

干线飞机 空气动力学和 飞行力学

[俄]Г.С. 比施根斯 主编
孙荣科 等译
顾涌芬 主审

航空工业出版社

内 容 简 介

《干线飞机空气动力学和飞行力学》主要介绍干线飞机翼型、机翼、动力装置及操纵机构的空气动力学和现代客机的稳定性、操纵性与飞行力学等问题。本书集中反映了俄罗斯中央空气流体动力研究院在上述方面所取得的研究成果。

该书对航空科研、设计部门的专业技术人员和大专院校的空气动力学专业师生均有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

干线飞机空气动力学和飞行力学/(俄)比施根斯(Г. С. Бюшгенс)主编. -北京:航空工业出版社,1996. 5

ISBN 7-80046-917-4

I. 干… I. 比… III. ①飞机-空气动力学 ②飞机-飞行力学 IV. V 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 07001 号

中华人民共和国国家版权局著作权合同登记章

图书出字 01—1995—079 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1996 年 5 月第 1 版

1996 年 5 月第 1 次印刷

开本:850×1168 1/32

印张:20

字数:539 千字

印数 1—2000

定价:45.00 元

目 录

中译本出版说明

前言

缩略语

符号

绪论

第一章 翼型空气动力学

1.1 翼型气动力特性..... (21)

1.2 超临界翼型空气动力学..... (28)

第二章 巡航飞行状态下干线飞机的空气动力学

2.1 亚音速干线飞机机翼空气动力学(一般设计原理) (51)

2.2 具有超临界翼型的大展弦比机翼的气动力特性..... (58)

2.3 跨音速巡航飞行的机翼空气动力学..... (92)

2.4 机身空气动力学及机翼与机身间的干扰..... (96)

2.5 发动机舱对飞机气动力特性的影响 (105)

2.6 巡航状态下飞机极曲线的计算和模型试验极曲线向飞行条件的换算 (119)

第三章 干线飞机的起飞着陆空气动力学

3.1 机翼各种增升装置的效率 (130)

3.1.1 机翼前缘的增升装置 (130)

3.1.2 机翼后缘的增升装置 (138)

3.2 改善起飞着陆特性的方法 (148)

3.3 真实飞行条件下飞机气动力特性的近似评估 ... (153)

第四章 干线飞机动力装置的空气动力学

4.1 概述 (159)

4.2 内外涵发动机短舱的空气动力学 (165)

4.2.1	中涵道比及高涵道比发动机的进气道	(165)
4.2.2	超高涵道比发动机的进气道	(171)
4.2.3	短舱外罩的阻力	(174)
4.2.4	短舱的尾部	(177)
4.3	发动机的反推力装置	(181)
4.4	动力装置在飞机上的布局	(185)
第五章 操纵面的空气动力学		
5.1	纵向操纵面	(198)
5.2	横向操纵面	(205)
5.3	航向操纵面	(218)
第六章 干线飞机的稳定性和操纵性		
6.1	纵向稳定性和操纵性	(226)
6.1.1	纵向稳定性和操纵性	(228)
6.1.2	过载稳定性裕度的选择	(236)
6.1.3	纵向操纵效率	(249)
6.1.4	水平尾翼尺寸和重心位置的选择	(254)
6.2	横侧稳定性和操纵性	(262)
6.2.1	横侧扰动运动特性	(262)
6.2.2	横向操纵	(269)
6.2.3	飞机航向操纵	(273)
6.2.4	重直尾翼尺寸的选择	(275)
6.3	起飞着陆状态的稳定性和操纵性	(278)
6.3.1	起飞和着陆的驾驶	(278)
6.3.2	着陆允许迎角的选择	(286)
6.3.3	直接升力控制技术在着陆中的应用	(292)
6.3.4	飞机在地面上的滑行	(294)
6.4	特殊飞行条件下的稳定性和操纵性	(298)
6.4.1	大迎角下的稳定性和操纵性	(298)
6.4.2	在结冰条件下的飞行	(308)

6.4.3	风切变条件下的飞行动力学	(311)
第七章 干线飞机的操纵系统		
7.1	不可逆助力操纵系统	(328)
7.1.1	概况	(328)
7.1.2	驾驶杆的加载机构	(330)
7.1.3	改进稳定性和操纵性系统的信号引入 HBY 的原则	(342)
7.1.4	带有可调水平安定面的不可逆助力操纵 系统	(349)
7.1.5	倾斜和偏航通道的 HBY 结构特点	(357)
7.2	电传操纵系统(СДУ)的组成	(363)
7.2.1	概况	(363)
7.2.2	各个系统按差动方式连接	(367)
7.2.3	各个系统分开工作(用余度系统代替失效 系统).....	(369)
7.2.4	在按力操纵原理的基础上两个不同种类系统 的连接	(371)
7.2.5	具有分段操纵面的各系统的协同工作	(376)
7.2.6	无余度机械系统的电传操纵系统	(378)
7.2.7	操纵杆和人机工程学要求	(383)
7.3	舵机及其能源供给的构成	(389)
7.3.1	飞机舵机类型	(389)
7.3.2	对驱动机构的主要要求	(394)
7.3.3	舵机的可靠性	(401)
7.3.4	舵机的能源	(403)
7.3.5	操纵系统和舵机的能源供给	(411)
7.4	机翼增升装置操纵系统(СУМК)	(419)
7.5	现役干线飞机操纵系统的若干特点	(425)
7.6	驾驶盘式操纵系统的可靠性	(444)

7.6.1	操纵系统的余度	(444)
7.6.2	操纵可靠性的保障	(452)
7.6.3	驾驶盘式操纵系统所需余度的评估	(458)
第八章 改进稳定性和操纵性系统(CYV)		
8.1	引言	(462)
8.2	改进静态稳定性和操纵性系统	(463)
8.2.1	改进静态纵向稳定性和操纵性的自动 装置(CYVΠ)	(463)
8.2.2	侧向运动静态改进稳定性和操纵性 系统(CYVB)	(474)
8.3	无静差改进静态稳定性和操纵性 系统(积分 CYV)	(483)
8.3.1	操纵性的动、静态特性保障	(483)
8.3.2	装有积分式改进纵向稳定性和操纵性系统的 飞机配平特性	(490)
8.4	迎角和过载极限值限制器	(495)
8.4.1	静态 CYVΠ 系统极限状态限制器	(495)
8.4.2	无静差式 CYVΠ 系统极限状态限制器	(498)
8.5	纵向运动的数字式操纵系统	(502)
8.6	混合操纵(通过自动操纵系统的操纵“CAV”) ...	(506)
8.7	飞机操纵自动化展望	(513)
第九章 主动控制系统		
9.1	机动载荷降低系统	(517)
9.2	小尺度大气紊流载荷降低系统	(525)
9.3	离散突风的载荷降低系统	(536)
9.4	主动颤振抑制系统	(539)
9.4.1	机翼弯曲—扭转颤振临界速度的提高	(540)
9.4.2	提高发动机装在吊舱内的重型飞机非对称弹性 振动阻尼	(544)

9.5	乘坐品质改善系统	(545)
9.6	主动控制系统的综合化	(549)
9.7	主动控制系统的可靠性评定	(550)
第十章 现代干线飞机的飞行技术性能		
10.1	起飞和着陆性能	(554)
10.1.1	起飞	(554)
10.1.2	着陆进场和着陆	(561)
10.2	运输效率的计算	(566)
10.2.1	巡航飞行	(568)
10.2.2	爬升到巡航高度	(573)
10.2.3	下降	(582)
10.3	在“四维”空中交通管制系统条件下飞行状态的 优化	(584)
10.4	干线飞机参数的优化	(587)
第十一章 亚音速干线飞机的发展前途		
11.1	改进燃油效率及运输成本的潜力	(595)
11.2	巡航飞行速度增加的前景	(612)
11.3	干线飞机载客量的进一步增加	(617)
参考文献		

中译本出版说明

《干线飞机空气动力学和飞行力学》一书,是俄罗斯中央空气流体动力研究院(ЦАГИ)的一批专家,在前副院长比施根斯院士的主持下,撰写的一本专著,采用了俄罗斯当代民用飞机的大量科研成果及对西方当代民用飞机的分析材料。

比施根斯院士来华讲学时,曾提出希望我们帮助其出版这书的俄文本,并允许我们无偿地译成中文出版。我国一些民机专家看了书稿后,感到这书系统地讲述了民机空气动力学,特别是民机飞行力学和飞行控制系统的结合,这对当代民机的总体设计是极有帮助的。这样的专著,西方还没有出版过。为此感到,为了我国民机的发展,出版这本专著是值得的。因此,中国航空研究院和俄罗斯中央空气流体动力研究院签订了由中方出版这书的俄文本和中译文的合作协议。协议由中国航空工业总公司民机局组织实施,航空工业出版社负责翻译和出版。

一批老俄文翻译工作者承担了本书的翻译任务。各章的译者分别是:第一章——焦明山;第二章——孙荣科;第三、四、五、十一章——周庭秋;第六章——吴永智;第七章——孙荣科、钟兆文;第八、九章——孙业绍;第十章——朱峰。翻译过程中,孙荣科同志做了大量组织协调工作。

顾诵芬院士和航空系统工程研究所秦丕钊、北京航空航天大学吴森堂等专家对译文作了校对。秦丕钊校对了第三、六章;吴森堂校对了第七、八、九章;其余各章由顾诵芬院士校对。

为了保证质量,校对后的译文,又请上海飞机研究所的专家们进行了再次审核。他们是:凌茂芙——第三、五、六、十章;沈克扬——第一、二、四章;马文彪——第七、九章;钟兆文——绪论及第

十一章;柏兆贵——第八章。

顾诵芬院士对译文作了全面审校。

在俄文本出版过程中,ЦАГИ 的专家们对原稿作了一些修改,俄文本责任编辑张敬儒帮助中译本作了相应修改。

《干线飞机空气动力学和飞行力学》一书俄文本和中译本的出版,是中俄两国航空科技合作与交流的又一重大成果。出版工作得到了中国航空工业总公司副总经理刘高倬同志的大力支持,民机局郑作棟、秦德馨、周海燕、陈亚红和科技局林森等同志对出版工作给予了大量帮助。在此,谨对为本书出版作过贡献的所有同志表示衷心感谢!

航空工业出版社

总编辑 任源博

1995.12

前 言

本专著由俄罗斯中央空气流体动力研究院(ЦАГИ)的专家写成,包括干线飞机翼型、机翼、动力装置、操纵机构的空气动力学和现代客机的稳定性、操纵性与飞行力学等内容。近年来,由于在计算和实验研究方面取得了显著进步,所以改进了燃油效率,提高了飞行安全性。中央空气流体动力研究院的专家在这些方面作出了很大的贡献。我们认为本书所陈述的材料对研制干线飞机必将有用。

本专著是通过俄罗斯和中国之间科技合作的形式,在中国航空研究院专家的协助下同时出版了俄文和中文两种版本。我们相信,此种合作出版专著的形式对双方都是有利的。

参加本书写作的教授和科学博士有:

序言——Г. С. 比施根斯

第一章——Г. А. 帕夫洛韦茨、В. Д. 博克塞、С. В. 利亚普诺夫

第二章——Г. А. 尤金、В. А. 巴里诺夫、С. И. 斯科莫罗霍夫

第三章——Г. А. 尤金

第四章——В. В. 卡利亚日诺夫、В. Ф. 库里岑

第五章——В. Г. 米克拉泽

第六章——С. Я. 瑙莫夫

第七章——В. Я. 博恰罗夫

第八章——Ю. Ф. 舍柳钦

第九章——Г. В. 亚历山德罗夫、Ю. Г. 日沃夫、А. С. 乌斯季诺

夫

第十章——А. В. 克利明、К. Ю. 科斯明科夫

第十一章——Г. А. 帕夫洛韦茨

最后,本书的全体作者一致向中国顾诵芬院士和帮助本书出

版的中国航空研究院所有人员表示深深的感谢。

主 编

俄罗斯科学院院士 Г. С. 比施根斯

1995 年于茹科夫斯基市

缩 略 语

АДТ	风洞	НГЖ	不燃液压油
АНЗ	领航燃油贮备量	НЛГС	民用飞机适航标准
АП-25	航空条例, 俄罗斯民 用飞机适航规范	НРУ	直接手动操纵
АРП	独立舵机	НУПС	升力直接控制
АСДУ	模拟式电传操纵系统	ОПР	飞行极限状态限制器
БИНС	机载惯性导航系统	ОСТ	部颁标准
БУК	舵机操纵和检测部件	ПЭР	直接运营费用
БЦВМ	机载数字计算机	РДР	起飞可用距离
ВЗ	进气道	РЛЭ	飞行手册
ВП	辅助传动装置	РП	舵机
ВПП	跑道(起飞)	САЗ	驾驶杆自动加载系统
ВСУ	辅助动力装置	СВС	大气信号系统
ГМРП	液压机械舵机	САУ	自动操纵系统
ГС	液压系统	СДУ	电传操纵系统
ДК	倾斜阻尼器	СП	伺服传动机构
ДЛУ	线加速度传感器	СПС	超音速客机
ДР	偏航阻尼器	СУМК	机翼增升装置操纵 系统
ДТ	俯仰阻尼器	СУУ	稳定性和操纵性改进 系统
ДУС	角速度传感器	СУУБ	侧向运动稳定性和 操纵性改进系统
ЗУ	驾驶杆加载机构	СУ	动力装置
ИКАО	国际民航组织	СУУП	纵向稳定性和操纵 性的自动器
КПБ	跑道头的安全地带	СШУ	驾驶盘操纵系统
КПД	有效系数(效率)	ТВВД	桨扇发动机
ЛП	跑道	ТВД	涡轮螺旋桨发动机
МСУ	机械操纵系统		
МРЗ	加载调节机构		
НБУ	非可逆助力操纵		

ТРД	涡轮喷气发动机	ЭГРП	电液压舵机
ТРДД	涡轮风扇发动机	ЭМРП	机电舵机
ТРДД СВ	超高涵道比涡轮 发动机	ЭС FAR-25	电气系统 美国民用飞机
УВД	空中交通管制		适航标准
ЦСДУ	数字式电传操纵 系统	JAR-25	欧洲民用飞机 适航标准

符 号

x, y, z	右手定则速度直角坐标系, x 轴——沿来流方向, y 轴——顺升力方向, z 轴——顺机翼翼展方向
S, l, λ	机翼面积及翼展, $\lambda = \frac{l^2}{S}$ ——机翼展弦比
χ	1/4 弦线处机翼后掠角
b	离飞机对称轴距离 z 处的机翼翼弦
$\bar{x} = x/b, \bar{z} = z/l/2$	沿翼弦及翼展的无因次距离
$b_A = \frac{2}{S} \int_0^{l/2} b^2 dz$	机翼的平均气动力弦(CAX)
$\bar{c}, \bar{c}_{\max}$	机翼翼剖面的最大相对厚度
$p_\infty, \rho_\infty, V_\infty, q_\infty, M_\infty$	来流的静压、密度、速度、速压 $\frac{\rho_\infty V_\infty^2}{2}$ 及 M 数。
$C_x = \frac{X}{q_\infty S}, C_y = \frac{Y}{q_\infty S}, m_x = \frac{M_x}{q_\infty S b_A}, m_z = \frac{M_z}{q_\infty S l}, m_y = \frac{M_y}{q_\infty S l}$	速度坐标轴系的迎面阻力系数、升力系数、俯仰力矩系数、滚转力矩系数、偏航力矩系数
$K = \frac{C_y}{C_x}$	升阻比, $K_{\max}$ ——最大升阻比
M	马赫数
$M_{\text{крет.}}$	巡航飞行 M 数
$M_{\text{крит}}$	临界 M 数, 当随 M 数的增大时流场中首次出现音速的 M 数
$M_{\text{кр}}^*$	临界 M 数, 此时 $dC_x/dM = 0.1$
α	攻角系指迎面气流速度的方向与翼型弦线(即机翼控制截面的弦线, 通常指机翼侧面弦线)的夹角

β

侧滑角,系指迎面气流速度方向与飞机对称面之间的夹角

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{q_\infty}$$

静压系数

$$C_{P_{\min}}, C_{P_{\text{крат.}}}$$

最大流速点的静压系数和局部 $M=1$ 处的静压系数

$$\bar{x}_F$$

飞机焦点位置相对于平均气动力弦 b_A 的前缘,以 b_A 的分数表示

$$\bar{x}_r$$

飞机重心位置相对于平均气动力弦 b_A 的前缘,以 b_A 的分数表示

$$A_{\Gamma,0} = \frac{S_{\Gamma,0} L_{\Gamma,0}}{S b_A}$$

水平尾面无因次静力矩, $L_{\Gamma,0}$ ——水平尾翼的尾臂,飞机重心至水平尾面 $\frac{1}{4} b_A$ 的长度

$$B_{\text{в.о}} = \frac{S_{\text{в.о}} L_{\text{в.о}}}{S l}$$

垂直尾面无因次静力矩, $L_{\text{в.о}}$ ——垂直尾翼尾臂,由飞机重心量至垂直尾翼 $\frac{1}{4} b_A$

绪 论

喷气航空运输业的发展始于 1956 年图-104 客机在航线上的广泛使用。

在此之前所进行的这方面的尝试未获成功,而且还引发一些灾难性事故。50 年代初,德·哈维兰公司制造的“彗星”喷气客机,由于在研制中对飞机承受大量交变载荷引起的结构疲劳问题未加考虑,曾引发了一系列空难。

迄今,喷气航空运输业已积累了约 40 年的经验。

鉴于干线飞机的研制从预研到投入使用需要 8~10 年,而飞机的使用期可长达 20 多年,因此,可以说至今总共只研制过二三代干线飞机。

如图 1 所示,最初致力于研制两种类型的干线飞机——装涡轮螺旋桨发动机的和装涡轮喷气发动机的。并且两者都广泛利用了军用飞机的经验。

作为运输工具,喷气干线飞机与其他形式的运输工具相比,由于速度快而具有明显的优势。

速度高,航程适中,在 10 公里高度上飞行(在此高度很少有大气扰动),气密机身使机舱内的气压保持有 0.6~0.7 的余压,这些条件保证旅客快速飞抵目的地,而且非常舒适。

然而,喷气飞机要求加紧机场和各种地面使用维修设施的发展。

喷气运输机的发展十分迅速。图 1 为这种飞机发展的概貌,但图中只列出了最重要的飞机型号。

1956~1960 年以后,在各个级别干线飞机的研制中展开了激烈的竞争,出现了三种主要类型的干线飞机。

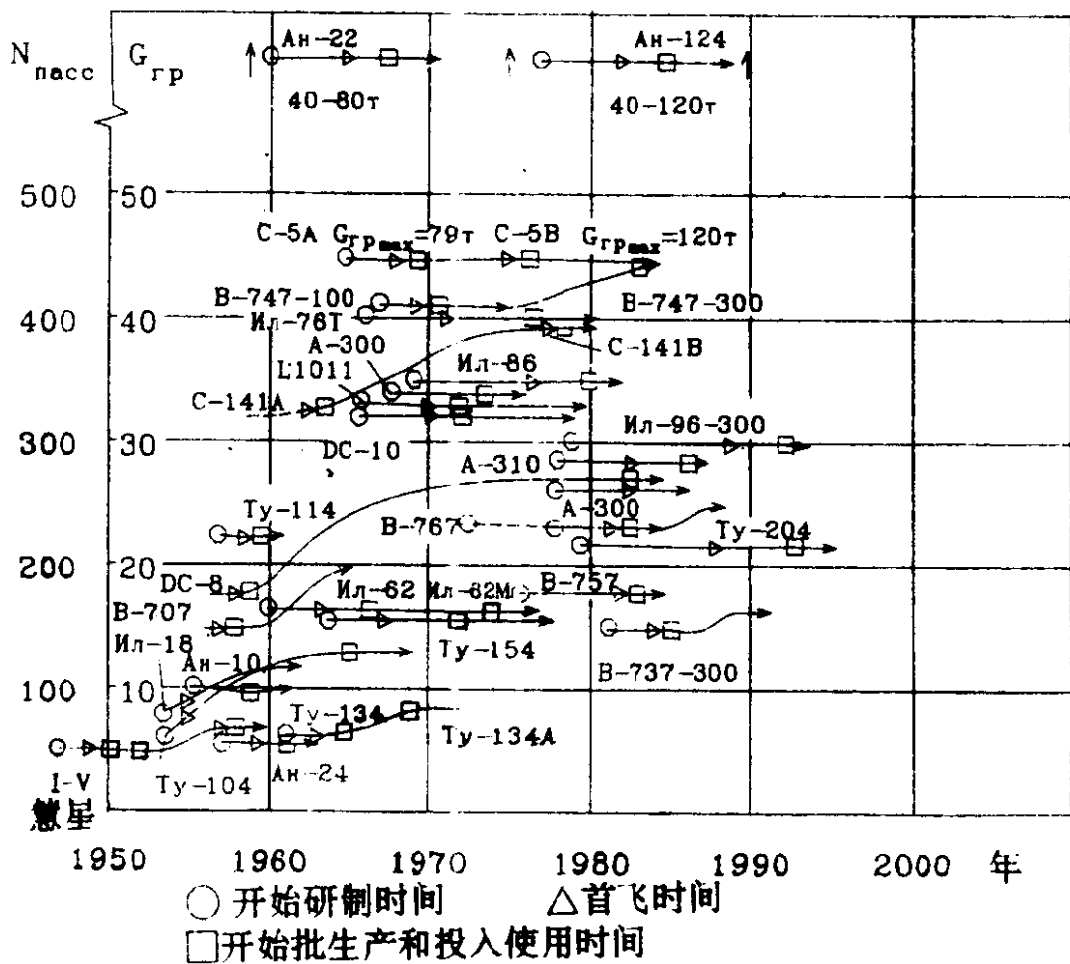


图1 干线飞机的发展

1. 近程干线飞机,航程为 1 500~2 500 公里;
2. 中程干线飞机,航程为 2 500~4 500 公里;
3. 远程干线飞机,航程为 7 000~10 000 公里,今后将会更远。

除上述三种类型干线飞机外,应该提及各种类型的支线飞机。

离开了航空这种主要旅客运输手段,现代生活是不可想象的。自 1962~1963 年起,载客量每十年增长 3.5~4 亿人次。1987~1988 年内,总客运量首次超过 10 亿人次。大多数作者预测,到 2005~2010 年期间,仍将保持这一增长率,也就是说,届时客运量将再增长一倍。这一估计大概是有根据的,因为全球人口到 2000 年将由 1980 年的 44 亿增加至 55~58 亿。