

# 安全 飞行 原理

刘汉辉 焦延津 等 编

中国民航出版社



# 安全飞行原理

刘汉辉 焦延津 等 编

中国民航出版社

(京)新登字 307 号

### 内 容 简 介

本书是一部从飞行原理角度系统地讲述飞行安全问题的参考书。

全书共分九章。第一章实为绪论,论述飞行原理与飞行安全的关系。第二章较为系统、概要地复习了飞行原理的基础知识,为以后的讨论奠定基础。第三章至第七章较为集中地分别讨论小速度、大速度、近地面、非对称动力以及高原、高温机场飞行的安全问题。第八章就云中、结冰、颠簸、风切变以及大侧风等特殊天气条件,探讨安全飞行的技术。第九章讨论诸如进入前机尾迹、起落架或襟翼故障以及迫降等极特殊情况下的安全问题。

本书主要是针对飞行员写的,也可供航管人员、安全管理人员参考。

## 安全飞行原理

刘汉辉 焦延津 等 编

责任编辑 李 焯 洪尚琴

\*

中国民航出版社出版发行

(北京市安外安贞大厦)

— 邮政编码:100029 —

北京市昌平区百善印刷厂印装

\*

开本:850×1168 1/32 印张:8<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 字数:215 千字

1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷 印数:1—10 000册

ISBN 7-80110-001-8/V·001 定价:8.00元

# 前 言

本书是一部从飞行原理角度系统地讲述飞行安全问题的参考书。安全问题一直是航空界关注的首要问题。近年来,随着民用航空的发展和技术的进步,各国民航当局、航空公司以及飞机制造厂家陆续发表了一些有关飞行使用安全的通告、指南、训练材料和研究报告等。无疑,在飞行理论的指导下,系统地讨论这些资料所涉及的飞行安全问题将是十分有益的。这不但能弥补因头绪繁多而不便掌握的缺陷,而且有助于把握问题的实质,防止理解片面。正是出于这样的考虑,民航学院飞行性能工程教研室集体编写了这本书。

全书共分九章。第一章实为绪论,论述飞行原理与飞行安全的关系。第二章较为系统、概要地复习了飞行原理的基础知识,为以后的讨论奠定基础。第三章至第七章较为集中地分别讨论小速度、大速度、近地面、非对称动力以及高原、高温机场飞行的安全问题。第八章就云中、结冰、颠簸、风切变以及大侧风等特殊天气条件,探讨安全飞行的技术。第九章讨论诸如进入前机尾迹、起落架或襟翼故障以及迫降等极特殊情况下的安全问题。

本书主要是针对飞行员写的,也可供航管人员、安全管理人员参考。

考虑到我国飞行员原有的飞行原理理论基础,有些最基本的概念,本书直接加以利用。另一方面,考虑到近代商用喷气运输机的特点,又在原有基础上,作了适当扩展和加深。例如关于飞机的稳定性,就在原有静稳定性的基础上,引入了动稳定性和速度稳定性的概念。在讨论各类飞行问题时都注意到了在原有理论上,通过从不同角度将内容系统化、引证大量实际资料等办法,达到适当扩展和加深的目的。

在写法上,本书避免了以往教科书的固定格式,采用漫谈的形式将问题讲透,并力求文字生动有趣。

我们希望,飞行及有关人员能通过阅读这本书,在比较轻松的气氛下,既复习了以往学过的飞行原理知识,又能加深理解,有新的收获,并能对有关飞行安全问题形成比较明确、系统、全面的认识,从而有利于今后的飞行安全。

应当强调的是:这本书是讲基本原理的,每架飞机都有自己的特点,其具体操纵使用均应严格遵照该机的飞行手册等文件。本书不可能照顾到各种具体机型的特点,因此在阅读本书中普遍适用的一般原理时,对所举具体事例和数据应具体情况具体分析,不可生搬硬套。

本书为集体编写,各章撰稿人分别是:第二章罗珊;第三、四章焦延津;第六、七、九章以及第八章第五节何肇熙;第八章第二节那伟;刘汉辉完成第一、五章及第八章第一、三、四节,并负责全书的编审工作。

由于编者水平有限,错误之处在所难免,敬请批评指正。

编 者

一九九一年七月于天津



# 目 录

## 前言

## 第一章 飞行原理与飞行安全

- 一、安全即是无事故 ..... (1)
- 二、预防飞行事故的关键 ..... (2)
- 三、飞行原理研究怎样正确使用和操纵飞机 ..... (3)
- 四、学习飞行原理,预防飞行事故 ..... (5)

## 第二章 基本原理

### 第一节 空气动力

- 一、升力不是浮力 ..... (7)
- 二、翼尖涡流与诱导阻力 ..... (10)
- 三、附面层与摩擦阻力 ..... (12)
- 四、气流分离与压差阻力 ..... (13)
- 五、空气的可压缩性与激波阻力 ..... (16)
- 六、空气动力特性 ..... (21)
- 七、升力抖动边界 ..... (25)

### 第二节 作用力与飞机的运动

- 一、轴和角 ..... (27)
- 二、作用在飞机上的力和力矩 ..... (29)
- 三、定常直线飞行 ..... (32)
- 四、非定常飞行 ..... (41)

### 第三节 飞机的稳定性与操纵

- 一、静稳定性与操纵 ..... (48)
- 二、飞机的动稳定性 ..... (55)
- 三、飞机对操纵输入的响应 ..... (60)

## 第三章 小速度飞行

### 第一节 大迎角时飞机的稳定性与操纵性

- 一、操纵性变差问题 ..... (67)

二、飘摆问题 .....	(70)
三、速度稳定性问题 .....	(72)
第二节 失速 .....	(75)
一、失速的现象与本质 .....	(75)
二、失速速度 .....	(77)
三、失速的预防 .....	(81)
四、失速的改出 .....	(85)
五、深失速问题 .....	(86)
第四章 大速度飞行	
第一节 大速度飞行时的限制 .....	(90)
一、机动飞行包线 .....	(90)
二、载荷限制 .....	(90)
三、速度限制 .....	(92)
第二节 大速度飞行时的操纵问题 .....	(92)
一、自动下俯与 $M$ 数配平 .....	(92)
二、大速度副翼反逆 .....	(95)
第五章 地面滑跑与近地飞行	
第一节 起飞操纵 .....	(98)
一、抬前轮技术 .....	(98)
二、俯仰姿态控制 .....	(100)
第二节 进近与着陆操纵 .....	(103)
一、目视错觉对进近的影响 .....	(103)
二、进场速度 .....	(106)
三、进近轨迹控制与能量管理 .....	(109)
四、拉平与接地 .....	(113)
五、着陆滑跑 .....	(116)
第三节 污染跑道上的起飞着陆 .....	(122)
一、积水跑道上的滑跑 .....	(122)
二、其他污染跑道上的滑跑 .....	(128)
三、跑道污染对起飞、着陆性能的影响 .....	(128)
第四节 中断起飞(RTO) .....	(134)
一、有关中断起飞事故的统计 .....	(134)
二、决断速度 $V_1$ .....	(135)
三、过渡与制动 .....	(140)

## 第六章 非对称动力飞行

第一节 非对称动力飞行的发生概率 .....	(144)
第二节 发动机失效时的瞬态响应 .....	(145)
一、瞬态响应 .....	(145)
二、适航规章的要求 .....	(146)
第三节 非对称动力飞行时的平衡 .....	(149)
第四节 一发失效时的飞行性能 .....	(152)
一、单发飞行的最小速度与升限 .....	(152)
二、飘降 .....	(154)
三、一发失效后的巡航 .....	(155)
四、空中改航与返回点 .....	(158)
第五节 单发起飞、着陆和转弯 .....	(160)
一、单发起飞 .....	(160)
二、单发着陆 .....	(161)
三、单发转弯 .....	(162)

## 第七章 高原、高温机场飞行

第一节 高原、高温条件下的飞行性能 .....	(164)
一、上升性能 .....	(164)
二、起飞性能 .....	(166)
第二节 高原、高温机场飞行的注意事项 .....	(170)
一、起飞重量的限制 .....	(170)
二、着陆重量的限制 .....	(173)
三、操纵上应注意的事项 .....	(173)

## 第八章 特殊天气条件下的飞行

第一节 云中飞行 .....	(174)
一、云中飞行错觉的产生 .....	(174)
二、一些飞行错觉事例 .....	(177)
三、云中飞行注意事项 .....	(179)
第二节 结冰飞行 .....	(180)
一、积冰天气与积冰概率 .....	(180)
二、飞机积冰的种类 .....	(183)
三、积冰对飞机性能的影响 .....	(185)
第三节 颠簸飞行 .....	(191)



一、大气紊流与飞行安全 .....	(191)
二、几种主要的大气紊流现象 .....	(193)
三、大气紊流的有关特性 .....	(198)
四、大气紊流对飞机的作用 .....	(200)
五、颠簸飞行速度 .....	(206)
六、颠簸飞行操纵 .....	(208)
第四节 低空风切变 .....	(210)
一、“天空中的新杀手” .....	(210)
二、几种低空风切变 .....	(212)
三、低空风切变对飞行的危害 .....	(218)
四、风切变改出技术 .....	(228)
五、预防措施 .....	(234)
第五节 大侧风着陆 .....	(238)
一、修正侧风的方法 .....	(241)
二、注意事项 .....	(242)
第九章 其他特殊情况下的飞行	
第一节 进入前机尾迹 .....	(244)
一、尾迹的物理特性 .....	(244)
二、尾涡对飞行的影响 .....	(246)
三、如何避开尾迹 .....	(248)
第二节 部分或全部起落架放不下来的着陆 .....	(248)
一、只前轮能放下或放不下 .....	(249)
二、有一个主起落架放不下来 .....	(250)
三、所有起落架都放不下来 .....	(250)
第三节 放不下襟翼的着陆 .....	(251)
第四节 安定面卡阻时的着陆 .....	(252)
第五节 迫降 .....	(253)
参考文献 .....	(255)

# 第一章 飞行原理与飞行安全

## 一、安全即是无事故

有人说“安全即是无事故”，英国的罗伯特还特别以此为题写了一本书。不过，从第一架飞机诞生的那一天起，航空界就一直为飞行事故所困扰。

早期的事故是如此之多，以致人们称航空为“冒险者的事业”。世界上第一批 40 名班机驾驶员（1935 年美国的空邮服务），有 31 人死于飞行事故，驾驶员的平均飞行寿命只有 3 年<sup>[1-2]</sup>，难怪至今人们还抱有“坐飞机不安全”的成见。

事实上，这种成见早就变得不正确了。图 1-1 的统计数字表

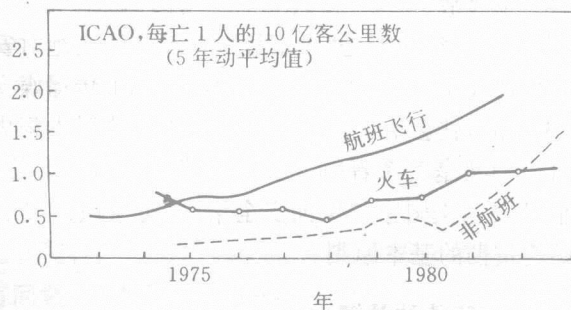


图 1-1 航空运输与铁路运输安全情况比较

明，从 1974 年起乘航班飞机旅行就比乘火车还安全<sup>[1-2]</sup>。有人作过一个更直观的比较：每亡一人，乘航班飞机可绕地球飞行 50 000 圈，乘私人/军用飞机则为 4 000 圈，而骑摩托车只能骑 85 圈<sup>[1-1]</sup>。

因此，今天的航空是安全的。这一成果是整个航空界依靠技术进步，不断努力争取得来的。图 1-2 说明近几十年世界范围内商

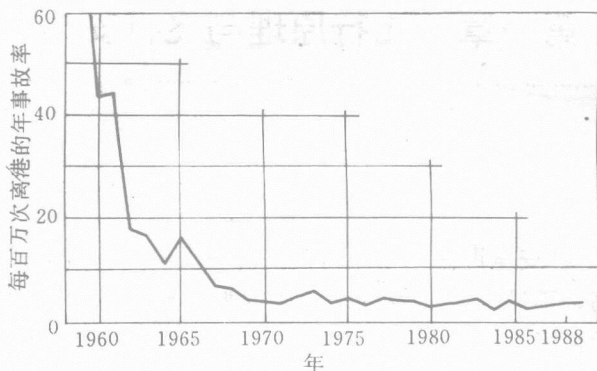


图 1-2 世界范围商用喷气机的年事故率

用喷气机飞行安全改善的情况,其进步之大给人留下了深刻的印象。

值得注意的是,自 1974 年以来世界商用喷气运输机群的年事故率基本保持常数,约为每百万次离港三次事故,其中约有一次是机毁人亡的严重事故<sup>[1-2]</sup>。

可见,今天的航空还不是“无事故”,还没有达到绝对安全的理想境地。而且现代飞机价值昂贵,乘员众多;加上传播媒介广为宣传,一旦发生事故,就会给航空公司在信誉上造成巨大损失。所以安全问题目前仍然是关系着航空公司经营成败的一个关键因素,特别是我们社会主义国家,“保证安全第一”更应该是民航一切工作中必须始终贯彻的基本原则。

## 二、预防飞行事故的关键

图 1-3 和图 1-4 是对 1959~1989 年间世界范围内商用喷气机群发生的 806 起事故所作的统计分析结果<sup>[1-3]</sup>。

尽管最终进近和着陆的飞行时间平均只约占总时间的 4%,但却有近一半的飞行事故发生在这两个阶段,如图 1-3 所示。故就飞行过程而言,预防事故的关键阶段是最终进近和着陆,其次

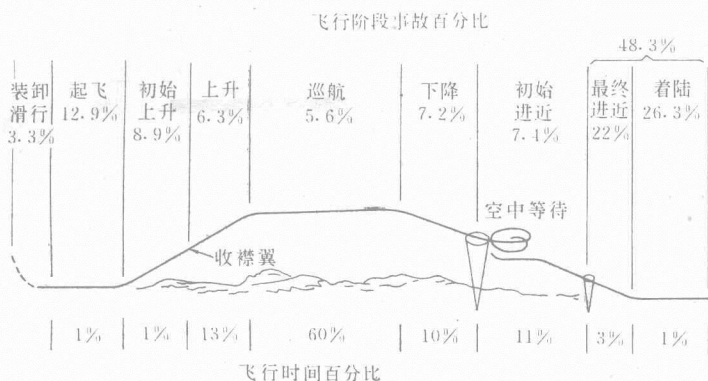


图 1-3 世界范围商用喷气机(1959~1989年)飞行阶段事故百分比是起飞。

就事故原因而论,图 1-4 表明约 66%的飞行事故其主要原因与飞行机组有关。如果专门对进近和着陆阶段的事故作类似分析,机组因素就更引人注目了,竟高达 80%。当然,主要原因不能等同于主要责任。深入的分析表明,很多这类飞行事故是由于其他因素,甚至是多个难以察觉的因素累积的结果,它迫使飞行机组处于十分困难的境地而后酿成的。不过,以往事故的统计资料还是告诉我们,要预防飞行事故,飞行机组是关键因素。

这是很自然的,大部分飞行事故主要归因于飞行机组是因为飞行机组直接使用和操纵飞机;最终进近和着陆为事故多发段是因为在这些飞行阶段使用情况复杂,操纵任务繁重。不过,即使其他方面有问题,只要飞行机组能正确使用和操纵,也往往能化险为夷。因此,通过教育和训练,使飞行机组在各种复杂情况下能正确使用和操纵飞机,仍是预防飞行事故的根本措施。

### 三、飞行原理研究怎样正确使用和操纵飞机

图 1-5 简要地说明了驾驶员与飞机运动之间的本质联系:驾驶员的操纵与外界扰动都改变作用在飞机上的力和力矩;而作用

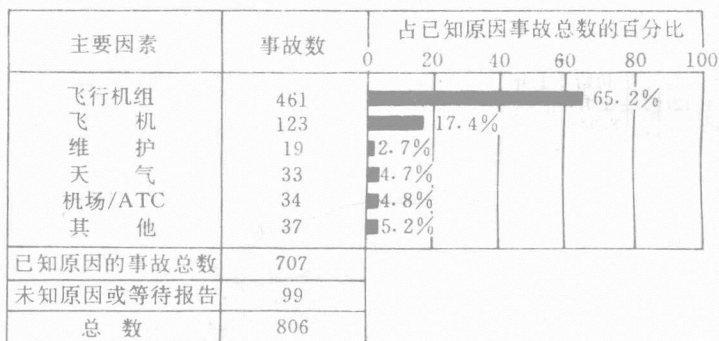


图 1-4 世界范围商用喷气机事故的主要原因分析  
在飞机上的力和力矩决定了飞机的运动状态。

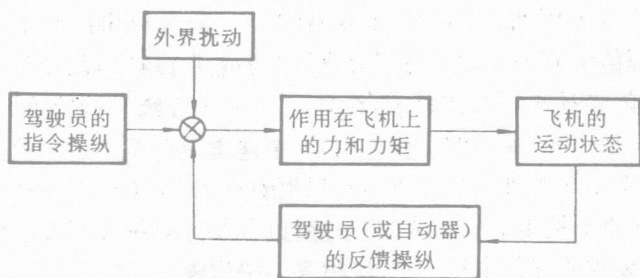


图 1-5 驾驶员—飞机系统方框图

假设只受外界扰动(包括非驾驶员有意操纵的飞机自身扰动),飞机将怎样运动呢?这是飞行原理研究的稳定性问题。

假设只有驾驶员的指令操纵,飞机将怎样运动呢?这是飞行原理研究的操纵性问题。

假设作用在飞机上的力和力矩都达到平衡,飞机的运动情况又会怎样呢?特别是飞机能在多大的速度、高度和轨迹倾斜角的范围内达到这种理想状态呢?这就是飞行原理研究的飞行性能问题。



飞行原理也常反过来讨论问题,如假设没有外界扰动,为达到预定的飞行状态或飞行轨迹,驾驶员应怎样操纵等问题。

作为讨论以上问题的基础,飞行原理还要说明作用在飞机上的力和力矩变化的规律,以及力和力矩怎样决定飞机运动等力学原理。

上述飞行原理研究的基本问题,都是在假设的条件下进行的。这正是基本理论的特点。假设排除了其他因素,从而能抓住问题的本质,便于说明飞机的基本使用和操纵特性。骑马要熟悉马的禀性。掌握这些基本特性是正确使用和操纵飞机的前提。

然而,实际飞行情况要复杂得多。首先,飞机构形和外界条件是千变万化的,其组合有可能形成多种困难的临界情况。其次,飞行员的操纵也不光是简单的指令输入,为达到预定的运动状态,驾驶员(或自动器)会不断地根据偏离预定状态的情况实施反馈操纵。不带反馈操纵的人—机系统称为开环系统;而带反馈操纵的称为闭环系统。开环和闭环系统的特性又会有很大的差别。

这本《安全飞行原理》将要讨论的正是在各种安全临界情况下,在尽可能考虑人—机系统实际特性的条件下,如何按照基本飞行原理正确地使用和操纵飞机;它将澄清一些容易含混的基本概念;分析各种特殊情况下可能发生的问题及应采取的措施。因此,它既是基本飞行原理的实际应用,又是其发展和补充。

#### 四、学习飞行原理,预防飞行事故

诚然,对飞机的正确使用和操纵取决于整个机组的协作精神、技能、经验以及知识等的综合水平。理论知识作为这种综合能力的不可缺少的一环,对预防飞行事故起着十分重要的作用。

特别是今天,由于技术的进步,飞机成了巨大且高度自动化的复杂系统,这给使用带来了如下特点:

(1) 为了最大限度地发挥其效益,使用常常接近于飞机的能力极限。理解这些极限并在使用中努力防止超出这些极限就成了确保飞行安全的重要环节。

(2) 精密自动导航装置的使用,使得精确掌握飞机性能的变化成为必要。由于输入导航装置的性能资料与实际性能的细小差异,造成飞机显著的位置差错,从而导致飞行事故的事例多有发生。

(3) 复杂天气条件下的飞行越来越多。这不但要求飞行员具有处置各种特殊情况的能力,而且还要求飞行员对自己所驾飞机的能力有更准确的判断。

(4) 由于自动装置代替飞行员实施了许多具体操作,飞行员的决策者作用越来越强,这就要求飞行员具有更强的分析和判断能力。

所有这些变化无疑都使学习理论知识的重要性与深入研究飞行原理的必要性显得更加突出了。

更值得注意的是,航空事业的飞速发展也大大丰富了航空理论。飞行原理的一些观念正在经受着严峻考验,有的内涵变得更丰富,有的甚至受到了冲击。例如,对“低空风切变”的认识就是最近十几年才发展起来的。低空风切变事故的深入分析,不断加深了对飞机能力局限性的认识,也导致基本操纵观念发生了深刻的变化。又如,以往对小飞机多强调杆、舵协调的转弯操纵,但一些现代大飞机的转弯则可只用压杆。再如,“轻接地”曾是飞行员着陆时争取的目标,但新的波音飞机则要求接地时有明确的触地感觉等等。认识若跟不上这些发展和变化,就会造成模糊和含混,这本身对飞行安全就是一大威胁。因此,开展飞行原理的再学习,特别是深入研讨那些与飞行安全直接有关的新情况、新问题,澄清那些容易含糊的基本概念,对于提高我国民航的安全营运水平具有重要的意义。

## 第二章 基本原理

概念的准确性将影响决策的正确性。澄清一些飞行原理的基本概念是做到正确使用和操纵飞机的第一步。

### 第一节 空气动力

#### 一、升力不是浮力

飞机在空中飞行同气球升空的道理是不同的。气球比空气轻，依靠空气浮力上升。飞机比空气重得多，它必须在空气(大气)中以相当大的速度运动，才能获得托举它在空气中飞行的升力。这种由于飞机与空气之间的相对运动而产生的力称为空气动力。

获得升力，像鸟一样翱翔天空是人类长期以来的梦想。早在汉朝王莽时代，我国就有人将鸟的羽毛缚在手臂上，从悬崖跳下，想学鸟的飞行，但失败了。风筝的发明，虽在实践上获得了升力，但真正弄清升力产生的原理并造出高效率的机翼，却是近代科学的重大成就。

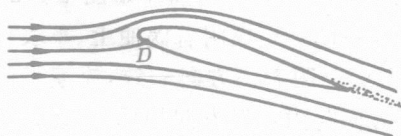


图 2-1 机翼剖面周围的流动

点。

图 2-1 说明空气流过机翼周围的情形。当空气流到机翼前缘附近时，受到阻滞，流速降低，在机翼前缘有那么一点(图中 D 点)流速会降到零，该点称为驻

气流在驻点处分为两股，分别沿机翼的上、下表面流过，到机翼后缘附近又重新汇合向后流去。在机翼上表面前段，因表面凸起较多，流动方向改变也大，流管比较细，于是流速加快；在机翼下表面则情况相反，气流受阻，流管变粗，流速减慢。翼面上、下流速差是产生升力的关键。这个流速差的存在还可用旋涡理论作进一步说明。将一段机翼置于可见的流体中，突然由静止启动机翼，则会看到一个旋涡从机翼后缘跑下来，参看图 2-2(a)。

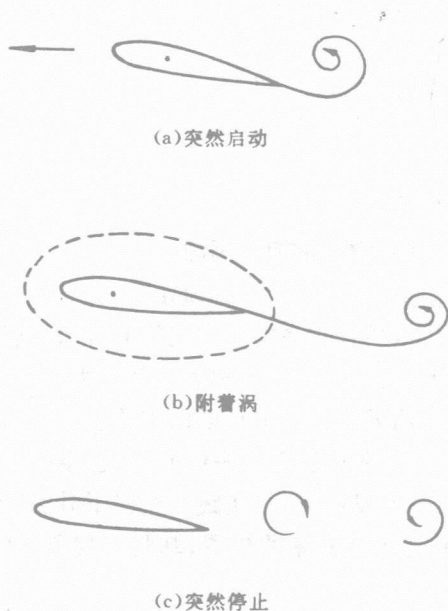


图 2-2 附着涡

所示，证明这个附着涡的确是存在的。机翼附着涡使上、下表面流速存在差别：在上表面，来流方向与附着涡方向一致，流速是两者之和，故加快；在下表面，来流方向与附着涡方向相反，流速是两者之差，故减慢。

为什么上下流速差会导致升力的产生呢？这个问题涉及流体能量的转换。当阻挡流动的空气时会感到压力增大，迎风骑自行车

但受基本自然规律的制约，在无旋转外力作用的情况下，流体旋涡只能成对地产生。有一个反时针方向的旋涡产生，就必然有另一个同样强度的顺时针方向的旋涡产生。现在只跑出来一个旋涡，另一个哪里去了呢？另一个附着在机翼上，称为“附着涡”，见图 2-2 (b)。机翼突然停止运动，会看到一个反方向旋涡从机翼上跑下来，如图 2-2 (c)