

第七章 横向弯曲的格形构件——桁架

第一节 桁架的构造和分类

第二节 桁架的外形、腹杆体系和主要参数的确定

第三节 桁架的计算假定和设计计算步骤

第四节 桁架杆件的内力分析与计算

第五节 桁架杆件的断面设计

第六节 桁架的节点设计

第七章 作业

第一节 桁架的构造和分类

一、概述

桁架是由型钢制成,能承受横向弯曲的格形结构。

- **桁架在起重机结构中的应用**

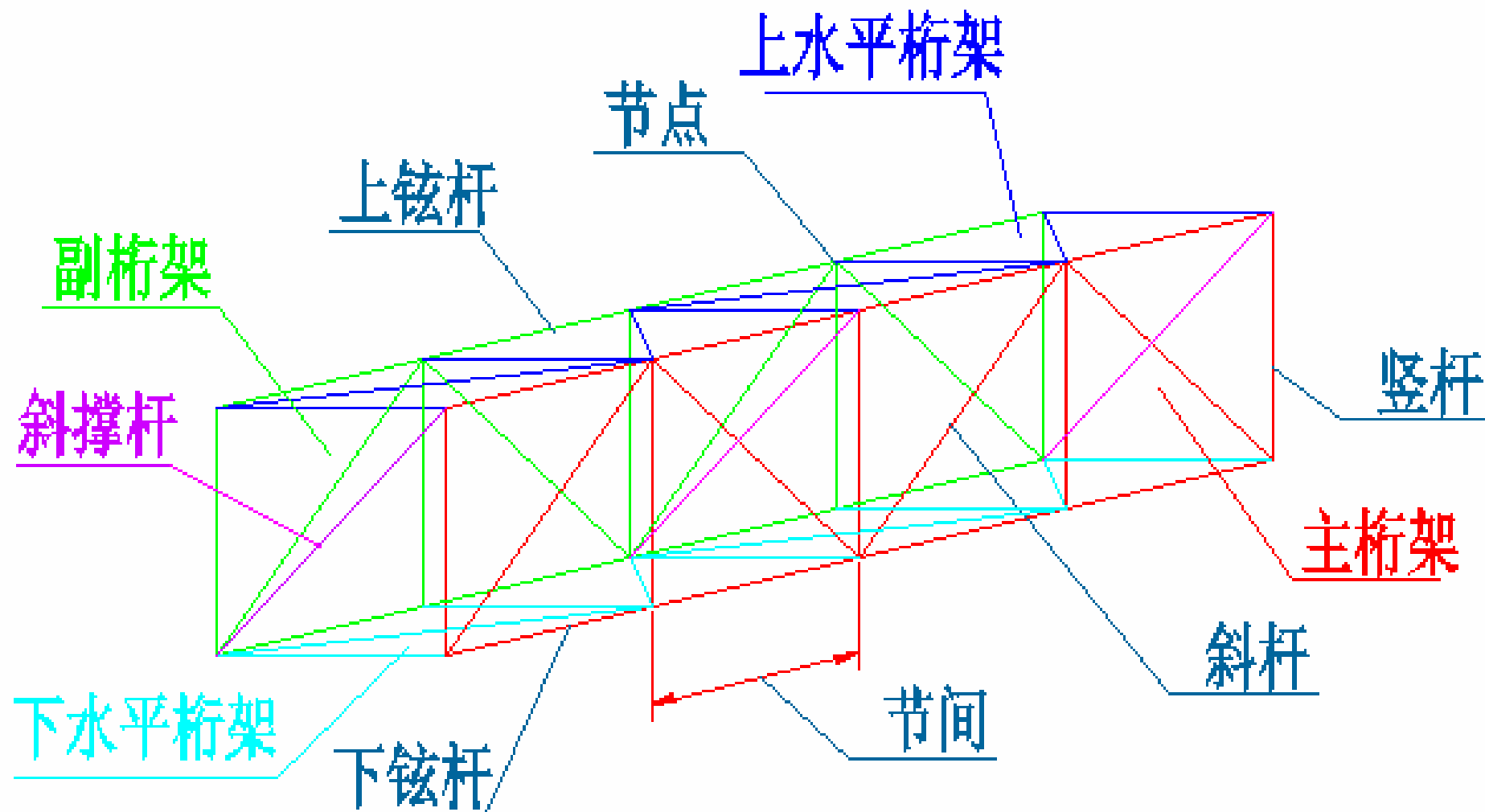


桁架式龙门起重机



塔式起重机

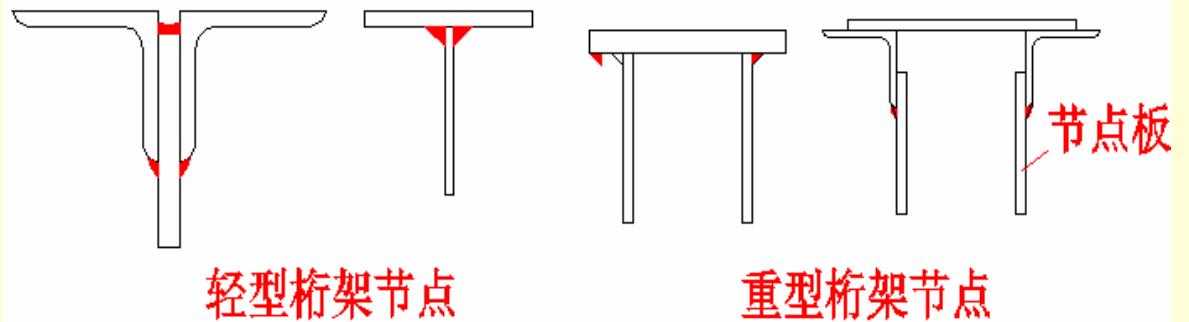
二、桁架的构造



三、桁架的分类

- 按构造桁架可分为

- 轻型桁架
- 重型桁架



- 按支承情况桁架可分为

- 单跨简支桁架
- 悬臂桁架
- 多跨连续桁架

四、桁架结构的特点

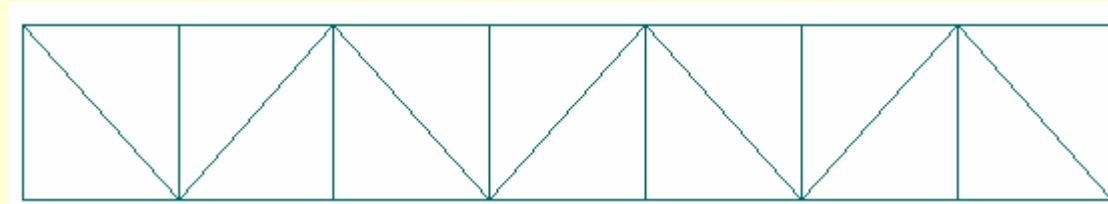
- 重量轻
- 用料省
- 刚度大
- 迎风面小



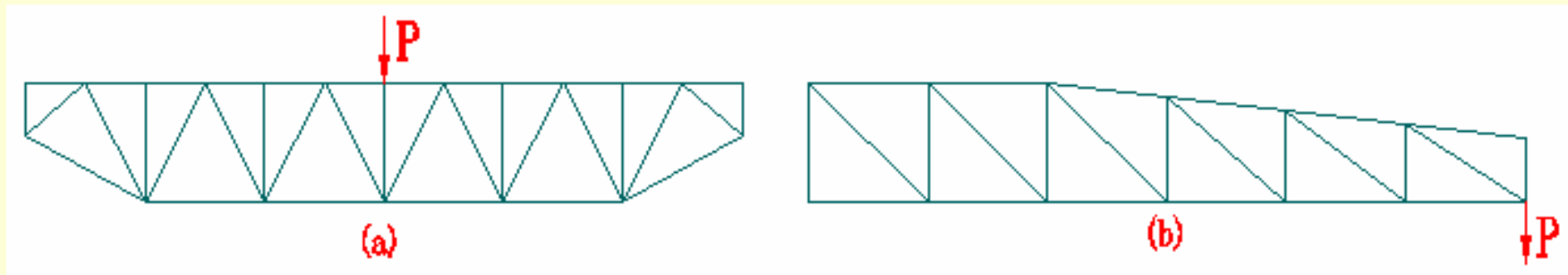
第二节 桁架的外形、腹杆体系和主要参数的确定

一、桁架的外形

① 平行弦桁架

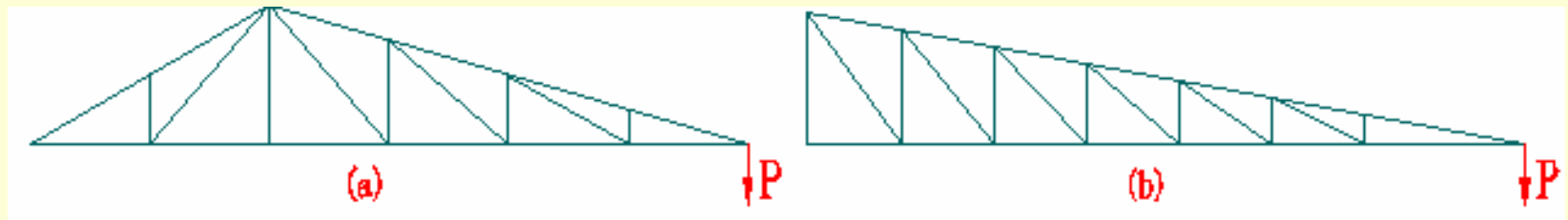


② 折线形桁架

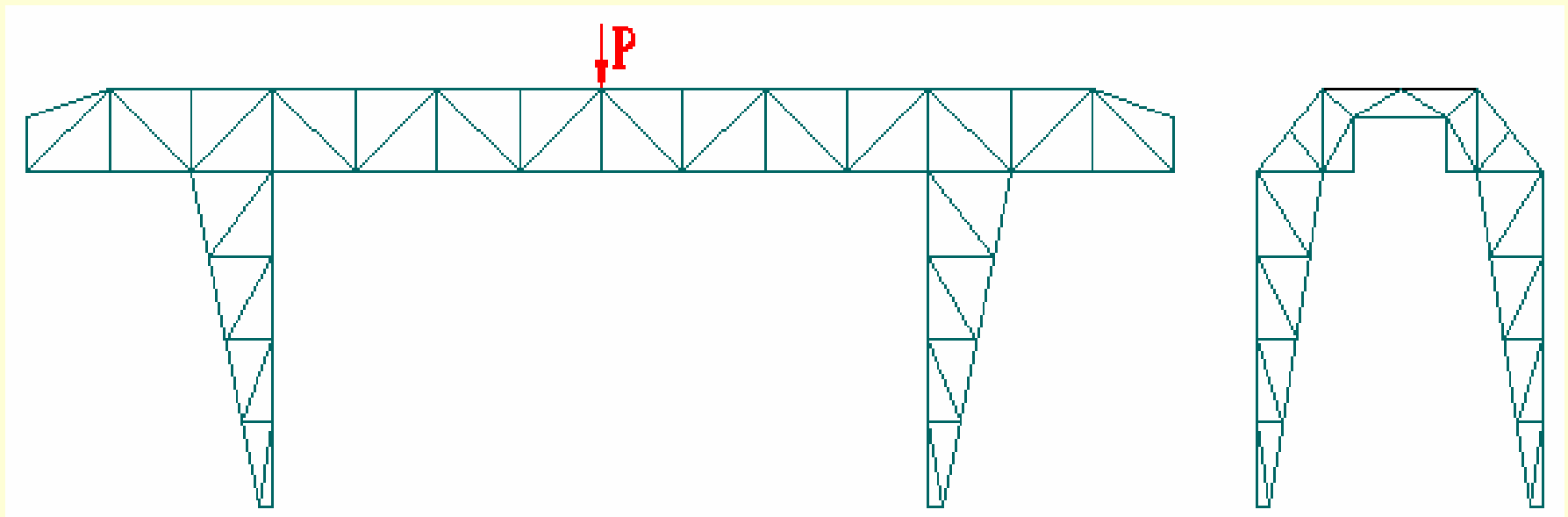




③三角形桁架



④O形桁架





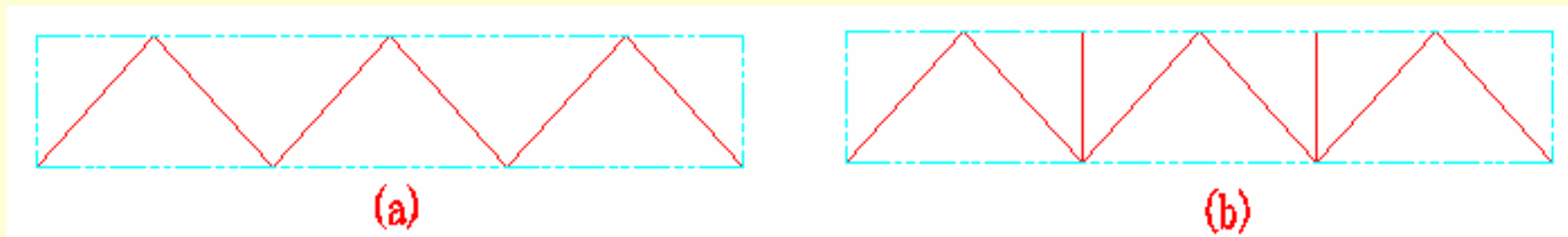
二、桁架的腹杆体系

对腹杆布置的要求：

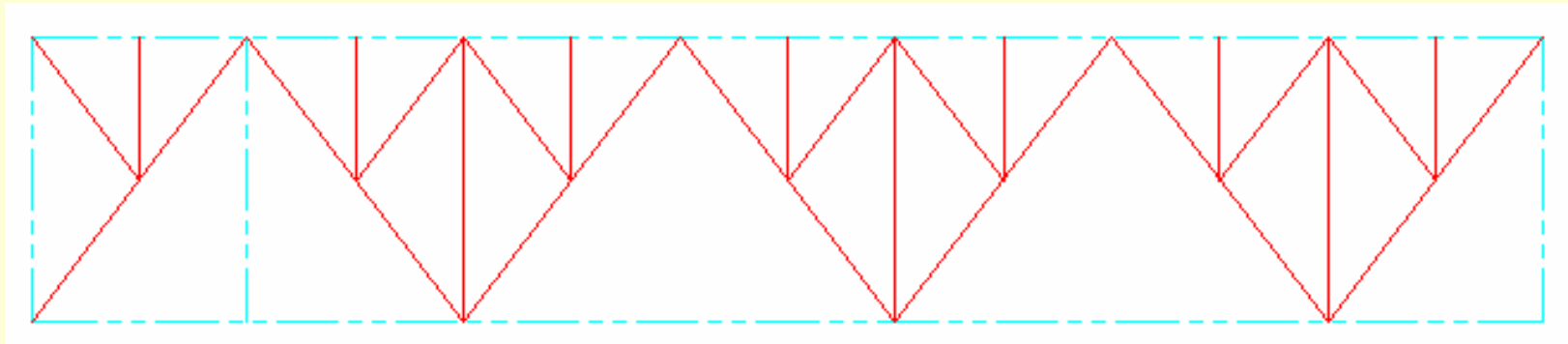
应使杆件受力合理、材料能充分利用，节点构造简单，制造方便。腹杆数、节点数应尽量少，而同一型式的杆件和节点尽量多。

二、桁架的腹杆体系 (续)

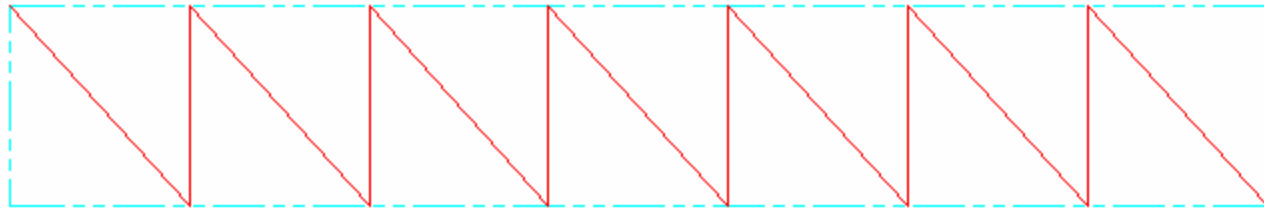
①三角形腹杆体系：多用于承受垂直载荷的金属结构。



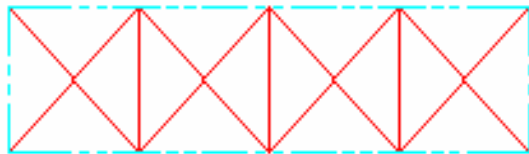
②再分式腹杆体系：常用于大跨度、大起重量的起重机桁架。



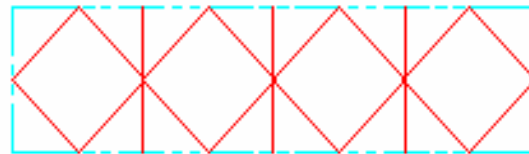
③斜杆式腹杆体系：用于斜腹杆受拉的起重机金属结构。



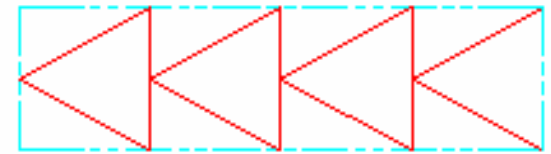
④十字形、菱形、K形腹杆体系：多用于受双向载荷的金属结构。



(a)

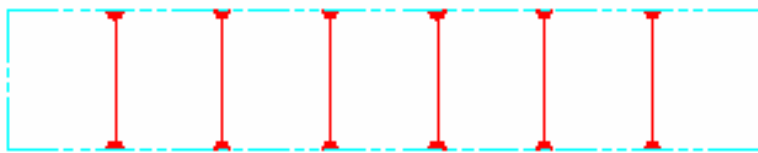


(b)

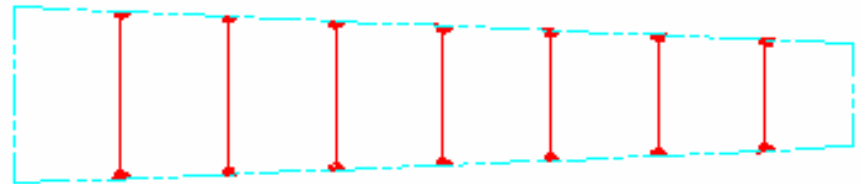


(c)

⑤空腹腹杆体系：多用于桥式类型起重机主桁架和回转类型起重机的动臂。



(a)

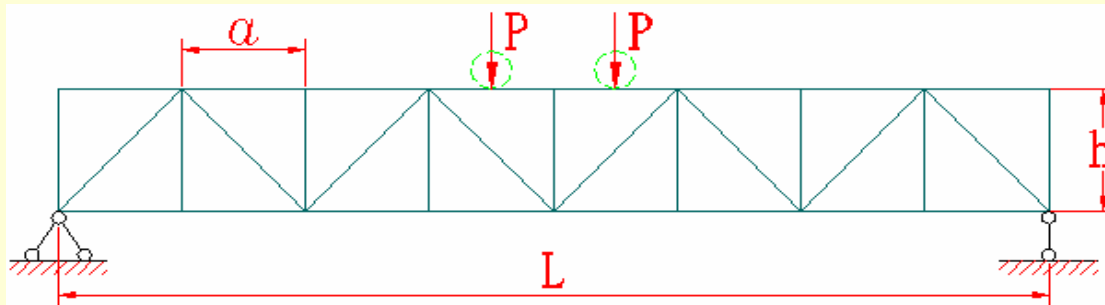


(b)

三、桁架主要参数的确定

桁架的主要参数有：

桁架的跨度 L 、高度 h 、自重 q 、节间长度 a 和节点数 n 等。



1. 桁架的跨度

常用起重机标准跨度系列值为：

桥式起重机： 7.5m、10.5、13.5、16.5、19.5、22.5、25.5、
28.5、31.5m等；

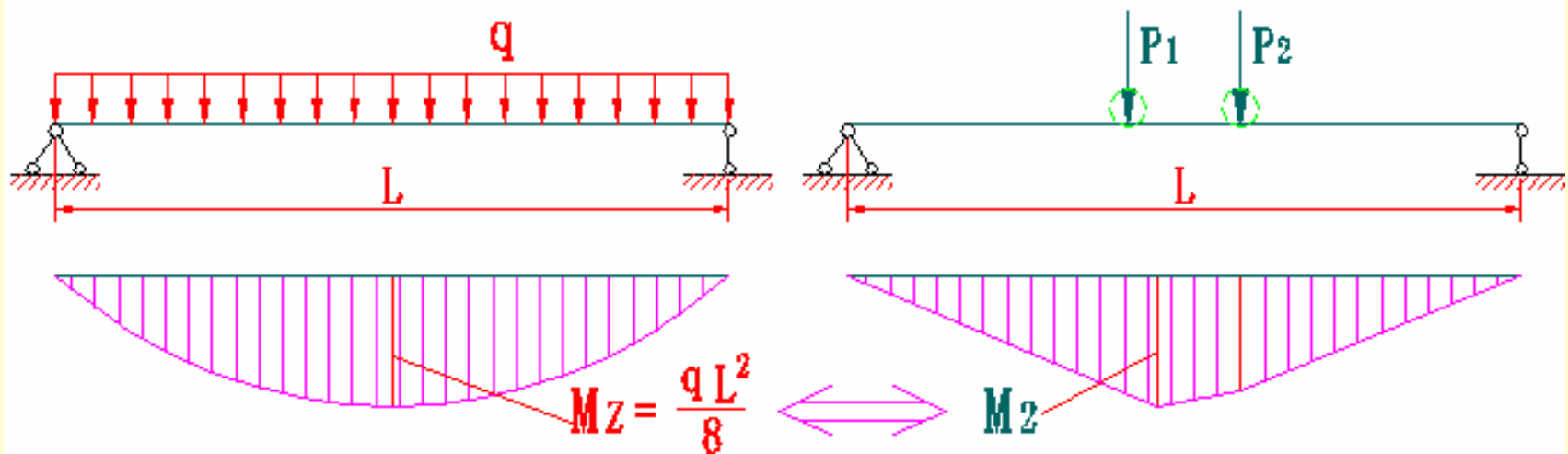
龙门起重机： 14m、18、22、26、30、35m等。

2. 桁架的高度

桁架跨中的挠度采用与简支梁类似的公式计算：

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{qL^4}{EI_z} \quad (7-1)$$

式中 q ——将桁架折算为梁的均布载荷,只考虑移动载荷的作用。转换原则如图示：



所以 $q = \frac{8M_2}{L^2}$



I_z ——将桁架折算为梁，跨中截面的折算惯性矩，其值为

$$I_z = \frac{A_s A_x h^2}{m(A_s + A_x)} \quad (7-2)$$

其中 A_s 、 A_x ——桁架上、下弦杆的截面面积；

μ ——折算系数，对常用桁架 $m = 1.2 \sim 1.5$ 。

下弦杆截面面积为

$$A_x = \frac{N}{[S]_{II}'} = \frac{M_{\max}}{h[S]_{II}'} = \frac{\varphi_4 M_1 + \varphi_2 M_2}{h[S]_{II}'} \quad (7-3)$$

上弦杆的截面面积近似取为

$$A_s = 1.3 A_x \quad (7-4)$$

取 $\mu = 1.3$, 并将 \mathbf{A}_S 、 \mathbf{A}_X 代入 I_z 计算式得


$$I_z = 0.435 \frac{\varphi_4 M_1 + \varphi_2 M_2}{[S]'_{II}} h \quad (7-5)$$

将 q 及 I_z 代入式 (7-1) 得

$$f = 0.24 \frac{M_2 L^2 [S]'_{II}}{Eh(\varphi_4 M_1 + \varphi_2 M_2)} \leq [f] \quad (7-6)$$

令 $a = \frac{M_1}{M_2} \varphi_4 + \varphi_2$, 则桁架的高跨比为

$$\frac{h}{L} \geq 0.24 \left[\frac{L}{f} \right] \frac{[S]'_{II}}{E} \frac{1}{a} \quad (7-7)$$



对Q235钢制造的桁架，取 $[S]_{II} = 100MPa$ ， $E = 2.1 \times 10^5 MPa$

对常用起重机取 $\left[\frac{L}{f} \right] = 800$

代入式 (7-7) 得
$$h \geq \frac{9}{100a} L \quad (7-8)$$

对常用桥式类型起重机，桁架跨中高度可取：

$$h \geq \left(\frac{1}{12} \sim \frac{1}{15} \right) L \quad (7-9)$$

对带悬臂的龙门起重机，悬臂部分的桁架高度可取与跨中相同的高度。

3. 桁架的自重G

①按弦杆和腹杆重量之和计算桁架自重 G

单位长度桁架的自重 q 为 $q = q_s + q_x + q_{fg}$


下弦杆单位长度重量 q_x 为:

$$q_x = A_x g \Psi_x = \frac{\varphi_4 M_1 + \varphi_2 M_2}{h[S]_{II}} g \Psi_x \quad (7-10)$$

Ψ_x --弦杆的构造系数 $\Psi_x = 1.1 \sim 1.3$

上弦杆单位长度重量 q_s 为: $q_s = 1.3q_x$

单位长度腹杆的重量为 $q_{fg} = 0.4(q_s + q_x)$


$$q = q_s + q_x + q_{fg} = 1.4(q_s + q_x) = 1.4 \times 2.3q_x = 3.22q_x \quad (7-12)$$

将 q_x 计算式代入式(7-12)得

$$q = 3.22 \times \frac{M_2 a}{[s]_{II} h} \times g \times \Psi_x \quad (7-13)$$

取桁架高度 $h = \frac{9}{100} L$ 代入上式, 则桁架单位长度重量为

$$q = \frac{3.22 \times M_2 a}{\frac{0.09}{a} L [s]_{II}} g \times y_x \quad (7-14)$$

对Q235-A钢, 取 $[s]_{II} = 100 \text{MPa}$ 代入上式可得

$$q = 0.36 a^2 M_2 g \times y_x / L \quad (N/mm) \quad (7-15)$$

$$\text{桁架自重} \quad G = 0.36 a^2 M_2 g \times y_x \quad (N)$$

②利用经验公式计算桁架自重

对桥式类型起重机，跨内部分一片主桁架的重量为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } Q < 400\text{kN} \text{ 时, } \quad G = 10Q(L-5) + 7000 \quad (N) \\ 400\text{kN} \leq Q \leq 750\text{kN} \text{ 时, } \quad G = 10Q(L-5) \quad (N) \end{array} \right.$$

式中 Q ——起重量 (kN)； L ——跨度 (m)。

③参照同类产品结构的重量。

按上述方法计算的自重 G ，应换算成节点载荷作用于桁架上。

4. 节间长度 a 和节间数 n

在平行弦桁架中，常取 $a=h$

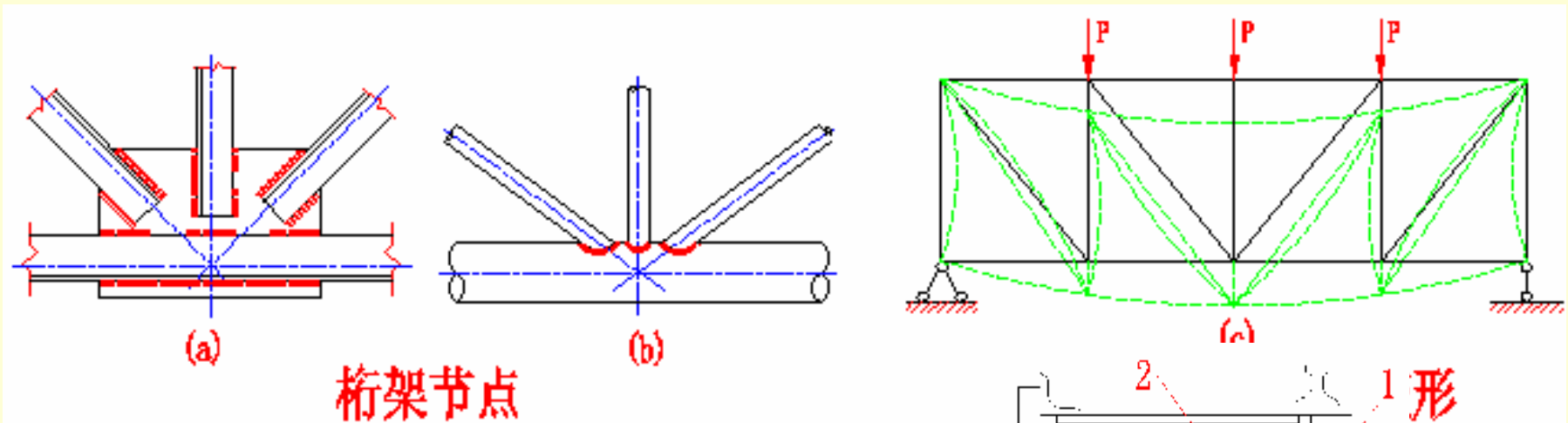
节间长度 a 通常取为 $a = 1.5 \sim 3.0m$

$$\text{节间数 } n = \frac{L}{a}$$

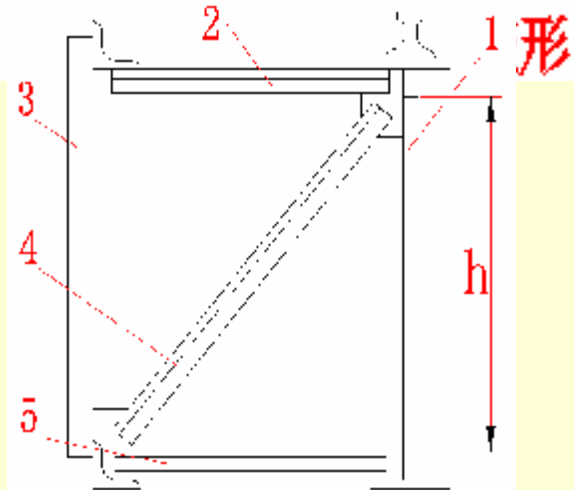
第三节 桁架的计算假定和设计计算步骤

一、桁架的计算假定

(1) 假定节点是光滑的铰节点



(2) 空间桁架分解成平面桁架

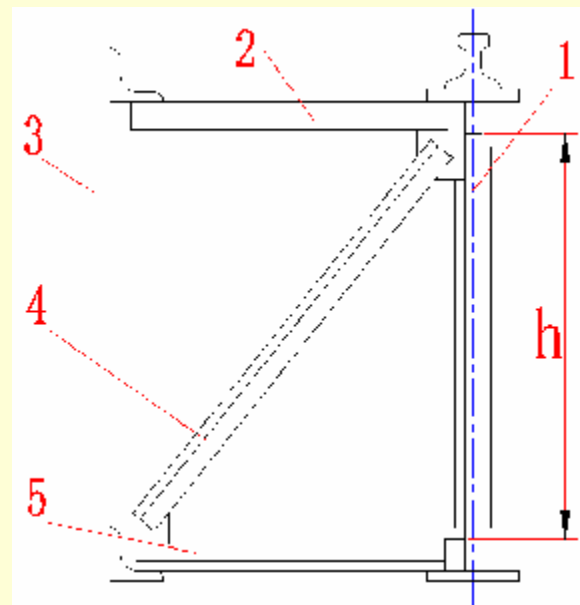


(2) 空间桁架分解成平面桁架

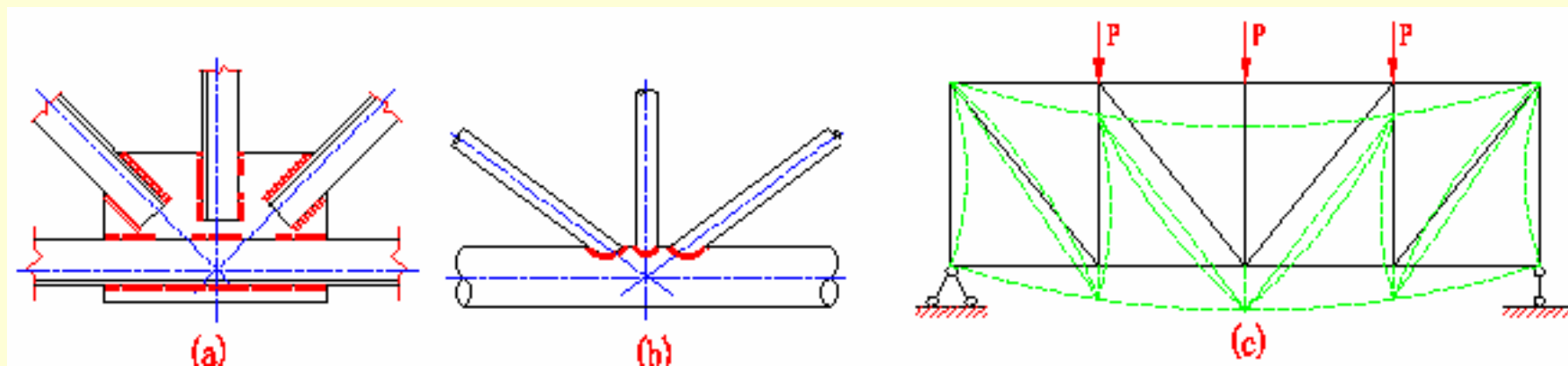
(3) 假定平面桁架所有杆件的轴线位于同一平面内,并假定杆件的轴线交汇于节点.

(4) 假定外载荷均作用于桁架的节点上。

但移动载荷作用于节间引起的弦杆局部弯矩另行计算。



1—主桁架； 2—上水平桁架；
3—副桁架； 4—斜撑杆；
5—下水平桁架。



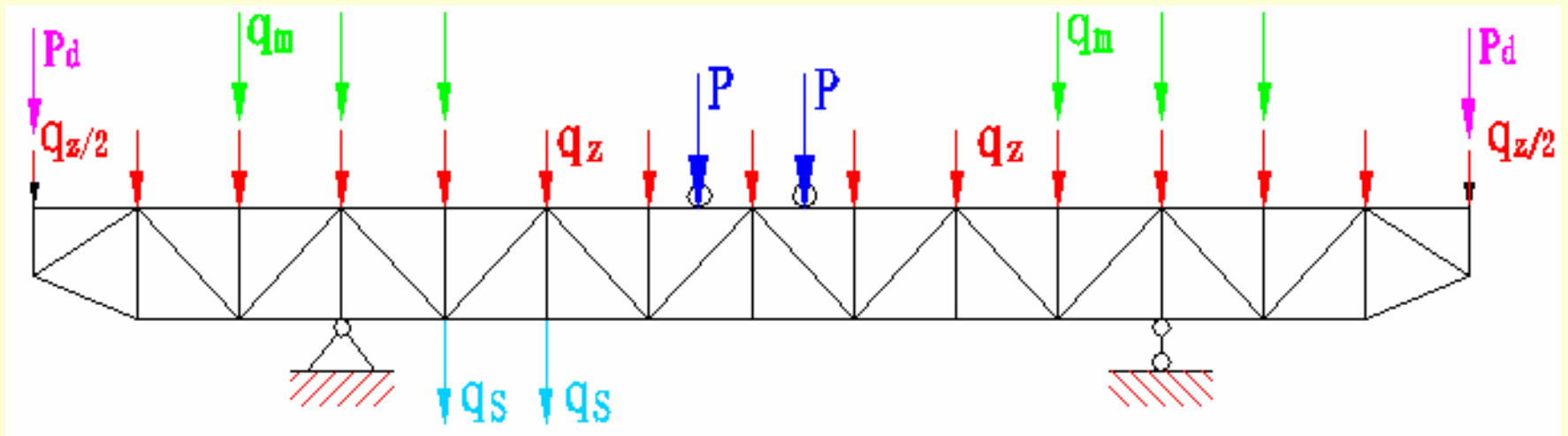
二、平面桁架设计计算步骤

- 选择桁架的外形，并确定桁架腹杆体系；
- 确定桁架的主要参数：桁架的高度 h 、自重，节间长度 a 等；
- 确定桁架的计算简图，并进行内力分析；
- 确定桁架各杆件的计算长度；
- 设计桁架各杆件的断面；
- 进行整体刚度计算；
- 进行节点设计并计算节点焊缝；
- 绘制桁架的施工图。

第四节 桁架杆件的内力分析与计算

一、桁架的计算简图

对结构、支座、载荷进行简化，建立计算模型。



二、内力分析方法

1. 求固定载荷引起桁架杆件内力的方法

图解法：适用于求所有杆件的内力（如克马图）。

数解法：
 { 节点法，适用于求所有杆件的内力。
 { 截面法，适用于求需要的特定截面杆件的内力。

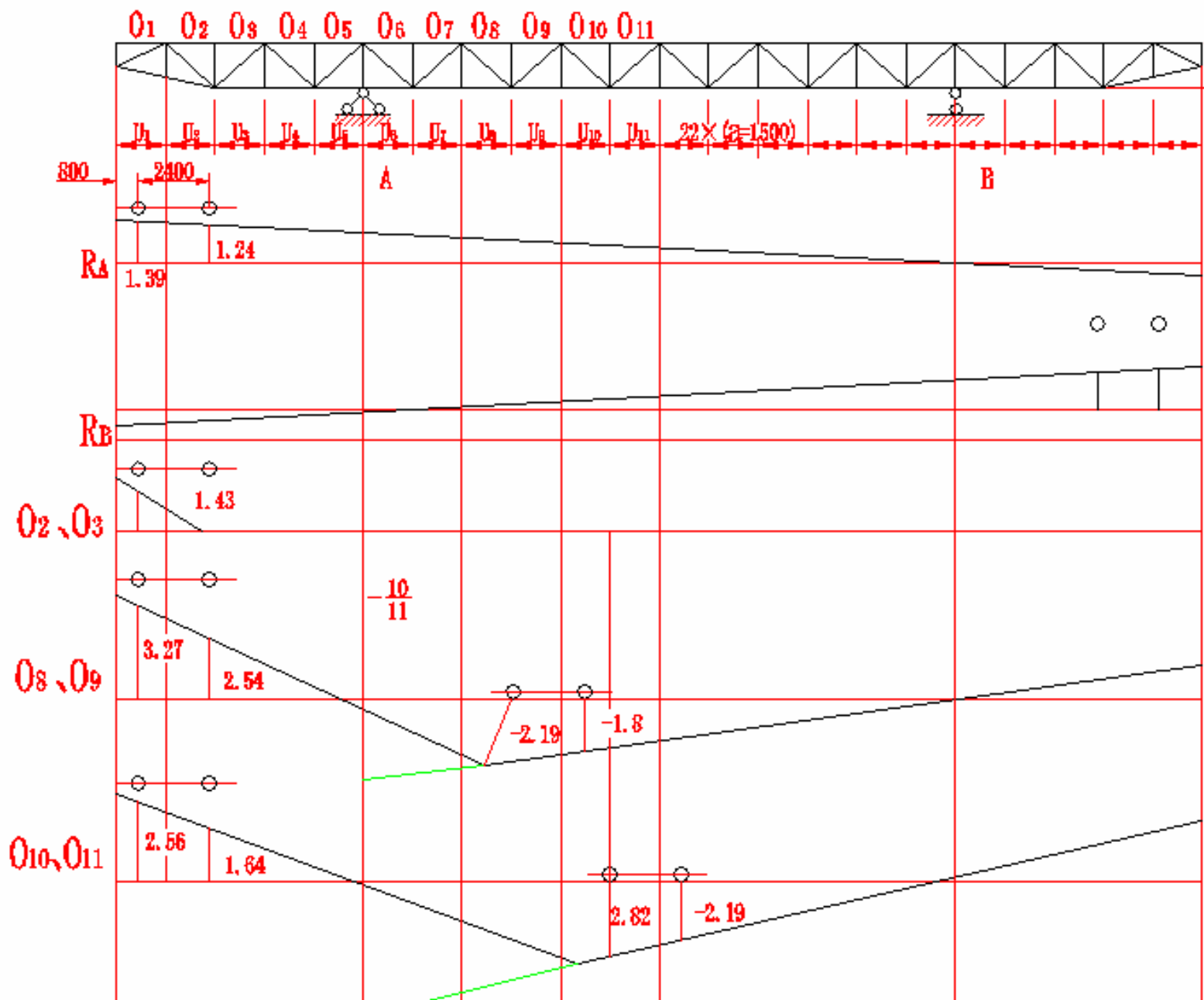
有限元方法：适用于复杂的空间结构。

2. 求移动载荷引起桁架杆件内力的方法

影响线法：适用于求所有杆件的内力。

如果移动载荷固定于某一位置，可将其看做是固定载荷，按固定载荷求其引起的桁架杆件内力。

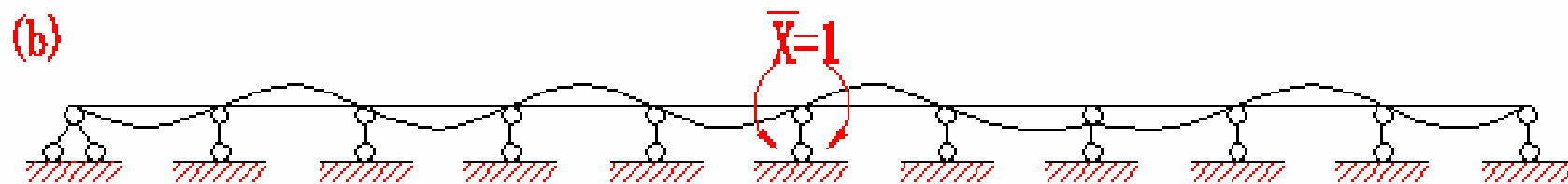
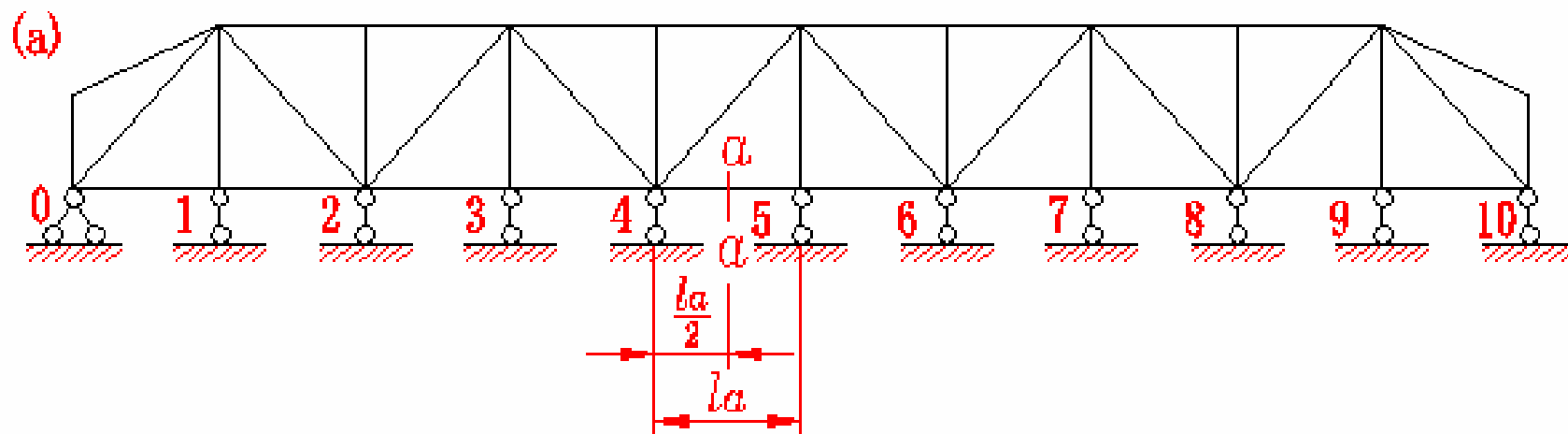
影响线法



三、移动载荷对桁架上弦杆的局部弯矩

1. 精确解法

视上弦杆为多跨连续梁,用弯矩影响线的方法确定。



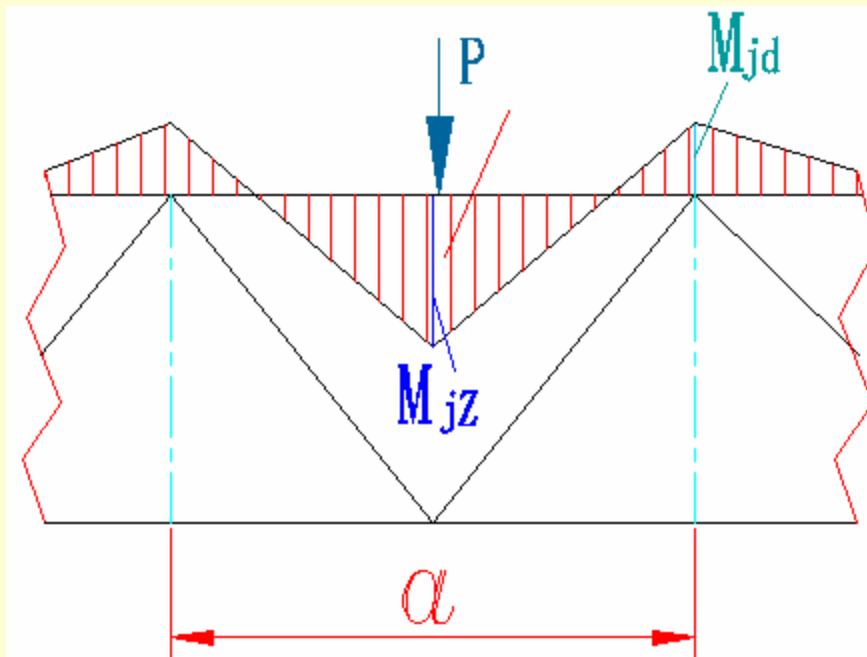
多跨连续梁支承5的弯矩影响线

2. 近似解法

使移动载荷位于节间中央，由轮压引起的局部弯矩，可按下列公式近似计算：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{节中弯矩: } M_{jz} = +\frac{Pa}{6} \\ \text{节点弯矩: } M_{jd} = -\frac{Pa}{12} \end{array} \right.$$

式中 P ——一个车轮的轮压；
 a ——上弦杆节间长度。



第五节 桁架杆件的断面设计

一、桁架杆件断面选择的一般原则

- (1) 同一片桁架中型钢的规格不超过五种。
- (2) 应尽量选用肢宽壁薄的型钢。
- (3) 所用角钢型号不小于 $\angle 45 \times 4$ 或 $\angle 56 \times 36 \times 4$ ；
钢管的壁厚不小于4mm；
板厚度不小于5mm；
圆钢直径不小于 $\phi 12$ 。



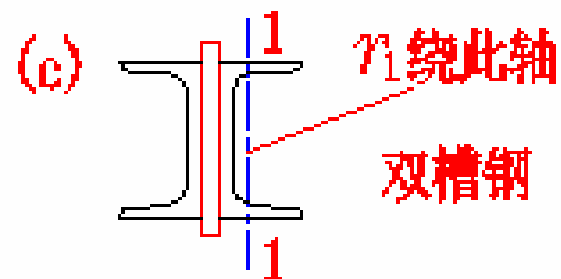
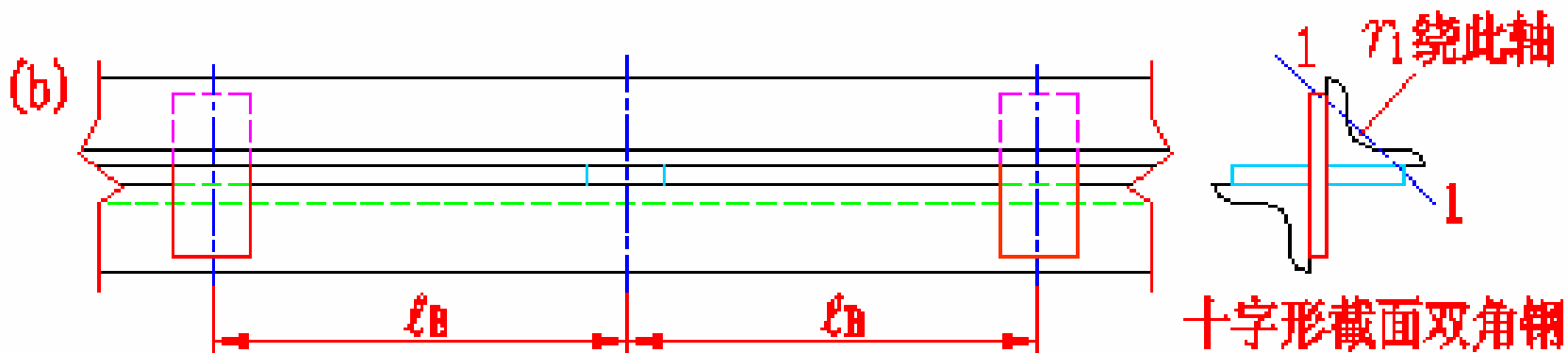
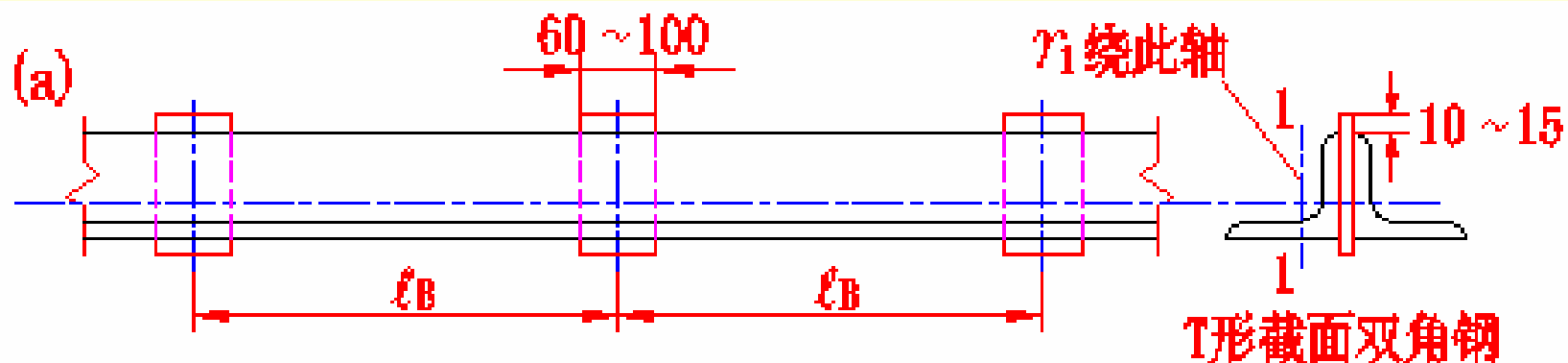
(4) 两根型钢组成组合截面时，杆件长度方向应设置垫板。

垫板中心线之间的距离 l_B 为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{压杆: } l_B \leq 40 r_1 \\ \text{拉杆: } l_B \leq 80 r_1 \end{array} \right.$$



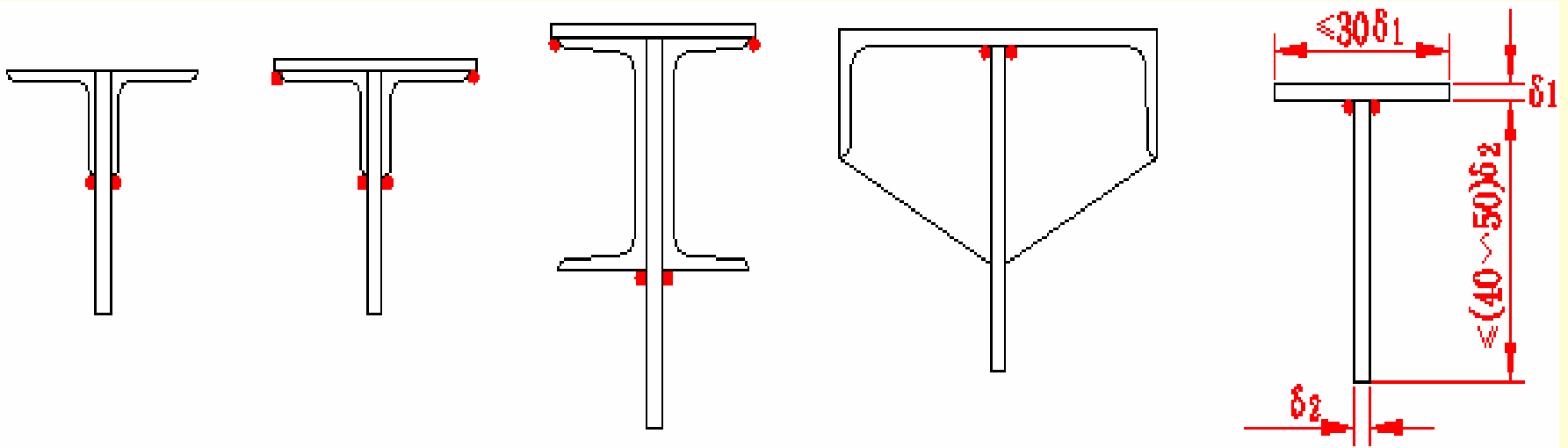
式中 r_1 —— 单根型钢对自身轴的回转半径，如图示。



垫板的设置

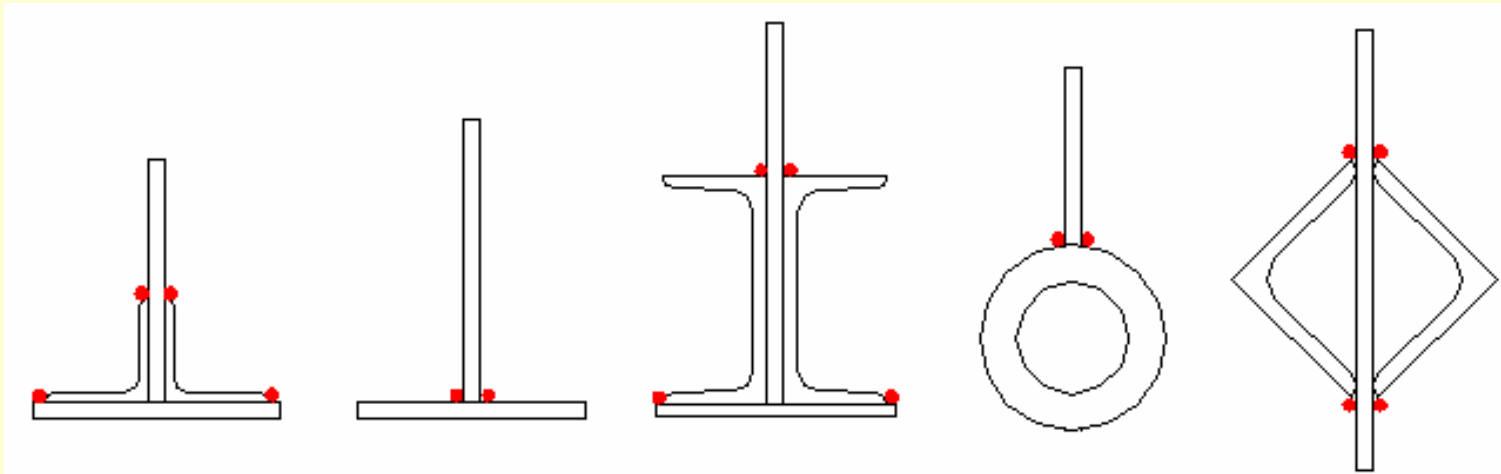
二、桁架各类杆件的常用断面形式

(1) 主桁架上弦杆



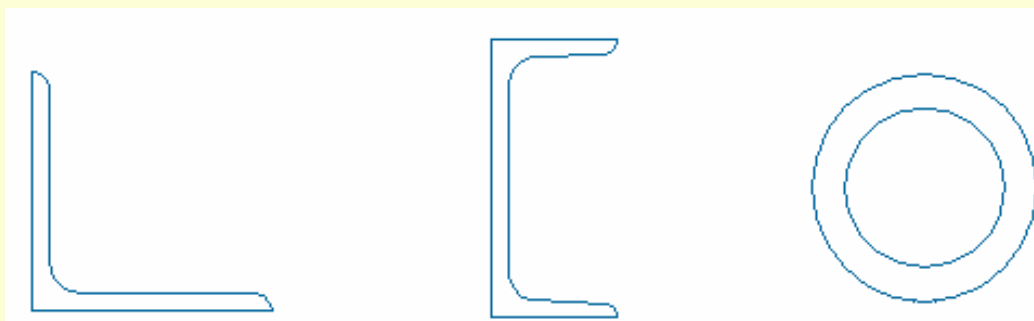
主桁架上弦杆的断面形式

(2) 主桁架下弦杆



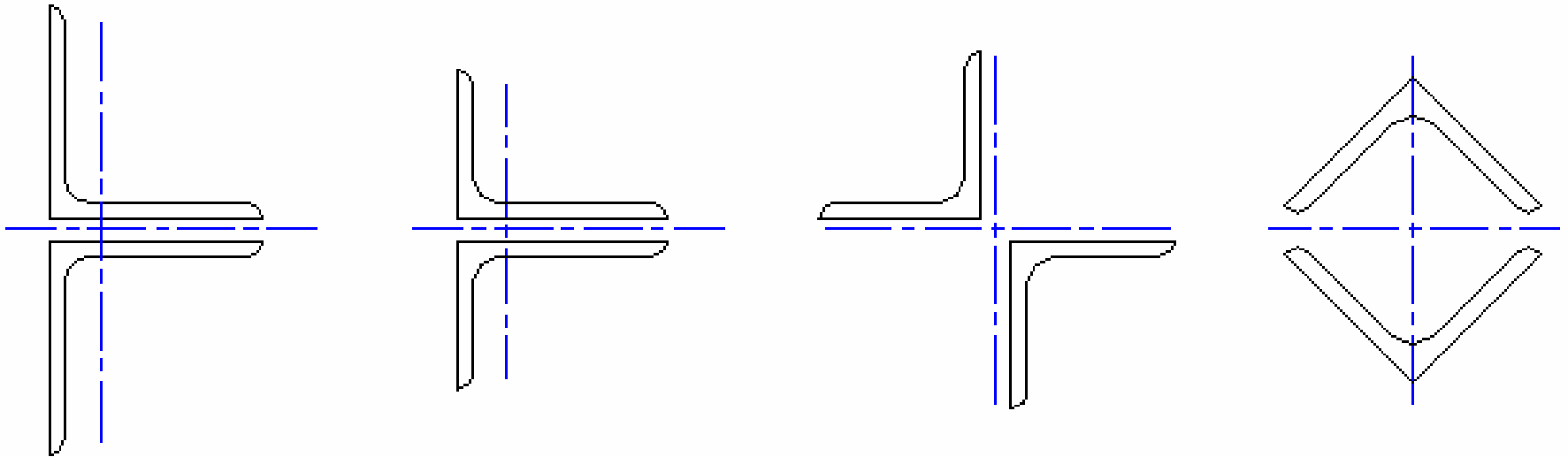
主桁架下弦杆的断面形式

(3) 普通桁架的弦杆



普通桁架弦杆的断面形式

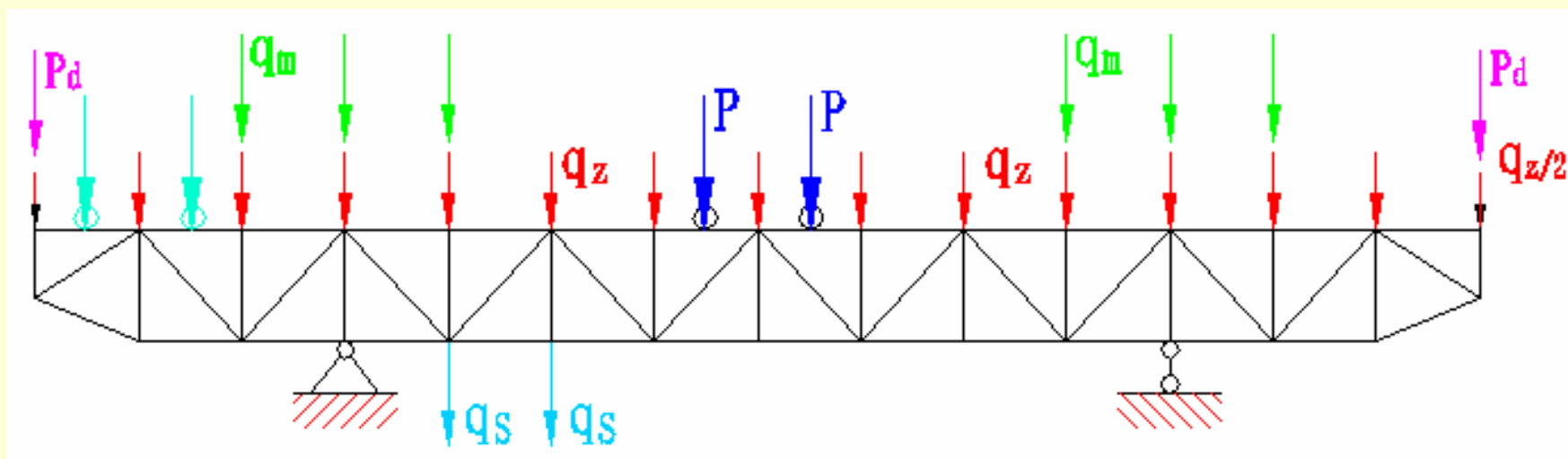
(4) 腹杆



桁架腹杆的断面形式

三、桁架杆件的设计计算

- 轴心拉杆
- 轴心压杆
- 偏心拉杆(拉弯杆)
- 偏心压杆(压弯杆)



轴心拉杆、偏心拉杆和轴心压杆可按第五章的方法计算。

受局部弯曲的主桁架上弦杆的计算

(1) 强度

节中
节点

$$S_{\max} = \frac{\varphi_4 N_1 + \varphi_2 N_2}{A} + \frac{\varphi_2 M_{jz}}{W_2} \leq [S]$$

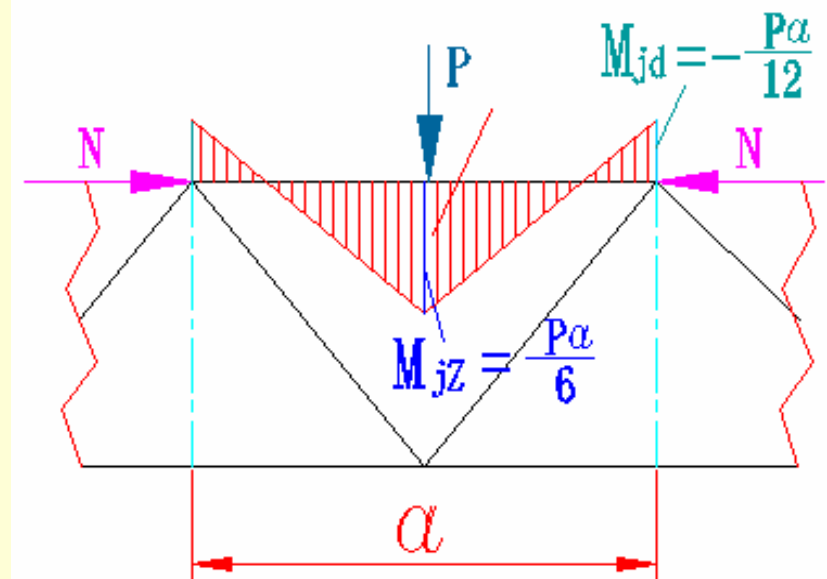
$$S_{\max} = \frac{\varphi_4 N_1 + \varphi_2 N_2}{A} + \frac{\varphi_2 M_{jd}}{W_1} \leq [S]$$

式中

N_1 ——固定载荷引起的杆件内力；

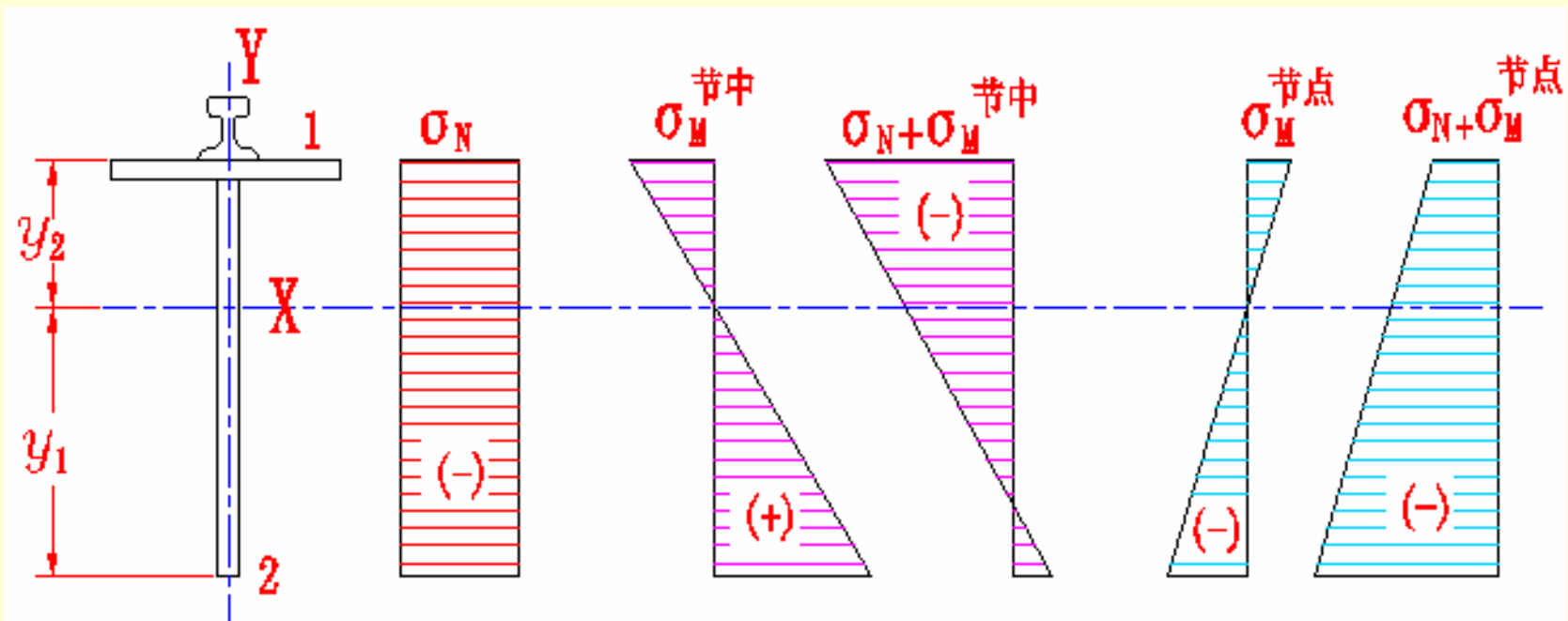
N_2 ——移动载荷引起的杆件内力。

M_{jz} 、 M_{jd} ——上弦杆节中和节点的局部弯矩；



上弦杆受力图

W_1 、 W_2 ——上弦杆节点和节中的截面抗弯模量。
常用T形截面的应力分布如图所示。



主桁架上弦杆应力分布图

对图示T形截面：

$$W_2 = I_x / y_2$$

$$W_1 = I_x / y_1$$

(2) 刚度

$$l_x = \frac{l_x}{r_x} \leq [I]$$

$$l_y = \frac{l_y}{r_y} \leq [I]$$

式中 l_x 、 l_y ——桁架平面内和桁架平面外杆件的计算长度；
 r_x 、 r_y ——截面对 x - x 轴和 y - y 轴的回转半径。

(3) 稳定性

只考虑垂直平面内的局部弯矩时：

$$S_{\max} = \frac{\varphi_4 N_1 + \varphi_2 N_2}{\varphi_x A} + \frac{\varphi_2 M_{jz}}{W_2} \leq [S]$$

四、桁架杆件的计算长度与极限长细比

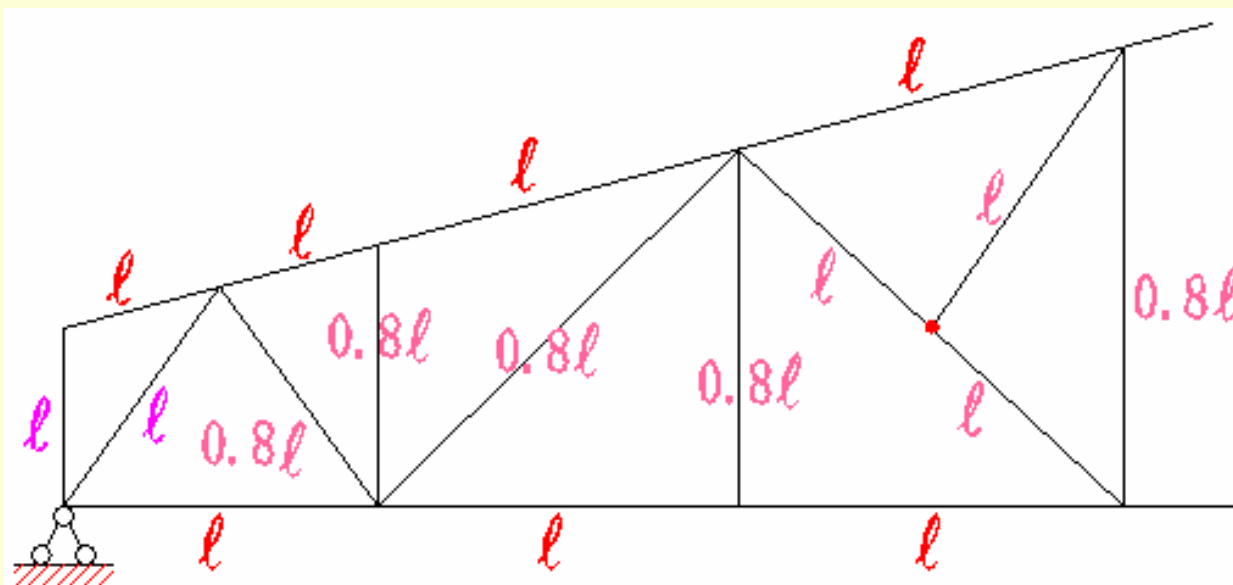
1. 桁架平面内的计算长度 l_{xj}

(1)弦杆： $l_{xj}=l$ （节点间距）

(2)腹杆

● 端部支座处腹杆： $l_{xj}=l$ （节点间距）；

● 其它腹杆：桁架平面内的计算长度 $l_{xj}=0.8l$

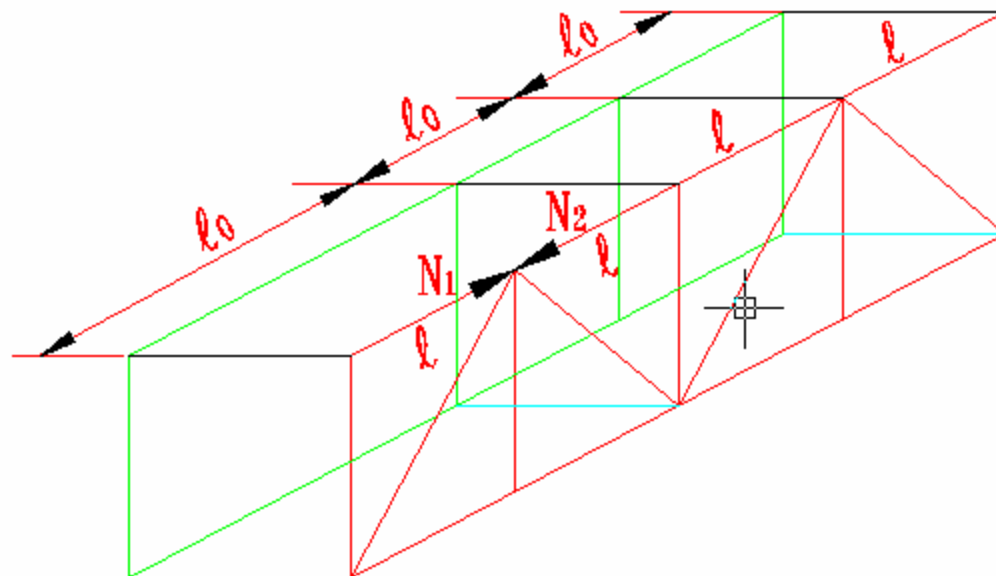


2. 桁架平面外的计算长度 l_{yj}

(1) 弦杆: $l_{yj} = l_0$

特例: 受压弦杆 l_0 范围内相邻弦杆的压力不等, 即当 $N_1 > N_2$ 时:

$$l_{yj} = l_0 \left(0.75 + 0.25 \frac{N_2}{N_1} \right)$$



(2) 腹杆: $l_{yj} = l$

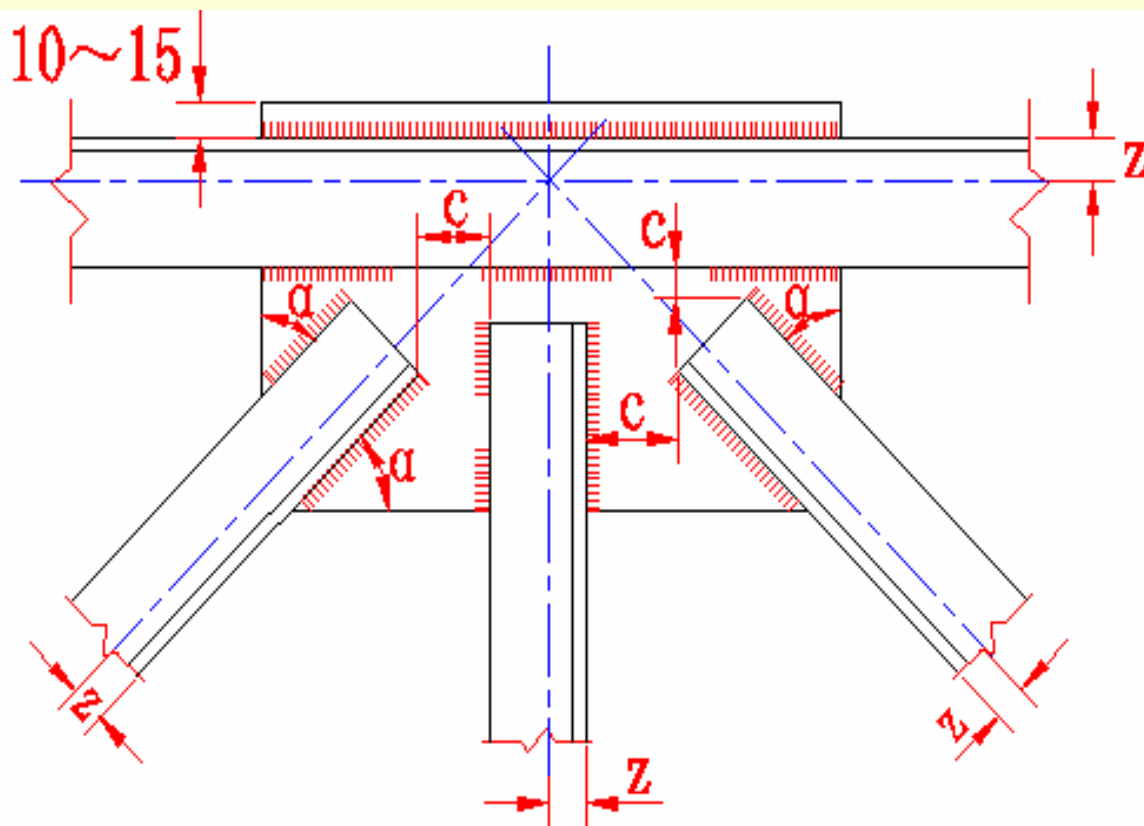
3. 极限长细比 $[\lambda]$

见表7-5。

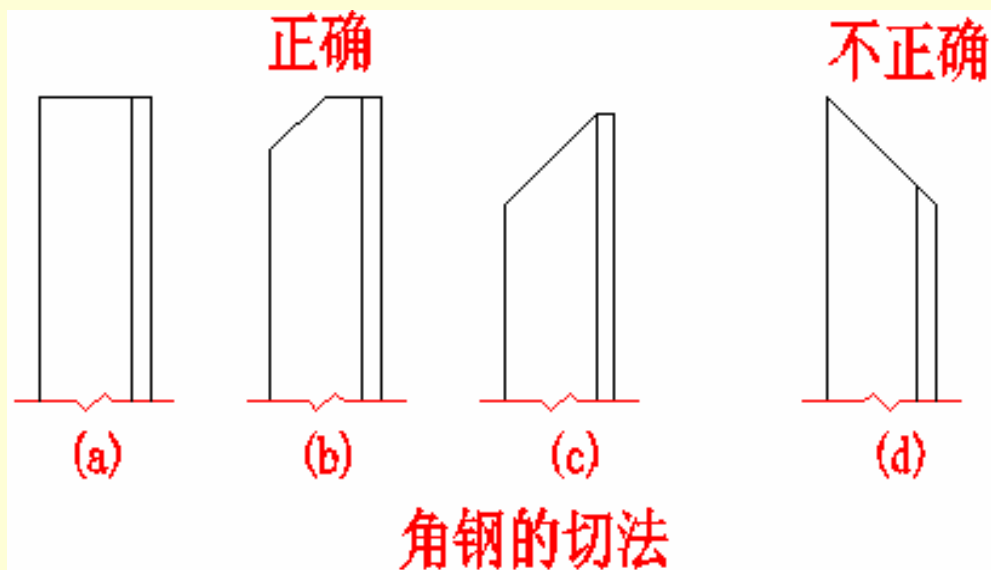
第六节 桁架的节点设计

一、桁架节点的构造要求

- 杆件的几何轴线交汇于节点。
- Z 为5mm的倍数。
- $\alpha > 15^\circ$
- $C = 15 \sim 20\text{mm}$



● 腹杆较宽并在节点板上斜交时：

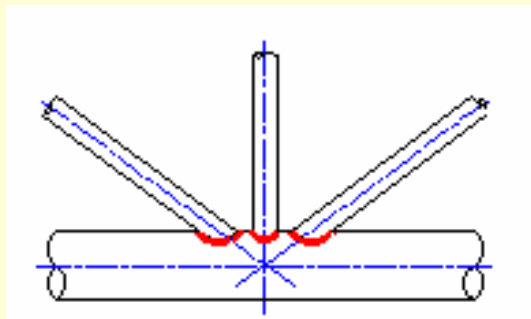
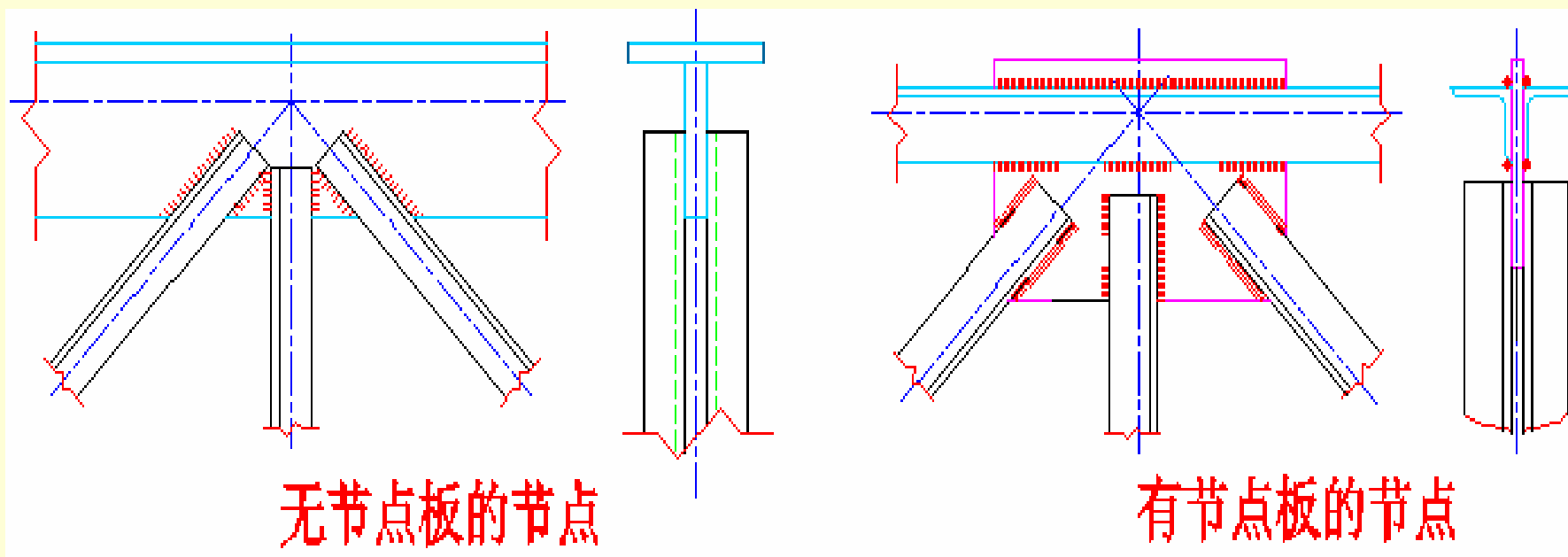


● 节点板的厚度：

腹杆内力	节点板厚度
$N < 100\text{kN}$	6
$100\text{kN} \leq N < 150\text{kN}$	8
$150\text{kN} \leq N \leq 300\text{kN}$	10~12
$300\text{kN} < N \leq 400\text{kN}$	12~14

二、节点焊缝计算

- 无节点板的节点：只需计算腹杆的连接焊缝。
- 有节点板的节点：需计算腹杆、弦杆的连接焊缝。



1. 腹杆焊缝的计算

$$t = \frac{N_{\max}}{h_e \Sigma l_f} = \frac{N_{\max}}{0.7 h_f \Sigma l_f} \leq [t_h]$$

腹杆采用双角钢时，一侧角钢所需连接焊缝的总长度为

$$\Sigma l_f = \frac{\frac{1}{2} N_{\max}}{0.7 h_f [t_h]} \quad (\mathbf{h}_f \text{ 推荐值见表7-6})$$

角钢焊缝长度分配：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{肢背: } l_b = K_1 \Sigma l_f + 10 \text{ mm} \\ \text{肢尖: } l_j = K_2 \Sigma l_f + 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$

K_1 、 K_2 ——分配系数，见表7-7。

2. 弦杆焊缝的计算

(1) 弦杆节点无集中载荷

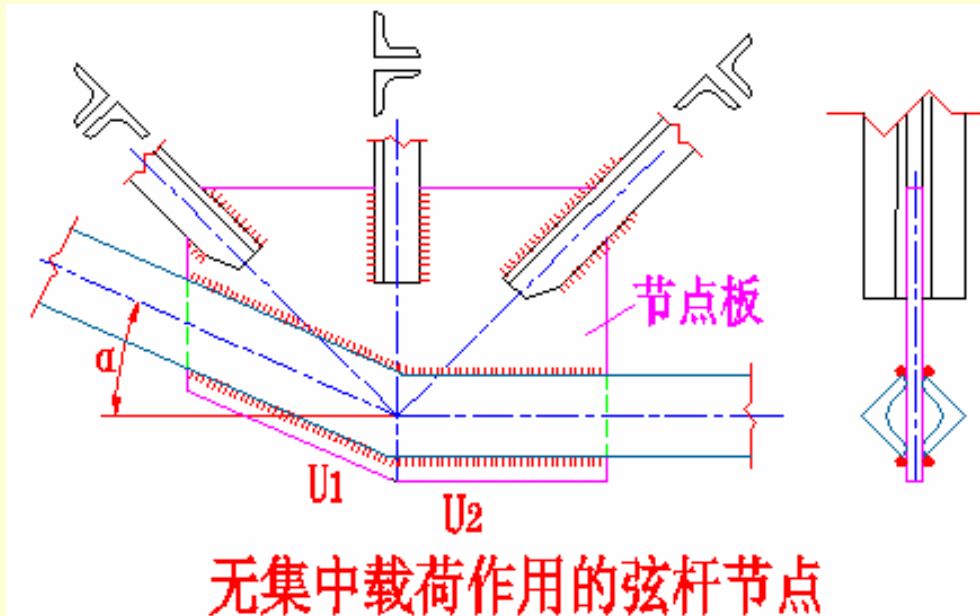
$$\Delta U = U_2 - U_1 \cos a$$

一根角钢所需焊缝长度:

$$\Sigma l_f = \frac{\frac{1}{2} \Delta U}{0.7 h_f [t_h]}$$

两侧焊缝的分配长度为

$$l_1 = l_2 = K \Sigma l_f = \frac{0.5 \Delta U}{1.4 h_f [t_h]}$$

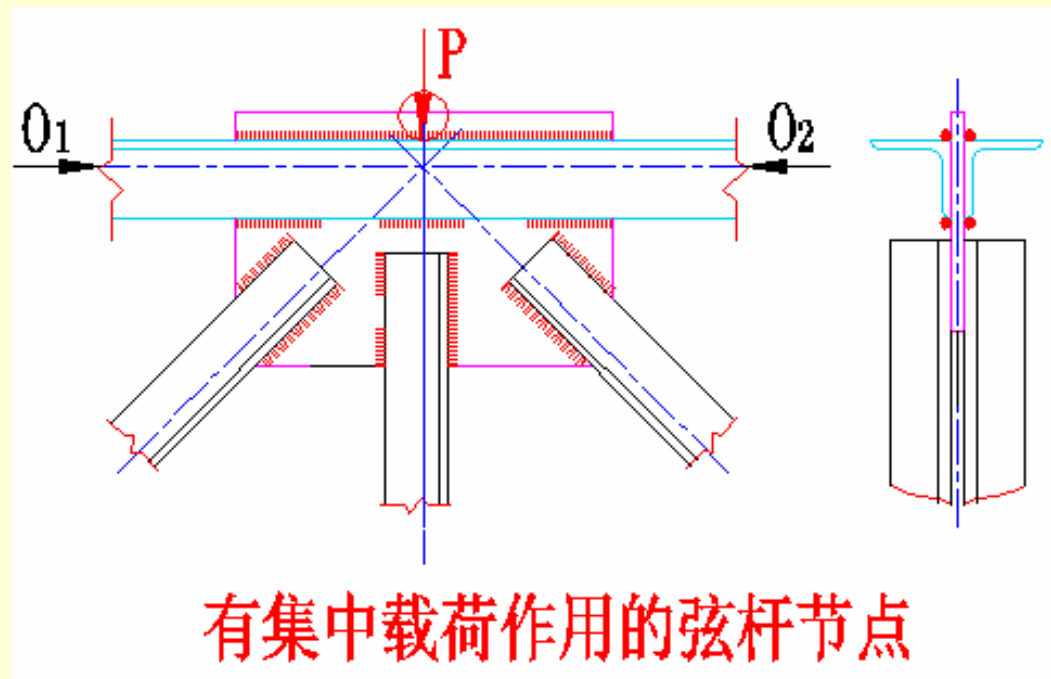


(2) 弦杆节点处有集中载荷

$$R = \sqrt{P^2 + (O_2 - O_1)^2}$$

一根角钢所需焊缝长度:

$$l_f = \frac{\frac{1}{2}R}{0.7h_f[t_h]}$$
$$= \frac{\sqrt{P^2 + (O_2 - O_1)^2}}{1.4h_f[t_h]}$$



第七章 作业

7-1 确定起重量为 $150/50kN$ 桁架式龙门起重机上部主梁（主桁架）的高度和自重载荷。

7-2 起重量为 $150/50kN$ 的桁架式龙门起重机上部主桁架上弦杆的断面尺寸如图示，最大内力

$$N_{\max} = -365150N \quad , \quad M_{jz} = 1635kN \cdot m$$

$$M_{jd} = -0.817kN \cdot m \quad \varphi_w = 1.0$$

节间长度 $l_x = l_y = 1.5m$ 。材料为 Q235-A。验算其强度、刚度和稳定性。

