

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第2册

航空宇航学院

(第2分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月



NUAA2011039759

Z427
1033 (2010) -B1

航空宇航学院

012~013



2011039759

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0122)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	陈华 张召明	中级 研究院	0122 0122	弹性变形对柔性飞艇气动特性的影响	实验流体力学	2010. 24. 03	2010. 06
2	陈华 赵宁 舒昌	中级 教授 教授	0122 0122 0122	径向基函数插值得优先体积方法	安徽工业大学学报	2009. 26. 04	2009. 1
3	董昊 王成鹏 程克明	讲师 副教授 教授	0122 0122 0122	experimental and numerical investigation of hypersonic jaws inlet	Modern Physics Letters B	2010. 24. 13	
4	董昊 王成鹏 程克明	讲师 副教授 教授	0122 0122 0122	设计参数及附面层修正对“咽”式进气道性能的影响	推进技术	2010. 31. 03	2010. 06
5	董昊 王成鹏 程克明	讲师 副教授 教授	0122 0122 0122	experimental and numerical investigation of hypersonic jaws inlet	The Third international Symposium on Physics of Fluids		
6	姚裕 张召明	副研究员 研究员	0122 0122	整体式盒式应变天平有限元设计	南京航空航天大学学报	2010. 42. 01	2010. 02
7	张红英 秦福德 刘卫华 童明波	讲师 博士 教授 教授	0122 0112 014 0112	牵顶伞对主伞充气过程的影响	南京航空航天大学学报	2010. 42. 01	2010. 02
8	邹宁 张召明	硕士 研究员	0122 0122	用于气流粉碎技术的超声速喷管流场实验研究	中国粉体技术	2009. 15. 06	

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0132)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	高存法 Yiu-Wing Mai	教授 教授	0132 外单位	Fracture of electrostrictive solids subjected to combined mechanical and electric loads	ENGINEERING FRACTURE MECHANICS	2010. 77. 10	
2	高存法 Yiu-Wing Mai 张宁	教授 教授 博士	0132 外单位 0132	Non-Axisymmetric Thermal Stress around a Circular Hole in a Functionally Graded Infinite Plate	Philosophical Magazine	2010. 90. 10	2010. 03
3	杨权权 高存法	博士 教授	0132 0132	Non-Axisymmetric Thermal Stress around a Circular Hole in a Functionally Graded Infinite Plate	Journal of Thermal Stresses	2010. 33	
4	高存法 Yiu-Wing Mai 张宁	教授 教授 博士	0132 外单位 0132	Solution of a crack in an electrostrictive solid	International Journal of Solids and Structures	2010. 47	
5	郑明明 高存法	硕士 教授	0132 0132	An arc-shaped crack in an electrostrictive material	International Journal of Engineering Science	2010. 48	
6	杨权权 高存法	博士 教授	0132 0132	Stress analysis of a functional graded material plate with a circular hole	Archive of Applied Mechanics	2010. 80	
7	罗家成 高存法 戴相花	博士 教授 硕士	0132 0132 0132	Partial discharge-induced crack growth in dielectric materials	SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy	2010. 53. 05	2010. 05
8	杨宾桦 高存法	博士 教授	0132 0132	Plane problems of multiple piezoelectric inclusions in a non-piezoelectric matrix	International Journal of Engineering Science	2010. 48	
9	蒋泉 高存法	副教授 教授	0132 0132	Axisymmetric stress in an electrostrictive hollow cylinder under electric loading	Acta Mechanica	2010. 211	
10	蒋泉 高存法	副教授 教授	0132 0132	Electroelastic stress in an electrostrictive material with charged surface electrodes	International Journal of Engineering Science	2010. 48. 12	
11	蒋泉 高存法	副教授 教授	0132 0132	On the general expressions of finite Hankel transform	SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy	2010. 53. 11	2010. 11
12	沈强 黄再兴	硕士 教授	0132 0132	舰载机前起落架突伸性能参数敏感性分析	航空学报	2010. 31. 03	2010. 03
13	马竞 黄再兴	硕士 教授	0132 0132	利用各向异性硬化张量模型预测 SnAgCu 合金在变温条件下的粘塑性力学行为	工程力学	2010. 27. 05	2010. 05
14	姚寅 黄再兴	博士 教授	0132 0132	基于原子内聚力与表面能等效的内聚裂纹模型	航空学报	2010. 31. 09	2010. 09
15	姚寅 黄再兴	博士 教授	0132 0132	非局部平面应变和平面应力问题界定及其精确性讨论	固体力学学报	2010. 31. 04	2010. 08
16	姚寅 黄再兴	博士 教授	0132 0132	An Investigation to Coaxial Stability of the Nano-bearing Under Two Axis-Deviation Perturbations	Science China: Physics, Mechanics & Astronomy	2010. 53. 12	2010. 12.
17	许鑫 史治宇	博士 教授	0132 0132	A Wavelet and State Space-based Approach for Instantaneous Frequency Identification of Linear Time-Varying System	2010 International Conference on Measurement and Control Engineering	2010	
18	尤琼 史治宇	博士 教授	0132 0132	基于小波有限元模型的移动荷载识别	第19届全国结构工程学术会议		
19	许鑫 史治宇	博士 教授	0132 0132	状态空间下基于小波变换的时变系统参数识别	振动工程学报	2010. 23. 04	2010. 08
20	尤琼 史治宇	博士 教授	0132 0132	基于小波有限元的移动荷载识别	振动工程学报	2010. 23. 02	2010. 04
21	孙慧玉	教授	0132	三维编织复合材料力学行为研究进展	材料科学与工程学报	2010. 28. 01	
22	袁欣 孙慧玉	硕士 教授	0132 0132	三维四向编织复合材料的有限元分析	中国科技论文在线		2010. 06. 25

23	王鑫伟 徐春铃 徐素明	教授 硕士 博士	0132 0132 0132	The discrete singular convolution for analyses of elastic wave propagations in one-dimensional structures	Applied Mathematical Modelling	2010. 34	2010
24	王鑫伟 徐素明	教授 博士	0132 0132	Free vibration analysis of beams and rectangular plates with free edges by the Discrete Singular Convolution	Journal of Sound & Vibration	2010. 329	2010
25	黄建城 王鑫伟	博士 教授	0132 0132	On a new crushing trigger for energy absorption of composite tubes	International Journal of Crashworthiness	2010. 15. 06	2010
26	黄建城 王鑫伟	博士 教授	0132 0132	Effect of the SMA trigger on the energy absorption characteristics of CFRP circular tubes	Journal of Composite Materials	2010. 44. 05	2010
27	戴隆超 王鑫伟 刘 峰	博士 教授 博士	0132 0132 0132	Stress concentrations around a circular hole in an infinite plate of arbitrary thickness	Structural Engineering and Mechanics	2010. 34. 02	2010
28	陆 浦 王鑫伟	硕士 教授	0132 0132	复合材料圆柱壳中心受横向集中载荷作用的渐进破坏非线性有限元分析	复合材料学报	2010. 27. 04	2010
29	黄建城 王鑫伟 袁张贤	博士 教授 硕士	0132 0132 0132	含薄弱环节复合材料圆管耐撞性研究	南京航空航天大学学报	2010. 42. 04	2010
30	林智育 许希武	讲师 教授	0132 0132	复合材料加筋壁板冲击损伤特性及损伤容限研究进展	材料科学与工程学报	2010. 28. 04	2010. 08
31	张超 许希武	博士 教授	0132 0132	二维二轴编织复合材料几何模型及弹性性能预测	复合材料学报	2010. 27. 5	2010. 10
32	朱炜垚 许希武	博士 教授	0132 0132	复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟	复合材料学报	2010. 27. 06	2010. 12
33	毛春见 许希武 林智育	博士 教授 讲师	0132 0132 0132	含冲击损伤复合材料层板及加筋壁板剩余强度研究	应用力学学报	2010. 27. 02	2010. 06
34	毛春见 许希武 郭树祥	博士 教授 副教授	0132 0132 0132	含椭圆孔有限大薄板弯曲应力分析	固体力学学报	2010. 31. 01	2010. 02
35	刘从玉 许希武 陈康	硕士 教授 博士	0132 0132 0132	考虑脱粘的复合材料加筋板屈曲后屈曲及承载能力数值分析	复合材料学报	2010. 27. 06	2010. 12
36	徐琨 许希武	博士 教授	0132 0132	三维五向编织复合材料渐进损伤分析及强度预测	固体力学学报	2010. 31. 02	2010. 04
37	严刚 周丽	讲师 教授	0132 0132	基于Mindlin板理论的偏移损伤成像数值仿真研究	力学学报	2010. 42. 03	2010. 05
38	杨雅洁 周丽	硕士 教授	0132 0132	基于磁致伸缩效应的超声应力波传感器设计与优化	仪器仪表学报	2010. 31. 11	2010. 11
39	周丽 汪新明 尹强	教授 硕士 博士	0132 0132 0132	利用序贯非线性最小二乘技术识别隔震支座模型的参数	振动工程学报	2010. 23. 01	2010. 02
40	尹强 周丽	博士 教授	0132 0132	基于遗传优化最小二乘算法的结构损伤识别	振动与冲击	2010. 29. 08	
41	尹强 周丽 汪新明	博士 教授 硕士	0132 0132 0132	SNLSE方法在橡胶隔震支座参数估计中的应用研究	振动与冲击	2010. 29. 08	
42	尹强 周丽 Jann N. Yang	博士 教授 教授	0132 0132 外单位	AN EXPERIMENTAL STUDY ON ASNLSE METHOD FOR HEALTH MONITORING OF BASE-ISOLATED STRUCTURES	7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)		2010. 03
43	尹强 周丽 Jann N. Yang	博士 教授 教授	0132 0132 外单位	An experimental study on AEKF method for health monitoring of base-isolated structure	Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, SPIE Conference	2010. 7467	2010. 03
44	尹强 周丽 汪新明	博士 教授 硕士	0132 0132 0132	Parameter identification of hysteretic model of rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation	Earthquake Engineering and Engineering Vibration	2010. 09. 03	2010. 09
45	李蕊 周丽 汪新明	博士 教授 硕士	0132 0132 0132	Experimental verifications of a structural damage identification technique using reduced order finite-element model	Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, SPIE Conference	2010. 7467	2010. 03

46	周光明 薄晓莉 匡宁	教授 硕士 工程师	0132 0132 0132	整体中空夹层复合材料的弹性性能分析	复合材料学报	2010. 27. 01	2010. 02
47	王新峰 陈国军 周光明			三维机织复合材料拉伸研究	南京航空航天大学学报	2010. 42. 01	2010. 02

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0133)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	张丽琴 邓宗白	硕士 教授	0133 0133	基于VC的蜂窝结构CT扫描图像处理研究	计算机测量与控制	2009. 17. 05	
2	全巧燕 邓宗白	硕士 教授	0133 0133	基于正方形网格能量模型的能量均衡策略	工业仪表与自动化装置	2010. 04	
3	王奔 邓宗白	硕士 教授	0133 0133	基于角点检测的铝蜂窝芯层拉伸力学性能研究	传感器与微系统	2010. 29. 09	
4	刘荣梅 梁大开	讲师 教授	0133 0134	Experimental study of carbon fiber reinforced plastic with embedded optical fibers	Materials & Design	2010. 31. 02	2010. 02
5	刘荣梅 梁大开	讲师 教授	0133 0134	Experimental study of optical fibers influence on composite	Proceedings of the SPIE	2009. 7522	
6	刘荣梅 梁大开	讲师 教授	0133 0134	石英光纤与树脂界面强度实验研究	南京航空航天大学学报	2010. 42. 06	2010. 12
7	孙伟 何小元	副教授 教授	0133 外单位	Warping measurement using projection speckle correlation method and microscopic interferometry	Proc. of SPIE	2009. 7375	
8	孙伟 刘雯雯 康新 何小元	副教授 讲师 副教授 教授	0133 外单位 外单位 外单位	显微干涉法在MEMS结构三维形貌测试中的应用	计量学报	2009. 30. 04	2009. 07
9	王开福 高明慧 A. K. Tie	教授 高工 教授	0133 外单位 外单位	Volume-grating DSPI for measurement of dynamic out-of-plane displacement fields	Measurement	2010. 43. 04	
10	顾国庆 王开福	博士 教授	0133 0133	Study of phase-shifting techniques in DSPI for deformation measurement	AIP Conference Proceedings	2010. 1236. 57-61	
11	顾国庆 王开福 燕新元	博士 教授 硕士	0133 0133 0133	基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理	激光技术	2010. 36. 04	2010. 11
12	王敏 王开福	硕士 教授	0133 0133	电子散斑剪切干涉相移技术研究	光学仪器	2010. 32. 05	
13	常奇峰 王开福	硕士 教授	0133 0133	基于DSP和FPGA的视频采集实时处理系统设计	郑州轻工业学院学报	2010. 25. 02	
14	王立峰 胡海岩 郭万林	教授 教授 教授	0133 0131 外单位	Thermal vibration of carbon nanotubes predicted by beam models and molecular dynamics	Proceedings of the Royal Society A	2010. 466. 2120	
15	王立峰 HeXQ	教授 讲师	0133 外单位	Vibration of a Multilayered Graphene Sheet With Initial Stress	Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine	2010. 01. 04	
16	张剑 周储伟 叶见曙	讲师 教授 教授	0133 0133 0133	几何非线性高性能复合材料筋混凝土梁 Heterosis组合壳单元	复合材料学报	2010. 27. 02	2010. 04
17	张剑 周储伟 雷笑 叶见曙 卓家寿	讲师 教授 讲师 教授 教授	0133 0132 外单位 外单位 外单位	混杂CFRP/GFRP筋HPC梁的非线性梁壳组合单元研究	复合材料学报	2010. 27. 04	2010. 08
18	张剑 叶见曙 艾军 周储伟 石杏喜	讲师 教授 教授 教授 将足	0133 外单位 015 0132 外单位	PC多梁式梁的横向受力非线性分析	哈尔滨工业大学学报	2010. 42. 12	2010. 12
19	张剑 黄剑峰 叶见曙 俞博	讲师 讲师 教授 博士	0133 外单位 外单位 外单位	多肋式梁桥在全过程中应力重分布研究	哈尔滨工业大学学报	2010. 42. 10	2010. 10
20	张剑 叶见曙 石杏喜 俞博	讲师 教授 讲师 博士	0133 外单位 外单位 外单位	横向荷载作用下RC多T梁上部结构的受力性能	南京航空航天大学学报	2010. 42. 02	2010. 04
21	张剑 周储伟 兰文改 卓家寿 张海波	讲师 教授 高工 教授 讲师	0133 外单位 外单位 外单位 外单位	多室弯箱力学参数的非线性动态Markov优化识别研究	应用力学学报	2010. 27. 04	2010. 12

文章编号: 1672-9897(2010)03-0059-04

弹性变形对柔性飞艇气动特性的影响

陈 华, 张召明

(南京航空航天大学空气动力学系, 南京 210016)

摘要:设计加工具有相同几何外形的刚性飞艇模型和可变内压的柔性飞艇模型,并进行了低速风洞实验。研究了内压变化对柔性模型阻力和俯仰力矩特性的影响,比较了柔性模型和刚性模型气动特性的差异。实验结果表明,随着内压的增加柔性模型的阻力呈下降趋势;对于具有相同几何外形的柔性和刚性模型,柔性模型的阻力明显大于刚性模型;刚性模型的尾翼对俯仰力矩的影响较大。

关键词:柔性飞艇模型;弹性变形;风洞实验

中图分类号:V211.7

文献标识码:A

Effect of elastic deformation on aerodynamic characteristics of the flexible airship

CHEN Hua, ZHANG Zhao-ming

(Department of Aerodynamics, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Two airship models having the same geometry outline, one is rigid and the other is flexible, were tested in the low-speed wind tunnel. The influence of the internal pressure change on drag and pitching moment characteristics was investigated, and the difference of aerodynamic characteristics for both models was compared. It is shown that aerodynamic drag of the flexible model presents a downward trend with the increase of internal pressure, and the aerodynamic drag of the flexible model is greater than the rigid one. As well, the empennages of the rigid model have greater impact on pitching moment than the flexible one.

Key words: flexible airship model; elastic deformation; wind tunnel test

0 引言

飞艇是一种依靠空气浮力升空,可操纵机动飞行的飞行器。目前,飞艇因其可长期定点悬停、载荷能力强、应用前景广等特性越来越受到研究者的广泛关注^[1-3]。

从结构上看,飞艇一般分为硬式飞艇、半硬式飞艇和软式飞艇。硬式飞艇由骨架和蒙皮组成,其形状和刚性由其内部骨架保持,骨架上带有可以提供升力的独立气囊,再以蒙皮包裹住骨架和气囊;半硬式气囊主要通过气囊来提供升力并保持外形,依靠骨架保持刚性。软式飞艇又叫柔性飞艇,内部不设骨架,其外形主要由内部的升力气体和外部空气的压差来维持。

与具有相同体积的硬式飞艇相比,软式飞艇由于其内部不设骨架,在一定程度上大大减轻了飞艇自重,因此平流层飞艇一般都是软式飞艇。但是软式飞艇的主气囊属于柔性结构,里面充满了压力大于外部

空气的氦气来保持刚性和外形,在内外压差的作用下主气囊会发生一定的变形,从而影响飞艇的气动特性。在风洞实验中,由于软式飞艇柔性模型加工的难度,常常采用刚性模型替代柔性模型来进行气动特性的研究,这样得到的风洞实验结果往往与实际飞行情况有所不同。作者为了解决这一问题,设计加工了一个柔性模型和一个刚性模型,并对这两个模型分别进行了低速风洞实验。通过实验结果比较了柔性模型与刚性模型实验结果的差异,并分析了内压变化对柔性飞艇模型气动特性的影响规律,为柔性飞艇的设计和內压的控制提供依据。

1 实验设备与模型

1.1 实验风洞

实验研究工作是在南京航空航天大学NH-2低速风洞中进行的。NH-2风洞为串置双实验段闭口回流式低速风洞,全钢结构,大小实验段的截面形状

均为切角矩形。本实验在小实验段中进行,小实验段截面尺寸为 $2.5\text{m} \times 3\text{m}$, 截面面积为 7.18m^2 , 最大风速 90m/s , 湍流度 $\epsilon \leq 0.01\% \sim 0.14\%$ 。

测力系统由与 NH-2 风洞配套的应变天平、天平信号前置放大器、实时数据采集系统及处理系统和计算机系统组成。天平阻力系数的重复性精度为 $0.0001 \sim 0.0003$ 。采集系统的采集精度为全量程的 0.1% 。

1.2 实验模型

设计加工了两个实验模型,一个为刚性模型,一个为柔性模型,两个模型具有相同的几何外形,全长 1.47m , 最大截面直径为 0.368m , 外形如图 1 所示。两个模型的重心位置不同,柔性模型的重心距离天平校准中心 0.172m , 刚性模型的重心到天平校准中心的距离则为 0.084m 。模型全艇状态包括单独囊体和四片尾翼,具有轴对称性。

刚性模型为钢木混合结构,其与天平连接的支撑杆为一刚性杆件。柔性模型的设计加工有一定的难度,不仅要考虑气囊的密封性及耐压性问题,还要能够保证外形以及模型与风洞天平的连接。因为柔性模型的外形靠气囊内的高压气体来维持,其内部充气压力始终大于外界大气压力,因此气囊的材料不仅要具有气密性,还要求具有一定的承压能力。柔性模型的气囊选用特殊柔性气密材料^[4-5],在保证模型外形的同时满足了气密性和承压性的要求。柔性模型与天平连接的问题通过加工一个钢件套管来解决,如图 1(a)所示。气囊的头部和尾部分别压紧固定在钢件套管的两端,在尾部附近留有充气孔;套管头部加工了一个木质堵块来保证模型外形。

模型通过尾部支撑的方式与风洞天平连接。图 2 为模型在风洞中的安装照片。

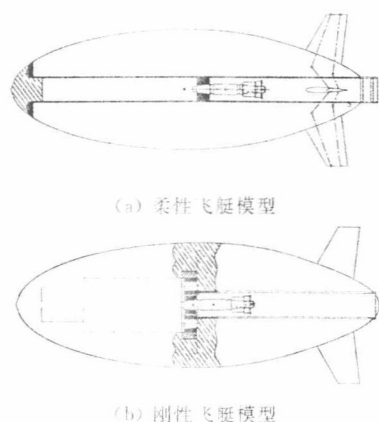


图 1 柔性及刚性飞艇模型
Fig. 1 The flexible and rigid airship model

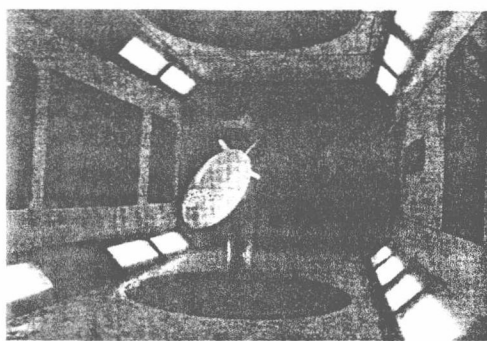


图 2 飞艇模型在风洞中的安装情况
Fig. 2 The airship model in wind tunnel

2 实验结果与分析

首先,对柔性模型进行了充气实验。图 3 绘制出柔性模型最大截面处直径随内部充气压力的变化规律。图 3 中模型最大截面直径变形量定义为模型最大截面处直径测量值与理论值之间的差值,理论值取刚性模型最大截面直径。

弹性变形是可逆变形,卸载时,变形消失并恢复原状。在弹性变形范围内,其应力和应变之间保持线性函数关系,即服从虎克(Hooke)定律。由图 3 可以看出,模型最大截面处直径的变形量基本上和内压保持线性函数关系。这说明,飞艇气囊在外力作用下发生的是弹性变形,并且随着气囊内压的增加(即气囊内外压差减小),弹性变形量逐渐减小。当内压增加到一定程度,模型最大截面处直径将不再变化,可以认为气囊外形也保持不变。

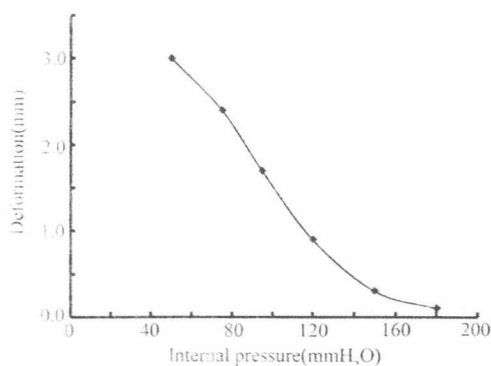


图 3 柔性模型最大截面处直径随内压的变化
Fig. 3 The deformation of maximum diameter on the cross section of the flexible model versus the increase in its internal pressure

试验风速为 $V = 30\text{m/s}$, 在侧滑角 $\beta = 0^\circ$ 时分别对全艇及单独囊体状态进行了迎角 α 的纵向试验,迎角 α 的变化范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ (间隔为 2°)。由于飞艇主要依靠自身的浮力来升空,要求飞艇具有较大的体积,体积的增大势必导致飞艇的阻力也会增加,因此高空飞艇的阻力特性就成为了关注的焦点^[6]。

图4和5分别给出全艇状态和单独囊体状态下,刚性模型和变内压柔性模型的阻力系数随迎角变化的曲线。

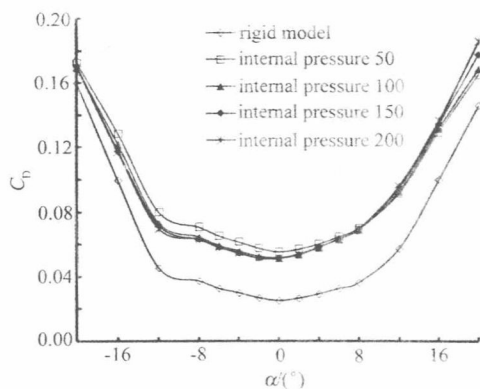


图4 全艇状态下阻力系数随迎角变化

Fig. 4 The drag coefficient of full body versus the angle of attack

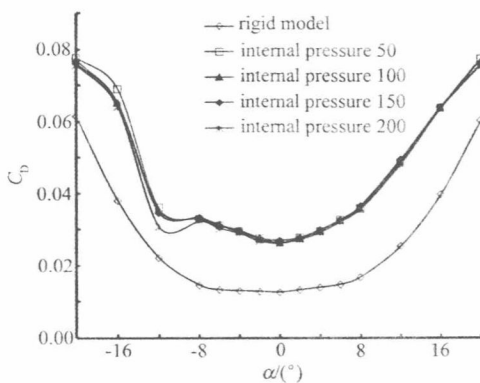


图5 单独囊体时阻力系数随迎角变化

Fig. 5 The drag coefficient of bare body versus the angle of attack

从图4可以看出,随着柔性模型气囊内部压力的增加,气囊内外压差增大,柔性模型的阻力系数有所下降。这是由于随着内外压差的增大,柔性模型表面粗糙度降低,模型的摩擦阻力下降。因此,在对柔性飞艇充气时,在气囊可承压范围内适当增大内外压差,从而达到减小飞艇阻力的效果。同时可以看到,柔性模型具有较刚性模型更大的阻力。当内压为200mmHg时,柔性模型和刚性模型的几何外形相同,此时比较二者的阻力系数,发现在迎角0°时柔性模型的阻力系数几乎为刚性模型阻力系数的2倍。这是由柔性模型和刚性模型表面粗糙度差异造成的。总体上来说,柔性模型表面粗糙度要远大于刚性模型,因此,柔性模型的阻力要大于刚性模型。由图5单独囊体状态下的阻力系数曲线可以得出与全艇状态一致的结论。

图6和7分别给出全艇状态和单独囊体状态下,刚性模型和变内压柔性模型的俯仰力矩系数随迎角变化的曲线。可以看出,对于柔性模型,在全艇和单独囊体两种工况下俯仰力矩系数变化很小,而同样的

两种工况下刚性模型的俯仰力矩系数变化较大,说明尾翼对刚性模型的俯仰力矩影响较大。初步分析认为是柔性模型和刚性模型重心位置不同引起的。

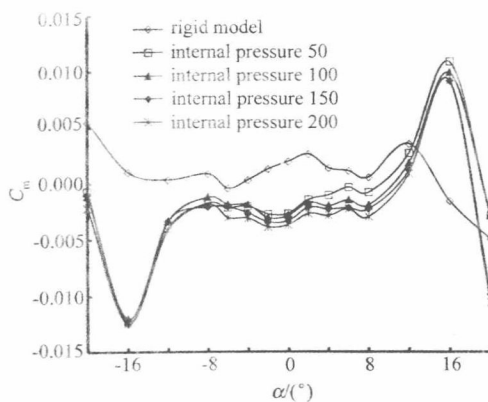


图6 全艇状态下,俯仰力矩系数随迎角变化

Fig. 6 The pitching moment coefficient of full body versus the angle of attack

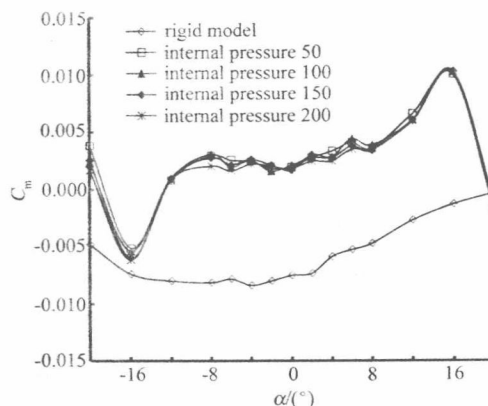


图7 单独囊体时,俯仰力矩系数随迎角变化

Fig. 7 The pitching moment coefficient of bare body versus the angle of attack

3 结 论

软式飞艇由于其内部不设骨架,在很大程度上减轻了飞艇的自重,可满足平流层飞艇必须具有较大体积、较轻自重的要求。现代飞艇一般都采用软式飞艇,笔者着眼于弹性变形对软式飞艇气动特性的影响,通过相关的研究工作和风洞试验,得出主要结论如下:

- (1) 本实验解决了柔性飞艇模型的设计、加工以及实验技术;
- (2) 柔性飞艇模型在内压的作用下发生的是弹性变形;
- (3) 充气压力不同,柔性飞艇模型的阻力也有不同;随着内压的增加,柔性模型表面粗糙度降低,摩擦阻力随之下降,因此模型的阻力呈下降趋势;
- (4) 对于具有相同几何外形的柔性飞艇模型和刚性飞艇模型,柔性飞艇模型的阻力大于刚性飞艇模

型。这是由于二者表面粗糙度不同造成的,柔性模型的表面粗糙度大于刚性模型;

(5) 刚性模型的尾翼对俯仰力矩的影响较大。

参考文献:

- [1] LI Y W, MEYER Nahon and INNA Sharf. Dynamics modeling of flexible airships[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2007.
- [2] PARSONS R R. Development and flight experience of a manned thermal airship[C]// Proceedings of the AIAA lighter than air technology conference, AIAA, 1975: 75-925.
- [3] LIU J M, LU C J, XUE L P. Investigation of airship aeroelasticity using fluid-structure interaction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2):164-171.

[4] 顾正铭. 平流层飞艇蒙皮材料的研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1):62-66.

[5] 王文隽, 李勇等. 飞艇气囊压力与蒙皮张力的估算[J]. 宇航学报, 2007, 28(5):1109-1112.

[6] 谢飞, 叶正寅. 蒙皮波动对飞艇阻力的影响[J]. 工程力学, 2009, 1(26):250-256.

作者简介:



陈 华(1979-),女,研究实习员,博士生。主要研究方向为低速风洞实验技术、飞行器大振幅运动非定常气动力等。通信地址:江苏省南京市南京航空航天大学航空宇航学院空气动力学系(210016);电话:13770613775;E-mail: huachen@nuaa.edu.cn。

(上接第38页)

- [3] LIU R H, YANG J N, LENIGK R, et al. Self-contained, fully integrated biochip for sample preparation, polymerase chain reaction amplification, and DNA microarray detection[J]. Analytical Chemistry, 2004, 76(7): 1824-1831.
- [4] LINNEMANN R, WOIAS P, SENFFT C D, et al. A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquids and gases[C]// Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 1998: 532-537.
- [5] ANDERSSON H, VAN DER WIJNGAART W, NILSSON P, et al. A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems[J]. Sensors and Actuators B, 2001, 72(3):259-265.
- [6] RICHTER M, LINNEMANN R, WOIAS P. Robust design of gas and liquid micropumps[J]. Sensors and Actuators A, 1998, 68(1-3):480-486.

[7] VAN DER WIJNGAART W, ANDERSSON H, ENOKSSON P, et al. The first self-priming and bi-directional valve-less diffuser micropump for both liquid and gas[C]// Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2000: 674-679.

[8] 王皓. 微流控芯片的微机械往复无阀泵技术研究[D]. 中国科学院光电技术研究所博士论文, 2005:89-98.

[9] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid transients in systems[M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall, 1993.

作者简介:



蒋 丹(1980-),女,四川遂宁人,电子科技大学机电学院讲师。研究方向:流体传动与控制。通讯地址:成都市高新西区西源大道2006号电子科技大学机电学院;E-mail: jdan2002@163.com。

径向基函数插值的有限体积方法

陈 华¹,赵 宁¹,舒 昌²

(1.南京航空航天大学 航空宇航学院,南京 210016; 2.新加坡国立大学 机械工程系,新加坡 119077)

摘要:构造了一类基于径向基函数插值思想的有限体积格式。依据 ENO 思想建立自适应模板,在选定的模板上利用 Multiquadric 函数逼近控制单元边界处的守恒变量,再构造高阶数值通量。对经典的一维和二维问题的数值模拟结果表明,这种格式具有高阶精度和高分辨率。

关键词:有限体积方法;径向基函数;ENO 方法;插值多项式;MQ 函数

中图分类号: O241.5 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2009.04.027

Finite Volume Method of Radial Basis Functions Interpolation

CHEN Hua¹, ZHAO Ning¹, SHU Chang²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Mechanical Engineering, National University of Singapore, 119077, Singapore)

Abstract: A kind of finite volume methods based radial basis function (RBF) is presented. The adaptive stencils are formed according to essentially non-oscillatory (ENO) method, then multiquadric radial basis function (MQ-RBF) is used to approximate the numerical flux terms on the adaptive stencils. Finally it is generalized to one and two dimensional problems of aerodynamics, and the numerical experiments show that it has high accuracy and resolution.

Key words: finite volume method; radial basis function; ENO stencil; interpolation polynomials; multi-quadric

在数值计算方法的研究中,有限体积格式构造的关键是控制面上数值通量的设计,如气体动力学方程。数值通量的构造直接关系到格式的精度、效用和分辨率,特别是关系到方法的自适应性^[1]。一般的有限体积格式主要采用具有限制器的高精度插值多项式来逼近控制面上的数值通量^[2],这在一定程度上限制了解的构造,并且,随着插值多项式次数的提高,计算误差增大,计算不稳定。径向基函数插值是一种新的插值思想,具有插值多项式不可比拟的优点^[3]。笔者采用径向基函数插值方法来取代以往的多项式插值,结合 ENO (essentially non-oscillatory) 思想^[4],来抑制数值解的非物理振荡,建立一种新型的高精度、高分辨率的有限体积格式。

1 径向基函数插值

对于一组离散数据 $\{x_j, f_j\} \in R^d \otimes R, j=1, 2, \dots, N$

(1)

给定函数 $\varphi: R \rightarrow R$, 要寻求一个函数 $f(x)$ 具有如下形式:

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \varphi(\|x - x_j\|) + \psi(x) \quad (2)$$

并满足插值条件

$$f_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \varphi(\|x_i - x_j\|) + \psi(x_i) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中: R 代表正数集合; $R^d \otimes R$ 代表 $d+1$ 维的乘积空间; N 是节点 x 的个数; λ_j 是待定系数 $j=1, 2, \dots, N$; φ 为径向基函数; ψ 为附加的多项式, 在实际应用中, ψ 常取为常数, 文中也取常数。

为了确定系数 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N, \lambda_{N+1})$, 除了方程(3)在 N 个节点处配置得到的 N 个方程外, 还需要另外的一个方程才能满足求解要求, 可用下面的条件来保证:

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j = 0, j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

径向基函数有很多种, 其中最常用的是^[9]:

薄板样条(Thin-plate splines)函数: $\varphi(r) = r^2 \log(r)$

Gaussians 分布函数: $\varphi(r) = e^{-cr^2}, c > 0$

多重二次(Multi-quadrics)函数: $\varphi(r) = \sqrt{r^2 + c^2}, c > 0$

式中: $r = \|x - x_j\|$; c 为形状参数。

1982 年, Franke 对当时所有有效的散乱数据插值方法进行了比较研究, 认为 Hardy 的 MQ 径向基函数方法的逼近精度最好^[9]。因此, 文中选用 MQ 作为插值的径向基函数。MQ 中形状参数 c 的选取非常关键, 直接影响到方法的精度。对于 c 的优化有两种观点: 参数 c 与节点无关, 可取为常数; c 是一个变化的量, Kansa 首先采用这种可变参数的 MQ 方法求解偏微分方程, 结果非常满意^[7,8]。尽管可变的参数选择能得到更精确的数值解, 但是人们更倾向于常数的 MQ(CMQ)方法。因为 CMQ 方法分析简便、计算量较小, 最重要的是 CMQ 插值的逼近精度能够满足计算要求的精度。

2 ENO 方法的模板选择

ENO 格式的关键思想是采用自适应模板技术^[9,10], 在所有可能的插值模板中选取相对最为光滑的模板作为插值模板进行插值。

2.1 自适应模板

自适应模板的核心是判断模板的光滑性^[11]。根据差商和导数之间的关系可以将牛顿差商作为模板光滑性的判据。

对于区间 I_j , 函数平均值 $\bar{u}$ 的零阶差商为 $w[j] = \bar{u}_j$

一阶差商为 $w[j, j+1] = \frac{w[j+1] - w[j]}{x_{j+1} - x_j}$

k 阶差商为 $w[j, j+1, \dots, j+k] = \frac{w[j+1, \dots, j+k] - w[j, \dots, j+k-1]}{x_{j+k} - x_j}$

ENO 的模板选择是在迎风的基础上, 选择使函数的差商尽量小的模板, 实现自适应机制, 自动地扩充插值模板, 达到提高分辨率的目的。已知各网格单元上的 $\{\bar{u}_j\}$, $x_{j+\frac{1}{2}}$ 处模板选择的步骤如下:

(1) 根据迎风性选择 j 或 $j+1$ 网格单元作为初始模板, 即 $S_1 = \{I_j\}$ 或 $S_1 = \{I_{j+1}\}$;

(2) 假设包含 n 个单元的模板为 $S_n = \{j-l, j-l+1, \dots, j+m\} (l+m+1=n)$, 考虑扩充模板, 在 S_n 中增加一个单元构成 S_{n+1} 。如果 $|w[j-l-1, \dots, j+m]| \leq |w[j-l, \dots, j+m+1]|$, 那么增加单元 $j-l-1$; 否则, 增加单元 $j+m+1$;

(3) 循环步骤(2)直到达到要求的精度 k 为止, 扩充到 S_k 即有 k 阶精度。

2.2 自适应模板的径向基函数插值

在选定的 k 节点模板

$$S_k = \{j-l, j-l+1, \dots, j+m\} \quad (l+m+1=k) \quad (5)$$

上构造一个径向基函数

$$\varphi_j(x) = \sqrt{(x-x_j)^2 + c_j^2} \quad j=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

使得

$$\bar{u}(x_i) = \sum_{j=1}^k \lambda_j \varphi_j(x_i) + \lambda_{k+1}, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (7)$$

又由式(4)可得

$$\sum_{j=1}^k \lambda_j = 0 \quad (8)$$

那么,式(7),(8)就构成一个线性方程组。当系数矩阵非奇异时,方程组有唯一解 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \lambda_{k+1}$ 。

3 数值离散格式

考虑一维双曲型守恒律初值问题

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 \quad x \in [a, b] \quad (9)$$

取一致网格剖分为: $\Delta x_i = \Delta x = \frac{b-a}{N}$, $i=1, 2, \dots, N$, 函数在每个单元 $I_i = [x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ 上的值定义为其积分平均。

有限体积方法是积分形式的离散格式,首先在控制单元 I_i 上积分

$$\frac{d}{dt} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} u \, dx + \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} f(u) \, dx = 0 \quad (10)$$

其最简单的全离散形式为

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\Delta x} \left[\bar{f}_{i+1/2}^{n+1/2} - \bar{f}_{i-1/2}^{n+1/2} \right] \quad (11)$$

式中: $\bar{f}_{i-1/2}^{n+1/2}, \bar{f}_{i+1/2}^{n+1/2}$ 为 $t_n + \Delta t/2$ 时间层上单元左右边界处的数值通量。这些数值通量构造是设计 FVM 格式的关键。一般来说,首先通过函数重构得到守恒变量在控制单元边界处的高阶近似值,然后求解高阶数值通量。

对于方程(9),有特征线 $C: \frac{dx}{dt} = f'(u)$ (12)

从点 $(x_{i+1/2}, t_{n+1/2})$ 引特征线与 t_n 时间层交于点 A , 沿特征线 C , 则有 $u_{i+1/2}^{n+1/2} = u_A$, 通过径向基函数插值得到 u_A 的近似值。由于 f 是已知函数,数值通量 $\bar{f}_{i+1/2}^{n+1/2}$ 的高阶近似值就可以得到。

对于双曲型守恒律方程组 $U_t + f(U)_x = 0$, 采用特征分解方法,在每一特征空间上数值通量的构造类似于二维标量情形,把得到的解转换到物理空间。

4 数值试验

为了验证格式的有效性、精度和分辨率,对一维和二维 Euler 方程进行数值模拟。

算例 1 Lax 激波管

Lax 激波管是一个很著名的算例,它具有准确的黎曼解。通过比较数值解和准确解的吻合程度,可以分析格式对间断解的分辨率。一维 Euler 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ u(E+p) \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

其中: ρ 为密度; u 为速度; E 为总能量; p 为压强。一维 Lax 问题的初值为:

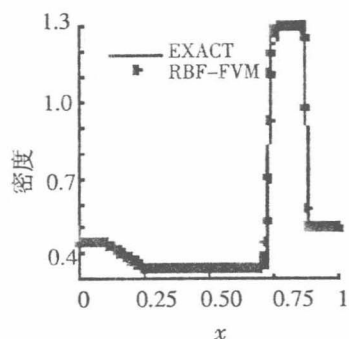
$(\rho, u, p)^T = \begin{cases} (0.445, 0.698, 3.528)^T & x < 0.5 \\ (0.5, 0, 0.571)^T & x \geq 0.5 \end{cases}$, 计算域: $[0, 1]$, $cfl=0.8$, $\Delta x=0.005$, $t=0.15$ 。图 1 给出了该问题的数值模拟结果与精确解,比较结果表明,构造的格式具有较高的间断分辨率和基本无振荡特性,对激波具有很好的捕捉能力。

算例 2 正规激波反射问题

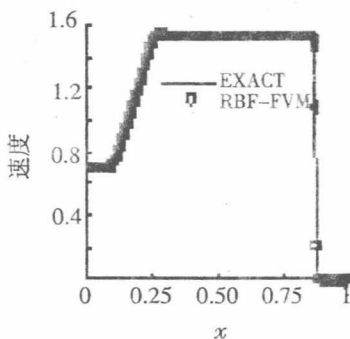
该问题主要考虑一斜激波入射在平板上并反射的物理过程(图 2)。计算区域为: $[0, 4] \times [0, 1]$, 初始值是一马赫数为 2.9 的斜激波,下边界为反射边界,右边界为超音速出流边界,其它 2 个边界采用 Dirichlet 边界条件:

$$(\rho, u, v, p)|_{(0,y)} = (1.0, 2.9, 0, 1/1.4)^T$$

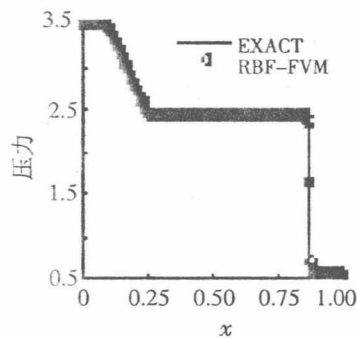
$$(\rho, u, v, p)|_{(x,1)} = (1.699\ 97, 2.619\ 34, -0.506\ 32, 1.528\ 19)^T$$



(a) 密度图



(b) 速度图



(c) 压力图

图1 Lax 激波管计算结果与精确解比较

开始时除上边界外均取左边界值为初场值。计算中取 $cf=0.6$, $\Delta x = \frac{1}{30}$, $\Delta y = \frac{1}{40}$, 收敛到定常解即停止计算。图3给出了密度等值线图和 $y=0.5$ 处密度值。计算结果表明, 本文构造的格式能够准确的捕捉到斜激波, 并且在间断处未出现振荡现象。

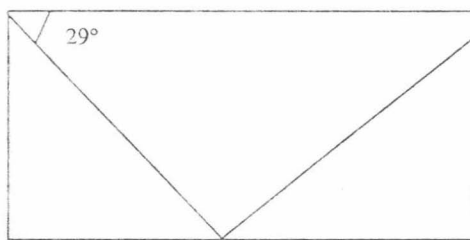
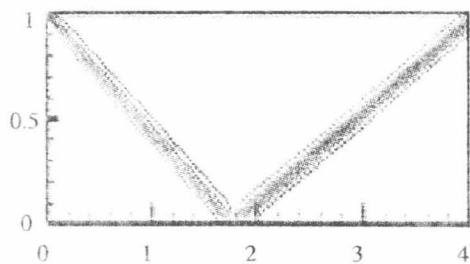


图2 斜激波入射在平板上并反射的物理过程



(a) 密度等值线图

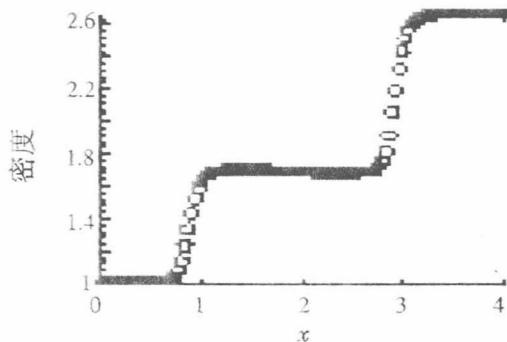
(b) $y=0.5$ 处密度图

图3 正规激波反射问题

5 结束语

提出了 RBF-FVM 方法, 将径向基函数插值和 ENO 方法相结合, 在依据 ENO 思想建立的自适应模板上作径向基函数插值来逼近控制面上的数值通量, 而不是采用传统的插值多项式来逼近。数值试验结果表明 RBF-FVM 方法既具有高阶精度和高分辨率, 又能够有效抑制非物理振荡, 准确地捕捉激波。

参考文献:

- [1] 刘儒勋, 舒其望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 忻孝康, 刘儒勋, 蒋伯诚. 计算流体动力学[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1989.
- [3] Hardy R L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 176: 1905-1915.
- [4] Harten A, Engquist B, Osher S, et al. Uniformly high order accurate essentially non-oscillatory schemes III [J]. Journal of Computational Physics, 1987, 71: 231-303.
- [5] Shu C, Ding H, Yeo K S. Local radial basis function-based differential quadrature method and its application to solve two-dimensional incompressible Navier-Stokes equations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 192: 941-954.

- [6] Franke R. Scattered data interpolation: tests of some methods[J]. *Mathematics of Computation*, 1982, 38: 181-199.
- [7] Kansa E J. Multiquadrics—A scattered data approximation schemes with applications to computational fluid-dynamics— I, Surface approximations and partial derivative estimates[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1990, 19(6-8): 127-145.
- [8] Kansa E J. Multiquadrics—A scattered data approximation schemes with applications to computational fluid-dynamics— II, Solutions to parabolic, hyperbolic, and elliptic partial differential equations[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1990, 19(6-8): 147-161.
- [9] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 77: 439-471.
- [10] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes II [J]. *Journal of Computational Physics*, 1989, 83: 32-78.

(上接 431 页)

- [4] Van Huyck J B, Raymond C B, Joseph C. Adaptive behavior and coordination failure [J]. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1997, 32: 483-503.
- [5] Tversky A, Kahneman D. Availability: A heuristic for judging frequency and probability [J]. *Cognitive Psychology*, 1973, 5: 207-232.
- [6] Tversky A, Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases [J]. *Science*, 1974, 185: 1124-1130.
- [7] 谢识予. 有限理性条件下的进化博弈理论[J]. *上海财经大学学报*, 2001, 3(5): 3-9.
- [8] 傅小兰, 刘超. 认知心理学研究心智问题的途径与方法[J]. *自然辩证法通讯*, 2003, 25(5): 96-101.
- [9] Stahl D O, Paul W. On players' models of other players: Theory and experimental evidence [J]. *Games and Economic Behavior*, 1995(10): 218-254.
- [10] Stahl D O. Evolution of Smart players [J]. *Games and Economic Behavior*, 1993(5): 604-617.
- [11] Nagel R. Unravelling in Guessing Games: An Experimental Study [J]. *American Economic Review*, 1995, 85: 1313-1326.
- [12] Costa-Gomes M, Crawford V, Broseta B. Cognition and behavior in normal-form games: an experimental study [J]. *Econometrica*, 2001, 69(5): 1193-1235.
- [13] Bosch-Domenech A, Montalvo J G, Nagel R and Satorra A. One, Two, (Three), Infinity, ...: Newspaper and Lab Beauty-Contest Experiments [J]. *The American Economic Review*, 2002, 92(5): 1687-1701.
- [14] Gneezy U. Step-Level Reasoning and Bidding in Auctions [J]. *Management Science*, 2005, 51(11): 1633-1642.
- [15] Camerer C F, Ho J H, Chong J K. A Cognitive Hierarchy Model of Games [J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2004, 3: 861-898.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF HYPERSONIC JAWS INLET

HAO DONG*, CHENG-PENG WANG and KE-MING CHENG
*College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*
*donghao@nuaa.edu.cn

Received 1 June 2009

In order to obtain the flow field characteristics and the influence of boundary layer, numerical simulations and wind tunnel tests are conducted for two streamline traced Jaws inlets at Mach number 7. The inlets are designed based on a flow field with 8-7 planar shock wave (the ramp in pitch plane is inclined at 8° to the free stream and in yaw plane is inclined at 7° to the free stream, yielding planar shocks). In the study, the static pressure distributions were measured and analyzed along the plane-symmetric centerline of the inlet with and without the boundary layer correction, respectively. Results show that boundary layer correction can obviously weaken the viscous influence to the inlet, increasing the mass flow coefficient and improving total pressure recovery.

Keywords: Hypersonic inlet; inward turning; streamline traced; boundary layer correction; wind tunnel test.

1. Introduction

Air-breathing hypersonic vehicle demands deep research on scramjet and its inner parts. The advantage of the inward turning inlet lies in that the essential character of the flow field could be preserved, and the geometry of the inlet can be chosen in view of requirements. The idea of inward turning flow field and the streamtracing technology are used worldwide in research of various inward turning inlets. The feature of an inlet depends on the choice of the variant basic inward turning flow field.^{1,2}

The innovative inward turning inlet based on a 3D flow field with four planar shock waves (see Fig. 1) and associated technology of streamtracing⁵ is studied by Malo-Molina.^{3,4} It is defined as 'Jaws inlet' due to its shape (see Fig. 2). In the present study, Cebeci and Bradshaw's finite difference program⁶ is used to solve the two-dimensional compressible boundary layer equation. Then according to the achieved displacement thickness of the inlet boundary layer, the inlet internal profile is corrected, and the inlet performance after correction is compared with uncorrected flow by numerical simulation. Besides, the reliability of the numerical result is also verified by the wind tunnel tests.

*Corresponding author.