



与工程”卓越工程师培养专业实践教学系列教材



飞行力学数值仿真

FLIGHT DYNAMICS NUMERICAL SIMULATION



林 海 王晓芳◎编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

计与工程”卓越工程师培养专业实践教学系列教材



飞行力学数值仿真

FLIGHT DYNAMICS NUMERICAL SIMULATION



林 海 王晓芳◎编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以项目为载体介绍了通过数值仿真实验来研究飞行力学相关问题的方法,内容涉及:铅垂面内的无控弹道计算和无控弹道散布研究;铅垂面内弹道设计与成形控制;六自由度无控弹道解算及散布分析;攻角、侧滑角、速度倾斜角导数的计算;垂直发射导弹方案弹道仿真;英美坐标体系下六自由度无控弹道建模与解算;追踪法、平行接近法、比例导引律和三点法导引弹道;导弹纵向动态特性分析;面对称飞行器侧向动态特性分析;质心移动对飞行器飞行稳定性和操纵性的影响;补偿导弹阻尼不足的方法;图像导引头建模与仿真;轴对称导弹倾斜运动的自动稳定;“导弹—目标”攻防对抗建模与仿真;具有终端角约束的滑模导引律;多导弹协同作战鲁棒制导律;等等。

为了方便读者研习或组织教学,本书对涉及的项目给出了预期学习成果、实验背景、实验基础、前序实验、相关知识和理论基础、必要的基础数据、具体实验项目内容和结果分析要点,并提供了进一步思考和探索的方向。

本书可以作为高等学校航空航天类专业核心课程“飞行力学”的配套教材使用,特别适用于教师组织实施基于团队的研究型课程教学,也可供对此感兴趣的读者自主研习。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

飞行力学数值仿真/林海,王晓芳编著. —北京:北京理工大学出版社,2018.10
ISBN 978-7-5682-6432-7

I. ①飞… II. ①林…②王… III. ①飞行力学-计算机仿真 IV. ①V212-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第238887号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/12

字 数/282千字

版 次/2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

定 价/48.00元

责任编辑/梁铜华

文案编辑/曾 仙

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

飞行力学是研究飞行器运动规律的一门学科,是研究和设计飞行器的理论基础。因此,飞行力学是飞行器设计与工程专业的必修课,也是一门非常重要的专业基础课。该课程集中运用了飞行器概论、自动控制原理、空气动力学、工程力学等航空航天类课程和其他先修课程知识,信息量大,涉及面广,公式多而复杂。其主要包括三个部分:(1)飞行器系统数学建模与仿真;(2)飞行弹道与导引规律;(3)飞行器动态特性研究。

飞行力学课程的教学目标分为三个层次:(1)掌握飞行力学的基本原理、概念和方法;(2)应用飞行力学基本原理、概念和方法解决飞行力学问题的必要技能;(3)应用相关知识、原理和方法进行飞行器系统分析与设计的能力。

目前,大多数学校的飞行力学课程都基本使用大致固定的教材,围绕上述三部分内容,采用讲授为主,结合1~2个实验,再加上少量习题训练这种比较传统的模式。在这种模式中,课程内容和教学过程以知识传授为主,实验的综合性、设计性不够,特别是学生针对特定的飞行力学问题自主设计实验进行研究的训练更加不够,因此很难达到第(2)层次教学目标,更不用说第(3)层次了。

至于对学习效果的考核评价,一般都采用“平时成绩”+“期末考试”的办法。但所谓的“平时成绩”,通常是以“作业”甚至“考勤”来评判,最多加上一两次实验报告;而所谓的“期末考试”,仍然离不开传统的试卷模式。以至于“平时”所考流于形式,“期末”所考限于传统。用这种考核评价模式对教学目标是否达成进行检验,通常也只能停留在第(1)个层次。这样一来,即使是对基本原理、概念和方法的掌握,也容易仅仅停留于表面。多年的教学实践已经证明,学生一旦通过考试,那些突击学到的知识很快就被忘得干干净净。

因此,有必要对飞行力学课程的教学内容、教学模式和考核评价方法进行改革,使学生通过“在研究中学习、在学习中研究”的教学过程,获得更有实际意义的预期学习成果。

我从事飞行力学相关课题研究将近30年,主讲飞行力学相关课程

也有 20 多年。从 2000 年起,结合科研成果,我在“近代飞行力学”和“飞行力学设计”等研究生课程中试行采用基于团队项目研究的课程教学改革,将课程内容通过一系列相关项目和案例来展开,实施教研结合的教学方式,致力将教学过程转变为“在研究中学习、在学习中研究”的过程。同时,我彻底改变考核评价模式,取消期末考试,根据学生在整个课程学习过程中的表现来评定其成绩——学生在项目设计、问题研讨、报告答辩等过程中的表现,以及研究报告、数学模型、仿真软件等文档整理撰写质量,都是考核评价的观察点。经过十多年的课程改革实践,这种教学模式被证明是行之有效的。它取材于最新科研成果的项目和案例,以及基于团队项目研究的课程教学效果,受到了研究生及其导师的一致好评。

2012 年,我开始思考这种教学模式是否可以用于和怎样用于本科层次的飞行力学课程。我将以往的本科飞行力学课程的教学经验和教训进行了总结和分析,归纳了以下三个主要问题:

(1) 教学内容和教学过程按传统的教科书形式展开,教学模式过于传统,与工程实际联系不密切,不利于调动、激发学生的积极性和主动性。学生基本上只能被动地参与教学,对相关问题的思考在深度上和广度上都远远不够,运用所学知识解决实际工程问题的能力训练严重不足。

(2) 与课程配套的作业基本上只起到让学生复习各个分散的知识点、基本原理和概念等的作用,仅有的少量实验缺少综合性和设计性,加上考核评价体系与教学目标不匹配,难以引导学生实现“在研究中学习、在学习中研究”,也不利于培养学生自行设计实验来研究飞行器设计相关问题的能力。

(3) 飞行器设计与工程专业的学生应着重培养分析、研究和设计复杂动力学系统的能力,但传统的课程教学内容、教学模式和考评方法容易使学生“重成绩、轻过程”“重知识、轻能力”“重细节、轻系统”“重学习、轻研究”“重个体、轻团队”,显然不适应飞行器设计相关领域对人才素质和能力的要求。

为此,我开始着手对飞行力学课程进行改革,主要的变化体现在:

(1) 将课程内容、教学过程项目化。针对各章内容,从最新的科研成果中组织提炼相关的项目和案例作为载体,组织开展相关内容的教学,以项目研究引导和推动学生对相关章节内容进行主动学习,变被动为主动,促进学生在联系工程实际进行深入思考的基础上,分析和解决相应问题。

(2) 围绕课程内容,将习题、作业和配套实验融入项目研究。采取研究报告、软件开发、仿真实验、答辩研讨等多种形式,使学生通过亲自参与综合性、设计性强的项目研究,实现“在研究中学习、在学习中研究”,培养学生从系统的观点去分析和研究问题的习惯。

(3) 实施基于团队项目的教学内容、教学过程、教学模式和考评方法的改革。学生按四人一组组成固定团队,以轮值的方式在项目组中担任不同的角色,完成不同的研究任务。学生的学习和研究以及教师对学生的考核评价贯穿每个项目和整个课程,确保学生的综合素质和能力得以提高。

(4) 飞行力学的很多问题,最好是通过理论和实验相结合的方法进行研究。但是,涉

及导弹与目标相对运动有关的实体飞行试验和实验,不大可能经济而方便地在学校开展。因此,在组织教学项目和案例时,有关的实验全部都是在计算机上进行的数值仿真实验。这样做的好处还在于,课程的有关资源可以不受限制地向感兴趣的学习者开放,不必虑及他们因缺少实体飞行试验和实验条件而无法学习。

本书收录了我自2013年第一次试行这样的课程改革以来,逐渐累积的一些深浅程度不同的教学项目。每一章以一个项目引出若干问题,引导学生在完成项目和拓展研究的过程中深入理解飞行力学的基本原理、概念和方法。第1~5章、第8~14章由我编写,其他章节由王晓芳编写。这些项目覆盖了本科飞行力学课程的大部分内容,涉及:弹道建模、设计、解算与成形控制;导引弹道的运动学分析与制导律设计;飞行器的稳定性和操纵性分析;图像导引头建模与仿真;“导弹—目标”攻防对抗建模与仿真;等等。部分项目也适用于一年级研究生,供他们进行初级的项目研究训练。

作为本科层次的飞行力学课程的配套教材,本书特别适用于教师开展基于团队项目的研究型教学。我比较推荐的办法是:将学生按每四人一组分为若干课题组,采用成员固定和组长轮值制,以课题组为单位进行分析研究。以48学时为例,每6个学时完成一个项目,共8个案例。在这8个案例的研究过程中,课题组每个成员至少担任2次课题组长。6个学时分为3次课,具体安排为:在第一次课,介绍背景情况和相关知识,每三人一组研讨解决方案;在第二次课,组内深入研讨,教师答疑并根据答疑情况补充讲授相关知识;在第三次课,由课题组长在全班进行报告,组织研讨交流,教师进行点评和总结。通过以不同角色(课题组长、成员、答辩者、评审者等)亲自参与项目分析、设计和评价,学生在掌握飞行力学基本原理、概念、方法的基础上,发现、分析、沟通、表达、批判、协作和领导等多种能力都能得到较好的锻炼。

对学生学习成果的考核评价,宜采用研究过程与研究结果相结合、学生自评和教师评价相结合、个人贡献与团队成绩相结合的模式,使考核评价贯穿每个项目的全过程和课程教学的全过程,而不是在课程结束时通过一张试卷来进行考评。

OBE (Outcome Based Education) 是世界一流大学普遍利用的教育模式,它在提高教育质量和课程评价方面的有效性已被许多世界一流大学经过长期实践而证明。同时,它也被“华盛顿协议”全面接受,并将其作为成员国和地区之间进行实质等效互认的重要基础。按照OBE的理念和“华盛顿协议”下的国际实质等效认证要求,“教”与“学”双方从一开始就必须非常清楚地了解课程的ILOS (Intended Learning Outcomes, 即预期学习成果),以便在教学的“设计、实施、考评和改进”四个方面都能根据学生的需求和ILOS的达成来进行。

为便于教师更好地利用本书来组织符合OBE理念的教学,本书在每一个项目的一开始就给出了若干可能的ILOS。但这并不意味着通过这一项目的研习,就一定能达成这些ILOS。比较客观的看法是,这些项目应该对这些ILOS的达成有所帮助而已。作为飞行力学课程的配套教材,还需要教师的精心组织并与学生一起投入大量的精力进行研习,学生才有可能在教师的帮助下,借助其中的项目达成课程的ILOS。

根据6年来的教学实践经验,如果使用5~6个左右项目为载体,基本可以承载一般飞行力学课程(48学时)所包含的内容。学生按四人一组以团队形式完成研习,师生双

方的工作量大约都是传统对应课程的4~5倍,甚至更多。但从教学实效看,学生对相关内容理解的深度以及各项ILOS的达成方面,与传统课程教学相比,确有大幅提高。

如果爱好者进行自主研习,亦可在完成项目研习之后,对ILOS的达成情况进行自我评价。

在本书的完成过程中,张艺伟、柴劲、贺敏、胡邦亚、李东旭、杜宗霖、肖念远等研究生做了大量的文字校正和修订工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,欢迎读者批评指正。

林 海

主要符号说明

- a_n ——导弹的法向加速度。
- a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 \dots 、 a_{36} ——纵向扰动运动的动力系数。
- b_{11} 、 b_{12} 、 b_{21} 、 b_{22} 、 \dots 、 b_{38} ——侧向扰动运动的动力系数。
- c_x 、 c_y 、 c_z ——阻力系数、升力系数、侧向力系数。
- c_{x0} ——当 $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ 时的阻力系数。
- c_{y0} ——由于外形相对于平面 Ox_1z_1 不对称引起的升力系数。
- $c_x^{\alpha^2}$ ——阻力系数对 α^2 的导数。
- $c_x^{\beta^2}$ ——阻力系数对 β^2 的导数。
- c_y^α ——升力系数对攻角的导数。
- $c_y^{\delta_z}$ ——升力系数对升降舵偏角的导数。
- F_{gx} 、 F_{gy} 、 F_{gz} ——干扰力在弹道坐标系上投影的三个分量。
- G ——重力。
- g ——重力加速度。
- J_x 、 J_y 、 J_z ——导弹绕 Ox_1 、 Oy_1 、 Oz_1 轴的转动惯量。
- K_M 、 K_α 、 K_{n_y} ——导弹传递系数、攻角传递系数、法向过载传递系数。
- L ——特征长度。
- M_x 、 M_y 、 M_z ——滚转力矩、偏航力矩、俯仰力矩。
- M_{gx} 、 M_{gy} 、 M_{gz} ——干扰力矩在弹体坐标系上投影的三个分量。
- m ——导弹质量。
- m_c ——单位时间内燃料消耗量。
- m_{x0} ——由生产误差引起的外形不对称产生的滚动力矩系数。
- m_{z0} ——由于外形相对于平面 Ox_1z_1 不对称引起的俯仰力矩系数。
- m_x 、 m_y 、 m_z ——滚转力矩系数、偏航力矩系数、俯仰力矩系数。
- m_x^β 、 m_y^β 、 m_z^α ——横向静稳定导数、偏航静稳定导数、俯仰静稳定导数。
- $m_x^{\bar{\omega}_y}$ 、 $m_y^{\bar{\beta}}$ 、 $m_z^{\bar{\alpha}}$ ——滚动力矩系数对 $\bar{\omega}_y$ 的偏导数、偏航力矩系数对 $\bar{\beta}$ 的导数、俯仰力矩系数对 $\bar{\alpha}$ 的导数。
- $m_x^{\bar{\omega}_x}$ 、 $m_y^{\bar{\omega}_y}$ 、 $m_z^{\bar{\omega}_z}$ ——滚动阻尼力矩系数导数、偏航阻尼力矩系数导数、俯仰阻尼力矩系数导数。
- $m_x^{\delta_x}$ 、 $m_y^{\delta_y}$ 、 $m_z^{\delta_z}$ ——副翼（差动舵）操纵效率、方向舵操纵效率、升降舵操纵效率。

$\overline{m_x^{\delta_y}}$ 、 $\overline{m_y^{\delta_y}}$ 、 $\overline{m_z^{\delta_z}}$ ——滚动力矩系数对 δ_y 的偏导数、偏航力矩系数对 δ_y 的导数、俯仰力

矩系数对 δ_z 的导数。

n ——导弹法向过载。

n_T ——目标法向过载。

P ——推力矢量。

R_M ——导弹与制导站之间的距离。

R_T ——目标与制导站之间的距离。

r ——导弹与目标之间的距离。

S ——特征面积。

T_1 ——气动力时间常数。

T_M ——导弹时间常数。

V ——导弹的飞行速度。

V_C ——制导站的运动速度。

V_T ——目标的运动速度。

W ——风速矢量。

X ——升力。

x 、 y 、 z ——导弹质心在地面坐标系的坐标。

x_G ——导弹质心离头部顶点的距离。

Y ——阻力。

Z ——侧向力。

α ——攻角。

β ——侧滑角。

$\overline{\dot{\alpha}}$ 、 $\overline{\dot{\beta}}$ 、 $\overline{\dot{\delta}_y}$ 、 $\overline{\dot{\delta}_z}$ ——分别为对 α 、 β 、 δ_y 、 δ_z 进行无量纲化处理后的角度变化率。

γ ——倾斜角。

γ_V ——速度倾斜角。

δ_x 、 δ_y 、 δ_z ——副翼偏转角、方向舵偏转角、升降舵偏转角。

ε_M 、 ε_T ——导弹高低角、目标高低角。

η ——导弹速度前置角。

η_T ——目标速度前置角。

ϑ ——俯仰角。

θ ——弹道倾角。

θ_T ——目标的纵向航向角。

ξ_M ——相对阻尼系数。

ρ ——大气密度。

σ_C ——制导站的航向角。

ψ ——偏航角。

ψ_V ——弹道偏角。

ψ_{TV} ——目标的偏航航向角。

ω_c ——固有频率。

ω_x ——导弹绕 Ox_1 轴的转动角速度，滚转角速度。

ω_y ——导弹绕 Oy_1 轴的转动角速度，偏航角速度。

ω_z ——导弹绕 Oz_1 轴的转动角速度，俯仰角速度。

$\bar{\omega}_x$ 、 $\bar{\omega}_y$ 、 $\bar{\omega}_z$ ——分别为对角速度 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 进行无量纲化处理后的角速度。

$Axyz$ ——地面坐标系。

$Ox_1y_1z_1$ ——弹体坐标系。

$Ox_2y_2z_2$ ——弹道坐标系。

$Ox_3y_3z_3$ ——速度坐标系。

$Ox_b y_b z_b$ ——弹体坐标系（英美坐标体系）。

$Ox_g y_g z_g$ ——地面坐标系（英美坐标体系）。

$Ox_1 y_1 z_1$ ——光轴坐标系。

$Ox_p y_p z_p$ ——地平坐标系。

$Ox_a y_a z_a$ ——风轴系（英美坐标体系）。

$Ox_z y_z z_z$ ——视线坐标系。

目 录

CONTENTS

第1章 铅垂面内的无控弹道计算	001
1.1 预期学习成果	001
1.2 实验背景	001
1.3 实验基础	001
1.3.1 前序实验	001
1.3.2 相关知识与理论基础	001
1.3.3 基础数据	004
1.4 实验项目内容	004
1.5 实验结果分析	005
1.6 探索与思考	008
第2章 铅垂面内的无控弹道散布研究	009
2.1 预期学习成果	009
2.2 实验背景	009
2.3 实验基础	009
2.3.1 前序实验	009
2.3.2 相关知识与理论基础	009
2.3.3 基础数据	013
2.4 实验项目内容	013
2.5 实验结果分析	013
2.6 探索与思考	014
第3章 铅垂面内弹道设计与成形控制	015
3.1 预期学习成果	015
3.2 实验背景	015
3.3 实验基础	015
3.3.1 前序实验	015

3.3.2	相关知识与理论基础	016
3.3.3	基础数据	018
3.4	实验项目内容	018
3.5	实验结果分析	018
3.6	探索与思考	020
第4章	六自由度无控弹道解算及散布分析	021
4.1	预期学习成果	021
4.2	实验背景	021
4.3	实验基础	021
4.3.1	前序实验	021
4.3.2	相关知识与理论基础	022
4.3.3	基础数据	026
4.4	实验项目内容	027
4.5	实验结果分析	028
4.6	探索与思考	030
第5章	攻角、侧滑角、速度倾斜角导数的计算	031
5.1	预期学习成果	031
5.2	实验背景	031
5.3	实验基础	031
5.3.1	前序实验	031
5.3.2	相关知识与理论基础	031
5.3.3	基础数据	033
5.4	实验项目内容	033
5.5	实验结果分析	034
5.6	探索与思考	034
第6章	垂直发射导弹方案弹道仿真	035
6.1	预期学习成果	035
6.2	实验背景	035
6.3	实验基础	035
6.3.1	前序实验	035
6.3.2	相关知识与理论基础	036
6.3.3	基础数据	042
6.4	实验项目内容	042
6.5	实验结果分析	043
6.5.1	俯仰角、弹道倾角和攻角的变化规律	043
6.5.2	导弹飞行弹道的分析	043
6.5.3	四元数与欧拉角的对应关系	043
6.6	探索与思考	043

第7章 英美坐标体系下六自由度无控弹道建模与解算	044
7.1 预期学习成果	044
7.2 实验背景	044
7.3 实验基础	044
7.3.1 前序实验	044
7.3.2 相关知识与理论基础	045
7.3.3 基础数据	050
7.4 实验项目内容	050
7.5 实验结果分析	051
7.5.1 导弹的飞行状态对比	051
7.5.2 模型切换时导弹飞行状态对比	055
7.6 探索与思考	055
第8章 追踪法导引弹道	056
8.1 预期学习成果	056
8.2 实验背景	056
8.3 实验基础	056
8.3.1 前序实验	056
8.3.2 相关知识与理论基础	056
8.4 实验项目内容	058
8.5 实验结果分析	059
8.6 探索与思考	060
第9章 平行接近法导引弹道	062
9.1 预期学习成果	062
9.2 实验背景	062
9.3 实验基础	062
9.3.1 前序实验	062
9.3.2 相关知识与理论基础	062
9.4 实验项目内容	063
9.5 实验结果分析	064
9.6 探索与思考	065
第10章 比例导引律导引弹道	066
10.1 预期学习成果	066
10.2 实验背景	066
10.3 实验基础	066
10.3.1 前序实验	066
10.3.2 相关知识与理论基础	066
10.4 实验项目内容	068
10.5 实验结果分析	069

10.6 探索与思考	071
第 11 章 三点法导引弹道	072
11.1 预期学习成果	072
11.2 实验背景	072
11.3 实验基础	072
11.3.1 前序实验	072
11.3.2 相关知识与理论基础	072
11.3.3 基础数据	075
11.4 实验项目内容	075
11.5 实验结果分析	075
11.6 探索与思考	076
第 12 章 导弹纵向动态特性分析	077
12.1 预期学习成果	077
12.2 实验背景	077
12.3 实验基础	078
12.3.1 前序实验	078
12.3.2 相关知识与理论基础	078
12.3.3 基础数据	081
12.4 实验项目内容	081
12.5 实验结果分析	082
12.5.1 动力系数	082
12.5.2 特征方程根	083
12.5.3 短周期扰动运动特征方程根	084
12.5.4 导弹纵向传递函数及关键参数	084
12.5.5 动力系数 a_{24} 的影响	089
12.5.6 舵面阶跃偏转时各偏量的过渡过程求解及分析	089
12.6 探索与思考	090
第 13 章 面对称型飞行器侧向动态特性分析	091
13.1 预期学习成果	091
13.2 实验背景	091
13.3 实验基础	091
13.3.1 前序实验	091
13.3.2 相关知识与理论基础	092
13.3.3 基础数据	094
13.4 实验项目内容	095
13.5 实验结果分析	095
13.5.1 扰动运动	095
13.5.2 侧向传递函数	095

13.5.3	自由扰动运动的变化趋势	096
13.5.4	偏量变化	097
13.5.5	利用侧向稳定边界图分析侧向运动	097
13.6	探索与思考	099
第 14 章	质心移动对飞行器飞行稳定性和操纵性的影响	101
14.1	预期学习成果	101
14.2	实验背景	101
14.3	实验基础	102
14.3.1	前序实验	102
14.3.2	相关知识与理论基础	102
14.3.3	基础数据	102
14.4	实验项目内容	102
14.5	实验结果分析	103
14.5.1	与质心移动有关系的动力系数	103
14.5.2	质心移动对导弹传递系数 K_M 和导弹时间常数 T_M 等参数的影响	104
14.5.3	初始扰动	105
14.5.4	对阶跃输入 $\Delta\delta_z = 2^\circ$ 的响应	106
14.6	探索与思考	107
第 15 章	补偿导弹阻尼不足的方法	108
15.1	预期学习成果	108
15.2	实验背景	108
15.3	实验基础	108
15.3.1	前序实验	108
15.3.2	相关知识与理论基础	108
15.3.3	基础数据	112
15.4	实验项目内容	112
15.5	实验结果分析	112
15.6	探索与思考	113
第 16 章	图像导引头建模与仿真	115
16.1	预期学习成果	115
16.2	实验背景	115
16.3	实验基础	115
16.3.1	前序实验	115
16.3.2	相关知识与理论基础	116
16.3.3	基础数据	122
16.4	实验项目内容	123
16.5	实验结果分析	123
16.6	探索与思考	125

第 17 章 轴对称导弹倾斜运动的自动稳定	126
17.1 预期学习成果	126
17.2 实验背景	126
17.3 实验基础	126
17.3.1 前序实验	126
17.3.2 相关知识与理论基础	126
17.3.3 基础数据	128
17.4 实验项目内容	129
17.5 实验结果分析	129
17.6 探索与思考	131
第 18 章 “导弹—目标” 攻防对抗建模与仿真	132
18.1 预期学习成果	132
18.2 实验背景	132
18.3 实验基础	133
18.3.1 前序实验	133
18.3.2 相关知识与理论基础	133
18.3.3 基础数据	141
18.4 实验项目内容	141
18.5 实验结果分析	142
18.5.1 控制系统	142
18.5.2 导弹攻击直线运动坦克的搜索情况及攻击情况分析	143
18.5.3 导弹攻击机动直升机的搜索情况及攻击情况分析	143
18.6 探索与思考	143
第 19 章 一种具有终端角约束的滑模导引律	145
19.1 预期学习成果	145
19.2 实验背景	145
19.3 实验基础	145
19.3.1 前序实验	145
19.3.2 相关知识与理论基础	146
19.3.3 基础数据	149
19.4 实验项目内容	149
19.5 实验结果分析	150
19.6 探索与思考	150
第 20 章 多导弹协同作战鲁棒制导律	151
20.1 预期学习成果	151
20.2 实验背景	151
20.3 实验基础	151
20.3.1 前序实验	151

20.3.2 相关知识与理论基础	152
20.3.3 基础数据	157
20.4 实验项目内容	157
20.5 实验结果分析	158
20.6 探索与思考	158
附录1 无控导弹弹道计算相关数据	160
附录2 基于四元数的坐标系变换	164
参考文献	171