

V211

V211 1042-1

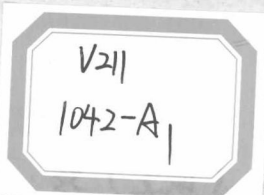
分离流动概论

· 上 册 ·

张 涵 信



1987.1



30895152

第一章：引 论

§ 1 · 分离现象

- 1、物体绕流的分离
- 2、机翼绕流的分离
- 3、绕拐角的分离



§ 2 · 研究分离流动的意义

- 1、气动力特性发生重大变化
- 2、气动热特性发生重大变化

§ 3 · 分离流研究的重要内容

- 1、分离模式
- 2、分离的识别
- 3、分离流动的描述
- 4、分离流动的计算

第二章：二维定常粘性流动的分离模式、识别条件及分离点附近流动的性状

§ 1 · 分离模式—Prandtl 图象

§ 2 · 分离的识别—判定分离的条件

- 1、分离必要满足的条件
- 2、满足条件(2-6)时, 流动必然出现分离

§ 3 · 实际粘性流动在分离点附近流动的性状

1. 过分离点 O 的流线

2. 过分离点的零 u 线

3. 过分离点的零涡线

§ 4 · 边界层方程所描述的流动在分离点处的性状

1. 分离点是边界层方程解的奇点

2. 分离点附近流线的性状

§ 5 · 简单的小结

第三章：二维定常分离流动的定性描述——拓扑分析

§ 1 · 二维定常分离流场的定性分析理论——拓扑规律

1. 场内鞍点或中心点规律

2. 边界鞍点规律

3. 奇点数规律

§ 2 · 拓扑规律在二维定常分离流动中的应用

§ 3 · 简单小结

第四章：二维分离流动的数学描述——主管方程、边界条件

§ 1 · 描述分离流动的 Navier—Stokes 方程及边界条件

§ 2 · 两层模型的方程组、边界条件和连结条件

§ 3 · 三层模型的方程组、边界条件和连结条件

§ 4 · 简化的 NS 方程及边界条件

§ 5 · 抛物化的 NS 方程和边界条件

§ 6 · 雷诺数趋于无穷大时, 分离流动的描述——Euler 方程
求解问题

§ 7 · 简单小结

第五章: 二层及三层模型的应用

§ 1 · 二层模型的应用

1. 内层方程组的求解方法

2. 外层方程组的求解方法

3. 干扰律的确定

§ 2 · 三层模型的应用

第六章: 二维分离流动的 NS (简化、抛物化、完全) 方程的数值
解法

§ 1 · 引 言

§ 2 · 简化、抛物化及完全 NS 方程的统一表达式

§ 3 · “模型”问题的简化 NS 方程、边界条件和起始条件

§ 4 · MacCormack 显式方法

1. 时间分裂法

2. MacCormack 二步显式差分方法的引入

3. 边界点的处理

4. 稳定条件

5. 人工粘性

6. 算例

§ 5. Beam_Warming 隐式方法

1. Beam_Warming 方法的引入

2. 差分格式

3. 边界处理

4. 求解的代数方程组

5. 算例

§ 6. 反扩散隐式方法

1. 方法的基本思想

2. 隐式反扩散方法

3. 算例

§ 7. 高阶方法

§ 8. 线 Gauss-Seidel 松弛法

§ 9. 通量分裂的推进迭代法

第七章: 分离流动的 Euler 方程计算模拟

§ 1. 概述

§ 2. 涡对法 (离散涡方法 1)

§ 3. 涡云法 (离散涡方法 2)

1. 涡云法的基本思想及求解过程

2 非圆形截面绕流的涡云法

§ 4. 用 Euler 方程数值模拟分离流动

1 后台阶绕流

2 超声速剪切流绕圆柱的运动

3 低亚声速流绕圆柱的运动

4 翼剖面绕流

§ 5. 关于 Euler 分离机理的讨论

中華民國二十六年

五月十五日

五月十五日

五月十五日

五月十五日

五月十五日

五月十五日

第一章 引 论

§ 1. 分离现象

在实际工程中,常常遇到这样一些流动:例如对于定常流,原来流动是附体的,后来在某一位置,流动离开物面,且其后的流动,出现反流或涡,这种流动,称之为分离流动。工程上所见的分离流动常常是很复杂的。下面研究几种重要的分离情况:

1. 物体绕流的分离(1, 2, 3)

(1)尖头圆锥(或尖头细长体)的超声速绕流。随攻角增加,流动的情况是:小攻角时,流动为附体流,大攻角时流动出现分离,且分离线在先随攻角增加而移向背风边,然后到达某极限位置后不再改变,图1.1, 1.2是小攻角和大攻角情况下的表面流态。如果更细致的观察分离流动,在横向流马赫数 M_c 小于0.5时,根据攻角 α 的大小,它又可分为对称定常涡、非对称定常涡、交替变化的非定常涡、作随机运动的非定常涡等四种情况(图1.3)。 $M_c \leq 0.5$ 的流动,一般称之为亚临界流动。 $M_c > 0.5$ 的流动,称之为超临界流动,其结论性的流动分区的意见尚待进一步研究。即是 $M_c \leq 0.5$ 的分区,也是粗线条的,实际情况要复杂得多。

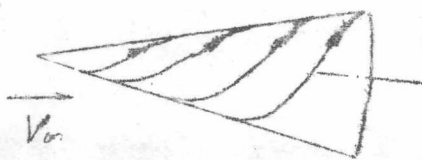


图 1.1 $\alpha < \alpha_c$
附体流动

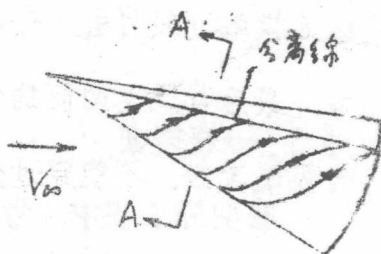


图 1.2 $\alpha > \alpha_c$
分离流动



$\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$
对称流



$\alpha_2 < \alpha < \alpha_3$
非对称流



$\alpha_3 < \alpha < \alpha_4$
反称非对称流



$\alpha > \alpha_4$
随机非定常流

图 1.3. 图 1.2 截面 AA 上的流动
随攻角 α 的变化

(2) 椭球的低速绕流

图 1.4 给出了分离流态随攻角变化的序列。零攻角时为轴对称分离，小攻角(如 3°)时分离线稍有倾斜。随着攻角增加，背风边分离点后移，结果分离线向上弯曲。攻角再大，出现开式分离，此时来自前

缘的极限流线可进入分离线的两侧。攻角进一步增大，开式分离线前移，最后背风面两侧的分流线闭合，形成闭式分离线，此时从前缘来的极限流线，不能穿过分离线。

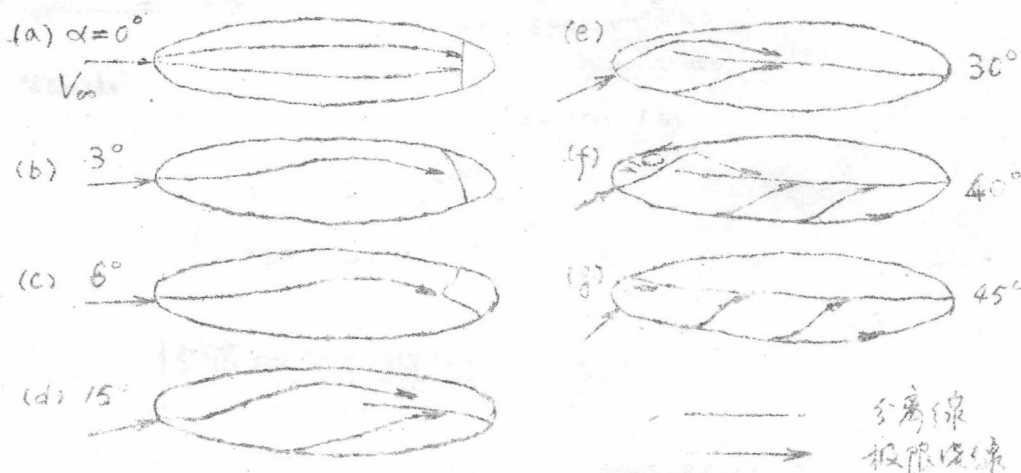


图 1.4 圆球绕流的分离线序列

(短轴/长轴 = 0.25)

(3) 钝锥绕流

在高超声速情况下，钝锥随攻角变化的分离线序列见图 1-5。

在小攻角下(如 $< 4^\circ$)，没有分离发生；在中等攻角下($6^\circ \sim 7^\circ$)，在锥身的后部出现开式分离；攻角增大($10^\circ \sim 20^\circ$)，开式分离线前移；攻角更大，发展为闭式分离。



(a) 小攻角 ($< 4^\circ$)



(b) 中攻角 ($6 \sim 7^\circ$)



(c) $10 \sim 20^\circ$



(d) $\sim 22^\circ$



(e) $\sim 25^\circ$

②.5 流阻分离的序列

(4) 球柱绕流

零攻角下球柱连接处出现短的分离泡。小攻角下迎风面的分离泡逐渐消失，而背风面的分离泡则稍向前移动，同时在后体出现开式分离。攻角进一步增大(例如 10°)，开式分离线进一步向前。攻角再大时 ($15^\circ \sim 19^\circ$)，头部出现“鼻涡”，关于鼻涡细致情况，尚在研究中。最后分离线发展为闭式分离(图 1.6)。

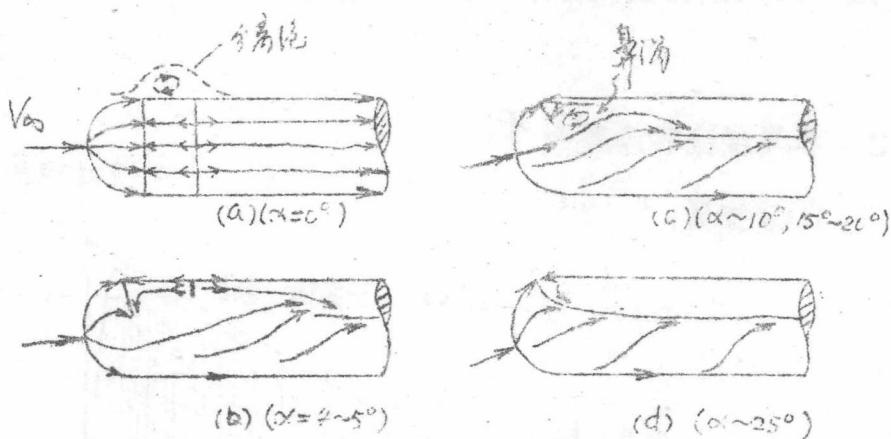


图 1.6. 球体的分离序列

(5) 航天飞机绕流

在 $M_\infty = 6$ 和 Reynolds 数为 $1.64 \times 10^7 - 1.31 \times 10^8$ / 米情况下, 实验表明, 分离流态是复杂的, 除主分离线外, 还有次分离线(图 17). 粗略的说,

在 $\alpha=10-20^\circ$ 时, 分离是开式的, 而攻角为 $30-40^\circ$ 时, 分离是闭式的。

2. 机翼绕流的分离^[1, 4]

(1) 后掠翼:

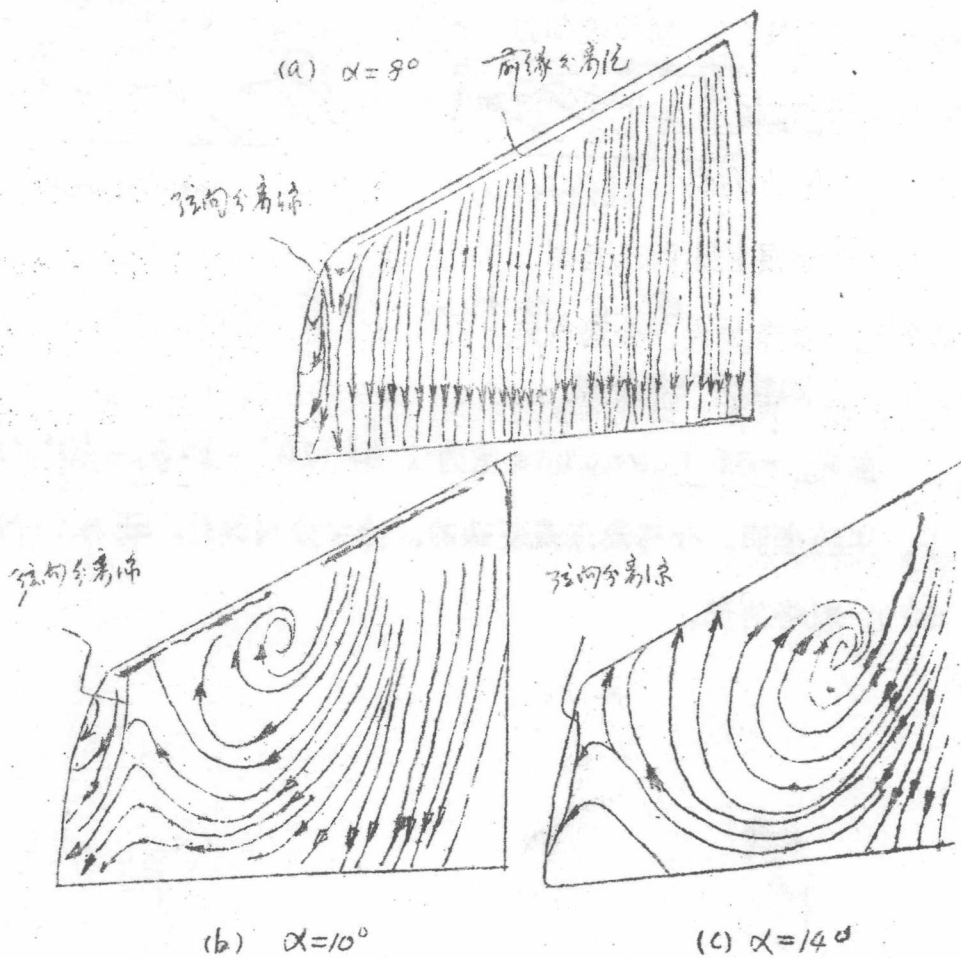


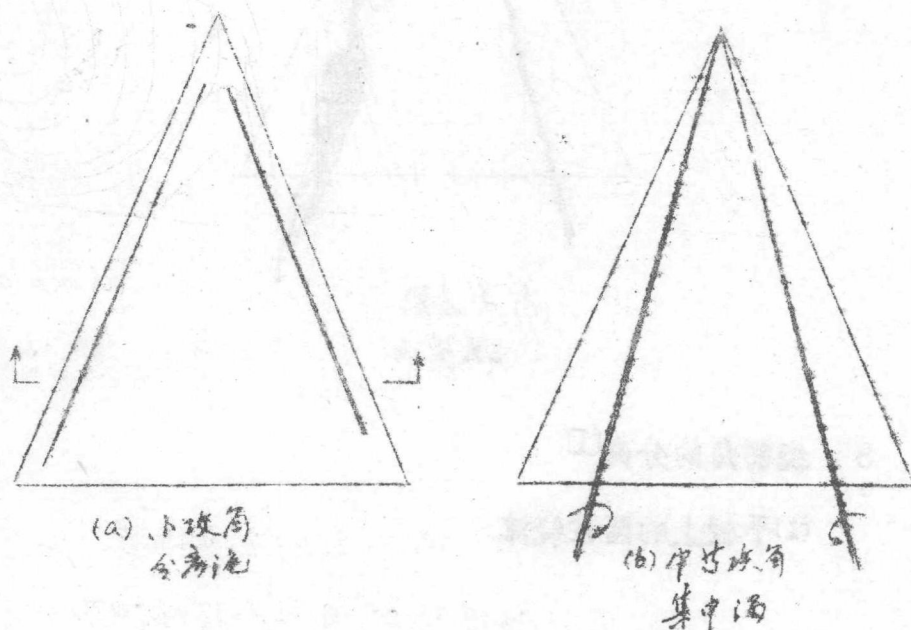
图 1.7. 后掠翼的分离流态

(后掠角 25° , 展弦比 3, $M_\infty = 0.7$)

图 1.7 是展弦比为 3，后掠角为 25° 的后掠翼在 $M_\infty = 0.7$ 时的分离流态。在小攻角时 ($< 8^\circ$)，前缘出现短分离泡，翼端局部分离。当攻角增大到 10° 时，前缘出现气泡涡，同时翼面出现螺旋流。攻角进一步增大 (14°)，螺旋流加强，螺旋中心移向机翼根部，气泡涡消失。如攻角再增大，则会出现倒流和完全分离流。

(2) 三角翼

对于小展弦比的三角翼，如果前缘是尖的，小攻角时前缘出现分离气泡；攻角加大，分离气泡发展为集中涡，同时伴随的可能还有二次涡；攻角再大，出现涡破裂现象。进一步增大攻角，相继出现螺旋流、倒流和完全分离。图 1.8 给出了小攻角、中等攻角和大攻角下的某些分离流态。



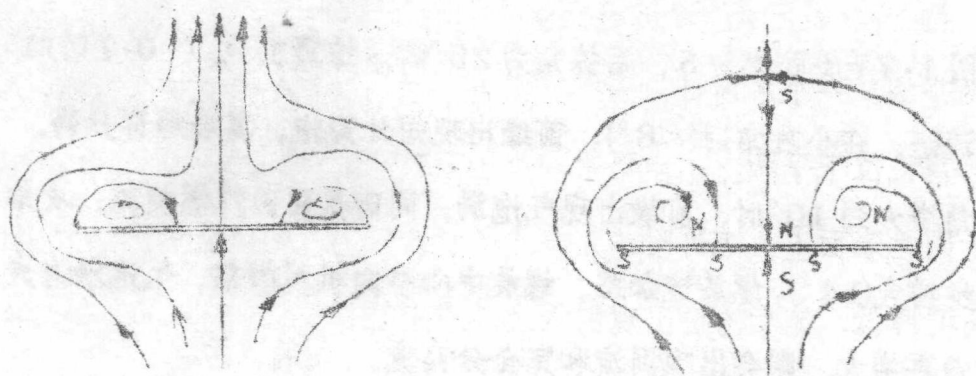
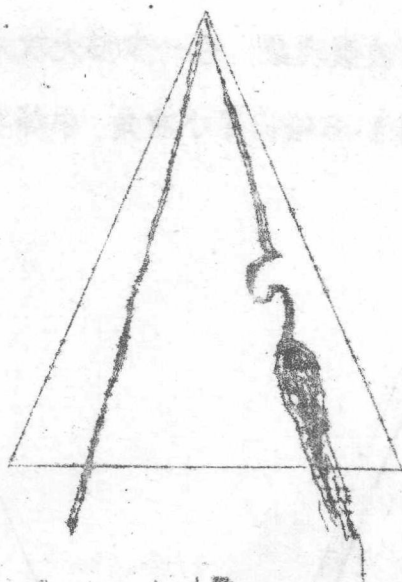


图1.5 三角型绕流流线的

分离现象 (a) (b)



(c) 大攻角
破裂面

3. 绕拐角的分离⁽¹⁾

(1) 平板上的圆柱绕流

图 1.9 是平板上长圆柱绕流的分离现象($Re_{\infty} > 1$)。图中清楚的看到两个涡，一个顺时针，一个反时针，它们向后发展为两个马蹄涡。主分离线位于平板上，主再附线位于圆柱表面上。二次分离的分离线位于圆柱表面上，但再附线则位于平板表面上。研究指出，如果圆柱的高度降低，流场内会出现四涡或六涡结构。

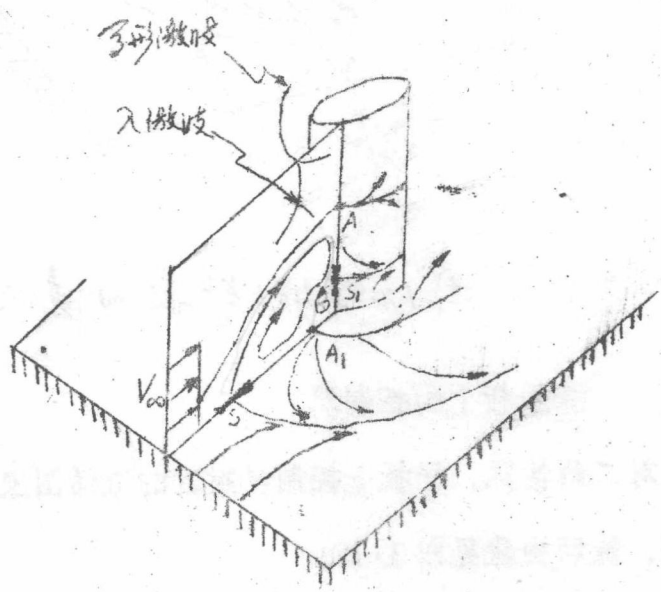


图 1.9 平板上的圆柱绕流

(2) 平板上钝舵的绕流

在前缘区，流动的情况同平板上的圆柱绕流。这个问题，亦存在多涡结构，图 1.10 给出了舵面附近流动的情况。

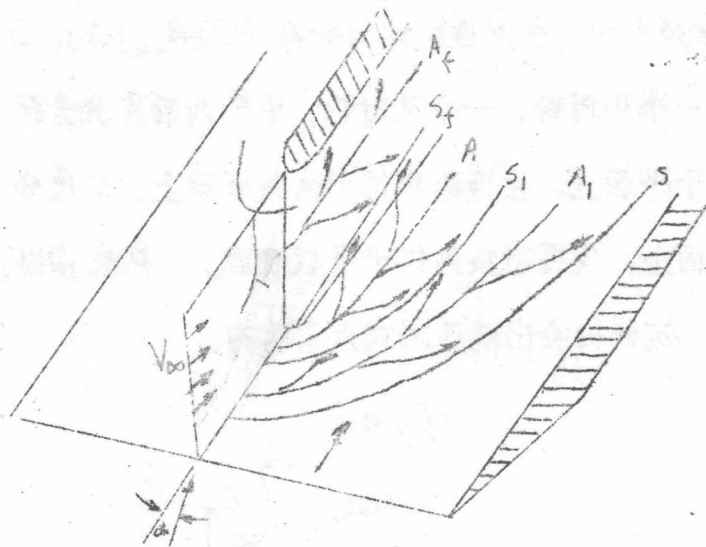


图 1.10 平板上钝体的绕流

(3) 平板上的控制翼

对二维情况，平板上控制翼附近的流动图象见图 1.11。在三维情况下，流动图象见图 1.12。

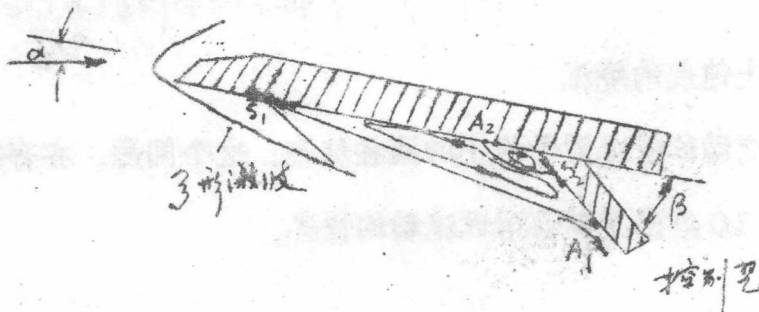


图 1.11. 平板上控制翼附近的流动