

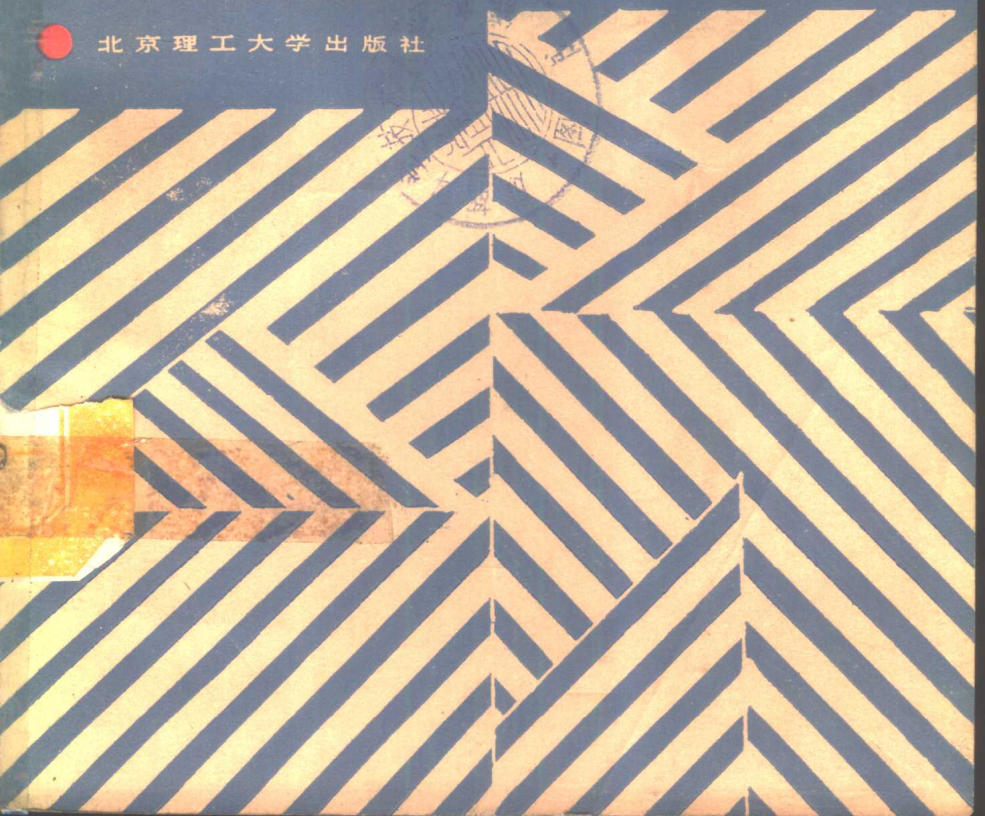
919553

理论力学 教程

(上册)

李树焕 戴泽墩 编著

北京理工大学出版社



理论力学教程

(上册)

李树焕 戴泽城 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是根据国家教委审订的教学基本要求，吸取了近十年来课程改革的经验而编写的高等工科多学时类理论力学教材。内容体系新颖、层次分明、重点突出、文字精练，例题、习题数量充足，因此有较好的教学适用性。

全书分上、下两册。上册为运动学和静力学，下册为动力学。可作为高等工料院校机械、建筑、航空、船舶等专业的教材，或其它有关专业的教学参考书，并可供工程技术人员参考。

理 论 力 学 教 程 (上 册)

李树焕 戴泽敏 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

**

787×1092毫米 32开本 13 印张 288 千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-354-3/O·68

印数：1—5000册 定价：3.50元

序

本书是根据国家教委颁发的《理论力学教学基本要求》而编写的。全书分上、下两册，上册为运动学和静力学，下册为动力学。本书适于作高等工科学校机械、航空、船舶、建筑等专业多学时类理论力学教材，亦可作为科技人员的参考书。讲授本书的全部内容约需110学时，其中运动学约需30学时，静力学约需24学时，动力学约需56学时。

编写这本教材总的想法是，吸取我校特别是作者近十年来在教改实践中正反两方面的经验，精简与前修课程不必要的重复，突出本课程扩宽、加深的内容和分析解决问题的特有方法，使教材更切合我国培养社会主义高级建设人材在教学工作中的实际需要。因此，在内容的选取、体系的编排、以及对某些理论概念的阐述和定理的证明等方面，做了一些我们认为对读者学习可能是有益的变动。主要有以下几点：

1. 本书采用了“运动学—静力学—动力学”的体系顺序。

这是基于以下几点考虑：第一，先讨论运动的描述，把力和运动分开，使静力学和动力学的结合更紧密，这对三部分的学习都有好处。第二，约束、自由度和广义坐标既是运动学的、同时也是静力学和动力学的重要理论概念。在运动学中建立这些概念比较自然、形象、易懂，更符合学科内容的内在联系和人的认识规律。第三，相对于静力学而言，运动学中的新内容和重点、难点较多，先学这部分，学生思考

和消化问题的余地较大。

2. 为了使难点分散,在刚体平面运动一章中仅对一个参考坐标系讨论刚体平面运动的描述,而不引入动坐标系研究刚体平面运动的分解。方法是从位移定理出发,突出速度瞬心法。而后,在点的复合运动一章之后再给出刚体复合运动的概念,引入平动和转动坐标系讨论刚体平面运动的两种分解。我们认为,这样处理,既分散了难点,又加深了学生对平面运动的理解。同时,由于先讲平面运动,也使过去无法求解的牵连运动是平面运动的点的复合运动问题得以解决。

3. 力系的主矢和对某点之主矩,是表征力系性质的两个特征量。它既是静力学的更是动力学的两个不依附于力系简化的重要概念。因此,我们认为在静力学中讲授力系简化之前单独列章,有利于消除在读者中过去曾产生的“没有力系的简化就没有力系的主矢和主矩”的误解。这对静力学和动力学的学习都有益处。

4. 根据我国教学的实际情况和我们实践的经验,我们认为在静力学中,按照由一般到特殊的认识规律来展开课程内容,既是必要的,也是可能的。因此,在编写时,我们采用了以力系的主矢和主矩为线索、以力系简化为手段、以平衡方程的应用为重点、由空间力系到平面力系的新体系。我们认为这样做,不仅可以避免教材自身以及与学生已有知识的许多不必要的重复,能较好地突出教材的层次台阶,而且可以大大减少教材的篇幅,节约授课学时。

5. 对于力偶无合力的性质,我们采用了二力平衡公理和三力平衡定理以反证法来证明。目的是希望把“无合力”与“合力为零”这两个完全不同的概念严格区别开来。

对于静不定问题的概念，我们认为在基本力系中即应建立。这比在物系平衡问题中才建立要更好。

6. 在动力学中，把质点和质点系动力学普遍定理合并，突出质点系动力学普遍定理。同时，调整了三个定理的顺序，先讲动能定理。目的是：第一，希望能突出动能定理在解决非自由质点系已知主动力求运动的大量问题中的独特作用。第二，希望能克服过去在学完动量定理后，不能处理需要先求运动，再用动量定理求动反力的一类问题。

此外，在动力学中，为强化学生对动能、动量、动量矩这些运动特征量的理解和计算能力的培养，在三个定理中均单独列节，突出讲解它们的定义和计算方法，并配备了相当数量的例题和习题，以利于读者把动力学的学习与已有的运动学知识有机地结合起来。

我们希望通过上述变动，能取得更有利于读者学习的效果。但这只是我们主观的愿望。由于我们教改实践经验不多，可以肯定地说，以上的变动以及书中对其它内容的处理会有不妥之处。因此，恳诚地希望国内同行专家和广大读者对本书的缺点、错误提出批评指正，以使我们的愿望能在大家的帮助下得以实现。

作者

1989年11月于北京理工大学

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 运动学

第一章 运动学基础	4
-----------	---

§ 1-1 运动学的研究对象	4
§ 1-2 参考系与参考坐标系	5
§ 1-3 约束	6
§ 1-4 刚体运动的分类	11
§ 1-5 机构与机构简图	13

第二章 点的运动学	20
-----------	----

§ 2-1 点的运动方程·广义坐标与自由度	20
§ 2-2 点的速度和加速度	28
§ 2-3 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	31
§ 2-4 点的速度和加速度在自然轴上的投影	39
§ 2-5 点的速度和加速度在极坐标中的投影	49

第三章 刚体的基本运动	54
-------------	----

§ 3-1 刚体的平动	54
§ 3-2 刚体的定轴转动	56
§ 3-3 转动刚体上点的速度和加速度	59
§ 3-4 以矢量表示刚体的角速度和角加速度·以矢积表示点的速度和加速度	63

第四章 刚体的平面运动	74
-------------	----

§ 4-1 刚体平面运动研究的简化	74
§ 4-2 平面运动方程·刚体的角速度和角加速度	75

§ 4-3	平面图形运动的位移定理	78
§ 4-4	平面图形上点的速度分析·速度瞬心	79
§ 4-5	平面图形上两点的速度关系	89
§ 4-6	速度投影定理	93
§ 4-7	平面图形上两点的加速度关系	94
第五章	点的复合运动和刚体复合运动初步	107
§ 5-1	相对运动·绝对运动·牵连运动	107
§ 5-2	变矢量的绝对导数与相对导数	111
§ 5-3	速度合成定理	114
§ 5-4	加速度合成定理	129
§ 5-5	刚体复合运动初步——平面运动的两种分解	146
*第六章	刚体的定点运动和一般运动	156
§ 6-1	欧拉角·刚体定点运动的运动方程	156
§ 6-2	定点运动刚体的位移定理(欧拉定理)	158
§ 6-3	刚体的瞬时转动轴·角速度·角加速度	159
§ 6-4	刚体微小转动位移合成定理·角速度合成公式	161
§ 6-5	定点运动刚体上点的速度和加速度	165
§ 6-6	刚体的一般运动	171
运动学习题		175

第二篇 静力学

第七章	作用于刚体上力系的基本性质与物体的受力分析	212
§ 7-1	力与力系	212
§ 7-2	作用于刚体上力系的基本性质	213
§ 7-3	物体的受力分析·受力图	217
第八章	力系的特征量	227
§ 8-1	力在坐标轴上的投影	227
§ 8-2	力系的主矢量	231
§ 8-3	力对点之矩	235

§ 8-4	力对轴之矩·点矩与轴矩的关系	240
§ 8-5	力系对点的主矩	247
第九章	基本力系	252
§ 9-1	汇交力系的简化与平衡	252
§ 9-2	力偶与力偶矩	263
§ 9-3	力偶的性质	265
§ 9-4	力偶系的简化与平衡	271
第十章	任意力系的简化及其平衡条件	277
§ 10-1	力的平移定理	277
§ 10-2	任意力系向一点简化	279
§ 10-3	固定端约束的约束反力和约束反力偶矩	283
§ 10-4	任意力系为平衡的情况·平衡条件	284
§ 10-5	任意力系为不平衡的情况	285
§ 10-6	平行力系中心与物体的重心	297
第十一章	任意力系的平衡方程及其应用	306
§ 11-1	平面力系的平衡方程	306
§ 11-2	刚体系统的平衡问题	314
§ 11-3	考虑摩擦的平面力系平衡问题	323
§ 11-4	空间任意力系的平衡方程及其应用	338
静力学习题		345
附录 I	简单几何形状物体的重心表	384
附录 II	习题答案	387

绪 论

理论力学是研究物体机械运动普遍规律的科学。

在客观世界中存在着多种多样的物质运动形式。物体的位置随时间而变化的这种物质运动形式，称为**机械运动**。此外，声、光、热、电、磁，物质的化合与分解，以至人类的思维活动、生命现象等也都是物质的运动形式。机械运动是物质多种运动形式中最常见、最简单的一种。

研究机械运动普遍规律的意义在于，一方面它是研究物质复杂(高级)运动形式的基础，另一方面在实际问题中存在着大量有关机械运动的课题需要人们去解决。

理论力学通常包含以下三部分内容：

运动学 研究物体运动的几何性质，不考虑物体运动变化的物理原因。

静力学 研究物体在力系作用下的平衡规律，同时研究力的基本性质和力系的简化方法。

动力学 研究物体的受力与其运动变化间的关系。

为了研究机械运动的普遍规律，在理论力学中，通常需要根据问题的性质把实际物体抽象成为**刚体**、**质点**或**质点系**等不同的理想力学模型。刚体是指在任何情况下都不会发生变形的物体。或者说体内任意两点间距离始终保持不变的物体称为刚体。质点是指具有质量的几何点。质点系又称为质点组，是指有限或无限个彼此有联系的质点的组合。质点间距离可以改变的质点系，称为可变质点系。例如气体、液体

和可以变形的固体。质点间距离保持不变的质点系，称为不变质点系。刚体是不变质点系。

显然，理想的刚体、质点和质点系是不存在的。但是，为了抓住决定事物本质的主要因素，就必需撇开影响不大的次要因素而把实际问题抽象为理想模型。这样不仅可以使问题的研究得到很大的简化，而且也是为了抓住事物的本质规律。例如，在研究人造地球卫星的轨道问题时，就必需撇开卫星上各点轨迹不同这一次要因素，而把卫星抽象为质点。不难理解，实际物体究竟应该抽象为什么样的力学模型，完全取决于所研究问题的性质。仍以地球卫星为例，当研究卫星飞行姿态时，就不能再把它抽象成为质点，而应抽象为质点系——刚体。

从实践出发，经过抽象、综合、归纳建立公理，再应用数学演绎和逻辑推理而得到结论，形成理论体系，然后又通过实践去检验理论的正确性。这是理论力学的研究方法，也是理论力学学科发展至今所走过的道路。

理论力学的全部理论以伽利略和牛顿创立的基本定律为基础，因而属于古典力学范畴。近代物理学指出，尽管古典力学的理论对于微观粒子的运动和接近于光速的宏观物体的运动已不适用，但是对于远低于光速的宏观物体的运动是完全适用的。一般工程技术中所遇到的大量力学问题，用古典力学去解决，不仅简便，而且有足够的准确度。这已为无数的事实所证实。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。学习理论力学的任务在于一方面它与其它学科相配合，可以直接解决工程技术中的有关问题；另一方面它又是学习材料力学、机械原理、机器零件等许多后继课程的基础；同时，学习理论力

学也有助于培养辩证唯物主义的世界观。

为了学好理论力学，在学习方法上必须充分重视基本概念、基本理论和基本方法的学习。要在钻研理论与分析例题、解算习题之间反复交替进行，使认识逐步深化，以达到提高分析、解决问题能力的目的。

第一篇 运动学

第一章 运动学基础

§1-1 运动学的研究对象

由物理学知道，物体的机械运动规律，不仅与物体的受力情况有关，而且与物体的质量以及物体运动初始情况有关。研究物体的机械运动规律与其受力间的普遍关系是本书第三篇动力学的任务。

在运动学里，我们将不考虑力和质量这些决定物体运动规律的物理因素，而单纯从几何角度来研究怎样对给定的物体运动规律作出定量的描述。这样做，不仅可以使复杂的动力学问题的研究得以简化，而且也是解决工程技术问题所必需的。因为在机械设计中，通常首先要解决的问题，总是暂时撇开物体的质量和受力状况，单独进行运动分析，以判断设计能否实现某种预期的运动。

由此可见，**运动学是从几何角度对给定物体的运动进行定量描述的一门科学。**

在运动学中，采用的理想化物体模型是质点与刚体。由于不考虑质量。所以又把质点进一步抽象为纯几何点。因此，运动学通常区分为**点的运动学**与**刚体运动学**两部分。

为了精确地描述点和刚体的运动，除几何公理之外，还

需要有微分学与矢量代数等有效的数学工具。恩格斯说：“只有微分学才使自然科学有可能用数学来不仅仅表明**状态**，并且也表明**过程**：运动。”^①力学发展史说明，正是对物体运动的分析，促进了微积分学的产生；同时，也正是微积分学的创立，才使对物体的运动作定量的、精密的分析与描述成为可能。

§1-2 参考系与参考坐标系

物理学告诉我们，对一切物体运动的描述都是相对于某一预先选定的参照物(参考体)而言的。参照物又称为**参考系**。对不同的参考系来观察和描述同一物体的运动，其结果是不同的。例如，站在地面上和坐在行驶着的车辆中来观察同一地面建筑物。在地面的观察者以地面为参考系，看到建筑物处于静止；而坐在车上的观察者，以行驶着的车辆为参考系，看到建筑物处于与车辆行驶的反方向运动中。

为了便于对物体的运动进行定量的描述，在选定参考系之后，还需要选定与参考系相固连的某种坐标系。这种坐标系称为**参考坐标系**。通常选取直角坐标系，此外还有自然轴系、柱坐标系(包括极坐标系)和球坐标系等。无论哪种坐标系，在运动学中都可以把它们理解为一个在三维空间中的刚体。

一般来说，在运动学里由于不考虑运动的物理因素，因此可以任意地选取参考系和参考坐标系。例如在上面的例子中，既可选取与地球相固连的参考坐标系，又可选取与车辆

^①恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版第249页。

相固连的参考坐标系。不过，由于人类生活在地球上，习惯以地球为参考系来考察物体的运动。因此，以后除了特别声明以外，物体的运动均指相对于地球这一参考系而言。

但是，在动力学(包含静力学)中，由于必须考虑运动的物理因素，因此，参考坐标系的选取就不再具有任意性。例如牛顿定律只适用于特定的参考坐标系——**惯性参考坐标系**。

§1-3 约 束

约束的概念是理论力学的重要基本概念之一。

在理论力学中把所有的物体分为两类：自由体和非自由体。自由体是指可以在空间取得任意方向的位移，即运动不受任何限制的物体。例如在空中飞行的飞机、飞禽等。非自由体是指某些方向的位移受到周围物体的限制而不能随意运动的物体。例如在轨道上行驶的列车、在轴承内转动的轮轴、被两端支座固定而静止不动的桥梁以及所有的机器零件、构件等。可以看出，非自由体之所以不能随意运动，是由于受到与之相连物体的限制，因而在运动中必须满足事先给定的几何条件。在上面例子中，列车受铁轨的限制只可沿轨道运动；轮轴受轴承的限制只可在轴承内转动；桥梁受支座的限制而静止不动等都是事先给定的限制物体运动的几何条件。我们称这种**预先给定的限制物体运动的几何条件为约束条件**，简称**约束**①。以后，凡物体运动必须满足某种约束

①在静力学中，由于我们主要研究物体之间的相互作用，因此，又把与自由体相联接而限制其某些方向运动的其它物体称为约束。

条件时，就说此物体是受到约束的物体。因此，也可以说非自由体是运动受到约束的物体，而自由体则是运动不受约束的物体。

可以看出，约束是由于物体与其它物体相联接而形成的。当这种相互连接的方式不同时，对物体运动的几何限制条件也不相同。为便于研究，可按物体间相互联接的形式及其限制运动的特点将常见约束分为以下几种类型。

(1) 柔绳约束 这种约束是物体与柔软不可伸长的绳索相联接而成(图1-1)。柔绳约束只限制物体沿绳索被拉伸方向的运动。机构中皮带轮受到皮带的约束、链轮受到链条的约束、滑轮组中滑轮受到绳索的约束都属于这类约束。

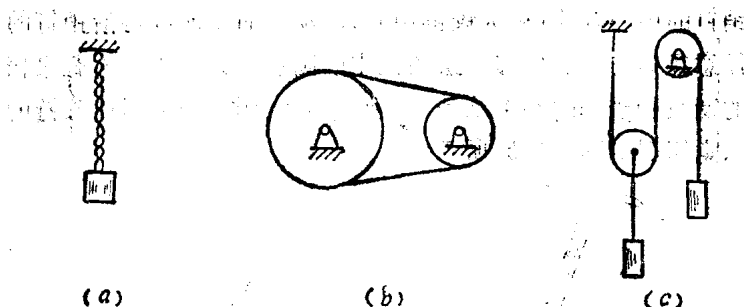


图1-1

(2) 光滑面约束 这类约束是将物体搁置于光滑的平面或曲面上而形成(图1-2(a)、(b))。它限制物体只能沿光滑面运动，而不能取得沿法线方向进入光滑面的位移。常见机构中，沿光滑轨道滑动的滑块和滑杆(图1-2(c))所受的约束都属于此类约束。

(3) 光滑圆柱铰链约束 此类约束是光滑面约束的一种

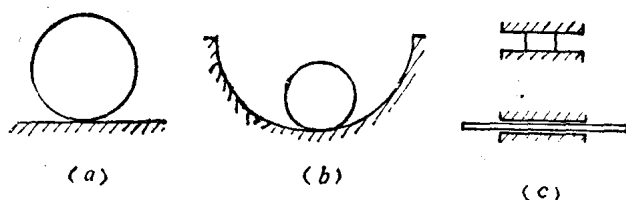


图1-2

演变形式。如图1-3(a)所示，在 AB 和 BC 两物体的 B 端钻以相同直径的光滑圆孔，用一直径稍小的光滑圆柱销钉 B 插入二孔内，把两物体联接在一起。我们称 AB 和 BC 两物体在 B 端受到光滑圆柱铰链约束。显然，受这种约束的物体只可绕销钉的中心轴线(称为铰链中心)转动，而不能取得沿销钉的任意径向方向的位移。绘图仪中的圆规、分规以及折叠桌椅的两只脚受到的约束都是这类约束的实例。光滑圆柱铰链的示意简图如图1-3(b)所示。

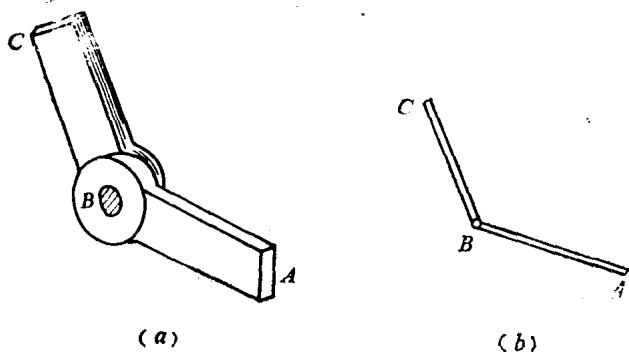


图1-3

(4) 固定铰支座约束 这类约束是光滑圆柱铰链约束的演变形式。若用光滑圆柱铰链联接的二物体中，有一个是与