



国防科技图书出版基金

Attack Guidance and Trajectory Control of Modern Combat Aircraft: Technology and Application

现代战机攻击导引 轨迹控制技术及其应用



吴文海 周思羽 刘锦涛 曲志刚 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

现代战机攻击导引 轨迹控制技术及其应用

Attack Guidance and Trajectory
Control of Modern Combat Aircraft:
Technology and Application

吴文海 周思羽 刘锦涛 曲志刚 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代战机攻击导引轨迹控制技术及其应用/吴文海等
著. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-118-09854-9

I. ①现... II. ①吴... III. ①歼击机—攻击—导
引—研究 IV. ①V271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 008549 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 11 字数 235 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
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	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	陆军
	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		

作者简介

吴文海 江苏泰兴市人,1962年11月出生,1983年毕业于南京航空航天大学飞行器自动控制专业,获得学士学位。之后,一直耕耘于海军航空工程学院青岛校区飞行综合控制专业的教学与科研一线,并先后在空军工程大学,南京航空航天大学导航、制导与控制专业完成全日制硕士、博士学位学习,获得工学硕士、博士学位。1994年破格晋升为副教授,2000年晋升为教授。2004年被评为学院“首届教学名师”,博士生导师;2006年被评为学院“优秀研究生指导教师”,海军首批“中青年学科带头人”;2008年获得军队院校育才“金奖”。现为中国航空学会高级会员,舰载机学术专业委员会委员,中国系统工程学会军事系统工程专业委员会委员。

任教30余年来,主讲了“控制系统仿真”、“自动控制原理”、“现代控制理论”和“飞行控制系统”等课程。2001年主编出版了国内首部《直升机飞行控制系统》教材,2007年主持编著的《飞行综合控制系统》教材被军内外院校选用,2009年主持翻译的《飞行综合驾驶系统导论》教材受到中航工业首席专家范彦铭等同行好评。主持建设的“飞行控制系统”课程,2007年被评为全军百门优质课程,2008年被确认为国家级精品建设课程。

1991年至2000年间,从事过各类先进导航系统的引进工程研究,完成了其与五种机型机载飞行控制系统的交联集成设计,参与地面试验、空中试飞等系统调试工作。指导项目协作单位解决了国产首批领航教练机研制中光学瞄准与实弹打靶试飞中所出现的轰炸瞄准控制延缓、导航系统与机载系统地面交联试验方案制定以及机载系统配置优化等技术难题。参加对外技术谈判、学术交流时,完成国际定货中的技术验收,为发现进口导航系统的技术质量问题,提供技术支持。获得部级科技进步二等奖6项。

2000年后,在军内率先并持续开展舰载机全自动着舰引导、战机自动攻击导引及其指挥引导自动化方面的基础科学研究,并引导所在研究团队向工程实现研究进军。与中航工业、中船工业和中电集团等十多家科研院所攻关协作,主持完成了基础性研究22项。近5年来,在核心刊物上以第一作者发表学术论文40余篇,所带领的研究团队连年获得全军“高新工程”人才特殊津贴。

周思羽 四川成都人,1983年10月生,2002年至2012年于海军航空工程学院获得本科、全日制硕士和全日制博士学位。现为海军航空工程学院青岛校区讲师,从事飞行综合控制、战机自主攻击导引、自主攻击决策等领域的科研与教学工作,立三等功一次。近5年来,完成军内科研项目7项,航空科学基金项目1项。在核心刊物上作为第一作者发表学术论文20余篇,其中5篇论文被EI检索。

刘锦涛 山东莱阳人,1981年7月生,2007年获海军航空工程学院精密仪器及机械专业硕士学位。现为导航制导与控制专业博士研究生,工程师。从事飞行综合控制、战机自主攻击导引、自主攻击决策等领域的科研工作。

曲志刚 山东牟平人,1972年3月出生,先后毕业于上海交通大学、华中科技大学,现为海军航空工程学院青岛校区副教授,主要从事飞行控制和飞行仿真方面的研究工作。获军队科技进步二等奖2项,三等奖2项。连续三年获“高新工程”人才特殊津贴。

前 言

打赢高科技条件下的现代战争,实现作战过程的“互联、互通”,进行体系对抗,需要信息感知、网络传输、指挥控制和作战行动等多方面的关键技术支撑。但是,指挥自动化并非指挥控制自动化,其对体系作战对抗能力的推动作用,迫切依赖于“指挥控制”的自动化,因为只有这样才能实现“互联、互通”向“互操作”的跃升,单一平台作战向多平台体系对抗能力的提升。因此,指挥控制自动化已经成为现代军事技术变革效能提升的关键,没有“指挥控制”自动化的实现,体系作战对抗能力的推进效果也只能如先贤所云:“行百里者半九十”,留下“最后一公里”的遗憾。

战机作战指挥引导控制也不例外。实现战机指挥控制自动化,也就是本书所述的自动/自主攻击导引,是提升战机/机群空战能力的催化剂,是有人、无人战机本机或它机攻击引导轨迹控制能力提升的“最后一公里”。有鉴于此,我们将多年来持续努力取得的一点点研究成果加以总结提炼,凝聚成本书。

本书着力论述了作者在针对机动目标的自动攻击导引律、机动决策算法等方面的理论和工程实现研究成果。内容翔实,覆盖面广,囊括了攻击导引轨迹控制技术的核心内容。这些成果可以运用于有人驾驶战机的辅助决策与控制,以减轻飞行员负担,提高战机的作战效能,同时也能为无人作战飞机的自主式机载智能火力控制与指挥系统设计提供支持,以进一步提升战机的指挥控制自动化水平。

2010年5月18日,中国科学院李天院士在听取本专著所涉研究工作汇报,观看地面半实物仿真验证演示后指出:“该研究成果能使战机增加‘自动攻击导引控制’功能,进一步缩短攻击瞄准时间、提高命中概率。这项成果还可进一步运用于飞机加油时的自动飞行控制,无人战机自动决策与攻击,以及预警机指挥

引导控制;还可运用于战斗机打卫星、打弹道导弹中的载机飞行控制系统设计”。可见,本书是一部对航空武器装备发展具有较大推动作用的专著,具备很强的现实意义和军事应用价值。

本书将主要为相关工程技术与研究人员提供研发设计参考,同时也可以作为国防院校相关专业研究生教材和研究参考资料。

期待本专著面世能为相关技术的自主创新贡献绵薄之力!

恳请同行批评指正!

吴文海

2014 年仲夏

完稿于海军航空工程学院青岛校区

主要符号表

γ	航迹倾斜角
ψ	偏航角
ϕ	滚转角
α	迎角
β	侧滑角
φ	目标方位角/落后角 (Deviation Angle)
q	目标进入角/提前角 (Angle Off)
λ	目标离轴角/目标雷达偏角 (Antena Train Angle, ATA)
ε	目标尾后角 (Angle of Tail, AOT)/视界角 (Aspect Angle, AA)
χ	航向交叉角 (Heading Crossing Angle, HCA)
ρ	大气密度
π	攻击决策解集
π_{opt}	攻击决策最优解
δ_T	油门杆操纵量
$\mathbf{a}_p$	载机指令加速度矢量
$\mathbf{e}$	单位向量
$\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_\theta$	球坐标系的单位矢量
g	重力加速度
s	秒
t	时间
u	控制函数、控制输入
u_i^n	i 机的第 n 种机动决策
$\mathbf{u}_i$	i 机的机动决策集
u_i^a	i 机采用机动决策集 $\mathbf{u}_i$ 中的第 a 种决策
n_x	切向载荷因数 (切向过载)
n_z	法向载荷因数 (法向过载)

rad	弧度
A	机动决策方案集
C_L	气动升力系数
C_D	气动阻力系数
J	目标函数
K	导引系数、增益、通道传动比
R	载机与目标相对距离
S	总优势函数
S_{ac}	机翼面积
S_A	角度优势函数
S_R	距离优势函数
S_V	速度优势函数
S_H	高度优势函数
$S_{u_P^a, u_T^b}$	载机 P 采取机动方案 u_P^a , 目标 T 采取机动 u_T^b 的自然状态下, 潜在空战态势评估值
V	速度
V_θ	切向相对速度
V_r	径向相对速度
Δ	增量
Ω	集
$\ \bullet\ $	欧几里德范数
(x, y)	二维位置坐标
(x, y, z)	三维位置坐标

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.1.1 现代空战过程分析	1
1.1.2 现代空战对载机导引的技术需求	5
1.1.3 载机导引轨迹控制技术的发展脉络	7
1.2 导引轨迹控制的若干概念	9
1.2.1 载机攻击导引	9
1.2.2 轨迹控制若干名词术语	11
1.3 本书主要内容与章节安排	15
参考文献	15
第2章 载机攻击导引轨迹控制问题描述	17
2.1 引言	17
2.2 远距追踪导引问题描述	17
2.2.1 远距追踪导引问题建模	17
2.2.2 远距追踪导引指标	19
2.3 近距占位导引问题描述	20
2.3.1 近距占位导引问题建模	20
2.3.2 近距占位导引指标	23
2.4 小结	25
参考文献	25
第3章 远距追踪导引实现方法研究——导引律研究	27
3.1 引言	27
3.2 经典追踪导引方法分析	27
3.2.1 追踪导引法	27
3.2.2 平行接近导引法	28
3.2.3 比例导引法	28
3.3 比例导引律研究	29
3.3.1 典型比例导引律	29
3.3.2 几种比例导引的分析与比较	30

3.3.3	控制延时对比例导引律捕获性能影响的研究	32
3.4	最优导引律研究	36
3.4.1	问题描述	37
3.4.2	最优导引律设计	37
3.4.3	最优导引律优化研究	40
3.5	非线性预测导引律研究	45
3.5.1	RH 预测控制	46
3.5.2	预测控制参数 t_p 的确定	46
3.5.3	非线性预测追踪导引律研究	46
3.6	非线性滑模导引律研究	57
3.6.1	非线性滑模控制	58
3.6.2	非线性 SMC 导引律设计	60
3.7	非线性 H_∞ 导引律研究	64
3.7.1	非线性 H_∞ 控制理论	64
3.7.2	非线性 H_∞ 导引律	66
3.7.3	仿真算例	68
3.8	导引律比较分析	69
3.9	小结	70
	参考文献	70
第4章	近距离占位导引实现方法研究——机动决策研究	73
4.1	引言	73
4.2	空战机动动作决策集模型及其拓展	73
4.2.1	典型战术动作决策集模型	73
4.2.2	基本机动动作决策集模型	77
4.2.3	基本机动动作决策集模型的拓展及仿真	78
4.3	机动决策方法研究	81
4.3.1	基于对策方法的机动决策	82
4.3.2	基于人工智能的机动决策	84
4.3.3	研究现状分析及改进思路	89
4.4	改进多级影响图机动决策研究	89
4.4.1	传统多级影响图机动决策分析	89
4.4.2	基于随机决策的改进多级影响图机动决策建模	93
4.4.3	基于严格不确定型随机决策的改进多级影响图机动决策	95
4.4.4	基于风险型随机决策的改进多级影响图机动决策	112
4.4.5	决策准则选择算法设计	124

4.5 小结	126
参考文献	126
第 5 章 战机攻击导引工程实现研究	130
5.1 概述	130
5.2 地面飞行仿真验证	131
5.2.1 总体设计	131
5.2.2 导引控制器设计	132
5.2.3 地面飞行仿真验证	145
5.3 空中飞行演示验证	148
5.3.1 系统组成	148
5.3.2 任务功能及各部分组成	148
5.3.3 机体及其它部分	156
5.3.4 实验及结果分析	157
5.4 小结	158
参考文献	158

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.1.1 Analysis of Process of Modern Air Combat	1
1.1.2 Analysis of Technical Demand for Modern Air Combat	5
1.1.3 Development of aircraft guidance and trajectory control	7
1.2 Concepts of Guidance and Trajectory Control	9
1.2.1 Aircraft Offensive Guidance	9
1.2.2 Terms of Trajectory Control	11
1.3 Structure of Book	15
Reference	15
Chapter 2 Problem Discription of Aircraft Attack Guidance and trajectory control	17
2.1 Intruduction	17
2.2 Problem Discription of Tracking Guidance in Long Distance	17
2.2.1 Modeling of Tracking Guidance in Long Distance	17
2.2.2 Index of Tracking Guidance in Long Distance	19
2.3 Problem Discription of Tracking Guidance in Close Distance	20
2.3.1 Modeling of Tracking Guidance in Close Distance	20
2.3.2 Index of Tracking Guidance in Close Distance	23
2.4 Conclusions	25
Reference	25
Chapter 3 Research on Application of Tracking Guidance in Long Distance Research on Guidance Law	27
3.1 Intruduction	27
3.2 Analysis of Classical Method of Tracking Guidance	27
3.2.1 Tracking Guidance Method	27
3.2.2 Parallel Approaching Methos	28
3.2.3 Proportion Guidance Method	28
3.3 Proportion Guidance Law	29
3.3.1 Classical Proportion Guidance Law	29

3.3.2	Comaration and Analysis of Several Guidance Methods	30
3.3.3	Affection of Capture Peformation of Proportion Guidance Law Occured by Control Delay	32
3.4	Optimal Guidance Law	36
3.4.1	Problem Discription	37
3.4.2	Design of Optimal Guidance Law	37
3.4.3	Optimization of Optimal Guidance Law	40
3.5	Nonlinear Prediction Guidance Law	45
3.5.1	RH Prediction Control	46
3.5.2	Parameter Determining of Prediction Control	46
3.5.3	Nonlinear Prediction Tracking Guidance Law	46
3.6	Nonlinear Slid – mode Tracking Guidance Law	57
3.6.1	Nonlinear Slid – mode Control	58
3.6.2	Design of Nonlinear SMC Guidance Law	60
3.7	Nonlinear H_{∞} Guidance Law	64
3.7.1	Theory of Nonlinear H_{∞} Control Theory	64
3.7.2	Nonlinear H_{∞} Guidance Law	66
3.7.3	Simulation Examples	68
3.8	Comarative Analysis Of Guidance Laws	69
3.9	Conclusions	70
	Reference	70

Chapter 4 Research on Application of Maneuver Decision for

	Close – in Guidance	73
4.1	Intruduction	73
4.2	Analysis and Expansion of Maneuvering Decisions Sets	73
4.2.1	Typical Tactical Maneuvering Decision Sets Model	73
4.2.2	Basic Maneuvering Decision Sets Model	77
4.2.3	Expansion and Simulation of Basic Maneuvering Decision Sets Model	78
4.3	Research on Maneuvering Decision – making	81
4.3.1	Maneuvering Decision – making Based on Game Theory	82
4.3.2	Maneuvering Decision – making Based on Artificial Intelligence	84
4.3.3	Analysis of Present Research and Improvement	89
4.4	Stochastic Decision Improved Multi – stage ID Maneuvering Decision – making	89
4.4.1	Analysis of Traditional ID Maneuvering Decision – making	89
4.4.2	Modeling Stochastic Decision Improved Multi – stage ID	93

4.4.3	Improved Multi – stage ID Based on Strict Uncertainty Decision	
	Criteria	95
4.4.4	Improved Multi – stage ID Based on Risk Decision Criteria	112
4.4.5	Decision Criteria Selection Methods Design	124
4.5	Conclusions	126
	Reference	126
Chapter 5 Engineering Design and Application of Auto Offensive		
	Guidance	130
5.1	Introduction	130
5.2	Simulation for Verification Before Flight	131
5.2.1	Chife Design	131
5.2.2	Design of Guidance Controller	132
5.2.3	Simulation	145
5.3	Flight Demonstration	148
5.3.1	System Composions	148
5.3.2	Fuction of Composition	148
5.3.3	Bodyframe and Others	156
5.3.4	Experiment and Result Analysis	157
5.4	Conclusions	158
	Reference	158