

Stochastic Robustness Analysis and Design for  
Guidance and Control System of Winged Missile

# 飞航导弹制导控制系统 随机鲁棒分析与设计

吴森堂 ■ 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 飞航导弹制导控制系统 随机鲁棒分析与设计

Stochastic Robustness Analysis and Design for  
Guidance and Control System of Winged Missile

吴森堂 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计 / 吴森堂著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-118-06764-4

I. ①飞... II. ①吴... III. ①飞航导弹 - 导弹制导 - 鲁棒控制 - 控制系统 IV. ①TJ761.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 081197 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 710×960 1/16 印张 24 字数 398 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镛 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治  
(按姓氏笔画排序) 甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭  
李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力  
吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠  
陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰  
韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 吴宏鑫

# 前 言

为了对某一类具有相同技术特点的导弹进行系统性的研究,我们会从所关注的不同方面对导弹进行分类。通常按照导弹的作战使用方式、打击目标和发射平台种类、飞行弹道形式、气动布局特点以及制导控制类型等方面来进行分类。例如:按照作战使用方式可分为战略导弹和战术导弹;按飞行弹道形式可分为弹道式导弹和飞航式导弹(巡航导弹属于飞航式导弹);按照发射平台和打击目标的种类可将导弹分为攻击地面目标的空地导弹、潜地导弹、空地导弹、反坦克导弹、反雷达导弹,攻击空中目标的反飞机/反飞航式导弹的地空导弹、空空导弹、舰(潜)空导弹,反弹道式导弹的高空拦截导弹、低空拦截导弹、反卫星导弹,攻击水域目标的岸舰导弹、空舰导弹、舰(潜)舰导弹、舰潜导弹、潜潜导弹、空潜导弹、制导鱼雷等。

本书所研究的飞航式导弹(简称飞航导弹)是从产生气动升力的布局特点和主要的飞行弹道与打击目标来分类的,是指一类主要在大气中飞行的具有产生气动升力承力面的用来攻击地面或水域目标的导弹。这类飞航导弹是一种主要利用气动升力来支持自身重量在大气层内飞行,以攻击地面和水域目标为主的无人驾驶飞行器。飞航导弹既包括像美国“战斧”系列的巡航导弹、“鱼叉”一类的反舰导弹、类似 LOCAAS 和 LAM 低成本自主巡逻攻击导弹、俄罗斯 X-59M 类型的空面电视制导导弹,又包括具有“升力体”或“乘波体”气动布局的装备吸气式超燃冲压发动机的高超声速巡航导弹,甚至像以色列“哈比”一类的侦打合一型无人机都属于此列。

飞航导弹以其下列突出优点在历次战争中发挥了重要作用:①用途广泛。飞航导弹的射程一般为数十千米至数千千米不等,可以从地面、水面、空中、水下等不同的作战平台发射,因而通用性强、对目标威胁大。②打击精度高。飞航导弹综合采用惯性制导、卫星全球定位系统和地形匹配中制导以及景象匹配、红外成像和激光雷达末制导等先进制导技术,既可以攻击面目标,又可攻击点目标,其 CEP 一般为数米左右,大大小于相同射程的弹道式导弹的误差。③毁伤威力大。飞航导弹一般配备有威力较大的战斗部,具有很强的毁伤能力。④体积小。由于飞航导弹具有产生气动升力的主翼面和巡航段弹道,且其弹翼、动力装置和制导系统是全程工作,因而在相同射程情况下,其体积和重量均比弹道式导弹

小。⑤低空突防能力强。飞航导弹的雷达反射面积小,飞行高度低,使防空雷达的远程预警难度加大。飞航导弹可在海上 10m 左右、平原 50m、丘陵 100m ~ 150m 高度上飞行,其雷达反射面积一般在  $0.1\text{m}^2$  以下。飞航导弹既可以充分利用雷达盲区、死角进行低空、超低空突防,又可利用其隐身技术和复合材料技术,对雷达进行“隐身”突防。⑥反应速度快。飞航导弹发射准备时间短、机动性能好、能快速对敌实施打击。⑦效费比高。一枚射程上千千米的巡航导弹价格仅为相同射程的弹道式导弹的 1/3 以下,与造价高昂的飞机相比,其优势就更加明显。正是由于飞航导弹兼有弹道式导弹和飞机的诸多优点,使其成为历次现代战争的“杀手锏”,成为对敌构成重大威胁的重要武器。

近年来,几次地区战争使美国“战斧”巡航导弹令世人瞩目,使更多的国家看到了此类常规中远程飞航导弹的军事作用。具有研制 300km 以上(导弹技术控制制度(MTCR)限制的射程)飞航导弹能力的国家和地区,已从 20 世纪 80 年代的美、苏、法、英 4 国增加到目前的 20 多个国家和地区,其中就包括我国的台湾地区。据统计,世界各国共研制飞航导弹 207 种,占当时各国研制的近 400 种导弹型号总数的 50% 以上。到 20 世纪 90 年代,新出现的飞航导弹型号达 40 多种,其中除 10 多种属于小型近程飞航导弹外,其他 30 多种均属于具有防区外发射能力的中远程飞航导弹<sup>[1-5]</sup>。该类防区外发射的中远程飞航导弹,尤其是远程飞航导弹无疑是一种常规威慑的重要力量和精确打击的主要武器,在未来高技术信息化战争中,既可以用做威慑力量,又可以在威慑失效时立刻用作远程精确打击武器。特别值得关注的是,近年来高超声速远程巡航导弹技术迅速发展,为在未来战争中执行纵深打击、进攻性防御、海上封锁和反封锁等多种任务,实现威慑力量非核化发展提供了重要的技术手段。

然而,随着现代对空防御技术的迅速发展,迫使飞航导弹向着大空域、强机动和高马赫数飞行的技术方向发展,但是由此导致其飞行条件的剧烈变化,气动加热和弹性变形等因素的强耦合作用,呈现复杂的非线性特点,致使飞航导弹制导控制系统的传统设计技术面临着前所未有的挑战。在实际工程中常用的增益裕度和相位裕度之所以成为不再可靠的鲁棒性能指标,是因为导弹的外形结构和实际参数变化不但会引起增益裕度和相位裕度的变化,而且会改变 Nyquist 曲线的形状。再则,最大奇异值本质上是多变量增益裕度并且限制了鲁棒性能。同时,以  $H_\infty$ /回路成形设计方法、 $H_\infty$ /混合灵敏度设计方法和  $\mu$  综合设计方法为代表的经典  $H_\infty$  鲁棒控制设计方法,也都存在一些工程设计中所遇到的实际困难,如权函数的选取、结构奇异值的计算等问题。

为了克服经典鲁棒控制系统设计方法在实际工程应用中所存在的缺陷,20 世纪 90 年代,美国普林斯顿大学 R. F. Stengel 等人基于蒙特卡罗估计(MCE)和



现代优化方法,提出了面向实际工程应用的随机鲁棒分析与设计(SRAD)方法,并成功地应用在高超声速飞行器纵向运动鲁棒控制系统设计中。随机鲁棒分析与设计(SRAD)作为一种基于现代优化算法面向工程应用的设计方法越来越受到人们的重视,自90年代开始,本书作者在国家自然科学基金、航空科学基金、航天技术支撑基金、总装备部及国防科工委“十五”和“十一五”科研项目支持下,对飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计方法进行了深入研究,并在中国航天科工集团公司第三研究院大力配合下,在多种飞航导弹的制导控制系统分析与设计中进行了工程应用性的研究。

全书共7章,在第1章绪论中阐述了本书所研究的对象、目的和必要性;第2章论述了随机鲁棒分析与设计方法所涉及的理论基础以及飞航导弹制导控制系统建模基础;第3章~第5章分别给出了针对不同类型的飞航导弹及其各个不同的关键飞行阶段的飞行控制系统的鲁棒设计实例和仿真分析,包括超声速反舰导弹制导控制系统随机鲁棒设计、飞航导弹初始段与级间分离段制导控制系统随机鲁棒设计、吸气式高超声速飞行制导控制系统随机鲁棒设计等内容;第6章分别讨论了以提高突防概率为目标的飞航导弹航路规划方法以及提升打击效能的末制导规律的设计方法,包括飞航导弹最优航路规划与目标自主捕获技术、实现大角度打击末段制导规律设计等内容;在第7章中,针对第3章~第6章所设计的制导控制系统作用下的飞行弹道、飞行速度和机动能力等主要战技指标参数,通过飞航导弹的作战效能评估来综合检验所设计的制导控制系统的性能。本书全面系统地论述了面向实际工程应用的飞航导弹制导控制系统随机鲁棒分析与设计方法。在兼顾理论分析同时,更加注重实际工程应用,书中所设计的制导与控制规律均通过大量的风洞试验数据进行了系统仿真验证,并在多种型号的飞航导弹制导控制系统分析与设计中得到了很好地应用。书中的基本理论和相关技术不仅适用于现代飞航导弹制导控制系统分析与设计领域,且可推广到更广阔科技领域的非线性制导控制系统鲁棒分析与设计。

获得国防科技图书出版基金资助出版此书,能够为进一步提高现代飞航导弹设计技术水平,促进国防科技和武器装备发展尽绵薄之力,作者感到不胜荣幸,同时对在本书撰写过程中给予作者很大帮助的中国科学院院士、北京控制工程研究所吴宏鑫研究员,中国工程院院士、中国航天科工集团公司第三研究院黄瑞松研究员以及张险峰研究员,还有北京航空航天大学张森、许仁牛、姜智超、刘星、穆晓敏、包一鸣、彭琛、胡磊和阎磊等同行们表示诚挚的感谢!

作者

2010年1月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 随机鲁棒分析与设计概述	4
1.2.1 控制系统鲁棒设计的典型方法	4
1.2.2 随机鲁棒分析与设计方法简述	5
第 2 章 制导控制系统随机鲁棒分析与设计基础	8
2.1 随机鲁棒分析与设计原理	8
2.1.1 随机鲁棒性概念	8
2.1.2 最小采样数边界定理	12
2.1.3 分布函数的逼近	15
2.1.4 系统不稳定性置信区间	16
2.1.5 随机鲁棒代价函数	19
2.2 典型的非线性控制器结构	23
2.2.1 基于 PID 结构的非线性控制器	23
2.2.2 滑模变结构控制器	27
2.3 随机鲁棒设计指示函数的改进	31
2.3.1 隶属度函数法	32
2.3.2 指示函数选取比较	34
2.4 飞航导弹制导控制系统建模	39
2.4.1 飞行力学基础	39
2.4.2 导弹运动方程组	59
2.4.3 过载与导弹运动的关系	61
2.4.4 理论弹道与发射方式	64
第 3 章 超声速反舰导弹控制系统随机鲁棒设计	67
3.1 超声速反舰导弹概述	67

3.2	导弹数学建模 .....	68
3.2.1	气动布局和理论弹道 .....	68
3.2.2	导弹的空间运动方程组 .....	69
3.3	超声速反舰导弹过载控制系统随机鲁棒设计 .....	69
3.3.1	过载控制数学模型 .....	70
3.3.2	过载控制律随机鲁棒设计 .....	72
3.3.3	系统的随机鲁棒性分析 .....	84
3.3.4	全弹道 6DOF 非线性系统仿真 .....	87
3.4	超声速反舰导弹非线性动态逆鲁棒控制系统设计 .....	90
3.4.1	导弹数学模型 .....	90
3.4.2	NDI 控制律随机鲁棒设计 .....	92
3.4.3	随机鲁棒性能分析 .....	101
3.5	超声速反舰导弹变结构控制综合设计 .....	103
3.5.1	问题阐述 .....	103
3.5.2	随机系统滑模变结构控制稳定性定理 .....	104
3.5.3	随机鲁棒滑模变结构控制系统设计 .....	106
3.5.4	导弹纵向运动随机鲁棒滑模变结构控制系统设计 .....	110
<b>第 4 章</b>	<b>发射初始段与级间分离段控制系统随机鲁棒设计 .....</b>	<b>118</b>
4.1	机载发射初始段控制系统随机鲁棒设计 .....	118
4.1.1	设计要求与约束条件 .....	120
4.1.2	导弹数学模型 .....	120
4.1.3	导弹控制系统建模 .....	122
4.1.4	机载发射初始段控制系统随机鲁棒设计 .....	125
4.1.5	全弹道 6DOF 非线性系统仿真分析 .....	134
4.2	陆基垂直发射段控制系统随机鲁棒设计 .....	139
4.2.1	设计要求与约束条件 .....	140
4.2.2	导弹数学模型 .....	140
4.2.3	陆基垂直发射初始段控制系统随机鲁棒设计 .....	147
4.2.4	全弹道 6DOF 非线性系统仿真分析 .....	159
4.3	级间分离段控制系统随机鲁棒设计 .....	167
4.3.1	全状态可测量的过载控制模型 .....	168
4.3.2	级间分离段随机鲁棒过载控制系统设计 .....	171
4.3.3	级间分离段随机鲁棒变结构控制律设计 .....	180

4.3.4	全弹道 6DOF 非线性系统仿真分析 .....	188
<b>第 5 章</b>	<b>吸气式高超声速飞行控制系统随机鲁棒设计</b> .....	<b>195</b>
5.1	基本概念与研究现状 .....	195
5.2	高超声速巡航弹数学模型 .....	197
5.2.1	导弹气动布局与模型数据 .....	199
5.2.2	作用于导弹上的力与力矩 .....	200
5.2.3	导弹的气动数据 .....	202
5.2.4	导弹动力学与运动学方程 .....	202
5.2.5	吸气式超燃冲压发动机数学建模 .....	202
5.2.6	导弹飞行控制系统建模 .....	209
5.3	高超声速巡航弹控制系统随机鲁棒设计 .....	212
5.3.1	飞行控制系统设计要求 .....	212
5.3.2	系统不确定性参数向量定义 .....	212
5.3.3	特征设计点选择 .....	212
5.3.4	俯仰通道随机鲁棒 PID 控制律设计 .....	212
5.3.5	俯仰通道随机鲁棒 PID 控制性能分析 .....	214
5.3.6	横侧向通道随机鲁棒 PID 控制律设计 .....	216
5.3.7	横侧向通道随机鲁棒 PID 控制性能分析 .....	218
5.4	高超声速巡航弹控制系统随机鲁棒分析 .....	219
5.4.1	随机鲁棒稳定性分析 .....	220
5.4.2	随机鲁棒性能分析 .....	221
5.5	全弹道 6DOF 非线性系统仿真分析 .....	222
<b>第 6 章</b>	<b>飞航导弹最优航路规划与制导规律设计</b> .....	<b>225</b>
6.1	飞航导弹低空突防最优航路规划 .....	225
6.1.1	航路规划基本方法 .....	226
6.1.2	综合 TF/TA <sup>2</sup> 航路规划基础 .....	228
6.1.3	数字地图处理技术 .....	232
6.1.4	综合 TF/TA <sup>2</sup> 最优航路算法 .....	236
6.1.5	TF/TA <sup>2</sup> 最优航路规划算法仿真分析 .....	244
6.2	飞航导弹末制导多模型多尺度数据融合方法 .....	247
6.2.1	末制导多模型多尺度非线性数据融合方案 .....	247
6.2.2	超声速反舰导弹末制导模型 .....	249

6.2.3	非线性数据融合方法	255
6.2.4	末制导多模型多尺度数据融合技术仿真验证	262
6.3	飞航导弹人在回路电视末制导系统分析	265
6.3.1	超声速反舰导弹和目标舰船数学模型	265
6.3.2	操控员数学模型	267
6.3.3	人在回路电视末制导系统仿真分析	268
6.4	飞航导弹末段目标自主捕获方法	271
6.4.1	末段目标自主捕获模型	271
6.4.2	末段目标自主捕获技术仿真分析	278
6.5	飞航导弹终端大落角末制导律设计	282
6.5.1	问题描述	284
6.5.2	具有终端落角约束制导律设计	285
6.5.3	末制导段初始条件约束	288
6.5.4	导引头下视视场约束条件	291
6.5.5	纵向运动与横侧向运动耦合影响分析	291
6.5.6	终端大落角末制导律仿真分析	301
<b>第7章</b>	<b>飞航导弹作战效能评估方法</b>	<b>312</b>
7.1	作战效能评估基本概念	314
7.1.1	作战效能评估指标与数学方法	314
7.1.2	导弹武器系统效能基本指标	315
7.1.3	飞航导弹的作战效能指标	318
7.2	飞航导弹作战效能评估基本模型	320
7.2.1	对空中目标探测雷达模型	320
7.2.2	导弹的雷达反射截面计算模型	323
7.2.3	飞航导弹编队的突防概率	330
7.2.4	飞航导弹的终端杀伤概率	341
7.2.5	飞航导弹的命中概率	344
7.3	攻防对抗数学仿真分析	346
7.3.1	攻防对抗模型参数设定	346
7.3.2	突防概率仿真结果分析	347
7.3.3	毁伤仿真结果分析	349
7.3.4	作战效能仿真结果分析	351
<b>参考文献</b>		<b>356</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b>	1
1.1 Foreword	1
1.2 Overview of Stochastic Robustness Analysis and Design (SRAD)	4
1.2.1 Typical Robust Design Methods for Control System	4
1.2.2 Summary of SRAD	5
<b>Chapter 2 Basis of SRAD for Guidance and Control System</b>	8
2.1 Principle of SRAD	8
2.1.1 The Concept of Stochastic Robustness	8
2.1.2 Explicit Bounds Theorem for the Minimum Number of Samples	12
2.1.3 Approximation of Distribution Function	15
2.1.4 Confidence Interval of System Unstability	16
2.1.5 The Cost Function of SRAD	19
2.2 Structures of Typical Nonlinear Controller	23
2.2.1 Nonlinear Controllers Based on PID Structure	23
2.2.2 Sliding Mode Variable Structure Controller (SMVSC)	27
2.3 Modifying the Indication Function of SRAD	31
2.3.1 The Membership Function Method	32
2.3.2 Indication Function Selection of SRAD	34
2.4 Building the Guidance and Control System Model of Winged Missile(WM)	39
2.4.1 Basic Flight Mechanics	39

2. 4. 2	Equations of Missile Motion	59
2. 4. 3	Relationship between Overload and Missile Motion	61
2. 4. 4	Ideal Trajectory and Launching Way	64
<b>Chapter 3 SRAD for Control Systems of Supersonic Anti-Ship</b>		
	<b>Missile (SASM)</b>	67
3. 1	Overview of SASM	67
3. 2	Mathematical Modeling of the Missile	68
3. 2. 1	An Aerodynamic Layout and Desired Trajectory	68
3. 2. 2	Equations of the Missile Motion	69
3. 3	SRAD for Overload Control System of the SASM	69
3. 3. 1	Mathematical Modeling of the Overload Control System	70
3. 3. 2	SRAD for the Overload Control Law	72
3. 3. 3	Stochastic Robustness Analysis of the Overload Control System	84
3. 3. 4	Nonlinear Simulation for the 6DOF Trajectory	87
3. 4	SRAD for Nonlinear Dynamic Inversion (NDI) Control System of the SASM	90
3. 4. 1	Mathematical Modeling of the Missile	90
3. 4. 2	SRAD for the NDI Control Law	92
3. 4. 3	Analysis of Stochastic Robustness Performance	101
3. 5	SRAD for SMVSC System of the SASM	103
3. 5. 1	Overview of Issues	103
3. 5. 2	Stability Theorem of SMVSC for Stochastic System	104
3. 5. 3	SRAD for SMVSC of the Stochastic System	106
3. 5. 4	SRAD for the Longitudinal SMVSC System	110
<b>Chapter 4 SRAD for Control Systems of Launching Stage and Stage-to-Stage Separation</b>		
4. 1	SRAD for Control System of the Air-Launched Stage	118
4. 1. 1	The Design Requirements and Constraints	120
4. 1. 2	Mathematical Model of the Missile	120

4. 1. 3	Modeling of the Missile Control System .....	122
4. 1. 4	SRAD for Control system of the Launching Stage .....	125
4. 1. 5	Nonlinear Simulation and Analysis for the 6DOF Trajectory .....	134
4. 2	SRAD for the Vertical Ground-Launched Control System .....	139
4. 2. 1	The Design Requirements and Constraints .....	140
4. 2. 2	Mathematical Model of the Missile .....	140
4. 2. 3	SRAD for Control System of the Vertical Ground- Launched Stage .....	147
4. 2. 4	Nonlinear Simulation and Analysis for the 6DOF Trajectory .....	159
4. 3	SRAD for Control System of Stage-to-Stage Separation .....	167
4. 3. 1	The Overload Control Model of Measurable Full State .....	168
4. 3. 2	SRAD for Overload Control System of the Stage-to- Stage Separation .....	171
4. 3. 3	SRAD for Variable Structure Control Law of the Stage- to-Stage Separation .....	180
4. 3. 4	Nonlinear Simulation and Analysis for the 6DOF Trajectory .....	188

## **Chapter 5 SRAD for Air-Breathing Hypersonic Flight Control**

	<b>System</b> .....	195
5. 1	Basic Concepts and Research Status .....	195
5. 2	Mathematical Model of the Hypersonic Cruise Missile(HCM) .....	197
5. 2. 1	An Aerodynamic Layout and Model Data of the Missile .....	199
5. 2. 2	The Missile Forces and Moments .....	200
5. 2. 3	The Missile Aerodynamic Data .....	202
5. 2. 4	The Equations of Missile Dynamics and Kinematics .....	202



5.2.5	Mathematical Modeling of the Air-Breathing Scramjet .....	202
5.2.6	Modeling of the Missile Flight Control System .....	209
5.3	SRAD for Control System of the HCM .....	212
5.3.1	Design Requirements of the Flight Control System .....	212
5.3.2	The Definition of the System Uncertainty Parameter Vectors .....	212
5.3.3	Selection for the Characteristic Design Points .....	212
5.3.4	SRAD for the Longitudinal PID Control Law .....	212
5.3.5	Performance Analysis for the Longitudinal PID Control Law .....	214
5.3.6	SRAD for the Lateral-Directional PID Control Law .....	216
5.3.7	Performance Analysis for the Lateral-Directional PID Control Law .....	218
5.4	Stochastic Robustness Analysis for Control System of the HCM .....	219
5.4.1	Analysis for the Stochastic Robustness Stability .....	220
5.4.2	Analysis for the Stochastic Robustness Performance .....	221
5.5	Nonlinear Simulation and Analysis for the 6DOF Trajectory .....	222

**Chapter 6 Optimal Route Planning and Guidance Law Design for WM .....** 225

6.1	Optimal Route Planning for Low Altitude Penetration of WM .....	225
6.1.1	Basic Methods of Route Planning .....	226
6.1.2	Basis of Integrated Route Planning for Terrain Following & Terrain Avoidance & Threat Avoidance TF/TA <sup>2</sup> .....	228
6.1.3	Processing Technology of Digital Maps .....	232
6.1.4	An Algorithm of Optimal Route Planning for the TF/TA <sup>2</sup> .....	236
6.1.5	Simulation for Optimal Route Planning Algorithm of the TF/TA <sup>2</sup> .....	244
6.2	Multi-Model Multi-Scale Data Fusion Method for Terminal Guidance of the WM .....	247