

力学与工程应用

(第九卷)

杜庆华 主编



中国林业出版社

力学与工程应用

(第九卷)

杜庆华 主编

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程应用. 第9卷/杜庆华主编. - 北京:中国林业出版社,2002.8
ISBN 7-5038-3147-2

I. 力… II. 杜… III. ①力学-文集②力学-应用-文集 IV. 03-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 053931 号

出 版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同 7 号)

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话 66184477

发 行 中国林业出版社

印 刷 北京林业大学印刷厂

版 次 2002 年 8 年第 1 版

印 次 2002 年 8 月第 1 次

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 26.5

字 数 575 千字

印 数 1~300 册

定 价 60.00 元

北方七省、自治区、直辖市力学学术工作委员会

主 任	杜庆华					
委 员	冯士箴	华筑信	佟景伟	张善元	李鸿琦	
	周丰峻	姚振汉	柳春图	鹿振友	蔡玄晖	
秘 书 长	鹿振友					
副秘书长	李鸿琦					

《力学与工程应用》编审委员会

主 编	杜庆华					
副主编	柳春图	鹿振友	邢永明	刘 波		
编 委	丁遂栋	刘 波	孙利民	邢永明	佟景伟	
	张方春	李鸿琦	杜庆华	杨 姝	陈昭怡	
	周慎杰	姚振汉	柳春图	曹天捷	鹿振友	
	黄永念	焦永树	蔡玄晖			
执行编委	鹿振友	刘春阳				

前 言

北方七省、自治区、直辖市（北京市、天津市、河北省、河南省、山东省、山西省、内蒙古自治区）力学学会第九届学术会议，2002年8月将在河北省承德市召开。我衷心祝愿本届学术会议圆满成功。参加本届学术交流并编辑出版的论文共98篇。这些论文先由各力学学会推荐，后经2001年8月呼和浩特《力学与工程应用》编审会审定的。内容涉及流体力学、固体力学、计算力学、一般力学与振动、实验力学、工程应用、力学教学研究等。入选论文集中反应了近两年来一大批青年力学工作者在力学基础理论研究、工程应用及力学教学改革等方面的工作，是北方七省、自治区、直辖市广大力学工作者辛勤劳动的丰硕成果。这些成果说明在知识经济时代力学学科的发展必须加强力学与工程应用的结合，加强与高新技术、其他工程技术领域的交叉与融合，同时要加强力学教育的研究和改革。我希望我们这种联合的学术交流活动能为力学学科繁荣做出积极的贡献。

感谢学术工作委员会和编审委员会各位同仁为学术交流会议的召开和论文集的编审、出版所付出的辛勤工作。借此对中国林业出版社的大力支持和帮助表示衷心的感谢！

杜庆华

2002年5月

目 录

第一部分 流体力学

超音速边界层扰动波传播的数值模拟	王毅 (2)
角区湍流场内拟涡能和螺度分布的实验研究	王凯建 林发布 魏中磊 (6)
可压缩混合层扰动演化的研究	何立志 (10)
空间周期流场中雷诺应力与速度变形率的相位关系	王新军 罗纪生 (14)
六线热线探针及其在二维混合层流场内涡量测量的应用	魏中磊 翟建军 胡伟 (18)
三个丁坝流态研究	吕志咏 张柏山 祝立国 (22)
旋涡结构的湍流统计理论	黄永念 (26)
应力偶效应对动载轴承润滑性能影响的分析	李征 朱克勤 王晓力 (30)
用子波变换分析三齿被动控制自由射流的流向结构	刘欣 安海玲 姜楠 舒玮 (34)

第二部分 固体力学

充满液体的圆柱壳轴向冲击屈曲的实验与数值模拟	孙华东 (40)
非线性弹性基础上板的动力行为	张年梅 马宏伟 (44)
改进的无网格方法在疲劳裂纹扩展计算中的应用	赵艳荣 赵修明 (48)
铰接于定轴转动刚体上的线性强化材料平面杆系弹塑性分析的数值解	马英忱 倪新华 刘协权 (52)
考虑端座效应的压杆稳定性	马诚捷 马建芳 (56)
考虑细观各向异性的马氏体相变的应力应变计算	韦广梅 国超妍 史志铭 蔡玄晖 (60)
拉压模量不同材料平面平行杆系应力应变分析的数值解	张淑琴 刘协权 倪新华 (64)
两刚性圆球间存在宾汉流体时的挤压流动分析	李红艳 黄文彬 (68)
疲劳破坏中的 P.G. Paris 公式	赵学友 朱云 方治华 (72)
人松质骨强度的细观分析	朱健 段荣 张宏民 (76)
塑性动力学的研究进展与展望	王辰 张方春 王锡平 (80)
植物粉粒体压缩成型过程中大变形问题的研究	赵东 黄文彬 (84)

第三部分 振动与一般力学

ZLC-140-220 型振动冷却机的动力分析	王伟 苗同臣 薛赣新 (90)
标枪投掷中的力学问题	任晋军 廖红 陈维毅 徐莉 (95)

弹性地基上具有简支边界板的振动分析	李欣业 邢素芳 于文英 (99)
肌肉的等体积收缩模型	陈维毅 陈昭怡 曾绍锋 (103)
利用结构振动响应进行损伤检测的基本方法	张向东 王志华 张立军 马宏伟 (107)
确定加速度瞬心位置的几何法	段淑敏 孔艳平 (113)
熔体在螺旋取向挤出机头中的运动分析	孙利民 申长雨 (115)
实对称正定五对角矩阵的一类特征值反问题	田霞 张方春 孙仙山 (119)
脱层对悬臂层合梁自然频率的影响	孙鲁原 张根全 武海龙 高进旺 (123)
用样条函数—配点法求解结构的动态响应	李革 方治华 朱云 (127)

第四部分 计算力学

边界元多极快速算法研究进展	赵丽滨 姚振汉 (132)
边界元法在复合材料二维模拟中的应用	姚振汉 孔凡忠 王朋波 王海涛 (137)
非线性 Boussinesq 方程的紧致差分格式研究	赵广慧 张年梅 杨桂通 (142)
非线性方程解法比较	毕继红 张利华 (146)
基于满应力方法的梁截面优化	隋允康 杜家政 宇慧平 (151)
结构有限元动态模型修正研究	杨杰 张方春 谭雪琴 侯明华 (155)
精确的混合界面模态综合法	柯丽君 张方春 (159)
具有弹性耦合结构振动系统的混合子结构法	司俊 张方春 孙仙山 (163)
六面体网格自动剖分方法及软件研制	梁醒培 李廷龄 吴蕙 张芸 (167)
求解椭圆型偏微分方程边值问题的无网格方法	汤红卫 赵艳荣 (171)
全平面上任意形状夹杂问题研究	赵颖涛 高洋 王敏中 (176)
三维船舶运动与载荷的非均匀有理 B 样条表面计算方法	徐立 陈映秋 (181)
四边形单元面积坐标法及其应用	岑松 龙取球 姚振汉 龙志飞 (186)
新型混合边界积分方程模型研究	王建省 王晓纯 (190)
一种新型无网格法——杂交边界点法	张见明 姚振汉 (194)

第五部分 工程应用

SMA 纤维混杂层合板的材料阻尼性能研究	任勇生 秦惠增 (200)
TY02 型接触网作业车抗倾覆稳定性计算及分析	初长红 (205)
泵房抗滑稳定可靠性主要影响因素的分析	李晓丽 申向东 (209)
层合结构中 SFEM 自动形成的技巧	宋云连 (214)
齿轮箱类结构振动功率流传递特性研究	李新德 宋孔杰 牛军川 徐英峰 (218)
齿轮箱系统结构声的功率流传递特性研究	张蔚波 宋孔杰 王随莲 (222)
大型水轮机缝隙式止漏环液膜动特性研究	慎政 张信志 (227)
改进 AFOSM 在结构分析中的应用	宋云连 (231)

干硬性水泥稳定土桩复合地基的特性分析	刘宏 闫晓璇 (235)
钢管拱在灌注混凝土过程中的计算分析	李黎 (239)
钢筋混凝土框架节点抗震设计分析	米晋生 张立军 (243)
挤扩支盘桩的荷载传递特性分析	赵明伟 白晓红 梁仁旺 (248)
农用三轮车车架结构的有限元分析	张根侠 王锡平 马健 (253)
铁路 SRC 连续梁的试验研究与设计	张金芝 (256)
物体水动力载荷工程计算	马震宇 (261)
一种路用玻纤加劲格栅的材料属性及理化性能	岳自军 杜云海 尤玉成 (265)
由直线与圆弧组成的曲梁计算	张裕媛 吴淦卿 (269)

第六部分 实验力学

Ni ₃ Al 合金 1200℃ 蠕变裂纹扩展行为研究	张国栋 刘绍伦 张行安 (276)
QF-6-2 型发电机座残余应力的测试与分析	马惠敏 (281)
SiC 超细粉增韧环氧树脂的研究	马世虎 李鸿琦 常晓环 邢冬梅 舒庆璇 李雨时 (285)
TIG 熔修焊缝裂纹的低温力学性能研究	李冬霞 贾宝春 (289)
不同粘粒含量的粉土振动过程中孔压变化试验研究	张素姣 牛琪琪 焦俊虎 (293)
材料韧性断裂与脆性断裂的应力状态分析	高峰 邱棟华 (298)
单板层积材静压大变形本构关系研究	李宁 王淑娟 鹿振友 徐曼琼 (301)
二维离散 δ -平滑算法提高 DSCM 测试精度的研究	王志 李鸿琦 邢冬梅 舒庆璇 马世虎 (305)
风电的发展和力学在风机的应用	李鸿琦 王毅 岳澄 尹保冠 李林安 (309)
机床动态性能分析	王守信 李群 董绍华 (313)
内压圆柱壳大开孔率开孔整锻件补强结构应力分布研究	张卫义 陈罕 (317)
人体股骨头松质骨的力学性能实验研究	关学锋 陈维毅 曾绍锋 (322)
弱界面叠层复合材料层缩区破坏机理的研究	尚海霞 邢永明 (326)
数字图像相关方法中自相关的分析	李雨时 佟景伟 舒庆璇 唐晨 (332)
小波变换在位移测量研究中的应用	王志勇 王世斌 佟景伟 (336)
小麦优种筛选中的生物力学性质研究	郭玉明 姚智华 李红波 郭建春 吕国栋 (340)
一种新的摩擦接触面模型及应用	陈曦 李林安 佟景伟 (345)
正交异性板曲线裂纹断裂参数的实验测定	常红 常莉莉 陈永刚 (349)
自由射流边界层平均流场的非均匀性对标度律影响的实验研究	陈春华 姜楠 舒玮 (353)
自由射流边界层中推广的自相似标度律的实验研究	苏锋 姜楠 舒玮 (357)

第七部分 教学研究

材料力学课堂教学用课件的开发与应用	王燕群 (362)
-------------------------	-----------

关于拉压静不定问题的能量解法	崔芸 曹彩英 玉光普 (365)
国外材料力学课程体系的现状研究及其发展	王世斌 (369)
几何法证明平面图形的速度合成定理和加速度合成定理	于振深 (373)
建筑工程类力学系列课程改革尝试	申向东 (377)
教改中的作业批改环节的研究探索	马群 佟晓君 武春亭 (380)
课程教学中贯彻主体性和创新性的几项措施	杨妹 韦广梅 张晓燕 (383)
理论力学多媒体教学的实践与探索	曹咏弘 王月梅 关学锋 李艳辉 李海涛 (386)
理论力学教学改革初探	杨晓冬 (389)
论圆轴扭转的平面假设	姚河省 常红 (393)
压杆稳定的机理研究	唐晓雯 刘燕 (397)
迎教学合格评估 促进实验室建设	钱民刚 孙建国 李晓莉 (402)
用动静法推导冲击问题	隋允康 (406)
在运动学教学中应加强分析法的应用	王月梅 曹咏弘 李海涛 (410)

第一部分

流 体 力 学

超音速边界层扰动波传播的数值模拟

王 毅

(天津大学力学系, 300072, 天津)

摘要 本文采用紧致差分格式对超音速平板边界层中 T-S 波的演化过程进行直接数值模拟, 发现扰动幅值为 0.01 时, 可以分辨出弱激波。这样的流场是否还能用不可压流中的弱非线性理论进行研究是值得探讨的问题。

关键词 小激波; T-S 波; 直接数值模拟; 超音速边界层

一、引言

近来由于航空、航天技术的发展, 可压缩流动的湍流及转捩问题正在成为新的研究热点, 流动稳定性问题是其中的一个重要部分。由于这类问题的复杂性, 从数学上求精确解是不可能的。在实验研究方面, 对可压缩流, 特别是超音速流, 也是十分困难的。由于缺少全面系统的实验研究, 理论上难以构造令人信服的可压缩流动稳定性的非线性理论框架。目前, 国内、外都有一些学者试图将不可压缩流动稳定性的非线性理论推广应用于可压缩流动中, 以研究有限幅值扰动的非线性演化。然而, 在超音速尤其是高超音速范围内, 扰动波的幅值达到一定程度时, 很可能产生小激波的运动^[1]。小激波的出现将使流场发生较大变化, 扰动解将变得不连续。这样, 建立在光滑流场基础上的不可压缩流动的非线性理论就不适用于带有阶跃的可压缩流场。本文分别用不同的格式, 对于不同马赫数下超音速边界层的扰动的演化进行了直接数值模拟, 以探讨超音速边界层中当扰动达到一定的幅值是否有小激波的出现。为建立可压缩流稳定性非线性理论提供一定的依据。

二、控制方程及数值方法

本文从二维可压缩 N-S 方程出发, 为了提高边界层内的精度, 对 y 方向进行坐标变换。若令广义坐标为 (ξ, η) , 并对各参数无量纲化, 则广义曲线坐标系下的守恒型式的 N-S 方程如下:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial E_1}{\partial \xi} + \frac{\partial F_1}{\partial \eta} = \frac{\partial E_{1v}}{\partial \xi} + \frac{\partial F_{1v}}{\partial \eta} \quad (1)$$

其中 $U_1 = JU$, $J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)}$, $U = [\rho, \rho u, \rho v, E_t]^T$

$$E_1 = J(E\xi_x + F\xi_y), E_{1v} = J(E_v\xi_x + F_v\xi_y), F_1 = J(E\eta_x + F\eta_y), F_{1v} = J(E_v\eta_x + F_v\eta_y)$$

$$E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E_t + p)u \end{bmatrix} E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx}/R_e \\ \tau_{xy}/R_e \\ (u\tau_{xx} + v\tau_{xy})/R_e - q_x \end{bmatrix} F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E_t + p)v \end{bmatrix} F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx}/R_e \\ \tau_{yy}/R_e \\ (u\tau_{yx} + v\tau_{yy})/R_e - q_y \end{bmatrix}$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right), \tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu \left(-\frac{\partial u}{\partial x} + 2\frac{\partial v}{\partial y} \right), \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$q_x = k \frac{\partial \tau}{\partial x}, q_y = k \frac{\partial \tau}{\partial y}, E_t = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2)$$

式中 u 、 v 分别是平行于平板和垂直于平板的速度分量, ρ 是密度, p 是压力, τ 是温度, 粘性系数 μ 满足 Sutherland's 公式:

$$\mu = T^{3/2} \left(\frac{1+C}{T+C} \right) \quad (2)$$

其中 $C=110.4 \text{ k/T}_\infty$, P_r 为 Prandtl 数, 定义为 $P_r = \mu C_p / k$, C_p 是定压热容, P_r 在计算中取常数 0.72. γ 为比热比, 取为 1.4.

为了对正负通量分别用迎风格式, 把守恒形 N-S 方程(1)的对流项进行 Stager 分裂. 控制方程变为:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial E_1^+}{\partial \xi} + \frac{\partial E_1^-}{\partial \xi} + \frac{\partial F_1^+}{\partial \eta} + \frac{\partial F_1^-}{\partial \eta} = \frac{\partial E_{1v}}{\partial \xi} + \frac{\partial F_{1v}}{\partial \eta} \quad (3)$$

对于分裂后的对流项, 本文采用袁湘江、周恒提出的三点三阶弱迎风紧致差分格式^[2]离散, 其形式如下:

$$5G_{j-1}^+ + 8G_j^+ - G_{j+1}^+ = \frac{12}{h}(g_j^+ - g_{j-1}^+)$$

$$-G_{j-1}^- + 8G_j^- + G_{j+1}^- = \frac{12}{h}(g_{j+1}^- - g_j^-) \quad (4)$$

其中 G 表示导数值, g 表示函数值。该格式对正负通量采取不同的形式, 使其都具有迎风机制, 有较好的稳定性、抑制非物理高阶振荡的能力和激波捕捉能力。其精度高于常用的二阶精度的激波捕捉格式 (如 NND 格式^[3]), 与之相比, 能够更好的满足稳定性计算的要求。对于粘性项我们用六阶精度对称型紧致差分格式^[4]离散。

三、数值模拟

研究小扰动的传播首先需要得到基本流场。本文用可压缩边界层的相似性解作为初始条件计算基本流场。边界条件的取法如下, 上边界的各物理量导数等于零, 下边界为无滑移绝热壁, 出口处采用 Poinso 和 Lele^[5]提出的特征关系边界条件。时间方向采用一阶离散。

为了给直接数值模拟研究提供初始扰动的准确波形, 对基本流进行线性稳定性分析。流动的瞬时量可以分解为基本流量和扰动量, 扰动量可以表示为行进波的形式, 即:

$$\varphi' = \hat{\varphi}(y)e^{i(\alpha x + \beta z - \omega t)}。采用二维的空间模式进行分析, 所以 $\beta = 0$, ω 为实数, α 为复数。$$

将瞬时量带入方程 (1), 减去基本流满足的方程并略去扰动的非线性项, 可以得到线性的扰动方程, 该方程与齐次边界条件构成特征值问题 $F(\alpha, \text{Re}, \omega, M) = 0$ 。本文采取 Malik 建议的二点四阶差分格式^[6], 求解特征值及相应的特征函数 $\hat{\varphi}$ 。

得到基本流场和其线性稳定性的扰动解后, 在计算域的入口引入扰动波, 进行直接数值模拟。时间方向采用 Runge-Kutta 三步三阶精度方法, 其它数值方法和边界条件的取法与计算基本流时相同。

四、计算结果与讨论

首先我们对马赫数为 4.5, 雷诺数为 10000 的流场加入 T-S 波, 扰动幅值为 0.01。图 1 是扰动的演化曲线, 其增长率与线性理论符合的很好。图 2 是局部放大的扰动场的等马赫线图。

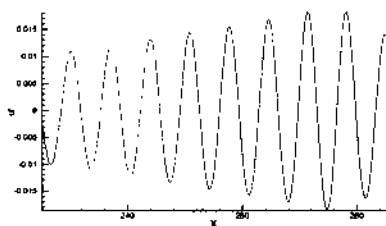


图 1 扰动演化曲线

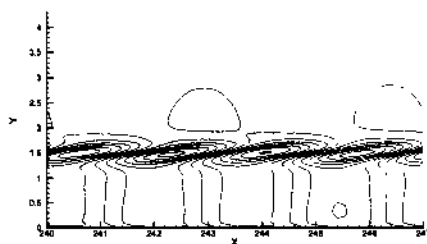


图 2 扰动场的等马赫线图

在图中,我们可以看到临界层附近有等值线的聚集的地方,这是由温度和密度的扰动在该位置引起的,但显然不能因为等值线密集就下结论说有激波存在。等值线聚集的线几乎与 x 轴平行,速度垂直于该线的分量是亚音速的,不会在该方向产生激波。我们在计算中跟随该线上游的点,发现该点并不会快速的穿过等值线聚集的线,其熵值也没有跃阶。我们把扰动幅值加大,分别用幅值为 0.05, 0.1, 0.2 的扰动进行数值模拟。尽管等值线更加密集,但仍然无法看到有与小幅值扰动时有本质的差别,也就是说仍然没有激波出现。本文对于不同马赫数的情况(1.4~6.0)也作了计算,都没有发现激波。

为了排除网格数不够所带来的定性上差异,本文对 x , y 方向网格都加密一倍,使边界层内达到 250 个点, x 方向一个 T-S 波长内有 50 个点。其数值结果与加密前一致,这说明本文所用的网格数是足够的。

根据以上的分析,我们可以得到以下结论:在本文所计算的马赫数范围内(1.4~6.0)加入 T-S 波,并无激波产生。用本文所用的数值方法也未能发现在某一位置有强压缩及熵增等类似于激波性质的现象。因此,在该马赫数范围内,将不可压缩非线性理论推广到可压缩流的研究中是可行的。

参 考 文 献

- 1 曹伟, 周恒. 二维超音速混合层中小激波的存在及其对流场结构的影响. 中国科学, A 辑, 2001, 31 (5): 439~444
- 2 袁湘江, 周恒. 计算激波的高精度数值方法. 应用数学和力学, 2000, 21 (5): 441~450
- 3 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式. 空气动力学报, 1988, 6 (2): 143~164
- 4 Lele S K. Compact Finite Difference Schemes With Spectral-like Resolution. Journal of Computational Physics, 1992, 103: 16~42
- 5 Poinot T J, Lele S K. 1991, Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flows. Journal of Computational Physics, 1992, 101: 104~129
- 6 Malik M R, Chuang S, Hussaini, M.Y., Accurate Numerical Solution of Compressible Linear Stability Equations, 1982, ZAMP 33: 189~201

角区湍流场内拟涡能和螺度分布的实验研究

王凯建 林发布 魏中磊

(北京大学湍流研究国家重点实验室, 100871, 北京)

摘要 用六线涡量探头对椭圆柱体和平板构成的角区湍流场的拟涡能和螺度进行了实验测量研究, 实验研究发现,

关键词 涡量探头; 涡量; 拟涡能; 螺度

一、引言

用一个二维椭圆柱体和平板构成的角区流场是一个在时间上非定常、在空间上非均匀的复杂湍流场, 其主要特征是流场内有马蹄涡, 这是自然界和工程流动中存在相当普遍的一种流动模型。由于椭圆柱体正前方的平板边界层内存在很强的逆压梯度, 流体在柱体前形成的边界层内必然分离, 并进而卷吸成旋涡管, 涡管不断地被拉伸, 绕过柱体的两侧被拖向柱体的尾流区, 直到旋涡在远后方完全弥散为止。如果从椭圆柱体的顶部向下观察角区流动的话, 则流场内的涡管呈马蹄形状, 这就是所谓的马蹄涡。对上述马蹄涡角区流场内涡量、拟涡能以及螺度分布的研究, 能使人们进一步理解马蹄涡演化机理。

二、测量模型与实验装置

角区流场是把椭圆柱体垂直固定在平板上构成的对称于来流的两个角区。椭圆柱体的长轴 c 为 400 mm (弦长), 短轴 b 为 80 mm (最大厚度), 柱体高度为 300 mm, 实验采用的 AD 板的采集频率分配到每个单通道的频率是 16.6 kHz。无量纲化的椭圆方程为:

$$x^2/(1/2)^2 + y^2/(1/10)^2 = 1$$

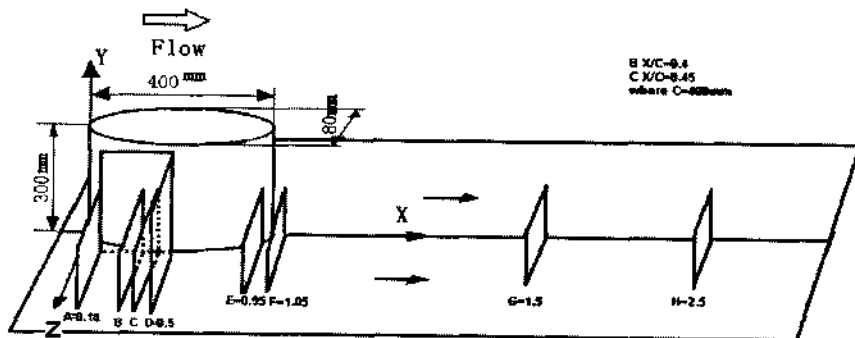


图1 测量截面

如图1所示, 原点设定在椭圆柱体最前缘线与平板的交叉点上, x 轴取自由来流方向, y 轴取翼展方向, z 轴取垂直于翼展的横向。实验时六线涡量探针的轴线和来流的方向一致。由于探头的尺寸的限制, 展向 y 方向从距壁面为 10 mm 的位置开始测量, 即

$y/C=0.025$; 横向 z 测量位置, 根据圆柱体外型, 对于测量截面 A~D 从 $z/C=0.125$ 开始, 对于截面 E 从 $z/C=0.08$ 开始, 对于截面 F~H 从 $z/C=0$ 开始的。实验雷诺数是 3.2×10^5 。用六线涡量探针^[1], 对角区流场的八个截面进行了测量, 其中有 5 个截面在角区区域, 3 个截面在尾流区域。

三、角区流场内的涡量、拟涡能和螺度的实验结果

3.1 涡量的分布

图 2 给出了在角区两个截面和尾流区一个截面内, 平均流向涡量的分布。截面 A ($x/c=0.18$) 上的涡量测量结果, 见图 2-A。由图可见, 有一个较强的负值涡核的涡量分布。由于这个截面是处在圆柱体最大厚度的前半部的顺压梯度区, 顺流而下的流体加速, 涡被拉伸和裂解, 到达圆柱体最大厚度处的截面 D ($x/c=0.5$) 时, 形成如图 2-D 所示的两个涡核的涡量分布结构。在角区圆柱体最大厚度的后半部是逆压梯度区, 涡量扩散较慢, 两个的涡核相互卷吸, 在向下游运动过程中, 又会融合为一个主涡核, 到达圆柱体的尾迹后, 就看得非常清晰了, 如图 2-G 所示。总之, 流体在角区流动时, 由于马蹄涡的卷吸, 在柱体最大厚度的前半部的顺压梯度区, 负涡量值的涡核趋于向角区根部处移动, 并把流场内高动量的流体诱向圆柱体和平板结合处的根部区域; 而在柱体最大厚度的后半部是逆压梯度区, 涡核则趋于从角区根部处向外移动。在角区之后的尾迹区, 在圆柱体中心线上的延长截面上以及平板的延长截面上, 其负值涡量都较大, 见图 2-G。

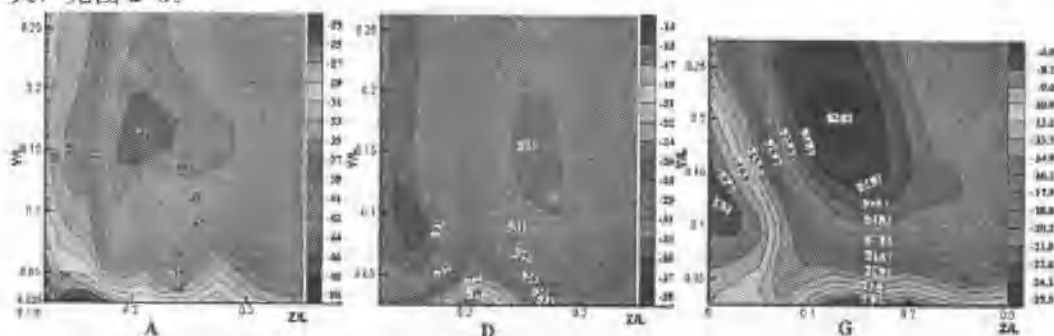


图 2 三个测量面流向涡分量 Q_z 分布的比较

3.2 平均拟涡能分布

拟涡能对角区流场的影响, 过去没有文献报道过, 拟涡能的定义为 $Q = \int_V \frac{1}{2} (\overline{\omega_x \omega_x} + \overline{\omega_y \omega_y} + \overline{\omega_z \omega_z}) dV$, 它与湍能耗散的关系为 $\frac{dT}{dt} = -2\nu Q = -\nu \int_V \overline{\omega^2} dV$ 。其中 $\overline{\omega^2} = 2\nu S_{ij} S_{ij}$, $S_{i,j} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$ 为不可压缩流体的耗散函数。在大雷诺数条件下, 湍流拟涡能和湍流耗散率之间的关系为: $\overline{\omega^2} \approx \nu \overline{\omega_i \omega_i}$ 。从测得的 3 个瞬时涡量分量可求得平均拟涡能 Q : $Q = \frac{1}{2} (\overline{\omega_x^2} + \overline{\omega_y^2} + \overline{\omega_z^2})$, 在角区的最大厚度点前面的顺压梯度区域, 靠近圆柱体前缘线的流动区域, 静压下降, 流体加速, 涡被拉伸, 涡核变细, 涡量增大, 拟涡能也就会相对增大, 结果如图 3-A 和图 3-D 所示。尾流内测得的拟涡能结果, 见图 3-G。由此可见, 角区内截面 A 和 D 上以

及尾迹内截面 G 上的平均拟涡能分布,也反映了相应截面上的能量耗散的分布。对比上述三个截面上的平均拟涡能分布和相应截面的涡量分布图,可以发现,它们各自的分布结构大致相似。由图 3 也可发现,在角区的顺压梯度区内椭圆柱体和平板壁面的附近地区、以及二者的交接拐角处,湍流耗散较小;而在旋涡核心区湍流耗散最大。但在椭圆柱体的最大厚度附近,靠近椭圆柱体底部的旋涡区,湍流耗散最大。在尾流区内,主旋涡核心区湍流的耗散最大,随着离开涡心的距离向外,湍流的耗散也随之下降。

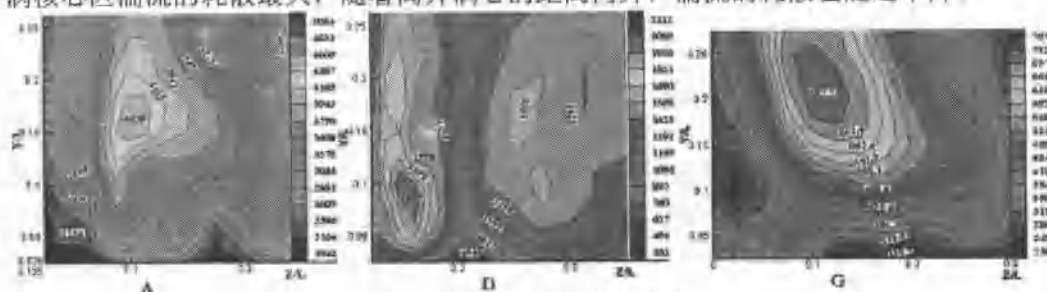


图 3 三个测量面平均拟涡能 Q 分布

3.3 平均螺度分布

早年由 Moffatt^[7]提出螺度的定义如下: $H = \int_V \vec{u} \cdot \vec{\omega} dV$ 。而 $h = \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{u}}{|\vec{\omega}| |\vec{u}|} = \cos \theta$ 定义为

相对螺度,式中, θ 是 $\vec{\omega}$ 和 $\vec{u}$ 之间的夹角, h 的绝对最大值为 ± 1 。若 $\vec{\omega}$ 和 $\vec{u}$ 平行,就是熟知的 Beltrami 流。螺度实质上是代表了湍流中涡丝的强度和其缠绕数。Moffatt 认为高 h 对应着低的耗散 ε ; 反之亦然,并用数值模拟证实过。对 Moffatt 的推断,在湍流边界层,二维平面混合层,网格湍流测得的相对螺度结果,与数值模拟和 Moffatt 的推断不一致。本文试图对 Moffatt 的推断在角区流场内加以验证。本文在角区流场和尾流内测得的螺度结果,见图 4。把测量得到的角区截面 4-A, 4-D 和尾流内截面 4-G 上的平均螺度分布,对比角区 3-A, 3-A 和尾流内 3-G 上拟涡能分布图,发现平均螺度最大值平均拟涡能最大值的分布基本上是一致的。在流场内平均拟涡能值大的区域,所对应的平均螺度值也较大。本文在角区内螺度分布的试验结果得出的结论,也进一步说明 Moffatt 的推断很值得商榷。

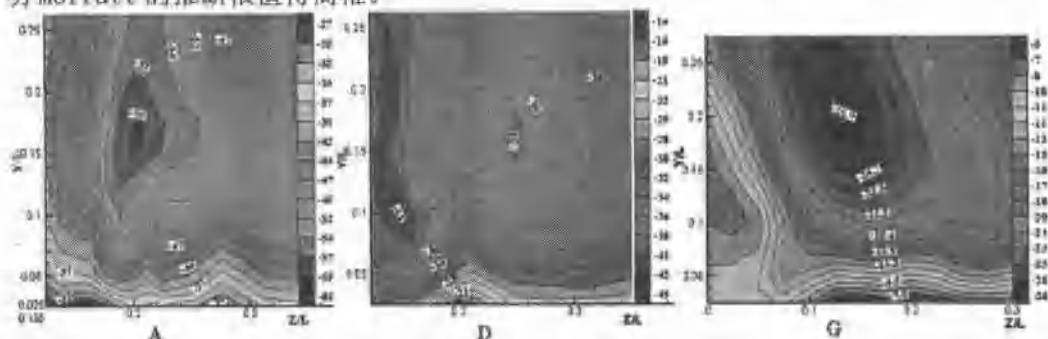


图 4 三个测量面平均螺度 H 分布

3.4 湍流场内不同截面上的最大平均螺度和最大平均拟涡能的演化

在角区内从截面 A 到 E, 尾流内从 F 到 H, 测量了 8 个截面上的平均拟涡能和螺度分布。对上述八个截面上找出各自截面上的最大值绘出沿 x 方向的变化, 如图 5 所示。