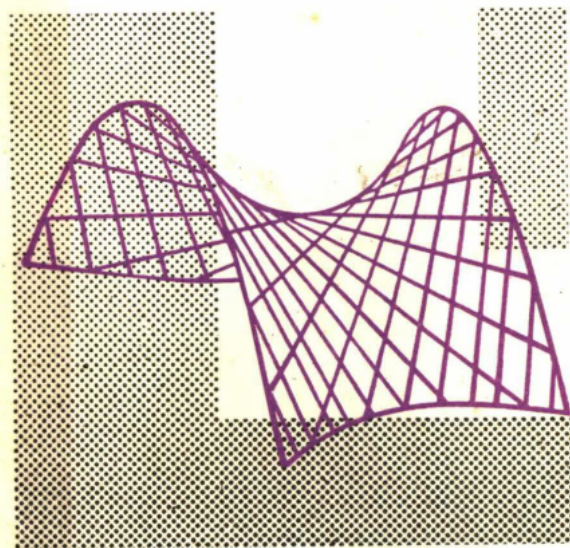


高等学校建筑工程专业系列教材

理论力学

西安建筑科技大学 乔宏洲 主编
哈尔滨建筑大学 刘明威 主审

● 中国建筑工业出版社



ISBN 7-112-02985-6



9 787112 029853 >

(8100) 定价: 24.40 元

高等学校建筑工程专业系列教材

理 论 力 学

西安建筑科技大学	乔宏洲	主编
西安建筑科技大学	乔宏洲	杨运安 童申家 编
西北建筑工程学院	曹 峰	
哈尔滨建筑大学	刘明威	主审

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书按照建设部建筑工程专业力学系列教材编委会审订的“理论力学编写大纲”编写,符合国家教委于 1995 年 9 月公布的“理论力学课程教学基本要求”(多学时)。

本书系统地讲述了静力学、运动学和动力学,各章后有思考题和习题,书末附有理论力学的计算机方法。本书反映了近年来理论力学教改的部分成果,基本理论叙述简明扼要,重点突出,特别加强了解题思路和解题方法的分析。全书符合国标《量和单位》(GB3100~3102—93)中的有关规定。

本书可作为土木类专业本科生的教材,也可供其他专业和有关工程技术人员参考。

高等学校建筑工程专业系列教材

理 论 力 学

西安建筑科技大学	乔宏洲	主编
西安建筑科技大学	乔宏洲 杨运安 童申家	编
西北建筑工程学院	曹 峰	
哈尔滨建筑大学	刘明威	主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市顺义县板桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米·1/16 印张: 24 字数: 584 千字

1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 24.40 元

ISBN7-112-02985-6

TU·2277 (8100)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是高等院校建筑工程专业力学系列教材之一，按照建设部力学系列教材编委会于1995年6月在北京审订的“理论力学编写大纲”编写而成，完全符合国家教委在1995年9月公布的“理论力学课程教学基本要求”（多学时）。

本书在编写过程中，反映了近年来教学改革的部分成果，注意了避免与物理课教学内容的重复，以及与后续力学课程的衔接。编写中力求使概念准确清楚，理论推导简明扼要，突出重点，讲透难点。精选例题，体现“少而精”的原则，大多数例题，解前有分析，解后有讨论，着重讲清解题思路与解题方法，以提高读者综合应用理论和分析问题的基本素质。

本书中打“*”号的章节，为加选内容。

本书采用我国的法定计量单位，符合国标《量和单位》(GB3100~3102—93)中的有关规定，上述国标等效采用国际标准ISO1000:1992，其中有些力学量符号与习惯用符号并不一致，使用本教材的教师应注意到这些变化。

参加本书编写工作的有西安建筑科技大学杨运安（第七、八、九、十、十八章）、童申家（第十九章、附录）、乔宏洲（第一、四、六、十四、十五、十六、十七章）和西北建工学院曹峰（第二、三、五、十一、十二、十三章），全书由乔宏洲任主编。

哈尔滨建筑大学的刘明威教授担任本书的主审，对书稿提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书在建设部力学系列教材编委会的指导下，得到编者两校领导的大力支持，特别是中国建筑工业出版社的具体帮助。在此特致谢意。

由于编者水平所限，书中的缺点和错误一定不少，恳望使用本书的师生提出宝贵意见。

高等学校建筑工程专业力学系列教材 编写委员会成员名单

主任委员：

王光远 中国工程院院士，哈尔滨建筑大学教授

委员(以姓氏笔画为序)：

王天明	重庆建筑大学副教授
王焕定	哈尔滨建筑大学教授
王福临	沈阳建筑工程学院副教授
刘 铮	西安建筑科技大学教授
乔宏洲	西安建筑科技大学副教授
朱象清	中国建筑工业出版社总编辑、编审
朱靖华	苏州城市建设环境保护学院讲师
吴德伦	重庆建筑大学教授
张如三	哈尔滨建筑大学教授
张来仪	重庆建筑大学建筑工程学院副院长、副教授
金康宁	武汉城市建设学院副教授
曹 峰	西北建筑工程学院副教授
蒋 桐	南京建筑工程学院教授
景 瑞	哈尔滨建筑大学校长、教授

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 静 力 学

引 言	5	第三节 平面一般力系的平衡	48
第一章 静力学基础	7	第四节 静不定问题·物体系统的平衡	54
第一节 静力学基本概念	7	第五节 平面桁架	59
第二节 静力学公理	8	*第六节 悬索	63
第三节 约束与约束反力	10	第五章 摩擦	76
第四节 受力分析与受力图	14	第一节 滑动摩擦与滑动摩擦定律	76
第二章 汇交力系	20	第二节 摩擦角与自锁	78
第一节 汇交力系合成的几何法	20	第三节 考虑摩擦时的平衡问题	81
第二节 汇交力系合成的解析法	21	第四节 滚动摩擦阻的概念	84
第三节 汇交力系的平衡	24	第六章 空间一般力系	91
第三章 力矩与力偶理论	31	第一节 力对轴之矩	91
第一节 力对点之矩	31	第二节 力矩关系定理	93
第二节 力偶与力偶矩	34	第三节 空间一般力系向任一点简化	95
第三节 力偶系的合成与平衡	36	第四节 空间一般力系的简化结果	97
第四节 力的平移定理	39	第五节 空间一般力系的平衡	100
第四章 平面一般力系	44	第六节 物体的重心	105
第一节 平面一般力系向一点简化	44		
第二节 平面一般力系的简化结果	46		

第二篇 运 动 学

引 言	117	的矢积式	142
第七章 点的运动	119	第九章 点的合成运动	148
第一节 矢量法	119	第一节 合成运动的基本概念	148
第二节 直角坐标法	120	第二节 点的速度合成定理	149
第三节 自然法	125	第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	155
*第四节 极坐标法	130	第四节 牵连运动为定轴转动时点的加速度合成定理	157
第八章 刚体的基本运动	136	第十章 刚体的平面运动	164
第一节 刚体的平动	136	第一节 刚体的平面运动方程	164
第二节 刚体的定轴转动	136	第二节 平面运动分解为平动和转动	165
第三节 转动刚体内各点的速度和加速度	138		
第四节 转动刚体内点的速度和加速度			

第三节	平面图形内各点的速度	166
第四节	速度瞬心法	169
第五节	平面图形内各点的加速度	173

* 第六节	刚体绕平行轴转动的 合成	176
第七节	运动学综合题分析	179

第三篇 动 力 学

引 言	189
第十一章 质点运动微分方程	191
第一节 质点运动微分方程	191
第二节 质点动力学的两类问题	192
第三节 质点在非惯性坐标系中的 运动	197
第十二章 动量定理	204
第一节 动力学普遍定理概述	204
第二节 动量和冲量	204
第三节 动量定理	206
第四节 质心运动定理	210
* 第五节 变质量质点的运动微分 方程	214
第十三章 动量矩定理	222
第一节 转动惯量·平行轴定理	222
第二节 惯性积和惯性主轴	227
第三节 质点和质点系的动量矩	230
第四节 动量矩定理	232
第五节 刚体定轴转动微分方程	235
第六节 相对质心的动量矩定理·刚体 平面运动微分方程	237
* 第七节 关于动矩心的动量矩 定理	240
第十四章 动能定理	247
第一节 力的功·功率	247
第二节 动能	251
第三节 动能定理	254
第四节 机械能守恒定理	261
第五节 动力学普遍定理的综合 应用	264
第十五章 达朗伯原理	273
第一节 质点的达朗伯原理	273

第二节 质点系的达朗伯原理	275
第三节 刚体惯性力系的简化	278
第四节 定轴转动刚体轴承的动 反力	284
第十六章 虚位移原理	291
第一节 约束及其分类	291
第二节 虚位移与自由度	293
第三节 虚位移原理	295
第四节 虚位移原理的应用	297
第五节 广义坐标形式的虚位移 原理	301
第十七章 动力学普遍方程与拉格朗 日方程	308
第一节 动力学普遍方程	308
第二节 拉格朗日方程	311
第十八章 振动的基本理论	319
第一节 单自由度系统的自由振动	319
第二节 用能量法计算系统的固有 频率	325
第三节 单自由度系统的衰减振动	326
第四节 单自由度系统的强迫振动	329
第五节 减振和隔振的概念	333
第十九章 碰撞理论	339
第一节 碰撞现象与碰撞力	339
第二节 质点对固定面的碰撞·恢复 系数	340
第三节 碰撞时的动力学普遍定理	341
第四节 两物体的对心正碰撞	344
第五节 碰撞对定轴转动刚体的作用· 撞击中心	347
附录 理论力学的计算机方法	350
习题答案	362

绪 论

一、理论力学的研究内容

1. 工科理论力学是研究物体机械运动的一般规律及其在工程中应用的科学。所谓机械运动是指物体在空间的位置随时间而变化。例如，江河的奔流，车船的行驶，飞机卫星的飞行，机器的运转等，都是机械运动。运动是物质的存在形式，自然界中的一切物质都在运动着。而运动的形式是多种多样的，除机械运动之外，还有光、热、电、磁等物理现象，化学反应，生命过程，各种社会形态以及人类的思维活动等。因而，物质的运动包括宇宙中发生的一切变化和过程，从物体最简单的位置变化直到人类的思维活动。在物体运动的各种形式中，机械运动是最简单的一种形式，但它却是自然界和工程技术中最常见的运动形式。平衡是机械运动中的特殊情况，因此，理论力学也研究物体的平衡问题。

2. 工科理论力学所研究的内容属于经典力学。它以 17 世纪伽利略和牛顿所总结的动力学基本定律为基础。运用这些定律，可以描述和预言宇宙中物体的运动。到 20 世纪初，物理学的重大发现，改变了绝对时空的观念，从而产生了相对论力学和量子力学。指出了经典力学的局限性，它不适用于速度接近光速的宏观物体的运动，也不适用于微观粒子的运动。但是，对于运动速度远远小于光速的宏观物体的运动，经典力学的结论是足够精确的。因而，在一般工程技术问题中，经典力学仍发挥着重要的作用。

3. 理论力学的教学内容。为了便于学习，一般将课程内容分为三部分，即静力学、运动学和动力学。静力学研究力系的简化和力系作用于刚体的平衡问题；运动学从几何角度研究点和刚体的机械运动规律而不考虑质量和作用于其上的力；动力学研究物体运动的变化和作用力之间的关系。静力学和运动学是学习动力学的基础。

二、理论力学的研究方法

在力学的长期形成和发展过程中，力学的研究方法日臻完善，并趋于成熟。力学的研究方法完全符合“实践—理论—实践”的辩证唯物主义认识规律。概括起来就是：人们从观察、实践和实验出发，经过抽象化和分析、综合方法，建立基本概念和公理或定律，采用逻辑推理和数学演绎，导出定理和结论，并应用它去解决实际问题，进一步验证和发展理论。

1. 观察和实验是力学的发展基础

在力学的萌芽时期，人们在生活生产实践以及对自然现象的观察中，积累了大量的感性认识和经验，建立了力的概念和早期的力学理论。从伽利略开始，人们开始有目的地进行科学实验，根据实验提出了惯性定律的内容，得出了真空中落体运动的正确结论等。科学实验是人类发现真理、检验和发展真理的特殊实践形式，它对自然科学的发生和发展具有愈来愈重要的作用，成为自然科学理论的直接基础。

2. 抽象化方法是力学研究的基本方法

抽象化方法是指透过现象、抽取本质的过程和方法，它是正确反映客观事物的本质，形

成概念，范畴和规律的一种认识方法。抽象化方法在力学中被普遍采用。通过抽象，把形形色色、各种各样的物体简化为力学模型。例如，在研究物体的机械运动时，不考虑物体几何形状和尺寸，就得到了质点的概念；不考虑物体的变形时，就得到了刚体的概念等。若需要考虑物体的变形，又将物体抽象为弹性体模型，成为材料力学等变形体力学的研究对象。这种分阶段、分层次的抽象化方法，不但抓住了事物的本质，简化了所研究的问题，而且更深刻地反映了实际。因而，科学抽象是从经验到理论的必由之路，是任何科学研究中必不可少的方法。

3. 应用公理化方法建立力学理论

所为公理是经过人们长期实践而归纳出来的少数规定，无需证明，是对客观事物的理性认识。公理化方法是选定若干个最根本的命题作为公理，引入和定义一些基本概念，并以此为出发点，进行逻辑推理和教学演绎，从而得到有关的定理和公式，以形成完整的理论系统。静力学中的五个公理代表了静力学现象的普遍规律，据此通过数学演绎和推理，从而得到了反映静力学各个侧面的定理和公式，例如各种力系的简化结果，各种力系的平衡方程等。动力学的普遍定理也是从动力学的基本定律直接推导而来。在推理过程中，必然要引入一些新概念。概念的形成，标志着人们的认识，已由感性认识进行到理性阶段，是对事物本质的新的认识。例如静力学中力、刚体、平衡等概念的引入就是如此。应注意数学演绎不能绝对化，不能把力学的理论看作是数学演绎的结果，而忽略其力学本质以及实践的重要作用。

在理论力学的推理中，广泛地应用数学工具。在实际应用中，数学还是计算的手段。数学对力学的发展起了促进作用，反过来，力学所提出的问题又促进了数学的发展。特别在当今广泛应用计算机的时代，许多复杂的力学问题将会得到解决，力学与计算机的应用已结下了不解之缘。

4. 实践是检验理论的唯一标准

从实践中得到的理论，还必须回到实践中去，接受实践的检验。只有当理论正确地反映客观实际时，这理论才是正确可靠的。人们进行科学研究的目的，不只是认识世界，更重要的在于改造世界。力学和其它科学一样，目的是应用理论去解决实际问题，并在新的实践中进一步发展理论。

三、学习理论力学的目的

1. 学习目的

在工科院校的许多专业中，理论力学是一门理论性较强的技术基础课。理论力学所研究的问题是力学中最普遍最基本的规律，是学习一系列后继课程的基础和前提。例如，材料力学、结构力学、机械原理、弹塑性力学、流体力学和振动理论等，都要用到理论力学的基本原理和方法。

理论力学是一门技术基础课，与工程技术的联系比较密切。某些工程实际问题可以直接应用理论力学的理论得到解决，有些比较复杂的工程问题可以应用理论力学和其他专业知识联合求解。学习理论力学为解决工程实际问题提供了必要的基础，也是一般工程技术人员必须掌握的理论和方法。

通过理论力学的学习，不仅可以学到具体的力学知识，还可学到它的科学研究方法以及其中所包含的辩证唯物主义思想。提高我们全面分析问题、综合应用理论和灵活求解问

题的能力，为我们今后解决实际问题 and 进行科学研究创造条件。

2. 学习方法

学习理论力学，首先，应注意理论力学的研究方法。即如何把实际的物体抽象化为力学模型，如何应用公理化方法建立力学的理论系统，如何通过数学演绎而得到有关的定理和公式，如何应用理论去求解实际问题，有哪些方法？

其次，对于具体的学习内容，我们将学习要点归纳为：理解概念，记住结论，掌握方法，灵活解题。力学中的多数习题是从实际问题抽象而来，解题是应用理论的初步实践，通过解题也是检验对概念、理论的掌握程度，是培养分析和解决问题能力的基本途径。因此，我们提醒读者，在有限的解题中，应做到举一反三，触类旁通，灵活解题，以最少的计算过程而获得正确的解答。

总之，只要学习目的明确，学习方法正确，坚持不懈，自强不息，就一定能学好理论力学。

原书空白页

第一篇 静 力 学

引 言

静力学是研究刚体在力系作用下的平衡规律。

刚体是静力学的研究对象，是人们将各种实际物体抽象化为便于计算的理想模型。力是物体间的相互机械作用，其作用用力矢量表示，于是力矢量是进行力学定量分析的工具。工程上所谓的平衡，一般是指物体相对地面的静止状态或作匀速直线运动的状态，研究受力系作用的平衡物体继续保持平衡的条件，即平衡条件，是静力学的目的。所以，静力学主要研究以下三方面的问题：

1. 物体的受力分析。
2. 力系的简化。
3. 力系的平衡条件及其应用。

由于求解静力学问题的理论依据不同，静力学分为矢量静力学与分析静力学。矢量静力学以静力学公理为基础，采用矢量代数方法，建立刚体的平衡条件。这正是本书静力学部分的内容。分析静力学以功与能的概念为基础，采用数学分析的方法，建立虚位移原理，讨论质点系的平衡问题。它将在第十六章中研究。

静力学在工程技术中有着广泛地应用，而且在学科本身也有重要的理论价值。学习静力学一方面为学习动力学打基础，同时又是学习各门力学课程的必要前提，对土木类专业尤为重要。

原书空白页

第一章 静力学基础

第一节 静力学基本概念

一、刚体

刚体是在外力的任何作用下形状和大小都始终不变的物体。或者说，刚体内任意两点间的距离始终保持不变。

实际上，任何物体受力作用时都会产生变形。若这种变形比起物体本身的尺寸十分微小，对物体的平衡或运动状态影响甚微，可略去不计。这样，就将实际物体抽象化为刚体，刚体成为静力学的理想化模型。将其他物体对刚体的作用以力代替，就得到了能够应用力学原理进行计算的受力图。在静力学中，一切物体均被视为刚体。对于那些需要考虑物体变形（不管变形多么微小）的力学问题，将以刚体静力学为基础，在材料力学、结构力学、弹性力学等课程中学习。

二、平衡

若物体相对于某惯性参考系保持静止或作匀速直线运动，则称该物体处于平衡状态或平衡。它是物体机械运动的一种特殊状态。工程上，常取地球为惯性参考系，而平衡是指物体的静止。因此本书中所提到的平衡，一般是指物体相对地面保持静止的状态。例如房屋、桥梁、水坝等都处于平衡。

三、力

人们在长期的生活和生产实践中，经过总结、科学抽象、给出了力的确切定义：力是物体间的相互机械作用，是物体运动状态发生变化的原因。

应当注意，既然力是物体间的相互作用，有施力体，就必定有受力体，而且这种作用必然是成对出现的，即力不能脱离物体而单独存在。因此，当研究一个物体的平衡时，必须明确是那个物体通过什么方式在何处对它施加了力。

在理论力学中，不研究产生力的物理根源，只研究力对物体的作用效果，并称其为力的效应。力使物体运动状态改变的效应称为外效应，力使物体形状改变的效应称为内效应。对于刚体，则不考虑内效应。

实践证明，力的效应完全取决于力的三要素：（1）力的大小；（2）力的方向；（3）力的作用点。

力的大小表示力的机械作用的强度。本书采用国标法定计量单位，力的单位为牛顿（N）或千牛（kN）。力的方向是指力的方位（例如水平、铅垂）和指向（例如向左、向上），应理解为静止的自由质点受此力作用后所产生的运动方向。力的作用点是力的作用位置抽象化的结果。

数学上，具有大小和方向的量称为矢量，用有向线段表示。力的三要素可用矢量表示，如图 1-1 所示。线段的长度 AB 按一定的比例表示力的大小；线段的方位（与水平线夹角

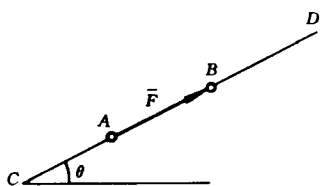


图 1-1

θ) 和箭头的指向表示力的方向; 线段的始端 A (或终端 B) 表示力的作用点。力矢量所在的直线称为力的作用线。

具有确定作用点的矢量, 称为**定位矢量**或**固定矢量**, 不涉及作用点的矢量称为**自由矢量**, 而作用点可沿作用线移动的矢量称为**滑动矢量**。可见力是**定位矢量**。力学中还用力矢表示力的大小和方向, 因而力矢自由矢量。

本书中, 凡力矢量均在斜体字母上加箭头或一杠标记或在力矢量的始、终端字母上加箭头表示。例如 $\vec{F} = \vec{AB}$ 。力的大小则由相应的斜体字母表示或不带箭头的力矢始、终端字母表示, 例如 $F = AB$ 。

四、力系

作用于同一刚体上的一群力, 简称为力系。若力系中各力的作用线分布在同一个平面内, 则称为平面力系。否则称为空间力系。

若两个力系对同一刚体分别作用时, 其效果完全相同, 则称此二力系互为**等效力系**。在特殊情况下, 若一个力和某一力系等效, 则称此力为该力系的**合力**, 而力系中的各力称为此合力的**分力**。所谓力系的简化就是用最简单的一个力系 (例如一力) 去等效代替一个复杂力系对刚体的作用。

若某力系能使刚体保持平衡状态, 则称此力系为**平衡力系**。该力系应满足的条件, 称为力系的**平衡条件**。静力学主要是研究各种力系的平衡条件及其具体应用。

第二节 静力学公理

静力学公理是力的概念逐步形成的同时, 人们对力的基本性质所进行的概括和总结。所谓公理是指以实验观察为依据并为实践反复所证明的客观规律, 是人们对客观事物的理性认识。静力学公理是整个静力学的理论基础。

公理一 二力平衡公理

作用于刚体的两个力, 使刚体维持平衡的必要与充分条件是: 这两个力的大小相等, 方向相反, 作用在同一条直线上。或简称为此二力等值, 反向, 共线。

此公理只适用于刚体。对于变形体并非充分条件。例如, 软绳受等值、反向的两个拉力作用时可以平衡, 若变为受压则不能平衡。

公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的力系中, 可以加上或减去任何一个平衡力系, 而不改变原力系对刚体的效应。

此公理只适用于刚体, 而不适用于变形体。应用公理一和公理二, 可以导出一个重要的推论。

推论 1 力在刚体上的可传性

作用于刚体上的力可沿其作用线移动, 而不改变此力对刚体的效应。

证明: 设力 $\vec{F}$ 作用在刚体上的 A 点 (图 1-2a), 在力 $\vec{F}$ 作用线上的任一点 B , 根据公理二, 加上一对平衡力 $\vec{F}_1$ 和 $\vec{F}_2$ (图 1-2b), 令力矢 $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = \vec{F}$ 。显然, $\vec{F}$ 与 $\vec{F}_2$ 是一对平

衡力，可将此二力去掉（图 1-2c）。这样，原力 $\vec{F}$ 与力系 $(\vec{F}, \vec{F}_1, \vec{F}_2)$ 等效，也与力 $\vec{F}_1$ 等效。这就意味着将作用在 A 点的力 $\vec{F}$ 沿其作用线移到了 B 点。于是力的可传性得证。

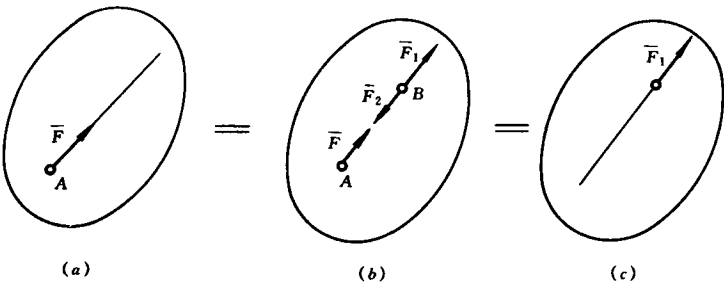


图 1-2

由此可见，对刚体而言，力的三要素是：力的大小、指向和作用线。因而作用在刚体上的力是滑动矢量。

公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上任一点的两个力可以合成为作用于该点的一个合力。合力矢由原二力矢为邻边所作出的平行四边形的对角线来表示。

图 1-3a 中，对角线 $\vec{AD}$ 表示两共点力 $\vec{F}_1$ 与 $\vec{F}_2$ 的合力 $\vec{R}$ ，即 $\vec{AD} = \vec{R}$ 。则有矢量等式。

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

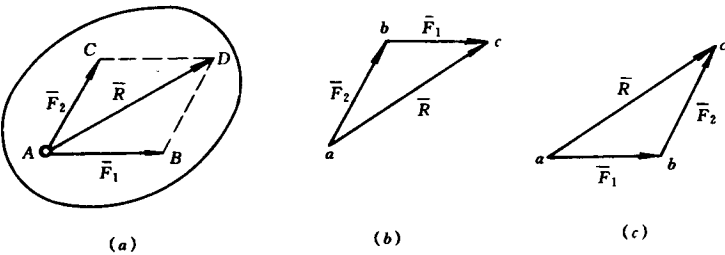


图 1-3

力的这个性质表明，作用于物体上的两共点力，符合矢量代数的矢量加法。即合力矢 $\vec{R}$ 等于两个分力矢 $\vec{F}_1$ 与 $\vec{F}_2$ 的矢量和（或几何和）。对于刚体而言，只要二力的作用线相交，就可进行矢量加法运算。

当求合力矢 $\vec{R}$ 时，只需作出平行四边形的一半即可。为此在任一点 a，作力矢 $\vec{F}_2 = \vec{ab}$ ，再由 b 点作力矢 $\vec{F}_1 = \vec{bc}$ ，连接 a、c 两点，即得合力矢 $\vec{R} = \vec{ac}$ （图 1-3b）。或者可先画 $\vec{F}_1$ ，后画 $\vec{F}_2$ ，同样可得合力 $\vec{R}$ （图 1-3c）。可见，求合力矢 $\vec{R}$ 与画分力矢的次序无关。三角形 abc 称为力三角形，这种求合力矢的作图方法称为力三角形法则。

应用公理三和力的可传性可得又一个重要推论。

推论 2 三力平衡汇交定理

当刚体在三力作用下处于平衡时，若其中两力的作用线相交于一点，则第三力的作用线必通过该交点，且三力共面。

证明：在刚体上的 A、B、C 三点，分别作用着互成平衡的三力 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$ 、 $\vec{F}_3$ ，设 $\vec{F}_1$ 与