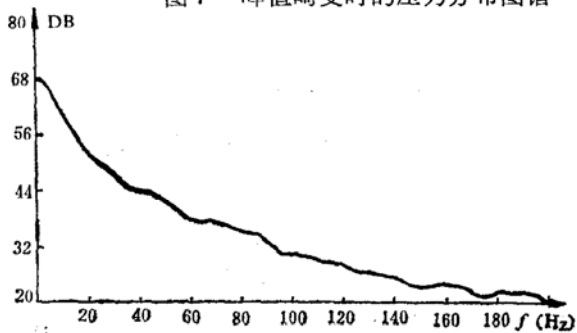


图9 脉动压力自功谱分布

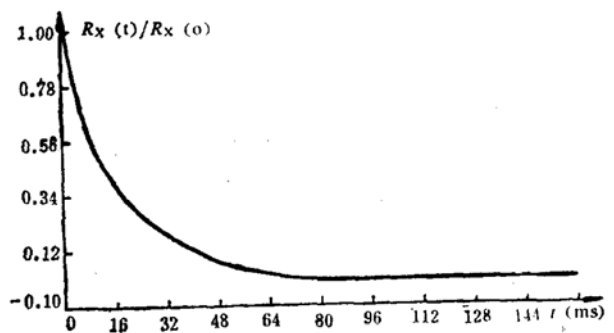


图10 脉动压力自相关函数

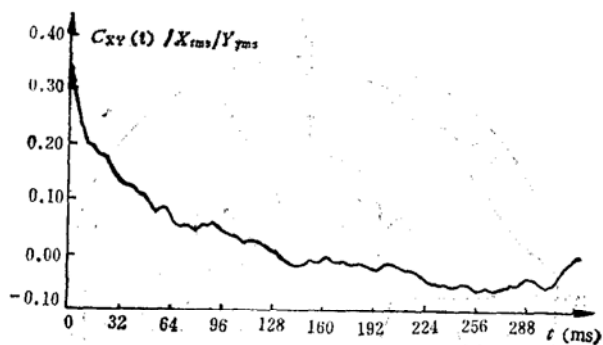


图11 脉动压力的互相关系数

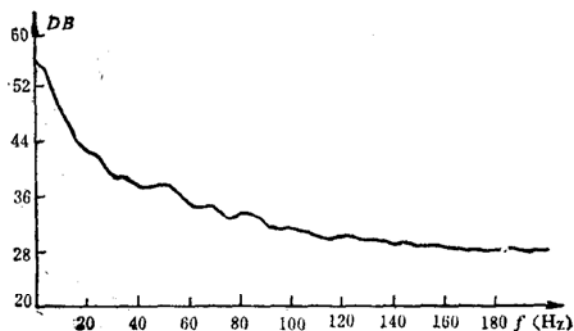


图12 脉动压力的互功谱分布

Y_{rms} 。图中 X 代表测点20处的脉动压力， Y 代表测点21处的脉动压力， X_{rms} ， Y_{rms} 则为相应的均方根值。

4. 瞬时畸变的随机统计特性

图13为瞬时畸变 K_{A2} 的幅值概率密度分布，经检验为正态分布。图中 K ， σ_K 分别为瞬时畸变和相应的均方根值。图14为瞬时畸变的功谱分布。比较图9，14可知，瞬时畸变的功谱分布与脉动压力的功谱分布相似。

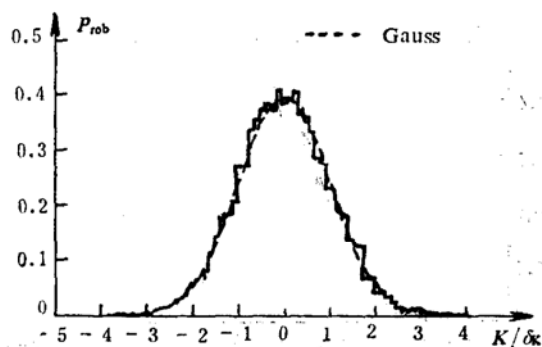


图13 瞬时畸变的幅值概率密度分布

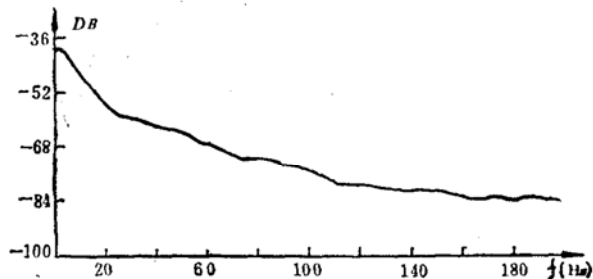


图14 瞬时畸变的自功谱分布

五、结 束 语

1. 通过本实验所建立的数据处理软件已能获得动态畸变实验的各种有关数据。
2. 动态数据的预处理对动态测量是不可缺少的。它不但可以去掉动态压力的时均量，而且还可以消除动态传感器的零漂影响。
3. 动态测量系统的测量精度与系统的信噪比有很大关系。提高系统信噪比是动态测量系统中棘手的问题之一。经验得知消除放大器之前的噪声源极其重要，因此屏蔽各通道信号，干电池供桥压，放大器前按组将各通道的屏蔽层相联可很好地消除系统的噪声。另外，计算机数字地，电源地，噪声地相互隔开有助于提高系统的信噪比。

4. 稳态测量中进行数字滤波(排队取中值)可消除系统噪声的影响,也可隔除压力本身脉动的影响。

5. 虽然本系统已能进行动态测量,但因受微机能力的限制,测量系统的采样频率尚只有400次/秒,如换用高采样速率的计算机,本文介绍的动态采集系统可望直接用于飞机和发动机匹配的实验研究中。

参 考 文 献

- (1) Czysz, P.: A Data System Concept for the Acquisition, Identification and Analysis of Critical Time Variant Pressure Parameter for Engine/Airframe Compatibility Programs, AIAA 70-594.
- (2) Costakis, w.: Analog Computer Instrumentation of Four Instantaneous Distortion Indices, NASA TMX-2993.
- (3) Burcham, F.W., Hughes, D.L., Holzman, J.K.: Steady-State and Dynamic Pressure Phenomena in the Propulsion System of an F-111A Airplane, NASA-TN-D-7328.
- (4) Robert K. Otnes and Loren Enochson: Digital Time Series Analysis, A Wiley-Interscience Publication, New York.
- (5) 张世英, 梁德旺: 模拟板的动态实验, 中国航空科技文献HJB860420.

were (related to) the residual styrene content in propellant, and styrene volatilization was considered as the major factor which effected propellant initial storage-mechanical properties. According to the experimental results, the conclusion could be made that the propellant formulas without styrene would remarkably improve the storage-mechanical properties.

Keywords: Hydroxy terminated polybutadiene propellant, Additive of solid propellant, Propellant aging, Mechanical test

BLACK POWDER AND MODERN CHEMICAL PROPELLANTS

Yao Guocui

Abstract

A discussion on the important roles of three main components of black powder in the development of the modern chemical propellants is presented in this paper. Black powder is the original composite propellant. The modern chemical propellants, either liquid or solid, are regarded as the further development and extension of black powder. The general trend of development of the modern composite propellants in future are briefly discussed.

Keywords: Black powder, Composite propellant, Oxygen poor rich-fuel propellant, Double-bass propellant, Review

EDITING AND DATA ANALYSIS SYSTEM FOR INLET DYNAMIC PRESSURE DISTORTION

Liang Dewang Zhang Shiyang

Abstract

Inlet/engine compatibility is very important for developing a new aircraft. A usual way of compatibility test is to measure the inlet instantaneous pressure distortions and find the peak value, and then to compare it with the allowable value of engine. In this paper, the editing and data analysis system for inlet dynamic pressure distortion is depicted. By increasing data sampling frequency, the described method might be useful in inlet/engine compatibility test.

Keywords: Engine inlet, Flow distortion, Measuring method, Data statistics