

高等学校试用教材

# 结 构 力 学

张崇文 曾思庄 合编



高等教育出版社

高等学校试用教材

# 结 构 力 学

张崇文 曾思庄 合编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书共十一章,主要讲述:静定结构的内力和位移的计算;计算超静定结构的力法;计算连续梁和刚架的位移法与力矩分配法;结构矩阵法中的直接刚度法;以及静定梁的影响线。此外,还对薄板、薄壳、网架等空间结构的性能给予了简要说明,并对水池的计算作了简单介绍。本书可作为给排水和建筑学等专业的教材,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

责任编辑 余美茵

高等学校试用教材

## 结 构 力 学

张崇文、曾思庄 合编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12.25 字数 280,000

1985年10月第1版 1985年10月第1次印刷

印数 00,001—9,150

书号 15010·0645 定价 2.10 元

# 目 录

|                              |    |                                |     |
|------------------------------|----|--------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....          | 1  | § 5-8 支座移动和温度改变引起的内力           | 86  |
| § 1-1 结构力学的任务                | 1  | <b>第六章 位移法计算超静定刚架</b> .....    | 94  |
| § 1-2 结构的计算简图                | 3  | § 6-1 位移法的基本概念                 | 94  |
| § 1-3 结构的分类                  | 6  | § 6-2 等截面直杆的转角位移方程             | 96  |
| § 1-4 荷载的分类                  | 10 | § 6-3 位移法的未知量数目的确定             | 100 |
| <b>第二章 平面杆系的几何组成分析</b> ..... | 11 | § 6-4 位移法计算刚架的步骤               | 103 |
| § 2-1 几何组成分析的目的              | 11 | § 6-5 对称性的利用                   | 111 |
| § 2-2 几何不变体系的组成规则            | 12 | <b>第七章 力矩分配法计算连续梁和刚架</b> ..... | 119 |
| § 2-3 瞬变体系                   | 12 | § 7-1 力矩分配法的原理                 | 119 |
| § 2-4 静定结构和超静定结构的概念          | 14 | § 7-2 分配系数、传递系数和计算示例           | 120 |
| <b>第三章 静定结构的内力计算</b> .....   | 17 | § 7-3 有一个结点线位移的刚架              | 124 |
| § 3-1 静力平衡方程和叠加原理            | 17 | § 7-4 对称性的利用                   | 127 |
| § 3-2 多跨静定梁                  | 19 | § 7-5 超静定结构的特征                 | 129 |
| § 3-3 静定平面刚架                 | 22 | <b>第八章 结构矩阵法</b> .....         | 132 |
| § 3-4 三铰拱                    | 26 | § 8-1 结构矩阵法的概念                 | 132 |
| § 3-5 静定平面桁架                 | 31 | § 8-2 位移列阵和荷载列阵                | 133 |
| § 3-6 静定结构的特征                | 33 | § 8-3 单元刚度矩阵与坐标变换              | 136 |
| <b>第四章 静定结构的位移计算</b> .....   | 46 | § 8-4 整体刚度矩阵和刚度方程              | 140 |
| § 4-1 位移计算的目的                | 46 | <b>第九章 静定梁的影响线</b> .....       | 154 |
| § 4-2 结构受静力荷载作用时的外力功和<br>内力功 | 47 | § 9-1 影响线的概念                   | 154 |
| § 4-3 荷载引起的位移                | 49 | § 9-2 用静力法作静定梁的影响线             | 155 |
| § 4-4 用图乘法求积分                | 53 | § 9-3 用影响线求固定荷载作用下结构的反<br>力和内力 | 159 |
| § 4-5 位移互等定理                 | 57 | § 9-4 用影响线确定最不利荷载位置            | 161 |
| § 4-6 支座移动和温度改变引起的位移         | 57 | § 9-5 简支梁的绝对最大弯矩               | 165 |
| <b>第五章 力法计算超静定结构</b> .....   | 64 | <b>第十章 空间结构简述</b> .....        | 168 |
| § 5-1 超静定结构的类型               | 64 | § 10-1 薄板结构                    | 168 |
| § 5-2 超静定次数的确定               | 66 | § 10-2 薄壳结构                    | 170 |
| § 5-3 力法原理                   | 68 | § 10-3 平板网架                    | 177 |
| § 5-4 对称性的利用                 | 73 | <b>第十一章 水池计算简介</b> .....       | 183 |
| § 5-5 荷载作用下超静定结构的位移计算        | 77 | § 11-1 矩形水池的计算                 | 183 |
| § 5-6 计算结果的校核                | 79 | § 11-2 圆形水池的计算                 | 184 |
| § 5-7 超静定拱的计算                | 80 |                                |     |

# 第一章 绪 论

## §1-1 结构力学的任务

图 1-1 为砖木混合建筑,其中木屋架承担着屋面上的荷载(屋面系统自重、雪荷载及风荷载),并通过砖墙将荷载传给基础。图 1-2 为钢筋混凝土单层厂房,尖顶框架承受着由屋面和吊车梁传来的荷载。在此两图中,木屋架、砖墙、尖顶框架、屋面板和吊车梁均称为结构。在土建工程中,凡满足一定的使用要求并能承受荷载而起骨架作用的物体或体系就称为结构。

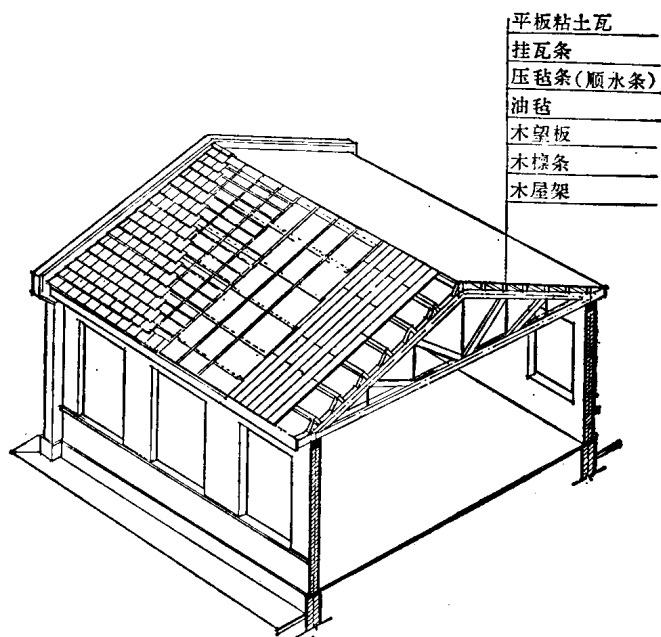


图 1-1

又例如:图 1-3 所示的钢筋混凝土地下贮液池,是由球面薄壳顶盖、环梁、池壁和底板等各种结构所组成;图 1-4 为正在施工的壁板结构;图 1-5 为北京网球馆,它的屋盖是钢筋混凝土的双曲扁壳结构;图 1-6 是北京工人体育馆,屋盖是悬索结构。

以上我们对“结构”的含义给了简单的说明。结构力学就是研究结构的强度、刚度以及稳定等问题的学科。结构力学的任务可概括为:

(1) 研究结构的组成规律、力学性能和合理形式,以保证结构在荷载作用下不致发生几何变形,并能充分有效地利用建筑材料的性能。

(2) 研究结构的强度、刚度和稳定的计算原理和计算方法,以保证结构满足经济、安全和适

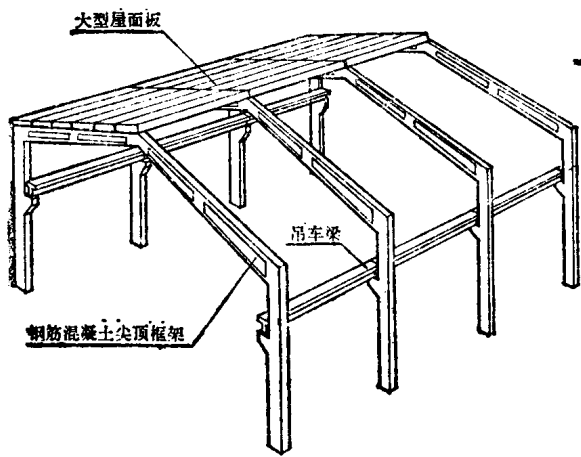


图 1-2

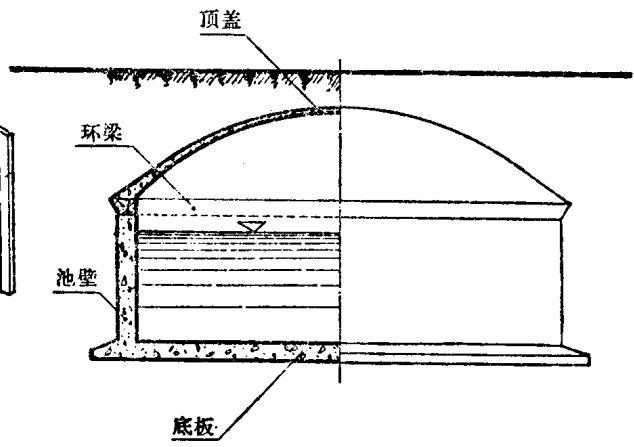


图 1-3



图 1-4

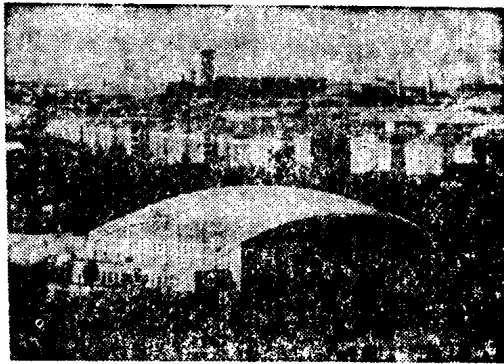


图 1-5

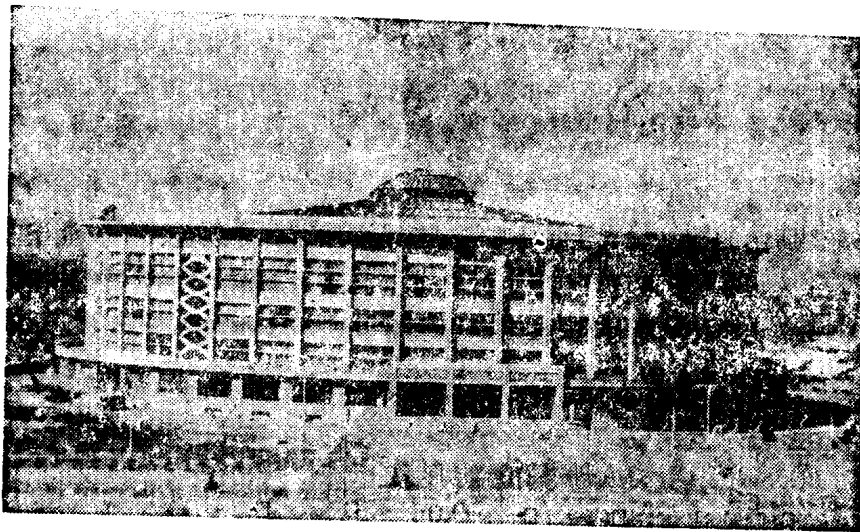


图 1-6

用的要求。

(3) 在生产发展的推动下, 进一步研究并提出新的计算理论和计算方法, 从而创造新型的结构。

在保证结构满足经济、安全和适用方面, 钢筋混凝土、钢木结构以及施工等学科也起着重要作用。

§ 1-2 结构的计算简图

如前一节所述, 计算结构的强度、刚度和稳定是结构力学的任务之一。但如果完全按照结构的实际构造与荷载情况进行计算, 则计算将会十分复杂。在保证计算结果能基本上反映结构的真实工作状态前提之下, 为了简化计算, 可以采用简化图形以代替实际结构, 这种简化图形就称为计算简图。

怎样将实际结构简化成计算简图? 一般情况是从两方面来考虑: 一方面是将作用于结构的外界影响给以简化, 例如, 将作用于结构的微小面积上的分布荷载视为作用于一点的集中荷载, 温度沿杆截面的变化规律视为按直线变化等; 另一方面是从结构的构造和力学性能上给以简化。例如, 在一定条件下可将空间结构按平面结构计算, 支座和结点的构造可以简化为不同的理想情况。

1 支座的计算简图

我们仅讨论平面杆系结构的支座。常用的支座计算简图有下述三种:

(1) 可动铰支座 这种支座的计算简图如图 1-7a 所示。它所代表的实际支座类型有图 1-7c、d、e 所示的几种。图 1-7c 所示的辊轴支座是这种支座的典型代表, 结构可绕铰轴转动, 又可沿垫块的平面滑动。这种支座对结构仅有一个约束, 相应地只有一个反力  $V$  (图 1-7b)。在较小跨度的结构中, 也常采用图 1-7d、e 所示的支座型式。

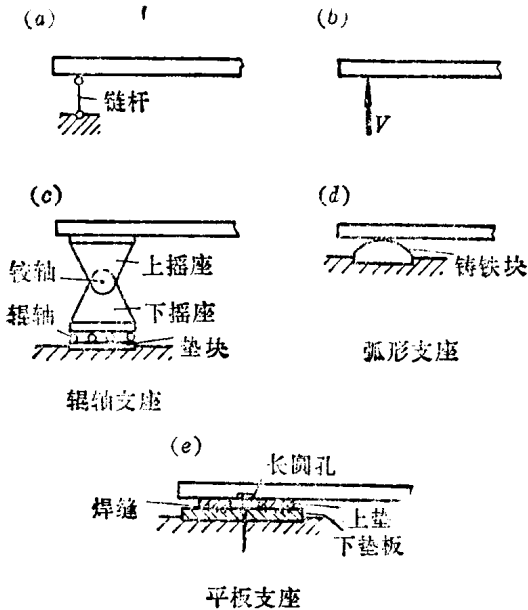


图 1-7

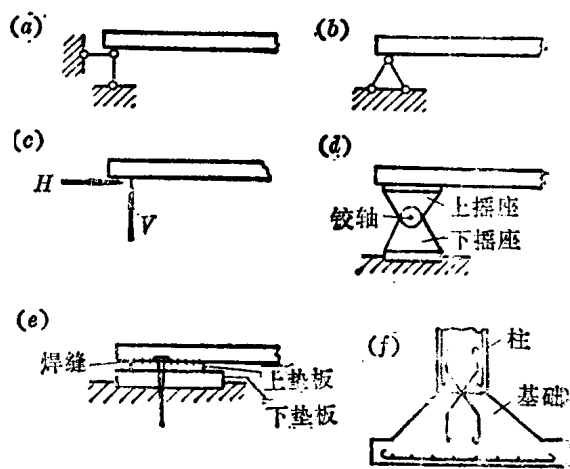


图 1-8

(2) **固定铰支座** 这种支座的计算简图可采用图 1-8a 或图 1-8b。图 1-8d 为其构造示意图, 结构只能绕铰轴转动但不能移动。这种支座对结构有两个约束, 相应地有两个分反力(图 1-8c), 即水平分反力  $H$  和竖向分反力  $V$ 。在小跨度的结构中常采用图 1-8e 所示的支座。图 1-8f 示一钢筋混凝土柱的下端与基础连接的构造, 因混凝土抗拉强度较低, 认为此种构造不能抵抗弯矩, 也可视为固定铰支座。

(3) **固定支座** 图 1-9a、b 为固定支座的计算简图。这种支座不容许结构绕支座转动和移动。工程实际中不可能有完全固定的支座, 但在计算简图中, 常将某些支座的构造近似地看做是固定的。图 1-9d 示一钢筋混凝土的大梁与一个截面较小的梁同时浇注在一起, 我们可认为小梁的 A 端被大梁所固定。图 1-9e 所示的情况, 认为柱的下端被基础所固定。此外在钢结构与木结构中, 均有这种可视为固定的支座构造, 此处不一一列举。这种支座对结构有三个约束, 相应地有三个分反力, 即水平分反力  $H$ 、竖向分反力  $V$  和反力矩  $M$ (图 1-9c)。为了简单, 以后将分反力称为反力。

图 1-9f 所示的支座计算简图, 与图 1-9a 相比, 其反力只有  $H$  和  $M$ , 称为**定向支座**。

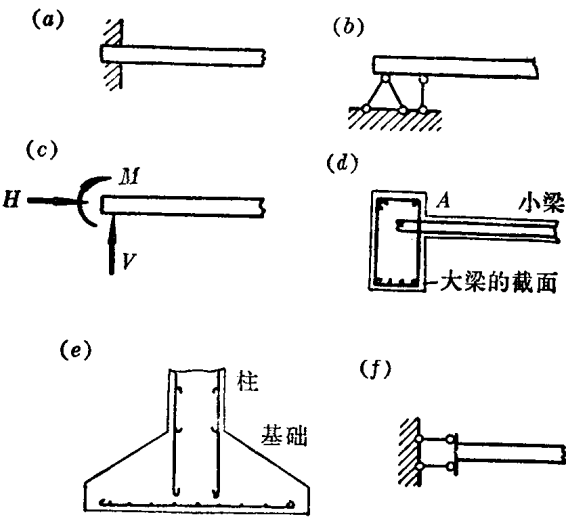


图 1-9

## 2. 结点的计算简图

在杆系结构中, 结点(两根或多根杆件的共同联接处)可分为两类:

(1) **铰结点** 所谓铰结点是指所联接的各杆件之间能相互自由转动的结点。在实际结构中, 由于制作上的困难, 这种结点是很少采用的, 故不予以介绍。下面仅指出在结构中常用的几种结点构造, 这种构造在计算时也可视为是铰结点。

图 1-10a 为焊接钢桁架的示意图, 在结点处用结点板将各杆(角钢)焊接在一起。如将这个钢桁架改为木桁架或钢筋混凝土桁架, 则结点 A 的构造如图 1-10b、c 所示。由于桁架的几何组成与力学特性的关系, 在设计这些结点时不必考虑它们的抗弯性能, 故这些结点可看作是铰结

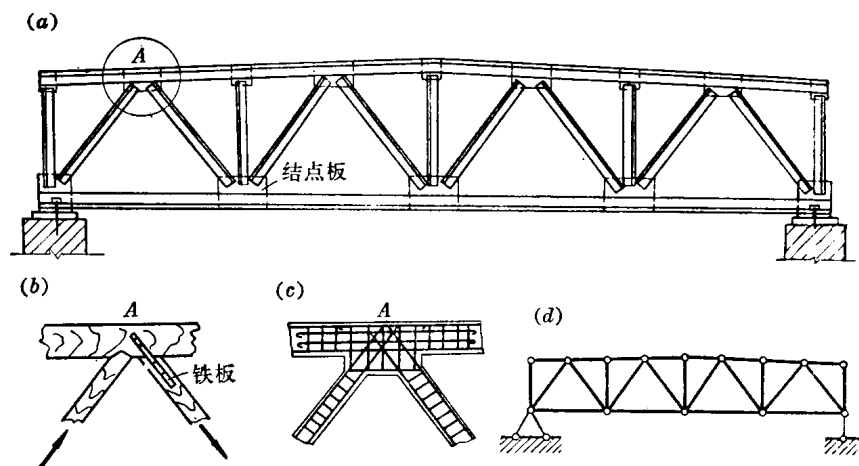


图 1-10

点,即认为各杆能绕它们轴线的交点自由转动。该桁架的计算简图见图 1-10d,图中的各小圆表示铰结点的计算简图。

(2) **刚结点** 图 1-11a 示一钢筋混凝土框架。在设计  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三个结点时,考虑了它们的抗弯性能,使汇交在同一个结点的各杆联接成一个整体。当刚架发生变形时,汇交在同一个结点的各杆轴的切线间的夹角保持不变 (图 1-11b)。这种结点称为刚结点,它们的计算简图见图 1-11b 的  $B$ 、 $C$ 、 $D$  各结点。具有这种刚结点的框架在结构力学中称为 **刚架**。

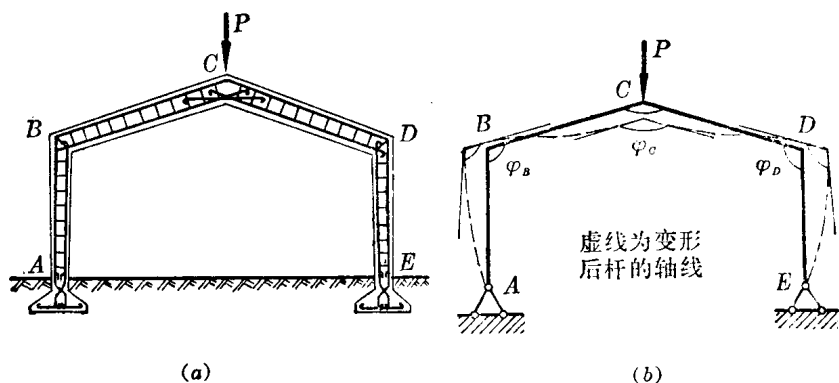


图 1-11

### 3. 结构的计算简图

以上给出了平面杆系结构的支座和结点的计算简图。此外,还用杆轴线代替杆件。由此,可作出一般平面杆系结构的计算简图。例如,图 1-10d 为图 1-10a 所示桁架的计算简图;图 1-11b 中的实线图为图 1-11a 所示刚架的计算简图。

以上所列举的计算简图的选择,在结构计算中是最常见的情况。实践证明,按照这样的计算简图,所得的计算结果基本上能够反映结构的实际工作状态。在生产实际中,有时遇到的构筑物比较复杂,选择它的计算简图并不是那样轻而易举。要做好这项工作,除具备结构力学和工程结构的知识外,还须具有一定的生产实践经验。

最后再强调说明选择计算简图所应遵循的原则：在保证计算结果能反映实际结构的工作状态、并满足所需要精度的前提下，应尽可能地略去某些次要因素，以使计算工作得到简化。

### § 1-3 结构的分类

在土建工程中，常用的结构有如下几种类型：

1. 梁 梁是受弯杆件，有单跨梁(图 1-12a、b)和多跨梁(图 1-12c、d)。

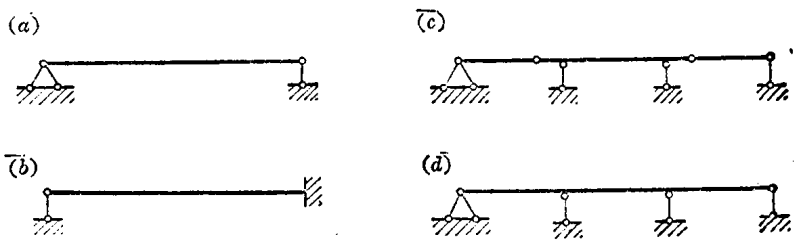


图 1-12

2. 刚架 刚架是由梁和柱所组成(图 1-13)，各杆主要承受弯矩，同时也承受轴力和剪力。它的结点为刚结点，有时也有部分铰结点。这种结构常用在单层厂房和高层建筑中。

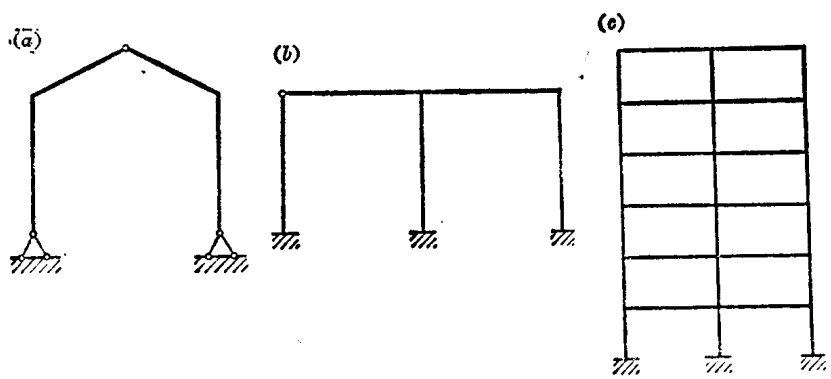


图 1-13

3. 组合结构 若结构的杆件中，除承受弯矩、轴力和剪力的杆外，还有仅承受轴力的二力杆，则称为组合结构。图 1-14a 中 *a* 和 *b* 杆是二力杆。图 1-14b 中，除 *AB* 和 *CD* 杆外其它各杆

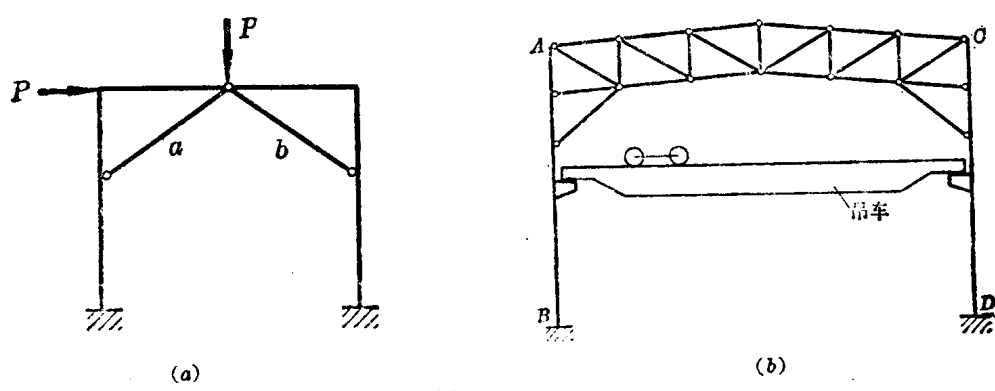


图 1-14

都是二力杆,这种组合结构常用在单层厂房建筑中,称为排架。

4. 拱 拱是由曲杆所组成,常用的拱轴线多为割圆或抛物线。图 1-15a、b、c 分别表示三铰拱、两铰拱和无铰拱,图 1-15d 为多跨连续拱。拱可用在大跨度建筑的屋盖结构及桥梁结构中。在竖向荷载作用下,支座处除有竖向反力外还产生水平反力。

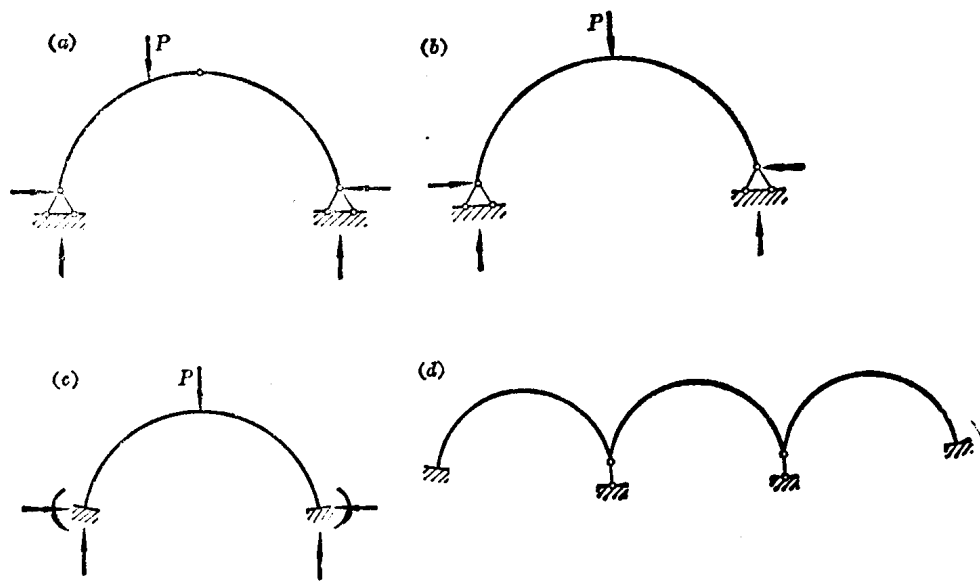


图 1-15

5. 桁架 桁架是由若干杆件在各杆两端相互联接而组成,它的结点在计算简图中认为是理想铰。当只承受结点荷载时,各杆中只产生轴力,即为二力杆。图 1-16a、b 分别为三角形桁架和平行弦桁架。图 1-16c 为拱式桁架,在竖向荷载作用下,支座处还产生水平反力。桁架常用在屋盖结构和桥梁结构中。

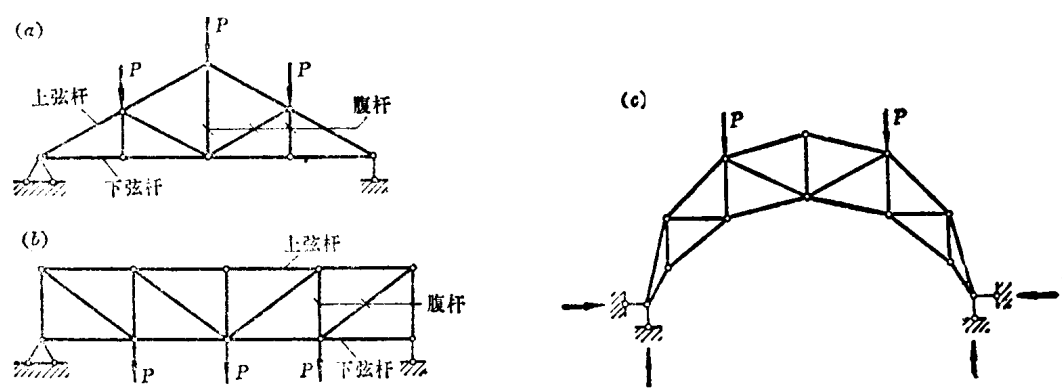


图 1-16

6. 薄板 图 1-17 表示一块矩形薄板,它的厚度远小于长度和宽度,故称为薄板。在多层建筑中,每层的楼盖多是钢筋混凝土薄板。

7. 折板 折板是由若干块不同倾度的薄板组成(图 1-18), 常用在屋盖结构中。

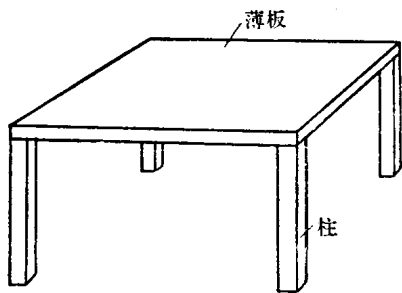


图 1-17

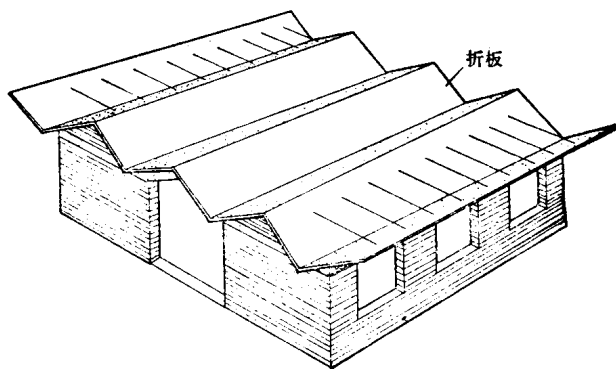
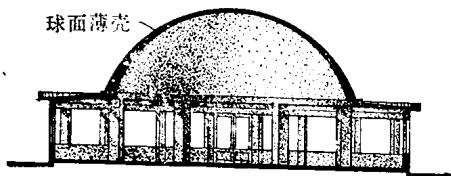
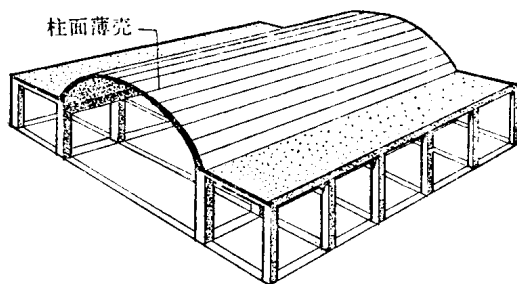


图 1-18

8. 薄壳 具有曲面形状的薄壁结构称为薄壳, 可用在大跨度建筑的屋盖结构中。图 1-5 所示的网球馆, 它的屋盖是钢筋混凝土的双曲扁壳。图 1-19a、b 为球面薄壳和柱面薄壳。



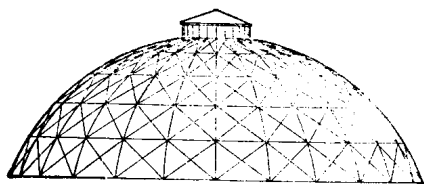
(a)



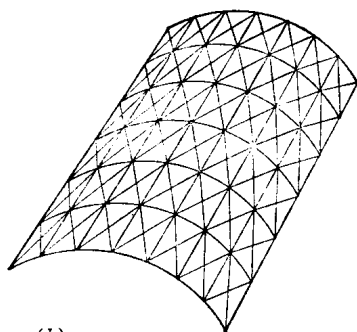
(b)

图 1-19

9. 网状结构 网状结构是将若干杆件沿某种曲面(球面或柱面)或平面按一定规律分布组合而成。图 1-20a 为网状穹顶, 图 1-20b 为柱形网状筒拱。图 1-21a、b 表示一种类型的平板网架和它的空心球结点。在同样跨度下, 平板网架比前两种网架的屋面面积小, 故可以节约钢材, 施工安装也较容易。在我国已建成的平板网架, 多用作体育馆、影剧院、俱乐部、候车室、礼堂和食堂等建筑的屋盖。首都体育馆的屋盖是平板网架, 跨度99m, 长112.2m, 可容纳两万观众。上海体育馆的内径 110m, 也是采用平板网架。



(a)



(b)

图 1-20

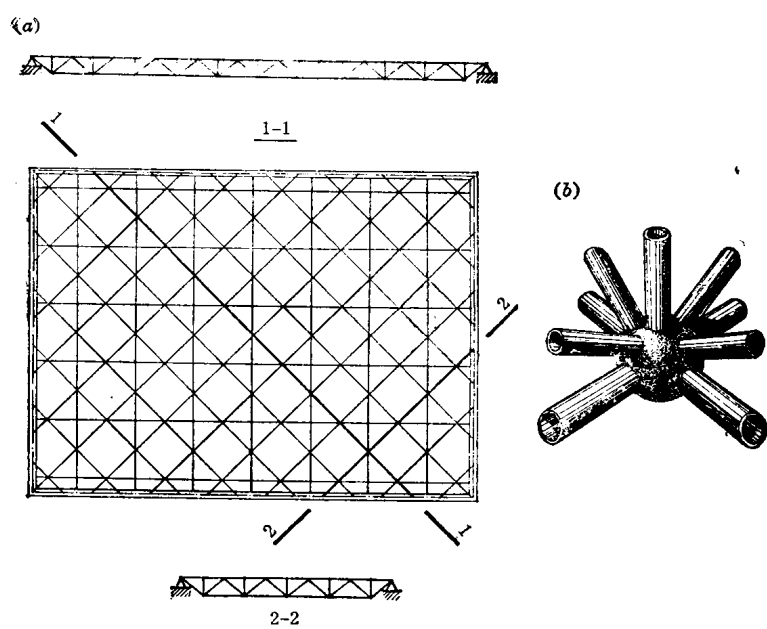


图 1-21

10. 悬索结构 悬索结构是由钢索网和钢筋混凝土的环梁组成, 索网只承受拉力, 故能充分发挥高强钢材的作用, 适用于大跨度公共建筑的屋盖。

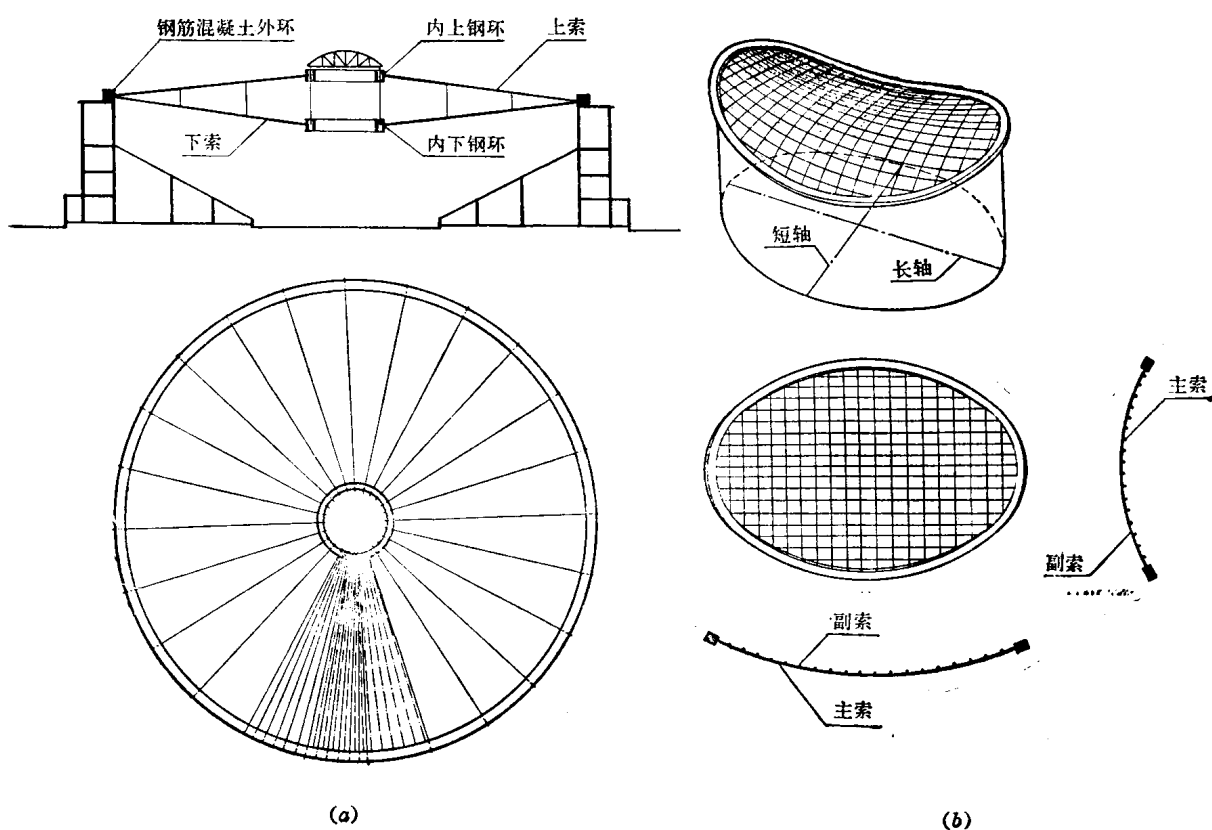


图 1-22

悬索结构有很多型式,我国六十年代建造的有两种,一种是圆形双层辐射式悬索屋盖,图1-22a表示它的构造简图。北京工人体育馆(图1-6)的屋盖就是采用了这种型式,钢筋混凝土外环梁直径94m,钢内环梁直径16m。另一种是椭圆平面正交索网双曲抛物面悬索屋盖,如图1-22b所示。浙江人民体育馆即为这种类型,椭圆的长轴80m,短轴60m,索网是由向下凹的承重索(主索)和向上凸的稳定索(副索)组成,主、副索均用高强钢丝束制成,环梁是钢筋混凝土的空间曲梁。

11. 实体结构 实体结构是指三个方向的尺度大约为同一量级的结构,例如图1-23a、b所示的挡水坝和挡土墙。

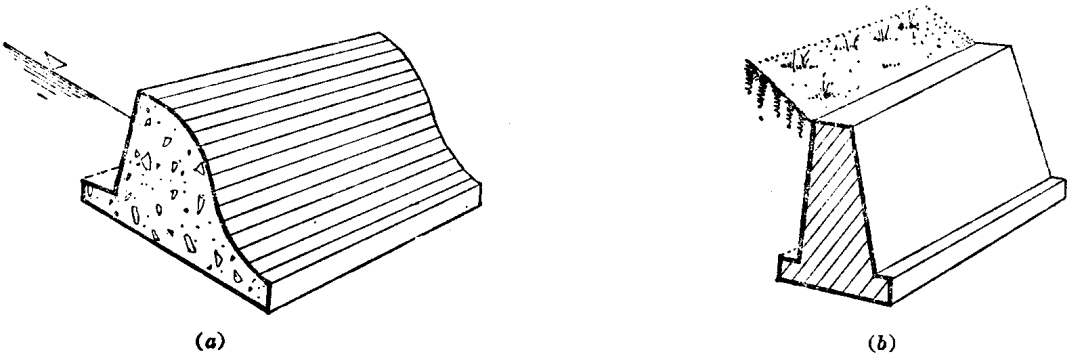


图 1-23

以上介绍了十一种类型的结构。其中前五种,各杆的轴线和荷载均位于同一平面内,称为平面杆系结构。后六种则属于空间结构。此外还有其它型的结构,这里不再一一类举了。

### §1-4 荷载的分类

作用于结构上的荷载,按其作用时间的久暂可分为以下三类:

1. 恒载 是指永久作用于结构上的荷载,在结构使用过程中,其重量和位置都是不变的,例如结构自重、固定设备重量、屋面重量等。
2. 活载 或称为临时荷载,是指暂时作用在结构上的荷载,例如风荷载、雪荷载、流体压力等。
3. 移动荷载 也属于活载,但荷载可在结构上移动,例如车辆、吊车、人群等。

按荷载作用的性质,又可分为两类:

1. 静力荷载 是指在加载过程中,荷载由零逐渐增加到最后值,不致使结构发生显著的振动,在计算时可以忽略惯性力影响的荷载。恒载和多数活载是属于静力荷载。
2. 动力荷载 是指荷载作用在结构上时会引起显著的振动,计算时须考虑惯性力影响的荷载。例如动力机械的振动、爆炸时的冲击波荷载、地震荷载等均为动力荷载。

本教材中,只讲述结构在静力荷载作用下的计算问题。

还应指出,在超静定结构中,除荷载作用外,温度改变、支座移动、材料收缩等也会引起内力。这种内力有时甚至是很大的,在结构设计时不可忽视。

## 第二章 平面杆系的几何组成分析

### § 2-1 几何组成分析的目的

图 2-1 所示的体系, 在荷载  $P$  作用下将发生弯曲。图 2-2 所示的体系, 承受荷载  $Q$  后各杆将伸长或缩短, 从而使体系改变了形状。当荷载不大时, 材料产生应变, 因而体系只产生很小的弹性变形。如果不考虑这种很小的变形, 而体系能维持几何形状和位置不变。则这样的体系称为几何不变体系。



图 2-1

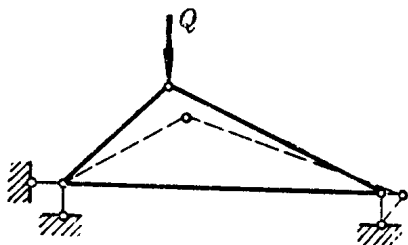


图 2-2

图 2-3 和图 2-4 所示的两个体系, 当作用很小的荷载时, 即使不考虑材料的应变, 它们的形状和位置也将会有大的改变, 故不能用来承受荷载, 这样的体系称为几何可变体系。

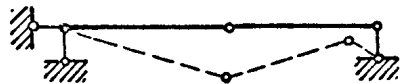


图 2-3

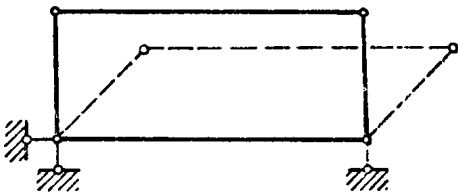


图 2-4

结构是用来承受荷载的, 故只有几何不变体系可以作为结构, 而几何可变体系是不能作为结构的。

对杆件体系的几何组成进行分析就称为几何组成分析。其主要目的是研究几何不变体系的组成规则, 并判别体系是否几何不变, 从而决定能否作为结构。另外也可用以判别某一体系是静定结构还是超静定结构。

这里我们仅研究体系的几何变形, 而不研究它们受力后的弹性变形, 故可将几何不变体系或体系中的几何不变部分视为刚片。下面只讨论平面杆件体系几何不变的组成规则。

## § 2-2 几何不变体系的组成规则

为了分析体系是否几何不变,先讨论组成几何不变体系的两个基本规则如下:

1. 规则1 两刚片用不交于一点也不互相平行的三根链杆联接,则组成几何不变体系。

以上这个规则,可用图 2-5 说明。图中两端有铰的杆称为链杆。将刚片  $A$  和  $B$  用一根链杆联接(图 2-5a),设刚片  $A$  不动,则刚片  $B$  可以绕铰  $b$  转动,或沿以点  $a$  为圆心  $ab$  为半径的弧线方向移动。如用两根链杆连接此二刚片(图 2-5b),当刚片  $A$  不动时,点  $b$  和点  $d$  可分别有与  $ab$  和  $cd$  垂直方向的位移,故刚片  $B$  能绕  $ab$  与  $cd$  的交点  $O$  而转动,不可能再沿其他方向移动。点  $O$  为刚片  $A$  和  $B$  的相对瞬心,或称为虚铰。倘再加一根不通过点  $O$  的链杆  $ef$ (图 2-5c),当刚片  $A$  不动时,点  $f$  的位移必须与  $ef$  垂直,这样就破坏了刚片  $B$  绕点  $O$  转动的条件,因此这两个刚片便形成了一个几何不变体系。

图 2-5d 所示的二个刚片,先用一个铰将它们联接。设刚片  $A$  不动,刚片  $B$  只能绕铰轴转动,故这个铰与图 2-5b 中的两根链杆起相同的联接作用。由此可知一个铰相当于二根链杆。然后再在这两个刚片之间加一根链杆,就形成一个与图 2-5c 相同的几何不变体系。

一根链杆相当于一个联系(或称约束);一个铰相当于二个联系。

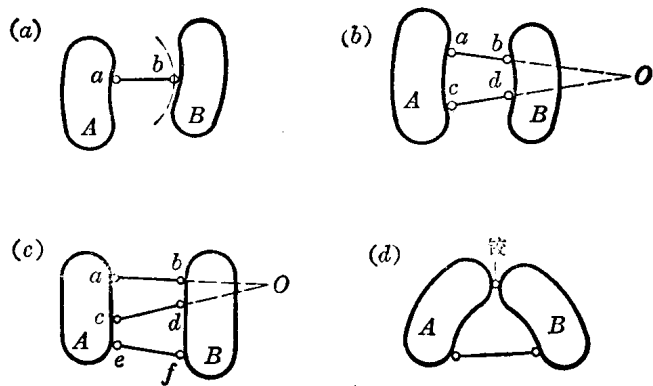


图 2-5

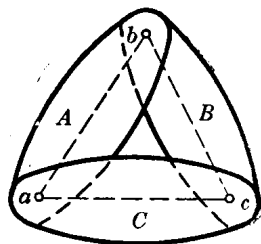


图 2-6

2. 规则2 三个刚片用不在一直线上的三个铰相互联接,则组成几何不变体系。

如图 2-6 所示,三刚片  $A$ 、 $B$ 、 $C$  用不在一直线上的三个铰  $a$ 、 $b$ 、 $c$  相互联接。 $ab$ 、 $ac$ 、 $bc$  是三角形  $abc$  的三个边,由于这三个边为定长,故三角形  $abc$  的形状是唯一的。因此三个刚片的相对位置是确定的,这样组成的体系是一个几何不变体系。

## § 2-3 瞬变体系

由两个或三个刚片组成的平面体系不符合上节中的规定时,都形成可变体系。它可能是不能保持几何外形的常变体系,也可能是在发生微小位移后又成为几何不变的瞬变体系。形成瞬变体系主要有以下两种情况:

1. 二刚片用交于一点的三根链杆联接, 则形成瞬变体系。

图 2-7a 示两刚片  $A$  和  $B$  用三根相交于一点  $O$  的链杆联接。交点  $O$  为相对瞬心, 刚片  $A$  和  $B$  可绕点  $O$  作微小的相对转动, 转动后三链杆不再交于一点, 形成几何不变体系。这种在发生微小位移后又成为几何不变的体系称为瞬变体系。

图 2-7b 所示的体系, 三根链杆相互平行但不等长, 当两刚片  $A$  和  $B$  发生微小相对转动后, 三根链杆就不再平行。这情况符合几何不变体系的组成规则1, 故这种体系也是瞬变体系, 这是图 2-7a 的特例。如果三根链杆既平行又等长, 当两刚片发生相对微小转动后, 三链杆仍然平行, 还将会继续转动, 则这体系是常变体系。

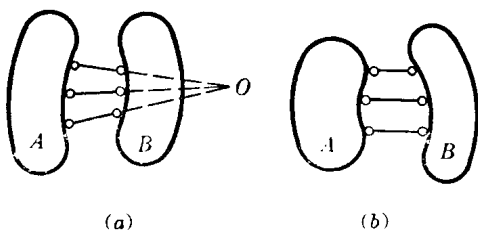


图 2-7

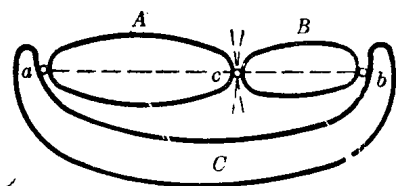


图 2-8

2. 三刚片用在同一直线上的三个铰相互连接, 则形成瞬变体系。

如图 2-8 所示, 刚片  $A$ 、 $B$ 、 $C$  用在一直线上的三个铰  $a$ 、 $b$ 、 $c$  相互联接。分别取圆心  $a$ 、 $b$  和半径  $ac$ 、 $bc$ , 可绘出两段相切于点  $c$  的弧线。因这两段弧线在点  $c$  有公切线, 故点  $c$  可有微小的位移。当这个微小的位移发生后, 铰  $a$ 、 $b$ 、 $c$  不再在同一直线上, 这个体系也就变为几何不变体系。这样的体系也是瞬变体系。

不仅几何可变的常变体系不能作为结构使用, 而瞬变体系亦不能作为结构使用。因为瞬变体系在理论上虽只有微小的位移, 但在荷载作用下所发生的位移要比几何不变体系大得多。瞬变体系也属于可变体系的一种类型, 以后凡说可变体系也包括瞬变体系在内。

例 2-1 分析图 2-9 所示体系的几何组成。

解 刚片  $ab$  与地基用不交于一点的三根链杆(固定支座相当于不交于一点的三根链杆)相联接, 是几何不变体系。将刚片  $ab$  和地基视为一个刚片, 这刚片又用两根支座链杆及链杆  $bc$  与刚片  $cd$  相联接, 组成几何不变部分。再将  $abcd$  部分和地基视为一个刚片, 用一根支座链杆及一个铰与刚片  $de$  相联接, 也组成几何不变体系。因此, 整个体系的组成符合规则 1, 是几何不变体系。

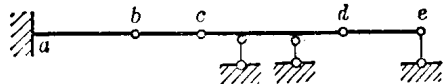


图 2-9

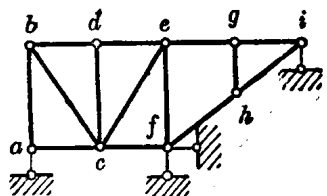


图 2-10

例 2-2 分析图 2-10 所示体系的几何组成。

解 三角形  $abc$  由三个刚片用不在一直线上的三个铰相互联接而成, 是几何不变的。将三角形  $abc$  视为一