

# 航空空气动力手册

第四册

(飞行力学部分)



国防工业出版社



# 航空气动力手册

第四册 飞行力学部分

《7210任务》办公室 编



\*30092876\*

国防工业出版社

342462



## 内 容 简 介

本手册分为上下两篇。上篇《飞机的运动方程》，介绍了飞行力学中常用的坐标系和运动参数以及各坐标系之间的转换，建立了刚性飞机各种形式的基本运动方程和线化运动方程（小扰动方程）。下篇《飞机的飞行性能》，扼要阐述了飞机飞行性能（基本飞行性能、续航性能、机动性能、起飞着陆性能）计算的基本原理和计算方法。

本手册可供从事于飞机设计和飞行力学工作的科技人员使用，对于航空院校相应专业的师生也有参考价值。

### 航空气动力手册

第 四 册 飞行力学部分

《7210任务》办公室 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张15<sup>3</sup>/<sub>8</sub> 344千字

1978年11月第一版 1978年11月第一次印刷 印数：0,001-2,500册

统一书号：N15034·1694 定价：1.60元



## 前 言

航空气动力手册第四册（飞行力学部分）由上下两篇组成。

上篇是《飞机的运动方程》。在这里，引入并定义了飞机飞行力学中常用的座标系和运动参数；建立了刚性飞机在平面大地上空、平静大气中的基本运动方程，这些方程是研究飞机飞行力学的基础，同时也可以直接用来计算飞机的航迹；建立了基准运动为对称定常直线飞行的条件下飞机的小扰动方程，这些方程是目前研究飞机稳定性和操纵性的主要依据；此外还列出了无因次形式的飞机小扰动方程；给出了可逆式和不可逆式飞机操纵系统的运动方程。

编写《飞机的运动方程》的目的，一方面是供航空工业部门的有关专业人员在实际工作中查阅，另一方面是促进各单位使用的飞机运动方程在处理方法和形式上逐步地达到统一化，以便于技术交流和协作。

下篇是《飞机的飞行性能计算》。主要内容是扼要阐述飞机飞行性能计算的基本原理和提供目前在飞机设计中广泛使用的飞行性能的工程计算方法。在介绍了性能计算所需的基本方程和原始数据以后，分别阐述了飞机的基本飞行性能、续航性能、机动性能、起飞和着陆性能的计算，最后一章介绍了大气和使用条件对飞机飞行性能的影响。每章均附有算例。为了便于使用，对一部分计算公式还绘制了计算图线（列线图），可供查用。

飞行性能的计算方法是多种多样的。本手册提供的性能计算方法主要是针对喷气式歼击机这一类型飞机的，但对于其它类型飞机也有一定的参考使用价值。

在讲述飞行性能计算的各章中，对各项性能指标给出了定义或说明。介绍了目前工程上常用的方法，主要是适合于人工计算用的近似解析法、简化数值法或图解法。并且对于各种参数的选取（例如气动外形状、发动机工作状态、飞机重量、燃料消耗量等）提出了建议，在我国正式的飞行性能计算规范尚未制定和颁布以前，这些建议可供各单位试用，以利于飞行性能计算逐步走向统一化和规格化，从而做到用同一的尺度来衡量飞行性能指标。待正式规范制定和颁布后，本手册的内容将要服从于规范要求。

第十一章提供了将标准条件下的飞行性能换算到实际使用条件的方法和公式。

作为手册来说，有些内容还不够完备和成熟，加之我们的水平有限，在编写中，肯定会有不少缺点和错误。因此，恳切希望同志们在使用中把意见及时告诉我们，以便进一步加以充实和完善。



# 目 录

## 上 篇

### 飞机的运动方程

主要符号表 .....	3
第一章 坐标系和飞机运动参数 .....	5
§ 1.1 基本定义 .....	5
§ 1.1.1 坐标系的定义 .....	5
§ 1.1.2 飞机运动参数的定义 .....	7
§ 1.2 各坐标系之间的关系和转换 .....	8
§ 1.2.1 各坐标系之间的几何关系 .....	8
§ 1.2.2 各坐标系之间的方向余弦表 .....	9
第二章 飞机的基本运动方程 .....	12
§ 2.1 概述 .....	12
§ 2.2 H-T体系的飞机运动方程 .....	12
§ 2.2.1 动力学方程 .....	12
§ 2.2.2 运动学方程及几何关系式 .....	15
§ 2.3 T-T体系的飞机运动方程 .....	16
§ 2.3.1 动力学方程 .....	16
§ 2.3.2 运动学方程及几何关系式 .....	17
第三章 线化的飞机运动方程——小扰动方程 .....	19
§ 3.1 概述 .....	19
§ 3.1.1 运动方程线化的条件 .....	19
§ 3.1.2 小扰动方程分离成两组的条件 .....	20
§ 3.1.3 扰动运动参数及力和力矩的表达形式 .....	20
§ 3.2 线化的飞机纵向运动方程 .....	21
§ 3.2.1 飞机的纵向小扰动方程组 .....	21
§ 3.2.2 纵向小扰动方程的简化情况及相应的传递函数 .....	24
§ 3.2.3 采用稳定性坐标系的情况 .....	29
§ 3.3 线化的飞机横侧运动方程 .....	31
§ 3.3.1 飞机的横侧小扰动方程组 .....	31
§ 3.3.2 横侧小扰动方程组的修正形式 .....	33
§ 3.3.3 横侧小扰动方程的简化情况及横侧运动传递函数 .....	35
§ 3.3.4 稳定性坐标系中横侧小扰动方程的特点 .....	39
§ 3.4 飞机小扰动方程的矩阵形式 .....	41
§ 3.4.1 纵向小扰动方程的矩阵形式 .....	42
§ 3.4.2 横侧小扰动方程的矩阵形式 .....	45
§ 3.4.3 传递函数的矩阵表达形式 .....	46
第四章 飞机小扰动方程的无因次形式 .....	49
§ 4.1 无因次系统表 .....	49
§ 4.2 纵向小扰动方程的无因次形式 .....	49
§ 4.3 横侧小扰动方程的无因次形式 .....	52



第五章 飞机操纵系统的运动方程 .....	54
§ 5.1 概述 .....	54
§ 5.2 可逆式操纵系统的运动方程 .....	54
§ 5.2.1 方程的基本形式 .....	54
§ 5.2.2 方程的线化形式 .....	57
§ 5.3 不可逆式操纵系统的运动方程 .....	58
§ 5.3.1 方程的基本形式 .....	58
§ 5.3.2 方程的线化形式 .....	60
§ 5.4 机体和操纵系统的组合方程组 .....	61
§ 5.4.1 机体和可逆式操纵系统的组合 .....	61
§ 5.4.2 机体和不可逆式操纵系统的组合 .....	62
附录 .....	63
I 座标变换的矩阵表示法 .....	63
II 旋转部件对飞机运动方程的影响 .....	67
III 过载的计算公式 .....	67
IV 有风时的飞机运动方程 .....	69
V 基准运动为定常盘旋时的小扰动方程 .....	72
VI 飞机运动方程无因次化的另一方案 .....	73
VII 美英两国采用的无因次系统表 .....	78
参考资料 .....	78

## 下 篇

### 飞机的飞行性能

主要符号表 .....	80
第六章 基本方程和原始数据 .....	83
§ 6.1 基本方程 .....	83
§ 6.1.1 动力学方程 .....	83
§ 6.1.2 运动学方程 .....	85
§ 6.1.3 重量变化和燃料消耗量方程 .....	85
§ 6.2 原始数据 .....	86
§ 6.2.1 气动力数据 .....	86
§ 6.2.2 发动机性能数据 .....	88
§ 6.2.3 重量数据 .....	89
第七章 基本飞行性能 .....	90
§ 7.1 平飞需用推力 .....	90
§ 7.2 可用推力 .....	91
§ 7.3 最大平飞速度 .....	91
§ 7.4 最小平飞速度 .....	91
§ 7.4.1 按升力特性确定 .....	92
§ 7.4.2 按发动机推力特性确定 .....	93
§ 7.5 爬升性能 .....	93
§ 7.5.1 最大爬升率 .....	94
§ 7.5.2 爬升时间 .....	94
§ 7.5.3 爬升水平距离 .....	97
§ 7.5.4 爬升时的重量变化和燃料消耗量 .....	98
§ 7.6 升限 .....	98
§ 7.6.1 用图解法求升限 .....	98



§ 7.6.2	用解析图解法求升限 .....	99
§ 7.7	下滑性能 .....	100
§ 7.7.1	下滑时的水平距离、时间和燃料消耗量 .....	100
§ 7.7.2	有利下滑速度 .....	101
§ 7.8	算例 .....	101
§ 7.8.1	平飞需用推力曲线 .....	102
§ 7.8.2	可用推力曲线 .....	102
§ 7.8.3	最大平飞速度 .....	102
§ 7.8.4	最小平飞速度 .....	104
§ 7.8.5	爬升性能 .....	105
§ 7.8.6	升限 .....	108
§ 7.8.7	下滑性能 .....	111
第八章	续航性能 .....	114
§ 8.1	基本公式 .....	114
§ 8.2	可用燃料量和巡航段可用燃料量 .....	115
§ 8.2.1	可用燃料量 .....	115
§ 8.2.2	巡航段可用燃料量 .....	116
§ 8.3	等高等速巡航航程和续航时间 .....	116
§ 8.3.1	给定高度给定速度的航程和续航时间 .....	116
§ 8.3.2	给定高度的最大航程和最大续航时间 .....	118
§ 8.3.3	最大航程和最大续航时间 .....	119
§ 8.4	变高等速巡航的最大航程和最大续航时间 .....	119
§ 8.4.1	最大航程 .....	119
§ 8.4.2	在巡航段中途投弹的最大航程 .....	121
§ 8.4.3	最大续航时间 .....	121
§ 8.5	作战半径 .....	122
§ 8.6	算例 .....	123
§ 8.6.1	给定高度等速巡航的续航性能 .....	123
§ 8.6.2	变高等速巡航的最大航程和作战半径 .....	127
第九章	机动性能 .....	131
§ 9.1	水平加减速性能 .....	131
§ 9.2	正常盘旋性能 .....	132
§ 9.3	特技性能 .....	133
§ 9.3.1	非定常盘旋 .....	134
§ 9.3.2	俯冲 .....	135
§ 9.3.3	跃升 .....	138
§ 9.3.4	筋斗 .....	138
§ 9.3.5	战斗转弯 .....	139
§ 9.4	算例 .....	141
§ 9.4.1	水平加减速 .....	142
§ 9.4.2	正常盘旋 .....	143
§ 9.4.3	非定常盘旋 .....	144
§ 9.4.4	俯冲 .....	145
§ 9.4.5	筋斗 .....	149
§ 9.4.6	战斗转弯 .....	149
第十章	起飞和着陆性能 .....	152
§ 10.1	起飞性能 .....	152
§ 10.1.1	离地速度 .....	152
§ 10.1.2	起飞滑跑距离和时间 .....	153



§ 10.1.3	起飞滑跑段的燃料消耗量 .....	156
§ 10.1.4	起飞空中段的距离和时间 .....	157
§ 10.1.5	起飞总距离和总时间 .....	157
§ 10.2	着陆性能 .....	157
§ 10.2.1	接地速度和着陆进场速度 .....	157
§ 10.2.2	着陆空中段的距离和时间 .....	158
§ 10.2.3	着陆滑跑距离和时间 .....	158
§ 10.2.4	着陆总距离和总时间 .....	161
§ 10.3	起飞性能算例 .....	161
§ 10.3.1	离地速度计算 .....	161
§ 10.3.2	起飞滑跑距离和时间的计算 .....	162
§ 10.3.3	起飞空中段的距离和时间的计算 .....	165
§ 10.3.4	起飞总距离和总时间 .....	166
§ 10.4	着陆性能算例 .....	166
§ 10.4.1	接地速度和着陆进场速度的计算 .....	167
§ 10.4.2	着陆空中段距离和时间的计算 .....	167
§ 10.4.3	着陆滑跑距离和时间的计算 .....	167
§ 10.4.4	着陆总距离和总时间 .....	169
第十一章	大气和使用条件对飞机飞行性能的影响 .....	170
补充符号	.....	170
换算参数	.....	170
§ 11.1	基本原理 .....	171
§ 11.2	大气和使用条件对最大平飞速度和爬升性能的影响 .....	172
§ 11.2.1	对最大平飞速度的影响 .....	172
§ 11.2.2	对快升速度的影响 .....	174
§ 11.2.3	对最大爬升率的影响 .....	175
§ 11.2.4	对爬升时间的影响 .....	177
§ 11.2.5	对升限的影响 .....	178
§ 11.3	大气和使用条件对续航性能的影响 .....	179
§ 11.3.1	对爬升段的航程、时间和耗油量的影响 .....	179
§ 11.3.2	对巡航段航程和续航时间的影响 .....	180
§ 11.3.3	对下滑段航程和时间的影响 .....	183
§ 11.4	大气和使用条件对机动性能的影响 .....	183
§ 11.4.1	大气温度、转速和重量对飞机水平直线加(减)速性能的影响 .....	183
§ 11.4.2	大气温度、转速和重量对飞机正常盘旋性能的影响 .....	184
§ 11.5	大气和使用条件对起飞着陆性能的影响 .....	185
§ 11.5.1	起飞性能的换算 .....	185
§ 11.5.2	着陆性能的换算 .....	188
§ 11.5.3	起飞(或着陆)滑跑距离和时间向另一离地(或接地)速度的换算 .....	189
§ 11.5.4	着陆前下滑特性向另一飞行重量的换算 .....	190
§ 11.6	算例 .....	190
§ 11.6.1	最大平飞速度的换算 .....	190
§ 11.6.2	快升速度的换算 .....	192
§ 11.6.3	最大爬升率的换算 .....	193
§ 11.6.4	爬升时间的换算 .....	194
§ 11.6.5	升限的换算 .....	195
§ 11.6.6	对爬升段续航性能的影响 .....	195
§ 11.6.7	正常盘旋性能的换算 .....	196
§ 11.6.8	飞机起飞性能的换算 .....	199
附录	.....	201



10-I	使用火箭起飞对滑跑距离的影响 .....	201
10-II	使用反推力装置对着陆滑跑距离的影响 .....	202
11-I	式(11-20)的推导 .....	204
11-II	式(11-29)和(11-30)的推导 .....	205
11-III	式(11-35)至(11-38)的推导 .....	205
11-IV	式(11-39)至(11-42)的推导 .....	207
11-V	式(11-68)的推导 .....	209
附图	.....	210
7-1A	平飞需用推力的确定 (已知 $H$ 、 $M$ ) .....	210
7-1B	平飞需用推力的确定 (已知 $H$ 、 $V$ ) .....	211
8-1	给定高度给定速度航程的确定 .....	212
9-1	正常盘旋的盘旋半径和时间的确定 .....	213
9-2	正常盘旋的盘旋角速度的确定 .....	214
9-3	正常盘旋时绕速度矢量的滚转角的确定 .....	215
10-1	起飞离地速度的确定 .....	216
10-2	起飞滑跑距离的确定 .....	217
10-3	着陆接地速度的确定 .....	218
10-4	着陆滑跑距离的确定 .....	219
11-1A	计算 $(\delta V_y)'_{Ths}$ 的曲线图 $(\delta V_y)'_{Ths} = f\left(\frac{\delta T_{hs}}{T}, V_y\right)$ .....	220
11-1B	计算 $(\delta V_y)''_{Ths}$ 的曲线图 $(\delta V_y)''_{Ths} = f\left(\delta P_{hs}, H_q, \frac{G}{i}, V_{ks}\right)$ .....	221
11-2A	计算 $(\delta V_y)'_G$ 的曲线图 $(\delta V_y)'_G = f\left(\frac{\delta G}{G_{sf}}, V_y\right)$ .....	222
11-2B	计算 $(\delta V_y)''_G$ 的曲线图 $(\delta V_y)''_G = f(\delta G, A, H_q, V_{ks}, S)$ .....	223
11-3A	计算 $(\delta V_y)_f$ 的曲线图 $(\delta V_y)_f = f\left(V_{ks}, \frac{dV_{ks}}{dt}\right)$ .....	225
11-3B	计算 $(\delta V_y)_f$ 的曲线图 $(\delta V_y)_f = f\left(V_{ks}, \frac{dV_{ks}}{dH_q}, V_y\right)$ .....	226
11-4A	计算 $1 + \chi$ 的曲线图 $1 + \chi = f\left(V_{ks}, \frac{dV_{ks}}{dH_q}\right)$ .....	227
11-4B	$\frac{dw}{dH_q} > 0$ 时, 计算 $(\delta V_y)_\omega$ 的曲线图 $(\delta V_y)_\omega = f\left(V_{ks}, \frac{dw}{dH_q}, \theta, \beta, 1 + \chi, V_y\right)$ .....	228
11-4C	$\frac{dw}{dH_q} < 0$ 时, 计算 $(\delta V_y)_\omega$ 的曲线图 $(\delta V_y)_\omega = f\left(V_{ks}, \frac{dw}{dH_q}, \theta, \beta, 1 + \chi, V_y\right)$ .....	229
参考资料	.....	230



# 上 篇

## 飞机的运动方程



生 徽

蘇式版圖四時方



## 主要符号表

1. 这里只列出比较重要的符号，其余的见有关章节。

2. 动力系数符号的意义见第三章。

3. 无因次量的符号见第四章及附录Ⅵ。

4. 本符号表中各符号的单位是按目前通用的工程单位制给出的，其中的“公斤”本来应写为“公斤力”，但按目前习惯仍简写为“公斤”。

$a$	音速，米/秒；或加速度，米/秒 <sup>2</sup>
$b_A$	机翼平均气动弦，米
$c_x, c_y, c_z$	阻力系数、升力系数、侧力系数
$G$	飞机重量，公斤
$g$	重力加速度，米/秒 <sup>2</sup>
$H$	飞行高度，米
$I_x, I_y, I_z$	飞机对机体轴的转动惯量，公斤·米·秒 <sup>2</sup>
$I'_x, I'_y$	修正转动惯量〔见式(3-42)〕，公斤·米·秒 <sup>2</sup>
$I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$	飞机对机体轴的惯性积，公斤·米·秒 <sup>2</sup>
$K_x, K_y, K_z$	副翼、方向舵、升降舵系统的传动比，弧度/米
$l$	翼展，米
$M$	马赫数
$M_x, M_y, M_z$	气动滚转力矩、偏航力矩、俯仰力矩，公斤·米
$M'_x, M'_y$	修正气动力矩〔见式(3-42)〕，公斤·米
$m_x, m_y, m_z$	滚转力矩系数、偏航力矩系数、俯仰力矩系数
$n$	过载系数
$O$	飞机重心
$P$	飞机发动机的推力，公斤
$P_x, P_y, P_z$	副翼、方向舵、升降舵的驱动力，公斤
$p$	$= d/dt$ ，微分算子，1/秒
$Q$	气动阻力，公斤
$S$	机翼面积，米 <sup>2</sup>
$s$	拉普拉斯算子
$t$	时间，秒
$V$	飞行速度，米/秒
$W(s)$	传递函数
$w$	风速，米/秒
$w_x, w_y, w_z$	副翼、方向舵、升降舵的驾驶位移，米



$x$	座标轴
$Y$	气动升力, 公斤
$y$	座标轴
$y_p$	发动机推力线的偏心距, 米
$Z$	气动侧力, 公斤
$z$	座标轴
$\alpha$	迎角, 弧度
$\beta$	侧滑角, 弧度
$\gamma$	滚转角, 弧度
$\gamma_s$	绕速度向量的滚转角, 弧度
$\delta_p$	油门杆位移, 米
$\delta_x, \delta_y, \delta_z$	副翼、方向舵、升降舵的偏转角, 弧度
$\theta$	航迹倾角, 弧度
$\vartheta$	俯仰角, 弧度
$\rho$	空气密度, 公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup>
$\varphi_p$	发动机推力线偏斜角, 弧度
$\psi$	偏航角, 弧度
$\psi_s$	航迹偏角, 弧度
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	飞机绕机体轴的角速度 (滚转角速度、偏航角速度、俯仰角速度), 弧度/秒

## 下标:

- $b$  半机体轴
- $d$  地面轴
- $h$  航迹轴
- $q$  气流轴
- $t$  机体轴
- $w$  稳定性轴
- $0$  未扰动参数



# 第一章 坐标系和飞机运动参数

## § 1.1 基本定义

### § 1.1.1 坐标系的定义

为了建立飞机运动方程，采用下列几套右手直角坐标系。

当定义坐标系（或简称坐标系）和运动参数时，假设大气是静止的，因此飞机重心相对于地面的速度（地速）与相对于空气的速度（空速）是一致的，统称为飞行速度（当考虑大气风速时所需要的特殊的坐标系和运动参数，将在附录Ⅳ中定义）。此外，还不考虑大地的曲率和整个地球的旋转。

#### 1. 地面坐标系 $Ax_d y_d z_d$

地面坐标系（参看图 1-1 或 1-5）固连于大地。原点  $A$  在地面或海平面上适当选择的某点；轴  $Ay_d$  为铅垂向上；轴  $Ax_d$  和  $Az_d$  为水平，其方向按具体情况来规定。

在研究各坐标系之间的关系时，还要利用所谓“飞机牵连的地面坐标系”  $Ox'_d y'_d z'_d$ ，它的原点  $O$  在飞机重心，而轴  $Ox'_d$ 、 $Oy'_d$ 、 $Oz'_d$  则分别平行于地面坐标轴  $Ax_d$ 、 $Ay_d$ 、 $Az_d$ 。

#### 2. 机体坐标系 $Ox_t y_t z_t$

机体坐标系（参看图 1-1、1-2 或 1-6）固连于飞机。原点  $O$  在飞机重心；纵轴  $Ox_t$  平行于机身轴线或机翼平均气动弦线，指向前；竖轴  $Oy_t$  在飞机对称平面内，垂直于  $Ox_t$ ，指向上（当飞机处于正常飞行状态时）；横轴  $Oz_t$  垂直于飞机对称平面，指向右。

气动力矩的三个分量（即滚转力矩  $M_x$ 、偏航力矩  $M_y$  和俯仰力矩  $M_z$ ）是在机体坐标系中定义的（参看图 1-6）。

有时还采用两种特殊的机体坐标系。一种是主惯性机体坐标系，它的三个轴与飞机主惯性轴重合，因而惯性积  $I_{xy}$ 、 $I_{yz}$ 、 $I_{zx}$  都等于零。另一种是稳定性坐标系，以后详述。

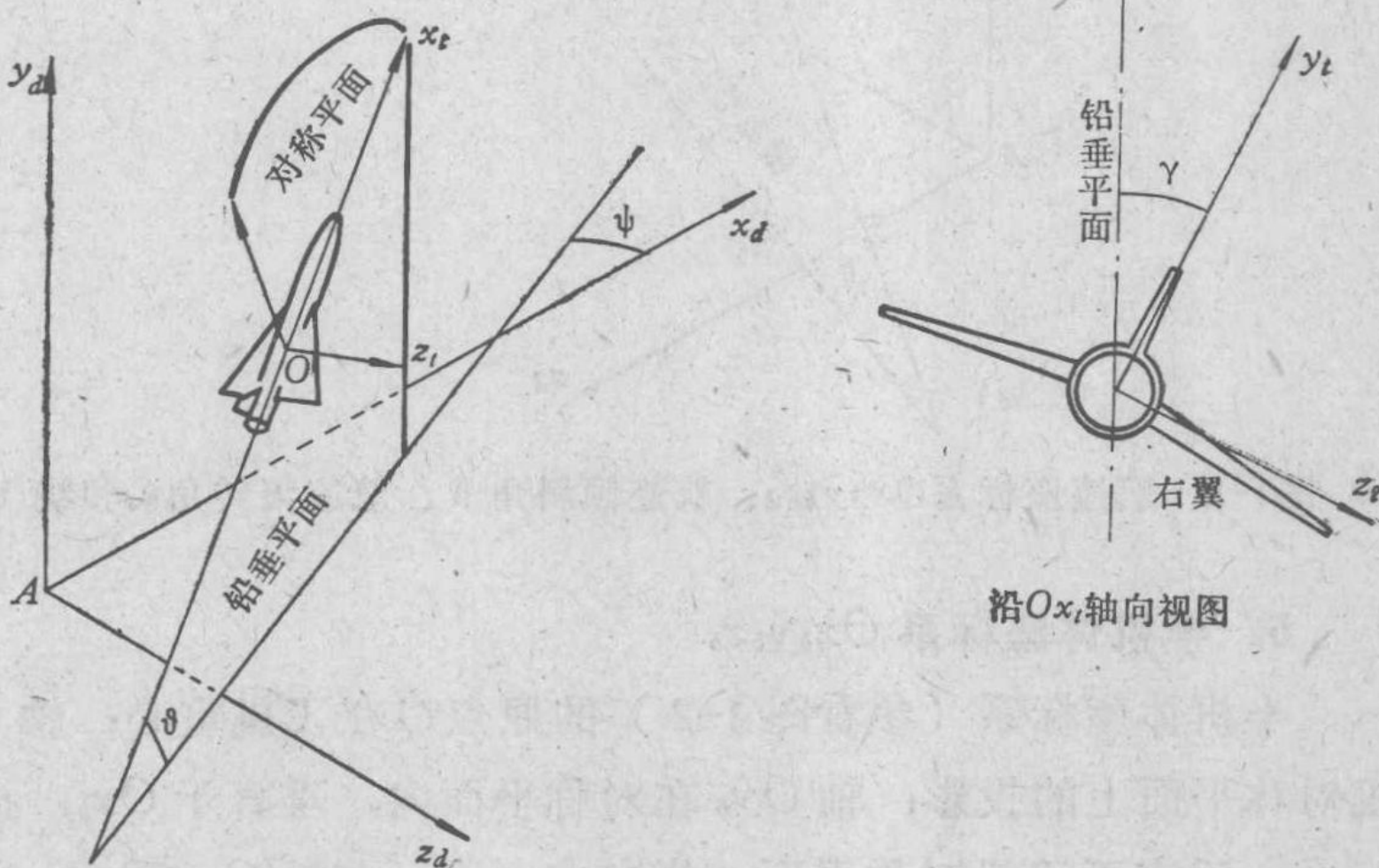


图1-1 地面坐标系  $Ax_d y_d z_d$ 、机体坐标系  $Ox_t y_t z_t$ 、飞机俯仰角  $\theta$ 、偏航角  $\psi$ 、滚转角  $\gamma$  的规定



**3. 气流坐标系  $Ox_qy_qz_q$**

气流坐标系（参看图 1-2）的原点  $O$  在飞机重心；轴  $Ox_q$  沿飞行速度向量  $V$ ；轴  $Oy_q$  在飞机对称平面内，垂直于  $Ox_q$ ，指向上；轴  $Oz_q$  垂直于平面  $Ox_qy_q$ ，指向右。

气动力的三个分量（即阻力  $Q$ 、升力  $Y$  和侧力  $Z$ ）是在气流坐标系中定义的，而且阻力  $Q$  沿轴  $Ox_q$  的负向（参看图 1-2）。

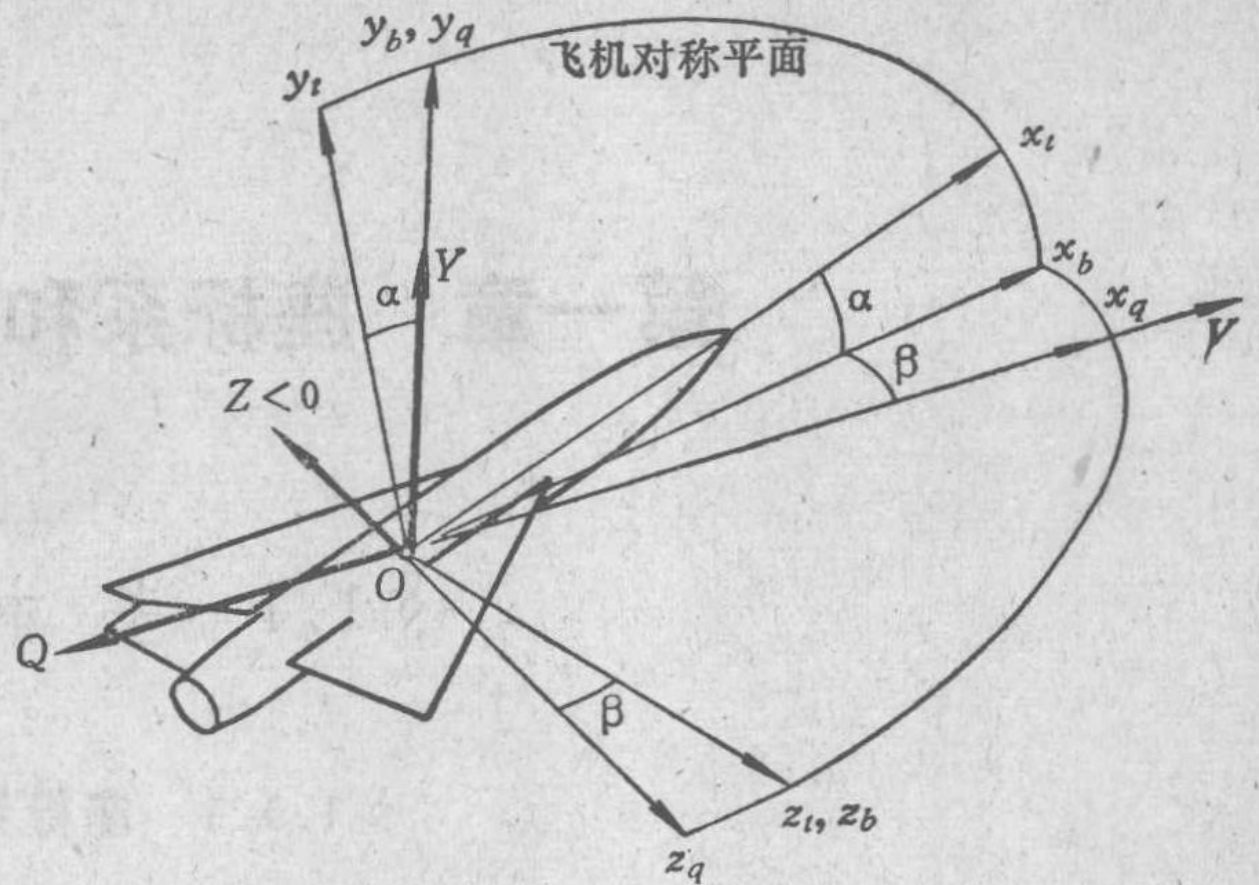


图1-2 气流坐标系  $Ox_qy_qz_q$ 、半机体坐标系  $Ox_by_bz_b$ 、迎角  $\alpha$ 、侧滑角  $\beta$  及气动力  $Q$ 、 $Y$ 、 $Z$  的规定

**4. 航迹坐标系  $Ox_hy_hz_h$**

航迹坐标系（参看图 1-3）的原点  $O$  在飞机重心；轴  $Ox_h$  沿飞行速度向量  $V$ （因而与轴  $Ox_q$  一致）；轴  $Oy_h$  在包含飞行速度向量  $V$  的铅垂平面内，垂直于  $Ox_h$ ，指向上；轴  $Oz_h$  垂直于平面  $Ox_hy_h$ （因而是水平的），指向右。

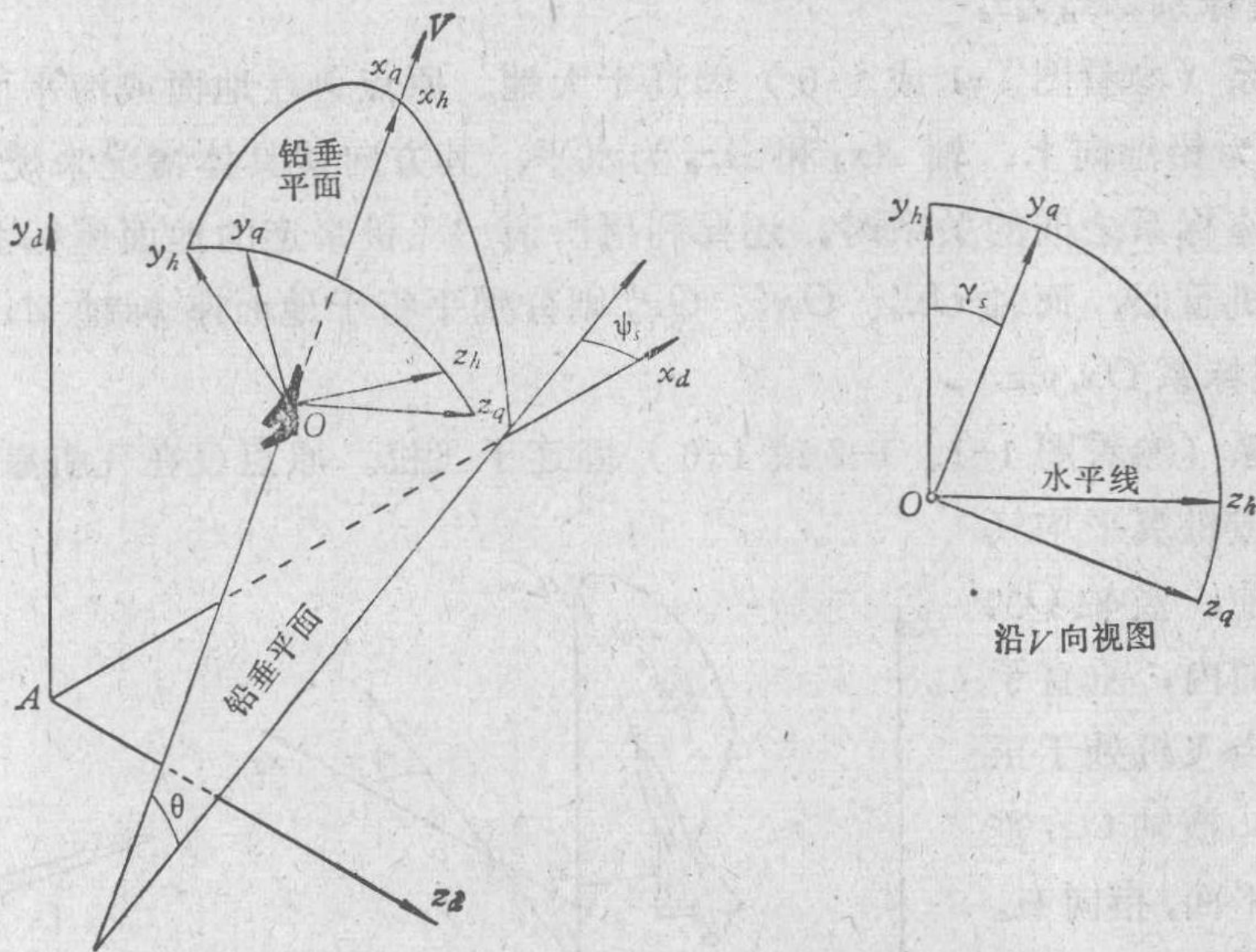


图1-3 航迹坐标系  $Ox_hy_hz_h$ 、航迹倾斜角  $\theta$ 、航迹偏转角  $\psi$  和绕飞行速度向量的滚转角  $\gamma_s$  的规定

**5. 半机体坐标系  $Ox_by_bz_b$**

半机体坐标系（参看图 1-2）的原点  $O$  在飞机重心；轴  $Ox_b$  沿飞行速度向量  $V$  在飞机对称平面上的投影；轴  $Oy_b$  在对称平面内，垂直于  $Ox_b$ ，指向上（因而与轴  $Oy_q$  重合）；轴  $Oz_b$  垂直于飞机对称平面，指向右（因而与轴  $Oz_q$  重合）。

有时，气动力的三个分量在半机体轴系中给出，它们应分别以  $Q_b$ 、 $Y_b (= Y)$ 、 $Z_b$  表示。气动力分量由半机体轴系到气流轴系的转换公式见 § 1.2.2 的 7。

**6. 稳定性坐标系  $Ox_wy_wz_w$**

稳定性坐标系（参看图 1-4）的原点  $O$  在飞机重心；轴  $Ox_w$  沿飞行速度向量  $V$  在飞



机对称平面上的投影；轴  $Oy_w$  在对称平面内，垂直于  $Ox_w$ ，指向上；轴  $Oz_w$  垂直于对称平面。在扰动运动中，此坐标系就固连于飞机。因此，稳定性坐标系与前述的机体坐标系具有相同的性质，而且两者的  $z$  轴是一致的，两者的  $x$  轴之间和  $y$  轴之间则相差一个未扰动迎角  $\alpha_0$ 。

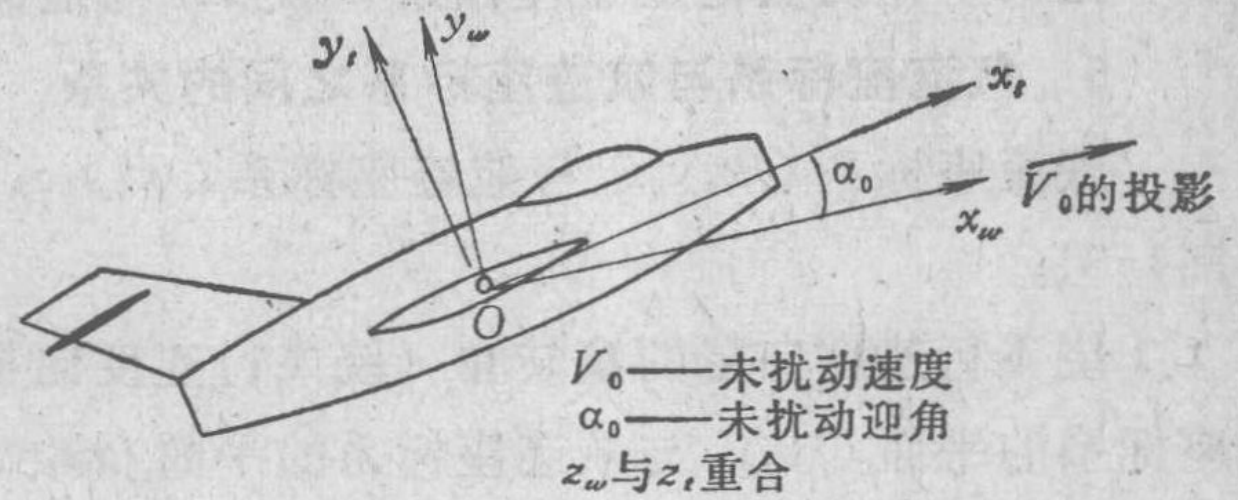


图1-4 稳定性坐标系  $Ox_w y_w z_w$  与机体坐标系  $Ox_i y_i z_i$  的关系

### § 1.1.2 飞机运动参数的定义

为了描述飞机的运动状态，定义下列运动参数。

#### 1. 飞机在空间的位置

飞机在空间的位置用飞机重心  $O$  在地面坐标系中的座标  $x_a$ 、 $y_a$ 、 $z_a$  来确定(参看图1-1或1-5)。

#### 2. 飞机在空间的姿态

飞机在空间的姿态用以下三个角度来确定(参看图1-1)。

俯仰角  $\theta$ ：飞机纵轴  $Ox_i$  与水平面  $Ax_a z_a$  之间的角度；当轴  $Ox_i$  向上方倾斜时， $\theta$  为正。

偏航角  $\psi$ ：飞机纵轴  $Ox_i$  在水平面  $Ax_a z_a$  上的投影与地面轴  $Ax_a$  之间的角度；如果按右手法则绕轴  $Ay_a$  从轴  $Ax_a$  转到该投影线，则  $\psi$  为正。

滚转角(倾侧角  $\gamma$ )：飞机对称平面  $Ox_i y_i$  与包含纵轴  $Ox_i$  的铅垂平面之间的角度；如果按右手法则绕轴  $Ox_i$  从铅垂平面转到飞机对称平面(即右翼下沉，左翼上升)，则  $\gamma$  为正。

这三个角度决定机体坐标系  $Ox_i y_i z_i$  与地面坐标系  $Ax_a y_a z_a$  的相互方位。

#### 3. 飞行速度向量相对于机体的方位

飞行速度向量  $V$  相对于飞机机体的方位用以下两个角度来确定(参看图1-2)。

迎角  $\alpha$ ：飞行速度向量  $V$  在飞机对称平面上的投影线(即半机体轴  $Ox_b$ )与机体轴  $Ox_i$  之间的角度；如果轴  $Ox_b$  在轴  $Ox_i$  的下方，则  $\alpha$  为正<sup>●</sup>。

侧滑角  $\beta$ ：飞行速度向量  $V$  与飞机对称平面之间的角度；如果速度  $V$  偏向右方，则  $\beta$  为正。

这两个角度决定气流坐标系  $Ox_q y_q z_q$  与机体坐标系  $Ox_i y_i z_i$  之间的相互位置。

#### 4. 飞行速度向量相对于地面的方向

飞行速度向量  $V$  相对于地面的方向用以下两个角度来确定(参看图1-3)。

航迹倾斜角  $\theta$ ：飞行速度向量  $V$  与水平面  $Ax_a z_a$  之间的角度；当速度  $V$  向上方倾斜时  $\theta$  为正。

航迹偏转角  $\psi_r$ ：飞行速度向量  $V$  在水平面上的投影与地面轴  $Ax_a$  之间的角度；如果按右手法则绕轴  $Ay_a$  从轴  $Ax_a$  转到该投影线，则  $\psi_r$  为正。

● 在研究飞机气动力特性时，迎角的基准线可能与上述的机体轴  $Ox_i$  并不一致(例如有时以零升力线或翼根弦线作为基准线)，这样的两个迎角将相差一个常数，应注意换算。



这两个角度决定航迹坐标系  $Ox_h y_h z_h$  与地面坐标系  $Ax_a y_a z_a$  之间的相互方位。

### 5. 气流坐标系与航迹坐标系之间的关系

气流坐标系  $Ox_q y_q z_q$  与航迹坐标系  $Ox_h y_h z_h$  之间的关系用如下角度来确定 (参看图1-3)。

绕飞行速度向量的滚转角 (绕飞行速度向量的倾侧角, 或简称速度滚转角)  $\gamma_s$ ; 气流坐标系的平面  $Ox_q y_q$  与航迹坐标系的平面  $Ox_h y_h$  (即包含飞行速度向量的铅垂平面) 之间的角度; 如果按右手法则绕飞行速度向量  $V$  从铅垂平面转到平面  $Ox_q y_q$  (即右翼下沉), 则  $\gamma_s$  为正。

### 6. 其它运动参数

确定飞机运动状态的其它参数包括:

飞机主要操纵面的偏转角, 即升降舵偏角  $\delta_z$  (或全动平尾偏角  $\varphi$ )、方向舵偏角  $\delta_y$  和副翼偏角  $\delta_x$ , 它们的正负号规定在图 1-5 中给出;

飞机的驾驶位移, 即升降舵驾驶杆 (或盘) 位移  $w_z$ 、方向舵脚蹬位移  $w_y$  和副翼驾驶杆 (或盘) 位移  $w_x$ , 它们的正负号规则是: 正的驾驶位移产生相应的正的操纵面偏转角 (参看图 1-6);

发动机工作状态的参数, 即转速  $n$ 、油门杆位置  $\delta_p$  等。

## § 1.2 各坐标系之间的关系和转换

### § 1.2.1 各坐标系之间的几何关系

各坐标系的相互几何关系可以通过上述的八个角度来说明。

1) 如果使飞机牵连的地面坐标系  $Ox'_a y'_a z'_a$  首先绕轴  $y'_a$  转过偏航角  $\psi$ , 成为  $Ox'_1 y'_1 z'_1$ , 然后绕轴  $z'_1$  转过俯仰角  $\theta$ , 成为  $Ox_t y_t z_t$ , 最后绕轴  $x_t$  转过滚转角  $\gamma$ , 就与机体坐标系  $Ox_r y_r z_r$  重合 (参看图 1-6)。

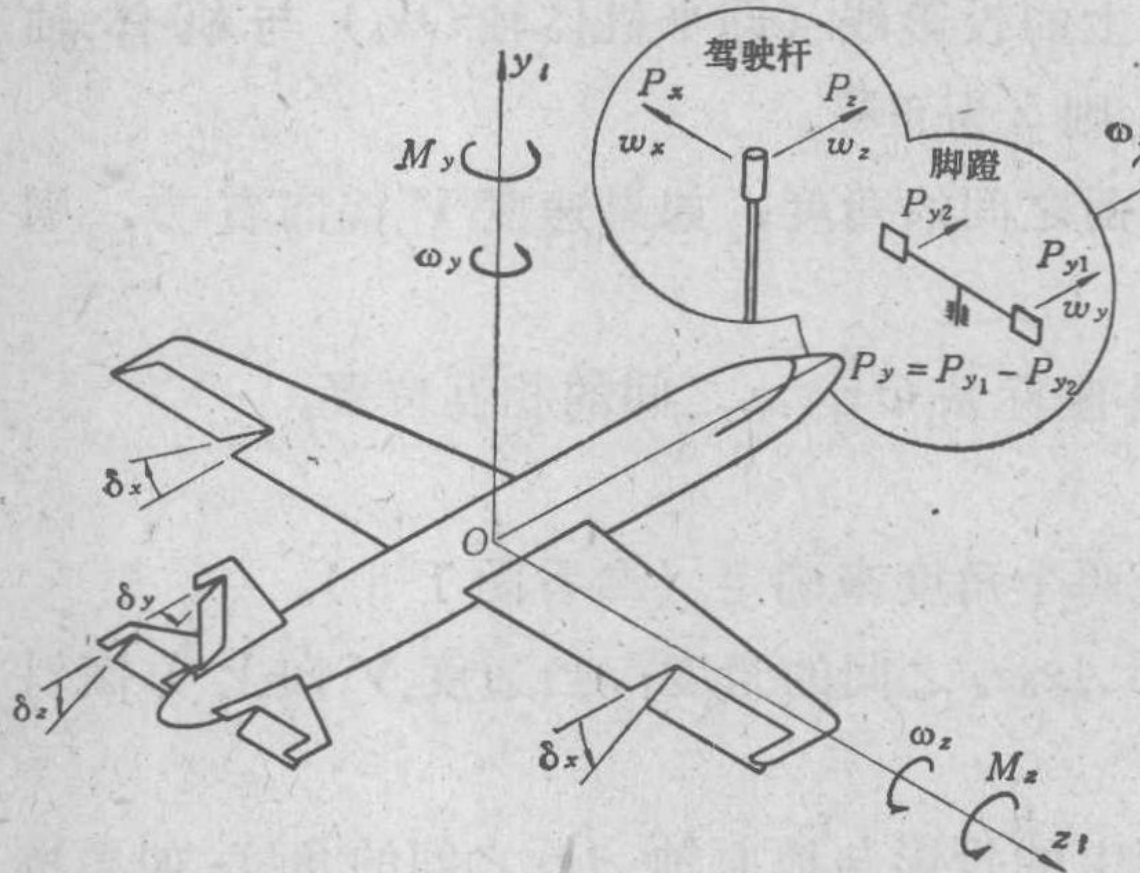


图1-5 力矩  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ , 角速度  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ , 操纵面偏转角  $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、 $\delta_z$ , 驾驶位移  $w_x$ 、 $w_y$ 、 $w_z$  及驱动力  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  的规定

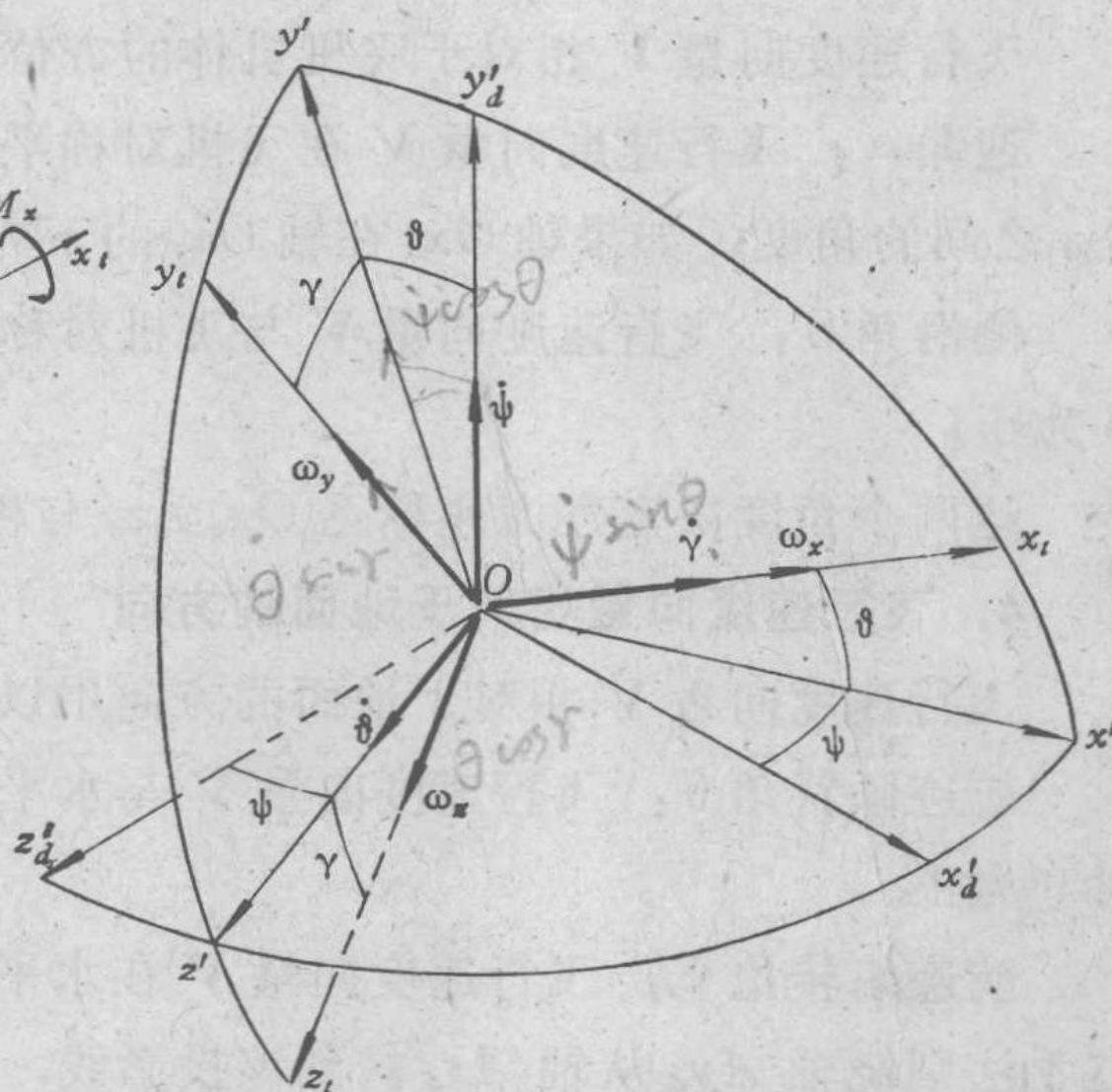


图1-6 地面坐标系与机体坐标系的关系