



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

航空市场及运营管理研究系列

民用飞机设计及 飞行计划理论

The Theory of Civil Aircraft Design and
Flight Plan

赵克良 傅职忠 编著



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



大飞机出版工程

航空市场及运营管理研究系列

总主编 顾诵芬

民用飞机设计及 飞行计划理论

The Theory of Civil Aircraft Design and
Flight Plan

赵克良 傅职忠 编著



上海交通大学出版社

内容提要

本书详细介绍了民用飞机设计的基础理论、飞机性能分析方法、飞行计划制作方法及在实际工作中的应用,同时介绍了航行新技术在我国的发展与具体应用。全书分7章:主要内容包括:民用飞机设计基础理论,飞机性能分析的基础知识,规章条例中关于计算燃油量的规定、飞行剖面与标准术语、航路数据计算方法等基础知识,常规飞行计划与特殊飞行计划的制作方法及应用,飞机延程飞行问题,航行新技术等。

图书在版编目(CIP)数据

民用飞机设计及飞行计划理论/赵克良,傅职忠编著. —上海:
上海交通大学出版社,2014
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-11406-8

I. ①民… II. ①赵…②傅… III. ①民用飞机—设计②飞行计划
IV. ①V271②V323.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 108682 号

民用飞机设计及飞行计划理论

编 著:	赵克良 傅职忠	地 址:	上海市番禺路 951 号
出版发行:	上海交通大学出版社	电 话:	021-64071208
邮政编码:	200030		
出 版 人:	韩建民		
印 制:	苏州市越洋印刷有限公司	经 销:	全国新华书店
开 本:	787mm×1092mm 1/16	印 张:	23.5
字 数:	464 千字		
版 次:	2014 年 10 月第 1 版	印 次:	2014 年 10 月第 1 次印刷
书 号:	ISBN 978-7-313-11406-8/V		
定 价:	98.00 元		

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0512-68180638

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、中国科学院和中国工程院院士)

副总主编

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长)

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、中国工程院院士)

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(中国民用航空局原副局长、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(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

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、比重大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和应用,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* (《运输类飞机的空气动力设计》), 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1000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点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

前 言

民用飞机制造业和运输业是相互支持、相互依存、不可分割的整体。一方面,随着航空管制放松、燃油价格上升、低碳经济兴起以及低成本航空风靡全球,现代民用飞机设计理念已经由追求技术性能的先进性转变为着力提升民机经济性、环保性和舒适性等市场适用性指标,并更加关注民机循环运营对设计的要求。因此,掌握民机运行的规律,尤其是飞行使用特征,是民机设计师的必修课之一。另一方面,现代民航飞机是高技术产物,是先进的运输工具,价格昂贵,燃油消耗很大,燃油费用在使用成本中占有相当大的比重。为安全有效地使用飞机,得到高的经济效益,应该对每个航班事先制订飞行计划,算出最大允许的业载、应加的油量、消耗的油量、飞行时间、起飞重量等数据。制订比较详细的飞行计划还可以给出预计到达各航路点的时间、剩余油量、真空速、航向等参数供飞行员参考。在先进的航空公司所使用的系统运行控制中心(SOC)或飞行运行控制中心(FOC)中一个重要的功能就是制订计算机飞行计划,因此,航空公司开发自己的 SOC 或 FOC 系统、制订计算机飞行计划势在必行。

本书的飞机设计部分简要介绍了民用飞机设计的一般流程,给出了民机方案设计所需的一般准则及部分经验公式,还介绍了民机设计发展趋势。接着以飞机性能为纽带,提出民机使用飞行的要点,为制订飞行计划提供坚实的基础。飞行计划部分介绍了 CCAR 条例第 121 部中关于制订飞行计划时计算油量的规定、飞机使用手册中制订飞行计划用的图表、制订飞行计划的方法、计算步骤及制订飞行计划时遇到的各种计算问题;详细讨论了正常飞行计划、最小成本飞行计划、利用燃油差价的飞行计划、利用二次放行的飞行计划的做法和双发飞机延程飞行问题。最后,还对 BPN、ADS-B 以及 BEF 等新航行技术进行了简要介绍。

本书两位作者根据多年的飞机设计经验以及民机飞行理论教学经验,在上海飞机设计研究市场研究中心的协助下,撰写了《民用飞机设计及飞行技术理论》一书,期望对民机设计师了解飞机运行提供一些帮助,供航空公司从事飞机性能工作、飞行签派工作、制订飞行计划的航务工程人员掌握制订飞行计划的原理和方法使用,并为飞行员(飞行计划的使用者)了解制订飞行计划的原理和方法提供参考。此外,本书的出版也可以为制造商和运营商的互相交流提供一些有用的信息。

全书分7章,中国商飞上海飞机设计研究院赵克良负责第1, 2, 7章,并负责全书统稿,中国民航大学傅职忠负责3, 4, 5, 6章,同时,在本书飞行计划相关章节的编写过程中也得到中国民航大学谢春生的大力支持;在本书的出版过程中,李晓勇、舒姚涵做了大量的工作。

由于时间和作者水平所限,本书存在的不足之处,恳请同行专家批评指正!

目 录

- 1 民用飞机设计基础 1**
 - 1.1 民用飞机设计过程 1
 - 1.2 市场要求与设计目标 2
 - 1.3 主要设计内容 4
 - 1.4 技术发展趋势 36
- 2 民用飞机性能分析 37**
 - 2.1 民用飞机性能设计 37
 - 2.2 民用飞机使用性能概述 60
- 3 飞行计划基础 111**
 - 3.1 飞行剖面 112
 - 3.2 备降场和燃油量的相关规定 112
 - 3.3 飞行计划中使用的术语及参数 119
 - 3.4 航路数据计算 123
 - 3.5 航路当量风和当量气温计算 141
- 4 常规飞行计划制作 144**
 - 4.1 制作飞行计划的方法 144
 - 4.2 做飞行计划使用的图表 151
 - 4.3 国内航线飞行计划制作 154
 - 4.4 国际航线飞行计划制作 162
 - 4.5 飞行计划中若干问题的计算 165

5 特殊飞行计划制作 167

- 5.1 规定起飞油量的飞行计划和无备降场的飞行计划 167
- 5.2 目标机场不能加油和只能部分加油的飞行计划 170
- 5.3 涡桨动力飞机和非涡轮动力装置飞机的飞行计划 178
- 5.4 最小成本飞行计划 178
- 5.5 利用燃油差价的飞行计划 195
- 5.6 途中改航(全发改航)飞行计划 207
- 5.7 公务机飞行计划 214
- 5.8 利用二次放行的飞行计划 233

6 延程运行(ETOPS) 279

- 6.1 延程运行的发展历程 279
- 6.2 ETOPS 有关条令 281
- 6.3 ETOPS 运行的优势 282
- 6.4 ETOPS 使用的名词术语 286
- 6.5 批准延程运行的条件 292
- 6.6 ETOPS 运行飞行计划 298

7 基于性能的导航(PBN) 319

- 7.1 PBN 概念与技术标准 319
- 7.2 国际民用航空组织(ICAO)导航规范的适用范围 324
- 7.3 机载性能监控和告警的作用 326
- 7.4 导航功能要求 331
- 7.5 中国民航 PBN 发展与解决方案 334

8 广播式自动相关监视系统(ADS-B) 336

- 8.1 ADS 简介 336
- 8.2 ADS 的组成 337
- 8.3 ADS 的作用 339
- 8.4 ADS 的局限性 340
- 8.5 ADS-B 技术原理 342
- 8.6 ADS-B 的应用 344
- 8.7 实现 ADS-B 的关键技术 345

8.8 如何实现 ADS-B 系统 346

9 电子飞行包(EFB) 348

9.1 EFB 的历史 348

9.2 优点 350

9.3 电子飞行包介绍 352

9.4 电子飞行包等级分类 353

9.5 电子飞行包的功能 355

参考文献 359

1 民用飞机设计基础

民用航空是社会经济发展繁荣的重要支柱产业之一,也已经成为人们日常工作和生活的重要组成部分。民用航空产业涉及广泛的产业链,包括飞机设计和制造、运营和维护,相关的机场等基础设施建设以及包括旅游业在内的相关外围产业。航空运输业的高效运行既需要高可靠性和高效率的飞机,也需要高效率的飞行组织管理,其中相关人员了解与飞机设计和飞机运营相关的基础知识是大有裨益的。

本章介绍民用飞机设计的基础知识,包括飞机设计过程概述、市场需求分析、设计目标制订、估算方法和飞机技术的发展趋势。本书面向飞行计划的制订者和管理者,有助于了解飞机主要设计特点与飞机性能之间的关系,以及对飞行计划制订产生影响的因素。

1.1 民用飞机设计过程

对于民用飞机的设计来说,通过市场需求和技术发展水平的分析,明确市场定位、适航审定基础和具体的设计指标是飞机设计者开展飞机项目研究的首要任务。飞机设计目标和方案的确立不是一蹴而就的事,一般需要设计方案的多次迭代优化,并在此过程中需要保持与潜在航空公司客户的持续沟通。

一般来说,飞机设计的过程分为概念设计、初步设计和详细设计三个阶段(见图 1.1),具体飞机型号项目的设计流程及其管理则更加具体和详细,通过安排分阶段的项目里程碑控制和相应的评审,在确保整体项目满足项目目标的基础上,能够按照进度要求推动项目开展,并满足经费控制的要求。三个设计阶段可以概括在图中,随着设计的深入,采用的分析模型的复杂度和可信度不断增加,需要使用的资源和时间以及得到的相关信息也随之增加,对飞机各项指标的了解也不断深入。

图 1.1 中给出的飞机设计过程中不同阶段的主要特征,飞机设计方案的确定需要涉及多个专业的多次迭代过程才能不断完善,这一过程如图 1.2 所示。通过多轮的循环迭代和权衡优化,分析模型和飞机数据的精确度不断提高,从而最终得到最优的综合飞机设计方案,在此基础上,开展进一步的详细设计。更为详细的飞机设计流程如图 1.3 所示。

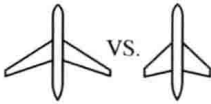
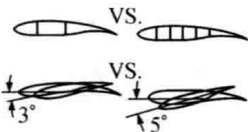
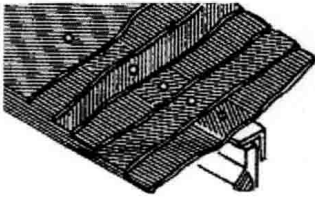
第一阶段 概念设计		第二阶段 初步设计	第三阶段 详细设计
			
已知量			
● 基本任务要求 ● 航程 ● 飞行高度 ● 飞行速度 ● 基本材料属性		● 气动弹性要求 ● 疲劳要求 ● 颤振要求 ● 总体强度要求	● 局部强度要求 ● 制造工艺 ● 功能要求
结果			
几何 ● 翼型 ● 厚度 ● 展弦比 ● 根梢比 ● 后掠角 设计目标 ● 阻力 ● 重量目标 ● 目标成本		● 基本内部布置 ● 整体外形(机翼弯度, 扭转分布) ● 主要载荷, 应力, 挠度	● 详细设计(机械装置, 转接头, 附件等) ● 改进设计(通过实验和飞行试验)

图 1.1 飞机设计的三个阶段

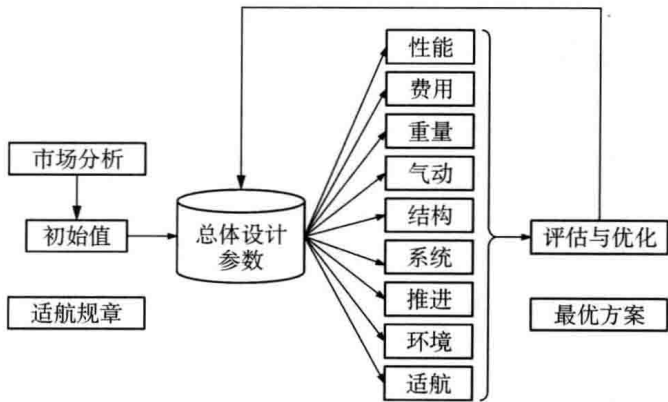


图 1.2 飞机方案的优化迭代流程图

1.2 市场要求与设计目标

民用飞机的市场竞争力是决定民机项目商业成功的关键因素之一，一般来说，新飞机的研制需要能够取得相比同类机型 10%~15% 的经济性的改善，才有可能取得航空公司的认可，获得首发用户的启动订单。在这之前需要开展大量的方案分析和技术研究，以确保一旦项目启动能够实现飞机的设计目标，满足不断发展的市场需求。

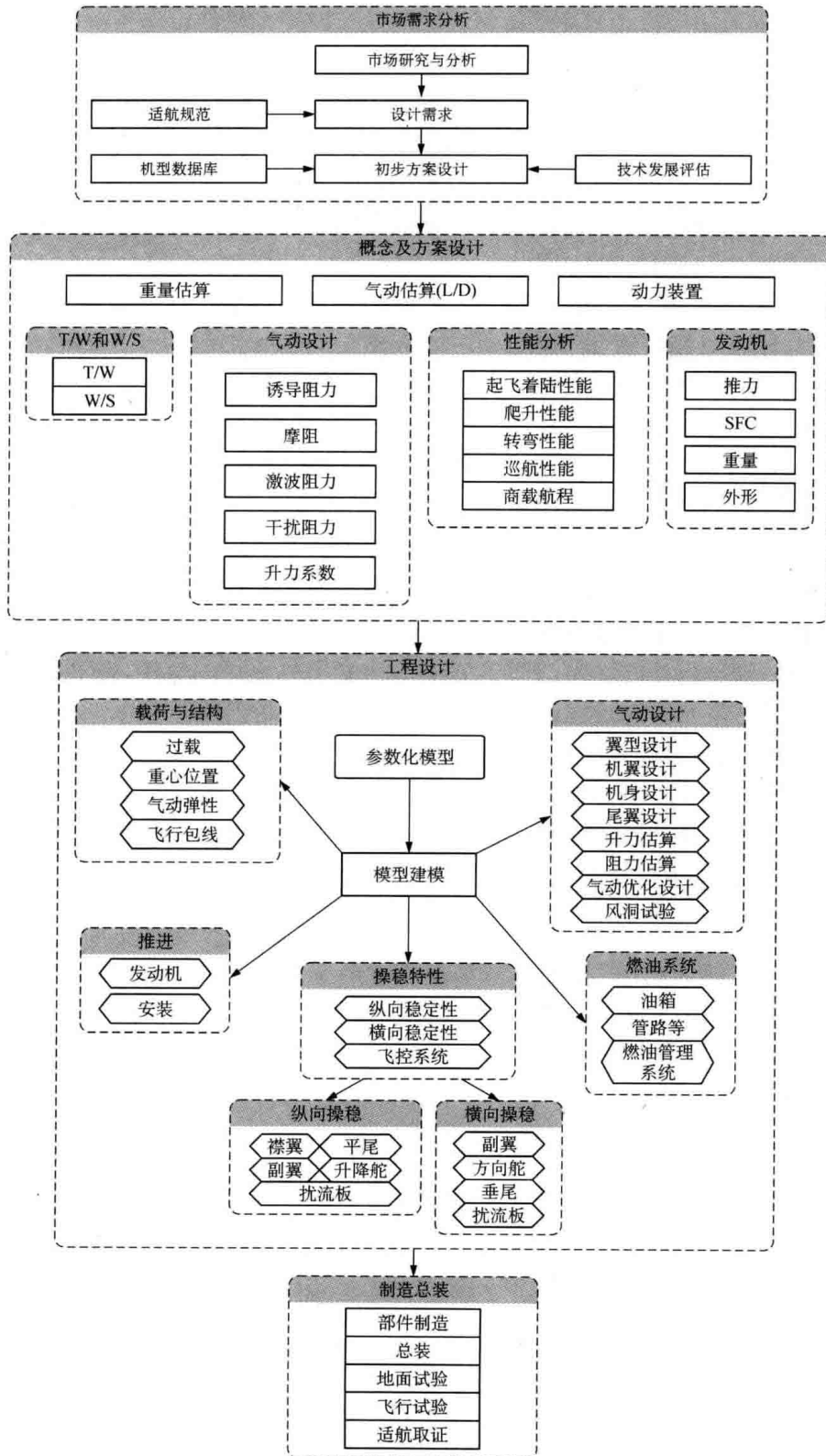


图 1.3 一般飞机设计流程

世界主要民用飞机制造商每年都会定期发布民用飞机的市场预测报告,给出后续 20 年内的民用飞机的全球市场的需求分析,起到市场培育和预测的作用。一般来说,飞机制造商的市场分析部门是与飞机的方案设计部门密切关联的,其职能一般包括不同飞机方案的经济性分析、市场预测、航空公司财务分析和技术经济性分析等内容。通过广泛的市场调研,与航空公司的持续对话,以及对相关技术发展和设计方法趋势的分析,针对未来发展,开展大量的不同机型的方案研究,为实际型号的发展进行预先研究和市场支持。

一般按照座位数将民用飞机市场分为支线机(100 座以下),单通道窄体飞机(120~200 座),双通道宽体飞机(200~300 座),大型飞机(300~400 座)和超大型飞机(400 座以上)。主要飞机型号及其参数可以参考相关飞机手册取得,也可从相应的飞机制造商网站取得。

1.3 主要设计内容

民用飞机设计过程涵盖大量系统性的分析与任务,是确保飞机性能满足设计目标的关键。在不同设计阶段对模型分析和设计工具的要求是不同的,在概念设计阶段,需要使用快速易用的分析方法和工具,以便针对大量可能的设计方案开展对比分析与评估,随着设计的深入,更准确的模型分析得到更多的应用,开展更多的试验分析,对设计方案是否满足设计目标方面的理解也更加准确。

本节从飞机设计过程中涵盖的主要专业出发,介绍不同专业领域在飞机设计过程中需要完成的主要内容,包括飞机的重量估算,气动力估算,布局设计,性能分析,操稳特性,系统分析,经济性分析,以及适航性分析等。这些模块相互关联和耦合,是系统开展飞机参数分析和优化设计的基础(见图 1.3)。

1.3.1 飞机重量估算

在确定了飞机的商载、航程及巡航速度等基本设计目标以后,可以快速进行飞机重量的初步估算,分析流程如图 1.4 所示。

飞机设计起飞总重是指飞机在设计确定任务开始时的总重量,飞机起飞总重可以表示为

$$W_{TO} = W_{OE} + W_F + W_{PL} \quad (1.1)$$

式中: W_{OE} 是使用空重; W_F 是飞行任务油重; W_{PL} 是飞机有效装载重量。而 W_{OE} 通常记为

$$W_{OE} = W_E + W_{tfo} + W_{crew} \quad (1.2)$$

式中: W_E 为空重, W_{tfo} 为死油重量, W_{crew} 为乘员重量。空重 W_E 可表示为

$$W_E = W_S + W_{FEQ} + W_{EN} \quad (1.3)$$

式中: W_S 为飞机结构重量, W_{FEQ} 为固定设备重量, W_{EN} 为动力装置重量。

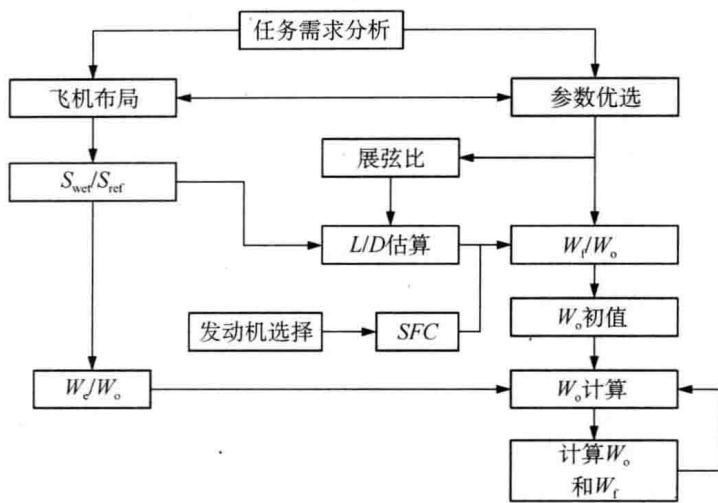


图 1.4 飞机重量估算流程

因此,对飞机重量的估算可以通过分别估算飞机结构空重、燃油重量和飞机的有效载荷来实现。首先讨论飞机的燃油重量的估算流程。

民用运输机的典型飞行剖面如图 1.5 所示。通过计算各飞行段典型燃油重量比例系数,可以得到飞机的任务燃油,再考虑适航规章对备用燃油的规定,得到飞机带油的重量。各飞行段典型燃油重量比例系数如表 1.1 所示。考虑飞机采用水平、定速巡航,巡航飞行的燃油消耗可以采用 Breguet 航程方程进行估算。

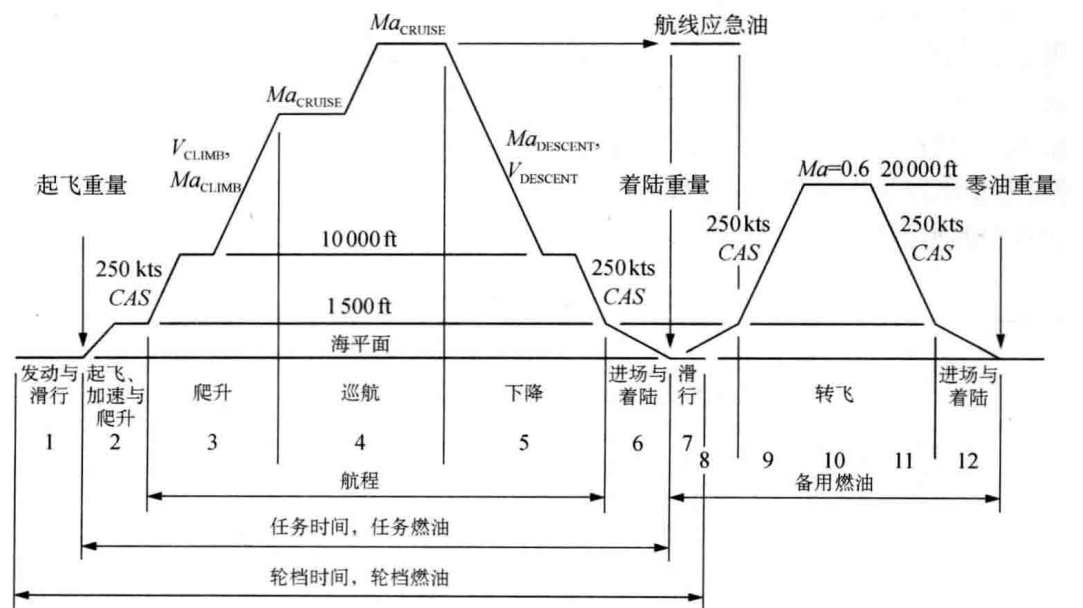


图 1.5 民用飞机典型飞行剖面图