

高等医药院校教材

医

YIYONGWULIXUE

YIYONGWULIXUE

YIYONGWULIXUE

用

相德有 主编

物

理

学

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

医用物理学/相德有主编. —大连:大连理工大学出版社, 1997. 7

ISBN 7-5611-1248-3

I. 医… I. 相… II. 医用物理学 N. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 01559 号

医 用 物 理 学

相德有 主编

大连理工大学出版社出版发行
(大连市凌水河 邮政编码 116024)
大连业发印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.125 字数: 442 千字
1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷
印数: 1—5000 册

责任编辑: 韩 露 责任校对: 王 洁
封面设计: 孙宝福

ISBN 7-5611-1248-3
R·23

定价: 20.00 元

前 言

本书是根据卫生部1982年颁布的高等医药院校医用物理学教学大纲,由多所院校的、具有教学实践经验的教师联合编写的。可供医疗、检验、药学、口腔、妇产和卫生等专业学生使用,也可作为相关的医务工作者的参考书。

为了照顾物理学的系统性和连贯性,又尽量避免与中学内容重复,根据我们多年来的教学经验,对于有些章、节的内容,是采用综合性概述的方法予以简单介绍。

本书着重对物理学基本定律和基本概念的推导和阐述,也适当地联系一些医学知识。一方面使物理学给后续的专业基础理论课和临床应用打基础,同时也可以提高学生物理学学习的兴趣。本书编写的原则是选材适度、少而精,并适当介绍物理学的新理论和新技术;语言表达上力求由浅入深,循序渐进,便于自学。

医学成像技术已成为现代医学诊断的重要支柱,被誉为四大医学影像。本书把它列在第十四章“医学成像的物理原理”,对于学时数少的院校可简单介绍;学时数多的院校则可详细讲解。本章内容也可作为医务工作者的参考资料。

参加本书编写的有:大连医科大学的相德有(绪论)、张毅(第十一、第十三章)、肖峰(第七、第十章);贵阳医学院的李光鼎(第一章);镇江医学院的雷蕾(第六、第十四章)、刘方平(第三、第十四章);遵义医学院的任社华(第二、第四、第五、第十二章)和齐齐哈尔医学院的石永锋(第八章)、王淑萍(第九章)等。经过大家的认真讨论,最后由相德有统一修改、定稿。在本书的编写、整理过程中,大连医科大学的王志杰、罗凤畴、陈艳霞、丁晓东、盖立平等老师做了大量工作,在此一并表示感谢。

本书定稿工作虽然慎之又慎,但由于编者水平有限,缺点和错误之处在所难免,恳请读者和同仁不吝指正,以便今后修订、提高。

编 者

1997年1月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 刚体的转动	3
第一节 力学知识回顾	3
第二节 惯性系与非惯性系	9
第三节 刚体的转动动能和转动惯量	13
第四节 力矩、转动定律和角动量守恒定律	16
习题一	19
第二章 液体的流动	20
第一节 理想液体的定常流动	20
第二节 伯努利方程及其应用	22
第三节 实际液体的流动	27
第四节 泊肃叶定律	30
第五节 斯托克斯定律	33
习题二	34
第三章 气体动理论和热力学	35
第一节 分子运动的基本概念	35
第二节 理想气体的压强公式和能量公式	37
第三节 气体分子速率和能量的统计分布定律	42
第四节 热力学的基本概念	45
第五节 热力学第一定律	46
第六节 热力学第一定律的应用	48
第七节 热力学第二定律	53
习题三	55
第四章 液体的表面现象	57
第一节 表面张力和表面能	57
第二节 弯曲液面的附加压强	60
第三节 毛细现象	62
第四节 表面活性物质	66
习题四	67

第五章 振动、波动和声	69
第一节 谐振动	69
第二节 阻尼振动、受迫振动与共振	74
第三节 谐振动的合成	75
第四节 波的产生与传播	79
第五节 波的能量	81
第六节 惠更斯原理	83
第七节 波的叠加	84
第八节 声波	89
第九节 多普勒效应	93
第十节 超声波	95
习题五	98
第六章 静电场	100
第一节 电场和电场强度	100
第二节 高斯定理	104
第三节 静电力做功和电势	108
第四节 电势和场强的关系	112
第五节 静电场中的电介质	113
第六节 静电场的能量	114
习题六	116
第七章 直流电	117
第一节 电流密度和欧姆定律的微分形式	117
第二节 含源电路的欧姆定律	121
第三节 基尔霍夫定律	124
第四节 电容器的充电和放电过程	128
第五节 直流电在医学中的应用	131
第六节 超导现象	134
习题七	137
第八章 磁场	139
第一节 磁感应强度	139
第二节 电流的磁场和毕奥-沙伐尔定律	141
第三节 磁场对运动电荷的作用	144
第四节 磁场对载流导线的作用	147
第五节 磁介质	150
第六节 电磁感应	153
第七节 生物磁学在医学上的应用	156
习题八	157
第九章 光的波动性	161

第一节	光的干涉	161
第二节	光的衍射	166
第三节	光的偏振	172
第四节	双折射现象和二向色性	174
第五节	物质的旋光性	177
习题九		178
第十章	光的量子性	180
第一节	热辐射和基尔霍夫定律	180
第二节	黑体的辐射定律	182
第三节	非温度辐射	184
第四节	光的吸收	187
第五节	光电效应	192
第六节	光的波粒二象性和微观粒子的波动性	197
习题十		199
第十一章	几何光学	201
第一节	单球面折射和共轴球面系统	201
第二节	薄透镜	205
第三节	厚透镜	210
第四节	圆柱透镜	212
第五节	眼睛	212
第六节	放大镜、检眼镜和纤镜	216
第七节	显微镜	219
习题十一		230
第十二章	激光和 X 射线	233
第一节	原子的能级	233
第二节	激光的发射原理	235
第三节	激光的特性和应用	237
第四节	X 射线	238
第五节	X 射线谱	241
第六节	X 射线的吸收	243
第七节	X 射线在医学上的应用	245
习题十二		246
第十三章	原子核和放射性	247
第一节	原子核的基本性质	247
第二节	原子核的衰变	249
第三节	核衰变的规律	253
第四节	射线与物质的相互作用	256
第五节	射线的剂量与防护	260

第六节 射线的探测.....	263
习题十三.....	265
第十四章 医学成像的物理原理.....	267
第一节 超声成像.....	267
第二节 X 射线电子计算机断层成像.....	273
第三节 核医学成像.....	279
第四节 核磁共振成像.....	283
附录一 基本单位和基本常数.....	291
附录二 习题答案.....	294

绪 论

物理学是除数学以外,包括医学在内的一切自然科学的基础,也是现代医学诊断和治疗高新技术和仪器的重大支柱。因此,作为必修基础课程的医用物理学,是每位医学生必须学习和掌握的一门学科。

一、物理学的研究对象

自然界中,形形色色的物质都在其中不停地运动变化着,绝对不动的物质是不存在的。例如,天体的运动、生物的生长和人类的思维活动等,都是物质运动的表现。物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。它包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内的运动等等。物理学所研究的运动,也普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中,例如,化学的、生物的以及生命现象。

现代物理学已成为基础学科中发展最快、影响最大、应用最广泛的一门学科。物理学的发展,不仅为当今生产和技术带来巨大进步,从而使社会物质生产的各个领域面貌一新,对医学的进展也起了很大的推动作用。近几十年来,物理学和工程学结合起来与生物医学相互渗透、相互利用、相互促进,形成了一门新的综合性交叉的边缘学科,即生物医学工程学。这门学科的出现,一方面向物理学提出了新的更高的要求,促使物理学向更深的层次探索;同时,物理学所提供的方法和技术也为医学的研究和医疗实践开辟了许多新的途径。

二、物理学的研究方法

学习物理学,除了要学习和掌握物质运动的各种规律外,还应该了解物理学的研究方法。物理学的研究方法包括观察、实验、假说和理论。而观察和实验是研究物理学的基础,观察是接触外界事物的第一步,是对自然界中所发生的现象进行观测和研究。历史上许多科学家的研究工作就是从观察开始的,例如,伽利略对落体运动的研究等。而实验则是用人为的方法使自然界中的现象重复发生,作反复细致的研究。例如,伦琴在1895年研究阴极射线时发现的X射线,其本质和性质就是通过反复实验研究得出来的。通过观察和实验获得大量的资料,再经过人们的分析、概括、综合和推理等过程,就引导出定律和理论的建立,一套体系完整的理论,可以从一些基本原理出发,经过一定的逻辑推理,就能够解释一定范围内的各种现象。

有些物理定律和理论的建立过程中,常常要经过假说的阶段。假说是在一定观察和实验的基础上概括和抽象出来的。例如,卢瑟福在实验基础上提出来的原子的核式结构假说,就发展成为当今核物理的重要理论基础。

理论建立以后还须回到实践中去。一方面理论需要经过实践的检验;另一方面正确的理论对实践具有指导作用,理论通过实践可以得到进一步发展。因此,物理学的研究是理

论和实践的统一,是辩证唯物论的认识法则。

三、物理学与医学的关系

医学是一门研究生命现象的生物科学,生命现象在自然现象中属于高级的、复杂的物质运动形态,它也必然地包含着许多比较简单、比较低级的物质运动形态在内,因此,物理学与医学是密切相关的。首先,医学生在学习医学基础理论方面,要想深入掌握人体的生理过程和病理过程,必须以物理学为基础。例如,不论是呼吸、消化还是血液循环,无不涉及到各式各样的生物化学反应,而这些反应以及过程本身又都是和一些力学的、分子运动的、热学的、电学的过程分不开。人们要了解声的感觉过程,就得了解声的基本定律;要了解眼的的作用,就必须掌握光学的有关知识;要了解血液在血管中的运动情况,就必须知道流体力学的基本理论。随着物理学的深入发展,人们对生命现象的认识也迅速向更深层次发展,生物科学的研究已从宏观形态的论述进入到微观机制的探讨,从细胞水平提高到分子水平。

其次,随着物理学的发展,临床诊断和治疗实践中,愈来愈广泛地采用物理学的高技术和新方法。医院中的任何一个研究,无不在使用先进的手段和精密的仪器进行诊断和治疗。例如,心电图机、超声诊断仪、光纤内窥镜、X射线CT机、核磁共振仪、各种放射性治疗仪器以及电子监护系统等,这些用物理学的原理和技术制造出来的高新医疗设备,为人类做出了很大的贡献。由此可见,一个医学生,无论是为了在校学好专业理论课,还是走向社会从事临床医疗工作,都必须学好物理学这门课程。

第一章 刚体的转动

本章讨论刚体作平动和转动时的线量与角量,它们间的关系和对应方程。引入惯性系与非惯性系的概念,讨论非惯性系中的力学定律、惯性力,介绍惯性离心力和离心分离器。然后讨论刚体的转动动能和转动惯量、转动定律和动量矩守恒定律,这些定律是物理学中的最基本的规律,是医学专业最常用的超速离心方法的理论基础,在分子光谱的研究中亦需应用。

第一节 力学知识回顾

一、参照系和坐标系

1. 参照系

参照系(reference system)亦称参照物,是为了描述物体的机械运动而选作标准的另一个相对静止的物体。平时所说的物体的运动都是相对于某个参照系而言的,由于选取的参照系不同,对于同一物体的运动描述一般是不同的,结果也是不一样的,究竟选取哪个物体作参照系,应视问题的需要和研究方便而定。

2. 坐标系

为了定量地描述物体在空间的位置,在参照物上按某种规定的方法,选取有次序的一组或几组数构成坐标系。研究物体直线运动常用一维坐标系;研究物体平面运动常用平面直角坐标系、极坐标系等;研究物体空间运动常用空间直角坐标系等。坐标系是参照系上的一个数学抽象。现简介最常用的空间直角坐标系。这种坐标系是在参照系中选一固定点 O ,作为坐标的原点,经过这一点做三条互相垂直的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴。物体在直角坐标系 P 点的位置,用 X, Y, Z 三个坐标来确定,或者用从原点 O 到 P 点的线段 OP 来表示,如图1.1所示。线段 OP 不仅有大小,而且有一定的指向(从 O 点指向 P 点)。除了数值还有方向的量称为**矢量(vector)**。我们用带箭头的线段表示矢量,箭头指出矢量的方向,在选定的比例尺下,线段的长度表示矢量的数值。矢量通常用黑体字母如 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 等表示,也可用 $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ 来表示。矢量的数值叫做矢量的模,用普通字母如 A, B, C 等表示。图1.1中有向线段 $\vec{OP}$ 是矢量,叫做**位置矢量**或称**矢径(radius vector)**,用 $\mathbf{r}$ 表示。相应地,坐标 x, y, z 便是矢径 $\mathbf{r}$ 沿坐标轴的三个分量,矢径的模为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-1)$$

矢径的方向余弦为

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

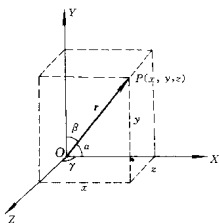


图 1.1 位置矢量

式中, α, β, γ 分别是 r 和 x, y, z 轴的夹角。所以 r 实际代表 x, y, z 三个标量, 亦即 P 点的位置由三个独立的量所确定, 所以位置矢量 r 是描述物体在空间中位置的物理量, 是描写物体运动状态的一个参量。选择不同的参照系以及在同一参照系上建立不同的坐标系, 则坐标的数值是不同的, 但它们反映的物理内容却是一致的。在所研究的问题中, 若物体的大小和形状可以忽略时, 就把物体当做一个有一定质量的点, 这样的点叫做质点 (particle)。质点的机械运动是质点的位置随时间而变化的过程, 这时质点的坐标 x, y, z 和矢径 r 都是时间 t 的函数。

物体的运动有两种基本类型: 平动 (translation) 和转动 (rotation)。物体的平动, 可用

质点的运动来简化, 但当物体在作转动时, 就不能再把物体视为质点, 为简化计, 可以把物体看做是有大小和形状, 但形状不能有明显变化的刚体 (rigid body)。

质点和刚体都是理想的模型, 是实际物体在一定条件下的抽象。把复杂而具体的物体用简单的模型来代替, 可以简化研究的条件, 突出主要因素, 而有利于探索规律的本质, 是一种重要的科学研究方法。

二、物体的平动

在图 1.2 中设曲线 $\widehat{AB}$ 是质点运动轨道的一部分。在时刻 t , 质点在 A 点处, 在时刻 $t + \Delta t$, 质点到达 B 点处。 A, B 两点的位置分别用矢径 r_A 和 r_B 来表示。在时间 Δt 内, 质点的位置变化可用从 A 到 B 的有向线段 $\widehat{AB}$ 来表示, $\widehat{AB}$ 称为质点的位移 (displacement)。位移除了表明 B 点与 A 点之间的距离外, 还表明了 B 点相对于 A 点的方位, 所以位移是矢量, 是描写初始时刻和终止时刻质点位置变动大小和方向的物理量, 它是从初始位置引向终止位置的一个有向线段。常用 S 或 Δr 表示。位移矢量表示式是

$$\Delta r = r_B - r_A \quad (1-3)$$

根据矢量的平行四边形加法定律, 从图 1.2 中可以看出, 位移 S 和矢径 r_A, r_B 之间的关系为

$$r_B = r_A + S \quad \text{或} \quad S = \Delta r = r_B - r_A$$

即为式 (1-3), 上式说明, 位移 Δr 等于末矢径 r_B 和初矢径 r_A 的矢量差, 此矢量差即为矢径 r 在 Δt 时间内的增量。

必须注意, 位移表示质点位置的改变, 它只决定于质点最初和最终的位置, 而与质点沿什么途径运动无关。从图 1.2 中可以看出, 位移为有向线段 $\widehat{AB}$, 是一矢量, 它的数值 $|\Delta r|$ 就是割线 AB 的长度, 而路程是一标量, 它是曲线 $\widehat{AB}$ 的长度 Δs , 弧长 Δs 和位移矢量的模 $|\Delta r|$ (即弦长) 并不相等, 只有在 Δt 趋近于零时, 才可视弧长与弦长相等。

在国际单位制中,位移的单位是米(m)。位移和位置矢量虽然都是矢量,但是它们的物理意义是不同的。位置矢量与时刻相对应,而位移则与时间间隔相对应。

为了说明质点运动的快慢和方向而引入速度(velocity)的概念。速度是位移对时间的变化率。在图 1.2 中若质点在一段时间间隔 Δt 内,位移为 Δr ,则质点运动的平均速度 $\bar{v}$ 是

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1-4)$$

平均速度也是矢量,它的方向与位移 Δr 的方向相同。在描述质点运动时,也常采用速率(speed)这个物理量。我们把路程 ΔS 与时间间隔 Δt 的比值 $\Delta S/\Delta t$ 称为质点在时间 Δt 内的平均速率。平均速率是一标量,等于质点在单位时间内所通过的路程而不考虑运动的方向。不能把平均速度与平均速率等同起来。例如,在某一段时间内,质点环行了一个闭合路径,显然质点的位移等于零,所以平均速度也为零,而平均速率却不等于零。

平均速度只能粗略描写质点在 Δt 时间间隔内运动的快慢及方向。设质点在 t 时刻位于 A 点处,在 $t+\Delta t$ 时刻位于 B 点(如图 1.2)。由于质点在 Δt 的时间内,运动是不均匀的,所以平均速度 $\bar{v}$ 只能近似地描写质点在 Δt 时间内的运动。显然时间间隔越小,则求得的平均速度就越接近于在 A 点的速度。在极限的情况下,即当 Δt 无限减小而趋近于零时,表示成 $\Delta t \rightarrow 0$,则 $\Delta r/\Delta t$ 趋近于一个极限,此极限值就称为质点在 A 点处的瞬时速度 v ,简称为速度:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-5)$$

上式说明,速度等于矢径 r 对时间 t 的一阶导数。速度是矢量,速度的方向就是当 Δt 趋近于零时,位移 Δr 的极限方向,即沿着轨道上质点所在处的轨道切线方向。速度的单位为米/秒($m \cdot s^{-1}$)。

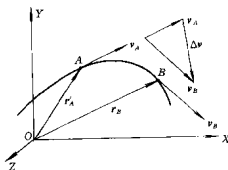


图 1.3 速度的增量

为了说明速度变化的快慢和方向,引入加速度的概念。速度对时间的变化率称为加速度(acceleration),如图 1.3 所示。一质点在时刻 t 位于 A 点,速度为 v_A ,在时刻 $t+\Delta t$ 位于 B 点,速度为 v_B 。在时间间隔 Δt 内,质点速度的增量为

$$\Delta v = v_B - v_A \quad (1-6)$$

若运动质点在 Δt 时间间隔内,速度的变化量是 Δv ,则质点的平均加速度定义为

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

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,质点在某一时刻 t ,在某一位置的**瞬时加速度**(简称**加速度**),等于平均加速度的极限值,即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-8)$$

加速度等于速度对时间的一阶导数,或等于矢径对时间的二阶导数,单位为米/秒²($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。加速度 $\boldsymbol{a}$ 是矢量,其方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。显然当加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向和速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向一致时,加速的结果只能引起速度量值的改变,不会引起速度方向的改变,



图 1.4 切向加速度和法向加速度

此时质点作直线加速运动。若 $\boldsymbol{a}$ 的方向与 $\boldsymbol{v}$ 的方向不一致,则质点必作曲线运动,如果 $\boldsymbol{a}$ 的方向与 $\boldsymbol{v}$ 的方向互相垂直,则质点运动的快慢将不改变,而只有运动方向的改变。我们可以把曲线运动在任何时刻的加速度 $\boldsymbol{a}$ 分解为沿速度 $\boldsymbol{v}$ 方向的切向加速度 $\boldsymbol{a}_t$ 和垂直于 $\boldsymbol{v}$ 方向**的法向加速度 $\boldsymbol{a}_n$** ,如图 1.4 所示。 $\boldsymbol{a}_t$ 的作用是使 $\boldsymbol{v}$ 的**量值改变**; $\boldsymbol{a}_n$ 的作用则是改变 $\boldsymbol{v}$ 的方向,即改变质点运动的方向。当 $\boldsymbol{a}_t = 0$,而 $\boldsymbol{a}_n \neq 0$ 时,质点作直线加速运动,当 $\boldsymbol{a}_t \neq 0$,而 $\boldsymbol{a}_n = 0$ 时,质点作等速率圆周运动。

位移、速度、加速度都是矢量,具有瞬时性,具有相对性。当质点 A 从参照系 B 变换到参照系 C 且参照系 B 相对于参照系 C 又有运动时,则质点 A 对参照系 C 的矢量变换规律遵循矢量合成的平行四边形法则。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \boldsymbol{r}_{A|C} &= \Delta \boldsymbol{r}_{A|B} + \Delta \boldsymbol{r}_{B|C} \\ \boldsymbol{v}_{A|C} &= \boldsymbol{v}_{A|B} + \boldsymbol{v}_{B|C} \\ \boldsymbol{a}_{A|C} &= \boldsymbol{a}_{A|B} + \boldsymbol{a}_{B|C} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

在直角坐标系里,我们用坐标、位移、速度和加速度这四个物理量来描写质点的运动,统称为**线量**。

三、刚体的定轴转动

转动是刚体在平动之外的另一种运动形式。刚体在运动中,若其中各个质点均绕同一直线作圆周运动,就称为**转动(rotation)**,这一直线叫做**转轴(rotation axis)**。例如,电风扇叶片的运动,车床上工件的运动,地球的自转等都是转动。如果转轴固定不动,就称**定轴转动**。刚体定轴转动的特点是:

- (1) 刚体上各个质点都在作圆运动,但各质点圆运动的半径不一定相等。
- (2) 各质点圆运动的平面(圆面)垂直于轴线,圆心在轴线上。
- (3) 各个点的矢径(从圆运动的圆心引到所研究的点的有向线段)在相同的时间间隔内,转过的角度是相同的。

根据定轴转动的特点,我们不能像研究质点那样建立直角坐标系,用直角坐标来描写刚体的定轴转动,而需要建立一个角坐标系,用角度来描写刚体的位置和它的转动情况。在角坐标系里,我们用角坐标、角位移、角速度和角加速度这四个物理量来描写刚体定轴转动的运动状况,统称为**角量**。

角坐标亦称**角位置(angular position)**,可描述刚体在转动过程中的位置。通常取任意

垂直于定轴的平面为转动平面,如图 1.5 所示。该平面上任一质点都在作圆周运动,其圆心为 O ,若能确定了任意一点 P 的位置,则整个刚体的位置也就确定了。 P 点的位置可用矢径 r 表示。若在转动平面上规定一个方向为参考方向,则可用矢径 r 与参考方向的夹角 θ 来描写 P 点的位置。 θ 确定后, P 点的位置从而整个刚体的位置也就确定了,角 θ 即称为角坐标,其单位为弧度(radian)。刚体定轴转动时,角 θ 随时间在变化,即 $\theta=f(t)$,角坐标与时间的函数关系,叫做刚体定轴转动的运动方程。

角位移(angular displacement)是描写刚体转动位置变动情况的物理量。它的单位仍用弧度表示。在图 1.6 中,一质点原来的位置在 P 点,角坐标是 θ_0 ,经一段时间 Δt 后,角

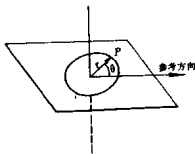


图 1.5 转动刚体的角坐标

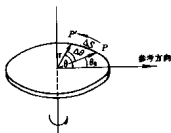


图 1.6 转动刚体的角位移

标变为 θ ,则角坐标的增量 $\Delta\theta=\theta-\theta_0$ 就叫做角位移。我们用角位移来表示刚体转动的角度。角位移是矢量,它的方向可按右手螺旋法则来确定。即将右手四指弯曲的方向和刚体的转动方向一致,而用与四指垂直的拇指的指向来判定角位移的正负,若拇指的方向与轴的正方向一致,则角位移为正;反之,角位移则为负。在定轴转动时,一般以逆时针转动的方向为正方向,顺时针转动的方向为负方向。故若 $\Delta\theta>0$ 则表示刚体作逆时针转动;若 $\Delta\theta<0$,则表示刚体作顺时针转动。

描述刚体转动快慢和方向的物理量是角速度(angular velocity),以 ω 表示。若刚体在 Δt 时间内,角位移为 $\Delta\theta$,则 $\Delta\theta/\Delta t$ 为在 Δt 时间间隔内的平均角速度。当 Δt 趋近于零时, $\Delta\theta$ 也趋近于零,比值 $\Delta\theta/\Delta t$ 则趋近于某一极限值,即

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

称为刚体在某一时刻对转轴的瞬时角速度,简称角速度 ω 。角速度的单位为弧度/秒($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$),常用的其他单位是每分钟的转数,即($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。角速度 ω 的方向与角位移 $\Delta\theta$ 的方向一致。对于定轴转动,可用角速度 ω 的正负号来表示转动的方向。若刚体逆时针转动则 $\Delta\theta>0$,且 $\omega>0$;若刚体顺时针转动则 $\Delta\theta<0$,且 $\omega<0$ 。刚体作匀速转动时,在任何相等时间内转过的角位移都一样,因此 Δt 可取任何值,则 $\omega=\theta/t$ 或

$$\theta = \omega t \quad (1-11)$$

上式是刚体匀速转动的运动方程。

若刚体作变速转动,在 Δt 时间间隔内,角速度从 ω 变到 $\omega+\Delta\omega$,则平均角加速度为

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

当 Δt 趋近于零时, $\Delta\omega$ 也趋近于零, 比值 $\Delta\omega/\Delta t$ 则趋近于某一极限值, 为刚体在某一时刻的瞬时角加速度, 简称角加速度 (angular acceleration)。

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-12)$$

角加速度 β 的方向与 $\Delta\omega$ 的方向相同。它的单位可以由角速度和时间的单位导出, 为弧度/秒² ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$)。需注意 ω 的方向决定于 $\Delta\theta$ 的方向; 而 β 的方向则是角速度改变量 $\Delta\omega$ 的方向, 对于定轴转动来说, 我们可用正负号表示。

我们不能只从 $\beta > 0$ 或 $\beta < 0$ 来确定是加速转动还是减速转动, 而应用 β 和 ω 的方向关系来确定是哪种转动。当刚体定轴转动时, β 和 ω 同号是加速转动; β 和 ω 异号时是减速转动。

四、角量和线量的关系

刚体转动时, 各组成质点均作圆周运动, 每个质点的各线量和各角量间的关系可需求如下。设刚体内某一质点 P 离开转轴的垂直距离为 r , 并设刚体在时间间隔 Δt 内的角位移是 $\Delta\theta$ (见图 1.6), 则 P 点在 Δt 极短时间内所走过的路程 ΔS 等于弧长 PP' , 由几何学可知

$$\Delta S = r\Delta\theta$$

由于时间 Δt 极短, 所以角位移 $\Delta\theta$ 也很小, 则弧长 ΔS 近似等于弦长 Δr 。此弦长就是 P 点在 Δt 时间内的线位移长度, 故 P 点的线速度 v 的大小为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = r \frac{d\theta}{dt} = r\omega \quad (1-13)$$

P 点的切向加速度 a_t 的大小为

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = r\beta \quad (1-14)$$

P 点的法向加速度 a_n 的大小为

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{r^2\omega^2}{r} = r\omega^2 \quad (1-15)$$

上面这些式子表示刚体转动时, 组成刚体的每一质点的位移、速度、切向加速度、法向加速度均与该点到转轴的垂直距离 r 成正比。刚体上不同的质点, 到转轴之距离若不同, 则其线量就不相同; 但刚体作定轴转动时, 其上各质点的角量即角位移、角速度、角加速度则都是相同的。角量是描述整个刚体转动状态的物理量。

刚体转动的运动方程和质点运动的运动方程完全相似。质点运动的运动方程为

$$v = v_0 + at, \quad S = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2aS$$

刚体转动的运动方程为

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

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\beta\theta \quad (1-16)$$

第二节 惯性系与非惯性系

一、惯性系与非惯性系

牛顿第一定律(惯性定律)不是对任何参照系都适用的。牛顿第一定律中谈到了物体静止和匀速直线运动等都必须涉及参照系问题。参照系如何选择,主要看问题的性质和研究是否方便。例如,研究物体对地面的运动时,选地球作参照系最为方便;如果研究在车厢内物体的运动时,则可选车厢为参照系。但在应用牛顿运动定律时,参照系不能任意选取。例如,在一列以加速度 $a_{\text{车对地}}$ 作直线运动的车厢里,有一个质量为 m 的小球放在光滑的桌面上,如图 1.7 所示。如果选地面为参照系,地面上的观察者得出的结论是:小球上所受合外力等于零,小球相对地面保持静止状态,符合牛顿第一定律。如果取车厢为参照系,发现这个小球虽然所受之合外力为零,但却具有向车厢内观察者加速运动的加速度 $a_{\text{球对车}} = -a_{\text{车对地}}$ 恰与 $a_{\text{车对地}}$ 等值反向。所以,对于车厢这个相对地面作加速运动的参照系,牛顿第一定律不能成立。

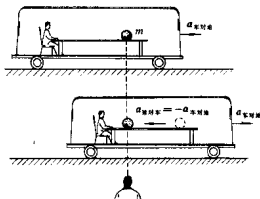


图 1.7 惯性系与非惯性系

凡是适用惯性定律的参照系叫做惯性参照系,简称惯性系(inertial system);把不适用惯性定律的参照系叫做非惯性参照系,简称非惯性系(non-inertial system)。要确定一个参照系是否是惯性系,只能依靠观察和实验。天体运动的研究证明,若选择太阳为参照系,以太阳中心为原点指向任一恒星的直线为坐标轴,则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做较好的近似惯性系。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。

较严格地说,地球相对于太阳这一惯性系并不是匀速直线运动,地球绕太阳作椭圆运动又要绕自身轴旋转,所以地球并不是一个惯性系。但如果不考虑地球的自转,而且我们所研究的是短暂时间(几秒钟、几分钟或几小时内)的运动,则可认为地球运动轨道是一直线段,就可认为地球相对于太阳作匀速直线运动,而可以把地球看做为惯性系。在此前提

下,凡相对于地球静止或匀速直线运动的参照系也是惯性系,而相对于地球有速度变化、作变速运动的参照系就是非惯性系。

二、惯性力和非惯性系中的力学定律

如图 1.7 所示,当列车突然以 $a_{\text{车对地}}$ 的加速度向右加速时,则列车成为非惯性系,车内的观察者会发现,车内光滑桌面上的小球会以与车加速方向相反的加速度 $a_{\text{球对车}} (= -a_{\text{车对地}})$ 沿桌面向左运动。当球从以地面为参照系变换到以车为参照系时,按矢量变换法则有

$$a_{\text{球对地}} = a_{\text{球对车}} + a_{\text{车对地}}$$

上式反映了惯性系(地球)与非惯性系(加速行进的列车)间的联络,一般地可表示成

$$a_{\text{物对惯}} = a_{\text{物对非}} + a_{\text{非对惯}} \quad (1-17)$$

在上例中,设物体(小球)的质量是 m ,则由上式可得

$$ma_{\text{物对惯}} = ma_{\text{物对非}} + ma_{\text{非对惯}}$$

所以

$$ma_{\text{物对惯}} - ma_{\text{非对惯}} = ma_{\text{物对非}}$$

上式左边第一项是在惯性系中据牛顿第二定律,作用在物体上的合外力 $F_{\text{非}} = ma_{\text{物对惯}}$ 。第二项是在非惯性系中引入一个假想力 $f = -ma_{\text{非对惯}}$ 作用在物体上,该假想力是在非惯性系中引出来的,故称为惯性力(inertial force),上式可写成

$$F_{\text{非}} + f = ma_{\text{物对非}} \quad (1-18)$$

此式就是非惯性系中的力学定律,是在非惯性系中引用牛顿运动方程的数学表示式。该式右边的 $a_{\text{物对非}}$ 是物体相对于非惯性系的加速度。由式(1-18)知,力的含义推广了,力有两种:一种是实际的相互作用力,无论在惯性系或是在非惯性系中都是存在的,用 $F_{\text{非}}$ 来表示。另一种是惯性力 $f = -ma_{\text{非对惯}}$,是仅对于非惯性系来说的,其大小等于在非惯性系中物体的质量与非惯性系相对于惯性系的加速度 $a_{\text{非对惯}}$ 的乘积,惯性力的方向则与此加速度的方向相反。这是站在非惯性系立场上的观察者,设想的假想力,用来解释非惯性系中的物体相对于非惯性系产生加速度 $a_{\text{物对非}}$ 这一现象,是人为增加的一个力,没有施力者,它与物体间相互作用力不同,一切相互作用力都有“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。因此,在非惯性系中分析物体受力情况时,除了考虑物体实际受到的力外,还要另加一个与非惯性系相对于惯性系所产生的加速度 a 方向相反的惯性力,才能列出运动方程;而在惯性系中分析物体受力情况时,就切勿再加上一个惯性力。

例 1.1 设有一质量为 60 kg 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 以加速上升或下降的升降机这一非惯性参照系进行分析。人体所受的重力 mg , 方向向下,磅秤支承力 N 方向向上,所有力的方向以向上为正,向下为负。磅秤的支承力亦即磅秤的读数。

(1) 升降机以加速度 a 上升时,则惯性力 $f = ma$ 方向向下。因人立在升降机上相对静止,故入对机之加速度 $a_{\text{物对非}} = 0$,据式(1-18)有

— 10 —