

GRADUS

物理 I

循迹而上 · 拾级登顶

寻迹 · 梦叶子 编著

目录

第一章 运动的描述	1
1.1 位置与位移	1
1.2 速度	2
1.3 加速度	3
第二章 匀变速直线运动	7
2.1 三个公式，一张图	7
2.2 v-t 图：把运动“画”出来	8
2.3 自由落体：地球给的加速度	9
第三章 相互作用与牛顿定律	13
3.1 三种基本力：重力、弹力、摩擦力	13
3.2 受力分析：力学的基本功	14
3.3 牛顿三定律：力是运动变化的原因	15
第四章 运动与力的结合	19
4.1 超重与失重：体重计上的骗局	19
4.2 连接体：先整体，后隔离	20
4.3 临界问题：恰好、刚好、最大、最小	21
第五章 曲线运动与圆周运动	25
5.1 曲线运动：速度方向永远沿切线	25
5.2 平抛运动：水平匀速 + 竖直自由落体	26
5.3 圆周运动：向心加速度的力学根源	27
第六章 万有引力与航天	31
6.1 万有引力定律	31

6.2	天体运动	32
6.3	卫星与变轨	33
第七章	功与能	37
7.1	功	37
7.2	功率	38
7.3	动能定理	39
第八章	机械能守恒	43
8.1	势能	43
8.2	机械能守恒定律	44
第九章	动量与动量守恒	49
9.1	动量与冲量：力在时间上的累积	49
9.2	动量守恒定律：合外力为零时	50
9.3	反冲与火箭：动量守恒的“喷气”式	51
第十章	机械振动与机械波	55
10.1	简谐运动：弹簧与摆的“钟摆律”	55
10.2	受迫振动与共振：借来的节奏	56
10.3	机械波：振动在介质中的传播	57
第十一章	卷末综合检测	61

第一章 运动的描述

1.1 位置与位移

考点精要

- Q1 位移与路程有什么区别？

A 位移是从起点指向终点的有向线段（矢量，有大小有方向）；路程是实际轨迹长度（标量）。问“最终在哪”用位移，问“走了多少路”用路程。

- Q2 位移为零就等于没动吗？

A 不是。绕操场跑一圈回到起点，位移为 0，但路程是整圈长度。“位移为零”只说明起点终点重合。

- Q3 什么情况下位移大小等于路程？

A 只有单向直线运动（不回头、不绕路、走直线）。

- Q4 什么是参考系？描述位置前为什么要先定参考系？

A “在哪”必须先说“相对于谁”；参考系不同，位置描述不同，但物体实际运动不变。选参考系的原则：使描述最方便。

- Q5 什么情况下可以把物体看作质点？

A 当物体的大小和形状对所研究的问题没有影响或影响可忽略时（如研究地球公转可以，研究自转不行）。

例题 1.1

无人机物流配送：无人机从驿站起飞，先向东飞行 800 m 到第一家送件，再向北飞行 600 m 到第二家。求该过程的位移与路程；若要求位移方向，请给出。

A 层 · 基础过关

A1. 一物体沿直线向东运动 5 m，再向西运动 3 m。求该过程的位移与路程。

A2. 电梯从 1 楼上升到 10 楼，再下降到 3 楼停下（每层楼高 3 m）。求该过程电梯的位移大小与路程。

A3. 判断下列情况能否把物体看成质点，并说明理由：

- (1) 研究地球绕太阳公转的周期；
- (2) 研究地球的自转；
- (3) 计算火车从北京开往上海所需时间（火车长约 400 m，京沪铁路长约 1300 km）；
- (4) 计算火车完全通过一座长 200 m 的桥所需时间。

1.2 速度

考点精要

• Q1 平均速度与平均速率有何不同？

A 平均速度 = 位移 ÷ 时间（矢量）；平均速率 = 路程 ÷ 时间（标量）。绕操场跑一圈，平均速度为 0，平均速率不为 0。

• Q2 什么是瞬时速度？汽车仪表盘显示的是什么？

A 瞬时速度是时间间隔 Δt 趋近于 0 时的极限，表示“此刻的快慢和方向”；仪表盘显示的就是瞬时速度。

• Q3 只知道全程平均速度，能求出某一瞬间的瞬时速度吗？

A 不能，除非物体全程做匀速直线运动。平均速度是“全程的账”，掩盖了中间快慢的变化。

• Q4 x-t 图怎么看？

A 斜率 = 速度：斜线 = 匀速运动，水平线 = 静止，斜率为负 = 往回走；两条图线交点 = 相遇（同一时刻同一位置）。

例题 1.2

复兴号动车组从静止开始加速，约 400 s 后速度达到 350 km/h。求这 400 s 内的平均加速度。

A 层 · 基础过关

A4. 运动员绕 400 m 标准跑道跑一圈，用时 100 s。求他的平均速度大小与平均速率。

A5. 某物体沿直线运动，其 $x-t$ 图像为一条折线：0 3 s 内从 $x=0$ 匀速运动到 $x=9$ m；3 7 s 内静止不动；7 12 s 内匀速返回 $x=0$ 。

(1) 求各阶段的速度；

(2) 求全程的平均速度与平均速率。

A6. 某高速公路区间测速路段长 20 km，限速 120 km/h。一辆汽车通过该区间用时 12 min。

(1) 求该车全程的平均速度大小；

(2) 能否据此判定该车超速？为什么？

1.3 加速度

考点精要

• Q1 加速度大 = 速度快吗？

A 不是。加速度是速度变化的快慢（速度变化率）。高铁速度 300 km/h 但加速度几乎为零；火箭刚起飞速度很小但加速度可达 $2g$ 。

• Q2 减速运动的加速度一定为负吗？

A 不一定。“负号”只是方向标记（取决于规定正方向）；判断加速还是减速，看加速度与速度是否同向。

• Q3 速度为零时，加速度一定为零吗？

A 不一定。竖直上抛的小球到达最高点时速度为零，但加速度仍为 g （竖直向下）。

• Q4 加速度增大时，速度一定增大吗？

A 不一定。若加速度与速度反向，加速度增大只会让速度减小得更快。

例题 1.3

地铁列车以 20 m/s 的速度进站，制动 40 s 后停下。求列车的加速度（大小与方向）。

A 层 · 基础过关

A7. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 加速度很大的物体，速度一定很大；
- (2) 物体的速度变化量很大，加速度一定很大；
- (3) 加速度减小的运动，速度一定减小。

A8. 竖直上抛的小球到达最高点时，它的速度和加速度分别是多少？方向如何？

A9. 一物体沿 x 轴运动， $t=0$ 时速度为 5 m/s （沿 $+x$ 方向）， 4 s 后速度变为 -3 m/s 。求物体的加速度（大小与方向）。

B 层 · 真题研习

B1.（2023 · 上海卷）一场 100 m 跑步比赛中，第三跑道的运动员跑到 30 m 处时，秒表计时为 3.29 s 。根据以上信息，能否算得该运动员在这段时间内的平均速度和瞬时速度？（ ）

- A. 可以算得平均速度，可以算得瞬时速度
- B. 无法算得平均速度，可以算得瞬时速度
- C. 可以算得平均速度，无法算得瞬时速度
- D. 无法算得平均速度，无法算得瞬时速度

B2.（2023 · 福建卷）“祝融号”火星车沿图所示路线行驶，在此过程中揭秘了火星乌托邦平原浅表分层结构，该研究成果被列为“2022 年度中国科学十大进展”之首。“祝融号”从着陆点 O 处出发，经过 61 天到达 M 处，行驶路程为 585 m ；又经过 23 天到达 N 处，行驶路程为 304 m 。已知 O 、 M 间和 M 、 N 间的直线距离分别约为 463 m 和 234 m ，则火星车（ ）

- A. 从 O 处行驶到 N 处的路程为 697 m
- B. 从 O 处行驶到 N 处的位移大小为 889 m
- C. 从 O 处行驶到 M 处的平均速率约为 20 m/天
- D. 从 M 处行驶到 N 处的平均速度大小约为 10 m/天

B3.（2024 · 浙江 1 月选考）杭州亚运会顺利举行，图为运动会中的四个比赛场景（甲：跳水运动员入水瞬间；乙：体操运动员空中转体；丙：运动员百米冲刺；丁：攀岩运动员通过支点）。在下列研究中可将运动员视为质点的是（ ）

- A. 研究甲图运动员的入水动作
- B. 研究乙图运动员的空中转体姿态
- C. 研究丙图运动员在百米比赛中的平均速度
- D. 研究丁图运动员通过某个攀岩支点的动作

B4.（2023 · 浙江 1 月选考）“神舟十五号”飞船和空间站“天和”核心舱成功对接后，在轨运行（图略），则（ ）

- A. 选地球为参考系，“天和”是静止的

- B. 选地球为参考系，“神舟十五号”是静止的
 C. 选“天和”为参考系，“神舟十五号”是静止的
 D. 选“神舟十五号”为参考系，“天和”是运动的

B5. (2026·河北卷) 某同学健身时，将哑铃举高后再回到原位置，如此重复 10 次。若每次举高的高度为 h ，则这 10 次过程中哑铃的位移大小为 ()

- A. 0
 B. h
 C. $10h$
 D. $20h$

C 层·创新拓展

C1. (北斗导航与瞬时速度) 手机导航实时显示汽车速度“85 km/h”。导航测速原理：接收机每隔 $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ 完成一次卫星定位，两次定位点的直线距离约为 11.8 m。

- (1) 估算汽车在这 0.5 s 内的平均速度；
- (2) 为什么导航可以把这段“平均速度”当作瞬时速度显示出来？
- (3) 汽车驶入隧道后卫星信号丢失 5 s，导航显示的瞬时速度会发生什么变化？为什么？

C2. (福建舰电磁弹射) 2024 年 5 月，我国第三艘航母福建舰首次海试，其电磁弹射系统可将舰载机从静止状态弹射起飞。设某型舰载机弹射后离舰速度达到 240 km/h，加速过程用时约 3.0 s。

- (1) 求舰载机起飞过程的平均加速度，并换算成以 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为单位的倍数；
- (2) 若飞行员质量 70 kg，弹射加速时飞行员受到座椅作用力的大小约为多少？方向如何？(提示：第 3 章才学 $F = ma$ ，这里先定性判断方向、用加速度估算力)

C3. (打点计时器测瞬时速度) 电磁打点计时器使用 50 Hz 的交流电源。某同学用它研究小车的运动，将纸带穿过打点计时器后与小车相连，小车拖着纸带运动，在纸带上留下点迹。为便于测量，每隔 5 个点取一个计数点，依次记为 0、1、2、3、4，用刻度尺测得相邻计数点间距 $x_1 = 2.40 \text{ cm}$ 、 $x_2 = 4.20 \text{ cm}$ 、 $x_3 = 6.00 \text{ cm}$ 、 $x_4 = 7.80 \text{ cm}$ 。

- (1) 打点计时器的工作电压约多大？相邻两个计数点的时间间隔 T 是多少？
- (2) 求计数点 2 的瞬时速度(用“相邻两点间的平均速度近似”)，以及 0 4 段的平均速度；
- (3) 根据相邻间距的变化，判断小车做什么运动，并说明判断依据。

本章综合·S 层

S1. ($x-t$ 图综合) 无人配送车沿直线送货，其位置—时间 ($x-t$) 图像为：0 4 s 内从仓库 ($x = 0$) 匀速前进 12 m；4 6 s 静止等待取货；6 10 s 匀速返回仓库。

- (1) 求各阶段的速度；
- (2) 求全程的位移与路程；
- (3) 求全程的平均速度与平均速率；

(4) 若 $6\ 10\ \text{s}$ 这段改为 $3\ \text{s}$ 内匀速返回仓库，返回时的速度应为多大？

S2. (火车过桥·质点) 复兴号动车组列车全长 $400\ \text{m}$ ，以 $30\ \text{m/s}$ 的速度匀速通过一座长 $1100\ \text{m}$ 的跨江大桥。

(1) 求从车头刚上桥到车尾完全离开桥面所需的时间；

(2) 求整列列车完全在桥面上的时间；

(3) 计算上述时间时，能否把列车看作质点？为什么？

第二章 匀变速直线运动

2.1 三个公式，一张图

考点精要

- Q1 匀变速运动的三个公式怎么选？

A 记口诀“缺谁不用谁”：题目没给时间，用 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ ；没给末速度，用 $v = v_0 + at$ 和 $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 联立；给了四个量中的三个，缺的那个就是要求的。

- Q2 刹车类问题最大的坑是什么？

A 刹车到停之后车不再运动，公式只对“还在动”的时间有效。看到刹车题先算停车时间 $t_{\text{停}} = v_0/|a|$ ，再决定代哪个数——问“6 s 位移”而车 4 s 就停了，答案等于 4 s 的位移。

- Q3 平均速度公式什么时候用？

A 匀变速运动中 $\bar{v} = (v_0 + v)/2 = \Delta x/t$ ，“初末速度已知求位移”用它一步到位（梯形的“上底加下底除以二”）。

- Q4 交警怎么用刹车痕迹测超速？

A 刹车痕迹长 x ，末速度为零，由 $v_0^2 = 2ax$ 反推刹车前车速。沥青路面刹车加速度约 6.8 m/s^2 ，痕迹 30 m $\rightarrow$ 车速约 72 km/h。

例题 2.1

汽车以 72 km/h 行驶，刹车加速度大小为 5 m/s^2 ，求刹车距离。

A 层 · 基础过关

A1. 汽车从 36 km/h 匀加速到 72 km/h，用时 4 s，求加速度。

A2. 物体以 10 m/s 的初速度做匀减速运动，加速度大小为 2 m/s^2 ，求 5 s 内的位移。(提示：先想清楚它几秒停下)

A3. 物体从静止开始以 2 m/s^2 的加速度做匀加速直线运动。

- (1) 求第 4 s 末的速度；
- (2) 求前 4 s 内的位移；
- (3) 求前 4 s 内的平均速度。

2.2 v-t 图：把运动“画”出来

考点精要

• Q1 v-t 图有哪三种读法？

A 斜率 = 加速度（线越陡加速越猛，斜率为正加速、为负减速、为零匀速）；图线与时间轴围成的面积 = 位移（时间轴上方为正、下方为负，正负抵消）；纵坐标 = 此刻的速度。

• Q2 两条 v-t 图线的交点表示什么？

A 表示“此刻两物体速度相同”（共速）——追及题里共速时刻往往是两车相距最远或最近的时刻，是追及题的“命门”。

• Q3 追及问题第一步找什么？

A 找共速时刻：之前慢的车在落后或拉开，之后快的车在追赶，距离的极值就出现在速度相等的瞬间。

例题 2.2

甲车以 20 m/s 做匀速直线运动，乙车从静止开始以 2 m/s^2 的加速度匀加速追赶甲车（两车同起点、同向出发）。求：

- (1) 乙车何时追上甲车？
- (2) 两车何时相距最远？最远距离多大？

A 层 · 基础过关

A4. 某物体运动的 v-t 图分三段： $0\text{--}4\text{ s}$ 内从静止匀加速到 8 m/s ； $4\text{--}10\text{ s}$ 内以 8 m/s 匀速； $10\text{--}14\text{ s}$ 内匀减速到 0 。

- (1) 求各段的加速度；

(2) 求 0.14 s 内物体的总位移。

A5. 某物体做匀加速直线运动，其 $v-t$ 图是过原点的直线，5 s 末速度达到 10 m/s。

(1) 求加速度；

(2) 求前 5 s 内的位移。

A6. 甲车以 10 m/s 匀速行驶，乙车从静止开始以 2 m/s^2 匀加速追赶甲车（同起点、同向出发）。

(1) 乙车何时追上甲车？

(2) 两车何时相距最远？最远距离多大？

2.3 自由落体：地球给的加速度

考点精要

• Q1 什么是自由落体运动？

A 初速度为零、只受重力的下落运动（理想模型）。三个公式： $v = gt$ ， $h = \frac{1}{2}gt^2$ ， $v^2 = 2gh$ 。
 $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ ，常取 10。

• Q2 g 是物体的属性吗？

A 不是。 g 是“地球属性”，与物体的质量、形状、材质无关——所以“两个铁球同时着地”；月球上 $g \approx 1.6 \text{ m/s}^2$ ，同一块石头掉得慢悠悠。

• Q3 竖直上抛有哪些对称性？

A 上升与下降时间相等（全程 $t = 2v_0/g$ ）；同一高度上升与下降的速率相等；最高点速度为零但加速度仍为 g （方向向下）。

• Q4 测楼高实验的误差从哪来？怎么减小？

A 三个误差源：反应时间（按表慢了， $h = \frac{1}{2}gt^2$ 里 t 是平方，误差被放大）、空气阻力（实际加速度小于 g ）、声音传播。对策：多次测量取平均、换密度大的重物、统一计时口径。

例题 2.3

苹果从 45 m 高的树上落下（ g 取 10 m/s^2 ），求落地时间与落地速度。

A 层 · 基础过关

A7. 苹果从 20 m 高处自由下落 (g 取 10 m/s^2), 求落地时间与落地速度。

A8. 小球以 30 m/s 的初速度竖直上抛 (g 取 10 m/s^2), 不计空气阻力。

(1) 求上升的最大高度;

(2) 求上升时间与全程 (回到抛出点) 时间。

A9. 物体从静止开始自由下落 (g 取 10 m/s^2)。

(1) 求第 1 s 内的位移与第 2 s 内的位移;

(2) 求第 1 s 内与第 2 s 内位移之比。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 北京卷) 一辆汽车以 10 m/s 的速度匀速行驶, 制动后做匀减速直线运动, 经 2 s 停止。汽车的制动距离为 ()

A. 5 m B. 10 m C. 20 m D. 30 m

B2. (2024 · 江西卷) 某物体位置随时间的关系为 $x = 1 + 2t + 3t^2$ (x 以 m 为单位, t 以 s 为单位), 则关于其速度与 1 s 内的位移大小, 下列说法正确的是 ()

A. 速度是对物体位置变化快慢的物理量, 1 s 内的位移大小为 6 m

B. 速度是对物体位移变化快慢的物理量, 1 s 内的位移大小为 6 m

C. 速度是对物体位置变化快慢的物理量, 1 s 内的位移大小为 5 m

D. 速度是对物体位移变化快慢的物理量, 1 s 内的位移大小为 5 m

B3. (2023 · 山东卷) 电动公交车做匀减速直线运动进站, 连续经过 R、S、T 三点, 已知 ST 间的距离是 RS 间距离的 2 倍, RS 段的平均速度为 10 m/s , ST 段的平均速度为 5 m/s , 则公交车经过 T 点时的瞬时速度为 ()

A. 3 m/s B. 2 m/s C. 1 m/s D. 0.5 m/s

B4. (2023 · 广东卷) 铯原子喷泉钟是定标“秒”的装置。在喷泉钟的真空系统中, 可视为质点的铯原子团在激光的推动下获得一定的初速度, 随后激光关闭, 铯原子团仅在重力作用下做竖直上抛运动, 到达最高点后再做自由落体运动。取竖直向上为正方向, 下列图像中, 可能正确描述激光关闭后铯原子团运动的是 ()

A. v - t 图像为斜率逐渐增大的曲线, a - t 图像为正的恒定水平线

B. v - t 图像为斜率逐渐减小的曲线, a - t 图像为正的恒定水平线

C. v - t 图像为一条倾斜直线 (先正后负), a - t 图像为正的恒定水平线

D. v - t 图像为一条倾斜直线 (先正后负), a - t 图像为负的恒定水平线

B5. (2025 · 全国卷) 我国自主研发的 CR450 动车组试验时的速度可达 450 km/h 。若以 120 m/s 的初速度在平直轨道上行驶的 CR450 动车组, 匀减速运行 14.4 km 后停止, 则减速运动中其加速度的大小为 ()

- A. 0.1 m/s^2
- B. 0.5 m/s^2
- C. 1.0 m/s^2
- D. 1.5 m/s^2

C 层 · 创新拓展

C1. (新能源汽车 AEB 自动紧急制动) 某智能汽车以 90 km/h 匀速行驶, 前方突发障碍物。该车配备 AEB 自动紧急制动系统: 从识别障碍到开始制动, 人驾模式约需 0.8 s (反应时间), AEB 模式仅约 0.2 s ; 制动后汽车以 8 m/s^2 的加速度匀减速。

- (1) 求人驾模式下, 从识别障碍到完全停下的总停车距离 (反应距离 + 制动距离);
- (2) 求 AEB 模式下同样的总停车距离;
- (3) AEB 比人驾模式少行驶多少米? 这说明什么?

C2. (天宫课堂 · 太空抛物实验) 2022 年“天宫课堂”中, 航天员王亚平在空间站内将冰墩墩沿水平方向轻轻推出, 它贴着桌面以约 0.2 m/s 的速度匀速飘向对面的同学, 2 s 后被接住。

- (1) 求冰墩墩飘行的距离;
- (2) 在地面, 同一水平推出动作会让冰墩墩一边前进一边下落; 为什么在空间站里它却能“匀速直线飘”? (提示: 空间站绕地球做圆周运动, 处于完全失重状态)
- (3) 若在地面以同样 0.2 m/s 的速度水平推出冰墩墩 (桌面高 1.25 m , g 取 10 m/s^2), 它从桌面落地需要多长时间?

C3. (纸带逐差法求加速度) 用 50 Hz 的打点计时器研究匀加速直线运动, 纸带上取 0 5 六个连续计数点 (相邻计数点间 $T = 0.1 \text{ s}$), 测得各段位移 (单位 cm): $x_1 = 1.40$ 、 $x_2 = 1.90$ 、 $x_3 = 2.40$ 、 $x_4 = 2.90$ 、 $x_5 = 3.40$ 、 $x_6 = 3.90$ 。

- (1) 用逐差法求小车的加速度大小 (提示: $a = \frac{(x_4 + x_5 + x_6) - (x_1 + x_2 + x_3)}{(3T)^2}$);
 - (2) 若用逐差法时误把 T 当成 0.02 s (打点周期), 算出的加速度是偏大还是偏小?
 - (3) 除逐差法外, 也可用 v - t 图像求加速度: 简述作图步骤, 并说明图像法减小误差的道理。
- C4.** (追及相遇 · 匀减速追匀速) 轿车以 $v_1 = 20 \text{ m/s}$ 在平直公路上匀速行驶, 司机发现前方 $x_0 = 100 \text{ m}$ 处有一辆货车以 $v_2 = 10 \text{ m/s}$ 同向匀速行驶, 立即刹车, 刹车加速度大小 $a = 2 \text{ m/s}^2$ 。

- (1) 判断两车是否会相撞, 说明判断依据;
- (2) 若不相撞, 求两车的最近距离;
- (3) 若要求恰好不相撞, 刹车的加速度大小至少应为多少?

C5. (追及相遇 · 图像法) $t = 0$ 时刻, 汽车 A 在前以 $v = 8 \text{ m/s}$ 匀速行驶, 汽车 B 在后、距 A 为 $x_0 = 20 \text{ m}$, 从静止开始以 $a = 2 \text{ m/s}^2$ 匀加速追赶。

- (1) B 追上 A 需要多长时间? 追上时 B 的速度多大?

(2) 追上之前, B 与 A 的最大距离是多少?

(3) 画出两车的 $v-t$ 图像 (0 10 s), 并在图中标出“最大距离”和“追上”两个关键时刻, 说明你依据的几何关系。

C6. (多过程·先加速后减速) 汽车从静止开始先以 $a_1 = 2 \text{ m/s}^2$ 匀加速 5 s, 再以 $a_2 = 1 \text{ m/s}^2$ 匀减速至停止。

(1) 求汽车的最大速度;

(2) 求加速段和减速段的位移, 以及全程总位移;

(3) 求全程平均速度;

(4) 画出全程 $v-t$ 图像, 并用图像面积验证总位移。

本章综合·S 层

S1. (停车距离与限速) 汽车以 72 km/h 行驶, 司机发现前方 40 m 处有障碍物, 经 0.5 s 反应时间后开始刹车, 刹车加速度大小为 5 m/s^2 。

(1) 求司机的反应距离与制动距离、总停车距离;

(2) 判断汽车是否会撞上障碍物;

(3) 若该路段限速 54 km/h, 其余条件不变, 汽车能否避免碰撞? 通过计算说明。

S2. (追及与反超) A 车以 15 m/s 匀速行驶, B 车停在 A 车前方 30 m 处。t = 0 时 B 车从静止开始以 2 m/s^2 的加速度同向匀加速启动。

(1) A 车第一次追上 B 车在什么时刻?

(2) 何时两车相距最远? 最远距离多大?

(3) B 车何时反超 A 车?

第三章 相互作用与牛顿定律

3.1 三种基本力：重力、弹力、摩擦力

考点精要

- Q1 重力是“引力”还是“拉力”？方向怎么记？

A 重力是地球对物体的引力， $G = mg$ ，方向竖直向下。注意是“竖直向下”（指向地心附近）而不是“垂直向下”（那是相对于支持面的说法）；作用点叫重心。

- Q2 胡克定律里的 x 是什么？

A $F = kx$ 中 x 是形变量（伸长了多少或压缩了多少），不是弹簧原长，也不是弹簧总长。算总长要“原长 $\pm$ 形变量”。

- Q3 静摩擦力为什么说它是“变色龙”？

A 滑动摩擦力 $f = \mu N$ 是“明码标价”；静摩擦力则在 0 到最大静摩擦力之间随需要取值——你用 4 N 推没推动，它就是 4 N；用 10 N 还没动，它就是 10 N。

- Q4 摩擦力一定阻碍运动吗？

A 不一定。摩擦力的方向与“相对运动（趋势）方向”相反，不是与运动方向相反。传送带上的物体刚放上时相对传送带向后滑，摩擦力向前，是把物体“带”起来的动力。

- Q5 拔河比的是谁的力气大吗？

A 不是。绳子两端的拉力永远等大（牛顿第三定律），真正决定胜负的是脚下摩擦力——鞋底更抓地、重心更低的一方更能站稳，从而把对方拽过来。

例题 3.1

质量 $m = 5 \text{ kg}$ 的木箱放在水平地面上，木箱与地面的动摩擦因数 $\mu = 0.2$ (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 求木箱与地面间的滑动摩擦力；
- (2) 用 8 N 的水平力拉木箱，木箱动吗？它受到的摩擦力多大？
- (3) 用 12 N 的水平力拉木箱，它受到的摩擦力多大？

A 层 · 基础过关

A1. 一根弹簧原长 20 cm，下端挂 2 N 的钩码后伸长到 24 cm。求该弹簧的劲度系数。

A2. 弹簧测力计中的弹簧劲度系数 $k = 200 \text{ N/m}$ ，把弹簧压缩 5 cm，弹簧产生的弹力多大？

A3. 质量 2 kg 的木块放在水平桌面上，木块与桌面的动摩擦因数 $\mu = 0.3$ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 用 4 N 的水平力推木块，木块未动，它受的静摩擦力多大？

(2) 用 7 N 的水平力推木块，木块滑动，它受的滑动摩擦力多大？

A4. 物块无初速度地放到水平匀速运动的传送带上，刚放上时物块相对传送带向哪个方向滑动？物块受到的摩擦力方向向哪？这个摩擦力对物块的运动起什么作用（动力还是阻力）？

3.2 受力分析：力学的基本功

考点精要

• Q1 受力分析的顺序是什么？

A 一重二弹三摩擦，其他外力最后加。每分析一个力都要问一句：施力物体是谁？找不到施力物体的力不存在。

• Q2 斜面上的物体，重力怎么分解最方便？

A 沿斜面方向分解出 $mg \sin \theta$ （下滑分量）、垂直斜面方向分解出 $mg \cos \theta$ （压紧斜面的分量），斜问题就变成两个一维问题。

• Q3 斜面上静止的物体受几个力？怎么列方程？

A 三个：重力 mg 、支持力 N 、静摩擦力 f 。垂直斜面： $N = mg \cos \theta$ ；沿斜面： $f = mg \sin \theta$ （沿斜面向上，对抗下滑趋势）。

• Q4 斜面坡度变陡，支持力和摩擦力怎么变？

A θ 增大时 N 减小、 f 增大——越陡越需要摩擦力“拉住”。“恰好不下滑”的临界条件是 $\tan \theta = \mu$ 。

例题 3.2

质量为 $m = 2 \text{ kg}$ 的物体静止在倾角 $\theta = 30^\circ$ 的斜面上 (g 取 10 m/s^2)。

(1) 画出物体的受力示意图；

(2) 求斜面对物体的支持力与静摩擦力大小；

(3) 若斜面倾角增大到 45° ，支持力和摩擦力各如何变化？

A 层 · 基础过关

A5. 一只重 5 N 的灯笼悬挂在天花板下静止不动（不计空气阻力）。灯笼受到几个力作用？各是什么力？绳对灯笼的拉力多大？

A6. 质量 $m = 10\text{ kg}$ 的物体静止在倾角 30° 的斜面上（ g 取 10 m/s^2 ，取 $\cos 30^\circ \approx 0.87$ ， $\sin 30^\circ = 0.5$ ）。求斜面对物体的支持力和静摩擦力大小。

A7. 质量 $m = 10\text{ kg}$ 的物体放在倾角 37° 的斜面上，物体与斜面间的动摩擦因数 $\mu = 0.5$ （ g 取 10 m/s^2 ， $\sin 37^\circ = 0.6$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ ）。判断物体能否在斜面上保持静止，并通过计算说明理由。

3.3 牛顿三定律：力是运动变化的原因

考点精要

• Q1 力是“维持”运动还是“改变”运动的原因？

A 牛顿第一定律：物体总保持匀速直线运动或静止，除非外力迫使它改变——力是改变运动的原因，不是维持运动的原因。

• Q2 惯性跟什么有关？为什么急刹车人往前冲？

A 惯性是物体自身的属性，只与质量有关（质量大惯性大），与速度、受力无关。急刹车时没有“推力”推你，是你的惯性要保持原来的速度，安全带就是来对抗这个惯性的。

• Q3 $F = ma$ 里的 F 是哪个力？

A 是合力！列方程前先受力分析求合力，把合力代入 $F_{\text{合}} = ma$ ，而不是把牵引力或某个分力直接代进去。

• Q4 作用力反作用力与平衡力怎么区分？

A 看作用对象：作用力与反作用力分别作用在两个不同物体上（等大反向、同性质）；平衡力作用在同一个物体上。一对作用力反作用力不能“抵消”，因为它们作用对象不同。

例题 3.3

质量 $m = 800\text{ kg}$ 的汽车以 $a = 1.5\text{ m/s}^2$ 的加速度在平直公路上匀加速行驶。

(1) 若阻力忽略不计，汽车的牵引力多大？

(2) 若行驶中受到的阻力 $f = 300\text{ N}$ ，牵引力应为多大？

A 层 · 基础过关

A8. 质量为 2 kg 的物体受到的合外力为 4 N ，求物体的加速度。

A9. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 马拉车的力与车拉马的力，大小一定相等；
- (2) 拔河比赛时，绳子对甲队的拉力一定大于绳子对乙队的拉力。

A10. 质量 $m = 5\text{ kg}$ 的物体在水平面上受到水平拉力 $F = 20\text{ N}$ ，同时受到阻力 $f = 5\text{ N}$ ，求物体的加速度。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 山东卷) 如图所示，国产人形机器人“天工”能平稳通过斜坡。若它可以在倾角不大于 30° 的斜坡上稳定地站立和行走，且最大静摩擦力等于滑动摩擦力，则它的脚和斜面间的动摩擦因数不能小于 ()

- A. $\frac{1}{2}$ B. $\frac{\sqrt{3}}{3}$ C. $\frac{\sqrt{2}}{2}$ D. $\frac{\sqrt{3}}{2}$

B2. (2024 · 辽宁卷) 利用砚台将墨条研磨成墨汁时讲究“圆、缓、匀”，如图，在研磨过程中，砚台始终静止在水平桌面上。当墨条的速度方向水平向左时，()

- A. 砚台对墨条的摩擦力方向水平向左
- B. 桌面对砚台的摩擦力方向水平向左
- C. 桌面和墨条对砚台的摩擦力是一对平衡力
- D. 桌面对砚台的支持力与墨条对砚台的压力是一对平衡力

B3. (2023 · 浙江卷) 在足球运动中，足球入网，则 ()

- A. 踢香蕉球时足球可视为质点
- B. 足球在飞行和触网时惯性不变
- C. 足球在飞行时受到脚的作用力和重力
- D. 触网时足球对网的力大于网对足球的力

C 层 · 创新拓展

C1. (C919 客机起飞 · 牛顿第二定律) 2023 年 5 月，国产大飞机 C919 首次商业飞行。设某次起飞中 C919 的起飞质量 $m = 7.2 \times 10^4\text{ kg}$ ，从静止开始在水平跑道上匀加速滑行，滑行距离 $x = 1600\text{ m}$ 时达到离地速度 $v = 80\text{ m/s}$ (约 288 km/h)。

- (1) 求起飞滑跑过程中的加速度大小；
- (2) 若起飞时发动机总推力 $F = 2.4 \times 10^5\text{ N}$ ，求滑跑过程中飞机受到的平均阻力大小。

C2. (拔河比赛的物理学) 拔河比赛不是比力气大，而是比脚下摩擦力。甲队连同队员总质量 $m_1 = 600\text{ kg}$ ，鞋底与地面间的动摩擦因数 $\mu_1 = 0.5$ ；乙队总质量 $m_2 = 550\text{ kg}$ ， $\mu_2 = 0.4$ (g 取 10 m/s^2 ，最大静摩擦力等于滑动摩擦力)。

- (1) 求两队各自能获得的最大地面摩擦力；

(2) 若两队在僵持中绳子拉力逐渐增大, 哪一队会先被拉动? 为什么?

(3) 如果你是乙队教练, 在不增加体重的前提下, 可以从哪些方面提高获胜可能? (各写出一条即可)

C3. (动态平衡·挡板旋转) 质量 $m = 1\text{ kg}$ 的光滑小球静止在竖直墙壁与光滑挡板之间 (挡板下端铰接于墙角地面, 与竖直墙的夹角为 θ , g 取 10 m/s^2)。

(1) 画出小球的受力示意图 (三个力);

(2) 求 $\theta = 60^\circ$ 时, 墙对小球的支持力 N_1 和挡板对小球的支持力 N_2 的大小;

(3) 挡板绕底端缓慢转动, 使 θ 从 60° 增大到 75° 。用“矢量三角形作图法”判断 N_1 、 N_2 如何变化, 并说明理由。

C4. (动态平衡·缓慢拉绳) 质量 $m = 2\text{ kg}$ 的光滑小球用轻绳拴在墙顶部的钉子上, 小球靠在竖直墙上, 绳与竖直墙的夹角为 θ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 画出小球的受力示意图;

(2) 求 $\theta = 30^\circ$ 时绳的拉力 T 和墙的支持力 N ;

(3) 缓慢增大 θ 到 60° (绳端沿墙缓慢下移), T 、 N 如何变化? 写出依据。

本章综合·S层

S1. (斜面+牛顿第二定律) 质量 $m = 5\text{ kg}$ 的物体从倾角 37° 的斜面顶端由静止开始下滑, 物体与斜面间的动摩擦因数 $\mu = 0.5$ (g 取 10 m/s^2 , $\sin 37^\circ = 0.6$, $\cos 37^\circ = 0.8$)。

(1) 求物体沿斜面下滑的加速度大小;

(2) 若斜面足够长, 物体从静止开始下滑 4 m 时的速度多大?

S2. (胡克定律+牛顿第二定律) 质量 $m = 2\text{ kg}$ 的木块放在水平地面上, 用一根劲度系数 $k = 100\text{ N/m}$ 的弹簧水平拉木块 (g 取 10 m/s^2 , 木块与地面间动摩擦因数 $\mu = 0.3$)。

(1) 使木块匀速前进时, 弹簧的伸长量是多少?

(2) 使木块以 $a = 1\text{ m/s}^2$ 匀加速前进时, 弹簧的伸长量是多少?

第四章 运动与力的结合

4.1 超重与失重：体重计上的骗局

考点精要

- Q1 体重计显示的是重力吗？

A 不是。体重计显示的是支持力 N ——你压秤，秤就顶你，读数 = 支持力。

- Q2 什么时候超重、什么时候失重？

A 看加速度方向： a 向上 $\rightarrow$ 超重， $N = m(g + a)$ ； a 向下 $\rightarrow$ 失重， $N = m(g - a)$ ； $a = g$ （自由落体） $\rightarrow$ 完全失重， $N = 0$ 。

- Q3 判断超重失重看速度还是加速度？

A 只看加速度方向！减速上升（ a 向下）其实是失重；减速下降（ a 向上）反而是超重。“向上/向下”只说了速度，是干扰项。

- Q4 空间站里的宇航员为什么“飘”着？

A 空间站和宇航员一起绕地球做圆周运动，“重力”全部用来提供向心力，处于完全失重——不是没有重力，而是不“压”任何东西。

例题 4.1

质量 $m = 50 \text{ kg}$ 的人站在电梯里的体重计上， g 取 10 m/s^2 。

- (1) 电梯以 2 m/s^2 的加速度加速下降，体重计读数多大？
- (2) 若电梯随后以 2 m/s^2 的加速度加速上升，体重计读数又多大？

A 层 · 基础过关

- A1. 质量 60 kg 的人站在体重计上，电梯以 1 m/s^2 的加速度加速上升，体重计读数多大？
- A2. 质量 60 kg 的人站在体重计上，电梯向上运动但正在减速（加速度大小 1 m/s^2 ，方向向下），体重计读数多大？此时人处于超重还是失重？
- A3. 电梯运行中钢缆突然断裂，电梯与其中的人一起做自由落体运动。体重计读数变为多少？这叫什么状态？
- A4. 人站在电梯里，电梯向下运动但正在减速。此时人是超重还是失重？为什么？

4.2 连接体：先整体，后隔离

考点精要

- Q1 连接体问题的口诀是什么？

A “先整体，后隔离”——先整体求加速度（内力互相抵消），再隔离求内力（绳的张力、物体间摩擦力、车钩力等）。

- Q2 为什么先整体？

A 把系统看成一个物体，两物体间的相互作用力（内力）在整体法中互相抵消，只列外力，一步得到加速度 $a = \frac{F_{\text{外}}}{m_{\text{总}}}$ 。

- Q3 车头与车尾的车钩，谁的受力大？

A 越靠前的车钩拖的车厢越多，受力越大——第 1 节车钩受力 = 后面全部车厢总质量 $\times$ 加速度。

例题 4.2

在光滑水平桌面上， $m_1 = 2 \text{ kg}$ 、 $m_2 = 3 \text{ kg}$ 两物体用细绳相连，用水平拉力 $F = 15 \text{ N}$ 沿水平方向拉 m_1 （ m_1 在前、 m_2 在后， m_1 通过绳子带着 m_2 一起运动）。

- （1）求整体加速度；
- （2）求两物体间细绳的张力。

A 层 · 基础过关

- A5. 光滑水平面上， $m_1 = 3 \text{ kg}$ 、 $m_2 = 2 \text{ kg}$ 两物体用细绳连接，水平力 $F = 10 \text{ N}$ 拉 m_2 。

- (1) 求整体加速度；
- (2) 求连接两物体的绳的张力。

A6. 光滑水平桌面上，质量 $m_1 = 1\text{ kg}$ 的小物块叠放在质量 $m_2 = 4\text{ kg}$ 的木块上，水平力 $F = 10\text{ N}$ 拉木块，两者一起运动。

- (1) 求整体加速度；
- (2) 求物块与木块间的摩擦力。

A7. 质量 $m_1 = 2\text{ kg}$ 与 $m_2 = 3\text{ kg}$ 的两个物体用轻绳跨过光滑定滑轮连接， m_2 竖直悬挂、 m_1 放在光滑水平桌面上。求两物体的加速度大小 (g 取 10 m/s^2)。

4.3 临界问题：恰好、刚好、最大、最小

考点精要

- **Q1 “恰好” 两个字是什么意思？**

A 临界状态的暗号：恰好滑动 = 静摩擦力达到最大值；恰好分离 = 弹力刚好为零；恰好共速 = 相对滑动刚好结束。

- **Q2 水平传送带问题三步走是什么？**

A (1) 算物块加速度 $a = \mu g$ ；(2) 算加速到共速所需的位移 $x = \frac{v^2}{2\mu g}$ ；(3) 与传送带长度 L 比较： $x \leq L$ 能共速（先加速后匀速）， $x > L$ 不能共速（全程加速）。

- **Q3 传送带不够长会发生什么？**

A 物块还没追上传送带的速度就从另一端出去了——出口速度小于传送带速度，这是最常见的陷阱。

例题 4.3

水平传送带以 $v = 3\text{ m/s}$ 匀速运动，物块无初速度地放到传送带上，物块与传送带间动摩擦因数 $\mu = 0.3$ (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 求物块加速到与传送带共速所需的时间与位移；
- (2) 若传送带长度 $L = 1\text{ m}$ ，物块离开传送带时的速度多大？

A 层 · 基础过关

A8. 水平传送带以 $v = 2 \text{ m/s}$ 匀速运动，物块无初速度放上，物块与传送带间动摩擦因数 $\mu = 0.1$ (g 取 10 m/s^2)。求物块加速到共速的时间与位移。

A9. 水平传送带以 $v = 2 \text{ m/s}$ 匀速运动，长度 $L = 0.5 \text{ m}$ ，物块无初速度放上， $\mu = 0.5$ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 物块能否在传送带上达到共速？通过计算说明；

(2) 若能共速，物块加速阶段经历多长时间？

A10. 物体放在倾角为 θ 的斜面上，物体与斜面间的动摩擦因数 $\mu = 0.4$ 。求物体“恰好不下滑”时斜面倾角 θ (g 取 10 m/s^2 ，结果用反三角函数表示即可)。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 北京卷) 在光滑水平地面上，两相同物块用细线相连，两物块质量均为 1 kg ，细线能承受的最大拉力为 2 N 。若在水平拉力 F 作用下，两物块一起向右做匀加速直线运动，则 F 的最大值为 ()

A. 1 N B. 2 N C. 4 N D. 5 N

B2. (2024 · 北京卷) 水平传送带匀速运动，将一物体无初速度地放置在传送带上，最终物体随传送带一起匀速运动。下列说法正确的是 ()

A. 刚开始物体相对传送带向前运动

B. 物体匀速运动过程中，受到静摩擦力

C. 物体加速运动过程中，摩擦力对物体做负功

D. 传送带运动速度越大，物体加速运动的时间越长

B3. (2024 · 全国甲卷) 某学生小组探究超重和失重现象，将弹簧测力计挂在电梯内，测力计下端挂一物体。已知当地重力加速度大小为 9.8 m/s^2 。

(1) 电梯静止时，弹簧测力计示数为 5.0 N ；

(2) 电梯上行时，一段时间内测力计的示数为 4.5 N ，则此段时间内物体处于____ (填“超重”或“失重”) 状态，电梯的加速度大小为____ m/s^2 (结果保留 1 位小数)。

C 层 · 创新拓展

C1. (长征火箭发射 · 超重体验) 2024 年“神舟十八号”飞船由长征二号 F 运载火箭发射升空，发射初始阶段火箭以约 $a = 2g = 20 \text{ m/s}^2$ 的加速度竖直向上加速。一名质量 $m = 70 \text{ kg}$ 的航天员 (g 取 10 m/s^2)。

(1) 发射加速瞬间，航天员受到的支持力 (座椅/束缚系统作用力) 多大？

(2) 这个支持力相当于航天员自身重力的几倍？

(3) 飞船进入轨道后绕地球运行，航天员处于什么状态？为什么？

C2. (复兴号动车组 · 车钩受力) 复兴号动车组由 8 节车厢编组，每节车厢质量均为 $6 \times 10^4 \text{ kg}$ 。动车组启动时以 $a = 0.5 \text{ m/s}^2$ 的加速度匀加速。

- (1) 求第 1 节与第 2 节车厢之间的车钩受力大小；
- (2) 求第 7 节与第 8 节车厢之间的车钩受力大小；
- (3) 比较两次结果，你能得出什么结论？

C3. (等时圆·沿光滑弦滑下的时间) 竖直平面内固定一个光滑圆环，半径 $R = 2.5 \text{ m}$ ，最高点为 A、最低点为 B (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 小球从 A 沿直径 AB (即竖直下落) 由静止滑到 B，求所用时间 t_1 ；
- (2) 小球从 A 沿另一条光滑弦 AC 由静止滑下，弦 AC 与竖直方向 AB 的夹角为 θ ($0 < \theta < 90^\circ$)，求到达圆上 C 点的时间 t_2 (用 R 、 θ 、 g 表示)，并与 t_1 比较；
- (3) 圆上再取一般两点 P、Q (P 在 Q 上方)，从 P 沿光滑弦 PQ 滑到 Q 的时间一定与 PQ 的方向无关吗？如果不是，请指出“等时”的成立条件，并说明理由。

C4. (等时圆·时间相同速率不同) 竖直光滑圆环半径 $R = 2.5 \text{ m}$ ，最高点为 A。圆上取 B、C 两点：弦 AB 与竖直方向成 30° ，弦 AC 与竖直方向成 60° ；D 为最低点。三个光滑小球分别从 A 沿弦 AB、弦 AC、直径 AD 由静止滑下 (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 比较三个球到达 B、C、D 所用时间的大小关系；
- (2) 比较三个球到达终点时速率的大小关系；
- (3) 若三根弦均改为粗糙 (动摩擦因数均为 $\mu = 0.1$)，三球到达终点的时间还相同吗？定性说明你的判断依据。

C5. (探究加速度与力、质量的关系) 用如图所示的实验装置探究加速度 a 与合外力 F 、质量 m 的关系：打点计时器固定在长木板一端，小车连纸带，细绳跨过滑轮悬挂槽码 (图略，装置同教材)。

- (1) 实验前为什么要“平衡摩擦力”？写出做法，并说明如何判断已平衡好；
- (2) 保持小车质量不变，改变槽码总重力 F ，测得 a - F 图像：若图线与横轴交于 F 轴正半轴 (不过原点)，说明实验操作出了什么问题？若 F 较大时图线明显向下弯曲，原因是什么？
- (3) 保持 F 不变，改变小车质量，正确做法是画 a - $1/m$ 图像还是 a - m 图像？为什么？
- (4) 为什么要求槽码质量远小于小车质量？槽码质量过大时 (2) 中图像弯曲的机理是什么？

C6. (板块模型·物块滑上木板) 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的小物块以 $v_0 = 6 \text{ m/s}$ 的水平速度滑上静止在光滑水平面上的长木板左端，木板质量 $M = 2 \text{ kg}$ ，物块与木板间动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ，木板足够长但长度有限 $L = 3 \text{ m}$ (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 分别求物块和木板的加速度大小及方向；
- (2) 物块能否滑离木板？若不能，求最终共同速度；若能，求滑离时两者的速度；
- (3) 若要求物块恰好不滑离木板，木板最短长度是多少？

C7. (板块模型·外力拉板) 质量 $M = 2 \text{ kg}$ 的长木板静止在光滑水平面上，其上放质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的小物块，物块与木板间动摩擦因数 $\mu = 0.3$ (g 取 10 m/s^2)。现用水平力 F 拉木板。

- (1) 当 F 较小时两者一起加速。求两者恰好发生相对滑动时 F 的大小 F_0 ;
- (2) 当 $F = 15 \text{ N}$ 时, 求物块和木板的加速度;
- (3) $F = 15 \text{ N}$ 时, 从开始运动起 2 s 内, 物块相对木板滑过的距离是多少?

本章综合 · S 层

S1. (超重 + 连接体综合) 电梯内水平放置一台台秤, 台秤上放一只质量 $m_1 = 20 \text{ kg}$ 的箱子 (g 取 10 m/s^2)。

(1) 电梯以 2 m/s^2 的加速度加速上升, 台秤读数多大?

(2) 电梯内还有一张光滑水平桌面, 桌面上放着质量 $m_2 = 5 \text{ kg}$ 的小物块, 用水平力 $F = 5 \text{ N}$ 推物块, 求物块相对电梯的加速度 (此时电梯仍以 1 m/s^2 加速上升);

(3) 若电梯钢缆断裂、整体做自由落体运动, 台秤读数变为多少?

S2. (传送带综合) 水平传送带长 $L = 2 \text{ m}$, 以 $v = 2 \text{ m/s}$ 匀速运动, 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的物块无初速度放到传送带左端 (g 取 10 m/s^2)。

(1) 若 $\mu = 0.2$, 求物块通过传送带所需的时间;

(2) 若 $\mu = 0.5$, 其他条件不变, 求物块通过传送带所需的时间;

(3) 在 (1) 的情形下, 从放上物块到共速, 传送带相对物块滑过的距离 (物块在传送带上留下的“痕迹”长度) 是多少?

第五章 曲线运动与圆周运动

5.1 曲线运动：速度方向永远沿切线

考点精要

- Q1 曲线运动的速度方向在哪？它一定是变速运动吗？

A 速度方向沿轨迹切线，时刻在变——所以曲线运动一定是变速运动（至少方向在变），即使速度大小不变（如匀速圆周）也算变速。

- Q2 合力方向与曲线轨迹有什么关系？

A 合力（加速度）指向轨迹的凹侧（内侧）——“拐弯向心力指向弯心”，骑车拐弯身体自然内倾，就是让合力指向弯心。

- Q3 合力与速度共线、垂直时分别做什么运动？

A 共线 $\rightarrow$ 直线运动（同向加速、反向减速）；垂直 $\rightarrow$ 匀速率曲线运动（只改变速度方向，如绳拉小球做匀速圆周）。

- Q4 斜抛是“匀变速”运动吗？

A 是。斜抛只受重力，加速度恒为 g （大小方向都不变），所以是匀变速曲线运动——别被“曲线”骗了，只要合力恒定就是匀变速。

例题 5.1

运动员将链球掷出后，链球在空中做斜抛运动（忽略空气阻力）。

- (1) 链球飞行过程中加速度的大小、方向如何？
- (2) 链球到达最高点时，速度方向如何？加速度方向如何？
- (3) 为什么说链球的运动是“匀变速曲线运动”？

A 层 · 基础过关

A1. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 曲线运动一定是变速运动；
- (2) 做曲线运动的物体，所受合力一定指向轨迹的凹侧；
- (3) 斜抛运动（忽略空气阻力）是匀变速曲线运动。

A2. 根据合力方向与速度方向的关系判断运动类型：

- (1) 合力方向与速度方向相同且恒定——物体做什么运动？
- (2) 合力方向与速度方向相反——物体做什么运动？
- (3) 合力始终与速度方向垂直——物体做什么运动？
- (4) 合力恒定但方向始终与速度方向不共线（如斜抛）——物体做什么运动？为什么？

5.2 平抛运动：水平匀速 + 竖直自由落体

考点精要

• Q1 平抛运动怎么处理？

A 拆成两个分运动：水平方向匀速直线 ($x = v_0 t$)，竖直方向自由落体 ($y = \frac{1}{2}gt^2$, $v_y = gt$)，两个方向共用同一个时间 t 。

• Q2 落地时间由什么决定？

A 只由高度决定： $t = \sqrt{2h/g}$ ，与水平初速度无关——同样高度，子弹水平射出的落地时间和自由落体的石头一样。

• Q3 速度偏角与位移偏角什么关系？

A 速度偏角 $\tan \theta = \frac{gt}{v_0}$ ，位移偏角 $\tan \alpha = \frac{gt}{2v_0}$ ，所以 $\tan \theta = 2 \tan \alpha$ ——速度偏角更大。

• Q4 水平射程怎么求？

A $x = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ ——先由高度求时间，再由时间求射程。

例题 5.2

从高 $h = 45 \text{ m}$ 的平台上以 $v_0 = 10 \text{ m/s}$ 的水平速度抛出一小球 (g 取 10 m/s^2 ，忽略空气阻力)。

- (1) 求小球落地时间；
- (2) 求小球的水平射程；
- (3) 求小球落地瞬间速度的大小与方向。

A 层 · 基础过关

A3. 从高 $h = 20\text{ m}$ 处以 $v_0 = 5\text{ m/s}$ 水平抛出一小球 (g 取 10 m/s^2)。求落地时间与水平射程。

A4. 两个小球从同一高度同时水平抛出，初速度分别为 10 m/s 和 20 m/s 。

- (1) 谁先落地？
- (2) 它们的水平射程之比是多少？

A5. 小球做平抛运动，某时刻竖直分速度 $v_y = 30\text{ m/s}$ (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 小球已运动了多长时间？
- (2) 若水平初速度 $v_0 = 40\text{ m/s}$ ，此时速度与水平方向的夹角 θ 满足 $\tan \theta = ?$

5.3 圆周运动：向心加速度的力学根源

考点精要

- **Q1 线速度、角速度、周期有什么关系？**

$$A \quad v = \frac{2\pi r}{T}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad v = \omega r。$$

- **Q2 向心力是一种新力吗？**

A 不是。向心力是“提供向心加速度的合力”。圆周问题的第一问永远是：谁提供向心力？(绳的拉力、摩擦力、支持力与重力的合力、万有引力……)

- **Q3 绳球模型最高点通过的最小速度是多少？**

$$A \quad \text{恰好通过最高点时绳拉力为零，重力独自提供向心力：} mg = \frac{mv^2}{r}, \quad v_{\min} = \sqrt{gr}。$$

- **Q4 汽车过拱桥顶，速度越大越怎样？**

A $mg - N = \frac{mv^2}{R}$, $N = mg - \frac{mv^2}{R}$ ——速度越大支持力越小；当 $v = \sqrt{gR}$ 时 $N = 0$ ，车“飞”起来（完全失重）。

- **Q5 甩干机为什么能把水甩出去？**

A 离心现象：转速越大，水需要的向心力 $F = m\omega^2 r$ 越大，超过水与衣物间的吸附力时，水沿切线方向“飞”出。

例题 5.3

汽车质量 $m = 1500 \text{ kg}$ ，以 $v = 10 \text{ m/s}$ 的速度通过半径 $R = 50 \text{ m}$ 的拱形桥最高点 (g 取 10 m/s^2)。

- (1) 求桥面对汽车的支持力；
- (2) 汽车以多大速度通过该桥顶时，支持力恰好为零？
- (3) 若汽车以同样速度通过同半径的凹形桥最低点，桥面对汽车的支持力又是多大？

A 层 · 基础过关

A6. 物体做匀速圆周运动，半径 $r = 2 \text{ m}$ ，角速度 $\omega = 2 \text{ rad/s}$ ，求线速度大小。

A7. 物体做匀速圆周运动，半径 $r = 1 \text{ m}$ ，周期 $T = 0.5 \text{ s}$ ，求线速度大小。

A8. 用长 $l = 1 \text{ m}$ 的细绳拴一个小球，在竖直面内做圆周运动 (g 取 10 m/s^2)。小球恰好通过最高点时，速度大小为多少？

A9. 汽车质量 $m = 1000 \text{ kg}$ ，以 $v = 10 \text{ m/s}$ 通过半径 $R = 40 \text{ m}$ 的拱形桥顶 (g 取 10 m/s^2)。求桥面对汽车的支持力大小。

A10. 关于圆周运动，判断下列说法是否正确并说明理由：

- (1) 向心力是物体受到的一种新力；
- (2) 做匀速圆周运动的物体加速度不变；
- (3) 火车转弯、汽车过拱桥都需要“某个力”来提供向心力。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 全国甲卷) 一同学将铅球水平推出，不计空气阻力和转动的影响，铅球在平抛运动过程中 ()

- A. 机械能一直增加 B. 加速度保持不变
C. 速度大小保持不变 D. 被推出后瞬间动能最大

B2. (2022 · 北京卷) 我国航天员在“天宫课堂”中演示了多种有趣的实验。某同学设计了如下实验：细绳一端固定，另一端系一小球，给小球一初速度使其在竖直平面内做圆周运动。无论在“天宫”还是在地面做此实验 ()

- A. 小球的速度大小均发生变化
B. 小球的向心加速度大小均发生变化
C. 细绳的拉力对小球均不做功
D. 细绳的拉力大小均发生变化

B3. (2022 · 广东卷) 在竖直平面内，截面为三角形的小积木悬挂在离地足够高处，一玩具枪的枪口与小积木上 P 点等高且相距为 L 。当玩具子弹以水平速度 v 从枪口向 P 点射出时，小

积木恰好由静止释放，子弹从射出至击中积木所用时间为 t ，不计空气阻力。下列关于子弹的说法正确的是（ ）

A. 将击中 P 点， t 大于 $\frac{L}{v}$

B. 将击中 P 点， t 等于 $\frac{L}{v}$

C. 将击中 P 点上方， t 大于 $\frac{L}{v}$

D. 将击中 P 点下方， t 等于 $\frac{L}{v}$

C 层·创新拓展

C1.（中国高铁过弯·圆周运动）我国高速铁路设计时速 350 km/h，一些区段弯道半径可达 $R = 9000 \text{ m}$ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 列车以 350 km/h 通过该弯道时，向心加速度为多大？

(2) 若轨道面是水平的，这个向心加速度完全靠轮轨间的横向摩擦力提供，其数值约为重力加速度的百分之几？

(3) 实际高铁弯道采用“外轨超高”（轨道面倾斜）来提供向心力，若设计轨道面与水平面的夹角为 θ ，应满足 $\tan \theta \approx \frac{a}{g}$ 。估算此时 θ 约为多大？

C2.（无人机救灾物资空投·平抛运动）某型号救灾无人机在距地面 $h = 20 \text{ m}$ 的高度以 $v_0 = 10 \text{ m/s}$ 的水平速度匀速飞行，向地面投放救生物资 (g 取 10 m/s^2 ，忽略空气阻力)。

(1) 物资离开无人机后，经多长时间落地？

(2) 物资落地时相对投放点的水平距离多大？

(3) 若想让物资恰好落在无人机正下方的地面目标上，无人机应在到达目标正上空前多远开始投放？

(4) 物资落地瞬间的速度大小约为多少？

C3.（小船过河）河宽 $d = 240 \text{ m}$ ，小船在静水中的速度 $v_1 = 5 \text{ m/s}$ ，水流速度 $v_2 = 3 \text{ m/s}$ 。

(1) 求船头垂直河岸时过河时间，以及船的实际位移大小；

(2) 要使航程最短，船头应朝什么方向？最短航程是多少？此时过河时间多长？

(3) 若水流速度增大为 $v_2' = 6 \text{ m/s}$ （大于船速），船还能垂直过河吗？此时最短航程是多少？

C4.（绳端速度分解·人拉船）岸上的人通过定滑轮用绳拉水平面上的小船（图略），收绳速度恒为 $v = 2 \text{ m/s}$ ，某时刻绳与水平面的夹角 $\theta = 60^\circ$ 。

(1) 求此时小船的速率（沿水平方向）；

(2) 小船向岸边靠近的过程中 (θ 逐渐增大)，船速如何变化？

(3) 有同学认为“船速 = 收绳速度 $\times \cos \theta$ ”，他的结论错在哪里？正确的分解依据是什么？

本章综合·S 层

S1.（拱桥临界 + 平抛综合）汽车驶上半径 $R = 20\text{ m}$ 的拱形桥，当汽车以 $v = \sqrt{gR}$ 的速度通过桥顶时，车对桥面的压力恰好为零，汽车“飞离”桥面后做平抛运动（ g 取 10 m/s^2 ）。已知桥顶距地面高度 $H = 45\text{ m}$ 。

- （1）求汽车“飞离”桥面瞬间的速度大小；
- （2）汽车从飞离桥面到落地经历多长时间？
- （3）汽车落地点距桥顶的水平距离多大？
- （4）汽车落地瞬间速度的大小约为多少？

S2.（圆周 + 平抛综合）小物块放在匀速转动的水平圆盘边缘，圆盘半径 $r = 1\text{ m}$ ，物块与圆盘间的动摩擦因数 $\mu = 0.8$ （ g 取 10 m/s^2 ，最大静摩擦力等于滑动摩擦力）。圆盘转速从零缓慢增大。

- （1）物块随圆盘转动时，向心力由什么力提供？
- （2）圆盘角速度增大到多大时，物块恰好相对圆盘滑动？
- （3）物块恰好滑出瞬间，它沿什么方向离开圆盘？若圆盘边缘距地面 $h = 0.8\text{ m}$ ，物块离开后做平抛运动，求落地时间与离开点正下方的水平距离。

第六章 万有引力与航天

6.1 万有引力定律

考点精要

- Q1 万有引力定律的公式是什么？适用条件是什么？

A 任意两个物体之间的引力 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ，其中 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。公式严格适用于质点；对质量均匀分布的球体也适用，此时 r 为两球心间的距离。

- Q2 为什么平时感觉不到物体之间的引力？

A 因为引力常量 G 太小。两个 60 kg 的人相距 1 m ，引力只有约 $2.4 \times 10^{-7} \text{ N}$ ，约为一根头发重量的万分之一。万有引力“普适但微弱”，只有地球这种巨大质量才有明显效果。

- Q3 卡文迪许是怎么“称出地球质量”的？

A 他用扭秤测出了引力常量 G ，再结合地表重力 $mg = \frac{GMm}{R^2}$ ，得 $M = \frac{gR^2}{G} \approx 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ 。测出 G ，“称”出地球。

- Q4 “平方反比”是什么意思？

A 引力与距离的平方成反比：距离变为 2 倍，引力变为原来的 $1/4$ ；变为 3 倍，引力变为原来的 $1/9$ 。

例题 6.1

地球表面的重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

- (1) 估算地球质量 M ；
- (2) 估算一个质量 70 kg 的人受到的地球引力（重力）大小。

A 层 · 基础过关

A1. 两个物体之间的距离变为原来的 3 倍，它们之间的万有引力变为原来的几分之几？若其中一个物体的质量变为原来的 2 倍而距离不变，引力又变为原来的几倍？

A2. 已知地球表面重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。用黄金代换关系估算地球质量。

A3. 两个质量均为 50 kg 的同学相距 1 m。求他们之间的万有引力大小，并把它与其中一位同学受到的重力（约 500 N）作比较。

A4. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

(1) 万有引力只存在于质量巨大的天体之间，普通物体之间没有万有引力；

(2) 质量均匀分布的球体与球外一质点之间的引力，可以看作球体全部质量集中在球心与质点的引力；

(3) 两物体距离趋于零时，万有引力趋于无穷大。

6.2 天体运动

考点精要

• Q1 卫星绕地球做圆周运动，向心力从哪来？

A 万有引力。 $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} mr$ ，由此可解出 $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 、 $T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$ 。

• Q2 什么是“高轨低速大周期”？

A 轨道半径越大，万有引力越弱（平方反比），卫星“拐弯”的力越小，所以线速度越小、角速度越小、周期越大。

• Q3 什么是黄金代换？什么时候用它？

A 地表附近 $mg \approx \frac{GMm}{R^2}$ ，故 $GM = gR^2$ 。题目只给了 g 和 R 、没给地球质量 M 时，用它把“看不见的 GM ”换成“看得见的 g 、 R ”。

• Q4 三个宇宙速度分别对应什么？

A 第一宇宙速度 $v_1 = \sqrt{gR} \approx 7.9 \text{ km/s}$ （近地环绕速度，“不掉下来”的最低速度）；第二宇宙速度 11.2 km/s （挣脱地球束缚）；第三宇宙速度 16.7 km/s （挣脱太阳系束缚）。

例题 6.2

一颗卫星在距地面 $h = 2.0 \times 10^6 \text{ m}$ 的圆轨道上运行。已知地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，地表重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

- (1) 求卫星的轨道速度 v ；
- (2) 求卫星的运行周期 T 。

A 层 · 基础过关

A5. 某卫星的轨道半径增大为原来的 2 倍（仍做匀速圆周运动），其线速度变为原来的多少倍？周期变为原来的多少倍？

A6. 已知地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，地表重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。用公式 $v_1 = \sqrt{gR}$ 计算第一宇宙速度，并换算成 km/h 。

A7. 关于地球同步卫星，下列说法正确的是（ ）

- A. 可以定点在北京正上空
- B. 周期必须等于地球自转周期（24 h）
- C. 轨道高度可以随意选择
- D. 运行速度大于第一宇宙速度

A8. 甲、乙两颗卫星绕地球做匀速圆周运动，轨道半径之比 $r_{\text{甲}} : r_{\text{乙}} = 4 : 1$ 。

- (1) 求两卫星线速度之比；
- (2) 求两卫星运行周期之比。

6.3 卫星与变轨

考点精要

• Q1 同步卫星为什么“钉”在赤道正上方？

A 周期必须等于地球自转周期 24 h，且万有引力必须全部提供向心力（方向指向轨道圆心）——只有赤道正上方的轨道满足。高度约 $3.6 \times 10^7 \text{ m}$ （约 5.6 倍地球半径），轨道速度约 3.1 km/s 。

• Q2 卫星变轨怎么操作？口诀是什么？

A 低轨加速 $\rightarrow$ 离心上移 $\rightarrow$ 到高轨减速定轨；反向则先减速向心、再加速定轨。口诀“加速变高轨、减速变低轨”。注意：同一轨道半径对应唯一运行速度，加速减速只发生在变轨瞬间。

• Q3 北斗卫星是怎么定位的？

A 北斗/GPS 卫星按已知轨道参数运行，接收机同时测到至少 4 颗卫星的距离，用“测距—交会”算出自己在地球上的位置。

例题 6.3

神舟飞船先在半径 $r_1 = 6.7 \times 10^6 \text{ m}$ 的低圆轨道运行，变轨到半径 $r_2 = 7.2 \times 10^6 \text{ m}$ 的高圆轨道与空间站对接。已知 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 。

- (1) 分别求两轨道上的运行速度 v_1 、 v_2 ；
- (2) 飞船应从低轨如何操作进入高轨？
- (3) 比较 v_1 、 v_2 ，验证“高轨低速”。

A 层 · 基础过关

A9. 已知 $GM = gR^2 \approx 4.0 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ，同步卫星周期 $T = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$ ，地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 。

- (1) 估算同步卫星的轨道半径 r ；
- (2) 估算同步卫星距地面的高度 h 。

A10. 嫦娥五号探测器在环月圆轨道上运行，若要在近月点启动发动机进入返回地球的转移轨道，应加速还是减速？比较变轨前后探测器在近月点速度的大小，并说明理由。

B 层 · 真题研习

B1. (2022 · 广东卷) “祝融号”火星车需要“休眠”以度过火星寒冷的冬季。假设火星和地球的冬季是各自公转周期的四分之一，且火星的冬季时长约为地球的 1.88 倍。火星和地球绕太阳的公转均可视为匀速圆周运动。下列关于火星、地球公转的说法正确的是 ()

- A. 火星公转的线速度比地球的大
- B. 火星公转的角速度比地球的大
- C. 火星公转的半径比地球的小
- D. 火星公转的加速度比地球的小

B2. (2023 · 天津卷) 运行周期为 24 h 的北斗卫星比运行周期为 12 h 的 ()

- A. 加速度大
- B. 角速度大
- C. 周期小
- D. 线速度小

B3. (2024 · 福建卷) 据报道，我国计划发射的“巡天号”望远镜将运行在离地面约 400 km 的轨道上，其视场比“哈勃”望远镜的更大。已知“哈勃”运行在离地面约 550 km 的轨道上，若两望远镜绕地球近似做匀速圆周运动，则“巡天号” ()

- A. 角速度大小比“哈勃”的小
- B. 线速度大小比“哈勃”的小
- C. 运行周期比“哈勃”的小
- D. 向心加速度大小比“哈勃”的大

B4. (2024·全国甲卷) 2024年5月, 嫦娥六号探测器发射成功, 开启了人类首次从月球背面采样返回之旅。将采得的样品带回地球, 飞行器需经过月面起飞、环月飞行、月地转移等过程。月球表面自由落体加速度约为地球表面自由落体加速度的 $1/6$ 。下列说法正确的是 ()

- A. 在环月飞行时, 样品所受合力为零
- B. 若将样品放置在月球正面, 它对月球表面的压力等于零
- C. 样品在不同过程中受到的引力不同, 所以质量也不同
- D. 样品放置在月球背面时对月球的压力, 比放置在地球表面时对地球的压力小

B5. (2026·云南卷) 我国“天宫”空间站的轨道离地高度约为 400 km , 空间站内的宇航员每 24 h 能看到 16 次日出。“吉林一号”遥感卫星组网中的某颗卫星轨道离地高度约为 535 km 。已知地球半径约为 6400 km , 空间站与该卫星绕地球的运动均视为匀速圆周运动, 则该卫星的周期约为 ()

- A. 1.0 h
- B. 1.5 h
- C. 2.0 h
- D. 2.4 h

B6. (2025·全国卷) “天都一号” 通导技术试验卫星测距试验的成功, 标志着我国在深空轨道精密测量领域取得了技术新突破。“天都一号” 在环月椭圆轨道上运行时 ()

- A. 受月球的引力大小保持不变
- B. 相对月球的速度大小保持不变
- C. 离月球越近, 其相对月球的速度越大
- D. 离月球越近, 其所受月球的引力越小

C 层·创新拓展

C1. (嫦娥五号月面取样) 嫦娥五号探测器完成了我国首次地外天体采样返回。已知月球表面自由落体加速度 $g_{\text{月}} \approx 1.63\text{ m/s}^2$ (约为地球的 $1/6$), 月球半径 $R_{\text{月}} \approx 1.7 \times 10^6\text{ m}$, 引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11}\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

- (1) 求月球的第一宇宙速度;
- (2) 嫦娥五号“上升器”质量为 500 kg , 求它在月球表面受到的重力大小;
- (3) 若嫦娥五号在距月面 200 km 的圆轨道上绕月飞行, 求它的轨道速度大小。

C2. (双星系统) 天文学上把相距较近、仅在彼此万有引力作用下绕连线上某点做匀速圆周运动的两颗恒星称为双星。设两星质量分别为 $m_1 = 2m$ 、 $m_2 = m$, 间距为 L , 引力常量为 G 。

(1) 证明：两星做圆周运动的周期相等，且轨道半径与质量成反比 ($r_1 : r_2 = m_2 : m_1$)；

(2) 求两星的轨道半径 r_1 、 r_2 和周期 T (用 G 、 m 、 L 表示)；

(3) 实际观测中往往只能测得周期 T 和间距 L 。写出双星总质量的表达式，并说明这一结果的天文意义。

C3. (卫星追及相遇) A、B 两颗卫星在同一轨道平面内绕地球沿相同方向做匀速圆周运动，轨道半径不同：A 的周期 $T_A = 90 \text{ min}$ ，B 的周期 $T_B = 180 \text{ min}$ 。某时刻两卫星相距最近 (与地心共线且同侧)。

(1) 求下次两卫星相距最近所需的时间；

(2) 求从此刻起第一次相距最远所需的时间；

(3) 若 A、B 绕行方向相反 (一顺一逆)，上述两个时间各变为多少？

本章综合 · S 层

S1. (北斗卫星组网综合) 北斗三号全球卫星导航系统由地球静止轨道卫星 (GEO，周期约 24 h)、倾斜地球同步轨道卫星和轨道高度约 $2.15 \times 10^4 \text{ km}$ 的中圆轨道卫星 (MEO) 等组成。已知地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，地表重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 求 GEO 卫星的轨道速度大小；

(2) 已知 MEO 卫星周期为 12 h，估算 MEO 卫星的轨道半径；

(3) 比较 GEO 卫星与 MEO 卫星的线速度大小，并说明“高轨低速”在其中如何体现。

第七章 功与能

7.1 功

考点精要

- Q1 功怎么算？

A $W = Fx \cos \theta$ ，其中 θ 是力与位移的夹角。力在位移方向上的分力 $\times$ 位移，就是力做的功。

- Q2 正功、负功、零功分别代表什么？

A 正功 ($\theta < 90^\circ$)：力在帮运动、输入能量；负功 ($\theta > 90^\circ$)：力在拦运动、拿走能量；零功 ($\theta = 90^\circ$)：力与位移垂直，白出力——向心力、洛伦兹力都不做功。

- Q3 功的正负表示方向吗？

A 不表示。功是标量，正负只表示“输入能量”还是“拿走能量”。

- Q4 F-x 图有什么用？

A 图线与 x 轴围成的面积 = 功。恒力是矩形，变力就求曲线下的面积。

例题 7.1

工人用大小 $F = 100 \text{ N}$ 、与水平方向成 37° 角的恒力拉雪橇，雪橇沿水平地面匀速前进 5 m 。已知雪橇质量 $m = 40 \text{ kg}$ ， $g = 10 \text{ m/s}^2$ ， $\sin 37^\circ = 0.6$ 、 $\cos 37^\circ = 0.8$ 。

- (1) 求拉力做的功；
- (2) 求摩擦力做的功；
- (3) 求各力对雪橇做的总功。

A 层 · 基础过关

A1. 用水平恒力 $F = 50 \text{ N}$ 推箱子沿水平地面前进 10 m ，力与位移同向。求推力做的功。

A2. 用与水平方向成 60° 角的拉力 $F = 20 \text{ N}$ 拉雪橇沿水平地面前进 5 m 。求拉力做的功。

A3. 判断下列说法中哪些力做了功、做的是正功还是负功：

- (1) 竖直上抛的小球上升过程中，重力做功的情况；
- (2) 沿粗糙斜面向上的物体，拉力、重力、摩擦力、支持力做功的情况；
- (3) 匀速圆周运动中，向心力做功的情况。

7.2 功率

考点精要

• Q1 平均功率和瞬时功率分别怎么算？

A 平均功率 $P = \frac{W}{t}$ ；瞬时功率 $P = Fv \cos \theta$ （恒力或瞬时力）。

• Q2 汽车上坡为什么要换低挡？

A 发动机功率一定： $P = Fv$ ，速度小则牵引力大。上坡需要大牵引力，只能降速换力——这就是“用速度换力”。

• Q3 机车能达到的最大速度在哪出现？

A 牵引力减小到等于阻力时，速度不再增大， $v_{\max} = \frac{P}{f}$ 。

• Q4 机车启动一般分哪两个阶段？

A 先匀加速（功率逐渐增大到额定值），后恒功率（牵引力减小、加速度减小，最后匀速）。

例题 7.2

某汽车发动机额定功率 $P = 80 \text{ kW}$ ，在平直公路上以 $v = 20 \text{ m/s}$ 匀速行驶。

- (1) 求此时汽车的牵引力；
- (2) 若该车需克服 8000 N 的阻力上坡，为保持匀速行驶，车速应降到多少？

A 层 · 基础过关

A4. 质量 60 kg 的同学从 1 楼跑到 10 楼（上升高度 30 m），用时 30 s。求他爬楼过程中克服重力做功的平均功率。

A5. 某汽车以额定功率 $P = 60 \text{ kW}$ 行驶，速度达到 $v = 30 \text{ m/s}$ 时，牵引力为多大？

A6. 某汽车额定功率 $P = 60 \text{ kW}$ ，行驶中阻力恒为 2000 N。求该车在平直路面上能达到的最大速度。

7.3 动能定理

考点精要

• Q1 动能定理怎么表述？

A 合外力做的功等于动能的变化： $W_{\text{合}} = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$ 。

• Q2 什么时候优先用动能定理？

A 曲线运动、变力做功、多过程问题——不关心中间过程，只算首尾动能和所有力做的功，一刀切。

• Q3 重力做功有什么特点？

A 只与高度差有关： $W_G = mgh$ ，与路径无关。所以同一高度，斜面再陡再长，滑到底的速度都一样。

• Q4 摩擦力做功呢？

A 与路径有关，要走实际路径： $W_f = -\mu mgs$ （ s 是实际路径长度）。有摩擦时动能定理写成 $mgh - W_{\text{摩}} = \frac{1}{2}mv^2$ 。

例题 7.3

质量 $m = 2 \text{ kg}$ 的物体，从高 $h = 3 \text{ m}$ 、倾角 37° （斜面长 $s = 5 \text{ m}$ ）的粗糙斜面顶端由静止滑下，物体与斜面间动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ， $g = 10 \text{ m/s}^2$ ， $\cos 37^\circ = 0.8$ 。求物体滑到底端时的速度大小。

A 层 · 基础过关

A7. 质量 2 kg 的物体，速度从 3 m/s 增大到 5 m/s 。求动能的变化量；合外力对物体做了多少功？

A8. 汽车质量 1000 kg ，以 20 m/s 的速度在水平路面上行驶，司机刹车后轮胎抱死，车轮与路面间动摩擦因数 $\mu = 0.5$ 。求刹车距离。

A9. 质量为 m 的物体从高 $h = 2\text{ m}$ 的光滑斜面顶端由静止滑下，滑到底端后进入水平粗糙地面 ($\mu = 0.2$)，直至停下。求物体在水平地面上滑行的距离。

A10. 质量 1 kg 的小球以初速度 $v_0 = 20\text{ m/s}$ 竖直上抛，不计空气阻力， $g = 10\text{ m/s}^2$ 。用动能定理求小球上升的最大高度。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 安徽卷) 某同学参加户外拓展活动，遵照安全规范，坐在滑板上，从高为 h 的粗糙斜坡顶端由静止下滑，至底端时速度为 v 。已知人与滑板的总质量为 m ，可视为质点。重力加速度大小为 g ，不计空气阻力。则此过程中人与滑板克服摩擦力做的功为 ()

A. mgh

B. $\frac{1}{2}mv^2$

C. $mgh + \frac{1}{2}mv^2$

D. $mgh - \frac{1}{2}mv^2$

B2. (2024 · 江西卷) 庐山瀑布“飞流直下三千尺，疑是银河落九天”。瀑布高 150 m ，水流量为 $10\text{ m}^3/\text{s}$ ，假设利用瀑布来发电，能量转化效率为 70% ，则发电功率为 () (水的密度 $1.0 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ ， g 取 10 m/s^2)

A. 10^9 W

B. 10^7 W

C. 10^5 W

D. 10^3 W

B3. (2023 · 广东卷) 人们用滑道从高处向低处运送货物。如图所示，可看作质点的货物从半径为 $h = 4\text{ m}$ 的四分之一圆弧滑道顶端 P 点由静止释放，沿滑道运动到圆弧末端 Q 点时速度大小为 6 m/s 。已知货物质量为 20 kg ，过 Q 点的切线水平，重力加速度取 10 m/s^2 。关于货物从 P 点运动到 Q 点的过程，下列说法正确的有 ()

A. 重力做的功为 360 J

B. 克服阻力做的功为 440 J

C. 经过 Q 点时向心加速度大小为 9 m/s^2

D. 经过 Q 点时对轨道的压力大小为 380 N

B4. (2023 · 天津卷) 质量为 m 的列车匀速行驶，速度为 v 。司机突然以大小为 F 的力制动刹

车, 列车减速到停止, 过程中始终受到大小为 f 的阻力。下列说法正确的是 ()

A. 减速运动的加速度大小 $a = \frac{F}{m}$

B. 制动力 F 的冲量为 mv

C. 刹车距离为 $\frac{mv^2}{2(F+f)}$

D. 列车匀速行驶时发动机的输出功率为 $(f+F)v$

B5. (2025 · 全国卷) 撑杆跳高运动中, 运动员经过助跑、撑杆起跳, 最终越过横杆。若运动员起跳前助跑速度为 10 m/s , 则理论上运动员助跑获得的动能可使其重心提升的最大高度为 (重力加速度取 10 m/s^2) ()

A. 4 m

B. 5 m

C. 6 m

D. 7 m

B6. (2025 · 全国 II 卷) 倾角 $\theta = 37^\circ$ 的固定光滑斜面, 底端有一垂直斜面的挡板。质量 $m = 2 \text{ kg}$ 的小物块从斜面上距离底端 $L = 5 \text{ m}$ 处由静止下滑, 物块与挡板碰撞无机械能损失 (g 取 10 m/s^2 , $\sin 37^\circ = 0.6$)。

(1) 求物块第一次下滑至斜面底端的时间;

(2) 物块第一次与挡板碰撞后, 沿斜面上滑的最大距离。

C 层 · 创新拓展

C1. (新能源汽车 · 再生制动能量回收) 某纯电动汽车质量 $m = 1500 \text{ kg}$, 以 $v = 20 \text{ m/s}$ (72 km/h) 在平直公路上匀速行驶。

(1) 求此时汽车的动能;

(2) 司机踩下制动踏板, 汽车在 40 m 距离内匀减速至静止。求此过程合外力做的功及平均制动力的大小;

(3) 该车采用再生制动技术, 可将制动过程中动能的 60% 回收为电能储存在电池里。求一次刹车回收的电能; 若这些电能全部用于下一次加速到 20 m/s (忽略损耗), 能提供所需能量的百分之多少?

C3. (多过程 · 斜面滑下接水平面) 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的物体从高 $h = 0.8 \text{ m}$ 的光滑斜面顶端由静止滑下, 斜面底端与水平面平滑连接, 水平面动摩擦因数 $\mu = 0.2$ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 求物体到达斜面底端时的速度;

(2) 求物体在水平面上滑行的距离;

(3) 若斜面也粗糙 (动摩擦因数同为 0.2 , 斜面倾角 $\alpha = 30^\circ$), 求物体在斜面上的加速度, 并求到达斜面底端时的速度 ($\cos 30^\circ \approx 0.866$)。

本章综合 · S 层

S1. (斜面—水平面综合) 质量 $m = 2 \text{ kg}$ 的物体, 从高 $h = 3 \text{ m}$ 的光滑斜面顶端由静止滑下 (斜

面长 6 m)，到达底端后进入水平粗糙地面，动摩擦因数 $\mu = 0.3$ ，继续滑行直到停止。 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 求物体滑到斜面底端时的速度大小；

(2) 求物体在水平地面上滑行的距离；

(3) 求物体从开始下滑到最终停止的整个过程中，合外力对物体做的总功，并说明重力做的功与摩擦力做的功之间存在什么关系。

第八章 机械能守恒

8.1 势能

考点精要

- Q1 重力势能怎么算？参考面起什么作用？

A $E_p = mgh$, h 是物体相对参考面的高度。参考面不同，势能数值不同，但同一过程势能的变化量不变（与参考面无关）。

- Q2 弹性势能怎么算？

A $E_p = \frac{1}{2}kx^2$, x 是形变量。拉长 2 cm 和压缩 2 cm，形变量相同，弹性势能一样大。

- Q3 为什么能定义势能？

A 因为重力做功与路径无关、只与高度差有关 ($W_G = mg\Delta h$)。做功与路径无关的力（保守力：重力、弹力、万有引力、电场力）才能定义势能。

- Q4 摩擦力为什么没有“摩擦势能”？

A 摩擦力做功与路径有关（绕一圈走得越远做功越多），是“偷能量”的力，无法定义势能。

例题 8.1

质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的物体，分别从高 $h = 2 \text{ m}$ 的光滑斜面和光滑曲面顶端由静止滑到底部。

- (1) 两种路径滑到底部的速度是否相同？各为多大？
- (2) 若问“谁先到达底部”，答案与 (1) 一样吗？说明理由。

A 层 · 基础过关

A1. 质量 1 kg 的物体静置在 10 楼（距地面 30 m ）。以地面为参考面，它的重力势能多大？以 10 楼为参考面呢？若把它移到 1 楼（距地面 3 m ），以地面为参考面，重力势能减少了多少？

A2. 一轻弹簧劲度系数 $k = 500\text{ N/m}$ 。把它拉长 2 cm ，弹性势能多大？若压缩 2 cm ，弹性势能多大？由此你能得出什么结论？

A3. 质量 2 kg 的物体，从高度 5 m 处分别沿竖直直线和任意弯曲路径降到高度 2 m 处。求两种路径重力做功的大小，并说明重力做功的特点。

8.2 机械能守恒定律

考点精要

• Q1 机械能指什么？守恒方程怎么写？

A 动能 + 势能（重力势能和弹性势能）。 $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$ 。

• Q2 机械能守恒的条件是什么？

A 两个依据：（1）只有重力/弹力做功；（2）除保守力外其他力总功为零。有摩擦力做功，机械能一定不守恒。

• Q3 机械能守恒和动能定理怎么选？

A 只有重力/弹力做功 → 优先用机械能守恒（直接写等式）；有其他力做功（摩擦、牵引）→ 用动能定理（把所有功算进去）。一句话：守恒用等式，不守恒用定理。

• Q4 “恰好通过最高点”要满足什么？

A 两个条件：临界条件（绳球模型最高点最小速度 $v_{\min} = \sqrt{gR}$ ）+ 能量条件（由守恒算出实际速度）。能量算“够不够”，临界算“到不到”。

例题 8.2

过山车从高 $h = 18\text{ m}$ 处由静止滑下，进入半径为 $R = 4\text{ m}$ 的竖直圆环轨道，不计摩擦， $g = 10\text{ m/s}^2$ 。

- （1）求过山车通过圆环最高点时的速度大小；
- （2）判断它能否恰好通过最高点；
- （3）若要使过山车恰好通过最高点，出发高度至少为多大？

例题 8.3

轻弹簧竖直放置，下端固定。质量 $m = 0.2 \text{ kg}$ 的小球从距弹簧上端 $h = 0.6 \text{ m}$ 处由静止自由下落，砸在弹簧上并将弹簧压缩至最大，已知弹簧劲度系数 $k = 200 \text{ N/m}$ ， $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求弹簧的最大压缩量 x 。

A 层 · 基础过关

A4. 摆长 $L = 1.6 \text{ m}$ 的单摆，摆球从与竖直方向成 60° 角的位置由静止释放（细线始终张紧）。求摆球摆到最低点时的速度大小。

A5. 质量 1 kg 的小球从高 5 m 处由静止自由下落（不计空气阻力）。求落地时的速度大小，并用机械能守恒解释：这个速度与小球质量无关。

A6. 物体从高 1.8 m 的光滑斜面顶端由静止滑下。求物体滑到底端时的速度大小。

A7. 判断下列运动中，物体的机械能是否守恒，并说明理由：

- (1) 物体沿光滑斜面下滑；
- (2) 物体从高处自由下落（不计空气阻力）；
- (3) 物体沿粗糙斜面匀速下滑；
- (4) 物体在空气阻力作用下从高处下落。

A8. 竖直圆环轨道半径 $R = 2 \text{ m}$ ，小球在轨道内侧运动，不计摩擦。求小球恰好能通过最高点所需的（相对圆环最低点的）最小出发高度 h 。

A9. 轻弹簧劲度系数 $k = 200 \text{ N/m}$ ，竖直放置下端固定。质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ 的小球从距弹簧上端 $h = 0.9 \text{ m}$ 处由静止自由下落，将弹簧压缩至最大。求弹簧的最大压缩量 x 。

B 层 · 真题研习

B1. （2023 · 新课标卷）无风时，雨滴受空气阻力的作用在地面附近会以恒定的速率 v 竖直下落。一质量为 m 的雨滴在地面附近以速率 v 下落高度 h 的过程中，克服空气阻力做的功为（重力加速度大小为 g ）（ ）

- A. 0
- B. mgh
- C. $\frac{1}{2}mv^2 - mgh$
- D. $\frac{1}{2}mv^2 + mgh$

B2. （2023 · 全国甲卷）一同学将铅球水平推出，不计空气阻力和转动的影响，铅球在平抛运动过程中（ ）

- A. 机械能一直增加
- B. 加速度保持不变

C. 速度大小保持不变

D. 被推出后瞬间动能最大

B3. (2022 · 全国乙卷) 固定于竖直平面内的光滑大圆环上套有一个小环, 小环从大圆环顶端 P 点由静止开始自由下滑。在下滑过程中, 小环的速率正比于 ()

A. 它滑过的弧长

B. 它下降的高度

C. 它到 P 点的距离

D. 它与 P 点的连线扫过的面积

C 层 · 创新拓展

C1. (抽水蓄能电站) 我国某抽水蓄能电站利用夜间低谷电力将下水库的水抽到上水库“储存能量”, 白天再放水发电。已知该电站上、下水库落差 $H = 300 \text{ m}$, 一次满发可放水 $m = 1.0 \times 10^7 \text{ kg}$, 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 水从上水库全部流到下水库, 重力势能减少了多少?

(2) 若发电效率为 80%, 一次满发可发出多少电能? (分别用 J 和 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 表示)

(3) 若每户家庭一天用电约 $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 这次满发可满足多少户家庭一天的用电?

C2. (过山车 · 轨道摩擦) 某游乐园的过山车从高 $H = 30 \text{ m}$ 的顶端由静止滑下, 沿轨道经过一个半径 $R = 6 \text{ m}$ 的竖直圆环, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 若轨道光滑, 求过山车通过圆环最高点时的速度大小;

(2) 通过 (1) 的速度判断能否恰好通过最高点 (给出临界速度);

(3) 实际轨道有摩擦, 从顶端滑到圆环最高点的过程中机械能损失 20%。判断此时还能否通过最高点。

C3. (验证机械能守恒定律) 用打点计时器研究重物自由下落过程中的机械能守恒, 电源频率 50 Hz 。选一条清晰的纸带, O 为打下的第一个点 (初速度为零), A、B、C 为连续三个计数点 (相邻计数点间隔 $T = 0.1 \text{ s}$), 测得 $OA = 0.20 \text{ m}$ 、 $OB = 0.45 \text{ m}$ 、 $OC = 0.80 \text{ m}$ (g 取 10 m/s^2)。

(1) 本实验需要天平测重物质量吗? 为什么?

(2) 求 B 点的瞬时速度 (用“AC 段的平均速度近似”), 并验证从 O 到 B 机械能是否守恒;

(3) 实际实验中, 多数结果是动能的增加量略小于重力势能的减少量, 原因是什么?

(4) 挑选纸带时为什么常选“第 1、2 两点间距接近 2 mm ”的纸带?

本章综合 · S 层

S1. (蹦极 · 弹性绳) 质量 $m = 50 \text{ kg}$ 的蹦极者从跳台由静止跳下, 弹性绳原长 $L_0 = 20 \text{ m}$, 劲度系数 $k = 100 \text{ N/m}$ (弹性绳被拉过原长后才产生弹力), 不计空气阻力和绳的质量, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 蹦极者下落到弹性绳刚好被拉直时 (下落 20 m) 的速度多大?

- (2) 求蹦极者下落到最低点时弹性绳的伸长量 x ;
- (3) 蹦极者在哪个位置速度最大? 最大速度多大?
- (4) 最低点距跳台多高?

第九章 动量与动量守恒

9.1 动量与冲量：力在时间上的累积

考点精要

- Q1 动量和动能有什么区别？什么时候用哪个？

A 动量 $p = mv$ (矢量，有方向)，管“撞起来冲劲多大”；动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ (标量)，管“多快能撞坏多少”。同样动能的两个球，质量大的动量更大、撞起来更“沉”。碰撞冲击力问题用动量，位移做功问题用动能。

- Q2 冲量是什么？和动量有什么关系？

A 冲量 $I = F\Delta t$ 是“力在时间上的累积”，是矢量，方向与力相同；合外力的冲量等于动量变化： $F\Delta t = \Delta p$ (动量定理)。F-t 图像中图线与时间轴围成的面积就是冲量。

- Q3 为什么安全气囊、沙坑、海绵能减小冲击力？

A 动量变化 Δp 固定时，冲击力 $F = \Delta p / \Delta t$ ——把碰撞时间 Δt 拉长，力就变小。碰撞速度翻倍， Δp 和 F 都翻倍。

- Q4 动量定理和动能定理怎么选？

A 两者是“表兄弟”：动量定理记“时间的账” ($F\Delta t = \Delta p$ ，管撞多久、多大力)，动能定理记“空间的账” ($W = \Delta E_k$ ，管滑多远、多高)。题目涉及碰撞时间、冲击力优先动量定理。

例题 9.1

质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ 的鸡蛋从 1.25 m 高处落到地面，撞击时间 0.01 s ，地面对鸡蛋的平均作用力多大？若落在海绵上（撞击时间 0.1 s ）呢？ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

A 层 · 基础过关

A1. 一质量 2 kg 的物体沿直线运动，速度从 5 m/s 增大到 10 m/s （方向不变）。求该过程物体的动量变化量与动能变化量。

A2. 质量 0.5 kg 的足球以 6 m/s 的速度撞向墙壁，以 4 m/s 的速度沿原路反弹（方向与撞墙前相反），碰撞时间 0.1 s 。

（1）求足球碰撞过程中的动量变化量；

（2）求墙对足球的平均作用力。

A3. 质量 1 kg 的物体做自由落体运动（ $g = 10\text{ m/s}^2$ ），下落 3 s 。

（1）求 3 s 内重力的冲量；

（2）求 3 s 末物体的动量；

（3）求 3 s 内物体动量的变化量。

9.2 动量守恒定律：合外力为零时

考点精要

• Q1 动量守恒的条件是什么？

A 系统不受外力或合外力为零。碰撞、爆炸、反冲时间极短，外力（如重力）的冲量可忽略，动量近似守恒；若某方向合外力为零，也可以只守恒该方向的分量。

• Q2 碰撞有哪三类？怎么判断？

A 弹性碰撞（动量守恒 + 动能守恒）；完全非弹性（碰后共速粘在一起，动量守恒、动能损失最大）；非弹性（动量守恒、动能部分损失）。看到“粘在一起”“留在其中”“共同速度”就是完全非弹性。

• Q3 完全非弹性碰撞损失的动能去哪了？

A 变成内能（发热、形变）。碰后共速时相对动能全部损失，所以动能损失最大。

• Q4 子弹打木块并留在木块里，属于什么碰撞？

A 完全非弹性碰撞；水平方向动量守恒（碰撞时间极短，水平方向合外力近似为零）。

例题 9.2

质量 $m_1 = 1 \text{ kg}$ 的物体以 $v_1 = 6 \text{ m/s}$ 撞向静止的质量 $m_2 = 2 \text{ kg}$ 的物体，碰后两物体粘在一起运动。求：

- (1) 碰后的共同速度；
- (2) 碰撞过程中损失的动能。

A 层 · 基础过关

A4. 质量 3 kg 的小球以 4 m/s 的速度撞向静止的质量 2 kg 的小球，碰后两球粘在一起。求碰后共同速度。

A5. 质量 2 kg 的球以 4 m/s 的速度在光滑水平面上撞向静止的质量 6 kg 的球，两球发生弹性正碰。求碰后两球的速度。

A6. 一静止的物体炸裂成两块，质量分别为 2 kg 和 3 kg 。测得其中 2 kg 的一块以 6 m/s 的速度水平向右运动，求另一块的速度大小和方向。

9.3 反冲与火箭：动量守恒的“喷气”式

考点精要

• Q1 反冲现象的本质是什么？

A 动量守恒。系统一部分向某一方向喷出（获得动量），另一部分获得等大反向的动量——内力只交换动量，不改变系统总动量。

• Q2 火箭为什么能前进？喷气速度越大火箭越快吗？

A 燃料高速向后喷出（向后动量），火箭本体获得向前动量（动量守恒自动给出）。喷出速度越大，火箭获得的速度越大（反冲速度正比于喷出速度）。

• Q3 为什么多级火箭比单级火箭效率高？

A 每级燃料烧完就把这一级的“死重”扔掉，剩下的箭体更轻、加速更轻松。单级火箭要入轨需携带巨量燃料，燃料越多自重越重、越难加速。

• Q4 爆竹爆炸后碎片动量总和为什么仍为零？

A 爆炸是内力作用，系统动量守恒；爆炸前总动量为零，爆炸后各碎片动量矢量之和仍为零。

例题 9.3

总质量 $M = 100\text{ kg}$ 的小车（含人）静止在光滑水平地面上，车上的人（ $m = 60\text{ kg}$ ）以 $v = 5\text{ m/s}$ 相对地面向后跳离小车。求小车获得的速度大小和方向。

A 层 · 基础过关

A7. 总质量 500 kg 的火箭（含燃料）在太空中静止，某次点火一次性向后喷出质量 5 kg 的气体，喷出速度（相对地面）为 1000 m/s 。求火箭获得的速度大小。

A8. 质量 60 kg 的人静止在光滑冰面上，将手中质量 0.4 kg 的球以 5 m/s 的速度水平向前抛出。求人后退的速度大小。

A9. 装有砂子的小车（总质量 $M = 2\text{ kg}$ ）以 2 m/s 的速度在光滑水平面上运动，从正上方竖直落入一个质量为 0.5 kg 的砂袋（落入瞬间水平速度为零）。求落入后小车与砂袋的共同速度。

B 层 · 真题研习

B1.（2024 · 北京卷）将小球竖直向上抛出，小球从抛出到落回原处的过程中，若所受空气阻力大小与速度大小成正比，则下列说法正确的是（ ）

- A. 上升和下落两过程的时间相等
- B. 上升和下落两过程损失的机械能相等
- C. 上升过程合力的冲量大于下落过程合力的冲量
- D. 上升过程的加速度始终小于下落过程的加速度

B2.（2023 · 全国乙卷）两个质量相等的小球 P 和 Q 位于同一高度，它们以相同大小的速度分别抛出，P 做平抛运动，Q 做竖直下抛运动，则（ ）

- A. P 落地时的动量大小小于 Q 落地时的动量大小
- B. P 落地时的动量大小大于 Q 落地时的动量大小
- C. 在各自从抛出到落地的时间内，P 所受重力冲量的大小比 Q 的大
- D. 在各自从抛出到落地的时间内，P 所受重力冲量的大小比 Q 的小

B3.（2022 · 湖南卷）1932 年，查德威克用未知射线轰击氢核，发现这种射线是由质量与质子大致相等的中性粒子（即中子）组成的。中子以速度 v_0 分别碰撞静止的氢核和氮核，碰撞后氢核和氮核的速度分别为 v_1 和 v_2 （设碰撞为弹性正碰，不考虑相对论效应）。下列说法正确的是（ ）

- A. 碰撞后氮核的动量比氢核的小
- B. 碰撞后氮核的动能比氢核的小
- C. v_2 大于 v_1
- D. v_2 大于 v_0

B4. (2023·北京卷) 质量为 m 的小球 A 用一根不可伸长的轻绳悬挂在 O 点, 在 O 点正下方的光滑桌面上有一个与 A 完全相同的静止小球 B, B 距 O 点的距离等于绳长 L 。现将 A 拉至某一高度由静止释放, A 以速度 v 在水平方向与 B 发生正碰并粘在一起。重力加速度为 g 。求:

- (1) A 释放时距桌面的高度 H ;
- (2) 碰撞前瞬间绳子的拉力大小 F ;
- (3) 碰撞过程中系统损失的机械能。

C 层·创新拓展

C1. (长征火箭·反冲) 长征二号 F 运载火箭点火升空时, 发动机每秒向下喷出燃气约 $\Delta m/\Delta t = 1.2 \times 10^3 \text{ kg}$, 燃气相对火箭的喷出速度 $u = 3000 \text{ m/s}$ 。

- (1) 求火箭此时获得的平均推力大小;
- (2) 若此时火箭(含燃料)质量约为 $m = 4.0 \times 10^5 \text{ kg}$, 不计重力变化与空气阻力, 求火箭向上的加速度;
- (3) 用动量守恒的观点解释: 火箭并没有“推空气”, 为什么也能获得向前的推力?

C2. (新能源汽车碰撞安全) 某新能源汽车进行正面碰撞测试: 轿车质量 1500 kg , 以 $v = 54 \text{ km/h}$ 的速度与刚性墙正撞, 碰撞过程用时 0.03 s 后停下。

- (1) 求碰撞过程中轿车受到的平均冲击力大小;
- (2) 车上 60 kg 的驾驶员在安全带与安全气囊作用下, 头部相对驾驶舱的“减速时间”约为 0.05 s ; 若没有安全气囊, 这个时间约为 0.005 s 。分别求两种情况下驾驶员头部受到的平均作用力, 并说明安全气囊为什么能救命;
- (3) 车身前部设计了“溃缩吸能区”, 从动量定理角度说明它的作用。

本章综合·S 层

S1. (子弹打木块+弹簧) 水平光滑面上, 质量 $m = 0.02 \text{ kg}$ 的子弹以 $v_0 = 300 \text{ m/s}$ 的水平速度射入静止的质量 $M = 0.98 \text{ kg}$ 的木块并留在其中。木块右端连接一根劲度系数 $k = 400 \text{ N/m}$ 的水平轻弹簧, 弹簧另一端固定在竖直墙壁上。

- (1) 求子弹与木块的共同速度;
- (2) 求子弹射入过程系统损失的机械能;
- (3) 求此后弹簧的最大压缩量;
- (4) 木块被弹簧弹回, 再次经过弹簧原长位置时的速度大小是多少?

S2. (碰撞三问) 在光滑水平面上, 质量 $m_1 = 1 \text{ kg}$ 的 A 球以 $v_1 = 4 \text{ m/s}$ 的速度撞向静止的质量 $m_2 = 2 \text{ kg}$ 的 B 球, 碰后 A 球以 1 m/s 的速度反弹。

- (1) 求 B 球碰后的速度;
- (2) 判断该碰撞是弹性碰撞还是非弹性碰撞, 并求出碰撞过程中损失的机械能;
- (3) 若两球碰撞时间 $\Delta t = 0.02 \text{ s}$, 求碰撞过程中 B 球受到的平均作用力大小。

第十章 机械振动与机械波

10.1 简谐运动：弹簧与摆的“钟摆律”

考点精要

- Q1 什么是简谐运动？回复力有什么特点？

A 回复力与偏离平衡位置的位移成正比且方向相反： $F = -kx$ （负号表示“往回拉”）。偏离越远，拉得越狠——所以它总能回到平衡位置， $x-t$ 图像是正弦曲线。

- Q2 弹簧振子的周期与什么有关？振幅增大周期变吗？

A $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ ，只与振子质量 m 和劲度系数 k 有关，与振幅无关。振幅增大一倍，周期不变，但机械能变为 4 倍（ $E = \frac{1}{2}kA^2$ ， A 在平方里）。

- Q3 单摆周期与什么有关？摆钟快了怎么调？

A $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ ，只与摆长 L 和重力加速度 g 有关，与质量、振幅无关（等时性）。摆钟走快了说明周期偏短，应加长摆长，而不是调质量。

- Q4 把单摆拿到月球上，周期怎么变？

A 月球上 g 变小， T 变长（ $T \propto 1/\sqrt{g}$ ）。

例题 10.1

一座摆钟的摆长 $L = 0.25 \text{ m}$ ，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。求摆钟摆动的周期；若这只摆钟走快了，应当加长还是缩短摆长？

A 层 · 基础过关

A1. 一水平弹簧振子，振子质量 $m = 0.4 \text{ kg}$ ，弹簧劲度系数 $k = 10 \text{ N/m}$ 。求振子的振动周期。（取 $\pi^2 \approx 10$ 时直接算，或保留 π ）

A2. 一单摆摆长 $L = 1 \text{ m}$ ，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，求周期；若把摆长改为 4 m ，周期变为原来的几倍？

A3. 一弹簧振子做简谐运动，振幅从 2 cm 增大到 4 cm 。振动周期和机械能各如何变化？

10.2 受迫振动与共振：借来的节奏

考点精要

- Q1 受迫振动的频率由什么决定？

A 由驱动力的频率决定，与系统固有频率无关。

- Q2 共振的条件是什么？

A 驱动力频率接近（等于）系统固有频率时，振幅急剧增大——共振是“频率匹配”现象，两个频率缺一不可。

- Q3 共振一利一害，请举例。

A 利：音箱腔体放大声音、微波炉加热（微波频率匹配水分子振动频率）、收音机调台；
害：塔科马大桥被风吹垮、士兵齐步走过桥可能引发共振。

- Q4 士兵过桥为什么要改“便步走”？

A 齐步走产生固定频率的周期性驱动力，接近桥的固有频率时会引发共振、振幅越来越大；便步走打乱节奏，让驱动力频率远离固有频率，避开共振。

例题 10.2

为什么士兵过桥要改便步走？

A 层 · 基础过关

A4. 某振动系统的固有频率 $f_0 = 5 \text{ Hz}$ ，在驱动力频率 $f = 8 \text{ Hz}$ 的周期性外力作用下做受迫振动。稳定后系统的振动频率是多大？若逐渐减小驱动力的频率，系统振幅将如何变化？

A5. 判断下列现象属于“利用共振”还是“避免共振”，并说明理由：

- (1) 音箱腔体放大声音；
- (2) 士兵齐步走过桥；
- (3) 微波炉加热食物；
- (4) 塔科马大桥被风吹垮。

A6. 荡秋千的人想让秋千越荡越高，正确的发力时机是什么？用共振的知识说明。

10.3 机械波：振动在介质中的传播

考点精要

- Q1 机械波传播的是什么？质点会随波迁移吗？

A 传播的是振动形式（能量与信息），质点只在平衡位置附近振动，不随波迁移——飘在水面的树叶只上下动，不会漂向岸边。

- Q2 波速、波长、频率三者的关系？

A $v = \lambda f = \lambda/T$ （波的“宪法”）。波速由介质决定，频率由波源决定；同一介质中频率越高波长越短。

- Q3 振动图像和波动图像怎么区分？

A 先看横坐标：振动图像（x-t）横轴是时间，看“一个质点的历史”；波动图像（y-x）横轴是位置，看“某一时刻全体质点的合影”。

- Q4 多普勒效应是什么？有哪些应用？

A 波源与观察者相对运动时，观察到的频率改变：靠近变高、远离变低。火车鸣笛、交警测速、彩超测血流、天文测星系退行都用它。

- Q5 地震 P 波和 S 波为什么能预警？

A P 波（纵波）快，约 6 km/s，先到但破坏小；S 波（横波）慢，约 3.5 km/s，后到但破坏大。预警系统检测到 P 波立即广播，利用时间差抢出几秒逃生窗口。

例题 10.3

声波在空气中的传播速度为 340 m/s，频率为 680 Hz，求波长。同一声音传入水中（水中声速 1500 m/s），波长变吗？频率变吗？

A 层 · 基础过关

A7. 频率为 200 Hz 的声波在水中的波长是多少？（水中声速 1500 m/s）

A8. 一列横波在介质中的传播速度为 4 m/s，波长为 0.8 m。求该波的周期与频率。

A9. 某次地震的震源距观测站 70 km，P 波传播速度约 6 km/s，S 波传播速度约 3.5 km/s。求 P 波与 S 波到达观测站的时间差。

B 层 · 真题研习

B1. (2022 · 浙江卷) 图甲中的装置水平放置, 将小球从平衡位置 O 拉到 A 后释放, 小球在 O 点附近来回振动; 图乙中被细绳拴着的小球由静止释放后可绕固定点来回摆动。若将上述装置安装在太空中的我国空间站内进行同样操作, 下列说法正确的是 ()

- A. 甲图中的小球将保持静止
- B. 甲图中的小球仍将来回振动
- C. 乙图中的小球仍将来回摆动
- D. 乙图中的小球将做匀速圆周运动

B2. (2023 · 广东卷) 渔船常用回声探测器发射的声波探测水下鱼群与障碍物。声波在水中的传播速度为 1500 m/s , 探测器发出频率为 $1.5 \times 10^4 \text{ Hz}$ 的声波。下列说法正确的是 ()

- A. 两列声波相遇时一定会发生干涉
- B. 声波由水中传播到空气中, 波长会改变
- C. 该声波遇到尺寸约为 1 m 的被探测物时会发生明显衍射
- D. 探测器接收到的回声频率与被探测物相对探测器运动的速度无关

B3. (2025 · 广东卷) 关于受迫振动和多普勒效应, 下列说法正确的是 ()

- A. 系统的固有频率与驱动力频率有关
- B. 只要驱动力足够大, 共振就能发生
- C. 应用多普勒效应可以测量车辆的速度
- D. 观察者与波源相互远离时, 接收到的波的频率比波源的频率大

B4. (2025 · 天津卷) 平衡位置处于坐标原点的波源 S 在 y 轴上振动, 产生频率为 50 Hz 的简谐横波向 x 轴正、负两个方向传播, 波速均为 100 m/s 。平衡位置在 x 轴上的 P、Q 两个质点随波源振动着, P、Q 的 x 轴坐标分别为 $x_P = 3.5 \text{ m}$ 、 $x_Q = -3 \text{ m}$ 。当 S 位移为负且向 $-y$ 方向运动时, P、Q 两质点的 ()

- A. 位移方向相同、速度方向相反
- B. 位移方向相同、速度方向相同
- C. 位移方向相反、速度方向相反
- D. 位移方向相反、速度方向相同

B5. (2026 · 湖南卷) 均匀介质中有且仅有一个点波源产生简谐横波, 在 xOy 平面内传播。A (4, 3)、B (4, 0) 两点在 xOy 平面内, 某时刻 A 处质点位于波峰、B 处质点位于波谷。下列说法正确的是 ()

- A. 若波源在 (0, 0) 处, 波长可能为 1 m
- B. 若波源在 (0, 0) 处, 波长可能为 2 m
- C. 若波源在 (0, 3) 处, 波长可能为 3 m

D. 若波源在 $(0, 3)$ 处, 波长可能为 4 m

C 层·创新拓展

C1. (吉他调音·弦振动) 一根吉他弦的长度 $L = 0.65\text{ m}$ 。弦上横波的传播速度由弦的张力 T 和线密度 μ 决定: $v = \sqrt{T/\mu}$ 。弦的基频 $f = v/(2L)$ 。

- (1) 若弦的张力为 T 时基频为 220 Hz , 将张力调为原来的 4 倍, 基频变为多少?
- (2) 该弦以 440 Hz 的频率振动时, 在空气中 (声速 340 m/s) 激发的声波波长多大?
- (3) 用物理知识解释: 为什么调紧琴弦 (张力增大) 音调会变高?

C2. (地震预警·时间差) 某次地震中, P 波 (纵波) 传播速度约 6 km/s , S 波 (横波) 传播速度约 3.5 km/s , 震中距某城市 105 km 。

- (1) 求 P 波与 S 波到达该城市的时间差;
- (2) 若地震预警系统检测到 P 波后立即向该城市发出警报, 居民能提前约多少秒避险?
- (3) 为什么 S 波 (横波) 的破坏力通常比 P 波 (纵波) 大?

C3. (振动图像与波形图联动) 一列简谐横波沿 x 轴正方向传播, $t = 0$ 时刻的波形图如图 (略): 波长 $\lambda = 4\text{ m}$, 振幅 $A = 0.2\text{ m}$, 波速 $v = 10\text{ m/s}$ 。质点 P 位于 $x = 2\text{ m}$ 处, $t = 0$ 时刻 P 正沿 y 轴负方向运动。

- (1) 求波的频率 f 和周期 T ;
- (2) 写出 P 的振动方程, 并画出 $0 \sim T$ 内 P 的振动图像 (标出关键点);
- (3) $t = 0.1\text{ s}$ 时 P 的位移是多少? 此时 P 处于什么位置 (波峰/波谷/平衡位置)?
- (4) 说明: 已知波形图和某质点振动方向, 如何确定波的传播方向? (用本题的 P 说明)

C4. (波的多解问题) 一列简谐横波沿 x 轴传播, $t = 0$ 时刻 $x = 0$ 处质点位于平衡位置且正沿 y 轴正方向运动。经过 $\Delta t = 0.3\text{ s}$, 该质点恰好到达波峰。

- (1) 求周期 T 的可能值 (写出通式, $n = 0, 1, 2, \dots$);
- (2) 若波速 $v = 4\text{ m/s}$, 求波长 λ 的可能值;
- (3) 若经过 $\Delta t = 0.3\text{ s}$ 后该质点位于波谷 (而非波峰), 周期 T 的可能值又是多少? 由此说明“波的多解性”通常由哪两个原因造成。

C5. (用单摆测量重力加速度) 某同学用单摆测当地重力加速度: 摆线长 99.00 cm , 摆球直径 2.00 cm (摆长 = 摆线长 + 半径), 用秒表连续计时, 测得摆球完成 50 次全振动用时 100.0 s ($\pi^2 \approx 9.87$)。

- (1) 为什么计时起点选“摆球经过平衡位置”的时刻, 而不是最高点?
- (2) 求摆长 L 、周期 T 和重力加速度 g ;
- (3) 若该同学误把“摆线长”当成摆长 (忘记加小球半径), 算出的 g 偏大还是偏小?
- (4) 若摆球未在同一竖直面内摆动 (形成圆锥摆), 测出的 g 将偏大还是偏小? 为什么?

本章综合·S 层

S1. (弹簧振子综合) 一水平弹簧振子, 振子质量 $m = 0.5 \text{ kg}$, 弹簧劲度系数 $k = 50 \text{ N/m}$, 在光滑水平面上做简谐运动, 从平衡位置拉开 $A = 0.1 \text{ m}$ 后由静止释放。

- (1) 求振动周期 T ;
- (2) 求最大回复力与最大加速度;
- (3) 求振子通过平衡位置时的最大速度;
- (4) 若振幅增大为 $2A = 0.2 \text{ m}$, 振动周期与机械能各如何变化?

S2. (多普勒·救护车) 一辆救护车鸣笛, 笛声频率 $f_0 = 700 \text{ Hz}$, 空气中的声速为 340 m/s 。

- (1) 救护车以 30 m/s 的速度驶向静止的路边观察者, 观察者听到的频率是多少?
- (2) 救护车以 30 m/s 的速度驶离观察者, 观察者听到的频率又是多少?
- (3) 救护车静止鸣笛时, 该声音在空气中的波长是多少?

第十一章 卷末综合检测

一、单项选择题（每题 6 分，共 30 分）

Z1. 一物体沿直线运动，其 $v-t$ 图像为：0 2 s 从静止匀加速到 6 m/s；2 6 s 以 6 m/s 匀速；6 8 s 匀减速到 0。则该物体在 0 8 s 内的平均速度大小为（ ）

- A. 4.5 m/s
- B. 3.6 m/s
- C. 6 m/s
- D. 4 m/s

Z2. 一质量 2 kg 的物块静止在倾角为 30° 的粗糙斜面上 ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。物块所受静摩擦力的大小为（ ）

- A. 10 N
- B. 17.3 N
- C. 20 N
- D. 5 N

Z3. 质量 60 kg 的人站在体重计上，电梯以 2 m/s^2 的加速度匀加速上升 ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。此时体重计的读数（即地板对人的支持力）为（ ）

- A. 480 N
- B. 600 N
- C. 720 N
- D. 840 N

Z4. 质量 1000 kg 的汽车以 10 m/s 的速度通过半径 $R = 20 \text{ m}$ 的拱形桥顶 ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。桥顶对汽车的支持力大小为（ ）

- A. 5000 N
- B. 10000 N
- C. 15000 N
- D. 0

Z5. 一水平弹簧振子，弹簧劲度系数 $k = 10 \text{ N/m}$ ，振子质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ ，振幅 $A = 0.05 \text{ m}$ 。下

列说法正确的是（ ）

- A. 该振子的周期约为 0.63 s
- B. 振幅增大一倍，周期也增大一倍
- C. 振子受到的最大回复力为 5 N
- D. 振子通过平衡位置时加速度最大

二、多项选择题（每题 8 分，共 24 分；选对但不全得 4 分，有选错得 0 分）

Z6. 两颗人造卫星 A、B 绕地球做匀速圆周运动，轨道半径之比 $r_A : r_B = 1 : 2$ 。下列说法正确的是（ ）

- A. 线速度之比 $v_A : v_B = \sqrt{2} : 1$
- B. 角速度之比 $\omega_A : \omega_B = 2\sqrt{2} : 1$
- C. 周期之比 $T_A : T_B = 1 : 2\sqrt{2}$
- D. 向心加速度之比 $a_A : a_B = 2 : 1$

Z7. 下列运动过程中，机械能守恒的是（ ）

- A. 忽略空气阻力时，物体在空中的竖直上抛运动
- B. 物体沿粗糙斜面匀速下滑
- C. 竖直方向做简谐运动的弹簧振子（只受重力与弹簧弹力）
- D. 物体在水平恒力拉动下沿光滑水平面加速运动

Z8. 在光滑水平面上，质量 1 kg 的球 A 以 6 m/s 的速度向右运动，与静止的质量 2 kg 的球 B 发生正碰。下列说法正确的是（ ）

- A. 若碰后两球粘在一起，共同速度为 2 m/s
- B. 若碰后 A 球以 2 m/s 向右运动，则 B 球速度为 2 m/s
- C. 碰撞过程中系统动量守恒，动能也一定守恒
- D. 完全非弹性碰撞损失的动能最大

三、实验题（共 12 分）

Z9.（验证动量守恒定律）利用斜槽轨道验证碰撞中的动量守恒：让质量 $m_1 = 30\text{ g}$ 的入射球从斜槽上某一位置由静止释放，从末端水平飞出落在木板上；再将等半径的被碰球 $m_2 = 20\text{ g}$ 放在轨道末端，入射球从同一位置释放，两球碰撞后均水平飞出。小球从轨道末端飞出后在空中的运动时间相等。

（1）（4 分）实验中入射球质量 m_1 应_____（选填“大于”“小于”或“等于”）被碰球质量 m_2 ，为什么？

（2）（4 分）某次实验测得三个落点到末端正下方 O 点的水平距离分别为：入射球碰前单独落点 P 距 O 25.0 cm，碰后入射球落点 M 距 O 11.0 cm，被碰球落点 N 距 O 21.0 cm。用这些数据验证该次碰撞是否满足动量守恒（写出验算式与结论）。

(3) (4分) 实验中为什么可以用水平距离之比代替水平速度之比?

四、计算题 (共 34 分)

Z10. (8分) 水平传送带以 $v = 3 \text{ m/s}$ 的速度顺时针匀速转动, 一质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的物块以初速度为零放到传送带左端, 物块与传送带间的动摩擦因数 $\mu = 0.5$, 传送带足够长, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 求物块加速阶段的加速度大小;

(2) 求物块速度达到 3 m/s 时, 在传送带上滑行的距离;

(3) 求物块从放上到与传送带共速所用的时间, 以及此过程中物块相对传送带的滑行距离。

Z11. (8分) 一光滑斜面与水平面相切, 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的小球从斜面上高 $h = 0.45 \text{ m}$ 处由静止开始下滑, 到达水平面后从离地面高 $H = 0.8 \text{ m}$ 的平台边缘水平飞出 ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。

(1) 求小球到达斜面底端时的速度大小;

(2) 求小球离开平台后的飞行时间;

(3) 求小球的水平射程;

(4) 求小球落地时的速度大小。

Z12. (8分) 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的小球从高 $h = 1.25 \text{ m}$ 处由静止沿光滑圆弧轨道滑下, 在最低点与静止在水平面上的质量 $M = 2 \text{ kg}$ 的木块发生完全非弹性碰撞 (碰后粘在一起)。碰后两者沿粗糙水平面滑行, 动摩擦因数 $\mu = 0.2$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

(1) 求小球碰撞前瞬间的速度大小;

(2) 求碰后两者的共同速度;

(3) 求碰撞过程中系统损失的机械能;

(4) 求碰后两者在粗糙水平面上滑行的距离。

Z13. (10分, 压轴) 光滑水平面上, 质量 $M = 3 \text{ kg}$ 的滑块左端固定一根水平轻弹簧, 质量 $m = 1 \text{ kg}$ 的小球以 $v_0 = 8 \text{ m/s}$ 的速度向右运动并与弹簧左端接触 (接触后开始压缩弹簧)。弹簧压缩到最短时两者共速, 随后弹簧恢复原长, 小球与滑块分离 (整个过程可视为弹性碰撞过程, 无能量损失)。

(1) 求弹簧压缩到最短时系统共同速度的大小;

(2) 求弹簧的最大弹性势能;

(3) 求弹簧恢复原长、小球离开滑块时小球和滑块各自的速度 (含方向);

(4) 判断该过程是否满足机械能守恒, 并说明理由。