

# 机械设计基础

The background of the cover is a technical drawing in a light blue color on a darker blue grid. It features several mechanical components: a large gear at the bottom, a protractor with degree markings on the right side, and various drafting tools like a compass and a pencil on the left. The overall aesthetic is clean and professional, typical of a technical textbook.

上册

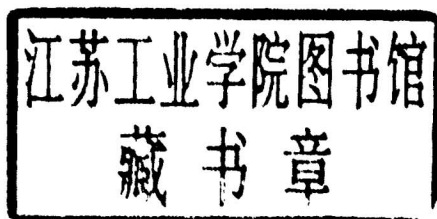
庞兴华 王林鸿 主编

 中国科学技术出版社

# 机械设计基础

上册

庞兴华 王林鸿 主编



中国科学技术出版社

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

机械设计基础/庞兴华, 王林鸿主编. —北京: 中国科学技术出版社,

2002.9 ISBN 7-5046-3365-8

I. 机… II. ①庞…②王… III. 机械设计-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 077011 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市卫顺印刷厂印刷

\*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 24.5 字数: 600 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册(上、下册) 定价: 44.00 元

---

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、  
脱页者, 本社发行部负责调换)

## 编委成员及分工

**主 编** 庞兴华 王林鸿

### 编 委

庞兴华 王林鸿 梁秀山 段江军 王 平 田光辉 熊运昌  
王艳红 赵 华 刘宏伟

### 编写任务分工

庞兴华编写绪论、第六、七、十七章，段江军编写第一章（1~5节），王平编写第二章，田光辉编写第三、四、五章，熊运昌编写第八、九章，梁秀山、刘宏伟编写第十章及第一章（6、7节及习题），王艳红编写第十一、十二章及第二章习题，王林鸿编写第十四、十五章、十六章，赵华编写第十三章。

庞兴华、王林鸿负责统稿、组编、整理工作。

# 前 言

本教材为机械制造及近机类专业大学专科教材。是我校机械制造专业及相关专业实行教学改革后的教学计划的配套教材，与该专业的培养方向及培养目标相适应。内容涵盖《理论力学》、《材料力学》、《机械原理》、《机械零件》四门课程，是机械制造专业及相关专业的专业技术基础主干课之一。本着学以致用、“必需”、“够用为度”的原则来选编教材内容，力求突出实用性、实践性。尽量体现专科层次的特点。总授课学时约为120课时。

本教材分为上、下两册出版，上册为力学基础部分及机械构造设计部分，包括理论力学、材料力学、机械原理三部分。下册主要为机械零件设计的基本内容，初步计划每册60课时左右，分两期学完。

本教材由机电工程系部分教师编写。其中庞兴华编写绪论、第六、七、十六章，段江军编写第一章（1~5节），王平编写第二章，田光辉编写第三、四、五章，熊运昌编写第八、九章，梁秀山、刘宏伟编写第十章及第一章（6、7节及习题），王艳红编写第十一章、第十二章及第二章习题，王林鸿编写第十四、十五、十七章，赵华编写第十三章。庞兴华、王林鸿分别为主编、副主编，负责统稿、组编、整理工作。

本教材在编写过程中得到我校校领导和教务处的大力支持、得到校内外专家、同行及学生们的热情关心和大力帮助，在此致以真诚的谢意。

本教材在编写过程中，编者各自尽了最大的努力，但由于水平有限，依然会有不足之处，恳请读者予以谅解，也恳请读者、专家批评指导。

编 者

2002年3月6日于南阳理工学院

# 目 录

## 绪 论

第一节	引言.....	1
第二节	本课程研究的对象和内容.....	1
第三节	本课程在教学中的地位、作用和任务.....	3
第四节	机械设计的主要任务、内容和一般程序.....	3
第五节	机械零件设计的一般步骤和方法.....	4
思考题	.....	5

## 第一章 静力学基础

第一节	静力学基本概念和受力图 .....	6
第二节	平面汇交力系 .....	13
第三节	力矩、力偶 .....	20
第四节	平面任意力系 .....	25
第五节	空间力系概述 .....	34
第六节	摩擦 .....	41
第七节	刚体的定轴转动 .....	44
习 题	.....	52

## 第二章 材料力学基础

第一节	概述 .....	61
第二节	轴向拉伸和轴向压缩 .....	62
第三节	剪切与挤压 .....	71
第四节	扭转 .....	77
第五节	弯曲 .....	87
第六节	组合变形.....	102
习 题	.....	108

## 第三章 机械的组成及机构运动简图

第一节	机械的组成.....	114
第二节	零件、部件、机构.....	115
第三节	机构运动简图.....	117
习 题	.....	123

## 第四章 平面连杆机构

第一节	平面连杆机构的基本形式和性质.....	124
第二节	四杆机构的演化及常见的应用类型.....	131
第三节	平面四杆机构的设计.....	134
第四节	用解析法设计平面四杆机构简介.....	136
第五节	多杆机构简介.....	138
习 题	.....	140

## 第五章 凸轮及间歇运动机构

第一节	凸轮机构.....	143
第二节	间歇运动机构.....	153
习 题	.....	155

## 第六章 联 接

第一节	螺纹联接.....	157
第二节	键联接.....	173
第三节	销联接.....	176
习 题	.....	177

## 第七章 螺旋传动及部件设计

第一节	螺旋传动的类型和特点.....	179
第二节	滑动螺旋传动的设计计算.....	180
第三节	滚动螺旋传动简介.....	186
习 题	.....	190

## 第八章 带传动

第一节	概述.....	191
第二节	带传动工作情况分析.....	194
第三节	普通 V 带传动的设计计算.....	198
第四节	带轮的结构设计.....	204
第五节	V 带传动的使用和维护.....	206
习 题	.....	209

## 第九章 链传动

第一节	概述.....	211
第二节	链传动的运动分析.....	213

第三节	套筒滚子链传动的设计计算.....	214
第四节	链轮的结构.....	219
第五节	链传动的使用和维护.....	221
习 题	.....	224

## 第十章 齿轮传动

第一节	概述.....	226
第二节	齿廓啮合基本定律.....	227
第三节	渐开线齿廓的形成及特点.....	228
第四节	渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分的名称及基本参数.....	231
第五节	渐开线齿轮正确啮合条件及重合度.....	234
第六节	公法线长度.....	236
第七节	渐开线齿廓切削加工简介.....	238
第八节	根切、最小齿数及变位齿轮的概念.....	240
第九节	齿轮传动的失效形式及设计准则.....	242
第十节	标准直齿圆柱齿轮的强度计算.....	244
第十一节	齿轮的材料和许用应力.....	251
第十二节	斜齿圆柱齿轮传动.....	257
第十三节	圆锥齿轮传动.....	264
第十四节	齿轮的结构设计简介.....	270
习 题	.....	274

## 第十一章 蜗杆传动

第一节	概述.....	275
第二节	蜗杆传动的的基本参数与尺寸计算.....	276
第三节	蜗杆传动的运动分析和受力分析.....	279
第四节	蜗杆传动的设计计算.....	281
第五节	蜗杆传动的效率及热平衡计算.....	282
第六节	蜗杆、蜗轮的结构.....	283
习 题	.....	285

## 第十二章 轮系及减速器

第一节	轮系.....	287
第二节	普通减速器.....	296
习 题	.....	300

## 第十三章 轴 承

第一节	滑动轴承.....	302
第二节	滚动轴承.....	312



习 题 .....	333
<b>第十四章 联轴器及离合器</b>	
第一节 联轴器.....	334
第二节 离合器.....	340
习 题 .....	343
<b>第十五章 轴</b>	
第一节 概述.....	344
第二节 轴的设计.....	345
第三节 轴的设计举例.....	350
习 题 .....	355
<b>第十六章 弹 簧</b>	
第一节 弹簧的功用和类型.....	357
第二节 圆柱螺旋弹簧的材料和制造.....	358
第三节 圆柱螺旋压缩弹簧的设计计算.....	359
习 题 .....	366
<b>第十七章 计算机辅助设计简介</b>	
第一节 计算机在机械设计中的应用.....	367
第二节 机械优化设计.....	370
第三节 机械强度的可靠性设计.....	373
习 题 .....	377

# 绪 论

本章介绍了机器、机构、构件及零件的概念及本课程的内容、性质和任务；简述了机械设计应满足的基本要求及一般程序；重点阐述机械零件工作能力准则。

## 第一节 引 言

机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、价格低廉、使用方便、安全可靠的技术装备任务。它在现代化建设中起着举足轻重的作用。通常把使用机器进行生产的水平作为衡量一个国家技术水平和现代化程度的重要标志之一。人类为了减轻体力劳动、提高生产率而创造发明了各种各样的机器，随着生产的发展，对机械的研究也不断深入，有关机械方面的知识也日趋完善，到 19 世纪中期逐渐形成了系统的研究机械设计的学科。由于科学理论的提高，相应的又促进了生产的发展，加之材料科学、力学、制图、机械制造工艺学等学科的研究进一步深入，逐渐形成了一整套机械设计的理论和方法。近几十年来，由于电子计算机的发展与广泛应用，在机械设计中引入了有限元法、优化设计和计算机辅助设计等先进方法，使机械设计方法更加科学化、系统化和现代化了。

机械设计是机械产品制造的第一道工序。设计工作质量的好坏直接关系到产品的质量、性能、研制周期和经济效益。有关统计资料表明，在产品生产的整个阶段中，设计本身所占的经济成本并不高，大约为 15% 左右，而对整个产品质量、性能的影响作用却占到 75% 以上。工业发达国家都十分重视产品设计，因为市场竞争的生命力在于产品的水平，而有竞争能力的产品，设计的好坏极为关键。所以机械设计这门学科在我国现代化建设中将起着重要的作用。

## 第二节 本课程研究的对象和内容

在人们的生产和生活中，经常遇到如汽车、机床、电动机、洗衣机等机械设备。这些机械的功能各不相同，结构性能各异。

图 0-1 所示为一单缸四行程内燃机。燃气在气缸体 1 内燃烧膨胀做功，驱动活塞 2 往下移动，经连杆 3 带动曲轴 4 转动。曲轴经过一对齿轮 5 和 6，带动凸轮 7 和挺杆 8，以控制进排气阀相对活塞的移动作定时启闭，一边将燃气吸入气缸，一边排出燃烧后的废气，气缸体 1 起支撑作用。以上各种动作协调配合，将燃气燃烧时的热能，转变为曲

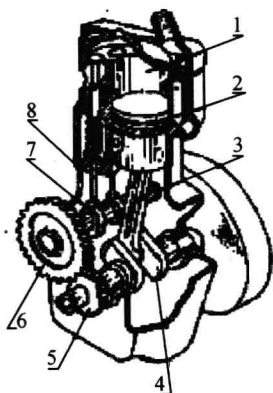


图 0-1

轴转动的机械能。又如发电机，它由定子（电枢）和转子组成，当外力矩驱动转子转动时，定子中便产生感应电动势，从而将机械能转换为电能。

综上所述，一般机械都具有以下三个明显的特征：

- (1) 它们都是人为的实物组合；
- (2) 组成机器的实物之间，具有确定的相对运动；
- (3) 能代替或减轻人的劳动，完成有用的机械功或转换机械能。

将其他形式的能量转换为机械能的机器称为原动机，如电动机、内燃机等。利用机械能完成有用功，或将机械能转换成其他形式能量的机器称为工作机，如金属切削机、球磨机、起重机、发电机、空气压缩机、计算机等、打印机等。

计算机等、打印机等。

机器由若干个机构组成。如内燃机，它是由曲柄滑块机构、凸轮机构、齿轮机构等机构所组成。机构与机器的区别，仅在于机构只具备机械的前两个特征，而不具备第三个特征。我们把能完成机械能转换的机构，称之为机器。

不考虑机械能转换，仅从运动和结构来看，机器与机构并无区别，故通常将机构和机器统称为机械。

组成机构的具有确定的运动的部件（或组件）称为构件。构件是机构的最小运动单元，如内燃机的曲柄滑块机构中的连杆、曲轴等。

构件可以是单一的整体，如图 0-2 中的曲轴，只有一个元件；也可以是几个元件组成的一个运动整体如图 0-2 中的连杆，它是由连杆体 1、螺栓 2、螺母 3 及连杆盖 4、轴瓦 5 等元件组成。组成构件的不能再分的元件叫零件，由此可知，零件是制造过程中不能再分割的单元体，是制造的基本单元，图 0-2 中的 1、2、3、4、5、6 均可称为零件。

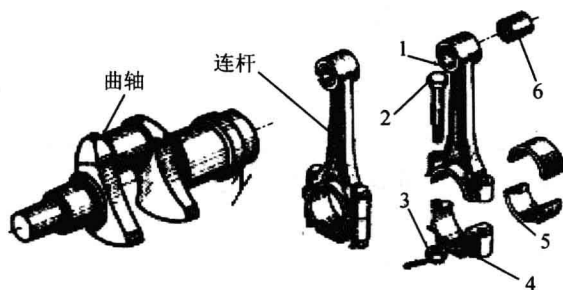


图 0-2

机器中普遍使用的机构称为常用机构，如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等。

机器中普遍使用的零件称为通用零件，如齿轮、轴承、螺钉等。只限于某些机械使用的零件称为专用零件，如内燃机中的活塞、活塞环等。

本课程主要研究机械中常用的机构和通用零件的工作原理、机构特点、设计方法及有关的基本理论。

### 第三节 本课程在教学中的地位、作用和任务

机械设计是机械类和近机类专业的一门主干技术基础课，它为学生学习专业课程提供必要的理论基础，是机械制造有关课程的先导课。本课程综合运用多种有关的基础理论与生产实践知识解决机械设计中的问题。因此，机械制图、金属工艺学、机械工程材料、高等数学、公差配合等又是本课程的先修课程。

通过对本课程的学习，使学生逐步掌握机构和机械零件的设计方法以及有关机械设计的一些基本理论与注意事项，了解机械设计的一般过程，具备简单机械的整体设计能力。同时还将使学生应用本课程的基本理论知识，对现有机械设备进行结构、性能等方面的分析，以便更好的应用、维修或改进现有设备，不断挖掘机械设备的潜力，提高机械的运行效率。

### 第四节 机械设计的主要任务、内容和一般程序

按预定目标和所需功能设计新机械，或对现有机械加以改进，以提高其应用效率，这便是机械设计的主要任务。

所设计的机械，在实现预定功能的前提下，应具有性能好、操作维修方便、安全可靠、外形美观、成本低等特点。

机械设计通常按以下程序进行。

#### 1. 调查研究

分析设计任务书，明确设计要求，了解现有同类型机器的生产使用情况、优缺点及存在的问题，采用先进技术的可能性、材料及标准件的供应情况以及本产品的市场竞争和供销情况等等。

#### 2. 拟定总体方案

根据实际任务及调查研究的具体情况，进行分析后拟定出机械设计的总体方案，确定机械的工作原理，绘制机构运动简图等。

#### 3. 技术设计

对机构进行运动和动力分析和强度计算，确定零件的主要参数和尺寸，并考虑结构工艺性，绘制装配图、零件工作图，编写各种技术文件和说明书。

#### 4. 试制、鉴定与投产

新设计的产品在投产前需经过试制和鉴定，进行必要的修改和小批量试生产，经过进一步改进设计后，才能定型，进行大批量生产。当然，产品能否满足实际要求，还要经过在长期实践中的不断验证、修改、多次的反复，所以说机械设计过程是一个不断回溯的复杂过程。设计者只有具备有关机械设计的坚实理论基础和丰富的实践经验，才能设计出较为合理的机械。

另外，当需要设计一台新机器时，设计人员必须进行周密的社会市场调查，所设计的机器应具有广阔的销售市场，在可靠性、使用性、成本等方面，必须具有很好的竞争

能力，必须争取获得较好的经济效益。

## 第五节 机械零件设计的一般步骤和方法

机械设计的基础和关键之一是机械零件的设计问题。机械零件设计一般按以下步骤进行。

- (1) 零件在机器中的地位和作用，选择零件的种类和结构。
- (2) 拟定零件的计算简图，根据机器的工作要求，计算作用在零件上的载荷。
- (3) 根据零件的工作条件及对零件的特殊要求（例如高温、高速等）选择适当的材料。
- (4) 拟定计算用的许用应力。
- (5) 根据零件可能出现的失效形式，按一定的工作能力准则确定其主要几何尺寸，并按标准及考虑制造工艺要求进行调整。
- (6) 绘制零件工作图并标注必要的技术条件。

目前最常用的设计方法有以下几种。

### 1. 理论设计

这是根据人们已经掌握的合乎客观规律的理论及实践知识所进行的设计，按设计程序的不同，理论设计的计算过程又分为：①设计计算：在零件尺寸尚未决定之前，根据载荷情况，由计算公式直接求出零件的某些主要尺寸；②校核计算：先按经验规范近似计算、类比等初步定出零件的形状及尺寸，然后由理论计算的方法校核零件危险剖面上的安全系数、工作能力和载荷能力等。

### 2. 经验设计

根据对某类零件已有的设计与使用实践而总结出来的经验关系式，或根据设计者的经验，采用类比的方法进行的设计。通常经验设计都是用于外形复杂、载荷情况不明、而目前尚不能用于理论分析的零件设计中，例如机架、变速箱体的设计等。

### 3. 模型实验设计

对于一些体积较大的、结构复杂而重要的但以现有知识尚不足以详细分析的零件和部件，可采用模型实验设计的方法。将初步设计的零件和部件做出模型，经过实验，再根据实验结果进行修改，这样的过程叫模型实验设计。实质上，这也是一项科学研究工作，借助于实验研究弥补理论的不足，同时也消除了实验设计中不够科学的成分。

这些常用的设计方法也是较为传统的设计方法，近年来，随着科技的不断进步，在机械设计领域发生了深刻的变化，逐步形成较为成熟的现代设计方法，主要有两种：

(1) 最优化设计思想 在此思想指导下所设计的机械零件，不仅仅只是合格零件、合格设计，而且就其选择材料和几何参数的取值来说，既要使零件所满足的使用要求达到最优化的程度，又要使不希望失效准则达到最小，或限制在容许范围以内。

(2) 设计变量随机化思想 传统的设计是把设计变量当作常量来看待的，实际的设计变量基本都是随机变量，由此引入“概率设计”，进而到“可靠性设计”，也就是从动态方面考虑零件的强度、刚度等工作能力指标。

现代化设计思想是和现代化设计方法、手段紧密相关的，随着电子计算机技术的发展，一些新的设计思想得以实现。加上材料科学、计算力学、摩擦学和设计理论的发展，逐渐形成了一整套现代设计理论和方法，表现为以下特点：①从静态设计到动态设计；②从单项设计指标到综合设计指标；③从常规设计到精确设计；④从手算设计到广泛应用计算机设计。

作为设计人员不仅要学习、掌握传统的设计方法，也要开阔视野，了解现代设计方法的动态，尽可能采用先进设计工具和技术，提高设计能力。

## 思考题

1. 试说明机器、机构、构件、零件的概念及其特征，并各举一例。
2. 机械设计的一般步骤有哪些？机械零件设计的一般步骤有哪些？
3. 传统设计方法有哪些？现代设计方法和传统设计方法主要区别是什么，设计人员应学习哪些设计方法？

# 第一章 静力学基础

静力学是研究物体平衡时作用力之间的关系的科学。主要研究下列两个问题：  
力系的合成与分解。研究如何将作用于刚体上的力系，用一个与原力系作用效果相同而便于分析的力系来代替。  
力系的平衡条件。研究受力作用下的刚体平衡时各力之间应该满足的条件。

## 第一节 静力学基本概念与受力图

### 一、力学基本概念

#### 1. 平衡

平衡是指物体相对于周围物体处于静止或匀速直线运动状态。桥梁和房屋就是处于相对静止的状态。它们都是平衡的。

静力学中所指的平衡，如果没有特别注明对于那个物体时，都是指相对于地球而言。

#### 2. 刚体

在静力学中，常常把研究的物体看成为刚体。所谓刚体，就是在力的作用下，大小和形状都不发生改变的物体。实际上，任何物体在力的作用下都将发生不同变形。但是实践证明，工程中构件的变形，通常都极为微小，在许多情况下，这些微小的变形，对平衡问题的研究不起主要作用，可以忽略不计，从而能使研究的问题大为简化。

为了进一步简化，有时还需要把物体当作质点来处理。所谓质点，应理解为沿任何方向的尺寸都极为微小以致可以忽略，但具有一定的质量的物体。物体虽具有一定大小，有时其大小对所研究的问题无关或不起显著的作用，对这样的物体便可视为质点。例如在研究地球绕太阳的运动时，因地球的大小比起它与太阳的距离来说，显得非常小，在这种情况下，可以略去不计地球体积的大小，而当作质点来讨论。

同一物体有时可以看做刚体，有时却可看做质点，这要根据具体情况来决定。例如同一地球在研究公转时可看成质点，研究自转时，则必须看成刚体。

#### 3. 力、力系

由日常生活和生产实践中知道，物体自由下落时愈来愈快，这是因为受到地球引力的作用；行驶着的自行车，当刹车后，速度愈来愈慢，最后停止，这是因为车轮上施加了阻力的缘故。所以，力是物体间相互的作用，这种作用会使物体的机械运动状态发生变化。

必须指出：力既然是两物体之间的相互作用，因此是不能脱离物体而存在的。以后在分析某一物体所受的力时，必须分清每个力是由哪个物体对此物体的作用。

由经验可知：用手推同一物体，用力大小的不同，或者按不同的方向施力，或者施

力于不同的位置，都会产生不同的效果。因此，力的大小、方向和作用点是决定力对物体作用的三个要素。

力的基本单位是牛顿，简称牛，符号 N。

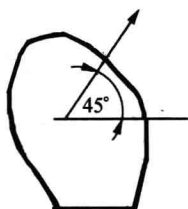
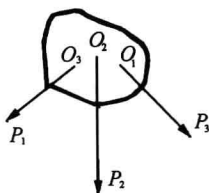


图 1-1



(a)



(b)

图 1-2

在力学中，要区别两种物理量：矢量和标量。如果一个量，只须指出它的大小，就可完全确定，例如物体的体积、距离、温度等，这种量称为标量（无向量）；如果一个量，指出大小后，还必须说明它的方向，如力、速度等，这种量称为矢量（有向量）。力用矢量表示，今后在图解中，我们用一带箭头的线段来表示（图 1-1），力的大小（或称模）由线段的长度（按一定的比例）来表示，方向由线段的方位和指向来表示，力的作用点由线段的起点或终点来确定。在书写时用  $P, Q, R, \dots$  表示力的大小，用  $\vec{P}, \vec{Q}, \vec{R}, \dots$  表示力矢量。

同时作用在刚体上的一群力，称为力系。如物体在某一力系作用下处于平衡状态，则此力系称为平衡力系。两个力系对同一刚体分别作用后，其效果相同时，这两个力系互称为等效力系。

如果力系与一个力等效，这个力就称为此力系的合力。力系中其他各力称为这个合力的分力。如图 1-2 所示，力系  $(\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3)$  与力  $\vec{R}$  等效，力  $\vec{R}$  称为力系  $(\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3)$  的合力。

## 二、静力学公理

为了研究力系的合成与分解以及平衡条件，对力系基本性质先要了解。静力学公理是一些最基本的规律，这些规律为我们研究静力学提供了必要的基础。

**公理 1** 作用在一个刚体上的两个力，若使刚体处于平衡，则此两力必须大小相等，方向相反，且作用在同一直线上（图 1-3）。

**公理 2** 在刚体上加上或减去一个平衡力系，刚体的运动状态不会改变。

**推论：**由上述公理可以推出一个重要的原理——力的可传性原理。即把作用在刚体上某点的力沿力的作用线移动到刚体内任意一点，并不改变力对刚体的作用。

如图 1-4 所示，在  $\vec{P}$  的作用线上任取一点  $B$ ，并在  $B$  点加上两个沿作用线而方向相反的力  $\vec{P}_1$  和  $\vec{P}_2$ ，且使  $\vec{P}_1 = \vec{P}_2 = \vec{P}$ ，由公理 2 知刚体的运动状态是不变的，即力系  $(\vec{P}_1, \vec{P}_2)$  与力  $(\vec{P})$  等效。但  $\vec{P}$  与  $\vec{P}_2$  也是一个平衡力系，可去掉，这样只剩下一个力  $\vec{P}_1$ ，



它的大小和方向都与力  $\bar{P}$  相同，只是作用点不同。这个情况正和力  $\bar{P}$  沿其作用线从  $A$  点移到  $B$  点的情形一样。

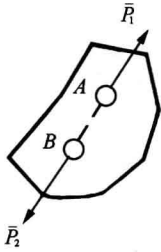


图 1-3

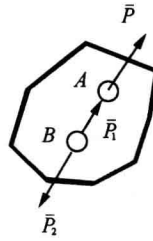
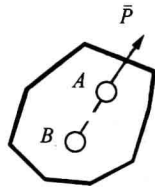


图 1-4

由此推论可知，力对刚体的作用仅决定于力的大小、力的方向及作用线位置，至于在作用线上那一点则是无关的。

**公理 3** 作用于刚体上汇交的两个力，其合力作用在汇交点上，合力的大小和方向是由这两力为边所画出的平行四边形的对角线来表示（图 1-5）。

$$\bar{R} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2$$

**推论：**由上述公理可推出一个三力平衡原理。即如果在同一平面内不平行的三个力成平衡，则三个力的作用线必须相交于一点。

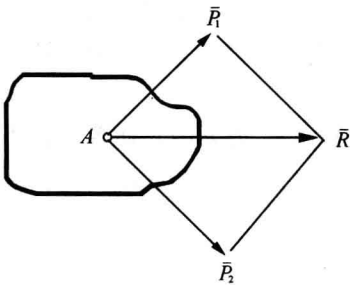


图 1-5

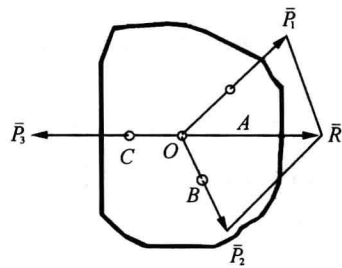


图 1-6

如图 1-6 所示，刚体在  $\bar{P}_1$ 、 $\bar{P}_2$ 、 $\bar{P}_3$  三力作用下处于平衡状态。首先把  $\bar{P}_1$  和  $\bar{P}_2$  移到它们的交点  $O$  上，求出合力  $\bar{R}$ ，因刚体处平衡状态， $\bar{R}$  必须和  $\bar{P}_3$  力平衡，因此，由公理 1 可知， $\bar{P}_3$  力必须通过  $\bar{P}_1$ 、 $\bar{P}_2$  力的交点  $O$ 。

**公理 4** 若甲物体对乙物体有一个作用力，则乙物体就同时给甲物体一个反作用力，这两个力大小相等，方向相反，同在一直线上。

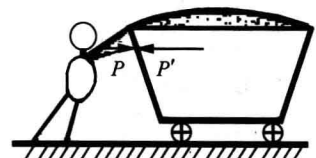


图 1-7