

有攻角组合旋成体过渡区 气动特性的统计模拟

吴振宇

李凤林

林保真

(中国人民解放军 89956 部队) (中国科学院计算中心) (空间技术研究院)

一、引 言

对于象卫星、载人宇宙飞船及航天飞机等长时间在外层空间飞行的物体,稀薄气体气动特性的研究具有相当重要的意义^[1]。几十年来,从事稀薄气体动力学研究的学者们一直在力图求解 Boltzmann 方程,但至今尚未获得重大突破。对于紧迫的实际问题,只能求助于实验和工程方法。不过,由 Bird 所发展的统计模拟方法几乎能在整个过渡区为飞行器提供气动数据^[2,3]。

在 Bird^[2] 以及文献[4]的基础上,我们建立了组合旋成体三维绕流的统计模型,并对具有球台底部的短钝锥外形做了一系列计算。给出了压力系数 c_p 、摩阻系数 c_f 、热交换系数 st 以及轴向力系数 c_A 、法向力系数 c_N 、力矩系数 c_m 和压心位置 x_{cp} 等。为了提高模拟效率、扩大计算范围,根据 Bird^[2] 的思想,推荐了一种模拟分子加权的办法。计算结果与实验基本符合。本文将简要地陈述部分计算结果。

二、方法描述

统计模拟方法的实质是用计算机模拟气体的流动过程。为此划定一空间域,称为流场。本文采用圆柱形流场,物体置于流场中部,其对称轴与流场的对称轴重合,来流位于 XY 平面内。由此看来只模拟半个空间就足够了(见图 1)。关于网格的划分、模拟分子初始位置和速度的确定以及在流场入口处补充分子的方式等均在文献[4]中详述,而对碰撞的简化处理方法则取自文献[2]。分子在流场对称面($Z=0$)上呈镜面反射,在物面上的反射模型引自文献[2,3]。

为了扩大模拟范围、提高模拟效率,本文还采用了加权技术。所谓加权就是赋予流场各部位的模拟分子以不同的权重,换句话说,令它们分别代表不同数目的真实气体分子。本文采用的办法是沿流场径向加权。令 $r_{i,j,k}$ 代表标号为 (i, j, k) 的网格节点在径向的坐标。由于权重的差别,当模拟分子在径向由一个网格跨入另一网格时,它可能消失、继续存在或派生为若干个模拟分子。举例说,当模拟分子由标号为 (i, j, k) 的网格进入标号为 $(i, j, k+1)$ 的网格时,应当用随机数判断其是否继续存在,当

本文于 1980 年 3 月收到。

$$R_i \leq \frac{2r_{i,j,k} + 1}{2r_{i,j,k+1} + 1}$$

时, 分子继续存在, 否则消失, 其中, R_i 为 (0—1) 区间均匀分布的随机数. 如果模拟分子由标号为 $(i, j, k+1)$ 的网格进入标号为 (i, j, k) 的网格, 则一个模拟分子可能派生为若干个, 表达式 $(2r_{i,j,k+1} + 1)/(2r_{i,j,k} + 1)$ 的整数部分为必然生成的分子数. 其小数部分如大于或等于随机数 R_i , 派生分子数加 1; 否则不加. 对于派生多个分子的情况, 必须对分子的位置和速度加以人工处理, 以使派生分子的速度之间略有差别并保证空间任何点最多只为一个模拟分子所占据. 这样, 计算模拟分子间的碰撞、跟踪每个模拟分子的位置和速度的变化, 将它们记录下来并经过相应的处理便能得到表征气动特性的各种参数.

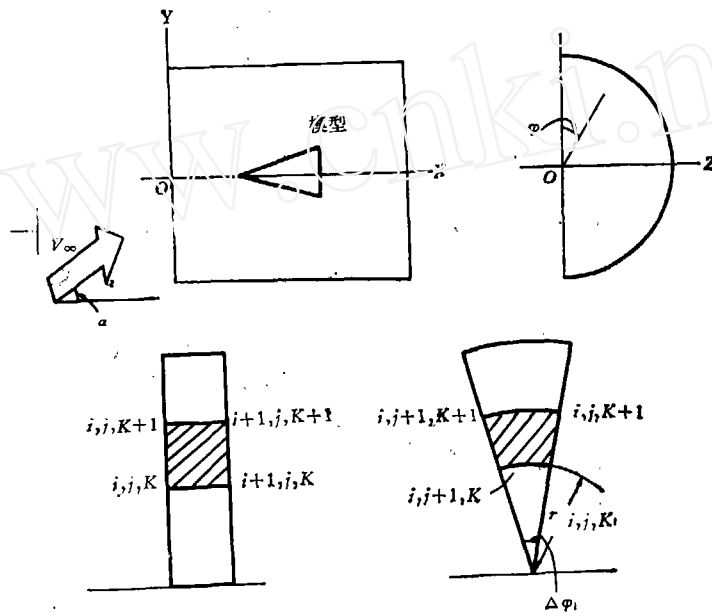
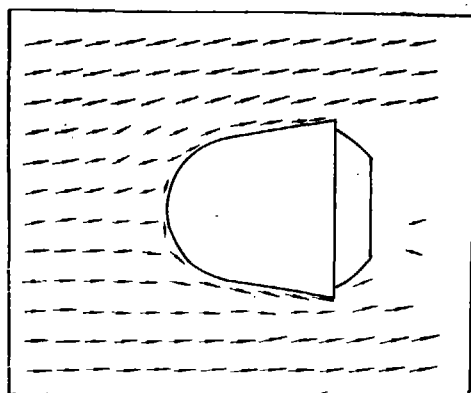


图 1 三维流场和网格的划分

三、结果分析

本文应用上述方法对组合旋成体的有攻角绕流作了一系列计算. 旋成体的外形如图 2 所示. 来流参数的变化范围是 $s = 16 \sim 22$ (s 是来流速度与分子最可几热运动速度之比); 壁温与总温比 $\tilde{T}_w = 0.1 \sim 0.13$; 攻角 $\alpha = 0 \sim 20^\circ$. 计算是在国产 013 机上进行的, 该机浮点运算速度为每秒 200 万次, 内存 13 万字. 不加权时, 初始分子数取 $3 \cdot 10^3 \sim 10^4$. 无量纲时间步长 $\Delta \tilde{t}$ 为 $0.01 \sim 0.04$ ($\Delta \tilde{t} = \Delta t \cdot c_{m\infty} / \lambda_\infty$, 这里 Δt 、 $c_{m\infty}$ 和 λ_∞ 分别表示时间步长、来流中分子最可几热运动速度和平均碰撞自由程). 为了尽可能消除非平衡效应的影响, 抽样从 $40 \sim 60 \Delta \tilde{t}$ 时刻后开始, 抽样周期为 $40 \sim 80 \Delta \tilde{t}$. 零攻角时沿辐角方向分两个区; 有攻角时分三个或四个区. 采用加权技术时, 使用的初始分子数为 $1.5 \cdot 10^3 \sim 5 \cdot 10^3$.

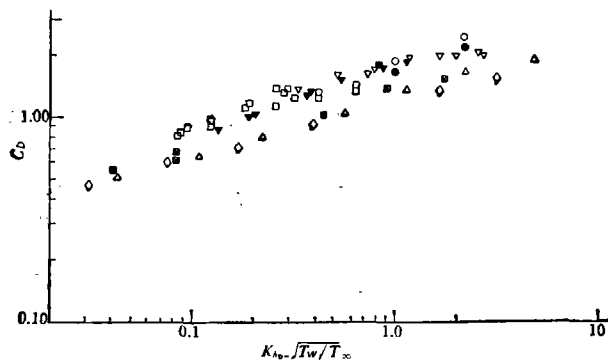
图 2 是不加权时得到的速度图. 数据取自辐角方向的第一和第四区, 这可以近似看

图2 速度 $(V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ 图谱

$$K_{D\infty} = 0.167, \quad S = 20$$

$$\bar{T}_w = 0.1, \quad \alpha = 10^\circ$$

成迎风面和背风面。线段的长短表示速度的大小，方向以箭头表示。因为忽略了 z 方向的速度分量，图上给出的实际上是 $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ ，速度图揭示了流动中的若干细节。首先，在驻点附近，速度的大小和方向都有明显变化。其次，物体迎风面所受到的扰动比背风面大。最后，由流场的分析还可以看到，当攻角 α 增大时，流场的径向尺度也要相应增大，以

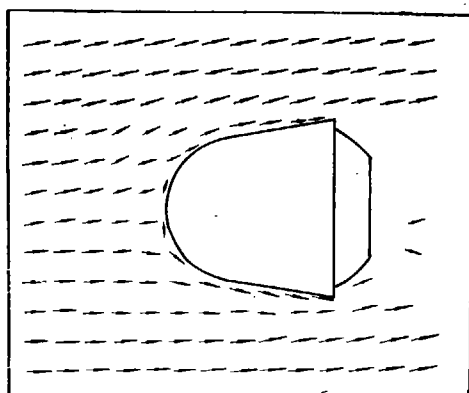


符 号		设 备	M_∞	半锥角
□		AEDC Tunnel "L"	0.4, 10	15°
■		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	15°
▲		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	6°
◇		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	6° (钝)
▼		VKL Free Jet	8.4	13.5°
▼			11.5	13.5°
○	本文	[2] 的反射模型	~22	10°
●	本文	[3] 的反射模型	~22	10°

图3 理论值与实验值的比较(阻力系数 c_D)

免流场边界的影响“反射”到物面上来。

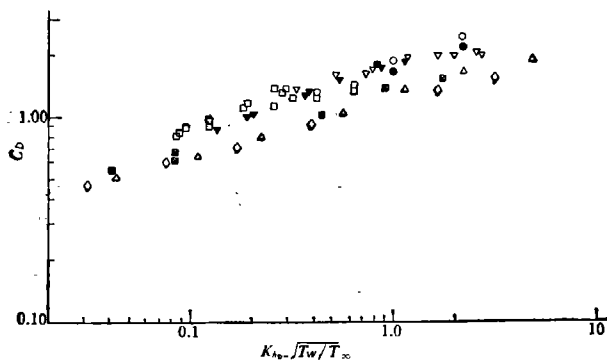
为了比较两种壁面反射模型计算了两组零攻角的情况。图3上给出了算得的阻力系

图2 速度 $(V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ 图谱

$$K_{D\infty} = 0.167, \quad S = 20$$

$$\bar{T}_w = 0.1, \quad \alpha = 10^\circ$$

成迎风面和背风面。线段的长短表示速度的大小，方向以箭头表示。因为忽略了 z 方向的速度分量，图上给出的实际上是 $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ 。速度图揭示了流动中的若干细节。首先，在驻点附近，速度的大小和方向都有明显变化。其次，物体迎风面所受到的扰动比背风面大。最后，由流场的分析还可以看到，当攻角 α 增大时，流场的径向尺度也要相应增大，以



符 号		设 备	M_∞	半锥角
□		AEDC Tunnel "L"	0.4, 10	15°
■		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	15°
▲		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	6°
◇		GE Shock Tunnel	21.7, 24.2	6° (钝)
▼		VKL Free Jet	8.4	13.5°
▼			11.5	13.5°
○	本文	[2] 的反射模型	~22	10°
●	本文	[3] 的反射模型	~22	10°

图3 理论值与实验值的比较(阻力系数 c_D)

免流场边界的影响“反射”到物面上来。

为了比较两种壁面反射模型计算了两组零攻角的情况。图3上给出了算得的阻力系

STATISTICAL SIMULATION FOR THE AERODYNAMICAL BEHAVIOUR OF THE TRANSITIONAL REGION OF FLOW PAST COMBINED BODIES OF REVOLUTION WITH ARBITRARY ANGLES OF ATTACK

Wu Zhen-yu

(PLA 89956 Unit)

Li Feng-lin

(Computer Center Chinese Academy of Sciences)

Lin Bao-zhen

(Chinese Academy of Space Technology)

Abstract

In this paper, we set up a three-dimensional statistical simulation model for the problem of rarefied gas hypersonic flow past combined bodies of revolution with an angle of attack. In order to improve the efficiency of the simulation and to expand the simulation region, we adopt a special weighting technique and reduced collision model. A series of calculation has been executed on 013 Computer and the results are very satisfactory.