

高等学校教学用书·理论物理基础系列教程

1

力学

〔日〕 户田盛和 著
任 萍 译
孙岳 喀兴林 校

065

北京师范大学出版社

高等学校教学用书
理论物理基础系列教程
第一册
力 学

〔日〕 户田盛和 著
任 萍 译
喀兴林 孙 岳 校

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京通县燕山印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.125 字数: 169千

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 7-303-00427-0/O·88

定 价: 1.75 元

原 序

物理学是理工科学生必不可少的基础课之一，因为理工科任何专业的基础必然与物理学有密切关系。理工科学生要想在学习专业课之后，再自学物理学，很难获得令人满意的结果。就是说，必须在大学一、二年级扎扎实实地掌握物理学的基础知识。

这样，最重要的就是同学们要有积极的学习热情。同时，需要有一本向学生们传授物理学知识、指导学生学习方法的入门书。这套《理论物理基础系列教程》正是为了起到以上作用而编辑的，这套书的编辑方针与以往教科书有很大差别。

力学和电磁学是所有与物理学有关的重要学科的基础。因此，大部分学校要在低年级学完此课程。但象流体力学则可以作为选修课开设，也可以由同学们自学。另外，还需要有大学二年级学历能够阅读的、内容充实的量子力学和相对论等教材。

编者基于这种观点，选择了物理学的基础课，编写了《理论物理基础系列教程》，这套丛书共10册，包括《力学》、《分析力学》、《电磁学》（上、下）、《量子力学》（上、下）、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》及《物理用数学》等八个科目。所有这些科目不全是（日本）大学一、二年级的课程，但各科目可以各自独立学习，力争做到大学一年或二年级的学生能够读懂。

在物理学教材中，往往有很多公式和现象，在期末考试之前，学生们常常要死记硬背，这不但掌握不了物理现象的本质，反而产生厌恶情绪。我们对这套教程的读者所应考虑的最重要问题，不是死记公式和现象，而是学会掌握事物本质的能力。

物理学相信一切事物都源于少数基本事实，而它们又遵循少

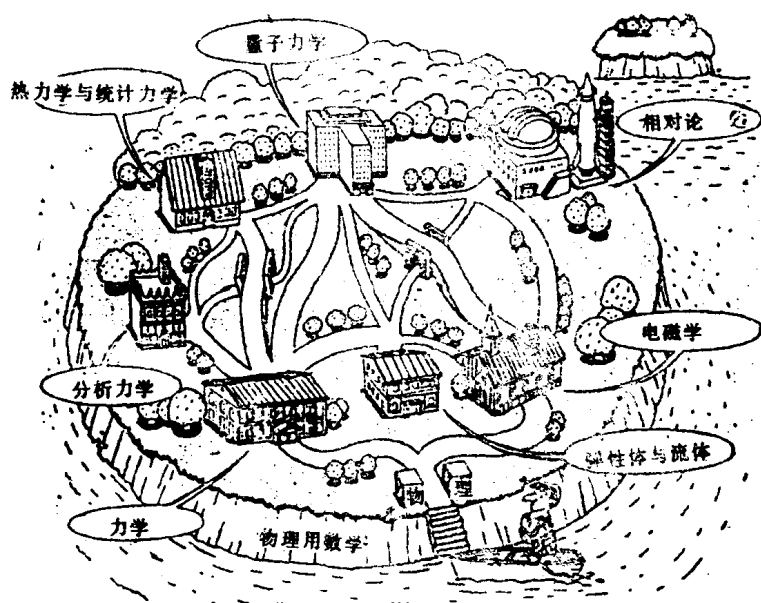
数基本定律，物理学求得这些定律。这些明确的基本事实和定律一定有助于同学们理解，在彻底理解的基础上，同学们通过自己亲身的努力去摸索事物的本质，这就是所谓的“物理学的思考方法”。

不仅限于物理学，科学的每个领域，都要探求事物的本质，但由于物理学发展的比较早，基础部分成熟，可以看做一个典型例子。因此，掌握“物理学的思考方法”的能力，不仅对于将来钻研物理学的同学们，而且对于钻研其它领域的同学都应该说是大有好处的。

在日常生活中，我们经常无意识地使用象时间、空间、力、压强、热量、温度、光等这样的物理学基本概念，物理学对这些日常使用的概念又重新给予了严格的定义，并与基本规律联系起来，物理学这样繁杂也是同学们厌烦的原因之一。但是，如果想根据基本事实和规律探索事物的本质，即使是日常感知的事物，也有必要详细弄清其实验的根据，重新明确与基本规律的关系，何况还涉及到超过我们日常体验的领域。例如：处理原子内部问题时，甚至有必要提出似乎与常识和直观相矛盾的新概念。因为物理学根据实验和观测不断扩大我们的经验世界，所以与其这样，倒不如改变常识和直观更有必要。

正如这样，用“物理学的思考方法”考虑事物，决不是很容易的事情。但是，如果采用正确的方法，是有可能掌握的。本教程的撰稿者们力求做到精选内容，所选的素材力争讲述通俗易懂，便于掌握。希望读者和作者一起探求事物的本质。这样一来，自然而然地就能够学会“物理学思考方法”。各卷篇幅都不大，不需要其它参考书就能读懂，但决不是简单的物理学摘要。希望读者认真阅读。

如上述，因为各科目基本上可以独立阅读，所以根据需要，从哪个科目开始阅读都可以。但是，作为基本联系，可用图解的形式表示各科的相互关系。



从图的前面向里延伸的宽路，表示传统的路线，窄路则表示做为相关联的学科，可以共同阅读。例如，《弹性体与流体》是集中了现代风格的弹性力学和流体力学的，但与《电磁学》中的场的概念相关联。而作为场的经典理论，可以与《相对论》加以对比，这一卷的波动部分，对于《量子力学》的理解也有帮助。另外，每卷都广泛涉及到数学，为不脱离物理学本身，同时阅读《物理用数学》是大有益处的。在整理这套《理论物理基础系列教程》之际，编者阅读了全卷的原稿，也请执笔者提出了各种要求，再三改稿。另外，不断采用了执笔者们的相互意见和岩波书店编辑部所提出的见解。今后在听取读者意见的同时，将进一步加以修正。

编者 户田盛和

中嶋贞雄

1982年8月

译者序

这套《理论物理基础系列教程》是根据日本岩波书店1982—1984年出版的《物理入门ユース》（物理学入门教程）翻译而成。原教程的主编者是户田盛和与中嶋贞雄。本书在日本颇受欢迎，在全套书出齐之前，先出的几本已经重印了三、四次。本译本根据我国习惯，定名为《理论物理基础系列教程》。

这套《系列教程》共十本，计有《力学》、《分析力学》、《电磁学》（上下）、《量子力学》（上下）、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》和《物理用数学》。各册篇幅不大，自成体系，而十本合起来又构成一个完整的整体。本书的起点相当低，有我国工科一年物理课基础的读者即可学习，但其达到的深度并不低，大体上只略低于我国综合性大学的理论物理各课的大纲要求，而在广度上则广于后者，并含有较多新鲜内容。

本书富有日本教材所独有的风格和特点：选材精炼；讲解简炼而明快又不失科学性；系统经过精心安排，组织周密，突出重点，深入浅出。在引导读者逐步掌握正确概念方面有其独到之处，书中不乏精辟的论述和精采简捷的推导与证明，在不知不觉之中把读者带到较难较深的境界。本书是我国高等学校理论物理较好的教学参考书，师范院校和成人教育院校可以直接采用作为课本。本书也是中学教师进修、工程技术人员知识更新和知识青年自学的理想读物。

本书的翻译工作由喀兴林、王锡绂、梁绍荣和任萍四人组成工作小组负责，他们担任组织译校、联系出版、保证译文质量和其它各项事务工作。本书的译校人员以北京师范大学和东北师范大学的人员为主，他们大多数都具有高级职称及多年的日文经

历，翻译工作以忠于原作为原则。

由于我们学识有限，加之译校人员众多，译文中容或有不当之处或彼此不甚统一之处，敬请各界读者指正，以便再版时修改。

喀兴林

1988年6月

前 言

这本书在大学课程中是为开始学习力学的人写的入门书或作参考书。也是给准备将来攻读物理学专业，或者以物理学作为基础课的理工科学生写的。

学习力学有以下几种目的。

1. 从自然现象中找出科学规律是学习物理学的方法。力学是物理学中最早形成的一个领域，其物理方法以最易理解的形式出现。

2. 学会对自然现象进行数理讨论。力学是最早数式化的科学分支，对开始学习数理讨论是很适宜的。

3. 力学研究对象中，有振动、波动等各种现象，而这些现象作为基础知识，多有助于加深对电磁振动、电磁波等领域的现象以及定律的理解。因此，通过比较简单的力学现象来学习这些内容是很必要的。对所有上述目的都给以注意，特别对基础现象的处理，对其物理意义及数学处理方法作为重点。

牛顿在给出了运动定律和万有引力定律这一力学中的真正的出发点的同时，用运动方程的形式表达运动定律，并创立了解具体问题特别有效的微分和积分方法，假如没有微积分的发明，就难以确切地表述运动定律。因此，处理各种具体问题的方法也不可能得以发展，势必影响力学、其他学科以及技术的进步。

我们还知道：物理定律与具体解这些定律的方法是不可分的。很多例子证明，解决问题的数学方法对于理解现象、确定规律是不可缺少的。数学技巧不是个简单技术问题，其中往往还蕴藏着很重要的物理意义。力学学习也是一样，首先依次在各章中学会用坐标表示位置的方法，学习微积分方法等等，这些都是很

重要的，其次还希望通过这些内容的学习过程，加深对力学整体内容的理解，达到切实领会各项具体内容以及理解力学整体以达到开阔视野这两个目的。

本书各章是按照力学的论题分的，同时在每章还分别引进新的数学内容，它们是与物理定律、物理概念结合在一起讲的，我们将它们集中整理成下表。如果能经常把它们反复回忆一下，作为学习力学的导引，是会有好处的。

章 名	主要数学内容	主要物理概念
1. 运 动	坐标, 矢量	空间, 时间
2. 运动定律	微 积 分	力
3. 运动和能	标 量 积	能量守恒定律
4. 行星运动和有心力	圆锥曲线, 极坐标	万有引力
5. 角 动 量	矢 积	角动量守恒
6. 质点系力学	多 体 系 统	质心与有关质心对运动进行分解
7. 简单的刚体运动	转 动 惯 量	球的转动
8. 相对运动	坐 标 变 换	地球自转的影响

在本书执笔的过程中承中嶋貞雄先生及参加本丛书编写的诸位先生提出了很多宝贵意见，岩波书店编辑部的先生们也给予很大帮助，在此对他们表示衷心谢意。

户田盛和
1982年9月

理论物理基础系列教程
(共10册)

- 1 力学
- 2 分析力学
- 3 电磁学(上)
- 4 电磁学(下)
- 5 量子力学(上)
- 6 量子力学(下)
- 7 热力学与统计力学
- 8 弹性体与流体
- 9 相对论
- 10 物理用教学

书 号 332
7/3065

登记号 888359

7A042/01

目 录

第一章 运动.....	(1)
§1-1 空间和时间.....	(1)
§1-2 速度.....	(5)
§1-3 速度积分.....	(10)
第二章 运动定律.....	(13)
§2-1 惯性定律(牛顿第一定律).....	(13)
§2-2 运动定律(牛顿第二定律).....	(15)
§2-3 作用与反作用定律(牛顿第三定律).....	(20)
§2-4 动量和冲量.....	(23)
第三章 运动和能量.....	(26)
§3-1 直线运动.....	(26)
§3-2 斜面运动.....	(30)
§3-3 简谐振动.....	(33)
§3-4 一维运动和能量.....	(39)
§3-5 二维运动.....	(48)
§3-6 圆周运动.....	(52)
§3-7 两个简谐振动的合成.....	(58)
§3-8 功和动能.....	(60)
§3-9 力的势能和能量守恒.....	(66)
第四章 行星运动和有心力.....	(72)
§4-1 开普勒定律.....	(72)
§4-2 圆、椭圆、抛物线与双曲线.....	(77)
§4-3 有心力与平面极坐标.....	(83)
§4-4 从开普勒定律推导太阳引力.....	(89)
§4-5 从太阳引力推导行星运动.....	(93)
§4-6 行星位置随时间变化的规律.....	(101)

§4-7	球形物体产生的势能	(104)
§4-8	库仑力引起的散射	(112)
第五章	角动量	(116)
§5-1	角动量和力矩的关系	(116)
§5-2	角动量矢量	(119)
§5-3	矢积	(121)
第六章	质点组力学	(131)
§6-1	动量守恒定律	(131)
§6-2	二体问题	(136)
§6-3	动能	(142)
§6-4	角动量	(143)
第七章	简单的刚体运动	(149)
§7-1	刚体的运动方程	(149)
§7-2	具有固定轴的刚体运动	(151)
§7-3	刚体的转动惯量	(155)
§7-4	陀螺的进动	(170)
第八章	相对运动	(173)
§8-1	平动坐标系	(173)
§8-2	质心坐标系和实验室坐标系	(175)
§8-3	坐标变换	(179)
§8-4	转动坐标系	(191)
§8-5	角速度矢量(转动矢量)	(194)
§8-6	运动坐标系的运动方程	(197)
§8-7	接近地球表面的运动	(201)
附录	习题略解	(210)
	基本物理常数	(216)

第一章 运 动

通过投球或开动机器，我们可以经常体验物体在运动。电车、汽车在公路上的快速行驶，飞机在高空的飞行也是日常生活中司空见惯的运动。在空间，在地面，在地球外都广泛地存在着形形色色的运动。很久以前，伽里略观察地面上落体运动，探讨运动的规律。牛顿相信他的力学定律对火星同样成立。研究运动的力学就是从这里发展起来的。

§ 1-1 空间和时间

向上抛球，就会发现球的速度渐渐变慢，继而开始降落，不久将落到地面上。即使重复多次，都可以见到同样的运动，这是由于球受到重力影响的缘故。球除了受重力影响外，还要经受空气的阻力。如用球拍击球，运动就会发生急剧变化。象这样讨论由于力的作用，使运动产生怎样的变化，这就是力学研究的问题。

运动在空间里进行，运动过程中经历了时间，象这样的空间和时间，我们都有某些直观的认识。根据这种认识，如象在房间里或在桌子上那样，空间是一种能够指定位置的“广袤”。用尺子或简单的测量工具可以得到空间的知识，早在公元前3世纪就解决了。这就是我们今天所说的欧几里德几何学，而把在这个意义上的空间称作欧几里德空间，从此空间就用数学来描述了。

另外，时间是通过太阳的位置或时钟，能够用数量测定的量。根据我们的直觉经验，时间是与空间无关联的“过程（流

逝)。

17世纪初，伽里略运用这样的空间和时间概念，研究了**落体**（在空间下落的物体）、**抛体**（被抛射到空间的物体）等具体的运动，并取得了很大成功。

落体向下加速运动是由**地球引力**产生的，那么月亮为什么不会**坠落**呢？我们以后将会学到。月亮不断地受到地球吸引改变运动方向，是它围绕着地球公转的原因。象这样，若力在物体之间作用，运动将会发生变化。牛顿解决了运动变化和力的关系，完成了对力学的研究。他这时对从我们周围空间扩展到包括太阳系在内的更大的空间。牛顿1687年出版了他的代表作《自然哲学的数学原理》一书。

对于地球表面小规模的运动，可以用地面作为基准所测定的空间来描述，当讨论地球的自转与公转，或者研究月球和行星运动时，我们可以认为是以相对于遥远的星体（恒星）的运动来表示空间。用这样的欧几里德空间与独立地流逝的时间来表述是**牛顿力学**或**经典力学**的观点。根据这种力学的成功表明，伽里略-牛顿的时空概念作为实际的物理空间和时间为模型是正确的，至少也是一种极好的近似。在很长一段时间，经典力学被认为是严格正确的。

可是，从19世纪末到20世纪初，发现如果把伽里略-牛顿的时空观用于电磁现象，与事实不符的情况变得明显起来，特别是对于光速有明显的**不一致**。从此以后，爱因斯坦提出相对论，明确提出空间和时间并不是互相没有关系的，这与伽里略-牛顿的时空观完全不同。但是，对远比光速迟缓的运动来说，可以认为牛顿力学还是正确的，其时空概念也可看作是恰当的。本书就是用伽里略-牛顿的观点讨论力学问题。

位置 当在实验室研究小球的运动时，若每时每刻都能把小球在空间的位置明确表示出来，就可以得到小球运动的完整记

录。我们首先叙述一下物体的位置。

最简单的运动是象自由落体那样的物体沿一直线的运动情况。例如，测量物体距起点垂直向下所测得的距离就可以明确表示物体的位置。这样，在直线运动中，从适当的点(原点)开始，可沿一定方向测得的距离(随时间变化)，这种用一个变量就能判断物体的位置的运动称为**一维运动**。

当球在桌子上运动时，若桌面上铺一张方格纸，以纸的一角为原点，数一数方格纸的纵向与横向的格数，就可以确定物体的位置。因为这时是根据两个变量来确定物体的位置的，所以这个空间是**二维的**。

为确定房间中物体的任意位置，必须指定该物体距地板的高度，以及到互相垂直的两墙面距离等三个变量，这样我们所面对的空间是**三维的**。

坐标系 现在讨论一下，选取一点(例如房间的一角)为原点，通过这个点引互相垂直的三条直线(如地板的两条边及上下方向的一条线)的情况。我们把这些直线叫做**坐标轴**。如图1-1所示。若空间中有一点P，则通过P点并平行于坐标轴引的直线，与坐标轴所组成的正方体三个棱的长度(x , y , z)就可以确定P点的位置。这三个变量(x , y , z)称为点P的坐标。反之，如果给出三个实数(x , y , z)，并以它们为坐标，则可以确定点P，可用 $P(x, y, z)$ 表示。坐标轴 x , y , z 称为坐标系。通常如图1-2那样，将右手的拇指、食指和中指伸开时，使三指所指的方向分别与坐标系中的 x 轴、 y 轴、 z 轴方向一致，我们把这称为**右手坐标系**。当然，用左手坐标系也可以，在本书中我们只使用右手坐标系。

位置矢量 对于空间中任意一个确定的点P，与用三个坐标 x , y , z 表示其位置一样，也可以用从原点O向P画出的箭头表示P的位置，我们把从原点O向P画出的箭头叫做P点的**位置矢**

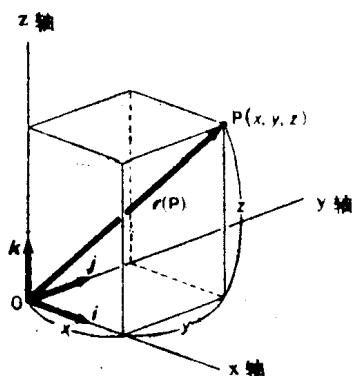


图1-1 直角坐标系和位置矢量

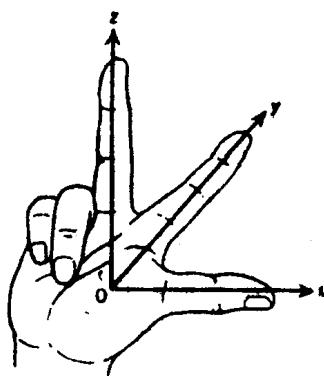


图1-2 右手坐标系

量。一般点P的位置矢量用粗体字 $\mathbf{r}(P)$ 或者 $\mathbf{r}$ 来表示，若点P的坐标用 x, y, z 表示可写成：

$$\mathbf{r} = (x, y, z) \quad (1.1)$$

在这个意义上说，点P的坐标 x, y, z 可以叫做位置矢量 $\mathbf{r}$ 的分量。也可以用箭头代替粗体字写成 $\vec{r}$ 。还可以直接用原点O与点P的两个字母写为 $\overrightarrow{OP}$ ，也是一样的。

后面我们将学到速度。速度也能用箭头表示，箭头指的方向为运动方向，长短表示速度的大小。一般，我们把这种具有大小和方向的量称为**矢量**或叫作**向量**。矢量都可以用箭头表示。

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的分量还可以用纵排写为

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

以后我们就会知道，用矢量表达式(1.2)的方法计算是很方便的。

对于象长度和时间那样，只具有大小，与方向无关的量叫做**标量**，或称作**无向量**。质量、能量都是标量。

现在我们如研究沿 x 轴， y 轴， z 轴的单位长度的矢量，它们分别用 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 表示，位置矢量 $\mathbf{r}$ 可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.3)$$

$\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 称为坐标系的**单位矢量**，它们相互垂直，组成正交坐标系的**基**。

原点到点 $P(x, y, z)$ 的距离，根据毕达哥拉斯定理应为 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ，写成

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r \quad (1.4)$$

$|\mathbf{r}|$ 称为矢量 $\mathbf{r}$ 的**绝对值**或**长度**。

习 题

1. 请考虑一下表示平面上的位置有几种方法？
2. 设 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ 为不同的两点 A 、 B 的位置矢量，当 λ 为任意常数时，试证明

$$\mathbf{r} = \mathbf{b} + \lambda(\mathbf{a} - \mathbf{b})$$

或 $\mathbf{r} = \lambda\mathbf{a} + (1 - \lambda)\mathbf{b}$ 表示的点，在联接点 A 和点 B 的直线上。

3. 设两个互不平行的矢量 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ ，试证用 $\mathbf{C} = a\mathbf{A} + b\mathbf{B}$ (a 、 b 是常数)表示的点 C 在矢量 $\mathbf{A}$ 与矢量 $\mathbf{B}$ 决定的平面上。

§1-2 速度

在一条直线上运动物体的位置，可以用直线上一点 O （原点）作基准的坐标 x 来表示，所以运动能以位置随时间 t 变化的形式 $x = x(t)$ 来表述（见图1-3）。假定时刻从 t 移到 $t + \Delta t$ （ Δt 是时间的变化），在此期间，物体位置从 x 变为 $x + \Delta x$ （ Δx 是 x 的变化），那么， $\Delta x / \Delta t$ 则是这段时间的**平均速度**。当 Δt 趋于无限小时用 $\frac{dx}{dt}$ 来表示，则

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1.5)$$

意味着在时刻 t （瞬时）的速度。由图1-3的 $x-t$ 坐标图，我们可