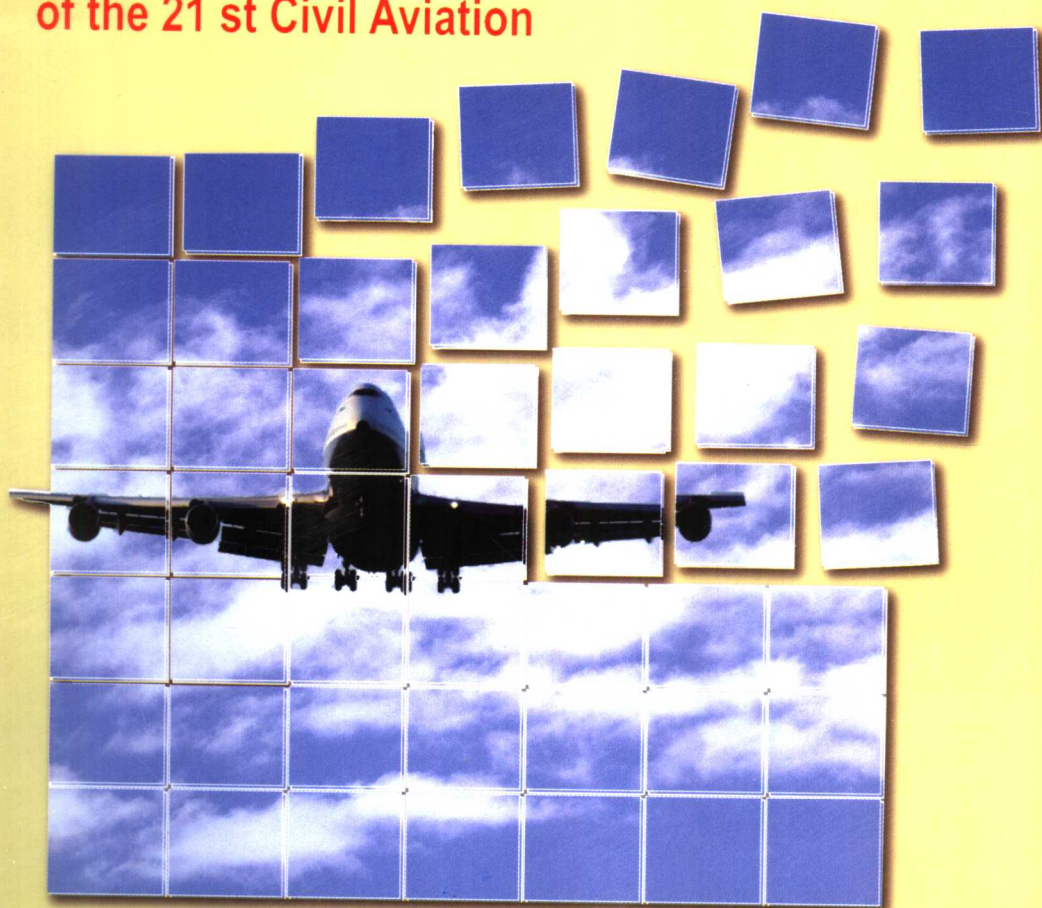


21世纪民航高等教育系列教材

飞机结构与强度

冯振宇 徐建新 主编

Textbook Series of the Higher Education
of the 21 st Civil Aviation



兵器工业出版社

飞机结构与强度

冯振宇 徐建新 主编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了飞机结构力学和飞机结构强度两部分内容。在飞机结构力学部分,侧重从力学分析的角度来介绍飞机结构的组成规律,阐述各种飞机结构模型的建立及其在载荷作用下的应力、变形及稳定性的计算方法,力求基本概念和基本原理清晰透彻;在飞机结构强度部分,主要在飞机结构分析的基础上,通过对飞机外载荷的介绍,研究飞机机翼、机身、起落架等典型结构的载荷传递路线及结构承力特点、结构内力分析等,使学生系统掌握飞机结构强度计算的基本原理和基本方法。为了便于学生对基本概念的理解,书中附有练习题。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构与强度/冯振宇,徐建新主编. —北京:兵器工业出版社,2006.2

ISBN 7-80172-637-5

I. 飞... II. ①冯... ②徐... III. ①飞机-结构力学②飞机-结构强度 IV. V21

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第007438号

出版发行:兵器工业出版社
发行电话:010-68962596, 68962591
邮 编:100089
社 址:北京市海淀区车道沟10号
经 销:各地新华书店
印 刷:北京瑞达方舟印务有限公司
版 次:2006年2月第1版第1次印刷
印 数:1-1050

责任编辑:朱丽均
封面设计:底晓娟
责任校对:王 绛
责任印制:赵春云
开 本:787×1092 1/16
印 张:15.25
字 数:350千字
定 价:35.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本书是为民航高等院校飞行器动力工程等专业编写的教材，也可供从事飞机结构强度和飞机结构维修工作的工程技术人员参考。

本书主要介绍了飞机结构力学和飞机结构强度两部分内容。在飞机结构力学部分，侧重从力学分析的角度来介绍飞机结构的组成规律，阐述各种飞机结构模型的建立及其在载荷作用下的应力、变形及稳定性的计算方法，力求基本概念和基本原理清晰透彻；在飞机结构强度部分，主要在飞机结构分析的基础上，通过对飞机外载荷的介绍，研究飞机机翼、机身、起落架等典型结构的载荷传递路线及结构承力特点、结构内力分析等，使学生系统掌握飞机结构强度计算的基本原理和基本方法。为了便于学生对基本概念的理解，书中附有练习题。

全书共分 11 章，第 2~6 章由冯振宇编写，第 7~11 章由徐建新编写，第 1 章由卢翔编写，练习题由洪编写。全书由冯振宇、徐建新担任主编。

本书承南京航空航天大学魏志毅教授审阅，并提出了许多宝贵意见。在此谨向他表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中缺点错误在所难免，敬请读者不吝指正。

编者
2005 年 10 月

目 录

第1章 结构组成分析	(1)
1.1 典型飞机结构元件	(1)
1.2 结构组成分析方法	(4)
1.3 桁架结构的组成	(11)
1.4 刚架结构的组成	(13)
1.5 薄壁结构的组成	(15)
练习题	(24)
第2章 静定结构内力	(27)
2.1 静定结构的特性	(27)
2.2 静定桁架结构内力	(28)
2.3 静定刚架结构内力	(35)
2.4 静定薄壁结构内力	(40)
练习题	(48)
第3章 静定结构变形计算	(51)
3.1 计算结构变形的意义	(51)
3.2 功和能的概念	(52)
3.3 广义力和广义位移	(54)
3.4 余虚功原理	(56)
3.5 单位载荷法	(57)
3.6 叠加原理和位移互等定理	(66)
练习题	(69)
第4章 静不定结构的内力及变形	(72)
4.1 静不定结构特性	(72)
4.2 力法和正则方程	(73)
4.3 基本系统的选择及对称条件的利用	(84)
4.4 静不定结构变形计算	(91)
练习题	(94)
第5章 工程梁理论	(96)
5.1 工程梁理论基本假设	(96)
5.2 自由弯曲时正应力的计算	(97)

5.3	自由弯曲时开剖面的剪流与弯心	(100)
5.4	开剖面弯心的计算	(106)
5.5	自由弯曲时单闭室剖面剪应力的计算	(108)
5.6	多闭室剖面剪流与弯心的近似计算	(115)
	练习题	(119)
第6章	薄壁构件的稳定性	(121)
6.1	矩形平板的稳定性	(121)
6.2	受压薄壁杆件的稳定性	(127)
	练习题	(132)
第7章	飞机外载荷及飞行包线	(133)
7.1	飞机的外载荷	(133)
7.2	飞机的过载	(136)
7.3	飞机的飞行包线	(139)
	练习题	(144)
第8章	机翼结构的受力分析	(145)
8.1	机翼的外载荷和力图	(145)
8.2	机翼结构的传力与受力分析	(150)
8.3	尾翼的外载荷与受力分析	(165)
	练习题	(168)
第9章	机身结构的受力分析	(169)
9.1	机身的外载荷和力图	(169)
9.2	机身结构的传力分析	(171)
9.3	机身结构横截面的应力分析	(173)
9.4	机身隔框的受力分析	(175)
	练习题	(184)
第10章	机体开口部位的受力分析	(185)
10.1	开口与口盖的分类	(185)
10.2	中小开口区的受力分析	(186)
10.3	大开口区的受力分析	(189)
	练习题	(193)
第11章	起落架受力分析	(194)
11.1	起落架的结构形式	(194)
11.2	起落架的外载荷	(198)

11.3 起落架各构件的受力分析	(202)
练习题	(211)
参考文献	(212)

第1章 结构组成分析

“飞机结构与强度”课程包括飞机结构力学和飞机结构强度两方面的内容。

飞机结构力学从力学的角度来研究飞机结构的组成规律，飞机结构在载荷作用下的强度、刚度、稳定性的计算方法，并为飞机结构的传力分析和强度计算提供必要的基础理论知识。

飞机结构强度通过飞机结构在使用中承受的载荷、载荷传递路线及飞机结构在载荷作用下的强度、刚度、稳定性等力学性能的系统学习，研究飞机结构强度计算的基本概念、飞机结构的传力分析、飞机结构在载荷作用下内力计算的基本原理和基本方法。

1.1 典型飞机结构元件

飞机结构与其他工程结构相比，具有明显的特点，因此，需要首先对飞机结构元件及其功能有一个基本的了解。

飞机结构的主要功用是承担和传递飞机在使用中所遇到的载荷，提供飞机最佳的气动外形。对飞机结构的要求是在安全可靠地实现这些功用的同时，尽可能地减轻结构重量。为此，现代飞机结构，包括机身、机翼、尾翼，几乎都采用了薄壁结构。薄壁结构的外壳叫做蒙皮，蒙皮通常用纵向和横向的加强元件来提高它的承载能力。

1.1.1 机翼

机翼是飞机的主要升力面。机翼结构由蒙皮、桁条、翼肋、翼梁、墙等组成，如图1.1-1所示。在现代民用飞机结构中，这些构件基本上是由铝合金制成的。

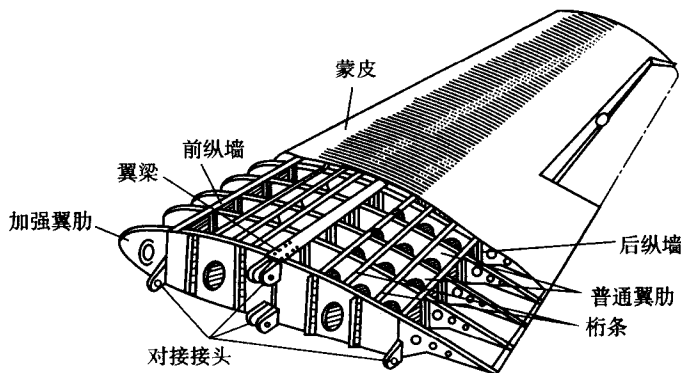


图 1.1-1 典型的机翼布局

机翼蒙皮的主要作用是形成飞机结构光滑而封闭的表面, 承担和传递不均匀分布的空气动力。蒙皮具有较强的抗拉能力, 但是, 这种薄的蒙皮容易在受压和受剪时失去稳定性而发生屈曲。在飞行中飞机表面由于屈曲而出现的皱折会使其空气动力性能恶化, 因此在实际机翼结构中, 往往采用蒙皮与其他构件相结合形成承力, 这种蒙皮结构被称为壁板。

桁条是板弯或挤压制成的型材, 是机翼纵向元件之一。图 1.1-2 几种常见的桁条型材及其和蒙皮的连接。桁条的主要作用是支持蒙皮, 防止在空气动力作用下产生过大的局部变形, 并与蒙皮一起把气动载荷传到翼肋上。桁条和蒙皮还在机翼的总体弯曲中部分地承受并传递轴向力。桁条把蒙皮分割成小块, 从而提高了蒙皮的抗压和抗剪能力, 使蒙皮更好地参与承担机翼的弯矩和扭矩。

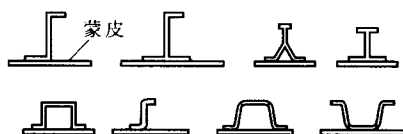


图 1.1-2 具有不同剖面形状的机翼桁条

翼肋是保证气动力所要求的翼剖面形状 (即翼型) 的横向元件。翼肋有普通翼肋和加强翼肋。图 1.1-3 给出了典型的翼肋构造形式。翼肋四周与蒙皮相连, 受到从蒙皮传来的分布气动力。加强肋主要承担起落架、发动机架等传来的集中力, 并把蒙皮和桁条传给它的空气动力传递给翼梁腹板。翼肋以其自身的刚度给桁条、蒙皮提供垂直方向的支持。翼肋还可以提高蒙皮和桁条在受压时的失稳临界应力。

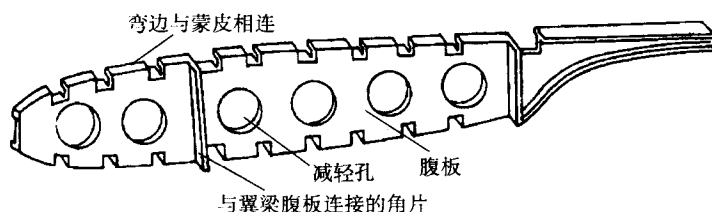


图 1.1-3 普通翼肋

机翼的纵向加强元件还包括翼梁和墙。翼梁一般由上、下凸缘和腹板铆接组成, 通常在根部与机身固接, 在凸缘上和蒙皮相连接。墙也称作腹板, 没有凸缘或只有很弱的凸缘。

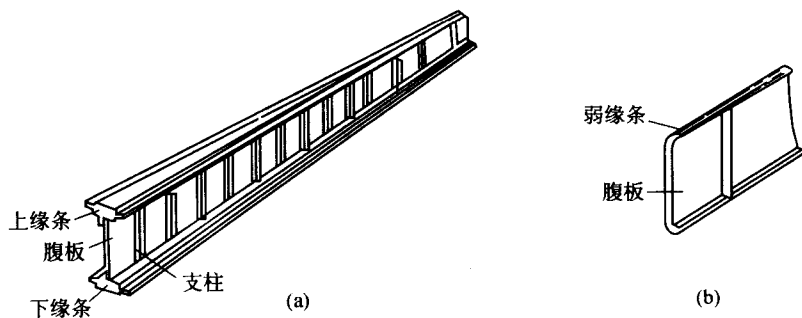


图 1.1-4 翼梁和墙
(a) 翼梁; (b) 墙

图 1.1-4 给出了典型的翼梁和墙的构造形式。在梁式机翼中,机翼的弯曲主要由翼梁的凸缘承担。翼梁腹板和墙的主要作用是传递和支承垂直于翼平面的剪力。

1.1.2 机身

图 1.1-5 给出了某型飞机机身结构简图。

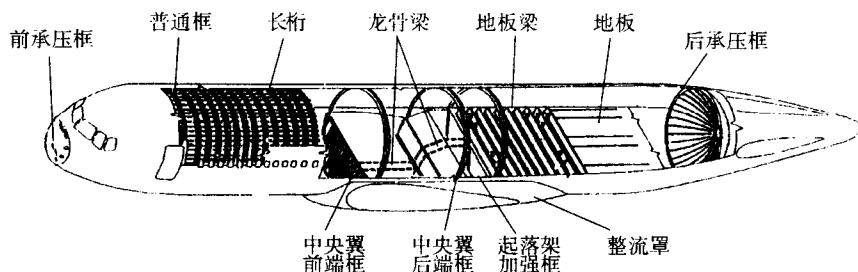


图 1.1-5 某型飞机机身结构

机身用来装载人员、货物、设备等。它作为整个机体的中枢部件与将机翼、尾翼、起落架等组装在一起,形成完整的飞机结构。机身所支承和传递的外载荷与机翼有较大差别。作用在机身蒙皮上的气动载荷比较小,但机身要受到很大的由机翼、尾翼和起落架连接接头传来的集中载荷。在高空飞行的飞机,机身还要受到由于座舱增压而附加的静压力。图 1.1-6 给出了由蒙皮、长桁、桁梁和隔框组成的典型机身壁板结构。

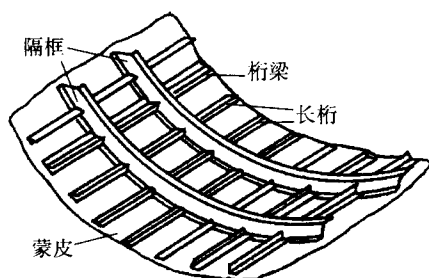


图 1.1-6 机身壁板结构

机身的横向加强元件——隔框的平面形状与机身的横截面形状一致。隔框分为普通框和加强框(如图 1.1-7 所示)。普通框主要用来维持机身的截面形状,通常是用金属板材压制而成,内外缘有翻边,以提供一定的弯曲刚度。由于座舱内外压差引起的两个框间的压力分布通过蒙皮长桁传到普通框上,使其产生环向拉力和弯曲内力。但机身受到的空气动力载荷相对较小,所以普通框内力不大。

通常,机身所支承并传递的集中载荷都应作用在加强框上,再由加强框把这些集中载荷传给蒙皮。因此,加强框要有足够的刚度。加强框种类较多,从受力形式上看,主要有环形加强框和壁板式加强框两种。

环形加强框一般由内外凸缘、腹板、支柱等构成。内、外凸缘主要承受框缘内的弯曲正应力和轴向力,腹板主要用于承受和传递剪力,支柱用来加强腹板,提高其抗剪能力并可承受压力。此外,在集中力作用处一般都布置有支柱,支柱把集中力传给腹板。

壁板式加强框属于平面薄壁结构,主要靠腹板和腹板上的型材(支柱)承担载荷,壁板框不再以受弯的形式承受载荷,框缘内的应力相对于环形刚框要小得多。壁板框形式较多,有壁板占机身截面全部的,也有壁板占部分机身截面的,其余部分为刚框。

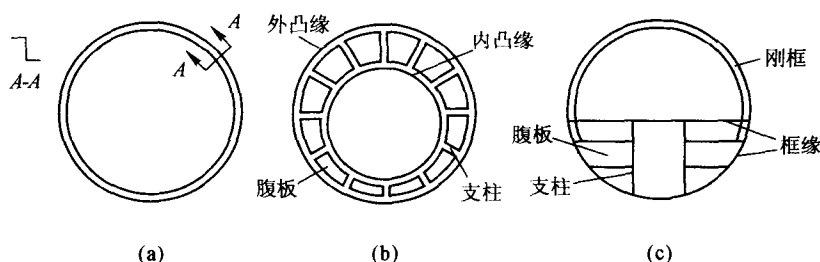


图 1.1-7 普通框和加强框
(a) 普通框; (b) 环形框; (c) 壁板框

作用在机身上的集中力所引起的弯矩由机身结构纵向加强元件（长桁和桁梁）和蒙皮中的正应力所平衡。机身桁梁和翼梁有所不同，它没有腹板，因而只承受正应力，不承受剪应力。长桁从截面形状上看类似于桁梁，但比桁梁弱。

1.2 结构组成分析方法

1.2.1 几何不变性与不可移动性

几何不变性和不可移动性是受力结构必须具备的两个性质。这里所说的几何形状和空间位置的变化不包括载荷作用下结构发生的弹性变形。

一、几何不变性

在任何载荷作用下，结构能保持其几何形状不变的特性，称为几何不变性。具有几何不变性的结构是几何不变结构。

图 1.2-1(a) 所示为平面桁架结构。在节点 2 作用垂直载荷 P 。很显然，在载荷作用下，1-2 杆、3-4 杆会分别绕节点 1、4 转动，整个结构的几何形状发生了明显的变化，这种变化是由于组成结构的各构件在载荷作用下产生相对刚体位移而造成的。如果在结构中增加一根杆件 2-4（如图 1.2-1(b) 所示），在载荷作用下，结构的几何形状就不会发生变化。

某些几何可变结构在特定载荷作用下，也可能保持其几何形状不变。如对 1.2-1(a) 所示桁架施加沿 1-2 杆作用的水平载荷 P_1 ，结构几何形状可以保持不变。但在某些特定载荷作用下，某种结构能保持几何形状不变，并不能说明它具有几何不变性。

二、不可移动性

图 1.2-2(a) 所示为平面桁架结构，在载荷作用下，结构几何形状虽然不会发生变化，但整个结构会绕节点 1 相对基础发生转动。这个结构仍然不能承受和传递载荷。如果在结构与基础连接中增加一根杆件，如图 1.2-2(b) 所示，在载荷作用下，结构将不再发生相对基础的转动，这种结构才能成为承受和传递一般载荷的受力结构。在任何载荷作用下，结构相对基础不发生刚体位移的特性，称为不可移动性。如果将基础看成是结构的一部分，那么几何不变性中包含了不可移动性。

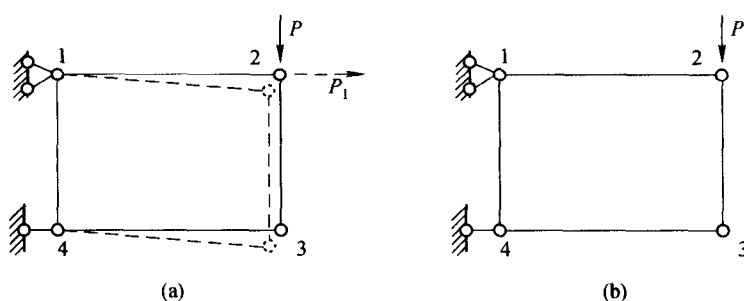


图 1.2-1 平面桁架的几何不变性

(a) 几何可变结构; (b) 几何不变结构

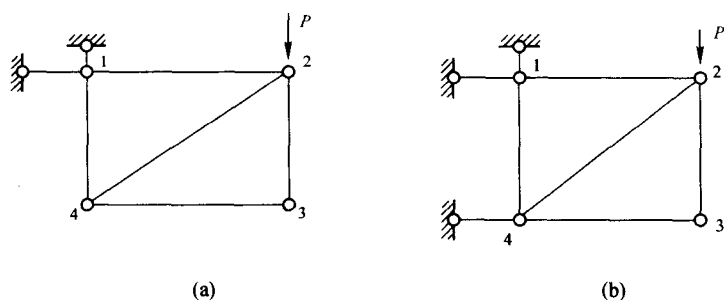


图 1.2-2 平面桁架的不可移动性

(a) 可移动结构; (b) 不可移动结构

由此看来, 具有几何不变性和不可移动性的平面桁架结构才能承受并传递节点上的平面任意载荷。

需要说明的是, 可移动的几何不变结构能够且只能承担平衡力系。

1.2.2 自由度与约束

如果结构在载荷作用下是几何可变或可移动的, 则意味着结构各构件之间或结构与基础之间存在着可以相对运动的自由度。如果有足够的约束将相对运动的自由度约束掉, 刚体位移就不会产生了。因此, 为了研究结构组成, 我们必须先引进“自由度”和“约束”这两个概念。

一、自由度

决定一物体在某一坐标系中的位置所需要的独立变量的数目, 称为物体在该坐标系中的自由度。

一个点在平面坐标系内有 2 个自由度, 在空间坐标系内有 3 个自由度; 一根杆件 (这里我们用其轴线来表示) 在平面坐标系内有 3 个自由度, 在空间坐标系内有 5 个自由度; 而一个刚体在平面坐标系内有 3 个自由度, 在空间坐标系内有 6 个自由度。

二、约束

减少自由度的装置，称为约束。一个装置能减少几个自由度，就称为是几个约束。在结构力学中通常将光滑铰链、双铰杆和刚性连接等看成是约束。

一个平面铰具有 2 个约束；而一个空间铰具有 3 个约束。

一根两端带铰的杆具有 1 个约束。图 1.2-3(a) 中，点 A 有 2 个自由度 X_A 、 Y_A ，现用一双铰杆将它与坐标系相连，A 点只能沿双铰杆杆端所画圆周上移动了。要确定 A 点的位置只需要一个独立的变量 α 。双铰杆在平面坐标系能消除一个自由度，因此它是 1 个约束。同理，一根两端带铰的空间杆也只具有 1 个约束。

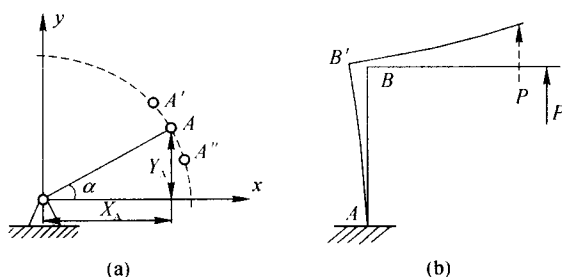


图 1.2-3 铰链连接与刚性连接
(a) 双铰杆约束；(b) 刚性连接约束

刚性连接使两个连接元件在连接处不产生任何相对位移（包括线位移和角位移），并且也不提供多余的约束，如图 1.2-3(b) 所示。因此用刚性连接将一个构件连接到另一构件上去，两个构件之间相对运动的自由度就全部被消除，而且它们之间有几个相对运动的自由度，刚性连接就提供几个约束。平面刚性连接提供 3 个约束，空间刚性连接提供 6 个约束。

1.2.3 几何不变性和不可移动性的条件

一、具有足够约束数

在分析结构组成时，通常将结构中某些元件或节点看成是具有自由度的自由体，而将某些元件如光滑铰链、双铰杆、刚性连接等视为约束。

如果约束将自由体连接起来形成一个几何不变不可移动的结构，很显然需要的约束数 C 应能把自由体所具有的自由度 N 全部消除，即 $C \geq N$ 。

组成几何不变不可移动结构，所需要的约束数：

$$C \geq N \quad (1.2-1)$$

组成几何不变可移动结构所需要的约束数：

$$\text{平面结构} \quad C \geq N - 3 \quad (1.2-2)$$

$$\text{空间结构} \quad C \geq N - 6 \quad (1.2-3)$$

在上式中分别减去 3 和 6，是使整体结构各具有相对基础运动的 3 个和 6 个自由度。

图 1.2-4 (a) 所示为平面桁架结构。将组成结构的 6 个节点看成是自由体， $n=6$ ，结

构在平面内共有自由度数: $N = 2 \times 6 = 12$ 。将双铰杆视为约束, 共有约束数: $C_1 = 1 \times 11 = 11$ 。该平面桁架结构不与基础相连, 形成一个几何不变可移动结构所需要的约束数应为: $C \geq N - 3 = 9$ 。现结构具有约束数 $C_1 = 11 > N - 3 = 9$ 。因此, 结构具有足够的约束。

图 1.2-4(b) 中示出的空间桁架结构由 4 个节点组成。将节点看成自由体: $N = 3 \times 4 = 12$ 。将双铰杆视为约束, $C_1 = 1 \times 6 = 6$ 。一个几何不变可移动的空间结构需要的约束数应为: $C \geq N - 6 = 6$ 。因此, 结构也具有足够的约束。

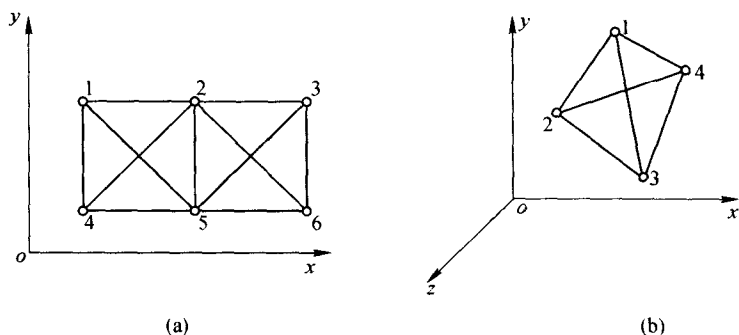


图 1.2-4 平面桁架与空间桁架
(a) 平面桁架结构; (b) 空间桁架结构

几何不变不可移动结构必须具有足够的约束数, 但具有足够约束数的结构是否就是几何不变不可移动的结构呢?

图 1.2-5(a) 示出一个最简单的平面桁架结构, 由两根双铰杆将一个节点连接到基础上形成。 $N = 2$, $C = 2$, 满足 $C \geq N$ 。结构可以承受平面内作用在节点上的任意方向的载荷, 是一个几何不变不可移动的结构。但如果将 1-2、2-3 两根双铰杆布置在同一直线上, 如图 1.2-5(b) 所示, 情况就不同了。

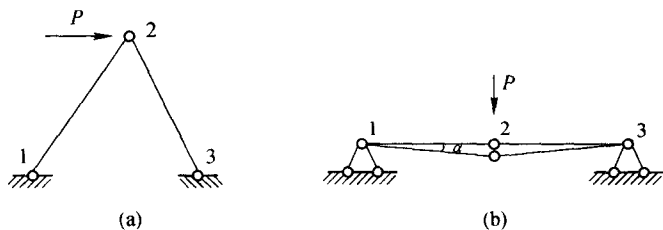


图 1.2-5 几何不变与几何瞬变
(a) 几何不变结构; (b) 瞬变结构

在图 1.2-5(b) 中, 作用在节点 2 上的载荷 P 垂直于直线 1-2-3。1-2、2-3 两杆都不能给节点 2 提供垂直 1-2-3 方向的约束以平衡载荷 P 。因此在 P 的作用下, 1-2 杆绕铰 1 转动, 2-3 杆绕铰 3 转动, 在两个圆的公切线上, 节点 2 会向下运动, 同时两杆会产生伸长变形, 与水平方向之间产生了一个小的角度 α 。两根杆轴力在垂直 1-2-3 方向上的

分量与 P 相平衡时, 节点 2 就停止运动。

在载荷作用下, 结构不能产生与载荷抗衡的内力, 而要产生瞬时明显的变形, 一旦产生变形, 内力即可以平衡外力, 变形也就停止了。这种结构称为瞬变结构。

现在计算杆轴力 N , 根据节点 2 的平衡条件, $N = P/\sin\alpha$, α 角一般很小。因此, 即使载荷 P 很小, 结构内力 N 也可能很大, 以至可能导致结构的破坏。故在工程结构中要避免瞬变结构。

由此, 具有足够约束数只是几何不变不可移动结构应具备的必要条件, 而不是充分条件。不满足此条件的结构一定是几何可变的, 不必再继续进行分析; 而满足此条件的结构可能是几何不变的, 也可能由于约束分布不合理而形成几何可变或瞬变结构。

二、结构组成合理

结构组成合理是结构具有几何不变性和不可移动性应具备的充分条件。分析结构组成是否合理, 不能简单地使用计算自由度和约束数的方法, 而需要进一步分析结构的组成情况。分析结构组成情况可以从以下两方面着手:

1. 掌握桁架结构、刚架结构和薄壁结构等结构组成的常规方法。这些方法将在本章以后几节介绍。

2. 将结构中明显的几何不变部分, 或经过分析确定是几何不变的部分视为刚盘或刚体, 然后再用以下几种方法分析它们之间的连接情况。

(1) 三个平面刚盘之间的相互连接

三个平面刚盘每两刚盘之间用两个约束连接而形成的平面结构具有足够的约束。如果每两个刚盘之间的两约束 (平面铰或两根双铰杆) 形成的三个铰, 包括实铰或虚铰 (图 1.2-6 (a) 中的虚铰 3), 不在一条直线上, 结构组成合理, 是几何不变结构; 如果三个铰 (实铰或虚铰) 在同一条直线上, 结构组成不合理, 是瞬变结构, 如图 1.2-6 (b) 所示。

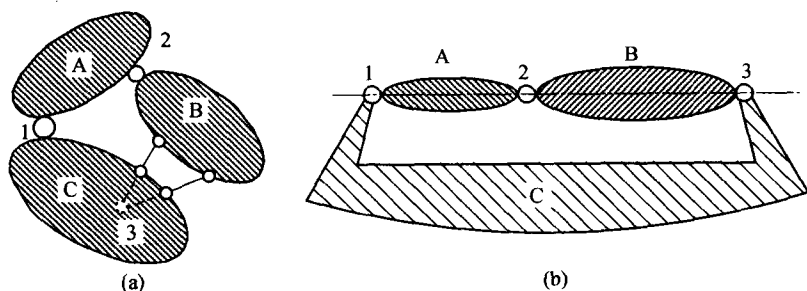


图 1.2-6 三个平面刚盘之间的相互连接

(a) 几何不变结构; (b) 瞬变结构

(2) 两个平面刚盘之间的连接

两个平面刚盘之间用三根双铰杆或一个平面铰和一根双铰杆连接而形成的平面结构具有足够的约束。如果三根双铰杆轴线不相交于一点 (无论是有限远还是无限远), 或双铰杆轴线不通过平面铰, 组成合理, 结构几何不变; 否则, 组成不合理, 结构瞬时可变, 如图

1.2-7、图 1.2-8 所示。

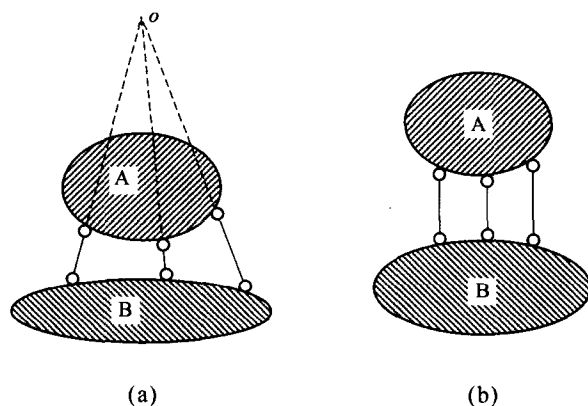


图 1.2-7 瞬变结构

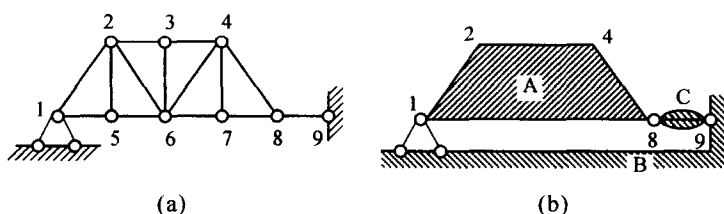


图 1.2-8 瞬变结构

(3) 两个空间刚体之间的连接

两个空间刚体之间用六根双铰杆连接而形成的结构具有足够的约束。如果六根双铰杆的轴线既不在互相平行的几个平面内，也不相交于一轴，或其中几根双铰杆轴线相交于一轴，而其余双铰杆轴线与此轴平行，则组成合理，结构几何不变（图 1.2-9(a)）；否则，组成不合理，结构几何可变（图 1.2-9(b)）或瞬时可变（图 1.2-9(c)）。

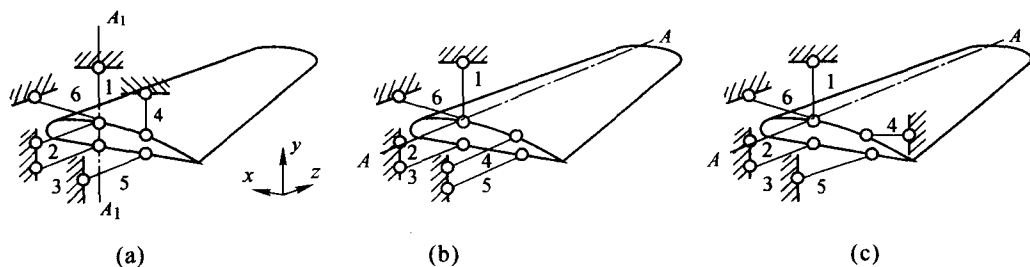


图 1.2-9 六根双铰杆连接示意图

(a) 几何不变；(b) 几何可变；(c) 瞬时可变

1.2.4 静定结构与静不定结构

图 1.2-10 所示出的两个平面桁架结构都具有几何不变性和不可移动性，因此都是能承受载荷的受力结构。

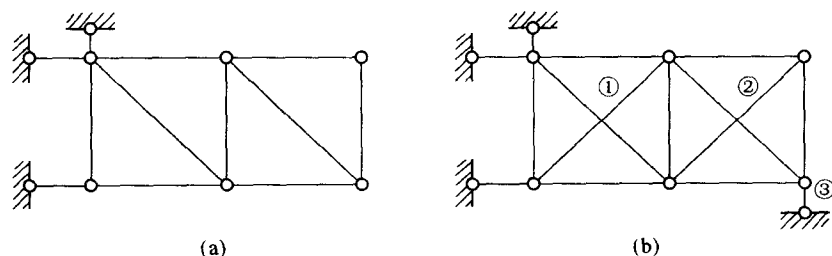


图 1.2-10 平面桁架的静不定分析

(a) 静定结构；(b) 静不定结构

但从结构组成中可以看出它们具有不同之处：(b) 中所示结构比 (a) 中所示结构增加了一些杆件。(a) 中结构已具有了几何不变性和不可移动性，去掉任何一个约束，都会使结构变成几何可变的或可移动的。(b) 中结构增加的杆件①、②、③杆，对保持结构几何不变性和不可移动性来说就是多余的了。

我们把具有最少必须约束数的几何不变结构，称之为静定结构。而具有多余约束的几何不变结构称之为静不定结构。静不定结构中，多余约束数称为结构的静不定度数。(a) 中所示结构为静定结构；而 (b) 中结构为静不定结构，静不定度数为 3。

静定结构与静不定结构虽然都是受力结构，但由于组成特点不同，在载荷作用下所表现的力学特性大不相同，而且在求解内力时所采用的方法也不相同。

1.2.5 结构组成分析的步骤和方法

综上所述，当我们具体对一个结构进行组成分析时，应按以下步骤和方法进行：

1. 首先应判断结构是否具有足够的约束数。

采用的方法通常是将结构中的节点，或某些元件看成是具有自由度的自由体，其余元件则视为消除自由度的约束，按照判别式 (1.2-1) ~ (1.2-3) 检查结构约束数是否足够。如果约束数不满足上述判别式，结构几何可变，不必再继续进行下一步分析；如果约束数满足上述判别式，结构具有足够的约束，就需要进一步分析结构组成是否合理。

2. 分析结构组成，确定结构组成是否合理。

可以采用桁架结构、刚架结构和薄壁结构常规的组成分析方法，得出结构中几何不变部分，并分别用刚盘代替，然后再运用前述的刚盘与刚盘之间组成规律进行分析。

3. 对于具有足够约束、组成合理的几何不变结构，又可分为静定结构和静不定结构，一般可以比较约束数 C 和自由度数 N 进行分析。

满足 $C = N$ (或 $C = N - 3$, $C = N - 6$) 的几何不变结构是具有最小必须约束数的几何不