

21 世纪高等教育规划教材——应用型本科系列

理论力学

顾晓勤 谭朝阳 编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育规划教材——应用型本科系列

理 论 力 学

顾晓勤 谭朝阳 编



机械工业出版社

本书针对当前应用型本科学生的数学、物理基础,在保证理论力学基本理论教学内容的同时,突出应用性,适当简化推导过程,书中附有较多图片以增加直观性。

本书内容包括静力学、运动学和动力学三篇。静力学包括静力学基础、平面力系、摩擦、空间力系;运动学包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动;动力学包括质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗伯原理、虚位移原理、振动基础等。本书各章附有小结、思考题和习题。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 ajiang2001@sina.com 索取。

本书可作为普通高等工科应用型本科院校机械、交通、动力、土建等专业以及研究型高校近机类、非机类专业的教材,也可作为自学、函授教材。本书推荐学时数为 48~64。考虑到不同院校、不同专业的需要,书中带*的章节为选学内容,带*的习题为选做题。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/顾晓勤,谭朝阳编. —北京:机械工业出版社,2010.7

21 世纪高等教育规划教材——应用型本科系列

ISBN 978-7-111-30983-3

I. ①理… II. ①顾…②谭… III. ①理论力学-高等学校-教材 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 109782 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:姜凤 责任编辑:姜凤

版式设计:霍永明 责任校对:李锦莉

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2010 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·21 印张·404 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30983-3

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

随着高等教育大众化、普及化的进程,应用型本科学生越来越多,他们对《理论力学》、《材料力学》课程的要求,与研究型大学学生的要求有所不同。针对这种情况,作者结合多年的教学实践,编写了本书及《材料力学》。

本书充分考虑当前应用型本科学生的生源特点和实际情况,在保证理论力学基本理论、基本概念教学内容的同时,突出应用性,借鉴国内外同类教材的优点,注意理论联系工程实际,附有较多图片以增加直观性。本书的目的是在有限的时间内,使学生掌握基本的静力学、运动学和动力学内容,为《材料力学》课程以及后续专业课程学习打好基础。

本书可作为普通高等工科应用型本科院校机械、交通、动力、土建等专业以及研究型高校近机类、非机类专业《理论力学》课程的教材,对于学时数在 48~56 的专业,可以不讲授带“*”号的内容;对于学时数在 56~64 的专业,可将全书(含带“*”号内容)作为课程教材。习题前面加“*”号的表示多学时讲授时要求掌握的题目,或者难度较大的题目。

本书的内容编写由顾晓勤教授和谭朝阳副教授共同完成。谭朝阳副教授为本书编写了电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 ajiang2001@sina.com 索取。

应用型本科教材建设目前仍处于探索阶段,由于作者水平所限,书中会有不少缺点和不足,恳请读者批评指正。

作者的电子邮箱: 872932911@qq.com, guxiaoqinguyan@tom.com, zdhx@zsc.edu.cn。

编 者
2010 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 静力学	7
---------------	---

第一章 静力学基础	8
-----------------	---

第一节 静力学基本概念	8
-------------------	---

第二节 静力学公理	10
-----------------	----

第三节 约束和约束力	14
------------------	----

第四节 物体的受力分析和受 力图	20
---------------------------	----

小结	26
----------	----

思考题	28
-----------	----

习题	28
----------	----

第二章 平面力系	32
----------------	----

第一节 平面汇交力系	32
------------------	----

第二节 力偶和力偶系	39
------------------	----

第三节 平面一般力系	43
------------------	----

第四节 静定问题与物体系统的 平衡	54
----------------------------	----

第五节 平面静定桁架的内力 计算	60
---------------------------	----

小结	68
----------	----

思考题	70
-----------	----

习题	71
----------	----

第三章 摩擦	77
--------------	----

第一节 滑动摩擦	78
----------------	----

第二节 摩擦角和自锁现象	80
--------------------	----

第三节 滚动摩擦阻	82
-----------------	----

第四节 考虑摩擦时物体的平衡 问题	86
----------------------------	----

小结	90
----------	----

思考题	91
-----------	----

习题	91
----------	----

第四章 空间力系	95
----------------	----

第一节 力在直角坐标轴上的 投影	95
---------------------------	----

第二节 力对点的矩	98
-----------------	----

第三节 力对轴的矩	102
-----------------	-----

第四节 空间力系平衡条件	106
--------------------	-----

第五节 物体的重心	111
-----------------	-----

小结	119
----------	-----

思考题	120
-----------	-----

习题	120
----------	-----

第二篇 运动学	125
---------------	-----

第五章 点的运动学	127
-----------------	-----

第一节 矢量法	127
---------------	-----

第二节 直角坐标法	128
-----------------	-----

第三节 自然法	132
---------------	-----

小结	138
----------	-----

思考题	138
-----------	-----

习题	139
----------	-----

第六章 刚体的基本运动	143
-------------------	-----

第一节 刚体的平行移动	143
-------------------	-----

第二节 刚体的定轴转动	145
-------------------	-----

第三节 转动刚体内各点的速度 和加速度	146
------------------------------	-----

第四节 轮系的传动比	149
------------------	-----

小结	153
----------	-----

思考题	153
-----------	-----

习题	155
----------	-----

第七章 点的合成运动	157
------------------	-----

第一节 相对运动 牵连运动 绝 对运动	157
------------------------------	-----

第二节 点的速度合成定理	159
--------------------	-----

第三节 牵连运动为平动时点的加 速度合成定理	163	第三节 刚体对轴转动惯量的 计算	234
* 第四节 牵连运动为转动时点的加 速度合成定理	166	第四节 刚体的定轴转动和平面运 动微分方程	240
小结	172	小结	244
思考题	172	思考题	245
习题	173	习题	246
第八章 刚体的平面运动	178	第十二章 动能定理	250
第一节 刚体平面运动概述与运 动分解	178	第一节 力的功	250
第二节 求平面图形内各点速度的 基点法	181	第二节 质点和质点系的动能	254
第三节 求平面图形内各点速度的 瞬心法	185	第三节 动能定理	255
第四节 用基点法求平面图形内各 点的加速度	190	第四节 功率方程和机械效率	259
小结	194	第五节 势能 机械能守恒 定律	263
思考题	194	小结	266
习题	195	思考题	267
第三篇 动力学	199	习题	267
第九章 质点动力学	201	第十三章 达朗伯原理	270
第一节 动力学基本定律	201	第一节 惯性力的概念	270
第二节 质点运动微分方程	203	第二节 达朗伯原理	271
小结	210	第三节 刚体运动时惯性力系的 简化	276
思考题	211	小结	283
习题	212	思考题	283
第十章 动量定理	214	习题	284
第一节 动力学普遍定理概述	214	* 第十四章 虚位移原理	287
第二节 动量和冲量	214	第一节 约束 自由度 广义 坐标	287
第三节 动量定理	217	第二节 虚位移和理想约束	291
第四节 质心运动定理	220	第三节 虚位移原理	293
小结	225	小结	298
思考题	226	思考题	298
习题	226	习题	298
第十一章 动量矩定理	228	第十五章 振动基础	301
第一节 动量矩定理	228	第一节 单自由度系统的自由 振动	301
第二节 质点系相对于质心的动 量矩定理	233	第二节 单自由度系统的受迫 振动	308

第三节 转子的临界转速	310	附录 单位制及数值精度	317
第四节 减振和隔振的概念	311	习题参考答案	319
小结	313	参考文献	328
思考题	314		
习题	314		

绪 论

固体的移动、旋转和变形，气体和液体的流动等都属于机械运动。力学是研究物体机械运动的学科。机械运动是最简单的一种运动形式，此外，物质还有发热、发光、发生电磁现象、化学过程，以及更高级的人类思维活动等各种不同的运动形式。

对各种不同形态的机械运动的研究产生了不同的力学分支学科。理论力学研究机械运动的最普遍和最基本的规律，它是各门力学学科的基础。近代工程技术，如机械工程、土木工程、交通运输工程等都是在力学理论指导下发展起来的，因此，理论力学也是这些与机械运动密切相关的工程技术学科的基础。

工业革命以来，由于科学发展和工程技术的需要，逐步形成了现代的力学学科，计算机技术的日益普及，更是推动了工程力学数值计算的发展。许多工程实例，如三峡大坝（图 0-1）、桥梁（图 0-2）、建筑物（图 0-3）、海洋工程（图 0-4）、航空航天领域（图 0-5）、工程机械（图 0-6）等研究和设计过程中都离不开工程力学知识。

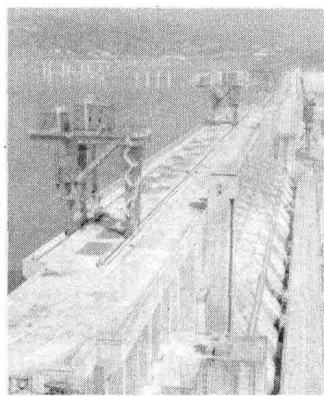
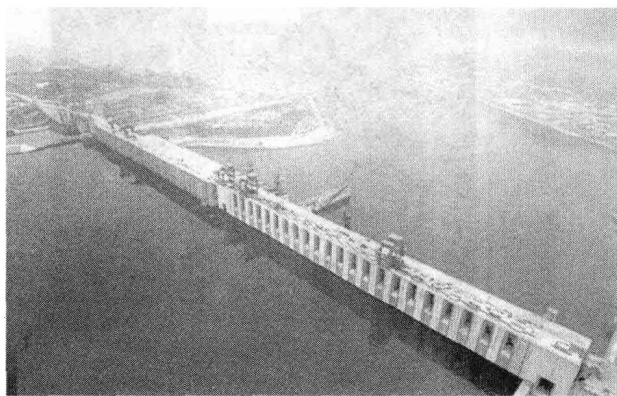
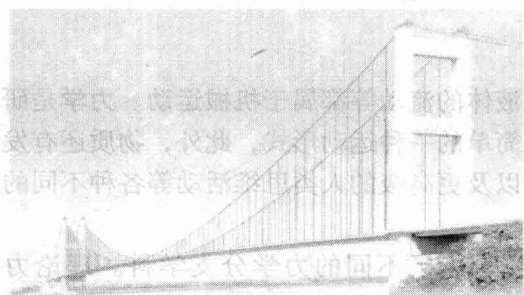
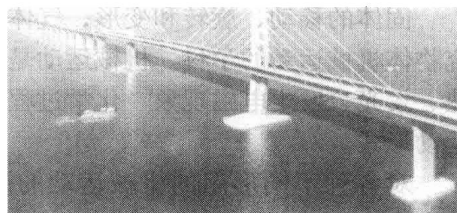


图 0-1 三峡大坝



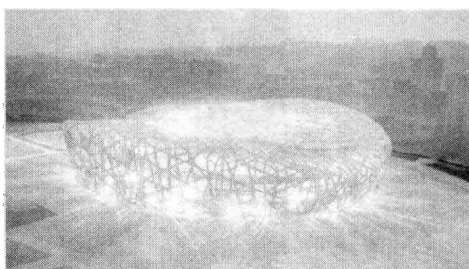
a)



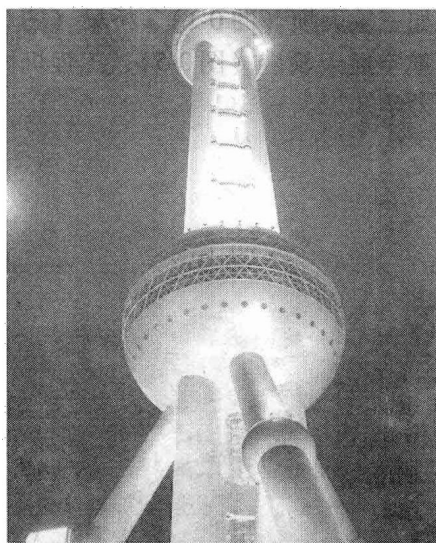
b)

图 0-2 桥梁

a) 江阴长江大桥 b) 港珠澳大桥



a)



b)

图 0-3 建筑物

a) 北京奥运会主会场 b) 上海东方明珠

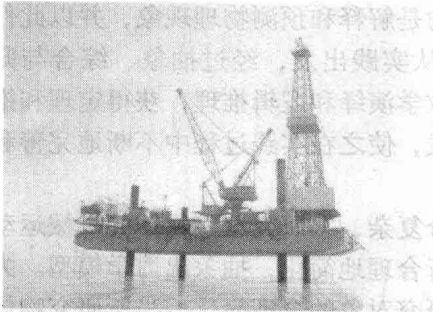
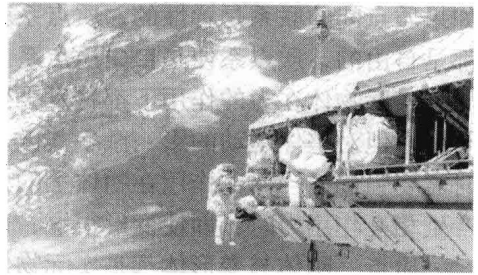


图 0-4 海洋工程



a)



b)

图 0-5 航空航天领域

a) 大型客机 b) 国际空间站

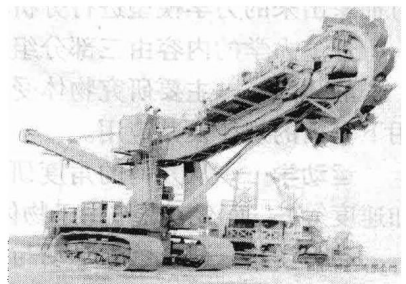
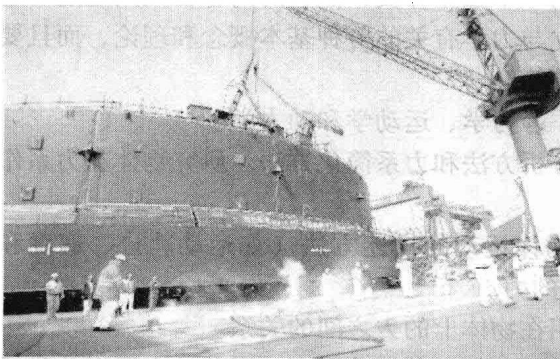


图 0-6 工程机械

理论力学不具有某些工程学科的经验基础，即不依赖于经验和独立观测；理论力学推理严谨，强调演绎，看上去更像是数学，但是，理论力学并不是抽象的纯理论学科。理论力学研究物理现象，其目的是解释和预测物理现象，并以此作为工程应用的基础。理论力学的研究方法是从实践出发，经过抽象、综合与归纳，建立公理；然后，以公理为基础，通过数学演绎和逻辑推理，获得定理和推论，形成理论体系；最后，再将理论用于实践，使之在实践过程中不断地完善和发展。

实际工程中涉及机械运动的物体有时十分复杂，在研究这些物体的机械运动时，必须忽略一些次要因素的影响，对其进行合理地简化，抽象出力学模型。**力学模型**是对自然界和工程技术中复杂的实际研究对象的合理简化。当所研究物体的运动范围远远超过其本身的几何尺度时，物体的形状和大小对运动的影响很小，这时，可将其抽象为只有质量而没有体积的**质点**。由若干质点组成的系统，称为**质点系**。质点系中质点之间的联系如果是刚性的，这样的质点系称为**刚体**；如果质点间的联系是弹性的，质点系就是**弹性体**或**变形体**；如果质点系中的质点都是自由的，质点系便是**自由质点系**。

实际物体在力的作用下都将发生变形。但对于那些受力后变形极小，或者虽有变形但对整体运动的影响微乎其微，则可以略去变形，将物体简化为刚体。同时需要强调，当研究作用在物体上的力所产生的变形，以及由变形而使物体内部产生相互作用力时，即使变形很小，也不能将物体简化为刚体，而应是变形体。

质点、刚体与变形体都是实际物体的抽象力学模型，不是绝对的，例如，对于一个航天器，当讨论轨道运动时，视航天器为质点；当讨论姿态运动时，视航天器本体为刚体，附加天线等为弹性体。又如，当讨论地球绕太阳运动时，视地球为质点；当讨论地球自转时，视地球为刚体；当讨论地震时，必须将地球看做变形体。

虽然理论力学是起源于物理学的一个独立分支，但它的内容已大大超过了物理学的内容。理论力学不仅要求建立与力学有关的各种基本概念和理论，而且要对抽象出来的力学模型进行分析和计算。

理论力学的内容由三部分组成：静力学、运动学和动力学。

静力学——主要研究物体受力分析方法和力系简化方法。研究物体在力系作用下平衡的规律及其应用。

运动学——从几何的角度研究物体运动的描述方法（如运动轨迹、速度和加速度等），而不考虑作用于物体上的力。

动力学——研究物体运动与作用在物体上的力之间的关系。

静力学中所讨论的静止和平衡是运动的一种特殊形态。因此，也可以认为静力学是动力学的一种特殊情形。不过由于工程技术的需要，静力学已积累了丰富的

的内容而成为一个相对独立的组成部分。

力学研究的起源可以追溯到古希腊亚里士多德和阿基米德所处的时代,我国古代也有关于力学研究的文献记载。到了 17 世纪,牛顿提出三定律和万有引力定律,后来达朗伯、拉格朗日和哈密顿给出了这些原理的其他形式。20 世纪初,爱因斯坦建立了相对论,对牛顿经典力学提出了挑战。本书所研究的运动是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,属于经典力学的范畴。经典力学以牛顿定律为基础,采用了与物质运动无关的所谓“绝对”空间、时间和质量的概念,应用范围有一定的局限性。对于速度接近光速的物体和基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的方法加以研究。但是,经过长期的实践证明,用经典力学来解决现代一般工程中所遇到的大量力学问题,不仅方便简捷,而且能够保持足够的精确度,所以,经典力学至今仍有很大的实用意义,并且还在不断地发展。

从 20 世纪 50 年代开始,计算机技术飞速发展,应用不断普及,这对于工程力学的发展起到了巨大的推动作用。在力学理论分析中,人们可以借助计算机推导复杂公式,从而求得复杂的解析解;在实验研究中,计算机不仅可以采集和整理数据、绘制实验曲线、显示图形,还可以帮助人们选用最优参数。

理论力学所研究的是力学中最一般、最基本的规律,理论力学是近代工程技术的重要理论基础之一,是机械、土木、交通、能源等众多工科专业的主干专业基础课。许多工科专业的后续课程,例如材料力学、机械原理、机械零件、结构力学、振动理论等,都要以理论力学为基础。学习理论力学的目的之一,就是为这些后续课程打下必要的理论基础。

有些日常生活中的现象和工程技术问题,可以直接运用理论力学的知识去解释和解决。另外一些问题,则需用理论力学知识和其他学科知识结合来解决。

在学习理论力学过程中,要注意观察工程实际情况,以及日常生活中的力学现象,对力学理论要勤于思考、多做练习题,做到熟能生巧。通过掌握领会本课程的内容,为学习后续课程打好基础,并能初步运用力学理论和方法解决工程实际中的技术问题。

第一篇 静力学

静力学研究物体在力系作用下平衡的普遍规律，即研究物体平衡时作用在物体上的力应该满足的条件。静力学主要研究三方面的问题：①物体的受力分析；②力系的等效与简化；③力系的平衡条件及应用。

所谓力系，是指作用于物体上的一群力。

所谓平衡，是指物体相对于惯性参考系（如地面）处于静止或匀速直线运动。例如，在地面上静止的建筑物，作匀速直线运动的车辆等，都处于平衡状态。

静力学是动力学的特例，因此，力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学的基础。

静力学的理论和方法在工程中有着广泛的应用，土木工程中房屋、桥梁、水坝、闸门，许多机器零件和结构件，如机器的机架、传动轴、起重机的起重臂、车间天车的横梁等，正常工作时处于平衡状态或可以近似地看做平衡状态。为了合理地设计这些零件或构件的形状、尺寸，选用合理的材料，往往需要首先进行静力学分析计算，然后对它们进行强度、刚度和稳定性计算。所以，静力学的理论和计算方法是土木工程、机械零件和结构件静力设计的基础。

第一章 静力学基础

第一节 静力学基本概念

一、力的概念

物体间的作用形式是多种多样的，大致可分为两类，一类是通过场起作用，包括重力、万有引力、电磁力等；另一类是由物体间的接触而产生的，如物体间的压力、摩擦力等。

人用手拉悬挂着的静止弹簧，人手和弹簧之间有了相互作用，这种作用引起弹簧运动和变形；运动员踢球，脚对足球施加的力使足球的运动状态和形状都发生变化；太阳对地球的引力使地球不断改变运动方向而绕着太阳运行；锻锤对工件的冲击力使工件改变形状。……人们在长期的生产实践中，通过观察分析，逐步形成和建立了力的科学概念：力是物体之间的相互机械作用，这种作用使物体的运动状态发生变化或使物体形状发生改变。

在力学中，我们抛开力的物理本质，只研究其表现，即力对物体的效应。力对物体的效应表现为两个方面：一是使物体的运动状态发生改变，叫做力的运动效应或外效应；二是使物体的形状发生改变，叫做力的变形效应或内效应。在理论力学中采用刚体模型，因而，只研究力对物体的运动效应。

实践证明，力对物体的内外效应决定于力的三个要素：力的大小、方向和作用点。

力的作用点表示力对物体作用的位置。力的作用位置，实际中一般不是一个点，而往往是物体的某一部分面积或体积。例如，人脚踩地，脚与地之间的相互压力分布在接触面上；物体的重力则分布在整个物体的体积上。这种分布作用的力称为**分布力**。但有时力的作用面积不大，例如，钢索吊起机器设备时，若忽略钢索的粗细，则可以认为二者连接处是一个点，这时，钢索拉力可以简化为集中作用在这个点上的力。这样的力称为**集中力**。由此可见，力的作用点是力的作用位置的抽象化。

为了度量力的大小，必须首先确定力的单位，本书采用国际单位制，力的大小以牛顿为单位。牛顿简称牛(N)，1000 牛顿简称千牛(kN)。

在力学中要区分两类量：标量和矢量。在确定某种量时，只需一个数就可以确定的量称为**标量**，例如长度、时间、质量等都是标量。在确定某种量时，不但

要考虑它的大小,还要考虑它的方向,这类量称为**矢量**,也称**向量**,力、速度和加速度等都是矢量。矢量可用一具有方向的线段来表示。如图 1-1 所示,线段的起点 A (或终点 B) 表示力的作用点,沿力矢顺着箭头的指向表示力的方向;线段的长度(按一定的比例尺)表示力的大小。本书中用黑体字母表示矢量,而以普通字母表示这个矢量的模(即大小)。图 1-1 中 $\mathbf{F}$ 表示力矢量, F 表示该力的大小($F=600\text{N}$)。

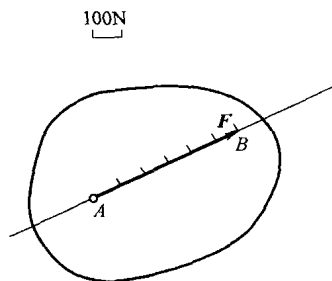


图 1-1 力的表示

力系是指作用在物体上的一群力。作用在物体上的一个力系如果可以用另一个力系来代替而效应相同,那么这两个力系互为**等效力系**。若一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的**合力**。

二、质点和刚体的概念

当仔细地考虑物体的机械运动时,其运动情况总是比较复杂的。例如,物体的落体运动,一方面物体受到重力作用,另一方面它还受到空气的阻力,而空气阻力又与落体的几何形状、大小及下降速度有关。但是,在许多情况下,阻力所起的作用很小,运动的情况主要取决于重力,因而,可以忽略空气阻力,这样,物体的运动就可看做与几何形状、大小无关。类似的例子很多,概括这些事实,可以看到,在某些问题中,物体的形状和大小与研究的问题无关或者起的作用很小,是次要因素。为了抓住主要的因素和掌握物体的基本运动规律,有必要忽略物体的形状和大小。这样,在研究物体的机械运动时,可以不计物体形状、大小,而只考虑其质量,并将物体视为一个点,即**质点**。质点在空间占有确定的位置,常用直角坐标系中 x 、 y 、 z 值表示。

力对物体的外效应是使物体的运动状态发生变化,力对物体的内效应是使物体发生变形。物体受力后总会发生变形,有些元件的变形还相当显著,图 1-2 所示为弹簧受力情况,弹簧受力后的平衡位置(图 1-2b)与初始位置(图 1-2a)相比,弹簧的长度及方位都有了不可忽视的改变。在撑杆跳运动员起跳后的过程中,撑杆也会呈现明显的弯曲变形。力学中把这类情况归结为大变形(或有限变形)问题。

但是在通常情况下,机械零件、工程中的结构件在工作时,受力产生的变形是很微小的,往往只有专门的仪器才能测量出来。

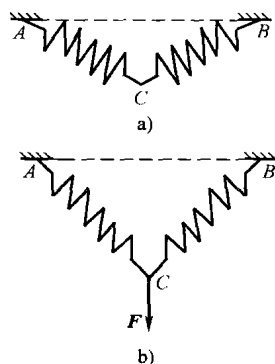


图 1-2 弹簧受力情况

a) 初始位置 b) 受力后的平衡位置

例如，一根受拉的钢杆，当载荷控制在允许范围内时，杆长的变化不超过原长的千分之几；一般的公路桥梁，在自重及外载荷作用下铅垂方向的位移不超过桥梁跨度的 $1/500 \sim 1/700$ 。力学中把这类情况归入小变形（或无限小变形）问题。在很多工程问题中，这种微小的变形对于研究物体的平衡问题影响极小，可以忽略不计。这样，忽略了物体微小的变形后，便可把物体看做刚体。我们把刚体定义为由无穷多个点组成的不变形的几何形体，它在力的作用下保持其形状和大小不变。刚体是对物体加以抽象后得到的一种理想模型，在研究平衡问题时，将物体看成刚体会大大简化问题的研究。

同一个物体在不同的问题中，有时可看做质点，有时要看做刚体，有时则必须看做变形体。例如，当研究月球运行轨道时，月球可看做质点；当研究月球自转时，月球要看做刚体。同样，当研究车辆离出发点距离时，车辆可看做质点；当研究车辆转弯时，车辆可看做刚体；当研究车辆振动时，车辆的一些部件则要看做变形体。

三、平衡的概念

物体相对于地面保持静止或匀速直线运动的状态称为物体的平衡状态。例如，桥梁、机床的床身、高速公路上匀速直线行驶的汽车等，都处于平衡状态。物体的平衡是物体机械运动的特殊形式。平衡规律远比一般的运动规律简单。

如果刚体在某一个力系作用下处于平衡，则此力系称为平衡力系。力系平衡时所满足的条件称为力系的平衡条件。力系的平衡条件，在工程中有着十分重要的意义。在设计工程结构的构件或作匀速运动的机械零件时，需要先分析物体的受力情况，再运用平衡条件计算所受的未知力，最后，按照材料的力学性能确定几何尺寸或选择适当的材料品种。有时对低速转动或直线运动加速度较小的机械零件，也可近似地应用平衡条件进行计算。人们在设计各种机械零件或结构物时，常常需要进行静力分析和计算，平衡规律在工程中有着广泛的应用。

第二节 静力学公理

人们在长期的生活和生产活动中，经过实践、认识、再实践、再认识的过程，不仅建立了力的概念，而且总结出力所遵循的许多规律，其中最基本的规律可归纳为以下五条：

一、二力平衡原理

受两力作用的刚体，其平衡的充分必要条件是：这两个力大小相等、方向相反，并且作用在同一直线上（图 1-3）。简称此两力等值、反向、共线。即：

$$\boldsymbol{F}_1 = -\boldsymbol{F}_2$$

上述条件对于刚体来说，既是必要的，又是充分的；但是对于变形体来说，