



大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 飞机结构与强度计算

Design and Analysis of Composite Structures with  
Applications to Aerospace Structures

黄季墀 汪 海 编著



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



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 飞机结构与强度计算

---

Aircraft Structures Design and Analysis

黄季墀 汪 海 编著  
崔德刚 审



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

## 内 容 简 介

本书重点介绍了飞机结构设计与强度分析中的基础知识和基本方法。全书分为 11 章,第 1 章对军用飞机的发展历史进行了简要回顾,并对军用飞机的常规设计指标进行了介绍;第 2 章和第 3 章系统阐述了飞机总体设计要求和结构设计准则;第 4 章介绍了飞机载荷计算方法;第 5 章介绍了飞机结构传力分析的一般方法;第 6 章和第 7 章详细介绍了飞机机翼、尾翼、机身等结构的设计与分析方法;第 8 章对飞机结构力学基础知识进行了重点介绍;第 9 章和第 10 章详细介绍了飞机结构静强度、疲劳强度的计算方法;第 11 章则对飞机结构设计完整性要求进行了简要说明。最后,本书还给出了部分飞机结构强度计算的工程实例。

本书可作为高等院校航空专业研究生、高年级本科生教材,也可供广大工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机结构设计与强度计算/黄季墀,汪海编著. —上海:上海交通大学出版社,2012

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-08040-0

I. ①飞… II. ①黄…②汪… III. ①飞机—结构设计  
②飞机—强度—计算 IV. ①V221②V215.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 275029 号

## 飞机结构设计与强度计算

黄季墀 汪 海 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

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 25.5 字数: 502 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-08040-0/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: 0573-86577317

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、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(上海交通大学常务副校长、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、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、金德珉研究员、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

# 《飞机结构与强度计算》编审委员会

主 编 黄季墀 汪 海

主 审 崔德刚

编 委 杨树勋 陈秀华 于哲峰  
      张晓晶 梁 嫒



# 前 言

为了满足我国“大型飞机”重大专项对飞机研制人才的迫切需求,上海交通大学在上海市人民政府的大力支持下,启动了“上海交通大学大型民机创新工程”项目。本书作为该项目中“人才工程”的配套内容,于2008年初形成讲义初稿,并在2009年春季学期及2010,2011年秋季学期的飞行器设计研究生“特班”得以试用和完善。

众所周知,飞机机体结构是实现各种先进气动布局、装载发动机等各大系统并承载旅客和货物的基础平台,没有这个平台,也就没有飞机。因此,飞机结构强度专业是飞机设计的主要专业,并在所有类型的飞机研制中扮演着至关重要的角色。

然而,飞机结构强度专业又是一个自从人类开始梦想飞天就诞生的一个古老专业,它是近现代力学在飞行器结构设计上进一步发展应用的典范。近几十年来,随着各种新材料、新工艺和新结构形式的出现和广泛应用,人们对飞机结构平台的要求也日益提高。先进复合材料、大型整体结构、先进计算机技术应用等使得人们对获得更轻质高强、更耐久可靠、更经济安全飞机结构的要求不断得以满足,日益激烈的市场竞争也推动了飞机结构强度设计这一专业的快速发展。

今天,一名合格的飞机结构设计师不仅需要精通材料力学、结构力学、弹性力学、复合材料力学、实验力学、材料学、制造工艺学、计算机软件等基础知识,而且还要熟悉各种飞机设计规范,掌握与飞机寿命、安全性、经济性相关的各种知识。为了使我国新时期培养出来的研究生能够在飞机结构强度设计的基础知识、动手能力及设计创新等方面有所突破,满足我国军用、民用飞机研制的需求,本书作者根据自己几十年来从事飞机结构研制的经验,参考了国内和国外部分优秀专著和教材后,结合一些具体的飞机型号研制典型案例和有关工程应用实践,编写了本书。

本书在编写时主要针对的阅读对象为航空专业高年级本科生、飞行器设计/固体力学/机械设计等专业研究生及从事飞机结构强度设计的技术人员。为了使内容尽量系统、完整,本书在内容编排上选编了参考资料中的部分内容,并根据教学需要,增补了一些与飞机结构与强度计算相关的飞机总体设计和结构力学基础知识,重点对飞机机翼、机身结构与强度计算、飞机结构疲劳强度计算等内容进行了详细介绍。最后,对飞机结构完整性大纲有关知识也进行了简要介绍。

本书除可作为航空专业高年级本科生、研究生教材外,还可作为广大工程技术人员学习和掌握飞机结构强度设计技术的参考书。由于编者知识水平所限,书中不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2011年10月于上海

# 主要术语和符号

## 1 术语

**飞机坐标(aircraft coordinate)** 以飞机重心(质心)为原点,  $x$  轴沿机身轴线向前为正,  $y$  轴垂直  $x$  向上为正,  $z$  轴由右手定则确定, 向右为正。

**安全系数(safety factor)** 极限载荷(设计载荷)与限制载荷(使用载荷)之比值, 是考虑实际使用中材料和设计不确定因素而规定的设计系数, 一般取  $f=1.5$ ; 考虑接头、振动、热、修理等特殊情况还要加附加安全系数。

**安全裕度(margin of safety)** 表示静强度的余量。

$$M. S = \frac{\text{零件计算部位的许用应力}}{\text{零件计算部位的实际应力}} - 1.0 \geq 0;$$

或 
$$\eta = \frac{\text{零件计算部位的许用应力}}{\text{零件计算部位的实际应力}} \geq 1.0$$

**结构完整性(structural integrity)** 关系到飞机安全使用、使用费用和功能的机体结构的强度、刚度、损伤容限及耐久性(或安全寿命)等飞机所要求的结构特性的总称。

**颤振(flutter)** 飞机或其部件在飞行中的自激振动, 属于空气动力学稳定性问题, 这是由于弹性力、惯性力、空气动力的交互作用使结构能从周围空气中吸取能量, 产生不稳定振动。

**地面载荷(ground load)** 飞机在地面停放、起飞、着陆、滑行或运动过程中以及使用维护时地面作用在飞机上的力。载荷计算原始参数包括: 飞机重量、重心、惯性矩、刚度、飞机三面图、气动参数、起落系统参数、跑道参数等。

**断裂力学(fracture mechanics)** 定量研究含裂纹体在外载荷作用下, 裂纹扩展规律和失效的工程学科。它是固体力学的一个分支, 是飞机结构断裂控制、损伤容限设计或耐久性设计的理论基础。

**飞行载荷 (flight load)** 飞行中结构受的气动力、惯性力、发动机力及陀螺力。通过飞行力学计算及结构动响应分析得到。计算的飞机构形依据强度规范或适航标准要求确定气动参数通过风洞试验确定。设计初也可依据原准机或同类飞机或部件试验结果确定。

**飞行包线 (flight envelope)** 以飞机速度(马赫数  $Ma$ )、高度和过载等为坐标,以飞机飞行使用限制条件为边界的包络曲线。在此包线内,飞机是可操纵的,而且强度、刚度要求得到保证。

**经济寿命 (economic life)** 按照规范要求对根据耐久性试验大纲完成的试验结果进行解释和评估所得到的使用寿命。当机体结构大范围出现损伤,先不修理则影响飞机使用功能和战备状态,而修理又是不经济的,则认为机体结构达到了经济寿命。

**结构可靠性 (structural reliability)** 是指在规定的使用条件与环境下和在规定的的使用寿命内,结构能承受载荷、耐受环境而正常工作的能力。这种能力通常用一种概率,即结构存活率,或结构可靠性来度量(与之相对的是结构破坏率或失效率,两者之和为1)。飞机结构可靠性是保证飞机出勤率的基本条件。

**耐久性 (durability)** 结构在规定期限内,考虑环境抵抗开裂、腐蚀、热退化、脱层、磨损和外界损伤的能力。

**损伤容限 (damage tolerance)** 结构在规定的未修使用期内,抵抗由缺陷、裂纹或其他损伤而导致破坏的能力。所谓结构的容许损伤是指不得超过规定界限的损伤。

**破损安全 (fail safety)** 是一种设计概念,即允许结构带有损伤(裂纹),但仍需保证结构的安全。破损安全又分为止裂破损-安全和多传力途径破损-安全。要求损伤发展到危险尺寸之前能够被发现,或者整个寿命损伤不会达到危险尺寸。

**疲劳载荷谱 (fatigue load spectrum)** 疲劳设计或试验时,试件、结构或构件所承受的载荷随时间变化的历程,通常由各种载荷大小及相应的频率按出现的先后次序排列而成,或由随机载荷过程的统计特性来表示。

**载荷系数 (load factor)** 又称过载。飞机过载为作用在飞机上除重力以外所有力的合力与重力之比;起落架过载为起落架载荷与停机载荷或当量载荷之比。飞机过载  $n$  是矢量, $n$  在各坐标轴上的投影用  $n_x, n_y, n_z$  表示, $n_x$  为纵向过载, $n_y$  为法向过载, $n_z$  为侧向过载。

## 2 符号

A 横截面面积( $\text{mm}^2$ );诱导阻力增长因子

- a* 加速度( $\text{m/s}^2$ );重心至主轮距离(mm)
- ACT 飞机主动控制技术
- b* 重心至前轮距离(mm)
- c* 机翼平均几何弦长(mm)
- c. g* 重心
- C. P 压心
- C. R 刚心
- CAD 计算机辅助设计
- CAE 计算机辅助工程分析
- CAM 飞机制造工程计算机管理
- CCAR 中国适航标准
- $C_L$  升力系数
- $C_D$  阻力系数
- $C_{D0}$  零阻力系数
- D* 阻力(N);直径(mm)
- d* 直径(mm)
- DFR 细节疲劳额定值
- E* 拉伸弹性模量(GPa)
- F* 力(N);横截面积( $\text{mm}^2$ )
- FAR (美)联邦航空条例
- f* 安全系数;挠度变形
- G* 剪切弹性模量(GPa);飞机重力(N)
- g* 重力加速度( $9.806\ 65\ \text{m/s}^2$ )
- H* 高度(mm)
- I* 质量惯性矩、转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
- J* 几何惯性矩( $\text{mm}^4$ )
- JAR 欧洲联合航空要求
- K* 系数;因子;刚度系数;动荷系数;应力集中系数;机轮中心点
- k* 飞机升阻比;系数
- L* 升力(N);长度(mm)
- l* 长度(mm)

- $M$  弯矩、力矩( $\text{kN} \cdot \text{mm}$ );质量( $\text{kg}$ )
- $m$  扭矩、力矩( $\text{kN} \cdot \text{mm}$ );质量( $\text{kg}$ )
- $Ma$  马赫数
- $\min$  最小
- $N$  拉伸压缩轴力( $\text{N}$ );寿命
- $n$  过载;件数
- $n_d$  设计过载,  $n_d = f n_r$
- $n_f$  疲劳分散系数
- $n_r$  使用过载
- $\rho$  空气密度
- $P$  载荷( $\text{N}$ )
- $P_d$  极限载荷, 又称设计载荷,  $P_d = f P_r$
- $P_r$  限制载荷, 又称使用载荷
- $Q$  剪力( $\text{N}$ )
- $q$  剪流;线载荷 ( $\text{kN}/\text{mm}$ )
- $RCS$  雷达散射截面积;飞机隐身性能的度量
- $R$  力;支反力( $\text{N}$ );半径( $\text{mm}$ )
- $r$  半径( $\text{mm}$ )
- $S$  机翼面积( $\text{mm}^2$ );静矩( $\text{mm}^2$ )
- $s. s. f$  应力严重系数
- $S_F$  疲劳分散系数
- $t$  厚度( $\text{mm}$ );时间( $\text{s}$ ,  $\text{h}$ )
- $v$  速度( $\text{m}/\text{s}$ )
- $W$  飞机重力( $\text{N}$ );抗弯矩( $\text{mm}^3$ )
- $\alpha$  迎角;角度;表面状态系数
- $\beta$  侧滑角;充填系数
- $\gamma$  剪切应变;角度
- $\delta$  变量;增量;变量
- $\Delta$  增量;变量
- $\epsilon$  拉伸应变;角加速度
- $\Sigma$  合成

- $\eta$  剩余强度  
 $\theta$  转角  
 $\lambda$  飞机展弦比;系数  
 $\mu$  系数;数学期望  
 $\rho$  密度  
 $\sigma$  正应力(MPa),标准差  
 $\sigma_b$  拉伸强度极限  
 $\sigma_e$  欧拉临界应力  
 $\tau$  剪应力  
 $\tau_b$  剪切强度极限(MPa)  
 $\varphi$  角度  
 $\chi$  机翼后掠角  
 $\omega$  转动速度;扇形面积  
[ ] 许用值;矩阵;

### 3 下标

- av 平均  
axi 轴向  
b 气动力  
be 弯曲  
back 后  
br 挤压  
c 压缩  
c. g 重心  
C. P 压心  
C. R 刚心  
cr 临界  
d 设计(极限)值  
e 当量  
eq 平衡;当量  
eff 有效  
fl 缘条

H	高度
h.t	平尾
in	内
lim	限制
lon	桁梁
m	平均
max	最大值
min	最小值
nose	前;前端
n	横向
out	外
open	开口
oversew	不开口;闭合
pa	壁板
r	使用(限制)值
run	起转
skin	蒙皮
st	桁条
s	剪切
sec	切割
soak	浸润
spr	回弹
t	拉伸
up	上
un	下
v	速度
v. t	垂直尾翼
w	机翼
web	腹板
$\omega$	扇形



# 大飞机出版工程

## 书 目

### 一期书目(已出版)

《超声速飞机空气动力学和飞行力学》(俄译中)

《大型客机计算流体力学应用与发展》

《民用飞机总体设计》

《飞机飞行手册》(英译中)

《运输类飞机的空气动力设计》(英译中)

《雅克-42M和雅克-242飞机草图设计》(俄译中)

《飞机气动弹性力学及载荷导论》(英译中)

《飞机推进》(英译中)

《飞机燃油系统》(英译中)

《全球航空业》(英译中)

《航空发展的历程与真相》(英译中)

### 二期书目(已出版)

《大型客机设计制造与使用经济性研究》

《飞机电气和电子系统——原理、维护和使用》(英译中)

《民用飞机航空电子系统》

《非线性有限元及其在飞机结构设计中的应用》

《民用飞机复合材料结构与验证》

《飞机复合材料结构设计与分析》(英译中)

《飞机复合材料结构强度分析》

《复合材料飞机结构强度设计与验证概论》

《复合材料连接》

《飞机结构与强度计算》

《飞机材料与结构的疲劳与断裂》(英文版)

### 三期书目

《适航理念与原则》

《适航——航空器适航审定概论》(译著)