

确定研究对象 受力分析 运动分析 列出方程

四步破解高中物理动力学问题

北京市第一六五中学教师 邢乐

动力学通常是高三物理复习的起始内容,其中既包括力学,也包括运动学,核心是力与运动的关系。这部分所涉及到的知识、思想、方法,在电磁学、原子物理学等领域内依然起着重要的作用。因此,同学们有必要重视这一阶段的复习,为后期打好基础。然而,动力学所涉及的内容多且复杂,既有三力平衡、正交分解等力学方法,又有匀变速直线运动、平抛运动、圆周运动、简谐运动等运动模型,还有合外力与加速度、功和能、动量与冲量等重要物理量之间的联系与规律。当面对比较复杂的动力学问题时,有的同学常常会感到“没思路”。那么,思路从何而来呢?实际上,流畅的解题思路并不是在考场上突然想到的,而是在日常的学习中逐渐积累、固化下来的。本文就结合确定研究对象、受力分析、运动分析、列出方程四个常见解题步骤,帮助大家形成对动力学的整体认知,为同学们寻求解题思路、提升解题能力提供一些参考。

明确研究对象

确定研究对象是解决物理问题的前提。2022年北京物理学业水平等级性考试第12题,以我国首座国际标准跳台滑雪场地“雪如意”为背景,B选项提出:起跳阶段,运动员猛蹬滑道主要是为了增加向上的速度。这个选项初看不易找到清晰的思路,而在明确了运动员为研究对象之后,就会发现不应该关注“运动员猛蹬滑道”的力,而应该将运动员作为受力分析的对象,关注“滑道给运动员的反作用力”。从题目配图(图1)中看,起跳区的滑道水平,因此滑道给运动员的作用力竖直向上,其中大于重力的部分能够产生向上的加速度,增加运动员向上的速度,因此B选项为正确选项。这个选项的精妙之处在于“运动员猛蹬滑道”这一条件将受力对象指向了滑道,如果考生没有明确研究对象,则找不到力和运动之间的关系。



图1

一部分同学认为只有存在多个运动物体或者使用整体隔离法的时候,确定研究对象才是重要的。但这道题告诉我们,确定研究对象并不仅是“先分析谁”“后分析谁”的问题,也不仅是“该整体”还是“该隔离”的问题。对于动力学问题,还要注意受力分析的对象和运动的对象是否为同一个物体。很多同学在解决动力学问题的时候思路混乱,是因为要研究A物体的运动,却考虑了B物体的受力,导致研究对象不明确。

运动分析

在运动分析环节,同学们首先要区分两个重要的概念,即“状态”和“过程”。状态是对物体在某一位置或者某一时刻运动的描述,而过程则是对物体在一段位移或一段时间内运动的描述。物理量中有状态量(如速度、加速度、动能、动量等)和过程量(如位移、时间、功、冲量等),物理方程中也有状态方程(如牛顿第二定律 $F_{\text{合}}=ma$)和过程方程(如动能定理 $W_{\text{合}}=E_{k2}-E_{k1}$ 、动量定理 $I_{\text{合}}=p_2-p_1$)。因此,每确定一个运动过程或一个运动状态,都可以列出至少一个对应的方程,确定的运动过程和状态越多,能够列出的方程数量就越多,所能够求解的未知量也就越多。这是在较为复杂的动力学问题中,运动分析的一项重要作用。

此外,在不同的运动情景中,运动分析也应有不同的侧重。比如:使用牛顿第二定律解题时,要分析初速度、末速度、位移、时间等物理量,并写出加速度的表达式;在分析圆周运动时,侧重点同样是加速度的表达式,但需要分析的是线速度、角速度、周期和半径;运用动能定理解题时,重点是

分析物体的初、末速度,并求出初、末动能;使用动量定理时则需要写出初、末动量。

例如2021年北京物理学业水平等级性考试第20题,考查了同学们对运动的分析能力,题目如下:

秋千由踏板和绳构成,人在秋千上的摆动过程可以简化为单摆的摆动,等效“摆球”的质量为 m ,人蹲在踏板上时摆长为 l_1 ,人站立时摆长为 l_2 。不计空气阻力,重力加速度大小为 g 。

(1)如果摆长为 l_1 ，“摆球”通过最低点时的速度为 v ,求此时“摆球”受到拉力 T 的大小。

(2)在没有别人帮助的情况下,人可以通过在低处站起、在高处蹲下的方式使“摆球”摆得越来越高。

a.人蹲在踏板上从最大摆角 θ_1 开始运动,到最低点时突然站起,此后保持站立姿势摆到另一边的最大摆角为 θ_2 。假定人在最低点站起前后“摆球”摆动速度大小不变,通过计算证明 $\theta_2 > \theta_1$ 。

b.实际上人在最低点快速站起后“摆球”摆动速度的大小会增大。随着摆动越来越高,达到某个最大摆角 θ 后,如果再次经过最低点时,通过一次站起并保持站立姿势就能实现在竖直平面内做完整的圆周运动,求在最低点“摆球”增加的动能 ΔE_k 应满足的条件。

首先本题中存在多个运动状态和运动过程,第(1)问针对“最低点时”,是一个运动状态,因此应列出此时的状态方程(牛顿第二定律): $T - mg = m \frac{v^2}{l_1}$,即可解出拉力 T 。第(2)问涉及到两个运动过程,因此应分别列出这两个运动的过程方程(动能定理):从最大摆角 θ_1 到最低点的过程为 $mgl_1(1 - \cos \theta_1) = \frac{1}{2}mv_1^2$,从最低点到另一边最大摆角 θ_2 的过程为 $mgl_2(1 - \cos \theta_2) = \frac{1}{2}mv_2^2$;而对于“在低处站起,在高处蹲下”这一条件,由于涉及到的是圆周运动,因此我们应从速度和半径两个角度分析,根据题目已知“站起”的前后速度没有发生变化,但圆运动的半径变小,即 $v_1 = v_2, l_1 > l_2$,于是两方程联立即可证明 $\theta_2 > \theta_1$ 。

受力分析

在受力分析环节,同学们不仅要明确研究对象受到了哪些力、这些力的大小和方向,还应该根据实际需要,求出合力、合力做功或者合力的冲量。这是因为动力学问题关注的是力和运动的关系,而决定物体运动情况的是物体的合力,我们不能割裂地看待物体所受的某一个或几个力,必须要分析各个力之间的联系,进行整合。根据不同的情景和需求,受力分析的侧重点也是不同的。如研究匀变速直线运动时,我们侧重分析沿运动方向的合力;而研究圆周运动时,则应该侧重分析沿半径方向的合力;使用动能定理时,要侧重物体各个力做功的代数和。

例如,2021年北京物理学业水平等级性考试的第10题的A选项,涉及到圆周运动的受力分析,题目如下:

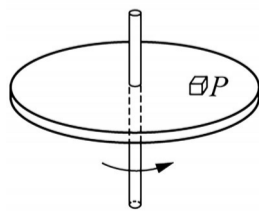


图2

如图2所示,圆盘在水平面内以角速度 ω 绕中心轴匀速转动,圆盘上距轴 r 处的 P 点有一质量为 m 的小物体随圆盘一起转动。某时刻圆盘突然停止转动,小物体由 P 点滑至圆盘上的某点停止。下列说法正确的是

A.圆盘停止转动前,小物体所受摩擦力的方向沿运动轨迹切线方向

B.圆盘停止转动前,小物体运动一圈所受摩擦力的冲量大小为 $2m\omega r$

C.圆盘停止转动后,小物体沿圆盘半径方向运动

D.圆盘停止转动后,小物体整个滑动过程所受摩擦力的冲量大小为 $m\omega r$

受到某些“生活经验”误区的影响,一部分同学习惯认为摩擦力的方向与速度方向相反,因此有误选A选项的可能。但是,根据匀速圆周运动的特点,同学们应该知道:小物体所受合力提供向心力,方向应指向圆心。小物体共受到三个力的作用,分别是重力、支持力和摩擦力。重力和支持力均与圆平面垂直,沿圆轨道半径方向上没有分力,因此向心力只可能由摩擦力提供,方向应与运动轨迹的切线方向垂直,故A选项不正确。通过这个例子我们还可以看出,受力分析与运动分析往往需要相互配合进行:本题需要明确小物体做匀速圆周运动这一前提,才能够得到正确的受力分析结果。

本题中,B、D两个选项涉及到冲量,因此应该使用动量定理方程。B选项对应的运动过程为“匀速转动一周”,因此摩擦力的冲量 $I_{\text{合}} = mv - mv, I_{\text{合}} = 0$;D选项对应的运动过程为“圆盘停止转动到小物块最终停下”,因此 $I_{\text{合}} = 0 - mv$,由于 $v = \omega r$,因此 $I_{\text{合}} = m\omega r$,而由于重力和支持力的冲量等大反向,因此合力的冲量与摩擦力的冲量大小相等,D选项是正确的。

列出方程

对于每一个运动状态或过程,都可以列出一个运动学方程。对于单个物体的运动而言,常见的动力学方程只有三个——牛顿第二定律、动能定理、动量定理。我们可以把这三个方程理解为三种不同角度对“力和运动关系”的描述:牛顿第二定律描述力对物体运动的瞬时影响,即产生加速度;动能定理描述合力做功对物体动能的影响;动量定理描述合力冲量对物体动量的影响。因此,这三个方程的等号左侧,都是受力分析的结果(合外力、合力做功、合力的冲量),等号右侧都是运动分析的结果(加速度、动能变化量、动量变化量)。不难发现,只要做好确定研究对象、运动分析和受力分析三个环节,方程便可以“水到渠成”。

通过以上分析,我们从四个环节对研究动力学问题的方法进行了简要梳理,核心可以表述为“对象、运动、受力、方程”八个字。大部分单个物体的动力学问题,都可以在这个框架下提炼出一套对应的解题步骤,下表仅以四种情况举例说明。

步骤	匀变速 直线运动	圆周运动	动能定理	动量定理
确定对象	确定研究对象	确定研究对象	确定研究对象	确定研究对象
运动分析	根据初速度、加速度、位移、时间,结合运动学公式,分析加速度 a 。	根据圆周运动的速度、半径,结合向心加速度公式,分析向心加速度 a_n 。	确定初、末动能,分析动能变化量: $\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1}$	确定初、末动量,分析动量变化量: $\Delta P = P_2 - P_1$
受力分析	合外力 $F_{\text{合}}$	向心力 F_n	合力做功 $W_{\text{合}}$	合力冲量 $I_{\text{合}}$
列出方程	$F_{\text{合}} = ma$	$F_n = ma_n$	$W_{\text{合}} = E_{k2} - E_{k1}$	$I_{\text{合}} = P_2 - P_1$

如果同学们在解决动力学问题时感到“没思路”,不妨从以上四个步骤进行尝试,看看自己是在哪个环节出现了问题。当然,并非所有的问题都可以套用这些步骤,比如对于多个物体组成的系统,解题的思路和侧重点就会有所不同。但不论是什么样的题目,都能够在练习和思考中找到规律、技巧和方法。希望同学们通过努力,找到适合自己的思路和方法,实现物理解题能力的提升。