Lecture 15
Mechanical Spring Design
第十五章 弹簧设计

ME303 Introduction to Mechanical Design

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

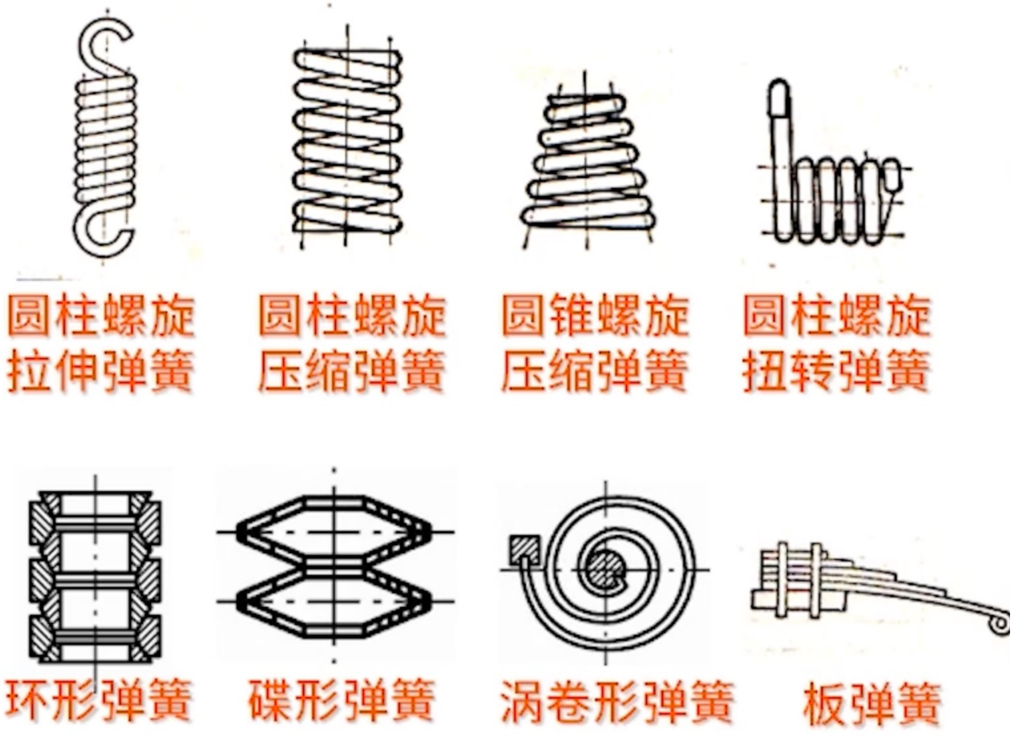
Types and Functions of Mechanical Spring

弹簧的类型和功能

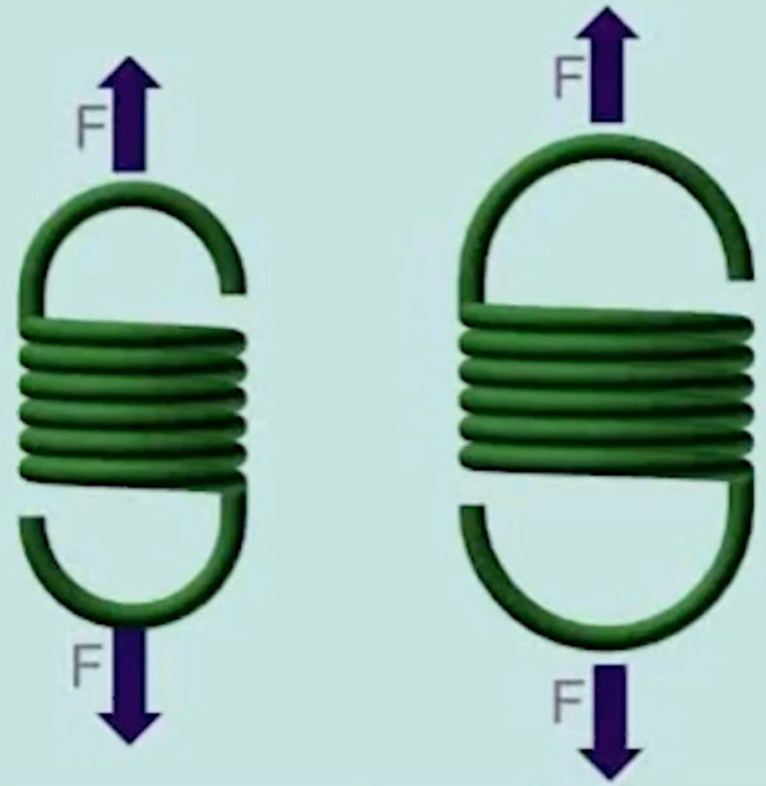
Basic Types of Mechanical Springs

弹簧的基本类型

受载 / 形状	拉伸	压缩	扭转	弯曲
螺旋形	圆柱螺旋拉伸弹簧	圆柱螺旋压缩弹簧 圆锥螺旋压缩弹簧	圆柱螺旋扭转弹簧	
其他		环形弹簧 碟形弹簧	涡卷形弹簧	板弹簧



不同中径的拉伸弹簧受力变形



Functions of Mechanical Springs

弹簧的功用

吸振、缓冲

车辆减震装置

控制运动

内燃机气门控制弹簧

储存或释放能量

枪械击发装置

测力

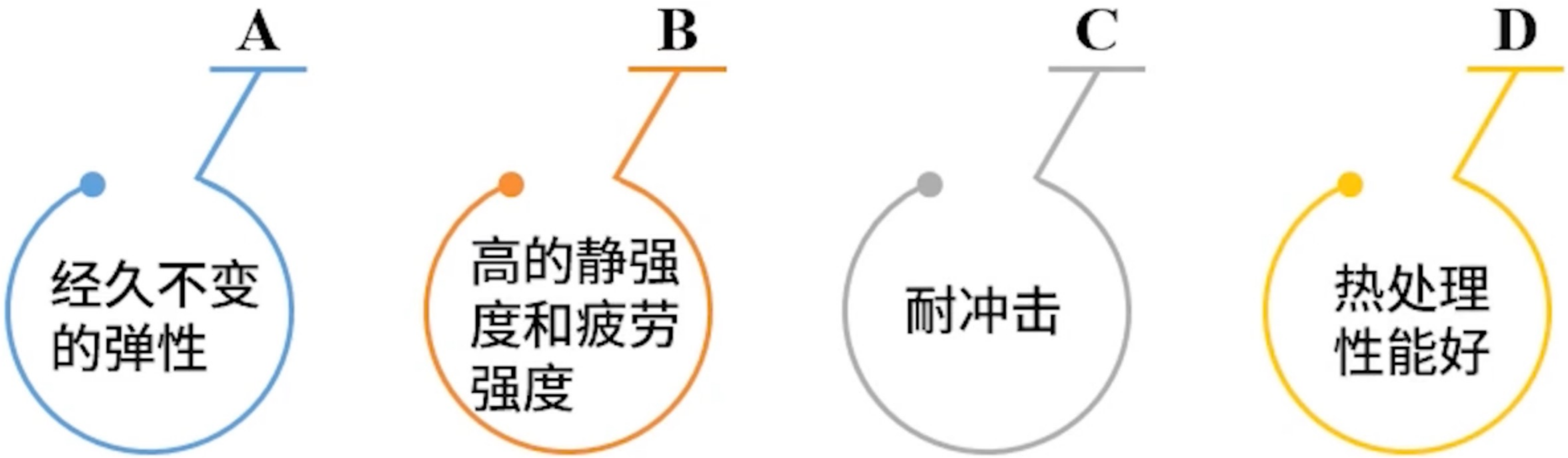
弹簧秤

Materials of Mechanical Springs

弹簧的材料

弹簧经常受到变载和冲击载荷作用

要求



Materials of Mechanical Springs

弹簧的材料

常用材料

- 碳素弹簧钢：适于做小的或要求不高的弹簧
- 合金弹簧钢(65Si2Mn)：热处理性能好、用于受载较大的弹簧
- 不锈钢(1Cr18Ni9)：耐腐蚀
- 青铜丝(QSi3-1)：耐腐蚀、防磁，用于仪器仪表
- 非金属材料 (橡胶弹簧、空气弹簧等)

按应力循环次数 N 弹簧分为：

- I 类： $N > 10^6$
- II 类： $N = 10^3 \sim 10^5$
- III 类： $N < 10^3$

许用应力不同

Dimensions and Characteristics of Mechanical Spring

弹簧的结构尺寸和特性曲线

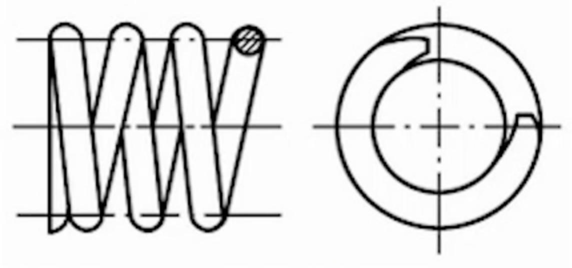
Structure of Mechanical Springs

弹簧的结构

1.压缩弹簧（有间距）

YI 型：

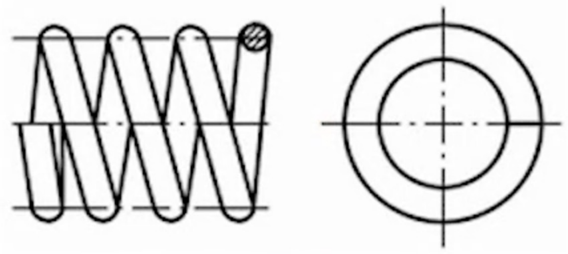
两端面圈并紧磨平　支撑面与轴线垂直



YI型

YIII 型：

两端面圈并紧不磨平



YIII型

Structure of Mechanical Springs

弹簧的结构

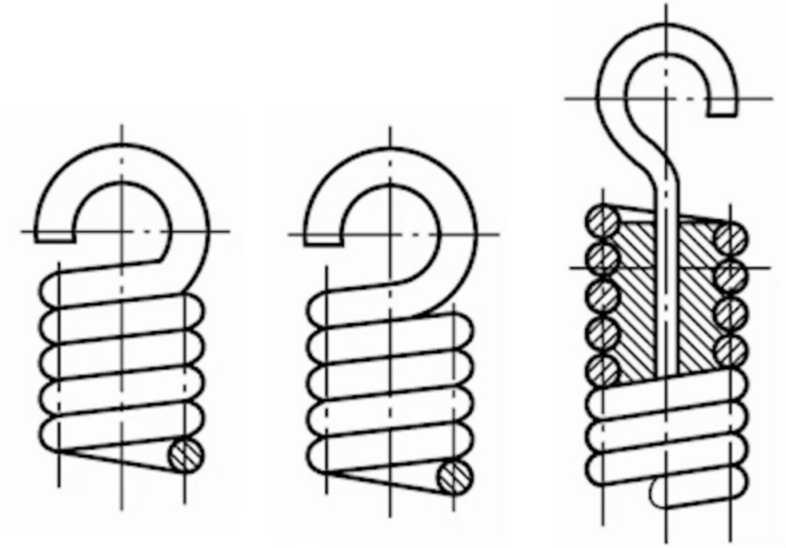
2.拉伸弹簧（并紧）

LI、LII 型：

挂钩过渡处弯曲应力大，
簧丝直径 $d \leq 10\text{mm}$

LVII 型：

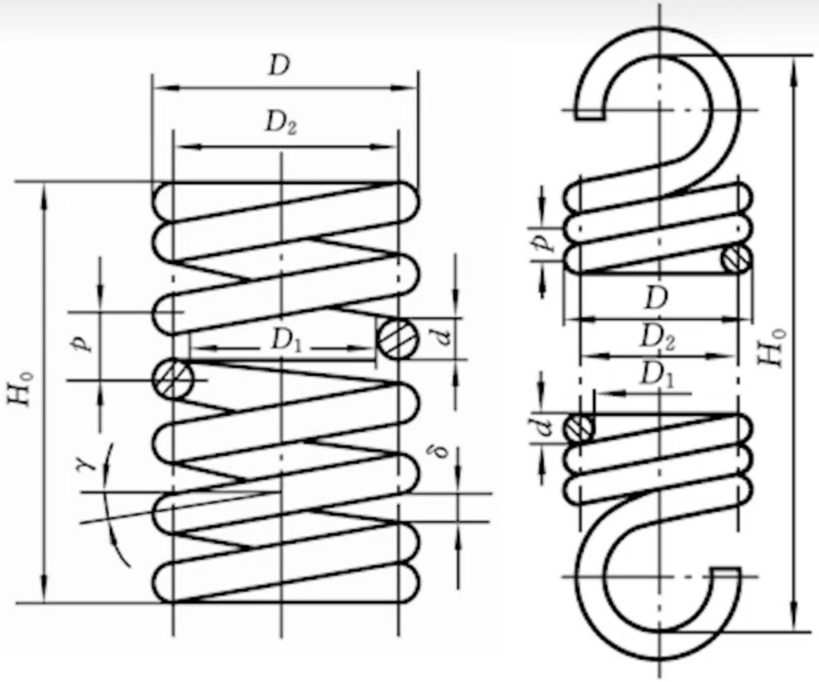
挂钩可转任意方向、用于受力较大场合



LI型 LII型 LVII型

Geometric Dimension of Mechanical Springs

弹簧的几何尺寸



簧丝直径	d	外 径	D
内 径	D_1	中 径	D_2
节 距	p	螺旋升角	γ
压簧自由高度	H_0	拉簧长度	H_0
有效圈数	n	总圈数	n_1

弹簧指数 $C=\dfrac{D_2}{d}$

$C\uparrow$ →刚度越小、易变形，容易卷制；

但易产生颤动、不稳定，常取 $C=4\sim10$，或按表选：

圆柱螺旋弹簧常用弹簧指数 C

弹簧丝直径 d/mm	0.2~0.4	0.5~1.0	1.1~2.2	2.5~6	7~16	18~50
C	7~14	5~12	5~10	4~9	4~8	4~6

Characteristics of Mechanical Springs

弹簧的特性曲线

1.圆柱形螺旋压缩弹簧

未受载 → 自由高度H_0

受F_{min} → 高度H_1， 变形

受F_{max} → 高度H_2， 变形λ_{max}

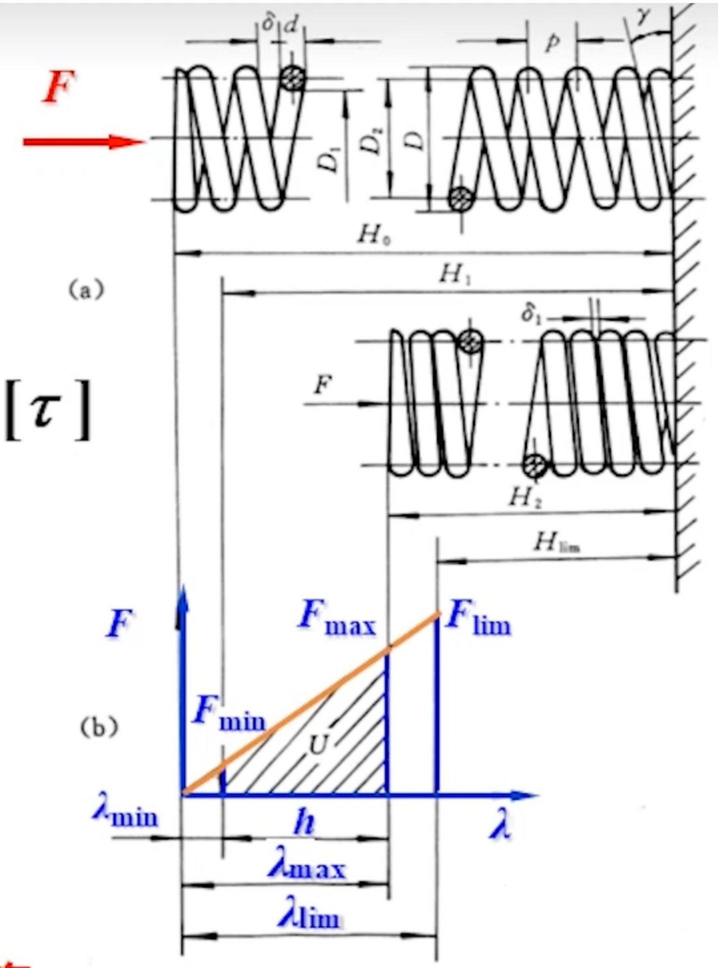
受F_{lim} → 高度H_{lim}， 变形λ_{lim}

此时应力达到材料剪切弹性极限

产生的 $\tau = [\tau]$

工作行程 $h = H_1 - H_2 = \lambda_{max} - \lambda_{min}$

弹簧刚度 $k = \dfrac{F_{min}}{\lambda_{min}} = \dfrac{F_{max}}{\lambda_{max}} = \dfrac{F_{lim}}{\lambda_{lim}} = \dfrac{F_{max} - F_{min}}{h}$

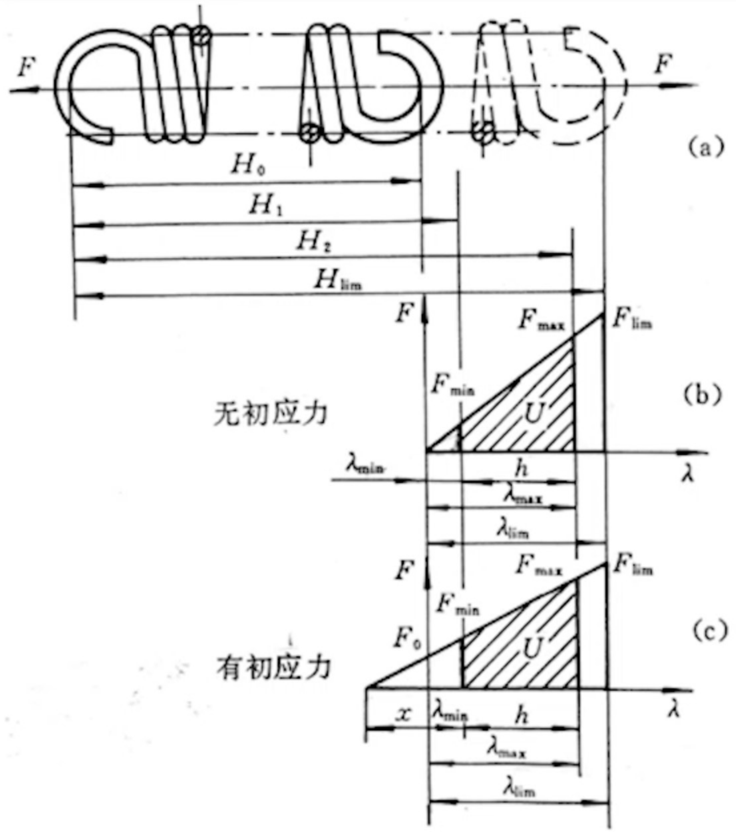


k不变，称为定刚度弹簧

Characteristics of Mechanical Springs

弹簧的特性曲线

2.圆柱形螺旋拉伸弹簧



- **无初应力的拉簧:**

特性曲线与压簧相同

未受载 → 自由长度 H_0

受 F_{min} → 长度 H_1 变形 λ_{min}

受 F_{max} → 长度 H_2 变形 λ_{max}

受 F_{lim} → 长度 H_{lim} 变形 λ_{lim}

工作行程 $h = H_2 - H_1 = \lambda_{max} - \lambda_{min}$

弹簧刚度 $k = \dfrac{F_{min}}{\lambda_{min}} = \dfrac{F_{max}}{\lambda_{max}} = \dfrac{F_{lim}}{\lambda_{lim}}$

$$= \frac{F_{max} - F_{min}}{h}$$

Characteristics of Mechanical Springs

弹簧的特性曲线

- **有初应力的拉簧**

绕制时各圈间相互挤紧，
簧丝中产生一定的初拉力 F_0，
工作载荷大于F_0时，弹簧才能伸长
F_0 — 产生假想变形量 x 的初拉力

弹簧刚度：

$$k=\frac{F_0}{x}=\frac{F_{min}}{x+\lambda_{min}}=\frac{F_{max}}{x+\lambda_{max}}$$

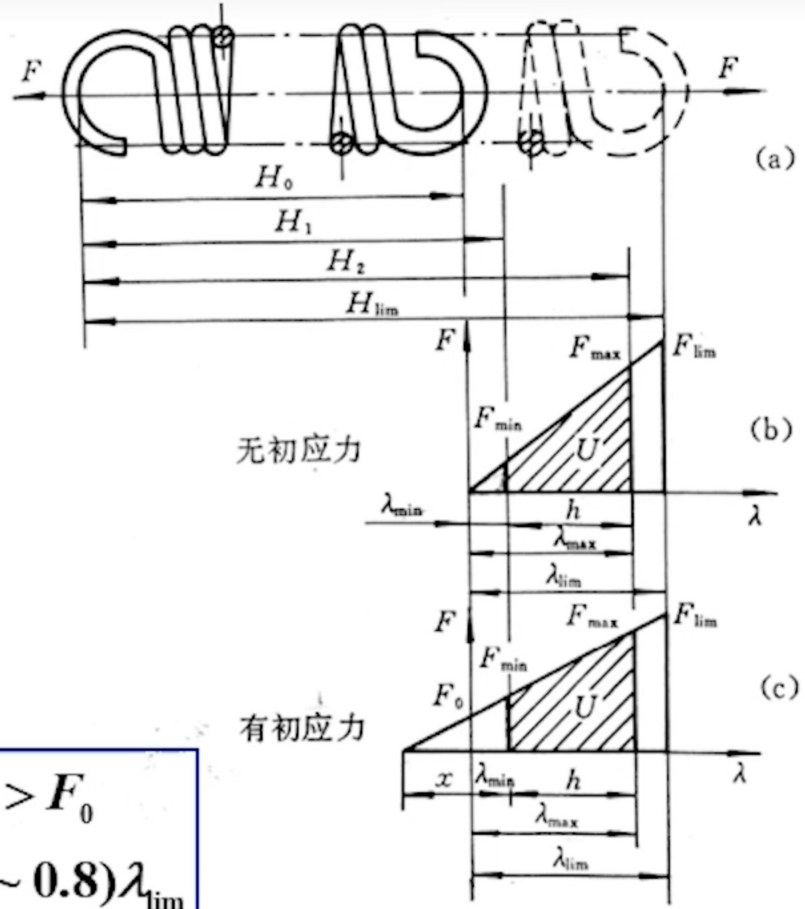
$$=\frac{F_{lim}}{x+\lambda_{lim}}=\frac{F_{min}-F_0}{\lambda_{min}}$$

$$=\frac{F_{max}-F_{min}}{h}$$

设计时要求：

$$F_{min}\geq 0.2F_{lim} \qquad F_{min}>F_0$$

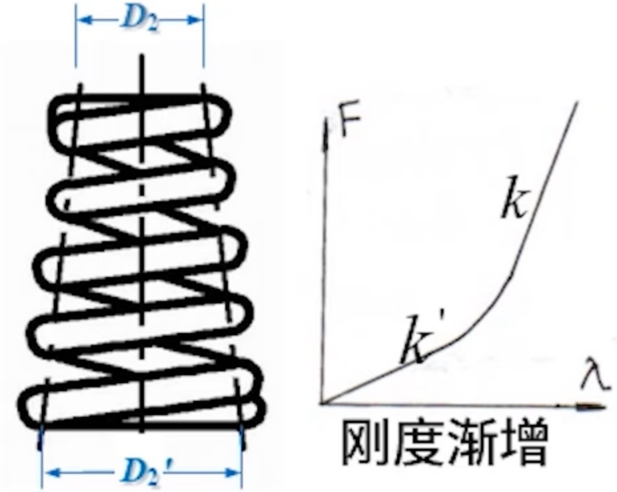
$$F_{max}\leq 0.8F_{lim} \qquad h=(0.2\sim 0.8)\lambda_{lim}$$



Characteristics of Mechanical Springs

弹簧的特性曲线

3. F 与λ非线性关系时的特性曲线 —— 变刚度弹簧



$D_2 < D_2'$

上部：$C = \frac{D_2}{d}$ 小 → 变形难(k 大)

下部：$C' = \frac{D_2'}{d}$ 大 → 变形易 (k 小)

受载后，大端先压紧，小端再压缩

环形弹簧　　碟簧

Design for Cylindrical Spiral Spring

圆柱形螺旋弹簧的设计

Design Principals for Cylindrical Spiral Spring

圆柱形螺旋弹簧的设计准则

拉簧	满足强度条件	满足刚度条件	
压簧	满足强度条件	满足刚度条件	满足稳定性条件

根据强度条件 → 设计簧丝直径 d

根据刚度条件 → 确定弹簧圈数 n

稳定性验算，防止发生侧弯

Strength Conditions: Avoid Fatigue Fracture

强度条件 – 防止疲劳断裂

簧丝剖面的应力

剪切力 F，　　剪应力 $\tau_F = \dfrac{F}{\pi d^2/4} = \dfrac{4F}{\pi d^2}$

扭矩 $T = F\dfrac{D_2}{2}$，扭剪应力 $\tau_T = \dfrac{FD_2/2}{\pi d^3/16} = \dfrac{8FD_2}{\pi d^3}$

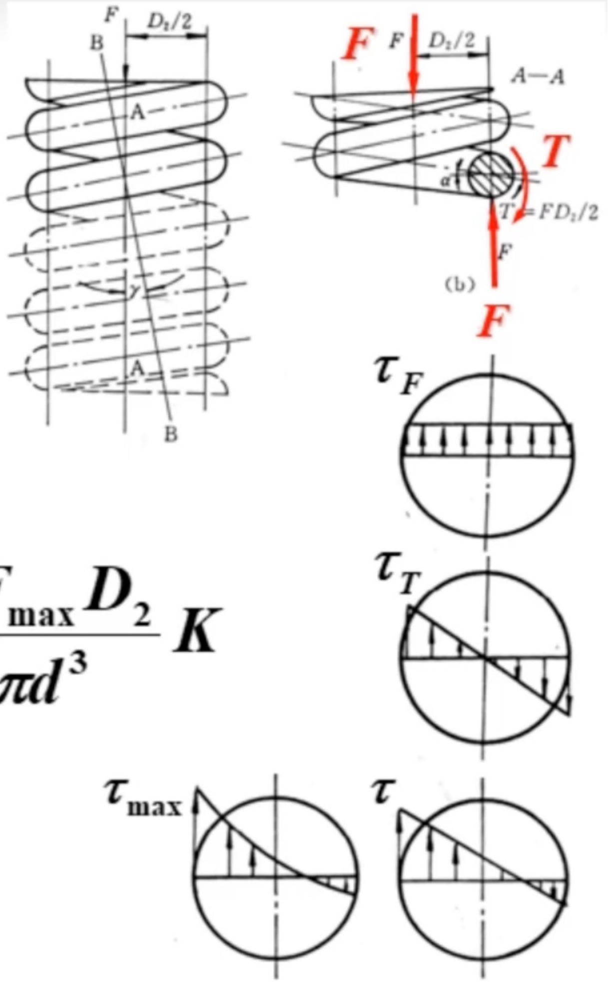
叠加后：$\tau = \tau_F + \tau_T = \dfrac{8FD_2}{\pi d^3}(1+\dfrac{d}{2D_2}) = \dfrac{8FD_2}{\pi d^3}(1+\dfrac{1}{2C})$

考虑弹簧曲率及升角的影响，最大剪切应力：$\tau_{max} = \dfrac{8F_{max}D_2}{\pi d^3}K$

曲度系数 $K = \dfrac{4C-1}{4C-4} + \dfrac{0.615}{C}$

τ_{max} 在靠近弹簧轴线的一侧

故疲劳裂纹常首先出现在簧丝内侧



Strength Conditions: Avoid Fatigue Fracture

强度条件 – 防止疲劳断裂

强度条件

根据材料和N查表

校核式：$\tau_{max} = \dfrac{8F_{max}D_2}{\pi d^3}K \leq [\tau]$

设计式：$d \geq 1.6\sqrt{\dfrac{F_{max}KC}{[\tau]}}$

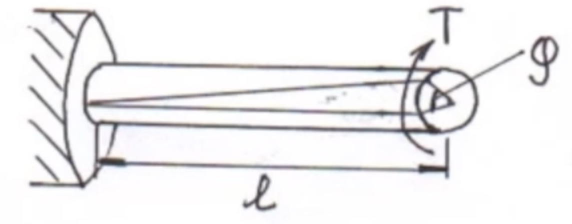
对于拉伸弹簧：$[\tau]_{拉伸} = 0.8[\tau]$

Stiffness Conditions: Determine Spring Rounds n

刚度条件 – 确定弹簧圈数n

受载后簧丝产生扭转变形 → 引起弹簧高度或长度的变化

假想拉直：



簧丝的扭转变形

外载 F 所做功 = 弹簧储存变形能

$$F\lambda = T\varphi$$

由材料力学知：$\varphi = \dfrac{Tl}{GI_P}$

- 扭矩 $T = F\dfrac{D_2}{2}$
- 极惯性矩 $I_P = \dfrac{\pi d^4}{32}$
- 剪切弹性模量 G
- 受扭长度 $l = \pi D_2 n$

Stiffness Conditions: Determine Spring Rounds *n*

刚度条件 – 确定弹簧圈数*n*

弹簧变形量：$\lambda = \frac{T\varphi}{F} = \frac{8FC^3n}{Gd}$

弹簧刚度：$k = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd}{8C^3n}$

$C\uparrow \rightarrow k\downarrow$

$n\uparrow \rightarrow k\downarrow$

计算工作圈数：$n = \frac{Gd}{8C^3k}$

- $k = \frac{F_{max}}{\lambda_{max}}$ （压簧或无初应力拉簧）
- $k = \frac{F_{max}}{\lambda_{max} + x}$ （有初应力拉簧）

或 $k = \frac{F_{max} - F_{min}}{h}$

应圆整为 0.5 的整数倍且大于 2

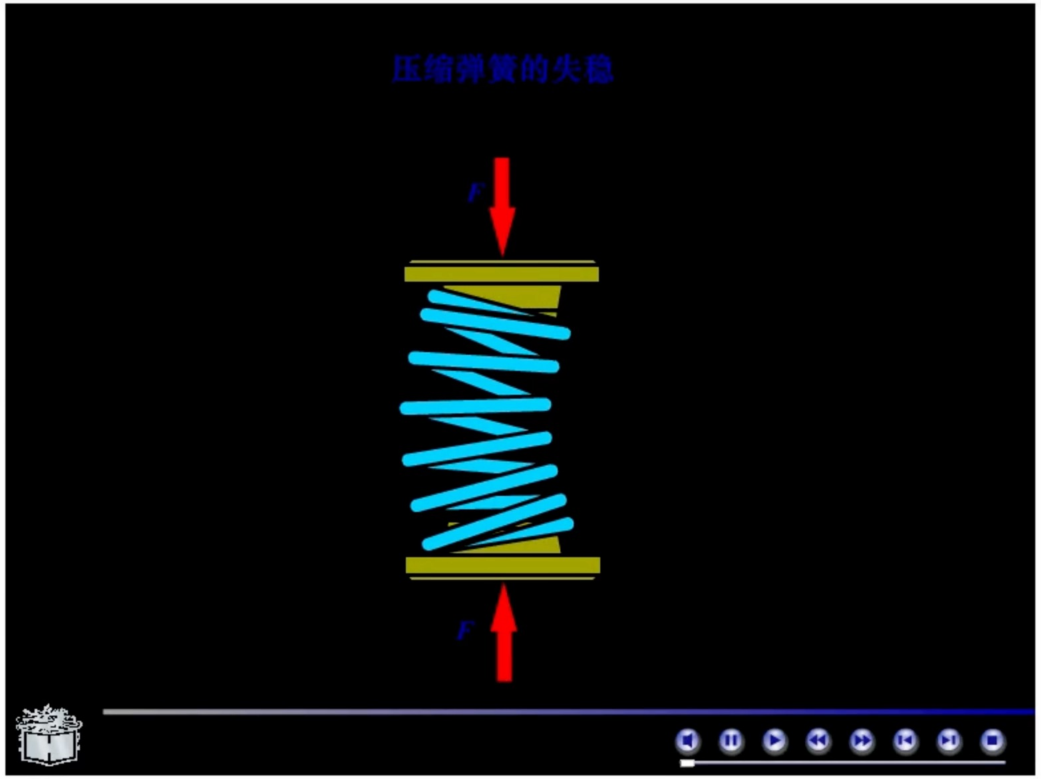
总圈数 n_1：

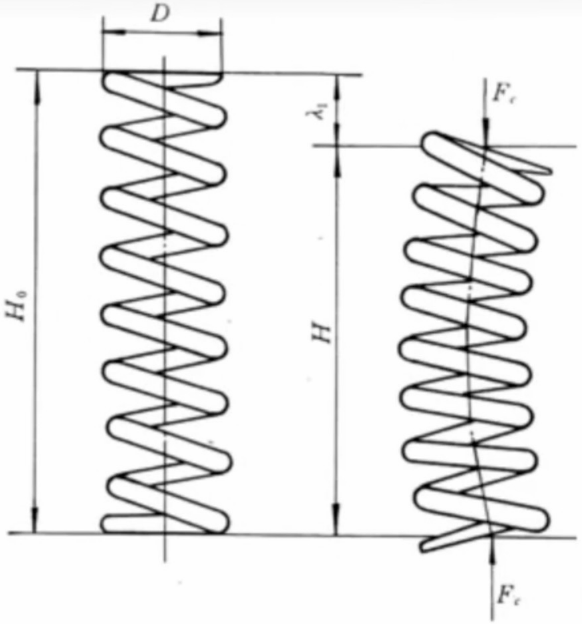
压簧 – $n_1 \approx n + 2$

拉簧 – $n_1 = n$

Stability Conditions:
Avoid Bending for Compression Spring

稳定性条件（对于压缩弹簧，防止侧弯）





Stability Conditions: Avoid Bending for Compression Spring

稳定性条件（对于压缩弹簧，防止侧弯）

高径比：$b = \dfrac{H_0}{D_2}$

要求：
- 两端固定 $b < 5.3$
- 一端固定一端自由 $b < 3.7$
- 两端自由 $b < 2.6$

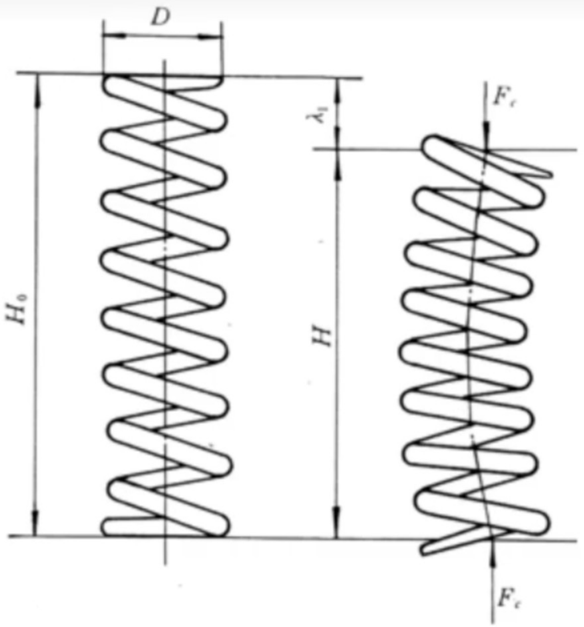
未满足时，验算：$F_{max} < F_C = C_B k H_0$

临界载荷（F_C）

不稳定系数（C_B）

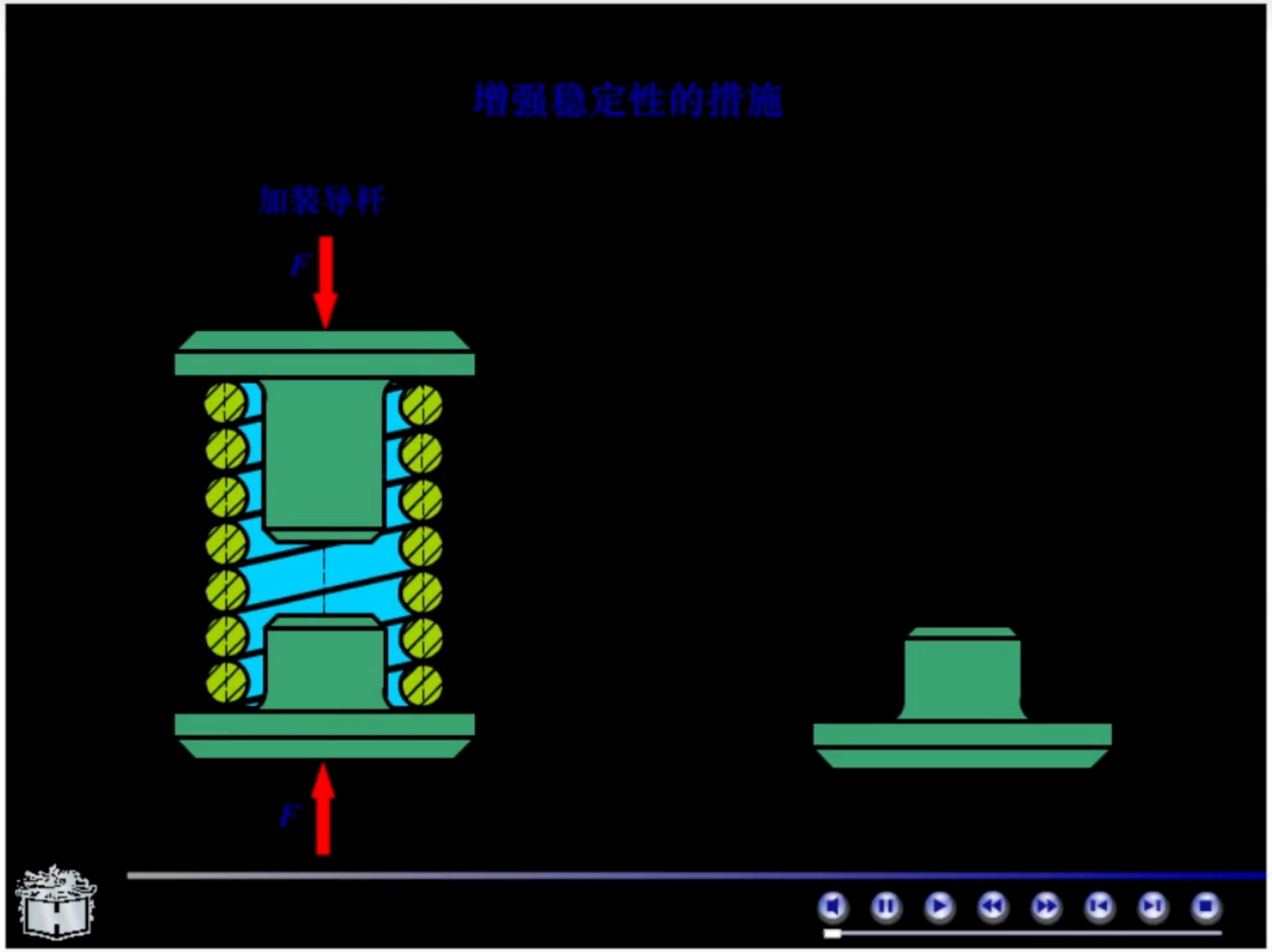
或采用其他措施：

加装导杆、导套或采用组合弹簧



Stability Conditions:
Avoid Bending for Compression Spring

稳定性条件（对于压缩弹簧，防止侧弯）



Design Steps for Mechanical Springs

弹簧的设计步骤

已知：最大工作载荷F_{max}
最小工作载荷F_{min}
工作行程 h
尺寸限制和工况

设计：簧丝直径 d
工作圈数 n
其他尺寸
绘制工作图及特性曲线

★由强度条件确定簧丝直径

$$d \geq 1.6\sqrt{\frac{F_{max}KC}{[\tau]}}$$

选择弹簧材料

选 $C \rightarrow K$

预选簧丝直径 $d' \rightarrow \sigma_b \rightarrow [\tau] \rightarrow d$

比较 d 和 d' 若 $d > d'$，说明强度不足

对于碳素弹簧钢丝：
$[\tau]$与σ_b有关，
而σ_b又取决于d

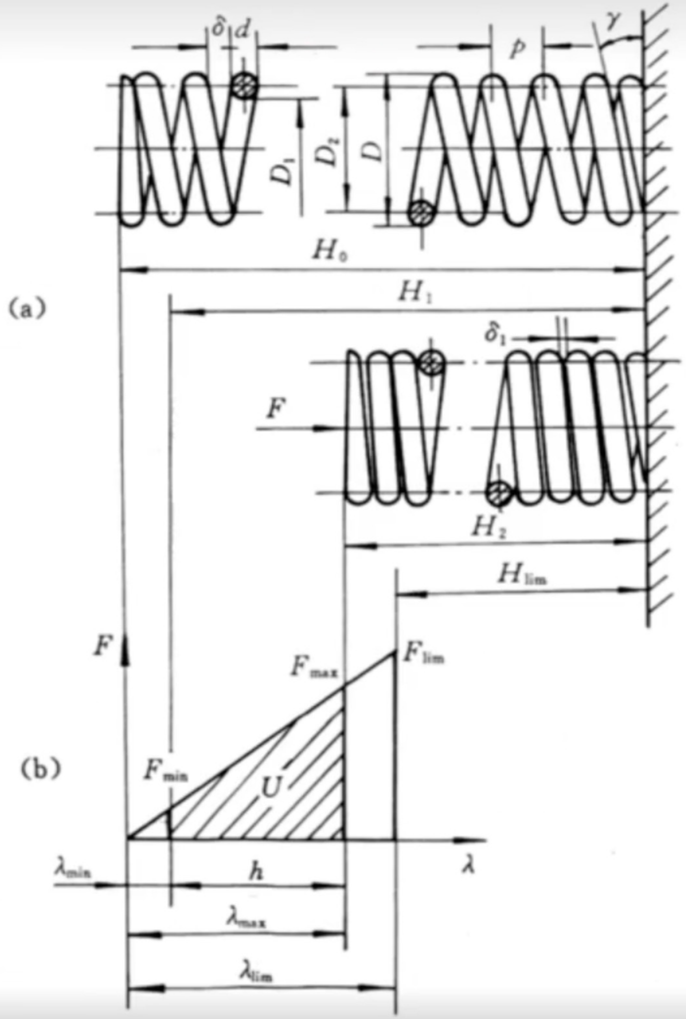
★由刚度条件确定弹簧工作圈数

$$n = \frac{Gd}{8C^3 k} = \frac{Gdh}{8C^3(F_{max} - F_{min})}$$

★压缩弹簧的稳定性验算

Design Steps for Mechanical Springs

弹簧的设计步骤



弹簧工作图

Course Review

课程回顾

Thank you~

Good luck to your exams~~

ME303 Introduction to Mechanical Design

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