

文章编号: 1000-8055(2003) 01-0060-05

最大瞬时畸变图谱的预估

梁德旺

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了分析最大瞬时畸变图谱对发动机工作稳定性的影响, 本文提出了一种新的最大瞬时畸变图谱的预估方法。该方法中根据给定的最大瞬时畸变值, 利用 Fletcher-Reeves 非线性优化方法来确定压力分布。与实验测得的最大瞬时畸变图谱的比较表明, 本文提出的最大瞬时畸变图谱预估方法能准确地模拟高低压区的位置和大小, 高压梯度区的位置和形状; 即使在最大瞬时畸变值误差较大时也能准确地预估最大瞬时畸变图谱。因此, 本文提出的最大瞬时畸变图谱预估方法能满足工程精度要求。

关键词: 航空、航天推进系统; 畸变图谱; 瞬时畸变; 预估方法; 进气道与发动机匹配

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

The Estimation of Maximum Instantaneous Distortion Contour Maps

LIANG De-wang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A new method for the estimation of maximum instantaneous distortion contour maps is proposed based on the Fletcher-Reeves nonlinear optimum theory in this paper. In the method, the maximum instantaneous distortion values are obtained by experiments or predicted by statistical methods; The Fletcher-Reeves nonlinear optimum method is used to determine the pressure distribution that makes the distortion value be equal to the given maximum instantaneous value. A comparison between the estimated and experimental maximum instantaneous distortion contour maps shows that the method described in this paper can accurately predict the range and position of high and low pressure regions, and the position and shape of large gradient of pressure region.

Key words: aerospace propulsion; distortion contour map; instantaneous distortion; predicting method; inlet/engine compatibility

1 引言

由于压力脉动, 瞬时畸变随时间变化, 且具有随机特性, 服从一定的概率分布规律。研究表

明^[1], 当瞬时畸变值超过发动机的畸变容许值且持续时间大于发动机转子转一圈所需时间时, 会引起发动机工作不稳定。因此在进气道与发动机的匹配研究中应对进气道出口流场的最大瞬时畸

收稿日期: 2001- 12- 21; 修订日期: 2002- 06- 27

作者简介: 梁德旺(1962-), 男, 湖南人, 南京航空航天大学能源与动力学院教授、博士生导师、副校长, 博士, 主要从事内流气动力学、进/发匹配技术、流场测试技术、计算流体力学、流场控制技术、推进系统隐身技术、微型发动机技术及高超声速气动热力学等领域的研究。

变值及其畸变图谱进行研究。在进气道与发动机的流场匹配研究早期,通常用预估方法来分析畸变对发动机工作稳定性的影响。目前已有的最大瞬时畸变值预估方法有: Jacock 方法^[2], Melick 方法^[3,4], Motycka 方法^[5,6]和 Liang 方法^[7,8]。Bowditch^[9]和 Sanders^[10]对前三种方法进行了讨论和评述,并用模型和飞行数据对 $IDC, IDR, K_{\theta}, K_{RAD}, K_{A2}$ 和 $AMPC$ 等畸变指数进行了估算比较。从 Bowditch 给出的数据可知, Jacock 方法的估算精度最高,实验费用与最大瞬时畸变实验费用相差无几; Melick 方法的估算精度一般不很理想,有时偏差较大; Motycka 方法的估算精度可满足工程要求,但估算机时很长,计算费用很高。Liang 方法的估算精度与 Motycka 方法的估算精度相当,但估算机时仅为 Motycka 方法的十万分之一。在上述四种预估方法中,除 Motycka 方法外,其他方法均不能预估畸变图谱。

在进气道与发动机的流场匹配中,不仅最大瞬时畸变值影响发动机的工作稳定性,而且最大瞬时畸变图谱也有很大的影响。因此,提出最大瞬时畸变图谱的预估方法对用预估方法来分析进气道与发动机匹配有着十分重要意义。为此,本文利用 Fletcher-Reeves 非线性优化方法,基于稳态压力分布,紊流度分布和最大瞬时畸变值,提出了最大瞬时畸变图谱的预估方法。与实验所得最大瞬时畸变图谱的比较表明: 基于实验最大瞬时畸变值所预估的最大瞬时畸变图谱与实验图谱吻合很好; 若用 Liang 方法预估最大瞬时畸变值然后用本文方法预估最大瞬时畸变图谱,所得最大瞬时畸变图谱与实验图谱吻合较好,能满足工程精度要求。

2 最大瞬时畸变图谱预估的基本思想

为了估算最大瞬时畸变图谱,本文提出了一种新的最大瞬时畸变图谱预估方法。提出该方法基于以下几点认识:

(1) 最大瞬时畸变图谱是稳态畸变图谱与脉动压力畸变图谱的迭加。

(2) 各点的瞬时压力服从一定的概率分布规律,其瞬时值应满足:

$$P_{ss} - nP_{rms} \leq P \leq P_{ss} + nP_{rms} \quad (1)$$

其中: P 为瞬时压力, P_{ss} 为稳态压力, P_{rms} 为脉动压力均方根, n 为系数,一般可取为 5 或 6。

(3) 当稳态压力和紊流度分布给定时,尽管最大瞬时畸变值和对应的畸变图谱是随机的,但一旦最大瞬时畸变值已确定,对应的最大瞬时畸变图谱也随之而定,而且一一对应。

(4) 给定畸变值的条件下,对应畸变图谱的预估便化为各点压力大小的预估,约束的条件是各点压力取值应满足式(1)。要预估各点压力值,并使其畸变值等于给定值,用逐点取值试算的办法,显然是不可取的,试算的工作量很大,而且不易确保达到目的。如适当选取目标函数,可采用优化算法来预估各点的压力值。

3 共轭梯度优化方法 (Fletcher-Reeves 优化方法)

优化方法有很多种,通过比较,本文选取由 Fletcher 和 Reeves 首先提出的共轭梯度法。对于某一设计问题,寻找一个设计变量:

$$\vec{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$$

使得目标函数 $f(\vec{X})$ 具有极小值,该方法可归纳如下:

(1) 选取任意初始点 $\vec{X}_1$

(2) 取初始搜索方向:

$$\vec{S}_1 = -\nabla f(\vec{X}_1) = -\nabla \vec{f}_1$$

(3) 由下式求得设计变量的新值 $\vec{X}_2$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + \lambda_1^* \vec{S}_1 \quad (2)$$

式中: λ_1^* 为 $\vec{S}_1$ 方向的最优步长(可以采用一维优化方法求得 λ_1^*)。置 $i = 2$, 转向下一步。

(4) 求 $\nabla \vec{f}_i = -\nabla f(\vec{X}_i)$, 并令该步的搜索方向为:

$$\vec{S}_i = -\nabla \vec{f}_i + \frac{|\nabla \vec{f}_i|^2}{|\nabla \vec{f}_{i-1}|^2} \vec{S}_{i-1} \quad (3)$$

(5) 计算 $\vec{S}_i$ 方向的最优步长,并求新点:

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + \lambda_i^* \vec{S}_i \quad (4)$$

(6) 检验 $\vec{X}_{i+1}$ 的最优性,如 $\vec{X}_{i+1}$ 是最优点,则终止迭代过程。否则使 $i = i + 1$, 重复(4),(5)和(6)直至收敛到最优点为止。

对于病态二次函数(其等值线极值严重偏心和畸变),该方法可能要多于 n 次迭代才收敛。其原因是由于舍入误差的积累效应造成的。因此搜索方向 $\vec{S}_i$ 将会由于这些误差而不断失真。为此,实际应用中,有必要在每 m 步之后,重新选取最速下降方向作为新的搜索方向。Fletcher 和 Reeves 建议 $m = n + 1$ 。

4 Fletcher-Reeves 方法在最大瞬时畸变图谱预估中的应用

4.1 目标函数的确定

在最大瞬时畸变图谱的预估中, 要使用上述 Fletcher-Reeves 方法, 必须对某些问题进行明确或具体化。首先是优化目标函数的确定。根据最大瞬时畸变图谱预估的要求, 本文定义目标函数为:

$$f = \left| \frac{K - K_{\max}}{K_{\max}} \right| \quad (5)$$

于是, 最大瞬时畸变图谱预估问题简化为求极小值问题, 且 $f_{\min} = 0$ 。其中 K 为计算出来的畸变指数, $K_{\max}$ 为给定的最大瞬时畸变值。 K 为压力 P 的函数, 无法用解析法来求解, 只能用数字方法来确定 K 与 P 之间的梯度。

4.2 设计变量的确定

很显然最大瞬时畸变图谱预估中设计变量应为各点的压力, 即:

$$\vec{X} = [p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{i,j}, p_{I,J}]^T$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, I, \\ J = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (6)$$

4.3 设计变量的变换

各点的压力必须满足式(1), 而 Fletcher-Reeves 方法中变量 $\vec{X}$ 是任意变化的, 因此不能直接用 Fletcher-Reeves 方法, 为此应对设计变量 $\vec{X}$ 进行变换。设:

$$P_{ij} = P_{ssij} - nP_{rmsij} + 2nP_{rmsij} \sin^2 y_{ij} \quad (7)$$

这样, 参数 y 是任意变化的, 而且压力 P 自动满足式(1)。

4.4 初始状态的确定

Fletcher-Reeves 方法中, 应给定初始状态 $\vec{X}_1$ 。对最大瞬时畸变图谱的预估选取压力的初始状态为稳态压力, 变换后的 y 值则为 $\pi/4$ 。

4.5 梯度的求得

从前面的定义可知, 目标函数是压力的函数, 对不同的畸变指数有不同的函数关系, 且很难用具体的函数关系来表示。为此用有限差分法来求梯度。

对目标函数在各次搜索起始处求偏导:

$$f_0 = f[y_{1,1}^i, y_{1,2}^i, \dots, y_{i,j}^i, \dots, y_{I,J}^i]$$

$$f_1 = f[y_{1,1}^i, y_{1,2}^i, \dots, (y_{i,j}^i + \Delta y_{i,j}^i), \dots, y_{I,J}^i]$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, I \\ j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (8)$$

式中: 上标 i 表示为第 i 次搜索($i = 1, 2, \dots$)。

$$\nabla f_{i,j} = \frac{f_1 - f_0}{\Delta y_{i,j}}$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, I \\ j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (9)$$

$$\nabla \vec{f}^T [\nabla f_{1,1}, \nabla f_{1,2}, \dots, \nabla f_{i,j}, \dots, \nabla f_{I,J}]^T$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, I \\ j = 1, 2, \dots, J \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\nabla \vec{f}^T$ 为梯度向量($i = 1, 2, \dots$)。

则搜索方向为:

$$\vec{S}^i = -\nabla \vec{f}^i + \frac{|\nabla \vec{f}^i|^2}{|\nabla \vec{f}^{i-1}|^2} \vec{S}^{i-1}$$

且第一次搜索方向为:

$$\vec{S}^1 = -\nabla \vec{f}^1$$

4.6 在 $\vec{S}^i$ 方向上进行一维优化

式(4)中, 要求求出 $\vec{S}^i$ 方向上的最优步长 λ^* , 此意为在给定搜索方向上迈出多远才能使得寻优最为有利。虽然求目标函数梯度采用数字方法, 但畸变计算机时很小, 本文在求最优步长 λ^* 时采用黄金分割法。具体步骤如下:

(1) 计算开始状态的目标函数值:

$$f_0 = f(\vec{X}_i)$$

$$\lambda_0 = 0, \quad \lambda_{\text{step}} = 0.1$$

(2) 给定步长, 计算新状态的目标函数

令:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{\text{step}}$$

$$\vec{X} = \vec{X}_i + \lambda \vec{S}^i$$

$$f_1 = f(\vec{X})$$

(3) 比较目标函数的大小, 决定下一步的走向:

如 $f_1 < f_0$, 则: $f_0 = f_1, \lambda_0 = \lambda$; 重复步骤(2)。

如 $f_1 > f_0$, 则: $f_0 = f_1, \lambda_0 = \lambda, \lambda_{\text{step}} = -0.618\lambda_{\text{step}}$; 重复步骤(2)。

如 $|(f_1 - f_0)/f_0| \leq 10^{-4}$ 或 $|f_1| \leq 10^{-6}$ 则终止寻优, 此时的 λ 值即为所求 λ^* 。

4.7 收敛准则

Fletcher-Reeves 方法中步骤(6) 要求检验 $\vec{X}_{i+1}$ 的最优性, 这就要求对整个寻优过程的收敛性进行检验。

本文共采用了以下三种收敛准则:

(1) 控制设计变量的步长, 即:

$$\max \frac{\vec{X}_{i+1} - \vec{X}_i}{X_{av}} \leq 10^{-8}$$

其中: X_{av} 为各设计变量的平均值。

- (2) 控制目标函数值, 即: $f(\vec{X}_i) \leq 10^{-8}$ 。
- (3) 控制目标函数值的增量, 即:

$$\left| \frac{f(\vec{X}_i) - f(\vec{X}_{i-1})}{f(\vec{X}_{i-1})} \right| \leq 10^{-4}$$

当上述三种收敛准则中任一个满足时, 即结束 Fletcher-Reeves 的寻优过程。此时的压力分布即为最大瞬时畸变图谱对应的压力分布。

5 最大瞬时畸变图谱预估及与实测图谱的比较

为了检验上述最大瞬时畸变图谱预估方法的正确性, 本文用文献[11] 中六个实验状态二十四

个最大瞬时畸变图谱进行了检验, 其平均紊流度在 0. 010~0. 020 之间不等。由于篇幅, 本文只用一个实验状态畸变 DC_{90} 的最大瞬时畸变图谱来说明。图 1 给出了实验测得的最大瞬时畸变图谱, 图 2 为根据实验测得的最大瞬时畸变值和用上述方法估算得到的最大瞬时畸变图谱, 图 3 则为根据 Liang 方法估算得到的最大瞬时畸变值和用上述方法估算得到的最大瞬时畸变图谱。由图可知,

求。与此同时, 当稳态畸变较大时, 最大瞬时畸变图谱与稳态畸变图谱基本相似。

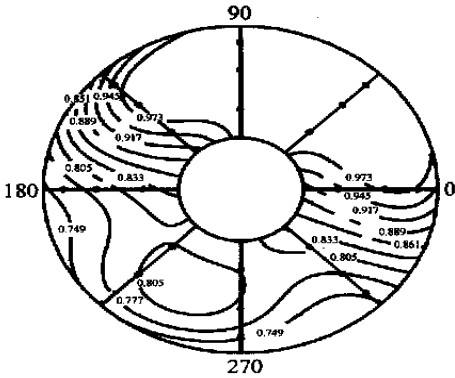


图 2 预估图谱
Fig. 2 Estimated contour map

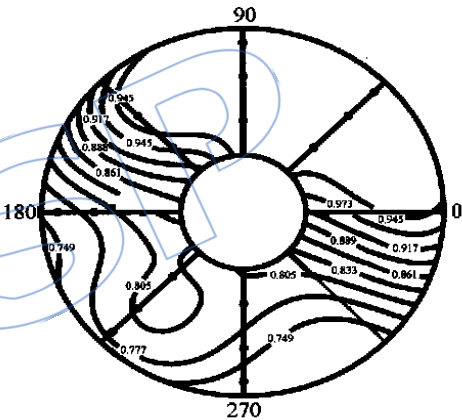


图 3 Liang 方法预估图谱
Fig. 3 Contour map estimated with Liang's method

本文所给最大瞬时畸变图谱预估方法中, 除要求输入稳态压力和紊流度分布外, 还要求输入最大瞬时畸变值。这个最大瞬时畸变值可以是实验测得的, 也可以是预估方法预测的, 工程中一般是预估的。为了进一步说明本文所给最大瞬时畸变图谱预估方法的实用性, 下面将有意改变最大瞬时畸变值的大小, 分析最大瞬时畸变值的预估精度对最大瞬时畸变图谱预估的影响。图 4 给出了不同最大瞬时畸变值条件下估算得到的最大瞬时畸变图谱。由图可见, 在最大瞬时畸变值的误差高达 25%, 本文所给方法还能较准确地预估最大瞬时畸变图谱, 即高低压区的位置和范围基本一致; 压力梯度较大的区域(大小, 形状)基本一致。不同的是随着最大瞬时畸变值的增大, 低压区的压力值减小。从而表明, 本文所给最大瞬时畸变图谱预估方法可以与各种最大瞬时畸变值预估方法

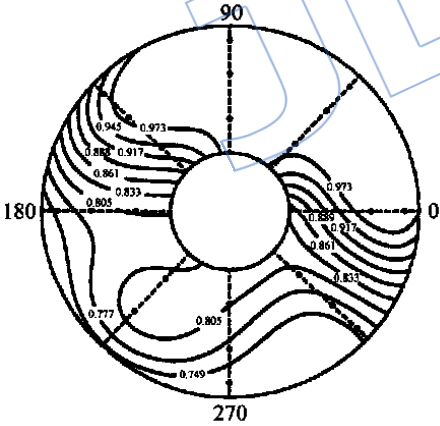


图 1 实测图谱
Fig. 1 Experimental contour map

不论是根据实测的最大瞬时畸变值还是用 Liang 方法估算得到的最大瞬时畸变值, 预估图谱与实测图谱吻合较好, 具体表现为高低压区的位置和范围基本一致; 压力分布图谱中压力梯度较大的区域(大小, 形状)基本一致。表明上述最大瞬时畸变图谱预估方法是可行的, 能满足工程要求。另外, 文献[11] 已从理论上说明, 当平均紊流度小于 0. 04 时, Liang 方法具有足够的精度, 满足工程要

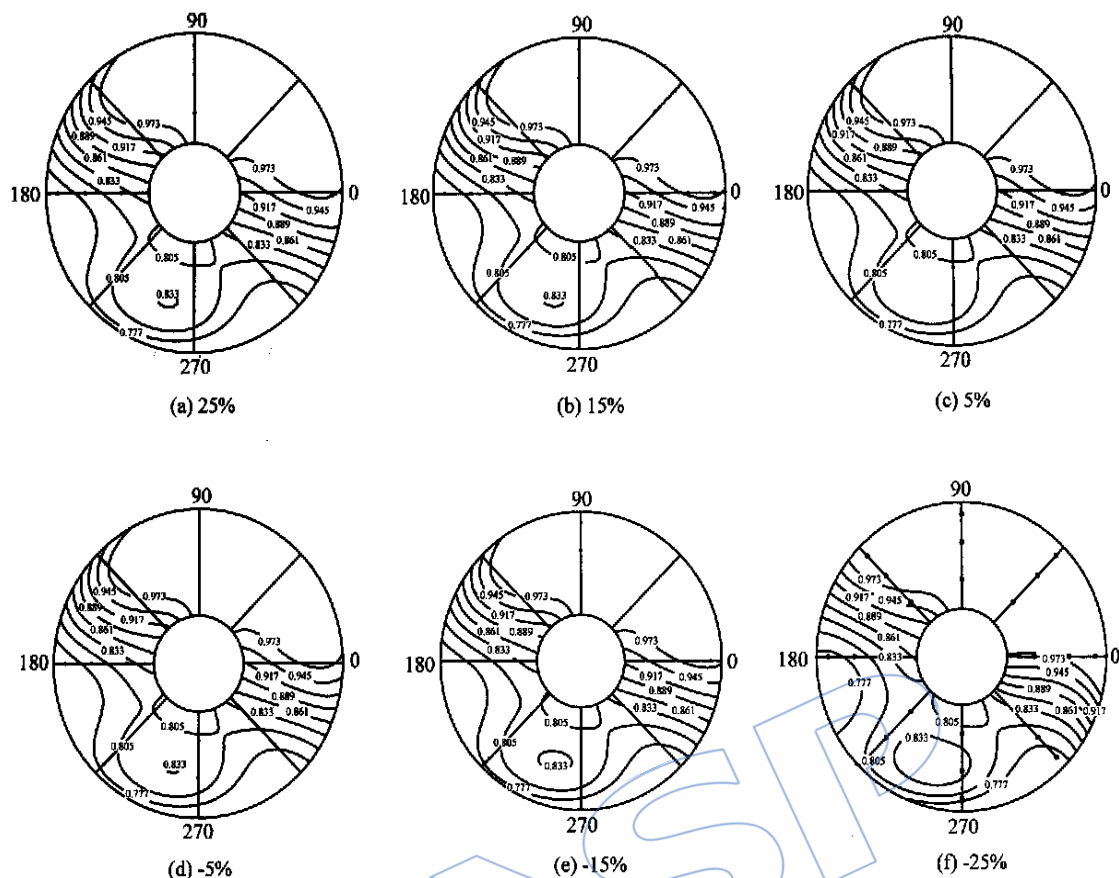


图 4 最大瞬时畸变值对最大瞬时畸变图谱预估的影响

Fig. 4 Effect of maximum instantaneous distortion value to contour maps

配用。

6 结 论

由上面的讨论和分析可见,本文提出的最大瞬时畸变图谱预估方法,能准确地预估最大瞬时畸变图谱,可以与各种最大瞬时畸变值预估方法配用。它既省时,又能满足工程要求。

参考文献:

[1] Plourde G A, Brimelow B. Pressure Fluctuations Cause Compressor Instability, Airface/ Propulsion Compatibility Symposium[R]. AFAPL- Tr- 69- 103, 1969.

[2] Jacocks J L, Kneile K R. Statistical Prediction of Maximum Time Variant Inlet Distortion Levels [R]. AD/A - 004104, 1975.

[3] Melick H C, Ybarra A H, Bencze D P. Estimating Maximum Instantaneous Distortion from Inlet Total Pressure RMS and PSD Measurements[R]. AIAA 75- 1213.

[4] Melick H C, Ybarra A H, Bencze D P. Estimating Maximum

Instantaneous Distortion from Inlet Total Pressure RMS and PSD Measurements[R]. AIAA 78- 970.

[5] Motyka D L. Determination of Maximum Expected Instantaneous Distortion Patterns from Statistical Properties of Inlet Pressure Data[R]. AIAA 76- 705.

[6] Sedlock D. Improved Statistical Analysis Method for Prediction of Maximum Inlet Distortion[R]. AIAA 84 - 1274.

[7] Liang D W, Zhang S Y. The Estimation of Maximum Instantaneous Distortion from Inlet Total Pressure and RMS Measurements[R]. AIAA 89- 2470, 1989.

[8] Liang D W, Zhang S Y. Improved Method for Estimation of Maximum Instantaneous Distortion Value[J]. J. of Power & Propulsion 1994, 10(4): 522- 526.

[9] Bowditch D W, Coltrin R E. A Survey of Inlet/ Engine Distortion Compatibility[R]. AIAA 83- 1166.

[10] Sanders M E. An Evaluation of Statistical Method for the Prediction of Maximum Time Variant Inlet Total pressure Distortion[R]. AIAA 80- 111011.

[11] 梁德旺. 最大瞬时畸变畸变值的预估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1987.