

航天与力学的发展*

庄逢甘

(中国航天工业总公司科学技术委员会 北京 100830)

关键词 航天, 力学, 发展趋势, 研究方法, 挑战, 机遇

1 引言

对于力学在航天领域中的重要性, 经历了一个认识过程。国内外航天飞行器多次失事的教训告诉我们, 忽视航天领域的力学问题不仅影响到它们的性能, 而且会带来难以估量的损失。联盟号飞船第一次飞行的船毁人亡, 难道不与这个飞船的跨声速气动特性不理想有关吗? 航天力学就是研究航天飞行器(Space Vehicle)的力学问题, 这里说的航天飞行器应该包括运载器(Launch Vehicle)和航天器(Spacecraft)。今天, 我们就从当今航天领域的发展趋势和航天与力学的相互关系谈起。

2 当今航天领域的发展趋势

纵观当今世界航天的发展, 大体上可以分成三个方面:

第一方面是应用卫星和卫星应用。绝大部分的卫星都是利用空间的高远位置为信息的获取、传递与发布服务。其中包括通信卫星、遥感卫星、气象卫星、导航卫星和海洋卫星等等。通信卫星不仅成为当今通信技术的主要工具之一, 而且已成为各国正在建设的信息基础设施(Information Infrastructure, 即媒介中常说的信息高速公路)的重要组成部分。当代的空间遥感技术已经渗透到国民经济各个领域。除此之外, 卫星在未来的高技术战争中, 无疑将起十分重要的作用。由于卫星及其应用有着明显的经济效益和国防价值, 就必然成为航天技术发展的一个最主要的领域。当今, 在卫星领域中正在孕育着一场技术革命, 即卫星向小型化方向发展。可以预见, 小卫星在卫星技术中引起的变化, 就如同微型计算机在计算机技术中引起的变化一样深刻。为了满足发射小卫星的需求, 已经研制成功了在飞机上发射的小型火箭。

第二方面, 载人航天领域。21 世纪初, 载人航天的重点是建立空间站工程大系统。建立空间站只是载人航天漫长历程的第一步。正如俄国的著名火箭专家齐奥尔科夫斯基所说, “地球是人类的摇篮。人类绝不会永远躺在这个摇篮里, 而会不断探索新的天体和空间。人类首先将小心翼翼地穿过大气层, 然后再去征服太阳系空间”。人类开发宇宙, 是人类长期以来的梦想。无疑, 载人航天可以大大地提高国家的威望和民族自豪感。另一方面, 载人航天也为信息、能源和材料的综合开发创造了必要的条件。然而, 大规模开发空间必须以大幅度降低空间运输系统的运输费用为前提。人们虽然为此进行了努力, 但目前收效甚微。现在正寄希望于重复使用的

* 收稿日期: 1996 年 6 月 8 日

单级入轨火箭和水平起降的空天飞机。

第三方面,深空探测方面。为了开发宇宙,寻找地外文明,就必须对月球、火星,以及其它的行星进行探测。美国的 Apollo 计划实现了人类登月的愿望。当前,美、俄、欧洲、日本等都正在实施一系列月球、火星等深空探测计划。

在航天事业发展的过程中,上述 3 个方面都不断地给力学的发展提出了许多新的课题。另一方面,力学也为航天的发展提出了许多新概念、新思想、新方法。航天作为需求牵引,力学作为航天的技术推动因素之一,航天与力学互相促进,相得益彰。

3 航天力学的研究内容

航天力学主要研究航天飞行器在发射上升段、轨道进行段和再入返回段的力学问题。

(1)天体力学和轨道力学 为了开发宇宙,我们必须对各个行星的运动规律有进一步的认识。因此,必须用近代的力学知识进一步描述天体的运动规律。另一方面,为了节约能量,必须对各种航天器的轨道进行优化。关于这方面,我们可以举出两个例子。一个例子是所谓的 AOTV,就是气动辅助变轨转移飞行器。大家知道,要改变航天飞行器的飞行轨道,需要很大的能量。有时几乎是做不到的。一些力学专家提出了一些新的想法,即利用航天器在再入大气层中所受的气动力,来改变飞行轨道,就可以节省许多能量。第二个例子是,为了实现对行星的探测,可以利用另一个行星的重力场,使得或是节省整个飞行的能量,或是寻找合适的发射窗口。

(2)大气层飞行力学 大气层飞行力学的重点是空天飞机的上升段轨道优化。由于空天飞机使用吸气式组合发动机,在整个飞行过程中,它受到很大的阻力和气动加热。为了节省能量,必须对上升段的轨道进行优化。

(3)结构动力学 不论是航天器,还是运载器,都存在大量振动问题。例如,运载火箭的长细比例较大,就必须进行振动塔试验和结构动力学的计算。建造振动塔是非常费钱的。随着今后火箭直径的加大和长度的进一步增加,进行全尺寸的振动试验变得越来越困难。为此,必须在建立正确的模拟火箭结构的结构动力学模型,进行分析计算。运载火箭还存在一些复杂的振动现象,若处理得不好,就可能造成发射的失败。例如,跨声速的抖振和对高空风切变的响应。又如,纵向耦合振动(POGO),及火箭发动机管路中的液体的振动频率和整个火箭的固有频率相同时,产生的共振现象。对航天器来说,由于有太阳能帆板,或者它是由多个舱段交会对接成功的组合体,也会产生新的结构动力学问题。

(4)微重力流体力学 对微重力流体力学的要求主要来自于空间材料加工和空间材料试验,但是航天器设计中遇到的微重力燃烧和微重力下的流体管理等工程问题也要求微重力流体力学的支持。虽然在航天器中已经进行过几百次的微重力的材料试验,但迄今为止,大部分的试验还都不能多次重复实现。考察其原因,主要是对微重力下材料加工的机理仍然没有认识清楚。而其中非常重要是对微重力的流体物理没有清楚认识。在微重力条件下,重力的影响固然已经大大减小,但也不是完全等于零。另一方面,比起重力来说,一些其它在地球上并不重要的力,如表面张力等等,就会在微重力条件下显示出来。表面张力现象就会引起所谓的马拉哥尼(Marangoni)对流,在微重力条件下,马拉哥尼对流就显得非常重要,而在地面很重要的自由对流就大大减弱了。但是直到现在为止,我们对马拉哥尼对流的基本机理还没有搞清楚。我们认为对微重力流体力学的研究,将十分有助于搞清楚空间蛋白质晶体生长、空间材料加工的机理,也将十分有助于航天器在微重力条件下的设计。

(5)高超声速空气动力学 高超声速空气动力学在五六十年代主要是为设计洲际导弹的弹头服务的,重点解决了弹头的防热问题。随后,为了提高弹头的落点精度,又解决了烧蚀外形对气动力的影响问题。在这些问题解决之后,高超声速空气动力学由于没有明确的任务需求,在一段时间内,它处于停步不前的状态。到80年代初期,美国的航天飞机上天了。在轨道器上进行了一系列气动力的飞行试验。飞行试验结果中最突出的问题是所谓的“高超声速异常”,也就是说它的机身襟翼的偏角在实际飞行中要比预测的值大一倍。追究其原因,主要是根据风洞试验结果,预测的俯仰力矩特性和飞行试验的情况有很大不同。通过认真的分析和讨论,认识到这主要是地面的模拟设备不能正确地模拟马赫数的效应和真实气体效应。利用现代的计算流体力学方法,可以较好地预测高马赫数效应。但是,为了正确地确定真实气体的影响,还需要正确地确定化学反应和反应速率常数,而这些反应速率常数也需要通过地面试验来确定。高超声速空气动力学的任务除了要精确地预测航天飞行器的气动特性外,还要为高超声速飞行器提供满足特定要求的气动构形。近年来,有一些高超声速构形引起了人们广泛的兴趣。一是乘波(Waveride)构形,它具有很高的升阻比,并能为发动机进气口提供均匀的流场。二是升力体(Lifting Body)构形。它的体积利用率接近飞船构形,它的升阻比接近于航天飞机构形。目前对这两种构形正在进行广泛的研究和试验工作。

(6)气动热力学 气动热力学主要研究高温气体所发生的热现象。它的主要任务之一是确定高超声速飞行器表面的热环境。在航天飞机表面热流的飞行试验中,发现实际测得的结果要比预测的结果低。追究其原因,主要是航天飞机的防热瓦涂有一种硫化玻璃,这种硫化玻璃对化学反应的催化作用是很小的。为了正确地估计表面对化学反应的催化作用,也需要研究真实气体的影响问题。对于高超声速飞行器来说,一些局部区域,如空天飞机进气道的唇部等,可能出现很高的热流区,对此必须十分小心。这些局部区域的流动十分复杂,通常会出现激波与激波干扰、激波与边界层干扰、旋涡干扰等现象。

气动热力学的另外一项任务是预测进入其它行星的高超声速飞行器的热环境。以火星为例,其大气与地球的大气完全不同,火星大气的95%是 CO_2 ,3%是 N_2 ,在确定火星探测器的热环境时,必须掌握上述 CO_2 - N_2 大气的高温动力学数据,同时还必须了解在这种大气中,飞行器表面的催化特性。另外,在火星上经常发生局部的尘暴,偶尔也发生全星的尘暴。在发生尘暴后,大气中可以保留尘埃达几周或数月之久。据估计,在火星上空40km遇到尘埃大气的概率为2—4%。无数尺寸很小很小的尘埃可以对探测器的防热层带来很大损害。为此,在探测器防热系统的设计中,必须考虑尘埃的侵蚀问题。

(7)发动机空气动力学 气动热力学的另一项任务就是为火箭发动机和高超声速的吸气式发动机服务,此时,它也可以叫作发动机空气动力学。从航天运输系统的任务来看,有两种任务需求。一种是从地面直接加速到低轨道,也就是所谓的加速任务。针对这种任务,看来是火箭更加适应。火箭发动机在较小的体积内有非常高的能量密度。由于高的动压和大的流动梯度,形成了严峻的定常、非定的动力学环境和热力学环境。对于火箭发动机的设计来说,近年来一个很大的变化是广泛采用了计算流体力学。这不仅提高了发动机的性能,而且缩短了研制时间和节省了研制的经费。最近,美国决定将重复使用的单级入轨火箭作为目标来开展关键技术的预研。为了使喷管在高空和低空都有很好的性能,又提出了塞式喷管的概念。为了确定塞式喷管的性能,又给计算和试验工作提出了新课题。航天运输系统也有另外一种任务,即由于军

方的需求和民用的需求,可能要求它能进行高超声速巡航,即要求飞行器在大气层中有一个高超声速巡航的飞行阶段。例如,要求对于固定的目标进行跨大气层、全方位的侦察,就需要在高超声速飞行中有一个巡航段。在这种情况下,利用吸气式发动机可以获得较大的比冲,减小总的起飞重量。但是众所周知,现有的吸气式发动机,例如涡轮喷气发动机,涡轮风扇发动机,在马赫数大于3以后,比冲就大大下降了。亚声速燃烧的冲压发动机,在马赫数大于6以后,比冲也大大下降。只有超声速燃烧的冲压发动机,能够在马赫数从6到15之间,提供很高的比冲。为了研究清楚超声速燃烧,正确地设计超燃发动机的燃烧室、相应的进气道和尾喷管,需要解决有化学反应的高温气体的气动力学问题。在这方面最突出的问题是缺乏相应的地面模拟设备,特别是马赫数大于8以后,只能依靠脉冲型风洞,如激波风洞和活塞激波风洞。因此,对于超声速燃烧和高超声速燃烧(燃烧室入口的马赫数大于5,具有典型的三维特征,其流动受空气动力、湍流混合和化学反应速率等因素的影响很大),还必须进行缩比的飞行试验。

对于空天飞机来说,不仅要精确地确定单独的发动机部件的气动特性,而且要求进行发动机和机体的一体化设计。此时,空天飞机的前体要作为进气道的预压缩面,既能提供预压缩,又能为进气道提供均匀的进口流场。后体要作为发动机喷洞内进行带有发动机的全机气动特性试验,而且要求发展可以计算包括发动机内部流动在内的全机气动特性程序,这就要求发展能适应复杂外形的非结构计算网格,高分辨率、高精度、高效率的计算格式。

(8)稀薄气体动力学 对于在地球低轨道(200—500km)运行的卫星和空间站来说,必须正确地预测它们在稀薄气体中运动时所承受的气动力和气动力矩。这样,才能正确地估计为了维持轨道高度和保持它们姿态而必须携带和需补给的燃料重量,从而才能进一步正确地估计它们的寿命和全寿命费用。它们在稀薄气体中受到的气动加热量也是航天器热控系统的重要设计依据。近年来,卫星和空间站的发动机羽流在高空对发动机附近区域的粒子污染已成为人们十分关注的问题。有人把许多卫星的事故归结为粒子碰撞,羽流不正是粒子源吗?

关心稀薄气体动力学的另一个原因是与所谓的AOTV,就是气动辅助变轨转移飞行器有关的。对于这种设想已经做了大量研究工作,不久就可以付诸实践了。显然,稀薄气体空气动力学是设计AOTV的一个关键。

4 航天力学的研究方法

从航天力学的研究内容来看,它有以下几个特点:

(1)力学与其它学科,如物理、化学等有很多交叉,这就使得航天力学问题十分复杂。

(2)许多新提出的航天力学问题,必须通过理论分析、试验研究的多次迭代反复,才能建立正确的物理模型。

(3)航天力学对航天飞行器的设计和运行有十分重要的影响,能否正确地预测航天飞行器的力学特性往往会影响到整个任务的成败。

针对上述航天力学发展的特点,传统的力学研究方法正在发生改变。传统的力学研究方法,主要是理论分析、数值计算和地面试验研究。采用这样的方法,在解决新的航天力学问题时就显得不够了。所以,在解决近代航天任务提出的力学问题时,已经形成了理论分析和数值计算、地面模拟试验和飞行试验三种手段相结合的研究方法。

我们认为理论分析仍然是十分重要的,其关键是建立正确的物理模型。特别是一些长期困惑力学家的基本问题,如湍流、边界层转捩、有化学反应的流动等,还有大量的理论分析要

做。另一方面,由于近代计算机的发展,形成了计算力学的重要分支。但是由于在物理模型、计算方法中存在着一些不确定的因素,计算力学的结果必须用相应的试验进行验证。所以,在近代计算力学中,出现了程序确认、程序验证等等概念。也就是说,要对计算的结果通过特定的地面试验进行考核,而这些地面试验,必须是已知所有的试验条件和它的试验数据的不确定度。这样的验证工作必须是有计划、有组织地进行的。

说到地面试验,它仍然是当今力学中重要的方面。但是我们应该认识到对航天任务来说,地面试验往往不能全部模拟航天任务所遇到的全部环境。以高超声速飞行器为例,现有的地面模拟设备,就无法模拟高马赫数具有真实气体影响的飞行环境。因此,在将地面试验数据外推到真实飞行条件时,就必须十分谨慎小心。

我们必须强调航天力学的飞行试验。这是我国航天力学中最薄弱的环节。一种新的技术概念或一种新的设计方法,假若只有理论计算和地面试验,而没有经过飞行试验的综合考核,航天飞行器的总设计师往往不敢采用这种高风险的新技术手段,因此,它们就很难得到应用。近年来,国内也好,国外也好,都十分强调先期技术演示验证(Advance Technology Demonstration)。这种先期技术演示验证可以针对整个飞行器,也可以针对关键技术。例如,美国的空天飞机(NASP)计划,在其技术发展过程中,由于缺乏高马赫数的地面模拟试验能力,很长时间内把解决气动问题的希望寄托于计算流体力学,但最终还是无法解决问题,不得不下马。最近,美国在发展重复使用单级入轨火箭时,就充分吸取了这方面的经验和教训。它首先决定执行一个先进运载技术计划,在此基础上,进一步发展技术演示验证飞行器,到2000年再决策是否研制重复使用的单级入轨火箭。这样做既符合科学技术的发展规律,循序渐进,又可以加大技术发展的跨度。我国在过去的航天领域发展中,较少地注意到先期技术演示验证,从而影响我们技术发展的跨度。

最后,我们认为,成功地解决好一个航天方面的力学问题,必须善于综合理论分析与数值计算、地面模拟试验和飞行试验这三种手段的成果。这三种手段,应该取长补短,互相补充。从这个意义来说,解决航天力学问题,必须采用系统工程的方法。

5 我国航天力学面临的挑战和机遇

我国的力学界为我国的火箭、卫星和导弹技术的发展做出了重要贡献,在长期的实践中,我国的力学界积累了许多采用系统工程协作攻关的经验。但是,航天事业在卫星、载人航天和深空探测等三个领域中的纵深发展,也给我国的力学界提出了许多新的迫切需要解决的问题。这就要求我国的力学工作者,不断拓宽自己的研究领域,去研究新的课题,去发展新的方法。要善于分析航天飞行器发展提出的各项力学课题的相对重要性和对它们的具体要求,并能采用系统工程的方法,利用理论分析与数值计算、地面模拟试验和飞行试验三种手段去解决这些问题。这无疑对我国的力学工作者提出了严峻的挑战。这种挑战,一方面要求力学工作者不断提高自己的学术修养,并把现代的高技术成果用到航天力学的研究工作中来;另一方面,要求力学工作者善于采用系统工程的方法,善于组织重大课题的联合攻关,善于在重大航天飞行器的设计中争取自己的发言权。

航天事业领域的拓宽,也给我国的力学工作者提供了广阔的舞台。特别是这段跨世纪的时期,我国航天事业正在迈上目标更高的新台阶,将为我国的力学工作者,特别是年轻的科技人员提供发挥自己聪明才智的极好机会。