

# Lecture 02

## Design Constraints in Mechanical Systems

### 第二章 机械系统的设计约束

ME303 Introduction to Mechanical Design

Adapted from <https://www.icourse163.org/course/HUST-1206698847>

# Design Requirements in Machinery Design

机械系统的设计要求

# The Need for Machinery Design

## 机械设计的需求

### 需求层次理论

科技始于人性  
设计始于需求



# The Need for Machinery Design

## 机械设计的需求

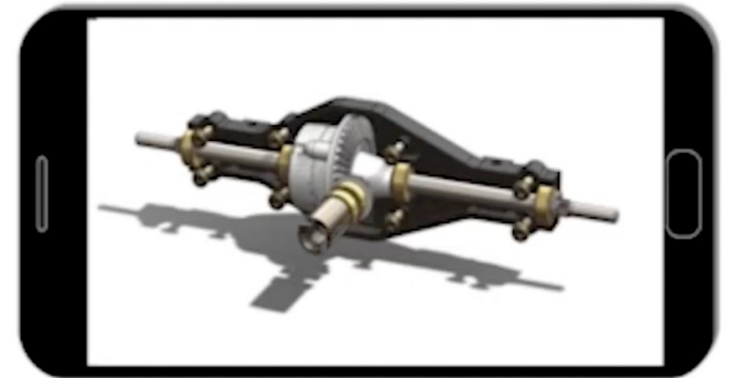
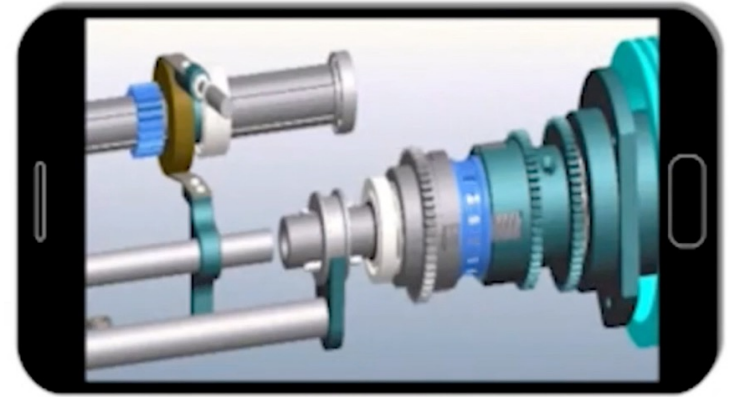
### 机械与人的关系

#### 机械产品的特点1:人为

- 人的主观思维作用于客观世界的产物
- 人为的创造性的建构过程和对象性活动

#### 机械产品的特点2:为人

- 解决自然界与人之间的矛盾
- 改变和改善人类生存发展的境遇
- 根本目的是为人服务





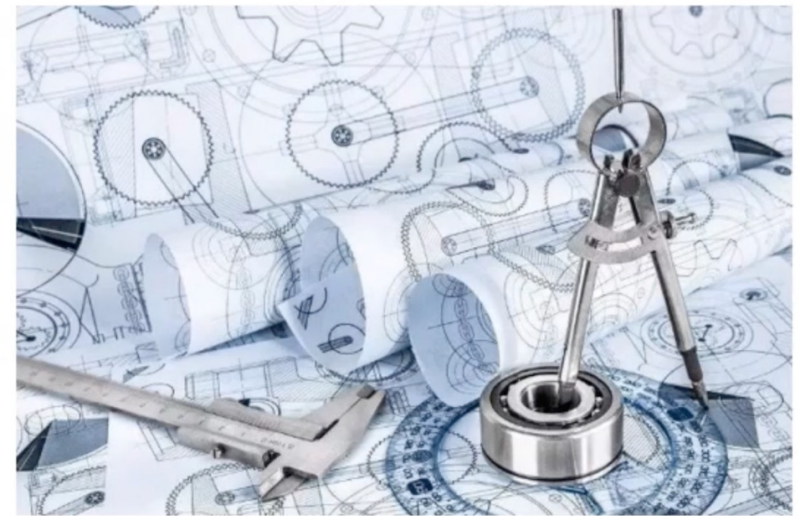
# The Need for Machinery Design

## 机械设计的需求

### 机械与人的关系

- 以人为本

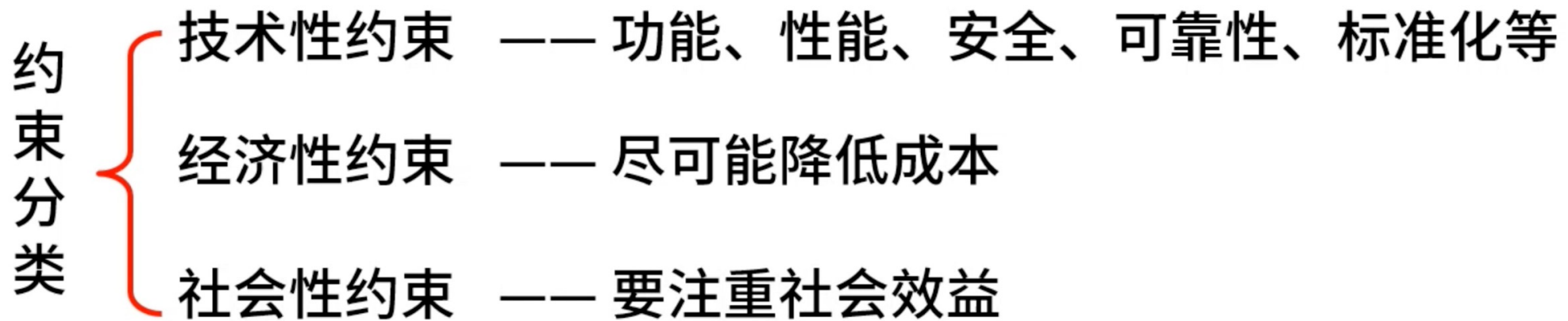
机械设计必须从人的角度出发，尊重人、理解人、关心人，为人服务，脱离了人的存在的设计没有意义



# Type of Constraints in Machinery Design

## 机械设计的要求分类

机械设计的过程就是在满足各种约束前提下，寻求较优的设计方案。



# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 功能约束

主要功能须达到设计要求。

### 性能约束

技术性能须达到设计要求。

如功率、效率、强度、刚度、寿命、耐磨性、振动稳定性等。

# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 安全性约束

零部件、整机的安全性，工作及环境的安全性。

### 可靠性约束

产品、零部件应满足规定的可靠性要求。

### 标准化约束

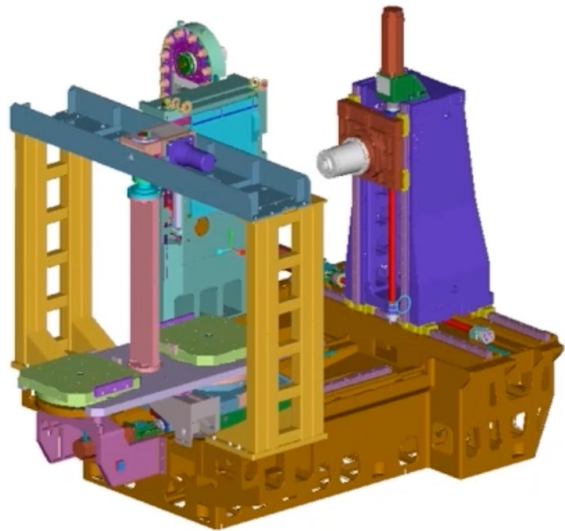
概念、实物形态、方法、技术文档符合标准化要求。

# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 1. 功能约束

主要功能须达到设计要求。



制造者

工艺性好  
结构简单  
重量轻

用户

质量好  
效率高  
操作维护方便  
价格低廉



专用机床：工艺范围窄 → 结构简单、自动化程度高

普通机床：工艺范围宽 → 结构复杂、自动化程度低



# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 2. 性能约束

技术性能须达到设计要求。

如功率、效率、强度、刚度、寿命、耐磨性、振动稳定性等。

#### □ 精度保持性

机床保持其原始加工精度的能力

影响因素

机床精度

机床刚度

机床热变形

机床抗振性

残余应力引起的变形磨损

# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

- 噪声：机械、液压、电磁、空气动力等噪声
- 低速运动的平稳性
  - 低速运动时，主动件匀速运动，被动件出现速度不均匀的跳跃运动，即时走时停 或者时快时慢
  - 措施：提高刚度、阻尼比，降低质量，减少动静摩擦因数差



# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 3. 安全性约束

机器的安全性包括四个方面的内容：

- (1) 零件安全性：在规定外载荷和规定时间内，零件不发生如断裂、过度变形，过度磨损现象和不丧失稳定性，等等。
- (2) 整机安全性：机器保证在规定条件下不出故障，能正常实现总功能的要求。
- (3) 工作安全性：保证操作人员的人身安全和身心健康等。
- (4) 环境安全性：机械对周围环境和人不造成危害和污染。

# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 4. 可靠性约束

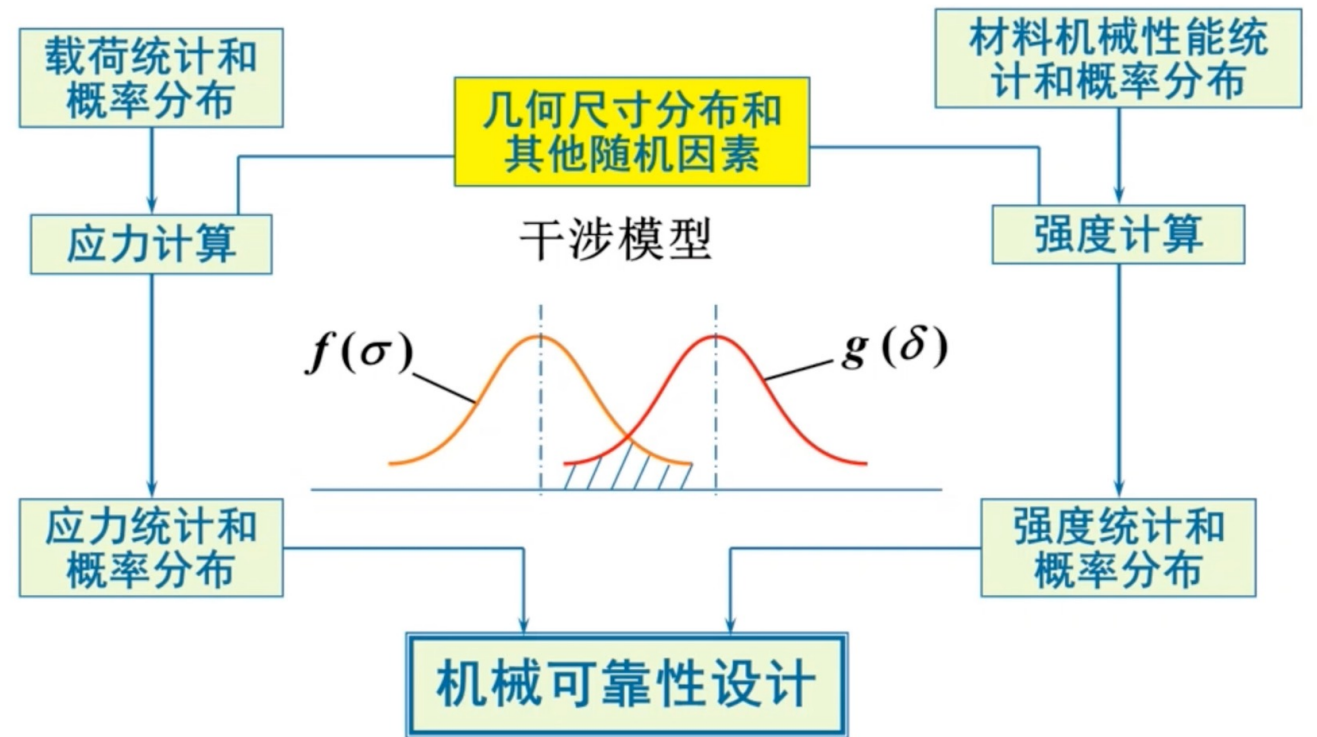
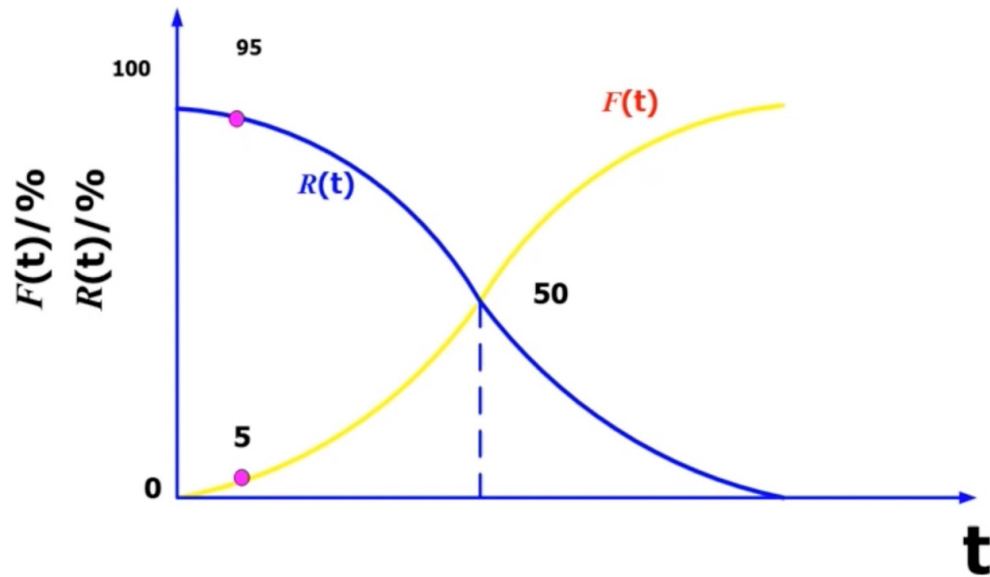
产品、零部件应满足规定的可靠性要求。

- 无故障性 — 机床在使用过程中不易发生故障
- 维修性 — 机床发生故障后容易维修



# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束



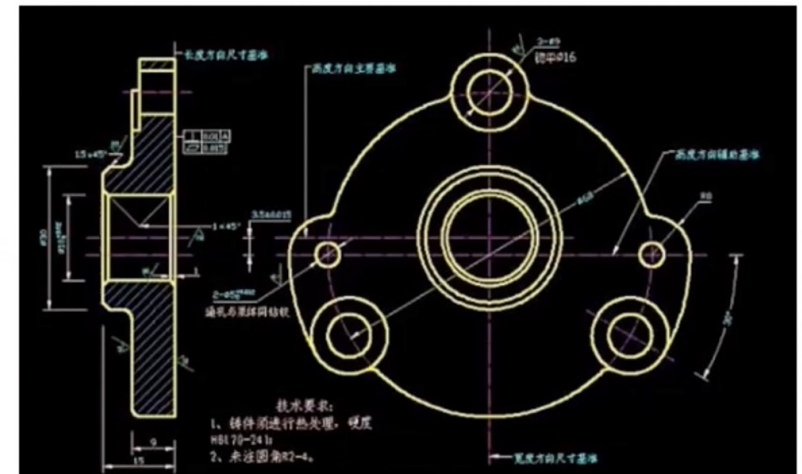
# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

### 5. 标准化约束

概念、实物形态、方法、技术文档符合标准化要求。

市场对待加工件的尺寸、结构和材料、精度等要求多样，单一规格产品无法满足市场需求。需要设计制造出：尺寸规格、功率参数和精度不同的系列产品投放市场





# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

- 系列化设计的概念

在设计中的某一类产品中，选择功能、结构和尺寸等方面较典型的产品为基型，以它为基础，设计出其它各种尺寸参数的产品，构成产品基型系列

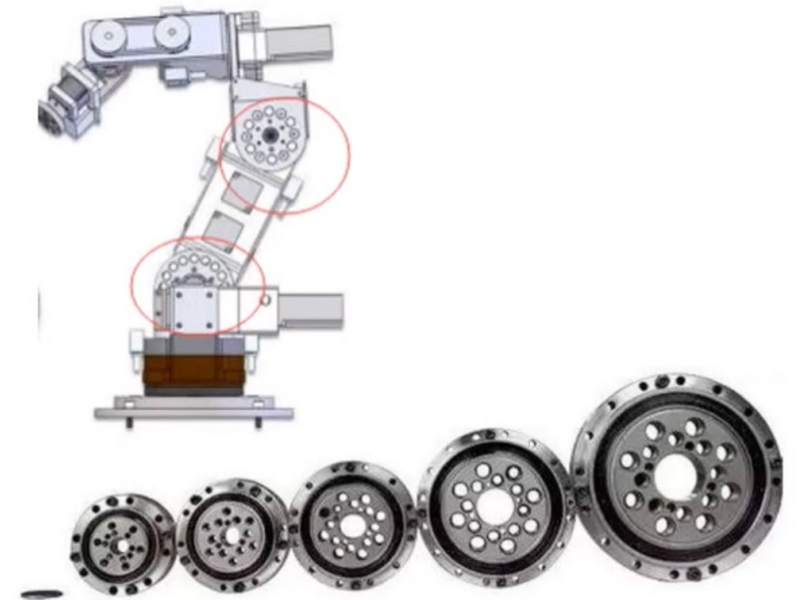
- ◆ 需编制反映基型系列和派生系列关系的产品系列型谱
- ◆ 系列化设计应遵循“产品系列化、零部件通用化、标准化”原则，包括：“结构的典型化”，即所谓的“四化”原则

# Technical Constraints in Machinery Design

## 机械设计的技术性约束

- 系列化设计的特点

- ◆ 减少品种规格，隐形提高批量；基础性减少风险，缩短周期；产品相似，工装减少；便于维修；变型设计技术的基础
- ◆ 产品覆盖一定谱宽，谱宽设计准确比较难，用户体验不完美

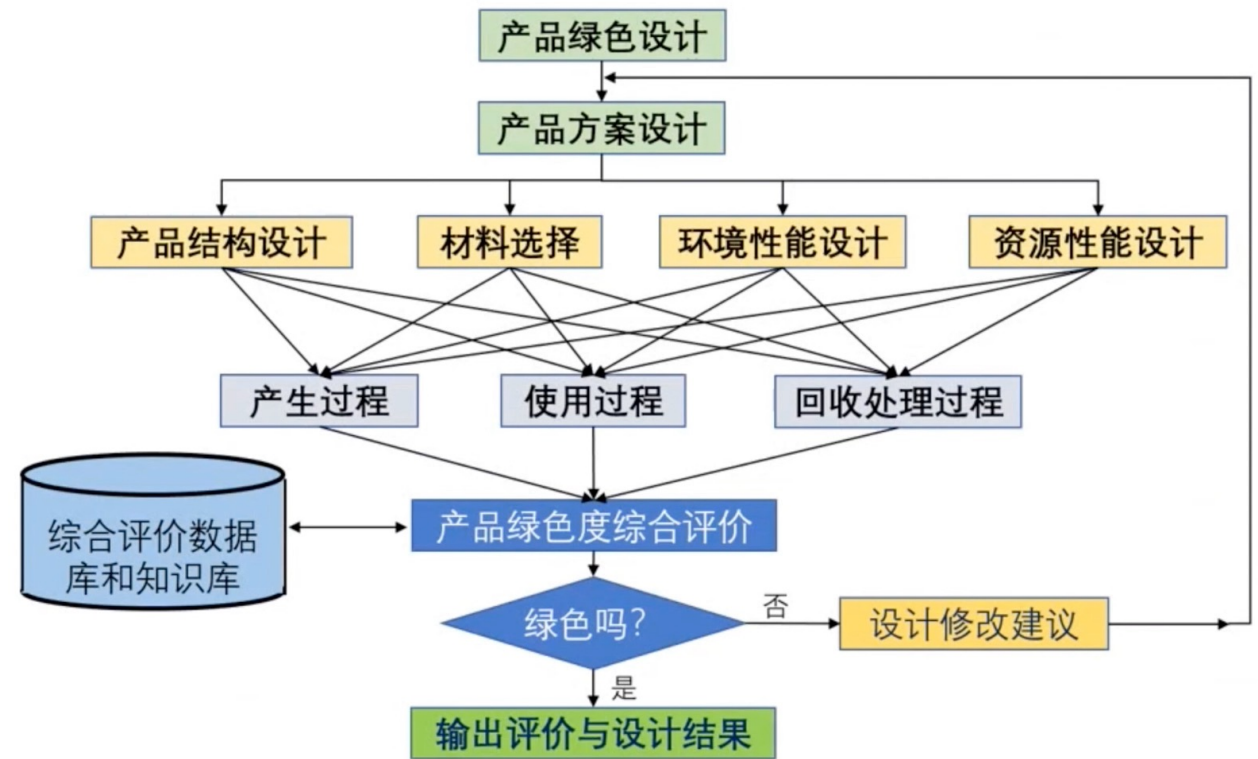


# Social Constraints in Machinery Design

## 机械设计的社会性约束

### 1. 可持续性发展要求

- ◆ “天人合一”与“无为”；
- ◆ “保护环境，就是保护生产力；改善环境，就是发展生产力”
- ◆ 制造各阶段都必须充分计及环境保护：自然环境，社会环境、生产环境、生产者的身心健康；
- ◆ 制造必然要走向“绿色”制造，这是实现国民经济可持续发展的重要条件。



绿色设计的体系结构

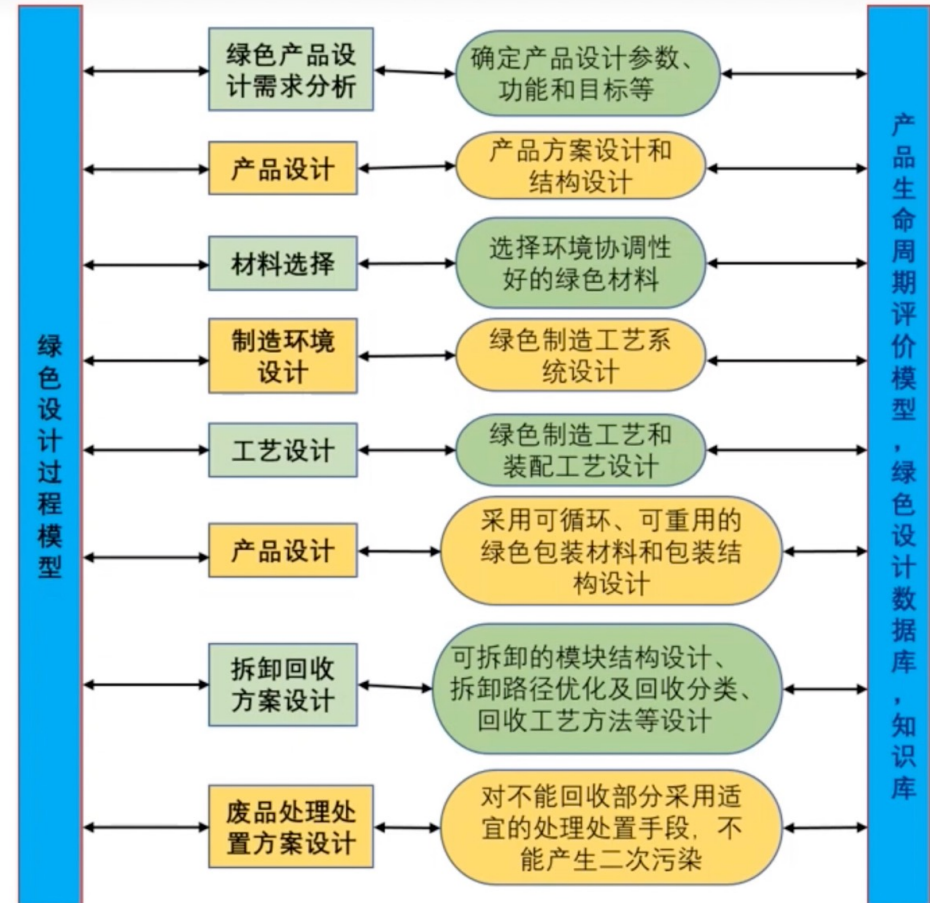


# Social Constraints in Machinery Design

## 机械设计的社会性约束

### 1. 可持续性发展要求

- ◆ “天人合一”与“无为”；
- ◆ “保护环境，就是保护生产力；改善环境，就是发展生产力”
- ◆ 制造各阶段都必须充分计及环境保护：自然环境，社会环境、生产环境、生产者的身心健康；
- ◆ 制造必然要走向“绿色”制造，这是实现国民经济可持续发展的重要条件。



绿色设计的全过程

# Social Constraints in Machinery Design

## 机械设计的社会性约束

### 2. 工程伦理要求

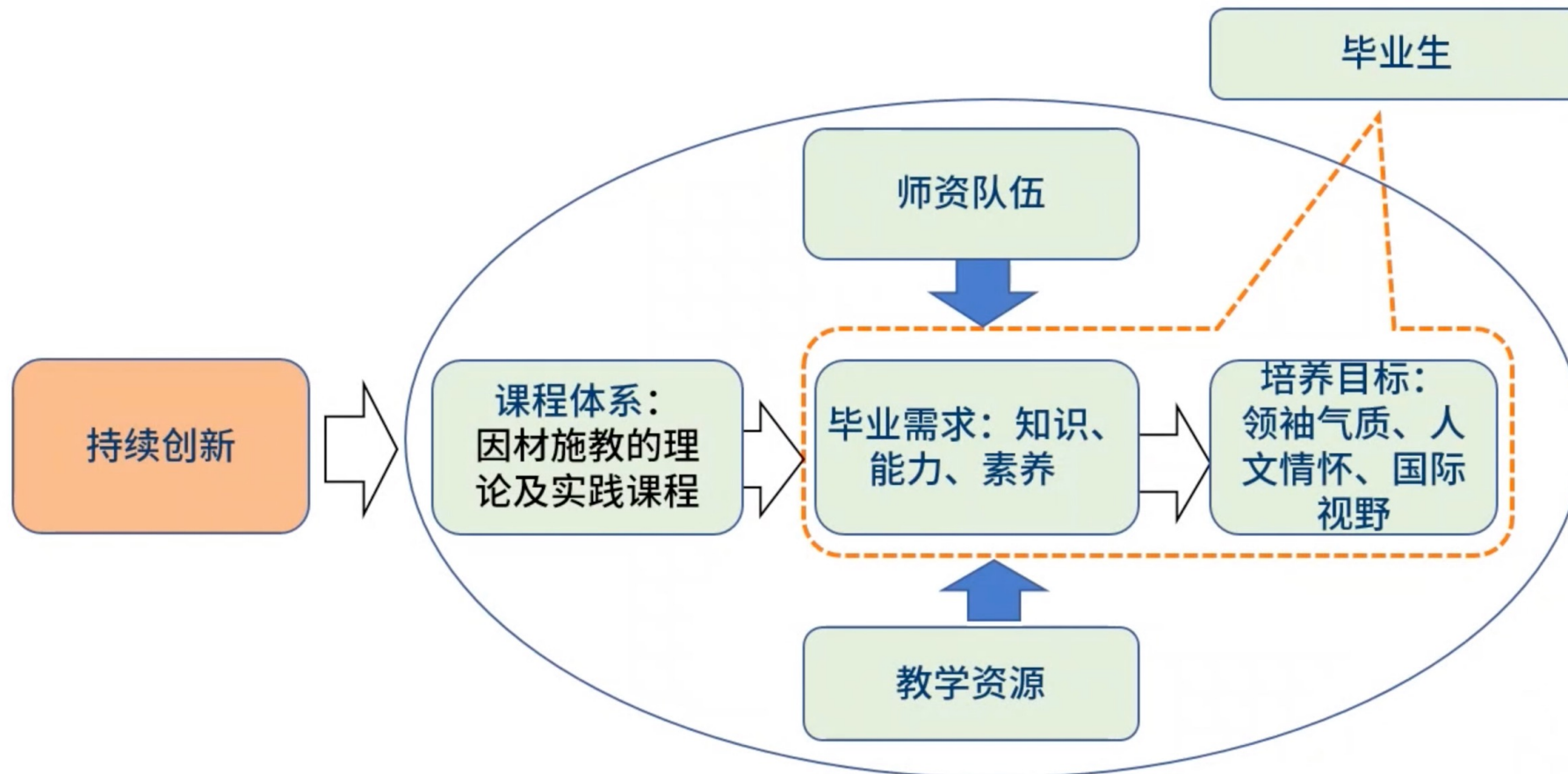
培养具有“伦理意识”的现代工程师，以造福人类和可持续发展为理念的工程师，才能在面临着忠诚于股东还是公众的利益冲突等道德困境时做出正确的判断和选择。



# Social Constraints in Machinery Design

## 机械设计的社会性约束

“有责任创新”和“符合公众利益”的工程实践的主体。



# Social Constraints in Machinery Design

## 机械设计的社会性约束

### 3. 法律及规范

#### 法律

目前，我国涉及设计过程，规范设计行为和设计活动的法律、法规主要包括：《中华人民共和国民法通则》、《中华人民共和国标准化法》、《中华人民共和国计量法》、《中华人民共和国环境保护法》、《水污染防治法实施细则》、《固体废物污染环境防治法》、《环境噪声污染防治法》、《产品质量法》、《专利法》、《新产品、新技术鉴定验收管理办法》等。

#### 规范

中国机械工程学会于2003年制定颁布了《机械工程师职业道德规范》

# Failure Modes and Design Principals of Mechanical Parts

机械零件的失效形式与设计准则



# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

—**断裂** 如轴、齿轮轮齿发生断裂



# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

—**断裂** 如轴、齿轮轮齿发生断裂

—**表面点蚀** 表面材料片状剥落





# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

- 断裂** 如轴、齿轮轮齿发生断裂
- 表面点蚀** 表面材料片状剥落
- 塑性变形** 零件发生永久性变形

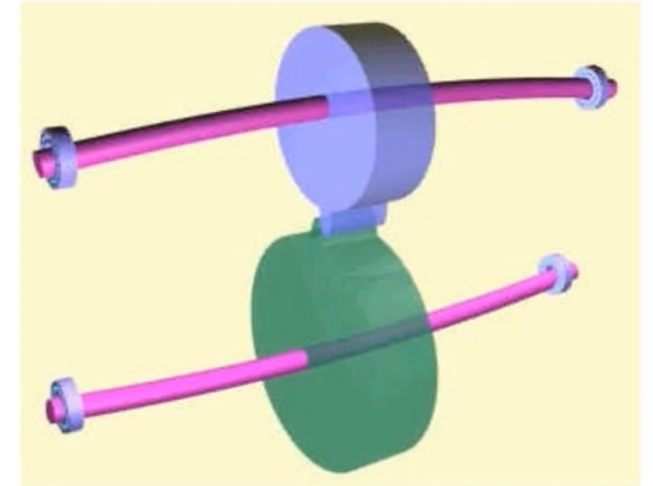


# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

- 断裂 如轴、齿轮轮齿发生断裂
- 表面点蚀 表面材料片状剥落
- 塑性变形 零件发生永久性变形
- 过大弹性变形



# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

- 断裂 如轴、齿轮轮齿发生断裂
- 表面点蚀 表面材料片状剥落
- 塑性变形 零件发生永久性变形
- 过大弹性变形
- 过度磨损



# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

- 断裂 如轴、齿轮轮齿发生断裂
- 表面点蚀 表面材料片状剥落
- 塑性变形 零件发生永久性变形
- 过大弹性变形
- 过度磨损
- 过大振动和噪声、过热等

# Failure Modes of Mechanical Parts

## 机械零件的失效形式

失效—丧失工作能力或达不到设计要求的性能，  
不仅仅指破坏。失效形式主要有：

- 断裂 如轴、齿轮轮齿发生断裂
  - 表面点蚀 表面材料片状剥落
  - 塑性变形 零件发生永久性变形
  - 过大弹性变形
  - 过度磨损
  - 过大振动和噪声、过热等
- 强度问题
- 刚度问题
- 耐磨性问题
- 稳定性问题

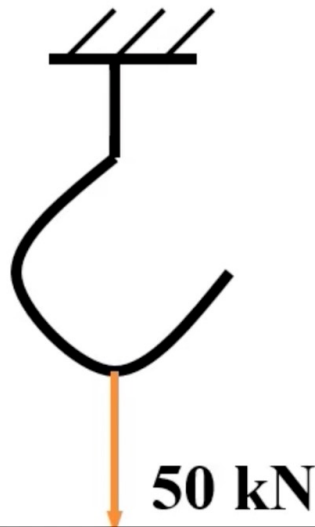
# Load Capacity of Mechanical Parts

## 机械零件的承载能力

零件的工作能力 ——

不失效条件下零件的安全工作限度

这个限度通常是以零件承受载荷的大小来表示，  
所以又常称为“**承载能力**”



吊钩最大起重量——50 kN

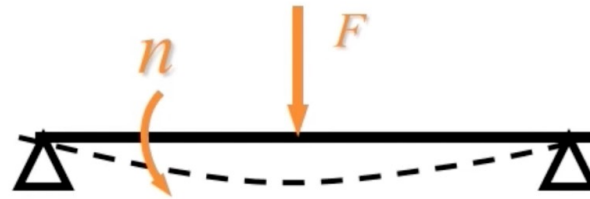
工作能力或承载能力——50 kN



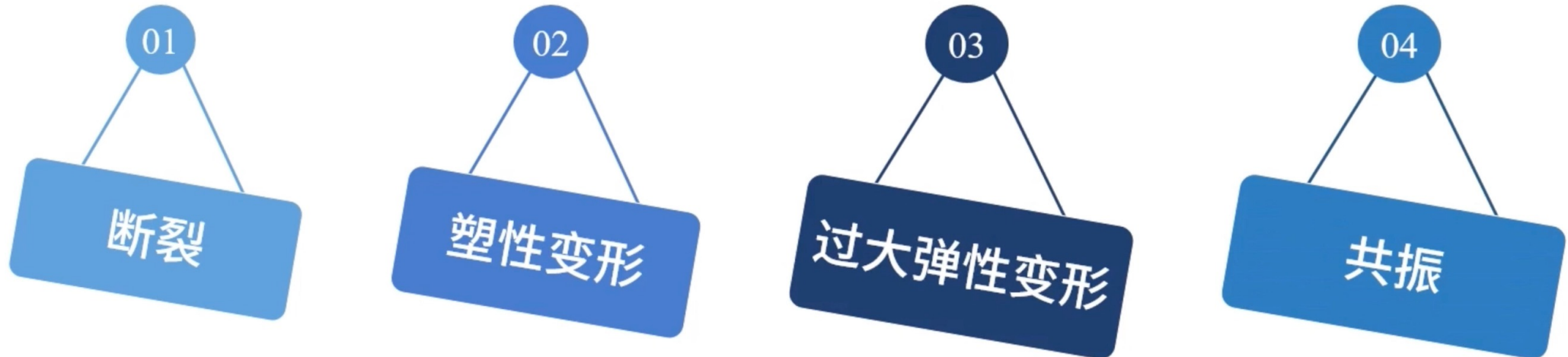
# Determining Load Capacity – Design Principals

承载能力的判定条件 – 设计准则

同一零件可能发生各种不同形式的失效



轴可能出现的失效形式:





# Determining Load Capacity – Design Principals

## 承载能力的判定条件 – 设计准则



### 强度条件:

工作应力  $\leq$  许用应力

$$\sigma \leq [\sigma] \text{ 或 } \tau \leq [\tau]$$



### 刚度条件:

实际变形量  $\leq$  许用变形量

$$y \leq [y]、\theta \leq [\theta]、\varphi \leq [\varphi]$$



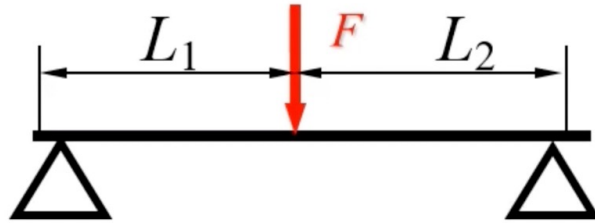
### 稳定性条件

工作转速  $n \leq$  许用转速  $[n]$

# Design Procedures for Mechanical Parts

## 机械零件的设计步骤

- 1) 拟订零件的设计简图;
  - 2) 确定载荷的大小及位置;
- } 受力分析



- 3) 选择材料;
- 4) 根据失效形式选用承载能力判定条件, 设计或校核零件的主要参数;

强度条件 (或刚度)  $\xrightarrow{\text{设计计算}}$  尺寸

设计式

尺寸  $\xrightarrow{\text{校核计算}}$  强度条件 (或刚度)

校核式

- 5) 结构设计, 绘制零件工作图。

# Load and Stress Classification

载荷与应力的分类

# Classification of Payload

## 载荷的分类

载荷 — 作用于零件上的力或力矩

**静载荷** —— 不随时间改变或变化缓慢  
**变载荷** —— 随时间作周期性或非周期性变化

**工作载荷** —— 正常工作时的实际载荷  
**名义载荷** —— 理想工作条件下的载荷  
**计算载荷** —— 考虑附加载荷后的载荷值

$$\text{计算载荷} = K \times \text{名义载荷}$$

└─ 载荷系数  $\geq 1$

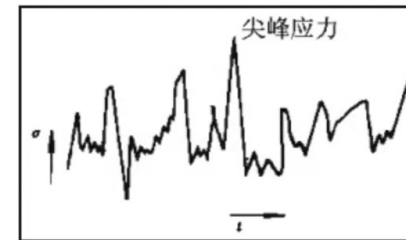
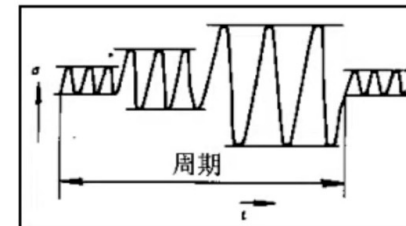
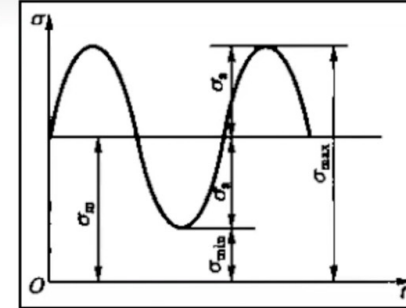
$$\text{即: } F_{ca} = KF \quad \text{或} \quad T_{ca} = KT$$

# Classification of Stress

## 应力的分类

载荷引起的表面应力或体积应力

- 静应力 —— 不随时间改变或变化缓慢
- 变应力 —— 随时间作周期性或非周期性变化
  - 稳定循环变应力 —— 周期性变应力
  - 非稳定循环变应力 —— 参数有变化
  - 随机变应力 —— 非周期性变应力





# Classification of Stress

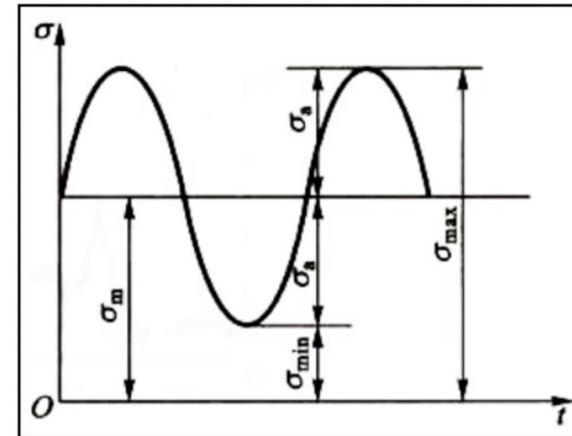
## 应力的分类

稳定循环变应力

对称循环变应力

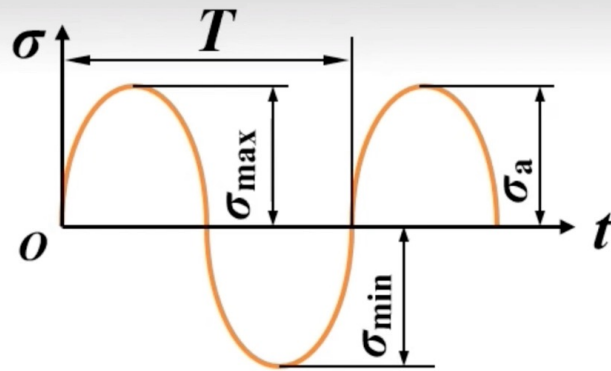
脉动循环变应力

非对称循环变应力

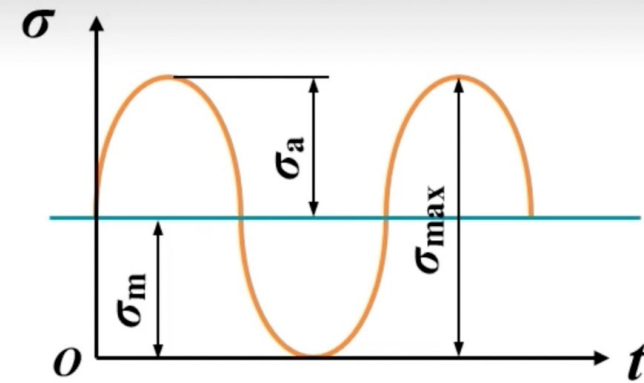


# Classification of Stress

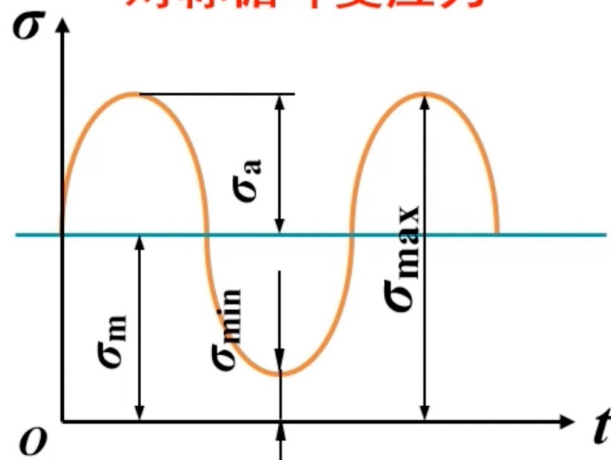
## 应力的分类



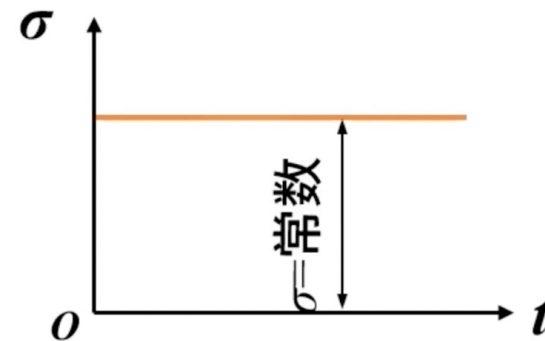
对称循环变应力



脉动循环变应力



非对称循环变应力

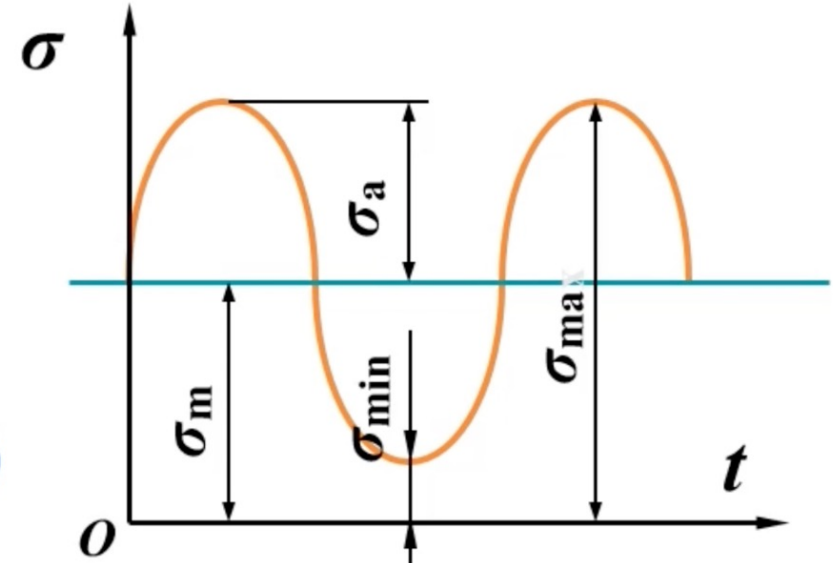


静应力

# Parameters for Variable Stress

## 变应力的参数特性

- 最大应力  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$
- 最小应力  $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$
- 应力幅  $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$  (总为正)
- 平均应力  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$
- 循环特征  $r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$



定义规则:

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别为绝对值最大、最小的应力值;

已知任意两个参数, 可确定其余参数

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  在横轴同侧时,  $r$  取“+”号; 否则,  $r$  取“-”号

用  $\sigma_r$  表示循环特征为  $r$  的变应力

$$-1 \leq r \leq +1$$

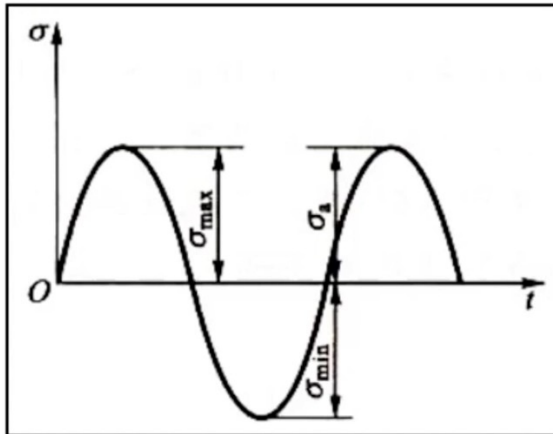
# Parameters for Variable Stress

## 变应力的参数特性

### ● 对称循环变应力

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$$

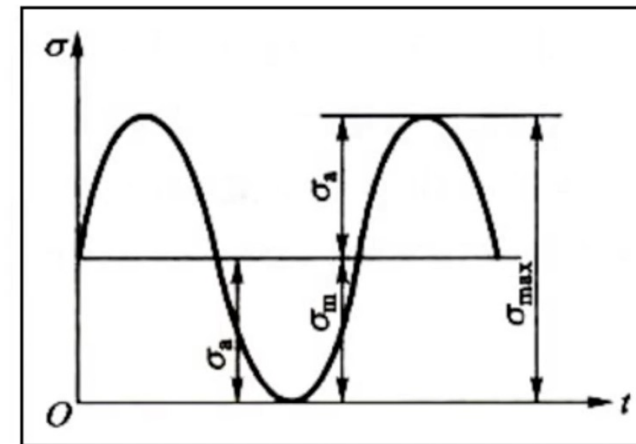
$$\sigma_m = 0; \sigma_a = \sigma_{\max}$$



$$r = -1$$
$$\sigma_{-1}$$

### ● 脉动循环变应力

$$\sigma_{\min} = 0; \sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

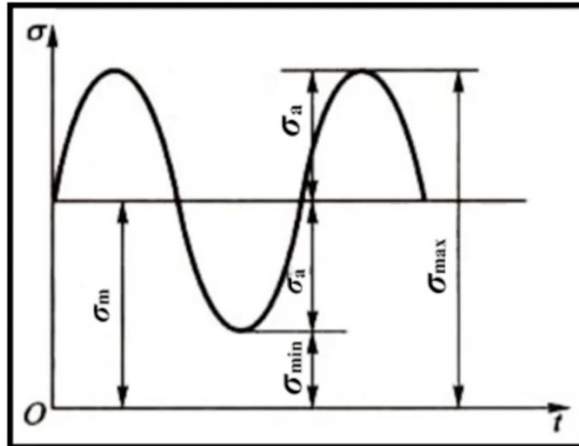


$$r = 0$$
$$\sigma_0$$

# Parameters for Variable Stress

## 变应力的参数特性

- 非对称循环变应力  
一般情况

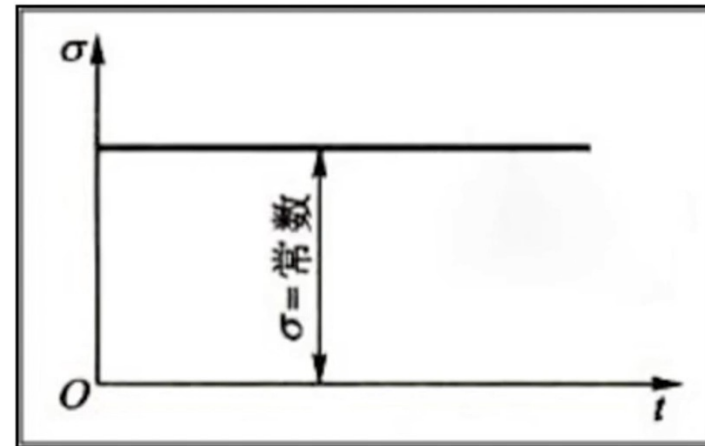


$-1 < r < +1$   
如:  $r = 0.3$

$\sigma_{0.3}$

- 静应力

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_m; \sigma_a = 0$$



$r = +1$

$\sigma_{+1}$



# Fatigue Strength - 1

疲劳强度 - 1

# Static Strength

静应力作用下的强度问题（静强度）

主要失效形式：塑性变形 或 脆性断裂

以许用应力为约束的强度条件

正应力作用时： $\sigma_{ca} \leq [\sigma]$

剪应力作用时： $\tau_{ca} \leq [\tau]$

计算应力： $\sigma_{ca}$ 、 $\tau_{ca}$

许用应力： $[\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]}$ ； $[\tau] = \frac{\tau_{lim}}{[S]}$

$\sigma_{lim}$ 、 $\tau_{lim}$  — 极限应力； $[S]$  — 安全系数

# Static Strength

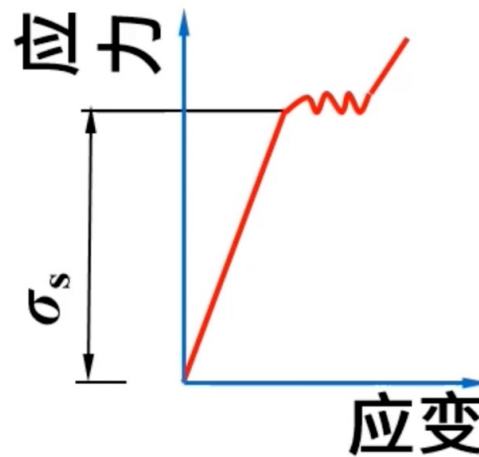
静应力作用下的强度问题（静强度）

塑性材料： $\sigma_{\text{lim}} = \sigma_s$ ； $\tau_{\text{lim}} = \tau_s$

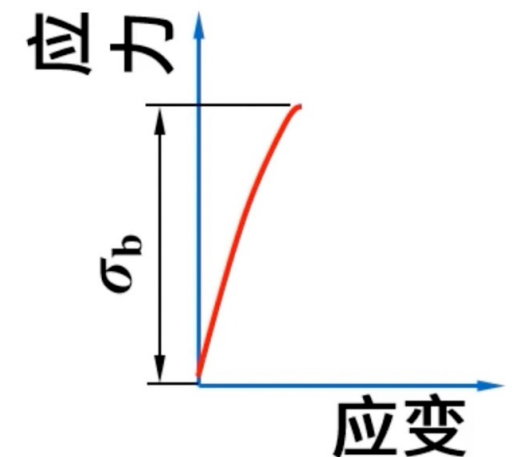
$\sigma_s$ 、 $\tau_s$ —材料屈服极限

脆性材料： $\sigma_{\text{lim}} = \sigma_b$ ； $\tau_{\text{lim}} = \tau_b$

$\sigma_b$ 、 $\tau_b$ —材料强度极限



塑性材料



脆性材料

# Static Strength

静应力作用下的强度问题（静强度）

## 以安全系数为约束的强度条件

计算安全系数

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{正应力作用时: } S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma_{\text{ca}}} \geq [S] \\ \text{剪应力作用时: } S_{\tau} = \frac{\tau_{\text{lim}}}{\tau_{\text{ca}}} \geq [S] \end{array} \right.$$

许用安全系数： $[S]$ ，通常  $[S] \geq 1$

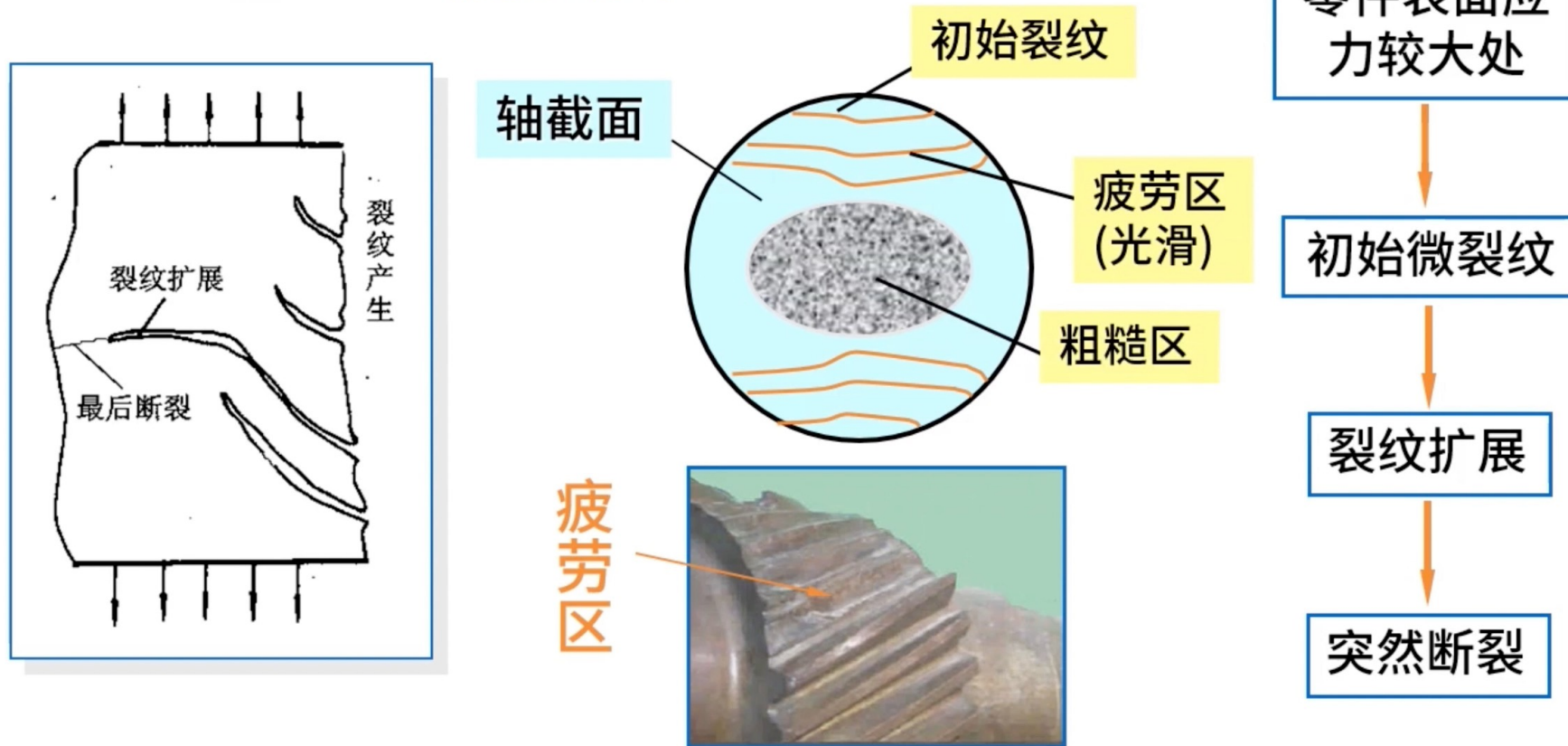
重要情况下或受力分析等精确性较差时  $[S]$  取大些；  
否则， $[S]$  取小些。

# Failure Theory Under Variable Stress

变应力作用下零件的失效机理

静应力作用下：危险剖面塑性变形或脆性断裂

变应力作用下：**疲劳破坏**

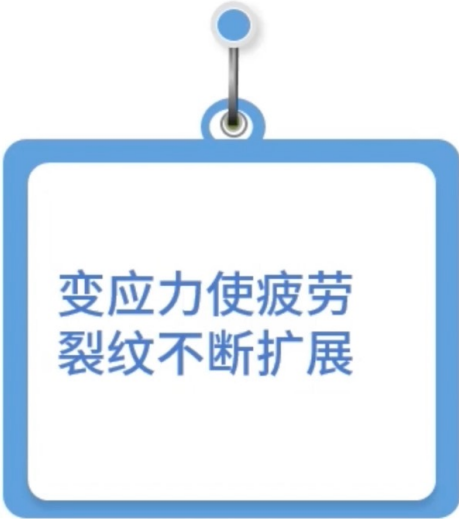




# Failure Theory Under Variable Stress

## 变应力作用下零件的失效机理


### 疲劳破坏的特征



变应力使疲劳  
裂纹不断扩展



疲劳破坏是一  
个时间历程



使零件发生疲劳  
断裂的应力比使  
零件发生脆性断  
裂的应力小的多

# Strength Conditions Under Variable Stress

变应力作用时的强度条件

表达形式与静应力作用时相同，即：

计算应力  $\leq$  许用应力

计算安全系数  $\geq$  许用安全系数

$$\sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]}$$

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{ca}} \geq [S]$$

强度计算的关键：确定极限应力  $\sigma_{lim}$

$\sigma_{lim}$  — 不发生破坏的前提下，所能承受的最大变应力

# Stress Limit Under Variable Stress

变应力作用时的极限应力

静应力作用时， $\sigma_{\text{lim}}$  仅与材料的力学性能有关：

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_s \text{ 或 } \sigma_{\text{lim}} = \sigma_b$$

变应力作用时， $\sigma_{\text{lim}}$  不仅与材料力学性能有关，还与

- 循环特征  $r$
- 应力循环次数  $N$  (或工作时间的长短)
- 应力集中、绝对尺寸、表面状态

等因素有关。

$r$  越小 (如  $r = -1$ )、 $N$  越大、应力集中越明显，则零件的极限应力  $\sigma_{\text{lim}}$  越小，越容易发生疲劳破坏。

变应力时，其  $\sigma_{\text{lim}}$  远小于材料的屈服极限  $\sigma_s$ 。

# Failure Limit under Different Cycle Count $N$

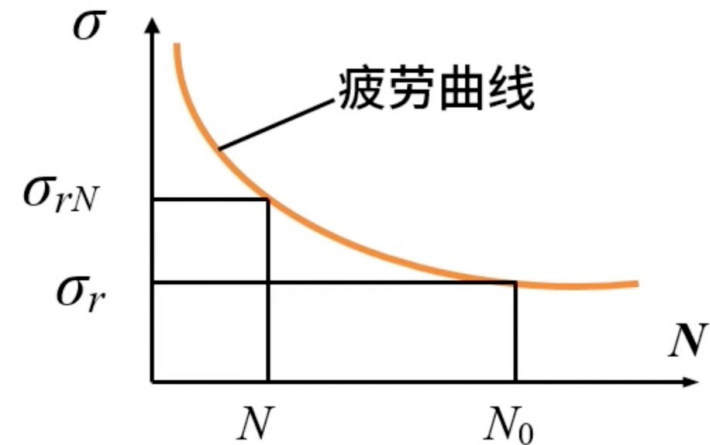
不同循环次数 $N$ 时的疲劳极限

变应力时的极限应力称为疲劳极限 $\sigma_{rN}$

用某种材料的标准试件进行疲劳试验，得到 $\sigma_{rN}$ 与 $N$ 的关系曲线——疲劳曲线

- 循环特征  $r$  不同，疲劳曲线亦不同；
- 应力循环次数  $N$  越多，疲劳极限 $\sigma_{rN}$  越小；
- 当疲劳极限减小到 $\sigma_r$  时， $N$  可达无限次而不发生疲劳破坏

$\sigma_r$  — 持久极限       $N_0$  — 循环基数      对于碳钢  $N_0 \approx 10^7$



# Failure Limit under Different Cycle Count $N$

不同循环次数 $N$ 时的疲劳极限

$r = -1$ 时（对称循环变应力）， $\sigma_r$  记为 $\sigma_{-1}$

$r = 0$ 时（脉动循环变应力）， $\sigma_r$  记为 $\sigma_0$

各种材料的 $\sigma_{-1}$ 、 $\sigma_0$  通过疲劳试验得到，

作为已知量，可从相关设计手册中查取。

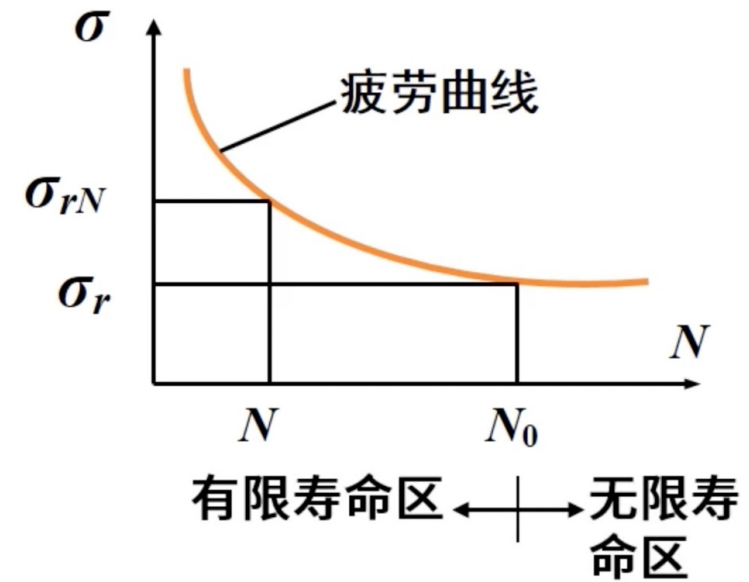


# Failure Limit under Different Cycle Count $N$

不同循环次数 $N$ 时的疲劳极限

当  $N \leq N_0$ ，为试件材料的有限寿命区，  
极限应力  $\sigma_{rN}$  大一些；

当  $N > N_0$ ，为试件材料的无限寿命区，  
极限应力恒等于  $\sigma_r$



# Failure Limit under Different Cycle Count $N$

不同循环次数 $N$ 时的疲劳极限

- 循环次数为  $N$  时，材料的疲劳极限求解

疲劳曲线方程：

$m$  为与材料和应力状态有关的指数

$$\sigma_{rN}^m \times N = \text{常数} = \sigma_r^m \times N_0$$

寿命系数：

$$\text{当 } N \leq N_0 \text{ 时 (有限寿命区)} \quad \sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r \quad k_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}}$$

$$\text{当 } N > N_0 \text{ 时 (无限寿命区)} \quad \sigma_{rN} = \sigma_r \quad \text{此时, } k_N = 1$$

# Failure Limit under Different Cycle Count $N$

不同循环次数 $N$ 时的疲劳极限

## 变应力作用下的强度条件

计算应力  $\leq$  许用应力

$$\sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]}$$

计算安全系数  $\geq$  安全系数

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{ca}} \geq [S]$$

计算许用应力 $[\sigma]$ 时，极限应力 $\sigma_{lim} = \sigma_{rN}$  或  $\sigma_r$

$$\text{有限寿命时: } [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]} = \frac{\sigma_{rN}}{[S]}$$

$$\text{无限寿命时: } [\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[S]} = \frac{\sigma_r}{[S]}$$

$r = -1$  或  $0$  时，  
 $\sigma_r$  查手册确定

# Fatigue Strength - 2

疲劳强度 - 2

# Stress Limit Graph

## 极限应力图

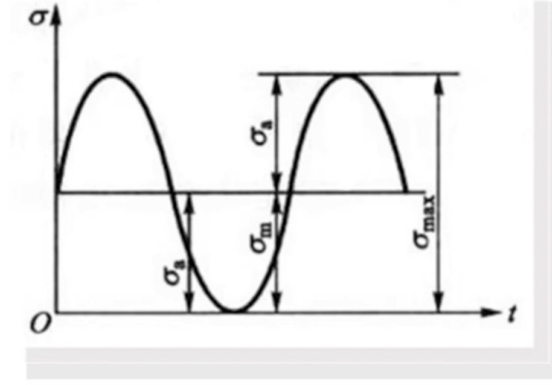
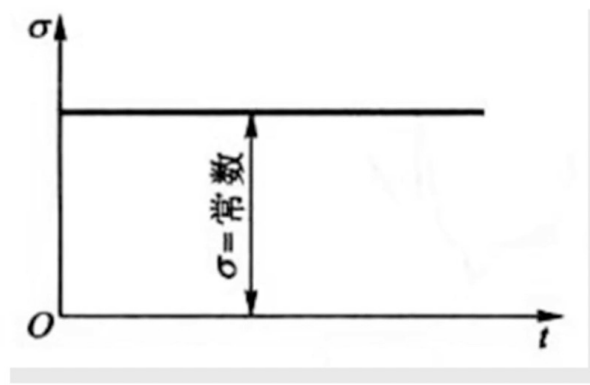
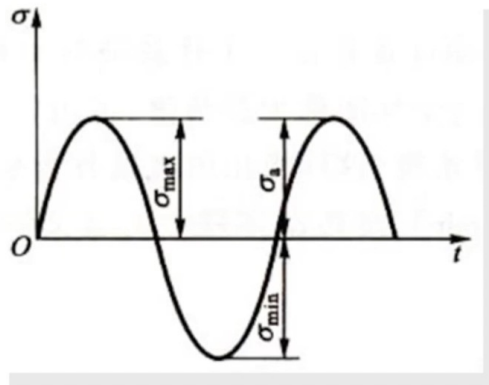
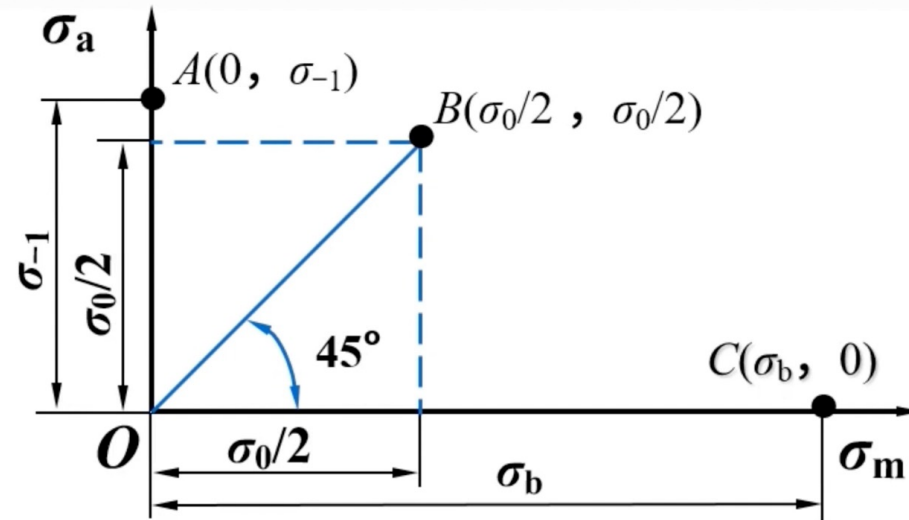
极限应力图 ( $\sigma_m - \sigma_a$  图):

以  $\sigma_m$  为横坐标,  $\sigma_a$  为纵坐标

$r = -1$  时,  $\sigma_a = \sigma_{-1}$ ,  $\sigma_m = 0$

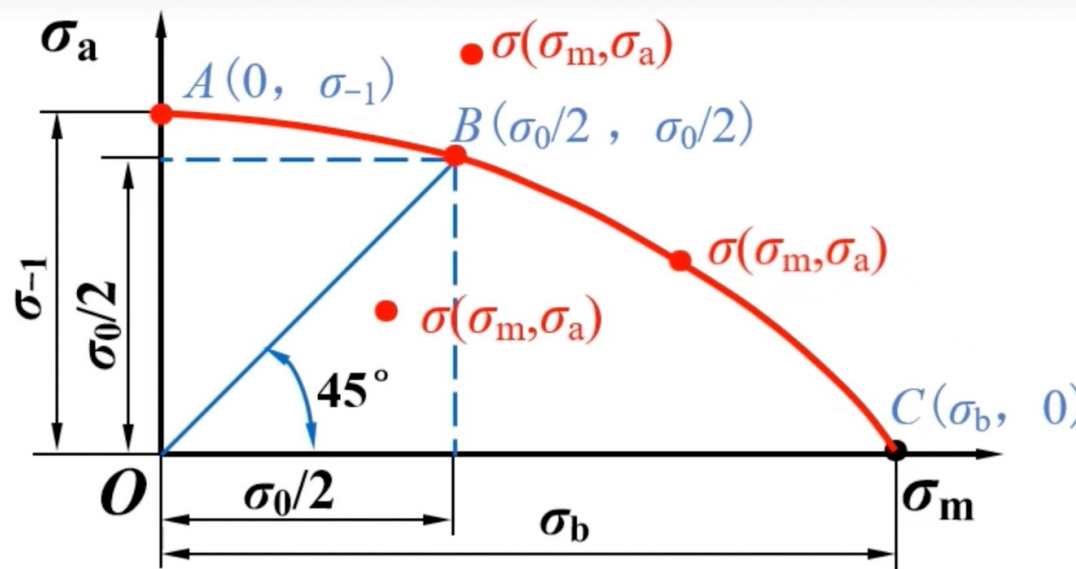
$r = +1$  时,  $\sigma_m = \sigma_b$ ,  $\sigma_a = 0$

$r = 0$  时,  $\sigma_m = \sigma_a = \sigma_0/2$



# Stress Limit Graph

## 极限应力图



连接  $ABC$  得一曲线，近似于抛物线  
— 材料的极限应力图

该曲线上的任一点都代表了某一  $r$   
时的疲劳极限  $\sigma_r$

材料是否发生疲劳破坏的分界线，区域  $OABC$  为安全区  
若工作应力  $\sigma(\sigma_m, \sigma_a)$  位于  $OABC$  内，则不会发生疲劳；  
若工作应力  $\sigma(\sigma_m, \sigma_a)$  位于  $OABC$  外，则会产生疲劳；  
若工作应力  $\sigma(\sigma_m, \sigma_a)$  位于  $ABC$  上，则处于临界状态

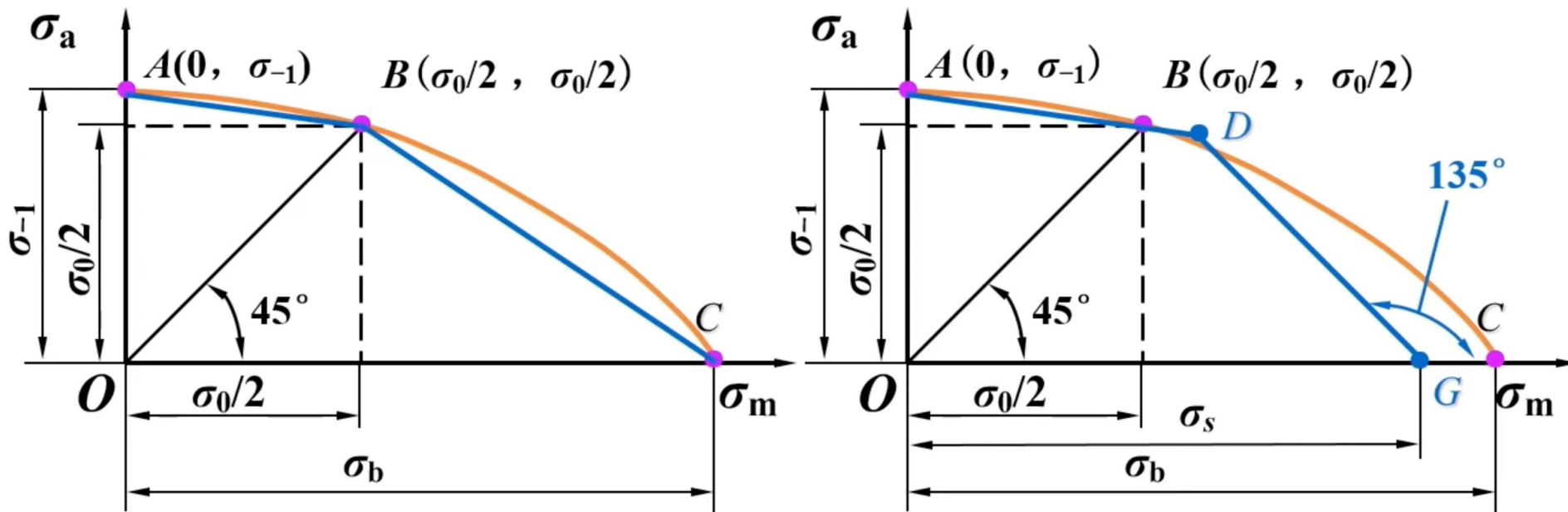


# Simplified Stress Limit Graph for Plastic Material

## 塑性材料的简化极限应力图

简化的极限应力图： 为便于计算，常将极限应力图简化，用折线代替曲线

方法：用直线连接 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，即得简化的极限应力图。  
对于塑性材料，静应力时的极限应力实际上应为 $\sigma_s$ ；  
过 $G$ 点作 $135^\circ$ 斜线，与 $AB$ 连线的延长线交于 $D$ 点；  
则折线 $ADG$ 即为塑性材料简化的极限应力图。



# Simplified Stress Limit Graph for Plastic Material

## 塑性材料的简化极限应力图

线上任一点代表循环特征为  $r$  的疲劳极限:

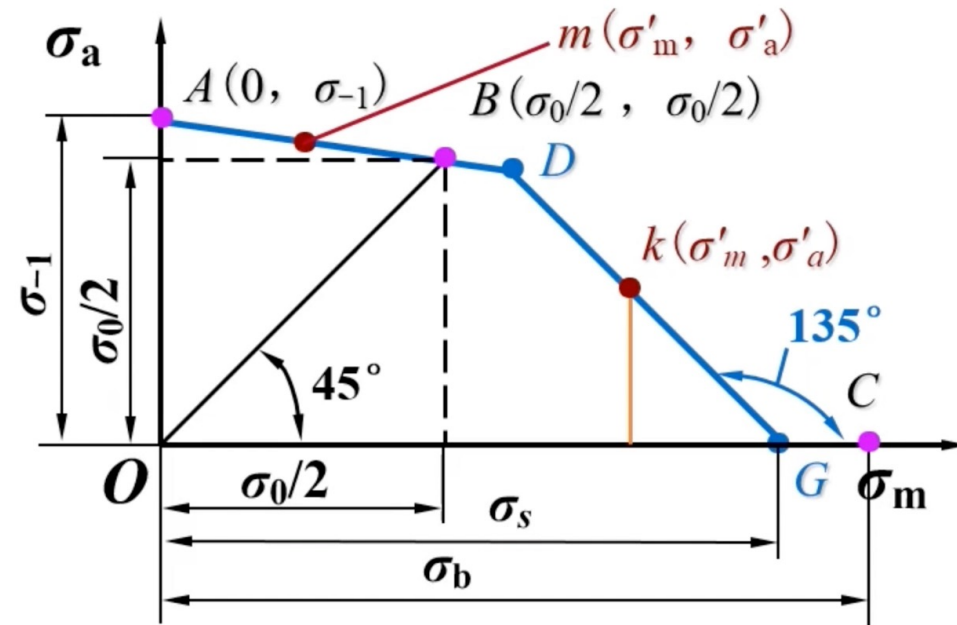
$$\sigma_r = \sigma'_{\max} = \sigma'_m + \sigma'_a$$

A点为  $r = -1$  时的疲劳极限:

$$\sigma_r = 0 + \sigma_{-1} = \sigma_{-1}$$

B点为  $r = 0$  时的疲劳极限:

$$\sigma_r = \sigma_0/2 + \sigma_0/2 = \sigma_0$$



为什么作 135° 斜线?

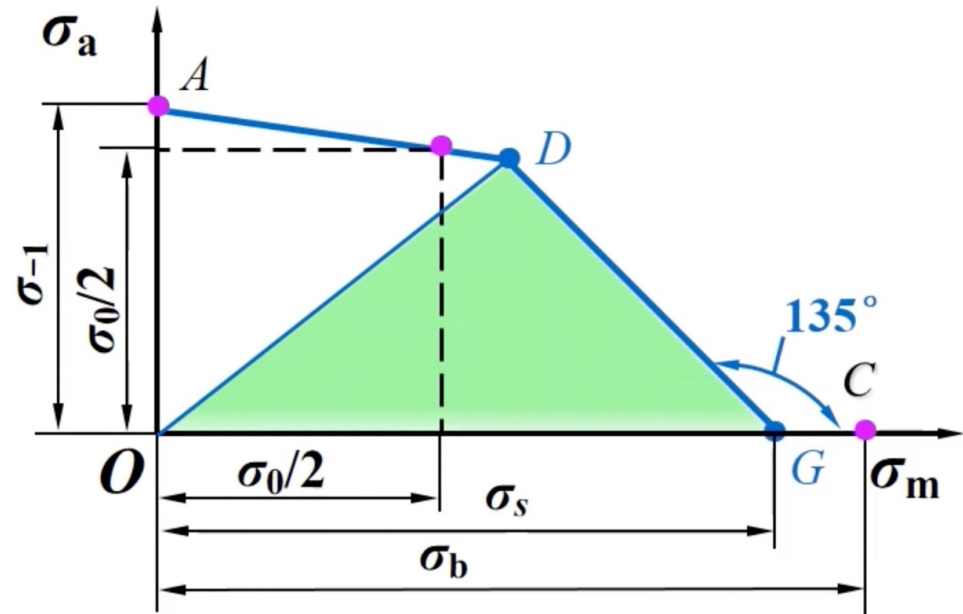
# Simplified Stress Limit Graph for Plastic Material

## 塑性材料的简化极限应力图

连接 $OD$ ，将极限应力图分解成两个区域：

$OAD$ 为**疲劳安全区**，零件的强度取决于疲劳强度，疲劳极限由线段 $AD$ 确定；

$ODG$ 为**塑性安全区**，零件的强度取决于静强度，极限应力由线段 $DG$ 确定。





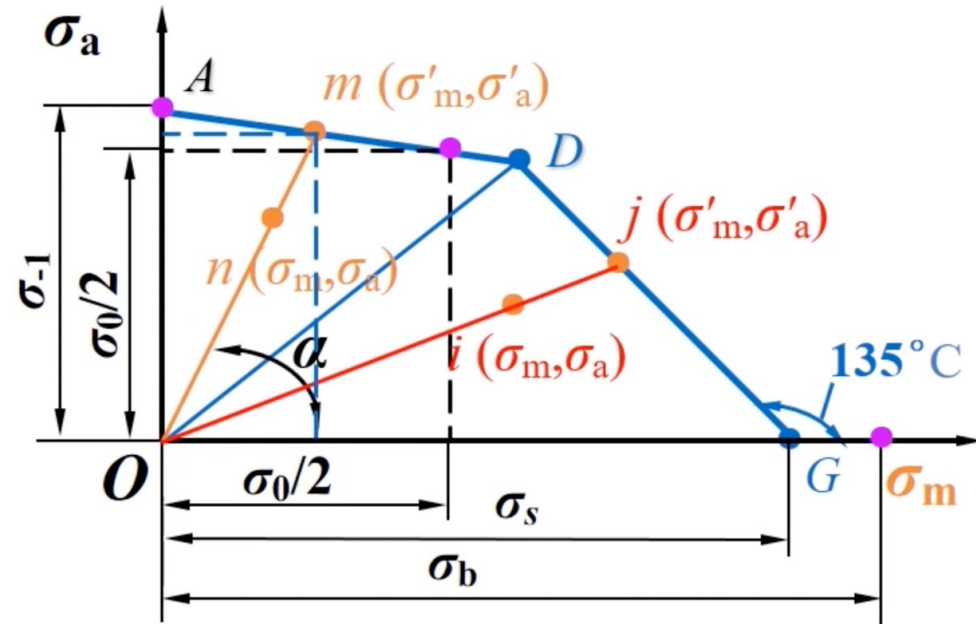
# Determine Failure Limit using Working Stress

由工作应力确定疲劳极限

$m$  点如何求取?

## 1. 作图法

关键：极限应力点  $m$  与工作应力点  $n$  的循环特征  $r$  相同  
从原点引射线  $On$  交  $AD$  于  $m$  点，此点即极限应力点  
该射线上各点的  $r$  均相等









# Determine Failure Limit using Working Stress

由工作应力确定疲劳极限

直线  $AD$  的方程:

$$\sigma_{-1} = \sigma'_a + \frac{(2\sigma_{-1} - \sigma_0)}{\sigma_0} \sigma'_m = \sigma'_a + \psi_\sigma \sigma'_m \quad \text{--- ②}$$

令  $\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$  — 等效系数, 将平均应力等效成应力幅

联立①、②后求得:  $\sigma'_a = \frac{\sigma_{-1} \sigma_a}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$        $\sigma'_m = \frac{\sigma_{-1} \sigma_m}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$

则工作应力点  $n$  对应的疲劳极限:

$$\sigma_r = \sigma'_{\max} = \sigma'_m + \sigma'_a = \frac{\sigma_{-1} (\sigma_a + \sigma_m)}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

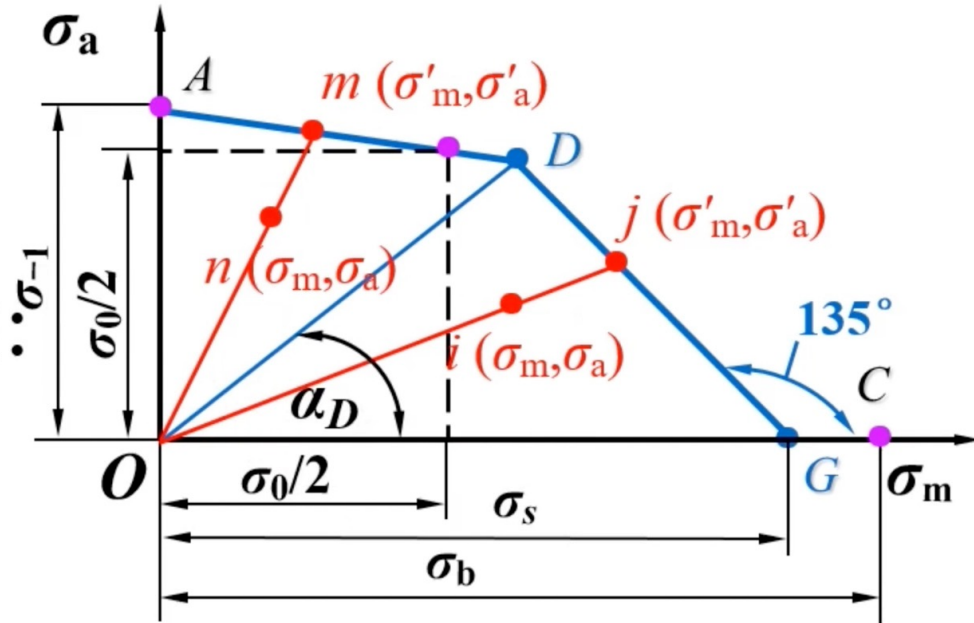
# Determine Failure Limit using Working Stress

由工作应力确定疲劳极限

问题：不作图时，如何判断工作应力点位于哪个区域？

根据循环特征  $r$  的大小判断工作应力点  $(\sigma_m, \sigma_a)$  的循环特征：

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$$



由直线方程可求得直线  $OD$  的夹角  $\alpha_D$  ，

# Determine Failure Limit using Working Stress

由工作应力确定疲劳极限

则  $OD$  所对应的循环特征:  $r_D = \frac{1 - \tan \alpha_D}{1 + \tan \alpha_D} = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_s - \sigma_0)}{\sigma_s(\sigma_0 - \sigma_{-1})}$

若  $-1 \leq r < r_D$  则工作应力点位于**疲劳安全区**  $OAD$  ,

若  $r_D \leq r \leq +1$  则工作应力点位于**塑性安全区**  $ODG$  。

# Fatigue Strength - 3

疲劳强度 - 3

# Stress Limit Considering Various Conditions

考虑应力集中、绝对尺寸、表面状态时的极限应力

材料的强度参数是用试件通过试验的方法得到的  
而机械零件与试件有很多不同之处

## 影响机械零件疲劳强度的主要因素

- 应力集中 — 零件剖面形状突变处，局部应力远远大于名义应力，使疲劳极限相对降低  
引进有效应力集中系数  $k_\sigma$  来修正

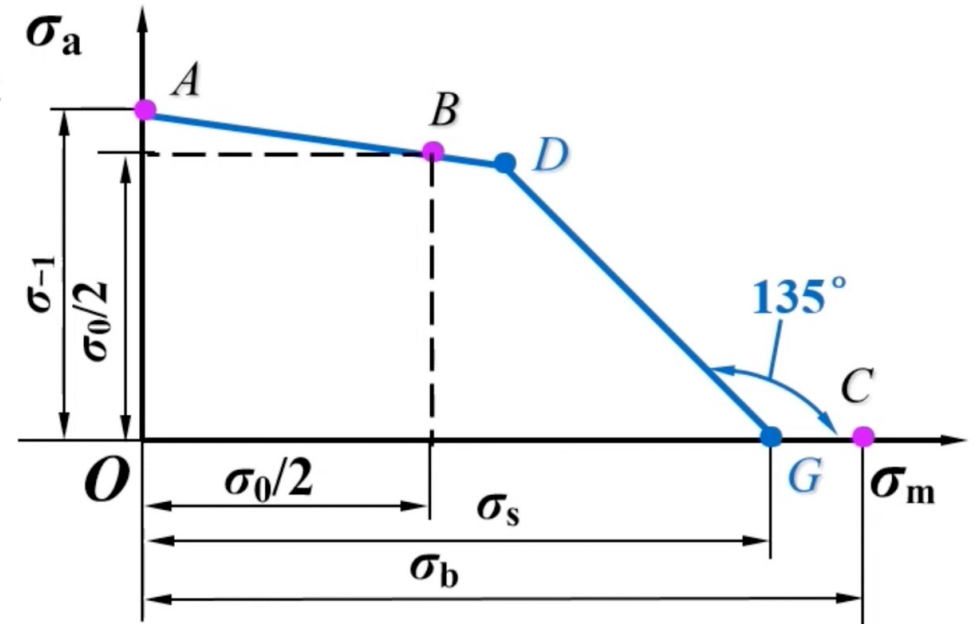
# Stress Limit Considering Various Conditions

考虑应力集中、绝对尺寸、表面状态时的极限应力

## 修正后，机械零件的极限应力简图

零件的疲劳极限小于试件材料的疲劳极限

理论分析和试验表明：上述因素只影响  
疲劳极限的应力幅部分





# Stress Limit Considering Various Conditions

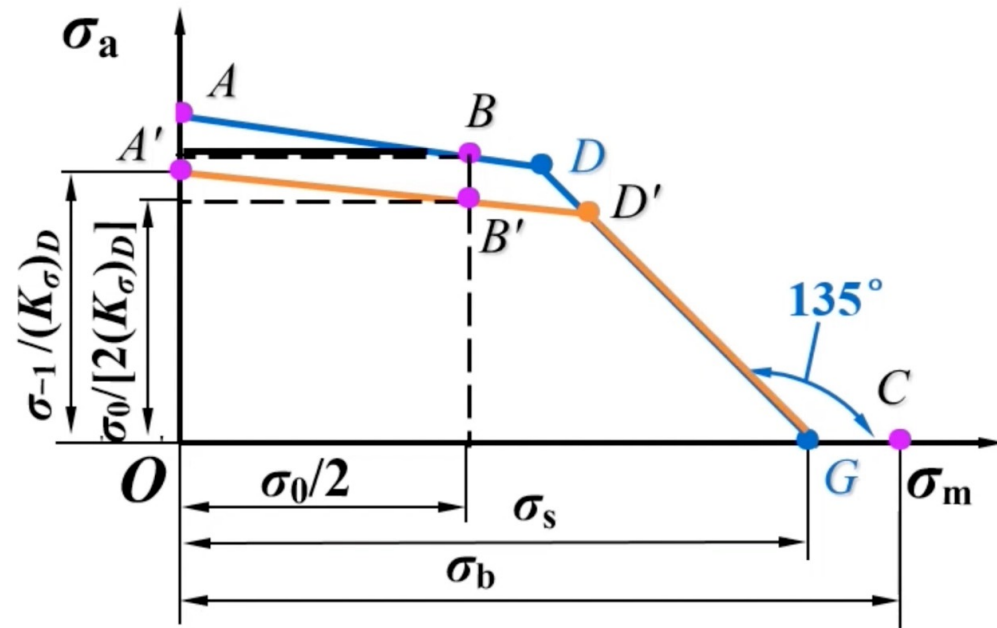
考虑应力集中、绝对尺寸、表面状态时的极限应力

步骤:

- 将线段  $AD$  的纵坐标除以  $(K_\sigma)_D$ ，得两点坐标;

$$A' \left( 0, \frac{\sigma_{-1}}{(K_\sigma)_D} \right) \quad B' \left( \frac{\sigma_0}{2}, \frac{\sigma_0}{2(K_\sigma)_D} \right)$$

- 连接  $A'B'$  得直线
- 线段  $DG$  保持不变，因该线段是按静应力考虑的;
- 折线  $A'D'G$  即为零件的极限应力简图



# Stress Limit Considering Various Conditions

考虑应力集中、绝对尺寸、表面状态时的极限应力

$OA'D'$  — 零件的疲劳安全区;

$OD'G$  — 零件的塑性安全区

线段  $OD'$  对应的循环特征:

$$r_{D'} = \frac{[(K_\sigma)_D + \psi_\sigma] \sigma_s - 2\sigma_{-1}}{[(K_\sigma)_D - \psi_\sigma] \sigma_s}$$

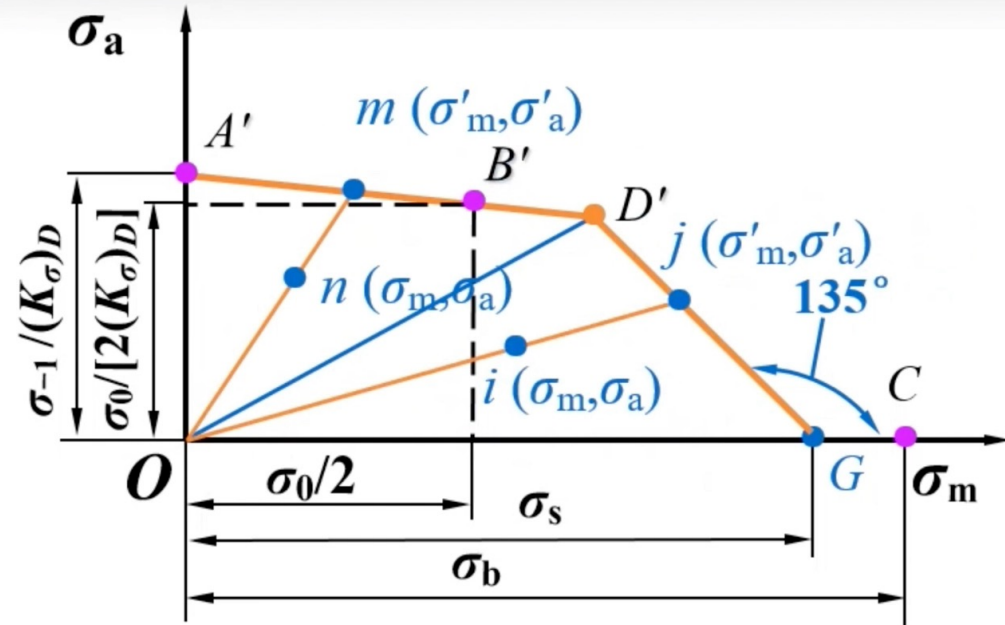
零件的极限应力  $\sigma_r$  :

● 对于塑性材料

当  $r < r_{D'}$  时 
$$\sigma_r = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_a + \sigma_m)}{(K_\sigma)_D \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

当  $r \geq r_{D'}$  时 
$$\sigma_r = \sigma_s$$

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$$





# Stress Limit Graph of Brittle Materials

## 脆性材料的极限应力图

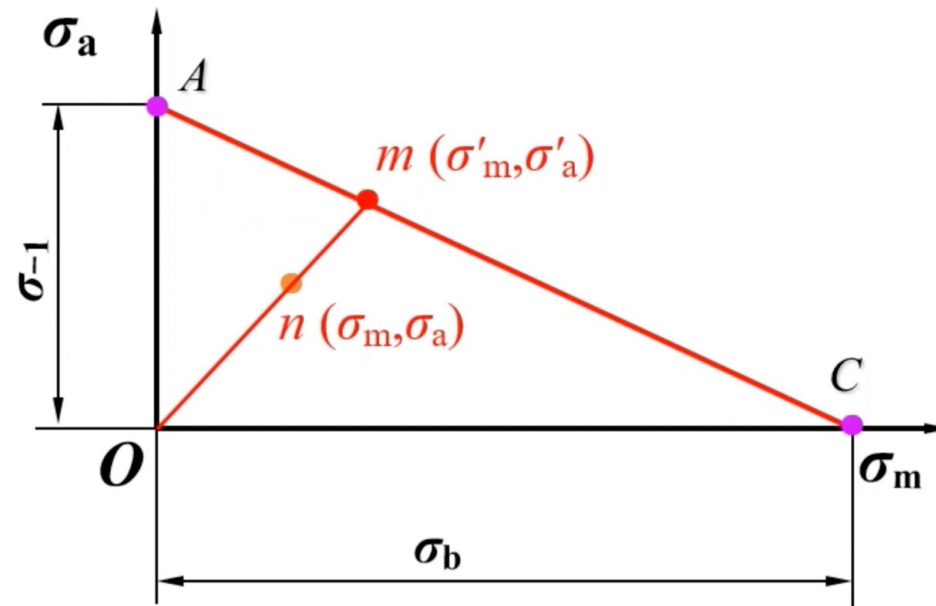
对于脆性材料(如铸铁)试件,  
将极限应力图进一步简化:

用直线 AC 代替折线 ADG

根据  $On$  和  $AC$  两直线的方程,  
可求得交点  $m$  的坐标值

则疲劳极限:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma'_m + \sigma'_a \\ &= \frac{\sigma_{-1}(\sigma_a + \sigma_m)}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}\end{aligned}$$



式中, 等效系数  $\psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$

# Stress Limit Considering Various Conditions

考虑应力集中、绝对尺寸、表面状态时的极限应力

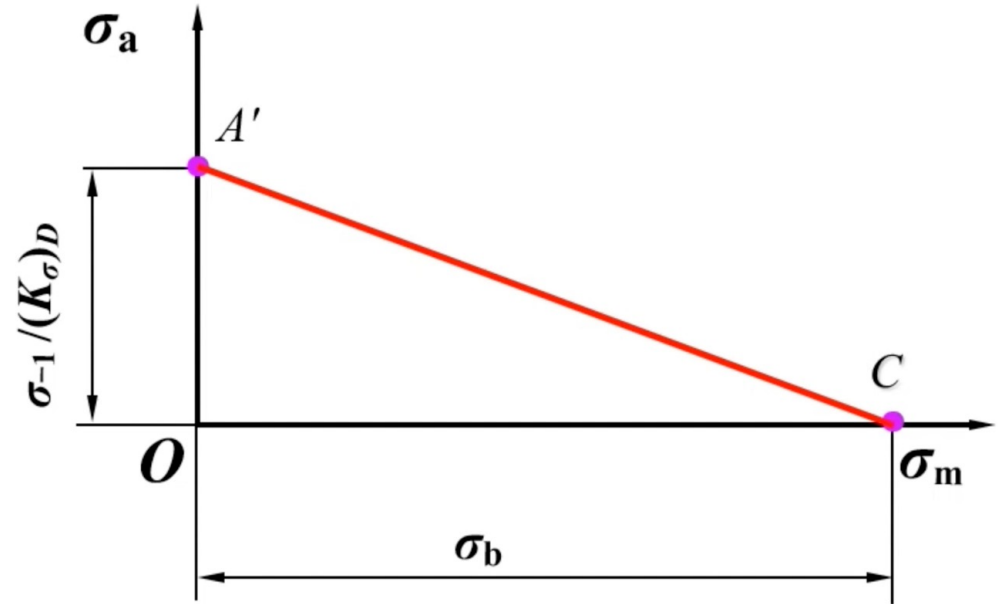
● 对于脆性材料零件  
用直线  $A'C$  代替折线  $A'D'G$   
则其疲劳极限:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_a + \sigma_m)}{(K_\sigma)_D \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

$$\text{式中 } \psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}$$

脆性材料零件的安全系数及强度条件:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(K_\sigma)_D \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \geq [S]$$





# Fatigue Strength Condition Under Shear Stress

## 剪应力作用时的疲劳强度条件

注意：前面所有公式是针对**正应力** $\sigma$ 导出的，但同样适用于**剪应力** $\tau$ 作用的情况，

将 $\sigma$ 换成 $\tau$ 即可。

剪应力作用时的安全系数：

塑性材料

疲劳区

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{(K_{\tau})_D \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m} \geq [S]$$

塑性区

$$S_{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_m + \tau_a} \geq [S]$$

脆性材料

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{(K_{\tau})_D \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m} \geq [S]$$



# Safety Factor under Compound Variable Stress

## 复合变应力时零件的安全系数

实际上，很多零件同时受 $\sigma$ 、 $\tau$ 联合作用

如转轴，同时受弯曲应力和扭剪应力作用

$\sigma$ 、 $\tau$ 均为对称循环且相位相同时，安全系数计算式：

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S]$$

其中：

不是对称循环时(近似计算)：

$$\left\{ \begin{array}{l} S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(K_\sigma)_D \sigma_a} \\ S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{(K_\tau)_D \tau_a} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(K_\sigma)_D \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \\ S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{(K_\tau)_D \tau_a + \psi_\tau \tau_m} \end{array} \right.$$

# Assignment 02

**Link will be closed before this Sunday noon. No late submission.**

- 针对你上次作业所分析的机械系统，尝试写一个不超过2页纸的用户手册
- Based on the mechanical system you submitted in your last assignment, write a user manual within 2 pages.
- Rename your file as  
StudentID-FullName-AssignmentNum-PageNum.jpg  
i.e. 10111011-Zhang Sanfeng-Assignment02-1.jpg,  
10111011-Zhang Sanfeng-Assignment02-2.jpg
- Scan the code using Feishu to submit
- <https://wenjuan.feishu.cn/m?t=sz1wOcPuQzvi-uwbe>

21年秋季ME303第二次作业提交链接



打开飞书“扫一扫”

# Thank you~

ME303 Introduction to Mechanical Design

Adapted from <https://www.icourse163.org/course/HUST-1206698847>