

# 第18篇 机架设计

主要撰稿 蒋友谅 蔡学熙

审 稿 王德夫 王省三



# 第1章 机架结构概论

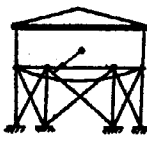
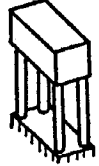

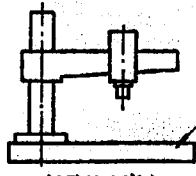
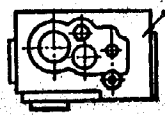
在机器（或仪器）中支承或容纳零、部件的零件称为机架。如支承贮罐的塔架、固定发动机的机架、容纳传动齿轮的减速器壳体、机床的床身等等统称为机架。

## 1 机架结构类型

### 1.1 按机架外形分类

表 18-1-1

机架外形分类

外形类别	网架式	框架式	梁柱式	板块式	箱壳式
举例	 <p>贮罐塔架</p>	 <p>柱式压力机机身</p>	 <p>钢丝绳绕机架</p>	 <p>摇臂钻床底座</p>	 <p>机械传动箱体</p>

### 1.2 按机架的制造方法和材料分类

按制造方法，机架可分为铸造机架、焊接机架和螺栓或铆接机架。按机架材料可分为金属机架、非金属机架。非金属机架又可分为混凝土机架、素混凝土机座平台、花岗岩机架、塑料机架等。

铸造机架常用材料为铸铁、铸钢和铸铝。小型设备（如仪表等）的机架则有用铜制或塑料制造，其制造工艺设计可参考本手册第1篇有关章节。

本篇主要介绍钢结构形式的机架。

### 1.3 按力学模型分类

表 18-1-2

结构类型	杆系结构	板壳结构	实体结构
几何特征	结构由杆件组成，而杆件（直杆或曲杆）长度远大于其它两个方向的尺寸	结构由薄壁构件组成，而薄壁构件（薄板或薄壳）厚度远小于其它两个方向的尺寸	结构三个方向的尺寸是同一数量级的
机架举例	网架式机架，多数框架式和梁柱式机架	多数板块式和箱壳式机架	少数板块式、框架式和箱壳式机架

注：对某一具体机架，有时很难把它归于哪种结构，因为它可能界于杆系和板壳或板壳和实体两种结构之间。究竟按哪种结构计算，取决于计算工作量和计算精度。若计算精度满足结构设计要求，则按前者计算，否则按后者计算。有的机架要简化为几种结构的组合，用有限元法计算。

## 1.4 机架杆系结构类型

大部分机架可化简或分解为单个杆件，或简单而又规则的薄板、薄壳。这类机架可以按本手册第1篇所列公式、图表进行计算。若机架为复杂的板壳结构、实体结构或组合结构，则可以按本手册姊妹篇《机械设计方法》进行计算。

本篇侧重编入机架的杆系结构，其分类见表18-1-3。

表 18-1-3

机架杆系结构类型

结构类型	桁架		刚架				
	平面桁架	空间桁架	平面刚架	平面板架	空间刚架		
结点	性质	铰结点		刚结点			
	传递的力	集中力		集中力，力矩			
杆件	形状	杆轴	通过截面形心的直线		直线，刚架面内曲线	直线，且是对称轴线	直线，曲线
		截面	任意		有一对称轴，且位于刚架面内	有二对称轴，且垂直或平行板架平面	有二对称轴
	内力	轴力		轴力，剪力，弯矩	剪力，扭矩，弯矩	轴力，剪力，扭矩，弯矩	
载荷	位置	结点		任意			
	方向	桁架面内	任意	刚架面内	垂直板架平面	任意	
支座	类型	活动铰支座 固定铰支座		活动铰支座，固定铰支座 滑动支座，固定端支座			
	方位	桁架面内	任意	刚架面内	垂直板架平面	任意	
机架举例	机架示意图						
	结构计算图						

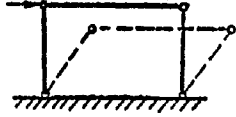
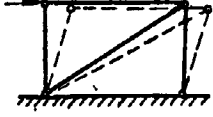
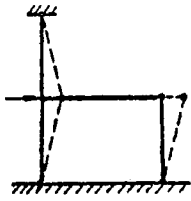
- 注：1. 实际的机架杆系结构，有时既有桁架杆件又有刚架杆件，这种结构叫做组合杆系结构。其中包括受有非结点载荷的桁架，因为受有载荷的杆件将产生剪力和弯矩，这种杆件已不是桁架杆件。可见含有这种杆件的桁架，严格地讲是一种特殊的组合杆系结构，但是若把非结点载荷等效到结点上，仍可按纯桁架进行整体计算。
2. 若杆件形状不满足表中对称性要求，则杆轴不过截面形心的桁架杆件将产生弯曲；截面没有对称轴或载荷、支座不与对称轴共面的平面刚架杆件将产生非平面弯曲；不满足截面对称性的平面板架杆件或空间刚架杆件将产生耦合的弯曲-扭转。
3. 直梁（例如连续梁）可按平面刚架计算，只不过梁不受轴力作用。

## 2 机架杆系的几何不变性

### 2.1 杆系几何不变性的意义

不少机架都可以看作是由杆件组成的，但是并非把若干杆件随意组合起来就能成其为合理 机架 结构。一个杆系在载荷作用下，按照其几何形状的可变性可以分为三种类型，见表18-1-4。

表 18-1-4 杆系几何可变性类型

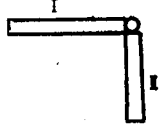
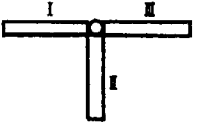
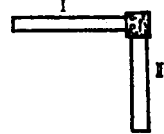
杆系类型	几何可变杆系	几何不变杆系	几何瞬变杆系
特征	在载荷作用下，若不考虑杆件变形，杆系的位置或形状可以改变	在载荷作用下，若不考虑杆件变形，杆系的位置和形状都不改变	在载荷开始作用的瞬时，若不考虑杆件变形，杆系的位置或形状可以微小地改变
举例			

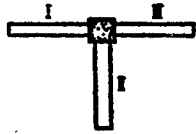

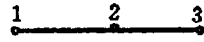
由表 18-1-4 可知，只有几何不变杆系才能承受一定的载荷。在对机架进行结构设计时，必须保证机架杆系是几何不变杆系，应避免几何可变杆系和几何瞬变杆系。本篇各章所述的机架杆系结构，均指几何不变杆系。

### 2.2 平面杆系的自由度计算

#### 2.2.1 平面杆系的约束类型

表 18-1-5 平面杆系约束类型

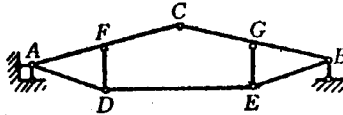
约束名称	约束方式	约束示意图	约束数	说明
简单铰结	一个铰结连 二个刚体		2	
复杂铰结	一个铰结连 $n$ 个刚体		$2(n-1)$	相当于 $n-1$ 个简单铰结
简单刚结	一个刚结连 二个刚体		3	

约束名称	约束方式	约束示意图	约束数	说明
复杂刚结	一个刚结连 $n$ 个刚体		$3(n-1)$	相当于 $n-1$ 个简单刚结
简单链杆	一根杆连二个铰点		1	
复杂链杆	一根杆连 $n$ 个铰点		$2n-3$	相当于 $2n-3$ 简单链杆

2.2.2 平面杆系自由度的计算

表 18-1-6

平面杆系自由度计算方法

计算方算	算法 1	算法 2
基本观点	杆系由若干平面刚体受铰结、刚结和链杆的约束而组成	杆系由若干结点受链杆的约束而组成
计算公式	$W = 3m - (3g + 2h + b)$	$W = 2J - B$
	$W$ ——平面杆系的计算自由度数	
	$m$ ——平面刚体数 $g$ ——简单刚结数 $h$ ——简单铰结数 $b$ ——支承链杆数	$J$ ——结点数 $B$ ——简单链杆数
计算举例		
	原有简单铰结数 $h_1 = 5$ (A, B, C, F, G点) 折算简单铰结数 $h_2 = 2 \times (3-1)$ (D, E点复杂铰结, $n=3$ ) 简单铰结总数 $h = h_1 + h_2 = 9$ 平面刚体数 $m = 7$ (AC, CB, AD, DF, DE, EG, EB) 简单刚结数 $g = 0$ (无刚结点) 支承链杆数 $b = 3$ (A处二根, B处一根) 计算自由度数 $W = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 3 = 0$	原有简单链杆数 $B_1 = 8$ (AD, DF, DE, EG, EB, 三根支杆) 折算简单链杆数 $B_2 = 2 \times (2 \times 3 - 3)$ (AC, BC复杂链杆, $n=3$ ) 简单链杆总数 $B = B_1 + B_2 = 14$ 结点数 $J = 7$ (A, B, C, D, E, F, G点) 计算自由度数 $W = 2 \times 7 - 14 = 0$
结论	$W > 0$ 为几何可变杆系 $W \leq 0$ 为几何不变杆系的必要条件	

## 2.3 平面杆系的组成规则

由表18-1-6结论可知, 要保证一个杆系的几何不变性必须要有足够数目的约束; 但是约束数目足够, 并不能肯定几何不变, 因为还有一个约束布置的问题。几何不变杆系的组成规则就是为保证杆系几何不变, 使约束数目足够又布置合理而规定的准则。

表 18-1-7

平面杆系几何不变性规则

规则名称	几何不变且无多余约束的组成条件	组成示意图	分析举例
二元体规则	二根链杆各用一个铰连接于一个平面刚体上, 且三个铰不在同一直线上(若三铰共线, 则几何瞬变)		
两刚体规则一	二个平面刚体各用一个铰和一根链杆相连, 且三个铰不在同一直线上(若三铰共线, 则几何瞬变)		
两刚体规则二	二个平面刚体用三根链杆相连, 且三根链杆不交于一点(若交于一点, 则实交点时, 几何可变; 虚交点时, 几何瞬变)		
三刚体规则	三个平面刚体用三个铰两两相连, 且三个铰不在同一直线上(若三铰共线, 则几何瞬变)		

## 2.4 举例

例 1 试计算表18-1-3中导弹车架杆系的自由度, 并分析其几何可变性。

解 按表18-1-6中算法1计算其自由度。由于每一杆件均可视为一平面刚体 $m=13$ ; 没有刚结点 $g=0$ ; 有2个原有简单铰结, 有2个连接3个刚体(杆件)的复杂铰结, 有4个连接4个刚体(杆件)的复杂铰结, 简单铰结总数 $h=2+2\times(3-1)+4\times(4-1)=18$ ; 有3根支承链杆 $b=3$ , 所以由算法一的公式便得

$$W=3\times 13-2\times 18-3=0$$

按表18-1-6中算法2计算其自由度。由于每一铰结构可视为一结点 $J=8$ ; 包括三根支承杆在内的每一杆件均为简单链杆 $B=16$ , 所以由算法2的公式便得

$$W=2\times 8-16=0$$

按表18-1-7中所列几何不变杆系组成规则, 分析其几何可变性。本例需先分析杆系内部, 后分析与地面的连结。对杆系内部, 可选择一几何不变的三角形为基础, 譬如选左端三角形(选右端三角形亦可), 运用五次二元体规则, 即可分析完毕, 而且每次三铰都不共线, 所以杆系内部几何不变, 且无多余约束。对与地面连结问题, 可把已肯定几何不变的杆系内部和几何不变的地面看作两个平面刚体, 此二平面刚体是用三根支承链杆连结起来的, 且三链杆不交于一点, 符合两刚体规则二, 所以杆系外部几何不变, 且无多余约束。由此可见, 该导弹车架杆系在载荷作用下, 若不考虑杆件变形, 杆系的形状(内部)和位置(外部)都不改变, 即该车架是几何不变杆系。

例 2 试计算图18-1-1所示平面梁系的自由度, 并分析其几何可变性。

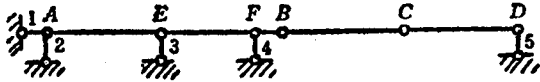


图 18-1-1

解 按表18-1-6中算法1计算其自由度数。由于

$$m=3(AB, BC, CD)$$

$$g=0(\text{无刚结点})$$

$$h=2(B, C)$$

$$b=5(\text{支杆}1, 2, 3, 4, 5)$$

所以

$$W=3 \times 3 - 2 \times 2 - 5 = 0$$

按表18-1-6中算法2计算其自由度数。由于

$$J=6(A, B, C, D, E, F)$$

$$B=5(\text{支杆}1, 2, \dots, 5) + 2(BC, CD) + [2 \times 4(A, E, F, B) - 3] = 12$$

所以

$$W=2 \times 6 - 12 = 0$$

按表18-1-7分析其几何可变性。首先把AB视为刚体，它与基础之间用四根不共点的链杆（支杆1, 2, 3, 4）连结，故由两刚体规则二和表18-1-5可知，二者组成几何不变部分，但有一个多余约束。其次把CD视为刚体，它与扩大了的基础（刚刚肯定的几何不变部分）之间，仅用两根链杆（BC和支杆5）连结，故由两刚体规则二可知，二者组成几何可变杆系，缺少一个约束。由此可见，杆系计算自由度数 $W=0$ ，只表明约束数目足够，但是若约束布置得不合理（AB与基础之间多一约束，CD与基础之间少一约束），则仍不能保证杆系几何不变。

### 3 机架杆系结构的静定性

#### 3.1 杆系几何特性与静定特性的关系

##### 3.1.1 杆系静力分析的基本要素

杆系静力分析的基本方法是：截断约束，取分离体，用约束力代替约束；根据分离体的平衡方程，解出约束力。可见，平衡方程总数和未知约束力总数是杆系静力分析的两个基本要素。这两个基本要素的计算见表18-1-8。

表 18-1-8 杆系平衡方程数和约束力数

所用自由度计算方法		表18-1-6算法1			表18-1-6算法2
平衡方程数	截取的分离体	平面刚体			结点
	所截分离体数目	$m$			$J$
	每个分离体平衡方程数	3			2
	杆系平衡方程总数	$3m$			$2J$
未知约束力数	被截断的约束	简单刚结	简单铰结	支承链杆	简单链杆
	被截约束数目	$g$	$h$	$b$	$B$
	每个约束的约束力数	3	2	1	1
	杆系未知约束力总数	$3g + 2h + b$			$B$

##### 3.1.2 杆系几何要素与静力要素的对比

杆系几何特性与静定特性之间的对比，见表18-1-9。

表 18-1-9 杆系几何要素和静力要素

几何特性	几何要素	共同表达式		静力要素	静定特性
	自由度总数	$3m$	$2J$	平衡方程总数	
	约束总数	$3g + 2h + b$	$B$	未知约束力总数	
	计算自由度	$W = 3m - (3g + 2h + b)$	$W = 2J - B$	平衡方程数减去未知力数	
几何可变	缺少约束	$W > 0$		平衡方程数多于未知力数	无解，不成其结构
假定几何不变	无多余约束	$W = 0$		平衡方程数等于未知力数	有唯一解，静定结构
	有多余约束	$W < 0$		平衡方程数少于未知力数	有无穷多解，超静定结构



### 3.2 静定桁架与静定刚架的比较

表 18-1-10

静定桁架与静定刚架的比较

	静定桁架	静定刚架
是否便于使用	由于桁架结点都是铰结点, 所以为了保证杆系的几何不变性, 所用的杆件数目较多, 而且占据了内部空间, 不便使用	由于刚架结点主要是刚结点, 所以刚架的几何不变性, 除了支座的约束作用外, 主要依靠刚结点的连结作用, 所用的杆件数目较少, 内部空间大, 便于使用
是否节省材料	由于桁架杆件都是二力杆件, 只有轴力, 所以内力沿杆轴和应力沿杆件截面都是均匀分布的, 充分利用了材料	由于刚架杆件大都是梁式杆件, 内力主要是弯矩, 所以内力沿杆轴和应力沿杆件截面都是非均匀分布的, 没有充分利用材料

### 3.3 静定结构与超静定结构的比较

表 18-1-11

静定结构与超静定结构的比较

	静定结构	超静定结构
防护能力	静定结构没有多余约束。当任一约束突然破坏, 即变成几何可变杆系, 不能承受任何载荷, 所以防护能力差	超静定结构有多余约束。多余约束突然破坏后, 仍能维持几何不变性, 还能承受一定的载荷, 所以防护能力强
内力分布	由于没有多余约束, 局部载荷对结构的影响范围小, 内力分布很不均匀, 内力峰值大	由于有多余约束, 局部载荷对结构的影响范围大, 内力分布比较均匀, 内力峰值较小
结构刚度和稳定性	由于没有多余约束, 载荷作用下的结构变形, 受不到多余约束的进一步限制, 结构的刚度和稳定性差	由于有多余约束, 载荷作用下的结构变形要受到多余约束的进一步限制, 结构的刚度和稳定性较好
结构材料和杆件截面的影响	静定结构的内力只需用静力平衡方程即可确定, 所以内力与结构材料性质和杆件截面尺寸无关	超静定结构的内力不能单用静力平衡方程来确定, 还需同时考虑变形条件, 所以内力与结构的材料性质和杆件截面尺寸有关
非载荷因素(支座移动、温度改变、材料收缩和制造误差)的影响	非载荷因素只引起静定结构的位移和变形, 不在静定结构中产生内力(因为位移和变形受不到多余约束的限制)	非载荷因素不仅引起超静定结构的变形, 而且还在超静定结构中产生内力(因为变形要受到多余约束的限制)
杆件截面设计的简单程度和调整结构内力分布的能力	静定结构杆件截面尺寸设计简单, 只要结构外形及其尺寸(指用杆轴表示的力学模型)一定, 即可由平衡方程求出内力, 再按强度条件设计杆件截面。但静定结构的内力分布与杆件刚度比值无关, 故不能通过改变杆件刚度来调整内力分布	超静定结构杆件截面尺寸设计复杂, 只有事先假定截面尺寸才能求出内力, 然后再根据内力重新设计杆件截面, 若设计截面与假定截面相差过大, 需重新计算。但超静定结构的内力分布与杆件刚度比值有关, 故可通过改变杆件刚度来调整内力分布

## 4 机架设计计算的准则和要求

### 4.1 机架设计的准则

(1) 工况要求 任何机架的设计首先必须保证机器的特定工作要求。例如, 保证机架上安装的零部件能顺利运转, 机架的外形或内部结构不致有阻碍运动件通过的突起, 设置执行某一工况所必需的平台, 保证上下料的要求、人工操作的方便及安全等。

(2) 刚度要求 在必须保证特定外形条件下, 对机架的主要要求是刚度。例如机床的零部件中, 床身的刚度则决定了机床的生产率和加工产品的精度; 在齿轮减速器中, 箱壳的刚度决定了齿轮的啮合性及运转性能。

(3) 强度要求 对于一般设备的机架, 刚度达到要求, 同时也能满足强度的要求。但对于重载设备的强

度要求必须引起足够的重视。其准则是在机器运转中可能发生的最大载荷情况下,机架上任何点的应力都不得大于容许应力。此外,还要满足疲劳强度的要求。

对于某些机器的机架尚需满足振动或抗振的要求。例如振动机械的机架;受冲击的机架;考虑地震影响的高架等。

(4) 稳定性要求 对于细长的或薄壁的受压结构及受弯-压结构存在失稳问题,某些板壳结构也存在失稳问题或局部失稳问题。失稳对结构会产生很大的破坏,设计时必须校核。

(5) 美观 目前对机器的要求不仅要能完成特定的工作,还要使外形美观。

(6) 其他 如散热的要求;防腐蚀及特定环境的要求;对于精密机械、仪表等热变形小的要求,等等。

## 4.2 机架设计的一般要求

在满足机架设计准则的前提下,必须根据机架的不同用途和所处环境,考虑下列各项要求,并有所偏重。

(1) 机架的重量轻,材料选择合适,成本低。

(2) 结构合理,便于制造。

(3) 结构应使机架上的零部件安装、调整、修理和更换都方便。

(4) 结构设计合理,工艺性好,还应使机架本身的内应力小,由温度变化引起的变形应力小。

(5) 抗振性能好。

(6) 耐腐蚀,使机架结构在服务期限内尽量少修理。

(7) 有导轨的机架要求导轨面受力合理,耐磨性良好。

## 4.3 设计步骤

(1) 初步确定机架的形状和尺寸 根据设计准则和一般要求,初步确定机架结构的形状和尺寸,以保证其内外部零部件能正常运转。

(2) 根据机架的制造数量、结构形状及尺寸大小,初定制造工艺。例如非标准设备单件的机架、机座,可采用焊接代替铸造。

(3) 分析负载情况,负载包括机架上的设备重量,机架本身重量,设备运转的动负载等。对于高架结构,还要考虑风载、雪载和地震负荷。

(4) 确定结构的形式,例如采用桁架结构、还是板结构等。再参考有关资料,确定结构的主要参数(即高、宽、板厚与材料等等)。

(5) 画出结构简图。

(6) 参照类似设备的有关规范、规程,确定本机架结构所允许的挠度和应力。

(7) 进行计算,确定尺寸。

(8) 必要时,进行详细计算并校核或做模型试验,对设计进行修改,确定最终尺寸。

# 5 机架结构的选择

## 5.1 一般规则

根据前面第4节中的准则和要求,进行机架结构形式的选择仍是一个较复杂的过程。对结构形式、构件截面和结点构造等均需要结合具体的情况进行仔细的分析。对结构方案要进行技术经济比较。由于各种设备有不同的规范和要求,制定统一的机架结构选择方法较困难。但是,可以利用结构力学的知识提出下列一般的规则。这些规则是为了节约材料在选择结构形式时应遵守的一般规律。

(1) 结构的内力分布情况要与材料的性能相适应,以便发挥材料的优点。轴力较弯矩能更充分地利用材料。杆件受轴力作用时,截面上材料的应力分布是均匀的(图18-1-2a),所有材料都得到充分利用。但在弯矩作用下截面上的应力分布是不均匀的(图18-1-2b),所以材料的利用不够经济。

机械结构中许多构件所受的荷载都是沿垂直于杆轴的方向作用的。弯矩沿杆长变化很迅速。有垂直荷载处,弯矩曲线有曲率,且曲率与荷载集度成正比。最大的弯矩常限于一小段内,在较长段内材料不能充分利用,这是弯曲构件不经济的另一原因。

这个规则的一个明显的例子就是桁架使用材料较梁更为经济，梁所以常用于小跨结构是因为构造的简单和制作的便利。在大跨结构中，桁架是更经济的型式。

在塑性设计中，钢构件在弯矩作用下的极限状态的应力分布如图18-1-2c所示，而钢筋混凝土构件相应的应力分布见图18-1-2d。由这些应力图可知塑性设计比按弹性状态设计要经济一些，但是即使按塑性设计，以轴力作用为主的结构也比以弯矩作用为主的结构更为经济。必须说明，在机架设计中有关动载荷的情况下一般是不考虑塑性设计的。

壳体结构由于主要受轴力作用，使用材料极为经济。

(2) 结构的作用在于把载荷由施力点传到基础。载荷传递的路程愈短，结构使用的材料愈省。

图18-1-3 a 和 b 所示为桁架常用的两种腹杆布置。图 a 为斜杆腹系，长斜杆在载荷作用下承受拉力，这是一个优点。但是在斜杆腹系中，载荷通过交替的斜杆和竖杆传到桁架的两端所经的路程很远。在图 b 所示的三角形腹系中，载荷通过斜杆传到桁架两端所经的路程就比较短。由于这个原因，图 b 所示桁架使用材料较少。

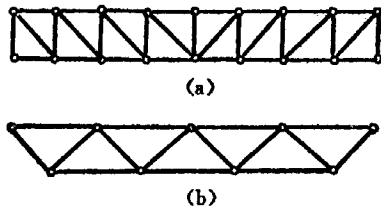


图 18-1-3

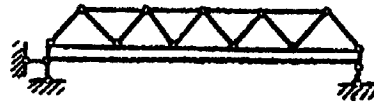


图 18-1-4



图 18-1-5

另一个例子是图18-1-4所示的梁和桁架的组合体系。用这种体系做成的结构要比一般桁架经济，因为下弦梁缩短了载荷传递的路程。

(3) 结构的连续性可以降低内力，节省材料。

例如，连续梁比一串简支梁经济，连续桁架也比一串简支桁架经济。在刚架中由于结点的刚性使弯矩降低，例如在同样载荷下图18-1-5 a 所示刚架受到的弯矩比图18-1-5 b 所示刚架受到的要小。一般说，连续刚架比孤立的梁柱体系要经济。

以上规则在实际应用中有时是互相矛盾的。例如图18-1-5 a 所示结构和 b 所示结构比较起来，是互有利弊的。一方面由于结构的刚性，图 a 所示结构中梁的弯矩较小，但在另一方面由于结点的刚性，柱的弯矩增加了。

## 5.2 几种杆系结构的力学性能的比较

机架的典型结构形式有梁、刚架、桁架和组合结构，还可按其结构受力分为：

(1) 无推力结构和有推力结构。梁和梁式桁架属于前者，三铰拱，三铰刚架、拱式桁架和某些组合结构属于后者。

(2) 将杆件分为链杆和梁式杆。桁架中的各杆都是链杆；多跨梁和刚架中的各杆都是梁式杆；组合结构中的杆件有的是链杆，有的是梁式杆。

对于梁式杆，应尽量减小杆件中的弯矩，最好是完全消除杆件中的弯矩，使之处于无弯矩状态，现从这个角度，讨论各杆系结构的特点。

- 1) 在静定多跨梁和伸臂梁中，利用杆端的负弯矩可以减小跨中的正弯矩(如图18-1-6 b)。
- 2) 在有推力结构中，利用水平推力的作用可以减小弯矩峰值(如图18-1-6 c)。
- 3) 在桁架中，利用杆件的铰接和合理布置以及载荷的结点传递方式，可使桁架中的各杆处于无弯矩状态。

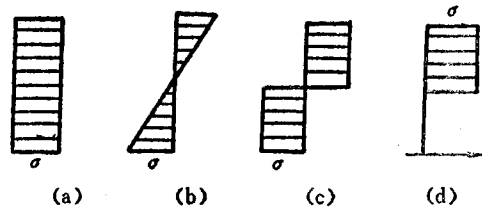


图 18-1-2

无弯矩状态是一种合理的受力状态,上述结构形式都是合理的结构形式。在组合结构中只有一部分杆件处于无弯矩状态。

为了对各种杆系结构形式的力学特点进行综合比较,在图18-1-6中给出了几种结构形式在相同跨度和相同荷载(全跨受均布荷载 $q$ )作用下的主要内力数值。图18-1-6 a是简支梁。跨中截面C的弯矩为 $M_C^0 = \frac{ql^2}{8}$ ,如果截面为矩形(截面高为 $h$ ),截面上正应力为三角形分布,则在截面C上压应力的总和与拉应力的总和都是 $H = \frac{M_C^0}{2h/3}$ 。图b是伸臂梁。为了使弯矩减小,设法使支座负弯矩与跨中正弯矩正好相等。根据这个条件可以求出伸臂长度应为 $0.207l$ ,这时弯矩峰值下降为 $\frac{1}{6} M_C^0$ 。

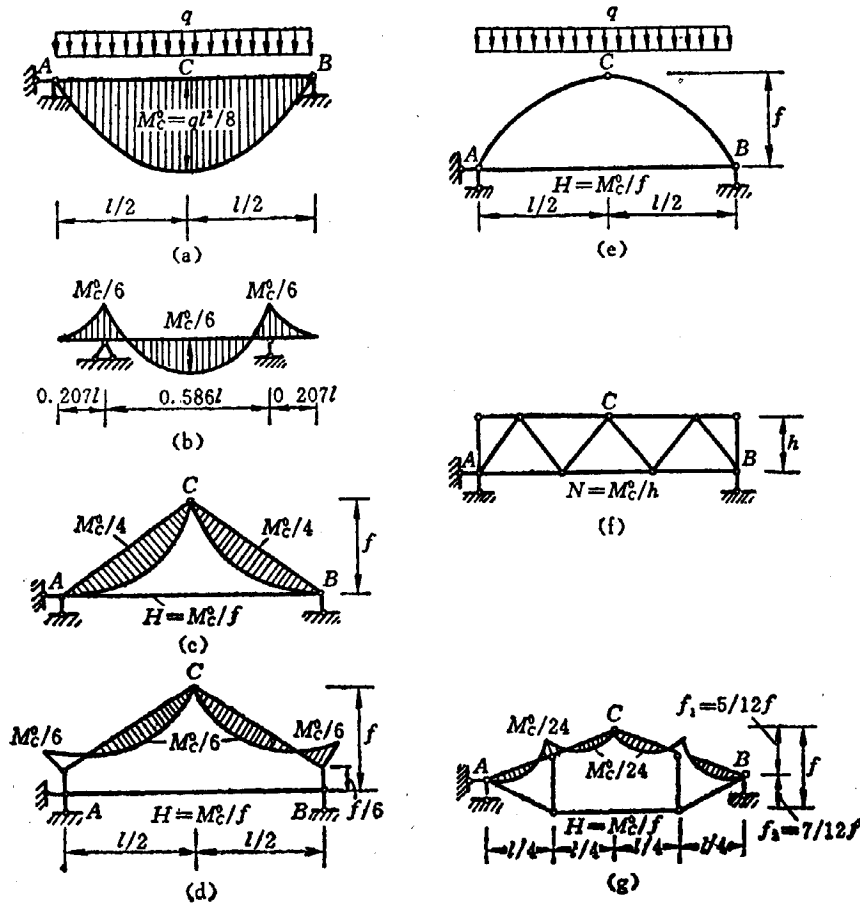


图 18-1-6

图c是带拉杆的三角形三铰架,推力为 $H = M_C^0/f$ ,由于推力的作用,上弦杆的弯矩峰值下降为 $\frac{1}{4} M_C^0$ 。图d中,拉杆与上弦杆端部之间有一个偏心距 $e = f/6$ ,这样,上弦杆端部负弯矩与杆中正弯矩正好相等,弯矩峰值进一步下降为 $\frac{1}{6} M_C^0$ ,这两种情况都属于三铰刚架的特殊情况。图f是梁式桁架,在结点荷载作用下,各杆处于无弯矩状态,中间下弦杆的轴力为 $M_C^0/h$ 。图g是组合结构,为了使正弦杆的结点负弯矩与杆中正弯矩正好相等,故取 $f_1 = \frac{5}{12}f$ ,  $f_2 = \frac{7}{12}f$ ,这时上弦杆的弯矩峰值下降为 $\frac{1}{24} M_C^0$ ,中间下弦杆的轴力为 $\frac{M_C^0}{f}$ 。

从以上的分析和比较可看出,在相同跨度和相同荷载下,简支梁的弯矩最大,伸臂梁、静定多跨梁、三铰刚

架、组合结构的弯矩次之，而桁架的弯矩为零。基于这些受力特点，所以在工程实际中，简支梁多用于小跨度结构；伸臂梁、静定多跨梁、三铰刚架和组合结构可用于跨度较大的结构；当跨度更大时，则多采用桁架。所以不同的结构形式都有各自适用的跨度范围，这是在选择结构形式时要注意的一个问题。

另一方面，各种结构形式都有它的优点和缺点。简支梁虽然具有上述缺点，但也有许多优点：如制造简单，使用方便。所以在工程实际中简支梁仍然是广泛使用的一种结构形式。其它结构形式虽具有某些优点，但也有其缺点：如桁架的杆件很多，结点构造比较复杂；三铰刚架要求基础能承受推力（或需要设置拉杆承受推力）。所以选择结构形式时，不能只从受力状态这一方面去看，而必须进行全面的分析和比较。

### 5.3 几种桁架结构的力学性能的比较

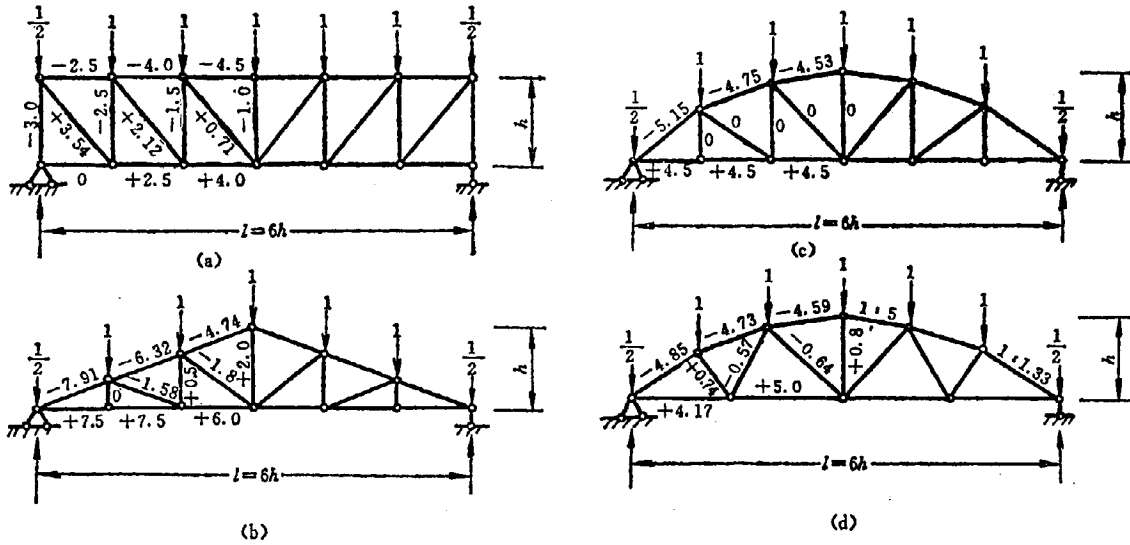


图 18-1-7

对于几种常见形式的桁架，为了便于比较，使它们的跨度、节距及承受的载荷（上弦各结点承受的载荷）都相同。又为了方便计算，使各结点载荷均等于 1。

#### (1) 平行弦桁架 (图 18-1-7 a)

1) 弦杆轴力 计算弦杆轴力时，可应用力矩平衡方程，矩心选在桁架各结点。力臂等于桁架高度  $h$ 。设与桁架同跨度、同载荷的简支梁上，对应于桁架各结点的截面弯矩为  $M^0$ ，则弦杆的轴力可表示为

$$N = \pm \frac{M^0}{h}$$

式中右边的正号表示下弦杆的轴力为拉力，负号表示上弦杆的轴力为压力。因为平行弦桁架的轴力与梁相应结点处的  $M^0$  值成比例，所以，中间弦杆的轴力大，两端弦杆的轴力小。

2) 腹杆轴力 求桁架腹杆轴力时用截面法。由铅垂投影平衡方程可知，斜杆的铅垂分力和竖杆的轴力，分别等于简支梁相应节间的剪力  $Q^0$ ，即

$$\begin{aligned} V_{\text{斜杆}} &= +Q^0 \\ N_{\text{竖杆}} &= -Q^0 \end{aligned}$$

上式表明，这里的斜杆轴力为拉力，竖杆轴力为压力。图 18-1-7 a 中，给出了平行弦桁架各杆的轴力值（因载荷取值为 1，所以此内力值也就是内力系数）。

若对上边平行弦桁架与实体梁的内力进行比较，可以看出二者有许多类似之点。桁架弦杆主要承受弯矩，相当于工字梁中翼缘的作用；腹杆主要承受剪力，相当于工字梁中腹板的作用。对实体梁来说，在横截面面积不变的情况下，如材料尽可能远离中性轴布置（采用合理截面形状），则截面惯性矩就越大，梁的抗弯能力就越强。实际上，桁架是更好地体现上述条件的，它宛如一根被“挖空”的大梁。从整体看，图 18-1-7 a 所示桁架

是承受弯曲的结构,从局部看,每根杆件都是承受拉伸与压缩的杆件,因而强度性能好。桁架在其高度、跨度、重量轻、承载力强等方面的优点,实体梁都是无法与之相比的。

### (2) 三角形桁架 (图18-1-7 b)

1) 弦杆轴力 弦杆所对应的力臂,由中间往两端按直线规律变化。设力臂为  $r$ ,则弦杆轴力仍可表示为

$$N = \pm \frac{M^0}{r}$$

力臂  $r$  向两端减小的速度比  $M^0$  要快,因而  $\frac{M^0}{r}$  往两端渐增。所以,弦杆越靠近两端的,其轴力越大。

2) 腹杆轴力 由截面法可知,斜杆轴力为压力,竖杆轴力为拉力,并且二者都是越靠近桁架中间,其轴力越大。三角形桁架各杆的轴力如图18-1-7 b 所示。

### (3) 抛物线桁架 (图18-1-7 c)

1) 弦杆轴力 在抛物线桁架中,各下弦杆的轴力及各上弦杆轴力的水平分力矩,其矩心的力臂,即为各竖杆的长度,而竖杆的长度与弯矩一样,都是按抛物线规律变化的。故可知各下弦杆的轴力与各上弦杆轴力的水平分力的大小都相等(符号相反),从而各上弦杆的轴力也接近相等。

2) 腹杆轴力 由于下弦杆轴力与上弦杆轴力的水平分力相等,根据截面法,由  $\Sigma X=0$ ,可知各斜杆轴力均等于零。不难断定,各竖杆的轴力也均等于零。

### (4) 折线形桁架 (图18-1-7 d)

折线形桁架是三角形桁架和抛物线形桁架的一种中间形式。由于上弦改成折线,端节间上弦杆的坡度比三角形桁架大,因而使力臂  $r$  向两端递减得慢一些,这就减小了弦杆特别是端弦杆的内力,虽然  $\frac{M^0}{r}$  值也逐渐增大,但比三角形桁架的变化要小。

由上面的分析,可得以下结论:

(1) 平行弦桁架的内力分布不均匀,弦杆内力向中间增加,因而弦杆截面要随着改变,这就增加了拼接的困难,如同样的截面,又浪费材料。但是,由于它在构造上有许多优点,如可使结点构造划一,腹杆标准化等,因而仍得到广泛应用,不过多限于轻型桁架,这样便于采用截面一致的弦杆,而不致有很大的浪费。

(2) 三角形桁架的内力分布也不均匀。弦杆的内力近支座处最大,并且端结点夹角很小,构造复杂。由于其两面斜坡的外形符合屋顶构造的要求,所以三角形桁架只在屋顶结构中应用。

(3) 抛物线形桁架的内力分布均匀,从受力角度来看是比较好的桁架形式。但是,曲弦上每一结点均须设置接头,构造较复杂。

(4) 折线形桁架的内力分布比三角形桁架均匀,又克服了抛物线形桁架上弦转折太多而形成的缺点,制造方便。

下面讨论桁架腹杆的布置对其内力的影响。

在平行弦桁架中(图18-1-7 a),若腹杆的布置由N式变为反N式,即斜杆由原来向两端倾斜改为向跨中倾斜,则其内力的性质也随着改变,斜杆由受拉变为受压,竖杆由受压变为受拉。斜杆内力的大小与倾斜角度有关。斜杆与弦杆的夹角小,则内力大。此外,腹杆的布置对桁架的构造和制造也有影响。如桁架节间长度变小,斜杆与弦杆夹角加大,其内力虽较小,但腹杆增多,结点数目增加,制造复杂,反而不一定经济,所以布置腹杆需要全面权衡。

在三角形桁架中(图18-1-7 b),若腹杆的布置由N式变为反N式,则腹杆内力的性质也要改变,即斜杆受拉,竖杆受压。以前钢屋架采用这种形式,可以避免钢材压杆过长容易失稳的缺点。用钢筋混凝土或钢材做成的三角形桁架,跨度较大时,腹杆采用N式或反N式,都使下弦结点和腹杆太多,不够经济,故常采用如图18-1-8 a 和 b 的形式,这种形式在全跨屋面荷载作用下,各杆受力情况如图示,其中粗线表示压杆,细线表示拉杆。图18-1-8 c 表示三角形桁架的另一种形式,由于改变了腹杆的布置,使压杆短而拉杆长。压杆采用钢筋混凝土,截面大,不易失稳,拉杆采用钢材,使两种材料都能发挥各自的长处。

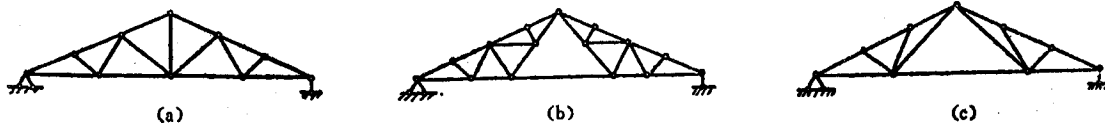


图 18-1-8

### 5.4 几种典型钢机架结构型式

本节提供某些设备所采用的机架结构形式，供选择时参考。

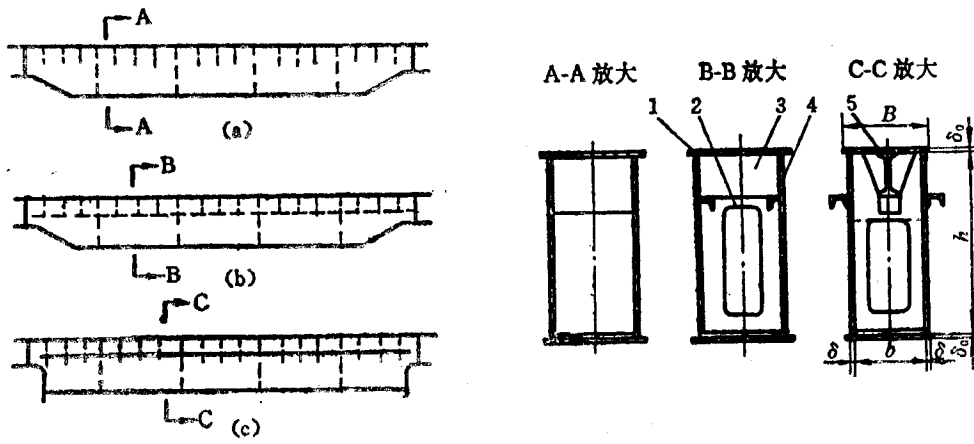


图 18-1-9 正轨箱形梁式起重机机架

a—适用于小起重量小跨度；b—适用于小起重量大跨度；c—适用于大起重量  
1—盖板；2—大筋板；3—小筋板；4—腹板；5—承轨架

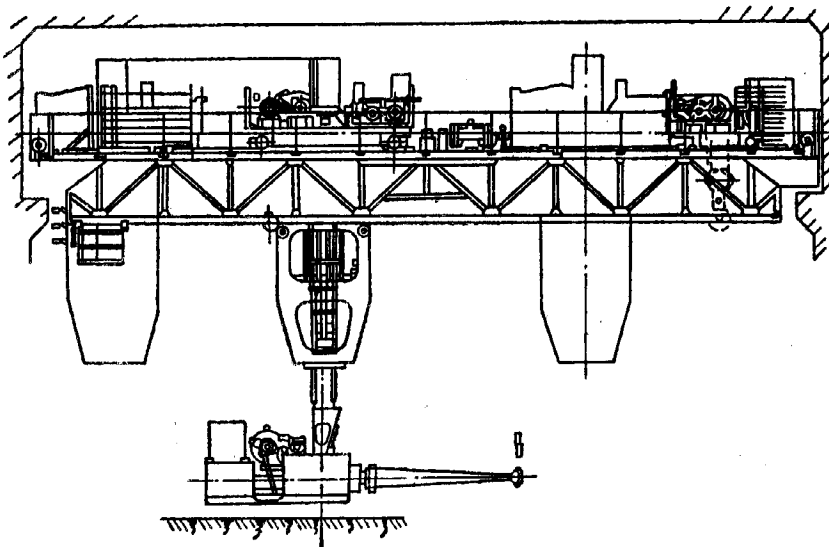


图 18-1-10 桁架式起重机（起重量20 t 加料起重机）

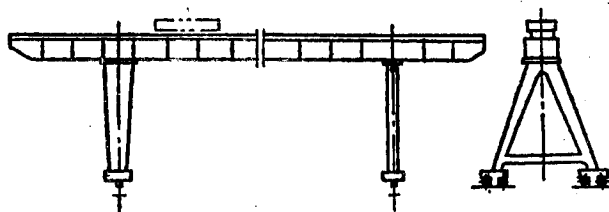


图 18-1-11 龙门起重机机架（刚性-挠性支腿起重机架）

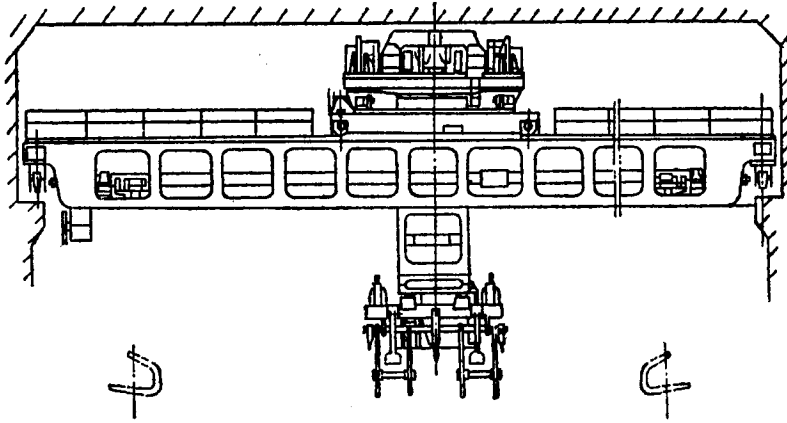


图 18-1-12 空腹框架式起重机机架 (15 t 刚性料耙起重机)

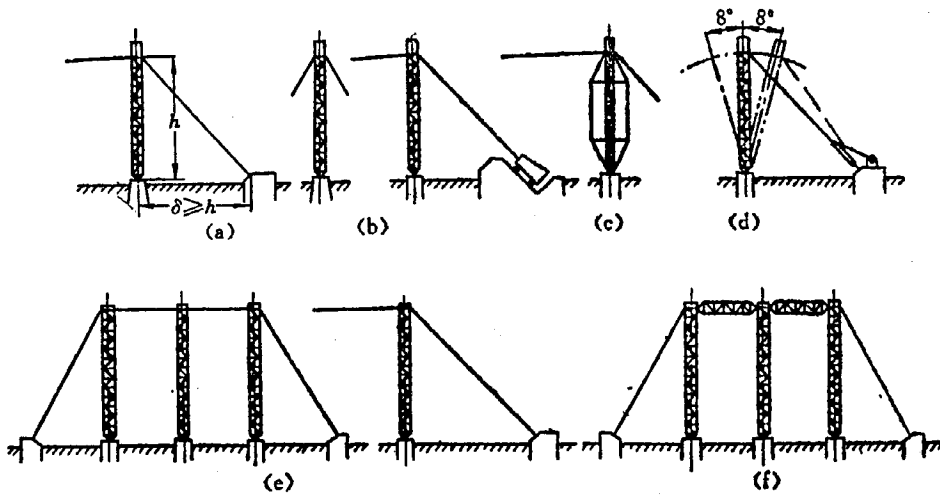
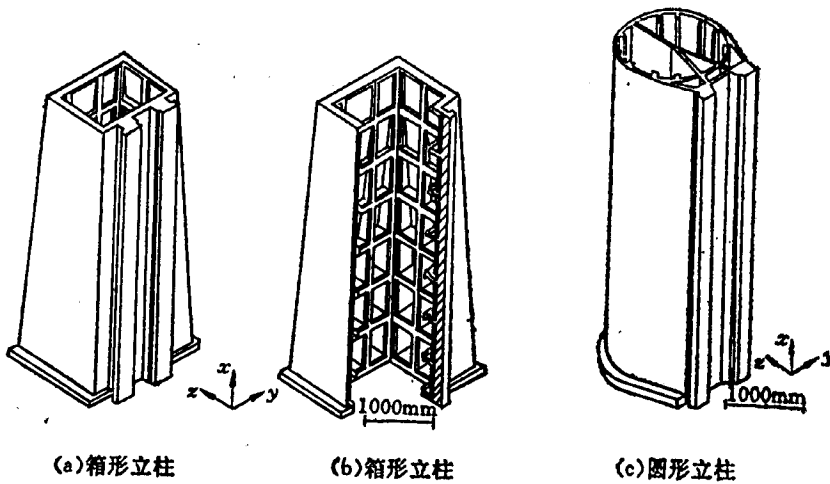


图 18-1-13 缆索起重机桅杆式机架



(a) 箱形立柱

(b) 箱形立柱

(c) 圆形立柱

图 18-1-14 机床的立柱



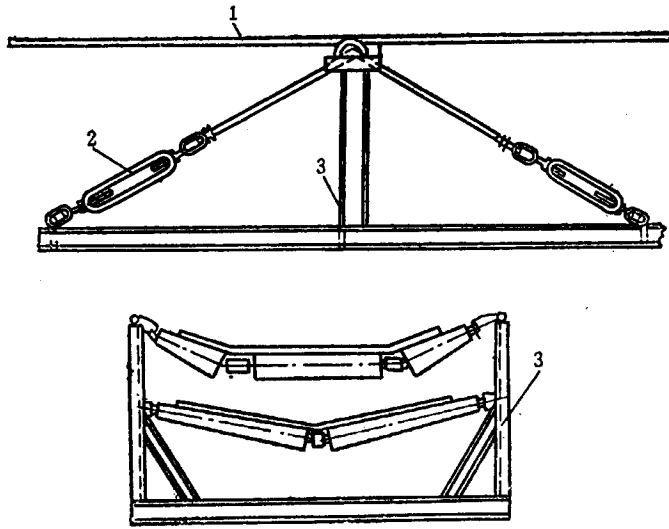


图 18-1-15 吊挂式胶带输送机的钢绳机架  
1—机架绳；2—花篮螺丝；3—收绳架