



研究述评

空气动力学的新问题

周恒^{①*}, 张涵信^②

① 天津大学力学系, 天津 300072;

② 中国空气动力研究与发展中心, 国家计算流体力学实验室, 北京 100191

*联系人, E-mail: hzhou1@tju.edu.cn

收稿日期: 2015-08-03; 接受日期: 2015-08-11; 网络出版日期: 2015-09-01

摘要 空气动力学是力学的一个分支, 是航空航天技术的基础之一. 自 20 世纪 30 年代开始, 从当时的传统流体力学逐步分离出来. 随着航空航天技术发展的需求, 空气动力学的发展也十分迅速. 在很多国家, 特别是大国, 在流体力学, 甚至在整个力学领域的各个分支中, 投入到空气动力学研究的人力和物力, 都是最大的. 而空气动力学自身也已形成了一个庞大的体系. 但近来, 近空间飞行器的研发已受到越来越多的关注, 其飞行高度一般在 40–70 km 的高空, 飞行速度一般在 5–20 倍声速的范围, 已超出人们熟知的范围. 因此人们自然要问, 是否会有新的重要的空气动力学领域需要我们去开发和研究, 其核心科学问题又是什么. 本文将试图回答这一问题.

关键词 空气动力学, 近空间, 气体分子动力学, 稀薄气体

PACS: 47.40.ki, 47.45.-n, 47.15.Cb, 51.20.+d

doi: 10.1360/SSPMA2015-00402

1 引言

空气动力学是力学的一个分支, 是航空航天技术的基础. 二者相辅相成, 一方面航空航天已形成了一个庞大的产业, 另一方面, 空气动力学也发展成了力学的一个重要分支, 且其相对重要性还在上升. 我国在空气动力学的发展上, 目前已达到很高的水平. 这除了国家的重视和广大科技人员的努力外, 和钱学森先生的作用是分不开的. 钱学森先生在 20 世纪 50 年代回国时, 对当时世界上空气动力学最前沿的情况有清楚的了解, 他本身就是当时空气动力学的领军人物之一. 因此他回国后, 能对我国空气动力学

的发展做出全面的规划建议. 此后几十年, 我国航空航天技术的发展, 特别是航天技术的发展, 与我国空气动力学在钱学森先生的前瞻性布局下的发展有密切的关系. 一个学科的发展, 需要大量的工作和长期的积累, 没有前瞻性的布局, 靠临时突击是不行的.

但也不可否认, 我国空气动力学的发展, 在相当长的一段时间里, 除个别领域外, 基本上是对国外最高水平的跟踪. 近年来, 在空气动力学的实验设备, 如风洞的种类和规模上, 已和国外最先进水平相当接近. 但在实验技术上还有一定差距. 主要表现在还缺乏针对需求而自己创新的方法和技术. 在空气动力学的理论(包括计算)上, 和国外最先进水平也相当

引用格式: 周恒, 张涵信. 空气动力学的新问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 104709

Zhou H, Zhang H X. New problems of aerodynamics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 104709, doi: 10.1360/SSPMA2015-00402

接近.

同时,我们也应当看到,在空气动力学的一些重要方面,我们和国外最先进水平仍有一定差距,例如在湍流计算和转捩预测上.这主要是我们的积累少,特别是实验数据的积累少.国外多年来不但重视理论研究,也积累了很多实验资料(包括飞行实验),而我国在这方面特别欠缺.这种和国外先进水平的差距,应该引起我们的重视并尽快赶上.

而目前空气动力学又面临一个新的问题,即如何应对由于近空间飞行器的发展而产生的新的空气动力学问题.近年来近空间飞行器的发展越来越受到各大国的重视,但无论是国外还是我国,空气动力学界似乎还没有人明确提出,有哪些新的关键科学问题需要解决.本文的目的就是探讨什么是邻近空间飞行器发展中可能遇到的空气动力学新问题.

2 为什么会有新问题

自 20 世纪末起,我国开始了近空间飞行器的研制.实际上,美国在 20 世纪 70 年代,就已经开始了马赫数为 6,飞行高度在 50 km 上下的高速飞行器的研制.但由于其技术难度很大,更有一些基础科学问题还不清楚,进展非常缓慢,迄今离实用还有很大距离.

邻近空间飞行器有两种形式,一种是带发动机的,一种是滑翔式的.但无论是哪一种,其设计飞行速度都在 5 倍音速以上.带发动机的需要有能在速度很高条件下工作的发动机.由于发动机需要从空气中得到足够的氧,而随着高度的增加,空气会越来越稀薄,因此飞行高度受到限制.且其速度也不能太高,否则发动机的研制难度更大.

而滑翔式的飞行器,由于不带发动机,要远距离飞行,全靠初速高,且在较高的高度飞行以减少空气阻力.其初始马赫数最高可达 20 上下,飞行高度则从飞行距离考虑,越高越好.但如果要靠空气动力以控制飞行器的机动,则又不能太高.因此,这两类飞行器的飞行高度一般在 40–70 km 之间.

在 40–70 km 的高度范围内,随着高度的增加,空气变得更稀薄,于是就产生一个问题,即空气是否还能作为连续介质处理.如果能,则不存在新的空气动力学问题.在 20 世纪 40 年代,钱学森先生就注意到了这一问题.他提出了可用无量纲数 kn (称克努森数,为气体分子自由程和某一特征长度之比)的大小

界定从连续介质到稀薄气体的不同流态^[1].他建议,当 kn 小于 0.01 时,气体可看成通常的连续介质.当 kn 大于 0.01,但小于 0.1 时,仍可看成是连续介质,但在边界处不再附着于边界,而有一个相对于边界的滑移速度,相应地温度也有一个跃变.当 kn 大于 0.1 而小于 10 时,称为过渡区,没有确定的处理方法.而当 kn 大于 10 时,属于稀薄气体范围,要用气体分子运动论的方法处理.后来 Anderson 等人^[2]提出另一种划分的办法^[2],认为 $kn < 0.03$ 时为连续流, $0.03 < kn < 0.2$ 时为滑流. $kn \leq 0.2$ 是 NS 方程成立的区域.按当时的认识,高度小于 70 km 的区域(70 km 高度的空气分子自由程约为 2 mm,只要特征长度大于 20 cm, kn 数就小于 0.01),空气都能视为连续介质.

现在看来,这种分区的方法是有问题的.在钱学森先生建议的区分流态的方法中,一个飞行器的特征长度只有一个,从而 kn 数是唯一的.只要特征长度大于 20 cm,在 70 km 以下的空间,空气就可视为连续介质,就不存在新的空气动力学问题.但实际上,更精细一些,对 Mach 数很高的飞行器,其表面存在多个物理特征长度不同的区域.例如,飞行器前缘小钝头区存在高温热化学反应的低 Mach 数流,随后由于在低空的膨胀迅速转变为熵层与黏性干扰流.再后又转变为更稀薄的低密度流.由于这种变化迅速,甚至要取当地的某一物理特征长度为特征尺度(它不是当地的几何尺度,例如有人认为可取为 $\rho/(d\rho/dx)$,这里 ρ 为密度).即在飞行器的不同部位,要取不同的特征长度,从而 kn 数沿流向是变的.

实际上,对速度很高的飞行器来说,还有更复杂的情况.这类飞行器周围的流场,可以有很高的温度,而温度的升高导致分子自由程的增加(基本上和温度成正比),且沿流向和物面法向温度都可能是变的.综合考虑以上两个因素,沿流向和物面法向 kn 数就都是变的.对一个飞行器来说,其周围流场,有的部位可视为连续流,有的部位则应视为稀薄流.流态如何确定,是一个重要问题.例如,对于钝体前缘,原先在 50 km 高空,分子自由程并不大,约为 0.16 mm,而如果温度升高为 1500 K 时,分子自由程就将为 1 mm 的量级.对气动压力的计算,特征长度如取为飞行器的半径,这时 kn 数就可能小于 0.01.而当特征长度取边界层厚度(当地的物理特征长度),对应的 kn 数就将大于 0.01.不同的 kn 数,对应的是不同的计算模型.这对摩阻和热流的计算显然是重要的,至今也还

没有可靠处理方法.

我们可以举一个例子, 这是一个长 1 m, 在 70 km 高空以马赫数 15 零攻角飞行的零厚度平板的绕流问题. 我们专门请中国科学院力学所的孙泉海和国家计算空气动力学重点实验室的李志辉, 用现有的几种方法做了计算. 孙泉海用了两种算法. 李志辉用了 4 种方法. 图 1 所示的是李志辉的结果(孙泉海的结果

和李志辉中同样算法的结果很接近, 故没有单独给出). 其中分图的(a)–(d)是各个量沿平板的分布, 图(e)–(h)是接近平板后缘处各个量的法向剖面. 图中 DSMC 是蒙特卡罗直接模拟方法, 是目前计算稀薄气体流的理论基础看起来最好的方法; GKUA 是叶友达等人发展的能适应不同流态的算法; NS/DSMC 是事先分好连续介质区和稀薄气体区, 分别采用 NS 方

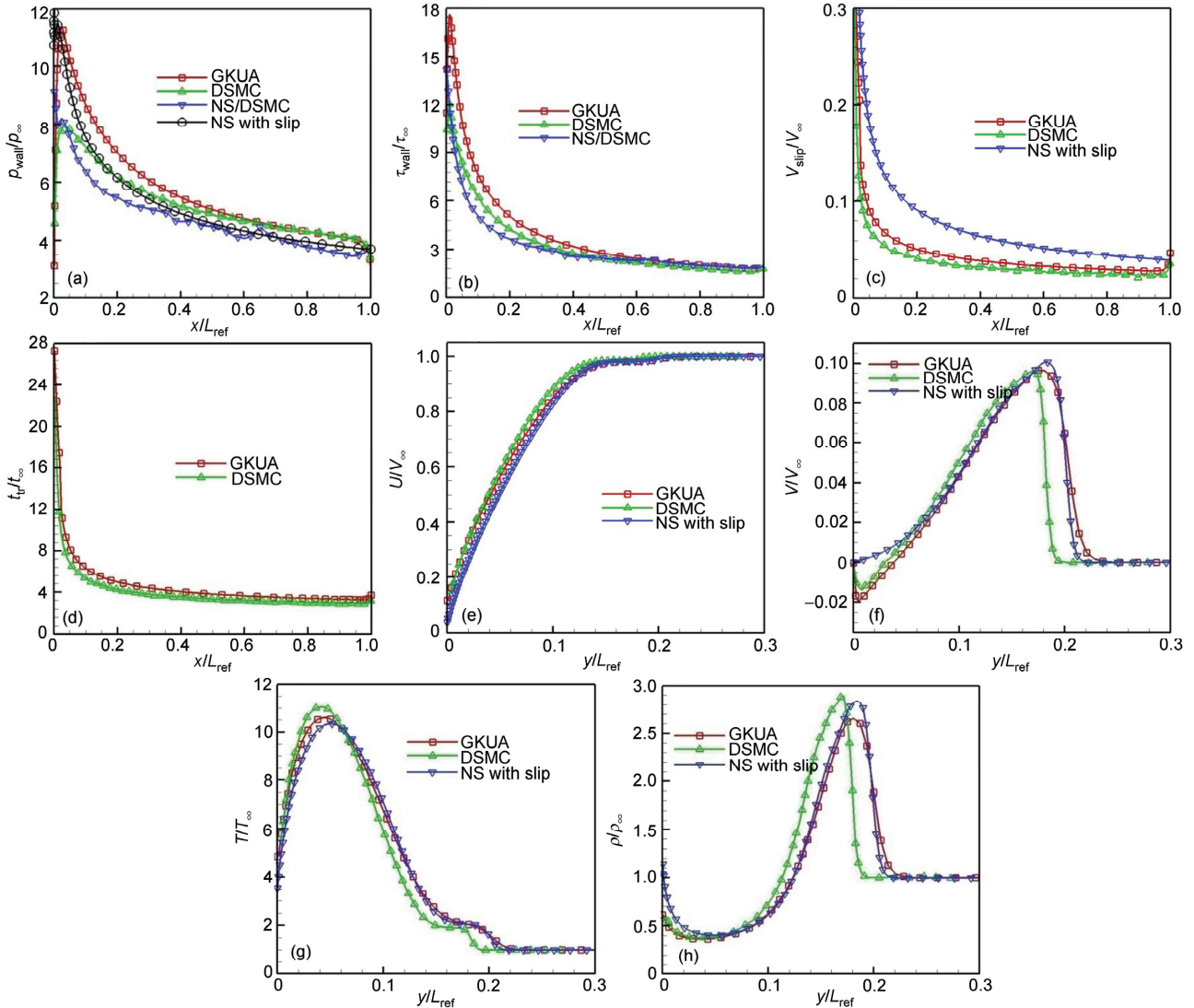


图 1 (网络版彩图) 零攻角平板计算结果. 符号下标 ∞ 表示来流值, 参考长度 $L_{\text{ref}}=1$ m, x 为沿平板流向坐标, y 为法向坐标. (a) 壁面压力分布; (b) 壁面剪切力分布; (c) 壁面滑移速度分布; (d) 壁面温度分布; (e) 流向速度沿法向的分布; (f) 法向速度沿法向的分布; (g) 温度沿法向的分布; (h) 密度沿法向的分布

Figure 1 (Color online) Computational results for a plate with zero angle of attack. Subscribe ∞ implies quantities of the oncoming flow, the reference of the length $L_{\infty}=1$ m, x is the stream-wise coordinate along the plate, y the normal-wise coordinate. (a) Distribution of pressure along the surface of the plate; (b) distribution of shear stress along the surface of the plate; (c) distribution of the slip velocity along the surface of the plate; (d) distribution of the temperature along the surface of the plate; (e) normal-wise distribution of the stream-wise velocity; (f) normal-wise distribution of the normal-wise velocity; (g) normal-wise distribution of the temperature; (h) normal-wise distribution of the density.

程和蒙特卡罗直接模拟计算的方法; NS with slip 则是用 NS 方程但有滑移的边界条件的方法. 可以看到, 无论是什么量, 各种算法的结果都不相符, 有的相差还很大, 特别是在前缘, 那里的温度最高, 因此气体的稀薄效应也最大.

要注意的是, 虽然 DSMC 方法直接源自气体分子运动论, 但并不能保证其结果是最接近于真实情况的. 因为气体分子运动论用于空气动力学时, 仍然认为分子热运动速度的分布对 Maxwell 分布只有小的偏离. 而这在流速很高的情况, 例如图中算例的情况是很可疑的. 如暂时以图示计算结果为参考来估算, 可知约在平板法向 4 cm 处(见图 1(h)), 气体密度最低, 约为 0.4, 因而该处分子自由程约为 5 mm(来流分子自由程为 2 mm). 同时该处温度约为 10(图 1(g)), 对应于 2000 K(来流温度为 200 K). 该处速度梯度约为(32 m/s)/mm(由图 1(e)估得), 或在法向相差一个分子自由程的两层间速度差约为 160 m/s. 如果假设分子热运动平均速度与温度的二分之一次方成正比, 则该处的分子热运动平均速度约为 1190 m/s(在室温 300 K 下, 分子热运动平均速度约为 450 m/s). 粗略地讲, 相隔一个分子自由程的两层间的分子碰撞是产生剪切力和热传导的主要机制. 而在上述这个速度很高的例子下, 两层分子的碰撞要使各自的平均速度改变 160 m/s, 相对于其热运动平均速度, 显然不是一个小量, 它会使各自的分子热运动的速度分布显著偏离标准的 Maxwell 分布. 当然, 以上的分析是过于简化了的分析. 实际上, 法向间距小于一个分子自由程的两层分子也有相碰的可能, 所以最终平均下来, 上述的 160 m/s 应是一个高估了的量.

3 新问题是什么

在过去, 气体分子运动论在用于空气动力学时是很成功的, 从它可以导出 NS 方程. 令人惊异的是, 原来的 NS 方程只是一个唯象理论结果, 但从 NS 方程所得的结果和实验结果迄今没有发现有系统误差. 但如上所述, 在从气体分子运动论导出 NS 方程时的一个关键假设是分子热运动速度的分布偏离 Maxwell 分布必须足够小. 这一点在 kn 数很小(例如如在 30 km 时, 以 m 为长度参考量时的 kn 数就约为 0.00002), 且飞行马赫数不大于 3, 以至气动热导致

的温度也并不高时, 是完全没有问题的.

而除了上一节中所论述的情况, 即对 kn 数不太小而马赫数很大的情况, 分子热运动速度分布可能显著偏离 Maxwell 分布外, 分子运动论在应用于空气动力学问题时, 还存在若干不确定性. 例如, 气体黏性和温度有关, 而且还可能有化学反应, 改变气体的成分. 用气体分子运动论可以导出黏性和温度的关系, 但结果却不是唯一的. 用不同的模型处理分子间的碰撞, 就得出黏性和温度的不同关系式^[3]. 又如, 在气体分子和物体表面发生碰撞时, 其反射规律是什么并没有唯一的答案^[3]. 这直接影响到气体在边界上到底有无滑移及滑移速度是什么, 以及温度的跃变量是什么等的问题. 而这是处理空气动力学问题时必然会遇到的问题.

因此, 我们认为, 和临近空间高速飞行问题相关的空气动力学所面临的最主要的科学问题就是, 气体分子运动论在空气动力学中的适用性问题. 换句话说, 即在空气较稀薄处, 高速空气动力学的物理理论基础还不够坚实. 为解决这一问题, 除了在分子运动论的基础问题上要做新的探讨外, 更需要有相应的实验手段和方法. 没有可靠的实验结果, 理论结果的可靠性无从检验, 更何况气体分子运动论本身的出发点就是无法直接验证的假设. 而迄今为止, 还没有精细而可靠的实验结果可用于检验理论或计算的结果. 有人曾把基于气体分子运动论的计算方法用于计算微器件中的流动(由于微器件的尺度很小, 在常温常压下 kn 可以变得较大), 并和实验结果比较, 基本证实计算结果可信. 但那种流动与高空的高速流有本质的不同, 不足以检验针对后者的理论或计算结果.

其次, 即使有了可靠的理论, 在应用于实际时, 用什么相应的计算方法, 也是一个需要下大力气探讨的计算空气动力学问题. 对连续介质, 相应的计算空气动力学已得到很大的发展, 目前在大多数情况下已可满足工程计算的要求. 但对基于分子运动论的空气动力学计算, 目前的方法还无法满足工程计算的要求. 必须要有可靠的简化方法.

还可以举一个气体变稀薄带来的问题. 分子自由程大到一定程度, 很可能就不再有连续介质中的湍流和转捩问题, 而目前我们并不知道其临界值是什么. 或即使仍有湍流问题, 但湍流的性质和连续介质的湍流性质是否会有明显的不同, 等等.

以上是我们目前认识到的在研制近空间飞行器时将会遇到的新的空气动力学问题. 如果我们不能

在这方面有所突破, 则在发展近空间高速飞行器时, 将面临严重的不确定性.

参考文献

- 1 Chien H S. Superaerodynamics, mechanics of rarified gases. J Aero Sci, 1946, 13 : 653–664
- 2 Anderson J D. Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics. New York: Mcgraw-Hill Book Company, 1989. 22
- 3 沈清. 稀薄气体动力学. 北京: 国防工业出版社, 2003. 70–83, 122–126

New problems of aerodynamics

ZHOU Heng^{1*} & ZHANG HanXin²

¹ School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² National Laboratory of Computational Fluid Dynamics, China Aerodynamics Research & Development Center, Beijing 100191, China

Aerodynamics is a branch of mechanics, and is also one of the foundations of aero-space technology. Starting from 1930's, it gradually separate itself from the traditional fluid mechanics. With the development of aero-space technology, the development of aerodynamics is very fast. In many countries, especially in big countries, the manpower and material resources devoted to aerodynamics is the biggest among all branches of fluid mechanics and even among the whole field of mechanics. In fact, aerodynamics has already had its own comprehensive system of knowledge. But recently, the R&D of the technology for near space flying vehicles, which would fly at the height of 40–70 km with the speed of 5–20 times of sound speed, has draw more and more attention. The flight height, combined with the flight speed, is new to us. So people would ask, if there is relevant new and important area of aerodynamics needs to be explored, and what would be its key scientific problem. In this paper, we would try to answer this question.

aerodynamics, near space, kinetic theory of gases, rarefied gas

PACS: 47.40.ki, 47.45.-n, 47.15.Cb, 51.20.+d

doi: 10.1360/SSPMA2015-00402