

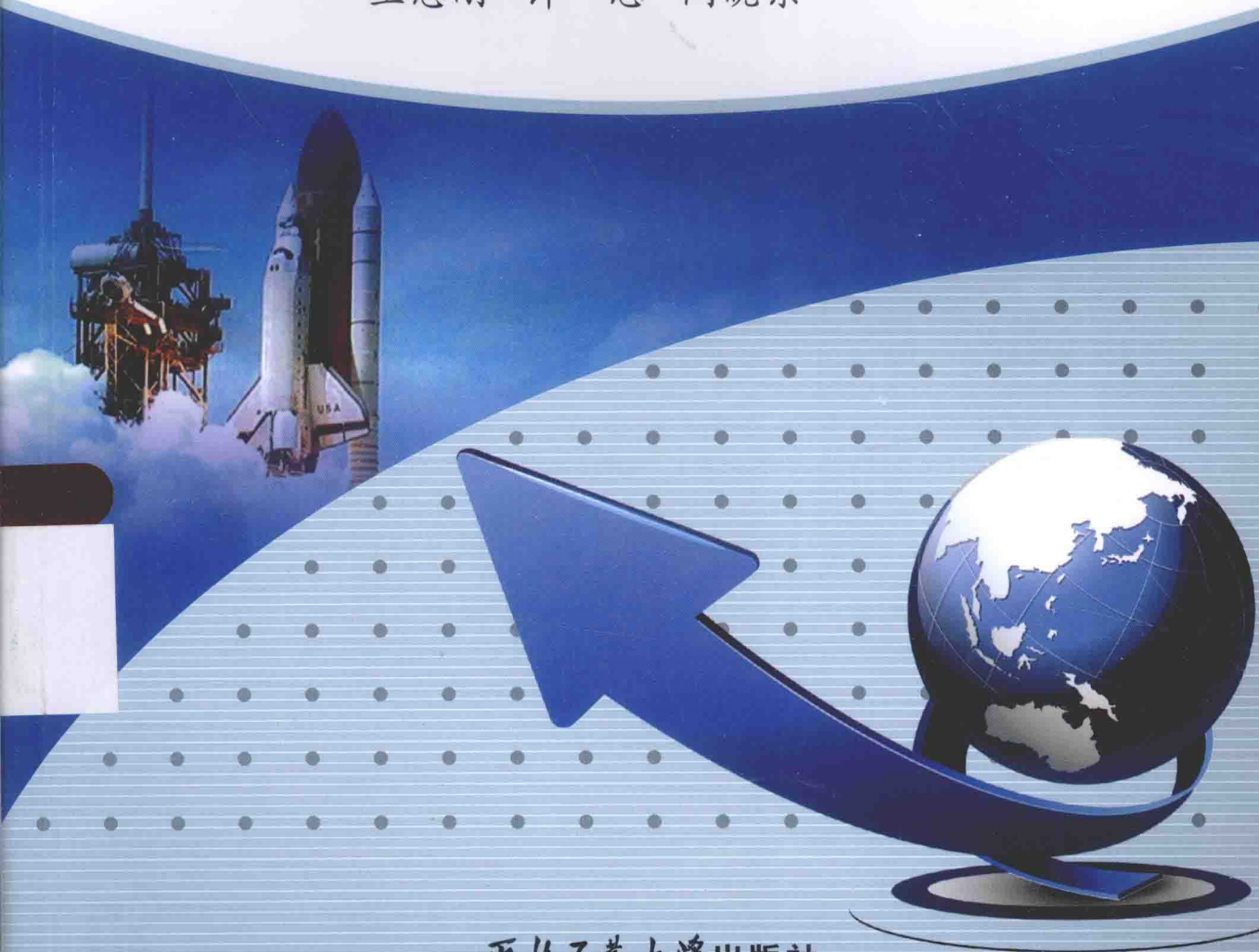


工业和信息化部“十二五”规划教材

西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

航天飞行动力学

方 群 李新国 朱战霞 主编
王志刚 许 志 闫晓东



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

西北工业大学研究生高水平课程体系建设丛书

HANGTIAN FEIXING DONGLIXUE

航天飞行动力学

方 群 李新国 朱战霞 主编
王志刚 许 志 闫晓东



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地阐述了航天飞行动力学的基本原理和方法。全书分为7章。其主要内容包括绪论,导弹飞行动力学,飞行动态特性分析,远程火箭与航天器再入弹道,临近空间飞行动力学,航天器飞行动力学以及航天飞行动力学的发展等。

本书既可作为航空、航天类专业高年级本科生及研究生的教材,也可作为相关交叉学科专业教师、本科生和研究生的参考书,还可作为从事航天器研究、设计、试验和应用单位的飞行动力学、导航、制导、控制、总体设计、系统工程、效能分析以及其他有关专业技术人员的主要参考书和常用手册使用。

图书在版编目(CIP)数据

航天飞行动力学/方群等主编. —西安:西北工业大学出版社,2015.8

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5612-4548-4

I. ①航… II. ①方… III. ①航空器—飞行力学—高等学校—教材 IV. ①V212.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 200712 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:28.75

字 数:708 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

前 言

航天飞行动力学是研究飞行器在复杂飞行环境中,在各种力作用下运动规律及其伴随现象、总体性能的科学,是一门建立在刚体力学、弹性结构力学、空气动力学、流体力学、多体系统动力学、振动理论、运动稳定性等力学基础之上,又依赖于现代控制论和计算技术的发展,并与测量技术密切相关的综合性的应用力学。同时也是航天类专业高年级本科生和研究生需要掌握的专业技术基础知识之一,对于从事航天器设计、研究和研制等工程技术人员,是不可缺少的理论基础。其所涉及的知识内容、原理和方法、技术和手段是各类航天飞行器总体设计、气动外形设计、控制系统设计、动力系统设计以及效能分析的重要依据。本书不仅涉及战术导弹、远程火箭、航天器、临近空间及高超声速等航天飞行器研究、设计、试验和应用中主要的飞行动力学理论和方法,同时还增添了能够启迪和开阅读者思维的航天飞行动力学前沿问题,并在部分章节配有包括与工程实际问题相结合的思考题。其主要内容包括,在阐述航天飞行动力学的发展以及与各类航天飞行器总体设计、气动外形设计、控制系统设计、动力系统设计和效能分析的融会贯通关系的基础上,对涉及对象(战术导弹、远程火箭、航天器、高超声速飞行器、临近空间飞行器等)和飞行环境(大气层内、大气层外、临近空间)的动力学问题的相关基本概念和原理,坐标系建立和描述方法,力学环境特性分析方法,动力学特性建模和分析方法,运动特性建模和分析方法,导引规律的轨道特性分析方法,飞行轨迹优化设计原理和方法,飞行仿真技术和原理,飞行动力学前沿、统一性及一些特殊性问题等进行论述。全书分为7章。其中:第1章,绪论,由方群编写;第2章,导弹飞行动力学,由李新国编写;第3章,飞行动态特性分析,由许志编写;第4章,远程火箭与航天器再入弹道,由王志刚编写;第5章,临近空间飞行动力学,由方群编写;第6章,航天器飞行动力学,由朱战霞编写;第7章,航天飞行动力学的发展,由闫晓东编写。全书由方群统稿。

本书知识内容更注重基础性、综合性、全面性、充实性和前沿性,同时在空天飞行环境的全面覆盖性、动力学特性分析的统一和完整性、与其他相关学科的融会贯通性,以及学科发展的前瞻性等方面体现出不同于同类教材的特色。因此本书既可作为航空、航天类专业高年级本科生及研究生的教材,又可作为相关交叉学科专业教师、学生和研究生的参考书,还可作为从事航天器研究、设计、试验和

应用单位的飞行动力学、导航、制导、控制、总体设计、系统工程、效能分析以及其他有关专业技术人员的主要参考书和常用手册使用。

本书所涵盖的内容比较全面,在选用本书作为教材时,应根据专业需求、教学课时、教学对象等确定教学的侧重点,从而进行教学内容的取舍。

由于水平有限,疏漏之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2015年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 航天飞行动力学的发展	3
1.3 飞行动力学的重要作用及地位	8
参考文献	9
第 2 章 导弹飞行动力学	10
2.1 空气动力	10
2.2 气动力矩	14
2.3 推力	23
2.4 重力	24
2.5 导弹运动的建模基础	25
2.6 常用坐标系及其变换	26
2.7 导弹运动方程组	35
2.8 导弹运动方程组的简化与分解	46
2.9 导弹的质心运动	49
2.10 过载	53
2.11 方案飞行与弹道	58
2.12 导引飞行综述	65
思考题	72
参考文献	74
第 3 章 飞行动态特性分析	75
3.1 引言	75
3.2 导弹运动方程线性化	78
3.3 纵向扰动运动	87
3.4 侧向扰动运动	110
3.5 扰动运动的自动稳定与控制	121
思考题	143
参考文献	144
第 4 章 远程火箭与航天器再入弹道	145
4.1 常用坐标系与变质量力学原理	145

4.2 火箭的力学环境	161
4.3 火箭的运动方程	190
4.4 火箭主动段的运动	207
4.5 火箭载荷自由飞行段的运动	230
4.6 再入段弹道	238
4.7 多级火箭	264
思考题	273
附录 A 雷诺迁移定理	274
参考文献	276
第 5 章 临近空间飞行动力学	277
5.1 临近空间力学环境分析	278
5.2 临近空间环境效应分析	286
5.3 临近空间环境中的扰动因素	291
5.4 临近空间力学环境建模与分析	293
5.5 临近空间飞行器运动模型	310
5.6 临近空间飞行器轨道优化设计	313
5.7 临近空间飞行器最优轨道制导方法	331
思考题	334
参考文献	334
第 6 章 航天器飞行动力学	336
6.1 航天器的飞行环境	336
6.2 航天器的开普勒轨道	346
6.3 航天器轨道摄动	365
6.4 航天器轨道机动	377
6.5 航天器姿态动力学基础	398
思考题	424
参考文献	426
第 7 章 航天飞行动力学的发展	427
7.1 弹性飞行力学	427
7.2 计算飞行力学	432
7.3 最优飞行轨迹设计方法	443
7.4 飞行轨道与弹道的统一建模	448
参考文献	452

第1章 绪 论

1.1 概 述

飞行力学(flight mechanics)是研究飞行器在复杂飞行环境中,在各种力作用下运动规律及其伴随现象、总体性能的科学,是一门建立在刚体力学、弹性结构力学、空气动力学、流体力学、多体系统动力学、振动理论、运动稳定性等力学基础之上,又依赖于现代控制论和计算技术的发展,并与测量技术密切相关的综合性应用力学。其研究内容具有鲜明的综合性、有效性和边缘性等特点。研究飞行力学的目的在于为飞行器的研制和使用从基本原理和性能分析方面提供理论基础。

按照一般力学的划分方法,飞行力学可以粗分为3个分支(branch)或3个学科(subject),即静力学(statics)、运动学(kinematics)和飞行动力学(flight dynamics)(见图1-1)。静力学研究飞行器上力、力矩的平衡或飞行器的“静止”问题;运动学只考虑飞行器怎样运动,不讨论飞行器与所受力的关系;飞行动力学则要讨论飞行器运动与所受力的关系^[1]。

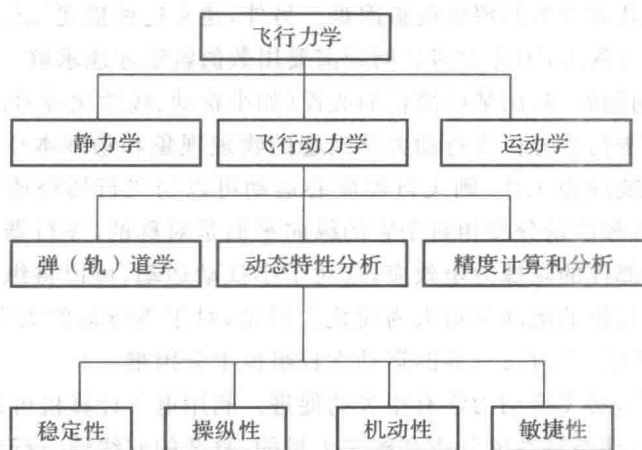


图 1-1 飞行力学“家族”的纵向关系

由此可见,飞行动力学是飞行力学的组成部分,是研究作用于飞行器上的力和力矩与飞行器运动之间关系的学科。它主要研究飞行器的轨迹(弹道、轨道、航迹以及飞行性能)问题、飞行器的动力学特性(动态特性)以及飞行器的飞行精度计算和分析(见图1-2)。通常在飞行力学中,飞行动力学占有相当大的或主要的比例。

研究飞行器的飞行动力学,首先研究作用在飞行器上各种力和力矩在运动过程中变化的特性,然后进而研究在这些力和力矩作用下飞行器的运动特性。



图 1-2 飞行动力学范畴

飞行器的运动特性按其特点可以分为以下两种类型^[2]。

(1) 飞行器的整体运动,即飞行器质心运动和飞行器绕质心转动的姿态运动;

(2) 飞行器局部的物体运动,如操纵面运动,弹性结构变形和振动,贮箱内液体的晃动等。这些局部运动的特性对飞行器整体运动也产生影响。

研究飞行器飞行动力学需要掌握工程数学、物理、理论力学、计算方法、高等数学等基础理论知识,还必须要掌握空气动力学、自动控制原理、飞行器总体设计、计算机技术等专业知识。如此才能正确地了解飞行过程中各种力的相互作用,精确地建立描述飞行器运动特性的数学模型,并得到有关问题的解。

现代飞行动力学的研究方法主要有下述 3 种^[1-2]。

1. 理论分析

应用现有的知识,将研究的飞行器状态和过程用数学模型的形式(代数方程、微分或积分方程、统计数学方程、有限的、超越的、确定的、随机的等等)加以表达。方程的数量决定于所研究飞行器系统的复杂程度以及要求的精确程度。要研究的问题愈复杂和要求愈精确,则所列的方程组就愈复杂,求其方程组的解也就愈困难。另外,通常这种描述飞行器运动的数学模型是变系数、非线性微分方程组,因此大多数问题需要用数值解法才能求解。

求解飞行动力学问题时,利用某些简化的假设(如小扰动、线性化等)可以得到一些简易的解析解,这些解析解对于初步分析飞行动力学问题的物理现象和物理本质是有意义的。假设飞行器无惯性,控制系统理想工作,则飞行器质心运动可以与飞行器绕质心的转动分开来研究。如果飞行器的外形和质量分布相对于它的纵向平面是对称的,飞行器原先运动在对称平面内,略去飞行器转动部件的陀螺力矩效应,则对于小扰动运动,可以将纵向运动和横侧运动分开来研究,从而使飞行器的运动分析大为简化。但是,对于飞行器的大多数运动情况,纵向和横侧运动是难以分开的,求解飞行器的运动方程组也十分困难。

计算机技术的发展,对飞行动力学有很大的促进。利用电子计算机可以进行飞行航迹(弹道)和飞行性能的计算,动态特性的分析和解决大量的、复杂的非线性飞行动力学问题。

2. 实验或试验

常用的手段有飞行仿真器、(缩比模型的)物理仿真(风洞试验、自由飞)、半实物仿真,最后是(全实物)飞行试验。从飞行试验所取得的数据对飞行动力学模型进行验证和校正,最后给定飞行器的运动数学模型。

3. 高速计算

量化的数值计算和可视化的图像计算对计算机的运算速度要求很高,主要内容是 CAD(计算机辅助设计)和仿真。

1.2 航天飞行动力学的发展^[1,3]

作为飞行力学组成部分的飞行动力学,伴随着飞行力学的发展而发展。即按照文献[3]作者的观点,作为指导人类飞行活动的理论基础——飞行力学,经历了从无到有、由初级到高级的发展过程。从传统飞行动力学→有控飞行动力学→计算飞行动力学,飞行力学实现了两次大的飞跃,现在已经成为人类解决飞行问题的有力工具。

1.2.1 传统飞行动力学

传统飞行动力学主要研究低速飞行器的运动特性和飞行安全性(平衡、稳定性和操纵性)问题。这时,飞行自动控制理论和技术还处于发展初期,还没有达到实用的程度,飞行器一般是无控的或仅仅依靠人(驾驶员)来操纵。现在,这种传统的方法还可能在一些模型飞机、滑翔机等飞行器设计中应用。

1.2.2 有控飞行动力学

第二次世界大战以后,喷气技术有了突飞猛进的进展,自动控制理论和技术日臻完善,高性能有人和无人飞行器发展迅速。这些高性能飞行器大都带有飞行自动装置或飞行控制系统,无控仅仅是有控的特殊情况。因此,现代飞行动力学的研究对象是一个有控的飞行器,或有控的力学系统。有控飞行动力学一方面利用自动控制的理论、观点和方法来研究飞行动力学问题,把飞行器视为控制系统中的一个环节,即控制对象;另一方面,广泛采用主动控制技术(Active Control Technology, ACT)来改善飞行器的动力学特性,实现对飞行器的各种控制。

有控飞行动力学解决了现代飞行器发展中的一个带有普遍意义的、共性的问题,解决了飞行动力学发展中的一个普遍性的矛盾,体现了现代飞行动力学研究中起主导作用的边缘交叉的本质。因此,“有控”或“无控”就形成了现代飞行动力学与传统飞行动力学的重要区别。从本质上说,现代飞行动力学可视为有控飞行动力学。

由此可见,有控飞行动力学(Auto-Flight Dynamics)可定义为,“有控飞行动力学是在传统飞行动力学基础上,利用自动控制的理论、方法和技术手段来研究有控飞行器总体性能、运动规律及其伴随现象的科学,是一般力学的一个新的分支,是现代飞行器设计、试验、训练和运用研究的理论基础。”

飞行动力学中的一些特殊问题,例如静不稳定问题,直接力控制问题, BTT 控制问题,惯性交感问题,大迎(攻)角问题,大气紊流扰动问题,伺服气动(热)弹性问题,液体晃动问题,制导规律或导引规律问题,发射动力学、分离动力学、回收动力学问题,等等,都是飞行动力学中的一些特殊性矛盾(问题)或个别性矛盾(问题),都可以在有控飞行动力学的理论框架内获得解决。实践表明,只要抓住了“力学+控制”这一对基本的、主要的矛盾,其他的矛盾就可以迎刃而解。

1.2.3 计算飞行动力学

从1946年发明第一台数字电子计算机以来,至今只有半个多世纪,计算机科学与技术已经发生了日新月异、突飞猛进的进步,这就大大改变了力学研究的面貌,因而也就大大改变了飞行动力学研究的面貌。

1960年左右,出现了计算力学,并首先在固体力学和流体力学中得到应用。这就预示着计算飞行动力学将成为未来起主导作用的一个飞行动力学分支。

在有控飞行动力学中的许多带大扰动、非线性、多变量、滞后变量、变系数、大机动和随机干扰,并带有“病态”微分方程组的、大规模的实际问题,要想通过理论方法获得解析解是十分困难的。而高速计算机出现以后,在满足一定工程规范和技术要求的前提下,这些十分复杂的飞行动力学问题,往往可以通过数值计算获得令人比较满意的解决。同时,数值计算可视化等技术可生成飞行器运动的逼真图像,为飞行动力学的研究和应用提供表达工具和交互手段。

在多年工程实践的基础上,文献[6]给出了计算飞行(动)力学(Computational Flight Mechanics(Dynamics))的定义:“计算飞行(动)力学是一门运用电子计算机技术、试验设计和计算数学等手段和方法,对飞行器的复杂运动及其伴随现象进行定量化和(或)可视化研究的、边缘交叉性很强的应用力学学科,是飞行(动)力学的一个新的分支,是现代飞行器设计、试验和应用研究的有力工具。”

计算飞行动力学是信息时代的飞行动力学,是飞行动力学的一个新的发展阶段。

由于飞行动力学与飞行器及其相关系统的设计、试验、飞行环境,以及飞行器的训练、运用等有着十分密切的关系,因此,同其他计算力学分支比较,计算飞行动力学作为飞行器总体技术(系统工程学)不可分割的组成部分,具有下述一些显著特点。

(1)研究对象的复杂性。飞行问题通常涉及飞行器系统及其相关分系统(特别是飞行器的制导、导航、控制系统),飞行地理环境和战场环境,人机工程,多个智能体系的协同或对抗,等等。因此,这是一个多学科交叉的问题,其中也包括固体力学和流体力学的一些问题。

(2)研究问题类型广泛。其中包括飞行动力学的优化设计问题(如飞行器的受控轨道问题,飞行器的飞行稳定性、操纵性、机动性和敏捷性问题,飞行器的发射、分离和回收问题,两个飞行器的对接问题,飞行精度问题,使用效能问题,等等);飞行仿真问题(如实时、超实时的弹道仿真,模拟打靶,攻防对抗仿真等);飞行任务规划问题(如飞行器的弹道或航迹规划及其检验);飞行器的参数辨识问题;应用研究问题;等等。

(3)建模技术的特殊重要性。数学模型是计算飞行动力学的基础。通常,飞行器运动的数学模型比较复杂,其中包括大规模,大范围(大机动、大扰动),多回路,多变量,多交联(惯性交联、运动交联、气动交联和控制交联),随机干扰,滞后变量,变系数,病态(刚性, stiff)的强非线性常微分方程组,代数方程组和超越方程组;飞行器的数学模型需要经过检验、验证和确认(VV&A)。

(4)试验设计(experiment design)技术的广泛应用。飞行动力学问题的解决与给定的初始条件、试验条件或使用条件及其变化范围有关,其中包括诸多参数(因素)及其不同取值(水平),在进行试验时,需要进行大量的统计计算。因此,欲取得具有实用价值的成果,试验方案的确定往往具有重要的意义。

(5) 量化与可视化并重。对于实际飞行问题的研究,不仅需要获得正确的量化的数值计算结果,而且还特别强调,需要提供尽可能逼真的可视化的动态飞行图像,二者相辅相成,相得益彰。

(6) 统计试验法(统计仿真法,随机抽签法,或 Monte Carlo 法)的广泛应用。这一部分也被一些飞行力学工作者称为统计飞行力学。过去,该方法仅仅是一个“不得已而为之”的方法,在其他方法无可奈何的情况下才使用。但是,随着计算机技术的发展,以及实际问题的日趋复杂化,统计试验法已经被普遍应用,或者说已经成为飞行力学研究中的一种例行公事。所要解决的问题越是复杂,越能显示该方法的优越性,模拟打靶就是一个典型例子。

(7) 计算机硬件与软件平台并重。为了建立一个高效、多功能、多媒体、智能化的飞行动力学计算系统,必须提供先进的计算机(网络)硬件平台以及相应的软件平台。如上所述,计算飞行动力学是飞行动力学第三个发展阶段的主要特征和标志,但并不是说计算飞行动力学可以替代一切。相反,在一些比较复杂的飞行条件下,飞行器运动及其飞行环境还难以获得比较正确的、可靠的数学描述。这时,还需要通过试验方法来对飞行器的运动进行研究。另外,在某些情况下,定性的理论分析有助于获得关于飞行器运动的一般性结论,也是不可忽视的。当然,即使在这两种情况下,高速计算也会起着重要的作用。

1.2.4 研究进展

1.2.4.1 国外研究进展

由于现代先进飞行器呈现出高度的气动/结构/控制/运动非线性耦合特点,国外飞行动力学研究在解决传统性能、飞行品质问题的基础上,目前主要研究内容是综合多学科知识,研究飞行动力学/空气动力学/结构力学/飞行控制一体化的设计技术和方法,以适应先进飞行器设计、研制的需求。具体包括非定常气动特性的气动/飞行动力学一体化计算技术、非线性飞行动力学特性分叉分析技术与控制律连续设计技术、飞行仿真和模拟技术、风洞自由飞行和虚拟飞行实验技术、缩比样机试飞和全机空中试飞技术等。

空天飞行器分为跨大气层飞行器、空间机动飞行器和临近空间飞行器,是一种在大气层内以吸气式发动机为动力、在大气层外以火箭发动机为动力,或者以吸气式组合发动机为动力,实现大气层内巡航或跨大气层、天地往返飞行或空间大机动飞行的新型飞行器。如高超声速飞行器、高超声速飞机、空天飞机、重复使用运载器、亚轨道飞行器、空间机动平台。与传统的航空飞行器或航天飞行器不同,空天飞行器具有航空、航天飞行器的综合技术特征,其基础性研究涉及诸多科学领域,蕴涵大量的基础科学和前沿技术问题。

美国、俄罗斯、日本、印度和欧洲等国在空天技术的研究与探索方面从未停止过,对空天科学技术给予了广泛的关注,针对空天飞行器技术领域的重点目标,持续实施了多个发展研究计划。

1.2.4.2 国内研究进展

近年来,根据新概念先进飞行器设计需求,国内在消化、吸收国外先进研究成果的基础上,通过自主创新、发展,在飞行动力学理论、方法和技术研究中取得一定的成绩,主要包括下述几

方面。

1. 非线性飞行动力学研究

在经典飞行动力学研究中,一般采用小扰动线性化理论分析飞行品质。然而在先进飞行器设计中,基于隐身、高机动特性等设计需求,广泛采用新的气动布局及控制技术,飞行器具有在大迎角等非常规飞行区域的机动能力,导致飞行器的气动/控制/运动存在高度非线性耦合特性,构成非线性飞行动力学系统。为此,发展非线性飞行动力学分析理论和方法成为飞行动力学的重要研究方向。

前期南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国空气动力研究与发展中心、空军工程大学等单位,基于非线性动力学系统理论,采用分叉分析方法研究飞行器的全局稳定性,揭示尾旋、机翼摇晃等失稳特性,并结合非线性动态逆、模糊逻辑、鲁棒控制等方法设计失稳改出控制律,取得了一定成果。同时将分叉分析方法与特征结构配置、鲁棒控制、动态逆控制等方法结合,开展过失速机动控制律初步设计,在构建全局控制律连续设计框架研究中取得初步成绩。

2. 非定常气动建模技术研究

大迎角非定常气动建模问题是具有过失速机动能力的先进高机动飞行器设计中面临的最具挑战性的问题之一。基于非定常流动机理,建立工程实用的非定常气动模型,是开展过失速机动、尾旋进入/改出等领域飞行动力学分析、飞行仿真、控制律设计及验证研究的基础。

前期南京航空航天大学、中国空气动力研究与发展中心、西北工业大学等单位深入开展大迎角非定常气动建模技术研究,建立了非线性微分方程、神经网络、模糊逻辑、线性状态方程等形式的非定常气动模型,分析非定常气动力对飞行动力学特性的影响,并提出相应的风洞试验需求及试验方案,发展风洞虚拟飞行试验技术,取得了重要的研究成果。

3. 弹性飞行动力学研究

基于巡航性能、机动性能等需求,先进飞行器正逐步使用轻质的新型复合材料减轻机体结构质量,飞行器呈现出轻结构、大柔性和低阻尼的特点,气动弹性及气动伺服弹性的影响越来越显著。如高速、大型飞行器由于动压增大和结构刚度降低,首阶气动弹性模态频率降低,接近于机体运动的短周期模态频率,导致机体运动与结构运动的动态耦合,飞行器将呈现出新的高阶飞行动力学特性,为此,弹性飞行动力学成为飞行动力学的又一重要研究方向。

前期西北工业大学、南京航空航天大学等单位在弹性飞行器动力学建模、飞行品质分析及综合控制等方面开展深入研究。如采用 Lagrange 方程和平均轴坐标系假设方法建立弹性飞行器飞行动力学模型,采用模型降阶、模态分析等方法分析确定弹性运动对整机飞行品质的影响,并针对弹性飞行器存在的模型不确定性、鲁棒性和抗干扰性差等问题,研究基于飞行品质、抗干扰和噪声性能、鲁棒性等多目标的控制律综合设计方法,采用模型跟踪、 H_∞ 控制、 μ 分析等方法进行弹性飞行器的控制律综合设计。

4. 高超声速飞行器动力学

高超声速飞行器飞行动力学是研究高超声速飞行器在高空稀薄大气层内飞行的运动规律的学科,建立飞行器动力学和运动学模型,研究飞行器的飞行性能、动态特性(稳定性和操纵性等)、控制特性等问题,优化设计飞行轨迹和姿态控制,是实现高超声速飞行的基础理论和重要基石。与传统飞行动力学比较,高超声速飞行动力学同样包含飞行器气动特性、弹道力学(轨道力学)以及姿态动力学三个主要的研究范畴。由于高超声速飞行器具有典型的多学科耦合

性、高度非线性和环境复杂性,带来了经典飞行动力学理论和方法的新挑战。

国内西北工业大学、北京航空航天大学 and 南京航空航天大学等对此进行了初步的探索研究。

5. 在轨机动动力学与控制

通过对快速在轨机动模式、机动轨道动力学、在轨机动姿态动力学、自主机动轨道(包括非开普勒轨道)设计/计算及优化等基础理论的研究,突破在轨机动及面向多任务的组合机动与控制相关理论和关键技术。建立面向任务的在轨机动动力学与控制研究和实验环境,通过虚拟现实、半物理仿真等实验手段对关键技术进行实验研究和演示验证。

西北工业大学、国防科技大学对相关理论和方法进行了前期研究。

6. 其他飞行动力学相关问题研究

飞行动力学与其他学科知识融合开展研究,在解决飞行器设计关键技术问题中起到了重要的作用。前期开展的其他飞行动力学相关问题包括大气紊流建模、阵风载荷减缓控制、气动参数辨识、航迹规划、控制律重构等。

1.2.5 未来发展趋势

随着航空航天科学技术的发展,先进飞行器气动/结构/控制/运动间呈现出高度非线性耦合的特性,要求飞行动力学与空气动力学、结构力学、飞行控制等学科紧密结合开展研究。目前,国内外飞行动力学在理论研究和方法研究方面,主要向气动/结构/控制/飞行力学一体化研究方向发展,以飞行器动力学特性及任务能力最优为设计目标,分析其耦合特性,开展多学科、综合化、定量化、精细化、数字化设计,建立一体化的设计技术和方法;在工程应用方面,主要致力于解决新概念飞行器涉及的特殊飞行动力学问题。

1. 气动/飞行力学一体化计算、试验、分析技术

在未来先进飞行器飞行动力学问题研究中,由于非定常气动力与机体运动间存在非线性动力学耦合特性,发展气动/飞行动力学一体化计算方法及气动/运动耦合的风洞试验技术,揭示非定常流动机理,并建立非定常气动建模技术和非线性飞行动力学分析技术,是未来重要的研究趋势。

2. 气动/结构/飞行动力学一体化计算、试验、分析技术

在弹性飞行器飞行动力学研究中,发展气动/结构/飞行动力学的一体化分析方法,在飞行器初步设计阶段,将气动/结构耦合动力学模型纳入飞行动力学大平台中,研究弹性变形对飞行动力学特性的影响,采用变体技术提高飞行性能,开展精细化设计和评估,将为未来弹性、柔性及变体飞行器的研究提供重要的技术基础。

3. 飞行动力学/飞行控制一体化设计技术

控制律设计已成为先进飞行器设计不可或缺的环节,是保障飞行品质、实现任务能力的重要技术手段。目前,传统的线性化分析和设计方法不能完全满足先进飞行器的设计需求,将飞行动力学系统的分叉分析方法和先进控制方法相结合,基于任务性能、飞行品质、控制效能、鲁棒性等多目标需求,发展非线性飞行动力学/飞行控制的一体化设计技术,是飞行动力学未来

重要的发展方向。

4. 飞行动力学/空气动力学/结构力学/飞行控制一体化设计技术

在飞行器子系统设计技术研究的基础上,发展飞行动力学/空气动力学/结构力学/飞行控制一体化设计技术,构建虚拟飞行动力学样机,开展飞行仿真、人在环路模拟飞行,同时发展风洞虚拟飞行试验技术,缩比及全机空中试飞技术,进行半物理/物理试验研究,有利于尽早发现设计缺陷,提高设计质量,缩短设计周期,降低设计成本。

另一方面,建立未来战场环境,开展作战效能仿真、战场指挥、战术决策等研究,将是飞行动力学在飞行器使用领域拓展的重要方向。

5. 无人飞行器飞行动力学问题

无人飞行器包括高超声速飞行器、组合飞行器、智能变形飞行器、微型飞行器、隐身飞行器、诱饵飞行器等,为飞行动力学提出新的问题;同时有关攻防对抗中的飞行动力学、计算飞行动力学等也是重要的发展趋势。

6. 空间机动飞行动力学问题

空间机动与操作所要求的飞行器运动不同于模仿自然天体的开普勒运动,具有快速、自主、精确、大范围、协同等特征,需要在空间飞行动力学、制导导航与控制、推进等创新研究的基础上,延伸和拓展传统轨道计算与飞行规划、轨道测定、空间变轨、轨道保持和空间交会等技术,探索空间机动的新机理、新理论、新方法和新技术,完善和发展航天动力学与控制的理论和方法。

1.3 飞行动力学的重要作用及地位^[1,3-4]

随着航空航天科学技术的发展,飞行力学作为一门具有显著航空航天特色的学科,在先进飞行器设计、研制、试验及使用等领域的作用日益重要。从狭义上来说,传统飞行力学主要采用力学原理研究飞行器的运动规律和特性,是力学学科的分支。但从广义上来说,由于飞行器运动特性与飞行器所受的空气动力、发动机推力及飞行器结构弹性变形、飞行控制等密切相关,直接决定了飞行器的总体特性、任务能力和使用需求,已成为飞行器设计的出发点和归宿点,为此,飞行力学正逐步发展成为一门飞行器设计领域的系统、综合性学科,并为飞行器的使用提供基础理论指导。同时飞行动力学研究结果还是各类飞行器总体设计、气动外形设计、控制系统设计、动力系统设计以及效能分析的重要依据。

图1-3描述了飞行动力学与飞行器设计中其他学科的关系,体现了多学科交叉的特点。随着科学技术的发展,许多学科势必交叉(见图1-3),你中有我,我中有你。因此研究一个问题,一定要从学科交叉和跨学科的角度去思考。由图1-3可见,研究飞行动力学问题,是需要懂得自动控制、结构力学、飞行器总体、空气动力学和一般力学的。而反过来,研究飞行器的控制问题、总体设计问题、结构问题、气动问题、动力系统和有效载荷设计问题、GNC系统设计等问题也离不开飞行动力学。

另外在飞行器设计、型号研制以及使用中,飞行动力学的重要作用 and 地位同样是不可忽视的。其原因主要在于:

(1) 飞行动力学是型号设计的重要理论基础;

(2) 飞行动力学是新型号设计或改型设计的关键技术之一,它决定了型号的飞行性能和使用条件,与飞行器的总体布局、部位安排、载荷、强度、结构、动力装置、战斗部、控制和制导系统设计等有着密切的关系;

(3) 飞行动力学是研究飞行器的可靠性、精度、攻防对抗、作战效能和飞行任务规划的理论基础;

(4) 飞行动力学是飞行器的 CAD、飞行仿真和飞行试验的理论基础;

(5) 飞行动力学是研究飞行器相关应用问题的理论基础。

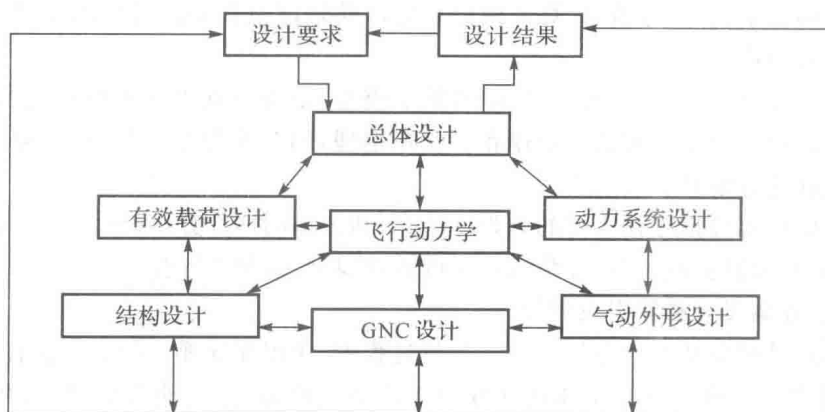


图 1-3 飞行器设计中各学科之间的关系

参 考 文 献

- [1] 关世义. 关于飞行力学的再思考[J]. 战术导弹技术, 2003, 5(2): 01-12.
- [2] 张有济. 战术导弹飞行力学设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [3] 沈宏良, 唐硕, 唐胜景. 飞行力学学科发展研究[C]. 2010—2011 航空科学技术学科发展报告, 2011-04-10.
- [4] 关世义. 有控飞行力学在无人飞行器研制和使用中的作用[J]. 宇航学报, 1995, 16(4): 29-35.
- [5] Babister A W. Aircraft Dynamics Stability and Response[M]. Oxford: Pergamon Press, 1980.
- [6] 关世义. 计算飞行力学的产生和发展[J]. 航空学报, 2001, 22(1): 1-5.
- [7] 龚正, 沈宏良, 吴根兴. 非定常气动力对飞行动力学特性影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(3): 291-295.
- [8] 关世义, 等. 未来无人飞行器发展可能面临的飞行力学问题[C]. 中国宇航学会 2010 飞行力学学术年会论文集. 哈尔滨, 2010.

第2章 导弹飞行动力学

对实际系统中的物理现象或过程进行定性或定量的分析研究时,通常需要先建立描述系统特性的数学模型。如果其变量中不含时间因素,则为静态模型;如与时间有关,则为动态模型。根据所建立的数学模型可在数字计算机上进行仿真实验,以获得真实系统的行为特性。研究导弹的运动也不例外,分析、计算或模拟它的运动轨迹及其动态特性的基础,仍是建立描述导弹运动的数学模型。

导弹运动方程组是表征导弹运动规律的数学模型,是飞行动力学的重要内容。建立导弹运动方程组的理论基础是牛顿第二定律和动量矩定理,同时涉及变质量力学、空气动力学、推进和自动控制理论等学科。

本章介绍的内容包括导弹飞行的力学环境、力和力矩的计算方法、导弹运动方程组的建模方法、常用坐标系及其变换关系、导弹六自由度运动模型、简化的导弹运动(平面运动和质心运动)模型、过载、方案飞行和导引飞行等。

建立导弹运动模型从受力分析开始。飞行过程中,作用在导弹上的力主要有空气动力、发动机推力和重力。本章首先介绍作用在导弹上的空气动力、空气动力矩、推力和重力的有关特性。

2.1 空气动力

空气动力(简称为气动力)是空气对在其中运动的物体的作用力。当可压缩的黏性气流流过导弹各部件的表面时,由于整个表面上压强分布的不对称,出现了压强差;空气对导弹表面又有黏性摩擦,产生黏性摩擦力。这两部分力合在一起,就形成了作用在导弹上的空气动力。空气动力的作用线一般不通过导弹的质心,因此,将形成对质心的空气动力矩。

2.1.1 空气动力的表达式

空气动力分解为3个分量,分别称为阻力 X 、升力 Y 和侧向力 Z 。实验分析表明:空气动力的大小与来流的动压头 q 和导弹的特征面积 S 成正比,即

$$\left. \begin{aligned} X &= C_x q S \\ Y &= C_y q S \\ Z &= C_z q S \\ q &= \frac{1}{2} \rho V^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中, C_x, C_y, C_z 为无量纲比例因数,分别称为阻力因数、升力因数和侧向力因数(总称为气动力因数); ρ 为空气密度; V 为导弹飞行速度; S 为参考面积,通常取弹翼面积或弹身最大横