



21世纪高职高专规划教材·机电系列

工程力学

韩瑞功 主编

马春荣 主审



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

工程力学

第 二 版



机械工业出版社
北京

21 世纪高职高专规划教材·机电系列

工 程 力 学

韩瑞功 主编
马春荣 主审

清华大学出版社
北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在编写过程中,注意高等职业教育的特点,全面贯彻素质教育,体现“以应用为目的,以必需、够用为度”和“以素质为核心、能力为基础、技能为重点”的教学原则,注意培养学生综合能力、创新意识和基本技能。全书共分 11 章,主要内容包括静力学基础、平面汇交力系、平面任意力系、空间力系、拉伸与压缩、扭转与弯曲、强度理论和组合变形理论、压杆的稳定性、点的运动、刚体的平面运动规律和动力学基本方程等,并附有思考与习题和部分习题答案。

本书可供高等职业学院、中等职业学校、成人高等学校及本科院校举办的二级学院和民办高校机电及相关专业基础或专业教材,也可供有关人员自学参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/韩瑞功主编. — 北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2004.8

ISBN 7-81082-354-X

I. 工… II. 韩… III. 工程力学-高等学校:技术学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075818 号

责任编辑:高振宇

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686045,62237564

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×260 印张:10.25 字数:248千字

版次:2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

书号:ISBN 7-81082-354-X/TB·5

印数:1~5000册 定价:15.00元

本书编委会

主 编 韩瑞功

主 审 马春荣

副主编 孙学英 张金宝

编 委 韩瑞功 孙学英 张金宝 董 琳 杨树人

李振东 刘建新 陈桂明

21 世纪高职高专规划教材·机电系列

编审委员会成员名单

主任委员	李兰友	边奠英			
副主任委员	周学毛	崔世钢	王学彬	丁桂芝	赵伟
	韩瑞功	汪志达			
委 员	(按姓名笔画排序)				
	马 辉	万志平	万振凯	王永平	王建明
	尤晓晔	丰继林	左文忠	叶 华	叶 伟
	付晓光	付慧生	冯平安	江 中	佟立本
	刘 炜	刘建民	刘 晶	曲建民	孙培民
	邢素萍	华铨平	吕新平	陈小东	陈月波
	李长明	李 可	李志奎	李 琳	李源生
	李群明	李静东	邱希春	沈才梁	宋维堂
	汪 繁	张文明	张权范	张宝忠	张家超
	张 琦	金忠伟	林长春	林文信	罗春红
	苗长云	竺士蒙	周智仁	孟德欣	柏万里
	官国顺	柳 炜	钮 静	胡敬佩	姚 策
	赵英杰	高福成	贾建军	徐建俊	殷兆麟
	唐 健	黄 斌	章春军	曹豫莪	程 琪
	韩广峰	韩其睿	韩 劼	裘旭光	童爱红
	谢 婷	曾瑶辉	管致锦	熊锡义	潘玫玫
	薛永三	操静涛	鞠洪尧		

出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,它的根本任务是培养生产、建设、管理和服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型专门人才,所培养的学生在掌握必要的基础理论和专业知识的基础上,应重点掌握从事本专业领域实际工作的基本知识和职业技能,因而与其对应的教材也必须有自己的体系和特色。

为了适应我国高职高专教育发展及其对教学改革和教材建设的需要,在教育部的指导下,我们在全国范围内组织并成立了“21世纪高职高专教育教材研究与编审委员会”(以下简称“教材研究与编审委员会”)。“教材研究与编审委员会”的成员单位皆为教学改革成效较大、办学特色鲜明、办学实力强的高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院,其中一些学校是国家重点建设的示范性职业技术学院。

为了保证规划教材的出版质量,“教材研究与编审委员会”在全国范围内选聘“21世纪高职高专规划教材编审委员会”(以下简称“教材编审委员会”)成员和征集教材,并要求“教材编审委员会”成员和规划教材的编著者必须是从事高职高专教学第一线的优秀教师或生产第一线的专家。“教材编审委员会”组织各专业的专家、教授对所征集的教材进行评选,对列选教材进行审定。

目前,“教材研究与编审委员会”计划用2~3年的时间出版各类高职高专教材200种,范围覆盖计算机应用、电子电气、财会与管理、商务英语等专业的主要课程。此次规划教材全部按教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”编写,其中部分教材是教育部《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》的研究成果。此次规划教材编写按照突出应用性、实践性和针对性的原则编写并重组系列课程教材结构,力求反映高职高专课程和教学内容体系改革方向;反映当前教学的新内容,突出基础理论知识的应用和实践技能的培养;适应“实践的要求和岗位的需要”,不依照“学科”体系,即贴近岗位群,淡化学科;以兼顾理论和实践内容的同时,避免“全”而“深”的面面俱到,基础理论以应用为目的,以必要、够用为度;尽量体现新知识、新技术、新工艺、新方法,以利于学生综合素质的形成和科学思维方式与创新能力的培养。

此外,为了使规划教材更具广泛性、科学性、先进性和代表性,我们希望全国从事高职高专教育的院校能够积极加入到“教材研究与编审委员会”中来,推荐“教材编审委员会”成员和有特色、有创新的教材。同时,希望将教学实践中的意见与建议及时反馈给我们,以便对已出版的教材不断修订、完善,不断提高教材质量,完善教材体系,为社会奉献更多更新的与高职高专教育配套的高质量教材。

此次所有规划教材由全国重点大学出版社——清华大学出版社与北京交通大学出版社联合出版。适用于各类高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院使用。

序 言

本书是 21 世纪高职高专规划机电系列教材，是针对高职高专教育的总体要求和人才培养目标而编写的。主要内容包括静力学基础、平面汇交力系、平面任意力系、空间力系、拉伸和压缩、扭转和弯曲、强度理论和组合变形理论、压杆的稳定性、点的运动、刚体的平面运动规律和动力学基本方程等，对高职高专机电专业具有较强的针对性和适用性。本书在编写中突出了“基础理论教学要以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为教学重点”和综合训练的特色。本书对学生的动手、应用操作和创新能力的培养做了有益的探索；同时，在编写过程中，紧密联系实际发展和吸收科学技术的最新成果，积极渗透最新科学知识和尖端技术，体现高职高专的办学特色。

全书共分为 11 章，各章在重点介绍基础知识，强化能力培养，体现高职高专教育特色的同时，十分重视实践和学生实际能力的培养。除配备典型例题、不同层次的插图外，本书结合知识和能力的要求，增加了与生产实践、实际运用、工程技术、社会生活等相关的内容，特别是在例题选用上，紧紧围绕应用为目的，重在解题方法，强化实际应用能力的培养。授课时教师可根据教学大纲和实际授课情况对内容进行科学取舍，以增强教学的针对性。每章后都附有小结，便于学生自学时参考，也便于教师在教学中组织指导复习。

思考与习题是学生学习每一章后，需要完成的课后作业，通过对思考与习题的解答，可充分调动学生的创造性思维活动，巩固基础知识，熟记基本概念，以达到培养实际能力和创造能力的目的。习题答案可供学生在学习时参考。本书可供高职高专、本科二级学院机电专业及相关工程专业使用，也可供其他机电或相邻专业的教学和自学使用。

编写高职高专教材是我们的初步尝试，在编写过程中得到了部分领导、老师的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！由于时间紧，任务重，书中难免存在一些错误，恳求广大教师在使用时不吝赐教。

编者

2004 年 8 月

目 录

第 1 章 静力学基础	1
1.1 静力学的基础知识	1
1.1.1 力	1
1.1.2 刚体	2
1.1.3 质点	2
1.1.4 力系	2
1.1.5 平衡	2
1.2 静力学公理	3
1.3 约束和约束反力	4
1.3.1 光滑接触面(线)约束	5
1.3.2 柔性体等的约束	5
1.3.3 光滑的铰链约束	6
1.3.4 滚动铰链支座	6
1.3.5 球形铰链支座	7
1.4 物体受力分析	8
1.5 小结.....	10
思考与习题	11
第 2 章 平面汇交力系	14
2.1 平面力系的合成法则.....	14
2.1.1 平面汇交力系的合成法则.....	14
2.1.2 平面汇交力系平衡的几何条件	16
2.2 力的分解和投影.....	17
2.2.1 力的分解.....	17
2.2.2 力在轴上的分解	17
2.2.3 力在坐标轴上的投影	18
2.3 平面汇交力系合成与平衡法——解析法.....	18
2.3.1 力在正交坐标轴系的投影与力的解析表达式	18
2.3.2 平面汇交力系合成的解析法	19
2.3.3 平面汇交力系的平衡条件.....	20
2.4 平面汇交力系合成与平衡法的应用.....	20
2.5 小结.....	23
思考与习题	24
第 3 章 平面任意力系	26
3.1 力矩及其计算.....	26

3.1.1	力对点之矩	26
3.1.2	合力矩定理	27
3.1.3	力矩的性质	27
3.1.4	力矩的计算	27
3.1.5	分布载荷力矩的确定	28
3.2	平面力偶系	28
3.2.1	力偶	28
3.2.2	力偶的性质	29
3.2.3	平面力偶系的合成与平衡条件	29
3.3	平面任意力系的简化	31
3.3.1	平面任意力系	31
3.3.2	平面任意力系的简化	32
3.4	平面任意力系的平衡方程	33
3.5	平面任意力系平衡方程的应用	33
3.6	物体系统的平衡问题及解题方法	36
3.7	一般物体的平衡	38
3.7.1	滑动摩擦	38
3.8	小结	39
	思考与习题	40
第4章	空间力系	42
4.1	空间力的投影及空间汇交力系	42
4.1.1	力在空间直角坐标轴上的投影及其求解	42
4.1.2	空间汇交力系的合成与平衡条件	44
4.2	力对点和轴的矩	45
4.2.1	力对点的矩	45
4.2.2	力对轴的矩	46
4.3	空间力系和平衡方程	47
4.4	空间力系和平衡方程的应用	49
4.5	重心的确定	52
4.5.1	重心的概念及计算公式	52
4.5.2	确定物体(或刚体)重心的方法	54
4.6	小结	54
	思考与习题	56
第5章	拉伸与压缩	59
5.1	材料力学	59
5.1.1	构件承载能力的3个因素	59
5.1.2	材料力学的基本假设	60
5.2	轴力和轴力图	61
5.2.1	内力	61

5.2.2 杆件的共同特点	61
5.2.3 轴力	61
5.2.4 轴力图	62
5.3 拉(压)杆的应力	63
5.3.1 应力	63
5.3.2 拉(压)杆横截面上的应力	64
5.3.3 拉(压)杆斜截面上的应力	65
5.4 拉(压)杆的变形与胡克定律	66
5.4.1 轴向拉伸或压缩时的变形	66
5.4.2 变形系数	67
5.4.3 胡克定律	67
5.5 拉(压)杆的强度条件及其应用	68
5.6 小结	71
思考与习题	72
第6章 扭转和弯曲	75
6.1 扭转、扭矩及计算	75
6.1.1 扭转及其应用	75
6.1.2 外力偶矩	76
6.1.3 扭矩及扭矩图	76
6.2 圆轴扭转时的变形与刚体条件	78
6.2.1 圆轴扭转时横截面上的应力	78
6.2.2 刚度条件	81
6.3 平面弯曲的概念	82
6.3.1 平面弯曲的特点	82
6.4 剪力方程及应用	84
6.4.1 剪力和弯矩的概念	84
6.4.2 剪力和弯矩方向	85
6.5 弯曲应力	87
6.5.1 纯弯曲时的正应力	87
6.5.2 纯弯曲正应力公式的应用与推广	89
6.6 强度条件及应用	90
6.7 弯曲变形	91
6.7.1 工程上的弯曲变形	91
6.7.2 曲线方程	91
6.7.3 挠度与转角	92
6.7.4 挠曲线的微分方程	92
6.8 梁的设计	94
6.9 小结	95
思考与习题	96

第 7 章 强度理论和组合变形	99
7.1 应力状态及其分析	99
7.1.1 应力状态及其分类	99
7.1.2 二向和向力应力状态的实例	100
7.2 强度理论	102
7.2.1 强度理论的概念	102
7.2.2 常用的 4 种强度理论	103
7.3 组合变形理论	104
7.3.1 组合变形	104
7.3.2 拉伸或压缩与弯曲的组合	105
7.4 弯曲与扭转的组合变形	106
7.5 小结	110
思考与习题	110
第 8 章 压杆的稳定性	112
8.1 压杆的稳定性及临界荷载	112
8.1.1 压杆稳定	112
8.1.2 两端铰支细长压杆的临界力	113
8.2 欧拉公式的应用	115
8.2.1 具体应用	115
8.2.2 适用范围	115
8.3 小结	115
思考与习题	116
第 9 章 点的运动	117
9.1 描述运动的方程	117
9.1.1 自然法	117
9.1.2 直角坐标系	117
9.1.3 矢径法	118
9.2 速度及加速度的计算	119
9.2.1 速度和加速度	119
9.2.2 速度与加速度的直角坐标表示法	120
9.3 小结	122
思考与习题	122
第 10 章 刚体的平面运动规律	124
10.1 刚体的平面运动	124
10.1.1 平面运动	124
10.1.2 平面运动的特点	124
10.2 刚体的平动和转动	125
10.2.1 刚体平行移动定理	125
10.2.2 刚体的定轴转动	126

10.2.3 转动刚体内各点的速度和加速度	127
10.3 速度和加速度的解题方法	127
10.4 小结	129
思考与习题	130
第 11 章 动力学基本方程	132
11.1 动力学的基本方程	132
11.1.1 动力学的基本定律	132
11.1.2 应注意的问题	133
11.2 质点的微分方程	134
11.2.1 质点运动微分方程的投影式	134
11.2.2 质点动力学第一类基本问题	134
11.2.3 质点动力学第二类基本问题	136
11.3 刚体的定轴转动微分方程	138
11.4 质点的动能定理	140
11.4.1 常力在直线路程中的功	140
11.4.2 变力在曲线路程上的功	141
11.4.3 合力的功	142
11.4.4 质点的动能定理	143
11.4.5 刚体的动能	144
11.4.6 功率	145
11.5 小结	146
思考与习题	147
附录 A 部分习题答案	149

第 1 章 静力学基础

静力学的基本概念、定理及物体的受力分析是研究静力学的基础。尤其是静力学公理的应用，为解决具体问题，特别是工程中的实际问题提供了方便；也是学习机电知识，提高技能，掌握科学的分析、解决问题和创新问题能力的关键所在。静力学理论及其应用是从生产实践中总结出来的，是对机械零件和结构进行受力分析和计算的基础，在工程技术中具有广泛的应用。因此，学习和掌握本章内容，对于掌握必要的机电基础知识，学会分析解决问题的方法，提高应用能力和创新能力，具有重要的意义。

1.1 静力学的基础知识

1.1.1 力

力是物体间相互的机械作用，而这种作用使物体的机械运动状态发生了变化。物体的机械运动状态的变化可有两种情形：一是使物体的运动状态发生变化，例如，当物体受到一个不为 0 的合外力作用时，物体在这个力的作用下，运动了一段距离；二是使物体产生了形变，例如，作用在弹簧上的力，使弹簧发生了伸长或缩短的现象等。总之，力对物体的效应表现在两个方面：一是运动状态发生了变化；二是物体的形状发生了变化。前者称之为力的外效应，后者称之为力的内效应。

通过高中对力的学习和认识，我们知道力对物体的作用效应决定于 3 个要素：力的大小、力的方向和力的作用点。

力的大小是指物体间相互作用的强度，可以用弹簧秤或测力计测量。它的单位是牛顿，用符号 N 表示。

力是一个矢量，可以用一个带箭头的线段来表示力的 3 个要素，如图 1-1 所示。这个矢量的长度(AB)按一定的比例尺表示了力的大小；矢量的方向表示了力的方向；矢量的始端表示了力的作用点。

在研究问题的时候，我们所遇到的力的作用点是比较抽象的。实际上力的作用位置一般来说并不是一个点，而是分布地作用于物体的一定面积上。当作用面积很小时，可将其抽象为一个点，称之为作用点。将作用于物体某个点上的力称之为集中力。通过力的作用点代表力的方位的直线称之为力的作用线。分布力的作用强度用单位面积上力的大小 q (N/cm^2) 来度量，称为载荷集度。

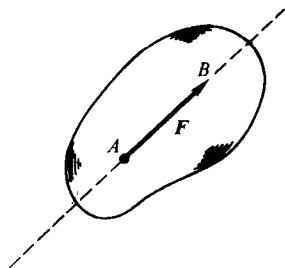


图 1-1

1.1.2 刚体

所谓刚体，是指在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。即在任何情况下永远不变形的物体。

刚体是一个理想化的模型。实际上物体在力的作用下，都会产生不同程度的变形。但是，由于物体的这些微小变形，对在静力学中研究物体的平衡问题不起任何作用，可以忽略不计，这样可以使比较复杂的问题简单化，为人们研究和解决具体问题提供了方便。在静力学中研究的对象主要是刚体，这样我们也可以把静力学称之为刚体静力学。同样，在静力学中，如果没有特别的说明，我们所说的物体均指刚体。

1.1.3 质点

所谓质点，是指具有一定质量且其大小可以忽略不计的物体。在静力学中被视为质点的物体的大小是相对的，并不是绝对的。例如，在研究太阳系中各星球的运动问题时，虽然行星本身很大，但相比太阳来说可以视各行星为质点；而在研究行星自转时，就不能将其看做质点来处理了。

1.1.4 力系

作用在物体上的一群力称为力系。如果一个力系对物体的作用是使物体处于平衡状态，则称此力系为平衡力系。一个力系只能在满足一定的条件下才能成为平衡力系，此条件称为力系的平衡条件。若两个力系分别作用在物体上时，其作用效果相同，我们就说这两个力系是等效力系。如果一个力和一个力系等效，则这个力就是力系的合力，而将力系中的各个力称为合力的分力。

力系依作用线分布情况的不同有下列几种：

- (1) 若所有力的作用线在同一平面内时，称为平面力系，否则称为空间力系；
- (2) 若所有力的作用线汇交于同一点时，称为汇交力系；
- (3) 若所有力的作用线都相互平行时，称为平行力系，否则称为任意力系。

若力系中各力对于物体的作用效应彼此抵消，而使物体保持平衡或运动状态不变时，则称这种力系为平衡力系。平衡力系中的任一力对于其余的力来说都称为平衡力，即与其余的力相平衡的力。

1.1.5 平衡

所谓平衡，是指物体相对周围物体保持静止或匀速直线运动。在研究工程问题中，平衡通常是指物体相对于地球静止或匀速直线运动。

平衡是物体机械运动的一种特殊状态。

要使物体保持平衡状态，作用于物体上的力系要满足一定的条件，这个条件就是力系的平衡条件。研究物体的平衡问题，就是研究物体在各力系作用下的平衡条件，并应用这些平衡条件解决工程上的具体问题。尤其是对于机电、机械等专业，加强对力系的学习和研究，对于全面了解和掌握专业知识，提高分析和解决专业问题的能力，具有重要的意义。

在静力学中主要解决两个基本问题：一是力系简化；二是力系的平衡条件及应用。大量的实践证明，静力学理论是从生产实践中总结出来的，是对机械零件和结构构件进行受力分析和计算的基础，在工程技术中有着广泛的应用。

1.2 静力学公理

静力学公理，是解决静力学的基础，是对力的性质的具体概括和总结。它也是人类长期奋斗的结果，是通过劳动和社会实践积累而得到的结论。因此，学习和掌握好静力学公理，对于学习和掌握力学的内涵，掌握工程问题的解决方法，学会科学的创新意识和创新精神都具有重要作用。

公理 1.1 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。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-2 所示。合力矢量等于这两个力矢的几何和，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2。$$

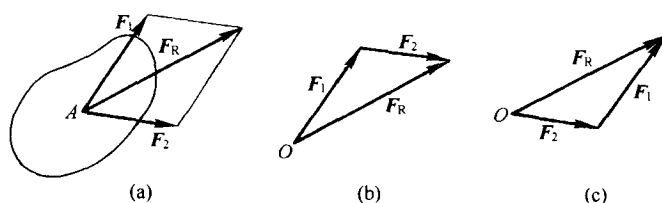


图 1-2

应用此定理求两个汇交合力的大小和方向(即合力矢)时，可由任意一点起作一力的三角形，这样解决问题就容易得多。

利用平行四边形法则求合力，对于形变体来说，二力要有共同的作用点；对于给定的刚体来说，二力的作用线只要相交就可以合成了。因此，平行四边形法则不仅适合于刚体，也适合于形变体。

也可利用平行四边形法则将一个力分解成作用于同一点的两个分力。显然，一个力可以沿任意方向分解，其解决方法更加灵活。在工程上，常将力沿两个垂直方向进行分解，这种方法称为正交分解法，也叫直角三角形解法。

公理 1.2 二力平衡条件

欲使作用于刚体上的两个力平衡，必须具备的充要条件是：这两个力的大小相等、方向相反且作用于同一直线上。

公理 1.2 揭示了作用于物体上最简单的力系平衡时所必需满足的条件。对于给定的刚体来说，这个条件是必要和充分的，如图 1-3 所示。

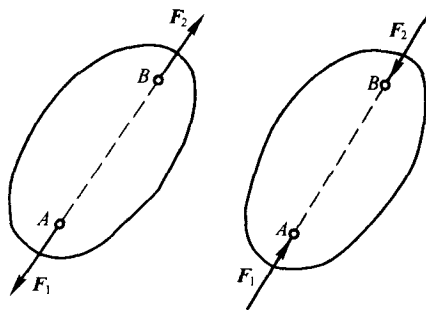


图 1-3

在工程中遇到二力平衡时，一般是指二力构件和二力杆。

需要说明的是，定理 1.2 只适用于刚体。对于刚体，等值、反向、共线作为二力平衡条件是必要的，也是充分的；但对于变形体来说，这个条件是不充分的。这样的例子在生活和生产实践中很多，例如，一个具有弹性的物体，当受到两个等值反向的拉力时，物体处于平衡状态，反之当受到两个等值、反向压力时，物体不一定能平衡。

公理 1.3 加减平衡力系公理

在作用于刚体上的力系加上或减去一个任意的平衡力系，并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，则它们对刚体的作用是相同的；因此可以等效替换。

公理 1.3 是研究力系等效变换的重要依据。

根据公理 1.3，可以导出如下两个推理。

推理 1.1 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。

推理 1.2 三力平衡汇交定理

刚体在 3 个力的作用下平衡，若其中 2 个力作用线相交，则第 3 个力的作用线必过该交点，且三力共面。

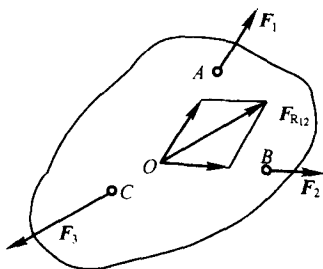


图 1-4

利用推理 1.2 可以确定刚体在三力作用下平衡时其中未知力的方向，并做出合理的判断。

如图 1-4 所示，根据力的可传性原理，可以将力 F_1 和 F_2 移至汇交点 O ，然后再根据力的平行四边形法则将 F_1 和 F_2 合成，得合力 F_{R12} ，则力 F_3 应与 F_{R12} 平衡；因而 F_3 必与 F_{R12} 共线，也就是说， F_3 作用线也必然通过 O 点。

公理 1.4 作用和反作用定理

作用力和反作用力总是同时存在，两力的大小相等、方向相反，沿着同一直线，分别作用在两个相互作用的物体上。

如果将相互作用的一个力视为作用力，那么另一个力一定是反作用力，这是牛顿第三定律告诉我们的。

应用公理 1.4 时，应当特别注意作用力和反作用力是分别作用在两个物体上的。力总是成对出现的，决不能与二力平衡相混淆。分析具体问题时也要分清受力物体和施力物体，找准构成作用力和反作用力的根源和症结所在。

一个起重机通过钢丝绳吊起重物，它的受力情况分析如图 1-5 所示，试讨论各个力的反作用力分别是哪个力？

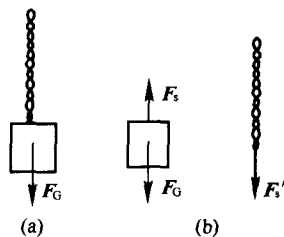


图 1-5

1.3 约束和约束反力

在工程专业学习中，我们会经常遇到类似这样的问题，如铁轨对于机车，轴承对于电机转子，钢丝对于重物等的约束事例。实际上约束如同作用力和反作用力一样，也有约束