

3321

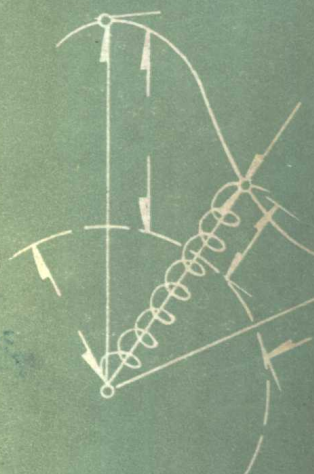
820851

U428.1

谢传锋 主编

谢传锋 汪恩松 丁新 编

理论力学



中央广播电视大学出版社

3321

820851

0428; 1

理 论 力 学

谢传锋 主编

谢传锋 汪恩松 丁新 编

中央广播电视大学出版社

理 论 力 学

谢传锋 主编

谢传锋 汪恩松 丁 新 编

*

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

文字六〇三厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 20 千字 484

1987 年 1 月第 1 版 1987 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—52,000

书号 13300·49 定价 3.15 元

前 言

本书是为中央广播电视大学理论力学课程编写的教材。

多年来中央广播电视大学理论力学课程一直是选用南京工学院等九院校合编，由高等教育出版社出版的理论力学教材。随着形势的发展，这本教材以及与之相配合的电视录相，已经很难适应当前的需要和今后的发展，因此决定编写本书。

在编写本书时，我们一方面注意了要使本书符合中央广播电视大学理论力学课程的教学大纲，以及电视教学的特点；另一方面还注意了多年来理论力学课程本身在教学和教材中出现的一些问题，对传统的体系作了一些修改。这些修改主要是：

在静力学中，把力对点之矩矢符合矢量合成规则作为力矩的基本性质。由此出发，使力偶理论大为简化，并且一次性地给出了合力矩定理的证明。

在运动学中，改变了刚体平面运动传统的研究方法，把它放在复合运动之前讲述，而把复合运动作为运动学专题来处理。这样修改一方面是为了使刚体运动的研究不致因点的复合运动的插入而间断；另一方面还可使研究点的复合运动时，牵连运动的类型不受限制；此外还使得复合运动的讲述更为完整，既包含点的复合运动，又包含刚体的复合运动。

在动力学中，充分注意了与普通物理中动力学理论重复的问题，提高了本课程的起点。因此，省略了一般理论力学教材中有关牛顿三定律的重复的叙述，直接从质点运动微分方程开始讲述。

以上对本课程传统体系的修改也可以说是本书的一个特点，其出发点很大程度上是考虑到这是一本工科的理论力学教材，应当更多地注意它的实用性。这种修改的效果如何，最后当然应当

通过今后教学使用的实践来检验。

本书适合于机械、土建专业 80 学时左右的理论力学课程使用。也可供相近专业和学时的工科本科、大专,以及各类成人高等学校选用或参考。

为配合电视教学,加强自学和辅导环节,中央广播电视大学出版社还同时出版了丁新老师编写的《理论力学学习指导书》,该书为电视大学理论力学课程的主要参考书。

由于编者水平有限,特别是对一些内容作了较大修改,缺点错误在所难免,恳请广大读者批评指正,不胜感激!

编 者

目 录

绪论	1
第一篇 静力学	3
第一章 静力学基础和物体的受力分析	3
§ 1-1 静力学基本概念	3
§ 1-2 力的基本性质	6
§ 1-3 约束和约束反力	10
§ 1-4 研究对象和受力图	17
思考题	23
习题	24
第二章 基本力系	27
§ 2-1 汇交力系	27
§ 2-2 力偶系	41
思考题	60
习题	61
第三章 平面一般力系	67
§ 3-1 力的平移定理	68
§ 3-2 平面一般力系向一点简化	70
§ 3-3 平面一般力系简化的结果	74
§ 3-4 平面一般力系的平衡方程及其应用	79
§ 3-5 物体系统的平衡问题	92
§ 3-6 静定与静不定问题的概念	101
思考题	109
习题	112
第四章 空间一般力系	125
§ 4-1 力对轴之矩	126
§ 4-2 力对点之矩与力对通过该点的轴之矩的关系	129
§ 4-3 空间一般力系向一点简化	132
§ 4-4 空间一般力系简化的结果	135

§ 4-5 空间一般力系的平衡方程及其应用	137
思考题	149
习题	151
第五章 静力学专题——平面桁架·摩擦·重心·悬索	157
§ 5-1 平面桁架	158
§ 5-2 摩擦	175
§ 5-3 重心	192
§ 5-4 悬索	209
思考题	230
习题	232
第二篇 运动学	243
第六章 点的运动	243
§ 6-1 运动学的任务和基本概念	243
§ 6-2 描述点的运动的方法	245
§ 6-3 点的速度和加速度	250
§ 6-4 求点的速度和加速度的直角坐标法	253
§ 6-5 求点的速度和加速度的自然法	261
思考题	274
习题	274
第七章 刚体的基本运动	279
§ 7-1 刚体的平动	279
§ 7-2 刚体的定轴转动	281
§ 7-3 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	284
§ 7-4 角速度矢和角加速度矢。定轴转动刚体上各点的速度和加速度的矢量积表达式	291
思考题	296
习题	296
第八章 刚体的平面运动	301
§ 8-1 刚体平面运动的运动方程	301
§ 8-2 刚体平面运动分解为平动和转动	303
§ 8-3 平面图形上各点的速度	307
§ 8-4 平面图形上各点的加速度	321

思考题·····	331
习题·····	332
第九章 运动学专题——点的合成运动和刚体绕平行轴转动的合成 ·····	338
§ 9-1 点的合成运动·····	338
§ 9-2 刚体绕平行轴转动的合成·····	364
思考题·····	378
习题·····	379
第三篇 动力学 ·····	386
第十章 质点运动微分方程 ·····	386
§ 10-1 动力学引言·····	386
§ 10-2 质点运动微分方程·····	387
§ 10-3 质点动力学的两类问题·····	390
思考题·····	403
习题·····	404
第十一章 动量定理 ·····	407
§ 11-1 动力学普遍定理概论·····	407
§ 11-2 动量和冲量·····	408
§ 11-3 动量定理·····	410
§ 11-4 质心运动定理·····	414
§ 11-5 两球的对心正碰撞·····	421
思考题·····	430
习题·····	431
第十二章 动量矩定理 ·····	435
§ 12-1 动量矩·····	435
§ 12-2 动量矩定理·····	437
§ 12-3 质点系相对于质心的动量矩定理·····	445
§ 12-4 刚体对轴的转动惯量的计算·····	447
§ 12-5 刚体的定轴转动和平面运动微分方程·····	457
思考题·····	466
习题·····	468
第十三章 动能定理 ·····	474
§ 13-1 力的功·····	474

§ 13-2 动能	485
§ 13-3 动能定理	488
§ 13-4 势力场 势能 机械能守恒定理	498
§ 13-5 动力学普遍定理的综合应用	503
思考题	516
习题	517
第十四章 动静法	526
§ 14-1 惯性力	526
§ 14-2 达朗伯原理	528
§ 14-3 动静法	529
§ 14-4 刚体惯性力系的简化	532
思考题	548
习题	549
第十五章 虚位移原理	555
§ 15-1 约束 自由度与广义坐标	555
§ 15-2 虚位移 虚功与理想约束	557
§ 15-3 虚位移原理	560
§ 15-4 动力学普遍方程	567
思考题	572
习题	572
第十六章 动力学专题——机械振动基础	576
§ 16-1 引言	576
§ 16-2 自由振动	577
§ 16-3 阻尼对自由振动的影响	586
§ 16-4 受迫振动	591
§ 16-5 阻尼对受迫振动的影响	598
§ 16-6 减振和隔振的概念	602
思考题	607
习题	608
习题答案	614

绪 论

一、理论力学的研究对象

理论力学是研究物体机械运动一般规律的学科。

机械运动是指物体在空间的位置随时间的变化。平衡是机械运动的特殊情况,因此,理论力学也研究物体的平衡问题。

本书的内容属于经典力学的范围。也就是说,在本书中物体运动的速度远小于光速,物体的尺寸远大于基本粒子,即本书仅在低速、宏观的范畴内来研究物体的机械运动。实践表明,即使在现代,工程技术中遇到的大量力学问题都可应用经典力学的理论加以解决,因此学习经典力学有着极其重要的实际意义。物体运动的速度接近光速的机械运动的研究属于相对论力学,研究基本粒子运动的学科是量子力学,这些都要根据需要在专门的课程中进行讨论。

二、理论力学的内容

理论力学的内容包括以下三部分:

静力学 研究物体平衡的一般规律。

运动学 研究物体运动的几何性质,而不涉及产生运动的原因。

动力学 研究作用于物体上的力和物体运动之间的关系。

三、学习理论力学的目的

理论力学是一门理论性较强的技术基础课，又是学生接触工程实际的第一门课程，因此学习这门课程主要要达到以下几个目的：

1. 理论力学是一切力学的基础。学习理论力学将 为学习一系列后继课程如材料力学、结构力学、机械原理、机械设计等打下必要的基础，也为进一步探索新的科学技术领域准备好力学方面的条件。
2. 通过理论力学的学习，初步学习处理工程实际问题的方法。
3. 培养分析和解决问题的能力，特别是逻辑思维能力、抽象化能力、自学能力、表达能力以及数学计算能力等。

第一篇 静力学

第一章 静力学基础和物体的 受力分析

内 容 提 要

本章首先介绍平衡、刚体、力和力系等静力学基本概念，然后介绍力对物体作用的最基本的五条性质。为了对非自由体进行受力分析，本章介绍了几种常见的典型约束，以及它们的约束反力的特点。最后，本章详细介绍了画受力图的步骤和方法。

§ 1-1 静力学基本概念

静力学是研究物体平衡的科学。为了研究这个问题，下面先介绍一些基本概念。

一、刚体的概念

静力学研究的物体主要是刚体。所谓刚体是指在力作用下不变形的物体，即刚体内部任意两点间的距离保持不变。在实际问题中，任何物体在力作用下或多或少都会产生变形。如果物体变形不大或变形对所研究的问题没有实质影响，则可将物体抽象为刚体。由于静力学主要以刚体为研究对象，所以也称为刚体静

力学。

二、平衡的概念

平衡是指物体相对惯性参考系静止或作匀速直线平动。它是物体机械运动的一种特殊状态。在工程技术问题中，常把固连于地球上的参考系视为惯性参考系。这样，平衡就是指物体相对地球处于静止或作匀速直线平动的状态。

三、力的概念

力是物体间的相互机械作用。物体间的相互机械作用的形式多种多样，总起来可以归纳为两类，一类是物体直接接触的作用，如压力、摩擦力等；另一类是通过场的作用，如万有引力场、电场对物体作用的万有引力和电磁力等。尽管物体间相互作用的形式和物理本质不同，但这种机械作用的效应主要有两方面：一是使物体的机械运动状态发生改变，例如改变物体运动速度的大小或方向，这种效应称为力的外效应（也称为运动效应）；另一是使物体的形状发生改变，例如使梁弯曲，使弹簧伸长，这种效应称为力的内效应（也称为变形效应）。力对物体作用产生的这两种效应是同时出现的。由于本课程所研究的主要是刚体，所以主要研究力的外效应。

人们的长期实践证实，力对物体作用的效应取决于力的三个要素：(1) 力的大小，(2) 力的方向，(3) 力的作用点。力的大小反映了物体间相互机械作用的强度，它可以通过力的外效应或内效应的大小来度量。在国际单位制(SI)中力的单位是牛顿(N)。在工程单位制中力的单位是公斤(kgf)。两种单位制存在下列关系

$$1(\text{kgf}) = 9.80(\text{N})$$

力的方向指的是静止质点在该力作用下开始运动的方向。沿该方向画出的直线称为力的作用线。力的方向包含力的作用线在空间

的方位及指向。力的作用点是物体相互作用位置的抽象化。实际上,两个物体接触处总占有一定面积,力总是分布地作用于物体的一定面积上的。如果这个面积很小,则可将其抽象为一个点,称为力的作用点,这时的作用力称为集中力;反之,如接触面积比较大,力在整个接触面上分布作用,这时作用的力称为分布力。分布力作用的强度用单位面积上力的大小 $q(\text{N}/\text{cm}^2)$ 来度量,称为载荷集度。

力的三要素说明,力可以用一带箭头的线段来表示(图 1-1)。线段的长度 $\overline{AB}$ 按一定比例表示力的大小,线段的方位和箭头指向(由 A 指向 B)表示力的方向,线段的始端 A 表示力的作用点。在下节还将说明作用于物体上同一点的两个力服从平行四边形加法法则。我们知道,任何一个有大小,方向并服从平行四边形加法法则的物理量是矢量,所以力是矢量。由于力的作用点是力对物体作用的三要素之一,所以表示力的矢量只能将其始端放置在作用点 A 上,这种矢量称为定位矢量。因此,力是定位矢量。今后我们用黑体字母表示矢量,例如图 1-1 中的力 $\boldsymbol{F}$,而用非黑体字母 F 表示力 $\boldsymbol{F}$ 这个矢量的模,即 $F=|\boldsymbol{F}|$ 。需要注意的是仅从符号 $\boldsymbol{F}$ 并不能确定它所表示的矢量的作用点,这种只表示力的大小和方向,并可以从任一点画出的矢量称为力矢。

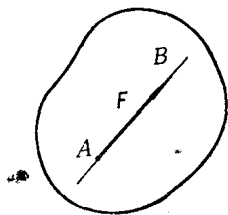


图 1-1

则的物理量是矢量,所以力是矢量。由于力的作用点是力对物体作用的三要素之一,所以表示力的矢量只能将其始端放置在作用点 A 上,这种矢量称为定位矢量。因此,力是定位矢量。今后我们用黑体字母表示矢量,例如图 1-1 中的力 $\boldsymbol{F}$,而用非黑体字母 F 表示力 $\boldsymbol{F}$ 这个矢量的模,即 $F=|\boldsymbol{F}|$ 。需要注意的是仅从符号 $\boldsymbol{F}$ 并不能确定它所表示的矢量的作用点,这种只表示力的大小和方向,并可以从任一点画出的矢量称为力矢。

四、力系的概念

作用在物体上的一群力总称为力系。一个力系作用于刚体而不改变其运动状态,则该力系称为平衡力系。如果两个力系分别作用于同一物体其效应相同,则这两个力系称为等效力系。若一个力和一个力系等效,则称这个力是这个力系的合力,而该力系

中的每个力是合力的分力。对一个比较复杂的力系求与它等效的简单力系的过程称为力系的简化。力系简化是静力学最基本的内容。力系简化的方法在动力学中也是十分有用的。

按照力系中诸力作用线在空间分布的情况, 可以将力系进行分类。如果诸力作用线在同一平面内, 该力系称为平面力系, 否则称为空间力系; 如果诸力作用线汇交于一点, 则称为汇交力系; 诸力作用线彼此平行的称为平行力系; 诸力作用线任意分布的称为一般力系或任意力系。显然, 诸力作用线在同一平面上并汇交于一点的力系可以称为平面汇交力系。以后我们将根据由简单到复杂的顺序分章研究各种力系的简化和平衡问题。

§ 1-2 力的基本性质

在力的概念逐步形成的同时, 人们通过大量的实践也逐步认识到力的一系列基本性质, 也就是力对物体作用的最简单的和最基本的规律, 力的这些基本性质是显而易见的, 并为长期以来的大量实践证明是正确的。力的基本性质主要有五条, 它们是静力学的理论基础。

一、二力平衡原理

要使两个力作用的刚体平衡, 必须也只需这两个力的大小相等, 方向相反, 且作用在同一直线上(图 1-2)。

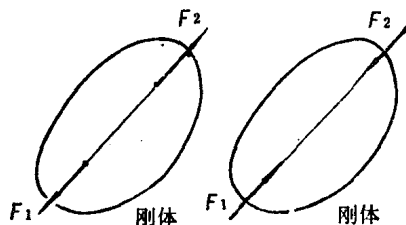


图 1-2

需要强调的是,这个原理只适用于刚体。二力等值、反向、共线是刚体平衡的必要与充分条件。由二力平衡原理得知,两个大小相等、方向相反且共线的力构成最简单的平衡力系。

二、增减平衡力系原理

在作用于刚体的力系上增加或减去一组平衡力系不改变原力系对刚体作用的效应。

这个原理也只适用于刚体。对于变形体来说,增加或减去一组平衡力系,改变了变形体各处的受力状态,将引起其外效应和内效应的变化。

从前面两个原理可导出一个重要的推论。

推论 力在刚体上的可传性

作用在刚体上的力可以沿作用线任意移动,而不改变它对刚体作用的效应。

证明:

设有力 F 作用在刚体上的 A 点,如图 1-3(a) 所示。在其作用线上的任一点 B 增加一组平衡力 F' 和 F'' ,且令 $F' = -F'' = F$,根据增减平衡力系原理,力 F 与三个力 F, F', F'' 等效,如图 1-3(b) 所示。在这三个力中,显然 F 与 F'' 构成一平衡力系。再根据增减平衡力系原理,去掉这两个力。因此, F, F', F'' 三个力与 F' 等效。也就是说,作用在刚体上 B 点的力 F' 与原作用在 A 点

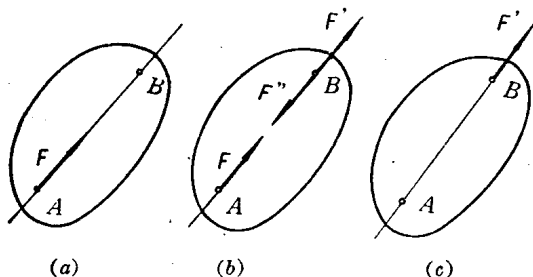


图 1-3

的力 F 等效, 即力 F 从作用点 A 沿作用线移到了任一点 B , 如图 1-3(c) 所示。

可以沿其作用线移动而不改变其性质的矢量称为滑动矢量。根据力在刚体上的可传性知道, 作用在刚体上的力是滑动矢量。即力对刚体作用的效应与力的作用线的位置有关, 而与力的作用点在作用线上的具体位置无关。所以, 对于作用在刚体上的力来说, 力的三要素应是: 力的大小、力的作用线、沿作用线的指向。

三、力的平行四边形定律

作用在物体同一点的两个力可以合成为一个合力, 合力的作用点在同一点, 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决定(图 1-4)。力的这个性质也称为力的平行四边形法则。力的这个性质写成矢量表达式为

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1-1)$$

即合力矢 $\mathbf{R}$ 等于两个分力矢 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 的矢量和。

很明显, 利用力的平行四边形法则求合力, 对于变形体来说, 二分力要有共同的作用点; 而对于刚体来说, 二分力作用线只要相交就可以合成, 这时根据力的可传性, 可将分力移到作用线的交点处。

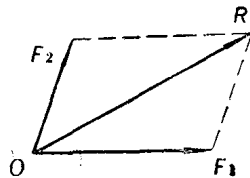


图 1-4

由力的这个性质可得到如下重要推论。

推论 三力平衡汇交定理

刚体在三力作用下平衡, 如其中二力的作用线相交, 则第三力的作用线必过该交点, 且三力共面。

证明:

设在刚体的 A, B, C 三点上分别作用有力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3$ (图 1-5), 其中 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 的作用线相交于 O 点, 刚体在此三力作用下平衡。