

文章编号: 1000-6893(2002)04-04-0324

## 鼓包对舵的气动特性影响研究

董程栋<sup>1</sup>, 叶卫国<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 1011 研究室, 上海 200030)

(2. 上海航天局 第八设计部, 上海 200233)

### RESEARCH ON AERODYNAMICAL CHARACTERISTICS OF A FIN WITH BULGE

DONG Cheng-dong<sup>1</sup>, YE Wei-guo<sup>2</sup>

(1. 1011 Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

(2. General Design Department of Astronautics Industry Bureau of Shanghai, Shanghai 200233, China)

**摘 要:** 运用自适应八叉树结构直角网格 Euler 算法对舵的流场进行了模拟。与无鼓包的舵相比较, 带有鼓包的舵其气动特性, 尤其是阻力有所变化。给出了直角网格生成方法以及 Euler 方程解法。结果显示, 本算法很准确地捕捉了激波, 真实地模拟了该流场。在此基础上讨论了鼓包及其位置对舵的气动特性的影响。

**关键词:** 鼓包; 舵; Euler 方程; 八叉树结构; 直角网格

**中图分类号:** V211.3 **文献标识码:** A

**Abstract:** A computational study based on the Cartesian grid method and Euler solver for the three-dimensional inviscid flow around a fin with a bulge has been conducted. Compared with the fin without bulges, the aerodynamic characteristics of the a fin with a bulge are changed, especially for the drag. This paper explains the general issues of the grid generation and Euler solver. The computational Mach contours agree well with the corresponding experimental ones. Effects of the existence and position of a bulge have been discussed.

**Key words:** bulge; fin; Euler equations; octree structure; Cartesian grid

采用箱式发射的战术导弹, 为减小箱体尺寸, 实现多联装, 必须减小导弹的展向尺寸, 采用折叠舵是一种行之有效的方法。折叠方式分为沿导弹轴向和展向折叠两种。展向折叠方式一般采用扭簧加扭杆折叠机构, 由于扭杆需要一定的长度才能提供足够的扭矩, 而扭簧的直径一般总是大于舵的厚度, 因此, 在折叠部位有一突起的鼓包, 并伸出舵的前缘。带折叠舵的正常式布局气动外形的气动实验数据表明, 鼓包的存在对舵的气动特性, 尤其是阻力特性有一定的影响。当  $Ma = 1.2, 1.5$  时, 鼓包并没有增加舵的阻力, 而是使阻力有所减小。当  $Ma$  更大时, 舵的阻力基本不变。分析认为, 超音速时, 鼓包头部产生的激波改变了舵的绕流流场, 可能使舵前缘的激波强度减弱, 导致前缘压力降低, 舵本身的阻力下降, 而减小的这一部分阻力可能大于鼓包头部产生的阻力, 从而导致有鼓包时, 舵的总阻力下降。实验数据表明, 鼓包的减阻作用随  $Ma$  增大而减小, 这是由于鼓包头部激波的影响区域减小, 而鼓包头部产生的阻力增加。由此可知, 头部激波影响区和头部阻力的大小是影响减阻效果的主要因素, 鼓包的位置也会

对舵的气动力产生一定的影响。

为验证并确定此影响的大小, 本文对舵的流场进行了数值模拟。采用了八叉树结构直角网格方法<sup>[1, 2]</sup>, 给出了网格生成的过程, 并采用 Jameson 的有限体积法<sup>[3]</sup>求解三维 Euler 方程。计算结果与实验很好的符合。在此基础上讨论了鼓包及其位置对舵的气动特性的影响。

### 1 直角网格生成技术

三维物理的表面通常为一个较为复杂的曲面, 一般没有解析表达式, 因此有必要对外形进行预处理, 即把整个物体表面三角化。一个复杂外形通常可以看成是若干个简单外形的组合。

将需计算的流场取成长方体。对该长方体均匀地进行划分, 使得每一个网格均为正方体, 然后根据物体的几何形状进行必要的局部加细来产生一个适宜的网格。加细指把要加细的正方体网格一分为八的八叉树结构。找到与物面相交的网格, 把它及其各个方向上的 3 个最近的邻居加细。每进行一次此过程, 就生成一层更细的网格, 直到最细一层网格的大小达到事先给定的限制值为止。

### 2 Euler 方程解法

Euler 方程的积分形式为

$$\int_{\Omega_k} \frac{\partial W}{\partial t} dV + \int_{\alpha_k} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

其中:  $\mathbf{W} = (\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho w \quad \rho E)^T$ ;  $\mathbf{F}$  是通量。

采用以中心差分为基础的 Jameson 的有限体积法<sup>[3]</sup>及四步 Runge-Kutta 时间推进格式求解 Euler 方程。在计算网格单元通量的过程中, 采用的是以有效面为基础的算法<sup>[2]</sup>。假设通过一个有效面的通量为  $F$ , 如果这个面两边的网格大小相同, 那么把  $-F$  赋给左边的网格, 把  $F$  赋给右边的网格; 如果左边的网格小于右边的网格, 那么左网格  $-F$ , 右网格  $0.5F$ 。如此按面进行循环, 累计便得到每个有效单元的通量积分, 可以省去频繁地查找网格邻居的工作量, 节省机时。

### 3 计算结果

计算了不同  $Ma$ ( 攻角为零) 的单独舵流场,

以研究其气动特性的变化规律。

图 1 和图 2 为舵的表面直角网格图, 图 3 是  $Ma = 1.2$  时无鼓包舵计算所得等  $Ma$  数线图, 图 4 是风洞实验中所拍摄的照片。从中可以看到数值计算准确地捕捉到了激波。图 5 和图 6 分别是  $Ma = 1.2$  和  $Ma = 1.5$  时有鼓包舵的风洞实验照片, 图 7 和图 8 则是计算所得等  $Ma$  数线图, 此时鼓包头部位于舵根前缘之前 38mm, 与实验情况一致。从对应的图的比较可以看出数值计算很好地模拟了真实流场。图 9 和图 10 鼓包头部在舵根前缘之后 18mm 的情况下计算所得的等  $Ma$  数线图。鼓包前后位置的移动对流场, 尤其是舵前缘流场的改变是很明显的。图 11 是不同马赫数情况下的压差阻力系数图, 从中可以看出阻力的变化情况。

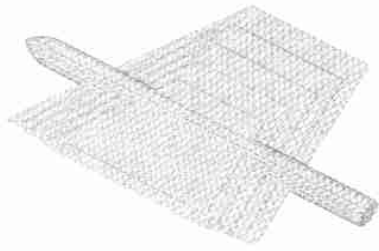


图 1 有鼓包舵的表面直角网格  
Fig. 1 Cartesian mesh of the fin with a bulge

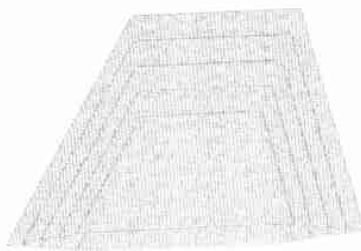


图 2 无鼓包舵的表面直角网格  
Fig. 2 Cartesian mesh of the fin without bulges

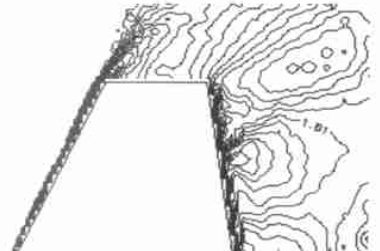


图 3 无鼓包舵的等  $Ma$  数线图 ( $Ma = 1.5$ )  
Fig. 3 Mach contours of the fin without bulges ( $Ma = 1.5$ )



图 4 无鼓包舵的风洞实验照片 ( $Ma = 1.5$ )  
Fig. 4 Picture of the fin without bulges in wind tunnel ( $Ma = 1.5$ )



图 5 有鼓包舵的风洞实验照片 ( $Ma = 1.2$ )  
Fig. 5 Picture of the fin with a bulge in wind tunnel ( $Ma = 1.2$ )

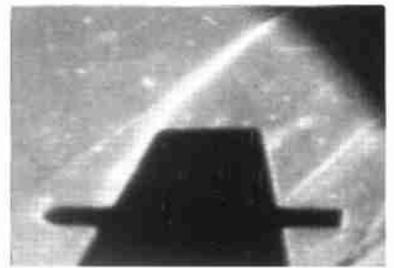


图 6 有鼓包舵的风洞实验照片 ( $Ma = 1.5$ )  
Fig. 6 Picture of the fin with a bulge in wind tunnel ( $Ma = 1.5$ )

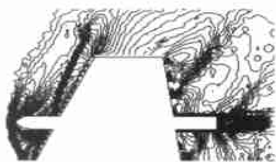


图 7 计算所得等  $Ma$  数线图 ( $Ma = 1.2, x_0 = -38$ )  
Fig. 7 Mach contours of the fin with a bulge ( $Ma = 1.2, x_0 = -38$ )



图 8 计算所得等  $Ma$  数线图 ( $Ma = 1.5, x_0 = -38$ )  
Fig. 8 Mach contours of the fin with a bulge ( $Ma = 1.5, x_0 = -38$ )



图 9 计算所得等  $Ma$  数线图 ( $Ma = 1.2, x_0 = 18$ )  
Fig. 9 Mach contours of the fin with a bulge ( $Ma = 1.2, x_0 = 18$ )

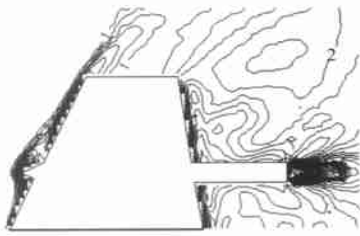


图 10 计算所得等  $Ma$  数线图( $Ma = 1.5, x_0 = 18$ )

Fig. 10 Mach contours of the fin with a bulge( $Ma = 1.5, x_0 = 18$ )

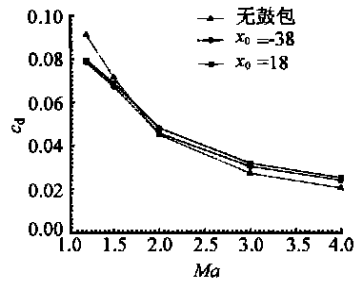


图 11 压差阻力系数

Fig. 11 Pressure drag coefficient

#### 4 结果分析

数值模拟结果表明,  $Ma = 1.2, 1.5$  时, 有鼓包的舵的阻力明显减小, 随着  $Ma$  数的逐渐增大, 当  $Ma = 2.0, 3.0, 4.0$  时, 有鼓包的舵的阻力已不小于无鼓包的舵。这是因为  $Ma$  数较小时, 鼓包头部产生的激波影响区域较大, 导致舵的前缘压力减少较多, 从而使阻力减小; 相反, 当  $Ma$  数较大时, 鼓包头部产生的激波影响区域较小, 舵的前缘压力减小不多, 已不足以抵销鼓包本身产生的阻力, 从而舵的阻力不减小。这与实验结果相符。

当鼓包向后移时, 尤其是在  $Ma$  数较大的情况下, 阻力明显增大。这是因为  $Ma$  数较小时, 鼓包的位置变化对鼓包头部产生的激波影响区域范围的影响不大; 而当  $Ma$  数较大时, 随着鼓包的后移, 激波影响区域变小, 舵前缘压力减小的幅度也变小, 因此阻力也就越来越大。

#### 参 考 文 献

- [1] 董程栋, 黄明恪. 三维 Euler 方程的自适应八叉树结构直角网格算法[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(1): 12-17.  
(Dong C D, Huang M K. An adaptively refined octree

Cartesian mesh solver for 3-D Euler equations[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 31(1): 12-17.)

- [2] 董程栋. 三维复杂无粘流场的自适应八叉树结构直角网格算法模拟[J]. 航空学报, 1999, 21(6): 504-507.  
(Dong C D. Numerical simulation for 3-D complex inviscid flow field with adaptive octree cartesian grids[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 21(6): 504-507.)
- [3] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical solutions of the Euler equations by the finite volume methods using Runge-Kutta time stepping schemes[R]. AIAA 81-1259, 1981.

作者简介:



董程栋(1972-) 男, 1999年毕业于南京航空航天大学空气动力学系, 获工学博士学位, 现于上海交通大学工程热物理博士后流动站从事博士后研究工作。研究方向有: 复杂流场网格生成, Euler 方程及 N-S 方程计算。联系电话: 021-62932242。Email: dcddcd@online.sh.cn

叶卫国(1954-) 男, 上海航天局第八设计部高级工程师, 主要从事航天气动力研究, 联系电话: 021-64701725-1510。Email: ywg843@citiz.net.

(责任编辑: 吴小勇)