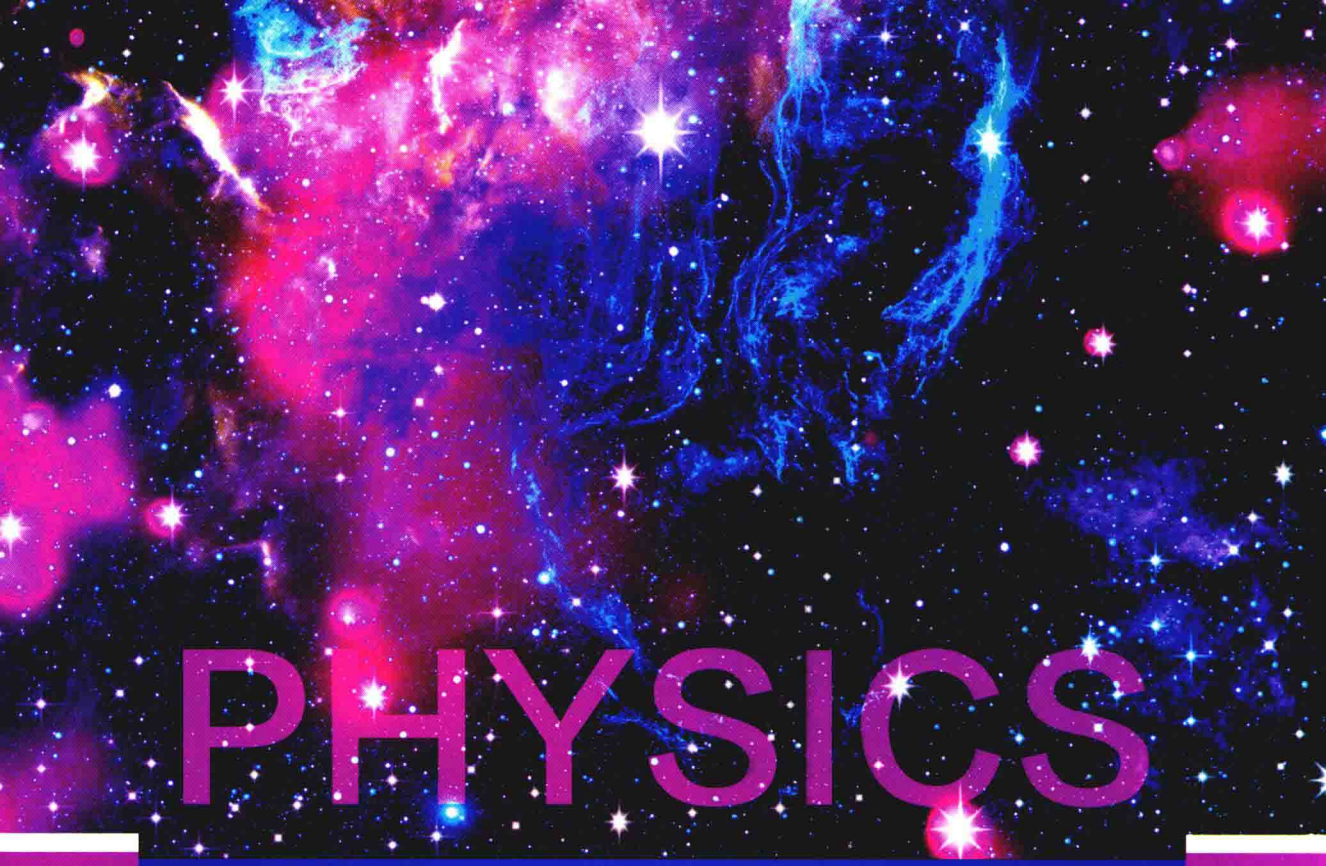

普通高等教育“十三五”规划教材

物理演示实验

Physical demonstration experiments

郎海涛 主编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

普通高等教育“十三五”规划教材

物理演示实验

主　编　郎海涛
副主编　于化惠　林　静
　　季　梅　何惠梅

机械工业出版社

本书结合新高考改革对大学和高中物理与物理实验教学提出的新要求，筛选了133个演示实验项目，对其原理、方法等进行了深入的介绍。全书共六章：第1章为力学，介绍了包括相对运动在内的21个实验；第2章为热学，介绍了包括蒸汽机工作原理在内的4个实验；第3章为电磁学，介绍了包括避雷针原理在内的33个实验；第4章为机械振动与机械波，介绍了包括孤立波在内的19个实验；第5章为光学，介绍了包括裸眼立体显示在内的45个实验；第6章为近代物理，介绍了包括辉光球原理在内的11个实验。

本书为大学实验物理教学与高中实验物理教学的教材，可作为大学、高中理论物理教学的参考书，也可作为物理科学知识普及的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

物理演示实验/郎海涛主编. —北京：机械工业出版社，2018.8
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-60356-6

Ⅰ.①物… Ⅱ.①郎… Ⅲ.①物理学－实验－高等学校－教材
Ⅳ.①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第142734号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：李永联 责任编辑：李永联 于苏华
责任校对：刘志文 封面设计：马精明
责任印制：张 博
河北鑫兆源印刷有限公司印刷
2018年8月第1版第1次印刷
184mm×260mm·11印张·211千字
标准书号：ISBN 978-7-111-60356-6
定价：39.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前言

实验是物理学的基础，是检验物理理论的标准。物理演示实验既是物理理论教学的有益补充，又兼具拓展课本知识点的作用，是当前物理教学的重要组成部分。物理演示实验能化抽象为具体，化枯燥为生动，把物理现象清楚地展现在学生面前，因此深受学生的喜爱。物理演示实验为教师进行教学工作提供了更丰富的方法和手段，通过引导学生观察，并进行思考，同时配合讲授，学生可以更好地认识物理概念和规律，达到事半功倍的效果。

本书是在总结北京化工大学物理教学实验中心演示实验室近十年建设经验的基础上，并结合北京化工大学附属中学物理教学实验平台近三年的建设成果，在深入思考和分析新高考改革对大学及高中物理和物理实验教学提出的新要求后，由两校物理及物理实验教学一线教师精心编写而成。在编写过程中，做到了延续传统并与时俱进，既汇集了经典物理演示实验的内容，又体现了物理学及新技术的最新发展。

本书由北京化工大学郎海涛教授担任主编，北京化工大学林静、何惠梅以及北京化工大学附属中学于化惠、季梅担任副主编。参加编写的还有：石洪基、徐永杰、杨洁、武思文、陶云红。

本书为大学实验物理教学与高中实验物理教学的教材，可作为大学、高中理论物理教学的参考书，也可作为物理科学知识普及的参考书。

特别感谢机械工业出版社的编辑为本书的出版所付出的努力。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有不妥之处，望读者指正。

编　者

目录

前　言

第1章　力学 …… 1

实验1.1　相对运动 …… 1
实验1.2　惯性离心力 …… 2
实验1.3　科里奥利力 …… 3
实验1.4　旋珠式科里奥利力演示 …… 5
实验1.5　傅科摆 …… 6
实验1.6　转动液体内部压强的分布 …… 7
实验1.7　水火箭 …… 9
实验1.8　弹性碰撞 …… 10
实验1.9　锥体上滚 …… 12
实验1.10　转动定律 …… 12
实验1.11　对比滚柱式转动惯量演示 …… 13
实验1.12　刚体的进动（陀螺仪） …… 14
实验1.13　茹科夫斯基凳 …… 16
实验1.14　角动量守恒转台 …… 17
实验1.15　利用直升机演示角动量守恒 …… 18
实验1.16　伯努利方程 …… 20
实验1.17　伯努利悬浮球 …… 23
实验1.18　气体流速与压强成反比 …… 24
实验1.19　飞机的升力 …… 24
实验1.20　流体的层流和湍流 …… 25
实验1.21　阿基米德螺旋汲水机 …… 26

第2章　热学 …… 28

实验2.1　双向翻转式伽尔顿板 …… 28
实验2.2　大型蒸汽机的工作原理 …… 29
实验2.3　斯特林热机 …… 30
实验2.4　外燃式高温斯特林热机 …… 32

第3章　电磁学 …… 33

实验3.1　静电跳球 …… 34
实验3.2　静电乒乓球 …… 34
实验3.3　静电除尘 …… 35
实验3.4　尖端放电吹烛、静电风滚筒和富兰克林轮 …… 36
实验3.5　避雷针的工作原理 …… 37
实验3.6　库仑扭秤 …… 38
实验3.7　雅格布天梯 …… 40
实验3.8　高压带电作业 …… 40
实验3.9　手触式蓄电池 …… 41
实验3.10　电介质对电容的影响 …… 42
实验3.11　*RC* 电路的时间常数 …… 43
实验3.12　压电效应 …… 44
实验3.13　磁力 …… 46
实验3.14　亥姆霍兹线圈 …… 47
实验3.15　地磁场水平分量的测量 …… 49
实验3.16　洛伦兹力及电子阴极射线 …… 51
实验3.17　电子束的电偏转与磁偏转 …… 53
实验3.18　电子束的电聚焦与磁聚焦 …… 55
实验3.19　温差电磁铁 …… 59
实验3.20　安培力 …… 60
实验3.21　巴比轮 …… 60
实验3.22　楞次定律 …… 61
实验3.23　涡流的热效应 …… 62
实验3.24　涡流的力学效应 …… 63
实验3.25　阻尼摆与非阻尼摆 …… 64
实验3.26　电磁驱动 …… 65
实验3.27　巴克豪森效应 …… 66
实验3.28　铁磁材料的居里点 …… 68
实验3.29　电磁炮 …… 69
实验3.30　轻功漫步 …… 70
实验3.31　三相旋转磁场 …… 70
实验3.32　脚踏发电机 …… 71
实验3.33　能量转换轮 …… 72

第4章　机械振动与机械波 …… 74

实验4.1　简谐振动与圆周运动 …… 74
实验4.2　大型蛇形摆 …… 75

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实验 4.3 共振 …… 76
实验 4.4 大型玻璃杯的共振 …… 78
实验 4.5 简谐振动的合成 拍 …… 79
实验 4.6 相互垂直的简谐振动的合成 …… 80
实验 4.7 激光李萨如图形 …… 82
实验 4.8 纵波 …… 83
实验 4.9 声波波形 …… 84
实验 4.10 声波可见 …… 85
实验 4.11 水面波 …… 86
实验 4.12 弦线上的驻波 …… 89
实验 4.13 环驻波 …… 92
实验 4.14 弹簧纵驻波 …… 93
实验 4.15 声驻波（昆特管） …… 94
实验 4.16 鱼洗 …… 95
实验 4.17 克拉尼图形 …… 95
实验 4.18 大型混沌摆 …… 96
实验 4.19 孤波 …… 97
第 5 章 光学 …… 98
实验 5.1 双曲面镜成像 …… 98
实验 5.2 同自己握手 …… 99
实验 5.3 光学幻影 …… 99
实验 5.4 窥视无穷 …… 100
实验 5.5 大型金字塔 360°幻影 …… 101
实验 5.6 光学分形 …… 102
实验 5.7 光岛 …… 103
实验 5.8 菲涅耳透镜 …… 104
实验 5.9 双缝干涉 …… 104
实验 5.10 牛顿环 …… 105
实验 5.11 台帘式皂膜 …… 107
实验 5.12 绿激光干涉综合演示 …… 108
实验 5.13 单缝夫琅禾费衍射 …… 110
实验 5.14 圆孔夫琅禾费衍射 …… 110
实验 5.15 光学仪器的分辨本领 …… 111
实验 5.16 光栅衍射 …… 113
实验 5.17 绿激光衍射综合演示 …… 114
实验 5.18 迈克耳孙干涉仪 …… 115
实验 5.19 柱面光栅立体画 …… 117
实验 5.20 光的起偏与检偏 …… 118
实验 5.21 穿墙而过 …… 120
实验 5.22 光的双折射 …… 121
实验 5.23 布儒斯特定律 …… 121
实验 5.24 反射起偏与检偏 …… 124
实验 5.25 玻片堆起偏与检偏 …… 125
实验 5.26 偏振光的干涉 …… 126
实验 5.27 光测弹性 …… 128
实验 5.28 光的偏振现象的综合演示 …… 129
实验 5.29 偏振光立体电影 …… 132
实验 5.30 旋光色散 …… 132
实验 5.31 人造火焰 …… 133
实验 5.32 海市蜃楼 …… 134
实验 5.33 光纤通信 …… 136
实验 5.34 无线光通信 …… 139
实验 5.35 全息照相 …… 141
实验 5.36 白光反射全息图 …… 143
实验 5.37 大型动态全息图 …… 144
实验 5.38 θ 调制 …… 145
实验 5.39 光学显微镜的构造和使用 …… 146
实验 5.40 天文望远镜的结构和使用 …… 150
实验 5.41 视觉暂留 …… 153
实验 5.42 扫描成像原理 …… 154
实验 5.43 普氏摆 …… 154
实验 5.44 三基色 …… 155
实验 5.45 裸眼立体电视 …… 156
第 6 章 近代物理基础 …… 158
实验 6.1 激光琴 …… 158
实验 6.2 光栅光谱 …… 159
实验 6.3 太阳电池 …… 160
实验 6.4 氢燃料电池 …… 162
实验 6.5 氢燃料电池小车 …… 164
实验 6.6 辉光球 …… 164
实验 6.7 闪电盘 …… 165
实验 6.8 大型双层 LED 彩球 …… 166
实验 6.9 彩色 LED 魔扇 …… 167
实验 6.10 悦动长廊 …… 168
实验 6.11 精准通过 …… 169
参考文献 …… 170

第 1 章

力　学

实验 1.1　相对运动

【实验目的】

通过观察小球的运动轨迹，了解运动描述的相对性，以利于更好地描述运动，研究运动。

【实验装置】

相对运动演示实验装置主要含有电源箱、轨道、小车、三挡位扳动开关等，如图 1.1-1 所示。

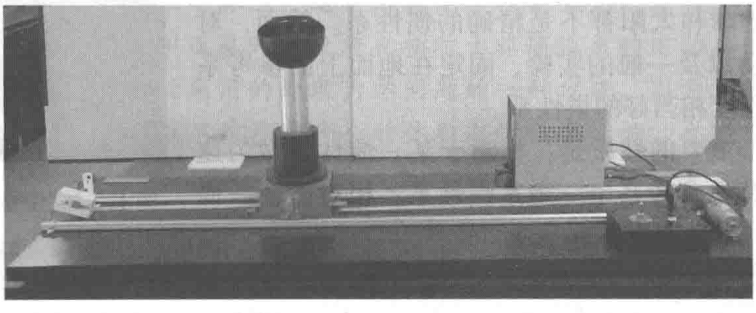

图 1.1-1　相对运动演示装置

【实验原理】

物质是运动的，运动是永恒的。世间一切物质无一不在运动。因此我们说，运动是绝对的，但运动的描述却是相对的。同一物体的同一运动，在不同参考系中的描述是不同的。比如，在相对地面运动的小车里竖直向上抛起又竖直向下落回的小球，在地面上的观察者看来，小球的运动轨迹却是一条抛物线。由于运动的描述具有相对性，这就要求我们在描述运动、研究运动时，必须指明是相对于哪个参考系的，否则，对于运动的描述是没有意义的。

【实验步骤】

1. 接通电源开关，调节电源箱面板上的电压、电流表至合适值。

2. 利用装置前端小盒上的扳动开关将小车置于轨道起始端。按下小车上圆碗里底部的弹射平台，并将小玻璃球放入其中。

3. 将三挡位扳动开关扳至运动挡，小车就会沿轨道移动。

实验 1.2　惯性离心力

【实验目的】

通过弹性圆环在快速旋转中变扁的物理现象，演示惯性离心力的存在与作用。

【实验装置】

仪器结构如图 1.2-1 所示。

相互垂直的两个圆环下端固定在电动机转轴上，上端通过一个固连着的小环套在竖直的转轴上，圆环可随电动机转动而转动。

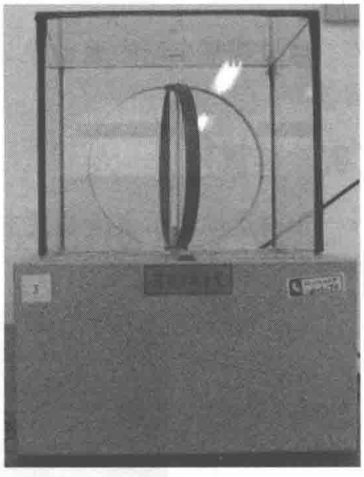

图 1.2-1　惯性离心力演示装置

【实验原理】

惯性定律（牛顿第一定律）在其中严格成立的参考系，称为惯性参考系，简称惯性系。

严格而言，地球和太阳都不是精确的惯性系。然而，对于日常所见的运动以及一般的实验，固定在地面上的参考系可以看成是近似程度相当好的惯性系。

惯性系的一个重要的性质是：相对于某一惯性系做匀速直线运动的任何其他参考系也一定是惯性系。相对于某一惯性系做加速运动的其他参考系都是非惯性系。

牛顿运动定律只在惯性系中成立。然而，在实际问题中经常需要在非惯性系中观察、研究和处理物体的运动。为了能在非惯性系中从形式上利用牛顿第二定律来分析问题和解决问题，引入惯性力这一概念，即假想在非惯性系中的物体都会受到惯性力的作用。

在平动的非惯性系中，物体所受的惯性力为

$$\boldsymbol{F}_{惯} = -m\boldsymbol{a} \tag{1.2.1}$$

式中，$\boldsymbol{a}$ 为非惯性系相对于惯性系的加速度。

在转动的非惯性系中，物体受到的惯性力为

$$\boldsymbol{F}_{惯离} = m\omega^2\boldsymbol{r} = \frac{mv^2}{r}\boldsymbol{e}_r \tag{1.2.2}$$

式中，ω 为非惯性系相对于惯性系的角速度；$\boldsymbol{e}_r$ 为矢径方向的单位矢量。正如式（1.2.2）已表明的，$\boldsymbol{F}_{惯离}$ 沿远离中心的矢径方向，所以称之为惯性离心力。

在本实验中，当按下电源开关时，电动机开始转动，圆环也随之旋转，圆环上的各部分都受到惯性离心力的作用，随着转速的加快，离心力越来越大，迫使环壁向外拉。根据上式可知，圆环上离转轴越远的部分（r 越大）受到的惯性离心力越大，加上轴对圆环底端的约束作用，使环逐渐变扁。松开按钮开关后，随着转速减小，环所受的惯性离心力也越来越小，圆环在弹性力的作用下逐渐恢复原状。

【实验步骤】

1. 按下电源开关。

2. 观察转动着的圆环。当按下电源开关时，圆环随电动机开始旋转。随着转速的加快，作用于圆环上的惯性离心力迫使环壁向外拉，圆环变扁。

3. 松开电源按钮开关，圆环将恢复原状。

【知识拓展】

惯性离心力

惯性力是一种假想力，它并不是真实的力，不是物体之间的相互作用。因此，惯性力没有反作用力，它在本质上反映了非惯性系相对于惯性系的加速运动。惯性离心力是在转动的非惯性系中物体所受到的一种惯性力。如水平放置的光滑转台上有一轻橡皮筋，其一端系在转台中心，另一端系在小球上。当转台以恒定角速度转动时，一个随转台一起转动因而相对转台静止的观察者观察到橡皮筋被拉长，因而橡皮筋以拉力作用在小球上。在这个观察者看来，小球受力后仍能保持平衡，他必然想象有一个与橡皮筋拉力大小相等、方向相反的力作用在小球上，这个力就是惯性离心力。显然，引入惯性离心力是为了在从非惯性系来看力学现象时，使质点相对于非惯性系的运动在形式上满足牛顿第二定律。这是非惯性系中所采用的处理力学问题的一种方法。因为惯性离心力不是由物体间相互作用产生的，所以不能指出哪个物体引起惯性离心力，也不可能找到它的反作用力。

实验 1.3 科里奥利力

【实验目的】

通过在转动的圆盘中运动的小球受力偏转的物理现象，了解科里奥利力的产生原因和影响。

【实验装置】

科里奥利力实验装置如图 1.3-1 所示。图 1.3-2 是其结构示意图，其中，1 为可绕通过其中心的竖直轴转动的圆盘；2 为固定在圆盘上的斜面凹槽轨道；3 为可沿斜面凹槽轨道下滚的小球；4 为支撑圆盘的支柱；5 为底座。



图 1.3-1　科里奥利力实验装置

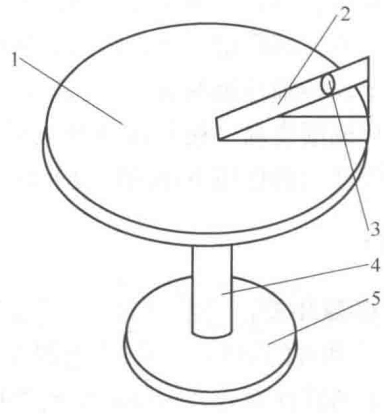

图 1.3-2　实验装置结构示意图

【实验原理】

在转动的非惯性系中，以速度 $\boldsymbol{v}$ 相对于该参考系运动的质点除了受到惯性离心力的作用（见图 1.2-1）外，还受到另外一种惯性力——科里奥利力的作用，科里奥利力的表达式为

$$\boldsymbol{F}_c = 2m\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\omega} \tag{1.3.1}$$

式中，m 为物体的质量；$\boldsymbol{\omega}$ 为转动的非惯性系相对于惯性系的角速度。

本实验以转动的圆盘为非惯性系，当小球相对于圆盘沿斜面滚下时，小球因受到科里奥利力的作用而使运动轨迹偏离直线。

【实验步骤】

1. 保持圆盘静止，使小球沿导轨下滚，小球运动的轨迹沿圆盘的直径方向，不发生任何偏离。

2. 使圆盘转动，同时释放小球从导轨顶端滚下，当滚到圆盘面上脱离导轨时，小球将偏离直径方向运动：如果从上向下看圆盘逆时针方向旋转，即圆盘角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 方向向上，则小球向前进方向的右侧偏离；如果圆盘转动方向相反，则小球将向前进方向的左侧偏离。

【知识拓展】

科里奥利力实例

由科里奥利力的表达式可以看出，无论物体向哪个方向运动，科里奥利力的方向，若在地球的北半球上，总是指向物体行进方向的右侧，如图 1.3-3 所示；若在地球的南半球上，总是指向物体行进方向的左侧。由此可以说明，为什么在北半球河流右岸被冲刷得比较严重，以及赤道附近的信风（见图 1.3-4）和北半球上的旋风的形成原因。

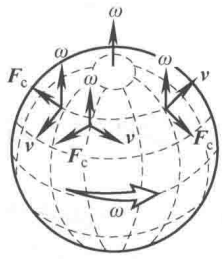

图 1.3-3 地球北半球科里奥利力的方向

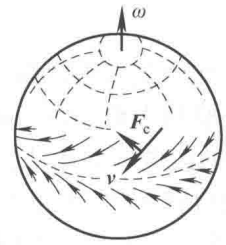

图 1.3-4 信风

实验 1.4 旋珠式科里奥利力演示

【实验目的】

利用旋珠式科里奥利力演示仪，通过在转动中旋珠所围圆平面的形变演示科里奥利力的存在。

【实验装置】

主要由底座、转盘、支柱、飞轮和塑料串珠组成，如图 1.4-1 所示。

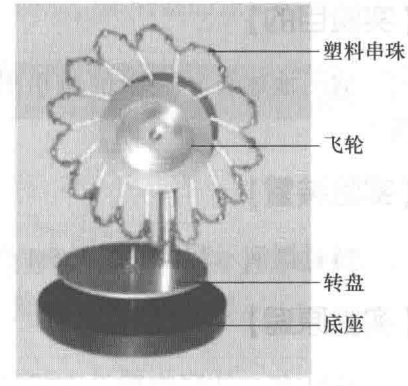

图 1.4-1 旋珠式科里奥利力演示仪

【实验原理】

科里奥利力是由法国气象学家科里奥利在 1835 年提出的，是为了描述旋转的非惯性系的运动而引入的一个假想力。科里奥利力不只与非惯性系相对于惯性系的转动有关，还与物体相对于转动的非惯性系的运动相关，其表达式为

$$\boldsymbol{F}=2m\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{\omega} \qquad (1.4.1)$$

式中，$\boldsymbol{F}$ 为科里奥利力；$\boldsymbol{v}$ 为质点相对于转动非惯性系运动的线速度；$\boldsymbol{\omega}$ 为转动的非惯性系相对于惯性系的角速度。

在本实验中，塑料串珠所围的平面发生形变、偏离平面的原因，是因为塑料串珠受到了科里奥利力的作用。取四个特殊位置（上、下、左、右）的珠子来判断串珠的运动变化。假设转盘是逆时针转动，即非惯性系的转动角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 的方向竖直向上，若飞轮绕自转轴在纸平面内的转动也是逆时针的，此时四个位置上的珠子相对于飞轮（非惯性系）的线速度 $\boldsymbol{v}$ 如图 1.4-2 中所示，则可以判断出：左、右两颗珠子所受的科里奥利力为零；上面的珠子受到的科里奥利力的大小为 $\boldsymbol{F}=2mv\omega$，方向垂直纸面向内，从而该位置上的串珠垂直纸面由外向内偏移（向后仰）；下面的珠子也受到同样大小的科里奥利力，方向却是垂直纸面向外，从而该位置上的串珠垂直纸面由内向外偏移（向前伸）。全部塑料串珠旋转所围的平面变形。

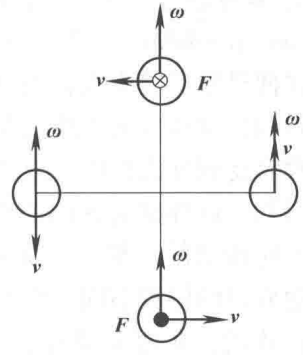

图 1.4-2 四个位置处的科里奥利力

需要全本请访问 www.ertongbook.com

【实验步骤】

1. 一手握住底座上方的转盘，使转盘固定。

2. 另一只手驱动飞轮，使飞轮绕水平自转轴转动，可以观察到飞轮边缘上的塑料串珠都在同一竖直平面内做圆周运动，呈一朵花的形状。

3. 飞轮在绕自转轴转动的同时，驱动转盘使转盘绕支承轴转动。可以观察到塑料串珠构成的花的形状发生了改变，不同位置的串珠产生了向竖直转动平面内或外的偏移，一眼望去，串珠的边缘似乎起了波浪。

【注意事项】

1. 操作时注意安全。

2. 连接串珠的细线易断，不要拉扯串珠。

实验 1.5 傅 科 摆

【实验目的】

演示地球自转产生的科里奥利力使摆球摆动平面发生转动的现象。

【实验装置】

傅科摆演示装置如图 1.5-1 所示。

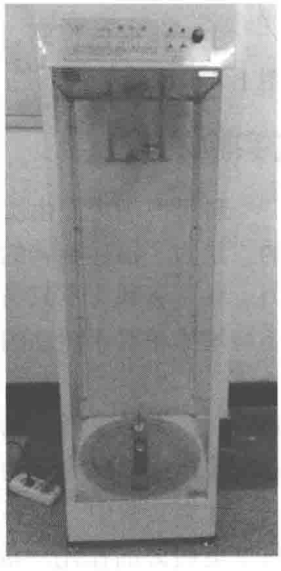

图 1.5-1 傅科摆

【实验原理】

1851 年，法国物理学家傅科（J. B. L. Foucault 1819—1868）为了证实地球的自转，在巴黎万神殿的圆拱屋顶上悬挂了一个长约 67m 的大单摆，摆锤是质量为 28kg 的铁球。尽管相对于惯性系（例如日心参考系）来说，单摆的摆动平面是保持不变的，但人们在地面上观察时却发现，傅科所悬挂的摆的摆动平面不断地在做顺时针方向的偏转，这验证了地球的自转运动。这就是著名的**傅科摆**（Foucault pendulum）。图 1.5-2 给出了傅科摆摆面轨迹的示意图。

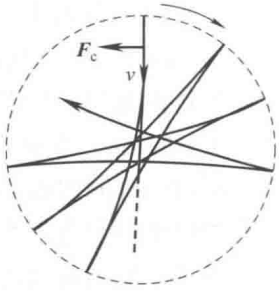

图 1.5-2 傅科摆摆面轨迹

在傅科摆实验中人们看到，摆动过程中摆动平面沿顺时针方向缓缓转动，摆动方向不断变化。分析这种现象，摆在摆动平面方向上并没有受到外力作用，按照惯性定律，摆动的空间方向不会改变，因而可知，这种摆动方向的变化，是由于观察者所在的地球沿着逆时针方向转动的结果，从而有力地证明了地球是在自西向东自转。傅科摆放置的位置不同，摆动情况也不同。在北半球时，摆动平面顺时针转动；在南半球看，摆动平面逆时针转动，而且纬度越高，转动速度越快；在赤道上的摆动平面几乎不转动。傅科摆摆动平面

偏转的角度可用公式 $\theta = 15t\sin\varphi$ 来求，θ 的单位是度。式中 φ 代表当地地理纬度；t 为偏转所用的时间，以小时为单位。由此可计算出在纬度 φ 处，傅科摆摆动平面每天转过的角度是 $2\pi\sin\varphi$ 弧度。在北京天文馆里的傅科摆摆长 10m，其摆动平面每隔 37 小时 15 分钟转动一周。根据这个关系式，可以算出北京的地理纬度就是“北纬 40 度”。

【实验步骤】

1. 实验前先调整仪器底座水平，使静止时摆球停在下圆盘中心。

2. 实验时把仪器电源打开，适当调整摆球摆幅使摆线刚好与金属环相碰，摆幅一般在下圆盘上的 4 格左右为宜。

3. 调节底盘上的定标尺，使其方向与单摆的摆动方向一致。

4. 经过一段时间（大约 1 ~ 2 小时），观察单摆的摆动面与定标尺方向的夹角（大约 10° ~ 20°）。

【注意事项】

1. 摆球摆动的幅度不能超过底盘的限定范围。

2. 在实验过程中，不要摇动仪器，此外还要避免风吹到摆上，影响摆的正常运行。

实验 1.6 转动液体内部压强的分布

【实验目的】

利用两个小球（比重分别大于和小于水的比重）在转动盘上透明管中的上升和下降来演示转动液体内部压强的变化及所受的离心力，加深对惯性离心力概念的理解。

【实验装置】

实验装置（见图 1.6-1）中的几个主要部分是：

1. 轻球（比重小于水）。

2. “V”形有机玻璃管。

3. 液体（水）。

4. 重球（比重大于水）。

5. 电动机和调压器（电压≤75V）。

6. 转盘（转动角速度可通过调压改变）。

7. 支架。



图 1.6-1 转动液体内部的压强分布演示仪

【实验原理】

图 1.6-2 表示一个水平放置的玻璃管，内部封装着密度为 ρ_0 的液体，玻璃管可以绕铅直轴（y 轴）在水平面内以角速度 ω 匀速转动，这时液体内部的压强沿 x 轴各点并不相等，其理由如下：

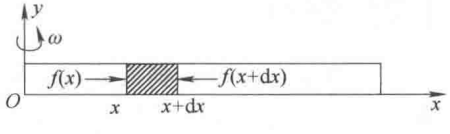

图 1.6-2 小液柱受力分析

在 x 处取一段长为 dx 的小液柱，其质量为 $\rho_0 S\mathrm{d}x$，S 为液柱截面积。小液柱两边的液体对其压力分别为 $f(x)$ 和 $f(x+\mathrm{d}x)$。以管为参考系时，小液柱静止，故有如下的平衡方程

$$f(x+dx)-f(x)=\rho_0 S\mathrm{d}x\cdot\omega^2 x$$

可以解出

$$f(x)=\frac{1}{2}\rho_0 S\omega^2 x^2$$

由此可知，在转动液体中距离转轴为 x 处的压强 $P(x)=\frac{1}{2}\rho_0\omega^2 x^2$。

若一个长度为 l、密度为 ρ 的小圆柱体放入管中，设其左端位于 x 处，则其受到的合力为

$$F_l=\left[\frac{1}{2}\rho S\omega^2(x+l)^2-\frac{1}{2}\rho S\omega^2 x^2\right]-\left[\frac{1}{2}\rho_0 S\omega^2(x+l)^2-\frac{1}{2}\rho_0 S\omega^2 x^2\right]$$

$$=\frac{1}{2}(\rho-\rho_0)S\omega^2(2x+l)l$$

上式右边第一个中括号内的式子表示小圆柱体受到的总惯性离心力的大小，而第二个中括号内的式子表示液体对小圆柱体的作用力。由 F_l 表示式可知，若 $\rho>\rho_0$，则 $F_l>0$，表示合力沿 x 轴正向，小柱体将沿 x 轴正向运动而远离转轴；若 $\rho<\rho_0$，则 $F_l<0$，表示合力沿 x 轴负向，小柱体将沿 x 轴负方向运动，靠近转轴。

在本实验装置上，玻璃管不是水平的，而是向上翘起，它与水平面之间有一角度 θ，这时，液体中的球体会受到重力 mg、液体对它向上的浮力 F'、管壁的压力 F_N 以及前述的由转动引起的惯性力 F_i 的作用，如图 1.6-3 所示。

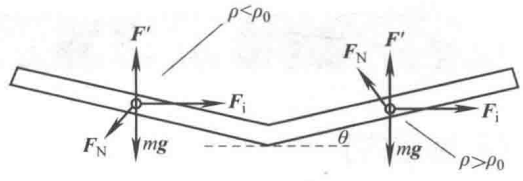

图 1.6-3　液体中的球受力分析

（1）$\rho>\rho_0$

这时，重力大于浮力，令 $G=mg-F'$，其大小不变，方向向下。该情况下重球将沿下管壁内侧运动，如图 1.6-4a 所示。若 $F_i\cos\theta>G\sin\theta$，即 $F_i>G\tan\theta$，则重球沿管壁向上运动。若 $F_i<G\tan\theta$，则重球沿管壁向下运动。由于 F_i 与球到转轴的距离和转动的角速度有关，所以可以通过调节角速度 ω 的大小来改变重球的运动。

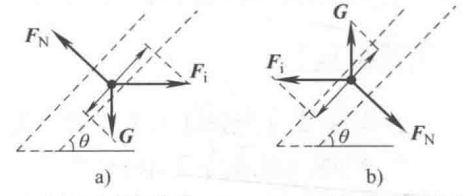

图　1.6-4

（2）$\rho<\rho_0$

在这种情况下，浮力大于重力，从而 $G=F'-mg$，方向向上，其大小也不变。而 F_i 的方向指向转轴，轻球将沿上管壁内侧运动，受力情况如图 1.6-4b 所示。若 $F_i\cos\theta>G\sin\theta$，即 $F_i>G\tan\theta$，则轻球沿管壁向下运动。若 $F_i<G\tan\theta$，则轻球沿管壁向上运动。同样可以通过调节角速度 ω 的大小来改变 F_i，观察轻球的运动。

【实验步骤】

转盘静止时可看到重球在透明管的底部，轻球浮在管中的水平面上。接通电源，调节调压器，使转盘转动，并使转速逐渐加快（注意：最高只能调到 75V，否则转速太快易发生危险），可观察到重球逐渐上升，轻球逐渐下降。当深色球升到顶部后，断开电源，转盘转速

将逐渐减慢，这时可观察到两个小球做与转盘渐快时相反的运动，或可手动立即停止转盘转动，静止观察这一运动现象，从而分析转动液体内部的压强分布。

实验 1.7 水 火 箭

【实验目的】

1. 了解火箭的飞行原理和应用。
2. 加深对动量守恒定律的理解。

【实验装置】

自制的水火箭演示器，如图 1.7-1 所示。

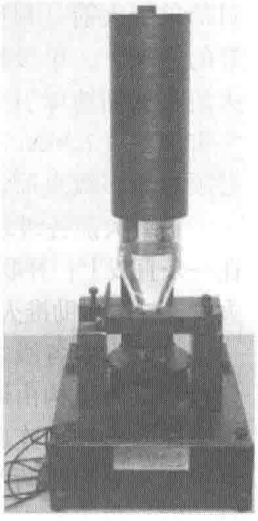

图 1.7-1 水火箭

【实验原理】

火箭是一种利用燃料燃烧后形成的热气流高速向后喷出，产生反冲推力向前运动的喷气推进装置，它自身携带燃料与助燃剂，不依赖空气中的氧助燃，因而可以在空间任何地方发动，既可在大气中、又可在外层空间飞行。火箭技术在近代有很大的发展，火箭炮以及各种各样的导弹都利用火箭发动机作动力。空间技术的发展更是以火箭技术为基础，各式各样的人造地球卫星、飞船和空间探测器都是靠火箭发动机发射来控制航向的。

火箭在飞行过程中随着火箭推进剂的消耗，其质量不断减小，是变质量飞行体。火箭的飞行原理简述如下：为简单起见，设火箭在自由空间飞行，即它不受引力或空气阻力等任何外力的影响。设某时刻 t 火箭（包括火箭体和其中尚存的燃料）的总质量为 $m_{总}$，以 v 表示此时刻火箭的速度，则此时刻系统的总动量为 $m_{总}v$（沿 x 轴正向）。此后经过 $\mathrm{d}t$ 时间，火箭喷出质量为 $\mathrm{d}m$ 的气体，其喷出速度相对于火箭体为定值 u。在 $t+\mathrm{d}t$ 时刻，火箭的速度增为 $v+\mathrm{d}v$，而系统的总动量为

$$\mathrm{d}m(v-u)+(m_{总}-\mathrm{d}m)(v+\mathrm{d}v)$$

由于喷出气体的质量 $\mathrm{d}m$ 等于火箭质量的减少，即 $-\mathrm{d}m_{总}$，所以上式可写为

$$-\mathrm{d}m_{总}(v-u)+(m_{总}+\mathrm{d}m_{总})(v+\mathrm{d}v)$$

由动量守恒定律可得

$$-\mathrm{d}m_{总}(v-u)+(m_{总}+\mathrm{d}m_{总})(v+\mathrm{d}v)=m_{总}v$$

展开此等式，略去二阶无穷小量 $\mathrm{d}m_{总}\,\mathrm{d}v$，可得

$$u\mathrm{d}m_{总}+m_{总}\,\mathrm{d}v=0 \quad 或 \quad \mathrm{d}v=-u\frac{dm_{总}}{m_{总}}$$

设火箭点火时的质量为 m_0，初速度为 v_0，发动机熄火（推进剂用完）时的质量为 m_1，达到的末速度为 v_1，对上式积分则有

$$\int_{v_0}^{v_1}\mathrm{d}v=-u\int_{m_0}^{m_1}\frac{\mathrm{d}m_{总}}{m_{总}}$$

可得

$$\Delta v = v_1 - v_0 = u\ln\frac{m_0}{m_1} \tag{1.7.1}$$

式中，$\frac{m_0}{m_1}$称为火箭的质量比。此式就是早在1903年齐奥尔科夫斯基推导出的单级火箭的理想速度公式，被称为齐奥尔科夫斯基公式。由这个公式可知，火箭在燃料燃烧后所增加的速度与发动机的喷气速度成正比，也与火箭的质量比的自然对数成正比。

即使使用性能最好的液氢液氧推进剂，发动机的喷气速度也只能达到4.3～4.4km/s。目前单级火箭（只有一个发动机的火箭叫单级火箭）的质量比可做到15。因此，在目前最好的情况下，单级火箭从静止开始可获得的末速度约为11km/s。由于实际上从地面发射时，火箭要受到地球引力和空气阻力作用，末速度只可能达到7km/s左右。这一速度小于第一宇宙速度（7.9km/s），所以用单级火箭不能把人造地球卫星或其他航天器送入太空轨道，必须采用多级火箭，以接力的方式将航天器送入太空轨道。

多级火箭各级之间的连接方式有串联、并联和串并联几种。串联就是把几枚单级火箭串联在一条直线上；并联就是把一枚较大的单级火箭放在中间，叫芯级，在它的周围捆绑多枚较小的火箭，一般叫助推火箭或助推器，即助推级；串并联式多级火箭的芯级也是一枚多级火箭。

多级火箭各级之间、火箭和有效载荷及整流罩之间，通过连接－分离机构来实现连接和分离。分离机构由爆炸螺栓（或爆炸索）和弹射装置（或小火箭）组成。平时，它们由爆炸螺栓或爆炸索连成一个整体。分离时，爆炸螺栓或爆炸索爆炸，使连接解锁，然后由弹射装置或小火箭将两部分分开，也有借助前面一级火箭发动机起动后的强大射流分开的。发射时，第一级火箭先点火，火箭即开始加速上升。等这一级火箭所储存的燃料燃烧完后，整个这一级就自动脱落，以便增大此后火箭的质量比。随着第二级点火使火箭继续加速，它的燃料用完后又自动脱落，然后又第三级点火，这样一级一级地使火箭的有效载荷不断加速而最后达到需要的速度。

我们自制的水火箭演示器是以水作为推进剂，发射时，水火箭腔内具有一定压力的空气对水施以作用力，使水高速向下喷射而出，从而使水火箭腔体获得反向推力而向上飞行。

【实验步骤】

1. 往水火箭腔内注入约1/3体积的水，然后扣好带有气嘴的顶盖儿。
2. 将水火箭腔体上的气嘴朝下，然后通过气嘴向腔内打气，至腔内具有一定的压力。
3. 将打好气的腔体安装在水火箭发射底座上，上好解锁螺栓，缠好连接螺栓的拉绳。
4. 快速拉动解锁螺栓上的绳索，使水火箭发射升空。

【注意事项】

水火箭发射后，箭体的最大上升高度可达二三十米，所以一定要在室外空地上发射。

实验1.8　弹性碰撞

【实验目的】

通过对小钢球弹性碰撞现象的演示、观察与分析，加深理解动量守恒定律和机械能守恒

定律。

【实验装置】

弹性碰撞演示装置，如图 1.8-1 所示：五个材料、质量、形状、尺寸完全相同的金属球用等长的摆线拴在水平横梁上。

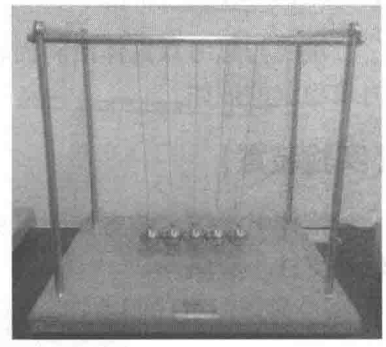

图 1.8-1 弹性碰撞演示装置

【实验原理】

碰撞，一般是指两个物体在运动中相互靠近，或发生接触时，在相对较短的时间内发生强烈相互作用的过程。碰撞会使两个物体或其中一个物体的运动状态发生明显的变化。如果两个物体发生碰撞后不再分开而以共同的速度运动，这样的碰撞称为完全非弹性碰撞。当两个物体发生碰撞时，碰撞前后两物体的总能没有损失的碰撞称为完全弹性碰撞，有时简称弹性碰撞。

设质量分别为 m_1 和 m_2 的两物体，分别以速度 $\boldsymbol{v}_{10}$ 和 $\boldsymbol{v}_{20}$ 运动，发生弹性碰撞，碰撞后的速度分别 $\boldsymbol{v}_1$ 和 $\boldsymbol{v}_2$。设 $\boldsymbol{v}_{10}$、$\boldsymbol{v}_{20}$ 和 $\boldsymbol{v}_1$、$\boldsymbol{v}_2$ 的方向均沿两物体质心连线方向（这样的碰撞称为对心碰撞或正碰撞），则由动量守恒定律可得

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2 \tag{1.8-1}$$

又由于是弹性碰撞，总动能应保持不变，可得

$$\frac{1}{2} m_1 v_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \tag{1.8-2}$$

将上述二式联立，可解得：

$$v_1 = \frac{(m_1 - m_2) v_{10} + 2 m_2 v_{20}}{m_1 + m_2} \tag{1.8-3}$$

$$v_2 = \frac{(m_2 - m_1) v_{20} + 2 m_1 v_{10}}{m_1 + m_2} \tag{1.8-4}$$

由此可得：当 $m_1 = m_2$ 时，$v_1 = v_2$，即（质量相同的两个物体发生弹性碰撞时，相互交换）（速度）。两个台球的碰撞就近似于这种碰撞。两个分子或两个粒子的碰撞，如果没有引起内部的变化，也都可以看作是弹性碰撞。

本实验中的几个小钢球质量相同，它们相互碰撞时都是弹性碰撞。因此，拉起几个小球，下落碰撞后必然在另一侧弹起几个小球。

【实验步骤】

1. 用手拉起一个小钢球，到一定高度后松手，让小钢球下落后与其他没被拉起的小钢球碰撞。

2. 用手拉起两个小钢球，到一定高度后松手，让它们一同下落后与其他没被拉起的小钢球碰撞。

3. 再依次拉起三个、四个小钢球，重复上述动作。

需要全本请访问 www.ertongbook.com