

# 高超声速飞行器 终端滑模控制技术

---

孙长银 穆朝絮 张瑞民 著



科学出版社

# 高超声速飞行器终端 滑模控制技术

孙长银 穆朝絮 张瑞民 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要包括滑模控制的基本概念、理论和方法,终端滑模控制的特点和暂态分析理论,高超声速飞行器再入自适应终端滑模控制技术等。本书内容系统、严谨,理论与应用结合。

本书可供从事飞行器控制、滑模控制理论与应用研究的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为控制理论与控制工程、导航制导与控制等专业的研究生参考用书,对控制工程等专业的本科生课程学习也很有帮助。

### 图书在版编目(CIP)数据

高超声速飞行器终端滑模控制技术/孙长银,穆朝絮,张瑞民著. —北京:科学出版社,2014. 1

ISBN 978-7-03-039387-6

I. ①高… II. ①孙…②穆…③张… III. ①高超声速飞行器-终端控制器-研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 309814 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:赵桂芬  
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张:13

字数:257 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



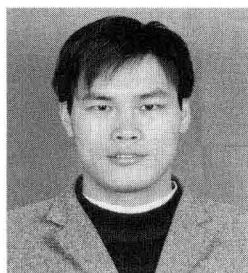
孙长银, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者。2004 年于东南大学控制理论与控制工程专业获工学博士学位, 现任北京科技大学自动化学院院长和中国自动化学会常务理事、副秘书长、青年工作委员会主任。近年来, 在 *IEEE Transactions on Automatic Control*、*Neural Networks*、*Soft Computing*、《中国科学: F 辑》、《自动化学报》、《控制理论与应用》等国内外学术期刊上发表学术论文 100 余篇。曾获 2006 年全国优秀博士学位论文提名、2007 年教育部自然科学奖一等奖(第二完成人)、2010 年教育部自然科学奖二等奖(第一完成人)和 2013 年国家自然科学奖二等奖(第二完成人)等多项荣誉和奖励。曾受邀为澳大利亚皇家墨尔本理工大学访问教授、美国南加州大学高级研究学者。主要研究方向为飞行器控制、非线性控制及智能优化理论等。

E-mail: cysun@seu.edu.cn



穆朝絮, 1984 年生, 2012 年于东南大学控制理论与控制工程专业获工学博士学位, 现为天津大学电气与自动化工程学院讲师。目前已发表 SCI/EI 论文十余篇, *Asian Journal of Control*、《自动化学报》、《控制理论与应用》(英文版)等国内外期刊审稿人。主要研究方向为非线性系统变结构控制理论及应用、飞行器鲁棒控制、智能控制方法与应用等。

E-mail: cxmu@tju.edu.cn



张瑞民, 1979 年生, 2013 年于东南大学控制理论与控制工程专业获工学博士学位, 现为河南科技大学数学与统计学院讲师。目前已发表论文十余篇。主要研究方向为非线性系统建模、变结构控制理论及应用、飞行器控制等。

E-mail: zhangrim@163.com

## 前 言

20 世纪 60 年代远程弹道导弹的出现、载人飞船的成功返回,以及 X-15 试验机试飞等事件,标志着人类开始进入高超声速时代。高超声速飞行器兼有航天器和航空器的优点,融合了诸多航空航天的前沿技术,是未来飞行器发展的一个重要方向。

与传统的飞行器相比,高超声速飞行器自身复杂的气动特性以及采用的超燃冲压发动机、机体/发动机一体化等技术,使得高超声速飞行器机体、推进系统以及结构动态之间的耦合更强,模型的非线性度更高,而且飞行高度和马赫数跨度范围大,飞行环境复杂,飞行器气热特性和气动特性变化剧烈,这些巨大的技术挑战导致能够满足实际应用要求的近空间高超声速飞行器到目前为止仍未出现。为确保高超声速飞行器在复杂的飞行条件下拥有稳定的飞行特性和良好的飞行性能,必须在其飞行控制系统设计过程中引入新的控制方法和控制手段。

考虑到空间系统存在不确定情况,包括外部干扰、噪声和未建模动态等,高超声速飞行器的控制器一定要具有好的鲁棒性。近年来国内外学者对高超声速飞行器控制设计问题进行了广泛的研究,取得了一些研究成果,如提出了增益预置法、反馈线性化方法,以及其他一些线性控制方法和非线性控制方法等。滑模控制方法由于具有良好的鲁棒性,可对存在模型不确定和外界干扰的非线性系统实施良好的控制,因而在高超声速飞行器控制设计方面得到了广泛的重视,成为一种重要的高超声速飞行器控制方法。一些国际知名期刊,如 *Journal of the Franklin Institute*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 等都为该主题做了专刊。

滑模变结构控制著名理论家 Utkin 教授和我国中国科学院院士高为炳出版的专著中比较系统地介绍了滑模控制的基本理论。随着控制学科的迅速发展,滑模变结构控制理论出现了新的方法和理论,如终端滑模控制理论,高阶滑模控制理论,结合模糊控制、神经网络以及自适应控制等的高级滑模控制方法等。

本书正是在这样的背景下,根据高超声速飞行器的特点,在滑模控制理论研究的基础上,对终端滑模控制理论进行深入研究,对再入过程中高超声速飞行器滑模控制器设计问题进行探讨,总结了作者非线性系统终端滑模控制以及高超声速飞行器滑模自适应控制领域多年来的研究工作。全书共 8 章:第 1 章为绪论,介绍了高超声速飞行器和滑模控制的研究现状,概述了高超声速飞行器再入滑模

的控制问题。第2章讨论了非线性系统稳定以及滑模控制基本理论。第3章详细研究了终端滑模控制的内容,包括其数学描述、齐次性、相轨迹和暂态时间分析,以及高阶系统的终端滑模控制策略。第4章介绍了高超声速飞行器再入飞行的六自由度十二状态数学模型和飞行器的开环特性。第5章提出了一种快速光滑二阶滑模方法,应用于高超声速飞行器的再入飞行控制,实现了飞行器的稳定控制,并且较好地解决了抖振问题。第6章和第7章提出了两种高超声速飞行器再入姿态的自适应终端滑模控制方法。第8章基于自适应反步方法在处理具有级联结构的非线性系统方面的优势,提出了高超声速器再入飞行的自适应反步终端滑模控制方法。

在本书出版之际,由衷感谢墨尔本皇家理工大学余星火教授,南京航空航天大学姜长生教授、姜斌教授,东南大学费树岷教授、张侃健教授、李世华教授,哈尔滨工业大学冯勇教授,天津大学宗群教授、鲜斌教授,南京信息工程大学钱承山教授、王伟教授的悉心指导和热情鼓励。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金重大研究计划(编号:91016004)、国家杰出青年科学基金项目(编号:61125306)、国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:61304018)和教育部博士点基金(编号:20120092110026)的资助。

本书是作者在终端滑模控制和高超声速飞行器滑模控制领域初步的研究成果,由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2013年12月

## 主要符号说明

$b$	翼展长度
$c$	平均气动弦长
$g$	重力加速度
$l_A$	滚转力矩, 空气动力矩在体坐标系中的分解, 绕 $x_b$ 轴运动, 极性按右手定则确定
$m_A$	俯仰力矩, 空气动力矩在体坐标系中的分解, 绕 $y_b$ 轴运动, 极性按右手定则确定
$n_A$	偏航力矩, 空气动力矩在体坐标系中的分解, 绕 $z_b$ 轴运动, 极性按右手定则确定
$l_{Tr}, m_{Tr}, n_{Tr}$	反作用推力器推力矩在体坐标系中的分解, 分别为滚转力矩、俯仰力矩、偏航力矩, 极性按右手定则确定
$mrc$	参考力矩中心
$\hat{q}$	动压
$x$	对地位置矢量(地面坐标系 $o_g x_g y_g z_g$ ), $o_g x_g$ 轴处于地平面内, 并指向某方向(如指向飞行航线)
$y$	对地位置矢量, $o_g y_g$ 轴在地平面内, 且垂直于 $o_g x_g$ 指向右方
$z$	对地位置矢量, $o_g z_g$ 轴垂直地面指向地心
$\delta_e, \delta_a, \delta_r$	左、右升降副翼和方向舵的偏转角
$\gamma$	航迹倾斜角(俯仰轨迹角), 飞行速度 $v$ 与地平面 $x_g o_g y_g$ 间的夹角, 以飞行器向上飞时为正

$\chi$	航迹方位角(航向轨迹角),飞行速度 $v$ 在地面上的投影与 $o_g y_g$ 间的夹角,以速度在地面的投影在 $o_g x_g$ 右侧时为正
$\alpha$	迎角(攻角),飞行速度 $v$ 在飞行器对称面上的投影与机体轴 $ox_b$ 的夹角, $v$ 的投影在 $ox_b$ 轴下面为正
$\beta$	侧滑角,飞行速度 $v$ 与飞行器对称面间的夹角,以 $v$ 处于对称面右侧时为正
$\mu$	滚转角,机体轴 $oz_b$ 与通过机体轴 $ox_b$ 的铅垂面间的夹角,飞行器向右滚转时为正
$p$	滚转角速度,与机体轴 $ox_b$ 重合一致
$q$	俯仰角速度,与机体轴 $oy_b$ 重合一致
$r$	偏航角速度,与机体轴 $oz_b$ 重合一致
$C_D$	阻力系数(沿 $x_a$ 轴的分量),向后为正
$C_Y$	侧力系数(沿 $y_a$ 轴的分量),向右为正
$C_L$	升力系数(沿 $z_a$ 轴的分量),向上为正
$C_l$	滚转力矩系数(绕 $x_b$ 轴)
$C_m$	俯仰力矩系数(绕 $y_b$ 轴)
$C_n$	偏航力矩系数(绕 $z_b$ 轴)
$C_{D,a}$	基本阻力系数
$C_{D,\delta_e}, C_{D,\delta_a}, C_{D,\delta_r}$	左、右升降副翼舵和方向舵引起的阻力增量系数
$C_{Y,\beta}$	基本侧力系数
$C_{Y,\delta_e}, C_{Y,\delta_a}, C_{Y,\delta_r}$	左、右升降副翼舵和方向舵引起的侧力增量系数
$C_{L,a}$	基本升力系数
$C_{L,\delta_e}, C_{L,\delta_a}$	左、右升降副翼引起的升力增量系数
$C_{l,\beta}$	基本滚转力矩系数
$C_{l,p}$	滚转角引起的滚转力矩增量系数



$C_{l,r}$	偏航角引起的滚转力矩增量系数
$C_{l,\delta_e}, C_{l,\delta_a}, C_{l,\delta_r}$	左、右升降副翼舵和方向舵引起的滚转力矩增量系数
$C_{m,a}$	基本俯仰力矩系数
$C_{m,q}$	俯仰角速度引起的俯仰力矩增量系数
$C_{m,\delta_e}, C_{m,\delta_a}, C_{m,\delta_r}$	左、右升降副翼舵和方向舵引起的俯仰力矩增量系数
$C_{n,\beta}$	基本偏航力矩系数
$C_{n,p}$	滚转角引起的偏航力矩增量系数
$C_{n,r}$	偏航引起的偏航力矩增量系数
$C_{n,\delta_e}, C_{n,\delta_a}, C_{n,\delta_r}$	左、右升降副翼舵和方向舵引起的偏航力矩增量系数
$D$	阻力,总气动力在气流坐标系 $x_a$ 轴上的分量,向后为正
$Y$	侧力,总气动力在气流坐标系 $y_a$ 轴上的分量,向右为正
$L$	升力,总气动力在气流坐标系 $z_a$ 轴上的分量,向上为正
$H$	飞行高度
$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$	转动惯量
$M$	飞行器质量
$M_a$	马赫数
$S$	参考面积
$T_{rx}, T_{ry}, T_{rz}$	RCS 推力在体坐标系轴上的分量
$v$	飞行速度
$X_{cg}$	质心到 $mrc$ 的距离,质心在 $mrc$ 后为正
$X_m$	质心到前缘距离位置
$X_{mrc}$	$mrc$ 到前缘距离
$X_{Tr}$	反作用发动机推力作用中心到质心间距离
$X_{Trf}$	反作用发动机推力作用中心与机体纵轴间距离
$\rho$	空气密度

---

$A > 0$	正定矩阵
$A^T$	矩阵的转置
$A^{-1}$	矩阵的逆
$I_n$	$n$ 阶单位阵
$\  \cdot \ $	欧氏范数
$\  \cdot \ _F$	Frobenius 范数
$\text{diag}_{n \times n} \{ * \}$	以 $*$ 为对角线元素的 $n \times n$ 对角阵
$\text{tr}(A)$	矩阵的迹
$\text{sgn}(\cdot)$	符号函数

## 主要缩写词说明

ABSOTSMC	adaptive backstepping second order terminal sliding mode control 自适应反步二阶终端滑模控制
AHW	advanced hypersonic weapon 先进高超声速武器
ASOTSMC	adaptive second order terminal sliding mode control 自适应二阶终端滑模控制
ATSMC	adaptive terminal sliding mode control 自适应终端滑模控制
CAV	common aero vehicle 通用航空飞行器
CFD	computational fluid dynamics 计算流体动力学
CSMC	conventional sliding mode control 传统滑模控制
CTSMC	conventional terminal sliding mode control 传统终端滑模控制
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency 美国国防高级研究计划局
FSSOSMC	fast smooth second order sliding mode control 快速光滑二阶滑模控制

---

HOSMDO	high order sliding mode disturbance observer 高阶滑模干扰观测器
HST	hypersonic transport 高超声速运输机
IXV	intermediate experimental vehicle 过渡试验飞行器
NASA	National Aeronautics and Space Administration 美国国家航空航天局
NASP	national aero-space plane 国家空天飞机计划
NSHV	near space hypersonic vehicle 近空间高超声速飞行器
ONR	Office of Naval Research 美国海军研究办公室
RBFNN	radial basis function neural network 径向基神经网络
RCS	reaction control system 反作用控制系统
RHNN	recurrent Hermite neural network 递归 Hermite 神经网络
RHNDO	recurrent Hermite neural network disturbance observer 递归 Hermite 神经网络干扰观测器
RgNSHV	reentry-glide near space hypersonic vehicle 再入滑翔式近空间高超声速飞行器

---

SHEFEX	sharp edge flight experiment 尖前缘飞行试验
SISO	single input single output 单输入单输出系统
SMC	sliding mode control 滑模控制
SOSMC	second order sliding mode control 二阶滑模控制
SSOSM	smooth second order sliding mode 光滑二阶滑模
TSMC	terminal sliding mode control 终端滑模控制

# 目 录

前言

主要符号说明

主要缩写词说明

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 高超声速飞行器概述 .....	1
1.2 国内外高超声速飞行器的研究现状 .....	2
1.3 高超声速飞行器的控制方法 .....	7
1.3.1 高超声速飞行器的特点 .....	7
1.3.2 几种高超声速飞行器的控制方法 .....	8
1.4 滑模控制概述 .....	12
1.4.1 滑模控制的发展历程 .....	12
1.4.2 滑模控制的研究进展 .....	14
1.4.3 滑模控制中的问题 .....	17
1.5 高超声速飞行器再入滑模控制 .....	21
1.6 本书内容安排 .....	23
参考文献 .....	24
第 2 章 滑模控制的基本概念与理论 .....	38
2.1 数学基础 .....	38
2.1.1 微分方程解的存在性和唯一性 .....	38
2.1.2 微分方程解的稳定性 .....	40
2.1.3 基于 Lyapunov 直接法的微分方程稳定性判别方法 .....	41
2.2 非线性系统中的若干基本概念 .....	43
2.2.1 非线性系统的基本性质 .....	43
2.2.2 不连续和非单值的非线性系统 .....	44
2.2.3 右端不连续微分方程和 Filippov 理论 .....	45
2.3 滑模控制的概念和性质 .....	46
2.3.1 滑动模态和滑模控制 .....	46
2.3.2 到达条件和等效控制 .....	47
2.3.3 控制品质和趋近律 .....	48
2.3.4 滑模控制的特点 .....	49

2.4	滑模控制方法	51
2.4.1	渐近收敛滑模控制	51
2.4.2	终端滑模控制	52
2.4.3	高阶滑模控制	52
2.5	本章小结	58
	参考文献	58
<b>第3章</b>	<b>终端滑模控制理论分析</b>	<b>60</b>
3.1	有限时间控制的基本理论	60
3.1.1	有限时间稳定性定义	60
3.1.2	有限时间稳定性判别准则	61
3.2	终端滑模控制理论	63
3.2.1	终端滑模控制	63
3.2.2	终端滑模控制系统的齐次性	66
3.2.3	连续非奇异终端滑模控制	67
3.3	非奇异终端滑模相轨迹分析	70
3.3.1	相轨迹分析	70
3.3.2	相轨迹仿真	73
3.4	非奇异终端滑模暂态时间分析	82
3.4.1	到达时间的定性分析	82
3.4.2	到达时间的估计算法	83
3.4.3	到达时间的数学表达	86
3.4.4	仿真	87
3.5	三阶系统的终端滑模控制	89
3.6	本章小结	95
	参考文献	96
<b>第4章</b>	<b>高超声速飞行器再入建模和开环特性</b>	<b>98</b>
4.1	引言	98
4.2	高超声速飞行器气动外形及其反作用控制系统	99
4.2.1	近空间高超声速飞行器气动外形	99
4.2.2	近空间高超声速飞行器反作用控制系统	100
4.3	近空间高超声速飞行器六自由度十二状态方程	102
4.3.1	基本假设	102
4.3.2	常用坐标系定义	103
4.3.3	近空间高超声速飞行器再入数学模型	103
4.4	控制力与控制力矩	105

4.4.1	气动力和力矩 .....	105
4.4.2	反作用控制系统推力器推力和力矩 .....	105
4.5	开环特性分析 .....	107
4.5.1	零输入响应 .....	107
4.5.2	开环耦合特性分析 .....	107
4.6	高超声速飞行器再入仿射非线性模型 .....	110
4.7	本章小结 .....	113
	参考文献 .....	113
<b>第 5 章</b>	<b>高超声速飞行器再入姿态二阶滑模控制 .....</b>	<b>117</b>
5.1	引言 .....	117
5.2	高阶滑模控制概述 .....	118
5.3	快速光滑二阶滑模控制设计 .....	119
5.3.1	快速光滑二阶滑模方法 .....	119
5.3.2	基于高阶滑模干扰观测器的快速光滑二阶滑模控制律 .....	126
5.4	高超声速飞行器再入姿态控制设计 .....	127
5.4.1	慢回路控制设计 .....	128
5.4.2	快回路控制设计 .....	129
5.4.3	仿真验证 .....	129
5.5	本章小结 .....	133
	参考文献 .....	133
<b>第 6 章</b>	<b>高超声速飞行器再入姿态自适应终端滑模控制 .....</b>	<b>135</b>
6.1	引言 .....	135
6.2	问题陈述 .....	135
6.3	自适应终端滑模控制设计 .....	136
6.3.1	终端滑模面设计 .....	136
6.3.2	自适应终端滑模控制律的设计 .....	140
6.4	高超声速飞行器再入姿态控制仿真验证 .....	143
6.5	本章小结 .....	146
	参考文献 .....	146
<b>第 7 章</b>	<b>基于递归神经网络的高超声速飞行器再入姿态终端滑模控制 .....</b>	<b>148</b>
7.1	引言 .....	148
7.2	递归 Hermite 神经网络 .....	149
7.3	基于 RHNN 的自适应终端滑模控制设计 .....	151
7.3.1	基于 RHNN 的快慢回路自适应终端滑模控制设计 .....	151
7.3.2	仿真验证 .....	156



---

7.4 基于 RHNN 干扰观测器的自适应终端滑模控制设计 .....	159
7.4.1 RHNN 干扰观测器设计 .....	159
7.4.2 基于 RHNDO 的姿态控制器设计 .....	163
7.4.3 仿真验证 .....	166
7.5 本章小结 .....	171
参考文献 .....	172
<b>第 8 章 高超声速飞行器再入姿态自适应反步终端滑模控制 .....</b>	<b>174</b>
8.1 引言 .....	174
8.2 反步法基本思想 .....	175
8.3 自适应反步终端滑模控制设计 .....	177
8.4 再入姿态自适应反步终端滑模控制仿真验证 .....	185
8.5 本章小结 .....	188
参考文献 .....	188