

微分博弈论在导弹和 自主系统制导中的应用

[澳] 法尔汉·A·法拉奇 (Farhan A. Faruqi) ◎ 著

邹汝平 张宏 王江 范军芳 ◎ 译

**DIFFERENTIAL GAME THEORY WITH
APPLICATIONS TO MISSILES AND
AUTONOMOUS SYSTEMS GUIDANCE**



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

WILEY

微分博弈论在导弹和 自主系统制导中的应用

**Differential Game Theory with
Applications to Missiles and
Autonomous Systems Guidance**

[澳] 法尔汉·A·法拉奇 (Farhan A. Faruqi) 著

邹汝平 张 宏 王 江 范军芳 译



 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

微分博弈论在导弹和自主系统制导中的应用 / (澳) 法尔汉·A·法拉奇著; 邹汝平等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.12

书名原文: Differential Game Theory with Applications to Missiles and Autonomous Systems Guidance

ISBN 978-7-5682-6393-1

I. ①微… II. ①法… ②邹… III. ①博弈论-应用-导弹制导 ②博弈论-应用-自动控制系统 IV. ①TJ765 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 223946 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-5480

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 15.5

字 数 / 202 千字

版 次 / 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 76.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

译者序

制导技术是制导弹药、战术导弹等精确打击武器装备的核心技术。世界军事强国以颠覆性技术为主体，持续推动新型作战理念的生成与运用，特别是多次局部战争、反恐作战的军事斗争实践，使各国全面加强了对先进制导技术的基础研究和工程应用。

呈现于读者面前的《微分博弈论在导弹和自主系统制导中的应用》是制导控制领域的一本不可多得之作。作者法尔汉·A·法拉奇（Farhan A. Faruqi）教授，先后在英国、美国及澳大利亚的大学与工业部门从事导航制导与控制、目标跟踪、智能系统等研究工作多年，具有丰富的学术研究与工程实践经验。

该书系统总结了微分博弈理论及其在制导领域应用的最新成果。

第1章回顾了导弹制导系统的历史与现实需求，通过囚徒困境、井字游戏两个经典例子阐述了博弈论的基本概念，并分析了微分博弈理论在制导系统中的应用问题。

第2章奠定了全书的理论基础。通过引入欧拉-拉格朗日乘数来合并约束条件，构建了哈密顿函数；给出了庞特里亚金最小值原理和哈密顿-雅克比正则方程，推导出了最优化的必要与充分条件。导出了线性系统二

次型性能指标 (LQPI), 这一工具也贯穿了全书剩余部分。最后讨论了 LQPI 在双方和三方博弈制导问题上的应用。本章附录提供了矢量/矩阵代数及其微分运算法则。

第 3 章着重运用 LQPI 方法研究两方博弈制导问题。建立了三维交战运动学模型, 导出了性能指标和基于博弈论的制导问题的解。借助黎卡提微分方程实现制导律的反馈形式。最后探讨了最优制导、基于博弈论的制导、比例导引以及增强型比例导引之间的关联性。本章附录给出了黎卡提微分方程求解的相关内容。

第 4 章提出并研究了三方博弈制导的一个特定情况, 即目标意识到自己被攻击导弹锁定时, 发射防御导弹对该攻击导弹进行拦截, 而目标自己进行规避机动。其中, 防御导弹只负责拦截攻击导弹, 而攻击导弹则扮演双重角色, 即必须在躲避防御导弹的同时实现对目标的拦截。本章建立了数学模型, 得出了三方博弈反馈制导律, 还探索了人工智能与博弈、制导的融合。附录给出了黎卡提方程的推导与解析解的相关内容。

第 5 章建立了一套 4 自由度制导控制系统仿真模型, 附录提供了模型的若干细节。

在上述内容基础上, 第 6 章进行三方博弈制导仿真研究。详细讨论了仿真结果, 并考虑了通过人工智能技术来增强博弈各方能力的情况。

该书以最优控制为基本工具, 系统阐述了微分博弈的基本理论, 研究了基于微分博弈的先进制导律。全书内容完整, 推导严谨, 在阐述基本概念的同时, 也抓住了制导问题的物理意义。其中涉及拦截弹、目标及防御弹的三方博弈问题研究, 以及将博弈、制导、人工智能融合为一体的研究思路, 值得学习与借鉴。

本译著可供装备技术论证、研制部门的高级工程技术人员参考, 也可作为高等学校兵器、航空航天、控制等专业研究生的教学参考书。

前 言

这本《微分博弈论在导弹和自主系统制导中的应用》著作是作者多年来在英国、美国及澳大利亚等国的空间发展与防御组织从事导弹制导控制系统研究的结晶，部分内容被用于美国与澳大利亚本科生与研究生教学。本书旨在引导航天工程领域与控制工程领域的专家学者对本领域新近发展的关注。目前已经有很多杰出的著作对经典的导弹制导理论进行过讨论。在本书中，作者从已有的最优博弈理论出发，紧扣导弹制导这个主题。显然，经典的制导方式与这种方法有着紧密的联系。实际上，本书第3章论证了经典制导方法在某种意义上是现代最优博弈控制方法的特例。这种方法给专家学者在系统分析与综合权衡方面提供了更为广阔的设计选择——以便更为有效地处理当前与未来导弹或飞行器在战斗情景中，将持续出现不断演化的挑战。

正如第1章所述，博弈理论起源于经济学、商业、政治学与社会科学领域，目前已发展成可被用来解决工程实践研究与战斗任务系统中出现的复杂且具有挑战性的难题。工程领域以外的读者与实践者也可发现本书的效用，尤其是严格阐述微分博弈理论基础的第2章。这为对经济学、商业以及其他领域感兴趣的读者提供了一个有效的知识背景。博弈论在解决实

际问题、设计算法以及多领域应用方面发展迅速，进化论和量子博弈理论、随机博弈以及医学诊断应用是这一趋势的一些范例。本书在微分博弈论方面提供了正式且集成的表述，并为工程、数学及科学专业的本科生与研究生提供了核心背景知识。第 6 章给出了导弹制导的仿真例程，并提供了仿真程序（MATLAB 的.m 文件），以供读者作为随手练习和涵盖本书内容的强化性学习之用。可通过访问 www.wiley.com/go/faruqi/game 网站来获取相关内容。

本书聚焦于微分博弈论在导弹制导问题中的应用，与此同时，其他应用，包括自动控制与智能机器控制、无人机编队策略、无人机或飞行器避障、监视与侦察、电子对抗与电子反对抗部署，也与此紧密相关，而且正在成为正式的研究科题。希望学生、教师、工厂或行政机关的实践工程师以及其他领域对此感兴趣的读者，能够领悟本书所兼有的趣味性与挑战性。

法尔汉·A·法拉奇

致 谢

我诚挚地感谢澳大利亚防务科技集团（DST, Australia）对本书成稿所给予的帮助、支持与鼓励，正是这些帮助、支持与鼓励，使本书的成稿成为可能。同时，感谢武器与战斗系统部（WCSD）的领导与员工对本书成稿所给予的支持。本书撰写过程中，得到了许多他人的帮助与宝贵的建议。在此，我要特别感谢 Jim Repo（前 DST 集团员工）和 Arvind Rajagopalan（DST 集团）的帮助、意见与建议。这些帮助、意见与建议对本书成稿起到了至关重要的作用，尤其体现在制导仿真测试平台方面。我要感谢 DST 集团中从事制导与控制技术实践的员工们，我在过去的工作学习中与他们交流，收获颇丰。我要感谢 DST 集团的 Sanjeev Arulampalam 博士、Mark Krieg 博士和 Paul Heuer 先生，他们审阅了本书的技术内容，并提出了相关评价、意见与建议。我要感谢南澳大利亚大学和阿德莱德大学的教师与学生们在学术方面所提供的帮助，他们在本书主题博弈论方面提供了实用的讨论与启发式的思路。最后，感谢我的女儿 Nasheed Qamar 完成了艰巨的编辑工作，并提出了很多意见与建议。

法尔汉·A·法拉奇博士

目 录

第 1 章 微分博弈论及在导弹制导中的应用	1
术语表	1
缩写表	2
1.1 引言	3
1.2 博弈论的概念与定义	5
1.3 博弈论问题范例	6
1.3.1 囚徒困境	6
1.3.2 井字游戏	8
1.4 博弈理论概念推广	10
1.4.1 离散时间博弈	11
1.4.2 连续时间微分博弈	12
1.5 微分博弈论在导弹制导中的应用	13
1.6 两方及三方追逃博弈	14
1.7 本书章节概要	15
参考文献	17

第2章 最优控制与微分博弈论	21
术语表	21
缩写表	22
2.1 引言	22
2.2 函数的最优（最小或最大）微积分	24
2.2.1 最优状态充要条件的存在性	24
2.2.2 利用拉格朗日乘数的等式约束稳态最优控制问题	25
2.2.3 具有二次型成本函数的线性系统稳态最优控制问题	28
2.3 动态最优控制问题	30
2.3.1 给定初始和终端条件的最佳控制	30
2.3.2 边界（横截性）条件	31
2.3.3 最优性的充分条件	36
2.3.4 具有固定初始条件和不定最终时间的连续最优控制	38
2.3.5 哈密顿函数的其他性质	43
2.3.6 不等式控制约束的连续最优控制——庞特里亚金最小值 （最大值）原理	44
2.4 线性动态系统的最优控制	47
2.5 微分博弈论在最优控制中的应用	49
2.5.1 线性动态系统的两方博弈制导理论	50
2.5.2 线性动态系统的三方博弈制导理论	54
2.6 多方交战微分博弈论的拓展	60
2.7 总结与结论	61
参考文献	62
附录	64
A2.1 矩阵代数和微积分的简要回顾	64
A2.2 特征方程与特征值	65
A2.3 线性、双线性及二次型微分	65

A2.4	标量函数对矢量的偏微分	66
A2.5	矢量函数对矢量的偏微分	66
A2.6	海森矩阵	67
A2.7	标量二次与双线性函数对矢量的偏微分	68
A2.8	标量函数的第一和第二变分	69
A2.9	用以确定标量函数性质 (最小/最大值) 的第一和 第二变分的性质	70
A2.10	线性系统动力学模型	74
第 3 章	应用于两方导弹制导的微分博弈论	77
	术语表	77
	缩写表	79
3.1	引言	79
3.2	交战运动学模型的发展	83
3.2.1	n 对 m 个飞行器之间的相对运动	84
3.2.2	向量矩阵表达	84
3.3	两方博弈的最优拦截弹/目标制导	86
3.3.1	微分博弈性能指标的构建	86
3.3.2	加权矩阵 S , R^p 和 R^e	89
3.3.3	博弈理论制导问题的解	90
3.4	黎卡提微分方程的解	92
3.4.1	矩阵黎卡提微分方程的解	92
3.4.2	状态反馈制导增益	93
3.4.3	矢量黎卡提微分方程 (VRDE) 的解	94
3.4.4	矢量黎卡提微分方程在特殊情况下的解析解	95
3.4.5	博弈论制导的机理	96
3.5	博弈论下最优制导的扩展	97
3.6	比例导引与增强型比例导引制导的关系	99

3.7 结语	100
参考文献	101
附录	102
A3.1 检验矩阵 S 的半正定性	102
A3.2 黎卡提微分方程的推导	103
A3.3 求解矩阵黎卡提微分方程	104
A3.4 矢量黎卡提微分方程的解	114
A3.5 小角度和速率的视线角速度	118
第 4 章 三方微分博弈论在导弹制导问题中的应用	121
术语表	121
缩写表	122
4.1 引言	122
4.2 交战运动学模型	124
4.3 三方微分博弈问题及其解	127
4.4 黎卡提微分方程求解	131
4.4.1 矩阵黎卡提微分方程 (MRDE) 求解	131
4.4.2 矢量黎卡提微分方程 (VRDE) 求解	133
4.4.3 性能指标 (PI) 加权的进一步思考	136
4.4.4 博弈的终止条件和结果	137
4.5 探讨与结论	137
参考文献	138
附录	139
A4.1 黎卡提方程的推导	139
A4.2 黎卡提微分方程的解析解	141
A4.3 状态反馈增益	142
A4.4 干扰输入	143
A4.5 制导干扰输入	145

第 5 章 导弹制导与控制系统的四自由度仿真模型·····	147
术语表·····	147
缩写表·····	148
5.1 引言·····	148
5.2 交战运动学模型的推导·····	149
5.2.1 多飞行器交战的平移运动学·····	149
5.2.2 矢量/矩阵表示·····	150
5.2.3 旋转运动学：相对距离，距离变化率，视线角度和 视线角速率·····	151
5.3 飞行器导航模型·····	153
5.4 飞行器载体角度和航迹角度·····	156
5.5 飞行器自动驾驶仪动力学·····	158
5.6 空气动力学分析·····	159
5.7 传统制导律·····	160
5.7.1 比例导引制导·····	160
5.7.2 增强型比例导引（APN）制导·····	161
5.7.3 最优制导和博弈论制导·····	161
5.8 总的状态空间模型·····	162
5.9 结论·····	162
参考文献·····	163
附录·····	164
A5.1 状态空间动态模型·····	164
A5.2 空气动力与运动方程·····	166
A5.3 计算命中过程导弹航向角·····	170
第 6 章 三方微分博弈导弹制导仿真研究·····	175
术语表·····	175
缩写表·····	176

6.1 引言	176
6.2 交战运动学模型	177
6.3 博弈论问题与求解	180
6.4 仿真结果讨论	183
6.4.1 博弈论制导演示仿真	183
6.4.2 包含干扰输入的博弈论制导仿真	187
6.5 本章结论	189
6.6 有益的未来研究	190
参考文献	190
附录	192
A6.1 黎卡提方程的解析解	192
A6.2 源程序	193
专业术语中英文对照表	223

第 1 章

微分博弈论及在导弹 制导中的应用

术语表

k : 一次博弈（在离散博弈中）

P : 一次博弈中参与者的集合

U : 所有参与者的可用策略集合

U^i : 参与者 i 的可用策略集合

$J_{ij}(\cdots)$: 参与方 ij 的目标函数

X_k : k 阶段博弈集合的当前状态

U_k : k 阶段参与者的可用策略集合

$u_{ij}(k)$: k 阶段参与者 i 针对参与者 j 的策略矢量（输入矢量）

C_k : k 阶段的约束条件集合

G_k : 离散时间博弈中要素集合

t : 在连续时间（微分）博弈中的时间

X_t : t 时刻的博弈状态的集合

U_i : t 时刻的策略集合

$u_{ij}(t)$: t 时刻参与者 i 针对参与者 j 的策略矢量 (输入矢量)

C_i : t 时刻的约束条件集合

G_i : 连续时间 (微分) 博弈中要素集合

$x_{ij}(t)$: t 时刻, 参与者 i 与参与者 j 的相对状态矢量

$u_i(t)$: 参与者 i 的策略矢量 (输入矢量)

F : 状态系数矩阵

G : 输入系数矩阵

Q : 当前相对状态下的性能指标加权矩阵

S : 最终相对状态下的性能指标加权矩阵

$\{R_i, R_j\}$: 输入的性能指标加权矩阵

缩写表

APN: 增强型比例导引

CF: 成本函数

LQPI: 线性系统二次型性能指标

OF: 目标函数

PI: 性能指标

PN: 比例导引

UF: 效用函数

4-DOF: 4 自由度

1.1 引言

在过去的几十年中, 已经出版了大量有关博弈论主要方面的书籍和刊物。其中比较著名的是由约翰·冯·诺伊曼 (John von Neumann) 和奥斯卡·摩根斯坦 (Oskar Morgenstern) 所著的《博弈与经济行为》(Games and Economic Behaviour)^[1]。从那时起, 有关理论成果和应用的出版物的数量有了显著的增加。前后共有 8 项诺贝尔经济学奖颁给了博弈论的研究人员, 包括在 1994 年获奖的约翰·海萨尼 (John Harsanyi)、约翰·纳什 (John Nash) 和莱茵哈德·泽尔腾 (Reinhard Selten), 他们在非合作博弈的分析上取得了开创性的成果; 在 2005 年获奖的罗伯特·奥曼 (Robert Aumann) 和托马斯·谢林 (Thomas Schelling), 他们通过博弈论分析改进了人们对冲突和合作的理解; 还有在 2007 年获奖的里奥尼德·赫维茨 (Leonid Hurwicz)、埃里克·马斯金 (Eric Maskin) 和罗杰·迈尔森 (Roger Myerson), 他们奠定了机制设计理论的基础。上述提及的及其他有关博弈论的著作, 请参见参考文献[2-7]。

许多作者已经研究了合作博弈论在自主系统中的应用, 包括对潜在威胁的监视与侦察, 以及对区域的持续封锁; 有关本书及相关主题请参见本章末尾部分^[8-15]。通常, 战场上的(潜在)目标和威胁都十分智能且可移动, 可采用对抗策略来避免被侦测、追踪或打击。两方的行动可以在博弈设置中制定, 或者更确切地说, 可以通过追/逃微分博弈(有多个参与者)来制定。值得注意的是, 微分博弈在作战系统中的应用最早是由鲁弗斯·菲利普·艾萨克斯 (Rufus P. Isaacs) 在研究追/逃博弈时提出的^[8]。当时的大多数理论成果都集中在双角色博弈上, 即只有一个追者和一个逃者; 而现在的博弈已经扩展至多角色参与的情景。

自第二次世界大战以来, 人们就在使用从导弹发射点远距离拦截目标(通常是一架飞机)的制导导弹。导弹制导系统用于纠正其初始瞄准误差,