



“十三五”普通高等教育本科规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(第二版)

理论力学

许庆春 张慧 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(第二版)

理论力学

许庆春 张 慧 编 著
邱棣华 陈定圻 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材，曾评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共5篇19章，第1~4章为第1篇静力学，包括基本概念及基本原理、力系的简化、力系的平衡、静力学应用专题（平面静定桁架与摩擦）等；第5~8章为第2篇运动学，包括点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动等；第9~13章为第3篇矢量动力学，包括质点运动微分方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理等；第14、15章为第4篇分析力学基础，包括虚位移原理、拉格朗日方程、哈密顿原理等；第16~19章为第5篇动力学专题，包括刚体定点运动的动力学、质点系在非惯性参考系中的动力学、碰撞、微振动理论基础等。

本书紧密联系工程实际，重视力学概念的阐述，注重力学建模能力的培养，坚持理论与应用并重，突出水利、土木类专业特色。

本书可作为高等院校土建类、水利类专业教材，也可作为工程力学、港口航道及海岸工程等专业教材，还可作为工科类院校其他相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/许庆春,张慧编著.—2版.—北京:中国电力出版社,2017.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5198-0893-8

I. ①理… II. ①许… ②张… 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154390号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:孙 静

责任校对:郝军燕

装帧设计:张俊霞

责任印制:吴 迪

印 刷:百盛印装有限公司印刷

版 次:2017年8月第二版

印 次:2017年8月北京第六次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:22.25

字 数:543千字

定 价:45.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

本书参照教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会编制的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》(A类),在第1版的基础上修改、补充而成。经过多年的教学实践,在保持本书第1版特色的前提下,作了如下修改:

- (1) 增加了与日常生活和工程实际密切相连的思考题,以提高读者兴趣,促进其思考。
- (2) 在第15章分析动力学中,删除了“正则方程”的有关内容。
- (3) 对部分例题、习题进行删除和修改。
- (4) 对第1版中的印刷错误进行修正。

本书适用于工科各专业,书中标有*的内容为专题部分,可根据专业要求选用。

本书由许庆春、张慧编著。书中第1~19章及附录由许庆春修订,各章后的思考题和习题由张慧修订。

本书修订工作得到江苏省品牌专业建设工程项目(工程力学)及河海大学的资助,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正,以使本书不断提高和完善。

编 者

2017年5月

第一版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是参照教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会编制的《理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》(试行、2008年版)(以下简称《基本要求》)编写的，其主要特色如下：

- (1) 提高起点，删去了与大学物理重复的内容，增加反映现代科学技术的有关内容。
- (2) 注重力学概念的阐述，重视分析问题、解决问题的方法。
- (3) 紧密联系水利、土木等工程实际，注重力学建模能力的培养和力学在工程中的应用。
- (4) 在继承本课程理论严密、逻辑性强的基础上，设置一定量的思考题，以促进思考、启发思维、培养创新精神。

本书适用于工科各专业，书中标有*的内容对应《基本要求》中的专题部分，可根据专业要求选用。

全书由河海大学许庆春编写，思考题、习题由张慧编写。河海大学陈定圻教授对本书的编写提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

书稿承蒙邱棣华教授认真仔细地审阅，并提出许多宝贵的意见，在此深表感谢！

本书编写过程中，主要参考了华东水利学院(现河海大学)工程力学教研室理论力学编写组编写的《理论力学》(上、下册)、吴永祯、张本悟、陈定圻编写的《理论力学》(上、下册)，同时还参考了国内外一些优秀教材，在此谨向这些教材的编著者深表感谢！

限于水平，书中错误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2010年6月

主要符号表

a	加速度	g	重力加速度
a_n	法向加速度	h	高度
a_t	切向加速度	i	轴 x 的单位矢量
a_a	绝对加速度	I	冲量
a_r	相对加速度	j	轴 y 的单位矢量
a_e	牵连加速度	J_z	刚体对轴 z 的转动惯量
a_C	科氏加速度	J_{xy}	刚体对轴 x 、 y 的惯性积
A	面积, 自由振动振幅	J_C	刚体对质心的转动惯量
C	质心, 重心	k	弹簧刚度系数
e	恢复因数, 偏心距	k	轴 z 的单位矢量
e_t	切向单位矢量	l	长度
e_n	主法向单位矢量	L	拉格朗日函数
e_b	副法向单位矢量	L_O	刚体对点 O 的动量矩
f	频率, 动摩擦因数	L_C	刚体对质心的动量矩
f_s	静摩擦因数	L_z	刚体对 z 轴的动量矩
F	力	m	质量
F_I	惯性力	M	平面力偶矩
F_R	主矢或合力	$M_z(F)$	力 F 对轴 z 的矩
F'_R	合力	M	力偶矩矢, 主矩
F_s	静滑动摩擦力	$M_O(F)$	力 F 对点 O 的矩
F_N	法向约束力	M_I	惯性力的主矩
F_{Ie}	牵连惯性力	n	质点数目
F_{IC}	科氏惯性力	O	参考坐标系的原点
$F^{(e)}$	外力	p	动量
$F^{(i)}$	内力	P	功率
F_Q	广义力	P	重力

q	荷载集度, 广义坐标	x, y, z	直角坐标
q_v	体积流量	α	角加速度
r	半径	α	角加速度矢量
r	矢径	β	角度
r_O	点 O 的矢径	γ	角度
r_C	质心的矢径	δ	滚阻系数, 阻尼系数
R	半径	δ	变分符号
s	弧坐标	ζ	阻尼比
t	时间	η	减缩因数, 效率
T	动能, 周期	λ	频率比
v	速度	Δ	对数减缩
v_a	绝对速度	ρ	密度, 曲率半径
v_r	相对速度	φ	角度坐标
v_e	牵连速度	φ_f	摩擦角
v_C	质心速度	ω_0	固有频率
V	体积, 势能	ω	角速度
W	力的功	ω	角速度矢量
W	重力	θ	角度, 初相角

目 录

前言	
第一版前言	
主要符号表	
绪论	1

第1篇 静 力 学

第1章 基本概念及基本原理	4
第1节 力的概念	4
第2节 静力学基本原理	4
第3节 力的投影与力的分解	5
第4节 力矩	7
第5节 力偶	9
思考题	11
习题	11
第2章 力系的简化	14
第1节 汇交力系的简化	14
第2节 力偶系的简化	15
第3节 任意力系的简化	16
第4节 任意力系简化结果讨论	18
第5节 重心和形心	21
第6节 平行分布力的简化	24
思考题	26
习题	27
第3章 力系的平衡	33
第1节 约束与约束力	33
第2节 计算简图和示力图	37
第3节 汇交力系的平衡	40
第4节 力偶系的平衡	42
第5节 任意力系的平衡	43
第6节 静定与超静定问题 物体系统的平衡	48
思考题	51
习题	52

第4章 静力学应用专题	63
第1节 平面静定桁架	63
第2节 摩擦	67
思考题	73
习题	74

第2篇 运 动 学

第5章 点的运动	80
第1节 点的运动的矢量法	80
第2节 点的运动的直角坐标法	81
第3节 点的运动的自然法	84
第4节 点的运动的极坐标法	87
思考题	88
习题	89
第6章 刚体的基本运动	93
第1节 刚体的平行移动	93
第2节 刚体的定轴转动	94
第3节 转动刚体内各点的速度和加速度	95
第4节 角速度与角加速度的矢量表示 以矢积表示点的速度和加速度	97
思考题	99
习题	99
第7章 点的合成运动	103
第1节 合成运动的概念	103
第2节 点的速度合成定理	105
第3节 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	107
第4节 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成定理	109
思考题	113
习题	113
第8章 刚体的平面运动	119
第1节 刚体平面运动的运动方程	119
第2节 平面图形内各点的速度 速度瞬心	120
第3节 平面图形内各点的加速度 加速度瞬心	125
思考题	127
习题	129

第3篇 矢 量 动 力 学

第9章 动力学基本定律 质点运动微分方程	134
第1节 牛顿运动定律 惯性参考系	134

第2节	单位制和量纲	135
第3节	质点运动微分方程	136
	思考题	140
	习题	140
第10章	质心运动定理 动量定理	143
第1节	质心运动定理	143
第2节	动量和冲量	147
第3节	动量定理	148
	思考题	151
	习题	152
第11章	动量矩定理	157
第1节	动量矩	157
第2节	动量矩定理	159
第3节	刚体定轴转动微分方程	162
第4节	相对于质心的动量矩定理 刚体平面运动微分方程	164
	思考题	168
	习题	169
第12章	动能定理	176
第1节	功与功率	176
第2节	动能	179
第3节	动能定理	181
第4节	势力场与势能	184
第5节	机械能守恒定理	185
第6节	普遍定理的综合应用	187
	思考题	190
	习题	190
第13章	达朗贝尔原理	197
第1节	达朗贝尔原理 惯性力	197
第2节	达朗贝尔原理在刚体动力学中的应用	199
第3节	非对称转动刚体的轴承动约束力	202
	思考题	205
	习题	206

第4篇 分析力学基础

第14章	分析静力学	211
第1节	约束与约束方程	211
第2节	自由度和广义坐标	213
第3节	虚位移 理想约束	214

第4节	虚位移原理	216
*第5节	广义力 以广义力表示的质点系平衡条件	221
*第6节	保守系统平衡的稳定性	224
	思考题	226
	习题	228
*第15章	分析动力学	234
第1节	动力学普遍方程	234
第2节	拉格朗日方程	235
第3节	拉格朗日方程的首次积分	239
第4节	哈密顿原理	242
	思考题	245
	习题	245

第5篇 动力学专题

*第16章	刚体定点运动的动力学	249
第1节	刚体定点运动的运动方程	249
第2节	位移定理 转动瞬轴 无限小角位移合成定理	250
第3节	角速度及角加速度	252
第4节	定点运动刚体内一点的速度和加速度	253
第5节	刚体定点运动的欧拉动力学方程	255
第6节	陀螺近似理论	256
	思考题	258
	习题	258
*第17章	质点系在非惯性参考系中的动力学	261
第1节	非惯性参考系中的质点动力学基本方程	261
第2节	非惯性参考系中的动力学普遍定理	264
第3节	地球自转对地面上物体运动的影响	266
	思考题	269
	习题	269
*第18章	碰撞	272
第1节	碰撞的特征	272
第2节	基本假设与基本理论	272
第3节	两物体的对心碰撞	273
第4节	碰撞对定轴转动刚体及平面运动刚体的作用	277
	思考题	282
	习题	283
*第19章	微振动理论基础	286
第1节	单自由度系统的自由振动	286

第 2 节	单自由度系统的衰减振动	291
第 3 节	单自由度系统的强迫振动	295
第 4 节	减振与隔振	301
第 5 节	两个自由度系统的自由振动	303
第 6 节	两个自由度系统的强迫振动	308
思考题		310
习题		311
附录 A	矢量导数	316
第 1 节	变矢量与矢量导数	316
第 2 节	变矢量的绝对导数和相对导数	318
附录 B	转动惯量	320
第 1 节	转动惯量的一般公式	320
第 2 节	惯性积与惯性主轴	323
第 3 节	平行轴定理	324
第 4 节	转轴公式	325
习题参考答案		327
参考文献		344

绪 论

一、理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门学科。按照辩证唯物主义的观点,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,它包括宇宙中发生的一切现象和过程——从简单的位置变化到人的思维活动。机械运动则是所有运动形式中最简单的一种,指的是物体在空间的位置随时间的变化。如车辆的行驶、机器的运转、水的流动、宇宙飞船的运行、建筑物的振动等,都属于机械运动;平衡是机械运动的特殊情况。

理论力学是研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以牛顿定律为基础,属于古典力学的范畴。而速度接近于光速的物体和微观粒子的运动,则要用相对论和量子力学进行研究。虽然古典力学有局限性,但在日常生活和一般工程技术(水利、土木、机械、航空、航天等)中,所考察的物体都是宏观物体,且运动速度远小于光速,所以,有关力学问题仍然用古典力学的原理来解决。

本书内容分为以下三部分:

静力学:主要研究物体在力系作用下的平衡规律,包括物体的受力分析,力系的等效简化,力系的平衡条件及其应用。

运动学:仅从几何方面研究物体的运动规律(轨迹、速度、加速度等),而不考虑引起物体运动状态变化的物理因素。

动力学:研究物体的运动与作用在物体上的力之间的关系。

二、理论力学的研究方法

力学的发展完全符合辩证唯物主义认识论。人们通过长期的生活实践、生产实践和科学试验,积累了关于机械运动的丰富材料,经过分析、综合和归纳,总结出力学基本规律,形成力学概念,又回到实践中去加以检验并指导实践;再从实践中获得新的材料,推动理论的进一步发展和完善。

在形成理论力学概念和系统理论的过程中,抽象化和数学演绎这两种方法起着重要的作用。

客观事物总是复杂多样的。对大量来自实践的材料,必须根据所研究问题的性质,抓住主要的、起决定作用的因素,撇开次要的、偶然的因素,深入事物的本质,了解其内部联系,这就是抽象化方法。例如,在某些问题中忽略实际物体的大小和形状,得到质点的力学模型;在另一些问题中忽略实际物体受力后的变形,得到刚体的力学模型。抽象化方法既简化了所研究的问题,又更深刻地反映了事物的本质。但是,抽象必须是科学的,不能不顾条件,随意取舍。

通过抽象化,将长期实践和实验所积累的感性材料加以分析、综合、归纳,得到一些基本的概念和定律或原理,再以这些基本概念、定律或原理为基础,经过严密的数学推演,得到一些定理和公式,构成系统的理论,这就是数学演绎方法。应当注意,数学推演是在经过实践证明其为正确的理论基础上进行的,且由此导出的定理或公式,必须回到实践中去,经

过实践检验,证明其为正确时才能成立。理论力学的许多定理都是以牛顿定律为基础,经过严密的数学推导得到的。这些定理揭示了力学中一些物理量之间的内在联系,并经实践证明是正确的,但这些定理也只是在一定范围内才成立。

三、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课,在诸多工程技术领域有着广泛的应用。学习理论力学的目的是:

(1) 掌握机械运动的规律,为解决工程问题打下一定的基础。从水利、土木工程中结构物的设计和施工、机械的制造与运转,到宇宙飞船的发射和运行,都有着大量的力学问题,理论力学在解决这些问题时有着广泛的应用。

(2) 为学习后续课程作准备。理论力学是材料力学、结构力学、水力学、流体力学、弹性力学、振动理论、机械原理、机械设计等课程的基础。随着现代科学技术的飞速发展,理论力学的研究内容已渗透到其他科学领域,如生物力学、电磁流体力学、爆炸力学等。

(3) 训练逻辑思维,培养分析问题和解决问题的能力,为今后解决生产实际问题、从事科学研究工作打下基础。理论力学的理论来源于实践又服务于实践,既抽象又紧密结合实际,研究的问题涉及面广,且系统性、逻辑性强。这有助于培养辩证唯物主义世界观,培养正确的分析问题和解决问题的能力。

第1篇 静力学

静力学主要研究物体在力的作用下的平衡问题。

平衡是机械运动的一种特殊情形,即物体相对于惯性坐标系^①处于静止状态或做匀速直线运动的情形。在一般工程问题中,平衡是指相对于地球的平衡,特别是指相对于地球的静止。实践证明,应用静力学的理论来解答这些问题,得到的结果是足够精确的。

静力学所研究的物体都被看作刚体(rigid body),因此静力学也称为刚体静力学。刚体是指这样一种物体:当其受到力的作用时,大小和形状都保持不变,即不发生变形(deformation)。事实上刚体是不存在的,它只是一种理想化的力学模型。实际物体受力作用时,或多或少都将发生变形。但多数情况下,在研究物体的平衡或运动时,变形只是次要因素,可忽略不计,因而可将实际物体看作刚体^②。

通常,作用于物体的力不止一个而是若干个,这若干个力总称为力系(force system)。如果两个力系作用于同一物体产生同样的效果,则这两个力系互为等效力系(equivalent force system)。如果一个力与一个力系等效,则该力称为合力(resultant force)。如果一个力系作用于某一物体而使其保持平衡,则该力系称为平衡力系(force system of equilibrium)。一个力系必须满足某些条件才能成为平衡力系,这些条件称为平衡条件(condition of equilibrium)。研究物体的平衡问题,实际上就是研究作用于物体的力系的平衡条件及其应用。

作用于物体的力系往往较为复杂,在研究物体的运动或平衡问题时,需要将复杂的力系加以简化(reduction),即将复杂力系变换成另一个较简单的等效力系。

静力学将研究三个问题:

- 1) 物体的受力分析;
- 2) 力系的等效简化;
- 3) 力系的平衡条件及其应用。

工程中有大量的静力学问题。例如在土木、水利工程中,用移动式吊车起吊重物时,必须根据平衡条件确定起重量不超过多少才不致翻倒;设计屋架时,必须将所受的重力、风压力、雪压力等加以简化,再根据平衡条件求出各杆所受的力,据以确定各杆横截面的尺寸;设计闸、坝、桥梁等建筑时,必须进行受力分析,以得到既安全又经济的设计方案。在机械工程中,进行机械设计时,往往要应用静力学理论分析机械零部件的受力情况,作为强度计算的依据。对于运转速度缓慢或速度变化不大的零部件的受力分析,通常都可简化为平衡问题来处理。除此以外,静力学中关于力系简化的理论,将直接应用于动力学中;而动力学问题也可在形式上变换为平衡问题来求解。可见静力学理论在生产实践中应用很广,在力学理论上也是很重要的。

① 惯性坐标系是指适用牛顿定律的坐标系,在动力学里将详细说明。

② 本篇中,除特别说明外,文中的“物体”都指刚体。

第1章 基本概念及基本原理

力和力偶是力学中的两个基本物理量。本章将介绍与力、力偶有关的基本概念以及相应基本量的计算,并介绍静力学基本原理。

第1节 力的概念

力是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的运动状态发生改变,或使物体产生变形。实践表明,力对物体的作用效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素。

在我国法定计量单位中,力的单位是N(牛顿)或kN(千牛)。力的方向包含方位和指向两个意思,如铅直向上。力的作用点是指力在物体上的作用位置,通常力是作用在一定面积上的分布力(distributed force),若分布力作用的面积很小,可抽象成为一个点,即力的作用点,则这种作用于一点的力称为集中力(concentrated force)。过力的作用点沿力的方向作一直线,该直线称为力的作用线。

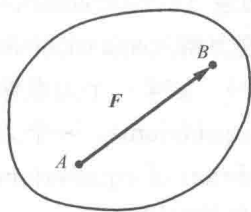


图 1-1 力的矢量表示

力具有大小和方向,且服从矢量的平行四边形法则,所以力是**矢量**^①。矢量可用有向线段来表示,线段的长度表示力的大小,箭头指向表示力的方向,线段的始端或终端表示力的作用点(图 1-1)。

第2节 静力学基本原理

静力学中用到的几个原理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结,并得到实践的反复检验。

1. 二力平衡原理 (equilibrium principle of two forces)

作用于同一刚体的两个力使刚体平衡的充分必要条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

只受两个力作用而平衡的杆件称为二力杆(two-force member),二力杆中两个力的作用线必沿这两个力作用点的连线。

2. 加减平衡力系原理 (principle of added or moved equilibrium force system)

在任一力系中加上一个平衡力系,或从其中减去一个平衡力系,所得新力系与原力系对于刚体的运动效应相同。

3. 力的平行四边形法则 (parallelogram law of force)

共点的两个力可以合成为一个合力,合力的作用点也在该点,大小和方向由以这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线来确定[图 1-2(a)]。用矢量表示为 $\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$ 。

① 矢量用黑斜体字母表示,矢量的大小用相应的白斜体字母表示。

为求合力 F_R 的大小和方向, 可将 F_1 、 F_2 首尾相连构成开口的力三角形, 该力三角形的闭合边就是合力 F_R [图 1-2 (b)], 这种合成方法称为力的三角形法则 (triangle law of force)。

应用上述原理, 可导出下面两个推论 (请读者自行推证)。

推论 1 力的可传性 (transmissibility of a force): 作用于刚体的力可沿其作用线移动而不致改变其对刚体的作用效应。

此推论表明, 对刚体而言, 力的作用点已不再是决定力的作用效应的要素, 它被力的作用线所取代。作用在刚体上的力是**滑动矢量** (sliding vector), 但作用在变形体上的力却是**固定矢量** (fixed vector)。

推论 2 三力平衡原理 (equilibrium principle of three forces): 若作用于同一刚体的共面而不平行的三个力使刚体平衡, 则这三个力的作用线必汇交于一点。

4. 作用与反作用定律 (principle of action and reaction)

两物体间相互作用的力 (作用力与反作用力) 同时存在、大小相等、方向相反, 沿同一作用线分别作用在这两个物体上。

5. 刚化原理 (principle of rigidization)

设变形体在某一力系的作用下处于平衡, 若将此变形体刚化为刚体, 则其平衡状态不变。此原理表明了刚体平衡条件和变形体平衡条件之间的关系, 扩大了刚体静力学的应用范围。但是, 刚体平衡的充分与必要条件, 只是变形体平衡的必要条件, 而非充分条件。

第3节 力的投影与力的分解

一、力在轴上的投影

设力 F 、轴 x 如图 1-3 所示, 过点 A 和 B 分别作垂直于轴 x 的平面, 两平面与轴 x 的交点分别为 a 和 b , ab 取适当的正负号即为力 F 在轴 x 上的投影。设轴 x' 与轴 x 平行, 力 F 与轴 x' 正向的夹角为 θ , 则力 F 在轴 x 上的投影为

$$F_x = F \cos \theta \quad (1-1)$$

力在轴上的投影为代数量, 可以为正或为负, 也可以为零。

设力 F 与直角坐标轴 x 、 y 、 z 正向的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 (图 1-4), 则力 F 在轴 x 、 y 、 z 上的投影分别为

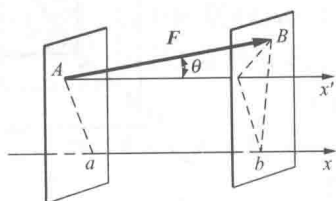


图 1-3 力在轴上的投影

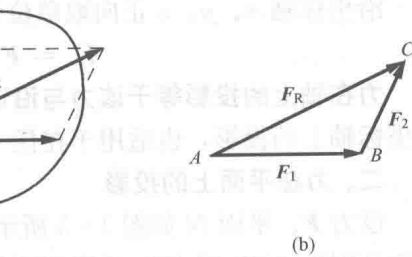


图 1-2 共点的两个力的合成

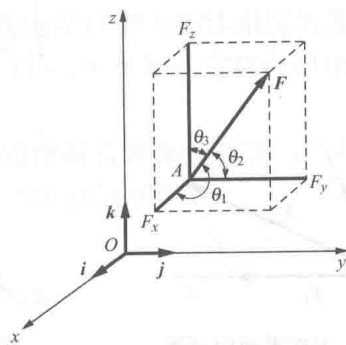


图 1-4 力在坐标轴上的投影