

瞬时畸变指数 IDC、IDR 最大值的预估与实验

何丽霞 张世英

(南京航空学院动力系, 南京, 210016)

PREDICTION AND EXPERIMENTS OF MAXIMUM INSTANTANEOUS DISTORTION INDEX OF IDC AND IDR

He Li-xia , Zhang Shi-ying

(Department of Power Engineering, Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing, 210016)

摘要 提出了一种预估流场畸变指数 IDC、IDR 瞬时最大值的方法。推导了周向畸变指数 IDC、径向畸变指数 IDR 的时均值与均方根值。还由实验测得了实际的最大瞬时畸变值。经过与预估值相比较给出了预估的精度。

关键词 瞬时最大畸变, IDC 和 IDR, 压力畸变预估

Abstract In this paper a method of predicting the maximum distortion IDC and IDR of the the outlet flow field of the intake is presented. As in the instantaneous IDC, the minimum value of the total pressure distributed along a ring is involved; it is not so easy to predict the maximum distortion in a certain duration directly. To overcome this difficulty it is proposed to find the maximum IDC at a location within a duration with the assumption of normal distribution of APD of distortion at first and then to compare the IDC's of different locations obtained to find the maximum IDC of the whole flow field. The predicted maximum IDC and IDR are compared with experimental results with satisfaction. Meanwhile, the formulas for calculating the time average and R.M.S. values of IDC and IDR are derived.

Key words instantaneous maximum distortion, IDC and IDR, prediction of maximum pressure distortion

国际上在 70 年代发展了一些动态畸变预估的方法⁽²⁾。其目的是拟在进气道方案设计的初期辅以一些简单的模拟实验数据, 就能预估其与发动机匹配的程度。这样就可很方便地在方案设计阶段修改进气道, 从而可避免复杂的反复测试和巨大耗资。文献〔1〕也是一种这样的预估方法, 其特点是省去文献〔3〕中的伪随机数, 能大大地节省机时。本文的内容是文献〔2〕方法的扩展, 使该方法不仅能用于预估美国 PW 公司所提出的畸变指数 K_{rad} , K_{θ} , K_{A2} , 而且也可以估计美国 GE 公司的畸变指数一类的 IDC、IDR。

1 最大瞬时畸变的预估

1.1 切向畸变 IDC 最大值预估方法的设想

1992 年 10 月 15 日收到

由文献〔4〕,第 i 圈稳态切向畸变表达式为 $IDC_i = (R_i - P_{i_{\min}}) / \bar{P}$ 。此处 R_i , \bar{P} 分别为第 i 圈及截面上总压平均值。 $P_{i_{\min}}$ 为 i 圈测点总压的最小值。由此可得相应瞬时 t_n 的 $IDC_i(t_n) = [R_i(t_n) - P_i(t_n)_{\min}] / \bar{P}(t_n)$ 。为了求得一段时间内最大瞬时 IDC, 就必须知道每一瞬间的 IDC(t_n), 也就是要事先知道每一瞬间的 $P_i(t_n)_{\min}$ 。在预估中这是很困难的。但可以设想先认定在一点(i, j)按 n 个时刻所得 IDC, 求其最大值后比较 i 圈中各不同点的按时间的 IDC, 最后求其最大值。根据这个原则可以先按文献〔2〕的方法在一确定点估算一段时间内的 IDC 的最大值, 而后同样估算其他各点的最大值, 经过比较各点值筛选出最后第 i 圈的最大瞬时切向畸变最大值。这样做只要事先求得各点上的 IDC _{ij} 的时均值和均方值, 求瞬时切向畸变最大的问题的就迎刃而解了。

1.2 瞬时切向畸变的时均值与均方值的计算

按文献〔4〕,第 (i, j) 点的瞬态 IDC _{ij} (t)为

$$IDC_{ij}(t) = [R_i(t) - P_{ij}(t)] / \bar{P}(t) \quad (1)$$

令 $P_{ij}(t) = P_{ijss} + \Delta P_{ij}$; $P_{ij}(t)$ 为 (i, j) 点瞬时压力, P_{ijss} 为稳态压力, ΔP_{ij} 为脉动压力。

$$IDC_{ij}(t) = \left[\left(\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{ijss} \right) + \left(\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij} - \Delta P_{ij} \right) \right] \frac{IJ}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ijss}} \times \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ijss}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ijss}} \right)^2 + \dots \right] \quad (2)$$

令

$$A = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I P_{ijss} - P_{ijss}; \quad B = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij} - \Delta P_{ij};$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ijss}}; \quad D = IJ / \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ijss}$$

忽略 ΔP_{ij} 的三阶及三阶以上无穷小, 得

$$IDC_{ij}(t) = (A + B)D(1 - C + C^2) \quad (3)$$

$$E(IDC_{ij}) = [E(A) - E(BC) + E(AC^2)]D \quad (4)$$

$$\sigma^2(IDC_{ij}) = D^2 [E(A^2) + E(B^2) - 4E(ABC) + 3E(A^2C^2)] - D^2 [E(A) - E(BC) + E(AC^2)]^2 \quad (5)$$

此处 $E(\quad)$, $\sigma^2(\quad)$ 分别为时均值及均方值算子。

1.3 瞬时径向畸变 IDR 的预估及时均值与均方值的计算

按文献〔4〕,第 i 圈的瞬时 IDR 为

$$IDR_i(t) = [\bar{P}(t) - R_i(t)] / \bar{P}(t) \tag{6}$$

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij}(t); \quad R_i(t) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{ij}(t).$$

将 $P_{ij}(t)$ 表示为 $P_{ij}(t) = P_{ij\ ss} + \Delta P_{ij}$ 代入公式 (6) 简化后可得

$$IDR_i(t) = 1 - \frac{IJ}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}} \left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss} + \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij} \right] \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}} + \left(\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}} \right)^2 + \dots \right] \tag{7}$$

令

$$D = \frac{IJ}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}}; \quad C = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}}; \quad M = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{ij\ ss}; \quad N = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}$$

忽略 ΔP_{ij} 的三阶及三阶以上无穷小, 可以得到

$$IDR_i(t) = 1 - D(M + N)(1 - C + C^2) \tag{8}$$

$$E[IDR_i(t)] = 1 - D[E(M) + E(MC^2) - E(NC)] \tag{9}$$

$$\sigma^2 [IDR_i(t)] = 1 - 2D[E(M) + E(MC^2) - E(NC)] + D^2 [E(M^2) + 3E(M^2 C^2) - 4E(MNC) + E(N^2)]^2 - \{1 - D[E(M) + E(MC^2) - E(NC)]\}^2 \tag{10}$$

IDR_i 仅为时间的函数, 在求得 $E[IDR_i(t)]$ 及 $\sigma^2 [IDR_i(t)]$ 以后即可按文献[2]方法估算其最大值。

1.4 最大瞬时 IDC 及 IDR 预估的实例

本文中的稳态总压和动态总压的测点分布系采取了 3 圈, 每圈 8 个测点, 点间相隔 45° , 这样就可以简单地按各圈所获预估最大瞬时值直接进行比较筛选。在本文的实例中采样时间为 $T = 8s$, 总压数据的截止频率为 $1\ 000Hz$, 采样频率 $f_s = 2\ 000Hz$ 。因而样本数为 $Tf_s = 16\ 000$ 。

按文献〔2〕, 忽略动压相关, 在已知 $IDG_{ij}(t)$, $IDR_i(t)$ 的时均值和均方值的条件下, 假设其概率分布均为正态, 则可根据正态分布表采用样本插值求最大值。即如已知概率 $F(IDC_{ij} < IDC_{max}) = 1 - \frac{1}{Tf_s}$, 可插值求出 $(I_{max} - \mu_1) / \sigma_1$, 此处 I_{max} 即为 IDC_{ij} 瞬时最大值。 μ_1, σ_1 分别为 (i, j) 处畸变指数的时均值与均方值。再求一圈的 IDC_i 最大值和整个测量面上的最大值。

预估结果可参见图中的 $IDC_{计算}$ 及 $IDR_{计算}$ 。

2 最大瞬时畸变 IDC、IDR 实测

最大瞬时畸变值的测量是在联接在吸气式管道系统的设备上进行的。气流由双纽线唇

口导气盆吸入直径 150mm 管道中, 经模拟板产生畸变流场, 改变吸气的程度可以改变测量截面上的平均 Ma 数和畸变, 该耙的测量位置距模拟板为一倍管道直径, 是固定的“米”字耙。在测点上装有紧靠的稳态总压探头和 Kulite XQ-80 型动态传感器各一个。

实验时, 稳态和动态总压分别进行测量。稳态由总压探头接到电子扫描阀进行采集, 动态压力的测量采用了高频响的固定压阻式 kulite 传感器; 先记录, 后回放, 通过 A/D 转换后采样。

实验时选用两台 SR-50 型 14 通道记录仪去记录 24 个测点的动压信号。同时在两台记录仪的某个通道上分别录入由某一脉冲电路发出的另一脉冲信号, 作为回放时每个通道采样时的触发信号, 这样就解决了各通道的同步问题。

压力信号截止频率为 1 000Hz, 取样频率为 2 000Hz。实验结果如图 1, 图 2 中 $IDC_{\text{实验}}$, $IDR_{\text{实验}}$ 。

3 结论

(1) 瞬时畸变表达式中具有压力最小值如 IDC , 也同样可按文献〔2〕预估其最大值。

(2) 在平均紊流度为 2.5% 时, 用 3 圈, 每圈 8 个测点, 数据样本为 16 000 个, 用本文方法进行 IDC 、 IDR 的预估, 精度可在 10% 左右。

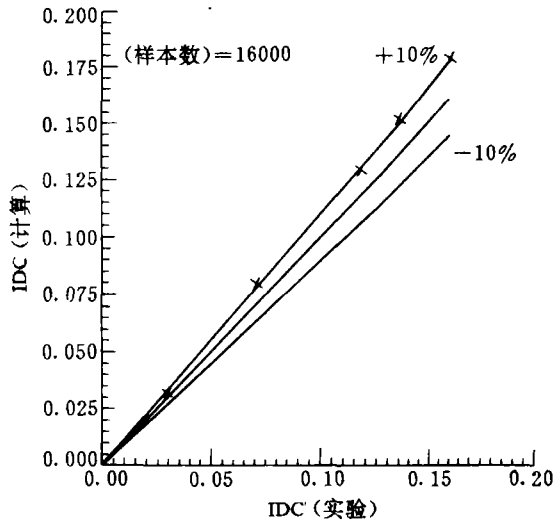


图 1

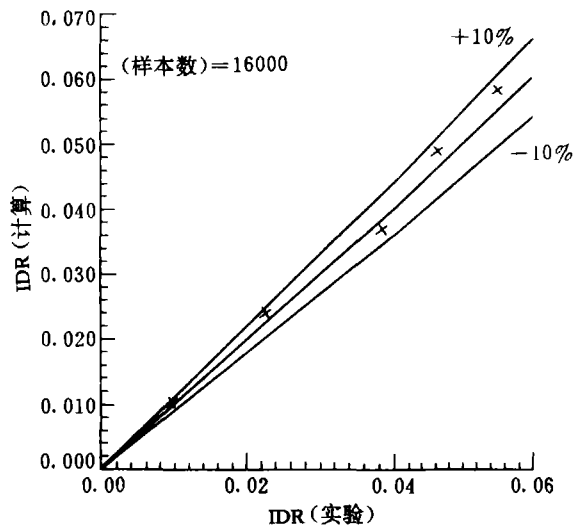


图 2

参 考 文 献

- 1 Bowditch D N, Coltrin R E. A Survey of Inlet Engine Distortion Compatibility. AIAA-83-1166, 1983.
- 2 Liang D W, Zhang S Y. Estimation of the Maximum Instantaneous Distortion. J of Propulsion and Power, 1992, 8:(1)
- 3 Motycka D L. Determination of Maximum Expected Instantaneous Distortion Patterns from Statistical Properties of Inlet Pressure Data. AIAA-76-705, 1976.
- 4 Jacocks J L, Kneile K E. Statistical Prediction of Maximum Time Variant Inlet Distortion Level. ADA004104, 1975.