

# 反舰导弹航路规划 理论与应用

Theories and Applications of  
Anti-ship Missile Path Planning

周智超 刘 钢 徐清华 著



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

# 反舰导弹航路规划 理论与应用

周智超 刘钢 徐清华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书根据现代反舰导弹所具有的航路规划功能,全面、系统、深入地论述了反舰导弹航路规划的理论及应用问题,主要包括:航路规划的战术价值、使用要求和基本原则,反舰导弹航路规划方法,典型应用下的航路规划指挥决策,航路规划的方案评估与优化,以及多平台反舰导弹协同航路规划的实现等问题。并在这些理论指导下设计与实现了多平台反舰导弹协同航路规划的决策支持系统和仿真系统。

作为系统深入研究反舰导弹航路规划理论和应用的专著,本书主要面向武器装备研究和运用人员,也可以作为导弹及相关专业的研究生或高年级本科生教材,以及从事导弹武器控制系统使用和维护的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

反舰导弹航路规划理论与应用/周智超,刘钢,徐清华  
著. —北京:国防工业出版社,2015.9  
ISBN 978-7-118-09792-4

I. ①反... II. ①周... ②刘... ③徐... III. ①反舰  
导弹-航线-规划 IV. ①TJ761.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 068259 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 210 千字

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 46.00 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

# 前 言

航路规划是信息时代的产物,它大量应用信息时代的高新技术,是一个涉及多领域、多学科的综合性问题,主要涉及飞行力学、自动控制、导航、作战效能评估、人工智能、运筹学、计算机和建模仿真等多个学科专业,是难度很大的多领域交叉型研究课题。自 20 世纪 50 年代以来,国内外各领域的学者根据各自的学科背景和专业知识的结合应用需求,对各类飞行器的航路规划方法进行了研究,并取得了许多成果。在航路规划这一领域的研究中,根据不同飞行器自身的特点和实际作战需求,研究的内容、方法以及相关侧重点也是各不相同的。反舰导弹航路规划(Anti-Ship Missile Path Planning, ASMPP)是航路规划领域中一类新问题,它对航路规划领域的相关研究提出了新要求。反舰导弹航路规划是在现代信息化条件下由海上火力机动战理论所催生的新的技术产物,航路规划已成为提高反舰导弹作战效能,实施远程精确打击的有效手段。反舰导弹航路规划的实现,使海上作战中火力机动代替了传统的平台机动,改变了许多传统的攻击样式,对海上突击作战中的火力应用理论带来巨大影响,深刻改变了对海作战的理念和方法。如何运用航路规划技术以充分发挥反舰导弹武器的作战效能,已成为目前导弹攻击作战理论领域亟待解决的新问题,需要在航路规划方法、规划空间建模方法、航路规划算法、航路规划方案评估等方面分别展开有针对性的研究。

本书系统、深入地论述了反舰导弹航路规划理论以及应用问题,主要阐述了四个方面的内容。一是反舰导弹航路规划的战术价值。反舰导弹具备航路规划能力之后,使武器平台的火力运用观念和战术使用方法发生了改变,并带来了使作战效能大大提高的战术价值。二是面向性能约束和作战效能的反舰导弹航路规划方法理论。包括航路规划的作战使用要求和航路规划基本原则、反舰导弹航路规划的决策内容和决策约束条件,以及单平台和多平台反舰导弹航路规划方法、典型应用条件下导弹航路规划指挥决策过程分析和舰艇编队导弹航路规划的决策模式等。三是反舰导弹航路规划方案评估与优化方法。论述了评估的基础理论和航路规划方案评估优化方法,建立了反舰导弹

航路规划方案评估指标体系,并建立了相应方案评估模型。四是反舰导弹航路规划的实现和航路规划的决策支持系统和仿真系统。论述了基于遗传算法的舰艇编队反舰导弹航路规划的实现,设计与实现了多平台反舰导弹协同航路规划的决策支持系统和仿真系统。

作为系统深入研究反舰导弹航路规划理论和应用的专著,本书主要面向武器装备使用、研究(研制)和教学人员。武器装备使用人员可以通过本书了解导弹航路规划作战思想,掌握导弹航路规划理论和方法;同时本书也对武器装备研究(研制)人员论证反舰导弹作战需求、研制更加适应未来作战要求的反舰导弹具有很高的参考借鉴价值;本书也可以作为导弹、指挥信息系统及相关专业的研究生或本科生教材,供专业课程学习之用。

反舰导弹航路规划理论与应用是一个涉及多领域、多学科的综合性研究课题,研究难度大,许多问题还有待进一步深入探索。并且随着技术的进步,装备性能的提升,反舰导弹航路规划理论与应用也将不断向前发展。由于作者的研究水平和研究程度的局限,本书的错误和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正,以推动反舰导弹航路规划作战理论与应用的深入发展。

作者

2015年4月于广州

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第1章 导论 .....                    | 1  |
| 1.1 反舰导弹航路规划概念及问题的界定 .....      | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....               | 4  |
| 1.2.1 国外研究现状 .....              | 4  |
| 1.2.2 国内研究现状 .....              | 6  |
| 1.3 本书架构和内容 .....               | 10 |
| 第2章 反舰导弹航路规划的战术价值 .....         | 12 |
| 2.1 基于导弹航路规划的隐蔽攻击和灵活兵力配置 .....  | 12 |
| 2.2 基于导弹航路规划的多方向攻击和全方位攻击 .....  | 14 |
| 2.3 导弹航路规避敌防空警戒区和选择性攻击方向 .....  | 16 |
| 第3章 航路规划作战使用要求和制定航路规划基本原则 ..... | 18 |
| 3.1 航路规划的作战使用要求 .....           | 18 |
| 3.1.1 对信息保障要求高 .....            | 18 |
| 3.1.2 对辅助决策要求高 .....            | 18 |
| 3.1.3 对指挥控制要求高 .....            | 19 |
| 3.1.4 对规划时效要求高 .....            | 19 |
| 3.1.5 对精确用兵要求高 .....            | 19 |
| 3.2 制定航路规划的基本原则 .....           | 20 |
| 3.2.1 战术稳妥原则 .....              | 20 |
| 3.2.2 航路安全原则 .....              | 20 |
| 3.2.3 航程最短原则 .....              | 21 |
| 3.2.4 转向最少原则 .....              | 21 |
| 3.2.5 易于实现原则 .....              | 21 |
| 3.2.6 整体协同原则 .....              | 22 |
| 3.2.7 机动服务原则 .....              | 22 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第4章 反舰导弹航路规划方法 .....                | 24 |
| 4.1 反舰导弹航路规划需要确定的内容 .....           | 24 |
| 4.1.1 确定反舰导弹攻击进入方向 .....            | 24 |
| 4.1.2 确定反舰导弹航路转向点 .....             | 25 |
| 4.1.3 导弹航路点有效性判别 .....              | 25 |
| 4.1.4 导弹总航路距离判别 .....               | 25 |
| 4.1.5 确定导弹发射时机 .....                | 26 |
| 4.2 航路规划要素的确定及战技性能对航路规划的约束 .....    | 26 |
| 4.2.1 最后一个航路点的确定 .....              | 27 |
| 4.2.2 每枚导弹相邻航路点之间航路距离的要求 .....      | 28 |
| 4.2.3 航路转向角的要求 .....                | 28 |
| 4.2.4 导弹自控段总航程的约束条件 .....           | 28 |
| 4.2.5 第一个航路点的约束条件 .....             | 29 |
| 4.3 单平台导弹航路规划图形化快速逆推方法 .....        | 30 |
| 4.3.1 反舰导弹的航路特征 .....               | 30 |
| 4.3.2 建立单平台导弹航路规划功能区域模型 .....       | 30 |
| 4.3.3 反舰导弹航路规划图形化快速逆推方法 .....       | 32 |
| 4.3.4 单航路点决策因素分析 .....              | 39 |
| 4.3.5 航路规划功能区域的战术意义及应用 .....        | 42 |
| 4.4 导弹航路交叉现象问题分析与建模 .....           | 44 |
| 4.4.1 坐标系之间的转换 .....                | 44 |
| 4.4.2 舰艇编队反舰导弹航路规划区域划分方法 .....      | 45 |
| 4.4.3 编队对多目标导弹攻击航路规划区域划分方法 .....    | 56 |
| 4.4.4 装备异型导弹舰艇编队攻击航路规划的约束条件 .....   | 57 |
| 4.5 编队导弹攻击航路规划中导弹攻击方向的分配 .....      | 59 |
| 4.6 编队导弹攻击航路规划制定过程 .....            | 61 |
| 4.6.1 明确编队导弹攻击航路规划前的已知条件和限制因素 ..... | 61 |
| 4.6.2 确定编队导弹攻击航路规划区域划分参考线 .....     | 63 |
| 4.6.3 绘制导弹飞行区域划分图 .....             | 64 |
| 4.6.4 确定各舰所发射导弹的攻击方向 .....          | 64 |
| 4.6.5 确定各枚导弹末制导雷达开机点位置 .....        | 64 |
| 4.6.6 确定各枚导弹最后一个航路转向点的位置 .....      | 65 |
| 4.6.7 确定各枚导弹其他航路转向点的位置 .....        | 65 |

|            |                                |           |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 4.6.8      | 各枚导弹航路转向点数量及位置的优化              | 66        |
| 4.6.9      | 导弹捕捉概率判别                       | 66        |
| 4.6.10     | 确定各枚导弹的发射时机                    | 67        |
| <b>第5章</b> | <b>反舰导弹航路规划典型应用下的指挥决策</b>      | <b>68</b> |
| 5.1        | 实施高效多方向攻击航路规划的指挥决策             | 68        |
| 5.1.1      | 多方向攻击航路规划的使用时机                 | 68        |
| 5.1.2      | 多方向攻击可行性分析                     | 69        |
| 5.1.3      | 多方向攻击时航路规划决策应注意的问题             | 70        |
| 5.2        | 攻击隐蔽在近岛岸附近目标时航路规划的指挥决策         | 71        |
| 5.2.1      | 近岛岸对导弹攻击的影响                    | 71        |
| 5.2.2      | 对攻击岛岸附近预定目标射击方向的选择             | 72        |
| 5.2.3      | 攻击近岛岸附近目标时航路各转向点的确立            | 73        |
| 5.3        | 充分利用地形掩护实施攻击时航路规划的指挥决策         | 74        |
| 5.3.1      | 地形掩护攻击对航路规划决策的影响               | 74        |
| 5.3.2      | 地形掩护攻击时航路规划决策的要求               | 74        |
| 5.3.3      | 地形掩护攻击时航路规划决策应注意的问题            | 74        |
| 5.4        | 选择合适的攻击方向进行攻击时航路规划的指挥决策        | 75        |
| 5.4.1      | 选择攻击方向航路规划的使用时机                | 75        |
| 5.4.2      | 选择攻击方向对航路规划决策的影响               | 76        |
| 5.4.3      | 选择方向攻击时航路规划决策的要求               | 76        |
| 5.4.4      | 选择方向攻击时航路规划决策应注意的问题            | 76        |
| 5.5        | 通过敌防空警戒区实施攻击时航路规划的指挥决策         | 76        |
| 5.5.1      | 目标防空警戒区对航路规划决策的影响              | 77        |
| 5.5.2      | 通过目标防空警戒区攻击时航路规划决策的要求          | 77        |
| 5.5.3      | 通过目标防空警戒区攻击时航路规划决策应注意的问题       | 78        |
| <b>第6章</b> | <b>舰艇编队对海导弹攻击航路规划决策体系及使用原理</b> | <b>79</b> |
| 6.1        | 舰艇编队对海导弹攻击航路规划模式               | 79        |
| 6.1.1      | 舰艇编队对海导弹攻击航路规划决策结构             | 79        |
| 6.1.2      | 集中式航路规划                        | 80        |
| 6.1.3      | 分散式航路规划                        | 81        |
| 6.1.4      | 分布式航路规划                        | 83        |
| 6.2        | 舰艇编队导弹攻击航路规划时序描述               | 85        |

|              |                                   |            |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 6.2.1        | 舰艇编队导弹航路规划的 UML 时序图模型 .....       | 85         |
| 6.2.2        | 舰艇编队导弹航路规划的 UML 活动图模型 .....       | 87         |
| 6.3          | 舰艇编队导弹攻击航路规划决策体系结构 .....          | 88         |
| 6.3.1        | 舰艇编队对海导弹攻击航路规划问题领域分析 .....        | 89         |
| 6.3.2        | 舰艇编队对海导弹攻击航路规划作战体系结构模型设计 .....    | 89         |
| 6.4          | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击样式 .....         | 93         |
| 6.4.1        | 传统的舰艇编队对海导弹攻击样式及其利弊分析 .....       | 93         |
| 6.4.2        | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击样式 .....         | 94         |
| 6.5          | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击的目标选择和火力分配 ..... | 95         |
| 6.5.1        | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击的目标选择 .....      | 95         |
| 6.5.2        | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击的火力分配 .....      | 96         |
| 6.5.3        | 舰艇编队对海导弹攻击的火力分配模型及其解算 .....       | 98         |
| 6.6          | 航路规划条件下舰艇编队导弹攻击时间的选择和确定 .....     | 101        |
| 6.6.1        | 舰艇编队导弹攻击基准时刻 .....                | 101        |
| 6.6.2        | 齐至攻击时各突击群(舰艇)发射时刻的确定 .....        | 101        |
| 6.7          | 航路规划条件下舰艇编队对海导弹攻击过程设计 .....       | 102        |
| 6.7.1        | 航路规划技术的运用对反舰导弹攻击阶段划分的影响 .....     | 102        |
| 6.7.2        | 舰艇编队对海导弹航路规划攻击过程设计 .....          | 102        |
| <b>第 7 章</b> | <b>反舰导弹航路规划的方案评估与优化 .....</b>     | <b>106</b> |
| 7.1          | 导弹航路规划指挥决策的优化思想 .....             | 106        |
| 7.2          | 方案评估方法理论基础 .....                  | 106        |
| 7.3          | 导弹航路规划指挥决策的基本样式 .....             | 108        |
| 7.3.1        | 航路规划决策基本样式 .....                  | 108        |
| 7.3.2        | 影响因素分析 .....                      | 108        |
| 7.4          | 导弹航路规划方案效能评估的决策树模型 .....          | 109        |
| 7.5          | 导弹航路规划方案效能评估指标体系的确定 .....         | 111        |
| 7.5.1        | 建立指标体系的要求 .....                   | 111        |
| 7.5.2        | 方案效能层次分析 .....                    | 112        |
| 7.5.3        | 单枚导弹对单目标航路规划方案评估指标体系 .....        | 112        |
| 7.5.4        | 多枚导弹对单目标航路规划方案评估指标体系 .....        | 115        |
| 7.5.5        | 多枚导弹对多目标攻击航路规划方案评估指标体系 .....      | 122        |
| 7.5.6        | 反舰导弹航路规划方案评估指标体系分析 .....          | 124        |
| 7.6          | 模糊多属性综合评估方法 .....                 | 125        |

|               |                                     |            |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 7.6.1         | 决策矩阵的规范化及其统一性质 .....                | 126        |
| 7.6.2         | 指标权重的求取 .....                       | 127        |
| 7.6.3         | 循环排序和逆序的解决方法及其论证 .....              | 129        |
| 7.6.4         | 模糊多属性综合评估方法 .....                   | 130        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>基于遗传算法舰艇编队对海导弹攻击航路规划实现 .....</b> | <b>132</b> |
| 8.1           | 基于遗传算法舰艇编队导弹攻击航路规划模型建立 .....        | 132        |
| 8.1.1         | 舰艇编队导弹攻击航路规划评价 .....                | 132        |
| 8.1.2         | 航路种群个体编码 .....                      | 133        |
| 8.1.3         | 初始化群体的设定 .....                      | 134        |
| 8.1.4         | 适应值函数设计 .....                       | 134        |
| 8.1.5         | 遗传操作设计 .....                        | 135        |
| 8.1.6         | 方案求解的控制参数设定 .....                   | 137        |
| 8.2           | 算例分析 .....                          | 137        |
| 8.2.1         | 算例基本假设 .....                        | 137        |
| 8.2.2         | 攻击任务下达 .....                        | 138        |
| 8.2.3         | 方案规划结论 .....                        | 138        |
| 8.2.4         | 结论分析 .....                          | 140        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>舰艇编队对海导弹攻击航路规划决策支持系统 .....</b>   | <b>141</b> |
| 9.1           | DSS 的设计概述 .....                     | 141        |
| 9.1.1         | DSS 的设计思想 .....                     | 141        |
| 9.1.2         | DSS 的设计内容 .....                     | 142        |
| 9.2           | 数据库的设计 .....                        | 143        |
| 9.2.1         | 实时数据库 .....                         | 143        |
| 9.2.2         | 预置数据库 .....                         | 144        |
| 9.3           | 模型与数据库(DB)的关系 .....                 | 145        |
| 9.4           | 系统总控程序的设计 .....                     | 146        |
| 9.5           | FMPPDSS 决策方案的决策支持 .....             | 148        |
| <b>第 10 章</b> | <b>舰艇编队导弹航路规划仿真系统 .....</b>         | <b>149</b> |
| 10.1          | 仿真需求及系统结构组成 .....                   | 149        |
| 10.1.1        | 仿真需求 .....                          | 149        |
| 10.1.2        | 仿真系统的结构组成 .....                     | 150        |

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| 10.2       | 仿真系统的面向对象分析 .....      | 150 |
| 10.2.1     | 仿真系统的静态结构模型 .....      | 151 |
| 10.2.2     | 仿真系统的动态行为模型 .....      | 151 |
| 10.3       | 仿真系统的设计 .....          | 153 |
| 10.3.1     | 仿真系统的 SOM 描述 .....     | 153 |
| 10.3.2     | 仿真系统的 FOM/SOM 设计 ..... | 153 |
| 10.4       | 仿真系统的实现 .....          | 156 |
| 10.4.1     | 仿真策略和时间管理 .....        | 156 |
| 10.4.2     | 模型的建立 .....            | 158 |
| 10.4.3     | 联邦成员的实现 .....          | 159 |
| 参考文献 ..... |                        | 161 |

# 第1章 导 论

反舰导弹是用于攻击敌方水面舰船的导弹，反舰导弹作为当前信息化海上作战中攻击海上水面目标最主要的制导武器，其发展一直受到各国海军的高度重视，而科学技术的发展和战场条件的变化，对反舰导弹的更新换代又起到了推波助澜的作用。当今海上突击作战中，实施超视距远程攻击是交战双方共同追求的作战形式，因此具有大射程的远程反舰导弹已成为反舰导弹重要的发展方向。反舰导弹具备大的射程和远程攻击能力后，在长距离的接敌过程中按一条什么样的飞行路径对目标进行攻击，从而使攻击效果更加理想、攻击战术更加灵活、战术协同更加便捷、攻击目的更易实现，这是反舰导弹设计人员和作战使用人员非常关心的问题。具体而言，就是反舰导弹从发射点到导弹末制导雷达预定开机点这一段弹道将按照什么规律进行飞行和控制才能最好地达到攻击目的，我们称这个问题为反舰导弹的航路规划问题。反舰导弹航路规划的目的就是利用海上战场环境和作战态势，在满足各种约束条件的前提下，规划反舰导弹的飞行航路，达到最佳攻击效果，从而更好地实现作战意图，提高反舰导弹的作战效能。

当今世界各国远程反舰导弹一般在技术上均已实现了航路规划的功能，反舰导弹航路规划的实现，使海上作战中火力机动代替了传统的平台机动，改变了许多传统的攻击样式，对海上突击作战中的战术和指挥理论带来巨大影响，深刻改变了对海作战的理念和方法。但目前对具有航路规划功能的反舰导弹在航路规划方面的作战应用研究还不够深入和系统，对其作战价值的挖掘还不够。本书主要研究反舰导弹航路规划的理论及作战应用，将全面系统地论述反舰导弹航路规划的战术价值，建立制定反舰导弹航路规划基本原则，确定反舰导弹航路规划方法，分析研究反舰导弹航路规划典型应用下的指挥决策，作战使用以及航路规划的方案评估与优化，研讨多平台反舰导弹协同航路规划的实现等问题，推动反舰导弹航路规划应用理论的深入发展。

## 1.1 反舰导弹航路规划概念及问题的界定

航路规划(Path Planning)的概念是从 20 世纪 80 年代开始，在发展综合地形跟随/地形、威胁回避(Terrain Following/Terrain Avoidance and Threat Avoidance, TF/TA<sup>2</sup>)技术的基础上提出的，是指在特定的约束条件下，寻找运动物体从初始点

到目标点,并且满足某种性能指标和某些约束的最优运动路线、路径。它的研究对象包括飞行器、水面舰艇、地面车辆及机器人等。航路规划又称路径规划,是飞行器任务规划的核心技术之一,通常是指在综合考虑飞行器机动性能、突防概率、碰地概率和飞行时间等约束因素下,寻找一条从起始点到目标点的最优或可行的飞行轨迹。

随着航路规划技术在“战斧”等巡航导弹上的成功应用,航路规划的研究日益受到世界各国的重视。航路规划是信息时代的产物,它大量应用信息时代的新技术,特别是“3S”技术,即 GPS(Global Positioning System),GIS(Geographic Information System)和 RS(Remote-sense System)技术。运用 GPS 技术可以为飞行器提供高精度的导航能力,利用 GIS 和 RS 技术及其他情报手段可以获得地形和敌情信息。航路规划可以用精确的数字地图来描述真实地形,从而用数字地形检索来取代传统的 TF(Terrain Following)雷达,达到提高隐蔽性的效果。

研究反舰导弹航路规划问题,首先就要弄清它的反舰导弹航路规划的相关概念和定义。许多专家学者根据各自的研究方向和研究目的给出了航路规划的不同定义。下面分别从面向技术要求的一般飞行器航路规划和面向军事问题背景的反舰导弹航路规划两个方面来进行综述分析。

在对一般飞行器航路规划问题论述中,国内许多学者给出了对航路规划的一般性描述,如闵昌万<sup>[9]</sup>将航路规划定义为:航迹规划是指在特定约束条件下,寻找运动体从初始点到目标点满足某种性能指标最优的运动轨迹。何珮<sup>[20]</sup>从航路规划的问题需求角度出发,提出了规划空间的概念,将上述航路规划的定义加强为:航迹规划是指在给定的规划空间内,寻找飞行器从起始点到达目标点且满足某些约束条件并使某项性能指标达到最优的飞行轨迹。这两种有代表性的定义明确了航路规划问题的数学本质,得到了国内外从事信息科学和系统工程领域研究专家学者的广泛认同。

对于反舰导弹这类飞行器的航路规划问题,许多研究人员和专家都是在上述一般飞行器航路规划定义的基础上,根据各自的研究问题将此定义中的概念元素具体化,并从一定的作战背景出发来进行描述的,例如王涛<sup>[10]</sup>从反舰导弹航路规划的军事问题背景出发,将其定义为:弹道规划是指反舰导弹在技术上应具备一定功能,使导弹在发射前,可以由发射操作人员或指挥员根据实际的战场态势和作战需要,对导弹的飞行弹道进行设定,使得导弹在发射后,其弹道轨迹按照事先设定的弹道飞行。龙飞和刘鼎臣<sup>[16]</sup>对不同层次的航路规划进行了界定,并将上述定义中的实施过程具体化,得到航路规划的定义:反舰导弹航路规划有广义和狭义之分。广义的航路规划指对导弹整个飞行弹道的规划,包括发射、中制导、末制导等各个阶段。狭义的航路规划仅指对导弹弹道中段的规划,通常根据预定的攻击方案,发射前给每枚导弹装定飞行航路特征点或转向角和转向时间,导弹发射后首先向第一个航路特征点飞行;到达第一个航路特征点后,按预

定转角转向第二个航路特征点飞行；如果设定了多个航路特征点，则可以依次转向机动飞行。中段弹道又包括水平方向上的弹道规划(即侧向弹道规划)和铅垂方向上的弹道规划(即纵向弹道规划)。本书中的论述均指狭义上的反舰导弹侧向航路规划。陈玉文<sup>[17]</sup>结合反舰导弹的航路特征，所给出的定义更具针对性：反舰导弹航路规划是求解从导弹发射点至末制导系统开机点之间满足各种约束条件的最优或次优航路点集合。该定义的规定较为具体，针对性较强，主要体现在以下三个方面：首先，对于反舰导弹来说，由于主要是对其自控飞行段进行规划，而自控飞行段的终点为末制导系统开机点，于是将“目标点”具体化为“末制导系统开机点”；其次，将“运动(飞行)轨迹”具体化为“航路点集合”，将航路以航路点经纬度坐标的方式表达，这样更加符合反舰导弹“直线航段+转弯时弧线航段”的飞行航路特征；第三，将“最优”改为“最优或次优”，这是因为，虽然航路规划问题通常可抽象为一个多约束的多目标优化问题，但与其他优化问题不同的是，航路规划并不存在经典数学上的最优，在航路满足性能约束的前提下，而仅需根据实际需要来规划一条可行的、同时又较为合理的航路。

以上种种定义从航路规划军事问题的角度理清了反舰导弹航路规划的概念，界定了不同层次的航路规划的研究范畴，为我国从事航路规划军事运用研究的专家学者奠定了基础。

综上所述，我们认为从技术外在表现和军事内在需求两个方面相结合来定义反舰导弹航路规划的概念将更能反映反舰导弹航路规划这一问题的本质。因此，我们认为，反舰导弹航路规划是指，在规划空间内，设置一条反舰导弹从发射点到目标点满足给定约束条件，取得高效攻击效能的飞行航路，使反舰导弹发射后的弹道轨迹按照设定的航路飞行。此定义表明了进行反舰导弹航路规划三个方面的含义：一是反舰导弹的飞行航路应是可以设定的，即该导弹首先应该具有航路规划的功能，这是研究问题的基础；二是实施反舰导弹航路规划的目的是为了达到好的攻击效果，取得高的攻击效能；三是反舰导弹的航路规划并不能按照人的主观意愿任意规划，它需满足一定的约束条件，受到技术和战术等多方面的制约。定义中的导弹目标点一般并不是指反舰导弹攻击的目标，而是指导弹末制导雷达的开机点。导弹的最优或可行的飞行航路可以航路点坐标的方式进行表达。

反舰导弹航路规划实际上就是作战平台上的反舰导弹武器系统指挥和操纵人员，在导弹发射前，根据实际的战场态势和各种相关作战信息，包括目标位置、运动状态、目标类型、目标威胁和威胁分布等目标信息，以及海上环境、海情特征和反舰导弹自身的飞行性能(约束条件)，如最大有效航程、最小转弯半径、飞行高度及飞行速度等结合作战需求对导弹的飞行弹道进行设定，使得导弹在发射后，按照事先设定的弹道飞行，规划所得到的航路通常是满足特定约束条件的一条全

局最优或次优的参考航路。

在水面舰艇防空技术日益先进、防空体系日益完善的现代海战中，航路规划已成为提高反舰导弹作战效能，实施远程精确打击的有效手段。作为提高反舰导弹作战能力的重要措施，航路规划技术目前正逐渐被反舰导弹所应用，使得反舰导弹具有越来越强的作战能力。这里尤其需要指出，航路规划只是反舰导弹作战使用的一个可选战术功能，并不是必选项。在实际作战中，必须根据具体的战场情况因素来决定是否使用反舰导弹的航路规划功能。

反舰导弹航路规划是在现代信息化条件下由海上火力机动战理论所催生的新的技术产物。航路规划技术在给反舰导弹作战效能带来巨大提升的同时，将给传统基于直航式反舰导弹的攻击战术带来巨大影响，使传统的导弹攻击的方法运用发生改变，如何运用航路规划技术以充分发挥反舰导弹武器的作战效能，已成为目前导弹攻击作战理论领域亟待解决的新问题。

## 1.2 国内外研究现状

航路规划作为任务规划的主要功能之一，在任务规划系统中占有重要的地位。对反舰导弹而言，任务规划是指为圆满完成所要实施的攻击行动而做的前期计划，一般包括导弹发射平台初始位置的选取、攻击目标的选择与确定、飞行航迹的确定、支援力量的配置、武器的投放、发射时间和地点的选择、发射平台情况以及攻击批次的确定等。而航路规划往往是指单一的反舰导弹在初始位置、攻击目标位置和相应其他任务结点确定之后的航迹优化问题。反舰导弹的航路规划是为其任务规划服务的。本节分别介绍国内外对航路规划的研究现状，从不同角度对其研究进展进行分析和总结。

### 1.2.1 国外研究现状

航路规划的概念实际上在 20 世纪 80 年代初就有提出。由于受到当时技术水平低、防空体系不完善等诸多因素的限制，军用飞行器对航路规划的要求不高，航路规划基本上还依赖于规划人员的手工操作。80 年代以来，美、英、德等国在战术飞行器的航路规划方面进行了不断的研究，在该领域已经做了大量的工作。到 80 年代中后期，纯人工规划已经无法处理涉及的各种复杂因素，于是美国投入大量的人力物力进行自动航路规划技术的研究，取得了一定的成功，其中以系统控制技术公司 (System Control Technology Incorporation) 为空射巡航导弹 (Air-Launched Cruise Missile) 开发的自动航迹产生模块 (Automatic Routing Module) 和波音航空航天公司开发的基于人工智能 (Artificial Intelligence) 的任务规划软件为代表。但是这两个航路规划系统在实际应用上还有许多不足。90 年代以来，美

国国家航空航天局(NASA)和美国军方联合开展了一项名为 ANOE(Automated Nap-of-the-Earth) 的研究计划,旨在辅助直升机驾驶员实施贴地 NOE(Nap-of-the-Earth)飞行,该计划主要是利用机载传感器获取环境信息结合导航系统数据,实时产生 NOE 最优轨迹,并给出沿最优轨迹飞行的导引控制指令。而 ANOE 实际上研制的是个实时航迹规划系统。

90 年代末,发达国家在巡航导弹以及远距离攻击中已广泛采用航路规划技术。随着航路规划技术在“战斧”等巡航导弹上的成功应用,对航路规划方法的研究日益受到世界各国的重视。美国研制的任务规划系统已发展到第三代,处于绝对领先地位,目前正朝着提高效率和降低系统成本等方面继续发展。

航路规划算法是航路规划的灵魂,在航路规划算法的研究中,大量文献对算法已经作了不同程度的综述。航路规划一般采用分层规划方法,根据规划层次不同,可以将航路规划算法分为任务级航路规划算法和战术级航路规划算法两大类。任务级航路规划的目的是获得参考航路,从而减少战术级航路规划的搜索空间。这类航路规划的方法有网络法、符号规划方法、试探法和知识推理法等。战术级航路规划实质是航路优化问题,它可以运用最优控制理论求解,其算法也有很多。有的文献利用极小值原理对最优  $TF/TA^2$  问题进行初步处理后,运用梯度算法给出了一组求解最优控制和动态方程的迭代公式,但仅考虑了飞行器的运动学特性。美国海军研究院采用“随机射线优化”方法给出了一种最优突防航路的确定方法。这种方法利用已有文献中给出的  $A^*$  算法划分搜索空间,然后在搜索空间内运用光线折射的斯内尔定律搜索最优航路。这种方法的优化速度很快,但不能处理绕过障碍的航路。如果按照规划决策的计算方法分,可以将航路规划算法分为最优式和启发式算法,也就是传统规划法和智能规划法。Geiger 等把航迹规划看成一个拉格朗日最优控制问题,建立其非线性规划模型,考虑了多种等式及不等式约束条件,建立了关于距离、控制代价的积分型多目标函数,并采用直接配置(Direct Collocation NLP, DCNLP)非线性规划法求解此模型,最终得到由控制变量生成的满足约束的最优航迹。Misove 把航路规划处理成一个非线性优化问题,还考虑了时间约束,将目标函数解释为一个与时间相关的函数,建立了具有时间约束的航路规划数学优化模型,并给出了一种基于连续二次规划的航路生成方法。Bollion 等利用最优控制的相关理论和方法求解航路规划问题。把航路规划转化为一个迈耶尔型的约束泛函极值求解问题,给定航路初始状态变量和终止状态变量,其中各变量分别代表时间、高度、经度、纬度、速度、航迹倾角、航迹偏角,把实际得到的航迹终点与给定的终点位置误差作为目标函数,建立终值型目标函数,通过改变控制变量的值,使目标函数值最小,但是整个动态过程中对状态及控制的演变不做要求。如果结合空间,按照几何学的观点分类,可以分为基于栅格(Grid-based)的算法和基于图形(Graph-based)的算法。Doyle 研究了基于切线的机器

人航路规划方法,该方法并不是针对反舰导弹进行研究,但是所得出的航路大致符合反舰导弹的航路特征,由于该方法采用跳跃式边界扫描求取切线,而非直接求取切线,这就使得算法的计算速度较慢。Helgason 提出了一种基于几何学的巡航导弹航路自动生成算法,通过构造对航路造成威胁的障碍物的外接等腰三角形,选择外接三角形的部分边作为规避该障碍物的航路段,采用边界弹跳法进行启发式搜索,得到最优航路。该方法适用于处理圆形和凸多边形的障碍物,但是在外接三角形的外接点和其底边顶点之间选取航路点时,采用进行大量实验的方法,这一点缺乏严格的理论依据。还可以借助分层规划的思想,将航路规划算法分为任务级航路规划算法和战术级航路规划算法两大类。也可以分为离线规划和在线实时规划两个阶段或者分为整体参考航迹规划和局部航迹动态优化两个层次。

对于多飞行器编队航路规划方面,关键问题在于多个飞行器之间的协同。Freund 采用集中处理分层控制方式提出了一种多个机器人避障协同路径规划算法,可满足动态环境的需要。McLain 提出了一种多架无人机编队进行协同的分解策略,它的主要思想是单机在考虑整个编队要求的情况下分别计算自己的最优航迹。McLain 还同时考虑了多无人机的空间协同约束、任务执行时序约束和时间约束等多类协同约束关系,但带来了算法搜索空间巨大的问题。Ram 在反应控制领域进行了深入的研究,主要用于机器人路径规划问题,机器人如何通过学习来调整它们的行为结构和控制参数,这些研究已经扩展到多个机器人之间的协同问题上。

航路规划技术在巡航导弹上得到了深入应用。据《简氏防务周刊》报道,2002 年底,挪威海军与康斯堡公司合作开发 NSM 导弹,在整个飞行阶段,采用全球定位系统、惯性与地形轮廓匹配导航技术相结合进行导航,经过弹道试射,导弹可以通过编程控制进行极其精确的导航,航路点可达几百个,作战时,可以对 8 枚导弹进行导航。又如,瑞典萨伯—博福斯公司研制的第三代 RBS15 MK3 反舰导弹,射程为 200km,采用新的作战规划系统-MEPS,用于目标及航迹规划,这样可使 RBS15 MK3 导弹沿着预先规划好的 10 个航迹点飞行,并具备 90°转弯机动飞行的能力。这类导弹既可从不同的方向同时到达目标,也可以全部从目标的同一侧进行攻击。

但目前看到的国外对于航路规划技术和理论内容比较具体的文献主要集中在航路规划算法方面,基于编队的反舰导弹航路规划方面的研究较少见到。

### 1.2.2 国内研究现状

目前,国内关于飞行器航路规划的研究主要集中在航路规划各种算法,研究也比较深入,许多专家、学者在这方面作了大量的研究工作,并有多篇论文发表。主要有以下几个方面: