

精确制导、控制与仿真技术

Precision Guide & Control and Simulation Technology

刘兴堂 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

精确制导、控制与仿真技术

Precision Guide & Control and Simulation Technology

刘兴堂 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

精确制导、控制与仿真技术/刘兴堂著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 2

ISBN 7-118-04251-X

I. 精... II. 刘... III. ①导弹制导-仿真②导弹控制-仿真 IV. TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 145006 号

 出版社出版发行

(北京市海坛路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 12¼ 字数 304 千字

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓名笔画排序) 杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

前 言

随着科学技术的发展,人类战争史经历了徒手战争、冷兵器战争、热兵器战争、机械化战争,进入了现阶段的信息化战争时代。信息化战争是在核威慑下的现代高技术战争,战争中使用的兵器统称为高技术兵器,它包括:精确制导武器、高度电子化武器、人工智能武器、聚能武器、隐身武器、天基武器和新概念武器等。其中,精确制导武器在近几次局部战争中显示了超常的作战能力,已经成为现代高技术战场中武器的主角,并不断地影响着现代战争的模式和进程,使现代战争面貌发生了空前巨变。

权威军事专家认为:“精确制导武器运用不仅在很大程度上决定着战争胜负,而且可以起到战术核武器的重大作用。”高技术战争对精确制导武器的大量需求直接牵引着精确制导与控制技术的飞速发展,其结果必将对未来战争产生更深刻的影响。

导弹是一种能够依靠自身动力装置推进,借助制导控制系统自动控制飞行路线,并导向目标的精确制导武器。第二次世界大战后的半个多世纪以来,许多国家,尤其是美、俄、英、法等军事强国,竞相研制了各种不同用途的导弹,形成了十分庞大的导弹家族,成为现代高技术战争的标志性精确制导武器。60多年来的导弹发展历史表明:精确制导与控制是导弹的第一性能;制导控制系统的分析与设计从来就是决定导弹武器系统功能和性能的关键环节;导弹制导与控制技术的发展始终同系统仿真有着不解之缘,仿真技术应用贯穿着导弹制导控制系统的全寿命周期,并已成为导

弹制导控制系统论证、研制、试验、鉴定、定型、作战使用和部队训练等必不可少的工具。因此,本书有足够理由以导弹武器为例来论述精确制导、控制与仿真技术。

全书共分6章。第1章,绪论。阐明精确制导与控制概念;提出导弹制导控制系统分析与设计问题;论述精确制导与控制的设计方法学;综述系统仿真技术及其在导弹制导控制系统全寿命周期中的应用。第2章,弹体运动特性分析。内容包括:导弹气动布局和控制特点;刚性弹体动力学与运动学模型;刚性弹体空间运动特性和稳定性分析;弹性弹体的运动数学模型。第3章,导弹稳定控制回路分析与设计。讨论导弹侧向和倾斜稳定控制回路的结构特点;给出几种典型稳定控制系统的分析与设计;研究弹性导弹稳定控制系统的分析与设计;展望未来导弹稳定控制系统的发展趋势。第4章,导弹制导回路分析与设计。给出导弹制导回路的设计原则、依据和要求;详细讨论遥控制导系统、寻的制导系统、复合制导系统及多模寻的制导系统的分析与设计。第5章,保证精确制导与控制的若干技术问题。提出为了保证精确制导与控制在制导控制系统设计中的某些关键环节与技术;深入研究精确制导与控制的若干技术问题,如制导体制、方法和导引律的分析与选择,各种比例导引及其有效导航比的分析选择;自主回路寄生反馈和制导回路惯性对导引精度的影响;天线罩斜率误差及其补偿;舵伺服系统优化设计;气动和燃气动力组合控制特性分析与设计以及制导系统抗干扰设计等。第6章,导弹制导控制系统仿真。侧重讲述各种仿真方法;仿真系统和主要仿真设备;论述数学仿真和各种半实物仿真系统(如射频、红外、成像、激光制导等的半实物仿真系统)的构成及其应用。

本书在撰写过程中得到了许多同行和专家的鼓励和帮助。王子才院士、梁晋才院士给予大力推荐并提出了许多宝贵建议;张双

选、夏伟鹏、张刚、刘力、徐杰、孙文、姜晓赞等硕士生为本书出版付出了极大的辛劳；雷虎民博士、教授和何广军副教授为本书出版同样做了许多工作并提供了相当宝贵的资料；博士生柳世考副教授负责文稿的编排。这里，一并衷心地表示感谢。

最值得提出的是，本书引用和参考了不少文献，从中汲取了丰富营养，可以说没有他们的奉献，本书是难以问世的。在此，对这些中外专家、学者表示崇高敬意。作者还要感谢进行书评和审定的各位专家以及出版社的领导和同志们。

本书涉及知识面很广，而作者水平有限，其缺点和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2005 年 9 月 20 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 精确制导武器与导弹	1
1.3 导弹制导控制系统	3
1.4 导弹制导控制系统分析与设计	6
1.4.1 对制导控制系统的基本要求	6
1.4.2 制导体制与控制方式	8
1.4.3 导引方法和导引律分析与选择	10
1.4.4 自动驾驶仪与稳定控制系统	11
1.4.5 导弹制导回路分析与设计	12
1.5 导弹制导控制系统发展趋势	12
1.6 精确制导与控制技术研究的方法论	13
1.7 系统仿真技术及其在精确制导与控制中的应用	14
1.7.1 系统仿真技术及其作用	14
1.7.2 制导控制系统在全寿命周期中的仿真 应用	15
第 2 章 弹体运动特性分析	17
2.1 引言	17
2.2 对控制对象——弹体的主要要求	17
2.3 导弹气动布局与控制特点	19
2.3.1 导弹气动布局	19
2.3.2 导弹的控制特点	21
2.3.3 导弹随控布局	22

2.3.4	导弹直接力控制	23
2.4	作用在弹体上的力和力矩	26
2.4.1	作用力	26
2.4.2	作用力矩	28
2.5	刚性弹体运动方程	30
2.5.1	坐标系及其转换	30
2.5.2	采用的假设	35
2.5.3	刚性弹体运动方程组	35
2.6	刚性弹体运动的传递函数	45
2.7	刚性弹体动态特性分析	47
2.8	刚性弹体空间运动的稳定性分析	51
2.8.1	一般分析方法	51
2.8.2	实用工程方法	51
2.9	弹性弹体运动数学模型	54
2.10	具有两套控制机构的弹体动态特性	56
2.10.1	引言	56
2.10.2	理论基础及传递函数推导	56
2.10.3	弹性弹体动态特性分析	59
第3章	导弹稳定控制回路分析与设计	60
3.1	引言	60
3.2	典型稳定控制回路结构	62
3.2.1	侧向回路结构	62
3.2.2	倾斜回路结构	64
3.3	理想化稳定控制回路理论及其应用	66
3.4	无差稳定控制回路的基本特性及其分析	71
3.4.1	主通道的稳定控制回路	71
3.4.2	倾斜通道的稳定控制回路	72
3.5	具有稳定控制回路的导弹空间运动稳定性分析与改善	73

3.5.1	具有稳定控制回路的导弹平衡状态稳定性 分析.....	73
3.5.2	导弹布局对称性偏差对稳定性区域边界的 影响估计.....	76
3.5.3	提高导弹空间运动平衡稳定性的技术 途径.....	79
3.6	侧向稳定控制回路分析与设计.....	82
3.6.1	对侧向稳定控制回路设计的基本要求.....	82
3.6.2	侧向稳定控制回路方案分析及选择.....	83
3.6.3	侧向稳定控制回路主要元件选择与分析.....	90
3.6.4	侧向稳定控制回路结构确定及参数设计.....	97
3.7	倾斜稳定控制回路分析与设计.....	103
3.7.1	对倾斜稳定控制回路设计的基本要求.....	103
3.7.2	倾斜稳定控制回路设计考虑的主要方面.....	104
3.7.3	倾斜稳定控制回路调节规律的选择.....	104
3.7.4	倾斜稳定控制回路方案分析及选择.....	105
3.7.5	倾斜稳定控制回路主要元件选择与分析.....	106
3.7.6	倾斜稳定控制回路结构确定及参数设计.....	106
3.7.7	倾斜稳定控制回路分析与设计实例.....	113
3.8	数字式稳定控制系统分析与设计.....	115
3.8.1	引言.....	115
3.8.2	数字式稳定控制系统的结构.....	115
3.8.3	A/D 和 D/A 转换器字长及采样频率的 选取.....	115
3.8.4	数字式稳定控制回路的设计方法.....	117
3.8.5	数字式自适应稳定控制系统.....	119
3.9	BTT 导弹稳定控制系统分析与设计.....	126
3.9.1	引言.....	126
3.9.2	古典频域设计方法.....	127

3.9.3	现代控制设计方法	130
3.10	垂直发射导弹控制系统分析与设计	133
3.10.1	引言	133
3.10.2	系统工作特点与设计技术要求	134
3.10.3	系统组成及原理	135
3.10.4	控制系统分析与设计	136
3.10.5	垂直发射最优控制律设计	138
3.11	考虑弹体弹性的稳定控制系统分析与设计	143
3.11.1	引言	143
3.11.2	引起结构弹性振动与回路耦合的主要 因素分析	143
3.11.3	考虑弹体弹性时的稳定控制回路分析 与设计	144
3.12	新一代导弹稳定控制系统引论	149
3.12.1	对新一代导弹稳定控制系统设计的 特殊要求	149
3.12.2	新一代导弹的稳定控制系统一般结构 形式	149
第4章	导弹制导回路分析与设计	151
4.1	引言	151
4.2	制导回路设计的主要依据和基本要求	153
4.2.1	主要依据	153
4.2.2	基本要求	153
4.3	制导体制和制导规律的分析与选择	154
4.3.1	制导体制分析与选择	154
4.3.2	制导规律分析与选择	158
4.4	遥控制导系统分析与设计	161
4.4.1	引言	161
4.4.2	系统的组成原理及工作过程	161

4.4.3	目标搜索、跟踪与坐标测量	163
4.4.4	导弹截获和预制导	166
4.4.5	遥控指令形成及指令形成装置	167
4.4.6	无线电遥控装置及其动力学特性	168
4.4.7	遥控制导系统结构图	168
4.4.8	遥控制导系统动态误差分析	169
4.5	寻的制导系统分析与设计	172
4.5.1	引言	172
4.5.2	寻的制导系统组成及制导模式	173
4.5.3	导引精度分析与计算	178
4.5.4	寻的制导回路的技术设计和试验验证	181
4.6	自主式制导回路分析与设计	184
4.6.1	引言	184
4.6.2	惯性导航系统	185
4.6.3	卫星导航系统	193
4.6.4	地图匹配制导系统	200
4.6.5	方案制导系统	202
4.6.6	复合自主制导系统	202
4.7	复合制导系统分析与设计	204
4.7.1	引言	204
4.7.2	复合制导体制的选择依据和原则	205
4.7.3	复合制导系统基本组成及运行过程	209
4.7.4	导弹截获跟踪系统分析与设计	210
4.7.5	目标交接班技术	212
4.7.6	复合制导的中制导导引律选择	216
4.7.7	复合制导系统的作战运用设计	217
4.8	多模复合寻的制导系统分析与设计	218
4.8.1	引言	218
4.8.2	多模复合寻的制导系统设计的主要	

考虑方面	220
4.8.3 典型的双模复合寻的制导系统	220
4.9 制导控制系统分析与设计中的全数字仿真	222
第5章 保证精确制导与控制的若干技术问题	226
5.1 引言	226
5.2 可达导引精度的分析与估计	226
5.3 有效导航比选择和最佳导航比计算	230
5.4 制导回路惯性对导引精度特性影响分析	234
5.5 自主回路寄生反馈影响及其减小途径	235
5.5.1 问题提出	235
5.5.2 带寄生反馈的自主回路特性分析	237
5.5.3 减小寄生反馈影响的技术途径	238
5.6 典型比例导引及其工程实现	239
5.6.1 引言	239
5.6.2 典型比例导引律及其性能比较	242
5.6.3 偏置比例导引(BPN)律	246
5.6.4 LQG 最优导引律	249
5.6.5 新型导引律分析与设计	256
5.7 天线罩斜率误差及其补偿	262
5.7.1 引言	262
5.7.2 天线罩斜率对制导系统性能的影响	263
5.7.3 天线罩斜率影响的补偿方法	267
5.8 导弹控制力和力矩的产生方法	269
5.8.1 空气动力方法	269
5.8.2 燃气动力和组合法	270
5.8.3 燃气动力控制对导弹动力学特性的影响	272
5.9 制导控制系统抗干扰设计	273
5.9.1 引言	273
5.9.2 电子战新发展	273

5.9.3	制导系统干扰威胁环境	274
5.9.4	抗干扰设计原则及重点	277
5.9.5	主要抗干扰技术及其应用	277
5.10	卡尔曼滤波器在寻的制导回路中的应用	280
5.11	导弹制导控制系统的建模技术与方法	282
5.11.1	引言	282
5.11.2	面向对象的建模技术及应用	283
5.11.3	分解—组合和混合建模方法及其应用	283
第6章	导弹制导控制系统仿真	287
6.1	引言	287
6.2	制导控制系统数学仿真	289
6.2.1	引言	289
6.2.2	系统数学模型及其验证	290
6.2.3	制导控制系统数学仿真系统的构成	293
6.2.4	数学仿真过程及主要内容	295
6.2.5	仿真结果分析与处理	295
6.3	制导控制系统数学仿真实例	299
6.3.1	系统描述	299
6.3.2	系统组成及原理	299
6.3.3	系统建模	300
6.3.4	导弹对地攻击作战的数学仿真	305
6.4	制导控制系统半实物仿真综述	308
6.4.1	半实物仿真的特点与作用	308
6.4.2	半实物仿真系统组成	309
6.4.3	半实物仿真系统的主要设备和模型	309
6.5	射频制导半实物仿真及其系统设计	320
6.5.1	引言	320
6.5.2	射频仿真系统设计要求及基本技术参数	321
6.5.3	射频仿真系统的工作原理及组成	323

6.5.4	射频制导半实物仿真实例	333
6.6	红外制导半实物仿真及其系统设计	334
6.6.1	引言	334
6.6.2	红外辐射仿真分类及系统组成	335
6.6.3	红外目标与环境特性建模	338
6.6.4	红外辐射半实物仿真实例	339
6.7	成像制导半实物仿真及其系统设计	341
6.7.1	引言	341
6.7.2	仿真系统组成、功能及仿真过程	343
6.7.3	成像制导半实物仿真系统设计问题	344
6.8	激光制导半实物仿真及系统设计	347
6.8.1	引言	347
6.8.2	激光半主动制导系统	347
6.8.3	激光半主动制导半实物仿真系统设计 及应用	348
6.8.4	激光制导半实物仿真系统实例	350
6.9	双模寻的制导半实物仿真系统	351
6.9.1	引言	351
6.9.2	双模导引头半实物仿真方法与系统	352
6.10	导弹制导控制系统的数字化建模与仿真平台 及应用	353
6.10.1	引言	353
6.10.2	“自动驾驶仪”子系统平台	354
6.10.3	“制导系统”子系统平台	354
6.10.4	复合制导数据处理的仿真平台	354
参考文献		357