

现代飞机设计中的 空气动力学

3 2 5 7 3 5 0 1

朱自强 陈炳永 李 津 编著



(京) 新登字166号

内 容 提 要

现代与未来战斗机与民航机的高性能要求对空气动力学提出了极大的挑战, 本书概括了现代与未来飞机设计中有关空气动力学的新问题和新要求, 介绍了有关的新思想和新概念, 并从工程应用角度分别针对战斗机和民航机简述了空气动力学方面目前已取得的成果。

本书可供飞机设计单位、工厂设计所的设计人员参考使用, 亦可作为高等院校教师、研究生和高级学生的教学参考书。

现代飞机设计中的空气动力学

XIANDAI FEIJI SHEJI ZHONG
DE KONGQI DONGLIXUE

朱自强 陈炳永 李 津 编

责任编辑 郭维烈

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

密云华都印刷厂印制

850×1168 1/32 印张: 6.75 字数: 177.4千字

1995年2月第一版 1995年2月第一次印刷 印数: 1000册

ISBN 7-81012-540-0/V·038 定价: 7.5 元

序

现代工程技术的发展极大地依赖于现代科学的发展，这在航空工程和飞机设计方面表现得尤为特殊。毫无疑问，工程技术的发展也促进了有关学科的发展，应该说从1903年莱特兄弟飞机问世以来的九十多年时间里，空气动力学的发展是工程技术与学科结合并相互促进的一个典型。冯卡门在50年代和60年代初的两本著作深入而浅出地说明了空气动力学的作用。一本是1954年出版的《空气动力学发展》已由上海交大江可宗教授译成中文出版；另一本是1963年在他逝世后出版的“From Low Speed Aerodynamics To Astronautics.”这里不可能详细介绍这两本著作的内容，但是如果你读完了这两本书，你就会确信空气动力学在推动航空事业的发展中是起到了关键作用的。可能有人会说：“这是过去的事了，现在空气动力学已是一门老科学，没有多少好研究，也不起关键作用，当前是电子技术时代、信息时代（也许还有其它各种提法），即使对于航空，电子技术也应当是首位的”。航空的发展使世界实实在在变小了，过去横渡太平洋要半个多月，现在只要半天时间，将来的东方快车从纽约到日本只要两小时，国防的需要也是促进航空发展的重要因素。歼击机已从60年代开始研制的第三代向第四代过渡。从第三代歼击机的性能来看，苏联和现俄罗斯的飞机从总体性能上讲不次于西方国家，有些地方还要好一些。如Su-27实现了世界上首次大迎角机动即所谓普加乔夫眼镜蛇，这不是靠电子技术，因为俄罗斯在这方面是落后的。苏联飞机设计的成功，苏联的空气动力学工作者作出了巨大的贡献。他们继承和发扬了儒考夫斯基为首的苏联空气动力学派的优良传统。当然

今天的空气动力学与儒可夫斯基时代相比已不可同日而语，但是空气动力学作为研究物体在空气(事实上包括所有气体)中运动时与空气相互作用的科学是设计一切飞行器的内在依据。飞行器的控制需要电子技术,但是我们必须首先明确控制的对象,使我们确实能得到需要的受控气流。航空的发展产生了很多与空气动力学交叉的学科,早期的空气弹性力学就是一例。过去我们只注意外流,现在要研究(发动机)内流和外流的相互作用;要研究飞行控制与空气动力学相结合的飞行力学;为了研究隐身问题要研究与电磁波理论结合的隐身空气动力学;为了进一步研究更高速度的飞机要研究热空气弹性力学等等。空气动力学的研究工具除去已有百年历史的经典风洞以外,还可以利用电子计算机进行数字模拟和地面仿真,再加上必要的飞行试验,今天空气动力学可以更好地为飞机设计服务。

现在的问题是如何在我国使空气动力学与飞机设计更好地结合,使空气动力学工作者与飞机设计工作者更好地理解,使以儒可夫斯基、普朗特和卡门等第一代空气动力学家开创的事业在社会主义的中国生根开花。我看了朱自强教授等编写的这本书,对我很有启发,为此我写了一段上面的感想,朱自强教授等的这本书是促使飞机设计者与空气动力学工作者结合的一个很好的尝试,我愿意推荐这本书给我的航空同行一阅,愿祖国的航空事业突飞猛进!

庄逢甘

1994.10.1

前 言

海湾战争中多国部队采用的“空-地一体战”，即协同陆、海、空与电子战而形成一个一体化作战体系，反映了现代战争的特点，并使多国部队取得了压倒性的胜利。“空-地一体战”的核心是空中优势，因此当前各国在大量削减常规武器的同时又继续增大投资于新航空技术的研究以发展更先进的飞机，争取空中优势。

同时，国际民航事业一直在持续并高速地发展着，国际商业剧烈竞争的形势使各国迫切要求发展各自先进的民航机。积累大量经过飞行实践考验的设计经验对民机的发展至关重要。

上述形势使距离国际水平仍有相当差距的我国军民机发展面临着极为严峻的考验。

未来战斗机和民航机的设计是高度复杂的大系统并涉及多种学科的综合。导弹、雷达、电子仪表及自动控制系统等的迅速发展对战斗机的优异性能起着愈来愈大的作用。然而，毋庸置疑，高性能的动力装置和优良的空气动力特性仍然是使战斗机获得高机动性和机敏性，在作战效能上实现新高度的保证，也是使民航机获得优异的巡航性能、起飞着陆性能和经济性的保证。因而空气动力学在航空中的地位不仅不应削弱，还需进一步加强。没有先进的空气动力技术及新成果，就无法实现未来军民机的高性能。我们编写此书的目的即希望人们能重视并推动空气动力学这一经典力学学科的新发展。

虽然军、民机的设计有各自的特点，对空气动力的要求也不尽相同，但仍有很多共同的特点和要求。为叙述方便，本书仍针

对军机和民机分别讨论其有关的气动技术问题，但并不意味着对民机有意义的气动新技术对军机就不重要。反之亦然。本书共十章，第一至第七章讨论军机的气动问题；第八至第十章讨论民机的气动问题。

本书是根据第一作者朱自强在北京航空航天大学飞机高研班讲课讲稿修改补充而成的。工作过程中得到我国空气动力学、飞机设计方面部分老科学家的鼓励与支持，如中科院院士、中国科协副主席庄逢甘教授，中科院和工程科学院院士顾诵芬教授等。特别庄逢甘教授仔细阅读了初稿并提出了宝贵的意见，在百忙之中还为本书撰写了序言，作者在此向他们表示深切的谢意。

由于时间仓促，加之我们本身水平有限，本书将不可避免存在错误及不妥之处，请读者批评指正并给以谅解。

作 者 1994.8

目 录

第一章	未来战斗机发展的趋势及其对空气动力学提出的挑战	(1)
第二章	非定常大迎角空气动力学	(8)
§ 1	大迎角空气动力的特性	(8)
§ 2	绕细长物体的大迎角非定常空气动力特性	(19)
§ 3	细长前机身非对称涡流动的控制	(23)
§ 4	大迎角和非定常空气动力的计算	(33)
第三章	隐形飞行要求和空气动力的综合设计	(43)
§ 1	减缩雷达散射截面(RCS)的空气动力外形设计措施	(45)
§ 2	飞机隐形特性要求与飞行性能要求的综合和折衷.....	(50)
§ 3	气动/隐形一体化设计的数值计算简介.....	(51)
第四章	进排气系统及其与飞机的一体化设计	(57)
§ 1	一体化的含义	(57)
§ 2	超音速战斗机中一体化设计的重要性	(57)
§ 3	进气道系统与前机身的一体化设计	(60)
§ 4	后机身、尾翼和喷管系统的一体化设计	(73)

§ 5	内流以及内外流一体化分析与设计的数值模拟	(79)
第五章	推力矢量化、机敏性和超机敏性	(93)
§ 1	飞机的机敏性	(93)
§ 2	推力矢量化	(97)
第六章	大迎角非定常空气动力的数学模型	(106)
§ 1	问题的提出	(106)
§ 2	空气动力的暂态函数模型	(107)
§ 3	状态-空间变量模型.....	(108)
第七章	数值模拟方法是未来飞机设计的重要工具	(117)
§ 1	数值模拟在未来飞机设计与研制中的地位和作用.....	(117)
§ 2	程序验证与确认(Code validation)是使数值模拟方法成为有效计算工具的必要条件	(122)
§ 3	计算流体动力学的发展和展望	(125)
第八章	未来民机发展的趋势	(128)
第九章	亚音速干线飞机	(132)
§ 1	先进翼型的不断发展	(137)
§ 2	机翼翼梢减阻装置的应用	(144)
§ 3	减少部件间的干扰阻力	(152)
§ 4	层流化技术	(159)
§ 5	湍流减阻——小肋(Riblets)减阻	(167)
§ 6	增升装置外形的空气动力	(171)

§ 7 民机气动力的数值计算	(176)
第十章 高速民航机(HSCT)	(187)
结束语	(193)
参考文献	(195)

第一章 未来战斗机发展的趋势 及其对空气动力学 提出的挑战

海湾战争中多国部队运用的“空-地一体战”体系的核心是空中优势，说明发展飞机技术对未来战争具有极其重要的战略意义。

以著名的美国F-15，F-16和俄罗斯Su-27，Mig-29等为代表的第三代歼击机充分运用当时已取得的空气动力学研究成果，如非线性升力技术、边条翼布局、弯扭的机翼中弧面、翼身融合技术以及飞机/推进系统的一体化设计概念等等，并在气动布局上作了精细的设计计算和实验分析，从而取得了高升力特性及良好的操纵性和稳定性，再结合采用高性能的发动机和电子设备系统，充分保证了飞机的优异性能。分析这些第三代歼击机，可知其具有如下特点：

一、宽阔的高度-速度范围

实用升限为18~19km，低空最大速度1350~1450km/h，高空最大速度2300~2500km/h，活动高度为30m~18km，

二、高的机动性（过载大、爬升率高、增速快）

转弯半径小和转弯时间短，减速范围宽，保证能有效地进行近距空战和截击高空高速目标时能进入有利攻击位置。

三、大的实用航程

保证低空以800~1000km/h速度飞行时，作战半径可达400km，在巡航高度以巡航速度飞行时，作战半径可达1600km。

这一代歼击机具有的优异性能可从Su-27在1989年巴黎航展中表演的“普加乔夫眼镜蛇 (Cobra)”机动动作中得到反映。该机在 $H = 500 \sim 1000\text{m}$ 高度之间，在几秒钟内完成动态减速，实现飞行迎角从 $\alpha = 0^\circ$ 至 $\alpha = \alpha_{\max} (\approx 110^\circ)$ ，再回到 $\alpha = 0^\circ$ 的机动动作（见图1-1），实现了世界上前所未有的大迎角的飞行。随后在加拿大渥太华航展中，米格-29也表演了此机动动作。

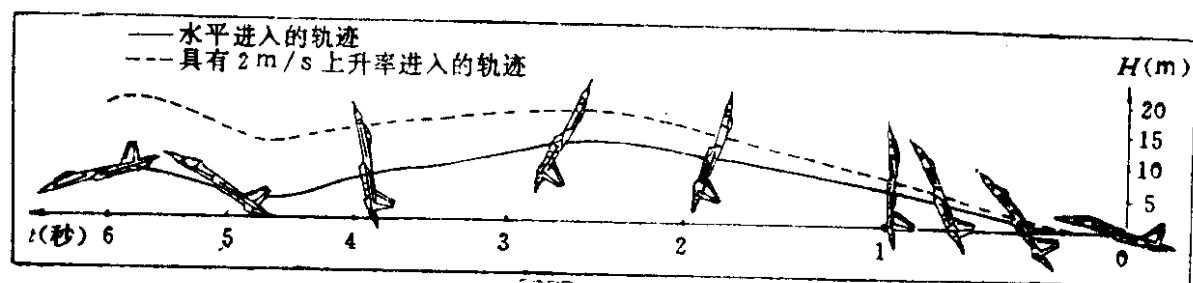


图1-1 苏27“眼镜蛇”动作过程示意图

表1-1列出了美国通用动力公司所作的米格-29与5种西方战斗机在航展中飞行表演的数据对比。表1-2列出了米格-29、苏-27、F-16、F-18及幻影2000等现役飞机的性能比较。可以看到，尽管各机性能都有其相对优点与不足，但基本性能均属同一水平，是代表具有上述特点的第三代歼击机，也是目前服役的最高水平的歼击机。

表1-1 米格-29与5种西方战斗机的航展飞行表演数据对比

机型	参数	从松开刹车至水平飞行的时间 (s)	起飞推重比 (估计)	从最小飞行速度恢复到作战速度时间 (s)	水平盘旋360°时间 (由压坡度至改出)(s)	盘旋能量损失率 (km/h/s) (估计)	亚音速加速性 (Ma0.4~Ma0.9) (s)	典型空中表演耗油 (kg) (估计)
米格-29		37.6 100%	1.24 100%	21.8 100%	17.5 100%	64.75 100%	14.2 100%	2000 100%
F-16		36.3 96.5%	1.17 94.4%	21.7 99.5%	16.3 93.1%	51.8 80%	14.2 100%	1455 72.8%
F/A-18A		38.6 102.7%	0.95 76.6%	29.0 133%	17.8 101.7%	107.30 165.7%	18.0 126.8%	2000 100%
幻影2000C		—	0.85 68.5%	30.6 140.4%	24 137.1%	86.95 134.3%	19.6 138%	1364 68.2%
“阵风”A		37.5 99.7%	1.12 90.3%	23.4 107.3%	16.6 94.9%	68.45 105.7%	15.3 107.7%	1636 81.8%
EAP		—	1.07 86.3%	—	19.0 108.6%	—	—	—

注：1. 百分数是以米格-29的数据为100%（以下表格均同）

2. “从最小飞行速度恢复到作战速度时间”指飞机从大迎角最小飞行速度状态恢复到Ma0.9的时间。

表1-2 几种现役战斗机性能比较

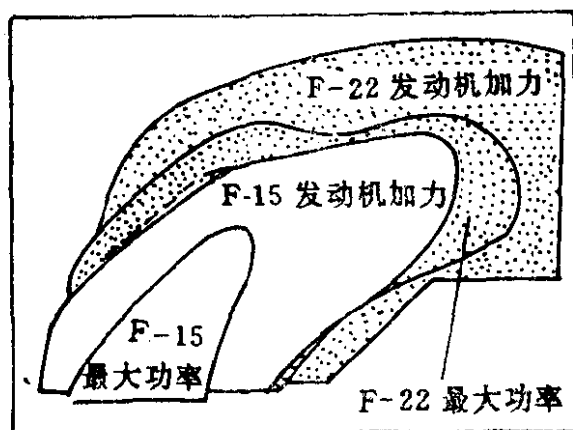
机种	米格-29	苏-27	F-16C/D	F/A-18A/B	“幻影”2000
最大起飞重量 (t)	18	30	11.4	22.3	17
内部燃油 (t)	5.44	10	3.16	4.99	3.17
发动机型号	RD-33	AL-31F	F100-PW-220E	F404-GE-402	M53P-2
推力 (kN)	2×81.4	2×122.6	2×106	2×78.8	2×95
推重比	1:2	1:2	1:1.18	1:1	1:1.35
使用升限 (m)	17000	18300	15200	15200	18000
最大挂弹量 (t)	5.9	6	5.44	6.95	6.3
最大速度	Ma2.35	Ma2.35	Ma2.2	Ma1.8	Ma2

续表

机 种	米格-29	苏-27	F-16C/D	F/A-18A/B	“幻影”2000
瞬时转弯率($^{\circ}/s$)	20	23	13	13	16
持续转弯率($^{\circ}/s$)	17	17	16	16	13
最大迎角($^{\circ}$)	30 $^{\circ}$	120	25	57	30
作战半径(km)	700	1500	500	1065	1000
IRST航程(km)	30	30	—	—	—
最大航程(km)	2100	4000	1800	3700	1480
起飞滑跑距离(m)	240	500	400	430	4900
着陆滑跑距离(m)	600	600	700	?	580
雷达作用距离(km)	10 $^{\circ}$	241	100	80	70

美国正在研制的第四代先进技术战斗机(ATF)将使一架飞机上集中五个特点:

1. 低可探测性(沿方位的雷达截面积约为 $0.08 \sim 0.065 m^2$)。
2. 高机动性和机敏性。
3. 实现发动机不开加力进行超音速巡航 ($Ma = 1.5$)。
4. 有效载荷与F-15相当。
5. 具有飞越所有战区的足够航程。



1-2 F-22与F-15飞行包线的比较

与第三代歼击机相比, ATF不但保持或超过第三代歼击机的跨音速机动能力, 而且具有持续超音速巡航和超音速机动能力, 好的隐形特性, 更为宽广的高度-速度飞行范围。图1-2给出了F-22与F-15飞行包线的

比较，可见，F-22 发动机不开加力的飞行包线已明显超过 F-15 发动机开加力的范围。再加上先进的机载设备和武器，其空战效能将比当代战斗机有大幅度的提高，特别可填补以超音速进行超视距空战的空白。

典型的超视距空战要求战斗机具有超音速巡航和超音速机动能力，良好的识别能力，良好的隐形能力并使用先进的导弹和火控雷达。图1-3给出了以超音速机动进行超视距空战的一个图例。

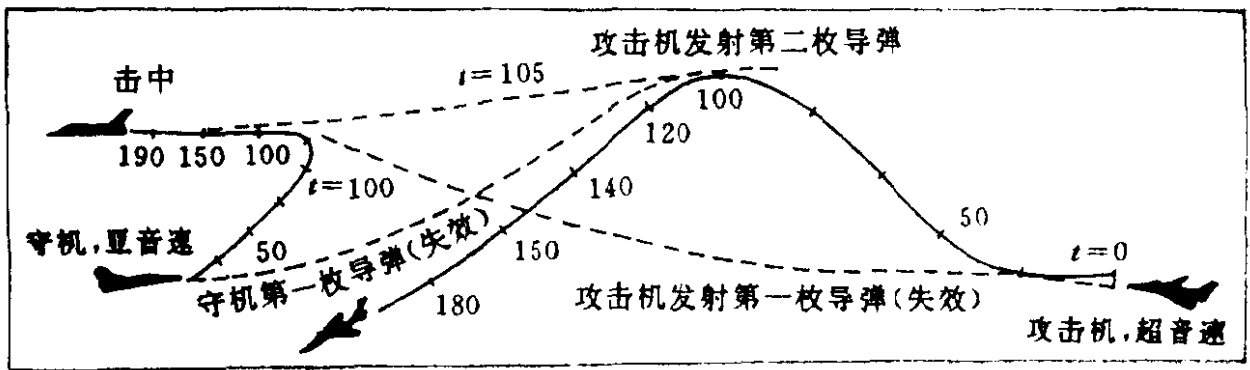


图 1-3 超视距空战的一个图例

攻击机（超音速）和守机（亚音速）各自发射第一枚导弹后（假定均失效）分别进行机动。由于攻击机有超音速优势，可成功地进行二次攻击而击中目标。图1-4显示了4机对4机超视距空战模

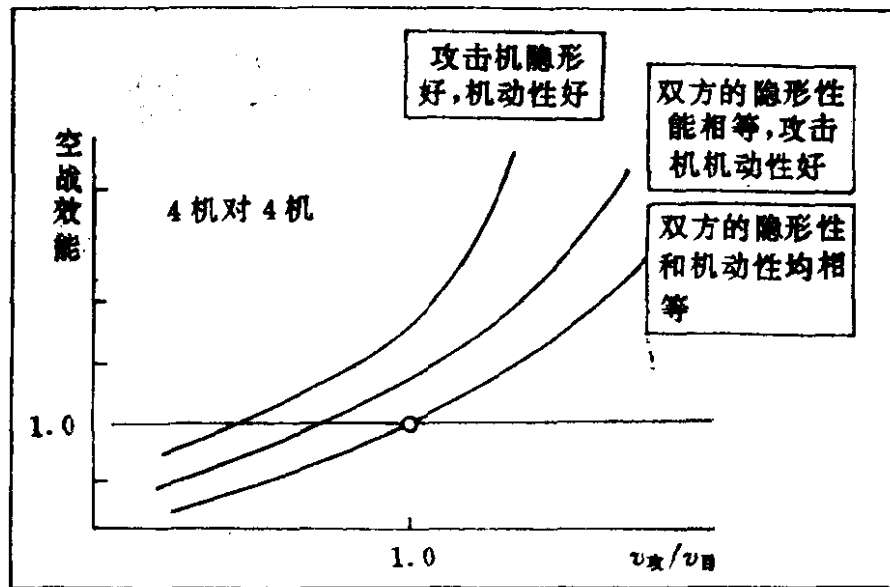


图 1-4 飞行速度、机动性和隐形对超视距空战的影响

拟的结果。可以看出，增加速度，提高机动性和隐形能力，可大大提高空战效能。因此，具有上述五个特点的F-22比第三代歼击机有高得多的超视距空战能力。

第三代歼击机的机动性比第二代歼击机的平均高75%，因而使两者的近战作战效能相差2~3倍。影响近战效能的主要机动性因素有：单位剩余功率(SEP)、稳定盘旋率、瞬时盘旋率、水平加速性能和机敏性。从这些方面看，第四代歼击机F-22的性能较第三代歼击机的代表F-15提高了许多，F-22的水平加速性将是F-14与F-15的三倍；F-22的SEP也比F-15大得多，因过载为1g时的SEP主要取决于飞机推重比，F-22的推重比为1.03，F-15仅为0.76，F-22采用大尾容量和二维推力矢量相结合而获得了很高的机敏性。

从战役总体效果看，要求歼击机最好不需专门改装就能带上武器对地实施攻击，即对地攻击能力也是对歼击机要求的一个基本方面。生存力是歼击机对地攻击能力的一个重要因素，为获得生存力，目前歼击机通常以超低空突防。但超音速高空突防能显著提高歼击机的生存能力。隐形和电子自卫能力也是提高生存能力的重要措施。F-22所具有的特点反映出它也具有更强的对地攻击能力。

为能取得如F-22这样的高性能，对空气动力学提出了很高的要求，如为能实现发动机不开加力进行超音速巡航，飞机的超音速升阻比应达到6左右，即需把现有战斗机的超音速零升阻力系数大致降低50%。同时发动机的推重比要达到10左右。又如为提高飞机的机敏性，为飞行员快速调转机头，提高对目标的击毁概率创造条件，必须扩大使用迎角。F-16的使用迎角限制在25°，而F-22的则已扩大到60°，且还可在此迎角下，使飞机在1秒钟内绕速度矢量滚动30°，这几乎使机头的指向改变90°，从空气动力学观点来看，这种可用迎角的大幅度提高是很不寻常的。

美国“2020年战斗机”的设想要求飞机可使用特大迎角飞行

和超音速巡航 ($Ma = 2$), 自修正飞控系统的使用可望最终达到对迎角无限制的飞行。

未来战斗机性能迅速提高的要求除在飞机上必须应用推进技术、电子技术、新材料技术等高科技的成就外, 也必须应用空气动力学的新技术。对空气动力学工作者提出了严峻的挑战。如何尽可能扩大迎角使用范围, 如何提高飞机的机敏性, 如何在满足高飞行性能的同时达到尽可能小的可探测性, 如何发挥推进系统的高效率等问题, 将有待空气动力学工作者付出巨大的努力以求得到解决。

依笔者所见, 未来战斗机设计中的空气动力学新技术将可能涉及到下述几方面问题。

第二章 非定常大迎角空气动力学

§1 大迎角空气动力的特性

在定常绕流中,若以 Ma_∞ 和迎角 α 的来流绕细长尖前缘的三角翼为例,取垂直前缘的迎角分量 $\alpha_n = \text{tg}^{-1}(\text{tga}/\text{tg}\Delta)$ 和 $Ma_n = Ma_\infty [1 - \sin^2\Delta \cdot \cos^2\alpha]^{1/2}$ 为坐标轴,其流态分布将如图2-1所示,其中 Δ 为前缘后掠角。当 $Ma_n < 1$,即使来流是超音速的,则

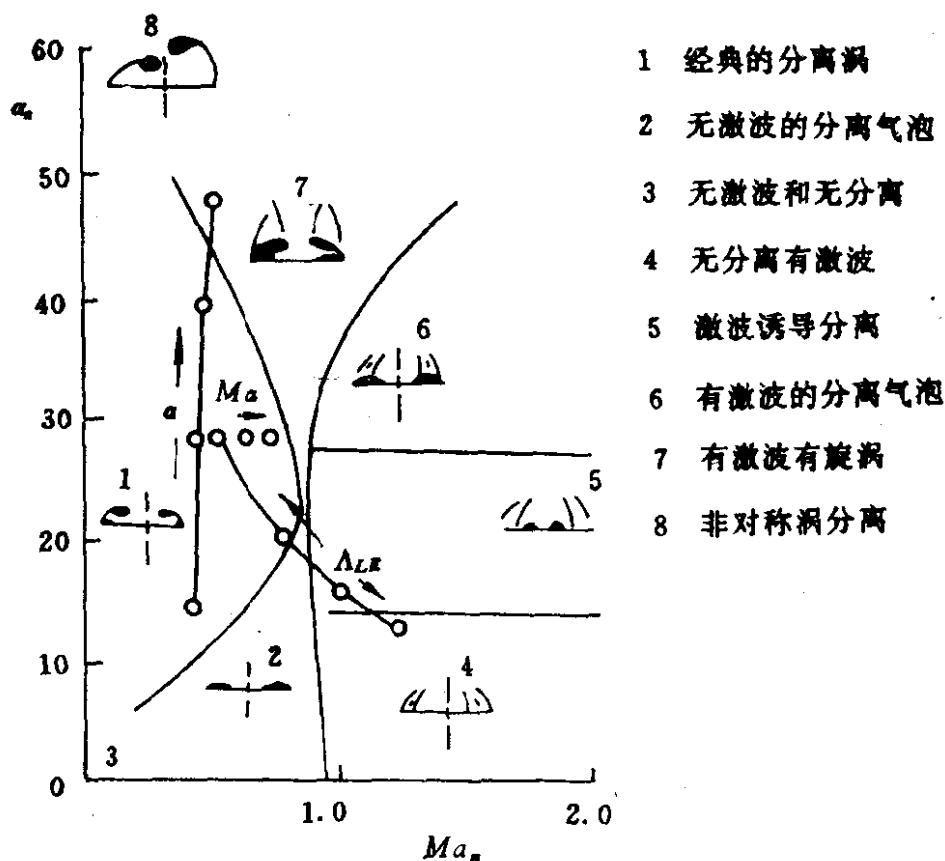


图 2-1 绕细长尖前缘三角翼流动结构的分类