

普通高等教育“十二五”规划教材

理论力学

Theoretical Mechanics

张功学 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014057314

031-43
93

普通高等教育“十二五”规划教材

理论力学

张功学 主编

陈继生 王永琴 张艳华 参编



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1742834

031-43

93

内 容 简 介

本套教材包括《理论力学》主教材、相配套的多媒体课堂教学课件及规范化练习册。

本教材依据“高等学校工科非力学专业力学基础课程教学基本要求”,考虑到机械大类应用型本科生源的实际情况,在保证体系基本完整的前提下,广泛涉及诸多工程实际,注重学生工程应用能力的培养。

全书包含静力学、运动学、动力学三篇共 14 章内容。静力学部分包含静力学基础、平面基本力系、平面任意力系、空间力系 4 章内容,运动学包含运动学基础、点的合成运动、刚体平面运动 3 章内容,动力学包含质点动力学、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理、虚位移原理、机械振动基础 7 章内容。每章后均配有相应的思考题、练习题及答案。推荐学时数为 56~72 学时。

本教材适合应用型本科机械、包装、土木、航空、航天、装备、制造、地质、采矿、冶金、材料加工专业学生学习之用。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 张功学主编. —北京: 国防工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-118-09410-7

I. ①理… II. ①张… III. ①理论力学 IV. ①031

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 187291 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19³/₄ 字数 486 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 37.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前言 PREFACE

“理论力学”是高等院校机械、包装、土木、航空、航天、装备、制造、地质、采矿、冶金、材料等专业本科生开设的一门技术基础课,是材料力学、机械原理、机械设计等课程的重要理论基础。本教材考虑到当前应用型本科的生源特点和实际情况,依据“高等学校工科非力学专业力学基础课程教学基本要求”,结合编者近 30 年的教学经验编写而成,可满足 56 ~ 72 学时的“理论力学”课程教学需求。

本教材共包含静力学、运动学、动力学三篇内容。静力学以力系分类为主线索,采用由平面到空间、由易到难的编排原则编写;运动学简化了基础内容,强调了点的合成运动与刚体平面运动;动力学简化了动力学基础,强调动力学综合应用、达朗贝尔原理与虚位移原理,以满足工程应用为出发点,介绍了机械振动基础。

参加本教材编写工作的有陕西科技大学张功学、陈继生教授,王永琴、张艳华讲师。张功学任主编,全书由张功学负责统稿。其中,张功学编写绪论及第 5 ~ 7 章和第 14 章;王永琴编写第 1 ~ 4 章;陈继生编写第 8 ~ 11 章;张艳华编写第 12、13 章。

陕西科技大学侯东生教授详细审阅了本书,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误与疏漏之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

主编张功学 E-mail: zhanggx@ sust. edu. cn

编者
2014 年 7 月

元素周期表

(根据国际纯粹与应用化学联合会2013年5月1日发布的元素周期表改编)

1

H 氢

hydrogen

[1.007, 1.009]

2

3

Li 锂

lithium

[6.938, 6.997]

4

11

Na 钠

sodium

22.99

12

19

K 钾

potassium

39.10

20

37

Rb 铷

rubidium

85.47

38

55

Cs 铯

caesium

132.9

56

87

Fr 钫

francium

88

4

Be 铍

beryllium

9.012

5

12

Mg 镁

magnesium

[24.30, 24.31]

13

20

Ca 钙

calcium

40.08

21

38

Sr 锶

strontium

87.62

39

56

Ba 钡

barium

137.3

57-71

88

Ra 镭

radium

89-103

21

Sc 钪

scandium

44.96

22

39

Y 钇

yttrium

88.91

40

57-71

镧系

lanthanoids

72

89-103

锕系

actinoids

104

22

Ti 钛

titanium

47.87

23

40

Zr 锆

zirconium

91.22

41

72

Hf 铪

hafnium

178.5

104

23

V 钒

vanadium

50.94

24

41

Nb 铌

niobium

92.91

42

73

Ta 钽

tantalum

180.9

105

24

Cr 铬

chromium

52.00

25

42

Mo 钼

molybdenum

95.96(2)

43

74

W 钨

tungsten

183.8

106

25

Mn 锰

manganese

54.94

26

43

Tc 锝

technetium

44

75

Re 铼

rhenium

186.2

107

26

Fe 铁

iron

55.85

27

44

Ru 钌

ruthenium

101.1

45

76

Os 锇

osmium

190.2

108

27

Co 钴

cobalt

58.93

28

45

Rh 铑

rhodium

102.9

46

77

Ir 铱

iridium

192.2

109

28

Ni 镍

nickel

58.69

29

46

Pd 钯

palladium

106.4

47

78

Pt 铂

platinum

195.1

110

29

Cu 铜

copper

63.55

30

47

Ag 银

silver

107.9

48

79

Au 金

gold

197.0

111

30

Zn 锌

zinc

65.38(2)

31

48

Cd 镉

cadmium

112.4

49

80

Hg 汞

mercury

200.6

112

5

B 硼

boron

[10.80, 10.83]

6

13

Al 铝

aluminium

26.98

14

31

Ga 镓

gallium

69.72

32

49

In 铟

indium

114.8

50

81

Tl 铊

thallium

[204.3, 204.4]

82

6

C 碳

carbon

[12.00, 12.02]

7

14

Si 硅

silicon

[28.08, 28.09]

15

32

Ge 锗

germanium

72.63

33

50

Sn 锡

tin

118.7

51

82

Pb 铅

lead

207.2

114

7

N 氮

nitrogen

[14.00, 14.01]

8

15

P 磷

phosphorus

30.97

16

33

As 砷

arsenic

74.92

34

51

Sb 锑

antimony

121.8

52

83

Bi 铋

bismuth

209.0

116

8

O 氧

oxygen

[15.99, 16.00]

9

16

S 硫

sulfur

[32.05, 32.08]

17

34

Se 硒

selenium

78.96(3)

35

52

Te 碲

tellurium

127.6

53

84

Po 钋

polonium

116

9

F 氟

fluorine

19.00

10

17

Cl 氯

chlorine

[35.44, 35.46]

18

35

Br 溴

bromine

[79.90, 79.91]

36

53

I 碘

iodine

126.9

54

85

At 砹

astatine

116

10

Ne 氖

neon

20.18

11

18

Ar 氩

argon

39.95

19

36

Kr 氪

krypton

83.80

37

54

Xe 氙

xenon

131.3

55

86

Rn 氡

radon

116

13

B 硼

boron

[10.80, 10.83]

14

31

Ga 镓

gallium

69.72

32

49

In 铟

indium

114.8

50

81

Tl 铊

thallium

[204.3, 204.4]

82

14

Si 硅

silicon

[28.08, 28.09]

15

32

Ge 锗

germanium

72.63

33

50

Sn 锡

tin

118.7

51

82

Pb 铅

lead

207.2

114

15

P 磷

phosphorus

30.97

16

33

As 砷

arsenic

74.92

34

51

Sb 锑

antimony

121.8

52

83

Bi 铋

bismuth

209.0

116

16

S 硫

sulfur

[32.05, 32.08]

17

34

Se 硒

selenium

78.96(3)

35

52

Te 碲

tellurium

127.6

53

84

Po 钋

polonium

116

17

Cl 氯

chlorine

[35.44, 35.46]

18

35

Br 溴

bromine

[79.90, 79.91]

36

53

I 碘

iodine

126.9

54

85

At 砹

astatine

116

18

Ar 氩

argon

39.95

19

36

Kr 氪

krypton

83.80

37

54

Xe 氙

xenon

131.3

55

86

Rn 氡

radon

116

57

La 镧

lanthanum

138.9

58

59

Pr 镨

praseodymium

140.9

60

61

Pm 钷

promethium

62

63

Eu 铕

europium

152.0

64

65

Tb 铽

terbium

158.9

66

67

Dy 镝

dysprosium

162.5

68

69

Ho 钬

holmium

164.9

70

71

Lu 镥

lutetium

175.0

72

89

Ac 锕

actinium

232.0

90

91

Pa 镤

protactinium

231.0

92

93

Np 镎

neptunium

238.0

94

95

Am 镅

americium

96

97

Bk 锫

berkelium

98

99

Es 镅

einsteinium

100

101

Fm 镆

fermium

102

103

Lr 铹

lawrencium

104

4

Be 铍

beryllium

9.012

原子序数

元素中文名称

元素英文名称

元素符号

标准原子质量*

注:

*: 标准原子质量取4位有效数字。末位的不确定度标注于圆括号内; 无圆括号标注的不确定度为最后一位数字; 方括号内标注为该元素标准原子质量的上限和下限范围。

绪论

1

第一篇 静力学

第一章

第一章 静力学的基本概念与物体的受力分析 5

第一节	静力学的基本概念	5
第二节	静力学公理	6
第三节	约束与约束反力	9
第四节	物体的受力分析与受力图	13
思考题		16
习题		17

第二章

第二章 平面基本力系 19

第一节	平面汇交力系合成与平衡的几何法	19
第二节	平面汇交力系合成与平衡的解析法	21
第三节	平面力对点之矩	25
第四节	平面力偶理论	28
思考题		31
习题		32

第三章

第三章 平面任意力系 37

第一节	力的平移定理	37
第二节	平面任意力系的简化	38
第三节	平面任意力系的平衡条件与平衡方程	42
第四节	物体系统的平衡·静定与静不定问题	48

第五节	简单平面桁架	55
第六节	摩擦及其平衡问题	58
思考题		65
习题		66

第四章

第四章	空间力系	73
-----	------	----

第一节	力沿空间直角坐标轴的分解与投影	73
第二节	力对点之矩·力对轴之矩与空间力偶矩矢	74
第三节	空间力系的简化	78
第四节	空间力系的平衡	80
第五节	平行力系的中心与物体的重心	85
思考题		90
习题		90

第二篇 运动学

第五章

第五章	运动学基础	97
-----	-------	----

第一节	点的运动学	97
第二节	刚体的平行移动	105
第三节	刚体的定轴转动	106
思考题		112
习题		113

第六章

第六章	点的合成运动	118
-----	--------	-----

第一节	相对运动·牵连运动·绝对运动	118
第二节	点的速度合成定理	120
第三节	牵连运动为平动时点的加速度合成定理	123
第四节	牵连运动为转动时点的加速度合成定理及科氏加速度	126
思考题		133
习题		134

第七章

第七章 刚体平面运动

139

第一节	刚体平面运动概述与运动分解	139
第二节	平面图形上各点的速度分析	141
第三节	用基点法求平面图形内各点的加速度	147
第四节	运动学知识综合应用	154
思考题		159
习题		160

第三篇 动力学

第八章

第八章 质点动力学

167

第一节	动力学基本定律	167
第二节	质点运动微分方程	168
思考题		173
习题		173

第九章

第九章 动量定理

175

第一节	动量和冲量	175
第二节	动量定理	177
第三节	质心运动定理及质心运动守恒定律	181
思考题		184
习题		185

第十章

第十章 动量矩定理

187

第一节	动量矩的计算	187
第二节	动量矩定理	189

第三节	刚体对轴的转动惯量	193
第四节	刚体定轴转动微分方程	197
第五节	刚体平面运动微分方程	198
思考题		203
习题		204

第十一章

第十一章	动能定理	208
------	------	-----

第一节	功与功率	208
第二节	动能的计算	213
第三节	动能定理	215
第四节	势能及机械能守恒定律	223
第五节	动力学普遍定理的综合应用	224
思考题		229
习题		230

第十二章

第十二章	达朗贝尔原理(动静法)	233
------	-------------	-----

第一节	达朗贝尔原理	233
第二节	惯性力系的简化	236
第三节	刚体绕定轴转动时轴承的动约束力	242
思考题		245
习题		245

第十三章

第十三章	虚位移原理(静动法)	249
------	------------	-----

第一节	约束·自由度与广义坐标	249
第二节	虚位移与理想约束	251
第三节	虚位移原理	254
思考题		259
习题		260

第十四章

第十四章 机械振动基础

263

第一节	单自由度系统的自由振动	263
第二节	单自由度系统的有阻尼自由振动	269
第三节	单自由度系统的受迫振动	273
第四节	隔振	279
第五节	两个自由度系统自由振动	282
第六节	两个自由度系统的受迫振动·动力消振器	288
思考题		291
习题		291

习题
答案

习题答案

295

参考
文献

参考文献

306

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科学。

所谓**机械运动**,是指物体在空间的位置随时间而发生的变化。机械运动是人们日常生活和生产实践中最常见、最简单的一种运动。平衡是机械运动的特殊情况。

本课程的研究对象是速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于经典力学的范畴。至于速度接近于光速物体的运动和基本粒子的运动,需要用相对论和量子力学的观点予以完善解释。

掌握物体机械运动的普遍规律,不仅能够解释许多发生在我们周围的机械运动现象,而且理论力学的定律和结论还能广泛应用于工程技术之中。机械、建筑结构的设计、航空航天技术等,都以本学科的理论为基础。

本书的研究内容分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学主要研究物体的平衡,包括物体的受力分析,力系的简化,物体的平衡条件等问题;运动学是从几何角度研究物体的运动(如轨迹、速度、加速度等),而不考虑引起物体运动的物理原因;动力学研究物体的运动与其受力之间的关系。

二、理论力学的研究方法手段

科学研究的过程,就是认识客观世界的过程。理论力学的研究方法符合辩证唯物主义认识论的“实践→认识→再实践”的循环发展过程。

观察和实验是理论发展的基础。通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行无数次的科学实验,经过分析、综合和归纳,总结出力学最基本的概念和定律。如力、力矩、加速度等概念,摩擦定律、动力学三大定律等都是在大量实践和实验的基础上经分析、综合和归纳而得到的。

通过抽象化建立力学模型。客观事物总是复杂多样的,当我们在实践中获得大量资料之后,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。这就是力学中普遍采用的抽象化方法。例如,在研究物体机械运动时,撇开物体的变形就得到**刚体**的模型;在另一些问题中撇开物体的大小和形状就得到**质点**的模型等。一个物体究竟应该作为质点还是作为刚体来看待,主要取决于所讨论问题的性质,而不取决于物体本身的大小和形状。例如机器上的零件,尽管尺寸不大,当要研究它的转动时,就必须将其视为刚体。一列火车虽然很长,但当我们考察其沿铁路运行的距离、速度、加速度时,可将其视为质点。即使同一个物体,在不同问题中有时可视为质点,有时则可视为刚体。如研究地球的自转时可将其视为刚体,研究地球绕太阳的公转时可将其视为质点。

在建立力学模型的基础上,从基本定律出发,用数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的

具有理论意义和实用价值的定理和结论,在更高水平上指导实践,推动生产的发展。

辩证唯物主义的认识论是:从实践到理论,再由理论到实践,通过实践进一步补充和发展理论,然后再回到实践,如此循环往复,每一个循环都在原有的基础上提高一步。理论力学与所有其他科学一样,也是沿着这条道路不断向前发展的。

●三、理论力学的学习目的与方法

理论力学研究的是物体机械运动的一般规律,是一门理论性较强的技术基础课。

运用理论力学知识,可以直接解决许多工程中有关机械运动的问题,对于一些比较复杂的工程问题,则需要综合运用理论力学和其它专门知识共同解决。

理论力学是工科专业一系列后续课程的重要基础,如材料力学、机械原理、机械设计、结构力学、弹塑性力学、流体力学、振动学、断裂力学等都要以理论力学为基础。

理论力学课程的系统性和实践性较强,学习过程中不仅要掌握基本概念,领会公式推导的依据、物理意义、应用条件、适用范围,还要重视分析问题与解决问题的方法,善于抓住工程问题的本质,建立合理的力学模型,培养抽象和逻辑思维能力,培养综合分析和创新能力,为今后解决工程实际问题,从事科学研究打下坚实的基础。

第一篇 静力学

引言

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学,主要研究以下三个问题:

1. 物体的受力分析

分析物体共受几个力作用,每个力的作用位置及其方向。

2. 力系的简化

所谓力系,是指作用在物体上的一群力。如果作用在物体上两个力系的作用效果是相同的,则这两个力系互称为等效力系。用一个简单力系等效地替换一个复杂力系的过程称为力系的简化。力系简化的目的是简化物体受力,以便于进一步分析和研究。

3. 建立各种力系的平衡条件

刚体处于平衡状态时,作用于刚体上的力系应该满足的条件,称为力系的平衡条件。满足平衡条件的力系称为平衡力系。力系平衡条件在工程中有着特别重要的意义,是设计结构、构件和零件的力学基础。

第一章

静力学的基本概念与物体的受力分析

第一节 静力学的基本概念

一、力的概念及其分类

力是人们从长期生产实践中经抽象而得到的一个科学概念。例如,当人们用手推、举、抓、掷物体时,由于肌肉伸缩逐渐产生了对力的感性认识。随着生产的发展,人们逐渐认识到,物体运动状态及形状的改变,都是由于其它物体对其施加作用的结果。这样,由感性到理性建立了力的概念:力是物体间相互的机械作用,其作用效果是使物体运动状态或形状发生改变。

实践表明力的效应有两种,一种是使物体运动状态发生改变,称为力对物体的外效应;另一种是使物体形状发生改变,称为力对物体的内效应。在静力学部分将物体视为刚体,只考虑其外效应;而在材料力学课程中则将物体视为变形体,需考虑力的内效应。

力是物体间相互的机械作用,力不能脱离物体而独立存在。在分析物体受力时,必须注意物体间的相互作用关系,分清施力体与受力体。否则,就不能正确地分析物体的受力情况。

由经验可知,力对物体的作用效果取决于三个要素:力的大小、方向、作用点。此即称为力的三要素。在国际单位制(SI)中以牛顿(N)作为力的计量单位,有时也用千牛顿(kN),其关系为:1 kN = 1000N。

力的三要素可用一个矢量来表示(图1-1)。矢量长度按照一定比例表示力的大小;矢量方向为力的作用方向;矢量的起始端或末端为力的作用点(图1-1中的A、B点)。本书用粗体字母 $\boldsymbol{F}$ 表示力矢量,而用普通字母 F 表示力的大小。

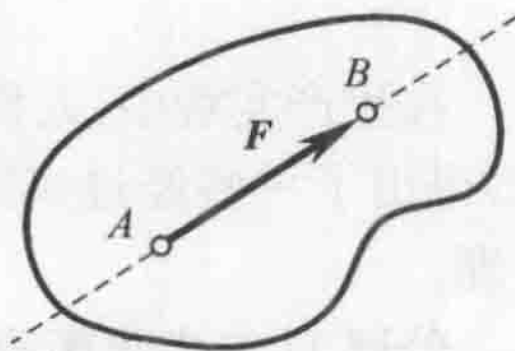


图 1-1

依据力的作用范围可将力分为集中力和分布力:

集中力(集中载荷):当力的作用面面积相对于结构或构件尺寸很小时,可视为作用于结构或构件上的某一点,称其为集中力。

分布力(分布载荷):分布于物体上某一范围内的力称为分布力。分布力用载荷集度 q 来

表示。在一定体积范围内分布的力称为体分布力,其单位为牛/米³(N/m^3);在一定面积范围内分布的力称为面分布力,其单位为牛/米²(N/m^2)。工程设计中,常将体、面分布力简化为连续分布在某一段长度范围内的力,称为线分布力,其单位为牛/米(N/m)。

作用在物体上的一群力称为力系。依据力系中各力作用线是否在同一平面内,可将力系分为空间力系和平面力系;依据力系中各力作用线是否相交或平行,又可将力系分为汇交力系、平行力系与任意力系。汇交力系、平行力系是任意力系的特殊情形。

二、刚体、质点、质点系

所谓刚体,是指在任何力作用下都不发生变形的物体,其表现特征为内部任意两点之间的距离始终保持不变。宇宙中并无刚体存在,刚体是一种理想化的力学模型。这种模型使问题的研究得以简化,静力学中所研究的物体都是刚体,所以静力学又称为刚体静力学。

应该指出,是否将所研究的物体抽象为刚体,取决于所研究问题的内容和条件。当变形这一因素在所研究的问题中不起主要作用时,可将物体视为刚体;当变形这一因素在所研究的问题中起主要作用时,就必须用另一种模型——变形体来代替。变形体力学问题将在材料力学课程中研究。

所谓质点,是指具有一定质量而其形状大小可以忽略不计的物体。是否可将所研究的物体视为质点,亦取决于所研究问题的内容与条件。在研究行星绕太阳的运动时,行星虽然很大,但比起它的运动范围来说是很小的,可将其视为质点;而在研究行星的自转时,就不能将其视为质点了。

所谓质点系,是指由有限个或无限个有一定联系的质点组成的质点系统。若质点系中各质点的距离保持不变,这种质点系称为不变质点系。刚体就是由无限个质点组成的不变质点系。由若干个有一定联系的刚体组成的系统称为物体系统(简称为物系)。

三、平衡

所谓平衡是指物体相对于惯性参考系(通常取为固结在地球表面的参考系)保持静止或作匀速直线运动的状态。地面上的各种建筑物、桥梁、机床的床身、作匀速直线飞行的飞机等都处于平衡状态。平衡是物体运动的一种特殊形式。

若物体在一个力系作用下处于平衡状态,该力系称为平衡力系,该力系中任意一力对其余力来说都称为平衡力。

第二节 静力学公理

在生产实践中,人们对物体的受力进行了长期观察和实验,对力的性质进行了概括和总结,得出了一些经过实践检验是正确的、大家都承认的、无须证明的正确理论,这就是静力学公理。

公理1(二力平衡原理)作用在刚体上的两个力,使刚体保持平衡的充分必要条件是:两力大小相等,方向相反,作用在同一直线上(图1-2)。或者说二力等值、反向、共线。

此公理阐明了由两个力组成的最简单力系的平衡条件,是一切力系平衡的基础。此公理只适用于刚体,对于变形体来说,它只给出了必要条件,而非充分条件。

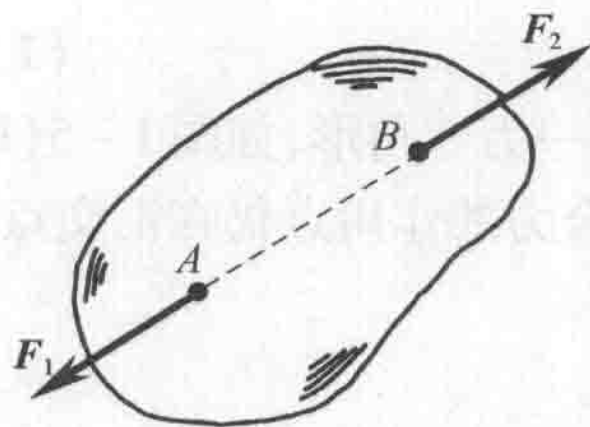
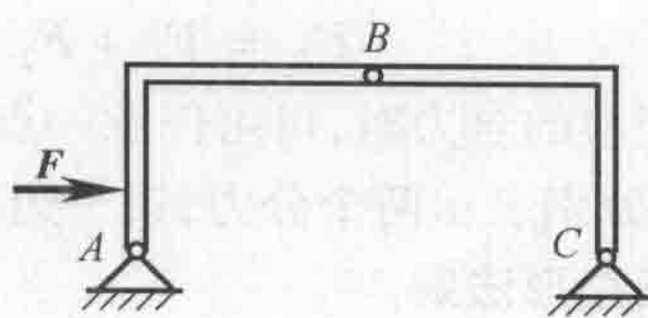
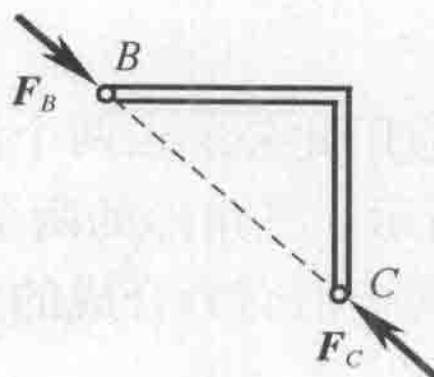


图 1-2



(a)



(b)

图 1-3

工程中经常遇到不计自重,且只在两点处各受一个集中力作用而处于平衡状态的刚体。这种只在两个力作用下处于平衡状态的刚体,称为二力构件(二力杆)。二力构件的形状可以是直线形的,也可以是其它任何形状的,图 1-3 中的 BC 杆即为一二力构件。作用于二力构件上的两个力必然等值、反向、共线。在结构中找到二力构件,对整个结构系统的受力分析是至关重要的。

公理 2(加减平衡力系原理) 在已知力系上,加上或减去任意平衡力系,不改变原力系对刚体的作用效果。

也就是说,如果两个力系只相差一个或几个平衡力系,它们对刚体的作用效果相同。此公理是力系简化的基础。

推论 1(力的可传性定理) 作用于刚体某点上的力,其作用点可以沿其作用线移动到刚体内任意一点,不改变原力对刚体的作用效果。

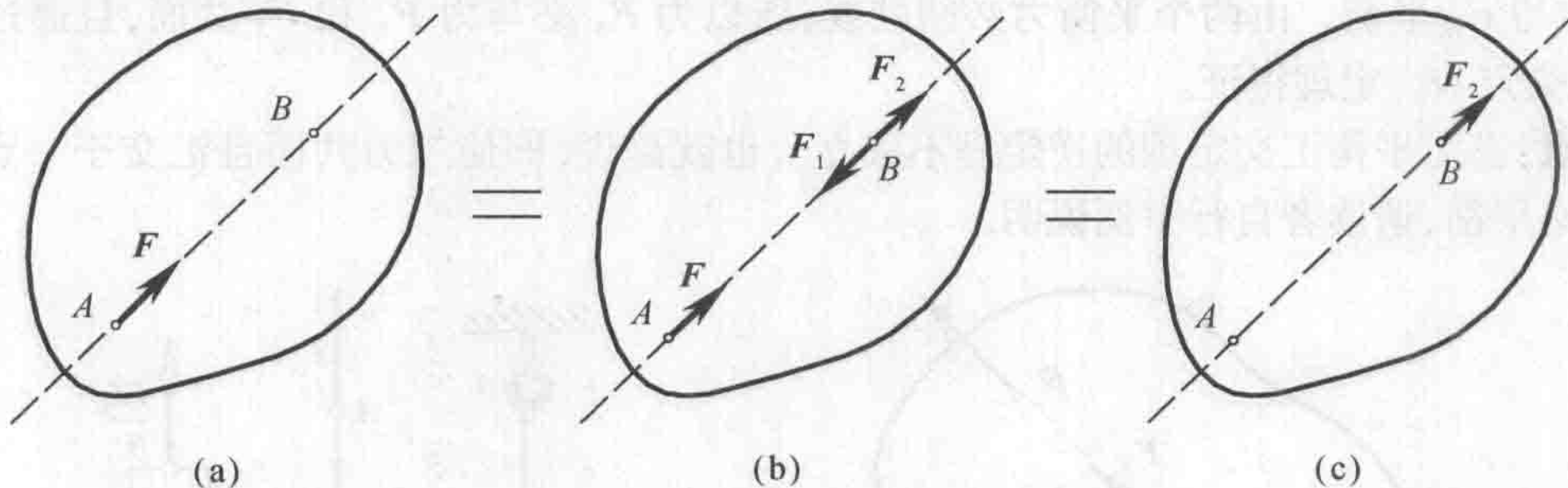


图 1-4

证明: 设一力 F 作用于刚体上的 A 点,如图 1-4(a) 所示。根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B ,加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_1 = F_2$,如图 1-4(b) 所示。由于 F 和 F_1 构成一个新的平衡力系,故可减去,这样只剩下一个力 F_2 ,如图 1-4(c) 所示。于是原来的力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_2 互为等效力系。这样, F_2 可看成是原力 F 的作用点沿其作用线由 A 移到了 B 。

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力作用效果的要素,它已为作用线所替代。因此,作用于刚体上力的三要素是大小、方向、作用线。

公理 2 及其推论 1 只适用于刚体,不适用于变形体。对于变形体来说,作用力将产生内效应,当力沿其作用线移动时,内效应将发生改变。

公理 3(力的平行四边形法则) 作用在物体上同一点的两个力,可以合成为一个合力。合力作用点也在该点,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所决定。如图 1-5(a) 所示。或者说,合力矢等于两个分力矢的矢量和,即