

高等学校试用教材

力 学

上 册

(船舶驾驶专业用)

大连海运学院 张天祥 吴厚烈主编

人 民 交 通 出 版 社

高等学校试用教材

力 学

上 册

(船舶驾驶专业用)

大连海运学院 张天祥 吴厚烈主编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

力学是船舶驾驶专业的一门重要技术基础课，全书共分上、下两册。上册为理论力学，共十七章。下册包括材料力学（四章）和流体力学（三章），共七章。

本书的特点是：在保证完整的力学基础理论的前提下，比较密切地结合船舶驾驶专业的特点和实际。本书有的章节提出一些思考题，它有助于读者深入理解力学的基本概念；各章均附有习题及答案，可供教学参考和选用。

本书为高等院校船舶驾驶专业的教材（包括函授大学和业余大学），也可供船舶驾驶人员学习、参考。若将内容作适当删减（这并不影响基本理论体系），本书也可作为中等专业学校教材。

高等学校试用教材

力 学

上 册

（船舶驾驶专业用）

大连海运学院 张天祥 吴厚烈主编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：16 字数：400 千

1982年7月 第1版

1982年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—4,800册 定价：1.65元

前 言

本书是船舶驾驶专业用的力学教材，全书包括理论力学、材料力学和流体力学三大部分。

众所周知，船舶驾驶专业有其自己的特点，从专业课的设置和学生将来所从事的工作来看，和一般工程专业有很大的不同。力学是该专业一门重要的技术基础课，我们认为，在保证基本理论完整的前提下，应该有一定的专业针对性。实践证明：这对提高学生学习力学的兴趣，对技术基础课与专业课更密切地配合，对理论联系实际原则的贯彻都是有益的。

本书在保证完整的基本理论体系的前提下，在问题的提出、内容的取舍、例题和习题的选择等方面，都适当结合船舶驾驶专业的特点。例如，在静力学中增加了空间汇交力系的图解法；在点的复合运动中着重介绍非载体的情况；在刚体定点运动理论中，只介绍里萨立角而不再引入欧拉角；在天体力学基本简介这一章中，适当地介绍了人造卫星的运行理论；材料力学部分，在讲清四种基本变形及强度条件的前提下，着重分析船体总强度的初步概念和剪切弯曲问题；流体力学部分，在讲清流体静力学和一元流动基本理论的前提下，结合船舶推进和操纵性能，定性地阐明阻力及机翼理论以及与之有关的一些流体力学概念。

本书的形成有一个过程。它是多年来，在我院力学教研组许多同志共同努力、积累资料，编写讲义、教材，和教学实践的基础上，这次又作了比较大的修改编写而成的。其中理论力学中的静力学、动力学及流体力学由张天祥、吴厚烈共同编写，理论力学的运动学部分由张义文编写，材料力学（包括习题）由衷儒堂编写。张义文选编了理论力学的习题，吴厚烈选编了流体力学习题。在此基础上，由张天祥、吴厚烈负责对全书进行修改、审校和文字加工，最后定稿。

在本书编写过程中，王国贵、刘太山、罗盛祥、王升润等同志分别对理论力学、材料力学、流体力学各部分提出过很多宝贵意见，在此表示感谢。由于编者水平的限制，书中肯定有不足之处，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 理论力学

绪 言

第一章 刚体静力学的基本概念和公理	1
§1 刚体静力学的任务和基本概念	1
§2 约束及约束反力	3
§3 刚体静力学基本公理	5
§4 受力分析	7
§5 力的分解及其在航海实践中的应用	8
第二章 汇交力系	12
§1 汇交力系合成的几何法及平衡条件	12
§2 汇交力系合成解析法及平衡方程	16
§3 船用单吊杆受力分析	21
第三章 力矩和力偶理论	29
§1 力对点之矩及合力矩定理	29
§2 力偶及力偶矩 力偶系的合成及平衡条件	33
§3 空间力对点之矩矢及力对轴之矩	36
第四章 平面任意力系	41
§1 平面任意力系的简化	42
§2 平面任意力系平衡条件和平衡方程	46
§3 考虑摩擦力时的物体平衡问题	49
第五章 空间任意力系	63
§1 空间任意力系的简化	63
§2 空间任意力系简化的最后结果	64
§3 空间任意力系的平衡方程	65
第六章 平行力系中心和重心	70
§1 平行力系中心	70
§2 重心的坐标公式	71
§3 求重心坐标的方法	72
§4 船舶重心求法	74
第七章 点的运动学	81
§1 运动学的研究对象和基本概念	81
§2 决定点的运动的基本方法	83
§3 点的直线运动方程 速度与加速度	85

§4 点的速度与加速度表示为矢导数.....	88
§5 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影.....	89
§6 点的速度和加速度在平面极坐标上的投影.....	90
§7 点的速度和加速度在自然坐标轴上的投影.....	92
第八章 刚体的基本运动	99
§1 刚体的平动.....	99
§2 刚体的定轴转动.....	100
§3 转动刚体上各点的速度与加速度.....	102
§4 角速度矢量 以矢性积表示点的速度和加速度.....	104
第九章 点的复合运动	107
§1 点的相对运动、牵连运动和绝对运动.....	108
§2 速度合成定理.....	109
§3 加速度合成定理.....	114
§4 当牵连运动为转动时的加速度合成定理的矢量推导法.....	121
第十章 刚体的平面运动	128
§1 刚体平面运动的概念.....	128
§2 刚体的平面运动方程 平面运动的分解.....	129
§3 平面图形内各点的速度 瞬时速度中心.....	130
第十一章 动力学基本定律	138
§1 动力学的研究对象 质点和质点系.....	138
§2 动力学基本定律.....	139
§3 质点的运动微分方程.....	142
第十二章 动量定理	154
§1 动力学普遍定理引言.....	154
§2 质点动量定理.....	155
§3 质点系动量定理及其应用.....	158
第十三章 动量矩定理	167
§1 动量矩的概念与计算.....	167
§2 动量矩定理及动量矩守恒定律.....	169
§3 刚体绕定轴转动的运动微分方程.....	175
§4 转动惯量的计算及平行轴定理.....	177
§5 刚体平面运动动力学.....	180
第十四章 动能定理	186
§1 力的功.....	186
§2 物体的动能.....	189
§3 质点及质点系动能定理.....	191
§4 功率及功率方程 机械效率.....	196
§5 机械能守恒定律.....	198
§6 应用功的图示法分析船舶动稳性的力学原理.....	203
第十五章 刚体定点运动及陀螺仪理论基础	206

§1 刚体定点运动 绕相交轴转动的合成	206
§2 定点运动刚体内各点的速度和加速度	208
§3 刚体定点运动方程 里萨立角	211
§4 刚体对于通过定点的任意轴的转动惯量 惯性主轴	213
§5 欧拉动力学方程及陀螺仪技术方程	215
§6 陀螺仪近似理论	218
第十六章 相对运动动力学	225
§1 质点的相对运动基本方程	226
§2 质点相对运动基本方程的应用	227
§3 潮汐现象的动力学分析	231
第十七章 天体力学基础简介	238
§1 开普勒定律和万有引力定律	239
§2 行星的轨道及其参数的分析	241
§3 岁差现象简介	243
§4 人造卫星的运动简介	245

第一篇 理论力学

绪 言

理论力学是本书的第一篇，也是内容最多的一篇。理论力学的研究对象是物体机械运动的一般规律。所谓机械运动是指物体的位置在空间随时间的变化（当然是指相对于某个特定的参考系而言的）。

显然，机械运动普遍存在于自然界中。如天体的运行，炮弹、火箭、人造卫星以及车、船相对于地球的运动，所有机器在运转过程中各部件之间以及部件相对于地球的运动等等，都属于机械运动。即使在微观世界中，也同样存在机械运动，如电子在其轨道上的运动。因此，机械运动实为最普遍、最基本的运动形态。一般工程技术人员，都必须了解机械运动的基本规律及处理问题的方法。

作为一个船舶驾驶人员，掌握理论力学的基本知识是十分必要的：如甲板吊货设备的受力分析与计算，船舶的配载，雷达避碰原理，船舶旋回性能的分析，船舶冲程的计算，船舶摇摆的分析，潮汐理论的分析，导航卫星的应用等等，都要用到理论力学的基本知识。

理论力学不仅能独立解决某些工程实际问题，而且也是其他力学分支的基础，如本书第二篇的材料力学和第三篇的流体力学都要用到理论力学的知识。因此，只有学好理论力学，才能更好地学习材料力学和流体力学。

按照传统的习惯，整个理论力学又分成三部分：即静力学（1—6章）、运动学（7—10章）和动力学（11—17章）。静力学研究力系的简化及物体平衡时作用力之间的关系；运动学专门研究如何描述运动，按照拉格朗日的说法，运动学就是以时间为参数的空间几何；动力学全面研究机械运动的内在规律，即在什么样的条件下将发生什么样的运动。

第一章 刚体静力学的基本概念和公理

§1 刚体静力学的任务和基本概念

静力学是关于力的普遍性质及其合成规律和平衡的一般理论。这里所说的平衡是指物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动。在静力学中将研究以下两个问题：

1. 力系的简化，即将作用在物体上的很多力（称为力系）进行合成或简化，用一个最简单的和它等效的力系来代替。例如正在机动操纵的船舶，受到地心引力、海水浮力、螺旋桨推力、海流和风的阻力以及舵力等的作用，这些力错综复杂地分布在船舶的各个部分，每个力都影响着船的运动。要想确定船的运动规律，就必须知道这些力的总效果，这就归结为力系简化问题。研究力系的简化有双重意义：一方面通过力系简化的总结果可以说明力系对物体作用的总效果，给今后研究动力学打下基础；另一方面，力系简化的结果也是研究力系平衡

条件的前提。

2.力系的平衡条件,即受力作用的物体处于平衡状态所需要满足的条件。比如说船作匀速直线运动是一种平衡状态,那么作用在船上的力系必须满足什么条件呢?再如用船上吊杆匀速起吊货物时,整个装卸设备可认为处于平衡状态,此时,各种索具的受力情况如何,在装卸操作过程中要注意什么问题,都可以通过力系的平衡条件计算出来,并作出科学的分析。

所以静力学研究的两个问题都具有广泛的实际意义。以下介绍几个在静力学中经常遇到的基本概念。

一、刚体和变形体

自然界任何物体在受到力的作用时都会产生变形。变形的大小取决于力的大小、力的作用位置及材料的性质。如橡皮容易变形,而钢铁就不容易变形。根据研究问题的不同,物体变形对问题的影响也不同。例如,在研究船舶的旋回性能,计算船舶的重心高度,计算船舶的摇摆周期等问题时,就不考虑船舶的变形,把船舶视为刚体。所谓刚体就是在任何外力作用下不发生任何变形的物体。显然,刚体实际上是不存在的,它是物体抽象化的模型。抽象化的方法不仅是合理的,而且是必需的。例如,在计算船舶的重心时,如果考虑船体的变形,将导致不必要的复杂化,甚至于无法计算。

但是不能将刚体的概念绝对化,当研究物体在外力作用下能否破坏的问题时,显然不能再把物体看成刚体,因为破坏总是和变形相联系的。又如研究船体的振动问题时,即使变形很小,也不能忽略,因为正是这个看来极其微小的变形,却是船体振动的主要因素。当然,不仅仅是船体,其它一切工程结构、机械设备的振动和强度问题,莫不如此,这就要研究变形体力学。以后将会看到,刚体力学是变形体力学的基础。

二、力的概念

力的概念,最初是从肌肉的紧张中感受到的。人们在长期的生产实践中,通过用手推、拉、举、扔和利用机械、畜力、水力、风力等进行生产时,反复观察、分析,并运用科学抽象的方法,建立起力的科学概念:力是物体间的相互作用,这种作用可以使物体的运动状态发生改变,或者使物体发生变形。

力的作用方式是多种多样的。例如,两个物体相互接触,可以发生相互作用;也可以不接触而相互作用,如物体间的引力。在研究物体受力时,必须对物体之间的相互作用进行具体分析。这里强调指出:力是物体的相互作用,故力不能脱离实际物体而存在。当分析某个物体的受力情况时,必须首先分析,那一个物体是所要研究的“受力物体”,那一些物体是“施力物体”,也就是确定究竟有那些物体对所研究的物体施加了力。如果离开了物体的相互作用来分析受力情况,就要发生错误。

实践证明,力对物体的作用效果决定于力的大小、方向和作用点。通常把它们叫做力的三要素,这三个要素的任一要素发生改变时,力的作用效果就要改变。

力的大小表示物体间相互作用的强烈程度。在国际单位制中,力的单位是牛顿,而在工程单位制中则采用千克力或吨力为单位。这两种单位的换算关系,可表示如下:

$$1\text{千克力}=9.8\text{牛顿}$$

力的作用点是表示物体相互作用的地方,实际上它是具有一定大小的一块面积。当这块

面积很小时, 就可以认为这个力是作用在一点上。若这块面积较大, 力的作用就不能看成是作用在某一点上了, 而是分布在这块作用面积上。例如作用在船吃水线以下船壳表面上水的压力及作用在吃水线以上船体表面的风的压力等等, 都是分布力。但在很多实际问题中, 力的作用面积很小, 可以近似地看成作用在一个点上。这种作用在一点上的力称为**集中力**, 该点称为力的作用点。用绳索吊货时, 绳索作用在货物上的力就是集中力, 绳与货物的系结点即是力的作用点。力的大小、方向及作用点这三个要素, 表明力是**矢量**。在力学上, 用一个有方向的线段来表示。线段的长度按一定比例尺表示力的大小, 线段末端所附箭头表示力的作用方向, 线段的起点或终点表示力的作用点。如图 1-1 所示, 被吊起的货物的重力以矢量 P 表示, 吊货索拉力则用 T 表示。



图 1-1

§2 约束及约束反力

力学中所研究的物体, 往往是和其他物体相互联系、相互制约的, 它的运动要受到某些限制。例如货物受到吊货索的限制, 不能自由下落; 船在锚泊时受到锚链的限制不能任意运动; 螺旋桨的转轴受到轴承的限制, 只能在轴承内转动等。总之, 当某一物体被其他物体用一定方式限制了某些运动时, 这些周围物体——地面、地脚螺钉、吊货索、锚链和轴承等, 就构成对该物体运动的**约束**。约束既然限制被约束物体的运动, 那么就一定有力作用在被约束的物体上。在力学中把约束加在物体上的作用力称为**约束反力**。与约束反力相对应的是使物体产生运动或有运动趋势的力, 称为**主动力**, 如重力、机器的驱动力、放枪时的火药爆炸力等。在力学中, 把在运动上受有某些限制的物体叫做**非自由体**, 例如在汽缸中运动的活塞、在轨道上行驶的火车。相反, 把可以在空间作任意运动的物体叫做**自由体**, 例如在空中飞行的炮弹。只有对于非自由体, 才存在约束反作用力。最后必须特别指出, 约束反力是由主动力引起的, 它是被动的; 如果没有任何主动力存在, 约束反力也就不存在了。下面介绍一些在工程实际中常见的约束类型及它们所产生的约束反力的特点。

1. 光滑的固定面约束

物体搁置在光滑的固定面上, 约束反力 N 垂直于平面, 方向指向物体内部。这是因为接触面是光滑的, 没有摩擦力存在, 所以这种固定面不能限制物体沿固定面任何方向的运动, 只能限制其沿固定面的垂直方向上的运动。因此, 不管主动力如何作用, 约束反力 N 将永远沿接触面的法线方向。当然, 绝对光滑是不存在的, 一般情况下总有摩擦力, 但是如摩擦力很小, 对研究的问题影响不大时, 可以近似地视为光滑面。若物体搁置在光滑的曲面上, 其约束反力 N 必沿接触处曲面的公法线方向 (以上见图 1-2a、b、c、d)。桥梁、屋架等结构所经常采用的滚动支座也属于这种约束, 其约束反力如图 1-2e 所示。

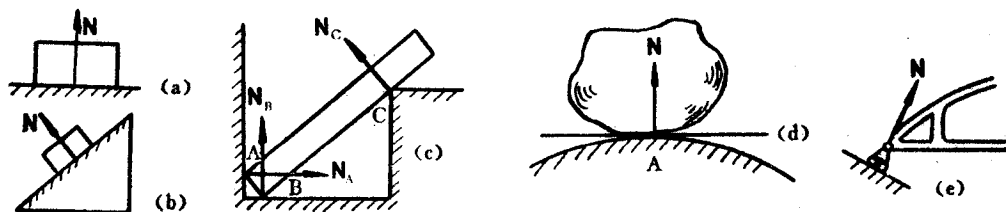


图 1-2

2. 柔性约束

绳索、皮带、锚链等物体称为柔体。由柔体构成的约束称为柔性约束。因为柔体本身只能承受拉力，不能承受压力，所以柔体所产生的约束反力 T 的作用线必定沿柔体本身并背离物体，作用在柔体与物体的联结点

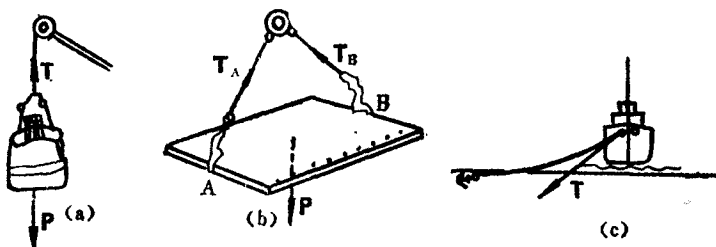


图 1-3

上。如果柔体成曲线形状时，其约束反力 T 一定沿联接点的切线方向，见图1-3a、b、c。

3. 圆柱铰链约束

圆柱铰链的应用比较广泛，如由销钉、轴承、固定支座等构成的约束，都可视为圆柱铰链约束。船舶吊杆装置中的吊杆底座，就是用横栓与竖栓使吊杆能够上下俯仰和左右摆动，以保证吊杆在适当的位置装卸货物。这个横栓、竖栓也属于圆柱铰链，见图1-4。

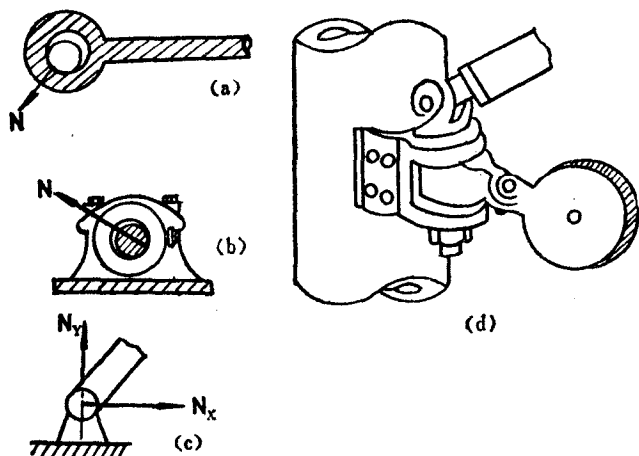


图 1-4

圆柱铰链的主要构造是：将固定部分与活动部分各钻直径相等的圆孔，再用销钉将固定部分和活动部分联接起来，

使物体只能绕销钉的轴线转动，如图1-5所示。由于销钉和被约束物体的内孔都是圆柱面，故可在任一母线接触。假设接触是光滑的，则约束反力沿接触面法线方向，必通过铰链（销钉）的中心，如图1-4a、b所示。但是应用铰链联接物体时，轴与孔可以在不同地方接触，所以约束反力 N 可沿任意方向。由此可知，铰链约束的特点是：约束反力的方向是不确定的，但反力作用线垂直于铰链轴线，并通过销钉的中心。因此一般用垂直于轴线的 Oxy 平面内两个互相垂直的分力 N_x 及 N_y 来表示这个未知的约束反力，如图1-4c所示。

4. 球型铰链

圆柱铰链属于平面约束类型，它是在垂直于轴的平面内将物体的一点固定，而物体可绕此垂直于平面的轴转动。球铰链则属于空间约束类型，它是在空间将物体的一点固定，物体可绕此点任意运动。图1-6所示为一球型铰链。由于支座是球形，若忽略摩擦，则约束反力必通过球心，但其方向不能确定。一般来讲，可将约束反力 N 在空间分解成 N_x 、 N_y 、 N_z ，即所谓三向不定力。与此相仿，圆柱铰链的约

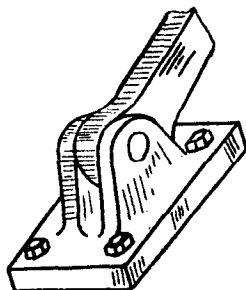


图 1-5

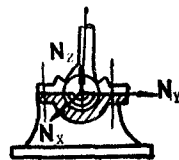


图 1-6

束反力是二向不定力。

从以上对约束反力的分析中可以看出：主动力是引起约束反力的外因。但是，约束对被约束的物体所产生的约束反作用力不仅与主动力有关，而且与约束类型有直接关系。如光滑的平面约束，不管主动力如何作用，只能产生法向反作用力。约束类型是产生约束反力的内因，而作为产生约束反力外因的主动力，一定要通过约束本身（内因）而起作用。

§3 刚体静力学基本公理

要研究力系的简化和力系的平衡条件，还需要对力的某些基本性质有更为深入的了解。下面讲述的几个公理就反映了力的基本性质。这些公理简单明了，很容易为人们所了解，它是研究力系的简化与平衡的基础。

公理1 二力平衡公理：作用在刚体上的两个力，使刚体处于平衡，这两个力必定是大小相等、方向相反、并沿着同一直线，如图1-7所示。

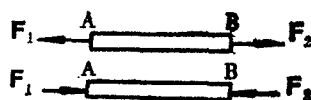


图 1-7

显然，满足上述条件的二力是平衡力系最简单的情形。

实际上，受二力作用而处于平衡的物体很多，如结构中的拉杆(图1-8a中的AB)在不计自

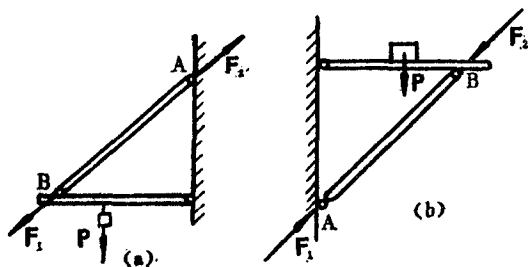


图 1-8

重情况下，就只受拉力 F_1 及 F_2 作用。同样图1-8b中的撑杆AB只受压力 F_1 及 F_2 作用。这种只受两个力作用的构件，称为二力构件。下面将看到，如果不计船用吊杆的自重，吊杆也是一个二力构件。

公理2 加减平衡力系公理：在已知力系上加上或取去任意平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。

这是很明显的，因为平衡力系对刚体的平衡或运动状态没有影响。这个公理对于研究力系的简化特别重要。

推论 可以将作用在刚体上某点的力沿其作用线移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用。证明如下：

设在刚体上的A点作用一力 F 图1-9，在力 F 的作用线上任选一点B，在B点上加一对平衡力 F_1 及 F_2 ，使 $F_1 = -F_2 = F$ 。于是三个力组成的力系(F, F_1, F_2)和原来一个力 F 的作用相同。但是 F 和 F_2 也是一个平衡力系，可以取去，只剩下一个力 F_1 ，它的作用和 F 相同。也就是说，力 F 的作用点沿着作用线从A点移到B点，并不改变对刚体的作用，这叫做刚体上力的可传性。



图 1-9

下面，我们考虑直杆AB在等值共线两个力 P_1 、 P_2 作用下处于平衡的问题，如图1-10a所示。显然AB杆受压。如果按力的可传性， P_1 沿作用线移动到B点，而 P_2 沿作用线移动到A点，如图1-10b所示，则AB杆仍处于平衡，但所受到的是拉力。由此可见，应用力的可传性，虽不能改变物体的平衡状态，但却可能改变物体的受力状态。因此若考虑物体的受力状态，即考虑物体的内力时，不能应用力的可传性，这一点在第二篇材料力学中要特别注意。

公理3 力的平行四边形公理

理：作用在物体上某点的两个力的合力，也作用在该点上，且等于这两个力的矢量和；即合力可由以这两个力为边所构成的平行四边形的对角线来表示，如图1-11所示。根据这个公理作出的平行四边形称为力的平行四边形。

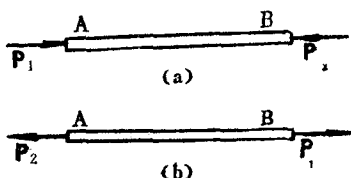


图 1-10

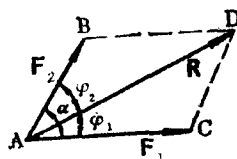


图 1-11

如以 R 表示 F_1 及 F_2 的合力，则公理3可以表述为： $R = F_1 + F_2$ ，这就是矢量加法。

公理4 作用反作用公理：两个物体间的作用与反作用力大小相等、方向相反、且作用线在同一直线上。

对于作用反作用公理应注意以下两点：

1. 作用力和反作用力永远同时存在，同时消失。有作用力，必有反作用力，决不是作用力产生在前，反作用力在后。
2. 作用力和反作用力，大小相等、方向相反、并在同一条直线上，但决不能互相抵消。因为作用力和反作用力是分别作用在两个物体上的两个力，不是作用在同一个物体上的两个力。

为了说明作用力与反作用力概念，现举一个简单例子。链条 AB 上端挂在天棚上的钩子 B 上，下端悬一重球 C 。设 C 的重量为 Q ，不计吊钩及链条重量，试分析重球 C 、吊钩 B 及链条 AB 的受力（图1-12）。

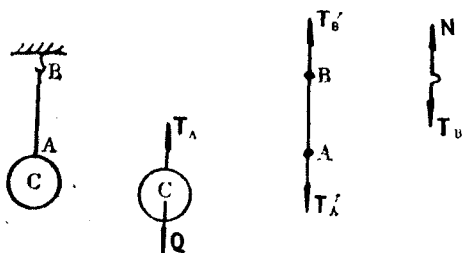


图 1-12

显然重球 C 受重力 Q 及链条拉力 T_A 作用，而吊钩 B 受天棚的反力 N 及链条拉力 T_B 的作用。至于链条 AB ，则在 A 点受到重球 C 的反作用力 T_A' 的作用，在 B 点受到吊钩的反作用力 T_B' 的作用。也就是说， T_A 及 T_A' 组成一对作用与反作用力， T_B 与 T_B' 组成一对作用力与反作用力。读者可思考一下，对重球 C 的作用力 Q 的反作用力是什么？它作用在哪一个物体上？

公理5 刚化原理：如变形体在某一力系作用下而处于平衡，则将此变形体刚化为刚体，平衡状态不变。

这个原理建立了刚体静力学与变形体静力学之间的联系，它可将刚体静力学中得到的平衡条件应用到变形体静力学中去。例如研究柔索、锚链等变形体的平衡时，就必须应用刚化原理。

应该指出，刚体的平衡条件对于变形体来说只是必要条件，而非充分条件。如图1-13所示一段绳索，在相等、反向两拉力作用下平衡，如将绳硬化成刚杆，这二力必须满足刚体平衡条件。但是若物体受等值反向的两压力作用，则对于刚性杆来说仍然平衡，而柔软绳则不能平衡。因此，要确定变形体是否平衡，仅有刚体平衡条件是不够

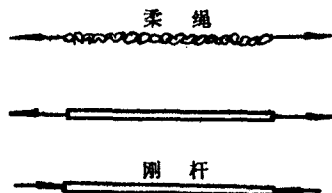


图 1-13

的,还必须有附加条件。换句话说,刚体的平衡条件对于变形体来说只是必要条件,而不是充分条件。关于硬化原理的应用及实质,在以后研究变形体及流体的平衡时会有更深刻的体会。

§4 受力分析

在工程实际问题中,常要分析某一个构件受那些力作用,在这些力中那些是已知的,那些是未知的,他们的大小、方向如何,以及构件受力作用后会不会破坏。要解决这些问题,首先就是要对物体进行受力分析,看看它究竟受到那些力的作用。为此,就要把被研究的那个物体从周围物体中分离出来,单独画出它的简单轮廓图形——脱离体图,再在脱离体图上画出物体所受的全部力——主动力与约束反力。这个画有物体所受全部力的脱离体图,称之为物体的受力图。在实际工作中,对所研究的物体取脱离体,画出它的受力图是分析解决实际问题的关键一步,必须切实掌握。下面通过对吊杆的部分构件的受力分析来掌握这一环节。船用吊杆如图1-14所示,试画出货物的、吊货滑车、吊杆顶箍及吊杆的受力图。

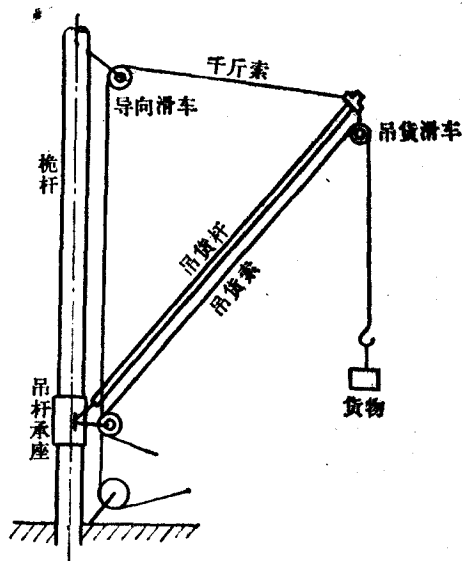


图 1-14

1. 分析货物的受力

(1) 取货物为脱离体, 如图1-15;

(2) 画出货物的重力 P ;

(3) 根据约束类型画出吊货索的拉力 T , 它沿着吊货索, 背离货物。

2. 分析吊货滑车的受力 (不计滑车的重量)

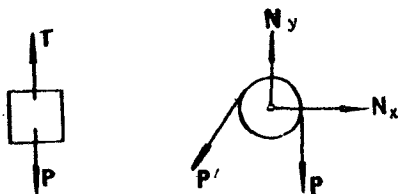


图 1-15

图 1-16

(1) 取滑车为脱离体, 如图1-16;

(2) 画出吊货索后手拉力 P' 及货物重量 P (在平衡时, P 即为吊货索作用于滑车上的力);

(3) 滑车轮轴的约束可视为圆柱铰链, 其约束反力 N 用 N_x 、 N_y 两个分力表示。

3. 分析吊杆上端顶箍的受力

(1) 取吊杆顶箍及吊货滑车和一小段吊货索为脱离体;

(2) 画出已知的重力 P , 其方向铅垂向下;

(3) 根据约束类型画出约束反力: 吊货索后手拉力 P' 及千斤索拉力 T , 分别沿着吊货索和千斤索, 背离吊杆头; 吊杆对顶箍的约束反力 N 的方向一般不能直接确定。但如不考虑吊杆自重, 吊杆是在底座及顶箍对它的两个作用力的作用下保持平衡的。也就是说, 吊杆是二力构件, 两力的作用线必须沿着吊杆两端的连线。根据作用反作用公理可知, 吊杆对顶箍的约束反力 N 的方向也必沿着吊杆轴线, 指向顶箍。

这样吊杆头上端的顶箍及滑车共受四个力作用, 即 P 、 P' 、 T 及 N , 如图1-17所示。

4. 分析吊杆的受力

(1) 取脱离体: 如图1-18所示, 将整个吊杆与滑车取为脱离体;

(2) 画出已知的主动力——货物的重量 P 及吊杆的重量 Q ;

(3) 根据约束类型画出约束反力如下:

柔性约束——吊货索后手拉力 P' 及千斤索拉力 T 分别沿着吊货索和千斤索, 方向如图1-18所示。

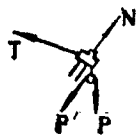


图 1-17

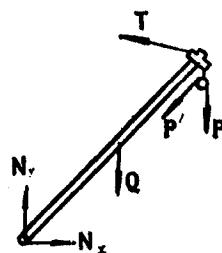


图 1-18

圆柱形铰链约束——吊杆承座横轴对吊杆的约束反力 N 用两个分力 N_x 、 N_y 表示 (读者可自己考虑不计吊杆自重时 N 力的画法)。

这样, 在考虑吊杆自重情况下, 吊杆的受力图如图1-18所示。

总之, 在分析物体受力的过程中, 必须明确分析那一个物体的受力, 即明确研究对象。然后画出研究对象的脱离体图, 在脱离体上先画出已知的主动力, 然后再根据其他物体对研究对象所构成的约束类型, 画出约束反力。

必须强调指出, 画受力图是学习理论力学必须熟练掌握的基本功, 而且最容易出现错误。为此, 提出以下两点, 要求初学者牢记。

1. 一定要严格根据约束类型画出约束反力, 绝不能想当然, 随便假设。

2. 力是物体间的相互作用, 因此, 每画一个力, 都必须明确是那一个物体施加于所研究对象上的, 绝不能凭空加一个力。

§5 力的分解及其在航海实践中的应用

从公理 8 可知, 作用于一点的两个力可合成为一个力, 其合成的办法是应用力的平行四边形法则。反之, 一个力也可分解成相交于一点的两个力。由于从一条对角线可画出无数个平行四边形, 因此力的分解问题的解答将是不定的。所以在研究实际问题时, 力的分解是根据具体情况, 沿着某个特定方向进行的。

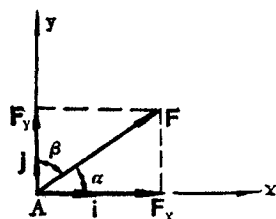


图 1-19

最常用的是将一个力分解为互相垂直的两个力。如图1-19所示, 在 A 点作用有力 F , 它与水平轴夹角为 α , 与垂直轴夹角为 β 。则可将 F 分解为 F_x 、 F_y 两个力, 如以 i 、 j 表示 x 、 y 轴上的单位矢量, 则有:

$$F = F_x + F_y = F_x i + F_y j = F \cos \alpha i + F \cos \beta j$$

这里顺便指出, F_x 、 F_y 是 F 的两个分力, 它是矢量; 而 F_x 、 F_y 是力 F 分别在 x 、 y 轴上的投影, 它是代数量。

例1-1 试分析拖轮拖力的作用。

〔解〕 如图1-20所示, 拖轮的拖力 F 必沿着拖缆系结点的切线方向, 它倾斜向下。要分析拖力作用, 可将 F 分解为 F_1 及 F_2 两个力, F_1 使被拖船沿水平方向前进, 垂直向下的分力 F_2 使船首微微向下压。显然 F_2 越大将越不利。



图 1-20

例1-2 试分析帆船驶风时风力对船的作用，并找出最佳帆位角。

〔解〕 如图1-21所示，设船沿 y 轴正向航行，风从左后方吹来，风向与船首尾线交角为 θ 。 θ 称为风舷角，自船首向两舷计算，从 0° 到 180° 。 AB 为帆面，与船首线夹角为 φ ， φ 称为帆位角，自船尾向两舷计算，从 0° 到 90° 。

现研究风力对船的作用，并找出最佳帆位角。假设风力均匀作用于帆 AB 上，总风力为 P ，作用在 CO 方向。因为 P 不与帆 AB 垂直，可先将 P 分解为 P_1 及 P_2 。 P_2 平行于帆面，擦帆而过，对船的航行不起作用； P_1 与帆面垂直，推船前进。但要注意， P_1 的方向并不是船的航行方向，因此还必须将 P_1 再分解为 P_x 及 P_y 。 P_y 是使船前进的推动力， P_x 作用于船的正横方向，它一方面使船产生倾斜，一方面使船横漂，但由于这方面阻力较大，故横漂较小。

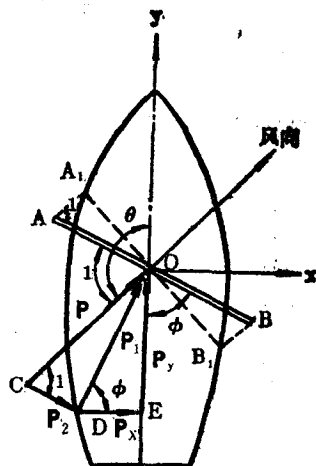


图 1-21

现计算这些力的大小及分析其与 φ 角关系。设帆的面积为 s ，风的强度为 p （风强是指在垂直于风向的平面上单位面积所受的风力）。由于风向与帆位并不垂直，作 A_1B_1 垂直风向 OC ，且 $AA_1 \perp A_1B_1$ ， $BB_1 \perp A_1B_1$ ，则 A_1B_1 为垂直于风向的帆面积，以 s' 表示。且

因为：

$$s' = s \sin \angle 1$$

$$\angle A_1AO = \angle AOC = \angle OCD = \angle 1 = \theta - \varphi$$

则

$$s' = s \sin(\theta - \varphi)$$

故

$$P = ps' = ps \sin(\theta - \varphi)$$

因此

$$P_2 = P \cos \angle 1 = ps \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi)$$

$$P_1 = P \sin \angle 1 = ps \sin(\theta - \varphi) \sin(\theta - \varphi) = ps \sin^2(\theta - \varphi)$$

又因为

$$\angle ODE = \angle \varphi$$

则

$$P_x = P_1 \cos \varphi = ps \sin^2(\theta - \varphi) \cos \varphi$$

$$P_y = P_1 \sin \varphi = ps \sin^2(\theta - \varphi) \sin \varphi$$

由此可见，使船前进的有效推力 P_y 的大小是随 φ 角而变的。事实上，航向及风向一般都是已定的，即 θ 角是不变的，而帆位 φ 则是可以调整的。那么 φ 角究竟多少，才能使推力 P_y 达到最大呢（此时的帆位角 φ 就是最佳帆位）？现以高等数学中函数求极值的方法计算如下：

令

$$\frac{dP_y}{d\varphi} = 0$$

可得

$$2ps \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) (-1) \sin \varphi + ps \sin^2(\theta - \varphi) \cos \varphi = 0$$

化简得

$$2 \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\theta - \varphi) = \frac{\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \varphi}$$

解此三角方程可得

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-3 \pm \sqrt{9 + 8 \operatorname{tg}^2 \theta}}{4 \operatorname{tg} \theta}$$

故

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{-3 \pm \sqrt{9 + 8 \operatorname{tg}^2 \theta}}{4 \operatorname{tg} \theta}$$

由于帆位角是从 0° 到 90° ，故上式中根号前应该取正值。计算出来的 φ 角就是最佳帆位角。为了对最佳帆位有定量的概念，现选几个特殊角度，将计算结果列表如下。

风舷角 θ	$\text{tg}\theta$ 值	$\text{tg}\varphi$ 值	最佳帆位角 φ	备 注
30°	$1/\sqrt{3}$	0.1772	约 10°	
45°	1	0.2807	约 16°	
60°	$\sqrt{3}$	0.3928	约 21.5°	
120°	$-\sqrt{3}$	1.2493	约 51°	
135°	-1	1.7807	约 60°	
150°	$-1/\sqrt{3}$	2.7777	约 70°	
180°	0	∞	90°	风从船尾吹来，帆在正横

上述计算表明，最佳帆位角 φ 比风舷角 θ 的一半略小一些。

当风从正横以后方向吹来($\theta > 90^\circ$)时情况容易理解；但当风从正横前方吹来($\theta < 90^\circ$)时，为什么也能使船前进呢？从力的分解来看，这是极其明显的，如图1-22所示。

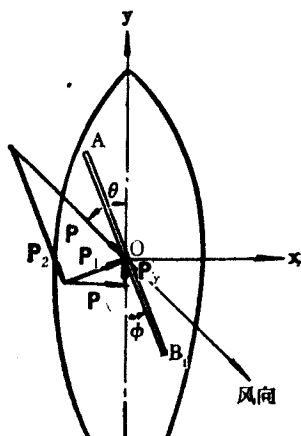


图 1-22

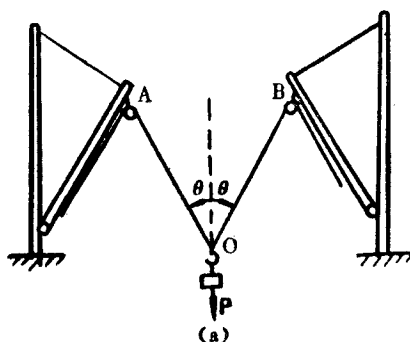
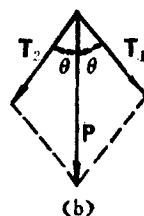


图 1-23



例1-3 如图1-23所示，船上用双吊杆吊货。设货物自舱底匀速上升时，两吊货索与铅垂线夹角同为 θ ，且随着货物高度的不同， θ 角将不断变化。试分析吊货索受力大小与 θ 角的关系。

〔解〕 将 P 沿吊货索方向分解为 T_1 及 T_2 两个力（图b）。由于对称关系，显然 $T_1 = T_2 = T$

因为

$$P = 2T \cos \theta$$

故

$$T = \frac{P}{2 \cos \theta}$$

可见 T 是 θ 角的函数，随着 θ 角的增大而增大。当 $\theta = 60^\circ$ 时， $T_1 = T_2 = P$ ，即吊货索受力等于货重。 θ 角如再增大，则每根吊货索受力都将大于货重。例如，当 $\theta = 80^\circ$ 时，则：

$$T_1 = T_2 = \frac{P}{2 \cos 80^\circ} = 2.89P$$

即吊货索受力大小约为货物重量的3倍。所以船上规定，用双吊杆进行装卸作业时，两吊货