



# 理论力学

(第四版) 上册

清华大学理论力学教研组 编

罗远祥 官飞 李苹 修订

高等教育出版社

高等学校教材

# 理论力学

上册

(第四版)

清华大学理论力学教研组编

罗远祥 官飞 李莘 修订

高等教育出版社

(京) 112 号

## 内 容 提 要

本版在内容和体系上作了一定的调整,理论部分较第三版进一步精练和压缩,突出理论体系的主要线索,补充了应用理论分析实际问题的内容。静力学部分突出基本力系和一般力系;从空间问题讲起;增加了刚架结构静力分析、摩擦在工程技术中的应用问题、分布载荷的简化等。物体的受力分析仍作为静力学中的重点。运动学部分首先从一个参照系描述点和刚体的运动,然后再过渡到从两个相互运动的参照系描述点和刚体的复合运动,使读者便于学习和掌握。全书加强了矢量运算,书末附有计算机解题作业。

本书可作为重点高等学校教材或参考书,也可供其它科技人员参考。

高等学校教材

## 理 论 力 学

上 册

(第四版)

清华大学理论力学教研组 编

罗远祥 官飞 李苹 修订

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

中国科学院印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 16.875 字数 430 000

1961年7月第1版 1962年6月第2版

1981年6月第3版

1994年11月第4版 1994年11月第1次印刷

印数 0001—3 192

ISBN7-04-004992-9/TU·76

定价 9.55 元

## 第四版前言

自一九八一年底本书第三版出版以来,已经有十二个年头。在这相当长的时间内,经过许多次教学实践,听取了教师和学生的意见,收集了兄弟院校教师的反映,我们在保持本书原有基本风格和特点的基础上,对本书作了修改。我们希望修改后的第四版更能适应理论力学课程当前教学改革和今后发展的需要。本版主要在下列几个方面作了修改:

(一)适当调整了学科内容的教学体系,突出理论体系中的主要线索,使学生在学本课程时,对理论系统有较为简洁、明确的认识。

现就三篇内容分别说明如下:

第一篇静力学主要分两大部分:力系简化与平衡的理论部分及应用问题部分。其中理论部分较上版进一步加以压缩和简化,突出基本力系和一般力系两个主题,从空间问题讲起,并将平面问题作为空间特例处理。从我们教学实践经验来看,静力学的难点是如何应用理论分析实际问题。为此我们加强了应用问题部分,增加了刚架结构静力分析、摩擦在工程技术中的应用问题、分布载荷的简化等。当然,物体的受力分析仍然作为静力学中的重点,在静力学例题的分析方法中加以强调并从头到尾注意贯彻。

第二篇运动学主要也分两大部分:一是点和刚体运动;二是点和刚体的复合运动。第一阶段主要是从一个参照系描述运动,然后,再过渡到第二阶段,主要是从两个相互运动的参照系来描述运动。这样做,在研究对象上和分析方法上比较清晰。

第三篇动力学主要分三大部分:一是质点动力学,二是质系动力学普遍定理,三是非自由质系动力学。这是按研究对象从易

到难分类的,主要内容为后面两部分,即质系动力学。其中每一部分都力图贯彻两条主要线索:即以动量为基础和以动能为基础的普遍定理;以惯性力为基础的达朗伯原理及以能量、功的变分为基础的力学变分原理。概括起来说,一条是力和动量为主的线,另一条是功和能量为主的线。在本篇中还有两个应用问题专章:质点的振动和碰撞。

(二) 增添了新的内容,使本版内容在深度与广度上均有所增加。本版仍分上、中、下三册出版。上、中册为基本内容,与国家教委理论力学课程教学指导小组所提出的要求是相符合的,其中有“\*”号的节为加深内容,可根据需要选讲。下册为动力学专题,其内容较上一版增加了质点的非线性振动、力学变分原理和多自由度系统的微振动等三章。这样做的目的是为了使得下册适用于50学时左右高等动力学课程教学需要,也便于在理论力学教学中根据专业特点、因材施教、组织课外专题小组学习之用。

(三) 注重教学法,遵循学生学习时的认识规律来阐述课程中的重点和难点。每章习题前编写解题指导,帮助学生如何学习如何将理论应用于解决实际问题。习题中增加了基本功训练题目,但注意保持本书前版中理论联系工程实际的特点。全书中均加强了矢量运算,把它作为力学分析方法的基本数学工具,要求学生熟练掌握。为了适应现代科技发展及应用计算机的需要,本书还引入了必要的矩阵运算,并在附录中编入了一些应用计算机求解的习题。本书全部习题均附有答案。

本书的修订工作由罗远祥、官飞、李苹三人分工完成。其中动力学绪论、专题部分引言、第15至22章、25及26章由罗远祥修订,静力学绪论、第1至6章、13及27至29章由官飞修订,运动学绪论、第7至12章、14、23及24章由李苹修订。上册由罗远祥统稿,中册由官飞统稿,下册由李苹统稿。罗远祥主持制定了全书修订大纲。王正校核了本书部分内容并编写了计算机作业。此外,由于在制定修订大纲和本书修订过程中关冀华不在国内,但后来

她回国也赶上参加了本版修订中的一些工作。

本书前三版是清华大学理论力学教研组集体编著的,为此,我们在本版前言之后,附上前三版的序或编写说明。

本书由湖南大学黎邦隆教授审阅,由天津大学毕学涛教授和山东轻工业学院刘思汉教授复审,他们对修订稿提出了许多宝贵意见。谨向他们表示衷心的感谢。

本版虽然经过修改,注意改正了前版中的一些缺点和错误,但难免还有疏漏之处,我们诚恳希望读者,特别是使用本书作为教材的教师和学生多多提出批评和指正。

编 者

一九九四年二月

于北京清华大学

## 第三版序

本书是第三版,是在一九六二年第二版的基础上,参考一九八〇年五月在南京审订的《理论力学教学大纲》(草案)(120学时)修订而成的,适用于高等工业学校机械、土建、水利、航空等类专业。本版保留了第二版的主要内容和教学体系,但基本内容的深广度有所增加,以便于在教学中贯彻“因材施教”的原则。考虑到当前理论力学的教学情况和今后发展的需要,本版主要在下列几个方面作了修改:

(一) 根据当前学生入学的水平、大学普通物理和高等数学的教学情况,本版适当地提高了理论力学教学的起点,减少了不必要的重复,但仍然注意有一定的复习和衔接。例如在汇交力系、点的运动学和质点动力学等部分都作了较大的精简和改动。

(二) 在阐明力学的基本概念和基本理论的基础上,本版强调力学的分析方法,例如物体的受力分析和运动分析的方法,正确地画出受力图,建立力学问题的数学模型等。根据我们的教学经验,理论力学的理论不难懂,但如何应用理论去分析具体问题则比较难,关键在于是否深入理解力学的概念和熟练掌握力学的分析方法。为了帮助学生克服这种困难,在本书的例题中注意阐明解题的思路和分析方法,并在主要章节后写有阶段性小结。

(三) 为了适应力学在近代工程技术中应用的需要,我们删减了旧版中的一些内容,增写了新的章节,此外还加强了矢量分析的方法和能量法。例如删减了图解静力学和动、定瞬时中心轨迹等;桁架由原来的一章减为一节;加强了刚体动力学、拉格朗日第二类方程和哈密尔顿原理以及有关的应用问题等。此外,全部改用了国际单位制。

(四) 为了便于教师选用和学生自学,本版由浅入深地编排了相当数量的例题和习题,较难的题目附有“\*”号。习题均附有答案,编印在书后以便自学校核之用。

(五) 为了适应不同学时教学和不同程度学生的需要,本版分上、中、下三册出版。上、中册为基本部分,其中有“\*”号的节为加深内容,可根据需要选讲。下册为专题部分,可根据专业需要选学其中一部分,或完全不用。

本书第二版由清华大学基础部理论力学教研组集体编写。这次第三版的修订大纲也多次经过教研组集体审议,重点章节的修订方案也经过集体讨论。教研组的许多同志参加了本版的修订工作并做习题解答。参加本版修订工作的主要有:

主编: 罗远祥。

执笔: 罗远祥、官飞、关冀华、李苹。

习题选编: 官飞、刘毅朴、时学黄、刘荣暄、陈景宝等。

制图: 王正、丁占鳌、关冀华。

本书由西北工业大学吕茂烈、白振林和哈尔滨工业大学王铎、洪敏谦、王宏钰等同志主审,参加审稿的还有北京航空学院、天津大学、北京钢铁学院等校的同志。此外,华东水利学院和南京工学院等校的同志参加了本书上册的审稿工作。许多兄弟院校理论力学教研组的同志还提出了不少宝贵的书面审稿意见。编者对他们一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,本书中一定还有不少缺点和错误,我们诚恳希望广大读者,特别是使用本书作为教材的师生多多提出批评和指正。

编 者

一九八〇年十二月于北京清华大学



## 第二版编写说明

本书是清华大学理论力学教研组编写的,作为交流讲义出版。

全书分上下两册:上册为静力学及运动学部分,前者内容包括:静力学绪论,汇交力系,力矩及力偶理论,平面力系,摩擦,平面桁架,图解静力学基础,空间力系及重心。后者内容包括:运动学绪论,点的运动学,刚体的基本运动,点的复合运动,刚体的平面运动(包括平行轴转动合成),刚体绕定点运动(包括相交轴转动合成)及自由刚体一般运动。下册为动力学部分,内容包括:动力学绪论,质点运动微分方程,质点的相对运动,动量定理(包括变质量质点运动),动量矩定理(包括陀螺近似理论),动能定理(包括机械能守恒定律),碰撞理论,质点在有心力场中的运动,达伦伯原理及动静法,虚位移原理,第二类拉格朗日方程,一个自由度及两个自由度质系微振动。此外每篇末附有习题及习题解法提要,供师生教学参考选用。

1962年初编者对本书内容作了一些小的修改,更换了一部分例题。

本书可作高等工业学校机械、电机、动力、土建、水利等类专业“理论力学”课程教学的用书,也可供工程技术人员参考。

本书系由清华大学理论力学教研组集体编写,主编人:罗远祥、官飞。主要执笔人:钟一谔、罗远祥、黄昭度、官飞、何衍宗、李方泽。制图人:李方泽、王正。

## 第一版编写说明

本书是清华大学理论力学教研组编写的,作为交流讲义出版。

全书分上下两册:上册为静力学及运动学部分,前者内容包括:静力学绪论,汇交力系,力矩及力偶理论,平面力系,摩擦,平面桁架,图解静力学基础,空间力系及重心。后者内容包括:运动学绪论,点的运动学,刚体的基本运动,点的复合运动,刚体的平面运动(包括平行轴转动合成),刚体绕定点运动(包括相交轴转动合成)及自由刚体一般运动。下册为动力学部分,内容包括:动力学绪论,质点运动微分方程式,质点的相对运动,动量定理(包括变质量质点运动),动量矩定理(包括陀螺近似理论),动能定理(包括机械能守恒定律),碰撞理论,质点在有心力场中的运动,达伦伯原理及动静法,可能位移原理,第二类拉格朗日方程,一个自由度及两个自由度质系微振动。此外每篇末附有习题及习题解法提要,供师生教学参考选用。

本书可作高等工业学校机械、电机、动力、土建、水利等类专业“理论力学”课程教学的用书,也可供工程技术人员参考。

# 目 录

## 第一篇 静 力 学

<b>I. 绪论</b> .....	1
引言.....	1
<b>第一章 力的基本性质和物体的受力分析</b> .....	3
§ 1-1 力的基本性质.....	3
§ 1-2 两种特殊力系的平衡条件和硬化原理.....	5
§ 1-3 约束和约束力.....	9
§ 1-4 受力分析方法.....	15
习题.....	19
<b>II. 力系的简化和平衡条件</b> .....	28
<b>第二章 基本力系</b> .....	28
§ 2-1 汇交力系的简化.....	28
§ 2-2 汇交力系的平衡.....	33
§ 2-3 力对点之矩.....	43
§ 2-4 力对轴之矩.....	48
§ 2-5 力偶的性质.....	51
§ 2-6 力偶系的简化和平衡.....	54
习题.....	58
<b>第三章 一般力系</b> .....	77
§ 3-1 空间一般力系向一点简化.....	77
§ 3-2 空间一般力系简化的最后结果.....	81
§ 3-3 力系的平衡方程和应用.....	87
习题.....	97
<b>III. 静力学应用问题</b> .....	124
<b>第四章 平面结构和机构的静力分析</b> .....	124
§ 4-1 平面桁架.....	124

§ 4-2	桁架杆件内力分析的节点法和截面法	128
§ 4-3	连续梁和刚架	133
§ 4-4	平面机构静力分析	138
§ 4-5	刚体系统的平衡问题·静定与静不定问题	141
	习题	150
<b>第五章</b>	<b>考虑摩擦的平衡问题</b>	<b>163</b>
§ 5-1	滑动摩擦力和摩擦定律	163
§ 5-2	摩擦角和自锁现象	166
§ 5-3	考虑滑动摩擦的平衡问题	170
§ 5-4	皮带摩擦	178
§ 5-5	滚动摩擦	184
	习题	188
<b>第六章</b>	<b>分布平行力系的合力及重心</b>	<b>198</b>
§ 6-1	分布平行力系的合力	198
§ 6-2	物体的重心	201
§ 6-3	简单物体的重心	205
§ 6-4	复合形体的重心	209
§ 6-5	液体静压力	216
	习题	223

## 第二篇 运 动 学

<b>I. 结论</b>	232	
<b>II. 点及刚体的运动学</b>	<b>240</b>	
<b>第七章 点的运动学</b>	<b>240</b>	
§ 7-1	决定点运动的矢径法·点的速度和加速度	240
§ 7-2	用直角坐标法研究点的运动	245
§ 7-3	研究点的运动的自然法	255
*§ 7-4	曲线坐标系	265
§ 7-5	用柱坐标或极坐标研究点的运动	270
*§ 7-6	点在不同直角坐标系中的坐标变换·变换矩阵	277

习题 .....	280
<b>第八章 刚体的基本运动</b> .....	<b>292</b>
§ 8-1 刚体的平动 .....	292
§ 8-2 刚体绕固定轴的转动 .....	294
§ 8-3 用欧拉角确定刚体绕定点的运动 .....	307
§ 8-4 刚体绕定点运动的位移定理·瞬时转动轴 .....	<b>309</b>
§ 8-5 绕定点运动刚体的角速度和角加速度 .....	311
§ 8-6 绕定点运动刚体上任一点的速度和加速度 .....	312
*§ 8-7 刚体的运动量及其上任一点的速度和加速度的矩阵表 达式 .....	316
习题 .....	318
<b>第九章 刚体的平面运动</b> .....	<b>335</b>
§ 9-1 刚体的平面运动方程 .....	336
§ 9-2 平面运动分解为平动和转动 .....	338
§ 9-3 平面图形上各点速度的分析 .....	342
§ 9-4 有限位移转动定理·平面图形的定、动瞬心轨迹 .....	360
§ 9-5 平面图形上各点加速度的分析 .....	365
习题 .....	376
<b>III. 点及刚体的复合运动</b> .....	<b>390</b>
<b>第十章 点的复合运动</b> .....	<b>395</b>
§ 10-1 点的绝对运动和相对运动·牵连运动 .....	395
§ 10-2 速度合成定理 .....	400
§ 10-3 牵连运动为平动时的加速度合成定理 .....	408
§ 10-4 牵连运动为定轴转动时的加速度合成定理 .....	412
习题 .....	430
<b>第十一章 刚体的复合运动</b> .....	<b>447</b>
§ 11-1 刚体绕平行轴转动的合成 .....	447
§ 11-2 刚体绕相交轴转动的合成 .....	458
§ 11-3 自由刚体的一般运动的特例——刚体绕相交轴转动 的推广 .....	470
习题 .....	473

附录 I 简单几何形体的面积、体积和形心·····	485
附录 II 计算机解题作业·····	488
习题答案·····	495
索引·····	520

# 第一篇 静力学

## I. 绪论

### 引言

静力学研究物体在力系的作用下处于平衡的规律。平衡是物体机械运动的一种特殊状态。若物体相对于惯性参考系<sup>①</sup>静止或作匀速直线运动，则称此物体处于平衡。对工程技术中的多数问题来说，可以把固结在地球上的参考系当作惯性参考系。

静力学中所采用的物体的力学模型是刚体。所谓刚体是指在力的作用下不变形的物体。实际上，任何物体受力后或多或少都会发生变形，但是许多物体（例如工程结构的构件或机器的零件等）的变形十分微小，对静力学所研究的问题来说，略去变形不会对研究的结果发生显著的影响，同时能大大减少问题的复杂程度。因此，这时我们把实际的物体抽象化为刚体，不仅是合理的，而且是必要的。

在静力学中我们将着重研究以下两个基本问题：

#### 1. 作用在刚体上的力系的简化。

力系是指作用在物体上的一组力或一群力。当力系作用在刚体上时，在保持力系对刚体作用效应不变的条件下，用最简单的力系等效地代替较复杂的力系，称为力系的简化。通过力系的简化

---

<sup>①</sup> 由普通物理学已知，凡是对牛顿运动定律成立的参考系称为惯性参考系。通常将坐标原点放在太阳系的质量中心，三个坐标轴分别指向恒星的坐标系作为惯性参考系，在这坐标系中进行力学实验与牛顿运动定律密切符合。

可以揭示力系对刚体作用的效应。

## 2. 刚体在力系作用下的平衡条件及其应用。

在一般情形下，刚体在力系作用下不一定处于平衡状态。若作用在刚体上的力系不平衡，则刚体的运动或平衡状态就要发生变化，这是动力学中所要研究的问题。在特殊情形下，若力系满足某些特定的条件，则刚体将处于平衡，这种特定的条件称为平衡条件。因此可以说，静力学是动力学的特例。以后我们将先讨论力系的简化，这时力系不一定平衡；然后再从简化的结果推导力系的平衡条件，建立力系的平衡方程，并应用它来求解刚体的平衡问题。

静力学在工程技术中有着广泛的应用。例如各种工程结构的构件或机械零部件的设计计算，常要先进行静力分析。所谓静力分析包括受力分析和应用平衡条件求出未知力。静力分析所得的结果是构件强度和刚度计算的依据，在材料力学、结构力学或机械零件等课程中将讨论这方面的问题。此外，静力学中力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学的基础。



## 第一章 力的基本性质和物体的受力分析

力的基本性质是从长期的生产实践和科学实验中归纳总结得来的，它们是研究力系简化和平衡问题的基础。本章将要阐明约束的概念和各种典型约束力的分析。同时还要详细说明分析物体受力的方法。

### § 1-1 力的基本性质

性质一 力对物体的效应取决于力的三要素。

力是物体之间相互的机械作用，力对物体的效应是使物体的机械运动发生变化，同时使物体发生变形；前者称为运动效应，后者称为变形效应。在理论力学中只研究力的运动效应。实践证明力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点，称为力的三要素。

力的大小表示物体之间机械作用的强度，它可通过力的运动效应或变形效应来度量，在静力学中常用测力器的弹性变形来测量。在国际单位制中，力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)， $1\text{kN} = 10^3\text{N}$ 。在工程单位制中，力的单位是公斤(kgf)， $1\text{kgf} = 9.80\text{N}$ 。本书采用国际单位制。

力的方向表示物体间的机械作用具有方向性。力的方向包括力的作用线在空间的方位和力沿作用线的指向。

力的作用点是物体间机械作用位置的抽象化。物体相互接触时，力总是分布地作用在一定的面积上。如果力作用的面积很小(相对于受力物体的表面积而言)，可以近似地看成作用在一个点上，这种力称为集中力，此点称为力的作用点。如果力的作用面积较大而不能忽略，则称该力为分布力，例如风压力、水压力等。