

高等学校通用教材

# 航线飞行工程学

王小宛 张永顺 邢万红 编著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书以保证航线飞行安全和效益为中心,以空气动力学、飞行力学、飞机性能和发动机性能为理论基础,说明从起飞、爬升、巡航、下降到着陆全过程;在不同气象条件和不同飞行状态下,保证安全和效益的操纵原理和有关性能工程问题;还简略地介绍了安全飞行的人为因素问题,这是 21 世纪民航安全飞行的重要课题。在编写中尽量做到理论与实际相结合,为民航飞行员掌握操纵技术打下良好的工程理论基础。

本书是为民航飞行员养成教育和继续培训编写的教科书和教学参考书,也可供民航空中管制、机务和航空公司运行控制管理人员等学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

航线飞行工程学/王小宛等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.3

ISBN 7-81077-491-3

I. 航… II. 王… III. 航线飞行—航空工程  
IV. V323.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 104553 号

## 航线飞行工程学

王小宛 张永顺 邢万红 编著  
责任编辑 陶金福

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:17.0 字数:381 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-81077-491-3

定价:23.00 元

# 序

北京航空航天大学教授与厦门航空公司机长共同编写的《航线飞行工程学》一书值得推荐。

1. 该书针对当前民航飞行队伍中普遍存在的理论知识差,操作不规范和违章操作问题,系统地讲解了安全飞行的基本概念、基本知识和基本理论,涉及空气动力学、飞行力学、飞机性能和发动机性能等理论知识。

2. 该书涉及很多飞行操纵问题,包括对称和非对称飞行、在定常和非定常大气条件下飞行。非对称飞行如单发飞行、侧风着陆等。非定常飞行如大气紊流、风切变和尾流等,并且在保证安全飞行的前提下,还涉及提高效益问题,如各种条件下的省油飞行、飞机装载平衡等操作。

3. 该书对飞行员理论教学进行了有益的探索。北京航空航天大学张永顺和王小宛两位教授在多年培养飞行员实践中,总结基础知识、基本规律和理论联系实际的经验体会,力求抓住本质、抓住要害、融汇贯通,深入浅出、通俗易懂。如稳定性和操纵性三章,既涉及对飞机扰动运动建立微分方程,又没有陷入繁琐的数学求解之中,还透彻地讲解了飞机扰动运动的物理本质和操作原理,便于课堂讲述和自学参考。这是难能可贵的。

我相信,通过这样的理论学习,对提高飞行员基础理论知识和安全素质修养是非常有益的;对于民航界油料、机务、空中管制、航空公司运行控制管理人员和机场地面代理人员也是有益的。希望能经常看到这样的教科书问世。在此对作者的努力和探索表示敬意!希望他们对教材继续改进,不断完善。

程志气

二〇〇二年九月廿四日

# 前言

本书是为民航飞行员养成教育和继续培训编写的教科书和教学参考书,也可供民航界空中管制、机务和航空公司运行控制管理人员等参考。

本书以保证航线飞行安全和效益为中心,以空气动力学、飞行力学、飞机性能和发动机性能为理论基础,说明从起飞、爬升、巡航、下降到着陆全过程,在不同气象条件和不同飞机状态下,讲解保证安全和高效益的操纵原理和有关性能工程问题。在编写中尽量做到理论与实际相结合,为民航飞行学员掌握操纵技术打下良好的工程理论基础。

本书还简略地介绍了安全飞行的人为因素问题,这是 21 世纪民航安全飞行的重要课题。

由于北京航空航天大学飞行学院的学生在学完飞行基本理论课后要到澳大利亚去学习飞行,而澳大利亚使用英制和工程单位制,且目前国内大部分旅客机都为美、欧飞机,因此,为了与后续课程接轨和适应目前民航客机的实际,本书单位制主要为英制和工程单位制。

本书编写参考了以往有关教科书和资料,并总结北京航空航天大学飞行学院历年来飞行学员毕业论文,还得到有经验机长们的指导和民航总局领导的支持。在此一并感谢!

在此感谢杨元元、徐柏龄、宋成仁、方振平、高金源、刘导治、郑光华、章澄昌、钱翼稷、朱一锟、刘同仁、肖业伦等诸位专家教授的支持和帮助。

书中错误和不当之处,敬请相关专家和读者指正!

编著者

2002 年 10 月

# 目 录

## 第 1 章 飞机飞行的主要参数和数据曲线

1.1	坐标轴系、姿态角和速度角	(1)
1.2	飞机的基本气动参数	(5)
1.2.1	升力系数 $C_L$	(5)
1.2.2	阻力系数 $C_D$ 、升阻比 $K$ 和极曲线	(7)
1.2.3	平均气动力弦 $MAC$ 、零升俯仰力矩系数 $C_{m0}$ 和气动力中心 (焦点) $AC$	(9)
1.3	发动机主要使用性能参数	(11)
1.3.1	涡扇发动机的主要使用参数	(11)
1.3.2	发动机的基本工作状态	(12)
1.3.3	速度特性和高度特性	(13)
1.4	飞机重量与重量分布的特征参数	(16)
1.4.1	飞机的重量与重心	(16)
1.4.2	质点和质点系的概念	(18)
1.4.3	质点系的动量分析	(18)
1.4.4	质点系动量矩的计算分析	(20)
1.4.5	飞机的转动惯量和惯性积	(23)
1.5	航线飞行中标准大气的主要参数	(24)
1.5.1	标准大气	(25)
1.5.2	大气的气温和气压	(25)
1.5.3	大气中的空气声速	(30)

## 第 2 章 飞机的平飞、上升、下降以及盘旋

2.1	平 飞	(33)
2.1.1	平飞中飞机上作用的外力	(33)
2.1.2	平飞所需的飞行速度	(33)
2.1.3	低速平飞所需推力	(34)
2.1.4	高速平飞所需推力曲线计算	(36)
2.1.5	平飞最小速度的限制	(37)
2.1.6	平飞操纵原理	(39)
2.2	上 升	(40)

2.2.1	上升中的作用力及其所需速度	(40)
2.2.2	上升率、上升角、上升梯度和升限	(41)
2.2.3	飞机重量、气温和风对上升性能的影响	(42)
2.2.4	上升的操纵原理	(43)
2.3	下降	(45)
2.3.1	下降中的作用力及其所需速度	(45)
2.3.2	下降性能	(46)
2.3.3	飞机重量、气温和风对下降性能的影响	(49)
2.3.4	下降的操纵原理	(50)
2.4	正常盘旋	(52)
2.4.1	盘旋中的作用力和载荷因数(过载)	(52)
2.4.2	盘旋所需速度	(53)
2.4.3	盘旋所需推力和功率	(54)
2.4.4	盘旋半径和盘旋时间	(54)
2.4.5	盘旋的操纵分析	(55)
2.4.6	盘旋中的侧滑	(57)

### 第3章 起飞和着陆

3.1	飞机的起飞性能	(58)
3.1.1	起飞滑跑距离 $l_R$	(60)
3.1.2	起飞滑跑迎角	(61)
3.1.3	离地速度	(62)
3.1.4	影响起飞滑跑距离的因素	(62)
3.1.5	起飞场道段的空中飞行距离 $l_A$	(63)
3.1.6	起飞擦机尾	(64)
3.2	起飞过程中各种速度限制数值	(65)
3.3	减推力起飞	(66)
3.4	飞机的着陆与着陆性能	(67)
3.4.1	着陆的进场段和滑跑段距离计算	(69)
3.4.2	影响着陆滑跑距离的因素	(70)
3.5	风对起飞和着陆的影响	(71)
3.5.1	飞机在正常负逆风中起飞、着陆的特点	(72)
3.5.2	侧风对起飞、着陆的影响及其修正原理	(72)
3.6	起飞滑跑过程中一台发动机失效	(77)
3.6.1	中断起飞	(77)
3.6.2	继续起飞	(78)

3.6.3 最大起飞重量和起飞决断速度 $V_1$ .....	(81)
---------------------------------	------

## 第4章 航线飞行的耗油分析

4.1 航线耗油量分析中的特性参数 .....	(86)
4.1.1 飞机小时耗油量和里程耗油量 .....	(86)
4.1.2 航程估算与航程因子 .....	(87)
4.2 低速巡航飞行的耗油分析 .....	(88)
4.2.1 定高巡航 .....	(88)
4.2.2 定速巡航 .....	(89)
4.2.3 固定油门巡航 .....	(90)
4.2.4 航时飞行的省油问题 .....	(90)
4.3 考虑空气压缩性的巡航耗油计算 .....	(91)
4.3.1 飞机气动效率 $KMa$ 的计算分析 .....	(92)
4.3.2 折算重力 .....	(94)
4.3.3 最大航程巡航 .....	(96)
4.3.4 等高巡航 .....	(97)
4.3.5 短航程巡航飞行 .....	(98)
4.4 航班飞行的经济性和成本指数 .....	(98)
4.5 用系统工程处理航线飞行的省油问题 .....	(101)
4.5.1 航线省油飞行的系统工程的表述 .....	(101)
4.5.2 求航班的直接成本费用最小的问题 .....	(102)
4.5.3 最小备份油与飞行安全 .....	(103)
4.5.4 满座率与省油飞行的关系 .....	(103)
4.5.5 气象导航的省油飞行 .....	(103)
4.5.6 巡航飞行耗油最小的数学规划的表述 .....	(104)

## 第5章 飞行中几个特殊问题

5.1 飞机进入前机尾流的飞行 .....	(108)
5.1.1 飞机尾流的物理特性 .....	(108)
5.1.2 前机尾流对后机飞行的影响 .....	(110)
5.1.3 预防进入前机尾流的措施 .....	(112)
5.2 扰动气流中的飞行 .....	(112)
5.2.1 飞行中的颠簸 .....	(112)
5.2.2 阵风过载 .....	(114)
5.2.3 颠簸飞行的速度和高度限制 .....	(114)
5.2.4 颠簸飞行中的操纵特点 .....	(117)

5.3	低空风切变对起降影响 .....	(117)
5.3.1	风切变对飞行的影响 .....	(118)
5.3.2	低空风切变的形式 .....	(120)
5.3.3	低空风切变对起飞和着陆过程的影响 .....	(121)
5.3.4	怎样避免低空风切变的危害 .....	(124)
<b>第6章 航线飞机的载重与平衡</b>		
6.1	航线飞机的重量分类与限制 .....	(126)
6.2	航线飞机的重心位置审核 .....	(127)
6.3	航班飞机重心位置的确定 .....	(128)
6.3.1	重心位置的数值算法 .....	(129)
6.3.2	重心位置的图表审核单 .....	(130)
6.4	飞机重心配定平衡图 .....	(132)
6.5	飞行舱单 .....	(135)
<b>第7章 飞机纵向静稳定性和静操纵性</b>		
7.1	飞机俯仰力矩的平衡 .....	(139)
7.1.1	全机俯仰力矩系数曲线 .....	(140)
7.1.2	全机俯仰力矩系数随飞行 $Ma$ 数的变化规律 .....	(141)
7.1.3	飞行中影响俯仰力矩平衡的因素 .....	(142)
7.1.4	保持俯仰力矩平衡的方法 .....	(143)
7.2	飞机纵向静稳定性 .....	(143)
7.2.1	舵面的松浮影响 .....	(143)
7.2.2	迎角静稳定性(定速静稳定性、过载静稳定性) .....	(144)
7.2.3	速度静稳定性(定载静稳定性) .....	(146)
7.3	飞机纵向(运动)静操纵性 .....	(148)
7.3.1	驾驶杆的杆力与杆位移 .....	(148)
7.3.2	平飞中的升降舵偏角与驾驶杆力 .....	(151)
7.3.3	飞机等直平飞静操纵性综述 .....	(153)
<b>第8章 飞机纵向动稳定性与动操纵性</b>		
8.1	小扰动分析和飞机扰动方程式线性化 .....	(160)
8.2	纵向扰动运动和侧向扰动运动的分离 .....	(162)
8.3	气流轴系的纵向小扰动方程组及其无量纲形式 .....	(163)
8.4	飞机纵向动稳定性的计算分析 .....	(165)
8.4.1	求解纵向小扰动方程式 .....	(165)

8.4.2	飞机纵向扰动运动的模态特征及动态参数 .....	(166)
8.4.3	短周期与长周期模态的分析 .....	(170)
8.5	飞机纵向动操纵性 .....	(173)
8.5.1	飞机的纵向操纵运动方程 .....	(175)
8.5.2	飞机在阶跃操纵输入下的动态反应 .....	(175)
8.5.3	飞行条件和气动参数对纵向操纵特性影响 .....	(176)
8.5.4	举例说明飞机纵向操纵扰动的物理过程 .....	(178)
8.6	飞机的纵向非正常俯仰摆动 .....	(179)
<b>第 9 章 飞机侧向稳定性与操纵性</b>		
9.1	飞机侧向运动的描述 .....	(184)
9.2	飞机侧向静稳定性 .....	(186)
9.2.1	飞机横向静稳定性 .....	(186)
9.2.2	飞机方向静稳定性 .....	(190)
9.2.3	飞行马赫数 $Ma$ 的影响 .....	(192)
9.3	飞机侧向静操纵性 .....	(193)
9.3.1	大迎角飞行中副翼操纵效能的下降 .....	(193)
9.3.2	高速飞行中副翼效能的反逆 .....	(194)
9.3.3	稳定滚转角速度与副翼操纵 .....	(195)
9.3.4	高速飞行中蹬方向舵反斜现象 .....	(196)
9.3.5	侧向操纵的辅助装置 .....	(197)
9.4	等速直线侧滑飞行中侧向操纵分析 .....	(198)
9.4.1	等速直线侧滑飞行中的侧向平衡操纵 .....	(199)
9.4.2	不对称推力飞行的操纵原理 .....	(200)
9.5	飞机侧向动稳定性 .....	(202)
9.5.1	建立飞机侧向运动方程 .....	(202)
9.5.2	3 种侧向扰动运动模态的成因分析 .....	(205)
9.5.3	飞机的侧向动不稳定 .....	(206)
<b>第 10 章 飞行安全中的人为因素</b>		
10.1	回顾为安全飞行而奋斗的历史 .....	(212)
10.1.1	初创阶段(1903—1945 年)的飞行安全 .....	(212)
10.1.2	飞行装备和管理日趋完善的 30 年(1945—1975 年) .....	(212)
10.1.3	突显的人为因素(1975—现在) .....	(213)
10.2	民用航空的飞行事故与人为因素 .....	(214)
10.2.1	人为错误的基本性质 .....	(214)

10.2.2	现代认知心理学的机理分析	(215)
10.2.3	人的飞行技能的形成	(218)
10.2.4	人为错误的主要分类	(219)
10.3	走向自动化飞行的安全问题与人为因素	(221)
10.4	飞行机组与飞行安全	(223)
10.5	当前调查人为因素的系统方法	(226)
10.5.1	REASON 模型	(227)
10.5.2	SHEL 模型	(230)
10.5.3	校核单的使用	(232)
10.6	加强教育培训,建设民航安全文化,完善民航安全体系	(232)
10.6.1	从源头抓起,提高飞行员养成教育的全面素质	(233)
10.6.2	强化飞行机组航线模拟训练,发扬机组的团队精神	(234)
10.6.3	以人为中心的驾驶自动化与余度设计	(235)
10.6.4	严格执行和继续完善飞行检查单制度	(236)
10.6.5	关注建设民航安全文化	(237)

## 附录

A.	飞机俯仰力矩系数的计算	(238)
A.1	机翼的俯仰力矩	(238)
A.2	翼身组合体的俯仰力矩	(239)
A.3	组合体情况下平尾的俯仰力矩	(239)
A.4	全机的俯仰力矩系数	(241)
B.	上升飞行的省油分析	(242)
B.1	能量高度和单位能量变化率	(242)
B.2	飞机的能量转换效率和最少油耗上升轨迹	(244)
C.	标准大气简表(0~32 km)	(246)
D.	人的因素的校核单	(248)
E.	基于 SHEL 模型的校核单	(250)
E.1	个人因素(人件)	(250)
E.2	个人与其工作的有关因素	(252)
F.	Symbol & Terminology 符号和术语	(255)
G.	本书常用英制—工程单位制—SI 制换算表	(259)
	参考文献	(260)

# 第 1 章 飞机飞行的主要参数和数据曲线

飞机飞行的运动特性和运动方程的描述,需要有飞机自身的种种参数;需要飞机的方位和姿态等表达参数;也需要有升力系数、升阻极曲线、零升力矩系数等相关知识;发动机动力和耗油等相关特性参数;另外还有标准大气和空气声速等有关参数。本章介绍和说明这方面的相关知识。

## 1.1 坐标轴系、姿态角和速度角

从力学角度看,飞机在空中的运动可以看成是飞机各个部件随飞机重心一道在空中移动和飞机各个部件绕重心转动。通过重心选用一个直角坐标系,如图 1.1 所示。坐标轴的原点  $O$  在飞机重心处,由  $O_x$ 、 $O_y$  和  $O_z$  3 个坐标轴组成一个右手直角坐标系。 $O_x$  轴(纵轴)在飞机对称平面内,沿机身轴线向前为正; $O_y$  轴(横轴)垂直于飞机对称平面向右为正;而  $O_z$  轴(竖轴)垂直于  $Oxy$  坐标平面向下为正。这个轴系称机体坐标轴系。利用这一坐标系,可以把飞机的运动分解为:①沿  $O_x$  轴方向移动;②沿  $O_y$  轴方向移动(称侧滑);③沿  $O_z$  轴方向移动;④绕  $O_x$  轴的转动(称为滚动),其转动角速度用  $\omega_x$  来表示,单位 rad/s;⑤绕  $O_y$  轴的转动(称为俯仰),其转动角速度用  $\omega_y$  来表示,单位 rad/s;⑥绕  $O_z$  轴的转动(称偏航),其转动角速度用  $\omega_z$  来表示,单位 rad/s。注意,由于坐标原点选在飞机重心处,所以重力相对于各轴的力矩都恒等于零。

作用在飞机上的力和力矩,主要是空气动力和发动机推力产生的。这些力和力矩分解为:①沿  $O_x$  轴方向的作用力  $X$ (称为切向力);②沿  $O_y$  轴方向的作用力  $Y$ (称为侧向力);③沿  $O_z$  轴方向的作用力  $Z$ (称为法向力);④绕  $O_x$  轴的转动力矩  $M_x$ (称滚转力矩);⑤绕  $O_y$  轴的转动力矩  $M_y$ (称俯仰力矩);⑥绕  $O_z$  轴的转动力矩  $M_z$ (称偏航力矩)。力的正负号由坐标轴的方向决定。绕 3 个坐标轴转动的力矩的正负号,按右手定则规定。比如,使右半翼下沉的滚动力矩为正值滚转力矩,  $M_x > 0$ ;使飞机迎角增加的俯仰力矩为正值俯仰力矩,  $M_y > 0$ ;使飞机右偏转的偏航力矩为正值偏航力矩,  $M_z > 0$  等。

飞行中,由于操纵或外部扰动,可以同时产生和改变绕几个坐标轴的力矩。但是,只有在操纵或外部扰动引起飞机飞行状态偏离初始平衡状态不太大的情况下(称小扰动情况),产生绕  $O_y$  轴的俯仰力矩  $M_y$ (又称对称面力矩),才不会引起滚转力矩  $M_x$  和偏航力矩  $M_z$ ;反过来,

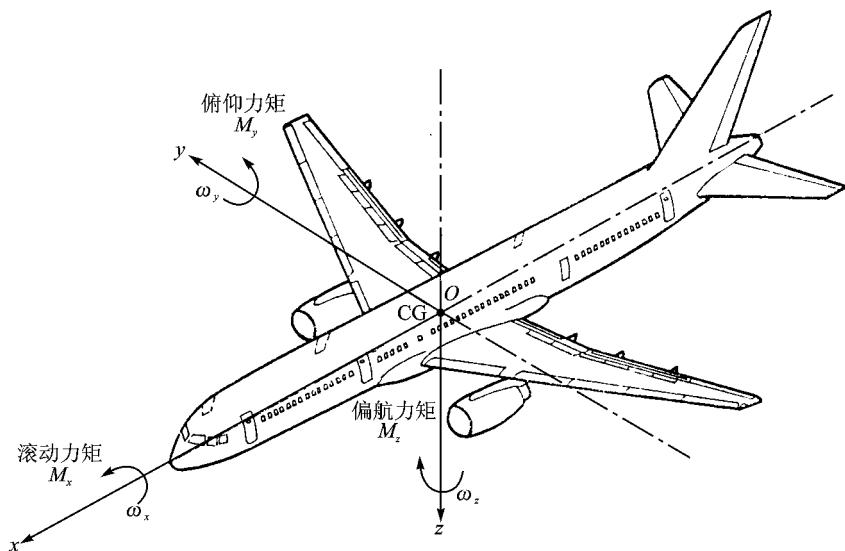


图 1.1 机体坐标轴系

产生滚转力矩和偏航力矩  $M_x$  和  $M_z$ ，也不会引起俯仰力矩  $M_y$ 。原因是飞机上存在一个几何对称平面  $Oxz$ 。正是因为飞机有对称面，因而作用在飞机上的力和力矩，以及飞机的平衡、稳定性和操纵性可以分成两组来单独分析。这样不仅对理论研究带来很大方便，而且初学者易于掌握影响飞机平衡、稳定性和操纵性的因素和变化规律。常把沿  $Ox$  轴方向和  $Oz$  轴方向的移动及绕  $Oy$  轴的转动（俯仰运动）合在一起讨论，统称飞机的纵向运动；相应的，飞机在纵向运动中切向力、法向力和俯仰力矩的平衡及其稳定性和操纵性称为飞机纵向平衡、纵向稳定性和纵向操纵性。与此对应的另一组，是把沿  $Oy$  轴方向的移动、绕  $Ox$  轴的转动（滚转运动）和绕  $Oz$  轴的转动（偏航运动）合在一起讨论，统称飞机的侧向运动；有关飞机的侧向力、滚转力矩和偏航力矩的平衡及其稳定性和操纵性，称为飞机的侧向平衡、侧向稳定性和侧向操纵性。

关于飞机飞行的姿态角，首先定义俯仰角  $\theta$ 。飞机在空中飞行时，如果飞机的几何对称面  $Oxz$  与海平面（即地球表面）的铅垂面重合的话，飞机的纵轴  $Ox$  与水平面之间的夹角  $\theta$ ，就是飞机俯仰角。 $Ox$  轴指向水平面的上方时  $\theta$  为正，即  $\theta > 0$ ；反之， $\theta < 0$ ，见图 1.2(a)。如果飞机的几何对称平面与铅垂面不重合，其间的夹角  $\phi$ ，称为飞机的倾斜角，或称为坡度（飞行员习惯称坡度）。当右半机翼下沉时， $\phi > 0$ ；反之，右半机翼上抬时， $\phi < 0$ ，见图 1.2(b)。在座舱内，飞行员可以通过观察姿态仪 ADI (Attitude Direction Indicator) 了解飞机的俯仰角  $\theta$  和坡度  $\phi$  的大小。这两个数据对了解飞行的姿态，保证飞行安全有重要意义。但是，只知道飞机的姿态角（比如角  $\theta$ ），飞行员并不完全了解飞机的飞行状态。因为在一俯仰角  $\theta$  下，飞机既可能在爬升，

也可能在平飞巡航,甚至可能以失速状态(迎角超过失速角)在作下降飞行。为此,飞行员还必须注意其他仪表,如速度表、高度表和升降速度(垂直速度)表上的指示数。最后讨论飞行的速度角。飞机的对称面和相对气流方向不一致的飞行叫侧滑。飞机带有侧滑飞行时,空气从飞机侧前方向吹来,见图 1.3。飞机重心处的飞行速度  $V$  (即相对气流) 方向与飞机对称平面  $Oxz$  之间的夹角  $\beta$ , 称为侧滑角。当飞行速度方向偏向右侧时,称为正侧滑(右侧滑),  $\beta > 0$ ; 反之,当飞行速度方向偏向左侧时,称为负侧滑(左侧滑),  $\beta < 0$ 。飞行速度  $V$  在飞机对称面  $Oxz$  上的投影与  $Ox$  轴之间的夹角  $\alpha$ , 称为迎角, 见图 1.4。当飞行速度  $V$  的投影指向  $Ox$  轴的下方

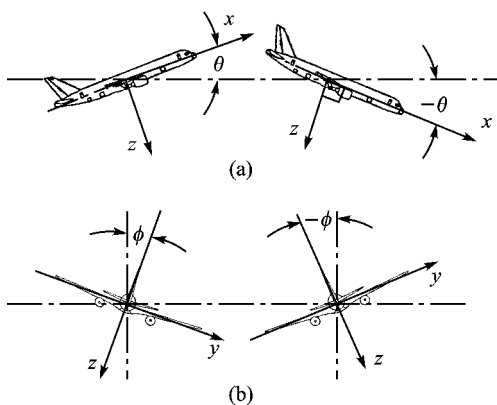


图 1.2 飞机的俯仰角和倾斜角

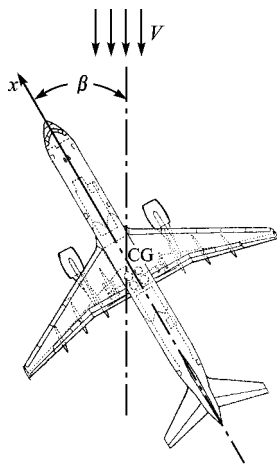


图 1.3 侧滑飞行

时,称为正迎角,  $\alpha > 0$ ; 反之,为负迎角,  $\alpha < 0$ 。这两个角度  $\alpha$  和  $\beta$ , 确定了飞行速度  $V$  和飞机机体之间的方位关系,对飞机上产生的空气动力和空气动力矩的大小和方向具有决定性意义,十分重要。在飞行中,飞行速度  $V$  与水平面(海平面)之间的夹角  $\gamma$ , 称为飞机的轨迹角。当飞行速度  $V$  指向水平面上方时,轨迹角  $\gamma > 0$ , 也称轨迹上升角(简称上升角  $\gamma_{CLB}$ ); 反之,当飞行速度  $V$  指向水平面下方时,轨迹角  $\gamma < 0$ , 也称轨迹下降角(简称下降角  $\gamma_{DES}$ , 飞机零推力下滑时,称下滑角  $\gamma_{GLD}$ )。在纵向飞行中,显然有  $\beta = \phi = 0$ 。飞行速度  $V$  与  $Ox$  轴之间的夹角为迎角  $\alpha$ , 飞行速度  $V$  与水平面的夹角为轨迹角  $\gamma$ , 而飞机  $Ox$  轴与水平面的夹角为俯仰角  $\theta$  (见图 1.4), 因而有

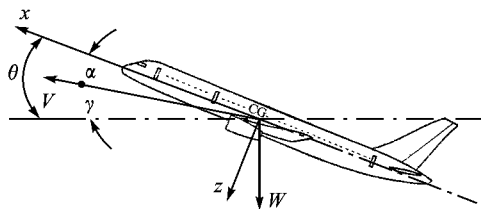


图 1.4 飞机俯仰角与轨迹角及飞行迎角

$$\theta = \gamma + \alpha \quad (1.1)$$

在飞行中,有的飞机上装有迎角指示器,飞行时迎角的大小可以从指示器读出;有的飞机没有这个仪表,则难以直接获得这个重要数据,只能从姿态仪所指示的俯仰角  $\theta$ 、升降速度表和速度表中的读数估算出  $\gamma$ ,再用式(1.1)计算得到迎角的大小。在飞行中飞机是否有侧滑角,一般从座舱中的侧滑仪上可以显示;有经验的飞行员可从身体与坐椅之间受力和移动状况作出有无侧滑的判断。

作用在飞机上的气动力和力矩取决于飞机重心相对于大气的速度  $V$ 。采用与飞机飞行速度有关的坐标轴系,称气流坐标系,图 1.5 示出了气流坐标系与机体坐标系的关系。气流坐标系  $Ox_a y_a z_a$  的原点  $O$  位于飞机重心; $Ox_a$  轴(纵轴)沿着飞行速度  $V$  方向; $Oz_a$  轴(竖轴)在飞机对称平面内与  $Ox_a$  轴垂直,并指向下方; $Oy_a$  轴(横轴)垂直于  $Ox_a z_a$ ,指向飞行员的右方。3 个坐标轴仍然构成一个右手直角坐标系。空气动力学中的升力、阻力和侧向力是气动力在气流坐标系中的分量。气流坐标系与机体坐标系之间的关系用下面两个角度来确定。空速  $V$  在飞机对称面上的投影与机体轴  $Ox$  之间的角度称为迎角  $\alpha$ ,当空速偏向  $x$  轴下方时迎角  $\alpha$  为正。空速  $V$ (即  $Ox_a$  轴)与飞机对称面(机体轴  $Oxz$ )之间角度称侧滑角  $\beta$ ,当空速偏向飞机右侧时侧滑角  $\beta$  为正。这两个角度确定了飞行空速相对于飞机机体的方位。如果气流坐标系  $Ox_a y_a z_a$  绕  $Oz_a$  转过侧滑角  $\beta$ ,就成为半机体坐标系,用  $Ox_i y_i z_i$  表示。然后再绕半机体坐标系的  $Oy_i$  轴转过迎角  $\alpha$ ,这就是机体坐标系  $Oxyz$ 。

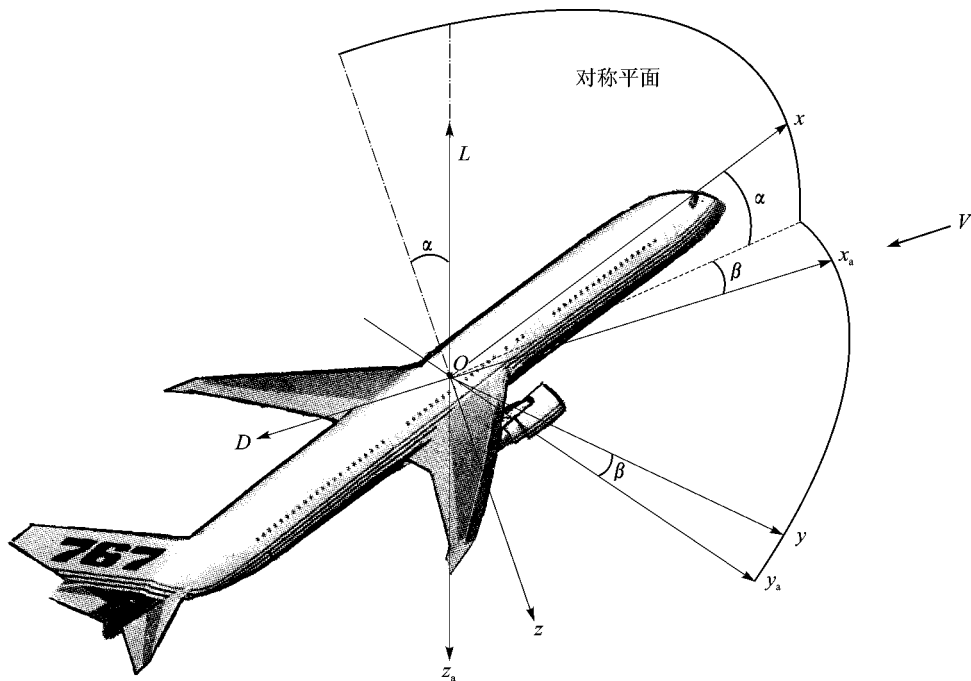


图 1.5 气流坐标系与机体坐标系的关系

## 1.2 飞机的基本气动参数

这里讨论的气动力参数主要有全机升力系数  $C_L$ 、阻力系数  $C_D$ 、零升力力矩系数  $C_{m0}$  以及与其有关的两个专用术语：平均气动力弦和焦点（也称气动力中心——aerodynamic center）。其他气动力参数，在需要用时再分别说明。

### 1.2.1 升力系数 $C_L$

全机升力主要由飞机机翼产生。正常气动布局的飞机，平尾通常产生的是负升力，在数值上占的比例很少，约为 5% 左右。飞机升力  $L$  的公式是：

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L S \quad (1.2)$$

式中： $V$  是飞行速度； $\rho$  是飞行高度上的空气密度； $S$  是机翼面积。 $C_L$  是升力系数，是量纲为 1 的量，其数值可从风洞试验或试飞中测出，也可编程用计算机算得。图 1.6 是 B-757 飞机全收气动外形（指起落架和操纵面全收状态）时升力系数随迎角  $\alpha$  的变化曲线。从图上看，在迎角不大时，增加迎角  $\alpha$ ，升力系数曲线呈线性增加。到达一定迎角，升力系数曲线由直线转变成向下弯的曲线，说明气流开始从机翼上表面分离，飞机开始抖动。飞机开始抖动的迎角叫做初始抖动迎角，用  $\alpha_B$  来表示，对应的升力系数叫做初始抖动升力系数  $C_{L,B}$ 。

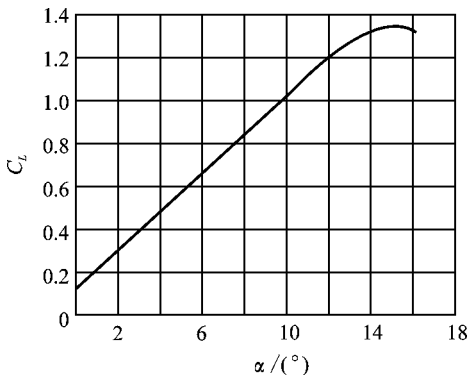


图 1.6 飞机升力系数随迎角变化曲线

B-757 飞机全收气动外形的初始抖动迎角为  $15.5^\circ$ ，初始抖动升力系数为 1.21。各种机型有各自的初始抖动的迎角和升力系数，飞行员要记住所驾驶飞机的这两个数据。升力系数最大的迎角叫做失速迎角  $\alpha_s$ ，对应的升力系数叫做失速升力系数  $C_{L,s}$ 。B-757 飞机全收气动外形飞行（前重心）失速角为  $18.5^\circ$ ，失速升力系数为 1.34。

下面分析增升装置对  $C_L - \alpha$  曲线的影响。B-757 飞机为适应高空、高巡航速度的要求，采用超临界翼型和  $25^\circ$  后掠翼，以减小高速巡航的阻力，所以全收气动外形的失速升力系数比较小，失速速度比较大。如果不配备强有力的增升装置，势必增大起飞离地速度和着陆接地速度，导致起飞和着陆距离增长，起降性能变差。为解决此问题，该机配备了高效前缘缝翼和后缘襟翼。该飞机襟翼有 6 个位置，分别表示为位置 1、5、15、20、25、30。图 1.7 为 B-757 飞机不同襟翼位置的升力系数与迎角的对应曲线。前 4 个襟翼位置是利用增大机翼面积和弯度提

高  $C_{L,B}$  和  $C_{L,S}$ ; 后 2 个襟翼位置还利用了缝翼的缝隙打开, 依靠从缝隙中吹出的高动能气流给机翼上表面附面层中的气流加速, 使分离点后移, 增大抖动和失速迎角。B-757 飞机不同襟翼位置号的初始抖动迎角、失速迎角及其相应的升力系数如表 1.1 所列。

表 1.1 B-757 飞机不同襟翼位置的相应系数

襟翼位置	0	1	5	15	20	25	30
$\alpha_B^0/(\circ)$	15.5	20.5	20.2	19	18.4	20.4	19.3
$C_{L,B}$	1.21	1.72	1.94	2.04	2.28	2.65	2.74
$\alpha_S^0/(\circ)$	18.5	23.5	23.2	22	21.4	23.4	22.2
$C_{L,S}$	1.34	1.95	2.18	2.36	2.54	2.81	2.9

注: 重心在  $9\%c_A$  (机翼平均空气动力弦长) 处。

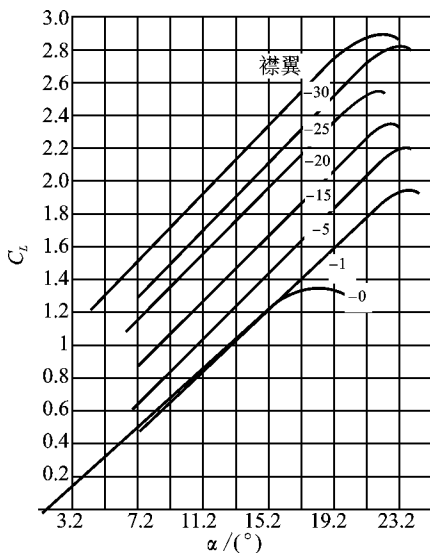


图 1.7 不同襟翼位置飞机升力系数与迎角的对应曲线

关于飞机飞行马赫数  $Ma$  的大小对升力系数的影响, 表现在两个方面: 一是升力系数与迎角曲线的斜率  $C_{L\alpha}$  (即  $\partial C_L / \partial \alpha$ ) 的变化; 二是失速升力系数的变化。图 1.8 是 B-757 飞机在不同飞行马赫数  $Ma$  时的  $C_L - \alpha$  曲线。从图上看,  $Ma$  数从 0.4 到 0.84, 随着  $Ma$  数的增加, 升力系数曲线斜率  $C_{L\alpha}$  有少量增加。如在  $Ma=0.4$  时,  $C_{L\alpha}=0.1$ ; 在  $Ma=0.84$  时,  $C_{L\alpha}=0.125$ 。失速和初始抖动的升力系数, 即  $C_{L,S}$  和  $C_{L,B}$ , 却随  $Ma$  数的增大有明显的减小。图 1.9 是 B-757 飞机初始抖动升力系数随  $Ma$  数的变化。从图上看,  $Ma$  数的增大,  $C_{L,B}$  有不同程度的减少。如  $Ma=0.4$  时,  $C_{L,B}=1.14$ ; 当  $Ma$  数增到 0.78,  $C_{L,B}$  减小到 0.8, 减小了 30%。

关于地面效应。飞机在空中飞行或在地面附近飞行, 由于周围大气边界条件不同, 其升力和诱导阻力直接受到影响。在起飞、着陆

过程中, 由于机翼的洗流与地面之间的反作用, 常规飞机升力增大的影响是地面效应, 飞行员需要注意并有效操纵。

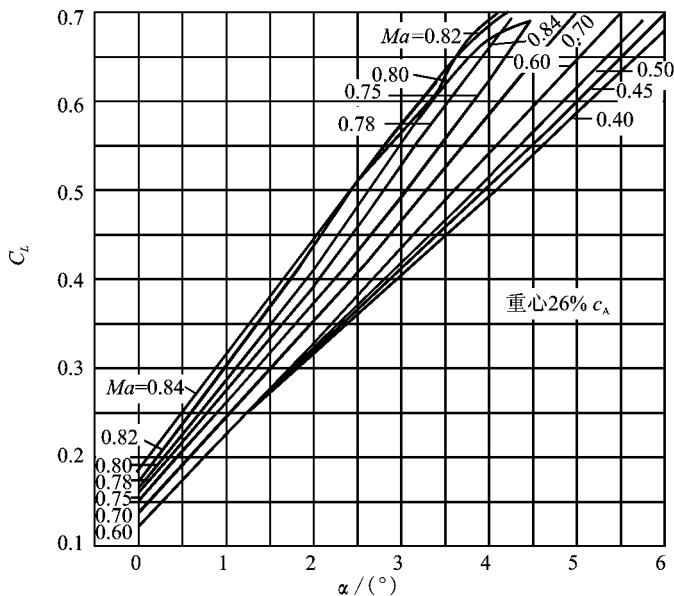


图 1.8 不同飞行马赫数时飞机升力系数与迎角的对应曲线

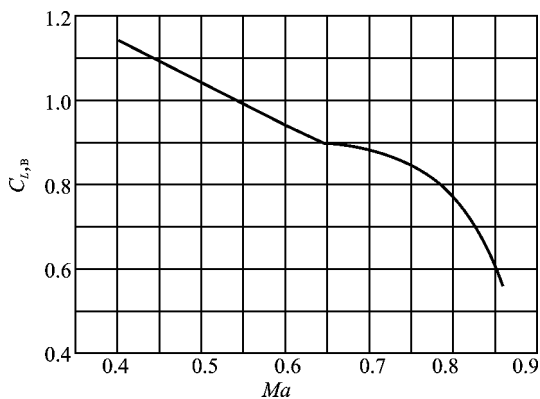


图 1.9 飞机初始抖动升力系数随飞行马赫数的变化

### 1.2.2 阻力系数 $C_D$ 、升阻比 $K$ 和极曲线

飞机全机阻力  $D$  的公式是

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \quad (1.3)$$