

寻迹 • PATHWAY

物理 I • 力学

循迹而上 • 拾级登顶

寻迹 • 梦叶子 编著

情境版v9

2026 年 8 月 12 日

目录

第一章 怎么描述一段运动：运动的描述	3
1.1 位置与位移：从“在哪”到“动了多少”	3
1.2 速度：快慢的两种说法，外加一张图	5
1.3 加速度：速度变化的快慢	7
第二章 用秒表测楼高：匀变速直线运动	11
2.1 三个公式，一张图	11
2.2 刹车与追及：两个最经典的模型	13
2.3 自由落体与竖直上抛：伽利略的推理	15
第三章 力是怎么改变运动的：相互作用与牛顿定律	19
3.1 三种基本力：重力、弹力、摩擦力	19
3.2 受力分析：力学的基本功	21
3.3 力的合成与分解：把力当向量算	22
3.4 牛顿三定律：力是运动变化的原因	23
第四章 力与运动怎么配合：运动与力的结合	29
4.1 超重与失重：体重计上的骗局	29
4.2 连接体：先整体，后隔离	31
4.3 临界问题：恰好、刚好、最大、最小	32
第五章 拐弯与抛射：曲线运动与圆周运动	37
5.1 曲线运动：速度方向永远沿切线	37
5.2 平抛运动：水平匀速 + 竖直自由落体	38
5.3 圆周运动：向心加速度的力学根源	40
第六章 为什么卫星不掉下来：万有引力与航天	45

6.1	开普勒三定律：天上的“规矩”	45
6.2	万有引力定律：宇宙的“平方反比”	46
6.3	天体运动：万有引力就是向心力	47
6.4	卫星与变轨：火箭怎么“调轨道”	49
第七章	用“账本”算运动：功与能	53
7.1	功：力在位移方向上的“效果”	53
7.2	功率：做功的快慢	54
7.3	动能定理：合外力做功 = 动能变化	55
第八章	能量不会凭空消失：机械能守恒	59
8.1	势能：位置决定的“储存”	59
8.2	机械能守恒定律：只有保守力做功时	60
第九章	撞车为什么疼：动量与动量定理	65
9.1	动量与冲量：力在时间上的累积	65
9.2	动量守恒定律：合外力为零时	67
9.3	反冲与火箭：动量守恒的“喷气”式	68
第十章	来来回回与传向远方：机械振动与机械波	73
10.1	简谐运动：弹簧与摆的“钟摆律”	73
10.2	受迫振动与共振：借来的节奏	75
10.3	机械波：振动在介质中的传播	76
10.4	波的叠加、干涉、衍射与反射折射	77
附录 A	力学核心公式速查	81
附录 B	读题即解题：力学关键词速查	83
附录 C	学生必做实验指导（力学）	85

第一章 怎么描述一段运动：运动的描述

这一章讲运动。你大概觉得没什么好讲的——不就是快慢吗？

先别急着下结论，回答三个问题：

你 50 米跑 8 秒，这叫快；可你起跑那一瞬间“弹”出去，也叫快。这两个“快”，是一回事吗？

你中午绕了大半个校园去食堂，回到教室坐下——这一趟，你到底“动”了没有？

龟兔赛跑，兔子比乌龟快得多，怎么最后还是输了？

这三个问题看着互不相干。学完这一章你会发现，它们其实是同一件事的三副面孔——描述一段运动，物理只需要三件工具：**在哪（位置）、多快（速度）、变化多快（加速度）**。这一章把它们一次讲明白，谜底在章末揭晓。顺带你会知道，连“区间测速怎么抓超速”这种事，物理早就把答案写好了。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 用位置、位移、路程描述一段运动，分清标量与矢量；(2) 区分平均速度与瞬时速度，会读 $x-t$ 图像；(3) 用加速度描述速度变化的快慢与方向。

1.1 位置与位移：从“在哪”到“动了多少”

先说说位置。周末和同学约好在商场门口碰头，你先到了，掏出手机发一条：“我到了，在奶茶店旁边。”同学回：“马上，还差两个路口。”——一个位置，一句话的事。我们把物体在坐标系里的坐标叫作**位置**。

真正有坑的是“动了多少”。中午去食堂，你绕了大半个校园：穿过篮球场、绕过教学楼、还爬了两层楼。回来同学问你走了多远，你估摸：“五百米吧。”

可要是换一种问法——“你从教室出发，转了一圈又回到教室，位置变了多少？”

答案让你一愣：0。

走了五百米，位置却一点没变。你可能想反驳：“我明明动了啊！”——没错，你确实“动了”五百米；可你的**位置**，真的没变。问题出在哪？出在“动了多少”这句话，其实有两种算法，我们平时混着用，物理把它们分开了。

按你实际走过的路算，是**路程**：我们把物体运动轨迹的实际长度叫作路程，用 s 表示，单位是米（m）。路程是标量，只有大小，没有方向。你绕校园那五百米，就是路程。

按“从哪到哪”算，是**位移**：我们把从起点指向终点的有向线段叫作位移，用 x (或 Δx) 表示，单位是米 (m)。位移是矢量，既有大小，也有方向。教室出发又回到教室，起点终点重合，位移是 0。

路程管“你走了多少”，位移管“你从哪到哪”。直线走一趟，它俩相等；一绕圈、一回头，立刻分家。位移不关心你中间怎么绕——起点终点一定，位移就定了。这像快递：不管快递员在城里怎么绕，两点之间的直线距离只有一个。

还有个更刁钻的问题，答案藏在一艘船上。四百年前，伽利略写过这样一段话：船在平静的海面上匀速行驶，你在船舱里向上跳——请问，你会落到原地，还是落到船尾？〔注 1〕

当时的学者们吵翻了天：船在往前跑，你跳起来的那一瞬间，船底不是已经“溜走”了吗？

伽利略说：落回原地。因为你跳起来之前，已经和船一起在往前“跑”了——跳起来时带着船的速度，落下时船还是那个速度，一人一船相对静止。判断“动不动”，永远得先找个参照：以船为参考系，你原地起落；以岸为参考系，你跟着船每秒前进几十米。同一件事，说法完全不同。〔注 2〕

我们把用来判断物体是否运动的参照物体，叫作**参考系**。说一个物体动不动，必须先说“相对于谁”。这句话看着像废话，却是物理的第一步——你坐在教室里，觉得桌椅纹丝不动，可地球带着你每秒钟转四百多米；以太阳为参考系，你正以每秒约 30 公里的速度绕太阳狂奔。操场上的国旗在动吗？以旗杆为参考系，不动；以你跑步的方向为参考系，它在向后飘。

想一想 (概念边界)：绕操场跑一圈，路程 400 米，位移却是 0——起点终点重合，有向线段缩成了一个点。同一个“跑了一圈”，两本账记法完全不同。

由此你也认识了物理量的两种“性格”：只有大小、没有方向的叫**标量**，路程、质量、时间、温度、能量都是；既有大小又有方向的叫**矢量**，位移、速度、加速度、力都是。考试最爱挖的坑在这里：位移是矢量，说它“大小是 400 米”可以，说“位移是 400 米”就不完整——一圈下来，位移明明是 0。

你其实早就在用这对概念：手机导航报“剩余 12 公里”，而地图上从家到学校拉一条直线只有 8 公里。导航要告诉你真实要走的路线，那是路程；地图上两点之间的几何直线，才是位移。点开导航的那一刻，你已经在用物理了。

例题 1.1

物体先从 A 向东走 30 m 到 B，再向北走 40 m 到 C。求总位移和总路程。**想一想**：

- 问：“总路程”怎么算？它是什么量？
- 想：路程 = 实际走过的轨迹长度（标量），直接把两段相加。
- 问：“总位移”是什么？和路程一样吗？
- 想：位移是起点 A 指向终点 C 的有向线段（矢量）——和路程不一样，折线绕路，位移只看出发点和终点。

- 问：A 到 B、B 到 C 互相垂直，位移大小怎么求？
- 想：勾股定理： $|\overrightarrow{AC}| = \sqrt{30^2 + 40^2}$ 。
- 问：方向呢？结果合理吗？
- 想：东偏北 $\arctan(40/30) \approx 53^\circ$ ；位移 50 m 小于路程 70 m（绕路了），合理。

详细答案：解：(1) 路程 $s = 30 + 40 = 70$ m。(2) 位移 $|\overrightarrow{AC}| = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50$ m，方向东偏北 $\theta = \arctan(40/30) \approx 53^\circ$ 。答：路程 70 m，位移 50 m，方向东偏北约 53° 。

变式提醒：若两段位移不在垂直方向，用平行四边形法则（余弦定理）合成；位移只由起点终点决定，中间怎么绕不影响。**练一练**

- 物体向东运动 5 m 再向西运动 3 m，位移与路程各是多少？
- 位移为零是否意味着路程为零？举例说明。
- 电梯从 1 楼上到 10 楼再回到 3 楼，位移与路程谁大？

参考答案：1. 位移 2 m（向东），路程 8 m——位移只看起点终点：向东 5 减向西 3，净位移 2 m；路程是实际走过的 $5+3=8$ m。2. 不一定——绕一圈回到起点，位移为零但路程是整圈长度。位移为零只说明「起点终点重合」，不代表没动。3. 位移小，路程大——从 1 楼到 3 楼只算首末高度差；路程是实际走的楼层数（10 楼再回 3 楼，走了 14 层）。

1.2 速度：快慢的两种说法，外加一张图

“快”，你觉得只有一个说法——跑得快就是速度快。可你跑步的时候开着跑步软件，跑完停下，屏幕上是一行数字：**当前配速 4'50"**、**平均配速 5'30"**（配速就是跑 1 公里要几分钟，数字越小越快）。

同样是“快慢”，为什么屏幕上要给两个数？因为一个是“此刻”——你最后那一刻的快慢；一个是“这一路”——整段平均下来的快慢。跑过步的人都知道，这两个数几乎永远不相等：起跑慢、中途匀速、冲刺快，平均配速总在“当前”配速上下晃。

于是，“快”有两种说法——

先说**速率**：瞬时速度的大小，叫**速率**——它回答“此刻有多快”，不管方向。汽车仪表盘、限速牌上的 120 km/h 都是速率。把路程与所用时间之比，叫作**平均速率**：跑步软件的平均配速就是按路程算的，它是平均速率，单位是米每秒（m/s），是标量，只有大小、没有方向。

可物理还要多问一句“从哪到哪”：把位移与所用时间之比，叫作**平均速度**，用 v 表示，单位是米每秒（m/s）。平均速度是矢量，既有大小也有方向。绕操场跑一圈，软件记你跑了 400 米、平均配速 6 分钟，可物理上的平均速度是 0——位移是 0。同一圈，两个“平均”：一个记路程，一个记位移，账目完全不同。

而屏幕上的“当前配速”，对应的是**瞬时速度**——把时间取到极短那一刻的速度，它回答“此刻有多快、朝哪去”。测速枪一枪打过去读出的数字，就是它；仪表盘上的 120 km/h 是它的**大小**（速率）。

现在的汽车还学会了“自己测速”：无人驾驶车顶上的激光雷达，每秒向周围发射上百万个激光点，靠反射回来的时间差，算出每个障碍物的距离和速度——你这一节学的速度概念，是它的底层算法。

速度说完了，还有一张图值得认识。把横轴当作时间、纵轴当作位置，画出的就是位置-时间图（ x - t 图）——它把一段运动“画”了出来。

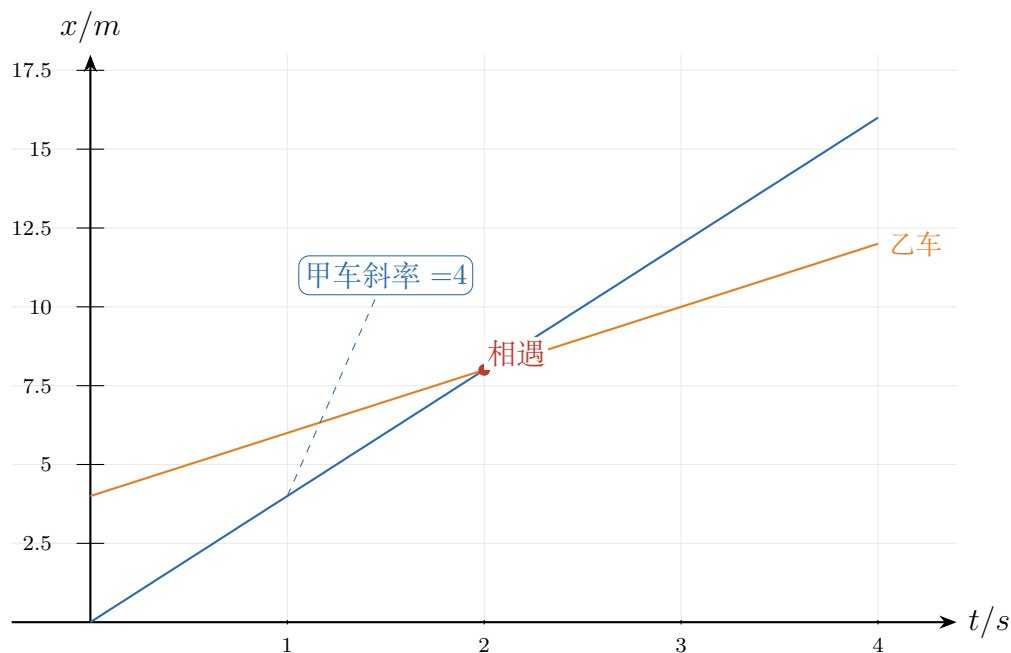


图 1.1: x - t 图：两线交点 = 相遇，斜率 = 速度

龟兔赛跑用这张图一画，输赢一目了然：兔子先冲出一段——斜线，斜率大，速度快；然后睡觉——水平线，位置不动，静止；醒来再冲——又是斜线。乌龟全程慢慢爬——斜率小，但从不停。**两线交点 = 相遇**：同一时刻、同一位置。 x - t 图的**斜率 = 速度**——线越陡越快，水平线是静止，斜率是负的，往回走。

例题 1.2

某高速区间测速段长 12 km，限速 120 km/h。你开车通过这段，用了 8 分钟。求你的平均速率，并判断是否超速。**想一想**：

- 问：平均速度怎么算？用哪两个量？
- 想：区间测速算的是**平均速率** = 路程 $\div$ 时间（这里路程即区间长 12 km，时间 8 min）。若路段近似直线，速率 $\approx$ 速度大小——但严格说，测的是“走了多少路有多快”，不是“从哪到哪”。

- 问：单位不统一，先换算。
- 想：12 km = 12000 m, 8 min = 480 s。
- 问：代进去，结果多少？超速了吗？
- 想： $v = 12000/480 = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h} < 120 \text{ km/h}$ ，没超速。

详细答案：解： $v = \frac{s}{t} = \frac{12000 \text{ m}}{480 \text{ s}} = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$ 。答：平均速率为 90 km/h，未超过限速 120 km/h。

变式提醒：若用时 6 分钟， $v = 120 \text{ km/h}$ 正好压线——区间测速看的正是全程平均速率——两头快、中间慢也救不了你。**练一练**

- 平均速度为零时，平均速率一定为零吗？
- 一人绕 400 m 跑道跑一圈用时 100 s，求平均速度与平均速率。
- 瞬时速度大时，平均速度一定大吗？

参考答案：1. 不一定——绕圈回到起点，平均速度（位移/时间）为零，但平均速率（路程/时间）不为零。平均速度看位移、平均速率看路程，两个不同的账。2. 平均速度 = 0（位移为零）；平均速率 = $400/100 = 4 \text{ m/s}$ 。3. 不一定——瞬时速度大只说明「此刻」快；全程可能走走停停，平均速度可以很小（比如跑完又走，平均被拉低）。

1.3 加速度：速度变化的快慢

电梯关门，启动那一瞬间，你的身体微微一沉——像被“按”了一下；快到站时，又轻飘飘的。公交车上的体验更直白：起步油门踩得猛，你被推着往后倒；刹车踩得急，你往前冲。

这些感觉，你肯定有过，但你可能一直以为是“错觉”。不是错觉——是电梯和公交车在**变速**：启动时速度从 0 往上加，停止时速度往下减，速度一变，身体就有感觉；匀速运行时，你完全感觉不到车在动。

可“变快”这件事本身，也有快慢之分。老司机会说“起步别太猛”——这个“猛”，就是加速度。但“猛”是个感觉词，考试不认感觉词。而且你会发现，**速度大，不代表变化快**：高铁跑 300 km/h，巡航时加速度约等于 0；火箭刚起飞速度还很慢，2 秒就蹿出去几十米，那才叫猛。要描述“速度变化的快慢”，速度这个量不够用了。

于是，物理定义了一个精确的量——我们把速度的变化量与发生这一变化所用时间之比，叫作**加速度**，用 a 表示，单位是米每二次方秒 (m/s^2)。加速度是矢量，既有大小也有方向。用两个物理量之比定义新的物理量，是物理学常用的方法——速度和加速度，都是这样“比”出来的。

关于加速度，有三句话要记住。

第一，**加速度大 $\neq$ 速度大**：高铁速度 300 km/h，加速度约等于 0；火箭刚起飞速度还不小，加速度却是 2 个 g 。一个讲“现在多快”，一个讲“变化多猛”，两回事。

第二，**方向决定加减**：加速度与速度同向，加速；反向，减速；垂直，拐弯。你骑车拐弯的时候，速度大小没变，可方向一直在变——所以拐弯也有加速度。想一想，验证一下：汽车匀速转弯，速度大小没变，它有加速度吗？**有**。加速度看的是“速度的变化”，方向变了，也是变化。答错的同学，恭喜你踩中了本章最大的坑。

第三，**加速度的方向 $\neq$ 速度的方向**：加速度的方向永远与**速度变化**的方向相同，与速度本身的方向可以毫无关系——减速刹车时，加速度方向与速度方向相反（取初速度方向为正方向时 a 为负值），车在反向加速度中慢慢停下。

例题 1.3

赛车 0 到 100 km/h 加速用 3 秒。换算 100 km/h $\approx$ 27.8 m/s，求平均加速度。**想一想**：

- 问：加速度的定义是什么？
- 想：加速度 = 速度变化量 $\div$ 时间： $a = \Delta v / \Delta t$ 。
- 问：速度变化量是多少？注意单位。
- 想：初速度 0，末速度 27.8 m/s（已换算好）， $\Delta v = 27.8$ m/s。
- 问：代进去，加速度多大？合理吗？
- 想： $a = 27.8/3 \approx 9.3$ m/s²——约等于一个 g ，赛车起步把你“压”在座椅上，合理。

详细答案：解：(1) $v_0 = 0$ ， $v = 27.8$ m/s， $t = 3$ s。(2) $\Delta v = 27.8$ m/s。(3) $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{27.8}{3} \approx 9.3$ m/s²。答：平均加速度约 9.3 m/s²。

变式提醒：若问“从静止加速到 100 km/h 走了多远”，需用匀变速位移公式——先有加速度，才能算位移，这是第 2 章的活。**练一练**

- 加速度增大时，速度一定增大吗？
- 物体做减速运动，加速度方向与速度方向什么关系？
- 速度为零时，加速度可能不为零吗？举例（竖直上抛最高点）。

参考答案：1. 不一定——加速度与速度同向才加速；加速度增大只说明“速度变化得更快”，若方向与速度相反，则是减速越来越快。2. 相反——加速度与速度方向相反，速度才减小。3. 可能——竖直上抛到最高点，速度为零，加速度仍为 g （重力加速度），方向向下。

本章注释

〔注 1〕 出处：伽利略《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632 年）。原文其实没有“向上跳”这个例子，他讲的是：船匀速行驶时，船舱里的苍蝇照常乱飞、鱼照常各方向游动、水滴照常滴进罐子、你原地跳远和平时跳得一样远——所有实验都做不出“船在动”的证据。“向上跳落到原地”是后世教科书的通俗说法，意思相同，更好懂。

〔注 2〕 伽利略船舱实验真正要说明的，是**相对性原理**：在匀速运动的船舱里，任何力学实验都无法察觉船在运动。这正是“参考系”思想的源头——描述运动要分参考系，但物理规律本身，与参考系是否匀速无关。这个原理后来成了爱因斯坦相对论的出发点（物理三第 6 章还会遇到它）。

看到	想到	用
质点 / 参考系 位移 / 路程	理想化模型 矢量 vs 标量	判断能否忽略物体大小形状；“在哪”必须先说“相对谁” 位移 = 起点到终点的有向线段（矢量）；路程 = 轨迹长度（标量）
平均速度 / 平均速率 瞬时速度	位移 vs 路程 ÷ 时间 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限	绕一圈：平均速度为 0、平均速率不为 0 仪表盘、限速牌 120、测速枪
x-t 图	斜率 = 速度	斜线 = 匀速、水平 = 静止、交点 = 相遇、负斜率 = 往回走
加速度	速度变化率	$a = \Delta v / \Delta t$ ，方向与 Δv 相同；同向加速、反向减速

你该记住的流程：描述一段运动，三步走——(1) 定位置：位移还是路程？选好参考系；(2) 看快慢：平均速度还是瞬时速度？时刻还是时段？(3) 问变化：速度变了吗？用加速度描述变化的快慢和方向。

现在回到章首的三个问题。你 50 米跑 8 秒——那是平均速度；起跑“弹”出去——那是加速度，两个“快”根本不是一回事。绕了大半个校园——路程五百米，可回到教室、起点终点重合——位移是 0，你“动了”又“没动”。龟兔赛跑——兔子跑得快（瞬时速度大），可它把大把时间花在了睡觉上，全程平均速度被拖得很低；乌龟虽然慢，但平均速度从头到尾没有停过——比全程平均，是“不停”赢了“飞快”。三副面孔，你现在都认得了。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 甲、乙两物体沿同一直线运动，其 x-t 图像如图所示。甲从原点出发做匀速直线运动，4 s 末到达 $x = 8\text{ m}$ 处；乙从 $x = 8\text{ m}$ 处出发，先静止 2 s，再以 4 m/s 的速度匀速返回原点。下列说法正确的是？

- A. 甲的速度大小为 1 m/s
- B. 乙在 $t = 4\text{ s}$ 末回到原点
- C. $0 \sim 4\text{ s}$ 内乙的平均速度大小为 4 m/s
- D. 甲、乙在第 3 s 末相遇

答案 B。 解析：x-t 图像的斜率是速度——甲 4 s 走 8 m， $v_{\text{甲}} = \frac{8}{4} = 2\text{ m/s}$ ，A 错；乙静止 2 s 后以 4 m/s 返回原点，8 m 需 2 s，故 $t = 4\text{ s}$ 末回到原点，B 对； $0 \sim 4\text{ s}$ 乙的位移 $= 0 - 8 = -8\text{ m}$ ，平均速度 $= -8/4 = -2\text{ m/s}$ （大小 2 m/s ），C 错；相遇时间：甲 $x = 2t$ ，乙 $x =$

$8 - 4(t - 2)$, 令 $2t = 16 - 4t$ 得 $t = \frac{8}{3} \text{ s} \approx 2.7 \text{ s}$, 不在第 3 s, D 错。读 x-t 图口诀: **看斜率定速度、看交点定相遇、看首尾定平均。**

章末检测 (基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★)

基础

- 从 A 到 B 直线距离 100 m, 你绕路走了 150 m。路程和位移大小各是多少?
- 判断: 位移是标量。(对/错)
- 一物体 5 s 内位移 20 m, 平均速度多大? 方向如何确定?
- 汽车速度表显示 80 km/h, 这是平均速度还是瞬时速度?
- x-t 图像是一条倾斜直线, 物体做什么运动? 斜率代表什么?
- 加速度的定义式是什么? 单位是什么?

提升

- 物体做直线运动, 加速度方向与速度方向相反, 速度大小如何变化?
- 一质点沿直线运动, 前 2 s 位移 10 m, 后 3 s 位移 15 m, 全程平均速度多大?
- 某物体加速度 2 m/s^2 , 表示什么意思? 第 3 s 末与第 1 s 末速度相差多少?

探究

- 你如何用一把刻度尺和一块秒表, 粗略测出教室所在楼层的高度? (写出方案与所用公式)

参考答案: 1. 路程 150 m、位移大小 100 m。2. 错——位移是矢量, 有方向。3. 平均速度 $= 20/5 = 4 \text{ m/s}$, 方向为位移方向。4. 瞬时速度 (速度表显示的是某时刻的速度)。5. 匀速直线运动; 斜率 = 速度。6. $a = \Delta v / \Delta t$, 单位 m/s^2 。7. 减速 (反向减速, 速度大小减小)。8. 全程位移 $25 \text{ m} \div 5 \text{ s} = 5 \text{ m/s}$ 。9. 每秒速度增加 2 m/s ; 3 s 末比 1 s 末快 $2 \times 2 = 4 \text{ m/s}$ 。10. 方案: 在楼顶释放一小石子, 用秒表测下落时间 t, 由 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 计算楼高; 多次测量取平均减小误差。

第二章 用秒表测楼高：匀变速直线运动

物业公司要买消防水带，可教学楼的图纸丢了。他们找到你：“用这把秒表，帮我们把楼高量出来。”

没有尺子，也不许上楼顶放绳子。这听起来像刁难——但先别急着拒绝。量高度，非要尺子吗？

石头从楼顶掉下来，楼越高，石头落地用的时间越长。反过来：只要测出石头落地用了多久，楼高就藏在这个时间里。时间怎么变成高度？这一章，你亲手把这个答案“长”出来。章末你会看到，同一个原理，还藏着交警测超速、汽车自动刹车的秘密。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握匀变速直线运动的三个基本公式与 $v-t$ 图像；(2) 熟练处理刹车问题（先判停车时间）与追及问题（共速分水岭）；(3) 理解自由落体与竖直上抛的对称性，能设计“测楼高”实验并分析误差。

2.1 三个公式，一张图

先纠正一个直觉。说到“变速运动”，你可能觉得那是乱变——一会儿快一会儿慢，没什么规律可抓。但物理从不从“乱”入手，物理从**最简单的变速**入手：速度的变化本身是均匀的。高铁出站，车厢里电子屏上的速度数字开始跳动：40、60、80……每过 1 秒，数字往上加的量几乎一样。我们把加速度恒定不变的直线运动，叫作**匀变速直线运动**；其中速度均匀增加、加速度方向与速度方向相同的，叫作**匀加速直线运动**，每秒增加的那个量，就是加速度 a 。

为什么偏偏研究“加速度不变”？因为它最简单，也因为够用：刹车、起步、自由落体、炮弹飞行——大部分真实运动在关键阶段都是匀变速。先吃透最简单的，再对付复杂的。

描述这样的运动，要回答三个问题：**现在多快？走了多远？用了多久？**匀变速运动的三个公式，就是这三个问题的答案。

但你可能会想：公式那么多，背得过来吗？不用背——它们根本不是三个独立的公式，而是**同一张图上的三句话**。

拿一张纸，横轴画时间，纵轴画速度。从 $t = 0$ 开始，匀加速运动每过 1 秒速度增加 a ，画出来是一条斜线，方程就是 $v = v_0 + at$ 。第一个问题“现在多快”的答案，就是这条斜线上“此刻”的高度。

这个公式值得多看一眼：它说的是“每过 1 秒，速度增加 a ”。它还能反过来用：已知初

速、末速和加速度，求用了多久—— $t = \frac{v-v_0}{a}$ ，把公式倒过来就是。

那“走了多远”呢？图已经画出来了，位移藏在图线和时间轴围成的梯形里——把每个瞬间的速度乘时间，是一小段位移；把所有小段加起来的**总面积**，就是总位移。把梯形拆开：下面矩形 v_0t ，上面三角形 $\frac{1}{2}at^2$ ，于是 $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 。

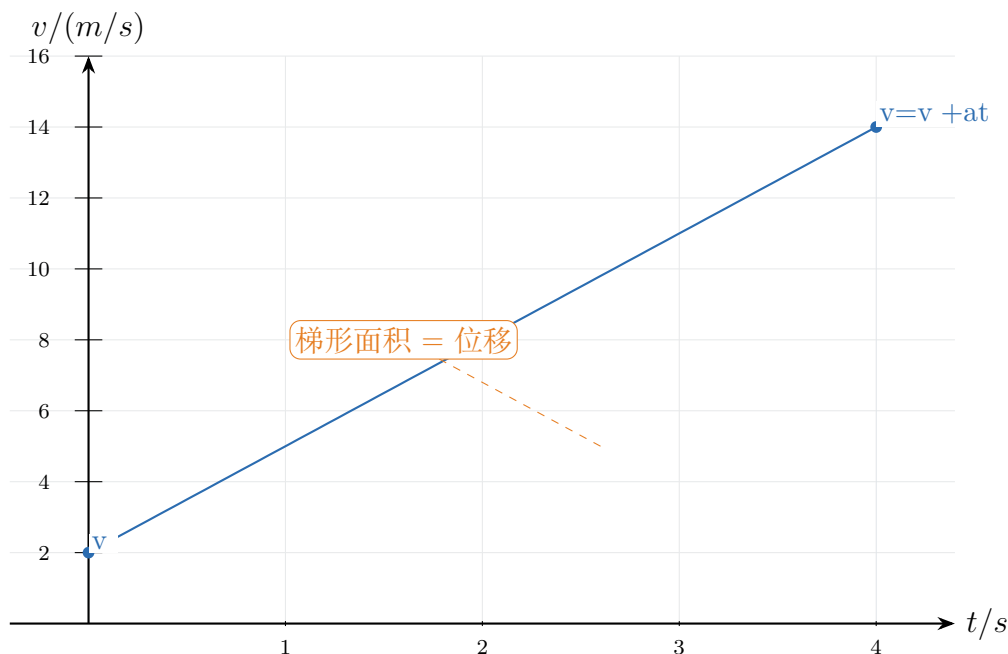


图 2.1: v-t 图一图出三公式：斜率 = 加速度，梯形面积 = 位移

梯形面积 = “上底下底的平均” × 高，也就是位移 = **平均速度** × 时间，而平均速度恰好是 $\frac{v_0+v}{2}$ 。所以匀变速运动还有一个“隐藏公式”： $x = \frac{v_0+v}{2} \cdot t$ 。它不常单考，但用它解题经常一步到位。

第三个公式不用画了：前两个都含时间 t ，题目压根没提时间时，把 t 消掉，得到 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 。它还有个超好用的退化版：初速为零时 $v^2 = 2ax$ ——由“走了多远”直接反推“多快”，自由落体里天天用。

选公式有个口诀，记牢它：**缺谁不用谁**——题目没给时间，用第三个；没给末速度，用前两个联立；四个量里给了三个，剩下的那个就是你要的。

动手试试（材料：一支笔、一部手机秒表）先猜：笔从 1 米高处落到地面，需要多久？0.1 秒？0.5 秒？1 秒？动手：把笔举到 1 米高（手臂伸直，笔尖大约在你头顶上方），手机秒表准备好。松手的同时按开始，笔一落地立刻按停止，记下时间 t 。然后用 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 反算“下落高度”，和 1 米比一比。观察：算出来的高度往往不是 1 米——可能变成 2 米、3 米，甚至更高。公式明明没错，为什么会差这么多？思考：问题出在“计时”上——笔下落 1 米只需要约 0.45 秒，而人的反应时间就有 0.1~0.3 秒，按表慢半拍，误差几乎占了下落时间的一半。这就是“误差”：不是公式错了，是测量不够准。记住这个教训，它就是后面测楼高的底气——你的秒表有多靠谱，测出的楼高就能信几分。

别急着代公式。刹车题最喜欢挖坑：汽车 20 m/s 行驶，刹车加速度 5 m/s²，问“刹车后 6 s

的位移”。你可能会想：这题简单，代 $t = 6$ 呗。错——车 4 秒就停死了，公式只对“还在动”的那段时间有效。所以看到刹车题，先问一句：**它什么时候停？**算出停车时间，再决定代哪个数。

交警怎么测超速？你可能在新闻里见过：交警拿着卷尺量刹车的轮胎痕迹。刹车痕迹越长，说明刹车前的速度越大——由 $v^2 = 2ax$ （末速度为零， $v_0 = \sqrt{2ax}$ ）就能反推刹车前的车速。给你个真实数据：沥青路面上刹车加速度约 $6\text{--}8\text{ m/s}^2$ ，如果痕迹有 30 米，刹车前速度约 $\sqrt{2 \times 7 \times 30} \approx 20\text{ m/s} = 72\text{ km/h}$ ——市区限速 60，这就算超速了。你刚学的公式，交警天天用。

汽车厂也在用同一道题：很多新车搭载 AEB 自动紧急制动，系统每秒钟都在算“按当前速度，刹停需要多远、来得及吗”——算出来的刹车距离不够，就替你踩刹车。你学的 $v^2 = 2ax$ ，就是 AEB 的大脑。

2.2 刹车与追及：两个最经典的模型

例题 2.1

汽车以 $72\text{ km/h} = 20\text{ m/s}$ 行驶，刹车加速度大小 5 m/s^2 ，求刹车距离。**想一想：**

- 问：刹车后汽车做什么运动？末速度是多少？
- 想：匀减速直线运动，末速度 $v = 0$ 。
- 问：题目给了哪些量？要求什么？还缺哪个量？
- 想：给了 $v_0 = 20\text{ m/s}$ 、 $a = 5\text{ m/s}^2$ ，求位移 x ——**没给时间 t 。**
- 问：三个公式里，哪个不含时间？
- 想： $v^2 - v_0^2 = 2ax$ ——没给时间只能用它。
- 问：代进去算，结果合理吗？
- 想： $x = \frac{0-20^2}{2 \times (-5)} = 40\text{ m}$ ；停车时间 4 s ，平均速度 $10\text{ m/s} \times 4\text{ s} = 40\text{ m}$ ，吻合。

详细答案：解：(1) 取运动方向为正方向， $v_0 = 20\text{ m/s}$ ， $a = -5\text{ m/s}^2$ （减速，与正方向相反）， $v = 0$ 。(2) 由 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 得 $x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0-400}{-10} = 40\text{ m}$ 。(3) 验算：停车时间 $t = \frac{v_0}{a} = 4\text{ s}$ 。
答：刹车距离为 40 m 。

变式提醒：若问“刹车后 6 s 的位移”——先算停车时间 $t_{\text{停}} = 4\text{ s}$ ， $6\text{ s} > 4\text{ s}$ ，车早已停稳，位移仍是 40 m ，不能代 $t = 6$ 。**练一练**

- 汽车从 36 km/h 匀加速到 72 km/h 用时 4 s ，加速度多大？

- 物体以 10 m/s 初速匀减速，加速度大小 2 m/s^2 ，求 5 s 内的位移——先想清楚它几秒停下。
- 某运动员百米跑用 10 s ，若视为匀加速，加速度多大？实际为什么不是这样？

参考答案：1. $\Delta v = 72 - 36 = 36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$ ， $a = \Delta v / \Delta t = 10/4 = 2.5 \text{ m/s}^2$ 。2. 先算停车时间： $t_{\text{停}} = v_0/a = 10/2 = 5 \text{ s}$ ，正好 5 s 停下，位移 $x = v_0 t - \frac{1}{2} a t^2 = 10 \times 5 - \frac{1}{2} \times 2 \times 25 = 25 \text{ m}$ 。3. $a = 2x/t^2 = 200/100 = 2 \text{ m/s}^2$ （把百米视作初速为零的匀加速）；实际百米不是匀加速——起跑慢、途中冲，速度分布不均匀，加速度是变化的。

追及题的分水岭。甲车 20 m/s 匀速，乙车从静止匀加速追甲。什么时候两车相距最远？

先猜一下：是不是乙车追上甲车的那一刻？恰恰相反。两车相距最远，发生在**速度相等**那一刻：之前乙比甲慢，距离一直在拉大；之后乙比甲快，距离才开始缩小。“共速”是追及题的命门——很多追及题，第一步就是找共速时刻。

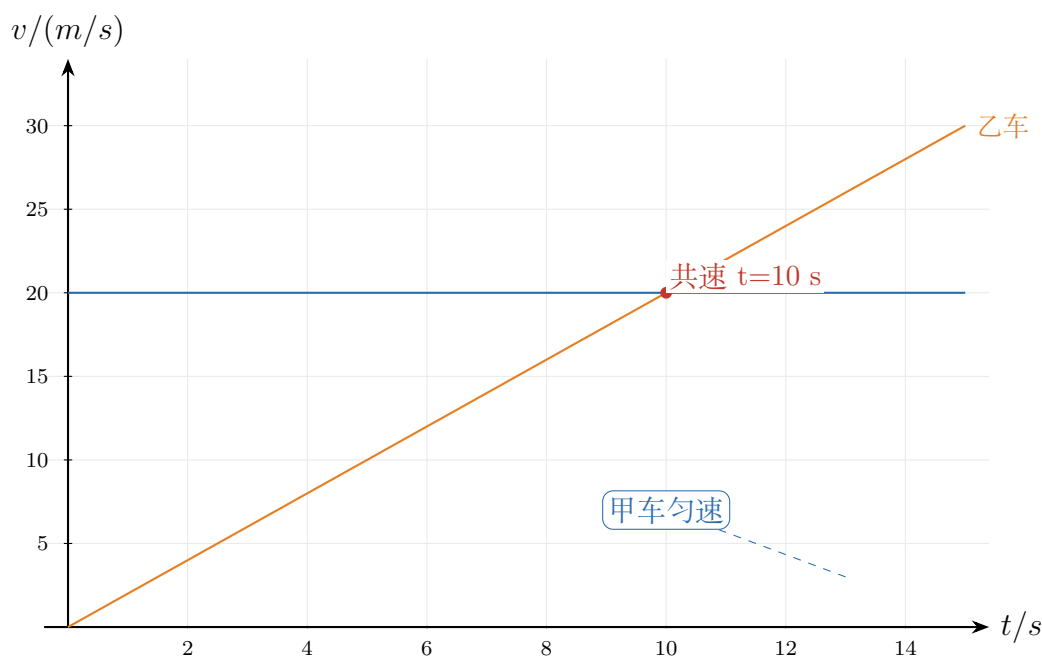


图 2.2: 追及问题 v-t 图

例题 2.2

甲车以 20 m/s 匀速，乙车从静止以 2 m/s^2 匀加速追甲。何时追上？何时相距最远？**想一想：**

- 问：两车什么时候“追上”？用什么条件表示？
- 想：同起点出发，追上 = 两车位移相等： $x_{\text{甲}} = x_{\text{乙}}$ 。
- 问：各自位移怎么表达？解方程。
- 想： $\Delta x = 20 \times 10 - \frac{1}{2} \times 2 \times 10^2 = 100 \text{ m}$ 。

详细答案：解：(1) 设经时间 t 追上：甲车位移 $x_{\text{甲}} = 20t$ ，乙车位移 $x_{\text{乙}} = \frac{1}{2}at^2 = t^2$ 。(2) $20t = t^2 \Rightarrow t = 20 \text{ s}$ (舍去 $t = 0$)。(3) 相距最远时 $v_{\text{甲}} = at \Rightarrow t = 10 \text{ s}$ ， $\Delta x = 20 \times 10 - \frac{1}{2} \times 2 \times 10^2 = 100 \text{ m}$ 。答：20 s 追上；10 s 时相距最远，最远 100 m。

2.3 自由落体与竖直上抛：伽利略的推理

先回答一个更古老的问题：**越重的东西，落得越快吗？**两千年来，几乎所有人都信这个——亚里士多德说：重的先落地，轻的后落地，天经地义。伽利略用一段推理就把它推翻了：如果重的真的落得快，那把两个球绑在一起——重的那个会被轻的“拖慢”，可绑在一起更重，应该落得更快。同一个东西，又是被拖慢、又是更快，矛盾了。〔注 1〕所以“重的落得快”不可能是对的。后来的实验证实了推论：忽略空气阻力，一切物体下落得一样快——你让一颗铁球和一片羽毛从同一高度同时落下，真空中它们同时着地。我们把这种从静止释放、只受重力作用的下落，叫作**自由落体**，它下落的高度与时间的关系正是 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，落地速度 $v = gt$ (或 $v^2 = 2gh$)。测楼高的原理，就藏在这两行公式里。

上抛是落体的镜像。竖直上抛 $v_0 = 30 \text{ m/s}$ ：往上抛和往下掉，其实是同一件事，而且对称得漂亮。上升段：初速 30 m/s 向上，重力让它每秒减速 10 m/s，3 秒减到零——**最高点到了**，高度 $h = \frac{v_0^2}{2g} = 45 \text{ m}$ ，上升时间 $t_{\uparrow} = \frac{v_0}{g} = 3 \text{ s}$ 。然后它开始自由落体，掉回原点又是 3 s，落地速度还是 30 m/s。

所以竖直上抛的完整结论：**上升与下降时间相等** (全程 $t = 2v_0/g$)、**同一高度速率相等**、**同一位置速度方向相反**。抛球、接球，手感和公式是同一件事——最高点那一瞬间，速度是零，但加速度还是 g (它还在被地球拽着)。〔注 2〕

测楼高：误差在和你作对。真去测的时候，麻烦来了：测出的时间忽大忽小，算出的楼高普遍偏大。是楼在长高吗？当然不是——问题出在哪？你可能会想到自己的手：**按表慢了**。对了一半，但误差不只这一个。找找看，还有谁在捣鬼？

- 人的反应时间约 0.2 秒。按晚了， t 偏大，而 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 里 t 是平方——0.2 秒在 $t = 3 \text{ s}$ 时能造成约 4 米误差，比一层楼还高；
- 石头下落越快，空气阻力越明显，实际加速度小于 g ——还记得“只受重力”的理想化吗？误差就是理想化的代价；
- 靠“听到口令”计时，比“看到松手”多出声音传播的时间——楼越高，这个差越多。

找出敌人就好办了。对策都是实验题的看家本领：**多测几次取平均** (把偶然误差抹平)、**换密度大的重物** (减小空气阻力)、**统一“看到就按”** (系统误差改不了，就把口径统一)。有条件的话，用手机慢动作视频逐帧计时，反应时间从 0.2 秒压到 0.02 秒。改进后，重新测 5 次，对比两轮数据的平均值和波动——改进有用吗？

你能不能说清楚它为什么有用？说得清，你就是“会做实验”；说不清，只是“背实验”。

例题 2.3

苹果从 45 m 高的树上落下 ($g = 10 \text{ m/s}^2$), 求落地时间与落地速度。想一想:

- 问: 苹果落下是什么运动? 有哪些已知量?
- 想: 自由落体——初速为零、只受重力, $h = 45 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。
- 问: 要求时间 t , 用哪个公式?
- 想: $h = \frac{1}{2}gt^2$, 由 h 反推 t 。
- 问: 要求落地速度 v , 用哪个公式?
- 想: $v = gt$ (或 $v^2 = 2gh$ 一步到位)。
- 问: 结果合理吗?
- 想: $v = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$ ——比高速超速的车还快, 苹果摔下来确实很猛, 量级合理。

详细答案: 解: (1) 取竖直向下为正方向, 自由落体, $v_0 = 0$, $h = 45 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。(2) 由 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 得 $t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{90}{10}} = 3 \text{ s}$ 。(3) 由 $v = gt$ 得 $v = 30 \text{ m/s}$ 。答: 落地时间 3 s, 落地速度 30 m/s (108 km/h)。(4) 验算: $v^2 = 2gh = 900$, $v = 30 \text{ m/s}$, 与 (3) 一致。

变式提醒: 只问落地速度时用 $v^2 = 2gh$ 一步到位 ($v = \sqrt{2 \times 10 \times 45} = 30 \text{ m/s}$), 不用绕时间——“由高度直接反推速度”是 $v^2 = 2gh$ 的招牌用法。

动手试试 (材料: 一把直尺) 先猜: 你从看到尺子下落到手抓住它, 之间尺子下落了多远? 你的反应时间大概几秒? 动手: 让同桌竖直拿住尺子, 你的手张开放在尺子下端 (不碰)。同桌突然松手, 你尽快抓住尺子。记下尺子下落了多远 h , 用 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 反算出你的反应时间 t 。多试几次取平均。观察: 反应时间大约 0.1 ~ 0.3 秒——每次都不完全一样。思考: 下落距离和时间平方成正比—— $h = \frac{1}{2}gt^2$ 正在你自己身上做实验。测楼高的原理和测反应时间一模一样: **测出下落时间, 高度就藏在这个时间里。**你的秒表有多靠谱, 测出的楼高就能信几分——这也是接下来误差分析的底气。

练一练

- 从 125 m 高处自由落体, 落地时间和落地速度 ($g = 10$)?
- 竖直上抛 $v_0 = 30 \text{ m/s}$, 最高点高度和上升到最高点的时间? 全程多久回到出发点?
- 雨滴从 2000 m 高空落下, 若全程自由落体, 落地速度多大? 实际雨滴为什么没那么快 (空气阻力——第 3 章见)?

参考答案: 1. $t = \sqrt{(2h/g)} = \sqrt{(2 \times 125/10)} = 5 \text{ s}$, $v = gt = 50 \text{ m/s} = 180 \text{ km/h}$ 。2. 最高点 $h = v_0^2/2g = 900/20 = 45 \text{ m}$, 上升时间 $t_{\uparrow} = v_0/g = 3 \text{ s}$, 全程 $2v_0/g = 6 \text{ s}$ (上升下降对称)。3. 若全程自由落

体： $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{(40000)} = 200 \text{ m/s} = 720 \text{ km/h}$ 。实际雨滴没这么快——速度越大空气阻力越大，最终雨滴匀速下落（约 8 m/s ），这就是第 3 章要讲的「收尾速度」。

想一想（概念边界）：刹车题的“陷阱”是：题目给的“时间”可能超过实际停车时间。如果题目没说明“车是否已停”，你拿到一个刹车时间 t ，第一步应该做什么？

提示：第一步永远是先算停车时间 $t_{\text{停}} = v_0/a$ ，再比较： $t > t_{\text{停}}$ 用 $t_{\text{停}}$ 代入（车早停了）， $t \leq t_{\text{停}}$ 才用 t 代入。不知道先判停车时间，代错数是必然的——这是刹车题唯一的“分水岭”。

本章注释

〔注 1〕关于“越重落得越快”，流传最广的说法是伽利略在比萨斜塔上同时扔下两个铁球——这个故事出自伽利略的学生维维亚尼 1654 年写的传记，伽利略本人没留下过任何记载，学界普遍认为它**不是史实**。可靠的证据是伽利略《论两种新科学》（1638 年）里的推理：把重球和轻球绑在一起，既会被轻球“拖慢”，又因为更重而应该“更快”——矛盾，所以“重的落得快”不成立。教材采用逻辑论证版，是因为它真实、且比传说更考验思维。

〔注 2〕你也许听过“雨滴不会砸伤人”的说法，它背后也是自由落体的账：雨滴从 2000 m 高空落下，若真按自由落体算，落地速度高达 720 km/h——那就不叫下雨，叫枪林弹雨。实际雨滴因为有空气阻力，最终匀速下落，速度只有大约 8 m/s。自由落体是理想化的起点，空气阻力让真实世界“温柔”下来——这正是第 3 章的主题。

你这一章攒下了这些武器学完这一章，你做成了一件真事：用一把秒表，测出了一栋楼的高度。还记得开头的问题吗——**量高度，非要尺子吗？**现在你知道了：不用。时间就够了。这一章还顺手做了别的：算过刹车痕迹定超速、算过两车追及——每个公式都有一件事等着它去解决。

顺带还攒下了这些“读题暗号”。**这张表就是本章的全部考点——一个都没少**，每一条，正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
从静止释放 / 自由下落	自由落体	$h = \frac{1}{2}gt^2$ 、 $v = gt$ 、 $v^2 = 2gh$
刹车 / 匀减速到停	末速为零的匀变速	先算停车时间，再代 $v^2 - v_0^2 = 2ax$
追及 / 相距最远	共速分水岭	v - t 图看面积、位移相等
竖直上抛	自由落体的镜像	上升 = 下降： $t = v_0/g$ 、 $h = v_0^2/2g$
没给时间	速度位移公式	$v^2 - v_0^2 = 2ax$
只给秒表 / 不给尺子	时间法	由 t 反推 h

你该记住的流程：拿到一道匀变速题，按五步走——(1) 判类型：匀加速、匀减速、自由落体还是竖直上抛？(2) 列已知： v_0 、 v 、 a 、 t 、 x 五个量，已知几个？(3) 选公式：缺谁不用谁（没给时间用第三个，没给末速度用前两个联立）；(4) 查陷阱：刹车先算停车时间，上抛注意对称，追及找共速；(5) 验算：量级合理吗？单位对吗？答案能讲出物理意义吗？

真题直击（改编自 2024 北京卷）（单选）水平传送带匀速运动，一物体无初速度放上传送带，最终随传送带匀速。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静摩擦力 C. 物体加速过程中摩擦力对物体做负功 D. 传送带速度越大，物体加速时间越长

答案 D。解析：A 错——物块刚放上时速度为零、相对传送带**向后**运动；B 错——共速后与传送带一起匀速，无相对运动趋势，不受摩擦力（不是“有传送带就有摩擦”）；C 错——加速阶段摩擦力方向与位移方向相同，对物块做**正功**（摩擦是动力）；D 对——加速时间 $t = v/\mu g$ ，传送带速度 v 越大，加速时间越长。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 匀变速直线运动的三条基本公式（含 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ ）分别适用于什么条件？
- 汽车 10 m/s 行驶，刹车加速度 2 m/s^2 ，刹车距离多大？
- 自由落体的加速度是多少？方向如何？
- 竖直上抛到最高点时速度多大？加速度多大？
- 从 45 m 高自由落体（ $g = 10$ ），落地时间与落地速度？
- v - t 图像中，图线斜率代表什么？图线与 t 轴围成的面积代表什么？

提升

- 追及问题中，两车何时相距最远？（提示：用速度关系判断）
- 汽车刹车 4 s 停下，刹车距离 40 m，刹车前的速度多大？（用 $v^2 = 2ax$ ）
- 竖直上抛初速 20 m/s（ $g = 10$ ），上升的最大高度和总时间？

探究

- 如何用“滴水法”测重力加速度？（水滴从水龙头滴下，测相邻水滴间隔与下落距离，写出公式）

参考答案：1. 三个公式都只适用于匀变速直线运动（ a 恒定）。2. $x = v_0^2/2a = 100/4 = 25 \text{ m}$ 。3. $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ （约 10），竖直向下。4. 最高点速度 0，加速度仍为 g （向下）。5. $t = \sqrt{2h/g} = 3 \text{ s}$ ， $v = gt = 30 \text{ m/s}$ 。6. 斜率 = 加速度；面积 = 位移。7. 当两车速度相等（ v ）时相距最远。8. $v_0 = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \times 5 \times 40} = 20 \text{ m/s}$ （验算： $a = v_0/t = 20/4 = 5 \text{ m/s}^2$ ，与 $v_0 = at$ 自洽）。9. $h = v_0^2/2g = 400/20 = 20 \text{ m}$ ，总时间 $t = 2v_0/g = 4 \text{ s}$ 。10. 调节水龙头使水滴匀速滴下，测 n 滴水的总时间算周期 T ；测水滴下落 h 的距离，由 $h = \frac{1}{2}gT^2$ 得 $g = 2h/T^2$ 。

第三章 力是怎么改变运动的：相互作用与牛顿定律

为什么苹果会落地，而月球不会掉到地球上？为什么拔河比赛不是比力气大？为什么急刹车时人往前冲？

这三个问题看着各不相干。它们背后是同一套东西：**力**——而且是同一套思路的三层递进：先认识自然界的三位“常客”（重力、弹力、摩擦力），再学怎么给物体“画账本”（受力分析），最后请出牛顿三定律——力学的“宪法”。学完这一章你会发现，苹果、拔河、急刹车，答案都是同一本书的三页。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 正确分析物体的受力（一重二弹三摩擦），找出施力物体；(2) 会用平行四边形定则与正交分解处理力的合成与分解；(3) 理解牛顿三定律，会用牛顿第三定律解释相互作用现象。

3.1 三种基本力：重力、弹力、摩擦力

重力：体重秤到底在测什么？

你站上体重秤，数字蹦到 60。你可能觉得这没什么好想的：秤测的当然是体重。可你有没有想过，**秤显示的到底是什么？**你压秤，秤就顶你——它测的其实是**支持力**，不是重力本身。那重力是什么？我们把地球对物体的吸引力叫作**重力**， $G = mg$ ，方向竖直向下，作用点叫重心。 $g = 9.8 \text{ N/kg}$ 和上一章的 9.8 m/s^2 是同一件事：每千克质量，地球就给 9.8 牛的拉力。

“秤测的是支持力”这句话看着像文字游戏，但它是个伏笔——下一章你会发现，电梯一加速，同样的你，秤上的数字会自己变大变小。你并没有变重，变的是支持力。

弹力：蹦床为什么压得越狠，弹得越高？

你跳上蹦床，床面凹下去一大块，然后把你弹起来老高。为什么？因为蹦床被压变形了，它想恢复原状，于是推你。我们把物体发生形变后、想要恢复原状而产生的力叫作**弹力**。形变越大，弹力越大——这就是蹦床的答案。弹簧也一样： $F = kx$ （胡克定律， k 是劲度系数， x 是形变量不是长度）。还有两条规则：接触面弹力垂直于接触面；绳的拉力沿绳，杆的弹力方向不定（可推可拉）。

摩擦力：冰面为什么比水泥地危险这么多？

同样的速度刹车，在冰面上滑出去的距离是水泥地的好几倍。为什么？因为冰面给轮胎的“抓力”小。这个抓力就是**摩擦力**：两个相互接触的物体，当它们发生相对运动（或有相对运动趋势）时，在接触面上产生的阻碍相对运动（或相对运动趋势）的力。产生摩擦力的三个条件：(1) 接触且挤压（有弹力——两个物体只是“挨着”但没有相互挤压，就没有摩擦力）；(2) 接触面粗糙；(3) 有相对运动（或相对运动趋势）。滑动摩擦力 $f = \mu N$ （ μ 是动摩擦因数， N 是正压力）；静摩擦力是个“变色龙”——在 0 到最大静摩擦之间随需要取值，需要多大给多大：你推箱子，用 4 N 的力没推动，静摩擦就是 4 N；用 10 N 还是没动，它就是 10 N。

摩擦力的三个“反直觉”，专治想当然：

- **摩擦力不一定阻碍运动**——传送带上的物体，摩擦力是让它加速的“动力”！物体刚放上传送带时相对传送带向后滑，摩擦力向前，把它“带”到共速；
- **静摩擦力做功可以为正**——你站在加速的公交车上，让你跟着车走的就是静摩擦力，它做正功；
- **摩擦力方向与“相对运动（趋势）方向”相反，不是与运动方向相反**——人走路，脚向后蹬地，摩擦力向前，你才能往前走。没有摩擦力，你连一步都迈不出去——想想冰面。

拔河为什么不是比力气大？绳子两端的拉力永远等大（牛顿第三定律的伏笔）——你拉我多少，我拉你多少。那赢靠什么？靠**脚下的摩擦力**：谁能站得更稳（鞋底更抓地、重心更低），谁就能把对方拽过来。下次拔河，别死拽绳子，先站稳。

例题 3.1

$m = 2 \text{ kg}$ 的箱子在水平地面上， $\mu = 0.3$ 。求滑动摩擦力大小；若拉力 $F = 4 \text{ N}$ ，箱子动吗？

想一想：

- 问：滑动摩擦力怎么算？正压力是多少？
- 想： $f = \mu N$ ；水平面上正压力等于重力， $N = mg = 20 \text{ N}$ 。
- 问：用 4 N 拉，箱子动吗？——关键看什么？
- 想：看静摩擦力这个“变色龙”：它随需要取值，拉力 $4 \text{ N} < \text{最大静摩擦}$ （约 6 N），它“恰好给到 4 N”，箱子不动。
- 问：如果拉力加到 8 N 呢？
- 想：超过最大静摩擦，箱子滑动，摩擦力变成滑动摩擦 6 N——不再“随需要给”。

详细答案：解：(1) $N = mg = 20 \text{ N}$ ， $f_{\text{滑}} = \mu N = 0.3 \times 20 = 6 \text{ N}$ 。(2) 拉力 $4 \text{ N} < 6 \text{ N}$ ，静摩擦力恰为 4 N。答：滑动摩擦力 6 N；用 4 N 拉，箱子不动。

变式提醒：若拉力加到 $8\text{ N} > 6\text{ N}$ ，箱子开始滑动，摩擦力为滑动摩擦 6 N ；“恰能拉动”的拉力等于最大静摩擦（约等于 μN ）。

练一练

- 弹簧长度 10 cm ，挂 2 N 重物后变 12 cm ，劲度系数多大？
- 推箱子 30 N 推不动，静摩擦力多大？加到 50 N 刚推动，最大静摩擦至少多大？
- 传送带上有物体，摩擦力方向向哪？它做正功还是负功？

参考答案：1. 伸长量 $x = 12 - 10 = 2\text{ cm} = 0.02\text{ m}$ ， $k = F/x = 2/0.02 = 100\text{ N/m}$ 。2. 30 N 推不动：静摩擦力 $= 30\text{ N}$ （被动力，随需要取值，正好抵消推力）； 50 N 刚推动：最大静摩擦力 $\approx 50\text{ N}$ （恰要动的临界）。3. 物体刚放上时相对传送带向后滑，摩擦力向前（沿运动方向）——它是动力，做正功；若物体已与传送带同速一起匀速运动，则没有摩擦力（不是「有传送带就有摩擦」）。

3.2 受力分析：力学的基本功

一件棉被才几公斤，为什么晾衣绳拉得越直，越费劲？

晒衣服，衣服轻的时候绳子弯弯的；挂上湿棉被，绳子被绷得笔直——而撑住绳子的两端，反而要费更大的劲。一件棉被不过几公斤，为什么绳子几乎水平时，需要的拉力比棉被本身重好几倍？这看着像魔术，其实是一道算术题。

因为棉被的重力被“拆”开了。一个力可以拆成两个：沿绳子的两个方向，重力被分成两股，分别拉向两边。绳子绷得越接近水平，两股力就越大——绳子完全水平时，理论上要无穷大的力才撑得住。你越想把绳子拉直，越费劲，不是错觉，是数学。

这就是**力的分解**：把一个力按照它的作用效果，用两个（或多个）分力来代替。分解是力的合成的逆运算，同样遵从**平行四边形定则**——就像把一个数拆成两个因数，反过来两个因数相乘又回到原来的数。沿绳方向分解重力，就是分解最典型的用法。很多“想不通”的力的问题，都是因为没把一个力拆开看。

而拆之前，得先知道一个物体到底受哪些力。我们把这一步叫作**受力分析**，它是力学的基本功。顺序口诀：**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。

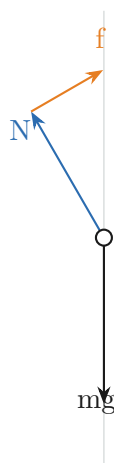


图 3.1: 斜面上物体的受力：重力分解为下滑分量与压紧分量

斜面上的物体，和晾衣绳是**同一个道理**：重力沿斜面“拆”成两股——沿斜面向下的下滑分量 $mg \sin \theta$ ，和垂直斜面压紧斜面的分量 $mg \cos \theta$ 。支持力 N 抵消压紧分量，摩擦力 f 对抗下滑分量。斜面越陡（ θ 越大），下滑分量越大、压紧分量越小——所以同一辆车，缓坡轻轻刹住，陡坡要死命刹车。

3.3 力的合成与分解：把力当向量算

两个人拔河，绳子中间挂一盏灯——两个人使的力，最后谁说了算？

力的作用效果不是“谁大听谁的”，而是**合在一起算**。我们把几个力共同作用的效果，用一个力来代替，这个力叫这几个力的**合力**；求合力的过程叫**力的合成**。反过来，把一个力按效果拆成几个分力，叫**力的分解**——合成与分解，是一对互逆的运算。

平行四边形定则（力的合成与分解的统一法则）：求两个互成角度的力的合力，可以把这两个力画成以同一点为起点的两个邻边，作一个平行四边形——从起点出发的对角线，就是这个合力的大小和方向。晾衣绳里“重力被沿绳拆成两股”，就是定则的分解用法；反过来，绳的两股拉力合成起来，正好顶住棉被的重力。

合成时有个直觉陷阱：合力不是两个力“相加”。两个 5 N 的力：

- 方向相同，合力 10 N （最大）；
- 方向相反，合力 0 （最小）；
- 夹角 90° ，合力 $\sqrt{5^2 + 5^2} \approx 7.07\text{ N}$ ；
- 夹角越大，合力越小——**合力范围**： $|F_1 - F_2| \leq F_{\text{合}} \leq F_1 + F_2$ 。

所以拔河绳中间那盏灯，绳子越接近水平（两股拉力夹角越接近 180° ），合力越小——挂不住灯，灯会掉下来（这正是晾衣绳“拉直了反而费劲”的另一面：越直，需要的拉力越大）。

正交分解：把任意角度的力变成“横平竖直”

平行四边形定则画图好懂，算数麻烦。更实用的方法是**正交分解**：把一个力沿互相垂直的两个方向（比如水平 x 、竖直 y ）分解，变成两个垂直分量 F_x 、 F_y ——因为垂直，它们互不影响，可以分开列方程。斜面那辆车就是这么算的：重力分解为沿斜面（下滑分量）和垂直斜面（压紧分量）两个方向，各自列方程。读题暗号里说的“受力分析+正交分解列方程”，就是把这一步练熟：**一重二弹三摩擦** → **选 x/y 方向** → **各方向合力分别列式**。

例题 3.2

一物体重 $G = 20\text{ N}$ ，放在倾角 $\theta = 30^\circ$ 的斜面上，恰好匀速下滑（摩擦力与下滑分量平衡）。求：（1）重力沿斜面的下滑分量和垂直斜面的压紧分量；（2）斜面对物体的支持力 N 和摩擦力 f 。**想一想**：

- 问：怎么分解重力？
- 想：沿斜面方向和垂直斜面方向正交分解——沿斜面 $G \sin \theta$ ，垂直斜面 $G \cos \theta$ 。
- 问：匀速下滑说明什么？
- 想：沿斜面方向合力为 0：摩擦力 = 下滑分量；垂直斜面方向合力为 0：支持力 = 压紧分量。
- 问：代入算？
- 想： $G \sin 30^\circ = 20 \times 0.5 = 10\text{ N}$ ； $G \cos 30^\circ = 20 \times 0.866 \approx 17.3\text{ N}$ 。

详细答案：解：（1） $F_{\text{下}} = G \sin \theta = 20 \times \frac{1}{2} = 10\text{ N}$ ， $F_{\text{压}} = G \cos \theta = 20 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 17.3\text{ N}$ 。（2）匀速下滑：沿斜面方向 $f = F_{\text{下}} = 10\text{ N}$ ；垂直斜面方向 $N = F_{\text{压}} \approx 17.3\text{ N}$ 。答：下滑分量 10 N、压紧分量约 17.3 N；支持力约 17.3 N、摩擦力 10 N。

变式提醒：正交分解的黄金规则是“**选好方向**”——沿运动方向和垂直运动方向分解最省事；物体匀速或静止时，各方向合力都为 0，列两个方程解两个未知量。凡是斜面、坡道、悬挂、晾衣绳的问题，先分解再列式，就再也不会“无从下手”。

3.4 牛顿三定律：力是运动变化的原因

急刹车时你往前冲，是有东西推你吗？

公交车急刹车，你往前冲。停下来想想：有什么东西推了你吗？没有。是你自己“想”保持原来的速度——身体想继续往前，车却先停了。这个现象让古人困惑了两千年：亚里士多德说力“维持”运动——这个说法统治了欧洲近两千年，因为它看起来太对了：推车，车动；不推，车停。〔注 1〕伽利略用理想斜面实验推翻它：小球在没有摩擦的斜面上会永远滚下去，运动不需要力来维持。牛顿把它写成第一定律：

第一定律（惯性定律）：一切物体总保持匀速直线运动或静止状态，除非作用在它上面的外力迫使它改变这种状态。这就是**牛顿第一定律**，也叫**惯性定律**。力不是维持运动的原因，是改

变运动的原因。惯性是物体自身的属性——**质量大，惯性大**，与受力无关。急刹车你往前冲，不是因为有个力推你，而是因为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。〔注2〕

那启动时你为什么会往后倒？车加速，座椅推你的背，让你跟上车的速度——这就是力在**改变**你的运动。改变得多快，由第二定律说了算：

第二定律：物体加速度的大小跟它受到的作用力成正比、跟它的质量成反比，加速度的方向跟作用力的方向相同，写成 $F = ma$ （矢量式）。这就是**牛顿第二定律**，力学的“宪法”：**力决定加速度，不决定速度**。推车：力大，加速度大；质量大，同样的力加速度小。所以大货车“难启动也难停下”——不是它懒，是质量大，惯性大。注意，第二定律说的是瞬时关系——力没了，加速度立刻没（但速度还在，因为惯性）。

你走路能前进，靠的是谁推你？脚向后蹬地——地同时向前推你。一个物体对另一个物体施加力的同时，也受到另一个物体对它施加的力，我们把这一对力叫作**作用力与反作用力**：**大小相等、方向相反、作用在同一条直线上、作用在不同物体上**——这就是**牛顿第三定律**。你推墙，墙也在推你。

这里有个最经典的陷阱，几乎人人都踩过：**你推墙的力和墙推你的力等大反向，为什么不抵消成零？**因为抵消需要两个力作用在**同一个物体上**——可这两个力一个作用在你身上、一个作用在墙上，各有各的“主人”。先想清楚你研究的是谁（墙？还是你？），只数作用在它身上的力——这叫**明确研究对象**，是解力学题的第一步。

火箭能飞上天，也是这个原理：向下喷气，气体向下推火箭，火箭向上推气体——互相推。你看波士顿动力的人形机器人走路，每一步都稳稳当当——它和你走路是同一件事：脚向后蹬地，地面向前推脚，作用力与反作用力。机器人的“大脑”每秒上千次地在解这道牛顿第三定律的题。拔河赢不是比力气大（前面说过，绳子两端拉力永远等大），比的是脚下摩擦力。

例题 3.3

$m = 1000 \text{ kg}$ 的汽车以 2 m/s^2 加速，牵引力多大（不计阻力）？若阻力 $f = 500 \text{ N}$ 呢？

想一想：

- 问：牛顿第二定律里， $F = ma$ 的 F 是哪个力？
- 想：是**合力**，不是牵引力本身——这是最容易错的地方。
- 问：无阻力时，合力等于什么？
- 想：合力就是牵引力： $F = ma$ 。
- 问：有阻力时呢？合力怎么表示？
- 想：合力 = 牵引力 - 阻力： $F - f = ma$ 。
- 问：算出来，两种情况哪个牵引力大？合理吗？

- 想：有阻力时 $F = ma + f = 2500 \text{ N}$ 更大——阻力抵消一部分力，需要更大牵引力，合理。

详细答案：解：(1) 无阻力： $F = ma = 1000 \times 2 = 2000 \text{ N}$ 。(2) 有阻力： $F - f = ma \Rightarrow F = 2000 + 500 = 2500 \text{ N}$ 。答：无阻力 2000 N；有阻力 2500 N。

变式提醒：若已知牵引力和阻力求加速度，反过来解 $a = (F - f)/m$ ；上坡还要再减 $mg \sin \theta$ 的下滑分量。

动手试试（材料：两本书）

先猜：两本书的书页交错叠在一起，要拉开它们，难吗？

动手：把两本书的书页一页页交错叠起来（十几页就够），然后试着把它们拉开。

观察：很难拉开！页数越多越难。

思考：每两页之间都有摩擦力，十几页就是几十个摩擦力叠加——摩擦力不是“小到可以忽略”的力，它叠起来能超过你的力气。这正是“静摩擦力随需要取值”的威力：你拉得越用力，它给得越足，直到超过极限才“放手”。

练一练

- 用力推车车不动，牛顿第二定律失效了吗？（提示：合力为零）
- 马拉车与车拉马的力，谁大？为什么车还能前进？
- 为什么质量大的物体“难启动也难停下”？

参考答案：1. 没有失效——车不动 = 合力为零（推力被静摩擦抵消）， $a = F_{\text{合}}/m = 0$ ，运动状态不变，完全符合牛顿第二定律。2. 一样大——牛顿第三定律：马拉车和车拉马大小相等、方向相反。车能前进，是因为地面对车的摩擦力（向前）大于车受到的阻力；马能前进，是因为地面对马蹄的摩擦力（向前）大于车对马的拉力。3. 质量大 $\rightarrow$ 惯性大：同样力下 $a = F/m$ 更小（难启动）；要停下需要更大冲量（难停下）——惯性是质量的本性。

想一想（概念边界）：静摩擦力是“随需要取值”的变色龙。如果题目只告诉你拉力 F 的大小，却没说最大静摩擦力，你能判断物体动不动吗？

提示：不能直接判断——必须先把最大静摩擦算出来（约等于 μN ）再比较。静摩擦的实际值在 0 到最大静摩擦之间“看情况给”，不知道上限就不知道它能不能“顶住”拉力。这就是“边界量必须已知才能判边界”。

本章注释

〔注 1〕亚里士多德“力维持运动”的观念统治了欧洲近两千年，它错得并不离谱——日常生活里，推车不推就停，确实像“力在维持运动”。问题是人们没看见那个隐藏的力：摩擦力。伽利略在《论两种新科学》（1638 年）里用一个思想实验拆穿了它：让小球从斜面滚下，

再滚上另一个斜面——把第二个斜面放平，小球就会一直滚下去（没有摩擦时）。运动不需要力来维持，需要力的是“改变运动”。

〔注 2〕“急刹车往前冲”其实就是第 1 章那个伽利略船舱实验的另一面：船匀速行驶时你跳起落回原地，靠的是惯性；车急停时你往前冲，也是惯性——惯性不是“懒”，是你原有的运动状态不肯改变。安全带、安全气囊（第 9 章还会细讲）存在的全部理由，就是对抗这个“不肯改变”。

你这一章攒下了这些武器

这一章你认识了力的“三常客”和牛顿三定律——后面所有力学题，都是在这一章的基础上“画受力图、列方程”。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
弹簧	胡克定律	$F = kx$, x 是形变量
滑动 / 摩擦因数	滑动摩擦	$f = \mu N$
静止 / 匀速 / 平衡	合力为零	受力分析 + 正交分解列方程
传送带 / 相对滑动	摩擦是动力还是阻力	先判相对运动（趋势）方向
急刹车 / 安全带 / 惯性	第一定律	惯性 = 质量，力改变运动不维持运动
求加速度	第二定律	$F_{\text{合}} = ma$ ，先受力分析
作用力反作用力	第三定律	等大反向、作用在不同物体

你该记住的流程：解动力学题，三步走——(1) 受力分析（一重二弹三摩擦，问施力物体）；(2) 选方向建坐标（斜面沿斜面 + 垂直斜面）；(3) 列方程（平衡：合力为零；加速： $F_{\text{合}} = ma$ ）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 如图所示，物体 A 静止在粗糙斜面上，对 A 的受力分析，下列说法正确的是？

- A. A 受到重力、支持力、摩擦力、下滑力四个力
- B. 若增大斜面倾角，A 与斜面间的摩擦力一定增大
- C. 若在 A 上加一个竖直向下的力，A 与斜面间的摩擦力增大
- D. 摩擦力方向沿斜面向下

答案 C。解析：A 错——“下滑力”是重力的分力，不是真实存在的力，受力分析只数真实力（重力、支持力、静摩擦力）；B 错——静摩擦力随重力沿斜面分量变化，若倾角增大但未滑动，摩擦力 $f = mg \sin \theta$ 是增大的，但若超过最大静摩擦力开始滑动则变为滑动摩擦（不一定增大，题目说“一定”错）；C 对——加竖直向下的力 F 后，沿斜面分量增大，平衡所需静摩擦力 $f = (mg + F) \sin \theta$ 增大；D 错——摩擦力沿斜面向上（阻碍下滑趋势）。受力分析铁律：只数真实力、先重力后弹力再摩擦。

章末检测（基础★ / 提升★★ / 探究★★★）

基础

- 重力、弹力、摩擦力的产生条件各是什么？
- 滑动摩擦力的大小公式？与什么因素无关？

- 力的合成遵从什么定则？两个 3 N、4 N 的力夹角 90° ，合力多大？
- 什么叫正交分解？通常怎么选 x、y 方向？
- 牛顿第一定律的内容？惯性大小由什么决定？
- 牛顿第三定律的内容？作用力与反作用力能否抵消？

提升

- 静摩擦力是“需要多大给多大”——推箱子用 5 N 没动，静摩擦力多大？
- 质量 2 kg 的物体在水平面上，动摩擦因数 0.3，求滑动摩擦力（ $g = 10$ ）。
- 弹簧测力计两端各挂 5 N 的重物，读数是多少？

探究

- 用一支弹簧测力计和一个量角器，设计实验验证“两力合成遵循平行四边形定则”。

参考答案：1. 重力：物体在地球表面受地球吸引；弹力：接触 + 形变；摩擦力：接触 + 粗糙 + 有相对运动（趋势）。2. $f = \mu N$ ，与接触面积和相对速度无关。3. 平行四边形定则； $F = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ N}$ 。4. 把力沿互相垂直的两个方向分解；通常选沿运动方向和垂直运动方向。5. 一切物体总保持匀速直线运动或静止，除非外力迫使它改变；惯性由质量决定。6. 作用力与反作用力等大、反向、共线、作用在不同物体上；不能抵消（作用对象不同）。7. 5 N（静摩擦与推力平衡）。8. $f = \mu mg = 0.3 \times 20 = 6 \text{ N}$ 。9. 5 N（弹簧两端受等大拉力，读数即拉力大小）。10. 用两个测力计互成角度拉同一绳结，记下两力与合力；换方向再做；比较合力与两分力是否满足平行四边形定则（也可用尺规作图验证）。

第四章 力与运动怎么配合：运动与力的结合

上一章学了牛顿三定律，这一章就让它们干活——把力与运动“接上线”的三个经典战场：**体重计为什么骗人（超重失重）、动车车厢之间凭什么互相拽（连接体）、传送带怎么让物体“跟着走”（临界问题）**。这三个模型，是高考大题里出现频率最高的“常客”，也是三个“你每天都会遇到、却一直没想明白”的谜。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 用牛顿第二定律求解加速度与力；(2) 理解超重失重（看加速度不看速度）；(3) 掌握连接体“整体隔离”与传送带“共速判断”两大模型。

4.1 超重与失重：体重计上的骗局

坐电梯时，你变重了吗？

站在体重计上，电梯刚启动向上加速——读数“呼”地跳高了。你第一反应大概是：我变胖了？当然不是。这就是本章的第一个陷阱：**体重计显示的从来不是你的重力，而是支持力**——你压秤，秤就顶你，读数 = 支持力。上一章那句“秤测的是支持力”，现在该兑现了。

电梯向上加速：支持力 N 减去重力 $mg = ma$ ，所以 $N = m(g + a)$ ——读数变大了。我们把物体对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）大于物体所受重力的现象，叫作**超重**；电梯向下加速： $mg - N = ma$ ， $N = m(g - a)$ ——读数变小。压力小于重力的现象，叫作**失重**；如果电梯缆绳断了自由落体， $a = g$ ， $N = 0$ ——压力为零，**完全失重**，体重计显示 0。

(a) 超重



(b) 失重



图 4.1: 超重与失重：比较支持力 N 与重力 mg

超重失重看加速度，不看速度——这是全章最阴的陷阱：电梯**减速上升**（正在向上去但越来越慢，加速度向下）其实是失重；**减速下降**（正在向下去但越来越慢，加速度向上）反而是超重。你感觉到“身体发飘”还是“被压”，只取决于加速度方向。记住：“上升”两个字骗不了你，加速度方向才是真话。

空间站的宇航员为什么飘着？空间站和宇航员一起绕地球“自由落体”——完全失重。宇航员不是“没有重力”，而是重力全部用来做圆周运动了，他和空间站都在掉，所以谁都不压谁。这就是完全失重最壮观的现场——“天宫课堂”里王亚平在空间站里把水做成悬浮的水球、原地转身像拧螺丝一样飘着转，你看到的每一个画面，都是第3章那句“秤测的是支持力”在太空里的回响。〔注1〕

航天员训练时还会体验它的反面——离心机训练：人坐在转臂末端高速旋转，承受最高8倍重力的过载，脸被拉变形、话都说不清。那就是超重。从8g到0g，航天员把超重和失重都提前“预习”过了。

例题 4.1

体重 60 kg 的人在电梯里，电梯以 2 m/s^2 加速上升，体重计读数多少？

想一想：

- 问：体重计读数显示的是什么力？
- 想：显示支持力 N ，不是重力——你压秤，秤就顶你。
- 问：电梯加速上升，加速度向哪？人受哪些力？
- 想： a 向上；人受重力 mg 向下、支持力 N 向上，合力向上： $N - mg = ma$ 。
- 问：超重失重看速度还是看加速度？
- 想：**看加速度**——加速上升（ a 向上）是超重；若“减速上升”（ a 向下）反而是失重，别被“上升”两个字骗了。

- 问：算出来读数多少？变重了吗？
- 想： $N = m(g + a) = 60 \times 12 = 720 \text{ N}$ ，显示 72 kg ——超重 12 kg ，但你并没有变重。

详细答案：解：(1) 取向上为正方向， $N - mg = ma$ 。(2) $N = m(g + a) = 60 \times (10 + 2) = 720 \text{ N}$ 。答：读数 720 N ，相当于显示 72 kg ——超重了 12 kg 。

变式提醒：减速上升 (a 向下)： $N = m(g - a) = 480 \text{ N}$ ，失重；自由落体 ($a = g$)： $N = 0$ ，完全失重。

练一练

- 体重计在电梯加速上升 / 加速下降 / 匀速时读数分别怎么变？
- 电梯减速上升时，是超重还是失重？为什么？
- 人蹲下再站起的过程，体重计读数怎么变？(提示：重心先向下加速再向上减速)

参考答案：1. 加速上升： $N > mg$ ，超重，读数变大；加速下降： $N < mg$ ，失重，读数变小；匀速： $N = mg$ ，读数正常。2. 失重——减速上升时加速度向下 (减速 = a 与 v 反向)，超重失重看加速度方向，不看速度方向。3. 蹲下：重心先向下加速 (失重，读数变小) 再向下减速 (超重，读数变大)；站起：先向上加速 (超重读数变大) 再向上减速 (失重读数变小)——整个过程读数「先小后大」(蹲) 或「先大后小」(站)。

4.2 连接体：先整体，后隔离

动车组八节车厢连在一起，中间的车钩 (挂钩) 受力多大？一列动车加速，每节车厢都受力——可车钩上的力，不是“每节都一样”的。先猜一个：车头的车钩和最后两节之间的车钩，哪个受力大？

直觉告诉你，肯定是车头的——它要拖着后面全部七节车厢跑，而最末端的车钩，只拖着一节。猜对了一半。可关键是：**怎么算出来？**八节车厢八张受力图，每张图上都有两个车钩力——方程一堆，未知数一堆，联立起来算到崩溃。

有个聪明的办法：**先整体，后隔离**——把整个动车组看成一个物体，车钩力是“内力”，互相抵消，只算外力，一步得到加速度；再挑一节车厢单独画受力图，内力就露出来了。

为什么先整体？把整个系统看成一个物体，内力 (车厢间的车钩力) 互相抵消，只算外力，立刻得到加速度；**为什么再隔离？**加速度知道了，挑一个物体单独画受力图，内力就露出来了。

例题 4.2

光滑桌面上 $m_1 = 2 \text{ kg}$ 、 $m_2 = 3 \text{ kg}$ 叠放， $F = 10 \text{ N}$ 拉 m_2 (桌面光滑，两物体一起运动)。求整体加速度和 m_1 、 m_2 间的摩擦力。

想一想：

- 问：两个物体一起运动，先算什么？——连接体口诀是什么？
- 想：“先整体后隔离”——先整体求加速度，再隔离求内力。
- 问：为什么先整体？内力去哪了？
- 想：把 m_1 、 m_2 看成一个系统，两物体间的摩擦力是内力，互相抵消，只算外力 F ，立刻得 a 。
- 问：加速度有了，怎么求 m_1 、 m_2 间的摩擦力？
- 想：隔离 m_1 ——它水平方向只受一个力（摩擦力），这个力是让它跟着加速的“动力”： $f = m_1 a$ 。
- 问：如果两物体间太光滑（最大静摩擦 $< 4\text{ N}$ ）会怎样？
- 想： m_1 会掉队——“一起运动”的假设就破了。

详细答案：解：(1) 整体： $a = \frac{F}{m_1+m_2} = \frac{10}{5} = 2\text{ m/s}^2$ 。(2) 隔离 m_1 ： $f = m_1 a = 2 \times 2 = 4\text{ N}$ 。
答：整体加速度 2 m/s^2 ，两物体间摩擦力 4 N 。

变式提醒：若 F 拉的是 m_1 ，隔离对象换成 m_2 ($f = m_2 a$)；桌面粗糙时整体法要把桌面摩擦也算进去，一步得加速度。直接隔离每个物体列方程，方程组里有相互作用力这个未知量，要联立解，容易漏力、容易算错——先整体求 a 、再隔离求内力，两步最省也最稳。

练一练

- 连接体问题为什么要“先整体后隔离”？内力去哪了？
- 动车组八节车厢，车头的车钩和最后两节之间的车钩，哪个受力大？怎么算？

参考答案：1. 整体法把系统看成一个物体，内力（物体间相互作用力）互相抵消，只算外力，一步得加速度；再隔离才能让内力“现身”——先整体求 a 、再隔离求内力，两步最省最稳。
2. 车头的车钩力大——它要拖动后面所有车厢（车头车钩受力 = 后面全部车厢总质量 $\times a$ ）；越靠前的车钩拖的车厢越多，受力越大。算的时候： $F_{\text{钩}} = m_{\text{后面全部}} \times a$ 。

4.3 临界问题：恰好、刚好、最大、最小

“恰好”两个字，是题目的暗号。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。临界状态是受力分析的“分界线”——找到它，答案就出来了。

传送带模型：三步走。超市结账口的传送带、机场安检的行李带，你天天见：把包放上去，包先是“蹭”一下，然后跟着带子一起走了。为什么它会突然“粘”住？因为刚放上时包相对带子向后滑，摩擦力向前推它，把它加速到和带子一样快——一旦同速，相对滑动消失，摩擦

力也没了，包就“粘”在带子上匀速走。这个“从滑到粘”的过程，就是传送带模型的核心。水平传送带以 v 匀速，物块无初速放上——物块先被摩擦力加速 ($a = \mu g$)，直到与传送带共速，然后一起匀速。三步：(1) 判断能否共速：算加速到共速需要的位移 $x = v^2/2\mu g$ ，与传送带长度 L 比较；(2) 能共速：先加速后匀速，分两段算；(3) 不能共速 ($x > L$)：全程加速，速度达不到 v ——这是最常见的陷阱：

传送带不够长，物块永远追不上传送带的速度。

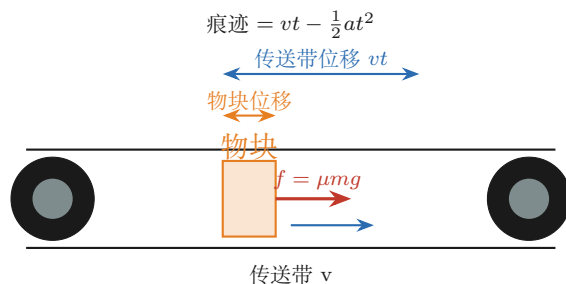


图 4.2: 水平传送带模型：物块无初速放上，受向前的滑动摩擦力加速，痕迹 = 传送带位移 - 物块位移

例题 4.3

水平传送带以 $v = 2 \text{ m/s}$ 匀速，物块无初速放上， $\mu = 0.2$ 。求物块加速到共速的时间与位移；若传送带长 $L = 0.5 \text{ m}$ 呢？

想一想：

- 问：物块刚放上传送带，摩擦力向哪？它做什么运动？
- 想：物块相对传送带向后滑，受向前的滑动摩擦力（**摩擦是动力**），做匀加速： $a = \mu g$ 。
- 问：它会一直加速吗？加速到什么时候？
- 想：加速到与传送带共速为止，之后一起匀速。
- 问：**关键判断**——传送带够不够长？怎么比？
- 想：算加速到共速需要的位移 x ，与传送带长度 L 比： $x \leq L$ 能共速； $x > L$ 全程加速，速度达不到 v 就出去了。
- 问：这里 $L = 0.5 \text{ m}$ ，够吗？出口速度是多少？
- 想：共速需 $1 \text{ m} > 0.5 \text{ m}$ ，不够长！全程加速，出口速度仅 1.4 m/s ——**没追上传送带的速度就出去了。**

详细答案：解：(1) $a = \mu g = 2 \text{ m/s}^2$ 。(2) 共速 $t = \frac{v}{a} = 1 \text{ s}$ ， $x = \frac{1}{2}at^2 = 1 \text{ m}$ 。(3) $L = 0.5 \text{ m} < 1 \text{ m}$ ，全程加速： $\frac{1}{2}at'^2 = 0.5 \Rightarrow t' \approx 0.71 \text{ s}$ ， $v' = at' \approx 1.4 \text{ m/s}$ 。答：够长时 1 s 共速、位移 1 m ； 0.5 m 传送带上物块全程加速，出口速度仅 1.4 m/s 。

变式提醒：物块相对传送带的“痕迹” = 传送带位移 - 物块位移 ($vt - \frac{1}{2}at^2$) ——痕迹题、发热题都要用它；传送带倾斜时还要考虑重力沿斜面的分量。

真题直击 (改编自 2023 湖北卷) (计算, 拆第 (1) 问) 小物块从半圆形竖直挡板内侧 A 点以水平初速度切入, 从 B 点飞出桌面, 恰好沿圆弧轨道 C 点切线进入, 并恰好能到达轨道最高点 D。圆弧轨道半径 R, C 点半径与竖直方向夹角 60° 。(1) 求小物块到达 D 点的速度大小。

读题: “恰好能到达最高点 D” ——圆轨道 (绳模型) 最高点的临界条件是轨道压力为零, 重力提供向心力: $mg = \frac{mv_D^2}{R} \Rightarrow v_D = \sqrt{gR}$ 。一个“恰好”, 直接锁定答案——这就是读题即解题。这道题的“恰好”和第 5 章的绳球模型是同一个暗号。

练一练 (A 组)

- 体重计在电梯加速上升/加速下降/匀速时读数如何变?
- 连接体问题为什么要“先整体后隔离”?
- 传送带足够长时, 物块最终状态是什么?

练一练 (B 组)

- 倾斜传送带 (倾角 θ 、 $\mu > \tan \theta$) 上无初速放物块, 描述它的运动过程。
- 两物体叠放, 用力拉下方物体, 什么条件下上方物体不滑下来?

参考答案: 1. 加速上升 (a 向上) 超重、读数偏大; 加速下降 (a 向下) 失重、读数偏小; 匀速读数等于重力——体重计显示的是“支持力”, 不是“重力”。2. 先整体: 求共同加速度 (不必拆内力); 再隔离: 求物体间内力——先粗后细, 一步一个量。3. 先加速到与传送带共速, 之后一起匀速 (传送带足够长时必然共速; 判断用加速位移与带长比较)。4. $\mu > \tan \theta$ 说明最大静摩擦力大于重力沿斜面分力, 物块加速到与传送带共速后能保持相对静止随带匀速 (不会滑下去); 若 $\mu < \tan \theta$ 则共速后仍继续下滑。5. 上方物体不滑下来的条件: 下方物体加速度 $a \leq \mu g$ (最大静摩擦力足以提供上方物体的加速度) —— $a = \frac{F}{m_1 + m_2}$ 不超过 μg 。

想一想 (概念边界): 超重失重看加速度方向, 不看速度方向。如果电梯正在“向上运动”, 你能判断是超重还是失重吗?

提示: 不能!“向上”只说了速度方向, 没说加速度方向——加速上升 (a 向上) 超重, 减速上升 (a 向下) 失重。判断超重失重永远只问一个问题: 加速度朝哪? 速度方向是干扰项。

本章注释

〔注 1〕“完全失重”还有一个更深刻的面孔, 来自爱因斯坦的一个思想实验: 你站在一个自由下落的电梯里——电梯和你一起以 g 加速下落, 你完全失重, 飘在空中。这时如果有人问“你是在地球上, 还是在远离任何引力的太空里?”——你无法用任何实验区分。爱因斯坦从这个“电梯”出发, 推出了**广义相对论**: 引力与加速度是等价的。这个电梯会在物理三第 6 章再次出现——现在记住它, 到时候你会像见到老朋友一样。

你这一章攒下了这些武器

这一章你学会了把牛顿定律“接上线”——超重失重看加速度、连接体先整体后隔离、临界找“恰好”。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
超重 / 失重	看加速度方向，不看速度	$N = m(g \pm a)$ ，完全失重 $N = 0$
连接体 / 叠放 / 车厢	先整体后隔离	整体求 a ，隔离求内力
恰好 / 刚好 / 临界	分界条件	恰好滑动： f 最大；恰好分离： $N = 0$
传送带	先判能否共速	$x = v^2/2\mu g$ 与 L 比较，不够长则全程加速

你该记住的流程：传送带问题三步走——(1) 算加速度 $a = \mu g$ ；(2) 算共速位移 $x_{\text{共速}} = v^2/2a$ ；(3) 与传送带长度 L 比较：够长就“先加速后匀速”，不够长就“全程加速”。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 牛顿第二定律的表达式？加速度的方向与什么方向相同？
- 质量 2 kg 的物体受 10 N 合力，加速度多大？
- 超重和失重的判断依据是什么？
- 电梯加速上升时，体重秤读数变大还是变小？为什么？
- 完全失重时，体重秤读数是多少？什么情况下会发生？
- 连接体问题的一般解法思路？

提升

- 质量为 60 kg 的人在电梯中，电梯以 2 m/s^2 向上加速，人对秤的压力多大（ $g = 10$ ）？
- 物体在光滑水平面上受恒力作用，从静止开始 3 s 内位移 9 m ，物体质量 2 kg ，求力的大小。
- 传送带问题的关键判断是什么？（物体能否达到共速）

探究

- 用弹簧测力计和钩码设计实验，验证“牛顿第二定律”（ a 与 F 、 m 的关系）。

参考答案：1. $F = ma$ ；方向与合力方向（加速度方向）相同。2. $a = F/m = 5\text{ m/s}^2$ 。3. 看加速度方向：向上加速或向下减速为超重；向下加速或向上减速为失重（看 a ，不看 v ）。4. 变大——支持力 $N = m(g + a) > mg$ ，超重。5. 读数为 0 ——自由落体（或绕地球运动的飞船内）

$a = g$ 时完全失重。6. 先整体求加速度，再隔离求内力。7. $N = m(g + a) = 60 \times 12 = 720 \text{ N}$ 。
8. $a = 2x/t^2 = 18/9 = 2 \text{ m/s}^2$, $F = ma = 4 \text{ N}$ 。9. 判断物体加速到传送带速度所需的位移与传送带长度的大小关系。10. 用小车在水平面上（垫高平衡摩擦），用砝码提供恒力，打点计时器测加速度：保持 m 不变改变 F ，验证 $a \propto F$ ；保持 F 不变改变 m ，验证 $a \propto 1/m$ 。

第五章 拐弯与抛射：曲线运动与圆周运动

为什么投篮的球走弧线？为什么过山车到最高点不会掉下来？为什么洗衣机甩干能把水甩出去？——直线运动已经讲完了，这一章让物体“拐弯”。你会看到：**平抛是“水平匀速+竖直自由落体”的合体，圆周是“方向一直在变”的特殊运动**，而它们背后的武器，还是你学过的运动和力——三件事，一套账。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解曲线运动的条件与特点；(2) 掌握平抛运动的分解方法（水平匀速+竖直自由落体）；(3) 会用线速度、角速度、向心加速度公式分析圆周运动。

5.1 曲线运动：速度方向永远沿切线

先处理一个几乎人人都有过的错觉。坐车拐弯，你的身体往一侧“甩”——你可能会觉得，有个力在往外推你。真吗？没有。你的身体想保持原来的直线运动（惯性），车却拐了弯，于是你相对车“甩”向外侧——**不是有离心力往外推，是惯性想让你走直线。**〔注 1〕这个错觉骗了人类几百年，连“离心力”这个名字都是它留下的。

那拐弯到底靠什么？**你骑车拐弯，身体为什么自然向内侧倾斜？**因为不倾斜，你就拐不过这个弯——车会往外滑。把车和你看成一个整体，它拐弯需要合力指向弯心（内侧），倾斜正是为了让地面的支持力和重力合成一个指向内侧的合力。

高铁过弯也这么干：弯道处外侧钢轨故意垫高几厘米，让支持力和重力合成指向弯心的向心力——你骑车倾斜，高铁垫轨，物理是同一件事。于是有了第一条分界线：**物体什么时候走直线，什么时候拐弯？**合力与速度方向在同一直线上，走直线（同向加速、反向减速）；合力与速度方向不在同一直线上，就拐弯。我们把运动轨迹是曲线的运动，叫作**曲线运动**。曲线运动两条铁律：

- **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）；
- **合力（加速度）指向轨迹的凹侧（内侧）**——“拐弯向心力指向弯心”。你骑车拐弯，身体会自然向内侧倾斜，就是在“让合力指向弯心”。

斜抛也是匀变速吗？斜抛的物体只受重力，加速度恒为 g （大小方向都不变）——所以斜抛是**匀变速曲线运动**：加速度恒定，但轨迹是曲线。别被“曲线”骗了：只要合力恒定，就是匀变速，不管轨迹多弯。

练一练

- 曲线运动中速度大小可能不变吗？方向呢？
- 合力方向与速度方向垂直时，物体做什么运动？速度大小变吗？

参考答案：1. 速度大小可以不变（匀速圆周），但方向一定变——曲线运动的速度方向沿切线，时刻在变，所以曲线运动一定是变速运动（方向变也算变速）。2. 做匀速率圆周运动——合力始终垂直于速度，只改变方向不改大小（如绳子拉着小球转、行星绕太阳）。

5.2 平抛运动：水平匀速 + 竖直自由落体

你站在三分线外投篮，球出手后划一道弧线，空心入筐。你有没有想过，球在空中为什么走这条弧线？它出手后明明只受一个力——重力。

答案藏在一个看似矛盾的观察里：球出手时带着向前的速度，这个水平方向没有力管它，于是它靠惯性匀速向前；而竖直方向，重力让它自由落体。水平匀速 + 竖直自由落体，两个运动同时进行、互不干扰，合成就是那条抛物线。我们把物体以一定的初速度沿水平方向抛出、只在重力作用下的运动，叫作**平抛运动**——它就是这两个运动的“合体”。

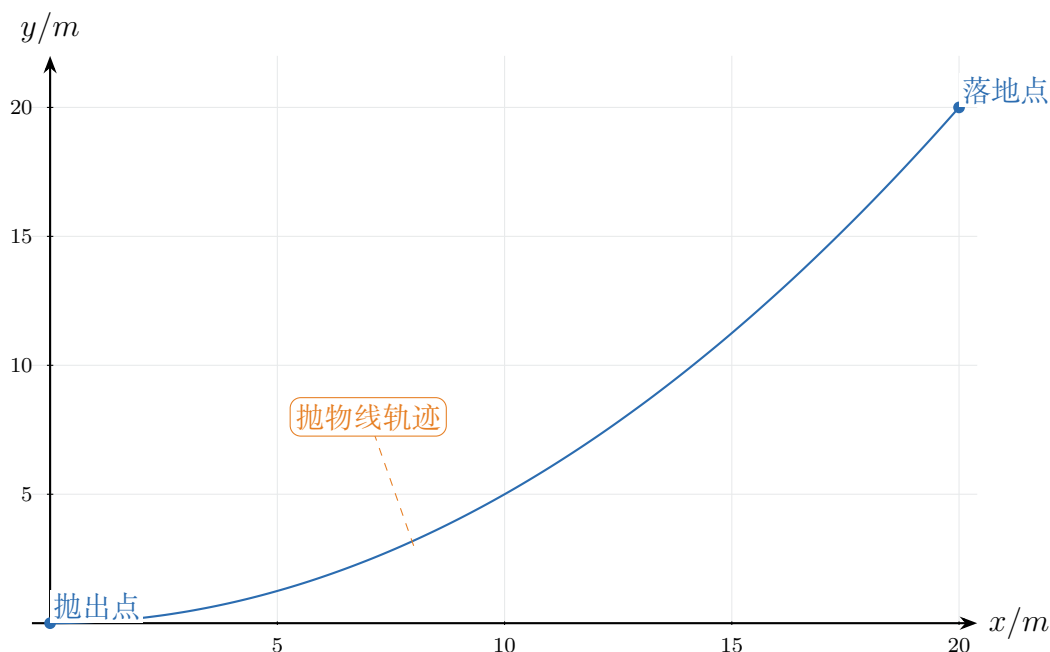


图 5.1: 平抛运动轨迹：水平匀速 + 竖直自由落体的合体

- 水平方向：匀速直线， $x = v_0 t$ ；
- 竖直方向：自由落体， $y = \frac{1}{2}gt^2$ ， $v_y = gt$ 。

两个关键结论，考试最爱考：

- **落地时间只由高度决定：** $t = \sqrt{2h/g}$ ——与初速度无关！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。你可能会说“不可能，子弹飞那么快”——但竖直方向它俩只受重力，加速度都是 g ，当然同时落地；
- **速度偏角是位移偏角的两倍：**速度偏角 $\tan \theta = \frac{gt}{v_0}$ ，位移偏角 $\tan \alpha = \frac{gt}{2v_0}$ —— $\tan \theta = 2 \tan \alpha$ ，且速度反向延长线过水平位移中点（示波器偏转原理也靠它，物理二再见）。

例题 5.1

从 $h = 20 \text{ m}$ 高处以 $v_0 = 30 \text{ m/s}$ 水平抛出 ($g = 10$)，求落地时间与水平射程。**想一想：**

- 问：平抛运动怎么处理？拆成哪两个运动？
- 想：拆成水平匀速 ($x = v_0 t$) + 竖直自由落体 ($y = \frac{1}{2}gt^2$)，两个方向共用同一个 t 。
- 问：先求什么？时间由哪个方向决定？
- 想：先求时间——由竖直方向（高度）决定： $t = \sqrt{2h/g}$ ，与水平速度无关。
- 问：射程怎么求？
- 想：水平方向匀速： $x = v_0 t$ 。
- 问：落地速度是哪个方向的？怎么合成？
- 想：水平、竖直速度的合成： $v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$ 。

详细答案：解：(1) $t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{40}{10}} = 2 \text{ s}$ 。(2) $x = v_0 t = 30 \times 2 = 60 \text{ m}$ 。(3) $v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2} = \sqrt{900 + 400} \approx 36 \text{ m/s}$ 。答：落地时间 2 s ，射程 60 m ，落地速度约 36 m/s 。

变式提醒：求落地速度方向用 $\tan \theta = \frac{gt}{v_0}$ （速度偏角）；落到斜面上要把斜面方程和抛物线联立。**练一练**

- 平抛的落地时间由什么决定？和初速度有关吗？
- 从同一高度以不同初速度平抛两个球，谁先落地？
- 平抛轨迹上某点速度方向与水平方向的夹角，和位移与水平方向夹角谁大？**参考答案：**1. 只由高度决定： $t = \sqrt{2h/g}$ ，与初速度无关。2. 同时落地——落地时间只看高度，初速度不同只影响水平射程，不影响下落时间。3. 速度偏角的正切是位移偏角正切的 2 倍： $\tan \theta_v = gt/v_0$ ， $\tan \theta_x = gt/(2v_0)$ ——所以速度与水平方向的夹角更大。

5.3 圆周运动：向心加速度的力学根源

过山车到最高点，为什么不会掉下来？因为它在做圆周运动，需要一个指向圆心的力——向心力。先认识描述圆周运动的几个量：物体沿圆周运动，在单位时间内通过的弧长，叫作**线速度**， $v = \frac{2\pi r}{T}$ （ T 是**周期**，转一圈所用的时间）；在单位时间内转过的角度，叫作**角速度**， $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ；两者关系 $v = \omega r$ 。圆周运动速度方向时刻在变，所以**一定有加速度**——问题只是它多大。

向心加速度 $a = v^2/r$ 怎么来的？（用“速度矢量相减”推一遍，你就不会再背错）

物体从 A 点运动到 B 点（转过一个小角度 θ ），速度大小不变（匀速圆周）、方向转过 θ 。速度变化量 $\Delta \vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ ，由几何关系（两个速度矢量构成的等腰三角形）可知 $|\Delta v| = v\theta$ 。加速度是 Δv 除以时间 Δt ： $a = \frac{|\Delta v|}{\Delta t} = \frac{v\theta}{\Delta t}$ 。而 $\theta = \omega \Delta t$ （角速度定义），代入得 $a = v\omega = \omega^2 r = \frac{v^2}{r}$ （最后用了 $v = \omega r$ ）。方向： Δv 指向圆心，所以**向心加速度指向圆心**。

结论：**向心加速度** $a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$ ，**方向指向圆心**。〔注 2〕它只改变速度方向、不改变速度大小——这正是“匀速圆周”里“匀速”的真正含义（速率不变，方向时刻在变）。

向心力不是一种新力——它是“提供向心加速度的合力”。找“谁提供向心力”是圆周问题的第一问：绳球模型（绳提供拉力）、锥摆（重力与绳拉力的合力）、汽车转弯（摩擦力）、拱桥（支持力与重力合力）、天体（万有引力）、带电粒子（洛伦兹力，物理二再见）。

绳球模型最高点临界：恰好通过最高点时，绳拉力为零，重力独自提供向心力： $mg = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v_{\min} = \sqrt{gr}$ 。**杆球模型最高点临界**是 $v = 0$ （杆可推可拉，不给力也能撑住）。“恰好通过最高点”这个暗号，第 3 章真题里刚见过。

汽车过拱桥为什么会“飞”？拱桥顶： $mg - N = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow N = mg - \frac{mv^2}{R}$ ——速度越大，支持力越小；当 $v = \sqrt{gR}$ 时 $N = 0$ ，车“飞”起来（完全失重）。这就是“桥顶不能开太快”的物理原因。

洗衣机甩干为什么能把水甩出去？脱水桶高速旋转，水珠需要的向心力 $F = m\omega^2 r$ 随转速急剧增大，但水珠和衣物之间的“抓力”（附着力）有限——向心力不足，水珠就沿切线“飞”出去了。离心现象：向心力不够，物体沿切线飞离。

例题 5.2

汽车以 $v = 20 \text{ m/s}$ 过半径 $R = 100 \text{ m}$ 的拱形桥顶，桥对车的支持力多大（ $m = 1000 \text{ kg}$ ， $g = 10$ ）？**想一想**：

- 问：圆周运动第一步问什么？
- 想：**谁提供向心力**？——桥顶车受重力 mg （下）和支持力 N （上），合力提供向心力： $mg - N = \frac{mv^2}{R}$ 。
- 问：速度越大，支持力怎么变？
- 想： $N = mg - \frac{mv^2}{R}$ ——速度越大， N 越小，车越“轻”。
- 问：速度到多少会“飞”起来？

- 想： $N = 0$ 时 $v = \sqrt{gR} = \sqrt{1000} \approx 31.6 \text{ m/s} \approx 114 \text{ km/h}$ ——超过这个速度，车就离开桥面。
- 问：算出来，支持力合理吗？
- 想： $N = 6000 \text{ N} < \text{重力 } 10000 \text{ N}$ ——车在桥顶变轻了，合理。

详细答案：解：(1) $mg - N = \frac{mv^2}{R}$ 。(2) $N = mg - \frac{mv^2}{R} = 10000 - 4000 = 6000 \text{ N}$ 。答：支持力 6000 N。

变式提醒：凹形桥底反过来： $N - mg = \frac{mv^2}{R}$ ， $N = mg + \frac{mv^2}{R}$ ——凹桥底“压”得更重（超重）。**动手试试（材料：一把伞，或一根绳拴个水瓶）**先猜：快速转动雨伞，水滴从伞边缘甩出去，是沿着伞的切线方向还是沿半径方向？动手：雨天把伞快速一转，看水滴飞出的方向；或者用绳子拴个装了水的水瓶，快速转圈后松手，看水从哪个方向飞出。观察：水滴沿**切线**方向飞出——不是沿半径向外！思考：圆周运动的物体“想”沿切线飞走（这是惯性），向心力把它拽回来；伞一停或绳一松，它立刻沿切线飞了。这就是“离心现象”的本质：不是有什么力在向外甩，而是惯性让它沿切线走直线。

练一练

- 绳子拴小球在竖直面内圆周运动，最高点最小速度是多少？
- 汽车转弯时向心力由什么提供？雨雪天为什么容易侧滑？
- 洗衣机的脱水桶转速越快，甩得越干——用向心力公式解释。

参考答案：1. 最高点最小速度 $v = \sqrt{gR}$ ——再小，需要的向心力 $< mg$ ，绳子就会松弛（临界：重力刚好完全提供向心力，绳上拉力为零）。2. 向心力由地面对轮胎的静摩擦力提供（有坡度的路面还有支持力的水平分量）。雨雪天 μ 变小，最大静摩擦变小，需要的向心力 $(m v^2/R)$ 不够 $\rightarrow$ 车沿切线方向滑出去（侧滑）。3. 脱水转速越快， ω 越大，水需要的向心力 $F = m\omega^2 r$ 越大；水与衣物间的吸附力有限，当需要的向心力超过吸附力，水就沿切线被甩出去——转速越快，甩得越干净。

想一想（概念边界）：平抛运动的落地时间由什么决定？如果不知道水平初速度 v_0 ，还能求出落地时间吗？

提示：落地时间只由高度决定 ($t = \sqrt{2h/g}$)，与水平速度无关——不知道 v_0 照样能求 t 。反过来，不知道高度只知道 v_0 ，才求不出时间。分清“谁决定谁”是平抛题的命门。

本章注释

〔注 1〕“离心力”是个历史遗留的名字。严格说，在静止的地面参考系里，根本不存在“离心力”这个力——拐弯时你感觉被往外甩，是惯性（想沿切线走直线），真实存在的只有指向圆心的向心力（摩擦力、支持力分量等）。“离心力”只在跟着车一起转的参考系里才“出现”，

那是个虚拟力。所以考场上看到“离心力”三个字，先想：它是真的力吗？——不是。向心力是合力，离心力是错觉。

〔注 2〕向心加速度公式 $a = v^2/r$ 的发现者是荷兰科学家惠更斯（1673 年，比牛顿发表力学还早 14 年）。他在研究摆钟时顺手解决了“圆周运动需要多大的力”这个问题，牛顿后来正是用惠更斯的这个公式，加上自己的万有引力定律，推导出了开普勒行星运动定律——圆周运动这一章的公式，是牛顿万有引力大厦的第一块砖（第 6 章见）。

你这一章攒下了这些武器这一章你让物体“拐弯”了——曲线看切线、平抛拆两半、圆周找向心力。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
曲线运动	切线 + 凹侧	速度沿切线，合力指向凹侧
平抛 / 水平抛出	分解两运动	竖直求时间 $t = \sqrt{2h/g}$ ，水平求射程
类平抛	分解	沿场方向匀变速，垂直场方向匀速
圆周 / 向心力	找向心力来源	$\sum F = \frac{mv^2}{r}$
恰好通过最高点（绳）	绳球临界	$mg = \frac{mv^2}{r}$, $v = \sqrt{gr}$
拱桥 / 凹桥	支持力与重力合力	$mg \pm N = \frac{mv^2}{R}$
离心 / 甩干	向心力不足	沿切线飞出

你该记住的流程：圆周运动三步走——(1) 找“谁提供向心力”（绳？摩擦？支持力？引力？）；(2) 列方程 $\sum F = mv^2/r$ ；(3) 临界：恰好通过最高点 $\rightarrow v = \sqrt{gr}$ 。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）如图所示，小球以初速度 v_0 从斜面顶端水平抛出，落在倾角为 θ 的斜面上。下列说法正确的是？

- A. 小球在空中飞行时间 $t = \frac{2v_0 \tan \theta}{g}$
- B. 落点到抛出点的水平距离 $x = \frac{v_0^2}{g} \cdot \frac{1}{\tan \theta}$
- C. 若 v_0 增大一倍，飞行时间变为原来的一半
- D. 落地速度方向与水平方向的夹角等于 θ

答案 A。解析：平抛落在斜面上，位移偏向角 $\tan \theta = \frac{y}{x} = \frac{\frac{1}{2}gt^2}{v_0 t} = \frac{gt}{2v_0}$ ，故 $t = \frac{2v_0 \tan \theta}{g}$ ，A 对；B： $x = v_0 t = \frac{2v_0^2 \tan \theta}{g}$ （不是 $1/\tan \theta$ ），B 错；C： $t \propto v_0$ ， v_0 加倍飞行时间也加倍，C 错；D：速度偏向角 $\tan \alpha = \frac{gt}{v_0} = 2 \tan \theta$ ， $\alpha = \arctan(2 \tan \theta)$ 对任意 $0 < \theta < 90^\circ$ 恒大于 θ （如 $\theta = 30^\circ$ 时 $\alpha \approx 49^\circ$ ），故“等于”恒错，D 错。斜面上的平抛：**位移偏向角等于斜面倾角、速度偏向角的正切是其 2 倍**，两步锁定答案。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 物体做曲线运动的条件是什么？曲线运动一定是变速运动吗？
- 平抛运动可以分解为哪两个分运动？
- 平抛运动的时间由什么决定？与水平初速度有关吗？
- 线速度、角速度、周期的关系式？

- 向心加速度的公式（两个）？
- 向心力是“新的一种力”吗？

提升

- 从 20 m 高处以 10 m/s 水平抛出 ($g = 10$)，落地时间和水平射程？
- 摩天轮上做匀速圆周运动的乘客，向心力由什么提供？加速度大小变吗？
- 汽车过水平弯道（半径 50 m， $\mu = 0.4$ ， $g = 10$ ），最大速度多大？

探究

- 用绳拴小球做圆周运动，改变转速观察绳的拉力变化——说明向心力与哪些因素有关。

参考答案：1. 合力方向与速度方向不在同一直线上；是——速度方向时刻改变。2. 水平匀速直线 + 竖直自由落体。3. 由高度决定 $t = \sqrt{2h/g}$ ，与水平初速度无关。4. $v = \omega r$ ， $\omega = 2\pi/T$ ， $v = 2\pi r/T$ 。5. $a = v^2/r = \omega^2 r$ 。6. 不是——向心力是效果力（合力或某个分力），不是独立的性质力。7. $t = \sqrt{2h/g} = 2\text{ s}$ ， $x = v_0 t = 20\text{ m}$ 。8. 由座椅的支持力与重力的合力提供；大小不变（匀速圆周， $a = v^2/r$ 恒定）。9. $v_{\max} = \sqrt{\mu g r} = \sqrt{0.4 \times 10 \times 50} = 14.1\text{ m/s}$ （约 51 km/h）。10. 转速越快绳越紧（ $F = m\omega^2 r$ ）；绳长不变时，转速增大向心力增大；转速不变时，半径越大向心力越大。

第六章 为什么卫星不掉下来：万有引力与航天

你天天用导航，卫星在天上飞——可你想过吗：**卫星为什么不掉下来**？火箭把它送上天，它就一直绕地球转。

你可能会想：是因为它飞得高，没有重力了？不对——第3章说过，苹果落地是重力，卫星绕地球转也是重力（万有引力），只是用途不同：苹果的重力让它加速下落，卫星的重力让它“拐弯”——永远拐不过去，就永远绕着转。这一章就讲这笔“天上”的账：从牛顿的一个苹果，讲到北斗导航的每一秒定位。

不过，在牛顿开口之前，天上的账已经有人记了六十年——先认识记账人。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 说出开普勒三定律；(2) 用万有引力定律与圆周运动公式推导天体质量、卫星速度；(3) 理解第一宇宙速度与同步卫星。

6.1 开普勒三定律：天上的“规矩”

行星绕太阳转，轨道是什么形状？

在牛顿之前一百年，丹麦天文学家第谷用肉眼和简陋仪器，积累了二十年最精确的行星观测数据；他的助手开普勒接过这些数据，算了整整十年，终于从“数字的海洋”里捞出三条规律——**开普勒三定律**：

第一定律（轨道定律）：所有行星绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上。行星轨道并不是正圆——火星轨道偏离正圆的程度最大（偏心率约 0.09），地球轨道几乎正圆（偏心率约 0.017）。开普勒为什么敢跟“正圆”叫板？因为当时人们坚信天体做完美的圆周运动，是数据逼他承认椭圆。

第二定律（面积定律）：行星与太阳的连线，在相等时间内扫过相等的面积。行星离太阳近时跑得快，离得远时跑得慢——地球在1月初（近日点）比7月初（远日点）公转速度快约 3.5%。这个定律后来被证明是**角动量守恒**的体现（角动量守恒在第9章动量会学到）。

第三定律（周期定律）：所有行星公转周期的平方，与轨道半长轴的立方成正比， $\frac{T^2}{a^3} = k$ （ k 只与中心天体有关，与行星无关）。水星离太阳最近、跑得最快（88 天一圈），海王星最远、最慢（165 年一圈）——数字一摆，规律自己站出来。

开普勒三定律是“观察的胜利”：他完全不知道“为什么”会这样，只知道“就是这样”。牛顿站在他的肩上——万有引力定律的一大成就，就是**从力学原理推导出了开普勒三定律**（包括“椭圆轨道”这个看起来最奇怪的结论）。从观察到规律，从规律到原理，科学就是这样一级一级爬上去的。

例题 6.1

地球绕太阳公转周期 $T_{\text{地}} = 1$ 年，轨道半长轴 $a_{\text{地}} = 1$ AU；火星公转周期约 1.88 年。用开普勒第三定律估算火星轨道的半长轴 $a_{\text{火}}$ 。想一想：

- 问：开普勒第三定律的公式？
- 想： $\frac{T^2}{a^3} = k$ ，同一中心天体（太阳） k 相同。
- 问：怎么代入？
- 想： $\frac{T_{\text{火}}^2}{a_{\text{火}}^3} = \frac{T_{\text{地}}^2}{a_{\text{地}}^3} \Rightarrow a_{\text{火}} = a_{\text{地}} \left(\frac{T_{\text{火}}}{T_{\text{地}}} \right)^{2/3}$ 。
- 问：估算一下？
- 想： $a_{\text{火}} = 1 \times 1.88^{2/3}$ 。 $1.88^{1/3} \approx 1.234$ ，平方得约 1.52——即约 1.52 AU。

详细答案：解：由开普勒第三定律 $\frac{T^2}{a^3}$ 为常量： $a_{\text{火}} = a_{\text{地}} (T_{\text{火}}/T_{\text{地}})^{2/3} = 1.88^{2/3} \approx 1.52$ AU。答：火星轨道半长轴约 1.52 AU（约 2.28 亿公里），与实测值 1.524 AU 吻合——三定律经得起实测检验。

变式提醒：开普勒第三定律的 k 只与中心天体有关——算地球系内卫星比周期， k 用地球；算行星比， k 用太阳。**别把不同中心天体的 k 混着用。**

6.2 万有引力定律：宇宙的“平方反比”

两个苹果之间有引力吗？

有。任何两个物体之间都存在引力，从苹果、你、到月球，无一例外。传说牛顿是看到苹果落地才想到这一点的——这个说法有当事人依据：牛顿晚年亲口对传记作者讲，他确实在沉思引力问题时看到过苹果落下。〔注 1〕无论故事真假，牛顿 1687 年把它写成定律：**任何两个物体之间都存在相互吸引的力，它的大小与两个物体的质量乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比，方向在它们的连线上**——这就是**万有引力定律**，写成公式：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

其中 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，叫**引力常量**。这个定律有两个“没想到”：

第一，引力常量 G 太小了——两个 60 kg 的人相距 1 m，引力只有 $2.4 \times 10^{-7} \text{ N}$ ，约为一根头发重量的万分之一。所以日常生活中你感觉不到物体之间的引力，只有地球这种超大质量才

有存在感。万有引力“普适但微弱”：宏观天体是它的主场，微观世界（物理二里电子和质子之间）引力完全输给电力。

第二，G 是卡文迪许测出来的——他用了扭秤，把引力“放大”到能测量的程度，然后算出地球质量： $M = \frac{gR^2}{G} \approx 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ 。人们说卡文迪许“称出了地球的质量”——他用一根秤，称了整颗地球。〔注 2〕

为什么是“平方反比”？引力随距离平方衰减：距离变 2 倍，引力变 1/4；变 3 倍，变 1/9。想象引力“铺”在球面上——球面面积是 $4\pi r^2$ ，距离越远，同样的引力铺得越稀，所以按 r^2 反比衰减。物理二里的库仑定律（电荷之间的力）也是平方反比——同是一家人，一个管电荷、一个管质量。

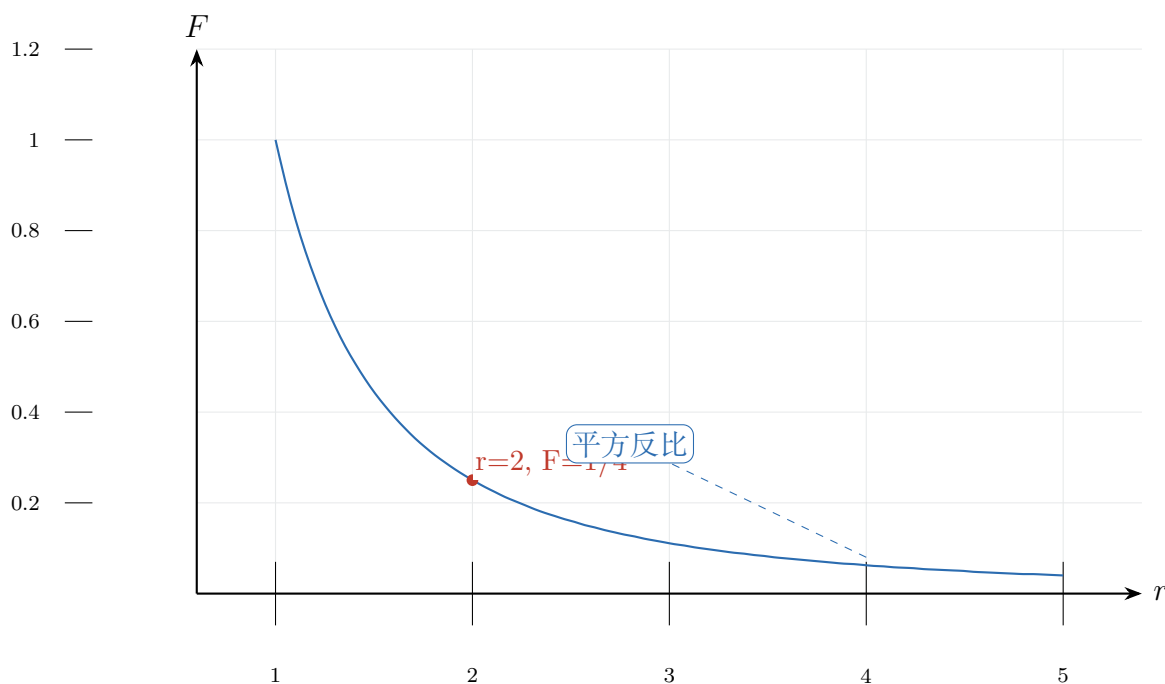


图 6.1: 万有引力随距离平方衰减：距离 2 倍，引力变 1/4

练一练

- 两个物体距离变为原来的 3 倍，引力变为原来的几分之几？
- 卡文迪许“称出了地球质量”用的公式是什么？已知 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ 、 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ ，求地球质量。

参考答案：1. 1/9；2. $M = gR^2/G \approx 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$

6.3 天体运动：万有引力就是向心力

卫星为什么绕地球转而不是飞走？

想想你拴着绳子转圈甩石头：石头想沿切线飞走，是绳子把它拽回来。卫星没有绳子——拽住它的，是万有引力。第 5 章讲过，做圆周运动的物体需要向心力，而卫星的向心力，恰好由万有引力扮演：万有引力提供向心力，卫星做匀速圆周运动：

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r = m\frac{4\pi^2}{T^2}r$$

把 v 解出来，就得到轨道速度 $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$ 。两个推论，记牢：

- **轨道半径越大，速度越小、周期越大**——“高轨低速大周期”。直觉：卫星越远，引力越弱（平方反比），“拐弯”的力越小，只能飞得慢点、转得久点；
- **黄金代换** $GM = gR^2$ ——地表附近物体所受重力近似等于万有引力： $mg = \frac{GMm}{R^2}$ ，于是 $GM = gR^2$ 。它把“看不见的 GM ”换成“看得见的 g 、 R ”，是卫星题最常用的替换。

三个宇宙速度。把卫星送上天，要快到什么程度？这里有三道“门槛”：第一宇宙速度 $v_1 = \sqrt{gR} \approx 7.9 \text{ km/s}$ ——物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动所需的最小速度，达到它就能绕地球不落地，是“不掉下来”的最低门槛，也叫**近地环绕速度**；第二宇宙速度 11.2 km/s ——逃逸地球引力；第三宇宙速度 16.7 km/s ——逃逸太阳系。

卫星在轨道上还受重力吗？受，而且全靠它。卫星绕地球转，万有引力全程拉着它“拐弯”——第 4 章讲过，完全失重不是没有重力，是重力全部用来做圆周运动了。卫星里的宇航员飘着，不是“没重力”，是和卫星一起在掉。这是本章最容易错的检查题：**失重 $\neq$ 无重力**。

动手试试（材料：一张纸）

先猜：把一张纸一半揉成球、一半摊平，同时从同高度松手——哪个先落地？

动手：撕下同一张纸的两半，一半揉成紧实的纸球，一半摊平，双手齐平同时松手。

观察：纸球先落地！纸片飘着慢慢落。

思考：是纸球“更重”所以更快吗？——不是！伽利略 400 年前就证明：没有空气阻力，铁球和羽毛同时落地（阿波罗宇航员在月球上真的做过这个实验）。纸片飘，是空气阻力占了上风。所以“自由落体”公式只在**忽略空气阻力**时成立——这就是理想化模型的含义：先忽略次要因素，看清主规律，再把误差加回来。

练一练

- 卫星轨道半径增大到原来的 2 倍，速度变为原来的多少？
- 为什么同步卫星必须在赤道正上方？（提示：周期要与地球自转同步，且万有引力全部做向心力）
- 用黄金代换求第一宇宙速度： $v_1 = \sqrt{gR}$ ，代入 $g = 9.8$ 、 $R = 6.4 \times 10^6$ 算一下。

参考答案：1. $1/\sqrt{2}$ ；2. 只有赤道上方万有引力方向才指向轨道圆心；3. $\sqrt{9.8 \times 6.4 \times 10^6} \approx 7.9 \text{ km/s}$

6.4 卫星与变轨：火箭怎么“调轨道”

同步卫星为什么“钉”在赤道上空？你抬头看不见它，但它一直在头顶的同一位置。要做到这一点，它的周期必须等于地球自转周期（24 h）——这样它转一圈，地球也刚好转一圈，看起来就像“钉”住了。我们把运行周期等于地球自转周期的卫星，叫作**地球同步卫星**。周期一定了，轨道半径就唯一确定：只能在赤道正上方，高度约 $3.6 \times 10^7 \text{ m}$ （约 5.6 倍地球半径），轨道速度 $v = \sqrt{gR^2/r} \approx 3.1 \text{ km/s}$ ——比第一宇宙速度小，正好印证“高轨低速”。

火箭怎么把卫星送上高轨？不能一步到位，要变轨：在低轨**加速** → 离心上移 → 到高轨**减速**定轨。口诀“**加速变高轨，减速变低轨**”——但注意：同一轨道半径对应唯一速度，加速减速只发生在变轨的瞬间。

北斗是怎么工作的？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，就能算出自己在地球上的位置——这就是“测距-交会”定位。GPS 卫星轨道高度约 $2.0 \times 10^7 \text{ m}$ ，周期约 12 h，每天绕两圈——你手机里的导航，每秒钟都在解这道“卫星题”。

更近的例子是嫦娥六号：2024 年它落在月球背面，挖了两公斤月壤，又从月面起飞、与轨道器对接、带着样品飞回地球——每一步着陆、变轨、返回，算的都是这一章的账：万有引力提供向心力、宇宙速度够不够。

想一想（概念边界）：求卫星轨道速度时，如果题目没给地球质量 M ，还能算吗？什么条件下能算？

提示：能——用黄金代换 $GM=gR^2$ ：题目只要给了地表重力加速度 g 和地球半径 R ，就能把看不见的 M 换成看得见的 g 、 R 。“没给 M ”不等于“没法算”，关键是找代换。

本章注释

〔注 1〕“牛顿被苹果砸中脑袋”的故事是后人添油加醋——但“牛顿看到苹果落下想到引力”有当事人依据：牛顿晚年（1726 年）亲口对传记作者斯图克利（William Stukeley）说过，他思考引力问题时看到苹果落地，由此想到“地球的引力也许能延伸到月球”。伏尔泰也在 1727 年记录过类似说法。教材采用“苹果引发思考”的版本，是因为它有当事人转述，比“砸头”版本可靠。

〔注 2〕卡文迪许扭秤实验（1798 年）是人类测量史上最精巧的实验之一：一根悬挂的细丝吊起一根横杆，两端各放一个小铅球，旁边放两个大铅球——引力把横杆微微扭转，细丝的扭转程度换算成引力大小。这个实验在牛顿去世 71 年后才完成，它不但测出了 G ，还“称”出了地球质量、太阳质量，让万有引力定律从“纸上公式”变成了“可计算宇宙”的工具。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
卫星/天体	万有引力 = 向心力	$v = \sqrt{GM/r}$
已知 g 和 R	黄金代换	$GM = gR^2$
同步卫星	周期 24 h、赤道上空	$T = 2\pi\sqrt{r^3/GM}$
变轨	加速离心、减速向心	高轨低速大周期
星球表面重力	黄金代换变体	$g = GM/R^2$
第一宇宙速度	近地环绕	$v = \sqrt{gR} \approx 7.9 \text{ km/s}$

你该记住的流程：读天体题 → (1) 万有引力提供向心力 → (2) 没给 M 就用黄金代换 → (3) 同步卫星先想“24h+ 赤道” → (4) 变轨想“加速高轨、减速低轨” → (5) 验算：高轨低速。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）北斗导航卫星中，某颗地球同步卫星的质量为 m 、距地面高度为 h ，地球质量为 M 、半径为 R 、自转周期为 T ，引力常量为 G 。下列说法正确的是？

- A. 同步卫星的线速度大小 $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$
- B. 同步卫星的轨道半径 r 满足 $r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$
- C. 同步卫星的向心加速度大于地球表面的重力加速度 g
- D. 同步卫星的周期大于 24 h

答案 B。解析：A 错——第一宇宙速度 $\sqrt{GM/R}$ 是近地轨道速度，同步卫星轨道半径大、线速度小；B 对——万有引力提供向心力 $\frac{GMm}{r^2} = m\frac{4\pi^2}{T^2}r$ ，得 $r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$ （开普勒第三定律的万有引力版）；C 错—— $a = \frac{GM}{r^2} < \frac{GM}{R^2} = g$ ，离地越远向心加速度越小；D 错——同步卫星周期等于地球自转周期 24 h。卫星题两条铁律：**轨道半径越大、线速度角速度加速度越小、周期越大**；同步卫星“三定”：轨道面在赤道、周期 24 h、高度约 3.6 万 km。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 开普勒三定律分别是什么？
- 万有引力定律的表达式？引力常量 G 的数值？
- 第一宇宙速度是多少？它代表什么意义？
- 卫星绕地球做圆周运动，向心力由什么提供？
- 轨道越高的卫星，线速度越大还是越小？为什么？
- 地球同步卫星的周期是多少？轨道面必须在哪里？

提升

- 地球质量 $6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，卫星在距地心 $7.0 \times 10^6 \text{ m}$ 的圆轨道上，求线速度（ $G = 6.67 \times 10^{-11}$ ）。
- 火星轨道半长轴约 1.52 AU，用开普勒第三定律估算火星公转周期（地球 1 年）。

- 月球绕地球周期约 27.3 天，轨道半径 $3.8 \times 10^8 \text{ m}$ ，求地球质量 ($G = 6.67 \times 10^{-11}$)。

探究

- 为什么说“第一宇宙速度也是卫星最大环绕速度”？用公式说明。

参考答案：1. (1) 轨道椭圆、太阳在焦点；(2) 相等时间扫过相等面积；(3) T^2/a^3 为常量。2. $F = Gm_1m_2/r^2$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。3. 7.9 km/s ；近地环绕所需最小速度（也是最大环绕速度）。4. 万有引力。5. 越小—— $v = \sqrt{GM/r}$, r 越大 v 越小（高轨低速）。6. 周期 = 地球自转周期 24 h；轨道面在赤道平面。7. $v = \sqrt{GM/r} = \sqrt{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}/7.0 \times 10^6} \approx 7.6 \text{ km/s}$ 。8. $T = 1.52^{3/2} \approx 1.87$ 年。9. $M = 4\pi^2 r^3/GT^2$, $T = 27.3 \times 86400 \text{ s}$ ，代入得 $M \approx 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ 。10. $v = \sqrt{GM/r}$, r 最小（近地面）时 v 最大——所以近地环绕速度既是发射的最小速度，也是环绕的最大速度。

第七章 用“账本”算运动：功与能

前几章你一直在“一步一步算”——先受力分析，再算加速度，再算速度。但有些问题这样算太累了：物体沿弯曲轨道下滑、被变力推动、经历好几个过程……能不能**跳过过程，只看开头和结尾**？能。这就是功与能：给运动记一本“总账”。这一章学记账的规矩（功、功率），再学最锋利的一把刀（动能定理）——顺便回答一个你可能早就好奇的问题：**电动车松油门时会自己减速，能量去哪了？**

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 判断力是否做功、计算功与功率；(2) 掌握动能定理并用于多过程问题；(3) 理解“做功是能量转化的量度”。

7.1 功：力在位移方向上的“效果”

先纠正一个直觉。你推一堵墙，使出吃奶的力气，推了十分钟，累得满头大汗——可物理上，你**没做功**。因为你累，是身体在消耗化学能；物理的“功”却只看两件事：你出了多大力，物体沿力的方向**走了多远**。墙没动，位移为零，功就是零。举着 20 kg 的书包站在地铁里纹丝不动，同样没做功——手酸是真的，做功是零。这就是“功”和“累”的第一道分界线：**累是感觉，功是位移账**。

我们把力与物体沿力的方向通过的位移的乘积，叫作**功**，用 W 表示：

$$W = Fx \cos \theta$$

其中 θ 是力与位移的夹角。功是标量但有正负，正负表示“输入能量”还是“拿走能量”，不是方向：

- **正功** ($\theta < 90^\circ$)：力在帮运动，输入能量——你推箱子，你做正功；
- **负功** ($\theta > 90^\circ$)：力在拦运动，拿走能量——摩擦力拉后腿，做负功；
- **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，就是这个道理（向心力永远垂直速度，方向在变但不给速度“加油”）。

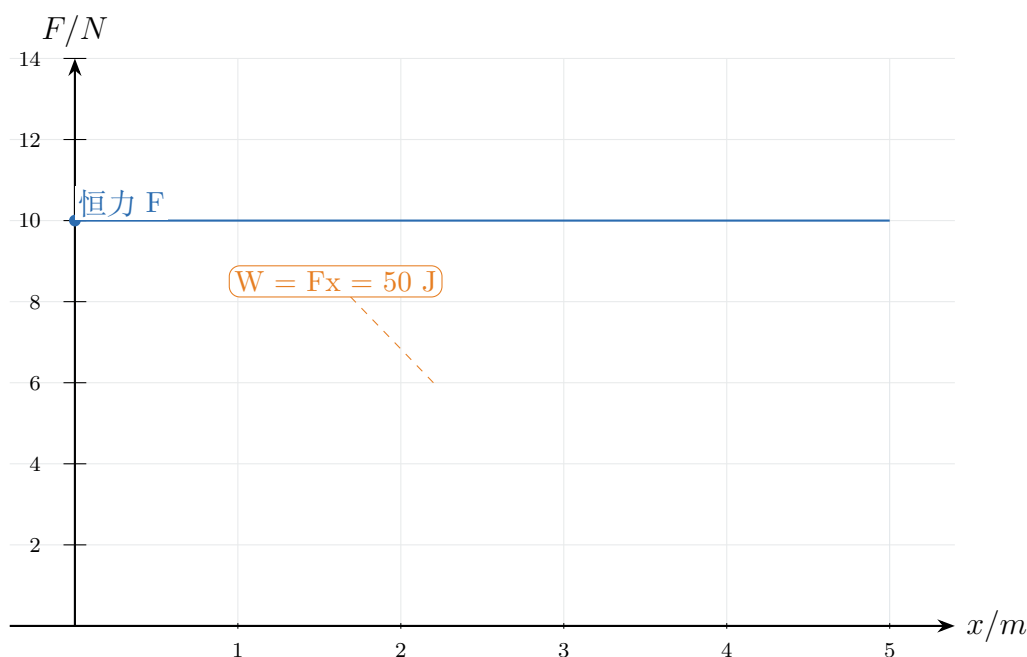


图 7.1: F-x 图：功 = 图线下的面积

功还可以“看图”：把力 F 画在纵轴、位移 x 画在横轴，**图线和横轴围成的面积就是功**——和 v - t 图的面积是位移，同一个道理。一本账：你推箱子做 500 J 正功，摩擦力做 300 J 负功，合计净输入 200 J——这 200 J 去哪了？变成箱子速度的增加（下一节动能定理回答）。

练一练

- 人提着箱子水平匀速前进，手对箱子的拉力做功吗？为什么？（提示：拉力竖直向上，位移水平， $\theta = 90^\circ$ ）
- 沿斜面向上拉物体，重力做正功还是负功？
- 匀速圆周运动中，向心力做功是多少？为什么？

参考答案：1. 不做功（力 $\perp$ 位移）；2. 负功（重力沿斜面向下的分量与位移反向）；3. 0（向心力始终垂直速度）

7.2 功率：做功的快慢

同样一块电池，为什么 120 W 的充电器比 65 W 的快？因为快充“做功”更快。我们把功与完成这些功所用时间之比，叫作**功率**，用 P 表示， $P = \frac{W}{t}$ ，单位是瓦特（W）。它描述做功的快慢。

对恒力牵引还有一个更常用的形式：**瞬时功率** $P = Fv$ ——力乘以此刻的速度。你手机上充电器标的“120 W”、空调铭牌上的“1.5 匹”（约 1100 W）、电动车电机标称的“最大功率”，都是功率。

电动车爬坡为什么要降速？电机功率一定： $P = Fv$ ，速度小时牵引力大，速度大时牵引力小——上坡需要大牵引力，就只能降速度，这就是“用速度换力”。油车爬坡换低挡，电车爬坡自动降速，物理是同一件事。

例题 7.1

额定功率 $P = 100 \text{ kW}$ 的汽车，在平直路上以 $v = 20 \text{ m/s}$ 匀速行驶，牵引力多大？上坡需要 10000 N 的牵引力，速度该降到多少？

想一想：

- 问：机车问题核心公式是什么？注意单位。
- 想： $P = Fv$ （瞬时功率）； $100 \text{ kW} = 10^5 \text{ W}$ 。
- 问：平路上牵引力多大？
- 想： $F = \frac{P}{v} = \frac{10^5}{20} = 5000 \text{ N}$ 。
- 问：上坡牵引力要 10000 N （变大了），功率一定，速度怎么办？
- 想： $v = \frac{P}{F}$ ——牵引力翻倍，速度必须减半： $v = 10 \text{ m/s}$ 。这就是“上坡换低挡”：用速度换力。
- 问：为什么功率一定？
- 想：发动机额定功率是上限，牵引力大时只能慢——物理原理就是 $P = Fv$ 的反比关系。

详细答案：解：(1) 平路： $F = \frac{P}{v} = \frac{10^5}{20} = 5000 \text{ N}$ 。(2) 上坡： $v = \frac{P}{F} = \frac{10^5}{10000} = 10 \text{ m/s}$ 。答：平路牵引力 5000 N ；上坡速度降到 10 m/s （减半）。

变式提醒：机车启动分两阶段——先匀加速（功率增大到额定），后恒功率（牵引力减小、加速度减小）；“最大速度”出现在牵引力等于阻力时： $v_{\max} = P/f$ 。

练一练

- 汽车功率一定时，牵引力与速度什么关系？用一句话总结“换挡”的物理原理。
- 某运动员 60 s 内爬楼做功 $4.2 \times 10^4 \text{ J}$ ，平均功率多大？

参考答案：1. 反比（ $F = P/v$ ），上坡降速换力；2. $P = W/t = 700 \text{ W}$

7.3 动能定理：合外力做功 = 动能变化

为什么同样高度，不管斜面多陡，滑到底速度都一样？

先把“运动的东西带多少能量”定义清楚：我们把物体由于运动而具有的能量，叫作**动能**， $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。这个“ $\frac{1}{2}mv^2$ ”不是拍脑袋定的——17 世纪，莱布尼茨和笛卡尔的支持者为“运动的量到底是什么”吵了几十年，最后科学界接受：动量 mv 描述“运动的量”，动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 描述“运动的能量”，两本账各有各的用处（动量那本，第 9 章再翻）。〔注 1〕

接下来是力学最强的武器之一——**动能定理**：合外力对物体做的功，等于物体动能的变化， $W_{\text{合}} = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$ 。

它强在哪？**不关心中间过程**——不管轨迹多绕、受力多复杂、经历几个阶段，只算首尾动能和所有功。曲线运动、变力做功、多过程问题，一刀切。你问“为什么斜面陡不陡都一样”——因为重力做功只与高度差有关（ $W_G = mgh$ ），与路径无关，所以底端动能一样，速度一样。

电动车松油门为什么自己减速？答案就藏在动能定理里：松油门后电机反转，把车的动能一点点“收走”变成电能存回电池——这就是**动能回收**。车从 80 km/h 滑到 30 km/h，动能少了，被电机以“负功”的形式拿走了。你每踩一次刹车踏板，都在亲手用一次动能定理。〔注 2〕

例题 7.2

物体从 $h = 10 \text{ m}$ 光滑斜面顶端由静止滑下，求底端速度（ $g = 10$ ）。

想一想：

- 问：求速度，用匀变速公式还是动能定理？
- 想：用动能定理——它**不关心中间过程**，直接砍掉斜面长度、加速度这些中间量。
- 问：重力做功多少？为什么与斜面形状无关？
- 想： $W_G = mgh$ ，只与高度差有关——不管斜面多陡、多长，重力做功一样。
- 问：动能定理怎么列？
- 想： $mgh = \frac{1}{2}mv^2 - 0$ （初速为零）。
- 问：底端速度多大？合理吗？
- 想： $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{200} \approx 14.1 \text{ m/s}$ ——同一高度任何光滑路径到底速度相同。

详细答案：解：(1) $W_{\text{合}} = mgh$ 。(2) $mgh = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{2gh} = \sqrt{200} \approx 14.1 \text{ m/s}$ 。答：底端速度约 14.1 m/s。

练一练

- 用动能定理解释：同样高度的光滑斜面，不同倾角到达底端速度相同。
- 物体质量变为 2 倍、速度变为 3 倍，动能变为原来的多少倍？
- 子弹以 v 射入木块，受阻力 f 停下，射入深度是多少（用 f 、 m 、 v 表示）？

参考答案：1. 重力做功只与高度差有关， $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ ；2. 18 倍（ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ，质量 $\times 2$ 、速度平方 $\times 9$ ）；3. $x = mv^2/2f$ （ $fx = \frac{1}{2}mv^2$ ）

想一想（概念边界）：动能定理不关心中间过程。如果物体沿粗糙曲面下滑（有摩擦），还能直接写 $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ 吗？

提示：不能！有摩擦时动能定理要写成 $mgh - W_{\text{摩}} = \frac{1}{2}mv^2$ ——摩擦做功必须算进去（且与路径有关，要走实际路径）。“光滑”才是直接省略摩擦项的条件，题目没写光滑就默认有摩擦。

本章注释

〔注 1〕17 世纪末，莱布尼茨提出“活力”（ mv^2 ）是运动的真正量度，笛卡尔的追随者则坚持“动量”（ mv ）。这场争论持续了几十年，最后的结论是：**两个都对，各管一摊**——动量守恒是宇宙的普遍规律（第 9 章），动能变化由做功决定（本章）。它们不是同一个量的两种说法，而是两本独立的账。

〔注 2〕动能回收不是电动车的专利。高铁下坡时也会把电动机变成发电机，把下坡的势能和动能“还”给电网；F1 赛车的 KERS 系统回收刹车能量用于超车加速。物理原理永远是同一句：能量不消失，只转换——这一句，下一章要升级成守恒定律。

你这一章攒下了这些武器

这一章你学会了“跳过过程看首尾”——功是账目，功率是速度，动能定理是总账的算法。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
做功 / 力与位移夹角	功的定义	$W = Fx \cos \theta$, $\theta = 90^\circ$ 做功为零
功率 / 额定功率	做功的快慢	$P = Fv$, 上坡降速换力
求速度 / 做功 / 多过程	动能定理	$W_{\text{合}} = \Delta E_k$, 跳过中间过程
曲线 / 变力 / 复杂轨迹	动能定理	只算首尾动能和所有功
只有重力做功	机械能守恒（下章）	$mgh = \frac{1}{2}mv^2$

你该记住的流程：动能定理五步走——(1) 选对象（研究哪个物体）；(2) 画受力，找所有做功的力；(3) 算总功 $W_{\text{合}}$ （正功负功分开算）；(4) 列 $W_{\text{合}} = \Delta E_k$ ；(5) 解出未知量。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）一辆汽车以恒定功率 P 从静止启动，所受阻力恒为 f 。下列说法正确的是？

- A. 汽车做匀加速直线运动
- B. 速度达到最大时，牵引力等于阻力 f
- C. 汽车的最大速度 $v_m = \frac{P}{f}$ ，与牵引力无关
- D. 启动过程中牵引力始终等于 f

答案 B。解析：恒定功率启动—— $P = Fv$ 不变， v 增大则 F 减小，加速度 $a = \frac{F-f}{m}$ 减小（变加速，不是匀加速），A 错；当 $F = f$ 时 $a = 0$ 、速度达到最大，B 对； $v_m = \frac{P}{f}$ ，C 前半对，但“与牵引力无关”表述混乱（ v_m 就是牵引力 = 阻力时取得）；D 错——牵引力从大到小变

化。机车启动两种模型：**恒功率（F 变小）与恒加速度（P 变大）**，临界点都是“P 达到额定功率”和“F 减小到等于阻力”。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 做功的两个必要因素是什么？“提着重物站着不动”做功了吗？
- 功的计算公式？力的方向与位移方向垂直时做功多少？
- 功率的定义式？单位？
- 1 马力约等于多少瓦？（工程常识）
- 动能定理的表达式？
- 合力做功与动能变化的关系？

提升

- 用 50 N 的水平力推箱子沿水平面移动 10 m，做功多少？
- 起重机以 0.5 m/s 匀速吊起 1 t 重物，输出功率多大（ $g = 10$ ）？
- 物体质量 2 kg，速度从 3 m/s 增加到 5 m/s，合外力做功多少？

探究

- 如何用功的定义估算“爬楼梯的功率”？（写出测量方案）

参考答案：1. 力 + 沿力方向发生位移；不做功（没有位移）。2. $W = Fs \cos \theta$ ；做功为 0。3. $P = W/t$ ；瓦特（W）。4. 约 735 W。5. $W_{\text{合}} = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$ 。6. 合力做功等于动能的变化（动能定理）。7. $W = Fs = 50 \times 10 = 500 \text{ J}$ 。8. 匀速： $F = mg = 10^4 \text{ N}$ ， $P = Fv = 10^4 \times 0.5 = 5000 \text{ W}$ 。9. $W = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \times 2 \times (25 - 9) = 16 \text{ J}$ 。10. 测体重（重力 mg ）、楼高 h （数台阶 $\times$ 每级高）、爬楼时间 t ： $P = W/t = mgh/t$ ，多测几次取平均。

第八章 能量不会凭空消失：机械能守恒

上一章的动能定理说“合外力做功 = 动能变化”——但它没回答一个问题：**动能到底“从哪来、到哪去”**？这章你会发现，能量是“存”起来的：物体的高度存着能量（重力势能），弹簧的形变存着能量（弹性势能）。只要没有摩擦这类“偷能量”的力，动能和势能互相倒来倒去，总数不变——这就是机械能守恒，物理里最优雅的一条定律。你天天用的电，很大一部分就是这么“存”出来的。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 计算动能、重力势能、弹性势能；(2) 判断机械能守恒条件；(3) 用机械能守恒定律解决运动问题（比牛顿定律更省事）。

8.1 势能：位置决定的“储存”

为什么举高的锤子砸下来劲更大？因为它“存”了能量——我们把物体由于被举高而具有的能量，叫作**重力势能**， $E_p = mgh$ （ h 是相对参考面的高度）。还有弹簧的**弹性势能**：物体由于发生弹性形变而具有的能量， $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ （ x 是形变量）。

你可能觉得“能量还能存起来”有点玄——但有个生活细节能帮你想通：**你天天在“存电”**。手机充电，是把电能存进电池的化学能里；水电站把水蓄在高处，是把电能“变成”水的重力势能存起来。能量不是虚无的账目，它实实在在“住”在位置和形变里。

为什么能定义“势能”？因为重力做功有个了不起的特点：**与路径无关，只与高度差有关**。你从 A 到 B，走直线、绕远路、走曲面，重力做的功都一样（ $W_G = mg\Delta h$ ）。正是这个特点，让“势能”这个概念成立——能量的多少只由位置决定，不看你中间怎么走。只有**“做功与路径无关”的力（保守力）才能定义势能**：重力、弹力、万有引力、电场力（物理二见）都是；摩擦力做功与路径有关（绕一圈走得越远，摩擦做功越多），没有“摩擦势能”。

三峡大坝存的不只是水，是能量。上游水库把水举到 100 多米高的落差，白天放水冲过水轮机发电——水往下流，重力势能变成动能，再变成电能。更妙的是**抽水蓄能电站**：夜里用电低谷、电便宜的时候，把下游的水抽回山上“存”起来；白天用电高峰再放下来发电。水还是那些水，能量被高度“存”了一夜——这就是重力势能在电网里当“充电宝”。

例题 8.1

物体从 h 处沿光滑斜面滑下，再沿光滑曲面滑下，底端速度相同吗？

想一想：

- 问：“光滑”意味着什么？两种路径做功情况一样吗？
- 想：没有摩擦，都只有重力做功；重力做功与路径无关，只与高度差有关： $W_G = mgh$ 。
- 问：动能定理怎么说？
- 想： $mgh = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$ ——与路径形状无关。
- 问：如果问“时间谁短”呢？和速度是一回事吗？
- 想：不是！速度相同，但曲面先获得大速度、用时更短——**速度相同，时间不同**，别混。

详细答案：解：两种路径重力做功都是 mgh ，由 $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ 得 $v = \sqrt{2gh}$ 。答：相同——“只与高度差有关”是保守力的特权。

变式提醒：若问时间，曲面更快；若斜面粗糙，路径不同做功不同，速度就不同了。

练一练

- 重力势能与参考面有关：同一物体在 1 楼和 10 楼，以地面为参考面，势能各是多少（ $m = 1\text{ kg}$ ，每层 3 m ）？
- 弹簧拉长 2 cm 和压缩 2 cm ，弹性势能谁大？（提示： $E_p = \frac{1}{2}kx^2$ 只与形变量大小有关）

参考答案：1. 30 J 和 300 J （ $E_p = mgh$ ）；2. 一样大（形变量相同）

8.2 机械能守恒定律：只有保守力做功时

过山车从高处冲下，速度为什么越来越快？势能在“放”出来变成动能。我们把动能和势能（重力势能、弹性势能）统称**机械能**。实验发现：在只有重力或弹力做功的情况下，物体系统的动能与势能相互转化，而机械能的总量保持不变——这就是**机械能守恒定律**，写成：

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

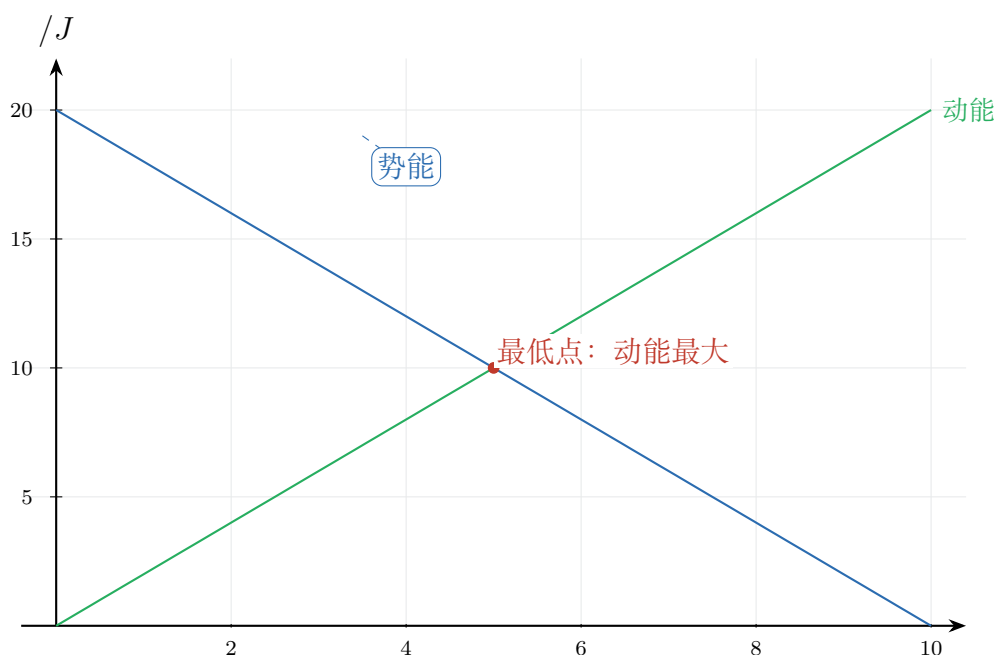


图 8.1: 过山车能量转化：势能换动能，总量不变

怎么判断守恒？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。注意：**摩擦力做功，机械能一定不守恒**（动能被摩擦“偷”走变成内能）。

“能量不会凭空消失”这句话，今天你听来像常识——但在 19 世纪以前，它是科学界最大的谜。当时的人真以为能量会“用完”：煤烧完了就没了，马车停了就停了。直到焦耳用 40 年、400 多次实验证明“热是一种能量，能和功互相换算”（他的实验室是自家啤酒厂），迈尔、亥姆霍兹同时从不同领域凑齐了拼图——能量守恒定律才诞生。〔注 1〕有了它，一个流传了几百年的梦想直接被判了死刑：**永动机**——那个“不用输入能量、永远自己转”的机器——第一类永动机违反能量守恒，不存在。〔注 2〕

机械能守恒 vs 动能定理，怎么选？只有重力弹力做功 → 优先机械能守恒（简单，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**。

例题 8.2 (过山车) 过山车从 $h = 20\text{ m}$ 高处由静止滑下，经过半径为 $R = 5\text{ m}$ 的竖直圆环，能否通过最高点（不计摩擦）？

想一想：

- 问：“能否通过最高点”要满足几个条件？
- 想：两个——(1) 临界条件：绳球模型最高点最小速度 $v_{\min} = \sqrt{gR}$ （再小就掉下来）；(2) 能量条件：实际到最高点的速度由机械能守恒决定。
- 问：最高点比起点高多少？能量怎么守恒？
- 想：高 $2R$ ； $mgh = \frac{1}{2}mv^2 + mg \cdot 2R$ 。

- 问：实际速度够吗？
- 想： $v = \sqrt{2g(h-2R)} = 14.1 \text{ m/s} > v_{\min} = 7.1 \text{ m/s}$ ——能通过。

详细答案：解：(1) $v_{\min} = \sqrt{gR} = \sqrt{50} \approx 7.1 \text{ m/s}$ 。(2) $mgh = \frac{1}{2}mv^2 + mg \cdot 2R \Rightarrow v = \sqrt{2g(h-2R)} = 14.1 \text{ m/s}$ 。(3) $14.1 > 7.1$ 。答：能通过——能量把“够不够”一次算清。

变式提醒：若问“最小高度”，反过来解 $2g(h-2R) = gR \Rightarrow h = 2.5R$ ——“恰好通过”是能量与临界的联立题。

例题 8.3 (弹簧) 轻弹簧一端固定，小球从 h 处自由下落压弹簧，弹簧最大压缩量 x 满足什么方程？

想一想：

- 问：全程有哪些力做功？机械能守恒吗？
- 想：只有重力、弹力做功 $\rightarrow$ 机械能守恒。
- 问：选哪个瞬间？“最大压缩”时小球什么状态？
- 想：最大压缩瞬间速度为零，动能全没了——选它做能量对比最方便。
- 问：重力势能减少了多少？弹簧弹力势能增加了多少？注意高度差！
- 想：重力势能减少 $mg(h+x)$ （别漏压缩量 x ！）；弹性势能增加 $\frac{1}{2}kx^2$ 。
- 问：守恒方程怎么写？
- 想：减少的 = 增加的： $mg(h+x) = \frac{1}{2}kx^2$ 。

详细答案：解：以起点为零势能面，最大压缩瞬间机械能守恒： $mg(h+x) = \frac{1}{2}kx^2$ 。答：解这个关于 x 的二次方程即可——“最大压缩” = 速度为零 = 动能全部转化。

变式提醒：最大速度处（弹力等于重力， $kx = mg$ ）和最大压缩处（速度为零）是两个不同的点——考题常在这两个“关键点”之间设问。

真题直击 (改编自 2023 天津卷) (计算，拆三问) $m_A = 2 \text{ kg}$ 的物体 A 自距地面 h 处自由下落， $m_B = 3 \text{ kg}$ 的物体 B 由地面竖直上抛，经 $t = 1 \text{ s}$ 在空中碰撞，碰后粘在一起， $g = 10$ 。(1) 求碰撞位置距地面高度 x ；(2) 求碰后瞬间速度 v ；(3) 求碰撞损失的机械能。

读题：自由落体 + 竖直上抛相向运动——先算碰撞前各自速度：A 下落 $x = \frac{1}{2}gt^2 = 5 \text{ m}$ ， $v_A = gt = 10 \text{ m/s}$ 向下；B 上抛位移 x 向上， $x = v_B t - \frac{1}{2}gt^2 \Rightarrow v_B = 10 \text{ m/s}$ 向上。碰后粘一起（完全非弹性）：动量守恒 $2 \times (-10) + 3 \times 10 = 5v \Rightarrow v = 2 \text{ m/s}$ 向上。损失动能 $= \frac{1}{2} \times 2 \times 100 + \frac{1}{2} \times 3 \times 100 - \frac{1}{2} \times 5 \times 4 = 240 \text{ J}$ 。自由落体、上抛、动量守恒、能量损失，一题四考点——第 9 章马上系统讲动量。

动手试试 (材料：一串钥匙 + 一根线，或任何重物)

先猜：把钥匙拉到一边放手，它会在另一边摆到多高？能超过放手时的高度吗？

动手：线一端拴钥匙，另一端固定在高处，把钥匙拉到一侧松手，看它在另一侧能荡多高。

观察：几乎荡回同样的高度（略低一点点），永远超不过放手高度。

思考：这是能量守恒的“看不见的手”在记账：放手处动能 0、势能最大；最低点势能全变成动能；另一边动能又全变回势能——所以高度一样。略低的那一点，是被空气阻力“偷”走的能量。**能量不会凭空出现，也不会凭空消失**——这句话你亲眼看到了。

练一练

- 判断机械能是否守恒的两种依据是什么？
- 从 45 m 高处自由下落，落地动能多大 ($m = 1 \text{ kg}$, $g = 10$)？
- 有摩擦力时机械能为什么减少？减少的机械能去哪了？

参考答案：1. 只有重力/弹力做功；其他力总功为零；2. $E_k = mgh = 450 \text{ J}$ ；3. 摩擦生热，变成内能

想一想（概念边界）：机械能守恒的条件是“只有重力或弹力做功”。如果题目只说“物体沿轨道下滑”，没提摩擦，你能直接用机械能守恒吗？

提示：不能！没提“光滑”就默认有摩擦，机械能不守恒，必须用动能定理（动能定理永远成立）。判据一句话：题目说“光滑/不计阻力”→机械能守恒；没说→动能定理兜底。

本章注释

〔注 1〕能量守恒定律的诞生是 19 世纪科学史上最了不起的“多人接力”：焦耳（英国啤酒厂老板、业余科学家）用 40 年做了 400 多次实验，证明“做功多少 = 产生热量多少”（热功当量， $1 \text{ cal} \approx 4.18 \text{ J}$ ），他的实验装置包括搅拌水的水轮、压气缸、通电线圈，实验室就是自家啤酒厂；与此同时，德国医生迈尔从人体代谢、物理学家亥姆霍兹从力学，各自独立地走到了同一个结论。三个背景完全不同的人，从三条路同时发现同一条定律——这说明它确实是大自然的真相。

〔注 2〕“永动机”是人类历史上最执着的集体空想之一：从 12 世纪印度、13 世纪欧洲的“自转轮”，到 18 世纪的磁力永动机，几百年来无数发明家声称造出了“不用输入能量永远转动的机器”。能量守恒定律一确立，第一类永动机（无中生有产生能量）直接被判死刑——不是“还没造出来”，是“原理上不可能”。今天各国专利局收到永动机申请都会礼貌退回，附一句：请先证明能量守恒是错的。

你这一章攒下了这些武器

这一章你学会了“能量记账”：势能是存的，动能是花的，守恒时总数不变。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
重力势能 / 高度	位置储存的能量	$E_p = mgh$ (与参考面有关)
弹簧 / 形变	弹性势能	$E_p = \frac{1}{2}kx^2$
只有重力弹力做功	机械能守恒	$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$
有摩擦 / 牵引力	机械能不守恒	用动能定理 $W_{\text{合}} = \Delta E_k$
过山车 / 最高点	守恒 + 临界	能量算 “够不够”，临界算 “到不到”

你该记住的流程：(1) 先判守恒（只有重力/弹力做功？）→ (2) 守恒：写 $E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$ ，注意零势能面与“漏了压缩量”这类高度陷阱 → (3) 不守恒：动能定理 $W_{\text{合}} = \Delta E_k$ 兜底 → (4) 临界题（过山车最高点）先把能量和临界两条线都列出来。

章末检测（基础★ / 提升★★ / 探究★★★）

基础

- 重力势能的表达式？参考面选择影响重力势能的值吗？影响重力势能的变化吗？
- 动能、重力势能、弹性势能的表达式？
- 机械能包括哪些能？
- 机械能守恒的条件是什么？
- 只有重力做功时，什么能与什么能相互转化？
- 自由落体过程中，机械能守恒吗？为什么？

提升

- 物体从 10 m 高自由下落，落地时速度多大（ $g = 10$ ，用机械能守恒）？
- 小球从光滑斜面顶端（高 5 m）由静止滑下，底端速度多大？
- 弹簧把小球弹出，弹性势能 $\frac{1}{2}kx^2$ 转化为小球的什么能？

探究

- 用“摆球”实验验证机械能守恒：摆球从 A 点释放，在最低点测速度，说明如何比较。

参考答案：1. $E_p = mgh$ ；影响值，不影响变化（变化只由高度差决定）。2. $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 、 $E_p = mgh$ 、 $E_{\text{弹}} = \frac{1}{2}kx^2$ 。3. 动能 + 重力势能 + 弹性势能。4. 只有重力（或弹力）做功。5. 动能与重力势能相互转化。6. 守恒——只受重力做功，无其他力做功。7. $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{200} \approx 14.1$ m/s。8. $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{100} = 10$ m/s。9. 小球的动能（弹性势能 → 动能）。10. 测摆球释放高度 h 与最低点速度 v （可用光电门），比较 mgh 与 $\frac{1}{2}mv^2$ 是否相等；考虑空气阻力， $\frac{1}{2}mv^2$ 略小于 mgh 属正常。

第九章 撞车为什么疼：动量与动量定理

鸡蛋从 1 米高掉到瓷砖上碎了，掉到海绵上没事——为什么？你可能会说“海绵软”，但物理要问：**软是怎么起作用的？**把“软”拆开，你会看到一本比动能更老的账本：力的作用效果有两种记法——动能定理记“力的空间累积”（做功），动量定理记“力的时间累积”（冲量）。碰撞、爆炸、火箭，全靠这本“时间账”。你可能在新闻里见过汽车碰撞测试：车以 64 km/h 撞向刚性墙，假人身上测满传感器——它测的，就是这一章的东西。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 计算动量与冲量；(2) 用动量定理解释“缓冲”现象；(3) 用动量守恒定律解决碰撞、爆炸问题。

9.1 动量与冲量：力在时间上的累积

为什么要多一个“动量”？上一章刚学了动能 $\frac{1}{2}mv^2$ ，你可能会想：一个“运动的量”还不够吗？不够。动能管“多快能撞坏多少”，动量管“撞的时候冲劲多大”——它们是两本独立的账。我们把物体的质量与速度的乘积，叫作**动量**，用 p 表示， $p = mv$ ，单位是千克米每秒 ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)，是矢量，方向与速度相同。区分它俩有个经典例子：同样动能的两个球，质量大的那个动量更大，撞起来更“沉”——一个 2 kg 球和一个 8 kg 球，动能一样时，8 kg 球撞上来“分量”重得多。

力作用在物体上要持续一段时间才有效果。我们把力与力的作用时间的乘积，叫作**冲量**，用 I 表示， $I = F\Delta t$ ，单位是牛秒 ($\text{N} \cdot \text{s}$)。冲量与动量的关系，就是**动量定理**：物体所受合外力的冲量，等于物体动量的变化量：

$$F\Delta t = \Delta p = mv_2 - mv_1$$

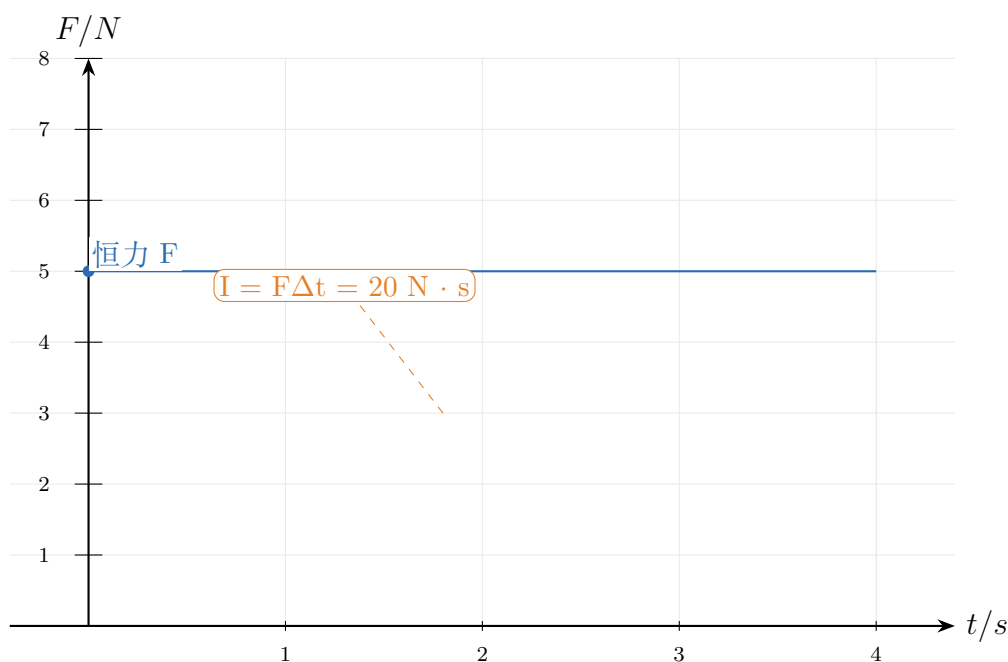


图 9.1: F-t 图：冲量 = 图线下的面积

和动能定理是“表兄弟”：一个看空间（做功），一个看时间（冲量）。

动量定理的招牌应用——延长作用时间减小冲击力：回到开头的鸡蛋。掉到瓷砖上，鸡蛋的动量变化是固定的（从 5 m/s 到 0），可瓷砖让碰撞在 0.01 秒内完成——力大得惊人，蛋壳扛不住；海绵把碰撞拖到 0.1 秒——同样的动量变化，力只有十分之一。跳远沙坑、安全气囊、汽车保险杠的溃缩，本质是同一件事：“软”不是玄学，是时间账。把碰撞时间 Δt 拉长，让冲击力 F 变小（ Δp 固定）。碰撞瞬间力大，是因为时间短。汽车碰撞测试里，工程师最关心的数据之一就是假人头部受到的加速度峰值——他们做的，就是把 Δt 拉得足够长。

例题 9.1

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

想一想：

- 问：求撞击力，用什么定理？
- 想：动量定理 $F\Delta t = \Delta p$ ——撞击类问题的招牌。
- 问：落地速度多大？（自由落体）
- 想： $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{20 \times 1.25} = 5 \text{ m/s}$ 。
- 问：动量变化是多少？方向呢？
- 想： $\Delta p = 0 - 0.1 \times (-5) = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ （向上）。

- 问：硬地和海绵两次，什么变了、什么没变？为什么海绵不疼？
- 想： Δp 一样，时间变 10 倍 $\rightarrow$ 力变 1/10——这就是“海绵缓冲”的本质。注意 F 是支持力（还要托住重力）： $F - mg = \Delta p / \Delta t$ 。

详细答案：解：(1) $v = \sqrt{2gh} = 5 \text{ m/s}$, $\Delta p = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。(2) 硬地： $F - mg = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 50 \Rightarrow F = 51 \text{ N}$ 。(3) 海绵： $F = 5 + 1 = 6 \text{ N}$ 。答：硬地 51 N、海绵 6 N——时间 10 倍，冲击力减到约十分之一。

变式提醒：安全气囊、跳远沙坑、保险杠都是同一原理：延长 Δt 减小 F ；碰撞速度翻倍， Δp 和 F 都翻倍。

练一练

- 动量定理与动能定理各看力的什么累积？
- 安全气囊为什么能救命？用动量定理公式说明。
- 相同速度的卡车和小汽车，谁的动量更大？撞墙时谁需要更长的缓冲？

参考答案：1. 动量定理看时间累积（冲量），动能定理看空间累积（功）；2. 碰撞时间 Δt 变长， $F = \Delta p / \Delta t$ 变小；3. 卡车（质量大），卡车更需要缓冲

9.2 动量守恒定律：合外力为零时

两个球相撞，撞完会怎样？把两个球看成一个系统，碰撞时它们之间的作用力是内力——内力只能交换动量，不能改变系统的总动量。于是有了**动量守恒定律**：如果系统不受外力，或者所受外力的矢量和为零，那么系统的总动量保持不变：

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

就像两个人互相推，力是内力，谁也改变不了两人系统的总动量。这条定律的历史比能量守恒还老：17 世纪笛卡尔先提出“运动量守恒”，惠更斯用碰撞实验修正了他——动量是矢量，方向也要守恒；牛顿把它写进《原理》。〔注 1〕它是整个宇宙最可靠的规律之一：**从台球到星系碰撞，从子弹到爆炸，没有例外。**

什么时候用动量守恒？(1) 碰撞/爆炸/反冲（时间极短，外力冲量可忽略）；(2) 系统水平方向合外力为零（可只守恒某方向）。

碰撞三分类：我们把碰撞后形变完全恢复、机械能没有损失的碰撞，叫作**弹性碰撞**（动量守恒 + 动能守恒）；碰后粘在一起以共同速度运动的，叫**完全非弹性碰撞**（动量守恒、动能损失最大）；其余介于两者之间的，叫**非弹性碰撞**（动量守恒、动能部分损失）。

例题 9.2

$m_1 = 1 \text{ kg}$ 以 $v_1 = 6 \text{ m/s}$ 撞静止的 $m_2 = 2 \text{ kg}$ ，碰后粘在一起，求共同速度和损失的动能。

想一想：

- 问：“粘在一起”是哪种碰撞？先用什么守恒？
- 想：完全非弹性碰撞——先动量守恒（碰撞时间极短，外力冲量可忽略）求共速。
- 问：动量守恒怎么列？共同速度多大？
- 想： $1 \times 6 = (1 + 2)v \Rightarrow v = 2 \text{ m/s}$ 。
- 问：动能守恒吗？损失多少？
- 想：不守恒！碰前 $E_1 = 18 \text{ J}$ ，碰后 $E_2 = 6 \text{ J}$ ，损失 12 J ——变成内能。

详细答案：解：(1) $1 \times 6 = 3v \Rightarrow v = 2 \text{ m/s}$ 。(2) $E_1 = \frac{1}{2} \times 1 \times 36 = 18 \text{ J}$ ， $E_2 = \frac{1}{2} \times 3 \times 4 = 6 \text{ J}$ ，损失 12 J 。答：共同速度 2 m/s ，损失动能 12 J ——完全非弹性损失最大。

变式提醒：若 m_1 碰后反弹，动量守恒要带负号；弹性碰撞则动量、动能都守恒，两个方程联立。

练一练

- 完全非弹性碰撞为什么损失动能最大？
- 两球弹性碰撞，动量守恒吗？动能守恒吗？
- 子弹打木块并留在木块里，属于哪种碰撞？动量守恒吗？

参考答案：1. 碰后共速，相对动能全没了；2. 都守恒；3. 完全非弹性，动量守恒（水平方向合外力近似为零）

9.3 反冲与火箭：动量守恒的“喷气”式

火箭怎么飞的？ 不断“喷气”——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）。我们把系统的一部分向某一方向运动、而其余部分向相反方向运动的现象，叫作**反冲**。烟花升空、水枪喷水、开枪的后坐力，都是反冲。

为什么火箭要多级？ 单级火箭想达到入轨速度（约 7.9 km/s ）需要携带大量燃料，但燃料越多、自重越重、越难加速。多级火箭每级烧完就扔掉（扔掉“死重”），让后面的加速更轻松——每一级都在“轻装上阵”。

你大概在视频里见过 SpaceX 猎鹰 9 火箭第一级**竖着降落在海上平台上**——那是动量定理的反向运用：火箭下落时带着巨大的向下动量，着陆前猛喷反推，用向上的冲量把向下的动量一点点减到零，而不是“砸”在平台上。同一章的两个公式，一发一收。〔注 2〕

变式提醒：火箭就是不断“跳离”——喷出燃料向后，火箭向前；多级火箭把烧完的“死重”级扔下，后面的加速更轻松。

动手试试（材料：一个熟鸡蛋、一个生鸡蛋）

先猜：两个鸡蛋在桌上转起来，然后手指轻按一下——哪个先停？

动手：让熟鸡蛋和生鸡蛋在桌上转起来（转速差不多），用手指轻按一下再抬起，观察。

观察：熟蛋立刻停了；生蛋停了一下又继续转起来！

思考：熟蛋内部是固体，说停就停；生蛋内部是液体，惯性让它“不听话”地继续转。这就是惯性——物体保持运动状态的本领，也是“动量”概念的直觉来源。顺带收获：这招是判断生熟鸡蛋的独门妙计。

练一练

- 爆竹爆炸后碎片动量总和为什么仍为零？
- 火箭喷出速度越大，火箭获得的速度越大还是越小？为什么？
- 为什么多级火箭比单级火箭效率高？

参考答案：1. 爆炸是内力，总动量守恒仍为零；2. 越大（反冲速度正比于喷出速度）；3. 逐级扔掉死重，后续加速更轻松

想一想（概念边界）：动量守恒的条件是“系统合外力为零”。碰撞瞬间很短，如果不知道碰撞过程中有没有外力作用，还能直接用动量守恒吗？

提示：可以——碰撞时间极短，外力（如重力）的冲量 $F\Delta t$ 在极短时间内可以忽略，系统动量近似守恒。这是碰撞、爆炸题的默认前提：“时间短到外力来不及起作用”。

本章注释

〔注 1〕动量守恒是第一条被人类写下的守恒定律：1644 年笛卡尔提出“运动量”（他用的还是 mv 的标量版）守恒；1650 年代惠更斯用摆球碰撞实验修正了他——发现碰撞中动量按矢量守恒，还顺带发现“相对速度交换”（弹性碰撞前后相对速度大小不变）；1687 年牛顿把它系统化并纳入《自然哲学的数学原理》。值得一提：7.3 章讲的“动能 vs 动量”之争，正是从这场“运动量到底是什么”的世纪辩论里长出来的。

〔注 2〕猎鹰 9 的一级回收（2015 年首次成功）靠的不只是反推——着陆前它先翻转机身、再点 3 台发动机“刹车”，最后 1 台发动机精准调节推力，把下落速度从每秒上千米减到着陆瞬间接近零。火箭的“轻盈着陆”和鸡蛋掉海绵是同一个道理：把“碰撞”时间拖长，力就温柔。区别只是：鸡蛋靠海绵被动延长，火箭靠喷气主动延长。

你这一章攒下了这些武器

这一章你学会了“时间账本”：冲量是力 $\times$ 时间，动量定理是碰撞的通用算法，动量守恒是系统的不变量。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
动量 / 冲量	力在时间上的累积	$p = mv$ 、 $I = F\Delta t$
碰撞 / 缓冲 / 气囊	动量定理	$F\Delta t = \Delta p$, 延长 Δt 减小 F
碰撞 / 爆炸 / 反冲	动量守恒	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$
碰后粘在一起	完全非弹性	共速, 动能损失最大
弹性碰撞	动量 + 动能都守恒	双守恒方程
火箭 / 反冲	动量守恒喷气	多级火箭扔掉死重

你该记住的流程：碰撞题四步走——(1) 判断碰撞类型（弹性？完全非弹性？）；(2) 写动量守恒方程（注意方向正负号）；(3) 需要动能就再写能量关系（弹性：动能守恒；完全非弹性：算损失）；(4) 解方程组，验算方向。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）光滑水平面上，质量 $m_1 = 1\text{ kg}$ 的小球以 $v_1 = 4\text{ m/s}$ 向右运动，与静止的质量 $m_2 = 3\text{ kg}$ 的小球发生**完全非弹性碰撞**。下列说法正确的是？

- A. 碰后两球粘在一起，共同速度大小为 2 m/s
- B. 碰撞过程中机械能守恒
- C. 碰后系统总动量为 $4\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向向左
- D. 碰撞损失的机械能为 6 J

答案 D。解析：动量守恒 $m_1v_1 = (m_1 + m_2)v \Rightarrow v = \frac{1 \times 4}{4} = 1\text{ m/s}$ （向右），A 错（ 2 m/s 不对）；完全非弹性碰撞机械能不守恒（损失最大），B 错；总动量 $1 \times 4 = 4\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 向右，C 错；损失 $\Delta E = \frac{1}{2}m_1v_1^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v^2 = 8 - 2 = 6\text{ J}$ ，D 对。碰撞题三步：**判类型（弹/非弹/完全非弹）** → **动量守恒列式** → **能量取舍**；完全非弹性 = “粘在一起” = 损失最大。

章末检测（基础★ / 提升★★ / 探究★★★）

基础

- 动量的表达式？单位？动量是矢量还是标量？
- 冲量的表达式？单位？
- 动量定理的表达式？
- 动量守恒的条件是什么？
- 鸡蛋掉在水泥地上碎、掉在海绵上不碎，为什么？
- 碰撞分类：弹性碰撞、完全非弹性碰撞各有什么特点？

提升

- 质量 2 kg 的物体速度 10 m/s ，动量多大？速度变为反向 5 m/s ，动量变化量多大？
- 质量 0.1 kg 的球以 20 m/s 打到墙反弹回 20 m/s ，作用时间 0.01 s ，墙对球平均作用力多大？

- 质量为 4 kg 的 A 球以 3 m/s 与静止的 2 kg B 球完全非弹性碰撞，碰后共同速度多大？

探究

- 用两辆小车（碰撞后粘连）验证动量守恒，说明需要测量哪些量。

参考答案：1. $p = mv$ ； $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ ；矢量。2. $I = Ft$ ； $\text{N} \cdot \text{s}$ 。3. $Ft = \Delta p = mv_2 - mv_1$ 。4. 系统不受外力或合外力为零（内力远大于外力时近似守恒）。5. 动量变化相同，但海绵延长了作用时间 t ，由 $Ft = \Delta p$ ， t 大则 F 小。6. 弹性碰撞：动能守恒；完全非弹性：碰后共速、动能损失最大。7. $p = 20 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ； $\Delta p = m(v_2 - v_1) = 2 \times (-5 - 10) = -30 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ （大小 30）。8. $F = \Delta p/t = 0.1 \times (20 + 20)/0.01 = 400 \text{ N}$ 。9. $v = m_A v_A / (m_A + m_B) = 4 \times 3/6 = 2 \text{ m/s}$ 。10. 测两车质量 m_1 、 m_2 与碰前 v_1 、碰后共同速度 v （可用打点计时器纸带或光电门），验证 $m_1 v_1 = (m_1 + m_2)v$ 。

第十章 来来回回与传向远方：机械振动与机械波

为什么摆钟走得那么准？为什么士兵过桥要“便步走”？为什么远处有人喊你，你会觉得声音“闷”？——这一章讲两类“动”：振动（一个物体来回动）和波（振动传向远方）。从单摆到地震预警，都是同一套节奏。你手机里那个“检测到你在走路”的小东西——加速度计，本质上是一个微小的 MEMS 机械结构（比头发丝还细的硅片悬臂梁），靠惯性位移改变电容来感知加速度。三件事，一套节奏。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 描述简谐运动，掌握弹簧振子与单摆周期公式；(2) 理解共振条件与危害/应用；(3) 掌握波速公式，区分横波纵波，理解干涉衍射与多普勒效应。

10.1 简谐运动：弹簧与摆的“钟摆律”

弹簧挂个球，一松手它会怎么动？来回振动。你可能会想：振动不就是乱动吗？恰恰相反——最标准的振动，是物理里最“守规矩”的运动之一。这种振动叫**简谐运动**：物体在跟偏离平衡位置的位移大小成正比、方向总指向平衡位置的回复力作用下的振动，回复力 $F = -kx$ （负号表示“往回拉”）。偏离越远，拉得越狠——这就是它永远回得来的原因。它的位置随时间按正弦变化，和圆周运动在“影子”里是同一件事：

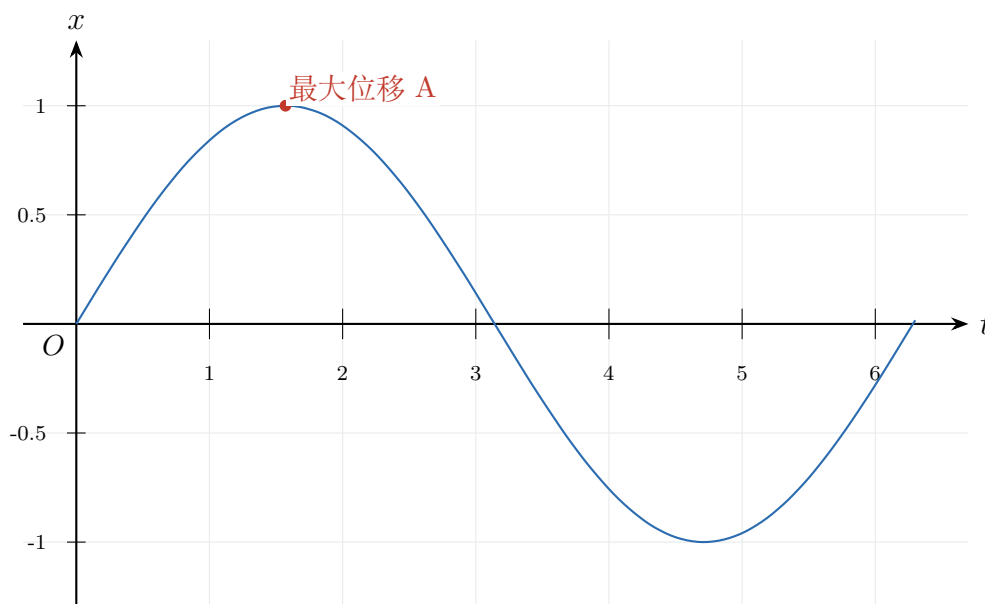


图 10.1: 简谐运动 $x-t$ 图: 位移按正弦变化

描述振动要几个量: 振动物体离开平衡位置的最大距离叫**振幅** A ; 完成一次全振动所用的时间叫**周期** T ; 单位时间完成全振动的次数叫**频率** f , $f = 1/T$ 。两个周期公式, 考试最爱考:

- 弹簧振子: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ——与**振幅无关**! 拉得远点、近点, 周期一样;
- 单摆: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ ——与**质量、振幅无关** (等时性)。

这两个公式怎么来的? (用“简谐 = 圆周运动的影子”推一遍, 就永远忘不了)

简谐运动的物体, 位移随时间按正弦规律变化: $x = A\sin\omega t$ (A 是振幅, ω 叫圆频率)。它的运动, 恰好是匀速圆周运动在直径方向上的投影——一个绕圆周匀速转动的点, 它在直径上的投影就是在做简谐运动, 角速度 ω 就是圆频率, 转一圈的时间就是周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。

对投影 (简谐) 求加速度, 可得 $a = -\omega^2 x$ 。而弹簧振子的回复力 $F = -kx$, 由牛顿第二定律 $a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x$ 。两式对比: $\omega^2 = \frac{k}{m}$, 即 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 代入 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 得:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

单摆同理: 小角度摆动时回复力近似 $F \approx -\frac{mg}{L}x$ (重力沿圆弧切向的分量), 对比得 $\omega^2 = \frac{g}{L}$, 即 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 。**注意“小角度”是前提**——摆角太大 (如超过 5°) 时等时性失效, 周期会变长。

摆钟为什么走得准? 因为它靠“周期只与摆长有关”校准——摆长定了, 节奏就定了。摆钟快了, 调摆长 (加长) 而不是调质量。传说伽利略 19 岁时在比萨教堂数着吊灯的摆动发现了等时性——这个故事和比萨斜塔一样, 出自他的学生维维亚尼的传记, 细节未必可靠; 但伽利略确实是最早系统研究摆的人, 还用摆做过脉搏计。〔注 1〕

练一练

- 单摆周期与什么有关？摆钟快了，该调摆长还是调质量？
- 弹簧振子振幅增大一倍，周期变吗？机械能变吗？（提示： $E = \frac{1}{2}kA^2$ ）
- 把单摆拿到月球上（ g 变小），周期变长还是变短？

参考答案：1. 与摆长和 g 有关，与质量无关——调摆长；2. 周期不变，机械能变为 4 倍；3. 变长（ $T \propto 1/\sqrt{g}$ ）

10.2 受迫振动与共振：借来的节奏

秋千为什么越荡越高？你在有节奏地推它——这就是**受迫振动**：系统在周期性外力（驱动力）作用下振动，频率等于驱动力的频率（与固有频率无关）。当**驱动力频率接近固有频率时，振幅急剧增大——共振**。共振一利一害，都是考点：

- **害：**1940 年美国塔科马大桥在风中摆动、最终垮塌——教科书常用“共振”解释，严格说它的机制更复杂（风的能量不断注入，是“颤振”而不是简单的共振），但它让全世界记住了“频率匹配会出大事”〔注 2〕；士兵过桥要“便步走”（打乱齐步走的节奏），就是怕齐步走引发共振；
- **利：**音箱腔体放大声音、微波炉加热食物（高频电场使极性水分子快速转向、摩擦生热）。

例题 10.1

为什么士兵过桥要改便步走？**想一想：**

- 问：这是哪个物理现象？共振的条件是什么？
- 想：共振——驱动力频率接近系统固有频率时，振幅急剧增大。
- 问：齐步走怎么会引发共振？
- 想：齐步走的步伐频率固定，若接近桥的固有频率，每次“推力”同节奏叠加，振幅越来越大，桥可能垮掉。
- 问：改便步走为什么有效？
- 想：打乱节奏 = 让驱动力频率远离固有频率 = 避开共振。**详细答案：**解：齐步走产生周期性驱动力；频率接近桥的固有频率 → 共振、振幅剧增（塔科马大桥就是风振垮塌的著名案例）。答：便步走 = 打乱节奏 = 避开共振。**变式提醒：**共振一利一害——害：桥、齐步走；利：音箱腔体、微波炉（高频电场让水分子转向摩擦生热）、收音机调台。**练一练**
- 什么是共振？举一利一害。
- 受迫振动的频率由什么决定？和固有频率有关吗？

参考答案：1. 驱动力频率接近固有频率时振幅剧增；利如音箱/微波炉，害如桥/齐步走（微波炉是高频电场让水分子转向摩擦生热）；2. 由驱动力频率决定，与固有频率无关

10.3 机械波：振动在介质中的传播

水波传过去，水分子跟着走了吗？没有——你可能觉得“水波推着水走”，其实飘在水面的树叶只是上下动，并不会漂向岸边。我们把振动在介质中的传播叫作**机械波**，传播的是**振动形式**，质点只在平衡位置附近振动，不随波迁移。波传能量、传信息，不传物质。

波速公式： $v = \lambda f = \lambda/T$ ——**波长**（相邻两个同相质点间的距离） λ 、频率、波速三者的“宪法”。按振动方向分两类：**横波**（振动方向垂直于传播方向：绳波），**纵波**（振动方向平行于传播方向：声波、地震P波）。

振动图像 vs 波动图像——先看横坐标再动手：振动图像（ $x-t$ ）看“一个质点的历史”（横轴是时间）；波动图像（ $y-x$ ）看“某一时刻全体质点的合影”（横轴是位置）。读图第一件事：看横轴标的是时间还是位置。

多普勒效应：波源与观察者相对运动时，观察到的频率改变——火车鸣笛靠近音调变高、远离变低。我们把这种因相对运动导致接收频率变化的现象，叫作**多普勒效应**。警察测速、彩超测血流、天文测星系退行都用它。你戴的降噪耳机，一半功劳也来自“波”：先采集环境噪声，再发出反相位的声波把它抵消——两列波相遇，峰谷对消，世界就安静了。

地震预警为什么能抢出几秒？地震波分纵波P波（快，约6 km/s，破坏小）和横波S波（慢，约3.5 km/s，破坏大）。P波先到、S波后到——预警系统检测到P波立即广播，利用时间差抢出几秒到几十秒的逃生窗口。你手机上如果开过地震预警，那几秒倒计时，就是P波和S波的赛跑。

例题 10.2

声波在空气中速度 340 m/s，频率 680 Hz，波长多大？想一想：

- 问：波速、波长、频率三者的关系是什么？
- 想：波的“宪法”公式 $v = \lambda f$ ，变形 $\lambda = v/f$ 。
- 问：代进去，波长多大？
- 想： $\lambda = \frac{340}{680} = 0.5 \text{ m}$ 。
- 问：同一声音进入水中（声速 1500 m/s），波长变吗？频率变吗？
- 想：频率不变（声源决定）、波速变大（介质决定）、波长变长——变的是波长和波速，不变的是频率。

详细答案：解： $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{680} = 0.5 \text{ m}$ 。答：波长 0.5 m——频率越高波长越短，高频“刺”、低频“闷”。

变式提醒：频率升高一倍，波长减半（波速不变）；声波进入水中 f 不变、 v 变大、 λ 变长。

动手试试（材料：一个纸盒 + 几根不同粗细的橡皮筋）先猜：绷得紧的橡皮筋和松的，拨出来的声音谁高？动手：把橡皮筋套在纸盒上绷紧，拨动听声音；再放松对比；换不同粗细的再对比。观察：绷得越紧、越细，声音越高（频率大）；越松越粗，声音越低。思考：频率由“回复力 ÷ 质量”决定——绷紧 = 回复力大 = 频率高。吉他就是靠调琴弦的张力定音的。频率决定音调，而波速公式 $v = f\lambda$ 就藏在你弹出的每一声里：同一根弦，张力变了频率就变，波长跟着变。

练一练

- 横波与纵波的区别？地震 P 波与 S 波哪个先到（说明地震预警原理）？
- 频率 200 Hz 的声波在水中的波长（水中声速 1500 m/s）是多少？
- 火车鸣笛向你驶来，你听到的音调变高还是变低？为什么？

参考答案：1. 振动方向垂直/平行于传播方向，P 波先到（速度快），预警靠时间差；2. $\lambda = v/f = 7.5 \text{ m}$ ；3. 变高（多普勒效应，相对运动使接收频率升高）。

10.4 波的叠加、干涉、衍射与反射折射

两列波相遇，会怎样？——波的叠加、干涉与衍射

水面上两处同时落水滴，两圈波纹交叉而过——它们会互相撞碎吗？不会：两列波相遇时，每列波都保持自己原来的样子继续前进（**波的独立性**），相遇区域的位移是两列波各自位移的**矢量和**（**叠加原理**）。降噪耳机就是叠加原理的活广告：环境噪声 + 反向声波 = 安静。

如果两列**频率相同、振动方向相同、相位差恒定**的波相遇（**相干波**），叠加的结果是稳定的：某些位置两波“同相”到达，峰峰相遇，振动加强（振幅变大）；某些位置“反相”到达，峰谷相遇，振动减弱甚至抵消——空间出现稳定的**加强区与减弱区**，这就是**波的干涉**。水波干涉实验里那一片片明暗相间的花纹，声波干涉会形成“有的地方特别响、旁边特别安静”的听音区。

干涉的前提是“相干”——频率相同是硬条件。**两盏不同频率的灯、两个不同音高的喇叭，不会产生稳定的干涉花纹**。这跟光一样：物理 III 第 4 章讲光的干涉（双缝实验），用的就是同一套“同频相遇”的规则。

波还能“绕”过去：墙那边有人说话，你在墙这边能听见——声波没有“穿墙”，它是**绕过了**墙的拐角。波绕过障碍物继续传播的现象，叫作**波的衍射**。衍射的显著程度取决于波长与障碍物尺寸的对比：声波波长范围约 $0.02 \sim 17 \text{ m}$ ($340 \text{ m/s} \div 20 \sim 20000 \text{ Hz}$)，其中**低频部分（波长数米）与门尺寸相当甚至更大**，所以拐个弯还能听到；光波波长只有几百纳米，比门缝小上千倍，所以光“走直线”——只有遇到极小的缝（针孔、双缝）时才显出衍射。**障碍物尺寸与波长差不多时，衍射最明显**——这就是为什么“隔墙有耳”容易，“隔墙有光”难。

波碰到“墙”：反射与折射：你对着山谷喊一声，过一会儿回声就来了——声波撞上崖壁**反射**回来，回声就是反射波；对着水面照一束光，一部分光弹回空气（反射）、一部分钻进水里（**折射**，方向改变）。波遇到两种介质的分界面时，会同时发生**反射**（返回原介质）与**折射**（进入新介质、方向改变）。反射服从反射定律（入射角 = 反射角）；折射时波的频率不变、波速和波长随介质改变——声波从空气进入水中，频率不变、速度变大、波长变长（例题 10.2 的思路）。水波从浅水区传到深水区方向会偏折，就是折射；B 超、声呐、“隔墙喊话”全靠反射。一句话：**反射是“撞墙回头”，折射是“换个环境拐弯”**——两者都是波遇分界面的本能。

练一练

- 为什么能隔着墙听到人说话，却看不到墙后的人？用衍射解释。
- 两列频率相同的波在空间相遇，为什么有的位置特别响、有的位置特别安静？

参考答案：1. 声波波长远大于门缝/障碍物尺寸，衍射显著；光波波长极短，衍射可忽略，只能直线传播；2. 干涉——同相叠加振动加强（响），反相叠加振动减弱（安静），稳定的加强区与减弱区就是干涉图样

想一想（概念边界）：共振的条件是“驱动力频率接近固有频率”。如果不知道系统的固有频率，能判断会不会共振吗？

提示：不能——共振是“频率匹配”现象，两个频率缺一不可。不知道固有频率就无法判断是否匹配。这也解释了为什么士兵过桥要便步走：打乱步伐频率，让驱动力频率远离桥的固有频率。

本章注释

〔注 1〕“伽利略在比萨教堂数吊灯摆动”的故事，出自他的学生维维亚尼 1654 年写的传记——和比萨斜塔传说同一个作者，学界普遍认为细节未必可靠。可靠的史实是：伽利略 1602 年前后确实系统研究过摆，发现摆的周期与摆长有关、与振幅近似无关，并据此发明了“脉搏计”（医生量脉搏的仪器）。还要补充一个伽利略不知道的细节：摆的等时性只在**小角度**下严格成立——大角度摆动时周期会变长，这个问题后来由惠更斯用“摆线摆”解决（他顺便还发明了第一台摆钟，1656 年）。

〔注 2〕塔科马海峡大桥（1940 年 11 月 7 日）在 19 m/s 的风中摆动、扭曲、最终垮塌，全过程被摄影机拍下，成为 20 世纪最著名的工程失败案例。教科书常把它简化为“风振频率与固有频率共振”——严格说，它的真正机制是**气动弹性颤振**（气流不断给桥面注入能量，振幅越来越大，是一种自激振动，不要求频率严格匹配）。教材保留“共振”的直觉（频率匹配、振幅剧增），但要知道：真实世界的桥垮塌，往往是更复杂的能量注入。这场事故直接催生了桥梁“风洞试验”行业——从此大桥设计必先过风洞。

你这一章攒下了这些武器这一章你学会了“节奏”：振动是来回，波是传向远方，共振是频率的共鸣，多普勒是相对运动改频率。这张表就是本章的全部考点——一个都没少，每一条正文里都设过问、讲过、练过：

看到	想到	用
简谐运动 / 回复力	$F = -kx$	偏离越远拉得越狠
弹簧振子	周期与振幅无关	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
单摆 / 摆钟	周期只与摆长有关	$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
共振 / 齐步走 / 风振	驱动力频率 = 固有频率	频率匹配判振幅
波速 / 波长 / 频率	波的“宪法”	$v = \lambda f$
振动图 vs 波动图	先看横坐标	x-t 看历史, y-x 看合影
两列波相遇 / 降噪耳机	波的独立性 + 叠加	位移矢量和
干涉 / 明暗条纹 / 加强减弱区	相干波 (同频)	同相加强、反相减弱
衍射 / 绕过障碍 / 隔墙有耳	波长与障碍物尺寸比	波长 $\geq$ 尺寸时明显
反射 / 折射 / 回声	波遇分界面	反射定律、频率不变

你该记住的流程：波题三步走——(1) 分清振动图还是波动图（看横轴）；(2) 用 $v = \lambda f$ 找关系；(3) 多普勒判断频率高低（相对靠近 $\rightarrow$ 高）；遇到“两列波相遇”先想叠加，再判是否相干（同频才稳定干涉），衍射看“波长 vs 尺寸”。

综合题（改编自近年高考考查方式） 一列简谐横波沿 x 轴传播，波速 $v = 4 \text{ m/s}$ 。t = 0 时刻波形如图（可自行画出：波长 $\lambda = 8 \text{ m}$ ，波峰在 $x = 0$ 处）。下列说法正确的是（ ）

- A. 该波的频率为 0.5 Hz
- B. 若该波沿 x 轴正方向传播， $x = 2 \text{ m}$ 处质点在 t = 0 时刻向 y 轴正方向运动
- C. 经过 2 s， $x = 4 \text{ m}$ 处的质点通过的路程等于 4 个振幅
- D. 该波遇到宽 3 m 的障碍物时会发生明显衍射

解析：A： $f = v/\lambda = 4/8 = 0.5 \text{ Hz}$ ✓（频率 = 波速 ÷ 波长）。B：沿 x 轴正方向传播，用“上坡下坡”法（或平移法）： $x = 2 \text{ m}$ 处位于波峰与平衡位置之间（上坡段），质点向下运动，不是向上——B 错。C：周期 $T = 1/f = 2 \text{ s}$ ，经过 2 s 恰好一个周期， $x = 4 \text{ m}$ 处质点完成一次全振动，路程 = 4 个振幅 ✓。D：衍射明显程度看障碍物尺寸与波长的对比：波长 8 m、障碍物 3 m（小于波长），衍射显著 ✓。

答案：ACD。——波速公式、周期、传播方向判断、衍射条件，一道题串起本章四大考点。

章末检测（基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★）

基础

- 简谐运动的回复力有什么特点？周期由什么决定（弹簧振子）？
- 弹簧振子周期公式？单摆周期公式？
- 波长、频率、波速的关系式？
- 机械波传播的是“物质”还是“振动形式”？
- 横波与纵波的区别？
- 什么是共振？发生共振的条件？

提升

- 声波在空气中的速度 340 m/s，频率 1700 Hz，波长多大？
- 单摆摆长 1 m ($g = 10$, $\pi^2 \approx 10$)，周期多大？
- 波速 20 m/s，波长 4 m，频率多大？
- 两列相干声波在空间相遇，某点到两波源的路程差为半个波长，该点是加强区还是减弱区？为什么？

探究

- 为什么士兵过桥要改便步走？用共振原理解释。
- 一列水波（波长 2 m）遇到宽 3 m 的礁石，衍射明显吗？换成波长 0.5 m 的光波遇到宽 1 mm 的缝呢？

参考答案：1. 回复力与位移成正比、方向相反 ($F = -kx$)；由质量和劲度系数决定。2. $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ ； $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 。3. $v = \lambda f$ 。4. 传播的是振动形式（能量和信息），不传物质。5. 振动方向垂直/平行于传播方向。6. 驱动频率等于固有频率时振幅最大。7. $\lambda = v/f = 340/1700 = 0.2$ m。8. $T = 2\pi\sqrt{l/g} = 2\pi\sqrt{0.1} \approx 2$ s。9. $f = v/\lambda = 20/4 = 5$ Hz。10. 减弱区——路程差为半波长的奇数倍时两波反相到达，峰谷相遇振动减弱。11. 士兵齐步走的频率可能接近桥的固有频率，引起共振使振幅剧增、桥体破坏；改便步走（打乱节奏）避开共振频率。12. 水波波长 2 m 与礁石宽 3 m 同量级，衍射明显；光波波长 500 nm 远小于缝宽 1 mm，衍射可忽略（光“走直线”）。

附录 A 力学核心公式速查

板块	公式	适用
匀变速	$v = v_0 + at$ 、 $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$	加速度恒定
匀变速	$v^2 - v_0^2 = 2ax$	不含时间
自由落体	$v = gt$ 、 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 、 $v^2 = 2gh$	初速为零
牛顿第二定律	$F = ma$	力的瞬时效果
摩擦力 / 胡克定律	$f = \mu N$ 、 $F = kx$	滑动摩擦 / 弹簧
平抛	$t = \sqrt{2h/g}$ 、 $x = v_0t$	水平抛出
圆周	$a = v^2/r$ 、 $v = \omega r$	匀速圆周
万有引力	$F = GMm/r^2$ 、 $v = \sqrt{GM/r}$	天体圆轨道
黄金代换	$GM = gR^2$	地表附近
功与功率	$W = Fx \cos \theta$ 、 $P = Fv$	恒力 / 瞬时
动能定理	$W_{\text{合}} = \Delta E_k$	全程首尾
机械能守恒	$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$	只有重力弹力做功
动量定理	$F\Delta t = \Delta p$	碰撞 / 缓冲
动量守恒	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$	合外力为零
简谐运动 / 单摆	$T = 2\pi\sqrt{m/k}$ 、 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$	弹簧振子 / 小角度单摆
波速	$v = \lambda f$	机械波 / 电磁波

附录 B 读题即解题：力学关键词速查

做题卡壳时先翻这张表。读到关键词 → 立刻反应模型 → 选方法。每一条都是全书正文反复讲过的“底牌”：

读到	立刻反应	首选方法
从静止释放 / 自由下落	自由落体	$h = \frac{1}{2}gt^2$ 、 $v = \sqrt{2gh}$
刹车 / 匀减速到停	末速为零的匀变速	先算停车时间，再 $v^2 - v_0^2 = 2ax$
追及 / 相距最远	共速分水岭	v-t 图看面积、位移相等
竖直上抛	自由落体镜像	$t = v_0/g$ 、 $h = v_0^2/2g$ 、全程 $2v_0/g$
恰好 / 刚好 / 临界	分界条件	找临界方程（摩擦最大 / 弹力为零 / 压力为零）
恰好通过最高点（绳）	绳球临界	$mg = mv^2/r$ ， $v = \sqrt{gr}$
传送带	先判能否共速	$a = \mu g$ ， $x_{\text{共速}} = v^2/2\mu g$ 与 L 比较
连接体 / 叠放	先整体后隔离	整体求 a，隔离求内力
超重 / 失重	看加速度方向	$N = m(g \pm a)$
平抛 / 类平抛	分解两运动	竖直求时间，水平求距离
圆周运动	找向心力来源	$\sum F = mv^2/r$
卫星 / 天体	万有引力 = 向心力	$v = \sqrt{GM/r}$
同步卫星	周期 24 h、赤道上空	$T = 2\pi\sqrt{r^3/GM}$
变轨	加速离心、减速向心	高轨低速大周期
求位移没给时间	速度位移公式	$v^2 - v_0^2 = 2ax$
求做功 / 速度变化	动能定理	$W_{\text{合}} = \Delta E_k$
只有重力弹力做功	机械能守恒	$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$
碰撞 / 爆炸 / 反冲	动量守恒	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$
冲击力 / 缓冲 / 气囊	动量定理	$F = \Delta p/\Delta t$ ，延长 Δt 减小 F
单摆 / 摆钟	周期与摆长有关	$T = 2\pi\sqrt{L/g}$
共振	驱动力频率 = 固有频率	频率匹配判振幅
多普勒效应	相对运动	靠近频率高、远离频率低
地震 P 波 S 波	纵波快横波慢	时间差预警
干涉 / 加强区减弱区	相干波（同频）	路程差定加强减弱
衍射 / 明显衍射	波长与障碍物尺寸比	波长 $\geq$ 尺寸时显著

附录 C 学生必做实验指导（力学）

实验一 测量做直线运动物体的瞬时速度

目的：用打点计时器测量物体运动的瞬时速度，学会用纸带处理数据。

原理： $v = \Delta x / \Delta t$ 。把很短时间内的平均速度近似当作这段时间中间时刻的瞬时速度。

器材：电磁打点计时器、学生电源（交流 50 Hz）、纸带、刻度尺、小车、长木板。

步骤：1. 把打点计时器固定在长木板一端，纸带穿过限位孔、连在小车上；2. 先接通电源，再释放小车，打点计时器在纸带上打下一系列点；3. 取下纸带，选点迹清晰的区段，从某点起每隔 5 个点取一个计数点（相邻计数点时间间隔 $T = 0.1 \text{ s}$ ）；4. 用刻度尺测量各计数点到起始点的距离。

数据处理：第 n 个计数点的瞬时速度 $v_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2T}$ （用相邻两段的平均速度近似）；作 $v-t$ 图，若为直线，其斜率即加速度。

误差与注意： Δt 取得越小近似越好，但点距过近会放大读数误差；读数要估读；先通电后释放，避免纸带提前运动。

实验二 探究弹簧弹力与形变量的关系

目的：探究弹力大小与弹簧伸长量的关系，验证胡克定律。

原理： $F = kx$ 。弹簧悬挂钩码静止时，弹力与钩码重力二力平衡： $F = mg$ 。

器材：铁架台、弹簧、钩码（组）、刻度尺。

步骤：1. 弹簧竖直悬挂，记下自然长度 l_0 ；2. 逐个增加钩码，记录弹力 F 与弹簧长度 l ；3. 计算伸长量 $x = l - l_0$ ；4. 作 $F-x$ 图像。

数据处理： $F-x$ 图为过原点的直线，斜率即劲度系数 k ；若直线不过原点，说明 l_0 测量或弹簧自重处理有偏差。

误差与注意：不要超过弹簧弹性限度（钩码加到弹簧明显失去线性即停）；弹簧自重会使下端伸长， l_0 应取悬挂后的自然长度。

实验三探究两个互成角度的力的合成规律

目的：验证两个力合成时遵循平行四边形定则。

原理：合力与两分力满足平行四边形定则；橡皮条被拉到同一位置等效。

器材：方木板、白纸、图钉、橡皮条、两个弹簧测力计、细绳套、三角板、刻度尺。

步骤：1. 用两个测力计互成角度拉橡皮条，使结点到 O 点，记录两拉力 F_1 、 F_2 的大小和方向；2. 改用一个测力计拉到同一 O 点，记录合力 F' ；3. 按同一标度作力的图示，以 F_1 、 F_2 为邻边作平行四边形，比较对角线 F 与 F' 的大小和方向。

数据处理：在误差范围内 F 与 F' 重合，即验证了平行四边形定则。

误差与注意：两个测力计使用前校零，拉力方向应沿绳套方向且与木板平行；O 点位置尽量靠近板中；换测力计后 O 点必须严格不变。

实验四探究加速度与物体受力、物体质量的关系

目的：探究加速度与合外力、质量的关系，验证 $a \propto F$ 、 $a \propto 1/m$ 。

原理：控制变量法。用打点计时器测加速度；垫高木板平衡摩擦力后，细绳拉力近似等于小车所受合力。

器材：打点计时器、小车、细线、砝码及砝码盘、长木板（一端垫高）、纸带、刻度尺。

步骤：1. 垫高木板一端，轻推小车使纸带上点距均匀（摩擦力已平衡）；2. 保持小车质量不变，改变砝码盘中砝码（改变拉力 F ），测对应加速度；3. 保持拉力不变，改变小车中砝码（改变质量 m ），测加速度。

数据处理：作 $a-F$ 图（过原点直线，则 $a \propto F$ ）；作 $a-1/m$ 图（过原点直线，则 $a \propto 1/m$ ）。

误差与注意：砝码（盘）总质量应远小于小车质量（ $m_{\text{砝}} \ll m_{\text{车}}$ ），否则细线拉力明显小于 mg ；平衡摩擦力后实验过程中不要再动垫块；先通电后释放小车。

实验五探究平抛运动的特点

目的：探究平抛运动水平、竖直两个方向分运动的规律。

原理：平抛运动 = 水平匀速直线 + 竖直自由落体，轨迹满足 $y = \frac{g}{2v_0^2}x^2$ 。

器材：斜槽、小球、竖直木板、白纸、复写纸、刻度尺、重锤线。

步骤：1. 白纸与复写纸固定在木板上，用重锤线确定竖直方向；2. 小球从斜槽同一高度由静止释放，用挡板记录小球通过的位置（多次描点）；3. 取下纸，用平滑曲线连接各点；4. 在轨迹上取多个点，测 x 、 y 。

数据处理：检验 y 与 x^2 是否成正比（作 $y-x^2$ 图，过原点直线即证）；由斜率 $k = g/2v_0^2$ 反推初速度 v_0 。

误差与注意：斜槽末端必须水平（否则抛出方向有竖直分量）；释放位置每次必须相同；描点

越多越准。

实验六探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

目的：定性探究 $F = m\omega^2 r$ 中向心力与三个因素的关系。

原理：向心力公式 $F = m\omega^2 r = mv^2/r$ ；控制变量法。

器材：向心力演示仪（转动手柄、塔轮、小球、标尺）或自制转盘装置。

步骤：1. 质量、半径相同，改变转速（角速度）——观察标尺示数变化；2. 角速度、半径相同，换不同质量的小球；3. 质量、角速度相同，改变转动半径。

数据处理：记录三组对比： ω 加倍示数约为 4 倍 ($F \propto \omega^2$)；质量加倍示数加倍 ($F \propto m$)；半径加倍示数加倍 ($F \propto r$)。

误差与注意：两球应尽量同半径同质量做对照；读数取稳定后的示数；注意角速度相同的条件是塔轮半径相同或传动比正确。

实验七验证机械能守恒定律

目的：验证自由落体运动中动能增量等于重力势能减少量。

原理： $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ ，即 $\Delta E_k = -\Delta E_p$ 。

器材：打点计时器、重锤、纸带、铁架台、刻度尺。

步骤：1. 重锤系纸带竖直悬挂，先接通电源再释放；2. 选取第一、二两点间距约为 2 mm 的纸带（近似初速度为零）；3. 取若干点，测各点到起始点的高度 h_n ，用 $v_n = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{2T}$ 求速度。

数据处理：比较 $\frac{1}{2}mv_n^2$ 与 mgh_n （或比较相邻点间动能增量与势能减少量）；误差范围内相等即验证。

误差与注意：阻力做功使 $\frac{1}{2}mv^2$ 略小于 mgh 属正常方向；起始点选第一、二点间距约 2 mm 处；纸带要竖直且重锤质量适当大些。

实验八验证动量守恒定律

目的：验证碰撞过程中系统动量守恒。

原理： $m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。碰撞后小球做平抛运动，水平射程与初速度成正比，可用落点水平距离代替速度。

器材：斜槽、两个大小相同质量不同的小球 ($m_1 > m_2$)、天平、白纸、复写纸、刻度尺、重锤线。

步骤：1. 天平测两球质量；2. m_1 从斜槽同一高度释放，落点 P（重复多次取平均）；3. m_1 与槽口静止的 m_2 碰撞，落点分别为 M、N；4. 过槽口作重锤线确定垂足 O，测 OP 、 OM 、 ON 。

数据处理：验证 $m_1 \cdot OP = m_1 \cdot OM + m_2 \cdot ON$ 是否成立。

误差与注意：斜槽末端必须水平；两球球心等高（ m_2 的位置要调整）；落点用圆规画最小圆取圆心；碰撞不一定是弹性碰撞，动量守恒照样成立。

实验九用单摆测量重力加速度的大小

目的：用单摆测量当地重力加速度 g 。

原理： $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ ，得 $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$ 。

器材：铁架台、细线、小钢球、秒表、刻度尺、游标卡尺。

步骤：1. 摆长 $L =$ 摆线长 + 小球半径（游标卡尺测直径取半径）；2. 摆角小于 5° ，用秒表测 30 ~ 50 次全振动总时间 t ，周期 $T = t/n$ ；3. 改变摆长，重复 3 ~ 5 次。

数据处理：作 T^2 - L 图，斜率为 k ，则 $g = 4\pi^2/k$ （图像法比逐次代入更准）；或逐次计算取平均。

误差与注意：计时起点选在摆球通过**最低点**（平衡位置）而不是最高点，误差更小；摆角过大时等时性失效，周期偏大；摆线要用不易伸长的细线，摆球用密度大的小钢球。