第二节

物体动量变化的原因 动量定理

通过碰撞实验寻找相互作用中的守恒量时发现，碰撞前后两个物体动量的矢量和不变，但每个物体的动量都发生了变化。单个物体动量发生变化的原因是什么？

## 冲量

推动一辆质量为 *m* 的小车，使其由静止开始加速到速度 *v*，小车的动量由 0 增加为 *mv*。由牛顿运动定律可知，若由一名儿童用较小的力推动该车，所需的时间较长；换由一位成人用较大的力推，则所需时间较短。可见，物体动量的变化不仅与作用力有关，还与力的作用时间有关。

假设小车仅在水平恒力 *F* 的作用下，沿光滑的水平地面做匀加速直线运动，从 *t*0 到 *t*（Δ*t* = *t* − *t*0），速度由 *v*0 增加到 *v*，则动量由 *mv*0 增大到 *mv*。以小车为研究对象，设小车加速度为 *a*，由牛顿第二定律和运动学知识可知

*F* = *ma*

*a* = =

整理可得

*F*(*t* − *t*0) = *mv* − *mv*0 = *p* − *p*0

即 *F*Δ*t* = *p* − *p*0

*p*0 和 *p* 分别表示加速过程始、末两个状态小车的动量。

上式表明，小车动量的变化由作用力 *F* 和作用时间 Δ*t* 共同决定，只要两者的乘积 *F*Δ*t* 相同，小车动量的变化就相同。

在物理学中，把作用力与其作用时间的乘积称为**冲量（impulse）**，用符号 *I* 表示。

*F*

*F*0

*O*

*t*1

*t*

图 1–7 恒力的 *F*-*t* 图像

*I* = *F*Δ*t*

冲量是矢量，它的方向与力 *F* 的方向一致。在国际单位制中，冲量的单位是牛顿·秒，符号为 N·s。

利用上式可直接计算恒力的冲量。以力 *F* 为纵轴，时间 *t* 为横轴作 *F* – *t* 图像，若 *F*0 为恒力，图像为平行于横轴的直线，如图 1–7 所示，直线与横轴所围面积可表示 0 ~ *t*1 时间内力 *F*0 的冲量大小。

*F*

*F*2

*O*

*t*1

*t*

*F*1

图 1–8 某个变力的 *F*-*t* 图像

大家谈

如果物体受到一个大小随时间变化的力的作用，力随时间变化的关系如图 1–8 所示，如何确定这个力的冲量？

## 动量定理

在实际情况中，物体往往在某一时间段 Δ*t* 内受到多个力的作用，这些力在 Δ*t* 时间内的共同作用效果与其合力在这段时间内的作用效果相同。因此，物体在 Δ*t* 时间内动量的变化等于其所受合力 *F*合 在这段时间内的冲量，即

*F*合Δ*t* = *p* − *p*0

这一关系称为**动量定理（theorem of momentum）**。

上述动量定理的推导是从物体在恒力作用下的特殊情形中得出的结论。变力作用下物体的动量变化是否也遵循动量定理？

①

②

③

④

图 1–9 验证动量定理

如图 1–9 所示，① 为力传感器，② 为光电门传感器，③ 为装有挡光片和弹性圈的小车，④ 为水平导轨。推动小车，使弹性圈与固定的力传感器碰撞，利用力传感器获得小车受到的力与作用时间的关系，光电门传感器测得碰撞前、后小车的速度。根据所得数据，验证动量定理。

自

主

活

动

在上述活动中，小车虽然受到变力作用，但动量定理依然成立。

进一步的研究表明，物体在变力作用下动量定理也成立。

示例 高空抛物存在极大的安全隐患，即使从楼上落下一枚小小的鸡蛋，也可能把路上的行人砸伤。假设鸡蛋撞击地面的持续时间约为 0.005 s，估算一枚由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力有多大。

**分析**：根据实际情况，估算鸡蛋的质量和下落高度。由自由落体运动的规律或机械能守恒定律得鸡蛋触地前的速度。以鸡蛋为研究对象，分析鸡蛋的受力情况，用动量定理估算鸡蛋在触地过程中撞击地面的平均作用力。

**解**：通常 500 g 鸡蛋约有 8 枚，则 1 枚鸡蛋的质量 *m* 约为 0.06 kg。一般住宅楼的层高约为 3 m，则鸡蛋下落的高度 *h* 约为 18 m。由于下落距离不大，可以忽略鸡蛋下落时的空气阻力，则可将鸡蛋下落的过程看作自由落体运动。重力加速度 *g* 取 10 m/s2。

以鸡蛋为研究对象，设鸡蛋触地前的速度为 *v*1

*v*1 = = m/s ≈ 19 m/s

触地过程中，鸡蛋受到地面作用力 N 和重力 *G* 的作用，受力分析如图 1–10 所示。

鸡蛋触地，在合外力 *F*合 的作用下，它的速度在 Δ*t* = 0.005 s 内由 *v*1 减小到零。取竖直向上为正方向，以鸡蛋为研究对象，在鸡蛋触地到速度为零的过程中，速度方向与正方向相反，其初动量为 −*mv*1，末动量为零。再由动量定理

*G*

N

图 1–10 鸡蛋触地时的受力分析

*F*合Δ*t* = *mv* − *mv*0

得 (N − *G*)Δ*t* = 0 − (−*mv*1)

即

N = + *G*

 = N

= 228.6 N

地面对鸡蛋作用力的反作用力即为鸡蛋对地面的作用力。由此可知，鸡蛋落地时对地面平均冲击力的大小约为 228.6 N。

由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力与 10 kg 物体受到的重力相当。因此，“高空抛物”存在极大的危险。为了保护人民的生命安全，2021 年，国家正式将“高考抛物罪”列入刑法。

*F*

*O*

*t*

$$\overbar{F}$$

图 1–11 冲力的 *F*–*t* 图像

在很短时间内大小随时间剧烈变化的作用力称为冲力。图 1–11 中曲线与时间轴包围的面积即为冲力的冲量。

由于冲力在极短时间内由零达到最大值后又很快减小为零，通常无法直接用力与时间的乘积计算其冲量。设想存在一个恒力 $\overbar{F}$，它在相同时间内的冲量与冲力的冲量相等，如图 1-11 所示。该恒力改变动量的效果与冲力相同，反映了冲力在该段时间内的平均作用效果，称为平均冲力。

拓 展 视 野

鸡蛋触地过程中，地面对鸡蛋的作用力远大于鸡蛋所受到的重力（约为 0.6 N）。对于碰撞、冲击等相互作用过程，计算平均冲力时往往可以忽略重力的影响。

**问题 思考**

**与**

1. 当人从高处跳下双脚接触地面时，会本能地弯曲以减小人与地面间的冲击力，类似的现象称为“缓冲”。用动量定理解释其中的原因。
2. 质量为 2 kg 的物体在合力 *F* 作用下由静止开始运动，合力 *F* 随时间 *t* 变化的图像如图 1–12 所示，求物体在 4 s 末的速度。

*F* /N

*t* /s

*O*

2

−2

2

4

图 1–12

1. 质量为 0.02 kg 的小球从离地面 1.4 m 高处自由下落至地面，与地面碰撞后反弹，小球反弹的最大高度为 0.8 m。设小球与地面碰撞时间为 0.004 s，忽略空气阻力的影响，小球受到地面的平均冲力为多大？（*g* 取 10 m/s2）
2. 冲量和功均与力有关，也与过程有关。冲量和功有哪些区别？
3. 长为 *l* 的轻绳，一端固定在水平面上，另一端连着质量为 *m* 的质点，使质点在水平面上做周期为 *T* 的匀速圆周运动。在 *T* 内质点所受绳子拉力的冲量和质点所受重力的冲量分别为多少？
4. 某同学打算通过如图 1–13 所示的装置测量小车在水平导轨上受到的摩擦力。图中 *A*、*B* 分别为位移传感器的发射端和接收端，可测量小车速度大小随时间的变化；*C* 为力传感器，可测量小车受到的拉力 *F* 的大小。水平细线一端连接小车上的力传感器，另一端跨过定滑轮连接钩码。钩码由静止释放后，细线带动小车从静止开始在轨道上运动至钩码着地，此后，小车继续沿轨道向前运动一段距离后静止。实验测得的 *F*–*t* 图像如图 1–14（a）所示，图中 *t*2 为小车静止的时刻。

*C*

*A*

*B*

图 1–13

（1）在图 1–14（b）中画出小车运动的 *v*–*t* 图像的大致形状。

（2）根据牛顿运动定律、动能定理、动量定理均可实现小车所受摩擦力的测量，测量的方案如何？分别需要从图像中获取哪些信息？补全表 1–5。

*F*/N

*O*

*t*/s

*F*0

*t*1

*t*2

(a)

(b)

图 1–14

*v*/(m·s−1)

*O*

*t*/s

*t*1

*t*2

表 1–5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **原理** | **测量的物理量及相应符号** | **阻力与所测物理量的关系** |
| 牛顿运动定律 |  |  |
| 动能定理 |  |  |
| 动量定理 |  |  |

### 本节编写思路

回顾上一节的实验结果，将问题聚焦于相互作用系统内某个物体动量变化的原因，引入本节内容。

本节通过理论推导和实验验证相结合的方法，讨论物体动量变化的原因及量度，得出冲量的概念和动量定理，并用其分析解决实际问题。

具体分为三个层次：

1．以手推车只在一个恒定推力作用下做匀加速直线运动为例，通过演绎推导，得出冲量的概念和动量定理，再将动量定理推广到多力作用情况。

2．用实验验证动量定理，将动量定理的适用范围由恒力作用情况推广到受变力作用的情况。

3．通过示例，示范用动量定理解决实际问题的方法，体会动量定理的特点，形成解决问题的思路。

学习本节内容，将经历推导、实验和应用等过程，有助于学生提高模型建构、科学推理的能力，感悟科学与社会生活之间的关系，并认识高空抛物的严重危害，形成从自身做起、坚决杜绝此类行为的责任感。

### 正文解读

通过创设小车由静止加速，动量发生变化的情境，引导学生联系生活经验，体会作用力与持续作用时间会影响动量的变化。再将小车受力和运动情况进行简化，推导小车动量变化与作用力、持续作用时间的定量关系，建立冲量的概念。

此处设置“大家谈”，旨在引导学生通过类比和迁移，理解变力的冲量可以用图像的“面积”来表示。运用无限分割与逼近的方法，在深入理解冲量概念的同时，为实验验证变力作用下的动量定理做准备。

动量是与物体运动状态对应的“状态量”，冲量是与作用时间或运动过程对应的“过程量”。动量定理表明，合力的冲量导致物体的动量发生改变，冲量的大小量度了物体始末状态动量变化量的大小。

这是一个需要学生动手做的“自主活动”。通过实验获得变力作用下的 *F* – *t* 图像，由此得出相应的冲量大小。根据约定的正方向和小车碰撞前、后的速率，比较碰撞过程中小车受力的冲量和碰撞前后小车动量的变化量是否相等，验证动量定理。

本示例示范了应用动量定理分析问题的一般思路或步骤，即：

（1）明确研究对象，把它从周围环境中隔离出来。

（2）明确相互作用的过程，分析研兖对象在此过程中的受力情况，画出其受力分析的示意图。

（3）分析研究对象在相互作用前、后速度的大小和方向。

（4）约定正方向，根据动量定理列出相应的方程并求解。

这里，还需要说明两点：

（1）解决此类问题不能单凭相互作用时间 Δ*t* 很短，就轻易忽略重力。示例表明，对于竖直方向发生的撞击，撞击力的平均大小既有撞击物自身重力 *mg* 的贡献，也有其动量变化率 的贡献，只有当两者之比，即 ≪ 1 时，才能忽略重力。相反，在人从高处跳下双膝弯曲、使用发泡包装材料搬运易碎物品、航天返回舱着陆前利用反冲火箭缓冲等事例中，都是通过延长相互作用时间 Δ*t*，大大减小动量变化率 对撞击力的贡献，这些事例中重力 *mg* 反而可能对撞击力大小有主要贡献。

（2）鸡蛋与地面碰撞时，鸡蛋所受地面的作用力是一个变力。示例中要求的平均冲击力，是用恒力替代变力。这是从力的时间累积作用效果的角度，通过用恒力替代变力，使得两者在相同时间内的冲量相等，由此求出的恒力大小即为所求平均冲击力的大小。

### 问题与思考解读

1．参考解答：人从高处跳下，以一定的速度接触地面，落地后人的速度变为零。从将要接触地面到速度减为零的过程中人动量的变化 Δ*p* 一定，即合力的冲量一定。由动量定理 *F*·Δ*t* = Δ*p* 可知，若通过弯曲双腿增加减速过程的时间 Δ*t*，人所受的合力 *F* 将减小。由于人所受重力不变，则地面对腿部的作用力减小。因此，弯曲双腿可起到保护作用

命题意图：用动量定理解释简单的现象。

主要素养与水平：模型建构（Ⅱ）；科学论证（Ⅱ）；科学本质（Ⅰ）。

2．参考解答：由图可知，0 ~ 4 s 内合力 *F* 的冲量为 4 N·s。由动量定理 *F*·Δ*t* = *mv*2 – *mv*1 得，4 s 内合力 *F* 的冲量等于物体动量的变化量，物体的初动量为 0，则末动量为 4 kg·m/s，可得末速度为 2 m/s，与 *t* = 0 时合力 *F* 的方向一致

命题意图：能从图像中读取信息，用动量定理做简单的推理。

主要素养与水平：科学推理（Ⅱ）；科学论证（Ⅱ）。

3．参考解答：由自由落体运动的规律得小球碰地前的速度 *v*1 的大小为 5.3 m/s，与地面碰撞后小球做竖直上抛运动，可得小球与地面碰撞后的速度 *v*2 的大小为 4 m/s。以向上为正方向，球与地面碰撞的过程，由动量定理，得 *F*合·Δ*t* = *mv*2 – *mv*1，即 *F*合 = = N = 46.5 N，*F*合 = *F* – *G* = 46.5 N，得 *F* = 46.7 N，即小球受到的平均冲力 *F* 的大小为 46.7 N

命题意图：厘清运动过程，明确规律的适用对象，对综合性物理问题进行分析和推理，发展运动与相互作用观念。

主要素养与水平：运动与相互作用观念（Ⅱ）；模型建构（Ⅲ）。

4．参考解答：冲量是力对时间的累积，反映物体运动量的变化；功是力对空间的累积，反映物体能量的变化。冲量是矢量，功是标量

命题意图：通过比较，建立与原有认知的联系，有助于建立运动与相互作用的观念。

主要素养与水平：运动与相互作用观念（Ⅲ）。

5．参考解答：质点做匀速圆周运动的向心力由绳子的拉力提供，拉力为变力，用动量定理求其冲量。在 *T* 内，动量的大小虽然没变，但方向转过了 ，动量变化量的大小为 2π 。故绳子拉力的冲量大小为 2π ，方向与初速度的夹角为 π。重力为恒力，其冲量为 *G*·Δ*t* = *mg* *T* = *mgT*，方向竖直向下

命题意图：了解冲量的矢量性，比较恒力的冲量和变力的冲量。

主要素养与水平：运动与相互作用观念（Ⅲ）；科学推理（Ⅱ）。

6．参考解答：（1）如图 1 所示

*v*/(m·s−1)

*v*0

*t*1

*t*/s

*O*

*t*2

（2）测量方案：根据题干要求组装实验装置，获取力 *F* 随时间变化的图像及对应物体运动速度础随时间变化的图像。

从 *F* – *t* 图像上可获得不同时间内力的大小，从 *v* – *t* 图像上获得相应时间段内的加速度和位移大小。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 原理 | 测量的物理量及相应符号 | 摩擦力与所测物理量的关系 |
| 牛顿运动定律 | 小车所受的拉力 *F*T 和阻力 *F*f，加速和减速阶段的加速度分别为 *a*1 和 *a*2 | *F*T – *F*f = *ma*1，*F*f = *F*T – *ma*1；或 *F*f = *ma*2 |
| 动能定理 | 小车所受的拉力 *F*T 和阻力 *F*f，加速和减速阶段的位移分别为 *s*1 和 *s*2 | *F*T*s*1 − *F*f（*s*1 + *s*2） = 0，*F*f =  |
| 动量定理 | 小车所受的拉力 *F*T 和阻力 *F*f，加速和减速阶段的时间分别为 *t*1 和 *t*2 | *F*T*t*1 − *F*f（*t*1 + *t*2） = 0，*F*f =  |

命题意图：根据已有的实验装置，运用不同的规律展开方案设计和分析推理。

主要素养与水平：运动与相互作用观念（Ⅲ）；科学推理（Ⅲ）；证据（Ⅲ）。