

高中物理讲义

高寒

2021 年 2 月 6 日

目录

1 引言、质点和运动的描述	3
1.1 高中物理的研究对象	3
1.2 质点	3
1.3 运动的描述	4
1.4 速度和加速度	5
2 匀加速直线运动的规律	9
2.1 速度时间关系	9
2.2 位移时间关系和位移速度关系	9
2.3 追击问题	10
2.4 其他习题	11
3 静力平衡	12
3.1 矢量合成和正交分解	12
3.2 常见力的特征	12
3.3 典型习题	13
4 牛顿第二定律	15
4.1 牛顿第二定律的理解	15
4.2 整体法与隔离法	15
4.3 量纲分析	16
5 多过程的牛顿第二定律分析	18
5.1 单物体的多过程分析：斜面-平面模型	18
5.2 多物体的多过程分析：物块-木板模型	20

目录	2
6 能量和动量	22
6.1 功和势能	22
6.2 动能和动能定理	22
6.3 机械能守恒定律	23
6.4 动量定理和动量守恒	23
7 直线运动综合问题	26
8 平抛运动	29
8.1 速度合成	29
8.2 曲线运动	30
8.3 平抛运动	31
9 匀速圆周运动	34
9.1 角速度和线速度	34
9.2 向心加速度	35
9.3 离心现象	38
10 万有引力定律	39
10.1 万有引力	39
10.2 行星轨道和开普勒定律	41

1 引言、质点和运动的描述

1.1 高中物理的研究对象

目前来看，你觉得高中物理都讲了些什么？研究什么问题？未来可能继续学习什么内容？

- 如果要理一条主线，高中物理主要是讲**质点**在各种**力**的作用下如何**运动**，也就是质点牛顿第二定律的应用。
- 全国卷高考物理有 2 道大题，一般都围绕这个话题展开。一般一道题涉及电、另一题为纯力学，且喜欢考直线运动 (e.g. 木板滑块模型) \Rightarrow 高一上的知识点是整个高中物理的基础，也是高考的重点。

怎么学习？

- 多阅读教材，熟悉基本**概念**：了解概念背后的**数学工具**，熟悉定律定理对应的典型物理**现象**；
- 多想一些实际例子，建立清晰的物理图像 \Rightarrow 对题目能够很清晰地想清楚物理过程，这对高考的物理综合大题非常重要！

1.2 质点

怎么理解质点？

- 不妨把我们的问题放大一点，看看怎么理解物理中的各种模型。
- 质点可以理解成数学中的点，它的唯一属性是质量 m (未来还会引入电荷 q)。 \Rightarrow 高度抽象化和理想化。
- 如果题目没有说，质点**不会碎**；在高中阶段，所有的质点都**不会转**。
 - 不会碎：质点永远只是一个点，就像小时候玩的弹珠：只要不用太大的力，它永远都是一个坚硬的球体。(著名段子：坚不可摧的小滑块)
 - 不会转：质点不会自己转动。高中阶段不考虑转动。下面的问题具有启发性：

例 1.1 一个玻璃弹珠从倾角为 θ 的斜面下滚下，其加速度大小是多少？是 $g \sin \theta$ 吗？

解答 1.1 答案不是著名的 $g \sin \theta$ 。因为弹珠是从斜面上滚下而不是滑下，它会越滚越快从而消耗一部分重力势能，使得加速度小于 $g \sin \theta$ 。真实的答案是 $a = \frac{5}{7}g \sin \theta$ 。(怎么得到这个答案的？超纲啦，别管)

如果考虑的是小滑块，那么加速度就是 $g \sin \theta$ 。 \Rightarrow 高中物理不考虑质点的转动！

- 因此，老生常谈的例题：研究地球绕太阳转的时候，可以把地球当初质点；研究地球自转的时候就不行。

物理中的其他模型也是这样高度抽象化的，当然，考虑清楚什么时候这种抽象是合理的是一种重要的，需要慢慢培养的能力。来看另外一个抽象的例子：

例 1.2 将一个质量为 2 kg 的物块靠近一个粗糙的竖直墙面后松手，请问墙面和滑块间有没有**摩擦力**的作用？墙面和滑块间有没有**力**的作用？

解答 1.2 滑块对墙面没有正压力的作用 \Rightarrow 由 $f = \mu N$ ，不存在摩擦力作用。

但有没有**力**的作用呢？肯定是没有了。但是比较杠的同学可能会说，任何两个物体都存在万有引力，为什么不考虑呢？

两个物体间万有引力的公式为 $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ ， G 在国际单位制下大概是 6.7×10^{-11} ，两个相隔 0.1 m ，质量在 kg 量级的物体间万有引力只有 $\sim 10^{-9} \text{ N}$ 。而这里我们考虑的力都在 $mg \sim 10 \text{ N}$ 的量级，因此在这种问题里我们就当万有引力不存在了。

同样的哲学：为什么研究地球公转的时候不用考虑自转？地球半径 $R_{\oplus} \approx 6000 \text{ km}$ ；地日距离 $r \approx 2 \times 10^8 \text{ km}$ ，相比起来实在太小了！

1.3 运动的描述

我们已经同意了质点就是一个数学上的点，那么，怎么描述运动？

- 数学和物理是不可分离的整体，在学习物理时要主动借用初高中数学中学到的工具！即使高中物理老师常常回避这个问题 \Rightarrow 初中的平面直角坐标系、三角函数；高中将要学到的向量和导数都是帮助理解物理概念的重要数学工具，在将来学到这些数学时要主动跟物理联系起来。
- 数学上，点的位置用坐标系描述，点的坐标为 (x, y) 。高一上学期，我们考虑的问题更简单：质点只在 x 轴上运动 \Rightarrow 我们只需要一个坐标 x 。
- 质点的坐标 x 是时间 t 的函数，就是一个类似于抽象成 $f(x)$ 的关系式 $x(t) \Rightarrow$ 如果 $x(t)$ 的表达式已知，质点的运动也就清楚了。
- 数学里函数图像是研究函数的重要工具 \Rightarrow 我们也把 $x(t)$ 做成一个图，并且物理老师给它起了一个有点可怕的名字，叫 $x-t$ 图。

例 1.3 以 2 m/s 的速度匀速运动的质点在 $t = 3 \text{ s}$ 时位于 $x = 3 \text{ m}$ 的位置，它的位置时间关系写成公式是什么样子？画成 $x-t$ 图是什么样子呢？

解答 1.3 虽然这是一个很简单的问题，但是请在下面自己写写吧：

1.4 速度和加速度

为什么匀速直线运动的平均速度就等于瞬时速度？

- 质点在 $(t, t + \Delta t)$ 时间段里的**平均速度**定义为

$$\bar{v} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

而质点在 t 时刻的**瞬时速度**就是令 $\Delta t \rightarrow 0$ 的 \bar{v} 。

- 平均速度对一个时间段定义，而瞬时速度对一个时间点定义。
- 令 $\Delta t \rightarrow 0$ 得到瞬时速度的操作也可以对任意的数学函数 $f(x)$ 做，它在数学上叫做求导数，我们会在高一下学期的数学课上学习到这种操作和导数的具体计算，从而更好地回来理解这一块知识点。不过我们可以看一个简单的例子体验一下：

例 1.4 如果一个质点的运动规律是 $x = t^2 + 3$ ，求它在 $(2 \text{ s}, 2 \text{ s} + \Delta t)$ 时间段内的平均速度和 2 s 时的瞬时速度。

解答 1.4 按定义

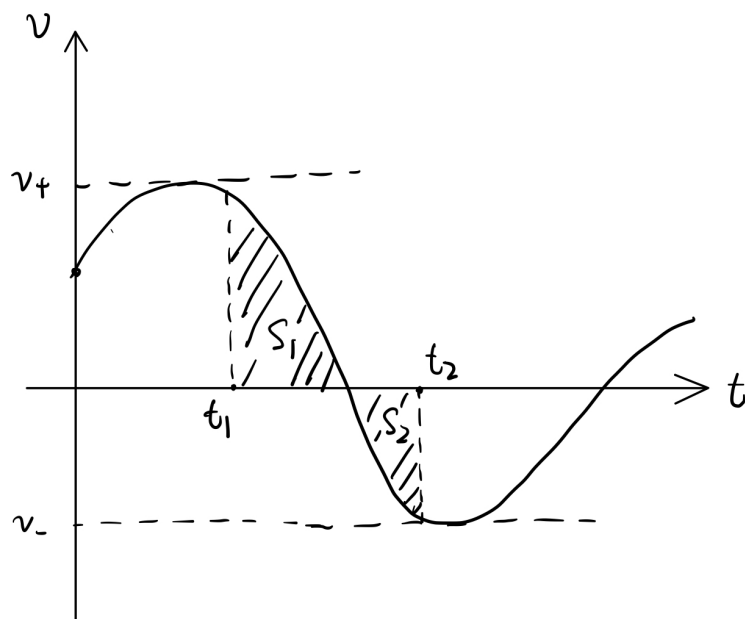
$$\bar{v} = \frac{(2 + \Delta t)^2 + 3 - (2^2 + 3)}{\Delta t} = \frac{4 + 4\Delta t + \Delta t^2 - 4}{\Delta t} = 4 + \Delta t \quad (2)$$

从而再让 Δt 趋于零得到 $t = 2 \text{ s}$ 的瞬时速度 $v = 4 \text{ m/s}$ 。

- 对应应在 $x - t$ 图上，在 t 时刻质点的瞬时速度就是 $x - t$ 曲线在那一点处的斜率（画个图在下面解释一下）。

现在你应该能回答我们开头提出的问题了！

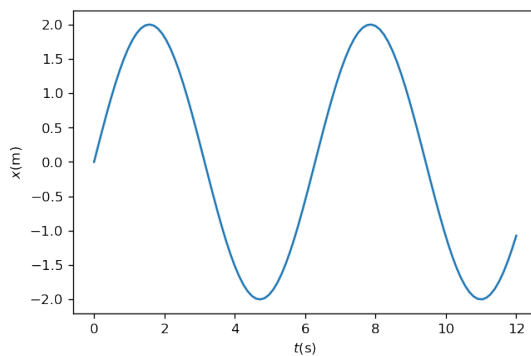
- 把上面的所有 x 改成 v ； v 改成 a 就是平均加速度和瞬时加速度的定义。
 - 速度 v 衡量位置 x 的变换快慢；而 a 就相应地衡量 v 的变换快慢。
 - 就像某时刻的速度 v 和位置 x 毫无关系一样，某时刻的 a 也和 v 毫无关系（e.g. 刚点火的火箭具有巨大的 a ，而 v 几乎为 0；在高空巡航的客机有很大的 v ，而 a 几乎为 0）。
 - 学完高一上学期应该很清楚了：为什么研究加速度？因为它出现在我们的中心定律 $F = ma$ 的右端！
 - 对 $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$ 做一次“求导数”操作得到 $v(t)$ 函数；再对 $v(t)$ 函数做一次“求导数”操作可以得到加速度 a ，从而可以自己验证这个公式的正确性。感兴趣就自己动手试试吧！
- 研究这种问题的一个更加 powerful 的工具就是 $v - t$ 图，它就是函数关系 $v(t)$ 的函数图像。
 - 中心结论： $v - t$ 曲线和 t 轴围成的面积是质点在这段时间内的位移 Δx ； $v - t$ 曲线在某点处的斜率是质点在这个时刻的速度。
 - 上面两个东西都区分正负：如果曲线在 t 轴下方，则围成面积为负，位移也为负（为什么？曲线在 t 轴下方 $\Rightarrow v < 0 \Rightarrow$ 质点朝 $-x$ 方向运动）；如果斜率为负，加速度 a 就为负（为什么？斜率为负表示速度在减小）。
 - 斜率为 0 的点，质点速度达到最大或最小值。
 - 看图 1...

图 1: 一个典型的 $v-t$ 图

— $v-t$ 曲线为倾斜直线 \Rightarrow 斜率为常数 $\Rightarrow a$ 为常数 \Rightarrow 质点做匀加速直线运动 (曲线就一定为变加速!)

下面一个题有一定难度, 不过如果你能理清这例题, 你就能理清 $v-t$ 图这一节的所有概念!

例 1.5 质点的运动规律是 $x = 2 \sin t$ (m), 如图 2, 试大概画出对应的 $v-t$ 图, 并指出质点的加速度什么时候达到最大? 质点的位置什么时候达到最大? 对于这个运动你还能说出一些什么特征?

图 2: $x = 2 \sin t$ (m) 对应的 $x-t$ 图

解答 1.5 自己动手做一做！

2 匀加速直线运动的规律

我们上一讲的末尾介绍了高中物理大杀器 $v-t$ 图。这一节我们来小试牛刀，用它来复习一下匀加速直线运动。

2.1 速度时间关系

匀加速直线运动的规律那么多条，怎么记住？

- 答案是，你只用记一条：

$$v = at + v_0 \quad (3)$$

说一说上面这个公式里每个参数的物理意义？

2.2 位移时间关系和位移速度关系

后面那么多怎么办呢？

- 先画出 $v = at + v_0$ 对应的 $v-t$ 图。利用规律“ $v-t$ 图和 t 轴围成的面积就是质点的位移”，得到

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \quad (4)$$

- 怎么用 $v-t$ 图推出速度位移关系？看图 3。

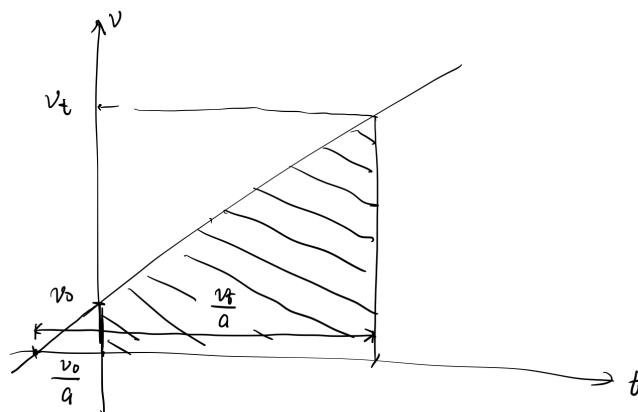


图 3: 用 $v-t$ 图得到速度位移关系

提示够多啦，请自己写出完整的推导过程。

例 2.1 解释公式 $\Delta s = at^2$ 的中各个符号的物理含义，在一个 $v-t$ 图上画出各个物理量并用 $v-t$ 图证明之。

解答 2.1 自己动手做一做！

老师好无聊，为什么非要用 $v-t$ 图这种东西研究？

可视：容易建立清晰的物理图像。在力学大题中一般涉及多个过程 $\Rightarrow v-t$ 图可以更方便地研究相对运动趋势；判断摩擦力方向等，因此最好从最基本的物理开始就熟悉运用 $v-t$ 图这种工具！

2.3 追击问题

- 追击问题的最有效解决工具就是 $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$ ，然后就可以转换成初中二次函数求最值问题无脑做了。
- 不过也要理清清楚物理图像，比如问一下自己，为什么两者速度相等时相距最大/最小？和你直接用二次函数求最值的方法一致吗？

例 2.2 静止的警车发现前方 100 m 处有一辆违法车辆以 72 km/h 的速度行驶，警车立即以 $a = 2 \text{ m/s}^2$ 的恒定加速度追赶。由于当天大雾，当两车相距 240 m 后便会失去视野而无法再跟踪车辆。请问警车能否追上违法车辆？

解答 2.2 以警车为原点建立一维坐标系 Ox ，警车的速度-时间关系写为

$$x_1 = t^2 \quad (5)$$

犯罪车辆的速度-时间关系为

$$x_2 = 20t + 100 \quad (6)$$

两者的距离差为

$$s = x_2 - x_1 = -t^2 + 20t + 100 \quad (7)$$

根据数学中的二次函数知识，当 $t = \frac{20}{2} \text{ s} = 10 \text{ s}$ 时， s 有最大值 $-10^2 + 200 + 100 = 200(\text{m})$ ，小于 240 m 。此后警车开始靠近违法车辆，故可以追上。

2.4 其他习题

- 其他习题主要涉及匀加速直线运动的复杂计算和读 $v-t$ 图。主要运用的工具还是 $v-t$ 图，它能很好地帮你看清问题。
- 灵活运用 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 和 $\Delta s = aT^2$ 有时可以很大地减小计算量。

例 2.3 坐标轴上有原点 O 和三点 ABC ，其中 $AB = s_1, BC = s_2$ 。一静止质点在 $t = 0$ 时刻开始从原点做匀加速直线运动，通过 AB 段和通过 BC 段的时间相等，求 OA 长度。

解答 2.3 画出 $v-t$ 图：

假设相等的时间是 T ，则加速度为 $a =$ ，且 B 点速度为 $v_B =$ ，最后在 $v-t$ 图上补完所有可以推得的物理量求得 $OA =$ 。

3 静力平衡

3.1 矢量合成和正交分解

什么是矢量？力和速度是矢量吗？电流是矢量吗？

- 矢量有大小和方向，还必须符合平行四边形定则（或三角形定则，更常用）。
- 数学上的向量：在坐标系中表示成一个数组 $\vec{a} = (a_x, a_y) \Rightarrow$ 物理上的 jargon：矢量的正交分解（i.e. 正交 = 两个垂直方向）。
- 常用的正交分解方案：遇到斜面沿斜面；其他问题沿竖直和水平方向。
- 合力和分力：等效替代的思想。
- 平衡条件：系统内各个质点受到的合外力在 x, y 两个方向上都为 0

$$\begin{aligned} F_{1x} + F_{2x} + \dots F_{nx} &= 0 \\ F_{1y} + F_{2y} + \dots F_{ny} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

区分方向：正交分解后，沿 x 正方向的力写正号；负方向写负号（和速度一样）。

例 3.1 若质点在 n 个力的作用下平衡，则力 F_1, \dots, F_{n-1} 的合力 F_t 和 F_n 的关系是什么？

解答 3.1 自己试一试！如果一下想不出来，先考虑 $n = 2, 3$ 的情况...

- 受力分析：整体法与隔离法。结合生活实际经验，先定性分析想清楚图像！
顺序：重力 \rightarrow 弹力 \rightarrow 摩擦力（为什么有这个顺序？）
- 整体法的物理依据是什么？

3.2 常见力的特征

杆和绳有什么区别？

- 重力：竖直向下，正比于质量（生活常识）

$$G = mg \quad (9)$$

质量和重量的区别：日常生活中不区分，物理上？ \Rightarrow 质量用 $m = F/a$ 定义；重量是在地球表面测到的 mg 值 \Rightarrow 在月球表面，因为月球的 g 大概是地球的 $1/6$ ，同样的物体重量也变成原来的 $1/6$ ，但是质量不变。

- 弹力：与形变方向相反，大小正比于形变量： $F = kx$ 。 \Rightarrow **硬**杆是什么意思？ $k \rightarrow \infty$ 使得形变可以忽略不计，提供任意的弹力。
- 摩擦力
 - 不管是静摩擦力还是滑动摩擦力，总是阻碍相对运动（趋势）：不准离开我
 - 静摩擦力：有一个最大值，一般题目不明说可以认为近似等于滑动摩擦力 $f = \mu N$ 。 \Rightarrow 如果没有沿表面的压力 N ，任何情况下也不会有静摩擦力。
 - 滑动摩擦力： $f = \mu N$ ，只取决于这两个因素！

高二开始会学习简单的电场力和磁场力，不过也万变不离其中。

3.3 典型习题

- 斜面滑块问题：

例 3.2 固定斜面上放置一个物块，认为最大静摩擦力等于滑动摩擦力，摩擦系数为 μ ，倾角为 α 。如果物块能够沿斜面滑下， μ 和 α 之间应该满足？

解答 3.2 思路：定性分析：生活经验， θ 越大， μ 越小，越容易滑下。

做法：正交分解，最大滑动摩擦力等于 _____，

- 自锁问题：

例 3.3 拖把和地面的摩擦系数为 μ ，拖把自重不计。拖把杆与地面夹角至少为多大时，无论使多大的力都无法推动拖把？

解答 3.3 思路：定性分析：生活经验， $\theta = 90^\circ$ 时，肯定没法推动； $\theta = 0^\circ$ 时，一点点力就可以推动（为什么？） $\Rightarrow \theta$ 越大，越难推动。

做法：正交分解，最大滑动摩擦力大于 _____，人施加的水平方向分力（动力）等于 _____。要推动，动力要大于 _____。从而列出等式...

如果考虑拖把自重呢？刚才的定性分析不会有太大变化,具体计算？试一试!(如何快速检查你的结果？和上题比较，取极限...

- 摩擦力叠叠乐：先整体再隔离的一般思路。

4 牛顿第二定律

4.1 牛顿第二定律的理解

- 牛顿第二定律是连接运动学和力学的桥梁

$$F = ma \quad (10)$$

- 定量地定义了惯性（惯性 = 质量）：质量是物体被外力改变运动状态的难易程度。
- 矢量等式： $\vec{F} = m\vec{a}$ ，在平面内找两个正交方向 x, y ，实际上牛顿第二定律是两个方程：

$$\begin{aligned} F_x &= ma_x \\ F_y &= ma_y \end{aligned} \quad (11)$$

- 牛顿第二定律是一个**方程**，也就是等号两边描述的是不同的对象。 \Rightarrow 绝不能把加速度和力混为一谈。 \Rightarrow 运用牛顿第二定律解题时，**坚持左边写合外力、右边写加速度的原则！**。

4.2 整体法与隔离法

- 牛顿第二定律具有**可加性**：假设有两个物体 A, B ，分别受到外力 \vec{F}_A, \vec{F}_B ，加速度为 \vec{a}_A, \vec{a}_B ，且存在相互作用力： A 对 B 为 \vec{F}_{AB} ， B 对 A 为 \vec{F}_{BA} 。 \Rightarrow 分别列出各自的牛顿第二定律

$$\begin{aligned} \vec{F}_A + \vec{F}_{BA} &= m_A \vec{a}_A \\ \vec{F}_B + \vec{F}_{AB} &= m_B \vec{a}_B \end{aligned} \quad (12)$$

\Rightarrow 两式相加，牛顿第三定律保证了 $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{BA} = 0 \Rightarrow$

$$\vec{F}_A + \vec{F}_B = m_A \vec{a}_A + m_B \vec{a}_B \quad (13)$$

- 物理诠释：将 A, B 打包成一个整体系统，系统受的总合外力等于系统内部的所有 $m\vec{a}$ 相加。 \Rightarrow **整体法**的物理依据。

例 4.1 两个用弹簧连接的物块在空中自由下落，上方物块的质量为 $m_1 = 2 \text{ kg}$ ，下方物块的质量为 $m_2 = 1 \text{ kg}$ ，某一时刻测得上方物块向下掉落的加速度为 8 m/s^2 ，求下方物块此时的加速度和弹簧的弹力。指明弹簧此时是压缩还是拉伸。

解答 4.1 先整体法：打包成整体，只受重力。 \Rightarrow 列出等式

$$(m_1 + m_2)g = m_1 a_1 + m_2 a_2 \quad (14)$$

$\Rightarrow a_2 =$ 。

再对随意一个物块单独分析：请自己完成这部分。

例 4.2 一个倾角为 θ 的粗糙斜面固定在水平面上，其上放置一个质量为 m 的物块，物块以 a 的加速度下滑，地面对斜面的支持力是多大？朝什么方向？地面对斜面的摩擦力是多大？朝什么方向？

解答 4.2 正交分解后在水平和竖直方向上分别列整体法的等式：

4.3 量纲分析

为什么初中教 $g = 9.8 \text{ N/kg}$ ，高中教 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ？

- 物理的等式不仅是数的等式，更是量的等式 \Rightarrow 带单位计算，等式左右两边必须是同类单位

例 4.3 判断以下表达式是否可能正确。

1. $s = v^2/t$

2. $v = s_1 s_2/t$

解答 4.3 第一个等式左边单位为 m ，右边为 m^2/s^3 ，非同类单位，不可能正确。
第二个

- 牛顿第二定律给出了力的单位： $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。

- 量纲分析：高中力学只有 3 个基本单位 m, s, kg ，其他单位，如牛顿 N ，焦耳 J 都可以写成这三个基本单位的乘积。 \Rightarrow 用单位来排除选择题错误答案，快速检查自己计算题结果。

例 4.4 单摆的周期（摆动一个往返的时间） T 可能和摆长 l ，重力加速度 g 以及摆的质量 m 有关，下面哪个可能是 T 的正确公式？

(A) $T = 2\pi \frac{l}{g}$ (B) $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{mg}}$ (C) $T = 2\pi \frac{mg}{l}$ (D) $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

解答 4.4 自己试试，算出各选项右边表达式对应的单位。

5 多过程的牛顿第二定律分析

应用牛顿第二定律的关键是求出各物体在各阶段的加速度，再用 $v-t$ 图分析运动。

5.1 单物体的多过程分析：斜面-平面模型

- 从斜面上滑下再停止：对每个过程分别列出牛顿第二定律后算出每个过程的加速度，用 $v-t$ 图分析。

例 5.1 如图 4, $m = 0.5 \text{ kg}$ 的质点从距斜面低端 $L = 25 \text{ m}$ 的地方滑下，斜面的倾角为 $\theta = 37^\circ$ ，质点与斜面的动摩擦因数为 $\mu_1 = 0.5$ ，与水平地面的动摩擦因数为 $\mu_2 = 0.4$ ，求质点运动的总时间。



图 4: 斜面-平面模型

解答 5.1 受力分析：在斜面上，质点受到重力 mg 、斜面对质点的支持力 N 和斜面对质点的摩擦力 $f = \mu_1 N$ ，在垂直斜面方向列出牛顿第二定律

$$mg \cos \theta - N = 0 \quad (15)$$

在平行斜面方向列出牛顿第二定律

$$mg \sin \theta - f = ma_1 \quad (16)$$

从中解得 $a_1 =$

在水平面上，在竖直和水平方向分解，质点的加速度为 $a_2 = \mu_2 g = 4 \text{ m/s}^2$ ，方向向左。

质点将在水平面上一直减速运动直到停止，画出过程的 $v-t$ 图，算出关键点的坐标

思考：给定 $m = 0.5 \text{ kg}$ 是多余条件吗？量纲分析的角度...

- 如果水平面变成传送带，如何处理？摩擦减速过程结束 = 质点静止 = 质点和水平面速度相等（都为 0） \Rightarrow 在传送带上：摩擦减速过程结束 = 质点和传送带速度相等。（生活经验：安检传送带）

例 5.2 其他条件不变，将上面例题里的地面换成以 $v_0 = 2 \text{ m/s}$ 向右运行的传送带，其他条件不变，怎么解决？

解答 5.2 牛顿第二定律求加速度的部分不会变化，唯一变化的是...

- 如果物体初速度不为零，需要分成几个过程分析？

例 5.3 例 5.1 中其他条件不变，但质点一开始有沿斜面向上的初速度 $v_0 = 5 \text{ m/s}$ 。

解答 5.3（质点向上运动和下滑过程中摩擦力一样吗？）

5.2 多物体的多过程分析：物块-木板模型

- 两物体画在同一个 $v-t$ 图上 \Rightarrow 两条线夹成的面积 = 相对位移（为什么？两个角度证实）
- $v-t$ 图判断共速时的时间和速度、共速前的位移 \Rightarrow 是否会掉下木板

例 5.4 如图 5，光滑水平面上有一个质量为 $M = 2 \text{ kg}$ 的无限长木板，另有一质量为 $m = 1 \text{ kg}$ 的木块以 $v_0 = 6 \text{ m/s}$ 的速度从左端冲上木板，它们随即开始向右运动。木板和木块之间的动摩擦因数为 0.4。求两者的最终速度和木块在木板上划过的长度。

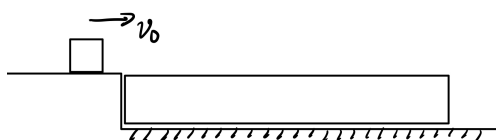


图 5: 物块-木板模型

解答 5.4 对物块应用牛顿第二定律：

对木板应用牛顿第二定律：

画出 $v-t$ 图，两线的交点表明木板和物块达到相对静止，不再相对滑动。

从图中读出此时的时间为 $t_c =$ ，速度为 $v_c =$ 。围成的面积为相对位移，为 $\Delta x =$ 。

- 如果水平面光滑，则有 $mv_0 = (m + M)v_c$ （计算验证一下） \Rightarrow 动量守恒定律的体现
- 如果有外力牵引或地面对木板有摩擦：共速后整体法分析得到加速度 a_c ，判断 a_c 和 μg 的相对大小 $\Rightarrow a_c > \mu g$ ，不能一起运动，需要用隔离法分析。

例 5.5 例 5.4 中的其他条件不变, 但

1. 光滑水平面改成 $\mu = 0.1$ 的粗糙水平面;
2. 光滑水平面改成 $\mu = 0.8$ 的粗糙水平面;
3. 水平面光滑, 但有水平向右的恒力 $F = 18 \text{ N}$ 作用在木板上。木板长度有限, 为 $L = 6.6 \text{ m}$ 。求物块在木板上运动的总时间

求两者的最终速度和木块在木板上划过的长度; 并求物块最终停在木板上的位置。

解答 5.5 (记得讨论最终能不能共同运动)

6 能量和动量

6.1 功和势能

初中的时候为什么引入功的概念？

- **功是能量转换的量度**：e.g. 电做了多少功 = 多少电能转换成了其他的能量。
- 人把重物往上提：人消耗自己干饭获得的能量增加重物的势能 \Rightarrow 生活经验：越重、举得越高，消耗能量越大 \Rightarrow 转换的能量 = 功 = Fs 。
- 力 \vec{F} ，位移 \vec{s} 都是矢量 $\Rightarrow W = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs \cos \theta$ 。 \Rightarrow 垂直于物体运动方向不做功，于运动方向相反的力做负功。
- 合力（矢量和）做功 = 各分力做功之和（代数和）
- 重物向上提，重力势能增大。同时，重力向下，位移向上，重力做负功 \Rightarrow 什么力做负功，什么力对应的能量就增大。
- 滑动摩擦力方向和位移相反 \Rightarrow 摩擦力做负功，热能（内能）增加。
- 不是所有力都有势能：高中范围内，只有重力（引力）、弹力和电场力有相应的势能。

势能的表达式是什么？

- 重力做了多少负功 = 重力势能增大了多少 \Rightarrow 取地面为参考平面（高度 $h = 0$ ）， $E_g = -(-mg) \cdot h = mgh$ 。
- 弹性势能的表达式是什么呢？力 F 随 x 变化... 和 $v-t$ 图下的面积为位移一样的思想 $\Rightarrow E_e = \frac{1}{2}kx^2$ 。（不要求，从量纲分析的角度能知道 $E \propto kx^2$ ）

6.2 动能和动能定理

- 公式 $v_2^2 - v_1^2 = 2as$ 两边同乘 $\frac{1}{2}m \Rightarrow$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fs \quad (17)$$

- 等式右边是功，暗示左边是某种能量 \Rightarrow 定义动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。
- 动能定理：合外力所做的功等于物体动能的变化量。（对任意运动都成立）

6.3 机械能守恒定律

- 只有重力做功的动能定理：物体从高度 h_1 运动到 h_2

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = (-mg)(h_2 - h_1) \quad (18)$$

\Rightarrow

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \quad (19)$$

- 物理意义：只有重力做功时，动能 + 势能等于常数
- 推广到有弹力的情况和多个物体组成的系统 \Rightarrow 定义机械能 = 动能 + 势能 \Rightarrow **只有重力和弹力做功（无摩擦力）时，物体（系统）的机械能守恒。【机械能守恒定律】**
- 再推广：能量守恒定律

为什么初中的时候告诉我们使用机械只能省力不能省功？

6.4 动量定理和动量守恒

由 $v_2^2 - v_1^2 = 2as$ 可以得到动能定理，那由另一个相似的公式 $v_2 - v_1 = a\Delta t$ 可以得到什么类似的结论？

- $v_2 - v_1 = a\Delta t$ 两边同乘质量 $m \Rightarrow mv_2 - mv_1 = F\Delta t \Rightarrow$ 定义动量 $p = mv$ ，冲量 $I = F\Delta t$
- 动量定理：

$$I = \Delta p \quad (20)$$

- 是矢量等式！
- 动量定理和动能定理都是牛顿第二定律的推论，不是独立的。

例 6.1 一个质量为 $m = 0.1 \text{ kg}$ 的小球以 $v = 100 \text{ m/s}$ 的速度垂直地砸向一个弹性墙壁，在 0.2 s 后被以原速度大小弹回，求弹性墙壁形变最大时的弹性势能和墙壁受到的平均冲力大小。

解答 6.1 形变最大时，小球不再深入墙壁，所有动能转换为弹性势能

$$E_{p,max} = \frac{1}{2}mv^2 = 500 \text{ J} \quad (21)$$

由动量定理，冲力为

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv - (-mv)}{\Delta t} = 100 \text{ N} \quad (22)$$

机械能守恒的动量类比是什么

- 两个物体 A, B 组成的系统，若系统不受外力而只存在内力：分别写出动量定理

$$\begin{aligned}\Delta \vec{p}_A &= \vec{F}_{BA} \Delta t \\ \Delta \vec{p}_B &= \vec{F}_{AB} \Delta t\end{aligned}\quad (23)$$

牛顿第三定律保证 $\vec{F}_{BA} + \vec{F}_{AB} = 0 \Rightarrow \Delta(\vec{p}_A + \vec{p}_B) = 0 \Rightarrow$ **不受合外力的系统动量不变【动量守恒定律】**

- 动量守恒和机械能守恒的适用范围区别：动量守恒无外力（可以有内部的摩擦力）；机械能守恒无摩擦力（可以有外部的重力）
- jargon: 弹性碰撞 = 碰撞前后总机械能不变

例 6.2 如图 6。一个质量为 M 的沙袋用绳悬挂在空中，一个质量为 m 的子弹以 V 的速度水平打入沙袋后和沙袋一起运动，求沙袋上升的最大高度。有多少能量转化成了热能？

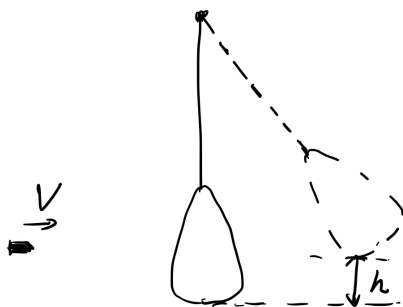


图 6: 子弹和沙袋

解答 6.2 子弹和沙袋组成的系统在子弹打入的瞬间不受合外力作用，满足动量守恒

$$mV = (m + M)v \quad (24)$$

其中 v 是子弹打入后瞬间沙袋的速度。此后两者相对静止，无摩擦耗散，由机械能守恒由

$$\frac{1}{2}(m + M)v^2 = (m + M)gh \quad (25)$$

联立两式容易解得

$$h = \frac{(mV)^2}{2(m + M)^2 g} \approx \left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad (26)$$

- 这一题目的实际应用？测量 $h \Rightarrow$ 测量子弹速度！

7 直线运动综合问题

- 原则上来说，需要用机械能解决的直线运动问题也可以全部用牛顿第二定律解决 \Rightarrow 求加速度和 $v-t$ 图是永远的重点和工具。
- 2017 年高考后引入了动量作为必考点 \Rightarrow 有一些涉及碰撞的问题需要用动量守恒解决，并且速度可能突变（如果没有碰撞，速度不可能突变）。

例 7.1 (2015 全国卷 2) 下暴雨时，有时会发生山体滑坡或泥石流等地质灾害。某地有一倾角 $\theta = 37^\circ$ 的山坡 C ，上面有一质量为 m 的石板 B ，其上下表面于斜坡平行； B 上有一碎石堆 A （含有大量泥土）， A 和 B 均处于静止状态，如图 7 所示。假设某次暴雨中， A 浸湿雨水后总质量也为 m （可视为质量不变的滑块），在极短时间内， A, B 间的动摩擦因数 μ_1 减小为 $\frac{3}{8}$ ， B, C 间的动摩擦因数 μ_2 减小为 0.5， A, B 开始运动，此时刻为计时起点；在第 2 s 末， B 的上表面突然变为光滑， μ_2 保持不变。已知 A 开始运动时， A 离 B 下边缘的距离 $l = 27$ m， C 足够长，设最大静摩擦力等于滑动摩擦力。取 $g = 10$ m/s²， $\sin \theta = 0.6$ ，求

1. $0-2$ s 时间内 A 和 B 的加速度大小。
2. A 在 B 上总的运动时间。

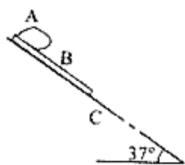


图 7: 例 7.1 题图

解答 7.1

例 7.2 (2017 全国卷 3) 如图 8, 两个滑块 A 和 B 的质量分别为 $m_A = 1\text{ kg}$ 和 $m_B = 5\text{ kg}$, 放在静止于水平地面上的木板的两端, 两者与木板间的动摩擦因数为 $\mu_1 = 0.5$; 木板的质量为 $m = 4\text{ kg}$, 与地面间的动摩擦因数为 $\mu_2 = 0.1$ 。某时刻 A, B 两滑块开始相对滑动, 初速度大小均为 $v_0 = 3\text{ m/s}$ 。 A, B 相遇时, A 与木板恰好相对静止。设最大静摩擦力等于滑动摩擦力, 取重力加速度大小 $g = 10\text{ m/s}^2$, 求

1. B 与木板相对静止时, 木板的速度;
2. A, B 开始运动时, 两者之间的距离

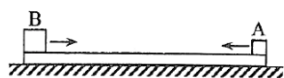


图 8: 例 7.2 题图

解答 7.2

- 关于弹性碰撞的简单结论:
 - 弹性撞墙: 速度反向 (类比光的反射);
 - 两个质量相等的物体弹性碰撞: 交换速度。
- 其他情形: 联立能量守恒 (碰撞前后动能相等) 和动量守恒求解。

例 7.3 (2019 全国卷 3) 静止在水平地面上的两小物块 A, B , 质量分别为 $m_A = 1.0 \text{ kg}$, $m_B = 4.0 \text{ kg}$; 两者之间有一被压缩的微型弹簧, A 与其右侧的竖直墙壁距离 $l = 1.0 \text{ m}$, 如图所示。某时刻, 将压缩的微型弹簧释放, 使 A, B 瞬间分离, 两物块获得的动能之和为 $E_k = 10.0 \text{ J}$ 。释放后, A 沿着与墙壁垂直的方向向右运动。 A, B 与地面之间的动摩擦因数均为 $\mu = 0.20$ 。重力加速度取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。 A, B 运动过程中所涉及的碰撞均为弹性碰撞且碰撞时间极短。

1. 求弹簧释放后瞬间 A, B 速度的大小
2. 物块 A, B 中的哪一个先停止? 该物块刚停止时 A 与 B 之间的距离是多少?
3. A, B 都停止后, A 与 B 之间的距离是多少?

解答 7.3

8 平抛运动

8.1 速度合成

如何描述平面内的运动？

- 速度是矢量 \Rightarrow 加法遵循平行四边形定则。
- 小船过河问题：速度合成，船在静水中的速度 \vec{v}_b ，河水速度 $\vec{v}_r \Rightarrow$ 实际速度 $\vec{v} = \vec{v}_b + \vec{v}_r$ 。如图 9。

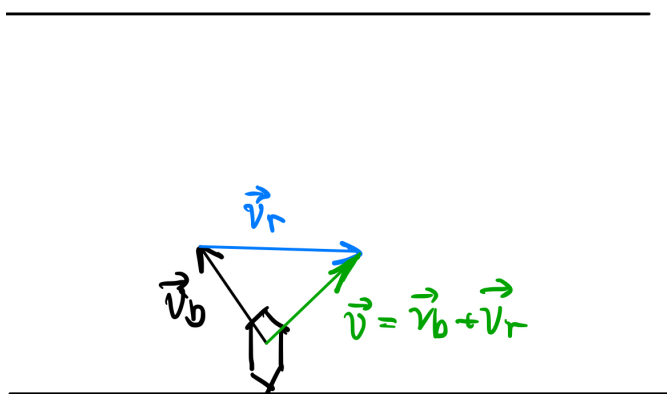


图 9: 小船过河的速度合成

- 以最短时间和最短路程过河。

例 8.1 河两岸之间的距离为 h ，船速大小为 v_b ，方向可以自由调节；水速为 v_r 平行与河岸，求小船过河的最短时间和最短路程。

解答 8.1 最短路程需要分类讨论：看合速度 \vec{v} 可能落在平面上的什么范围内。

8.2 曲线运动

轨迹为曲线时，如何描述质点在某一点的速度方向？

- 按定义

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t} \quad (27)$$

其中 $\vec{r}(t)$ 是质点在 t 时刻的位置，如图 10。

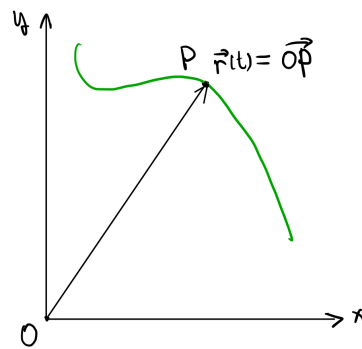


图 10: 质点的位置可以用一个矢量 $\vec{r} = (x, y)$ 描述， x, y 都是 t 的函数

- Δt 越小，越接近切线 \Rightarrow 瞬时速度沿曲线切线方向，如图 11。

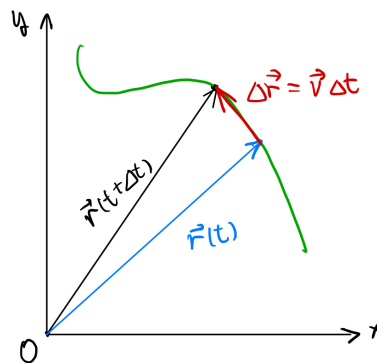


图 11: 速度方向是曲线某点的切线方向

- 数轴图像 \Rightarrow 坐标系图像

- 初中知识：力是改变速度的原因， \vec{F}, \vec{v} 不共线则做曲线运动 \Rightarrow 曲线运动需要力来维持，存在加速度；曲线运动速度方向在不断改变 \Rightarrow 曲线运动无论如何都是变速运动

8.3 平抛运动

为什么二次函数的图像被称为抛物线？

- 如图 12，将质点从 h 的高度以 v_0 的初速度水平抛出
 - 竖直方向受重力 \Rightarrow 自由落体运动 $\Rightarrow y = -\frac{1}{2}gt^2 + h$;
 - 水平方向不受力 \Rightarrow 匀速直线运动 $\Rightarrow x = v_0t$ 。

- 两式消去 t :

$$y = -\frac{g}{2v_0^2}x^2 + h \quad (28)$$

轨迹为一个二次函数。

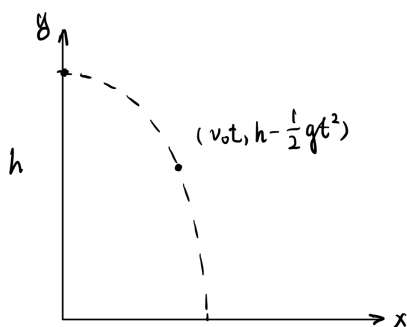


图 12: 平抛运动的轨迹

- 数学上

$$\begin{cases} x = v_0t, \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + h \end{cases} \quad (29)$$

称为参数方程。物理意义：描述质点在 t 时刻的位置。

- 用 $y = -\frac{1}{2}gt^2 + h$ 还是 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 取决于具体问题中所建立的 y 轴方向。
- 在 t 时刻的**速度**为 $v_x = v_0, v_y = gt$ ，**速率**为 $\sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$ 。

例 8.2 轰炸机在高度为 h 的高空以 v 匀速飞行，欲摧毁一个地面目标，不计空气阻力，请问轰炸机需要在到达目标正上空前提前多少时间投弹？

解答 8.2 定性分析：由于惯性需要提前投弹，高度越高提前时间越长 \Rightarrow 假设需要提前时间为 t ，满足方程

例 8.3 如图 13，从倾角为 α 的足够长斜面顶端以 v 的速度平抛一个质点，求其在斜面上的落点到斜面顶端的距离。

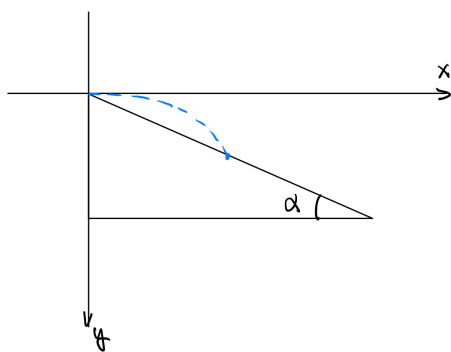


图 13: 斜面平抛模型

解答 8.3 方法 1: 在顶端建立平面直角坐标系 xOy , 联立轨迹方程和直线方程...

方法 2: 利用质点在 t 时刻的位置满足 $\frac{y}{x} = \tan \alpha$, 有方程...

如果斜面长度是有限的, 怎么分类讨论?

9 匀速圆周运动

9.1 角速度和线速度

怎么严格定义匀速圆周运动？

- 轨迹沿圆周（圆周），速率始终不变（匀速）。
- **线速度**为不变的速率：

$$v = \frac{\text{在 } \Delta t \text{ 时间内走过的弧长}}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (30)$$

- **角速度**为单位时间内走过的圆心角弧度数：

$$\omega = \frac{\text{在 } \Delta t \text{ 时间内转过的弧度数}}{\Delta t} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (31)$$

- ω 的单位 弧度/s = rad/s = s⁻¹。
- 曲线运动速度方向沿曲线切线方向 \Rightarrow 匀速圆周运动速度方向沿该点切线方向。
- 弧度的定义 $\Delta \theta = \frac{\Delta s}{r} \Rightarrow$

$$v = \omega r \quad (32)$$

- 一图总结：图 14。

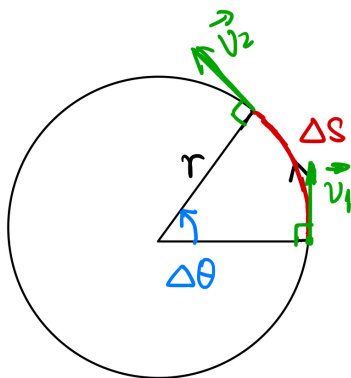


图 14: 匀速圆周运动的速度和角速度

- 匀速圆周运动的周期 = 转一周所花费的时间。一周 = $2\pi \Rightarrow$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (33)$$

如果角的单位用度 ($^\circ$) 而非弧度, $v = \omega r$ 还成立吗?

例 9.1 如图 15, 两个齿轮的半径分别为 r_1 和 r_2 。当左边齿轮以 n_1 圈/s 的转速转动时, 右边齿轮的转速是多少?

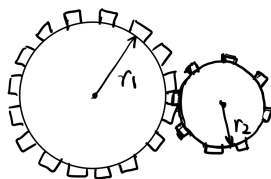


图 15: 两个贴合的齿轮

解答 9.1 分析: 两个齿轮如此贴合, 连接处的线速度必须相等。

思考: 汽车离合器的原理是什么?

9.2 向心加速度

匀速圆周运动是变速运动, 其加速度是多大?

- 量纲分析的角度: a 的单位为 m/s^2 , a 可能取决于 ω 和 $r \Rightarrow a \propto \omega^2 r = \frac{v^2}{r}$
- 运动学严格分析: 几何学角度, 相似三角形给出 $\frac{\Delta s}{r} \approx \frac{\Delta l}{r} = \frac{\Delta v}{v} \Rightarrow \Delta v = \frac{v^2}{r} \Delta t \Rightarrow$

$$a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \quad (34)$$

方向指向圆心。

- 推导过程中没有用到牛顿定律 \Rightarrow 向心加速度是 $F = ma$ 的右边而非左边, $m \frac{v^2}{r}$ 不是力。
- 向心加速度公式对非匀速圆周运动也适用, v 是在某点的瞬时线速度 (速率)。此时的向心加速度也称法向加速度 a_n (方向指向法线方向)。

例 9.2 水平面内一个质点被长度为 l 的绳子牵引围绕原点 O 做匀速圆周运动, 质点的动能为 E_k , 求绳子对小球的拉力为多少。

解答 9.2 小球做匀速圆周运动对应的向心加速度为 $a_n = \frac{v^2}{r}$ 。由牛顿第二定律

$$F = ma_n = \frac{mv^2}{l} \quad (35)$$

由根据动能的定义 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, 有

$$F = \frac{2E_k}{l} \quad (36)$$

例 9.3 如图 16, 光滑水平面上有一个小孔和一个质量为 m 的做匀速圆周运动的质点, 其圆周运动的半径为 r 。一绳连接该质点穿过小孔, 连接一个质量为 M 的重物。重物在竖直方向上静止, 求质点的角速度。

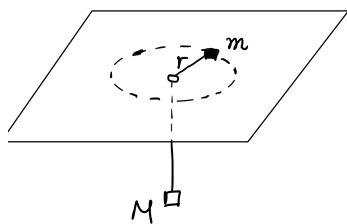


图 16: 平面穿绳模型

解答 9.3 分析: 经验定性判断, 如果质点角速度为 0, 肯定会被重物拉掉下平面; 如果质点运动太快, 重物肯定会被拉飞 \Rightarrow 存在一个合适的速度保持平衡, 应该是绳上拉力刚好提供向心加速度的时候 (和上面例题一样)。

设绳上的张力为 T , 对重物运用牛顿第二定律, 有

例 9.4 如图 17, 半圆形轨道的半径为 R , 一个质量为 m 的质点以 v_0 的速度冲上轨道。

1. 如果质点不从最高点落下, v_0 至少为多大?

2. 如果质点在最高点对轨道的压力为 N ，其离开轨道后在水平面上的落点距离轨道下端多远？

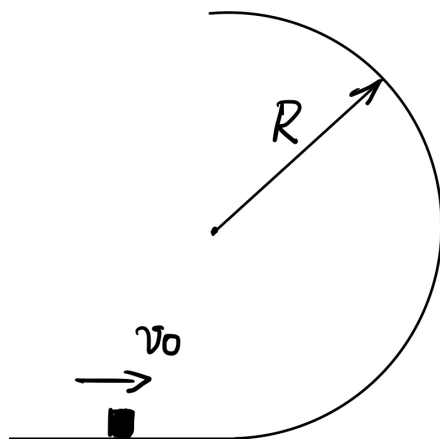


图 17: 半圆轨道模型

解答 9.4 定性分析：如果速度较小，肯定会从最高点落下 \Rightarrow 有一个合适的速度使得质点不会落下，在最高点的速度应该刚好满足重力提供向心加速度。

从轨道最低点到最高点，设在最高点的速度为 v ，由机械能守恒定律（或动能定理）：

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + mg(2R) \quad (37)$$

在最高点，由牛顿第二定律：

9.3 离心现象

洗衣机甩干衣服的原理是什么？

- 匀速圆周运动需要时刻指向圆心的外力维持 \Rightarrow 当外力突然不足（小于 $\frac{mv^2}{r}$ ），物体远离圆心运动 \Rightarrow 离心现象。
- 反过来，如果指向圆心的外力突然增大 \Rightarrow 靠近圆心运动。
- 典型例子：洗衣机、印度飞饼...

思考：一个自转的圆盘需要力维持旋转吗？什么力承担了这个角色？

10 万有引力定律

10.1 万有引力

为什么万有引力普遍存在于物体间，却被人类忽视了几千年？

- **据说**牛顿被苹果砸了一下，然后就想出了万有引力定律，如图 18。

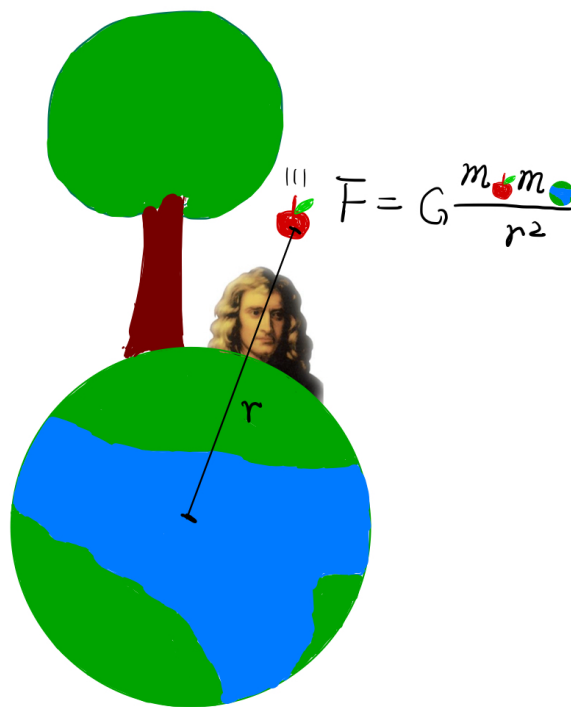


图 18: 高空抛物的危害性

- 既然地球和苹果之间有，那任何两个物体之间都应该有 \Rightarrow 物理定律有普适性，不偏爱任何一个特殊物体。
- 质量分别为 m_1 和 m_2 的物体（质点），间距 r 为质心的间距，万有引力方向指向对方，大小为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (38)$$

其中 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ （化成基本单位是什么?）。

- 为什么叫 G ? \Rightarrow 引力 = Gravitation

- 为什么是 $m_1 m_2$? \Rightarrow 牛顿第三定律的要求。
- 为什么正比于 $\frac{1}{r^2}$? \Rightarrow 类比于一个灯泡在 r 距离的亮度 (单位面积上的功率), 如图 19。 \Rightarrow 事实上因为我们生活在 3 维空间, 所以电场力也是 $\frac{1}{r^2}$ 的。

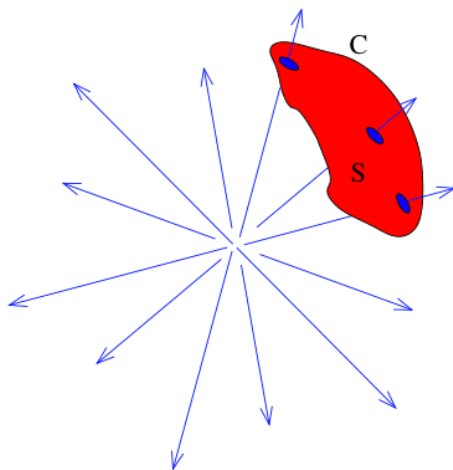


图 19: 为什么是平方反比

例 10.1 根据万有引力定律, 重力加速度 g 可以怎样用地球质量 M 和地球半径 R , 以及万有引力常数表示? 怎么用地球密度 ρ 和 R 已经 G 表示? 在距地球表面高度 h 的山上, 重力加速度 $g(h)$ 和地面重力加速度 $g(h=0) = g$ 的关系是什么?

解答 10.1 在地球表面, 质点受到的重力就是地球对质点的万有引力。于是

10.2 行星轨道和开普勒定律

地理知识：太阳系内行星的轨道有什么特点？

- 行星轨道具有近圆性，近似认为它们就是半径为 r 的圆，行星在轨道上做匀速圆周运动，角速度为 ω 。太阳质量记为 M_{\odot} 。⇒ 牛顿第二定律，万有引力提供向心力

$$\frac{GM_{\odot}m}{r^2} = m\omega^2 r \quad (39)$$

- 天文上更常用的是周期 T （大家都知道地球绕太阳转的周期是 1 年，但是很少说角速度是多少）， $\omega = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow$

$$\frac{GM_{\odot}m}{r^2} = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r \quad (40)$$

⇒

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM_{\odot}}{4\pi^2} \quad (41)$$

右边对太阳系的所有行星都是一个常数。（开普勒第三定律）

- 历史上，开普勒 **先从天文观测数据** 总结出 (41)，此外还有开普勒第一和第二定律：
 - （第一定律）行星的轨道都是一个椭圆，太阳在椭圆的一个焦点上。
 - （第二定律）行星与太阳的连线在相同时间扫过相同的面积。
 - （第三定律）行星椭圆轨道半长轴 a 的三次方和周期 T 的平方成正比。
- 初学第一次不用理解椭圆、焦点这些概念，这也不是考试重点。圆是椭圆的退化情况，此时椭圆的焦点退化为圆心；半长轴退化为半径。
- 太阳质量 $M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，如何从天文观测数据上得到？怎么得到地球的质量？

例 10.2 地球和太阳的平均距离 r_{\oplus} 常记做一个天文单位 $r_{\oplus} = 1 \text{ AU}$ 。若某一个太阳系行星到太阳的距离是 $a \text{ AU}$ ，其周期是多少年？

解答 10.2 根据开普勒第三定律，有

例 10.3 绕地球以半径为 r 的圆轨道运行的卫星的速度为多大？卫星越贴近地球表面，卫星的速度是增大还是减小？卫星的最大可能速度称为第一宇宙速度 v_1 ，求第一宇宙速度的表达式，分别用 G, M, R 和 g, R 表示。

解答 10.3 由牛顿第二定律，万有引力提供向心加速度，有