

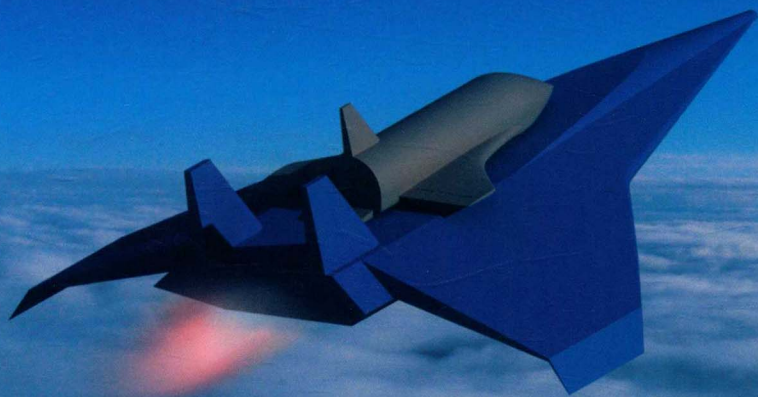


“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

高超气动外形设计的 控制稳定性准则研究

闵昌万 王颖 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

高超气动外形设计的 控制稳定性准则研究

闵昌万 王颖 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

气动外形设计与气动特性预示是高超声速飞行器研制的关键技术,在高超声速飞行器研制中处于核心地位;制导与控制技术也是高超声速飞行器研制的关键技术,气动特性是其主要研制输入。高超声速气动外形设计的控制稳定准则研究是解决如何在总体层面协同这两大关键技术,确保飞行器的气动外形设计和控制策略选择一开始就处于正确的道路上,其属于飞行器总体设计的范畴。

本书系统地阐述了高超声速飞行器纵向、横侧向气动特性与控制稳定性的关系,在高超声速条件下,研究了基于最简气动布局原则的气动/控制一体化设计准则,可为我国从事相关专业的科研人员提供设计参考,也可作为工程院校相关专业高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高超气动外形设计的控制稳定性准则研究 / 闵昌万, 王颖著. —北京: 科学出版社, 2019.7

高超声速出版工程 国家出版基金项目 “十三五”
国家重点出版物出版规划项目·重大出版工程
ISBN 978-7-03-061234-2

I. ①高... II. ①闵... ②王... III. ①飞行器—设计—研究 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 091190 号

责任编辑: 徐杨峰 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 163 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

高超声速出版工程 专家委员会

顾 问

王礼恒 张履谦

主任委员

包为民

副主任委员

杜善义 吕跃广

委 员

(按姓名汉语拼音排序)

艾邦成	包为民	陈连忠	陈伟芳	陈小前
邓小刚	杜善义	李小平	李仲平	吕跃广
孟松鹤	闵昌万	沈 清	谭永华	汤国建
王晓军	尤延铖	张正平	朱广生	朱恒伟

高超声速出版工程·高超声速总体设计系列

编写委员会

主 编

包为民

副主编

朱广生

编 委

(按姓名汉语拼音排序)

包为民 才满瑞 蔡巧言 陈 萱
陈 政 陈伟芳 陈小前 侯中喜
黄 伟 柳 森 罗世彬 闵昌万
唐 硕 童轶男 王长青 王友利
朱广生

丛书序

飞得更快一直是人类飞行发展的主旋律。

1903年12月17日,莱特兄弟发明的飞机腾空而起,虽然飞得摇摇晃晃,犹如蹒跚学步的婴儿,但拉开了人类翱翔天空的华丽大幕;1949年2月24日,Bumper-WAC从美国新墨西哥州白沙发射场发射升空,上面级飞行速度超越马赫数5,实现人类历史上第一次高超声速飞行。从学会飞行,到跨入高超声速,人类用了不到五十年,蹒跚学步的婴儿似乎长成了大人,但实际上,迄今人类还没有实现真正意义的商业高超声速飞行,我们还不得不忍受洲际旅行需要十多个小时甚至更长飞行时间的煎熬。试想一下,如果我们将来可以在两小时内抵达全球任意城市的时候,这个世界将会变成什么样?这并不是遥不可及的梦!

今天,人类进入高超声速领域已经快70年了,无数科研人员为之奋斗了终生。从空气动力学、控制、材料、防隔热到动力、测控、系统集成等众多与高超声速飞行相关的学术和工程领域内,一代又一代科研和工程技术人员传承创新,为人类的进步努力奋斗,共同致力于推动人类飞得更快这一目标。量变导致质变,仿佛是天亮前的那一瞬,又好像是蝶即将破茧而出,几代人的奋斗把高超声速推到了嬗变前的临界点上,相信高超声速飞行的商业应用已为期不远!

高超声速飞行的应用和普及必将颠覆人类现在的生活方式,极大地拓展人类文明,并有力地促进人类社会、经济、科技和文化的发展。这一伟大的事业,需要更多的同行者和参与者!

书是人类进步的阶梯。

实现可靠的长时间高超声速飞行堪称人类在求知探索的路上最为艰苦卓绝的一次前行,将披荆斩棘走过的路夯实、巩固成阶梯,以便于后来者跟进、攀登,

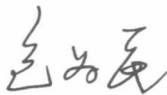
意义深远。

以一套丛书,将高超声速基础研究和工程技术方面取得阶段性成果和宝贵经验固化下来,建立基础研究与高超声速技术应用的桥梁,为广大研究人员和工程技术人员提供一套科学、系统、全面的高超声速技术参考书,可以起到为人类文明探索、前进构建阶梯的作用。

2016年,科学出版社就精心策划并着手启动了“高超声速出版工程”这一非常符合时宜的事业。我们围绕“高超声速”这一主题,邀请国内优势高校和主要科研院所,组织国内各领域知名专家,结合基础研究的学术成果和工程研究实践,系统梳理和总结,共同编写了“高超声速出版工程”丛书,丛书突出高超声速特色,体现学科交叉融合,确保了丛书的系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

丛书记载和传承了我国半个多世纪尤其是近十几年高超声速技术发展的科技成果,凝结了航天航空领域众多专家学者的智慧,既可为相关专业人员提供学习和参考,又可作为工具指导书。期望本套丛书能够为高超声速领域的人才培养、工程研制和基础研究提供有益的指导和帮助,更期望本套丛书能够吸引更多的新生力量关注高超声速技术的发展,并投身于这一领域,为我国高超声速事业的蓬勃发展做出力所能及的贡献。

是为序!



2017年10月

前 言

高超声速飞行器是指飞行速度大于马赫数 5 的飞机、导弹一类的有翼或者无翼飞行器。20 世纪 20~30 年代,人类提出高超声速技术发展概念,20 世纪 50~60 年代弹道导弹的出现、载人飞船的成功返回及 X-15 验证样机飞行速度超越马赫数 6 的事件,标志着人类开始进入高超声速时代,由于高超声速飞行器巨大的军用及民用前景,美国、俄罗斯、英国、法国、德国、日本、印度等国均把探索高超声速技术作为未来航空航天领域发展的重要方向,在世界范围内掀起了一场探索高超声速飞行器的浪潮。尤其是 21 世纪初,随着美国 X-43 率先突破马赫数 10 的超燃动力飞行,以及“猎鹰计划”中高超声速助推滑翔验证机 HTV-2 的研制,高超声速技术再一次吸引了全球的关注。

本书本着“少而精”的原则,结合工程实践,重点阐述了高超声速飞行器气动布局与控制系统设计的内在耦合关系,建立气动布局设计与控制设计间的匹配准则,实现气动布局、操稳特性和控制策略的一体化设计,以提高飞行器整体性能和设计效率,降低气动布局设计及飞行控制系统设计的盲目性和复杂度。本书研究的高超声速飞行器完全依靠气动力进行飞行控制,在总体参数和飞行剖面确定的情况下,其气动外形一经确定,其控制特性就相应确定。因此,气动布局设计必须一开始就考虑到飞行器的可控性,在气动布局设计过程中就从控制的角度来评价飞行器的设计。

气动布局的简洁化一般意味着控制舵面配置的简化、控制稳定性上裕度的下降,因此如何从控制专业的角度提出稳定控制所需要的最低气动性能要求,是实现更为简洁、流畅的气动布局,降低气动布局设计复杂度的前提。这实际上对气动布局与控制的匹配设计提出了更高的要求,需要立足于稳定控制,进行气动

与控制一体化设计。在进行气动与控制一体化设计时,需要结合气动特性对飞行器操纵性、稳定性的影响提出气动外形设计技术指标。此外,不同飞行器的动力学特性不同,采用不同控制策略时对气动特性提出需求。因此飞行器总体设计过程要充分考虑气动、控制间的耦合关系,实现气动控制一体化设计。

全书共 8 章:第 1 章介绍高超声速飞行器气动布局发展及气动控制一体化设计的研究现状;第 2 章介绍飞行动力学的基础知识,包括坐标系的定义、坐标系转换矩阵、飞行器运动方程、小扰动线性化方程;第 3 章介绍类 HTV-2 飞行器的飞行任务剖面及气动特性;第 4 章分别从纵向静稳定性调节方法、静稳定性与配平能力、舵偏使用范围、伺服特性与静稳定性关系、纵向操稳特性匹配与气动外形设计等方面详细介绍纵向操稳特性与气动外形设计的内在耦合关系;第 5 章从开环模态与稳定性分析、滚摆比特性分析等方面分析高超声速飞行器横侧向开环模态与稳定性的关系;第 6 章从强侧向静稳定性、强横向静稳定性一体化设计,基于 LCDP 特性的全飞行剖面的设计准则选取, LCDP 临界状态的运动特性研究等方面介绍基于 LCDP 特性的气动/控制一体化设计准则;第 7 章介绍基于失稳模式的自适应控制方法及基于 LCDP 特性在线辨识的自适应控制方法;第 8 章总结本书的主要研究工作并对未来工作进行展望。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,欢迎读者批评指正。

阎昌万

2019 年 2 月

高超声速出版工程

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪 论

1

- 1.1 气动与控制的关系 / 1
- 1.2 国内外研究现状 / 6
 - 1.2.1 高超声速飞行器气动布局发展情况 / 6
 - 1.2.2 气动与控制一体化设计研究 / 14
 - 1.2.3 针对气动特性切换的控制重构方法 / 19
- 1.3 研究问题及章节安排 / 22

第 2 章 飞行器运动模型建模

25

- 2.1 坐标系定义及坐标系转换 / 25
 - 2.1.1 坐标系定义 / 25
 - 2.1.2 坐标系转换 / 26
- 2.2 飞行器运动方程 / 28
 - 2.2.1 质心动力学方程 / 28
 - 2.2.2 绕质心动力学方程 / 31
 - 2.2.3 绕质心运动学方程 / 33

- 2.3 小扰动线性化方程 / 33
 - 2.3.1 线性化方法 / 36
 - 2.3.2 线性化方程 / 37
- 2.4 本章小结 / 40

第3章 飞行剖面及气动特性分析

42

- 3.1 飞行剖面分析 / 42
- 3.2 气动特性分析 / 43
 - 3.2.1 纵向静稳定性 / 43
 - 3.2.2 侧向静稳定性 / 44
 - 3.2.3 横向静稳定性 / 45
 - 3.2.4 滚动舵偏导数项 / 46
 - 3.2.5 方向舵舵效 / 47
 - 3.2.6 侧向动稳定导数 / 49
 - 3.2.7 横向控制偏离参数 / 50
- 3.3 本章小结 / 52

第4章 纵向操稳特性与气动外形设计

54

- 4.1 飞行器纵向静稳定性设计难点 / 55
- 4.2 纵向静稳定性调节方法 / 57
 - 4.2.1 通过调节质心前后升力面面积分布调节焦点位置 / 57
 - 4.2.2 通过在迎风面尾部设置压缩面增大纵向静稳定性 / 58
 - 4.2.3 通过减小迎风面前体压缩角增大纵向静稳定性 / 58
- 4.3 纵向静稳定性与配平能力关系 / 60
- 4.4 纵向稳定性分析 / 61
 - 4.4.1 纵向开环稳定性 / 61
 - 4.4.2 纵向闭环稳定性 / 61
 - 4.4.3 通道间耦合对纵向稳定性的影响 / 62

- 4.5 舵偏使用范围 / 63
 - 4.5.1 飞行器配平与纵向调整比 / 63
 - 4.5.2 飞行器舵偏需求与气动参数的关系 / 63
- 4.6 纵向闭环操纵性 / 64
- 4.7 伺服动特性与纵向静稳定性的关系 / 65
- 4.8 纵向操稳特性匹配与气动外形设计 / 67
- 4.9 本章小结 / 67

第 5 章 横侧向开环模态特性及稳定性分析

69

- 5.1 开环模态及稳定性分析 / 69
- 5.2 滚摆比特性分析 / 80
- 5.3 本章小结 / 81

第 6 章 基于 LCDP 特性的气动与控制一体化设计准则研究

82

- 6.1 基于强侧向静稳定性的一体化设计 / 82
 - 6.1.1 一体化设计准则研究 / 82
 - 6.1.2 稳定问题研究 / 84
- 6.2 基于强横向静稳定性的一体化设计 / 88
 - 6.2.1 一体化设计准则研究 / 88
 - 6.2.2 稳定问题研究 / 96
- 6.3 基于 LCDP 特性的全飞行剖面设计准则选取 / 104
 - 6.3.1 LCDP <0 与 LCDP >0 的特性分析比较 / 104
 - 6.3.2 基于全飞行剖面的设计准则选取 / 105
- 6.4 LCDP 临界状态的运动特性研究 / 106
- 6.5 本章小结 / 109

第 7 章 针对 LCDP 特性在线切换的自适应控制研究

111

- 7.1 基于失稳模式的自适应控制方法 / 111
- 7.2 基于 LCDP 特性在线辨识的自适应控制方法 / 116

- 7.2.1 最小二乘法 / 116
- 7.2.2 LCDP 在线辨识最小二乘模型构建 / 121
- 7.2.3 主动激励设计 / 122
- 7.2.4 基于 LCDP 在线辨识结果的自适应控制仿真分析 / 123
- 7.3 本章小结 / 126

第8章 总结与展望

128

参考文献

131

主要符号表

136

缩略词

137

第 1 章

绪 论

1.1 气动与控制的关系

天空的鸟儿,为什么有不同的样子?

达尔文指出:优胜劣汰,适者生存,自然选择决定鸟儿的樣子。同样,在天空翱翔的鸟儿有不同的“气动外形”是不同物种适应环境、自然进化的结果。

那是什么因素决定了飞行器的模样?高超声速飞行器的气动外形应该如何确定?

经过几十年的发展,高超声速飞行器已经形成了浩大的族谱,有人驾驶/无人驾驶、重复使用/单次使用、不同速域范围、不同飞行任务……它们有着令人眼花缭乱的“气动外形”。先来看几种典型的高超声速飞行器。

1. HL-10

HL-10(Horizontal Lander 10)^[1](图 1.1),由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)兰利研究中心研制,主要为了验证升力体特性,其为翼身融合体布局,机身翼型采用大厚度反弯翼型,74°后掠三角翼平面布局,尾部有三个垂尾,两侧垂尾对称偏转提供俯仰控制能力,差动偏转提供滚转控制能力,中间垂尾控制偏航方向和速度。

2. X-15

X-15^[2]项目由 NASA 牵头,美国空军、海军和北美航空公司联合进行,主要验证高超声速理论和风洞技术,研究高气动压力下的飞机结构、稳定性和控制性能等相关技术。在气动布局方面,X-15 包括机翼、水平尾翼、楔形垂直尾翼、升降舵及方向舵(图 1.2),其机翼为中单翼设计方案。

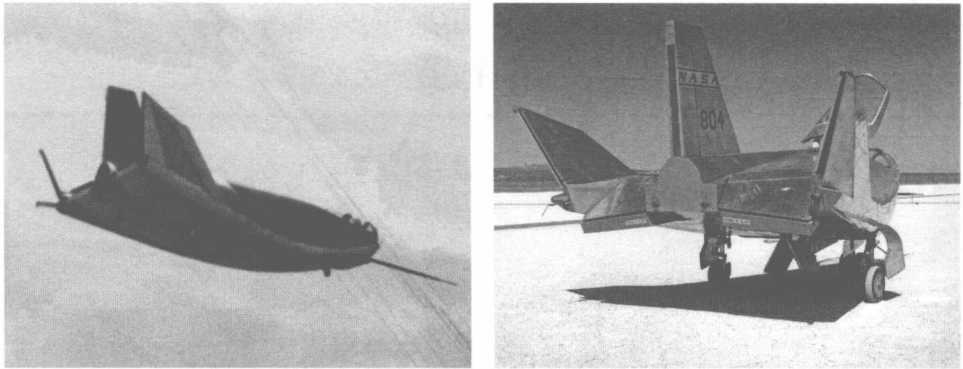


图 1.1 HL-10 示意图

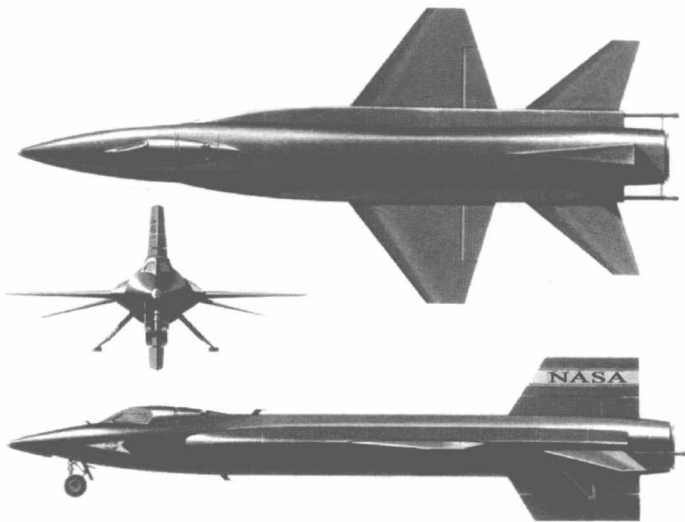


图 1.2 X-15 示意图

3. X-33

X-33^[3]是美国在1996~2001年研制的一种亚轨道、可重复使用的空天飞行器验证机,主要目的是降低全尺寸、可重复使用飞行器的研制和使用风险。X-33基本构型为升力体式,飞行器控制翼面包括垂直方向舵、倾斜立尾及机身襟翼,如图1.3所示。两个垂直方向舵为飞行器提供航向控制;两个机身襟翼与带有内、外升降副翼的机翼为飞行器提供纵向控制和横向控制并辅助航向控制。

4. 航天飞机

航天飞机^[4](图1.4)的正式名称是空间运输系统,它是一种通过火箭发射

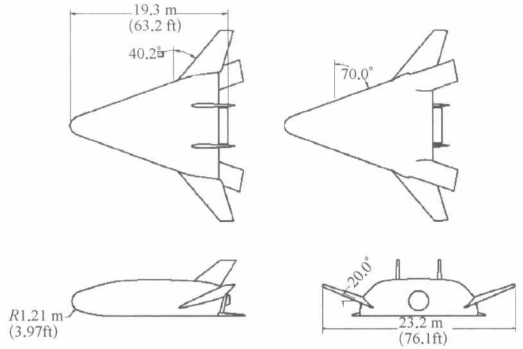
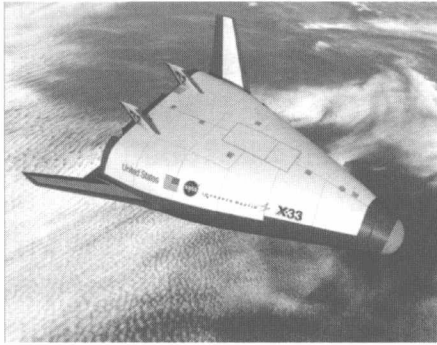


图 1.3 X-33 示意图

入轨的可重复使用的航天器,在完成轨道运行后,以滑翔方式在地面跑道着陆。在机翼设计上,航天飞机采用大前缘半径和大后掠角双三角翼结合的形式,机翼上配置了全横向的升降副翼,每边由两片升降副翼板构成,每片升降副翼板都是独立驱动的;机体背面的垂尾包括安定翼和分裂方向舵;机身尾部装体襟翼。

5. HTV-2

HTV-2^[5,6](图 1.5)的目标是发展、试验一种火箭助推的、能以马赫数 20 以上速度再入大气层并进行高超声速滑翔机动飞行的无人驾驶飞行器。其

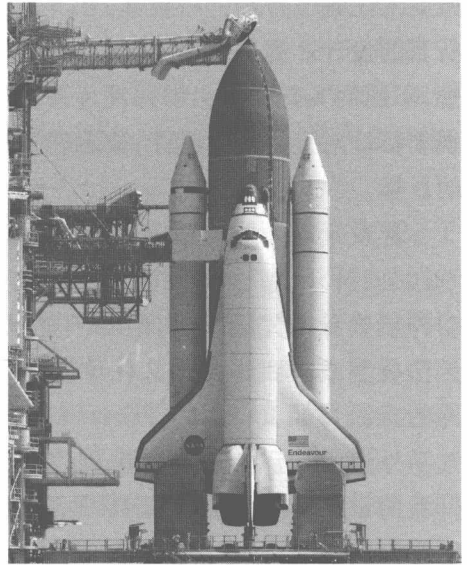


图 1.4 航天飞机示意图

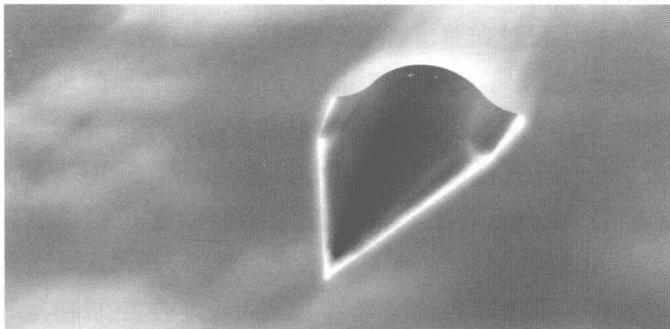


图 1.5 HTV-2 示意图

采用了乘波体设计与优化技术,升阻比为 3.15~4,堪称历史上最先进的气动外形,流线的机身,全机只有两个 FLAP 控制舵面,是历史上控制舵面最少的飞行器。

高超声速飞行器的外形如此“纷繁多样”,到底是什么因素决定了其外形?是否有高超声速飞行器应该普遍遵循的共同法则呢?

当高超声速飞行器主要依靠气动力进行飞行控制时,在总体参数和飞行剖面确定的情况下,其气动外形一经确定,控制特性就相应确定;在控制指标约束下的控制策略和控制参数也就基本确定了,稳定或不稳定、好控或不好控均由气动外形这一“出生背景”决定。因此,一方面,气动外形设计必须一开始就考虑到飞行器的可控性,在气动外形设计过程中,从控制的角度来评价飞行器的设计。另一方面,将飞行器看作一个被控对象,分析飞行器的动力学特性,不同的飞行器动力学特性可采用不同的控制策略,特别是不同控制策略下气动特性对飞行器操纵性、稳定性的影响,从而有针对性地提出气动外形设计的目标。

若在气动外形设计中不考虑可控性因素,则气动外形设计得再漂亮,也不过是“样子货”。即使控制系统“逆来顺受”,能够在一定程度上弥补气动外形设计的先天不足,但若不重视气动外形设计的先天缺陷,则可能导致无法控制或需要付出太大代价的问题,例如,气动外形重新设计或者配置额外的操纵力如 RCS 之类,从而带来设计周期变长或总体性能的下降。因此,气动外形设计伊始就要考虑到飞行器的可控性,从可控性的角度来评价飞行器的设计,这样可以提高气动外形设计效率、加快飞行器设计方案的闭合。

反之,若控制系统设计只站在本系统的角度,不顾其他系统的要求,对气动外形设计“颐指气使”,这样的可能结果就是得到一个笨重的气动外形或给其他系统增加了设计难度。例如,为满足增强侧向稳定性的要求,在飞行器迎风面安装腹鳍;为了增强偏航通道的控制能力,在飞行器迎风面配置方向舵,上述设计均带来了气动热和热防护的问题。再如,为满足全飞行剖面的稳定,要求配置足够的控制力,如兼顾全程的 RCS 配置或较多的空气舵面,则会带来增重、安装难的问题。满足稳定控制的气动布局设计要求与系统设计的其他要求往往是矛盾的,例如,从气动热、热防护及总体质量、装配的角度期望简洁的气动布局,而从增强控制稳定性或控制能力的角度需求的气动布局可能就相对复杂。气动布局的简洁化一般意味