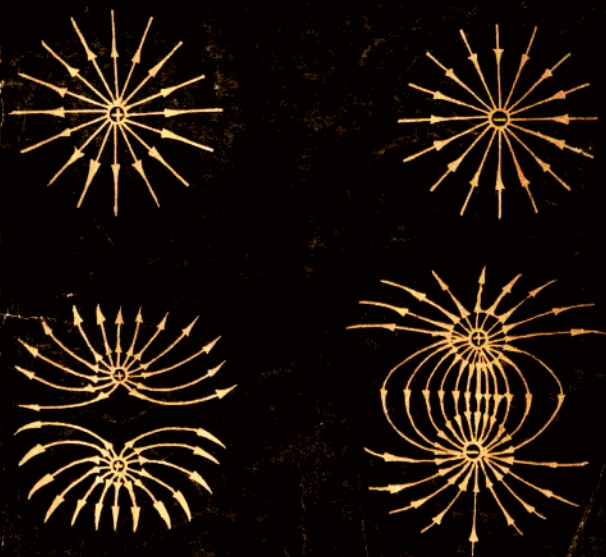


全国高等林业院校试用教材

大学物理

刘德祖 编



中国林业出版社

《大学物理》简介

《大学物理》是根据农林高等院校生物类专业物理教学基本要求和有关教学大纲编写的，曾经20多所农林高等院校试用，得到好评。这次修订出版，由北京农业大学李崇慈教授主审。内容包括力、热、电、光和近代物理等基本内容，并按生物类专业特点有所侧重，并结合有关实际，对近代物理和物理新技术在农林等科技上的应用作了适当介绍。讲授学时为80学时。适用于农、林、牧、水产等农林专业作为物理教材，也适用于医科、师范等生物类专业。对农林科技人员和其他自学进修者也是一本较好的参考书。

前 言

本教材系根据高等农、林院校物理教学基本要求和有关教学大纲编写，并以原有教材第一版和再版为基础，参照几届使用情况进行了修订。可作农、林、牧、水产和医科、师范等院校生物类有关专业的物理教材，也可供其他院校师生和农林科技人员参考。

为了提高教材的适用性，编写时注意了加强基础，精选内容，结合专业，逐步更新，利于教学等几个方面。教材在注意物理学的系统性和科学性前提下，避免了和中学内容不必要的重复，适当提高起点和要求。教材既注重基本概念，基本理论的阐述，又考虑生物类学科和农林专业的特点，在内容上有所侧重，并对近代物理知识和物理新技术在农林科技中的应用作了适当介绍。书中有适量的例题和习题。

考虑到各校物理教学的实际情况，本教材是按讲授80学时编写的。其中标有*号和小字排印的内容可供教学时选择，或供同学作为阅读材料。使用本教材宜根据学时情况和基本要求、教学大纲适当取舍，讲授时该详则详，该简则简，该不讲则不讲，注意加强自学环节，引导学生进行适当自学。

此教材的编写出版，与兄弟院校鼓励和支持是分不开的。中南林学院、西南林学院、福建林学院、广西农学院林学院分院、山西农大、山西师大、江西农大、河南农大、内蒙古农牧学院、北京农学院、华南热作学院、云南农大、西藏农牧学院、湛江农专、西昌农专、张家口农专等院校给我们很大支持。在此，谨表谢忱。

本教材由北京农业大学李崇慈教授主审，编写中得到杭州大学田志伟教授、王锦光教授和西北林学院李炽副教授、南京农业大学唐玄之副教授的鼓励和指导。对此，谨向他们表示谢意。

由于编者水平所限，教材中难免会有欠妥之处，敬请使用本教材的老师和同学给予指正。

编者

1988年12月

36454/62

目 录

绪 论	(1)
第一章 力学的物理基础	(2)
§ 1 牛顿运动定律	(2)
§ 2 牛顿定律的适用范围	(5)
§ 3 刚体的平动和转动	(11)
§ 4 刚体的转动动能、转动惯量	(15)
§ 5 力矩、力矩的功	(19)
§ 6 转动定律	(21)
§ 7 角动量原理、角动量守恒定律	(24)
习题	(27)
第二章 振动与波动	(31)
§ 1 谐振动	(31)
§ 2 描述谐振动的物理量	(34)
§ 3 谐振动的能量	(40)
§ 4 振动的合成和分解	(42)
§ 5 机械波的产生和传播	(48)
§ 6 描写波动的物理量	(50)
§ 7 波动方程	(51)
§ 8 波动能量 能流和能流密度	(56)
§ 9 惠更斯原理	(60)
§ 10 波的叠加原理 波的干涉	(62)
§ 11 声波 超声波	(66)
• § 12 多普勒效应	(70)
习题	(72)
第三章 流体的运动	(77)
§ 1 理想流体的稳定流动 连续性方程	(77)
§ 2 伯努利方程及其应用	(79)
§ 3 粘滞性 实际流体的流动	(85)
§ 4 泊肃叶定律 斯托克斯定律	(89)
习题	(92)
第四章 分子物理	(95)
§ 1 分子运动论的基本概念	(95)
§ 2 气体状态的描述 理想气体状态方程	(97)
§ 3 理想气体的压强公式	(100)
§ 4 理想气体分子平均平动动能与温度的关系	(103)

§ 5	气体分子速率的统计分布规律	(105)
§ 6	能量按自由度均分原理 理想气体的内能	(111)
§ 7	分子的平均碰撞次数及平均自由程	(115)
§ 8	真实气体 范德瓦耳斯方程	(117)
§ 9	气体的内迁移现象	(120)
§ 10	液体的结构 表面张力	(124)
§ 11	弯曲液面的附加压强	(128)
§ 12	润湿和不润湿 毛细现象	(131)
§ 13	弯曲液面外的饱和蒸汽压	(138)
§ 14	渗透压	(141)
§ 15	固体 液晶	(142)
习题		(146)
第五章 热力学基础		(149)
§ 1	功 热量 内能	(149)
§ 2	热力学第一定律	(150)
§ 3	热力学第一定律对于理想气体等值过程的应用	(152)
§ 4	气体的热容量	(155)
§ 5	绝热过程	(158)
§ 6	循环过程 卡诺循环	(162)
§ 7	热力学第二定律	(168)
§ 8	可逆和不可逆过程 卡诺定理	(170)
§ 9	热力学第二定律的统计意义	(172)
§ 10	熵 熵增加原理	(174)
§ 11	热力学函数	(181)
§ 12	生命系统的热力学问题	(183)
习题		(190)
第六章 静电学		(194)
§ 1	库仑定律	(194)
§ 2	电场 电场强度	(195)
§ 3	电通量 高斯定理	(199)
§ 4	静电场力所作的功 电势	(206)
§ 5	等势面 场强与电势的关系	(211)
§ 6	电容器的电容	(213)
§ 7	静电场中的导体	(216)
§ 8	电介质的极化 电介质中的场强	(217)
§ 9	电场的能量	(221)
习题		(224)
第七章 稳恒电流		(228)
§ 1	电源 电动势	(228)
§ 2	闭合电路和一段含源电路的欧姆定律	(231)
§ 3	基尔霍夫定律	(233)

§ 4 接触电势差 温差电现象	(237)
• § 5 能斯特电势 生物电势	(242)
• § 6 非电量电测法简介	(245)
习题	(247)
第八章 电磁学	(249)
§ 1 磁感应强度 磁通量	(249)
§ 2 毕奥-沙伐-拉普拉斯定律	(251)
§ 3 安培环路定律	(257)
§ 4 磁场对运动电荷的作用——洛伦兹力	(260)
§ 5 磁场对载流导线的作用	(266)
§ 6 电磁感应定律	(269)
§ 7 磁场的能量	(275)
§ 8 电磁波 电磁波谱	(277)
习题	(285)
第九章 光学和色变学基础	(290)
§ 1 辐射通量 视觉灵敏度	(290)
§ 2 光通量 发光强度	(293)
§ 3 照度 照度定律	(297)
§ 4 面光源的光亮度	(299)
• § 5 电光源简介	(302)
§ 6 颜色的感觉	(303)
§ 7 颜色的分类和特性	(304)
§ 8 颜色环 颜色相加原理	(306)
§ 9 颜色相减原理 染料染料等的颜色	(308)
• § 10 彩色摄影简介	(309)
习题	(311)
第十章 光的波动性	(313)
§ 1 光的干涉	(314)
§ 2 光程 薄膜干涉	(320)
§ 3 劈尖的干涉 牛顿环	(323)
§ 4 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	(327)
§ 5 单缝衍射	(328)
§ 6 光栅衍射	(331)
§ 7 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(335)
• § 8 X射线: X射线的衍射	(339)
§ 9 光的偏振 偏振片	(343)
§ 10 双折射 偏振棱镜	(346)
§ 11 马吕斯定律 旋光现象	(348)
• § 12 偏振光的干涉 圆二色性	(352)
习题	(354)
第十一章 光的量子性	(358)

§ 1 热辐射	(358)
• § 2 光的吸收 光的散射	(359)
§ 3 基尔霍夫热辐射定律	(364)
§ 4 绝对黑体的辐射定律 普朗克的量子假设	(366)
§ 5 光电效应	(370)
§ 6 爱因斯坦光电效应方程 光子	(372)
• § 7 光电效应的应用	(376)
习题	(378)
第十二章 量子力学初步	(380)
§ 1 德布罗意波 电子衍射	(380)
§ 2 测不准关系	(385)
§ 3 波函数 薛定谔方程	(387)
• § 4 一维无限深势阱 线性谐振子	(391)
§ 5 氢原子的量子条件 电子自旋	(395)
• § 6 量子生物学的基本方法简介	(401)
§ 7 原子光谱	(402)
§ 8 分子光谱	(407)
§ 9 荧光与磷光	(413)
§ 10 激光	(414)
习题	(420)
• 第十三章 原子核和放射性	(422)
§ 1 原子核的结构	(422)
§ 2 原子核的自旋和磁矩 核磁共振	(424)
§ 3 原子核的结合能	(428)
§ 4 原子核衰变的类型	(430)
§ 5 核衰变规律	(433)
§ 6 放射线与物质的相互作用	(436)
§ 7 放射性的探测	(439)
§ 8 电离辐射剂量及其单位	(441)
§ 9 放射性同位素在农林方面的应用	(443)
§ 10 基本粒子	(446)
习题	(450)
附 录	(451)
附录一 矢量的标积和矢积	(451)
附录二 量纲	(452)
附录三 国际单位制 (SI)	(453)
附录四 希腊字母	(453)
附录五 基本物理常数	(454)
附录六 物理问题的分析方法简介	(454)
附录七 习题答案	(457)
参考文献	(466)

绪 论

物理学所研究的是物质最基本、最普遍的运动形式，包括机械运动、分子热运动、电磁运动、微观粒子的运动等，这些运动普遍存在于自然界。其它高级的、复杂的运动形式（如化学过程、生物过程等）之中也普遍存在着这些运动。因此，物理学所研究的规律具有极大的普遍性。不仅如此，对物质运动建立必要的物理概念和物理图象，了解物理学对自然现象的定量研究方法（包括实验方法）和理论体系建立的过程，对各学科都有重要借鉴作用。

物理学不仅是研究其他自然科学的重要基础，而且和工程技术、农林科学技术等有着十分密切的关系。物理学与农林科学技术的关系有以下几个方面：

1. 物理学的概念、原理和方法对研究农林等生物类学科关系十分密切。例如分子物理、热力学、光学等基本原理，对学习和研究生理、生态、气象、土壤、遗传育种、农林机械等学科都十分重要。

2. 物理学是一门以实验为基础的学科，许多实验仪器和实验手段都在农林科学技术中得到广泛应用。例如电学和光学仪器等。

3. 现代物理新技术正在越来越多的渗入农林等生物学科，使农林科学技术有极大的发展。例如电子技术、超声技术、X射线技术、红外遥感技术、微波技术、激光、光谱技术、放射性同位素、核磁共振方法等。

4. 随着科学的发展，生物学与物理学正在紧密结合和互相渗透，从而产生一系列新兴学科，例如生物物理学、分子生物学、分子遗传学、量子生物学等。这些学科一方面是不断向微观世界探索，另一方面实验方法和手段的更趋现代化。要提高农林科学技术水平，必须研究和掌握这些现代生物学的理论和实验技术。为此，必须具备坚实的物理学知识。

物理学的内容十分丰富，不同专业对物理学内容的要求有所不同。例如：多数工科专业对力学和电学的要求较高，而农林专业和某些工科专业按专业特点，对热学和光学的要求较高。因此，物理学对农林专业与工科专业都是重要基础课，不同专业对物理学的要求只有侧重点的不同，没有重要与不重要的区分。所以，我们必须重视物理的学习，通过学习，使我们能够比较牢固地掌握物理学的基本概念、基本原理和基本方法，对支配自然界（小到微观粒子，大到宇宙）的基本规律有较好的理解，并学到在农林等生物科学中的应用有重要作用的一些知识，同时，在实验能力和分析解决问题能力等方面受到必要的训练，为学好专业和适应科学技术发展的需要打下必要的物理基础。

第一章 力学的物理基础

牛顿 (Newton) 运动定律是质点运动的基本定律, 由牛顿运动定律可导出刚体转动、振动与波动、流体运动等机械运动形态的客观规律, 从而建立起整个经典力学体系。

在研究机械运动时, 如果物体的线度和形状在所研究的现象中不起作用, 或所起作用可以忽略不计, 我们就可近似地把物体看作是一个质量集中在一点的理想物体, 称为质点, 并用质点的运动描述整个物体的运动。例如, 研究地球绕太阳的公转, 由于地球直径较之公转运动的轨道直径要小得多, 因此地球的各点相对于太阳的运动基本上可视为是相同的, 也就是说, 可以忽略地球的线度和形状把地球当作一个质点。但是, 研究地球的自转时, 地球上各点的运动情况就大不相同, 这时就不能再把地球当作一个质点处理了。当所研究的运动物体不能视为一个质点时, 我们可把整个物体看作许多质点所组成, 分析这些质点的运动, 从而弄清整个物体的运动。

本章在简要讨论牛顿运动定律及其适用范围基础上, 进而导出刚体转动的基本规律, 下两章再导出振动与波动、流体运动的基本规律。

§ 1 牛顿运动定律

牛顿运动定律是从观察和实验中归结出来的, 定律中的“物体”是指质点而言。

第一运动定律:任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态, 直到其他物体所作用力迫使它改变这种状态为止。

第一定律告诉我们, 力是物体间的一种相互作用, 由于这种作用, 物体会改变速度, 即获得加速度。第一运动定律还指出, 任何物体都具有一种特性, 这种特性表现为物体不受外力作用时将保持其速度不变, 我们把这种特性称为物体具有惯性。

第二运动定律:物体受到外力作用时, 物体所获得加速度的大小与合外力的大小成正比, 并与物体的质量成反比, 加速度的方向与合外力的方向相同。

在国际单位制中, 第二定律可表示为:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1-1)$$

第二定律说明合外力 $\vec{F}$ 、质量 m 和加速度 $\vec{a}$ 三者的定量关系。由上式可看出, 在大小相等的外力作用下, 不同质量的物体所获加速度是不同的, 质量较大的物体获得的加速度较小, 即此物体不易改变其原有运动状态, 其惯性较大; 反之, 质量较小的物体获得的加速度较大, 其惯性较小, 因此, 物体的质量是物体惯性大小的量度。

应用第二定律应注意：1. 第二定律是说明瞬时关系的， $\vec{a}$ 表示某一时刻的瞬时加速度， $\vec{F}$ 表示物体在该时刻所受的合外力。合外力改变，加速度也同时随之改变，加速度和合外力同时存在，同时改变，同时消失。当合外力变为零时，加速度相应变为零。

2. 第二定律的数学表达式 (1-1) 是矢量式，实际应用常常用正交坐标中各轴方向的分量式

$$f_x = ma_x \quad f_y = ma_y \quad f_z = ma_z \quad (1-2)$$

3. $\vec{F}$ 是物体所受一切外力的合外力 ($\vec{F} = \sum \vec{F}_i$)，不能把 $m\vec{a}$ 误认为是外力， $\vec{F} = m\vec{a}$ 表明 $\vec{F}$ 在大小和方向上等于 $m\vec{a}$ 。

第三运动定律：当物体 A 以力 $\vec{F}_1$ 作用在物体 B 上，物体 B 也必定同时以力 $\vec{F}_2$ 作用在物体 A 上， $\vec{F}_1$ 和 $\vec{F}_2$ 在同一直线上，大小相等而方向相反 (图 1-1)。

牛顿三条运动定律有着紧密联系。第一定律和第二定律分别定性和定量地说明一物体的机械运动状态的变化与其他物体对这物体作用力的关系。第三定律说明物体间相互作用力的定量关系。由牛顿定律讨论力在持续作用物体

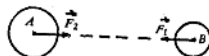


图 1-1 作用力和反作用力

时在一段时间的累积效应，可以导出动量原理和动量守恒定律；讨论力在促使物体运行一段路程中的空间的累积效应，引入功、能等概念，可导出动能原理和机械能守恒定律，从而使牛顿定律在理论上更深入，可处理更多的力学问题。应用牛顿定律分析和解决问题，首先要弄清题意，明确已知条件和求解的问题。然后要正确分析运动物体的受力情况，为此常用力的图示法，把所研究的物体从与之相联系的其他物体中“隔离”出来，把作用在此物体的力一个不漏地（也要避免多画）都画出来。其次，根据题意选择适当的坐标，由牛顿第二定律列出每一个隔离体的方程。最后，对方程求解，求解时最好用文字符号先得出结果，而后代入已知数据运算。这样，可以显示各物理量的函数关系，有助于分析讨论它们间的相互关系，既简单明了，又可避免繁复的数字运算。

【例 1】一轻而无伸缩性的细绳，一端系在质量为 m_1 的物块，物块置于光滑的水平面上，另一端跨过摩擦可忽略不计的小滑轮悬挂一质量为 m_2 的物块 (图 1-2)。求：(1) 这系统的加速度 a (2) 绳的张力 T 。

【解】由题意知滑轮和绳的质量均可不计，它们之间的摩擦力也可忽略不计，所以对两物块的拉力（即绳的张力）大小相等，我们用同一字母 T 来表示。

对平面上的物块，画出受力图，取定坐标，应用牛顿第二定律，写出 x 和 y 方向的分量式

$$T = m_1 a$$

$$N - m_1 g = 0$$

对悬挂的物块，由于绳子无伸缩性，它和平面物块的加速度大小相等，由牛顿第二定律得

$$m_2 g - T = m_2 a$$

解方程消去 T 得

$$m_2 g = (m_1 + m_2) a$$

因此, 系统的加速度是

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g$$

绳子的张力 T 是

$$T = \frac{m_2}{m_1 + m_2} m_1 g$$

〔例2〕一物体在流体中下降, 如已知它所受的阻力与该物体的速度成正比, 试求它的沉降速度?

〔解〕质量 m 的物体在重力 mg 、浮力 B 和阻力 $f = kv$ (k 为比例系数) 的作用下

在流体中自由下降是直线运动 (图1-3), 设向下方向为坐标轴正方向, 由于 $a = \frac{dv}{dt}$, 根据牛顿第二定律得

$$mg - B - kv = m \frac{dv}{dt}$$

其中 v 和 t 是变量, 分离变量得

$$\frac{dv}{mg - B - kv} = \frac{1}{m} dt$$

设 $t = 0$ 时 $v_0 = 0$ (自由下降), t 时刻速度为 v , 由积分得

$$\int_0^v \frac{dv}{mg - B - kv} = \frac{1}{m} \int_0^t dt$$

$$\text{则 } v = \frac{mg - B}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t} \right)$$

此式是沉降速度 v 随时间 t 变化的关系式, 表明 v 随 t 而增大。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 速度最大, $v_m = \frac{mg - B}{k}$, 称为极限速度。由此得:

$$v = v_m \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t} \right)$$

实际上时间不要很长, 物体沉降速度就非常接近极限速度。例如, 当 $t = 3 \frac{m}{k}$ 时, $v = 0.95 v_m$ 。

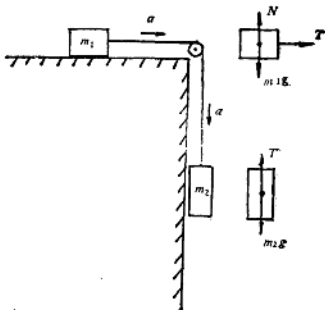


图1-2



图1-3

§ 2 牛顿定律的适用范围

一、惯性系

研究物体的运动，必须首先选定一特定物体或物体系统作为参照系。且牛顿定律并不是在任何参照系都适用的。例如在一列以加速度 $\vec{a}$ 作直线运动的车厢内，有一个质量为 m 的小球放在光滑的桌面上（图1-4），这时如选地面为参照系，得到的结论是：小球的合外力等于零，小球保持静止状态，这是符合牛顿定律的。如选车厢为参照系，这个小球虽然所受合外力为零，但具有加速度 $-\vec{a}$ ，所以对车厢这个参照系来说，牛顿定律并不成立。

我们把牛顿定律适用的参照系称为惯性参照系，简称惯性系；反之，就叫非惯性系。要决定一个参照系是不是惯性系，只能依靠观察和实验。伽里略（Galileo）在观察一个封闭的船舱内所发生的现象时，曾生动地描述道：“只要船的速度是匀速的，在这里你从一切现象中观察不出丝毫的改变，你也不能根据任何现象来判别船究竟是在运动还是停止；当你在地板上跳跃的时候，你所通过的距离和你在一静止船上跳跃所通过的距离完全相同，也就是说，并不因船的迅速运动而使得你向船尾跳时，比你向船头跳时跳得远些，虽然当你跳在空中时在你下面的地板是向背和你跳的相反方向奔驰着；当你抛一东西给你的朋友时，如果你的朋友在船头而你在船尾时，你所费的力气并不比你两个站在相反的位置时所费的力气更大；从挂在天花板上的装着水的酒杯里滴下的水滴，将垂直落在地板上，没有一滴水落向船尾方向，虽然水滴尚在空气时，船在向前走；苍蝇将继续自己的飞行，在各方面都是一样，毫不发生苍蝇好象疲惫地跟着疾驶的船而聚集在船尾方向的情形。”总之，在一个相对于惯性系（例如相对于地面）作匀速直线运动的系统里，所发生的一切力学过程，都不会受到系统作匀速直线运动的影响，它们与在惯性系中“静止”时完全一样。这一原理称为经典力学相对性原理，也叫做伽里略相对性原理。

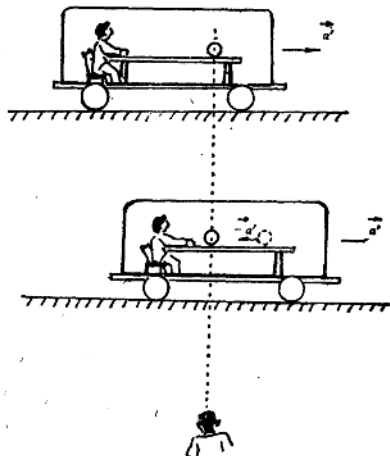


图1-4 以加速运动的车厢为参照系，牛顿定律并不适用

根据伽里略相对性原理可知，相对于一个惯性系作匀速直线运动的一切参照系都是惯

性系。根据观察和实验,太阳等恒星是惯性系,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,而对惯性系作变速运动的参照系,就不是惯性系。地球对太阳有公转和自转,也就是说地心相对于太阳以及地面相对于地心都有向心加速度,显然,地球并不是一个惯性系。不过计算表明,这些向心加速度都是极其微小的,因此在一般精确度范围内,地球或静止在地面上的任何物体都可近似看作惯性系。同样,在地面上作匀速直线运动的物体也可近似地看作惯性系,但在地面上作变速运动的物体就不能看作惯性系。

二、非惯性系中的力学定律

在非惯性系中,牛顿定律是不适用的。但可以假想非惯性系中,除相互作用所引起的力以外,还有一种由于非惯性系作为参照系而引起的力——惯性力,那末,牛顿第二定律仍然可以应用。

在(图1-4)的例子中,以加速度 $\vec{a}'$ 作匀加速直线运动的车厢里,就车厢为参照的非惯性系(车厢中的人很自然的以车厢为参照系)而言,小球以加速度 $-\vec{a}'$ 运动,车厢中的人想要应用牛顿定律来解释这一现象,他必须假想在小球上有一大小等于 $m\vec{a}'$,方向和 $\vec{a}'$ 相反的力 $\vec{F}'$ 作用着。这个假想力 $\vec{F}' = m\vec{a}'$ 就是所谓的惯性力。必须指出,惯性并非一种真实的力,它既不是由哪一个物体相互作用所引起,也不能指出它的反作用力,它实际上只不过是一种虚拟的力(尽管有时我们也说惯性力“作用”)。引入惯性力的目的在于在非惯性系中有可能应用牛顿第二定律,从而能解决非惯性系中的力学问题。而在不少情况下,以非惯性系考虑和解决问题较为简便,且有实际价值。

实际上,惯性力是惯性系(例如以地面为参照系)中物体具有惯性这一特性在非惯性系中的反映。例如,当汽车急刹车时,车上的人向前冲动,从地面的观察者来看是人继续作惯性运动的表现。而以车厢为参照系或车上的人来看,则认为受到一个向前的力,这就是惯性力。

对于其他非惯性系(例如转动系统)也同样可引入惯性力。一般来说,在非惯性系中,牛顿第二定律的数学表达式为

$$\begin{aligned}\vec{F} + \vec{F}' &= m\vec{a} \\ \vec{F} + (m\vec{a}') &= m\vec{a}\end{aligned}\quad (1-3)$$

或
式中 $\vec{F}'$ 是惯性力, $\vec{a}'$ 是非惯性系相对于惯性系的加速度, $\vec{a}$ 是物体相对于非惯性系的加速度, $\vec{F}$ 是除惯性力以外物体所受的合外力。

【例】在升降机的顶板上,用绳子悬挂着一个质量为 3kg 的物体A,升降机的初速度为 1m/s ,以匀减速下降,在 2s 钟内停止运动,试求在下降过程中绳子的张力?

【解】①在惯性系中,先求升降机下降的加速度 a' 。以地面为参照系取向上方向为 x 轴的正方向,已知初速度 $v_0 = -1\text{m/s}$,末速度 $v = 0$,所经时间 $\Delta t = 2\text{s}$,则得

$$a' = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{1}{2} = 0.5\text{m/s}^2$$

物体A受到重力 mg 和绳子的拉力 T , 如(图1-5)所示。当升降机以加速度 a' 下降时, 物体也以同样的加速度 a' 下降(a' 的方向和 v 的方向相反, 所以是匀减速运动), 应用牛顿第二定律, 可得

$$T - mg = ma'$$

即

$$T = m(g + a')$$

代入已知数据得

$$T = 30.9 \text{ N}$$

②在以升降机为参照系的非惯性系中(或在升降机内的观察者看来), 小球处于平衡状态, 因此, 小球除受重力和绳子张力 T 外, 还受惯性力 $F' = -ma'$ 。在非惯性系中, 应用牛顿第二定律应为

$$T - mg - ma' = 0$$

代入已知数据同样可得

$$T = 30.9 \text{ N}$$

三、惯性离心力

在匀角速转动的参照系中静止的物体, 由转动参照系来观察, 物体的惯性力可用(图1-6)说明。我们设想有一个圆盘, 沿圆盘半径方向有一直槽, 直槽内放一质量为 m 的小球, 并用弹簧把它连结在圆盘轴上, 当圆盘以匀角速度 ω 转动时, 小球和圆盘一起转动, 弹簧被拉长, 因此弹簧作用一个力在小球上, 这力指向圆盘中心, 这力就是小球作匀速圆周运动的向心力, 其大小 $F = m\omega^2 r$, r 为小球离中心的距离。

对于以圆盘为参照系的观察者来说, 小球是静止在圆盘上的。小球虽然受到弹簧的拉力, 但小球并未因此而向轴心运动, 由此可认为小球除受到弹簧拉力之外, 还有一个与弹簧拉力 F 大小相等、方向相反的力 F' 作用在小球上, 这个力 F' 叫做惯性离心力。它是转动系统中的观察者所设想的一个力, 它的方向是径向而离心的, 其大小和上述向心力相等。

惯性离心力在化学和生物学研究中有重要的作用, 它可以加速液体中悬浮微粒的沉淀和分离不同密度的液体。

如离心机以角速度 ω 旋转(图1-7), 容器呈水平状态旋转时, 我们以旋转的容器为参照系(为非惯性系)来分析其悬浮液中不同密度和体积的微粒运动的规律。

设一球形微粒的密度为 ρ , 体积为 V , 悬浮在密度 ρ' 的液体里。在旋转的容器中微粒受到惯性离心力 $F' = \rho V \omega^2 r$, 方向沿半径向外, 指向容器底部。微粒还受到周围液体对它的作用力 F 。为了求出 F , 可以设想把微粒从液体中取出, 让它所占的空间被液体占据, 这时占据这个空间的液体是不会发生对周围液体的相对运动的。这说明这部分液体所受周围液体对它的作用力 F 正好与它受到离心惯性力平衡, 即 $F = \rho' V \omega^2 r$, 方向指向转轴。

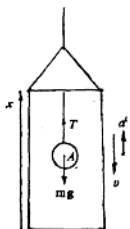


图1-5 升降机匀减速下降

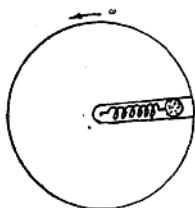


图1-6 圆盘上的观察者认为, 小球除受弹性力作用, 还有惯性离心力作用

当 $P' > P$ 时, 液中的微粒将向容器底部作加速运动, 此时微粒还将受到液体粘滞阻力 f , 由于 f 与球形微粒速度 v 和微粒半径成正比, 即 $f = k' R v$ (k' 为比例系数, 详见第三章 §3-12), 而方向与微粒运动方向相反, 指向转轴。当 P' 、 P 和 f 达到平衡时微粒将以匀速 v 向容器底部沉降。这时, 水平方向的力平衡, 即有

$$\rho V \omega^2 r - \rho' V \omega^2 r - k' R v = 0$$

则
$$v = \frac{1}{k'} (\rho - \rho') \frac{V \omega^2 r}{R}$$

可见悬浮液中不同密度和不同半径的微粒有不同的沉降速度。密度大的或半径大的粒子沉降速度大 (由于

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3, \text{ 上式中 } \frac{V}{R} = \frac{4}{3} \pi R^2), \text{ 首先沉积在容器底部, 而不同密度的粒子或半径不同的粒子将依次}$$

沉积为一系列层次。这就是离心机分离的原理。由于实际上 $\rho - \rho'$ 和 r 都不可能很大, 上式指出, 沉降速度 v 与 ω^2 成正比, 增加转速可以大大加快分离的速度。现代超速离心机转速可达每分钟几十万转, 在生物科学中常用超速离心机分离各种生物大分子。

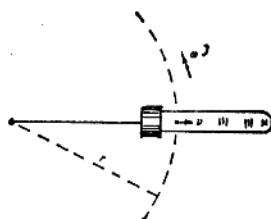


图 1-7 离心机分离原理

*四、科里奥利力

如果质点相对于转动系统不是静止不动, 而是以一径向速度运动时, 除了上述惯性离心力外, 它还受到另一种惯性力, 这种惯性力叫科里奥利力 (Coriolis force)。

假设有一光滑圆盘通过中心 O 点绕其垂直轴作逆时针方向旋转 (图 1-8)。当有一小球由圆盘中心 O 点以径向速度 v , 向 OB 方向运动时, 站在圆盘外 B 点的观察者看来 (即以惯性系为参照系), 小球保持着惯性沿 OB 作匀速直线运动, 圆盘的转动对小球运动的方向和速度大小都没有影响 (因为在光滑圆盘上)。而对于站在圆盘边缘上 A 点的观察者看来 (以转动圆盘为参照系), 当小球沿 OB 方向运动到圆盘边缘时, 站在圆盘 A 点的观察者已同圆盘一起由 A 点转动到 A' 点。在他看来小球并不是作直线运动而是作曲线运动偏移到 A 点。在他看来小球运动情况如图中虚线所示, 并认为这种偏移好像是小球在作径向运动

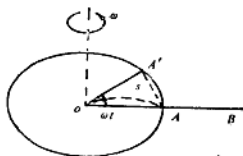


图 1-8 小球由圆盘中心向边缘运动时的科里奥利力

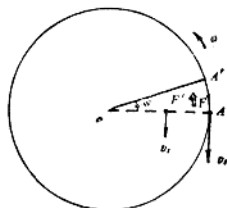


图 1-9 小球由圆盘边缘向圆盘中心运动时的科里奥利力

时, 时刻受到一个与它运动方向垂直并指向右方的力。事实上, 并无任何物体对小球产生这个力, 它只是为了用牛顿第二定律来解释所观察的现象而引进的一个假想力, 这个力就是科里奥利力。

设小球运动的径向速度为 v_r , 从 O 点出发经 t s 后到达 A 点, 则 $OA = v_r t$ 。与此同时, 圆盘以 ω 角速度在转动, t s 内转过的角度 $\angle AOA' = \omega t$ 。由圆盘上的人看来, 小球在此 t 时间内偏离距离为 S , 在 $\angle AOA'$ 不大时, S 近似等于 $\widehat{AA'}$, 则

$$S \approx \widehat{AA'} = OA \times \angle AOA' = v_r t \times \omega t = v_r \omega t^2$$

以圆盘为参照系上述偏离是由假想的惯性力所引起的。设此惯性力所引起的加速度为 a (在 ω 和 v_r 一定时 a 为恒量), 以匀加速运动公式 $S = \frac{1}{2} at^2$ 代入上式得

$$\frac{1}{2} at^2 = v_r \omega t^2$$

则得

$$a = 2v_r \omega$$

可见, 科里奥利力应为 $F' = ma = m(2v_r \omega)$, 即科里奥利力的大小与小球质量成正比, 其大小还与小球径向速度和转动角速度成正比。

上述推导是粗略的, 只有当 $t \rightarrow 0$ 时方为极限情况才精确。上述转动圆盘上如 A 点是小球任一时刻到达的某一点 (即不局限于边缘上一点), 则小球的径向位移 $r = OA = v_r t$, 对圆盘上的观察者看来, 具有切向速度和切向加速度, 其大小可直接由其切向偏移的位移 $S = v_r \omega t^2$ 求导数精确求得, 即

$$v_t = \frac{dS}{dt} = 2v_r \omega t$$

$$a_t = \frac{dv_t}{dt} = 2v_r \omega$$

切向加速度 a_t 即为科里奥利力加速度。

若小球从旋转的圆盘边缘 A 向盘心 O 作径向运动, 小球离开 OA' 的切向速度在边缘处较大, 随后逐渐减小 (图 1-9), 此切向速度减小相当于有切向加速度, 方向与切向速度方向相反。因此, 以圆盘 (或以 OA') 为参照系, 科里奥利力的方向也是指向小球前进方向的右侧。通过适当分析, 可知其科里奥利力的量值也是 $m(2v_r \omega)$ 。

生活在地球上的人和上述站在圆盘上的人很相似, 会很自然地以转动的地球表面作为参照系, 而且考虑物体相对与转动的地球表面作大范围的运动时也是如此, 也会自然地以转动的地球表面为参照系。当物体相对于地球表面有径向分速度 (与地轴垂直圆截面的径向速度), 就有相应的科里奥利力出现。例如, 北半球沿经线方向 (南北走向) 的水流, 由于科里奥利力, 河水流动偏右侧, 右侧河岸将受到较大冲刷。又如, 北半球的大气环流, 由于科里奥利力产生相应偏转, 这大气环流由赤道热空气不断上升, 两极冷空气不断给予补充形成, 在北半球地面有吹向赤道的气流, 这气流由于科里奥利力 (气象学上称地转偏向力) 偏成东北信风, 高空由赤道吹来的气流由于科里奥利力偏成西南风 (图 1-10)。

科里奥利力让人直接感觉的现象有下面一个比较直观生动的例子。在水槽 (或浴缸) 排水时, 若改

有扰动，槽内位于边缘部分的水不断向中心排水孔流去，我国位于北半球，考虑地球以 ω 角速度旋转，可以确定此水流受到逆时针方向的科里奥利力，使之一定是逆时针旋转运动。在南半球则与之相反。

五、经典力学的适用范围

以牛顿定律为基础的经典力学（包括惯性系和非惯性系）经两百多年来不断发展，成了一门理论严谨、体系完整的学科。可是二十世纪以来，发现经典力学在说明接近于光速的物体的运动以及微观粒子的运动时必须修正若干概念和定律。

1905年爱因斯坦发表相对论，建立了相对论力学。按照相对论，物体质量随其运动速度而改变，它们满足下列关系式：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1-4)$$

式中 m_0 是物体静止时的质量，叫静止质量， m 是物体以速度 v 运动时的质量， C 为光在真空中的速度（ $C = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ），这一关系的正确性已被大量实验所证实。

由上式可看出，当 $v \ll C$ 时， $m \approx m_0$ ，即物体运动速度远小于光速时，物体的质量可认为不随速度而改变，所以对一般物体运动我们可用经典力学来处理；但在物体的运动速度大到与光速可以比拟时，经典力学就不再适用。

经典力学的适用范围还有另一个方面，在经典力学中质点的运动状态可以同时用它的位置和速度来描述，这就是说，质点的位置和速度是可以同时准确测量的，并且经典力学中所指的质点是属于宏观物质，也就是由大量分子所构成的物体。但量子力学指出，对于微观物体（分子、质子、电子等微观粒子）的运动状态就不可能同时准确地测量出它的位置和速度，如果微观粒子的位置测量得越准确，则测量的速度的不准确程度就越大；反之亦然（测量仪器十分完善也如此）。这说明微观物体和宏观物体有不同的运动规律。但通常所认为极小的物体，例如质量为 10^{-18} kg 的灰尘（它实际上包含有几千亿以上数目的分子），用量子力学和经典力学研究，所得结果没有多大差别。

由上述可知，只有物体运动速度与光速可以比拟或是微观粒子时，经典力学才不适用。而当宏观物体运动速度远小于光速时，相对论力学与量子力学所得的结论和经典力学所得结论几乎是相同的，也就是说经典力学实际上是相对论力学与量子力学在这些条件下的近似理论，是它们的特例。在通常情况下，包括一般工程技术方面，经典力学是足够精确的，所以它仍有广阔的应用范围。最后还必须指出，并不是经典力学的所有概念都受这个适用

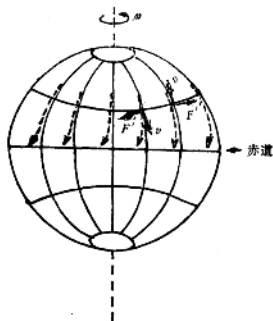


图 1-10 沿北半球经线运动的物体由于科里奥利力发生偏移的情况（粗实线表河流，虚线表东北信风）