

力学与工程应用

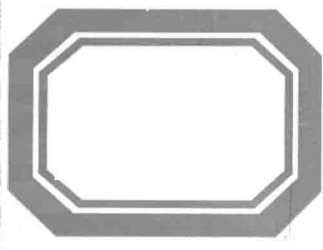
(第十五卷)

本书编委会 编

执行主编 孙利民



郑州大学出版社



力学与工程应用

(第十五卷)

本书编委会 编

执行主编 孙利民

 郑州大学出版社
郑州

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程应用. 第15卷/孙利民主编. —郑州:郑州大学出版社,
2014.7

ISBN 978-7-5645-1925-4

I. ①力… II. ①孙… III. ①力学-文集②工程力学-文集
IV. ①O3-53②TB12-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第137909号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路40号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

郑州市金汇彩印有限公司印制

开本:850 mm×1168 mm 1/16

印张:28

字数:1169千字

版次:2014年7月第1版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2014年7月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1925-4

定价:70.00元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

《力学与工程应用》 编审委员会

主任委员 姚振汉

委	员	佟景伟	施惠基	李鸿琦	周丰峻	李延涛
		陈维毅	周慎杰	史志铭	梁醒培	隋允康
		孙利民	杨 强	汤红卫	范慕辉	李海滨
		李喜德	赵丽滨	李林安	陈永强	桑建兵
		王 晔				

执行主编 孙利民

前 言

北方七省、市、区(北京、天津、河北、河南、山西、山东、内蒙)力学学会学术会议,是1986年在杜庆华院士积极倡导、组织下开始举办的。会议由北方七省、市、区力学学会学术工作委员会组织,各省、市、区力学学会轮流承办,每两年一届,历经28年,从未间断。这个系列会议对北方七省、市、区力学学科的发展与力学人才的培养都起到了积极的促进作用。本次在素有“三代京华,两朝重镇”之称的国家历史文化名城大同市召开的第十五届北方七省市区力学学会学术会议,由山西省力学学会承办,河南省力学学会负责本论文集出版工作,此次会议列入中国力学学会年度学术活动计划。

在这28年中,北方七省、市、区力学学会学术会议,广泛交流了北方七省、市、区力学工作者在力学与工程研究中取得的成果,以及在力学教学中创新与改革的经验,推动了力学的繁荣和发展。这种形式的学术活动加强了信息交流,增进了相互了解,得到了广大力学工作者的积极支持和广泛参与,并为青年力学工作者和研究生提供了展示研究成果的平台。本届学术交流会将进一步推动力学与工程的结合、提高力学教学水平、促进力学更好地为国民经济建设服务。

本论文集内容丰富,共收入论文142篇,其中一般报告124篇,摘要18篇,涉及流体力学、固体力学、动力学与控制(含振动与冲击)、实验力学、计算力学、力学在工程中的应用及力学课程的改革与创新等领域。从地域上讲,除北方七省市区外,还收录了江苏省4篇,甘肃省2篇,湖北省1篇。

在此,北方七省、市、区力学学会学术工作委员会衷心感谢为本次学术会议提供论文、出席会议的各位同仁和研究生,感谢为本次会议的召开做了大量工作的论文编审委员会和会议组织委员会的同仁,还要感谢为本论文集的出版付出了辛勤劳动的郑州大学出版社的领导和编辑同志们,以及为会议提供了服务和重要支持的朋友们。

孙利民
二〇一四年七月

目 录

【流体力学】	1
LOCALIZED BULGING DUE TO STRETCHING IN AN INFLATED TUBE	
Zhiming Guo Shibin Wang Linan Li Qi Liu	1
高速风洞动导数试验技术研究	
刘 金 陈 农 宋玉辉 胡 静 解 克	3
气动输送管道流场模拟	
程敬华 孙利民 王慧洋	8
匀速旋转圆柱绕流问题的多参考系 LBM 方法研究	
赫万恒 马英忱 韩保红 张莹莹 王凌英	12
【固体力学】	
断裂力学与断裂准则	
张廷毅 魏 民 宋海亭 周永海	16
惰性夹杂颗粒对固相烧结的影响	
王 超 陈少华	20
反平面剪切作用下带涂层的椭圆纳米压电材料的有效特性分析	
黄明娟 房学谦	24
含连通开孔的饱和孔隙介质的细观模型	
贾存利 陈永强 黄筑平	32
基于回传射线矩阵方法求解正交各向异性层合板的频散曲线	
马朝阳 苏先樾	34
具有非均匀界面相的球形颗粒填充复合材料的有效比热	
张振国 陈永强 黄筑平	41
开孔对受压薄板的屈曲影响分析	
龙连春 王亭亭	44
空心圆球在热冲击载荷作用下的动态响应	
石星烨 尚新春	47
镁中不同取向纳米孪晶的分子动力学模拟	
周磊 郭雅芳	50



碳化硅颗粒增强铜基材料界面损伤的力学行为研究

张 丽 李 磊 53

微纳米薄膜/基底界面性能研究

薛秀丽 王世斌 李林安 56

【生物力学】

生物犄角材料的研究进展

赵丽滨 王雅娜 张建宇 57

基底水层及润湿性对壁虎黏附的影响

彭志龙 陈少华 64

颈椎三维运动测量及生物力学特性研究

郑伟龙 王志勇 王世斌 李林安 李鸿琦 68

一种确定关节软骨不同层区厚度尺寸的实验方法

门玉涛 田倩倩 叶金铎 张春秋 王献抗 70

细胞微管力学行为的无网格数值模拟

孙玉周 高斌 李冬霞 74

【动力学与控制】

部分模型未知系统次优控制理论及方法

祝乐梅 岳宝增 闫玉龙 宋晓娟 78

覆冰分裂导线防舞技术概述

周安琪 刘习军 张素侠 82

混沌运动的神经网络反馈控制仿真研究

韩保红 闫石 马英忱 张淑琴 程兆刚 86

欠驱动航天器的姿态稳定性控制

闫玉龙 岳宝增 90

应用神经网络预测控制混沌运动的研究

闫 石 韩保红 马英忱 程兆刚 朱如意 94

自适应滑膜控制/李亚普诺夫控制的混合控制方法抑制挠性航天器的颤振

宋晓娟 岳宝增 邓明乐 98

【振动与波动】

敲击扫描式桥梁损伤快速检测车

向志海 陆秋海 102

非均匀介质中的一维弹性波动方程

姚瑞文 向志海 103

钢纤维混泥土地下洞室衬砌结构的动力响应分析

张 伟 张晓庆 王 政 刘文静 于英霞 107

框架结构损伤固有频率变化规律数值模拟研究

许念勇 郭丽丽 111

水电机组运行中振动和噪声的分析	
陈贵清 李 晶 杨雪梅 陈 静	115
悬挂弹簧系统的冲击特性研究	
王 则 赵子龙	119
平板减薄缺陷的定量化重构方法研究	
王 彬 钱征华	123

【实验力学】

纳米压痕周边残余应力分布的实验研究	
亢一澜 韩月涛 仇 巍 石宝琴	124
超声波固结铝铜合金多层结构的力学性能及小裂纹扩展行为研究	
施惠基 贺晓华	125
基于虚位移场和云纹干涉法的高温力学参数的反演	
谢惠民 王怀喜	126
高温合金蜂窝结构快速时变热环境下的隔热性能研究	
吴大方 潘 兵 周岸峰 蒲 颖 商 兰	130
车轴钢损伤的非线性超声和金属磁记忆测试	
税国双 李常武	135
带预紧力压力传感器的静态标定研究	
王朝阳 李海滨 韦广梅	137
非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究	
李法新 谭 池 高 鹏	140
浮石混凝土基本力学性能试验研究	
高 鑫,申向东	141
高温超导悬浮横向稳定性测试系统介绍	
周 军 张兴义	145
后屈曲式微力传感器的数值模拟设计与制造	
叶 璇 李喜德	146
环境温度对 Nb3Sn 股线疲劳特性影响规律研究	
王 军 张兴义 周 军 周又和	147
基于间隔平滑法的点阵材料板的无损检测方法	
李 冰 周 洁 励 争 高桂云	148
基于挠曲电效应的应变梯度传感器的研制	
骆 英 李兴家 徐晨光	150
基于脑电图的信号分析	
戴 军 赵玉成 马 晓	151
基于数字体散斑法的单轴压缩泥岩内部三维应变场的测量	
毛灵涛 袁则循 郝 耐	153
基于投影光栅法的三维形貌测量研究	
刘雯雯 孙利民	157



基于音叉探针的微纳米传感系统性能研究及其应用	
高峰利 李喜德	160
基于正交试验的抗滑桩的土拱效应研究	
袁颖 何国峰	161
颗粒介质等效弹性模量测量的影响因素分析	
张瑞楠 马方园 马少鹏	166
不同混凝土板结构破坏预报模型试验	
董承全 陈辉 胡在良	168
石墨点接触强度测量的实验研究	
刘贺同 庞家志 王洪涛 马少鹏	172
数字散斑相关法测量木材断裂临界载荷的应用研究	
邵欢 张喆 赵东	174
太赫兹频谱下不透明物质平面应力状态的测量	
张旭 王志勇 王世斌 佟景伟	178
微米尺度金属丝反常塑性行为实验研究进展	
何玉明 刘大彪 张波 甘志鹏 胡鹏 丁华明 沈磊	180
无冗余计算的反向组合配准算法:一种可能的标准数字图像相关方法	
潘兵	181
应用于应力强度因子测试的数字图像相关方法	
张晓川 计宏伟	182
大开口复合材料层合板孔边应力集中实验研究	
陈建霖 励争 徐吉峰 陆孜子 王岩 卜宏利	183

【计算力学1】

高性能边界元法与真实梁板壳局部应力分析	
姚振汉	184
移植 ICM 方法发展结构拓扑优化变密度方法	
隋允康 易桂莲	189
边界元法在复合材料界面分离问题中的应用	
林勤业 陈永强	193
海底管道铺设非线性屈曲的几何不确定性分析	
章杰 杜显赫 刘应华	195
一种新的结构修改算法及其应用	
宋琦 苏铭森 孙树立 陈璞	199
有限元计算中的局部高应力之浅谈	
梁醒培 诸高 余超杰	204
智能压电复合梁表面缺陷检测的谱有限元模型	
许伯强 骆英 徐桂东 徐晨光 岳去疾 张景秀	208
有限差分法在单向固结理论中的应用	
袁颖 尹超 周爱红	209

【计算力学2】

基于内聚力模型的多向层压板 I 型和 I/II 型分层扩展模拟	
赵丽滨 龚 愉 张建宇 陈玉丽 费斌军	212
基于纳米压入与有限元模拟的自修复微胶囊囊壳材料力学性能的反演分析	
计宏伟 王怀文 赵 钊 张晓川	213
金属冲裁加工过程的数值模拟	
侯永威 王 建 赵媚娇 王献抗 叶金铎	214
镁中 I 型裂纹裂尖场及裂尖形变机制的有限元分析	
张鲁顺 郭雅芳	218
拟弧长延拓法在静电激励 MEMS 吸合特性研究中的应用	
梁斌斌 王炳雷 周慎杰	221
有限元模拟镁单晶中纳米孪晶拉伸变形行为	
于 静 郭雅芳	225

【工程应用1】

电厂再热蒸汽管道支吊架严重偏斜问题的研究	
李 磊 张 丽	228
井架结构强度计算研究	
武云鹏 程光凯 赵媚娇 叶金铎	231
均布荷载作用下混凝土深梁抗剪研究	
杨 梅 刘君阳	234
旁多水利枢纽工程沥青混凝土心墙土石坝静动力分析	
斯迎军 郭永刚 水小平	237
牵引式路缘石滑膜机车轮轴的有限元分析	
刘荣昌 邢朋飞 杨 阳	242
新型深潜器观察窗的应力分析	
贾栋梁 刘道启	246
一种新型潜水器观察窗结构力学性能分析	
杜 娟 刘道启	249
载人深潜器观察窗结构接触面应力分析	
贾栋梁 刘道启	251

【工程应用2】

南水北调中线一期工程郑州 1 段渠道岩石强度分析	
刘起霞 徐志军 崔伟华	255
水泥混凝土路面质量病害及防治措施	
董忠洲	259
水泥土变形特性与应力应变全曲线本构方程研究	
薛慧君 申向东 邹春霞	263



水平层分法计算考虑渗流力时挡土墙的土压力

张庆伟 肖建清 267

叙福花苑基坑稳定性分析

康 抗 闫安志 271

循环加载条件下花岗岩变形的时域特性研究

肖建清 张庆伟 274

【工程应用3】

跨航道抛锚作业对海底管道的损伤研究

张萌萌 郭志明 李 媛 李林安 佟景伟 277

裂缝对某输电杆影响的有限元分析

王 赞 梁清香 王 伟 279

桥梁结构损伤识别方法概述

相林杰 刘习军 张素侠 282

【工程应用4】

Maple 在结构优化设计中的应用

阮江涛 286

导弹吊挂结构的可靠性及优化分析

黄益民 陈虎林 葛 森 吴 炜 何 洁 288

【工程应用5】

单弓形与双弓形折流板换热性能模拟分析

张丽娜 马震宇 294

润滑脂的触变性与恢复过程研究

刘建秀 郑 禹 王耿华 周亚军 298

【力学教育1】

撰写“材料力学”发现法教材的思考与操作

隋允康 宇慧平 杜家政 303

为清华大学钱学森力学班设计材料力学精品课

施惠基 308

材料力学教学模式改革的一次实践性尝试

张 靖 张淑琴 马英忱 赫万恒 309

Maple 在材料力学中的应用(六)——连续分段独立一体化积分法

李银山 官云龙 桑建兵 311

材料力学教学内容改革的研究与实践

马英忱 张淑琴 程兆刚 张莹莹 王凌英 314

材料力学国家级精品资源共享课建设实践及双语教学体会

原 方 王 辉 316

分层次教学研究——独立学院材料力学课程教学改革与探索

武 瑛 吴桂英 闫晓鹏	319
关于材料力学应用型教学改革的几点探索	
王凌英 程兆刚 曹洪娜 张淑琴 赫万恒 张莹莹	321
基于实例训练的材料力学教学	
陈俊旗 刘起霞 崔伟华	324
军事院校材料力学课程教学改革研究	
张莹莹 王凌英 张淑琴 曹洪娜	327
平面应力状态最大应力及其方位的三角函数法	
郭俊宏 尹绍华 马瑞平	329
浅谈材料力学中引入力学史的几点作用	
张 丽 李 磊	333
浅谈轴力图与扭矩图的教学方法	
张晓燕 郎凤超 姜爱峰	335
依托力学实验竞赛,对材料力学实验课程改革的研究	
程兆刚 张淑琴 闫 石 王凌英 赫万恒	338
轴向拉伸压缩应力分析教学的思考	
张淑琴 闫 石 韩保红 程兆刚 张 靖	341

【力学教育2】

少学时理论力学教学方法革新

张振华 王钦亭 绳 飘	344
-------------------	-----

【力学教育3】

工程力学教学创新初探

赫万恒 张淑琴 曹洪娜 程兆刚 张 靖	347
工程力学双语课程教学实践与探索	
王锦燕 孙玉周	350
案例教学在工程力学中的应用	
姚 力 杨海军	353
初探机械振动课程的教学方式与方法	
张晓燕 姜爱峰	356
对工程力学课程教学方法的新认识	
林金保 陈艳霞 梁清香 崔小朝 马崇山	359
工程管理专业工程力学课程教学方法的探讨	
姜爱峰 马海云	362
基于创新思维工程力学课程体系与教学内容的改革	
桑建兵 于文英 邢素芳 刘宝会	365
逻辑推理在工程力学教学中的运用	
王 晔 杨 姝	368



面向工程教育的工程力学专业建设

梁清香 林金保 张伟伟	370
-------------------	-----

【力学教育4】

振动力学的教学思考与实践

薛春霞 关学锋	373
---------------	-----

MATLAB-GUI 编程在弹性力学教学的应用

张伟伟 杨 坤 梁清香 李 忱	376
-----------------------	-----

对实验力学校级精品课程建设的思考

姜爱峰 于丽英	380
---------------	-----

工程振动与测试-国家资源共享课

刘习军 张素侠 刘 鹏 霍 冰 相林杰 李 想 施睿智 周安琪	382
---------------------------------------	-----

为机械专业本科生开设有限元分析课程的教学实践

李建宇 朱应利 崔世海	383
-------------------	-----

力学专业实验教学改革的探索与研究

李 磊 张 丽	386
---------------	-----

流体力学课程“厌学”的现状分析与改进措施

刘起霞 王海霞 崔伟华	388
-------------------	-----

浅谈结构力学教学过程中教学效果的提高

刘兴旺 刘 燕	392
---------------	-----

塑性力学校级精品课程建设的几点措施

王 晔 杨 姝	395
---------------	-----

翼型实验对本科生实践能力的训练

华 杰 陈大帅 李德坚 马震宇	397
-----------------------	-----

有限元软件在弹性力学教学中的应用

李 磊 张 丽	401
---------------	-----

【力学教育5】

“力学与现代生活”通识课程的实践与体会

李冬霞 孙玉周 王锦燕	403
-------------------	-----

创新应用型人才培养模式下力学课程教学改革研究

何 伟 白新理 何 容	406
-------------------	-----

工科力学类课程平台构建及专业实践

白新理 唐克东 何 伟 刘桂荣 张建华	409
---------------------------	-----

浅谈培养学生综合素质的“三环教学法”

曹洪娜 李琳赫 杨华辉 涂森攀 戴 萌	413
---------------------------	-----

趣味比赛对促进基础力学学习的作用

赵亚军 王二成 胡启平	415
-------------------	-----

如何培养独立学院学生学习力学基础课程的兴趣

陈艳霞 林金保 梁清香 刘利亭	418
-----------------------	-----

学生对流对教学楼内疏散效率的影响	
李兴莉 孙 凯	421
应用审美评判标准体会力学中的美	
李 忱 梁清香 张伟伟 陈艳霞	424
针对“90 后”大学生特点,调整力学教学模式研究	
糕瑞花 朱志雄	428
区域特色工程力学专业人才培养模式研究	
刘铁军	430

【流体力学】

LOCALIZED BULGING DUE TO STRETCHING IN AN INFLATED TUBE

Zhiming Guo Shibin Wang* Linan Li Qi Liu

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

ABSTRACT A localized bulge forms somewhere along the length of the hype-elastic tube in the presence of axial load when the pressure of the tube inside reaches a critical value P_{cr} . In this case, the instability of the tube occurs with or without axial tension, which has effects on the stability of the inflated tube. On the contrary, the tube is first inflated and then subjected to increasing axial tension, it is observed that a local bulge appears when the axial tension increases to a critical value F_{cr} . The 3D profile is recorded and measured by high speed CCD system and digital shape analysis software, respectively. For the range of axial tension is controlled by the stretcher. It is shown that initial internal pressure should be high enough but lower than the value of instability of the tube, otherwise there is no bulge no matter how large the axial tension is. In addition, the initial pressure lowers the critical axial force of localized bulging.

KEYWORDS Localized bulge; 3D profile; Initial pressure lowers the critical axial force

1 INTRODUCTION

The inflation of an tube provides a good illustration of the phenomenon of the initiation and propagation of an instability^[1], which shares the same mathematical and mechanical features with a variety of other strain localization phenomena in engineering structures and materials. A local bulge appears somewhere along the length of the tube with the internal pressure drops. The effects of the axial load and extension ratio on the inflation of tubes are studied in papers such as Kyriakides & Chang^[2-3], Pamplona et al.^[4] and Goncalves et al.^[5]. In their research, the tubes or membranes are generally loaded axially first and then inflated. Kyriakides & Chang show that axial tension lowers initiation and propagation pressures, and change the profiles of propagating bulge. Pamplona and Goncalves et al present the bulge localization for the same specimen may vary with the value of extension ratio. The analysis of instability of tubes for stretching is not so common, but the these structures under internal pressure are may be used widely. The rest of this work is divided into two sections as follows. A set of experiments are carried out firstly and then present part of results. The paper is concluded with a summary and additional remarks.

2 RESULTS

An experimental device is used to stretch the pressured tubes and measure relevant parameters. The stretching velocity is 80 mm/min, and the values of pressure in the tubes are maintained a constant with a pressure maintaining valve. Some results in a set of experiments are presented in Fig. 1 and Fig. 2 as follows. Fig. 1 shows effects of initial pressures and axial loads on instability of pressured tubes. In the range of stretcher, the bulge would not form if the initial pressure is not big enough. Fig. 2 shows that when the bulges occurs, critical axial force decreases as the increasing initial pressure, and demonstrates the difference between two ways of loading.

3 CONCLUSIONS

In this work, we observe the phenomenon of localization due to axial stretching in an initial pressure hype-elastic tube. When the tube is first loaded axially and then inflated slowly, the bulge occurs due to increasing pressure inside no matter how large the axial tension. On the contrary, the tube is inflated to approach the state of instability firstly, the localized bulge occurs due to

subsequent stretching. In this case, the axial force leading to localized bulge decreases with the increase of initial pressure in the tube. It is probably that the bulge would not appear if the internal pressure of a tube is lower than a certain value. Besides, the curves of pressure and axial tension are different in the two kinds of loading ways when the bulge forms. More theory analysis will be carried out and relevant results will be reported in separate papers.

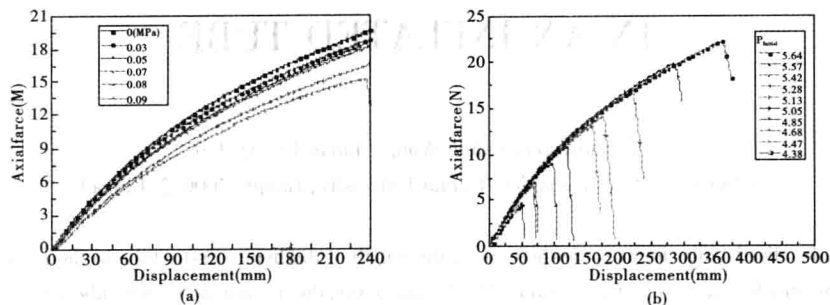


Figure 1 The effect of initial pressure on load-displacement curves in (a), and the instability due to stretching in inflated tubes with different pressure values in (b)

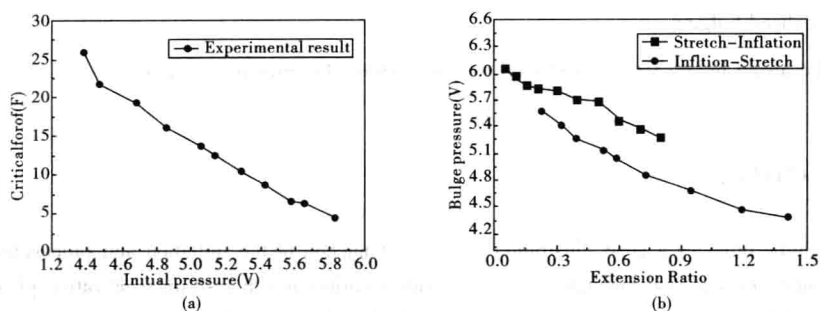


Figure 2 Critical forces for bulging as a function of initial pressures inside the tubes in (a), and the critical pressures for different extension ratios with two ways of loading in (b)

Acknowledgement

This work presented was supported by the National Science Foundation (NSFC, Grant Nos. 11372212, 11072174) and the National Key Basic Research Program of China (973 Program, No. 2012CB937500).

References

- [1] E. Chater, J. W. Hutchinson, On the propagation of bulges and buckles. *ASME Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1984, 51:269-277.
- [2] Kyriakides S-Chang Y C. On the inflation of a long elastic tube in the presence of axial load. *International Journal of Solids and Structures*, 1990, 26:975-991.
- [3] S Kyriakides, Chang Y C. The initiation and propagation of a localized instability in an inflated elastic tube. *International Journal of Solids and Structures*, 1991, 27:1085-1111.
- [4] D Pamplona, P B Goncalves, S R X. Finite deformation of cylindrical membrane under internal pressure, *International Journal of Mechanical Science*, 2006, 48:683-696.
- [5] P B Goncalves, D Pamplona, S R X. Finite deformations of an initially stressed cylindrical shell under internal pressure. *International Journal of Mechanical Science*, 2008, 50:92-103.

* Email: shbwang@tju.edu.cn.

【流体力学】

高速风洞动导数试验技术研究

刘 金 陈 农 宋玉辉 胡 静 解 克

(中国航天空气动力技术研究院,北京市丰台区云岗西路17号,100074)

摘 要 目前国内外研究机构对非传统构型的和升力体构型的航天飞行器的研究越来越多,和以往常规构型航天飞行器对比,对这类航天飞行器的研究需要准确的预测和精确测量动稳定导数。出于这个目的,中国航天空气动力技术研究院设计并且加工出一套适用于亚跨超声速风洞的强迫振动试验装置,这套试验装置为试验人员准确测量动稳定导数以及研究升力体构型的航天飞行器的非对称交叉、交叉耦合现象提供试验能力。

关键词 非传统构型和升力体构型航天飞行器;强迫振动试验装置;非对称耦合现象;亚跨超声速风洞

一、引言

非正常气动力特性及稳定与控制特性是影响航天飞行器总体性能和安全的关键技术之一。以测试直接动稳定导数(俯仰、偏航与滚转动稳定导数)为主体的传统风洞动态试验技术,在研制我国洲际导弹弹头、载人飞船、探月三期返回器和某些战略/战术导弹中起着关键的支撑作用,但它不适应未来高超声速飞行器(如高超声速巡航导弹、高性能战术导弹、空天飞行器等)的研制和发展。未来高超声速飞行器为了满足反拦截、机动规避、可重复使用等战术性能指标需要,具有面对称、高升阻比等航天飞行器气动布局上的新特点。相比传统航天飞行器轴对称、小升阻比气动布局形式,会带来不同的气动力特性(表1)。

表1 传统与未来航天飞行器差别

参数	传统航天飞行器 	未来高超声速飞行器 
$\alpha_{C_{Lmax}}$	$\leq 6^\circ$	$\approx 10^\circ$
C_{Lmax}	≤ 0.3	> 2.0
I_z/I_x	≈ 10	≥ 10
长细比	> 2.0	< 2.0
M_y, M_x	≈ 0	$\neq 0$
M_y^β	$M_y^\beta \approx M_z^\alpha$	$M_y^\beta \ll M_z^\alpha$, 有相当大的马赫数区域,可能变号
横航向耦合	由于低升阻比,弱	由于高升阻比,强
纵航向耦合	由于低升阻比,弱	由于高升阻比,强

一般来说,飞行器在大气中自由飞行时,飞行器周围会产生复杂的绕流流场,其对航天飞行器的动态气动力特性与飞行器运动产生重要影响。研究航天飞行器飞行的稳定性,必须仔细考虑动态气动力带来的严重影响。而动态气动力来源于航天飞行器在飞行过程中复杂绕流流场变化,是绕流流场结构变化的极端表现,尽管引起绕流流场结构变化是多种因素相互作用的结果,目前研究主要认为航天飞行器飞行时边界层转捩、流动分离与再附是导致绕流流场结构变化的主要物理机制,上述复杂的非正常绕流流场具有高度非线性与复杂性,引发航天飞行器气动力呈现较强的非正常、非线性与纵/横航向耦合特性。