

信息处理与智能计算类著作
国家自然科学基金资助项目

直觉模糊核匹配追踪理论 及应用

*Intuitionistic Fuzzy
Kernel Matching Pursuit*

雷 阳 孔韦韦 尤著宏 等著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

信息处理与智能计算类著作

国家自然科学基金资助项目

直觉模糊核匹配追踪 理论及应用

雷 阳 孔韦韦 尤著宏 余晓东 著
刘 佳 张明书 任 聪

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了直觉模糊核匹配追踪理论与方法在模式识别、图像信息融合等领域的应用。全书分为三个部分,共13章。第1部分为基础知识部分(第1~5章),第1章介绍目标识别的背景、意义、发展现状及直觉模糊集、核匹配追踪的概况;第2章介绍直觉模糊集的定义、性质及基本运算;第3章介绍直觉模糊集非隶属度函数的几种规范性确定方法;第4章介绍核匹配追踪的基本理论知识;第5章介绍弹道中段目标的弹道特性、自旋及进动特性、雷达回波特性等。第2部分为直觉模糊理论及目标识别应用(第6~8章),第6章介绍直觉模糊推理的目标识别方法、自适应直觉模糊推理的目标识别方法;第7章介绍直觉模糊 CLOPE 的参数优选方法、特征加权的直觉模糊 c 均值聚类的目标识别方法;第8章介绍基于人工蜂群优化的直觉模糊核聚类弹道目标识别方法;第3部分为核匹配追踪理论及目标识别应用(第9~13章),第9章介绍基于直觉模糊核匹配追踪的弹道目标识别方法。第10章介绍基于粒子群优化的直觉模糊核匹配追踪的目标识别方法和基于弱贪婪策略的随机直觉模糊核匹配追踪的目标识别方法;第11章介绍基于目标函数的直觉模糊 c 均值聚类的核匹配追踪算法及弹道中段目标识别方法;第12章介绍基于直觉模糊核匹配追踪集成的弹道目标识别方法。第13章介绍基于 ECOC 核匹配追踪的弹道目标识别方法。

本书可作为高等院校计算机、信息等专业高年级本科生或研究生计算智能课程的教材或教学参考书,也可供从事人工智能、模式识别等领域研究的教师、研究生以及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直觉模糊核匹配追踪理论及应用/雷阳等著. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.3

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5202 - 3

I. ① 直… II. ① 雷… III. ① 人工智能-研究 IV. ① TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 008344 号

策划编辑 李惠萍

责任编辑 唐小玉 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14.5

字 数 341千字

印 数 1~2000册

定 价 35.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5202 - 3/TP

XDUP 5504001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前言

近年来,多传感器信息融合理论及其应用技术得到了快速发展,其中基于信息融合的目标识别技术是国内外一个重要的研究热点。在现代信息化战争中,空天目标识别是防空反导中的一项关键技术,但传感器受到多种因素干扰的影响,所获得的数据是不精确、不完整、不可靠的,往往难以发挥效用。直觉模糊集是对 Zadeh 模糊集的一种扩充与发展,同其他理论进行有效融合后,可用于解决复杂环境下空天目标的识别问题。

本书汲取直觉模糊集、核匹配追踪、神经网络、聚类、核方法、粒子群、弱贪婪、集成学习、免疫克隆选择等一系列人工智能理论的优势,有效融合、大胆尝试,探索和挖掘其意想不到的潜在价值,形成以直觉模糊核匹配追踪融合理论为主线的系列智能融合理论,进而从新的视角探索和建立空天目标识别方法模型。

本书共分三个部分,其中前两部分内容是基于直觉模糊理论的研究及其空天目标识别领域的应用,提供了四种直觉模糊非隶属度函数的规范性确定方法,建立了直觉模糊推理系统和基于 T-S 型自适应直觉模糊推理系统,进而提出了相应的目标识别方法;第三部分内容是基于核匹配追踪理论的研究及其在空天目标识别领域的应用、基于直觉模糊和核匹配追踪有效结合的理论研究及其在空天目标识别领域的应用,给出了一种基于人工蜂群算法优化的直觉模糊核聚类算法,并将其用于空天目标识别。

本书是系统介绍关于直觉模糊核匹配追踪理论的目标识别的著作,是作者在“国家自然科学基金项目”(No. 61309008, No. 61309022)、“国家级信息保障技术重点实验室开放基金课题”(No. KJ-13-108)、“全国博士后基金面上项目二等资助”(No. 2014M552718)、“陕西省自然科学基金项目”(No. 2013JQ8031, No. 2014JQ8049)、“武警工程大学自然研究基础基金”(No. WJY-201214, No. WJY-201312, WJY-201414)资助下系列研究成果的汇集,书中主要内容取自作者研究团队近年来发表的 20 余篇学术论文和数篇博士、硕士学位论文,在此对他们的辛勤工作表示诚挚的感谢。在本书撰写过程中,还参考了国内外大量的文献和资料,众多学者们的研究成果是本书不可或缺的素材,在此一并致以诚挚的感

谢。此外,本书的出版还得到了“军队 2110 工程”建设项目的资助。

本书内容新颖,逻辑严谨,语言通俗,体例合理,注重基础,面向应用,可作为高等院校计算机、信息等专业高年级本科生或研究生计算智能课程的教材或教学参考书,也可供从事模式识别、人工智能等领域研究的教师、研究生以及科研人员参考。

全书分三部分共 13 章,第 1 部分为基础知识(第 1~5 章),第 2 部分为直觉模糊理论及目标识别应用(第 6~8 章),第 3 部分为核匹配追踪理论及目标识别应用(第 9~13 章)。

本书由雷阳主编,参加编撰工作的有:孔韦韦副教授(第 7~9 章)、尤著宏教授(第 1 章、第 5、6 章)、余晓东讲师(第 10、11 章)、张明书副教授(第 12、13 章)、刘佳副教授(第 2、3 章)、任聪讲师(第 4 章)等课题组成员。

目标识别技术是近年来信息处理领域内的热点研究问题,其理论及应用研究受到国内外众多学者的关注,是当前研究的一个热点领域,本书汇集的研究成果只是冰山一角,只能起抛砖之效,加之作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2018 年 10 月

目 录

第 1 部分 基础知识

第 1 章 概述	3	3.1.2 IFS 非隶属度函数的计算公式	33
1.1 弹道目标识别的研究背景及目的意义	3	3.2 基于三分法的 IFS 非隶属度函数	
1.1.1 研究背景	3	确定方法	33
1.1.2 研究目的及意义	4	3.2.1 三分法非隶属度函数的确定方法	34
1.2 目标识别	6	3.2.2 实例分析	36
1.3 直觉模糊集	11	3.3 基于优先关系定序法的 IFS 非隶属度	
1.4 核匹配追踪	12	函数确定方法	37
参考文献	14	3.3.1 优先关系定序法非隶属度函数的	
第 2 章 直觉模糊集	22	确定方法	37
2.1 直觉模糊集的定义及其基本运算	22	3.3.2 实例分析	39
2.2 直觉模糊关系及其性质	23	3.4 基于对比平均法的 IFS 非隶属度函数	
2.2.1 直觉模糊关系	23	确定方法	41
2.2.2 直觉模糊关系的自反性	25	3.4.1 对比平均法非隶属度函数的	
2.2.3 直觉模糊关系的对称性	25	确定方法	41
2.2.4 直觉模糊关系的传递性	25	3.4.2 实例分析	43
2.3 直觉模糊合成运算	26	3.5 基于绝对比较法的 IFS 非隶属度函数	
2.3.1 直觉模糊集 T -范数与 S -范数	26	确定方法	44
2.3.2 直觉模糊关系的合成运算	27	3.5.1 绝对比较法非隶属度函数的	
2.4 直觉模糊条件推理	28	确定方法	44
2.4.1 条件式直觉模糊推理	28	3.5.2 实例分析	46
2.4.2 多重式直觉模糊推理	29	本章小结	47
2.4.3 多维式直觉模糊推理	29	参考文献	48
2.4.4 多重多维式直觉模糊推理	30	第 4 章 核匹配追踪	49
本章小结	30	4.1 核方法理论	49
参考文献	30	4.2 基本匹配追踪算法	50
第 3 章 IFS 非隶属度函数的规范性		4.3 平方间隔损失函数及其拓展	51
确定方法	32	4.4 核匹配追踪算法	51
3.1 IFS 非隶属度函数的规范性确定方法	32	本章小结	52
3.1.1 IFS 隶属度函数的确定方法	32	参考文献	52

第 5 章 弹道中段目标特性研究及建模	53	5.4 弹道中段目标的雷达回波特性	61
5.1 弹道中段目标识别	53	本章小结	65
5.2 弹道中段目标的弹道特性	55	参考文献	66
5.3 弹道中段目标的自旋及进动特性	59		

第 2 部分 直觉模糊理论及目标识别应用

第 6 章 基于直觉模糊推理的目标识别方法	69	7.4.1 修正划分的直觉模糊度	96
6.1 引言	69	7.4.2 直觉模糊 CLOPE 算法的 Profit 判决函数	98
6.2 空天目标识别问题描述	70	7.4.3 基于直觉模糊 CLOPE 的参数优选方法	98
6.3 基于直觉模糊推理的典型目标识别方法	71	7.5 基于特征加权的直觉模糊 c 均值聚类算法	99
6.3.1 直觉模糊推理系统	71	7.6 仿真实验结果及分析	100
6.3.2 状态变量属性函数	73	7.6.1 基于特征加权的直觉模糊 c 均值聚类算法实验	101
6.3.3 推理规则及合成算法	76	7.6.2 特征加权直觉模糊聚类算法的时间复杂度	102
6.3.4 解模糊算法	78	7.6.3 直觉模糊聚类算法的目标识别仿真实验	102
6.3.5 仿真实例	78	本章小结	104
6.3.6 讨论	81	参考文献	104
6.4 基于自适应直觉模糊推理的目标识别方法	81	第 8 章 基于直觉模糊核聚类的弹道目标识别方法	105
6.4.1 自适应神经网络——直觉模糊推理系统	81	8.1 引言	105
6.4.2 模型结构	82	8.2 直觉模糊核聚类算法	106
6.4.3 网络学习算法	84	8.2.1 基于核的直觉模糊欧式距离度量	106
6.4.4 仿真实例	86	8.2.2 直觉模糊核聚类算法的实现	108
6.4.5 结果对比分析	88	8.2.3 算法复杂度分析	111
本章小结	89	8.2.4 实验与分析	111
参考文献	89	8.3 基于人工蜂群优化的直觉模糊核聚类算法	117
第 7 章 基于直觉模糊聚类的目标识别方法	91	8.3.1 人工蜂群算法	118
7.1 引言	91	8.3.2 人工蜂群收敛性分析	119
7.2 聚类	92	8.3.3 ABC-IFKCM 算法的实现	121
7.2.1 聚类概念与聚类过程	92	8.3.4 算法复杂度分析	122
7.2.2 聚类算法类别	92		
7.3 模糊 c 均值聚类算法	93		
7.3.1 数据集的 c 划分	93		
7.3.2 模糊 c 均值聚类算法	94		
7.4 基于直觉模糊 CLOPE 的参数优选方法	96		

8.3.5 实验与分析	122	参考文献	129
本章小结	128		

第3部分 核匹配追踪理论及目标识别应用

第9章 基于直觉模糊核匹配追踪的弹道		10.3 基于弱贪婪策略的随机直觉模糊核	
目标识别方法	133	匹配追踪算法	156
9.1 引言	133	10.3.1 弱贪婪策略理论	156
9.2 匹配追踪基本理论	134	10.3.2 随机直觉模糊核匹配追踪算法的实现	156
9.2.1 基本匹配追踪算法及其后拟合算法	134	10.3.3 算法复杂度分析	158
9.2.2 平方间隔损失函数及其拓展	135	10.3.4 实验与分析	158
9.2.3 核匹配追踪	135	本章小结	165
9.3 直觉模糊核匹配追踪	136	参考文献	165
9.3.1 基于平方间隔损失函数的直觉模糊核匹配追踪学习机	136	第11章 基于直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪	
9.3.2 基于任意损失函数的直觉模糊核匹配追踪学习机	137	弹道中段目标识别方法	167
9.4 直觉模糊参数选取	138	11.1 引言	167
9.5 仿真实验	138	11.2 基于目标函数的直觉模糊 c 均值聚类算法	168
9.5.1 实际样本高精度识别	138	11.3 基于目标函数的直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪算法	169
9.5.2 线性样本高精度识别	140	11.4 实验结果与分析	171
9.5.3 同心圆样本高精度识别	140	11.4.1 Iris 样本的 IFCM-KMP 分类实验	172
9.5.4 IFKMP 算法的时间复杂度	141	11.4.2 IFCM-KMP 算法有效性测试	173
9.5.5 对空天目标类别的识别测试	142	11.4.3 IFCM-KMP 算法时间复杂度	175
本章小结	144	11.5 基于快速核最优变换与聚类中心特征提取方法	176
参考文献	144	11.6 基于 IFCM-KMP 弹道中段目标识别的仿真实验及分析	178
第10章 基于改进直觉模糊核匹配追踪的		本章小结	180
弹道目标识别方法	146	参考文献	181
10.1 引言	146	第12章 基于直觉模糊核匹配追踪集成的	
10.2 粒子群优化的直觉模糊核匹配追踪算法	147	弹道目标识别方法	182
10.2.1 粒子群优化算法原理	147	12.1 引言	182
10.2.2 PS-IFKMP 算法的实现	148	12.2 直觉模糊核匹配追踪集成算法	183
10.2.3 算法复杂度分析	149	12.2.1 集成学习系统	183
10.2.4 算法参数设置	150		
10.2.5 实验与分析	150		

12.2.2 集成直觉模糊核匹配追踪学习机的理论分析	184	13.2 基于 Hadamard 纠错码的核匹配追踪多类分类算法	203
12.2.3 基于直觉模糊核匹配追踪集成学习机的实现	186	13.2.1 纠错输出编码思想	203
12.2.4 算法复杂度分析	187	13.2.2 基于 ECOC 框架的核匹配追踪学习机的理论分析	205
12.2.5 实验与分析	187	13.2.3 Hadamard 纠错码结合核匹配追踪的多类分类算法	206
12.3 基于混合选择策略的直觉模糊核匹配追踪集成算法	192	13.2.4 算法复杂度分析	207
12.3.1 算法设计	192	13.2.5 实验与分析	208
12.3.2 子分类器的生成	193	13.3 基于免疫克隆选择编码的核匹配追踪多类分类方法	211
12.3.3 基于 k 均值聚类的修剪方法	194	13.3.1 免疫克隆选择算法	211
12.3.4 子分类器的动态选择与循环集成	195	13.3.2 算法设计	212
12.3.5 实验与分析	197	13.3.3 算法流程	217
本章小结	199	13.3.4 算法复杂度分析	218
参考文献	200	13.3.5 实验与分析	218
第 13 章 基于 ECOC 核匹配追踪的弹道目标识别方法	202	本章小结	222
13.1 引言	202	参考文献	222
		致谢	224

第 1 部分

基 础 知 识

第1章 概 述

弹道目标识别是模式识别领域研究的热点问题，也是关乎我国空天安全的现实难题。本书通过融合直觉模糊集、核匹配追踪等相关理论的优势，对弹道中段目标识别方法进行了研究，提出了新的弹道目标识别方法，以获得更有效的识别结果。

本章的主要内容包括本书的研究背景、研究目的及作用意义；国内外直觉模糊集、核匹配追踪、弹道目标识别等相关领域的发展研究现状。

1.1 弹道目标识别的研究背景及目的意义

1.1.1 研究背景

弹道导弹是一种可从水、陆发射，按固定轨道高速飞行的攻击性武器，具备速度快、射程远、精度高、突防能力强等优点，已成为局部战争的“撒手锏”武器。据不完全统计，全世界目前有近 40 个国家及地区拥有战术弹道，现役弹道导弹数量更是高达 1 万枚以上。甚至可以说，世界上没有一个国家不是处在弹道导弹的打击威胁之下^[1]。如图 1.1 所示，目前，我国周边地区拥有超过 1000 km 射程弹道导弹的国家就分别有俄罗斯、印度、伊朗、朝鲜、巴基斯坦以及沙特阿拉伯 6 个国家，拥有射程低于 1000 km 的国家有哈萨克斯坦、越南、韩国、中国台湾等 19 个国家和地区。尤其是印度、中国台湾等国家和地区弹道导弹的相继研制和列装，已对我国战略防御环境构成了严重威胁。印度射程为 3500 km 的“烈火-III”型弹道导弹可覆盖我国包括首都在内的大部分区域，其于 2012 年 4 月 29 日首次试射成功的“烈火-VI”型弹道导弹射程达到 5000 km，打击范围覆盖我国全境。

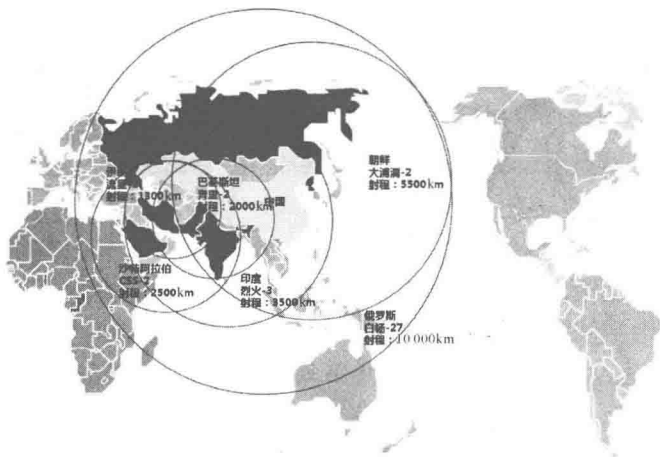


图 1.1 周边国家和地区弹道导弹对我国国土覆盖示意图

由此可见，我国在地缘上已处于拥有并部署弹道导弹的国家、地区的重重包围之中，而且部分国家和地区的矛头直指我国。随着弹道导弹技术的进一步扩散以及不友好国家和地区弹道导弹武器系统的发展，我国面临弹道导弹的威胁正在不断加剧，并有多元化、多方向、现实与潜在并存、受威胁地域不断扩大等特点。这无疑对我国的空天安全构成了现实且紧迫的威胁。

值得强调的是，2015 年 9 月 3 日，纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 70 周年大会在北京隆重举行。习近平总书记在短短十多分钟的讲话里 18 次提及和平，并语重心长地讲到：“今天，和平与发展已成为时代主题，但世界仍很不太平，战争的达摩克利斯之剑依然悬在人类头上。”作为祖国和人民的忠诚战士，我们同样珍爱和平，但我们更要做到能打仗，打胜仗！为此，在“空天一体，攻防兼备”的战略指导方针下，深入研究弹道导弹防御技术，并逐步建立完善的弹道导弹防御体系，已势在必行，刻不容缓。

本书所涉及的研究内容正是在此背景下展开的，作者结合直觉模糊集、核匹配追踪等理论各自的优势，从新的视角研究空天目标识别方法，对我国战略预警、防空反导系统的建设具有重要理论意义和应用价值。

1.1.2 研究目的及意义

纵观弹道导弹防御技术的发展历程，从 20 世纪 60 年代以来，目标群中的真弹头识别问题一直是其研究热点和核心难题之一^[2]。弹道中段的飞行时间约占整个飞行时间的 80%~90%，是识别真弹头并拦截的重要阶段。

由于缺乏大气的过滤作用，弹头在中段飞行过程中会与诱饵、碎片等目标以相同速度在近似轨道上运动。因此，在该阶段进行真假弹头识别变得极为困难。如图 1.2 所示，以一个射程 2317 km 的中程弹道导弹为例^[3]，其飞行时长为 879 s，发射 20 s 后预警卫星发现目标，并警示远程预警雷达对其进行跟踪；340 s 左右地基多功能跟踪雷达与远程预警雷达进

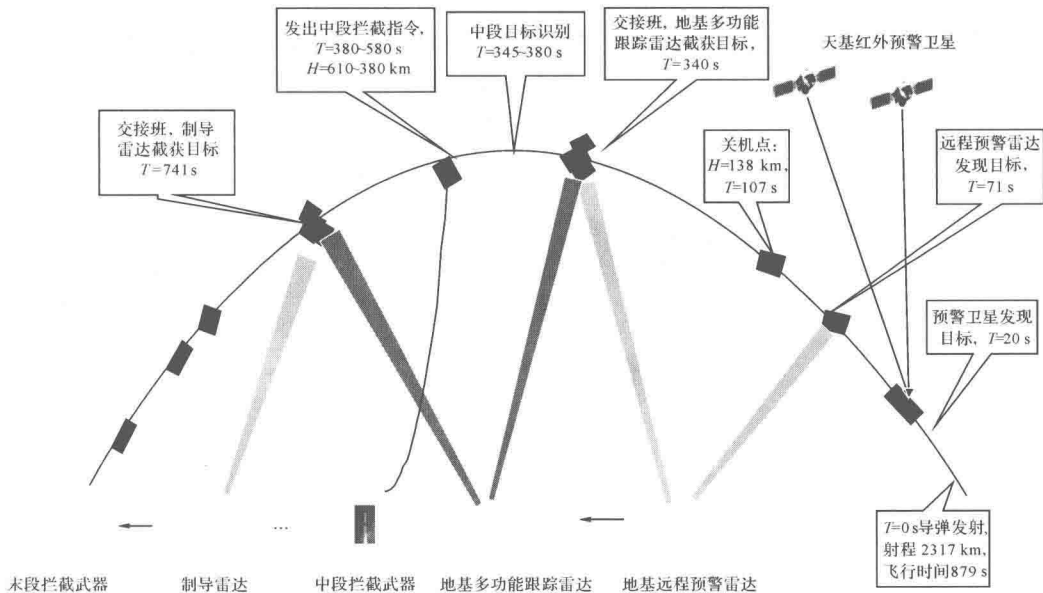


图 1.2 反导作战过程示意图

行交接班;在345~380 s之间,地基多功能雷达负责对弹道目标群进行连续跟踪与识别,并在此基础上完成反导作战决策;在380~580 s之间,指控系统发出拦截弹发射指令,实施中段拦截。从反导作战过程的时序上看,留给反导系统进行目标识别的时间只有短短35 s左右。由于没有空气阻力,诱饵、母舱、碎片残骸等假目标均会在弹道附近伴随弹头高速运动,形成了一个几千米范围的目标群。要在这么短的时间内从这么庞大的目标群中识别出真弹头,其难度可想而知。

美国军事理论家 Drall 曾说过:“我们不知道在大气层外如何分辨出真假目标,从一开始这个难题就为反导武器系统的研制带来极大的困难。”由此可知,弹道中段目标的识别问题是公认的技术难题之一,也是现阶段防空反导系统研究的技术瓶颈,这个瓶颈的突破程度很大程度上决定了未来导弹防御系统的发展前途及方向。因此,本书主要针对弹道中段目标的识别问题展开研究。

随着战争样式的日益多样化及各种高性能电子对抗装备的综合使用,战场环境越发复杂恶劣,传感器所获得的目标数据也通常都是不精确、不完备和不确定的。尤其是弹道导弹在中段飞行时,攻击方可以从几何特性、雷达特性以及红外特性等多个方面进行伪装,而防御方的雷达探测系统要在数千公里之外对这些在识别特性上只有细微差别的目标予以区分识别。显然,这种识别具有极大的不确定性。传统的目标识别方法大多是基于理想条件,信息融合缺乏自学习性、自适应性及泛化能力,且鲁棒性差,其研究成果往往难以满足复杂电磁干扰环境下弹道目标识别系统的实战需求。因此,本书重点选取有较强不确定知识表达及处理能力的直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Set, IFS)理论以及有较强分类性能却具有更稀疏解的一种新兴核机器方法——核匹配追踪(Kernel Matching Pursuit, KMP)——对复杂战场环境下的弹道中段目标识别方法进行大胆创新与尝试。

IFS 理论因其增加了犹豫度属性参数,从而能更加有效地表达出“非此非彼”的模糊概念,其内涵是人们对事物的认知过程中存在不同程度的犹豫或表现出一定程度的知识缺乏,从而使认知结果中存在介于“支持”与“反对”之间的犹豫度。IFS 理论在描述客观事物不确定性本质时表现出来的优良特性,为模糊不确定性信息的建模与处理提供了新的思路和方法。虽然 IFS 理论具备较强的不确定性知识表达能力,但从目前已有的研究成果来看,对于复杂战场环境下的弹道中段目标识别问题,单一的信息处理方法已难以奏效,应综合灵活使用多种不同的信息处理技术,以期达到更好的应用效果。因此,如何将 IFS 理论同其他理论进行科学有效的融合成为弹道中段目标识别领域赋予我们的一项新任务。

KMP 是近年来在模式识别领域兴起的一种崭新有效的稀疏核机器学习方法^[4],其思想源自于信号领域中的匹配追踪(Matching Pursuit, MP)算法以及支持向量机(Support Vector Machine, SVM)中的核方法。KMP 通过将低维空间线性不可分的数据投影到高维特征空间来实现线性可分的目的,其分类性能与 SVM 的分类性能相当,却具有更为稀疏的解。此外, KMP 同其他核方法相比,在 KMP 中应用的核函数可使用任意的核,不必满足 Mercer 条件,甚至在生成函数字典时可采用多个核函数。与 SVM 相比, KMP 具备明显的优势,但由于该理论 2002 年才问世,目前仍处于初步发展阶段,因此还存在一些不足。如何对该理论进行深入研究以发现其深层次的问题,并进行必要、有效的改进,已成为弹道中段目标识别领域对我们提出的另一项新任务。

因此,本书在前期成果拓展与创新的基础上,结合直觉模糊集、核匹配追踪等理论进

行深入研究,从新的视角研究目标识别技术,以期为弹道中段的目标识别提供一次有益的尝试。

1.2 目标识别

目标识别是模式识别领域的一个研究热点问题,这一基础而又重要的技术在现代军事领域及诸多民事领域中均具有重要的意义,且得到了非常广泛的应用。

随着空天战场信息化技术的迅猛发展,空天攻防对抗日益受到越来越多国家的重视。因此,对来袭目标的有效探测和预警,对战场目标的高清侦察和监视,精确制导武器的高精度定位,等等,都需要目标识别技术作为支撑,其主要作用是对空中飞机、空地导弹、巡航导弹及弹道导弹真假弹头、碎片、伴随物、干扰物等目标进行探测和跟踪,提取目标的特征信息,进而实现准确识别。可见高技术武器的信息化、智能化发展趋势对目标识别技术的需求是显而易见的,这奠定了该技术在军事信息化领域中的重要地位。

在严格意义上,广义的目标识别(Target Recognition)可以划分为目标辨别(Target Discrimination)、目标分类(Target Classification)和目标辨识(Target Identification)三个层次。通常所说的目标识别,即狭义的目标识别,多指最高层次的目标辨识。本书的研究工作也主要集中在目标辨识这一层次上。

目标识别系统或识别算法千变万化,但是研究内容主要包括五个大的方面,即目标电磁反射特性和背景特性、电磁波的传播、特征提取、识别算法和目标数据库^[5],这五个方面与系统的识别效果密切相关。然而,即使是其中的任一个方面,也包含了相当丰富的内容,具有相当的难度。本书的研究内容重点是在识别算法的创新与拓展上。

在现代信息化战争中,由于威胁平台的多样化、密集型、隐蔽性以及目标对抗措施的先进性,使单传感器提供的信息无法满足作战要求,因而只有将多个传感器(既包括雷达、红外等物理传感器,也包括不同的分类器及特征子集等所构成的逻辑意义上的传感器)关于目标身份提供的信息依据某种准则来进行组合,才能获得更为准确可靠的目标身份估计。可见多传感器信息融合技术已成为军事力量的倍增器。而根据传感器输出信息的抽象层次不同,融合目标识别可以分为数据层融合目标识别、特征层融合目标识别以及决策层融合目标识别^[6]。本节重点研究基于特征层、决策层的融合目标识别。

由于复杂的识别背景和目标本身的动态变化,目标识别问题是一个难度较大的课题。通常目标识别既要区分相近的不同目标,又要在同一目标发生姿态、尺度、位置变化时不致误判。此外目标识别算法还要对于光照变化、噪声干扰、背景变化有一定的鲁棒性,有时为了达到一定的实时性,目标识别算法还必须在足够短的时间内完成。这导致识别过程非常复杂,信息量和计算量都很大。目前在目标识别方法中,还没有通用的方法能对不同情况的目标均能准确识别。而目标识别理论经过多年的发展,识别方法琳琅满目,枚不胜数。

美国在该领域的研究成果占据国际领先地位。早在 20 世纪 70 年代, Berni 就提出利用目标时域的自然频率响应来进行识别^[7],该方法思路直观,在信噪比较高的情况下能够保持一定的识别率,但仍与实用化有一定距离。之后, Blaricum 研究了直接从目标的时域响应提取极点及其留数的方法^[8]。这些极点及其留数是将目标看做一个电路系统时域响应的极点及其留数,由于将 Prony 法作为计算工具,因而一般将该目标识别方法简称为 Prony

法。Stephen 等提出一种利用 beta 概率函数为目标的雷达反射截面的建模方法^[9], 并且进一步研究了将其用于复杂目标雷达反射截面建模及 SAR 目标识别的问题。为了解决 SAR 目标识别中的目标数据建模问题, Richards 研究了多个 SAR 图像生成目标模板的方法^[10]; Reuven 针对 SAR 目标识别中的目标特征与数据库模板的匹配问题展开了研究, 形成一种基于非线性的优化方案^[11]; Koets 和 Moses 提出了基于散射中心的 SAR 特征提取方案, 并形成了较为有效的算法^[12]; 以 Chen 为代表的研究小组极大地推动了基于波形综合的目标识别发展, 形成了整体构架方案^[13]; Army Research Laboratory(美国陆军研究实验室, ARL)开发了一种基于 BP 网(Back Propagation Neural Network, BPNN)的目标识别技术, Wellman 等采用基于图像/图形高阶统计信息实现了其特征提取部分, 达到了较好的效果^[14]; 而 Goldman 和 Dropkin 在利用 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar, 逆合成孔径雷达)技术识别非合作运动目标上进展也较大^[15]。此外, 一些大的公司对目标识别表现出极高的热情, 较为出色地完成了某些研究。Cyber Dynamics 公司的 Wells 和 Beckner 研发实现的目标数据库自动更新技术多年来一直闪耀着光芒^[16]; 而 See 等研究了 SAR 目标识别中非训练目标对系统产生的混淆作用^[17]。

近年来, 国外学者的一些典型目标识别方法研究有: 2006 年, Cooke 等研究了一种从逆合成孔径雷达图像的序列信息中获得 3D 目标散射信息的新型目标识别方法^[18]; 2007 年, Barshan 等通过红外传感器获得目标数据信息, 并研究和发展了多种统计学模式识别方法将其应用于目标识别^[19]; 2008 年, Prasad 等研究了一种采用权重大小分配信任度的方法对超光谱进行决策融合, 从而达到目标识别效果^[20]; Du 等提出了一种基于超球面几何模型的雷达高分辨距离像的统计识别方法^[21]; 2009 年, Lui 等研究了地面目标识别的电磁散射问题, 获得了有效的识别方法^[22]; Yang 等研究了轮廓波包变换算法, 结合神经网络用于雷达目标识别^[23]; 2010 年, Pal 等提出了一种新型的雷达信号目标识别方法^[24]; Stumpf 等研究了基于高分辨图像的目标识别方法^[25]; 2011 年, Giusti 等提出了一种针对持续散射物极谱度量自动目标识别方法^[26]; Ames 等从分子结构角度提出了一种全新的目标识别方法^[27]。

我国学者另辟新径, 深入研究, 提出了一系列目标识别方法。2006 年, 张天序等提出了一种三维运动目标的多尺度智能递推的识别方法^[28]; 2007 年, 刘华林等运用核修正格兰-施密特正交化过程直接提取正交投影变换矩阵, 从而提出了一种 QR 分解的广义辨别分析算法用于雷达目标识别^[29]; 2008 年, 宦若虹等提出了一种基于核函数的费舍尔判别分析(KFD)和独立分量分析(ICA)特征提取的合成孔径雷达(SAR)图像目标识别方法^[30]; 2009 年, 刘华林等提出了一种基于广义奇异值分解的核不相关辨别子空间算法, 并将其用于高分辨距离像雷达目标识别^[31]; 2010 年, 龙泓琳等采用非负矩阵分解结合费舍尔线性判别方法对合成孔径雷达图像进行识别, 得到了一种有效的目标识别方法^[32]; 2011 年, 潘泓等结合多尺度几何分析和局部二值模式算子, 构造了一种新的多尺度局部方向特征描述子——局部 Contourlet 二值模式(Local Contourlet Binary Pattern, LCBP), 通过对尺度内、尺度间及同一尺度不同方向子带直方图的分析, 研究了 LCBP 特征的边缘和条件统计模型, 又用隐马尔可夫树模型对 LCBP 系数建模, 并提出了隐马尔可夫树模型 LCBP 目标识别算法, 取得了较传统小波变换特征和 Contourlet 域高斯分布模型特征更好的识别结果^[33]。

在目标识别众多应用领域中, 弹道目标识别占有独特的、重要的一席之地。由于弹道

导弹的作战技术不断提高,其精确打击和超常的破坏力给被攻击方造成极大威胁,作为对立面,弹道导弹防御系统应运而生,其功能是为己方基础设施、军事要地和部队提供全方位和多层次的防御,免遭敌方弹道导弹袭击,避免在不对称攻击中处于劣势。美国目前实施的弹道导弹防御计划系统由助推段防御系统、中段防御系统和末段防御系统组成,其中中段防御系统包括两部分:一是海基中段防御系统,即原海军全战区防御系统(NTW);二是陆基中段防御系统(GMD),即原国家导弹防御系统(National Missile Defense, NMD)。该系统用于保护美国本土,是目前美国导弹防御计划发展的重点^[34]。在弹道导弹中段,目标在大气层外作惯性飞行,不存在助推段、再入段中目标与大气作用的复杂物理过程,因而时间相对较长,是进行识别和拦截的较好时机。但是在中段,进攻方常利用释放诱饵、改变目标特性信号等突防手段,形成包含真假多目标的复杂光电对抗环境,对识别提出了更高的要求。中段是弹道目标识别中最具挑战性的阶段,这也决定了大部分的弹道目标识别研究主要围绕中段识别而开展。弹道导弹防御系统的作战思想基于“全程观测、分段拦截”,把中段作为主要作战窗口之一。迄今为止弹道中段目标识别仍是困扰 NMD 系统发展的一个“瓶颈”。

弹道中段又称自由飞行段,是弹道中最长的一段,约占导弹整个射程的 80%~90%。中段目标识别成功与否在一定程度上决定了防御系统拦截的成败。弹道中段的目標类型众多,具体有:① 发射碎片,可能是助推火箭、保护罩、废弃母舱、弹簧和各种螺栓部件;② 一个或数个真实弹头;③ 诱饵,包括涂有金属的气球或红外热源等;④ 主动干扰机;⑤ 箔条等。以上这些都要求防御系统能够进行准确识别,以便进行有效拦截。在推进系统关机后,中段目标的温度大大降低,这时天基红外系统的定位和识别能力都相当有限,因此制导雷达(主要是 GBR)将在中段目标识别中发挥核心作用。对于中段弹道目标,雷达识别大致有三个途径:一是“特征”识别,通过对信号特征的分析识别获取有关目标的特征信息,例如通过回波信号的幅度、相位、极化频率特征估计目标的飞行姿态、结构特征、材料特征等;二是“成像”识别,即用高分辨雷达获取目标图像,进而确定目标的尺寸、形状、材料;三是根据目标再入大气层所特有的运动状态,获取目标的弹道参数,确定目标的质量。由于弹头与诱饵所具有的相似特性以及目标飞行的动态特性,因而识别过程应基于各目标的不同特征,综合利用多种识别手段,不断排除假目标、碎片等,实现真假目标的良好辨识。

近年来,关于弹道目标的识别能力及其对抗手段一直是研究的热点。国内外在此方面均开展了大量研究,主要技术包括成像技术(一维像技术、ISAR 成像技术和超分辨 ISAR 成像技术)、微动特性识别技术及雷达散射截面(RCS)识别技术。其中具有代表性的研究成果有:Lammers 研究了进动目标的雷达成像^[35];Foster 和 Thomas 对几类弹头目标 RCS 时间序列的均值、标准差、直方图、概率密度函数、功率等特征进行比较,总结了从累计概率分布、傅立叶变换、数密度等特征中提取参数进行分类的方法^[36, 37];Rasmussen 等对目标 RCS 时间序列进行频谱分析,利用频域特征对目标分类,仅用 DFT 变换的前 5 个最大系数便可识别出立方体、锥体、圆柱体等几类简单形体^[38];Schultg 等研究了弹道导弹弹头的激光雷达特征,建立了关于弹头几何参数和运动参数的距离——多普勒特征的近似模型^[39];Sato 研究了通过距离——多普勒技术估计空间目标尺寸和形状的方法^[40]。我国教授许小剑利用目标 RCS 幅度信息,采用模糊判决原理对导弹和飞机目标进行识别实验^[41],在