

7B47-43  
R59

普通高等教育机电类规划教材

# 工业设计机械基础

主 编 阮宝湘  
参 编 邵祥华 高炳学 张宝刚  
        钟家珍 胡 锦  
主 审 吴永健



机械工业出版社

本书共三篇十三章及一个附录。第一篇工程力学基础,包括静力学和材料力学两部分,内容有工程力学基本概念、产品与构件的静力分析、强度、刚度、稳定性和动载荷的分析计算。第二篇机械设计基础,内容有机械设计基础知识、常用机构、联接、机械传动、轴系零件和弹簧、润滑等。第三篇产品机构与结构图例(学生参考资料),提供了日用产品、家用电器和电动工具、典型机构和电器机箱等三类近40种产品的立体透视图。附录为本课程的大作业指南,内有几十个适合于工业设计专业特点的课程论文与课程设计题。本书力求适合工业设计专业的需要,以适专业、宽而浅、重实例、重应用为编写原则。

本书为普通高等教育机电类规划教材,主要适用于工业设计专业本科生“工程力学”和“机械设计基础”两门课程,也可供其他非机类专业本科、专科选用为这两门课的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业设计机械基础/阮宝湘主编. —北京:机械工业出版社, 2002.5  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-08475-6

I. 工… II. 阮… III. ①工程力学—高等学校—教材②机械设计—高等学校—教材 IV. TH12

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第016195号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:邓海平 版式设计:张世琴 责任校对:韩晶  
封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京大地印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年7月第1版·第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·21.75印张·537千字  
0 001—4 000册  
定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677—2527  
封面无防伪标均为盗版

## 前 言

工业设计是一个相对年轻的专业，我国多数高校建立这个专业（系）的时间还不是很长，所以本专业的工程基础课程一般聘请外系的教师来主讲。全国高等学校工业设计专业第二届教学指导组在讨论到这种现状时，指出存在以下两个值得关注的现象：第一，外系教师不易在短时间内熟悉本专业的需要，使得适当地把握课程的深广度和使课程内容结合专业实际，都有一定难度。第二，工程基础各门课程由不同系的教师来讲授，教材也由他们分别选用，那么各课程之间的互相贯通衔接也难免出现问题。在这些工程基础课程中，当然包括“工程力学”和“机械设计基础”这两门课程。有鉴于此，教学指导组讨论通过了编写本专业规划教材《工业设计机械基础》的建议，并审议通过了该教材的编写大纲，目的在于对解决上述问题进行初步的实践和探索。这就是本教材产生的背景。

非机类专业教材把《工程力学》和《机械设计基础》合成一册《机械基础》，已经不乏先例。本教材沿用这种做法，主要着眼于两者的贯通衔接。这既不妨碍在教学计划中仍把它们分列为两门课，也不影响分别聘请两位教师来授课。由于一般不会有哪个学校只开其中一门课而不开另一门，相信合册比分册能给教学双方都带来一些方便。

本教材在编写中力求遵循“适专业、宽而浅、重实例、重应用”的要求。专业的培养目标是工业设计师，需要一定宽度的力学和机械知识，但不可能也没必要达到机械专业的深度。在工程力学部分中，教材突出了静力学和材料力学的基本概念和结论；提供基本计算方法的目的，是让学生掌握的知识能从定性向定量的层面有初步的延伸，这对本科层次的人才培养是需要的。但计算公式的推导一般都加以精简了。机械设计部分中，常用机构、联接、各种传动、轴系零部件等基本内容，都从实用出发，着重于阐明特性对比和适用场合。一般机械基础教材的例题和习题，常限于生产机械的范围，本教材补充了一些生活日用品的例子，以期贴近专业。工业设计的核心是创新，而结构创新往往就是功能创新的基础，应该是本专业学生学习本课程的重点之一，对此本教材也在例题和习题中尽量加以体现。在第三篇“产品机构与结构图例”中，还提供了三大类、近40种产品的立体透视图，作为学生的参考阅读材料。希望它们既能给学生提供创新设计的借鉴，又能激发学生创新设计的热情。本书的附录为课程的“大作业指南”，阐明了“课程论文”和“课程设计”两类大作业的目的、要求和方法，还给出了几十个适合于工业设计专业特点的题目。编者的初步教学实践表明，学生对这样的大作业是欢迎和有兴趣的，能提高本课程的教学效果。希望使用本教材的老师和同学们，通过实践，把改进大作业的意见和好的作业题目反馈给本书编者，让更多的学校能分享你们的宝贵经验。

在各个学校的教学计划中，“工程力学”和“机械设计基础”这两门课程的课时数颇有差异，加之本专业有从理工类招生的，也有从艺术类招生的，因此，各校对这两门课在要求上存在多样性是客观现实。这种多样性对我国设计教育整体而言，是好事；不可能也不应该强求一致。当然，既然如此，就不可能有任何一本教材能适用于所有的学校。本教材的基本对象为理工类招生的工业设计专业本科生。但本教材对较深的理论均已删削，例如，书中公

式基本上都以初等数学的形式给出（只在个别地方出现微积分符号，可以跳过去，不影响对主要内容的理解），因此也可供艺术类招生的工业设计专业本科生、理工类招生的工业设计专业大专生参考。

本书由北京理工大学阮宝湘主编。参加编写的有北京理工大学阮宝湘、邵祥华（第一、二、三、四章，附录），北京机械工业学院高炳学（第五、六章，第十章的第一、二节），北京工商大学张宝刚（第七、八、九章），湖南大学钟家珍、胡锦（第十一、十二、十三章，第十章的第三节）。全书由北京理工大学吴永健教授主审。

由于作者水平所限，书中难免存在种种缺点与不当，恳切期待读者给予批评指正。

编者  
于北京

# 目 录

前言

## 第一篇 工程力学基础

<b>第一章 工程力学的基本概念</b> .....	1	第三节 材料在拉伸和压缩时的力学性能	66
第一节 工程力学与工业设计	1	第四节 拉压杆的强度计算	70
第二节 工程力学的研究对象与基本 内容	4	第五节 剪切和挤压强度的计算	72
第三节 工程力学的基本概念	5	第六节 圆轴扭转的强度计算	76
第四节 静力学公理	7	第七节 梁的抗弯强度计算(一)	83
第五节 约束与约束反力	9	第八节 梁的抗弯强度计算(二)	89
第六节 分离体与受力图	12	第九节 组合变形强度计算简介	96
习题	15	习题	99
<b>第二章 产品与构件的静力分析</b> .....	18	<b>第四章 构件的刚度、压杆稳定和     动载荷问题</b> .....	104
第一节 平面力系的简化与合成	18	第一节 构件的刚度计算	104
第二节 平面力系平衡问题的求解	25	第二节 压杆的稳定性	111
第三节 空间力系简介 超静定的概念	33	第三节 动载荷与动应力	116
第四节 物体的重心和平面图形的形心	36	第四节 应力集中现象和裂纹问题	119
第五节 摩擦与摩擦力	40	第五节 交变应力与构件的疲劳破坏	124
第六节 功与功率	49	习题	127
习题	54	<b>第一篇 篇后语(学生阅读材料)     设计专业的学生怎样解读     力学公式——从张飞的     虎须谈起</b> .....	131
<b>第三章 产品与构件的强度分析</b> .....	59		
第一节 材料力学的研究目的 杆件的 基本变形形式	59		
第二节 内力、应力与应变	62		

## 第二篇 机械设计基础

<b>第五章 机械设计基础知识</b> .....	134	第一节 平面连杆机构及其设计	159
第一节 机械设计基础概述	134	第二节 凸轮机构及其设计	166
第二节 平面机构的结构分析	137	第三节 其他常用机构	171
第三节 平面机构的运动分析和力分析	144	第四节 机械系统设计	178
第四节 机械工程常用的金属材料及 热处理基本知识	148	习题	182
第五节 机械工程常用的非金属材料及 材料的选择	153	<b>第七章 联接</b> .....	184
习题	157	第一节 联接的种类及应用	184
<b>第六章 常用机构及其设计</b> .....	159	第二节 粘接与粘结剂	185
		第三节 键联接与销联接	189
		第四节 螺纹联接	193
		第五节 弹性嵌卡联接	196

习题 .....	196	第二节 轴径的设计计算 .....	223
<b>第八章 机械传动</b> .....	198	第三节 滑动轴承的类型、材料与结构 .....	224
第一节 齿轮传动及渐开线齿轮的 基本知识 .....	198	第四节 非液体润滑轴承的设计计算 .....	229
第二节 渐开线齿轮的参数和齿轮结构 .....	200	第五节 滚动轴承的基本类型、 代号与选择 .....	230
第三节 蜗杆传动和螺旋传动简介 .....	206	第六节 滚动轴承的组合设计 .....	235
第四节 带传动 .....	208	第七节 联轴器、离合器与制动器 .....	239
第五节 链传动 .....	212	习题 .....	243
第六节 液压传动简介 .....	213	<b>第十章 弹簧、润滑与其他知识</b> .....	244
第七节 各种传动方式的对比 .....	214	第一节 弹簧 .....	244
第八节 减速器 .....	216	第二节 摩擦、磨损与润滑、密封 .....	251
习题 .....	217	第三节 产品结构设计的经济因素 和造型因素 .....	255
<b>第九章 轴系零件</b> .....	219	习题 .....	260
第一节 轴的类型、材料与结构 .....	219		

### 第三篇 产品机构与结构图例 (学生参考阅读材料)

<b>第十一章 日用产品图例</b> .....	262	第十节 台钻 .....	304
第一节 电子式气体打火机 .....	262	第十一节 冲击式电动扳手 .....	306
第二节 气体打火机 .....	262	<b>第十三章 典型机构和电器机箱图例</b> ...	307
第三节 壁纸刀 .....	263	第一节 金属拉链 .....	307
第四节 削笔器 .....	264	第二节 爬树转换机构 .....	307
第五节 针管笔 .....	265	第三节 搓元宵机构 .....	308
第六节 记号笔 .....	265	第四节 自行车飞轮 .....	309
第七节 伸缩式圆珠笔 .....	266	第五节 管扳子和扳手 .....	309
第八节 顶销式自动铅笔 .....	266	第六节 小型按钮开关的转换机构 .....	311
第九节 缝纫机 .....	267	第七节 过热保护按钮开关 .....	311
第十节 框架式家具 .....	271	第八节 机械定时器 .....	312
第十一节 板式家具 .....	274	第九节 长距离往复运动机构 .....	314
<b>第十二章 家用电器和电动工具图例</b> ...	276	第十节 供给机构 .....	315
第一节 电动剃须刀 .....	276	第十一节 分离机构 .....	315
第二节 灯具 .....	277	第十二节 整列机构 .....	316
第三节 台式电风扇 .....	281	第十三节 挑选机构 .....	318
第四节 电熨斗 .....	285	第十四节 典型电器机箱的组合机构 .....	318
第五节 电吹风机 .....	289	<b>附录 机械基础大作业指南</b> .....	324
第六节 电烤炉 .....	292	附录 A 机械基础课程论文指导书 .....	324
第七节 吸尘器 .....	294	附录 B 机械基础课程设计指导书 .....	330
第八节 电冰箱 .....	298	<b>参考文献</b> .....	339
第九节 手电钻 .....	302		

# 第一篇 工程力学基础

## 第一章 工程力学的基本概念

### 第一节 工程力学与工业设计

#### 一、工程力学在产品设计中的作用

我们首先通过一个简单的引例，来说明工业设计中的产品设计与工程力学的关系。

无论中外，历史上早期的家具均以木材为主要的制作材料。采用钢管材料来制作家具，始于20世纪20年代，被认为是开辟了现代家具设计的新篇章。这也是包豪斯广为后人称道的贡献之一。包豪斯学校的教师布劳耶（Marcen Breuer, 1902—1981）设计的钢管椅，便以早期钢管家具的代表作而流传于工业设计史籍之中，如图1-1所示。

从有钢管椅的创意，到完成一件合理的钢管椅设计，不可避免地需要正确处理一些与力学相关的问题。虽然其中有些问题，仅仅凭借经验或常识就有可能作得基本适宜；但是深入的分析设计，却离不开工程力学方面的专门知识。不具备一定的工程力学基础知识，将不可能完成一款完美的钢管椅设计。



图 1-1 布劳耶设计的钢管椅

这样一件简单的钢管椅设计，大体涉及哪些工程力学问题呢？

1) 人在上面坐着，以及后仰倚背和前倾起立的时候，要椅子保持稳定不致倾倒，在地面上支撑整个椅子的那段“ $\cap$ ”形钢管，其横宽和纵深至少应该多大？——这是一个静力学问题。

虽然对于椅子这种简单产品来说，这一问题凭直觉或简便地试一试，即不难解决；但是倘若产品形态较为复杂，使用时产品中的部分部件有各种运动、导致整个产品的重心有较大移动，就必须用到静力学的知识（参见第二章中的例2-12和例2-17），否则类似问题不可能给予完善的解决。

2) 钢管椅要能充分承受一个成年人静坐时的体重（“静载荷”）而不致折断破坏，钢管的直径和壁厚这两个尺寸分别需要有多大？——这是材料力学中的强度问题。

实际上强度问题涉及到造型设计中必须处理的多种要素和数据，本引例中影响钢管椅的钢管直径和壁厚这两个尺寸的因素就很多，如所选用钢材的型号（钢材性能因型号不同而不同）、椅子的纵深尺寸和就坐者后仰倚靠的姿态、钢管折弯处圆弧半径的大小等。当然钢管直径和壁厚两个尺寸互相也有关系，还要分析人猛然往椅子上坐下时的冲击作用（“动载

荷”)，以及人在钢管椅上长期晃动造成的反复作用(构件的“疲劳”问题)。

3) 富于弹性是钢管椅的关键性特征，恰到好处的弹性才能使人充分享受钢管椅的舒适和乐趣，因而计算变形量的大小是设计中的重点和要点——这是材料力学中的刚度问题。

刚度问题与上面说的强度问题一样，与材料的截面尺寸(粗细厚薄)、形状(方圆、实心空心、是高的还是扁的)、所选材料的性能以及产品的结构形态等要素都有确定的关系，材料力学理论能给出他们之间相互关系的计算公式。

复杂、大型工业产品的设计中，强度、刚度、工作寿命等属于力学方面的分析计算，总是占有重要的地位。直接由人使用的产品也是如此。

比如鞋子，尤其是女性穿的高跟鞋，鞋底前掌和后跟的形状、尺寸、位置的合理确定，依赖于穿着中脚底的着力情况。为此，我国制鞋工业研究部门曾进行过《脚掌面压力分布实验及其应用》的专项研究，图 1-2 为测试所得大量数据中的两幅力值分布曲线图。

与平面造型活动的视觉传达设计不同，作为工业设计主体的产品设计，最终要落实为具有使用功能的物化成果，因此，其形态、尺寸、结构、材料选择、宜人性(即人机关系)都是基本的设计要素和工作内容。通过上面对钢管椅的分析可知，处理这些要素全要用到工程力学的知识。在产品创意和初步方案构思的阶段，或许工程力学还不是重点问题，但是进行深入设计，为所有设计元素确定量化结果的时候，如果设计师只会依靠自己的“感觉”来决断，那将是“瞎子摸象”式的自以为是，常常难以做得正确合理，更不要说设计的完美了。掌握一定程度工程力学等方面的基础科技知识，是现代产品设计师所必须具备的素质。

## 二、工程力学与产品的形态美

美的本质、审美意识与审美对象的关系是基本哲学问题之一，关于这方面的研究从古代开始，一直延续在整个人类文明史中，涉及广泛的学术领域，而且有着各种不同的理论与不同的观点。因此，凡关乎于此的问题，深入讨论起来，常常很难作出确凿而毫无争议的结论。尽管如此，关于美的感受与审美标准，还是有相当多的论点至少在表层层面上获得了多数研究者较为一致的认同。比如说，和谐与秩序是美的本质之一，而和谐与秩序也意味着一种数理逻辑关系；黄金分割比例之美，即蕴藏着理性与和谐的深刻内涵，等等。关于产品的形态美和工程力学之间的关系问题，也大体可以在这样一个层面上举出一些具体事例，并由此引出相应的一些看法，供读者参考和研究探讨。

### 1. 均衡与稳定是造型美的形式法则之一，他们来源于力学中的概念

均衡与稳定的造型法则来源于人们对事物安稳、可靠的心理要求，直接由实际物体在重力作用下的平衡状态引申而来。

我国古代的文物“马踏飞燕”的造型令人惊叹(图 1-3)：飞奔着的马一蹄着地，动态中还维持着瞬时的平衡与稳定。

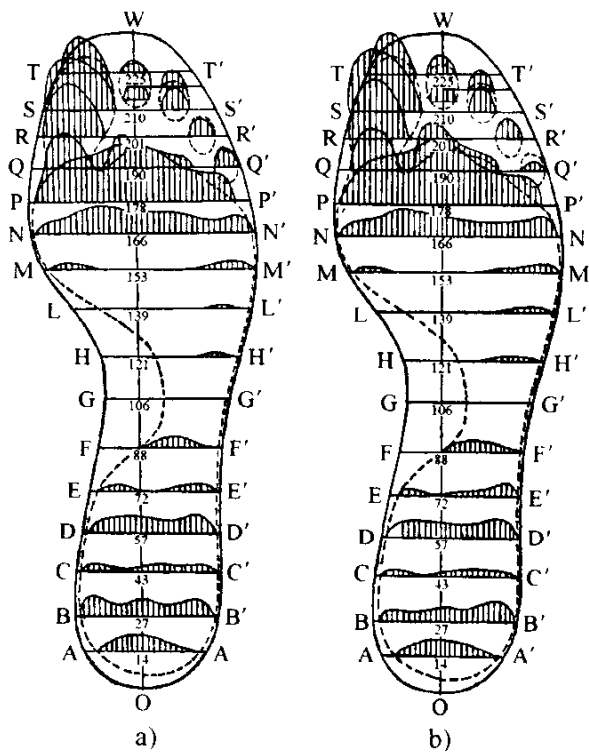


图 1-2 女子脚掌面纬向力值的分布曲线

a) 跟高：70mm 状态：步行

b) 跟高：80mm 状态：步行



对于工业产品，物理意义上的稳定自然是必要的，碰碰就要倒塌的产品无法使用。而且就造型而言，视觉感受上的稳定也同样是取得美感所应具备的条件。视觉稳定与“视觉量感”有关：体积大、颜色深的物体，不论实际重量如何，总是让人产生很重的心理感受，这属于视觉量感。

图 1-4 是夏普公司的 BH-351 型半导体收音机；适应当时（20 世纪 60 年代）的“太空热”而设计成飞行器的式样，前后方向的造型是不对称的。该产品前部（图上为右部）体积小而颜色深浓，后部（图上为左部）体积大而颜色浅淡。如两者的视觉量感相近，可使两分量感重心到底面中心点  $O$  的距离  $q$  与  $h$  也应相近；如前部量感  $H$  略大于后部量感  $Q$ ，则可使两分量感重心到底面中心的距离大体成相应的反比例关系，即使得  $Qq \approx Hh$ 。经过这样的造型处理，产品前后方向上符合形式美学的均衡法则，给人安稳、可靠、端庄的良好感觉。倘若处理不当，看上去就使人觉得前后失衡，似乎不小心一碰就倒，将很难给人以美感。

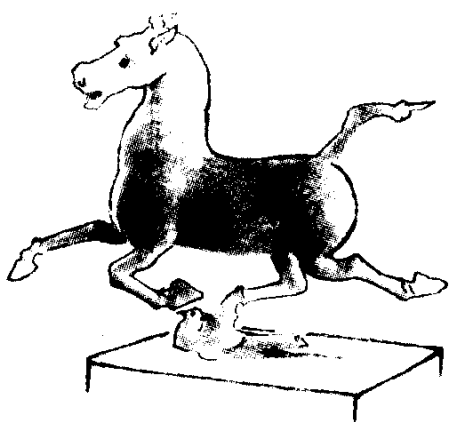


图 1-3 飞马踏燕

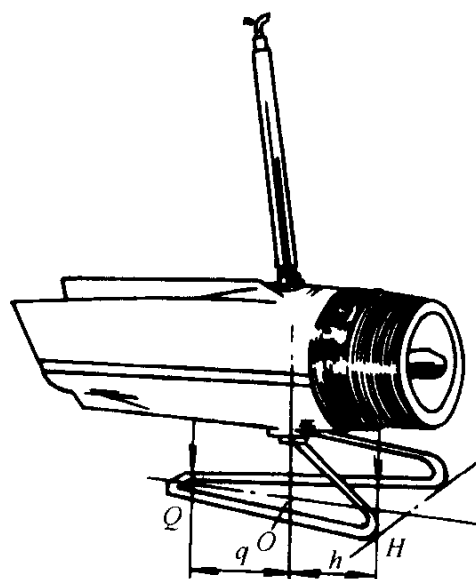


图 1-4 夏普 BH-351 型半导体收音机

产品，尤其是大型产品设计时，一般都采用上部浅淡、下部深浓的色彩方案以保持视觉稳定，其根源在于力学上的合理性。

## 2. 形态的视觉心理感受，与强度、刚度上的合理性有深刻的潜在联系

我国隋代工匠大师李春设计的赵州桥（图 1-5），是世界上最古老、也是最著名的石拱桥之一，建造至今已经历约 1400 年的悠久历史。由楔形石块拼成向上弯曲的石拱，能充分发挥石材耐压的性能，使这一桥梁跨度既大，承受负荷的能力又高，而大小拱形的优美曲线形态、端庄稳定的雄姿，也永远成为文明史中的佳话。



图 1-5 中国古老的石拱桥——赵州桥

图 1-6a 所示的结构，常用作城市中公共汽车站，或铁路沿线小站的遮阳防雨棚架。从立柱顶部向两侧伸展出去的挑梁支承着棚顶的重量。试看这段挑梁截面尺寸和形状的变化情况：与立柱相连及邻近部分梁截面的高度尺寸较大，而逐渐趋向挑梁的远端，高度尺寸也逐

渐越来越小。人们会觉得挑梁的这种截面曲线挺美。事实上，由于挑梁正是越接近根部受力越大，所以挑梁截面的高度尺寸沿着趋近根部而逐渐加大，从结构强度来分析才是合理的。如果相反，挑梁根部很薄，越延伸向外反倒越厚，如图 1-6b 所示，挑梁的截面仍然是一条曲线，但人们看上去会自然地觉得不太顺眼，甚至别扭，因而同样是曲线，却缺乏了美感。原来这样的挑梁将很容易在根部折断，从结构强度来看是不合理的。

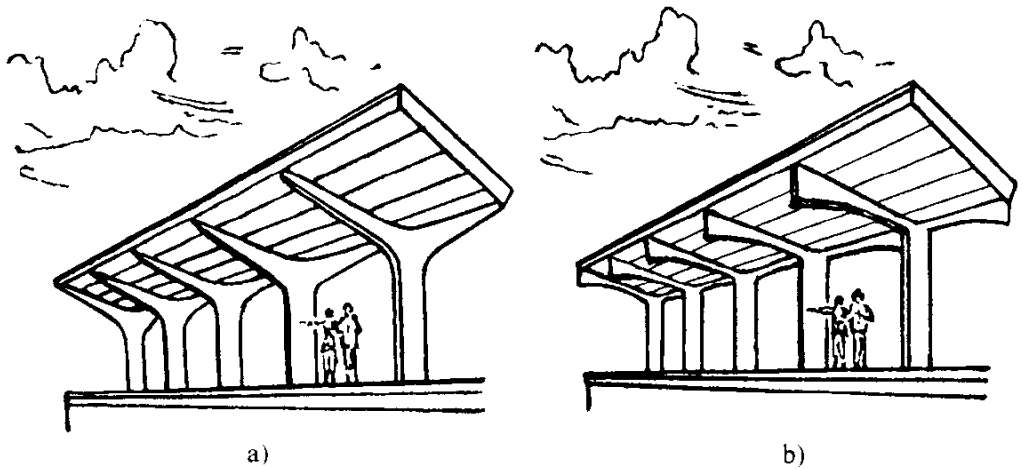


图 1-6 棚架的立柱与挑梁

a) 力学上合理，富有美感 b) 不利于承载，视觉不佳

洗衣机等一些机壳的正面、侧面常采用压肋加固结构（图 1-7），这是因为大面积薄平板的强度和刚度都很差，经过凹凸压肋，可大幅度提高薄板构件的强度和刚度，在力学上更为合理。与此相反，在视觉效果方面，当箱壳是一大块完全平的表面时，看上去单调、平淡、无生气、疲软，有了凹凸压肋，增加了立体感与层次，于是显得挺拔、丰富、生动。即使不懂力学，讲不出上面这番道理，但凭直觉也会有同样感受。由此可见，合理的力学构形与造型美存在着内在的深刻联系这一点，应该是毋庸置疑的。

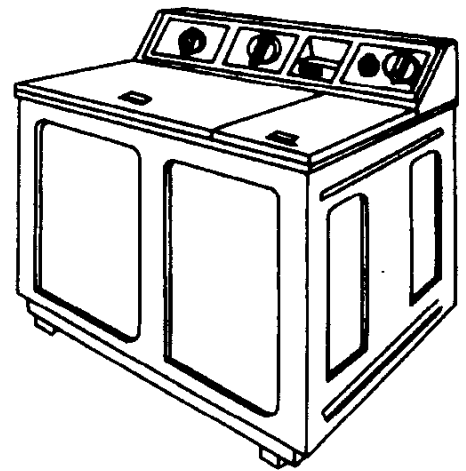


图 1-7 洗衣机合理的力学结构与造型美

猛禽翱翔于高空，凶兽奔跑在山崖。猛禽的翅膀、凶兽的肢体都以他们超凡的形态美为千百年来艺术家所倾倒。研究表明，由于亿万年进化的结果，飞禽走兽的翅膀肢体，形态结构都具有极佳的力学性能。

科学和艺术是人类文明的两大分支，它们在高层次上却有同一性。力学上的合理与造型美之间的关系，属于这种同一中性的一个部分，是值得进一步深入研究的问题。

## 第二节 工程力学的研究对象与基本内容

工程力学一般包括理论力学和材料力学两个部分。

### 一、理论力学的基本内容

理论力学研究物体由于受力引起的机械运动的规律。物体的机械运动，是指物体的空间位置随时间而变化的过程与结果。

理论力学一般包含静力学、运动学和动力学三部分内容。

结合工业设计专业本科教学的实际，本书只讲述其中的静力学部分。静力学研究物体受力分析的方法和物体在外力作用下处于平衡状态的条件。

### 二、材料力学的基本内容

材料力学研究构件由于受力引起的变形和发生破坏的规律。材料力学研究构件的强度、

刚度和稳定性三类问题。

构件的强度，指构件受力中抵抗破坏的能力。

构件的刚度，指构件受力中抵抗变形的能力。

构件的稳定性，指构件受力中保持其原有平衡形式的能力。

结合工业设计专业本科教学的实际，本书只讲述其中的强度与刚度两类问题。对于强度、刚度问题的讲述，着重在基本概念和工业设计中可能涉及的应用方法，而果断删削理论分析和公式的数学推导过程（这部分在某些专业的材料力学教材中占有较大篇幅）。工业设计中要能正确、自如地处理好构件强度和刚度问题，只对强度、刚度问题有定性的了解是不够的，学生应该掌握与构件强度、刚度有关的基本量化关系。因此本书将结合实例介绍基本的强度、刚度计算公式，——只给结论，舍弃推导。

下面是三件大小不同的工业设计产品，读者试着初步分析一下，他们的设计中会遇到哪些有关工程力学的问题。

图 1-8 是 Giovenni Albera 设计的系列台灯（1984）（此图取自《ITALIAN MODERN——A Design Heritage》）。

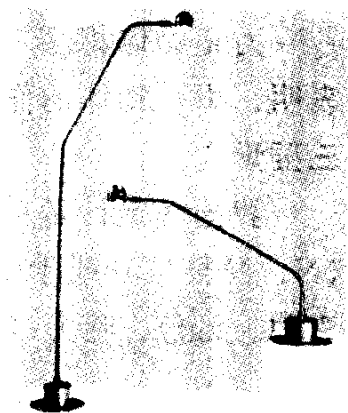


图 1-8 Giovenni Albera 设计的系列台灯

图 1-9 是英国布莱克-戴克公司的家庭训练器（此图取自《世界产品设计 商标设计 包装设计 广告设计精华》）。



图 1-9 英国布莱克-戴克公司的家庭训练器

图 1-10 是 Bruno Giardino 设计的缆车客罐（1986）（此图取自《ITALIAN MODERN——A Design Heritage》）。

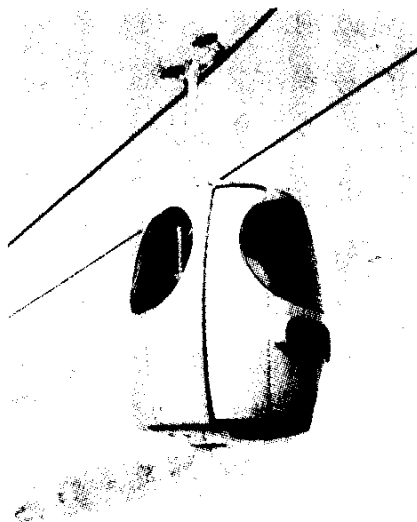


图 1-10 Bruno Giardino 设计的缆车客罐

### 第三节 工程力学的基本概念

#### 一、刚体与变形固体

任何材料制作的产品及其构件，在外力作用下都会产生一定量的变形。但在分析构件受力的平衡条件等问题时，由于包括构件自身重力在内的外力所引起的变形，相对于他们的原始尺寸而言，通常是极其微小的。把构件理想化为不会变形（也不会破坏）的“刚体”，可以大大简化计算，其结果又能满足设计要求的精度。因此在静力学的分析计算中，即把构件

视为刚体。

但研究构件的强度和刚度问题时，变形就既是分析问题的依据也是分析的目标了。所以在材料力学中，把构件视为（可）**变形固体**。

由于上述区别，通常说：静力学研究的是构件受力的“外效应”；而材料力学研究的是构件受力的“内效应”。

## 二、力与力系

### 1. 力与力的表示

力是物体相互之间的机械作用，是引起物体运动状态变化或引起物体变形的原因。实践表明，力对物体的作用效应取决于三个要素：**力的大小、力的方向、力的作用点**，称为力的**三要素**。

我国法定计量单位的基础是国际单位制（SI）。在国际单位制中，力的度量单位是牛顿（N，简称牛）或千牛顿（kN，简称千牛）。过去人们生活的一定范围中曾有使用公斤力（千克力，kgf）、吨力（tf）的习惯。牛顿和公斤力的换算关系是

$$1\text{kgf} = 9.8\text{N}$$

力是一个既有大小又有方向的量，称为**矢量**。通常用一段带箭头的线段来表示一个作用力，因为它能把力的三要素都表示出来，如图 1-11 所示。

线段的长度按选定的比例表示力的大小；线段与某基准线间的夹角表示力的方位，箭头的指向表示力的作用指向；线段的起始点或箭头的指向点表示力的作用点。

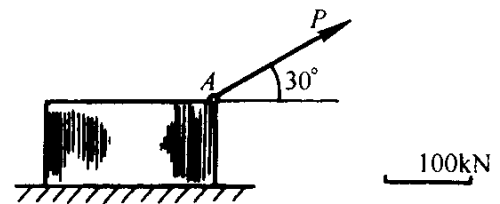


图 1-11 力的图示法

用字母符号表示力的矢量时，常用黑体字母  $F$ 、 $P$ 、 $T$ 、 $R$ 、 $N$ 、 $X$ 、 $Y$  等等；而相应的明体字母  $F$ 、 $P$ 、 $T$ 、 $R$ 、 $N$ 、 $X$ 、 $Y$  等则表示力矢量的数值大小。

### 2. 集中力与分布力

在产品设计或工程分析中，作用力常被称为**载荷**。比如汽车装载货物的重量就叫汽车承受的载荷。当作用力的作用面积与所论产品或构件相比很小的时候，该力称为**集中力**或**集中载荷**。例如跳水运动员脚踏跳板的作用面积，相对于整个跳板来说是很小的，运动员跳水时蹬板的作用力对于跳板，便是集中力，或称集中载荷。当作用力分布作用在产品或构件上一个区域时，该力称为**分布力**或**分布载荷**。例如吹在广告牌上的风力、压在公共汽车站棚顶的积雪的重量等，都是分布力，或称分布载荷。对于分布载荷而言，单位长度上的载荷量、或单位面积上的载荷量称为**载荷集度**。线载荷集度的单位是：牛/米（N/m），或千牛/米（kN/m）；面载荷集度的单位是帕〔斯卡〕（Pa），即牛/平方米（N/m<sup>2</sup>）；或兆帕（MPa），即牛/平方毫米（10<sup>6</sup>Pa = 10<sup>6</sup>N/m<sup>2</sup> = N/mm<sup>2</sup>）。一段长度上或一块面积上载荷集度为等值的分布载荷，称为**均布载荷**。

### 3. 力系

作用在某物体上的若干个力统称为一个**力系**。如果用一个力系代替另一个力系作用于物体，其作用效果不变，则说这两个力系是等效的，两者互为**等效力系**。如果一个力系的作用等效于一个力的作用，则该力称为此力系的**合力**；力系中的各力都是这个合力的**分力**。

物体相对于地球保持静止或作匀速直线运动，则称物体处于**平衡状态**。物体在一个力系作用下处于平衡状态，该力系称为**平衡力系**。

各分力的作用线都处于同一平面上的力系称为平面力系。各力的作用线不共面，则为空间力系。各力的作用线汇交于一点的力系称为汇交力系。各力的作用线互相平行的力系称为平行力系。作用线既不汇交于一点、也不全互相平行的力系称为任意力系。

#### 第四节 静力学公理

公理是由人类长期实践所证明了的正确结论、客观规律。静力学有四个公理，概括了力的基本性质，是建立静力学全部理论的基础。

##### 公理 1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要与充分条件是：这两个力大小相等，方向相反，且作用在同一直线上（简称：等值、反向、共线，如图 1-12a 中的  $F_1$ 、 $F_2$  所示）。

此公理指出了刚体平衡最简单的性质，是推证各种力系平衡条件的依据。

不计自重、只在两点受力而处于平衡状态的构件，称为二力构件。当构件为杆状时，又习惯称为二力杆。二力构件（二力杆）的概念虽然简单，掌握它，对分析问题是很有用的。它有助直观快捷地确定该构件所受外力的方向。

在图 1-12b 所示的吊架中  $AB$  杆有  $A$ 、 $D$ 、 $B$  三个作用力点，它不是二力构件。而  $CD$  杆只在  $C$ 、 $D$  两点与其他物体相接触，若不计重力（与所承载荷相比，工业产品自身的重力通常是很小，可以忽略不计的），只可能在这两点受力，是二力杆，因此作用于  $CD$  杆  $C$ 、 $D$  两点的力  $F_C$  和  $F_D$  的作用线，必在  $CD$  连线上，且等值、反向，如图 1-12b 中所画。

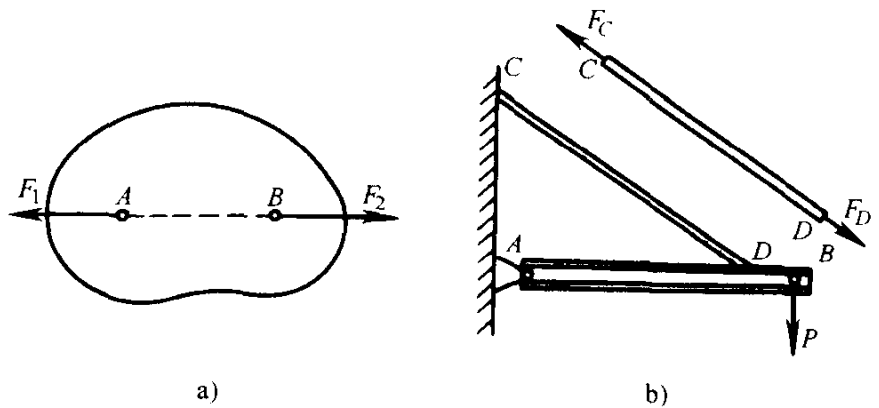


图 1-12 二力平衡和二力构件

a) 二力平衡 b) 二力杆（杆  $CD$  的重量不计）

##### 公理 2 加减平衡力系公理

在作用着已知力系的刚体上，加上或减去任意的平衡力系，不会改变原力系对该刚体的作用效应。

##### 推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上某点的力，可以沿其作用线移到刚体上任意一点，而不会改变该力对刚体的作用效应。

此推论由公理 2 推断而来：在图 1-13a 中，小车在  $A$  点受  $F$  力作用。在  $F$  力作用线上某点  $B$  加一对等值、反向、共线的力（ $F_1$ ， $F_2$ ），且取  $F_1 = -F_2 = F$ ，小车受力成图 1-13b 所示状态。因所加的（ $F_1$ ， $F_2$ ）是平衡力系，由公理 2 可知，图 1-13a、b 两情况下力的作用效应不

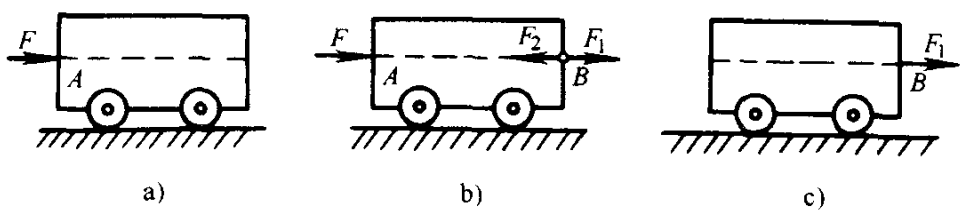


图 1-13 力的可传性原理

变。而图 1-13b 中的  $(F, F_2)$  两力也符合等值、反向、共线的条件，也是平衡力系；再将  $(F, F_2)$  从图 1-13b 中减去，小车受力成图 1-13c 所示状态。同理，图 1-13a、b、c 三种受力状态下，力的作用效应仍然没变。而对比图 1-13a 和图 1-13c，就相当于将原作用力沿其作用线移到了另一点。由此，推论 1 得到了证明。

**公理 3 作用与反作用公理**

当甲物体给乙物体一作用力时，甲物体必同时受到乙物体的反作用力，且两个作用力大小相等、方向相反、作用在同一条直线上。

如图 1-14，重物给绳一个向下的拉力  $T$ ，同时绳必给重物一个向上的拉力  $T'$ ； $T$  与  $T'$  互为作用力与反作用力。作用力与反作用力必成对同时出现，也同时消失。

作用力与反作用力虽然也是等值、反向、共线的两个力，但这两个力不是前面说的一对平衡力。只有作用在同一物体上的若干个力才谈得上是否组成平衡力系，而作用力和反作用力却是分别作用于两个物体上的力，与平衡力系的概念不沾边。而在图 1-14 中，重物在 A 点作用于绳子的拉力  $T$  和挂钩在 B 点作用于绳子的拉力  $T_1$  才是一对平衡力；绳子在 A 点对重物的拉力  $T'$  和地球对重物的吸引力  $G$  也是一对平衡力。

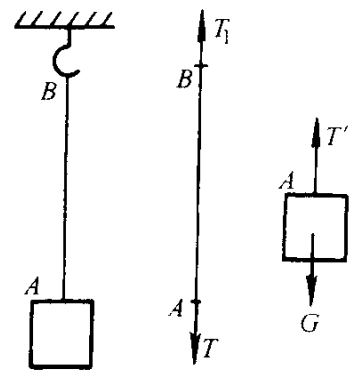


图 1-14 作用力与反作用力

**公理 4 力的平行四边形公理**

作用在物体上同一点的两个力，可以合成一个合力；合力也作用在该点上，合力的大小和方向用这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线确定。

如图 1-15a 所示， $F_1$ 、 $F_2$  为作用于 O 点的两个力，以这两个力为邻边作平行四边形  $\square OACB$ ，则从 O 点作出的对角线 OB，就是  $F_1$  与  $F_2$  的合力  $R$ 。

实际上，如图 1-15b 所示，先画出力矢量  $F_1$  后，再以它的终点为起始点画出力矢量  $F_2$  (简言之，将力矢量  $F_1 F_2$  首尾相连)，形成折线 OAB，再以直线 OB 将折线封闭构成一个三角形 OAB，则矢量 OB 就代表了合力  $R$ 。这就是由力的平行四边形法则演变而来的力的三角形法则。力的三角形法则应用起来较为简便。

力的平行四边形法则是力的合成与分解的依据，也是较复杂力系简化的基础。

图 1-15a 所表示的力的合成关系，通常可说成“ $F_1$ 、 $F_2$  两力相加得到合力  $R$ ”。这一关系的矢量表示式是

$$F_1 + F_2 = R \tag{1-1}$$

由  $F_1$ 、 $F_2$  可以算出合力  $R$  的数值和方向，公式如下 (见图 1-16)。

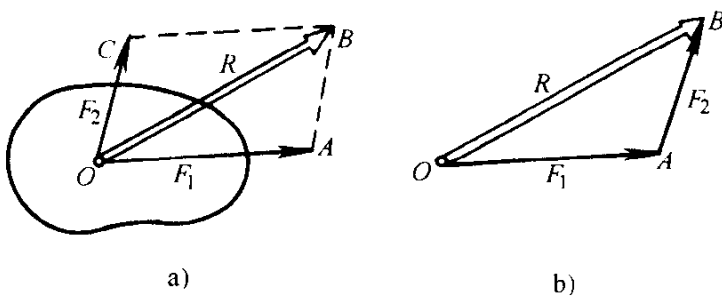


图 1-15 力的平行四边形公理  
a) 力平行四边形 b) 力三角形

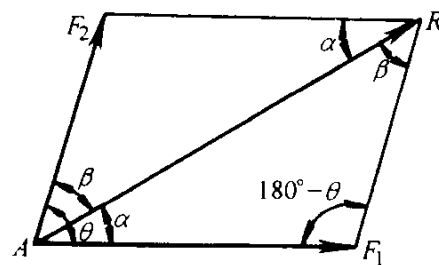


图 1-16 分力与合力的关系

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\theta} \tag{1-2}$$

$$\tan\alpha = \frac{F_2\sin\theta}{F_1 + F_2\cos\theta} \tag{1-3}$$

由两个（或更多的）力求它们的合力，解是唯一的。反过来将一个力分解为两个（或更多的）力，则有无穷多组解。分析求解问题时常将力沿两个互相正交的方向分解为两个分力，称为力的正交分解，如图 1-17 所示，力  $F$  沿水平 ( $A_x$ ) 和铅垂 ( $A_y$ ) 两方向分解为  $F_x$  和  $F_y$  两个分力。

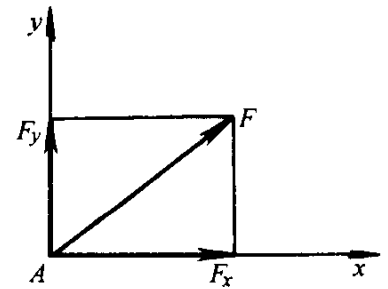


图 1-17 力的正交分解

由公理 1 和公理 4 可以得到一个如下的推理（推证从略）：

**推论 2 三力平衡汇交定理**

刚体受不平行三力作用而平衡时，这三个力的作用线必汇交于一点。

推论 2 虽然简单，但在分析问题、尤其是判定某些未知力的方向时却很有用。

例如图 1-12 中二力杆 CD 所受两力  $F_C$ 、 $F_D$  的方向已经确定，现在进一步来分析 AB 杆。外载荷  $P$  的方向是给定的，CD 杆作用于 AB 杆的力  $F'_D$  是  $F_D$  力的反作用力，方向也知道了（见图 1-18），那么，AB 杆在 A 点所受的力  $F_A$  的作用线如何确定呢？利用推论 2 就可以解决这个问题：AB 杆在三力作用下处于平衡状态，因此，三力必汇交于一点，即  $F_A$  的作用线必通过  $P$  力与  $F'_D$  两力作用线的交点 E，所以 A、E 两点的连线就是  $F_A$  力的作用线。这样，当该吊架 AB、CD 两杆间的夹角已知，那么，在一定的  $P$  力（ $P$  力就是起吊的重量）作用下，AB、CD 两杆所受的力就全能求解出来了。

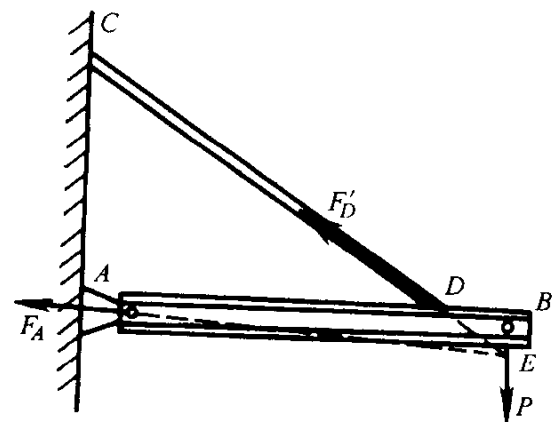


图 1-18 三力平衡汇交定理的应用

## 第五节 约束与约束反力

### 一、约束与约束反力

对物体的运动（或运动趋势）起限制作用的其它物体，称为该物体的约束。若干个物体可以看成是一个整体，这个整体就是一个物系。约束也可以是对物系而言的。产品总是由若干构件组成的，分析整个产品或分析它的组成构件，都有其各自的约束。约束能阻止被约束物体运动，必存在着约束对于所论物体的作用力，这种作用力称为约束反力，简称反力。

例如 AB 绳吊着重量为  $G$  的小球 C（图 1-19a），对被研究的物体小球 C 而言，绳索 AB 能阻止它掉下来，是它的约束；绳索对小球向上的拉力  $T$  就是约束反力（图 1-19b）。而小球 C 的重量也在 B 点加给绳索，是绳索所受的载荷。同样，图 1-10 所示的缆车吊

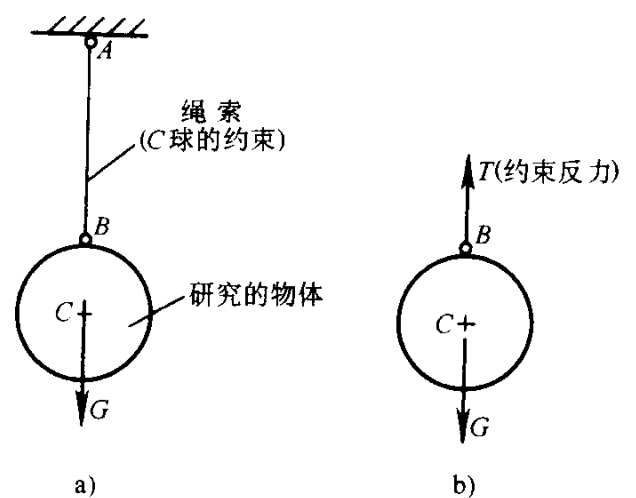


图 1-19 约束与约束反力

罐，是由于钢制缆绳支持才使它不致坠落的，缆绳就是吊罐的约束。吊罐的重量加在缆绳上，是缆绳所受的载荷；而缆绳阻止吊罐坠落的作用力，就是对于吊罐的约束反力。

再来看看图 1-12b 和图 1-18。杆 AB 和杆 CD 构成的吊架组成一个物系。该吊架在左边墙面上（或立柱上）A、C 两点受到约束的作用，吊架作为一个物系，除受到外载荷  $P$  的作用外，还受到  $F_A$  和  $F_C$  两个约束反力的作用。单独分析 CD 杆，墙面（或立柱）和 AB 杆都是它的约束；它在 C 点受墙面（或立柱）的约束反力  $F_C$  的作用，在 D 点受 AB 杆的约束反力  $F_D$  的作用。单独分析 AB 杆，墙面（或立柱）和 CD 杆都是它的约束，它受两个约束反力  $F_A$ 、 $F'_D$  和一个外载荷  $P$ ，共 3 个力的作用（图 1-18）。

## 二、常见的约束类型和约束反力特性

### 1. 柔索约束

绳索、传动带、胶带、链条等柔性索状物形成的约束即柔索约束。

柔索只能承受拉力，不能抵抗压力和弯曲，该约束只能阻止物体沿着柔索中心线伸长方向的运动，而不能阻止相反方向的运动，因此，柔索约束反力的特性是：作用点为柔索与物体的连接点，作用线与柔索中心线一致，作用力的指向为背离物体的方向。

图 1-19b 中的力  $T$  就是如此。

### 2. 光滑面约束

支承面与物体接触处光滑，两者间的摩擦力很小，可以忽略不计，则支承面对物体形成光滑面约束。

光滑面阻止物体沿光滑面的法线方向向着光滑面的运动，而不能阻止物体背离光滑面和沿光滑接触面切线方向的运动，因此，光滑面约束反力的特性是：作用点为接触点，作用线与接触面的法线方向一致，作用力指向被约束物体。光滑面约束反力也常称为法向反力

图 1-20 给出了两个表示光滑平面约束反力的例子，两图中的  $K$  都是光滑面约束反力。

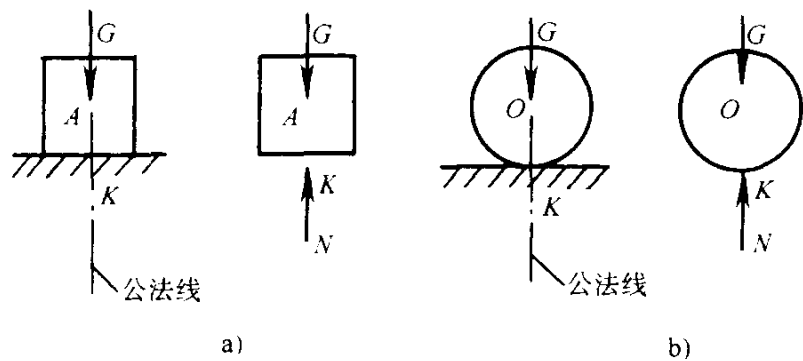


图 1-20 光滑平面的约束反力

图 1-21 给出了三个表示光滑曲面约束反力的例子，图 1-21a 和图 1-21b 中的  $K$ ，图 1-21c 图中的  $N_B$  都是光滑曲面约束反力。图 1-21c 所画的是渐开线齿轮两个齿廓啮合接触的情形。

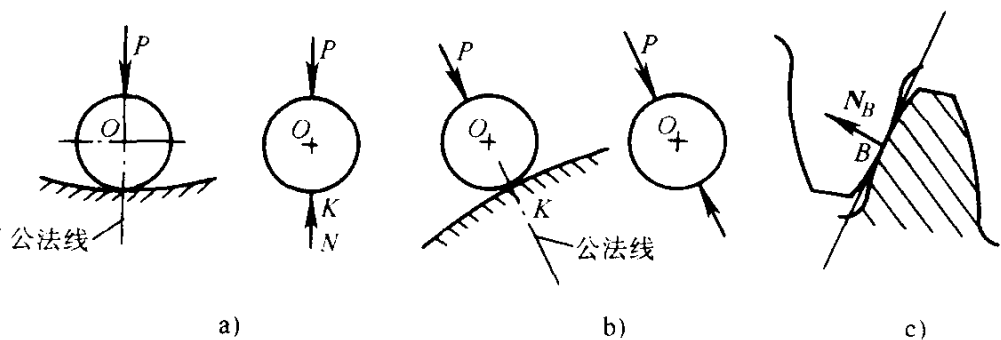


图 1-21 光滑曲面的约束反力

图 1-22 给出了光滑棱角约束反力的例子，图中  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  分别是支承面在 A、B、C 三点给斜靠杆的约束反力。注意，三个力的作用线均沿相应支承面在该点的法线方向。

### 3. 光滑圆柱形铰链约束

表面光滑的圆柱形销轴插



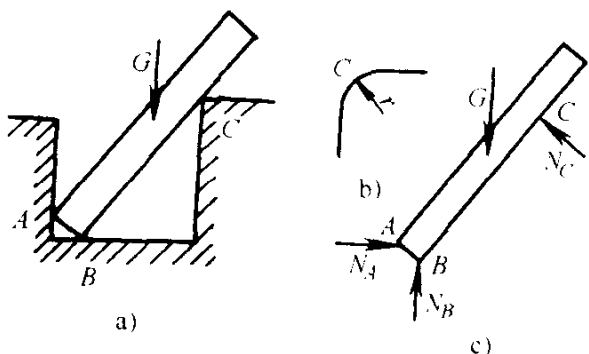


图 1-22 光滑棱角的约束反力

入两个构件的光滑圆孔中，若忽略不计绕销轴转动的摩擦力，则销轴对于构件，或两构件互相之间形成圆柱铰链约束，简称铰链约束。

图 1-23a 为构成铰链约束三个构件的常见形状。图 1-23b 为三构件联结后的形式。

铰链约束不能阻止构件间绕销轴轴心线的相互转动，也不能阻止构件沿销轴轴心线方向的相对移动，但能阻止垂直于销轴轴心线平面内任意方向上的相对移动。圆柱铰链可用图 1-23c 或图 1-23d 所示简图来表示。圆柱铰链约束的形式决定了铰链约束反力的特性是（见图 1-23e）：作用点在销轴与圆孔的接触点  $K$ ，作用线通过销轴及圆孔的圆心，如  $R_C$  所表示。但铰链约束反力  $R_C$  的方位角  $\theta$  和指向取决于外载荷等具体条件，要根据实际情况才能分析确定。实际分析计算中，较方便、也是较常用的方法，是求出  $R_C$  在  $x$ 、 $y$  两个互相垂直方向上的正交分力  $X_C$ 、 $Y_C$  来，如图 1-23f 所示。求出了  $X_C$ 、 $Y_C$ ，则它们的合力  $R_C$  的大小、方位角  $\theta$  和指向也就完全确定了。

建筑门窗的合页铰链、冰箱、微波炉的门铰链都是铰链约束的例子。图 1-24 所示的曲柄连杆中， $A$ 、 $B$  两处都是铰链约束。

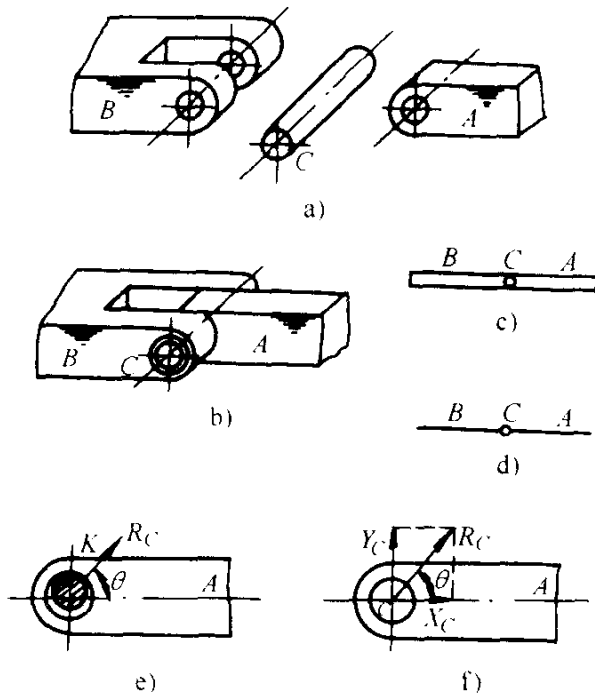


图 1-23 光滑圆柱形铰链约束

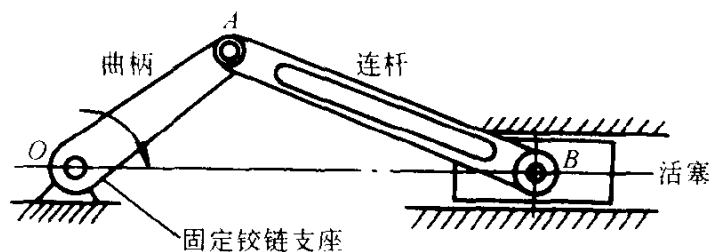


图 1-24 曲柄连杆机构中的铰链约束

#### 4. 固定与活动铰链支座约束

以光滑铰链联接在固定基础上的支座为固定铰链支座约束，简称固定铰支座。

图 1-24 中的  $O$  点处就是一个固定铰支座。图 1-25a、b 是固定铰支座的常见结构形式。力学计算中，常以图 1-25c、d 所示简图表示固定铰支座。

固定铰支座的约束反力特性类似于光滑圆柱形铰链约束，也常用在  $x$ 、 $y$  方向上的两个正交分力  $R_x$ 、 $R_y$  来表示（图 1-25e）。

以光滑铰链联结在一个支座上，支座能在一定范围内移动，移动所受阻力很小而可以忽

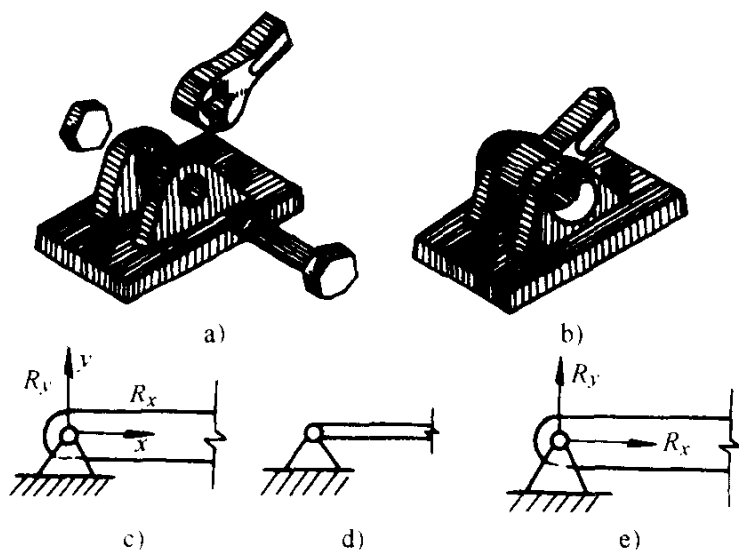


图 1-25 固定铰支座约束