

分析几个动力学问题

施 纯

上海教育出版社

分析几个动力学问题

(修 订 版)

施 纯

上海教育出版社

目 录

写在前面.....	1
一 怎样才算动?	2
二 物体运动的原因是什么?	3
三 怎样使用隔离法分析问题?	6
四 内力和外力.....	10
五 重量 5 牛顿和力 5 牛顿一样吗?	13
六 绳子的张力怎样计算?	15
七 在什么情况下才有相对运动?	18
八 人往上跳,地球是否同时往下沉?.....	20
九 杂技演员的气功.....	22
十 怎样称体重?	24
十一 马拉车,还是车拉马?.....	27
十二 拔河比赛的胜负靠什么?	34
十三 卡车上的箱子.....	37
十四 “飞檐走壁”.....	42
十五 怎样转弯?	44
十六 “神仙葫芦”.....	50
十七 几个有趣的滑轮问题.....	52
十八 可以单独运用“分矢量”吗?	58
十九 电梯里的学问.....	61
二十 奇妙的“惯性力”.....	71

写在前面

牛顿运动三定律是物体做机械运动时所遵循的最基本的规律。从表述这三个定律的文字和表示第二、第三定律的公式来看,它们是简单易懂的,但是,它们的含义却很深刻,应用也非常广泛。在日常生活中,很多力学的现象和问题都可以用这三个定律来解释,在工程技术上更是经常要用到它们。这三个定律之间的关系非常密切,而且在解决实际问题的時候,三个定律往往同时要用到。

高一学生在学习牛顿运动三定律的时候,总觉得老师讲得很有道理,听了似乎也懂。但是,当自己着手分析问题的时候,就往往不能灵活运用这三个定律,有时感到无从着手。甚至对学习物理产生畏难情绪。为此,我们选取了同学们在学习力学中常常不大搞得清楚的一些问题,作了比较详细的分析讨论,帮助同学们消除对这些问题本身存在的疑问,并且通过这些问题的分析,使同学们更加深入地理解牛顿三定律,从而能运用这三个定律来分析实际问题,提高学习物理的兴趣。

1965年10月本书出版第一版,这次再版保留了原书的特点,且增添了近一半新的有趣的生活实例,单位全部采用国际单位制。

限于水平,内容难免有错误和不妥之处,恳请读者提出宝贵的意见和批评。

编者

1983年1月

一 怎样才算动？

怎样才算动？怎样才算不动？

也许你认为这个问题简单到可笑的程度。小孩子都知道什么东西在动；什么东西不动。天上飞的飞机，路上行驶着的汽车，街上的行人都在动。我们住的房子，房子里的桌子、椅子、床等等，都不动。

这样的回答，一般地讲，当然是可以的，但从物理学的观点来说，并不确切。

为什么不确切呢？原来运动和静止（不动）都是相对的，要确定一个物体动还是静，必须先假定某个物体不动，然后将要判断的物体与它比较，如果它们之间的位置在变化，那么这个物体在动；如果它们之间的位置不在变化，则这个物体是静止的。由此可见，要判断一个物体是动还是不动，都是相对于一个事先假定为不动的物体来说的。这个被假定为不动的物体叫参照物或者叫参照系。离开了参照物来谈某个物体动与不动是毫无意义的。

为什么平时我们听到：飞的飞机、行驶的汽车在动，桌子、椅子不动，并不觉得有什么不妥当呢？

因为我们生活在地球上总是习惯于把地球作为参照物。拿物体跟地面是否有位置的变化，来判断它是否在动。因此，我们说飞的飞机、行驶的汽车在动，桌子、椅子不动。

这样说来，习惯上既然把地球作为参照物，那么在回答某个物体动与不动的问题时，可以不必说明以地球作为参照物，

这样不是可以简单些吗？

不一定行，有时我们还用自己作为参照物来判断物体动与不动的。这跟用地球作参照物来对某一物体的动与不动作出的判断可能是不同的。

如果我和你并排地走着，我说你的耳朵在动，你一定以为我在和你开玩笑。其实我说的是真话。我是以地球为参照物的。你在走，耳朵和你在一起，当然在动。而你是以自己的眼睛、鼻子等作为参照物，你的耳朵相对于你的眼睛、鼻子等来说，当然是静止的。

所以在判断物体是否作相对运动，或者相对静止的时候，应该说明以什么为参照物。不然，只说动或者静是毫无意义的。

二 物体运动的原因是什么？

物体为什么会动呢？

从日常生活经验中知道，一个静止的物体，要它运动，必须要用力推它。一个运动的物体，如果没有力作用，它就会静止。这样看来，物体维持运动的原因也是由于受到力的作用。十七世纪以前，人们就是凭这种直觉推理的方法得出有关运动原因的虚假观念的。

直到十七世纪初，意大利科学家伽利略否定了力学上这个错误的结论。

那么，物体究竟怎样会动的呢？

英国科学家牛顿，在伽利略和其他前人研究的基础上，总结出运动三定律。其中第一定律就是惯性定律，他说：“一切物体在没有受到外力作用的时候，总保持匀速直线运动状态

或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。”物体保持静止状态或匀速直线运动状态的性质叫做物体的惯性。

可见，物体如果不受外力的作用，由于惯性，它原来是静止的还是静止；它原来是运动的还是作匀速直线运动。

可是在地球上的任何物体，不可能不受到外力的作用。它们都要受到地球引力的作用，也会受到空气阻力、摩擦力等等的作用，所以惯性定律是无法用实验来证明的，只能用推理方法来得出。如果让石子在泥地上滑动，它很快就停下来，这是由于摩擦力阻碍石子运动的结果；如果让石子在水泥地上滑动，就可以滑得远些；如果让石子在冰上滑动，一定会滑得更远些；可以推想，如果石子不受到阻力将会永远滑下去。

在这里你可能会这样想：运动着的物体，它继续运动固然是由于它的惯性。但原来静止的物体，要它运动就得用力推它。这不说明了物体的运动是要用力的吗？

这个问题应该这样来理解：静止只是运动的一种特殊情况，也就是说，静止是速度为零的运动。用力推物体，使物体由静止到具有一定的速度，这只能是物体运动状态的改变，而不是运动不运动的问题。

所以力是改变物体运动状态的原因，而不是使物体运动的原因，物体运动的原因是由于物体具有惯性。它是任何物体都具有的固有属性。

量度物体惯性大小的物理量，叫做惯量。两个物体受到相同的力作用时，其中产生较小加速度的那个物体，我们说它的惯量比较大。

例如，有两辆汽车在水平公路上用相同的速度运动，其中一辆汽车是空的，另一辆载有货物。载有货物汽车的质量比空汽车的质量大。假设同时对这两辆汽车用相同的力来阻碍

它们的运动,那么,载货汽车不容易停下来。这就是说,它得到的加速度比较小,我们可以说,它具有较大的惯量。

从牛顿第二定律知道, $a = \frac{F}{m}$, 即加速度跟质量成反比,由于载货汽车的质量较大,它得到的加速度就小(加速度是负值),所以它不容易停下来。

由此可见,物体的质量越大,它的惯量就越大。这就是说,物体的质量是物体的惯量的量度。

惯性在日常生活中和技术上有着重要的意义。例如,公共汽车在没有到站之前,司机就关闭了发动机,使车依靠惯性继续前进,这样就可以节约汽油;在内燃机和蒸汽机上,往往装有一个笨重的飞轮,利用它的惯性通过连杆、曲柄使活塞的平动变为机轴的转动,以及使机轴转动速度均匀;再如跳远时,运动员从远处跑到沙坑边再起跳,由于人到达沙坑边时已具有一定的速度,依靠身体的惯性就可以比立定起跳成绩好得多。另一方面,我们又要注意防止由于物体的惯性而造成的不必要损失。例如,汽车司机必须遵守行车规则里关于车速和车距的规定,否则,前面车辆突然刹车,后面车辆的司机发现后即使立刻刹车,由于惯性汽车不能立刻停下来,会造成碰撞事故。又如:在公共车辆上站立的乘客要拉好扶手,以免车子在开动、刹车或转弯时跌倒。

可能有人会想:如果物体没有惯性将会出现什么现象呢?根据惯性定律可知,如果物体没有惯性,则不需要外力,它自己就会改变运动状态,静止的可能会突然运动起来,运动的又可能会突然改变速度或停止运动。这样,物体的一切运动就不再有它的规律性。当然,人们也就无法控制他自己和其他物体的运动。其实,惯性是一种客观存在的自然现象,正因为

物体有惯性，以及物体间的相互作用，才造成物质世界的千变万化而又有规律的运动。如果我们脱离了客观实际加以臆断，那是毫无意义的。

也有人会想：现在宇宙中的一切物体都是在运动着的，那么开始时是什么力使这些物体运动的呢？

这个问题的提法本身就有错误，错误在于提出问题的人首先假定万物是静止的。众所周知，宇宙间的任何物体都是互相联系，互相制约的，它们原来就是永恒地、不停地在运动着。这种存在于人类意识之外的物体永恒地、不停地运动叫做运动本身的绝对性。由于物体原来是运动着的，而不是静止的，所以根本不需要用什么力去推动它了。

三 怎样使用隔离法分析问题？

为了充分利用发动机的动力与装运较多的货物，我们看到有的卡车后面挂有拖车。如果已知发动机的牵引力 F ，卡车的质量 m_1 ，拖车的质量 m_2 ，和它们所遇到的阻力 f_1 和 f_2 （图1），就可以求出它们的加速度。因为在运动过程中卡车和拖车的加速度一般是相同的，所以，完全可以把它们当做一个整体来看待，其质量为 $M = m_1 + m_2$ ，而根据牛顿第二定律， $a = \frac{F - (f_1 + f_2)}{m_1 + m_2}$ ，即可求出它们的加速度。但是，当我们要

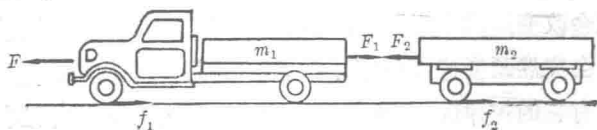


图 1

求拖车受到卡车的拉力是多大时,就不能再把它们当做一个整体来看待了,必须把卡车和拖车隔离开来,才能求出拖车所受到的拉力 F_2 。这种在研究问题时根据需要把研究的对象从整体中隔离出来,分析它的受力情况的方法,叫做隔离法。

用隔离法解题一般可以分成三个步骤。

第一,在仔细分析题意的基础上画出草图,根据需要选定隔离体。

第二,画出隔离体的受力图(与我们研究无关的平衡力可以不画在力图上)。

第三,根据隔离体的受力图和物体间作用与反作用的关系,利用牛顿第二、第三定律列出方程,有几个要求的量就应该列出几个方程,然后联立求解。

下面举几个用隔离法解动力学问题的例子。

【例一】在水平桌面上放着三个用细绳连接着的物体 A 、 B 、 C (图 2),它们的质量分别为 $m_A=4\text{ kg}$ 、 $m_B=4\text{ kg}$ 、 $m_C=2\text{ kg}$,如果在 A 上加一个水平拉力 $F=1\text{ N}$,摩擦不计,求它们的加速度和 A 对 B 的拉力。

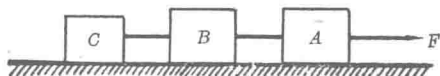


图 2

解: (1) 用隔离法解,此题已有草图,不必再画。根据题目的要求,只要求 A 对 B 的拉力,所以,只要选出两个隔离体,一个是物体 A ,另一个是物体 B 和 C (根据题意,物体 B 和 C 可以看作一个整体,没有必要再把它们隔离开)。

(2) 画出隔离体的受力图(图 3)。

(3) 根据牛顿第二、第三定律列出以下方程:

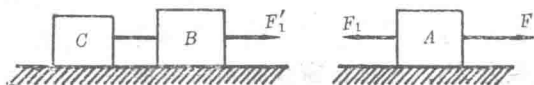


图 3

对 A:

$$F - F_1 = m_A a \quad (1)$$

对 B 和 C:

$$F'_1 = (m_B + m_C) a \quad (2)$$

因为在细绳的质量可以忽略的情况下, F_1 与 F'_1 可以认为是通过细绳的一对作用力和反作用力, 量值是相同的, 所以

$$F_1 = F'_1 \quad (3)$$

以 ③ 代入 ①, 得

$$F - F'_1 = m_A a \quad (4)$$

② 与 ④ 相加, 得 $F = (m_A + m_B + m_C) a$,

$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{m_A + m_B + m_C} = \frac{1}{10} \text{ (m/s}^2\text{)} \\ &= 0.1 \text{ (m/s}^2\text{)}. \end{aligned}$$

将 a 值代入 ② 式, 得

$$F'_1 = (m_B + m_C) a = (4 + 2) \times 0.1 = 0.6 \text{ (N)}.$$

在上面的例题中, 如果还要求物体 B 对物体 C 的拉力, 那么, 就得把物体 B 和物体 C 隔离开来。如果它们在运动中还受到阻力, 那么, 在求每个隔离体所受外力的合力时, 把每个隔离体各自受到的阻力计算进去就行了。在实际问题中, 一列火车在平直的轨道上运动, 求它的加速度和各节车厢间挂钩所受的力, 跟上述例题的情况一样。

【例二】如图 4 所示, 一根细绳跨过定滑轮, 一端拴一个

质量为 1 kg 的物体 m ，另一端拴一个质量为 2 kg 的物体 M ，用手托着 M 。如果不计摩擦，问：

(1) 当手静止时， M 对手的压力是多大？绳子对物体 M 的拉力是多大？

(2) 当手托 M 以 1 m/s^2 的加速度向上运动时， M 对手的压力是多大？绳子对 M 的拉力是多大？

(3) 当手承受 M 的压力为 12 N 时， M 向什么方向做加速运动，这时绳子对物体的拉力是多大？

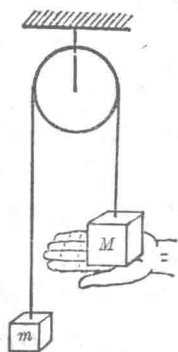


图 4

解：(1) 我们知道，在平衡时物体的重量等于它对支持物的压力或拉力。当手静止时， m 也静止，故 m 对绳子的拉力与绳子对 m 的拉力都是 9.8 N 。这时 M 受到三个力：竖直向上的绳子的拉力 9.8 N ，竖直向上的手对 M 的托力，和竖直向下的重力 19.6 N ，这三个力的合力为零，故手对 M 的托力为 9.8 N 。那么， M 对手的压力也是 9.8 N ，方向向下。

(2) 作隔离体的受力图(图 5， F 为手对 M 的托力)。

列出下列运动方程：

$$F + T_2 - G_2 = Ma \quad (1)$$

$$G_1 - T_1 = ma \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 \quad (3)$$

解得 $F = (M + m)a - G_1 + G_2$,

$$\therefore F = (2 + 1) \times 1 - 1 \times 9.8 + 2 \times 9.8 = 12.8(\text{N}),$$

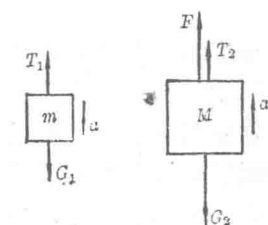


图 5

而

方向向上。 M 对手的压力是 12.8 N , 方向向下。将 F 值代入 ① 式, 得 $T_2=8.8\text{ N}$, 方向向上。

(3) 根据第一个问题中的答案, 在静止时手对 M 的托力为 9.8 N , 那么, 手承受 M 的压力为 12 N 时, 即 $F+T_2>G_2$ 时, 物体 M 一定是向上做匀加速运动。

隔离体受力图和根据牛顿运动定律列出的三个方程跟第二个问题完全相同, 只是已知的不是 a 而是 F , 因此, 需要先求出 a 。

解上述方程, 得

$$a = \frac{F + G_1 - G_2}{M + m} = \frac{12 + 9.8 - 19.8}{2 + 1} = 0.73 (\text{m/s}^2),$$

$$T_2 = 9.1\text{ N}, \text{ 方向向上。}$$

四 内力和外力

世界万物是十分繁杂而又众多的, 我们在分析物理现象时, 通常把注意力集中于物质的某一部分, 并设想这一部分物质和它周围的物质隔离开来, 这一部分物质叫做系统。在系统外部, 与系统的行为直接有关的一切叫做外界。显然系统和外界的划分不是绝对的, 系统也可以是外界, 外界也可以是系统, 这主要看研究对象是什么。例如, 一个跳伞员从空中下落, 我们要研究跳伞员的运动, 就把降落伞和人作为系统; 而把地球、空气作为外界。如果我们需要研究的是人, 则降落伞又成为外界了。

系统内各部分之间相互作用的力就叫做系统的内力, 外界对系统的作用力就是外力。内力和外力也不是绝对的, 它们是根据系统和外界的划定而决定的。如图 6 中, 一个人爬

在一个气球下面的绳子上，悬浮在空中。我们把气球和人作为系统时，则这个系统中的人对气球的拉力 F' 和气球对人的拉力 F 就是系统的内力。而空气的浮力 Q ，气球的重力 $G_{\text{球}}$ 和人的重力 $G_{\text{人}}$ 则是外力了。如果我们需要研究的是人，则 F 和 $G_{\text{人}}$ 都是人受到的外力。

内力和外力有一个很重要的不同特性，就是内力不能改变系统的运动状态，而外力是改变系统运动状态的原因。

这是因为内力是系统内部各部分之间相互作用的力，所以总是成对地出现在系统内部，它们量值相等、方向相反。对整个系统来说这两个力的合力为零，因而不会使系统产生加速度。

但是内力可以使系统内部各部分产生加速度。例如在图 6 中，人用力向上爬，气球就会向下落，人和气球的运动状态发生了改变（当然这时的内力 F 和 F' 要比人和球静止时的 F 和 F' 大），但是，在这个过程中人和气球的质心（一般可以看作系统的重心所在处）总是在原来位置不动。可以用下面方法来证明：

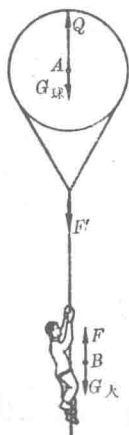


图 6

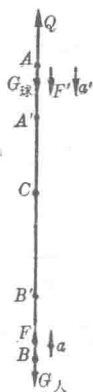


图 7

将图 6 画成图 7，起始位置气球重心 $G_{\text{球}}$ 在 A 点，人的重心位置在 B 点，系统的重心位置在 C 点。则有 $G_{\text{球}} \times AC = G_{\text{人}} \times BC$ ，即 $m_{\text{球}} \times AC = m_{\text{人}} \times BC$ 。设人用恒力 F 向上加速爬 t 秒，人的重心上移到 B' 点，同时气球重心下降到 A' 点，如果这时系统的重心仍在 C 点，则有 $\frac{A'C}{B'C} = \frac{m_{\text{人}}}{m_{\text{球}}}$ 。显然其中 $F = F'$ ，

时系统的重心仍在 C 点，则有 $\frac{A'C}{B'C} = \frac{m_{\text{人}}}{m_{\text{球}}}$ 。显然其中 $F = F'$ ，

$$Q = G_{\text{球}} + G_{\text{人}}。$$

$$\begin{aligned} \frac{A'O}{B'O} &= \frac{AO - AA'}{BO - BB'} = \frac{AO - \frac{1}{2} a_{\text{球}} t^2}{BO - \frac{1}{2} a_{\text{人}} t^2} \\ &= \frac{AO - \frac{1}{2} \frac{G_{\text{球}} + F' - Q}{m_{\text{球}}} t^2}{BO - \frac{1}{2} \frac{F - G_{\text{人}}}{m_{\text{人}}} t^2} \\ &= \frac{2m_{\text{球}} \times AO - (F - G_{\text{人}}) t^2}{2m_{\text{人}} \times BO - (F - G_{\text{人}}) t^2} \times \frac{m_{\text{人}}}{m_{\text{球}}} \end{aligned}$$

由于 $m_{\text{球}} \times AO = m_{\text{人}} \times BO$, 所以上式为 $\frac{A'O}{B'O} = \frac{m_{\text{人}}}{m_{\text{球}}}$, 合重心仍在 O 点。结论表明虽然系统(人和气球)受到内力 F 和 F' 的作用后, 人和气球都改变了运动状态, 但系统的重心仍在原处。所以说系统的内力不能改变系统的运动状态。

关于内力的这个特性还可以用动量来描述: 一对作用力和反作用力是系统的内力, 由于它们大小相等, 方向相反, 所以两个力的冲量也是大小相等方向相反。由此可知, 在任何时间内, 无论那个部分的动量矢量的变化, 和另外一部分的动量矢量的变化大小相等, 方向相反, 所以该系统的总动量不变。由此得出结论: 系统的内力不能使系统的总动量发生改变。

例如, 在很光滑的冰上骑一辆自行车, 无论人怎样用力蹬脚踏脚使后轮飞转, 也很难使车向前驶动。这时因为人用力蹬车, 车也以大小相同、方向相反的力阻碍人踏动, 这是一对内力, 只有地面与车间有摩擦时, 这个摩擦力才是外力, 它是使自行车向前加速的力。同理, 制动橡皮对车辆的摩擦力只能使车轮停止转动, 地面对车轮的摩擦力才是车制动的力。

五 重量 5 牛顿和力 5 牛顿一样吗？

5 N 的重量和 5 N 的力不是一样吗？这还有什么问题呢？

的确，物体的重量是地球对物体的引力所产生的，在研究静力学的问题中 5 N 的重量就是 5 N 的力。

可是在研究动力学的问题中 5 N 重量所起的作用就不一定是 5 N 力所起的作用了。下面通过对一个例题的分析来说明这个问题。

【例题】 图 8 中物体 A 的质量 $m_A = 15 \text{ kg}$ ，放在光滑的水平桌面上。如果滑轮的摩擦不计，那么，在绳子 B 端挂一个重量是 5 N 的物体，和用 5 N 的力向下拉

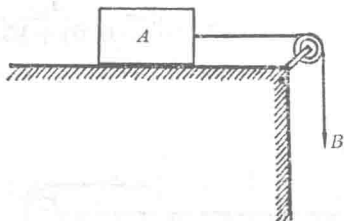


图 8

B 端，其效果是否相同？在这两种情况下，A 的加速度各是多少？绳子的张力又各是多少？

解：在 B 端挂一个重量是 5 N 的物体和用 5 N 的力向下拉，使 A 产生的加速度是不一样的。因为挂 5 N 的物体，它的重力除了使 A 加速运动外，还使自己向下加速运动。而用 5 N 力拉时，这 5 N 的力全部用来使 A 加速运动。因此，前者所得到的加速度一定小于后者所得到的加速度。绳子受到的张力前一种情况也小于后一种情况。不过，如果整个物体处于静止或者匀速运动状态时，那就完全一样了。

第一种情况：在 B 端挂 5 N 重的物体（图 9）。

取 A 为隔离体，则

$$T' = m_A a \quad (1)$$

取 G 为隔离体, 则

$$G - T = m_G a \quad (2)$$

解联立方程得

$$a = \frac{G}{m_A + m_G}, \quad T = \frac{m_A G}{m_A + m_G}。$$

$$\text{已知: } G = 5 \text{ N}, \quad m_G = \frac{5}{9.8} = 0.51 (\text{kg}), \quad m_A = 15 \text{ kg}。$$

代入上面两式, 得

$$a = \frac{5}{0.51 + 15} = 0.32 (\text{m/s}^2),$$

$$T = 15 \times 0.32 = 4.8 (\text{N})。$$

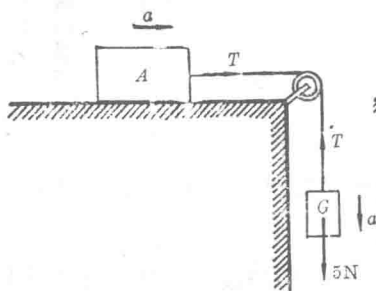


图 9

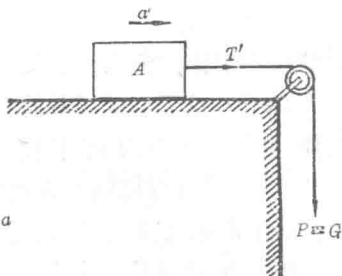


图 10

第二种情况: 在 B 端用 5 N 的力去拉(图 10)。由于定滑轮只能改变力的方向, 不能改变力的大小, 所以绳子的张力 T' 等于拉 A 的力, 即

$$T' = 5 \text{ N}。$$

对于 A :

$$T' = m_A a',$$

则

$$a' = \frac{T'}{m_A} = \frac{5}{15} = 0.33 (\text{m/s}^2)。$$