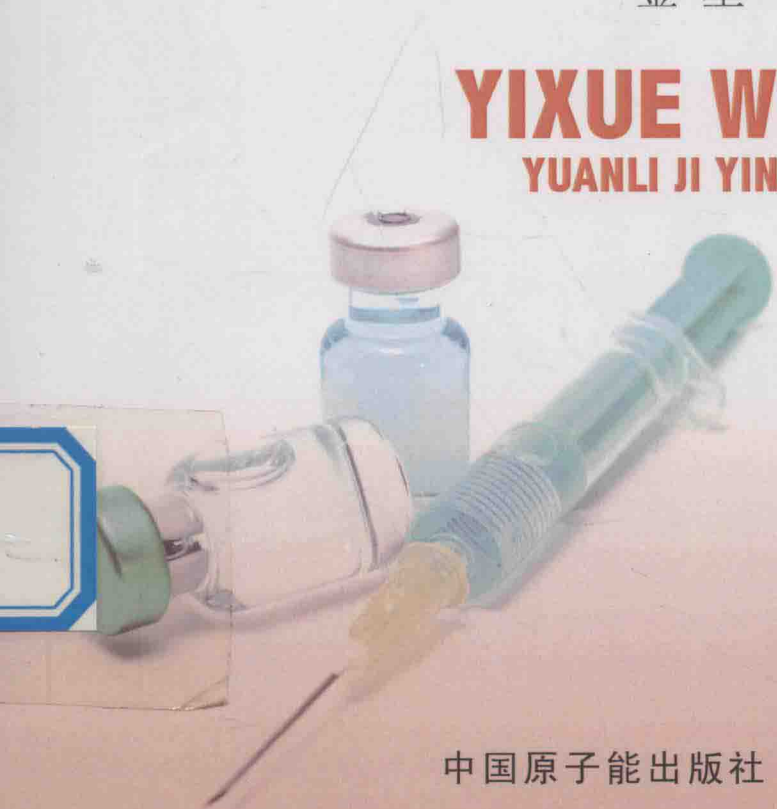


医学物理学

原理及应用研究

金星 罗利霞 编著

YIXUE WULIXUE
YUANLI JI YINGYONG YANJIU



中国原子能出版社

本书受贵州省科学技术基金项目（黔科合J字LKZS[2014]11号）、贵州省省级重点学科项目（黔学位办[2013]18号）资助。

医学物理学

原理及应用研究

金星 罗利霞 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学原理及应用研究 / 金星, 罗利霞编著

. -- 北京: 中国原子能出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5022-6581-6

I. ①医… II. ①金… ②罗… III. ①医用物理学—
研究 IV. ①R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 067635 号

内 容 简 介

本书阐述了医学基础和临床及医学科学研究关系密切的物理学基础理论和科学思维方法。主要包括力学,流体的运动,振动、波动和声,静电场,直流电,电磁现象,波动光学,几何光学,原子核与放射性,X射线成像。本书内容丰富但又具有较大的弹性,能够满足不同读者需求。本书适合临床、预防、药学、护理、口腔、检验、美容、麻醉、影像等专业研究工作者作为参考。

医学物理学原理及应用研究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 三河市龙大印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16.25

字 数 395 千字

版 次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6581-6 定 价 46.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

医学物理学是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科,是生命科学的基础学科之一。物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律,是自然科学的主导。物理现象和物理规律存在于一切自然现象之中,而生命现象是物质世界中的高级运动形态,因而,物理学是自然科学和工程技术的基础,也是医学的基础。物理学与医学的关系是相辅相成的。物理学为现代医学的发展提供了理论基础和技术手段。例如,微波、超声、激光、各种内窥镜、磁共振成像、电子计算机 X 线断层扫描术、核医学等物理技术,在医学研究、预防、临床诊断和治疗等方面的应用和发展,都证明了掌握物理学的重要性。反之,医学的不断发展,特别是随着人们对生命现象认识的逐步深入,以及层出不穷的医学难关的攻克,都需要更方便和更精密的仪器和方法,进而又促进了物理学的发展。因此,研究医学物理学的原理及应用已成为现代医学科学研究的一种趋势。

本书内容大致分为 11 章:第 1 章为绪论,简要介绍了物理学与生命科学、医学的关系以及物理学和医学的研究对象与研究方法;第 2~4 章从运动的角度讨论了力学、流体的运动、振动、波动和声;第 5 章重点介绍了静电场的相关理论以及其在医学领域的应用;第 6~7 章讨论了直流电的基本规律和电磁现象两个方面,并介绍了生物膜电位及其医学应用、磁场的生物效应及其医学应用等;第 8~9 章阐述了波动光学和几何光学,重点介绍了几种医用光学仪器;第 10 章从原子核的基本性质、核衰变及规律、射线与物质的相互作用、放射性核素在医学上的应用、核医学成像、核磁共振成像及磁共振技术在医学中的应用等方面阐述了原子核与放射性;第 11 章阐述了 X 射线成像及其在医学领域的应用。

全书由金星、罗利霞、潘玲撰写,具体分工如下:

第 1 章~第 5 章、第 10 章:金星(遵义师范学院);

第 6 章~第 8 章、第 11 章:罗利霞(包头医学院);

第 9 章:潘玲(遵义医学院附属医院)。

本书的出版得到遵义师范学院高钦翔教授、张鹏教授、杨友昌教授的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在撰写的过程中参考了大量书籍,但由于作者的水平和所收集的资料有限,书中难免存在疏漏和不足之处,望广大读者批评指正。

作者

2015 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理学研究的对象	1
1.2 物理学与生命科学的关系	1
1.3 物理学和医学的研究方法	2
1.4 物理学和医学的关系	2
第 2 章 力学	4
2.1 质点的运动	4
2.2 牛顿运动定律	6
2.3 运动定理与守恒	9
2.4 刚体的转动	15
2.5 物体的弹性	19
第 3 章 流体的运动	28
3.1 理想流体的流动	28
3.2 伯努利方程	30
3.3 黏性流体的流动	37
3.4 血液循环与血液黏度	44
第 4 章 振动、波动和声	51
4.1 简谐振动	51
4.2 阻尼振动、受迫振动、共振	56
4.3 振动的合成与分解	59
4.4 波动与波	64
4.5 声波	72
4.6 多普勒效应	75
4.7 超声波及其医学应用	77
第 5 章 静电场	83
5.1 电场和电场强度	83
5.2 高斯定理	87
5.3 静电场力的功、电势	92

5.4	电偶极子与电偶层	98
5.5	静电场中的电介质	101
5.6	心电场和心电图	104
第6章	直流电	108
6.1	电流密度	108
6.2	基尔霍夫定律及其应用	112
6.3	电容器的充电和放电过程	116
6.4	生物膜电位及其医学应用	119
6.5	直流电的医学应用	126
第7章	电磁现象	131
7.1	磁场、磁感应强度、磁通量	131
7.2	电流的磁场	133
7.3	磁场对电流的作用	142
7.4	磁介质	148
7.5	电磁感应	152
7.6	磁场的生物效应及其医学应用	153
第8章	波动光学	159
8.1	光的干涉	159
8.2	光的衍射	165
8.3	光的偏振	173
8.4	双折射现象	177
8.5	旋光现象	182
8.6	光的吸收和散射	183
第9章	几何光学	186
9.1	球面折射	186
9.2	薄透镜	190
9.3	厚透镜	194
9.4	眼睛的光学性质	196
9.5	几种医用光学仪器	201
第10章	原子核与放射性	208
10.1	原子核的基本性质	208
10.2	原子核的衰变类型	211
10.3	射线与物质的相互作用	214

10.4	放射性核素在医学上的应用·····	221
10.5	核磁共振成像及磁共振技术在医学中的应用·····	226
第 11 章	X 射线成像 ·····	239
11.1	X 射线的产生及其基本性质·····	239
11.2	X 射线衍射和 X 射线谱 ·····	240
11.3	物质对 X 射线的衰减规律 ·····	244
11.4	X 射线在医学的应用·····	246
11.5	X 射线计算机断层成像(X—CT) ·····	248
参考文献	·····	252

第 1 章 绪论

1.1 物理学研究的对象

物理学是研究最普遍、最基本的物质运动形态的科学,是探索物质运动规律、物质结构及相互作用的科学。物质是在人们周围存在着的客观实体,从粒子、原子、分子到宇宙天体,从蛋白质、细胞到人体,从电磁场到引力场都是物质。所有物质都在不停地运动和变化着,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性。因此,物理学研究的领域非常宽广,如自然界和人类活动中最常见的机械运动、分子热运动、电磁变化、原子和原子核的运动等都属于物理学研究的范畴。物理学研究的范围在空间尺度上所涉及的从小到质子半径 10^{-15} m ,大到可观测到最远类星体的距离 10^{26} m ;在时间尺度上从短到 10^{-25} s 的最不稳定的粒子的寿命,直到长达 10^{39} s 的质子寿命。物理学所研究的运动形式,普遍存在于其他高级、复杂的物质运动形式之中。生命现象是物质世界中的高级运动形态,不管生命活动多么复杂,其中也必定涉及一些物理现象。例如,细胞、分子、电子之间都遵守万有引力定律;人体的代谢遵从能量守恒和转换定律;生物电的电学性质符合电磁学的规律等。因而,物理学是自然科学和工程技术的基础,也是医学的基础。

1.2 物理学与生命科学的关系

医学是以人体为研究对象的生命科学,生命现象属于物质的高级运动形式。随着现代物理学的迅速发展,人类对生命现象认识的逐步深入,生命科学和医学已从宏观形态的研究进入微观机制的研究,从细胞水平的研究上升到分子水平的研究,并日益将其理论建立在精确的物理学基础之上。任何生命过程都是和物理过程密切联系的。揭示生命现象的本质,诸如能量的交换、信息的传递、体内控制和调节、疾病发生机制、物理因素对机体的作用等,都必须应用物理学规律。大量事实表明,物理学在生物医学领域中的应用日益广泛和深入。医学物理学的迅速发展,正在对阐明生命现象的本质不断作出新的贡献。

另一方面,物理学所提供的技术和方法已日益广泛应用于生命科学、医学研究及临床医疗实践之中,并且不断更新。例如,光学显微镜、X 线透视和照片、放射性核素等在医学上的应用已是人们早已熟知的。而现代电子显微镜与光学显微镜相比,分辨率提高了近千倍,成为研究细胞内部超微结构的重要工具,计算机 X 线断层摄影术(CT)与通常 X 线诊断相比,其灵敏度提高了百倍,磁共振成像(MRI)技术既能显示解剖学图像,又能显示反映功能和代谢过程与生化信息的图像,为医学提供了一种崭新的诊断技术。各种光纤内镜取代了刚性导管内镜,提高了疾病的诊断率,减轻了患者的痛苦。物理治疗除常见的热疗、电疗、光疗、放疗、超声治疗等方法外,还应用低温冷冻、微波、激光等手段。电子计算机不仅应用于研究人体生理和病理过程中的各种控制调节,而且用于辅助诊断、自动监护和医院管理。在研究生物大分子本身的结构、

构象、能量状态及其变化,以及这些状态和变化与功能之间的关系方面,除应用了物理学中的量子力学方法外,还普遍应用了物理学中的各种光谱和波谱技术等,如电子自旋共振谱、磁共振谱、激光拉曼谱、圆二色术、旋光色散、红外光谱、荧光偏振、X 射线衍射、光散射以及激光全息等物理技术。

物理学在理论上和技术上的新成就不断为生命科学和医学的发展提供理论基础和技术方法。反过来,生命科学和医学的发展,又不断地向物理学提供新的研究课题,两者互相促进、相辅相成。总之,物理学与生命科学的关系可归结为两个主要方面:

- 1) 物理学知识是揭示生命现象不可缺少的基础。
- 2) 物理学所提供的技术和方法为生命科学的研究、临床实践开辟了许多新的途径。

1.3 物理学和医学的研究方法

物理学与医学的研究方法基本是一致的,主要方法有三点:

(1) 观察

物理学的观察就是在自然条件下观察所要研究的对象,而医学观察就是对人体在一定的条件下进行研究的自然过程,这是获取医学资料信息的主要来源。例如,血液流变学对血液的黏度、流动性、聚集等流变特性进行研究,利用仪器对血样的观察检验,可以得到血液的流变学指标。运用物理学中的流体运动学和流体动力学,可以计算出血液的还原黏度、血浆黏度、红细胞比容、红细胞变形性及聚集性指标等。人类的血液病、心血管疾病、肿瘤等多种疾病都伴随着这些指标的变化。所以血液流变指标的观察,对有关疾病的诊断、病情的观察和治疗效果的判断都是重要的依据。观察这些指标的变化,可对潜在的疾病及时做出预测,有利于早预防、早诊断、早治疗。

(2) 实验

实验就是在人为的条件下,重现客观现象,从而研究现象中各种因果关系,在观察和实验所取得大量资料基础上,经过分析、概括、判断和推理,把事物的本质和内在联系抽象到更一般的形式,建立实验定律,物理学和医学都需要这样的实验。

(3) 建立理论

客观现象经过反复验证,被证明能正确反映客观规律时就可以形成一定的理论。例如,物理学中,当润湿液体在细管中流动时,如管中有气泡,液体的流动就会受阻,气泡多时可发生气体栓塞现象。而在临床医学中,输液及静脉注射时应注意防止气泡出现,护士们都会认真地把输液管中的气泡排尽后才给病人输液,这样就能防止因输液时气泡进入血管引起气体栓塞,危及病人的生命。

1.4 物理学和医学的关系

物理学起源于人类的生产活动和科学实践,是人们认识和研究物质世界的基础学科,它的形成和发展是和其他学科相辅相成、互相推动的,物理学的理论和定律带有极大的普遍性。

(1) 物理学是医学的基础

如物理学中的声波,它是一种机械波,作用于人的听觉器官后,就会引起声音的感觉。物理学对声波的进一步研究发现了超声波和次声波,并推动医学和技术领域相继发明了利用超声波探测人体内部各种信息的超声波医疗诊断仪,在此基础上创立和发展了超声诊断学学科。

(2) 物理学是医学的重要工具

在基础医学的研究、医学预防、诊断、治疗、药物制备和检验等领域,物理学的方法和技术为医学的发展提供了强有力的工具。例如,正是三百多年前光学显微镜的问世以及在医疗领域中的应用,为现代医学的临床诊断和科学研究提供了有力的工具,它使医学工作者可以观察到人体肉眼看不到的细胞,为发现致病因子,控制危害人类健康的传染病和流行病创造了条件。我国在2003年对SARS病毒的研究,就是依靠高科技的电子显微镜找出了冠状病毒的结构,为防治和消灭非典病毒打下了基础。

(3) 物理学和医学互为进步和发展动力

物理学的重要发明、发现和新理论的建立,大都被医学领域采纳运用甚至推动医学领域产生了划时代的进步,大量采用物理学的设备和方法,已成为现代医学的一个特征;同时由于医学领域对疾病的诊断和治疗不断提出更多更高的要求,极大地推动了物理学和相关技术的发展。1923年德国物理学家伦琴发现X射线后,很快就应用于临床医学,大大地丰富了诊断内容和手段。医生看不到、摸不着的内脏器官,经X射线透视摄影后便可观察到各器官的形态、运动功能等,为早发现、早诊断疾病提供了崭新的有效工具。为了满足诊断和治疗的需要,医学领域对影像质量的分辨率、直观性和快速性不断提出更高的要求,从而推动X射线机的技术进步及其他影像设备的发明和创新,使人们对病变的诊断进入了影像时代,也使人们在新的认识基础上,建立了解剖学、生理学、病理学的新概念。随着科学的进步发展,物理学和医学领域的相互推动和发展正日益广泛和深入。

第2章 力学

2.1 质点的运动

2.1.1 位移 运动方程

任何物体都具有一定的形状和大小,但是在研究物体运动时,如果物体的大小和形状在所研究的问题中可以忽略,就把它抽象为一个质量与它相同的点,称为质点(particle)。质点是一个理想模型,将实际物体抽象成一个几何点,具有全部物体的质量,占据物体的原来空间位置点。用来确定质点在空间位置的矢量称为位置矢量,简称位矢(position vector)。如图 2-1 所示,设质点在 t 和 $t + \Delta t$ 时刻分别通过 P 和 P_1 点,其位矢为 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$,质点在一段时间内位置的改变量称为这段时间内的位移(displacement),由 P 引到 P_1 的矢量表示位矢的增量,即 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$ 。这一位矢的增量就是质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这一段时间内的位移。

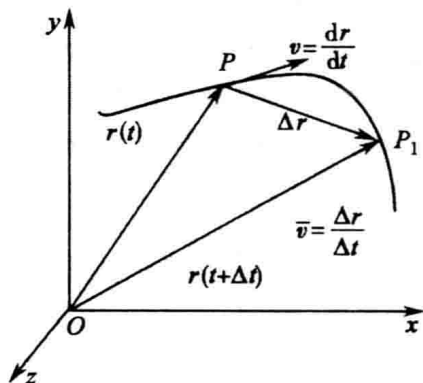


图 2-1 位移与速度

应该注意的是,位移 Δ 向量矩阵是矢量,既有大小又有方向。其大小用 $\Delta \mathbf{r}$ 矢量的长度表示,记作 $|\Delta \mathbf{r}|$ 。这一数量不能简写为 Δr ,因为 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$,它是位矢的大小在 t 到 $t + \Delta t$ 这一段时间的增量。 $|\Delta \mathbf{r}|$ 一般不等于 Δr 。

从运动学的角度看,质点的运动就是它的位置随时间的变化,也就是它的位矢是随时间改变的。这一改变可以用下述函数形式来表示,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (2-1)$$

式(2-1)是质点运动方程的矢量表示式。若位矢 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系中的三个分量分别是 $x\mathbf{i}$, $y\mathbf{j}$, $z\mathbf{k}$, 则有

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

作为时间函数的三个坐标值可以表示为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (2-3)$$

式(2-3)是质点的运动函数或运动方程的标量表示式,也可看作是质点沿各坐标轴的分运动的表示式。质点的实际运动是各分运动的矢量合成,即运动的叠加原理。

2.1.2 速度 加速度

位移 Δr 和发生这段位移所经历的时间的比称为质点在这一段时间内的平均速度(mean velocity) $\bar{v}$ 。

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (2-4)$$

平均速度是矢量,它的方向就是位移的方向,如图 2-1。当 Δt 趋于零时,式(2-4)的极限,称为质点在时刻 t 的瞬时速度(instantaneous velocity),简称速度(velocity) v 。

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (2-5)$$

质点在时刻 t 的速度的方向就沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线而指向运动的前方。

速度的大小称为速率(speed),以 v 表示

$$v = |v| = \left| \frac{dr}{dt} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t}$$

用 Δs 表示在 Δt 时间内质点沿轨道所经过的路程。当 Δt 趋于零时, $|\Delta r|$ 和 Δs 趋于相同因此可以得到

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (2-6)$$

即速率的大小又等于质点所走过的路程对时间的变化率。

在直角坐标系中,速度的分量表示式如下

$$v = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j + \frac{dz}{dt}k = v_x i + v_y j + v_z k \quad (2-7)$$

应该注意,速度与速率不同。速度是位移的时间变化率,速率是路程的时间变化率。速度是矢量,速率是标量。

质点的运动速度变化的情况用加速度(acceleration)表示。以 $v(t)$ 和 $v(t + \Delta t)$ 分别表示质点在时刻 t 和时刻 $t + \Delta t$ 的速度,则在这段时间内的平均加速度 $\bar{a}$ 由下式定义

$$\bar{a} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2-8)$$

平均加速度的极限称为质点在时刻 t 的瞬时加速度,简称加速度,以 a 表示,就有

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (2-9)$$

应该明确的是,加速度是矢量。由于它是速度对时间的变化率,因此不管是速度的大小发生变化,还是速度的方向发生变化,都有加速度。利用式(2-5)、(2-9)还可得

$$a = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (2-10)$$

在直角坐标系中,加速度的分量表示式如下

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \quad (2-11)$$

质点在运动过程中,加速度 $\mathbf{a}$ 和速度 $\mathbf{v}$ 的方向可能一致也可能不一致。如果 $\mathbf{a}$ 的方向和 $\mathbf{v}$ 的方向一致, $\mathbf{a}$ 只能引起 $\mathbf{v}$ 的量值变化而不会改变它的方向,质点将作直线运动。如果 $\mathbf{a}$ 的方向与 $\mathbf{v}$ 的方向垂直, $\mathbf{a}$ 只会改变 $\mathbf{v}$ 的方向而不改变它的量值,质点作圆周运动。 $\mathbf{a}$ 的方向与 $\mathbf{v}$ 的方向不垂直也不一致时,质点作曲线运动。因此,将曲线运动在任何时刻的加速度 $\mathbf{a}$ 分解为沿 $\mathbf{v}$ 方向的切向加速度(tangential acceleration) a_t 和垂直于 $\mathbf{v}$ 方向的法向加速度(normal acceleration) a_n 。切向加速度改变速度的量值,而法向加速度改变速度的方向。

将式(2-5)、(2-9)转换成积分形式,可得

$$\mathbf{r} = \int \mathbf{v} dt \quad (2-12)$$

$$\mathbf{v} = \int \mathbf{a} dt \quad (2-13)$$

如果质点作匀加速直线运动,假设在 $t=0$ 时刻,质点的位移是 r_0 ,速度是 v_0 ,可得 t 时刻质点的位置 r 和速度 v 分别为

$$v = \int_0^t a dt = v_0 + at \quad (2-14)$$

$$r = \int_0^t a dt^2 = r_0 + \frac{1}{2}at^2 \quad (2-15)$$

位矢、位移、速度和加速度是运动学中很重要的物理量,这四个物理量都具有矢量性、瞬时性和相对性。计算时必须指出它们的大小和方向,并按照矢量的法则进行运算。若质点在三维空间运动时,位矢、位移、速度、加速度是三维矢量;若在平面内运动时,是二维矢量;若沿直线运动时,是一维矢量,此时可以取轨道直线为坐标轴,规定原点和坐标轴的正方向后,可用正负号表示此物理量的方向。

2.2 牛顿运动定律

2.2.1 牛顿运动定律

1. 牛顿第一定律

任何物体都将保持静止或匀速直线运动的状态,直到有外力作用迫使它改变这种运动状态为止。

第一定律提出了两个重要的概念:一个是物体具有保持匀速直线运动状态的性质,即惯性;另一个是力不是维持物体运动状态的原因,是改变物体运动状态的原因。

2. 牛顿第二定律

物体在运动时总具有速度,把物体的质量 m 与运动速度 $\mathbf{v}$ 的乘积叫做物体的动量,用 $\mathbf{p}$ 表示,即

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (2-16)$$

牛顿第二定律表明,作用在物体上的合外力 F 等于物体动量的时间变化率。

$$F = \frac{dmv}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad (2-17)$$

物体在低速情况下运动时,即物体的运动速度远远小于光速时,物体的质量可以看做常量,式(2-17)可写成

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{mdv}{dt} = ma \quad (2-18)$$

式(2-18)是牛顿第二定律的数学表达式,是质点动力学的基本方程。

牛顿第二定律是牛顿力学的核心,应用它解决问题时须注意以下几点:

- 1) 牛顿第二定律只适用于质点的运动。
- 2) 牛顿第二定律所表示的合外力与加速度之间的关系是瞬时关系。作用到物体的合外力改变了,加速度也也随之改变;当合外力为零时,物体加速度也为零。
- 3) 力的叠加原理。当几个外力同时作用于物体时,合外力所产生的加速度与每个外力单独存在时产生加速度的矢量和一致。这就是力的独立性原理。以上叙述可表示为

$$\begin{aligned} F &= \sum_i F_i = F_1 + F_2 + F_3 + \cdots = ma_1 + ma_2 + ma_3 + \cdots \\ &= m \sum_i a_i = ma \end{aligned} \quad (2-19)$$

3. 牛顿第三定律

牛顿第三定律:两个物体之间的作用力 F 和反作用力 F' 沿同一直线,大小相等,方向相反,分别作用在两个物体上,这就是牛顿第三定律。其数学表达式为

$$F = -F'$$

应用它解决问题时应当注意如下几点:

- 1) 作用力和反作用力同时产生,同时消失,任何一方都不能孤立存在。
- 2) 作用力和反作用力分别作用在两个物体上,因此不能相互抵消。
- 3) 作用力和反作用力总是属于同种性质的力。例如作用力是弹力,那么反作用力也一定是弹力。

2.2.2 惯性系和伽利略相对性原理

1. 惯性系(inertial reference system)

从运动学的角度看,相对于任意参考系描述物体的运动都是有意义的。因此,如果研究问题只涉及运动的描述,我们就可以根据问题方便任意选择参考系。但是,如果问题涉及运动和力的关系时,要应用牛顿运动定律,是否可以任意选择参考系?

设地面上有一个相对于地面参考系静止的小车,人站在地面上去观察该小车时,小车在水平方向不受力,竖直方向所受重力和地面支持力平衡,即合力为零,这符合牛顿运动定律。但是,人站在一辆沿路面加速前进的火车上观察此物体时,发现该物体加速向后运动,即当以加速运动的火车为参考系时,物体在水平方向虽然受力为零,但其加速度不为零,这显然不符合牛顿运动定律。

由上可以得出结论,牛顿运动定律在有些参考系成立,对另外一些参考系不成立。我们把

牛顿运动定律在其中能够成立的参考系称为惯性系。一切相对于惯性系做匀速直线运动的参考系也是惯性系；而相对于惯性系做加速运动的参考系就是非惯性系。如：相对于地面加速运动的火车、升降机，旋转的圆盘都是非惯性系。在非惯性系中牛顿运动定律不再成立。

要确定一个参考系是不是惯性系，只能依靠实验观察。如果以太阳为参考系，并以太阳中心为原点，指向任一恒星的直线为坐标轴，那么对于大量天体运动的观测表明，在这个参考系中由牛顿运动定律和万有引力定律得出的结果与观测一致，因此这个参考系是一个惯性系。对于地面参考系是坐标轴固定在地面上的参考系，由于地球围绕自己的轴相对于地心参考系不断地自转，所以地面参考系不是惯性系。但由于地面上各处相对于地心参考系的法向加速度最大不超过 $3.4 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (在赤道上)，所以地面参考系也可以近似地当惯性系看待。

2. 伽利略相对性原理

牛顿运动定律适用于所有的惯性系。同一物体的运动，在不同的参考系中表现为不同的形式，但从动力学来看，在各个惯性参考系之间是没有差别的。

设有两个惯性系参考系 $S(O, x, y, z)$ 和 $S'(O', x', y', z')$ ，它们对应的坐标轴都相互平行，且 x 轴和 x' 轴相重合。其中 S' 系以恒定速度 u 相对于 S 系沿 x 轴正向运动，如图 2-2 所示。若有一质点 P 相对于 S' 的速度为 v' ，相对于 S 的速度为 v ，由伽利略速度相加原理可知，它们的关系为

$$v = v' + u$$

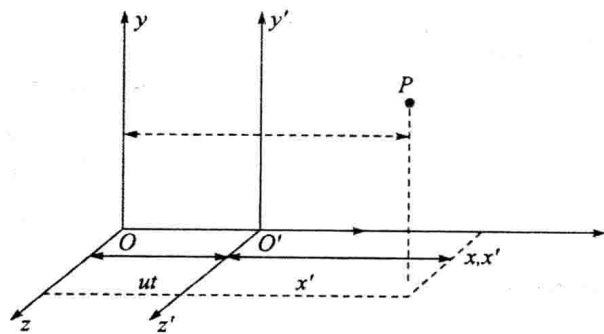


图 2-2 相互做匀速直线运动的两个参考系

将上式对时间求导数，并考虑 u 为常矢量，可得

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv'}{dt}$$

即

$$a = a'$$

上式表明，同一个物体相对于不同的参考系的加速度是相同的。在经典力学中认为物体的质量是与运动无关的恒量，所以在两个惯性系中牛顿第二定律的数学表达式也具有相同的形式，即 $F = ma$ 。由此可知，对于任意惯性系，牛顿力学的运动规律都具有相同的形式，也就是说，在一个惯性系内部所做的任何力学实验，都不能确定该惯性系相对于其他惯性系是否在运动，这个原理叫做力学相对性原理或伽利略相对性原理。

2.3 运动定理与守恒

2.3.1 冲量 动量定理

牛顿定律表明,力可以使受力物体获得加速度,这是一种瞬时关系。实际上力对物体的作用总要持续一段时间,因而有必要研究力对物体持续作用的时间积累效应。本节主要讨论质点发生的动量变化与力的时间累积——冲量的关系。

1. 力的时间积累效应——冲量

力的冲量(impulse)的概念是与动量密切相关的。质点受合外力 $F(t)$ 的作用,经过 dt 时间,定义作用于质点的元冲量为

$$d\mathbf{I} = \mathbf{F}(t)dt \quad (2-20)$$

$d\mathbf{I}$ 表示力 $F(t)$ 在 dt 时间内的积累量。力的作用要积累一定的时间才会产生冲量。只有当 F 的方向恒定不变时, $\mathbf{I}$ 才与 F 同方向。在 t_1 到 t_2 的有限时间内,质点受到的合外力的冲量为

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t)dt \quad (2-21)$$

或作用于质点的合力的冲量 $\mathbf{I}$ 等于作用于质点的各个力 $\mathbf{F}_i(t)$ 的冲量 $\mathbf{I}_i$ 的矢量和。

2. 质点的动量定理

根据牛顿第二定律有 $\mathbf{F}(t)dt = d(m\mathbf{v})$, 于是

$$d\mathbf{I} = d(m\mathbf{v}) = d\mathbf{p} \quad (2-22)$$

经历一段时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$, $\mathbf{F}(t)$ 作用于物体的冲量等于物体在该时间内的动量改变,即

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t)dt = \int_{p_1}^{p_2} d\mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 \quad (2-23)$$

式中, $\mathbf{p}_1$ 是物体在 t_1 时刻的动量; $\mathbf{p}_2$ 是 t_2 时刻的动量,此式为动量定理。它表明质点运动过程中所受合外力的冲量,等于该质点动量的增量。

冲量和动量都是矢量,动量定理具有矢量性。对各坐标分量式仍然成立,表明物体沿某方向的动量改变,取决于该方向上所受外力的冲量。

在诸如质点的碰撞和被冲击等过程中,质点受到的作用力往往非常复杂,不易测量,通常引入平均冲力 $\bar{\mathbf{F}}$ 。利用动量定律,可通过测量质点的动量变化,估算相互作用过程中质点受到的平均冲力 $\bar{\mathbf{F}}$ 为

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t)dt}{t_2 - t_1} = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{t_2 - t_1} \quad (2-24)$$

质点系的动量可表示为

$$\mathbf{p} = \sum_i m_i \mathbf{v}_i \quad (2-25)$$

由于质点系的内力和为零,从式(2-22)可知,质点系的动量定理的微分形式为

$$d\mathbf{p} = \mathbf{F}dt \quad (2-26)$$

表明质点系所受合外力 $\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i$ 在 dt 时间内的元冲量等于质点系总动量的元增量。在 dt 时间内, 质点系总动量的变化是各个质点动量变化的矢量和, 即 $d\mathbf{p} = \sum_i d(m_i \mathbf{v}_i) = \mathbf{F}_i dt$ 。

对于 $t \rightarrow t'$ 的一段有限的时间过程, 有

$$\mathbf{p} - \mathbf{p}_0 = \mathbf{I} \quad (2-27)$$

上式为质点系动量定理的积分形式, 式中 $\mathbf{p}_0 = \sum_i m_i \mathbf{v}_{i0}$ 、 $\mathbf{p} = \sum_i m_i \mathbf{v}_i$ 分别为质点系初、末状态的动量, $\mathbf{v}_{i0}$ 、 $\mathbf{v}_i$ 分别为第 i 个质点的初、末速度, $\mathbf{I}$ 为合外力在 $t \rightarrow t'$ 时间内对质点系的总冲量, 等于在相同时间内各外力冲量的矢量和, 即 $\mathbf{I} = \sum_i \mathbf{I}_i$, 表明在一段时间内, 质点系总动量的增量等于质点系所受外力的总冲量。

当合外力为零时, 质点系动量守恒, 即

$$\sum_i m_i \mathbf{v}_i = \text{常量} \quad (2-28)$$

自然界中不受外力作用的系统常称为孤立系统, 孤立系统总动量守恒。若质点系在某方向不受外力, 或合外力在某方向上的分量为零, 则沿该方向动量守恒。

2.3.2 功 功率 动能定理 势能

1. 功、功率

力 $\mathbf{F}$ 作用下质点在经过 $d\mathbf{r}$ 元位移的过程中, 力所做的功(work)为 $dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, 称为力作用于质点的元功, 它是力 $\mathbf{F}$ 与元位移 $d\mathbf{r}$ 的标积:

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F |d\mathbf{r}| \cos\theta \quad (2-29)$$

式中, θ 为力 $\mathbf{F}$ 和元位移 $d\mathbf{r}$ 之间的夹角。功是标量, 有正负之分。当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时, $dA = 0$, 力 $\mathbf{F}$ 对质点不做功。

元功 $dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 为力 $\mathbf{F}$ 在质点空间位移 $d\mathbf{r}$ 上的积累量。对于一段有限的运动路径, 力 $\mathbf{F}$ 所做的功为该路径上各段元功的和, 表示为

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad (2-30)$$

式中, a 是路径的起点, b 是路径的终点。功是一个过程量, 其值与质点沿一定的具体路径相关。始末点相同而路径不同, 同样的作用力对质点做的功不一定相同。由于质点的位移与参考系有关, 则功依赖于参考系的选取, 不同的参考系对功的描述是不同的。

功对时间的变化率称为瞬时功率, 简称功率(power), 表示为

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (2-31)$$

它等于力与速度的标积, 是力对质点在单位时间中所做的功, 表明了做功的快慢, 功率越大, 做同样的功所花费的时间越少, 做功的效率越高。

2. 动能定理

力 $\mathbf{F}$ 在质点运动过程的某元位移 $d\mathbf{r}$ 段所做的元功为 $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, 根据牛顿第二定律, 有