

# 飞机结构学

中国航空工业沈阳飞机设计研究所

# 飞机结构学

中国航空工业沈阳飞机设计研究所

责任编辑：高惠芳

出版编辑：施 勇

封面设计：高惠芳

书名：飞机结构学

---

翻译：中国航空工业沈阳飞机设计研究所

出版：中国航空工业沈阳飞机设计研究所

印刷：沈阳市统计局印刷厂

开本：787×1092 1/16

印次：2000年11月第1版      2000年11月第1次印刷

印张：13.0

字数：700千字

印数：1000册

---

书号：辽A内出字[2000]第4号

# 飞机结构学

译 校： 郭 楨 郭培凡 冯家珍  
温学志 曾冬娟 隋福成

技术审校： 施荣明 李 天

校 订： 隋福成

中国航空工业沈阳飞机设计研究所

# КОНСТРУКЦИЯ САМОЛЕТОВ

Г. И. ЖИТОМИРСКИЙ

2 – е издание,  
переработанное и дополненное  
*рекомендовано*  
*Государственным комитетом*  
*Российской Федерации*  
*по высшему образованию*  
*в качестве учебника*  
*для студентов*  
*авиационных специальностей*  
*высших учебных заведений*

---

1995 年

# 飞机结构学

作者 Г.И.日托米尔斯基

航空专业高等院校学生用教科书。— 第2版修改增订本，— 莫斯科机器制造出版社，1995，— 416页，插图。

该书叙述了与飞机及其部件的用途、外形和参数有关的问题；研究了作用在飞机部件上的力和结构在载荷作用下的承载情况。给出了飞机部件的结构受力型式，对其进行分析和比较评价。对复合材料结构和新一代飞机部件的描述扩充了很多。叙述了对飞机及其部件的要求，指明了进一步完善结构的途径。

## 译文出版前言

这本“飞机结构学”是根据俄文最新版(1995年)“飞机结构”一书翻译出版的。全书共十章,插图300余幅。

该书既从飞机结构设计原理,又从工程实践应用两个方面讲述了飞机及其部件的用途、外形和各种设计参数等有关的问题,还研究了作用在飞机部件上的力和结构在载荷作用下的各种工况,给出了飞机结构部件的各种受力形式,分析和比较评估。并用很多篇幅对复合材料结构和新一代飞机部件做了描述。

该书对俄国近代先进飞机如苏-27、米格-29、图-204、伊尔-96-300的结构设计特点也做了详细的介绍,因而对我国从事航空专业的工程技术人员有很重要的参考价值。

书中还特别强调,要学会掌握对某一具体用途的飞机在其特定使用条件下为什么选定是这样的结构方案,对其它类型的飞机应选取什么样的方案的方法。所以此书对航空专业高等院校教师和学生也是一本难得的很好的教学、课外参考书。

中国航空工业沈阳飞机设计研究所翻译出版此书,旨在给从事航空专业的技术人员提供一本实用的设计参考书,启迪和拓宽他们的设计思路,以提高结构设计能力和水平。

为保证译文质量,负责组织翻译出版此书的沈阳飞机设计研究所科技委主任施荣明(研究员)、副总设计师李天(研究员)不但亲自对译文的技术负责审订,而且亲自指导,邀请已离退休的本所老俄文翻译郭 楨(译审)、郭培凡(副译审)、冯家珍(副译审)、温学志(副研究馆员)担纲翻译、校对;同时也请俄文翻译的后起之秀隋福成(高级工程师)、曾冬娟(工程师)参加翻译校对工作。

本书的序言、第一章、第二章由郭 楨翻译,温学志校对;第三章、第八章由冯家珍翻译,郭 楨校对;第五章、第六章由郭培凡翻译,曾冬娟校对;第四章、第九章、第十章由曾冬娟翻译,郭 楨校对;第七章由隋福成翻译,郭 楨校对。全书的校订由隋福成承担。科技委的郭大林(高级工程师)、郭锦平承担了部分文字校对和贴图字工作。

此书在翻译出版的过程中还得到了结构强度室的宁晋建(高级工程师)、科技部的李永成(高级工程师)的鼎力相助和支持。

本书的翻译、校对、出版工作历经10个月,即将出书,愿它成为每一位读者的好朋友。对书中疏漏之处,敬请不吝指正。

## 作 者 的 话

该书是“飞机结构学”教科书(1991年第1版)经过全面修改和增订的第2版。教科书主要是按作者从1980年在莫斯科航空学院讲课的材料写成的,在准备教科书时,考虑到根据教学计划,大学生们在开始学习“飞机结构学”课程之前已经从“专业概论”教程中获得了飞机结构的初步概念,熟悉了专业术语,掌握了普通工程课程,开始学习结构力学、空气动力学和工艺流程课程。因此,考虑到飞机的用途、使用条件及决定飞机结构的其它因素,对在载荷作用下结构承载问题、分析和比较评估各种结构方案给予很大的关注。因此,教科书的内容不仅能回答:不同用途的飞机结构这个或那个部件或元件如何构成的问题,而且能回答为什么是这样的问题。

在解决这一问题时,作者依靠在使用的图书目录中所指出的著作,特别是依靠**К.Д.**图尔金、**Л.В.**梅什金、**В.А.**季洪拉沃夫和**В.И.**维诺格拉道夫等教授著作的有名的飞机结构学教科书的材料;**В.И.**扎伊彩夫和**В.Л.**鲁达科夫的飞机结构和强度;**М.Н.**舒利任科的飞机构造学\*;**С.М.**叶戈尔的飞机设计等熟知的教科书的材料。

十分注意整理各种用途飞机结构的材料和选择信息量大的插图。在解决这一任务时广泛利用了一系列书籍的材料,例如,1980年代机器制造出版社出版的“**С.В.**伊留申设计局飞机结构和系统历史概述”和现在使用中的飞机结构说明书。为提高图的信息量又不过度地塞满图,在某些插图上有条件地将结构件视图与其截面合并起来。

在每章的末尾给读者提出练习题,以便创造性地掌握讲述过的材料并检验所获得的知识。在教科书第2版准备时,主要注意的是使术语、概念和定义更精确;从统一的方法学观点,第1版本教科书也有这个特点,修正飞机具体部件结构和插图材料的说明;加入关于飞机构件和部件复合材料结构与最新几代飞机部件结构的说明和插图等新的几章;随着加入各种用途和各代飞机的布局作为原始信息,修改测验的问题和作业系统。此外,教科书第1版问世后作者收到的大部分意见和要求已经考虑到。

作者感谢以图波列夫命名的喀山国立技术大学飞行器结构和设计教研室集体对手稿作书评时所提出的有益意见。

作者还感谢莫斯科航空学院飞机结构和设计教研室的教师们,他们以自己的建议和帮助使本书更趋完善。

---

\* 中译名为“飞机构造学”——译者

# 目 录

译文出版前言

作者的话

第 1 章 确定飞机结构的因素	1
§ 1.1 飞机的结构图	1
§ 1.2 航空综合体的概念	2
§ 1.3 飞机的分类	3
§ 1.4 飞机性能的相互联系	5
§ 1.5 飞机发展的历史技术概述	9
§ 1.6 结构材料	21
§ 1.7 在飞行中作用到飞机上的力——过载	26
§ 1.8 不同飞行条件下的过载	28
§ 1.9 飞机的热问题	32
§ 1.10 飞机的强度规范	33
§ 1.11 根据强度条件对飞行速度的限制。飞机的使用区域	36
§ 1.12 影响飞机结构的因素	37
§ 1.13 改善结构的重量特性并提高飞机的寿命	42
第 2 章 机翼	49
§ 2.1 机翼的用途和对它的要求	49
§ 2.2 机翼的外形	50
§ 2.3 作用在机翼上的载荷	58
§ 2.4 机翼在载荷作用下的承载情况	60
§ 2.5 剪力、弯曲力矩和扭转力矩图	61
§ 2.6 机翼在载荷作用下的承载情况(把作用在机翼上的 载荷传递到固定接头上的次序)	64
§ 2.7 主要受力构件的用途和结构	69
§ 2.8 机翼的承力结构型式	84
§ 2.9 梁式和盒段式(整体)机翼的比较评估,它们的使用范围	92
§ 2.10 各种承力结构机翼的对接原则	95
§ 2.11 在机翼结构中开口的结构形式	101
§ 2.12 机翼前缘、后缘及翼尖、整流罩的结构特点	101
第 3 章 后掠翼和三角翼的结构和承载特点	107
§ 3.1 后掠翼承力形式和根部承载的特点	107
§ 3.2 纵向构件组构件轴线带有转折的后掠翼	109

§ 3.3	纵向受力构件轴向不带转折点一带内支撑梁的后掠翼 .....	119
§ 3.4	前掠翼 .....	122
§ 3.5	回转翼 .....	124
§ 3.6	三角翼 .....	132
§ 3.7	联结翼 .....	138
第 4 章	机翼活动部分 .....	141
§ 4.1	概 述 .....	141
§ 4.2	杨翼的增升装置。用途和要求 .....	141
§ 4.3	机翼的增升装置的种类 .....	144
§ 4.4	副 翼 .....	157
§ 4.5	自适应机翼 .....	163
第 5 章	尾 翼 .....	165
§ 5.1	尾翼的用途和对它的要求 .....	165
§ 5.2	尾翼载荷和尾翼承力结构 .....	169
§ 5.3	水平尾翼的结构 .....	170
§ 5.4	垂直尾翼的结构 .....	179
§ 5.5	全动式水平尾翼结构 .....	182
§ 5.6	V 形尾翼的布局形式 .....	187
第 6 章	机 身 .....	189
§ 6.1	机身的用途及对机身的要求 .....	189
§ 6.2	机身的外形和参数 .....	191
§ 6.3	机身载荷及其平衡 .....	193
§ 6.4	机身的承力结构形式及承载情况 .....	195
§ 6.5	机身基本承力构件的用途和结构 .....	202
§ 6.6	部件与机身的固定 .....	207
§ 6.7	机身开口的结构形式 .....	211
§ 6.8	机 舱 .....	213
§ 6.9	与飞机用途有关的机身结构特点 .....	235
第 7 章	起落架 .....	239
§ 7.1	用途和基本要求 .....	239
§ 7.2	起落架型式 .....	240
§ 7.3	起落架参数 .....	245
§ 7.4	起落架上的载荷及在载荷作用下起落架的工作情况 .....	248
§ 7.5	飞机起落架结构件及其用途 .....	249
§ 7.6	起落架单个构件的结构方案 .....	257
§ 7.7	多轮式起落架 .....	269

§ 7.8	起落架的结构受力型式及其分析 .....	274
§ 7.9	支持部件向起落架支柱的固定方式及其分析 .....	280
§ 7.10	前起落架结构特点 .....	285
§ 7.11	支持部件 .....	286
§ 7.12	起落架的缓冲装置 .....	297
§ 7.13	起落架收放运动型式 .....	305
§ 7.14	飞机沿机场运动时产生的振动 .....	308
<b>第 8 章</b>	<b>飞机操纵系统 .....</b>	<b>313</b>
§ 8.1	操纵系统的用途和对其提出的要求 .....	313
§ 8.2	操纵机构 .....	317
§ 8.3	操纵台 .....	318
§ 8.4	操纵线系 .....	326
§ 8.5	亚音速飞机操纵系统 .....	333
§ 8.6	超音速飞机操纵系统结构特点 .....	342
§ 8.7	操纵系统构件的配置和固定 .....	348
§ 8.8	飞机操纵系统的发展方向 .....	353
<b>第 9 章</b>	<b>动力装置 .....</b>	<b>357</b>
§ 9.1	动力装置的用途和组成 .....	357
§ 9.2	对动力装置的要求 .....	359
§ 9.3	发动机在飞机上的不同配置方案的分析 .....	360
§ 9.4	发动机固定接头上的载荷 .....	362
§ 9.5	发动机固定接头的结构 .....	363
§ 9.6	进气道 .....	378
§ 9.7	排气系统 .....	381
§ 9.8	燃油系统和防火系统 .....	382
<b>第 10 章</b>	<b>结构刚度 机体部件在飞行中的振荡 .....</b>	<b>387</b>
§ 10.1	足够结构刚度的概念 .....	387
§ 10.2	气动弹性现象 .....	388
§ 10.3	机翼的变形 .....	388
§ 10.4	操纵机构的反效 .....	389
§ 10.5	发 散 .....	391
§ 10.6	飞机部件在飞行中的强迫振荡 .....	393
§ 10.7	颤 振 .....	393
	综合总结测验题 .....	400
	文献目录 .....	401

# 第 1 章

## 决定飞机结构的因素

---

### § 1.1 飞机的结构图

飞机是一种利用空气动力原理飞行的重于空气的飞行器。在飞行时利用飞机的升力面(机翼和尾翼)借助于空气介质产生升力、操纵力和动力装置——靠飞机上的燃油产生前进力。为了在地面上运行——起飞滑跑、着陆滑跑和滑行以及停放,飞机装有支持系统——起落架。根据用途飞机具有一定的使用装载、设备和装备、操纵系统。因此,飞机是复杂的技术装置,是由按用途、部位和功能作用相互联系的部件、部段和构件构成的。图 1.1 示出了飞机及其一些主要部件和部段的简化的结构图。

作为复杂系统的飞机,具有发达的层次结构,其中可以分成若干个子系统:产生升力和运动力的子系统、保证稳定性和操纵性的子系统、生命保障子系统、保证完成目标功能的子系统等。所有它们的总和通过它们的参数和特性  $Z$  就决定了飞机的有效性能——它的效率  $\Theta$ , 以及成本  $C$ :  $\Theta = F_1(Z)$ ;  $C = F_2(Z)$ 。在这里  $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$  ——其分量组成飞机参数和特性的矢量(例如,决定它的主要部段和部件和形状和尺寸、材料性能、动力装置特性、燃油和运送货物的质量、飞行战术和技术特性、设备和武器特性等的参数)。

如果  $K$  ——不只考虑效率  $\Theta$ , 而且也考虑材料费用  $C$  的参数指标,以材料费用为代价取得效率  $C$ , 并且  $K = \Phi(Z)$ , 当然,决定飞机结构的矢量参数值  $Z$  应当通过指标  $K$  对参数  $Z$  优化来选取。被认为是飞机设计主要任务之一的这项任务用数学公式可以表示如下:

$$K = \Phi(Z) \rightarrow \text{opt},$$

$$Z \in U$$

式中  $U$  — 对矢量参数值  $Z$  的限制(例如,按科学和技术的发展水平,材料费用等限制)\*。

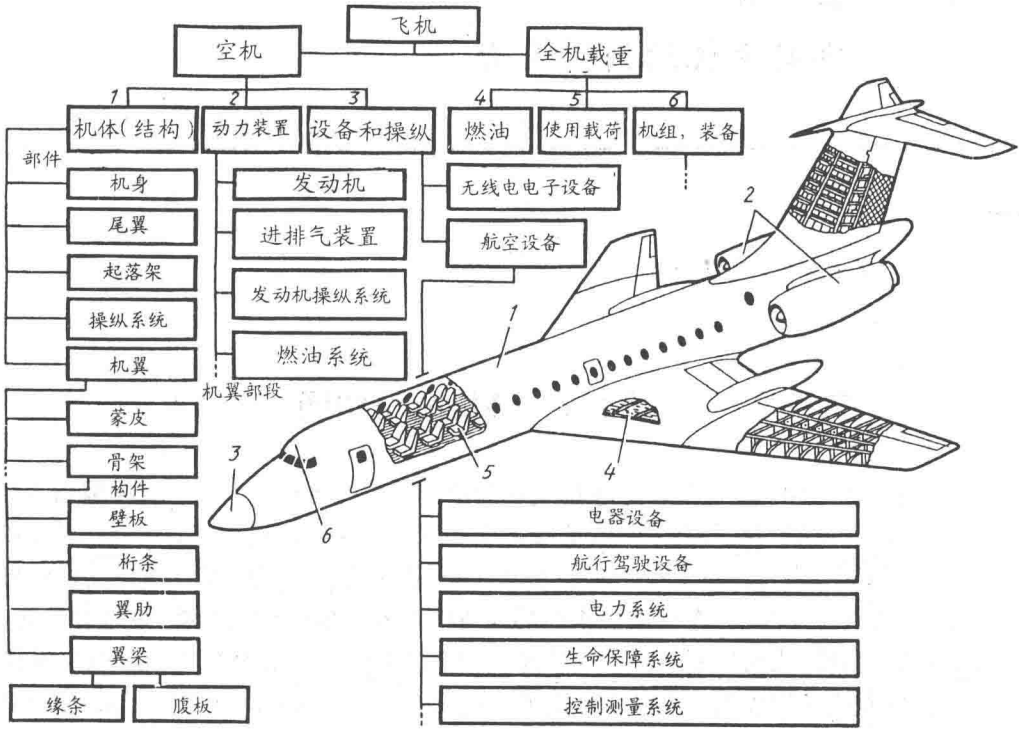


图 1.1 飞机的结构图

## § 1.2 航空综合体的概念

尽管现代飞机具有很大的独立性,它们不能单独地得到利用并且为使其正常地发挥作用就需要操纵和保障系统的技术设备、飞行条件的信息等。这就迫使把飞机看作是更复杂的系统(更高水平的系统)——航空综合体系的一个组成部分。

航空综合体系(AK) 是一种由人们操纵的飞机和操纵与保障系统的技术设备在功能上相互联系的综合,用来完成在航空综合体基础上飞机用途所确定的任务。图 1.2 示出了航空综合体的功能图,其中飞机是航空综合体的主要执行元件——它的“执行环节”\*\*。

飞机和操纵系统(通讯、导航、引导、着陆)及保障系统(航空工程的、机场技术的

\* 飞机效率和设计问题是专门的学科课目。

\*\* 飞机本身是较低层次的航空综合体并有图 1.2 所示的功能图。

及其它形式保证)的技术设备在功能上的相互联系应是很密切的——必须使航空综合体的飞机和地面系统技术设备的参数和特性相符合。例如：

起飞-着陆跑道(БИП)的长度决定了对飞机起飞-着陆特性值的要求,影响着对机翼后掠角和相对厚度、起飞-着陆增升装置、机翼单位载荷和飞机推重比的选择。短的起飞-着陆跑道是较为便宜的。在这种情况下,机场上机动得以简化并且成本降低,而对于军用飞机——这还减少地面上的损失。然而,飞机自身的重量变得更重而使成本更高了。这是因为,为了减小起飞滑跑距离,就需要增大推重比和(或)减小机翼单位载荷。这两方面都使飞机的质量(动力装置的质量和结构的质量)增加;

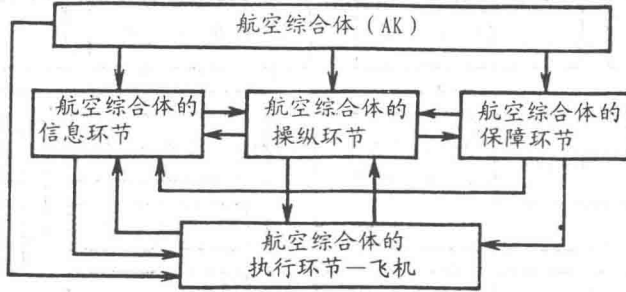


图 1.2 航空综合体的结构

机场土壤的强度决定了起飞-着陆装置的尺寸和型式(例如,机轮的尺寸和轮胎的压力、滑橇的尺寸等);

在结构上存在可拆卸的大小使用舱口盖使技术维护的劳动消耗减低,可是削弱了结构,并且由于在力的作用下结构必须补偿开口使得结构加重;

燃油系统的管路及其装置的截面应与加油车油泵的输油量相适应等。

考虑类似的因素对于分析和比较评价不同的结构方案是必需的。这项任务的数学描述列于 § 1.1。可是在这种情况下指标  $K$  已经应针对整个航空综合体,而矢量  $Z$  还应包括航空综合体地面部分的参数和特性。这些情况就决定了在这里必须研究航空综合体的概念。

### § 1.3 飞机的分类

在国民经济和军事目的中所使用的飞机类型的多样性决定了飞机分类,并首先按其用途分类的必要性。

使用装载的特性和尺寸,飞机的飞行战术和技术特性、它的布局、所使用的设备以及个别的部件和部段的结构在很大程度上是由飞机的用途决定的。按这一特征,所有飞机分为民用航空飞机和军用飞机。

1.3.1 民用航空飞机(ГА) 用来运送旅客、货物、邮件和服务国民经济某些部

门。民用航空飞机的分类示于图 1.3。在这里依据所完成的的任务的特点、航程  $L$ 、运送旅客人数  $n_{\text{nac}}$ 、商务载重  $m_{\text{KOM}}$ 、起飞-着陆跑道的尺寸和类型列出了飞机的划分。

1.3.2 军用飞机 用来执行各种战斗任务:消灭空中目标(歼击航空兵),消灭敌人后方目标(轰炸航空兵),获取敌情信息(侦察航空兵),运送部队和战斗技术装备(军用运输航空兵)。

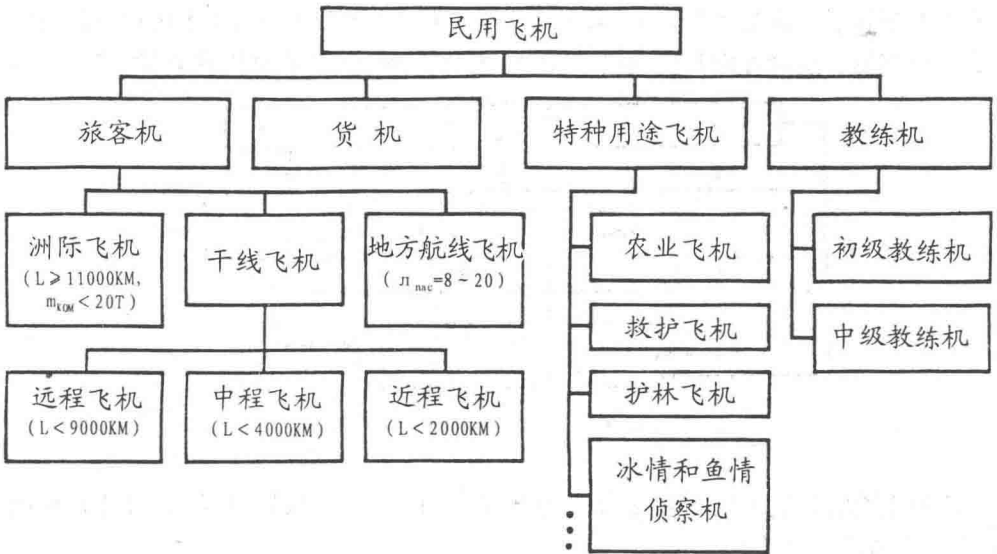


图 1.3 民用飞机的分类

军用飞机在空军(BBC)、海军航空兵(BMΦ)和防空(ΠBO)航空兵中得到运用[8]。

在空军的组成中包括:

前线航空兵(歼击机、歼击-轰炸机、前线轰炸机和装备导弹的飞机、侦察机等);

远程航空兵(远程装备导弹的飞机和轰炸机、远程侦察机等);

军用运输航空兵(不同载重量的货机)。

海军航空兵的组成中包括:

陆(岸)基航空兵[8](装备导弹的飞机、侦察机等);

舰基航空兵。

防空航空兵为达到自己的目的使用歼击-截击机。

歼击航空兵(ИA)具有高的飞行技术特性、高的机动性并装备远距和近距导弹作战使用的“空-空”级导弹及机炮。为了攻击地面目标,歼击航空兵可以使用炸弹、导弹和无控火箭、机炮及其它武器。

轰炸航空兵(歼击-轰炸机、强击机、各种类型的轰炸机)具有航程远和载重量大,

能在亚音速和超音速下执行自己的任务,根据应当击毁目标的特点,机上携带各种不同的制导和非制导武器、炸弹、机炮以及其它武器。

侦察航空兵具有高的飞行战术特性和在机上携带各种设备以便进行各种形式的侦察并把数据传输到地面。

军用运输航空兵为达到自己的目的可以使用装备特种防护设备的民用货机。

1.3.3 飞机按气动力布局和结构特征(图 1.4)以一定的详细程度用飞机单个部分和部件结构布局形式的矩阵示出,以反应其形状和形式在演变发展中的多样性。

依次利用每一级的信息(1……9,见图 1.4),就可以得到(组装)几乎任何一种过去有的和现在有的飞机的结构布局形式。建议读者练习一下组装你们熟知的飞机结构布局形式。

## § 1.4 飞机性能的相互联系

为了分析和比较评价不同的结构方案,利用飞机存在方程和确定其起飞质量的表达式是方便的。

飞机的起飞质量可以表示为下式

$$m_0 = m_{\kappa} + m_{c.y} + m_m + m_{o.y} + m_{u.\kappa} + m_{ca} \quad (1.1)$$

式中 (根据飞机结构图,见图 1.1)  $m_{\kappa}$ —(机体)结构质量:机翼质量( $m_{\kappa p}$ ),机身质量( $m_{\phi}$ ),尾翼质量( $m_{on}$ ),起落架质量( $m_{in}$ ),舵面和副翼操纵系统质量  $m_{c.y.p}$ ;  $m_{c.y}$ —动力装置的质量,在对飞机提出的战术技术要求(TTT)所决定的状态下保证飞机飞行所需的推重比;  $m_{\tau}$ —为保证在一定的状态下飞行给定的航程飞机上的燃油质量;  $m_{o.y}$ —设备和操纵系统的质量,它们保证飞机(根据其用途)在给定的条件下使用;  $m_{u.\kappa}$ —使用装载的质量(对于旅客机—旅客、其行李、邮件的质量,对于货机—运送货物的质量,对于军用飞机—弹药的质量);  $m_{ca}$ —服务装载的质量,包括机组质量( $m_{\text{жк}}$ )和装备质量( $m_{ca}$ )(对于旅客机这里包括,例如:售品柜、衣帽间、盥漱室、餐具等可拆卸设备的质量)。方程(1.1)称为质量平衡方程。其中所有各项除以  $m_0$ ,得

$$1 = \overline{m_{\kappa}} + \overline{m_{c.y}} + \overline{m_m} + \overline{m_{o.y}} + \overline{m_{u.\kappa}} + \overline{m_{ca}} \quad (1.2)$$

这一方程由著名的飞机设计师和学者B. Ф. 鲍勒霍维季诺夫于1945年首次求

1	飞机气动布局	无尾飞机	正常式	飞翼	鸭式	带前翼和尾翼	推力耦合式
2	数目和配置	张线式单翼机	三翼机	斜撑式单翼机	伞式飞机	张臂式双翼机	海鸥式机翼
		张线式双翼机	双翼机	斜撑式双翼机	支柱式双翼机	一个半翼飞机	单翼机
3	平面形状	长方形翼	椭圆形机翼	抛物线形机翼	圆形机翼	后掠机翼	前掠翼
		椭圆形机翼	椭圆形机翼	椭圆形机翼	椭圆形机翼	椭圆形机翼	椭圆形机翼
4	尾翼	盒式尾翼	双梁式	多垂尾式	双垂尾式	圆形机翼	带中平尾
		盒式尾翼	双梁式	多垂尾式	双垂尾式	圆形机翼	带中平尾
5	型式	四轮起落架	后三点起落架	后三点起落架	前三点起落架	多轮式起落架	自行车式起落架
		四轮起落架	后三点起落架	后三点起落架	前三点起落架	多轮式起落架	自行车式起落架
6	支持构件的型式	机轮式	滑撬式	机轮-滑撬式	小盘式	履带式	气垫式
		机轮式	滑撬式	机轮-滑撬式	小盘式	履带式	气垫式
7	机身型式	短舱(无机身的)	正常式	双梁式	双机头式	船式	升力机身
		短舱(无机身的)	正常式	双梁式	双机头式	船式	升力机身
8	发动机类型	人力的	蒸汽的	活塞式柴油机	涡轮螺旋桨发动机	涡轮螺旋桨发动机	固体燃料火箭发动机
		人力的	蒸汽的	活塞式柴油机	涡轮螺旋桨发动机	涡轮螺旋桨发动机	固体燃料火箭发动机
9	发动机台数和配置	在机头	在中部	在尾部	在翼根	在翼中部	在翼尖
		在机头	在中部	在尾部	在翼根	在翼中部	在翼尖

.. 冲压式空气喷气发动机(脉冲式空气喷气发动机)(ПВРД/П.В.РД)

图 1.4 飞机按结构特征的分类