



第5章 机械零部件的可靠性设计

- 5.1 概述
- 5.2 螺栓连接的可靠性设计
- 5.3 弹簧的可靠性设计
- 5.4 齿轮的可靠性设计
- 5.5 轴的可靠性设计
- 5.6 轴承的可靠性设计

第5章 机械零部件的可靠性设计

5.1 概述

1) 机械可靠性设计

- **基础:** 常规机械设计的原理、准则、计算方法
- **方法:** 将设计变量认为是服从某种分布的随机变量，并应用概率论与数理统计方法推导出可靠度计算表达式。
- **内容:** 在给定的可靠度条件下确定零件的参数和结构尺寸；或已知零件的参数和结构尺寸确定其可靠度及安全寿命。

2) 不同机械产品的故障后果及可靠度要求

故障后果		可靠度要求	机械产品类型
灾难性	失事 重大事故	$R(t) \geq 0.99999$ —1.0	飞行器、军事装备、 制动系统等
经济性	损失 重大	$R(t) \geq 0.999$	工艺装备、农业机械等
	一般 损失	$R(t) \geq 0.99$	
修理费用 在预算内		$R(t) < 0.9$	机器的不重要零部件

3) 产品的可靠度等级

可靠度等级	0	1	2	3	4	5
可靠度值 $R(t)$	< 0.9	≥ 0.9	≥ 0.99	≥ 0.999	≥ 0.9999	≥ 0.99999

4) 国外机械产品可靠性指标推荐值

产品类型	可靠性指标	可靠性指标数值
小汽车	$R(t=1a)$	0.9967
推土机行走机构	MTBF	4000—5000h
Volvo载重汽车	大修理周期	60万km
汽车变速箱	MTBF	20000h
军用汽车	MTBF	12年
滚动轴承	$R(N=10^6)$	0.9
履带式液压挖掘机	平均寿命	10000h

5.2 螺栓连接的可靠性设计

1) 受拉螺栓的连接

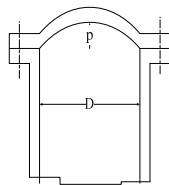
设计步骤:

- (1) 确定设计准则
- (2) 选择螺栓材料, 确定其强度分布
- (3) 确定螺栓的应力分布
- (4) 应用联结方程求解螺栓直径

■ 变异系数——材料的尺寸、加工、热处理等引起的材料强度变化, 为材料的强度标准差与其均值的比值。

受拉螺栓的连接的可靠性设计

实例: 已知某汽缸内径
 $D=380\text{mm}$,
 缸内工作压力 $p=0—1.7\text{MPa}$,
 螺栓数目 $n=8$, 采用金属
 垫片,
 试设计此缸盖的螺栓,
 且要求螺栓连接的可靠度
 $R=0.999999$ 。



算 例

5.2 螺栓连接的可靠性设计

2) 受剪切螺栓连接

- (1) 按受剪螺栓进行设计
- (2) 按挤压进行设计

设计步骤:

- (1) 确定设计准则
- (2) 选择螺栓材料, 确定其强度分布
- (3) 确定螺栓的应力分布
- (4) 应用联结方程求解螺栓直径

受剪切螺栓连接

■实例：已知某受剪切连接的螺栓，载荷F为等幅交变载荷，呈正态分布，其均值和标准差为 $F(\bar{F}, \sigma_F) = F(24000, 1440) N$
承剪面数n=2，预紧力忽略不计。从安全考虑，在10000个螺栓中，只允许有两次因螺栓失效引起的停工，请设计此连接螺栓。

5.2螺栓连接的可靠性设计

- 分析比较：
- 安全系数设计法
 - 可靠性设计法

5. 3弹簧的可靠性设计

弹簧是机械产品中的重要基础件之一。它的种类很多，按形状划分有：螺旋弹簧、板（片）簧、碟形弹簧、环形弹簧、平面（截锥）蜗卷弹簧等；按承载特点划分有：压缩、拉伸、扭转等弹簧。还有按成形方式、材质等划分弹簧的方法。
弹簧承受的应力主要有：弯曲应力、扭转应力、拉压应力和复合应力等。
弹簧的故障模式主要有：断裂、变形、松弛、磨损。其中最主析是断裂和变形。

弹簧的故障模式分类

模式分类		说 明
断裂	脆性断裂	弹簧断裂中绝大部属于脆性断裂。只有当工作温度较式时，才有可能出现塑性断裂（如切变形断裂及蠕变断裂等）。在工程上把疲劳断裂、应力腐蚀断裂及氢脆断裂等称为脆性断裂
	疲劳断裂	弹簧在循环载荷作用下的断裂
	应力腐蚀断裂	在拉应力和腐蚀介质共同作用下引起弹簧断裂现象
	腐蚀疲劳断裂	弹簧在循环载荷和腐蚀介质共同作用下发生的断裂
	氢脆、蠕脆、黑脆	由于弹簧材料中有有害物质含量过高引起的脆断
松弛或变形		
磨损		磨损分为：磨料、疲劳和腐蚀磨损

弹簧常规设计的主要公式:

最大剪切应力 τ

$$\tau = k \frac{8FD}{\pi d^3}$$

曲度系数 K_s

$$K_s = \frac{4C-1}{4C+1} + \frac{0.615}{C}$$

弹簧指数 C

$$C = \frac{D}{d}$$

弹簧常规设计的主要公式:

弹簧受载后的轴向变形 y

$$y = \frac{8FD^3n}{Gd^4}$$

弹簧刚度 k

$$k = \frac{F}{y} = \frac{Gd^4}{8D^3n}$$

5. 3 弹簧的可靠性设计

■ 圆柱型螺旋弹簧的可靠性设计

- (1) 确定失效应力分布
- (2) 确定强度分布
- (3) 计算可靠度

■ 实例：一螺旋压缩弹簧的参数如下，试确定下列问题：

- (1) 在设计寿命为 $N=5 \times 10^4$ 次时的可靠度；
- (2) 在设计寿命为 $N \geq 10^6$ 次时的可靠度；

参 数	均 值	标准差
d	2.0mm	0.008mm
D	16.0mm	0.0928mm
G	79250MPa	1585MPa
n	14	0.0833
Y	20mm	0.4mm
σ_b	1667MPa	84MPa

5. 4齿轮的可靠性设计




- 1) 齿轮轮齿的故障模式及其特征
- 2) 齿轮可靠性设计的基本方法
- 3) 齿面接触疲劳强度的可靠性设计
- 4) 齿根弯曲疲劳强度的可靠性设计

1) 齿轮轮齿的故障模式及其特征

	故障模式特征	举 例	损坏部位示意图
表面接触疲劳损伤	麻点疲劳剥落 在轮齿节圆附近，由表面产生裂纹，造成深浅不同的点状或豆状凹坑	承受较高的接触应力的软齿面（正火调质状态）和部分硬齿面齿轮	
	浅层疲劳剥落 在轮子齿节圆附近，由内部或表面产生裂纹，造成深浅不同、面积大小不同的片状剥落	承受高接触应力的重载硬齿面（表面经强化处理）齿轮	
	硬化层剥落 经表面强化处理的齿轮在很大接触应力作用下，由于应力/强度比值大于0.55，在强化层过渡区产生平行于表面的疲劳裂纹，造成硬化层压碎，大块剥落	承受高接触应力的重载硬齿面（表面经强化处理）齿轮	

齿轮弯曲断裂	疲劳断齿 表面硬化（渗碳、碳氮共渗、感应淬火等）齿轮，一般在轮齿承受最大交变弯曲应力的齿根根部产生疲劳断裂。断口呈疲劳特征	承受弯曲应力较大的变速箱齿轮和最终传动齿轮等	
	过载断齿 一般发生在轮齿承受最大弯曲应力的齿根部位，由于材料脆性过大或突然受到过载和冲击，在齿根处产生脆性折断，断口粗糙	变速箱齿轮等	

磨损	磨粒磨损 润滑介质中含有类角硬质颗粒和金属屑粒，犹如刀刃切削轮齿表面，使齿面几何形状发生畸变，严重时会使齿顶变尖，磨得像刀刃一样	在有灰沙环境工作的开式齿轮，矿山机械传动齿轮等	
	腐蚀磨损 在润滑介质中含有化学腐蚀成分，与材料表面发生化学和电化学反应，产生红褐色腐蚀产物（主要是三氧化二铁），受啮合摩擦和润滑剂的冲刷而脱落	在化学腐蚀环境中工作的齿轮	
	胶合磨损 轮齿表面在相对运动时，由于速度大，齿面接触点局部温度升高（热胶合）或低速重载（冷胶合）使表面油膜破坏，产生金属局部粘附而又撕裂，一般在接近齿顶或齿根部位速度大的地方，造成与轴线重直的刮伤痕迹和细小密集的粘焊节瘤，齿面被破坏，噪音变大	高速传动齿轮、蜗杆等	
	齿端冲击磨损 变速箱换挡齿轮在换挡时齿端部受到冲击载荷，使齿端部产生磨损、打毛或崩角	变速箱换挡齿轮受多次换挡冲击载荷作用	

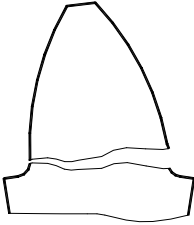
齿面塑性变形	塑性变形 在瞬时过载和摩擦力很大时，软齿面齿轮表面发生塑性变形，呈现凹沟、凸角和飞边，甚至使齿轮扭曲变形造成轮齿塑性变形	软齿面齿办过载	
	压痕 当有外界异物或从轮齿上脱落的金属碎片进入啮合部位，在齿面上压出凹坑，一般凹痕线平，严重时会使轮齿局部变形	齿轮啮合时有异物压入	
	塑性折皱 硬齿面齿轮（尤其是双曲线齿轮）当短期过载摩擦力很大时，齿面出现塑性变形现象，呈波纹形折皱，严重破坏齿廓	硬齿面齿轮过载	

齿轮故障模式所占比例		
序 号	齿轮故障模式	占总故障模式所占比例/%
1	疲劳断齿	32.8
2	过载断齿	19.5
3	轮齿碎裂	4.3
4	轮子裂撕裂	4.6
5	表面疲劳	20.3
6	表面磨损	13.2
7	齿面塑性变形	5.3

失效形式

1.轮齿折断

- 齿根弯曲应力大;
- 齿根应力集中

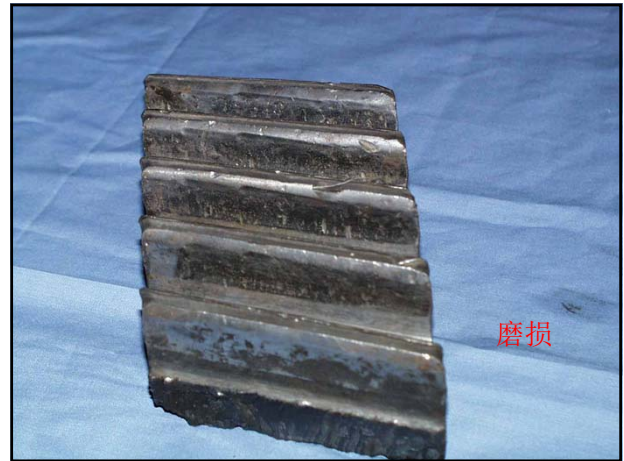
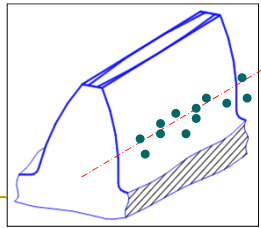




失效形式

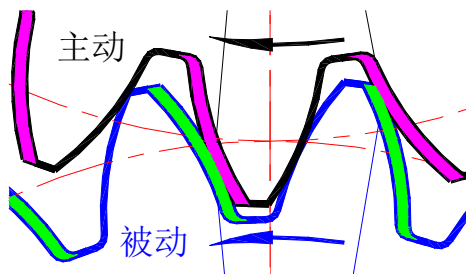
2. 齿面点蚀

- 轮齿在节圆附近一对齿受力
- 载荷大；滑动速度低形成油膜条件差；
- 接触疲劳产生的小裂纹-扩展-脱落-凹坑。



失效形式

3. 齿面磨损 砂粒、金属屑



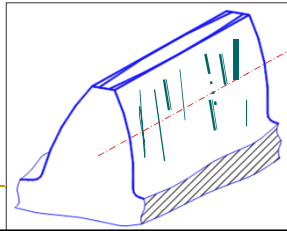
失效形式

4. 齿面胶合

高速重载；散热不良；
滑动速度大；
齿面粘连后撕脱

措施：

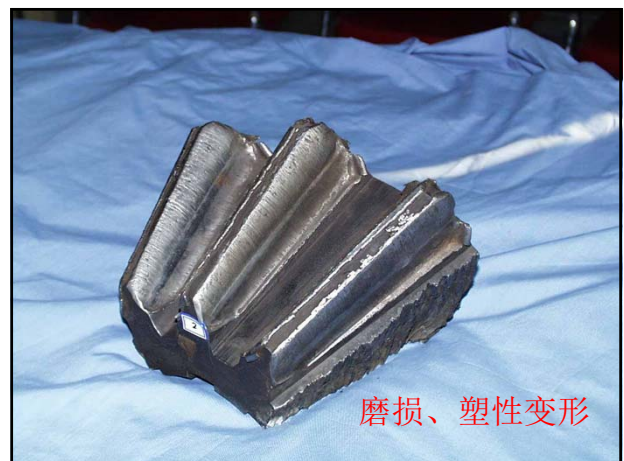
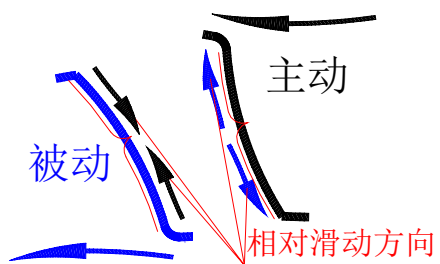
减小模数，降低齿高；
抗胶合能力强的润滑油；
材料的硬度及配对



齿面胶合

失效形式

5. 齿面塑性变形



磨损、塑性变形

2) 齿轮可靠性设计的基本方法

以常规设计作为基础，以其设计参数作为随机变量，将由设计手册中查得的有关数据按统计量处理。

3) 齿面接触疲劳强度的可靠性设计

- (1) 确定齿面接触应力的分布参数
- (2) 确定齿面接触疲劳强度的分布参数

4) 齿根弯曲疲劳强度的可靠性设计

- (1) 确定齿根弯曲应力的分布参数
- (2) 确定齿根弯曲疲劳强度的分布参数
- (3) 计算齿根弯曲疲劳强度下齿轮的可靠度

5. 5轴的可靠性设计

- 1) 轴的力学模型
- 2) 传动轴的可靠性设计
- 3) 心轴的可靠性设计
- 4) 转轴的可靠性设计
- 5) 轴的刚度可靠性模型
- 6) 轴强度可靠性模型的应用

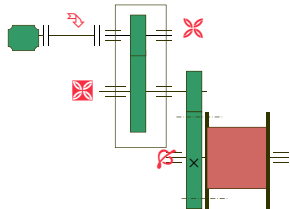
轴件的故障模式

模式分类	说 明
断裂	静载断裂
	冲击断裂
	应力腐蚀及腐蚀疲劳断裂
	疲劳断裂
表面损伤	磨损
	腐蚀
	接触疲劳
塑性变形	超出设计允许的过度的弹性、塑性变形。

1) 轴的力学模型

- 心轴——弯矩作用（弯曲变形）
- 传动轴——扭矩作用（扭转变形）
- 转轴——弯扭作用（弯曲与扭转变形）

- 传动轴：扭矩 T
- 心轴：弯矩 M
- 转轴： $T + M$



2) 传动轴的强度可靠性模型

- 传动轴的应力分布
- 传动轴的静强度分布
- 传动轴的剪切疲劳强度极限分布
- 传动轴的强度可靠性模型

常用国产机械材料剪切疲劳强度极限

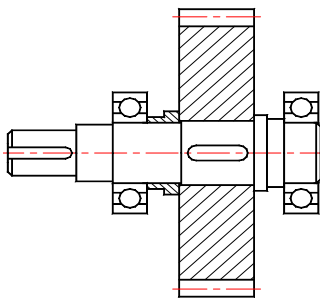
材 料	δ_{-1}/MPa	材 料	δ_{-1}/MPa
45(正火)	167.9	40Cr(调质)	296.9
45(调质)	200.3	40CrNiMo(调质)	407.9

3) 心轴的强度可靠性模型

- 心轴的应力分布
- 心轴的静强度分布
- 心轴的对称弯曲疲劳强度极限分布
- 心轴的强度可靠性模型

4) 转轴的强度可靠性模型

- 转轴的应力分布
- 转轴的静强度分布
- 转轴的疲劳强度极限分布
- 转轴的强度可靠性模型



1. 作出轴的受力图，计算支反力；

2. 作出弯矩图

水平弯矩 M_{xy}

垂直弯矩 M_{xz}

3. 合成弯矩: $M = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2}$

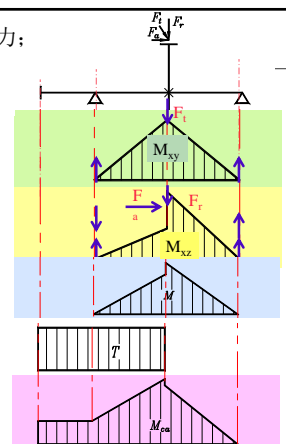
4. 作出扭矩图 T

5. 作出当量弯矩图

$$M' = \sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}$$

6. 强度校核

$$\sigma_b = \frac{M'}{W} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{W}$$



5) 轴的刚度可靠性模型

- 轴的变形
- 轴的刚度可靠性模型

6) 轴强度可靠性模型的应用

- 轴的可靠性预测
- 轴的可靠性设计

5.6轴承的可靠性设计

- 受力——径向力、轴向力（交变载荷）
- 失效——接触疲劳破坏
- 特点——寿命差异很大
- 疲劳寿命—— $t_0=0$ 的二参数威布尔分布（失效概率 $F(t)=0.07—0.60$ 时）
- t_{90} ——指可靠度为90%时对应的寿命（额定寿命为1000万转）

再见

liuhunju@163.com