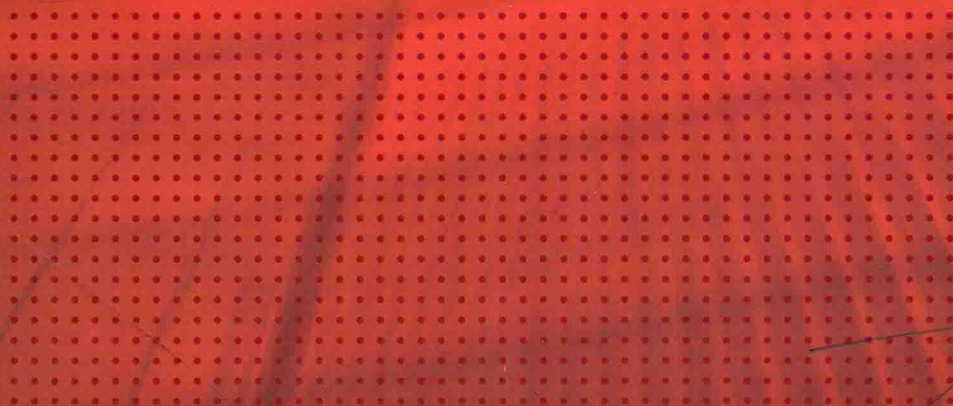


当代应用力学

DANGDAI YINGYONG LIXUE

苏 禾 编著



東北大學出版社
Northeastern University Press

039
P



当代应用力学

苏 禾 编著

东北大学出版社

·沈 阳·

© 苏禾 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

当代应用力学 / 苏禾编著. —沈阳: 东北大学出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5517-1274-3

I. ①当… II. ①苏… III. ①应用力学 IV. ①O39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 112721 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83680267 (社务部) 83687331 (市场部)

传真: 024-83680265 (办公室) 83680178 (出版部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 30.5

字 数: 736千字

出版时间: 2016年6月第1版

印刷时间: 2016年6月第1次印刷

责任编辑: 郎 坤

封面设计: 刘江旻

责任校对: 一 方

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1274-3

定 价: 78.00元

实践检验

——对《当代应用力学》

一、力学计算程序化将促进力学教学时代适应性。针对此形势，作者编著此书可供参考，如有可能可进行教学试点尝试。书中内容及各观点，尚有待理论实践和教学实践的检验。扬善弃弊，或有益乎。

二、作者系东北大学理学院力学系教授（离休）。近90岁高龄的老师，仍不忘万千菁菁学子，含英咀华焚膏继晷总结多年教学经验，晚节可贵也。

东北大学信息科学与工程学院教授
中国科学院院士



2015年11月29日

学习牛顿

1685—1686年，牛顿从事《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》）这部伟大著作的创作。

《原理》第一版出版时，牛顿43岁。

牛顿的《原理》标志着17世纪科学革命的顶点，为后来的工业革命奠定了科学基础。

牛顿本人很谦虚，在评论他的科学成就时，他曾这样说：科学真理像汪洋大海，我只是站在大海之滨，拾到几个贝壳而已。他还说过：我为什么看得远一些，那是因为我站在别人的肩膀上。

学习牛顿首先要学习牛顿的这种谦虚风范。

《当代应用力学》这本书稿我看过两遍，我觉得有两点值得关注：一是力学计算进入程序化的现实，这本书稿提供了“当代应用力学基础综合作业”，这适应了时代潮流发展趋势；另一点是整个书稿内容撰述趋向合理化。

我的这些看法不一定正确，仅供参考。

东北大学机械工程与自动化学院教授
中国科学院院士

周邦椿
2013年7月8日

写在前面的话

一、本书特点

理论方面。牛顿定律代替静力学公理，奠定了静力学的理论基础，结束了漫长的“静力学公理”年代，根据牛顿第一定律，建立了力系平衡的理论依据，还原历史面貌，维护牛顿科学的完整性。

适应时代要求。随着近代计算技术的发展，可以这样说，解决程序化的分析软件均采用分析力学（拉格朗日第一类方程）作为系统的动力模型。据此而建立“当代应用力学基础综合作业”篇章（第十五章），并提供43道当代应用力学基础综合作业题（其中给出部分题解，供参考）。

结构调整。“几何静力学”篇建立“基本力系”（平面、空间汇交力系，平面、空间力偶系，力矩，力系化简），“分析力学”篇建立“分析静力学”“分析动力学（一）”“分析动力学（二）”，全书建立四篇引言（加强对该篇内容的深层次理解并对该篇内容建立应用理念）。

凡在大学物理^①课程中阐述过的一些力学概念（如力、质点、刚体等），质点运动的描述（参考系、位置矢量、运动方程、位移、速度、加速度），圆周运动（如平面极坐标、圆周运动的角速度、圆周运动的切向加速度和法向加速度、角加速度、匀速率圆周运动和匀变速率圆周运动），以及质点动力学的基本方程等，本书将尽可能地不予重复阐述，贯彻“减负”“少而精”原则，避免占用学生更多的学习时间。

二、本书适用范围

本书可作为高等学校工科机械、土建、水利、航空等专业理论力学课程的教材和教学参考书，亦可作为高等学校其他专业理论力学教材（长、中、短型）及教学参考书，成人教育及自学考试教材，工程师自学及考研参考书，高级技工学校及技师学院教学用书。

三、审阅

韩二中资深教授（东北大学理论力学教研室主任）和殷汝珍副教授（辽宁科学技术出版社1985年出版的《理论力学函授教材》兼作“高等教育自学用书”编委；高等教育出版社2008年1月出版的《工程力学》修订版第四版“运动学、动力学”主编）对本书稿进行了全面审阅，提出了许多宝贵的修改意见，谨表谢忱！

四、作者简介

本书作者系东北大学理学院力学系教授（离休）。

^① 参考《物理》第5版上册，东南大学等七所工科院校编，马文蔚改编，高等教育出版社2007年12月第6次印刷。

Characteristics of this textbook:

In theory: Newton's laws replaced the axioms of statics, and laid the theoretical foundation for the statics, ended a long time of "static axiom", Newton's first law became the theoretical foundation of equilibrium, restored the truth of history, maintained the integrity of the Newton scientific theory.

To meet the requirements of the times: With the development of modern computing technology, it can be said that the solution of the analysis of the program are used to analytical mechanics (Lagrange first equation) as the system's dynamic model. Thus, the Fifth chapter 15 provides 43 comprehensive problems as homework (and some of them are given solutions for reference).

The adjustments of the textbook structure: geometric statics parts establish a "fundamental mechanics system" (coplanar concurrent force system, spatial concurrent force system, coplanar couple system, spatial couple system, moment, mechanics reduction), analytical mechanics parts constructs "analytical statics" and "analytical dynamics (part one & part two)", this textbook provides four forewords (readers and learners can deepen understanding of the contents and concepts of those parts).

Some mechanics concepts (such as: power, particle, rigid body, etc.), the description of particle motion (reference system, displacement vector, the equations of motion, displacement, velocity, acceleration), circular motion (plane polar coordinates, circular motion angular velocity, circular motion tangential acceleration and normal acceleration, angular acceleration, uniform circular motion and uniformly varying velocity circular motion), and the fundamental equations of particle dynamics, have been elaborated in college physics, this textbook will be as far as possible not repeat. This textbook carries out "reducing burden" and "fewer but better" to avoid the students tired of repeating contents.

主要符号表

a	加速度
a_t	切向加速度
a_n	法向加速度
a_a	绝对加速度
a_r	相对加速度
a_e	牵连加速度
a_c	哥氏加速度
f	动摩擦系数
f_s	静摩擦系数
F	力, 绳索拉力 (原符号为 T 或 S)
F_R 或 F	合力 (原符号为 R)
F_N 或 F	法向反力 (原符号为 N)
F_i	惯性力
F_{Ax}, F_{Ay}	A 处铰支座反力
I	冲量 (原符号为 S)
J	转动惯量 (原符号为 I)
L	动量矩
m	质量
M	力偶矩、力矩
$M_O(F)$	力 F 点对 O 的力矩
M_{iO}	惯性力对点 O 之矩
p	动量 (原符号为 K)
P	功率 (原符号为 N)
P 或 W	重量
S	面积
T	动能
v	速度
V	势力, 体积
W	功
ω	角速度
α	角加速度 (原符号为 ε)
η	效率

注: 以上符号均为 GB 3100—93, GB 3101—93 和 GB 3102—93 中规定的符号

X, Y, Z 力 F 在 x, y, z 坐标轴上的投影

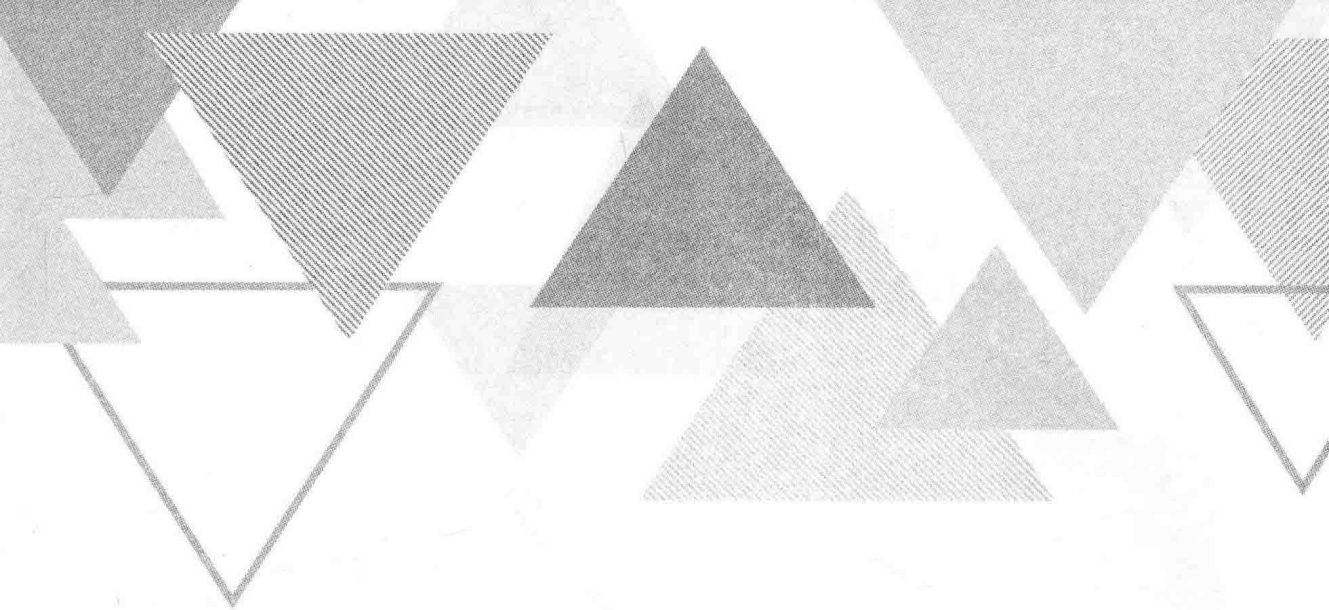


第一篇	几何静力学	1
“几何静力学”引言（论静力学公理与牛顿定律关系）		3
第一章 受力分析		4
第一节	牛顿第一定律	4
第二节	牛顿第三定律（作用与反作用定律）	6
第三节	受力分析的几种基本类型	6
习 题		14
第二章 基本力系		18
第一节	平面汇交力系	18
第二节	空间汇交力系	26
第三节	平面力偶系	29
第四节	空间力偶系	33
第五节	力 矩	36
第六节	力系化简	40
习 题		44
第三章 平面任意力系		55
第一节	平面力系力学模型	55
第二节	平面任意力系平衡方程	59
第三节	平面平行力系的平衡方程	64
第四节	静定与静不定问题	65
第五节	物体系的平衡	65
第六节	桁 架	70
习 题		73
第四章 空间任意力系		87
第一节	空间任意力系的平衡方程	87
第二节	空间约束的类型举例	87
第三节	空间力系平衡问题举例	89
第四节	重 心	92
第五节	重心坐标公式	93
第六节	物体重心的求法	95
习 题		99

第五章 摩 擦	107
第一节 滑动摩擦	107
第二节 摩擦角和自锁现象	109
第三节 考虑摩擦时物体的平衡问题	111
第四节 摩擦圆	117
第五节 滚动摩擦	119
习 题	121
第二篇 运动学	129
“运动学”引言	131
第六章 刚体的基本运动	132
第一节 刚体的平移	132
第二节 刚体绕定轴转动	133
第三节 转动刚体上各点的速度和加速度	137
第四节 定轴轮系的传动比	140
习 题	144
第七章 点的合成运动	147
第一节 点的合成运动的概念	147
第二节 点的速度合成定理	148
第三节 牵连运动为平移时点的加速度合成定理	151
第四节 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	154
习 题	160
第八章 刚体的平面运动	165
第一节 刚体平面运动概述	165
第二节 平面运动分解为平移与转动	165
第三节 平面图形上各点的速度	166
第四节 平面图形上各点的加速度	172
习 题	173
第三篇 动力学基本定理	179
“动力学基本定理”引言	181
第九章 动量定理	182
第一节 动量和冲量	182
第二节 质点动量定理	183
第三节 质点系动量定理	185
第四节 质心运动定理	189
第五节 变质量质点的运动	194
习 题	196
第十章 动量矩定理	201
第一节 质点动量矩定理	201

第二节	质点系动量矩定理	204
第三节	刚体绕定轴转动微分方程	209
第四节	转动惯量	212
第五节	相对于质心的动量矩定理	218
第六节	刚体平面运动微分方程	220
习 题		221
第十一章	动能定理	226
第一节	力的功	226
第二节	质点动能定理	229
第三节	质点系动能定理	232
第四节	功率和功率方程	239
第五节	势力场、势能、机械能守恒定律	243
习 题		246
第四篇	分析力学	255
“分析力学”引言		257
第十二章	分析静力学(虚位移原理)	259
第一节	虚位移和虚功	259
第二节	理想约束	261
第三节	虚位移原理	262
第四节	分析静力学的应用举例	264
第五节	广义坐标、广义力	267
第六节	以广义坐标表示的质点系的平衡条件	270
习 题		272
第十三章	分析动力学(一)(达朗贝尔原理及动静法)	277
第一节	惯性力的概念	277
第二节	质点的达朗贝尔原理	279
第三节	质点系达朗贝尔原理	282
第四节	刚体惯性力系的简化	285
第五节	刚体对任意轴的转动惯量、惯性积、惯性主轴	292
第六节	刚体绕固定轴转动及轴承的附加动反力	296
习 题		301
第十四章	分析动力学(二)(动力学普遍方程及拉格朗日方程)	309
第一节	动力学普遍方程	309
第二节	拉格朗日方程	312
第三节	拉格朗日方程应用举例	315
习 题		320
第五篇	当代应用力学基础综合作业	323
第十五章	当代应用力学基础综合作业	325

第一节	综合作业例题	325
第二节	考研试题	330
第三节	模拟工程实际习题	335
第四节	综合作业题解	346
第六篇	专 题	401
第十六章 碰 撞		403
第一节	碰撞现象、碰撞力	403
第二节	物体对固定面的碰撞（两物体的对心正碰撞）	404
第三节	碰撞过程中动能的损失	410
第四节	碰撞时转动刚体角速度的改变、撞击中心	413
习 题		416
第十七章 振 动		419
第一节	工程中的振动问题	419
第二节	单自由度系统的自由振动	420
第三节	角振动	428
第四节	能量法	429
第五节	瑞利法	431
第六节	阻尼对自由振动的影响	433
第七节	单自由度系统的受迫振动	437
第八节	阻尼对受迫振动的影响	443
第九节	减振与隔振	447
习 题		450
部分习题答案		455



第一篇

几何静力学

“几何静力学”引言

(论静力学公理与牛顿定律关系)

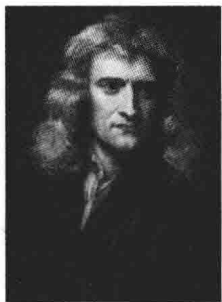
静力学公理:

公理1 力的平行四边形法则;

公理2 二力平衡定理;

公理3 加减平衡力系定理;

公理4 作用和反作用定律。



艾萨克·牛顿 (1643—1727)

杰出的英国学者, 经典力学的奠基人。他的不朽巨著《自然哲学的数学原理》总结了前人和自己关于力学方面的研究成果, 其中含有三条运动定律 (即著名的牛顿定律) 和万有引力定律。

静力学公理是人们从最古老的年代、在长期的生活和生产实践中总结概括出来的。这些公理简单而明显, 无须证明而为大家所公认。1687年, 英国学者艾萨克·牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中, 阐述了经典力学的基本定律 (简称牛顿定律), 完备地建立了经典力学体系。

公理1“力的平行四边形法则”被列为牛顿定律的第一推论; 公理4“作用和反作用定律”被列为牛顿第三定律。

至于公理2和公理3, 显然属于牛顿第一定律的推论。牛顿第一定律原文: “LAW I Every body continues in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impressed upon it.” 译文: “任何一个物体都保持静止或匀速直线运动的状态, 除非物体受力的作用被迫改变这种状态。”

牛顿第一定律的前一句话揭示了物体的惯性运动中的平衡状态^①, 后一句话说的是平衡状态的充要条件——不受力, 即所有力作用效果总和为零。

如果把地球近似地视为惯性参考系, 对地球上的物体进行受力和受力计算时, 牛顿第一定律表述为: 物体处于平衡状态的必要和充分条件是, 作用于物体 (质点或刚体) 上所有力作用效果总和为零。

故, 根据牛顿第一定律, 毋庸置疑, 可推出公理2和公理3。

牛顿第一定律除了上述两个推论以外, 还建立了力系平衡的理论依据。

据此, 当代应用力学的静力学理论基础将不再是静力学公理, 而是牛顿定律。

拉普拉斯说: 牛顿“揭示了宇宙的最伟大定律”。爱因斯坦说: “至今还没有可能用一个同样无所不包的统一概念来代替牛顿的关于一切物体运动现象和规律的概念。”

静力学公理应为牛顿定律所代替;

结束了漫长的静力学公理年代;

牛顿定律奠定了静力学的理论基础;

牛顿第一定律建立了力系平衡的理论依据。

^① 作者原话是“牛顿第一定律的前一句话揭示了物体的平衡状态”, 后经资深教授韩二中改为“揭示了物体的惯性运动中的平衡状态”。

第一章

受力分析

静力学是研究物体相对地面保持静止或作匀速直线平行移动（简称平移）受力计算的科学，受力计算首先要进行受力分析。

第一节

牛顿第一定律

大家知道，在地球上，有许多物体相对地面是保持静止的（如桥梁、厂房、未运转的机器等）；有些物体相对地面保持匀速直线平移运动（如直线轨道上匀速行驶的列车）；有些物体运行的加速度极其微小（如吊车慢速起吊重物），则可近似视为相对地面保持静止或匀速直线平移运动。

这样，在工程实际中，相对地面保持静止或匀速直线平移运动的物体是大量存在的。当研究这些物体的受力分析与受力计算时，首先依据的是牛顿第一定律。

牛顿第一定律原文：“LAW I Every body continues in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impressed upon it.” 译文：“任何一个物体都保持静止或匀速直线运动的状态，除非物体受力的作用被迫改变这种状态。” 牛顿第一定律的前一句话揭示了物体的惯性运动中的平衡状态，后一句话说的是平衡状态的充要条件——不受力，即所有力作用效果总和为零。

如果把地球近似地视为惯性参考系，对地球上的物体进行受力分析和受力计算时，牛顿第一定律表述如下：物体处于平衡状态的必要和充分条件是，作用于物体（质点或刚体）上所有力作用效果总和为零。

下面通过一个具体实例，对牛顿第一定律阐述的概念加以理解。假定用手推动放在直线轨道上的小车而使之移动，当手离开小车，小车的移动速度就逐渐减慢，最后停止。如果希望小车保持匀速运动，就必须继续施加一向前的力，以克服轨道对小车存在的摩擦力及空气阻力的作用。如果所加的力恰好与摩擦及空气阻力相抵消，则小车将继续匀速运动下去。换言之，牛顿第一定律应该包含这样的意思：当作用在小车（刚体）上的所有力作用效果总和为零，就相当于没有任何力的作用。这样，小车开始时静止或匀速直线运动，则小车将继续保持静止或匀速直线运动。小车保持平衡，则作用在小车上的所有力作用效果总和必等于零；作用在小车上的所有力作用效果总和为零，则小车必处于平衡。

这样，从牛顿第一定律出发，推得以下结论。

1. 二力平衡定理（牛顿第一定律第一推论）

作用在物体上的两个力使物体处于平衡状态的必要和充分条件是，这两个力大小相等、方向相反，并沿同一直线作用（如图1-1所示）。

事实上,物体在两个力作用下处于平衡状态,则根据牛顿第一定律,两个力的作用效果总和必等于零,即只有两力等值、反向且沿同一直线作用,其作用效果才等于零;反之,如果作用在物体上的两个力等值、反向且沿同一直线作用,则根据力的矢量合成法则,两个共线力的合力等于零,即两个力作用效果为零,故物体必处于平衡状态。

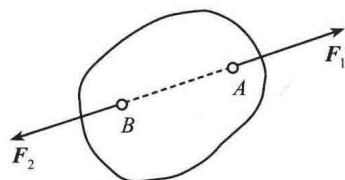


图 1-1

二力平衡定理在物体受力分析上的应用较多。

2. 加减平衡力系定理 (牛顿第一定律第二推论)

在已知力系上加上或减去任意平衡力系,并不改变原力系对物体的作用。

作用在物体上的一群力称为力系。如果一个力系作用在物体上,使物体处于平衡状态,则这个力系称为平衡力系。

事实上,由于平衡力系的作用效果等于零,故根据牛顿第一定律,平衡力系并不能改变物体原来的平衡状态。

推理 1 三力平衡汇交定理

当物体受三个力作用而平衡时,设其中任何两力的作用线相交于某点,则第三个力的作用线也必通过这个点。

证明 设在物体上的点 A_1 , A_2 与 A_3 分别作用互成平衡的三个力 F_1 , F_2 与 F_3 (见图 1-2)。已知力 F_1 与 F_2 的作用线相交于某点 O , 这两个力的合力 F_R 也应与 F_3 平衡, 根据二力平衡定理, 两力平衡必共线, 即 F_3 与 F_R 的作用线重合, 所以, 力 F_3 的作用线必通过点 O 。

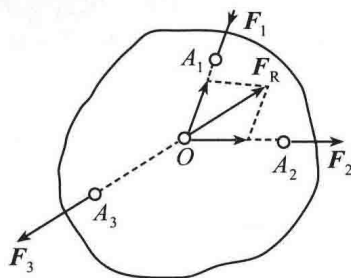


图 1-2

推理 2 力的可传性

作用于刚体上某点的力, 可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点, 并不改变该力对刚体的作用。

证明 设有力 F 作用在刚体上的点 A , 如图 1-3(a) 所示。根据加减平衡力系定理, 可在力的作用线上任取一点 B , 并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 , 使 $F = F_2 = -F_1$, 如图 1-3(b) 所示。由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系, 故可除去; 这样, 只剩下一个力 F_2 , 如图 1-3(c) 所示。于是, 原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 及力 F_2 互等。而力 F_2 就是原来的力 F , 只是作用点已移到了点 B 。

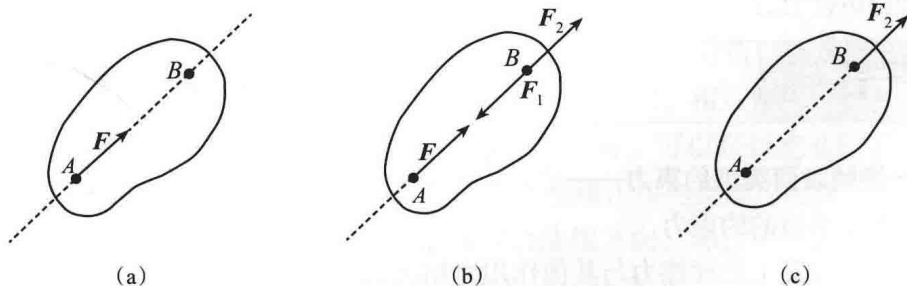


图 1-3

由此可见, 对于刚体来说, 力的作用点已不是决定力的作用效果的要素, 它已为作用线所代替。因此, 作用于刚体上的力的三要素是: 力的大小、方向和作用线。