



结构稳定性设计手册

崔德刚 主编

航空工业出版社

结构稳定性设计手册

崔德刚 主编



航空工业出版社

ISBN 7-80134-131-7



内 容 提 要

受压缩、剪切载荷的薄壁结构主要的失效模式之一是结构失去稳定性。对减重要求严格的航空、空间薄壁结构,合理的结构稳定性设计显得尤为重要。本手册在理论与实验研究以及工程设计实践的基础上,提供了多种类型薄壁结构屈曲、后屈曲直至破坏的结构稳定性分析和设计方法,是国内第一本实用的薄壁结构稳定性设计手册。可供航空、空间、机械、造船、车辆以及其他结构设计和强度分析工程技术人员使用。同时本手册也是供科研院所使用和高等学校教学的一本有价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构稳定性设计手册/崔德刚主编. —北京:航空工业出版社,2006.5

ISBN 7-80134-131-7

I. 结... II. 崔... III. 航空器-薄壁结构-稳定性-结构设计-技术手册 IV. V214.4-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第033071号

责任编辑 李铁柏 校对 王永林

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

北京印刷学院实习工厂印刷

全国各地新华书店经售

1996年6月第1版

2006年6月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:19.5 字数:489.6千字

印数:501—1000

定价:98.00元

编 审 委 员 会

主 编： 崔德刚

副 主 编： 章怡宁

编 委：（按姓氏笔画顺序）

朱永本 迟 坚 杨学勤 张杏仙

林梦鹤 胡红东 段泽光 章怡宁

崔德刚 廖家驹 燕秀云

主 审： 林梦鹤

副 主 审：（按姓氏笔画顺序）

乔 新 张 行 童贤鑫

责任编辑： 李铁柏

封面设计： 吴小勇

出 版 社

审 定： 周士林

各章编、校、审人员名单

第1章 总论

编写：迟 坚 林梦鹤

校对：崔德刚 张 行

审查：乔 新

第2章 平板的屈曲

编写：林梦鹤

校对：迟 坚

审查：乔 新

第3章 圆筒与曲板的屈曲

编写：朱永本

校对：廖家驹

审查：乔 新

第4章 组合元件的屈曲

编写：张杏仙

校对：章怡宁

审查：乔 新

第5章 板和组合元件的破坏

编写：章怡宁

校对：张杏仙

审查：乔 新

第6章 加筋平板屏的压缩破坏

编写：章怡宁 张杏仙

校对：张杏仙

审查：童贤鑫

第7章 加筋曲板和加筋壳的强度

编写：朱永本

校对：廖家驹

审查：童贤鑫

第8章 受剪板张力场结构设计

编写：廖家驹

校对：朱永本

审查：童贤鑫

第9章 多墙多支柱结构稳定性

编写：崔德刚

校对：张杏仙

审查：张行

第10章 蜂窝结构设计计算方法

编写：崔德刚

校对：林梦鹤

审查：张行

第11章 结构热屈曲简介

编写：段泽光 朱永本

校对：朱永本

审查：童贤鑫

第12章 常用受压结构形式的适用范围分析

编写：崔德刚

校对：林梦鹤

审查：张行

序

结构设计是飞机设计中的关键,要提高飞机性能必须千方百计地减轻飞机的重量,尤为重要是飞机结构重量。飞机结构重量一般占飞机总重的 $1/3$ 以上,如减轻了结构重量不仅减轻全机重量,而且也可以提高飞机的装载量,因而提高飞机的总的性能。减轻结构重量的途径无非两个方面,一是合理地选择材料和制造工艺;一是合理地承载。对后一方面更依赖于设计人员的才智。怎样在保证安全可靠的前提下,设计出轻的合理受力结构,这是结构设计人员的职责。结构设计人员不是光画图,更重要的是设计出受力合理的轻结构。由于一般给结构设计的周期都很紧,要加快设计进度不是单靠计算机辅助设计画图所能解决的,重要的是要有可靠而方便的、能设计出合理受力轻结构的手段,这就需要有坚实的数据库——也即有关的手册,这就是编写本书的用意所在。

在飞机结构设计中,过去只注意材料破坏强度,对结构稳定性的问题重视不够,一般仅用理论方法加一定的经验修正,这是沿用 50 年代苏联飞机强度手册和仿制机种的强度计算报告的方法,但是根据我们自行设计的实践,这种方法设计的结构应力水平较低,以致造成结构重量减不下来。我们必须对薄壁结构设计要承载到“过屈曲”状态,实际上“过屈曲”后薄壁结构还能承载,而对于这样的承力状态已非经典弹性稳定理论所能概括。对于结构屈曲后的破坏问题是材料非线性和几何非线性交织在一起,要得到解析解十分困难,只能采用半理论半经验的方法,这就需要有大量试验支持。我国开展飞机自行设计已有 40 年的历史,多个设计部门已做过从加筋壁板到机翼盒段的 1367 件次试验,取得了大量可贵的试验数据,以此为依据,并用理论方法进行了归纳整理,形成了可用方法和大量设计图线,而且这些方法和数据已用于自行研制的多种型号上,并得到验证。

为了提高我国飞机结构的设计水平,长期从事飞机结构设计的崔德刚、林梦鹤、章怡宁、朱永本、张杏仙、廖家驹等同志,不辞辛苦,在繁忙的日常工作之余,

编写成了这本手册以便各单位的设计人员可应用。这种为发展航空工业尽心尽责的精神,是值得大家学习的。我感到这是一个很好的开端,我们开展飞机自行设计40年以来,自行研制了多种飞机型号并投入使用,我们是有自己的经验和体会的。为了提高我们的设计水平,有经验的同志应该认真总结过去,形成可信赖的数据库,编成我们自己的设计员指南,以提高今后我们自己的飞机设计水平。这本手册除供给各飞机设计单位使用外,也希望航空院校作为教学参考,使飞机设计专业的学生一开始就重视结构的稳定性。

最后应感谢作者为我们提供了很好的飞机设计工具,同时也希望飞机设计其他专业的老同志也能自告奋勇的,在总结自己经验的基础上来编这样真正有用的设计手册。

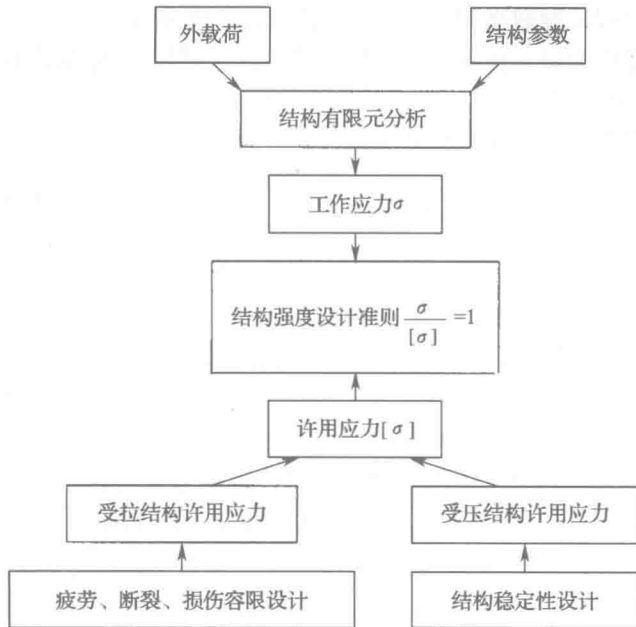
王福芳

1996年6月

前 言

现代高性能飞机设计师的一个重要目标是减轻结构重量。经过几代人努力,飞机结构重量占正常起飞重量比(称为结构重量系数)在不断下降。第二代战斗机如美国 F-4 一级飞机大约为 33% 左右;第三代战斗机如 F-15 级飞机大约为 30%;第四代战斗机如 F-22 大约为 28%,由于结构重量系数的下降,有效地改善了飞机的性能。

减轻飞机结构重量主要从两个方面开展研究:(1)精确的确定在各种载荷下的工作应力。目前的有限元分析方法及飞行应力实测技术已能达到足够的精度。(2)提高结构承载能力。在飞机结构中受拉应力的结构主要通过疲劳断裂、损伤容限及耐久性设计来提高其承载能力。而受压结构则通过结构稳定性研究,来提高承载能力。下图给出结构设计的基本思路。



从我国飞机发展的实践可以看出,飞机的静力试验大都是由于结构稳定性破坏而导致全机的破坏。因而对飞机结构稳定性研究成为各飞机研制单位多年来致力研究的课题。从 1964 年至今,各研究所经历了几代人的努力,花费了上千万元科研费的投资,并经过多个型号的验证,形成了一套我国的结构稳定性分析方法。本手册将其总结出来,供致力我国航空工业等领域的工程技术人员使用。

本手册概括了结构稳定性分析与设计的基本方法。从结构稳定性基本概念及基本理论出发,给出了各种结构的屈曲分析方法。在此基础上突出地介绍了过屈曲破坏的分析方法及结构稳定性设计方法。本手册还给出了多墙结构、蜂窝结构的稳定性计算手段。在总结各种结构稳定性的基础上,最后给出了结构形式选择的设计方法。

薄壁结构受压稳定性问题较为复杂,以至国内外一些设计部门仍以结构屈曲临界应力

做为设计许用应力,忽略了薄壁结构屈曲后仍能承受更大过屈曲破坏载荷的事实。为此本手册特别突出了对结构过屈曲分析方法的介绍,为新产品的高质量设计提供手段。

为方便用户,以本手册有关内容为理论依据,将提供配套的微机软件包,内含加筋板屈曲分析、多墙结构稳定性分析、蜂窝结构及蜂窝板结构分析、张力场校核及多种结构形式初步优化选型功能等,同时附有型材几何尺寸和材料性能等数据库。软件包还有良好的前后置图形显示功能,用户通过统一的执行软件,用菜单形式调用。软件包配有相应的理论手册和使用手册。

在主审林梦鹤主持下,副主审乔新、张行、童贤鑫为本手册做了认真审核工作。各位审查人员除去对负责的有关部分进行审核外,以对本手册高度负责的精神,对全书各章也都给予了审查,提出了许多建设性意见。感谢责任编辑李铁柏所做的认真细致工作。同时,向为本手册提供宝贵资料和试验数据的专业人员,表示衷心感谢。

在此要特别感谢中国科学院院士、中国工程院院士顾诵芬教授对手册编写工作给予的热情支持,并为手册撰写了序。

由于本手册编写人员日常工作繁忙,在内容和文字上都难免有不尽人意之处,请读者及时予以指出。

崔德刚

1996年6月

常用符号

A	加筋板(或板)的剖面面积	mm^2
A_{st}	加筋条剖面面积	mm^2
a	纵向受压板和简单元件的非承载边长度	mm
	受剪板长边长度	mm
	横向加筋板的筋条间距(纵向加筋板的筋条长度)	mm
	加筋曲板长边长度	mm
b	纵向受压板和简单元件的承载边长度	mm
	受剪板短边长度	mm
	横向加筋板的承载边长度(纵向加筋板的筋条间距)	mm
	加筋曲板短边长度	mm
	蜂窝夹芯边长	mm
b_e	有效宽度	mm
b_s	多墙结构每个闭室宽度	mm
	加筋板的筋距	
c	型材的角数	
C	系数	
D	单位宽度板的弯曲刚度, $\frac{Et^3}{12(1-\nu_e^2)}$	$\text{N} \cdot \text{mm}$
E	弹性模量	MPa
E_s	$\frac{\sigma}{\varepsilon}$, 割线模量	MPa
E_t	$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, 切线模量	MPa
e	加载边(或翼肋)端面支持系数	
	铆钉末端固定系数	
f	凸缘数	
	有效铆钉偏距	mm
G	剪切模量	MPa
g	切口和凸缘数	
I	剖面抗弯惯性矩	mm^4
J	剖面抗扭惯性矩	mm^4
K	修正屈曲系数, $\frac{k\pi^2}{12(1-\nu_e^2)}$	
	张力场系数	
k	屈曲系数	
k_b	与元件宽度 b 屈曲应力相应的筋条广义屈曲系数	

	弯曲屈曲系数	
k_c	压缩屈曲系数	
k_s	剪切屈曲系数	
L	板(筒、柱)的长度	mm
	多墙结构盒段宽度	mm
L'	柱的有效长度	mm
M	施于板平面内弯矩	N · mm
	盒剖面弯矩	N · mm
m	应力方程指数	
N	单位宽度的轴向载荷	N/mm
n	总宽为 $(n + 1)b$ 加筋板上的筋条数	
	墙数	
	长度为 L 的圆筒上框数	
	应力—应变曲线的形状参数	
	应力方程指数	
	屈曲板上纵向半波数	
p	铆钉间距	mm
R	曲板的曲率半径	mm
	应力比	
r	筒或曲板的半径	mm
t	板厚	mm
w	垂直于板平面的位移	mm
x, y, z	坐标	mm
Z	筒、单曲度板和球面板的曲率参数	
Z_b	板的曲率参数, $\frac{b^2 (1 - \nu_c^2)^{1/2}}{Rt}$	
Z_L	圆筒的曲率参数, $\frac{L^2 (1 - \nu_c^2)^{1/2}}{Rt}$	
\bar{Z}	筋条形心至板中面的距离	mm
α	系数	
β	压损系数	
β_c	按角决定的压损系数	
β_s	根据切口和凸缘决定的压损系数	
ε	正应变	
	板边缘加筋条抗扭刚度与板抗弯刚度之比	
	板边缘弹性约束刚度与扭转刚度之比	
η	塑性修正系数	
$\bar{\eta}$	包覆层修正系数	
λ	简单元件或板的屈曲半波长	mm

	加筋板屈曲波长	mm
ν_e	弹性泊松比	
ν_p	塑性泊松比	
ρ	剖面回转半径	mm
σ	正应力	MPa
σ_{cr}	广义屈曲应力	MPa
σ_{cy}	压缩屈服应力	MPa
σ_e	欧拉柱应力	MPa
	边缘处应力	MPa
σ_i	钉间屈曲应力	MPa
σ_p	比例极限应力	MPa
σ_w	铆接板的皱曲应力	MPa
σ_{20}	$L'/P = 20$ 的板屏强度	MPa
$\bar{\sigma}_{co}$	有效板屏强度	MPa
$\bar{\sigma}_f$	压损强度	MPa
τ	剪应力	MPa
τ_{cr}	受剪元件(板,筒)的屈曲应力	MPa
η	塑性修正系数	

脚 标

b	弯曲
c	压缩或夹芯
cy	屈服
cr	屈曲
e	有效的或弹性或边缘
f	凸缘或面板
p	塑性
r	铆钉或肋
s	剪切或蒙皮
st	筋条
t	拉伸或扭转
w	腹板
T	温度

边缘支持条件

C	固支
F	自由
SS	简支

目 录

常用符号	(1)
------	-------

第 1 章 总论

1.1 概述	(1)
1.2 飞机设计中的结构稳定性问题	(1)
1.3 结构稳定性的基本概念	(2)
1.3.1 屈曲	(2)
1.3.2 过屈曲	(5)
1.3.3 屈曲与破坏	(5)
1.4 稳定性的基本理论和分析方法	(7)
1.4.1 失稳判别准则	(7)
1.4.2 工程中常用的计算方法简介	(8)
参考文献	(12)

第 2 章 平板的屈曲

2.1 概述	(13)
2.2 单一载荷下平板的弹性屈曲	(13)
2.2.1 薄板弹性弯曲微分方程及屈曲系数	(13)
2.2.2 矩形平板的受压屈曲	(14)
2.2.3 边缘旋转弹性约束矩形板受压屈曲	(16)
2.2.4 轴向压载变化的等厚度矩形平板	(17)
2.2.5 轴向压载变化的变厚度矩形平板	(17)
2.2.6 板柱	(17)
2.2.7 凸缘	(19)
2.2.8 矩形平板的受剪屈曲	(19)
2.2.9 矩形平板的弯曲屈曲	(21)
2.2.10 平行四边形板受压屈曲	(22)
2.2.11 边缘固支的平行四边形板的受压、受剪屈曲	(24)
2.2.12 等腰三角形板的受压、受剪屈曲	(24)
2.2.13 梯形板的受压屈曲	(25)
2.3 复合载荷下平板的弹性屈曲	(27)
2.3.1 矩形平板压—压、压—拉复合屈曲	(27)

2.3.2	矩形平板压—剪复合屈曲	(28)
2.3.3	矩形平板弯曲与其他各类载荷复合的屈曲	(28)
2.3.4	其他复合载荷下的屈曲	(28)
2.4	平板的塑性屈曲	(31)
2.4.1	塑性区应力—应变关系	(32)
2.4.2	非弹性模量	(32)
2.4.3	部分航空铝合金材料数据	(33)
2.4.4	非弹性泊松比	(35)
2.4.5	平板的塑性屈曲	(36)
2.4.6	计算用塑性修正系数和图表	(36)
2.5	包覆层塑性对平板屈曲的影响	(39)
2.5.1	有包覆层板屈曲的工程近似	(40)
2.5.2	工程近似的包覆层修正系数	(40)
2.5.3	常用航空硬铝合金包铝层机械性能	(41)
	参考文献	(41)
	附录 A	(42)

第 3 章 圆筒与曲板的屈曲

3.1	概述	(48)
3.2	受轴压作用的圆筒	(48)
3.2.1	计算公式及曲线	(48)
3.2.2	圆柱壳体轴压屈曲的临界载荷	(50)
3.2.3	塑性修正	(52)
3.2.4	内压影响	(53)
3.3	圆筒的弯曲屈曲	(54)
3.3.1	计算公式	(54)
3.3.2	内压影响	(54)
3.3.3	塑性修正	(55)
3.4	圆筒的扭转屈曲	(55)
3.4.1	计算公式及曲线	(55)
3.4.2	塑性修正	(56)
3.4.3	内压与扭转同时作用下的屈曲相关方程	(56)
3.4.4	非圆剖面的扭转屈曲	(57)
3.5	圆筒在外压载荷作用下屈曲	(58)
3.5.1	计算公式	(58)
3.5.2	塑性修正	(58)
3.6	圆筒复合载荷作用下的屈曲	(59)
3.6.1	相关方程汇总	(59)

3.6.2	轴压和内压或外压复合作用	(60)
3.6.3	轴压和弯曲联合作用下圆筒的屈曲	(60)
3.6.4	轴压和扭转复合加载的圆筒屈曲	(61)
3.6.5	弯曲和扭转联合作用的圆筒屈曲	(61)
3.6.6	轴压、弯曲和扭转联合作用的圆筒屈曲	(62)
3.6.7	横向剪切和弯曲复合加载的圆筒屈曲	(63)
3.6.8	圆柱壳体复合加载的实用相关曲线	(63)
3.7	圆柱曲板轴压屈曲	(64)
3.7.1	计算公式及曲线	(65)
3.7.2	塑性修正	(65)
3.7.3	内压的影响	(66)
3.8	曲板受剪屈曲	(66)
3.8.1	曲板剪切屈曲应力计算公式	(66)
3.8.2	塑性修正	(67)
3.8.3	内压载荷的影响	(67)
3.9	曲板的弯曲屈曲	(68)
3.9.1	曲板弯曲屈曲应力计算公式	(68)
3.9.2	塑性修正	(68)
3.10	受外压的曲板屈曲	(69)
3.10.1	曲板屈曲压力的计算公式	(69)
3.11	复合加载柱形曲板的屈曲	(69)
3.11.1	圆柱曲板轴压和剪切联合作用下的屈曲	(69)
3.11.2	轴压和侧压的耦合	(71)
3.12	受外压作用的球面曲板	(73)
3.12.1	屈曲应力计算公式	(73)
3.12.2	塑性修正	(74)
	参考文献	(74)

第4章 组合元件的屈曲

4.1	概述	(75)
4.1.1	组合元件的定义	(75)
4.1.2	组合元件的屈曲应力	(75)
4.1.3	组合元件屈曲的研究内容	(75)
4.2	加筋条的压缩屈曲特性	(75)
4.2.1	轴向压缩的加筋条屈曲形式	(75)
4.2.2	加筋条的总体屈曲应力	(76)
4.2.3	加筋条的局部屈曲应力	(77)

4.3 加筋板的压缩屈曲特性	(86)
4.3.1 加筋板的压缩屈曲形式	(87)
4.3.2 加筋板压缩屈曲应力计算	(87)
4.4 加筋板的剪切屈曲特性	(108)
4.4.1 纵向加筋平板剪切屈曲应力	(108)
4.4.2 横向加筋平板剪切屈曲应力	(110)
4.4.3 加筋曲板剪切屈曲应力	(111)
4.4.4 受扭加筋圆筒的屈曲应力	(112)
4.4.5 塑性影响	(112)
4.5 加筋板的弯曲屈曲应力	(112)
4.6 加筋板的压缩和弯曲复合屈曲应力	(117)
4.7 加筋板双向压缩的复合屈曲应力	(121)
参考文献	(122)

第5章 板和组合元件的破坏

5.1 概述	(123)
5.2 屈曲后品质分析	(123)
5.3 凸缘、平板与曲板的破坏	(124)
5.3.1 凸缘的破坏	(124)
5.3.2 平板的破坏	(125)
5.3.3 曲板的破坏	(128)
5.4 型材的压损	(129)
5.4.1 单角元件	(129)
5.4.2 双角元件	(132)
5.4.3 多角元件	(135)
参考文献	(136)

第6章 加筋平板屏的压缩破坏

6.1 概述	(137)
6.2 加筋平板屏压缩破坏的几种形式	(137)
6.3 带加筋条的板屏压损强度	(140)
6.3.1 带弯制加筋条的板屏压损强度	(140)
6.3.2 带挤压加筋条的板屏压损强度	(144)
6.3.3 典型加筋板屏压损强度简化计算	(149)
6.3.4 铆接短板屏的强度	(153)
6.4 加筋板屏的柱强度	(156)
6.4.1 加筋板有效板屏强度 $\bar{\sigma}_0$ 的计算	(156)