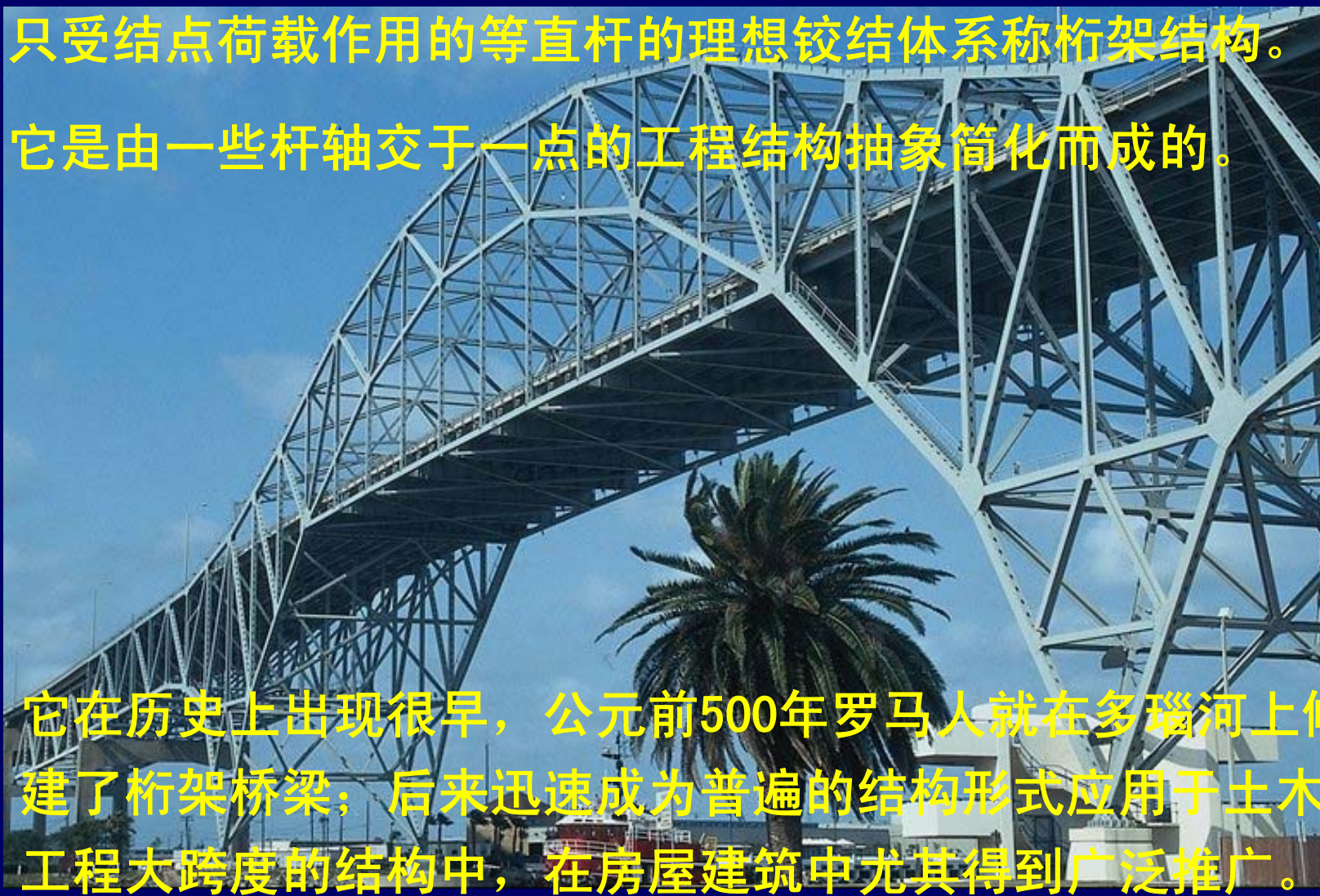


# 第三章 桁架(屋架)结构

只受结点荷载作用的等直杆的理想铰结体系称桁架结构。  
它是由一些杆轴交于一点的工程结构抽象简化而成的。

它在历史上出现很早，公元前500年罗马人就在多瑙河上修建了桁架桥梁；后来迅速成为普遍的结构形式应用于土木工程大跨度的结构中，在房屋建筑中尤其得到广泛推广。



1. 优点：受力合理、计算简单、施工方便、适应性强，对支座无横向推力，应用广泛。

2. 缺点：结构高度大，侧向刚度小。

➤ 结构高度大增加了屋面及围护墙的用料，同时也增加了采暖、通风、采光等设备的负荷，并给音响控制带来困难。

➤ 侧向刚度小，对于钢屋架特别明显受压的上弦平面外稳定性差，也难以抵抗房屋纵向的侧向力，这就需要设置支撑。一般房屋的纵向侧向力并不大，但支撑很多，都按构造(长细比)要求确定截面，故耗钢不少却未能材尽其用。



## 第三章

## 桁架结构

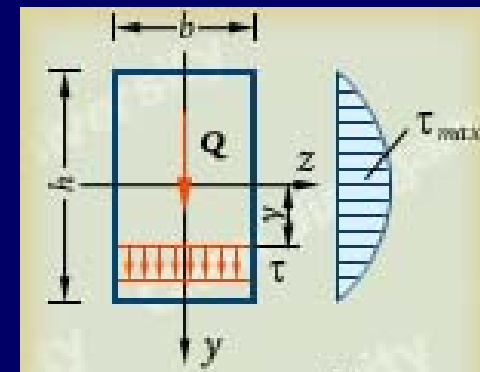
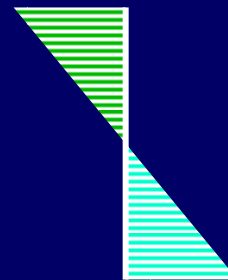
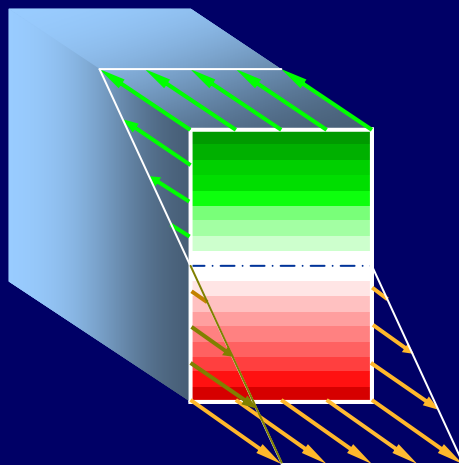
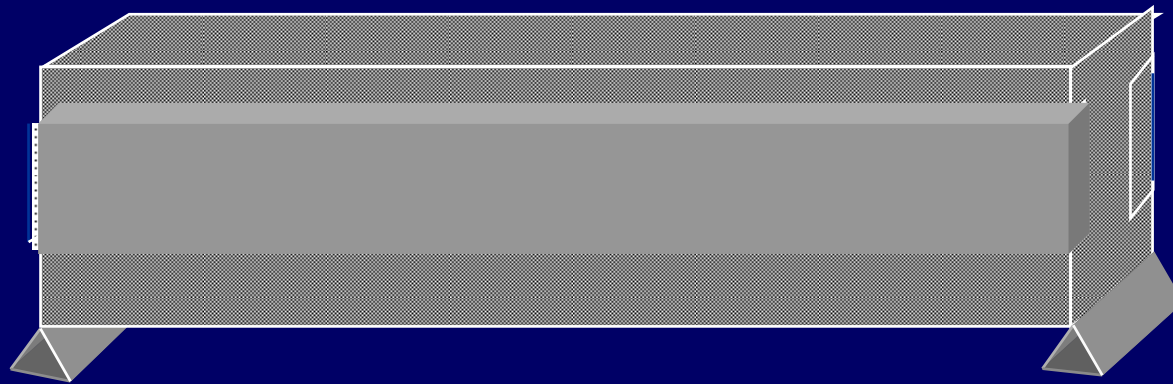
- 3. 1 桁架结构的受力特点
- 3. 2 屋架结构的型式
- 3. 3 屋架结构的选型与布置
- 3. 4 立体桁架
- 3. 5 张弦结构
- 3. 6 桁架结构的其他型式



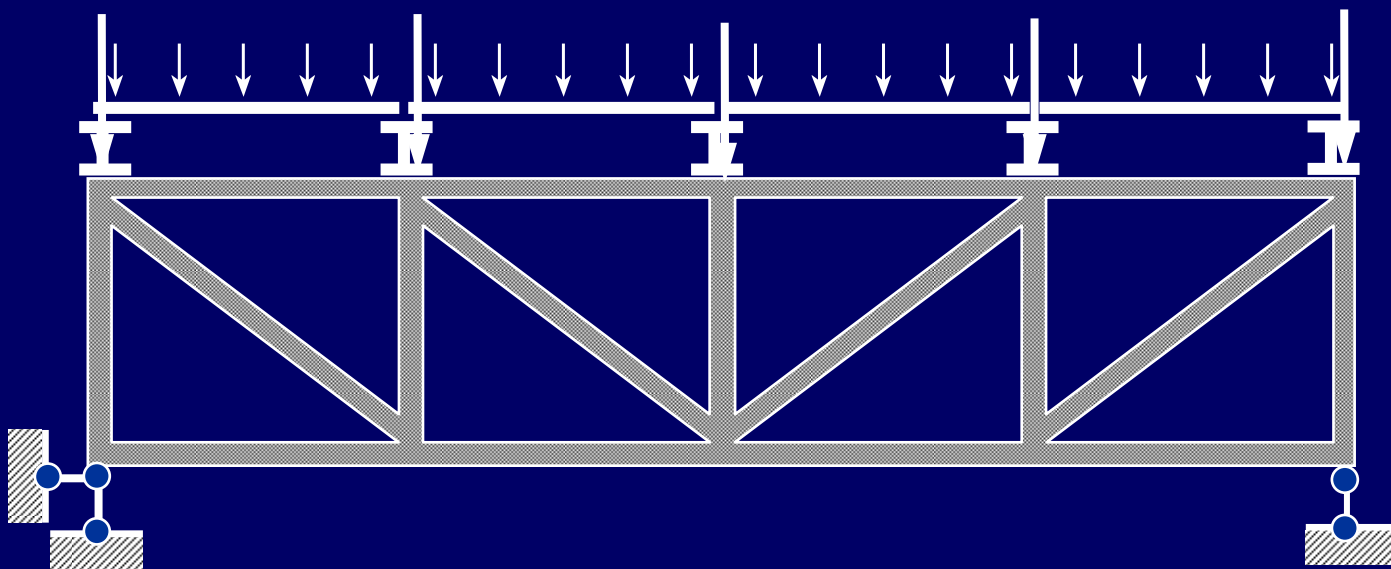
# 3.1 桁架结构的受力特点

## 3.1.1 桁架结构的组成

从受弯方面来说工字形截面梁优于矩形截面梁。



### 3.1.1 桁架结构的组成

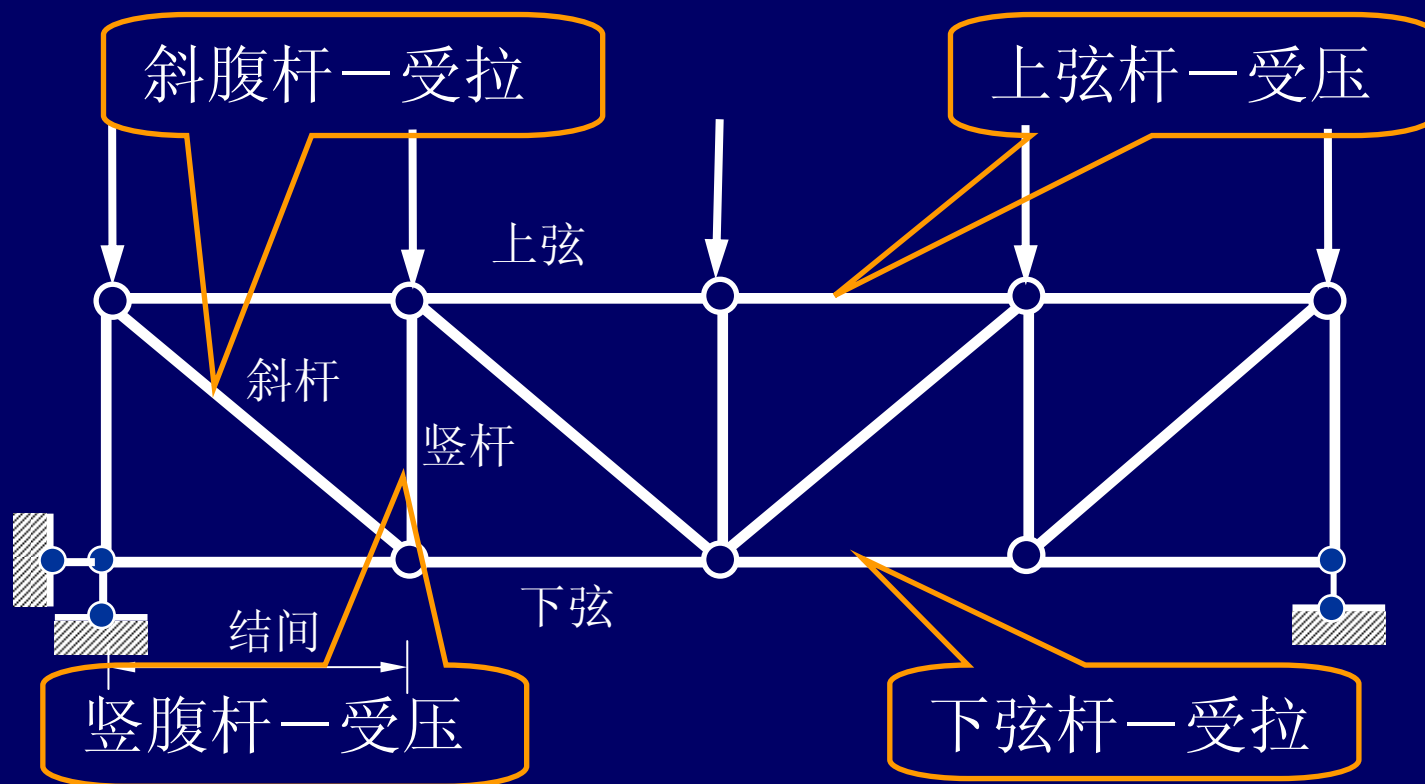


梁 → 桁架

梁式桁架（桁梁）实际上是对实腹梁中性区的掏空和改进，有助于减轻自重，增加承受外荷载的数量比，适合于向大跨度发展。

### 3.1.1 桁架结构的组成

桁架一般由上弦杆、腹杆（竖杆和斜腹杆）组成。

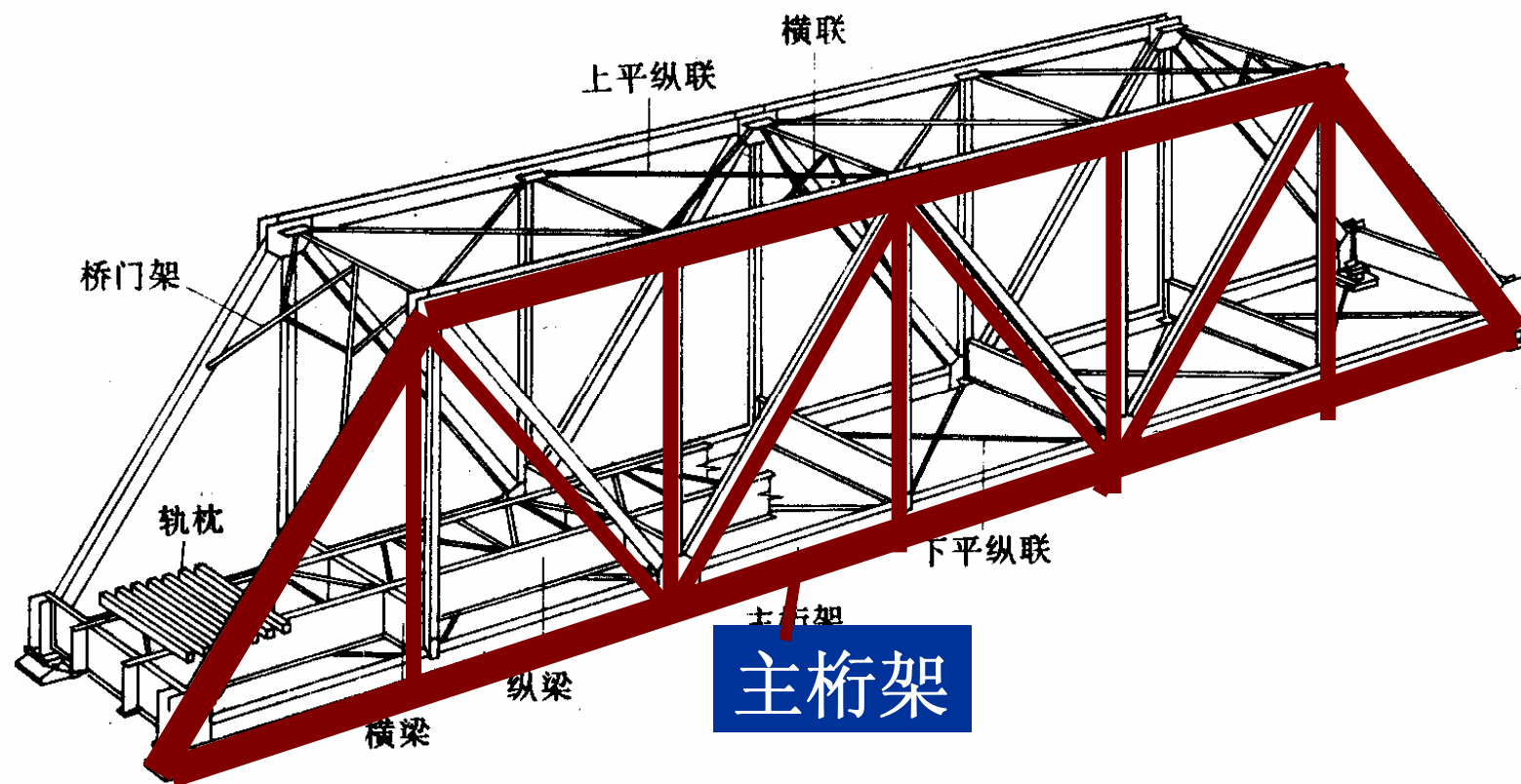


计算简图

为什么要把斜杆设计成受拉，而竖杆设计成受压？

## 桁架的受力与梁的区别

- 1、上弦受压、下弦受拉，形成力偶来平衡外荷载所产生的弯矩。
- 2、由斜腹杆轴力中的竖向分量来平衡外荷载所产生的剪力。
- 3、桁架结构中，各杆单元均为轴向受拉或轴向受压构件，使材料的强度可以得到充分的发挥。





### 3.1.2 桁架结构计算的假定

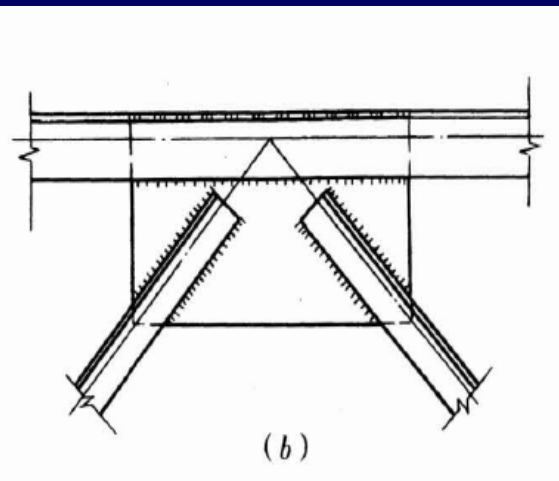
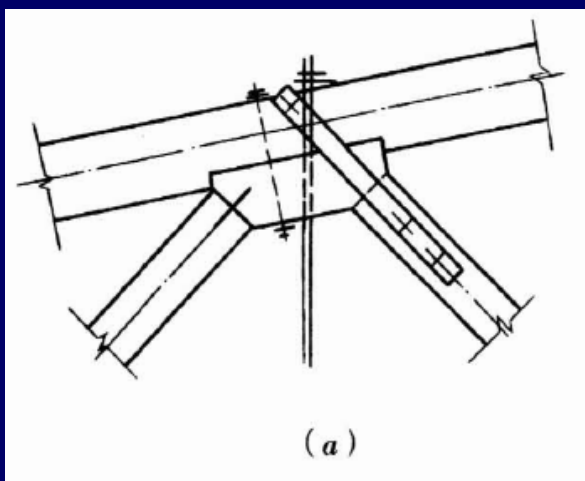
(1) 直杆：组成桁架的所有各杆都是直杆，所有各杆的中心线(轴线)都在同一平面内，这一平面称为桁架的中心平面。

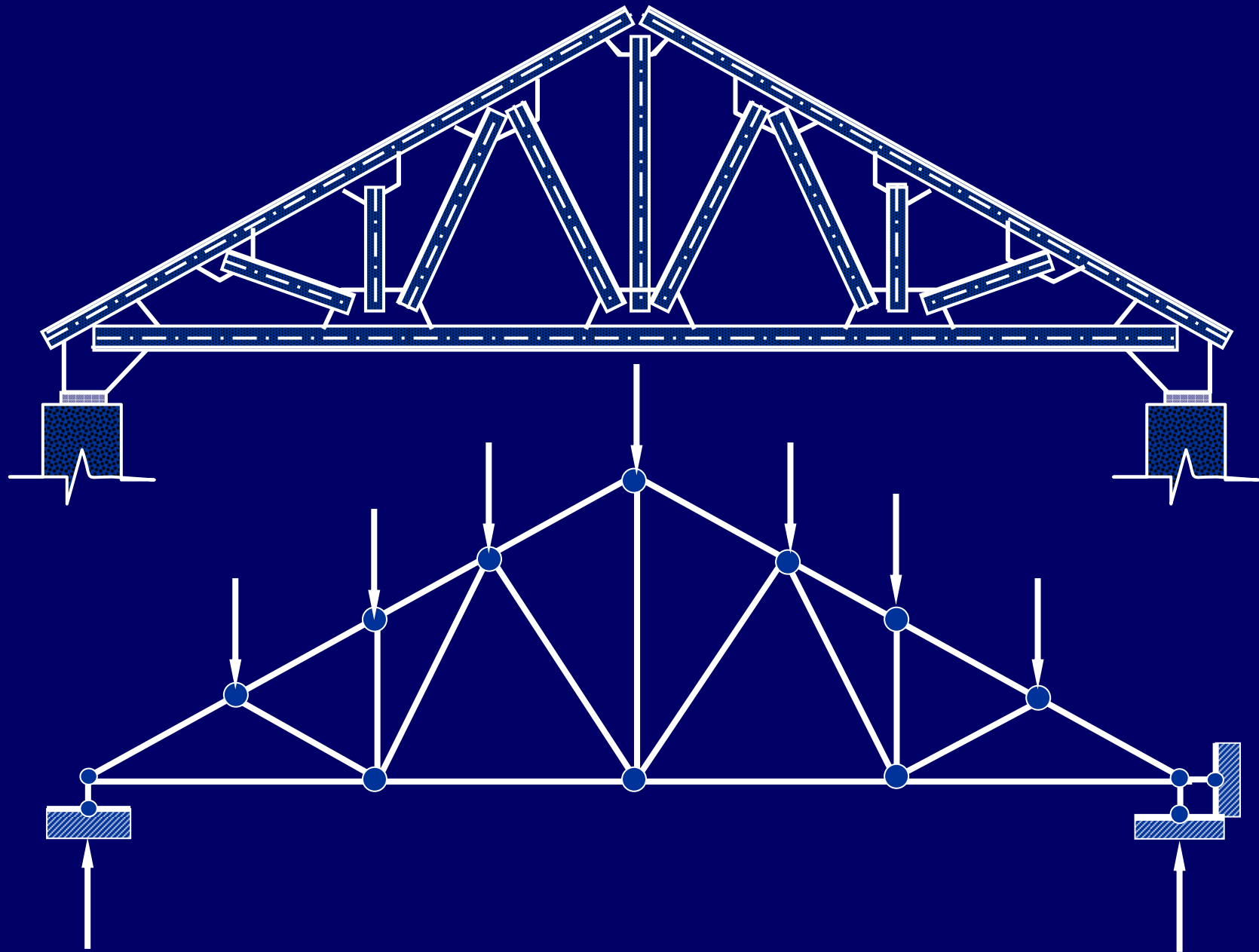
(2) 节点均为铰节点：桁架的杆件与杆件相连接的节点均为铰接节点。

木材——榫接、钉连接

钢桁架——焊接或螺栓连接

钢筋混凝土——刚性连接





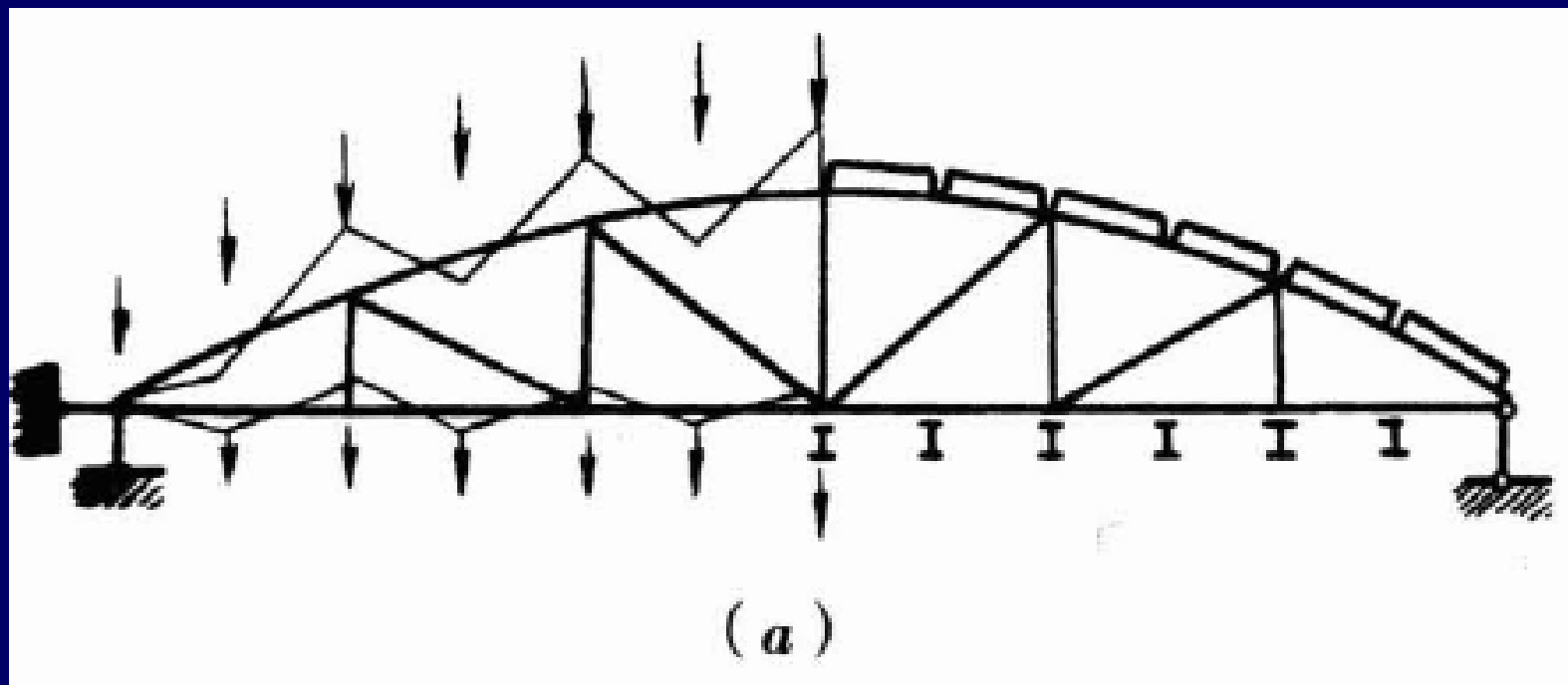
### 3.1.2 桁架结构计算的假定

(2) 节点均为铰节点：桁架的杆件与杆件相连接的节点均为铰接节点。

严格地说，钢桁架和钢筋混凝土桁架都应该按刚架结构计算，各杆件除承受轴力外还承受弯矩的作用。但进一步的理论分析和工程实践经验表明，上述杆件内的弯矩所产生的应力很小，只要在节点构造上采取适当的措施，该应力对结构或构件不会造成危害，故一般计算中桁架结构节点均按铰接处理。

(3) 所有外力(包括荷载及支座反力)都作用在中心平面内，并集中作用于节点上。

对于桁架上直接搁置屋面板的结构，当屋面板的宽度和桁架上弦的节间长度不等时，上弦将受到节间荷载的作用并产生弯矩；或对下弦承受吊顶荷载的结构，当吊顶梁间距与下弦节间长度不等时也会在下弦产生节间荷载及弯矩。这将使上、下弦杆件由轴向受压或轴向受拉变为压弯或拉弯构件，是极为不利的。



## 如何解决？

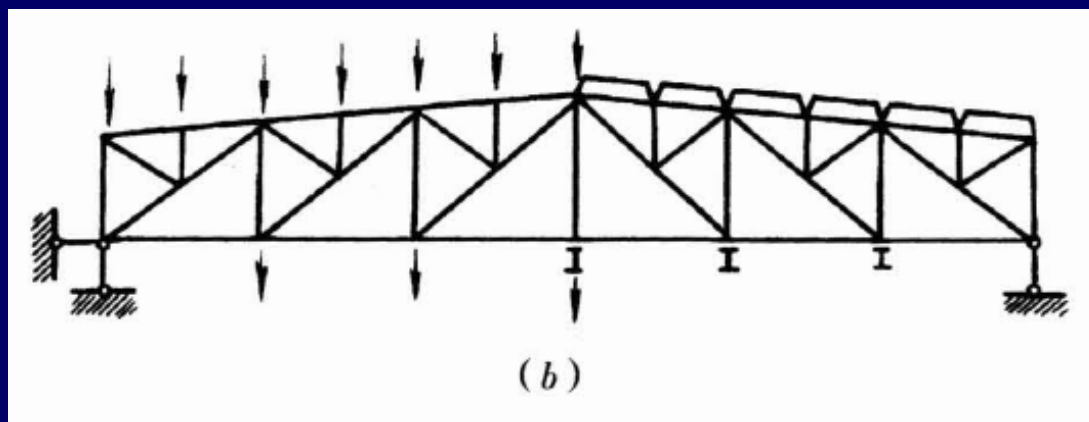
### 1、木桁架与钢筋混凝土桁架：

上、下弦截面尺寸较大，节间荷载所产生的弯矩对构件的影响可通过增大截面或采取构造措施。

### 2、钢桁架：

因其上、下弦截面尺寸很小，节间荷载所产生的弯矩对构件受力有较大影响，桁架节间的划分应考虑屋面板、檩条、吊顶梁的布置要求使荷载尽量作用在节点上。

当节间长度较大时，在钢结构中，常采用再分式屋架，使屋面荷载直接作用在上弦节点上，避免了上弦受弯。





### 3.1.3 桁架结构的内力

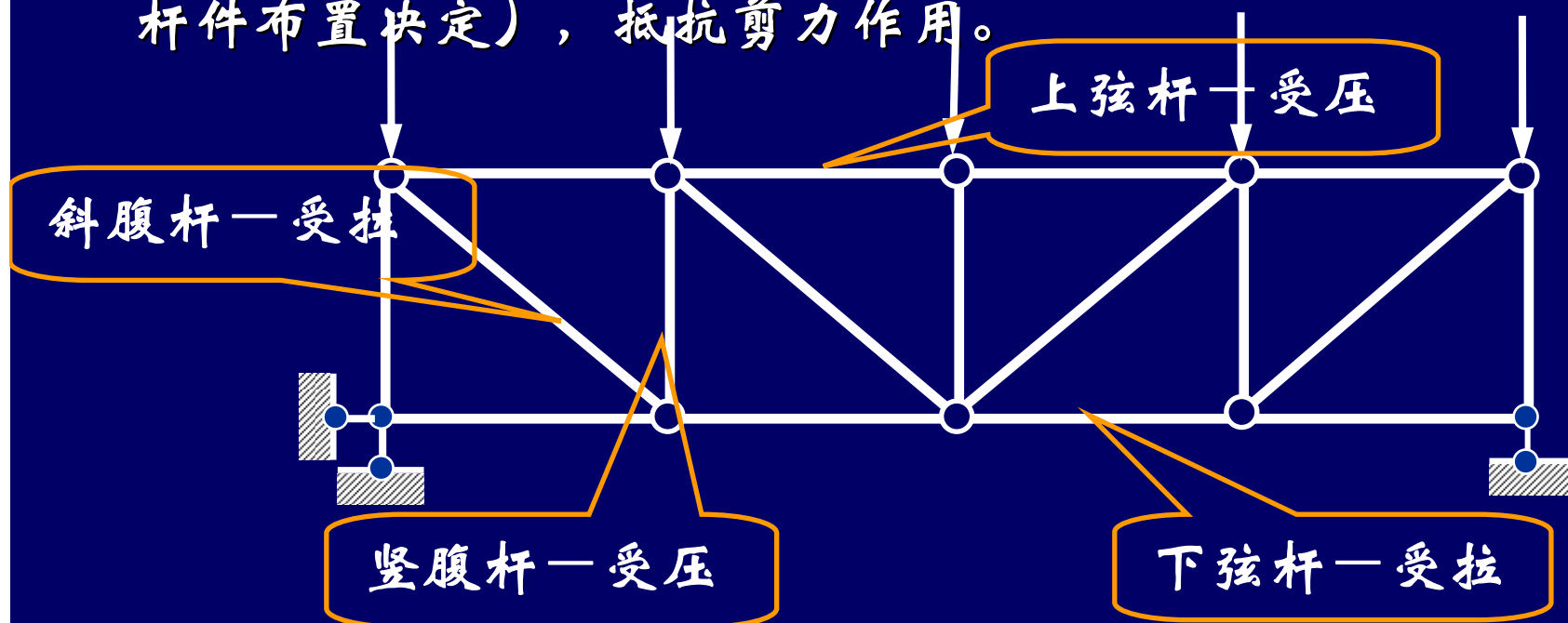
桁架结构的内力以轴力为主，各杆件内力分布不均匀。

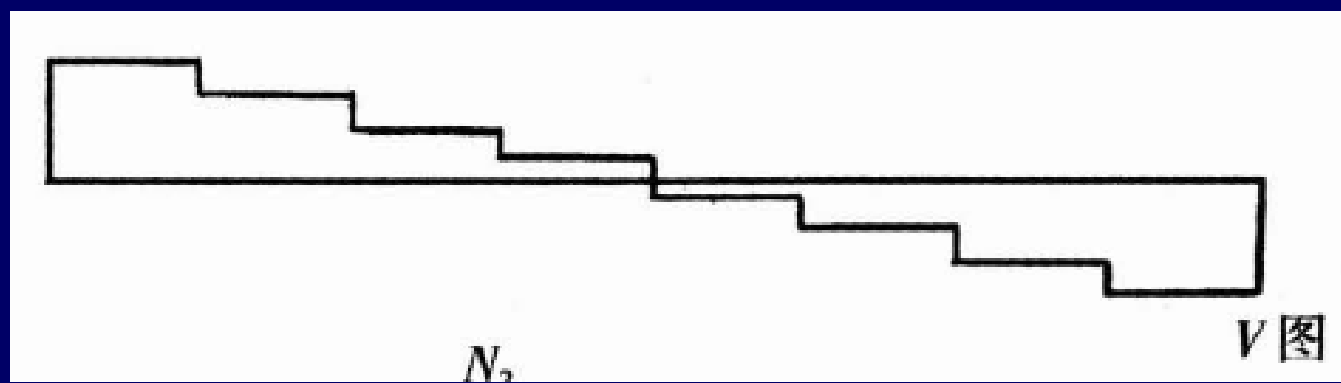
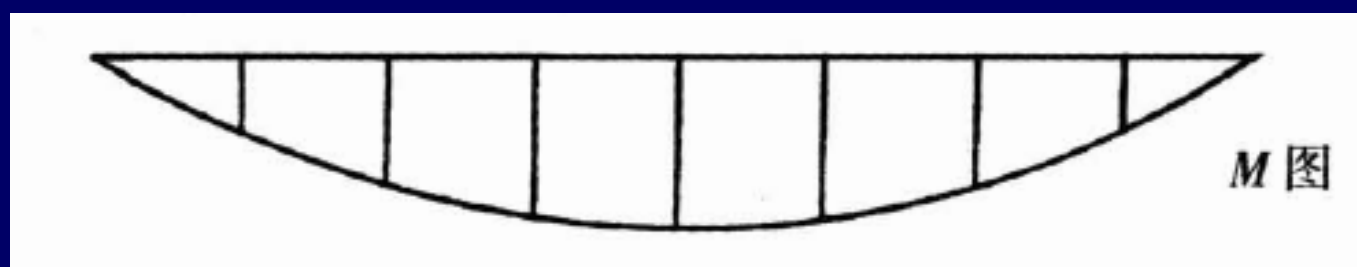
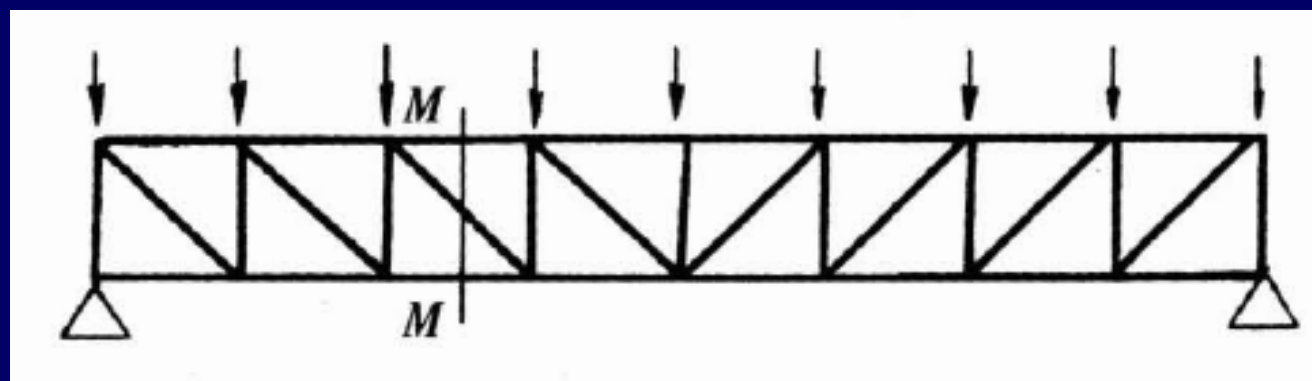
弦杆的内力

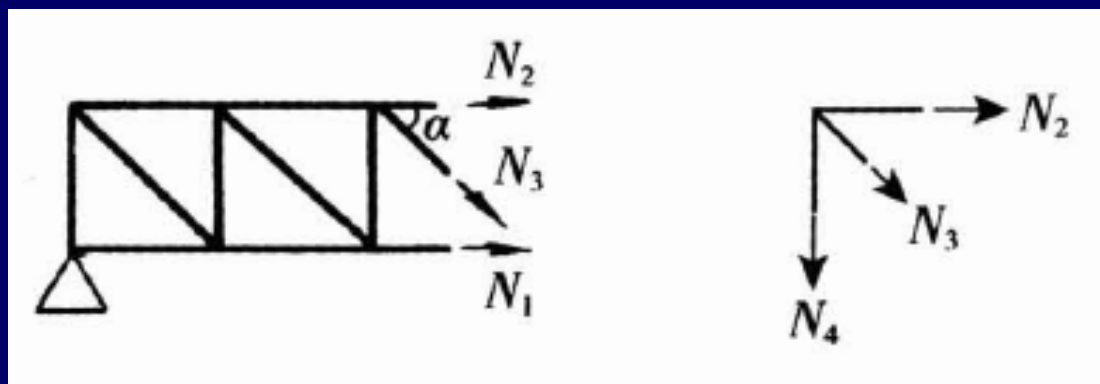
上弦杆件的内力为轴向压力，下弦杆件的内力为轴向受拉，形成力偶抵抗弯矩作用。

腹杆的内力

竖腹杆和斜腹杆的内力可能为轴向拉力或轴向压力（由杆件布置决定），抵抗剪力作用。







$$N_1 = \frac{M_0}{h}$$

$$N_2 = -\frac{M_0}{h}$$

$$N_3 = \frac{V_0}{\sin \alpha}$$

$$N_4 = -V_0$$

式中  $M_0$ ——按简支梁计算的矩心节点处的弯矩值；  
 $h$ ——屋架高度；

$N_1$ 、 $N_2$ ——杆件内力， $N_2$  为负值表示其为压力。

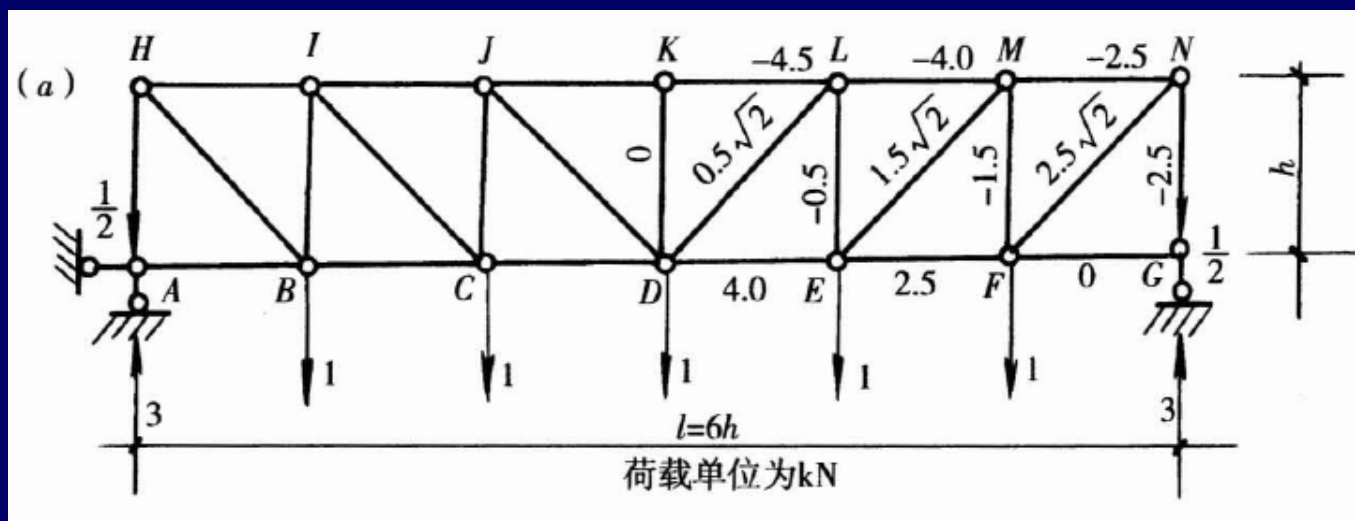
$V_0$  为按简支梁计算的相应截面处的剪力值。

## 常见桁架的受力特点:

### 1. 平行弦桁架

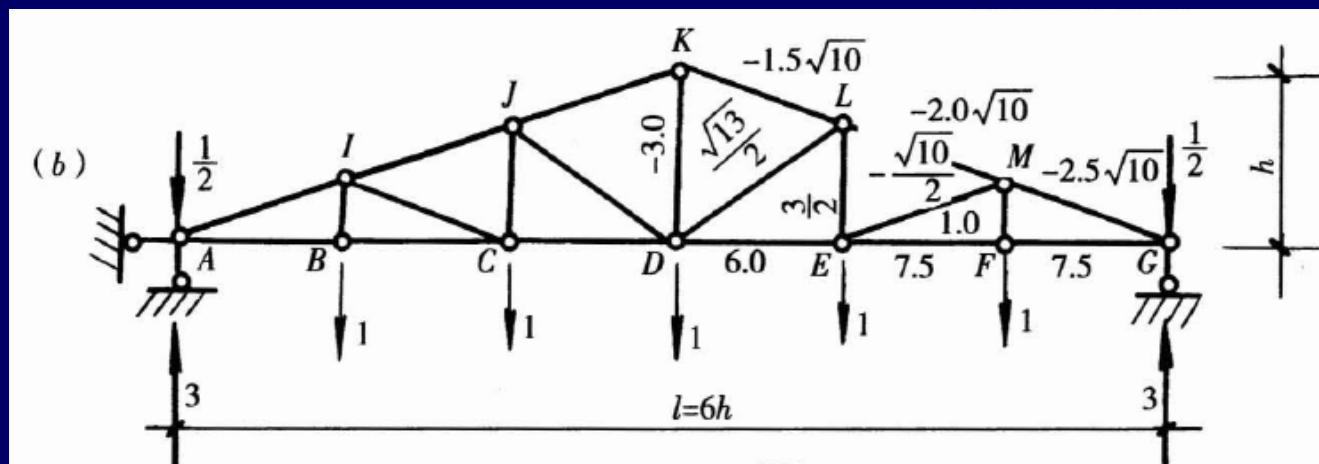
➤弦杆：平行弦桁架高度相等，下弦各节间的内力随外荷载产生的总弯矩而变化，跨中节间轴力大、靠近支座处轴力较小或为零，下弦内力变化较大。

➤腹杆：沿跨度方向各腹杆的轴力变化与剪力图一致，跨中小而支座处大，其值变化较大。



## 2. 三角形桁架

- 上、下弦杆内力在跨中节间最小，在靠近支座处最大。
- 因高度变化速度大于剪力变化速度，故斜腹杆和竖腹杆的受力都是跨中大，支座处小。

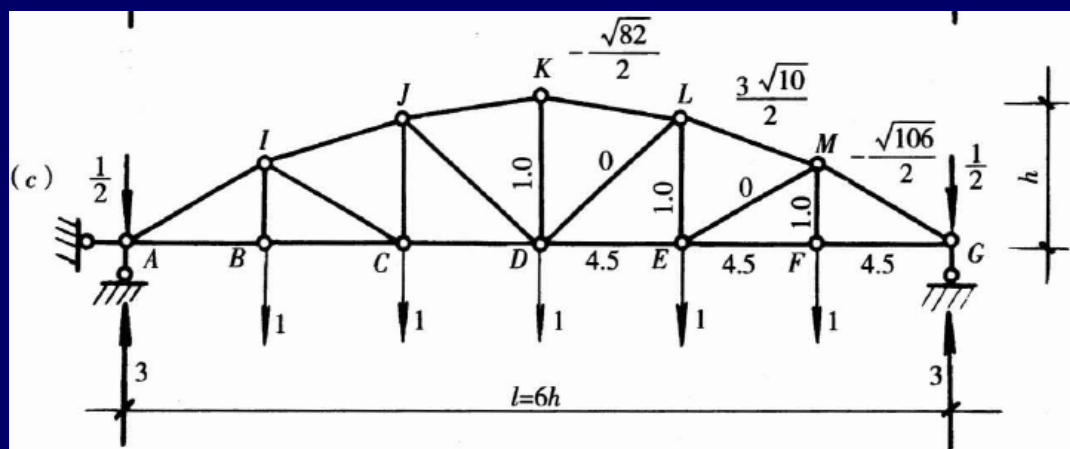




## 常见桁架的受力特点:

### 3. 折线形桁架

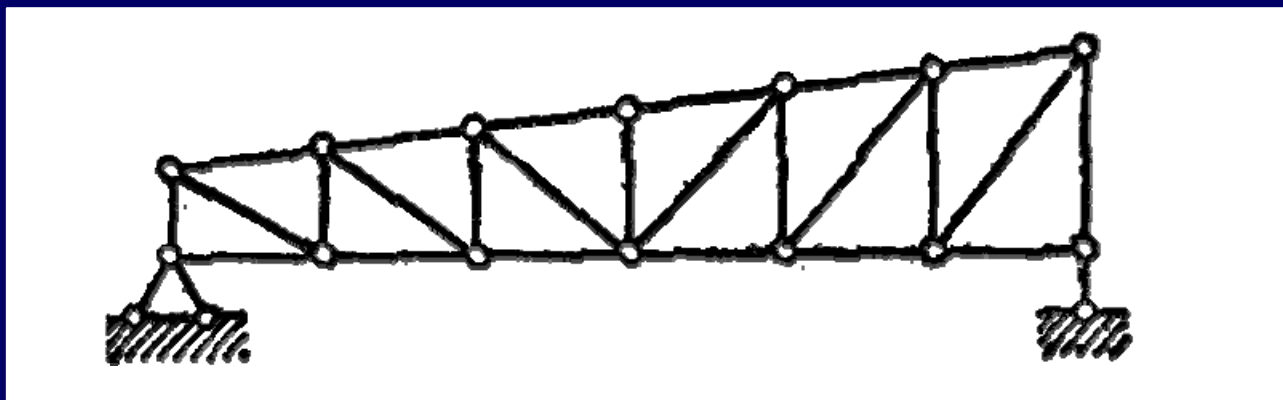
- 高度呈抛物线型的桁架是最理想的桁架形式。
- 上弦曲线做成圆形使屋架外形与抛物线弯矩图接近，为便于制作，常将桁架上弦各节点与弯矩图重合，而在各节点之间取直线，成为折线形桁架。这时，上、下弦杆内各节间轴力基本相等。
- (斜) 腹杆内力全部为零。



## 常见桁架的受力特点:

### 4. 梯形桁架

- 梯形桁架高度的变化在矩形桁架与三角形桁架之间，因此其上、下弦内力分布也在上述两种桁架之间。
- 根据梯形桁架防水层构造的不同，可分为缓坡梯形桁架和陡坡梯形桁架。
- 缓坡梯形桁架适用于卷材防水屋面，因其屋架高度变化较小，其内力变化接近矩形桁架。
- 陡坡梯形桁架适合于屋面板构件自防水屋面，屋面坡度常为 $1/5 - 1/3$ ，其屋架高度变化较大，内力变化接近于三角形桁架。



## 结论

- **三角形桁架：**内力分布不均匀，弦杆要改变截面，施工困难，否则浪费材料，端点角度小，制造困难，但外型符合普通粘土瓦屋面对坡度的要求，在跨度小，坡度大的屋盖中使用。
- **矩形桁架：**内力分布不均匀，施工困难，否则材料浪费，但结构划一，腹杆标准，在轻型桁架中采用，便于采取相同截面的弦杆，而不致于造成很大浪费。
- **折线形桁架：**内力分布均匀，使用材料最为经济，但上弦杆的倾角不同，结构复杂，施工不便，因此，多在大跨结构中采用，节约材料有重大意义。
- **梯形屋架：**内力介于三角形桁架和矩形桁架之间。

## 3.2 屋架结构的形式

### ➤ 按材料分类

木屋架、钢-木组合屋架、钢屋架、轻型钢屋架、钢筋混凝土屋架、预应力混凝土屋架、钢筋混凝土—钢组合屋架等。

### ➤ 按形状分类

三角形、梯形、抛物线、折线形、平行弦等。

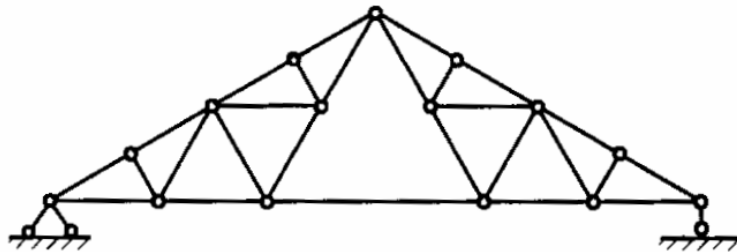
### ➤ 按结构受力特点及材料性能分类：

桥式屋架、无斜腹杆屋架或刚接桁架、立体桁架等。

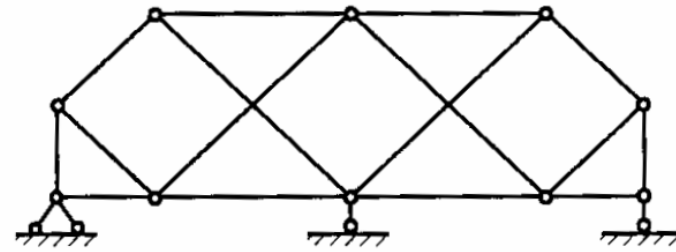
## 3.2 屋架结构的形式

➤ 按几何组成方式可以分：

简单桁架、联合桁架（由几个简单桁架按几何不变体系的简单组成规则联合组成）和复杂桁架（不同于前两种的其他静定桁架）。



联合桁架



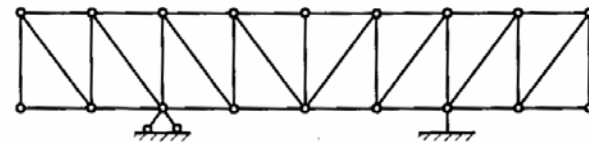
复杂桁架



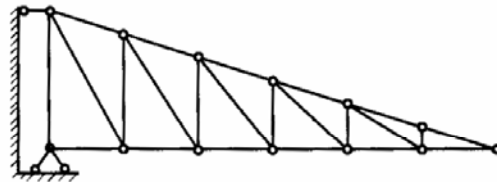
## 3.2 屋架结构的形式

➤ 按是否存在水平推力分类：

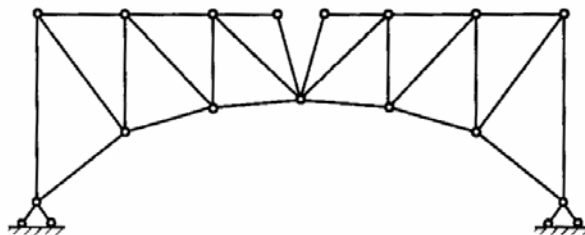
**无推力的梁式桁架**（与相应的实体梁结构比较，掏空率大，上下弦杆联合抗弯，腹杆主要抗剪，受力合理，用材经济）  
**和有推力的拱式桁架**（拱圈与拱上结构联为一体，整体性好，便于施工，跨越能力强，节省钢材）。



伸臂梁式桁架

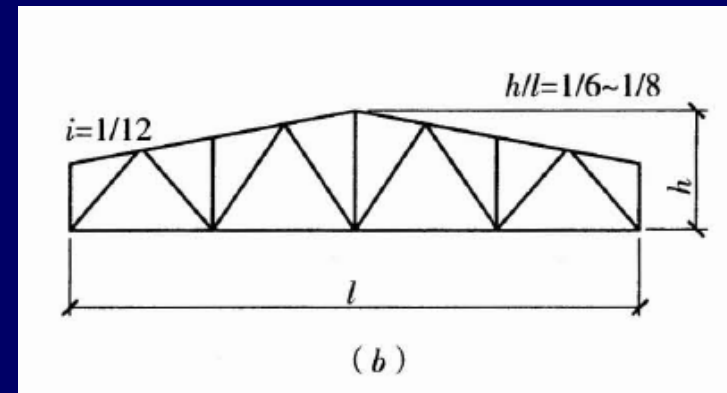
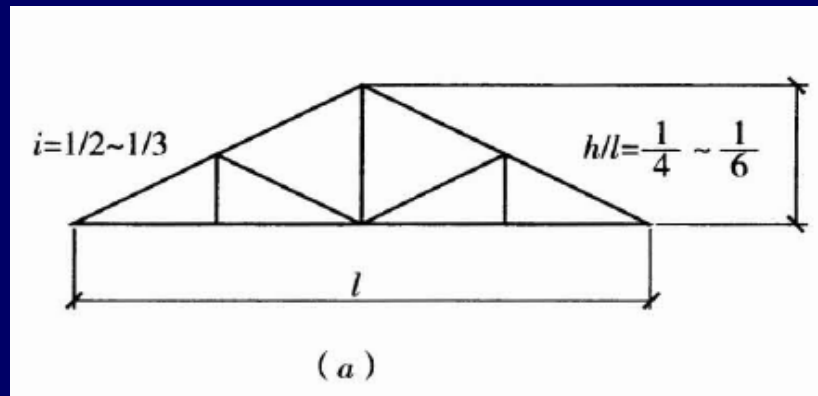


悬臂梁式桁架



拱式桁架

### 3.2.1 木屋架



常用的木屋架是方木或原木齿连接的豪式木屋架。分为三角形和梯形（如上图）。大都在工地手工制作。

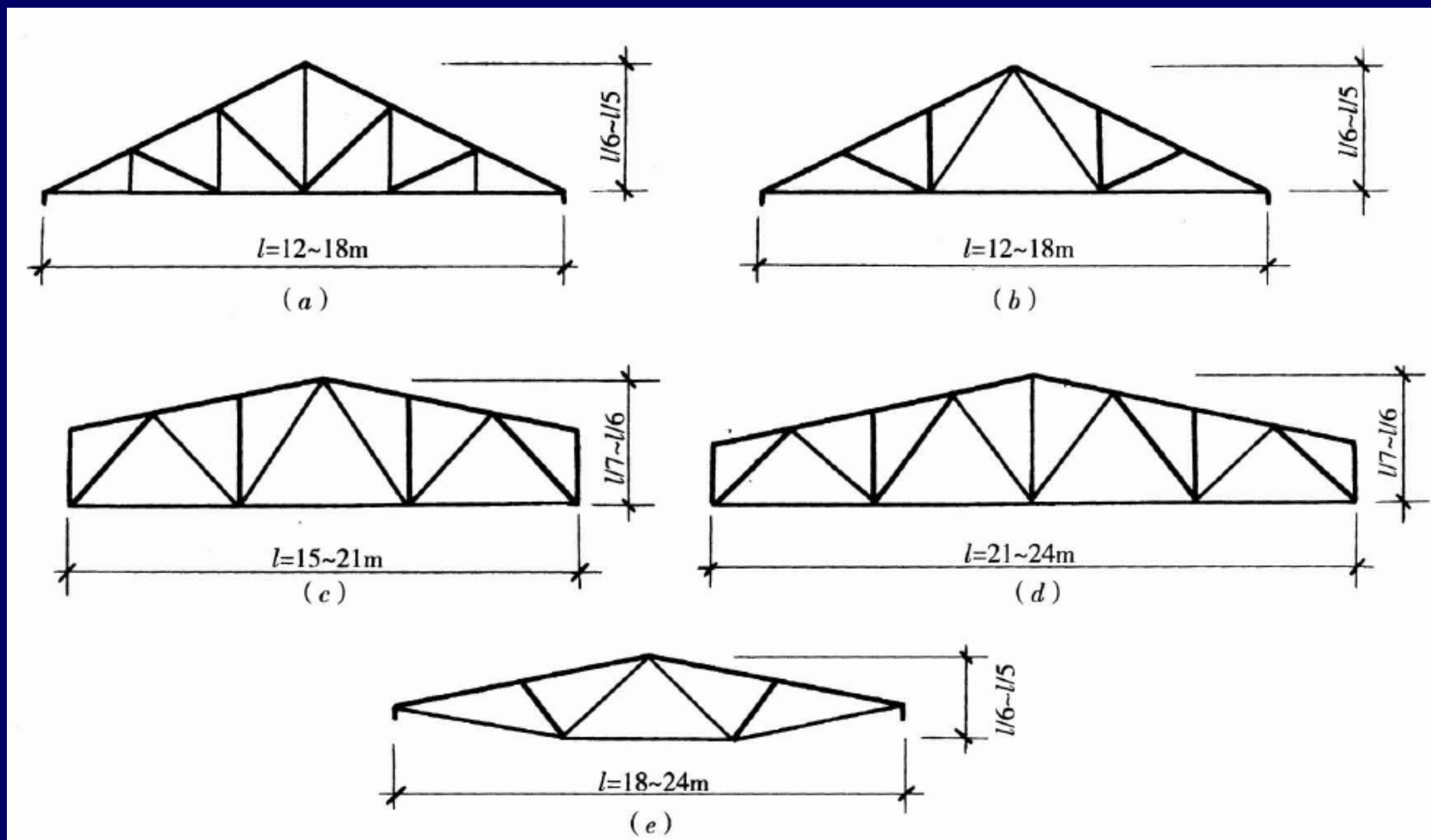
豪式木屋架的节间长度2~3m，一般为4~8节间，适用跨度为12~18m，高跨比宜在1/5~1/4之间。当屋架跨度不大时，上弦可用整根木料。

### 3.2.1 木屋架

- 三角形屋架适用于跨度在18m以内（取12m）的建筑。坡度大，适用于屋面材料为粘土瓦，水泥瓦及小青瓦等要求排水坡度较大的情况。
- 梯形屋架受力性能比三角形屋架合理，可用于跨度较大房屋适用跨度为12~18m。

### 3.2.2 钢—木组合屋架

➤ 形式：(1) 豪式、(2) 芬克式、(3) 梯形、(4) 下折式。



### 3.2.2 钢—木组合屋架

#### 钢材用在什么位置？

➤ 由于不易取得符合下弦材质标准的上等木材，特别是原木和方木干燥较慢，干裂缝对下弦不利，采用钢拉杆作为屋架的下弦，每平方米建筑面积的用钢量增加2~4kg，但显著提高了结构的可靠性和屋架刚度。



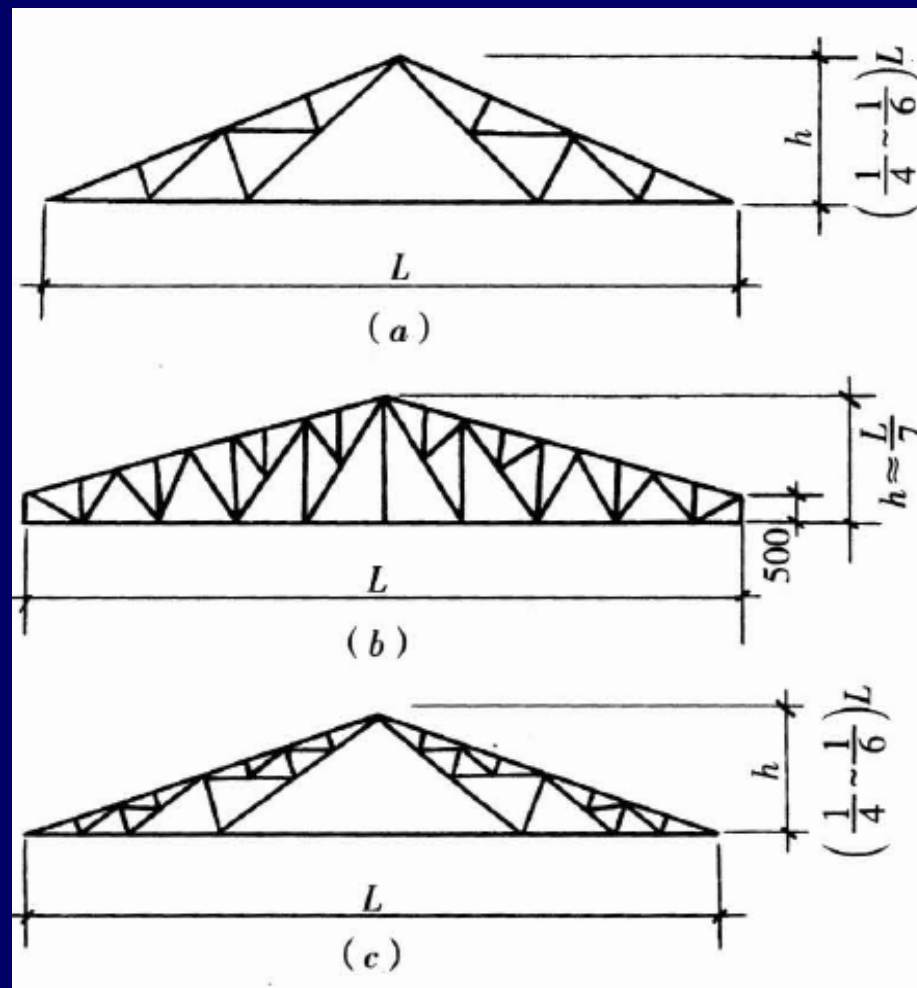
### 3.2.3 钢屋架

#### 三角形屋架:

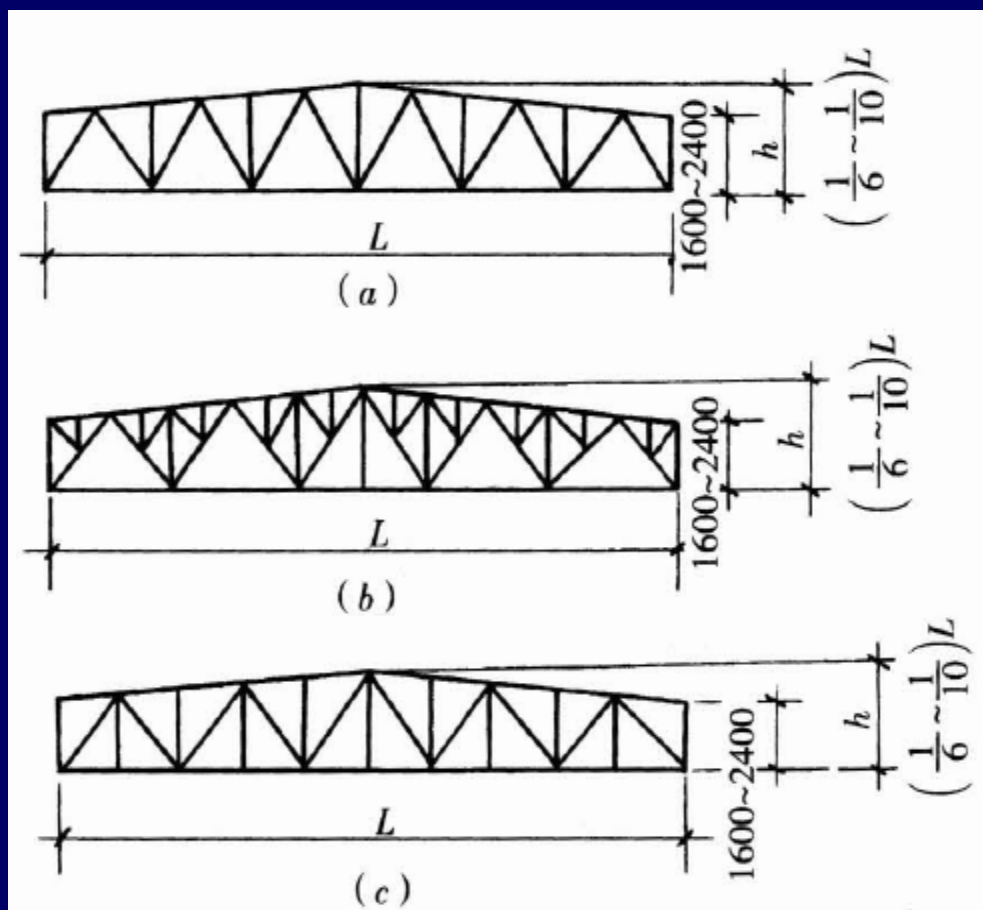
➤ 用于屋面坡度较大的屋盖结构中。当屋面材料为黏土瓦、机制平瓦时，要求屋架的高跨比为  $1/6 - 1/4$ 。

➤ 内力变化较大，弦杆内力在支座处最大，在跨中最小，材料强度不能充分发挥作用。一般用于中小跨度的轻屋盖结构。

➤ 芬克式屋架，腹杆受力合理，长杆受拉，短杆受压，可分为两榀小屋架制作，现场安装，施工方便。



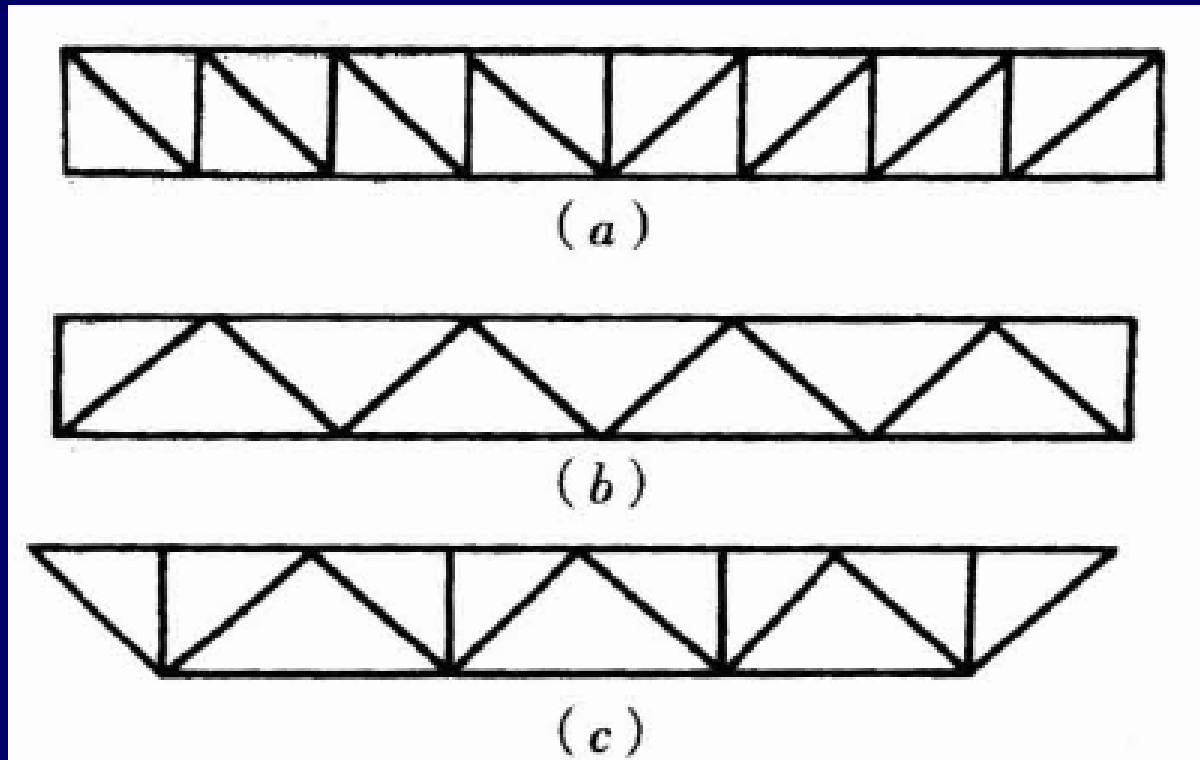
### 3.2.3 钢屋架



### 梯形屋架

- 用于屋面坡度较小的屋盖中，受力性能比三角形屋架优越，适用于较大跨度或荷载的工业厂房。
- 当上弦坡度为  $1/12 - 1/8$  时，梯形屋架的高度可取  $(1/10 - 1/6)L$ ，当跨度大或屋面荷载小时取小值，跨度小或屋面荷载大时取大值。
- 用于无檩体系屋盖，屋面材料大多用大型屋面板。

### 3.2.3 钢屋架



矩形屋架

- 矩形屋架在均布荷载作用下，杆件内力分布极不均匀，故材料强度得不到充分利用。
- 不宜用于大跨度建筑中，一般常用于托架或支撑系统。当跨度较大时为节约材料，也可采用不同的杆件截面尺寸。

### 3.2.4 轻型钢屋架

- 屋架的上弦一般用小角钢、下弦和腹杆用小角钢或圆钢。
- 适用于：跨度 $\leq 18\text{m}$ ，柱距 $4\sim 6\text{m}$ ，设置有起重量 $\leq 50\text{KN}$ 的中、轻级工作制桥式吊车的工业建筑和跨度 $\leq 18\text{m}$ 的民用房屋的屋盖结构。
- 结构型式：三角形、三铰拱和梭形屋架。
- 常用：三角形屋架。

三角形轻钢屋架常用的有芬克式和豪式两种。构件布置和受力特点与普通钢屋架相似。

### 3.2.4 轻型钢屋架

- 三铰拱轻钢屋架由两根斜梁和一根拉杆组成，斜梁有平面桁架式和空间桁架架式两种，拉杆可用圆钢或角钢。这种屋架的特点是杆件受力合理，斜梁腹杆短短，取材方便，经济效果好。
- 三铰拱屋架由于拱拉杆比较细柔，不能承压，并且无法设置垂直支撑和下弦水平支撑，整个屋盖结构的刚度较差，故不宜用于有振动荷载及屋架跨度超过18m的工业厂房。
- 三角形、三铰拱屋架适用于斜坡屋面，屋面坡度通常取 $1/2 \sim 1/3$ ，梭形屋架的屋面坡度较平坦，通常取 $1/12 \sim 1/8$ 。



### 3.2.4 轻型钢屋架

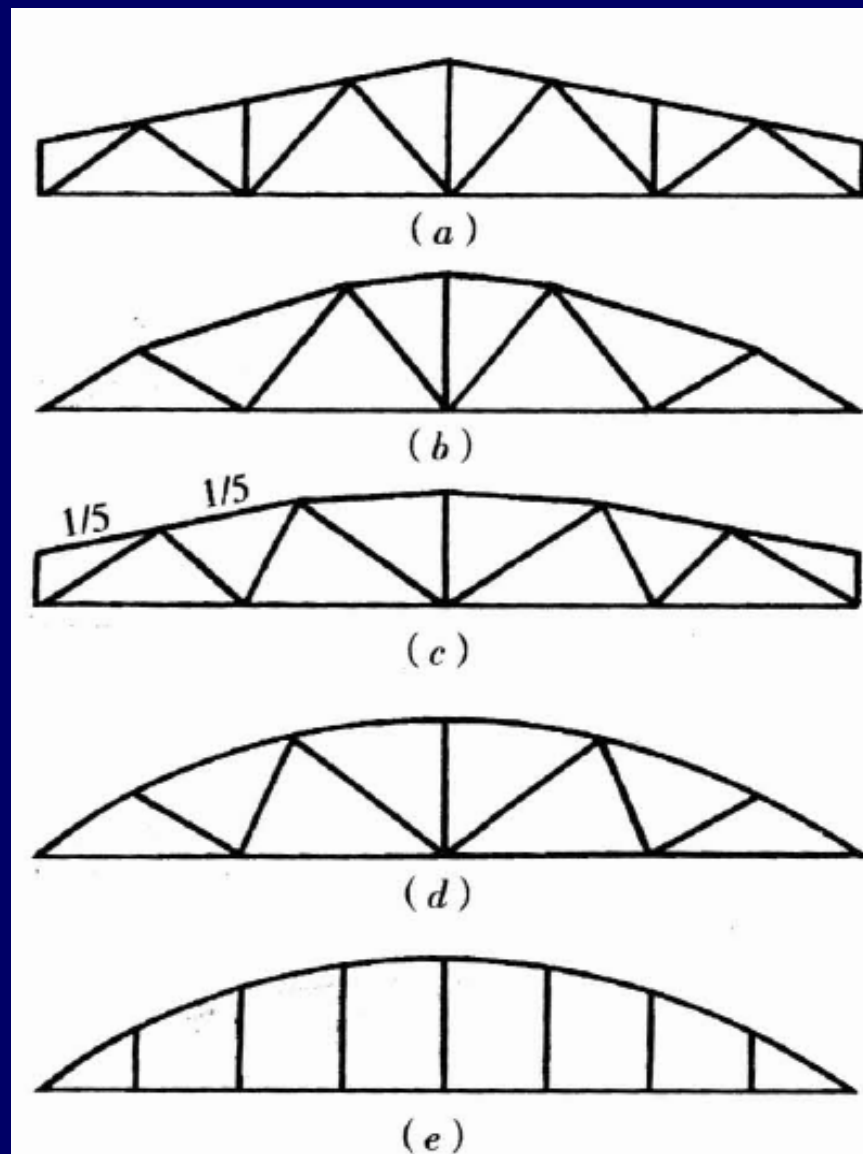
- 梭形屋架有平面桁架式和空间桁架式两种。一般是上弦杆为角钢、其余则采用圆钢构成空间桁架结构，具有取材方便、截面重心低、空间刚度好、一般再不设支撑等优点。
- 梭形屋架适用于跨度为9-15m，间距为3-4.2m的屋盖体系。





### 3.2.5 钢筋混凝土屋架

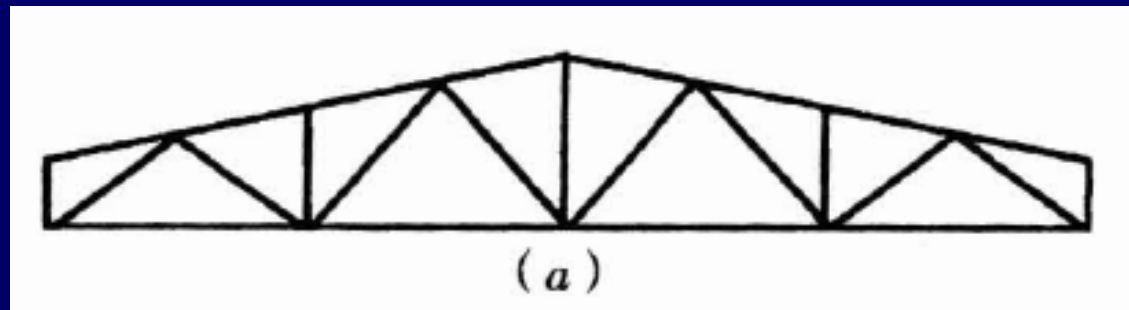
- 常见形式有：梯形、折线形、拱形、无斜腹杆屋架等。
- 根据是否对屋架下弦施加预应力，分为：钢筋混凝土屋架和预应力混凝土屋架，前者适用跨度为15~24m，后者适用跨度为18~36m或更大。



## 3.2.5 钢筋混凝土屋架

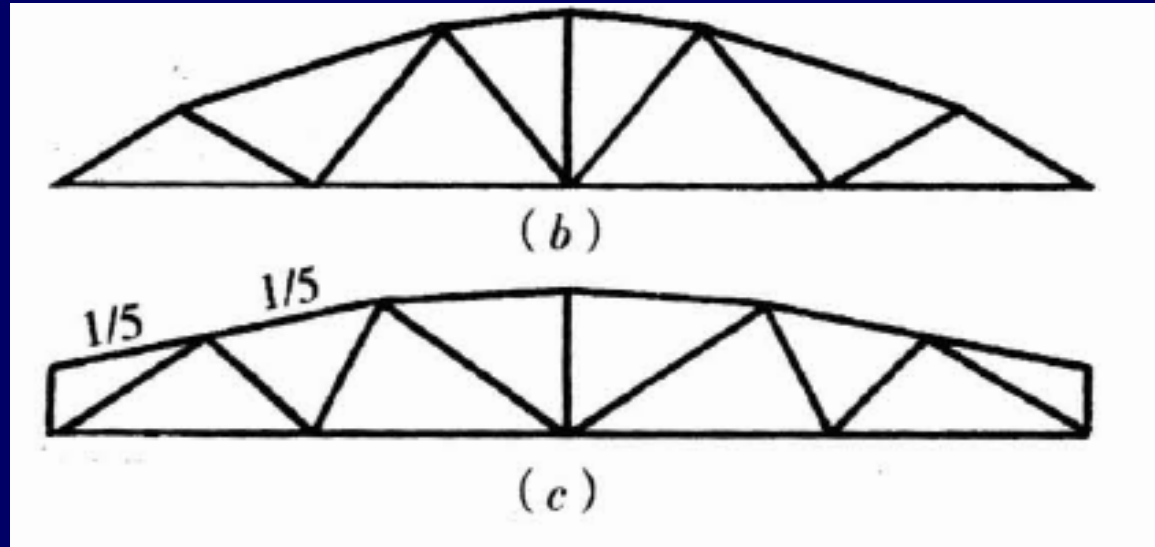
### 1、梯形屋架

➤ 上弦为直线，屋面坡度为 $1/10\sim 1/12$ ，适用于卷材防水屋面。上弦节间为3m，下弦节间为6m，矢高与跨度之比为 $1/6\sim 1/8$ ，屋架端部高度为1.8~2.2m。梯形屋架自重较大，刚度好。适用于重型、高温及采用井式或横向天窗的厂房。



### 3.2.5 钢筋混凝土屋架

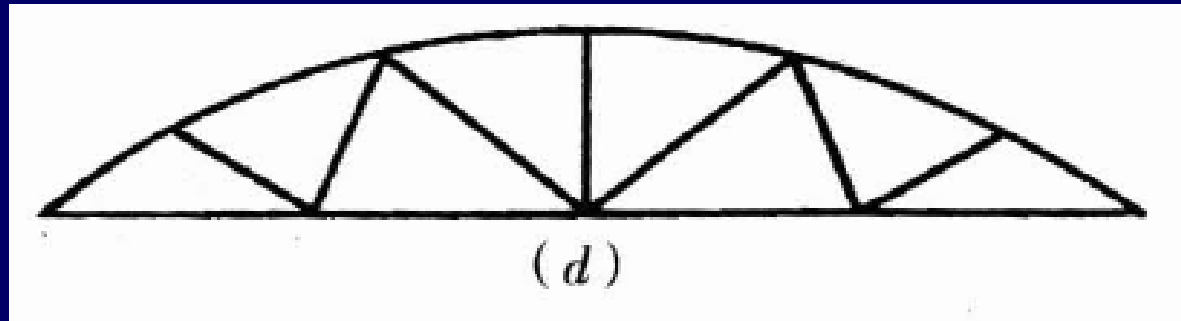
#### 2、折线形屋架



- 外形较合理，结构自重较轻，屋面坡度为 $1/3 \sim 1/4$ ，适用于非卷材防水屋面的中型厂房或大中型厂房。
- 屋面坡度平缓，适用于卷材防水屋面的中型厂房，为改善屋架端部的屋面坡度，减少油毡下滑，一般可在端部增加两个杆件，使整个屋面的坡度较为均匀。

## 3.2.5 钢筋混凝土屋架

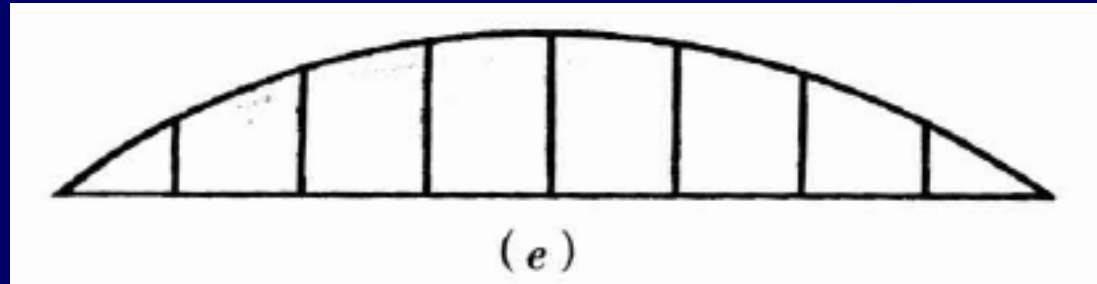
### 3、拱形屋架



- 上弦为曲线形，采用抛物线形，为制作方便，可采用折线形，但折线的节点应落在抛物线上。
- 屋架外形合理，杆件内力均匀，自重轻，经济指标良好，但屋架端部屋面坡度太陡，可在上弦上不加设短柱，矢高比为 $1/6 \sim 1/8$ 。

### 3.2.5 钢筋混凝土屋架

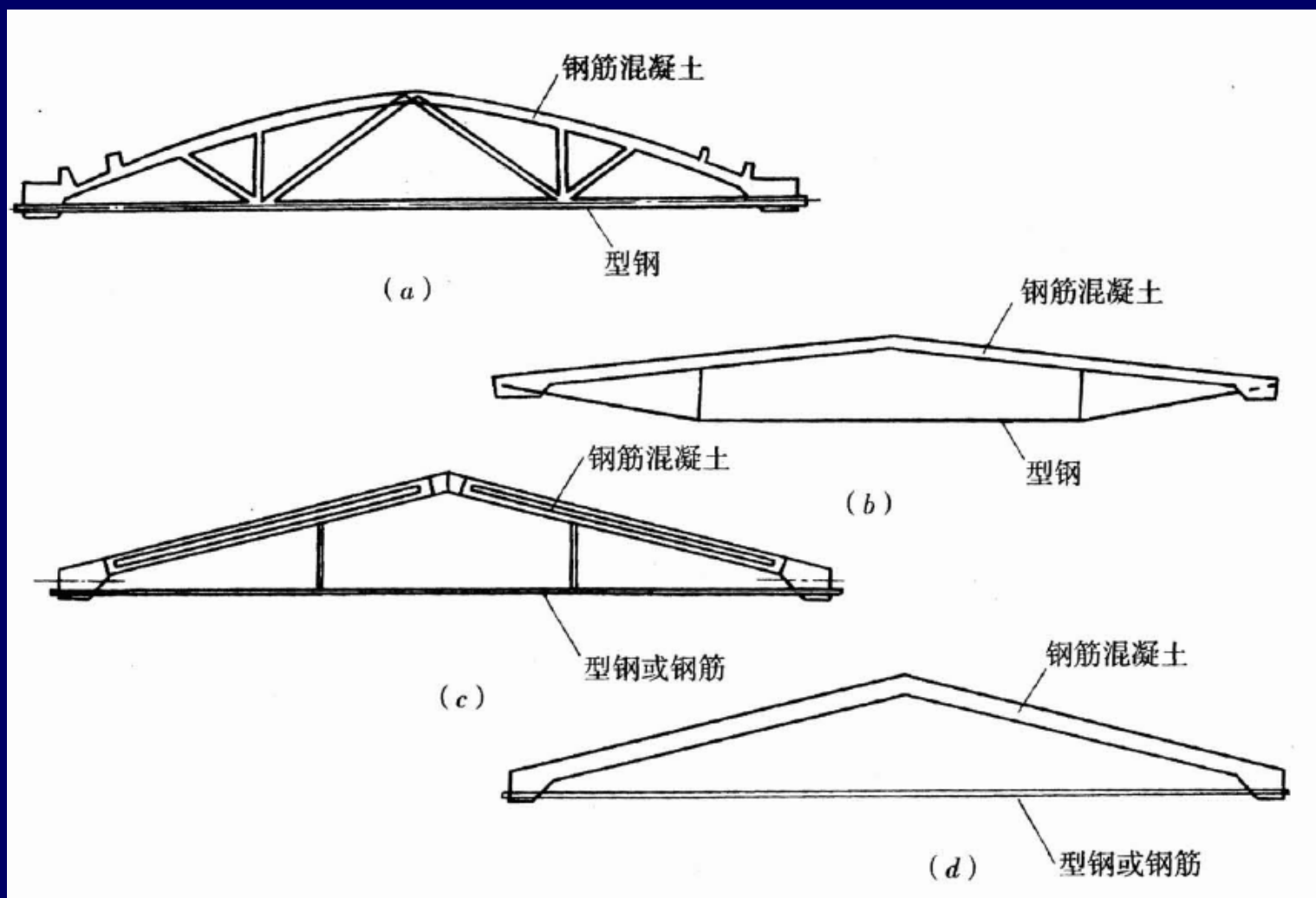
#### 4、无斜腹杆屋架



- 上弦一般为抛物线拱。由于没有斜腹杆，故结构构造简单，便于制作。屋面板可以支承在上弦杆上，也可以支承在下弦杆上，因此较适用于采用井式或横向天窗的厂房。这样不仅省去了天窗架等构件简化了结构构造，而且降低了厂房屋盖的高度，减小了建筑物受风的面积。
- 无斜腹杆屋架的技术经济指标较好，当采用预应力时，适用跨度可达到36m。由于没有斜腹杆，屋架中管道穿行和工人检修等均很方便，使屋架高度的空间得以充分利用。
- 无斜腹杆屋架力学上的显著特点是屋架节点不能简化为铰节点。

### 3.2.6 钢筋混凝土-钢组合屋架

常见的有折线形屋架、三铰屋架、两铰屋架。

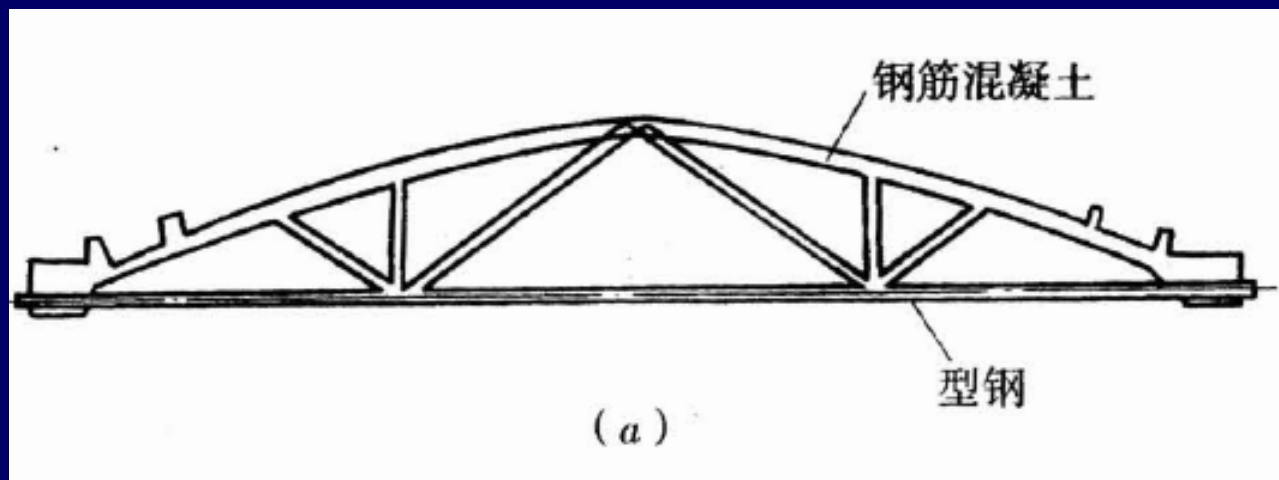




### 3.2.6 钢筋混凝土-钢组合屋架

#### 1、折线形屋架

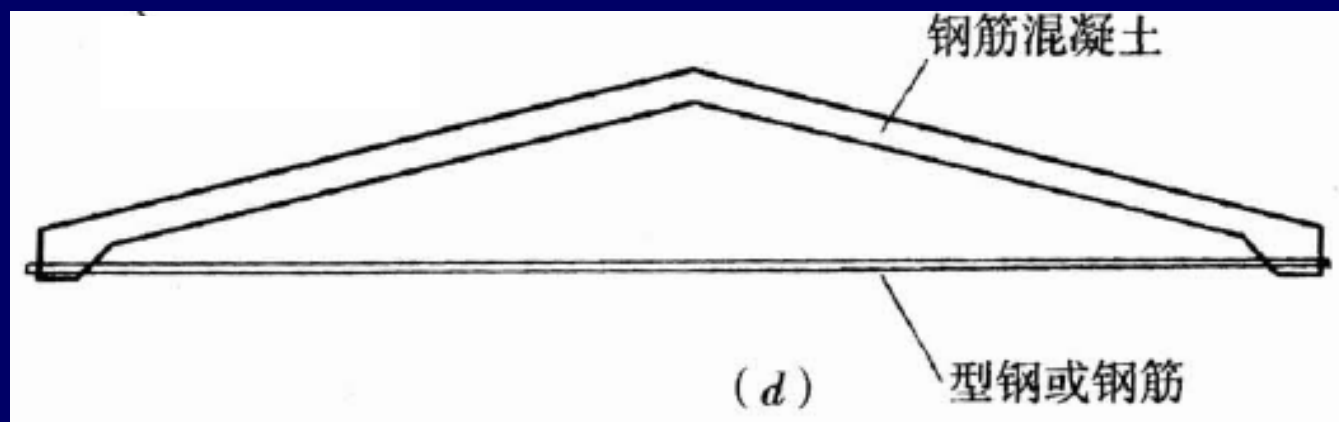
➤折线形屋架上弦及受压腹杆为钢筋混凝土，下弦及受拉腹杆为角钢，充分发挥了两种不同材料的力学性能，自重轻、材料省、技术经济指标较好，适用于跨度为12~18m的中小型厂房。



### 3.2.6 钢筋混凝土-钢组合屋架

#### 2、两铰或三铰组合屋架

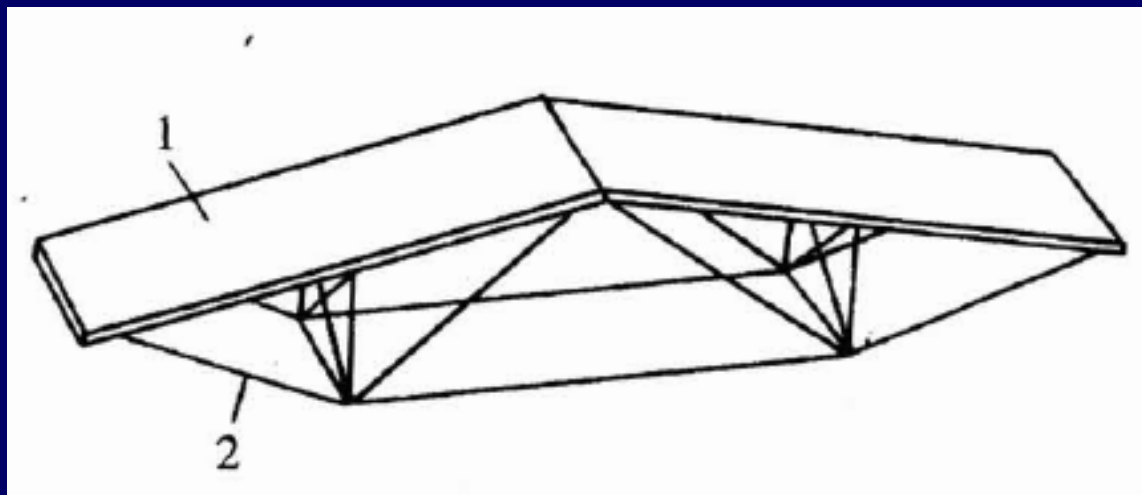
➤ 上弦为钢筋混凝土或预应力混凝土构件，下弦为型钢或钢筋，顶接点为刚接或铰接（三铰组合屋架）。屋架杆件少，自重轻，受力明确，构造简单，施工方便，适用于农村地区的中小型建筑。



## 3.2.6 钢筋混凝土-钢组合屋架

### 3、桥式屋架

➤ 将屋面板与屋架合二为一的结构体系。屋架结构的上弦为钢筋混凝土屋面板，下弦和腹杆可为钢筋，亦可为型钢。



## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.1 屋架结构的主要尺寸

#### 1、矢高

- 矢高大，弦杆受力小，但腹杆长、长细比大、易压曲，用料反而会增多。
- 矢高小，弦杆受力大，截面大、且屋架刚度小，变形大。
- 因此，矢高不宜过大和过小，一般取 $1/10 \sim 1/5$ 。

#### 2、坡度

- 当采用瓦类屋面时，屋架上弦坡度应大些，一般不小于 $1/3$ ；
- 当采用大型屋面板并做卷材防水时，屋面坡度可平缓些，一般为 $1/8 \sim 1/12$ 。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.1 屋架结构的主要尺寸

#### 3、节间长度

➤上弦受压，节间长度应小些，下弦受拉，节间长度可大些。屋面荷载应直接作用在节点上，以优化杆件的受力状态。

➤为减少屋架制作工作量，减少杆件与节点数目，节间长度可取大些，一般为1.5~4m。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.2 屋架结构的选型

屋架结构的选型应考虑房屋的用途、建筑造型、屋面防水构造、屋架的跨度、结构材料的供应、施工技术条件等因素，做到受力合理、技术先进、经济适用。



## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.2 屋架结构的选型

#### 1、屋架结构的受力

- 抛物线状的拱式结构：受力最为合理，但施工复杂。
- 折线形屋架：与弯矩图最接近，力学性能良好。
- 梯形屋架：力学性能较好，上下弦均为直线施工方便，在大中跨建筑中被广泛应用。
- 三角形屋架：力学性能较差，适用于中小跨度。
- 矩形屋架：力学性能较差，用作托架或荷载较特殊情况下使用。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.2 屋架结构的选型

#### 2、屋面防水构造

- 三角形、陡坡梯形屋架：屋面材料采用粘土瓦、机制平瓦或水泥瓦。
- 拱形、折线形屋架：采用卷材防水、金属薄板材料。

#### 3、材料耐久性

- 木材、钢材：易腐蚀，维修费用高，不宜用于有侵蚀性的工业厂房和通风不良的建筑。
- 预应力混凝土屋架：提高屋架下弦的抗裂性，防止钢筋腐蚀。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.2 屋架结构的选型

#### 4、跨度

- 18m以下：钢筋混凝土——钢组合屋架，构造简单、施工方便、技术经济指标较好。
- 36m以下：预应力混凝土屋架，节省钢材，有效控制裂缝宽度和挠度。
- 36m以上（大跨度或振动荷载较大）：钢屋架，结构自重轻，提高结构的耐久性和可靠性。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.3 屋架结构的布置

#### 1、屋架的跨度

- 一般以3m为模数。
- 我国制订了相应的标准图集可供查用。

#### 2、屋架的间距

- 等间距平行排列，与房屋纵向柱列的间距一致，屋架直接搁置在柱顶。常见的有：6m、7.5m、9m、12m等。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.3 屋架结构的布置

#### 3、屋架的支座

- 支座标高由建筑外形的要求确定，在同层中屋架的支座取同一标高。
- 在力学上可简化为铰接支座。
- 当跨度较小时，把屋架直接搁置在墙、柱或圈梁上；跨度较大时，应采取专门的构造措施。

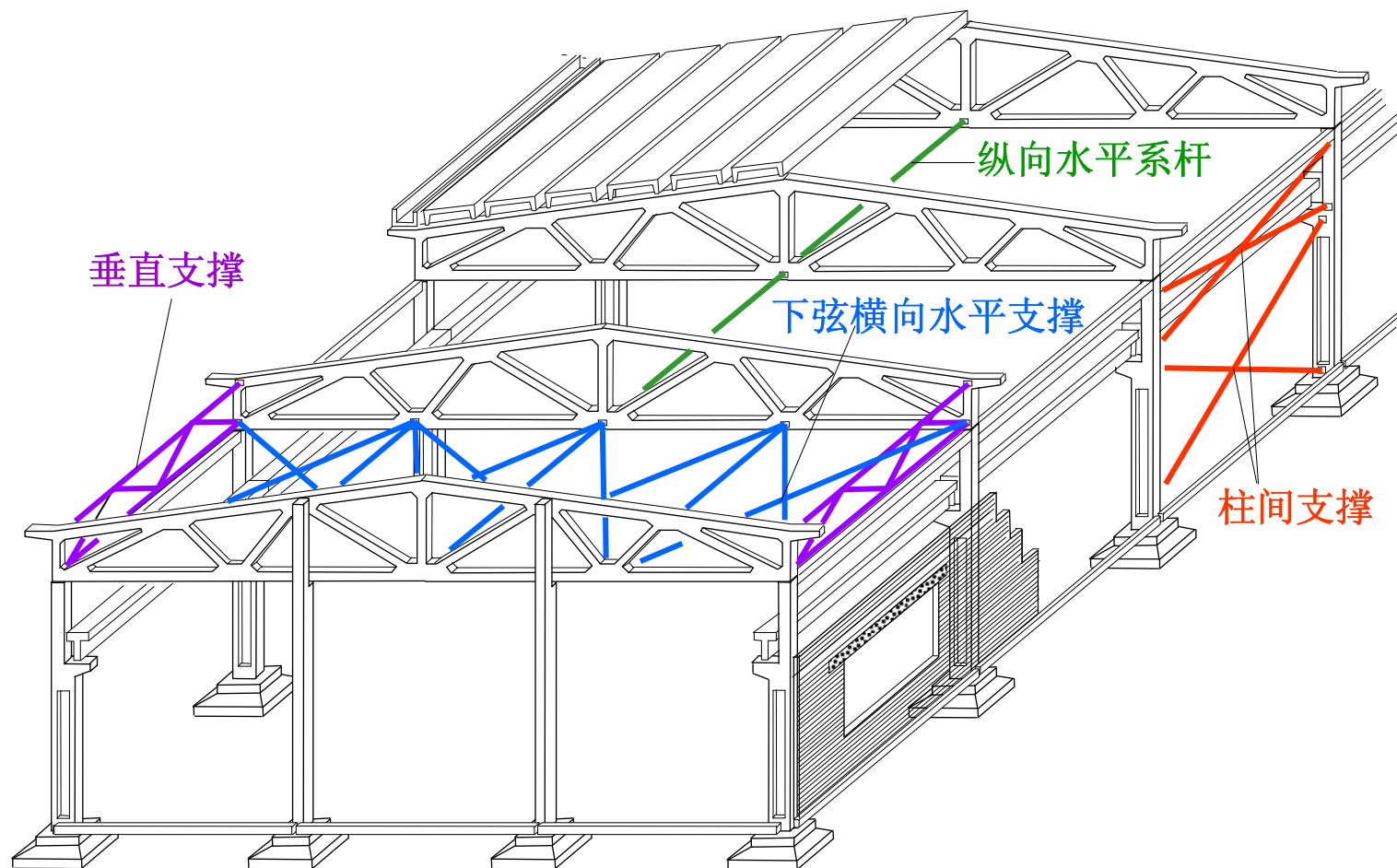
## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.4 屋架结构的支撑

- 平面屋架结构，平面内受力性能好，但平面外的刚度很小，需要设置支撑。
- 包括：屋架之间的垂直支撑、水平系杆、设置在上、下弦平面内的横向支撑、下弦平面内的纵向水平支撑。
- 作用：保证屋架在使用和安装时的侧向稳定性，增强屋盖的整体刚度，增强排架的空间工作性能。

## 3.3 屋架结构的选型与布置

### 3.3.4 屋架结构的支撑





## 3.4 立体桁架

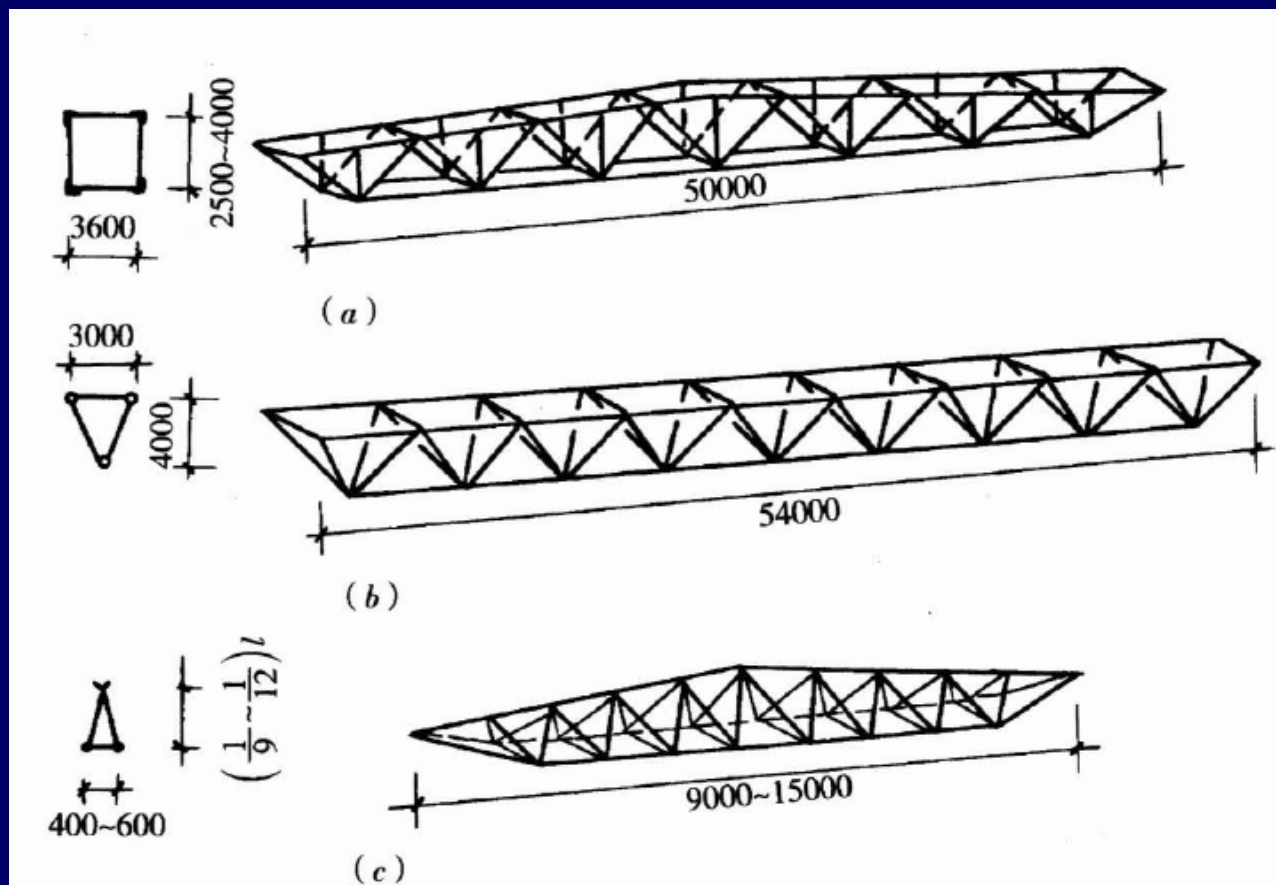
平面屋架在平面内受力性能好，但平面外刚度很小。为保证结构的整体性，必须要设置各类支撑，支撑结构的布置要消耗许多材料，且以长细比来控制，材料强度得不到充分发挥。立体桁架可以避免以上缺点。

## 3.4 立体桁架

### 3.4.1 立体桁架的结构型式及特点

#### ➤ 立体桁架：

由两榀平面桁架相隔一定的距离以连接杆件将两榀平面桁架成90度或45度夹角。构造与施工简单易行但耗钢较多。



## 3.4 立体桁架

### 3.4.1 立体桁架的结构型式及特点

➤ 立体桁架的截面形式可为矩形、正三角形、倒三角形。

相比矩形截面，三角形截面立体桁架可减少连接杆件。当跨度较大时，上弦压力大，截面大，可把上弦一分为二，构成倒三角形立体桁架；当跨度较小时，上弦截面不大，宜把下弦一分为二，构成正三角形立体桁架。

➤ 两根下弦在支座节点汇交于一点，形成两端尖的梭子状，亦称为梭形架。

## 3.4 立体桁架

### 3.4.1 立体桁架的结构型式及特点

立体桁架特点：

- **优点：** 具有较大的平面外刚度，有利于吊装和使用，节省用于支撑的钢材；
- **缺点：** 三角形截面立体桁架杆长计算繁琐，杆件的空间角度非整数，节点构造复杂，焊缝要求高，制作复杂。

## 3.4 立体桁架

### 3.4.2 立体桁架的工程实例

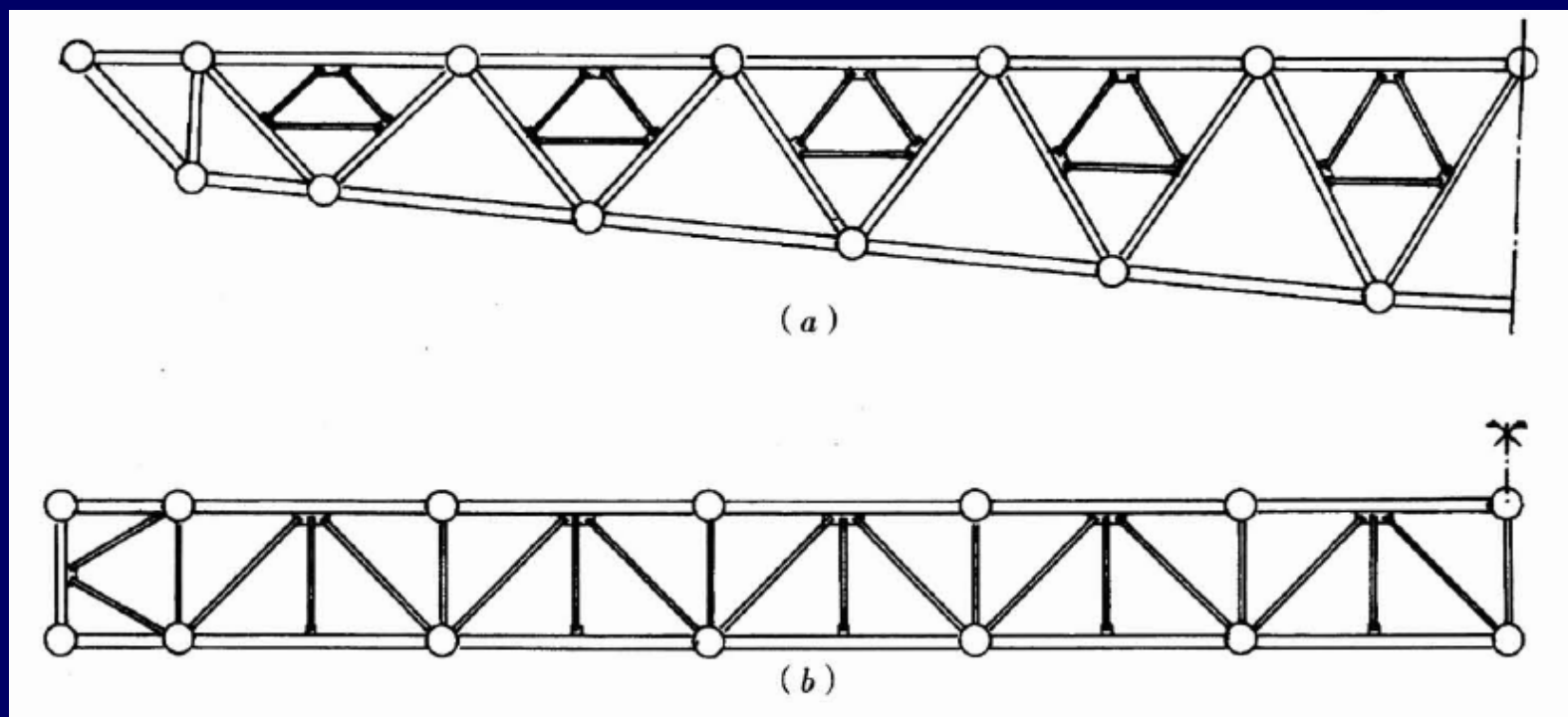


贝宁  
友谊  
体育  
场的  
多功  
能综  
合体  
育馆

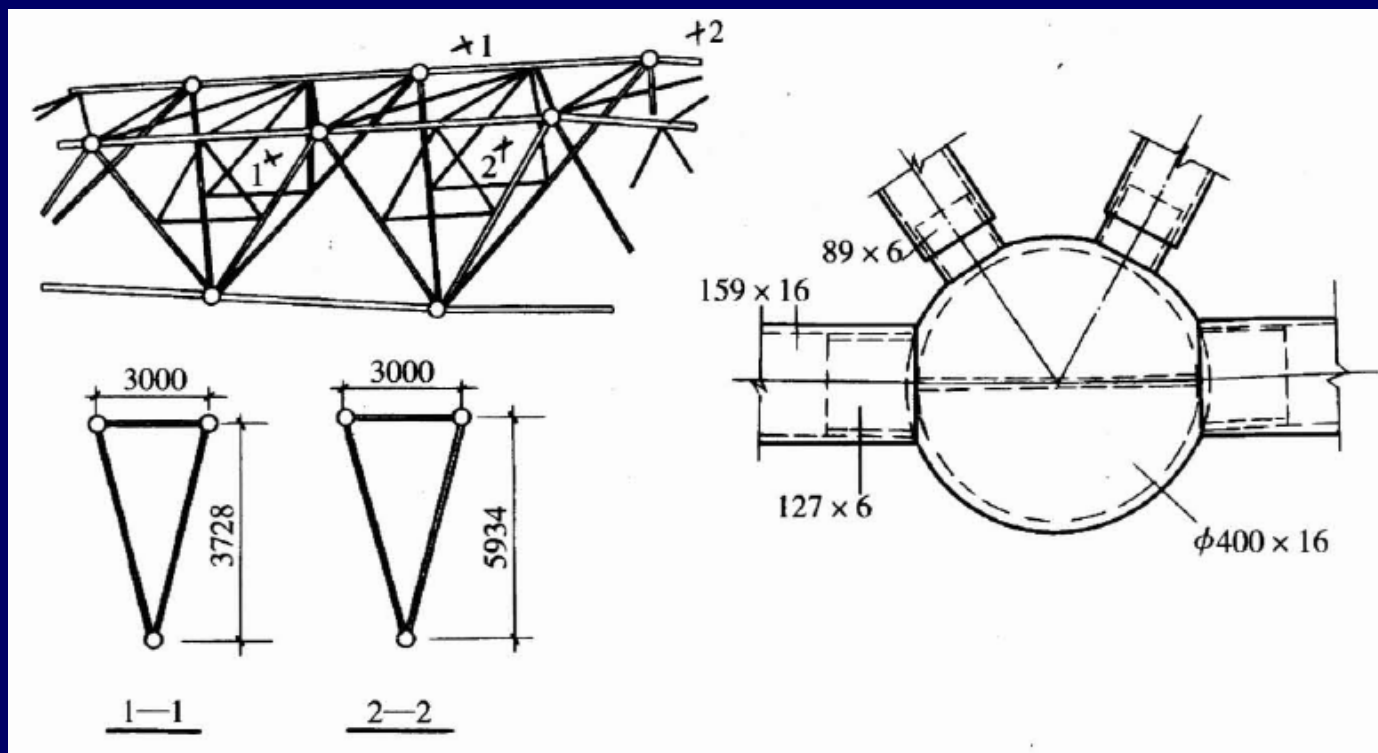
体育馆可容纳观众**5000**名，总建筑面积**14015m<sup>2</sup>**。

### 3.4.2 立体桁架的工程实例

- 屋盖结构考虑到当地的施工条件及实际情况，采用钢管球节点梭形立体桁架，跨度为65.3m，高跨比为1/13，中间起拱1/330。
- 上弦及腹杆采用20号普通碳素钢无缝钢管，下弦用16Mn低合金无缝钢管，钢球及加劲板用16Mn低合金钢，钢管支撑用20号普通碳素钢无缝钢管。



### 3.4.2 立体桁架的工程实例



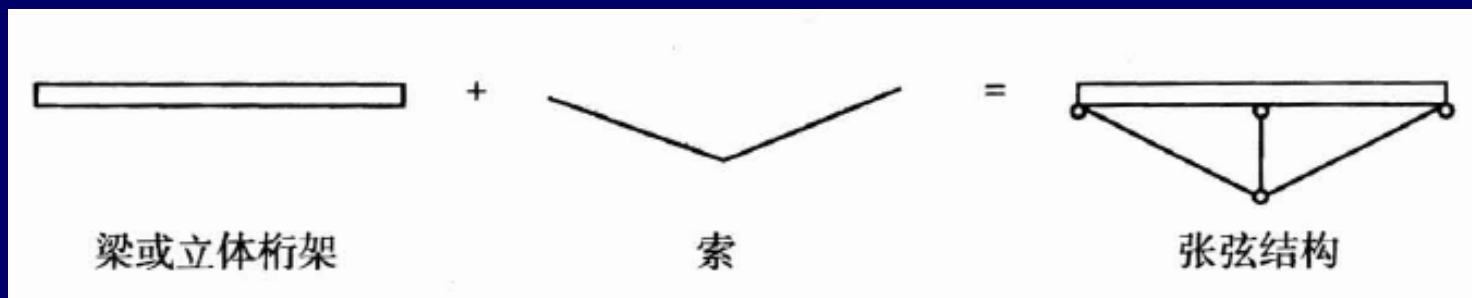
➤ 立体桁架采用钢球节点，使各杆件的中心汇交于球节点的中心。其特点是受力明确、均匀，施工方便。立体桁架的弦杆及斜杆与球节点的连接均加设衬管。为了减少檩条的跨度，桁架加设了再分杆。



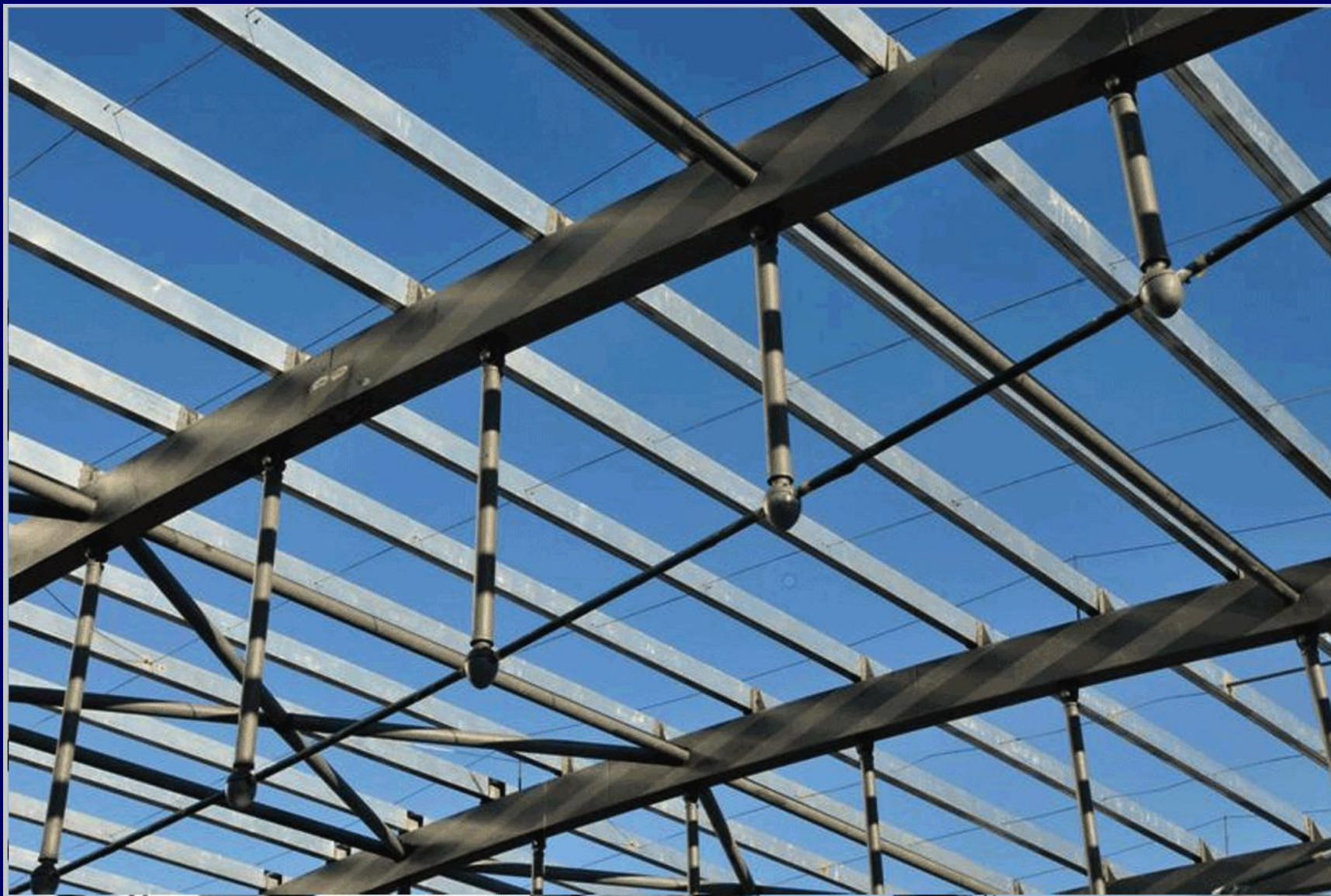
## 3.5 张弦结构

将平面桁架结构的受拉下弦杆用高强度拉索代替并通过张拉拉索在结构中施加预应力，可有效改善结构的受力性能。根据这一原理衍生出一种新的结构形式称为张弦结构。

➤ 张弦结构由三部分结构单元所组成：作为上弦的梁、拱或桁架结构，作为下弦的拉索，位于上下弦之间的竖向撑杆。



## 3.5 张弦结构



## 3.5 张弦结构

### 3.5.1 张弦结构的特点

#### (1) 承载能力高

➤ 通过对张弦结构的索施加的一定的预应力，可以控制刚性构件的弯矩大小和分布。撑杆对于上弦刚性结构的作用犹如弹性支座，在索内施加一定的预应力后，通过支座和撑杆在梁或桁架内引起负弯矩使梁或桁架中的内力分布趋于均匀。

#### (2) 结构刚度大

➤ 张弦结构中的刚性构件与索形成整体刚度后，这一空间受力结构的刚度就远远大于单纯刚性构件的刚度。在同样的使用荷载作用下，张弦结构的变形比单纯刚性构件小得多。



## 3.5 张弦结构

### 3.5.1 张弦结构的特点

#### (3) 结构稳定性强

➤张弦结构在保证充分发挥索的抗拉性能的同时，由于引进了具有抗压和抗弯能力的刚性构件而使体系的刚度和形状稳定性大为增强。同时，若适当调整索、撑杆和刚性构件的相对位置可保证张弦梁结构整体稳定性。

#### (4) 支座推力小

➤张弦结构是一种自平衡受力体系，与拱式结构在支座处产生很大的水平推力不同，索的引入可以平衡水平推力，从而减少对下部结构抗侧刚度的要求，使支座受力明确简单。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.1 张弦结构的特点

#### (5) 建筑造型适应性强

➤张弦结构中刚性构件的外形可以根据建筑功能和美观要求进行自由选择，而结构建筑选型选型的受力特性不会受到影响。张弦梁结构的建筑造型和结构布置能够完美结合，使之适用于各种功能的大跨空间结构。

#### (6) 制作、运输、施工方便

➤与网壳、网架等空间结构相比张弦梁结构的构件和节点的种类、数量大大减少，这将极大地方便该类结构的制作、运输和施工。此外，通过控制钢索的张拉力还可以消除部分施工误差，提高施工质量。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.2 张弦结构的形式

➤按荷载传递方向分类：

平面张弦结构和空间张弦结构

➤按上弦构件的形状分类：

直梁型张弦结构、拱型张弦结构、人字拱型张弦结构



直梁型



拱型



人字拱型

图 2-5-2 平面张弦结构的形式

## 3.5 张弦结构

### 3.5.2 张弦结构的形式

空间张弦结构是以平面张弦结构为基本组成单元，通过不同形式的空间布置所形成的张弦结构。主要有单向张弦结构、双向张弦结构、多向张弦结构、辐射式张弦结构等。

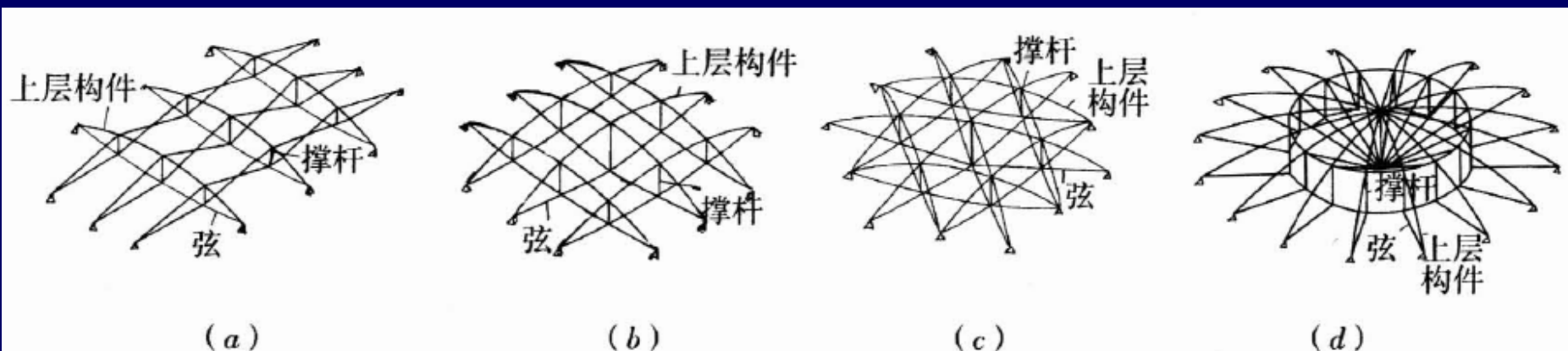


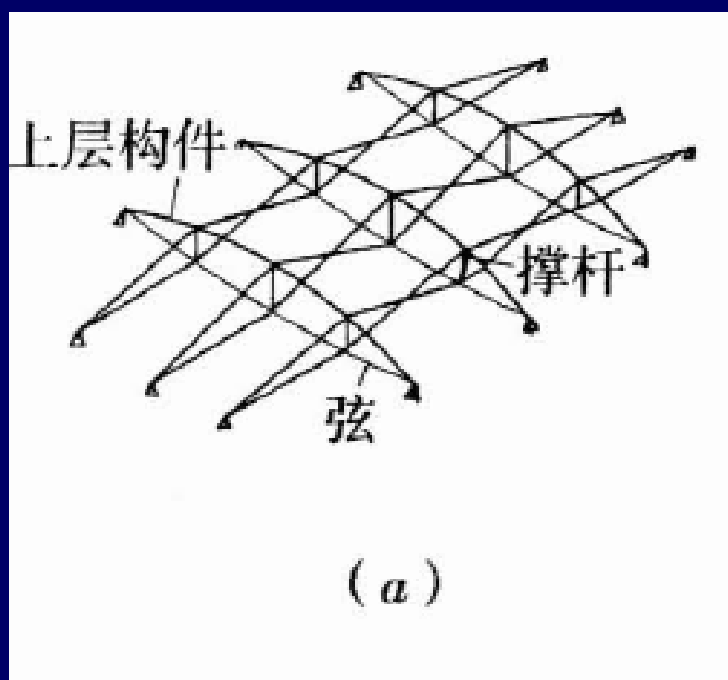
图 2-5-3 空间张弦结构的布置

(a) 单向张弦结构; (b) 双向张弦结构; (c) 多向张弦结构; (d) 辐射式张弦结构



## 3.5 张弦结构

### 3.5.2 张弦结构的形式

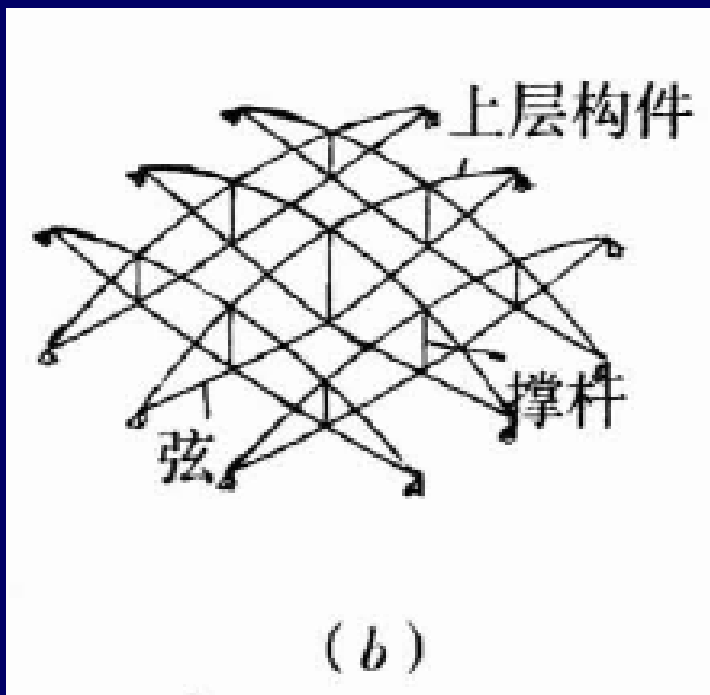


**单向张弦结构**是在平行布置的单槁平面张弦结构之间设置纵向支承索而形成的空间受力体系。

纵向支承索一方面可以提供整体结构的纵向稳定性，保证每槁平面张弦结构的平面外稳定，同时通过对纵向支承索进行张拉，为平面张弦梁提供弹性支承。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.2 张弦结构的形式

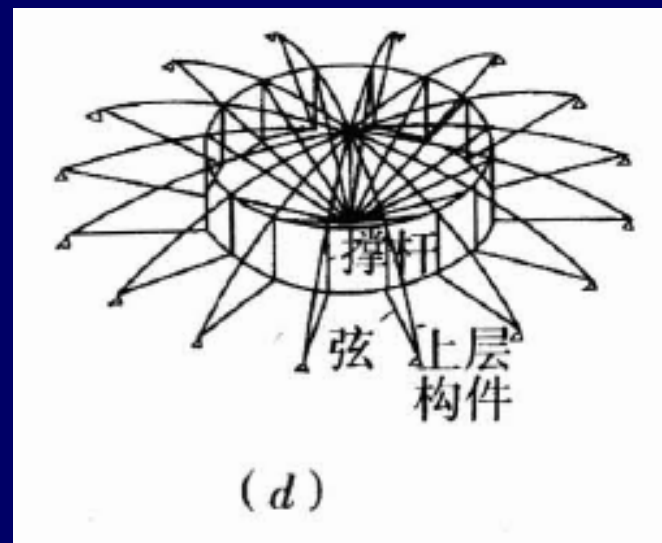
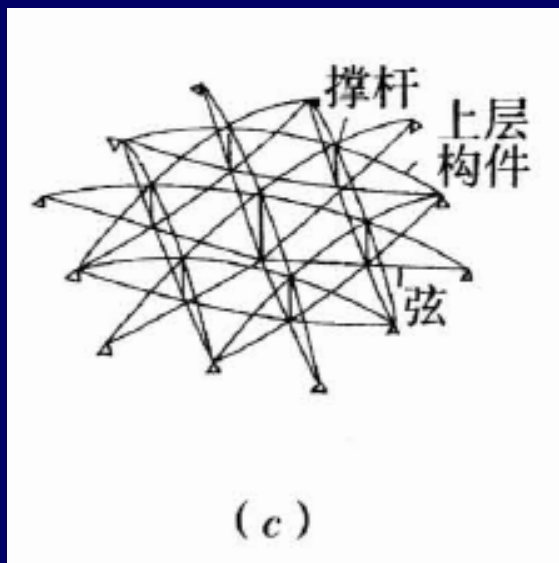


**双向张弦结构**是由单枙平面张弦结构沿纵横向交叉布置而形成的空间受力体系。

两个方向的交叉平面张弦结构相互提供弹性支承。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.2 张弦结构的形式



**多向张弦结构**是将平面张弦结构沿多个方向交叉布置而成的空间受力体系。

**辐射式张弦结构**是由中央按辐射状放置上弦构件，并对应设置撑杆用环向索或斜索连接而形成的空间受力体系。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.3 张弦结构的受力性能

#### 1) 张弦结构的形态定义

张弦结构像悬索结构等柔性结构一样，根据张弦结构的加工、施工及受力特点，将其结构形态定义为零状态、初状态和荷载态。

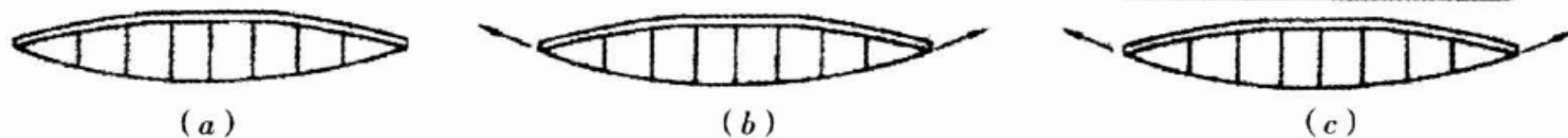


图 2-5-4 张弦结构的三种结构形态

(a) 零状态; (b) 初始态; (c) 荷载态

## 为什么要进行零状态定义？

对于张弦梁结构零状态，主要涉及结构构件的加工放样问题。张弦梁结构的初始形态是建筑设计所给定的基本形态，即结构竣工的验收状态。

如果张弦梁结构的上弦构件按照初始形态给定的几何参数进行加工放样，那么在张拉拉索时，由于上弦构件刚度较弱，拉索的张拉势必引导撑杆使上弦构件产生向上的变形。当拉索张拉完毕后，结构上弦构件的形态将偏离初始形态而不满足建筑设计的要求。因此张弦梁结构上弦构件的加工放样通常要考虑拉索张拉产生的变形影响，这也是张弦梁这类半刚性结构需要进行零状态定义的原因。

## 2) 张弦结构的预应力特性

**预应力：**即为在没有外荷载作用下结构内部所维持的自平衡内力分布。

出于改善上弦构件的受力性能，减小上弦构件的弯矩考虑；

由于在结构使用期间某种荷载工况（主要是屋面风吸力作用下）可能会克服恒荷载的效应而使得拉索受压退出工作，因此拉索中维持一定的预应力可以保证拉索不出现压力。

**注意：**张弦梁结构中的预应力不应该过大，过高的预应力会使得上弦构件的轴压力增加，从而人为地加大上弦构件的负担造成结构的不经济。



### 3) 张弦结构的平面外稳定及纵向受力

平面张弦梁结构作为一种大跨度结构体系，当其跨度较大时，会在上弦构件存在较大的压力，因此要保证其平面外的稳定性。

采用平面外刚度较大的上弦杆件；  
设置屋面水平支撑系统。

严格来讲，大跨度张弦结构的屋面水平支撑系统（保证单枹张弦梁的平面外稳定的作用，作为受力系统承担屋盖平面内的纵向荷载，主要包括两端山墙传递给屋面的风荷载及纵向地震作用）不应该按构造设置，在抗震设防烈度较高的地区及山墙传递风荷载较大的情况平面张弦梁结构必须整体分析，以进行结构在纵向荷载作用下的屋面支撑系统验算。



## 4) 张弦结构的抗风作用

张弦结构的抗风性能是设计时的关键问题之一，主要包括**抗风吸收作用**和**抗风振作用**两个方面。

张弦梁结构的屋面系统常采用轻质屋面，而风荷载在屋面产生向上的吸力，当风的吸力 $>$ 屋面自重时，屋面就会把吸力传递给屋架使张弦结构承受向上的荷载作用。在向上的荷载作用下，张弦结构上弦受拉，下弦受压。而下弦柔性索是不能受压的。

为防止出现下弦受压的情况，一般采取增大屋面恒荷载或加大拉索预应力来抵抗压力效应等措施。造成结构的不经济。这个特性是张弦结构的主要缺点之一。

张弦结构还容易受到结构风振效应的影响。由于张弦结构的刚度与普通刚性结构相比较弱，在跨度较大的情况下，结构的周期较低，在脉动风压作用下，会引起张弦梁结构较大的振动，故应对其进行风振动力反应分析。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.4 张弦结构的选型

#### 1) 上弦刚性受压构件

上弦构件形式主要取决于结构跨度和撑杆间距两个因素：

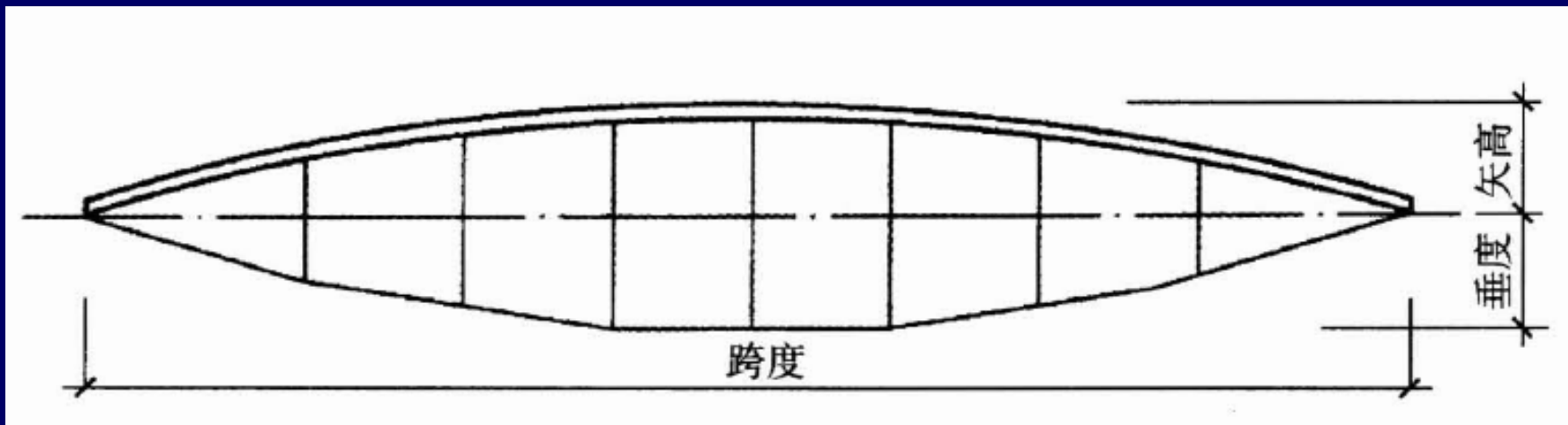
跨度增加，跨中整体弯矩增大，导致上弦构件压力增加，需要加大上弦构件的截面面积来保证；

撑杆间距增大，其整体剪力效应对上弦构件产生的局部弯矩增大，需要上弦构件提供较大的抗弯刚度。

张弦梁常采用**工字形截面**、**焊接箱形截面**。当张弦结构跨度增大时，一般采用截面面积和抗弯模量均较大的**桁架结构**。实际工程中常常采用立体桁架，因为立体桁架比普通的平面桁架的平面外刚度大有利于受压上弦构件的平面外稳定性。

## 2) 张弦结构上弦矢高和下弦垂度

一般采用垂跨比和高跨比来表达。垂跨比是下弦索的垂度和结构跨度的比值，高跨比是上弦梁的矢高和结构跨度的比值。随着垂跨比或高跨比的增大，除剪力外，其他内力如梁的弯矩和轴力以及索的最大应力都会减小同时结构的变形也会明显减小。



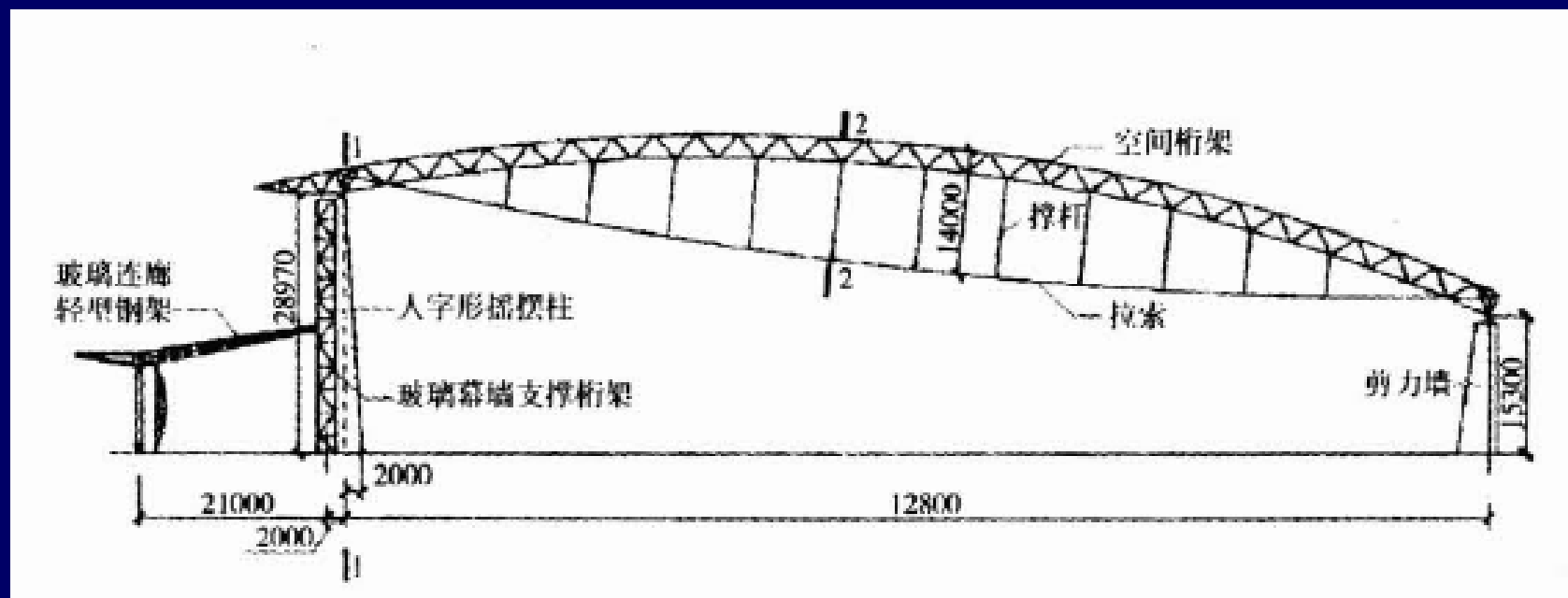
### 3) 撑杆数目

撑杆作为张弦结构上部刚性构件的弹性支承设置的数量直接关系到上部刚性构件的跨度。撑杆数量多，上弦刚性构件内力均匀，弯矩小，受力合理。但是撑杆数目的增加也会带来撑杆材料用量的增加和施工的复杂性。且对于某一确定的张弦结构，当撑杆数达到某一数目后，受力性能随撑杆数目的改善效果不再明显。

## 3.5 张弦结构

### 3.5.5 张弦结构的工程实例

请自学，采用张弦结构设计某体育馆屋盖并绘制屋盖平面图、剖面图。



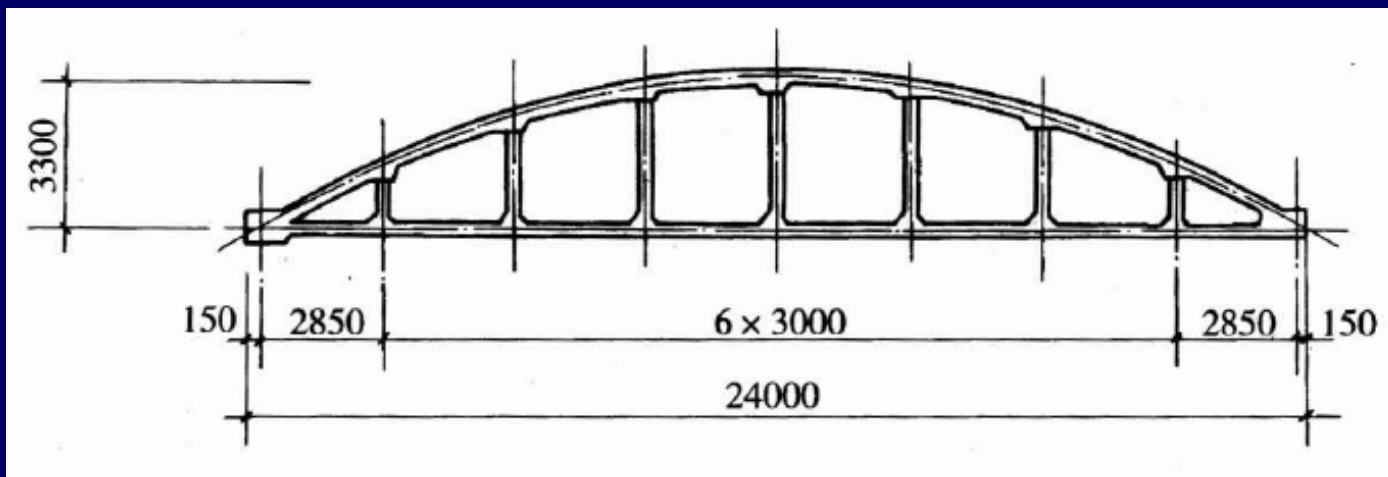
哈尔滨国际会议展览体育中心主馆

## 3.6 桁架结构的其他应用形式

### 3.6.1 刚接桁架

桁架结构杆件的连接节点均简化为铰节点，可简化计算，也符合结构的实际受力情况。

但有时由于桁架使用功能上的要求，或建筑造型上的要求，桁架没有斜腹杆，仅有竖腹杆。这时若把桁架节点简化为铰节点，则整个结构就成为一个几何可变的机构，必须采用刚接桁架。





### 3.6.1 刚接桁架

工程实例——上海大剧院





### 3.6.1 刚接桁架

工程用地面积21644m<sup>2</sup>，占地面积11530 m<sup>2</sup>，总建筑面积62800 m<sup>2</sup>，地下两层，地上6层，高度为40m。法国建筑师中标。

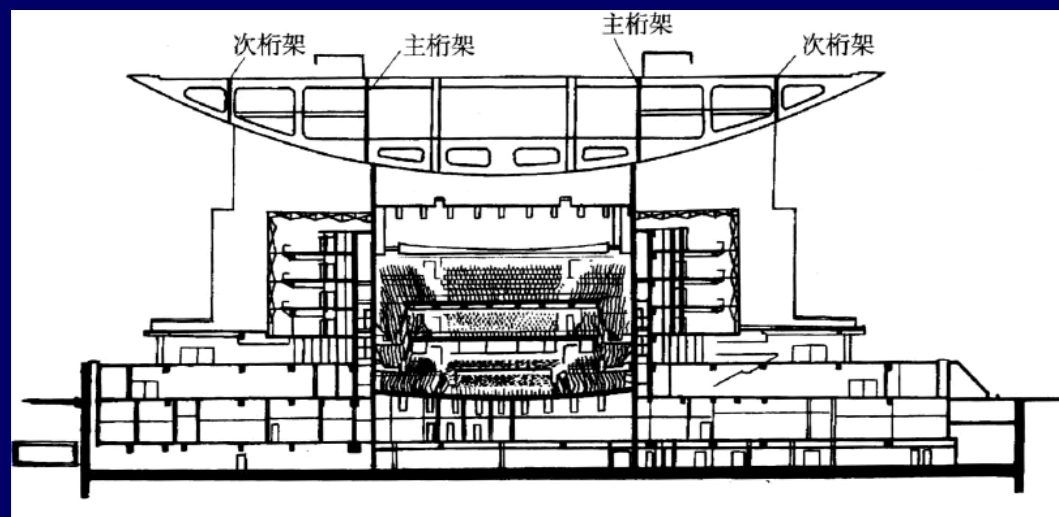
方案中最引人注目的是呈反拱的月牙形屋盖，纵向长100.4m，横向宽94m，纵向悬挑26m，横向悬挑30.9m，反拱圆弧半径 $R=93\text{m}$ ，拱高11.5m。

屋盖体系采用交叉刚接钢桁架结构。

纵向为两榀主桁架和两榀次桁架，在每榀主桁架下各设三个由电梯井筒壁形成的薄壁柱，作为整个屋架结构的支座，次桁架仅起到保证屋盖整体性的作用。



### 3.6.1 刚接桁架



反拱的月牙形屋盖内有两层，局部为三层，作为设备层和观光餐厅等，既是覆盖整个大剧院下部结构的屋顶，又是上部屋顶结构的承重结构，发挥双重功能。屋盖结构复杂，内力较大，采用刚接桁架结构较为合理，以保证屋盖结构的整体刚度和承载能力。

月牙形屋架采用无斜腹杆屋架，既可满足建筑对钢屋盖内部纵向交通的要求，又使杆件总数减少，节点构造简便。受力性能好，具有很大的抗扭刚度和双向抗弯刚度，整体稳定性强，可省去大量支撑。

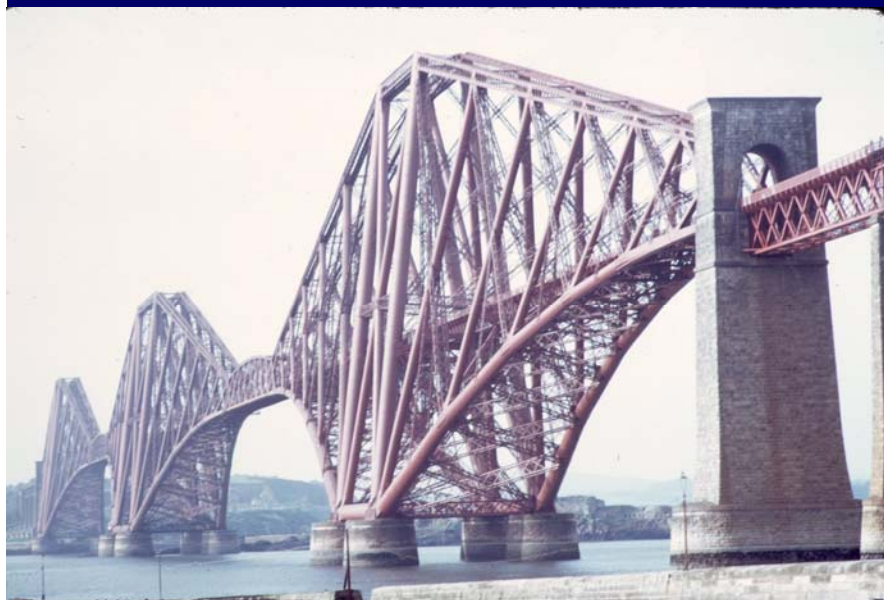
### 3.6.2 桁架桥

- 桁架桥指的是以桁架作为上部结构主要承重构件的桥梁。
- 桁架桥一般由主桥梁、上下水平纵向联结系、桥门架和中间横撑架以及桥面系组成。
- 在桁架中，弦杆是组成桁架外围的杆件，包括上弦杆和下弦杆，连接上、下弦杆的杆件叫腹杆，按腹杆方向的不同又区分为斜杆和竖杆。弦杆与腹杆所在的平面就叫主桁平面。



### 3.6.2 桁架桥

- 大跨度桥架的桥高沿跨径方向变化，形成曲弦桁架；中、小跨度采用不变的桁高，即所谓平弦桁架或直弦桁架。
- 桁架结构可以形成梁式桥、拱式桥，也可以作为缆索支撑体系桥梁的主梁（或加劲梁）。

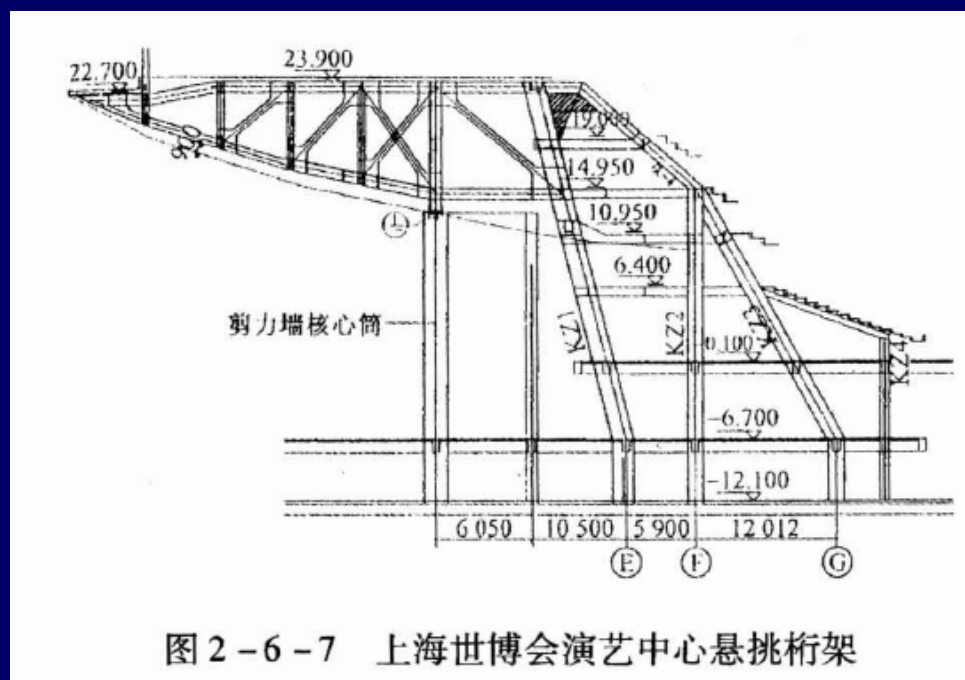


苏格兰福斯海湾桥

### 3.6.3 主次桁架结构

➤ 主次桁架结构体系是由平面桁架组成的一种特殊形式的空间桁架结构。次桁架支撑于主桁架上，形成主次桁架组成的屋架系统。

### 3.6.4 悬挑桁架结构



### 3.6.5 悬挂桁架结构



代代木体育中心