

文章编号: 0258-1825(2004)01-0080-04

三维复杂外形横截面拓扑结构随迎角变化研究

刘伟

(国防科技大学航天与材料工程学院宇航科学与工程系, 湖南长沙 410073)

摘要 通过数值求解抛物化的椭圆型方程生成复杂外形三维网格;采用交替方向隐式分解的隐式 NND 格式求解全 N-S 方程模拟“类升力体”外形在高超声速下的大迎角流动;采用张涵信发展的流动拓扑结构理论分析给出了“类升力体”外形垂直于体轴的横截面流线随迎角变化的拓扑结构;此外,通过计算发现:大于 20°迎角后,在部分横截面背风对称线上出现结构不稳定的鞍点相连现象。

关键词: NND 格式;升力体;N-S 方程;高超声速流动;拓扑分析

中图分类号: V211.4 文献标识码: A

0 引言

升力体构架外形由于升阻比高,并具有较强的机动能力等,已被下一代可重复使用航天运载器设计所采用,因此其气动特性研究受到世界各国广泛重视。事实上,NASA 从 20 世纪 60 年代就对升力体外形开始预先研究,进行了大量的理论研究、风洞试验及飞行实验。但尽管如此,其气动问题仍没有完全解决,在已经受到重大挫折的 X-33 计划中,还曾发现横侧不稳定性。因此,可重复使用运载器要真正达到实用化水平,仍必须在包括流动机理等诸多方面做深入研究。

涉及流动分离和旋涡运动的流场结构分析理论在 20 世纪 80~90 年代取得了不少进展,特别是张涵信等^[1~3]在流动分离的识别和定性描述、横截面(垂直于体轴或垂直于物面)流态拓扑结构分析,以及旋涡沿涡轴的分叉演变规律等方面的系统研究成果对揭示流动机理和发现新的物理规律起重要的指导作用。

本文数值模拟类升力体外形的高超声速绕流,其三维空间网格通过求解抛物化的椭圆型方程生成,计算中采用空间二阶精度的隐式 NND 格式求解全 N-S 方程,给出了 $M = 8$, $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 下垂直于体轴的横截面流线的拓扑结构变化。

1 控制方程及差分算法

1.1 控制方程

采用贴体坐标系下非定常完全气体三维可压缩流动无量纲守恒形式的 N-S 方程:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \quad (1)$$

\bar{Q} 为守恒状态变量, \bar{E} 、 \bar{F} 、 \bar{G} 为无粘通矢量, \bar{Q}_v 、 \bar{F}_v 、 \bar{G}_v 为粘性通矢量。

1.2 差分算法

控制方程的离散采用 NND 格式,除个别点外,该格式在空间上具有二阶精度,为提高收敛效率采用左端线性化处理的 ADI 形式的 Δ 型隐式 NND 格式^[4]。

2 计算网格

一般来说,升力体外型往往具有带上反角的机翼。通常的代数方法很难适应这类外型。本文采用求解抛物化椭圆型方程的方法沿体轴逐剖面生成网格^[5],该方法保留了椭圆型方程解析性好的特点,同时又可推进求解,不须迭代。图 1 为本文所计算外形的物面及空间网格。从图中可见网格具有良好的正交性、光滑性和均匀性。

* 收稿日期:2003-01-17; 修订日期:2003-04-30.

基金项目:湖南省自然科学基金(01JJY2008)及国家部委预研项目资助.

作者简介:刘伟(1965-)男,副研究员,主要从事非定常空气动力学及动态特性研究.

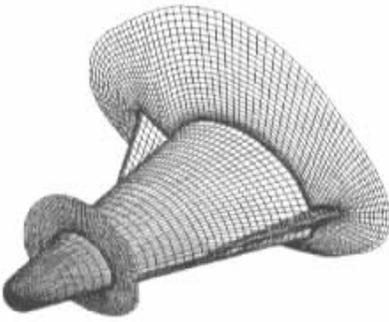


图 1 三维网格
Fig.1 3-D grid

3 结果及分析

限于篇幅,程序的验证性工作不再赘述,可参见文献[4,7]。类升力体外形为球头接长轴相同,上、下短轴不同的椭圆面而构成,计算网格数为 $65 \times 51 \times 51$,计算条件为: $M_\infty = 8.0, \alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$

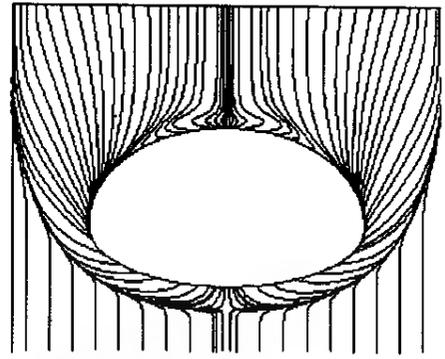
横截面流动特征是目前实验、数值计算及理论分析研究分离流和涡运动空间结构的常用方法, Hunf^[6]在 1978 年首次给出了截面流线奇点总数的拓扑规律,但结论仅适用于截面轮廓线是截面流线的特殊情况,而张涵信在文献[2]给出了适用于任何截面的奇点数目拓扑规律。本文研究类升力体外形垂直于体轴的横截面流线拓扑结构随迎角的变化过程。对于本文所研究的双连通区域且外边界无奇点的情况,拓扑规律简化为

$$\sum N + \frac{1}{2} \sum N' - \sum S - \frac{1}{2} S' = -K(C) \quad (2)$$

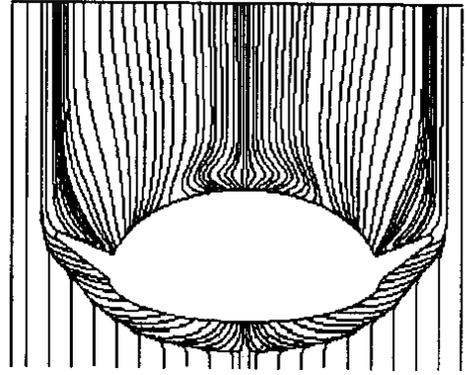
式中 N, S 分别为截面内结点和鞍点数目, N', S' 分别为截面边界上的半结点和半鞍点数目, $K(C)$ 为绕截面内边界闭曲线上的 Poincare 指数,当横截面位置处于或不处于纵向分离区时, $K(C)$ 分别为 0 或 1。

图 2 为 20° 迎角时垂直于体轴的横截面流线图 (X/R 分别为 7.514、16)。背风面已经出现横向分离流动,由于物面子午线与体轴夹角大于零,壁面流线向外跑,并在迎风面形成鞍点,两个横截面轮廓线上均无半奇点,且背风面没有出现纵向分离,奇点总数满足(2)式拓扑规律 ($\sum N = \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 1, K(C) = 1$)。

图 3 为 30° 迎角时垂直于体轴的横截面流线图 (X/R 分别为数据 14、16)。背风面仍没有出现明显的



(a) $X/R = 7.514$

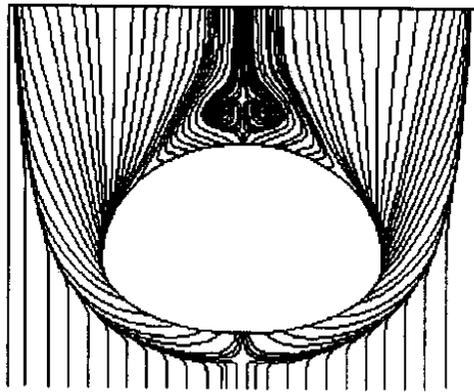


(b) $X/R = 16$

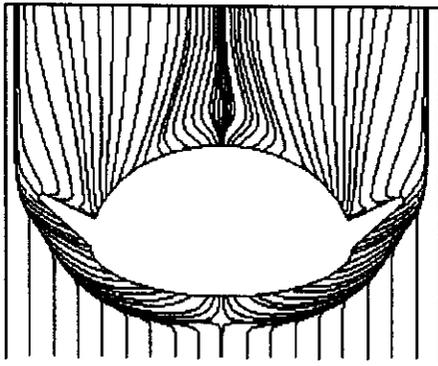
图 2 垂直于体轴截面流线 ($\alpha = 20^\circ$)

Fig.2 Sectional flow patterns perpendicular to the body axis ($\alpha = 20^\circ$)

纵向分离现象,图 3(a)背风面由于横向分离卷起两个分离涡,并在对称线上出现两个鞍点相连,由流动稳定性理论知属于不稳定情况。奇点总数也满足(2)式拓扑规律 ($\sum N = 2, \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 3, K(C) = 1$),而图 3(b)也满足(2)式拓扑规律 ($\sum N = \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 1, K(C) = 1$)。



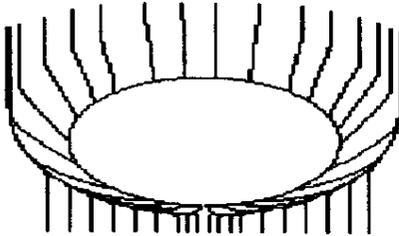
(a) $X/R = 7.514$



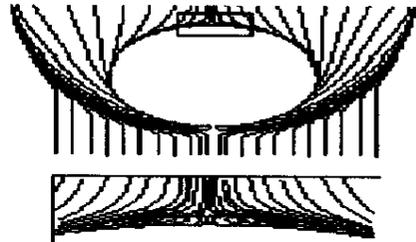
(b) $X/R = 16$

图 3 垂直于体轴截面流线($\alpha = 30^\circ$)

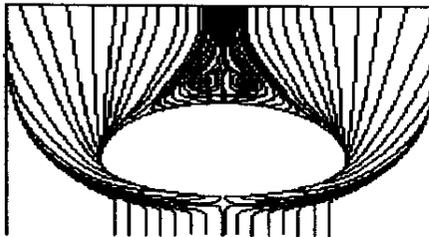
Fig.3 Sectional flow patterns perpendicular to the body axis ($\alpha = 30^\circ$)



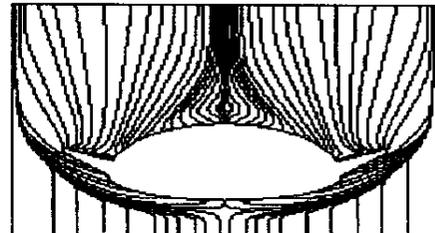
(a) $X/R = 0.512$



(b) $X/R = 1.305$



(c) $X/R = 7.514$



(d) $X/R = 16$

图 4 垂直于体轴截面流线($\alpha = 40^\circ$)

Fig.4 Sectional flow patterns perpendicular to the body axis ($\alpha = 40^\circ$)

奇点总数也满足(2)式拓扑规律($\sum N = \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 1, \mathcal{K}(C) = 1$)。

此外,仔细分析上述各个横截面流线图中对称线上奇点数目可以发现,对于本文物面子午线与体轴倾角大于零的情况,截面不处于纵向分离区内时,其迎风对称线上奇点总数为奇数个(1个),背风对称线上奇点总数为偶数个(0个或2个);而当截面背风区处于纵向分离区内时,其背风对称线上奇点总数为奇数个(1个)迎风对称线上(没有纵向分离)奇点总数为奇数个(1个)数目和文献[2]的理论分析一致。

图 4 为 40° 迎角时垂直于体轴的横截面流线图(X/R 分别为 0.512、1.305、7.514、16)。此时由图 5 可知背风面出现纵向分离泡。图 4a 截面不在分离泡内,横截面轮廓线上无半奇点,奇点总数满足(2)式拓扑规律($\sum N = \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 1, \mathcal{K}(C) = 1$)图 4(b)截面在分离泡内, $\mathcal{K}(C) = 0$ 奇点总数满足(2)式拓扑规律($\sum N = 2, \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 2, \mathcal{K}(C) = 0$);图 4c 截面不在分离泡内,背风面由于横向分离卷起两个分离涡,并在对称线上出现两个鞍点相连的不稳定结构,奇点总数也满足(2)式拓扑规律($\sum N = 2, \sum N' = \sum S' = 0, \sum S = 3, \mathcal{K}(C) = 1$),而图 4(d)截面不在分离泡内,

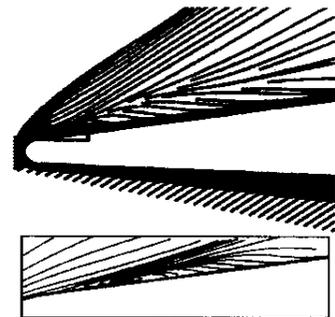


图 5 对称面流线

Fig.5 Streamline of symmetry plane

4 结 论

通过对类升力体外形高超声速粘性绕流的数值模拟,可以看到本文所采用的数值计算方法及网格生成技术是成功的,可清楚模拟包括激波、旋涡及流动分离等复杂现象,垂直于体轴的横截面流动拓扑结构与文献 [2] 给出的理论分析结论一致,大于 20° 迎角后,在部分横截面背风对称线上出现结构不稳定的鞍点相连现象。

最后要指出的是,本文对复杂带翼外形的流动结构分析还是初步的,要更为细致地研究三维流场中的拓扑结构,本文的网格分布数目仍嫌不够(如对背风面及分离起始点附近情况的模拟),这些都有待今后工作进一步进行。

参 考 文 献 :

[1] 张涵信,邓小刚. 三维分离流和涡运动的定性分析研究

- [J]. 空气动力学学报, 1992, 10(1): 8-20.
- [2] 张涵信. 分离流和涡运动横截面流态的拓扑[J]. 空气动力学学报, 1997, 15(1): 1-13.
- [3] 张涵信, 国义军. 垂直于物面的横截面上流态的拓扑[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(1): 1-13.
- [4] 沈清. 一种高精度、高分辨率激波捕捉的迎风型 NND 格式[C]. 第七届全国计算流体力学会议文集. 1994: 49-55.
- [5] 刘伟, 刘君, 李沁. 复杂外形数值网格生成技术[J]. 弹道学报, 2000, 12(4): 41-44.
- [6] HUNT J C R, ABELL C J, etc. Kinematical studies of the flows around free or surface mounted obstacles, applying topology to flow visualization[J]. *J. of Fluid Mech.*, 1978, 86: 179-200.
- [7] 刘伟, 刘君. 数值模拟类升力体外形高超声速粘性绕流. 国防科技大学学报[J]. 2000, 22(5): 12-15.

Sectional topological structure research of 3D complex figuration at different angles of attack

LIU Wei

(Institute of Aerospace and Materials Engineering ,NUDT ,Changsha 410073 ,China)

Abstract : The 3-D grids of complex shape are created by solving parabolic partial differential equations. The hypersonic flows of high angle of attack over liftbody-type are simulated by solving N-S equations with alternating direction implicit NND scheme. The topological structures of hypersonic flowfield based on the sectional flow patterns perpendicular to the body axis are analysed by Zhang hanxin 's theory of flow topological structure. Additionally , the unstable-structure phenomenon which is showed by two saddles connection along leeward symmetry line occurs at some sections when the angle of attack great than 20° .

Key words : NND scheme ;liftbody ;N-S equations ;hypersonic flow ;topological analysis