



“十二五”江苏省高等学校重点教材

Structural Mechanics

结构力学

主 编 王振波 乔 燕 马 林
主 审 张金生 周广春

中国建材工业出版社

“十二五”江苏省高等学校重点教材（编号：2013-2-048）

结 构 力 学

主 编 王振波 乔 燕 马 林
主 审 张金生 周广春

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/王振波, 乔燕, 马林主编. —北京:
中国建材工业出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-5160-0776-1

I. ①结… II. ①王… ②乔… ③马… III. ①结构力学—高等学校—教材 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 044534 号

内 容 简 介

本书是“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号: 2013-2-048)。

本书共 12 章, 主要内容包括绪论, 平面体系的几何组成分析, 静定结构的受力分析, 静定结构的影响线, 虚功原理和结构的位移计算, 力法, 位移法, 力矩分配法, 矩阵位移法, 结构的极限荷载, 结构的稳定计算, 结构的动力计算。其中第 1~8 章为基本内容, 第 9~12 章为专题内容, 各院校可根据具体情况选学, 一般需安排约 120 学时。

本书适合作为普通高校应用型本科土木类(包括建筑工程、交通工程及工程管理等)专业以及水利工程、港口航道工程等相近专业教材, 也可供上述专业的广大工程技术人员参考。

结构力学

主 编 王振波 乔 燕 马 林
主 审 张金生 周广春

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 21.5

字 数: 532 千字

版 次: 2014 年 6 月第 1 版

印 次: 2014 年 6 月第 1 次

定 价: **49.00 元**

本社网址: www.jccbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

结构力学是土木工程专业的一门重要的专业基础课，主要内容包括绪论，平面体系的几何组成分析，静定结构的受力分析，静定结构的影响线，虚功原理和结构的位移计算，力法，位移法，力矩分配法，矩阵位移法，结构的极限荷载，结构的稳定计算，结构的动力计算。其中第1~8章为基本内容，第9~12章为专题内容，各院校可根据具体情况选学，一般需安排约120学时。不同专业可根据专业的需要酌情取舍，每章均配备精选的习题和小结，对活跃思维、启发思考，加深对基本概念理解，掌握基本的运算技能具有重要作用。

本书内容精练，通俗易懂，便于自学，既重视基本概念、基本原理的讲解和基本方法的训练，又注重理论知识与后续课程及工程应用背景的结合，力求保持结构力学基本理论的系统性、内容的先进性，并适当地掌握内容的深度和广度，由浅入深、注意培养学生的解题能力及方便教学。

本书适合作为普通高校应用型本科土木类（包括建筑工程、交通工程及工程管理等）专业以及水利工程、港口航道工程等相近专业教材，也可供上述专业的广大工程技术人员参考。

本书由王振波、乔燕、马林主编，张金生、周广春主审。编写分工如下：乔燕（第1、2章），王振波（第3、5章），于晓明（第4、6章），马林、李洁（第7、8、9章），生涛、陈旭阳（第10、11、12章）。

在本书编写过程中吸取了目前结构力学教材中适合普通高等院校特点的内容，在此对这些教材的作者表示衷心的感谢。由于水平有限，书中可能存在一些疏漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2014.5

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1-1 结构力学的研究对象、基本任务和学习方法	1
§ 1-2 结构的计算简图	3
§ 1-3 杆系结构的分类	9
§ 1-4 荷载的分类	11
§ 1-5 小结	12
第 2 章 平面体系的几何组成分析	13
§ 2-1 概述	13
§ 2-2 平面杆件体系的自由度和约束	13
§ 2-3 几何不变体系的基本组成规则	18
§ 2-4 几何组成分析举例	21
§ 2-5 静定结构与超静定结构	25
§ 2-6 小结	26
习题	27
第 3 章 静定结构的受力分析	30
§ 3-1 静定梁	30
§ 3-2 静定平面刚架	38
§ 3-3 静定平面桁架	43
§ 3-4 三铰拱	49
§ 3-5 静定组合结构	55
§ 3-6 小结	57
习题	58
第 4 章 静定结构的影响线	64
§ 4-1 影响线的概念	64
§ 4-2 静定梁的影响线	65
§ 4-3 结点荷载作用下梁的影响线	72
§ 4-4 影响线的应用	74
§ 4-5 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	81
§ 4-6 小结	86
习题	88

第5章 虚功原理和结构的位移计算	91
§5-1 概述	91
§5-2 实功与虚功	91
§5-3 变形体的虚功原理	92
§5-4 单位荷载法	94
§5-5 图乘法	98
§5-6 静定结构在非荷载因素作用下的位移计算	103
§5-7 线弹性体系的互等定理	108
§5-8 小结	110
习题	112
第6章 力法	115
§6-1 超静定结构的概念和超静定次数的确定	115
§6-2 力法的基本原理与基本方程	117
§6-3 力法解超静定结构	120
§6-4 对称结构的计算	127
§6-5 温度改变和支座移动时超静定结构的内力计算	132
§6-6 超静定结构的位移计算	137
§6-7 小结	139
习题	141
第7章 位移法	144
§7-1 位移法的基本概念	144
§7-2 位移法的基本未知量和基本结构	144
§7-3 等截面直杆的杆端内力	146
§7-4 位移法的基本方程	149
§7-5 位移法解梁和刚架	151
§7-6 对称性的利用	160
§7-7 支座位移和温度变化时的位移法计算	167
§7-8 小结	171
习题	173
第8章 力矩分配法	176
§8-1 力矩分配法的基本概念	176
§8-2 力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	178
§8-3 无剪力分配法	186
§8-4 小结	191
习题	192

第 9 章 矩阵位移法	195
§ 9-1 概述	195
§ 9-2 单元刚度分析	197
§ 9-3 坐标变换	200
§ 9-4 结构的整体刚度分析	203
§ 9-5 等效结点荷载	207
§ 9-6 先处理法解梁和刚架	209
§ 9-7 小结	219
习题	222
第 10 章 结构的极限荷载	225
§ 10-1 概述	225
§ 10-2 极限弯矩、塑性铰和破坏机构	226
§ 10-3 极限荷载	230
§ 10-4 比例加载时判定极限荷载的一般定理	237
* § 10-5 刚架的极限荷载	244
§ 10-6 小结	251
习题	252
第 11 章 结构的稳定计算	255
§ 11-1 概述	255
§ 11-2 用静力法确定临界荷载	258
§ 11-3 用能量法确定临界荷载	266
§ 11-4 组合压杆的稳定	274
§ 11-5 刚架的稳定	280
§ 11-6 小结	287
习题	288
第 12 章 结构的动力计算	292
§ 12-1 概述	292
§ 12-2 单自由度体系的自由振动	295
§ 12-3 单自由度体系有阻尼的自由振动	299
§ 12-4 单自由度体系的强迫振动	303
§ 12-5 两个自由度体系的自由振动	308
§ 12-6 多自由度体系的自由振动	315
§ 12-7 小结	319
习题	322
习题参考答案	326
参考文献	335

第1章 绪 论

§1-1 结构力学的研究对象、基本任务和学习方法

在土建、交通和水利工程中，支承和传递荷载而起骨架作用的部分称为工程结构，简称结构。图 1-1 所示为工程结构实例：结构通常是由许多构件连接而成，如杆、柱、梁、板、壳等。

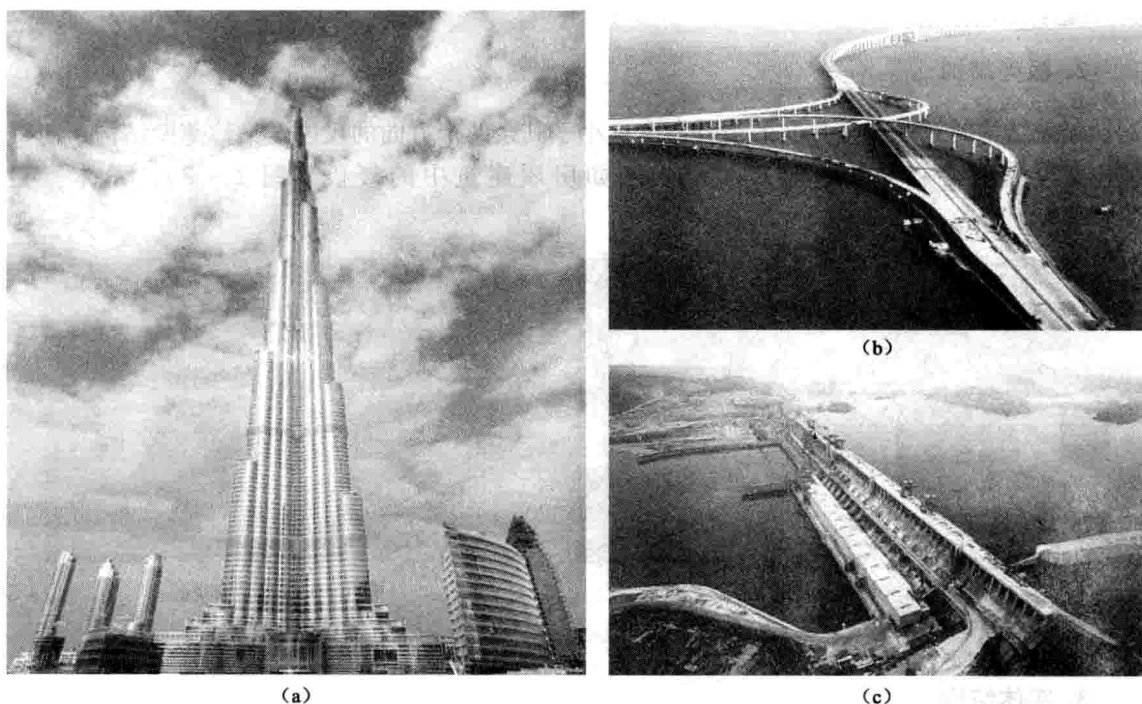


图 1-1 工程结构实例

图 (a) 为高层建筑结构 (哈利法塔, 世界第一高楼, 160 层, 总高 828m, 比台北 101 大楼高出 320m。2004 年 9 月 21 日开始动工, 2010 年 1 月 4 日竣工启用); 图 (b) 为桥梁结构 (胶州湾跨海大桥, 全长 41.58km, 投资 100 亿元人民币, 历时 4 年, 是当今世界上最长的跨海大桥。大桥于 2011 年 6 月 30 日全线通车); 图 (c) 为水利工程结构 (三峡大坝, 是世界第一大水电工程, 工程总投资为 954.6 亿元人民币。于 1994 年 12 月 14 日正式动工修建, 2006 年 5 月 20 日全部建成)

结构的类型是多种多样的, 结构的受力特性和承载能力与结构的几何特征关系密切。结构按其构件的几何特征可分为以下三种类型:

1. 杆系结构

杆系结构是由若干个杆件相互连接而组成的结构。杆系结构的几何特征是杆件的长度远

大于其横截面上两个方向的几何尺度。梁、拱、刚架、桁架等都是杆系结构的典型形式，例如钢结构厂房（图 1-2）。杆系结构又可分为平面杆系结构和空间杆系结构。

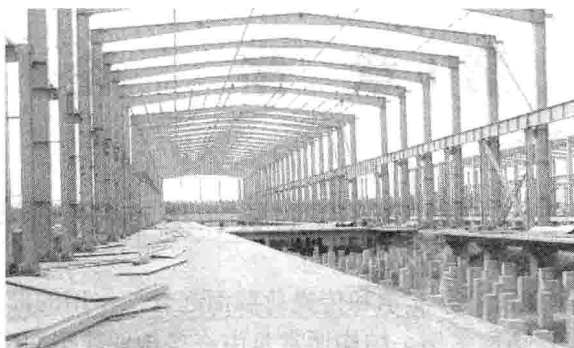


图 1-2 钢结构厂房

2. 板壳结构

板壳结构的几何特征是它的构件厚度远小于其余两个方向的尺度，又称薄壁结构。薄壁结构又可分为薄板结构和薄壳结构。例如房屋建筑中的楼板（图 1-3）、壳体屋盖（图 1-4）等。



图 1-3 地下室顶板

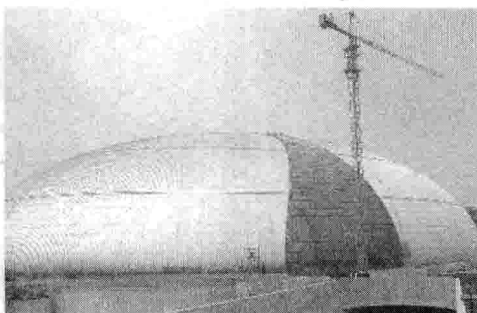


图 1-4 国家大剧院

3. 实体结构

实体结构的几何特征是构件的三个方向的尺度大约为同一量级的结构，例如重力式挡土墙、堤坝（图 1-1c）等。

结构力学是土木工程类专业的一门重要的专业基础课，与先修的理论力学、材料力学以及后继的弹、塑性力学之间有着密切的联系。材料力学主要是研究材料和单根杆件的强度、刚度和稳定性的计算；而结构力学是以杆系结构为主要研究对象；弹、塑性力学则是以板壳结构和实体结构为主要研究对象。

结构力学是研究结构的合理形式及结构在受力状态下的内力、变形、动力响应和稳定性等方面的计算原理和计算方法。研究的目的是使结构满足安全性、适用性和经济性的要求。具体地说，结构力学的基本任务主要包括以下几个方面：

① 研究结构的几何组成规则,探讨结构的合理形式,以便有效地利用材料,充分发挥其性能。

② 计算结构在荷载、温度变化、支座移动等外部因素作用下的内力、变形和位移,为结构的强度和刚度计算提供依据,以保证结构满足安全、经济和适用的要求。

③ 计算结构的稳定性,确定结构丧失稳定性的最小临界荷载,以保证结构处于稳定的平衡状态而正常工作。

④ 研究结构在动力荷载作用下的动力特性,为结构抗震设计提供理论基础。

结构力学的学习,一方面要用到高等数学、理论力学和材料力学等课程的知识,另一方面又为钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构、桥梁结构等后继专业课程的学习提供必要的基本理论和计算方法。结构力学在房建、水利、交通及地下工程等专业的学习中占有重要的地位。

学习结构力学课程时要注意它与先修课程的联系。对先修课的知识,应当根据情况进行必要的复习,并在运用中得到巩固和提高。只有牢固地掌握结构力学课程所涉及的基本理论和计算方法,才能为后继课程的学习打下坚实的基础。因此,学习结构力学时应特别注重分析能力、计算能力、自学能力和表达能力的培养。

① 分析能力:合理选择结构计算简图,对结构的受力、变形和位移进行分析,选择恰当计算方法的能力。

② 计算能力:对各种结构进行计算和使用结构计算程序进行校核的能力。

③ 自学能力:吸收、消化、运用和拓展相关知识的能力。

④ 表达能力:表述问题条理清晰、内容简洁、图文并茂和计算准确的能力。

学习结构力学课程必须坚持理论与实践相结合的原则。在参观、实习及日常生活中,要留心观察实际结构的构造,分析结构的受力特点,思考如何利用所学习的理论知识解决实际结构的力学问题。只有理论联系实际,才能深刻理解、掌握书本知识,为将来应用所学知识解决实际工程问题做好铺垫。

做习题是学好结构力学课程的重要环节之一,只有高质量地完成足够数量的习题,才能掌握和理解相关的概念、原理和方法。

§1-2 结构的计算简图

在结构设计中,需要对实际结构进行力学分析。由于实际结构的组成、受力和变形情况复杂,要完全按照结构的实际情况进行力学分析,通常很困难,也是不必要的。因此,在对实际结构进行力学分析时,应抓住结构基本的、主要的特征和能反映实际结构受力情况的主要因素,忽略一些次要因素,对实际结构进行抽象和简化。这种既能反映真实结构的主要特征,又便于计算的模型称为计算简图。

由于计算简图的选取直接关系到计算精度和计算工作量的大小,因此在选取计算简图时,可根据具体情况和不同要求,对于同一实际结构可选取不同的计算简图。例如:对结构的静力计算,由于计算较简单,可选取比较精确的计算简图;对结构的动力计算,由于计算较复杂,可选取较为简单的计算简图;在初步设计阶段可选取较为粗略的计算简图,在施工图设计阶段可选取较为精细的计算简图;采用手算时可选取较为简明的计算简图,采用电算

时可选取较为复杂的计算简图。

将实际结构简化为计算简图，通常包括以下几方面的工作。

1. 结构体系的简化

实际结构一般都是空间结构，各部分相互连接形成一个整体，以承受各种荷载作用。对空间结构进行力学分析往往比较复杂，工作量较大。在一定条件下，可抓住实际结构受力情况的主要因素，略去次要因素，将其分解简化为平面结构，使计算得到简化。在本书中主要以平面杆系结构为研究对象。

2. 杆件的简化

杆系结构中的杆件，在计算简图中可以用杆件的轴线来表示，用各杆轴线相互连接构成的几何图形代替真实结构。

3. 结点的简化

在杆系结构中，杆件间相互连接的部分称为结点。根据结构的受力特点和结点的构造情况，结点的计算简图常简化为以下两种类型：

(1) 铰结点

铰结点的特征是汇交于结点的各杆端不能相对移动，但它所连接的各杆可以绕铰自由转动。理想的铰结点在实际结构中是很难实现的，结点处各杆件并不能完全自由地转动，但是由于杆件间的连接对于相对转动的约束作用不强，受力时杆件发生微小的相对转动还是可能的，因此，这时该结点可近似视为铰结点。图 1-5 表示一个木屋架的结点构造和它的计算简图，图 1-6 表示一个钢桁架的结点构造和它的计算简图。

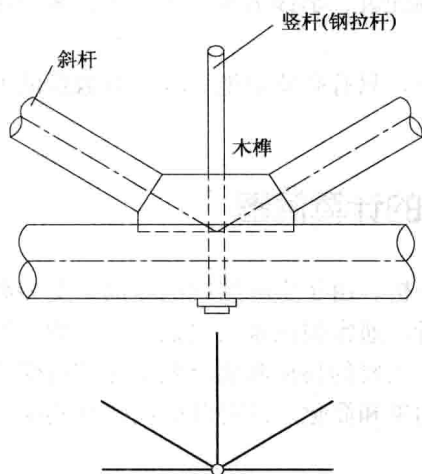


图 1-5 木屋架结点构造与计算简图

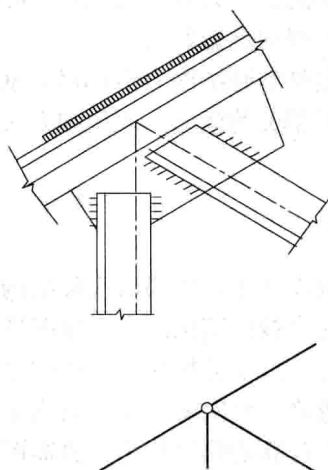


图 1-6 钢桁架结点构造与计算简图

(2) 刚结点

刚结点的特征是结点处所连接的各杆端不能相对移动，也不能相对转动，即结点处的各杆件之间的夹角在结构变形后不会改变。

图 1-7 所示为一钢筋混凝土框架结点构造与计算简图。横梁的受力钢筋伸入柱内锚固，二者整体浇筑，该结点不仅可以传递力，而且可以传递弯矩，因此简化为刚结点。

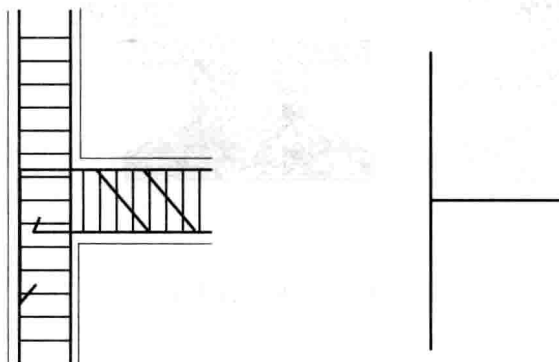


图 1-7 钢筋混凝土框架结点构造与计算简图

4. 支座的简化

把结构与基础或其他支承物连接起来的装置称为支座。平面杆系结构的支座通常简化为以下几种形式：

(1) 可动铰支座

可动铰支座的特征是被支承的结构物既可以绕铰中心转动，也可以沿支承面移动，但不能沿垂直于支承面方向移动。桥梁结构中所用的摇轴支座（图 1-8a）和辊轴支座（图 1-8b）都是可动铰支座，其计算简图可用图（1-8c）来表示，支座反力的作用点和作用线均为已知，只有大小未知，可用力 Y 表示。

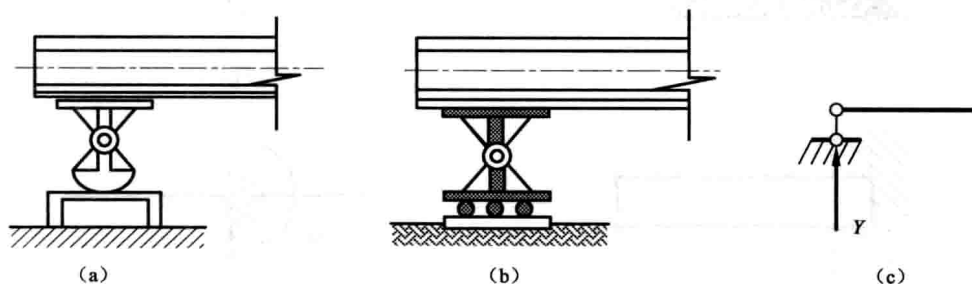


图 1-8 可动铰支座

(2) 固定铰支座

固定铰支座的特征是被支承的结构可以绕铰中心转动，但不可以沿任何方向移动。图 1-9a 所示为结构施工过程中连接撑杆和基础的装置，为一固定铰支座。图 1-9b 为插入杯形基础的混凝土预制柱，杯口内用沥青麻刀填实，柱端可以做微小转动，柱下端杯口连接处可视为固定铰支座。固定铰支座的计算简图如图 1-9c 所示，其支座反力通常可用水平反力 X 和竖向反力 Y 来表示。

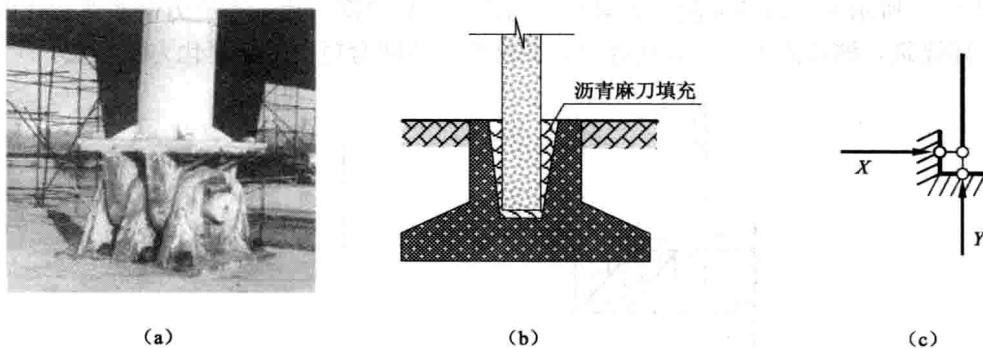


图 1-9 固定铰支座

(3) 固定支座

固定支座的特征是在支承处被支承的结构既不能发生移动，也不能发生转动。图 1-10a 所示为插入杯形基础的混凝土预制柱，杯口内用细石混凝土填充，柱端不能移动和转动，柱下端杯口连接处可视为固定支座。它的计算简图如图 1-10b 所示，其支座反力通常可用水平反力 X 和竖向反力 Y ，反力矩 M 来表示。图 1-10c 所示为一悬臂梁，当梁端插入墙体一定深度时，梁端约束可视为固定支座，其计算简图与支座反力如图 1-10d 所示。

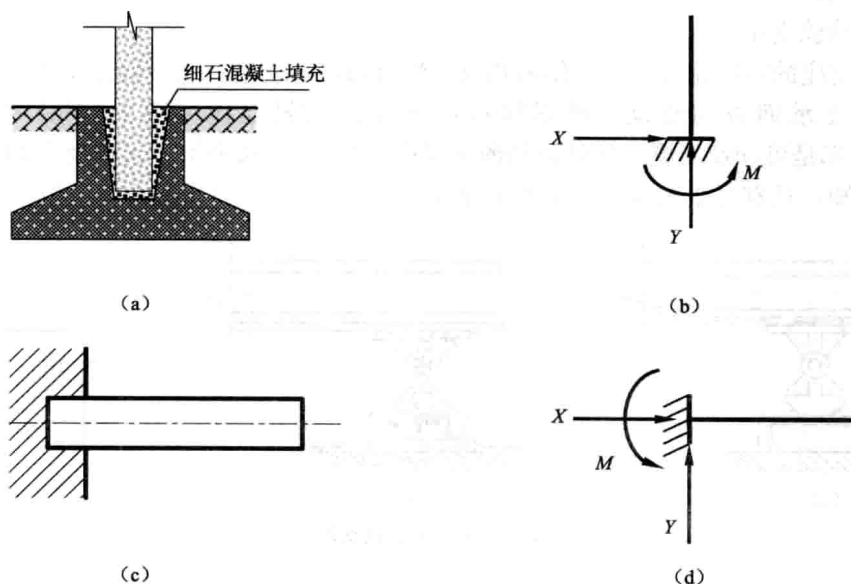


图 1-10 固定支座

(4) 定向支座

定向支座又称滑动支座，它的特征是允许被支承的结构沿支承面移动但不允许有垂直于支承面的移动和绕支承端的转动。定向支座的构造如图 1-11a 所示，其计算简图与支座反力如图 1-11b 所示。

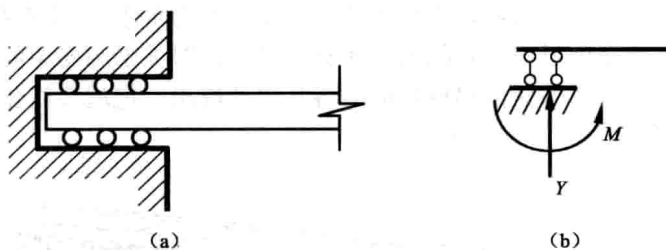


图 1-11 定向支座

上述四种支座，均假设支座本身是不变形的，计算简图中的支杆也被视为不能变形的刚性链杆，这类支座称为刚性支座。

(5) 弹性支座

若要考虑支座本身的变形，则这类支座称为弹性支座。图 1-12a 所示的桥面结构计算简图，桥面板上的荷载通过纵梁传给横梁，然后由横梁传给主梁，最后由主梁传给桥墩。在荷载传递过程中，横梁起支承纵梁作用，横梁将产生弯曲变形而引起竖向位移，此时横梁相当于一个弹簧，它具有抵抗纵梁移动的能力，故计算纵梁时把横梁对它的约束简化为弹性支座，如图 1-12b 所示。

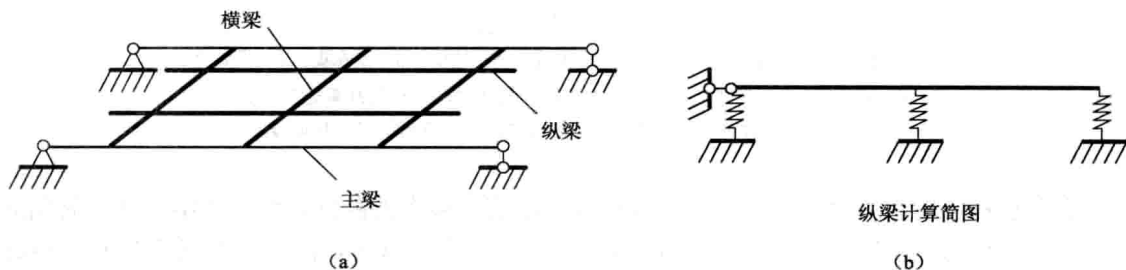


图 1-12 弹性支座

5. 荷载的简化

作用在结构上的外力，包括荷载和约束反力，可以分为体积力和表面力两大类。体积力是指自重和惯性力等分布在结构内的作用力；表面力是指风压力、水压力和车辆的轮压力等分布在结构表面上的作用力。不管是体积力还是表面力都可以简化为作用在杆轴线上的力（图 1-13）。根据外力的分布情况，这些力一般可以简化为集中荷载、集中力偶和分布荷载。

下面举例说明结构计算简图的选取。

图 1-14 所示为单层厂房结构组成示意图，根据结构受力特点，抓住结构的主要因素，略去次要因素，可将空间结构体系简化

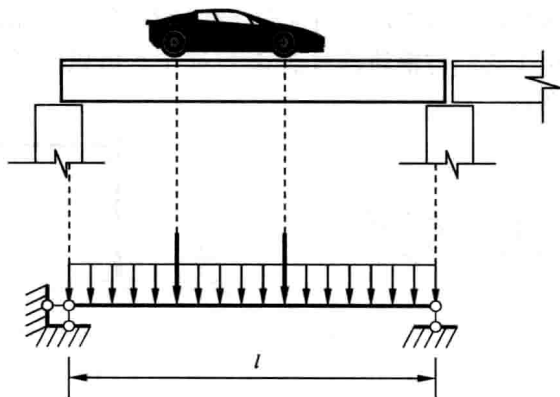


图 1-13 桥梁上的荷载简化

为平面结构体系。沿厂房的横向，柱子与屋架之间通过预埋钢板，吊装就位后焊接在一起，不能相互移动，但不能完全阻止二者间发生相对转动，此时柱子与屋架间的连接可视为铰结点，计算屋架内力时，可忽略其传递柱顶剪力将其单独取出，把屋架简化为两端铰支的平面理想桁架，计算简图如图 1-15a 所示。

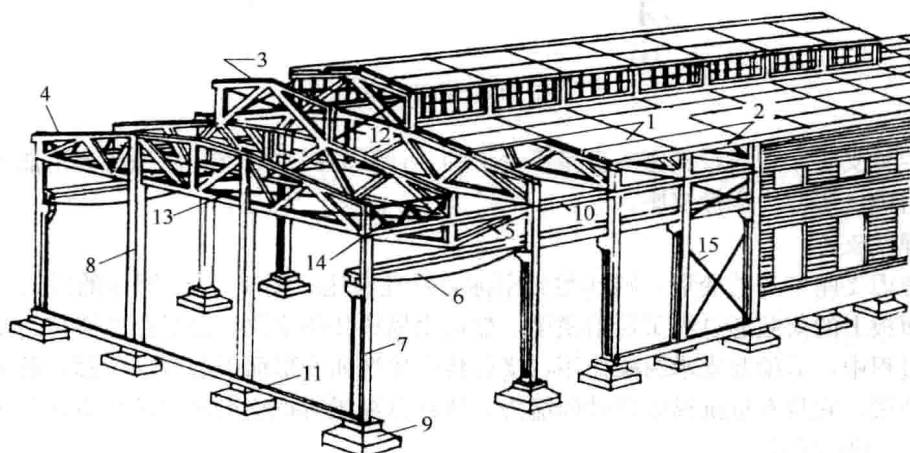


图 1-14 单层厂房结构组成

- 1—屋面板；2—天沟板；3—天窗架；4—屋架；5—托架；6—吊车梁；7—排架柱；
8—抗风柱；9—基础；10—连系梁；11—基础梁；12—天窗架垂直支承；
13—屋架下弦横向水平支承；14—屋架端部垂直支承；15—柱间支承

在分析柱子的内力时，屋架可视为连接柱端刚度无限大的链杆，柱顶铰结，计算简图如图 1-15b 所示，这种结构体系工程上称为排架。沿厂房的纵向，由于吊车梁支承在单阶柱上，梁上铺设钢轨，可将吊车荷载引起的轮压、钢轨和梁的自重及支座反力一起简化到梁轴线所在的平面内，以梁的轴线代替吊车梁。由于梁的两端搁置在柱子上，整个梁既不能上下移动，也不能水平移动，当承受荷载而微弯时，梁的两端可以发生微小的转动，当温度变化时，梁还能自由伸缩；为了反映上述支座对梁的约束作用，可将梁的一端简化为固定铰支座，另一端简化为可动铰支座。钢轨和梁的自重是作用在梁轴线上的恒荷载，它们沿梁的轴线是均匀分布的，可简化为作用在梁轴线上的均布线荷载。吊车荷载引起的轮压是活荷载，由于它们与钢轨的接触面积很小，可以简化为集中荷载，吊车梁的计算简图如图 1-15c 所示。

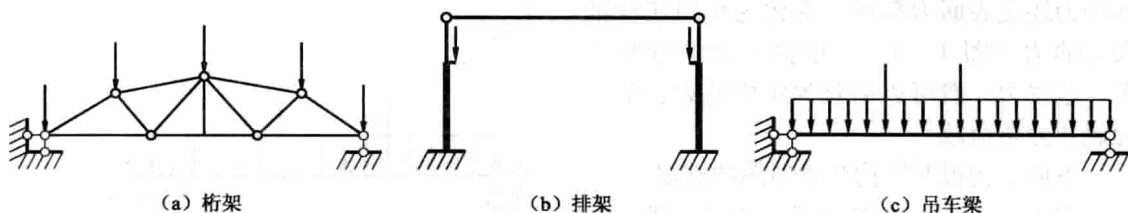


图 1-15 计算简图

§1-3 杆系结构的分类

平面杆系结构是本书的主要研究对象，根据其组成特征和受力特点，通常可将其分为以下五种类型：

1. 梁

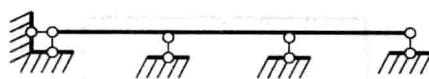
梁是一种受弯构件，它的轴线通常为直线，其变形主要以弯曲变形为主。梁有单跨梁和多跨梁（图 1-16）。



(a)



(b)



(c)

图 1-16 梁

2. 拱

拱的轴线一般为曲线，拱在竖向荷载作用下支座处会产生水平推力，由此可以减小拱截面内的弯矩（图 1-17）。



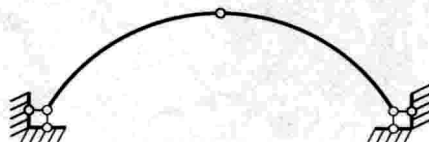
(a)



(b)



(c)

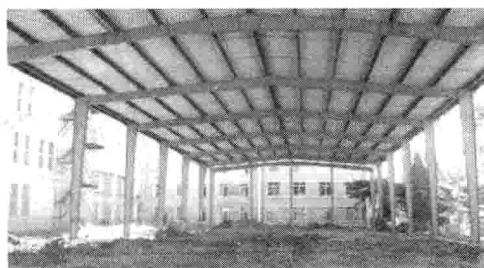


(d)

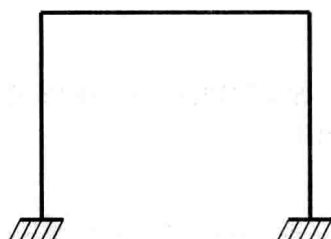
图 1-17 拱

3. 刚架

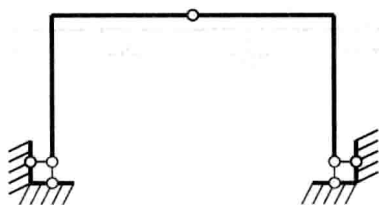
刚架中的杆件通常由直杆组成，刚架的结点主要是刚结点，也可以有部分铰结点。刚架中各杆以弯曲变形为主（图 1-18）。



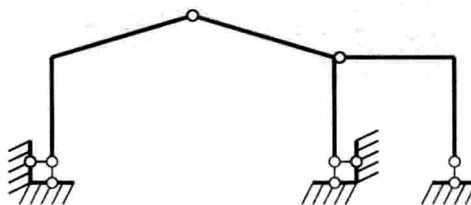
(a)



(b)



(c)

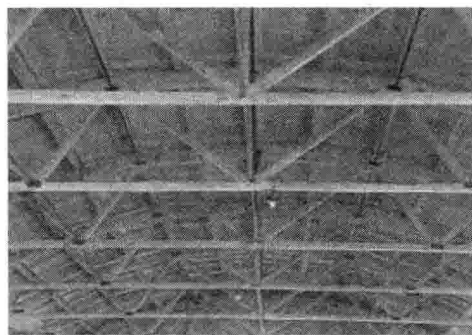


(d)

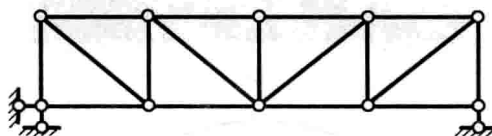
图 1-18 刚架

4. 桁架

桁架由直杆组成，各结点均为铰结点（图 1-19）。当桁架承受结点荷载时，各杆件内只产生轴力。



(a)



(b)

图 1-19 桁架