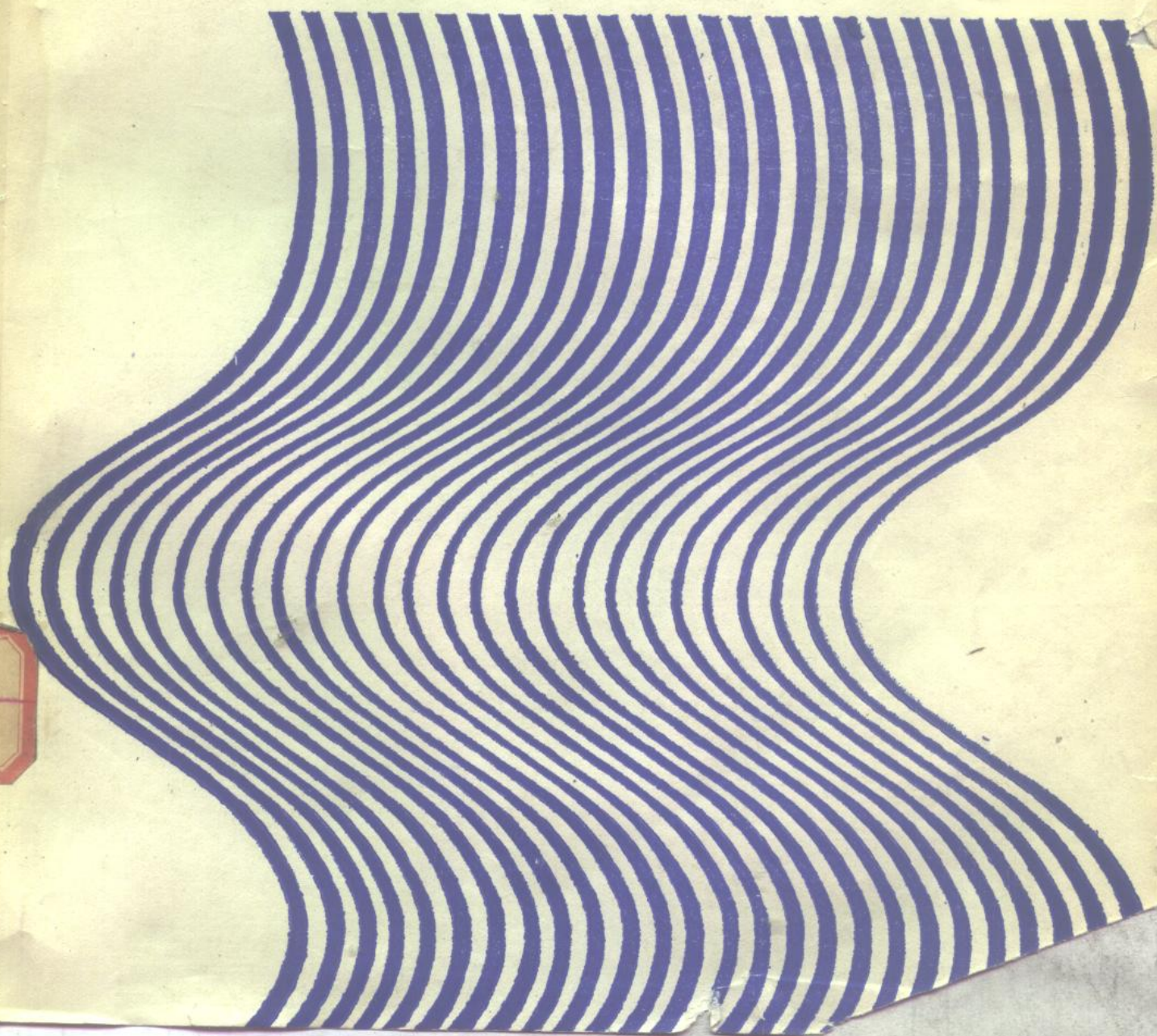


医学检验物理学

YIXUE JIANYAN
WULIXUE

刘泽民 主编

重庆大学出版社



医学检验物理学

刘泽民 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书根据医学检验的需要,对涉及检验的物理知识作了深入浅出的介绍,内容包括转动、液体流动、液体的表面现象、静电学、电流、磁场、振动与波、波动光学、光的辐射和吸收、光的量子性、应用几何光学、原子结构与光谱、x射线、原子核和放射性。本书取材结合专业,深广度适宜,某些公式推导方法新颖,每章后附有小结,并有适量结合内容的习题。

本书可供医科院校医学检验专业作教材,亦可供医学院校其它专业师生和医学检验工作者作参考书。

2V12/23

医学检验物理学

刘泽民 主编

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆医科大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 512 千

1988年8月第1版

1988年8月第1次印刷

印数: 1-5200

标准书号: ISBN 7-5624-0102-0 定价: 3.42元
O·17

前 言

医学检验专业是我国高等院校中近几年来建立的一个新专业,也是一个理工与生物医学相渗透、交叉的边缘性的应用学科,是现代医学中临床医学与实验室科学技术的结合。随着近代物理学、化学、数学、电子技术和计算机的飞跃发展和向生物医学的渗透及广泛应用,使原来医学检验室的工作内容不断更新,高灵敏度的、多功能的、自动化的检测设备不断涌现,使烦琐的操作得以简化,冗长的实验时间得以缩短、技术方法得以改进、精微含量的测定得以实现。先进技术的采用,无疑将会加速对生命现象及其本质的认识和研究,进一步提高临床诊断与治疗的水平,为此对物理学的广度和深度的要求也将会越来越高。为适应专业特点和需要,1984年由重庆医科大学刘泽民以电学、光学内容为主兼顾有关内容编写了一本“检验应用物理学”教材,经该校和贵阳医学院几届教学实践取得一定经验,同时吸收了不少兄弟院校同行们的宝贵意见,在此基础上,1987年由重庆医科大学、大连医学院、第三军医大学、贵阳医学院等四院校的同行人联合对原大纲进行了修订,根据修订后的大纲编写成本书。为使本书能体现专业的特色,适合专业的需要,在编写中选材紧密结合专业,适当介绍新技术在专业方面的应用,充分利用同学已有的高等数学基础,并坚持少而精的原则,力求语言精练易懂。尽可能作到教师使用顺手,学生易读。该书采用国际单位制。

本书由大连医学院陈秀文教授主审,重庆医科大学康格非教授审阅了有关结合专业部分的内容,重庆医科大学邓必中老师对该书进行了校审。参加编写的同志以姓氏笔画为序有:重庆医科大学刘泽民(绪论、第一、七、八章),贵阳医学院李光鼎(第四、十一章),重庆医科大学胡国虎(第五、六章),第三军医大学洪昭昇(第二、十二、十三章),大连医学院相德有(第三、九、十章),由刘泽民主编。第三军医大学于占洋同志绘制了全部插图。在编写中得到福建医学院、吉林医学院、温州医学院、张家口医学院、四川省卫生管理干部学院、湖北省药检专科学校同行们的大力支持,谨此一并致谢。

由于我们水平有限,不妥之处在所难免,恳切欢迎批评指正。

编 者

1987.8.

绪 论

0-1 物理学研究对象

物理学是研究自然界中物质运动的普遍性质和基本规律的科学。自然界是由运动着的物质组成的,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,物质和运动是不可分离的。没有不运动的物质,也没有非物质的运动。所谓“静止”是相对于一定的参照系而言,运动是绝对的,静止是相对的。这里所指的运动是广义的,它包括各种机械运动、变化、生长、相互作用和相互联系等过程。各种自然现象,如化学变化、天体运动、动植物生长和生殖过程都是不同形式的物质运动的表现。简单的运动形态是机械运动、分子热运动、电学的和电磁学的过程以及原子内部的运动等等。而生命现象则是更加复杂、更加高级的物质运动形态。

物质的各种运动形式间都有着密切的联系,而且在本质上又相互区别,在一定条件下会相互转化,如光与分子原子的电磁运动相联系,热与分子的无规则运动相联系,热运动可转化为机械运动,机械运动也可以转化为热运动等等。高级运动形式与低级运动形式间也是互相联系、相互渗透的,在一定条件下相互转化,生命现象不能没有机械的、分子的、化学的、电的、热的……等变化。人类的神经活动过程就包含着一系列的电学过程,所以,即是高级运动形式也包含低级运动形式,但是低级运动形式不能把高级的运动形式的本质包括无遗。

各门自然科学都以不同的物质运动形式作为自己的研究对象,物理学所研究的物质运动形态具有最基本最普遍的性质。如力学现象、物质结构和状态有关的现象、各种场的性质、场和实物的相互作用等。研究它们的特殊矛盾和本质,以及它们之间的联系和影响,找出这些运动形式各自的和共同的规律。由于物理学研究的物质运动形态是普遍地存在于其它复杂的高级的运动形态中,因此,一切物体不论它们的化学成份和性质如何,不论有无生命,都必须遵从物理学所确立的能量守恒与转换定律、万有引力定律以及其他物理学定律。正是由于物理学所研究的物质运动的普遍形态和规律又存在于其它所有的物质运动形态中,因此,使得物理学的知识成为研究其他自然科学和应用技术所不可缺少的基础。

0-2 物理学与医学检验学的关系

随着人类对生命现象认识的逐渐深入,生物科学已经从宏观形态的研究进入微观机制的探讨,从显微镜下的细胞水平提高到超显微层次的分子水平,这样,必将更深入地触及到生命现象的微观本质。生物化学曾经大大推动了生物医学科学和检验学的进展,生物物理学对阐明生命现象本质已作出了相当的贡献。这就反映了物理学与生物医学和检验学之间不可分割的内在联系。我们知道,生命现象是属于较高级、复杂的物质运动形态,同时它也必须包含着许多较低级、简单的物质运动形态。除遵守有关的低级物质运动规律外,生命现象还另有它自己的客观规律。即是说,生命现象除了必须服从物理的和化学的规律外,还必须遵守生物学的规律。因此,物理学和化学的知识是理解生命现象的基础。

其次,在生物医学科学研究及医疗和检验实践中,越来越多的采用物理学的先进技术和

方法,光学显微镜对生物学的贡献早已为人们熟知,除此之外,电子显微镜、各种医用电子技术、各种探测分析仪器、分离技术、计算机、顺磁共振、 x 射线、放射性同位素、超声、激光、纤镜、液晶、红外技术等。总之,伴随着新技术的应用,不少的检测设备已向精密、多功能、自动化方向发展,这对促进医学和检验学的现代化将会起到重要的作用。可以这样说,物理学的每一项新发现、新技术、都会给医学和检验学提供更新、更好的仪器和方法。大量采用物理学的方法和设备已成为现代医学、检验学研究及临床实践的一个特征。

综上所述,物理学与医学检验学的关系可归结为两个主要方面:(1)物理学知识是了解生命现象及本质所不可缺少的基础。(2)物理学的方法和技术为医学检验学的实践开辟了许多新途径。

医学检验物理学是一门基础课程。其主要任务是以高中物理学为起点,结合专业需要,传授给学生必须的物理学基本理论,基本知识和基本技能,适当介绍物理学新技术在专业方面应用的进展,为学好医学检验基础课和专业课以及从事临床检验工作打下必要的物理学基础。

目 录

绪论	(1)
0-1 物理学研究对象	(1)
0-2 物理学与医学检验学的关系	(1)
第一章 转动	(1)
1-1 线量与角量	(1)
1-2 惯性系与非惯性系	(5)
1-3 非惯性系中的力学定律 惯性力	(5)
1-4 惯性离心力 离心分离器	(6)
1-5 刚体的转动动能与转动惯量	(9)
1-6 刚体转动定律 角动量守恒定律	(12)
小结	(14)
习题一	(15)
第二章 流体的流动	(17)
2-1 理想液体的流动	(17)
2-2 柏努利方程	(19)
2-3 实际液体的流动	(25)
2-4 泊肃叶公式	(28)
2-5 血液在人体循环系统中的流动	(31)
2-6 流变力学简介	(33)
小结	(34)
习题二	(35)
第三章 液体的表面现象	(37)
3-1 表面张力和表面能	(37)
3-2 弯曲液面内外的压强差	(39)
3-3 液体与固体接触处的表面现象	(41)
3-4 毛细现象	(42)
3-5 表面活性物质 吸附	(44)
小结	(45)
习题三	(46)
第四章 静电场	(48)
4-1 基本概念综述	(48)
4-2 静电场的高斯定理	(51)
4-3 电场力作功 电势	(58)
4-4 电势和场强的关系	(66)
小结	(68)
习题四	(69)
第五章 电流	(73)
5-1 欧姆定律的微分形式	(73)

5-2 焦耳——楞次定律的微分形式	(75)
5-3 电压源 电流源	(76)
5-4 电位和电位差的计算	(79)
5-5 复杂电路的计算	(80)
5-6 一阶网络的三要素分析法	(83)
5-7 三要素法的应用	(89)
5-8 温差电现象	(93)
5-9 电泳	(95)
5-10 超导电现象	(96)
小结	(97)
习题五	(98)
第六章 磁场	(102)
6-1 磁知识的回顾	(102)
6-2 电流元的磁场 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	(103)
6-3 毕奥定律的应用	(105)
6-4 安培环路定律	(108)
6-5 安培环路定律的应用	(111)
6-6 洛仑兹力的应用	(114)
6-7 电磁波	(119)
小结	(126)
习题六	(127)
第七章 振动与波	(129)
7-1 谐振动	(129)
7-2 谐振动的速度和加速度	(131)
7-3 谐振动的能量	(132)
7-4 二体振动系统	(134)
7-5 振动的合成	(136)
7-6 波的产生与传播	(137)
7-7 波动方程	(138)
7-8 波的能量	(141)
7-9 惠更斯原理	(143)
7-10 波的干涉	(144)
7-11 声波	(146)
7-12 多普勒效应	(149)
7-13 超声波	(151)
小结	(156)
习题七	(158)
第八章 波动光学	(161)
8-1 相干光源	(161)
8-2 光的干涉	(162)
8-3 光通过不均匀媒质的干涉	(164)

8-4 光的衍射	(168)
8-5 x射线的衍射	(173)
8-6 全息照相	(174)
8-7 光的偏振	(176)
8-8 旋光性 糖量计	(185)
8-9 液晶	(186)
小结	(187)
习题八	(188)
第九章 光的辐射和吸收 光的量子性	(190)
9-1 热辐射 基尔霍夫定律	(190)
9-2 绝对黑体的辐射定律	(192)
9-3 普朗克量子假设	(193)
9-4 热辐射的应用	(194)
9-5 非温度辐射	(195)
9-6 光的吸收	(197)
9-7 光电效应	(204)
9-8 光的波粒二象性 粒子的波动性	(209)
小结	(211)
习题九	(213)
第十章 应用几何光学	(214)
10-1 单球面折射 共轴球面系统	(214)
10-2 薄透镜	(218)
10-3 厚透镜	(224)
10-4 圆柱透镜	(225)
10-5 放大镜	(226)
10-6 显微镜	(227)
10-7 几种医用显微镜	(232)
10-8 电子显微镜	(237)
10-9 纤镜	(239)
10-10 折射计	(241)
小结	(244)
习题十	(246)
第十一章 原子结构与光谱	(248)
11-1 氢原子光谱的实验规律	(248)
11-2 类氢原子的玻尔理论	(250)
11-3 量子力学的基本概念	(253)
11-4 类氢原子的能级	(262)
11-5 化学元素周期律与原子的电子壳层结构	(265)
11-6 光谱分析	(268)
11-7 激光	(273)
小结	(276)

习题十一	(278)
第十二章 x射线	(279)
12-1 x射线的一般性质	(279)
12-2 x射线的发生装置	(279)
12-3 x射线的强度与硬度	(281)
12-4 x射线谱	(281)
12-5 x射线的吸收	(284)
12-6 CT基本原理及其应用简介	(285)
12-7 x射线的医学应用	(288)
小结	(289)
习题十二	(290)
第十三章 原子核和放射性	(291)
13-1 原子核结构	(291)
13-2 放射性衰变	(293)
13-3 射线与物质的相互作用	(300)
13-4 放射剂量和辐射防护	(303)
13-5 辐射的探测	(304)
13-6 核磁共振CT	(307)
13-7 正电子PET	(310)
13-8 放射性核素在医学上的应用	(311)
13-9 基本粒子	(313)
小结	(314)
习题十三	(316)
附录	(318)

第一章 转 动

本章先描述物体作平动和转动时的线量与角量,以及它们间的关系和对应方程。进而讨论非惯性系中的力学定律、惯性力。在此基础上,进一步介绍惯性离心力和离心分离器。然后讨论刚体的转动,引出转动惯量这一物理量,该量对了解离心分离器的结构、原理和分子光谱的研究都是重要的。最后介绍转动定律、角动量原理和角动量守恒定律。这些定律都是物理学中最基本的定律。

1-1 线 量 与 角 量

一、线量

物体沿直线运动时,用位移 (*displacement*) 描写物体位置的改变,用速度 (*velocity*) 描写物体运动的快慢,用加速度 (*acceleration*) 来描写物体运动速度变化的快慢。这些描写物体作直线运动的物理量总称为线量,而且都是矢量。

设沿直线运动的物体在一段极短的时间 Δt 内,位置变化了 Δx ,那么,物体运动的平均速度等于在单位时间内通过的位移,即

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

当 Δt 趋近于零时, Δx 也趋近于零,这时 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 却趋近于某一极限值,这个极限值称为运动物体在某一时刻(或某一位置)的瞬时速度,简称速度。

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (1-2)$$

可见速度等于位移对时间的一阶导数。速度的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

沿直线运动的物体,若在一段极短的时间 Δt 内,速度增量为 Δv ,那么,物体运动的平均加速度在数值上等于单位时间内的速度增量,即

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-3)$$

当 Δt 趋近于零时, Δv 也趋近于零,这时 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 却趋近于某一极限值,这个极限值称为运动物体在某一时刻(或某一位置)的瞬时加速度,简称加速度。

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1-4)$$

加速度等于速度对时间的一阶导数,或等于位移对时间的二阶导数。加速度的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

• 1 •

例1 一质点作直线运动，其运动方程为 $x = 10 + 8t - 4t^2$ ，试求质点在 $t = 0\text{s}$ 、 1s 、 2s 、 3s 时刻的速度和加速度。

解 由方程，即可求得质点在时刻 t 的瞬时速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = 8 - 8t \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

此式表明，在一定的时刻，瞬时速度有一定的值。对应于各时刻瞬时速度分别为

$$\begin{aligned} t = 0\text{s时} \quad v &= 8 - 0 = 8\text{m} \cdot \text{s}^{-1} & t = 1\text{s时} \quad v &= 8 - 8 \times 1 = 0\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \\ t = 2\text{s时} \quad v &= 8 - 8 \times 2 = -8\text{m} \cdot \text{s}^{-1} & t = 3\text{s时} \quad v &= 8 - 8 \times 3 = -16\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

质点在时刻 t 的瞬时加速度为

$$a = \frac{dv}{dt} = -8\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

此式表明，加速度 a 是一个不随时间改变的恒量，因此这一质点是作匀变速直线运动。

二、角量

当物体绕定轴转动时(图1-1)，如物体中某一垂直于转轴的固定线 OP ，在某一段时间 Δt 内，转到 OC 位置，那么 OP 和 OC 间的夹角 $\Delta\theta$ 称为物体在这段时间内对转轴的角位移(angular displacement)。角位移是描述物体转动时位置变化的物理量，它的单位用弧度表示。

物体转动时，若在一极短时间 Δt 内，转过的角位移为 $\Delta\theta$ ，那么物体转动的平均角速度等于单位时间内的角位移，即

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1-5)$$

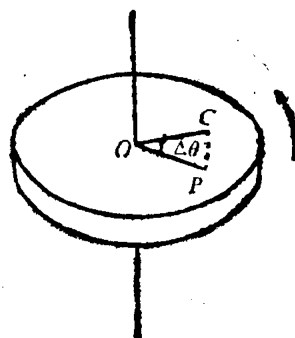


图1-1 物体绕定轴转动

当 Δt 趋近于零时， $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ 则趋近于某一极限值，这个极限值称为物体在某一时刻对转轴的瞬时角速度，简称角速度(angular Velocity)。

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-6)$$

角速度等于角位移对时间的一阶导数。角速度的单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (通常写作 s^{-1})，常用的其他单位为每分钟的转数，即 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

物体转动时，若在一段极短时间 Δt 内，角速度增量为 $\Delta\omega$ ，那么，平均角加速度等于单位时间内的角速度增量，即

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1-7)$$

当 Δt 趋近于零时， $\Delta\omega$ 也趋近于零， $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ 则趋近于某一极限值，这个极限值就是物体在

某一时刻的瞬时角加速度，简称角加速度 (angular acceleration)。

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-8)$$

角加速度等于角速度对时间的一阶导数，或等于角位移对时间的二阶导数。角加速度的单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$ (通常写作 s^{-2})。

角位移、角速度和角加速度这些描写物体绕定轴转动的物理量，统称为角量。

物体转动中的各个角量和物体作直线运动中的各个相当的线量完全对应。

在定轴转动中， $\Delta\theta$ 与 ω 的正负可用右手法则判断。在规定的正方向后，将右手的四个手指沿着转动方向回转，大拇指的方向与轴的正方向一致时，则为正值；反之则为负值。当 ω 的数值逐渐增大时， β 取正值；逐渐减小时， β 取负值。这三个量既有大小又有方向，所以是矢量。但绕定轴转动时，由于轴的方向已给定，这三个量都可有正或负取向，所以可把它们当作标量。

三、线量与角量的关系

物体转动时，物体的各组成质点作圆周运动。每个质点的各线量和各角量的关系可简单求出如下。设物体内某一点 P 离开转轴的垂直距离为 r (图 1-1)，并设物体在时间 Δt 内的角位移是 $\Delta\theta$ ，那么， P 点在这段极短时间 Δt 内走过的路程 Δs 等于弧长 $\widehat{PC}$ ，则

$$\Delta s = r\Delta\theta$$

$$P \text{ 点线速度的大小为 } v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = r \frac{d\theta}{dt} = r\omega \quad (1-9)$$

$$P \text{ 点切向加速度的大小为 } a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = r \frac{d\omega}{dt} = r\beta \quad (1-10)$$

$$P \text{ 点法向加速度的大小为 } a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{r^2\omega^2}{r} = r\omega^2 \quad (1-11)$$

上面这些式子表示物体转动时，组成物体的每一质点的速度、加速度和整个物体转动的角速度、角加速度之间的内在联系。而且线速度、切向加速度和法向加速度都与 r 成正比，离轴越远的点，其速度、加速度越大。

四、物体作平动与转动的运动方程

若转动物体作匀角加速度转动，则角速度可由积分求得，因

$$\frac{d\omega}{dt} = \beta = \text{恒量}, \quad \int d\omega = \int \beta dt, \quad \omega = \beta t + c_1$$

令 $t = 0$ 时，角速度为 ω_0 ，则积分常数 $c_1 = \omega_0$ ，因而

$$\omega = \omega_0 + \beta t \quad (1-12)$$

又因 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ， $\int d\theta = \int \omega_0 dt + \int \beta t dt$ ， $\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2 + c_2$ ，当 $t = 0$ 时，角 $\theta_0 = 0$ ，则积分常数 $c_2 = 0$ ，则有

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2 \quad (1-13)$$

根据链式法则, 角加速度可写为 $\beta = \frac{d\omega}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\omega}{d\theta}$, 于是 $\int \beta d\theta = \int \omega d\omega$,

$$\beta\theta = \frac{1}{2}\omega^2 + C_3. \text{ 如果 } t=0 \text{ 时, 角 } \theta_0=0, \text{ 初角速度为 } \omega_0, \text{ 于是 } C_3 = -\frac{1}{2}\omega_0^2, \text{ 因}$$

此有

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\beta\theta \quad (1-14)$$

公式 (1-12)、(1-13) 和 (1-14) 与物体作匀加速直线运动相应的运动方程完全类似, 比较如下。

物体作匀加速度直线运动的运动方程

$$a = \text{恒量}, v = v_0 + at, x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2, v^2 = v_0^2 + 2ax$$

物体作匀角加速度转动的运动方程

$$\beta = \text{恒量}, \omega = \omega_0 + \beta t, \theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2, \omega^2 = \omega_0^2 + 2\beta\theta$$

可见, 物体作平动与转动时, 运动方程也完全相似。

例2 一转速为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的飞轮, 因受到制动而均匀减速, 经 30 s 停止转动。试求: (1) 角加速度和在此时间内飞轮所转的圈数; (2) 制动开始后 $t = 6 \text{ s}$ 时飞轮的角速度; (3) 设飞轮的半径为 0.2 m , 求 $t = 6 \text{ s}$ 时飞轮边缘上一点的线速度、切向加速度和法向加速度。

解 (1) 由题意知

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 150}{60} = 5\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \omega = 0, t = 30 \text{ s}$$

因飞轮作匀减速转动, 所以角加速度为一恒量, 由此得

$$\beta = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{0 - 5\pi}{30} = -\frac{\pi}{6} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

飞轮在 30 s 内转过的角位移为

$$\theta = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\beta} = \frac{-(5\pi)^2}{2 \times (-\frac{\pi}{6})} = 75\pi \text{ rad}$$

于是飞轮所转的圈数为

$$N = \frac{\theta}{2\pi} = \frac{75\pi}{2\pi} = 37.5$$

$$(2) \quad t = 6 \text{ s} \text{ 时飞轮的角速度为 } \omega = \omega_0 + \beta t = 5\pi - \frac{\pi}{6} \times 6 = 4\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

(3) $t = 6 \text{ s}$ 时飞轮边缘上一点的线速度为

$$v = r\omega = 0.2 \times 4\pi \approx 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

该点的切向加速度和法向加速度各为

$$a_t = r\beta = 0.2 \times (-\frac{\pi}{6}) \approx -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, a_n = r\omega^2 = 0.2 \times (4\pi)^2 \approx 31.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

1-2 惯性系与非惯性系

在运动学中,研究物体运动时,首先要选取参照系。对同一物体的运动采用不同的参照系来描述,会得出不同的结果。因此如何选择参照系,就要看问题的性质和研究的方便来决定。例如,研究物体对地面的运动时,选地面作参照系最为方便。如果研究在车厢内物体的运动,则可选车厢为参照系。但在应用牛顿定律时,参照系不能任意选取。下面我们可以举一个例子来说明这个问题。假定在一辆作匀速直线运动的火车车厢内,一个乘客正在观察一个放在光滑桌面上质量为 m 的小球。他发觉,如果不受外力作用,小球将保持静止状态,如图1-2所示。这里所谓“静止”是相对于车厢来说的,也就是说,乘客在观察小球时是以车厢为参照系的。用手对小球加力,小球就沿力的方向获得加速度向前运动。在这种情况下,小球完全服从牛顿运动定律。

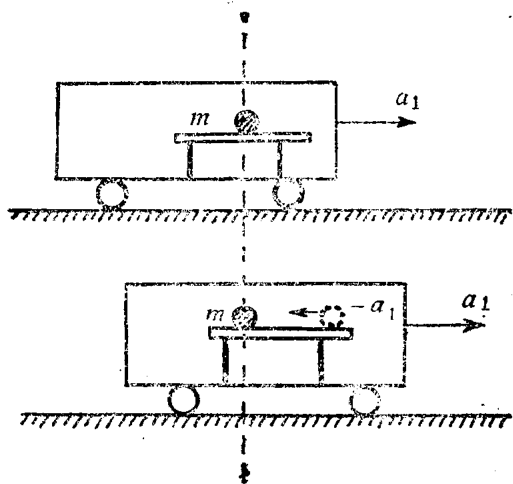


图1-2 惯性系与非惯性系

但是,当车厢不再保持原来的速度(如加快、减慢或改变进行方向)的时候,这个乘客就会观察到小球出现违反惯性定律的现象。例如,当车速加快时,小球在没有外力作用下会向后移动;车厢向右拐弯时,小球自动左滚等等。由此可见,惯性定律并不是对任何参照系都适用的,我们把适用惯性定律的参照系叫做惯性系(*inertial system*)。把不适用惯性定律的参照系叫做非惯性系(*non-inertial system*)。要确定一个参照系是不是惯性系,只能依靠观察和实验。天体运动的研究证明:如果我们选择太阳为参照系,以太阳中心为原点,指向任一恒星的直线为坐标轴,那么所观察到的无数天文现象,都和牛顿运动定律及万有引力定律

推出的结果相符合。因此,在力学中通常把上述的参照系看作较好的近似惯性系。观察到的现象和理论研究还进一步证明:所有相对于上述惯性系作匀速直线运动的参照系都是惯性系,而相对于惯性系作变速运动的参照系就是非惯性系。

1-3 非惯性系中的力学定律 惯性力

在非惯性系中,牛顿运动定律是不适用的,但从实践得到,只要我们在分析物体所受的作用力时,加上一个假想的力,则牛顿运动定律仍可应用。由于这个假想力是由非惯性系引出来的,故称为惯性力(*inertial force*)。

如1-2节图1-2所示,在以加速度 a_1 作匀加速直线运动的车厢中,假想质量为 m 的小球上有一个大小等于 ma_1 ,方向和 a_1 相反的力 $f = -ma_1$ 作用着,那么小球的运动仍可用牛顿运动

定律来描述。这个假想作用在小球上的力 f 就是惯性力。

当把惯性力一并考虑时,非惯性系中可借用牛顿运动方程的数学表示式,即

$$F + f = ma \quad (1-15)$$

式中 a 是物体相对于非惯性系的加速度, F 是由于相互作用物体所受到的合力。

惯性力是为了在非惯性系统中也能应用牛顿运动定律,人为地增加的一个力。它与物体间的相互作用力不同。一切相互作用都有“施力者”,而惯性力没有“施力者”。惯性力只能非惯性系中出现,作用在相对于非惯性系运动的物体上。在惯性系中分析物体所受之力时,切不要再加上一个惯性力。

例3 设有一质量为 60kg 的人站在升降机中的磅秤上。试求:(1)当升降机以加速度 $a = 4.9\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 上升时,磅秤的读数。(2)当升降机以加速度 $a = 4.9\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 下降时,磅秤的读数。

解 以升降机为参照系来分析,人体所受的重力 mg ,磅秤支承力 F 和惯性力 ma 三者处于平衡状态,磅秤的支承力亦即磅秤的读数。

(1) 升降机上升时

$$mg + ma - F = 0$$

$$F = m(g + a) = 60 \times (9.8 + 4.9) = 882\text{N}$$

(2) 升降机下降时

$$mg - ma - F = 0$$

$$F = m(g - a) = 60 \times (9.8 - 4.9) = 294\text{N}$$

从上例可看出,当升降机加速上升时,升降机中磅秤的读数有所增加,表现出超重。而当升降机加速下降时,升降机中磅秤的读数有所减少。当升降机的下降加速度 $a = g$ 时,磅秤的读数为零。此时人就可以不需要任何支持力而悬浮在升降机内,相当于没有重量。这种状态,称为失重(*weightlessness*)。

由于高速航空和航天技术的发展,加速度对人体的生理影响已经成为航空医学的一个重要内容。当直立的身体向上加速时,由于血管是可以扩张的,血液就积聚在身体的下半部,头部供血不足,可能因此失去知觉。如果加速度是向下的话,身体上部血液的体积就增大,会引起心脏收缩无力现象。另外,体内的器管也不是十分固定的,在加速时这些器管的过偏移也会引起不舒服的感觉。

1-4 惯性离心力 离心分离器

图1-3是一个水平转台,它以恒定的角速度 ω 转动,一个相对于平台静止而质量为 m 的小球,由一根连在中心轴上的绳子拴着,球离转轴的距离为 r 。

对于惯性参照系(比如以地面作参照系)而言,为了使小球能与转台同时运动,即小球

以半径 r 作等速率圆周运动,就必须给小球以向心加速度 (Centripetal acceleration) $a_n = r\omega^2$, 即施一向心力 (Centripetal force) $F' = mr\omega^2$ 于小球上。柱通过绳必须不停的把小球拉向自己,以使小球转弯。如果没有 F' 存在,则小球将沿切线方向运动。

对于匀速转动的转台这一非惯性系而言,小球除受到 F' 的作用外,还受到惯性力 f 的作用。由于小球对转台是相对静止的,所以 f 与 F' 两相平衡,于是

$$f = -F' = -ma_n \quad (1-16)$$

这个非惯性系中作用着的惯性力,它的方向是从转台的中心向外的,叫做惯性离心力,简称离心力 (Centrifugal force)。

离心分离器或离心机是医学实验室和医学检验中常用的设备。它主要用于在悬浮液中分离不同密度的微粒。图1-4是它的基本结构。把待分离的试样(如血液、尿等)放入离心管内,使离心管在水平面上绕转轴旋转。试样液中的微粒受到惯性离心力的作用向管底转移。由于密度大的微粒受到离心力大,因此经过一段时间以后,管中的微粒将按密度大小分离,密度最大的位于管底,最小的靠近管端。

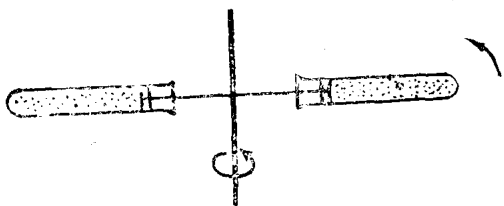


图1-4 离心分离器原理

我们以离心管为参照系来分析微粒在离心过程中所受的力。设试管中一颗微粒的密度为 ρ , 体积为 V , 悬浮在密度为 ρ' 的液体里。在离心管旋转时,微粒所受的水平力有两个(暂不考虑微粒在移动中受到的摩擦力):一是惯性离心力 f ,二是周围液体对它的作用力 F' 。以管口到管底的方向为正,则有

$$f = \rho V r \omega^2$$

式中 r 是微粒到转轴的距离, ω 是角速度,为了求出 F' ,可以假想把微粒从液中取出来,让它所占的空间被周围液体占据。这时如果旋转离心管,占据着这个空间的液体是不会改变它的位置的。这说明这部分液体所受到周围液体对它的作用力 F' 正好与它受到的惯性离心力平衡,即

$$F' = -\rho' V r \omega^2$$

这也就是微粒在占据同样空间时所受到周围液体的作用力。因此在旋转过程中,微粒受到水平方向的合力为

$$f + F' = \rho V r \omega^2 - \rho' V r \omega^2 = (\rho - \rho') V r \omega^2 \quad (1-17)$$

当 $\rho = \rho'$,微粒在管中保持原来位置。 $\rho > \rho'$,微粒受的向心力不足以维持它在圆周上运动,因此它将沿玻管外移,即向管底“沉淀”。 $\rho < \rho'$,微粒将向玻管内移,即“浮”向管口。

在没有离心机的时候,我们常常利用静置的办法使悬浮液中不同密度的微粒分离出来,

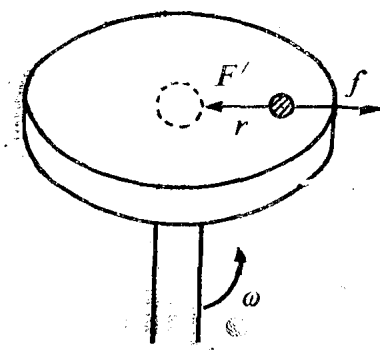


图1-3 惯性离心力