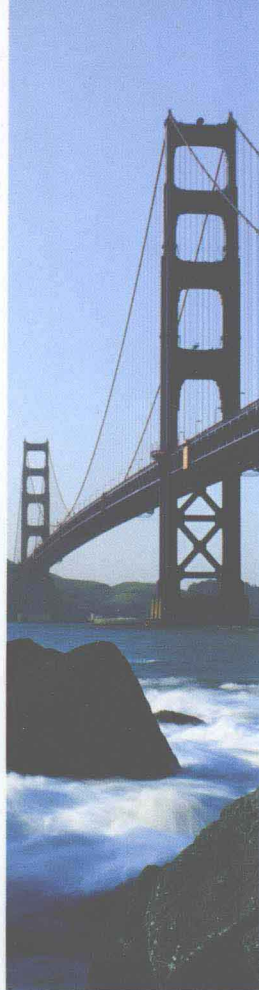




面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century



Theoretical
Mechanics

理论力学

■ 浙江大学理论力学教研室 编
■ 陈乃立 费学博 黄纯明 修订

第4版



高等教育出版社
Higher Education Press



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century



Theoretical
Mechanics

理论力学

■ 浙江大学理论力学教研室 编
■ 陈乃立 费学博 黄纯明 修订

第4版



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书是在第3版的基础上修订而成的,第3版是教育部“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向21世纪课程教材。本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本版继承和发扬第3版论述严谨、概念准确、叙述简练、内容简约、文字流畅、明白易懂的优点,又兼顾便于教师讲授和学生理解,突出对学生的学习指导。新增了源于工程和生活实际、引人入胜的思考题和源于学生常见错误的思考题。除个别较简单的题外,所有的习题和思考题都配有答案。

本书精选的理论力学基本内容包括:静力学(力系的等效和物体受力分析、汇交力系、平面一般力系、空间一般力系)、运动学(点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动)、动力学(动力学基本定律、动量定理、动量矩定理、动能定理、动静法),共13章。

本书可作为高等学校工科少学时理论力学课程教材,也可供有关工程技术人员作为自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/浙江大学理论力学教研室编.—4版.—北京:
高等教育出版社,2009.1
ISBN 978-7-04-024876-0

I.理… II.浙… III.理论力学-高等学校-教材
IV. O31

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第185115号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	保定市中国画美凯印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	1961年6月第1版
印 张	22		2009年1月第4版
字 数	400 000	印 次	2009年1月第1次印刷
		定 价	26.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24876-00

第 4 版前言

本书自 1961 年初版以来,已历经 47 年的岁月,值此第 4 版问世之际,衷心感谢广大师生和读者几十年来对本书的厚爱。

本书第 3 版是面向 21 世纪课程教材,是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果。第 3 版出版之日,正是浙江大学力学系的师生们全力以赴建设浙江大学国家工科基础课程力学教学基地之时。2003 年,理论力学精品课程建设又被列为省级教改项目。在这样的氛围下,如何使教材更好地适应教改的需要,也是我们时刻思考的问题。

为了培养学生解决实际问题的能力和创新思维方式,我们在教学基地和精品课程建设的过程中,从工程和生活实际、与同行的交流和学生常见错误中得到启发,设计了一批思考题。我们将其中的一部分在本科教学中试用,取得了良好的效果。学生反映:它们能开拓思路,激发兴趣,提出深一层的课题,指引钻研的方向。

本书第 4 版是普通高等教育“十一五”规划教材,本版修订工作主要有两个方面:一是对第 3 版作个别文字上的修订;二是新增了思考题部分。我们希望后者能对学生的学学习发挥积极作用。

本次修订由陈乃立执笔,费学博统一全稿。参与修订工作的还有黄纯明、蔡承文和张方洪。

本书承清华大学贾书惠教授审阅,提出了许多宝贵的意见,作者谨表示衷心感谢。

限于编者水平,本书恐难免疏漏和欠妥之处,万望广大读者不吝批评指正。联系的电子邮箱为: NaiLi_Chen@126.com。

编 者

2008 年 6 月于浙江大学求是园

第3版前言

从本书第2版于1983年出版以来,至今已有十多年了。在这期间,理论力学课程教学的客观条件发生了相当大的变化。这样,对该书进行修订就显得很有必要。我们在反复教学实践的基础上,依据国家教委颁布的《理论力学课程教学基本要求(少学时)》(1995年修订版)对该书进行修订,编成第3版。

这次修订时,在静力学中以力系等效定理和平衡力系定理取代了原来的静力学公理,成为静力学的理论基础。这两条定理的概括性较强,从而使有关力系简化、力偶等效和力系平衡等理论的论证过程大为缩短,节省学时,减少篇幅;并将静力学和动力学建立在统一的基础上,使两者在某些方面得以贯通。这两定理的证明安排在附录中,以便教师灵活处理。我们建议:一般可采取在静力学中先接受和应用,而后在动力学中再作论证的方式组织教学。我们的实践表明,这种静力学体系是可行的、有效的。

修订时保持了原书起点较高、文字较为简练、注意学习指导等特点;对物理学、高等数学课程中已涉及的内容,更注意表达的简要;保留了大部分例题和习题,删去了一些重复类型的题,适当增加了一些概念题和动力学综合题,补充了一些解题指导;按照国家标准修改了原书中的部分符号。

本书第3版由费学博、黄纯明、陈乃立分别承担静力学、运动学、动力学三篇的修订工作,费学博教授任本书主编。蔡承文、张方洪参加了修订方案的研究和制订。

本书承清华大学李苹教授审稿。她对书稿提出了许多宝贵意见,我们谨向她表示衷心的感谢。

限于编者水平,本书恐有疏漏和欠妥之处,热诚希望广大读者批评指正。

编者

1997年6月于求是园

第 2 版前言

本书初版于 1961 年出版。

为了适应教学的需要,我们在总结多年来教学实践的基础上,根据高等学校工科力学教材编审委员会理论力学编审小组 1980 年审订的《工程力学教学大纲》(草案)中理论力学部分(60 学时)的要求,并参照理论力学编审小组 1982 年召开的扩大工作会议的精神,对本书进行了修订,作为第 2 版出版。

本书适用于高等学校工科冶金、地质、化工、轻纺、加工、材料、石油等类专业的少学时理论力学课程。

本书的内容,除个别部分以外,都是基本内容,是教学大纲所要求的。考虑到学生在学习本课程时已经学过矢量导数,所以书中叙述了矢量形式的动量矩定理,相应地将“力对点的矩矢”列为基本内容。

为了适应某些院校和专业的需要,本书在基本内容以外增加了一些加深加宽的内容,以供选用。这些内容包括:空间力偶的等效、力偶矩矢、空间力偶系的合成和平衡条件、空间一般力系向一点的简化、牵连运动为平移时的加速度合成定理、平面图形内各点的加速度、刚体作平面运动时惯性力系的简化等。加深加宽内容的章节号和习题号前都注有“*”号,少数未单独成章节的加深加宽内容则用小号字排印。当然,加深加宽内容的讲授务须在确保基本内容的基础上进行。

对有些已经在普通物理中讲授的内容,本书中只作简要叙述,作为必要的衔接,而侧重于从理论力学课程的性质、任务和要求出发,应用这些内容的理论和方法去分析工程实际中的力学问题,达到巩固、深化和提高的目的。

本书修订时增加了习题部分。鉴于解题是理论力学课程的重要教学环节,本书所列习题数量较多,可供教学时选用。

参加本书修订工作的为浙江大学理论力学教研组费学博、蔡承文和黄纯明。

本书承哈尔滨工业大学王铎、谈开孚、洪敏谦同志和天津大学李骊同志主审,华东化工学院陈维新、陆钟瑞同志复审。参加审稿会的还有西安交通大学、华中工学院和重庆大学的同志。审稿的同志对本书提出了许多宝贵的意见,特向他们表示衷心的感谢。浙江大学理论力学教研组的同志十分关心本书的修订工作,汪家诤同志热心地作了指点,恽馥同志给予了有力的支持,谨向他们致以

谢意。

限于我们的水平,书中一定会有不少缺点,诚恳希望广大读者批评指正。

编者
1983 年 4 月

目 录

绪言	1
----------	---

第一篇 静 力 学

第一章 力系的等效和物体受力分析	3
§ 1-1 力系等效的概念	3
§ 1-2 力系的主矢	5
§ 1-3 力系的主矩	6
§ 1-4 力系等效定理	13
§ 1-5 平衡力系定理·刚化公理	15
§ 1-6 约束和约束力	16
§ 1-7 分离体和受力图	21
思考题	24
习题	25
第二章 汇交力系和力偶系	29
§ 2-1 汇交力系的合成	29
§ 2-2 汇交力系的平衡条件	30
§ 2-3 力偶系	37
思考题	41
习题	42
第三章 平面一般力系	48
§ 3-1 平面一般力系的简化和合成	48
§ 3-2 平面一般力系的平衡条件	52
§ 3-3 刚体系统的平衡	61
§ 3-4 考虑摩擦时的平衡问题	68
思考题	74
习题	77
第四章 空间一般力系	86
§ 4-1 空间一般力系的简化	86
§ 4-2 空间一般力系的平衡条件	87

§ 4-3 重心·平行力系中心	91
思考题	95
习题	95

第二篇 运 动 学

第五章 点的运动	101
§ 5-1 运动学基本概念	101
§ 5-2 点的运动方程·速度和加速度的矢量表示	102
§ 5-3 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	103
§ 5-4 点的速度和加速度在自然轴上的投影	105
§ 5-5 例题	108
思考题	116
习题	117
第六章 刚体的基本运动	122
§ 6-1 刚体的平行移动	122
§ 6-2 刚体的定轴转动	123
§ 6-3 转动刚体上各点的速度和加速度	125
思考题	131
习题	131
第七章 点的合成运动	134
§ 7-1 合成运动的基本概念	134
§ 7-2 速度合成定理	136
§ 7-3 牵连运动为平移时的加速度合成定理	139
思考题	142
习题	143
第八章 刚体的平面运动	149
§ 8-1 平面运动的基本概念	149
§ 8-2 平面运动分解为平移和转动	150
§ 8-3 平面图形内各点的速度	151
§ 8-4 平面图形的瞬时速度中心	153
§ 8-5 平面图形内各点的加速度	160
思考题	169
习题	170

第三篇 动 力 学

第九章 动力学基本定律	179
§ 9-1 质点和质点系	179
§ 9-2 动力学基本定律	179
§ 9-3 质点运动的微分方程	182
§ 9-4 质点动力学的两类基本问题	183
§ 9-5 质点系运动的微分方程	194
思考题	195
习题	195
第十章 动量定理	202
§ 10-1 动量和冲量	202
§ 10-2 质点的动量定理	203
§ 10-3 质点系的动量定理	203
§ 10-4 质心运动定理	208
思考题	211
习题	212
第十一章 动量矩定理	216
§ 11-1 动量矩	216
§ 11-2 质点的动量矩定理	217
§ 11-3 质点系的动量矩定理	219
§ 11-4 定轴转动刚体对转轴的动量矩·转动惯量	220
§ 11-5 刚体定轴转动的微分方程	225
思考题	231
习题	232
第十二章 动能定理	238
§ 12-1 功和功率	238
§ 12-2 一些常见力所作功的计算	240
§ 12-3 动能	243
§ 12-4 质点的动能定理	245
§ 12-5 质点系的动能定理	247
§ 12-6 关于动力学普遍定理的一些说明	252
思考题	256
习题	258
第十三章 动静法	264

§ 13-1 惯性力的概念	264
§ 13-2 质点的动静法	265
§ 13-3 质点系的动静法	268
§ 13-4 刚体惯性力系的简化	269
§ 13-5 刚体定轴转动时轴承的动约束力	279
思考题	281
习题	282
综合题	289
附录一 力系等效定理和平衡力系定理的证明	293
附录二 思考题参考解答	295
附录三 习题与综合题答案	325
参考文献	335
主编简介	336

绪 言

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门科学。

所谓机械运动,就是物体在空间的位置随时间而发生的改变。机械运动是最常见、最普遍的一种运动。平衡则是机械运动的一种特殊形式。宇宙间一切物质都在不停地运动。在客观世界中,存在着各种各样的物质运动。除机械运动外,物质的运动还有其他的表现形式:如发热、发光、产生电磁效应、发生化学反应,以至于人的思维活动等。在多种多样的运动形式中,机械运动是最简单的一种。而任何比较复杂的物质运动形式总是与机械运动存在着或多或少的联系。

物体的机械运动都服从某些一般规律。这些一般规律就是理论力学的研究对象。

理论力学属于以牛顿定律为基础的经典力学的范畴。近代物理学的发展指出了经典力学的局限性:经典力学仅适用于低速、宏观物体的运动。当物体的速度接近光速时,其运动应当用相对论力学来研究;当物体的大小接近于微观粒子时,其运动应当用量子力学来研究。然而,对于速度远低于光速的宏观物体,由经典力学推得的结果已具有足够的精确度。工程技术中所研究的对象一般都是宏观物体,而且其速度也远低于光速,所以其力学问题仍以经典力学的定律为依据。因而经典力学至今仍有很大的实用意义,并且还在不断发展。

力学的发展历史表明,与任何一门科学一样,理论力学的研究方法也遵循认识过程的客观规律。概括地说,理论力学的研究方法是从观察、实践和科学实验出发,经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本的概念和规律;在对事物观察和实验的基础上,经过抽象化建立起力学模型;并在建立力学模型的基础上,从基本规律出发,利用数学工具推理演绎,得出正确的具有物理意义和实用意义的结论和定理,从而将通过实践得到的大量感性认识上升为理性认识,构成力学理论。然后再回到实践中去验证理论的正确性,并在更高的水平上指导实践,同时从这个过程中获得新的认识,这些认识的积累又为力学理论的完善和发展奠定了基础。

理论力学是现代工程技术的基础理论,在各种工程技术中得到广泛应用。各种机械、设备和结构的设计,机器的自动调节,机器和结构振动的研究,航天技术,等等,都要以理论力学的理论为基础。为了正确理解工程技术中出现的各种

力学现象,并在必要时加以利用,或者予以防止或消除,也需要理论力学的知识。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。通过本课程的学习,我们要掌握物体机械运动的基本规律,初步学会运用这些基本规律去分析生产实际中的力学问题,并为学习材料力学、机械原理、机械零件等有关的后继课程作准备。学习理论力学,也有助于学习其他的基础理论,掌握新的科学技术;有助于建立辩证唯物主义的世界观,培养必要的分析问题和解决问题的能力。

本书将分为以下三篇进行叙述:

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律;同时也研究力系的等效和简化;

运动学——研究物体机械运动的几何性质,而不涉及引起物体运动的物理原因;

动力学——研究物体的机械运动与所受的力之间的关系。

第一篇 静 力 学

第一章 力系的等效和物体受力分析

静力学研究的基本问题是,作用于刚体的力系的简化和力系的平衡条件。本章介绍两条重要定理:力系等效定理和平衡力系定理。它们是解决上述基本问题的理论基础,涉及力系的等效、力系的主矢和主矩等概念。最后讨论物体的受力分析,这是力学中的重要基本技能。

§ 1-1 力系等效的概念

物理学中已经建立力的概念: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变化(包括变形)。作用在物体上的一组力,称为力系。

物体受到力系作用后产生的效应表现在两个方面:物体整体的运动状态发生变化、物体产生变形。前者称为运动效应或外效应,后者称为变形效应或内效应。

实践表明,任何受力物体多少总要产生一些变形。但是,在正常工作情况下,工程技术中的绝大多数零件和构件的变形,一般是很微小的,甚至只有用专门的仪器才能测量出来。例如,一般机械中的轴,其允许的最大挠度都在轴承间距的万分之五以下,最大扭转角每米轴长不超过 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 。研究表明,在许多情况下,这样微小的变形对物体外效应的影响甚微,可以略去不计,从而使问题的研究得以简化。这样,通过对实际物体进行抽象简化,在理论力学中提出了物体的一种理想模型——刚体。刚体是在任何情况下保持其大小和形状不变的物体。换句话说,在理论力学中将物体抽象为刚体,这就意味着只考虑物体受力时的外效应,而不考虑内效应。

物理学中已经指出,力对物体的效应取决于以下三个要素:力的作用点、力的方向、力的大小。力是有大小和方向的量,而且力的相加服从矢量加法规则,因此力是矢量。可以用矢量图示法来表示力矢。本书中用黑体字母(如 \mathbf{F})来标记矢量,而用对应的白体字母(如 F)来表示矢量的模。在国际单位制中,力的单位符号为 N(名称为牛顿)。

实际上,作用在物体上的往往不是单个力,而是一个力系。那么,力系对物

体的效应取决于什么呢？两个不同的力系是否会对物体产生相同的效应呢？在理论力学中，两个不同的力系，如果对同一物体产生相同的外效应，则称该两力系相互等效。两等效的力系相互交换时，力系对物体的外效应保持不变。可见，等效是指外效应的等同，而不要求内效应也相等。例如，质量为 m 的直杆放在光滑水平面上，力系 $2F$ 沿杆的轴线作用在 A 点(图 1-1a)，而力系 F 、 F 沿轴线作用于 A 、 B 两点(图 1-1b)。这两个力系对直杆产生相同的外效应(以加速度 $2F/m$ 向右平移)，因此彼此等效，虽然它们对直杆产生不同的内效应(对前者，直杆产生拉伸变形；对后者则直杆的一半拉伸，另一半压缩)。研究表明，力系对物体的外效应或者说对刚体的效应取决于力系的两个特征量——力系的主矢和对一点的主矩，在以下两节里将加以研究。

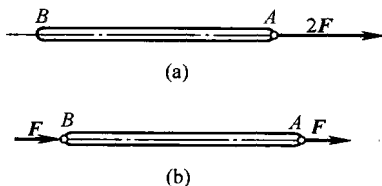


图 1-1

静力学着重研究以下两个基本问题：(1) 作用于刚体的力系的简化，即用一个比较简单的力系等效地代换一个复杂力系。例如，研究表明，满足一定条件的一个已知力系可以与单个力等效，此等效力称为该力系的合力。(2) 刚体在力系作用下的平衡规律。所谓平衡，是指物体相对于惯性参考系(参看 §9-2)处于静止或作匀速直线运动的状态。显然，平衡是机械运动的特殊形式，是物体在特殊力系作用下产生的特殊外效应。在工程实际中，一般可取固连于地球的参考系作为惯性参考系，由此得出的分析计算结果已具有足够的精确度。作用于刚体上使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系；平衡力系应满足的条件称为平衡条件。静力学研究刚体的平衡规律，就是研究作用于刚体的力系的平衡条件。

按照力系中各力作用线在空间分布的不同形式，力系可以分为：

- (1) 汇交力系 各力作用线相交于一点；
- (2) 平行力系 各力作用线相互平行；
- (3) 一般力系 各力作用线既不相交于同一点，又不都相互平行。

按照各力作用线是否位于同一平面内，上述三种力系都可再分为平面和空间两类，如平面一般力系、空间一般力系等。

从第二章开始，我们将从特殊到一般，分别研究不同类型力系的两个静力学基本问题。

§ 1-2 力系的主矢

力系中各力矢的几何和称为力系的主矢。设力系由 n 个力 F_1, F_2, \dots, F_n 组成, 它们的作用点分别为 P_1, P_2, \dots, P_n , 则力系的主矢 F'_R 为:

$$F'_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$$

或简写为

$$F'_R = \sum F_i \quad (1-1)$$

可以用几何法或解析法来求 F'_R 。采用几何法时, 可以用力多边形法, 即将各力矢 F_1, F_2, \dots, F_n 按任意选定的顺序首尾相接地相继画出, 则从第一个力矢的始端指向最后一个力矢末端的矢量就是矢量和 F'_R 。

采用解析法时, 则应取直角坐标系 $Oxyz$, 任一力矢 F_i 可以表示为按直角坐标的分解式:

$$F_i = F_{ix}i + F_{iy}j + F_{iz}k \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中 i, j, k 分别是沿坐标轴 x, y, z 的单位矢量, F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} 分别是力 F_i 在坐标轴 x, y, z 上的投影。将 (1-1) 式向各坐标轴投影, 得到 F'_R 的三个投影:

$$\left. \begin{aligned} F'_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = \sum F_{ix} \\ F'_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = \sum F_{iy} \\ F'_{Rz} &= F_{1z} + F_{2z} + \dots + F_{nz} = \sum F_{iz} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

于是, 主矢的模为:

$$\begin{aligned} F'_R &= \sqrt{F'^2_{Rx} + F'^2_{Ry} + F'^2_{Rz}} \\ &= \sqrt{(\sum F_{ix})^2 + (\sum F_{iy})^2 + (\sum F_{iz})^2} \end{aligned} \quad (1-3)$$

主矢的方向余弦分别为:

$$\cos(F'_R, i) = \frac{\sum F_{ix}}{F'_R}, \cos(F'_R, j) = \frac{\sum F_{iy}}{F'_R}, \cos(F'_R, k) = \frac{\sum F_{iz}}{F'_R} \quad (1-4)$$

值得注意的是, 力系的主矢和力系的合力是两个不同的概念。主矢是一几何量, 它有大小和方向, 但不涉及作用点问题, 可在任意点画出; 而力系的合力则是一物理量, 它具有与原力系等效这一特定的力学内涵, 除了大小和方向, 还必须说明其作用点才有意义。我们总可以计算一个已知力系的主矢, 但该力系未

必有合力。例如,如图 1-2 所示,在刚体的 O 、 A 、 B 三点分别作用有三个力 F_1 、 F_2 、 F_3 (为清晰起见,从现在起在阐明理论的图中,往往不画出受力的刚体),其中 $F_1 = 12k$, $F_2 = 4j$, $F_3 = 3i$ (力的单位为 N),各点坐标为 $O(0,0,0)$, $A(0,a,0)$, $B(b_1, b_2, 0)$ ($b_2 \neq 0$)。容易算出这个力系主矢的模 $F'_R = \sqrt{12^2 + 4^2 + 3^2} \text{ N} = 13 \text{ N}$,其方向余弦分别为 $3/13$ 、 $4/13$ 、 $12/13$ 。但是,进一步的研究表明,这个力系没有合力,即不存在与该力系等效的单个力。

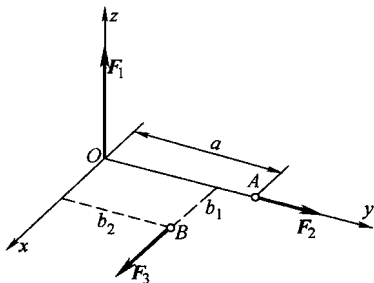


图 1-2

§ 1-3 力系的主矩

物理学中已经指出,力 F 对 O 点的矩等于乘积 Fd ,其中 d 是 O 点到力 F 作用线的垂直距离,称为力臂, O 点称为矩心。在本节中,我们将对力矩的概念作进一步的讨论。

1. 力对轴的矩

力使刚体绕轴转动的效应,可用力对该轴的矩来度量。例如,设力 F 作用在可绕 z 轴转动的门上,如图 1-3a 所示,我们可将力 F 分解为两个分力 F' 和 F'' :分力 $F' = \overrightarrow{AB'}$ 位于与 z 轴相垂直的平面 OAB' 内,也即 F' 是力 F 在垂直于 z 轴的任一平面 N 上的投影矢量;分力 $F'' = \overrightarrow{AB''}$ 则与 z 轴平行。由经验可知,分力 F'' 不能使门绕 z 轴转动,即它对 z 轴的转动效应为零。而分力 F' 使门绕 z 轴转动的效应则取决于乘积 $\pm F'd$,其中 d 是 z 轴与平面 OAB' 的交点 O 到力 F' 作用线的垂直距离,称为力 F' 对 z 轴的力臂,在取定了正负号以后,乘积 $\pm F'd$ 称为力 F 对 z 轴的矩。实际上,乘积 $\pm F'd$ 也可解释为力 F' 对 O 点的矩。

在一般情况下,为了求力 F 对 z 轴的矩,如图 1-3b 所示,可先任取一垂直于矩轴 z 的平面 N ,它与矩轴的交点记作 O 。于是,力 F 对 z 轴的矩就等于力 F 在平面 N 上的投影矢量 $F' = \overrightarrow{ab}$ 对 O 点的矩,记作 $M_z(F)$ 或简记为 M_z :

$$M_z(F) = \pm F'd = \pm 2 \times \triangle Oab \text{ 面积} \quad (1-5)$$