

# 飞行动力学

飞机飞行性能计算

(修订本)

飞行动力学  
——飞机飞行性能计算——

(修 订 本)

金长江 范立钦 编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了现代飞机飞行性能的基本内容和基本概念,除讨论了飞行性能的工程计算方法外,还建立了飞机在非平静大气中飞行时的质心运动方程,对近年来现代飞机飞行性能要求中的一些新概念作了必要的介绍,说明了适航性要求中的某些规定和一些新的处理方法。

本书是为航空院校空气动力学和飞行动力专业的大学本科生编写的,也可供飞行力学专业研究生和飞机设计及使用部门的工程技术人员参考。

### 飞 行 动 力 学

——飞机飞行性能计算——

(修订本)

金长江 范立钦 编著

\*

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168 1/32 印张9<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 254千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷 印数: 001—400 册

ISBN 7-118-00707-2/V·59 定价: 2.35元

# 前 言

自《飞行动力学—飞机飞行性能计算》(国防工业出版社, 1983年)出版后的几年里, 航空科学和技术发生了许多重要的变化, 对飞机飞行性能的要求越来越高, 机载设备越来越复杂。另外, 我国设计和制造的飞机开始逐渐走向世界市场, 标志着我国航空科学技术达到了一个新的水平。因此, 需要重新编写一本与此相适应的飞机飞行性能计算教科书。编者原先只想对1983年版本作适当修补, 但在编写修改过程中发现, 局部的修改很难满足实际要求, 必须对原书作相当大地修改和补充:

1. 原书是根据70年代中期前后北京航空航天大学 and 西北工业大学空气动力学和飞行力学专业的讲义编写的, 多少还带有那个时代的痕迹, 有些内容已显得陈旧。这次修改去掉了反映当时背景的一些用语和内容。

2. 原书是以轻型歼击机为对象编写的, 对大型运输机则几乎未与涉及。尽管这两类飞机在飞行原理上并无本质差别, 但却各有特点。这首先表现在现代大型运输机的升阻特性不能简单地视为以 $C_x$ 轴为对称形式的极曲线, 这必然会对飞机的参数选择和飞行性能有一定影响, 故在本版本中对升阻极曲线作了比较详细地讨论。

3. 鉴于美国联邦航空条例(Federal Aviation Regulations, 缩写为FAR)在世界航空工业中的重要指导作用, 特别是在各国民航适航条例制定过程中的权威性, 有的国家直接就把FAR作为本国的适航条例, 大多数国家的适航条例是对FAR进行适当修改、增删而制订的。因此, 本书起飞和着陆性能一章基本上是按照FAR Part 25的要求重新编写, 其基本定义和主要符号也直接采用FAR Part 25的规定。

4. 按照国家标准局的规定〔4〕, 本书全部使用国际单位制

和国际符号。考虑到英美单位制和工程单位制在国际航空科技文献及产品说明中仍在大量使用，本书除给出单位换算表外，在必要处非国际单位制用( )说明表示。另外，飞机重量不再用G表示而直接用mg，所有与此有关的方程和公式均全部修改。

5. 本书补充了一些原来作为专题研究的、现已成为现代飞机设计中常规工作的内容和概念，如：在非平静大气中飞机的质心运动方程、低噪声起飞和着陆航迹、最低成本巡航飞行的概念、实际巡航飞行的方法等。另外，对飞行范围边界线的飞行力学意义作了较多地讨论。

6. 飞机飞行性能试验是飞机飞行性能技术研究的一个重要手段，目前，我国航空高等院校还尚未开设飞机飞行性能试验有关课程。为了弥补一点这方面的缺憾，本书在附录中补充了有关气流参数的确定的内容，旨在介绍一点基本概念，供阅读本书正文时参考。

7. 随着计算机辅助优化理论和技术的发展，最优轨迹飞行已成为现实。80年代初投入使用的飞行管理系统(FMS)和近年来提出的战术飞行管理系统(TMS)给飞行力学这门经典学科注入了新的活力。国外在最优轨迹的研究分析中，很赞赏无因次参数研究方法，因为这种方法取综合参数、便于处理，且易于得出一般的结论和看法。本书在适当章节中也采用了无因次参数研究方法。

本书是在原书基础上，主要参考〔5〕、〔8〕、〔19〕、〔20〕修改补充，在此说明，恕不在文中一一注明出处。

本书的绪论、第一、二、三章和附录由金长江编写，第四、五、六章的初稿由范立钦执笔，全书由金长江最后统编定稿。

本书原稿承蒙赵震炎教授悉心审阅，指出了许多疏漏之处，提出了修改意见，并提供了有关数据，作者曾当面聆听了赵震炎教授的指教。在此，谨向赵震炎教授的关心和支持表示衷心地感谢。在本书编写过程中还得到很多同事的启发和支持；作者的学生洪冠新同志对单位制修改和插图设计提出了很有启发性的建

议；金振镁同志为本书绘制了全部插图。他（她）们的支持和帮助使本书增色不少，在本书出版之际，作者谨向他（她）们表示诚挚地谢意。

本书部分内容尚属初次编写，限于作者的学识和实践经验，缺点和不足实难避免，敬请读者在使用中不吝批评指正。

**编 著 者**

# 目 录

0-1 绪论 .....	1
0-2 符号表 .....	3
0-3 单位换算表 .....	8
0-4 主要物理常数 .....	10
第一章 飞机的质心运动方程 .....	11
§ 1-1 引言 .....	11
§ 1-2 坐标变换矩阵 .....	13
1.2.1 基元变换矩阵 .....	13
1.2.2 坐标变换矩阵的构成 .....	15
1.2.3 坐标变换矩阵的性质 .....	17
§ 1-3 大气飞行动力学常用坐标系及其变换矩阵 .....	20
1.3.1 坐标系的种类和定义 .....	20
1.3.2 坐标系的角度关系及坐标变换矩阵 .....	21
§ 1-4 飞机的质心动力学方程 .....	27
1.4.1 在活动坐标系中的飞机质心动力学方程 .....	28
1.4.2 在航迹坐标系中列写的飞机质心动力学方程 .....	30
§ 1-5 飞机的质心运动学方程及几何关系式 .....	32
1.5.1 飞机质心运动学方程 .....	33
1.5.2 几何关系式 .....	34
§ 1-6 飞机质心运动方程组 .....	35
1.6.1 飞机在铅垂平面内的运动方程 .....	36
1.6.2 飞机在水平平面内的运动方程 .....	38
§ 1-7 在非平静大气中飞机的质心运动方程 .....	39
1.7.1 风速矢量及其描述 .....	40
1.7.2 有风时的速度三角形 .....	40
1.7.3 有风时坐标系之间的关系 .....	41
1.7.4 有风时的几何关系式 .....	44
1.7.5 突风角和风速的关系 .....	48
1.7.6 风速在活动坐标系上的分量 .....	50

1.7.7	有风时的飞机质心运动方程组	52
1.7.8	有风时飞机在铅垂面内的运动方程组	54
复习题		56
第二章 飞行性能计算的原始数据		57
§ 2-1	引言	57
§ 2-2	大气空间和高度的定义	58
2.2.1	大气空间构造	58
2.2.2	大气物理	62
2.2.3	标准大气	63
§ 2-3	空速的定义	69
§ 2-4	动力系统特性	71
2.4.1	推力和耗油率的定义	71
2.4.2	空气螺旋桨推进系统	74
2.4.3	航空喷气发动机	79
2.4.4	火箭发动机	84
2.4.5	性能参数的引入	84
§ 2-5	空气动力特性	87
2.5.1	升力	87
2.5.2	阻力	92
2.5.3	飞机升阻极曲线	97
2.5.4	最大升阻比	101
2.5.5	翼型弯度的影响	105
复习题		108
第三章 飞机的基本飞行性能计算		109
§ 3-1	引言	109
§ 3-2	定常平飞运动基本关系式	111
3.2.1	定常平飞的升力方程	112
3.2.2	阻力方程和平飞需用推力	114
§ 3-3	确定基本飞行性能的图解分析法	
	——简单推力法	119
3.3.1	飞机定常平飞性能的确定	121
3.3.2	飞机定常直线上升性能的确定	124
§ 3-4	飞机的定直下滑和滑翔	134
3.4.1	滑翔速度	136



## VII

3.4.2	最小滑翔比 .....	137
3.4.3	最大滑翔速度 .....	138
3.4.4	最小下沉速度 .....	139
3.4.5	速度极曲线 .....	141
§ 3-5	飞机的飞行高度-马赫数曲线图 .....	143
3.5.1	飞行范围边界线 .....	144
3.5.2	第一飞行范围和第二飞行范围 .....	147
3.5.3	飞行范围的飞行力学意义 .....	152
§ 3-6	飞机的爬升方式 .....	155
3.6.1	能量高度的定义 .....	155
3.6.2	亚音速飞机的爬升方式 .....	157
3.6.3	超音速飞机的爬升方式 .....	161
3.6.4	等能量高度爬升飞行 .....	164
复习题	.....	167
第四章	飞机的续航性能 .....	169
§ 4-1	引言 .....	169
§ 4-2	基本定义和基本关系式 .....	172
4.2.1	可用燃油量 .....	173
4.2.2	小时耗油量和公里耗油量 .....	174
4.2.3	巡航段航程和航时的一般计算公式 .....	174
§ 4-3	给定高度和速度时喷气式飞机的续航性能 .....	179
§ 4-4	喷气式飞机最佳续航性能 .....	183
4.4.1	喷气式飞机最佳巡航飞行特点 .....	183
4.4.2	喷气式飞机最佳续航性能计算 .....	185
4.4.3	最低成本巡航飞行 .....	189
§ 4-5	实际实施巡航飞行的方法 .....	191
4.5.1	比航程(单位燃油里程) .....	191
4.5.2	马赫数对最大比航程的影响 .....	194
§ 4-6	上升、下滑段续航性能 .....	197
4.6.1	上升段续航性能计算 .....	197
4.6.2	下滑段续航性能计算 .....	198
§ 4-7	喷气式飞机的最大活动半径 .....	199
§ 4-8	风对续航性能的影响 .....	201
§ 4-9	超音速飞机续航性能的特点 .....	204

复习题 .....	207
<b>第五章 飞机的机动飞行性能 .....</b>	<b>209</b>
§ 5-1 引言 .....	209
§ 5-2 机动性的定义和过载系数 .....	209
5.2.1 基本定义 .....	209
5.2.2 过载分量 .....	211
5.2.3 机动飞行时驾驶员的感觉 .....	212
§ 5-3 飞机在铅垂平面内的机动飞行性能 .....	214
5.3.1 铅垂平面内机动飞行的数值计算方法 .....	214
5.3.2 飞机的水平加速和减速飞行性能 .....	217
5.3.3 跃升性能的近似计算 .....	222
5.3.4 俯冲性能的近似计算 .....	226
§ 5-4 飞机在水平平面内的机动飞行性能 .....	230
5.4.1 正常盘旋运动的基本关系式 .....	231
5.4.2 正常盘旋的盘旋半径与盘旋一周的时间 .....	232
5.4.3 极限盘旋 .....	234
5.4.4 非正常盘旋 .....	239
5.4.5 超音速飞机盘旋的特点 .....	242
§ 5-5 飞机的空间机动飞行 .....	244
5.5.1 空间机动飞行简介 .....	244
5.5.2 空间机动飞行的数值计算方法 .....	246
5.5.3 飞机机动能力的综合评定 .....	247
复习题 .....	248
<b>第六章 飞机的起飞和着陆性能 .....</b>	<b>250</b>
§ 6-1 引言 .....	250
§ 6-2 飞机的起飞性能 .....	251
6.2.1 基本定义 .....	251
6.2.2 抬前轮速度 .....	255
6.2.3 起飞加速滑跑的距离和时间 .....	258
6.2.4 发动机故障时的起飞滑跑 .....	262
6.2.5 起飞上升段 .....	267
6.2.6 起飞距离 .....	274
§ 6-3 飞机的着陆性能 .....	277
6.3.1 基本定义 .....	277

## X

6.3.2 着陆空中段距离 .....	280
6.3.3 着陆滑跑距离 .....	283
6.3.4 着陆距离 .....	286
复习题 .....	287
附录 飞行性能试验中气流参数的确定 .....	288
参考文献 .....	301

## 0-1 绪 论

飞机飞行性能和飞机飞行品质是飞机飞行动力学两项最基本的研究内容，虽然它们都是研究飞机在大气中飞行的运动规律，然而，飞行性能和飞行品质不仅所研究的对象主题不同，而且其解决问题的方法也完全不同，因而飞行性能和飞行品质在工业界和研究部门常分属不同的专业部门。

飞机设计的目标是满足预定的使用技术或战术技术要求。不论何种飞机，都要求在预计航程中最佳的运输有效载荷(旅客、货物或其它类型载荷)。飞机设计方案能否满足飞行使命的要求，须经飞行性能计算加以检验校核。因此，飞行性能是飞机设计、特别是总体设计的重要基础知识。飞行性能包括有表征飞机在各种飞行阶段飞行能力的各类参数，例如，飞机的起飞和着陆滑跑距离、在给定高度上的航程、上升率、加速或减速所需要的时间和距离、爬升到一定高度上所需要的时间等。这些表征飞机所具有的飞行能力是飞行性能最基本的研究内容。

飞机执行一次飞行任务或飞行使命是由一系列可截然分开的飞行阶段组成的。例如，起飞阶段，包括滑跑、抬前轮、离地和过渡飞行；爬升到巡航飞行高度；加速到巡航飞行速度和巡航飞行；减速到下滑飞行速度、下滑飞行；减速到进场速度、拉平着陆、接地、刹车减速滑跑到停止。执行战斗任务的飞机还包括各种曲线飞行阶段。一次飞行使命的这种复杂构成，是不可能通过解析研究完整的运动方程加以解决的。人们最多也只能分别研究在个别飞行阶段上的飞行性能和一定条件下的最优问题。为此，须研究飞机在各种飞行状态下，也就是在飞行包线内任一点上飞机所具有的飞行性能。飞机在飞行包线内的点性能是评价飞机设计方案的基本前提。

进行飞行性能计算前，必须知道飞机动力系统特性（推力及

耗油特性)、空气动力特性(升阻极曲线)以及大气条件(密度、压强和温度与高度的关系)。作为飞行性能计算的基础是描述飞机在大气中飞行的质心运动方程。

本书研究内容可划分成三部分。第一部分是研究飞行性能计算的基本知识,包括飞机质心运动方程的建立和各坐标系的定义、飞行性能计算必需的原始数据。这部分内容放在第一章和第二章中加以研究;第二部分是研究飞机的飞行状态,也就是飞机在飞行包线内的点性能问题。这部分内容主要放在第三章中加以讨论;第三部分是研究飞机的飞行阶段,其特点是涉及飞机点性能的积分问题,例如飞机的续航性能、起飞和着陆性能、机动飞行性能。这部分研究内容将在第四章、第五章和第六章中加以讨论。

目前,对飞机飞行性能的要求早已规范化,飞行性能的常规计算也已走向计算机程序化。尽管如此,根据符合实际的简化假设所提出的一些解析方法和解析表达式,以及由此而求得的某些最优解,对飞机设计仍很有实际意义。因为这些反映主要因素相互依赖关系的解析表达方式能清晰地表达最基本的物理概念,比数值计算方法的透明度要好得多,更便于从飞机设计的基本布局阶段就把结构布局与飞行性能的要求协调起来。

80年代初投入实际使用的现代飞行管理系统为开拓飞机的性能潜力展现了光辉的发展前景。人们把现代飞行管理与新材料、低阻力构形、新型节油发动机并列为改善飞机飞行性能的四大技术途径之一。近年才提出的战术飞行管理系统概念,将在提高高机动性飞机的飞行性能方面发挥重要作用。飞行性能作为飞行管理系统和战术飞行管理系统的主要基础,正在向航迹优化领域拓宽,传统的飞行性能计算将在改善航行经济性、提高安全性方面发挥指导作用。

## 0-2 符 号 表

本书所采用符号基本上是按照航空气动力手册(第一册)的规定, 另外, 还采用了一些新的量及符号。对于出现次数较少或者仅在特殊情况下所引用的符号, 本表未加列入, 它们的意义可以直接从叙述中看出。

符 号	意义和定义	单 位
$A, A_1$	升致阻力因子	
$A_r$	型阻因子	
$a$	音速	m / s
$a$	飞机质心加速度	m / s <sup>2</sup>
<b>B</b>	坐标变换矩阵	
$b_{ij}$	方向余弦	
$C_x$	阻力系数	
$C_{x.0}$	最小阻力系数	
$C_{x0}$	零升阻力系数	
$C_{x0.ww}$	翼型无弯度时的零升阻力系数	
$C_{xf}$	摩阻系数	
$C_{xs}$	型阻系数	
$C_{xs.0}$	最小型阻系数	
$C_y$	升力系数	
$C_y^a$	升力线斜率	
$C_{y.0}$	最小阻力状态下的升力系数	
$C_{y.yl}$	$= C_{y.1}$ , 升阻比最大状态下的升力系数 (有利状态升力系数)	
$C_{y.yx}$	最大允许使用升力系数	
$C_{y.yv}$	失速升力系数	

$C_{y_{max}}$	最大升力系数	
$C_{y_{dd}}$	抖动限制的最大升力系数	
$C_{y_{\phi}}$	平尾极限偏角所允许的最大升力系数	
$D$	$= L/L_{max}$ , 油门节流量	
$E$	总能量	N/mr
$\dot{E}$	能量变化率	m/s
$f$	无刹车的滚动摩擦系数	
$f_B$	带刹车的滚动摩擦系数	
$g$	重力加速度	m/s <sup>2</sup>
$H$	高度	m
$H_{nl}$	能量高度	m
$h$	$= dH/dm_{you}$ , 单位燃料消耗的上升高度	m/kg
$h_{nl}$	$= dH_{nl}/dm_{you}$ , 单位燃料消耗的能量高度变化	m/kg
$K$	$= C_y/C_x$ , 升阻比	
$K_t$	时间成本	元/s
$K_{you}$	耗油成本	元/kg
$K_z$	总的成本	
$L$	距离, 长度	m
$L$	发动机性能参数	
$Ma$	马赫数	
$m$	飞机质量	kg
$mg$	飞机重量	N
$m_{\rho}$	燃料消耗率和速度的关系指数	
$m_{\rho}$	燃料消耗率和空气密度的关系指数	
$n$	过载因子	
$n_j$	法向过载因子	

$n_x, n_y, n_z$	过载因子分量	
$n_v$	推力和速度的关系指数	
$n_\rho$	推力和空气密度的关系指数	
$P$	推力	N
$p$	大气压强	N/m <sup>2</sup>
$P_0$	静推力	N
$q$	动压	N/m <sup>2</sup>
$q_b$	单位时间耗油量	kg/s
$q_m$	空气质量流量	kg/s
$q_{mg}$	燃气质量流量	kg/s
$q_{N \cdot h}$	燃料消耗率	kg/N·s
$Q$	阻力	N
$Q_0$	零升阻力	N
$Q_l$	升致阻力	N
$r$	半径	m
$R$	盘旋半径	m
SEP	比剩余功率	m/s
$t$	时间	s
$T$	时间	s
$V$	空速, 飞行速度	m/s
$V_d$	地速	m/s
$V_1$	决策速度	m/s
$V_2$	安全起飞速度	m/s
$V_{LOF}$	离地速度	m/s
$V_R$	抬前轮速度	m/s
$V_s$	失速速度	m/s
$V_y$	上升率	m/s
$W$	风速	m/s
$Y$	升力	N
$Z$	侧力	N



## 希腊字母

符 号	意义和定义	单 位
$\alpha$	迎角	rad, (°)
$\alpha_0$	零升迎角	rad, (°)
$\alpha_w$	突风迎角	rad, (°)
$\alpha_d$	地速迎角	rad, (°)
$\beta$	侧滑角	rad, (°)
$\beta_w$	突风侧滑角	rad, (°)
$\gamma$	滚转角	rad, (°)
$\gamma_v$	速度滚转角 (绕飞行速度矢量)	rad, (°)
$\gamma_w$	突风滚转角 (绕地速矢量)	rad, (°)
$\delta_l$	襟翼偏角	rad, (°)
$\delta_z$	升降舵偏转角	rad, (°)
$e$	$=c_x/c_y$ , 滑翔比 (阻升比)	
$\eta$	可用推力因子	
$\eta_L$	螺旋桨效率	
$\vartheta$	俯仰角	rad, (°)
$\theta$	航迹倾角	rad, (°)
$\lambda$	展弦比	
$\nu$	动粘性系数	$m^2/s$
$\rho$	空气密度	$kg/m^3$
$\varphi_p$	发动机安装角	rad, (°)
$\phi_w$	风向角	rad, (°)
$\chi_w$	风向角	rad, (°)
$\psi$	航向角	rad, (°)

## 下标脚注

符 号	意 义
b	半机体坐标系
B	刹车