

# 弹箭外部绕流数值仿真中网格的选择<sup>\*</sup>

何晓聪,曹红松,赵捍东,朱基智

(中北大学机电工程学院,太原 030051)

**摘要:**讨论了结构网格和非结构网格在弹箭外流场数值仿真中的特点,提出了弹箭外部绕流数值仿真中选择网格的三点原则。以某火箭弹外部绕流数值仿真为例,对比了采用结构网格和非结构网格进行仿真时的内存占有量、CPU时间以及计算精度,其结果分析对弹箭外部绕流数值仿真中网格的选择具有一定的指导意义。

**关键词:**外部绕流;结构网格;非结构网格;数值仿真

**中图分类号:**TJ011 **文献标志码:**A

## The Grid Choice of Exterior Circumferential Flow of Rocket /Projectile in Numerical Simulation

HE Xiacong, CAO Hongsong, ZHAO Handong, ZHU Jizhi

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The paper mainly discussed the characteristic of structured grids and unstructured grids and proposed three principles of grids choice. Take the rocket projectile exterior circumferential flow numerical simulation as the example, compared the memory possessive amount, the CPU time as well as the computation precision when used the structure grids and the non-structure grids. And the analysis results play a guide role in the grid choice of exterior circumferential flow of rocket projectile in numerical simulation.

**Keywords:** exterior circumferential flow; structured grids; unstructured grids; numerical simulation

### 0 引言

对弹箭的外部绕流进行数值仿真,在工程应用中具有相当重要的意义,它与其它计算方法相结合,进行弹箭气动外形的初步设计,可以节省风洞试验费用,还可以缩短设计周期,提高工程质量。网格生成是数值仿真中的关键环节,在实际的工程计算中选择合适的网格,将对数值仿真的结果起关键性作用。在对弹箭外部绕流进行仿真过程中,因为弹箭本身的长径比大、头部外形曲线复杂、尾翼翼片外形复杂等特点,划分网格比较困难,选择合适的网格将会达到事半功倍的效果。

### 1 有限体积法可使用的网格

有限体积法又称控制体积法,其基本思路是:将计算区域划分为网格,并使每个网格点周

围有一个互不重复的控制体积,将待解微分方程(控制方程)对每一个控制体积积分,从而得到一组离散方程<sup>[1]</sup>。与其他离散化方法一样,有限体积法的核心体现在区域离散方式上,区域离散化的实质就是用有限个离散点来代替原来连续空间。有限体积法的区域离散实施过程是把所计算的区域划分成多个互不重叠的子区域,即计算网格。然后确定每个子区域中的节点位置及节点所代表的控制体积。在数值仿真计算中,采用的网格可以大致分为结构化网格和非结构化网格两大类。结构化网格的特点是每一节点与其相邻点之间的联接关系固定不变且隐含在所生成的网格中,因而不必专门设置数据去确认节点和相邻点之间的联系。非结构化网格舍去网格节点的结构性限制,节点和单元的分布是任意的。基于有限体积法思想的软件可以使用的网格二维问题有四边形网格和三角形网格,三维问

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-04-13

作者简介:何晓聪(1981-),男,甘肃镇原人,硕士研究生,研究方向:弹箭外流场数值模拟。

题有四面体、六面体、金字塔形以及楔形网格<sup>[1]</sup>。

## 2 网格的选择

在弹箭外流场的数值仿真中,为了能够准确得到外部绕流特性,对网格的主要要求是尽量保证网格线与来流方向平行,网格线相互正交,壁面网格线与壁面垂直,以便提高数值计算离散的精度,避免出现假离散现象<sup>[2]</sup>。很明显,使用三角形/四面体等非结构网格来流方向永远不会和网格线平行,而四边形网格/六面体网格可能就会实现来流方向和网格线平行。弹箭外流场数值仿真中由于弹箭几何外形的复杂性,如果采用结构网格可能要花费大量的时间,甚至根本无法得到网格模型,如果采用非结构网格问题可能会迎刃而解。非结构网格可以充满任何复杂的几何体,而且能够合理地控制疏密程度。在工程实际中,所要解决的问题是千变万化的,究竟应该选择什么样的计算网格,是要根据具体问题而定,但是在选择网格的时候,应该考虑下列问题:

1) 分网难度。数值仿真中划分网格是至关重要的一步,直接决定了计算结果的正确性。通常都花费大量的时间去划分网格。如果模型的几何外形很简单,长径比不大,应该用结构网格去划分流场。因为结构网格容易实现边界区域拟合,网格质量较高,数据存储结构简单,且分网难度不大。但是弹箭的几何外形一般都比较复杂,长径比大,用结构网格来对流场划分很困难甚至无法实现,此时应该考虑使用非结构网格去划分流场,以达到降低难度、节约时间的目的。

2) 计算时间。计算时间对于工程应用尤为重要。一般情况下,网格数目越多所需要的计算时间就越多。根据参考文献<sup>[1]</sup>,三维情况下,在给定网格节点数时,一般六面体单元数仅是四面体单元的 1/5,边缘数目仅是 1/6,因而在流场解的计算中计算量将减少 4/5 或 5/6,即使结构网格和非结构网格数目相同,非结构网格也比结构网格所耗费的时间要多。在弹箭外流场数值仿真中因为弹箭几何外形特别复杂而且流动的长度尺度很大,三角形网格和四面体网格所生成的单元会比等量的包含四边形网格和六面体网格的单元少得多。这是因为三角形网格和四面体

网格允许单元聚集在流场的所选区域,而四边形网格和六面体网格会在不需要加密的地方产生单元。四边形和六面体单元的一个特点就是它们在某些情况下可以允许比三角形/四面体单元更大的比率。三角形/四面体单元的大比率总会影响单元的歪斜,这样就加大了数值耗散,从而增加 CPU 时间。

3) 计算精度。数值模拟的准确性除了和数值方法(主要就是离散方法、差分格式)有关之外,最重要的就是计算网格。因为所有的算法以及求解的差分方程组最终都是基于网格进行的。计算网格的质量有一些评价标准,简单来说主要是保形性、长宽比、正交性、光滑性、网格密度等。保形性对于工程实际问题来说就是十分重要的,如果计算网格不能做到保形,在模型壁面上使用阶梯近似,不仅不能正确模拟壁面各种流场和热物理参数的法向梯度,在流量、辐射等计算上都无法保证其精度。有限体积法的好处就是从网格单元的界面 FLUX 得到守恒形差分方程组的关系,和网格是不是结构化没有关系。此时网格的质量由网格密度、网格长宽比、网格光滑性决定,也就是说如果能做到有限控制体尽可能规则(比如正三角形、正四面体,正立方体),则以控制体中心点的参量表示其控制体区域参量的误差就尽量小<sup>[3]</sup>,大量的工程计算实践和数值研究表明,非结构网格的精度不会比结构网格差,即使是结构网格,如果网格质量不能保证,计算结果也一样会面目全非。

## 3 弹体外部绕流数值仿真

为了更好地说明弹箭外部绕流数值仿真中网格的选择,文中以计算某弹丸在 0 攻角时的外部



图 1 某弹几何模型

绕流特性为例,分析结构网格和非结构网在数值仿真中的特点。弹丸几何模型如图 1 所示,图 2 为弹丸头部局部放大图,利用结构网格划分的网格如图 3 所示,利用非结构网格划分的网格如图

4 所示。表 1 给出了利用结构网格和非结构网格计算该

弹跨声速气动特性的计算量的比较。表中所占内存和关于 CPU 的数据皆取自两台 AMD5200 +、4G 内存并行运算机。单位内存量 = 所占内存量 / 单元数,单位 CPU 时间 = CPU 时间 / (单元数 × 迭代时间)。表 2 和表 3 给出了利用两种网格所得到的计算结果以及误差百分比。

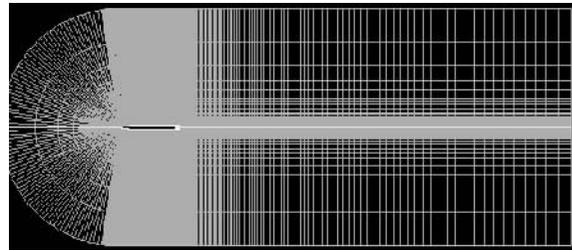


图 3 利用结构网格划分的网格图

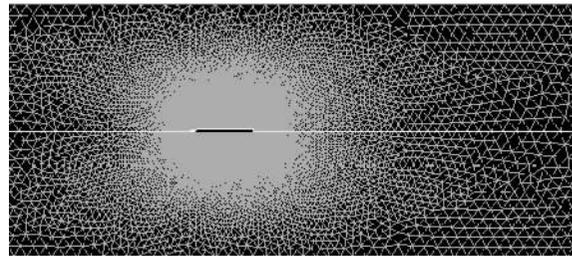


图 4 利用非结构网格划分的网格图

表 1 结构网格和非结构网格计算量比较

网格类型	单元数	内存总量	单位内存量之比	每 1000 步 CPU 时间/s	单位 CPU 时间之比
非结构网格	94464	394	1.71	780	2.14
结构网格	111368	230	1.0	540	1.0

表 2 采用全结构网格的计算结果

马赫数	阻力系数数值模拟值	阻力系数试验值	误差百分比/%
0.6	0.289	0.2937	3.63
0.8	0.309	0.2992	3.27
1.05	0.652	0.599	8.84
1.2	0.580	0.596	2.62
2.549	0.347	0.344	0.87
3	0.298	0.297	0.33

表 3 采用全非结构网格的计算结果

马赫数	数值模拟值	实验值	误差百分比/%
0.6	0.321	0.2937	9.29
0.8	0.310	0.2992	3.60
1.05	0.661	0.599	10.4
1.2	0.611	0.596	2.56
2.549	0.351	0.344	2.03
3	0.293	0.297	1.34

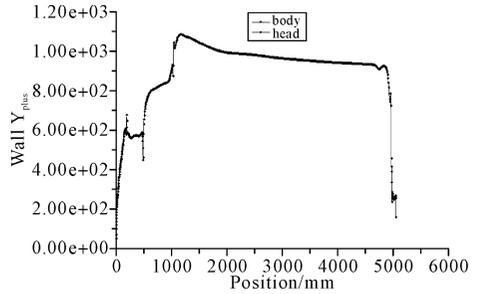


图 5 未采用网格自适应技术的壁面函数 y+ 值

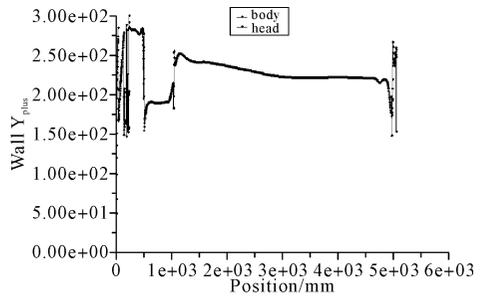


图 6 采用网格自适应技术的壁面函数 y+ 值

表 4 非结构网格采用自适应技术后计算结果

马赫数	阻力系数数值模拟值	阻力系数实验值	误差百分比/%
0.6	0.3112	0.2937	5.95
0.7	0.2966	0.2951	5.08

从该弹几何外形来看,头部由多条曲线组合而成,长径比很大,用结构网格划分就必须对弹体周围的流场进行分块切割,使每一块流场的外形和弹体头部外形曲线相似<sup>[4]</sup>。弹体的长径比很大,用结构网格很难控制合理的网格密度,造成网格的长宽比较大,而且网格过度性(光滑性)较差,在计算过程中也容易引起数值畸变。图 2 仅仅是一个二维问题的结构网格,如果是三维问题再加上尾翼那么用结构网格来划分流场就更加困难。如果采用非结构网格来划分流场就能降低划分网格的难度,因为非结构网格不需要对流场进行大量的分块,而且网格的疏密程度很好控制,也不会造成数值畸变。

从表 1 可以看出虽然非结构网格的数量少,

但是所占的内存量却比结构网格大,所占单位 CPU 时间也比结构网格要多。非结构网格容易控制密度,而结构网格却在不必要加密的区域加密,所以非结构网格的数量比结构网格要少。非结构网格因为必须记忆单元节点之间的关联信息,且在计算过程中必须为梯度项开设存贮空间,加之其不具备方向性,必须记忆各坐标方向的梯度分量,所以内存大为增加,而且非方向性梯度项增加了 CPU 的计算时间。

从表 2 和表 3 的计算结果来看在亚音速时非结构网格的计算误差比较大,在跨音速时两者的计算误差相对都比较大,在超音速时两者计算结果误差都较小。究其原因,在亚音速时粘性阻力相对较大,壁面附近流动变化很大,特别是在粘性底层,流动几乎是层流。而湍流模型解决这一问题的主要方法之一就是不对粘性影响比较明显的区域(粘性底层和过度层)进行求解,而是用一组半经验公式(即壁面函数)将壁面上的物理量与湍流核心区域相应物理量联系起来进行求解<sup>[3]</sup>。但是利用壁面函数时要求把壁面附近的第一层网格的节点布置在过度层区域内也就是要求壁面函数  $y^+$  值大于 30 而小于 300,而  $y^+ = \frac{\Delta y}{v} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  (其中  $\rho$  是流体密度,  $\tau_w$  是壁面剪切力,  $\Delta y$  是网格节点到壁面的距离)。从壁面函数  $y^+$  公式可以看出要保证其值大于 30 而小于 300 就是要求第一层网格节点到壁面的距离要小。而弹箭长径比较大,利用非结构网格划分流场时,如果第一层网格到壁面的距离太小就会造成壁面附近的网格数量太多从而增加了计算量。为了尽可能地减少网格的数量,只能使  $\Delta y$  值相对较大,从而导致  $y^+$  值超出了其范围,加之非结构网格的正交性相对较差,所以在亚音速时非结构网格得到的计算结果误差较大且比结构网格的大。但是非结构网格的这种误差却可以通过网格自适应的方法加以改善。图 5 是利用非结构网格计算时未采用网格自适应技术的壁面函数  $y^+$  值,图 6

显示的是采用网格自适应技术后的壁面函数  $y^+$  值,表 4 是非结构网格采用自适应技术后计算结果,计算精度明显提高。

在跨音速时因为流场比较复杂,加之数值模拟本身的缺陷,所以无论是结构网格还是非结构网格误差都相对较大。在超音速时因为流场比较稳定,且湍流充分发展,压差阻力占的比重相对较大,所以两者计算结果误差都是相对较小。

## 4 结论

弹箭外流场数值仿真过程中,选择合适的网格将会达到省时、省力、高效的目的。通过文中的论述可以得到以下结论:

- 1) 在弹箭外流场数值仿真过程中,结构网格和非结构网格在计算精度上都能达到工程误差要求,结构网格要比非结构网格的精度高。
- 2) 在弹箭外流场数值仿真中,因为弹箭的几何外形一般都比较复杂、长径比大,采用结构网格划分流场时容易在不需加密的区域加密,容易产生数值畸变,而且分网难度较大。采用非结构网格时容易控制网格疏密,网格过度光滑,分网难度相对较低。
- 3) 通过网格自适应技术能够解决非结构网格计算误差相对大的问题。

参考文献:

- [1] 朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [2] FLUENT Inc, FLUENT User's guide[Z]. 2003.
- [3] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 朱基智,张宏飞,曹红松,等. 结构网格在数值仿真中的应用[J]. 四川兵工学报,2006,27(4): 48—50.
- [5] 张宏飞,曹红松,赵捍东,等. 数值仿真中湍流模型的选择[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(4): 242—243.