



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

国家出版基金项目



上海科技专著出版资金资助

民用飞机总体设计

Civil Aircraft Design

陈迎春 宋文滨 刘 洪 编著
吴光辉 主审



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

大型飞机是高度复杂的大系统,涉及众多学科与技术的综合。现代民机设计朝着全球分布、协同设计与制造的方向发展,对飞机的安全性、经济性、环保性和舒适性提出了更高的要求。本书以介绍现代民机设计的理念、思路、技术和方法为重点,内容涵盖总体气动、材料结构、航电、动力装置、飞控系统等传统学科,又包括构型管理、适航等与民用飞机密切相关的学科。

本书面向航空航天工程飞行器设计专业,适合高年级本科生和研究生使用,也可供工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

民用飞机总体设计/陈迎春,宋文滨,刘洪编著. —上海:上海交通大学出版社,2010

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-05628-3

I. ①民… II. ①陈…②宋…③刘… III. ①民用飞机—总体设计 IV. ①V271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 229969 号

民用飞机总体设计

陈迎春 宋文滨 刘洪 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 21.5 字数: 438 千字

2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-05628-3/V 定价: 86.00 元

版权所有 侵权必究

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编：

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、两院院士）

副总主编：

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理）

马德秀（上海交通大学党委书记、教授）

编委：（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海交通大学航空航天学院副院长、研究员）

沈元康（国家民航总局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学副校长、教授）

金兴明（上海市经济与信息化委副主任、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学航空航天学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、重于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展,应用和体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能捷算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》、《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输机气动设计》),由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》、《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计500问》、《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一贡献。

殷涌菁

2009年12月15日

前 言

“研制和发展大型飞机,是国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)确定的重大科技专项,是建设创新型国家,提高我国自主创新能力和增强国家核心竞争力的重大战略举措。”我国发展大型客机,既面临相对有利的国内和国际环境:从国内来讲,我国国民经济持续以较高的速度发展,对航空旅行的需求将快速增长,在国际方面,据分析世界主要飞机制造商在近期内不会推出与我国大型客机类似的下一代机型,但同时也意味着更大的挑战,我国研制的大型客机在综合性能方面需要明显优于现有的竞争机型,接近其可能的下一代机型,才能在激烈的民机市场竞争中占据一席之地。

大型飞机是高度复杂的大系统,涉及众多学科与技术的综合。同时,现代民用飞机(简称民机)设计更朝着全球分布式、协同设计与制造的方向发展。不但总体气动,材料结构、航电、动力装置、飞控系统等传统学科在与其他学科,特别是计算机学科的交叉融合方面得到进一步的发展,而且一些新的与民机设计相关的学科也越来越受到重视,包括构型管理、适航、人机功效等。

现代民机设计对飞机的安全性、经济性、环保性和舒适性提出了更高的要求。世界主要飞机制造商都遵循同样的适航标准进行设计,在某些方面甚至提出更高的要求,随着技术的进步,对安全性的追求将朝着以乘客为中心的包含设计方法、准则、运营以及维修等全方位的安全体系发展。民机的经济性对项目成败的影响至关重要,通常认为,一个新推向市场的民机,需要在经济性上具有至少15%~20%的改善,才有可能获得市场的成功。航空业对环境的影响越来越受到重视,飞机的环保特性是关注的一个焦点,其中主要涉及排放和噪声。对环保性的追求已经成为推动技术进步的重要因素。

本书以介绍现代民机设计的理念、思路、技术和方法为重点,力争既体现学科发展的继承性,又强调创新性。本书的编写是在参考国内外广泛使用的资料和听取国内航空界老专家意见的基础上,根据作者多年的实际工作经验编写完成的。希望在目前我国航空产业发展的黄金时期,为人才培养、学科建设作出一些贡献。参加本书编写的人员还包括:张淼(第5章,除增升装置),李栋成(第11、12章),李亚林(增升装置)和俞金海(第7、14章)。参加本书审稿的专家包括:黎先平、王子方和张锡金。在本书编写过程中,包括上海交通大学“民机设计特班”学生在内的一些研究生参与了资料整理、录入等工作,在此表示感谢。由于作者水平有限,时间紧张,其中错误及不妥之处恳请读者批评指正。

本书适合高年级本科生、研究生使用,包含内容较多,可以根据学时进行筛选。同时,本书也可供工程设计人员参考。

目 录

- 1 绪论 1
- 2 飞机设计过程 5
 - 2.1 简介 5
 - 2.2 航空市场分析 7
 - 2.3 设计要求 10
 - 2.4 设计过程 12
 - 2.5 综合与优化 15
- 3 总体布局分析 17
 - 3.1 总体布局 17
 - 3.2 非常规布局 22
- 4 总体参数确定 26
 - 4.1 飞行任务剖面 26
 - 4.2 初始重量估算 28
 - 4.3 推重比和翼载 32
 - 4.4 翼载和推重比的使用 43
- 5 气动设计 44
 - 5.1 部件气动设计 44
 - 5.2 气动特性计算 71
 - 5.3 基于 CFD 的气动优化设计 86
 - 5.4 风洞试验 89

-
- 6 载荷、材料与结构强度 100**
 - 6.1 飞机载荷 100
 - 6.2 结构布局设计 102
 - 6.3 结构强度设计 107
 - 6.4 有限元分析 113
 - 6.5 气动弹性设计 114

 - 7 驾驶舱、客舱与货舱 116**
 - 7.1 驾驶舱 116
 - 7.2 客舱设计 121
 - 7.3 货舱与后机身 130

 - 8 动力装置 133**
 - 8.1 发动机特性 133
 - 8.2 发动机安装 146
 - 8.3 防火保障系统 147
 - 8.4 发动机噪声与排放 147

 - 9 主要系统 149**
 - 9.1 起落架系统 149
 - 9.2 航电系统 153
 - 9.3 操纵系统 154
 - 9.4 燃油系统 156
 - 9.5 液压系统 159
 - 9.6 供电系统 159
 - 9.7 环控与救生及其他系统 160

 - 10 重量和平衡 163**
 - 10.1 部件重量估算法 163
 - 10.2 其他重量估算方法 167
 - 10.3 重心位置估算和全机重量表 167

 - 11 性能分析 170**
 - 11.1 飞机设计中的性能工作 170
 - 11.2 基本概念和计算公式 171
 - 11.3 性能计算方法 176

-
- 11.4 性能分析的意义 206
 - 12 操稳特性 207**
 - 12.1 运动稳定性 208
 - 12.2 操纵性 210
 - 12.3 纵向运动和横侧运动 210
 - 12.4 纵向稳定性和操纵性 211
 - 12.5 横侧稳定性和操纵性 217
 - 12.6 影响操纵性与稳定性的因素 221
 - 12.7 现代技术发展 230
 - 13 经济性分析 237**
 - 13.1 成本概念与评估方法 237
 - 13.2 飞机经济性分析与计算方法 239
 - 13.3 DOC算例 244
 - 13.4 基于经济性的设计 245
 - 14 构型管理 248**
 - 14.1 构型管理概述 248
 - 14.2 构型管理的内容 250
 - 14.3 构型管理的应用 254
 - 14.4 构型管理发展趋势 257
 - 15 适航标准 259**
 - 15.1 适航的目标 259
 - 15.2 适航的来源及发展 259
 - 15.3 适航的内容和工作 260
 - 15.4 适航与设计的密切关系 263
 - 15.5 环保因素 265
 - 16 设计举例 268**
 - 16.1 市场分析 268
 - 16.2 设计任务书 269
 - 16.3 参数确定 270
 - 16.4 发动机选型 271
 - 16.5 客舱布局 271

- 16.6 机翼设计 272
- 16.7 气动力估算 273
- 16.8 性能估算 275
- 16.9 飞机设计方案 275

- 17 其他类型民用飞行器介绍 276
 - 17.1 扑翼飞机 276
 - 17.2 飞艇 277
 - 17.3 联翼布局 279
 - 17.4 双机身飞机 280
 - 17.5 地效飞行器 282
 - 17.6 高超声速商务机 284
 - 17.7 无人机 285

- 附录 1 大气数据计算公式 287
- 附录 2 速度转换公式 288
- 附录 3 国际标准大气参数表 290
- 附录 4 主要支线客机数据 295
- 附录 5 主要空客飞机参考数据 300
- 附录 6 主要波音飞机参考数据(一) 305
- 附录 7 主要波音飞机参考数据(二) 309
- 附录 8 主要发动机参考数据 313

- 参考文献 325

1 绪 论

人类对动力飞行的梦想由来已久,但真正发展到普通民众可以广泛使用的程度还是在喷气飞机发展起来以后。早期的飞机主要用于战场任务,尤其是在两次世界大战期间,对速度和高度的追求推动了航空技术的飞速发展,其中包括喷气发动机的发展。1937年,英国的 Frank Whittle 和德国的 Hans von Ohain 几乎同时研制出了涡轮喷气发动机,使用该发动机的喷气飞机在 1941 年 5 月 15 日成功首飞,开启了喷气飞行的时代。

第二次世界大战结束以后,一方面各国战争期间建立起来的研发和生产能力急需开拓新的发展领域,另一方面,和平的环境也促使许多国家的飞机制造商开始探索民用航空的发展,从最初的邮政运输和货运发展到客运。其中,美国与西欧继承了相当规模的研发力量和技术积累,形成了航空技术进一步快速发展的基础。而苏联从德国得到的硬件设施,大大增强了其航空工业的实力。随后的长期冷战又为大量增加航空航天研究的投入提供了背景。一方面各主要飞机制造商需要将战时建立的巨大研发和生产能力进行转移;另一方面,又面临着民用航空市场的巨大潜力,所以各主要飞机制造商纷纷将注意力转移到民机的研发上来。20 世纪 50、60 年代有 DeHavilland, Convair, 波音, 麦道, 洛克希德, 英国宇航等相继成立。

1952 年 5 月 3 日,“彗星一号(Comet 1)”投入伦敦与约翰内斯堡之间的商业客运服务,标志着世界上第一条采用喷气飞机的客运航线的正式开通。喷气飞机开始逐渐代替速度慢的以螺旋桨为动力的飞机,成为 50 年来民用航空市场的主流机型。当“彗星号”由于结构疲劳问题进行重新设计时,波音的 B707 和道格拉斯的 DC-8 纷纷进入市场,占据了大部分喷气客机的市场份额。波音公司在 B707 成功的基础上,陆续研发了具有独特外形的 B747,以及单通道 B737/B757 系列,中型宽体客机 B767/B777 系列等。

1970 年,欧洲为了应对美国在民用航空市场的垄断地位,由德国一些主要航空企业成立空中客车公司,后来法国、英国和西班牙陆续加入,空客成为欧洲四国组成的航空企业联合体,并在 21 世纪初,成功发展成为世界上领先的航空巨头之一。空客在成立之初把重点放在了双发、双通道宽体客机 A300 的研发上,这在当时是一

个市场空白。后续产品经过系列化发展,推出了 A320 系列单通道客机,以及 A330/A340 系列,产品覆盖的范围不断扩大,奠定了空客成功的基础。2005 年,空客推出世界上最大的双层客机 A380,并于 2007 年投入商业运营。

航空市场的激烈竞争和高风险导致早期为数众多的民机制造商或被兼并,或退出市场,形成了今天在大型客机市场上两强竞争的局面。民用航空市场的巨大诱惑导致许多国家和公司投入大量的财力和人力进行研发,力图占据一席之地,然而失败的例子也比比皆是。空客公司之所以能够成功,除了其成立初期各参与国所具有的雄厚的工业基础和长期的国家支持外,其对市场的准确把握起了非常关键的作用。当时,波音公司正集中于 B747 机型的研发,空客首选机型双通道 A300 占据了尚待开发的市场段,避开了与波音公司当时的机型的直接竞争,从而奠定了其取得市场成功的良好基础。空客将成熟技术与准确的市场把握相结合,一度成为以销售飞机数目和营业额计算都为首的世界第一大飞机制造商。

航空市场受到多种因素的综合影响,包括世界经济的整体走向、油价的波动以及突发事件等,同时航空公司的采购决策还容易受到政治因素的影响。这些因素决定了航空市场具有很大的不确定性,尤其是任何一种机型的研发一般需要 10 年左右的时间,因此民机制造商对未来市场的把握在很大程度上决定了项目的成败。另一方面,航空工业的发展受到技术发展的推动,在安全性、经济性、舒适性等方面的要求越来越高,因此民机制造商需要综合考虑技术的先进性、成熟度,实现成本,市场预期和潜在的竞争机型,以便降低推出新机型的风险。

波音公司和空中客车公司通常会定期或不定期推出市场预期报告,预测未来民用航空市场的总体走向以及对客机和货机的需求,2008 年双方的报告对 2008~2020 年的市场发布了大致相同的预测,由于亚洲和中东地区航空市场的高速稳定发展,对客机和货机的需求将持续增长。双方对中国市场的发展都非常乐观。随着我国经济维持相对高速的稳定发展,对航空运输需求的增长也将持续。这一宏观经济背景为我国发展自身的民用航空工业提供了良好的条件,同时,不断增强的综合国力和科技发展水平,以及参与国际分工合作所积累的经验也奠定了坚实的基础,再加上国家发展航空工业的战略决策,可以说,目前是我国航空工业发展所面临的最好时机。但同时也面临巨大的挑战,开放的国内民航市场使得竞争非常激烈,人才短缺成为航空工业发展的制约因素,同时,在许多技术领域还存在较大的技术差距。

飞机研发过程的复杂性导致了其研发的高成本、高风险,但成功的机型也将带来很高的经济回报,相关联的社会收益,包括高技术领域的就业,相关产业的发展,以及相关技术在国防上的潜在收益。虽然飞机设计经历了将近一百年的发展,但其设计过程仍基本相同。飞机设计总体上可以分为概念设计、初步设计和详细设计三个阶段。飞机总体设计是一个循环迭代、由粗到细的过程,在概念设计阶段,往往需要对各种潜在的整体布局进行综合评估以确定总体布局形式,然后从一个基本的布

局出发,通过不断细化,逐步确定相关设计参数,为后续设计的展开提供基本数据。

民用航空技术不断发展和进步主要体现在如下几个方面:发动机技术、气动总体、飞控技术和航空材料与结构设计等技术不断提高。图 1.1 给出了一些典型发动机的油耗水平的历史发展趋势。在气动总体方面,计算流体力学的发展使得计算在飞机设计过程中作用越来越大,与优化方法、多学科一体化设计技术相结合成为改善性能、降低成本、提高安全性和舒适性的不可或缺的手段。从 A320 开始逐渐引入的电传飞控技术大大改善了飞机的操稳特性,提高了舒适性,降低了结构重量。新材料的不断采用使结构重量降低和可靠性提高,以及维护成本降低。复合材料在新一代民机中应用的比例已经超过 50%,可以预计这一趋势仍会继续。

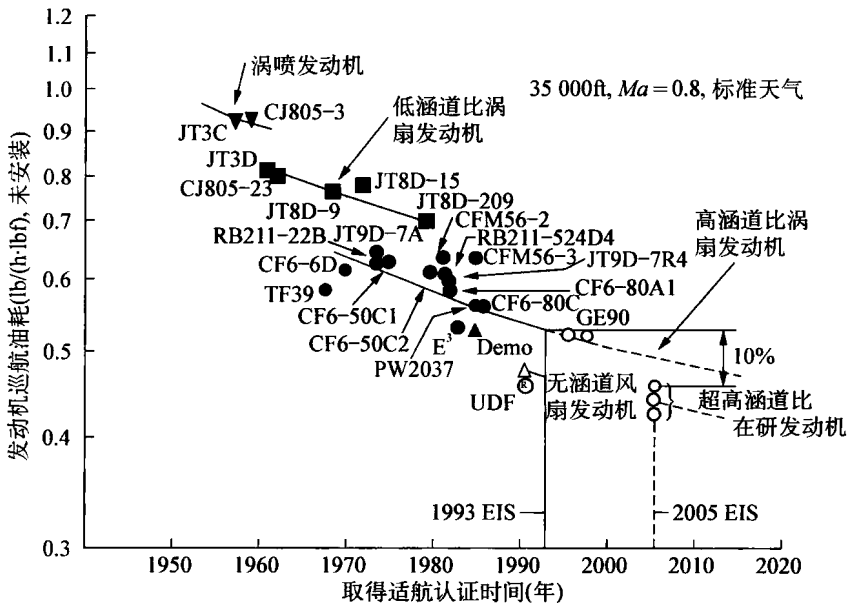


图 1.1 典型发动机油耗 SFC

注: 1lb=0.453 592 kg, 1lbf=4.448 22 N, 1ft=0.304 8 m

同时,随着国际分工的不断发展和经济全球化的逐渐深入,民机发展模式也正在经历着深刻的变化。在 20 世纪 90 年代前,存在着波音、麦道、空中客车、洛克希德、BAE 系统公司等多家飞机制造商,发展到今天 150 座以上客机波音和空客两强争霸的局面。一方面主承包商的数目减少为波音和空客两家;另一方面,风险共享的二级和三级承包商的数目却在增加,波音和空客作为全球主承包商的角色得到加强。全球分包的形式在波音 787 项目中的应用得到了非常具体的体现。承包商从单纯的制造分包发展成为负责子系统的设计研发与制造的全面角色,而主承包商则转变为系统集成商,图 1.2 给出了 A380 的主要承包商及其地理分布。这一模式的出现导致了专业技术和知识产权的扩散,承包商对项目的影响增强。这种模式的优势在于经济上风险的降低,但同时承包商的问题也可能会对项目整体带来消极的负

面影响。但总的来说,这让人们开始认真思考全球分包所带来的供应链管理与控制问题对项目整体的潜在挑战,全球化这一趋势还应该会继续发展,原因在于随着飞机项目复杂性的增加和商业风险的增大,在风险共享基础上的全球分包总体上有利于降低风险。

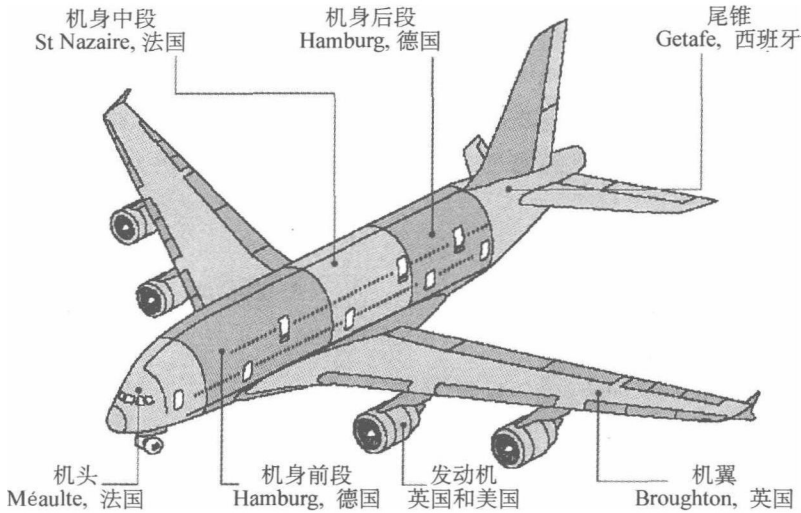


图 1.2 A380 的主要承包商及其地理分布

欧盟在 2001 年发表的航空 2020 前瞻报告中,提出了更安全、更高效和更环保的要求。为了达到降低 CO_2 和 NO_x 排放 50%,降低噪声 50%的目标,需要在多项技术领域获得阶跃式的发展。本书的目的在于为读者打下必要的基础,并对各项技术的发展方向提出作者的见解。

本书共包括 17 章,涉及民机总体设计的各个环节,包括总体布局、气动设计、客舱布局、动力装置、适航、经济性以及构型管理等。在本书的结尾,对多种多样的其他类型飞行器也进行了初步介绍。