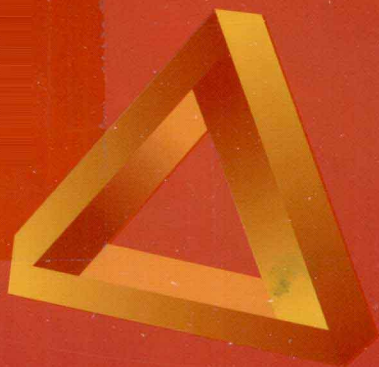


· 智 · 能 · 科 · 学 · 技 · 术 · 应 · 用 · 丛 · 书 ·

多感知系统 与智能仿真

Multi-Perception
System and
Intelligent Simulation

孟宪宇 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

智能科学技术应用丛书



多感知系统与智能仿真

孟宪宇◎著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

内 容 简 介

多感知系统与智能仿真是非常前沿的研究领域,既富有吸引力,又颇有挑战性。本书以人工鱼和无人作战飞机为研究对象,论述了虚拟环境下的多感知系统,及其智能仿真、建模、算法设计与软件实现方法和技术。

本书适合作为高等院校本科生及研究生相应课程的教材及参考书,对于关注和喜爱智能科学的科技人员,也是一本非常有益的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

多感知系统与智能仿真 / 孟宪宇著. —北京: 国防工业出版社, 2012. 6
(智能科学技术应用丛书)
ISBN 978-7-118-06808-5

I. ①多… II. ①孟… III. ①人工神经-神经网络-仿真系统 IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 135325 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 710×960 1/16 印张 12 字数 206 千字
2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

《智能科学技术应用丛书》编委会

名誉主编:吴文俊

主 编:涂序彦

副主编:钟义信 史忠植 何华灿 何新贵 李德毅 韩力群

黄河燕(常务) 陈 洁

秘书长:黄河燕

编 委:(按姓氏汉语拼音排序)

蔡庆生(中国科技大学)

蔡 文(广州工业大学)

蔡自兴(中南大学)

曹少中(北京印刷学院)

曹元大(北京理工大学)

陈 杰(北京理工大学)

陈 洁(国防工业出版社)

杜军平(北京邮电大学)

何华灿(西北工业大学)

何新贵(北京大学)

何 清(中科院计算所)

洪炳熔(哈尔滨工业大学)

韩力群(北京工商大学)

黄河燕(北京理工大学)

黄兴汉(华中科技大学)

贾英民(北京航空航天大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李德毅(北京邮电大学)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 民(清华大学)

刘增良(国防大学)

马少平(清华大学)

彭 岩(首都师范大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南师范大学)

阮秋琦(北京交通大学)

阮晓钢(北京工业大学)

史忠植(中科院计算所)

孙增圻(清华大学)

涂序彦(北京科技大学)

谭 民(中科院自动化所)

谭铁牛(中国科学院)

吴文俊(中科院数学所)

王国胤(重庆邮电大学)

王家钦(清华大学)

王 龙(北京大学)

王 普(北京工业大学)

王万森(首都师范大学)

王志良(北京科技大学)

杨春燕(广州工业大学)

杨放春(北京邮电大学)

杨国为(南昌航空航天大学)

杨义先(北京邮电大学)

于洪珍(中国矿业大学)

钟义信(北京邮电大学)

曾广平(北京科技大学)

张长水(清华大学)

张琴珠(华东师范大学)

张永光(中科院系统所)

赵沁平(北京航空航天大学)

周志华(南京大学)

庄越挺(浙江大学)

丛书序

智能科学技术(Intelligence Science & Technology, IST)是关于广义智能的理论、方法和应用的综合性科学技术,是计算机科学技术、信息科学技术、生命科学计算、电子科学技术等诸多学科大跨度交叉的前沿领域,其研究成果已广泛应用于各种高新技术领域,在我国的经济的发展以及现代化国防建设中发挥着巨大的作用。智能化已成为当前新技术、新产品的发展方向与重要标志。

广义智能意味着自然智能(如:人的智能、其他生物智能)、人工智能(包括:机器智能、智能机器,如:专家系统、人工神经网络、智能机器人)、集成智能(如:人的智能与机器智能相结合的人机集成智能)、协同智能(个体智能协同共生的群体智能)、分布智能(各种分布式智能系统的分布智能)及网络智能(局域网、广域网、互联网的网络智能)。

自“人工智能”学科诞生的 50 多年来,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。智能科学技术可广泛应用于国防现代化建设、国民经济建设、国家行政管理各部门,工业、农业、航空、航天、交通、运输、能源、环保、通信、建筑等各行业,医疗、卫生、保健、保安、商业、服务、家电、玩具、文化、娱乐等人民生活各方面。

智能化是当前和今后各行各业的新理论、新方法、新技术、新产品的方向、开发策略及显著标志。如:广义智能学、泛逻辑学、机器知行学、可拓学、智能系统理论;智能决策、智能推理、智能识别、智能优化、智能指挥、智能管理、智能调度方法;智能控制、智能调节、智能操作、智能检测、智能预测、智能通信、智能仿真技术;智能仪表、智能

装置、智能设备、智能网络、智能家电、智能武器、智能玩具、智能计算机、智能机器人、智能自动化产品等。

为了适时总结、交流、宣传、推广智能科学技术的应用研究开发成果,中国人工智能学会与国防工业出版社合作组织、编辑出版《智能科学技术应用丛书》。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与、大力支持,以及编委会同志们的共同努力,《智能科学技术应用丛书》将为发展我国智能科学技术应用事业,建设科技创新、经济发达、社会和谐的国家,做出应有的贡献。

祝《智能科学技术应用丛书》出版,特赋贺诗一首:

智能科技应用广
应用系统智能强
广义智能硕果多
智能应用效益创

中国人工智能学会荣誉理事长

前言

人和动物“多感知系统”的机理与功用天然巧作、鬼斧神工,是智能仪器、智能机器、智能设备模仿的对象。从人工智能诞生之日起,对感知智能的研究就从未停止过。如何模拟生物“多感知系统”,研究开发工程“多感知系统”,是人工智能,模式识别,计算机视觉、听觉、触觉、味嗅觉,智能仪表的前沿课题。同时,在人工智能与计算机仿真相结合的基础上,“智能仿真”技术的发展,已成为现代科技领域的重要研究工具。

本书主要内容来源于两部分:其一是作者在北京科技大学攻读博士期间的研究成果,在此期间,作者主要以人工鱼为研究对象,研究人工鱼的多感知智能仿真系统的设计与实现。发表相关论文十余篇,多篇被 EI 检索,并参与《人工鱼》一书的编写。参与国家自然科学基金项目“人工动物的自繁衍理论和方法”(项目批准号:60075012)、“基于认知的人工动物高级行为规划研究”(项目批准号:60503024)。其二是作者在清华大学做博士后期间的部分研究成果,在此期间,作者主要以无人作战飞机为研究对象,研究无人作战飞机的感知与控制决策系统的智能仿真问题,发表 SCI、EI 检索文章多篇,承担航空基金项目“飞行器管理计算机容错方法及可靠性分析方法研究”、“十一五”预研项目“飞行器智能自主控制”、863 项目“飞行器智能自适应控制技术研究”等多项科研任务。可以说,人工鱼的研究侧重于“感”,无人作战飞机的研究侧重于“知”,作为智能体,不论是“感”,还是“知”,都是行为与运动的基础,是系统协调工作的前提。

本书的研究成果是在北京科技大学涂序彦教授、清华大学朱纪洪教授指导下取得的,他们的无私与慷慨、他们的博学 with 严谨始终是我学习的榜样,在此向他们致以最诚挚的感谢和崇高的敬意。

本书从写作到出版,得到了涂教授的热诚关心和指教。他对新技术的敏感、对学术的严谨,敢为人先、又甘为人后的精神使我受益终生。正是涂教授这样德高望重的专家,无私地培育、扶植我们年轻人,在学术道路上、在人生旅途中,他们是我们的引路人,不仅将我们扶上马,还送了一程又一程。

感谢我博士研究阶段“人工鱼”课题组的班晓娟教授及各位同窗,感谢清华大学朱纪洪教授的科研团队,感谢范勇博士、安金霞博士、余波博士、刘凯博士、司宾强博士。

由于国内外“多感知系统”、“智能仿真”技术处于不断发展中,加之作者学识水平有限,书中疏漏、不当之处在所难免,衷心希望广大读者给予批评指正。

孟宪宇
于清华大学

目录

第1章 绪论	1
第2章 智能仿真	6
2.1 现代仿真技术的发展	6
2.2 智能仿真	9
2.3 基于智体的智能仿真	12
2.4 智能仿真的应用实例	15
第3章 人工鱼多感知智能系统研究	18
3.1 人工鱼系统	18
3.1.1 人工鱼系统概述	18
3.1.2 人工鱼多感知智能系统概述	19
3.2 人工鱼系统的几种模型	20
3.2.1 人工脑模型	20
3.2.2 基于行为建模的鱼	22
3.2.3 基于认知建模的鱼	23
3.2.4 基于“软件人”的人工鱼游戏动画模型	25
3.2.5 多感知智能系统模型	26
第4章 人工鱼多感知智能系统建模	28
4.1 虚拟环境下的人工鱼	28
4.1.1 多感知信息在虚拟环境中表示问题的提出	28
4.1.2 虚拟环境中的 Agent——人工鱼	29
4.2 虚拟环境中人工鱼多感知模型	30
4.2.1 人工鱼视觉系统建模	32

4.2.2	人工鱼触觉系统建模	34
4.2.3	人工鱼听觉系统建模	37
第5章	人工鱼多感知系统智能仿真	40
5.1	智能仿真方案	40
5.2	人工鱼嗅觉系统智能仿真	41
5.2.1	人工鱼嗅觉感知模型	41
5.2.2	人工鱼嗅觉感知器的设计	44
5.2.3	人工鱼嗅觉中枢模式识别方法	46
5.2.4	嗅觉感知实验	48
5.3	人工鱼味觉系统智能仿真	49
5.3.1	虚拟环境下人工鱼味觉系统建模	49
5.3.2	人工鱼味觉感知器的设计	51
5.3.3	基于 BP 网络的人工鱼内味觉感知系统设计	53
5.3.4	基于模糊神经网络的人工鱼内味觉感知系统设计	56
5.3.5	人工鱼味觉系统遗传进化及对环境的适应性	60
5.4	人工鱼多感知融合智能仿真	64
5.4.1	人工鱼多感知信息融合模型	65
5.4.2	基于多源注意力理论的感知实现	70
5.4.3	算法实现	72
5.4.4	多感知融合实验	74
第6章	人工鱼可视化仿真程序设计	76
6.1	仿真程序总体设计	76
6.2	感知器的设计和实现	77
6.2.1	感知信息格式设计	77
6.2.2	数据分析	78
6.3	部分仿真程序演示	80
6.3.1	嗅觉感知实验	82

6.3.2	味觉感知实验	84
6.3.3	多感知融合实验	86
第7章	无人作战飞机及系统智能仿真	88
7.1	无人作战飞机系统	88
7.1.1	无人作战飞行系统概述	88
7.1.2	无人作战飞机系统描述	89
7.1.3	无人作战飞机自主控制系统	92
7.1.4	无人作战飞机自主控制分级递阶控制结构	94
7.2	无人作战飞机智能仿真系统概述	95
7.2.1	智能仿真必要性	95
7.2.2	主要作战仿真软件	96
7.2.3	飞行控制系统的仿真设计方法	97
7.3	无人作战飞机智能仿真模型	99
7.3.1	无人作战飞机仿真模型分类	99
7.3.2	基于软件人的无人作战飞机仿真模型结构	100
7.3.3	基于认知的无人作战飞机仿真模型	101
第8章	无人作战飞机多感知智能系统研究	103
8.1	无人作战飞机多感知系统	103
8.1.1	多感知系统及其发展	103
8.1.2	多感知系统构成	104
8.1.3	常用传感器	106
8.2	无人作战飞机多感知系统模型设计	111
8.2.1	环境信息模型	111
8.2.2	探测模型	112
8.2.3	多感知器模型	113
8.2.4	形势评估模型	115
8.3	多感知系统研究	117

8.3.1	概述	117
8.3.2	无人作战飞机多感知系统	118
8.3.3	无人作战飞机系统多感知系统设计	118
8.3.4	无人作战飞机多感知融合系统设计	120
8.3.5	仿真实验	126
第9章	无人作战飞机智能决策系统研究	127
9.1	基于认知的无人作战飞机决策控制结构	127
9.1.1	决策层的设计	129
9.1.2	行为层的设计	131
9.1.3	无人作战飞机自主飞行控制仿真	132
9.2	基于人脑特征的无人作战飞机自主控制决策机制研究	134
9.2.1	决策机制研究的必要性	134
9.2.2	国内外发展情况	135
9.2.3	无人作战飞机决策系统建模技术	137
9.2.4	决策机制的强化学习	139
9.3	基于行为反应控制无人作战飞机自主航路决策	143
9.3.1	无人作战飞机自主航路规划分级组合模型	143
9.3.2	规划层设计	144
9.3.3	决策层设计	148
9.3.4	仿真实验	150
第10章	无人作战飞机多感知智能仿真可视化程序设计	154
10.1	仿真系统设计与实现	155
10.1.1	仿真系统结构	155
10.1.2	软件设计实现方法	156
10.1.3	仿真数据库的设计与实现	160
10.2	仿真环境构架	161
10.3	仿真环境界面实现	163

10.3.1	虚拟场景实现	164
10.3.2	虚拟对象模型建立	166
10.3.3	仿真数据分析模块	167
10.3.4	仿真环境性能测试	168
第 11 章	展望	170
参考文献		171

第1章

绪 论

智能科学研究智能的本质和实现技术,是由脑科学、认知科学、人工智能等综合形成的交叉学科^[1]。多感知系统(Multi-Perception System)的研究是智能科学的一部分,多感知是思维、行动的前提。

未来信息技术的一个必然发展趋势是智能化,而这种智能化实现的有效手段之一是“分而治之”,对智能的诸要素分别进行研究;智能化实现的有效手段之二是“模拟学习”,模拟人、模拟动物、模拟自然界中多种形式的智能行为,不失为一种快捷有效的途径。本书研究智能科学中的多感知智能,并模拟鱼类的多感知行为,对人工鱼^[2,3]的多感知系统进行研究,并将部分研究成果加以拓展,应用在无人作战飞机系统(Unmanned Combat Aerial System, UCAS)上,从而形成了多感知研究的一个相对完整的体系。

对多感知的研究,首先从生物原形出发。众所周知,感知是客观外界直接作用于人或动物的感觉器官而产生的信息,在发展中经历了感觉、知觉、表象三种基本形式^[4]。包括多种类感觉信息(视觉、触觉、听觉、嗅觉、味觉等)、多媒体感觉信息(图像、声音等),多模式感觉信息(离散的、连续的)。这些感觉信息的提取、在计算机中的表示以及如何对其进行时空整合、信息融合、数据挖掘、知识发现将是一个妙趣横生、富有挑战的课题。

人和动物的感知都是很复杂的,分为有意识的感知和无意识的感知两种。例如,动物在看到食物的同时又听到天敌的叫声,是逃逸还是捕食?这就涉及多感官的信息融合问题;中华民族的传统美食讲究“色香味”俱佳,这也是通过多感觉(视觉、嗅觉、味觉)的融合处理,使大脑感知到美食。中医理论的“望、闻、问、切”,不但是多感知的信息融合,还涉及多模式的数据挖掘。又如,人的经验、应变能力、灵感的产生,也涉及多感知信号的融合^[5-7]与自学习、自组织、自适应等问题。

不但人和动物具有感知能力,人类设计制造出来的一大批机器设备同样具

有感知能力,如机器人、无人机、无人驾驶车辆等。这些感知能力依赖于传感器的同时,人工生命及仿生学的贡献不容忽视。人类对多感知信息研究的目的,主要是为了应用于这些机器设备,提高这些机器设备的感知能力,提高其智能,使其更好地服务于人类。可见,对多感知研究的目的,是为了设计制造出高智能的机器设备,这同时也是科学发展的内在动力。

对多感知信息的研究,即采用信息化的手段提取、处理并输出到下一级机构,这是一项复杂的工作,研究过程中应用智能仿真方法是一种行之有效的手段。

“仿真”方法出现比较早,但严格来说,只是在20世纪40年代末,计算机的问世才为系统仿真技术打开大门,使其迅速发展并逐渐成为一门独立的学科。特别是进入20世纪90年代,伴随着人工智能、人工生命、机器人学、计算机系统、自动化系统向拟人化、人性化方向的发展,仿真系统逐渐向智能化方向发展,智能仿真已经引起仿真领域的普遍关注。1995年,涂序彦先生在《智能管理》^[8]专著中,曾提出“智能仿真”的概念,随后又将广义模型与软件人引用到系统建模与计算机仿真中,建议研究开发基于“广义模型”^[9]与“软件人”^[10]的拟人仿真系统,这将有助于传统仿真技术向智能化的方向迈进。

人类是万物之灵,但人类的感知行为却过于复杂,本书以人工鱼的多感知研究为切入点,简化了问题复杂度,并将人工鱼感知研究的部分成果应用于无人作战飞机的智能感知与决策系统中。在研究工作中,对人工鱼的研究侧重于“感”,对无人作战飞机的研究侧重于“知”,作为智能体,不论是“感”还是“知”,都是行为与运动的基础,是系统协调工作的前提。

长久以来,对多感知系统的研究,国内外主要集中在各感知系统的分散研究中,其中视觉感知的研究在国内外掀起了极高的热潮。早在1961年Barlow提出了有效编码理论^[11],随着人类对神经系统的认识不断加深,在20世纪90年代得到迅猛发展。国际上成立了专门的大会NIPS(Neural Information Processing System),有效编码理论已经成为国际上神经计算、人工神经网络和人工智能方面研究的热点。国内的罗四维等人出版了《视觉感知系统信息处理理论》^[12]一书。视觉感知的研究成果也广泛应用于视觉传感器、机器人、图像处理、导航、无人驾驶等领域。虚拟环境下视觉感知的研究有MIT媒体实验室以Pentland为首的研究组所从事的智能屋(Smart Rooms)的研究^[13]及Maes等人所从事的人工生命交互视频环境的研究^[14]等,这些研究针对虚拟现实(VR)领域的实际需求,从视觉感知的机理与计算机表示等方面进行研究。

嗅觉感知与味觉感知的研究最早主要集中在电子鼻^[15]与电子舌^[16]的研究方面,日本科学家领导的研究小组已成功研制出一种用于护理老人的新型机器

人“RI-MAN”,具有嗅觉功能^[17]。法国阿尔法—莫斯(Alpha M O S)公司在多年技术积累的基础上,以类脂材料为基质修饰多种敏感材料构建电极组成传感器阵列,在世界上第一家推出了商品化的电子舌系统。随着计算机技术、虚拟现实技术、人工生命^[18-20]的发展,如何在虚拟环境下表示、识别、处理嗅觉与味觉信息成为一个新的研究方向。虚拟现实领域中很多学者在从事虚拟味嗅觉的研究工作。其中日本处于国际先进水平,日本奈良尖端技术研究生院大学教授千原国宏领导的研究小组开发出一种嗅觉模拟器,只要把虚拟空间里的水果拉到鼻尖上一闻,装置就会在鼻尖处放出水果的香味^[21],2003年味觉虚拟器也由日本筑波大学的岩田广雄实验小组研制成功^[22]。国内的很多学者也在从事这方面的研究,比较有代表性的有浙江大学的王平教授进行的人工味觉与人工嗅觉的研究^[23],吉林大学的周春光教授等对茶味觉信号的研究^[24]。本书重点研究虚拟环境中嗅觉^[25,26]与味觉^[27,28]的特征如何表示、如何识别、如何处理等问题,更加偏重于软件模拟。

另外,本书还将探讨多感知融合的实现方法^[29]。国内外对多感知融合的研究主要是通过传感器采集数据,进行数据融合。在军事科学领域中,对传感器数据融合研究得比较多,如雷达系统、声纳系统。本书首先研究虚拟环境下多感知融合的实现算法,并以无人作战飞机为具体应用对象,研究各种传感器、数据链等多源头、多模式的信息融合方法。这种对多源头、多模式、多种类、多媒体的多感知信息融合的研究在国内外鲜有见到,本书将首次进行理论探讨。

对无人作战飞机(Unmanned Combat Aerial Vehicle,UCAV)的多感知研究,主要侧重于多感知融合结果对决策系统、控制系统的作用。目前,有关无人作战飞机的感知系统的研究,或集中在机载传感器的工作原理与融合技术上^[30],或集中在视觉导航领域^[31],或集中在感知运动模型对飞行状态的影响^[32]上。作为一种智能化武器平台,无人作战飞机的多感知系统是控制、决策、执行任务的前提,是智能化的一个重要环节。实际上,无人作战飞机的飞行环境和自身状态是复杂多变的,尤其在瞬息万变的战场环境中,战场态势、地形和威胁分布、飞机当前的参数、位置、姿态等随时都在变化,无疑使其感知是一种复杂多感知,包括对内部状态和外部环境的感知。随着感知设备的不断丰富,如何协调处理各种传感器、以及数据链传递过来的海量信息,是无人作战飞机面临的首要任务。

无人作战飞机的多模式、多来源的感知信息首先应该经过信息融合和感知计算,才能将处理后的信息传送给飞行控制系统、航迹控制系统、任务管理系统、武器管理系统、智能决策系统等核心处理区,以指导飞机完成飞行任务、航路规划、地形规避、目标跟踪、编队分组、作战任务等一系列任务。这些高维海量数据的快速准确计算是个难题。本书设计了一种基于控制函数的感知模型^[33],并提

出基于需求感知分类融合方案^[34],首先根据无人作战飞机的当前状态与需求,对感知信息进行分类融合,然后根据人脑信息处理的特点,利用行为函数控制感知输入,并将感知融合结果用来控制决策。

本书的研究内容主要来源于作者博士期间的研究工作——“虚拟环境下人工鱼多感知智能系统研究”,及博士后期间的研究工作——“无人作战飞机自主控制系统研究”。这两部分的研究基础是:

(1)人工鱼多感知智能系统的研究。作为人工生命研究的一个主要分支——人工动物,其研究可以分为两个方面,即基于硬件的人工动物和基于软件的人工动物。其中,基于软件的人工动物是用人工生命方法在计算机中创建类似动物的实体,人工鱼的研究即属于此类。华人女学者涂晓媛博士将人工生命方法运用到计算机动画的创作中,利用动物形态、习性和行为模型创作了人工鱼,用计算机动画实现了人工动物共有的基本特征——生物力学、运动、感知和行为,被学术界称为“Xiaoyuan's Fish”。多感知智能系统在虚拟环境下的实现借助人工鱼作为智能仿真平台,既可以丰富人工鱼动画,提高人工鱼的自主性和智能水平,创造一个逼真、自主、和谐的三维虚拟海底世界。另外,利用计算机构造虚拟海洋环境,对以鱼类为主的各种海洋生物进行智能仿真,用人工智能和人工生命的手段表现其运动规律、习性和行为,是海底世界可视化的有效途径,研究成果和动画可以应用于生物大脑感觉中枢研究、智能仪器和设备感知决策系统的研究、生物和海洋教学演示、海底世界可视化等方面,可为机器鱼与机器人感知系统研究提供软件仿真平台。

选取人工鱼作为多感知研究的对象,首先是因为鱼类的感知行为相对于人类简单得多,在不改变模型本质的前提下可以简化模型复杂度;其次是因为自“Xiaoyuan's Fish”诞生以来,人工鱼的研究已经相对成熟,多感知的研究具有可利用的仿真实验平台。

(2)无人作战飞机的研究。现代战争形成陆、海、空、天、电磁五维一体化“体系”实施作战。实战表明:在这个“体系”中,空中侦察、目标选定及分配,战场监视与控制 and 精确打击四个环节至关重要;专家预测,无人作战飞机将成为21世纪空中“杀手锏”。美国空军已把无人作战飞机设想为用于攻击任务、与有人驾驶的战斗机/轰炸机和巡航导弹并肩协同作战的攻击武器,作为实现“零伤亡”作战思想及高价值、技术先进的有人平台的替代物,将逐渐成为对敌“软杀伤”和“硬杀伤”的有力武器。而针对我国的国情,无人作战飞机系统作为一种新的武器系统概念,符合武器装备信息化、智能化、隐身化、微型化的发展趋势。因此无人作战飞机必将是我国武器装备发展的方向之一,也必将成为我军一种新型的空中力量^[35]。作者在清华大学做博士后期间,承担多项空军、国家项目,