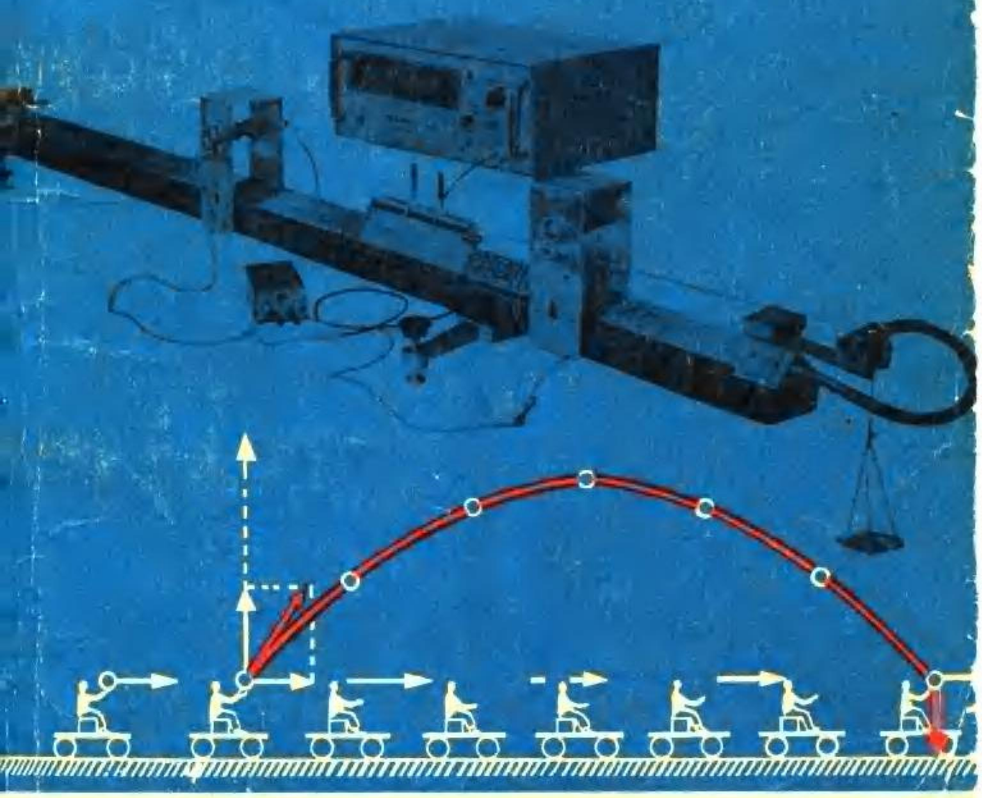
高等学校试用教材

大学物理学

力学

杨仲耆 等编



高等学校试用教材

大学物理学

力学

杨仲耆 等编

人民教育出版社

本书内容有牛顿力学和狭义相对论基础知识。书中加强了矢量和微积分的运用，宜于第一学年第二学期开课讲授。书中例题、习题较多，书末附有习题答案。

本书可作为工科院校的试用教材，也可供理科院校参考。

高等学校试用教材

大学物理学

力　学

杨仲耆　等编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32　印张 12.5　字数 302,000

1979 年 7 月第 1 版　　1980 年 4 月第 1 次印刷

印数 00,001—22,000

书号 13012·0370　定价 1.10 元

前　　言

本书是以天津大学物理教研室历年所编写的讲义为基础，参考国内外先进教材，根据1977年11月西安工科院校物理教材会议讨论过的编写大纲编写的。

编写时我们注意了以下各点：

一、在保证经典理论的基础上，加强了近代理论。对牛顿力学、电磁学和波动过程等经典部分作了适当的选择和安排。将狭义相对论基础知识列于牛顿力学之后。以上各部分共占全书篇幅的3/4，其余1/4篇幅对量子和统计物理基础作了初步论述。

二、力图以能量观点、守恒定律、迭加原理和波动特征等基本概念贯穿于全书，以使物理学的基本知识有机的联系起来。

三、注意引导和培养学生运用高等数学分析和解决物理问题的能力。本书宜于第一学年第二学期开课讲授。

四、例题、习题较多，可选择讲授。讲授时间为140—180学时。

本书拟分为力学；电磁学；振动、波动与光学；量子与统计物理基础等四册。

本书初稿经西北工业大学、华中工学院、华南工学院、武汉钢铁学院及我校共三千多名学生试用，他们提了很多宝贵意见；修改后承南开大学赵景员教授、哈尔滨工业大学洪晶教授、北京邮电学院施国钧教授和重庆大学刘之鄘教授等九所兄弟院校代表的审阅；在编写过程中，我校物理教研室同志从各方面给予了大力帮助，对此我们一并表示衷心的感谢。参加本书编写的有杨仲耆、倪

守正、高敦怡、马世宁和陈宜生，廖愓生负责插图设计，杨仲耆统稿。本书尚欠成熟，某些方面仅是初步尝试，有待于在教学实践中逐步提高。限于水平，缺点和错误在所难免，请批评指正。

编　者

1979年6月

目　　录

第一篇　力　　学

第一章　矢量……………………………………………………………1

§1-1-1　物理量　矢量与标量………………………………………1

§1-1-2　矢量加法——矢量合成　几何加法………………………2

§1-1-3　矢量的正交分解与合成　解析法…………………………6

§1-1-4　矢量的标积与矢积…………………………………………12

§1-1-5　矢量关系式的不变性………………………………………14

习题……………………………………………………………………16

第二章　运动学…………………………………………………………19

§1-2-1　运动及其描述方法…………………………………………19

§1-2-2　瞬时速度和瞬时加速度……………………………………23

§1-2-3　运动方程……………………………………………………29

§1-2-4　抛体运动……………………………………………………36

§1-2-5　圆周运动……………………………………………………45

§1-2-6　一般曲线运动方程的矢量形式……………………………49

习题……………………………………………………………………56

第三章　牛顿运动定律…………………………………………………66

§1-3-1　力的概念及其种类…………………………………………66

§1-3-2　牛顿运动定律………………………………………………72

§1-3-3　力学单位制和量纲…………………………………………81

§1-3-4　牛顿定律的简单应用………………………………………84

§1-3-5　牛顿定律的进一步应用——求解运动方程………………105

§1-3-6　惯性系　伽利略相对性原理………………………………113

习题……………………………………………………………………118

第四章　守恒定律………………………………………………………128

§1-4-1　功……………………………………………………………128

§ 1-4-2 功率……135
§ 1-4-3 动能及动能定理 位能……137
§ 1-4-4 保守力与非保守力……143
§ 1-4-5 功能关系……149
§ 1-4-6 机械能守恒和转换定律……154
§ 1-4-7 能量守恒定律——普遍的能量守恒和转换定律……163
§ 1-4-8 动量原理……166
§ 1-4-9 动量守恒定律……171
§ 1-4-10 对心碰撞……176
*§ 1-4-11 动量守恒定律和质心……185
§ 1-4-12 火箭的基本原理……188
§ 1-4-13 关于守恒定律的一些补述……190
习题……192
第五章 刚体转动……201
§ 1-5-1 角速度和角加速度……201
§ 1-5-2 滚动……207
§ 1-5-3 转动惯量……210
§ 1-5-4 转动定律……220
§ 1-5-5 转动中的能量关系……232
§ 1-5-6 角动量守恒定律……239
*§ 1-5-7 回转仪和进动……246
习题……250
第六章 有心力场作用下质点的运动……258
§ 1-6-1 开普勒定律 万有引力定律……258
§ 1-6-2 质点在平方反比有心力作用下的运动……264
§ 1-6-3 人造地球卫星的运动……277
*§ 1-6-4 α 粒子在库仑斥力作用下的运动……291
习题……293
第七章 分子运动……296
§ 1-7-1 分子运动的经典图象……296
§ 1-7-2 理想气体状态方程……303
§ 1-7-3 理想气体压强公式……309

§ 1-7-4　温度与分子运动……313
§ 1-7-5　能量按自由度均分原理……317
习题……322
第八章　狭义相对论基础……325
§ 1-8-1　经典力学的伽利略变换……325
§ 1-8-2　迈克耳孙实验与爱因斯坦的假设……332
§ 1-8-3　洛伦兹变换……339
§ 1-8-4　爱因斯坦速度变换……342
§ 1-8-5　长度的相对性……348
§ 1-8-6　时间的相对性……352
§ 1-8-7　同时性的相对性……356
§ 1-8-8　质量与速度的关系……360
§ 1-8-9　质能关系……365
习题……371
附录……374
附录 I.　重要的物理常数表……374
重要的物理性质常数及有关天体的数据表……374
附录 II.　国际单位制(SI)……375
附录 III.　希腊字母表……379
习题答案……380

第一篇 力 学

第一章 矢 量

§1-1-1 物理量 矢量与标量

物理学是现代科学技术的基础学科之一，它研究物质运动的基本规律。这里，“物质运动”不仅指物体空间位置随时间变化的机械运动，还包括电磁感应，发热发光，原子内部运动等形形色色的运动形式。要确切地描述物质运动的规律，必须建立许多物理概念，如速度、密度、电流、磁感强度等等。与一般概念不同，物理概念是建筑在量度的基础上的，就是说，每个物理概念都要以某种量度方法对它作严格规定。例如，规定密度为单位体积内的质量，规定电流为单位时间内流过导线截面的电量。这种用量度方法严格规定的量叫做物理量。上述的速度、密度、电流、磁感强度等都是物理量。

物理量常包含着数字与单位两部分。譬如，只说“某物长为3.5，质量为7.6”是毫无意义的，必须说出各量的单位才有意义。

有些物理量不仅具有数值大小(包括数字与单位)，还具有方向性。例如，甲车以10米/秒的速度运行，乙车以15米/秒的速度运行，问20秒后两车相距多远？这是无法回答的！因为，两车的运行方向，即速度的方向未给出。两车同向而行，反向而行，或两车运行方向成某一角度，将会得到不同的答案。这表明，速度这个物理量具有方向性，在给出数值的同时还必须标明其方向。凡是必须同时用数值大小和方向两者才能表明的物理量叫做矢量，例如，速

度、加速度、力、电场强度和磁感强度等都是矢量；凡是只具有数值大小而无方向性的物理量叫做标量，例如，质量、密度、温度、功和能量等都是标量。

§1-1-2 矢量加法——矢量合成 几何加法

用作图法来处理矢量就会使人一目了然，格外清楚。画个带有箭头的线段来表示矢量，如图 1-1-1 所示，线段长度以一定比例代表矢量的数值，箭头指向代表矢量的方向。用符号表示矢量时，在铅印书中常用黑体字，如 $\boldsymbol{a}$；在书写时常用 $\vec{a}$；又以 $|\boldsymbol{a}|$ 或 a 表示该矢量的数值（不包含其方向）。图 1-1-1 中的两矢量数值相同而方向相反，其一以 $\boldsymbol{a}$ 表示，则另一以 $(-\boldsymbol{a})$ 表示。

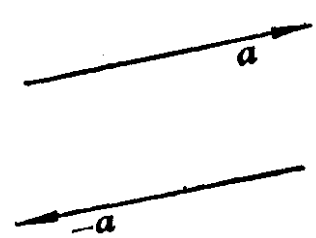


图 1-1-1 矢量的图示法

两个矢量合成的结果是怎样的？为此我们来分析一个例子。设一小船在静水中的划速为 $\boldsymbol{v}_1$，河水的流速为 $\boldsymbol{v}_2$。在图 1-1-2(a) 中，该小船以划速 $\boldsymbol{v}_1$ 朝着与水流成角 θ 的方向作匀速直线运动。显然，小船既被划动（速度为 $\boldsymbol{v}_1$），亦必随水流飘动（速度为 $\boldsymbol{v}_2$），从岸上看，小船同时参与这两种运动，其实际运动速度是 $\boldsymbol{v}$（图中所

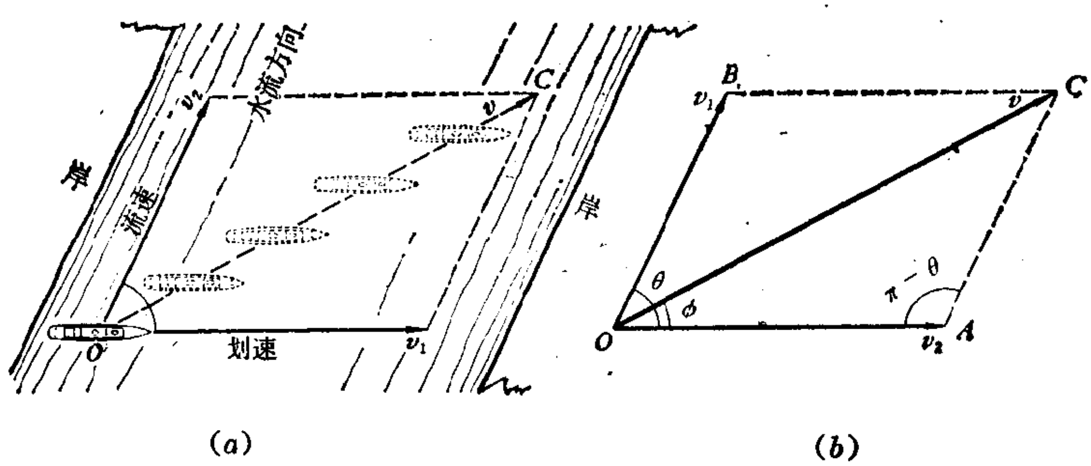


图 1-1-2 两矢量的合成（平行四边形法）

标出的 OC 方向)。$\boldsymbol{v}$ 就是速度矢量 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 合成的结果，叫做合成速度(简称合速度)。

这就是两个矢量的合成。实践证明矢量 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 的合矢量 $\boldsymbol{v}$，恰好是由 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 组成的平行四边形 $OACB$ 的对角线 OC，如图 1-1-2(b)所示，图中 OA 为矢量 $\boldsymbol{v}_1$，OB 为矢量 $\boldsymbol{v}_2$，二矢量夹角为 θ。合矢量 $\boldsymbol{v}$ 的数值大小(即 v 值)与方向(以图中角度 ϕ 标出)，可用米尺(按图 v_1 及 v_2 所用比例)与角规直接测量出来。更常用的方法是利用下述三角公式计算得 v 与 ϕ 值:

$$v^2=v_1^2+v_2^2+2v_1v_2\cos\theta \tag{1-1-1}$$

$$\operatorname{tg}\phi=\frac{v_2\sin\theta}{v_1+v_2\cos\theta} \tag{1-1-1a}$$

为了方便，在矢量分析中，常将矢量合成的关系用矢量式表示如下

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_1+\boldsymbol{v}_2 \tag{1-1-2}$$

注意，上式中符号“+”的含义已和它在普通代数中的含义有所不同了。它要求我们用平行四边形的方法(或其他等同的方法，见后)把 $\boldsymbol{v}$ 的大小和方向求出来，这叫做几何加法或矢量加法。$\boldsymbol{v}$ 称为 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 的合矢量或称为 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 的矢量和。

矢量加法(几何加法)的含义是包含着代数加法的。如当 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 方向相同，即 $\theta=0$ 时，则式(1-1-1)退化为 $v=v_1+v_2$；又，当 $\boldsymbol{v}_1$ 与 $\boldsymbol{v}_2$ 方向相反，即 $\theta=\pi$ 时，式(1-1-1)退化为 $v=v_1-v_2$。所以，矢量加法是代数加法的发展，代数加法是矢量加法的某种特殊情况。

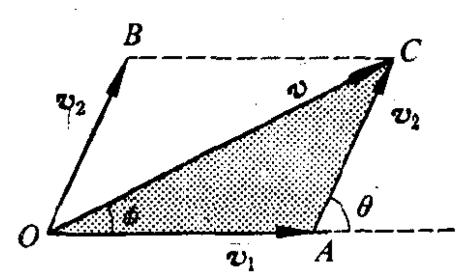


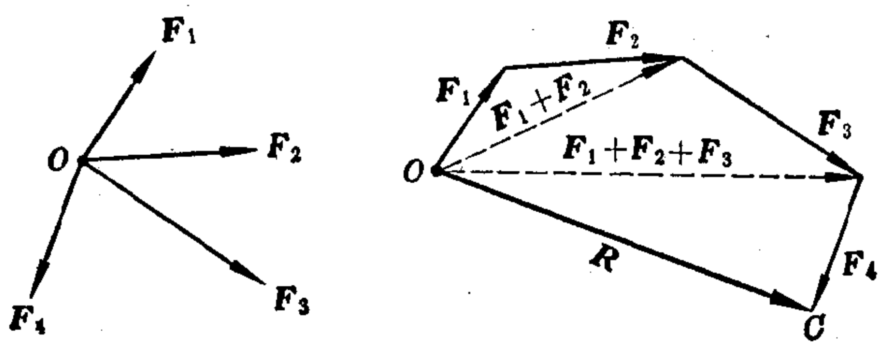
图 1-1-3 三角形法

求合成矢量的平行四边形法可简化为三角形法。如图 1-1-3，为求对角线 OC，只画出平行四边形的一半(三角形 OAC)即可。方

法是在矢量 $\boldsymbol{v}_1$ 的末端接着画矢量 $\boldsymbol{v}_2$, 首尾相接(即将 $\boldsymbol{v}_2$ 平移到使 $\boldsymbol{v}_2$ 的始端与 $\boldsymbol{v}_1$ 的末端相接的位置), 则从 $\boldsymbol{v}_1$ 的始端引向 $\boldsymbol{v}_2$ 末端的矢量 (图 1-1-3 中的 $\overline{OC}$) 即是合矢量 $\boldsymbol{v}$, 这就是三角形法。

发展三角形法,可得多个矢量合成(相加)的多边形法。例如,图 1-1-4(a)中有四个力矢量作用于 O 点, 在求合力矢量 $\boldsymbol{R}$ 时, 可把各力矢量分别地平移到首尾相接的相应位置, 如图1-1-4(b); 然后,从第一个矢量的始端起到最后的矢量的末端为止,画一个矢量 $\boldsymbol{R}$(图 1-1-4(b) 中的 $\overline{OC}$)。显然,这样画出的结果是

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\boldsymbol{F}_3+\boldsymbol{F}_4$$

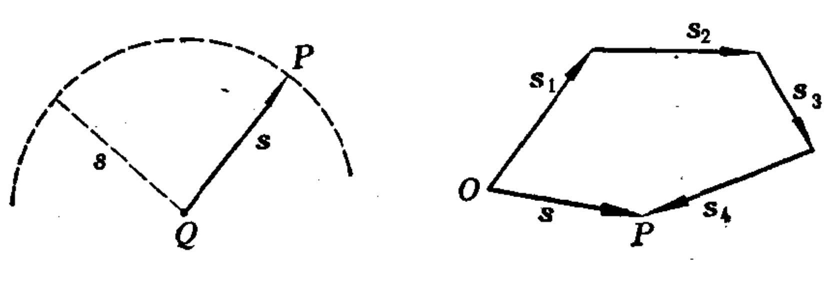


(a) (b)

图 1-1-4 矢量合成的多边形法

注意, 合矢量 $\boldsymbol{R}$ 的箭头是和最后一个矢量 (图 1-1-4 中为 $\boldsymbol{F}_4$) 的箭头是对顶着的,其他矢量 $\boldsymbol{F}_1, \boldsymbol{F}_2$……都是首尾相接。

物体的位置变化叫做物体的位移。位移是矢量。因为, 若只说某物体从地点 Q 移动了 s 远是不足以说明这个物体的位置的(如图 1-1-5(a) 所示圆周上诸点都距 Q 点为 s), 必须标明其方

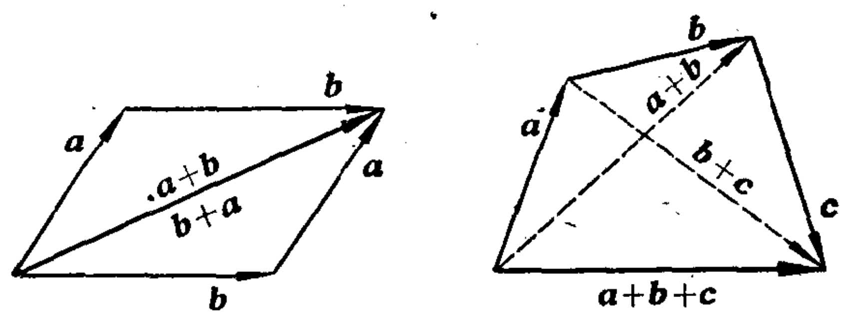


(a) (b)

图 1-1-5 位移矢量

向，如图 $\overline{QP}$。位移常用 s 表示，显然若干个位移的合成符合多边形法则，如图 1-1-5(b)所示，$\boldsymbol{s}_1+\boldsymbol{s}_2+\boldsymbol{s}_3+\boldsymbol{s}_4=\boldsymbol{s}$。

应该说明，与代数加法一样，矢量加法也遵从交换律与结合律。读者不难从图 1-1-6 中看出：



(a) 交换律　　(b) 结合律

图 1-1-6　矢量加法的交换律与结合律

$$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a} \qquad \text{[交换律]}$$

$$(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b})+\boldsymbol{c}=\boldsymbol{a}+(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c}) \qquad \text{[结合律]}$$

矢量减法是怎样的呢？因为

$$\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}=\boldsymbol{a}+(-\boldsymbol{b}) \tag{1-1-3}$$

从图 1-1-7 可知，矢量减法包括于矢量加法之中。

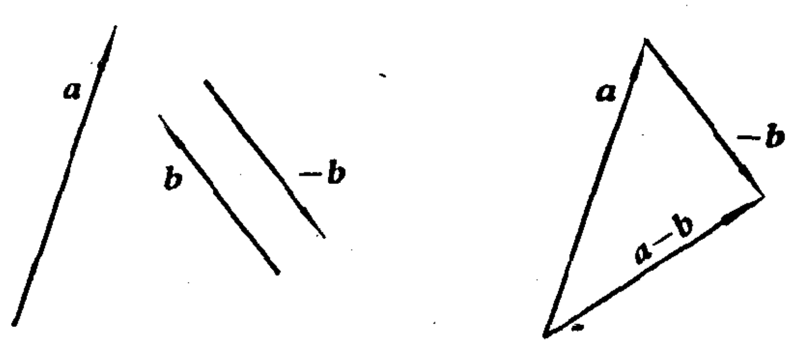


图 1-1-7　矢量的减法

必须指出，有的物理量虽然具有数值大小及方向，但在合成时却不符合平行四边形法则(如，有限大的转角)，这种物理量不是矢量。因此，严格地说只有满足下列两个条件的物理量才能被定义为矢量：(1)必须具有数值大小与方向；(2)合成时必须符合平行四

边形法则。

§1-1-3　矢量的正交分解与合成　解析法

采用多边形法进行多个矢量的合成，其合矢量的大小和方向可用米尺和角规直接量出，但这要求图形必须画得足够准确。如果想运用公式(1-1-1)及(1-1-1 a)进行计算，只能每两个矢量计算一次，这就显得异常繁琐。现引入另一种合成矢量的计算方法——解析法。因为这种方法的步骤是"先分后合"，因此先讨论矢量的分解。

如图 1-1-8(a)所示，把一个向斜上方拉物体的力 $\boldsymbol{F}$ 分解成水平分力 F_x 与竖直分力 F_y，是我们早已熟知的。同样我们可以把任一矢量 $\boldsymbol{v}$(例如 $\boldsymbol{v}$ 代表速度矢量)按直角坐标轴的方向分成两个分量 v_x 及 v_y，显然它们就是矢量 $\boldsymbol{v}$ 在两个坐标轴上的投影。若 θ 为矢量 $\boldsymbol{v}$ 与 x 轴的夹角，则由图 1-1-8(b)可知

$$v_x=v\cos\theta,\qquad v_y=v\sin\theta \tag{1-1-4}$$

这叫做矢量的正交分解。

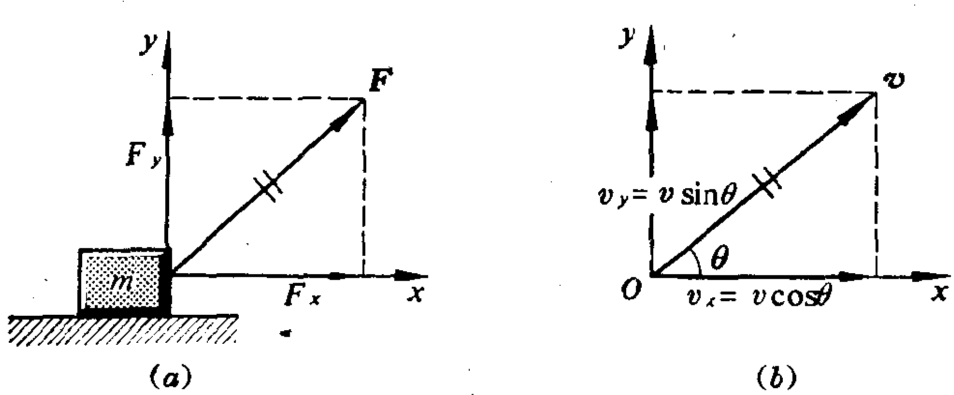


图 1-1-8　矢量的正交分解法

把问题翻过来，如果给出了分量 v_x 及 v_y，我们立刻能找到矢量 $\boldsymbol{v}$ 的大小及其方向(用 θ 表示)，因为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2},\qquad \theta=\mathrm{tg}^{-1}\frac{v_y}{v_x} \tag{1-1-5}$$

在运用正交分解时，引入单位矢量的概念是十分有益的。**具有确定的方向并且其数值大小为"1"的矢量**叫做该方向的单位矢量。图 1-1-9 中的矢量 $\boldsymbol{a}_0$ 表示在矢量 $\boldsymbol{a}$ 方向的单位矢量，其数值 $|\boldsymbol{a}_0|=1$。因此，矢量 $\boldsymbol{a}$ 可写作 $\boldsymbol{a}=a\boldsymbol{a}_0$，在图 1-1-9 中 $\boldsymbol{a}=5\boldsymbol{a}_0$。

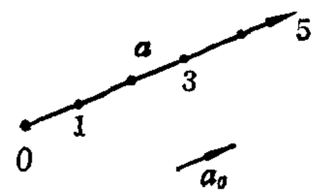
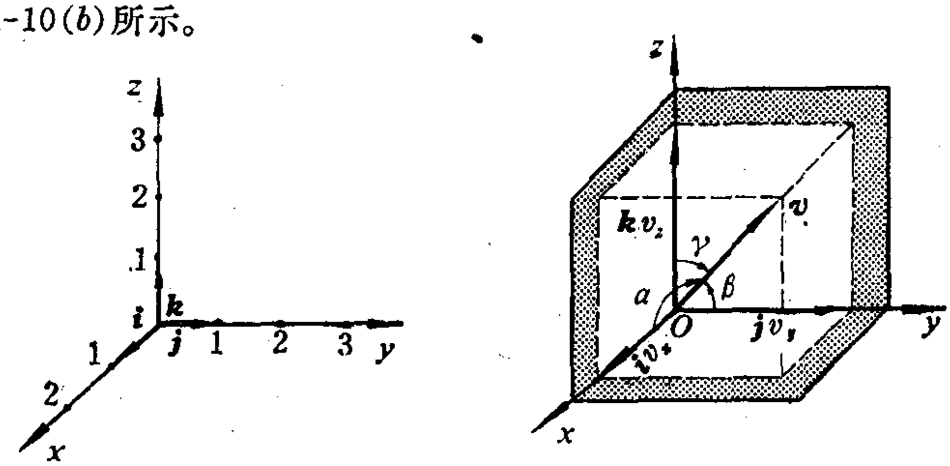


图 1-1-9　单位矢量 $\boldsymbol{a}_0$

通常在二维直角坐标系 (x,y) 中，令 $\boldsymbol{i}$ 与 $\boldsymbol{j}$ 分别代表沿 Ox 轴与 Oy 轴的单位矢量①，如图 1-1-11(a)所示。于是，图 1-1-8(b)中

① 对三维空间的直角坐标系 (x,y,z)，除仍令 $\boldsymbol{i}$ 与 $\boldsymbol{j}$ 分别代表 Ox 与 Oy 轴的单位矢量外，还令 $\boldsymbol{k}$ 代表沿 Oz 轴的单位矢量，如图 1-1-10(a)所示。矢量 $\boldsymbol{v}$ 的数值以 v 表示，其方向以该矢量与各坐标轴的夹角 α、β、γ 表出，如图 1-1-10(b)所示。



(a) 单位矢量　　(b) 矢量 $\boldsymbol{v}$ 及其分量

图 1-1-10　三维直角坐标系的矢量

从图中看到，矢量 $\boldsymbol{v}$ 的数值 v 和方向(以方向余弦表出)可由其分量 v_x、v_y、v_z 按下式求得

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2} \tag{1-1-6a}$$

$$\cos\alpha=\frac{v_x}{v},\quad \cos\beta=\frac{v_y}{v},\quad \cos\gamma=\frac{v_z}{v} \tag{1-1-6b}$$

显然，(1-1-6b)的三式中只有两个是独立的，因为 $\cos^2\alpha+\cos^2\beta+\cos^2\gamma=1$。矢量 $\boldsymbol{v}$ 与其分量的关系还可用矢量式表示为

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{i}v_x+\boldsymbol{j}v_y+\boldsymbol{k}v_z \tag{1-1-6c}$$

三维空间的矢量合成用解析法更显简便。

的矢量 $\boldsymbol{v}$ 与分量 v_x、v_y 的关系可用图 1-1-11(b) 的方法表示，它们的关系又可用矢量式表示如下：

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{i}v_x+\boldsymbol{j}v_y \tag{1-1-7}$$

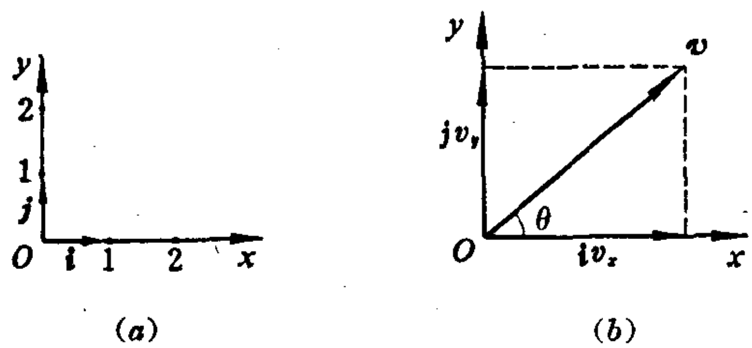


图 1-1-11　正交分解法的矢量图

现在，分析一下在矢量加法中各分量之间的关系。以 $\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{c}$ 为例，如图 1-1-12 所示，矢量 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$ 和它们各自的分量的关系为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{a}&=\boldsymbol{i}a_x+\boldsymbol{j}a_y\\ \boldsymbol{b}&=\boldsymbol{i}b_x+\boldsymbol{j}b_y\\ \boldsymbol{c}&=\boldsymbol{i}c_x+\boldsymbol{j}c_y\end{aligned} \tag{1-1-8}$$

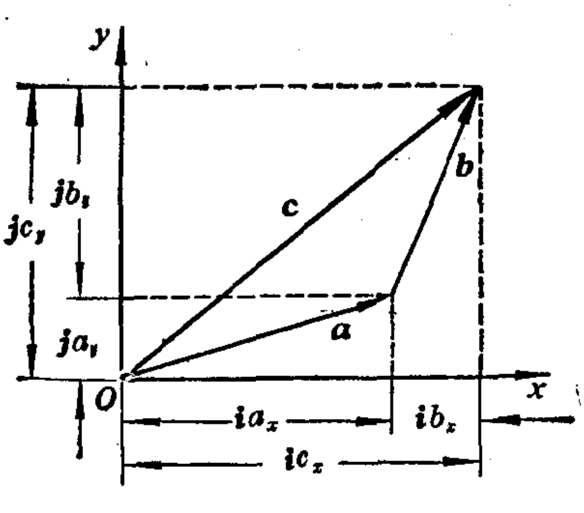


图 1-1-12　矢量合成的解析法

将(1-1-8)三式分别代入 $\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{c}$，可得

$$(\boldsymbol{i}a_x+\boldsymbol{j}a_y)+(\boldsymbol{i}b_x+\boldsymbol{j}b_y)=\boldsymbol{i}c_x+\boldsymbol{j}c_y$$

整理后可得

$$\boldsymbol{i}(a_x+b_x)+\boldsymbol{j}(a_y+b_y)=\boldsymbol{i}c_x+\boldsymbol{j}c_y$$

于是

$$\left.\begin{array}{l} c_x=a_x+b_x \text{（沿 } x \text{ 轴的分量）} \\ c_y=a_y+b_y \text{（沿 } y \text{ 轴的分量）} \end{array}\right\} \tag{1-1-9}$$

显然上面的结果也可以直接从图 1-1-12 上看出来。

(1-1-9)两式的几何意义为：一个合矢量沿任意给定方向的分量〔如式 (1-1-9) 中沿 Ox 方向的分量 c_x〕等于组成这个合矢量的诸矢量(如上例中的 $\boldsymbol{a}$ 及 $\boldsymbol{b}$)沿该方向分量的代数和。

有了合矢量的分量〔如式(1-1-9)中的 c_x 及 c_y〕，显然利用式(1-1-5)，即可求出合矢量的大小及方向。

综上所述可以归纳出一个把多个矢量相加的新方法，其步骤如下：

1）把要相加的矢量先沿各坐标轴分解成分量；

2）求出每个坐标轴上诸分量的代数和，这就是所要求的合矢量在相应坐标轴上的分量；

3）由合矢量的分量求出合矢量的数值与方向角。

这种“先分后合”的矢量加法就叫做解析法。由于它只同直角三角形打交道，从而使计算大为简化。

〔例题 1〕 某物体受到三个在 xy 平面内的力 $\boldsymbol{F}_1=30$ 公斤力、$\theta_1=45°$，$\boldsymbol{F}_2=28$ 公斤力、$\theta_2=150°$，$\boldsymbol{F}_3=20$ 公斤力、$\theta_3=-60°$ 的作用，θ_1、θ_2、θ_3 分别为各相应力与 x 轴所夹的角。试求其合力。

〔解〕 以物体受力点为原点 O 画出坐标轴及各力矢量，如图 1-1-13 所示。

第一步：用正交分解法(图 1-1-13)先将各力沿坐标轴 Ox 及 Oy 分解成分量：

$$\boldsymbol{F}_1=\boldsymbol{i}F_{1x}+\boldsymbol{j}F_{1y}=\boldsymbol{i}F_1\cos\theta_1+\boldsymbol{j}F_1\sin\theta_1$$

$$\boldsymbol{F}_2=\boldsymbol{i}F_{2x}+\boldsymbol{j}F_{2y}=\boldsymbol{i}F_2\cos\theta_2+\boldsymbol{j}F_2\sin\theta_2$$