



# 第九章 桁架式龙门起重机(装卸桥)的金属结构

第一节 桁架式龙门起重机金属结构的主要类型和总体布局

第二节 四桁架式双梁龙门起重机桁架主梁的计算

第三节 双梁桁架式龙门起重机桁架支腿的计算

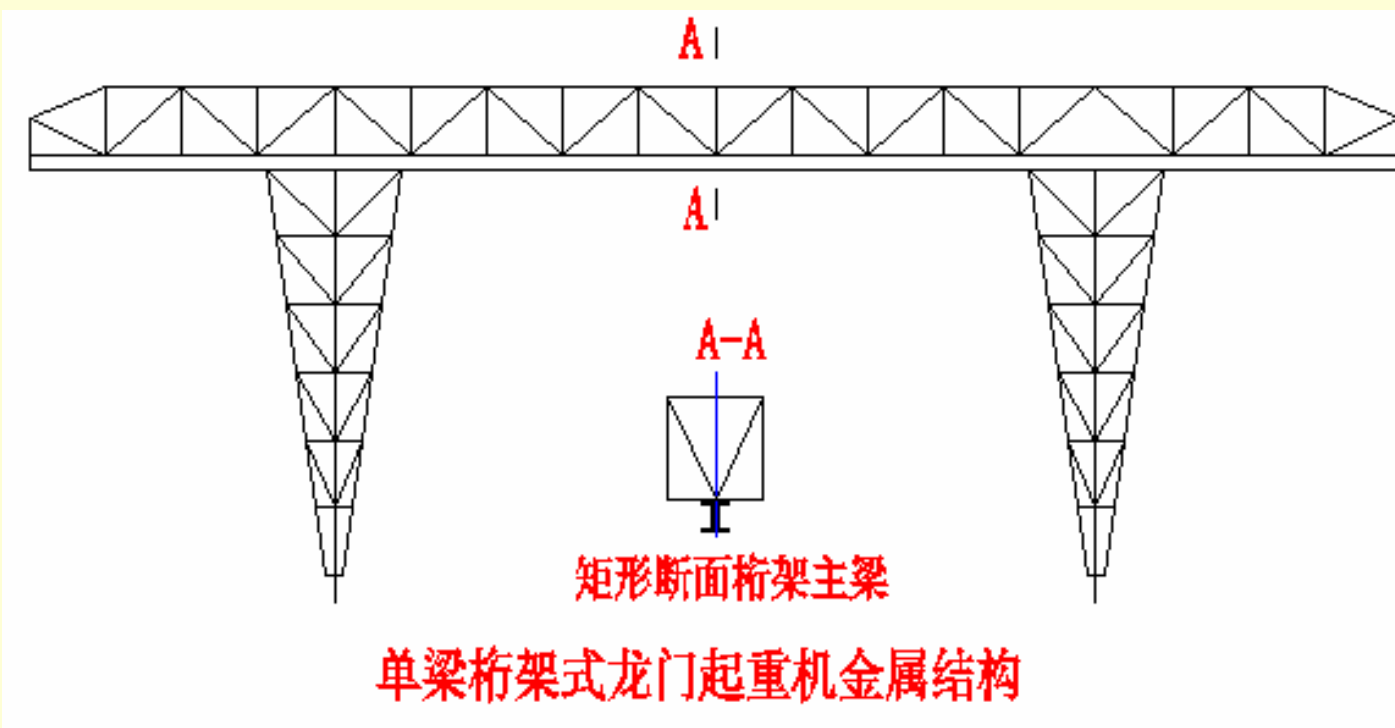
第九章 作业

# 第一节 桁架式龙门起重机金属结构的主要类型和总体布局

桁架式龙门起重机，当 $L > 35\text{m}$ 时常称为**装卸桥**。

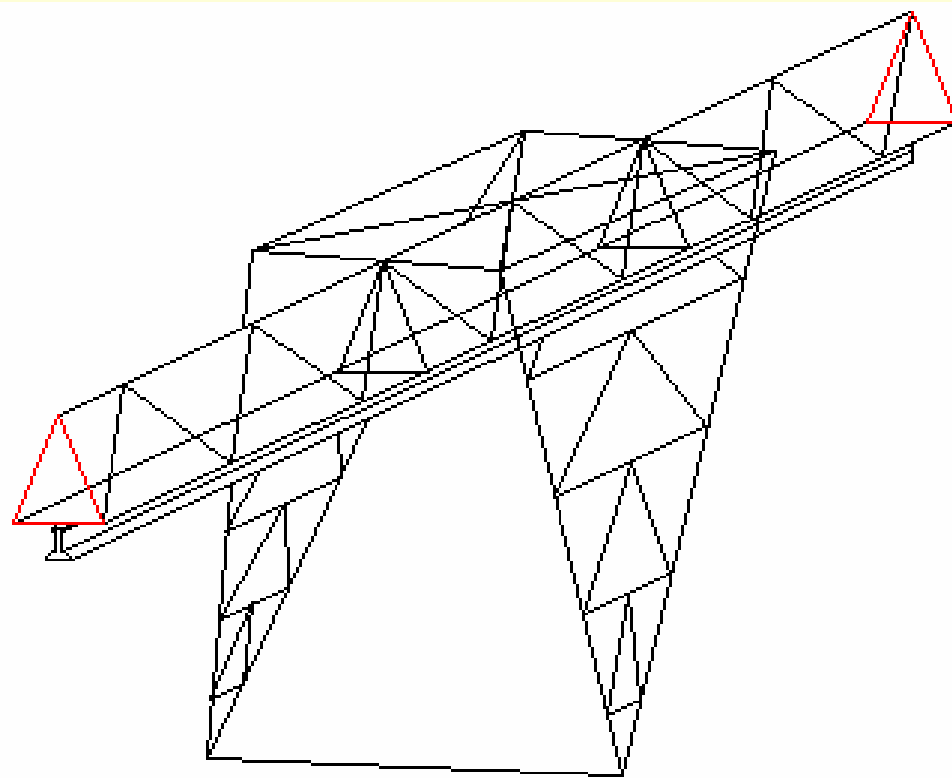
## 一、单梁桁架式龙门起重机主梁的截面形式及应用

### ● 矩形截面

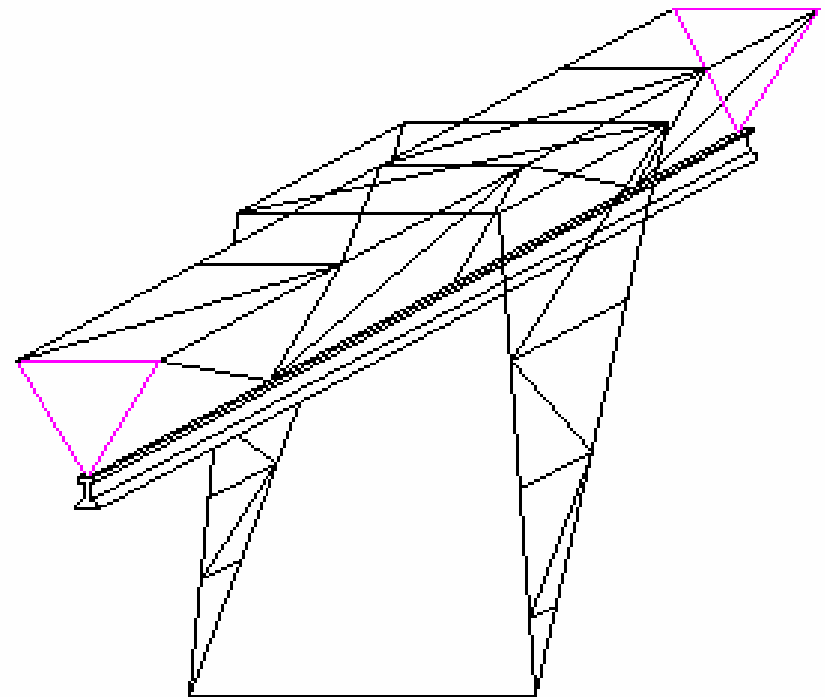


● 正三角形截面

● 倒三角形断面



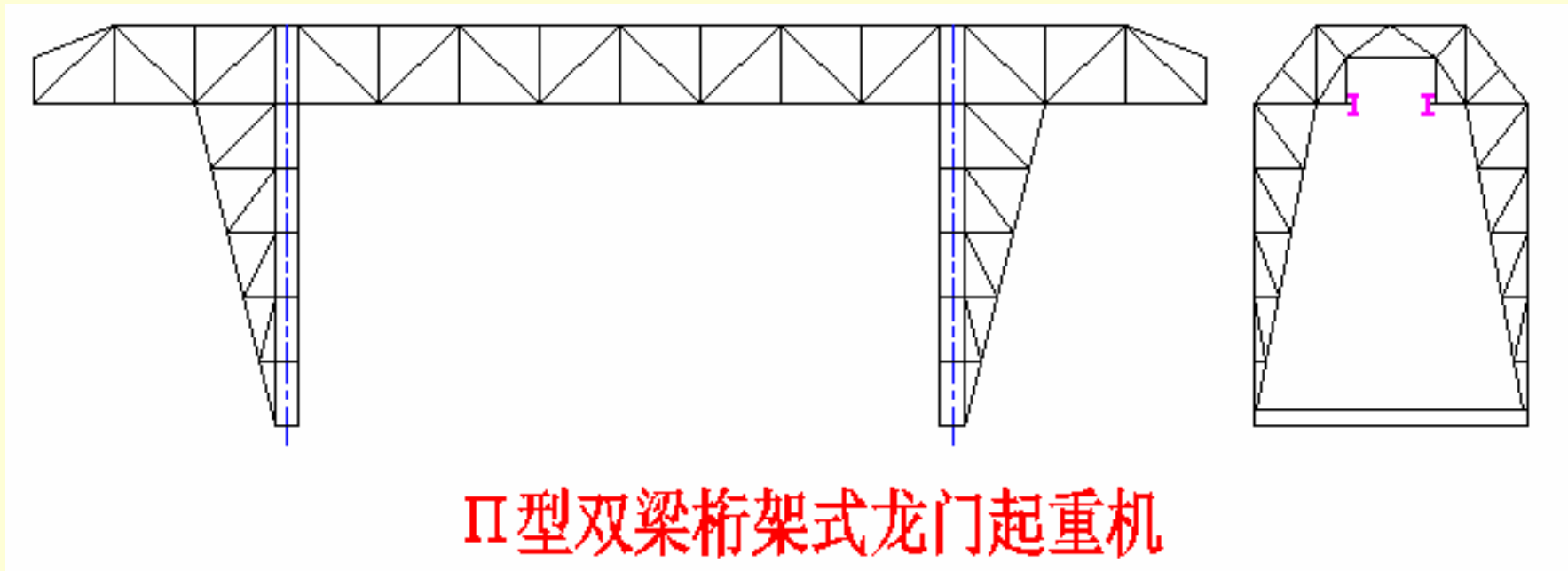
正三角形桁架主梁



倒三角形桁架主梁

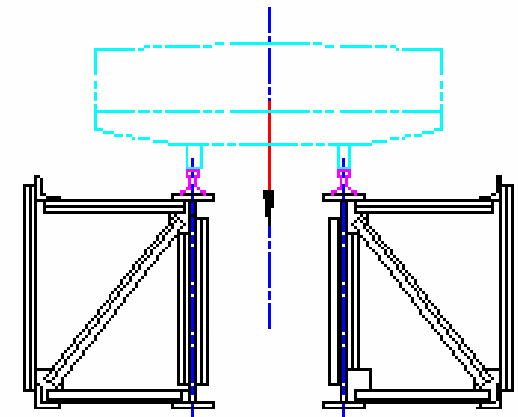
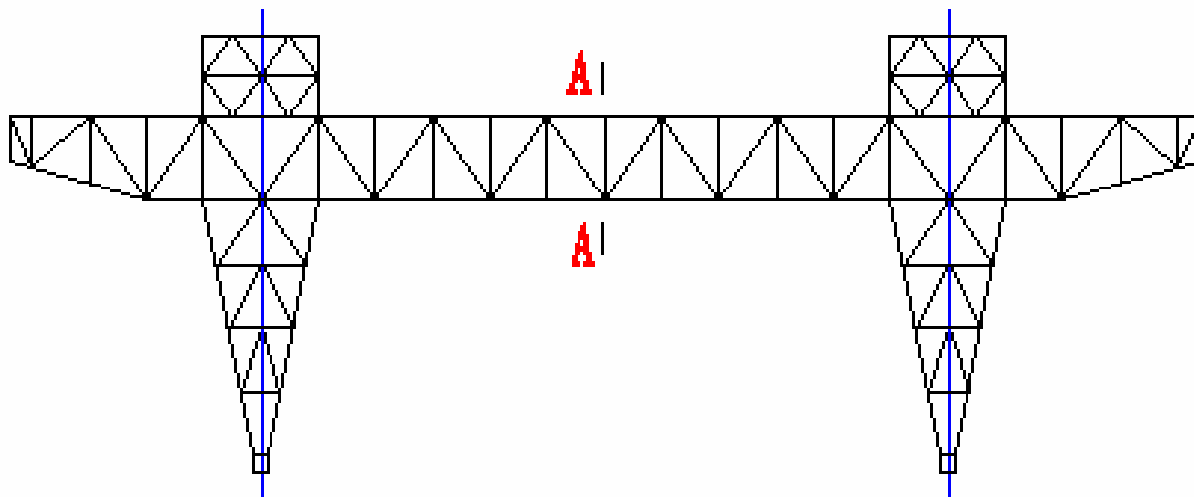
## 二、双梁桁架式龙门起重机主梁的截面形式及应用

### ● $\Pi$ 形桁架式主梁



## ● 四桁架式主梁：

常用于大起重量（ $\geq 500\text{kN}$ ）、大跨度（ $\geq 30\text{m}$ ）或大车运行速度较高的双梁桁架式龙门起重机。

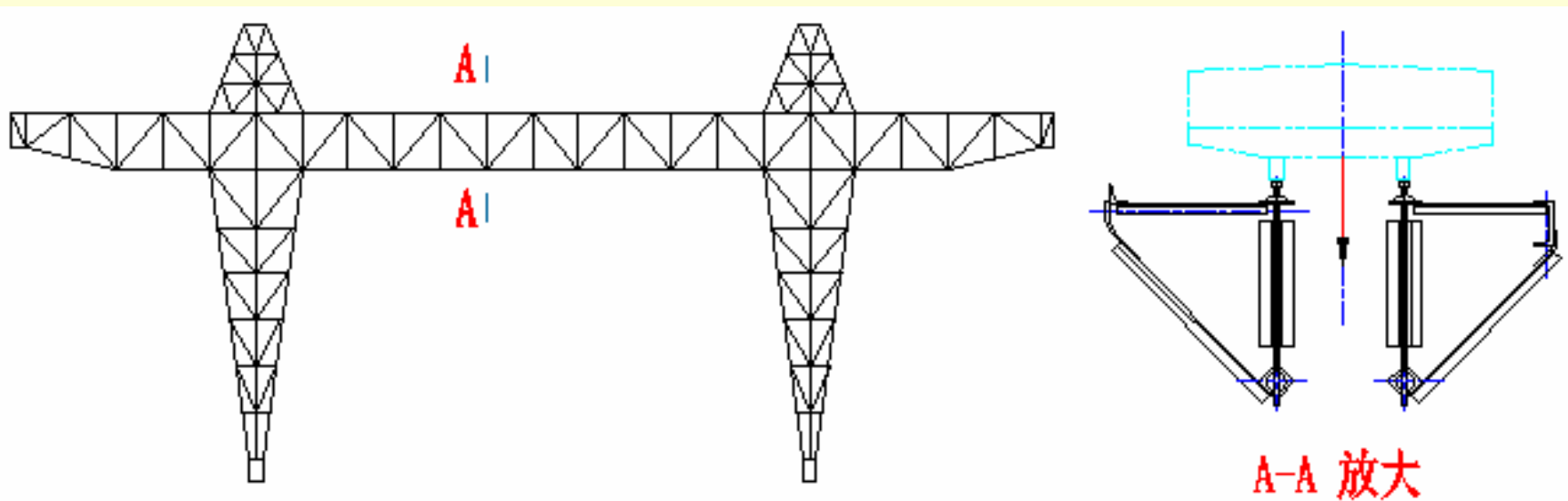


A-A 放大

四桁架式双梁龙门起重机

## ● 三角形断面桁架主梁

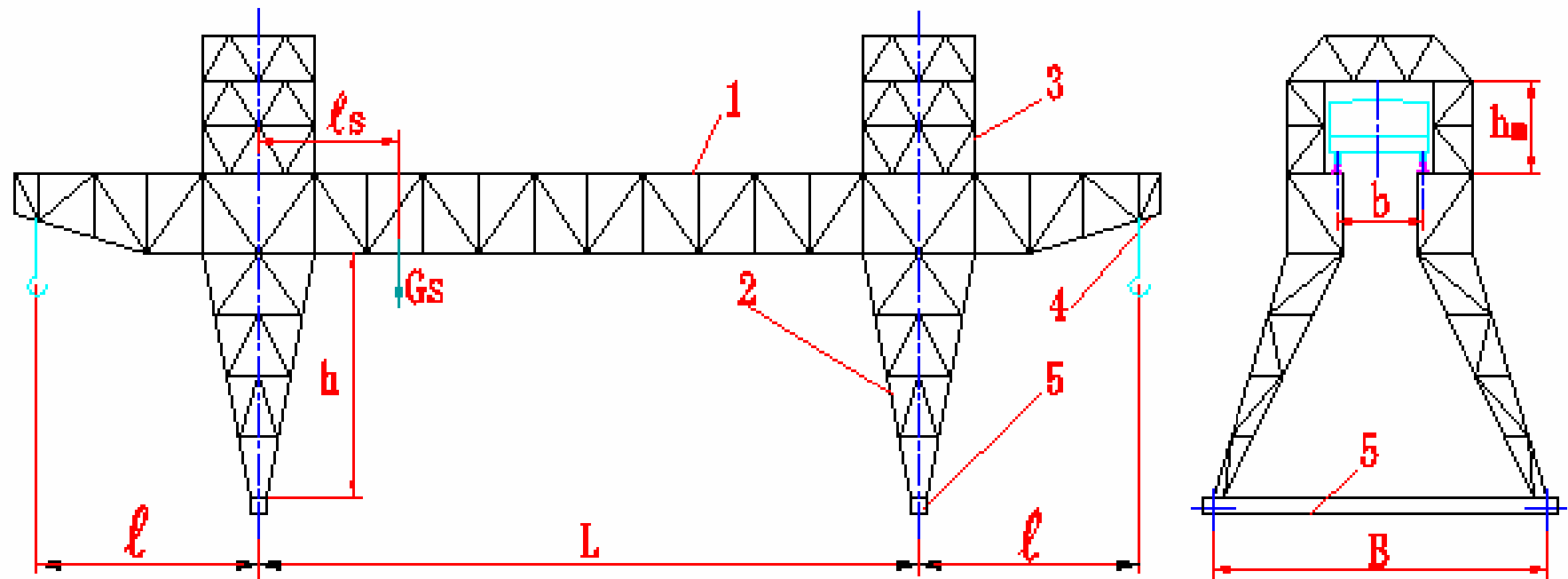
沿大车运行方向水平刚度较差，多用于中、小吨位，中等跨度（ $18\text{m} \leq L < 30\text{m}$ ）的双梁龙门起重机。



三角形断面桁架式龙门起重机金属结构

**马鞍的作用：**防止两主梁向中间并，提高桥架的水平刚度。

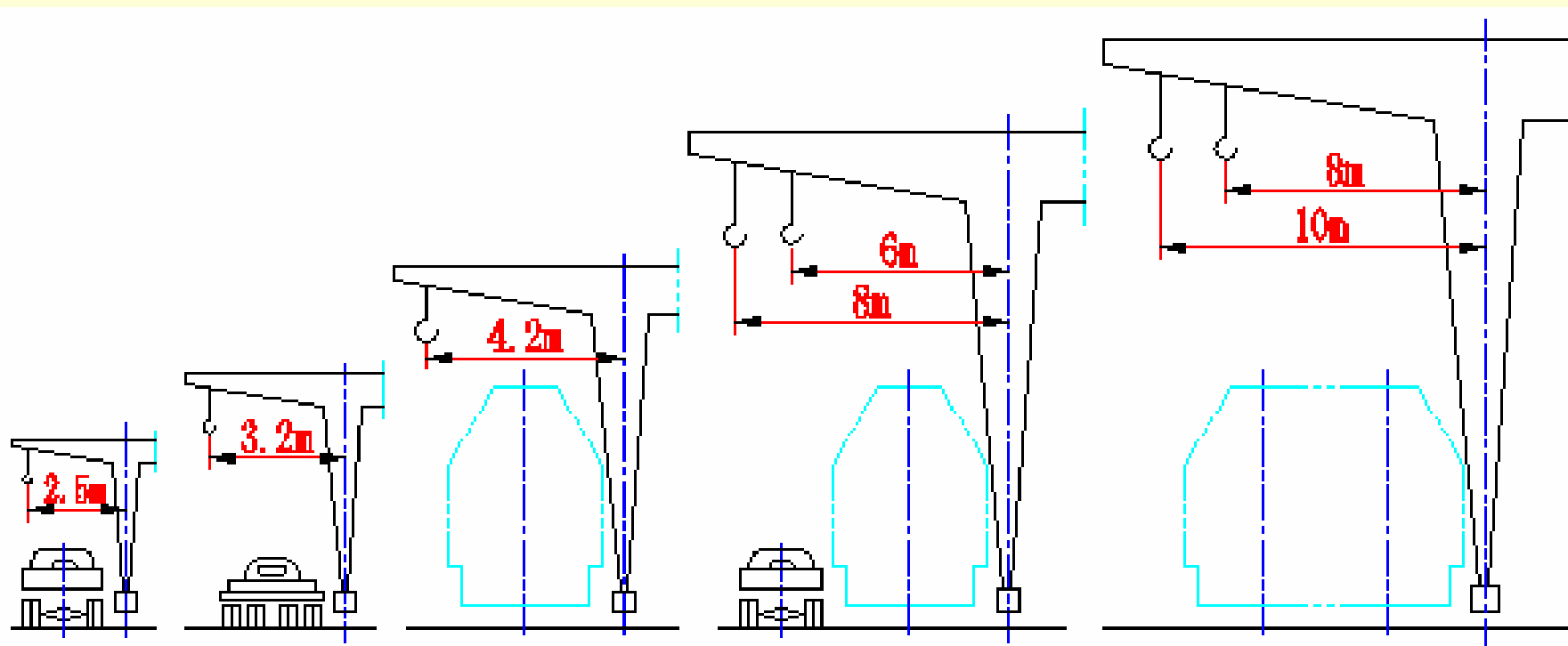
### 三、桁架式龙门起重机金属结构的总体布局



桁架式龙门起重机总体布局

1—桁架主梁；2—桁架支腿；3—马鞍；4—上端梁；5—下端梁。

- ①**跨度L**：常用跨度系列为18m、22m、26m、30m、35m等。
- ②**悬臂长 $l$** ： $l$ 一般在5~11m范围内，可根据工作需要而定。  
通常可取 $l=(0.3\sim 0.4)L$ 。



龙门起重机的悬臂长度



③大车轴距 $B$ :  $B \geq (0.25 \sim 0.3)L$

④双主梁的主梁间距: 取决于小车轨距 $b$ 。

⑤支腿长度 $h$ : 取决于大车轴距 $B$ 和起升高度 $H$ 。

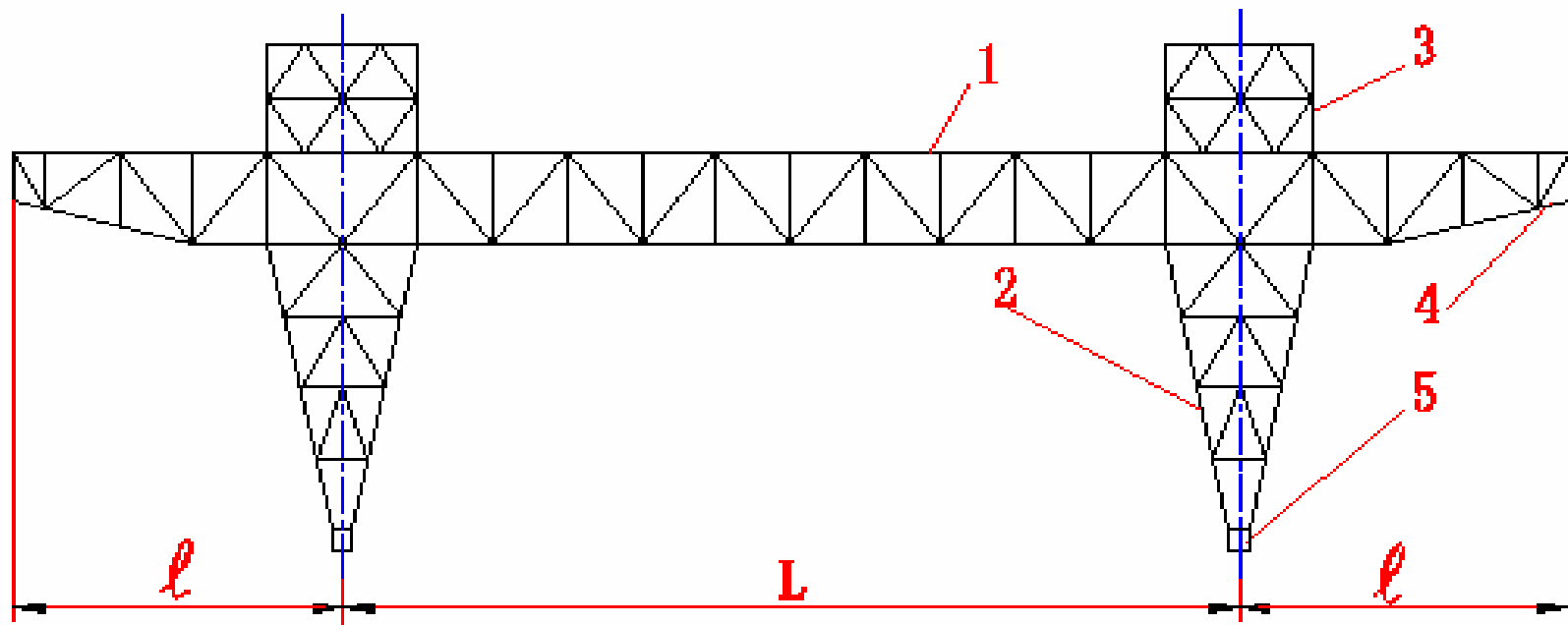
⑥马鞍净空高度 $h_m$ : 取决于小车高度。

一般 $h_m > 1.7\text{m}$ 。

⑦司机室安装位置 $l_s$ : 取决于跨度和悬臂长度。

一般靠近某一个支腿。

## 第二节 四桁架式双梁龙门起重机 桁架主梁的计算



### 四桁架式龙门起重机金属结构

1—桁架主梁； 2—桁架支腿； 3—马鞍； 4—上端梁； 5—下端梁。

# 一、四桁架式主梁的主要尺寸

## 1. 主梁高 $h$

当 $Q < 200\text{kN}$ 时,

$$L < 14\text{m}, h = \frac{L}{14}$$

$$L = 15 \sim 20\text{m}, h = \frac{L}{15}$$

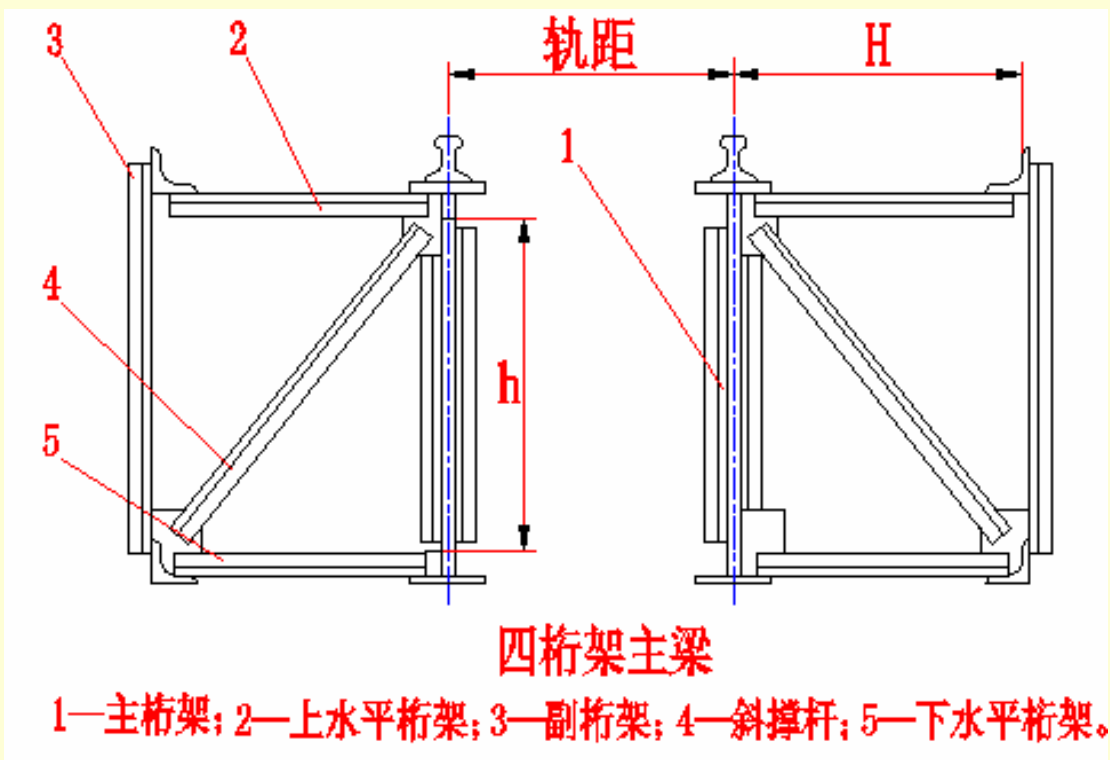
当 $Q = 300\text{kN}$ 时,

$$L \leq 17\text{m}, h = \frac{L}{14}$$

$$L > 14\text{m}, h = \frac{L}{15}$$

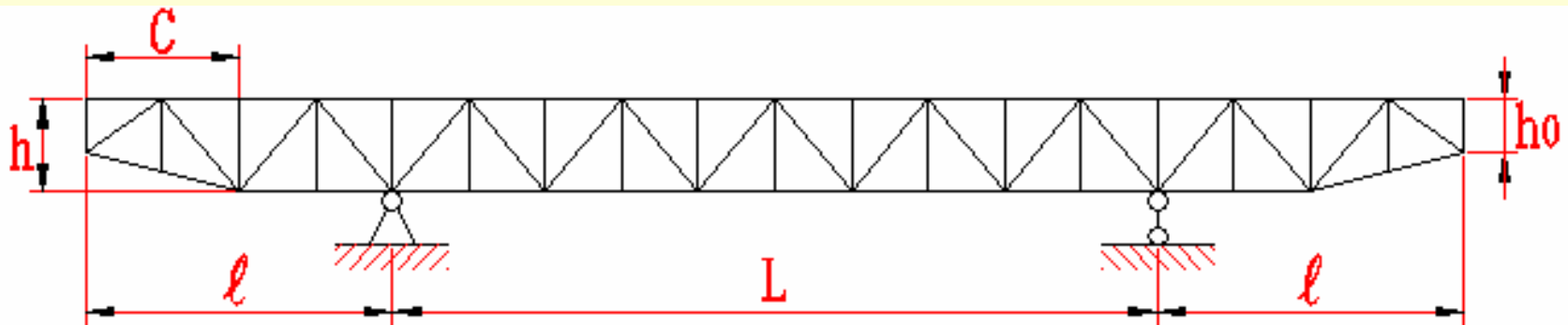
当 $Q = 500 \sim 1000\text{kN}$ 时,  $h = \frac{L}{14}$

当 $Q > 1000\text{kN}$ 时,  $h = \left( \frac{1}{12} \sim \frac{1}{13} \right) \times L$



变截面长度 $c$ 常取 $l/2 \sim l/4$ ，或取1~2个节间。

端梁高度  $h_0 = (0.6 \sim 0.8)h$



桁架式龙门起重机变截面主梁

## 2. 水平桁架的宽度H

$$H = \left( \frac{1}{15} \sim \frac{1}{20} \right) L$$

$$\text{且 } 700 \leq H \leq 2000$$

### 3. 两根主梁之间的距离，由小车轨距决定

1400 (Q=50KN) ,

2000 (Q=100KN, 150KN, 200/50KN) ,

2500 (Q=300/50KN, Q=500/100KN) ,

4400 (Q=750/200KN, Q=1000/200KN, Q=1250/200KN) ,

5500 (Q=1500/300KN, Q=2000/300KN, Q=2500/300KN)。

## 二、四桁架式主梁的计算方法

较精确计算：有限元法

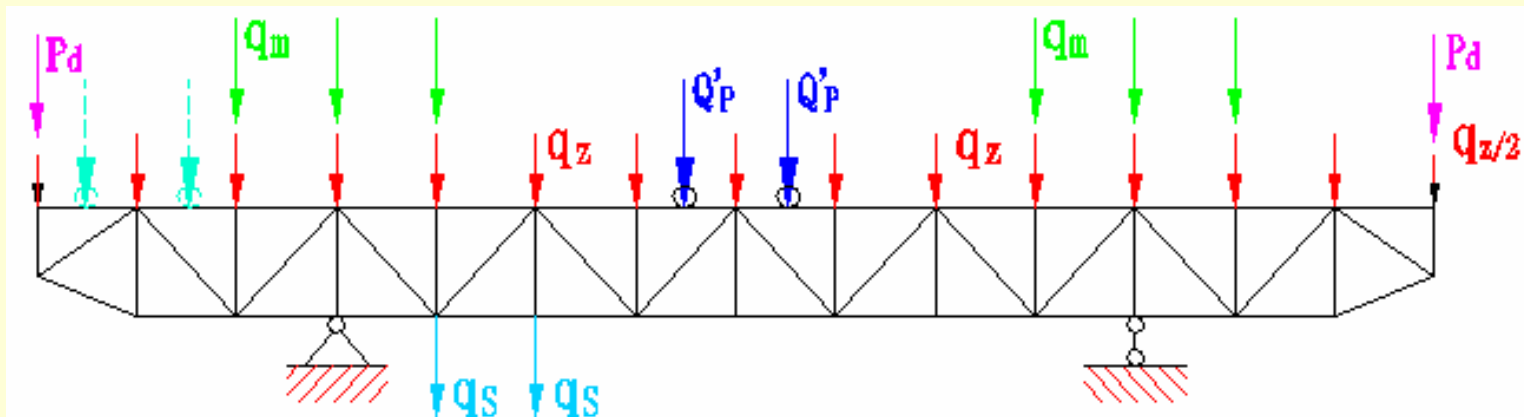
近似计算：将空间桁架分解为平面桁架计算。

# 1. 空间载荷在各片平面桁架上的分配方法

## (1) 第一种载荷分配方法 (不考虑扭矩)

### ① 主桁架上的载荷:

- $P_1$ 、 $P_2$  (移动载荷)；
- $G_z$  (主桁架自重)；
- $(G_{sp}+G_{ztg})/2$  (水平桁架和走台栏杆自重)；
- $G_d/4$ 、 $G_m/4$ 、 $G_s/2$  (端梁、马鞍、司机室自重)；
- $P_{Hx}$  (小车运行惯性载荷)



主桁架计算简图

## ②副桁架上的载荷：

- $G_f$  （副桁架自重）；
- $(G_{sp}+G_{ztg})/2$  （水平桁架和走台栏杆自重）；
- $G_d/4$ 、 $G_m/4$ 、 $G_s/2$  （端梁、马鞍、司机室自重）；
- $G_{GR}=2KN$  （检修人员重力）

## ③上水平桁架的载荷：

- $P_{H1}$ 、 $P_{H2}$  （大车启制动时, 移动载荷引起的惯性力）
- $P_{Hd} \times 2/3$  （大车启制动时, 主梁自重引起的惯性力）
- $P_w \times 3/4$  （主梁风载荷）

## ③下水平桁架的载荷：

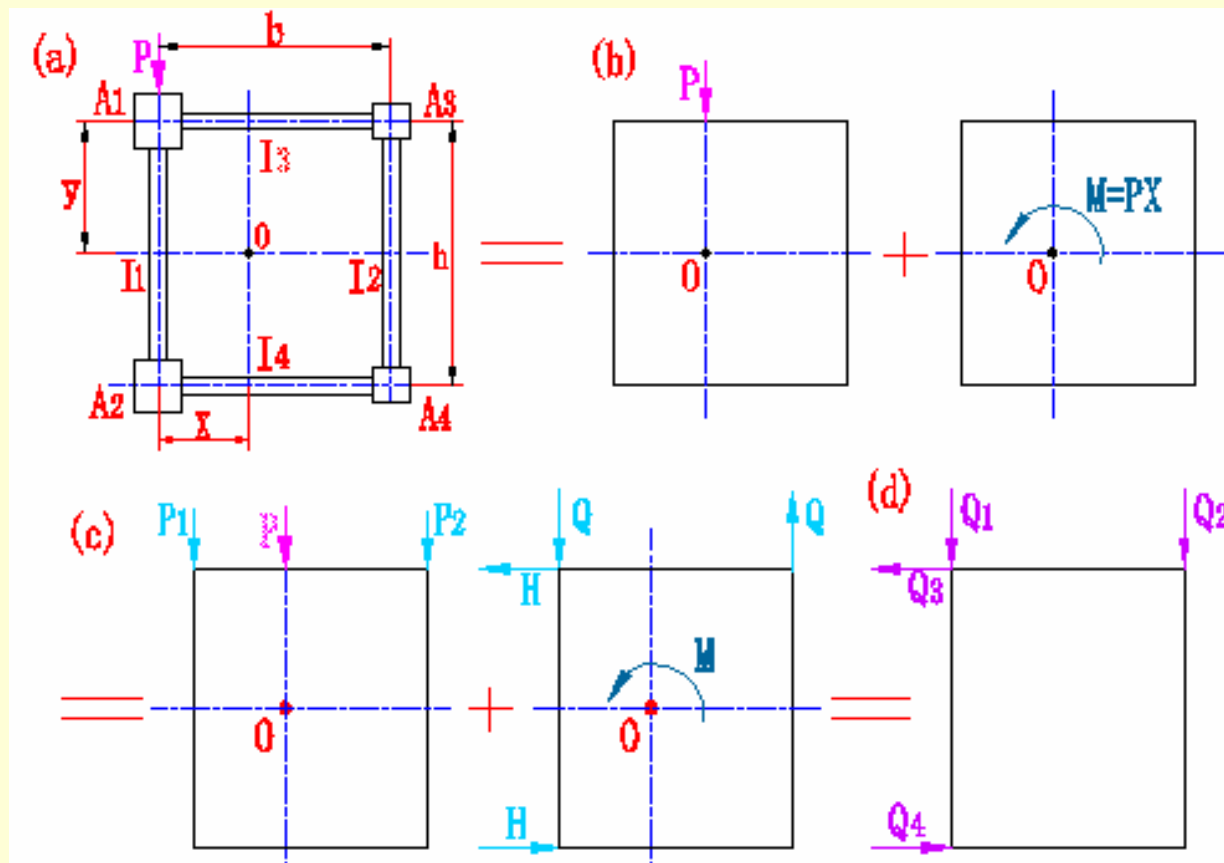
- $P_{Hd} \times 1/3$  （大车启制动时, 主梁自重引起的惯性力）
- $P_w \times 1/4$  （主梁风载荷）

确定副桁架下弦杆截面积时，应使  $\sigma \leq 0.7[\sigma]$

## (2) 第二种载荷分配方法（考虑扭矩）

固定载荷分配方法同上。

移动载荷及其引起的惯性载荷，按下列方法分配到主桁架、副桁架和上、下水平桁架。





各片桁架上的载荷按下式计算：

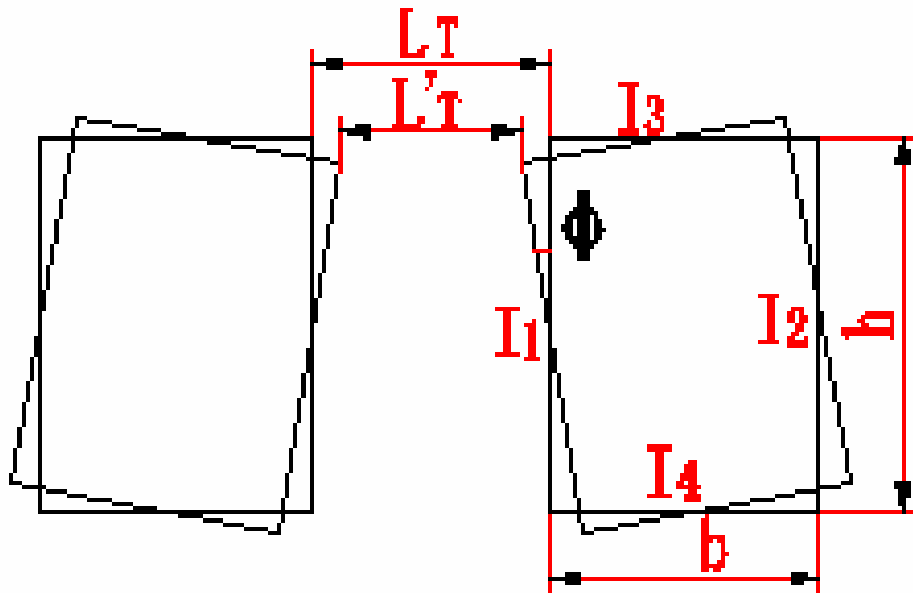
● 小车运行时

$$\begin{cases} Q_1 = P - Q_2 \\ Q_2 = \frac{1}{1 + k_2 + (k_3 + k_4)I^2} P \\ Q_3 = -Q_4 = I Q_2 \end{cases}$$

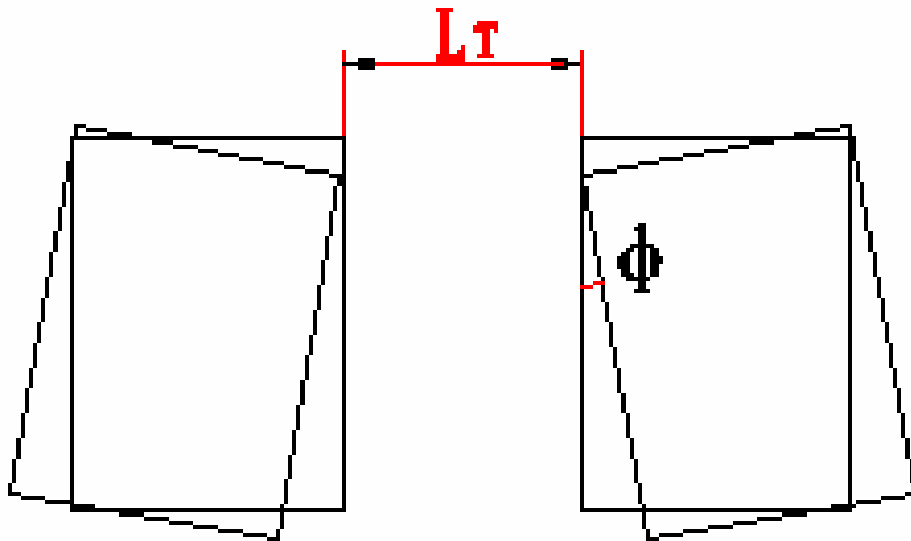
● 小车不动时

$$\begin{cases} Q'_1 = P - Q'_2 \\ Q'_2 = \frac{P}{1 + k_2 + k_4 I^2} \\ Q'_3 = -Q'_4 = I Q'_2 \end{cases}$$

式中  $I = \frac{b}{h}$  ,  $k_1 = \frac{I_1}{I_1} = 1$  ,  $k_2 = \frac{I_1}{I_2}$  ,  $k_3 = \frac{I_1}{I_3}$  ,  $k_4 = \frac{I_1}{I_4}$



小车运行时主梁的位移图



小车不动时主梁的位移图

## 2. 桁架杆件受力分析

### ● 危险杆件

- 主桁架上弦杆
- 副桁架下弦杆

### ● 最不利计算工况

- 小车位于跨中或悬臂端时：
  - 主桁架上弦杆和副桁架下弦杆应取小车不动的工况；
  - 主桁架下弦杆和副桁架上弦杆由应取小车运行的工况。

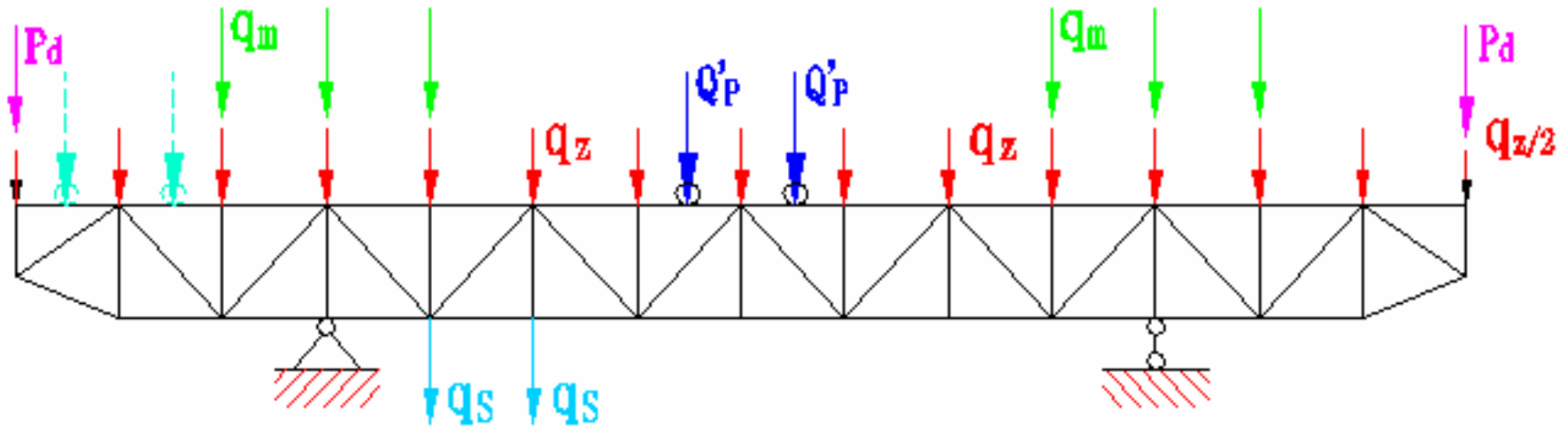
### ● 计算载荷及载荷组合

见表9-1。

将空间桁架分解为平面桁架计算时，垂直桁架与水平桁架共用弦杆的内力计算时应该迭加。

### 三、主桁架上弦杆的设计计算

#### 1. 主桁架上弦杆承受的内力



主桁架计算简图

- ①由固定载荷引起的杆件内力 $N_q$ ;
- ②由移动载荷引起的杆件内力 $N_0$ ;
- ③由移动载荷引起的局部弯矩 $M_{xjz}$ (节中弯矩)、 $M_{xjd}$ (节点);
- ④小车运行制动载荷引起的内力 $N_{Hx}$ (小车不动的工况,  $N_{Hx}=0$ );

- ⑤ 大车运行制时均布惯性载荷  $q_{Hd}$  引起的内力  $N_{Hd}$ ;
- ⑥ 大车制动时, 移动载荷  $Q_i$  的水平惯性载荷引起的内力;
- ⑦ 大车制动时, 移动载荷引进的局部弯矩  $M_{y_jz}$ 、 $M_{y_jd}$ ;
- ⑧ 工作状态风载荷引起的杆件内力  $N_w$ 。

## 2. 主桁架上弦杆的疲劳强度计算

### (1) 当小车位于跨中时

节中的疲劳强度: 
$$S_{\max}^{jz} = \frac{N_q + N_Q}{A} + \frac{M_{xjz}}{W_2} \leq [S_{rc}]$$

节点的疲劳强度: 
$$S_{\max}^{jd} = \frac{N_q + N_Q}{A} + \frac{M_{xjd}}{W_1} \leq [S_{rc}]$$

### (2) 当小车位于悬臂端极限位置时

$$S_{\max} = \frac{N_q^z + N_Q^z}{A} \leq [S_{rt}]$$

### 3.主桁架上弦杆的强度计算

#### (1)当小车位于跨中时

节中的强度:

$$S_{\max}^{jz} = \frac{N_q + N_Q + N_{Hd} + N_Q^s + N_W}{A} + \frac{M_{xjz}}{W_2} + \frac{M_{yjz}}{W_y} \leq [s]_{II}$$

节点的强度:

$$S_{\max}^{jd} = \frac{N_q + N_Q + N_{Hd} + N_Q^s + N_W}{A} + \frac{M_{xjd}}{W_1} + \frac{M_{yjd}}{W_y} \leq [s]_{II}$$

#### (2)当小车位于悬臂端极限位置时

$$S_{\max} = \frac{N_q^z + N_Q^z + N_{Hd}^z + N_Q^{sz} + N_W^z}{A} \leq [s]_{II}$$

## 4. 主桁架上弦杆的稳定性计算

(1)当小车位于跨中时，上弦杆节中的稳定性：

$$S_{\max}^{jz} = \frac{N_q + N_Q + N_{Hd} + N_Q^s + N_W}{jA} + \frac{M_{xjz}}{W_2} + \frac{M_{yjz}}{W_y} \leq [s]_{\text{II}}$$

$$j = \min(j_x, j_y)$$

(2)当小车位于悬臂端极限位置时

$$S_{\max}^z = \frac{N_q^z + N_Q^z + N_{Hd}^z + N_Q^{sz} + N_W^z}{jA} \leq [s]_{\text{II}}$$

$$j = \min(j_x, j_y)$$

## 5.主桁架上弦杆的刚度计算

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{l_x}{r_x} \leq [I] \\ I_y &= \frac{l_y}{r_y} \leq [I] \end{aligned} \right\}$$

式中  $l_x$ 、 $l_y$ —弦杆在桁架平面内和桁架平面外的计算长度。

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}, \quad r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$



## 四、主梁的总体刚度计算和上拱设计

### 1. 总体刚度计算

- **计算载荷**：静移动载荷（即静轮压）
- **计算工况**：
  - ┌ 小车位于跨中时，计算跨中挠度；
  - └ 小车位于悬臂端时，计算悬臂端的挠度。

#### (1)按莫尔公式计算刚度

$$f = \sum \frac{\bar{N}_1 N_P l_i}{EA_i} \leq [f]$$

## (2) 接近似公式计算刚度

小车位于跨中，主桁架跨中的挠度为

$$f_z = \frac{PL^3}{48EI_z} \left( \frac{8k+3}{8k+12} \right) \leq [f]_z$$

小车位于悬臂端极限位置时，主桁架有效悬臂端的挠度为

$$f_d = \frac{Pl^2}{3EI_z} \left( l + \frac{8k+3}{8k+12} \times L \right) \leq [f]_d$$

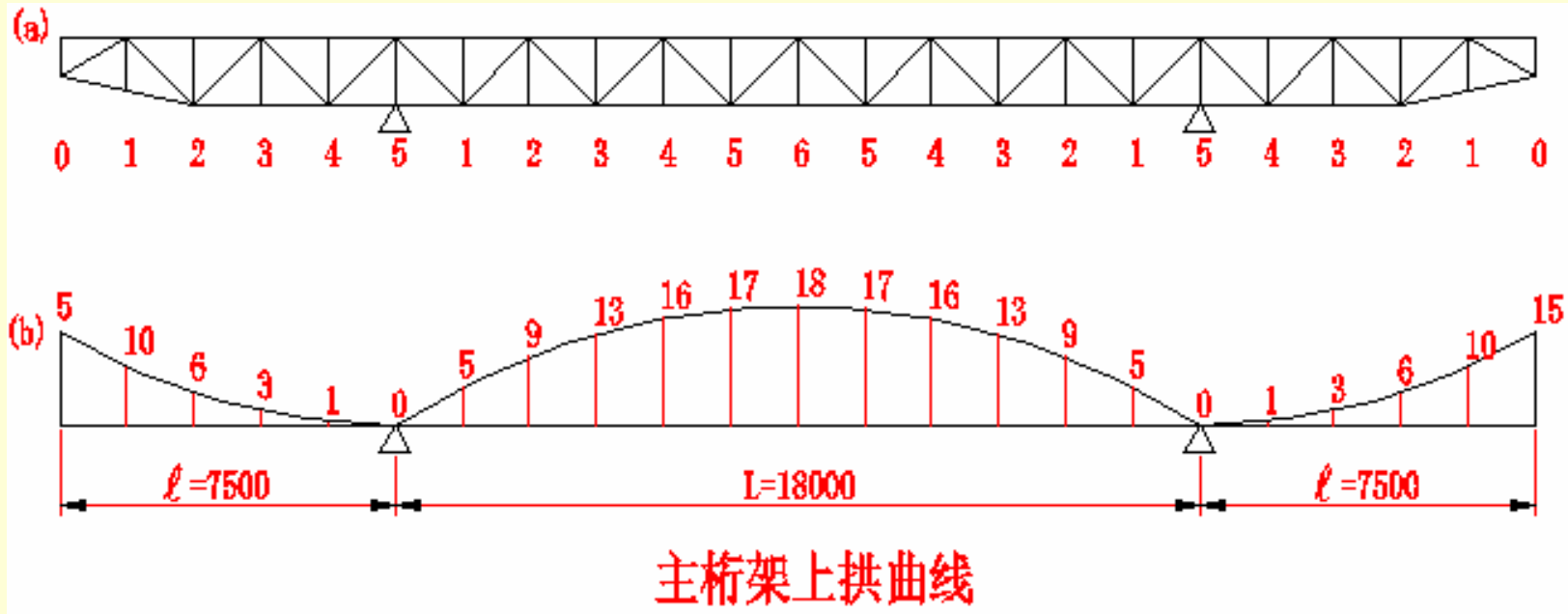
式中：  $P$ ——小车轮压  $P=P_1+P_2$ （不计动力系数）；

$k$ ——系数，

$$k = \frac{I_z}{I_{tz}} \cdot \frac{m_2 H}{L}$$

## 2. 主桁架的上拱设计

当 $L > 17\text{m}$ ， $\ell > 5\text{m}$ 时，桁架主梁应设上拱。



主桁架跨内各节点上拱度方程为

$$f_i^z = f_z \sin \frac{pn}{m}$$

跨中上拱度  $f_z = \frac{1.0 \sim 1.2}{1000} L$

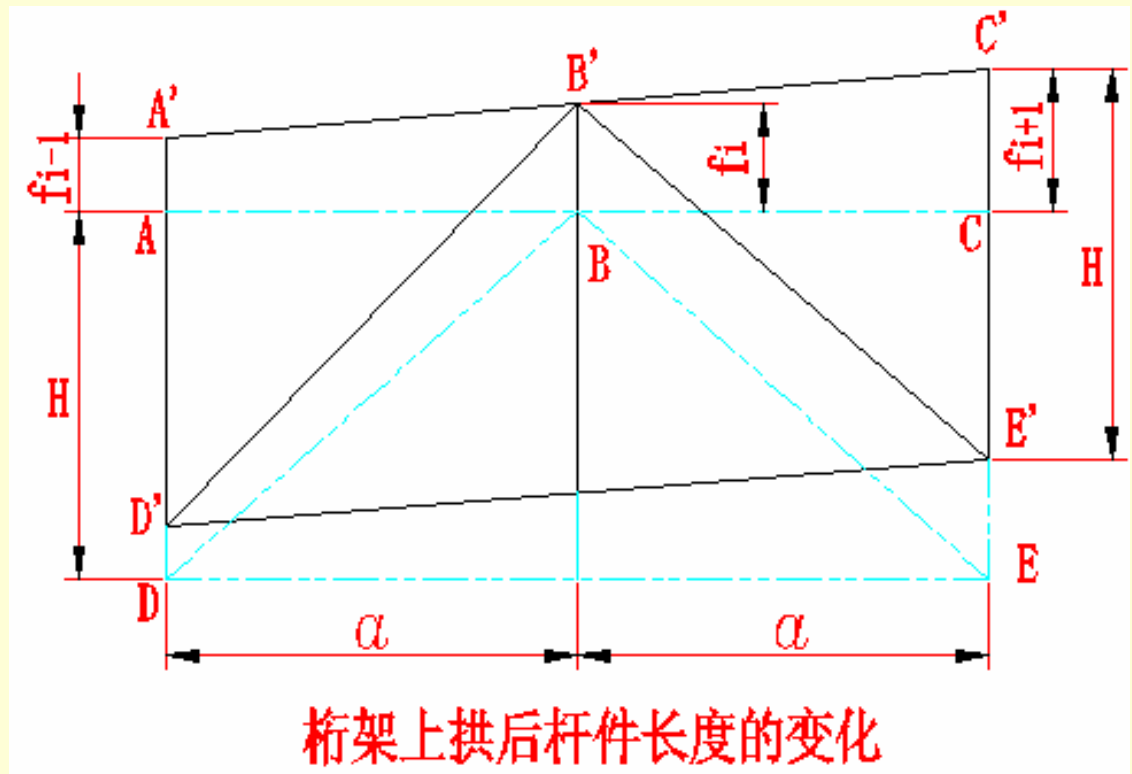
主桁架悬臂各节点上拱度方程为：

$$f_i^d = f_d \left( 1 - \sin \frac{pn'}{2m'} \right)$$

悬臂端上拱度

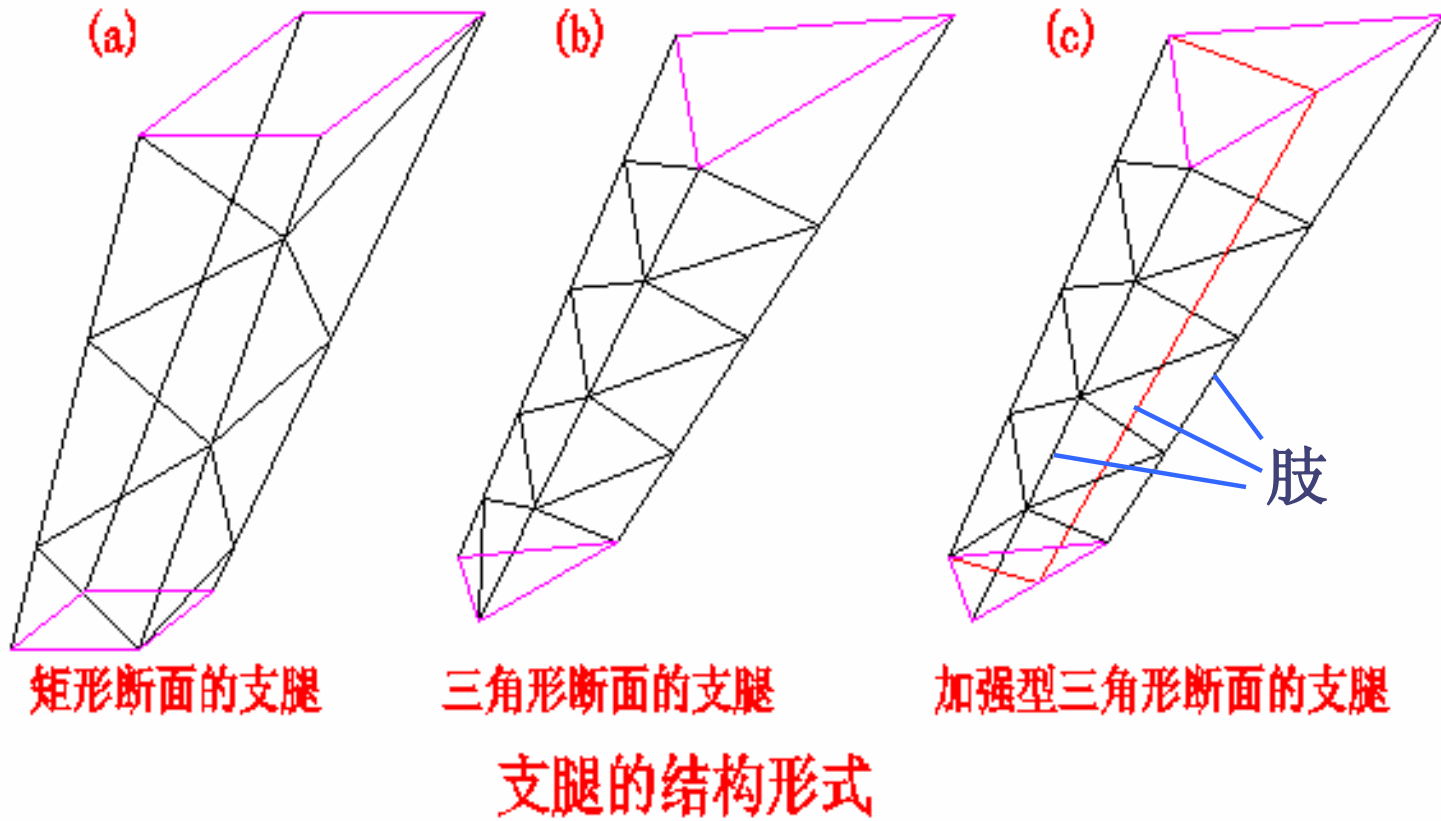
$$f_d = \frac{1.0 \sim 1.2}{500} \mathbf{l}$$

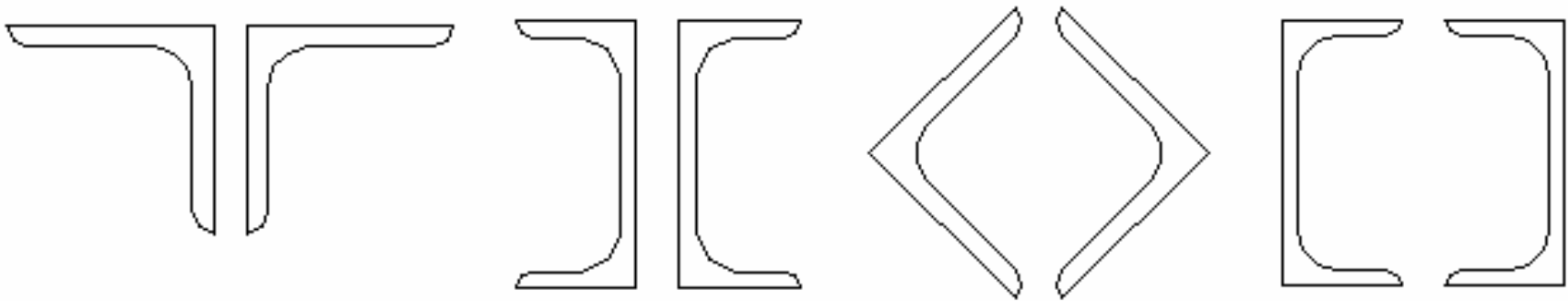
制造时，上拱曲线  
通过下料来实现。



# 第三节 双梁桁架式龙门起重机 桁架支腿的计算

## 一、支腿的结构形式





## 支腿分肢的断面型式

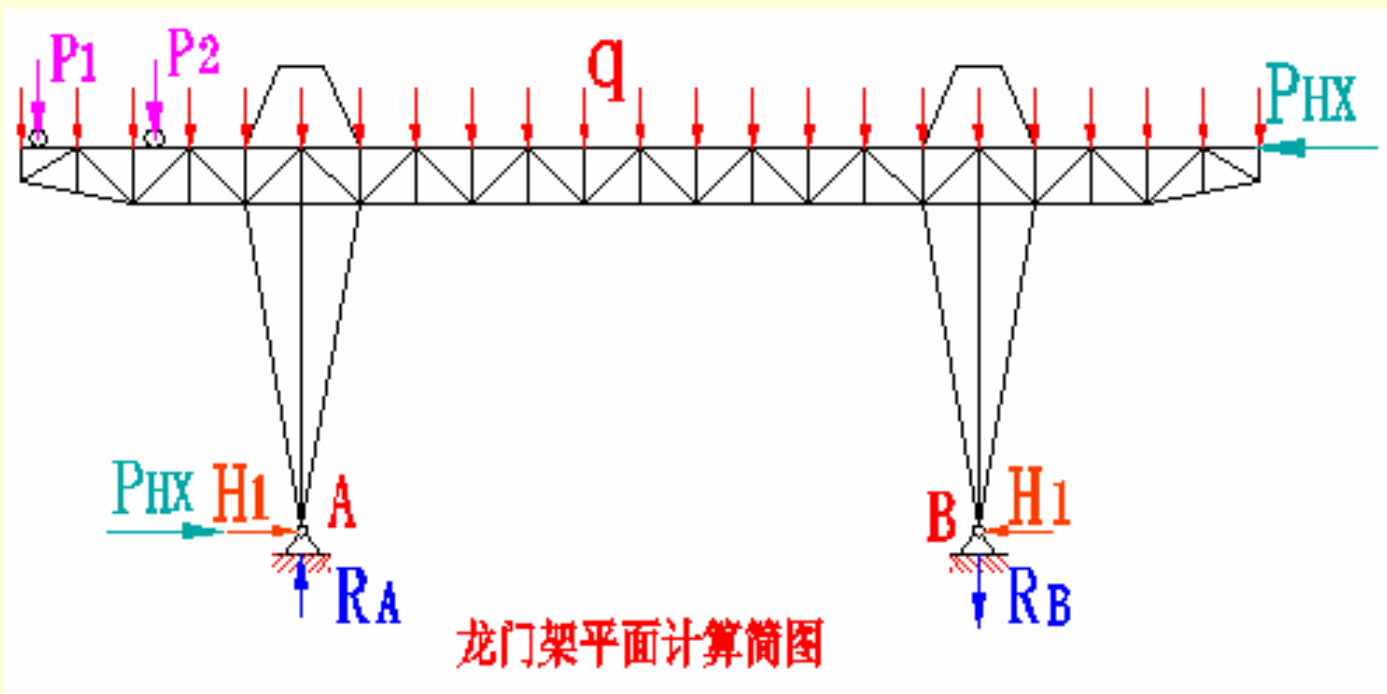
根据支腿的受力特点，桁架支腿通常做成上端大、下端小的变截面形式。



## 二、三角形变截面桁架支腿的计算

### 1. 龙门架平面支腿的受力分析

- **计算工况：** 大车不动，小车满载运行至悬臂端极限位置制动，同时起升机构下降制动。
- **计算载荷：** 移动载荷 $P$ ，结构自重 $q$ ，小车运行惯性载荷 $P_{HX}$ 。
- **计算简图：**



## (1) 求支腿垂直支反力 $R_A$

由表8-6

$$R_A = \frac{j'_i Q + j_i G_{xc}}{n} \left( 1 + \frac{l}{L} \right) + \frac{1}{2} j_i G_j$$

## (2) 移动载荷引起的横推力 $H_1$

由表8-5

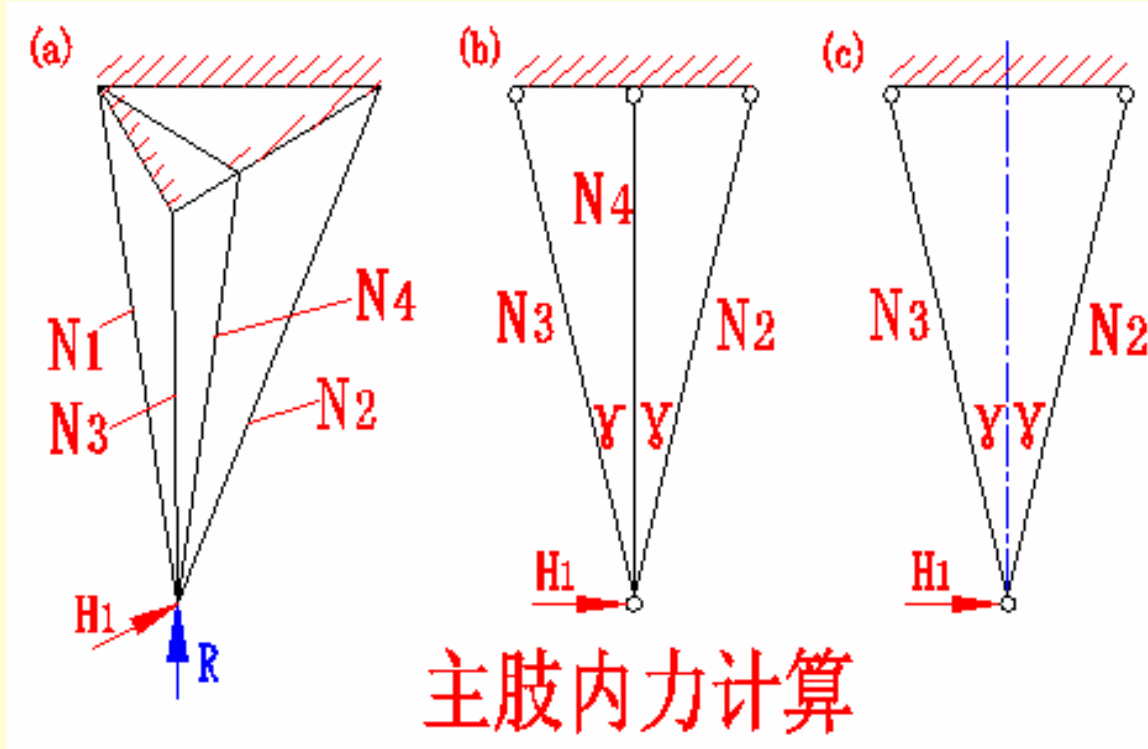
$$H_1 = \frac{j'_i Q + j_i G_{xc}}{n} \frac{3l}{2h(2k+3)}$$

$$k = \frac{I_z}{I_{tz}} \cdot \frac{h}{L}$$



### (3) 横推力 $H_1$ 引起的支腿各肢内力

$$\begin{cases} N_4 = 0 \\ N_2 = -N_3 = \frac{H_1}{2 \sin g} \end{cases}$$



垂直支反力 $R$ 引起各肢的内力在支腿平面计算。

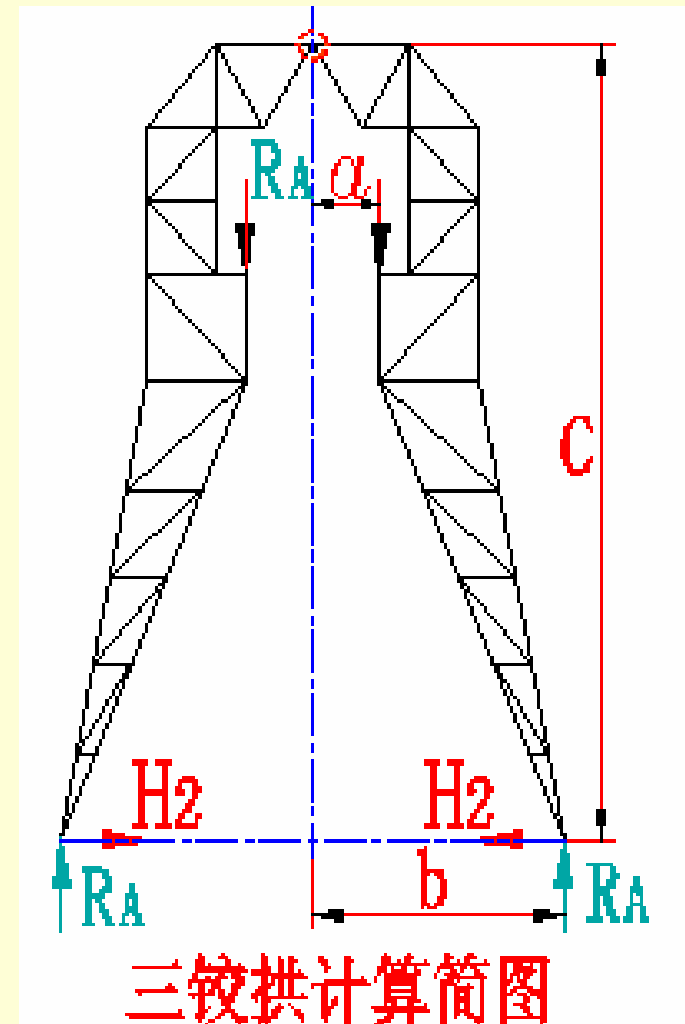
## 2. 支腿平面的受力分析

(1)按一次超静定计算简图计算横推力 $H_2$

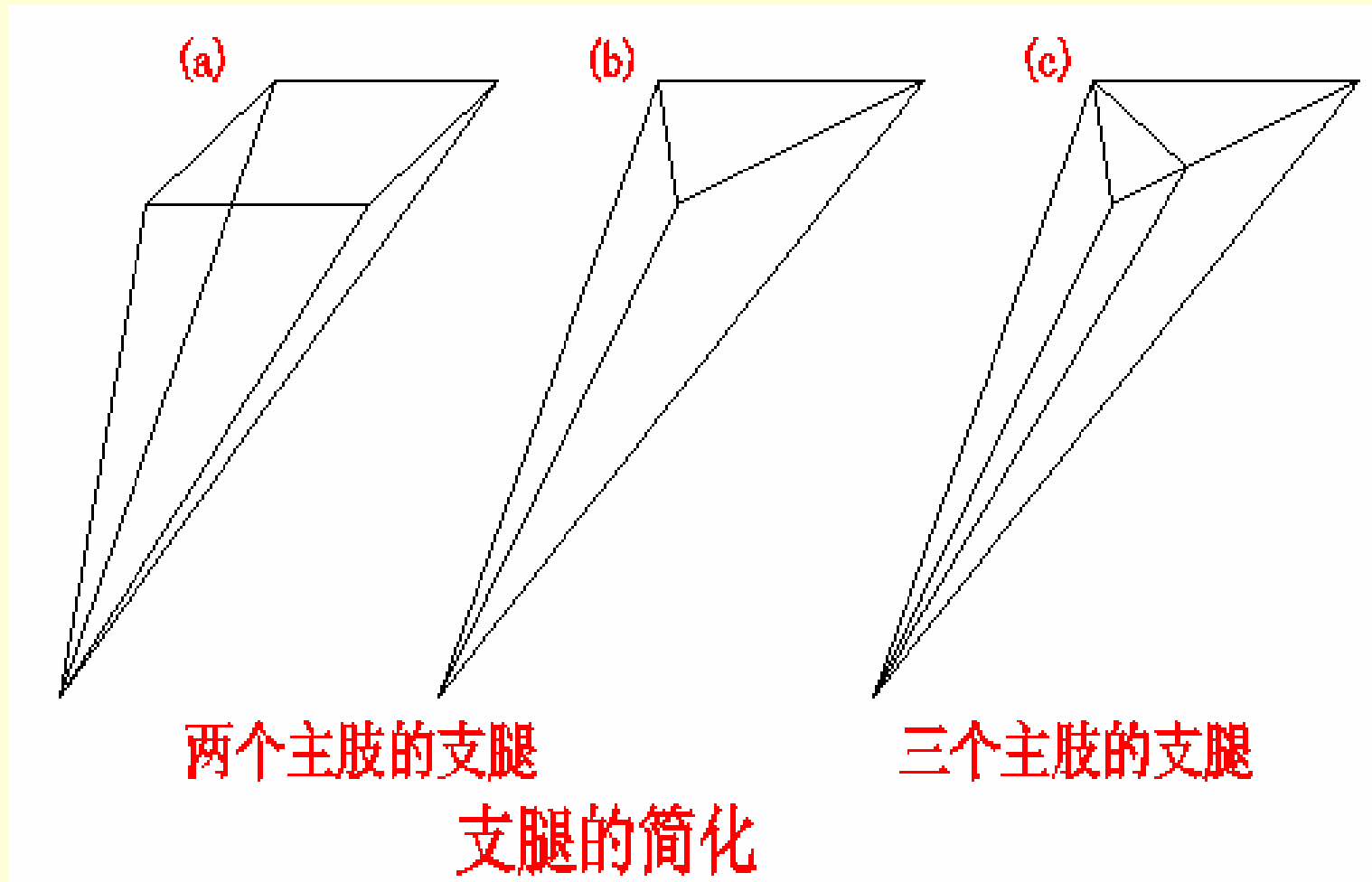
$$H_2 = \frac{\sum \frac{\bar{N}_{H_2=1} \times N_p \times l}{A}}{\sum \frac{\bar{N}_{H_2=1}^2 \times l}{A_i}}$$

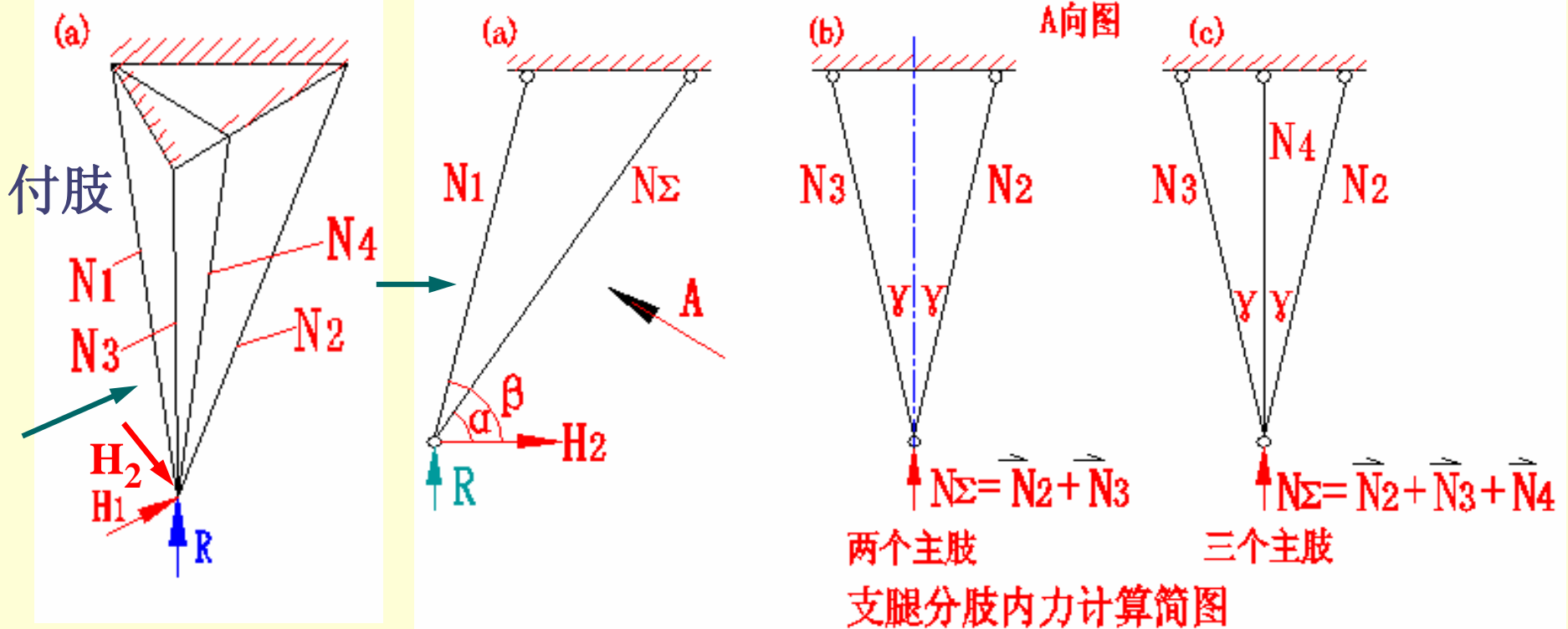
(2)按“三铰拱”静定简图计算横推力 $H_2$

$$H_2 = \frac{b-c}{a} R$$



### (3)由 $H_2$ 、R引起的支腿主、副肢内力





$$N_1 = \frac{R \cos a - H_2 \sin a}{\sin(b - a)}$$

$$N_\Sigma = \frac{R \cos b - H_2 \sin b}{\sin(b - a)}$$

两个主肢时

$$N_2 = N_3 = \frac{N_\Sigma}{2 \cos g}$$

三个主肢时

$$N_2 = N_3 = \frac{N_\Sigma}{2 \cos g + \frac{A_4}{A_2} \frac{1}{\cos^2 g}}$$

$$N_4 = N_\Sigma - 2N_2 \cos g$$

### 三. 支腿计算

#### 1. 主、副肢的强度计算

$$S_{\max} = \frac{N_l + N_z}{A} \leq [S]_{II}$$

式中  $N_l$ ——主、副肢在龙门架平面的内力；  
 $N_z$ ——主、副肢在支腿平面的内力。

#### 2. 主肢和副肢的局部稳定性计算

$$S_{\max} = \frac{N_l + N_z}{\varphi A} \leq [S]_{II}$$

式中  $\varphi$ ——压杆稳定系数，由  $l_z = \frac{l_z}{r_{\min}}$  查表。

其中  $l_z$ ——分肢节间长度；

$r_{\min}$ ——分肢绕自身轴的最小回转半径。

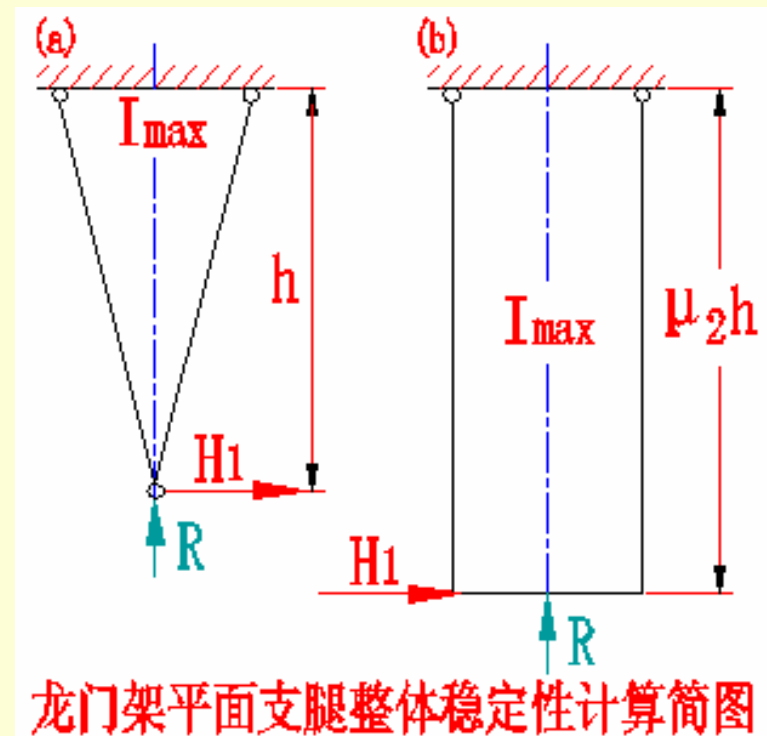
### 3. 支腿整体稳定性计算

#### ● 龙门架平面支腿整体稳定性

计算简图可视为：

上端固定，下端自由的  
变截面格形柱。

$$S_{\max} = \frac{R}{\varphi_x A_{\Sigma}} + \frac{m_2 H_1 h_t}{W_{\min}^{dd}} \leq [S]_{II}$$

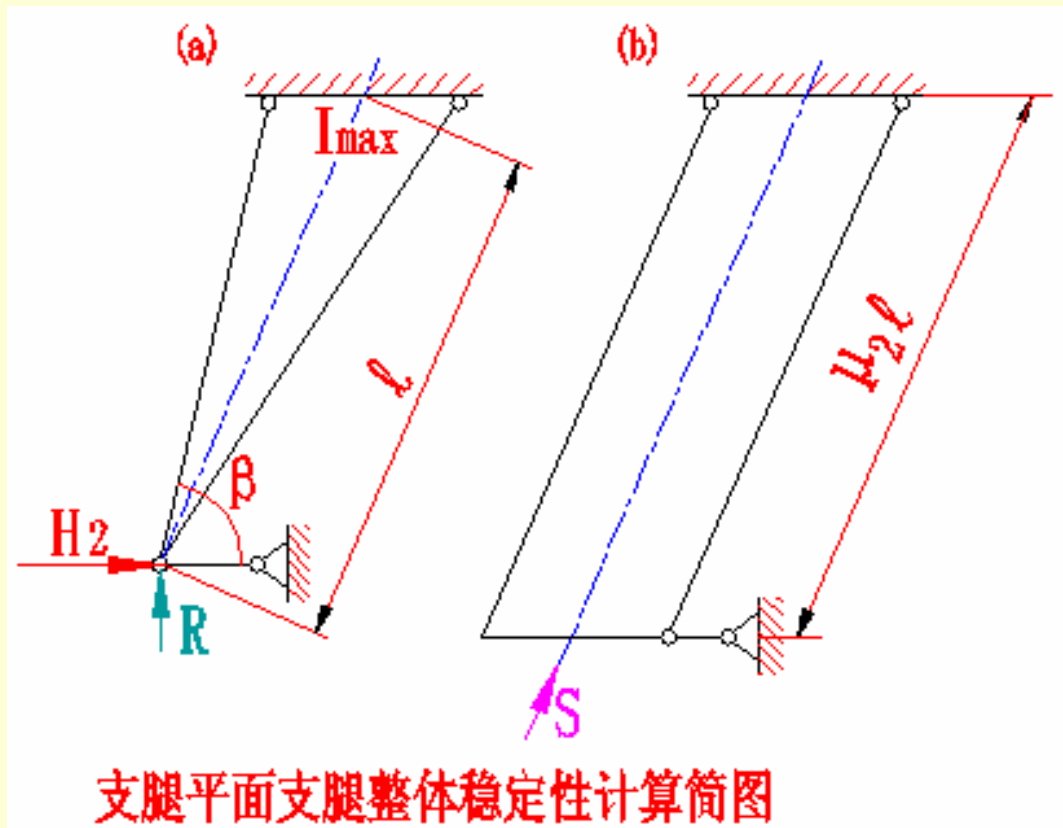


- 支腿平面的计算简图可视为上端固定，下端铰支的变截面格形柱。

$$S = \dot{H}_2 \cos b + \dot{R} \sin b$$

支腿的整体稳定性:

$$S_{\max} = \frac{S}{\phi_y A_{\Sigma}} \leq [S]_{II}$$



式中  $A_{\Sigma}$ ——所有肢的截面面积之和；  
 $\phi_y$ ——对y轴的稳定系数。

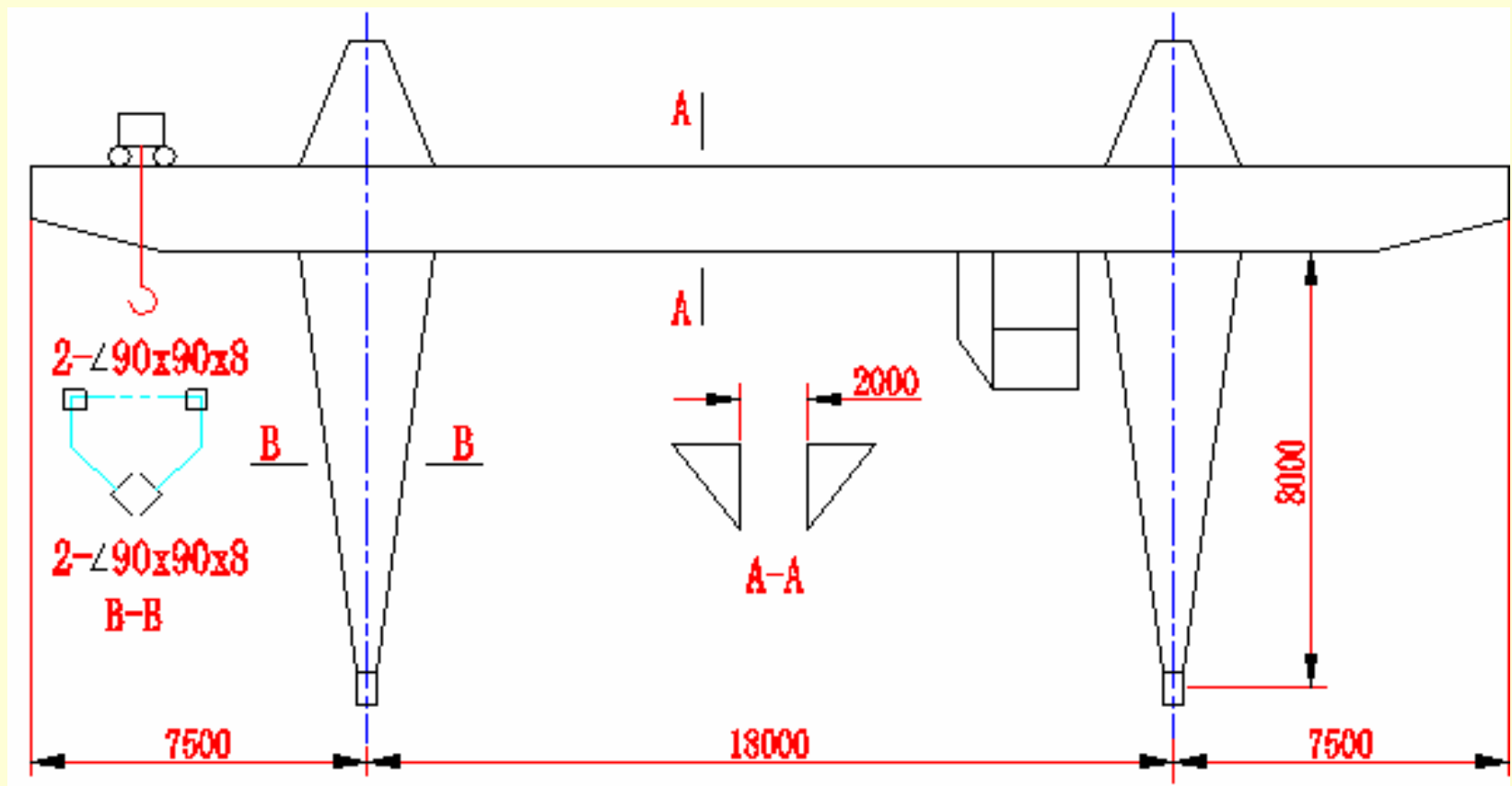
## 第九章 作业

根据下面所给的数据和资料，设计图示双梁桁架式龙门起重机的主桁架，并对支腿进行强度和稳定性计算。

已知：起重量 $Q=200/50\text{kN}$ ，吊具重： $6\text{kN}$ ；吊重起升速度： $0.2\text{m/s}$ ；小车运行速度： $0.75\text{m/s}$ ；大车运行速度： $1.0\text{m/s}$ ；小车轨距： $2.0\text{m}$ ；小车轴距： $2.4\text{m}$ ；小车走到悬臂端极限位置，

前轮距主梁最外端： $0.8\text{m}$ ；司机室（含电气设备）重 $15\text{kN}$ （吊装在主桁架下弦杆的两个节点上，具体位置自定）；小车结构对称布置，自重及吊重四轮均布；马鞍总重： $30\text{kN}$ ；走台板用 $3\text{mm}$ 厚的网纹板铺于上水平桁架。金属结构工作级别： $A6$ ，主要构件材料： $Q235-A$ 。起重机工作地点：上海港。





习题用图