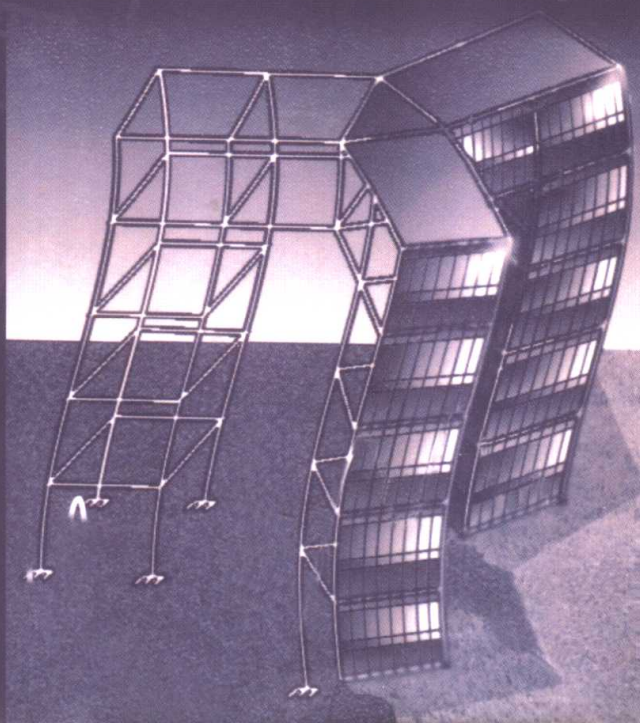


陈水福 编著
金建明

结构力学概念、方法及 典型题析

浙江大学出版社



第2版

结构力学概念、方法及

典型题析

清华大学出版社

结构力学概念、方法及 典型题析

陈水福 金建明 编著

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书简要阐述了杆件结构分析(结构力学课程)中的基本概念和分析方法,通过典型例题剖析这些概念和方法的物理意义、基本规律及其具体应用。

全书共分12章,包括平面体系的几何组成分析、静定结构的内力计算、静定结构的位移计算、力法、位移法、力矩分配法及其他综合方法、对称性的利用、影响线及其应用、矩阵位移法、结构的动力计算、结构的稳定计算、结构的极限荷载。为便于读者复习和自测,书末还附有两套测试题。

本书可作为大专院校土木、建筑及水利类学科各专业在校本、专科学生的学习指导书,硕士研究生入学考试者的复习用书,或作为教师参考书,也可供自学考试者及工程技术人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学概念、方法及典型题析 / 陈水福, 金建明编
著. —杭州:浙江大学出版社, 2002.9
ISBN 7-308-03114-4

I. 结... II. ①陈...②金... III. 结构力学—高等学校—教学参考资料 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 055654 号

责任编辑 邹小宁
出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 浙江大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 403 千
版、印次 2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷
印 数 0001—4000
书 号 ISBN 7-308-03114-4/O·285
定 价 25.00 元

前 言

结构力学是土木、建筑及水利类学科各专业的一门主要的专业基础课。该课程研究杆件结构的组成规律以及结构在荷载等外因作用下的内力、变形和稳定性的计算原理和分析方法。近十余年来,结构力学在工程应用和课程教学方面均呈现出了新的发展特点。首先,结构的计算机分析方法已在工程实践中得到广泛应用,这一方面使得一些纯粹基于手工运算的方法以及一些侧重于技巧性的特殊方法逐渐失去了其原有的应用价值;但另一方面,由于对结构的精确计算机分析一般都建立在概念分析的基础上,因此在对结构的受力概念、分析方法的原理和规律的把握方面提出了更高的要求。再者,工程实践中所采用的结构形式日趋复杂和多样化,因此只有打好基础,对结构分析的概念和方法有了透彻的理解,才能更好地解决工程实际中可能遇到的各种力学问题。

在课程教学方面,近年来各院校的工科力学课程的学时数均有较大程度的压缩。这使得课堂教学多半只能以讲授概念、方法并结合必要的例题分析为主,而课堂训练、习题分析与讨论等的时间将不得不压缩。但是,结构力学是一门实践性很强的课程,需要通过一定量的实际分析和训练才能较好地领会概念和方法的本质和规律。因此,除了课堂教学外,势必应更侧重培养读者的自学和自我训练的能力。

总而言之,无论在工程应用还是课程教学方面,目前结构力学课程都更加侧重于对概念和方法的理解以及对读者自学和自我训练能力的培养。为适应本课程的这些新的发展特点,需要一本配套的、适合于自学的教学指导书。本书的编写就是在这一指导思想下进行的。

除了尽可能地满足课程的上述发展要求外,本书在编写过程中还注重并形成了自己的一些特点:

(1)对概念和方法的阐述力求简明精炼,但又不是简单地罗列名词和公式,而是前后衔接,自成体系。

(2)典型题例,透彻分析。在每个典型例题中,不仅给出了题解,同时还附有题析和小结。题析主要给出分析思路,对分析方法进行取舍和选择;题解给出了计算分析的过程、步骤和结果;小结主要对用到或涉及到的概念和方法进行归纳和总结,得出有关的结论,并对方法的本质、规律、适用条件等进行讨论。在同一例题中,常采用多种方法进行分析,并作比较,以期达到举一反三的效果。

(3)纳入了作者最新的教学研究成果,例如平面体系几何组成的通用逆向分

析方法、功的互等定理在具有制造误差、材料收缩、温度改变等外因的结构中的应用,由反力位移互等定理直接推出影响线的机动作法、确定梁和刚架基本破坏机构的通用方法等。

作为教学指导书,本书涉及的主要内容及编写顺序与普通教科书基本一致。全书共分12章,包括平面体系的几何组成分析、静定结构的内力计算、静定结构的位移计算、力法、位移法、力矩分配法及其他综合方法、对称性的利用、影响线及其应用、矩阵位移法、结构的动力计算、结构的稳定计算、结构的极限荷载。为便于读者复习和自测,书末还附有两套测试题。

本书的第1、2和4章由金建明编写,其余各章及附录由陈水福编写。全书由陈水福修改并统一定稿。

本书由郭鼎康审阅,提出了许多宝贵的修改意见。本书在最后定稿中采纳了其中的大部分意见。作者在此对审阅人表示衷心的感谢。

本书可作为大专院校在校本、专科学生的学习指导书,硕士研究生入学考试者的复习用书,或作为教师参考书,也可供自学考试者及工程技术人员等参考。

限于时间和作者水平,书中一定存在不少疏漏甚至错误之处,恳请读者批评指正,以便进一步改进和提高。

陈水福 金建明

2002年5月

目 录

第 1 章 平面体系的几何组成分析	1
1.1 概念与法则	1
1.1.1 几何不变体系和几何可变体系	1
1.1.2 自由度和计算自由度	1
1.1.3 几何不变体系的基本组成规则	3
1.1.4 三刚片体系中虚铰在无穷远处的情形	3
1.1.5 体系的几何组成特性和静力特性	4
1.2 几何组成分析方法	6
1.2.1 按基本组成规则分析	6
1.2.2 按静力特性分析——零载法	8
1.3 典型题析	9
第 2 章 静定结构的内力计算	14
2.1 静定结构的分类与特性.....	14
2.1.1 静定结构的分类.....	14
2.1.2 静定结构的特性.....	16
2.1.3 梁式直杆的内力图特征.....	16
2.1.4 叠加原理与分段叠加法作弯矩图.....	17
2.2 内力分析的方法.....	18
2.2.1 截面法.....	18
2.2.2 内力分析的原则和步骤.....	19
2.3 典型题析.....	21
第 3 章 静定结构的位移计算	49
3.1 概念与原理.....	49
3.1.1 虚功、广义位移与广义力	49
3.1.2 虚功原理.....	50
3.1.3 互等定理.....	50
3.2 位移计算方法.....	53
3.2.1 位移计算的一般公式——单位荷载法.....	53
3.2.2 支座位移、制造误差(或材料收缩)引起的位移	53
3.2.3 荷载作用引起的位移.....	53

3.2.4	温度改变引起的位移·····	55
3.2.5	带弹性约束的结构的位移计算·····	55
3.3	典型题析·····	57
第4章	力法 ·····	69
4.1	概念与原理·····	69
4.1.1	超静定结构的分析方法·····	69
4.1.2	超静定次数·····	69
4.1.3	力法典型方程·····	70
4.2	计算步骤与典型应用·····	72
4.2.1	力法计算步骤·····	72
4.2.2	局部静定的超静定结构的计算·····	72
4.2.3	带弹性约束的超静定结构的计算·····	73
4.2.4	弹性中心法·····	74
4.3	典型题析·····	75
第5章	位移法 ·····	92
5.1	概念与原理·····	92
5.1.1	位移法基本未知量的确定·····	92
5.1.2	位移法基本结构与典型方程·····	94
5.2	计算步骤与典型应用·····	95
5.2.1	位移法计算步骤·····	95
5.2.2	直接利用平衡条件建立位移法方程·····	95
5.2.3	桁架及组合结构的计算·····	96
5.2.4	带弹性约束的结构的计算·····	96
5.3	典型题析·····	97
第6章	力矩分配法及其他综合方法 ·····	113
6.1	概念与原理·····	113
6.1.1	力矩分配法的应用条件·····	113
6.1.2	转动刚度、传递系数与分配系数·····	113
6.2	计算步骤及联合应用·····	115
6.2.1	力矩分配法的计算步骤·····	115
6.2.2	力矩分配法与位移法的联合·····	115
6.2.3	力法与位移法的联合——混合法·····	115
6.3	典型题析·····	116
第7章	对称性的利用 ·····	130
7.1	概念与特性·····	130
7.1.1	基本概念·····	130

7.1.2 基本特性	131
7.2 对称结构的简化分析方法	133
7.2.1 对称静定结构	133
7.2.2 对称超静定结构	134
7.3 典型题析	135
第8章 影响线及其应用	146
8.1 概念与特性	146
8.1.1 基本概念	146
8.1.2 影响线的形状特征	146
8.2 影响线的作法	147
8.2.1 静力法作影响线	147
8.2.2 机动法作影响线	148
8.2.3 最不利荷载位置的确定	149
8.3 典型题析	150
第9章 矩阵位移法	168
9.1 原理与概念	168
9.1.1 基本原理	168
9.1.2 基本概念	168
9.2 计算步骤	171
9.3 典型题析	172
第10章 结构的动力计算	183
10.1 基本概念	183
10.1.1 体系的振动自由度	183
10.1.2 自由振动与强迫振动、自振频率与主振型	184
10.1.3 主振型的正交性	184
10.1.4 阻尼对振动的影响	185
10.2 动力计算方法	185
10.2.1 振动微分方程的建立	185
10.2.2 自振频率和主振型的计算	186
10.2.3 振动反应的计算	188
10.3 典型题析	189
第11章 结构的稳定计算	206
11.1 基本概念	206
11.1.1 平衡状态的分类	206
11.1.2 两类失稳问题	206
11.1.3 结构的稳定自由度	207

11.2 临界荷载的计算方法·····	207
11.2.1 静力法·····	207
11.2.2 能量法·····	208
11.3 典型题析·····	209
第 12 章 结构的极限荷载 ·····	224
12.1 概念与定理·····	224
12.1.1 极限状态与极限荷载·····	224
12.1.2 极限弯矩、塑性铰与破坏机构 ·····	224
12.1.3 比例加载时判定极限荷载的一般定理·····	225
12.2 确定极限荷载的方法·····	225
12.2.1 静定梁和刚架的极限荷载·····	226
12.2.2 超静定梁和刚架的极限荷载·····	226
12.3 典型题析·····	228
附录 测试题 ·····	236
参考文献 ·····	243

第 1 章 平面体系的几何组成分析

1.1 概念与法则

1.1.1 几何不变体系和几何可变体系

按照几何组成性质不同,平面体系可分为几何不变体系和几何可变体系。几何可变体系又可分为常变体系和瞬变体系。**几何不变体系**是指在不考虑材料应变的情况下,其位置和形状是不能改变的体系。**几何可变体系**是指在不考虑材料应变的情况下,其位置或形状是可以改变的体系。**瞬变体系**是一种特殊的几何可变体系,它可以沿某一方向产生瞬时的微小运动,但瞬时运动后即转化为几何不变体系。一般工程结构必须是几何不变体系,而不能采用几何可变体系。几何组成分析的主要目的就是判别并设法保证结构的几何不变性。

1.1.2 自由度和计算自由度

体系的**自由度**是指确定该体系的位置所需的独立坐标的数目。一个平面体系的自由度若等于 0,或不考虑支座约束的体系本身的自由度等于 3,那么该体系就是几何不变的,反之亦然。

一般的平面体系是由若干个刚片以及联结这些刚片的铰、链杆等所谓的约束(或联系)所组成的。体系中能够减少一个自由度的装置称为一个**约束(或联系)**,例如一根链杆相当于一个约束,一个单铰相当于两个约束,一个刚性结点或固定支座相当于三个约束,一个联结 n 个刚片的复铰则相当于 $(n-1)$ 个单铰。由于一个体系或体系中的某一部分的自由度不可能小于 0。因此,并非每个约束都能使体系减少一个自由度。这种增加于体系,但体系的自由度并未因此而减少的约束称为**多余约束**。

由于可能存在多余约束,因此要使一个体系成为几何不变,不仅需要有足够的约束数目,而且还需要有合理的约束布置方式。

一个体系是否具有足够的约束数目,可以通过体系的**计算自由度 W** 反映。

我们知道,平面内一个点的自由度等于 2,一个刚片(一根链杆、一个构件或体系中一个已经肯定为几何不变的部分)的自由度等于 3。如果将一个体系中的全部刚片作为独立的自由体,而将联结这些刚片与刚片之间以及刚片与基础之间的刚结点、铰结点及链杆作为约束(图 1.1(a)),则该体系的计算自由度为

$$W = 3m - (3g + 2h + b) \quad (1.1)$$

式中, m 表示刚片数目, g 表示单刚结点(包括固定支座)数目, h 表示单铰(包括支座铰)数目, b 表示链杆(包括支座链杆)数目。

应当指出, (1.1)式中的刚片数目是指没有多余约束的刚片数, 如果刚片中存在多余约束, 则还需减去这些多余约束。

对于图 1.1(a)所示的体系, 若将 ADG , CFG 和 DEF 视为刚片, 则 $m=3$, 而 $g=2$ (支座 A, C), $h=3$ (单铰 G, D, F), $b=1$ (支座链杆 BE), 于是体系的计算自由度

$$W=3 \times 3 - (3 \times 2 + 2 \times 3 + 1) = -4$$

这里的单铰 D, F 是指刚片 ADG 与 DEF 之间以及 CFG 与 DEF 之间的联系。

若只将 ADG 与 CFG 视为刚片, 则 $m=2$, $g=2$ (支座 A, C), $h=1$ (单铰 G), $b=2$ (链杆 DF , 支座链杆 BE), 同样可得到计算自由度

$$W=3 \times 2 - (3 \times 2 + 2 \times 1 + 2) = -4$$

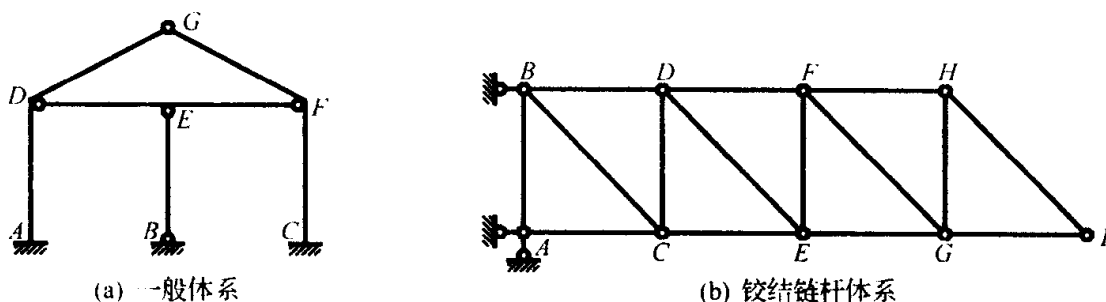


图 1.1 体系的计算自由度

对于一个完全由两端铰结的杆件组成的铰结链杆体系, 为计算方便, 也可将其中的铰结点作为独立的自由体, 而将链杆作为约束(图 1.1(b)), 这时体系的计算自由度可表示为

$$W=2j-b \quad (1.2)$$

式中, j 表示铰结点数目, b 表示链杆(包括支座链杆)数目。

对于图 1.1(b)所示的体系, 其铰结点数目 $j=9$ (结点 $A \sim I$), 链杆总数 $b=18$ (包括支座链杆), 于是计算自由度

$$W=2 \times 9 - 18 = 0$$

当然, 该体系的计算自由度也可由式(1.1)计算。将除了支座链杆以外的所有杆件均作为刚片, 则 $m=15$, $g=0$, $h=21$, $b=3$ (支座链杆), 同样可得到

$$W=3 \times 15 - (3 \times 0 + 2 \times 21 + 3) = 0$$

需注意的是, 这里的铰 A 为单铰, 它只连接刚片 AB 与 AC , 铰 B 也有类似情况。显然, 在这种情况下用式(1.1)计算较为复杂。

根据体系的计算自由度可获得如下结论:

① 若 $W>0$ (或就不考虑支座约束的体系本身 $W>3$), 则表明体系缺少足够的约束, 因而是几何可变的。

② 若 $W=0$ (或就体系本身 $W=3$), 则表明体系具有成为几何不变体系所必需的最少约束数目。

③ 若 $W<0$ (或就体系本身 $W<3$), 则表明体系具有多余约束。

由此可见, 体系的计算自由度 $W \leq 0$ (或就体系本身 $W \leq 3$) 只能说明体系具有了足够的约束数目, 即为判定体系的几何不变性提供了一个必要条件, 而非充分条件。因此, 计算自由度只能作为体系几何组成分析的一个辅助工具, 要进一步明确体系的几何不变性, 必须依据几何不变体系的基本组成规则或依据体系的静力特性。

1.1.3 几何不变体系的基本组成规则

(1) 二元体规则

在一个刚片上增加一个二元体,仍为几何不变体系,且没有多余约束(图 1.2(a))。

所谓二元体是指由两根不在同一条直线上的链杆联结一个新结点的装置。

(2) 两刚片规则

两个刚片用一个单铰(实铰或虚铰)和一根所在直线不通过该铰铰心的链杆相联,组成几何不变体系,且没有多余约束(图 1.2(b))。

所谓虚铰(或称瞬铰)是指联结两个刚片的两根链杆在其交点处组成的一个假想铰(图 1.2(b)),它的作用相当于一个单铰。

(3) 三刚片规则

三个刚片用不在同一直线上的三个铰(实铰或虚铰)两两相联,组成几何不变体系,且没有多余约束(图 1.2(c))。

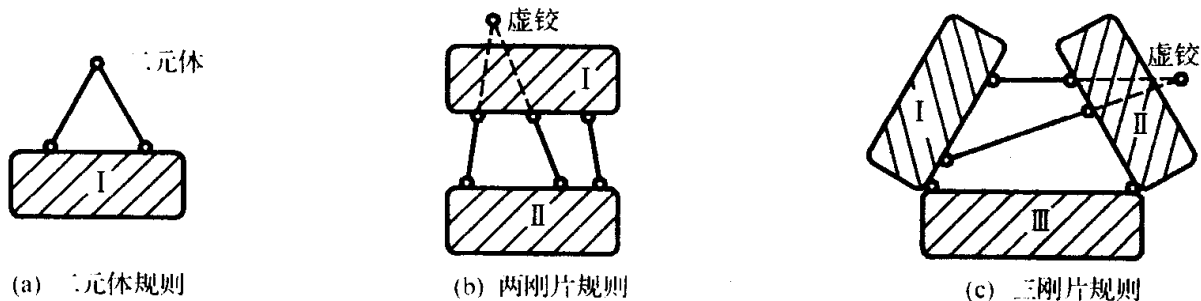


图 1.2 基本组成规则

上述三个基本组成规则的核心实际上只有一个,即铰结三角形规则。在平面体系中,铰结三角形(图 1.3)是一个稳定的平面组成形式。将铰结三角形中的一根链杆、两根链杆及三根链杆分别替换为一个刚片(即任一几何不变部分)、两个刚片和三个刚片,同时将虚铰的作用与一个单铰同等看待,即可分别得到二元体规则、两刚片规则和三刚片规则。

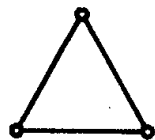


图 1.3 铰结三角形

应当指出,三个基本组成规则中所指的刚片是没有多余约束的刚片。

1.1.4 三刚片体系中虚铰在无穷远处的情形

运用三刚片规则分析时,常会遇到组成虚铰的一对或几对链杆相互平行,即虚铰在无穷远处的情形。此时可采用以下法则判断:

① 一个虚铰在无穷远时,若组成虚铰的两平行链杆与其余两铰的连线不平行,则体系为几何不变,且没有多余约束(图 1.4(a));否则体系为瞬变(图 1.4(b)),特殊情况下(例如两平行链杆等长,且与另两铰的连线等长,如图 1.4(c)所示)体系为常变。

② 两个虚铰在无穷远时,若组成虚铰的两对平行链杆互不平行,则体系为几何不变,且没有多余约束(图 1.5(a));否则为瞬变(图 1.5(b)),特殊情况下(例如两对平行链杆等长,如图 1.5(c)所示)为常变。

③ 三个虚铰均在无穷远时,体系为瞬变(图 1.6(a)),特殊情况下为常变(图 1.6(b))。

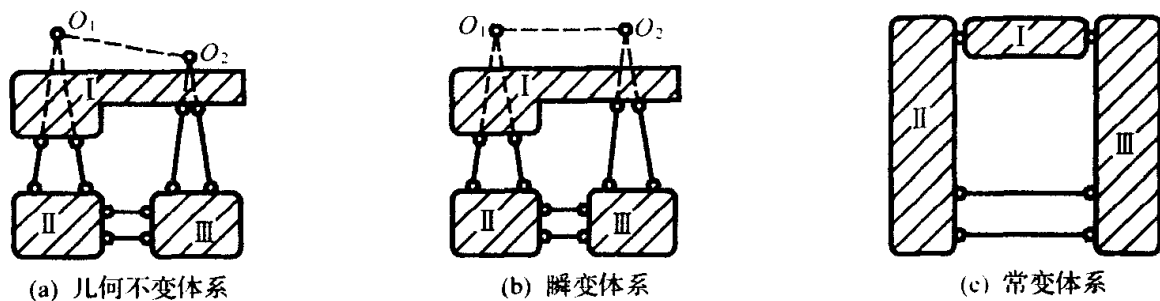


图 1.4 一铰无穷远

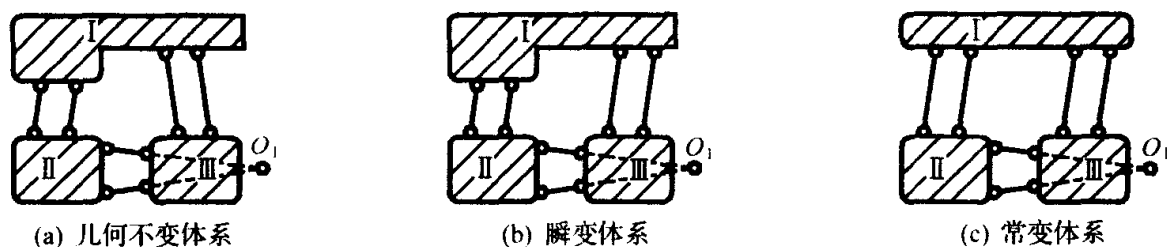


图 1.5 两铰无穷远

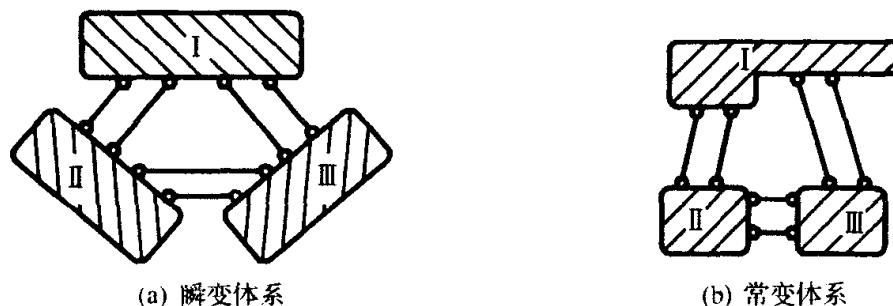


图 1.6 三铰无穷远

1.1.5 体系的几何组成特性和静力特性

1. 无多余约束的几何不变体系

(1) 几何组成特性

通常按三个基本组成规则所构成；或者虽不符合三个基本组成规则，但其计算自由度 $W=0$ (或就体系本身 $W=3$)，并且符合以下的静力特性。

(2) 静力特性

由静力平衡条件可求得其全部反力和内力的确定值，或者说其平衡方程有惟一解。可见，无多余约束的几何不变体系是静定体系；若作为结构使用，即为静定结构。

2. 有多余约束的几何不变体系

(1) 几何组成特性

在符合上述无多余约束几何不变体系的几何组成特性的基础上，又另外添加了约束。

(2) 静力特性

单由静力平衡条件不能求得其全部反力和内力的确定值，或者说其平衡方程有无穷多组解答。可见有多余约束的几何不变体系是超静定体系；若作为结构使用，即为超静定结构。

3. 常变体系

(1) 几何组成特性

缺少足够数目的约束；或者约束数目足够，但设置不合理，使得某一或某些方向的约束缺

少。主要表现为以下几种情形：

① 约束数目少于三个基本组成规则要求的数目(即体系计算自由度 $W > 0$, 或就体系本身 $W > 3$)。

② 两刚片间用三根相互平行且等长的链杆相联(图 1.7(a))。

③ 两刚片间用交于一个实铰上的三根链杆相联(图 1.7(b))。



图 1.7 两刚片由三链杆组成常变体系

④ 三刚片间如图 1.4(c), 1.5(c) 和 1.6(b) 的情形。

(2) 静力特性

平衡条件不成立, 没有相应的静力学解答。常变体系不能作为结构使用。

4. 瞬变体系

(1) 几何组成特性

体系具有足够的约束总数, 但由于设置不合理, 使得体系在某一方向的约束不足, 而另一方向却有多余约束。这样, 体系可沿约束不足的方向发生瞬时的微小运动, 但瞬时运动后, 由于另一方向的多余约束发生了倾斜, 填补了原来的不足约束, 从而使体系不能再继续运动。常见的瞬变体系有以下几种情形：

① 两刚片间用三根相互平行但不等长的链杆相联(图 1.8(a))。

② 两刚片间用交于一个虚铰上的三根链杆相联(图 1.8(b))。



图 1.8 两刚片由三链杆组成瞬变体系

③ 三刚片间用位于同一直线上的三个实铰或虚铰两两相联(包括虚铰在无穷远处时, 如图 1.4(b), 1.5(b) 和 1.6(a) 所示的情形)。

(2) 静力特性

在一般荷载作用下其反力或内力为无穷大, 即平衡方程无解; 在某些特殊荷载如零荷载作用下, 其反力和内力也可能有非零解存在, 即平衡方程有无穷多组解。瞬变体系不能作为结构使用。

1.2 几何组成分析方法

1.2.1 按基本组成规则分析

利用几何不变体系的基本组成规则,可对大多数常见体系的几何组成进行分析,这是最常用的分析方法。具体分析时,可依据以下几种方法进行。

1. 正向分析法

正向分析法也称为扩大刚片法。先找出易于观察的几何不变部分作为刚片,并根据找到的刚片数目套用三个基本组成规则,由此得到一个扩大的几何不变部分;进一步分析时将该部分作为一个刚片,如此重复,直至分析完整个体系。

2. 逆向分析法

几何不变体系的三个基本组成规则是将刚片组装为无多余约束的几何不变体系的基本法则。实际应用中,也可采用撤除刚片及相应约束的方法逐步减少刚片数目,再对余下的部分进行分析,这种分析方法称为逆向分析法。逆向分析法中撤除刚片及相应约束的依据仍是三个基本组成规则。

对应二元体规则,若反过来逐个撤除体系上的二元体,再对余下的部分进行分析,则并不会改变原体系的几何组成性质。例如图 1.9(a)所示体系,依次撤除二元体 DFG , EHG , DGE , ADB , CEB 后得到图 1.9(b)所示的体系,该体系是瞬变的,故知原体系为瞬变体系。

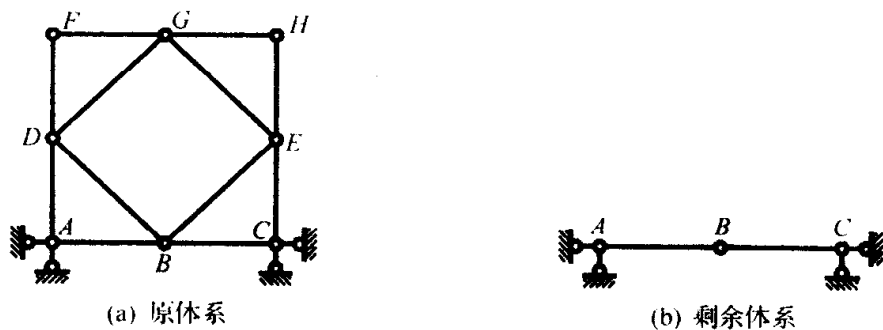


图 1.9 撤除二元体

对应两刚片规则,如果体系中的一个几何不变部分(刚片)与体系其余部分之间仅用一根链杆和一个不过该链杆的单铰(实铰或虚铰)相联,则可先将该刚片及联结该刚片的约束撤除,再对余下的部分进行分析,这并不改变原体系的几何组成性质。

例如图 1.10(a)所示的体系, DHE 为一几何不变部分(刚片),该部分与其他部分之间只用铰 D 及链杆 HF 联结。进行几何组成分析时,可将该部分及相应的约束撤除,从而得到图 1.10(b)所示的体系,从该体系中再撤除两个二元体,得到与图 1.9(b)相同的体系。显然该剩余体系是瞬变的,故知原体系为瞬变体系。又如,若一个体系本身与基础之间只用三根既不完全平行也不完全交于一点的支座链杆(或一根链杆和一个不过该链杆的铰)相联,则可以将基础及支座链杆撤除,仅对体系本身进行分析。换句话说,这种体系的几何组成性质仅取决于体系本身。

对应三刚片规则,如果体系中的两个几何不变部分(刚片)与体系其余部分之间仅用三个不共线的单铰(实铰或虚铰)两两相联,则可先将这两个刚片及相应的约束撤除,再对余下的部

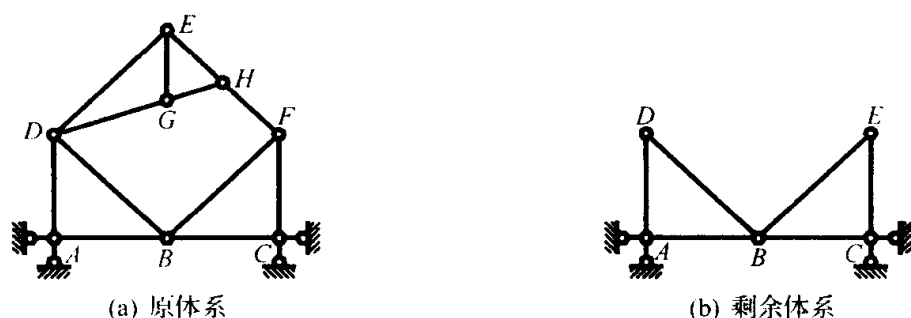


图 1.10 撤除一个刚片

分进行分析,这并不改变原体系的几何组成性质。

例如图 1.11(a)所示的体系, DFG, EHG 为两个几何不变部分,两者之间由铰 G 相联,它们与体系的其余部分之间由铰 D, E 联结。因三铰不共线,故可将铰 D, E 以上的两个刚片撤除,得到图 1.11(b)所示的体系,进一步分析容易得知原体系为瞬变体系。

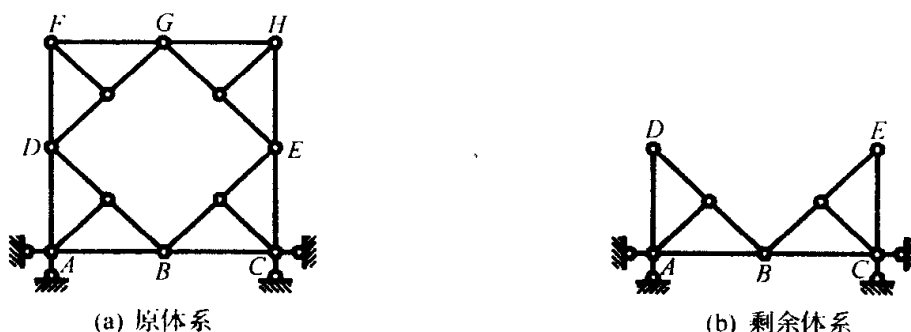


图 1.11 撤除两个刚片

上述介绍的逆向分析法是一种通用的分析方法,是三个基本组成规则按拆除刚片和约束方向的推广应用。

3. 替代分析法

前面已经提到,三个基本组成规则的核心只有一个,即铰结三角形规则(图 1.3)。换句话说,三个规则均可退化为一个铰结三角形规则。据此,在进行几何组成分析时,如果体系中的一个几何不变部分(刚片)与其他部分之间仅用两个单铰(实铰或虚铰)相联,则可将该刚片用一根通过这两铰铰心的链杆替代,这并不改变原体系的几何组成性质。

例如图 1.12(a)所示体系,刚性折杆 DGF, EHF 与其他部分之间分别用铰 D, F 及铰 E, F 联结,这两个刚片可分别用链杆 DF 和 EF 替代,从而得到图 1.12(b)所示的体系。该体系很容易用三刚片规则进一步分析。

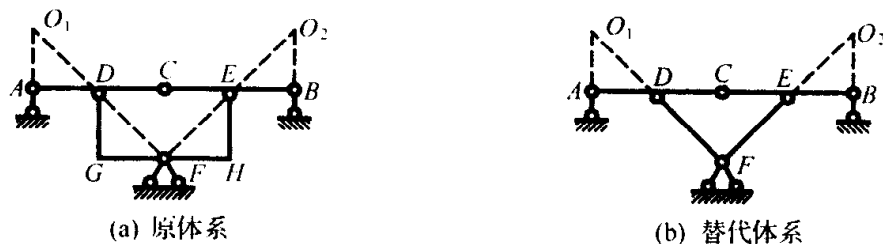


图 1.12 链杆替代

同样道理,如果体系中的一个几何不变部分(刚片)与其他部分之间仅用三个不共线的单铰相联,则可将该刚片用联结这三铰铰心的铰结三角形代替,这并不改变原体系的几何组成性质。

例如图 1.13(a)所示体系,很容易找出 $ADGF$ 和 $BEGH$ 两个几何不变部分,但无论如何