



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

航空经济学系列

商用飞机技术经济研究

——设计优化与市场运营

Technical Economics Researches on Design Optimization and
Market Operation of Commercial Aircraft

陈迎春 主 编

杨 洋 宋文滨 副主编



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



大飞机出版工程

航空经济学系列

总主编 顾诵芬

商用飞机技术经济研究

——设计优化与市场运营

Technical Economics Researches on
Design Optimization and Market Operation of
Commercial Aircraft

陈迎春 主 编
杨 洋 宋文滨 副主编



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

内容提要

本书汇集了商用飞机技术经济研究的优秀学术论文,内容主要涵盖飞机设计与市场运营环节的技术经济相关研究。技术经济研究贯穿商用飞机全寿命周期的所有环节,对制造商的市场分析、飞机设计、技术优化等具有重要影响,也可用于飞机引进、机队规划、航线运营等经营活动。开展商用飞机技术经济研究及应用工作对于发展技术经济这一交叉学科具有重要的意义。

本书可供从事相关工作的技术和管理人员使用,也可供决策人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

商用飞机技术经济研究:设计优化与市场运营/陈迎春主编. —上海:上海交通大学出版社,2016

大飞机出版工程

ISBN 978-7-313-15640-2

I. ①商… II. ①陈… III. ①民用飞机—技术经济—研究
IV. ①F560

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187272 号

商用飞机技术经济研究——设计优化与市场运营

主 编:陈迎春

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:181千字

版 次:2016年10月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-15640-2/F

定 价:78.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:9.75

印 次:2016年10月第1次印刷

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（上海交通大学原党委书记、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副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

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（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈 刚（上海交通大学原副校长、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（上海市政府副秘书长、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（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

本书编委会

主 编

陈迎春

副主编

杨 洋 宋文滨

编委会

杨 洋	宋文滨	李晓勇	何小亮
王 晶	张 康	王如华	侯盼盼
廖琳雪	曹 刚	李思颖	赵 楠
陈怡君	张 华	田永亮	

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贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

前 言

商用飞机制造业是国民经济的重要产业,具有高技术、高附加值和知识密集型等特点,是体现国家全球竞争力的行业。在高度竞争的市场条件下,经济性是商用飞机市场开拓的关键要素,也成为了飞机设计优化的基本目标。在当前航空大众化的趋势下,民用航空行业在关注技术创新和工程创新的同时,需要把产业经济性、项目经济性和飞机产品经济性统筹协调考虑,推动建立可持续发展的,具有全球竞争力的产业链。

商用飞机的发展历程就是通过持续性的技术改进与设计优化,不断提高飞机产品安全性、经济性、舒适性和环保性的过程。发展规律表明,每一代新机型的推出,需要在运营经济性上有 10%~15%左右的改善,才可能获得航空公司的认可。但是飞机制造商在新技术上的研发投入,势必会推高飞机成本,在飞机价格主要由市场决定的情况下,会降低其自身的盈利能力,影响其对后续机型的研发投入和持续稳健的发展。过分追求新技术甚至会导致飞机制造商在商业上面临破产的危机,因此,必须对商用飞机项目开展广泛的技术经济研究。商用飞机技术经济的研究应涵盖飞机设计和制造的经济性分析,民用航空经济性评估方法、标准和体系;飞机全寿命成本、直接使用成本、直接维修成本;影响飞机经济性设计的因素分析;面向价值工程的设计方法与体现了新一代布局飞机经济性分析、环保与经济性的关系、市场销售策略、经济环境和运营环境的影响,国家宏观政策和发展战略以及国际环境的影响等内容。

2015 年 12 月,上海航空学会技术经济专业委员会成立大会暨第六届商用飞机技术经济论坛在上海成功召开。技术经济专业委员会在 2015 年通过上海航空学会审议并成立。本次大会由上海航空学会主办,中国商飞市场研究中心承办,上海交通大学协办。此前市场研究中心与上海交通大学已经连续五年合

作召开商用飞机经济性设计学术研讨会,在商用飞机经济性研究领域内获得了良好的效果,2015 年会议更名为商用飞机技术经济论坛。

会议代表来自上海航空学会、中国商飞、中航工业发展研究所、中航飞机西安民机有限责任公司、上海交通大学、航空公司、租赁公司、国际航空咨询公司、维修公司、航空类专业院校等 20 家单位的领导和专家。在本届商用飞机技术经济论坛上,与会代表围绕民机技术经济研究范畴和意义、经济性设计优化、市场运营等相关议题,分享了研究成果,就商用飞机技术经济研究的未来发展展开了热烈讨论。本书即为该次会议的优秀论文成集而来。

本书可供从事相关工作的技术和研究人员使用,也可供决策人员参考。

目 录

基于报童模型的航空公司收益管理研究

曹 刚 1

民用飞机空调系统经济性设计研究

况 薇 7

基于测试性的民用飞机 COTS 经济性评价

李海伟 马麟龙 谢加强 12

飞机经营租赁与融资租赁对航空企业财务影响的比较分析

李思颖 19

民用飞机测试性设计经济性分析

马安祥 马麟龙 李海伟 27

基于成本指标的民机测试性定量分析方法研究

马麟龙 33

国内市场货机宏观机队规划方法及经济性研究

舒姚涵 40

民机设计与运营中的大数据应用分析

王 乐 48

基于经济性的机型选用方法

王如华 陈怡君 56

基于产品分解结构的民机研制工作分解结构技术研究

邬 斌 62

飞机智能健康管理效益研究

吴 骥 谢加强 73

飞机智能健康管理成本研究

谢加强 吴 骥 马安祥 78

波音和空客单通道干线机系列化发展研究

张 洁 张 楠 86

基于经济性考虑的民机水废水系统设计技术

张雪苹 雷美玲 朱 翀 94

基于需求-供应模型的公务机市场预测

张悦焕 王 晶 陈 烁 101

商用飞机共通性项目成本估算方法研究

赵 楠 109

航空运输经济学几个基本问题

朱金福 吴薇薇 汪 瑜 115

中外民机制造业科技投入效用比较研究

宋丹青 125

基于报童模型的航空公司收益管理研究

曹 刚

(中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 航空运输业是收益管理应用的发源地。以利润最大化为主要目标的收益管理, 在提高航空公司运营效益及竞争优势方面发挥了巨大的作用。本文基于报童模型的理论基础, 建立了适用于航空公司的超售模型, 并通过案例, 说明了模型的使用方法及有效性, 为航空公司收益管理实践及日常运营工作提供理论指导。

关键词: 收益管理; 报童模型; 超售

Research of Revenue Management of Airlines Based on News Vendor Model

Cao Gang

(China COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210)

Abstract: Air transport industry is the birthplace of revenue management. Maximizing the profit is the main goal of revenue management which played an important role in improving airline operation efficiency and competitive advantages. This paper established a overbooking model which based on the theory of news vendor model. The case indicated the application of the overbooking model and its effectiveness. The model also provide theoretical guidance for airline revenue management practice and daily operation.

Key Words: revenue management; news vendor model; overbooking

0 引言

航空运输业经过 100 余年的发展, 已经成为真正意义上的全球化产业, 为跨国公司、国际组织、公共管理部门、社会团体及个人进行访问交流、合作沟通提供了最为高效便捷的交通服务。这个庞大的产业为全球提供了约 5 800 万个就业岗位, 每年搭载 30 多亿民航旅客, 运输 5 000 多万吨航空货物, 创造近 2.4 万亿美元的经济价值。

然而, 随着国际互联互通程度的加强及“天空开放”政策在更多国家的推行, 航

航空公司之间的竞争也变得愈加激烈。近年来,低成本航空凭借其高座位密度、高飞机利用率、高客座率及低票价的运营模式,进一步使得航空运输产业成为名副其实的“红海市场”。价格战是所有航空公司都不愿意看到的后果。因此,现今大部分航空公司都把竞争的焦点聚集于收益管理,这也是目前低成本航空公司普遍施行的战略之一:应用收益管理实现外张式的利润增值。

本文通过报童模型及理论(News Vendor Model),建立起航空公司收益管理中的超售策略,帮助航空公司完善精益管理,实现收益最大化,以满足航企本身及利益相关方的需求和投资回报。

1 单周期订货模型

1.1 问题背景

报童每天清晨从报社购进报纸零售,但是在订购报纸的时候不能确定当天的实际需求数量,因此他只能根据以往的经验。如果报童当天购进的报纸太少,则导致不够卖而少赚钱;如果报童当天购进的报纸太多,则会卖不完而赔钱,那么如何来确定报童每天订购报纸的数量就成了一个关键问题。

报童模型其实是一种单周期订货模型,即在单位周期内只订购一次货物以满足整个单位周期的需求量。单周期订货模型主要用于容易腐烂物品(鲜花、海鲜、时令水果等)以及有效期短的产品(杂志、报纸等)的订货。这些未出售或未使用商品过了本周期就会失去价值,或者其过期的残值很小。例如,鲜花未被出售将会枯萎,过期报纸杂志将会廉价售给废品回收站,甚至处置剩余商品可能还需产生额外费用。模型要求制订该周期订货量,以使收益最大或损失最少。

1.2 模型建立

1.2.1 假设条件

首先作如下假设:

(1) 存在一个决策变量 Y (报纸采购量)和一个随机变量 X (报纸需求量),这两个变量共同作用于结果。

(2) 必须先决定 Y 的数量,即 Y 先于 X 发生。

(3) 当 X 大于 Y 时,出现缺货成本(缺货单位成本已知);当 X 小于 Y 时,出现过量成本(过量单位成本已知)。

(4) X 为非负的随机变量,且概率分布已知。

(5) 单位报纸购进价格为 b ,零售价格为 a ,打折价为 c ,且 $a > b > c$ 。

(6) 从实际来看,优化目的是使报童长期的平均收入最大,即利润的数学期望最大化。

1.2.2 连续型需求分布

在某些情况下需求很大,可以认为需求分布是连续函数,因此假设需求量 r 是

连续型随机变量,其概率密度为 $f(r)$,报纸订购量为 Q ,利润函数为 $L(r)$,利润期望为 $E[L(r)]$ 。

若当天的报纸需求量 $r \leq Q$,则售出 r 份报纸,打折处理 $Q-r$ 份报纸。若当天的报纸需求量 $r > Q$,则 Q 份报纸全部售出,因此利润函数为

$$L(r) = \begin{cases} (a-b)r - (b-c)(Q-r), & r \leq Q \\ (a-b)Q, & r > Q \end{cases} \quad (1)$$

因此利润期望 $E[L(r)]$ 为

$$E[L(r)] = \int_0^Q [(a-b)r - (b-c)(Q-r)]f(r)dr + \int_Q^{+\infty} (a-b)Qf(r)dr \quad (2)$$

为求得利润期望的最大值,对 $E[L(r)]$ 求一阶导数:

$$\frac{dE(Q)}{dQ} = -(b-c) \int_0^Q f(r)dr + (a-b) \int_Q^{+\infty} f(r)dr \quad (3)$$

令 $\frac{dE(Q)}{dQ} = 0$, 得到报纸最优订购量 Q^* 满足式(4):

$$\frac{\int_0^{Q^*} f(r)dr}{\int_{Q^*}^{+\infty} f(r)dr} = \frac{a-b}{b-c} \quad (4)$$

因为 $\int_0^{+\infty} f(r)dr = 1$, 因此式(4) 又可以表示为

$$\int_0^{Q^*} f(r)dr = \frac{a-b}{a-c} \quad (5)$$

由此可以得出最优订购量 Q^* 。

1.2.3 离散型需求分布——报童模型

设需求量 r 是非负的离散型变量,假设其概率分布为 $P(r=r_i) = P_i (i=1, 2, \dots)$, 求最优订购量 Q^* , 使利润期望值最大。

离散型需求与连续型需求的利润函数相同,均为式(1)。离散型需求的利润期望为

$$E[L(r)] = \sum_{r_i \leq Q} [(a-b)r_i - (b-c)(Q-r_i)]p_i + \sum_{r_i > Q} (a-b)Qp_i \quad (6)$$

对式(6)利用差分法得到最优订购量 Q^* 满足式(7):

$$\sum_{r_i \leq Q^*} p_i = \frac{a-b}{a-c} \quad (7)$$

由此可以得出最优订购量 Q^* 。

2 航空公司超售模型

长期以来航空公司发现有部分旅客预订了机票,但最后由于各种原因不登机,导致了座位放空的情况。由此,航空公司就开始有意识地超量售票,使得最终登机的乘客数尽量与飞机的座位数匹配。航空公司收益管理中一个非常重要的模型即超售模型,它以报童模型为基础,并利用了风险决策理论来解决该问题。

每个航班的现金运营成本(cash operation cost)仅与机组费、燃油费、导航费、机场收费、维修费、地面服务费相关。乘客满载与不满载仅对燃油消耗有轻微影响,而其余费用与乘客数无关。因此可以认为每个航班的现金运营成本与乘客数量无关,为了简化,假设每趟航班的现金运营成本为 C ,且假定每个旅客支付的票价都相同。

由于超售策略使得旅客总人数超过飞机座位数,如果旅客全部要求登机,那么必然会有部分旅客被转至下一个航班,因此航空公司会因超售而耽误旅客行程而支付赔偿费用。根据报童模型理论,每个旅客的赔偿费用即单位过量成本,而飞机每一个座位放空导致的利润减少即单位缺货成本。

假设参数如表 1 所示。

表 1 假设参数

飞机座位数	N	未出现者数	k
机票价格	g	实际登机人数	$m-k$
每趟航班成本	C	每个旅客赔偿费	b
预订持票者数	m	每趟航班利润	S_k

则每趟航班利润为

$$S_k = \begin{cases} (m-k)g - C, & k \geq m - N \\ (Ng - C) - (m-k-N)b, & k < m - N \end{cases} \quad (8)$$

S_k 为随机变量,假设有 k 个未出现者的概率为 P_k ,计算 S_k 的数学期望(均值)为

$$\begin{aligned} E(S_k) &= \sum_{k=0}^m P_k S_k \\ &= \sum_{k=0}^{m-N-1} P_k [(Ng - C) - (m-k-N)b] + \sum_{k=m-N}^m P_k [(m-k)g - C] \\ &= \sum_{k=0}^{m-N-1} P_k [(N-m+k)g - (m-k-N)b] + (mg - C) \sum_{k=0}^m P_k - g \sum_{k=0}^m k P_k \end{aligned} \quad (9)$$

由于 $\sum_{k=0}^m P_k = 1$, 且 $\sum_{k=0}^m kP_k$ 为未出现者的期望值 $E(k)$, 于是式(9) 可以表示为

$$E(S_k) = [m - E(k)]g - C - (b + g) \sum_{k=0}^{m-N-1} P_k (m - N - k) \quad (10)$$

现假设任一持票者出现的概率为 P , 而不出现的概率为 $1 - P$, 且乘客彼此之间是相互独立的。则乘客服从参数为 m, P 的二项分布, 即 $P_k = C_m^k (1 - p)^k p^{m-k}$, 则未出现者的数学期望为 $E(k) = m(1 - P)$, 代入式(10) 为

$$E(S_k) = pmg - C - (b + g) \sum_{k=0}^{m-N-1} P_k (m - N - k) \quad (11)$$

以每张机票价格 g 为计算单位的利润期望为

$$\frac{E(S_k)}{g} = pm - \left(1 + \frac{b}{g}\right) \sum_{k=0}^{m-N-1} P_k (m - N - k) - \frac{C}{g} \quad (12)$$

从航空公司的角度来看, 式(12)中的 C, g, b, p, N 是外部参数, 在外界环境一定的情况下很难改变, 所以航空公司的超售策略就是通过控制 m 来使利润期望 $E(S_k)$ 最大化。

3 应用举例

航空公司超售模型是一个优化问题, 可以利用计算机对式(12)进行求解, 即使使用枚举法, 逐个对计算值比较大小, 从而得到最优解。

例如, A 航空公司的某趟航班座位数为 200, 赔偿金/机票价格 $(b/g) = 0.2$, 持票者不出现的概率为 0.01。计算持票者数 m 取不同值时的利润期望 $\frac{E(S_k)}{g}$, 式(12)可以得到如表 2 所示的计算结果。

表 2 计算结果

m	201	202	203	204	205	206	207	208
$\frac{E(S_k)}{g}$	286.94	287.61	288.13	289.07	289.65	289.24	288.72	288.06

由表 2 可以看出, 当 $m = 205$ 时, 利润期望 $\frac{E(S_k)}{g}$ 取到最大值, 所以 A 航空公司的超售策略为可以预订 205 张机票。

更进一步, 我们对不同的赔偿金/机票价格 (b/g) 以及持票者不出现的概率 $(1 - P)$ 进行敏感性分析。仍以座位数 200 为例, 计算得航空公司最优售票数如表 3 所示。