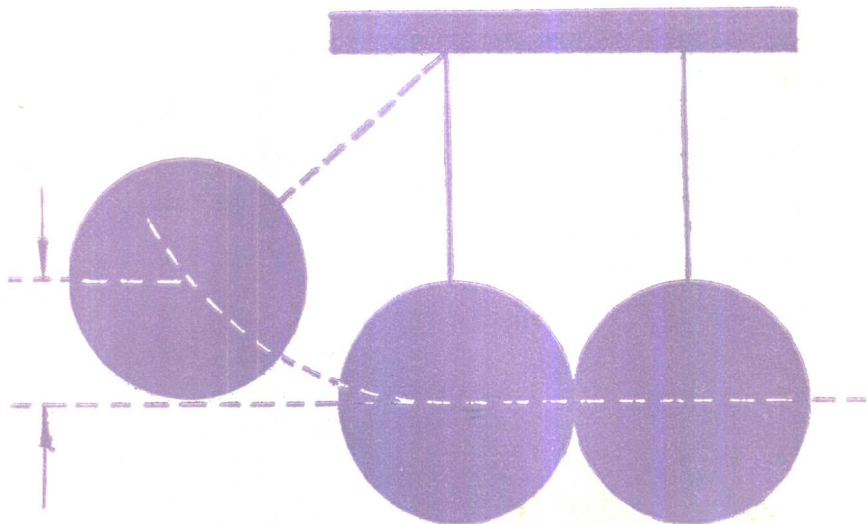


大学数理化实用手册

力学

胡则梁编著



上海科学技术出版社

大学数理化实用手册

力 学

胡则樑 编著

上海科学技术出版社

责任编辑 陈 丽

大学数理化实用手册

力 学

胡则樑 编著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 常熟第七印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张15 字数 328,000

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数 1-2,200

ISBN7-5323-2777-9/O·160

定价: 7.70 元

(沪)新登字 108 号

前 言

力学是物理学的一个主要分支，是理工科各专业的重要基础学科之一。随着科学技术的发展，学习和应用力学知识的人越来越多。在实际学习和工作中，许多读者经常需要查阅某些力学概念的确切含义，某条力学规律和公式的正确表述和应用，某个力学常数的数值和单位以及学习和应用力学时有关的数学公式等等。为了满足广大读者的需要，我们编写了本书。

本手册作为“大学数理化实用手册”的一个分册，其特点是实用。它不仅汇集了通常手册所具有的、读者需要经常查阅的基础力学的基本内容，而且还包含一般手册所没有的一些“实用性”内容。例如：与每部分力学内容有关的题目类型和解题方法，参考资料以及力学中的常用数学公式等。此外，为便于读者查阅，本手册按照传统力学教科书的章节顺序进行有关内容的条目编排，并列出了较详尽的“目录”。手册的“目录”实际上是查阅全部内容的“条目”，读者可根据需要按“目录”方便地查知有关的内容。

本手册内容的深广度基本上属于当代大学普通物理力学的范围，个别内容稍有加深和拓宽，以满足不同层次读者的需要。本书主要适用于大学理工科学生（包括业余院校的学生）学习时参考，也可供中学物理教师及有关科技人员工作中查阅。

115.5 / 1702 = 0.679

本手册在编写过程中，承蒙上海师范大学物理系刘友生副教授帮助审阅了全部书稿内容，并提出了不少中肯的意见，在此表示深切的感谢。

由于编者水平所限，缺点和错误在所难免，诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

1988 年 5 月于上海

综 述

1. 机械运动和力学

(1) 机械运动 机械运动是物质运动的最简单、最基本的形式,它是物体之间或物体各部分之间相对位置的变动。

(2) 力学 通常所说的力学指的是“经典力学”,它是研究在物体运动速率远小于真空中光速(3×10^8 米/秒)和量子效应不显著条件下物体位置变动(机械运动)的规律性的一门基础科学。

(3) 力学的分类 研究力学通常有两种分类方法,一是根据研究对象的不同,人们常把力学分为质点力学、刚体力学、弹性体力学和流体力学,其中后二者又常统称为连续介质力学;二是根据问题性质的不同,人们常把力学分为运动学、动力学和静力学。

2. 运动的绝对性和运动描述的相对性、参照系

(1) 运动的绝对性 运动的绝对性指自然界一切物体都在运动,即使貌似静止的物体(例如房屋、桥梁)也是在随地球一起运动。

(2) 运动描述的相对性 运动的相对性指的是观察和研究运动是相对的,即同一物体的运动相对于不同的参考标准具有不同的运动状况。

(3) 参照系 由于运动具有相对性,因此为了确切地说明一个物体的运动状况,就必须在研究该物体的运动之前先

选择好一其他物体做标准。这种研究运动时选作标准的物体(可以是一个不变形的物体，或若干个无相对位置变动的物体)称为参照系。

目 录

综 述

一、质点运动学

1.1 基础知识	1
1.1.1 质点及其运动的描述	1
1.1.2 质点运动位矢、速度和加速度之间的基本关系	5
1.1.3 坐标系 速度、加速度的分量表示	6
1.1.4 质点直线运动	9
1.1.5 质点曲线运动	10
1.1.6 质点相对运动	12
1.2 题目类型和解题方法	14
1.2.1 质点直线运动	15
1.2.2 质点曲线运动	27
1.2.3 质点相对运动	40
1.2.4 习题	42
1.3 参考资料	44
1.3.1 时间和空间的计量	44
1.3.2 关于自由落体运动的史料	46

二、牛顿运动定律

2.1 基础知识	48
2.1.1 力的概念和力学中的常见力	48
2.1.2 常见力的作用规律	50
2.1.3 质量	52

2.1.4	牛顿运动定律	54
2.1.5	惯性参照系和非惯性参照系,力学相对性原理	55
2.1.6	非惯性系动力学基础	57
2.2	题目类型和解题方法	59
2.2.1	质点的平衡问题	60
2.2.2	质点直线运动问题	62
2.2.3	质点曲线运动问题	76
2.2.4	非惯性系质点动力学问题	87
2.2.5	习题	94
2.3	参考资料	97
2.3.1	从开普勒定律到万有引力定律	97
2.3.2	惯性参照系	100

三、动量定理和动量守恒定律

3.1	基础知识	103
3.1.1	质点组、内力和外力	103
3.1.2	质点的动量、质点组的动量、质心和质心的动量	104
3.1.3	元冲量和冲量	105
3.1.4	质点动量定理及其守恒律	106
3.1.5	质点组动量定理及其守恒律	107
3.1.6	质心运动定理和质心运动守恒	107
3.2	题目类型和解题方法	108
3.2.1	基本物理量计算	103
3.2.2	质点动量定理及其守恒律的应用	114
3.2.3	质点组动量定理及其守恒律的应用	119
3.2.4	质心运动定理的应用	136
3.2.5	习题	142
3.3	参考资料	145
3.3.1	机械运动的度量	145
3.3.2	动量守恒定律和牛顿第三定律	148

四、功和能与碰撞问题

4.1 基础知识	150
4.1.1 功和功率	150
4.1.2 动能	153
4.1.3 保守力和非保守力,质点组的势能和机械能	153
4.1.4 动能定理	155
4.1.5 质点组功能原理和机械能守恒律	156
4.1.6 碰撞	156
4.2 题目类型和解题方法	158
4.2.1 质点和质点组动能定理的应用	158
4.2.2 质点组功能原理和机械能守恒定律的应用	163
4.2.3 两组运动定理及动力学基本定律的综合应用	169
4.2.4 质点碰撞问题	176
4.2.5 习题	183
4.3 参考资料	186
4.3.1 关于功的定义	186
4.3.2 第二宇宙速度和宇宙黑洞	189

五、角动量定理和角动量守恒定律

5.1 基础知识	191
5.1.1 力矩	191
5.1.2 角动量	193
5.1.3 质点角动量定理及其守恒律	195
5.1.4 质点组角动量定理及其守恒律	196
5.2 题目类型和解题方法	196
5.2.1 质点角动量定理及其守恒律的应用	198
5.2.2 质点组角动量定理及其守恒律的应用	201
5.2.3 三组运动定理和动力学基本定律的综合应用	207
5.2.4 习题	216

5.3 参考资料	218
5.3.1 宇宙天体的角动量守恒	218
5.3.2 角动量守恒律与牛顿第三定律	219

六、刚体力学

6.1 基础知识	221
6.1.1 刚体的概念和刚体运动的分类	221
6.1.2 作用于刚体上的力及其简化法则	222
6.1.3 刚体的质心和重心	224
6.1.4 刚体运动的动量、能量和角动量	225
6.1.5 刚体的平衡	227
6.1.6 刚体的平动	227
6.1.7 刚体的定轴转动	228
6.1.8 刚体的平面运动	236
6.1.9 刚体的定点运动	240
6.2 题目类型和解题方法	242
6.2.1 刚体运动学问题	242
6.2.2 刚体动力学问题(一)——动力学基本方程的应用 ...	249
6.2.3 刚体动力学问题(二)——动能定理及其特例的应用...	271
6.2.4 刚体动力学问题(三)——角动量定理的普遍应用 ...	275
6.2.5 习题	282
6.3 参考资料	286
6.3.1 对动点的角动量定理	286

七、振 动

7.1 基础知识	290
7.1.1 简谐振动	290
7.1.2 简谐振动的合成	297
7.1.3 振动的分解	302
7.1.4 阻尼振动	304

7.1.5	受迫振动	307
7.2	题目类型和解题方法	311
7.2.1	简谐振动的运动学问题	311
7.2.2	简谐振动动力学第一类问题	316
7.2.3	简谐振动动力学第二类问题	319
7.2.4	简谐振动的合成	330
7.2.5	阻尼振动和受迫振动	334
7.2.6	习题	341
7.3	参考资料	343
7.3.1	牛顿摆——惯性质量和引力质量相等的实验 史料 之一	343
7.3.2	参数共振	345

八、波 动

8.1	基础知识	347
8.1.1	固体的弹性	347
8.1.2	波动的基本概念	352
8.1.3	简谐波及其传播规律	355
8.1.4	波的叠加	362
8.1.5	多普勒效应	365
8.1.6	声学基础	366
8.2	题目类型和解题方法	370
8.2.1	平面简谐波的传播	370
8.2.2	波的叠加	384
8.2.3	多普勒效应	392
8.2.4	声学基础	395
8.2.5	习题	406
8.3	参考资料	402
8.3.1	声波的速度——牛顿模型及其修正	402
8.3.2	波的干涉和全息照相	405

九、流体力学

9.1 基础知识	408
9.1.1 流体的基本概念	408
9.1.2 流体静力学	409
9.1.3 理想流体的稳定流动	411
9.1.4 粘滞流体的运动	415
9.1.5 运动物体在流体中所受的阻力	417
9.2 题目类型和解题方法	418
9.2.1 流体静力学	418
9.2.2 理想流体稳定流动	422
9.2.3 粘滞流体的运动	430
9.2.4 物体在粘滞流体中的受力及其运动	434
9.2.5 习题	435
9.3 参考资料	438
9.3.1 流体静力学“佯谬”	438
9.3.2 海面的形状	439
附录 I 力学量的单位	443
I.1 SI 制基本单位	443
I.2 SI 制辅助单位	443
I.3 SI 制词头	444
I.4 SI 制力学量常用单位	444
I.5 厘米·克·秒制中力学量常用单位及其与国际制的换算	446
I.6 实用工程制中力学量常用单位及其与国际制的换算	447
附录 II 力学常数	448
II.1 基本常数	448
II.2 常用数据	448
II.3 一些物质间的静摩擦系数	448
II.4 常用材料的杨氏模量	449

I.5	声音的传播速度	450
I.6	常见物质的密度	450
I.7	某些物质的粘滞系数	451
附录 III	力学常用数学公式	451
II.1	代数公式	451
II.2	三角公式	452
II.3	解析几何	452
II.4	矢量代数	453
II.5	矢量分析(导数)	454
II.6	导数基本公式	455
II.7	积分基本公式	456
习题答案		459

一、质点运动学

质点运动学是从现象出发研究质点作机械运动的规律。其研究对象是质点，研究内容只是被研究对象在空间相对位置的变化情况，而不涉及引起这种变化的动力学原因(物体之间的相互作用)。

1.1 基础知识

1.1.1 质点及其运动的描述

1. 质点 质点是从实际中抽象出来的力学研究对象的一种简化模型(理想化模型)。即如果物体的形状、大小和所研究的问题没有关系或关系不大时，则我们可将该物体简化为没有形状和大小只有质量的点来研究，此种简化模型称为质点。

2. 质点运动的位置矢量和运动学方程

(1) 位置矢量 质点运动时，由参照系上的参考点引向质点所在位置的矢量，称为质点的位置矢量，它是描述质点运动位置的物理量，如图 1-1 所示，常以符号 r 表示，即

$$r = \overrightarrow{OP}, \quad (1-1)$$

如果在参照系上以参考点 O 为原

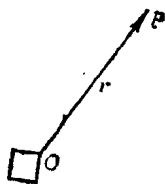


图 1-1

点建立直角坐标系 $O-xyz$ ，则质点位置矢量 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系 $O-xyz$ 中的正交分解形式为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}. \quad (1-2)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴方向的单位矢量, x, y 和 z 为质点位置的直角坐标(位置坐标)。由于质点的位置坐标与位置矢量一一对应, 因此它们也可用来描述质点运动的位置。

(2) 运动学方程 质点运动时, 质点的位置随时间而变化, 相应的位置矢量也随时间而变化, 即位置矢量 $\mathbf{r}$ 是时间 t 的函数, 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t). \quad (1-3)$$

式(1-3)称为质点的运动学方程。它不仅给出了任意时刻 t 质点运动的位置, 而且由它还可进一步求得任意时刻 t 质点的速度和加速度等, 即质点的运动状况可全部掌握。为此, 质点运动学方程是从运动学角度出发研究质点运动的最基本方程。

运动学方程 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ 在直角坐标系 $O-xyz$ 中的正交分解形式为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}. \quad (1-4)$$

已知标量函数 $x(t), y(t)$ 和 $z(t)$, 即可知 $\mathbf{r}(t)$, 反之亦然。为此我们常称标量函数

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-5)$$

为质点运动学方程的直角坐标分量形式。

3. 质点运动的轨迹和轨迹方程

(1) 质点运动的轨迹 质点运动时, 相对于一定的参照系质点在各个时刻的位置对应点按时间顺序的连线称为质点运动的轨迹。

(2) 轨迹方程 表示质点运动轨迹曲线的代数方程称为

质点的轨迹方程。显然,矢量形式的运动学方程(1-3)和标量形式的运动学方程(1-5)都可看作为以时间 t 为参数的质点轨迹的参数方程,而由式(1-5)消去时间参数 t 后得到的方程,例如

$$\begin{cases} F_1(x,y,z)=0 \\ F_2(x,y,z)=0 \end{cases} \quad (1-6)$$

就是质点的轨迹方程。

4. 质点运动的位移和路程

(1) 位移 自质点在时刻 t 的位置引向质点在时刻 $t+\Delta t$ 的位置的矢量称作质点在时间 Δt 内的位移,记作 $\Delta \mathbf{r}$,如图 1-2 所示。显然,

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t). \quad (1-7)$$

由此也可见,位移也可以定义为位置矢量的增量。

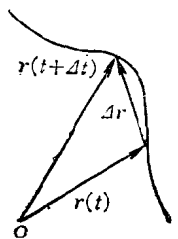


图 1-2

位移是反映质点运动位置变化的物理量。但是,应当注意,一般情况下的位移($\Delta \mathbf{r}$)只能粗糙地反映质点运动位置的变化,只有在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的情况下的位移(无穷小位移),才能精确地反映质点运动位置的变化。

(2) 路程 在一段时间内,质点沿其轨迹经过的路径的总长度叫作质点在该段时间内运动的路程。应当注意,一般情况下在同一时间间隔 Δt 内,路程和位移的大小并不相同。

5. 质点运动的速度

(1) 平均速度 质点运动中,质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与发生这一位移的时间间隔 Δt 之比,称为质点在这段时间内的平均速度,它是反映质点运动时位置变化平均快慢的物理量,常以符号 $\mathbf{v}_{\text{平均}}$ 表示之,即