



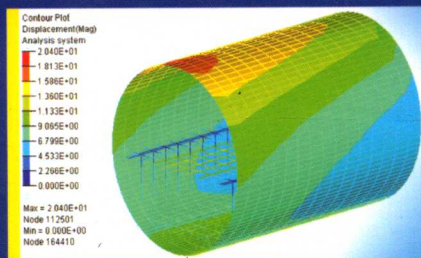
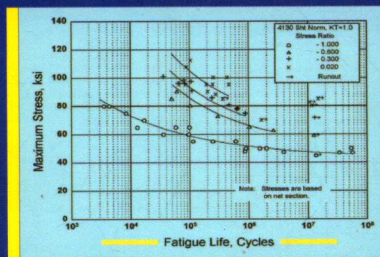
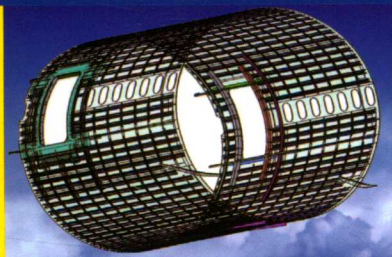
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



民机结构分析和设计

第2册

民机结构分析手册



秦福光 主 编

张嘉振 胡震东 副主编



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机结构分析和设计

第 2 册

民机结构分析手册

秦福光 主 编

张嘉振 胡震东 副主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书汇集了国内外经典的民机强度分析方法及流程,囊括了全机有限元建模规范,金属、复合材料结构分析方法及结构强度试验验证方法等内容。全机有限元建模规范包括全机有限元建模及验证两部分内容;金属结构分析方法涉及加筋板、板壳结构、加强件、薄壁腹板梁、耳片、加强孔及螺栓结构分析方法;复合材料相关章节介绍层合板、夹层板及复材连接结构分析方法;典型民机结构强度试验验证章节总结了各种典型结构强度试验方法、试验载荷的确定及试验夹具的设计原则。

本书可供民机结构分析人员参考,也可作为民机结构维护、维修领域相关从业人员的辅助工具书。

图书在版编目(CIP)数据

民机结构分析和设计. 第2册,民机结构分析手册 /
秦福光主编. -- 北京:北京航空航天大学出版社,
2015.5

ISBN 978-7-5124-1764-9

I. ①民… II. ①秦… III. ①民用飞机—结构分析—
技术手册 IV. ①V271-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 082729 号

版权所有,侵权必究。

民机结构分析和设计

第 2 册

民机结构分析手册

秦福光 主 编

张嘉振 胡震东 副主编

责任编辑 张艳学 董 瑞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京宏伟双华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:889×1 194 1/16 印张:32.25 字数:1 043 千字

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-1764-9 定价:160.00 元

《民机结构分析和设计手册》

编写委员会

主 任 杜善义

副主任 李东升 梁 波 姜丽萍 朱广荣

主 编 秦福光

副主编 张嘉振 胡震东

编 委 周良道 刘建中 董登科 周振功 张博明 汪 海

编写人员

《民机材料和结构性能数据手册》

张金玲	齐 绿	魏绎邴	李 明	王 裕	马立敏	王新林	向敬忠
宋 欣	潘承怡	吴雪峰	戴 野	沙 宇	白士刚	韩建勇	王亚辉
魏 东	王 涛	朱 辉	孔泳力	赵岩成	李振远	沈 阳	陈杨柳
高梦瑾	董登科	张 侃	陈 安	窦秋芳	张海英	刘建中	陈 勃
高倩倩	胡本润						

《民机结构分析手册》

冯 娟	刘 倩	王安俊	肖 浩	苏怀忠	邱 菊	杨洪琴	李忠峰
史 前	张继鹏	王 玥	赵 元	王时玉	祖士明	刘海涛	余 音
刘魏光	刘龙权	彭 蒙	于哲峰	陈 艳	宁宝军	唐占文	于雅琳
郭艳丽	祁国成	孟姗姗	甘民可				

《民机结构设计手册》

郭红军	包伟英	温顺达	姬杨玲	侯亚峰	黄海龙	许 延	谷 斌
王 裕	聂 磊	汤家力	赵 毅	朱林刚	刘朝妮	刘衰财	汪 洋
李 强	季佳佳	徐东明	刘长玮	方 芳			

序

《运输类飞机适航标准》对民用飞机(简称“民机”)的研制提出了通用性原则和基本的安全性要求,对民机结构材料的性能、结构分析和设计方法都有明确的要求。

民用飞机研制需要准确的材料设计许用值与结构设计参数,以规范民机结构设计,保证分析和计算结果的可比性和可靠性。随着飞机设计思想的进步和技术水平的提高,对飞机结构材料性能的要求也越来越高。目前,我国民机研制还没有一部系统的、能够满足适航要求的民机材料和结构性能手册。

随着世界民机市场竞争的不断加剧,现代的民机结构不断朝着轻量化、长寿命和高可靠性方向发展,其结构分析和设计方法也随着设计水平的提高、材料性能的改善而改变。结构分析和设计手册作为民用飞机设计公司的设计基础及依据,直接关系到民机的产品质量和市场竞争能力。国外飞机设计公司将多年的设计经验固化在其分析和设计手册中,通过手册进行知识和经验的传承,以满足其不断发展的需要。我国的民机发展战略刚刚确立,迫切需要一套完整、系统的民机结构设计分析方面的手册,为民机在研制过程中提供基础数据和有关设计规范,推进民机研制的顺利开展。在一定意义上,编写民机结构分析和设计手册是我国民机发展方面一项重要的技术和工程建设,能够为我国民机研制、特别是适航取证提供重要技术支撑,推动我国民机研制能力的快速发展,具有重要而深远的意义。

《民机结构分析和设计》编写组通过走访我国航空工业集团和中国商飞公司一线的有关设计和研制人员,充分了解了国内现有手册的优点及不足,在此基础上提出了本手册的编制思路。首先,研究了《运输类飞机适航标准》对民机结构设计的具体要求,用适航的要求对材料、结构、强度和试验等流程的经验进行总结;第二,充分借鉴了中国商飞公司在研的型号 ARJ21 和 C919 的结构分析和设计经验,结合工程实际,针对典型的飞机结构,用大量的设计和分析实例对问题进行深入说明,方便结构分析和设计工程师深入体会和理解各种结构的分析和设计方法;最后,收集和整理了大量的国外文献和资料,引用了包括 MMPDS、MIL-HDBK-17、ESDU 等大量数据、方法和标准。

编制手册是一项系统工程,需要长期的投入和不断更新,编写组收集和整理了大量的资料,完成了《民机结构分析和设计》的编写。但是,民机的材料、结构设计和分析技术日新月异,随着民机技术的发展,还需要不断对手册内容进行更新,使其更具有参考价值。相信此手册对我国民机的研制和发展定会起到重要的推动作用。

中国工程院院士 杜善义

前 言

民用飞机(简称“民机”)的结构分析工作贯穿飞机设计的整个过程,是直接影响民机结构的安全性、可靠性和先进性的关键工作。随着世界民机市场竞争的不断加剧,现代的民机结构不断朝着轻质量、长寿命和高可靠性方向发展,相应地,需要结构分析方法的与时俱进,以提供全面可靠的结构分析结果。

世界各主要民用飞机制造商都拥有各自较为完备的民机结构分析手册,并且不断地对其进行更新和细化,成为民用飞机设计的坚实基础。国内现有手册的覆盖内容较广,但实用性和针对适航要求方面有待提高。在 ARJ21 和 C919 的研制过程中,中国商用飞机有限责任公司已积累了一些民机结构强度分析方法和适航取证经验。本手册旨在以适航要求为指导,集成世界各主要民机研制公司结构分析经验,为民用飞机的研制和适航取证工作提供技术支持。

本书参考国外先进民机设计公司的结构分析方法,对民机典型结构设计中 12 种主要分析类型开展研究,结合有限元数值分析手段,形成分析流程和分析准则。全书共 12 章,主要内容包括民机金属和复合材料结构的静强度和稳定性分析以及结构强度实验技术。在实际的民机结构设计中,可根据结构的类型和主要的失效情况,通过选用书中相应的分析和实验方法,确定结构是否满足静强度和稳定性要求,并参考裕度值对结构进行优化。

由于复合材料在民用飞机上应用日益广泛,本书的第 9~11 章专讲民机复合材料结构的分析方法,结合复合材料不同于金属材料的特有性能,如可设计性、结构成形与材料成形的同时性、材料性能对环境因素敏感性和破坏模式多样性等,收集和整理国际上先进的复合材料分析方法和设计曲线,为民机复合材料结构的设计分析提供指导。

在本书的编写过程中,始终围绕适航符合性验证要求,严格把控分析方法的收录来源的可靠性,使书中的分析数据和方法能规范、系统、完整地反映国际上最新的研究成果,具备工程应用条件。为提高手册的实用性,精心编排了针对实际典型民机结构的设计分析实例,有助于使用本书的工程师加深理解分析方法的实际应用。

在本书的编制和修改过程中,得到了北京航空航天大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院等的大力支持,特别得到了杜善义院士的专门指导和极大帮助,在此一并感谢。

本书可供飞机结构设计、强度专业工程师参考。由于水平和资源的限制,书中错误、疏漏和不合适之处,请使用者指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第 1 章 民机全机有限元建模方法研究

1.1 全局有限元建模准则	1
1.1.1 有限元模型定义	1
1.1.2 NASTRAN 卡片使用规定	8
1.1.3 飞机建模通用界面要求	9
1.1.4 飞机有限元建模原则	10
1.1.5 典型结构模型简化规定(金属材料结构)	17
1.1.6 典型结构模型简化规定(复合材料结构)	19
1.2 全局有限元模型验证	23
1.3 模型管理	71
1.3.1 模型命名规定	71
1.3.2 模型提交	71
1.3.3 复合材料外翼有限元模型档案管理	71
1.4 飞机典型结构有限元分析	72
1.4.1 机身结构的有限元分析	72
1.4.2 机翼、尾翼结构的有限元分析	73
参考文献	74
附录 1 基于区域的复合材料建模方法	75
附录 2 基于板层的建模方法	76

第 2 章 加筋板结构分析方法

2.0 符号说明	81
2.1 加筋板结构失效形式	82
2.2 壁板的拉伸强度	82
2.2.1 NASA TN D-1259 方法	82
2.2.2 国外某公司工程方法	82
2.3 壁板压缩强度	84
2.3.1 蒙皮屈曲应力	84
2.3.2 长方形蒙皮屈曲应力	84
2.3.3 三角形蒙皮压缩屈曲应力	86
2.3.4 锥形蒙皮屈曲应力	87
2.3.5 平行四边形蒙皮屈曲应力	89
2.3.6 长方形蒙皮在线性变化轴力作用下的屈曲应力	89
2.3.7 桁条的局部失稳分析	92
2.3.8 桁条的压损应力	96
2.3.9 壁板的压缩破坏	102

2.3.10 工程实例	107
2.4 壁板剪切强度	109
2.4.1 蒙皮的抗剪强度	109
2.4.2 壁板剪切屈曲	110
2.4.3 壁板不完全张力场分析	114
2.4.4 工程实例	120
2.5 壁板压剪、拉剪屈曲分析	125
2.5.1 壁板压剪屈曲应力	125
2.5.2 拉剪屈曲应力	125
2.5.3 工程实例	125
参考文献	126

第3章 板壳结构屈曲分析方法

3.0 符号说明	127
3.1 板壳结构典型失效形式分析	129
3.2 平板结构屈曲分析	130
3.2.1 矩形平板结构屈曲分析流程	130
3.2.2 矩形平板的屈曲分析	130
3.2.3 平行四边形平板的屈曲分析	149
3.2.4 三角形平板的屈曲分析	152
3.2.5 梯形平板的屈曲分析	154
3.2.6 平板结构过屈曲及张力场分析方法	157
3.2.7 平板的破坏	161
3.3 曲板结构屈曲分析	163
3.3.1 曲板结构的分析流程	163
3.3.2 矩形曲板的屈曲分析	164
3.3.3 塑性修正	172
3.4 圆筒结构屈曲分析	174
3.4.1 圆筒结构屈曲分析概要	174
3.4.2 轴压载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	174
3.4.3 纯弯曲载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	178
3.4.4 纯扭载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	179
3.4.5 横向剪切载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	181
3.4.6 外压载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	181
3.4.7 复杂载荷作用下的圆筒壳的屈曲分析	182
3.4.8 薄壁锥壳和截锥壳的屈曲分析	185
3.4.9 椭圆筒壳的屈曲分析	190
3.4.10 球面曲板的屈曲分析	191
3.5 板壳结构屈曲问题的有限元分析技术	192
3.5.1 矩形平板稳定性分析有限元方法	192
3.5.2 三角形平板屈曲分析有限元方法	193
3.5.3 曲板的屈曲分析有限元方法	194

参考文献	195
第 4 章 加筋件结构分析方法	
4.0 符号说明	197
4.1 加筋件结构典型失效形式分析	199
4.2 加筋件总体屈曲分析	200
4.2.1 临界应力方程	200
4.2.2 端部支持系数	201
4.2.3 切线模量 E_t	201
4.2.4 设计曲线	204
4.3 加筋件的扭转失稳	204
4.3.1 加筋件具有两根对称轴线剖面的扭转稳定性	204
4.3.2 加筋件具有一根对称轴线剖面的扭转稳定性	205
4.3.3 加筋件具有非对称剖面的扭转稳定性	205
4.4 加筋件局部屈曲分析	205
4.4.1 板元法	206
4.4.2 I 形、Z 形以及槽形加筋件局部屈曲分析方法	210
4.4.3 Z 型加筋件局部屈曲分析方法	212
4.4.4 槽形加筋件局部屈曲分析方法	218
4.5 铆钉间屈曲分析方法	226
4.6 加筋件结构有限元分析	227
4.6.1 加筋件有限元建模	227
4.6.2 角材的模拟	228
4.6.3 多钉连接有限元模拟	229
参考文献	230
第 5 章 薄板梁结构分析方法	
5.0 符号说明	231
5.1 薄板梁结构典型失效形式	233
5.2 腹板应力分析	233
5.2.1 剪力场状态下腹板应力	233
5.2.2 腹板剪切失稳	234
5.2.3 弯曲失稳	236
5.2.4 复合载荷作用下的稳定性	237
5.3 对角拉伸腹板分析	240
5.3.1 张力场类型	240
5.3.2 完全张力场	240
5.3.3 不完全张力场	242
5.3.4 梁缘条应力	245
5.3.5 支柱应力	246
5.3.6 端部框与开口框的计算	246
5.3.7 张力场应用算例	248

5.4 缘条应力分析	251
5.4.1 缘条设计许用应力	252
5.4.2 设计许用应力载荷下的应力-应变关系	252
5.4.3 缘条强度	252
5.4.4 斜缘条的抗剪能力	253
5.5 紧固件受力分析方法	253
5.5.1 腹板与缘条、腹板与端加筋支柱的连接	253
5.5.2 腹板与加筋支柱的单面连接	254
5.5.3 加筋支柱与腹板的连接	254
5.6 薄板梁有限元分析	255
参考文献	257

第6章 耳片结构分析方法

6.0 符号说明	259
6.1 耳片结构典型失效形式	263
6.1.1 主方向	263
6.1.2 失效模式	264
6.2 轴向载荷分析方法	266
6.2.1 剪切-挤压破坏	266
6.2.2 拉伸破坏	266
6.2.3 屈服破坏——耳片	268
6.2.4 耳片轴向许用应力计算流程图	268
6.3 横向载荷分析方法	270
6.3.1 极限载荷	270
6.3.2 屈服载荷	271
6.3.3 确定屈服载荷	271
6.3.4 横向载荷作用时的许用载荷计算流程	272
6.4 斜向载荷分析方法	273
6.5 挤压载荷分析方法	274
6.6 销钉分析方法	274
6.6.1 销钉剪切	274
6.6.2 销钉弯曲	274
6.7 实例	283
6.7.1 基本参数	283
6.7.2 耳片受力分析	283
6.7.3 销钉应力	286
参考文献	287

第7章 加强孔结构分析方法

7.0 符号说明	289
7.1 概述	290
7.1.1 术语(定义)	290

7.1.2 行为和失效模式	290
7.1.3 方法介绍	290
7.2 数据准备	291
7.2.1 材料参数	291
7.2.2 几何参数	291
7.3 一般方法	292
7.3.1 应力集中系数 K_t 的计算	292
7.3.2 等效应力 σ_{equi} 的计算	294
7.3.3 考虑过渡半径情况	295
7.3.4 紧固加强件中紧固件的载荷	295
7.4 基本数据	300
7.4.1 几何效率系数 η 的计算	300
7.4.2 K_t 的计算	303
7.5 流程图	318
7.6 实 例	318
7.6.1 含宽对称加强件的圆孔	318
7.6.2 含紧凑非对称窄加强件的椭圆孔	320
7.6.3 含衬套加强件的圆孔	321
7.6.4 三角形孔的加强件	322
7.6.5 渐变厚度加强件	323
参考文献	325
 第 8 章 螺栓和铆钉连接分析方法	
8.0 符号说明	327
8.1 螺栓和铆钉典型连接及失效形式	329
8.2 剪切载荷分析方法	329
8.2.1 金属板破坏	330
8.2.2 剪切/挤压/过渡破坏	334
8.2.3 用于修补的加大紧固件	339
8.2.4 螺栓-螺母组合和锁紧螺栓-垫圈组合	339
8.2.5 预紧力的影响	339
8.2.6 周围结构的影响	339
8.2.7 一般剪切连接件静强度的确定	339
8.3 拉伸载荷分析方法研究	341
8.3.1 失效模式(极限载荷)	341
8.3.2 静强度设计值(极限拉伸强度)	342
8.3.3 静强度设计值(屈服拉伸强度)	346
8.3.4 预紧力的影响	346
8.4 剪切/拉伸分析方法研究	352
8.4.1 剪切/拉伸载荷作用下连接件的静强度确定	352
8.4.2 预紧力对剪切/拉伸相互作用准则的影响	352
8.4.3 剪切/拉伸相互作用安全系数计算	352

8.5 带预紧力螺钉接触的有限元分析实例	356
8.5.1 问题描述	356
8.5.2 分析步骤	356
参考文献	361

第9章 复合材料层合板结构分析方法

9.0 符号说明	363
9.1 复合材料层合板失效准则	366
9.1.1 复合材料层合板失效分析方法介绍	366
9.1.2 层合板单层内的失效模式	366
9.1.3 层合板层间失效模式	368
9.2 复合材料层合板面内/弯曲/横向剪切分析方法研究	368
9.2.1 复合材料层合板应力分析	368
9.2.2 复合材料层合板失效准则	377
9.2.3 复合材料层合板失效分析	381
9.2.4 算例分析	381
9.3 复合材料层合板屈曲分析方法	384
9.3.1 层合板屈曲分析方法介绍	384
9.3.2 正交各向异性矩形层合板在单轴压缩载荷的屈曲分析	385
9.3.3 正交各向异性矩形平板在双轴压缩载荷的屈曲分析	387
9.3.4 正交各向异性矩形层合板的剪切屈曲分析	388
9.3.5 正交各向异性矩形层合板在压缩-剪切耦合载荷的屈曲分析	389
9.3.6 算例分析	389
9.4 复合材料层合板开口结构分析方法	390
9.4.1 层合板开口结构分析方法介绍	390
9.4.2 孔的尺寸影响	392
9.4.3 失效准则	393
9.4.4 算例分析	394
参考文献	395

第10章 复合材料夹层板结构分析方法

10.0 符号说明	397
10.1 夹层板结构失效准则	399
10.1.1 夹层板结构分析方法介绍	399
10.1.2 基本参数	399
10.1.3 夹层板结构失效模式	399
10.2 夹层板结构面内/弯曲/横向剪切分析方法	402
10.2.1 夹层结构的基本性能	402
10.2.2 复合材料夹层板应力分析工程方法(面内/弯曲/横向剪切分析方法)	402
10.2.3 方法算例	408
10.3 夹层板结构屈曲分析方法	411
10.3.1 复合材料夹层板局部屈曲分析方法	411

10.3.2	复合材料夹层板总体屈曲分析方法研究	414
10.3.3	算例夹层板稳定性分析	416
10.4	夹层板损伤容限分析	416
10.4.1	Lie 模型	416
10.4.2	Cairns 模型	416
10.4.3	Kassapoglou 模型	417
10.4.4	Minguet 模型	418
10.4.5	Tsang 模型	419
	参考文献	419

第 11 章 复合材料连接结构分析方法

11.0	符号说明	421
11.1	复合材料螺栓连接分析	423
11.1.1	复合材料螺栓连接分析方法介绍	423
11.1.2	复合材料螺栓连接分析方法	423
11.1.3	复合材料机械连接的破坏模式	423
11.1.4	单钉连接强度校核方法	424
11.1.5	复合材料单钉连接经验分析方法	428
11.1.6	复合材料结构多钉连接钉载分配分析	430
11.1.7	多钉连接强度校核	436
11.1.8	复合材料拉脱强度分析	437
11.1.9	机械连接疲劳	437
11.2	复合材料胶结连接分析方法	438
11.2.1	胶接连接分析方法	438
11.2.2	胶接连接的基本形式	439
11.2.3	胶接连接的基本破坏模式	439
11.2.4	单搭接接头应力及强度分析	440
11.2.5	双搭接接头应力及强度分析	443
11.2.6	楔形搭接接头应力及强度分析	444
11.2.7	阶梯式接头应力及强度分析	445
11.2.8	胶接接头分析算例	447
11.3	复合材料结构的相关适航要求	449
11.3.1	条款 CCAR25.613 材料的强度性能和设计值	450
11.3.2	条款 CCAR25.305 强度和变形	450
11.3.3	复合材料结构“积木式”验证方法	451
	参考文献	452

第 12 章 典型民机结构强度试验

12.1	材料、元件及细节试验	453
12.1.1	试验的目的及意义	453
12.1.2	试验的主要对象及考核内容	453
12.1.3	试验的技术要求及依据	454

12.1.4	试验实施注意事项	456
12.1.5	试验结果数据处理	456
12.1.6	典型的试验项目及技术简介	458
12.1.7	试验中常用的配套设备、仪器以及相关技术	467
12.2	结构组件试验	467
12.2.1	试验目的及意义	467
12.2.2	试验的主要对象及考核内容	467
12.2.3	试验件的设计、制造	468
12.2.4	试验载荷	468
12.2.5	试验夹具的设计、制造	468
12.2.6	试验实施	469
12.2.7	试验结果数据分析处理	469
12.2.8	典型的试验项目及技术简介	470
12.2.9	试验中常用的配套设备、仪器	476
12.3	部件试验	477
12.3.1	试验目的及意义	477
12.3.2	试验项目及考核内容	477
12.3.3	试验件的设计、制造	479
12.3.4	试验件的支持	479
12.3.5	试验载荷处理	479
12.3.6	试验夹具的设计	481
12.3.7	试验实施	481
12.3.8	试验数据处理	481
12.3.9	典型部件试验	482
12.3.10	试验中常用的配套设备、仪器	485
12.4	全机静强度试验	485
12.4.1	试验目的	485
12.4.2	试验项目	486
12.4.3	试验顺序	486
12.4.4	试验件	486
12.4.5	试验设计	487
12.4.6	静强度试验程序	489
12.4.7	试验主要设备和基础设施	491
12.5	全机疲劳和损伤容限试验	494
12.5.1	试验目的	494
12.5.2	试验规划	494
12.5.3	试验设计	495
12.5.4	试验安全保护	496
12.5.5	试验主要设备和基础设施	497
参考文献		497

第 1 章 民机全机有限元建模方法研究^①

本章所涉及的有限元建模与分析是用 PATRAN 和 NASTRAN 软件完成的。

本章将成为飞机主要零部件以及整机的有限元模型建模的基本手册,适用于所有将来的结构有限元分析建模和相关的项目,目的是为飞机整机和部件模型提供一个完整的有限元模型检查方法,而不需要修改建模的细节,且不须重建有限元结构模型。

建模时还应特别注意:建好的部件模型可装配成一个完整的、不需要进一步处理工作的飞机模型,组装时,作为飞机整体模型的一部分,必须提供正确的加载路径以及满足刚度和变形的完整模型,同时也是考虑了静、气动弹性因素和强度、刚度优化后完全平衡的细节模型。

这个模型为所有将来的分析工作和所有工程学科研究提供基础,从而避免重复劳动。

本书还确定了共同的验证程序,以确保所有分析工作的有效性。

本书中定量规定根据结构模型的不同可视情况而定,并将其定期审查。

1.1 全局有限元建模准则

1.1.1 有限元模型定义

整机的有限元模型中应包含以下部件:

- 机身;
- 左、右翼,包括对应的小翼和翼尖装置;
- 左、右水平尾翼;
- 垂直尾翼;
- 所有发动机挂架。

在允许的情况下,应该提供以下的部件:

- 起落架;
- 动力学分析中的所有运动面(包括操作机构和附加结构);
- 动力学分析中的整流装置。

每个结构部件应作为一个独立的 MSC. Nastran 数据文件,附加的数据用于部件测试分析,也作为进一步的电脑计算文件。

1.1.1.1 全局有限元模型的单位制

在模型建立之前,需要确定所采用的单位。NASTRAN 的计算单位为 1,所有的输入数据必须指定一致性的量纲。

表 1-1 所列是全机建模中常用的一致性量纲。

^① 本书的量 and 单位以中华人民共和国国家标准为准。考虑到在实际设计工作中,很多资料(尤其是外版资料)大量应用英制单位,为方便读者使用,亦保留部分英制单位。

表 1-1 有限元单位制

变量	单位	变量	单位	变量	单位	变量	单位	变量	单位
长度	mm	应力	MPa	力矩	N·mm	惯量	mm ⁴	厚度	mm
力	N	位移	mm	能量	N·mm	密度	kg/mm ³	温度	℃
转角	rad	杨氏模量	MPa	截面积	mm ²	频率	Hz	热膨胀系数	mm·mm ⁻¹ ·℃ ⁻¹

1.1.1.2 坐标系的定义

1. 飞机结构坐标系

原点 O 与机身等直段前端面在 X 方向的距离为 10 000 mm, 即机身等直段前端面的 X 坐标值为 10 000 mm。全机坐标系原点定义如图 1-1 所示。

X 轴: 机身的纵向轴线, 正向是从机头指向机尾;

Y 轴: 垂直于 X 轴向上;

Z 轴: 按右手法则确定;

OXY 平面定义为飞机对称平面;

OXZ 平面定义为机身基准平面, 即过机身典型剖面上圆弧和中圆弧的圆心, 垂直于飞机对称平面的平面, 见图 1-2。

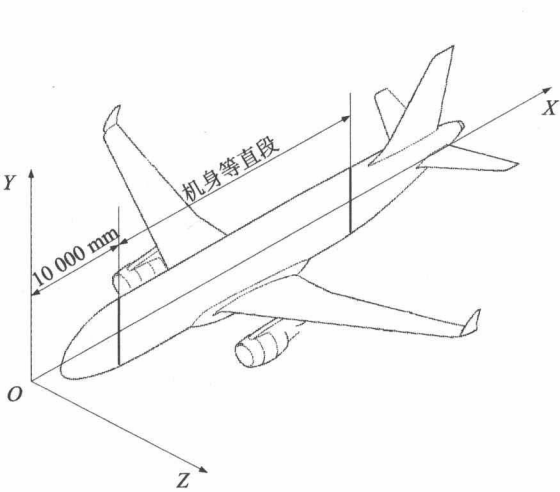


图 1-1 全机坐标系原点定义

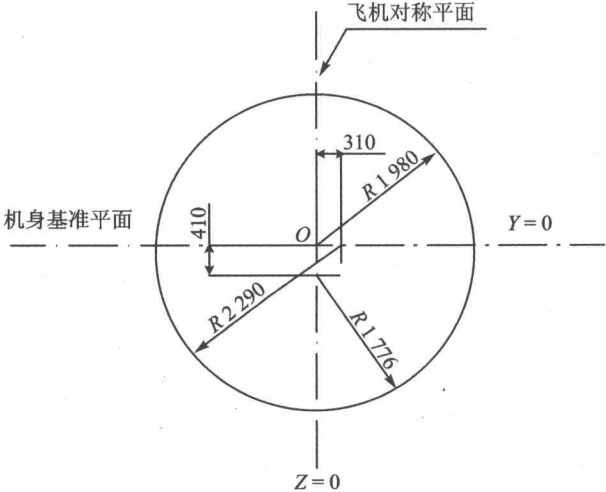


图 1-2 飞机对称平面与机身基准平面

2. 模型单元坐标系定义

(1) 机身单元坐标系定义

- 1) 机身蒙皮等板单元坐标系要求如下: X 轴沿机身轴线指向逆航向, Z 轴垂直于蒙皮指向机身外。
- 2) 机身纵向杆和梁单元坐标系要求如下: X 轴沿机身轴线指向逆航向。
- 3) 机身框平面内杆和梁单元坐标系要求如下: Z 轴指向逆航向, Y 轴指向机身内侧。
- 4) 机身框平面内板单元坐标系要求如下: Z 轴指向逆航向。

(2) 机翼单元坐标系定义

- 1) 机翼壁板单元坐标系要求如下: X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。
- 2) 机翼翼肋腹板单元坐标系要求如下: 油箱翼肋腹板法向指向翼尖。 X 方向原则上取沿肋方向, 从后梁指向前梁为正。 0 号肋指向左翼尖。
- 3) 展向方向杆元沿相邻板元的 X 方向。

4) 盒段翼梁腹板单元 X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。

5) 高度方向杆元从下翼面指向上翼面。

6) 航向件如翼肋缘条, 指向航向(基本坐标系 X 轴负向)。

(3) 水平尾翼单元坐标系定义

1) 平尾壁板单元坐标系要求如下: X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。

2) 平尾翼肋腹板单元坐标系要求如下: 翼肋腹板法向指向翼尖, X 方向原则上取沿肋缘条方向, 从后梁指向前梁为正。

3) 展向方向杆元沿相邻板元的 X 方向。

4) 盒段翼梁腹板单元 X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。

5) 高度方向杆元从下翼面指向上翼面。

6) 航向件如翼肋缘条, 指向航向(基本坐标系 X 轴负向)。

(4) 垂直尾翼单元坐标系定义

1) 垂尾壁板单元坐标系要求如下: X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。

2) 垂尾翼肋腹板单元坐标系要求如下: 翼肋腹板法向指向翼尖, X 方向原则上取沿肋缘条方向, 从后梁指向前梁为正。

3) 展向方向杆元沿相邻板元的 X 方向。

4) 盒段翼梁腹板单元 X 轴沿长桁指向翼尖, Z 轴指向盒段外。

5) 高度方向杆元从左翼面指向右翼面。

6) 航向件如翼肋缘条, 指向航向(基本坐标系 X 轴负向)。

3. 模型的装配坐标系

整体模型的装配坐标系是 NASTRAN 软件的基本坐标系(识别号 0)。在定义每一个飞机部件的装配坐标系后, 整个装配模型便会通过相应的定义坐标表示出来, 如图 1-3 所示。

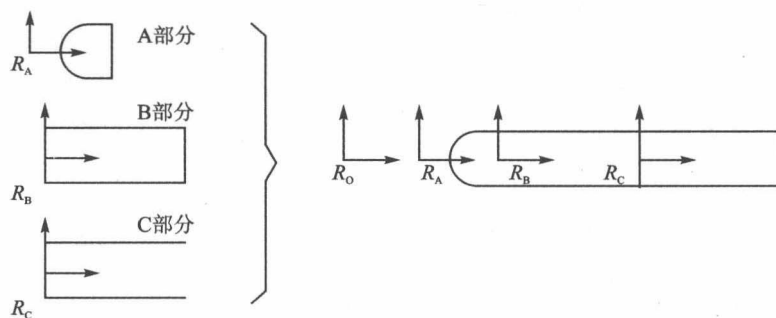


图 1-3 装配坐标系

4. 位移坐标系

定义: 该坐标系同样是对轴系的定义, 在轴系中可以将模型节点的位移准确地标示出来, 例如, 节点的自由度和受力情况。

① 推荐使用的位移坐标系为定义坐标系。

② 对于机身部件, 推荐使用局部位移坐标系。

但是, 在表示边界条件时可以考虑是否用局部位移坐标系(尤其是对吊挂部件)。

当定义节点时, NASTRAN 软件求解器能够定义节点的位移坐标系, 其识别号由网格卡片表 1-2 中 7 给出(CD)。