

电子与信息作战丛书

导弹飞行仿真

Jeffrey Strickland 著

窦文辉 廖守亿 等 译



科学出版社

电子与信息作战丛书

导弹飞行仿真

Jeffrey Strickland 著

窦文辉 廖守亿 等 译

科学出版社

北京

图字:01-2015-6869

内 容 简 介

本书是关于导弹动力学与控制、仿真技术相结合的教科书,以面空导弹为研究对象,将导弹动力学、运动学模型和仿真技术及其应用有机结合起来,源于理论但紧贴实际,简单实用,易于理解消化,具有很强的操作性。本书详细介绍导弹飞行仿真所涉及的导弹动力学模型、空气动力学模型、推进模型、导弹和目标运动模型、制导控制模型、场景仿真、系统实现、模型校核与验证、仿真系统集成等。

本书可作为导弹动力学与控制、仿真技术等专业的研究生教材,也可供导弹武器系统建模、飞行仿真系统的研究人员和工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

导弹飞行仿真/(美)杰弗里·斯特里克兰(Jeffrey Strickland)著;窦文辉等译. —北京:科学出版社,2018. 1

(电子与信息作战丛书)

书名原文:Missile Flight Simulation

ISBN 978-7-03-056333-0

I. ①导… II. ①杰… ②窦… III. ①导弹-飞行试验-计算机仿真
IV. ①TJ760. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 008917 号

责任编辑:魏英杰 王晓丽 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 1 月第一次印刷 印张:19

字数:383 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“电子与信息作战”丛书编委会

顾 问:李 天 孙 聪 刘志敏 李燕东 魏金钟
主 编:张 澎
编 委:王永庆 陈 刚 薛 晖 傅盛杰
桑建华 戴全辉 苏士明 邓龙江
丁鹤雁 许小剑 周建江 高 铁
高 健

译者名单

窦文辉	廖守亿	孙文侠	郑青阳
王保成	姜才胜	姜伟	吴周放
江世强	袁长普	刘天兴	周志杰
梁 烨			

“电子与信息作战”丛书序

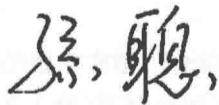
21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代。电子与信息技术的迅猛发展和广泛应用,推动了武器装备的发展和作战方式的演变,促进了军事理论的创新和编制体制的变革,引发了新的军事革命。电子与信息作战最终将取代机械化作战,成为未来战争的基本形态。

火力、机动、信息是构成现代军队作战能力的核心要素,而信息能力已成为衡量作战能力高低的首要标志。信息能力,表现在信息的获取、处理、传输、利用和对抗等方面,通过信息优势的争夺和控制加以体现。信息优势,其实质是在获取敌方信息的同时阻止或迟滞敌方获取己方的情报,处于一种动态对抗的过程中,已成为争夺制空权、制海权、陆地控制权的前提,直接影响整个战争的进程和结局。信息优势的建立需要大量地运用具有电子与信息技术、新能源技术、新材料技术、航天航空技术、海洋技术等当代高新技术的新一代武器装备。

如何进一步推动我国电子与信息作战的研究与发展?如何将电子与信息技术发展的新理论、新方法与新成果转化为一代武器装备发展的新动力?如何抓住军事变革深刻发展变化的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国国防科技工作者和工程技术人员的上下求索和艰辛付出。

“电子与信息作战”丛书是由设立于沈阳飞机设计研究所的隐身技术航空科技重点实验室与科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播和推广未来电子与信息作战技术重点发展领域,介绍国内外优秀的科研成果、学术著作,涉及信息感知与处理、先进探测技术、电子战与频谱战、目标特征减缩、RCS 测试与评估等多个方面。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性。

希望这套丛书的出版,能为我国国防科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。



中国工程院院士

前 言

1993年,我在美国陆军学院执教时,从事“爱国者导弹”系统的“后沙漠风暴”可靠性分析。由于导弹飞行力学知识匮乏,我便潜心自学。1994~2007年,投身国防部导弹防御研究项目。2008年,供职于导弹防御局,进行导弹飞行仿真和导弹威慑建模工作。在此工作的最后5年里,我以学习所得编纂了本书。

第1章是导弹飞行仿真的背景知识,包括仿真特征、仿真目的和仿真实现,以及本书的编写目的、涵盖范围和结构组成。

第2章概括描述导弹飞行仿真中重要的子系统及其功能。其中,2.2节介绍物理导弹导引头、自动驾驶仪、(飞行)控制、战斗部和引信、推进系统以及弹体。

第3章是导弹飞行仿真综述。讨论飞行仿真的四大主要目标——要求条件、导弹的设计和操作、导弹性能评估以及仿真训练。描述导弹的制导与控制,以及导弹与打击目标的运动情况;讨论坐标系的作用,还有配合仿真目标的仿真标准细节等。

从第4章开始,对应用于导弹飞行仿真的数学方法进行介绍。这种方法在前面几章讨论过,包括计算导弹所受的各种力和力矩,并代入公式得出载体加速度。本章介绍牛顿第二运动定律,提出这种计算方法,并推导出平移和旋转运动的计算公式,证明这些等式与旋转参考坐标系有关,能够计算出惯性陀螺转子的陀螺力矩。

导弹飞行仿真要求计算作用于导弹上的力和力矩。第5章详细介绍空气动力和力矩。讨论空气动力数据的多种来源。阐述力和力矩系数形式的空气动力数据,定义稳定导数。给出应用数据计算空气动力矢量力 F_A 和力矩 M_A 的方法与公式。讨论大气的性能(密度、压力、黏度、声速)及气流参数(马赫数和雷诺数)对空气动力各个力和力矩的影响。提出简化计算方法和适用于旋转坐标系的特殊计算方法。

第6章简述不同类型的导弹推进系统,并给出详尽的方法,以确定火箭发动机固体推进剂在每个计算步长中的力和力矩矢量。对推进剂颗粒的初始温度、环境大气压力、质量和惯量变化,以及发射筒发射进行讨论。

第7章描述导弹飞行仿真中计算导弹和空中目标运动的数学方法。介绍地球引力、空气动力、推力(第4章~第6章)和载体运动方程(第4章)相结合的方法。对处理不同数量自由度的变化进行描述;给出模拟简单目标机动规避的方程。提出计算接近矢量和接近时间的方法。

第8章介绍导弹制导与控制功能的仿真方法。仿真方法取决于导弹制导系统的类型,也取决于仿真的目的,因此给出具体的计算方法,以满足不同建模的要求。制导与控制功能包括导引头、制导处理器、自动驾驶仪和控制系统。

在极具保真度的水平上,给出光学和射频导引头的建模方法。通过完美跟踪和精确跟踪得出导引头低可信度模型,这种模型存在时间延迟。描述一种中等可信度导引头模型——有利于分析导引头视场内多个跟踪点的不同效果。同时,为使导引头仿真具有高可信度,在仿真回路中采用实际的导引头硬件设备。

给出弹载和地基目标跟踪器在不同仿真可信度条件下对制导系统处理器进行建模的方程。制导律的类型包括比例导引、指令和视线指令制导。介绍使用传递函数模拟控制系统对制导指令响应的方法。

讨论导弹半实物仿真中的两种实物替换方式——导引头在回路中的方式和导弹电子设备在回路的方式。同时,对仿真回路中采用实际导弹自动驾驶仪和控制系统硬件进行描述。出于仿真回路中对使用硬件的处理过程的特殊考虑,提供一份清单。

第9章介绍目标场景仿真的需求。有三种场景类型:纯数学飞行仿真的数学场景、半实物仿真中使用导引头的实物场景、半实物仿真中使用导引头电子硬件的电子场景。对光学和射频传感器场景仿真的方法及设备进行介绍,场景要素包括目标、背景和对抗措施。

第10章选择适于完成各类公式和算法的计算机系统;选择仿真开发的计算机语言;运用数字技术解决数字问题;对半实物仿真的飞行仿真进行特别说明。

第11章确保仿真过程具有可接受的置信度水平,能够代表实际导弹性能的综述。讨论仿真过程中与校核和验证相关的术语。强调满足仿真目标所需的验证工作,提出仿真验证的一系列可能方法。

第12章举例说明仿真中满足仿真目标的详细标准要求,演示通过子系统模型合成一次完整飞行仿真的方法。应用 MATLAB® 和 SIMULINK™ 完成对模型设计和需要运行的仿真技术,给出仿真结果并进行分析。

目 录

“电子与信息作战”丛书序

前言

第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.1.1 导弹飞行仿真描述	2
1.1.2 导弹飞行仿真的目的	3
1.1.3 导弹飞行仿真的实现	4
1.2 本书的编写目的	4
1.3 本书的涵盖范围	5
1.4 本书的结构组成	5
第2章 导弹系统概述	6
2.0 符号表	6
2.1 引言	6
2.2 导弹	8
2.2.1 导引头	8
2.2.2 自动驾驶仪	20
2.2.3 控制	20
2.2.4 战斗部和引信	24
2.2.5 推进系统	28
2.2.6 弹体	32
第3章 导弹仿真综述	34
3.0 符号表	34
3.1 引言	34
3.2 导弹仿真的目的	36
3.2.1 导弹仿真目的分析	36
3.2.2 本书侧重的仿真目的	39
3.3 导弹仿真的要素	39
3.3.1 导弹制导与控制的仿真	39
3.3.2 导弹和目标运动仿真	40
3.3.3 坐标系的作用	44

3.3.4 计算周期	47
3.4 仿真的细节层次	49
3.4.1 匹配仿真目标的建模	50
3.4.2 满足本书目标所需的模型复杂度	51
第4章 导弹动力学	53
4.0 符号表	53
4.1 引言	56
4.2 术语和规约	57
4.3 基本方程	59
4.3.1 牛顿第二运动定律	60
4.3.2 旋转参考系	61
4.4 力和力矩	65
4.4.1 空气动力和力矩	65
4.4.2 推力和力矩	67
4.4.3 重力	70
4.5 运动方程	73
4.5.1 平移方程	74
4.5.2 转动方程	76
4.6 运动方程的应用	81
第5章 作用在导弹上的空气动力	82
5.0 符号表	82
5.1 引言	84
5.2 空气动力系数	85
5.2.1 空气动力系数的应用	85
5.2.2 阻力系数	90
5.2.3 升力系数	93
5.2.4 力矩系数	94
5.3 气动稳定性导数	97
5.3.1 升力曲线斜率	99
5.3.2 静态俯仰稳定性导数	99
5.3.3 动态稳定性导数	99
5.3.4 滚动稳定性导数	100
5.4 空气动力系数的确定	100
5.4.1 分析预测法	101
5.4.2 风洞测试	102

5.4.3 飞行试验	104
5.5 大气特性	105
5.6 导弹空气动力和力矩公式	106
5.6.1 力和力矩	106
5.6.2 系数	107
5.6.3 简化式	108
5.7 滚动弹体考虑因素	109
5.7.1 滚动参考坐标系	110
5.7.2 忽略低滚动速率	111
5.7.3 平均空气动力系数	111
5.7.4 马格努斯效应	112
5.7.5 舵偏角调制	112
第6章 导弹推进系统	113
6.0 符号表	113
6.1 引言	113
6.2 推进系统分类	114
6.2.1 固体推进剂火箭发动机	114
6.2.2 吸气增强式火箭发动机	114
6.2.3 液体推进剂火箭发动机	115
6.2.4 涡轮喷气发动机	115
6.2.5 冲压发动机	115
6.3 推力和质量参数仿真	115
6.3.1 药柱温度	116
6.3.2 参考条件	116
6.3.3 质量变化	116
6.3.4 筒式发射	117
6.4 推力和力矩矢量	117
第7章 导弹及目标运动	119
7.0 符号表	119
7.1 引言	123
7.2 坐标系	123
7.3 导弹运动	124
7.3.1 初始状态	124
7.3.2 导弹飞行	125
7.4 目标运动	137

7.4.1 匀速直线飞行	138
7.4.2 机动飞行	138
7.5 导弹目标相对几何关系	142
7.5.1 相对位置	143
7.5.2 相对姿态	143
7.5.3 脱靶距离	144
第8章 制导与控制建模	148
8.0 符号表	148
8.1 引言	151
8.2 制导模型	152
8.2.1 导引头建模	152
8.2.2 制导处理器建模	160
8.2.3 自动驾驶建模	164
8.2.4 陆基制导建模	167
8.3 控制系统建模	171
8.4 硬件替换	173
8.4.1 导弹硬件替换的描述	174
8.4.2 导引头硬件替换	177
8.4.3 自动驾驶仪硬件替换	179
8.4.4 控制系统硬件替换	179
第9章 场景仿真	180
9.1 引言	180
9.2 场景要素	181
9.2.1 目标	181
9.2.2 场景背景	184
9.2.3 对抗措施	184
9.2.4 大气和距离效应	186
9.3 场景仿真方法	187
9.3.1 数学场景仿真	187
9.3.2 实物场景仿真	187
9.3.3 电子场景仿真	189
9.4 场景仿真设备	189
9.4.1 光电场景	189
9.4.2 射频场景	194

第 10 章 仿真实现	197
10.0 符号表	197
10.1 引言	198
10.2 计算机的选择	199
10.2.1 传统硬件	201
10.2.2 现代硬件	202
10.2.3 仿真计算机设备示例	203
10.2.4 次要考虑	204
10.3 计算机语言的选择	205
10.3.1 传统语言	205
10.3.2 现代语言	207
10.4 仿真解算技术	210
10.4.1 微分方程的数值解法	211
10.4.2 传递函数的数字解法	221
10.4.3 半实物仿真应考虑的问题	228
第 11 章 校核与验证	233
11.1 引言	233
11.2 校核	234
11.3 验证	234
11.3.1 可信度层次	235
11.3.2 测试结果对比	235
11.3.3 场景确认	238
11.4 确认	238
11.5 方法选择	238
第 12 章 仿真集成	240
12.0 符号表	240
12.1 引言	245
12.2 仿真实例	245
12.2.1 场景	245
12.2.2 目标	245
12.2.3 程序结构	246
12.2.4 仿真设计	246
12.2.5 输入数据	247
12.2.6 初始化	250
12.2.7 火控	251

12.2.8	大气	252
12.2.9	相当位置和速度	253
12.2.10	测试接近速度	253
12.2.11	导引头	254
12.2.12	制导与控制	255
12.2.13	气动力	258
12.2.14	推进	262
12.2.15	重力	262
12.2.16	运动方程	263
12.2.17	更新	266
12.2.18	子程序	268
12.2.19	结果	271
参考文献		282

第1章 绪 论

本章提供导弹飞行仿真的背景信息,并对仿真特征、目的和实现进行简要描述。同时,介绍本书的编写目的、涵盖范围和组织结构。

1.1 背 景

面空导弹系统的研发是为了满足规定的作战要求。广义上来讲,这些要求包括防御区的大小和杀伤力的强弱。另外,导弹系统也有特别规定的条件,包括威胁(即目标)所处的环境和特征。防御区和威胁的特征决定了导弹的射程与对海拔的要求。目标的速度和机动性影响着导弹的速度与可操控性。目标信号-辐射或反射的电磁辐射-作战环境影响着导弹制导系统的设计,同时应对威胁的对抗措施在确定制导系统的特征中尤为重要。杀伤力一般表述为杀伤概率,指的是导弹制导的准确性、机身的机动性、攻防对抗能力以及引信和弹头特征的要求。杀伤概率的要求通常理解为给定遭遇条件下对目标进行特定程度毁伤的概率。

为获得和支持导弹系统,美国国防部程序部门建立了重要的里程碑,从此项目管理和技术决策都有了定格。从新导弹系统概念的最初构想到导弹生命周期的终结,一直都需要对准备设计的导弹性能进行预测,这些设计需满足不同的作战要求,并针对不断变化的威胁加以改进^[1-3]。对决策者来说,日益重要的信息来源就是导弹飞行仿真。导弹系统的主要性能表现、杀伤概率和防御区的大小可以通过对导弹接近目标(导弹飞行)的方式及导弹碎片在所有动力与环境条件下影响不同类型目标易损部件的方式进行建模。大多数导弹系统性能评估系统通过对导弹飞行单独进行建模来简化评估过程。如本书后面所述,许多导弹的开发和评估目标都仅仅是通过导弹飞行来认定的。导弹飞行建模的主要目标之一就是预测在不断变化的力和环境条件下,导弹与目标接近的程度。脱靶量常常是导弹系统性能的一个量。通常情况下,脱靶量越小,对目标的杀伤概率就越大。导弹飞行的数学分析很复杂,涉及非线性、逻辑数列、奇异事件以及多个子系统之间的相互作用。计算机仿真技术是完成这一任务的理想工具。

1.1.1 导弹飞行仿真描述

导弹飞行仿真是计算导弹在离开发射器并与目标遭遇时的飞行轨迹和其他重要参数的计算方法。仿真是基于导弹、目标和环境的数学模型,这些数学模型由物理定律和逻辑数列方程构成。导弹模型包括导弹质量、空气动力学推力、制导和控制,以及计算导弹飞行姿态和飞行轨迹相关的公式等因素。目标模型一般不太详尽,但充分包含了决定目标飞行路径、辐射信号特征以及对抗措施的数据和公式。环境模型至少包括大气特征和重力因素。云、霾、太阳位置、地面或海面特征如果是必需的,就要包括这些因素。有时,不使用导弹某个子系统的数学模型,而使用导弹实物组件或导弹进行仿真。

仿真中用到的物理定律包括用于控制导弹和目标运动的规律以及影响子系统工作的规律。例如,导弹运动学方程能够确定导弹因重力、推力和空气动力等引起的加速度、速度及位置。其他方程用于仿真如目标跟踪和导弹控制系统等子系统。

仿真逻辑控制着条件事件。时间相关、条件事件的例子包括目标机动开始、诱饵弹投放、制导段交班等。依赖于其他条件事件的例子包括当指令制导导弹的机动超过规定的限制以及当导弹遭遇到目标时仿真终止所采取的行动。

图 1-1 是导弹飞行仿真输入和输出的情况。输入是数学模型需要的数据,用于从一台计算机运行输出到下一台计算机。



图 1-1 导弹飞行仿真

例如,输入可以是初始条件数据,如导弹及目标在仿真启动时的位置和速度、程序化的目标机动参数和对抗控制参数。如果目标模型是通用的模型,那么目标特征数据就作为输入数据进行输入。模型中那些很少或从不发生的数据将被内置于模型中。例如,对一种特定类型导弹的仿真通常在模型中有一些描述性数据,而对一般的导弹和尚未完全定义的导弹仿真要进行分类处理,以便将发生变化的参数作为输入。环境条件,如大气密度(海拔的函数)通常被内嵌到仿真模型中。但是,非标准大气条件或其他可变环境条件可由输入数据进行适当选择。典型的导弹飞行仿真输出包括导弹飞行轨迹序列和最终的脱靶距离。根据用户需要,其他导弹函数和响应的时间序列也可作为输出数据,如舵偏角、导弹平移及旋转的速率

和加速度、导引头功能以及控制系统的功能。

1.1.2 导弹飞行仿真的目的

导弹系统的性能由其所有子系统的交互作用来决定。每个子系统的部件必须保证自身的正常工作,并且组成整个导弹的所有子系统必须保持平衡调整到最佳性能。任何部件发生非常细小的变化都会使系统失去平衡并导致无法接受的结果。导弹设计人员和评估人员采用多种办法获取信息来解决导弹可选配置问题,包括解析评估、计算机仿真、实验室测试和飞行测试,如图 1-2 所示。简单的解析技术能够对导弹性能特征做出估计,如最大射程和飞行时间,但是简单分析方法很难或不可能准确预测子系统的交互细节。最可靠的方法是飞行测试,但也是代价最大的办法。实验室测试也能提供可靠的信息,但主要受制于子系统的评估。

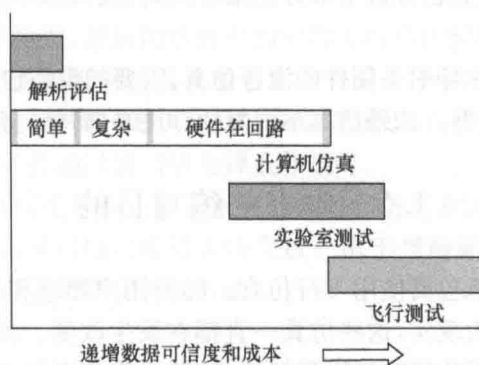


图 1-2 决定导弹性能的方法频谱

低成本、低可信度的解析方法和高成本、高可信度的测试方法之间的间隙由计算机仿真来填补^[1]。很明显,这是一个很大的间隙,为导弹仿真的成熟留下较大的变化空间,就看仿真用户是需要解析评估,还是需要飞行测试的结果。例如,一次非常简单的仿真就能够确定受一枚给定重量和推力的面空导弹保护区的面积及形状。如果把导引头的限制范围、万向节角度限制以及对防御区大小的跟踪速率限制考虑进去,就必须对这些功能进行建模。如果导弹的各种设计特点都要考虑脱靶距离,那么有益的功能就要包括在建模中,尤其是与导弹反应时间和机动的局限性有关的功能。如果重点是目标跟踪制导和控制,就需要更详细的导弹功能模型,甚至使用实际导弹进行半实物仿真,并产生导引头视场内的场景。一般情况下,如果用户的需求更详尽、更精确,仿真就变得更复杂、更精细、更细化^[2]。