

飞机空气动力学

纵向和横航向动力学

Г. С. 别佑士金斯 著
Р. В. 斯杜德涅夫

飞行力学编辑部

V211/A1019
1009-20

V211
1009-20

飞机空气动力学

纵向和横航向动力学

Г.С. 别佑士金斯 著
P.B. 斯杜德涅夫

戈平 刘金生 译
高浩 董庚寿 校



飞行力学编辑部
一九八二年

内 容 简 介

本书研究现代飞机纵向和横航向稳定性与操纵性特点。给出了驾驶员对飞机飞行品质的评定与飞机的空气动力以及惯性特性之间关系的研究结果。分析了包括气动不稳定飞机操纵自动化在内的有人驾驶飞机自动化的基本方向。

本书可供从事飞机稳定性与操纵性设计、飞机地面模拟实验、飞机飞行试验、飞机飞行控制系统和飞机操纵系统的工程技术人员以及高等航空院校师生使用。同时对广大的空、海军、民航的驾驶员和航校的教员和学员均有重要的参考价值。



飞机空气动力学——纵向和横航向动力学

Г.С. 别佑士金斯 著
P.B. 斯杜德涅夫

戈 平 刘金生 译
高 浩 董庚寿 校

编辑：飞行力学编辑部
印刷：西北电业管理局印刷厂

定价：2.00元

出 版 说 明

《飞机空气动力学——纵向和横航向动力学》一书为苏联别佑士金斯(Г.С.Бюшгенс)和斯杜德涅夫(Р.В.Студнев)著,莫斯科机械制造出版社一九七九年出版的新书。

该书详细分析了现代飞机纵向和横航向运动的稳定性及操纵性的特点。给出了驾驶员对飞机飞行品质的评价与气动力特性之间的关系的研究成果,气动不稳定飞机操纵自动化问题。该书还介绍了有关驾驶员数学模型和利用飞行模拟器进行飞行动力学和飞行品质研究情况。

全书共分四大部份,十章。内容新颖,技术实用,可供从事飞机及其飞行操纵系统和控制系统设计、地面实验、飞行试验和工程技术人员和高等航空院校高年级学生、研究生和教师使用。同时对广大的空、海军和民航的驾驶员和航校的教员、学员均有重要的参考价值。

本书由高级工程师戈平同志和工程师刘金生同志翻译,由副教授高浩同志和高级工程师董庚寿同志校对,许道业、张永河同志负责出版事务。限于水平,不免有错之处,请阅者批评指正。

在印刷出版过程中曾得到西北电业管理局印刷厂大力协助,在此表示深切谢意。

飞行力学编辑部

一九八二年五月

著者前言

近年来，飞行动力学问题的研究得到了重大发展。它关系到提高飞行的可靠性和安全性，改善飞机的飞行品质，以至最后得以提高使用的有效性等。

在航空技术的完善过程中，自动化装置合理地引入对有人驾驶的飞机起着重大作用。当今研究飞机动力学问题时，不同时研究操纵的自动化（其中包括手操纵时改善稳定性和操纵性系统）问题实际上是不可思议的。诸如在完成各种机动动作时飞机的操纵这类问题，需要对飞机与驾驶员之间相互作用进行更深入地研究和对驾驶员的动作做出数学描述。

自动控制装置的广泛应用是与故障概率以及对各种飞行情况拟定不同要求的必要性联在一起的。它也包括当控制系统装置中每一故障发生后，在保证飞行安全的条件下，允许品质的某些降级。

最后，近年来在专门的飞行模拟器上的研究得到了特别的发展。这种模拟器装有外界环境的显示系统和有全部必要的驾驶仪表和驾驶杆的座舱。此时，用电子计算机解飞机运动方程。在具有活动座舱的更加完善的飞行模拟器上，近似地产生作用于驾驶员的过载和其他的飞行感觉。

这种模拟器在现代飞机动力学的研究中起着非常重要的作用。在苏联及国外使用这种模拟器进行的工作为选择决定飞机稳定性及操纵性的参数，控制系统的参数，为急剧机动以及起飞和着陆状态下的动力学等提供了大量资料。在模拟器上的研究，节省了大量物资和大大缩短了飞机的研制周期。

尽管谈到有关飞行力学的各种观点和操纵自动化的文献数量虽然不少，然而对上述问题系统地研究和在著作中的阐述却很不够。

研究飞机的各种飞行问题需要对其动力学有不同精度的描述。在分析小扰动和操纵作用下的飞机运动时，允许将空间运动方程分解为纵向和横航向运动方程，并分别进行研究。

当作用在飞机上的扰动量或操纵作用大的时候，就必须研究飞机的空间运动，并分析非线性方程^[14]。最后，为了研究某些运动参数超出其变化的允许边界时飞机的动力学特点，必须研究称为飞行的临界状态（如失速、尾旋等等）。这通常需要分析描述飞机运动的全量方程。

本书基本上限于研究在允许方程线化和纵向与横航向运动可分开的情况下飞机运动的规律性。

在写此书时，作者给自己规定了下述任务：

目 录

著者前言	(1)
符 号	(3)
序	(6)
第一部分 飞机动力学绪论	
第一章 飞行器的空间运动方程	(8)
§ 1 飞行器运动的全量方程组	(8)
§ 2 飞机的运动方程	(17)
§ 3 飞机运动方程的线性化, 全量方程组分解为独立的纵向和横航向运动方程组	(25)
§ 4 无因次形式的飞机空间运动方程	(27)
第二章 驾驶员驾驶飞机过程的近似数学描述	(31)
§ 5 在完成单通道稳定任务时驾驶员行为的数学描述	(33)
§ 6 在同时操纵多通道稳定飞机时驾驶员行为的数学模型	(43)
§ 7 某些特殊飞行状态下驾驶员驾驶飞机过程的模型	(44)
第三章 用飞行模拟器进行飞行动力学研究	(46)
§ 8 飞行模拟器的建造原则和基本组成部分	(46)
§ 9 在飞行模拟器上模拟各种飞行动力学问题时信息来源的比较意义	(49)
§ 10 在飞行模拟器上目视信息的显示	(59)
§ 11 在飞行模拟器上角加速度和过载的模拟	(66)
§ 12 在飞行模拟器上飞行情况的补充信息源的模拟	(74)
§ 13 在飞行模拟器上研究方法的一些问题	(76)
第二部分 飞机的纵向稳定性和操纵性	
第四章 飞机纵向运动的动力学	(80)
§ 14 纵向运动方程	(80)
§ 15 飞机的纵向长周期(沉浮)运动	(86)
§ 16 等速飞行时飞机的稳定性和操纵性	(92)
第五章 飞机的纵向稳定性和操纵特性对驾驶员评价其飞行品质的影响	(98)

§ 17	对飞机操纵静特性的要求	(99)
§ 18	纵向运动中对飞机动态特性的要求	(104)
§ 19	稳定状态下对飞机纵向运动特性的要求 (应用驾驶员的数学模型)	(110)

第三部分 飞机横航向运动的稳定性和操纵性

第六章	飞机横航向运动的基本特点	(124)
§ 20	飞机横航向运动稳定性分析	(124)
§ 21	飞机横航向扰动运动的近似分析	(130)
§ 22	飞机的气动参数对横航向运动特征方程根的影响	(136)
§ 23	飞机横航向运动的操纵性	(157)
第七章	飞机横航向运动参数对驾驶员评价其飞行品质的影响	(164)
§ 24	对机动性飞机横向操纵通道中快速动作的要求	(165)
§ 25	着陆进场时对横向操纵的快速动作的要求	(170)
§ 26	横航向运动中驾驶员对飞机飞行品质的评价	(174)
§ 27	侧风着陆时飞机横航向运动特点的研究	(184)

第四部分 飞机手操纵的自动化

第八章	飞机操纵自动化的一般问题	(193)
§ 28	飞机操纵自动化发展的某些方向	(193)
§ 29	对有人驾驶飞机操纵系统的一般要求	(196)
第九章	飞机纵向操纵的自动化	(200)
§ 30	纵向阻尼器和改善纵向稳定性的自动器	(200)
§ 31	通过小的纵向稳定裕量来提高飞机的机动性和改善飞行性能	(204)
§ 32	纵向操纵的陀螺式随动自动器	(213)
§ 33	执行机构的非线性对具有陀螺式纵向操纵自动器飞机动力学影响的分析	(223)
§ 34	纵向操纵的过载式随动自动器	(229)
§ 35	飞机纵向操纵的静力系统	(235)
第十章	横航向运动中改善飞机的稳定性及操纵性的系统	(243)
§ 36	横航向运动中操纵自动化时飞机稳定性及操纵特性的改善	(243)
§ 37	具有滚转阻尼器飞机的横航向运动特性分析	(252)
§ 38	具有偏航阻尼器飞机的横航向运动特性	(262)
§ 39	航向或横向静不稳定飞机上使用阻尼器的特点	(271)

参考文献

(80)	参考文献	(80)
--------	------	--------

著者前言

近年来，飞行动力学问题的研究得到了重大发展。它关系到提高飞行的可靠性和安全性，改善飞机的飞行品质，以至最后得以提高使用的有效性等。

在航空技术的完善过程中，自动化装置合理地引入对有人驾驶的飞机起着重大作用。当今研究飞机动力学问题时，不同时研究操纵的自动化（其中包括手操纵时改善稳定性和操纵性系统）问题实际上是不可思议的。诸如在完成各种机动动作时飞机的操纵这类问题，需要对飞机与驾驶员之间相互作用进行更深入地研究和对驾驶员的动作做出数学描述。

自动控制装置的广泛应用是与故障概率以及对各种飞行情况拟定不同要求的必要性联在一起的。它也包括当控制系统装置中每一故障发生后，在保证飞行安全的条件下，允许品质的某些降级。

最后，近年来在专门的飞行模拟器上的研究得到了特别的发展。这种模拟器装有外界环境的显示系统和有全部必要的驾驶仪表和驾驶杆的座舱。此时，用电子计算机解飞机运动方程。在具有活动座舱的更加完善的飞行模拟器上，近似地产生作用于驾驶员的过载和其他的飞行感觉。

这种模拟器在现代飞机动力学的研究中起着非常重要的作用。在苏联及国外使用这种模拟器进行的工作为选择决定飞机稳定性及操纵性的参数，控制系统的参数，为急剧机动以及起飞和着陆状态下的动力学等提供了大量资料。在模拟器上的研究，节省了大量物资和大大缩短了飞机的研制周期。

尽管谈到有关飞行力学的各种观点和操纵自动化的文献数量虽然不少，然而对上述问题系统地研究和在著作中的阐述却很不够。

研究飞机的各种飞行问题需要对其动力学有不同精度的描述。在分析小扰动和操纵作用下的飞机运动时，允许将空间运动方程分解为纵向和横航向运动方程，并分别进行研究。

当作用在飞机上的扰动量或操纵作用大的时候，就必须研究飞机的空间运动，并分析非线性方程^[14]。最后，为了研究某些运动参数超出其变化的允许边界时飞机的动力学特点，必须研究称为飞行的临界状态（如失速、尾旋等等）。这通常需要分析描述飞机运动的全量方程。

本书基本上限于研究在允许方程线化和纵向与横航向运动可分开的情况下飞机运动的规律性。

在写此书时，作者给自己规定了下述任务：

前言

1、综述小扰动条件下飞机动力学特性研究的基本结果。

2、研究驾驶员对飞机飞行品质的评价与飞机动力学特性的关系，在飞行模拟器上研究这种关系的方法以及从力求得到与飞行相似的模拟中引出的对飞行模拟器的某些要求。

3、研究近年来为改善飞机的飞行品质而使现代飞机手操纵自动化的途径以及外形布局上具有最优飞行性能的飞机自动控制的某些问题。

全书分为四个部分

第一部分在一定程度上是序论。其中有飞机的运动方程和为解决各种动力学问题对方程的简化，驾驶员驾驶飞机过程的数学描述，在飞行模拟器上模拟飞行的方法和对模拟器结构的一些要求。

第二和第三部分研究飞机纵向和横航向运动的动力学特点和分析了对飞行品质的要求。

最后，第四部分研究了有人驾驶飞机手操纵的自动化问题。

在完成本书某些问题的计算和分析中，Ю. А. 维诺格拉道夫，Ю. Б. 杜波夫，В. И. 科布杰夫，А. В. 诺维科夫，В. А. 塞洛瓦特斯基，С. Н. 苏波鲁年科，В. М. 什巴也夫及其他人给了作者很大帮助，仅向他们表示谢意。

作者感谢技术科学博士В. К. 斯维亚道杜赫和咨询人，俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国科学和技术功勋工作者，技术科学博士М. А. 泰依茨对手稿提出的宝贵意见。

Г. С. 别佑士金斯

Р. В. 斯杜德涅夫

符 号

A —— 惯性矩关系参数;

$$A = (I_y - I_x) l / I_z.$$

a —— 音速。

B —— 惯性矩关系参数;

$$B = (I_z - I_x) l / I_y.$$

b_A —— 机翼的平均空气动力弦长 (CA X)。

C —— 惯性矩关系参数;

$$C = (I_z - I_y) l / I_x.$$

C_x, C_y, C_z —— 体轴系的无因次气动力系数;

$$C_{x(y, z)} = \frac{X(Y, Z)}{qS}$$

C_{xa} —— 迎面阻力系数; $C_{xa} = X_a / qS$ 。

C_{ya} —— 气动升力系数; $C_{ya} = Y_a / qS$ 。

C_{za} —— 侧向气动力系数; $C_{za} = Z_a / qS$ 。

(系数 C_{xa}, C_{ya}, C_{za} 对应速度轴系)。

C_p —— 发动机推力系数; $C_p = P / qS$ 。

G —— 飞机重量。

H —— 飞行高度。

I_x, I_y, I_z —— 飞机相对坐标轴 (OXYZ) 的惯性矩。

k —— 飞机操纵系统的传动比。

l —— 翼展。

M —— 飞行速度 V 与音速 a 的比值 ($M = V / a$)。

M_{Rx}, M_{Ry}, M_{Rz} —— 外力 (空气动力和发动机推力) 总的力矩在体轴上的投影。

M_x, M_y, M_z —— 气动力矩在体轴上的投影。

m —— 飞行器的质量。

m_x, m_y, m_z —— 相对体轴的无因次的气动力矩系数。

n_x, n_y, n_z —— 飞机重心处的纵向、法向和侧向过载。

$$n_x = R_x / G; n_y = R_y / G; n_z = R_z / G.$$

其中 R_x, R_y, R_z —— 合力 R 在体轴上的投影。

P —— 发动机推力。

P_B, P_a, P_H ——驾驶员作用在驾驶杆上的力。

$P^x = dP/dx$ ——力对驾驶杆行程的变化梯度。

$p = d/dt$ ——拉普拉斯算子。

\vec{R} ——合力。作用于飞行器的合力系统，一般，有气动力和重力。但引力、惯性力、与地接触时产生的力除外。

R_x, R_y, R_z ——矢量 R 在体轴上的分量。

$R_{x_a}, R_{y_a}, R_{z_a}$ ——矢量 R 在速度轴上的分量。

T ——振动周期。

\vec{V} ——飞行器的空速（体轴系原点 O 相对未扰动气流的速度）。

\vec{V}_k ——飞行器的地速（体轴系的原点 O 相对所选择地轴系的速度）。

\vec{W} ——风速（未扰气流相对所选定的地轴系的速度）。

$OXYZ$ ——与地面或与飞行器固连的右手直角坐标轴系。

$O_n X_n Y_n Z_n$ ——惯性坐标轴系。

$O_0 X_0 Y_0 Z_0$ ——地面坐标轴系。

$O X_g Y_g Z_g$ ——垂直坐标轴系。

$O X_k Y_k Z_k$ ——航迹坐标轴系。

$O X_a Y_a Z_a$ ——速度坐标轴系。

$OXYZ$ ——机体坐标轴系。

$O X_n Y_n Z_n$ ——半机体坐标轴系。

\bar{x}_T ——以 $CA X$ 的一部分或百分比表示的飞机重心的相对位置。

α ——飞机的迎角。

β ——侧滑角。

γ ——倾斜角。

$\delta_B, \delta_a, \delta_H$ ——升降舵、副翼和方向舵的偏角。

$\epsilon_{r.o}$ ——平尾处气流的下洗角。

ϵ ——控制误差（变量的需要值与其实际值之差）。

θ ——俯仰角。

κ ——倾斜角速度幅值与偏航角速度幅值之比。

μ ——飞机的相对密度系数，当分析纵向运动时 $\mu = 2m / (\rho S b_A)$ ，
当分析横航向运动时 $\mu = 2m / (\rho S l)$ 。

ρ ——空气的质量密度。

$\sigma_n = m_z^c + \frac{m_{z_z}^-}{\mu}$ ——纵向按过载静稳定性系数（ $V = \text{const}$ ）。

$\sigma_y = m_y^\beta \cos \alpha + m_x^\beta \frac{I_x}{I_y} \sin \alpha$ —— 飞机按侧滑角的动稳定性系数。

τ_m —— 将方程转换到无因次时间时使用的的时间尺度；当分析纵向运动时

$\tau_m = 2m / (\rho S V)$ ；当分析横航向运动时 $\tau_m = m / (\rho S V)$ 。

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ —— 飞机相对于体轴系的倾斜、偏航和俯仰角速度。

$\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$ —— 无因次角速度。

$$\bar{\omega}_x = \frac{\omega_x l}{2V}; \quad \bar{\omega}_y = \frac{\omega_y l}{2V}; \quad \bar{\omega}_z = \frac{\omega_z b_A}{V}$$

序

飞机的设计问题，它的气动布局和操纵系统形式与结构的选择是个非常复杂的综合问题。这个问题解决的结果如何，对飞机的使用价值和使用效率很有影响。从本质来说，这个问题需要系统地考虑各因素的相互关系和局部问题的处理对全局所得结果的重要影响。

飞机气动布局的完善和自动控制系统的发展在改善飞机飞行品质及提高飞行安全性中起着重大作用。如今，改善稳定性和操纵性系统乃是飞机不可分割的部分，且其作用不断扩大。

为了选择合理的飞机操纵的自动化，必需知道飞机的基本性能和提出在操纵自动化中必需满足的稳定性和操纵性要求。

制订飞机的稳定性和操纵性要求，通常是飞行力学的基本任务之一。在航空技术发展的同时，适航性条例及其他类似的文件中规定的要求也日趋完善了。目前，对飞机稳定性及操纵性的要求是根据^[90, 105, 106]规定的。按照对稳定性及操纵性的要求，根据基本用途和重量将飞机分类。例如，有以下分类：

I类——机动性飞机。

II类——机动性有限制的飞机。

III类——非机动性飞机。

III a类——起飞重量小于100吨的非机动性飞机。

III b类——起飞重量大于100吨的非机动性飞机。

对飞机稳定性及操纵性要求的形式可按飞机的任务和可按飞行阶段种类形式来表达的飞行阶段来划分：

A种——它包括要求精确跟踪和精确控制轨迹的急剧机动动作的这些飞行阶段。

B种——起飞着陆飞行阶段。该阶段一般不要求高速动作，但需要足够准确地控制飞行轨迹（例如，起飞，着陆，进入二转弯等等）。

B种——此阶段不要求快速机动和精确跟踪。例如：巡航，爬高及下降等等。

在不同飞行阶段，飞机对稳定性及操纵性要求的满足程度以飞行品质的等级定出，有三个等级：

等级1——稳定性及操纵性与该飞行阶段的要求符合良好。

等级2——稳定性及操纵性能保证该飞行阶段任务的完成，但完成任务的效果有所降低而驾驶员的负担有所增加。

等级3——稳定性及操纵性不能保证有效地完成任务或靠加重驾驶员很重的负担来保证飞机的操纵。

应满足这种或那种品质等级的要求与飞行器所处的状态有关。此状态可随控制系统故障和根据飞行条件（即飞行状态）而变化。至于飞行状态，可按飞行速度、高度和过

载的大小分为三种包线。

使用包线——能完成飞机预定的基本任务的飞行状态所包括的范围。

实用包线——允许大量使用的飞行状态所包括的范围。

允许包线——飞行安全所不允许超出的飞行状态所包括的范围。

这样来划分稳定性及操纵性要求就可更详细地研究各种驾驶问题。关于飞机参数对驾驶员对飞行品质的评价影响问题将在书中第五、七章进行研究。

为确定飞机的适航性对稳定性及操纵性的要求，操纵自动化的必需水平和自动控制要求，目前是在地面装置，首先是在飞行模拟器上广泛应用模拟的方法来实现的^[23, 30, 57, 60, 62, 71, 104]。本书列入这方面的一些研究成果是考虑到飞行模拟器和练习器的发展上所取得的成就以及用它们来正确地进行研究的重要性。

近年来，在制订飞机稳定性及操纵性要求时，驾驶员驾驶飞机过程的数学描述，“驾驶员模型”得到了广泛的应用。这一模型使得某些，主要是飞机的稳定问题获得了许多有趣的结果，并有力地加深了对飞机与驾驶员间相互作用过程的理解^[3, 58, 64, 70, 84, 86]。

根据这些工作的发展及其应用的资料得到的具有驾驶员模型的飞机动力学分析的一些研究结果已收入本书中。

最初，飞机操纵的自动化是以自动驾驶仪的形式实现的。它主要是用于长时间的飞行状态，以减轻驾驶员的工作负担。以自动驾驶仪为主的飞机操纵自动化问题有许多文献介绍^[11, 12, 36, 49 及其他]。随后，改善飞机稳定性系统（阻尼器）得到了广泛应用。它既保证了飞机驾驶性能的改善，也保证了空勤人员和旅客的舒适^[18, 26, 40, 41, 51]。

近年来，各国都对自动化系统进行了理论和试验研究。这种系统不但使飞机的飞行品质得到改善，而且大大减小了机翼和整个飞机的结构载荷。同时，它还引起飞机气动布局的变化，即大大地改善了飞机的飞行技术性能及其效率^[67, 68, 74—80]。

这种系统的影响是这样的大，以至可以说：可以由控制系统来决定飞行器的构形。另外，也广泛地使用了称之为具有主动控制系统的飞行器。主动控制概念的实际应用刚开始不久，目前，它已确定的主要作用为：

——用稳定性裕量很小的气动布局或气动力不稳定的布局来改善飞行性能。

——改善飞机结构的工作条件和空勤人员及乘客的舒适性。

本书所研究的飞机操纵自动化问题仅限于与改善飞机的稳定性和操纵性有关的系统。即为了改善飞机的动力学特性以使得驾驶员能有效地操纵飞机的系统。这种系统所做的研究工作^[18, 26, 40, 41, 51]大大少于自动驾驶仪的研究。

本书对手操纵自动化的研究有两个方面——传统的，为改善气动力稳定飞机的稳定性及操纵性方面和新的，保证这样的飞机可以飞行，即这种飞机的气动布局是根据得到好的飞行性能（包括可能使气动力不稳定的布局）来选择的。

书中基本的注意力集中在各种现象基本特点的研究，一般规律的确定以及飞机参数影响的分析方面。而且，一般都力求寻找解析关系或近似计算方法。至于制订精确的分析方法和对应的计算机研究方法问题已超出了本书的范围。

第一部分 飞机动力学绪论

在具有绪论性质的本部分中，研究三组问题。

在第一章中引出有一对称面的飞行器空间运动的一般方程。这方程既可用于飞机动力学的研究，也可用于进入大气层的可控宇航飞行器。

第二章介绍驾驶员驾驶飞机过程的数学描述。本书以后的章节中，当研究驾驶员完成各种操纵任务时，将使用这个数学模型。

第三章叙述在飞行模拟器上模拟飞行的方法和分析对飞行模拟器的要求。由于在有人驾驶飞机的手操纵特点的研究中，广泛应用了飞行模拟器，故本书将此单独列章。

第一章 飞行器的空间运动方程

为了有可能研究各种飞机的飞行动力学问题，必须研究其最普遍形式的运动方程。由于本书是分析飞机的大气飞行动力学问题，因而，与宇宙飞行及高超音速飞行有关的所有特点对分析该运动可以忽略。但在这样做之前，必须对运动方程中的相应项进行评定和确定可以去掉的条件。

一般，飞行器的运动是在重力和空气动力及力矩的作用下进行的，同时也有发动机推力及其力矩的作用。当分析飞行器在大气中的飞行时，重力力矩的作用可以忽略，只考虑重力。它作用于飞行器的质心，指向地球中心，与飞行器的方位无关。

在确定飞行器的运动时，必须解决以下具体问题：

- 求由于上述力和力矩作用引起的飞行器的运动角速度和线速度；
- 确定飞行器相对地球和气流的方位角（这里必须注意，通常有风时飞行器相对地和相对空气的运动速度是不同的）；
- 确定飞行器相对地面的位移。

每个具体问题都对应有自己的微分方程组。一般编写运动方程中必须考虑地球是球形的，并相对惯性空间旋转。对在大气中运动的飞行器，它的地面导航问题只要考虑地球的自转，而忽略绕太阳运动中的旋转就足够了。

§ 1 飞行器运动的全量方程组

研究飞行器运动时，做了一系列简化假设。

假定飞行器是绝对刚体。在目前飞行的速压内，结构弹性的影响只按准静态考虑。这样，由于结构弹性引起的自由度的增加将不考虑。应当指出，这些假设不是对所有的飞机都满足的。其中，在具有控制系统的重型飞机的动力学分析中，弹性振动的影响在许

多情况下可能是相当显著的。对这种问题的分析有其独自的意义，在许多著作^[7, 32, 33, 35, 90]中也有阐述，但这些问题已超出本书研究的范围。

认为飞行器的质量和惯性矩在所研究的时间内是不变的，并等于起始平衡飞行状态的值。

认为飞行器外形有对称面，且相对此平面的质量分布是对称的。

在飞机及预定为大航程、大速度飞行的宇宙飞行器的运动轨迹（包括脱离轨道的轨迹）的计算中，以及在研究稳定性和操纵性时，采用下列右手直角坐标系。

惯性坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 坐标原点位于地心。 $O_n Y_n$ 轴与地球旋转轴重合，并指向北。 $O_n X_n$ 和 $O_n Z_n$ 轴置于赤道平面内，同时 $O_n X_n$ 指向春分点（图1.1）。此坐标系的数值随地球一起绕太阳做每年一度旋转，但对于飞机飞行力学研究的问题，这可以忽略，并做为惯性坐标系使用。

飞行器在惯性坐标系中的位置由矢径值 R 和天文纬度 δ_n 以经度 λ_n 给出（图1.1）。

地面坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ 坐标原点位于地心。 $O_0 Y_0$ 轴与地球旋转轴重合（见图1.1）。 $O_0 X_0$ 轴通过零子午线（见图1.1）。坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ 相对于坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 以地球自转角速度 $\Omega = 0.727 \cdot 10^{-4} \text{ 1/秒}$ 绕 $O_n Y_n$ 轴旋转。

在所描述的坐标系中，飞行器的位置由矢径值 \bar{R} 、纬度角 δ 及经度角 λ 确定。实际上，若忽略地球的不圆度，则在地面坐标系中纬度与天文纬度重合（ $\delta = \delta_n$ ），而经度与天文经度的关系为：

$$\lambda = \lambda_n - \Omega t + \lambda_0$$

其中 λ_0 ——在时间 $t = 0$ 时刻春分线的经度。

垂直坐标系 $O_x Y_z Z_z$ 坐标原点与飞行器质心重合。 $O X_z$ 轴指向北且与子午线的切线平行。 $O Y_z$ 轴沿当地的铅垂线向上。 $O Z_z$ 轴置于平行面内指向东，与 $O X_z$ 及 $O Y_z$ 轴构成右手坐标系（图1.2及1.3）。 $O X_z O Z_z$ 平面与当地水平面平行。 $O X_z O Y_z$ 平面叫做当地的铅垂面。

表1.1中示出运动的地面坐标轴与地心极坐标轴之间的余弦关系。

航迹坐标系 $O X_k Y_k Z_k$ 。坐标原点与飞行器的质心重合。 $O X_k$ 轴（见图1.3）与飞机的地速重合。 $O Y_k$ 轴位于包含矢量 \vec{V}_k 的铅垂平面内与 $O X_k$ 轴垂直、 $O Z_k$ 轴构成右手坐标系。

$O X_k Y_k Z_k$ 坐标系相对地面坐标系绕 $O Y_z$ 轴转 Ψ 角，再绕 $O Z_k$ 轴转 Θ 角。

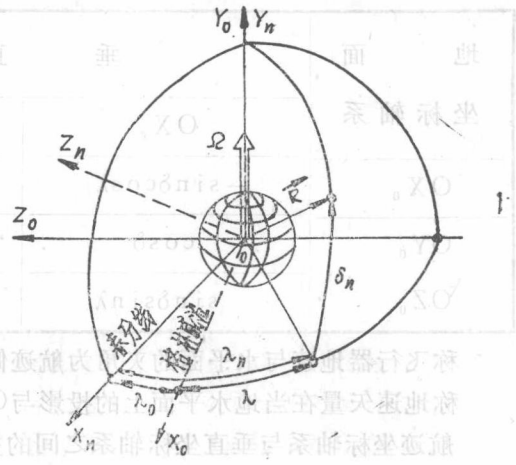


图1.1 惯性坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ 和地面坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$

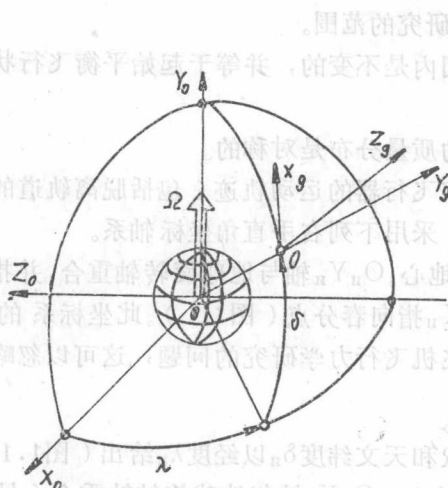


图1.2 垂直坐标系 $OX_g Y_g Z_g$

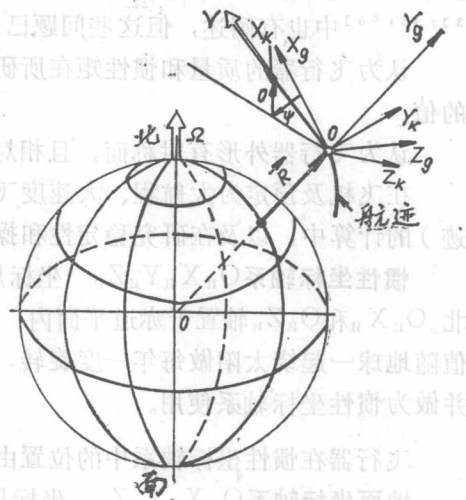


图1.3 垂直坐标系 $OX_g Y_g Z_g$ 和航迹坐标系 $OX_k Y_k Z_k$

表1.1 垂直坐标系与地面坐标系之间的方向余弦关系

地面坐标系	垂直坐标系		
	OX_g	OY_g	OZ_g
OX_0	$-\sin\delta\cos\lambda$	$\cos\delta\cos\lambda$	$-\sin\lambda$
OY_0	$\cos\delta$	$\sin\delta$	0
OZ_0	$\sin\delta\sin\lambda$	$-\cos\delta\sin\lambda$	$-\cos\lambda$

称飞行器地速与水平面的夹角为航迹倾斜角 Θ 。

称地速矢量在当地水平面上的投影与 OX_k 轴之间的夹角为航迹偏转角 Ψ 。

航迹坐标系与垂直坐标系之间的关系用余弦关系表给出(表1.2)

表1.2 航迹坐标系与垂直坐标系之间的方向余弦关系

垂直坐标系	航迹坐标系		
	OX_k	OY_k	OZ_k
OX_g	$\cos\Theta\cos\Psi$	$-\sin\Theta\cos\Psi$	$\sin\Psi$
OY_g	$\sin\Theta$	$\cos\Theta$	0
OZ_g	$-\sin\Psi\cos\Theta$	$\sin\Psi\sin\Theta$	$\cos\Psi$