



超轻型和轻型运动飞机 设计与制造入门

CHAOQINGXING HE QINGXING YUNDONG FEIJI
SHEJI YU ZHIZAO RUMEN

高国钧 编著



航空工业出版社



超轻型和轻型运动飞机设计与制造入门

高国钧 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书详细介绍了超轻型飞机、轻型运动飞机及小型通用飞机等初级类航空飞行器设计和制造的相关知识和方法。提供了很多设计实例和结构范例参考,资料丰富,具有较强的指导性。

本书适合没有受过专业航空教育的航空爱好者和家庭自制飞机爱好者参考使用,也可供相关专业的学生和教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

超轻型和轻型运动飞机设计与制造入门/高国钧编
著. --北京:航空工业出版社,2015.9
ISBN 978-7-5165-0895-4

I. ①超… II. ①高… III. ①超轻型飞机—运动飞机—设计②轻型飞机—运动飞机—设计 IV. ①V277

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第236703号

超轻型和轻型运动飞机设计与制造入门

Chaoqingxing He Qingxing Yundong Feiji Sheji Yu Zhizao Rumen

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年9月第1版

2015年9月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:16

字数:382千字

印数:1—2000

定价:48.00元

目 录

第 1 章 通用航空与超轻型飞机	1
第 2 章 超轻型飞机的设计制造	6
2.1 飞机的设计制造过程	6
2.1.1 概念设计	6
2.1.2 初步设计	6
2.1.3 详细设计	7
2.1.4 生产定型阶段	7
2.2 确保安全和质量	7
2.2.1 设计图纸阶段	7
2.2.2 制造阶段	7
2.2.3 飞行保养阶段	8
第 3 章 空气动力学的基础知识	9
3.1 升力	9
3.2 阻力	13
3.2.1 摩擦阻力	13
3.2.2 压差阻力	14
3.2.3 诱导阻力	15
3.2.4 干扰阻力	16
3.3 低阻翼型和低功率层流飞机设计	17
3.4 飞机平衡与控制	25
3.4.1 飞行的平衡与稳定性	25
3.4.2 平均气动弦 (MAC) 与中性点	28
3.5 超轻型和轻型运动飞机性能计算	33
3.5.1 性能计算的基本要求	33
3.5.2 性能计算的步骤	33
3.5.3 飞机零升阻力的估算	34
3.5.4 飞机诱导阻力的计算	37
3.5.5 飞机的可用功率	37
3.6 设计按美国 FAR 103 部要求的超轻型飞机	40

第4章 超轻型飞机的设计	42
4.1 外形设计	42
4.1.1 机翼	42
4.1.2 尾翼	46
4.1.3 机身	49
4.1.4 起落架	51
4.2 结构设计	53
4.2.1 木结构	53
4.2.2 木材、泡沫塑料的混合结构	58
4.2.3 金属构架式	60
4.2.4 复合材料结构	65
4.2.5 结构的应力集中和开口区加强	76
4.2.6 结构的受压强度	77
第5章 超轻型飞机的起落架	80
第6章 超轻型飞机的强度	87
6.1 飞机的外载荷	87
6.2 使用载荷、设计载荷和安全系数	88
6.3 飞机各部件的受力分析	89
6.3.1 耳片连接	89
6.3.2 悬臂梁	90
6.3.3 机翼和尾翼的受力情况	91
6.3.4 机身受力情况	93
6.3.5 机翼和机身载荷的传递	93
6.4 超轻型飞机的强度计算	94
6.5 复合材料起落架的强度设计计算	104
第7章 超轻型飞机的螺旋桨	106
7.1 螺旋桨的工作原理	106
7.2 螺旋桨设计	107
7.2.1 定螺距螺旋桨	107
7.2.2 变螺距螺旋桨	109
7.3 飞行中可变距的螺旋桨	110
7.4 螺旋桨的外形、直径和桨叶数	111
7.5 超轻型飞机螺旋桨的选用和制造	112

第 8 章 超轻型飞机的重量和重心位置的计算	115
8.1 飞机的重量控制与飞机性能的关系	115
8.2 飞机各部件重量配置与重心位置计算	115
8.3 飞机称重和重心位置计算	117
第 9 章 超轻型飞机的静力试验	120
9.1 静力强度试验的加载载荷	120
9.2 静力强度试验的加载方法	120
第 10 章 超轻型飞机的操纵系统	126
10.1 超轻型飞机操纵系统的基本要求	126
10.2 超轻型飞机操纵系统的设计参数	127
10.3 超轻型飞机操纵系统的结构	127
10.3.1 软轴操纵系统	130
10.3.2 硬轴操纵系统	132
10.3.3 V 形尾翼的操纵系统	137
10.4 操纵系统的差动操纵	138
10.5 操纵系统的铰链力矩	140
第 11 章 电动力超轻型飞机	142
第 12 章 超轻型飞机其他有关参考资料	147
12.1 超轻型飞机上螺栓选用和安装	147
12.2 板材的最小弯曲半径	147
12.3 金属管材弯曲方法	148
12.4 超轻型飞机座舱风挡	148
12.5 超轻型飞机的检查口盖	151
12.6 超轻型飞机的液压手操纵系统	153
12.7 超轻型飞机的仪表板和空速管	154
12.8 超轻型飞机的油箱	156
12.9 超轻型飞机的应急回收伞	159
12.10 几种起落架减振支柱的结构	161
第 13 章 水上轻型飞机设计	163
13.1 水上飞机用术语	164
13.2 水上飞机的船体设计	166

13.3	机翼设计·····	173
13.4	尾翼设计·····	174
13.5	起落架设计·····	174
13.6	动力装置设计·····	176
13.7	水上飞机的横向稳定性要求·····	177
附录 ·····		179
附录 1	标准大气表·····	179
附录 2	超轻型飞机常用材料性能·····	180
附录 3	超轻型飞机常用紧固件的标准和性能·····	184
附录 4	常用力学计算公式·····	195
附录 5	超轻型飞机用复合材料的有关参数资料·····	200
附录 6	轻型运动飞机性能和设计规范·····	203
附录 7	超轻型和轻型运动飞机适航证的申请和颁发·····	243
参考文献 ·····		250

第 1 章 通用航空与超轻型飞机

通用航空是指除军事、警务、海关等飞行和公共航空运输飞行以外的航空活动。通常通用航空是指在距地面 3000m 以下的低空空域飞行。

我国的通用飞机产业起步于 20 世纪 50 年代，由于飞机采购、适航许可证、空域空中管制等各方面的限制，发展缓慢。目前，美国的通用飞机数量约 23 万架，其中 90% 以交通运输为主要功能，通用航空飞行员人数达 50 万，通用航空机场 1.68 万个，占全国各类机场 90%。通用航空年飞行 2800 万余小时，占民用航空总飞行时间的 80%。每年提供超过 126 万个工作岗位，年产值超 1500 亿美元。每年在美国威斯康辛州奥什科什（Oshkosh）都要举行全世界最大的通用航空展（见图 1-1）。



图 1-1 通用航空展

目前，我国通用飞机保有量约 1000 架，直接从业人员不超过 1 万人，年产值约 20 亿元人民币。为了促进通用航空事业发展，国务院、中央军委于 2010 年年底颁发了《深化低空空域管理改革的意见》，指出低空空域是通用航空活动的主要区域，深化低空空域管理改革，是大力发展通用航空、繁荣我国航空业的重要举措，是促进我国经济社会发展的迫切需要。适时、有序地推进和深化低空空域管理改革，有利于充分开发利用低空空域资源，促进通用航空事业、航空制造业和综合交通运输体系的发展，具有十分重要的意义。确定了阶段实现低空空域管理改革的方针：2011 年前试点，2011—2015 年为推广阶段，2016—2020 年为深化阶段，达到法规标准科学完善、管理高效、保障体系完备。

预计到 2020 年，我国私人载人飞机拥有量将达到 2000 架以上，低空开放将有力刺激通用航空及其产业链的发展，带来我国航空产业发展的春天，我国未来将成为全球私

人飞机增幅最大的国家。未来 5 ~ 10 年中国需要通用飞机达 5000 架，主要用于通勤、飞行培训、航空休闲、体育运动和个人娱乐等。通用航空将成为扩大内需与就业，促进国民经济发展的产业。

通用航空领域飞机的类型和使用限制主要有以下几种。

(1) 单发飞机 (见图 1-2)

单发飞机的最大起飞重量不超过 2t，飞行员要求有私人驾驶执照，需定期进行健康检查，飞机有完整的飞行记录，具有指定的机场，并由特许的单位设计、生产和维护。如“钻石”DA40、赛斯纳 172、派珀 3C 等。这类飞机的飞行速度可达 300km/h，平飞最大功率在 20kW 左右。

(2) 滑翔机 (见图 1-3)

驾驶滑翔机同样要求有私人驾驶执照，飞行员需定期进行健康检查和有完整的飞行记录。滑翔机的动力一般主要用于起飞爬升和非常规降落，其余时间一般是无动力滑翔飞行，一般飞行时间不超过 1h，飞行速度可达 280km/h。



图 1-2 单发飞机



图 1-3 动力滑翔机

(3) 轻型运动飞机 (LSA, 见图 1-4)

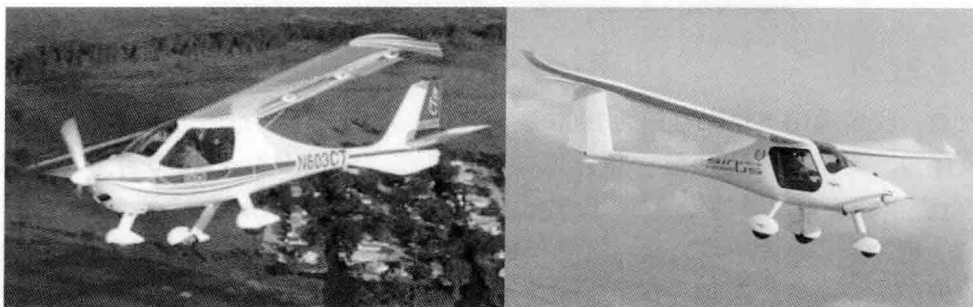


图 1-4 轻型运动飞机 (左为赛斯纳 162, 右为 Sinus912)

驾驶轻型运动飞机需要运动飞行证书 (比一般私人驾驶执照易得)，飞机无需进行定期人员健康和飞机安全检查，但只允许在指定空域内飞行。轻型运动飞机最大限于双座，最大起飞重量 600kg，不允许装收放式起落架和变距桨，平飞功率 10 ~ 15kW，全功率平飞速度限于 222km/h 以下，主要用于航空运动和休闲飞行，如赛斯纳 162。

为了实现低功率飞行,这类轻型运动型飞机多数以滑翔机为基础进行改进设计,采用新型复合材料用模具生产,保持高质量的流线外形和外表质量,飞机在巡航时的升阻比可达20以上,因此可以在较小功率下(平飞巡航时仅需7~8kW)载双人飞行。这种飞机一般配备各种基本飞行仪表,有些还带有应急火箭发射式回收伞,双座飞机配有并联的操纵系统。

轻型运动飞机除了航空运动和休闲飞行以外,主要用于飞行学校、航空协会、航空俱乐部和飞行员训练。

典型的轻型运动飞机如Pipistrel公司的Sinus912、Taurus503等,这类飞机普遍参照现代高级滑翔机结构,左右机翼通过翼根短梁对接自身平衡弯距,通过左右机翼根肋前后销钉与机身对接传递剪力,机翼的襟、副翼和空气刹车板由快卸接头与机身连接传递操纵。整个飞机仅需两人即可在15~20min内完成装配或分解工作。

典型轻型运动飞机主要数据见表1-1。

表1-1 典型轻型运动飞机参数

空机重量/kg	300
最大起飞重量/kg	472.5~600
动力/hp ^①	50~80
机长/m	6~7
翼展/m	12~17(机翼采用相对厚度14%~17%的层流翼型)
机高/m	1.5~2
机翼面积/m ²	11~15
展弦比	11~17
带襟翼最低速度/(km/h)	65
最大平飞速度/(km/h)	180~220
巡航速度/(km/h)	100~120
爬升率/(m/s)	4~6
起降距离/m	<100
留空时间/h	4~5
最大允许飞行过载	2~4
最大静力试验过载	7.2

(4) 次轻型飞机(VLA,见图1-5)

次轻型飞机最大起飞重量可达750kg,但不能用于商业载客运输。驾驶这类飞机需要持有私人飞行驾照,飞行员需定期进行健康检查和有完整的飞行记录,限于双座,由核准公司设计、生产、售后服务。用作经济的旅行飞机或飞行员培训,外形大多类似气

^① 1hp=745.7W。

动效率高的滑翔机，巡航速度在 200 ~ 250km/h，飞行时间几个小时，平飞功率在 15 ~ 20kW。

(5) 超轻型飞机 (ULA, 见图 1-6)

超轻型飞机最大起飞重量为双座 450 ~ 472kg, 单座 300 ~ 322.5kg, 要求带有应急救生系统。超轻型飞机的认证和维修较方便, 不需要经过特别审核批准就能设计、生产和维修。超轻型飞机的外观和普通飞机有很大不同, 机翼有较大展弦比, 只需要较小功率即可飞行, 速度小于 250km/h, 平飞功率在 10 ~ 12kW。超轻型飞机主要作航空运动和休闲飞行。



图 1-5 次轻型飞机

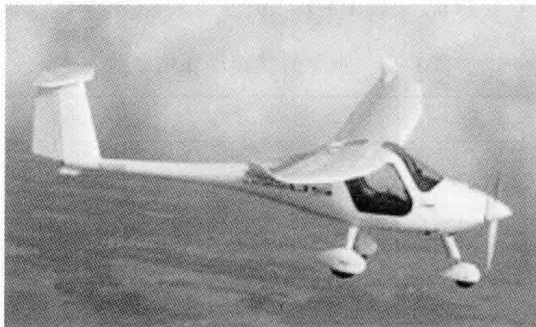


图 1-6 超轻型飞机

(6) FAR 103 部中规定的超轻型飞机 (仅在美国有此标准, 见图 1-7)



图 1-7 超轻型飞机

根据美国联邦航空条例 (FAR) 103 部设计的超轻型飞机, 这类飞机只限单座, 失速速度不大于 48km/h, 最大全动力平飞速度不超过 100km/h, 飞机空载时重量不超过 115kg。为了控制空机重量在 115kg 以下, 这种飞机多数采用铝管构架加柔性蒙皮的结构。

这类超轻型飞机不需要有关航空部门认证, 不需要专用驾驶证, 飞行也不需要认证和注册记录。对飞机的设计、生产和维修厂商也没有要求。由于要求空重很低, 故设计

非常简单。适合私人家庭、航空爱好者自己设计和制造。这类飞机主要用于自身休闲和航空体育活动。FAR 103 部中规定的超轻型飞机多数采用套材形式销售,如德国的 Sherpa、美国的 EZ-1 和 Spyder、法国的 Siocco。

FAR 103 部要求超轻型飞机的主要技术数据见表 1-2。

表 1-2 符合 FAR 103 部要求的超轻型飞机参数

机长/m	5~6
翼展/m	10~15
机高/m	2.5~3
机翼面积/m ²	10~15
螺旋桨直径/m	1.4~1.7
发动机动力/hp	25~45
最大起飞速度/(km/h)	<100
巡航速度/(km/h)	80
失速速度/(km/h)	<48
起降距离/m	40~60
最大巡航时间/h	1.5~2
海平面爬升率/(m/s)	1.5~2.5
实用升限/m	2000~3000

本书主要针对没有受过专业航空教育的航空爱好者和家庭自制飞机爱好者,提供超轻型飞机这类初级航空器的具体设计、制造所涉及的知识 and 资料。

初级类航空器具有设计制造相对简单、价格低廉、使用维护简便等特点。随着我国经济和航空制造业的发展,这类航空器在飞行训练、航空运动、农业作业、航空勘察、空中摄影、宣传广告等领域均有广泛的供需市场。

第2章 超轻型飞机的设计制造

2.1 飞机的设计制造过程

超轻型飞机的设计制造过程与一般飞机相似，概括起来，主要有概念设计、初步设计和详细设计三个阶段。

2.1.1 概念设计

根据飞机的使用技术要求、经费、周期等，对气动外形布局、性能、重量、动力、操纵、机体主要结构形式等进行初步和方向性的探讨，拟订新飞机的可能技术方案。概念设计中，设计者的经验和判断起重要作用，往往借鉴现有飞机，采用经验或半经验的分析方法。

2.1.2 初步设计

初步设计包括方案设计和打样设计两部分内容。

(1) 方案设计

首先根据设计要求在概念设计的基础上，进行多种气动外形布局方案的对比和研究，以及机翼、机身、尾翼的形状、设计参数的确定。同时进行飞机的内部布置，如结构传力路线设计、材料工艺选用、各个系统原理设计、飞机重心估计、飞机性能计算和飞行品质分析等，检查设计方案能否满足设计的要求。

(2) 打样设计

打样设计阶段需要进行以下工作：

a. 气动分析和试验，进行全机载荷计算、性能和飞行剖面计算、操纵性和稳定性分析和气动弹性分析等，制造不同的模型，进行飞行试验。

b. 结构打样设计。对主要受力部件进行初步设计和分析，选择合适的结构形式、新材料、新工艺和重量估计。

c. 系统打样设计。对所有系统和部件进行原理设计，确定主要附件和系统的功能及功率。对管道、电缆等进行初步设计和通路协调。

d. 全机布置协调。一般是在全尺寸图样上进行，画出全套协调图。现在可在计算机上画图，对全机布置协调、运动机构及间隙检查等。最终确定全机图样。

e. 样机审查。在打样设计后期要制作全尺寸样机，用户在全尺寸飞机和真实座舱

环境中检查是否符合使用要求。在样机审查通过后，冻结设计状态，开始详细设计。

2.1.3 详细设计

进行结构和系统的详细设计和分析，包括所有零部件的设计，有零件图、装配图、总图的绘制。进行详细的重量估算和强度校核，以及最后的飞机性能计算。

在此基础上，制作样机，进行必要的飞机部件和整机静力强度试验；最终制造出供飞行试验用原型机，制订试飞大纲。在调整试飞中，要排除新飞机在设计制造中可能存在的缺陷和故障，检查新飞机能否达到原设计性能要求。根据试飞所得技术资料对飞机的设计或工艺进行必要的修改，由试飞鉴定部门和试飞员给出正式试飞报告，经国家有关航空适航性权威机构批准后，方可进行原型机小批量生产。

2.1.4 生产定型阶段

首批生产的飞机还需要进行检验试飞，主要检查工艺质量，对工艺技术文件和工艺装备进行必要的修改达到满意结果后，编制和移交正式飞机生产图纸、技术文件、飞机使用维护手册和样机，生产单位才可进行定型生产。

2.2 确保安全和质量

超轻型飞机也是飞机的一种，虽然设计和制造比较简单，比商用飞机飞得慢、飞得低、飞行留空时间短，但仍属于要上天飞行的航空产品，关系到驾驶者的人身安全。因此，从设计制造到飞行的全过程，都必须时刻遵守质量第一、安全第一的标准。

2.2.1 设计图纸阶段

- (1) 设计图纸必须有严格的设计、校对、审定、批准的程序。
- (2) 设计者必须清楚飞机所受载荷及各部件内力的传递，设计的零部件必须经过强度计算和必要的试验，经过确认无误后才能生产和使用。
- (3) 图纸的更改必须有修改者署名和日期及有关批审手续。
- (4) 飞机的设计应考虑到飞行中出现各种意外情况的可能和应对措施，应尽可能保证在降落意外事故中乘员在使用座椅安全带情况下所受到的伤害最小。

2.2.2 制造阶段

- (1) 材料。必须按设计标准选用和采购材料，制造前必须严格检验材料的品质和

安全性。

(2) 工具。工量具、夹具、工装和设备等必须定期检验。

(3) 必须坚持零配件的领用、装配的核销制度。每个零配件的制造者、安装者、检验者都有案可查，建立可追索的责任制度。

(4) 必须坚持上下班工具清点、交接制度，防止工具遗失在飞机中而发生事故。

(5) 入库零部件必须附有合格证（档案），并有相应的保养制度。

2.2.3 飞行保养阶段

(1) 每次飞行必须有飞行前科目预案，严禁飞机上天后任意改变飞行科目，防止发生意外。

(2) 飞行前必须按飞机操作手册程序检查飞机各部位。

(3) 每次飞行前，必须由专业机务人员会签批准。

(4) 每架飞机飞行时，都应配备应急事故情况下确保人机安全的降落伞。

(5) 每次飞行必须有专项飞行记录，记录飞行科目、时间、各系统工作情况、故障等。

(6) 入库储存飞机需要按周期检查和保养试车。

第3章 空气动力学的基础知识

我们先从飞机在空中飞行的基本条件说起。飞机在空中能保持水平直线恒速飞行的条件见图3-1。

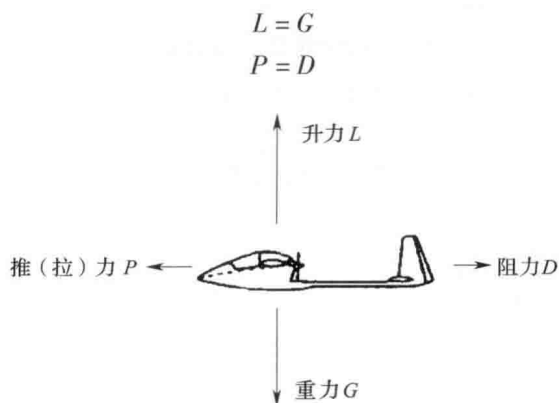


图3-1 飞机受力情况

升力 L 和阻力 D 的比值称为升阻比，升阻比是衡量飞机性能的一个重要指标。特别对初级航空器讲，飞机升阻比大则意味着可以用较小功率的动力实现飞机升空的目的。超轻型飞机升阻比一般在 10~20 左右，而高级滑翔机的升阻比可达到 50 以上。

3.1 升力

空气流过机翼的流线谱如图3-2所示，从图中可以看出，空气流到机翼前缘，分成两段，分别沿机翼上、下表面流过，而在机翼后缘重新汇合向后流去。因为机翼上表面凸起的影响，流管变细，根据连续性定理和伯努利定理，流管细处流速快，静压低，在机翼下表面流管相对比上表面粗，流速也比较慢，静压也较大，这样机翼上、下表面就会产生压力差。垂直于相对气流方向的压力差的总和，就是升力。机翼受力情况如图3-3所示。

事实上，即使机翼截面形状是对称的，只要机翼截面前后缘连线（称翼弦线）与迎面气流有夹角（称迎角 α ），由于气流流过有迎角的对称翼剖面与上述气流流过不对称翼剖面情况相似，这时机翼也会产生升力。

根据上述机翼产生升力的原理，同样在一定条件下，尾翼甚至机身也可以产生一定的升力。

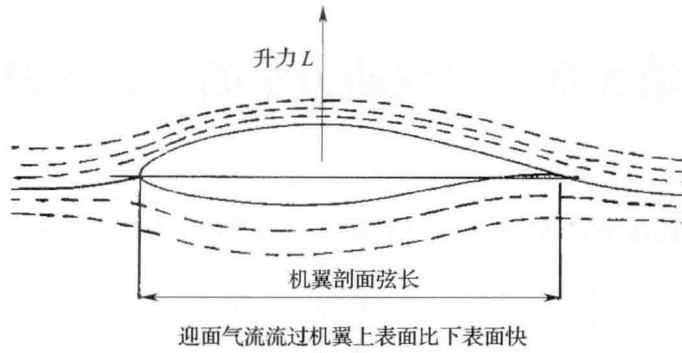


图 3-2 升力的产生

升力公式

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (3-1)$$

式中： L ——升力，N；
 ρ ——空气密度， kg/m^3 ；
 v ——飞行速度， m/s ；
 S ——机翼面积， m^2 ；
 C_L ——升力系数。

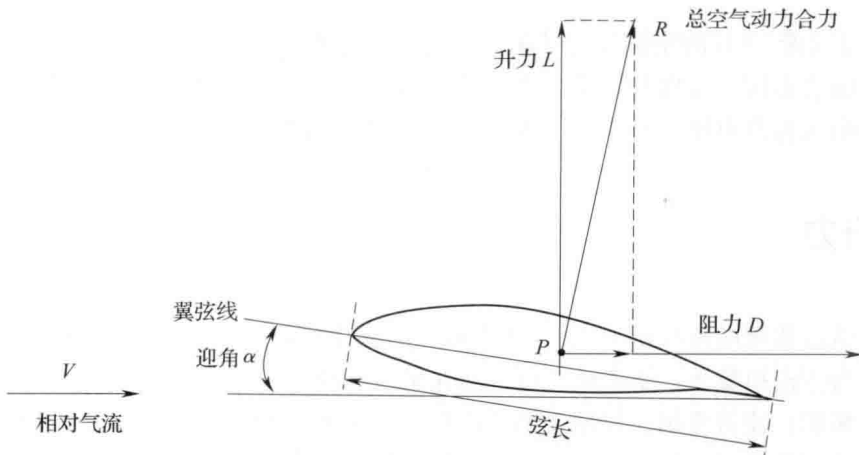


图 3-3 机翼受力情况

C_L 为机翼翼型的升力系数，它与翼型的厚度、相对弯度、弯度最高点的位置、机翼的迎角有关（见图 3-4）。

要了解不同翼型的性能，一般都是通过制作按比例缩小的模型去风洞内测试，获得其升力系数、阻力系数、力矩系数等性能数据。但由于模型和飞机机翼实物尺寸有很大的差别，而且风洞中的风速也比真正飞行速度小得多，因而摩擦阻力在总阻力中所占比例必然大得多。所以要做到“动力相似”，必须使模型的摩擦阻力在总阻力中所占的比