

—— 高等学校教材 ——

结 构 力 学

上 册

龙驭球 包世华合编

高 等 教 育 出 版 社

高等学校教材



结 构 力 学

上 册

龙驭球 包世华合编

高等教育出版社

本书是为河川枢纽及水电站建筑等专业编写的，编写时力图贯彻“少而精”原则，注意加强基本内容的阐述。

全书分上下二册，上册内容主要为静定结构的内力和位移的计算，下册为超静定结构的内力计算（主要介绍力法、位移法和力矩分配法等三种方法），并对结构的稳定及动力计算问题作了一些介绍，每一章都有小结，并附有习题供学习中选用。

本书作为交流讲义出版，可作为有关专业结构力学课程的教材，也可供有关工程人员参考。

结 构 力 学

上 册

龙驭球 包世华合编

北京市书刊出版业营业许可证出字第 119 号

高等教育出版社出版（北京沙滩后街）

上海市印刷五厂印装

新华书店上海发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 K15010·1209 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 5 $\frac{14}{16}$

字数 143,000 印数 0,001—2,000 定价（7）¥ 0.70

1966 年 4 月第 1 版 1966 年 4 月上海第 1 次印刷

序

本书是在编者给清华大学河川枢纽及水电站建筑专业学生讲授结构力学课程时所用讲义的基础上,修改编写而成的。

全书共十五章,在绪论之后分成三个部分。第一部分(第二章至第八章)讨论静定结构的内力和位移计算问题,第二部分(第九章至第十三章)讨论超静定结构的内力计算问题,第三部分(第十四、十五章)讨论结构的稳定计算和动力计算两个专题。

为了贯彻“少而精”的原则,本书在精选内容、分清主次等方面作了一些努力,加强了基本内容的阐述。

在静定结构部分,以静定刚架(第三章)及静定桁架(第五章)的静力分析和位移计算(第八章)为主要内容。在静力分析中,强调了根据结构的几何构造来确定静力计算程序的方法,以便在理论力学关于截离体平衡分析的基础上进一步对结构的整体分析有较清晰的了解,并掌握其规律性。

在超静定结构部分,介绍了三个主要方法——力法(第九、十章)、位移法(第十一章)和力矩分配法(第十二章)。前两个方法,主要侧重于基本原理的讨论;而后一方法则讨论得较为详细,以便对这个实用方法能较熟练地掌握。在第十三章中对超静定结构的力学特性和计算方法的灵活运用作了综合的讨论。

在两个专题中,主要侧重于有关力学特征的阐述,即关于临界荷载的静力特征和能量特征,以及主振型和荷载按主振型分解的概念。

以上三个部分中,前两部分是主要内容,其中第一部分是第二部分的基础,而第二部分则是在结构设计中应用得最多的内容。

本书在贯彻理论联系实际方面也作了一些努力。首先,加强了结构的计算简图的讨论,对桁架的结点简化为铰结点,结构中的杆件简化为铰支和固支杆件的条件,作了理论上的阐述,在例题中,也加进了一些工程实际结构的分析和计算问题。

其次,对于结构的力学特性,也着重进行了一些讨论。例如,对拱与曲梁、直梁,梁式和拱式桁架与梁和拱的力学性能作了比较,对静定结构和超静定结构的特性等作了分析。另有超静定结构总论一章,着重讨论了刚度变化对超静定结构内力分布的影响,刚架侧移影响的分析,超静定结构中主内力和次内力的概念,以及局部平衡的概念等。

对校核问题给予了重视,特别在力法、位移法和力矩分配法中都讨论了平衡校核和变形校核的方法,并作了例题示范。

为使讲解符合学生的认识规律和对自学进行指导,对于课程内容中的一些难点和易出错误的地方,作了较详细的阐述。每章附有小结,以帮助学生掌握每章的要点和要求。例题安排得比较多,有些还有一定的难度,可留一部分作自学用。某些用小字排印的章节也可留作自由选读的内容。习题在编排次序和分配比例上都是与正文相配合的。

本书是在清华大学结构力学教研组集体帮助下完成的,编写时也参考了杨式德、古国纪两同志历年的讲稿。并承西安冶金建筑工程学院陈叔陶同志、华东水利学院赵光恒同志审阅,提出了不少宝贵意见,特此向他们表示感谢。

为了进一步提高质量,编者欢迎使用本书的教师、同学和各方读者提出意见和建议。来信请寄北京沙滩后街高等教育出版社编辑部转。

编者 1965年12月

上册目录

序	v
第一章 绪论	1
§ 1-1. 结构力学的任务	1
§ 1-2. 结构力学的学习方法	3
§ 1-3. 结构计算简图的概念	4
§ 1-4. 计算简图的简化要点	6
§ 1-5. 结构简图的分类	8
§ 1-6. 荷载的分类	8
§ 1-7. 计算简图举例	10
第二章 结构的构造分析	13
§ 2-1. 构造分析的目的	13
§ 2-2. 平面体系自由度的下限公式	15
§ 2-3. 铰结体系的基本构造规律	19
§ 2-4. 小结	24
习题	25
第三章 静定梁和静定刚架	28
§ 3-1. 静定梁的构造分析和联系力的计算	28
§ 3-2. 静定梁的内力图	31
§ 3-3. 直杆弯矩图的叠加性质	32
§ 3-4. 静定刚架的构造分析和联系力的计算	35
§ 3-5. 静定刚架的内力图	36
§ 3-6. 小结	43
习题	43
第四章 三铰拱	49
§ 4-1. 拱式结构及其应用	49
§ 4-2. 竖向荷载作用下拱与梁的比较	50
§ 4-3. 三铰拱反力的图解法	54
§ 4-4. 三铰拱的压力线	56
§ 4-5. 三铰拱的合理轴线	58
§ 4-6. 小结	62
习题	63

第五章 静定平面桁架	65
§ 5-1. 桁架的一般概念	65
§ 5-2. 桁架按几何构造的分类	68
§ 5-3. 结点法	70
§ 5-4. 截面法	77
§ 5-5. 图解法	84
§ 5-6. 梁式桁架和拱式桁架	88
§ 5-7. 混合结构的计算	91
§ 5-8. 小结	94
习题	94
第六章 静定结构总论	100
§ 6-1. 虚位移原理	100
§ 6-2. 几何特征与静力特征间的对应关系	102
§ 6-3. 零载法	104
§ 6-4. 静定结构的静力特性	106
§ 6-5. 叠加原理	111
§ 6-6. 小结	113
习题	113
第七章 影响线	116
§ 7-1. 影响线的概念	116
§ 7-2. 影响线的应用	118
§ 7-3. 简支梁反力和内力影响线的静力作法	120
§ 7-4. 静定梁反力和内力影响线的机动作法	122
§ 7-5. 静定桁架内力的影响线	128
§ 7-6. 集中力系的最不利影响	137
§ 7-7. 简支梁的绝对最大弯矩	143
§ 7-8. 梁的内力包络图	145
§ 7-9. 小结	147
习题	148
第八章 结构的位移计算	151
§ 8-1. 结构位移计算的意义	151
§ 8-2. 应用虚功原理计算刚体体系的位移	152
§ 8-3. 结构位移的一般公式	157
§ 8-4. 静定结构由于荷载作用所产生的位移	162
§ 8-5. 图乘法计算积分	168
§ 8-6. 静定结构由于温度改变所产生的位移	173
§ 8-7. 交互定理	175
§ 8-8. 小结	177
习题	178

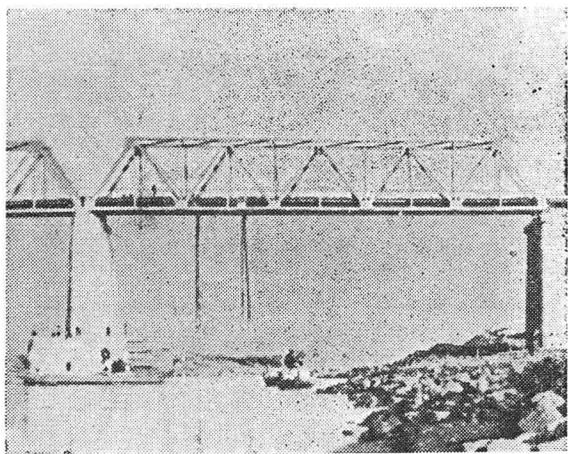
第一章 緒論

§ 1-1. 结构力学的任务

在工程中用建筑材料组成并能承受荷载的物体都称为结构。桥梁桁架(图 1-1)，壳体屋顶(图 1-2)，重力坝(图 1-3) 是结构的三类典型例子。

第一类结构称为杆件结构。它由杆件组成。杆件的几何特征是它的一个尺度(长度)大大超过另外两个尺度。第二类结构称为薄壁结构，它的几何特征是沿两个方向的尺度(长度和宽度)大大超过第三个尺度(厚度)。第三类结构称为实体结构，它的三个方

(a)



(b)

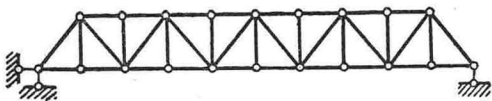


图 1-1

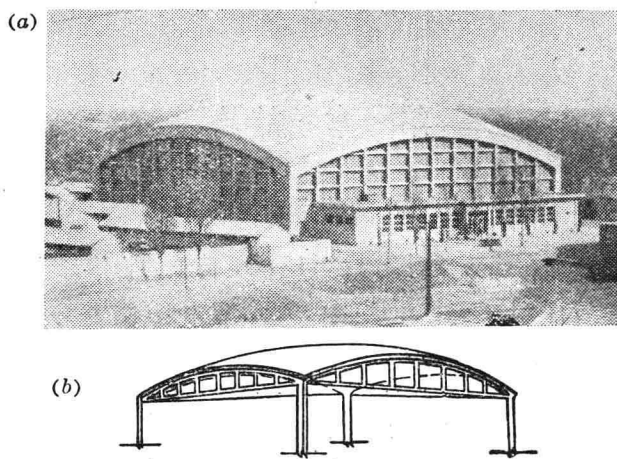


图 1-2

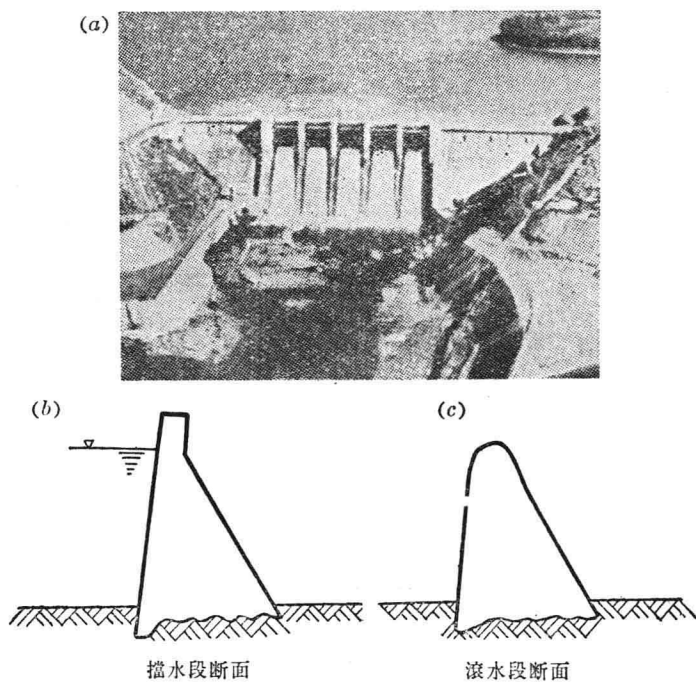


图 1-3

向的尺度属于同一量级。狭义的结构往往指的就是杆件结构，而平常所说的结构力学就是指杆件结构力学。

结构力学的任务主要有下面几个方面：(1)计算结构的内力以校核其强度；(2)计算结构的位移以校核其刚度；(3)了解结构的组成规律和力学性能；(4)核算结构的稳定性和抗振性。

与结构力学有密切关系的课程是理论力学、材料力学和弹性及塑性理论。在这四门力学课程中，理论力学是以质点和刚体体系为研究的对象，提供一般的力学原理及其运动规律；其余三门课程都是以变形体为研究的对象，其中材料力学和结构力学并采用某些简化假设以便得到实用的结果。但材料力学主要是讲述单根杆件的计算，而结构力学则是讲述杆件体系的计算。至于弹性及塑性理论，则使用了较严格较复杂的方法，研究范围也不限于杆件结构。

在学习结构力学时，需要应用数学、理论力学、材料力学等课程的知识。同时，结构力学又将为进一步学习钢筋混凝土结构、钢结构、木结构、水工结构等专业课程提供必要的力学基础。此外，它还为以后进行的结构设计和研究等工作提供必要的基本知识。

§ 1-2. 结构力学的学习方法

结构力学是一门技术基础课，它的内容是将理论力学和材料力学所提供的一般的力学基础(静定部分主要是截离体的平衡原理，超静定部分还加上变形协调条件)，用来解决某些类型的工程结构的计算问题。可见结构力学是与工程实际结合较为紧密的。因此，在学习结构力学课程时，应象学习其他课程一样，必须注意理论联系实际，结合一些工程实际结构，进行分析计算，以逐渐培养解决实际问题的能力。对于结构力学来说，基本原理和基本概念是重要的，但计算方法和应用技巧问题，也占着很重要的地位，

对于正确、迅速地进行结构的设计工作有很大意义。有些初学者在学习结构力学时,对静定结构这一部分往往认为新的概念不多,原理比较简单,而忽视计算方法和应用技巧的训练,这是不对的。在学习过程中,我们还应注意基本原理的应用,也就是注意计算方法和应用技巧的锻炼。学习理论的目的在于应用,用是更好的学习。本课程习题和作业较多,也反映了这一要求。

另外,关于计算能力的问题(包括数字计算的正确,计算书的清晰和有条理,计算结果的校核和分析等)也必须给予重视。结构力学课程中数字计算是较多的,而计算能力是工程技术人员的一项基本功,这是由生产的要求所决定的。在设计工作中经常有大量的数字运算,并要求能算得快、算得准、写得清晰、不出差错。要作到这一点,除了政治上的责任感外,平时的训练是很重要的。所以在学习过程中就应严格要求自己,作题时要注意数字计算的正确性、计算书的整洁、有条理、表达清楚。同时培养对计算结果进行校核和分析的习惯。那些认为只要原理对、方法对、数字结果无所谓,计算书自己能看懂就行的看法是不对的。

§ 1-3. 结构计算简图的概念

对实际结构进行计算时,假如要毫无遗漏地考虑几何形状和结构构造的每一个细节,严格地考虑各个部件之间每个次要的联系,则不仅实用上是烦琐的,而且理论上也是不可能的。因此,用计算简图来代替实际结构,将事物进行科学抽象,这是研究任何结构力学问题所必经的步骤。列宁说过:“物质的抽象,自然规律的抽象,价值的抽象及其他等等,一句话,那一切科学的(正确的、郑重的、不是荒唐的)抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”^①因此,计算简图必须保持实际结构的主要联系,反映其力学

^① 列宁全集,第38卷,人民出版社,1959年,第181页。

性能的主要特点,使计算结果与实际情况足够接近。另一方面,计算简图也必须略去实际结构中某些细节,使计算工作足够简单,更加突出其主要联系。

正确地采用计算简图是计算任何结构极为重要的第一个步骤,同时也是较为困难的一个步骤。常常有些人学完了结构力学课程之后,对于各种计算简图的计算方法是掌握了;但对于工程实际结构,就往往无从下手,不知如何得出一个既简单而又足够精确的计算简图。因为这需要他对结构的构造和力学特点有深入的了解,对结构计算有较多的经验,并且对于问题中的不同因素,能善于判断其相对的重要性。这些都需要在整个结构力学的学习过程中多加注意,并在以后的学习和设计中继续积累知识。

在计算同一结构时,根据不同情况,可能采取几种计算简图。例如在不同性质的荷载作用下采用不同的计算简图(如刚架在竖向荷载作用下的计算简图可与水平荷载作用下的计算简图不同,在静力荷载作用和动力荷载作用下的计算简图也可不同)。又如在初步选定结构尺寸时采用较简单的计算简图,而在最后核算中采用较复杂、较精确的计算简图。

计算简图并不是一成不变的,它与工程实际的要求,人们的认识过程,以及其他科学技术的发展水平等有关。在人们对结构的特性认识不足或科学技术水平较低的情况下,人们往往采用了一些简陋的,有时甚至是不正确的计算简图。有些工程实际对结构要求不高但要求便于计算,往往也采用一些较为简单的计算简图。随着人们对结构特性的认识加深和科学技术的发展,这种状况就得到了改善,向更正确、更完备、更接近于实际结构的方向发展。目前有每秒钟能进行上百万次运算的快速电子计算机,这就使结构力学处于一个新的时期,有可能采用更为精确更为完备的计算简图。

§ 1-4. 計算簡圖的簡化要點

確定計算簡圖時，需要在許多方面進行簡化，現在提出四個方面：

(1) 空間聯系的簡化

嚴格地說，實際結構總是空間結構，但在多數情況下，常可忽略一些次要的空間聯系而將實際結構分解成為幾個平面結構，使計算得以簡化。本課程將只討論平面結構的計算問題。當然也有一些結構具有明顯的空間特征而不宜簡化成平面結構，這些問題可作為以後進一步學習的內容。

(2) 杆件的簡化

杆件的截面尺寸(寬度和厚度)雖然小於其長度，但畢竟具有一定的尺寸。由於引入平截面假設，應力和應變沿截面的分布規律都已確定，而其數值則可根據截面的合力(彎矩、軸力、剪力)和軸線的變形(曲率、軸線的伸長應變、截面的折算剪切應變)來確定。因此，在計算簡圖中，杆件將用其軸線來代表。於是，杆件之間的聯結區將用結點來代表，杆長用結點間的距離來表示，而荷載的作用也轉移到軸線上。當截面尺寸增大時（例如超過長度的 $\frac{1}{4}$ ），杆件用軸線表示的簡化，將引起較大的誤差。

(3) 杆件間聯結的簡化

杆件間的聯結區已簡化為結點，此外，在聯結的剛度方面一般

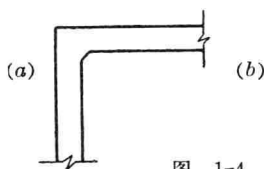


圖 1-4

簡化為兩種理想情形：

(a) 剛結點 被聯結的杆件不能相對轉動，聯結處可以傳遞力矩，現澆钢筋混凝土結

點通常屬於這類情形(圖 1-4)。

(b) 铰结点 被联结的杆件可以自由地相对转动, 联结处不能传递力矩。木结构中木樑的联结比较松动, 就微小变形而言, 可近似地看作铰结点 (图 1-5)。

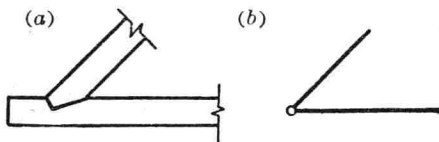


图 1-5

(4) 结构与基础间联结的简化

结构与基础的联结区可简化为支点。按其受力特征, 一般简化为四种情形:

(a) 辊轴支座 被支承的部分可以转动和水平移动, 不能竖向移动, 所提供的反力只有竖向反力 V 。在计算简图中用一根支杆表示 (图 1-6)。

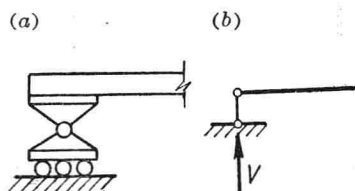


图 1-6

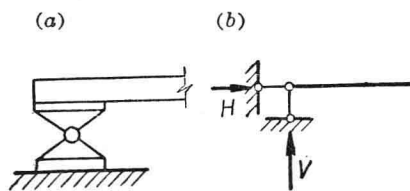


图 1-7

(b) 铰支座 被支承的部分可以转动, 不能移动, 能提供两个反力 V 、 H 。在计算简图中用两根相交的支杆表示 (图 1-7)。

(c) 定向支座 被支承的部分不能转动, 但可沿一个方向平行滑动, 能提供反力矩 M 和一个反力。在计算简图中用两根平行支杆表示 (图 1-8)。

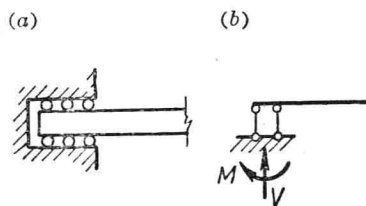


图 1-8

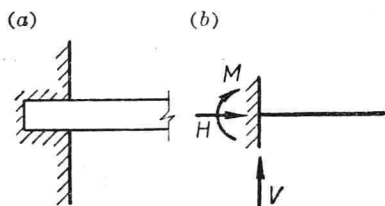


图 1-9

(d)固定支座 被支承的部分完全被固定,能提供三个反力 V 、 H 、 M (图 1-9)。在计算简图中可按图 1-9, b 表示。

§ 1-5. 结构简图的分类

平面杆件结构简图的几种主要型式是梁(图 1-10)、拱(图 1-11)、桁架(图 1-12)、刚架(图 1-13)。



图 1-10



图 1-11

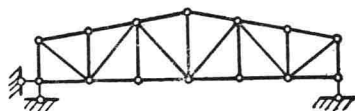


图 1-12

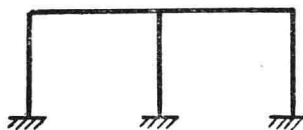


图 1-13

梁与拱除在几何形状上有直线和曲线的区别外,在力学上的主要差别在于它们的反力性质:在竖向荷载作用下,梁无水平反力,属于无推力结构;而拱则有水平反力,属于有推力结构。

桁架与刚架的差别在于杆件的联结方式。桁架是铰结体系,刚架则是刚结体系。

除上述分类外,按计算特性,结构又可分为静定结构和超静定结构。如果结构的杆件内力(包括反力)可由静力条件唯一确定,则此结构称为静定结构。如果杆件内力由静力条件还不能唯一确定,而必须同时考虑变形协调条件才能唯一确定,则此结构称为超静定结构。

§ 1-6. 荷载的分类

荷载是主动作用于结构上的外力。从更广泛的意义上看,凡

能使结构发生应力和变形的任何外部作用的因素都可称为荷载。例如温度变化、基础沉陷、材料收缩等因素都可看作广义的荷载。

荷载的合理确定，是进行合理设计的前提。当荷载估计过大时，则设计出的结构将过于笨重而浪费材料。当荷载估计偏小或者遗漏某些项目时，则所设计出的结构将不具有足够的安全度。有些结构的失事，就是由于荷载估计不正确而发生的。因此，谨慎地确定荷载是对每个设计者的要求。

荷载可以按照不同的特征来分类：

(1)恒载和活载 恒载是永久作用的荷载，如结构的自重和附属部分的重量等。活载是临时作用的荷载，如人和设备的重量，风压力和雪荷载，以及行动荷载(如列车、汽车、吊车)等。

(2)静载和动载 静载是缓慢地加到结构上的荷载，其数值、方向和位置不随时间而变化，或只缓慢地变化。动载则是随时间迅速变化的荷载，例如打桩时的冲击荷载，起吊时的突加荷载，机器运转时的周期荷载等。

(3)主要荷载、附加荷载和特殊荷载 主要荷载是结构正常使用条件下长久和经常起作用的荷载，如结构自重、设备重量、雪载等。附加荷载是偶然和短时作用的荷载，如风压力、施工荷载等。特殊荷载是在特殊例外情况下的荷载，如地震力、最大设计洪水下的水压力等。核算结构时应考虑荷载的最不利组合。

荷载的确定常常是比较复杂的。例如，结构的自重需要在设计前预先估计，然后在设计中再根据实际尺寸加以修正。人和设备的重量等活载，需要对同类结构的长期使用情况进行统计调查，才能合理确定。行动荷载需要考虑荷载的最不利位置。风载、雪载和正常水位需要根据当地长期的气象和水文资料进行统计与分析后才能确定。地下结构的土压力或岩石压力需要考虑结构与土壤岩石的变形协调条件。结构所受风压和水动压力的分布还需考

考虑流体与固体间的相互作用问题。地震荷载的确定需要研究地震产生的原因和传播方式,分析该地区的地质情况和历史地震记载,考虑结构本身动力性能等。

§ 1-7. 计算简图举例

例 1-1 图 1-14, *a* 示一水电站厂房装配式钢筋混凝土排架, 梁和柱都是预制的, 柱子下端插入基础的凹槽内, 然后用水泥砂浆将空隙填实。梁与柱的联结是通过将梁端和柱顶的预埋钢板进行焊接而实现的。各个排架之间, 在梁上有屋面板联系, 在柱的牛腿上有吊车梁联系。

计算厂房结构时, 可采用图 1-14, *b* 所示的计算简图。

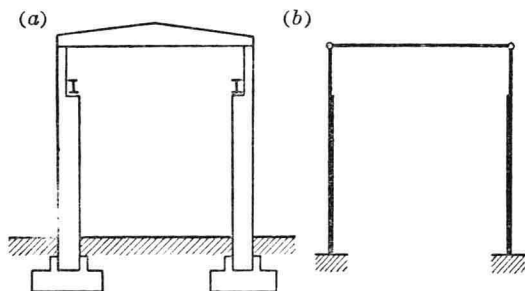


图 1-14

首先, 厂房结构虽然是由许多排架用屋面板和吊车梁联系起来而形成的空间结构, 但在厂房结构承受竖向荷载(自重、屋面体系重、雪重、吊车重)时, 通常把这些荷载分配给各个排架, 而将每一排架看作一个独立体系, 于是实际的空间结构便简化成了一系列平面结构。

其次, 梁和柱都用它们的几何轴线来代表。由于梁和柱的截面尺寸比长度小得多, 轴线都可近似地看作直线。

梁和柱的联结只依靠预埋钢板的焊接, 梁端和柱顶之间虽不能发生相对线位移, 但仍有发生微小相对转动的可能, 因此可看作铰结点。而柱底和基础的联结是十分牢固的, 故可以认为它们之间不能有相对线位移和相对角位移。所以柱底可取为固定端。

例 1-2 图 1-15, *a* 所示为水电站的高压水管, 水管支承在一系列支托