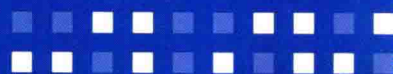




高等学校土建类专业 **应用型本科** “十三五” 规划教材
高等学校土建类专业 **“互联网+”** 创新教材

理论力学



LI LUN LI XUE



(第3版)

主编 刘 江 周楚兵



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

高等学校土建类专业应用型本科“十三五”规划教材
高等学校土建类专业“互联网+”创新教材

理论力学

(第3版)

主 编 刘 江 周楚兵
副主编 郑 折 王 璐

武汉理工大学出版社
· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书为高等学校教学用书,适合于应用型人才的培养。内容涵盖了理论力学的基本理论知识、基本原理和基本方法。全书共 14 章,包括刚体静力学的基本概念、平面力系的等效简化、平面力系的平衡、空间力系、摩擦及考虑摩擦的平衡问题、点的运动学、刚体的基本运动、刚体的平面运动、质点动力学、动量定理与动量矩定理、动能定理、达朗伯原理、虚位移原理、质点的振动等内容。每章后面有思考题和习题,习题有参考答案。一些疑难问题配有相应的视频讲解文件,通过扫描书中的二维码即可进行演示观看。

本书除可作为高等学校土建类专业教材外,也可作为机电类和其他工程类专业的教学用书,还可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/刘江,周楚兵主编. —3 版. —武汉:武汉理工大学出版社,2018. 8

ISBN 978-7-5629-5830-7

I. ①理… II. ①刘… ②周… 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(2018)第 170487 号

项目负责人:王利永

责任编辑:王利永

责任校对:陈 平

封面设计:许伶俐

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.5

字 数:387 千字

版 次:2008 年 12 月第 1 版 2012 年 5 月第 2 版 2018 年 8 月第 3 版

印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷 总第 6 次印刷

印 数:15001~18000 册

定 价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

版权所有,盗版必究。

高等学校土建类专业应用型本科“十三五”规划教材

编审委员会

顾问: 马成松 江义声 杜月中 孟高头 郑毅 唐友尧 熊丹安

主任: 李新福 杨学忠

副主任: (按姓氏笔画排列)

王琳	刘鹏	向惠生	许立强	许程洁	张伯平	张志国
张秀成	杨子江	杨和礼	沈建增	苏宝胜	邹建奇	陈升平
陈礼和	陈宜虎	陈俊杰	陈蓓	姚金星	姜袁	柳立生
胡铁明	荀勇	袁海庆	黄开平	蒋沧如		

委员: (按姓氏笔画排列)

牛秀艳	王伟	王有凯	王晓琴	邓训	史兆琼	宁文峰
刘广杰	刘伟	刘江	刘红霞	刘芳	刘莉莎	刘富勤
刘斌	刘黎虹	吕丽平	孙艳	毕艳	许汉明	吴秀丽
宋平	宋非非	张敏	张淑华	张朝新	张端丹	张耀东
李永信	李武生	杜文学	杜春海	杨双全	沈中友	苏卿
邹祖绪	陈华菊	陈金洪	周文昉	周燕	罗章	郎秋玲
施鲁莎	柯于锴	胡忠君	赵元勤	赵亮	赵峰	徐中秋
徐珍	贾贞	高成梁	高洁	黄非	彭第	程瑶
董晓琳	韩东男	熊海滢	熊瑞生	赫桂梅		

总责任编辑: 于应魁

秘书长: 王利永

前言

(第3版)

本书自2008年第1版、2012年第2版出版发行以来,得到了许多应用型本科院校同行老师的大力支持,其理论体系也得到了大家的一致肯定,并收到了一些宝贵意见。

为了更好地适应应用型人才培养的需要,根据教学实践和兄弟院校的意见,本书在第2版发行的基础上,再次进行了适当修订。修订后的第3版教材仍旧采用了《量和单位》(GB 3100—3102—93)中规定的有关通用符号。同时,第3版教材更加符合国家教育部颁布的《高等学校工科本科理论力学课程教学基本要求》,不仅适用于四年制土建类专业的理论力学教学,也可供电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、热能与动力工程、材料成型及控制工程等专业选用,还可作自学教材。

在本版修订中,对全书的内容和语句做了必要的增删和修改,也订正了第2版教材中部分印刷和编排问题。借助当前互联网和数字化技术,将书中一些疑难、重点问题录制了mp4格式的视频文件,扫描书中对应的二维码即可进行演示观看。

本书第3版由文华学院、武汉科技大学城市学院、青岛黄海学院联合编写。具体编写分工如下:文华学院刘江(第1、2、3、4章),武汉科技大学城市学院周楚兵(5、7、12、14章),青岛黄海学院王璐(第6、8、9章),文华学院郑折(第10、13章及习题答案),潘桂桦(第11章)。全书由刘江、周楚兵担任主编,郑折、王璐担任副主编。其中,数字资源资料由刘江负责整理提供,郑折在此次修订中做了大量具体工作,内容涵盖静力学、动力学大部分内容及习题答案勘误。

本教材在使用过程中得到了华中科技大学朱鸿茂教授和吴健康教授,以及王忠年副教授的长期支持,他们所提的建议对本书第3版的修订工作起了积极作用,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和不妥之处,衷心地希望大家批评和指正。

编者

2018年5月

目 录

第一篇 刚体静力学

1 刚体静力学的基本概念	(3)
1.1 刚体与力的基本概念	(3)
1.1.1 刚体	(3)
1.1.2 力	(3)
1.1.3 刚体的平衡状态	(3)
1.1.4 力系与平衡力系	(3)
1.2 静力学公理	(4)
1.2.1 二力平衡公理	(4)
1.2.2 加减平衡力系公理	(4)
1.2.3 力的平行四边形法则(二力合力公理)	(5)
1.2.4 作用与反作用定律	(5)
1.2.5 刚化公理	(6)
1.3 力的合成、分解与投影	(6)
1.3.1 力的合成与分解	(6)
1.3.2 力在坐标轴上的投影	(7)
1.3.3 二力合成的解析表示	(8)
1.4 力矩	(8)
1.4.1 力对点的矩	(8)
1.4.2 合力矩定理	(8)
1.4.3 力对点的矩的解析表达式	(9)
1.5 力偶	(10)
1.6 约束与约束反力	(11)
1.6.1 主动力	(11)
1.6.2 约束与约束反力	(11)
1.6.3 实际工程中常见的约束反力	(12)
1.7 物体的受力图与受力分析	(17)
1.7.1 物体的计算简图	(17)
1.7.2 物体的受力分析	(18)
思考题	(20)
习题	(21)
2 平面力系的等效简化	(24)
2.1 力系的分类	(24)

2.1.1	平面力系与空间力系	(24)
2.1.2	平面汇交力系	(24)
2.1.3	平面力偶系	(25)
2.1.4	平面平行力系	(25)
2.1.5	平面任意力系	(25)
2.2	力的平移定理	(26)
2.3	平面汇交力系和力偶系的简化	(27)
2.3.1	平面汇交力系的简化(合成)	(27)
2.3.2	平面力偶系的简化(合成)	(28)
2.4	平面任意力系的简化	(29)
2.4.1	平面任意力系向一点的简化	(29)
2.4.2	平面任意力系简化结果分析	(30)
2.5	平面平行力系的合力	(32)
	思考题	(33)
	习题	(33)
3	平面力系的平衡	(35)
3.1	平面汇交力系的平衡	(35)
3.1.1	几何法	(35)
3.1.2	解析法	(36)
3.2	力偶系的平衡	(38)
3.3	平面任意力系的平衡条件与平衡方程	(39)
3.4	静定与超静定的概念	(45)
3.4.1	静定问题	(45)
3.4.2	超静定问题	(46)
3.5	刚体系的平衡	(46)
3.6	平面简单桁架	(52)
3.6.1	概述	(52)
3.6.2	平面简单桁架的内力计算方法	(53)
	思考题	(55)
	习题	(56)
4	空间力系	(61)
4.1	空间汇交力系的合成与平衡	(61)
4.1.1	力在直角坐标系上的投影	(61)
4.1.2	空间汇交力系的合成	(61)
4.1.3	空间汇交力系的平衡	(62)
4.2	力对点的矩	(62)
4.3	力对轴的矩	(63)
4.3.1	力对轴的矩的解析表达式	(64)
4.3.2	力对点的矩与对轴的矩的关系	(64)

4.4 空间力偶系的合成与平衡	(65)
4.4.1 力偶矩矢的定义	(66)
4.4.2 空间力偶系的合成	(66)
4.4.3 空间力偶系的平衡	(67)
4.5 空间任意力系向一点简化	(68)
4.6 空间任意力系的平衡条件与平衡方程	(71)
4.7 重心	(72)
4.7.1 重心的概念及其坐标公式	(72)
4.7.2 质心的概念及其坐标公式	(76)
4.7.3 确定物体重心位置的方法	(76)
思考题	(78)
习题	(79)
5 摩擦及考虑摩擦的平衡问题	(82)
5.1 滑动摩擦	(82)
5.1.1 静摩擦力与库仑摩擦定律	(82)
5.1.2 动摩擦力与库仑摩擦定律	(83)
5.2 摩擦角与自锁现象	(84)
5.3 考虑摩擦的平衡分析	(84)
5.4 滚动摩阻	(86)
思考题	(89)
习题	(90)

第二篇 运 动 学

6 点的运动学	(95)
6.1 描述点的运动的矢量法	(95)
6.1.1 点的运动方程	(95)
6.1.2 点的速度	(95)
6.1.3 点的加速度	(96)
6.2 描述点的运动的直角坐标法	(96)
6.2.1 点的运动方程	(96)
6.2.2 点的速度	(97)
6.2.3 点的加速度	(97)
6.3 描述点的运动的自然坐标法	(99)
6.3.1 点的运动方程	(99)
6.3.2 密切面和自然轴系	(100)
6.3.3 点的速度	(100)
6.3.4 点的加速度	(101)
思考题	(103)
习题	(104)

7 刚体的基本运动	(106)
7.1 刚体的平行移动	(106)
7.2 刚体的定轴转动	(107)
7.2.1 刚体定轴转动的运动方程、角速度与角加速度	(107)
7.2.2 转动刚体上各点的速度与加速度	(108)
7.2.3 以矢积表示转动刚体上一点的速度与加速度	(109)
思考题	(110)
习题	(111)
8 刚体的平面运动	(113)
8.1 点的运动的相对性	(113)
8.1.1 运动的合成和分解	(113)
8.1.2 点的相对运动方程和绝对运动方程	(114)
8.2 刚体平面运动的运动方程	(115)
8.2.1 刚体平面运动的特征	(115)
8.2.2 平面运动刚体的运动方程	(116)
8.2.3 平面图形运动的分解	(116)
8.3 求平面图形内各点速度的基点法和投影法	(117)
8.3.1 基点法	(117)
8.3.2 投影法	(118)
8.4 求平面图形内各点速度的瞬心法	(120)
8.4.1 瞬时速度中心	(120)
8.4.2 速度瞬心法	(120)
8.4.3 确定速度瞬心位置的方法	(121)
8.5 平面图形内各点的加速度	(122)
思考题	(126)
习题	(127)

第三篇 动 力 学

9 质点动力学	(133)
9.1 质点运动微分方程	(133)
9.1.1 动力学基本定律——牛顿三定律	(133)
9.1.2 运动微分方程	(134)
9.2 质点动力学的两类问题	(134)
思考题	(138)
习题	(138)
10 动量定理与动量矩定理	(140)
10.1 动量定理	(140)
10.1.1 动量	(140)
10.1.2 动量定理	(142)

10.1.3	质心运动定理	(145)
10.1.4	质心运动守恒定律	(146)
10.2	动量矩定理	(149)
10.2.1	质点动量矩定理	(149)
10.2.2	质点系动量矩定理	(150)
10.2.3	质点系相对于质心的动量矩定理	(154)
10.3	转动惯量的计算	(155)
10.3.1	简单形状物体的转动惯量计算	(155)
10.3.2	回转半径	(157)
10.3.3	平行轴定理	(157)
10.3.4	求转动惯量的实验方法	(158)
10.4	刚体平面运动微分方程	(158)
	思考题	(161)
	习题	(162)
11	动能定理	(165)
11.1	力的功	(165)
11.1.1	功的定义	(165)
11.1.2	几种常见力的功	(166)
11.1.3	质点系内力的功	(168)
11.1.4	约束反力的功	(168)
11.2	动能	(170)
11.2.1	质点的动能	(170)
11.2.2	质点系的动能	(170)
11.3	动能定理	(171)
11.3.1	质点动能定理	(171)
11.3.2	质点系动能定理	(172)
11.4	动力学普遍定理综合应用	(176)
	思考题	(182)
	习题	(182)
12	达朗伯原理	(187)
12.1	质点的达朗伯原理	(187)
12.1.1	质点惯性力的概念	(187)
12.1.2	质点的达朗伯原理	(187)
12.2	质点系的达朗伯原理	(188)
12.3	刚体惯性力系的简化	(189)
12.3.1	刚体做平动	(189)
12.3.2	刚体做定轴转动	(190)
12.3.3	刚体做平面运动	(191)
12.4	达朗伯原理的应用	(191)

思考题	(193)
习题	(193)
13 虚位移原理	(197)
13.1 虚位移与虚功的概念	(197)
13.1.1 虚位移	(197)
13.1.2 虚功	(200)
13.2 虚位移原理	(200)
13.2.1 虚位移原理	(200)
13.2.2 虚位移原理的应用	(201)
13.3 以广义坐标表示的平衡条件	(204)
13.3.1 自由度	(204)
13.3.2 广义坐标和广义力	(205)
13.3.3 以广义坐标表示的平衡条件	(206)
思考题	(208)
习题	(209)
14 质点的振动	(213)
14.1 质点的自由振动	(213)
14.1.1 质点的自由振动微分方程及其解	(213)
14.1.2 振幅、相位、周期和频率	(214)
14.1.3 弹簧并、串联的等效刚度系数及固有频率	(215)
14.2 质点的衰减振动	(217)
14.2.1 质点的衰减振动微分方程及其解	(217)
14.2.2 质点的衰减振动特性	(219)
14.3 质点的强迫振动	(220)
14.3.1 质点受简谐干扰力作用下的强迫振动微分方程及其解	(220)
14.3.2 质点受简谐干扰力作用下的强迫振动响应特性	(221)
14.3.3 减振与隔振的概念	(223)
思考题	(223)
习题	(224)
参考答案	(226)
参考文献	(234)

数字资源目录

(1) 光滑铰链约束与链杆约束	13
(2) 固定铰链支座约束	14
(3) 活动铰链支座约束	15
(4) 轴承与止推轴承约束	15
(5) 球铰链约束	15
(6) 静摩擦到滑动摩擦	82
(7) 例 6.1 正弦机构	98
(8) 例 6.2 椭圆规	99
(9) 自然坐标轴系	100
(10) 直线平动和曲线平动	106
(11) 点的运动的相对性	114
(12) 例 8.2 车刀的相对运动轨迹	115
(13) 平面运动的概念	115
(14) 例 8.6 纯滚动速度瞬心问题	124
(15) 例 10.3 曲柄轴约束力计算	148
(16) 例 10.4 电动机外壳的运动	149
(17) 例 10.5 物理摆振动周期计算	153
(18) 例 10.7 摆对于水平轴的转动惯量计算	157
(19) 例 10.8 均质圆轮计算	159
(20) 例 10.9 均质圆轮质心 C 的运动规律计算	159
(21) 例 13.4 螺旋压榨机	202

第一篇 刚体静力学

静力学是研究物体在力的作用下的平衡规律的科学。

在静力学中,将研究以下三个问题:

1. 物体的受力分析

就是对物体的实际受力情况进行分析,并以受力图的形式进行表达,以便进行更进一步的研究。

2. 力系的简化(或等效替换)

物体的实际受力情况一般都比较复杂,将作用在物体上的一个复杂力系用另一个简单力系代替,而不改变原力系对物体的作用效应,这一过程称为力系的简化,也可以理解为用一个简单力系等效地替换一个复杂力系对物体的作用,所以又可以称为力系的等效替换。

3. 力系的平衡条件及其应用

当物体在力的作用下处于平衡状态时,研究作用在物体上的力系平衡所需满足的条件,并应用这些条件解决工程实际问题。力系的平衡条件是设计构件、结构时静力计算的基础。

因此,静力学在工程实际中有着十分广泛的应用。



图 1-1 力的等效替换

图 1-2 力的等效替换

图 1-3 力的等效替换

1 刚体静力学的基本概念

1.1 刚体与力的基本概念

1.1.1 刚体

在力的作用下,物体内部任意两点之间的距离始终不变,这样的物体称为刚体。通俗地理解为,刚体就是指在力的作用下不变形的物体。刚体是实际物体被抽象化了的力系模型。例如,在图 1.1 中,吊车梁的最大弯曲变形值一般不超过跨度(A 、 B 间距离)的 $1/500$,水平方向变形更小。因此,研究吊车梁的平衡规律时,变形是次要因素,可略去不计,此时计算结果同样能够满足实际工程的需要。静力学研究的物体是刚体,故又称刚体静力学,它是研究变形体力学的基础。

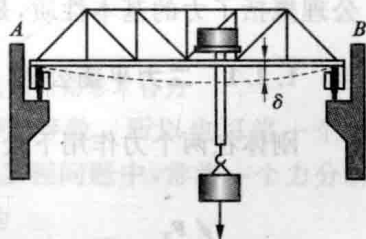


图 1.1 吊车梁的变形

1.1.2 力

力是物体间的相互机械作用。力的作用效应是使物体的运动状态发生变化,或使物体发生变形。刚体静力学只研究力改变物体运动状态的效应。

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向和作用点。三要素中只要任何一个改变,力的作用效果就不同。力是一个既有大小又有方向的量,即矢量。矢量可以用一个带有方向的线段表示,如图 1.2 所示。线段的起点表示拉力的作用点,如图 1.2(a)所示;线段的终点表示压力的作用点,如图 1.2(b)所示。线段的方位和箭头指向表示力的方向,线段的长度(按一定的比例)表示力的大小。本书中,力矢量用黑斜体字母表示,如 $\boldsymbol{F}$;而力的大小用普通字母表示,如 F 。在国际单位制中,力的单位为牛顿(N),或者千牛顿(kN)。

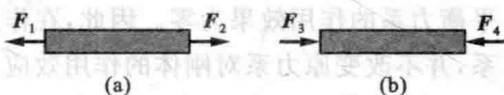


图 1.2 力的图形表示

(a) 拉力; (b) 压力

1.1.3 刚体的平衡状态

物体在空间的位置随时间的改变,称为物体的机械运动。

物体相对于地面处于静止或处于匀速直线运动状态,则称物体处于平衡状态。物体的平衡状态是物体机械运动的特殊情况,静力学研究物体的平衡问题。

1.1.4 力系与平衡力系

由多个力组成的一组力,称为力系。力或力系对物体的作用效果取决于其本身的特征。不同的力或力系的作用效果不同,能引起物体运动状态的不同变化。如果两个不同的力系对同一物体产生相同的效应,则这两个力系是等效的,称为等效力系。在保持对刚体作用效果不

变的前提下,用一个简单力系代替一个复杂力系,称为力系的等效简化。静力学研究物体的平衡规律,同时也研究力的一般性质及力系的简化。一个力是一种最简单的力系。如果一个力与一个力系等效,则这个力称为该力系的合力。求合力的过程称为力系的合成,该力系中的各力称为其合力的分量,简称分力。

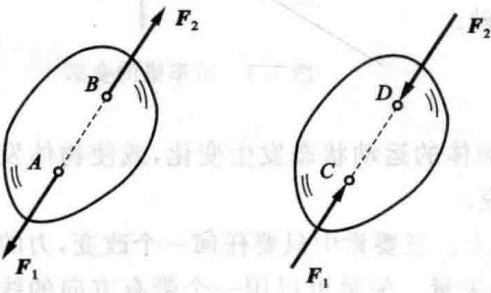
在一个力系作用下,物体处于平衡状态,这个力系必须满足一定的条件,这个条件称为力系的平衡条件,满足平衡条件的力系称为平衡力系。作用在物体上的一组力使物体处于平衡状态,这组力就是平衡力系。在平衡力系作用下,物体处于平衡状态。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结,无须证明而为大家所公认。静力学公理概括了力的基本性质,是建立静力学理论的基础。

1.2.1 二力平衡公理

刚体在两个力作用下处于平衡状态的充要条件是:两个力大小相等、方向相反,并作用在同一直线上,如图 1.3 所示。即



$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

这样的两个力是一种最简单的平衡力系,是推证平衡条件的基础。工程中常常遇到只受两个力作用而平衡的构件,称为二力构件或二力杆,如图 1.2 所示的受拉杆件和受压杆件。

1.2.2 加减平衡力系公理

平衡力系不改变物体的运动状态,就运动而言,平衡力系的作用效果为零。因此,在作用于刚体上的任何一组力系上添加或减去任一平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

推论(力的可传性原理):作用于刚体上的力,可以沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变它对刚体的作用效应。由此可知,力对刚体的作用取决于力的大小、方向和作用线,即力是有确定作用线的滑动矢量。

如图 1.4 所示,设刚体上 A 点作用有一力 $\mathbf{F}$ 。根据加减平衡力系公理,在刚体上 B 点加上一个平衡力系 $(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2)$,此处 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ 和 $\mathbf{F}$ 大小相等,即 $F_1 = F_2 = F$;再减去一个平衡力系 $(\mathbf{F}, \mathbf{F}_2)$ 。显然, $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}$ 等效。

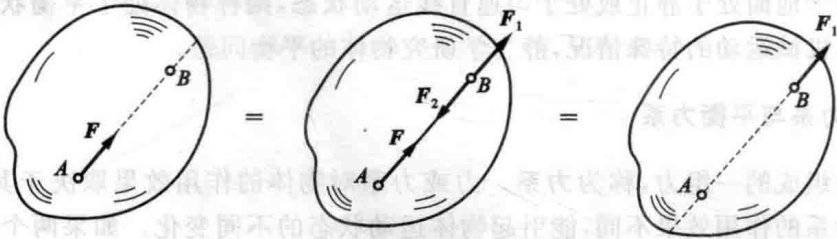


图 1.4 力的可传性

1.2.3 力的平行四边形法则(二力合力公理)

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力的作用点仍在该点,合力的大小和方向由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线来表示,如图 1.5 所示。

显然,这种合成力的方法是矢量加法,合力是这两个力的矢量和,即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \tag{1.2}$$

也可按照矢量三角形求合力,如图 1.6 所示。

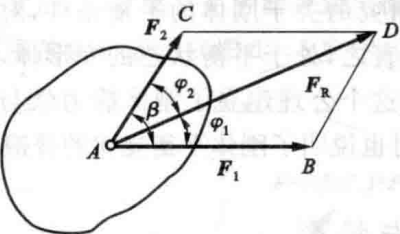


图 1.5 平行四边形求合力

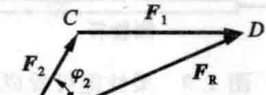
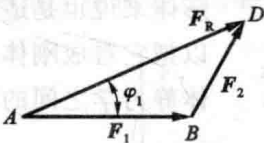


图 1.6 矢量三角形求合力

根据二力合力公理可知:两个力 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 组成的力系与力 $\mathbf{F}_R$ 等效。所以也可将一个力分解为作用于同一点的两个分量,只是分量有无穷多个组合。在工程问题中,常将一个力分解为方向相互垂直的两个力,如图 1.7 所示,这两个力的大小分别为

$$\left. \begin{aligned} F &= P \sin \beta \\ F_N &= P \cos \beta \end{aligned} \right\} \tag{1.3}$$

其中,力 $\mathbf{F}$ 使物块沿斜坡滑动,力 $\mathbf{F}_N$ 与坡面支反力相平衡。

推论(三力平衡汇交定理):刚体在不平行的三个力作用下处于平衡状态,则三个力作用线必交于一点,且位于同一平面内。

证明:如图 1.8 所示,刚体在三个力 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 、 $\mathbf{F}_3$ 作用下处于平衡状态,且分别作用在 A、B、C 三点。根据力的可传性,将 $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 移至二力的汇交点 O,合成得合力 $\mathbf{F}_R$,则 $\mathbf{F}_3$ 与 $\mathbf{F}_R$ 平衡。由二力平衡公理可知, $\mathbf{F}_3$ 与 $\mathbf{F}_R$ 必共线,即 $\mathbf{F}_3$ 也通过 O 点。

此定理是指明三力平衡的必要条件。

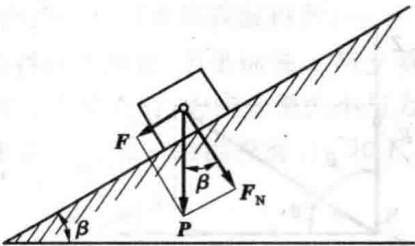


图 1.7 力的分解

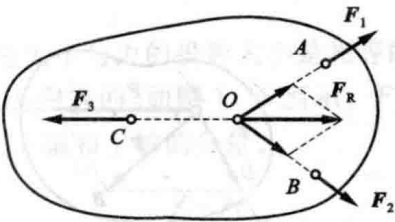


图 1.8 三力作用

1.2.4 作用与反作用定律

两物体间的相互作用力大小相等,方向相反,作用线在同一直线上。

此定律概括了物体间相互作用的关系,表明作用力与反作用力成对出现,并分别作用在不同的物体上。这个定律概括了自然界中物体间相互作用力的关系,表明一切力总是成对出现的。根据这个定律,已知作用力则可知反作用力。它是分析物体受力时必须遵循的原则,为