



NANJING UNIVERSITY OF
AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

南京航空航天大学



“**泉龙杯**”南京航空航天大学 第**十三**届研究生学术论坛

论文集

主办单位：南京航空航天大学研究生院
共青团南京航空航天大学委员会
南京航空航天大学科协

赞助单位：中航工业成都飞机设计研究所

承办单位：南京航空航天大学研究生会

2011年12月 江苏 南京

序

南京航空航天大学研究生学术论坛是由南京航空航天大学校团委、校研究生院、校科协联合主办，校研究生会承办，各学院研究生会协办，面向广大研究生的学术交流盛会，旨在营造浓厚的校园学术氛围，不断提高研究生的学术素养，增强研究生学术交流意识，培养良好的学术道德和科学精神。研究生学术论坛自 1999 年开办以来，已成功举办了十二届，以其鲜明的学术特色和严谨的学术风格赢得了全校广大师生的密切关注和积极参与，期间组织的主论坛与各学院的分论坛包括“科创之星”、“科创新秀”评选、“科学·人生”院长论坛、专家报告、研究生学术沙龙等形式多样、内涵丰富的活动以及和其他合作院校的学术交流活动，已成为我校提高研究生学术水平、增强学生交流的重要平台，并在省内具有一定的影响。

本届研究生学术论坛在 9 月 5 日到 9 月 30 日收稿期间，组委会共收到稿件 329 篇，内容涉及理、工、经、管、文、哲、法、艺等各个门类。经过各学院评审和学校评审两个评审环节，共评出拟录用论文 232 篇，其中一等奖 5 名，二等奖 10 名，三等奖 20 名。与往届相比，稿件在质量上、数量上都上了一个新的台阶，充分显示了研究生专业素质和科研能力的提高。

第十三届研究生学术论坛得到了中航工业成都飞机设计研究所的大力支持，冠名为“梟龙杯”。同时也得到了诸多兄弟院校研究生会的鼎力合作，切实反映了我校研究生学术论坛创新、开放、务实、多赢的论坛精神。

为反映我校广大研究生同学的优秀科研成果，现将被第十三届研究生学术论坛收录的学术论文结集成册，以期对大家的研究工作有参考和促进作用。由于作者和编者水平有限，疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

南京航空航天大学研究生会

二〇一一年十二月

目 录

全文收录

1. 基于 DFD 方法的扑翼流动数值模拟·····	1
2. 低信噪比条件下的 LFM-BPSK 复合信号识别和参数估计·····	7
3. 基于数控渐进成形的板料润滑技术研究·····	17
4. 低温热处理制备石墨烯-氧化钴及超电容性能·····	24
5. 社会主义核心价值体系与我国意识形态安全·····	30
6. M10 碳纤维层压板低速冲击参数影响分析·····	37
7. 桁架结构尺寸和形状并行协同优化方法·····	44
8. 超机动飞行状态发动机稳定控制研究·····	51
9. 新型混合励磁双凸极电机非线性磁网络分析·····	57
10. 扩散焊接的数值模拟及其在多孔冷却结构制造工艺中的应用·····	65
11. 外加电场对吸氢氮化硼薄膜带隙的调制作用·····	71
12. 区域出口贸易隐含碳驱动因素探究——以江苏省为例·····	78
13. 农民工培训投入分析——基于企业社会责任的视角·····	84
14. 国际商事争端解决机制的优化·····	90
15. 异构传感器网络安全高效的密钥预分配方案·····	95
16. Laguerre 横向滤波器对有源噪声控制次级通路建模·····	102
17. 结冰过程中的过冷水滴的运动轨迹数值研究·····	110
18. 改进轨道激励下的列车动力学分析及控制研究·····	116
19. 一种变翼稳定性的分析方法·····	124
20. 冷却空气管冲击机匣表面换热特性实验研究·····	131
21. 基于二维曲面基准流场的高超进气道设计·····	138
22. 基于改进型复飞边界准则的综合复飞决策系统·····	146
23. 基于虚拟阵列的 DOA 估计算法·····	151
24. Ti-0.2Pd 钛合金高温拉伸本构关系研究·····	156
25. 锡/介孔碳纳米复合材料的制备及其电化学性能·····	161
26. 基于目标增强的彩色夜视算法·····	169
27. 雪灾情形下城市交通站点负荷的动态预测模型·····	176
28. 师徒制中组织学习方式探析·····	184
29. 风电成本经济性分析及中国风电成本预测·····	190
30. 基于上证指数的我国股市波动性特征实证分析·····	197
31. 比较视野下的引咎辞职实践与本土化探索·····	209
32. “社会的毛细管”——福柯“权力的微观政治学”之解读·····	215
33. 高三英语学习策略运用与性别差异的实证研究·····	219
34. 面向控制的高超声速飞行器刚体-气动弹性耦合建模与分析·····	229
35. 对抗型分类器框架设计及其应用·····	239

摘要 收 录

航空宇航学院

一种按边插值的边界嵌入方法的初步研究	246
挺杆式起重机系统的稳定性分析与防摆控制	246
超声电机驱动的变弯度翼的研究	246
一种用于变体机翼后缘的 U 型蒙皮的动态特性实验研究	246
机翼增升装置气动设计的递进优化方法	247
基于 AD5933 的小型阻抗测试系统设计	247
变体飞行器智能蒙皮测试系统集成化研究	247
基于 NASTRAN 的防冰系统伸缩管有限元分析	247
45 钢非线性多轴疲劳累积损伤律研究	247
碳纤维复合材料 T 型接头的脱黏损伤实验研究	248
整体中空双夹层复合材料平压力学性能研究	248
含缺陷的复合材料胶接接头应力分析方法	248
基于智能夹层的复合材料柔性蒙皮变形测量研究	248
机电耦合下的三自由度微陀螺仪设计与研究	249
基于神经网络模型在线调整的飞行器尾翼振动主动控制	249
一种小电流接地系统的故障检测方法研究	249
车桥耦合系统随机振动响应分析	249
自动门用无刷直流电机的控制系统研究	250
地源热泵垂直换热器的热响应测试与数值模拟	250
基于加速度响应信号连续小波变换的参数识别	250
基于笛卡尔网格的运动边界虚拟单元法	250
混凝土冻融破坏研究综述	250
循环噪声激励下 van Der pol 系统相干共振分析	251
冲击载荷作用下接触结构的仿真分析	251
基于滑移网格的螺旋桨飞机流场研究数值模拟方法	251
可动舵面翼梢小翼对机翼气动特性影响的研究	251
基于 CFD/CSD 的机翼颤振分析	252
三维 DELAUNAY 网格法边界修复	252
直升机旋翼/机身气动干扰数值模拟	252
无人机飞行力学建模及虚拟训练平台的建立	252
隔板式液体热二极管的数学建模与仿真研究	253
应用于海上风力发电机的蒸发冷却技术可行性研究	253
单相流体在多孔扁管内的流动与换热试验研究	253
燃气采暖炉热效率测试的新方法	253
湿空气冷凝器性能动态模型仿真	254
某型离心压气机气动设计	254
论基线客机的发展	254

基于 ADAMS 和 ANSYS 的起落架落震仿真及强度优化设计.....254

基于 ANSYS 的起落架扭力臂受力分析与优化设计.....255

能源与动力学院

基于超椭圆曲线的方转圆隔离段设计.....255

叶片安装角对叶盘结构振动特性的影响.....255

基于 NLPQL 算法的电动轮汽车差速助力转向多目标优化.....255

基于线性叠加法的中介机匣全场疲劳寿命预测.....256

含孔隙的层叠陶瓷基复合材料弹性性能预测.....256

基于单神经元的涡轴发动机组智能 PID 控制.....256

Simulation analysis of different vehicle modeling.....256

某型活塞发动机高空涡轮增压性能模拟.....257

基于最小二乘和模糊逻辑的气路故障诊断方法.....257

基于遗传算法优化的 EPS 路感混合 H2/H ∞ 控制.....257

Variable Blank Holder Force Control of Tailor Welded Blanks Based on H ∞ Theory.....257

开孔对机箱屏蔽效能影响的仿真研究.....258

磁场对三层流体热毛细对流发展的影响.....258

双层壳型冲击/气膜综合流量系数实验研究.....258

某型航空活塞发动机活塞的有限元数值模拟研究.....258

基于最小二乘支持向量机的航空发动机预测控制.....259

涡轮进口“热斑”在 1 级涡轮中迁移特性数值模拟.....259

飞机客舱气流组织数值模拟与分析.....259

二元高超声速进气道内压段设计研究.....259

自动化学院

改进型动态帧时隙 ALOHA 算法.....260

电解电容器的参数性故障辨识方法.....260

双弱连接超流体陀螺解算算法与量程扩展研究.....260

基于结构特征的二次迭代小波去噪.....260

轴向附加气隙转子磁分路混合励磁同步电机结构与原理.....261

输入电压不对称对 18 脉冲自耦变压整流器的影响.....261

交叉凸极转子混合励磁同步电机的结构原理与三维场仿真分析.....261

基于模糊软形态学的红外弱小目标检测.....261

基于 Flightgear/Matlab 的舰载机弹射起飞综合视景仿真.....262

基于不确定原理的循环打击体系结构研究.....262

12/8 极电励磁双凸极电机提前角控制方式的改进.....262

鲁棒预测控制在可重复使用运载器上的应用.....262

自主空中加油受油机姿态跟踪机动控制研究.....263

不可再生资源石油价格系统的研究.....263

基于 SINS/GNSS 的高轨道卫星自主导航方法.....263

五相容错电励磁双凸极发电机研究.....263

电子信息工程学院

某型号机载显示器电路设计缺陷浅析.....263

一种改进的雷达机动目标自适应跟踪算法.....264

BER performance of free space optical communication over weak turbulence channel with pointing errors.....264

高斯最小频移键控(GMSK)信号的非相干多符号检测算法.....264

High selectivity dual-band dual-mode microstrip BPF with multi-zeros characteristic.....265

基于 FPGA 的 GLONASS 卫星导航信号生成器设计.....265

机会阵雷达系统中无线自适应同步技术的研究.....265

角系数在微波暗室性能研究中的应用.....265

机电学院

产品生产过程质量分析控制与流程管理.....266

基于 MATLAB 的 ODS 动画的实现及其软件设计.....266

中小型金属工件在线检测系统的设计.....266

基于可拓数据挖掘的产品方案设计.....266

液压支架双伸缩立柱结构设计及校核.....267

考虑负载影响的阶梯形超声变幅杆动力特性.....267

基于各向异性晶粒生长元胞自动机模拟.....267

基于小波形态参数的压气机失稳监测.....267

基于 ANSYS 的压电悬臂梁建模与优化分析.....268

基于回归分析的 LCD 缺陷检测.....268

基于模糊 PID 的地铁车辆制动控制.....268

纳米级 PZT 颗粒制备及压电性能检测.....268

ECAP 模具的新设计.....268

基于 DSP 和 FPGA 提高增量式光电编码器精度的研究.....269

基于 UG 二次开发的参数化建库方法.....269

材料科学与技术学院

磁控溅射 TiN 及 TiSiN 薄膜的变形机制研究.....269

B₂O₃ 低温助烧 ZMSZT 陶瓷的微波介电性能.....269

介孔二氧化硅包覆碳纳米管材料载 Pt 及电催化性能.....270

双辉等离子法在 Mo 表面制备 Ir-Zr 共沉积层.....270

聚 5-乙烯四氮唑/磺化聚苯乙烯共混膜制备表征.....270

CeO₂/TiO₂ 纳米管阵列的制备及光电催化性能研究.....270

聚吡咯/二氧化硅对新型电致动材料性能的影响.....271

Sn-9Zn-0.5Ga-xNd 钎料钎焊性能及显微组织.....271

单面双 S 型左手材料损耗的研究.....271

一种新型轻质装甲材料的抗侵彻性能研究.....271

介孔碳-镍复合物对甲基橙吸附性能的研究.....272

民航学院

PLC 和 Flash 技术在远程监控中的应用研究.....272

基于贝叶斯网络的航空公司飞行安全绩效评估.....272

基于复杂交通网络节点枢纽性分析.....272

蛛网式航线网络优化模型及算法研究.....273

基于 DELMIA 的虚拟维修仿真.....273

终端区扇区优化技术研究.....273

机场停机位指派问题研究概述.....273

基于状态信息的航空发动机健康预测.....274

基于嵌入式实时操作系统的应用程序开发.....274

一种 QAR 数据微弱突变信号检测方法研究.....274

理学院

两参数二阶非线性常微分方程的正解.....274

群似酉系统上的算子值框架生成元.....274

双包层光纤激光器中吸收效率的计算.....275

阻尼吊桥波方程的多重周期解.....275

导数非线性薛定谔方程初边值问题的松弛差分格式.....275

任意拓扑形状散乱点集的双四次 C1 曲面样条重建.....275

基于密码子偏性的置换模型估计正向选择.....275

经济与管理学院

移动通信服务质量测量标尺构建.....276

基于质量结构的参数-容差联合设计模型.....276

基于非期望产出的江浙制造业转移效率研究.....276

基于质量改进补偿的供应链质量控制与协调.....276

我国上市公司股权激励效应实证研究.....277

考虑权重优化的二维混合评价信息群集结方法.....277

食品安全监管中第三方参与的有效性分析.....277

航空工业上市公司资本成本与信息披露研究.....277

基于适度激励思想的三端点区间数动态评价模型研究.....278

江苏省产业结构与经济增长关系实证研究.....278

基于 Lotka-Volterra 模型的大型客机企业竞争研究.....278

中国股票市场定向增发效应实证研究.....278

基于社会责任的汽车召回成本分担机制研究.....279

民机制造业主制造商-供应商共生关系模型研究.....279

基于参与方决策知识状态的合作供给研究.....279

国际碳期货市场发展对我国的启示.....279

基于 TOPSIS 模型的航空公司发展能力研究.....280

基于关联规则的新词发现技术研究.....280

我国三大经济圈 FDI 区位选择因素研究.....280

我国制造业上市公司资本结构影响因素研究.....280

我国股市过度波动存在性检验.....281

多约束投资组合优化模型的建立与实证研究.....281

我国上市银行股权结构与绩效分析.....281

基于主成分分析的常州市综合竞争力评价.....281

投资者异质信念对股票收益的影响研究.....281

基于 DEA 模型对我国民航企业经营效率的研究.....282

欧洲碳关税对中国工业出口影响研究.....282

我国行政监督的动态博弈与路径选择研究.....282

基于因子分析法的橱柜企业品牌竞争力评价.....282

风电产业成本经济性分析及实证研究.....283

长尾时代的二八法则与企业战略.....283

基于 Meta 图的业务流程独立性分析.....283

经济学视角下我国行政处罚制度若干问题的探讨.....283

应急物流系统中首批应急物资分配问题研究.....284

人文与社会科学学院

晋升博弈、锦标赛体制与府际合作困境.....284

中日贷学金资助政策的比较研究.....284

市民社会与青年马克思现代性的双重批判.....284

《礼记·学记》的教育伦理思想及启示.....285

刑事辩护制度的完善建议.....285

国内有关我国第三部门与政府关系的研究综述.....285

机票价格的反垄断法研究.....285

区域公共政策协调与整合机制研究.....285

“80 后”青年离婚现象的道德拷问.....286

产学研合作对大学创新力的提升作用研究.....286

民营航空企业市场准入机制的竞争法研究.....286

艺术学院

莫友芝篆书与题跋文集中所见书学思想研究.....286

浅析美术创作之油画创作.....287

《搭车去柏林》：行走在有限与无限之间.....287

外国语学院

目的论视野下文化负载词的翻译——以鲁迅小说《呐喊》的两个英译本为例.....287

思维差异在写作中的体现及原因.....287

家庭教育投入与学习动机的关联性研究.....288

文化帝国主义理论视野下“龙”的翻译.....288

航天学院

Dynamics Modeling and Design of Control law for High-speed Re-entry Glide Missile Based on Moving Mass Control.....288

临近空间飞行器发射的空空导弹的复合制导律研究.....288

航空炸弹弹道反设计研究.....289

雷达组网定位及航迹预测.....289

山脉重力波对直升机稳定飞行的影响.....289

计算机科学与技术学院

一种基于双重图像分块的文档水印方法.....289

基于 FPGA 的局部动态快速重构系统的设计.....290

关于半球型滑雪场的研究.....290

The Sweet Spot of the Baseball Bat.....290

基于 PSO 优化的灰色神经网络预测算法的研究.....290

基于异构环境的 Top-k 分布式查询算法研究.....291

基于 DfP-DBSCAN 算法的民航客户细分方法.....291

E-learning 中基于标注标签的资源推荐.....291

能量受限无线传输的可靠性分析.....291

一种高效的基于身份代理盲签名方案.....292

最小顶点覆盖问题的改进贪心算法.....292

一种基于聚类集成学习的机场噪声等级评价方法.....292

特征选择方法的实验比较.....292

基于 DFD 方法的扑翼流动数值模拟

刘冠冕 周春华

摘要: 本文利用 DFD (Domain-Free Discretization) 方法对复杂扑翼流动进行数值模拟。DFD 方法中, 控制方程的离散形式包括解域内部和外部的点。通过插值或解当地简化流动方程可求得外部相关点的流动变量值, 并在此过程中强加物面边界条件。空间离散采用 Galerkin 有限体积法, 时间推进采用双时间步格式。在每个时间步上, 更新扑翼的运动状态和流场参数, 实现对扑翼流场的数值模拟。本文计算结果对比了实验值和传统方法的结果, 证明了 DFD 方法模拟复杂动边界问题的可靠性。

关键词: DFD 方法, 扑翼流动, 边界非协调方法, 非定常流动, 运动边界

Numerical Simulation of Flapping-wing Flow Based on the Local DFD Method

Abstract: Flapping-wing flow at low Reynolds numbers has been investigated by using the local domain-free discretization (DFD) method. In the DFD method, the discrete form of governing equations can involve the points inside and outside the solution domain. The functional values at the exterior dependent points can be obtained by interpolation or solving the local simplified equations, and in the process the boundary conditions are imposed on the body surface. Spatial discretization is completed by the finite volume Galerkin approximation, and time stepping is achieved with the dual-time scheme. The numerical simulation of flapping wing movement is realized by updating the state of flapping wing motion and flow field parameters at each time step. This calculation results are compared with the experimental results as well as traditional methods, which demonstrate to reliability of solving complex moving boundary problems by the DFD method.

Key words: domain-free discretization; flapping-wing flow; non-boundary conforming method; unsteady flow; moving boundaries

引言

模拟动边界问题通常可以分为两大类: 边界协调方法和边界非协调方法。前者在边界层特性的捕捉上具有一定的优势, 但通常需要在每个时间步上通过网格变形、重生成或重叠技术来实现贴体, 导致计算效率较低, 不同网格间的插值传递也影响了计算精度; 后者不要求物面与网格贴体, 通过对边界附近做适当的处理来反映边界效应, 这样就无需在每个时间步上花大量时间做网格处理, 非常适合于模拟复杂运动边界扰流。边界非协调方法按照不同的边界条件处理方式, 主要包括 Cartesian (或 Cut-cell) 方法、IBM (Immersed Boundary Method) 方法和 HCIB (Hybrid Cartesian Immersed Boundary) 方法。Cartesian 方法^[1]通过 cut-cell 技术来重构物面附近的单元, 但很容易产生体积很小甚至是严重变形的切削单元, 对解的精度和收敛性都要影响。IBM 方法^[2]通过将物面边界模化成 N-S 动量方程的力源项, 来模拟边界效应。HCIB 方法^[3,4]综合了 Cartesian 方法和 IBM 方法, 通过恰当的插值处理对物面外最近的网格点上解的重构, 隐式地引入相关附加外力, 从而间接地强加边界条件。DFD 方法^[5,6]是一种新的边界非协调方法。该方法基于偏微分方程解可外延的原理, 将控制方程的离散和物面边界条件的嵌入分开处理。在离散过程中, 先对规则的辅助域应用适当的格式进行空间离散, 然后再对边界进行处理, 在嵌入边界条件时需要用到解域外部的离散点来做插值计算。当地 DFD 方法在处理运动边界问题上具备独特的优势^[7,8]。

扑翼流动属于较为复杂的运动边界绕流问题。Dickinson 等人利用果蝇的翅膀模型做了

大量实验,研究了翅膀转动和尾迹对流场的影响^[9,10]。Anvar Gilmanov 和 Fotis Sotiropoulos^[11]应用 HCIB 方法对 Dickinson 的实验做了验证。Liu Hao 等人利用重叠网格技术^[12]模拟昆虫的悬停状态,分析了扑动过程中涡系结构的变化^[13,14]。应用 DFD 方法对扑翼进行数值模拟,既是对扑翼流场数值模拟新的尝试,也深化和发展了 DFD 方法,对其它复杂运动边界的问题具有一定的参考价值。

1 控制方程的离散

本文研究的扑翼运动的雷诺数在 10^2 量级,属于不可压的层流流动。对应无量纲的三维 Navier-Stokes 方程为:

$$\mathbf{I}^m \cdot \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial x_i} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{I}^m$ 为用于消除连续方程中的压强时间导数项的特征矩阵, $\mathbf{w}$ 、 $\mathbf{f}_i$ 、 $\mathbf{s}_i$ 分别为流动变量矢量、对流和粘性通量矢量。

DFD 方法离散策略的实质是控制方程的离散形式包括解域内部和外部的点,本文采用 Galerkin 有限体积法对方程进行离散。对 (1) 式进行离散可得:

$$\mathbf{I}^m \cdot \Omega_P \frac{\partial \mathbf{w}_P}{\partial t} = \sum_{e=1}^n \frac{\mathbf{F}^A + \mathbf{F}^B + \mathbf{F}^C}{3} \cdot \mathbf{S}_{ABC} - \sum_{e=1}^n \frac{4}{3} \mathbf{S}^e \cdot \mathbf{S}_{ABC} \quad (2)$$

式中, P、A、B、C 分别为一四面体单元 e 的四个顶点, n 为与节点 P 相连的所有单元的个数。 Ω_P 为这些单元的体积和, $\mathbf{S}_{ABC}$ 为 P 点对面的三角形 $\triangle ABC$ 的外法向有向面积, $\mathbf{F}^A$ 、 $\mathbf{F}^B$ 、 $\mathbf{F}^C$ 为顶点 A、B、C 上的对流通量, $\mathbf{S}^e$ 为单元 e 的粘性通量。

本文采用双时间推进来求解非定常流场。物理时间离散采用三阶向后差分,可得:

$$\mathbf{I}^m \left[\Omega_i \frac{\beta_1 \mathbf{w}_i^{n+1} + \beta_2 \mathbf{w}_i^n + \beta_3 \mathbf{w}_i^{n-1} + \beta_4 \mathbf{w}_i^{n-2}}{\Delta t} \right] + R(\mathbf{w}_i^{n+1}) = \bar{R}(\mathbf{w}_i^{n+1}) = 0 \quad (3)$$

式中, $R(\mathbf{w}_i^{n+1})$ 为对流和粘性通量项的和。

在每个时间步上,流动变量矢量对虚拟时间求导,可得:

$$\Omega_i \frac{d\mathbf{w}_i^{n+1}}{d\tau} + \bar{R}(\mathbf{w}_i^{n+1}) = 0 \quad (4)$$

以上对控制方程的离散过程中并没有强加物面边界条件,在整个辅助域上都适用。关于物面边界条件的嵌入在下节讨论。

2 物面边界条件的嵌入

由空间离散可知,位于解域内部任意网格点的守恒变量值的计算取决于包含该点的所有四面体单元其余三个顶点上的流动变量。DFD 方法的网格点分为内部点、外部相关点和外部无关点。大量计算域上的节点为内部点,所有靠近物面的内部点至少有一个外部相关点。DFD 方法的关键就是求解外部相关点的流动变量值。

本文求解外部相关点的流动变量值是通过沿物体法向由流场内部向外部线性插值得到,或者由当地简化的边界流动方程得到。为此,必须构建一些虚拟点来求得外部相关点的流动变量值。虚拟点在相对应的外部相关点到物面的外法线上,且与其关于物面切平面对称。包含虚拟点的单元称为宿主单元,如果宿主单元的四个顶点都在流场内部,可以直接插值得到虚拟点的流动变量值;如果宿主单元的顶点不全在流场内部,需要重新构建新单元来求流动变量值。当求得虚拟点的流动变量值后,根据物面条件就可以求得外部点的流动变量值。如果外部相关点对应的虚拟点不唯一,这类的外部相关点称为多值点,此情况需要特殊处理。图 1 中, A、B、C 是内部点 P 的外部相关点, D 是点 A 的虚拟点。

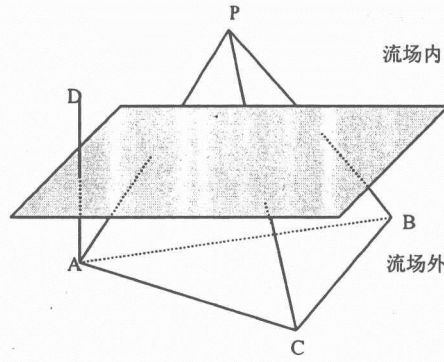


图1 内部点P, 外部相关点A、B、C, 虚拟点D

在有粘的流场中, 物面满足无滑移条件, 即:

$$u_i^S = V_i^S \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

式中, u_i 为单元与物面的交点 S 的流体速度分量, V_i 为点 S 的物体运动速度分量。由线性插值可得外部相关点 D 的速度, 即:

$$u_i^D = 2V_i^S - u_i^F \quad i=1,2,3 \quad (6)$$

由物面法向的动量方程可得到点 D 的压强值:

$$p_D = p_F + |FD| \left(\frac{dV}{dt} \right)_S \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

式中, p_F 表示虚拟点上的压强, FD 为虚拟点到外部相关点的距离, $\mathbf{V}$ 为物体运动速度, $\mathbf{n}$ 是物面上的外法向矢量。

3 扑翼运动的描述

为了验证 DFD 方法计算复杂动边界绕流的有效性和可靠性, 本文对比 Dickinson 等人的扑翼实验^[9]。昆虫的振翅过程较为复杂, 可以分解为三种运动: 拍动、转动和抬升。悬停时拍动平面是水平的, 翅膀前后拍动, 产生的平均气动力垂直向上, 和重力平衡。转动是翅膀绕自身轴的运动, 根据转动和拍动的相位差, 可以分为超前模式、对称模式和滞后模式。抬升是翅膀转轴偏离拍动平面的运动。

实验采用的是果蝇的翅膀模型。翅膀实体部分展长 0.19m, 厚度 3.2mm, 翅根到转轴的距离是 0.05m。实验在一个 $1 \times 1 \times 2\text{m}$ 的矩形容器中进行, 模型扑动频率 f 为 0.145Hz, 为了保证和实际果蝇具有相似的雷诺数, 容器中盛满矿物油 (密度为 880kg/m^3 、运动粘性系数为 1.15×10^{-4})。该算例中翅膀模型的轮廓数据由 Dickinson 提供, 平面形状和物面网格如图 2 所示。

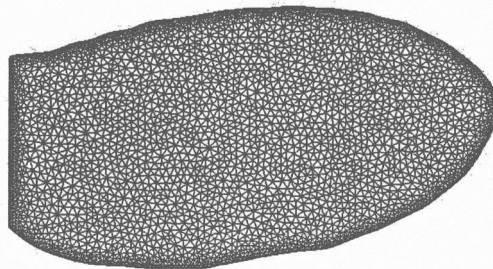


图2 果蝇翅膀模型[Dickinson 提供]和物面网格

实验作了简化, 没有考虑角度变化较小的抬升运动。本文用以下方程^[11]来拟合扑翼运动在半周期内角度和角速度的变化, 角度方程满足一阶连续可导。

(1) 加速阶段

$$\phi(t) = \frac{\Phi}{2} - \beta \frac{\Delta\tau_i^+}{\pi} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{\tau}{\Delta\tau_i}\right) \right] ; \quad u_i^+ = \sin\left(\pi \frac{\tau}{\Delta\tau_i}\right) \quad 0 < \tau < \frac{\Delta\tau_i}{2} \quad (8)$$

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{2} - \alpha \sin\left(\pi \frac{\tau - \tau_{r0}}{\Delta\tau_r}\right) ; \quad a_i^+ = -\alpha^+ \cos\left(\pi \frac{\tau - \tau_{r0}}{\Delta\tau_r}\right) \quad 0 < \tau < \tau_{r0} + \frac{\Delta\tau_r}{2} \quad (9)$$

(2) 匀速阶段

$$\phi(t) = \frac{\Phi}{2} - \beta \left[\frac{\Delta\tau_i^+}{\pi} + \tau^+ - \frac{\Delta\tau_i^+}{2} \right] ; \quad u_i^+ = 1.0 \quad \frac{\Delta\tau_i}{2} < \tau < \frac{T - \Delta\tau_i}{2} \quad (10)$$

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{2} - \alpha ; \quad a_i^+ = 0 \quad \tau_{r0} + \frac{\Delta\tau_r}{2} < \tau < \tau_{r0} + \frac{T - \Delta\tau_r}{2} \quad (11)$$

(3) 减速阶段

$$\phi(t) = \frac{\Phi}{2} - \beta \left\{ \frac{\Delta\tau_i^+}{\pi} \left[1 + \sin\left(\pi \frac{\tau - \frac{T - \Delta\tau_i}{2}}{\Delta\tau_i}\right) \right] + \left(\frac{1 - 2\Delta\tau_i^+}{2} \right) \right\} ; \quad u_i^+ = \cos\left(\pi \frac{\tau - \frac{T - \Delta\tau_i}{2}}{\Delta\tau_i}\right) \quad \frac{T - \Delta\tau_i}{2} < \tau < \frac{T}{2} \quad (12)$$

$$\alpha(t) = \frac{\pi}{2} + \alpha \sin\left(\pi \frac{\tau - \tau_{r0} - T/2}{\Delta\tau_r}\right) ; \quad a_i^+ = \alpha^+ \cos\left(\pi \frac{\tau - \tau_{r0} - T/2}{\Delta\tau_r}\right) \quad \tau_{r0} + \frac{T - \Delta\tau_r}{2} < \tau < \frac{T}{2} \quad (13)$$

其中, β 和 α^+ 是常数, 可由下面的式子确定:

$$\beta = TU/L = 2\Phi / (1 - 2\Delta\tau_i^+ (1 - 2/\pi)) \quad (14)$$

$$\alpha^+ = \pi\alpha St / \Delta\tau_r \quad (15)$$

式中, 上标+表示的是无量纲量。 $\phi(t)$ 和 $\alpha(t)$ 是 t 时刻的拍动角和转动角, u_i^+ 和 a_i^+ 是无量纲的拍动角速度和转动角速度。 Φ 是转动角幅值, $\Delta\tau_i$ 是一次拍动中加速或减速阶段所占整个周期的比值, α 是转动平面与垂直面的夹角, $\Delta\tau_r$ 是转动中加速或减速所占整个周期的比值, τ_{r0} 为转动超前量, St 是 Strouhal 数, T 是扑动周期。特征速度取为拍动分量的最大速度 0.229m/s, 特征长度取为翼尖到拍动轴心的距离 0.25m, 由此得到雷诺数 $Re = 498$ 。方程中的各参数见表 1。扑翼的角度和角加速度变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。

表 1 扑翼的运动学参数

f/mHz	Φ/deg	α/deg	$\Delta\tau_i$	$\Delta\tau_r$	τ_{r0}
145	160	50	0.16	0.24	-0.08

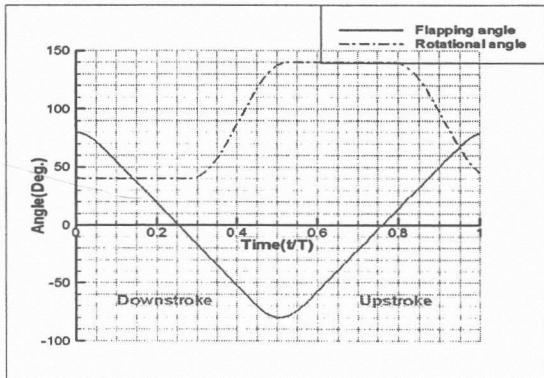


图 3 扑翼角度的变化曲线

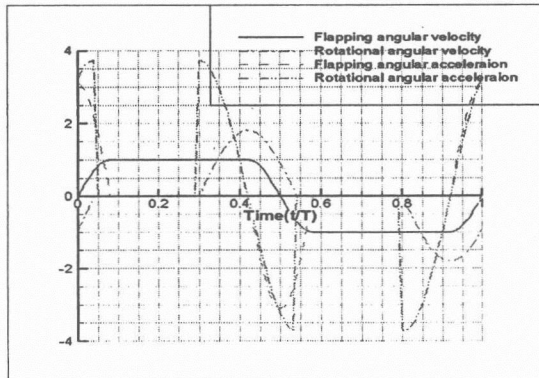


图 4 扑翼角速度和角加速度的变化曲线

在扑翼运动的半周期内，起始阶段翅膀模型经历加速拍动和快速转动，由于实验中采用超前模式，转动只有小部分在这一阶段完成；在扑翼运动中期，拍动角和转动角保持不变，角加速度为 0；在半周期后期，则经历减速拍动和快速翻转运动。

4 数值模拟

本文数值模拟中空间背景网格为四面体，在扑翼的运动所扫略的区域进行局部加密，采用对称方式进行计算。对称前网格量约为 280 万个单元、49 万个节点。

在 DFD 方法中，当前 t^{n+1} 时间层靠近物面的内部点可能是上一时间层 t^n 的外部点^[8]。为了保证这些点具有流动变量值，外部点必须是相关的，从而物理时间步长必须满足：

$$\Delta t \leq \frac{h}{K \max(|V_1^n|, |V_2^n|, |V_3^n|)} \quad (16)$$

式中， h 是靠近物面的最小网格尺度， V_i ($i=1,2,3$) 是物体运动速度分量， K 是时间离散的阶数。

本文物理时间步长取 $T/1000$ ，共计算 3 个周期。Dickinson 的文献^[9]中给出了一个周期内的平均升力系数 $\bar{C}_l=1.74$ ，本文计算结果为 1.775，两者相差 2.0%。阻力系数和升力系数的变化曲线如图 5 和图 6 所示。

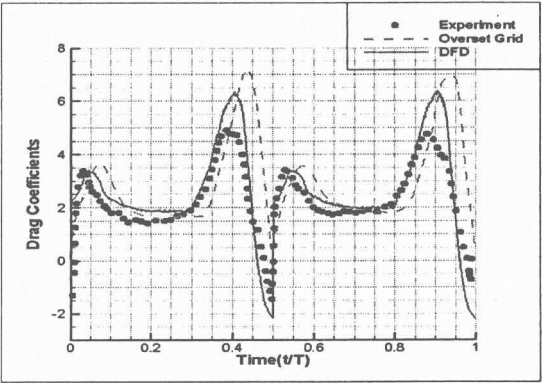


图 5 阻力系数曲线

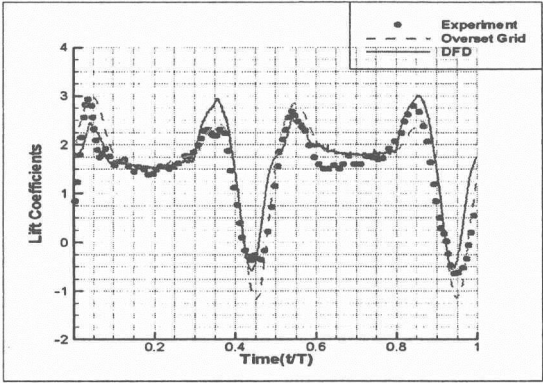


图 6 升力系数曲线

由以上对比曲线可以看到，本文计算的升阻力系数趋势和 Dickinson 的实验结果以及 Liu Hao 利用嵌套网格的计算结果^[12]都吻合地较好，在具体的量值上部分区域存在一定的差别。考虑到 Dickinson 的实验中拍动和转动均存在 $\pm 4.5^\circ$ 的误差，而 Liu Hao 的计算模型和运动拟合规律和 Dickinson 的实验也有差异，因此可以认为本文计算结果证明了 DFD 方法和程序的可靠性。

在每个半周期内，都存在 2 个气动力峰值。Dickinson 等人认为，第一个峰值是由“尾迹捕获” (Wake capture) 机制造成的，当翅膀反向拍动时，前一次扑动所形成的尾迹提高了翅膀与空气的相对速度，即捕获了“附加风速”，增加了气动力；第二个峰值是由“转动环量” (Rotational circulation) 机制引起的，这是由于翅膀快速转动产生了额外的环量，从而增加了气动力。

在拍动中期是平动阶段，此时拍动角和转动角均不变，对应有近似常值的高升力，这可以用“失速延迟” (Delayed stall) 机制来解释。平动过程中扑翼有很大的迎角，会产生强烈的前缘涡。对普通机翼而言，前缘涡随迎角的增加而不断加强直至失稳并从机翼脱落，导致机翼失速，升力急剧下降。但 Ellington 等^[15]通过系留鹰蛾的烟线法实验中显示了扑翼流场中存在较强的展向流动，前缘涡从翅根流向翅尖，这种展向流动稳定了前缘涡。由于涡没有脱落，高升力得以维持。

5 结 论

本文利用当地 DFD 方法模拟了扑翼流场, 将 DFD 方法进一步推广应用到复杂运动边界问题。DFD 方法的空间离散与解域无关, 可以快速生成使用任意复杂绕流的空间网格, 并且无需再每个时间步上对网格进行处理。数值模拟的结果表明 DFD 方法非常适合模拟运动边界问题, 并且具有很高的可靠性和准确性。

参考文献

- [1] C.S Marella, S. Krishnan, H. Liu, H.S. Udaykumar, Sharp interface Cartesian grid method I: An easily implemented technique for 3D moving boundary computations, *J Comput. Phys.* 210(2005)1.31
- [2] C. S. Peskin, Flow patterns around heart valves: a numerical method, *J. Comput. Phys.* 10 (1972) 345-380.
- [3] J. Mohd-Yusof, Combined immersed boundaries/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries. *CRT Annual Research Briefs, NASA Ames/Stanford University* (1997)317-327
- [4] E. A. Fadlun, R. Verzicco, P. Orlandi, J. A. Rosati, An immersed boundary method for complex incompressible flows, *J. Compute . Phys.* 161.(2000)35-60
- [5] Shu C, Fan L.F, A new discretization method and its application to solve incompressible Navier-Stokes equations, *Computational Mechanics* 2001;27:pp292-301.
- [6] Shu C, WU Y.L, Domain-free discretization method for doubly connected domain and its application to simulate natural convection in eccentric annuli, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2002;191:pp1827-1841.
- [7] ZHOU C.H, SHU C, WU Y.Z, Extension of domain-free discretization method to simulate compressible flows over fixed and moving bodies, to appear in *International journal for numerical methods in fluids*.
- [8] ZHOU C.H, SHU C, A local domain-free discretization method for simulation of incompressible flows over moving bodies, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, DOI: 10.1002/fld.2245(2010)
- [9] Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann, Sanjay P. Sane1, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, *Science*, 1999 vol284
- [10] James M. Birch, Michael H. Dickinson, The influence of wing-wake interactions on the production of aerodynamic forces in flapping flight, *The Journal of Experimental Biology* 206, 2257-2272
- [11] Anvar Gilmanov, Fotis Sotiropoulos, A hybrid Cartesian immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies, *Journal of Computational Physics* 207 (2005) 457-492
- [12] Liu Hao, Integrated modeling of insect flight: From morphology, kinematics to aerodynamics, *Journal of Computational Physics* 228 (2009) 439-459
- [13] Hikaru Aono, Fuyou Liang and Hao Liu, Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight: an integrated computational study, *The Journal of Experimental Biology* 211, 239-257
- [14] Hikaru Aono, Wei Shyy, Hao Liu, Near wake vortex dynamics of a hovering hawkmoth, *Acta Mech Sin* (2009) 25:23-36
- [15] C.P. Ellington, Coen van den Berg, A.P. Willmott, A.L.R. Thomas, Leading edge vortices in insect flight, *Nature* 384, 626 - 630

低信噪比条件下的 LFM-BPSK 复合信号识别和参数估计

薛妍妍 刘渝

摘要: 雷达信号脉内调制方式识别是电子对抗的重要内容。本文从工程应用的角度,在实信号进行正交变换的过程中通过频域滤波来滤除带外噪声,提高信噪比,对滤波后的复信号利用改进的相位展开算法计算瞬时相位,瞬时频率。判断频率跳变点的个数,若个数满足要求,剔除跳变点后,对时-频曲线进行拟合,根据拟合的参数和信号的时宽带宽积(TB)确定信号是否为线性调频-二相编码复合调制信号。再对正确识别的信号进行参数估计,通过平方消除伪码信息,运用快速解线性调频技术估计出起始频率和调制系数,接着重构原线性调频信号,共轭相乘得到基带相位编码信号。最后采用小波变换法提取码速率。仿真结果表明,该算法有很好的识别率和参数估计精度。

关键词: 调制方式识别; 相位展开; 伪码调相; 参数估计

The Recognition and Parameter Estimation of LFM-BPSK in Low Signal-Noise Ratio

Abstract: Intra-Pulse modulated signal recognition is important in Electronic Warfare. From the angle of practical applications, filtering by a sliding window in the process of orthogonal transformation can remove the out-of-band noise and improve the signal-noise ratio, the signals' phase and frequency can be obtained by improved phase unwrapping algorithm. First recognize signals by the number of trip point, by jump positions detection, curve fitting and TB, we can confirm the modulation system. The square of the right recognition signal is made to eliminate the PN code, the fast de-chirp algorithm is used to obtain the initial frequency and modulation factor with which the LFM signal is reconstructed. The base-band PN code signal is to get with the multiplication of the conjugated reconstructed signal and received signal. Finally the symbol rate of PN is extracted by the wavelet transform approach. Simulation shows that this algorithm has high recognition rate and high accuracy.

Key Words: modulated recognition; phase unwrapping; PN code; parameter estimation.

引言

伪码调相(PN)不仅测距、测速精度高,具有良好的距离和速度分辨能力,而且抗干扰能力强,易于实现。线性调频信号(LFM)则是应用最广泛、技术最成熟的一种脉冲压缩信号,它有效地解决了雷达系统作用距离与距离分辨力之间的矛盾,并且对多普勒频移不敏感。线性调频-二相编码复合调制信号(LFM-BPSK)兼具二者优点,具有很好的抗干扰性能和低截获概率特性^[1],目前这种复合信号已被用于多种雷达和微小型探测器中,因此,对这种伪码-线性调频复合信号的识别和参数估计具有非常重要的意义。

目前已有不少文献提出各种识别方法,文献[2]基于谱相关的识别方法,需要信噪比大于 6dB 的条件,文献[3]提出的方法,对 LFM-BPSK 信号的参数估计精度受信噪比影响较大。文献[4]提出了对 LFM-BPSK 复合信号识别和参数估计的谱相关方法,该方法要求复合信号具有循环平稳特性,而且计算量较大。文献[5-6]提出了基于 Wigner 时频分布的雷达信号参数估计方法,但需要在时频平面内进行二维搜索,计算量也较大。

本文在实信号进行短时傅里叶变换时通过频域截取滤除带外噪声,提高信噪比,对滤波后的复信号采用改进的相位展开算法估计瞬时相位,瞬时频率。对时-频曲线、时宽带宽积进行分析,判断是否是线性调频-二相编码复合调制信号。确定信号种类后,再对滤波后的

LFM-BPSK 信号进行参数估计, 通过平方消除伪码信息, 然后估计出起始频率和调制系数, 接着重构原线性调频信号, 共轭相乘得到基带相位编码信号, 最后采用小波变换法提取码速率。

1 信号模型

假设中频采样信号模型为 $x(n) = A \cos\{\phi(n)\} + w(n) \quad n = 0, 1 \dots L-1$

其中 A 是幅度, $\phi(n)$ 是相位调制, $w(n)$ 是均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声, L 为样本点数。各种信号的相位调制分别为:

1) 二相编码信号 (BPSK): $\phi(n) = 2\pi f_c n \Delta + \sum_{i=1}^N \alpha_i \Pi(n - iT_b)$, 其中 N 为码元个数, T_b 为码元宽度, Π 为持续时间为 T_b 的门函数, α_i 为 0 或 π , Δ 为采样时间间隔, f_c 为载频。

2) 线性调频信号 (LFM): $\phi(n) = 2\pi f_c n \Delta + \pi k n^2 \Delta^2$, 其中 k 为调频系数。

3) 线性调频 - 二相编码复合调制信号 (LFM-BPSK):
 $\phi(n) = 2\pi f_c n \Delta + \sum_{i=1}^N \alpha_i \Pi(n - iT_b) + \pi k n^2 \Delta^2$ 。

易见各雷达信号的调制信息在相位中都有反映: LFM-BPSK 包含了两种信号的相位信息 (相位编码和线性调频), 如果能得到信号的时相特征, 就能根据各种信号不同的时相特征来对信号进行识别。瞬时频率是瞬时相位的一阶导数, 在工程中分析瞬时频率更为简易, 本文中利用信号的时频特征对 LFM-BPSK 进行判别。

2 识别原理

线性调频信号的时-频曲线为 $\hat{f}_l = f_c + kn\Delta$, 是一条斜率不为 0 的直线。二相编码信号的时-频曲线是一个在相位跳变点频率有跳变的斜率为 0 的直线。对于 LFM-BPSK, 其时-频曲线应该具有上述两种时-频曲线的特性, 是一条斜率不为 0 的含有跳变点的直线。

由此知识确定识别的具体步骤是: 将要检测的信号通过短时傅立叶变换及滤波算法得到滤波后的复信号, 再依此估计瞬时相位, 瞬时频率。判断频率跳变点的个数, 如果个数满足

要求, 排除跳变点后, 对时-频曲线进行拟合, 并计算离差 ($\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - y(n)]^2}$, $x(n)$

为原始曲线, $y(n)$ 为拟合直线), 如果离差小于门限 ($\varepsilon < V_\varepsilon$) 且时宽带宽积大于门限

($TB > V_T$), 则认为信号是 LFM-BPSK。

2.1 滤波

实际工程应用中, 一般需将接收到的实信号运用正交变换原理变为复信号。

由于后续的相位展开需要一定的信噪比, 参数估计部分对信号平方处理也会降低信噪比, 所以这里需要对信号进行滤波, 提高信噪比。在电子侦察接收机中, 系统的带宽一般远大于信号的带宽, 所以可以通过对信号频域截取实现滤波, 而由于信号的瞬时带宽更小, 对信号分段做傅里叶变换可以滤除更多的带外噪声。

将实信号每 128 点分段做傅里叶变换, 最后一段若不足 128 点则并入前一段, 得到一系