

有控飞行力学与计算机仿真

Control Flight Mechanics and Computer Simulation

袁子怀 钱杏芳 编著



国防工业出版社

有控飞行力学与 计算机仿真

Control Flight Mechanics and
Computer Simulation

袁子怀 钱杏芳 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

有控飞行力学与计算机仿真/袁子怀,钱杏芳编著.
北京:国防工业出版社,2001.4
ISBN 7-118-02395-7

I.有... II.①袁...②钱... III.直升机-空中发
射-导弹-导弹飞行力学-研究 IV.TJ762.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 47598 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 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{8}$ 278 千字

2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:23.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

现代飞行器设计技术发展很快,在战术导弹领域研究工作十分活跃,在设计思想、原理、方法等方面不断推陈出新。有控飞行力学与现代飞行器的发展密切相关,它是一门与工程实际紧密结合的应用学科;同时,它又是一门边缘交叉学科,与空气动力学、自动控制理论、计算机仿真、系统辨识等密切相关。

目前,国内外出版的飞行力学书籍较少,且从已出版书籍的内容来看,大多数只写弹道学和动态分析两部分。对于从事此领域的科技工作人员和高等院校的研究生,迫切需要一本在一般飞行力学教材基础上且又密切结合工程应用的专题篇或补充篇,本书就是为此目的而编写的。

全书共分八章:第一章“坐标系及其变换”,介绍美、英、俄常用的坐标系及其变换方法,为飞行力学建模服务。第二、三、四章分别介绍四元数法(Quaternion)、蒙特卡洛法(Monte Carlo)和协方差分析描述函数法(CADET)及其在飞行力学中的应用,它们是现代飞行力学设计中常用的方法。其中,四元数和蒙特卡洛方法虽然都是经典而古老的方法,但在当今的电子计算机时代又都重放异彩,在飞行力学领域获得了广泛应用。协方差分析描述函数方法是70年代出现的一种非常适用于导弹统计性能分析的新方法。第五、六章是“滚转导弹”的专题篇,一般飞行力学书籍很少全面介绍滚转导弹,这是作者结合“七·五”、“八·五”期间的科研成果写成的。第七章为“直升机机载导弹与制导航弹建模研究”,探讨了直升机旋翼的下洗流场对导弹运动产生的影响,以及风标式制导航弹动力学特性。第八章为“战术导弹飞行力学软件系统”,向读者介绍一个用于工程实际的飞行力学设计软件包。作者期待“抛砖

引玉”,一方面向读者推荐使用该软件包,另一方面,希望在共享的基础上共同开发,以提高我国的飞行力学软件设计的水平。

本书第一、五、七、八章由袁子怀编写;第二、三、四、六章由钱杏芳编写。

本书是作者结合近二十年来的教学和科研写成的,书中自然也包含有许多青年人的智慧和辛勤劳动,其中作者尤其要向唐胜景副教授、林海副教授、欧阳杰高级工程师和夏群利博士等表示感谢。

本书可供航天、航空、兵器等部门从事导弹与火箭的总体设计、飞行力学、制导与控制等专业领域的科技人员使用,也可作为高等院校有关专业的研究生和高年级本科生的教材和参考书。

作 者

2000 年 10 月

于北京理工大学

目 录

第一章 坐标系及其变换	1
1.1 坐标变换的数学基础	1
1.1.1 基底、坐标	1
1.1.2 标准正交基底	2
1.1.3 正交矩阵	3
1.1.4 基底的变换	3
1.1.5 坐标变换矩阵建立方法之一	4
1.1.6 坐标变换矩阵建立方法之二	8
1.2 大气飞行力学中常用坐标系及其变换	13
1.2.1 美、英惯用的坐标系及其变换	13
1.2.2 俄罗斯惯用的坐标系及其变换	17
1.3 常用坐标变换仿真软件	21
1.3.1 软件功能	22
1.3.2 软件特点	22
1.3.3 软件结构	23
1.3.4 算法流程图	24
1.3.5 举例	26
1.3.6 常用坐标变换仿真程序	28
1.4 字符矩阵乘法运算仿真软件	28
1.4.1 软件功能	28
1.4.2 软件特点	28
1.4.3 软件结构	29
1.4.4 乘法表达式	33
1.4.5 操作说明	34
1.4.6 举例	34
1.4.7 字符矩阵乘法运算仿真程序	37

第二章 四元数及其在飞行力学中的应用	38
2.1 引言	38
2.2 四元数及其性质	39
2.2.1 定义	39
2.2.2 四元数的单元、零元、负元、共轭元和逆元	40
2.2.3 四元数的性质	40
2.2.4 规范化四元数	44
2.2.5 四元数与矢量的关系	45
2.2.6 四元数的几何表示	46
2.3 用四元数表示坐标变换	48
2.3.1 四元数坐标变换	48
2.3.2 四元数连续坐标变换	50
2.4 用四元数表示刚体的旋转运动	51
2.5 用四元数建立飞行器运动方程组	56
2.5.1 用四元数表示飞行器绕质心旋转的运动学方程	56
2.5.2 用四元数表示飞行器的姿态角	56
2.5.3 用四元数建立飞行器运动方程组	57
2.5.4 四元数积分初值的确定	59
2.5.5 用四元数建立滚转导弹的运动方程组	60
2.6 四元数在滚转反坦克导弹仿真中的应用	61
2.7 四元数在垂直发射舰空导弹仿真中的应用	66
2.7.1 垂直发射舰空导弹概述	66
2.7.2 舰空导弹的运动方程组	66
2.7.3 用四元数建立垂直发射舰空导弹运动方程组	73
2.7.4 四元数积分初值的确定	77
2.7.5 舰空导弹弹道仿真	80
第三章 蒙特卡洛法及其在飞行力学中的应用	82
3.1 引言	82
3.1 系统随机输入的建模	84
3.2.1 概述	84
3.2.2 经验分布	85
3.2.3 概率分布类型的选择	90

3.2.4	参数估计	97
3.2.5	拟合性检验	100
3.3	均匀随机数的产生与检验	102
3.3.1	产生随机数的方法及要求	102
3.3.2	线性同余法	104
3.3.3	均匀随机数的检验	107
3.4	非均匀随机数的产生	111
3.4.1	反变换法	111
3.4.2	舍选抽样法	115
3.4.3	复合法	118
3.4.4	变换法	119
3.4.5	查表法	120
3.5	减小试验方差的方法	122
3.5.1	重要抽样法	122
3.5.2	分层抽样法	123
3.5.3	控制变数法	124
3.6	蒙特卡洛法在飞行力学中的应用	125
3.6.1	用蒙特卡洛法计算导弹命中概率	126
3.6.2	用蒙特卡洛法选择系统最优参数	137
第四章	协方差分析描述函数法及其在飞行力学中的应用 ..	139
4.1	引言	139
4.2	线性系统协方差分析	140
4.3	非线性系统协方差分析描述函数法	143
4.3.1	统计线性化原理	143
4.3.2	协方差分析描述函数法	146
4.3.3	随机输入描述函数的计算	146
4.3.4	非白噪声干扰条件下的传播方程	157
4.4	协方差分析描述函数法在火箭与导弹统计性能分析 中的应用	158
4.4.1	系统的数学模型和状态变量方程	158
4.4.2	非线性函数的统计线性化	164
4.4.3	随机状态变量的均值和协方差的传播方程	168

4.4.4 CADET 法与统计试验法的比较	171
4.5 统计线性化伴随法	174
4.5.1 协方差方程的伴随方程	174
4.5.2 统计线性化伴随法及其与 CADET 法的结合应用	176
4.5.3 伴随法、CADET 法和统计试验法的比较	177
第五章 滚转导弹运动建模与解耦	183
5.1 引言	183
5.1.1 滚转导弹的发展	183
5.1.2 滚转导弹的主要特点	184
5.2 滚转导弹的马格努斯效应	184
5.2.1 古典马格努斯效应	184
5.2.2 滚转弹身的马格努斯力和力矩	185
5.2.3 滚转弹翼的马格努斯力和力矩	187
5.3 滚转导弹的陀螺效应	192
5.4 滚转导弹控制力的形成机理	193
5.4.1 舵机操纵力	193
5.4.2 操纵力的图解分析	194
5.4.3 操纵力的周期平均值	199
5.4.4 指令系数	202
5.5 滚转导弹运动方程组	203
5.5.1 准弹体坐标系与准速度坐标系	204
5.5.2 各坐标系间的转换矩阵	205
5.5.3 滚转导弹运动方程组	208
5.6 滚转导弹的瞬态数学模型与均态数学模型	212
5.6.1 瞬态数学模型	212
5.6.2 瞬态数学模型的简化	214
5.6.3 均态数学模型	216
5.6.4 均态数学模型的简化	218
5.6.5 瞬态模型与均态模型对比	220
5.7 滚转导弹纵侧向运动的交连与解耦	220
5.7.1 滚转导弹控制系统交叉耦合分析	221
5.7.2 复数形数学模型及气动交连角	224

5.7.3 解耦方法	229
5.8 非定常非线性系统解耦控制理论及其在滚转导弹制导中的应用	231
5.8.1 非定常非线性系统的解耦控制理论	231
5.8.2 滚转导弹解耦控制举例	234
第六章 滚转导弹动态特性分析	237
6.1 滚转导弹弹体扰动运动方程组	237
6.2 滚转导弹弹体传递函数	244
6.3 滚转导弹弹体的动态稳定性	248
6.4 滚转导弹的动态稳定区及转速范围的确定	253
6.4.1 滚转导弹的动态稳定区	253
6.4.2 滚转导弹转速范围的确定	254
6.5 滚转导弹的静稳定性与固有频率	255
第七章 直升机机载导弹与制导航弹建模研究	258
7.1 引言	258
7.2 直升机机载导弹运动建模	259
7.2.1 坐标系及其变换	259
7.2.2 角度参数定义	262
7.3 旋翼下洗流场对导弹气动特性的影响	263
7.3.1 主旋翼下洗流场诱导速度	263
7.3.2 下洗流场工程估算法	264
7.3.3 下洗流场对导弹气动特性的影响	265
7.4 直升机机载导弹运动方程组	269
7.4.1 非滚转导弹	269
7.4.2 滚转导弹	270
7.5 制导航空炸弹建模研究	271
7.5.1 概述	271
7.5.2 制导航空炸弹运动建模	272
7.6 风标头在制导炸弹弹体动力学分析中的作用	279
7.6.1 概述	279
7.6.2 局部气流与风标头失调角	280

7.6.3 仿真结论	281
第八章 战术导弹飞行力学软件系统	283
8.1 引言	283
8.2 软件设计的指导思想和系统组成	284
8.2.1 软件设计的指导思想	284
8.2.2 FMTMSS 软件系统组成框图	284
8.3 软件系统的功能和主要特点	285
8.3.1 软件系统的主要功能	286
8.3.2 软件系统的主要特点	286
8.4 FMTMSS 软件系统设计	287
8.4.1 软件系统结构方案	287
8.4.2 程序控制中心	287
8.4.3 数据文件库	290
8.4.4 算法程序库	291
8.4.5 模型库	292
8.4.6 应用软件程序库	293
8.5 气动—弹道一体化设计软件	294
8.5.1 软件组成	294
8.5.2 各模块的基本功能简介	294
8.5.3 气动—弹道一体化计算举例	302
8.6 软件文档	305
8.6.1 数据词典	305
8.6.2 文档	306
8.7 FMTMSS 软件系统运行环境及开发	306
8.7.1 编制语言	306
8.7.2 软件运行环境	306
8.7.3 软件系统开发前景	306
附录 1 常用坐标变换仿真程序	308
附录 2 字符矩阵乘法运算仿真程序	317
参考文献	327

Contents

Chapter 1	Coordinate Systems and Transformations	1
1.1	Mathematical Bases of Coordinate Transformations	1
1.1.1	Bases and Coordinates	1
1.1.2	Standard Orthogonal Bases	2
1.1.3	Orthogonal Matrices	3
1.1.4	Base Transformations	3
1.1.5	First Method for Establishing Coordinate Transformation Matrices	4
1.1.6	Second Method for Establishing Coordinate Transformation Matrices	8
1.2	Common Coordinate Systems in Atmospheric Flight Dynamics and Transformations	13
1.2.1	Common Coordinate Systems of America and Britain and Transformations	13
1.2.2	Common Coordinate Systems of Russia and Transfor- mation	17
1.3	Common Simulation Software of Coordinate Trans- formations	21
1.3.1	Software Functions	22
1.3.2	Software Characteristics	22
1.3.3	Software Structure	23
1.3.4	Algorithm Process Diagram	24
1.3.5	Example	26
1.3.6	Common Simulation Program of Coordinate Trans- formations	28

1.4	Multiplication Operation Simulation Software of	
	Character Matrix	28
1.4.1	Software Functions	28
1.4.2	Software Characteristics	28
1.4.3	Software Structure	29
1.4.4	Multiplication Expression	33
1.4.5	Operation Instruction	34
1.4.6	Example	34
1.4.7	Multiplication Operation Simulation Program of Character	
	Matrix	37

Chapter 2 Quaternion and Application in Flight

	Mechanics	38
2.1	Introduction	38
2.2	Quaternions and Their Characteristics	39
2.2.1	Definition	39
2.2.2	Unit Element, Zero Element, Negative Element, Conjugate Element and Inverse Element of Quaternion	40
2.2.3	Characteristics of Quaternion	40
2.2.4	Normalized Quaternion	44
2.2.5	Relation between Quaternion and Vector	45
2.2.6	Geometrical meaning of Quaternion	46
2.3	Expressing Coordinate Transformation Using	
	Quaternion	48
2.3.1	Coordinate Transformation of Quaternion	48
2.3.2	Continuous Coordinate Transformation of Quaternion	50
2.4	Expressing Rotation Motion of Rigid Body Using	
	Quaternion	51
2.5	Establishing Motion Equations of Vehicle Applying	
	Quaternions	56
2.5.1	Expressing Kinematics Equations of Rotational Motion of Vehicle around Mass Center Using Quaternion	56
2.5.2	Expressing Attitude Angle of Vehicle Using Quaternion	56

2.5.3	Establishing Motion Equations of Vehicle Applying Quaternions	57
2.5.4	Determination of Integral Initial Values of Quaternion	59
2.5.5	Establishing Motion Equations of Rolling Missiles Applying Quaternions	60
2.6	Application of Quaternions in the Simulation of Rolling Anti-Tank Missile	61
2.7	Application of Quaternions in the Simulation of Vertically Launched Ship-to-Air Missile	66
2.7.1	Introduction of Vertically Launched Ship-to-Air Missile	66
2.7.2	Motion Equations of Ship-to-Air Missile	66
2.7.3	Establishing Motion Equations of Vertically Launched Ship-to-Air Missile Applying Quaternions	73
2.7.4	Determination of Integral Initial Values of Quaternion	77
2.7.5	Trajectory Simulation of Ship-to-Air Missile	80
Chapter 3	Monte Carlo Method and Application in Flight Mechanics	82
3.1	Introduction	82
3.2	Modeling of Random Input in System	84
3.2.1	Introduction	84
3.2.2	Experience Distribution	85
3.2.3	Selection of Probability Distribution Type	90
3.2.4	Parameter Estimation	97
3.2.5	Fitting Test	100
3.3	Generation and Test of Uniform Distribution Random Number	102
3.3.1	Methods and Requirements of Generating Random Number	102
3.3.2	Linear Congruence Method	104
3.3.3	Test of Uniform Distribution Random Number	107
3.4	Generation of Non-uniform Distribution Random Number	111