

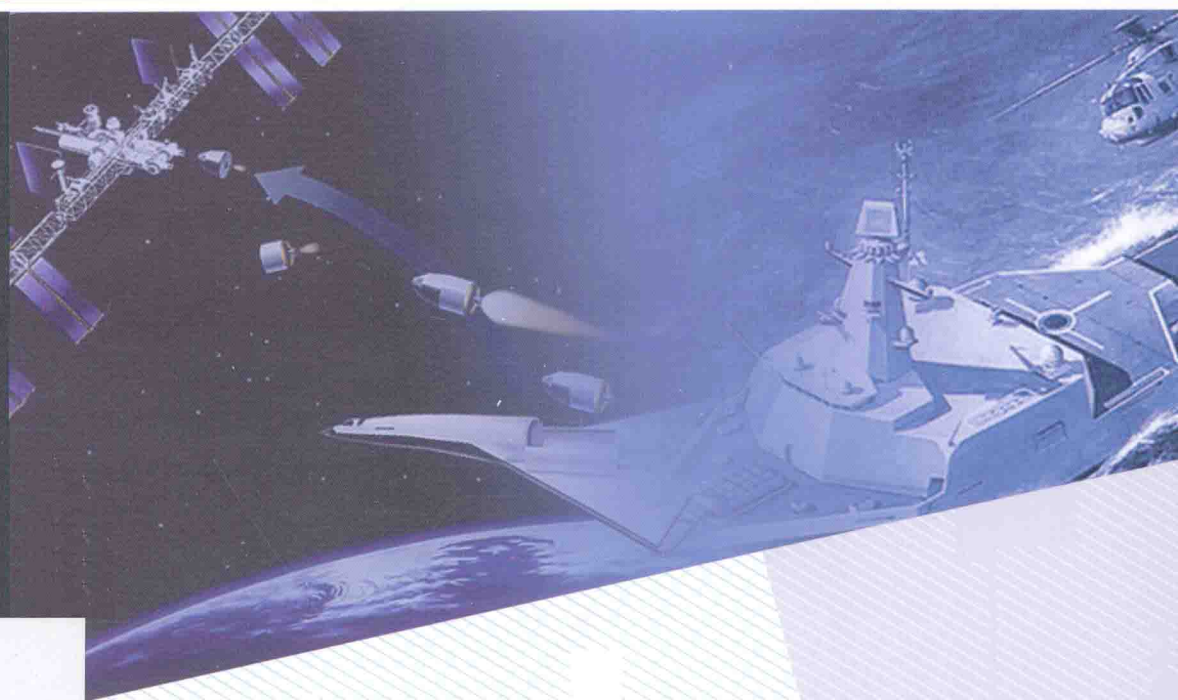


智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

无人智能运载器 航路规划方法及其应用

刘利强 李 刚 赵玉新 著



科学出版社

智能科学技术著作丛书

无人智能运载器航路规划 方法及其应用

刘利强 李 刚 赵玉新 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

无人智能运载器是一种无人操作的、全自主或半自主的、智能化的运载体,是一种特殊的智能机器人。无人智能运载器航路规划技术主要解决运载器在任务执行前和执行过程中行进的问题,是决定无人智能运载器智能化、自主化水平高低的关键技术之一。本书整理作者课题组近年来的部分研究成果,深入全面介绍了基于蚁群优化的航路规划方法、基于空间弹性绳算法的航路规划方法、基于粒子群优化算法的航路规划方法、基于协同进化的航路规划方法、基于萤火虫算法的航路规划方法,详细给出了各种航路规划方法的基本思想、流程和仿真结果。

本书可供机器人、自动化、计算机、人工智能等领域科技人员参考,也可作为相关专业本科生或研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无人智能运载器航路规划方法及其应用/刘利强,李刚,赵玉新著.
—北京:科学出版社,2014

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-042023-7

I. ①无… II. ①刘… ②李… ③赵… III. ①航天运载器—航线选择—研究 IV. ①V475

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第224227号

责任编辑:姚庆爽 王晓丽/责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:277 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》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 蔡自兴 孙增圻
 谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科学技术大学）

蔡自兴（中南大学）

杜军平（北京邮电大学）

韩力群（北京工商大学）

何华灿（西北工业大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

何新贵（北京大学）

黄河燕（北京理工大学）

黄心汉（华中科技大学）

焦李成（西安电子科技大学）

李德毅（中国人民解放军总参谋部第六十一研究所）

李祖枢（重庆大学）

刘 宏（北京大学）

刘 清（南昌大学）

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）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

孙增圻（清华大学）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

谭铁牛（中国科学院自动化研究所）

涂序彦（北京科技大学）

王国胤（重庆邮电学院）

王家钦（清华大学）

王万森（首都师范大学）

吴文俊（中国科学院数学与系统科学研究院）

杨义先（北京邮电大学）

于洪珍（中国矿业大学）

张琴珠（华东师范大学）

赵沁平（北京航空航天大学）

钟义信（北京邮电大学）

庄越挺（浙江大学）

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science&technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域，其研究对象包括：

- “自然智能”(natural intelligence, NI)，包括“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI)，包括“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II)，即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI)，指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI)，如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自1956年诞生的，五十余年来，在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展，从狭义人工智能走向广义人工智能，从个体人工智能到群体人工智能，从集中式人工智能到分布式人工智能，在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合，那么可以认为，现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年，“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立，25年来，从艰苦创业到成长壮大，从学习跟踪到自主研发，团结我国广大学者，在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展，促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下，我国智能科学技术的研究、开发及应用，在学术思想与科学方法上，具有综合性、整体性、协调性的特色，在理论方法研究与应用技术开发方面，取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果，中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是，这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

智能科技领域广

人机集成智能强

群体智能协同好

智能创新更辉煌

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

无人智能运载器是一种无人操作的、全自主或半自主的、智能化的运载体。它是一种特殊的智能机器人，最早是由于军事应用需求而被提出的，主要包括无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV)、无人地面车 (unmanned ground vehicle, UGV)、无人水面艇 (unmanned surface vessel, USV)、无人潜器 (unmanned underwater vehic, UUV) 等。由于无人系统在近几次局部战争和反恐中的突出表现，受到了各方普遍关注，许多国家争相发展无人技术，并已取得了一定的成果。在军事应用领域取得重大成功之后，无人系统也开始转向社会安全、大地测绘、海洋监测、海底勘探、救援等很多民用领域，并渐渐走进了人们的日常生活。

航路规划技术是决定无人智能运载器智能化、自主化水平高低的关键技术之一。它属于人工智能的范畴，其实质是基于抽象环境模型搜索优化路径的过程。该技术目前已经受到越来越多国内外学者和工程研究人员的关注，并已成为无人智能运载器研究的热点问题之一。本书著者通过整理课题组近年来在无人智能运载器航路规划技术领域的部分研究成果，完成了全书的撰写工作。全书共分为 6 章。第 1 章概括无人运载器和航路规划技术的发展；第 2 章和第 4~6 章分别介绍了基于蚁群优化、粒子群优化算法、协同进化和萤火虫算法的航路规划方法及应用效果；第 3 章介绍了著者提出的空间弹性绳算法及其在航路规划中的应用方法和效果。

本书研究工作先后得到国家自然科学基金(60904087、61210306002、51009036、51109041、51109045、51370949)、中央高校基本科研业务费(HEUCFX41302、HEUCF110419、HEUCF100423、HEUCF041216)、黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q09127)等项目的资助，特向相关部门表示感谢！同时，在本书撰写过程中得到了课题组许多年轻老师和同学的协助与支持。他们是刘厂、沈志峰、祖伟、王丹、范志超、王庆中、孟欣冉等，在此表示衷心的感谢！

由于著者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 无人智能运载器	2
1.2.1 无人机	2
1.2.2 无人地面车	3
1.2.3 无人水面艇	3
1.2.4 无人潜器	4
1.3 航路规划技术	5
1.4 本书结构	7
第 2 章 基于蚁群优化的航路规划方法	8
2.1 蚁群算法	8
2.1.1 产生与发展	8
2.1.2 生物学原理	9
2.1.3 蚁群优化元启发式算法	11
2.1.4 蚁群算法与其他仿生优化算法的比较	17
2.2 水下运载器三维空间航路规划问题描述	18
2.3 环境建模	20
2.3.1 三维海底地形的构造	20
2.3.2 三维环境空间的抽象建模	22
2.4 基于离散域蚁群算法的三维空间航路规划方法	24
2.4.1 算法设计	24
2.4.2 算法仿真与分析	30
2.5 基于连续域蚁群算法的三维空间航路规划方法	39
2.5.1 算法设计	40
2.5.2 算法仿真与分析	43
第 3 章 基于空间弹性绳算法的航路规划方法	49
3.1 空间弹性绳算法建模	49

3.1.1 弹性绳的定义	49
3.1.2 运动性质建模	50
3.1.3 弹性绳算法流程	52
3.1.4 收敛性分析	53
3.1.5 收敛速度分析	60
3.2 球形障碍环境下航路规划方法	66
3.2.1 球形障碍环境空间模型	67
3.2.2 收缩、滑动和碰撞的计算	67
3.2.3 弹性绳算法的计算步骤	69
3.3 海底地形障碍环境下航路规划方法	71
3.3.1 真实海底地形环境空间模型	71
3.3.2 收缩、滑动和碰撞的计算	72
3.3.3 弹性绳算法的计算步骤	75
3.4 仿真实验及分析	77
3.4.1 收敛性仿真实验	77
3.4.2 收敛速度仿真实验	84
3.4.3 球形障碍环境下航路规划	91
3.4.4 海底地形障碍环境下航路规划	95
第4章 基于粒子群优化算法的航路规划方法	99
4.1 粒子群优化算法	99
4.1.1 算法原理	99
4.1.2 算法特点及研究现状	101
4.1.3 PSO 在航路规划中的应用	103
4.2 一种极坐标环境下的粒子群航路规划方法	108
4.2.1 极坐标环境建模	108
4.2.2 航路规划方法设计	113
4.2.3 仿真实验及分析	118
4.3 动态已知环境下的局部航路规划方法	121
4.3.1 动态环境建模方法	121
4.3.2 局部航路规划避障模型	122
4.3.3 基于 PSO 算法的避碰策略及分析	125
4.3.4 仿真实验及分析	127
4.4 动态未知环境的局部航路规划	128
4.4.1 滚动窗口航路规划方法	129

4.4.2 基于观测窗口的局部航路规划方法	131
4.4.3 仿真实验及分析	136
4.5 基于 PSO 的多航路规划方法	138
4.5.1 算法的基本思想	139
4.5.2 多航路规划算法设计	139
4.5.3 粒子群的多样化	140
4.5.4 多群体的隔离进化	142
4.5.5 仿真实验及分析	143
第 5 章 基于协同进化的航路规划方法	145
5.1 协同进化算法	145
5.1.1 算法基本特征与类型	145
5.1.2 算法基本框架	150
5.1.3 算法动力学描述	151
5.1.4 协同进化算法与其他进化算法的对比分析	152
5.2 多飞行器协同航路规划问题建模	154
5.2.1 问题描述	154
5.2.2 问题建模	154
5.3 多飞行器协同航路规划方法设计	156
5.3.1 协同航路规划基本流程	156
5.3.2 航路编码和种群初始化	158
5.3.3 适应度函数设计	159
5.3.4 进化操作算子设计	162
5.3.5 算法流程	168
5.3.6 仿真实验与分析	169
第 6 章 基于萤火虫算法的航路规划方法	172
6.1 萤火虫算法	172
6.1.1 基本思想	172
6.1.2 数学描述	173
6.1.3 算法流程	174
6.1.4 算法性能分析	174
6.2 萤火虫算法改进研究	181
6.2.1 基本萤火虫算法问题分析	181
6.2.2 参数自适应调整策略	181
6.2.3 自主飞行策略	184

6.2.4 随机步长改进方法	184
6.2.5 改进算法描述	185
6.2.6 仿真实验	186
6.3 基于萤火虫的三维航路规划方法	192
6.3.1 航路表达	192
6.3.2 评价函数设计	194
6.3.3 萤火虫算法编码	194
6.3.4 航路规划流程设计	195
6.3.5 仿真实验	196
6.4 基于混合算法的运载器三维航路规划方法	201
6.4.1 混合算法描述	201
6.4.2 算法编码与执行流程	201
6.5 仿真实验	203
6.5.1 算法有效性测试	203
6.5.2 迭代次数对规划结果影响实验	205
6.5.3 种群规模对规划结果影响实验	206

第 1 章 概 述

1.1 引 言

1920 年,捷克斯洛伐克作家卡雷尔·恰佩克在他的科幻小说《罗萨姆的机器人万能公司》中,根据捷克文 *robota* (原意为“劳役、苦工”)和波兰文 *robotnik* (原意为“工人”),创造出了机器人 *robot* 这个词,其表达的意思是使用一种机器代替人做苦工、服劳役,来减轻人的劳动强度和痛苦。1967 年,在日本召开的第一届机器人学术会议上,森政弘与合田周平提出“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等 7 个特征的柔性机器”。1987 年,国际标准化组织将工业机器人定义为“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能,能完成各种作业的可编程操作机”。中国科学家对机器人的定义是“机器人是一种自动化的机器,所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力,如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器”。

现代机器人的研究始于 20 世纪中期。1954 年,美国的德沃尔最早提出了工业机器人的概念;1959 年,美国英格伯格和德沃尔制造出世界上第一台工业机器人,取名为“尤尼梅逊”,其含义为“万能自动”;1962 年,美国 AMF 公司推出了“Verstran”,UNIMATION 公司推出了“Unimate”,这是机器人产品最早的实用机型。这一阶段的机器人主要用于工业领域,称为工业机器人。随着传感器的应用,提高了机器人的可操作性,产生了有“感觉”的机器人。1962 年,托莫维奇和博尼在“灵巧手”上使用了压力传感器;1963 年,麦卡锡在机器人中加入视觉传感系统,并在 1965 年帮助 MIT 推出了世界上第一个带有视觉传感器,能识别并定位积木的机器人系统。随着计算机技术、电子技术、智能理论的不进步,机器人开始向着智能化、自主化方向发展,人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深,机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点,人们发展了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器。

无人智能运载器是一种无人操作的、全自主或半自主的、智能化的运载体。它是一种特殊的智能机器人,最早由于军事应用需求而提出,主要包括无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)、无人地面车(unmanned ground vehicle, UGV)、

无人水面艇 (unmanned surface vessel, USV) 和无人潜器 (unmanned underwater vehic, UUV) 等多种类型。在近几次的局部战争中, 无人系统渐渐发挥越来越重要的作用, 其突出表现受到了各方普遍关注。近些年, 无人智能运载器已开始由军事应用转向社会安全、大地测绘、海洋监测、海底勘探和救援等民用领域, 渐渐走进了人们的日常生活。航路规划技术是决定无人智能运载器智能化、自主化水平高低的关键技术之一, 主要解决无人智能运载器在任务执行前和执行过程中的行进问题。该技术目前已经受到越来越多国内外学者和工程研究人员的关注, 并已成为无人智能运载器研究的热点问题之一。

1.2 无人智能运载器

1.2.1 无人机

无人机是一种利用无线电遥控设备和机载程序控制装置操纵的不载人飞机, 如图 1.1 和图 1.2 所示。机上无驾驶舱, 但安装有自动驾驶仪、程序控制装置等设备。地面、舰艇上或母机遥控站人员可以通过雷达等设备对其进行跟踪、定位、遥控、遥测和数字传输。无人机目前已广泛用于空中侦察、监视、通信、反潜和电子干扰等。



图 1.1 美国捕食者无人机



图 1.2 中国 ASN-206

无人机的诞生可以追溯到 1914 年。第一次世界大战期间, 英国的卡德尔和皮切尔两位将军向英国军事航空学会提出了一项建议: 研制一种不用人驾驶, 而用无线电操纵的小型飞机, 使它能够飞到敌方某一目标区上空, 将事先装在小飞机上的炸弹投下去。1915 年, 美国的斯佩里公司和德尔科公司就研制出第一架无人机, 取名为“空中鱼雷”。该无人机不仅成功地进行了试飞, 而且装有 136kg 炸药, 成功地进行了攻击目标试验。在第二次世界大战中, 美国陆军航空队曾大量使用无人靶机, 并在太平洋战场上使用过携带重型炸弹的活塞式发动机无人机对

日军目标进行轰炸。第二次世界大战结束后,随着航空技术的飞速发展,无人机家族也逐渐步入其鼎盛时期。时至今日,世界上研制生产的各类无人机已达近百种,还有一些新型号正在研制中。

1.2.2 无人地面车

无人地面车(图 1.3 和图 1.4)是集环境感知、动态决策与规划、智能控制与执行多功能于一体的综合系统。从构成上可分为四部分:用来提供机动性能的车辆底盘、集成有多种传感器和电子设备的硬件平台、具有人工智能的系统软件、适应不同需求的任务载荷等。目前,无人地面车辆主要参加或承担如爆炸物等危险品的探测与处理、战场侦察与监视、目标搜索与定位、后勤运输和物资装卸、工程作业、清除障碍物、危险区伤员救援后送等任务。



图 1.3 美国 Talon 无人地面车



图 1.4 以色列 MTGR 无人地面车

无人地面车早在第二次世界大战期间就已经出现。纳粹德国在东线战场上投入了几类无人战车用于爆破地雷。20 世纪 50 年代后期开始,苏联展开了大规模的无人地面车辆研究。20 世纪 80 年代初,在政府部门的支持下,美国斯坦福大学、麻省理工学院等研究机构开展了无人地面车辆的研究。21 世纪初,机器人技术、计算机技术和传感器技术取得长足进步,英国、法国、日本、韩国、以色列等国也都展开了无人地面车辆的研制,并取得了一定成果。目前,德国在无人地面车辆环境感知技术方面较突出,新加坡在视觉信息处理技术、自动驾驶控制技术方面具有一定优势,美国则在无人地面车辆的总体发展水平上领先于其他国家。无人地面车辆的进步和发展需要感知、导航、信息融合、规划、通信、控制、决策和机械制造等众多技术领域发展的推动,它是信息技术与工业技术高度复合发展的产物。

1.2.3 无人水面艇

无人水面艇(图 1.5 和图 1.6)是一种具有自主规划、自主航行能力,并可自

主完成环境感知、目标探测等任务的无人操纵水面运动平台。主要用于执行危险以及不适于有人船只执行的任务。一旦配备先进的控制系统、传感器系统、通信系统和武器系统,无人水面艇就可以执行侦察、巡逻、排雷、反潜作战、反恐攻击等军事任务,还可进行搜救、导航、水文地理勘察等非军事任务。



图 1.5 美国“斯巴达侦察兵”USV



图 1.6 中国天象 1 号 USV

美国海军从 20 世纪 90 年代开始研究无人水面艇。2007 年,美国海军发布了《海军无人水面艇主计划》。该计划从满足美国海军战略计划、舰队发展以及国防部到 2020 年部队转型的需求等方面,详细介绍了美国海军未来无人水面艇的发展计划,赋予无人水面艇 7 项任务,同时还界定了无人水面艇的船型、尺寸和标准等要素,这标志着美国无人水面艇走上正规发展阶段。以色列在无人水面艇技术方面也一直处于领先地位。其研制的“保护者”型无人水面艇已经开始批量生产,并装备部队。新加坡海军是它的第一个海外用户,在一次演习中,他们利用登陆舰搭载两艘“保护者”无人水面艇进行海上保卫和封锁行动,据新加坡国防部称,“保护者”无人水面艇是“非常高效的”。目前,德国、法国、英国、中国、日本、意大利和葡萄牙等国也在积极投入无人水面艇的研究中,并已取得了一定的成果。

1.2.4 无人潜器

无人潜器(unmanned underwater vehicle, UUV)是将人工智能、自动控制、模式识别、信息融合和系统集成等技术应用于传统的载体上,在无人驾驶的情况下自主地完成复杂海洋环境中预定任务的水下航行器,如图 1.7 所示。按照航行控制方式的不同,UUV 可以分为两大类:一类是有缆 UUV,又称为水下遥控运载工具(remotely operated vehicle, ROV);另一类是无缆 UUV,又称为水下自主式无人运载工具(autonomous underwater vehicle, AUV),AUV 代表了 UUV 的发展方向。按用途的不同,UUV 又可分为反潜型无人潜航器、侦察监视型无人潜航

器、反水雷型无人潜航器、通信型无人潜航器和多用途无人潜航器等。



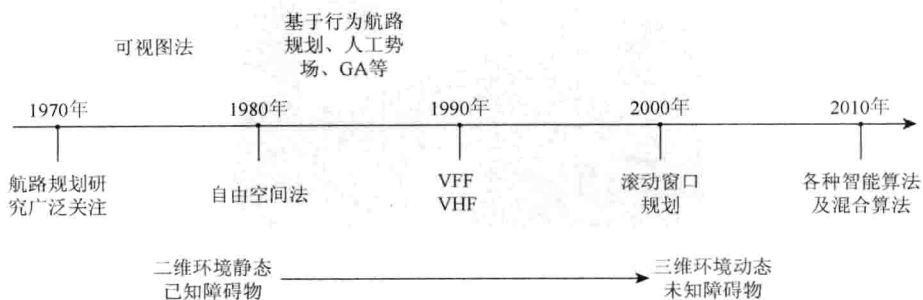
图 1.7 ECA 公司的 K-STER 无人潜艇

UUV 发展初期主要是用于深水勘探、沉船打捞、水下电缆铺设和维修等民用领域。近年来,随着平台、推进器、导航和控制系统的发展,以及传感器技术的进步,无人平台的军事应用得到高度重视,UUV 在水下侦察、水下通信和反潜、反水雷作战、信息作战等领域的应用得到了空前发展。目前,针对某种特殊需求,配置专用设备,完成特定任务的 UUV 仍是无人潜航器发展的主流。但是,专用 UUV 在续航能力、操控灵活性等方面难以兼顾,无法全面满足军事应用领域多层面的作战需求。随着传感器技术、智能控制技术和精密仪器技术的发展,多功能通用型 UUV 将成为新的热点。另外,利用传感器组合和配置技术,通过建立大范围的通信网络,UUV 相互间及 UUV 与其他平台之间的通信,可以实现综合任务管理、远程智能控制和态势协同等。通过群体作业共同完成复杂任务,将成为 UUV 的发展方向。

1.3 航路规划技术

航路规划是在一定的障碍物环境中给定初始位置 S 和目标位置 G ,按照一定的寻优策略规划出从初始位置 S 无碰撞地到达目标位置 G 的路径。它属于人工智能的范畴,其实质是基于抽象环境模型搜索优化路径的过程。根据对环境的掌握情况,航路规划可分为全局规划和局部规划。全局规划又称离线规划,是根据先验知识(如地图等),按一定的优化准则规划出一条从起点到达目标点的无碰撞路径。局部规划又称为动态避碰规划,是以全局规划的结果为指导,利用传感器在线得到的局部环境信息,在尽可能短的时间内,避开出现的未知障碍物,从而产生可行路径的过程。航路规划算法借鉴了许多其他领域的方法,从本质上说与数学的许多分支密切相关,如传统几何、拓扑学、图论、代数几何和组合数学中的一些工具都被应用于航路规划。目前对航路规划问题的研究

主要集中在机器人航路规划方面。图 1.8 记录了航路规划研究领域先后出现的一些具有代表性的方法。



1) 栅格法

栅格法是将机器人的规划空间分解为相互连接且不重叠的空间栅格单元，每一个栅格单元都使用一个累积值表示此方格存在障碍物的可信度，累积值越高则表示存在障碍物的可能性越大。这些空间栅格会构成一个连通图，依据各栅格累积值大小，使用优化算法即可在该连通图上搜索一条从起始栅格到目标栅格无碰撞的最优路径。在栅格法中，栅格的大小会直接影响环境信息存储量的大小和规划时间的长短。栅格划分大了，环境信息存储量小，规划速度快，但分辨率下降，在密集环境下发现路径的能力减弱；栅格划分小了，环境分辨率高，在密集环境下发现路径的能力强，但环境信息存储量大，规划时间长。

2) 可视图法

可视图法是由麻省理工学院的 Lozano-Perez 和 IBM 研究院的 Wesley 于 1979 年提出的。该方法先将障碍物依据机器人的尺寸放大，而机器人理论上被缩成一点，然后将所有障碍物的顶点和机器人起始点及目标点用直线相连，要求机器人和障碍物各顶点之间、目标点和障碍物各顶点之间以及各障碍物顶点与顶点之间的连线都不能穿越障碍物，即直线可视。这样搜索最短路径问题就转化为从起始点到目标点经过这些可视直线的最短距离问题。用 Dijkstra 法或 A* 搜索算法等对可行路径图进行搜索，就可以找到一条最短路径。这类方法虽然实现简单，且能够求得最优路径，但搜索时间长而且会出现组合爆炸问题。

3) 拓扑法

拓扑法是根据环境信息和运动物体的几何特点，将组成空间划分成若干具有拓扑特征的一致自由空间。根据彼此间的连通性建立拓扑网，从该网中搜索一条拓扑路径，即完成了航路规划的任务。该方法的优点在于，利用拓扑特征而大大缩小了搜索空间，其算法复杂性只与障碍物的数目相关，在理论上是完备的。