

第 19 篇 机 械 结 构 强 度

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会



机 械 工 业 出 版 社

TH-62
3
3-19

机械工程手册

第 19 篇 机械结构强度

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社



A706584

19-X 目 录

- $\alpha_\sigma, \alpha_\tau$ ——理论应力集中系数
 β ——表面状态系数; 线胀系数; II 型应力强度因子系数
 γ ——切应变; 单位体积重量; III 型应力强度因子系数
 $\bar{\gamma}$ ——平均切应变
 Δ ——位移; 过盈量
 δ ——位移; 厚度; 裂纹尖端张开位移
 δ_c ——裂纹尖端张开位移的临界值
 ε ——应变; 尺寸系数
 $\bar{\varepsilon}$ ——平均正应变
 $\varepsilon_r, \varepsilon_t$ ——径向应变, 周向应变
 $\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$ ——尺寸系数
 η ——工艺因素
 θ ——极坐标; 角度; 体积应变
 κ ——平面问题弹性常数; 曲率
 λ ——拉梅弹性常数; 波长
 μ ——泊松比; 剪切变形折算系数; 摩擦系数
 Π ——总势能
 ρ ——密度
 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ ——应力不变量
 σ ——正应力; 标准差
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力
 σ_0 ——材料在脉动循环下的疲劳极限
 σ_{-1}, τ_{-1} ——材料在对称循环下的疲劳极限
 σ_a, τ_a ——应力幅
 σ_A, τ_A ——疲劳极限振程
 σ_b ——强度极限
 σ_b^t ——工作温度下的强度极限
 σ_m, τ_m ——平均应力
 σ_n, τ_n ——名义应力
 $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ ——径向应力, 疲劳极限; 周向应力; 轴向应力
 σ_s ——屈服极限
 σ_H ——弯曲应力
 σ_{xd} ——相当应力
 σ_T^t ——持久极限
 σ_e^t ——蠕变极限
 $[\sigma]$ ——材料的许用应力
 τ ——切应力
 τ_1, τ_2, τ_3 ——主切应力
 Φ ——应力函数; 第二类椭圆积分
 $[\Phi]$ ——插值函数
 ϕ ——角度; 焊缝系数
 χ ——相对应力梯度
 ψ ——角度; 截面收缩率
 ψ_σ, ψ_τ ——不对称循环系数
 ω ——角频率; 角速度

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来, 机械工业在毛主席的革命路线指引下, 贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针, 取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验, 同时采用国外先进技术, 加强机械工业科学技术的基础建设, 适应实现“四个现代化”的需要, 我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用, 也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书, 着重介绍各专业的理论基础, 常用计算公式, 数据、资料, 关键问题以及发展趋向。在编写中, 力求做到立足全局, 勾划概貌, 反映共性, 突出重点。在内容和表达方式上, 力求做到深入浅出, 简明扼要, 直观易懂, 归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时, 《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成, 构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分, 共七十九篇; 《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分, 共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区

的科技交流部门,为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中,广泛征求意见,发挥了广大群众的智慧和力量。

(五)为了使手册早日与读者见面,广泛征求意见,先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验,试用本在内容和形式方面,一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证,提出批评和建议,以便今后出版合订本时加以修订。

(六)本篇是《机械工程手册》第19篇,由一机部郑州机械科学研究所主编,参加编写的有清华大学、东北工学院、哈尔滨工业大学、西安交通大学、西南交通大学、湖南大学、吉林工业大学、浙江大学、农机部上海内燃机研究所、一机部合肥通用机械研究所、一机部洛阳轴承研究所、一机部上海材料研究所、北京航空学院、上海交通大学、哈尔滨锅炉厂、一机部长春汽车研究所、一机部上海汽轮机研究所、六机部711所、南京工学院、水利部水利水电科学研究院、郑州工学院、一机部西安重型机械研究所、大连工学院等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助,在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

常用符号表

A ——截面积	K_{σ}, K_r ——有效应力集中系数 (亦称疲劳缺口应力系数或缺口作用系数)
a ——圆半径; 矩形边长; 椭圆半轴长度; 裂纹尺寸	k ——弹簧刚度; 刚度系数
a_c ——临界裂纹尺寸	$[k]$ ——单元刚度矩阵
B ——宽度; 厚度	L ——长度; 外力功
b ——宽度; 矩形边长; 圆半径; 椭圆半轴长度	l ——长度; 方向余弦
C ——常数; 弹簧常数; 应力光学系数	M ——力矩; 弯矩
c ——常数; 椭圆裂纹半轴长度	m ——方向余弦
D ——直径; 板壳抗弯刚度	N ——轴向力; 疲劳寿命; 条纹级数
d ——直径	n ——安全系数; 应力或应变循环数; 方向余弦; 折射率
da/dN ——疲劳裂纹扩展速率	P ——载荷; 集中载荷
da/dt ——应力腐蚀裂纹扩展速率	p ——分布压力; 单位面积分布载荷
E ——材料的弹性模量	Q ——剪切力; 广义力
e ——平均应变; 偏心距	q ——单位长度分布载荷; 广义位移; 材料的疲劳缺口灵敏度系数
f ——体积力; 频率; 条纹值; 柔度系数	q ——剪流
G ——剪切弹性模量; 裂纹扩展力	R ——半径; 集中力; 电阻
G_{Ic} ——材料的裂纹扩展阻力 (或应变能释放率)	r ——半径; 极坐标
h ——高度; 厚度	S ——表面积
I ——惯性矩; 光强度	s ——壁厚
I_p ——极惯性矩	T ——扭矩; 温度; 厚度
I_{ω} ——扇性惯性矩	t ——时间; 厚度; 温度; 分布切向力
i ——惯性半径	U ——应变能
J —— J 积分	u ——位移分量
J_{Ic} ——材料的临界 J 积分值 (I 型)	V ——体积; 外力势
J_K, W_K ——截面抗扭几何特性	v ——速度; 位移分量
J_{ω} ——扇性惯性矩	W ——抗弯截面系数; 应变能密度
K ——体积弹性模量; 外径与内径之比; 系数	W_K ——截面抗扭几何特性
$[K]$ ——刚度矩阵	W_n ——抗扭截面系数
K_I, K_{II}, K_{III} ——I, II, III 型应力强度因子	w ——挠度; 位移分量
K_{Ic} ——材料的平面应变断裂韧性 (I 型)	X, Y, Z ——面积力分量
K_{Isc} ——应力腐蚀界限应力强度因子	x, y, z ——直角坐标
K_c ——材料的平面应力断裂韧性	α ——角度; 线胀系数; I 型应力强度因子系数
K_{rms} ——应力强度因子幅度的均方根值	

目 录

编辑说明

常用符号表

第 1 章 机械结构的力学模型

- 1 机械结构力学模型的建立.....19-2
- 2 机械结构力学模型举例.....19-4
 - 2.1 水轮机主轴法兰应力分析19-4
 - 2.2 大型汽轮机转子应力分析19-5
 - 2.3 钢丝缠绕式压力机架应力分析19-6
 - 2.4 含裂纹构件的力学分析19-6
- 3 建立力学模型常用的几个原理和概念.....19-7
 - 3.1 叠加原理19-7
 - 3.2 局部静力等效力系与局部作用原理19-7
 - 3.3 关于唯一性原理的说明19-8
 - 3.4 对称与反对称性的利用19-8

第 2 章 弹塑性分析公式

- 1 应力.....19-9
 - 1.1 一点的应力状态19-9
 - 1.2 应力偏量.....19-10
 - 1.3 有关应力参量表.....19-10
- 2 应变19-11
 - 2.1 小变形应变.....19-11
 - 2.2 应变协调方程.....19-12
 - 2.3 应变偏量.....19-12
 - 2.4 小变形应变参量表.....19-13
 - 2.5 有限变形.....19-13
- 3 应力应变关系19-13
 - 3.1 各向同性线弹性材料的应力应变关系.....19-13
 - 3.2 弹性应力应变关系的能量概念.....19-15
 - 3.3 塑性条件和屈服面.....19-15
 - 3.4 塑性应力应变关系.....19-16

4 弹性理论的基本方程和边界条件

(空间问题)19-17

- 4.1 弹性理论的基本方程.....19-17
 - 4.2 其它常用坐标系内的平衡方程和几何方程.....19-17
 - 4.3 边界条件.....19-18
 - 4.4 按应力求解问题——力法.....19-19
 - 4.5 按位移求解问题——位移法.....19-19
- 5 平面问题的基本方程和边界条件19-19
 - 5.1 平面应力问题.....19-19
 - 5.2 平面应变问题.....19-20
 - 5.3 平面问题的基本方程.....19-20
 - 5.4 边界条件.....19-20
 - 5.5 平面问题基本方程及应力函数的极坐标表达式.....19-21

6 二维、三维问题常用应力应变

公式19-21

7 等直杆扭转应力应变公式19-25

8 弹塑性理论基本方程和边界条件

的矩阵表达19-26

- 8.1 符号说明.....19-26
- 8.2 矢量、弹性矩阵、运算矩阵.....19-26
- 8.3 弹性理论基本方程的矩阵表达.....19-27
- 8.4 塑性应力应变关系的矩阵表达.....19-28
- 8.5 边界条件.....19-29

第 3 章 弹性薄板、薄壳、薄壁

杆件计算公式

- 1 薄板19-29
 - 1.1 平板弯曲的基本方程.....19-30
 - 1.2 圆板的弯曲计算公式.....19-31
 - 1.3 矩形板的弯曲计算公式.....19-40
 - 1.4 杂形板的弯曲计算公式.....19-44
 - 1.5 板件计算举例.....19-45

2 薄壳19-46

2.1 薄壳的薄膜力计算公式.....19-47

2.2 圆柱壳的计算.....19-49

2.3 旋转壳弯曲的基本方程.....19-55

2.4 组合壳状结构的计算公式.....19-57

3 薄壁杆件19-58

3.1 薄壁杆件自由扭转.....19-58

3.2 薄壁杆件约束扭转.....19-59

第4章 能量方法

1 能量法中常见的力学概念19-66

1.1 广义位移 广义力 自由度.....19-66

1.2 功 余功.....19-66

1.3 应变能 应变余能.....19-67

1.4 功与能的关系 保守系统.....19-67

1.5 几何许可位移 虚位移 虚功.....19-68

1.6 平衡许可力 虚力 虚余功.....19-68

2 虚位移原理19-68

2.1 虚位移原理.....19-68

2.2 最小总势能原理.....19-69

2.3 卡氏第一定理.....19-70

2.4 单位位移法.....19-70

2.5 虚位移原理和最小总势能原理的
矩阵表达式.....19-70

3 虚力原理19-70

3.1 虚力原理.....19-70

3.2 最小总余能原理.....19-70

3.3 卡氏第二定理.....19-71

3.4 单位载荷法.....19-71

4 虚位移原理和虚力原理对应表19-72

5 互等定理19-72

5.1 功的互等定理.....19-72

5.2 位移互等定理.....19-72

5.3 反力互等定理.....19-72

5.4 反力与位移互等定理.....19-73

6 等效关系 静力几何进步关系19-73

6.1 刚体的静力等效和功等效一致.....19-73

6.2 变形体的功等效力.....19-73

6.3 静力几何进步关系.....19-73

第5章 机械构架分析方法

1 静定、超静定构架及其几何

稳定性19-74

1.1 静定和超静定构架.....19-74

1.2 构架的几何稳定性.....19-75

2 构架分析的力法19-76

2.1 力法的基本原理和基本方程.....19-76

2.2 起重机吊环的内力计算.....19-76

2.3 输汽管道的内力计算.....19-77

2.4 力法基本方程的矩阵表达式.....19-78

3 构架分析的位移法19-78

3.1 位移法的基本原理和基本方程.....19-78

3.2 简例.....19-81

3.3 位移法基本方程的矩阵表达式.....19-82

4 构架矩阵分析——直接刚度法19-82

5 杆元刚度矩阵19-83

5.1 杆元刚度矩阵的建立.....19-83

5.2 杆元的刚度矩阵.....19-83

6 载荷移置19-86

6.1 等效节点载荷的计算公式.....19-86

6.2 常用等效节点载荷(表19-5-6、19-5-7)
.....19-86

7 座标变换19-87

7.1 座标变换矩阵.....19-87

7.2 杆元刚度矩阵的座标变换式.....19-88

7.3 载荷的座标变换式.....19-88

7.4 举例——自由等直杆元刚度矩阵
的座标变换.....19-88

8 构架总刚度矩阵19-89

8.1 总刚度矩阵的形成.....19-89

8.2 总刚度矩阵的性质.....19-89

9 边界(约束)条件的处理19-90

10 内力的确定19-90

11 算例——锅炉炉侧构架内力计算19-90

第6章 有限元法

1 位移法基本原理19-94

1.1 单元形态 形函数[N].....19-94

1.2 单元应变和应力表达式.....19-94

1.3 单元刚度矩阵.....19-94

19-VI 目 录

1.4	单元节点外力——等效节点载荷	19-95
1.5	总刚度矩阵	19-95
1.6	节点平衡方程	19-95
1.7	边界条件的应用和应力计算	19-96
2	平面问题计算实例	19-96
2.1	常应变三角形元的形函数	19-97
2.2	应力、应变表达式	19-97
2.3	单元刚度矩阵	19-97
2.4	输入信息	19-98
2.5	总刚度矩阵的形成	19-99
2.6	节点外力列阵	19-101
2.7	位移边界条件	19-101
2.8	计算结果	19-101
2.9	平面有限元分析的公式 (表19-6-3)	19-101
2.10	平面问题工程实例计算	19-101
3	轴对称问题	19-104
3.1	基本公式	19-104
3.2	轴对称问题计算实例	19-105
4	接触问题	19-105
4.1	接触区已知的光滑接触	19-105
4.2	一般性接触问题	19-107
5	形函数简要说明	19-107
5.1	拉氏多项式的形函数	19-107
5.2	几种较简单单元的形函数 (表19-6-5)	19-108
6	几种较复杂的元	19-109
6.1	平板元	19-109
6.2	等参元	19-110
6.3	三维元	19-110
6.4	壳元	19-111
7	几个专门问题简介	19-111
7.1	凝缩	19-111
7.2	子结构技术	19-111
7.3	局部座标变换处理	19-112
8	有关计算特点的说明	19-112

第7章 结构稳定性分析 及临界载荷表

1	结构平衡稳定性 中性平衡 临界载荷	19-113
---	----------------------	--------

2	结构平衡稳定性分析	19-114
3	结构稳定平衡和失稳特点	19-114
3.1	平衡路径 平衡分枝点	19-114
3.2	丧失原来平衡形式——失稳形态 之一	19-115
3.3	丧失结构承载能力——失稳形态 之二	19-115
3.4	跳跃——失稳形态之三	19-115
3.5	结构不完善性的影响	19-116
4	结构临界载荷表	19-117

第8章 机械结构的断裂力学分析

1	线弹性断裂力学	19-125
1.1	裂纹对构件强度的影响	19-125
1.2	裂纹尖端变形的三种基本类型	19-125
1.3	应力强度因子	19-125
1.4	断裂判据和断裂韧性	19-126
1.5	裂纹尖端的塑性区尺寸和 K_{IC} 的 塑性修正	19-126
1.6	应变能释放率 (亦称推动裂纹扩 展力) G 的概念	19-127
1.7	应力强度因子和应变能释放率的 关系	19-127
1.8	复合型断裂判据	19-128
2	弹塑性断裂力学	19-128
2.1	裂纹尖端张开位移 (COD) 的概念和 判据	19-128
2.2	J 积分	19-129
3	压力容器的断裂力学分析	19-130
3.1	压力容器的脆断分析	19-130
3.2	含裂纹压力容器的鼓胀效应	19-130
3.3	用 δ 判据估算含裂纹压力容器的 开裂压力	19-131
3.4	全面屈服条件下的 δ 判据	19-131
4	轴类零件的断裂力学分析	19-132
4.1	断裂判据的选择	19-132
4.2	轴的应力计算	19-132
4.3	缺陷及其模型	19-132
4.4	K_I 表达式的选取	19-133
4.5	K_{IC} 的选取	19-133
4.6	安全系数	19-133
4.7	应用举例	19-133

5 应力强度因子 K 的表达式	19-134
-------------------------	--------

第9章 接触应力

1 弹性接触应力和变形	19-138
1.1 基本假定	19-138
1.2 符号说明	19-138
1.3 计算公式与实例	19-139
2 接触表面下的最大切应力	19-143
2.1 最大切应力 τ_1	19-143
2.2 平行于接触表面的最大切应力 τ_0	19-143
3 刚性压头接触问题	19-143
4 应用举例	19-143

第10章 应力集中系数

1 应力集中系数的概念和计算	19-146
2 带沟槽的机械零件的应力集中 系数图表	19-147
3 带台肩圆角的机械零件的应力 集中系数图表	19-149
4 开孔的机械零件的应力集中系 数图表	19-150
5 常用几种机械零件的应力集中 系数	19-153
6 应用举例	19-155
7 降低应力集中系数	19-156

第11章 结构疲劳强度

1 疲劳计算	19-157
1.1 无限寿命设计	19-157
1.2 安全寿命设计	19-159
1.3 低周疲劳 (低循环疲劳)	19-163
2 疲劳试验	19-164
2.1 机件疲劳试验	19-164
2.2 模拟疲劳试验	19-165
2.3 整机 (或结构) 疲劳试验	19-166
3 断裂力学在疲劳设计中的应用	19-166
3.1 疲劳裂纹扩展速率 da/dN	19-166
3.2 疲劳裂纹扩展寿命的估算	19-168

3.3 损伤容限设计	19-169
------------------	--------

第12章 模型试验

1 模型相似条件	19-172
1.1 相似理论	19-172
1.2 用量纲分析确定相似判据	19-173
1.3 根据物理方程确定相似判据	19-174
1.4 静弹性结构模型试验的相似条件	19-174
1.5 变态相似问题	19-175
2 模型材料和模型制造	19-175
2.1 模型材料的性能要求	19-176
2.2 常用几种非金属模型材料的主要 性能	19-176
2.3 模型制造	19-176
3 模型加载	19-176
3.1 模型加载原则	19-176
3.2 模型加载大小的确定	19-177
4 模型测试与模型试验	19-177
4.1 重型液压机活动横梁模型试验	19-177
4.2 万匹马力船用柴油机 A 字架的模 型分析	19-178
4.3 铣床床身动刚度模型试验	19-179

第13章 电阻应变片测量技术

1 电阻应变片	19-180
1.1 电阻应变片的种类、结构和特点	19-180
1.2 电阻应变片的工作特性	19-180
1.3 各类应变片的选用	19-182
2 测量电路和仪器	19-182
2.1 测量电路	19-182
2.2 电阻应变仪	19-183
2.3 记录器	19-185
3 应变测量技术	19-185
3.1 静态应变测量	19-185
3.2 动态应变测量	19-189
3.3 高、低温度下的应变测量	19-191
3.4 高压液下应变测量	19-193
3.5 旋转件的应变测量	19-194
3.6 应变的无线电遥测	19-196
4 电阻应变片式传感器	19-197

第14章 光弹性法

- 1 光弹性原理和平面光弹性的应用19-201
 - 1.1 等差线和等倾线19-201
 - 1.2 光弹性仪19-202
 - 1.3 条纹级数的测定19-203
 - 1.4 应力分离方法19-204
 - 1.5 应用举例19-205
- 2 光弹性材料和模型19-206
 - 2.1 光弹性材料性能19-206
 - 2.2 环氧树脂光弹性材料及其配方19-207
 - 2.3 光弹性模型的设计和制造19-207
- 3 三维光弹性问题19-208
 - 3.1 冻结切片法19-208
 - 3.2 表面应力测量19-209
 - 3.3 三维切应力差法19-209
 - 3.4 应用举例19-210
- 4 其它光弹性试验方法19-210
 - 4.1 全息干涉法19-211
 - 4.2 散射光法19-212
 - 4.3 贴片法19-213
 - 4.4 热光弹性法19-214
 - 4.5 动光弹性法19-214

第15章 典型构件强度计算
 ——压力容器

- 1 压力容器应力分类19-215
 - 1.1 一次应力19-215
 - 1.2 二次应力19-215
 - 1.3 峰值应力19-215
- 2 薄壁容器19-216
 - 2.1 筒壳、球壳的静应力19-216
 - 2.2 筒壳、球壳的温度应力19-216
 - 2.3 筒壳、球壳的外压稳定19-217
 - 2.4 封头19-218
 - 2.5 封头边缘应力19-218
 - 2.6 开孔及其补强19-219
- 3 厚壁容器19-221
 - 3.1 筒体、球体的静应力19-221
 - 3.2 筒体、球体的温度应力19-221

- 3.3 屈服压力和爆破压力19-223
- 3.4 组合容器19-224

第16章 典型构件强度分析
 ——旋转圆盘

- 1 等厚度旋转圆盘19-226
 - 1.1 等厚度旋转圆盘的离心应力19-226
 - 1.2 等厚度旋转圆盘的温度应力19-227
- 2 双曲线旋转圆盘19-229
 - 2.1 双曲线旋转圆盘的离心应力19-229
 - 2.2 双曲线旋转圆盘的温度应力19-230
- 3 等强度旋转圆盘19-230
- 4 任意型线的旋转圆盘19-231
- 5 旋转圆盘的自增强19-231
- 6 旋转圆盘的空间轴对称问题
(有限元法)19-232
- 7 圆盘飞裂试验19-233
- 8 旋转圆盘的静强度校核19-234

第17章 典型构件强度分析
 ——曲轴、连杆

- 1 曲轴19-234
 - 1.1 曲轴结构及其破坏型式19-234
 - 1.2 曲轴应力集中系数(或称形状系数)的计算19-235
 - 1.3 曲轴的受力分析和内力计算19-237
 - 1.4 曲轴的强度校核19-240
- 2 连杆19-241
 - 2.1 连杆强度计算19-241
 - 2.2 连杆的疲劳破坏及疲劳强度校核19-247

第18章 安全系数和许用应力

- 1 机件的失效19-249
 - 1.1 静应力下机件的失效19-249
 - 1.2 变应力下机件的失效19-249
- 2 室温静应力下的安全系数和强度判据19-250
 - 2.1 室温静应力下机件的安全系数19-250
 - 2.2 极限设计中的安全系数19-250
 - 2.3 考虑缺陷影响的安全系数19-251

2.4 承受动载荷机件的安全系数	19-252	4.2 同时承受弯应力和扭应力机件的 安全系数	19-253
3 高温静应力下的安全系数和 强度判据	19-252	4.3 承受变幅应力机件的安全系数	19-253
4 变应力下的安全系数和强度 判据	19-253	4.4 含裂纹机件的安全系数	19-253
4.1 承受单向正应力或切应力机件的 安全系数	19-253	5 可靠性设计的安全系数	19-253
		6 提高机件的安全度	19-254

机械工程中的一般杆件（它泛指杆、梁、轴和柱等）结构在载荷不太高的情况下，都可用本手册工程力学篇提供的计算方法进行设计计算。本篇将对结构型式和支承条件都较复杂，承受载荷又较高的机械结构，提供常用的分析方法和实验技术，以便弄清机械结构在较高载荷下，其危险区的应力分布、应变和变形、以及变形体的失稳分析等，作为确定机械结构合理型式的理论依据。

机械设计中进行结构强度分析，系根据所分析的机械结构的具体情况，确定进行理论分析或实验分析，或两者结合进行。为此，本篇主要内容将包括理论分析和实验分析两部分。进行理论分析时，应考虑机械设备在工作条件下的失效形式（如破坏、过量变形和变形体的失稳等），建立强度分析所需要的力学模型（第1章），并提供分析时常用的计算公式和数据图表，其中包括弹塑性分析公式（第2章），弹性薄板、薄壳、薄壁杆件计算公式（第3章），以及接触应力（第9章）和应力集中系数图表（第10章）。同时，还提出能量方法（第4章）和结构稳定性分析的基本概念及临界载荷表（第7章）。

随着大型高速电子计算机的发展和应用，机械结构分析方法（第5章）以及有限元法（第6章），用于分析机械结构强度，已取得显著成效。它不仅可用来分析复杂的杆系刚架结构、板壳结构等的静、动态应力，热应力，稳定性，以及材料的非线性问题等，还可对机械结构中常遇到的一些特殊问题，如弹性接触、过盈配合等，作出有效的处理，使得机械结构的设计更加合理。

有些焊接结构和重型构件由于不可避免地存在一定的冶金缺陷如夹渣、疏松、气孔、砂眼等或裂纹，并由于裂纹的扩展，使得这些机械结构在低于材料屈服极限的低应力下发生脆性断裂，造成严重事故。为此，在机械工程设计中，很有必要了解这些缺陷或裂纹的存在和扩展对这些结构的安全运行和使用寿命的影响，并提出评定这些影响的安全判据，以及对含裂纹的构件进行安全评价。本篇第8章简要介绍断裂力学的基本原理及其在机械工程设计

中的应用事例，并附有有关的应力强度因子表。

鉴于机械零件或构件常见的破坏型式，大多是疲劳破坏，必须引起重视。本手册工程力学篇已提出机械构件的常规疲劳强度计算方法和有关系数图表；金属材料强度篇则对金属材料的疲劳抗力指标及其各种影响因素作了较详尽的论述。本篇第11章结构疲劳强度将主要介绍几种疲劳设计计算方法和机械零件或构件的疲劳试验，以及断裂力学在疲劳中的应用，并列举了压力容器的应用事例。

实验技术是进行结构强度分析的另一重要手段。当设计的新产品需要确定设计方案时，可利用模型试验（或光弹性法试验），选取较优设计方案，并可对原设计方案提出有益的改进意见，如降低应力集中系数等。在新设计的机械产品开始运行后，还可利用电阻应变片测量技术和贴片光弹性法等，在机器实际运行情况下测量其主要零部件关键部位的应力，用来校核和验证理论分析和模型试验的有效性和可靠性，并为设计制造更大更好的机械设备积累试验数据。对于分析机械结构的失效原因，提出补强措施，以及挖掘现有机械设备的潜力，提高其承载能力，都可利用应力测量技术获得较好的效果。本篇第12、13、14章将分别介绍结构强度分析常用的试验技术，如模型试验，电阻应变片测量技术和光弹性法。

本篇最后举出几个构件作为例子，用来说明强度分析的一些特点，其中有压力容器（第15章），旋转圆盘（第16章）和曲轴、连杆（第17章）。

对机械结构进行了必要的强度分析后，还必须提出相应的强度判据，才能取得应力分析的效益。所有机械结构都应有适度的强度储备，以保证其安全运行和达到预期的使用寿命。但安全系数如取得过大或许用应力取得过小，将会使得设计的机械结构粗大笨重；反之，如安全系数取得过小或许用应力取得过大，又将使得设计的机械结构发生不应有的破坏。因此，合理选取安全系数和许用应力，是机械工程设计和结构强度分析中的一个重要环节，亦即本篇第18章的主要内容。

工程力学篇和机械结构强度篇都为核算机械零

部件和构件的强度、刚度和稳定性,合理确定尺寸,正确选取材料,建立了必要的理论基础。前者是后者的基础,后者是前者的补充,它扩大了强度分析的范围,提高了强度分析的精度。

机械结构大多是用金属材料制成,因此,机械结构强度分析是和金属材料强度紧密相关的。金属材料强度篇从几个方面论述了金属材料的失效抗力指标(如屈服极限、疲劳极限、断裂韧性,等等)及其评定方法,为正确确定金属材料的许用应力提供了分析基础。

还有许多机械结构是在动态工作条件下实现其

各项功能,特别是高速旋转机械,将产生较大的振动和动应力,是影响这类机械的工作性能和使用寿命的重要因素之一。机械振动篇已对各类机械振动的基本特性及其测试技术,作了较详尽的论述,将有助于机械结构的动态分析。

为了早日实现四个现代化,机械工业必将高速地发展新技术,新产品,新材料,新工艺,对结构强度分析将提出更多更高的要求,本篇将有必要补充如抗蠕变设计等方面的强度分析和机械结构动态分析方面的内容。

第1章 机械结构的力学模型

机械结构强度分析是合理设计机械的一个重要方面。无论是设计制造大型、高参数的新机械产品,还是大批量生产的常用机械,要做到安全、可靠、经济、耐用,都有必要对其关键零部件(以下简称机件)进行有效的力学分析,包括强度、刚度、稳定和动力特性等方面的分析。通过这些分析,对机件的总体和关键的局部,从强度等方面考虑作必要的改变,以加强其薄弱部位,延长机件的寿命;削减其臃肿部分,减轻机器的重量。

在进行机械结构的力学分析时,首先必须根据结构在强度、刚度等方面的主要矛盾,通过适当的简化,建立一个可作分析计算用的力学模型(或称计算简图)。这个力学模型既要有可靠的代表性,即能合理地反映真实的受力与约束情况,又要便于分析计算。建立力学模型是力学分析计算的第一步,取得正确的模型极为重要。可以说,工程设计分析计算效果的好坏,首先取决于力学模型的处理。

本章说明力学模型的具体内容,处理模型简化问题时的一些必要知识,并举出几个力学模型的实例。

1 机械结构力学模型的建立

建立机械结构的力学模型,首先要明确受力变形的性质,抓住问题的关键,才能取得预期的效果。

一个机械产品,尤其是高精尖的产品,受到强

度(应力过大)、刚度(变形过大)、稳定(整体或局部失稳)、振动(共振及动载引起的不平稳等)等方面的控制。其中强度问题又分为静强度、动强度、疲劳强度、持久强度等。刚度问题也分静力、动力、蠕变等方面。

机械结构,按照构件三个方向尺度的相对数值,可分为几类。一、一个方向的尺寸远大于另二个方向尺寸时,称为杆件,它泛指杆、梁、轴和柱等(参阅工程力学篇和本篇第3章薄壁杆件部分)。二、二个方向尺寸为同一量级,而第三个方向尺寸(厚度)小一个量级的,属于板、壳。如板所受载荷垂直于板面时,则将引起平板弯曲问题;板的载荷沿板面内作用时,通常引起平面应力问题。三、三个方向尺寸属于同一量级时,则一般称为三维问题或空间问题,但其中又有两种可加以简化的情形,即平面应变问题(当载荷及约束沿某个方向不变时)和轴对称问题。

力学模型的形状通常总是与实际结构的形状保持几何相似,但实际结构上有些部分,如对关键部位的强度分析无较大影响,则可将该部分予以简化,甚至略去。

由于问题解决的程度和阶段不同,其主要矛盾也不相同,因此它将影响模型的形式。有些结构原来就没有可以定量的力学分析依据,则需首先确定各部分的大致尺寸,这时应先着重于总体分析。有些结构已有了大致尺寸,而且大体上符合实用需

要, 但有个别高应力区容易引起损坏, 则对那个高应力区进行力学分析就成为关键问题, 这时对力学模型的分析, 主要是寻求能降低局部高应力的较优的形状尺寸。有时构件由于刚度不够, 影响机械的精度, 或出现动力特性不佳, 以致运行不平稳等。板壳和薄壁构件中在受压、弯、扭时, 还可能产生稳定问题。这些都须进行专门分析。机械结构的疲劳寿命问题, 则更是以强度即应力分析为根据的。

明确了问题性质和所要分析的部位以后, 可着手进行具体简化工作。这一工作要求对力学分析所应满足的基本条件有一概括的了解。这些基本条件有如下三方面的要求, 它包括便于分析计算的具体座标表达形式:

1) 力学方面: 力的平衡条件(在动力学问题中, 要考虑惯性力)。在物体表面处外力情况即为力的边界条件, 亦即物体表面承受载荷及支承反力的情况。

2) 几何方面: 变形连续条件。在物体表面处即为物体的边界几何约束。

3) 物性方面: 材料的力和变形的关系。对于一般机械结构来说, 所遇到的多数情况是均匀的各向同性的弹性材料, 其应力应变呈线性关系。当然也可能遇到材料的不均匀性和各向异性问题, 必要时也应加以考虑。

求出一个结构的应力和应变状态的过程, 一般首先必须明确外力和变形的边界条件, 然后综合力的平衡, 变形协调和物性三方面的方程组求解。因此, 可以认为力学模型的建立主要是在满足力学、几何和物性三个基本关系的前提下去确定所分析的部分物体的具体边界, 并明确地给出边界上的载荷或约束情况。这些边界情况往往并不容易简单地加以直观判定, 而是需要一定的力学分析作为依据。

分析关键部位的应力状态时, 往往只要分析包括关键部位在内的部分物体, 但这部分物体要足够大, 大到可以定出合乎实际的边界力或几何约束。在这过程中, 往往需用到局部静力等效力系与局部作用原理。在允许应用叠加原理和对称性等的简化时, 计算分析往往更为简单有效(参阅第2、3节的实例)。力学模型虽直接从力学、几何、物性三方面以及必要的边界条件来看, 是很明确的, 但从物理性质及数学处理上引入能量概念, 亦很重要。变形物体具有一定能量, 其变形状态与能量状态或

势能互相连系。依靠能量方法来处理已建立的力学模型, 在有些情形下, 也是当前对机械结构进行力学分析的一种有效手段(参阅本篇第4章)。而且一些有效的近似分析(如有限元法)也往往用能量形式来表达。

在建立力学模型的过程中, 一般对于载荷要作适当简化。通常将载荷简化为集中载荷或按比较简单的规律分布的载荷(如均布、线性分布、抛物线分布或正、余弦分布载荷等)。这些简化是以静力等效或能量等效为基础的。有时机件接触面上的载荷分布, 往往和间隙及机件刚度等有关, 例如第17章中连杆孔和销钉间的相互作用力。

约束或支承分为铰支、固支和弹性支承。一般简化为铰支或固支, 但实际情况往往处于二者之间。在设计分析中, 允许选取较安全的方案作为依据。但有时还必须考虑相邻部件的刚度和位移连续条件, 按弹性支承来处理。

应力应变关系或更一般的情况称为本构方程。普通机械结构强度一般应用简化的线性关系(虎克定律), 或简单的非线性关系(如用指数式表示的应力应变关系等)。在运转的机器中, 一般不允许材料明显地进入塑性范围。但有些主要承受静力的构件也有用极限设计方法进行计算的。一般采用理想塑性假设, 但在必要时应考虑材料的硬化效应。有限寿命部件有时要考虑应变速率, 如蠕变计算。

以上是建立力学分析模型的几个主要方面。总的是要求模型能反映实际力学、几何和物性三方面以及受力和约束的情况。力求其主要力学效果和实际结构的相当, 在略为偏于安全的情况下, 可用较易分析计算的简化方案。

关于有缺陷或裂纹的构件中的裂纹模型简化, 参阅第8章。

按照分析方法的不同, 现在常用的力学模型可分为经典的完全连续的和离散的(如差分 and 有限元法)两种。有限元法在划分单元上有较大的灵活性, 便于分析复杂形状零件的应力状态(对材料的不均匀性和各向异性等也较为容易地计入), 扩大了机械结构力学分析的范围。

模型是否恰当, 可用不同方式来检验。例如, 将分析结果与实际失效情况进行对比, 也可将理论数据与实物或模型的实验数据进行比较。而对于一

些常用的近似方法,如能量法可用增加参数数目的方法检验收敛的情况;有限元法在无其他可靠比较的情况下,亦可利用加细网格,观察收敛情况。一般地说,这种收敛情况只是最低限度的间接检验,但这是必不可少的。从计算中如发现模型有过度简化的情况,则应修改模型。

同一个结构,由于分析的重点不同,选取的模型可能不尽相同。例如分析强度与分析刚度或动态情况,分析关键的局部与分析总体时,其模型可以有所不同。一般对后者允许其模型有更大的简化。在设计的不同阶段,如初步设计和技术设计,分析计算方法和模型也有所不同,一般后者的模型较为复杂,分析的工作量也较大。这里,安全系数和许用应力的选取也应作相应的不同处理。

进行强度分析时,考虑实际工况,可能需要计算几种不同的载荷组合(工况),加以比较,取其最可能发生的、较为严重的情况,作为设计的依据。但为了便利设计上取得最优化的效果,可对分析的力学模型再作必要的简化,以利于进行多次快速分析。

2 机械结构力学模型举例

现在选择几个从力学模型建立上有一定特点的机械结构例子进行扼要分析。它们是:变截面轴的扭转问题(2.1),轴对称转子动应力问题(2.2),压力机架的平面应力分析(2.3),和含裂纹构件的分析(2.4)。

2.1 水轮机主轴法兰应力分析

水轮机主轴借助两端的法兰,把水轮机转轮和发电机连接起来,是水轮发电机组的一个重要部件(参阅图19.1-1)。随着水轮发电机组功率的不断提高,主轴的尺寸也越来越大,这样就有必要采用较薄的空心轴。当前主轴法兰多采用带锥度用双圆弧过渡的外形。

水轮机主轴设计主要根据传递机组功率引起的扭转应力,并考虑轴向拉力的影响,来确定其主要尺寸。一般在主轴连接法兰的过渡区,有一定的局部应力集中。正确分析过渡区的应力分布,对推广采用薄壁轴,以减轻大型主轴的重量,节约钢材,具有重要意义。

1) 先考虑确定过渡区扭转应力集中的力学模

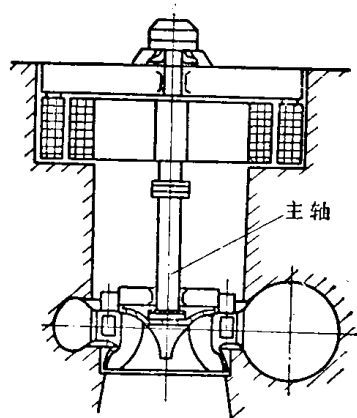


图19.1-1 悬式水轮发电机组装置

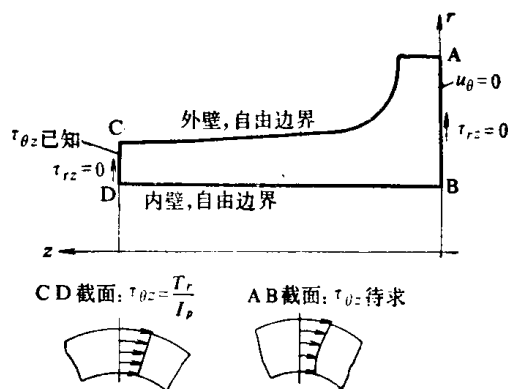


图19.1-2 水轮机主轴过渡区扭转应力分析

型。这是一个变截面空心圆轴的扭转问题。它的未知数包括一个位移或二个应力分量:

$$u_{\theta}(r, z); \tau_{\theta z}(r, z), \tau_{rz}(r, z)$$

截取一段轴和法兰(参阅图19.1-2),在它的边界上:

(a) AB截面: $u_{\theta} = 0, \tau_{rz} = 0$

(b) CD截面: $\tau_{\theta z}$ 已知, $\tau_{rz} = 0$

(c) 其它内外壁均为自由边界。这里作为自由表面,它应满足切应力合成为零。

CD截面的切应力 $\tau_{\theta z}$ 可根据工程力学篇的圆杆扭转应力公式求得: $\tau_{\theta z} = \frac{T_r}{l_p}$, 式中 T 为扭矩,

l_p 为截面的极惯性矩。根据静力等效力系与局部作用原理(参阅第3节),这不会影响过渡区的局部应力。

利用第2章的极坐标平衡条件,变形连续条件和弹性的应力应变关系,结合上述的边界条件,即可求得全部扭转应力和位移。这就是水轮机主轴法兰扭转应力的力学模型。

方程的求解可用差分法或有限元法。一般这种

力学模型求解的困难在于满足边界条件,例如内、外壁自由边界,如引用扭转应力函数 ϕ 求解,则可将边界条件化成边界上 $\phi = \text{常数}$ 。在此基础上,对于满足力学、几何、物性三方面的 ϕ 微分方程,可用差分法计算。对于有限元法,由于边界力都化成节点力,故在自由边界上,其边界单元上的边界节点力俱为零。这种简易处理,也是有限元法的一个明显优点。

2) 现在进一步说明主轴法兰在轴向力作用下的应力分析力学模型。这里,如用有限元法或差分法计算,则一般把主轴和法兰看成是一个整体。但在常用的结构分析中也曾把主轴和法兰分成两个构件考虑,以便建立一种工程计算方案。为了说明这里对力学模型所作的不同处理,特别提一下后一方案。

空心轴可视为长筒壳,法兰的简化则应先考虑轴的刚度,即考虑轴的壁厚情况。对于厚壁轴,一般将法兰看成环板,其内边缘与空心轴固接。而大型机组大都采用薄壁轴,这种情况应把法兰看成为刚性环。但在空心轴和法兰联接处,应满足力和变形的连续条件,即两者相互作用的力相等(作用力等于反作用力),两者在联接处的径向位移相等,转角也相等。

此外,对于法兰端部,还有一些较复杂的边界条件处理问题。即应考虑法兰上一圈螺栓的影响。螺栓予紧后,法兰端面受均布压力;轴受拉力作用

时,法兰端面上的压力,成为外侧大而内侧小的分布状态。为了便于分析,通常假定压力分布规律为直线分布(法兰厚度较大时)或二次抛物线分布(法兰厚度较小时)。

对于这种工程方法计算的结果,还应和模型试验进行比较,以验证其是否合理可靠。

从上述有关模型简化的讨论,可以看出,结构各部分相对尺寸的比例关系很重要,因为尺寸比例关系反映了各部分相对的刚度不同,而结构各部分的刚度不同,则往往是决定结构简化方式的重要因素。

还应指出,当前应力分析的精度不断提高,许用应力水平也正在逐步提高,从结构强度的观点来看,这种大型主轴尚有不少潜力可挖。

2.2 大型汽轮机转子应力分析

汽轮机转子(主轴)是一种高载荷的大型机械部件。其直径可超过一米,总长可达数十米。转子的静、动力分析是很重要的强度问题。以低压转子为例,其结构比较复杂,在高速旋转下将引起较大的离心应力,但一般温度应力并不显著。这种大型转子由于制造和工艺条件不同,一般有整锻和焊接两种形式。图19-1-3 a、b给出了两种不同构造的汽轮机低压转子的力学分析结构简图。图上示出转子部分截面,网格是用有限元法计算时划分的单元。分析的主要目的是定出内孔边的高应力水平和

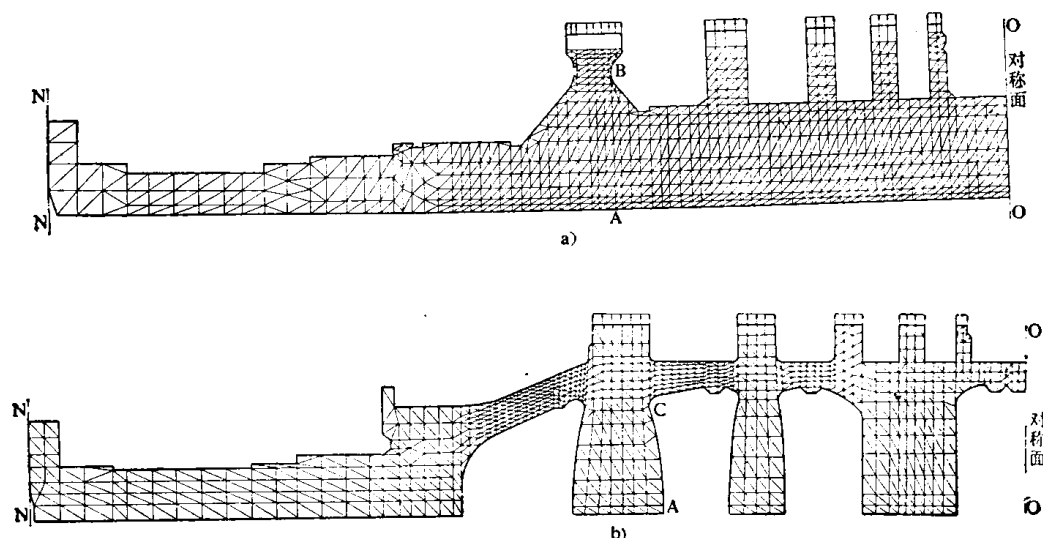


图19-1-3 汽轮机低压转子力学分析结构简图

a—整锻转子 b—焊接转子