燃烧室三维贴体网格的生成方法研究[1)]

徐 行 杨 榕
(北京航空航天大学 动力系)

摘 要 研究了燃烧室三维贴体网格人机交互生成的方法. 使用该方法可以生成包括扩压器、内外环通道和火焰筒在内的燃烧室流场计算所需的整个网格. 可以对网格的疏密和正交性进行调整. 可以处理火焰筒上的主燃孔, 掺混孔和气膜孔. 并能够输出边界曲面上网格点的类型, 用于流场计算. 网格边界线的输入和边界线上的网格点分布采用人机交互方式生成. 使用 VISUAL BASIC 语言编写程序界面. 把整个网格生成及图形显示功能集成在一个软件中.

关键词 燃烧室; 网格; 图形; 显示
分类号 V 231.3

现代航空发动机的燃烧室具有复杂的几何结构. 要对燃烧室内的流动进行数值计算, 首先要生成能够描述复杂几何形状的三维贴体网格, 并且能够对网格的疏密和正交性进行调整. 在网格的生成中, 边界曲线和曲面的描述, 以及边界曲线上网格点的确定是比较困难和烦琐的. 如何判断网格生成的质量也是很重要的. 本文所介绍的计算机交互式网格生成方法, 可以比较方便直观的进行边界曲线的输入, 以及确定边界上曲线网格点的分布. 并可显示生成的三维网格, 以判断网格生成的好坏.

1 三维网格的生成方法

现代航空发动机燃烧室是由扩压器、内外环通道和火焰筒四部分构成的. 它有几个特点:

(1) 扩压器、内外环通道和火焰筒壁面都是曲壁;

(2) 在火焰筒壁上开有主燃孔、掺混孔和气膜冷却孔;

(3) 计算区域是多连通的区域. 因而要处理复杂的壁面和各区域之间的连接.

1) 网格变换方程

根据上述燃烧室的特点, 把柱坐标下的一个扇区变换到计算空间的矩形区域, 如图 1 所示. 即 (x, r, θ) 变换为 (ξ, η, ζ). 设 $\boldsymbol{r}$ 为空间一点的位置矢量, 则反变换方程为[1]

$$g^{\xi\xi}(\boldsymbol{r}_{\xi\xi} + P\boldsymbol{r}_{\xi}) + g^{\eta\eta}(\boldsymbol{r}_{\eta\eta} + Q\boldsymbol{r}_{\eta}) + g^{\zeta\zeta}(\boldsymbol{r}_{\zeta\zeta} + R\boldsymbol{r}_{\zeta}) + 2g^{\xi\eta}\boldsymbol{r}_{\xi\eta} + 2g^{\eta\zeta}\boldsymbol{r}_{\eta\zeta} + 2g^{\zeta\xi}\boldsymbol{r}_{\zeta\xi} = 0 \quad (1)$$

式中 $g^{\xi^i\xi^j} = \Delta\xi^i \cdot \Delta\xi^j$

$\xi^i \rightarrow (\xi, \eta, \zeta)$

P, Q, R 为强迫函数.

$$\boldsymbol{r}_{\xi^i} = x_{\xi^i}\boldsymbol{e}_x + r_{\xi^i}\boldsymbol{e}_r + r\theta_{\xi^i}\boldsymbol{e}_\theta$$

$$\boldsymbol{r}_{\xi^i\xi^j} = x_{\xi^i\xi^j}\boldsymbol{e}_x + (r_{\xi^i\xi^j} - r\theta_{\xi^i}\theta_{\xi^j})\boldsymbol{e}_r + (r\theta_{\xi^i\xi^j} + r_{\xi^i}\theta_{\xi^j} + r\theta_{\xi^j\xi^i})\boldsymbol{e}_\theta \quad (2)$$

把式(2)代入式(1)展开就可以得到关于(x, r, θ)的三个方程.

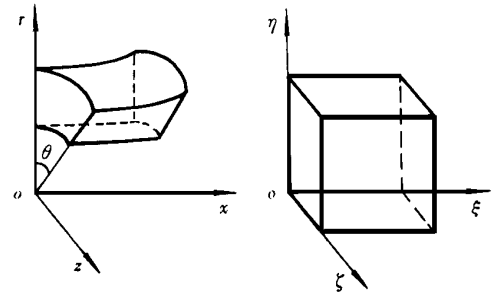


图 1 柱坐标转换到曲线坐标

2) 边界线的描述及边界线网格分布的确定

燃烧室的边界面可以看成是一个旋转面, 旋转面由一些离散的点拟合成的母线确定的. 本文选用三次 B 样条拟合边界曲线[2]. 这样做的好处:

(1) 可用 B 样条统一表示整个曲线, 包括曲线上的不光滑点, 如两段直线的连接点, 直线段和圆弧的连接点;

收稿日期: 1996-09-03 第一作者 男 35岁 副教授 100083 北京
1) 航空科学基金资助项目

(2) 用 B 样条容易实现对曲线的局部修改, 而不影响其余部分的曲线. 方便设计.

曲线上网格点的确定采用两种方法. 一是直接在拟合的曲线上用图形的方式确定网格点, 二是由给定的网格分布确定曲线上的网格点. 而网格分布采用三次样条函数的方法确定[3].

3) 曲面上网格的确定

确定了曲面四个边线上的网格点后, 就可以确定曲面网格. 曲面网格的变换方程为

$$g_{\eta\eta}(\boldsymbol{r}_{\xi\xi}+P\boldsymbol{r}_{\xi})+g_{\xi\xi}(\boldsymbol{r}_{\eta\eta}+Q\boldsymbol{r}_{\eta})-2g_{\xi\eta}\boldsymbol{r}_{\xi\eta}=\boldsymbol{n}^{v}R^{v} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{n}^{v}$, R^{v} 是曲面的法矢和主曲率.

强迫函数 P, Q 的确定:

(1) 使网格在边界上正交, 即

$$\boldsymbol{r}_{\zeta}\cdot\boldsymbol{r}_{\eta}=g_{\xi\eta}=0$$

(2) 分别用 $\boldsymbol{r}_{\xi}$ 和 $\boldsymbol{r}_{\eta}$ 点乘方程(4), 可得

$$P=-\frac{\boldsymbol{r}_{\xi}\cdot\boldsymbol{r}_{\xi\xi}}{g_{\xi\xi}}-\frac{\boldsymbol{r}_{\xi}\cdot\boldsymbol{r}_{\eta\eta}}{g_{\eta\eta}}$$

$$Q=-\frac{\boldsymbol{r}_{\eta}\cdot\boldsymbol{r}_{\xi\xi}}{g_{\xi\xi}}-\frac{\boldsymbol{r}_{\eta}\cdot\boldsymbol{r}_{\eta\eta}}{g_{\eta\eta}}$$

假设在 ξ 线上, 如果知道了网格点的分布, 则 $\boldsymbol{r}_{\xi}$, $\boldsymbol{r}_{\xi\xi}$, $g_{\xi\xi}$就知道了. 而 $\boldsymbol{r}_{\eta}$ 和 $\boldsymbol{r}_{\eta\eta}$是未知的. 如果给出第一网格线距边线的间距 S_{η}, 则

$$|\boldsymbol{r}_{\eta}|=\sqrt{g_{\eta\eta}}=S_{\eta}$$

$$\boldsymbol{r}_{\eta}=|\boldsymbol{r}_{\eta}|\,\boldsymbol{n}\times\frac{\boldsymbol{r}_{\xi}}{|\boldsymbol{r}_{\xi}|}=\sqrt{\frac{g_{\eta\eta}}{g_{\xi\xi}}}\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{r}_{\xi}$$

式中　$\boldsymbol{n}$ 为点的法矢. $\boldsymbol{r}_{\eta\eta}$根据初始网格求出, 然后根据所求出的网格重新计算.

(3) 用超限插值求曲面上内点的 P 和 Q.

4) 计算区域内三维网格的生成

(1) 三维初始网格

三维初始网格根据边界面上的网格用超限插值求出. 用这一方法可以保证插值结果与给定的边界面上的网格完全相同. 三维超限插值用布尔和的形式给出:

$$\boldsymbol{r}(\xi,\eta,\zeta)=P_{\xi}\oplus P_{\eta}\oplus P_{\zeta} \tag{3}$$

式中　P_{ξ}, P_{η}, P_{ζ} 为在 ξ, η, ζ 方向上的单项插值.

(2) 边界面上 P、Q 和 R 的确定

给定了边界面上的网格, 假设给定了 ζ 为常数的边界面上的网格, 求 P、Q 和 R 使得网格线与边界正交. 即

$$\boldsymbol{r}_{\zeta}\cdot\boldsymbol{r}_{\xi}=\boldsymbol{r}_{\zeta}\cdot\boldsymbol{r}_{\eta}=0$$

$$g_{\zeta\xi}=g_{\zeta\eta}=0$$

分别用 $\boldsymbol{r}_{\xi}$, $\boldsymbol{r}_{\eta}$, $\boldsymbol{r}_{\zeta}$ 点乘方程(1), 联立求解可得

$$P=-\left(\boldsymbol{r}_{\xi}-\frac{g_{\xi\eta}}{g_{\eta\eta}}\boldsymbol{r}_{\eta}\right)\cdot(g^{\xi\xi}\boldsymbol{r}_{\xi\xi}+2g^{\xi\eta}\boldsymbol{r}_{\xi\eta}+g^{\eta\eta}\boldsymbol{r}_{\eta\eta}+g^{\zeta\zeta}\boldsymbol{r}_{\zeta\zeta})$$

$$Q=-\left(\boldsymbol{r}_{\eta}-\frac{g_{\xi\eta}}{g_{\xi\xi}}\boldsymbol{r}_{\xi}\right)\cdot(g^{\xi\xi}\boldsymbol{r}_{\xi\xi}+2g^{\xi\eta}\boldsymbol{r}_{\xi\eta}+g^{\eta\eta}\boldsymbol{r}_{\eta\eta}+g^{\zeta\zeta}\boldsymbol{r}_{\zeta\zeta})$$

$$R=-\boldsymbol{r}_{\zeta}(g^{\xi\xi}\boldsymbol{r}_{\xi\xi}+2g^{\xi\eta}\boldsymbol{r}_{\xi\eta}+g^{\eta\eta}\boldsymbol{r}_{\eta\eta}+g^{\zeta\zeta}\boldsymbol{r}_{\zeta\zeta})$$

对其它边界面上的 P、Q 和 R 可按相同的方法求出. 在求出了 6 个边界面上的 P、Q 和 R 之后, 可用三维超限插值的方法, 求出整个区域内点的 P、Q 和 R. 由于边界面上的 P、Q 和 R 与区域内的网格有关, 故在每次计算出新的网格后, 要重新计算边界面上的 P、Q 和 R.

(3) 曲面上孔的处理

在火焰筒的内外壁上有主燃孔, 掺混孔和气膜孔, 在头部有扰 流器出口的同心圆孔. 这 3 种孔需要特殊处理. 气膜孔由很多的小孔组成, 可把它简化为环缝. 主燃孔和掺混孔, 由于孔径大一些, 每个孔用 4 块控制面表示, 即每个孔每个方向均有 3 条网格线通过. 这样可以根据考虑孔的孔径及分布情况, 先确定好描述这些孔所对应的网格线, 以及网格线在孔周边和中心点的坐标. 并保持这些网格点坐标在迭代过程中不变. 对于同心环的表面, 首先根据每环的半径, 按比例确定所需的网格数目, 然后用事先给定的分布, 确定圆环上网格点的坐标. 最后保持各环上网格点不变, 求出整个曲面上的网格.

5) 各区域之间的连接

为了保证各区域连接面上网格线光滑连接, 可采用两种方法:

(1) 给定 1 个连接面, 然后让连接面两边区域上的网格, 在连接面上正交, 以保证网格线的光滑.

(2) 给定 1 个初始的连接面, 然后在迭代过程中, 用连接面两边相邻内点的坐标取平均求出连接面的网格.

用以上方法生成燃烧室的三维曲线网格. 图 2 为 ζ 方向燃烧室整个网格. 图 3 为火焰筒外壁面的网格. 图 4 为火焰筒内壁面的网格, 图 5 为火焰筒头部壁面的网格. 图 6 为火焰筒网格的立体图.

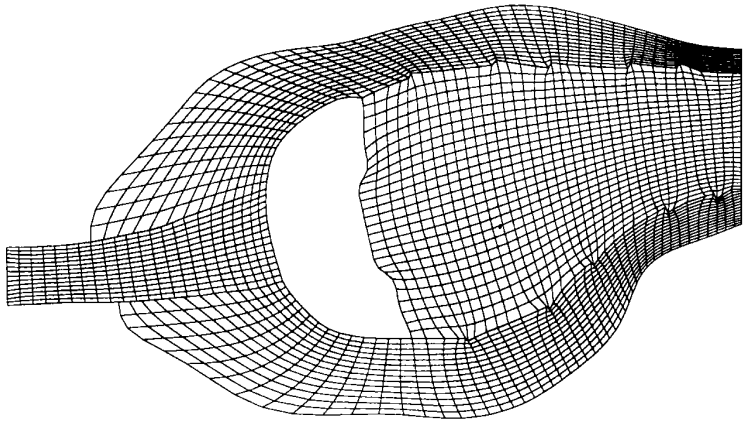


图 2 燃烧室整体网格(ζ= 2 网格面)

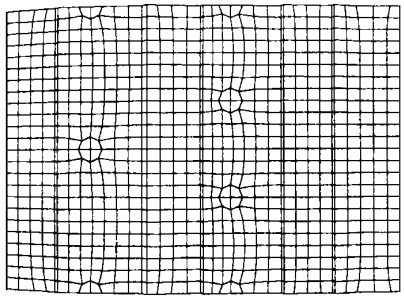


图 3 火焰筒外壁面网格(η= 25 网格面)

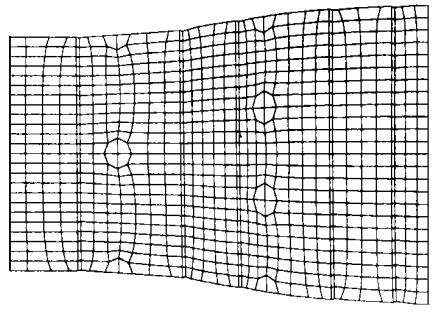


图 4 火焰筒内壁面网格(η= 1 网格面)

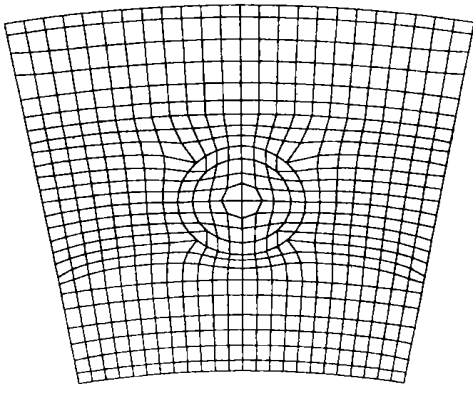


图 5 火焰筒头部壁面网格(ξ= 1 网格面)

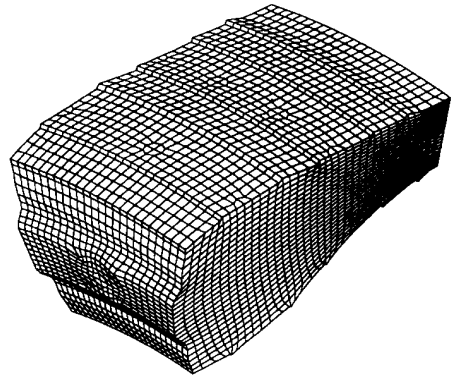


图 6 火焰筒立体网格图

2 交互式贴体曲线网格生成软件的设计

该软件用 VISUAL BASIC 语言设计了良好的用户界面和 图形显示, 把三维网格生成的各个部分, 集成在一起. 可以提供边界曲线输入与修改, 边界网格分布图形确定与修改. 用 C 语言和 FORTRAN 语言, 编写边界曲面和立体网格生成的程序. 通过 VB 调用它们. 并能图形显示所生成的网格. 使燃烧室三维曲线网格生成变得容易与直观. 该软件分为三部分.

1) 曲线部分

包括①边界曲线输入: 输入描述曲线的离散点的坐标. 输入离散点的类型(壁面点, 连接边, 气膜孔, 主燃孔, 掺混孔等) 和重复度(确定曲线不连

续的程度). 如果是掺混, 主燃孔就输入孔的半径. 然后用 B 样条拟合曲线. 如果不满意则可以对曲线进行修改. 最后存入文件. ② 曲线上网格点分布的确定: 用三次样条曲线表示边界曲线上每个网格点对应的积累弦长的曲线. 根据曲线的形状, 确定曲线上网格点分布. 这个积累弦长的曲线只需输入 3 至 4 个点即可确定. 如不满意可进行修改. ③ 曲线上网格点坐标的确定: 一是根据上面用三次样条确定的网格分布, 计算出网格点的坐标. 二是当曲线上有一些特殊点时, 直接在图上确定曲线网格点的坐标. 最后把网格点的间距变化在图上显示出来. 以判断分布的好坏.

2) 曲面部分

根据上面确定的边界曲线上的网格点坐标, 给定曲面坐标生成的一些选项, 调用曲面生成程序, 生成每个区域 6 个面上的曲线网格.

3) 立体网格部分

根据上面确定的 6 个边界面上的网格分布, 调用立体网格生成程序, 生成燃烧室三维贴体曲线网格, 然后可以显示立体网格和各个网格面, 可以对网格进行旋转, 平移和放大等观察. 并且可用图形格式文件输出, 如图 2~ 图 6 所示.

3　结 束 语

采用以上介绍的计算机交互式三维曲线生成的方法和软件, 可以很方便地生成具有一定通用性的燃烧室三维曲线网格. 并能输出边界曲面上网格点的类型, 用于流场计算.

参 考 文 献

1 Thompson Joe F. Grid generation techniques in computational flurid dynamic. AIAA J, 1984, 22(11): 1505~ 1523

2 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993. 228~ 317

3 Smith R E. A grid spacing control technique for algebraic grid generation methods. AIAA-82-0226, 1982

4 Woan C J. An integrated surface patch/ surface elliptic grid generator. AIAA-88-0512, 1988

5 Rajagopal K. A versatile multi-zonal girding technique fir complex geometry. AIAA-90-0011, 1990

Study on Grid Generation of Gas Turbine Combustor

Xu Hang　Yang Rong

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Jet Propulsion)

Abstract　The interactive grid generation method has been studied. The 3D body-fitted grid for whole combustor, which is composed of diffuser, outer and inner annular combustor, has been generated. The better density and orthogonality of grid could be achieved, The primary, dilution and film cooling holes on the liner of combustor could be treated properly. The type of grid on the boundary surface was exported for the numerical calculation of combustion flow. The boundary curves and distributions of grid points on them could be determined interactively. By use of the VISUAL BASIC language, all parts of grid generation were integrated into a set of software.

Key words　combustion chambers; grids; graphics; display