

高等职业教育土建专业系列教材

丛书主编 徐占发
本册主编 包世华 崔玉玺

结构力学

JIEGOU LIXUE

中国建材工业出版社

高等职业教育土建专业系列教材

结 构 力 学

主 编 包世华 崔玉玺

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

结构力学/包世华等主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2004.1

(高等职业教育土建专业系列教材)

ISBN 7-80159-498-3

I. 结... II. 包... III. 工程结构-结构力学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 106768 号

内 容 摘 要

本书系《高等职业教育土建专业系列教材》丛书的《结构力学》分册。

全书共 13 章, 分为: 绪论、结构的几何组成分析、静定梁、三铰拱、静定平面桁架和组合结构、静定结构的位移计算、力法、位移法、渐近法和近似法、影响线、矩阵位移法、结构的动力计算。每章均有小结、复习思考题和习题。书后附有习题参考答案。

本书除可作为土木建筑、道路桥梁、水利工程等专业的教材外, 也可供以上专业工程技术人员参考。

结 构 力 学

主编 包世华 崔玉玺

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: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 960mm 1/16

印 张: 29.75

字 数: 526 千字

版 次: 2004 年 1 月第 1 版

印 次: 2004 年 1 月第 1 次

印 数: 1 ~ 3000 册

书 号: ISBN 7 - 80159 - 498 - 3/TU·252

定 价: 45.00 元

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 68345931

序

大力发展高等职业教育,培养一大批具有必备的专业理论知识和较强的实践能力,适应生产、建设、管理、服务岗位等第一线急需的高等职业应用型专门人才,是实施科教兴国战略的重大决策。高等职业教育院校的专业设置、教学内容体系、课程设置和教学计划安排均应突出社会职业岗位的需要、实践能力的培养和应用型的教学特色。其中,教材建设是基础和关键。

高等职业教育土木建筑专业系列教材是根据最新颁布的国家和行业标准、规范,按照高等职业教育人才培养目标及教材建设的总体要求、课程的教学要求和大纲,由北京城市学院(原海淀走读大学)和中国建材工业出版社组织全国部分有多年高等职业教育教学体会与工程实践经验的教师编写而成。

本套教材是按照3年制(总学时1600~1800)、兼顾2年制(总学时1100~1200)的高职高专教学计划和经反复修订的各门课程大纲编写的。基础理论课程以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点;专业课以最新颁布的国家和行业标准、规范为依据,反映国内外先进的工程技术和教学经验,加强实用性、针对性和可操作性,注意形象教学、实验教学和现代教学手段的应用,并加强典型工程实例分析。

本套教材适用范围广泛,努力做到一书多用。在内容的取舍上既可作为高职高专教材,又可作为电大、职大、业大和函大的教学用书,同时,也便于自学。本套教材在内容安排和体系上,各教材之间既是有机联系和相互关联的;每本教材又具有独立性和完整性。因此,各地区、各院校可根据本身的教学特点择优选用。

北京城市学院是办学较早、发展很快、高职高专办学经验丰富并受到社会好评的一所民办公助高等院校。其中,土建专业是最早设置且有较大社会影响的专业之一,有10多名教学和工程实践经验丰富的双师型教师,出版了一批受欢迎的专业教材。

可以相信,由北京城市学院组编、中国建材出版社出版发行的这套高等职业教育土建专业系列教材一定能成为受欢迎的、有特色的、高质量的系列教材。

本教材编委会

2003年2月

前 言

结构力学是土木工程类各专业的一门重要的专业技术基础课。高等工程专科、高等职业技术教育的培养目标是应用型人才。根据这些特点,本书在内容的取材上,力求做到以结构力学的基本内容为主,以必须够用为度;在编写方法上,注意理论联系实际,深入浅出,学以致用;在文字叙述上,力求表达清晰,便于教和学;同时,精选了较为丰富的例题和练习题。

本书是为《高等职业教育土建专业系列教材》丛书编写的《结构力学》。可作为土木建筑、道路桥梁、水利工程各专业(即宽口径的土木工程专业,或简称“大土木”)结构力学课程的教材。适用对象为高等专科学校、高等职业学校和其他大学专科和参加高等学校自学考试的学生,也可作为一般工程技术人员参考用书。

考虑学生进一步提高的要求,书中增加了一些供选学的内容,加了“*”号,以示区别。

本书由清华大学包世华和崔玉玺共同编写;第1章、第3章~第8章由崔玉玺编写;第2章、第9章~第13章由包世华编写。全书由包世华统一、定稿。

本书难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编者

2003年8月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 结构力学的任务与研究方法	1
1.1.1 结构力学的任务	1
1.1.2 结构力学的研究方法	1
1.2 结构的计算简图	2
1.2.1 计算简图及其选择原则	2
1.2.2 计算简图的简化要点	2
1.2.3 结构计算简图实例	5
1.3 杆件结构的分类	7
1.4 荷载的分类	9
小 结	9
复习思考题	10
第 2 章 结构的几何组成分析	11
2.1 几何组成分析的目的、几何不变体系和几何可变体系	11
2.2 自由度和约束的概念	12
2.2.1 自由度	12
2.2.2 约束	13
2.2.3 约束代换和瞬铰	14
2.2.4 必要约束和多余约束	15
2.3 几何不变无多余约束的平面杆件体系的几何组成规则	16
2.3.1 二元体规则——一个点和一个刚片的连接	16
2.3.2 二刚片规则——平面内两个刚片的连接	17
2.3.3 三刚片规则——平面内三个刚片的连接	17
2.4 瞬变体系	19
2.5 几何组成分析举例	20
2.6 结构的几何组成和静定性的关系	21
小 结	22
复习思考题	23
习 题	23

第3章 静定梁	26
3.1 静定单跨梁的计算	26
3.1.1 杆件截面内力及正负号规定	26
3.1.2 指定截面内力的计算	26
3.1.3 荷载集度与内力之间的微分关系	30
3.1.4 突变规律	31
3.1.5 端点规律	31
3.1.6 内力图的绘制	32
3.2 叠加法绘制直杆弯矩图	36
3.2.1 简支梁弯矩图的叠加方法	37
3.2.2 分段叠加法	37
3.3 简支斜梁的计算	39
3.4 静定多跨梁的计算	42
3.4.1 静定多跨梁的几何组成与支座反力计算	42
3.4.2 静定多跨梁内力图的绘制	44
小 结	47
复习思考题	47
习 题	48
第4章 静定平面刚架	52
4.1 静定平面刚架的几何构造及特点	52
4.2 静定刚架支座反力的计算	54
4.3 用截面法求静定刚架杆端截面内力	56
4.4 静定刚架内力图的绘制	61
4.4.1 静定刚架内力图绘制举例	61
4.4.2 静定刚架内力图的绘制要点	63
4.5 三铰刚架及多层多跨静定刚架的内力图	63
4.5.1 三铰刚架及多层多跨静定刚架内力图的绘制	63
4.5.2 刚架内力图的校核	65
小 结	67
复习思考题	67
习 题	68
第5章 三 铰 拱	71
5.1 三铰拱的受力特点与分类	71
5.2 三铰拱的支座反力	72
5.3 三铰拱的内力计算	74

5.4 三铰拱的合理轴线	78
5.4.1 在竖向荷载作用下三铰拱的合理拱轴	79
5.4.2 在沿径向均匀分布荷载作用下三铰拱的合理拱轴	80
* 5.5 悬 索	81
小 结	84
复习思考题	85
习 题	85
第 6 章 静定平面桁架和组合结构	87
6.1 桁架的特点和组成分类	87
6.1.1 桁架计算简图的假设及内力特点	87
6.1.2 桁架按几何组成分类	89
6.1.3 桁架杆件轴力正负号规定及斜杆轴力的表示	90
6.2 结 点 法	91
6.3 截 面 法	94
6.4 结点法和截面法的联合应用	97
6.5 梁式桁架的形式与受力特性	98
6.6 组合结构	101
6.6.1 组合结构的组成与型式	101
6.6.2 组合结构的计算	101
小 结	104
复习思考题	104
习 题	105
第 7 章 静定结构的位移计算	110
7.1 概 述	110
7.2 虚功原理	111
7.2.1 用功能原理求变形体系的位移	111
7.2.2 求变形体系位移的虚功原理	113
7.3 单位荷载法计算位移	116
7.4 荷载作用下的位移计算	117
7.4.1 荷载作用下位移的计算公式及计算步骤	117
7.4.2 各类结构的位移计算公式	118
7.4.3 荷载作用下位移计算举例	119
7.5 图 乘 法	124
7.5.1 图乘法的计算公式	124
7.5.2 图乘分段和叠加	126

7.5.3 图乘法计算位移举例	128
7.6 温度作用时的位移计算	133
7.7 支座移动时的位移计算	135
7.8 线弹性变形体系的互等定理	137
7.8.1 功的互等定理	137
7.8.2 位移互等定理	138
7.8.3 反力互等定理	139
小 结	140
复习思考题	141
习 题	143
第8章 力 法	148
8.1 超静定结构和超静定次数	148
8.1.1 超静定结构	148
8.1.2 超静定次数	149
8.2 力法的基本概念	151
8.2.1 力法的基本结构和基本未知量	151
8.2.2 力法的基本方程	151
8.3 力法典型方程	154
8.4 用力法计算超静定梁、刚架和排架	156
8.4.1 超静定梁和刚架	156
8.4.2 铰结排架	162
8.5 用力法计算超静定桁架和组合结构	164
8.5.1 超静定桁架	164
8.5.2 超静定组合结构	167
8.6 对称结构的计算	169
8.6.1 结构和荷载的对称性	170
8.6.2 取对称基本结构进行计算	171
8.6.3 取半结构进行计算	173
8.7 超静定结构计算的校核	179
*8.8 力法计算超静定拱	181
8.8.1 两铰拱的计算	181
8.8.2 对称无铰拱的计算	187
8.9 温度变化时超静定结构内力的计算	191
8.10 支座移动时超静定结构内力的计算	194
8.11 超静定结构的特点	197

小 结	200
复习思考题	201
习 题	202
第 9 章 位移法	209
9.1 位移法的基本概念	209
9.2 等截面直杆的形常数和载常数	210
9.2.1 杆端位移和杆端力的正负号规定	210
9.2.2 等截面直杆的形常数	211
9.2.3 等截面直杆的载常数	214
9.3 位移法的基本未知量和基本结构	216
9.3.1 位移法的基本未知量	217
9.3.2 位移法的基本结构	219
9.4 位移法方程	220
9.4.1 位移法方程的建立	220
9.4.2 位移法方程的典型形式	221
9.5 位移法计算连续梁和无侧移刚架	224
9.6 位移法计算有侧移刚架和排架	230
9.7 用位移法计算对称结构	239
*9.8 用直接平衡法建立位移法方程	242
9.8.1 等截面直杆的转角位移方程	242
9.8.2 用直接平衡法计算超静定结构	243
小 结	245
复习思考题	246
习 题	248
第 10 章 渐近法和近似法	253
10.1 概 述	253
10.2 力矩分配法的概念	253
10.2.1 正负号规定	253
10.2.2 结点力偶的分配	253
10.3 单结点的力矩分配——力矩分配法的基本运算	258
10.4 多结点的力矩分配	263
*10.5 无剪力分配法	274
10.6 剪力分配法	277
10.6.1 柱顶有水平荷载作用的铰结排架	277
10.6.2 横梁刚度无限大时刚架的剪力分配	279

10.6.3 柱间有水平荷载作用时的计算	280
10.7 多层多跨刚架在竖向荷载下的近似计算——分层计算法	283
10.8 多层多跨刚架在水平荷载下的近似计算——反弯点法	286
小 结	289
复习思考题	290
习 题	291
第 11 章 影 响 线	295
11.1 影响线的概念	295
11.2 静力法作静定单跨梁影响线	297
11.2.1 简支梁的影响线	297
11.2.2 伸臂梁的影响线	299
* 11.3 结点荷载作用下梁的影响线 (道桥专业选学)	301
* 11.4 静力法作桁架的影响线 (道桥专业选学)	303
11.5 机动法作静定梁的影响线	306
11.5.1 机动法作影响线的原理和步骤	306
11.5.2 机动法作简支梁的影响线	307
* 11.5.3 机动法作静定多跨梁的影响线	308
11.6 影响线的应用	310
11.6.1 计算影响量值	310
11.6.2 可动均布荷载的最不利布置	312
11.6.3 移动荷载的最不利位置	313
11.7 连续梁的影响线	317
11.7.1 用静力法绘制超静定梁影响线的基本原理	317
11.7.2 用机动法绘制连续梁影响线的形状	318
11.8 荷载的最不利分布和内力包络图	320
* 11.8.1 简支梁的内力包络图	320
11.8.2 连续梁的最不利荷载分布及内力包络图	321
小 结	325
复习思考题	326
习 题	327
* 第 12 章 矩阵位移法	331
12.1 概 述	331
12.1.1 矩阵位移法的基本思路	331
12.1.2 结构的离散化及杆端位移、杆端力的正负号规定和 矩阵表示方法	331

12.2 单元分析 (一) ——局部坐标系中的单元刚度矩阵	333
12.2.1 一般杆单元的刚度矩阵	333
12.2.2 单元刚度矩阵的性质	335
12.2.3 特殊单元	336
12.3 单元分析 (二) ——整体坐标系中的单元刚度矩阵	338
12.3.1 单元坐标转换矩阵	338
12.3.2 整体坐标系中的单元刚度矩阵	339
12.4 连续梁的整体刚度矩阵	341
12.4.1 单元集成法的基本概念	342
12.4.2 单元定位向量	345
12.4.3 单元集成法的实施	347
12.4.4 整体刚度矩阵的性质	349
12.5 刚架的整体刚度矩阵	349
12.5.1 单元定位向量与单元集成	350
12.5.2 铰结点的处理	352
12.6 等效结点荷载	354
12.7 计算步骤和算例	358
12.8 平面刚架程序的框图设计	368
12.8.1 总框图与程序标识符	368
12.8.2 子框图	370
12.9 平面刚架源程序 (Fortran 90) 和算例	379
12.9.1 Fortran90 语言源程序	379
12.9.2 算例	389
小 结	391
复习思考题	392
习 题	392
第 13 章 结构的动力计算	394
13.1 动力计算概述	394
13.1.1 动力计算的特点	394
13.1.2 动力荷载的分类	394
13.1.3 动力计算的自由度	395
13.2 单自由度体系的自由振动	397
13.2.1 单自由度体系自由振动微分方程的建立	397
13.2.2 自由振动微分方程的解答	399
13.2.3 结构的自振周期和自振频率	400

13.2.4 阻尼对自由振动的影响	404
13.3 单自由度体系的受迫振动	407
13.3.1 单自由度体系受迫振动微分方程的建立	407
13.3.2 简谐荷载作用下结构的动力反应	408
13.3.3 一般荷载作用下结构的动力反应	412
13.3.4 阻尼对受简谐荷载强迫振动的影响	415
* 13.4 两个自由度体系的自由振动	418
13.4.1 两个自由度体系自由振动微分方程的建立	418
13.4.2 频率方程和自振频率	420
13.4.3 主振型及主振型正交性	425
* 13.5 两个自由度体系在简谐荷载下的受迫振动	429
13.5.1 柔度法	429
13.5.2 刚度法	433
小 结	436
复习思考题	437
习 题	438
习题答案	443
参考文献	457

第1章 绪 论

1.1 结构力学的任务与研究方法

1.1.1 结构力学的任务

工程中能承受荷载而起骨架作用的物体或体系称为结构。例如工业与民用建筑中的梁柱体系，公路、铁路上的桥梁，水工建筑中的水坝和地下工程的隧洞等。

结构从几何形状上可以分为杆件结构、板壳结构和实体结构，结构力学主要是研究杆件结构的受力分析和变形分析。严格讲，实际的结构都是空间结构，不过在进行计算时，大多数情况下，可以将它分解为若干个平面结构来分析，以使计算简化。所谓平面结构，即各杆轴线和荷载都位于同一平面内的结构。本书主要研究平面杆件结构。至于板壳结构和实体结构则属于弹性力学的研究范畴。

结构力学的主要任务是解决结构的受力与其承载能力的矛盾，即与杆件体系的强度、刚度、稳定性的关系。结构力学是材料力学（或工程力学）的后续课程。材料力学的主要任务是解决单根杆件的受力与其承载能力的矛盾，即单根杆件的受力与其强度、刚度、稳定性的关系。在材料力学的基础上，结构中每根杆件的受力和变形分析清楚后，整体结构的承载能力问题则不难解决，所以在结构力学中一般不涉及应力分析问题。

同时，结构力学又为后继的混凝土结构、砌体结构和钢结构等课程提供了力学、变形分析的基础。因此，结构力学课程的学习在土木建筑、道路、桥梁、水利工程以及地下工程各专业的学习中具有十分重要的地位。

1.1.2 结构力学的研究方法

1. 综合分析法

结构力学的计算方法很多，但所有方法都必须满足以下三个基本条件：

(1) 力系的平衡条件。在一组力系作用下，结构的整体及其中任何一部分都应满足力系的平衡条件。

(2) 变形的连续条件，即几何条件。连续的结构发生变形后，仍是连续的，材料没有重叠或缝隙；同时结构的变形和位移应该满足支座和结点的约束条件。

(3) 物理条件。把结构的受力和变形联系起来的条件，即物理方程。

以上三个基本条件，贯穿在本课程的全部计算中，只是满足的次序和方式不同而已。

2. 叠加法

对于线弹性材料，在小变形的条件下，在对结构进行受力和变形分析时，可以将一个复杂问题分解为几个简单问题，将每一个简单问题的分析结果叠加起来，求得复杂问题的最后结果。

1.2 结构的计算简图

1.2.1 计算简图及其选择原则

实际结构是很复杂的，完全按照结构的实际工作状态进行力学分析是不可能的，也是不必要的。因此，对实际结构进行力学计算以前，必须加以简化。

在计算时，对一个实际结构，用一个略去不重要的细节、而能反映其基本受力和变形性能的简化的计算图形来代替它。这种代替实际结构的简化计算图形就称为**结构的计算简图**。结构的受力分析都是在计算简图上进行。因此，计算简图的选择，是结构受力分析的基础；选择不当，则计算结果不能反映结构的实际工作状态，严重的将会引起工程事故。所以，对计算简图的选择，应该十分重视。

计算简图的选择原则是：

- (1) 计算简图应能反映实际结构的主要受力和变形性能；
- (2) 保留主要因素，略去次要因素，使计算简图便于计算。

此外，在设计的不同阶段，或采用不同的计算手段时，对于同一实际结构可采用不同的计算简图。如在初步设计的方案阶段，可采用较为粗糙的计算简图；而在技术设计阶段，则应采用较为精细的计算简图。如用手算，可采用较为简单的计算简图；用电子计算机计算，则可采用较复杂的计算简图。

1.2.2 计算简图的简化要点

1. 杆件的简化

因杆件的截面尺寸通常比杆件的长度小得多，截面的受力和变形符合平截面假设，截面上的应力可根据截面的内力（弯矩、剪力、轴力）来确定，截面的位移也可根据轴线上各点的位移来确定；所以在计算简图中，杆件可用杆件的轴线表示；杆件的长度则用杆件两端各杆件轴线交点之间的距离来表示。

2. 结点的简化

结构中杆件与杆件之间的相互连接处，称为结点。木结构、钢结构和混凝土结构结点的构造方式虽然很多，但结点的计算简图有两种基本的类型，即**铰结点和刚结点**。

- (1) 铰结点。图 1-1a 所示是一木屋架的上弦结点。各杆之间的连接，不

能阻止其相互间的微小转动，计算时简化为一铰结点，其计算简图如图 1-1b 所示。理想铰结点的特征是结点上所连接的各杆不能相对移动，而可以绕铰作自由转动。在铰结点处，只能承受和传递力，而不能承受和传递力偶。这种理想光滑的铰结，在实际结构中很难遇到，木屋架的结点也只是比较接近铰结点。

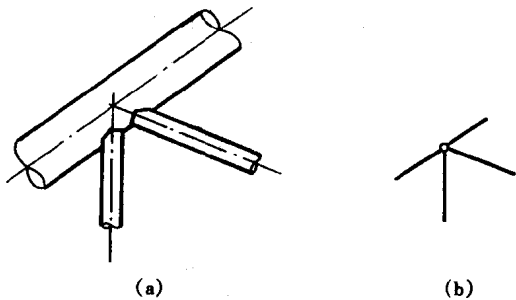


图 1-1 铰结点的实例和计算简图

(2) 刚结点。图 1-2a 所示是一钢筋混凝土框架边柱和梁的结点。由于梁和柱之间的钢筋布置以及混凝土将它们浇注成整体，使梁和柱不能产生相对移动和相对转动，计算时简化为一刚结点，其计算简图如图 1-2b 所示。刚结点的特征是结点上所连接的各杆端之间不能有相对移动，也不能有相对转动。在刚结点处不但能承受和传递力，而且能承受和传递力偶。

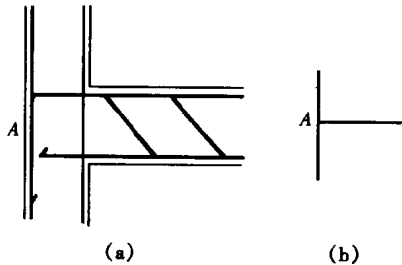


图 1-2 刚结点的实例和计算简图

3. 支座的简化

结构与基础的连接装置称为支座。支座的作用是把结构固定于基础上，同时，结构所受的荷载，通过支座传到基础和地基。支座对结构的反作用力称为支座反力。平面结构的支座有下列三种基本类型：

(1) 铰支座。图 1-3 所示为一预制的混凝土柱，插入杯形基础，杯口的空隙用沥青麻丝填充，柱子可以有微小的转动，但在竖直方向和水平方向的移动受限制，可以简化为一个铰支座。图 1-4 中 A 处所示为一水工结构的弧形闸门铰支座。闸门开启时，可绕一固定圆轴的中心 A 旋转。

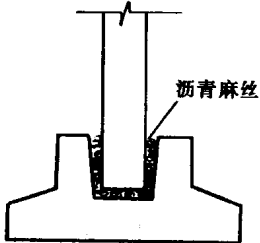


图 1-3 铰支座实例

图 1-5a 所示的铰支座通常可用图 1-5b 的计算简图来表示。铰支座的机动特征是结构可以绕铰的中心 A 转动，但 A 点的水平和竖向移动受限制。因此，结构受荷载作用时，如略去转动时摩擦力的作用，A 点只有水平支座反力 X_A 和竖向支座反力 Y_A ，且通过铰的中心。根据铰支座构造的机动特征和受力特征，也可用支杆表示的计算简图来表示（图 1-5c）。支杆是两端为铰而一端连于基础的刚性杆。

(2) 辊轴支座。图 1-6 所示为桥梁结构中所用的辊轴支座的简化图形。结构的端部用铰链与支座相连，可以发生转动，但支座下部的弧形面可以使结构的端部随该面沿切线方向作微小移动，结构的竖向位移受到限制。

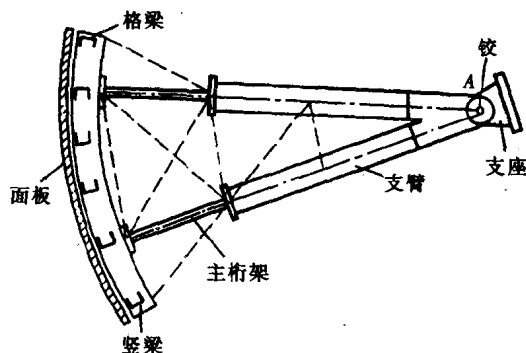


图 1-4 弧形闸门的结构

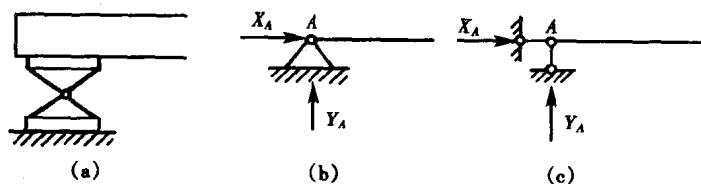


图 1-5 铰支座及其计算简图

辊轴支座通常用图 1-7a 所示的计算简图来表示。辊轴支座的机动特征是结构可以绕铰 A 转动，并容许沿支承面 $m-n$ 作微小移动，但限制铰 A 的竖向移动。因此，结构受荷载时只有竖向支座反力 Y_A 。根据辊轴支座构造的机动特征和受力特征，也可如图 1-7b 所示，用垂直于支承面的一根支杆表示的计算简图来表示。由此图可知，结构可以绕铰 A 转动，并可沿以 B 为圆心、 AB 为半径的圆弧移动。如果移动量很小，则方向可看作是水平的。

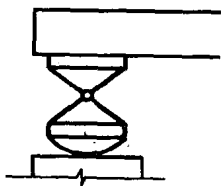


图 1-6 辊轴支座

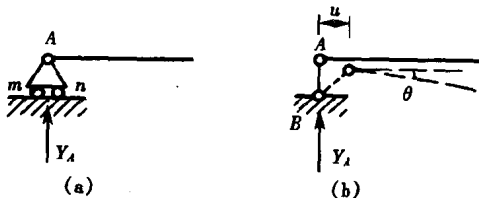


图 1-7 辊轴支座的计算简图

(3) 固定支座。图 1-8 所示为一悬臂梁。当梁端插入墙身有一定深度时，梁端不能有移动和转动，可以简化为一固定支座。