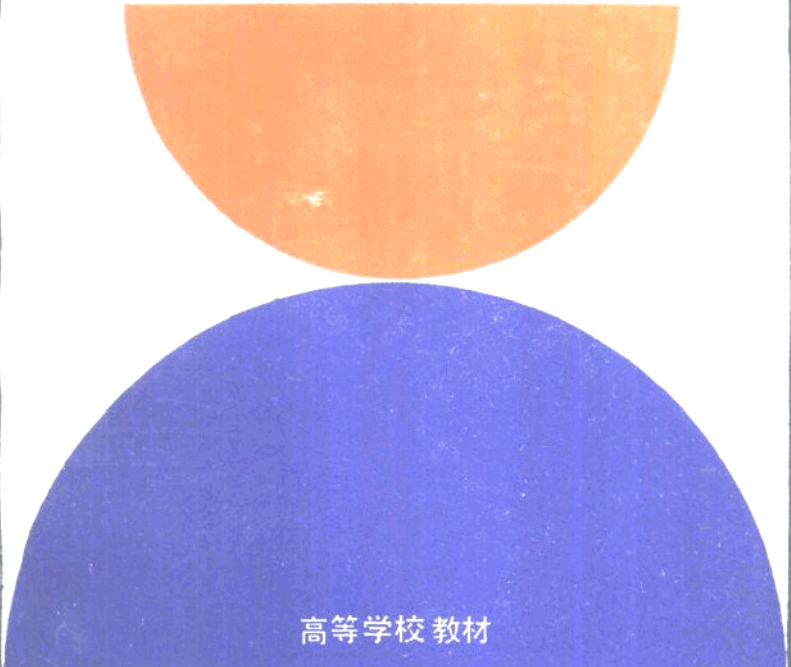


【第二版】



高等学校教材

理论力学

【运动学和动力学】

刘思汉 殷汝珍 编
纪炳炎 屈 苹

刘思汉 主编

高等教育出版社

高等学校教材

理论力学

[运动学和动力学]

第二版

刘思汉 殷汝珍 编
纪炳炎 屈革
刘思汉 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本教材是在北京钢铁学院与东北工学院合编的《工程力学》的基础上,参照一九八〇年五月在南京审订的《工程力学教学大纲》(草案)中理论力学部分(60学时)修订而成的。此次修订,将原《工程力学》分为《理论力学》和《材料力学》,独立分册出版。理论力学部分又分成静力学、运动学和动力学两册。

本教材与原《工程力学》比较,适当提高了起点,加强了矢算法的应用,编排了较多的例题和习题,各章之后有小结和思考题。

本教材主要适用于冶金、地质、轻工、材料、石油等类专业少学时理论力学课程,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

理 论 力 学

[运动学和动力学]

第 二 版

刘思汉 编
刘思汉 编

刘思汉 编

高等教育出版社

新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10.75 字数 268 000

1987年7月第1版 1987年8月第1次印刷

印数 00,001—44,130

书号 15010·0835 定价 1.95 元

第二版序

本教材是在北京钢铁学院与东北工学院合编的《工程力学》的基础上,参照一九八〇年五月在南京审订的《工程力学教学大纲》(草案)中理论力学部分(60学时)修订而成的。根据一九八二年理论力学教材编委扩大会议和材料力学教材编委扩大会议的建议,将《工程力学》分为《理论力学》和《材料力学》,理论力学又分成静力学、运动学和动力学,并独立成册出版,以利配合使用。

本教材适用于高等学校工科冶金、地质、轻工、材料、石油等类专业的少学时理论力学课程,也可供有关工程技术人员参考。

本教材的内容都是本学科的基本内容,是教学大纲所要求的。但为适应各类专业的不同要求,本教材还编写了一些带“*”号的选修内容。考虑到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,本教材适当地提高了起点,加强了矢算法的应用。为了便于教师选用和学生自学,本教材各章编排了较多的例题和习题,较难的题目附有“*”号。此外,各章之后还附有小结和思考题以期帮助读者总结收获和澄清概念。

参加本教材修订工作的有,静力学部分,北京钢铁学院纪炳炎(第一章、第二章、第三章、第四章),屈革(第五章、第六章);运动学和动力学部分,东北工学院刘思汉(第一章、第二章、第五章、第六章、第七章、第九章)殷汝珍(第三章、第四章、第八章、第十章)。第二版序、绪论、各部分引言和附录由本书主编刘思汉执笔。

本教材承天津大学毕学涛同志、北京航空学院周耀珊同志主审,清华大学罗远祥同志复审。审稿的同志对本教材提出了许多宝贵意见。此外,在修订过程中还得到许多兄弟院校的 help 和支

持。东北工学院，北京钢铁学院理论力学教研室的同志也十分关心本教材的修订工作，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，本教材中必然存在不少缺点和错误，诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

一九八五年五月

第一版序

本教材是根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科力学教材会议的建议,按照 120 学时的教学要求编写的。本教材主要适用于地质、采矿、冶金、热加工、材料等类专业;作适当增删后,也可适用于 100~130 学时的有关专业。

为适应各类专业的不同要求,本教材还编写了一些带有“*”号的选学内容。各章之后附有小结、思考题和习题,以期帮助读者总结收获,澄清概念和加强基本训练。习题的数量和类型已考虑了一定的选择范围和专业需要,不足之处可另作补充。

本教材采用国际单位制,同时也介绍了工程单位制及二者的换算关系。

为使用上的方便及适应不同专业的需要,本教材分三册出版,上册为静力学,中册为材料力学,下册为运动学和动力学,并分别独立成章。各册之间有一定的配合,也有相对的独立性。根据不同的教学要求及安排,可采用本教材的全部或其中的某一册或两册;作少量内容调整后,也可先讲授上、下册,然后再讲授中册。

本教材在编写过程中,得到许多兄弟院校的帮助和支持。初稿完成后,于一九七八年十月由教育部委托召开了审稿会议。参加会议的有中南矿冶学院、重庆大学、昆明工学院、中国矿业学院、西安交通大学、西安冶金建筑学院、武汉地质学院、河北矿冶学院、鞍山钢铁学院、上海工业大学等十个院校,由中南矿冶学院和重庆大学主审。在此一并表示谢意。

参加本教材编写的有:北京钢铁学院纪炳炎(上册第一、二、三、四章),屈革(上册第五、六章,中册第二、三章),马安禧(中册第

一、四、五、六章),东北工学院于绶章(中册第七、八、九章),周康年(中册第十章),刘思汉(下册第一、二、五、六、七、九章),殷汝珍(下册第三、四、八、十章),由刘思汉(上、下册)、马安禧(中册)主编。

限于编者水平,同时由于编写时间匆促,本教材必然存在不少缺点和错误。殷切希望读者批评指正。

编 者

一九七八年十二月

目 录

运动学引言	1
第一章 点的运动	3
§ 1-1 确定点的位置的方法	3
§ 1-2 点的速度和加速度的矢量表示法	7
§ 1-3 点的速度和加速度在直角坐标轴上的投影	9
§ 1-4 点的速度和加速度在自然坐标轴上的投影	19
小结	31
思考题	33
习题	34
第二章 刚体的基本运动	38
§ 2-1 刚体的平动	38
§ 2-2 刚体绕定轴转动	40
§ 2-3 转动刚体上各点的速度和加速度	45
§ 2-4 定轴轮系的传动比	50
*§ 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	56
小结	59
思考题	60
习题	60
第三章 点的合成运动	66
§ 3-1 点的合成运动的概念	66
§ 3-2 点的速度合成定理	68
*§ 3-3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	75
小结	80
思考题	81

习题	81
第四章 刚体的平面运动	90
§ 4-1 刚体平面运动概述	90
§ 4-2 刚体的平面运动方程平面运动分解为平动与转动	91
§ 4-3 平面图形上各点的速度	93
*§ 4-4 平面图形上各点的加速度	104
小结	108
思考题	110
习题	110
动力学引言	119
第五章 质点运动微分方程	121
§ 5-1 动力学的基本定律	121
§ 5-2 力学的单位制	124
§ 5-3 质点运动微分方程	125
§ 5-4 质点动力学的两类基本问题	127
小结	138
思考题	139
习题	139
第六章 动量定理	145
§ 6-1 质点的动量定理	145
§ 6-2 质点系的动量定理	149
§ 6-3 质心运动定理	155
小结	162
思考题	163
习题	164
第七章 动量矩定理	170
§ 7-1 质点的动量矩定理	170
§ 7-2 质点系的动量矩定理	173
§ 7-3 刚体绕定轴的转动微分方程	178
§ 7-4 转动惯量	186

小结	194
思考题	196
习题	197
第八章 动能定理	204
§ 8-1 力的功	204
§ 8-2 质点的动能定理	211
§ 8-3 质点系的动能定理	216
§ 8-4 功率和功率方程	225
§ 8-5 动力学普遍定理的综合应用	231
小结	233
思考题	235
习题	236
第九章 达朗伯原理	245
§ 9-1 惯性力的概念	245
§ 9-2 质点的达朗伯原理	248
§ 9-3 质点系的达朗伯原理	253
§ 9-4 刚体惯性力系的简化	255
小结	267
思考题	269
习题	270
第十章 振动	278
§ 10-1 工程中的振动问题	278
§ 10-2 单自由度系统的自由振动	279
§ 10-3 阻尼对自由振动的影响	287
§ 10-4 单自由度系统的受迫振动	292
§ 10-5 振动的消除和利用	303
小结	308
思考题	310
习题	312

附录 I 习题答案	318
附录 II 国际制词冠表	330
附录 III 国际单位制(SI)与工程单位制及其换算关系表	331

运动学引言

在静力学中,我们已经研究了物体平衡的规律。从现在起将研究物体运动的规律,这是一个比较复杂的问题,可分两步来进行。为了方便起见,第一步从几何方面来研究物体的运动,亦即只研究物体运动的几何性质(如轨迹、运动方程、速度和加速度等),而暂不考虑影响物体运动的物理因素(如力、惯性等)。在力学中把这部分称为运动学。第二步研究物体的运动与受力关系,称为动力学。

学习运动学有两方面的意义:一方面是为学习动力学打下基础;另一方面,在工程问题中,如机构设计、自动控制系统、仪表系统中,有时不需要对机构的受力进行计算,主要是研究怎样才能使它的运动符合一定要求,因此,运动学有其独立意义。

大家知道,在不同的物体上观察同一物体的运动时,将得出不同的结果。例如,在行驶着的列车里的座椅,相对于车厢是静止的,而相对于地面则是运动的。因此,在描述某一物体的运动时,必须指出是相对于哪一个物体而说的,用力学的术语来说,就是相对于哪一个参考系而说的。这就是运动的相对性。在以后叙述中,如果不加说明的话,一般都是相对于地球而言,亦即参考系固结在地球表面上。

一切物体的运动都发生在一定的空间和时间之中。空间,时间和物质的运动是不可分割的,它们是物质存在的形式。在相对论的研究中则更进一步地说明了时间、空间与物体运动速度的依赖关系。但是这种依赖关系,只有在物体的运动速度可与光速相比较时才明显起来。在一般工程技术问题中,物体运动的速度远

远小于光速,在这种情况下时间、空间与物体运动的依赖关系可以忽略不计。因此,在古典力学里认为时间和空间的度量对于所有参考系都是相同的,而且将时间视为连续的自变量。

在运动学中,量度时间要区分两个概念:瞬时和时间间隔。瞬时是指物体在运动过程中某一时刻,它对应于运动的瞬时状态。而时间间隔则是指两个瞬时相隔的时间,它对应于运动的某一过程。例如,列车从北京站开出的时间是8点钟,到达某车站的时间是12点钟。8点与12点即为列车开出和到达的两个瞬时,由北京站到达某车站所经历的4小时就是时间间隔。时间的工程制单位与国际制单位相同,均为秒(s)。

在研究物体的运动时,如果物体的大小和形状,对所研究的问题并不是主要的因素,我们就可以把这个物体抽象化为一个质点,即只具有质量而无大小的几何点。例如,在研究人造地球卫星的运行轨道时,就可以将人造卫星看成一个质点。在运动学中,由于不涉及质量,所以常把质点简称为“点”或“动点”。

这样,在运动学中把所考察的物体分为点和刚体来研究。我们先研究点的运动,然后再研究刚体的运动。

第一章 点的运动

本章研究点相对某参考系的位置随时间变化的规律,包括点的运动轨迹、运动方程、速度和加速度。由于读者在物理学中已学习了直线运动和圆周运动的基本知识,故这里将从点作任意曲线运动的一般情况讲起。

§ 1-1 确定点的位置的方法

当一点运动时,其相对于某一参考系的位置,通常采用下面三种方法来确定。

1. 直角坐标法

设动点 M 在空间运动,选坐标系 $Oxyz$,则动点 M 的位置,可由它的三个坐标 x, y, z (图 1-1) 来确定。当点 M 运动时,它的坐标 x, y, z 随着时间变化,它们都是时间 t 的单值连续函数,即,

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

这组方程称为以直角坐标表示的点的运动方程。如果知道了点的运动方程,则动点 M 在任何瞬时的位置,就可以完全确定。

式(1-1)实际上也是点的轨迹的参数方程,只要给定时间 t 的不同数值,就可依次得出点的坐标 x, y, z 的相应数值,根据这些数值就可以描出动点的轨迹来。如果要求点的轨迹方程,可将运动方程中的时间 t 消去。

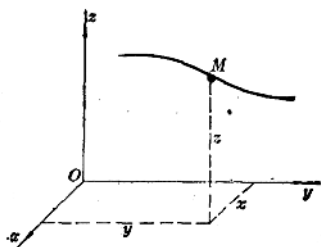


图 1-1

如果点的运动轨迹为一平面曲线,取此平面为坐标平面 Oxy ,则点的运动方程为:

$$\begin{cases} x = f_1(t) \\ y = f_2(t) \end{cases} \quad (1-2)$$

从上式中消去时间 t ,即得轨迹方程

$$F(x, y) = 0 \quad (1-3)$$

如果点的运动轨迹为一曲线,取此曲线为 Ox 轴,则点的运动方程为

$$x = f(t) \quad (1-4)$$

2. 自然坐标法

设动点 M 沿已知轨迹曲线运动,在轨迹上任选一固定点 O 为参考点,并规定轨迹的正向、负向(图 1-2),则点 M 在轨迹上的位置可用弧长 s (带正负号)来确定。 s 叫做弧坐标。当点 M 运动时, s 是时间的单值连续函数,即

$$s = f(t) \quad (1-5)$$

上式称为以自然坐标表示的点的运动方程。如果知道了点的运动方程,则动点 M 沿轨迹曲线上在任一瞬时的位置即可完全确定。

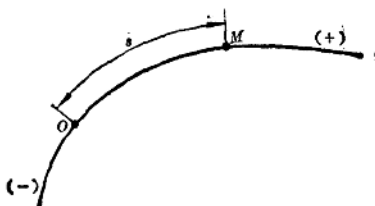


图 1-2

3. 矢量法

设动点 M 沿任一空间曲线运动(图1-3), 选空间任意一点 O 为原点, 则点 M 的位置可用矢径 $r = \overline{OM}$ 来表示。当点 M 运动时, 矢径 r 随时间变化, 它是时间的矢函数, 即,

$$r = r(t) \quad (1-6)$$

上式称为以矢量表示的点的运动方程。如果知道了函数 $r(t)$, 则动点 M 在任何瞬时的位置即可完全确定。

当矢径 r 随时间变化时, 矢径端点在空间所画出的曲线 AB 称为矢径 r 的矢端曲线, 也就是动点 M 的轨迹。

显然, 也可以用点的直角坐标表示它的矢径。设 i, j 和 k 分别表示沿坐标轴的单位矢量, 则由图 1-3 可见, 矢径 r 可写成

$$r = xi + yj + zk \quad (1-7)$$

例 1-1 飞轮以 $\varphi = 2t^2$ 的规律转动(φ 以 rad 计), 其半径 $R = 0.5$ m。试求飞轮轮缘上一点 M 的运动方程。

解: 由于飞轮作转动, 故飞轮轮缘上 M 点运动的轨迹是以 R 为半径的圆, 因而宜用自然坐标法建立运动方程。

当 $t = 0$ 时, M 点位于 M_0 处, 现以这点为参考点, 则弧长 $\widehat{M_0M}$ 为

$$s = R\varphi$$

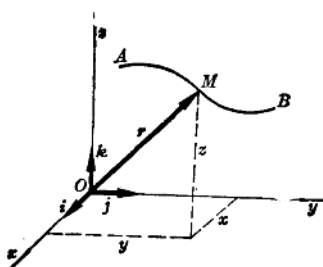


图 1-3

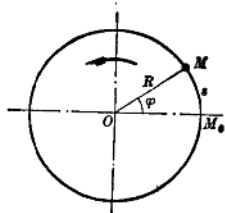


图 1-4

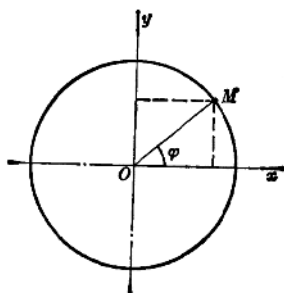


图 1-5

将 $R \neq 0.5, \varphi = 2t^2$ 代入上式, 便得

$$s = t^2$$

这就是以自然坐标表示的 M 点的运动方程。

此题也可用直角坐标法, 建立 M 点的运动方程, 由图 1-5 可知

$$x = R \cos \varphi, \quad y = R \sin \varphi,$$

将 $R = 0.5, \varphi = 2t^2$ 代入, 得

$$x = 0.5 \cos 2t^2, \quad y = 0.5 \sin 2t^2,$$

这就是以直角坐标表示的 M 点的运动方程。