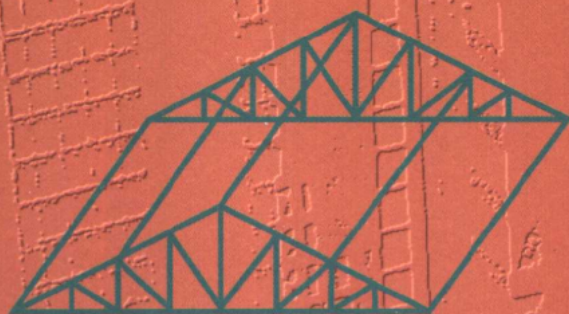


设计力学

• 陈保胜 编



同济大学出版社

设计力学

陈保胜 编

同济大学出版社

内 容 提 要

设计力学是根据目前各大专院校新设置的工业造型、艺术设计等专业的需求而建立起来的力学基础课,它综合了理论力学、材料力学、结构力学最基本的理论知识。全书共分九章,包括力的基本知识、静定结构的支座反力、构件的内力、构件的平面几何组成分析、构件的变形等,有较强的针对性。可供大专院校工业造型、艺术设计以及中专土建类对力学要求较低的专业作为教材。

图书在版编目(CIP)数据

设计力学/陈保胜编. —上海:同济大学出版社,
2004.4

ISBN 7-5608-2755-1

I. 设… II. 陈… III. 工业设计:造型设计—力学 IV. TB47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 001216 号

设计力学

陈保胜 编

责任编辑 解明芳 责任校对 杨江淮 封面设计 李志云

出 版 行 同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟华顺印刷有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 11.5

字 数 230000

印 数 1—4000

版 次 2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5608-2755-1/TB·44

定 价 17.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 设计力学的任务	(1)
第三节 荷载的分类	(2)
第四节 平面结构的支座及反力	(5)
第五节 结构的计算简图	(7)
第六节 杆系结构的分类	(10)
第七节 变形固体及其基本假设	(12)
第八节 杆件的几何特性与基本变形形式	(13)
第二章 力的基本知识	(15)
第一节 力的基本性质	(15)
第二节 力的合成与分解	(21)
第三节 力矩	(26)
第四节 力偶	(32)
第三章 构件的静力平衡条件及支座反力计算	(39)
第一节 概述	(39)
第二节 静力平衡条件	(42)
第三节 构件的支座反力计算	(46)
第四章 构件的内力计算	(66)
第一节 概述	(66)
第二节 指定截面的内力计算	(70)
第三节 构件的内力计算	(74)
第四节 其他构件的内力计算	(90)
第五章 平面几何组成分析	(109)
第一节 几何组成分析的目的	(109)
第二节 组成几何不变体系的基本规则	(109)
第三节 体系几何组成分析的举例	(113)
第四节 静定结构和超静定结构	(116)
第六章 平面图形的几何性质	(119)
第一节 静矩和形心	(119)
第二节 惯性矩、惯性积和惯性半径	(121)

第三节 平行移轴公式·····	(123)
第七章 剪切和承压 ·····	(127)
第一节 剪切和承压的基本概念·····	(127)
第二节 剪切和承压的基本假定和计算·····	(128)
第八章 构件的应力 ·····	(132)
第一节 构件的正应力强度条件·····	(132)
第二节 构件的切应力强度条件·····	(140)
第九章 构件的变形 ·····	(150)
第一节 构件挠曲线的近似微分方程·····	(150)
第二节 用积分法求构件的变形·····	(152)
第三节 叠加法求构件的变形·····	(159)
第四节 构件的刚度计算和提高构件的刚度的措施·····	(160)
附录 型钢规格表 ·····	(164)

第一章 绪论

第一节 概 述

随着科学技术的不断发展,新的技术学科不断出现。工科类各专业技术,对力学的需求有所不同,而设计力学是在理论力学、结构力学、材料力学等力学的基础上建立起来的新型基础理论,它不是创新,更不是新的发现,而是针对相应技术学科的需求,对三大基础力学理论的综合和改革,更具有较大的针对性和实用性。

第二节 设计力学的任务

在工业造型及艺术设计中,如构架等,用以担负预定的任务和支承荷载,由建筑材料按合理方式组成的构筑物称为结构。而这些结构又往往是由若干构件按一定几何形式组成的。

在荷载作用下,承受荷载和传递荷载的结构和构件会引起周围物体对它们的作用。同时,构件本身因受荷载作用而产生变形,并且存在着发生破坏的可能性。但结构本身具有一定的抵抗变形和抵抗破坏的能力,即具有一定的承载能力,而构件的承载能力的大小是与构件的材料性质、截面的几何尺寸和形状、受力性质、工作条件和构造情况等有关。在结构设计中,若其他条件一定时,如果构件的截面设计得过小,则结构不安全,它会因变形过大而影响正常工作,或因强度不够而遭到破坏。当构件的承载能力大于构件所受的荷载时,则要多用材料,造成浪费。因此,设计力学将讨论和研究构件在荷载或其他因素(支座移动、温度变化)作用下的主要任务,它可归纳为如下几个方面的内容:

(1) 力系的简化和平衡问题。力系是指作用在物体上的一群力。研究和分析此问题时,往往将所研究的对象视为刚体。所谓刚体,就是在任何外力作用下物体的大小和形状始终不会改变。事实上刚体是不存在的,我们知道任何物体在受到力的作用时,都将发生不同程度的变形(这种物体称为变形体),如房屋结构中的梁和柱,在受力后将产生弯曲和压缩变形。但由于在很多情况下物体的变形对于研究平衡问题的影响甚小,变形可略去不计。这样,将会大大简化对力系平衡条件问题的研究。

(2) 强度问题,即研究材料、构件和结构抵抗破坏的能力。例如,吊车起吊重物时,吊车梁可能受弯曲而断裂,在设计梁时,就要保证它在荷载作用下,正常工作情况下不会发生破坏。

(3) 刚度问题,即研究构件和结构抵抗变形的能力。例如,吊车梁或楼板梁在荷



图 1-1

载等因素作用下,虽然满足强度要求,即不致破坏,但梁的变形过大,超出所规定的范围,也会影响吊车的正常工作和使用。

(4) 稳定问题。对于比较细长的中心受压杆,如图 1-1 所示。当压力超过某一值时,杆件就不能保持直线形状,而突然从原来的直线形状变成曲线形状,改变它原来受压的工作性质而发生破坏。这种现象称为丧失稳定或简称失稳。例如,房屋承重的柱子,如果过细、过高,就可能由于柱子的失稳而导致整个房屋的突然倒塌。

(5) 研究几何组成规则。保证结构各部分不致发生相对运动。

本书只限于讨论杆和杆系结构。

第三节 荷载的分类

实际的建筑工程结构,由于其作用和工作条件的不同,作用在它们上面的力是多种多样的。如图 1-2 所示为房屋结构的楼面,楼面所受到的力有楼板的自重传给梁的力、梁本身的自重、人、家具及施工荷载的压力,以及两端砖墙或柱的支承力等。

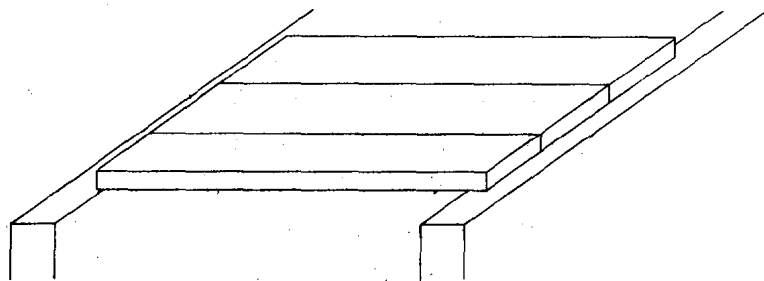


图 1-2

在设计力学中,一般把作用在物体上的力分为两种:一种是使物体运动或使物体有运动趋势的主动力,例如,重力、风压力等;另一种是阻碍物体运动的约束力,这里所谓约束,就是指能够限制某构件运动(包括移动、转动)的其他物体(如支承屋架的砖墙)。而约束作用于被约束构件上的力就称为约束力(例如,砖墙对屋架的支承力)。

通常把作用在构件上的主动力称为荷载;而把约束力称为反力。荷载与反力是互相对立又互相依存的一个矛盾的两个方面。它们都是其他物体作用在结构上的力,所以又统称为外力。在外力作用下结构内(如屋架内)各部分之间将产生相互作用的力称为内力。结构的强度和刚度问题,都直接与内力有关,而内力又是由外力所引起和确定的。在结构设计中,首先要分析和计算作用在结构上的各种外力,然后进一步计算结构中的内力。因此,确定结构所受的荷载,是进行结构受力分析的前提,必须慎重对待,计算过程中不能漏掉,也不能重复。如将荷载估计过大,则设计的结

构尺寸将偏大,造成浪费;如将荷载估计过小,则设计的结构不够安全。

在工程实际中,结构受到的荷载是多种多样的,为了便于分析,将从不同的角度,对荷载进行分类。

一、荷载按其作用在结构上的时间来分

可分为永久荷载和可变荷载两种。

为了确保构件的安全,荷载在计算过程中往往还要乘荷载系数 P_g ,通常,永久荷载系数取 1.2,可变荷载系数取 1.4。未乘荷载系数的荷载又称标准荷载;乘了荷载系数的荷载又称设计荷载。

1. 永久荷载

永久荷载是作用在结构上的不变荷载,即在结构形成以后,其大小和位置都不再发生变化的荷载。例如,构件的自重等。构件的自重可根据结构尺寸和材料的容重 (1m^3 体积的重量,单位为 N/m^3) 进行计算的。例如,截面为 $20\text{cm} \times 50\text{cm}$ 的钢筋混凝土梁,总长为 6m ,已知钢筋混凝土容重为 $25\text{N}/\text{m}^3$,则梁的标准荷载为

$$G=25 \times 0.2 \times 0.5 \times 6=15(\text{kN})$$

总重除以长度就得该梁每米长度的重量,单位为 N/m ,以符号 q 表示,即

$$q=15/6=2.5(\text{kN}/\text{m})$$

对于楼板的自重,一般以 1m^2 面积的重量来表示,例如, 10cm 厚的钢筋混凝土楼板,其标准荷载为

$$25 \times 0.1=2.5(\text{kN}/\text{m}^2)$$

就是说, 10cm 厚的钢筋混凝土楼板每 1m^2 的重量为 2.5kN ,即 2500N 。

2. 可变荷载

可变荷载是指在施工和使用期间可能作用在结构上的可以变化的荷载。所谓可变荷载,就是这种荷载有时存在、有时不存在,它们的作用位置及范围可能是固定的(如风荷载、雪荷载、教室的学生等),也可能是移动的(如吊车荷载、桥梁上行驶的车辆、会议室的人群等)。不同类型的房屋建筑,因其使用的情况不同,活荷载的大小就不相同。各种常用的活荷载,在《工业与民用建筑结构荷载规范》中都有详细规定,并以 1m^2 面积的重量来表示,例如,住宅、办公楼、托儿所、医院病房等一类民用建筑的楼面活荷载,目前规范定为 $2\text{kN}/\text{m}^2$ 。

二、荷载按其作用在结构上的分布情况来分

可分为分布荷载和集中荷载两种。

1. 分布荷载

分布荷载是指满布在结构某一表面上的荷载,又可分为均布荷载和非均布荷载两种。

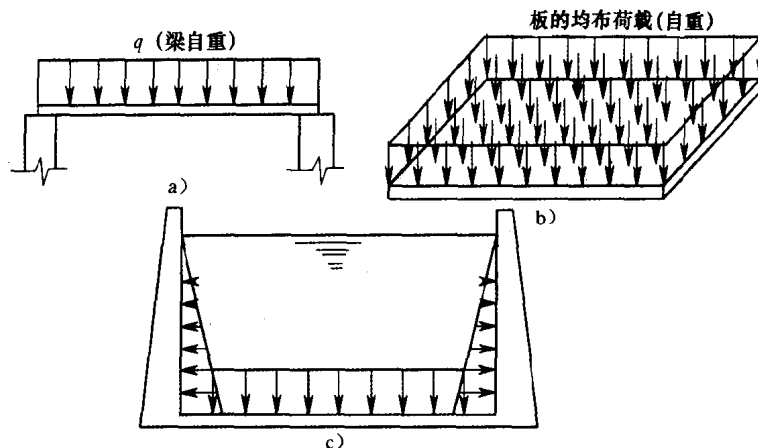


图 1-3

图 1-3a)所示为梁的自重,荷载沿梁连续作用,大小各处相同,这种荷载称为均布荷载。梁的自重是以每 1m 长度重量来表示,单位是 N/m 或 kN/m ,又称为线均布荷载。图 1-3b)所示为板的自重也是均布荷载,它是以 1m^2 面积重量来表示的,单位是 N/m^2 或 kN/m^2 ,故又称为面均布荷载。图 1-3c)所示为一水池,壁板受到水压力的作用,水压力的大小是与水的深度成正比的,这种荷载形成一个三角形的分布规律,即荷载连续作用,但大小各处不相同,故称为非均布荷载。

2. 集中荷载

集中荷载是指作用在结构上的荷载一般总是分布在一定的面积上,当分布面积远小于结构的尺寸时,则可认为此荷载是作用在结构的某一点上,称为集中荷载。如吊车的轮子对吊车梁的压力、屋架传给砖墙或柱子的压力等,都可认为是集中荷载。其单位一般用 N 或 kN 来表示。

三、荷载按其作用在结构上的性质来分

可分为静荷载和动荷载两种。

1. 静荷载

荷载从零慢慢增加至最后的确定数值后,其大小、位置和方向就不再随时间而变化,这样的荷载称为静荷载。如结构的自重、一般的活荷载等。

2. 动荷载

荷载的大小、位置、方向随时间而迅速变化的称为动荷载。在这种荷载作用下,结构产生显著的加速度,因此,必须考虑惯性力的影响。如动力机械产生的荷载、地震力等。

以上是从三种不同角度将荷载分为三类,但它们不是孤立无关的,例如,结构的自重,它既是恒载,又是分布荷载,也是静荷载。

第四节 平面结构的支座及反力

一般来说,一个结构与基础或地面联结的装置(构造形式)称为支座。其作用是把结构物与基础或地面联结起来,使结构物能稳固于地基上。不过,在以后对具体结构物进行分析时,对支座的观念应有一个较广泛的理解,当一构件支承于另一构件时,其联结处对前一构件来说也称为支座。例如,在房屋建筑中,梁或预制钢筋混凝土板支承的砖墙上,其联结处就是一种比较简单的支座形式。

在结构设计中,作用在结构上的荷载是根据设计要求和实际情况预先给定的。但结构所受的反力(约束力)却不能预先给定。因为它不但与作用在结构上的荷载有关,而且还与该结构跨度和其他物体相互联系的约束(支座)形式有关。

实际的建筑物,其结构的支座形式是多种多样的,下面分别介绍几种常见的、典型的支座及其反力的性质。

一、活动铰支座(滚轴支座)

图 1-4a)为常被采用的活动铰支座示意图。这种活动铰支座既允许结构绕铰 A 转动,又允许结构通过滚轴沿着支座垫板水平方向移动,但是限制 A 点沿支承面的垂直方向移动。当结构受到荷载作用时,只有垂直于支承面的法向反力 F ,若略去摩擦力,则反力 F 通过铰中心,这种支座常用图 1-4b)的简图表示,或者用两端铰接而本身变形略去不计的杆件即链杆来表示,一根链杆表示存在一个约束力,也就是存在一个支座反力。如图 1-4c)所示。

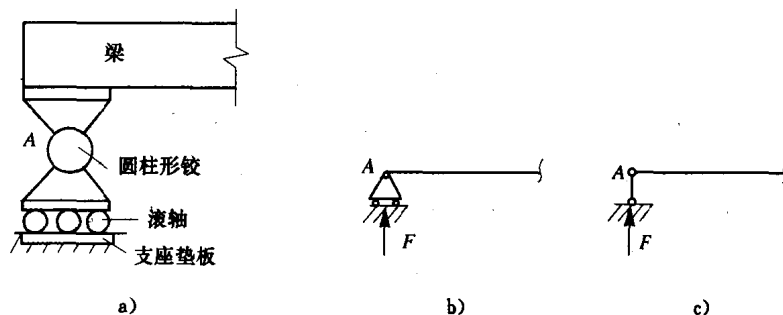


图 1-4

在房屋建筑中,常在某些构件支承处垫上沥青杉板之类的柔性材料,这样当构件受到荷载作用时,它的 A 端可以在水平方向作微小的移动,又可绕 A 点作微小的转动,这种情况也可看成是活动铰支座,如图 1-5a), b) 所示。

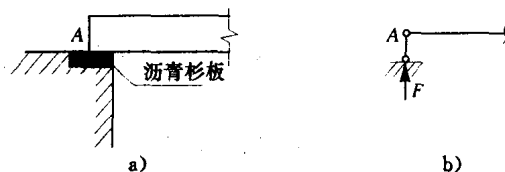


图 1-5

二、固定铰支座

图 1-6a) 为桥梁中采用的另一种支座形式的示意图。它与活动铰支座不同之处，主要是最下部没有滚轴，因而支座不会有水平移动，只允许结构绕 A 铰转动。因此，当结构受荷载作用时，这种支座在 A 点有水平反力 F_x 和竖向反力 F_y 。若略去 A 铰处的摩擦力，则反力 F_x 和 F_y 均通过铰的中心 A，这种支座形式称为固定铰支座，常用简图图 1-6b)、c) 表示。

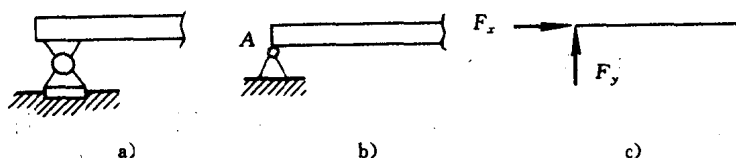


图 1-6

在工程中，由于构造要求不同，但只要它具有两个方向的约束力，也可视为固定铰支座。

三、固定支座

图 1-7a) 所示为现浇钢筋混凝土阳台，其根部在墙中现浇时，可认为根是固定在墙内，限制了阳台板的水平移动、竖向移动和转动。当结构受到荷载作用时，为了分析方便，其反力可简化为水平反力 F_x 、竖向反力 F_y 和反力矩 M ，这种支座形式称为固定支座，可用图 1-7b) 所示的简图来表示。因此，A 端可视为固定支座，用三个方向的反力来表示，其简图如图 1-7c) 所示。

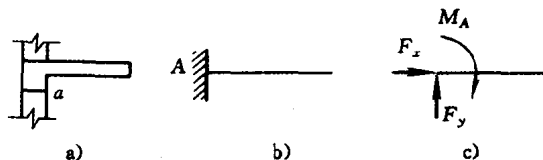


图 1-7

第五节 结构的计算简图

在实际工程中的建筑物,其结构、构造以及作用的荷载,往往是比较复杂的。结构设计时,若完全严格地按照结构的实际情况进行力学分析,会使问题变得非常复杂甚至是不可能进行计算的,也是不必要的。因此,在对实际结构进行力学分析时,有必要采用简化的图形来代替实际的结构,这种简化了图形称为结构的计算简图。

在设计力学中,是以计算简图作为力学计算的主要对象。因此,在构件设计中如果计算简图取错了,就会出现设计差错,甚至造成严重的工程事故。所以,正确选取计算简图是一项十分重要的工作,必须引起足够的重视。

在选取结构的计算简图时,一般来说应遵循如下两个原则:

- (1) 既要忽略次要因素,又要尽可能地反映结构的主要受力情况;
- (2) 计算简图应使计算工作尽量简化,而计算结果又要有足够的精确性。

在上述两个原则的前提下,对实际结构主要从三个方面进行简化。

一、杆件及杆与杆之间的连接构造的简化

由于杆件的截面尺寸通常比杆件的长度小得多,在计算简图中,杆件用其纵轴线来表示,如梁、柱等构件的纵轴线为直线,就用相应的直线来表示。又如曲杆的纵轴线为曲线,则用相应的曲线来表示。

在结构中杆件与杆件相连接的地方称为结点(或节点)。尽管各杆之间连接的形式有各种各样,特别是材料不同,连接方式也有多种多样,但在计算简图中,只简化为两种理想的连接方式,即铰结点和刚结点。

铰结点的特征是各杆可以绕结点中心自由转动。用理想铰来连接杆件的例子在实际工程结构中是极少的,但从结点的构造来分析,把它们近似地看成铰结点所造成的误差并不显著。如图 1-8a)所示为一木屋架的结点构造图,可认为各杆之间有微小的转动,其杆与杆之间的连接可简化为铰结点,用图 1-8b)表示。又如图 1-9a)所示为木结构或钢筋混凝土梁中经常采用的一种连接方式,计算时也可简化为铰结点,其简图如图 1-9b)所示。

刚性结点的连接方式,在钢筋混凝土结构中是经常采用的。如图 1-10a)所示为钢筋混凝土框架,柱和梁是刚性连接,其特征是当结构发生变形时,结点处各杆端之间夹角保持不变。其中,结点 A 钢筋的布置示意图如图 1-10b)所示。

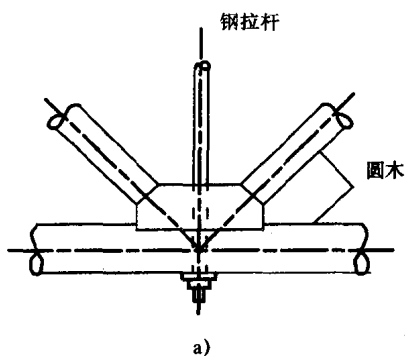


图 1-8

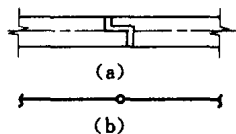
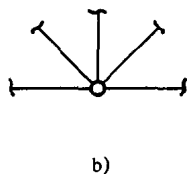


图 1-9

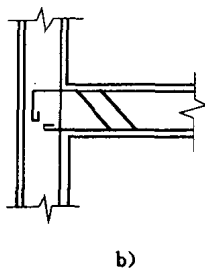
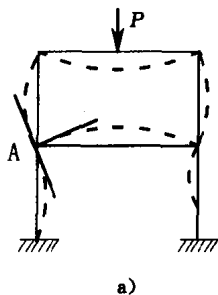


图 1-10

二、支座的简化

支座可根据实际构造和约束的情况,对照上一节所述的内容进行简化。

三、荷载的简化

关于荷载的简化已在本章第二节中讨论过,实际结构构件受到的荷载,一般是作用在构件内各处的体荷载(如自重),以及作用在某一面积上的面荷载(如风压力)。在计算简图中,把它们简化到作用在构件纵轴线上的线荷载、集中荷载和力偶。

下面通过一个简单的实例来说明结构计算简图的取法。

图 1-11a), b) 所示为工业建筑厂房内的组合式吊车梁,上弦为钢筋混凝土 T 形截面的梁,下面的杆件由角钢和钢板组成,结点处为焊接。梁上铺设钢轨,吊车在钢轨上左右移动,最大轮压 $P_1 = P_2$, 吊车梁两端由柱子上的牛腿支承。从上述三个方面来考虑选取其计算简图。

1. 杆件及其相互连接的简化

各杆由其纵轴线来代替,上弦是整体的钢筋混凝土梁,其截面较大,故 AB 为一连续杆,而其他杆件与 AB 杆相比截面均较小,它们基本上只承受轴力,即视为链杆。 AE, BF, EF, CE 和 DF 各杆之间连接均简化为铰接,其中, C, D 铰连在 A, B 梁的下方。

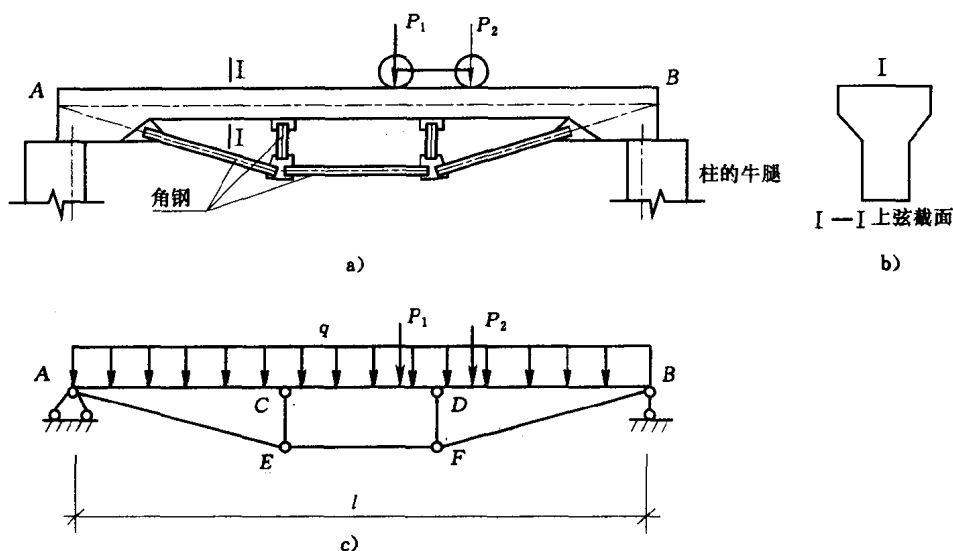


图 1-11

2. 支座的简化

整个吊车梁搁置在柱的牛腿上,相互之间仅由较短的焊缝连接,吊车梁既不能上下移动,也不能水平移动,但梁受到荷载后,梁的两端可以作微小的转动。此外,当温度变化时,梁还可以自由伸缩,为便于计算又考虑到支座的反力情况,将支座简化成一端为固定铰支座,另一端为活动铰支座。又吊车梁的两端与柱子牛腿支承接触面的长度较小,可取梁两端的柱子牛腿接触面中心的间距即两支座间的水平距离作为梁的计算跨度 l 。

3. 荷载的简化

作用在整个吊车梁上的荷载有恒载和活荷载两种。恒载包括钢轨、梁自重,可简化为作用在沿纵轴线上的均布荷载 q ,活荷载是轮压 P_1 和 P_2 ,由于轮子与钢轨的接触面积很小,可简化为分别作用在两点上的集中荷载。

综合以上所述,吊车梁的计算简图如图 1-11c) 所示。

怎样才能恰当地选取实际结构的计算简图是结构设计中比较复杂的问题。这不仅要掌握上面所述的两个基本原则和方法,而且需要有较多的实践经验。对于一些新型结构往往还要通过反复试验和实践,才能获得比较合理的计算简图。必须指出,由于结构的重要性、设计的阶段、计算问题的性质和计算工具的不同,即使是同一结构也可以取不同的计算简图。在一般情况下遵循以下原则来选取计算简图:

- (1) 对于重要的结构,应该选取比较精确的计算简图;
- (2) 初步设计阶段可选取粗略的计算简图,在技术设计阶段则应该选取比较精确的计算简图;
- (3) 对结构进行静力计算时,应该选取比较复杂的计算简图,而对结构作动力稳

定计算时,由于问题比较复杂,可以选择比较简单的计算简图;

(4) 结构的设计计算,随着电子计算机的广泛应用,可采用较精确的计算简图。

第六节 杆系结构的分类

由上一节所述可知,建筑力学研究的直接对象并不是实际的结构物,而是代表实际结构的计算简图。因此,所谓结构的分类,也就是指对计算简图的分类。

根据不同的观点,结构可分为各种不同类型,这里只介绍两种最常用分类方法。

按照空间观点,结构可分为平面结构和空间结构两种。组成结构的所有杆件的轴线和作用在结构上的荷载都在同一平面内,则此结构为平面结构,又称平面杆系结构。反之,如果组成结构的所有杆件的轴线或荷载不在同一平面内的结构称为空间结构。实际工程中的结构都是空间结构,但大多数结构在设计中是被分解为平面结构来计算的。不过在有些情况下,必须考虑结构的空間作用。

本书仅研究和讨论平面杆系结构,其常见的形式有下列几种。

一、梁

梁是一种常见的结构,其轴线常为直线,是受弯杆件,有单跨和多跨连续的形式,如图 1-12 所示。

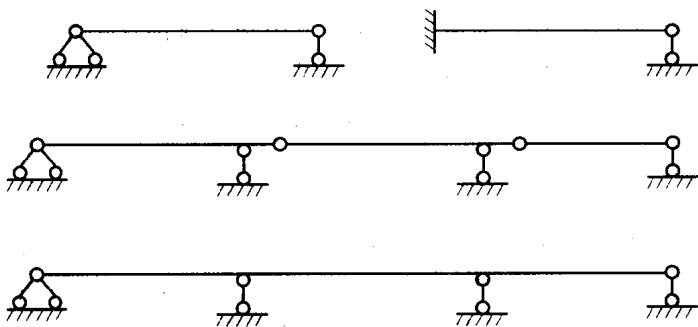


图 1-12

二、刚架

刚架是由直杆组成,各杆主要受弯曲变形,结点大多数是刚性结点,也可以有部分铰结点,如图 1-13 所示。

三、拱

拱的轴线是曲线,在竖向荷载作用下,不仅产生竖向反力,而且还产生水平反力。在一定条件下可以使拱以压缩变形为主,使拱的各截面主要产生轴力,如图 1-14 所示。大量的石拱桥,都是这种形式。

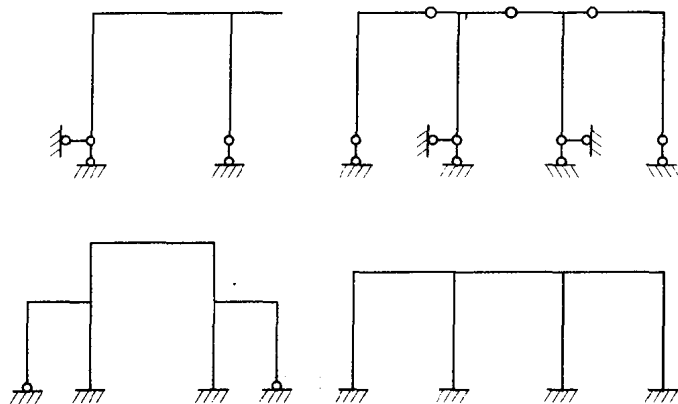


图 1-13

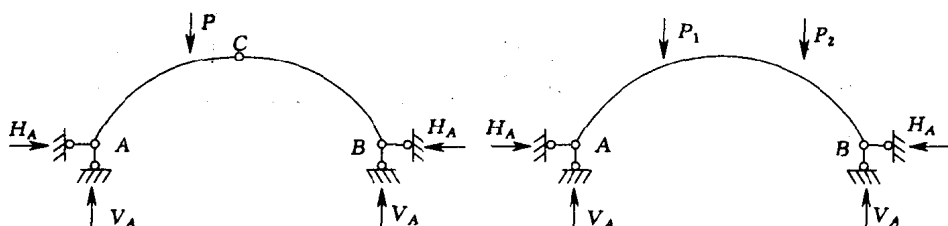


图 1-14

又如图 1-15 为北京崇文门菜市场的建筑结构计算简图。中间是拱形结构，跨度为 32m，其水平力和竖向力由两边的框架结构承受。

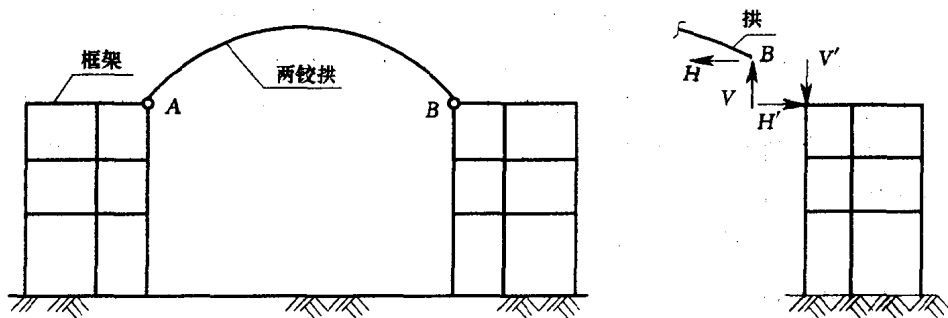


图 1-15

四、桁架

桁架由直杆组成，各结点假设为理想铰结点，荷载作用在结点，各杆只产生轴力。

图 1-16 为常用的桁架。

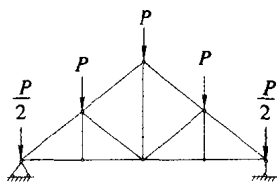


图 1-16

五、组合结构

这种结构中,一部分是桁架杆件只承受轴力,另一部分是梁或刚架杆件,即受弯杆件,由二者组合而成的结构,称为组合结构,如图 1-17 所示。

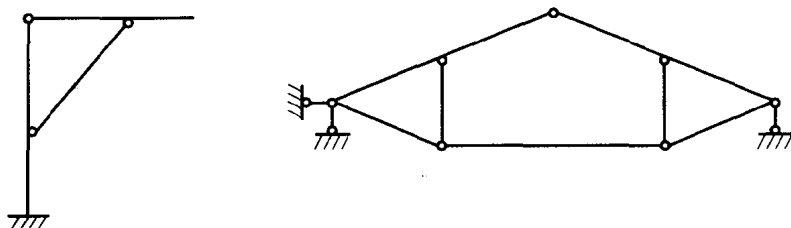


图 1-17

以上五种类型的杆系结构,将分别在以后的各章中作详细的介绍。

第七节 变形固体及其基本假设

构件所用的材料虽然在物理性质方面是多种多样的,但他们的共同点是在外力作用下均会发生变形。为解决构件的强度、刚度、稳定性的问题,需要研究构件在外力作用下的内效应——内力、应力、变形、应变能等。这些内效应又与构件材料的变形有关。因此,在研究构件的强度、刚度、稳定性问题时,不能将物体看作为刚体,而应将组成构件的固体材料视为可变形固体。在进行理论分析时,为使问题得到简化,对材料的性质作如下的基本假设。

一、连续性假设

认为在材料体积内部充满了物质,密实而无孔隙。在此假设下,物体内的一些物理量才能用坐标的连续函数表示它们的变化规律。实际可变形固体内部不同程度地存在着气孔、杂质等缺陷,但其与构件尺寸相比极为微小,可忽略不计。

二、均匀性假设

认为材料内部各部分的力学性能是完全相同的。所以在研究构件时,可取构件