

张 涵 信

论文选集

刘 刚 邓小刚 叶友达 编
张树海 刘金合 田 浩



科学出版社

张涵信论文选集

刘 刚 邓小刚 叶友达
张树海 刘金合 田 浩 编

科学出版社
北 京

内 容 简 介

张涵信院士是我国著名的力学家，中国计算流体力学的开拓者之一。他重视流动的物理分析，在计算方法、流动分离与流场拓扑结构、飞行动态稳定与控制、计算和实验的不确定度和验证确认，以及地面实验等领域，获得了丰硕的成果。本书从他发表的学术论文中选取部分代表性的文章汇集成书，有重要的指导和参考意义。

本书可供流体力学、空气动力学、应用数学、航空航天工程科技人员以及高等院校有关专业教师、研究生和高年级学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

张涵信论文选集 / 刘刚等编. —北京：科学出版社，2016.4

ISBN 978-7-03-048033-0

I. ①张… II. ①刘… III. ①空气动力学-文集 IV. ①V211.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第072751号

责任编辑：赵敬伟 / 责任校对：胡庆家

责任印制：肖 兴 / 封面设计：耕者工作室

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016年6月第一次印刷 印张：41 1/4 插页：1

字数：957 000

定价：280.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)



张涵信院士

序

张涵信同志是我国空气动力学界最杰出的专家之一，对空气动力学学科本身和相关的国防科技都做出了重要贡献。因此，他的论文集的出版，是力学界的一件大事。

我本人不是空气动力学专家，和他开始有交往的时间也晚于其他很多人，对他的学术成就又没有很全面的了解，所以本来不是写这个序的最合适的人选。但是，从十几年前开始，我们的交往逐步密切起来，原因是我们对力学工作者应该如何从事力学研究有很多共同的想法，为这一问题还合写过几篇文章。因此，在这方面可以说是“志同道合”。一个人的成功有多种原因，除了个人天赋、勤奋努力、机遇好（如遇到好的导师）等外，从事研究时的途径是否顺应了科学发展的客观规律也是一个重要条件。这篇序言中就着重谈一谈这方面的问题。

大约在十年前，力学界不少人感觉，相对于其他学科，力学的地位在下降，其表现就是在国家的第三次科技发展规划中，和前两次不同，力学未能单独立项。我们两人都感觉这和我国的力学工作者中，有相当一部分人没有把力学的研究紧密地和工程技术的需求相结合，以致于在不少本来和力学有密切关系的工程技术领域，感觉不到力学工作者的研究对它们有多大影响。为此，我们和崔尔杰同志一起写了一篇《有关力学工作的一点反思》，登在了《力学进展》上。总的意思是说，力学研究应该走钱学森先生倡导的技术科学途径，紧密结合实际，特别是工程技术实际的需求。据说在力学界，总的来说，对这篇文章的反映还不错，但也有一部分同志认为它可能会不必要地再次在力学界引起“究竟力学是‘基础科学’还是‘技术科学’之争”。之后，我和张涵信同志又合写了几篇由其他问题引起但性质类似的文章，刊登在了《中国科学》《中国科学报》上。

在我们看来，一方面，名词之争并不是问题的实质，实质是究竟什么是推动力学发展的主要动力。因此，我们并没有陷入名词之争，而是从 20 世纪力学发展的实际过程来分析，是什么推动了力学一步一步地发展到今天这样。结论自然是，主要是工程技术发展的需求，尤其是航空航天技术发展的需求，而不是某种事先就确定好了的学科体系发展的需求。其实，可以举一个极端的例子，在地球上，除了流星进入大气层外，自然界还没有自然发生的高超声速流动问题。如

果不是航天技术发展的需求,有哪个国家或社会会投入成百上千亿元的经费和组织成百上千的科技人员去从事高超声速空气动力学的研究?而在固体力学方面,如果不是航空技术发展的需求,板壳、疲劳、断裂和损伤力学等这些受到众多力学工作者关注的力学分支,恐怕也不会在 20 世纪中叶后相继出现。与此相反,单纯从学科需求出发的一些分支,如理性力学、非线性科学中的混沌、孤立波、分叉等理论,至少在力学范围内,并没有产生持久和很大的影响。原因正是它们没有能和实际需求,特别是工程技术上的实际需求结合起来。

另一方面,解决工程技术等实际问题时,又不能就事论事地仅限于解决某一具体问题,而要力求从更基础的科学层面出发去分析所遇到的现象,给出其定量的规律,并发展出相应的实验技术和计算方法。这就是钱学森先生提倡的发展力学的道路。这一道路,就既解决了工程技术问题,又推动了科学的发展。当然,除了工程技术问题外,也有其他重要的实际问题,如大气、海洋、河流、沙漠等自然界的演化问题,同样应该引起我们的注意。所以,技术科学的提法,需要从更广泛的意义上去理解。

钱学森先生还指出,为了解决具体的工程技术问题,力学工作者要熟悉工程技术中的方法和问题。在开发一种新的工程技术时,事先要对其可能性、可行性和克服困难的主要途径作出判断。否则,研究的选题往往不能切中要害。而这也是很多不在工程技术单位,例如在高校工作的同志,很容易犯的毛病。我本人早年就犯过这种毛病,现在也不能说已经做得很好了。

从文集的内容不难看出,张涵信同志之所以能取得出色的成果,除了他个人的天赋和努力及好的机遇外,正因为他身体力行地实践了钱学森先生的发展力学学科的思想。他针对航空航天技术发展的需求,科学地提出了新的力学问题,发展了新的力学方法,发现了新的力学规律,从而在解决重要的航空航天技术问题的同时,也推动了力学的发展。希望阅读这一论文集的同志,不但要学习其中的科学内容,还要学习他将工程技术问题,或更一般地说,将客观存在的实际问题提高到自然科学的水平以解决之的这一钱学森先生倡导的力学发展思想,这样才能全面地获取文集的精华。



2015年12月21日

前 言

本文集是从张涵信院士发表的大量学术论文中选出来的。内容涉及数值模拟理论、分离流动、旋涡运动机理及飞行稳定性理论等领域。从文集中可以看到：根据差分方程的修正方程式所包含的耗散、色散等物理量的贡献，张涵信院士用物理分析和数值计算相结合的方法建立了二阶精度 NND 格式和三阶精度以上 ENN 计算格式的理论体系，提出了建立计算格式的一般原则，特别重要的是建立了各阶格式在激波处避免出现虚假波动的物理熵增原则；研究了可压缩三维定常及非定常流动的分离，分别给出了判定流动分离和再附的数学条件，解决了国际学术界长达 20 年关于分离线是极限流线还是其包络线的争论；建立了旋涡沿其轴向分叉演化以致破裂的理论，发现亚声速和超声速旋涡具有本质区别；还建立了流动空间拓扑结构分析的方法，对阐明流动结构和编制计算网格具有重要意义；运用非线性动力学理论和数值模拟相结合的方法分析了飞行器俯仰、摇摆及其耦合运动，提出了稳定性判则及 Hopf 或鞍结点分叉失稳的控制参数，并据此提出了增强高速飞行器稳定性的建议，这对于新一代飞行器的气动布局设计具有重要的指导意义和参考价值。

张涵信院士一直致力于航空航天气动力学的研究，本文集仅给出他以第一作者发表的论文，而对于他和其他合作者联合发表的许多论文，由于篇幅有限，仅能列出论文的目录。他提出“创新是灵魂，应用是归宿”的思想，努力用新方法解决实际问题和发展新的理论。用他的理论和方法，他亲自参与了航空航天飞行器设计研制的很多计算烧蚀、气动力、热流的软件。这些工作这里不能一一详述，特此说明。

编者

2015年12月31日

自序

出版这一文集时,我首先想到的是引导我走上了这条航空航天空气动力学研究道路的钱学森和郭永怀先生,特别是我的导师郭永怀。这里引用已发表过的一篇文章(摘自《郭永怀先生诞辰一百周年纪念文集》)作为自序,以表达对郭永怀先生深深的怀念。

郭永怀先生诞辰一百周年纪念文集

难忘的记忆

——怀念导师郭永怀

我是1957年第一届力学研究生班的学生。当时,郭永怀先生教力学班的流体力学概论,潘良儒和孙天凤先生分别教理想流体力学和气体力学。潘、孙都是郭永怀先生在美国的学生,他们给我们介绍郭永怀先生的成就时,说郭先生在跨声速流动上临界马赫数的研究及PLK方法方面国外的影响很大。当时苏联边界层权威劳强斯基的教科书中,大加推崇郭先生的PLK方法。加上郭先生在教学中的理论严谨和重视物理分析的风范,使我对郭先生十分崇拜。所以,当1960年清华大学推荐我继续读研究生并请郭永怀作导师时,我十分高兴。下面就我当研究生时难忘的一些记忆做一回顾。

1960年3月有一天,郭先生叫我去见他,当时的心情是既高兴又害怕。见面后,郭先生说,我找你来是为了谈谈你的研究方向。接着,他介绍了空气动力学的现状,他说,气体力学的发展有3个阶段:第1阶段是低速空气动力学,基础是牛顿力学;第2阶段是高速空气动力学,基础是牛顿力学加热力学;现在正处于第3阶段,超高速空气动力学,基础是牛顿力学、热力学加物理化学,因为这个阶段,飞行速度高,有化学反应。郭先生问我想在哪个阶段做研究。我当时立即回答在第3阶段。郭先生说,我也是这样想。那你要先做好3件事:(1)你要学习统计力学和物理化学,清华大学物理系有位先生叫谢毓章,他知道谁开这两门课,你可找他,说郭老师叫他帮忙安排。不一定要学得很多,但要打好基础;(2)现在国内俄文的资料较多,苏联在高速空气动力学研究上有大的进展,你在力学班通过了英语,看英文资料不成问题,应该再学会俄语。我请黄克智先生

对你进行帮助；(3)你要搞一个调研，就国内外超高速空气动力学的研究状况及进展作一系统的调研报告，提出未解决的问题，能展望一下前景会更好。接着，他与我商议，用9个月的时间即到1960年12月完成这3件事。这次见面后，我按郭先生的要求，一一做了落实，并拼命地从事调研工作。当时确实俄文资料多。1960年底，我带着两门课的考试成绩、黄克智先生的评语及调研报告去拜见郭先生。这次谈话很简短，郭先生说，课程完成了，我看看你的调研报告怎么样。一个星期后，你等通知再来见我。

我心慌地等了大约10天，终于等到了拜见时间。出乎我的意料，郭先生说报告写得不错，但他做了修改。他从标题到文字，3万字左右的报告，密密麻麻全是修改的红字。他说，你还要按我批的意见改一遍，分成引言、理想完全气体流动、混合理想气体流动、结论4大节。在第2、第3节中再分若干小节，如尖体绕流、钝体绕流、细长体绕流等。突出流动特征、已取得的进展、存在问题及今后要做的工作。他说修改完后再去找他。

郭先生这次给我修改报告，对如何写论文起了示范和指导作用，是我写论文报告关键的一次实践。

当我把报告修改完后，又去找郭先生。他说，这次可谈谈你论文的题目了。现在，国外正在搞洲际导弹，其外形就是钝头细长体，飞行马赫数达20以上。他带有启发性地问我，你想搞什么，是钝体还是后面的细长体？因为我在调研中考虑过这个问题，我便回答说搞钝体绕流。当时我想，郭先生让我搞调研报告，太重要了。否则，我的回答不会这样快。郭先生又说，搞钝体绕流，还是要先搞无黏性完全气体流动，然后搞有化学反应的问题。一步步地走，不能一下吃个胖子。还有，在搞法上要有新的构思。如何搞，你回去想想，有了想法随时可来找我。

大约在这次谈话后半个月，我带着搞钝头绕流的构思及存在问题去请教郭先生。我汇报说，现在解决这一问题流行的方法是摄动法，以激波前后的密度比为小参数。这一方法苏联和美国人都做了，但有缺点。他们是用激波关系来估计各量与小参数的关系，其结果一级近似为Buseman离心力修正，二级近似在离前驻点很近的地方就出现了奇性，与实验不符。我想用物面上的流动关系去估计各量与小参数的关系，其摄动展开式与他们的很不同，一阶近似为牛顿流，与实验

很接近,比国外的方法好多了。但有一个问题,就是在激波附近的匹配出现困难。是否应该这样搞,请郭先生指示。郭先生听后,没有立即回答我的问题,他叫我先回去,找时间通知我再来。

第二天中午,我刚准备午休,一贯不午休的郭先生来了电话,叫我马上去见他。见面后,他说,你的做法应该从物理上考虑。气动力是作用在物面上的,当然用物面上的关系去估计各物理量的量级是好的,这就像钱学森所长在研究卡-钱公式时,用来流条件作切线近似比苏联人用驻点条件作近似好。至于激波条件的匹配,是否可引入自变量的一个变换,用新自变量的量级来匹配。郭先生的这个意见,是极为关键的。我按他的指导,引入了 Von Mises 变换,并让此变换有一个恰当的量级,结果解决了激波条件的匹配问题。就这样,我用新的摄动法对高超声速来流,求出了 Euler 方程描述的钝体绕流的各阶近似,其结果与当时苏联的积分关系式数值计算结果非常一致,与实验结果相当符合。郭先生很高兴,叫我写出论文,并把此结果告诉了钱所长,由钱所长把此论文带到当时五院内部的刊物《研究与学习》上发表。后来,1963 年初,郭先生叫我把此研究内容补充到调研报告中的钝体绕流一节,并一起缩减到 2 万多字,作为第一届全国流体力学大会的大会报告。当时没有投影设备,会议论文要求开会前印刷好。后来,该文在 1963 年 12 月《力学学报》上发表。

与此同时,高温化学反应的钝体绕流我也做了研究,导出各阶近似式,其一级、二级、三级近似的数值计算,找了清华大应届毕业生陈允文同学帮助,他出色地完成了计算工作,但由于当时没有比较的数据,论文没有发表。到 1965 年出现了有化学反应的数值解结果,和我们的结果比较,也很一致。于是,此文就投寄《航空学报》,经审查,同意发表。后因文化大革命,此文不仅没有发表,反被丢失了。

1963 年初,钝体绕流工作完成后,郭先生叫我继续研究钝头锥绕流的锥身的计算问题,把钝头绕流的方法推广到其头部后的锥身区。他说,你的调研报告中已经提到,在锥体表面附近存在高熵层。研究这个问题,应考虑熵层的影响。在郭先生的指导下,我把流场分成熵层和外层两个区域,然后求解。国外无人这样做过。这就是 1965 年在《航空学报》上发表的《钝锥绕流的熵层问题》。郭先生还指出,当钝锥的锥角很大时,锥体表面有压力回升现象,这将导致二次激波

的形成。他指导我用极限线的原理分析这个问题。这项研究的结果，后来写成论文《二次激波形成的条件》，1964年发表在《力学学报》上。

在从事研究生论文中，我深切体会到郭先生对学生的成长是关怀备至的。在发表上述论文时，郭先生坚决不同意将他列为作者，在论文最后表示感谢时，他一定要把导师郭永怀改成郭永怀同志。他说，新中国不要随便称导师，列宁才称导师，改成同志亲切。平时，郭先生要求我多参加学术交流，鼓励我参加当时北大每周举行的高超声速讨论会，要求我参加钱所长和他主持的每月一次的高超声速讨论班，并要我在这个讨论班开班时第一个做报告，鼓励我在上海流体力学会议上做大会报告，鼓励我接受上海复旦大学、北京五院的邀请做学术讲课。他说，参加这些交流并做学术报告，会上就有碰撞，新思想就容易产生，错误就容易发现，人就会有长进。当我们的工作写成论文后，他给予热情的鼓励，并帮助发表出去。但当社会上给予荣誉时（例如当选航空学会成立大会的主席团成员），他又告诫我，千万不要骄傲。郭先生的关怀，我是永世不忘的。

跟郭先生做研究生，也帮助我走上了一条力学研究的正确道路，那就是：从工程和学科发展中选择需解决而未解决的重大问题作为研究方向，在解决这些问题时，一定要重视力学分析，提出新方法、新思想、新理论，即有新的创造，然后再把这些创新应用于实际，解决工程问题和力学学科的问题，使研究工作最后有个归宿。根据这种思想，在参加工作和带研究生后，我提出“创新是科技工作的灵魂，应用是科技工作的归宿”作为工作的座右铭，也作为对郭永怀先生的怀念。

以上情况，是近50年前的事，因为涉及我的学术生命，所以记忆深刻。文中引用的郭先生的谈话，意思是准确的，但可能不是原话。

目 录

第一部分 研究生时发表的论文.....	1
1. 近代高速气体动力学现状.....	3
2. 高超声速运动中的熵层问题.....	41
3. 高超声速运动中第二激波形成的条件.....	65
第二部分 与物理分析相结合的数值计算.....	73
4. 超声速、高超声速粘性气体分离流动的数值解法.....	75
5. 差分计算中激波上、下游解出现波动的探讨.....	89
6. 超声速三维粘性分离流动的反扩散数值解法.....	97
7. 无波动、无自由参数的耗散差分格式.....	104
8. EXPLICIT NND SCHEMES SOLVING EULER EQUATIONS.....	127
9. NND Schemes and Their Applications to Numerical Simulation of Two- and Three-Dimensional Flows.....	141
10. 求解气动方程的混合反扩散方法.....	205
11. 高精度差分求解气动方程的几个问题.....	218
12. 关于建立高阶差分格式的问题.....	228
13. 网格与高精度差分计算问题.....	238
14. 与物理分析相结合的计算流体力学.....	246
15. 关于 CFD 高精度保真的数值模拟研究.....	262
16. Some Recent Progress of High-Order Methods on Structured and Unstructured Grids in CARDC.....	266
第三部分 分离与旋涡流动.....	295
17. 三维定常粘性流动的分离条件及分离线附近流动的性状.....	297
18. 分离流动的某些进展.....	309
19. 三维定常粘性流动中分离线的性状——建筑在边界层方程上的分析.....	321
20. 分离线上的奇点以及分离线的形态.....	329
21. ADVANCES IN THE STUDY OF SEPARATED FLOWS.....	339
22. NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL SEPARATED FLOW AND APPLICATIONS OF TOPOLOGICAL THEORY.....	358
23. 三维可压缩非定常流的壁面分离判据及其分离线附近的流动形态.....	380
24. 旋涡沿轴线的非线性分叉.....	391
25. 亚、超声速旋涡流动特征的定性分析研究.....	400

第四部分 流场的拓扑结构	407
26. 超声速主流中横向喷流场的激波-旋涡结构的数值模拟.....	409
27. 三维定常分离流和涡运动的定性分析研究.....	415
28. 高超声速层流尾迹的数值模拟.....	428
29. H_2/O_2 燃烧的超声速非平衡流动的数值模拟.....	439
30. 带尖针杆的钝体粘性绕流的数值模拟.....	450
31. 三维分离流动的拓扑分析研究.....	457
32. 细长锥体有攻角绕流对称流态到非对称流态的结构稳定性研究.....	460
33. 分离流和涡运动横截面流态的拓扑.....	467
34. 垂直于物面的横截面上流态的拓扑.....	479
35. 时间发展的二维混合层的物理分析和数值模拟.....	492
36. 超声速剪切层的混合问题.....	506
第五部分 动态问题	517
37. 关于非定常流动的计算问题.....	519
38. 飞船返回舱俯仰振荡的动态稳定性研究.....	528
39. 不带稳定翼飞船返回舱俯仰动稳定性研究.....	541
40. PHYSICAL ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION FOR UNSTEADY DYNAMIC STABILITY OF REENTRY CAPSULES.....	546
41. 基于动态演化的最优化方法.....	555
42. 后掠三角翼的摇滚及其动态演化问题.....	560
43. Physical analysis and numerical simulation for the dynamic behaviour of vehicles in pitching oscillations or rocking motions.....	565
第六部分 验证确认	583
44. 关于 CFD 计算结果的不确定度问题.....	585
45. 关于 CFD 验证确认中的不确定度和真值估算.....	589
第七部分 实验模拟	597
46. 自由分子流气动实验的模拟理论.....	599
47. 粒子侵蚀的相似规律及实验模拟问题.....	610
48. 真实气体流动的相似规律.....	615
收集到的张涵信院士及合作者发表的论文目录	623

第一部分

研究生时发表的论文

近代高速气体动力学现状*

張 涵 信

(清 华 大 学)

提 要

本文总结了1959年以后高速气体动力学的主要发展状况。建议依来流 Mach 数的高低把速度远超过声速的流动分成两个区域：一个区域是温度不很高，理想气体模型适用的区域，这个区域的流动我们叫它为高超声速流动；另一个区域是高温效应显著，因而必须采用具有化学反应的混合理想气体模型的区域，这个区域的流动我们叫它为超高速流动。本文主要包括两个部分。第一个部分研究理想气体的高超声速流动，内容是：(1)锥体的涡层分析；(2)钝体绕流，主要讨论激波层方法，但对幂级数方法的进展、数值解法的进展、非对称绕流也简单地加以讨论；(3)钝头圆锥及钝头细长体的绕流，主要讨论非定常比拟理论、熵层问题、数值解法。第二部分研究混合理想气体的超高速流动，内容是：高温空气的化学动力学模型、非平衡流的基本方程、相似律、钝体及尖体绕流研究的主要结果。文中除了对某些研究进行必要的评论外，还较详细地研究了流场的特点及各种计算方法的优劣。此外，也指出了有待进一步解决的问题。

主 要 符 号

γ ——气体的绝热指数。

M_∞ ——来流 Mach 数。

β ——激波与来流的夹角。

ϵ ——激波前后的密度比，在理想气体情况下，常令 $\epsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$ ；有时表示物体的厚度比或细长比，这时将另加说明。

α ——攻角；有时表示物面与来流的夹角，这时将另加说明。

R, ϑ, ω ——球坐标。

x, r ——柱坐标或直角坐标。

x, y ——正交曲线坐标，其中 x 平行于物面， y 垂直于物面。

r^*, r_b ——分别是激波和物面上的点到对称轴的距离。

p, ρ, s, h ——气体的压力、密度、熵和焓。

$\mathbf{V} = (u, v, w)$ ——气体的速度及其分量。

$p_s, \frac{1}{\epsilon} \rho_s$ ——钝体前驻点处的压力和密度。

ψ ——流函数。

* 力学学报，1963，6(4)：249-286。本文是为1963年10月中国力学学会流体力学学术讨论会准备的专题综合报告。

R_0 ——鈍体前緣的曲率半径或鈍头細长体内鈍头部分的特征尺度。

R_j^* ——激波前緣的曲率半径。

C_{x_0} ——鈍头細长体中鈍头部分的阻力系数。

$\mathcal{O}$ ——几何参数,对于平面問題 $\mathcal{O} = 0$, 对于軸对称問題 $\mathcal{O} = 1$; 有时用 ν 表示几何参数, $\nu = \mathcal{O} + 1$ 。

“*”——表示激波。

“ ∞ ”——表示来流。

引 言

在气体动力学中,近来对速度远超过声速的流动发生了很大兴趣。和一般的超声速流动比較,由于来流 Mach 数和来流总能量很大,这种速度远超过声速的流动具有下述一系列新的特点:

1. 对于鈍体或薄体繞流,問題都是非綫性的,并且一般是有旋的。

2. 激波和物面之間的激波层很薄,并且当物面坡度較大时,激波层内气体的密度远較激波前为大。此外,对于尖体,当絕热指数 γ 与 1 相差較大时,激波对由物面发出的膨胀波仍有強烈吸收的作用,因此,在激波层内激波反射常是次要的。

3. 对于薄体小攻角的繞流,和横向扰动速度相比,沿来流方向的扰动速度可以忽略,因此,定常薄体繞流就相当于平面上的非定常运动(即所謂平面截面規律)。对于尖头薄体,这种非定常运动相当于平面上的活塞运动;对于小鈍头薄体,这种运动則相当于平面上的点爆炸和活塞的联合运动。

4. 如果設 β 是激波与来流的傾斜角, M_∞ 是来流 Mach 数,則在来流速度远超过声速的情况下,条件 $M_\infty^2 \sin^2 \beta \gg 1$ 常常成立。这时,对于理想气体,流場内各个无量綱量几乎与 M_∞ 无关。因此,来流速度远超过声速的流动具有与 M_∞ 无关的极限状态。

5. 在来流速度远超过声速的情况下,特别是对于鈍体繞流,激波后的温度常常很高。例如当 $M_\infty \geq 15$ 时,正激波后的温度达 6000°K 以上。在这种高温下,不但气体分子的移动、轉动和振动自由度都被激发,而且也会出现气体的分离現象,甚至要产生电子激发和电离反应,这就改变了气体的成分和热力学状态。此外,由于分子振动自由度的激发以及分离、电离的反应达到平衡时需要較长的時間(特别是在高空低密度的情况下更是这样),在流場内,气体一般是处于非平衡态。如果温度再高,气体的輻射作用也就要考虑了。目前,这个高速高温气体动力学領域已經形成。

上述特点对于分析速度远超过声速的流动是相当重要的。特点 1 表明,在計算速度远超过声速的流动时决不允許采用綫性化理論,并且要放弃无旋假定。特点 2,3 是現有近似方法的依据,例如根据激波层厚度很小和激波层内密度很大的特点,发展了激波层理論;根据尖体表面激波层内激波反射次要的特点,发展了激波膨胀波方法;根据特点 3,发展了非定常运动比拟方法。特点 4 对于处理实验結果具有指导意义。特点 5 指明,在研究速度远超过声速的流动时,應該把流动分成两个区域:(1)气体成分不变而化学反应次要的区域,对于这个区域,可以采用理想气体模型;(2)高温下分离等反应起重要作用的区域,对于这个区域,單純的理想气体模型已不能反映客观实际,必須采用具有化学反应的