

工程力学

高 健 编著

SHIJI

GAODENG

JIAOYU

JINGPIN

DAXI

世纪高等教育精品大系

浙江科学技术出版社

工程力学

世纪高等教育精品大系

浙江科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/高健编著. —杭州: 浙江科学技术出版社,
2005. 1

(世纪高等教育精品大系)

ISBN 7-5341-2553-7

I. 工... II. 高... III. 工程力学-高等学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 137477 号

丛 书 名	世纪高等教育精品大系
书 名	工程力学
编 著	高 健
出版发行	浙江科学技术出版社
联系电话	(0571) 85152486
印 刷	杭州大众美术印刷厂
开 本	787×1092 1/16
印 张	26.75
字 数	664 000
版 次	2005 年 1 月第 1 版
印 次	2006 年 9 月第 2 次印刷
书 号	ISBN 7-5341-2553-7
定 价	45.00 元
责任编辑	余春亚
封面设计	孙 菁

前 言

本教材依照高职高专水利水电工程、水利工程、水利工程施工、农田水利、工业与民用建筑、道路桥涵等水利、土木建筑类专业教学计划和有关课程教学基本要求编写的。本教材贯彻高职高专技术教育改革精神，突出高职高专教育特点，以能力素质的培养为指导思想，不过分强调理论的系统性，着重基本概念和结论的应用，叙述简练通俗，例题典型，结合工程实际，重视对学生工程意识和力学素养的训练和培养。

本教材分为工程静力学（包括物体的受力分析、力系的简化与平衡、结构的组成规律、静定结构的内力分析等）、杆件的承载能力计算（包括基本变形杆件的内力分析和强度、刚度计算，压杆稳定和组合变形杆件的强度、刚度计算）和结构的内力分析（包括研究静定结构的位移计算和求解超静定结构内力的基本方法）3个部分，各部分内容相互协调，减少不必要的重复。概括介绍力学基本原理，重点介绍基本计算方法，结构分析的计算机方法，以提高学生分析和处理工程实际问题的能力。本教材共分为20章，每章都附有一定数量的思考题和习题，以助于学生学习掌握有关知识。带*号部分为不同专业选修内容。

本书被列为浙江省高等学校重点建设教材（浙教高教〔2004〕34号），得到省教委及浙江水利水电专科学校领导的大力支持与帮助，在此深表谢意！

本书承蒙河海大学土木学院力学系博士生导师王德信教授主审，主要对本教材内容的正确性、合理性、实用性作全面审定。本书在编写过程中还得到许多导师和同行的大力支持与帮助，在此深表谢意！在这里特别要感谢浙江水利水电专科学校土木工程系方荣、李颖、赖华伟等教师在编写过程中的大力支持和帮助。

由于编著水平有限，本书难免有不妥和错误之处，恳切希望读者予以批评指正。

编著者
2005年1月

目 录

绪 论	1
第 1 节 工程力学的研究对象	1
第 2 节 工程力学的研究内容和任务	2
第 3 节 刚体、变形固体及其基本假定	3
第 4 节 荷载的分类与组合	4
第 5 节 结构计算简图	4
第 1 章 工程静力学基础	9
第 1 节 静力学基本概念	9
第 2 节 静力学基本公理	10
第 3 节 力矩和力偶	14
第 4 节 约束与约束反力	19
第 5 节 物体的受力分析与受力图	25
思考题	28
习 题	29
第 2 章 力系的简化	32
第 1 节 力系等效与简化的概念	32
第 2 节 力系简化的基础——力的平移定理	33
第 3 节 平面汇交力系的简化	34
第 4 节 平面力偶系的简化	38
第 5 节 平面一般力系的简化	39
思考题	42
习 题	43
第 3 章 平面力系的静力学平衡	45
第 1 节 平面一般力系的平衡	45
第 2 节 简单刚体系统的平衡问题	51
第 3 节 考虑摩擦时物体的平衡	55
思考题	61
习 题	61
第 4 章 空间力系	65
第 1 节 力在空间直角坐标轴上的投影	65
第 2 节 力对轴之矩	67
第 3 节 空间力系的平衡	69
第 4 节 物体的重心	70

思考题	76
习 题	77
第 5 章 杆件的内力分析	79
第 1 节 杆件的外力与变形特点	79
第 2 节 内力概念及截面法	81
第 3 节 轴向拉伸和压缩杆件的内力分析	83
第 4 节 扭转轴的内力分析	86
第 5 节 梁的内力分析	88
思考题	101
习 题	102
第 6 章 平面体系的几何组成分析	106
第 1 节 几何组成分析的目的	106
第 2 节 体系自由度、刚片和约束	106
第 3 节 几何不变体系的组成法则	109
第 4 节 几何组成分析示例	111
第 5 节 几何组成与静定性的关系	113
思考题	113
习 题	114
第 7 章 静定结构的内力计算	115
第 1 节 静定结构的一般分析方法	115
第 2 节 多跨静定梁	117
第 3 节 静定平面刚架	120
第 4 节 三铰拱	124
第 5 节 静定平面桁架	132
第 6 节 静定组合结构	137
第 7 节 静定结构的特性	139
思考题	141
习 题	142
第 8 章 轴向拉伸和压缩的强度计算	145
第 1 节 应力的概念	145
第 2 节 轴向拉伸和压缩杆件横截面上的应力	146
第 3 节 拉(压)杆件的变形	148
第 4 节 材料在拉伸和压缩时的力学性质	152
第 5 节 拉(压)杆的强度计算	160
第 6 节 应力集中的概念	163
第 7 节 联接件的强度计算	165
思考题	175
习 题	175
第 9 章 平面图形的几何性质	180

第1节	面积矩	180
第2节	惯性矩和惯性积	182
第3节	组合截面的惯性矩	185
第4节	主惯性轴和主惯性矩	188
思考题		190
习 题		190
第10章	扭转的强度和刚度计算	193
第1节	圆杆扭转时的应力和变形计算	193
第2节	薄壁圆筒的扭转试验	200
第3节	圆轴扭转时的强度和刚度计算	201
第4节	矩形截面杆的自由扭转简介	204
思考题		206
习 题		207
第11章	弯曲的强度和刚度计算	208
第1节	梁横截面上的正应力	208
第2节	梁横截面上的切应力	213
第3节	梁的强度计算	216
第4节	弯曲中心的概念	223
第5节	梁的变形和刚度计算	225
思考题		231
习 题		231
第12章	应力状态和强度理论	236
第1节	应力状态的概念	236
第2节	平面应力状态分析	237
第3节	基本变形杆件的应力状态分析	244
第4节	三向应力状态下的最大应力	248
第5节	强度理论	249
思考题		253
习 题		254
第13章	组合变形	256
第1节	概 述	256
第2节	斜弯曲	257
第3节	拉伸(压缩)与弯曲的组合	260
第4节	偏心压缩(拉伸)	262
思考题		265
习 题		265
第14章	压杆稳定	268
第1节	压杆稳定的概念	268
第2节	细长压杆的临界力	269

第3节 压杆的临界应力	270
第4节 压杆的稳定计算	273
第5节 提高压杆稳定性的措施	277
思考题	278
习 题	279
第15章 静定结构的位移计算	282
第1节 计算结构位移的目的	282
第2节 功、广义力和广义位移	283
第3节 结构位移计算的一般公式	284
第4节 静定结构由于荷载引起的位移计算	286
第5节 图乘法	289
第6节 支座移动和温度改变引起的静定结构的位移*	293
第7节 功的互等定理	296
思考题	298
习 题	298
第16章 力 法	301
第1节 超静定结构概述	301
第2节 力法基本原理	303
第3节 力法的基本未知量、基本系和典型方程	305
第4节 力法计算超静定结构举例	307
第5节 对称性的利用	311
第6节 超静定结构的位移计算和最后内力图的校核*	318
第7节 等截面单跨超静定梁的杆端内力	319
思考题	321
习 题	321
第17章 位移法	324
第1节 位移法的基本原理	324
第2节 位移法的基本未知量	325
第3节 用位移法计算超静定结构	328
思考题	334
习 题	334
第18章 力矩分配法	336
第1节 力矩分配法的基本原理	336
第2节 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	341
第3节 无剪力分配法*	344
思考题	348
习 题	348
第19章 影响线	350
第1节 概 述	350

第2节	静力法绘制单跨静定梁影响线.....	351
第3节	结点传递荷载下主梁影响线*.....	357
第4节	机动法作静定梁影响线.....	359
第5节	影响线的应用	362
第6节	简支梁的内力包络图	366
第7节	连续梁的内力包络图简介*.....	370
思考题		371
习 题		371
第20章	矩阵位移法*.....	374
第1节	矩阵位移法的概念	374
第2节	单元刚度矩阵	375
第3节	结构刚度矩阵	379
第4节	坐标转换矩阵	383
第5节	等效结点荷载的计算	387
第6节	矩阵位移法的解题步骤.....	389
第7节	结构分析的计算机方法简介.....	394
思考题		396
习 题		397
附录	型钢表.....	398
参考答案		406
主要参考文献		415

绪 论

第 1 节 工程力学的研究对象

工程力学是研究工程结构的受力分析、承载能力的基本原理和方法的科学。它是工程技术人员从事结构设计和施工所必须具备的理论基础。

在水利建设、房屋建筑和道路桥梁等各种工程的设计和施工中都涉及到工程力学问题。为了承受一定荷载以满足各种使用要求，需要建造不同的建筑物。例如，水利工程中的水闸、水坝、水电站、渡槽、桥梁、隧洞等；土木建筑工程中的屋架梁、板、柱和塔架等。建筑物中承受荷载并起到骨架作用的部分称为结构。组成结构的各单独部分称为构件。结构是由若干构件按一定方式组合而成的。例如，工业厂房建筑一般是由屋架、梁、柱、基础等组成的体系，如图 1 所示，它们在传力过程中起骨架作用，这个体系称为厂房结构。工程中一般结构按宏观尺寸区分为：

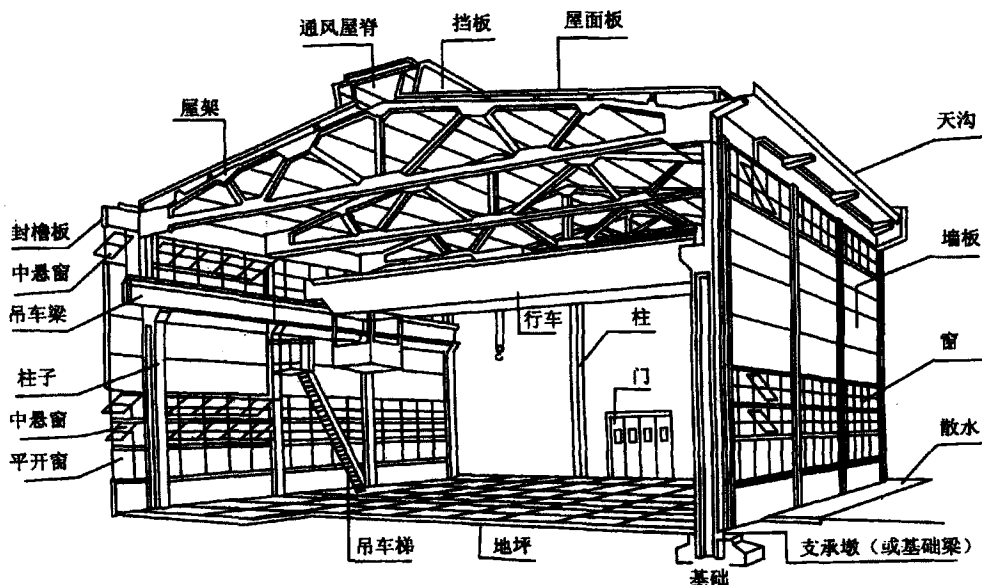


图 1

(1) 杆件结构。结构中构件的 3 个方向尺寸中某一方向的较其他两个方向的尺寸大得多的称杆件结构，如图 2 (a) 中 $l \geq b$ 与 h 的构件。

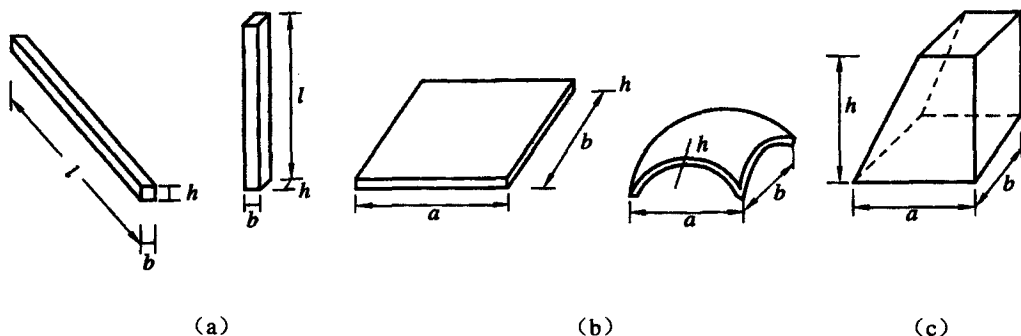


图 2

(2) 板、壳结构。结构中构件的 3 个方向尺寸中某一方向的尺寸（如厚度）较其他两个方向的尺寸小得多的称板（无曲率变化）、壳（有曲率变化）结构，如图 2 (b) 所示中 $h \leq a$ 与 b 的平板和双曲扁壳。

(3) 块体结构。此种结构 3 个方向尺寸相差不多，如图 2 (c) 所示的块体。工程力学的研究对象主要是杆系结构。

第 2 节 工程力学的研究内容和任务

工程力学的任务是进行结构的受力分析，分析结构的几何组成规律，解决在荷载作用下结构的强度、刚度和稳定性问题，即解决结构和构件所受荷载与其自身的承载能力这一对基本矛盾。研究杆件体系的计算原理和方法，为结构设计合理的形式，其目的是保证结构按设计要求正常工作，并充分发挥材料的性能，使设计的结构既安全可靠又经济合理。

进行结构设计时，首先须知作用在结构和构件上的各种荷载。结构设计要求各构件必须按一定规律组合，以确保在荷载作用下结构的几何形状不发生改变，即进行结构的几何组成分析。

结构正常工作必须满足强度、刚度和稳定性的要求，即进行其承载能力计算。

强度是指结构和构件抵抗破坏的能力。满足强度要求即要使结构的各构件正常工作时不发生破坏。

刚度是指结构和构件抵抗变形的能力。满足刚度要求即要使结构或构件正常工作时产生的变形不超过允许范围。

稳定性是指结构或构件保持原有平衡状态的能力。满足稳定性要求即要使结构或构件在正常工作时不突然改变原有平衡状态，以致因变形过大而破坏。

结构在安全正常工作的同时还应考虑经济条件，应充分发挥材料的性能，不至于产生过大的浪费，即设计结构的合理形式。

按教学要求，工程力学的内容包含以下几个部分：

(1) 工程静力学。这是工程力学中重要的基础理论。其中, 包括物体的受力分析、力系的简化与平衡、结构的组成规律、静定结构的内力分析等。

(2) 杆件的承载能力计算。杆件的承载能力计算是结构承载能力计算的实质。其中, 包括基本变形杆件的内力分析和强度、刚度计算, 压杆稳定和组合变形杆件的强度、刚度计算。

(3) 结构的内力分析。由此可按杆件承载力计算方法进行超静定结构的强度和刚度等计算。其中, 包括研究静定结构的位移计算和求解超静定结构内力的基本方法(力法、位移法、力矩分配法和矩阵位移法等)。

第3节 刚体、变形固体及其基本假定

自然界中的物体及工程中的结构和构件, 其性质是复杂多样的。不同学科只是从不同角度去研究物体性质的某一个或某几个侧面。为使所研究的问题简化, 常略去对所研究问题影响不大的次要因素, 只考虑相关的主要因素, 将复杂问题抽象化为只具有某些主要性质的理想模型。工程力学中将物体抽象化为两种计算模型: 刚体和理想变形固体。

刚体是在外力作用下形状和尺寸都不改变的物体。实际上, 任何物体受力的作用后都发生一定的变形, 但在进行结构和构件的受力分析及体系几何组成分析时, 变形这一因素不影响所研究问题的性质, 这时可将物体作为刚体处理。

理想变形固体是对实际变形固体的材料作出一定假设, 将其理想化。在进行结构的内力分析和杆件的承载能力计算时, 其变形是不可忽略的主要因素, 这时应将其作为理想变形固体。理想变形固体材料的基本假设有:

(1) 连续均匀假设。连续是指材料内部没有空隙, 均匀是指材料的性质各处相同。连续均匀假设即认为物体的材料无空隙地连续分布, 且各处性质均相同。

(2) 各向同性假设。即认为材料沿不同方向的力学性质均相同。具有这种性质的材料称为各向同性材料, 而各方向力学性质不同的材料称为各向异性材料。

按照上述假设理想化了的—般变形固体称为理想变形固体。刚体和理想变形固体都是工程力学研究中必不可少的理想化的力学模型。

变形固体受力作用产生变形。撤去荷载可完全消失的变形称为弹性变形。撤去荷载不能恢复的变形称为塑性变形或残余变形。在多数工程问题中, 要求构件只发生弹性变形。工程中大多数构件在荷载作用下产生的变形量若与其原始尺寸相比很微小时, 称为小变形, 否则称为大变形。小变形构件的计算, 可采取变形前的原始尺寸并略去某些高阶微量, 以达到简化计算的目的。

综上所述, 工程力学中把所研究的结构和构件作为连续、均匀、各向同性的理想变形固体, 在弹性范围内和小变形情况下研究其承载能力。

由于采用以上力学模型, 大大方便了理论的研究和计算方法的推导。尽管所得结果只具有近似的准确性, 但其精确程度可满足一般的工程要求。应该指出: 实践是检验真理的

惟一标准,任何假设都不是主观臆断的,而必须建立在实践的基础之上。同时,在假设基础上得出的理论结果,也必须经过实践的验证。工程力学的研究方法,除理论方法外,试验也是很重要的一种方法。

第4节 荷载的分类与组合

作用在结构上的荷载和其他外来作用,广义地讲,都可以称为结构的荷载。合理地确定荷载是计算简图的一部分,也是正确进行结构分析的前提。

广义荷载按其作用的性质可分为静力荷载、动力荷载和其他外来作用等3大类。

静力荷载是指其大小、方向不随时间而改变或改变得很缓慢,以致在结构分析中可以略去其惯性力。静力荷载又可分为固定荷载和活荷载两种。固定荷载是永久地作用在结构上的荷载,如结构的自重及固定设备等。活荷载是一种临时荷载,它的特点是位置可以移动,或者位置固定,但时有时无,如桥梁上行驶的车辆、仓库中堆放的货物、风、雪荷载等。

动力荷载是指大小、方向都可随时间而变的荷载。这种荷载使结构振动而产生加速度,在结构设计中必须考虑其惯性力,如机器运转、波浪压力、地震作用等。

其他外来作用如温度改变、材料收缩、支座沉陷和制造不精确等都可能引起结构变形,同时也可能产生相应的应力。

通常把荷载分为主要荷载、附加荷载和特殊荷载3种。主要荷载是结构在正常使用条件下经常作用的荷载,如自重、土压力、水压力等。附加荷载是不经常出现的临时荷载,如施工中吊车的移动荷载等。特殊荷载是在特殊情况下出现的荷载,如地震、爆炸冲击波等。

在结构设计中,需要按各种荷载出现的实际可能性加以组合。根据不同的工程领域,按结构在不同时期所承担的任务,有不同的荷载组合,一般情况下采用如下组合:

- (1) 主要荷载。
- (2) 主要荷载+附加荷载。
- (3) 主要荷载+附加荷载+特殊荷载。

设计结构时对上面3种荷载组合应分别考虑不同的安全储备。对第1种组合,安全储备应高一些;第2种组合,安全储备可低一些;第3种组合,安全储备可更低一些。

第5节 结构计算简图

结构计算简图是指将实际结构按一定的原则进行简化,使它成为既能反映原结构实际工作状态的主要特征,又便于结构分析的计算模型。在结构分析中,结构的计算简图就是实际结构的代表,一切计算都是按计算简图进行的。因此,计算简图的选取是十分重要的,

它直接影响到结构分析的结果。

结构计算简图选取必须满足如下两个基本要求：

- (1) 尽可能正确地反映结构的实际工作状态，使计算结果与实际情况足够接近。
- (2) 尽可能使结构分析计算得到简化。对实际结构进行简化的目的不仅仅是使结构分析得以进行，更重要的是使结构分析能反映实际工作状态。

结构的实际工作状态主要取决于结构本身的构造和荷载的传递。因此，我们将从这些方面入手对组成结构的杆件、杆件与杆件之间的联系（称为结点）、基础与结构之间的联系（称为支座）、作用的荷载和结构材料性质等几个方面进行简化，说明杆系结构计算简图的选取。

一、从空间到平面的简化

杆系结构可分为平面结构和空间结构。平面结构要求所有杆件的轴线和外力的作用线都在同一平面内，不符合这个条件的结构就属于空间结构。实际结构多属于空间结构。有些空间结构可以简化为平面结构来计算。

如图 3 (a) 所示为空间的钢筋混凝土刚架结构，在图示荷载作用下就可以简化为如图 3 (b) (c) 所示两个平面刚架来计算。又如图 4 (a) 所示的地下输水涵管，它沿水流方向（即管轴线方向）很长，其横截面和荷载沿此方向基本不变，计算时就可以沿水流方向截取单位长度的一段，如图 4 (b) 所示的平面框架。

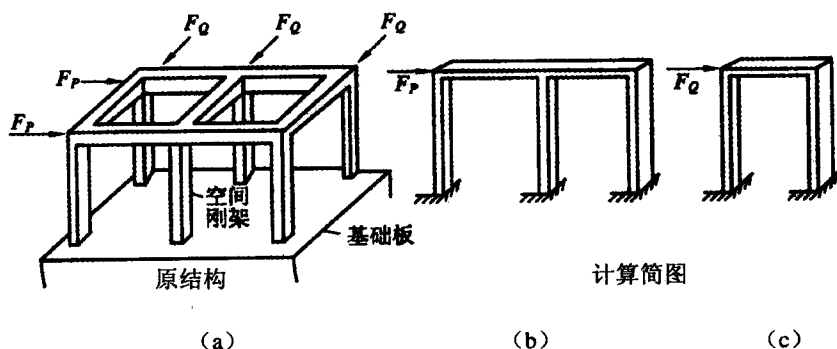


图 3

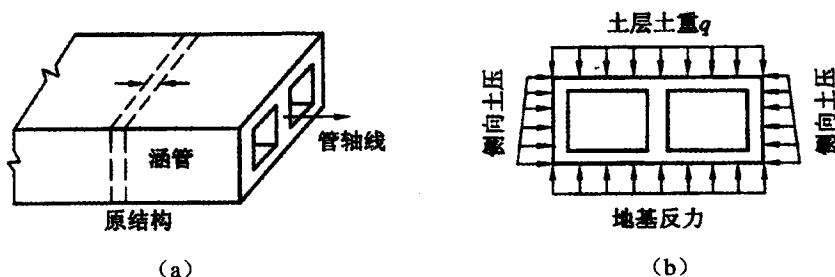


图 4

二、杆件的简化

杆系结构是由细而长的杆件组成的。通常,当杆件的长度大于其截面高度 5 倍以上时,可以用杆件的轴线来代替杆件,用杆轴线所形成的几何轮廓代替原结构。如图 5 (a) 所示为一箱形结构的剖面示意图,由各杆轴线所形成的结构的几何轮廓,即为计算简图,如图 5 (b) 所示。

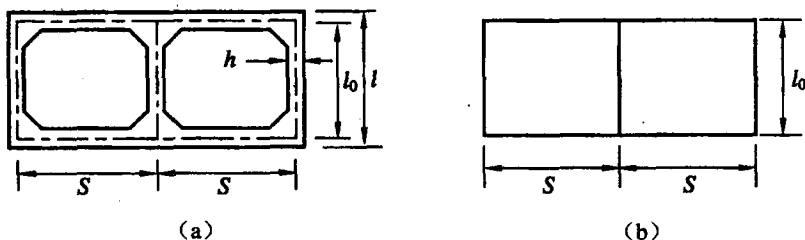


图 5

三、结点的简化

杆件与杆件的连接处称为结点。根据连接处构造的差异,结点可分为刚结点和铰结点两种。刚结点的特征是汇交于结点的各杆端相互固结在一起,它们之间既不能相对移动,也不能相对转动。如图 6 (a) 所示为钢筋混凝土结构的结点构造图,如图 6 (b) 所示为它的计算简图。

铰结点的特征是,汇交于结点的各杆端不能相对移动,但可以相对转动。如图 7 (a) 所示为典型的合页式铰,如图 7 (d) 所示为其计算简图。如图 7 (b)

(c) 所示分别为木结构与钢结构的结点构造图,它们通常简化为铰结点,计算简图为如图 7 (e) (f) 所示。需要指出的是,这种简化处理有一定的近似性。

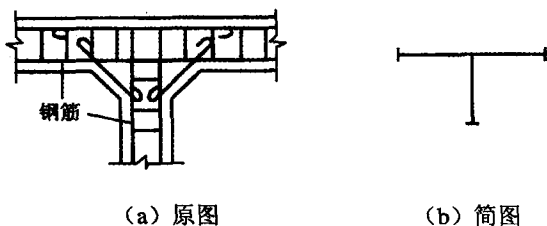


图 6

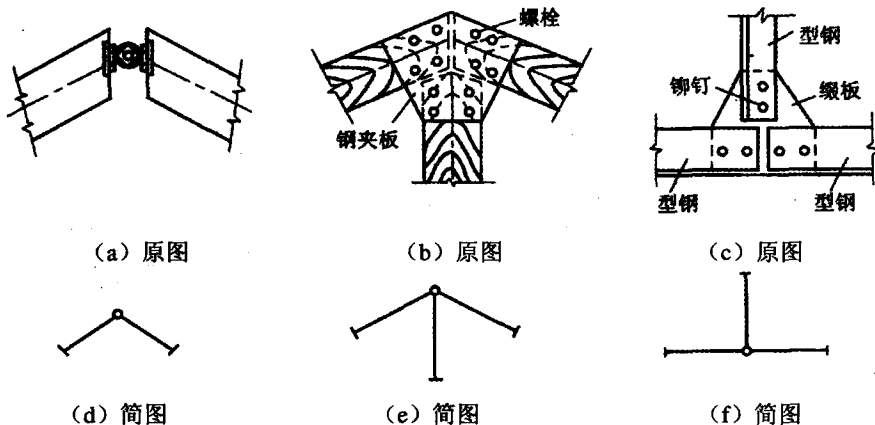


图 7

四、支座的简化

联系结构与基础的装置称为支座，它起着支承并限制结构运动的作用。根据支座的构造和所起作用的不同，一般可简化为铰支座、辊轴支座、固定支座、滑移支座和弹性支座 5 种（具体在第 1 章中讲解）。

上面介绍的选取计算简图的原则和方法，主要是从结构的构造所起的作用来分析的。一般来说，这样选择的计算简图能够反映结构各种可能的实际工作状态。需要注意的是，有的约束具有单向性质，这就使得同一结构在不同的荷载作用下，可能要选取不同的计算简图。如图 8 (a) 所示的闸门横梁，是一个加劲梁，当匀布水压力从左向右作用时应取如图 8 (b) 所示的计算简图；当右边受水压力作用时，考虑到加劲钢筋不能承受压力，应取如图 8 (c) 所示的计算简图。可见，必须抓住结构的实际工作状态这一基本点，对实际结构的受力状态作具体分析，才能选出既符合实际情况，又能使计算得到一定程度简化的计算简图。事实上，要正确、合理地选择实际结构的计算简图，不仅需要一定的力学知识，而且还要有丰富的结构设计和施工经验。所以，还必须在有关课程的学习中以及结构设计和建造中，紧密结合工程实践，不断积累和总结经验，逐步完善地解决这个问题。

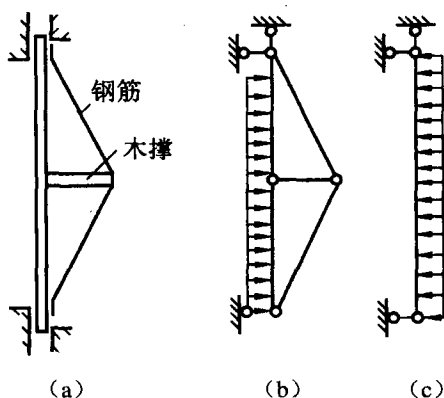


图 8

为了进一步理解计算简图的选取，下面以如图 9 所示单跨工业厂房为例加以说明。单层单跨工业厂房一般沿长度方向是由好几根排架组成的。每一根排架皆由相同的屋架和柱连接起来。各排架的受力情况相类似，所以，可取一根排架代替整个空间的厂房进行计算。每一根排架主要的传力构件为屋架和柱。对于屋架，考虑垂直荷载时把屋面板等重量等效地作用在屋桁架的结点上，每一结点为铰结点。对于柱子，因吊车梁处的立柱截面有变化，因此，立柱为变刚度杆件吊车梁上行车的荷载，作用于支撑吊车梁的立柱牛腿上。柱子的基脚深埋在地基中，当成固定支座。柱顶与屋架相连，一般联系为预埋件焊接，可当成铰结看待。再考虑厂房受风荷载作用时，则排架的计算简图如图 9 (a) 所示。进一步简化排架时，由于屋架在水平面内的刚度很大，在整体计算排架时可把屋架当成轴向刚度无穷大的杆来看待。屋架计算简图如图 9 (b) (c) 所示。

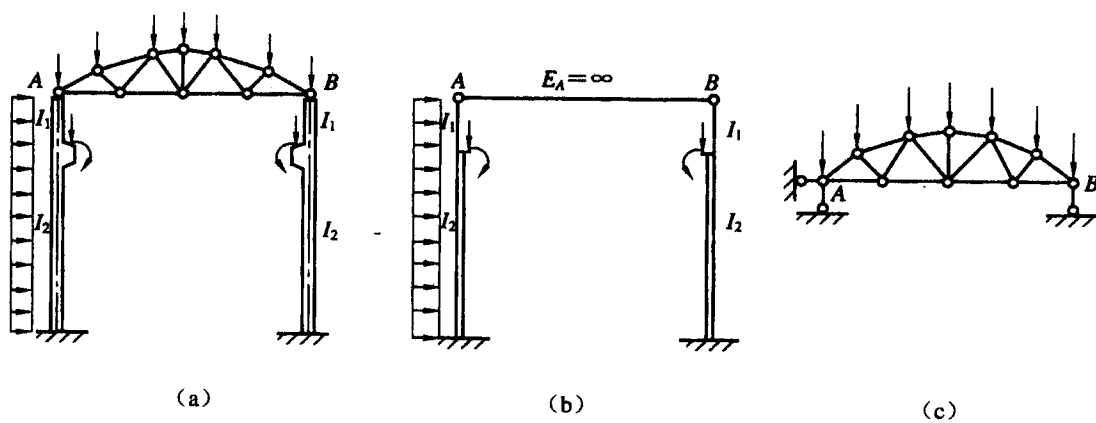


图 9