



现代力学丛书

可压缩湍流 直接数值模拟

傅德薰 马延文 李新亮 王 强 著



科学出版社
www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代力学丛书

可压缩湍流直接数值模拟

傅德薰 马延文 李新亮 王 强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以航天飞行器气动问题为应用背景,总结了课题组在可压缩湍流直接数值模拟研究方面的部分工作.在数值方法方面,分析了正确模拟多尺度物理结构及其非线性干扰对数值方法的要求,反映了国际上的一些最新成果;在物理问题方面,重点分析了可压缩剪切湍流的直接数值模拟及其流动机理.可压缩与不可压缩湍流之间的定量差别及其特征参数之间的关系和可压缩效应对湍流特征的影响等.所研究的典型湍流有均匀各向同性湍流、槽道湍流、平面混合流、射流、平板边界层湍流和钝楔、钝锥边界层湍流等,且给出了相应的算法及其高效并行软件.

本书可作为相关专业的高年级研究生、科研工作者的参考书,为更广泛流体力学数值模拟研究提供高精度高分辨率的计算方法及其并行软件.

图书在版编目(CIP)数据

可压缩湍流直接数值模拟/傅德薰等著. —北京:科学出版社, 2010
(现代力学丛书)

ISBN 978-7-03-029242-1

I. ①可… II. ①傅… III. ①可压缩流动: 湍流流动-数值模拟
IV. O357.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 201283 号

责任编辑: 张 静 杨 然 / 责任校对: 陈玉凤
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 11 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010 年 11 月第一次印刷 印张: 32 彩插: 8

印数: 1—2 500

字数: 620 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

《现代力学丛书》是由中国科学院力学研究所组织编撰的一套丛书，由科学出版社出版发行。丛书的作者为本所的科研人员、客座研究人员及其他相关人员。出版本套丛书的目的是为了总结和提高我们近年来的科学研究成果，并促进相关学科领域的开拓。中国科学院力学研究所自成立以来，既从事基础研究，也以基础研究为手段，参与和承担了国家和部门委托的许多任务，取得了一系列重要的成果。我们认为，将这些成果分类整理，系统化并加以提高，在此基础上出版专著，是一件很有价值的事，既有益于中国科学院力学研究所科研工作的进一步提高，也有利于广大读者获取新的知识，共同促进力学学科的繁荣发展。

本丛书可供相关专业的科研人员和研究生参考。

郑哲敏

二〇〇九年二月于北京

前 言

湍流是航空航天、能源、环境、气象、海洋等众多工程中实际流体运动的基本物理现象,是确定实际流体运动特征的关键问题之一。例如,航空航天飞行器绕流场中的复杂湍流,直接影响了飞行器的气动力和气动热特征,关系到飞行器的可靠性、隐身性和机动性等飞行性能。近年来,超、高超声速先进飞行器的发展进一步促进了可压缩湍流的研究。

研究湍流一般有两种方法。第一种是唯象方法,研究方法的基本思想是以观测湍流的物理现象,发现湍流的一般特征,推测湍流的统计平均性质。这种方法不依赖于 Navier-Stokes(简写为 N-S) 方程及其边界条件,如 Kolmogorov 理论。第二种方法是采用数值模拟方法求解具有确定边界条件的 N-S 方程,且结合实验研究和理论分析方法研究湍流特征。第二种方法中的数值模拟方法一般包含三种:① Reynolds 平均数值模拟方法,简称 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes simulation) 方法。该方法是从 Reynolds 平均方程或质量加权平均方程出发,结合具体湍流问题的边界条件进行求解,对 Reynolds 平均方程(或质量加权平均方程)中的不封闭项,提出合适的湍流模式。这是解决工程湍流问题经常采用的方法。② 大涡模拟方法,简称 LES(large eddy simulation) 方法,其基本思想是采用滤波方法将湍流场中的脉动运动分解为大尺度脉动和小尺度脉动,对大尺度脉动直接计算,而对小尺度脉动对大尺度脉动的影响以合适的模型假设进行表征。这种方法所能提供湍流信息的能力介于 RANS 方法和直接数值模拟方法之间。③ 直接数值模拟方法,简称 DNS(direct numerical simulation) 方法,这种方法是直接求解完全的三维 N-S 方程,结合所研究湍流问题的边界条件,给出湍流场中广泛尺度范围内的特征物理量随时间和空间变化的序列数据。本书所涉及的是以上三种方法中的湍流直接数值模拟方法。

自 20 世纪 60 年代中期开始,随着计算技术的发展,计算流体力学已成为一独立的学科分支,成为研究流体运动规律,解决很多实际问题的三大手段(理论、实验、计算)之一。近年来,随着高速巨型并行计算机的出现,以及计算方法的不断创新,利用巨型并行计算机的直接数值模拟方法已成为研究湍流的重要手段之一。

湍流的 DNS 研究工作在 20 世纪后期已取得了优异的成绩,人们对湍流也有了更进一步的认识。1987 年, Kim, Moin 和 Moser 采用谱方法,求解三维不可压缩 N-S 方程,首次给出了不可压缩槽道湍流的直接数值模拟结果。以后该计算成为经典的湍流 DNS 结果,形成的湍流数据库已被很多学者用于不可压缩壁湍流

的机理研究, 同时也被用来验证数值方法及校准湍流实验. Kim 等的最大成功在于使 DNS 方法被学者们广泛认可, 使得 DNS 逐渐成为研究湍流机理的主要手段之一.

DNS 方法用于研究湍流突出的优点是能给出最精细的湍流流场信息, 包括空间三维流场的时间序列. 它可以给出所有湍流脉动运动的统计平均量, 如 Reynolds 应力、湍流强度、压力-速度相关量以及瞬时涡量和扰动速度散度的非定常数据等. 这些数据在湍流实验测试中难以得到, 特别对于超、高超声速湍流, 实验测试这些数据更为困难, 而这些数据是研究湍流机理和湍流控制的基础. 为获得正确的数值模拟数据, 要求 DNS 方法具有分辨大范围物理尺度的能力, 包括数值方法和网格尺度的分辨率. 但是, 随着 Reynolds 数的增加, 湍流的尺度范围增加很快. 在高 Reynolds 数湍流场中, 最大尺度的物理量与最小尺度的物理量之比显著增加, 这对 DNS 的计算量、计算方法及计算机资源都带来了挑战.

DNS 的目的首先是给出正确可靠数据, 然后利用这些数据研究湍流的流动机理, 诊断我们还不清楚或总是无法预测的一些重要的物理量, 寻求不失掉重要物理机制的简单模型, 为 RANS 方法的湍流模式、LES 方法的亚格子模型及湍流控制的研究提供依据. 然而, 实践证明, 能正确模拟大尺度宏观稳定复杂流动 (如复杂外形飞行器绕流的层流场) 的数值方法, 一般难以用于湍流的 DNS, 这是因为湍流是多尺度非定常复杂流动, 对其正确模拟要求数值方法有更高的精度.

直到 20 世纪末, 大部分湍流的直接数值模拟研究主要是针对不可压缩湍流进行的. 对可压缩湍流的直接数值模拟研究起步较晚. 由于可压缩湍流问题往往是超、高超声速先进飞行器气动设计中的关键问题 (如转捩位置的确定、流动分离导致的激波-边界层干扰等), 故航空航天工业的快速发展带动了可压缩湍流的研究. 加之计算方法和大型并行计算机的快速发展, 使得近年来可压缩湍流在国际上形成了又一次研究高潮. 然而, 由于问题的复杂性和计算机资源的限制, 加之实验研究的困难, 目前还有很多问题有待进一步研究.

与不可压缩湍流相比, 可压缩湍流中的热力学变量, 如密度和温度, 不再是被动标量, 而需要与速度变量联立求解给出. 可压缩 N-S 方程多一个密度变量和一个能量方程, 且在超、高超声速湍流场中, 可能出现非定常随机激波, 故要求数值方法既能分辨湍流场中的最小尺度的物理量, 又能正确捕捉非定常激波. 因此, 可压缩湍流的直接数值模拟对数值模拟方法提出了更高的要求, 要求数值方法具有小耗散和小色散数值误差的行为特征, 且具有正确捕捉非定常激波的能力. 另外, 计算域中网格尺度及网格分布对 DNS 的分辨能力也是极为重要的, 即针对所给出的计算方法, 了解什么样的网格尺度能正确模拟我们所需分辨的湍流场中的最小尺度是极

为重要的。

本书以航天飞行器的气动问题为应用背景,主要总结了我课题组采用高精度差分格式求解三维可压缩 Navier-Stokes 方程,在直接数值模拟的基础上,研究可压缩湍流的部分工作。在数值模拟方法方面,重点分析了正确模拟多尺度物理结构及其非线性干扰对数值方法的要求,并反映了在这方面国际上的一些最新成果;在物理问题数值模拟方面,重点是可压缩剪切湍流从层流转捩到湍流的直接数值模拟及其流动机理的研究。由于计算机资源和计算技术的限制,研究范围仅限于中等以下 Mach 数及较低 Reynolds 数条件下的湍流。研究内容包括:高精度数值模拟方法;可压缩湍流与不可压缩湍流之间的定量差别及其特征参数之间的关系;可压缩效应对湍流特征的影响,特别注意内在压缩性效应(即声效应)的出现及其影响;利用线性稳定性理论分析,引入模态概念,结合 DNS 的数据研究模态之间的干扰,以及流动从层流发展到湍流过程中的转捩机理;探讨超声速湍流边界层转捩位置的确定方法。

本书是我课题组在中国科学院力学研究所研究可压缩湍流直接数值模拟方面的工作总结。其内容主要是以我课题组成员在这方面所发表研究论文和博士生们的博士论文为基础撰写而成,时间段为 1997~2009 年。由于文章发表时间的差异,其工作完成的程度也有所不同,书中基本上保持了原作者的结果。

全书共分两部分。第一部分为数值模拟方法:给出针对多尺度非定常非稳定流动特征所构造的高精度差分格式(高于二阶精度),分析了各种高精度差分格式的数值行为特征和模拟小尺度物理结构、分辨非定常间断面的能力。第二部分为物理问题的直接数值模拟:根据流动物理特征,建立了求解可压缩 Navier-Stokes 方程的高精度数值模拟方法,并详细描述了可压缩湍流直接数值模拟结果,以及在此基础上所发现的一些新的物理现象。所包括的典型湍流有:均匀各向同性湍流、槽道湍流、平面混合流、射流、平板边界层湍流和钝楔、钝锥边界层湍流等。为了使所得到的计算方法可应用于更多实际流动问题的数值模拟,在第 11 章中给出了所建立的高精度算法的高效并行算法软件及软件的使用说明。该软件已安装到中国科学院网络中心,可供感兴趣的学者使用。

书中第 1、2 章,除第 6、7 节的第 3 章和除第 5 节的第 4 章由马延文撰写;第 5、6 章,第 8 章的第 4、5 节,除第 4、6 节的第 9 章及第 10 章的第 2 节由傅德薰撰写;第 7、11 章、第 3 章的第 7 节,第 4 章的第 5 节,第 9 章的第 4、6 节和除第 2 节的第 10 章由李新亮撰写;第 8 章的第 1、2、3 节和第 3 章的第 6 节由王强撰写。全书由傅德薰总校。

由于可压缩湍流研究还处于起步阶段,很多问题有待进一步研究和认识,加之

作者水平所限, 书中难免有疏漏及不足之处, 望指正.

本书可作为高年级研究生、从事该领域研究工作的学者的参考书, 为更广泛流体力学问题的数值模拟研究提供高精度高分辨率的计算方法及其并行软件.

作者感谢庄逢甘院士、周恒院士和张兆顺教授的审稿及提出的诸多宝贵修改意见; 感谢郑哲敏院士和李家春院士等提出的宝贵意见. 这些意见对本书质量的提高起到了重要作用.

软件源代码、算例及相关资料请到作者的网盘下载, 下载地址: <http://cid-1cc0dcbff560c149.skydrive.live.com/browse.aspx/.Public?wa=wsignin1.0&sa=694347089>.

作 者

图 版

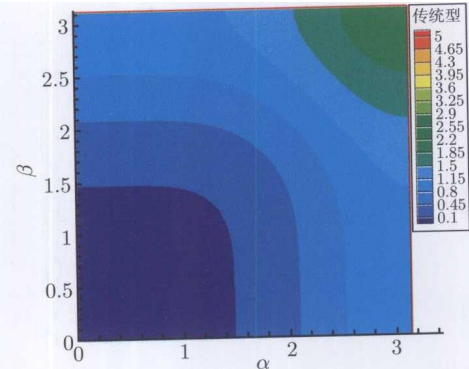


图 3.2.6 五阶精度传统型迎风偏斜逼近式耗散率云图

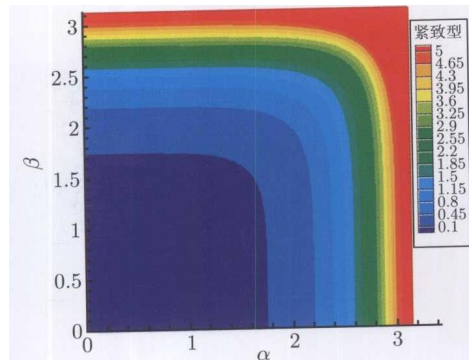


图 3.2.7 五阶精度迎风紧致差分逼近式耗散率云图

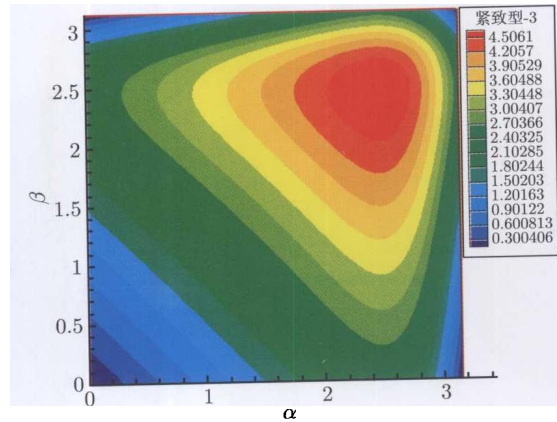


图 3.5.6 MXD 型三阶迎风紧致逼近式色散关系云图

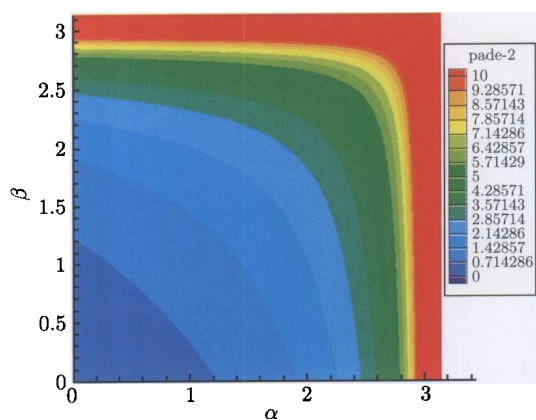
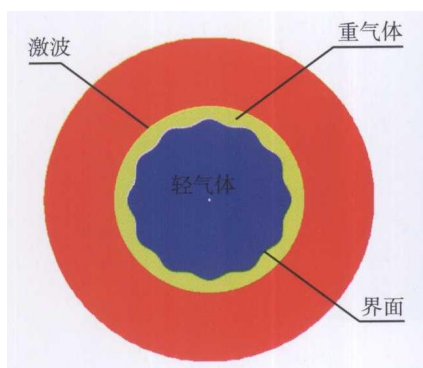
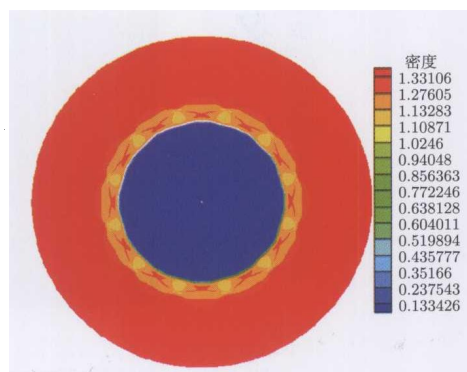


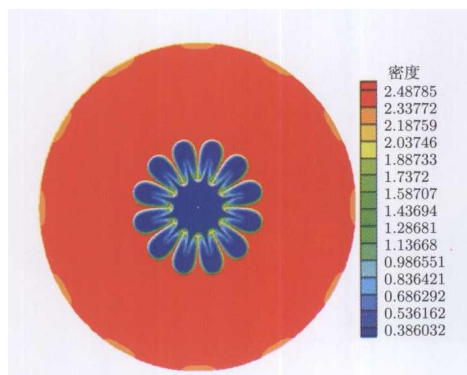
图 3.5.7 FST 型二阶 Pade 逼近式色散关系云图



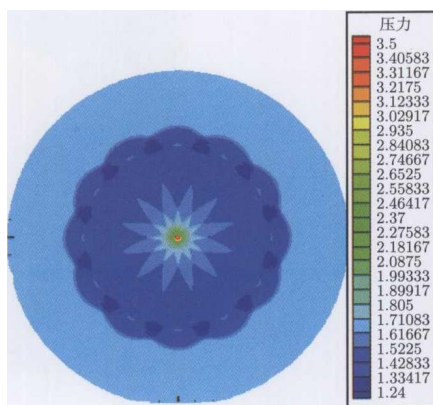
(a) $t=0.00$ 时刻的密度云图



(b) $t=0.30$ 时刻的密度云图



(c) $t=3.3$ 时刻的密度云图



(d) $t=3.9$ 时刻的压力云图

图 4.2.3 不同时刻的数值结果

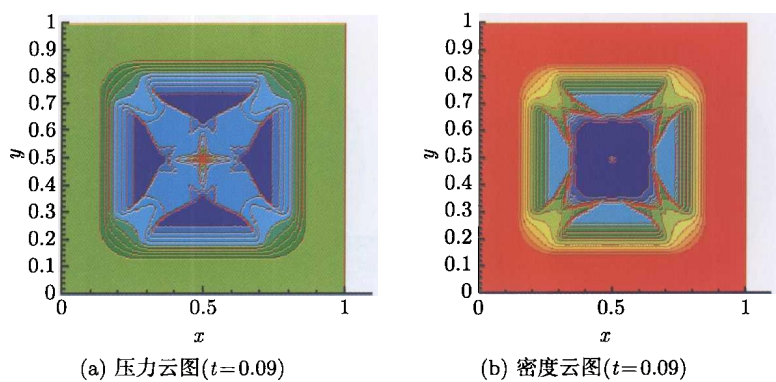


图 4.6.2 $t = 0.09$ 时的压力与密度云图

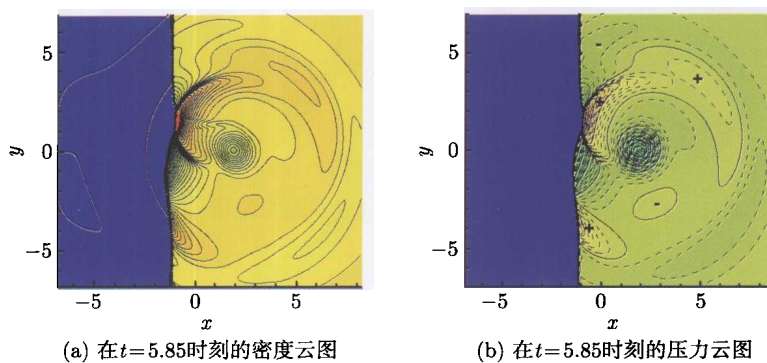


图 4.7.2 $t = 5.85$ 时的密度和压力云图

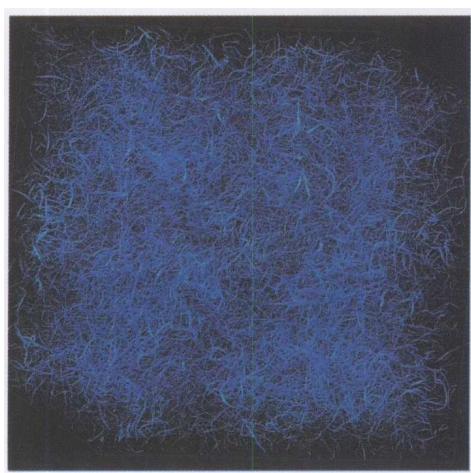


图 7.4.3 流场 D1 中微细拟序涡的轴心

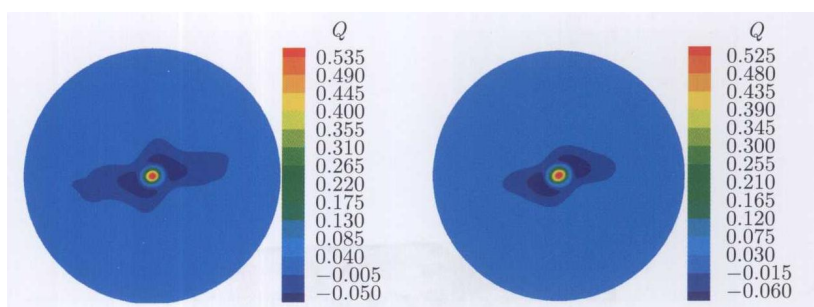


图 7.4.10 经过相位平均后的 Q (左图为流场 D1; 右图为流场 D3)

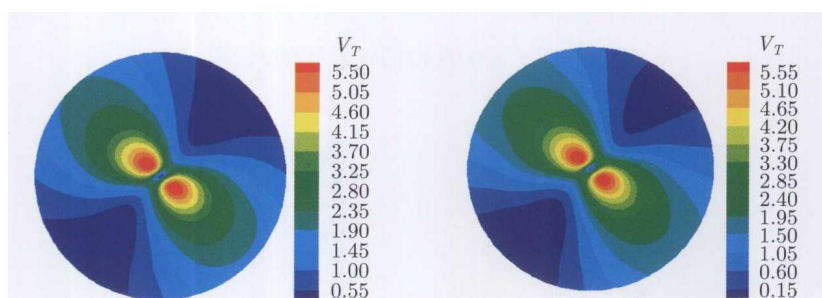


图 7.4.11 经过相位平均后的旋转速度 u_θ (左图为流场 D1; 右图为流场 D3)

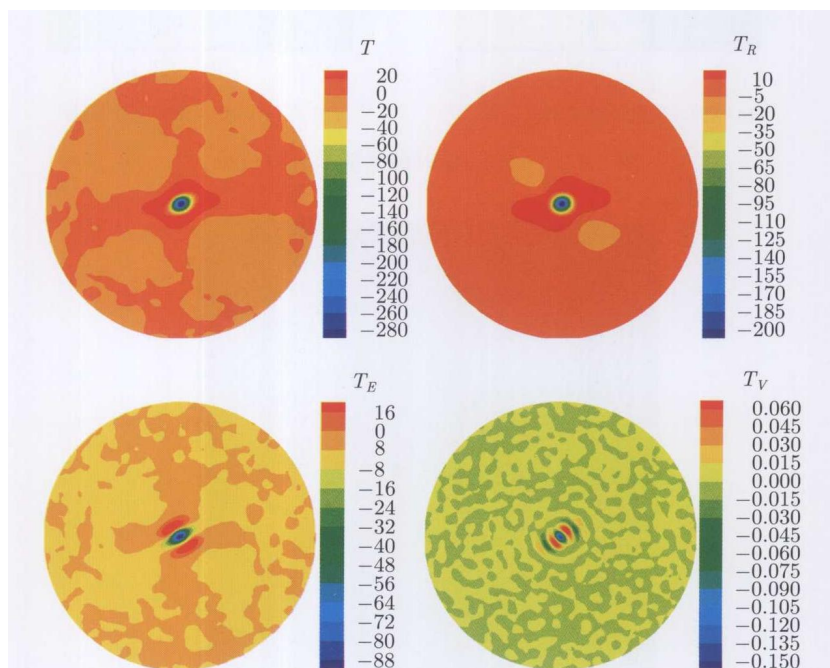


图 7.4.13 经过相位平均后微细涡周围的声源分布 (流场 D1)

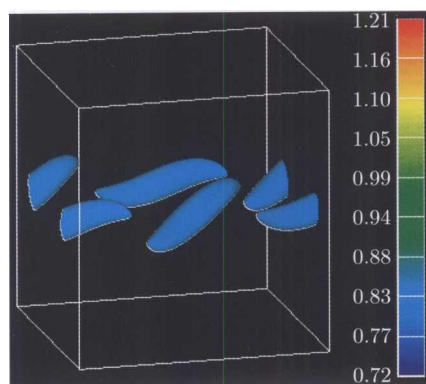


图 8.4.9 (a) $t = 36.63$ 三维压力等值面

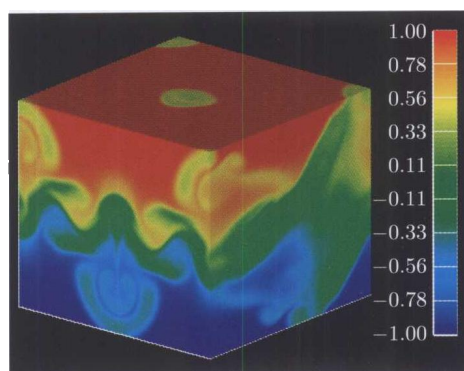


图 8.4.10a 标量场 g 的三维等值面, $Mc = 0.8, t = 36.63$

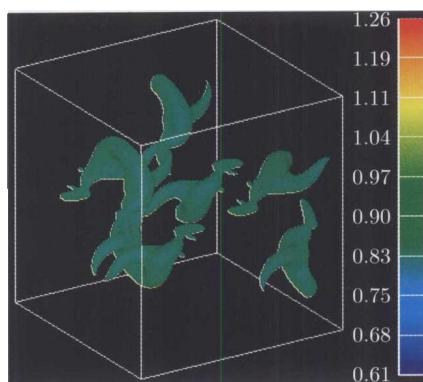
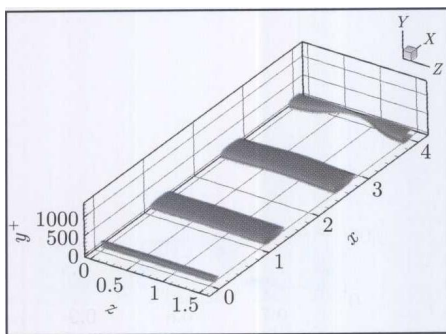
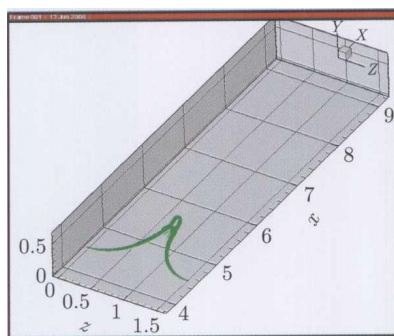


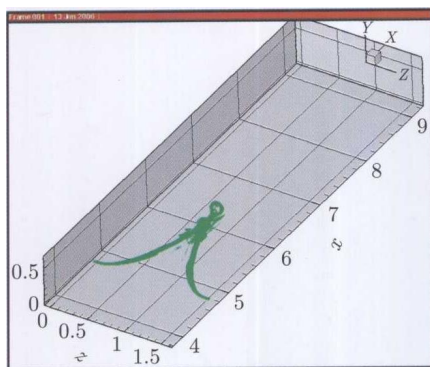
图 8.4.12 (a) $t = 52.37$ 三维压力等值面



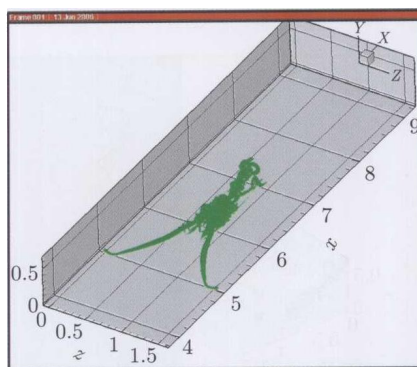
(a) $t = t_0 + \frac{3}{4}$



(b) $t = 15.61$



(c) $t = 16.62$

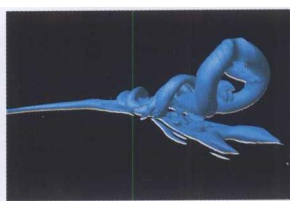


(d) $t = 17.63$

图 9.1.9 速度梯度张量的二阶不变量 Q_2 的三维等值面 (1)



(a) $t = 15.61$
 $x = 4.45 \sim 5.45$

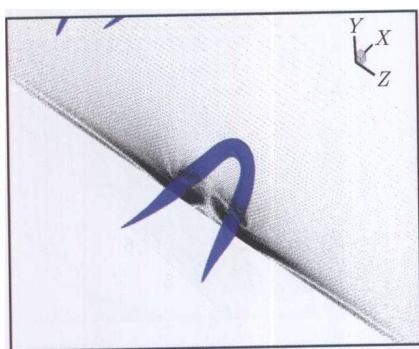


(b) $t = 16.62$
 $x = 4.70 \sim 6.20$

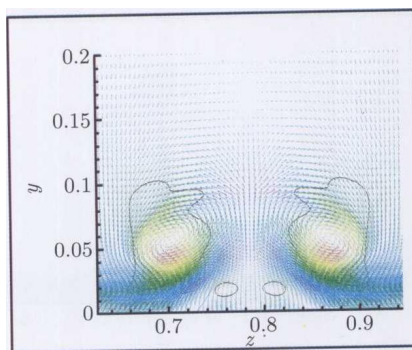


(c) $t = 17.63$
 $x = 4.95 \sim 7.00$

图 9.1.10 上图局部区域的放大图

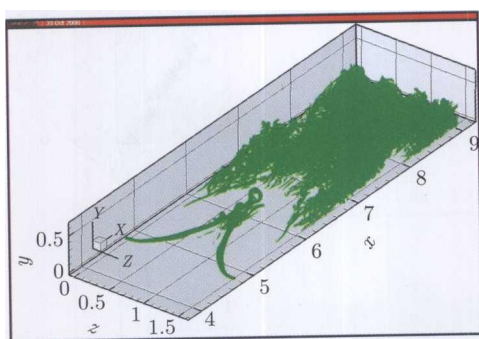


(a) 发卡涡头部附近的流动矢量

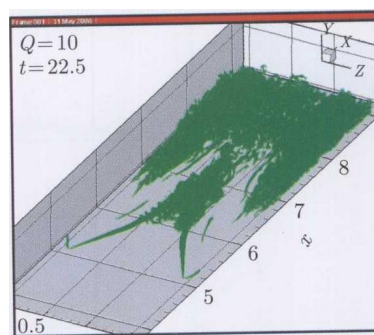


(b) 发卡涡头部附近的流动矢量切面

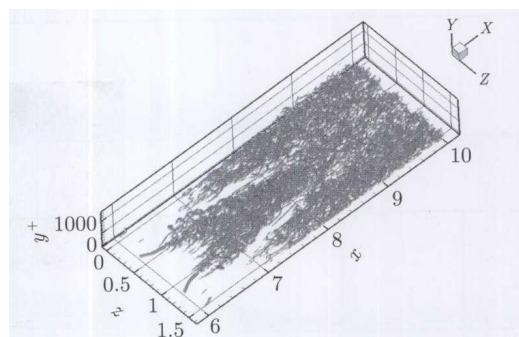
图 9.1.11 发卡涡附近的流动特征



(a) $t=20.42$

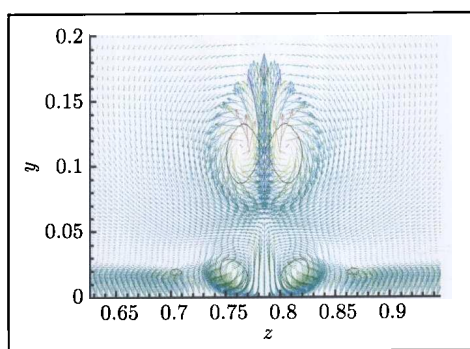


(b) $t=22.50$

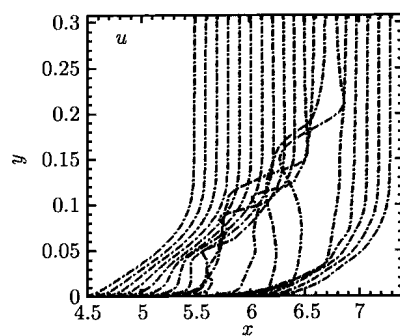


(c) $t=24.62$

图 9.1.12 速度梯度张量的二阶不变量 Q_2 的三维等值面 (2)

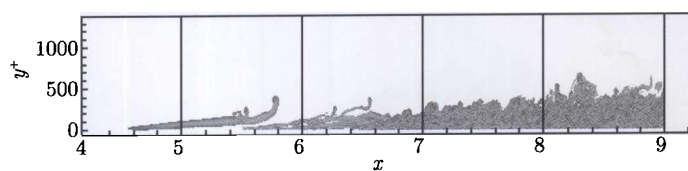


(a) 瞬时速度在 (y, z) 的切面图

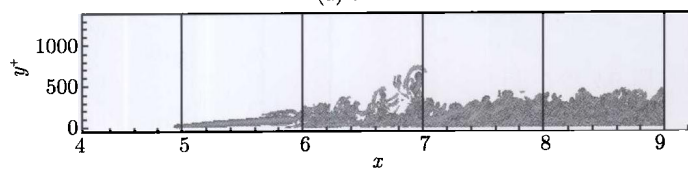


(b) 流向速度型沿流向的变化($t=16.16$)

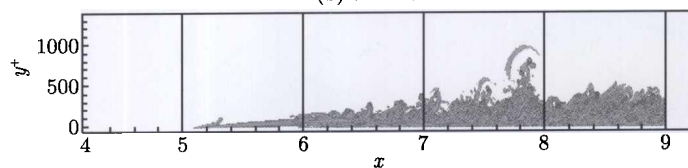
图 9.1.14 转换区的不稳定特征



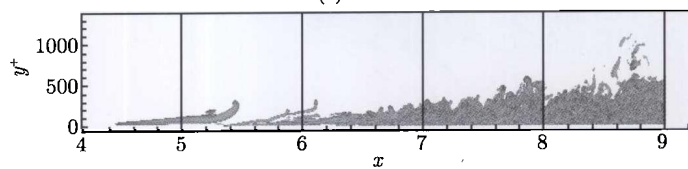
(a) $t=24.18$



(b) $t=25.69$



(c) $t=26.69$



(d) $t=27.70$

图 9.1.16 不同时刻发卡涡在 (x, y) 平面的侧向图