高等学校教学参考书

力 学 教 程

顾 建 中 编

人 民 教 育 出 版 社

本书是作者在前编《普通物理学简明教程(力学部分)》基础上增订修改而成的，增订时参考了编者1961年编写的《普通物理学(力学部分)》一书，力求集中两书优点，并改名为《力学教程》。新增内容主要有相对运动、科里奥利力、滚动、回转仪等，并增加“狭义相对论简介”一章。

本书可作为综合大学物理系的教学参考书，也可作为试用教材，估计需70学时左右。

高等学校教学参考书

力 学 教 程

顾建中 编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.875 字数 214,000

1979年3月第1版 1980年3月第2次印刷

印数 72,001—102,500

书号 13012·0293 定价 0.65 元

目　录

第八章 波动

第九章 流体力学

第十章 狭义相对论简介

引　言

1. 力学的研究对象　世界由物质构成，物质是在不断运动中．运动的形式很多，本课程研究最简单的一种运动形式——机械运动．

我们在日常的生产和生活中，常会看到一个物体相对于另一个物体的位置发生变化(包括物体各部分间相对位置的变化)，如天体的运行、大气和江河中水的流动、机器的运转、车船的运动等，这种运动称为**机械运动**．它是一种最简单、也是最基本的物质运动形式．恩格斯说："一切运动都是和某种位置移动相联系的，不论这是天体的、地上物体的、分子的、原子的……。位置移动决不能把有关的运动的性质包括无遗，但是也不能和运动分开。所以首先必须研究位置移动。"①这种位置移动所遵循的客观规律，亦即**机械运动所遵循的客观规律**，就是**力学的研究对象**．由于上述理由，所以在物理学中首先学习力学．

一般把力学分为运动学、动力学和静力学三部分．运动学研究物体位置随时间变化的各种情况；动力学研究物体的机械运动和物体的相互作用力间的关系；静力学研究在力的作用下物体获得平衡的问题．平衡一般指静止而言，即一物体对另一物体的位置不发生变化，它实际上也是一种运动状态，所以本书中把静力学作为动力学的一部分来处理．在力学中提到运动，一般是指机械运动而言．

力学是在劳动人民社会实践的基础上逐步发展起来的，到十

① 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社, 1971 年第 1 版, 53 页.

六、七世纪才开始形成为一门独立的学科．在实践的基础上，逐步总结出力学的基本定律，打下了力学的基础；后来随着生产水平的提高，力学中的刚体力学、弹性力学、流体力学等分支才先后得到发展，形成了比较完整的体系．这些学科主要以由大量分子组成的物体为对象，这种物体，小到一颗细砂，大到一个星体，都称为**宏观物体**；而且在所研究的运动中，速度都远比光速(3×10^8 米/秒)为小，这种速度一般称为“**常速**”．在本课程中主要研究**在常速情况下宏观物体的机械运动所遵循的规律**，即所谓**经典力学**．

由于生产和科学实践的进一步发展，二十世纪初期，在经典力学和物理学其他部分的基础上，产生了研究高速物体运动规律的相对论力学和研究微观物体运动规律的量子力学．在这些新的研究领域内，经典力学的理论就暴露出它的局限性，这说明经典力学只是在一定限度内一定条件下正确地反映了客观现实；但也应该注意到经典力学有它自己能够适用的广阔领域，仍是解决大量实际问题的基础．最后一章将简单介绍狭义相对论的基础知识．

2．参照系　一棵树，人站在地上看，它是静止的，人坐在运动着的车中看，它在运动．到底这棵树是静止的还是运动着的呢？总的说来，运动是绝对的，而静止则只是相对的．但如何运动以及是否静止，这和对什么物体而言有关．树对地静止，而对运动着的车作某种运动．一般地说，提到一个物体在运动，必须指明是对哪一个另外的物体才有意义，这种性质，称为**运动的相对性**；供参照用的那个物体，称为**参照系**．如人对地运动，人是运动物体，地是参照系．一般地说，甲对乙运动，甲是运动物体，乙是参照系．从上面所举的例中，还可以得出一个结论：在不同的参照系中观察同一物体的运动，所得结论(如径迹、速度等)并不相同．正是因为这个原因，参照系才显得特别重要；为了更好地掌握它，我们最好养成一个习惯，在力学中一提到运动，就要弄清楚是对哪一个参照系而

言．静止在某参照系中的观察者所观察到的物体的运动，就是该物体对该参照系的运动．为了更好地了解这种运动，我们可以设身处地作为该参照系中的观察者去观察．

运动是物体相对于参照系的位置随着时间所发生的变化，要研究这种位置变化，首先得确定物体的位置；为了定量地表出该物体在某时刻的位置，常将一付坐标系（如直角坐标系）和参照系牢固地连结起来，于是物体上的某一点在某时刻的位置可以用坐标（如 x、y、z）表示．这说明坐标系比参照系进了一步，它不仅在性质上起了参照系的作用，而且在数量上使描述精确化．选定参照系后，才能确定物体的运动，但随所取的坐标系不同，物体上一定点在某时刻的坐标值还可以不同．适当选取坐标系，可以简化问题的处理．例如研究直线运动，最好取该直线为坐标轴，其上某一点为原点，物体过原点的时刻为时间的零点，即 $t=0$．

思 考 题

0.1）若船对于岸以每秒 5 米的速速向东航行，问岸上的树对船如何运动？能不能画一根坐标轴讨论得具体一些？

0.2）在对地作匀速直线运动的火车中，让一个物体自由落下，问在车中观察和在地上观察，所得关于该物体运动的结论，有何不同？

0.3）既然说运动是绝对的，为什么又说它有相对性？

0.4）平常说的“风速”、“飞机的航速”、“水的流速”、“地球的公转速度”，是什么物体对什么参照系运动？有时提到物体在运动，但没有指明参照系，在这种情况下，参照系一般是指什么？能不能举几个例子说明？

0.5）在 0.2 题中，如果物体是在地上自由落下，问在车中及地上观察，结论有何区别？

第一章 质点运动学

运动学研究如何从现象上描述物体的运动．我们按照从简单到复杂的顺序，先讨论直线运动，后讨论曲线运动．主要问题是正确树立速度及加速度这两个重要的基本概念，而速度与加速度的瞬时性、相对性和矢量性则是问题的关键所在．我们将结合直线运动着重阐述瞬时性，结合矢量加减法初步介绍矢量性和相对性，结合曲线运动着重较全面地阐述瞬时性和矢量性．下面从质点这个基本概念开始．

§1.1 质 点

在生产或生活中，常会看到一种比较简单的运动，称为平动，例如活塞在汽缸中的运动、抽屉的运动等；在这种运动中，物体上各点都作同等的运动，因而任一点的运动都能代表整体的运动，物体的形状大小可以不必考虑，在这种情况下，可以将物体抽象为一个具有同等质量的点，称为**质点**．抽象的目的是简化问题和便于作比较精确的描述．

在一般情况下，物体的运动是非常复杂的，例如地球的运动就包括有如下的运动类型：绕太阳的公转（是一种平动，具体表现为地球重心的运动），绕地轴的自转，潮汐所表现的变形运动，以及动植物的运动等．如果把这些运动按比例画在纸上，由于地球的轨道半径为 1.49×10^8 千米，等于地球半径的 2.34×10^4 倍，在这个图上地球只能占有一个小点的位置．因此就地球的整体运动而言，潮汐和动植物的运动是微不足道的，连自转也是次要的，把这些忽略以后，地球的公转作为主要运动就突出来了．公转是平动，

因此研究地球的公转时，虽然它是一个十分巨大的星体，仍然可被简化为一个质点. 一般地说，如果我们忽略了物体的转动和形变，只研究它的平动部分，就可以忽略它的形状大小，把它简化为质点来处理. 质点突出了“物体具有质量”和“物体占有位置”这两个根本性质. 从运动方面说，我们忽略了转动和变形运动，从物体方面说，我们忽略了它的形状大小，这两个方面是一致的. 因为忽略了转动和变形运动，就意味着物体的形状大小可被忽略、而忽略了物体的形状大小，我们也就不必再考虑物体的转动和变形运动了.

在另一类问题中，例如研究一个齿轮的转动，由于它的形状大小起着主要作用，不能忽略，结果，即令齿轮很小，也不能被简化为质点. 在这类情况下，可以把物体(如齿轮)分成许多微小部分，小到每一微小部分的转动和变形运动可被忽略、因而这一微小部分可当作一个质点看待为止，这样，物体就可以作为质点的集合体处理. 因此，研究了质点的运动，不仅解决了物体的平动问题，解决了复杂运动的平动部分的问题，而且为进一步研究物体的复杂运动打下了基础.

质点是一个理想模型. 在物理学中，为了便于抓住本质，解决问题，常在科学分析的基础上，突出事物中与问题有关的主要矛盾，而将一些影响不大的次要因素加以忽略，从而建立**理想模型**. 这种研究问题的方法，在物理学中经常运用. 在一定条件下恰当地运用理想模型能不能正确反映客观现实呢？毛主席在“实践论”中引用过列宁的一句话：“一切科学的(正确的、郑重的、非瞎说的)抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”可以帮助我们认识这个问题.

知道了质点的涵义，就可以进一步研究质点的运动. 下面从比较简单的直线运动开始.

§1.2 直线运动

(一) 直线运动的位移 对一定参照系而言，如果质点的运动径迹①是一条直线，就说它作**直线运动**．如图 1.1，取质点沿其上

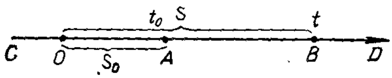

图 1.1

运动的直线 CD 为坐标轴，在轴上取某一点 O 为原点，并规定由 C 向 D 作为坐标轴的正向．设 t_0 时刻质点经过 A 点，$OA=s_0$，称为质点在 t_0 时刻的**坐标**，它标志着该时刻质点的位置；若 t 时刻质点经过 B 点，则 $OB=s$ 应表 t 时刻质点的坐标．$AB=s-s_0$ 表在 $t-t_0$ 时间内质点位置的变化，称为质点在这一段时间内的**位移**．坐标为正，表质点位于原点的右方；坐标为负，表质点位于原点的左方．位移为正，则 $s>s_0$，B 在 A 的右边，表质点的位置向坐标轴的正向变化；位移为负，则 $s<s_0$，B 在 A 的左边，表质点的位置向坐标轴的负向变化．

平常说的"路程"，指在一段时间内质点通过的距离，恒取正值．若在 $t-t_0$ 时间内质点一直向右运动，那么位移 AB 就和路程一致；若质点一直向左运动，那么位移为负，它的绝对值才等于通过的路程；若质点在该时间内先向右运动到 D 再折回 B 点，那么位移仍为 $AB=s-s_0$，但通过的路程则为距离 AD 和 DB 之和，二者并不一致．可见位移和路程是两个不同的概念．

(二) 直线运动的速度·平均速度和瞬时速度 比较几种直线运动，我们首先会发现它们的快慢程度一般并不相同，例如飞机

---

① 在本书中，为用词明确起见，将"径迹""轨道""轨迹"加以区别．径迹指连结各时刻质点所经过的点而得的曲线；轨道指限制质点运动的曲线形实物；轨迹表示满足某种数学条件的几何图形(一般为一曲面)。

比汽车快,步行比汽车慢. 为了描述直线运动的快慢程度,引入直线运动的速度这一物理量,它是质点在一段时间内的位移和那一段时间的比,也就是单位时间内的位移. 常用的速度单位是米/秒或厘米/秒.

如果质点在任意两段相等的时间内通过的路程相等,称为作匀速直线运动;它的速度

$$v=\frac{s-s_0}{t-t_0}. \tag{1}$$

是一个恒量. 若取 $t_0=0$ 为初刻,并取此时质点的位置为原点,即 $s_0=0$,则(1)式简化为:

$$s=vt. \tag{2}$$

如果在运动过程中,质点在任意两段相等的时间内通过的路程不相等,称为作变速直线运动. 对这种运动,用直线运动的速度来描述,显得过于粗糙,有必要发展上述速度概念. 将直线运动所经过的时间分成许多小段,各段时间的位移与相应时间的比,称为各该段的平均速度. 如图 1.2,设任一时刻 t 质点经过 A 点,坐标 $s=OA$. 我们说质点在运动,就意味着坐标 s 随时刻 t 而改变,用数学语言来说,就是 s 为 t 的函数,这个关系可以表为:

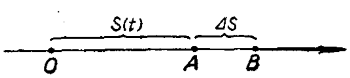

图 1.2

$$OA=s(t).$$

将某一 t 值代入 $s(t)$,即得该时刻质点的坐标,故 $t+\Delta t$ 时刻质点的坐标为:

$$OB=s(t+\Delta t).$$

Δt 是 t 时刻后的一小段时间,t 和 Δt 都是任意的,在这段时间内的位移为:

$$\Delta s=s(t+\Delta t)-s(t).$$

用 Δt 除此式，得这段时间内的**平均速度**为:

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{s(t+\Delta t)-s(t)}{\Delta t}. \tag{3}$$

在这一小段时间里，运动的快慢程度仍然不是恒定的，而是不断地在变化着，$\bar{v}$ 不仅随 t 而变，而且随 Δt 而变，因此，用平均速度仍然只能粗略地描述变速直线运动.

要精确地、如实地描述在任一时刻的邻近时间内变速直线运动的快慢，应该把时间 Δt 取得很短，Δt 越短，描述得越精确、越接近客观的真实情况；但 Δt 不能等于零，因为没有时间间隔就没有位移，就谈不上运动和快慢了. 要解决这个矛盾，可以使 Δt 趋近于零，而求平均速度的极限值，这个极限值称为 t 时刻的**瞬时速度**(或即时速度):

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{ds}{dt}. \tag{4}$$

它表示 t 时刻附近无限小的一段时间(这就是瞬时的涵义)内的平均速度，其值只随 t 而变，是精确地描述快慢程度的物理量. (4)式已引入高等数学中的符号$\frac{ds}{dt}$，它表示瞬时速度是坐标函数 s 对时间 t 的一阶导数. 以后提到速度总是指瞬时速度而言. v 为正，表质点沿坐标轴的正向运动；v 为负，表质点运动的方向与坐标轴的正向相反. 质点作变速直线运动时，每一时刻都有一个速度，用以描述相应时刻运动的快慢；而且各时刻的速度一般并不相等，即是说 v 也是时间的函数. 对匀速直线运动，v 为恒量，即不随时间改变的量. 速度的瞬时性是与变速直线运动的“变”字密切相联系的，速度不变，瞬时性就不突出了.

[**例一**] 一列火车，由车站出发，作变速直线运动，设 t(秒)时刻的坐标为 $s(t)=3t^2$(米). 试求 t 时刻后的 Δt 时间内的平均速度及 t 时刻的瞬时速度.

解: t 时刻的坐标: $s(t)=3t^2$,

$t+\Delta t$ 时刻的坐标: $s(t+\Delta t)=3(t+\Delta t)^2$,

Δt 时间内的位移:

$\Delta s=s(t+\Delta t)-s(t)=3(t+\Delta t)^2-3t^2=6t\Delta t+3\Delta t^2$.

故 t 时刻后的 Δt 时间内的平均速度为:

$$\bar{v}=\frac{\Delta s}{\Delta t}=6t+3\Delta t\,(\text{米/秒}),$$

它显然随 t 和 Δt 而变. 由(4)式,得 t 时刻的瞬时速度为:

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}(6t+3\Delta t)=6t\,(\text{米/秒}).$$

显然,v 只随 t 而变,与 Δt 无关. 把这个结果和初速为零的匀变速直线运动公式 $v=at$ 比较,可以看出,这列火车在作匀加速直线运动,加速度为 6 米/秒^2.

应当指出,本段讨论的瞬时速度适用于一般直线运动,并不局限于匀变速直线运动.

[**例二**] 在上例中,试求火车(i)在 3 到 3.1 秒间的平均速度;(ii)在 3 到 3.001 秒间的平均速度;(iii)在 3 到 3.00001 秒间的平均速度;(iv)火车在 3 秒时的瞬时速度.

解: (i) $t=3$ 秒时的坐标为: $s(3)=3\times3^2=27$(米),

$t=3.1$ 秒时的坐标为: $s(3.1)=3\times3.1^2=28.83$(米),

由(3)式, $\bar{v}=\dfrac{s(3.1)-s(3)}{3.1-3}=\dfrac{1.83}{0.1}=18.3$(米/秒);

(ii) $t=3.001$ 秒时的坐标为: $s(3.001)=3\times3.001^2=27.018003$(米),

同理, $\bar{v}=\dfrac{s(3.001)-s(3)}{3.001-3}=\dfrac{0.018003}{0.001}=18.003$(米/秒);

(iii) $t=3.00001$ 秒时的坐标为:

$s(3.00001)=3\times3.00001^2=27.0001800003$(米),

同理, $\bar{v}=\dfrac{s(3.00001)-s(3)}{3.00001-3}=\dfrac{0.0001800003}{0.00001}=18.00003$(米/秒);

(iv) 由上面的三个答案, 可见 $\Delta t\to0$ 时, $\bar{v}$ 趋于极限值 $v=18$(米/秒), 即 $t=3$ 秒时的瞬时速度.

（三）直线运动的加速度·平均加速度和瞬时加速度 在变速直线运动中，我们首先遇到如何描述快慢程度这一问题，引入瞬时速度,这个问题就解决了;接着遇到的是如何描述速度变化的缓急程度问题,例如当汽车紧急刹车时，速度变化很急；如果仅将油门关上,让汽车自由滑行，它最后也会停下来，但速度变化就比较缓．为了描述速度变化的缓急程度，引入直线运动的加速度这一物理量，它是物体作直线运动时，在一段时间内速度的变化(即该时间末的速度与该时间初的速度之差)和那段时间的比,也就是单位时间内速度的变化.常用的加速度单位为米/秒^{2}或厘米/秒^2.

如果质点在任意两段相等时间里速度变化相等，称为作匀变速直线运动,它的加速度

$$a=\frac{v-v_0}{t-t_0}. \tag{5}$$

是一个恒量，式中v_0是t_0时刻的速度，v是t时刻的速度．若取$t_0=0$为初刻,v_0称为初速度,则(5)式简化为:

$$v=v_0+at\ . \tag{6}$$

这就是我们熟悉的匀变速直线运动的第一个公式．若以t为横坐标,v为纵坐标,可绘得一直线AB如图1.3，它的斜率$\mathrm{tg}\alpha$表匀变速直线运动的加速度，这种图叫速度图.

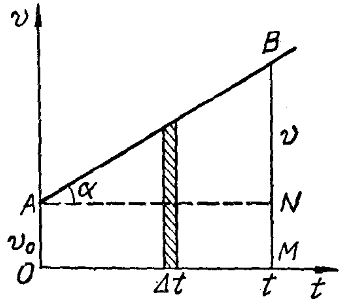

图 1.3

将所经时间t分成许多小间隔，Δt是其中的任一个，在这一小段时间内,各点相应的纵坐标,略有不同，当Δt足够小时，相应的一小段运动可近似地看作匀速直线运动,Δt时间内的位移应等于速度v与Δt的相乘积，数值上等于图中画斜线部分的面积.

每一时间间隔内的运动可同法处理，将各段位移相加，即得 t 时间内质点的总位移 s，数值上等于各小面积之和，即面积 $OABM$. 作 AN 与 t 轴平行，上述面积被分为矩形 $OANM$ 和三角形 ANB，其面积各为 v_0t 和 $\frac{1}{2}(v-v_0)t=\frac{1}{2}at^2$［已将（6）式代入］. 于是得：

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2. \tag{7}$$

这就是匀变速直线运动的第二个公式. 这里所用的方法，其实就是高等数学中的定积分，如果采用数学中的符号，

$$s=\int_0^t v\,dt=\int_0^t (v_0+at)\,dt=v_0t+\frac{1}{2}at^2.$$

如果直线运动不是匀变速的，那么用方才定义的直线运动的加速度来描述速度变化的缓急，显得过于粗糙，因为在一段时间里，速度变化的缓急程度是在不断改变的. 在这种情况下我们有必要发展上述加速度的概念.

仿前段的方法，将运动所经历的时间分成许多小段，各段时间内速度的变化与相应时间的比，称为各该段时间内的平均加速度. 我们只须取一个任意段来研究就行了. 设 t 时刻的速度为 $v(t)$，它是时间的函数；在 $t+\Delta t$ 时刻，速度变为 $v(t+\Delta t)$. 在这段时间 Δt 内，速度的变化为 $\Delta v=v(t+\Delta t)-v(t)$；用 Δt 除 Δv，得这段时间内的**平均加速度**为：

$$\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}. \tag{8}$$

在这段时间里，速度变化的缓急程度还在不断地改变，$\bar{a}$不仅随 t、而且随 Δt 而变，因此这种描述仍嫌粗糙.

要描述得精确，必须将 Δt 取得很短，越短越精确. Δt 趋近于零时，平均加速度的极限值，称为 t 时刻的**瞬时加速度**，即：

$$a=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{dv}{dt}. \tag{9}$$

表在 t 时刻附近无限小的一段时间内的平均加速度，其值只随 t 而变，是精确描述速度变化缓急程度的物理量.（9)式中已引入高等数学中的符号$\frac{dv}{dt}$，它表示瞬时加速度为速度函数 v 对时间 t 的一阶导数. 以后提到加速度总是指瞬时加速度而言. 对匀变速直线运动，加速度是一个恒量；对一般变速直线运动，加速度是时间的函数. a 为正，表速度随时间而增加；a 为负，表速度随时间而减少.

在本节中着重阐述了速度、加速度的瞬时性，下节将初步介绍它们的矢量性和相对性.

§1.3 矢　量

为了进一步研究曲线运动，并为以后的动力学打下基础，有必要把一些在中学学过的关于矢量的知识总结一下，并作一些必要的补充.

(一) 矢量与矢量的加减法　仅仅提到一质点某时刻以每秒5米的速度运动，意义并不完全，因为它在哪个方向运动，并不明确. 如果说一质点在某时刻以每秒 5 米的速度沿南北向向北运动，那么所描述的运动就完全确定了. 所以说速度这个物理量，不仅有数值，而且有方位和指向，5 米/秒是它的数值，南北向是它的方位，向北是它的指向. 有时将方位和指向合称方向. 有一些别的物理量如加速度、力等也有类似的性质，概括起来，把**同时具有数值、方位、指向的物理量**初步称为**矢量**. 书写时常在表示矢量的文字上加一矢号，印刷时则把相应文字排成黑体字. 因为一支箭有长短、箭杆、箭头，恰和矢量三要素相对应，所以可以画一支箭来图示一

个矢量，箭长按一定比例表示矢量的数值.

只用数值就能完全确定的物理量，称为**标量**，如时间和以后要学的质量、能量等，都是标量.

设一船在静水中划行，向东作匀速直线运动，速度为 $\boldsymbol{v}_1$；若不划行，任风吹动，将向东偏北 θ 角作匀速直线运动，速度为 $\boldsymbol{v}_2$，如图 1.4. 船同时参与这两种运动的结果，实际上是以速度 $\boldsymbol{v}$ 作匀速直线运动，$\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$ 恰满足平行四边形关系. 通过类似的观察实验，以及对其他矢量的实验，总结得出一条规律，称为矢量合成的**平行四边形法则**：如图 1.5(*a*)，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为二分矢量，把它们作两邻边完成一个平行四边形，过交点 O 画对角线，即得合矢量 $\boldsymbol{C}$. 这个关系可用矢量公式表示为：

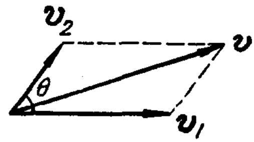

图 1.4

$$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=\boldsymbol{C}. \tag{1}$$

严格说，要同时具有数值、方位和指向而且合成时服从平行四边形法则的物理量才叫做矢量.

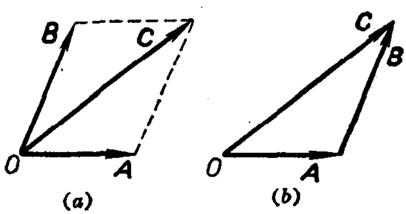

图 1.5

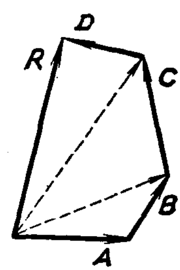

图 1.6

二矢量相加，也可以按三角形法则进行，如图 1.5(*b*). 把这个方法推广，可以求两个以上的矢量 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、…等的合矢量 $\boldsymbol{R}$，如图 1.6；这个方法，称为**多边形法则**.

“已知合矢量 $\boldsymbol{C}$ 和一个分矢量 $\boldsymbol{A}$，求另一个分矢量 $\boldsymbol{B}$”. 这就是矢量减法所要解决的问题，可用矢量公式表示为：