

全国高等院校规划教材

新编大学物理演示实验

第2版

何宇红 主 编



 科学出版社



附赠光盘

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

为辅助大学物理理论课教学,延边大学物理实验教学中心在大学物理演示实验室开设了力、热、电磁和光的演示实验课,编写本书是以配合大学物理教学,提高教学质量,培养创新人才为目的,实验原理遵循知识点循序渐进的原则,逐步教授给学生,使学生通过结合演示实验教学理解和掌握实验原理。

本书共分为力学、热学、电磁学、光学和兴趣物理演示实验五个部分,它适合于普通高等院校本科生大学物理演示实验课及中学物理教学法实验研究课。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理演示实验 / 何宇红主编. — 2 版. — 北京:科学出版社,2012. 7

全国高等院校规划教材

ISBN 978-7-03-035059-6

I. 新… II. 何… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 147034 号

责任编辑:胡治国 李国红 / 责任校对:李 影

责任印制:肖 兴 / 封面设计:范璧合

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 7 月第 二 版 印张:12

2012 年 7 月第二次印刷 字数:292 000

定价:32.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学从根本上说是实验科学。任何物理学的理论都是从实验现象中抽象总结出来并要受到实验检验的。物理演示实验是大学物理课的重要组成部分,通过观察演示实验对一些比较难于理解的教学内容进行分析,从中开阔眼界、启迪思维、培养兴趣、开发智力。通过对一些具有代表性演示实验的研究,培养学生的创新能力,提高创新意识。演示实验可以帮助学生加深理解教学内容,促进学生思考,培养学生根据物理原理解决实际问题的能力。从而达到事半功倍的教学效果。

本教程主要包括了我校现在开设的绝大部分物理演示实验。书中对每个实验都作了较详细的说明,尤其是对实验原理作了详细的讲述,读者可以根据此教程对每个实验的实验目的、仪器图片、实验原理、实验步骤以及注意事项进行全面深入的了解。其中大多数实验设置了一些关于仪器制作方面的思考题和实验拓展内容,目的是为了学生的自主创新意识,提高动手能力。

目前,我们开设的演示实验有 100 个,其中力学演示实验 28 个,热学演示实验 10 个,电磁学演示实验 20 个,光学演示实验 13 个,兴趣物理演示实验 29 个。这些资源凝聚了许多教师多年的辛勤劳动和心血,特别是金大奎教授虽年过七旬,还每天辛苦工作在演示实验室,带领物理系学生积极参与仪器制作和科技创新,使演示实验室的仪器逐年增多。在此由衷地感谢张寿院长多年来对本实验室的建设、关心、支持,还有其他帮助过本实验室的校领导及物理系全体教师。

本书的编写过程中主要以本校所能开设的演示实验内容为主导,清华大学出版的《物理演示实验教程》为主要参考教程,还有吉林大学、上海交通大学、上海同济大学等部分学校的教材为辅,还有网上关于实验拓展的相关内容,在此表示感谢!

再版《新编大学物理演示实验》延续了第 1 版已有特点的同时,对部分内容做出了增补和订正,并结合教学内容和教学实际的需要制作了配套的教学光盘,供广大读者参考。

限于编者水平,本教程难免存在不足,敬请读者批评指正,不吝赐教。

编 者
2012 年 6 月

目 录

第 1 章 力学演示实验	(1)	实验 1.23 共振音叉——拍	(37)
实验 1.1 平抛与自由落体运动独立性演示	(1)	实验 1.24 锯条共振演示	(38)
实验 1.2 惯性离心力与科里奥利力演示	(2)	实验 1.25 共振耦合摆	(40)
实验 1.3 超弹性现象演示动量定理	(8)	实验 1.26 纵波演示仪	(41)
实验 1.4 球摆演示碰撞	(10)	实验 1.27 水波盘演示实验	(42)
实验 1.5 七联球碰撞演示	(10)	实验 1.28 驻波演示	(45)
实验 1.6 三联球碰撞演示	(12)	第 2 章 热学演示实验	(48)
实验 1.7 载摆小车演示动量守恒	(13)	实验 2.1 气体压强的模拟演示	(48)
实验 1.8 力学锥体上滚	(14)	实验 2.2 分子运动论演示	(49)
实验 1.9 质心运动演示	(16)	实验 2.3 观察布朗运动	(54)
实验 1.10 角速度的矢量性及其合成规律	(17)	实验 2.4 麦克斯韦速率分布率	(55)
实验 1.11 抡绳演示角动量守恒	(18)	实验 2.5 翻转式伽尔顿板	(57)
实验 1.12 离心节速器演示角动量守恒	(20)	实验 2.6 玻尔兹曼分布律	(58)
实验 1.13 茹可夫斯基转椅演示角动量守恒	(21)	实验 2.7 热效率演示	(60)
实验 1.14 转动定理演示实验	(22)	实验 2.8 热力学第二定律开尔文表述演示	(65)
实验 1.15 柱状刚体平面平行运动演示	(23)	实验 2.9 空气黏滞演示	(66)
实验 1.16 刚体的平面运动——斜面圆柱式	(25)	实验 2.10 电冰箱工作原理演示	(67)
实验 1.17 刚体的平面运动——平面轮轴式	(26)	第 3 章 电磁学演示实验	(74)
实验 1.18 滚摆	(28)	实验 3.1 点电荷电力线模拟	(74)
实验 1.19 车轮式进动及回转力矩演示	(29)	实验 3.2 尖端放电——静电轮、电风吹蜡	(75)
实验 1.20 竖直与水平弹簧振子简谐振动	(30)	实验 3.3 静电风转轮	(76)
实验 1.21 简谐振动的合成	(32)	实验 3.4 避雷针原理——尖端放电和球端放电的比较	(77)
实验 1.22 受迫振动	(34)	实验 3.5 静电跳球	(79)
		实验 3.6 静电摆——电场力	(80)
		实验 3.7 不同曲率的电场分布	(81)
		实验 3.8 静电除尘	(83)
		实验 3.9 法拉第笼	(83)
		实验 3.10 电介质极化	(84)
		实验 3.11 投影式库仑扭秤	(85)
		实验 3.12 安培力演示仪	(87)

实验 3.13 通电螺线管磁场现象 演示····· (90)	实验 5.2 小桶传球····· (140)
实验 3.14 电磁感应现象原理演示 ····· (92)	实验 5.3 旋飞球····· (141)
实验 3.15 楞次定律····· (96)	实验 5.4 瑞利球····· (143)
实验 3.16 自感现象(用小灯泡和 氖泡显示)····· (97)	实验 5.5 流体与流线演示····· (144)
实验 3.17 涡电流演示····· (100)	实验 5.6 层流的演示····· (145)
实验 3.18 磁滞回线演示实验 ····· (105)	实验 5.7 旋转液面的形状····· (146)
实验 3.19 居里点····· (108)	实验 5.8 激光多普勒效应····· (147)
实验 3.20 电磁波的发射、接收 与趋肤效应····· (109)	实验 5.9 喷水鱼洗····· (149)
第 4 章 光学演示实验 ····· (112)	实验 5.10 声波波形演示····· (150)
实验 4.1 杨氏双缝干涉····· (112)	实验 5.11 液体表面张力····· (151)
实验 4.2 肥皂膜干涉····· (114)	实验 5.12 记忆合金趣味实验 ····· (152)
实验 4.3 牛顿环····· (116)	实验 5.13 饮水鸟····· (153)
实验 4.4 单缝衍射····· (118)	实验 5.14 静电感应盘····· (156)
实验 4.5 光栅衍射····· (120)	实验 5.15 磁力演示····· (157)
实验 4.6 正交光栅衍射····· (123)	实验 5.16 带电粒子在磁场中的 偏转····· (157)
实验 4.7 几何光学演示实验—— 光在平面界面上的反射 和折射····· (125)	实验 5.17 旋转磁场演示····· (159)
实验 4.8 分辨本领概念演示 ····· (128)	实验 5.18 常温磁悬浮····· (160)
实验 4.9 偏振片的起偏和检偏 ····· (130)	实验 5.19 示波器原理演示····· (161)
实验 4.10 反射光的偏振····· (132)	实验 5.20 绝缘体转换为导体 ····· (162)
实验 4.11 色偏振演示仪····· (133)	实验 5.21 辉光盘····· (165)
实验 4.12 大气散射演示····· (135)	实验 5.22 激光光纤通信····· (166)
实验 4.13 颜色混合····· (136)	实验 5.23 黑体辐射演示····· (167)
第 5 章 兴趣物理实验 ····· (139)	实验 5.24 白光全息····· (170)
实验 5.1 混沌摆····· (139)	实验 5.25 叶片热机演示····· (171)
	实验 5.26 导光水柱····· (171)
	实验 5.27 简单自制半导体激 光器····· (173)
	实验 5.28 雅各布天梯放电实验 ····· (183)
	实验 5.29 平行板电场分布····· (185)

第 1 章 力学演示实验

实验 1.1 平抛与自由落体运动独立性演示

【实验目的】

(1) 演示在线性相互作用(力为位置和速度的线性函数)下,质点在竖直和水平两个方向运动的独立性;

(2) 物体在重力场中做平抛运动时,在两个互相垂直方向上的分运动是独立进行的,深入理解和掌握运动叠加原理。

【仪器图片】

平抛与自由落体运动演示实验装置如图 1.1.1 所示。

【实验原理】

力学是研究物体机械运动的学科。要确切地描述一个物体的运动,必须在一定的空间框架中进行讨论,这种空间框架就是参照系。物体在参照系中的位置矢量(位矢) \vec{r} 来表示,如图 1.1.2 所示。如果知道了物体

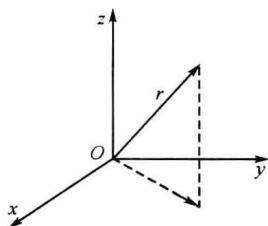


图 1.1.2 直角坐标系

任意时刻的位矢 $\vec{r}(t)$, 则可以说物体的运动规律已为我们所完全掌握,位矢 $\vec{r}(t)$ 称为物体的运动函数。与位矢 \vec{r} 相关联的是速度 \vec{v} (位矢 \vec{r} 对时间的变化率 $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$), 加速度 \vec{a} (速度 \vec{v} 对时间的变化率 $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$) 及受力 $\vec{F} = m\vec{a}$ 。任意空间矢量都可以分解成在相互正交的三个方向的分矢量,任一运动(可用 \vec{r} , \vec{v} 表示)均可分解成三个分运动。在一定条件下各分运动相互独立,即某一方向的运动不受其他方向运动的影响。根据牛顿第二定律有:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

式中, \vec{F} 为物体受的合外力。一般情况下, \vec{F} 是变力,它可能是速度 \vec{v} 的函数(如流体的阻力),也可能是位矢 \vec{r} 的函数(如弹簧的弹力、万有引力、静电力)。 \vec{F} 的具体形式将决定分运动之间是否独立,如果将 \vec{F} 的具体形式代入运动学方程后,运动方程是关于 \vec{v} , \vec{r} 线性微分方程时,方程中只有 \vec{v} , \vec{r} 及其各阶导数的一次项,动力学方程取下列形式:

$$\vec{F}_0 + a \frac{d\vec{r}}{dt} + b\vec{r} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

其中 \vec{F}_0 , a, b 均为常量,则微分方程可变成沿三个方向独立的微分方程,据此得到的分运动必然相互独立。如地球表面附近不太大的范围内, g 可看作常数,若忽略空气阻力或设

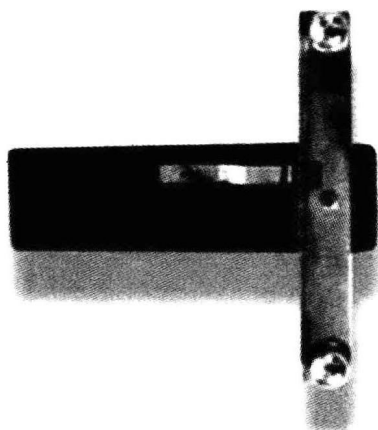


图 1.1.1 平抛与自由落体运动演示实验装置

空气阻力与速度成正比,则斜抛物体在竖直方向和水平方向的运动相互独立。再比如,若物体作斜抛运动时速度很快,空气阻力与速度的二次方成正比,即使认为 g 为常数,此时竖直方向的运动与水平方向的运动也不再独立,由此可见,运动的合成和分解是普遍的、无条件的,而运动的独立性不是运动本身的固有特征。

【实验步骤】

- (1) 如图 1.1.1 所示运动的独立性实验装置示意图,用平板托住 A、B 两个小球。
- (2) 推压簧片,使 A 球由静止自由下落,B 球有一水平初速度 v_0 ,沿抛物线下落。
- (3) 在 A、B 两球下落的高度相同情况下,A、B 两球同时落地,说明它们落地的时间相同。说明水平初速度的大小不影响竖直方向的运动。

【注意事项】

用力要轻微,以免用力过猛损坏仪器。

【思考题】

- (1) 证明:若小球运动受到的空气阻力与速度大小成正比,方向与速度相反,则运动的独立性成立。
- (2) 分析:若小球运动受到空气的阻力与其动能成正比,方向与其速度相反,则运动的独立性不成立。

实验 1.2 惯性离心力与科里奥利力演示

【实验目的】

演示惯性离心力与科里奥利力。

【仪器图片】

科里奥利力演示装置如图 1.2.1 所示。

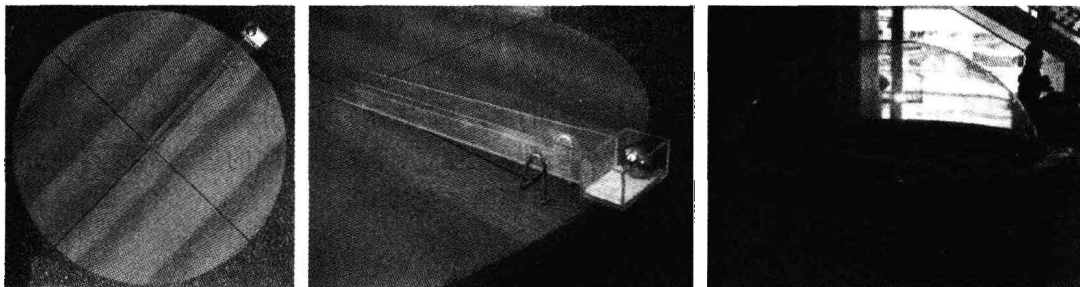


图 1.2.1 科里奥利力演示装置

【实验原理】

牛顿定律不成立的参考系统称非惯性参考系统。地球是一个颇为精确的惯性参考系统,因此相对地面有加速度的参考系统都是非惯性参考系统,在这些参考系统中牛顿第二定律不适用。如何解决相对于非惯性系统的力学问题呢?为了使非惯性系统中牛顿第二定律仍然“适用”,必须引入惯性力,这实际上是牛顿第二定律经适当修改后推广到非惯性系统中去。

1. 加速平动的参考系统中的惯性力 相对于某一惯性参考系统作加速平动的参考系

统为非惯性参考系统。设加速度为 \vec{a} (即为牵连加速度), 则非惯性参考系统中任何物体都受到一个惯性力作用, 此惯性力表为 $\vec{F}^* = -m\vec{a}$, 式中负号表示其指向与 \vec{a} 相反。

对于加速平动参考系统, 只有加上惯性力 ($-m\vec{a}$), 牛顿第二定律才“适用”。应当指出: ① 惯性力没有施力者, 也没有反作用力, 它只不过反映了参考系统不是惯性参考系统这一事实。② 对于平动加速参考系统, 所有质点普遍受到惯性力作用, 指向一律与牵连加速度 \vec{a} 相反, 其大小正比于 \vec{a} 的大小和各质点的质量。

在直线加速的非惯性系中, 质点质量与相对加速度的乘积等于作用于此质点的相互作用力和惯性力的合力。 $\sum \vec{F}_i + \vec{F}^* = m\vec{a}_{\text{相}}$, 为质点在直线加速的参考系中动力学方程。

2. 匀角速转动参考系统中的一种惯性力——惯性离心力 相对惯性参考系统做匀角速转动的系统为非惯性参考系统, 如图 1.2.2 所示。静止于匀角速转动的参考系统中的物体, 在转动参考系统中的观察者看来, 要加上一种惯性力——惯性离心力, 才能应用牛顿定律解释物体在转动参考系统中的静止状态。惯性离心力表示为: $\vec{F}^* = mr\omega^2\hat{r}$ 式中, \hat{r} 为 r 上的单位矢量。由式 $\vec{F}^* = mr\omega^2\hat{r}$ 知, 惯性离心力大小为 $mr\omega^2$, 指向为 \hat{r} 的指向。

应当区别惯性离心力和离心力。后者是真实的力, 是向心力的反作用力, 它施加于提供向心力的物体上。

3. 匀角速转动参考系统中的另一种惯性力——科里奥利力 当物体相对转动系统有速度的时候, 要使牛顿第二定律仍然“适用”, 除了附加以上所说的惯性离心力外; 还必须附加以另一种惯性力: 科里奥利力。

如图 1.2.3 所示任意一个矢量 \vec{r} 相对于旋转参考系是恒定的, 当从 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内转动的角速 $\omega\Delta t$, 其增量 $\Delta r = r\sin\theta\omega\Delta t = |\vec{\omega} \times \vec{r}| \Delta t$ 。

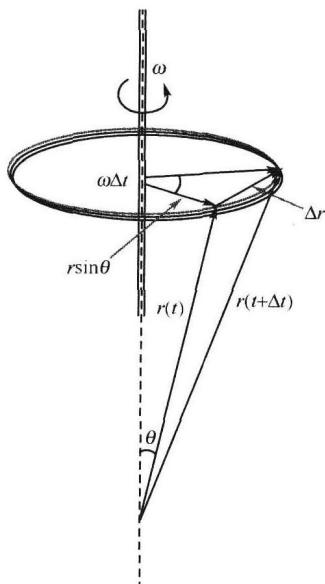


图 1.2.3 科里奥利力

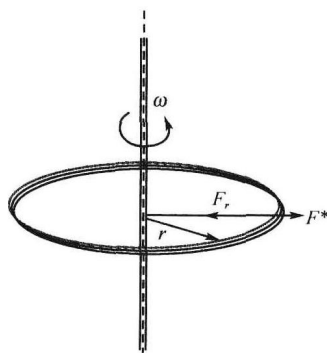


图 1.2.2 惯性离心力

$\therefore \Delta \vec{r}$ 的方向与 $\vec{\omega}$ 与 \vec{r} 都垂直, 即矢积 $\vec{\omega} \times \vec{r}$ 的方向。

$\therefore \frac{D\vec{r}}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, 式中用大写的 D 作微分, 表示

变化率是对静止系而言的, 以区别于对旋转系的微分 $\frac{d\vec{r}}{dt}$ 。如果矢量 \vec{r} 相对于旋转参考系不是恒定的, 上式中还

要加上 $\frac{d\vec{r}}{dt}$: 有 $\frac{D\vec{r}}{Dt} = \vec{\omega} \times \vec{r} + \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r} + \vec{v}$, 对此式再次取对静止系的时间导数:

$$\frac{D^2\vec{r}}{Dt^2} = \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{v} +$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2\vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{a}$$

$$\vec{A} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2\vec{\omega} \times \vec{v} + \vec{a}$$

$$\vec{a} = \vec{A} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - 2\vec{\omega} \times \vec{v}$$

式中 $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ 是质点相对于旋转系的加速度, $\vec{A} = \frac{D^2\vec{r}}{Dt^2}$

是质点相对于静止系的加速度。乘以质点的质量 m ： $m\vec{a} = m\vec{A} - m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - 2m\vec{\omega} \times \vec{v}$ 式中 $m\vec{A}$ 是由“真实”的力支持的，后面两项都是“假想”的力，惯性离心力 $\vec{F}_c^* = -m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = -m\omega^2 \vec{r}$ 和科里奥利力 $\vec{F}_k^* = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$ 。

4. 分析地球自转的科里奥利力 地球相对太阳参考系统来说，是一个转动参考系统。以地球为参考系统研究物体运动应考虑惯性力。静止于地面的物体应附加以惯性离心力，对于在地球上运动的物体，除了附加以惯性离心力外，还应附加上科里奥利力。由于地球自转角速度。很小 ($\omega = 0.73 \times 10^{-4}$ 弧度/秒)，所以惯性离心力和科里奥利力都是同数量级的微小量。地面上许多现象显示出科里奥利力的影响。河流、铁路、信风都受科里奥利力的作用，著名的傅科摆是演示科里奥利力存在的最生动的实验。

首先将运动分为纬线（速度记为 v_x ，正方向与地球自转方向相同）和经线（速度记为 v_y ，正方向自南向北），并设地球半径为 R ，地球角速度为 ω ，物体质量为 m ，纬度为 θ （北纬正值，南纬负值），一切计算忽略公转。

$$(1) \text{ 纬线方向: 若物体静止, 则其相对于太阳速度为 } v_0 = \omega R \cdot \cos\theta \quad (\text{式 1.2.1})$$

$$\text{受向心力为} \quad f_{n0} = \frac{v_0^2}{R \cdot \cos\theta \cdot m} \quad (\text{式 1.2.2})$$

又此时相对地球静止，因此所受合力即为向心力 f_{n0} ，该力与大地平行方向上的分力，即为向心力在与大地平行方向上的分力，也即 $f_{n0} \cdot \sin\theta$ 。

当物体沿纬线方向以速度 v_x 运动时，相对于太阳速度为 $v = v_0 + v_x$ ，

$$\text{受向心力为} \quad f_n' = \frac{(v_x + v_0)^2}{R \cdot \cos\theta \cdot m} \quad (\text{式 1.2.3})$$

此时所受地球的引力、支持力等合力在与大地平行方向上不变，仍为 $f_{n0} \cdot \sin\theta$ 。但向心力已变为 $f_n' \cdot \sin\theta$ 。

若以地球为非惯性参考系，则该物体受到惯性力：

$$f_n = f_n' \cdot \sin\theta - f_{n0} \cdot \sin\theta \quad (\text{式 1.2.4})$$

由式 1.2.1~式 1.2.4 得： $f_n = \frac{2v_x v_0 + v_x^2}{R \cdot \cos\theta \cdot m}$ ，又因为 $v_x \ll v_0$ ，所以

$$f \approx \frac{2v_x v_0}{R \cdot \cos\theta \cdot m \cdot \sin\theta} = 2v_x \cdot \omega \cdot m \cdot \sin\theta$$

方向与 f_n' 方向相反，即北半球向右，南半球向左。

(2) 经线方向：对纬度为 θ 的物体，其所在纬度线速度为 $v_0 = \omega R \cdot \cos\theta$ ，以 θ 为自变量，对 v_0 求得

$$dv_0 = -\omega R \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (\text{式 1.2.5})$$

$$\text{对于沿经线运动的物体, 其经线方向的角速度 } \omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{v_y}{R} \quad (\text{式 1.2.6})$$

式 1.2.6 代入式 1.2.5 得： $dv_0 = -\omega R \cdot \sin\theta \cdot d\theta = -v_y \cdot \omega \cdot \sin\theta \cdot dt$

$$\text{整理即: } a = \frac{dv_0}{dt} = -v_y \cdot \omega \cdot \sin\theta$$

又物体沿经线的速度 v 也是随地球自转转动的，加速度为 $v \cdot \omega \cdot \sin\theta$ ，证明同向心加速度，此处略。这是地球相对于物体的加速度，则物体相对于地球的加速度为 $a = 2v_y \cdot \omega \cdot \sin\theta$ 。

这就是科里奥利力产生的加速度，则科里奥利力为 $f = ma = m \cdot 2v_y \cdot \omega \cdot \sin\theta$ 。方向

与地球自转方向相同(所有变量为正值),进而推知北半球向右,南半球向左。

定性分析:越靠近赤道,线速度越大,而如果物体在纬线方向的速度保持不变,并沿经线向赤道运动时,物体的线速度就会小于地球的线速度,表面上看就是受到了地转偏向力被拉慢了,同时沿经线运动速度本身也在随地球自转改变,加速度方向与前者相同。其他情况与此同理。

(3) 综上所述:物体以速度 v 运动时 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, 受到科里奥利力 $f = m \cdot \sqrt{4v_x^2 + 4v_y^2} \cdot \omega \cdot \sin\theta = 2mv\omega \sin\theta$, 方向北半球向右,南半球向左,赤道上不受力。

【实验步骤】

- (1) 观察惯性离心力演示。
- (2) 观察并学会判断科里奥利力方向,体会科里奥利力的作用。

【思考题】

- (1) 举出生活中你遇到的科里奥利力现象。
- (2) 请说明北半球水流流向下水管时的漩涡方向为什么是如图 1.2.4 所示的那样?

【实验拓展】

旋转体系中质点的直线运动。科里奥利力(Coriolis force)是以牛顿力学为基础的。1835年,法国气象科学家科里奥利(Gaspard-Gustave Coriolis)提出,为了描述旋转体系中质点的直线运动,需要在运动方程中引入一个假想的力,这就是科里奥利力。引入科里奥利力之后,人们可以像处理惯性系中的运动方程一样简单地处理旋转体系中运动方程,大大简化了旋系的处理方式。由于人类生活的地球本身就是一个巨大的旋转体系,因而科里奥利力很快在流体运动领域取得了成功的应用。

1. 傅科摆 摆动可以看作一种往复的直线运动,在地球上的摆动会受到地球自转的影响。只要摆面方向与地球自转的角速度方向存在一定的夹角,摆面就会受到科里奥利力的影响,而产生一个与地球自转方向相反的扭矩,从而使得摆面入情人理转动。1851年法国物理学家傅科预言了这种现象的存在,并且以实验证明了这种现象,如图 1.2.5 所示,他用摆长达 67m,摆球为直径略大于 30m 的铁球,质量为 28kg,在摆垂下镶嵌了一个指针,将这个巨大的单摆悬挂在教堂穹顶,单摆振动时所画出的椭圆长轴等于 3m,摆的振动周期为 16s,而椭圆旋转的周期则为 32h。地球的自转对单摆的运动也会产生影响,单摆的振动平面将顺时针方向不断偏转。实验证实了在北半球摆面会缓缓向右旋转。傅科在巴黎的教堂第一次在历史上显示了地球的自转。

2. 柏尔定律 由于地球的自转,地球表面运动的物体都会发生运动方向的偏转。在北半球运动物体向右偏转,在南半球则向左偏转。导致地球表面运动物体方向偏转的力,叫做地转偏向力,又叫做科里奥利力,如图 1.2.6 所示。它具有以下几个特点:①这个力只改变物体的运动方向,不改变物体的运动速度;②这个力的作用方向总是与物体的运动方向垂直;③这个力的大小与物体运动的线速度成正比;④这个力的大小与纬度的正弦成正比,在赤道处为零,向两极地区逐步增大(如图 1.2.7 所示)。这个力对于地球表层环境的形成起到了非常重要的作用。由于地转偏向力的作用,导致了大气运动方向的改变,从而形成了地转风、气旋、反气旋;导致了河流、洋流、潮流运动轨迹的偏转,从而形成了北半球河流右岸的侵蚀,洋流、潮流的向右偏转。

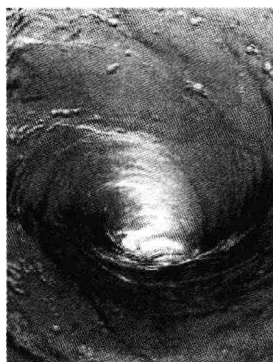


图 1.2.4 北半球水流流向下水管时的漩涡的形状

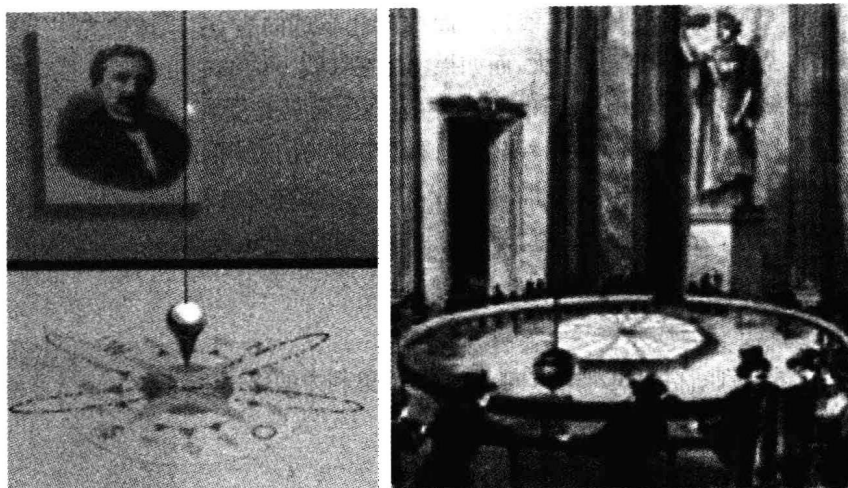


图 1.2.5 傅科摆在南半球时的运动轨迹及当时实验时实际照片

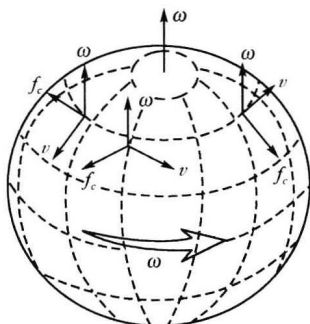


图 1.2.6 北半球的科里奥力

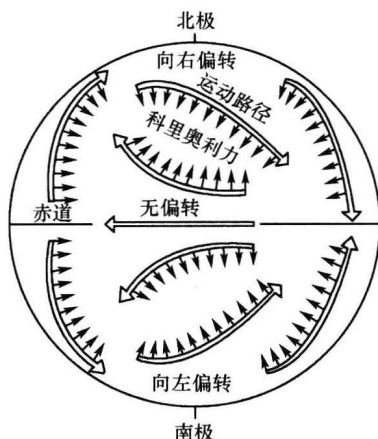


图 1.2.7 科里奥力的作用方向以小箭头表示,方向总是与空气运动的路径成直角

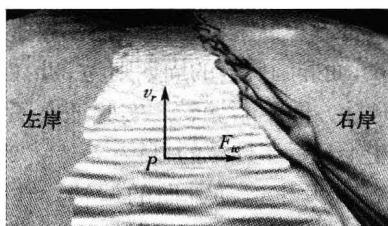


图 1.2.8 水流对右岸的冲刷

柏尔定律就是自然地理中一条著名的、从实际观察总结出来的规律,即北半球河流右岸比较陡峭,南半球则左岸比较陡峭。这可以由地转偏向力得到说明,在北半球河水在河岸间流动时由于地转偏向力的作用,河岸右侧(沿流速方向观察)与河水发生相互作用,经过长年冲刷,右岸比较陡峭而左岸是平坦的原野,如图 1.2.8 所示。

3. 大气环流 大气运动的能量来源于太阳辐射,气压梯度力是大气运动的源动力。全球共有赤道低压带,南、北半球纬度 30° 附近的副热带高压带,南、北半球纬度 60° 附近的副极地低压带,南、北半球的极地高压带等七个气压带。气压带之间在气压梯度力和地转偏向力的作用下形成了低纬环流圈、中纬环流圈和高纬环流圈。由于受地转偏向力的作用,南北向的气流却发生了东西向的偏转。北半球地面附近自北向南的气流,有朝西的偏向。在气压带之间形成了六个风带,即南、北半球的低纬信风带,南、北半球的中纬西风带,南、北半球的极地东风带,如图 1.2.9 所示。

地球北极的气温低于赤道附近的气温,尤其是冬天更为明显。地球表面温度较低处的气体将向温度较高的地方流动,因此,如果地球没有自转,北半球就经常容易形成北风。当地球自转时,流动的北风在运动过程中将受到科里奥利力的作用沿风的方向向右偏离,就会逐渐演变成东北信风。

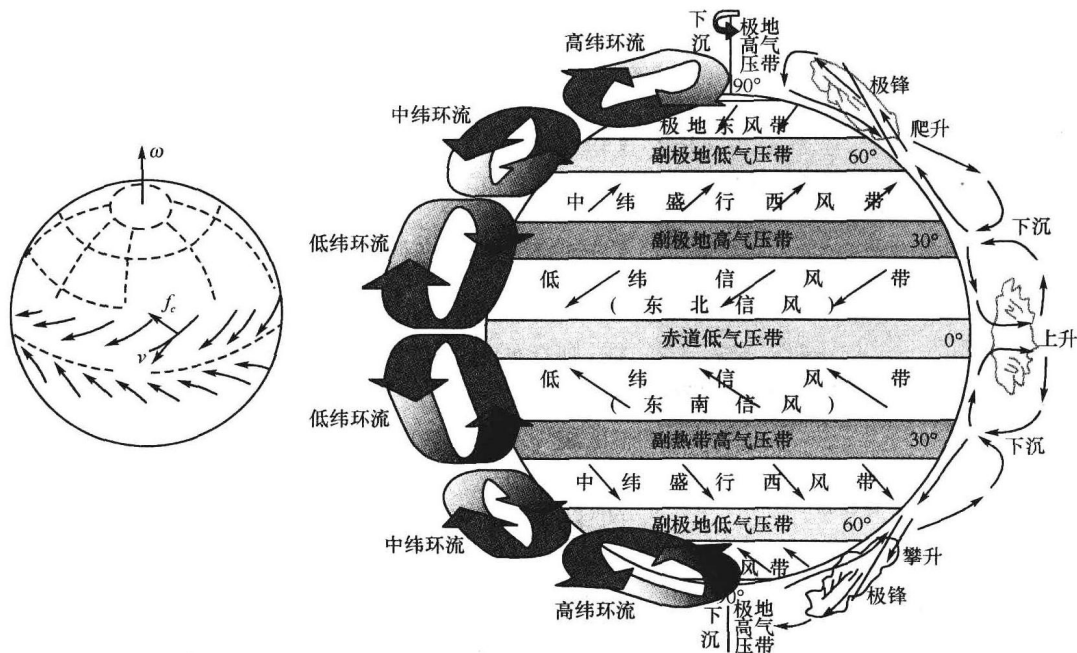


图 1.2.9 大气环流信风带

4. 气旋和反气旋 气旋与反气旋是大气中最常见的运动形式,也是影响天气变化的重要天气系统。在气压梯度力和地转偏向力的共同作用下,大气并不是径直对准低气压中心流动,也不是沿辐射方向从高压中心流出。低气压的气流在北半球向右偏转成按逆时针方向流动的大旋涡,在南半球向左转成按顺时针方向流动的大旋涡,大气的这种流动很像江河海流中水的旋涡,所以又叫气旋。夏秋季节,在我国东南沿海经常出现的台风,就是热带气旋强烈发展的一种形式。高压的气流在北半球按顺时针方向旋转流出,在南北半球按逆时针方向旋转流出,高压的这种环流系统叫反气旋,如图 1.2.10 所示。

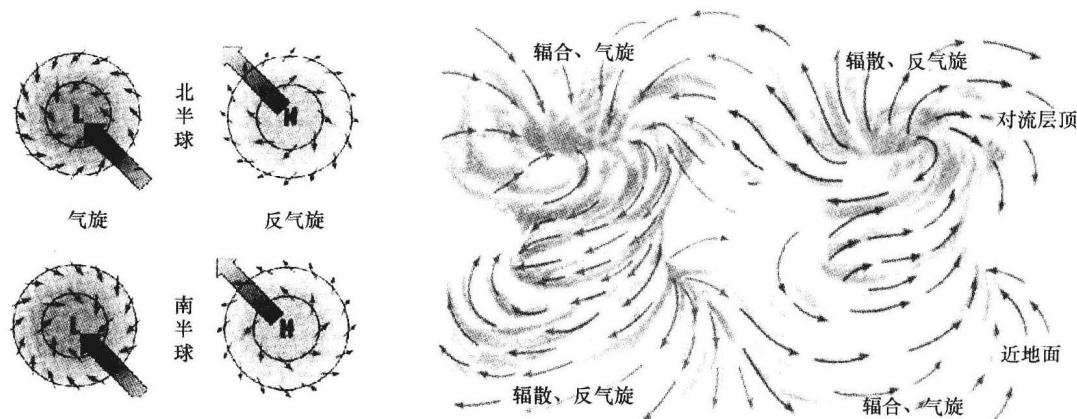


图 1.2.10 大气的辐散和辐合、气旋与反气旋及气流的辐散和辐合、气旋和反气旋的相互作用

实验 1.3 超弹性现象演示动量定理

【实验目的】

- (1) 演示三个不等质量球或多个球参与的弹性碰撞过程,加深对动量原理的理解。
- (2) 演示动量定理。

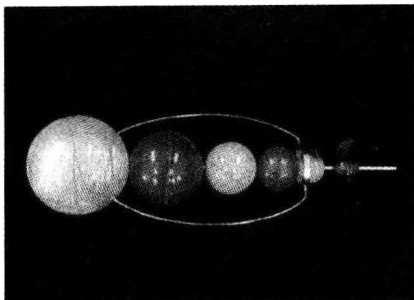


图 1.3.1 用弹力球组合的演示实验装置

【仪器图片】

用弹力球组合的演示实验装置如图 1.3.1 所示。

【实验原理】

若两球碰撞前的速度矢量都沿着两球的连心线,则在碰撞后它们的速度矢量也必然沿着两球的连心线的方向,这样的碰撞叫做“球的对心碰撞”或“正碰”。

两个球弹性正碰时,由动量能量守恒原理,较小的球的动量改变最大是其动量变化。而当有第三球介入时,较小的球将是与速度很大的较大的球相向正碰,它获得的动量改变将较两个球正碰时大得多。多球连续正碰时,效果将更加明显。

将两球视为一质点系,因外力矢量和为零,故动量也守恒。用质量分别为 m_1 和 m_2 的小球发生碰撞,撞前速度分别为 v_{10} 和 v_{20} ,撞后的速度分别为 v_1 和 v_2 ,则

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \quad (\text{式 1.3.1})$$

$$\text{由碰撞定律可知: } e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (e \text{ 叫恢复系数}) \quad (\text{式 1.3.2})$$

$$\text{将上两式联立求解得: } v_1 = v_{10} - \frac{(1+e)m(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2} \quad (\text{式 1.3.3})$$

$$v_2 = v_{20} + \frac{(1+e)m(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2} \quad (\text{式 1.3.4})$$

若 $e = 1$ 时,则即碰撞前后两球相对速度大小不发生变化的情况。这时式 1.3.2 变为

$$v_2 + v_{20} = v_1 + v_{10}$$

式 1.3.1 又可写作

$$m_2(v_2 - v_{20}) = -m_1(v_1 - v_{10})$$

将上两式相乘可得

$$\frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 = \frac{1}{2}m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{20}^2 \quad (\text{式 1.3.5})$$

碰撞前后质点系总动能不发生变化——完全弹性碰撞

解式 1.3.1 和式 1.3.5 得碰撞后的速度为

$$v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\right)v_{10} + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2}\right)v_{20}$$

$$v_2 = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right)v_{10} + \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right)v_{20}$$

(1) 若 $m_1 = m_2 = m$, $e = 1$ 时, 则 $v_1 = v_2, v_2 = v_1$ 。假设 $v_{20} = 0$, 则有 $v_1 = 0, v_2 = v_1$, 即 m_1 去碰撞静止的 m_2 , 结果 m_1 会突然停止, 而 m_2 接过 m_1 的速度前进。

$$(2) m_1 \ll m_2 \text{ 且 } v_{20} = 0 \text{ 则 } v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{10}, v_2 = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{10}$$

又因为 $m_1 \ll m_2$, 则 $v_1 \approx -v_{10}, v_2 \approx 0$ 。即 m_1 去碰撞一个质量大的 m_2 , 结果 m_1 将按原速度返回, m_2 将基本上不动。

(3) $m_1 \gg m_2$ 且 $v_{20} = 0$, 则 $v_1 \approx v_{10}, v_2 = 2v_{10}$ 。大球、小球的初动能都变成了小球返回的动能, 其返回速度将很大。

(4) 若一个球 m_1 撞向一个静止的大球 m_2 , 设 $m_2 = km_1$, 则

$$v_1 = -\frac{k-1}{k+1}v_{10}, v_2 = \frac{2}{k+1}v_{10}$$

若小球撞向相向运动的大球, 设 $v_{20} = -\beta v_{10}$, 则

$$v_1 = -\frac{k-1+2k\beta}{k+1}v_{10}, v_2 = \frac{2+(k-1)\beta}{k+1}v_{10}$$

若 $v_2 = 0$, 则 $\beta = \frac{2}{k-1}$, 则 $v_1 = -\frac{k-1}{k+1}v_{10}$ 。大球、小球的初动能都变成了小球返回的动能, 其返回速度将很大。

本实验的装置为一连串弹性球, 由上述分析可知, 超弹性的实验是利用对心碰撞中的动量守恒原理, 把一串球的动能变为一个小球的动能, 因此表现出所谓“超弹性”。

【实验步骤】

手拿冲突球上杆, 在离地面不超过 0.5m 的高度放手令其自由下落, 注意观察碰撞运动。注意小球碰撞后, 跳起极高, 切勿丢失小球。

【注意事项】

小球碰撞后跳超极高, 切勿丢失小球。

【思考题】

(1) 设本球串由直径分别为 1cm、3cm、5cm、8cm 的四个同质均匀球组成, 从 0.3m 高处自由下落, 求弹性碰撞的结果使最小球弹起的最大高度。

(2) (物理竞赛试题) 两个完全弹性球, 一个是重球, 另一个是轻球, 重球在下, 轻球在上同时离钢板高 H 处下落。重球与钢板相碰, 以原速率反弹, 那么, 轻球能够上升多高? 可以证明(略), 轻球能够上升 $9H$ 高! 这就是有名的超级球。

演示: 取一大一小两个弹性很好的球, 如市场上售的彩色半透明硅橡胶制成的实心球。大球直径 4.0cm 以上, 小球直径 2.0cm 以下。将小球放在大球的正顶部, 贴住大球。用单手拿这样配置的两个球, 从约 0.5m 高度放手, 使它们一起自由下落(也可用打足气的篮球、排球来代替大的弹性球), 如图 1.3.2 所示。

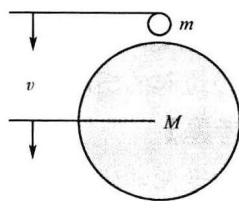


图 1.3.2 超级球

结果你看到它们落地后, 小球被反弹到 2~3m 高处。注意: 演示成功的关键是二球在落地时发生正碰。这就需要一定的熟练技巧, 要反复多练习几次。为了提高实验的成功率, 可从稍低处(0.1~0.2m)释放球。

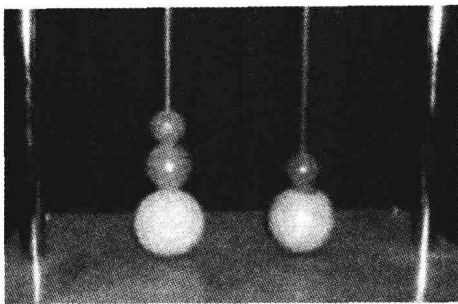


图 1.3.3 改进装置

实验改进:让细钢丝穿过两球的中轴(最好在中轴处套一小管,既减小摩擦,又保证竖直方向),装置见图 1.3.3 所示。

进一步探究:①超球能被反弹到初始高度的 9 倍,有没有违背能量守恒?如果说没有违背能量守恒,使小球增高的能量来自何处呢?②如果是三个球(一个重球,一个轻球,另一个极微小球),一起离地 H 落下,结果怎样?③如果有 n 个这样的球,情况又是如何呢?

实验 1.4 球摆演示碰撞

【实验目的】

- (1) 演示等质量弹性球的对心碰撞。
- (2) 借助球摆演示动量守恒和角动量守恒的区别及相关条件。

【仪器图片】

球摆演示实验装置如图 1.4.1 所示。

【实验原理】

根据牛顿第三定律作用力与反作用力大小相等方向相反,据此可推知在某一方向若物体绕系统所受外力为零,即使物体系内部相互作用力很大,物体系在该方向的动量也总保持守恒;可绕固定轴转动的物体系外力矩为零,物体系内部不同部件间存在较大内力,即使内力作用前后部件运动状态改变很大,其总角动量也要保持守恒。

本实验中弹性球对心碰撞的推导详见实验 1.3,参与弹性碰撞的两球质量相同时,则 $v_1 = v_2$, $v_2 = v_1$, 两球交换速度。

【实验步骤】

拉起一摆至一定高度,放手令其自由摆动与另一摆碰撞,观看碰撞前后两摆运动状态的变化。

【注意事项】

被拉起的摆球的启动高度不要太高。

【思考题】

改变两球碰撞条件(如加一块橡皮泥),使它成为非弹性碰撞。试分析对结果的影响。

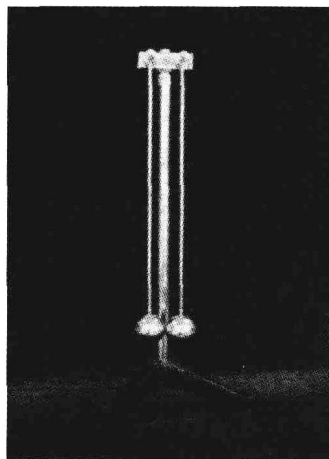


图 1.4.1 球摆演示实验装置

实验 1.5 七联球碰撞演示

【实验目的】

- (1) 演示 7 个等质量球的弹性碰撞过程,加深对动量原理的理解。

(2) 可演示弹性碰撞时能量的最大传递。可使学生对弹性碰撞过程中的动量能量变化过程有更清晰的理解。

【仪器图片】

七联球碰撞演示实验装置如图 1.5.1 所示。

【实验原理】

如果两个小球在碰撞时的相互作用力为保守力,则将满足机械能守恒定律。若碰撞过程始末势能不发生变化,即忽略势能的储存和消耗,则碰撞前后质点组动能不变。碰撞前后质点组总动能不发生变化的碰撞,叫做完全弹性碰撞。

若干个具有相同质量和半径的小球悬挂在同一高度上。当静止时,小球间恰能接触并且悬线平行。假设小球的质量均为 m ,碰撞前的速度分别为 $v_{10}, v_{20} \cdots v_{n0}$,碰撞后的速度分别为 $v_1, v_2 \cdots v_n$ 。

将一侧的小球拉起,然后释放,忽略势能的储存和消耗,则根据动量守恒,有

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 + \cdots + m_n v_n = m_1 v_{10} + m_2 v_{20} + \cdots + m_n v_{n0}$$

根据动能守恒,有

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \cdots + \frac{1}{2} m_n v_n^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 + \cdots + \frac{1}{2} m_n v_{n0}^2$$

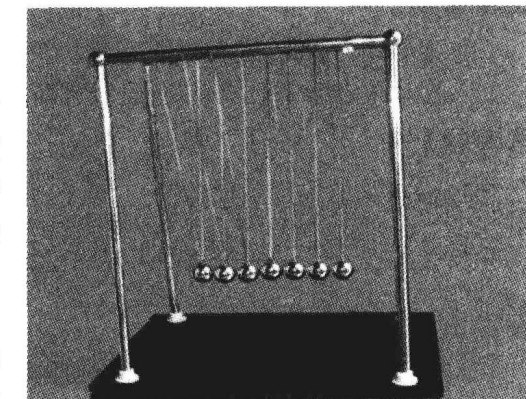


图 1.5.1 七联球碰撞演示实验装置



图 1.5.2 演示弹性碰撞动量守恒

对于多个球,并且考虑到 $v_{10} = v, v_{20}, \cdots v_{n0} = 0$,解得

$$v_n = v, v_1, \cdots v_{(n-1)} = 0$$

即,将第一个小球拉起,然后释放,让其碰撞其他静止的小球,结果原先被拉起的小球会突然静止,而原先静止的最后一个小球会接过第一个球的速度,运动到第一个小球被拉起的高度。

同理,可以拉起两个、三个...小球进行类似的实验。由动量守恒和能量守恒原理,两个等质量球弹性正碰时,它们将交换速度。七联球装置使人们自由组合联球个数,进行不同质量的交换速度碰撞的实验。如图 1.5.2 所示,观察五个小球碰撞的视频。

【实验步骤】

(1) 将仪器放置在水平桌上,拉动左侧一个球使其偏离竖直方向一定角度,松手令它与余球碰撞,观察碰撞过程。

(2) 仿上述过程,一次拉动两球、三球、多球,令它们与余球碰撞,观察碰撞过程。手拿右(或左) n 个球使偏开平衡位置,突然放手,使其与余球碰撞,观察其他球跳起的情况,并进行分析。

【注意事项】

- (1) 不要用力拉球,以免悬线断开。
- (2) 搬动仪器轻拿轻放,以免悬线震断。

【思考题】

本实验成功的关键是什么?

实验 1.6 三联球碰撞演示

【实验目的】

(1) 演示三个不等质量球参与的弹性碰撞过程,加深对动量原理的理解。

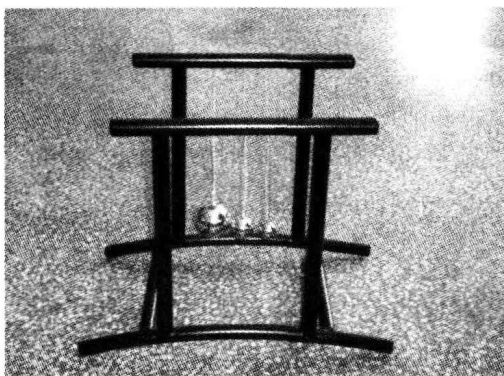


图 1.6.1 三联球碰撞演示实验装置

(2) 演示小球的超弹性碰撞,使学生深刻理解弹性碰撞的动量原理,进而理解小航天器绕过大质量天体时的弓矢效应。

(3) 演示非线性耦合产生的周期运动的同步现象。

【仪器图片】

三联球碰撞演示实验装置如图 1.6.1 所示。

【实验原理】

两个弹性的对心碰撞的推导详见实验 1.3,碰撞后的速度为:

$$v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\right)v_{10} + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2}\right)v_{20} \quad v_2 = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right)v_{10} + \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\right)v_{20}$$

如果: $m_1 \neq m_2$ 且 $v_{20} = 0$ 则 $v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}\right)v_{10}$, $v_2 = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right)v_{10}$ 。

就是当较小的质量的球 m_1 撞向静止的较大的球 m_2 时,小球 m_1 的动量改变最大时其动量改变符号(原路返回);而当小球 m_1 与迎面运动的较大质量的球 m_2 碰撞时,小球的动量改变最大时其动量改变可以大得多;而当有一中等质量的球介入大小球之间,令小球和中等质量的球一同撞向大球时,小球动量的改变将更大。小球与中等质量球的质量比例搭配合适时,两球弹性碰撞前的动能将全部或大部变为小球的动能,因此小球的动量改变较单球弹性碰撞时大得多。

若球之间的碰撞不是弹性碰撞时,即使由于摆线长度不等,周期略有差别,但最后它总趋于同步摆动。

【实验步骤】

使小球偏离平衡位置,与大树碰撞,记住其反弹摆幅的大小,再将大中二球偏开同样