

文章编号: 0258-1825(2008)01-0008-06

## 基于雷达散射截面约束的气动优化设计

张 兆

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘 要:**采用拉格朗日乘子法优化设计了雷达散射截面约束条件下的锥形融合气动外形。拉格朗日乘子法中的极小化问题采用动态演化的优化设计方法求解。该方法是一种基于非定常演化的优化设计方法,即在求解非定常流动支配方程的时候同时履行优化过程,较其它基于定常解的优化方法具有高得多的计算效率。其中的雷达散射截面通过求解非结构的笛卡儿网格上的时域麦克斯韦方程来得到,而升阻比则通过求解锥形流方程来计算。通过优化设计,得到了  $M_\infty = 8.0$  时,升阻比为 4.98,雷达散射截面只有  $1.66\text{m}^2$  的锥形融合气动外形。

**关键词:**动态演化方法;拉格朗日乘子法;雷达散射截面;锥形流方程;非结构笛卡儿网格

**中图分类号:** V211.3

**文献标识码:** A

### 0 引 言

近代飞行器的设计是一项多学科综合的系统工程,要综合多方面的需求,例如既要有良好的气动性能(机动飞行器要求升阻比大),又要要求隐身、结构满足一定的条件。如何利用 CFD 的方法,在满足众多要求的条件下,设计出气动性能优化的飞行器,成为我们研究的目的。对于这个问题,综合运用 CFD 和 CEM 方法进行研究的,尚不多见。这样一类优化问题的数学提法可以表示为:

$$\begin{aligned} \min & f(c) \\ \text{s.t.} & g(c) \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

上式中:  $c = (c_1, \dots, c_m)^T \in R^m$  是表示确定气动外形的设计变量,  $f: R^m \rightarrow R$  是表示气动性能的目标函数,  $g(c) \geq 0$  是与设计空间和隐身参数相关的向量型约束条件。

### 1 拉格朗日乘子法

拉格朗日乘子法<sup>[1]</sup>由于具有良好的收敛速度和数值稳定性,广泛应用于约束优化问题的求解,所以求解(1)式描述的优化问题即可采用拉格朗日乘子法。具体是将问题的约束条件以某种惩罚策略添加到目标函数中,建立增广的拉格朗日函数  $\Psi$ ,从而将原先的约束优化问题化为一组对增广拉格朗日函数  $\Psi$  的无约束优化问题。

$$\min \Psi(c, \lambda, \mu, \sigma)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Psi(c, \lambda, \mu, \sigma) = & f(c) - \lambda^T(g(c) - \theta) \\ & + \frac{\sigma}{2}(g(c) - \theta)^T(g(c) - \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\theta = \max\{0, g(c) - \lambda/\sigma\}$ ,  $\lambda$  是拉格朗日乘子向量,  $\sigma$  是罚因子,并且乘子向量和罚因子的递推公式为:

$$\begin{aligned} \lambda^{(k+1)} &= \max\{0, \lambda^{(k)} - \sigma^{(k)}g(c^{(k)})\} \\ \sigma^{(k+1)} &= \tau \cdot \sigma^{(k)} \quad (\tau > 1, \text{const}) \end{aligned} \quad (3)$$

考察如图 1 所示的半圆锥和三角翼的组合气动外形,  $\beta, \delta, \omega$  分别是组合外形的半锥角、半翼角和楔形顶角。图中的圆锥和楔形三角翼融合的过渡曲线 ADEC 采用如下的球坐标变量  $(\theta, \varphi)$  空间中的曲线方程:

$$\theta = \begin{cases} (\delta - \beta)\left(\frac{4\varphi}{\pi} - 1\right)^2 + \beta & 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{4} \\ \beta & \frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

并在其翼缘端对曲线采取圆滑处理。这样形成了以半锥角  $\beta$ , 半翼角  $\delta$  和楔形顶角  $\omega$  为设计变量的三个参数优化设计问题,即  $c = (\beta, \delta, \omega)^T$ 。如果其气动性能用升阻比表示,给定其雷达反射截面积的限制以及结构体积限制,则约束优化问题可以表示成:

$$\min f(\beta, \delta, \omega) = -\frac{L}{D}$$

• 收稿日期: 2007-01-30; 修订日期: 2007-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助(项目批准号: 90305012).

作者简介: 张兆(1980-),男,四川,博士研究生,主要从事流体力学专业。

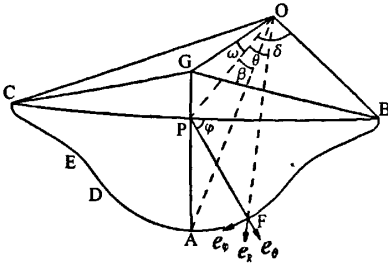


图1 优化设计的锥型体外形

Fig.1 The conical configuration

$$\text{s.t.} \quad RCS(\beta, \delta, \omega) \leq RCS_{\text{Design}} \quad (5)$$

$$\frac{\pi}{24} \leq \beta \leq \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{18} \leq \delta \leq \frac{\pi}{6}, 0 \leq \omega \leq \frac{\pi}{36}$$

应用增广的拉格朗日函数可以将上述约束优化问题表示成如下无约束的优化问题:

$$\min \Psi(c, \lambda, \sigma) = f(c) + \frac{1}{2\sigma} \sum_{i=1}^7 [\max\{0, \lambda_i - \sigma \cdot g_i(c)\}^2 - \lambda_i^2] \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} g_1 &= RCS_{\text{Design}} - RCS(\beta, \delta, \omega) \\ g_2 &= \beta - \frac{\pi}{24}, g_3 = \frac{\pi}{12} - \beta, g_4 = \delta - \frac{\pi}{18} \\ g_5 &= \frac{\pi}{6} - \delta, g_6 = \omega - 0, g_7 = \frac{\pi}{36} - \omega \end{aligned} \quad (7)$$

所以对于(5)式所描述的优化问题的求解需要如下三个步骤:首先要求解流动控制方程来获得气动参数,其次要求解电磁场方程来计算雷达散射截面,然后就是对无约束优化问题(6)的求解。

## 2 气动参数的计算

### 2.1 控制方程及其离散方法

这里采用无粘的 Euler 方程。图1所示的物体是锥形体,故 Euler 方程可以简化成锥形流方程。为此,采用球面坐标 $(\theta, \varphi)$ 系下的无量纲锥形流方程<sup>[2]</sup>做为流动控制方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial F}{\partial \theta} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial G}{\partial \varphi} + \frac{2E}{R} + \frac{F \cdot \cot \theta}{R} + S = 0 \quad (8)$$

其中守恒变量  $Q$ , 通量项  $E, F, G$  和源项  $S$  如下:

$$\begin{aligned} Q &= [\rho, \rho V_R, \rho V_\theta, \rho V_\varphi, e]^T \\ e &= \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho}{2} (V_R^2 + V_\theta^2 + V_\varphi^2) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} \rho V_R \\ \rho V_R^2 + p \\ \rho V_R V_\theta \\ \rho V_R V_\varphi \\ (e + p) V_R \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} \rho V_\theta \\ \rho V_\theta V_R \\ \rho V_\theta^2 + p \\ \rho V_\theta V_\varphi \\ (e + p) V_\theta \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} \rho V_\varphi \\ \rho V_R V_\varphi \\ \rho V_\theta V_\varphi \\ \rho V_\varphi^2 + p \\ (e + p) V_\varphi \end{bmatrix} \\ S &= \left[ 0, -\frac{2p}{R} - \rho \frac{V_\theta^2 + V_R^2}{R}, \frac{\rho}{R} (V_R V_\theta - V_\varphi^2 \cot \theta) - \frac{p \cdot \cot \theta}{R}, \right. \\ &\quad \left. \frac{\rho}{R} (V_R V_\varphi + V_\theta V_\varphi \cot \theta), 0 \right]^T \quad (10) \end{aligned}$$

这里的  $\rho, p, V_R, V_\theta, V_\varphi$  分别为气体的压力、密度和球坐标三个方向  $R, \theta, \varphi$  上的速度分量,  $\gamma$  为绝热指数。并采用  $p = \rho RT$  的完全气体假设。

对于上述锥形流方程,这里在半径  $R=1$  的球面上离散求解。考虑到流动具有对称性,同时高超声速流下锥形激波影响域有限,所以计算空间为  $\theta \times \varphi = [0, \pi/4] \times [0, \pi]$ 。离散方程写成:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{j,k}^n + \bar{S}(Q_{j,k}^n) + \frac{1}{R} \frac{\hat{F}_{j+1/2,k}^n - \hat{F}_{j-1/2,k}^n}{\Delta \theta} \\ + \frac{1}{R \sin \theta_j} \frac{\hat{G}_{j,k+1/2}^n - \hat{G}_{j,k-1/2}^n}{\Delta \varphi} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $\hat{S}_{j+1/2,k}^n = S + \frac{2E}{R} + \frac{F \cot \theta}{R}$  式中的  $\hat{F}_{j+1/2,k}^n$   $\hat{G}_{j,k+1/2}^n$  分别是相应控制界面上的数值通量,采用张涵信提出的 NND 格式<sup>[3]</sup>计算。通量  $\hat{F}_{j+1/2,k}^n$  可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{F}_{j+1/2,k}^n &= \hat{F}_{\hat{F}}^+ + \hat{F}_{\hat{F}}^- \\ \hat{F}_{\hat{F}}^+ &= F^+(Q_{j,k}) + \frac{1}{2} \min \text{mod}(F_{j+1,k}^+ - F_{j,k}^+, F_{j,k}^+ - F_{j-1,k}^+) \\ \hat{F}_{\hat{F}}^- &= F^-(Q_{j+1,k}) - \frac{1}{2} \min \text{mod}(F_{j+2,k}^- - F_{j+1,k}^-, F_{j+1,k}^- - F_{j,k}^-) \end{aligned} \quad (12)$$

通量  $\hat{G}_{j,k+1/2}^n$  可以类似地表示出来。方程在时间方向上采用二阶 Runge-Kutta 方法<sup>[4]</sup>离散

$$\begin{aligned} Q^{n+1/2} &= Q^n + \frac{1}{2} \Delta t \cdot L(Q^n) \\ Q^{n+1} &= Q^n + \Delta t \cdot L(Q^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.2 边界条件

对于这里的球面上超音速锥形流而言,只有来流条件和固壁条件,没有出口条件。给定超音速来流条

件:

$$\rho = \rho_{\infty}, V = V_{\infty}, p = p_{\infty} \quad (14)$$

对于运动固壁而言,这里规定外形上的每一点的演化都沿着其壁面法向  $n$ 。表面运动的速度  $D$  可以表示成:

$$D = (n \cdot V_s) n \quad (15)$$

$$D = n \cdot (r_i^{n+1} - r_i^n) / \Delta t \quad (16)$$

$r_i, V_s$  为不同时刻下坐标原点到表面点的矢径和表面上流场速度。这里采用的是球面坐标系网格,在固壁上并未贴体,所以计算网格被外形所截。对于固壁边界条件的处理,这里采用壁面内虚单元的来补齐目标体内部节点上的参数,使得整个计算域内部的计算节点都有足够的模板点,从而可以采用统一通量格式。虚单元的  $Q_N$  可以由镜像点  $Q_M$  通过镜像对称来实现:

$$Q_N = T_{\text{micro}} \cdot Q_M \quad (17)$$

$T_{\text{micro}}$  是镜像变换矩阵,它使得守恒变量  $Q$  中的法向量求反,切向量连续,而标量保持不变。

通过对流动控制方程的求解,得出外形的表面压力,积分后可给出升力  $L$  和阻力  $D$ ,然后进一步计算出气动参数:升阻比  $f = -L/D$ 。

### 3 雷达散射截面的计算

#### 3.1 控制方程及其离散方法

对于雷达散射截面的计算,这里采用非结构笛卡儿网格,结合计算流体力学中的数值方法,通过求解时域中的麦克斯韦方程组来获得。非结构的笛卡儿网格<sup>[5]</sup>广泛的应用于计算流体力学中,这种网格对于复杂外形具有良好的适应型。时域中的守恒型麦克斯韦方程组可以表示为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = S \quad (18)$$

$$Q = (B_x \ B_y \ B_z \ D_x \ D_y \ D_z)^T$$

$$E = (0 \ -D_x/\epsilon \ D_y/\epsilon \ 0 \ B_z/\mu \ -B_y/\mu)^T$$

$$F = (D_x/\epsilon \ 0 \ -D_z/\epsilon \ -B_z/\mu \ 0 \ B_x/\mu)^T$$

$$G = (-D_y/\epsilon \ D_x/\epsilon \ 0 \ B_y/\mu \ -B_x/\mu \ 0)^T$$

$$S = (0 \ 0 \ 0 \ -J_x \ -J_y \ -J_z)^T \quad (19)$$

其中,  $B = (B_x, B_y, B_z)^T$ ,  $D = (D_x, D_y, D_z)^T$  和  $J = (J_x, J_y, J_z)^T$  分别是磁感应强度矢量,电位移矢量和自由电流密度矢量; $\epsilon, \mu$  分别是介电常数和磁导率。

对于自由空间而言  $J = 0$ 。

方程时间上的离散采用如(17)式的二阶龙格库塔方法,在空间上的离散采用非结构的 NND 格式<sup>[6]</sup>。对 Maxwell 方程组的有限体积法可以表示为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \sum_{m=1}^M H_m \cdot A_m = S \quad (20)$$

其中:  $H_m = (E_m \cdot n_x + F_m \cdot n_y + G_m \cdot n_z)$

式中  $(n_x, n_y, n_z)$  是控制单元第  $m$  个界面的外法向量。界面上的通量  $E_m$  用 NND 格式表示为:

$$\begin{aligned} E_m = & E_1^+ + (x_m - x_1) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^+}{\partial x}, \frac{\partial E_2^+}{\partial x} \right) \\ & + (y_m - y_1) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^+}{\partial y}, \frac{\partial E_2^+}{\partial y} \right) \\ & + (z_m - z_1) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^+}{\partial z}, \frac{\partial E_2^+}{\partial z} \right) \\ & + E_2^- + (x_m - x_2) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^-}{\partial x}, \frac{\partial E_2^-}{\partial x} \right) \\ & + (y_m - y_2) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^-}{\partial y}, \frac{\partial E_2^-}{\partial y} \right) \\ & + (z_m - z_2) \min \text{mod} \left( \frac{\partial E_1^-}{\partial z}, \frac{\partial E_2^-}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中  $(x_m, y_m, z_m)$  是  $m$  界面的几何中心;下标“1”和“2”分别表示界面正负方向上的单元;  $E^+, E^-$  对应于  $E$  的正负通量。

$$E^+ = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{B_y}{2\sqrt{\mu\epsilon}} - \frac{D_z}{2\epsilon} \\ \frac{B_z}{2\sqrt{\mu\epsilon}} + \frac{D_y}{2\epsilon} \\ 0 \\ \frac{B_z}{2\mu} + \frac{D_y}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \\ -\frac{B_y}{2\mu} + \frac{D_z}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \end{bmatrix}; E^- = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{B_y}{2\sqrt{\mu\epsilon}} - \frac{D_z}{2\epsilon} \\ -\frac{B_z}{2\sqrt{\mu\epsilon}} + \frac{D_y}{2\epsilon} \\ 0 \\ \frac{B_z}{2\mu} - \frac{D_y}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \\ -\frac{B_y}{2\mu} - \frac{D_z}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

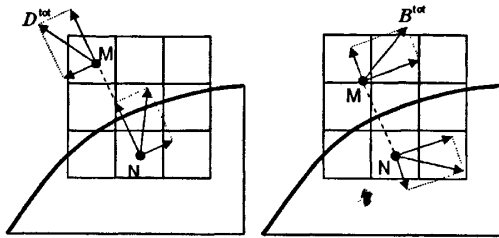
上式中单元  $P$  上的通量梯度  $\nabla E$  可以通过周围单元的参数采用线性最小二乘重构法来确定。界面上的通量函数  $F_m, G_m$  可以采用类似的方法表达。

#### 3.2 边界条件

理想导体边界条件:在界面处的边界条件要求总磁场的切向分量和总电场的法向分量在穿过界面时

保持连续,总磁场的法向分量和总电场的切向分量为零。同流场壁面边界条件的处理近似,为了保证内场内各个单元在计算时都有足够的模板点,在壁面内部补充一层虚单元,如图2所示。虚单元  $N$  中的参数由其边界镜象点  $M$  的参数通过下式计算:

$$\begin{aligned} D_N^{\text{tot}} &= 2(D_M^{\text{tot}} \cdot n)n - D_M^{\text{tot}} \\ B_N^{\text{tot}} &= B_M^{\text{tot}} - 2(B_M^{\text{tot}} \cdot n)n \end{aligned} \quad (23)$$



(a) 电场  $D$  的壁面边界处理 (b) 磁场  $B$  的壁面边界处理  
图2 壁面虚单元和壁面边界条件

Fig.2 Ghost cells and treatment of the PEC boundary

因为电磁散射问题是个无限大空间问题,但是计算域不能无限大,所以需要引入远场人工边界通过吸收边界条件来进行截断,即只允许散射波传出,而不能反射回到计算域中。对于远场边界点  $P$  而言,其散射波沿着其坡映享矢量  $S = D \times B / \epsilon \mu$  传播,因此远场吸收边界条件可以写成:

$$(\partial_t + S_x \partial_x + S_y \partial_y + S_z \partial_z) Q = 0 \quad (24)$$

### 3.3 RCS的求解

雷达散射截面<sup>[7]</sup>(Radar Cross Section)  $\sigma$  是在给定方向上返回的散射功率的一种频域响应量度。因此首先使用离散傅立叶变换实现时域参数  $B, D$  到频域参数  $\hat{B}, \hat{D}$  的转换,然后再利用 Stratton-Chu 积分公式实现散射场近场到远场的变换,最终求解出雷达散射截面。

## 4 基于动态演化的优化设计方法

张涵信和沈孟育提出的基于动态演化最优优化设计方法<sup>[8]</sup>认为可以通过外形的动态演化控制来实现最优优化过程,即在非正常演化过程中同时履行优化过程。

### 4.1 算法描述

设  $z = F(x, y, c_1, \dots, c_m)$  为物体的外形,其中  $(c_1, \dots, c_m)$  为设计变量,把它们看作时间的函数,不

同的时间就对应不同的外形。再设  $\Psi(c_1, \dots, c_m)$  为需要优化的量,即目标函数(如升阻比)或增广的 Lagrange 函数,它是设计变量的函数。我们希望当设计变量达到某组值  $c_1^*, \dots, c_m^*$  时,  $\Psi$  有最小(大)值。因为  $c_1, \dots, c_m$  是时间的函数,这就意味着当外形变化到某一时刻,  $c_1, \dots, c_m$  达到该组值时,该外形就是最优外形。寻求最优气动外形,就是在动态变化的外形中,寻求满足优化条件的某一外形。

设  $t = t^n$ , 给定设计变量  $c_i^n (i = 1, \dots, m)$  来描述物体的外形:  $z^n = F(x, y, c_1^n, \dots, c_m^n)$ 。在  $t = t^{n+1} = t^n + \Delta t$ , 对第  $k$  个变量  $c_k^n$  做  $\Delta c_k$  的变化,而其它变量  $c_i^n (i \neq k)$  则保持不变,就有新外形:  $z_k^{n+1} = F(c_1^n, \dots, c_k^n + \Delta c_k, \dots, c_m^n)$ 。对于上边的两个外形  $z^n$  和  $z_k^{n+1}$ , 可以通过分别求解流动控制方程给出其对应的气动参数  $f^n$  和  $f_k^{n+1}$ 。然后通过 Maxwell 方程的求解,定出雷达散射截面的约束  $g_1^n$  和  $g_1^{n+1}$ , 用其它方法定出其余的约束  $g_i^n$  和  $g_i^{n+1} (i \neq 1)$ , 这样就可以计算出和  $\Psi_k^{n+1} = \Psi(c_1^n, \dots, c_k^n + \Delta c_k, \dots, c_m^n)$  和  $\Psi^n = \Psi(c_1^n, \dots, c_m^n)$ 。这样就可以计算出  $\Delta \Psi_k^n = \Psi_k^{n+1} - \Psi^n$ , 进一步可计算出  $(\partial \Psi / \partial c_k)^n$ 。这里的上标“ $n$ ”表示  $n$  时刻。改变  $k$ , 使其取其它标号的值, 就可以求得  $\Psi$  在  $n$  时刻的梯度  $\text{grad}(\Psi^n)$ 。根据最优化算法, 可以沿这目标函数的梯度方向搜索  $n+1$  时刻的设计变量:

$$c_k^{n+1} = c_k^n + \alpha \cdot (\frac{\partial \Psi^n}{\partial c_k}) / \|\nabla \Psi^n\| \quad (25)$$

式中的松弛因子  $\alpha$  就是搜索步长。这样由新时刻  $t^{n+1}$  的设计变量  $c_i^{n+1} (i = 1, \dots, m)$  就可以得到新时刻的物体外形, 求出相应的  $f^{n+1}$  和  $g_i^{n+1}$ , 进一步求出  $\Psi^{n+1}$ 。若  $\Psi^{n+1}$  是当地的局部极值, 则该时刻对应的外形就是所要求的最优外形; 否则, 推进一个时间步做迭代运算, 直到收敛为止。

### 4.2 应用设计

锥体外形出发, 初始外形如图1。

初始条件:

$$\rho_\infty = 1.4, M_\infty = 8.0, p_\infty = 1.0, \alpha = 0$$

$$\beta^{(0)} = 15^\circ, \delta^{(0)} = 30^\circ, \omega^{(0)} = 5^\circ$$

$$RCS_{\text{Design}} = 15 \text{m}^2$$

优化设计结果, 具体见表1:

$$\beta = 7.5^\circ, \delta = 16.7^\circ, \omega = 0^\circ$$

$$C_L = 0.355, C_D = 0.0725, L/D = 4.98$$

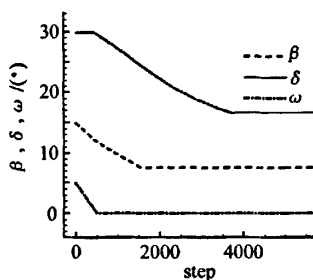
$$RSC = 1.66\text{m}^2$$

表1 初始参数和优化参数的对比

Table 1 Comparison between initial and optimal parameters

	$\beta$	$\delta$	$\omega$	$L/D$	RCS
初始参数	15.0°	30.0°	5°	2.84	15.56m <sup>2</sup>
优化结果	7.50°	16.7°	0°	4.98	1.66m <sup>2</sup>

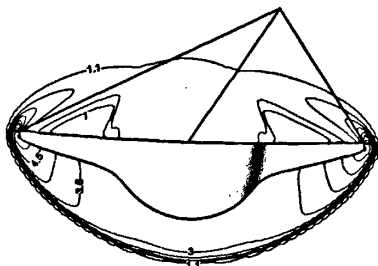
图3(a)给出了优化过程中,各个设计变量 $\beta$ , $\delta$ , $\omega$ 的变化,最终的优化结果为 $\beta = 7.5^\circ$ , $\delta = 16.7^\circ$ 、 $\omega$



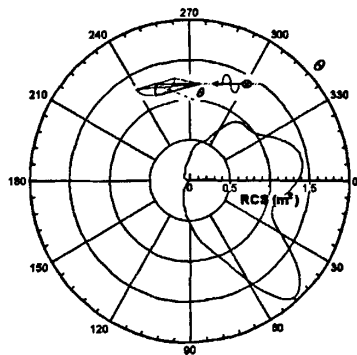
(a) 设计变量的演化

图3 设计参数的变化

Fig.3 Variation of parameters in optimal process



(a) 优化的气动外形及其压力场

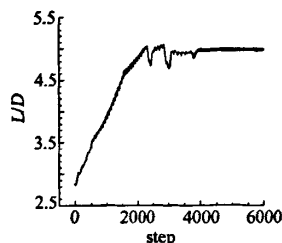


(c) 最优外形对称面上的双站雷达散射截面

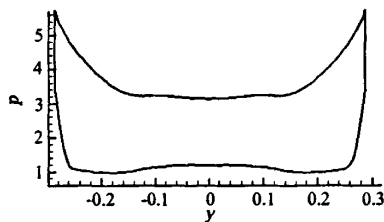
图4 优化结果

Fig.4 Optimal result

$= 0^\circ$ ,其对应的升阻比为 $L/D = 4.98$ ;图3(b)是升阻比的演化过程。图4(a)给出了最优外形下对应的压力场分布;图4(b)则为最优外形上下表面压力分布,可以看到翼尖的高压区将下表面的高压气体封在下边,保持下表面的高压,而上表面的压力基本上保持来流压力;图4(c)给出了最优外形对称面上的双站雷达散射截面的分布情况,此种情形下最大雷达散射截面 $RCS = 1.66\text{m}^2$ ,对应的观察角约为 $57^\circ$ 。



(b) 升阻比的变化



(b) 优化外形上下表面的压力分布

## 5 结论

本章采用拉格朗日乘子法,结合我们提出的动态演化方法成功地完成了带有隐身约束的锥型体气动优化设计。在优化的过程中,通过求解无粘的高超声速锥形流方程来计算锥型体的气动参数;而雷达截面的计算则是在非结构笛卡儿网格上采用有限体积法求解时域中的麦克斯韦方程来获得的;采用动态演化方法,求解了优化过程中的无约束极小化问题。在 $M_\infty = 8.0$ 的超声速来流条件下,我们得到了一个翼身融合的锥型体(由半圆锥和三角翼组合而成的气动外形),它的升阻比高达4.98,接近 $M_\infty = 8.0$ 时的升阻比限,而最大的双站雷达截面也只有 $1.66\text{m}^2$ ,完全满足隐身的约束。

本文在张函信、沈孟育教授指导下完成的,特表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 万仲平, 费浦生. 优化理论与方法 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [2] 克拉斯诺夫. 旋成体空气动力学 [M]. 浙江大学应用力学教研组译. 北京: 科学出版社, 1965.
- [3] 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式 [J]. 空气动力学学报, 1988, 6(2): 143-165.
- [4] ELEULERIO F TORO. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics [M]. Springer Press, 1999.
- [5] BERGER M J, LEVEQUE R J. An adaptive Cartesian mesh algorithm for the Euler equations in arbitrary geometries [R]. 1989. AIAA 89-1930-CP.
- [6] 张来平, 张涵信. NND 格式在非结构网格中的推广 [J]. 力学学报, 1996, 28: 135-142.
- [7] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [8] 张涵信, 沈孟育. 基于动态演化的最优化方法 [A]. 近代空气动力学文集 [M]. 北京: 宇航出版社, 2004.

## Aerodynamic optimization with the constrain of radar cross section

ZHANG Zhao

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In this paper, adopting the radar cross section as the constraint condition, a new conical aerodynamic configuration is presented using the Lagrange multiplier method, and the minimization problems are solved by the dynamic evolution method. In the dynamic evolution method, the unconstrained optimization is executed, simultaneously with the unsteady flow governing equations solved and objective function gradient obtained. This method costs less computing spending than other optimal methods based on solving steady state flow governing equations. The RCS of the configuration is computed using Finite-Volume Time-domain (FVTD) Method to solving the Maxwell equations; the lift-to-drag ratio is obtained by solving the conical flow equations. As a result, the optimum conical configuration is achieved, and whose lift-to-drag ratio reaches 4.98, RCS is only  $1.66 \text{ m}^2$ .

**Keywords:** dynamic evolution method; Lagrange multiplier; radar cross section; conical flow equations; unstructured Cartesian grid

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>