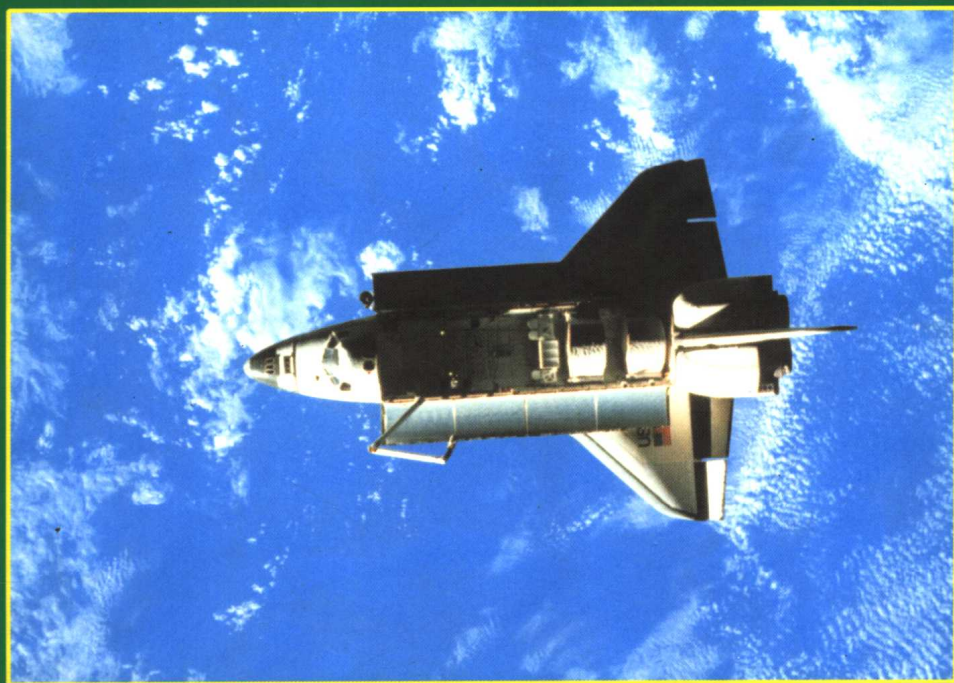


# 大学物理

潘琳 主编

上册



中国石化出版社

# 大学物理

## 上册

主 编	潘 琳
副主编	宋 青
	李巧改
	陆兴中
	张良瑞
主 审	饶瑞昌

中国石化出版社

## 内 容 简 介

《大学物理》是根据最新《高等工业学校大学物理基本要求》，在总结编者长期教学经验的基础上编写而成。全书分上、下两册，上册包括力学、狭义相对论力学基础、电磁学；下册包括气体动理论、热力学基础、机械振动和波、波动光学、量子物理基础。另外还编写了多篇阅读材料，以扩大知识面。

本书可作为高等工业院校各专业的大学物理课程教材，也可作综合大学和高等师范院校非物理专业及各类成人大学物理课程的教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理 上册/潘琳主编. —北京:中国石化出版社,2000.12

ISBN 7-80164-042-X

I.大… II.潘… III.物理学—高等学校—教材 IV.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 82042 号

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安内门大街18号

邮编:100011 电话:(010)84271824

http://www.sinopec-press.com

E-mail:press@sinopet.com.cn

华东地质学院印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092毫米 16开本 19.5印张 495千字 印 22701—24700

2000年12月第1版 2002年8月第1版第3次印刷

定价:23.00元

# 前 言

本书根据国家教育部颁布的《高等工科院校大学物理课程教学基本要求》，并考虑到当前各校学时和学生的实际情况而编写的。在编写过程中，吸取了多种优秀教材的优点，综合各校部分教师的成功教学经验，使教材面向大多数工科师生。为此，我们采取的措施如下：

(1)内容的选用较好符合基本要求。对基本要求中规定的掌握、理解和了解的内容分别作了不同的处理。但为了因材施教，除基本要求内容外，还编入一些要求较高的内容，并将这些内容标以\*号或排成小字，作为选讲或自学内容。

(2)有选择地增加近代物理及其应用的内容(如广义相对论简介等)，并使教材内容与现实生活、工程技术、高科技相联系(如人造地球卫星、火箭发射等)。

(3)精编例题和习题。注重选编有代表性的、难易适中且较新颖的例题和习题。考虑到工科物理教材特点，尽量多选用应用性例题和习题。书中部分例题采用了多种解法，以培养学生灵活应用知识解决问题的能力。习题的题型较丰富，有选择题、填空题、计算题、证明题。

(4)注意避免与中学物理内容简单重复。比较容易和中学重复的内容是质点力学部分，特别是例题和习题更容易和中学内容相同。本书基本上选取了不同于中学内容的例题和习题。

(5)书中编入了多篇阅读材料，以扩大学生知识面，开阔视野，激发学生学习物理的兴趣。

(6)注意处理好教材改革和易教性的关系。编者认为，教材改革并非简单“破体系”，“体系”是形式，形式应服从内容，“破体系”不能作为教学改革的目标和出发点。因此，本书比较接近传统体系，不作过大的改动。这样处理方式是适应大多数院校师生的实际，有利于学生自学和教师教学。

本书采用国际单位制(SI)，书中物理量的表示符号、单位列表于书前，书后有若干附录，供参考。

本书分上、下两册。上册内容为力学、狭义相对论基础、电磁学；下册内容为气体动理论、热力学基础、机械振动和机械波、波动光学、量子物理基础。

参加本书编写有(按编写章节顺序)：华东地质学院、华东船舶工业学院、兰州铁道学院、常

州工业技术学院、江西师范大学、西北轻工业学院、陕西工学院、重庆邮电学院、包头钢铁学院等高校的部分教师。

全书由潘琳主编,上册副主编有宋青、李巧改、陆兴中、张良瑞,下册副主编有聂翔、周平、张占山、潘小青(按编写章节顺序排名)。具体分工为:第一章及阅读材料1(潘琳),第二章(周素云、潘琳),第三章及阅读材料2(朱星华),第四章(潘琳),第五章(宋青),第六章及阅读材料3(李巧改),第七、八章(常文莉),第九章(陆兴中),第十章(聂义友),第十一章及阅读材料4、5(张良瑞、彭梦勇),第十二章(潘琳),第十三章(聂翔),第十四章及阅读材料6(周平),第十五章及阅读材料7(陈希明),第十六章及阅读材料8(张占山),第十七、十八章及阅读材料9、10、11、12、13(潘小青、潘琳)。

本书由饶瑞昌教授主审,并为本书提出了很好的修改意见。我们还得到各参编学校的大力支持,在此表示感谢。

由于编者水平和教学经验的限制,书中一定存在错误和不当之处,诚恳希望读者指正。

编者

2000年8月

## 物理量的名称、符号和单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	$l, L$	米	m
面积	$S, A$	平方米	$m^2$
体积, 容积	$V$	立方米	$m^3$
时间	$t$	秒	s
[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$ 等	弧度	rad
立体角	$\Omega$	球面度	sr
角速度	$\omega$	弧度每秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
角加速度	$\beta$	弧度每二次方秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$
速度	$v, u, c$	米每秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
加速度	$a$	米每二次方秒	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
周期	$T$	秒	s
转速	$n$	每秒	$\text{s}^{-1}$
频率	$\nu, f$	赫[兹]	Hz(1Hz = $1\text{s}^{-1}$ )
角频率	$\omega$	弧度每秒	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
波长	$\lambda$	米	m
波数	$\sigma, \bar{\nu}$	每米	$\text{m}^{-1}$
振幅	$A$	米	m
质量	$m$	千克(公斤)	kg
密度	$\rho$	千克每立方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
面密度	$\rho_s, \rho_A$	千克每平方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
线密度	$\rho_l$	千克每米	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
动量	$P, p$	} 千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
冲量	$I$		
动量矩, 角动量	$L$	千克二次方米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
转动惯量	$I, J$	千克二次方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
力	$F, f$	牛[顿]	N

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
力矩	$M$	牛[顿]米	$N \cdot m$
压力,压强	$p$	帕[斯卡]	Pa
相[位]	$\varphi$	弧度	rad
功	$W, A$	} 焦[耳] 电子伏[特]	J eV
能[量]	$E, W$		
动能	$E_k, T$		
势能	$E_p, V$		
功率	$P$	瓦[特]	W
热力学温度	$T, \Theta$	开[尔文]	K
摄氏温度	$t, \theta$	摄氏度	$^{\circ}C$
热量	$Q$	焦[耳]	J
热导率(导热系数)	$\kappa, \lambda$	瓦[特]每米开[尔文]	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
热容[量]	$C$	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
比热[容]	$c$	焦[耳]每千克开[尔文]	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
摩尔质量	$M$	千克每摩尔	$kg \cdot mol^{-1}$
定压摩尔热容	$C_p$	} 焦[耳]每摩尔开[尔文]	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
定容摩尔热容	$C_v$		
内能	$U, E$	焦[耳]	J
熵	$S$	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m
扩散系数	$D$	二次方米每秒	$m^2 \cdot s^{-1}$
电量	$Q, q$	库[仑]	C
电流	$I, i$	安[培]	A
电荷密度	$\rho$	库[仑]每立方米	$C \cdot m^{-3}$
电荷面密度	$\sigma$	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电荷线密度	$\lambda$	库[仑]每米	$C \cdot m^{-1}$
电场强度	$E$	伏[特]每米	$V \cdot m^{-1}$
电势	$U, V$	} 伏[特]	V
电势差,电压	$U_{12}, U_1 - U_2$		
电动势	$\mathcal{E}, \varepsilon$		
电位移	$D$	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电位移通量	$\Psi, \Phi_e$	库[仑]	C

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
电容	$C$	法[拉]	F( $1F = 1C \cdot V^{-1}$ )
电容率(介电常数)	$\epsilon$	法[拉] 每米	$F \cdot m^{-1}$
相对电容率 (相对介电常数)	$\epsilon_r$	无量纲	
电[偶极]矩	$p, p_e$	库[仑] 米	$C \cdot m$
电流密度	$j, \delta$	安[培] 每平方米	$A \cdot m^{-2}$
磁场强度	$H$	安[培] 每米	$A \cdot m^{-1}$
磁感应强度	$B$	特[斯拉]	T( $1T = 1Wb \cdot m^{-2}$ )
磁通量	$\Phi$	韦[伯]	Wb( $1Wb = 1V \cdot s$ )
自感	$L$	} 亨[利]	H( $1H = 1Wb \cdot A^{-1}$ )
互感	$M, L_{12}$		
磁导率	$\mu$	亨[利] 每米	$H \cdot m^{-1}$
磁矩	$m, p_m$	安[培] 每平方米	$A \cdot m^2$
电磁能密度	$w$	焦[耳] 每立方米	$J \cdot m^{-3}$
坡印廷矢量	$S$	瓦[特] 每平方米	$W \cdot m^{-2}$
[直流]电阻	$R$	欧[姆]	$\Omega(1\Omega = 1V \cdot A^{-1})$
电阻率	$\rho$	欧[姆] 米	$\Omega \cdot m$
光强	$I$	瓦[特] 每平方米	$W \cdot m^{-2}$
相对磁导率	$\mu_r$	无量纲	
折射率	$n$	无量纲	
发光强度	$I$	坎[德拉]	cd
辐[射]出[射]度	$M$	} 瓦[特] 每平方米	$W \cdot m^{-2}$
辐[射]照度	$I$		
声强级	$L_I$	分贝	dB
核的结合能	$E_B$	焦[耳]	J
半衰期	$\tau$	秒	s

基本物理常数表(1986年国际推荐值)

物理量	符号	数值	单位	不确定度 ( $\times 10^{-6}$ )
真空光速	$c$	299 792.458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	(精确)
真空磁导率	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	(精确)
真空介电常数	$\epsilon_0$	$8.854\ 187\ 817\cdots \times 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	(精确)
牛顿引力常数	$G$	$6.672\ 59(85) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	128
普朗克常数	$h$	$6.626\ 075\ 5(40) \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$	0.60
基本电荷	$e$	$1.602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19}$	C	0.30
里德伯常数	$R_\infty$	10 973 731.534(13)	$\text{m}^{-1}$	0.001 2
电子质量	$m_e$	$0.910\ 938\ 97(54) \times 10^{-30}$	kg	0.59
康普顿波长	$\lambda_c$	$2.426\ 310\ 58(22) \times 10^{-12}$	m	0.089
质子质量	$m_p$	$1.672\ 623\ 1(10) \times 10^{-27}$	kg	0.59
阿伏伽德罗常数	$N_A, L$	$6.022\ 136\ 7(36) \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$	0.59
原子(统一)质量单位, 原子质量常数 $1u = m_u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$	$m_u$	$1.660\ 540\ 2(10) \times 10^{-27}$	kg	0.59
气体常数	$R$	8.314 510(70)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.4
玻耳兹曼常数	$k$	$1.380\ 658(12) \times 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	8.4
摩尔体积(理想气体) $T = 273.15\text{K}$ , $p = 101\ 325\text{Pa}$	$V_m$	22.414 10(19)	$\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$	8.4
斯特藩 - 玻耳兹曼常数	$\sigma$	$5.670\ 51(19) \times 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	34

# 目 录

## 第一章 质点运动学

§ 1-1 质点 位置矢量 运动方程 .....	(1)
§ 1-2 位移 速度 加速度 .....	(4)
§ 1-3 直角坐标系中求解运动学问题 .....	(9)
§ 1-4 平面曲线运动中的速度和加速度 .....	(13)
§ 1-5 圆周运动的角量描述 .....	(19)
§ 1-6 相对运动 .....	(21)
习题 .....	(23)
阅读材料 1 .....	(27)

## 第二章 牛顿运动定律

§ 2-1 牛顿运动三定律 .....	(32)
§ 2-2 牛顿运动定律的应用 .....	(36)
§ 2-3 非惯性系 惯性力 .....	(39)
习题 .....	(41)

## 第三章 能量守恒

§ 3-1 功 动能定理 .....	(45)
§ 3-2 保守力的功 势能 .....	(49)
§ 3-3 功能原理 机械能守恒定律 .....	(55)
§ 3-4 能量守恒定律 .....	(59)
习题 .....	(60)
阅读材料 2 .....	(64)

## 第四章 动量守恒 角动量守恒

§ 4-1 冲量 动量 动量定理 .....	(67)
§ 4-2 质点系动量定理 .....	(71)
§ 4-3 质点系动量守恒定律 .....	(74)
§ 4-4 质点的角动量和角动量守恒定律 .....	(81)
* § 4-5 质心 质心运动定律 .....	(85)
习题 .....	(88)

## 第五章 刚体力学基础

§ 5-1 刚体的基本运动 .....	(92)
§ 5-2 刚体的角动量 转动惯量 .....	(95)
§ 5-3 刚体对定轴的转动定律 .....	(99)
§ 5-4 刚体定轴转动的动能定理 .....	(102)

§ 5-5 定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律 .....	(106)
习题 .....	(110)
<b>第六章 相对论基础</b>	
§ 6-1 力学相对性原理 伽利略坐标变换 .....	(115)
§ 6-2 狭义相对论基本原理 洛伦兹坐标变换 .....	(117)
§ 6-3 狭义相对论的时空观 .....	(127)
§ 6-4 狭义相对论动力学基础 .....	(131)
* § 6-5 广义相对论简介 .....	(136)
习题 .....	(142)
阅读材料 3 .....	(145)
<b>第七章 真空中的静电场</b>	
§ 7-1 库仑定律 .....	(148)
§ 7-2 电场 电场强度 .....	(151)
§ 7-3 高斯定理 .....	(161)
§ 7-4 静电场的环路定理 电势能 .....	(168)
§ 7-5 电势 电势差 .....	(171)
§ 7-6 等势面 * 电势与场强的微分关系 .....	(175)
习题 .....	(178)
<b>第八章 静电场中的导体和电介质</b>	
§ 8-1 静电场中的导体 .....	(184)
§ 8-2 电容 电容器 .....	(189)
§ 8-3 静电场中的电介质 电介质的极化 .....	(193)
§ 8-4 介质中的高斯定理 电位移 .....	(196)
§ 8-5 静电场的能量 .....	(201)
习题 .....	(204)
<b>第九章 真空中的稳恒磁场</b>	
§ 9-1 磁感应强度 磁通量 .....	(210)
§ 9-2 毕奥 - 萨伐尔定律 .....	(213)
§ 9-3 安培环路定理 .....	(219)
§ 9-4 磁场对运动电荷的作用 .....	(224)
§ 9-5 磁场对电流的作用 .....	(229)
习题 .....	(236)
<b>第十章 磁介质中的磁场</b>	
§ 10-1 磁介质及其磁化 .....	(244)
§ 10-2 磁介质中的磁场 磁场强度 .....	(247)
§ 10-3 铁磁质 .....	(251)
习题 .....	(253)
<b>第十一章 电磁感应 电磁场</b>	

§ 11-1 电磁感应的基本规律 .....	(256)
§ 11-2 动生电动势与感生电动势 .....	(261)
§ 11-3 自感和互感 .....	(267)
§ 11-4 磁能 .....	(271)
§ 11-6 麦克斯韦电磁场理论简介 .....	(273)
习题 .....	(276)
阅读材料 4、5 .....	(287)
附录 I 矢量 .....	(291)
附录 II 国际单位制 .....	(298)
附录 III 空气、水、地球、太阳系一些常用数据 .....	(300)

# 第一章 质点运动学

运动学研究物体位置随时间变化规律,而不涉及引起这种变化的原因.本章在引入质点、参考系、坐标系等概念基础上,介绍了描述质点运动的物理量——位移、速度和加速度,在此基础上,介绍了圆周运动,相对运动等.

## § 1-1 质点 位置矢量 运动方程

### 一、质点

任何物体都有一定的形状、大小和内部结构(微观粒子也一样).一般情况下,物体各点的运动状态各不相同,而且物体大小和形状也可能变化.如果物体的大小和形状在我们研究问题中不起作用,或者所起的作用很小且可以忽略不计,我们就近似地把这物体看作一个具有质量而没有大小和形状的几何点,称为质点.例如,研究地球绕太阳公转时,地球的大小比起地球和太阳之间的距离小得多(地球平均半径约为  $6.4 \times 10^3 \text{ km}$ ,地球与太阳间距离约  $1.50 \times 10^8 \text{ km}$ ),地球上各点运动状态(相对于太阳)的差别可忽略,也就是忽略了地球的大小和形状,把地球看作一个质点.如果研究地球自转和研究地震时,就不能把地球当作质点.原子大小约  $10^{-10} \text{ m}$ ,在研究原子结构问题时,不能把它当作质点.这说明一物体能否看作质点,主要决定于所研究问题的性质.再如一个物体在运动中不转动也不变形,只有平动,则物体上各点的运动情况相同,用物体上任一点的运动可代表整个物体的运动,因此象这种作平动的物体可以看作质点.

象中学物理中介绍的光滑斜面、理想气体、点电荷一样,质点是从实际问题中抽象出来的理想物理模型,在自然中是不存在的.但建立这种理想模型是我们经常采用的一种科学思维方法,因为这样可使许多复杂问题简化,抓住主要矛盾,忽略次要因素,找出其中规律.

### 二、参考系和坐标系

自然中的一切物体都在不停地运动,绝对静止的物体是不存在的.例如房屋相对地面静止,但它随地球一起绕太阳公转,太阳则以  $250 \text{ km/s}$  的速率绕银河系的中心旋转,银河系又在总星系中旋转,……,一切物质都处于不断运动之中,这就是运动的绝对性.坐在平稳的船上,人相对于船是静止的,而相对于地面是运动的,在观察一个物体的位置及位置变化的时候,总要选取其他物体作为标准,相对于不同的标准物,物体的运动情况是不相同的,这就是运动描述的相对性.

为了描述物体的运动而选定的标准物(或物体群)叫做参考系.物体的运动就是相对于参考系的运动,以后研究任何物体运动情况时,都须指明相对于什么参考系而言.参考系的选择

可以是任意的, 主要根据问题的特点和研究问题的方便而定. 通常研究地面上物体运动时, 选地球作参考系; 研究地球公转时, 选太阳为参考系.

为了从数量上精确地描述物体相对于参考系的位置, 需要在参考系上选用一个固定的坐标系. 常用的坐标系是直角坐标系, 根据需要也可以选用其它坐标系, 如极坐标系、自然坐标系、球坐标系或柱坐标系等.

### 三、位置矢量

要描述物体的运动, 先要选定参考系. 为了定量地确定质点在任一时刻的位置, 应在参考系上建立一个坐标系. 如图 1-1 是三维直角坐标系  $Oxyz$ . 在任意  $t$  时刻, 质点运动到  $P$  点, 在此坐标系中  $P$  点的位置可以由原点  $O$  向  $P$  点作一矢量  $r = \overrightarrow{OP}$  来表示, 矢量  $r$  称为位置矢量, 简称位矢.

设质点在  $P$  点的直角坐标为  $x, y, z$ , 则  $x, y, z$  就是位矢  $r$  沿坐标轴的三个分量. 现用  $i, j, k$  分别表示沿  $x, y, z$  三个坐标轴正方向的单位矢量, 这样位矢  $r$  写成

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

$r$  的大小  $|r|$  表示质点  $P$  到原点的距离,

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

位矢  $r$  的方向由三个方向余弦来确定

$$\cos\alpha = \frac{x}{|r|} \quad \cos\beta = \frac{y}{|r|} \quad \cos\gamma = \frac{z}{|r|} \quad (1-2)$$

式中  $\alpha, \beta, \gamma$  分别是  $r$  与  $Ox$  轴、 $Oy$  轴和  $Oz$  轴之间的夹角.

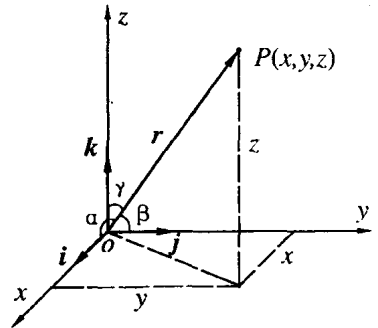


图 1-1 位置矢量

### 四、自然坐标

前面我们确定质点的位置是建立直角坐标系. 但在研究某些问题中, 用直角坐标不方便, 而选用其它的坐标系. 例如, 已知质点运动的轨道, 要确定质点的位置, 可用如下方法: 如图 1-2, 在已知轨道曲线上任取一点作为坐标原点  $O$ , 规定从  $O$  点起沿轨迹的某一方向(例如向右)量得的曲线长度  $s$  取正值, 这个方向称为自然坐标的正向; 反之则为负向,  $s$  取负值. 这样质点  $P$  的位置就用  $s$  唯一确定, 这种确定质点位置的方法叫自然法.  $s$  称为自然坐标. 若图 1-2

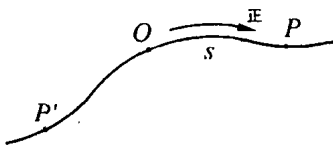


图 1-2 自然坐标

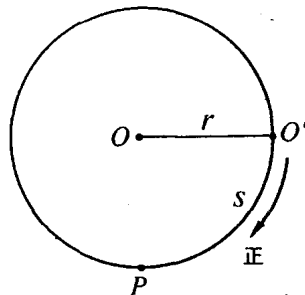


图 1-3 自然坐标的计算

中曲线  $OP$  长为  $4\text{m}$ , 曲线  $OP'$  长为  $3\text{m}$ , 则  $P$  点及  $P'$  点的自然坐标分别为  $s_p = 4\text{m}$ ,  $s_{p'} = -3\text{m}$ . 再如图 1-3, 半径为  $r$  的定滑轮绕其中心  $O$  点以角速度  $\omega$  转动, 取  $O'$  为自然坐标原点, 顺时针方向为自然坐标正向, 若  $t = 0$  时刻  $P$  点就在原点, 则任意  $t$  时刻边缘上  $P$  点的自然坐标为  $s = \omega r t$ .

## 五、运动方程

在确定的参考系中, 质点的位置按一定规律随时间  $t$  变化, 位置是时间  $t$  的函数. 这个函数称为质点运动方程.

用直角坐标表示质点运动方程为

$$\begin{cases} x = x(t) & y = y(t) & z = z(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

用位矢  $r$  表示质点运动方程为

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

用自然坐标  $s$  表示质点运动方程为

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

知道了质点运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 从而确定质点的运动. 将运动方程中的时间  $t$  消去, 可得质点的轨迹方程. 轨迹为直线的运动称为直线运动, 轨迹为曲线的, 叫曲线运动.

【例 1-1】 将多个小球从某点以同样速率  $v_0$ , 在同一竖直面内沿不同的方向同时抛出.

(1) 试分别用直角坐标、位矢表示抛射角为  $\theta$  的小球运动方程, 并求出此小球的轨迹方程;

(2) 证明在任一时刻这些小球分布在某一圆周上, 此圆周半径为多少?

【解】 (1) 如图 1-4, 以抛出点为原点, 建立直角坐标. 根据中学所学知识可知, 小球在水平方向分运动为匀速直线运动, 在竖直方向分运动为匀变速直线运动, 则直角坐标中小球运动方程为

$$\begin{cases} x = (v_0 \cos \theta) t & \text{①} \\ y = (v_0 \sin \theta) t - \frac{1}{2} g t^2 & \text{②} \end{cases}$$

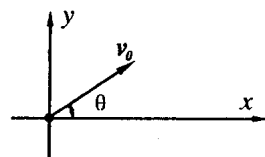


图 1-4

用位矢表示小球运动方程为

$$r = xi + yj = (v_0 \cos \theta) ti + [(v_0 \sin \theta) t - \frac{1}{2} g t^2] j$$

将式 ①、② 中的参数  $t$  消去, 得小球轨迹方程:

$$y = x \tan \theta - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} x^2$$

为开口向下的抛物线

(2) 由式 ② 得

$$y + \frac{1}{2} g t^2 = (v_0 \sin \theta) t \quad \text{③}$$

①<sup>2</sup> + ③<sup>2</sup> 可将  $\theta$  消去得到

$$x^2 + (y + \frac{1}{2} g t^2)^2 = (v_0 t)^2$$

在  $t$  时刻, 上式中  $\frac{1}{2}gt^2$  及  $v_0t$  都是定值, 与抛射角  $\theta$  无关, 这说明以不同方向抛出的小球, 任一时刻  $t$  是处在半径为  $v_0t$ , 圆心为  $(0, -\frac{1}{2}gt^2)$  的圆周上. 这个圆周的半径和圆心是随时间变化的.

### 复习思考题

1-1 我们通常说人造地球卫星的轨迹近似圆形, 这是以什么为参考系? 若以太阳为参考系, 其运动轨迹又是怎样的?

1-2 一质点作匀速圆周运动, 圆周半径为  $r$ , 角速度为  $\omega$ , 试分别写出用直角坐标、位矢、自然坐标表示的质点运动学方程.

## § 1-2 位移 速度 加速度

### 一、位移

如图 1-5 所示, 质点沿轨迹  $LM$  作一般曲线运动, 质点在  $t$  时刻运动到  $A$  点,  $A$  点的位置矢量为  $r_1$ , 在  $t + \Delta t$  时刻运动到  $B$  点,  $B$  点的位置矢量为  $r_2$ . 显然在时间间隔  $\Delta t$  内, 位置矢量的长度和方向都发生了变化. 现定义: 由点  $A$  到点  $B$  的有向线段  $\overrightarrow{AB}$  为点  $A$  到点  $B$  的位移矢量, 简称位移.

由图 1-5 可知:

$$\overrightarrow{AB} = r_2 - r_1 = \Delta r \quad (1-6)$$

这表明: 质点在某一时间内的位移等于同一时间内位矢 (位置矢量) 的增量.

根据式 (1-1), 位移矢量  $\Delta r$  可写成

$$\Delta r = r_2 - r_1 = (x_2i + y_2j + z_2k) - (x_1i + y_1j + z_1k)$$

$$\Delta r = (x_2 - x_1)i + (y_2 - y_1)j + (z_2 - z_1)k$$

上式表明, 质点的位移等于在  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴上的位移的矢量和.

关于位移这个物理量, 应注意以下三点:

第一点, 位移与位矢不相同, 位矢描述的是质点在某一时刻的位置, 而位移则描述质点某段时间内位置的变化. 位矢总与时刻相联系, 而位移总与时间联系在一起. 在相对静止的不同坐标系中, 位矢是不同的, 而位移则与选取的坐标系无关.

第二点, 要注意位移和路程区别. 位移反映的是质点在某段时间内始末位置的变化, 它不能表明质点在这段时间内沿什么路径运动, 如图 1-5 中, 质点从  $A$  点不论经过什么路径到达  $B$

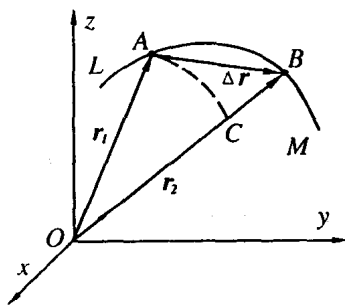


图 1-5 位移

点(可沿直线,也可沿曲线),位移  $\Delta r = \overline{AB}$  相同,其大小等于直线  $\overline{AB}$  长度. 而路程是指质点在某段时间内实际经历的运动轨迹的长度,是标量. 在图 1-5 中,质点从 A 点到 B 点经历的路程为弧线  $\widehat{AB}$  的长度.

例如一质点在某平面内沿半径为  $R$  的圆周运动一圈回到出发点,则质点经历的路程是  $2\pi R$ ,而位移为零. 一般情况下,质点在某段有限时间内的位移大小不等于这段时间内质点所经历的路程. 但当质点沿不变的方向作直线运动时,位移的大小等于路程(此时位移并不等于路程,为什么?)

第三点,质点位移  $\Delta r$  的大小  $|\Delta r|$  与位矢大小的增量  $\Delta r$  区别.  $|\Delta r|$  是指位矢增量的大小,其求法是先求出矢量  $\Delta r = r_2 - r_1$ ,然后再求其大小;而  $\Delta r$  求法是先求  $r_2$  和  $r_1$  的大小(即  $r_2$  和  $r_1$ ) 再求其大小增量  $\Delta r = |r_2| - |r_1| = r_2 - r_1$ .

如图 1-5 中,在矢量  $r_2$  上取一 C 点,使  $r_1 = \overline{OC}$ ,则位矢大小增量  $\Delta r = r_2 - r_1 = \overline{OB} - \overline{OC} = \overline{CB}$ ,而  $|\Delta r| = \overline{AB}$ ,一般情况下,  $\overline{AB} \neq \overline{CB}$  即  $|\Delta r| \neq \Delta r$ .

再看如图 1-6,质点在  $xOy$  平面内从 A 点沿半径为  $R$ ,圆心在 O 点的圆周运动到 B 点,在此过程中位移大小  $|\Delta r| = |\overline{AB}| = \sqrt{2}R$ ,而位矢大小增量  $\Delta r = r_2 - r_1 = 0$ .

## 二、速度

### 1. 平均速度

质点在时间  $\Delta t$  内通过的位移为  $\Delta r$ ,如图 1-5 所示. 质点位移  $\Delta r$  与相应的时间  $\Delta t$  的比值,称为质点在这段时间  $\Delta t$  内的平均速度,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速度是矢量,其方向与位移  $\Delta r$  的方向相同. 因为  $\Delta r$  只与  $\Delta t$  时间内始末位置有关,与经历的路径无关,故平均速度只能粗略地描述质点在这段时间内的运动. 例如,一学生昨天 9 点钟坐在某位置上听课,今天 9 点钟又坐在那位置上,这位学生在这 24 小时内的位移  $\Delta r = 0$ ,因此在这 24 小时内平均速度  $\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = 0$ . 当然这位学生在这 24 小时中的某段时间内平均速度可能不为零.

在研究质点运动时,我们把路程  $\Delta s$  与时间  $\Delta t$  的比值叫做质点在这段时间  $\Delta t$  内的平均速率,即  $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ . 平均速率是一标量,等于质点在单位时间内所通过的路程.

需要注意的是在一般情况下  $|\Delta r| \neq \Delta r$ ,所以平均速度大小  $|\bar{v}| = \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right| \neq \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right|$ . 而且在一般情况下质点的位移大小不等于路程即  $|\Delta r| \neq \Delta s$ ,故  $\left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right| \neq \frac{\Delta s}{\Delta t}$ ,即  $|\bar{v}| \neq \bar{v}$ ,也就是说,一般情况下平均速度大小不等于平均速率. 例如质点在  $T$  时间内,沿半径为  $R$  的圆周运动一圈,回到原出发点,则平均速度为零,而平均速率  $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi R}{T}$ .

### 2. 瞬时速度

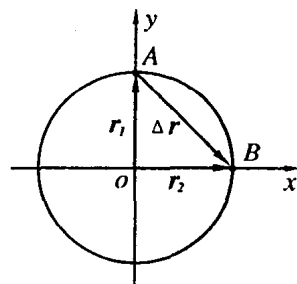


图 1-6 位移大小的计算