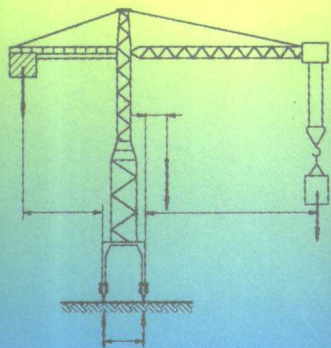
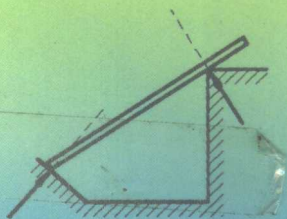
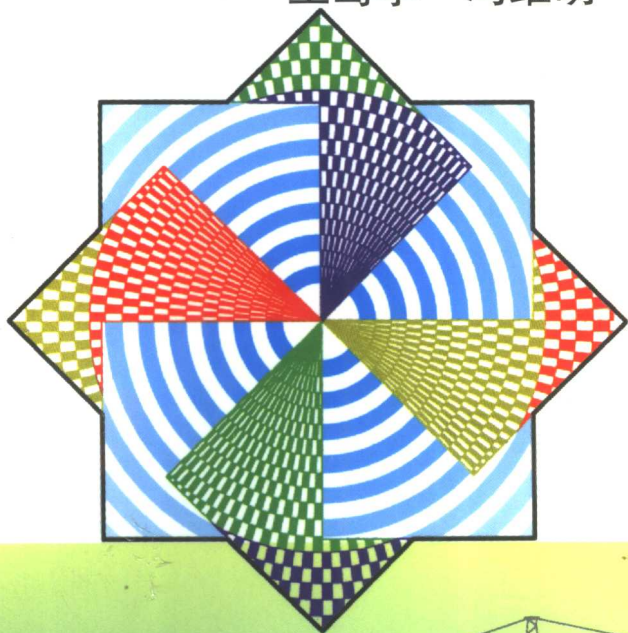


理论力学

王笃学 冯维明 编



上海交通大学出版社

高等学校通用教材

理论力学

王笃学
冯维明

编



上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/王笃学编著. —上海:上海交通大学出版社,
1999

ISBN 7-313-02221-2

I. 理… II. 王… III. 理论力学 IV. 031

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 21352 号

理 论 力 学

王笃学 冯维明 编

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

立信会计常熟市印刷联营厂·印刷

开本:850×1168(mm)1/32 印张:14.25 字数:366 千字

版次:1999 年 7 月 第 1 版

印次:1999 年 7 月 第 1 次

ISBN 7-313-02221-2/O · 150

定价:20.00 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

序 言

本书是根据国家教委颁发的对 70~80 学时的《理论力学教学基本要求》而编写的,适合于工科院校相应的专业选用。考虑到学生的入学水平逐年提高、前期课程扎实的理论基础和学时不断压缩的实际情况,在不降低基本要求的情况下,对原教材的结构体系进行了改革。把教材由传统的三篇改为运动学、动力学两篇,静力学内容放在动力学相应的章节中讲授。早在 80 年代末,编者就按新的结构体系授课并取得了良好的教学效果,讲稿在历届的教学实践中不断修改补充,逐步形成了这一教材,现正式出版,希望与兄弟院校交流,并虚心接受批评意见。

静力学内容在动力学中是这样处理的:力的概念和性质、约束和约束反力、动力学基本定律、分析受力画受力图及摩擦,作为动力学基本概念放在第五章中讲授。在第六章动力学基本定律之后,从质点系动力学的需要出发,在第七章讲授力系的简化。在质点系动力学普遍定理之后的第十一章,把刚体上各点的加速度同时为零的特殊运动状态,即刚体的平衡作为研究内容,从空间一般力系出发导出各种力系的平衡方程,第十二章就是以静力学方法解决动力学问题的达朗伯原理。这样安排不仅衔接自然、结构完整,而且理论的系统性更强。同时,它还具有以下几个特点。

一、提高了起点

运动学与物理学中重复的内容,如点的速度、加速度的概念,点的速度、加速度在直角坐标轴上的投影,可作复习性讲授,重点讲授自然轴系的生成,点的加速度在自然轴上的投影;以矢量表示

角速度、角加速度,以矢积表示定轴转动刚体上任一点的速度、加速度;用矢量直接推导动系为转动时点的加速度合成定理。如果学时充裕或专业需要,还可以讲授点在曲线坐标系中的运动学。与从静力学开始相比,显然提高了起点。一开始学生就直接用上了高等数学中的微积分知识,容易引起他们的兴趣和学习的主动性,为学好后续内容奠定了基础。

二、避免重复、节省学时

重心和质心两个不同的概念用同一坐标公式一次导出;动力学基本定律中的作用反作用定律不重复讲授;从力的平行四边形法则直接导出汇交力系的合成结果,不再单独讲授;无论是力系的简化,还是力系的平衡方程,都从空间一般力系入手,然后推广到各特殊力系。这样就免去了多次重复讲授,可节省学时 10% 以上。

三、加深、加宽了知识内容

用 60~70 学时,就足以讲授 70~80 学时要求的基本内容,打 * 号的内容可以不讲。如果学时接近 80 学时,根据专业要求可适当选择讲授打 * 号的内容。打 * 号的内容虽然超出了基本要求,由于提高了起点,突出了矢量和公式的严格推导,学生也不难接受。运动学中,点的加速度在曲线坐标轴上的投影公式与分析力学基础中拉格朗日方程在形式上是完全一致的,不仅前后呼应,给学生一个想象发挥的余地,也分散了难点。这些内容,无论对部分学生的考研,或对力学进一步深造,都将有很大的帮助。

本书由王笃学、冯维明编写。王笃学主编,负责内容和文字的最后处理,于艳秋、刘广荣老师对文稿的校对做了大量工作。山东轻工业学院的刘思汉教授,对本书的构思、编辑提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,特别是对结构体系作了较大的变动,不当之处在所难免,恳请读者批评指正,不胜感谢。

编 者

目 录

绪论	1
----	---

运 动 学

第一章 点的运动学	5
§ 1-1 点的运动方程	5
§ 1-2 点的速度、加速度	8
§ 1-3 速度、加速度的直角坐标表示法	10
§ 1-4 点的速度和加速度在自然轴上的投影	14
* § 1-5 点在曲线坐标系中的运动学	22
习题	30
第二章 刚体的基本运动	35
§ 2-1 刚体的平行移动	35
§ 2-2 刚体绕定轴的转动	37
§ 2-3 转动刚体内各点的速度、加速度	39
§ 2-4 轮系的传动比	41
§ 2-5 以矢量表示角速度和角加速度·以矢积表示点的速度和加速度	43
习题	47
第三章 点的复合运动	51
§ 3-1 相对运动·牵连运动·绝对运动	51
§ 3-2 点的速度合成定理	53
§ 3-3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	58

§ 3-4 牵连运动为转动时点的加速度合成定理	61
习题	69
第四章 刚体的平面运动	78
§ 4-1 刚体的平面运动概述和运动分解	78
§ 4-2 平面图形内各点的速度·速度投影定理	81
§ 4-3 求平面图形内各点速度的瞬心法	86
§ 4-4 平面图形内各点的加速度	90
* § 4-5 刚体绕平行轴转动的合成	95
习题	101

动 力 学

第五章 动力学基本概念	113
§ 5-1 力的概念	113
§ 5-2 作用于刚体上的力及其性质	115
§ 5-3 动力学基本定律	120
§ 5-4 约束、约束反力	122
§ 5-5 物体的受力分析和受力图	128
§ 5-6 摩擦	130
习题	135
第六章 质点动力学	143
§ 6-1 质点的运动微分方程	143
* § 6-2 质点相对运动动力学的基本方程	154
习题	160
第七章 力系的简化	166
§ 7-1 力偶·力偶系的合成	166
§ 7-2 力对点的矩和力对轴的矩	173
§ 7-3 力的平移定理·空间任意力系向一点的	

简化	180
* § 7-4 空间任意力系简化结果分析	186
§ 7-5 重心	189
习题	198
第八章 动量定理	204
§ 8-1 质点和质点系的动量	204
§ 8-2 力和力系的冲量	206
§ 8-3 质点和质点系动量定理	208
§ 8-4 质心运动定理	214
* § 8-5 变质量质点的运动微分方程	218
习题	222
第九章 动量矩定理	230
§ 9-1 质点和质点系的动量矩	230
§ 9-2 动量矩定理	232
§ 9-3 刚体绕定轴的转动微分方程	239
§ 9-4 转动惯量	244
§ 9-5 质点系相对于质心的动量矩定理	251
§ 9-6 刚体的平面运动微分方程	254
习题	258
第十章 动能定理	269
§ 10-1 质点和质点系的动能	269
§ 10-2 力的功	273
§ 10-3 动能定理	278
§ 10-4 功率·功率方程·机械效率	284
§ 10-5 势力场·势能·机械能守恒定律	287
§ 10-6 普遍定理的综合应用举例	293
习题	298
第十一章 刚体静力学	309

§ 11-1	空间任意力系的平衡条件·平衡方程	309
§ 11-2	平面力系的平衡方程	312
§ 11-3	刚体系统的平衡·静定和静不定问题的 概念	317
§ 11-4	考虑摩擦时的平衡问题	327
	习题	331
第十二章	达朗伯原理	344
§ 12-1	惯性力·质点的达朗伯原理	344
§ 12-2	质点系的达朗伯原理	345
§ 12-3	刚体惯性力系的简化	347
* § 12-4	绕定轴转动刚体的轴承动反力	354
	习题	360
第十三章	分析力学基础	367
§ 13-1	约束·自由度和广义坐标	367
§ 13-2	虚位移·虚功和理想约束	370
§ 13-3	虚位移原理	372
§ 13-4	以广义坐标表示质点系的平衡条件	378
* § 13-5	定常约束和非定常约束	381
* § 13-6	动力学普遍方程	384
* § 13-7	拉格朗日方程	386
	习题	391
第十四章	机械振动基础	397
§ 14-1	单自由度系统的自由振动	398
§ 14-2	单自由度系统的衰减振动	404
§ 14-3	单自由度系统的强迫振动	408
§ 14-4	隔振	414
	习题	419
附录	习题答案	426

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

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

本课程研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动,它以伽利略、牛顿基本定律为基础,属于古典力学的范畴。至于接近于光速或微观粒子的运动,则必须用相应的相对论力学或量子力学进行分析研究。古典力学虽然有一定的局限,但在现代科学技术中仍被广泛应用,其计算精度足能满足要求。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。通过对该课程的学习,既可以应用所学理论解决工程实际问题,又可以为材料力学、结构力学、弹性力学、流体力学、机械原理、机械零件等后续课程及有关的专业课程提供重要的理论基础。另外,通过理论力学的学习还有助于树立辩证唯物主义世界观,培养逻辑思维,提高分析问题和解决问题的能力。

根据循序渐进的认识规律,本书将理论力学的内容分为运动学和动力学两部分。

运动学 研究物体运动的几何性质,而不考虑物体运动的原因。

动力学 研究物体的受力分析、作用于刚体上力系的简化及物体的运动变化与所受力之间关系,也研究物体的平衡规律,即物体平衡时力系所应满足的条件。

理论力学的研究,应遵循**实践——理论——实践**的认识规律。对工程实践中的具体问题,在观察、分析的基础上,透过表象抓住

本质,采用抽象方法建立力学模型。根据掌握的基本理论,经过逻辑推理和数学演绎,建立起相应的运动微分方程或方程组。然后将已知数据代入数学方程,得出计算结果。**实践是检验真理的唯一标准**。若结果在实践中证明正确,就直接证明了理论的正确性。如证明错误,除反复验证外,应考虑采用其他理论或发展形成其他新的学科理论。

从实践中总结、归纳、创造理论,再把理论应用到实践中,只有当理论符合客观实践时,才能证明理论是正确的,只有这样的理论才有实际意义。

运 动 学

运动学是理论力学的一部分,不考虑被研究物体的质量和力对它的作用,只研究物体运动的几何性质。因此,**运动学是研究物体机械运动几何性质的科学**。当物体的尺寸与它的运动范围相比微不足道时,如地球在太阳系中的运动或人造地球卫星相对地球的运动,可作为一个几何点来研究。在运动过程中物体内任意两点之间的距离始终不发生改变,这种物体称为**刚体**。点与不计质量的刚体是运动学的两个力学模型,因此运动学又分为**点的运动学**和**刚体运动学**两部分。

物体在空间的位置随时间的改变称为机械运动。为了观察或描述物体的运动,观察者总是依附于某一物体上,如人既可以站在地面上观察或描述飞机的运动,亦可以坐在运动的汽车上观察或描述同一种运动,观察者所依附的物体称为**参考体**。如果参考体是静止的,固结其上的坐标系称为静坐标系;反之称为动坐标系。如果物体相对所选参考体的位置发生改变时,该物体就处于运动状态;在相反情况下,物体则处于静止状态。实质上,物体的运动或静止是对所选参考体的一个相对概念。由于在运动学里不考虑物体的质量和力的作用,可以任选参考体和参考坐标系。

机械运动是在空间伴随时间而发生的,空间和时间在理论力学中认为是绝对的,即空间是欧几里得三维空间;而时间在任何参考坐标系中均是相同的,与坐标系的运动无关,它是连续变化、均匀增长的自变量 t 。绝对空间、绝对时间并不反映真实的空间和时间,当研究对象是宏观物体,它的运动速度远小于光速时,计算所产生的误差很小,足以满足工程技术的要求。

在运动学中研究两个基本问题:(1)介绍点和刚体相对参考坐标系运动方程的建立方法,即确定点和刚体的空间位置随时间变化规律的方法;(2)研究点和刚体的运动学几何特征,即点或刚体上点的运动轨迹、速度、加速度和刚体转动的角速度、角加速度。

第一章 点的运动学

点的运动学是研究一般物体运动的基础,又具有独立的应用意义。本章将研究点相对某一个参考系的几何位置随时间变动的规律,包括点的运动方程、运动轨迹、速度和加速度等。

§ 1-1 点的运动方程

在空间运动的点,简称为动点。动点在空间的位置随时间变化规律的数学表达式称为点的运动方程。下面介绍几种建立点的运动方程的方法。

一、矢径法

动点 M 的位置可用由固定点 O 指向 M 的矢量 r 表示,该矢量称为矢径。矢径 r 是时间 t 的单值连续的函数

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-1)$$

上式被称为矢径形式的运动方程。

动点 M 即矢径端点,它在空间描绘的曲线称为矢端曲线,矢径的矢端曲线亦即动点的轨迹。

以 O 为坐标原点,建立如图 1-1 的直角坐标系 $Oxyz$,矢径在三根坐标轴上的投影就等于 M 点相应的坐标 x, y, z , 设 i, j, k 为相应坐标轴

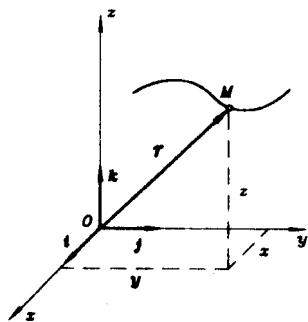


图 1-1

的单位矢量,矢径 r 可以表示为三个分矢量的矢量和,即

$$r = xi + yj + zk \quad (1-2)$$

二、直角坐标法

动点 M 在图 1-1 直角坐标系中运动时,相应坐标 x, y, z 可唯一确定它在空间的位置,并且是时间 t 的单值连续函数。利用式(1-2),可以将运动方程(1-1)写为

$$\left. \begin{aligned} x &= f_1(t) \\ y &= f_2(t) \\ z &= f_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

以上三式就是直角坐标形式的运动方程,也是以 t 为参数的轨迹方程。消去时间参数 t ,可得两曲面方程

$$f(x, y) = 0, \quad f(y, z) = 0$$

两曲面的交线即为动点 M 的轨迹。

若点在 Oxy 平面内运动,运动方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= f_1(t) \\ y &= f_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

从上式消去时间参数 t ,即得轨迹方程

$$f(x, y) = 0$$

三、以柱坐标表示的运动方程

动点 M 在空间的位置若由图 1-2 所示的三个独立参数 φ, r 和 z 确定,这三个参数称为柱坐标。当动点 M 运动时,柱坐标为时间的函数,即

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= f_1(t) \\ r &= f_2(t) \\ z &= f_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

当点的轨迹为平面曲线时,动点 M 的位置只需要 φ 和 r 两个参数确定,如图 1-3 所示, φ 和 r 称为极坐标。式(1-5)中的前两个方程称为以极坐标表示的点的运动方程。

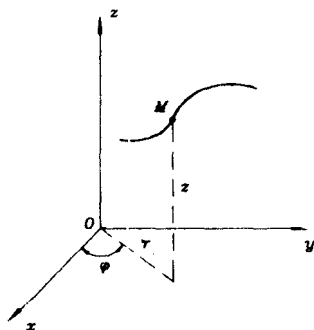


图 1-2

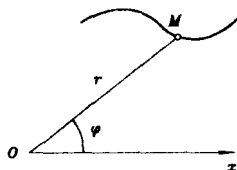


图 1-3

四、以球坐标表示的运动方程

动点 M 在空间的位置若由图 1-4 所示的三个参数 φ , θ 和 r 确定,当动点 M 运动时,这三个参数都是时间的函数,即

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= f_1(t) \\ \theta &= f_2(t) \\ r &= f_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

则 φ , θ 和 r 称为球坐标,上式称为以球坐标表示的点的运动方程。

五、以弧坐标表示的运动方程

设动点 M 的轨迹为如图 1-5 所示的曲线,则动点 M 在轨迹上的位置可以这样确定:在轨迹上任选一点 O 为参考点,并设点 O 的某一侧为正向,动点 M 在轨迹上的位置由弧长确定,视弧长 s 为代数量,称它为动点 M 在轨迹上的弧坐标。当动点 M 运动时, s 随时间变化,它是时间的单值连续函数,即