



国防科技图书出版基金

高超声速滑移流气动热 并行计算数值模拟

Aeroheating Parallel
Numerical Simulation Research for
Hypersonic Slip Flow

李桦 潘沙 田正雨 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

高超声速滑移流气动热 并行计算数值模拟

Aeroheating Parallel Numerical
Simulation Research for Hypersonic Slip Flow

李桦 潘沙 田正雨 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高超声速滑移流气动热并行计算数值模拟/李桦,
潘沙,田正雨著. —北京:国防工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-118-08975-2

I. ①高... II. ①李... ②潘... ③田... III. ①高
超音速空气动力学-气动加热-数值模拟-计算方法
IV. ①V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 185216 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16½ 字数 296 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

近空间高超声速飞行器是目前非常重要的一类飞行器,具有显著的军事和民用价值,关系到国家的空天安全。飞行器在近空间高速飞行带来气动热问题,必须准确预测飞行器的热环境,为热防护提供指导和参考。然而近空间飞行条件下,气动热的数值模拟涉及到黏性干扰效应、稀薄气体效应和真实气体效应等多个热点和难点问题,对数值模拟方法提出了很高的要求。

本书针对近空间高超声速飞行器气动热数值模拟中涉及的难点问题开展了深入研究。考虑量热完全气体条件和高温热化学非平衡条件建立了数值模拟方法,对两种气体模型条件下的气动热开展了计算分析;对气动热数值模拟中的网格效应、收敛判别开展了讨论;讨论了高超声速滑移流动机理,对滑移模型进行了分析比较;开展了高超声速滑移流数值模拟,进行了滑移条件下的气动热数值模拟分析;基于消息传递库,发展了两种气体模型的高超声速气动热并行计算方法,开展了气动热大规模并行计算研究。

本书共7章,各章内容如下:

第1章介绍了本书研究工作的背景和意义,并对国内外相关研究历史与现状进行了综述,提出了高超声速气动热数值模拟中存在的若干典型问题。

第2章针对 Riemann 问题,采用一维非定常欧拉方程,对8种差分格式和5种限制器进行了计算对比研究,对比分析了各种格式和限制器各种格式对于膨胀波、激波及接触间断的分辨率,讨论了各种格式的黏性机理和优劣,为气动热数值模拟进行了差分格式和数值方法上的准备。

第3章建立了量热完全气体模型条件下的气动热数值模拟方法,发展了相应的二维/三维计算程序。对气动热数值模拟中网格相关性和收敛性问题进行了研究,对进气道前缘气动热进行了研究分析。

第4章建立高温空气热力学非平衡、化学非平衡条件下的气动热数值模拟方法,发展了相应的计算程序。对二维/三维算例进行计算验证,分析了热化学非平衡条件下不同非平衡模型、热流构成及催化壁的影响。

第5章介绍了高超声速滑移流动的机理以及不同区域流动所对应的计算方法,重点介绍了N-S方程加滑移边界条件的数值模拟方法,并比较分析了3种典型的滑移边界条件模型。

第6章采用N-S方程加滑移边界条件的数值模拟方法,对高超声速滑移

流动进行计算分析。

第7章基于消息传递库(MPI),对前面发展建立气动热数值模拟方法进行了并行化处理,分别发展了相应的气动热并行计算程序,在自行搭建的64CPU核PC集群并行系统上,采用多个算例进行了气动热并行计算分析,将所发展并行程序移到高性能集群系统上,开展了气动热大规模并行计算、研究和分析。

本书取材于作者及其课题组几年来在高超声速数值模拟方面取得的研究成果,其中部分研究成果得到了国家自然科学基金(项目编号:91016010)的支持。在此,对国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国防科技图书出版基金的大力资助,在此表示衷心的感谢。

希望本书的出版能够为高超声速气动热的数值模拟和近空间飞行器的优化设计提供相关参考。鉴于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者指正。

作者

2013年5月

主要符号表

英文字母标量

A_i	组分热力学常数, 见附录表 C. 2
A_i, B_i, C_i	组分黏性系数拟合常数
a	声速
C_p	压力系数
$c_V, c_{V, tr}^i, c_{V, ve}^i$	总质量定容热容, 组分平动质量定容热容, 组分振动 - 平动质量定容热容
c_p	质量定压热容
D	非平衡源项雅可比矩阵对角阵
E	能量
e	比能
e_i^0	组分零点能
e_{ve}, e_{ve}^i	组分振动 - 电子能
H	焓
H_{normal}	网格界面法线方向上的总比焓
h	质量焓, 比焓
J	坐标变换雅可比矩阵
k, k_{tr}, k_v	热传导系数, 平动热传导系数, 振动 - 电子热传导系数
L_0	参考长度
Ma	马赫数
$\dot{m}$	质量流量
n_i	单位体积内的组分粒子数
Pr	普朗特数
p	压强
p_e	电子压力
Q, q	热流
$\bar{R}$	混合气体常数
R_0	通用气体常数

R_i	组分气体常数
Re	雷诺数
Re_{cell}	网格雷诺数
R_n	钝头半径
St	斯坦顿数
T	温度
T_{ve}	振动 - 电子温度
T_0	总温
t	时间
U, V, W	ξ, η, ζ 三个方向上的逆变速度
u, v, w	x, y, z 三个方向的速度
x, y, z	笛卡儿坐标

英文字母矢量、矩阵与张量

A, B, C	无黏通量雅可比矩阵
$A^+, B^+, C^+ A^-, B^-, C^-$	采用最大特征值进行分裂后的雅可比矩阵
D	LU - SGS 数值方法中的对角阵
E	x, ξ 向无黏通量矢量
E_v	x, ξ 向黏性通量矢量
F	y, η 向无黏通量矢量
F_v	y, η 向黏性通量矢量
$\hat{f}$	流通矢量
G	z, ζ 向无黏通量矢量
G_v	z, ζ 向黏性通量矢量
L	雅可比矩阵的左特征矩阵, LU - SGS 数值方法中的 Lower 矩阵
l	雅可比矩阵的左特征矢量
n	单位化的面法向矢量
Q	守恒变量矢量
R	雅可比矩阵的右特征矩阵
RHS	残值项矢量
r	雅可比矩阵的右特征矢量
S	源项
T	非平衡源项雅可比矩阵对角阵
X	

U 一维欧拉方程中的守恒项, LU - SGS 数值方法中的 Upper 矩阵

希腊字母标量

φ 球头表面某点和驻点分别与球心连线的夹角
 γ 比热容比
 $\overline{\gamma}$ 等效比热容比
 ξ, η, ζ 一般曲线坐标
 λ 雅可比矩阵特征值, 分子平均自由程
 μ 黏性系数
 θ 拐角压缩角
 ρ, ρ_i 密度, 组分密度

物理化学常数

$R_0 = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 普适气体常数
 $N_A = 6.0225 \times 10^{23} / \text{mol}$ 阿伏伽德罗常数

索引参数

i, j, k 结构网格 ξ, η, ζ 三个方向网格索引
 $i_{\max}, j_{\max}, k_{\max}, id, jd, kd$ 结构网格 ξ, η, ζ 向最大网格数

上标

i 无黏, 组分项
 n 迭代时间步
 v 有黏
 $*$ 有量纲量
 $'$ 一阶导数
 $''$ 二阶导数
 $+, -$ 表示单元体面两侧参数值

下标

∞ 自由来流参数
 $1/2$ 表示单元交界面处参数
 ref 参考量

s	钝体驻点参数
$tr, tr - r$	平动或平动 - 转动
v, ve	振动, 振动 - 电子
n	法向
τ	切向
w	壁面参数

顶标

—	无量纲量
~	无量纲量

英文缩写与简称

缩写	含义
AUSM	Advection Upwind Splitting Method
AUSMPW +	Advection Upstream Splitting Method by Pressure - based Weight function
AUFS	Artificially Upstream Flux Vector Splitting
CA	Computational Aerothermodynamics
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
COWs/NOWs	Clusters or Networks of Workstations
CRV	Crew Return Vehicle
DPLR	Data Parallel Line Relaxation
DSMC	Direct Simulation Monte Carlo
FDS	Flux Difference Splitting
FVS	Flux Vector Splitting
GASP	General Aerodynamic Simulation Program
HPC	Hyper Performance Computation
LAURA	Landley Aerothermodynamic Upwind Relaxation Algorithm
LU - SGS	Lower - Upper Symmetric Gauss - Seidel Relaxation
MD	Molecular Dynamics
MHD	MagnetoHydroDynamics
MPI	Message Passing Interface
MPP	Massively Parallel Processing

NND	Non – oscillatory , containing No free parameters and Dissipative scheme
OREX	Orbital Re – entry Experiment
TPS	Thermal Protection System
TVD	Total Variation Diminishing
VULCAN	Viscous Upwind algorithm for Complex flow Analysis

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究概况	3
1.2.1 气动热数值模拟研究	3
1.2.2 非平衡数值模拟研究	7
1.2.3 稀薄滑移流数值模拟研究	11
1.2.4 CFD 并行计算数值模拟研究	12
第 2 章 差分格式的研究与对比	20
2.1 Riemann 问题格式计算对比分析	20
2.1.1 非定常一维欧拉方程组	20
2.1.2 各种差分格式的介绍	21
2.1.3 Riemann 问题计算分析比较	27
2.2 限制器应用对比分析	32
2.2.1 各种限制器的介绍	32
2.2.2 限制器计算对比分析	36
第 3 章 量热完全气体条件下的气动热数值模拟	40
3.1 量热完全气体控制方程	40
3.1.1 笛卡儿坐标形式	40
3.1.2 无量纲形式	42
3.1.3 坐标变换形式	43
3.2 差分格式	43
3.2.1 AUSMPW + 格式	44
3.2.2 M - AUSMPW + 格式	46
3.2.3 界面声速的求解	47
3.3 初边值条件	48
3.3.1 虚拟网格边界	48
3.3.2 边界条件	49
3.3.3 流场初始化	50
3.4 LU - SGS 隐式方法	51

3.5	气动热数值模拟影响因素研究	53
3.5.1	网格相关性研究	53
3.5.2	收敛判别研究	61
3.6	进气道前缘气动热计算研究	67
3.6.1	问题与建模	67
3.6.2	计算与分析	68
3.6.3	进一步的讨论	72
第4章	高温热化学非平衡气动热数值模拟	74
4.1	高温热化学非平衡模型	74
4.1.1	高温非平衡效应与气体模型	74
4.1.2	化学冻结、化学平衡与化学非平衡	75
4.1.3	热力学平衡与非平衡	75
4.1.4	温度模型	76
4.2	三维可压缩流高温热化学非平衡控制方程	77
4.2.1	笛卡儿坐标系下有量纲形式	77
4.2.2	无量纲形式	80
4.2.3	一般曲线坐标系形式	81
4.3	物理化学模型	82
4.3.1	热力学关系式	82
4.3.2	输运系数	83
4.3.3	化学反应动力学模型	85
4.3.4	松弛过程和松弛时间	87
4.4	数值求解方法	89
4.4.1	AUSMPW + 格式在热化学非平衡方程中的应用	89
4.4.2	温度的求解	90
4.4.3	源项的处理	90
4.4.4	LU - SGS 方法	93
4.4.5	边界条件及流场初始化	94
4.5	高温非平衡条件下的气动热算例计算与分析	95
4.5.1	二维圆柱计算算例	95
4.5.2	三维球头算例	107
第5章	高超声速滑移流动机理与计算模型分析	118
5.1	流动分区与数值计算方法	118
5.2	高超声速滑移流动机理	120
5.3	滑移边界条件模型	121
5.3.1	Maxwell 滑移条件	123

5.3.2	Gokcen 滑移条件	128
5.3.3	Lockerby 滑移条件	130
5.3.4	比较与分析	132
5.4	壁面适应系数	135
第 6 章	高超声速滑移流气动热数值模拟研究	138
6.1	滑移流动条件下的网格效应研究	138
6.1.1	二维钝头计算分析	138
6.1.2	三维球头计算分析	147
6.2	稀薄滑移效应对流场特征的影响	152
6.2.1	流场特性	152
6.2.2	壁面特性	162
6.3	稀薄滑移效应对热流的影响	174
6.3.1	物体尺度对热流的影响	175
6.3.2	来流稀薄程度对热流的影响	177
6.4	化学平衡滑移流数值模拟研究	179
第 7 章	气动热并行计算数值模拟	185
7.1	CFD 并行计算方法	185
7.1.1	CFD 并行策略	186
7.1.2	分区网格处理与负载平衡	187
7.1.3	边界条件处理与数据交换	188
7.2	并行计算平台	189
7.2.1	PC 集群式并行系统	189
7.2.2	大规模集群系统	190
7.3	并行计算应用与分析	191
7.3.1	量热完全气体圆柱并行算例	192
7.3.2	热化学非平衡球头并行算例	197
7.3.3	双椭球算例	198
7.3.4	ELECTRE 钝锥算例	202
7.4	CFD 大规模并行计算性能分析	207
7.4.1	算例并行测试	207
7.4.2	某乘波飞行器前体算例并行测试	211
7.4.3	数据并行计算的加速比和效率分析	214
7.5	返回舱外形算例	216
7.5.1	GSC 算例计算条件	216
7.5.2	GSC 算例计算网格及分区	217
7.5.3	流场结果及分析	218

附录 A 量热完全气体数值通量雅可比矩阵 222

附录 B 双温模型非平衡计算中数值通量及源项雅可比矩阵及相关
推导 224

附录 C 空气化学反应模型及组分常数表 227

参考文献 229