

普通高等教育工程应用型系列规划教材

理论力学

张克猛 唐红春 主编



科学出版社

普通高等



规划教材

理论力学

张克猛 唐红春 主编

韩海燕 黄志德 谷俊斌 侯先芹 韩少燕 参编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以课程任务组织内容、阐述理论,适当简化了理论推导过程,侧重于对学生的力学问题分析、判断、建模能力的培养。全书共分为静力学、运动学、动力学三个部分,包括静力学基础、基本力系、作用于刚体的力系等效简化、力系的平衡、摩擦、运动学基础、刚体平面运动、点的合成运动、质点运动微分方程、质点系动量定理、质点系动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理等 14 章内容。其中少量带*章节为选学内容,可供学有余力的读者课外选修或走出校门后结合工程实际进一步深造。

本书可作为本科的机械、土木、能动、建环、化工装备、材料、工业工程等专业 48~64 学时的理论力学教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/张克猛,唐红春主编. —北京:科学出版社,2017.8

普通高等教育工程应用型系列规划教材

ISBN 978-7-03-053369-2

I. ①理… II. ①张… ②唐… 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(2017)第 134824 号

责任编辑:邹 杰 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市密东印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:368 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书以课程任务组织内容、阐述理论,适当简化了理论推导过程,侧重于学生对力学问题的分析、判断、建模能力培养以及灵活选用力学理论解决工程实际的方法掌握。适用于应用性本科的机械、能动、土木、电气等大类的本科生,也可作为一般理工院校相关专业中学时的理论力学教材。

作为一种尝试,将静力学基本理论有针对性地穿插、分散阐述或直接引用,以突出理论的针对性和实用性;将刚体平面运动提前到点的合成运动之前讲述,一方面可保持对刚体运动分析的连贯性,同时还可由平动到转动,循序渐进地引出动参考系;作为质点微分方程的应用,在该章安排了单自由度机械振动内容;为避免和大学物理课程的内容重复,有意绕开了对质点动力学普遍定理的介绍,并在质点系的动量定理与质点系的动量矩定理中,有意强调了定理在研究流体动力学中不可替代的独特作用,同时也加强了这方面的举例与习题分量。

理论力学是为高等理工科开设的第一门力学课程,为了给学生以整体印象,本书适当穿插介绍了与其他力学课程间的过渡和联系。针对应用技术型本科生的特点,各章分别新增了“学习要点”和“思考题”,以指导学生把握基本要求、掌握重点、难点以及求解的方法和步骤,结合思考题,加强对基本概念的理解;在例题的解答过程中,尽量以“思考”、“讨论”等形式,引导学生主动思维;在例题、思考题以及习题的选取过程中,充分注意了分量、难度的适当性。各章还结合日常生活现象或工程实例,穿插了一些扩展知识的简介或问题质询,以强调本课程的工程应用性、前承后续性,以及知识综合性,同时启发学生对新知识的求知欲,调动学生主动学习的积极性,加强学生查阅资料获取知识的能力训练。

本书是由西安交通大学城市学院、西安工业大学北方信息工程学院和内蒙古科技大学三校合作完成的。具体编写分工如下:张克猛编写前言、绪论、各部分的导言、第9章和第14章,唐红春编写第1章~第5章,韩海燕编写第6章~第8章,黄志德编写第10章和第11章,谷俊斌编写第12章,侯先芹编写第13章,韩少燕负责编写部分习题及相关扩展内容。全书由张克猛、唐红春任主编,由张克猛统稿和定稿。

编写过程中,得到了科学出版社的悉心关照。作者在此深表谢意!

书中的不妥和疏忽之处,衷心希望广大读者批评指正。

作 者

2017年4月

目 录

前言	
绪论	1
第一篇 静 力 学	
第 1 章 静力学基础	5
1.1 力及其表示方法	5
1.1.1 力的概念 作用与反作用公理	5
1.1.2 力的投影和分析表示法	5
1.2 共点力系	6
1.2.1 共点二力的合成	7
1.2.2 共点力系的合成	7
1.2.3 共点力系的平衡条件	8
1.3 刚体与变形体	8
1.4 作用于刚体的力的基本性质	9
1.5 刚化公理	10
1.6 常见约束 约束反力	11
1.6.1 自由体 非自由体 约束	11
1.6.2 常见约束及其约束反力	11
1.7 受力图	15
学习要点	19
思考题	20
习题	21
第 2 章 基本力系	23
2.1 汇交力系	23
2.1.1 汇交力系的合成	23
2.1.2 汇交力系的平衡	24
2.2 力偶系	25
2.2.1 力偶及其基本性质	25
2.2.2 力偶系的合成	27
2.2.3 力偶系的平衡	29
学习要点	30
思考题	30
习题	31

第3章 作用于刚体的力系等效简化	34
3.1 力矩	34
3.1.1 空间力对点之矩	34
3.1.2 平面内力对点之矩	35
3.1.3 合力矩定理	35
3.1.4 力对轴之矩	36
3.1.5 力对点之矩与力对轴之矩关系定理	37
3.2 力的平移定理	38
3.3 力系向一点简化	39
3.3.1 空间力系向指定点简化	39
3.3.2 主矢和主矩	39
3.3.3 平面力系向指定点简化	40
3.4 力系简化结果的讨论	40
3.4.1 空间力系的最终简化结果	40
3.4.2 平面力系的最终简化结果	41
3.5 固定端约束	42
*3.6 重心	43
3.6.1 重心坐标	44
3.6.2 确定重心位置的方法	44
学习要点	47
思考题	48
习题	49
第4章 力系的平衡	51
4.1 空间力系平衡方程	51
4.2 空间平行力系平衡方程	53
4.3 平面力系平衡方程	53
4.4 平面平行力系平衡方程	55
4.5 物体系统的平衡 静定与静不定问题	56
4.6 平面简单桁架的内力计算	60
学习要点	63
思考题	64
习题	64
第5章 摩擦	70
5.1 滑动摩擦性质	70
5.2 考虑摩擦的平衡问题	71
5.2.1 考虑摩擦的平衡问题	71
5.2.2 摩擦角与自锁现象	74
5.3 滚动摩擦概念	75
学习要点	76

思考题	76
习题	77
第二篇 运 动 学	
第 6 章 运动学基础	81
6.1 点的运动	81
6.1.1 直角坐标法和矢量法	81
6.1.2 自然法	83
6.2 刚体的基本运动	87
6.2.1 刚体的平动	88
6.2.2 刚体的定轴转动	88
学习要点	91
思考题	93
习题	93
第 7 章 刚体的平面运动	97
7.1 刚体平面运动基本概念及运动方程	97
7.1.1 平面运动特点及运动的简化	97
7.1.2 平面运动方程	97
7.2 刚体平面运动分解为平动和转动	98
7.3 刚体平面运动的速度分析	99
7.3.1 相对转动概念	99
7.3.2 速度合成法(基点法)	100
7.3.3 速度投影法	102
7.3.4 瞬时速度中心法	103
*7.4 刚体平面运动的加速度分析	107
学习要点	109
思考题	110
习题	111
第 8 章 点的合成运动	115
8.1 合成运动中的基本概念	115
8.1.1 三个对象与三种运动	115
8.1.2 三种速度与加速度	116
8.2 速度合成定理	117
8.3 牵连运动为平动时的加速度合成定理	123
8.4 科氏加速度概念	124
学习要点	126
思考题	127
习题	128

第三篇 动力学

第 9 章 质点运动微分方程	133
9.1 研究质点动力学的意义和方法	133
9.2 质点运动微分方程	133
9.2.1 质点动力学第一类问题举例	134
9.2.2 质点动力学第二类问题举例	135
9.3 单自由度系统的振动	137
9.3.1 自由振动	137
9.3.2 阻尼自由振动	138
9.3.3 阻尼受迫振动	141
9.3.4 固有频率的计算与测量	142
9.3.5 振动的消减与隔离	145
学习要点	147
思考题	148
习题	149
第 10 章 质点系动量定理	151
10.1 质点系质心	151
10.2 质点系动量	152
10.3 质点系动量定理	153
10.4 质点系质心运动定理	157
学习要点	160
思考题	161
习题	161
第 11 章 质点系动量矩定理	165
11.1 质点系动量矩	165
11.2 质点系动量矩定理	166
11.3 刚体定轴转动定理	168
11.4 转动惯量	169
11.4.1 常见刚体的转动惯量	170
11.4.2 平行移轴定理	170
*11.5 刚体平面运动微分方程	172
11.5.1 平面运动刚体对质心的动量矩	172
11.5.2 质点系对质心的动量矩定理	173
11.5.3 刚体平面运动微分方程	173
学习要点	175
思考题	176
习题	177

第 12 章 动能定理	180
12.1 力的功.....	180
12.1.1 常力在直线路程上的功.....	180
12.1.2 变力的功.....	180
12.1.3 常见力的功.....	181
12.1.4 质点系内力的功.....	182
12.1.5 理想约束反力的功.....	183
12.2 动能.....	185
12.2.1 动能的定义.....	185
12.2.2 常见运动的刚体动能.....	185
12.3 动能定理.....	186
12.4 功率方程 机械效率.....	191
12.4.1 功率.....	191
12.4.2 功率方程.....	191
12.4.3 机械效率.....	192
12.5 动力学综合问题举例.....	193
学习要点.....	196
思考题.....	197
习题.....	197
第 13 章 达朗贝尔原理	201
13.1 惯性力.....	201
13.2 达朗贝尔原理.....	202
13.2.1 质点的达朗贝尔原理.....	202
13.2.2 质点系的达朗贝尔原理.....	203
13.3 刚体的惯性力系简化.....	205
13.3.1 平动刚体惯性力系的简化.....	205
13.3.2 定轴转动刚体惯性力系的简化.....	206
*13.3.3 平面运动刚体惯性力系的简化.....	207
13.4 转子的静平衡与动平衡.....	211
13.4.1 转子的静平衡.....	212
13.4.2 转子的动平衡.....	212
学习要点.....	213
思考题.....	214
习题.....	215
第 14 章 虚位移原理	218
14.1 约束及其分类.....	218
14.2 虚位移与虚功.....	220
14.3 虚位移原理.....	221

绪 论

1. 理论力学的研究对象

理论力学研究物体机械运动的一般规律。

机械运动是指物体的位置随时间的变化，这种变化依据所选的参考物体的不同而不同。就一般的工程问题而言，通常取地球作为参考体，称与地球固连的参考系为惯性参考系。

平衡是指物体相对惯性参考系保持静止或匀速直线移动的运动状态，是机械运动的特殊情况。理论力学也研究物体的平衡问题。

本书所研究的物体运动速度远小于光速，物体的尺寸远大于基本粒子，即在低速、宏观的范畴内来研究物体的机械运动，因而属于经典力学的研究内容。实践表明，即使在现代，工程技术中遇到的大量力学问题都可应用经典力学的理论加以解决，因此学习经典力学有着极其重要的实际意义。关于物体速度接近光速的机械运动研究属于相对论力学，关于基本粒子运动的研究学科属于量子力学，这些都要根据需要在专门的课程中进行讨论。

2. 理论力学的内容

理论力学包括三部分的内容：静力学研究物体平衡的一般规律；运动学研究物体运动的几何性质，而不涉及产生运动的原因；动力学研究作用于物体上的力和物体运动之间的关系。

3. 学习理论力学的目的

对工科许多专业而言，理论力学既是系列后续课程的基础，又是学生接触工程实际的首门技术课程，因此是一门理论性较强的技术基础课。学习这门课程主要目的如下：

- (1) 为学习诸如材料力学、结构力学、机械原理、机械设计等一系列后续课程打基础；为探索新的科学技术领域储备必要的力学知识。
- (2) 初步学习处理工程实际问题的方法。
- (3) 培养分析和解决问题的能力，特别是逻辑思维能力、抽象化能力、自学能力、表达能力以及数学计算能力等。

4. 处理力学问题的一般方法

解决好一个力学问题，通常包含以下四个方面的工作：

- (1) 围绕所要解决的问题，考察各相关因素的影响。在充分考虑各主要影响因素的前提下，忽略一些次要因素，建立合理的力学模型(又称物理模型)。
- (2) 针对力学模型，运用相关的力学理论和数学工具，建立或推导所研究问题的基本方程，最后形成定解方程。又称为建立数学模型。

(3) 方程求解以及研究解的性质。简单情况下可以人工求解析解；对于复杂的问题则需借助计算机求数值解。

(4) 通过实验验证力学、数学模型的合理性，检测所得结果的可信度。必要时对模型进行修正。

对于具有创新意义的研究，上述各项工作可能要反复进行才能得出满意的成果。

第一篇 静力学

静力学研究力系的简化与平衡条件。

力系是指作用在研究物体上的一群力。力系的简化是指在保持对研究物体的作用不变的条件下，用最简单的力系代替给定的复杂力系；当物体处于平衡时，作用其上的力系所应满足的条件称为力系的平衡条件。显然，力系的简化是寻找力系平衡条件的便捷途径，但力系简化的应用绝不仅限于此，在动力学中，当研究在给定力系作用下的物体如何运动时，力系的简化同样也有重要的应用。力系平衡条件可用于计算处于平衡状态下的构件或机械零件在载荷作用下的内力或所受的未知外力，为设计提供依据，因而在工程上应用得十分广泛。

第1章 静力学基础

本章讨论力学模型中所涉及的刚体的概念、常见约束的性质以及物体的受力分析。公理是人们在长期的生活与生产中经过观察、实践和实验所总结出的几条结论，并经过严格的科学抽象和表述，其正确性已被公认。这些公理为建立静力学理论提供了物理依据，在建立力学模型中具有重要的指导意义。

1.1 力及其表示方法

1.1.1 力的概念 作用与反作用公理

力是物体之间相互的机械作用，它的效果是改变物体的运动状态(外效应)并使物体变形(内效应)。改变物体的运动状态，在静力学中可理解为使静止的物体开始运动。在动力学中则依据牛顿定律对不同的力学模型和不同的运动形式给出更明确的表述。力使物体产生变形，将在材料力学等课程中进行研究。实践表明，力的作用效果取决于三个要素：(1)力的大小；(2)力的方向；(3)力的作用点。这意味着任何一个要素的改变或误判，都将导致该力的效果发生改变。在国际单位制(SI)中力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。

力的三要素说明，在几何上力可以用一段矢线(带有箭头的有向线段)来表示：线段长度依比例表示力的大小，矢量线方向即代表力的方向，矢量线的起点(或终点)则代表力作用点的位置，并用符号 F_A 表示。其中黑斜体的英文大写字母 F 表示力矢量的大小和方向，下标 A 表示力 F 的作用点(图 1-1)。在运算表达式中也可视为一般的数学矢量。

力是物体之间相互的机械作用，并服从于牛顿第三定律。本课程中称之为作用反作用公理。

作用反作用公理 当甲物体对乙物体有作用力的同时，甲物体也受到来自乙物体的反作用力；作用力与反作用力必定是同时出现，且大小相等、方向相反、沿同一直线。

在对物体进行受力分析时必须遵循这一公理。否则会
给解决问题造成致命性的错误。

1.1.2 力的投影和分析表示法

数学中已给出了矢量在给定轴或平面上的投影的定义。据此，在建立直角坐标系后，即可计算力在坐标轴上的投影。

设力 F 与 x 、 y 、 z 轴正向的夹角分别为 α 、 β 、 γ ，如图 1-2(a)所示，则力在坐标轴上的投影为

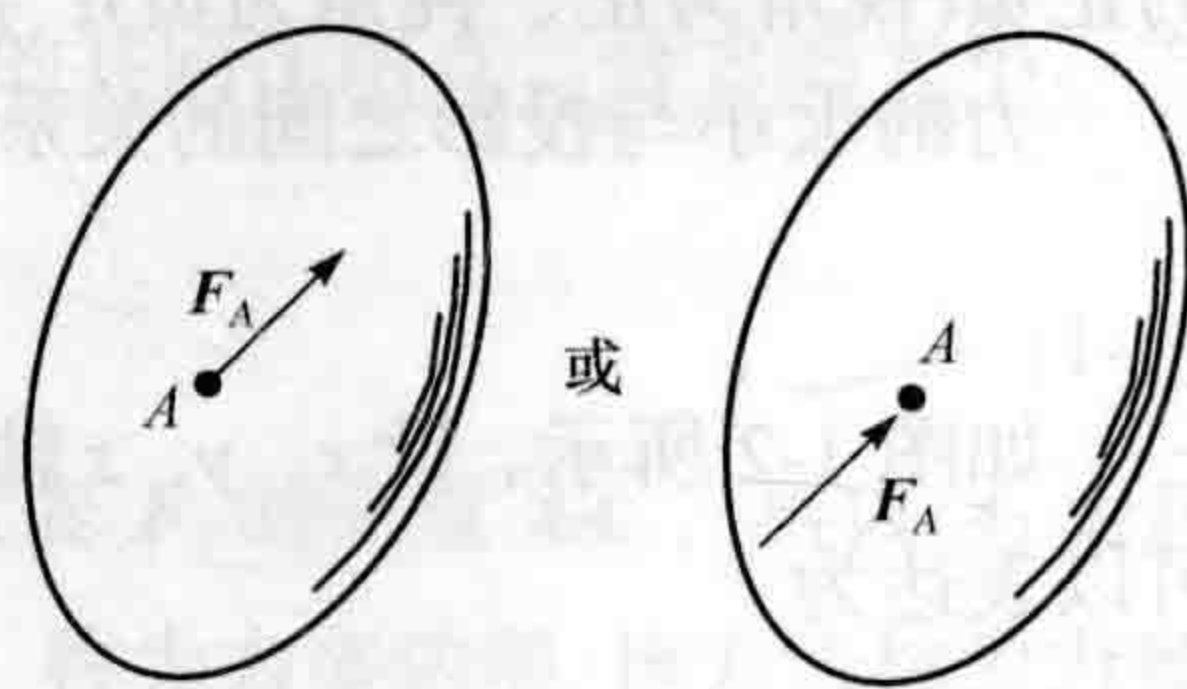


图 1-1

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \cos \beta \\ F_z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

称为一次(直接)投影法。

当力 F 与 Ox, Oy 之间的夹角事先不确定时, 若已知力 F 与 z 轴的锐角夹角为 γ , 力 F 和 z 轴组成的平面与 x 轴的锐角夹角为 φ , 则可先将力 F 投影到 Oxy 平面上, 得投影力 F_{xy} , 然后再将 F_{xy} 投影到 x, y 轴上, 如图 1-2(b)所示。故力在 x, y, z 轴上的投影为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \sin \gamma \cos \varphi \\ F_y &= F \sin \gamma \sin \varphi \\ F_z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

称为二次(间接)投影法。

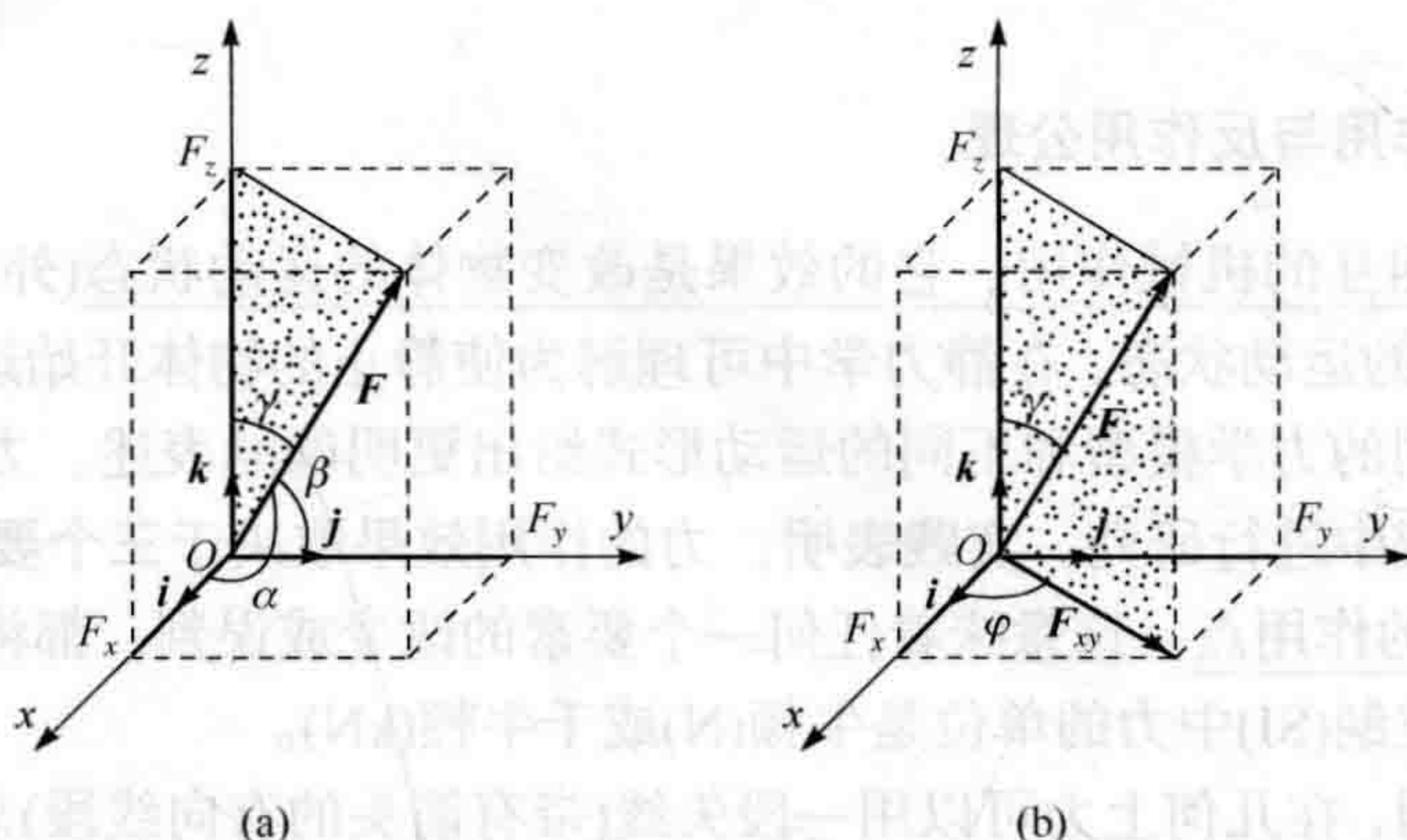


图 1-2

力在坐标轴上的投影为代数量。在具体计算时可以先依据力与坐标轴正向夹角确定投影的正负(锐角为正、钝角为负); 再利用几何关系求得投影的大小。

力的大小与投影之间的关系为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1-3)$$

如图 1-2 所示, 设 x, y, z 轴的单位矢量分别为 i, j, k , 则力矢量与其投影之间的关系就可以表达为

$$F = F_x i + F_y j + F_z k \quad (1-4)$$

称为力的分析表达式。

力的分析表示法只描述了力的方向及大小, 力的作用点仍需通过受力图得以反映。

1.2 共点力系

各力作用于物体的同一点的力系称为共点力系。

若两个力系分别作用于同一物体的效果相同, 则此两力系称为等效力系。如果一个力和一个力系等效, 则此力称为该力系的合力。

1.2.1 共点二力的合成

作用于物体上一点的二力合成理论即物理中通过实验归纳出力的平行四边形法则，本课程中称之为力的平行四边形公理。

力的平行四边形公理 作用在物体上一点 A 的两个力 F_1 和 F_2 可以合成一个合力 F_R ；该合力仍作用于 A 点，大小方向由以 F_1 和 F_2 为邻边所作平行四边形的对角线表示(图 1-3)。

此公理是讨论力系合成简化的物理基础。对它的全面理解包括：适用条件，合成结果，合力的大小、方向及作用点。从数学角度看，合力 F_R 的大小和方向(即合力矢量)等于 F_1 、 F_2 的矢量和，即

$$F_R = F_1 + F_2$$

若先画出第一个矢量，再把第二个矢量的起点置于第一个矢量的终点，则从第一矢量的起点指向第二个矢量终点的矢量即表示合力的大小和方向(图 1-4)，此方法称为力的三角形方法。

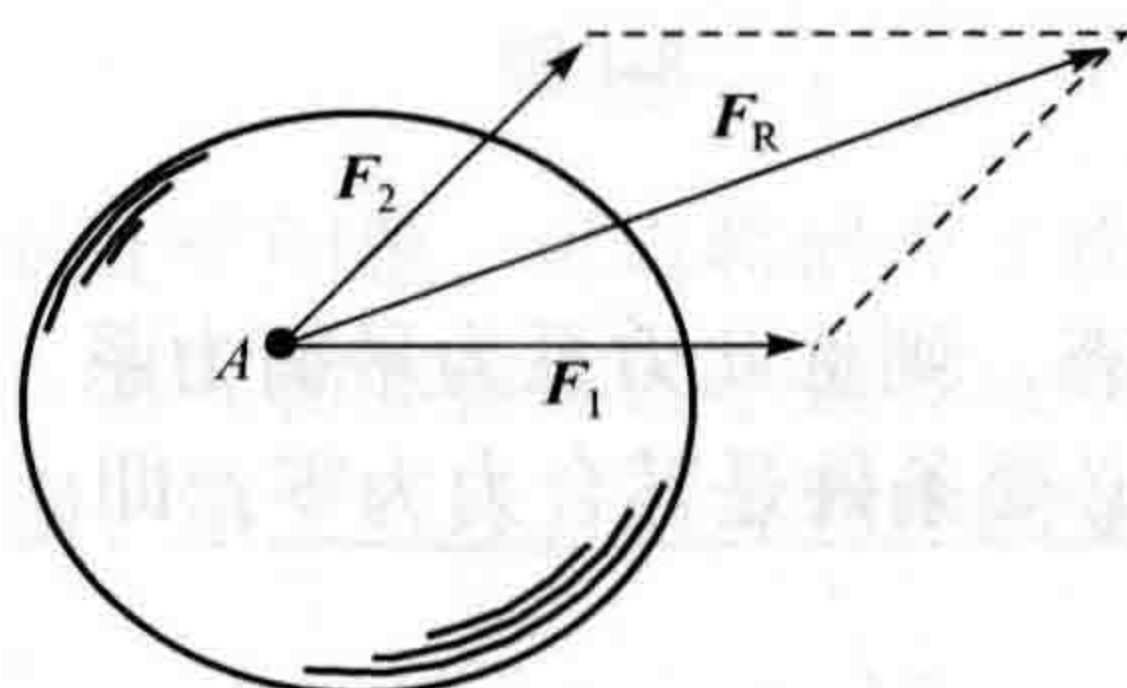


图 1-3

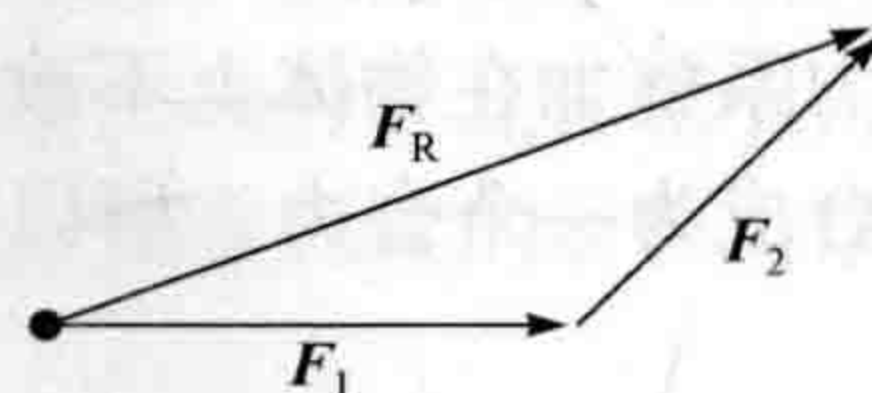


图 1-4

反之，也可以把一个力按平行四边形法则进行分解，并用来表示待求的未知约束力或计算力的投影或力矩等，但不提倡直接用力分解求解平衡问题。

1.2.2 共点力系的合成

给定作用于物体上的共点力系($F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$)(图 1-5)。可以运用力的平行四边形公理求得 F_1 与 F_2 的合力，再求此合力与 F_3 的合力，以此类推，可得出以下结论：一般情况下一个共点力系可合成一个合力；此合力的作用点即力系中各力的共同作用点，合力的大小、方向等于力系中各力的矢量和，即

$$F_R = \sum F_i \quad (1-5)$$

力矢量求和可用几何方法完成，如图 1-6 所示，先作出代表 F_1 的矢量 $\overline{AA_1}$ ，再以 A_1 为起点作代表 F_2 的矢量 $\overline{A_1A_2}$ ，以此类推得到一组折线 $AA_1A_2 \dots A_n$ ，称为力多边形，该方法称为力多

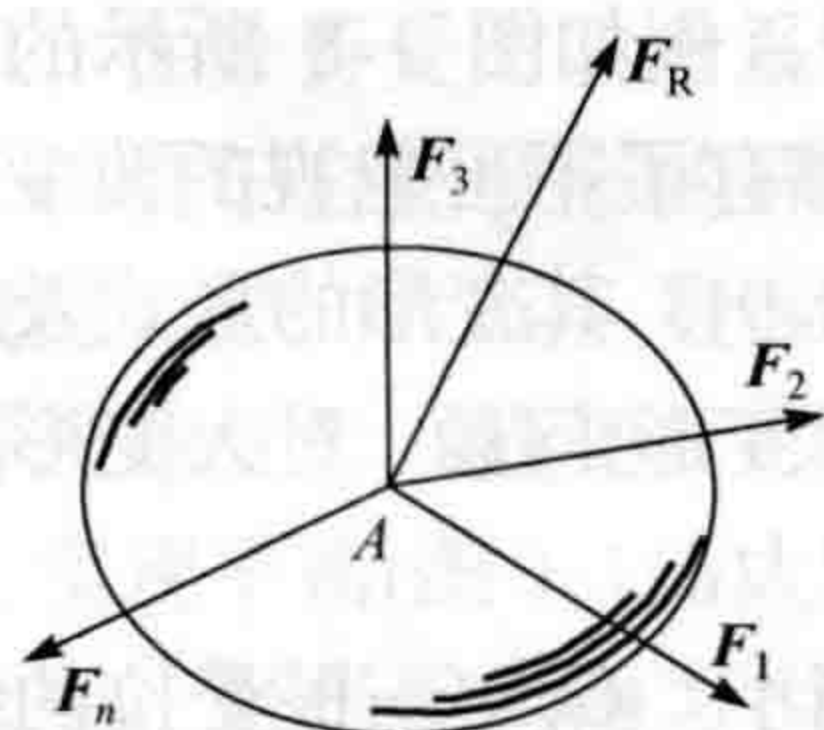


图 1-5

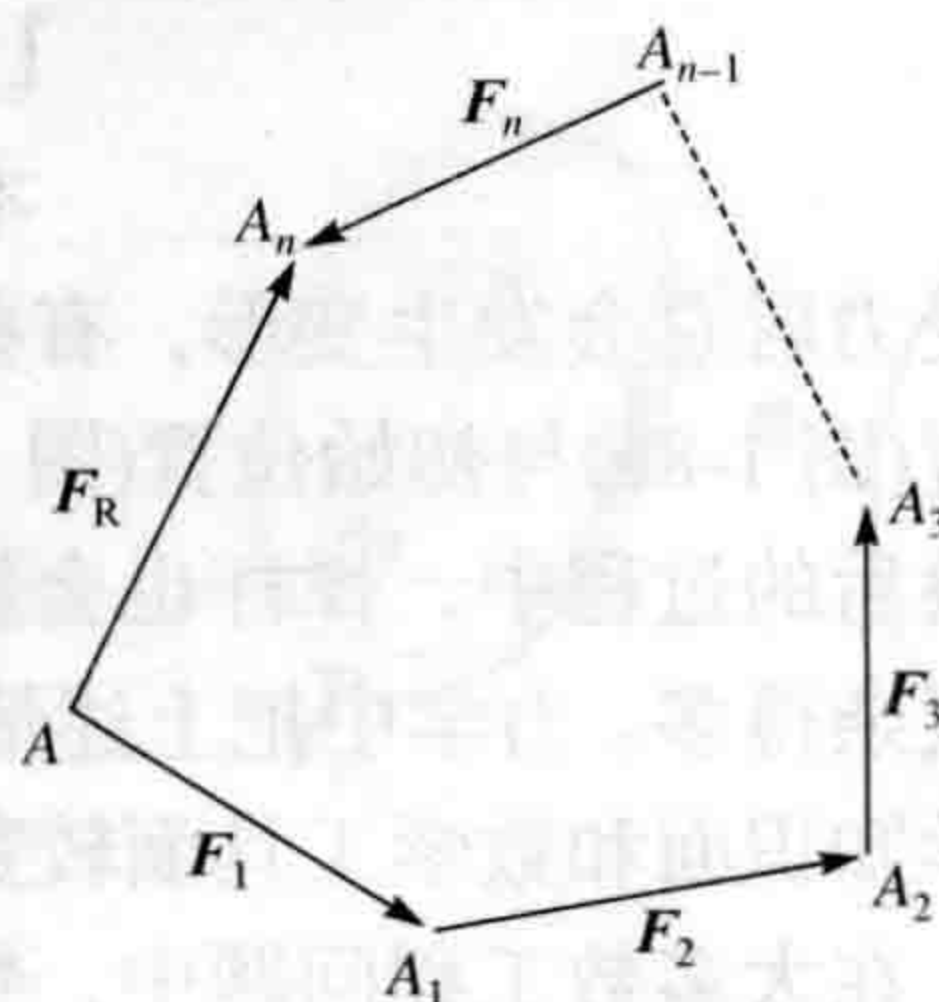


图 1-6