

一种应用于不规则平面域的网格生成技术*

施发树 刘兴洲

(航天工业总公司 31 所, 北京, 100074)

摘 要: 建立了一种关于由四条不规则边界线封闭的平面区域的通用网络生成数值的方法。生成了某型小涡扇发动机环形燃烧室的平面网络, 应用在该燃烧室的 CFD 计算中。实践证明该方法简单, 计算快速、准确, 在由复杂形状边界组成的喷气发动机燃烧室流场计算中具有重要的应用价值。

主题词: 涡轮喷气发动机, 环形燃烧室, 流场仿真, 计算机辅助设计, 格网法

分类号: V235.113

GRIDS ALGORITHM FOR TWO-DIMENSIONAL UNREGULAR DOMAINS

Shi Fashu Liu Xingzhou

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: A grids algorithm for two-dimensional domains enclosed by four unregular and complicated lines was derived for the combustor of a small turbofan engine. The method was put into use successfully in application to CFD of the annular combustor. It proved that the algorithm has the advantages of simplicity, efficiency and accuracy. It was useful in the numerical simulation for the combustor of turbojet engines.

Subject terms: Turbojet engine, Annular combustor, Flow field simulation, Computer aided design, Grids method

1 引 言

涡轮喷气发动机燃烧室结构复杂, 它主要由多个串联的火焰筒或由一体化的环形燃烧室组成。在其内部, 燃油充分燃烧形成高温燃气流; 在其外部, 气流对高温壁面进行冷却, 最后进入内部与高温燃气流掺混形成合适的出口温度场。在对燃烧室进行流体数值模拟时, 要区分不同的物理区域, 而它们都是由燃烧室内、外机匣和相邻的共同边界封闭的, 一般边界很不规则, 传统的数值方法不适用于复杂边界情况, 为此, 本文提出了一种网格生成技术。

2 网格生成方法

采用柱坐标系, 分别沿与内外缘和进出口方向相适应的径向和轴向, 利用线性插值方法初步划分出网格。这时, 每个网格是一个四边形单元, 每个网格点周围分布有八个点。由于边界形状极不规则, 有不少“病态单元”, 需要对网格进一步修正, 建立与边界线相适应的接近于正交的网格单元, 且网格线比较光滑。如何建立修正准则和数值模型是关键。

* 收稿日期: 1998-04-01, 修回日期: 1998-08-06

2.1 初始网格

假设燃烧室中某一物理区域如图 1 所示。图中 CED , AFB 分别为内、外边界, CA , DB 分别为进、出边界, 而 EF 分别是内、外缘上导数不连续点。首先, 分别对径向、轴向边界, 利用点分布函数方法^[1]求得一系列离散点坐标 $(X(i, j), Y(i, j))$, $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, M$, 往往在不连续点处要增加网格密度; 其次, 分别求径向、轴向相对应边界点坐标的平均值 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 同时计算各向平均坐标点构成的折线的累积长度与总长的比例 r_i 。

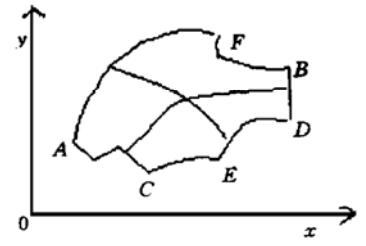


Fig. 1 Physical domain

$$\text{轴向: } \begin{cases} \bar{X}_i = 0.5 \times (X(i, 1) + X(i, M)) \\ \bar{Y}_i = 0.5 \times (Y(i, 1) + Y(i, M)) \end{cases} \quad r_i = \frac{\sum_j \sqrt{(\bar{X}_j - \bar{X}_{j-1})^2 + (\bar{Y}_j - \bar{Y}_{j-1})^2}}{\sum_j \sqrt{(\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1})^2 + (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{i-1})^2}},$$

$$\text{径向: } \begin{cases} \bar{X}_j = 0.5 \times (X(1, j) + X(N, j)) \\ \bar{Y}_j = 0.5 \times (Y(1, j) + Y(N, j)) \end{cases} \quad r_i = \frac{\sum_k \sqrt{(\bar{X}_k - \bar{X}_{k-1})^2 + (\bar{Y}_k - \bar{Y}_{k-1})^2}}{\sum_k \sqrt{(\bar{X}_k - \bar{X}_{k-1})^2 + (\bar{Y}_k - \bar{Y}_{k-1})^2}}$$

沿轴向利用 r_i 值线性插值计算出“中间”坐标, 即:

$$\begin{cases} X_A(i, j) = r_i \times X(N, j) + (1 - r_i) \times X(1, j) \\ Y_A(i, j) = r_i \times Y(N, j) + (1 - r_i) \times Y(1, j) \end{cases}$$

最后, 沿径向利用其 r_j 线性插值, 计算出各网格点坐标:

$$\begin{cases} X(i, j) = X_A(i, j) - ((1 - r_j) \times (X_A(i, 1) - X(i, 1)) + r_j \times (X_A(i, M) - X(i, M))) \\ Y(i, j) = Y_A(i, j) - ((1 - r_j) \times (Y_A(i, 1) - Y(i, 1)) + r_j \times (Y_A(i, M) - Y(i, M))) \end{cases}$$

从而生成了初始网格。

2.2 目标函数与约束条件

初始网格考虑了边界因素, 但是往往很不成功, 主要是由于边界的不规则。在引入一些约束条件并加上经验修正因子后, 就可以得到符合要求的最佳网格。

进口边界条件

$$P(1, j) = -\frac{X_{yy} \times X_y + Y_{yy} \times Y_y}{X_y^2 + Y_y^2}, \quad \text{假设其大小沿轴向网格线不变。}$$

内外边界条件

$$F(i, j) = -\frac{X_{xx} \times X_x + Y_{xx} \times Y_x}{X_x^2 + Y_x^2} \quad O_f(i, j) = -\frac{X_{xx} \times Y_x - Y_{xx} \times X_x}{\sqrt{X_x^2 + Y_x^2}}$$

令 $X_y = X(i, j) - X(i, j-1)$, $Y_y = Y(i, j) - Y(i, j-1)$, $j=2$ 或 M

边界点 $O_p(i, j) = \pm \frac{2 \times (X_x \times X_y + Y_x \times Y_y)}{\sqrt{X_x^2 + Y_x^2}}$, $j=1$ 时, 取 ‘-’ 号; $j=M$ 时, 取

‘+’ 号。

边界内点的 $F(i, j)$, $O_f(i, j)$, $O_p(i, j)$ 沿径向按 $(j-1)/(M-1)$ 值线性插值。在给出目标函数之前, 先计算每个网格点 (见图 2) 离散参数:

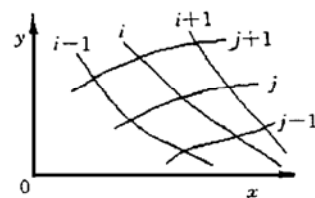


Fig. 2 Regional calculation grid

$$\text{令: } A = X_y^2 + Y_y^2, B = X_x \times X_y + Y_x \times Y_y, C = X_x^2 + Y_x^2$$

$$O_f = K_f \frac{O_f(i, j)}{\sqrt{C}}, O_p = K_p \frac{O_p(i, j)}{\sqrt{A}}, B = B \times B_f, K_f, K_p,$$

B 为经验系数, 从而定义目标加权函数:

$$\begin{cases} R_x = A \times (X_{xx} + F \times X_x + O_f \times Y_x) - 2 \times B \times X_{xy} + C \times (X_{yy} + P \times X_y + O_p \times Y_y) \\ R_y = A \times (y_{xx} + F \times y_x + O_f \times x_x) - 2 \times B \times y_{xy} + C \times (y_{yy} + P \times y_y - O_p \times X_y) \end{cases}$$

其物理意义是在上述约束条件下, 利用数值方法加经验修正, 使得 (i, j) 点离四个相邻网格点的距离接近极小, 且四边形单元逼近矩形元素, 网格接近正交, 网格线光滑连续, 这时 $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ 接近极小。

2.3 数值逼近方法

下面用数值方法加经验修正逼近 R 极小值, 令: $T = CFL \times \frac{0.5}{A+C}$, CFL 为经验系数, 一般取 10。

$$\begin{cases} \Delta_\xi = 1.33 \times R_x \times T, A_d(i, j) = A \times T \\ \Delta_\eta = 1.33 \times R_y \times T, C_d(i, j) = C \times T, \text{沿轴向计算各网格点参数:} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_\xi(i) = \frac{A}{1 + A(2 - U_\xi(i-1))}, \text{其中 } A = A_d(i, j), U_\xi(1) = 0, i = 2, 3, \dots, N-1, \\ V_\xi(i) = \frac{\Delta_\xi(i, j) + A \times V_\xi(i-1)}{1 + A(2 - U_\xi(i-1))}, V_\xi(1) = 0. \end{cases}$$

同样, $U_\eta(i) = \frac{A}{1 + A(2 - U_\eta(i-1))}, V_\eta(i) = \frac{\Delta_\eta(i, j) + A \times V_\eta(i-1)}{1 + A(2 - U_\eta(i-1))}$, 其中 $U_\eta(1) = V_\eta(1) = 0$ 。

$\Delta_\xi(i, j) = U_\xi(i) \times \Delta_\xi(i+1, j) + V_\xi(i)$, $\Delta_\eta(i, j) = U_\eta(i) \times \Delta_\eta(i+1, j) + V_\eta(i)$, 其中 $i = N-1, N-2, \dots, 2$, $\Delta_\xi(N, j) = \Delta_\eta(N, j) = 0$ 。

由于 $U_\xi(i)$ 具有极限稳定性, 极限值 $U_\sigma < 1$, 相应地, $V_\xi(i)$ 也具有极限稳定性, 故 $\Delta_\xi(i, j)$, $\Delta_\eta(i, j)$ 也具有了稳定性, 其变化趋势是绝对值减小。从而保证了在合理的经验修正系数条件下, 如调整 O_f , O_p , B_f 修正系数, $\Delta_\xi(i, j)$, $\Delta_\eta(i, j)$ 能快速减小, 达到稳定。

接下来利用新的 $\Delta_\xi(i, j)$, $\Delta_\eta(i, j)$, 沿径向重复上述过程, 只是将 C 代替 A 。经过一次轴向、径向交替计算, 得到新的网格点坐标:

$X^n(i, j) = X^{n-1}(i, j) + \Delta_\xi(i, j)$, $Y^n(i, j) = Y^{n-1}(i, j) + \Delta_\eta(i, j)$, 式中 $n-1$ 代表旧值, n 代表新值。如此循环, 直到 $|\lg R^n - \lg R^0| < -3$, 获得令人满意的网格为止。

3 算例与结论

利用上述方法生成了某型小涡扇发动机环形燃烧室的网格^[2], 计算中, $K_f = 0$, $K_p = 0.2$, $B_f = 1$, 图 3 为初始网格, 图 4 为修正后网格。

事实证明, 上述方法简单, 计算快速准确, 且网格线贴近边界形状, 接近正交, 能获得
(下转第 98 页)

可以有效抑制变速扰动环节和大滞后环节对控制系统的影响。

(2) 建立的控制方法达到了发动机推力测量原位校准的加载控制要求, 实现了精确快速控制的目标。

参 考 文 献

- 1 李庆忠. 负荷传感器计量检定技术. 北京: 中国计量出版社, 1990.
- 2 张学成. 压电陶瓷在叠加式力标准机上的应用研究. 计量学报, 1993, 14 (3): 218~223
- 3 张学成. 压电陶瓷力发生装置. 压电与声光, 1997, 19 (3)
- 4 王俊普. 智能控制. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.

(上接第 75 页)

理想的网格。非常适合于喷气发动机燃烧室内由复杂边界形成的区域内的网格生成和流场数值模拟, 也可以推广到其他一些复杂边界区域的网格生成。

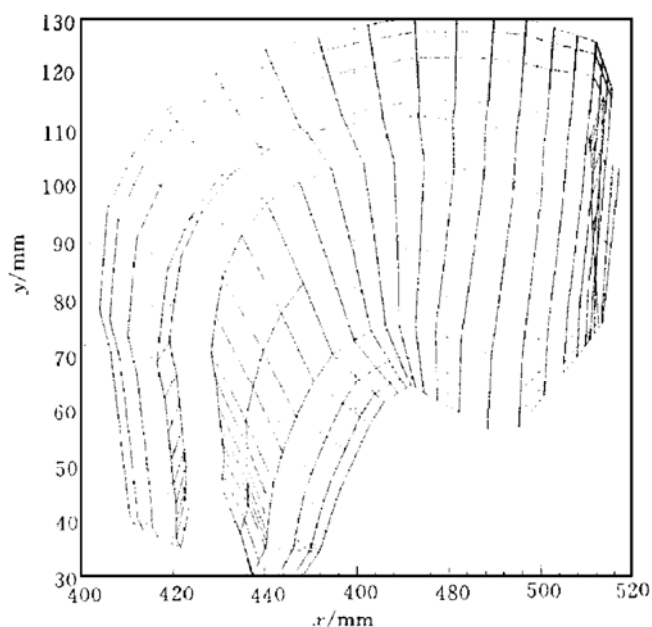


Fig. 3 Initial grids

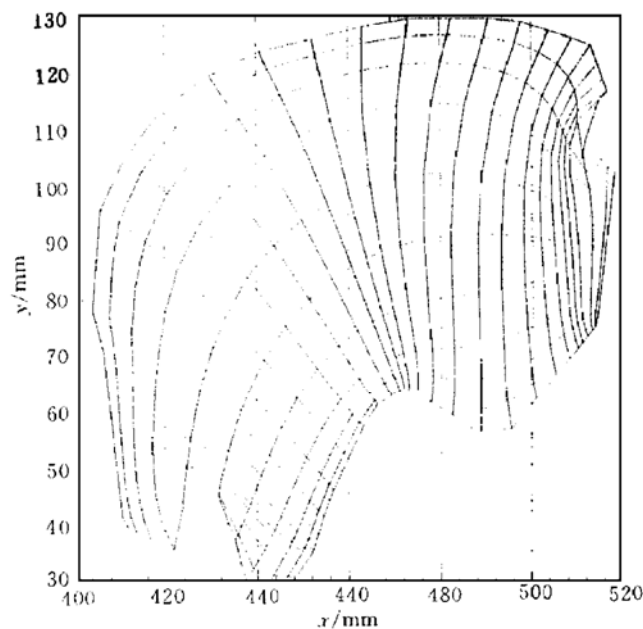


Fig. 4 Modified grids

参 考 文 献

- 1 施发树, 刘兴洲. 叶片机叶片平截面型线坐标的快速精确插值代数算法. 推进技术, 1998, 19 (6)
- 2 施发树, 刘兴洲. 多部件模型在全尺寸小型双涵道涡扇发动机气流数值模拟中的应用. 推进技术, 1998, 19 (4)