

学 术 著 作 丛 书

*Numerical Simulation for Hypersonic Flow
Control by Magnetohydrodynamics Method*

高超声速流动磁流体力学 控制的数值模拟研究

李桦 田正雨 著

国防科技大学出版社

国防科技大学学术
著作专项经费资助出版

高超声速流动磁流体力学 控制的数值模拟研究

李 桦 田正雨 著

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

高超声速流动磁流体力学控制的数值模拟研究/李桦,田正雨著. —长沙:国防科技大学出版社,2010.1

ISBN 978 - 7 - 81099 - 720 - 1

I . 高… II . ① 李… ② 田… III . 超音速流动—磁流体力学—数值模拟—研究 IV . O361.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 191345 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:石少平 责任校对:耿 筠

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:10.25 字数:266

2010年1月第1版第1次印刷 印数:1—500

ISBN 978 - 7 - 81099 - 720 - 1

定价:39.00 元

内 容 简 介

本书围绕高超声速 MHD(磁流体力学)流动控制的数值模拟进行了系统的阐述。首先介绍了高超声速 MHD 流动控制技术的发展以及 MHD 基本理论,然后分别针对两大类形式——全 MHD 形式和低磁雷诺数近似形式展开研究,建立了相应的数值模拟方法,其中重点考察了磁场伪散度清除问题。针对发展的数值模拟方法,通过大量经典算例进行了验证。最后通过数值模拟研究了高超声速 MHD 流动控制方法的几类重要应用,主要包括斜激波 MHD 控制和钝体 MHD 防热控制,其中考虑了高温效应等因素的影响。

前 言

吸气式超燃冲压发动机技术作为高超声速飞行器的关键组成部分,是当今世界研究的热点。吸气式超燃冲压发动机打破了空气动力学中传统的外流与内流的界线,飞行器机体和发动机形成的流场存在着强烈的耦合影响:(1)飞行器前体形状、激波结构和边界层发展直接影响进气道启动性能、捕获流量、压力恢复等指标,从而对发动机燃烧状态和推力性能产生影响;(2)发动机的安装位置、形状变化对飞行器的气动力和力矩特征产生影响;(3)发动机排出的燃气经过尾喷管和后体,产生额外的气动力和力矩,对推力做出贡献,同时也会和气动控制面发生相互作用,影响飞行器的飞行状态、稳定性和操纵性。针对上述问题的飞行器一体化设计是当前高超声速研究领域的难题。此外,高超声速飞行器面临的严峻气动热环境也是制约其发展的瓶颈之一。

上世纪90年代,俄罗斯提出了飞行器概念 AJAX,针对超燃冲压发动机添加了旁路装置,用于MHD(磁流体力学)发电与流动加速。这种MHD发电机-加速器系统的设计从根本上减小了发动机流动路径上气体混合和燃烧的熵增。此外,还设想通过等离子体和MHD流动控制追求达到下面两个方面的一些优点:(a)亚音速和超音速流动中的等离子体效应(改变飞行器阻力、燃烧效率、雷达截面等);(b)在带有足够电导率的高焓流动中采用MHD方法提高进气道质量捕获率、促进剪切层混合、辅助发电以及喷管流

动加速。

AJAX 概念提出之后,基于等离子体和磁流体的飞行器流动控制技术成为世界航天领域关注的热点。美国空军研究实验室推进与动力委员会和约翰·霍普金斯大学应用物理实验室联合主持了一个项目,其名称是“未来航天飞行器高级物理系统研究”。该项目主要研究可能应用于高超声速飞行器的高级技术,论证并评估这些技术所带来的潜在性能提升。这些技术包括等离子体流动控制、磁流体控制和机载发电、针对燃烧的等离子体助燃等方面。具体地,主要针对 4 大类 17 种可能应用于未来空天飞行器的新技术进行分析研究,包括:

- 增加推力的技术

① 高于设计速度时 MHD 进气道流动控制,② 低于设计速度时 MHD 进气道流动控制,③ 激波-边界层干扰控制,④ 进气道虚唇口。

- 变更一般/轴向力的技术

① 用于外流控制的均匀体电离,② 用于外流控制的非均匀体电离,③ 表面等离子体电离用于减小表面摩阻和控制转捩,④ 等离子体喷流用于前缘的激波位置控制。

- 针对增加操纵性的技术

① MHD 用以减小前缘的热流,② 微波电离用于燃料点火,③ 微波火炬点火和火焰保持,④ 脉冲式 DC(直流)放电点火和火焰保持,⑤ 快速电离波放电点火和火焰保持。

- 增强发动机性能的技术

① 进气道层流控制,② 非均匀放电的等离子体助混,③ MHD 增强等离子体助混。

该课题研究直接促使了美国空军实验室飞行器委员会在制定

前 言

中期(2015)和远期(2025+)技术发展规划中,更加关注针对高超声速流动的应用等离子体和磁流体流动控制研究。这是世界上MHD飞行器应用研究认识的一个缩影,反映出世界航天大国对MHD流动控制的重视。主要原因在于,这类方法能够在不改变飞行器外形的前提下,对飞行器附近的流动实施干扰,达到影响飞行器气动力的目的,这是传统的气动面接触式干扰方式所不具有的优势。因而存在着很强的需求,需要理解不同MHD现象以及它们对高超声速飞行器产生的影响。

由于电磁场与流体的相互作用,磁流体力学具有一般流体力学所没有的一些特殊性质,再加上需要考虑等离子体的电导率、化学反应、非平衡性等因素,流动将更加复杂。当前研究MHD流动控制的手段有理论分析、试验研究和数值模拟三大类。而工程化的等离子体模型和MHD模型不能适用于稍复杂的MHD流动分析,因此需要通过试验研究和数值模拟方法进一步研究高超声速飞行器MHD流动控制的机理和控制效果。

本书基于三维MHD流动数值模型进行研究,发展了相应的数值方法,并针对高超声速飞行器进气道激波MHD控制和钝头/缘热流MHD控制进行了数值模拟和系统分析。全书共分为七章。第一章介绍了高超声速流动MHD控制概念及其作为一项新技术对高超声速飞行器设计的重要意义,介绍了国内外MHD流动控制的研究概况,分析了MHD流动控制研究中可能遇到的问题。第二章介绍了等离子体的基本知识,基于电磁学和流体力学的基本理论,引出了磁流体力学的基本方程,说明了基本假设与简化。第三章针对具体坐标系下的MHD控制方程形式,介绍了所发展的数值模拟方法,其中重点讨论了伪磁场散度问题及其清除处理方法。第四章研究发展了针对MHD流场结构精细捕捉的三维自适应各

向异性叉树网格方法,提出了一组自适应加密与优化策略。第五章通过对多个经典 MHD 流动算例的模拟,验证了数值方法的准确性。算例分别针对低磁雷诺数 MHD 流动、全 MHD 流动、磁场伪散度清除以及源项处理进行了考察算例。第六章模拟研究了高超声速斜激波 MHD 流动控制问题,分别模拟了全 MHD 和低磁雷诺数情况。对于全 MHD 斜激波流场,分析激波分裂的特点和壁面压强的变化规律;对于低磁雷诺数 MHD 斜激波流场,主要研究磁场和等离子体产生的相关参数的影响;然后针对高超声速进气道斜激波进行 MHD 控制分析,并研究控制效果。第七章是高超声速飞行器钝头/缘气动加热 MHD 控制模拟分析研究。模拟分析了磁场对激波、壁面压强和热流的影响。此外,还考虑建立真实电导率模型,并在考虑化学反应平衡效应影响的条件下进行了模拟研究。

本书取材于作者及其课题组几年来在 MHD 流动控制方面研究取得的研究成果。其中部分研究成果是在国家自然科学基金(项目编号 10672179)的支持下完成的。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大学学术专著出版基金和国防科技大学出版社的大力资助,在此一并表示衷心的感谢。

希望本书能够为高超声速 MHD 流动控制研究和高超声速飞行器的设计研制提供相关参考。鉴于作者水平有限,书中存在错误和不足之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作者

2009年7月

符 号 表

罗马字母标量

符号	定义
$A_1 \sim A_6$	Poisson 方程求解中的参数, 或 MHD Rankine-Hugoniot 关系中的通用参数
a_1, a_2, \dots, a_{16}	Tannehill 和 Mugge 化学平衡关系中的系数
B_0	外加磁场大小
B_{\max}	壁面处磁场大小
B_s	钝体驻点处磁场大小
b	OC-TVD 限制器中的参数, 或 Poisson 方程十九点格式中的系数
b_1, b_2, \dots, b_{12}	Tannehill 和 Mugge 化学平衡关系中的系数
C	流动对偶极子磁场的扰动量
C_p	压力系数
c	声速
c_1, c_2, \dots, c_{11}	Tannehill 和 Mugge 化学平衡关系中的系数
c_1	光速

c_f	快磁声速
c_p	等压比热
c_s	慢磁声速
d	叉树网格中的合并控制参数
d_1, d_2, \dots, d_{12}	Tannehill 和 Mugge 化学平衡关系中的系数
E	电场矢量大小
e	比内能,或电压势
erf	误差函数
$erfc$	余误差函数
e_t	总比能
F	Bush 钝体 MHD 分析方法中的相似流函数
f, g	Bush 钝体 MHD 分析方法中的变量
G	Hartmann 流动中驱动流体运动的单位质量力,或 Bush 钝体 MHD 分析方法中的常数
g_+, g_-	快群速度图和慢群速度图
H	总焓
Ha	Hartmann 数 $Ha = BL\sqrt{\frac{\sigma_e}{\mu}}$
h	焓,或 Hartmann 流动中的平板半间距,或 Bush 钝体 MHD 分析方法中的变量
J	Jacobi 矩阵的模
K	Bush 钝体 MHD 分析方法中的过激波密度比

符 号 表

k	热传导系数,或波尔兹曼常数
k_f	正向反应速率常数
k_b	逆向反应速率常数
L	长度
L_e	电子束作用区域宽度
L_R	电子束衰减长度
l_i	叉树网格中单元块在 i 方向的级别
l_b	MHD 作用区点沿磁场矢量方向到壁面的距离
M	马赫数,或 Bush 钝体 MHD 分析方法中的磁势
M_{A1}, M_{I1}, M_{S1}	MHD Rankine-Hugoniot 关系中定义的多个波的马赫数
m	Bush 钝体 MHD 分析方法中的平面、轴对称判别参数
n^+, n^-	单位体积内的正电荷和负电荷数
n_e	电子密度
Pr	普朗特数 $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$
p	压强
p_m	磁压
q	电荷密度

Q	互涉参数 $Q = \sigma_e B_L^2 / (\rho_\infty V_\infty)$, 或分子碰撞截面
R_b	磁压数 $R_b = \frac{B^2}{\rho \mu_{e0} V^2}$, 或 Bush 钝体 MHD 分析方法中的钝体半径
Re	雷诺数 $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$
Re_m	磁雷诺数, $Re_m = \sigma_e \mu_e V L$
R_s	Bush 钝头 MHD 分析模型中的激波半径
r_b	钝头或圆柱半径
r_A, r_B, r_C	MHD Rankine-Hugoniot 关系中方程的根
St	斯坦顿数
s	Hartmann 流动中的平板长度
T	温度
T_0	总温
t	时间
U, V, W	速度大小, 某些情况 V 还指代体积
U_{mean}	平均速度
U_0	Rayleigh 问题平板速度
u, v, w	x, y, z 三个方向的速度
w_e	体静电能
X, Y, Z	Tannehill 和 Mugge 化学平衡关系中的中间参数

符 号 表

x, y, z 直角坐标

罗马字母矢量、矩阵与张量

符号	定义
A, B, C	x, y, z 向无粘 Jacobi 矩阵
$A^+, B^+, C^+,$ A^-, B^-, C^-	采用最大特征值进行分裂后的 Jacobi 矩阵
B	磁场矢量 $B = [B_x, B_y, B_z]^T$
D	电位移矢量
E	x 向无粘通量矢量, 或电场强度矢量 $E = [E_x, E_y, E_z]^T$
E_v	x 向粘性通量矢量
e_r, e_θ	极坐标系下的矢径和极距角方向
F	y 向无粘通量矢量, 或作用力矢量
F_v	y 向粘性通量矢量
F_L	洛伦兹力矢量
\hat{f}	流通矢量
G	z 向无粘通量矢量
G_v	z 向粘性通量矢量
L	Jacobi 矩阵的左特征矩阵
l	Jacobi 矩阵的左特征向量

H	磁场强度矢量,或非守恒项/源项
H_M	与磁非守恒项成正比的矢量项, $H_M = H/(\nabla \cdot B)$
\bar{I}	单位张量
J	电流密度矢量
M'	守恒量的第一次变换矩阵
M''	守恒量的第二次变换矩阵
n	单位化的面法向量矢量
\bar{n}	单位化的面法向矢量张量
P	极化矢量,或坡印亭矢量
Q	守恒变量矢量
q	热通量矢量
q_j	焦耳热通量矢量 $q_j = [q_{jx}, q_{jy}, q_{jz}]^T$
R	Jacobi 矩阵的右特征矩阵
RHS	残值项矢量
r	Jacobi 矩阵的右特征向量,或电荷相关的位置矢量
S_{MHD}	低磁雷诺数源项
V, U	速度矢量 $V = [u, v, w]^T$, $U = [u, v, w]^T$
Y	投影方法中的矢量势函数

符 号 表

希腊字母标量

符号	定义
α	电离度
α_B	二维理想导电拐角流动问题中,磁场与水平方向的夹角
α_e	电子束方向角
β_f, β_s	快激波角和慢激波角
χ	各向异性叉树网格合并/分裂时的参数 阈值
Δ	弓形激波驻点前激波脱体距离
ϵ_e	介电常数
ϵ_{e0}	真空介电常数
ϵ_k	单个粒子的平均动能
Φ	OC-TVD 格式中的参数
φ	投影方法中的标量函数
ϕ	球头表面某点和驻点分别与球心连线的 夹角
γ	比热比
$\bar{\gamma}$	等效比热比
Γ	叉树网格方法中的目标区域
η	一般曲线坐标之一

κ	压力系数改变量 $\kappa = C_{p,Q} - C_{p,Q=0}$
λ	Jacobi 矩阵特征值
λ_D	德拜长度
λ_+, λ_-	Rayleigh 问题精确解中的参数
μ	粘性系数
μ_e	介质磁导率
μ_{e0}	真空磁导率
ν	运动学粘性系数
ν_e	磁扩散率
Ω	控制单元体积
$\bar{\omega}$	SSOR 迭代法中的单步残差
ω	SSOR 方法松弛因子
θ	拐角压缩角
ρ	密度
ρ_e	体电荷密度
σ	单元体表面元面积
σ_e	电导率
σ_H	完全电离气体的电导率
σ_L	弱电离气体电导率
ξ	一般曲线坐标之一

符 号 表

$\xi(x), \eta(x)$	Bush 钝体 MHD 分析方法中引入的独立变量
ζ	一般曲线坐标之一

希腊字母矢量、矩阵与张量

符号	定义
Λ	以特征值为迹的矩阵
$\bar{\tau}$	剪应力张量

索引参数

符号	定义
d_i, d_j, d_k	ξ, η, ζ 方向目标区域位移量参数
id, jd, kd	结构网格 ξ, η, ζ 三个方向最大网格数
i, j, k	结构网格 ξ, η, ζ 三个方向网格索引
l, m, n	通指三个坐标方向

上标

符号	定义
i	无粘
n	迭代时间步
v	有粘
*	有量纲量