

航空结构连接件

疲劳分析手册

583083



飞机结构强度研究所

583083

V215.5-62/01

+

航空结构连接件 疲劳分析手册

HK48/116



C0179585

飞机结构强度研究所

内 容 简 介

本手册分为六章,包括结构连接件疲劳分析基础、内力分析的有限元素法、疲劳寿命估算方法、一般设计指导、设计用的曲线和图表以及算例。本手册主要供航空结构设计和强度计算人员使用,亦可供其他部门从事结构强度工作的人员参考。

航空结构连接件 疲 劳 分 析 手 册

飞机结构强度研究所 主编

*

飞机结构强度研究所出版
南京航空学院印刷厂印装

*

78×1092 1/16 印张 23 585.6 千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数 0001~2000 册 平装 6.50 元 精装 9.00 元

出版说明

航空结构连接件疲劳分析是飞机设计、定寿、延寿的重要工作。广大飞机设计和强度计算人员迫切需要一本较为系统、完善的手册，作参考、使用。为此，航空工业部于一九八〇年向飞机结构强度研究所下达了编写《航空结构连接件疲劳分析手册》的任务。

直接参加手册讨论和编写的有西北工业大学、南京航空学院、红安公司、洪都机械厂、第六〇一所、第六一一所、第六二三所等单位。

手册编写过程中，进行了大纲拟订讨论、初稿审查、二稿复审和定稿审核诸重要环节、手册定稿后，通过杨庆雄、吴富民、叶克家、贾国荣、王俊扬和杨学勤六位专家、教授和科技局领导的鉴定，报航空工业部科技局批准，于一九八四年十月交付印刷出版。

本手册的内容以实用为主，力求精练，对于各种公式的推导和有关基本概念的叙述尽量从简。它比较全面的引用了国内各厂、所、院校等单位多年来在这方面的科研成果和国外的最新资料，列出了大量试验曲线和理论曲线，介绍了几种疲劳寿命估算的方法和适用范围，同时把有限元素法应用于结构连接件疲劳分析中，最后还附有工程实际算例。因此，本手册不仅在理论上正确、内容上充实、而且在工程上实用性强，

手册从编写到出版工作，始终得到航空工业部领导和有关单位的热情关怀、支持，在此谨表示衷心的感谢。

飞机结构强度研究所

一九八五年五月

前 言

航空结构中存在着大量的结构连接件, 由于结构的不连续性和复杂的传力形式使其抗疲劳破坏的能力急剧下降, 直接影响飞机的使用寿命。因此结构连接件的疲劳特性及其分析方法一直是结构设计人员注意的重要问题之一。本手册收集、归纳和整理了国内外这方面的研究成果, 试图为强度和结构设计人员在初步设计估算寿命和改善设计的过程中提供所需的基本估算方法和参考数据。耳片连接件、受拉螺栓疲劳分析未包括在本手册中。

本手册分为六章:

第一章: 结构连接件疲劳分析基础, 说明应力严重系数的意义、功用和各有关参数的确定。

第二章: 结构连接件内力分析的有限元素法, 介绍结构内力细节分析的有限元素法, 着重讨论有关计算模型的建立及数据准备等问题。

第三章: 结构连接件疲劳寿命估算, 介绍估算结构连接件疲劳寿命的名义应力法和局部应力一应变法。

第四章: 一般设计指导, 给出改进细节设计、提高连接件寿命的一些方法、原则和图表。

第五章: 曲线图, 给出细节分析和寿命计算中所需的部分应力集中系数曲线、 $P-\delta$ 曲线以及等寿命图等。

第六章: 算例, 给出了应用上述方法计算飞机结构连接件疲劳寿命的计算实例。

参加本手册编著的单位有: 西北工业大学、南京航空学院、红安公司、洪都机械厂、第六〇一研究所、第六一一研究所、第六二三研究所。

本手册的编著分工如下:

主编: 飞机结构强度研究所

主审: 杨庆雄、吴富民

第一章编写: 薛景川*、杨玉功

校对: 许毓光、王 正

主审: 杨庆雄

第二章编写: 魏志毅*、刘义常、王 正、孟繁沛、汪厚凡、杨春正

校对: 汪厚凡、刘义常、贾国荣

主审: 杨庆雄

第三章编写: 薛景川*、杨玉功*、钱智声、刘义常、王 正、孟繁沛

校对: 赵名泮、钱智声

主审: 吴富民

第四章编写: 聂忠良*、孟繁沛*、薛景川、杨玉功

校对: 郭丽娟

主审: 吴富民

第五章编写: 薛景川*、杨玉功*、汪厚凡、杨春正、钟志康

校对：魏志毅

主审：吴富民

第六章编写：魏志毅*、钱智声*、薛景川、杨玉功

校对：杨春正、汪厚凡

主审：杨庆雄、吴富民

责任编辑：陈绍祖

封面设计：薛景川

带*者为主要编写人。

本手册最后由薛景川同志统一整理，吴富民同志统一校审。

叶克家同志主持了大纲讨论、一稿审查和二稿复审及定稿会议。

本手册提供的寿命估算方法和参考数据，对于非航空结构连接件也是适用的。由于我们的实践经验和理论水平的局限，错误难免，望批评指正。

编 者

一九八五年一月

符 号

一、基本符号

A	剖面面积、常数、系数	a	系数、常数、距离
A_0	初始面积	b	系数、常数、距离、疲劳强度指数
B	常数、系数	c	系数、常数、距离、疲劳延性指数
C	紧固件柔度系数	d	系数、常数、直径
D	损伤、直径	e	工程应变、系数、常数、距离
E	弹性模量	f	频率
F	板柔度系数	h	厚度
G	剪切模量	i	序号
I	惯性矩、转动惯量	j	序号
K	刚度、结构刚度方阵、常数、系数	k	序号、常数、元件刚度方阵、系数、刚度
K_t	理论应力集中系数	k'	循环强度系数
K_{ty}	挤压应力集中系数	l	长度
K_y	应力严重系数	m	系数、指数、常数
K_{py}	疲劳应力严重系数	n	常数、过载、循环次数
K_f	疲劳减缩系数	n'	循环硬化指数
L	长度	o	坐标原点
M	弯矩、扭矩、力矩、质量、常数、系数	q	剪流
N	循环次数(寿命)、轴力、常数、系数	r	半径、应力比、极坐标
N_{p0}	破坏时的循环块数	t	厚度、时间
O	坐标原点	x	坐标、随机变量
P	载荷	y	坐标、随机变量
P_b	破坏载荷	z	坐标、随机变量
Q	剪力、常数	α	角度、系数
R	紧固件传递载荷、半径、支反力、应力比	β	角度、系数
S	工程应力、名义应力	γ	角度、系数
T	时间、周期、厚度	δ	变形、厚度
U	能量	ε	真实应变
V	位移	ε_f	真实断裂强度
W	宽度、力	ε'_f	疲劳延性系数
X	坐标、随机变量	θ	角度、系数
Y	坐标、随机变量	λ	应力集中系数比、减缩系数、几何修正系数
Z	坐标、随机变量	μ	泊桑比

σ 正应力、真实应力
 σ_b 抗拉强度
 σ_f 真实断裂强度
 σ'_f 疲劳强度系数
 σ_s 材料屈服强度
 $\sigma_{0.2}$ 材料试验屈服强度
 φ 角度、系数
 ψ 系数、断面收缩率
 Δ 增量

$\Delta\sigma$ 真实应力变程
 $\Delta\varepsilon$ 真实应变变程
 $\Delta\sigma'$ 静残余应力
 Σ 和号、累加号
 τ 剪应力
 τ_b 剪切破坏强度
 τ_s 剪切屈服强度
 ρ 铆钉、螺栓间距

二、角注符号

a (应力、应变)幅
 b 板、表
 bj 板挤压
 ch 长桁、持续
 c 侧板
 ck 参考
 chx 程序
 chf 常幅
 d_l 当量
 fb 腹板
 g 拐点
 ht 桁条
 i 序号
 j 序号、紧固件
 jm 净截面
 jb 局部
 jq 剪切
 iy 挤压
 k 孔、序号
 lj 临界
 ls 拉伸
 m 平均
 md 铆钉
 mp 蒙皮

max 最大
 min 最小
 po 破坏
 sh 上
 sz 塑性
 sj 设计
 sy 使用
 ty 突缘
 tx 弹性
 wq 弯曲
 xi 下
 xy 许用
 xj 销钉挤压
 ys 压缩
 yx 有效
 zh 中
 zt 总体
 pb 平板
 js 计算
 s 试验

目 录

符 号

第一章 结构连接件疲劳分析基础	(1)
第一节 应力严重系数	(2)
第二节 紧固件载荷变形曲线	(3)
一、厚度影响	(4)
二、连接件型式的影响	(4)
三、铆接和螺接	(4)
四、紧固件直径	(5)
五、埋头铆和凸头铆	(5)
六、材料	(5)
七、夹持影响	(6)
八、疲劳载荷影响	(6)
第三节 内力分布计算	(6)
一、弹性范围简单连接件内力分布计算的有限差分法	(6)
二、弹性范围简单连接件内力分布计算的解析法	(10)
三、塑性范围紧固件传递载荷的计算	(13)
参考文献	(19)
第二章 结构连接件内力分析的有限元素法	(20)
第一节 概述	(20)
第二节 常用的元素刚度矩阵和应力矩阵	(21)
一、基本矩阵及其相互关系	(21)
二、钉元的刚度矩阵	(22)
三、复杂受力钉元	(23)
四、钉元的内力矩阵	(23)
第三节 建立计算模型	(24)
一、确定结构的分析部位	(24)
二、计算模型的规模	(24)
三、结构离散化	(25)
四、等效节点载荷	(25)
五、结构元素的简化	(26)
六、结构简化举例	(40)
七、结构简化注意事项	(43)
第四节 数据准备	(44)
一、节点坐标	(44)

二、节点编号	(44)
三、一般元素的信息	(45)
四、钉元素的特性信息	(45)
第五节 计算方法	(45)
一、方程组的求解	(45)
二、钉元素弹塑性解法	(45)
第六节 力法	(50)
参考文献	(50)

第三章 结构连接件的疲劳寿命估算 (51)

第一节 名义应力法	(51)
一、常幅载荷下结构连接件的疲劳寿命估算	(51)
二、程序载荷下结构连接件疲劳寿命估算的线性累积损伤法	(53)
三、程序载荷下结构连接件疲劳寿命估算的残余应力修正累积损伤法	(54)
第二节 局部应力—应变法	(62)
一、基本概念	(63)
二、应力集中处真实应力应变的确定	(69)
三、寿命估算方法及步骤	(71)
第三节 算例	(72)
第四节 各种估算方法简单初步评述	(75)
一、线性累积损伤法	(75)
二、残余应力修正累积损伤法	(76)
三、局部应力应变法	(76)
参考文献	(76)

第四章 一般设计指导 (78)

第一节 一般原理	(78)
一、孔的制作与充填	(78)
二、重接件中加强片的设计	(80)
三、重接件与塔接件的比较	(80)
四、最小边距和间距	(81)
五、带间隙装配和垫片的使用	(81)
六、细节设计和其它规则	(84)
第二节 一些连接件的内力分布和钉孔的应力严重系数	(89)
一、厚度相同的搭接件	(90)
二、厚度不同的搭接件	(94)
三、双面对称搭接件	(98)
四、阶梯形变厚度搭接件	(102)
五、重接件—加强片厚度为基本结构厚度的 $1/2$	(105)
六、重接件—加强片厚度为基本结构厚度的 $3/4$	(109)

七、重接件—基本结构中间削弱为原结构的 3/5	(113)
参考文献	(117)
第五章 曲线图	(118)
第一节 理论应力集中系数 K_t 汇集	(118)
第二节 $P-\delta$ 曲线	(137)
一、 $P-\delta$ 曲线的测量确定	(137)
二、 $P-\delta$ 曲线的工程确定方法	(140)
三、半经验公式得来的曲线图	(146)
四、实测 $P-\delta$ 曲线图	(164)
第三节 常用航空材料疲劳性能数据汇集	(226)
一、等寿命曲线图	(227)
二、应变疲劳数据	(273)
三、结构连接件疲劳试验数据举例	(285)
参考文献	(296)
第六章 算 例	(297)
第一节 某机机翼主梁细节分析	(297)
一、计算部位和外载	(297)
二、计算模型	(298)
三、计算结果	(298)
第二节 机翼主梁寿命估算	(303)
一、疲劳危险部位的选定	(303)
二、计算应力严重系数	(350)
三、计算参考应力	(351)
四、损伤及疲劳寿命计算	(353)
参考文献	(356)

第一章 结构连接件疲劳分析基础

结构连接件在疲劳载荷作用下，其破坏大都从紧固件孔处开始。用应力严重系数这个概念表征孔处的疲劳特征。本手册介绍的结构连接件疲劳分析和寿命预计方法，以应力严重系数法为核心。分析步骤如图 1—1 所示。

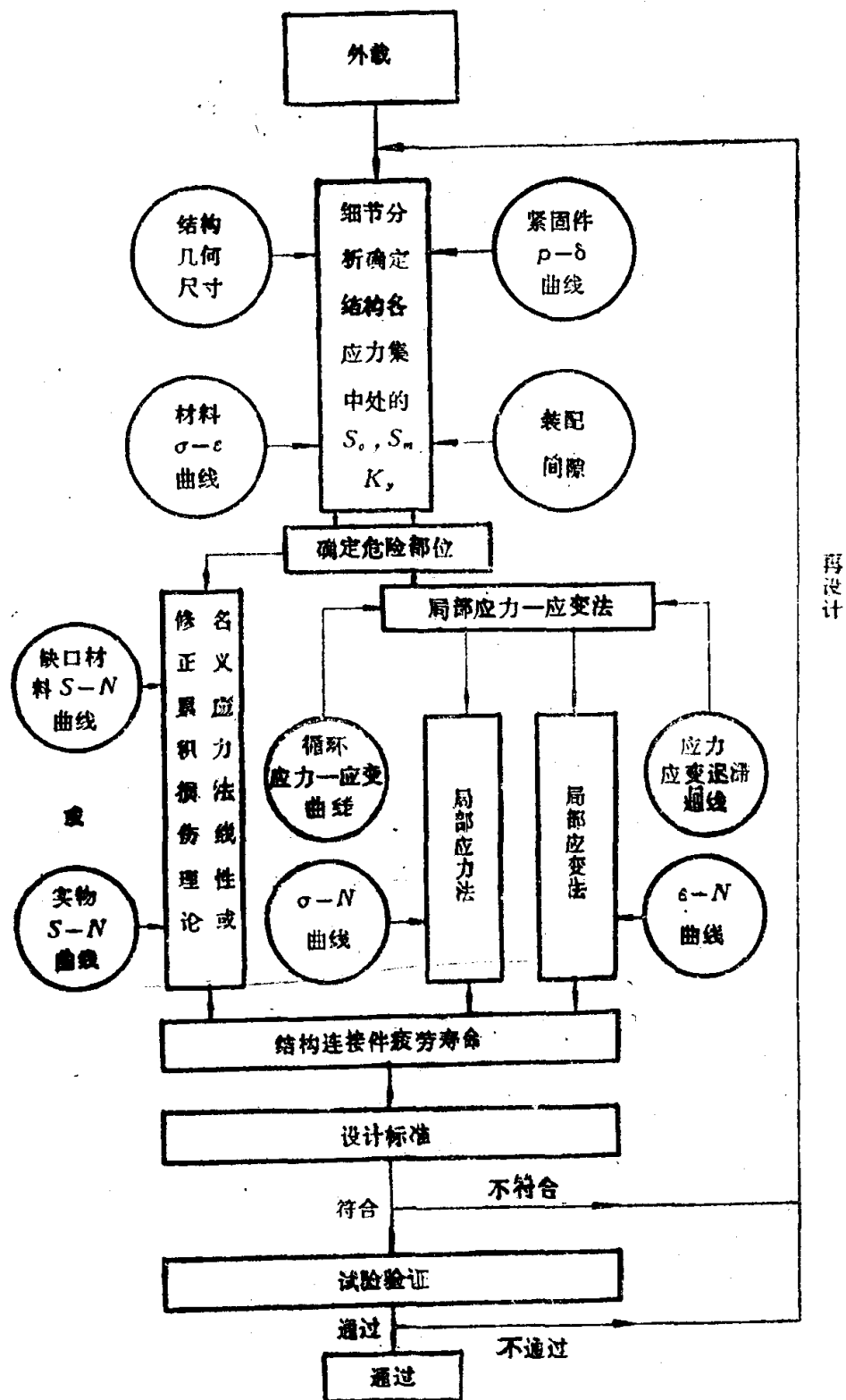


图1—1 疲劳寿命估算流程图

本章重点介绍应力严重系数的概念及其有关问题。

第一节 应力严重系数^[1~3]

在疲劳载荷作用下,如图1—2(a)所示的结构连接件,对每一个紧固件连接来说,基板上的载荷 P ,一部分由紧固件传走,称作紧固件传递载荷(或称钉传载荷) R ,另一部分由基板承受,称作旁路载荷 P_p 。由紧固件传递载荷引起的孔边局部最大应力为

$$\sigma_1 = K_{iy} \frac{R}{Dt} \theta \quad (1-1)$$

式中 D ——紧固件直径;

t ——板厚;

θ ——挤压分布系数,见图5—16;

K_{iy} ——挤压应力集中系数,见图5—15。

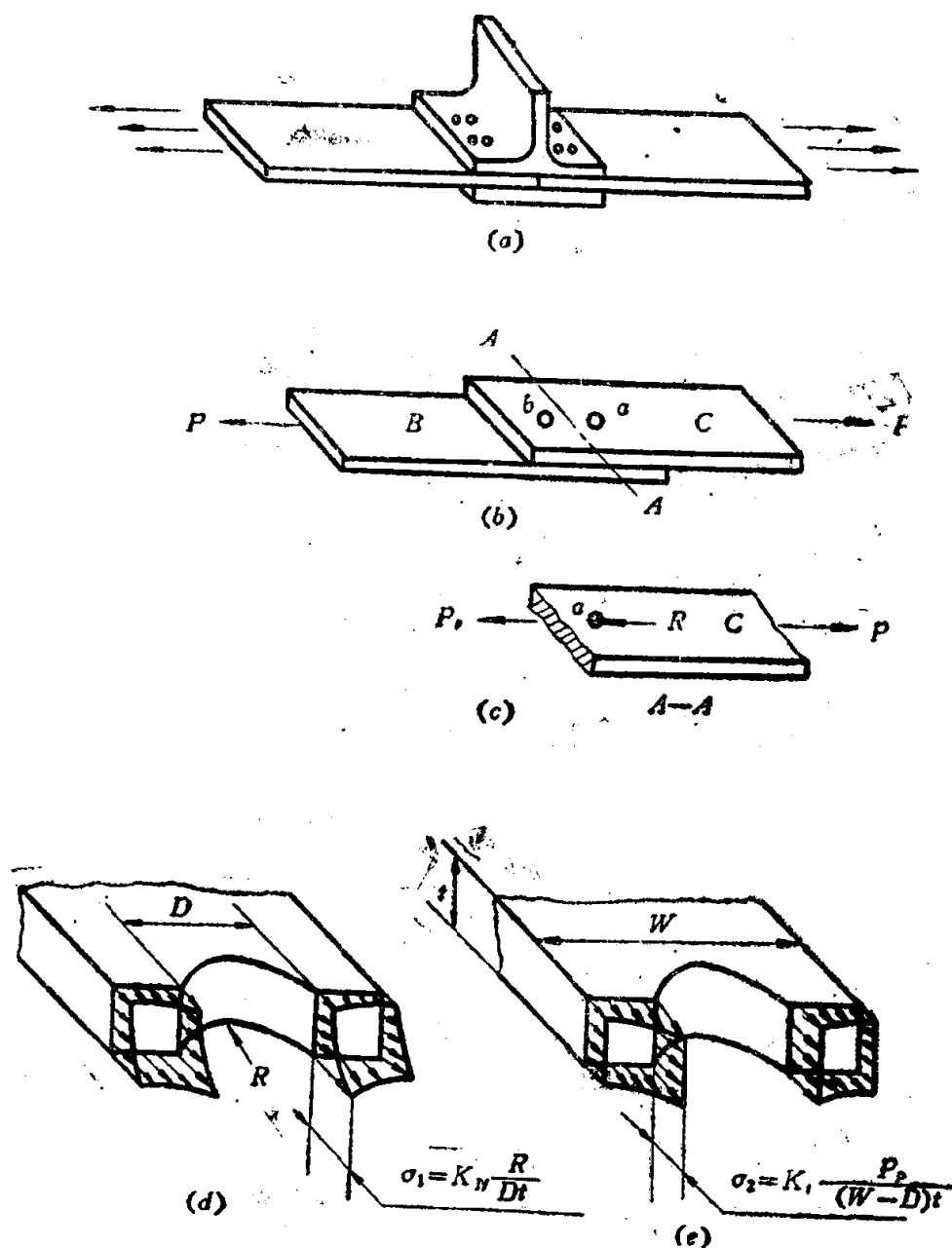


图1—2 孔边应力分布

由旁路载荷引起的孔边局部最大应力为

$$\sigma_2 = K_t \frac{P_p}{(W-D)t} \quad (1-2)$$

式中 K_t ——理论应力集中系数, 见图 5—1~5—15;

W ——板宽。

两部分载荷引起的最大应力为

$$\sigma_{max} = K_{iy} \frac{R}{Dt} \theta + K_t \frac{P_p}{(W-D)t} \quad (1-3)$$

最大应力与参考应力的比为联合理论应力集中系数

$$K'_t = \frac{1}{\sigma_{ch}} \left[K_{iy} \frac{R}{Dt} \theta + K_t \frac{P_p}{(W-D)t} \right] \quad (1-4)$$

式中 σ_{ch} ——参考应力, 本文取净截面参考应力 $\sigma_{ch} = P/(W-D)t = \frac{R+P_p}{(W-D)t}$

为了考虑孔表面状况和紧固件充填作用, 引入 α 、 β 两个系数。把这个既反映孔边应力集中程度, 又反映孔和紧固件的疲劳特征的系数称作应力严重系数, 其定义为

$$K_y = \frac{\alpha\beta}{\sigma_{ch}} \left[K_{iy} \frac{R}{Dt} \theta + K_t \frac{P_p}{(W-D)t} \right] \quad (1-5)$$

式中 α ——孔表面状况系数, 见表 1—1;

β ——孔充填系数, 见表 1—2。

综上所述, 应力严重系数同下列因素有关:

由紧固件传递载荷引起的应力集中;

由局部旁路载荷引起的应力集中;

孔表面状况 (包括基材冷作);

紧固件型式、装配方法及干涉量等因素。

应力严重系数是反映结构连接件孔的疲劳品质的参数, 它同参考应力乘积最大的部位反映了结构中的最薄弱环节。在弹性状态, 应力严重系数是同外载无关、仅同结构的几何特征有关的常数。在寿命计算过程中应力严重系数同寿命图相应的 K_t 相对应。

表1—1 α 值^[4]

孔 状 态	α
铰 孔	1.0
钻 孔	1.1
冷 作 孔	0.8~0.9

表1—2 β 值^[4]

紧固件型式	β
开 孔	1.0
铆 钉	0.75
螺 栓	0.75~0.9
锁紧钢螺栓	0.75
锥形螺栓	0.5

第二节 紧固件载荷变形曲线^[5~7]

为了求得结构连接件的内力分布, 进而求得应力严重系数和计算寿命, 须进行结构细节

分析。紧固件载荷与变形关系是结构连接件细节分析中不可缺少的原始数据。紧固件变形包括紧固件本身的弯曲、剪切和挤压变形以及相配孔的挤压变形。紧固件载荷与变形的关系通常可用一条曲线来表示, 这条曲线简称 $P-\delta$ 曲线。第 i 点的切线刚度定义为

$$K_i = \frac{dp_i}{d\delta_i} \quad (1-6)$$

相应的柔度定义为

$$C_i = \frac{d\delta_i}{dp_i} \quad (1-7)$$

$P-\delta$ 曲线随相配壁板和紧固件的材料及型式不同以及装配方法的不同而异。结构参数对紧固件弹性段刚度的影响可归纳如下:

一、厚度影响

在其他参数相同的情况下, 随着板厚的增加, 刚度增加, 但当板厚增加到一定值后, 刚度变化就不明显了, 见表 1-3。

表 1-3 刚度随板厚的变化^[5]

板材 LY12-CZ, 铆钉 $\phi 6$, LY10		
上板厚度 (mm)	下板厚度 (mm)	刚度 (kg/mm)
1.2	1.2	1270
3	3	3550
4	4	4700
8	8	4800

二、连接件型式的影响

在其他参数相同的情况下, 对称连接比搭接的刚度要大, 这是由于对称连接紧固件中点转角为零、变形小, 见表 1-4。

表 1-4 刚度随连接型式的变化^[5]

板材 LY12-CZ, 螺栓 M6, LY10			
连接型式	侧板或上板 (mm)	中板或下板 (mm)	刚度 (kg/mm)
对称连接	4	5	3700
搭接连接	4	4	2200
	5	5	3100

三、铆接和螺接

在其他参数相同的情况下, 铆接比螺接的刚度大, 见表 1-5。

表1—5 刚度随紧固件种类的变化^[5]

板材LC4—CS, 紧固件LY10, 直径6mm			
紧固件种类	上板(mm)	下板(mm)	刚度(kg/mm)
螺 接	3	4	<2200
铆 接	3	4	6000

四、紧固件直径

在其他参数相同的情况下, 刚度随着紧固件直径的增加而增加, 见表1—6。

表1—6 刚度随紧固件直径的变化^[5]

材板LC4—CS, 铆钉LY10			
铆钉直径(mm)	上板(mm)	下板(mm)	刚度(kg/mm)
3	3	3	2400
3.5	3	3	2700
4	3	3	3200
5	3	3	3660

五、埋头铆和凸头铆

在其他参数相同的情况下, 埋头铆比凸头铆的刚度大; 不同角度的埋头铆之间和不同大小的凸头铆之间, 刚度变化不大, 见表1—7。

表1—7 刚度随紧固件型式的变化^[5]

板材LC4—CS, 铆钉 $\phi 6$, LY10			
铆 钉 型 式	上 板 (mm)	下 板 (mm)	刚度(kg/mm)
GB954	3	4	7000
GB869	3	4	6850
GB868	3	4	6000

六、材料

在其他参数相同的情况下, 板材的 E 愈大, 紧固件刚度愈大, 见表1—8。另外, 只要 E 值相同, 不同材料牌号的紧固件刚度近似相等。

表1—8 刚度随板材的变化^[5]

铆钉 $\phi 6$, LY10				
上 板		下 板		刚 度 (kg/mm)
材 料	厚度(mm)	材 料	厚度(mm)	
LY12—CZ	1.5	LY12—CZ	1.5	1600
LY12—CZ	1.5	30CrMnSiA	1.5	2320

七、夹持影响

试件端头夹持限制了紧固件变形, 所以其刚度比没有夹持的大, 见表1—9。

表1—9 夹持影响^[5]

板材LC4—CS, 铆钉 $\phi 3$, LY10			
夹 持 否	上板(mm)	下板(mm)	刚度(kg/mm)
不 夹 持	3	3	1800
夹 持	3	3	2400

八、疲劳载荷影响

在疲劳载荷作用下, 紧固件变形可能出现硬化(或软化)现象。

第三节 内力分布计算^{[8], [9]}

当结构形式确定以后, 为了计算应力严重系数及其寿命, 要进行细节分析, 计算结构各个连接件上的内力分布, 以便确定紧固件传递载荷、旁路载荷和参考应力并选定结构危险部位。通常结构连接件是由很多紧固件连接的, 求解紧固件传递载荷是一个高次静不定问题。本节仅介绍简单连接件的内力分布计算方法。有限元素法在第二章中专门叙述。

一、弹性范围简单连接件内力分布计算的有限差分法^[8]

1. 基本假设

- (1) 结构均处在弹性范围以内;
- (2) 轴向元件尺寸均匀, 无台阶, 无尖削;
- (3) 轴向元件无弯曲应力;
- (4) 紧固件大小相同, 间距相等;
- (5) 把结构简化为当量焊接结构, 单位长度的紧固件刚度定义为

$$k = K/\rho$$

式中 K ——紧固件刚度;

ρ ——紧固件间距。