

航空特种设备 技术概论

主 编 钱正在 黎学远



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空特种设备技术概论

主编 钱正在 黎学远

编著 胡进 孟飞 刘建安 严浩 徐亨成

主审 吕印晓 钱坤

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书重点介绍航空特种设备技术相关的专业基础知识。全书分为三篇:第一篇为飞行控制系统,第二篇为航空陀螺仪,第三篇为飞机电气系统。第一篇介绍飞机运动基本知识、人工飞行控制系统和自动飞行控制系统基本理论及现代飞行控制技术;第二篇介绍陀螺仪的基本特性及陀螺仪的应用,包括几种典型陀螺仪及惯性导航系统;第三篇介绍飞机电源系统、输配电系统、发动机控制电气系统和飞机机电控制系统等的基本工作原理。

本书适用于航空特设专业生长干部任职培训学员使用,也可供从事航空机务维修保养的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空特种设备技术概论/钱正在,黎学远主编. —北京:
国防工业出版社,2016.3

ISBN 978-7-118-10511-7

I. ①航... II. ①钱... ②黎... III. ①航空设备
IV. ①V243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 030608 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12¼ 字数 280 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

在航空领域里,飞机特种设备包括飞行控制系统、飞机仪表系统、飞机电气系统三部分,它是保证飞机正常飞行的重要机载设备。

航空特种设备涉及的部件种类繁多,与其他机载设备交联关系复杂,尤其是航空特种设备技术复杂,涉及面广,这对从事航空特种设备的有关人员提出了很高的要求。为了使生长干部任职教育学员能在短时间内了解和掌握相关基础理论,我们在分析生长干部任职教育学员知识结构的基础上,针对特设装备的特点,编写了本书。

本书在内容设计上,贯彻了知识系统、科学新颖的原则;在内容选取上,主要结合航空特设装备的技术现状与发展趋势,同时参考相关专业基础教材,图文并茂,适用性强。

全书分三篇,共12章。其中,第一篇为飞行控制系统,包括第1~4章。第1章介绍了飞机运动的基本知识;第2章介绍了人工飞行控制系统的组成及控制原理;第3章介绍了自动飞行控制系统的组成、控制原理及典型的控制方式;第4章介绍了主动控制、综合控制与飞行管理等现代飞行控制技术。第二篇为航空陀螺仪,包括第5~9章。第5章介绍了航空陀螺仪的分类、结构、应用和发展;第6、7章分别介绍了三自由度陀螺仪和二自由度陀螺仪的基本特性,分析了引起陀螺的漂移的因素;第8章介绍了几种典型陀螺仪的结构及工作原理;第9章介绍了惯性导航的基本原理。第三篇为飞机电气系统,包括第10~14章。第10章介绍了飞机供电系统的组成、飞机供电系统的基本参数、飞机用电设备特性、飞机电气设备的工作条件及基本要求;第11~14章分别介绍了飞机电源系统、飞机输配电系统、发动机控制电气系统、飞机机电控制系统的组成及典型设备。

本书第1~4章由钱正在编写,第4~6章由黎学远编写,第7章由严浩编写,第8、9章由刘建安编写,第10、11章由孟飞编写,第12、13章由胡进编写,第14章由徐亨成编写。全书由钱正在、黎学远任主编,吕印晓、钱坤担任主审。在编写过程中,编者与主审一起多次研究讨论,对全书的内容结构与内容取舍进行反复修改,使得各个篇章的知识系统全面、针对性强,符合生长干部任职教育学员的特点。

本书主要用于生长干部任职教育学员的专业基础补差课程学习,也可作为航空特设装备专业维修保障人员的基础理论知识学习参考书。

由于编写时间和水平所限,书中差错敬请读者指正。

作 者

目 录

第一篇 飞行控制系统

第 1 章 飞机运动的基本知识	2
1.1 飞机在空间运动坐标系	2
1.1.1 地面坐标系 $Ax_d y_d z_d$	2
1.1.2 机体坐标系 $Ox_t y_t z_t$	2
1.1.3 速度坐标系 $Ox_q y_q z_q$	3
1.2 运动参数和操纵机构的参数	3
1.2.1 飞机的姿态角	3
1.2.2 速度矢量与机体轴之间的关系	4
1.2.3 飞机的航迹角	4
1.2.4 飞机的操纵机构	4
1.3 飞机的气动力	5
1.3.1 飞机的升力	5
1.3.2 飞机的阻力	6
1.4 飞机的纵向运动	7
1.4.1 定常水平直线飞行	7
1.4.2 纵向静稳定性	8
1.4.3 纵向运动的典型模态	10
1.5 飞机的侧向运动	11
1.5.1 侧向运动的静稳定性	11
1.5.2 侧向运动的典型模态	12
复习思考题	15
第 2 章 人工飞行控制系统	16
2.1 阻尼器	16
2.1.1 俯仰阻尼器	16
2.1.2 滚转阻尼器	18
2.1.3 偏航阻尼器	18
2.2 增稳系统	19

2.2.1 俯仰增稳系统	19
2.2.2 横侧增稳系统	21
2.3 控制增稳系统	22
2.4 电传操纵系统	23
2.4.1 电传操纵系统的提出	23
2.4.2 电传操纵系统的组成、工作原理和控制律	24
2.4.3 电传操纵系统的作用	25
复习思考题	26
第3章 自动飞行控制系统	27
3.1 概述	27
3.1.1 自动飞行控制系统的组成	27
3.1.2 自动飞行控制系统的基本参数	28
3.2 三轴姿态控制系统	29
3.2.1 飞机角运动的稳定与控制	29
3.2.2 飞机纵向角运动的稳定与控制	32
3.2.3 飞机侧向角运动的稳定与控制	33
3.3 自动配平系统	35
3.3.1 俯仰自动杆力配平	36
3.3.2 马赫数配平系统	36
3.4 飞行轨迹控制系统	36
3.4.1 飞机高度的稳定与控制	37
3.4.2 侧向偏离控制系统	39
3.5 飞行速度控制系统	40
3.5.1 控制速度的作用	40
3.5.2 速度控制系统的基本方案	41
3.5.3 飞行指引系统	42
复习思考题	43
第4章 现代飞行控制技术	44
4.1 主动控制技术	44
4.1.1 放宽静稳定性	45
4.1.2 直接力控制	47
4.1.3 边界控制系统	50
4.1.4 机动载荷控制	51
4.1.5 主动颤振抑制系统	52
4.2 综合控制与飞行管理	53

4.2.1 综合飞行火力控制系统·····	53
4.2.2 综合飞行推进控制系统·····	54
4.2.3 综合飞行/火力/推进控制与战术任务飞行管理·····	55
复习思考题·····	56

第二篇 航空陀螺仪

第5章 陀螺仪概述·····	58
5.1 陀螺仪的分类·····	58
5.2 陀螺仪的结构·····	59
5.3 陀螺仪的应用·····	60
5.4 陀螺仪的发展·····	60
复习思考题·····	62
第6章 三自由度陀螺·····	63
6.1 三自由度陀螺的特性·····	63
6.1.1 稳定性·····	63
6.1.2 进动性·····	64
6.1.3 陀螺力矩·····	66
6.2 稳定性分析·····	68
6.2.1 定轴性的解释·····	68
6.2.2 章动的解释·····	69
6.3 进动性分析·····	70
6.3.1 动量矩定理·····	70
6.3.2 莱查定理·····	70
6.3.3 进动性的解释·····	71
6.4 三自由度陀螺的漂移分析·····	72
6.4.1 陀螺漂移概念·····	72
6.4.2 陀螺漂移的各种因素·····	73
6.5 表观运动·····	76
6.5.1 陀螺在北极的表观运动·····	76
6.5.2 陀螺在赤道处的表观运动·····	77
6.5.3 陀螺在任意纬度的表观运动·····	77
复习思考题·····	78
第7章 二自由度陀螺·····	79
7.1 二自由度陀螺的进动·····	79

7.2	二自由度陀螺在内环轴上有外力矩时的运动	80
7.2.1	基座绕 x 轴方向没有转动	80
7.2.2	基座绕 x 轴方向转动	80
7.3	二自由度陀螺的漂移分析	81
	复习思考题	82
第8章	典型陀螺仪	83
8.1	液浮陀螺仪	83
8.1.1	单自由度液浮积分陀螺仪	83
8.1.2	两自由度液浮陀螺仪	85
8.1.3	动压气浮支承	86
8.1.4	磁力悬浮支承	87
8.1.5	液体悬浮支承	89
8.2	挠性陀螺仪	89
8.2.1	挠性支承原理	89
8.2.2	平衡环的振荡(扭摆)运动	91
8.2.3	动力调谐过程	92
8.2.4	挠性陀螺仪的结构特点	93
8.2.5	挠性陀螺仪的特点	97
8.3	静电陀螺仪	98
8.3.1	静电陀螺仪的组成及基本原理	98
8.3.2	静电陀螺仪的特点	102
8.4	激光陀螺仪	103
8.4.1	激光陀螺	103
8.4.2	激光和激光器	103
8.5	光纤陀螺仪	109
8.5.1	光纤陀螺仪的发展	109
8.5.2	光纤陀螺仪的工作原理	111
8.5.3	光纤陀螺仪的分类	113
	复习思考题	116
第9章	惯性导航系统	117
9.1	惯性导航系统基本原理	117
9.1.1	惯性导航基本原理	117
9.1.2	陀螺稳定平台工作原理	119
9.1.3	惯性导航特点	120

9.2 三轴惯导平台的组成	121
9.2.1 基本组成	121
9.2.2 方位坐标分解器	122
9.2.3 正割分解器	125
9.2.4 方位锁定回路	127
9.2.5 四环三轴惯性平台	128
9.3 惯导系统的初始对准	130
9.3.1 初始对准的目的及要求	130
9.3.2 平台锁定	132
9.3.3 水平对准原理	133
9.3.4 方位对准原理	134
复习思考题	137

第三篇 飞机电气系统

第10章 电气系统概述	140
10.1 飞机供电系统的组成	140
10.2 飞机供电系统的基本参数	141
10.2.1 电压	141
10.2.2 频率	141
10.2.3 相数	142
10.3 飞机用电设备特性	142
10.3.1 供电频率特性	143
10.3.2 起动特性	143
10.3.3 输入电压特性	143
10.3.4 输入伏安特性	143
10.3.5 对供电系统的影响	144
10.4 飞机电气设备的工作条件及基本要求	144
复习思考题	145
第11章 飞机电源系统及设备	146
11.1 飞机电源系统	146
11.1.1 直流电源系统	146
11.1.2 交流电源系统	147
11.2 飞机电源典型设备及原理	148

11.2.1	航空发电机	148
11.2.2	航空蓄电池	150
11.2.3	机载二次电源	151
复习思考题		152
第12章 飞机输配电系统及设备		153
12.1	飞机输配电系统	153
12.1.1	配电系统布局	153
12.1.2	配电系统的控制与保护	154
12.2	输配电系统典型设备及原理	158
12.2.1	导线及电连接器	158
12.2.2	电路控制元件	159
12.2.3	电路保护元件	163
复习思考题		165
第13章 发动机控制电气系统及设备		166
13.1	发动机电气控制	166
13.1.1	发动机起动控制	166
13.1.2	发动机状态控制	167
13.2	发动机控制典型设备及原理	168
13.2.1	起动电点火装置	168
13.2.2	起动程序控制装置	171
13.2.3	状态控制装置	176
复习思考题		178
第14章 飞机机电控制电气设备		179
14.1	电磁阀及电动活门	179
14.1.1	电磁阀	179
14.1.2	电动活门	180
14.2	电动机构及电动油泵	181
14.2.1	电动机构	181
14.2.2	电动油泵	183
14.3	机、内外照明及信号灯具	183
14.3.1	机内照明及信号灯具	184
14.3.2	机外照明及信号灯具	186
14.4	火警传感器	187

14.4.1	离子式火警传感器	187
14.4.2	双金属片式火警传感器	188
	复习思考题	188
	参考文献	189

飞行控制系统

第一篇 飞行控制系统



Figure 1.1

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

Figure 1.1: A 3D coordinate system with axes x, y, and z.

第 1 章 飞机运动基本知识

飞行控制系统的控制对象是飞机。如何描述飞机的运动，飞机在运动过程中受到哪些力和力矩的作用，飞机的运动有何规律，本章将回答这些问题。

1.1 飞机在空间运动的坐标系

作用在飞机上的空气动力和力矩与选择的参考坐标系有密切的关系，而飞机运动参数和操纵机构参数也是相对于坐标系而言。并且，若参考坐标系选择适当，可使飞机的运动方程形式简单，也便于分析。下面介绍几种常见的右手直角坐标系，引出飞机姿态角、气流角等一些重要飞行参数，给出操纵机构的参数的定义。顺便指出，不同国家对坐标系的规定互不相同，在查阅资料时应加以注意。

1.1.1 地面坐标系 $Ax_d y_d z_d$

地面坐标系简称为地轴系，如图 1-1 所示。原点 A 取在地面上某一点，轴 Ax_d 和 Az_d 位于地平面内相互垂直，其方向视具体情况而定，轴 Ay_d 垂直于 $Ax_d z_d$ 平面，指向上方。

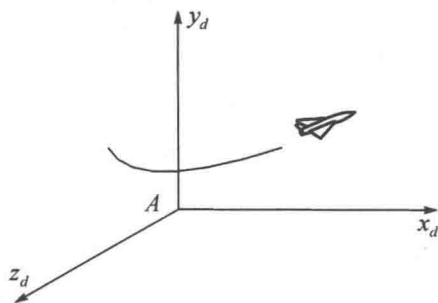


图 1-1 地面坐标系

1.1.2 机体坐标系 $Ox_t y_t z_t$

机体坐标系简称机体轴系，如图 1-2 所示。这个轴系是固定在飞机上的。原点 O 位于飞机质心；纵轴 Ox_t 沿机身轴线或机翼平均气动弦线而指向前方；竖轴 Oy_t 在飞机对称面内并垂直于轴 Ox_t ，指向上方；横轴 Oz_t 垂直于飞机对称面，指向右方。

利用机体坐标系相对于地面坐标系的关系可以方便地描述飞机的姿态运动。

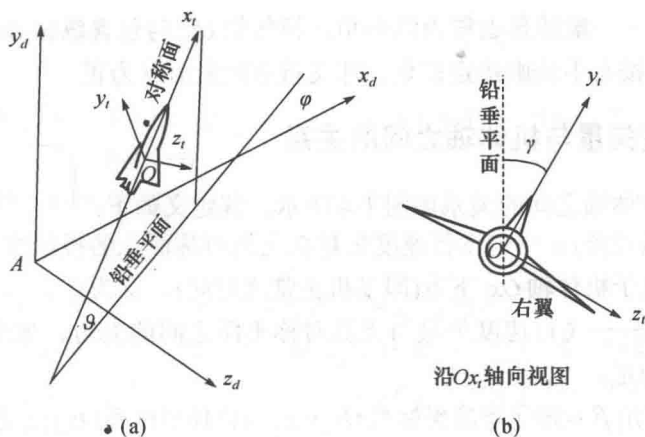


图 1-2 飞机姿态角的规定

(a) 地面坐标系; (b) 机体坐标系。

1.1.3 速度坐标系 $Ox_qy_qz_q$

速度坐标系简称速度轴系, 如图 1-3 所示。原点 O 也在飞机的质心处; 轴 Ox_q 沿飞行速度矢量方向(一般情况下, 飞行速度矢量不一定在飞机的对称面内); 轴 Oy_q 在飞机对称面内, 垂直于轴 Ox_q , 指向飞机上方; Oz_q 轴垂直于 Ox_qy_q 平面, 指向右方。

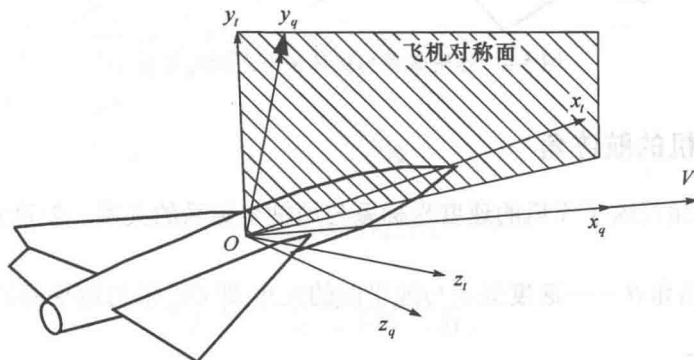


图 1-3 速度坐标系

1.2 运动参数和操纵机构的参数

1.2.1 飞机的姿态角

三个姿态角表示机体轴系与地轴系之间的相对关系, 如图 1-2 所示, 其定义如下:

(1) 俯仰角 ϑ ——飞机纵轴 Ox_t 与水平面 Ax_dz_d 之间的夹角, 当轴 Ox_t 向上方倾斜时此角为正, 反之则为负。

(2) 偏航角 ϕ ——飞机纵轴 Ox_t 在水平面 Ax_dz_d 上的投影与地轴 Ax_d 之间的夹角, 绕轴 Ay_d 按右手法则决定正负, 即机头左偏航时的偏航角 ϕ 为正, 右偏航角为负。

(3) 滚转角 γ ——滚转角也称为倾斜角。机体轴 Oy_l 与包含纵轴 Ox_l 的铅垂平面之间的夹角，绕轴 Ox_l 按右手法则决定正负，即飞机右倾斜时 γ 为正。

1.2.2 速度矢量与机体轴之间的关系

速度矢量与机体轴之间的关系如图 1-4 所示，其定义如下：

(1) 迎角(又叫攻角) α ——飞行速度矢量在飞机对称面上的投影线与机体轴 Ox_l 之间的夹角。投影线位于机体轴 Ox_l 下方(即飞机正常飞行时)， α 为正。

(2) 侧滑角 β ——飞行速度矢量与飞机对称平面之间的夹角。如速度矢量偏向对称平面右方，则 β 为正。

迎角 α 和侧滑角 β 反映了速度坐标系 $Ox_q y_q z_q$ 与机体坐标系 $Ox_l y_l z_l$ 之间的相互关系。

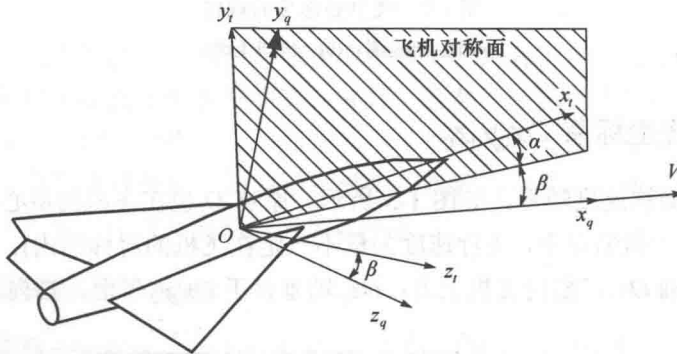


图 1-4 速度矢量与机体轴系之间的关系

1.2.3 飞机的航迹角

飞机的航迹角反映了飞机的速度坐标系与地轴坐标系的关系。航迹角包括以下三个变量：

(1) 航迹倾斜角 θ ——速度矢量与地平面的夹角(即 Ox_q 轴与地平面的夹角)，以飞机爬升时的 θ 为正。

(2) 航迹偏转角 φ_s ——速度矢量在地平面的投影与地轴 Ax_d 之间的夹角，以左偏为正。

(3) 航迹滚转角 γ_s —— Oy_q 轴与通过速度矢量并与地平面垂直的平面之间的夹角，以 Oy_q 在该平面之右为正。

1.2.4 飞机的操纵机构

对于传统的飞机，飞机的运动一般是利用升降舵、方向舵、副翼及油门杆进行控制的。升降舵的偏转通过前后推拉驾驶杆来操纵，副翼的偏转通过左右压驾驶杆来操纵，方向舵偏转通过脚蹬操纵。这些操纵机构的偏转极性与其所产生的力矩极性有密切的关系，而操纵力矩的极性对分析飞机运动又很重要，因此，通常根据“操纵面的正偏转产生负操纵力矩”这一原则来规定操纵机构的偏转极性，如图 1-5 所示。

(1) 驾驶杆前推(飞机低头)为正, 这时杆力 F_z 、杆位移 W_z 均为正。驾驶杆前推使升降舵(或全动平尾)向下偏转, 升降舵偏转角 $\delta_z > 0$, 产生俯仰力矩 $M_z < 0$ (即低头力矩)。

(2) 驾驶杆向左偏转, $F_x > 0$, $W_x > 0$; 右副翼向下偏转, 同时左副翼向上偏转, 副翼偏转角 $\delta_x > 0$, 产生滚转力矩 $M_x < 0$ 。

(3) 右脚蹬前移, 同时左脚蹬后移, $F_y > 0$, $W_y > 0$; 方向舵向右偏转, 方向舵偏转角 $\delta_y > 0$; 产生偏航力矩 $M_y < 0$ 。

(4) 油门杆前推时油门加大, 杆位移为正, 反之为负。

近代飞机采用“主动控制”新技术, 除上述舵面外, 还增加一些新的操纵面。这些操纵面的极性应不违背上述原则, 即操纵面的正偏转产生负的操纵力矩。

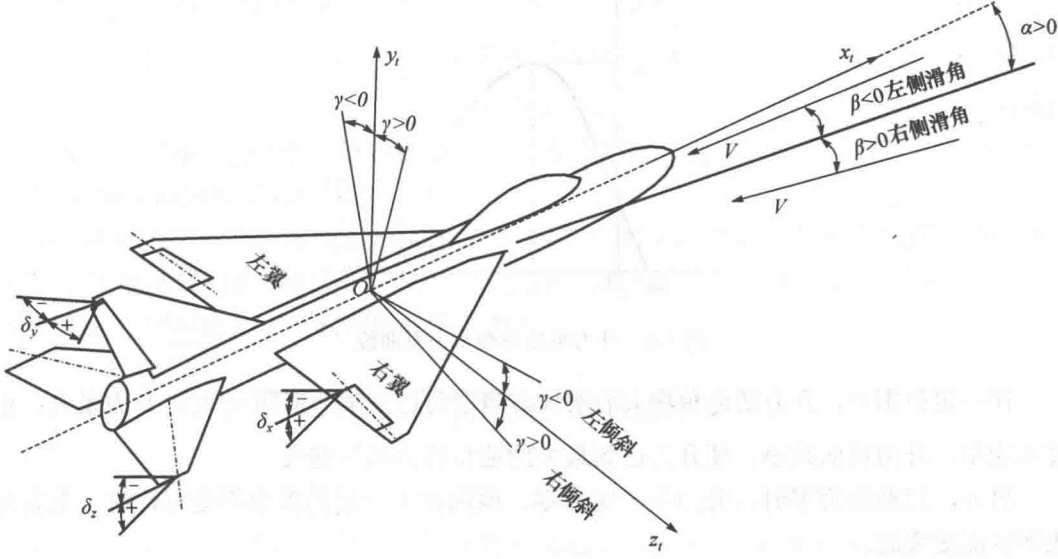


图 1-5 飞机操纵机构的偏转极性

1.3 飞机的气动力

1.3.1 飞机的升力

飞机的升力是指飞机相对于空气运动时, 空气对飞机产生的作用力(称为空气动力, 简称为气动力)在飞机速度坐标系 Oy_q 轴上的分量。

飞机的升力大小与飞机的气动外形有关。飞机的升力主要由机翼产生, 此外, 机身、平尾等也产生升力。

飞机升力的大小与飞机的运动参数、大气参数等有关。这些参数有飞机迎角 α 、马赫数 M 、空速 V 、大气密度 ρ 等。

飞机的升力还与升降舵偏角 δ_z 有关。

在飞机升降舵偏角不变的情况下, 在近似分析飞机的升力时, 可以认为飞机的升力与飞机机翼的面积、动压成正比。飞机的升力可以用公式表示为

$$Y = C_y q S \quad (1-1)$$

式中 Y ——飞机升力；

C_y ——升力系数；

$q = \frac{1}{2} \rho V^2$ ——飞机动压；

S ——机翼面积。

升力系数 C_y 不仅与 α 、 δ_z 有关，而且与马赫数 M 有关，升力系数是 α 、 δ_z 和 M 的函数。如果 δ_z 和 M 不变，只考虑 α 变化， C_y 随 α 的变化规律可用图 1-6 的曲线表示。

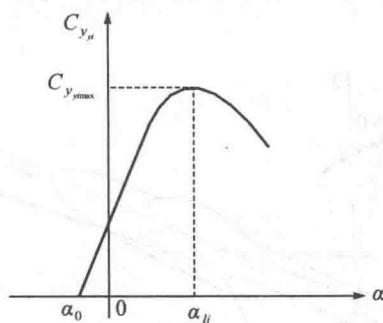


图 1-6 升力系数与迎角关系曲线

在一定范围内，升力随迎角增大而增大。当迎角达到某一值即 α_{ly} 时，升力最大；超过该迎角，升力反而减小。使升力达到最大的迎角称为临界迎角。

另外，当迎角为零时，升力不一定为零；原因在于一般的翼型不是对称的，上表面比下表面更突起。

在上述关于升力的介绍中，尚未涉及飞机姿态变化引起的升力，这部分升力为动态升力。它与飞机的角速度有关，作为力来看，数值不大，因而在此不作介绍。

1.3.2 飞机的阻力

阻力是指作用在飞机上的气动力合力在气流方向(速度坐标系 Ox_q 轴负方向)上的投影。阻力可分为两部分：一部分与升力无关，称为零升阻力；另一部分与升力有关，是由于升力而诱导产生的阻力，称为升致阻力。

1. 零升阻力

零升阻力包括空气与飞机机体之间的摩擦阻力、飞机底部回流区压差阻力和飞机超声速飞行时产生的激波阻力。这些阻力形成的根本原因在于气流与飞机之间存在相对运动。

2. 升致阻力

当亚声速气流流经具有一定迎角的机翼时，机翼上表面出现负压区，下表面出现高压区，若暂不考虑机翼前缘的流动情况，则可把所有的压力总和合成一个垂直于翼弦的法向力 Y_1 ，如图 1-7 所示。