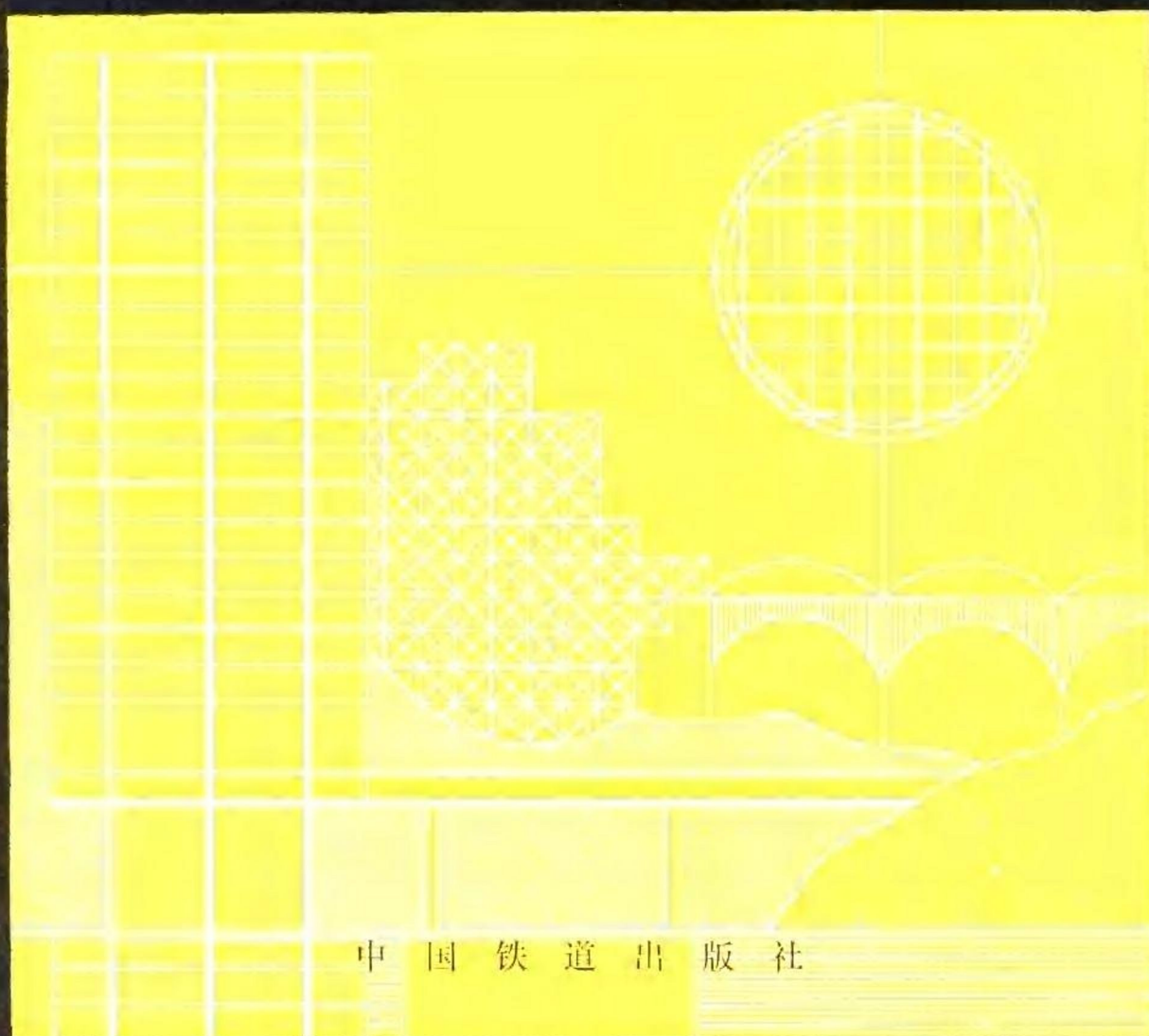


结构分析的基本概念

〔美〕弗瑞德·W·波费特 著

王恩惠 胡人礼 译



结构分析的基本概念

〔美〕弗瑞德 W. 波费特 著

王 恩 惠 译
胡 人 礼

中 国 铁 道 出 版 社

1980年

内 容 简 介

本书为美国1977年出版的结构力学教材。全书共九章，前七章论述了一般概念、静定结构的分析以及计算结构位移的几何法和虚功法，后两章论述了静不定结构分析的柔度法和刚度法。

本书的特点是全面采用了矩阵的数学形式，以适应使用电子计算机的需要。本书可供大专院校师生和工程设计人员阅读、参考。

Fred W. Beaufait
BASIC CONCEPTS OF STRUCTURAL ANALYSIS
Prentice-Hall, Inc. 1977

结构分析的基本概念

〔美〕弗瑞德 W. 波费特 著

王 恩 惠

胡 人 礼 译

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：26 字数：575 千

1980年8月 第1版 1980年8月 第1次印刷

印数：0001—13,000册 定价：2.65元

目 录

第一章 结构性能概述	1
1.1 引言	1
1.2 强度分析	2
1.3 刚度分析	2
1.4 稳定性分析	2
1.5 使用效能	3
1.6 小结	3
第二章 理想化模型	4
2.1 构架结构	4
2.2 结构与模型之间的关系	4
2.3 结构和模型的加载	9
2.4 分析的类型	9
2.5 有关分析的假设	10
2.6 计算的精确度	10
2.7 自由体图	11
2.8 稳定性、确定性和不定性	12
2.9 小结	14
第三章 支承反力	15
3.1 静力方程	15
3.2 结构对于支承反力的静力稳定性和确定性	16
3.3 简单结构的反力	18
3.4 组合结构的反力	21
3.5 小结	28
3.6 符号	29
3.7 习题	29
第四章 静定桁架中的内作用力	32
4.1 桁架的定义	32
4.2 桁架杆件的布置	32
4.3 桁架的静力稳定性和静定性	34
4.4 杆力的计算	37
4.5 用于确定静定平面桁架中杆力的计算机程序	49
4.6 小结	52
4.7 符号	52
4.8 习题	53
第五章 静定梁和框架中的内作用力	57

5.1 引言	57
5.2 梁结构和框架结构的静力稳定性和静定性	60
5.3 轴向力、剪力和弯矩的方程	63
5.4 梁单元上横向荷载、剪力和弯矩之间的关系	67
5.5 剪力图和弯矩图	69
5.6 小结	81
5.7 符号	82
5.8 习题	82
第六章 平面结构的位移—几何法	85
6.1 引言	85
6.2 变位曲线的微分方程	86
6.3 直接积分法	89
6.4 中点差分法	95
6.5 共轭梁法	112
6.6 小结	122
6.7 符号	122
6.8 习题	123
第七章 结构的位移—虚功法	129
7.1 能量和功	129
7.2 基本概念	130
7.3 由于内作用力所产生的虚应变能	137
7.4 桁架结构的挠度	143
7.5 梁和框架结构的挠度	150
7.6 马克斯威尔互等位移定理和贝蒂定理	164
7.7 虚位移原理	168
7.8 小结	170
7.9 符号	171
7.10 习题	173
第八章 结构分析的柔度法	179
8.1 引言	179
8.2 基本方程	179
8.3 柔度法—体系方法	184
8.4 柔度法—单元方法	208
8.5 小结	256
8.6 符号	258
8.7 习题	260
第九章 结构分析的刚度法	267
9.1 引言	267
9.2 基本结构单元	272
9.3 分析方法的组成	296

9.4 刚架结构的分析	316
9.5 桁架结构的分析	339
9.6 连续梁和矩形框架的分析	356
9.7 力矩分配法	365
9.8 小结	395
9.9 符号	397
9.10习题	400
一般参考书	408
附录 英制单位的写法及其对公制的换算	409

第一章 结构性能概述

1.1 引言

1.1.1 为了保证工程结构具有满足要求和可靠的使用效能,结构工程师必须能准确地预测结构体系对于可能发生的干扰(力、荷载、位移等等)的全部反应。结构的这种反应和性能的预测,必须基于对性能尽可能与实际结构相接近的模型所进行的分析。

所选定的分析模型的类型可以是各种各样的。在设计或确定实际结构各部分时,可以利用物理试验模型,应用实验室的试验结果,还可以使用纯数学模型。也可以采用这两种模型的结合(通常以试验模型验证数学模型)来设计建议采用的结构。一般来说,全部设计过程主要是应用数学模型。根据类似结构的经验,提出结构概念并给予明确的实际尺寸。然后提出数学模型,应用一般分析方法作详细的分析。用所给的设计标准对分析结果进行检验,视情况修改结构的形状。按修改后的实际结构修改数学模型,再进行详细分析。这种循环操作继续进行,直到其结构设计在根据数学模型承受外加干扰获得最佳性能为止。在每一次施加荷载下都可得出一些相应的反应,当动力条件时其反应取决于质量的分布和结构模型的变形。一般要寻找的最佳结构设计,是指材料和建造费用最低,而且在许多情况下是重量最轻的结构。本书将着重介绍数学模型和用于分析其模型以完成结构体系设计的各种分析方法。

1.1.2 应用可变形固体力学研究结构模型性能,起始于十七世纪初期。在这之前,建造者或设计者在确定结构部件尺寸时只是墨守陈规和旧律。伽利略最先致力于合理地说明承受荷载的物体的性能。他的研究显然与意大利海军关于船体的建造有关。从很早起,分析方法的研究就已经有了巨大的进展,顺便要提一下,其中有很多是由诸如牛顿、库仑、泊松、纳菲尔(Navier)、圣·维南(St. Venant)、欧拉(Euler)和柯希(Cauchy)以及其他早期研究者做出的。几个世纪以来,分析方法有了改进和提高。随着这些改进,特别是随着电子计算技术的出现,分析人员和设计人员已经能够研究更能精确表示实际结构及其反应的模型的性能。

1.1.3 用各种方法对于承受力或其它干扰的结构模型性能的分析,是根据应用于可变形固体的必要平衡条件的牛顿力学基本定律,以及实际结构材料的力学特性得出来的。所需要的材料特性是从实验室在控制条件下得到,然后与模型结合起来。

在结构体系方面,有三个基本的东西:强度、刚度和稳定性。结构应有足够强度以抵抗作用于它上面的干扰。另外,结构的各个部分必须足够坚硬或具有足够的刚度,以使在施加的干扰作用下不产生过大的挠曲或变形。最后,每一部分必须具有适当的大小,以使承受压缩荷载时不发生屈曲。

在结构分析和设计中,所有必须考虑的事项分成这三类,与每一类有关的要求必须得到满足。在大多数情况下,还要做到费用(成本)最低。

1.2 强度分析

结构体系中各部分杆件的**强度**，根据模型受力状态的分析来确定。这种分析通常包括结构在可能要求它抵抗的任一作用力下所引起的轴向应力、剪应力和弯曲应力的求算。其受力状态可藉各种分析方法来确定。基本上，受力状态必须在边界处满足所施加的力或位移的条件或同时满足这两个条件，还必须满足平衡条件以及涉及材料内部力学性能的应变协调性和应力-应变关系。

为了满足强度要求，需要选定材料和杆件大小，使其杆件中任一点处的计算应力不超过所选材料的规定允许值。在不可能得到有关加载条件与材料性能的足够资料的情况下，或实际反应不可能模拟到想要的精确度的情况下，对分析结果采用安全系数是很重要的。这些系数的应用在很大程度上取决于设计者的判断和经验，还取决于根据多年研究结果并由权威方面所颁发的各种结构设计法规中提出的规定。设计者了解所采取的建造方法和安装方法也是很重要的，因为，在某些情况下，安装过程中杆件承受的荷载条件会引起超过工作荷载使结构产生的应力状态。

1.3 刚度分析

结构或结构构件的**刚度**，乃是表示作用于结构上的荷载与所产生的变形之间的一种特性。一根杆件相应于一特定位移状态的刚度是随其几何形状（或杆件的实际尺寸）的不同而变化的，也因制造该杆件所用材料的力学性能的不同而变化，所以，设计者可以而且必须藉通过结构模型的刚度分析以确定结构各部件或整体的刚度来考虑和控制结构的挠度（变形）。虽然建筑物的楼板可能在承受所作用的荷载方面具有足够的强度，但是过大的挠度可以引起工业设备失灵，或者引起粉刷的天花板底面开裂。在某些情况下，刚度分析可能是结构分析中的主要方面。例如在大型涡轮发电机构架基础设计中，必须避免相应于共振的挠度。

关于各种结构构件在一定条件下的容许挠度量，在许多情况下，由结构设计法规来规定，或者根据多年的有关经验或应用良好的工程判断来确定。

1.4 稳定性分析

结构部件的**稳定性**是指，由于轴向压缩荷载的作用，部件可能屈曲的现象。这种失败或毁坏的方式通常是由于结构杆件具有过分的细长度引起的，但是它也随材料的力学性能的不同而变。屈曲现象的最早数学表达式是瑞士数学家 L·欧拉（1707—1783）于 1757 年提出的。他的研究成为后来所有结构稳定性理论的基础。能够准确预测细长柱或薄壳以及梁的腹板在屈曲前所能承受的轴向压缩荷载量（见图 1—1），对于设计人员来说是非常重要的。

结构杆件制造中的缺陷，对于能使杆件维持稳定状态的荷载临界值之确定，也起着作用。此外，设计人员在稳定性分析中还必须考虑局部不稳定性，它与整个杆件不稳定性不同，局部不稳定性可以在杆件的个别区域内发生，使整个杆件不能使用；还要考虑扭转不稳

定性，也就是考虑结构的一部分或整个体系的扭转。

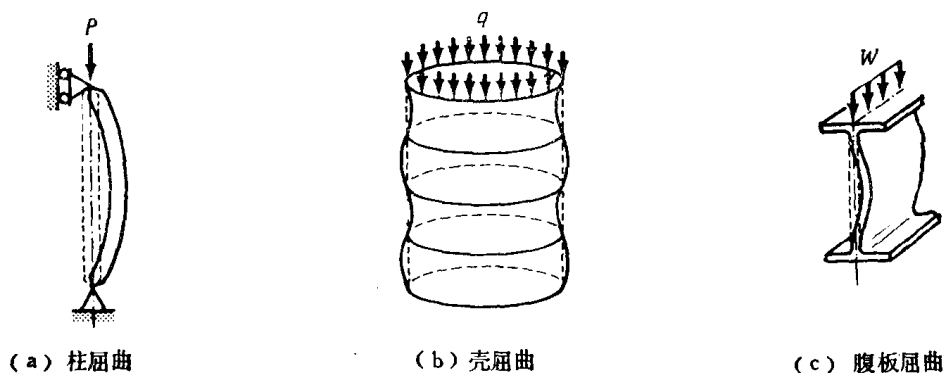


图 1—1 屈曲现象的典型分析模型

1.5 使用效能

实际结构体系的良好使用效能，取决于设计人员恰当应用模拟和分析的方法以及建造者和材料制造者的优良工艺。重要的是结构设计人员要知道可能影响结构效能的许多不可控制因素，因为结构的建造是基于设计人员的分析之上的。不论模拟和接着进行的分析可以怎样彻底和精确，但是必须与良好的工程判断相结合，目的在于使实际结构的使用效能良好。为此，结构设计人员必须尽力这样去做。

1.6 小 结

本章中用一般的说法介绍了结构分析和设计的基本原理。讨论了今天广泛用于预测结构体系反应的成熟的数学分析方法，这种方法的基础是对其体系应用数学模型。介绍了作为本书基础的结构分析的各个方面之分类。强调了工程判断在设计使用效能良好的结构时所起的重要作用。在后面诸章中将深入讨论设计人员必须熟悉和精通的各种分析方法。

第二章 理想化模型

2.1 构架结构

由比其横截面尺寸要长的单元（杆件）组成的结构体系称为**构架结构**。构架结构的单元称为**线性杆件**，因为它们可以顺一个方向传递荷载的作用，亦即沿单元的长度传递荷载的作用。线性杆件可以是直线形的也可以是曲线形的。

有两种基本的构架结构：

1. 桁架结构。
2. 刚架结构。

桁架结构是设计成当干扰作用时结构杆件主要承受轴向力的结构体系。通常，诸杆件布置成三角形形式。桁架结构的节点设计成基本上没有抵抗力矩的能力，因而允许与一节点连接的诸杆件端点独立地转动。电力线的输送塔是一个桁架结构的好例子，桁架还用于屋面体系和桥梁结构中。

刚架结构是其节点被设计成提供诸相交杆完全连续性的结构体系。当刚架结构承受干扰时，诸杆件可能产生轴向变形、剪切变形、扭转变形和弯曲变形。现代大楼建筑的骨架就是刚架的一个例子。

当一结构的所有杆件和所作用的荷载位于同一平面内时，该体系称为**平面结构**。如果一结构的所有杆件不位于同一平面内，那么该体系称为**空间结构**。一个由位于同一平面内的杆件组成，而承受垂直于该结构平面的荷载作用的刚架称为**格栅结构**。

梁结构亦即一个具有两个或多个支承点的线性杆件，考虑为刚架结构的特殊类型。由支于杆端处的一个或多个曲线杆件组成的平面结构体系称为**拱结构**。梁和拱结构常常用于桥梁体系中。

有时采用**混合结构**体系，它是桁架结构和刚架结构的组合。

2.2 结构与模型之间的关系

2.2.1 为了分析在所给干扰作用下结构体系的性能，需要确定一个满足分析方法的限制的结构理想化模型。要分析的是结构体系的理想化模型而不是该结构本身。当确定一结构体系的模型时，必须运用工程判断；模型必须尽可能精确代表实际结构。必须作某些假设，以便使分析成为可能；建造结构的材料的实际性能必须加以理想化以简化数学表示法，还要作一些假设以简化分析本身。例如，为了分析一个三维构架结构，可以把它分成一系列二维平面结构，又如板或壳这样的面形结构，可以理想化为框架结构。使结构分析复杂化的结构细节，在模型中可以略去不管，如果它们对体系的总性能影响很小的话。

提出数学模型和解释分析结果，是工程师在分析结构体系性能时的主要职责。用于分析模型的数学运算是相当简单和常规的，在许多情况下，这种运算可以编成数字计算机程序。

轮廓图

2.2.2 当为一结构体系建立模型时,其模型的形态往往藉一轮廓图来描述。结构的各别杆件以单线来表示,两根杆件或多根杆件连接处的位置以一个点来表示。代表结构中一特定杆的杆线方向表示该杆件传递荷载的方向。这种杆线未必就是杆件的形心轴,而是可以大致确定用于描述杆件在体系中的位置的工作轴线。杆线的长度确定杆件的跨长。因而,如何合理确定其杆线长是一个问题,因为,结构杆件存在着宽度、高度和长度尺寸,这就必须确定,它是以杆件的净跨作为跨长,还是如通常所做的按照预先确定的诸杆件工作线交点之间的距离作为跨长。其次,因为杆件具有宽度和高度,所以可能难以正确地决定把节点位置假设在哪里。通常,把节点取在上述诸工作轴线的交点处。在确定一模型的轮廓图时不应该太犹豫。模型在几何上的微小偏差不可能在分析中引进不能接受的误差。

除了确定轮廓图的形态外,还必须确定结构的各别杆件,具体地说,必须确定诸杆件的几何尺寸。在大多数情况下,所需要的尺寸是明显的,然而有时会出现必须采取某些设想的情况。

节点的类型

2.2.3 一旦数学模型的形态确定了,就必须模拟出两根或更多根杆件连接处的节点的特性以及结构与其支承系统的连接装置。如果一结构的连接设计成通过节点保持各杆件的完全连续性,如图2-1中所示,那么此节点必定按刚体工作,使与该节点连接的所有杆的端点产生相同的位移。有些接头,如图2-2中所示,它们的连接不能提供诸连接杆的完全连续性,因而使得有可能在该节点处诸杆有某一相对转动。如果一节点抵抗诸连接杆件的相对运动的能力可以求得的话,那么此节点就能够模拟成反映这种性能。但遗憾的是难以估计出接头的刚性程度。结构的节点通常理想化为刚性节点或铰接节点。例如,图2-2(a)中所示连接类型,通常描写成柔性者,对于抵抗梁端转动提供小的约束,可以理想化为一个铰连接,而对分析没有危害。相反,图2-2(b)中所示连接类型可以设计成对抵抗梁端转动有足够约束程度,可以较精确地模仿为一刚性连接。另外,还必须应用判断。

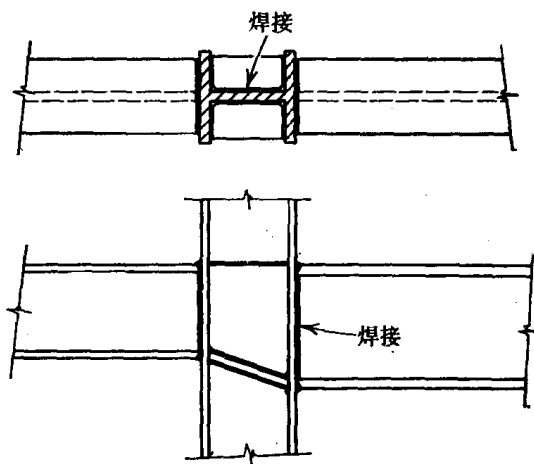


图2-1 刚性连接

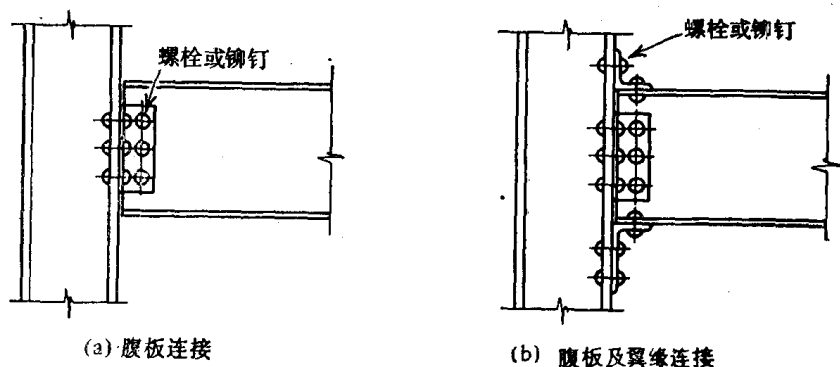


图2-2 半刚性连接

连接还用于结构体系内，以提供某些结构特性：可以在一杆的跨度内放进一个销连接，使该点处的内弯矩为零；或在结构中某点处可以采用不使剪力从连接器的一侧传到另一侧的连接（剪力连接器）。准确地认识和模拟这些特殊连接器是很重要的。

本书中对于刚性连接、半刚性连接、销接和剪力连接所用的模型表示法示于图 2—3 中。

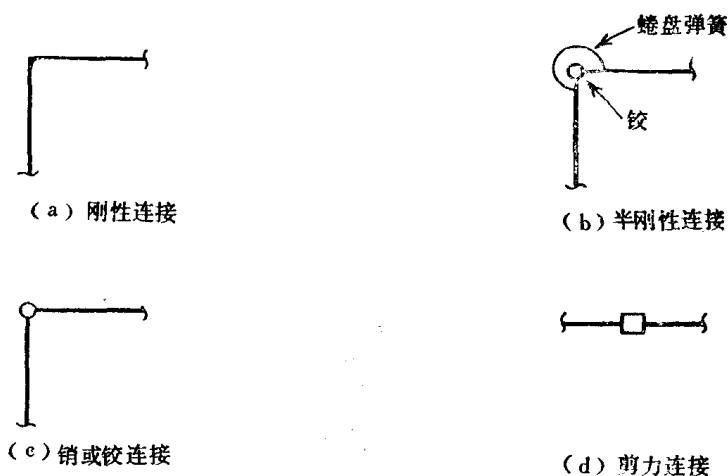


图 2—3 结构连接的模型表示法

支承的类型

2.2.4 结构与其基础连接的方式和基础本身的设计，决定了产生于支承而作用于结构上的约束作用力的性质和个数。

虽然，关于一结构的支承可以作出很多种设计，但是，为了表示数学模型，较普通的支承类型可以理想化为下面一种或几种类型的组合：辊、铰、螺旋形弹簧、螺旋弹簧和固定支承。

图 2—4 (a) 所示辊支承，假设在连接点处对结构提供一约束，以阻止垂直该辊支承面方向的移动*。这样，在支承点处，结构可自由地转动，并自由地顺平行支承面的方向移动。辊支承对结构的约束，描述成作用于模型上的单个反作用力，其作用线垂直于辊的支承面，其大小为未知。为了方便，这单个反力可以以两个相关的分力来描述。辊支承既能对结构提供一个推力，也能提供一个拉力。

铰支承或销支承[图 2—4 (b)]假设在连接点处对结构提供一约束，以阻止任何方向的移动，但允许结构自由转动。由这种支承提供的约束可以用两种方式描述：(1) 为单个反作用力，其作用线方位和大小均为未知，或者 (2) 为一对正交反作用力，它们的大小均为未知。在任一情况下，这种支承给分析引进两个未知数。

图 2—4 (c) 中表示的固定支承**假设在支承点处约束此结构以阻止移动和转动。这种支承的效应可用一个反作用力矩和一对正交反作用力来描述。由于正交反力组的指向可以随

* 原文为“translation”，可根据情况译为移动、平动（平移）或线位移。它与转动（角位移）并列，统称为位移。

——译者注

** 固定支承，亦称固结支承或嵌固支承。

——译者注

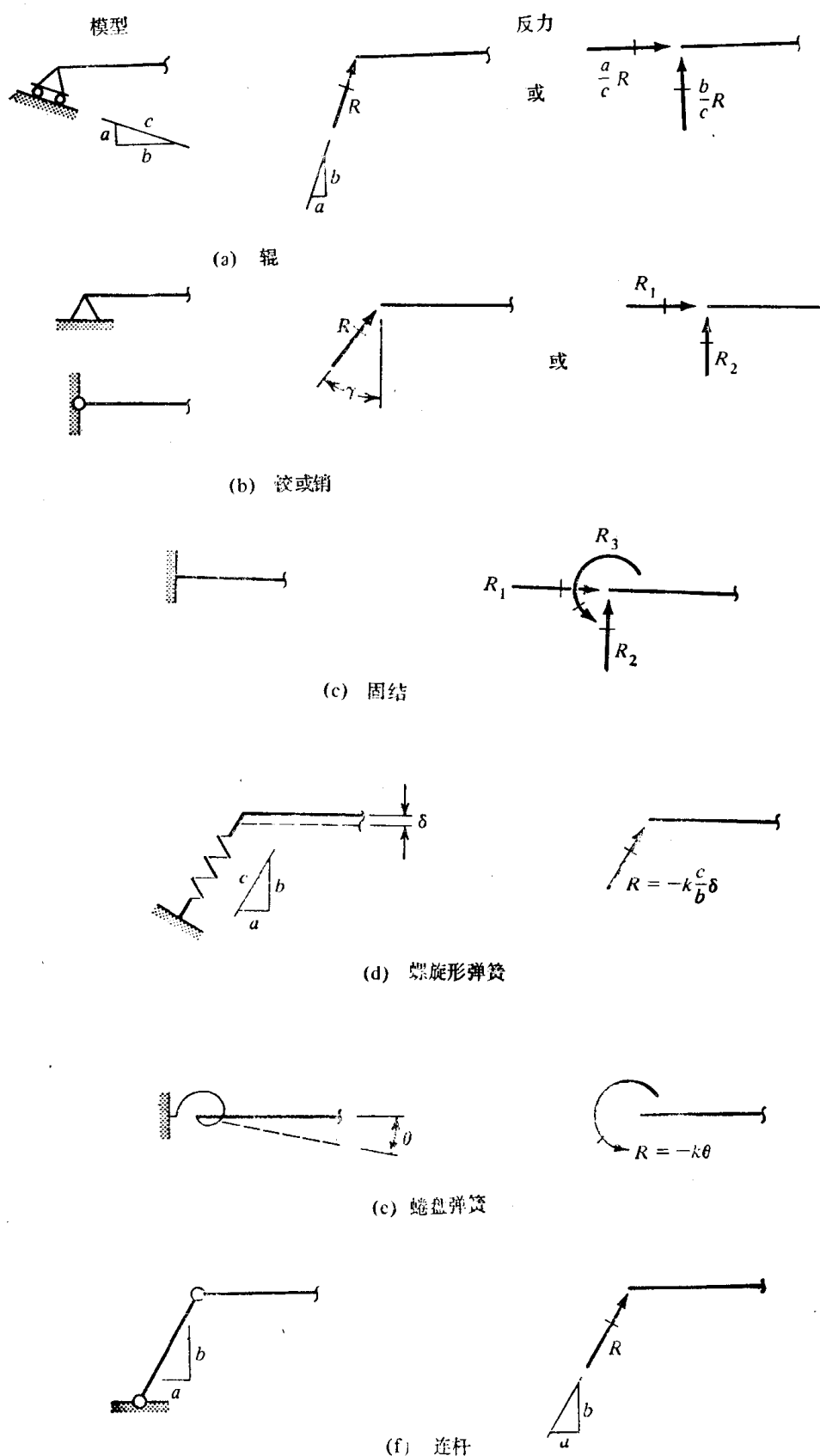


图 2—4 支承条件

意选定，所以只是三个反作用力的大小是未知的。

图 2—4(d) 中所示**螺旋形弹簧**支承，对抵抗结构顺弹簧轴方向的移动起部分约束作用。结构可以在支承点处自由产生转动和垂直于弹簧轴的移动。螺旋形弹簧支承的效应可以以单个反作用力来描述，该反作用力的作用线顺弹簧的轴，其方向与弹簧的位移方向相反，它的大小随弹簧刚度 k 和弹簧所产生的线性变形而变。这种支承给分析引进一个未知数。

螺旋弹簧支承[图 2—4(e)]可以在连接点处仅提供抵抗结构转动的部分约束。结构在支承点处可自由移动。藉这种支承对结构提供的约束可以描述为一反作用力矩，它的大小随其弹簧刚度 k 和弹簧所产生的转动变形而变，它的方向与弹簧的转动变形相反。

图 2—4(f) 中所示**连杆**支承的作用与辊支承相似。由于连杆的任一端均为销，所以该支承只能产生一个反力，其作用线必须穿过两销的中心。这种杆件往往称为**二力杆**。除阻止顺该连杆轴方向运动外，结构可以自由运动。其反力的作用线为已知，只是它的大小必须要确定。

例题2-1 试作出图 2—5* 中所描述的整体钢筋混凝土山形刚架的理想化模型。该结构的基础由倾斜和竖直的桩群所支承的扩大底座组成，其桩顶嵌固于扩大底座中。该刚架设计为现场灌注。

由于该刚架的诸杆件具有变化的高度，所以对每一杆件要规定工作线。假设柱与梁之间的节点位置位于这些工作线的交点处。如果柱与基础是整体的，那么柱端可以假设是固定的。所示桩基础应具有抵抗基础任何转动的能力。所建议的该结构的数学模型给于图 2—6 中。

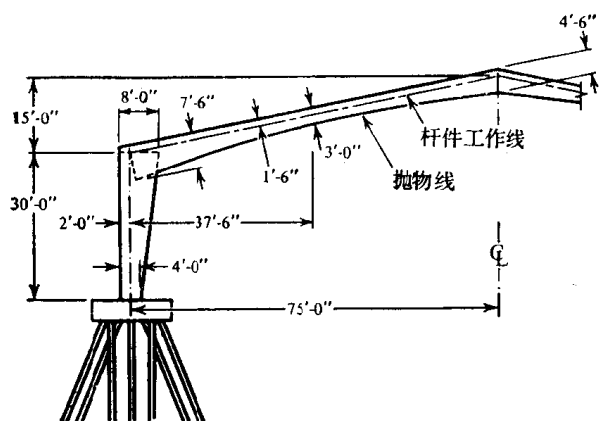


图 2—5 例题 2—1，山形刚架

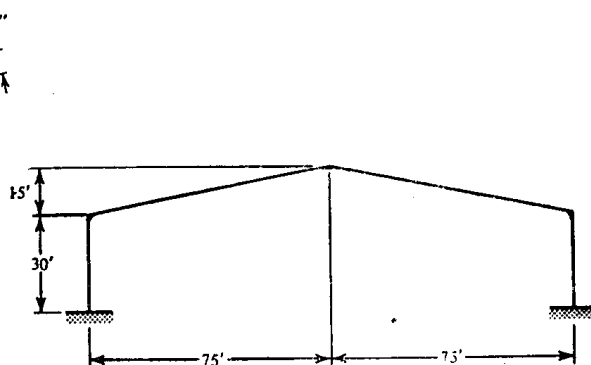


图 2—6 例题 2—1 山形刚架的模型

该刚架诸节点处梁和柱的假设轮廓以虚线示于图 2—5 中。这些假设的形状可用于各单杆的分析。

*本书所有图中的各种单位所用符号的意义及其与公制的换算，见附录。

——译者注

2.3 结构和模型的加载

结构通常是为一一定的目的而建造的, 房屋是用来围住或限定一空间的, 坝或桥梁是用来将荷载从空间传至地面。很少是为建造结构而建造结构的, 但是也有这样做的, 例如圣·路易斯拱。不管结构的建造是什么原因, 所有结构都承受这一种或那一种干扰或者荷载的作用。因此, 为了促进结构性能的分析, 不仅需要模拟结构本身, 还必须模拟作用于结构上的荷载或干扰。然而, 不了解荷载或干扰本身, 那么荷载或干扰是不可能理想化的*。

荷载可以分成两大类: **恒载**和**活载**。恒载为静止的重力, 考虑它们永久作用于结构上, 这些力也就是结构自身的重量以及结构必须支承的任何固定设备的重量。活载为动力, 它可能取决于也可能不取决于重力的影响。活载是可动的, 因而它们与时间有关。有些荷载的持续时间可能是长的, 如对办公楼的可动隔墙或仓库中所存货物的重量的情况, 以几小时, 几天, 甚至几年计; 或者其持续时间可能很短, 以几秒钟计, 如对于炸弹爆炸引起的力的情况。

除了荷载的作用外, 结构可能承受诸如趋于改变结构几何尺寸的温度变化, 支承土的固结或膨胀引起结构支承的运动, 或引起整个结构发生运动的地震等这样的干扰作用。

结构可能承受的许多较常见荷载由现行建筑法规和设计规范来确定, 但是这些资料的来源不能考虑到可能作用于特殊结构上的所有各种荷载。了解结构可能承受的各种荷载和描述这些荷载对结构的作用是工程师的职责。有一些荷载诸如恒载和许多活载可以以数学式较正确地来区别和描述。其它诸如风力、地震效应和热效应等荷载和干扰则必须以等效力来描述, 以便分析结构性能。在可能时, 以等效静力荷载表达活荷载的作用是合乎理想的, 因为结构的动力性能分析起来复杂。工程师在将作用于结构上的荷载理想化为模拟荷载时, 仍然必须依靠判断和经验。

在模拟荷载时, 必须规定理想化力的大小、方向、作用点和作用线。在大多数情况下, 荷载或干扰可以表示为一集中力或分布力。

2.4 分析的类型

结构体系理想化模型的性能的分析**可以分为两类: **作用力的分析**和**位移的分析**。作用力的分析包括支承反力的求算和结构内作用力和应力变化的确定。位移分析包括结构中各杆的变形和其体系的位移的确定。往往把这两种分析联合起来, 以便分析结构。

为了完成作用力分析和位移分析这两个不同方面, 已提出了许多方法。每一种方法具有一定的特点, 使之能适于求解某些问题。有一些方法最适于手算, 而另外一些则适于数字计算机计算。这些方法都建于下面三种方程的基础之上:

1. **平衡方程**, 它是根据任一静力系必须处于平衡这一事实提出来的。
2. **协调方程**, 它确认一特定点处结构的位移必须与该点处结构内产生的应变相协调。
3. **应力-应变方程**, 它规定建筑材料的应力和应变之间的关系。

* 关于荷载的完整讨论, 见William McGuire著*Steel Structures*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1968.

** 以后, 结构体系的理想化模型将称为结构。

2.5 有关分析的假设

本书中所讨论的线性分析方法，是以建造结构体系所用的材料具有线性的应力-应变关系（亦即服从虎克定律），而且应力决不出材料的弹性极限为基础而提出来的。这意味着结构存在线性的荷载-变形关系。此外，任何作用荷载或干扰引起结构几何形状的变化，当其结构的原来几何形状相比时，认为可以略去不计。

由于这些假设，诸平衡方程可应用未变形结构的几何形状来建立，而且迭加的概念可用于确定结构对所作用干扰的反应。迭加的概念说明于图 2—7 中。在 $A-B$ 跨内均匀荷载 W 和 $B-C$ 跨内集中荷载 P 的作用下，该连续梁的状况可描述为下面两项之和：（1）仅对跨度 $A-B$ 中均匀荷载 W 的反应，和（2）仅在跨度 $B-C$ 中有集中荷载作用的反应。

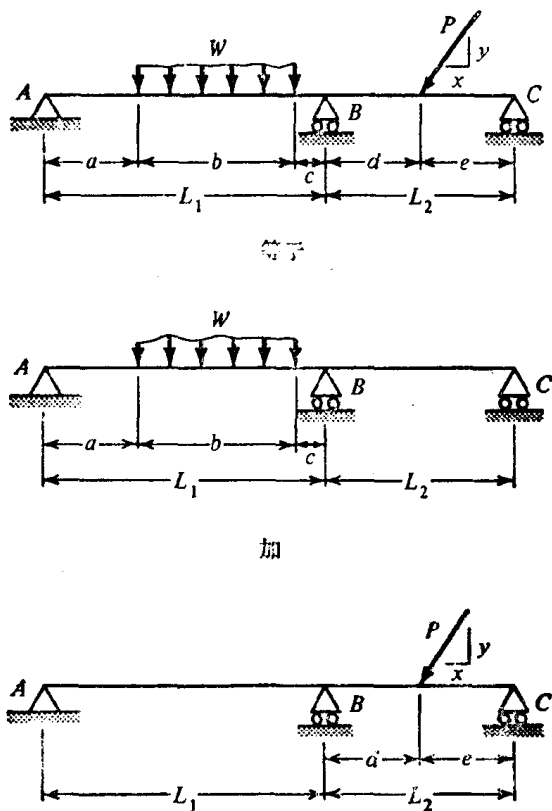


图 2—7 迭加概念

2.6 计算的精确度

今天，大多数工程计算是借助于小型电子计算器或在数字计算机上进行的，其结果一般显现八位或更多位有效数。虽然在计算过程中（特别是当求解多元联立方程时）需要大量有效位数以减小舍入误差，但要记住，其解答可能不比所用的原始数据更为精确。譬如，当荷载可能精确地测定（模拟）为不多于两位有效数时，那么计算反力至五位或六位有效数是不合理的。当解释计算结果时必须应用判断，譬如说，在计算机上产生八位有效数的答案，应舍入到适当有效位数以与初始数据相一致。

例如, 对于一结构杆, 如果弹性模量 E 规定为 30,000 千磅/英寸², 惯性矩 I 给定为 1000 英寸⁴, 当刚度 EI 从千磅-英寸² 的单位变换成千磅-英尺² 时, 在一计算器上计算 $(30,000)(1,000)/144$ 的解可以显现为 208 333.3333。更合适的答案可以为 208,000。问题在于方框中的那些数字并不显示出数据的精确度。

2.7 自由体图

有助于结构分析的最有用的工具是**自由体图**, 也就是从总体系中分离出来说明结构体系的一部分的草图。当对总体系的个别部分作一自由体图时, 不仅必须表示所作用的干扰, 而且还必须表示出已被切去的体系部分的影响。

如果把如图 2—8 (a) 中所示的结构与支承分离开, 那么支承施加到结构上的约束作用力——称为**反作用力**, 就如图 2—8 (b) 那样, 表示在自由体图中。当结构的个别部分被分离出来时, 诸相邻段对该分离段的影响以作用于暴露面上的**等效内作用力**来表示, 如图 2—8 (c) 中所示。注意, 当结构的一根杆件, 在从结构分离出来的过程中被一假想截面

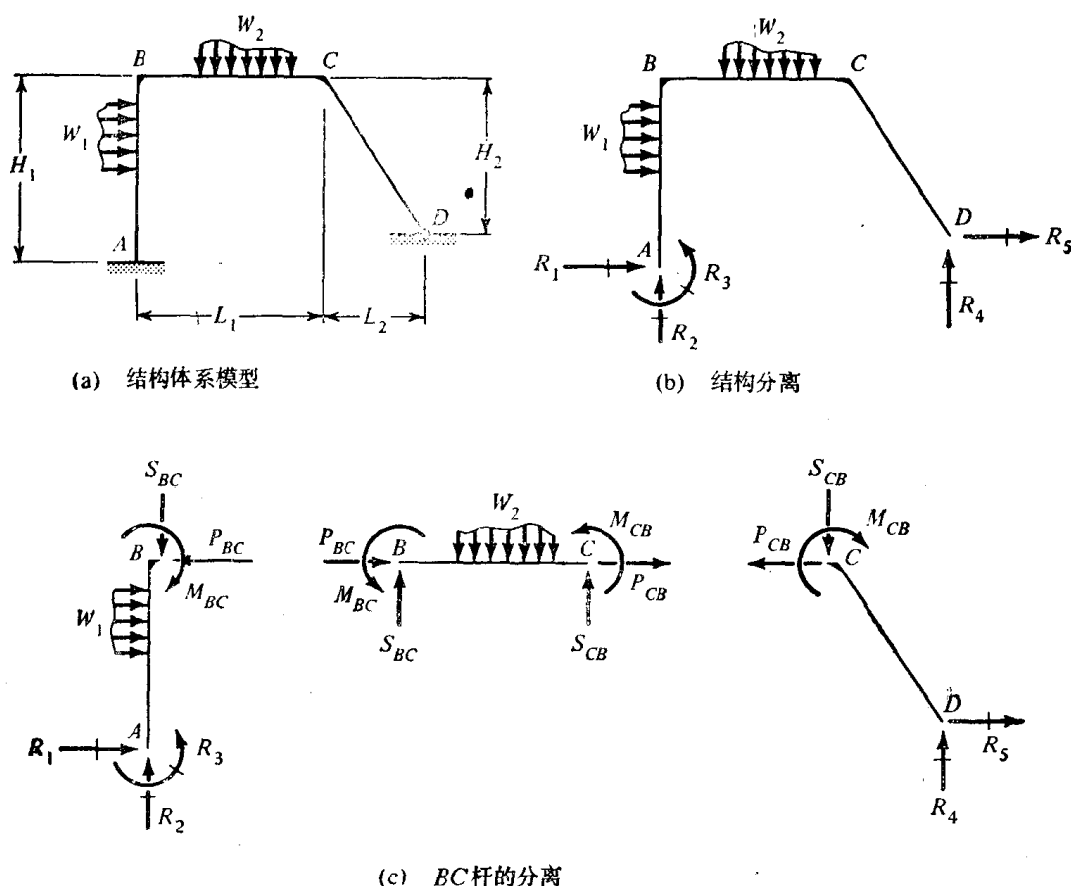


图 2—8 自由体图