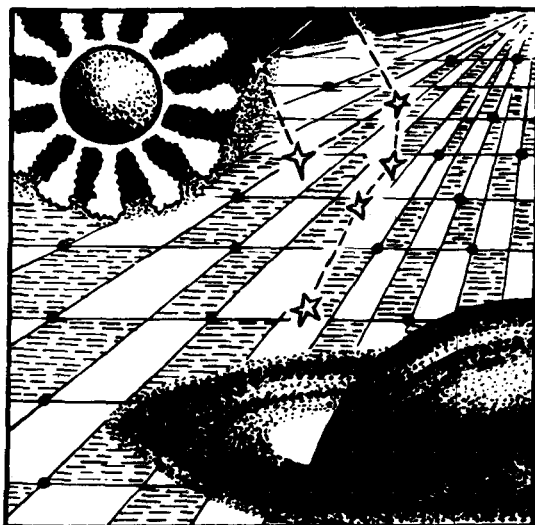




1

物体因何而动

不停息的宇宙

这个关于北极星的故事来自古印度神话。国王尤塔纳帕达 (Uttanapada) 有两个妻子，受宠的一个名叫苏鲁奇 (Suruchi)，傲慢而洋洋得意；被冷落的一个名叫苏尼蒂 (Suniti)，为人谦恭有礼。有一天，苏尼蒂生的儿子德赫鲁瓦 (Dhruva) 看到他的同父异母兄弟尤塔玛 (Uttama) 坐在父亲的膝上玩。德赫鲁瓦也想这样做，但被碰巧走过的苏鲁奇阻止了。5 岁的德赫鲁瓦感受到了侮辱，决心寻找一个他能稳居不动的地方。他接受了贤人的指点，为求得维希努 (Vishnu) 神的好感而作长期的苦行。维希努终于显现，并应允给予恩惠。德赫鲁瓦请求得到一个能稳居不动的地方，维希努就把他放到了北极星的位置上，那个位置是永远固定的。

与其他的恒星和行星都不同，北极星不升起也不降落，它总是在天空中同一位置上被看到。它的这种不变性自古至今都对海上航行大有帮助。但是，假如德赫鲁瓦活在今天，他对把北极星作为终极静止位置是不会满意的。让我们来看看这是为什么。

北极星在天空中的位置之所以不变，是因为它碰巧大致上处在地球自转轴的方向。随着地球绕轴转动，其他恒星都从东方地平线上升起并落到西方地平线下。但只要地球自转轴的指向保持不变，北极星就不会东升西落，而是看去固定不动，总是在同一个位置上。然而，地球自转轴的指向在很缓慢地改变。这个指向并不是如图 1—1a 中那样固定的，而是如图 1—1b 所示那样在空中画出一个很尖的圆锥。地球自转轴沿这个圆锥转一圈的时间是将近 26 000 年。于是在一个人的有生之年，甚至在几个世纪里，北极星看上去几乎不动也就不奇怪了，尽管实际上它的视向相对



于地球的轴是在缓慢改变。

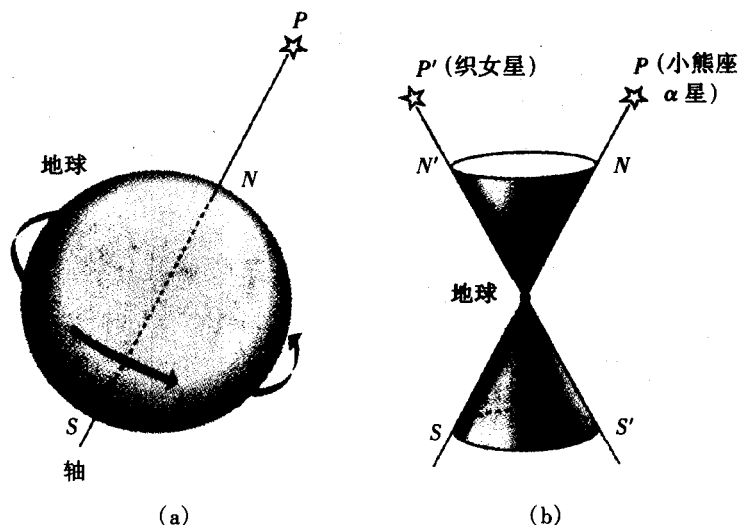


图 1—1 (a) 地球绕着它的南北轴旋转。现在的北极星 P 几乎正处在轴线方向上。(b) 南北轴并不是在空中固定的，它在进动，也就是在天空中画出一个圆锥。因此，相对于这根轴来说，北极星的方向是会改变的。 NS 和 $N'S'$ 表示轴在进动过程中的两个极端位置。现在，南北轴指向小熊座 α 星，也就是通常所称的北极星。13 000 年后，轴将指向天琴座 α 星（织女星），于是那颗星就将取代现在的北极星而成为“固定的”星

但是，真正的问题并不在这里，而是在于北极星本身并不是在空中固定的，它像银河系里的其他恒星一样在运动。的确，银河系作为一个整体（如图 1—2 所示，它是一个中央有小凸起的圆盘状天体，包含的恒星在 1 000 亿颗以上）在绕着它的轴转动，转动周期是约 2 亿年。^{〔1〕} 所以，德赫鲁瓦根本不可能真的找到一个固定不动的地方！

的确，只要作更精细的考察，总能表明运动而非静止才是宇宙的特征。正如天文学家发现大尺度上运动的实例一样，学习微观物理的学生也总能找到小尺度上运动的各种例证。当我们从远

〔1〕 除转动外，银河系还参与更大尺度上的运动，即许多人听说过的宇宙膨胀。这将在第 9 章中再讲。





图 1—2 银河系的示意图。箭头表示银河系转动的方向。北极星的大约位置由 + 记号标出

处看一条河时，它似乎是静止不动的。但当我们走近它时，就会看到稳恒的水流。类似地，在无风的日子，我们会觉得空气是静止的。但是微观物理学告诉我们，平静的空气是由作无规运动的分子组成的，这种无规运动赋予空气一种性质即温度（图 1—3）。

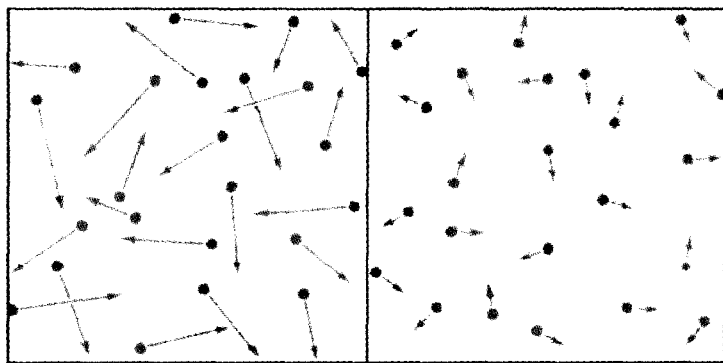


图 1—3 空气分子的无规运动。箭头的长度表示相应分子的速率。右图中的分子速率从而对应的空气温度都比左图中的低



无规运动正与如军队行进那样的整体有序运动相反。空气分子是在所有方向上杂乱运动。这种无规运动越是快，空气的温度也就越高。再缩小到原子尺度上，我们仍能继续看到所有类型物质的这种或那种方式的运动。晶体中有晶格振荡，金属中有自由运动的带负电荷的电子，原子中的束缚电子不断地从围绕原子核的一个轨道跳跃到另一个轨道。即使在原子核内，物质也不静止。原子物理学家正在用高能粒子加速器（如芝加哥附近的费密实验室和日内瓦附近的 CERN^{〔1〕}所拥有的）使粒子相互高速碰撞，从而逐步揭示神奇的亚原子粒子世界的奥秘（图 1—4）。试图在这样一个不停息的宇宙里寻找静止不动的东西是徒劳的。我们应该问的倒是：“为什么物体会运动？”



图 1—4 费密实验室高能粒子加速器的一部分。在这个隧道里产生出高速的亚原子粒子流〔经国家加速器实验室威尔孙（R. R. Wilson）同意转载〕

〔1〕 即欧洲核子研究中心。——译者注

从亚里士多德到伽利略

其实这个问题早在大约 23 个世纪之前就由希腊哲学家亚里士多德 (Aristotle) 提出来了。他自己的回答是, 每个物体都有一种到达某个所喜爱的位置的天然倾向, 而在自然界中观察到的运动就是物体朝着那个位置的运动。

亚里士多德是柏拉图 (Plato) 的学生, 又是亚历山大 (Alexander) 大帝的私人教师。虽然亚历山大的帝国在他死后不久就瓦解了, 亚里士多德的哲学却继续统治了欧洲许多个世纪, 贯穿了整个中世纪时期, 他的科学后来也被罗马天主教廷封为正宗。今天, 在这现代科学的时代, 我们会觉得亚里士多德的探索 and 思想很奇怪、很难以领会。但是, 如果放到公元前 350 年的希腊这个背景上看, 亚里士多德的确提出了高度系统化的见解。

亚里士多德在广泛的意义上论述过一个系统里的变化, 他认为运动就意味着局部的变化。日常观察提供了许多例证: 恒星在天空中的移动, 烟的升起, 云的漂浮, 雨的落下, 海洋的潮汐, 箭的射出等等。亚里士多德概括了这些观察, 把所有自然界的运动实例都分解为直线运动和圆周运动的合成。为什么直线和圆周线这样特别呢? 如图 1—5 所示, 就因为这些线简单。一根简单线的任何一部分都能重合到任何其他部分上。亚里士多德的论断是, 自然界物体的运动都沿着简单线或简单线的合成线来进行。

亚里士多德又指出, 与这类自然运动相区分的还有另一类运动, 他称之为强制运动, 是由生物的力量造成的。上面给出的实例之一, 即箭的射出, 是由人造成的, 在亚里士多德看来箭的这种运动就不是自然的而是强制的。对任何一种强制运动而言, 必定总有一个有效的力量来干扰物体沿简单路线运动的自然倾向。

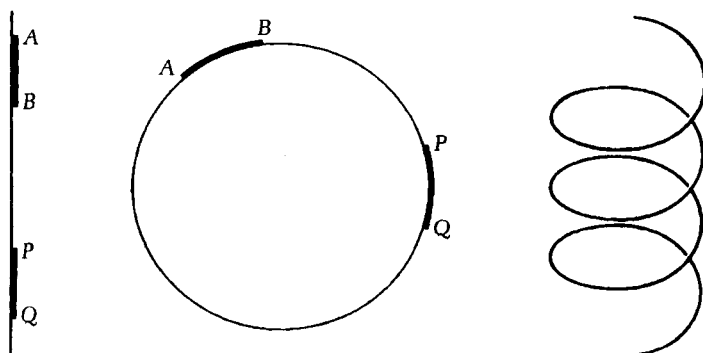


图 1—5 直线和圆周线是简单线，意思是其任一部分 AB 都能重合到任一别的部分 PQ 上。伽利略指出，右边的螺旋线也具有此种性质

在欧洲文化中影响最大的亚里士多德思想之一，是地球固定于转动宇宙的中心。这就是所谓地心说，他认为地球固定不动，位于转动着的太阳和行星系统的中心。地心说成了宗教教条，直到 16 世纪才由于哥白尼（Copernicus）的研究而第一次受到严重挑战。按照哥白尼的日心说，太阳才是固定的中心，包括地球在内的所有行星都绕之旋转。下一章里将再谈哥白尼的革命。

到了 17 世纪才有人对亚里士多德的思想从根本上表示怀疑。这个人就是伽利略·伽里列（Galileo Galilei），一位为佛罗伦萨大公服务的数学家和哲学家。伽利略的天才主要地倒不是表现在数学和哲学上，而是在于能用精巧的实验演示来支持自己的论辩。伽利略的著作《关于托勒密（Ptolemy）和哥白尼两大世界体系的对话》是现代科学论证对抗陈旧的亚里士多德哲学的光辉典范。伽利略不仅是捍卫哥白尼的体系，而且锋芒直指亚里士多德自然哲学的根基。伽利略以自己的实验求证而堪称现代科学中实验精神的首倡者。

伽利略为反对亚里士多德体系而作的所有论辩和证明，在这里对之作哪怕是简要的重述也是不可能的。且选取两个与亚里士多德所称的强制运动有关的例子：射箭和推车。



一支箭从弓上射出，为什么它会运动？按照亚里士多德的说法，必定有一种力量在所有时间都作用在箭上来使它运动。当然，首先是射箭的人施了力。但后来呢？箭仍在飞行，亚里士多德不得不争辩说，箭后面的空气在继续推动它，就像风推动空中的云那样。伽利略对此的回答是先看这一事实：如果箭被横着射出，也就是射出方向与箭头指向相垂直（图 1—6），箭就只能飞行很短的距离。假如亚里士多德是对的，怎么空气不会对横射的箭有更大的推动截面，从而使它获得比通常的直射箭更大的速率呢？

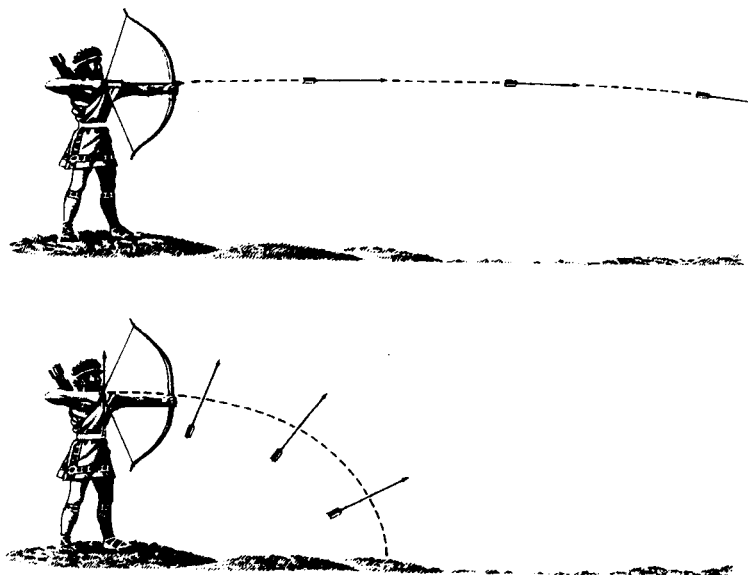


图 1—6 箭头朝前射出的箭比横着射出的箭飞得远多了。伽利略用这个实验来反驳亚里士多德的物体飞行是因为空气推动的观点，因为空气对横射的箭比对直射的箭有更大的推动作用截面

亚里士多德用来支持他的运动靠力维持的主张的另一个例子是手推车。车子需要推才能动。只要有人在推，车就继续前进；一旦停止推动，车就会停下来。于是，亚里士多德派的人就说，要保持运动就需要力。伽利略是怎么来对付这个基本前提的呢？



为理解亚里士多德与伽利略之间分歧的关键，不妨先举一辆行驶中的汽车为例。汽车随时间而改变其位置，我们用它所经过的距离除以所用的时间而确定它的速率。于是，一辆速率为 60 千米每小时的汽车将在 1 小时里驶过 60 千米的距离，如果它是以恒定速率行驶的话。但实际上汽车在 1 小时里可能并不保持同样的速率。它可以由于刹车而慢下来（减速），也可以因司机加大油门而变快（加速）。速率计指示着车子的瞬时速率，指针的摆动表明速率在变化。

亚里士多德说，一个恒定的力产生一个恒定的速率。为了检验这种说法是否正确，伽利略制造了一架能精确测量时间的水钟，然后作了从高处抛下重物的实验。如果物重就是使它下落的力，那么按照亚里士多德的说法，物体在相同时间里应该下落相同的高度。伽利略却证明（图 1—7），物体在各个相等的时间段里下落的高度是依次增加的。物体的速率并不保持恒定，而是与时间成正比增大。

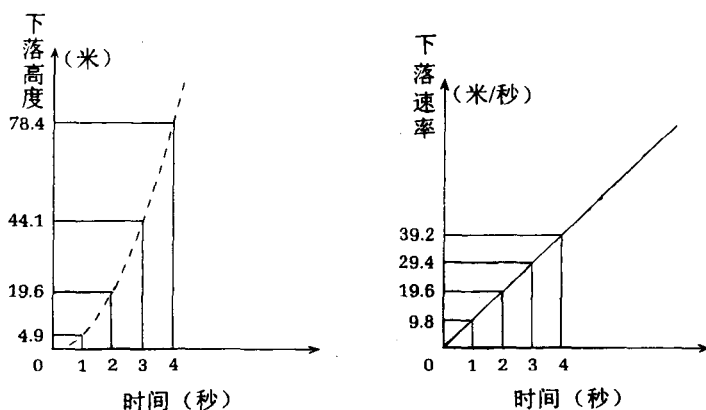


图 1—7 伽利略用实验证明，物体从高处下落时，在各个相等的时间段里所落过的高度是依次增大的。如（a）中的弯曲虚线所示，随着物体的下落，相等的时间段对应着增大的高度段。下落速率也随时间逐渐增大，如（b）中的直实线所示

被抛下的物体原先是静止的，然后才获得速度。在日常生活



的其他事例里也是同样情形。汽车原是静止的，当它被开动时，我们看到的不是一个恒定的速度，而是速度的变化。每单位时间里的速度变化叫做加速度。如果一辆汽车以 50 千米每小时的速率在平直路面上行驶，司机又加大油门，车子的速率就增大了，也就是说它获得了加速度。伽利略的才能正在于认识到，力作用到物体上时的真正效应是产生加速度。

再回到那辆手推车。使车子动需要用力，推动停止了车也停止。亚里士多德说运动需要力怎么会不对呢？要看清他的谬误的确要用一点脑筋。当我们用一定的力开始推车时，车子并不是立即获得一个恒定的速度，它是慢慢地动起来的，也就是说，它在加速（正如司机踩油门时的汽车那样）。如果亚里士多德是对的，那么我们一停止用力，车子就应该立即停下来。但实际上车子是以逐渐减小的速率再运动一会儿，然后停住。车子减速是因为有一个与它的运动方向相反的力作用于它，这就是摩擦力。需要有推力来克服摩擦力，才能使车子保持以匀速运动。推力一旦撤去，摩擦力就使车子减速直至停住。

运动定律

伽利略通过此类推理和实验而正确地掌握了力与运动之间的关系。他认识到，力造成运动状态的改变，不受力的物体其速度就不会有改变。但是，伽利略的这种认识只是定性的。力与运动之间关系的定量表述还得在伽利略之后再等几十年。运动定律的精确表述是由伊萨克·牛顿（Isaac Newton）给出的，他正好生于伽利略去世的那一年（1642）。牛顿在他出版于 1687 年的著作《自然哲学的数学原理》里对这三条运动定律作了详细论述。

在考虑牛顿的定律之前，应当先定义一些动力学的概念，动



力学是研究在不同的力作用下的物体运动的学科。首先要强调的是速率与速度的区别。前面已经谈到了速率。速度的概念实际上包括两部分信息：物体运动得有多快和在什么方向上运动。第一部分信息就表示速率。于是，一辆汽车每小时行驶 60 千米这个信息所告诉我们的是车子的速率。要知道车子的速度，我们还得知道它在什么方向上行驶。

如前所述，加速度指的是速度的变化率。速度的变化可以有两种方式，一是改变速率，二是改变方向。图 1—8 所示是一辆汽车以 150 千米每小时的恒定速率沿着环形跑道行驶。车子的速率虽然恒定，其方向却在不断地改变。所以，车子是在加速。

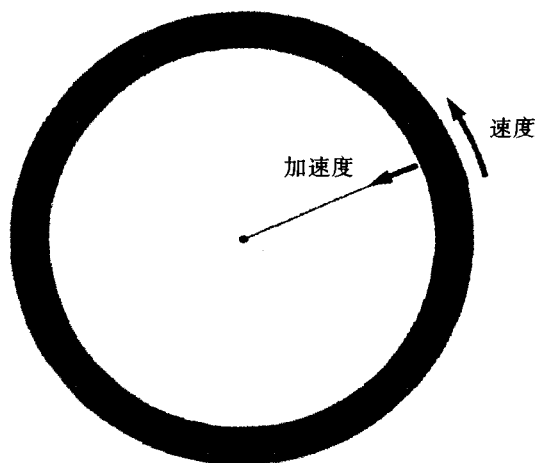


图 1—8 环形跑道上行驶的汽车在不断改变方向。它可以有恒定的速率，但其速度却由于方向的变化而变化，于是就有一个朝向跑道中心的加速度

像速度一样，加速度也有大小和方向。现在这辆汽车的加速度是怎样的呢？答案通常要借助于微分计算得到，但可以用简单的方式来表述。加速度的方向朝着跑道的中心，其大小等于车子速率的平方除以跑道的半径。如果跑道半径是 1 千米，加速度的大小就是 $150 \text{ 千米/小时} \times 150 \text{ 千米/小时} \div 1 \text{ 千米} = 22\,500 \text{ 千米/}$

小时²。

另一个有用的概念是角速度。对这辆车而言，它跑完一圈也就是绕中心跑完了 360° 角，这要用多长时间呢？已经知道车子的速率是 150 千米/小时，跑道的周长是 2π 千米^[1]。所以，车子转 1 圈的时间是 $2\pi/150$ 小时，约是 $2\frac{1}{2}$ 分。既然在这段时间里汽车越过了 360° 角，其角速度的大小就约是 $360^\circ/2\frac{1}{2}$ ，即 144° 每分。

现在可以讲运动定律了。第一定律是伽利略已经知道的，说的是物体将保持其静止或以不变速度运动的状态，除非受到某种外力作用。图 1—9 描绘了使伽利略得出这一定律的实验和推理。请注意这条定律与亚里士多德的运动概念之间的对立。亚里士多德要求有一个恒定的力作用在物体上使之产生一个恒定速度，而伽利略的结果表明，没有力作用在处于恒定速度状态的物体上。

牛顿第二定律说的是物体所产生的加速度与作用于其上的力成正比。这里又遇到一个伽利略也定性的知晓的概念，即惯性。定性地讲，这个概念所描述的是任何物体都有的反抗其运动状态改变的倾向。定量地讲，物体的惯性越大，为使它产生同样的加速度所需要的力也越大。推动汽车比推动自行车需要用更大的力，因为汽车有着比自行车大得多的惯性。把这同一个意思换一种不同说法就是，同样的力使惯性较小的物体产生较大的加速度。例如，同样的汽油消耗会使小汽车获得比大轿车更大的加速度。

牛顿用质量来作为惯性的定量量度。质量是物体中物质的量。物质的量越大，质量就越大，惯性也越大。运用牛顿第二定律，就可以通过简单地测量同样外力作用于两个物体 A 和 B 所分别产生的加速度来比较它们的质量。如果同样的力作用下 A

[1] 圆的周长是其半径乘以 2π 。常数 $\pi = 3.141596\cdots$ 常用分数 $22/7$ 来近似代替。

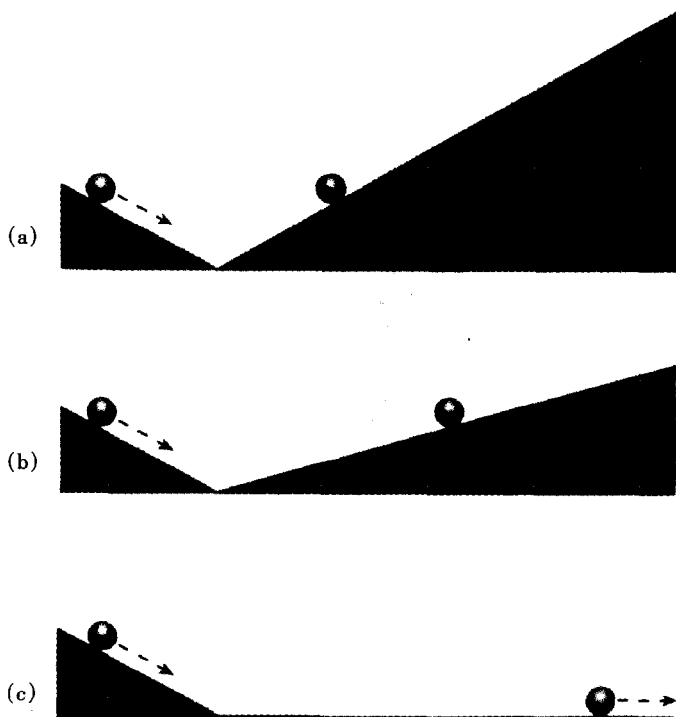


图 1—9 伽利略是通过如图所示这样的实验来得出第一运动定律的。一只球在一个倾斜平面上滚下，然后在另一个斜面上滚到与起始位置同样的高度 (a)。随着第二个面倾斜度的降低，球在其上会滚得更远 (b)。如果第二个面是水平的而且没有摩擦力或其他阻力，球将永远滚动下去 (c)

的加速度是 B 的 2 倍，那么 B 的质量就是 A 的 2 倍。

牛顿第三运动定律是作用力与反作用力大小相等、方向相反。我们用手压一面墙时，手也会感到墙的压力。我们施加于墙的力（作用）引起墙对我们的等值而反向的力（反作用）。

图 1—10 画的是一只猴子在沿一根绕滑轮的绳子向上攀，同时把一块重力与它体重相等的石头带上去。石块和猴子与滑轮的距离是一样的。当猴子攀到顶部时石块会在哪里呢？由牛顿第三定律就可得出，石块也将与猴子同时到达顶部。

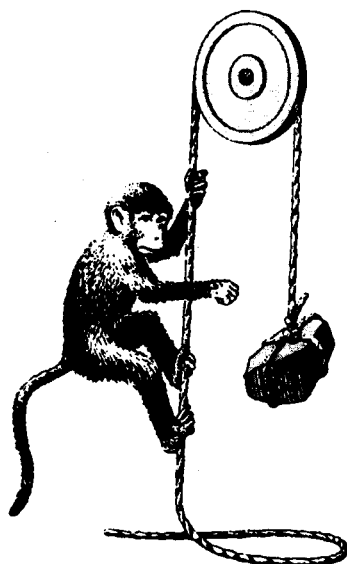


图 1—10 猴子在攀绳。它用在绳子上使自己攀上去的拉力，会通过作用力与反作用力相等的定律而传递给石块。所以，石块同猴子一样上升

一些动力学概念

现在来看看图 1—11，这种情节常在劳雷尔（Laurel）和哈迪（Hardy）的滑稽电影里见到。一只蝴蝶撞了劳雷尔一下，给了他一点小打扰，但没有什么大麻烦。但是当急匆匆追捕蝴蝶的哈迪撞上劳雷尔时，那场面可就好看了。是运动的何种性质在决定着这些不同的效应呢？

为便于说明，可以假定哈迪和蝴蝶有着同样的速度，但两者对劳雷尔所产生的效应可不一样。显然，差别就在于哈迪的质量比蝴蝶大。但这并不完整。如果哈迪是在慢慢地走，他就不会把



图 1—11 这个滑稽剧说的是哈迪的动量如何通过碰撞而传递给劳雷尔

劳雷尔撞得这么厉害。因而总效应与质量和速度都有关。这两者结合而成的量叫做动量。动量简单地说就是质量与速度的乘积，它与速度有着同样的方向。

再回到牛顿第二定律，现在就可以看出它还能表述成另一种方式：动量的变化率等于所受的力。在撞上劳雷尔时，哈迪的动量显然是改变了，这是由碰撞力造成的。而按照牛顿第三定律，劳雷尔会感受到一个大小相等方向相反的作用力，这正是他从椅子上摔出去的原因。

牛顿第二定律的一个推论是，如果没有净力作用在一个物体（或一些物体组成的系统）上，总动量是不变的。在劳雷尔与哈迪的碰撞过程中没有净力，因为相等而又相反的碰撞力互相抵消了，于是他俩的总动量不变。在碰撞之前劳雷尔是静止的，而哈迪在运动。后来，绝大部分动量就由可怜的劳雷尔携带，又因为他的体重比哈迪轻，他就以更大的速度从椅子上摔出去了。这个总动量不变的规则就叫动量守恒。

一个相关的概念是角动量。为理解这个概念，且回到那辆在跑道上的汽车。若汽车的质量是 1 000 千克，它的动量简单地就是 $1\,000\text{ 千克} \times 150\text{ 千米/小时} = 150\,000\text{ 千克} \cdot \text{千米/小时}$ ，它对于跑道中心的角动量就等于这个动量乘以跑道的半径。

推而广之，转动的物体都有角动量。图 1—12 所示是地球绕着它的轴的转动，怎么来计算它的角动量呢？这得想象着把地球

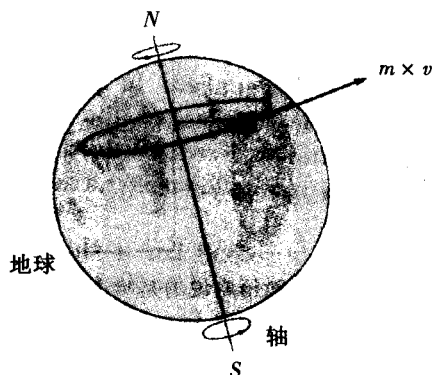


图 1—12 转动的地球内的一个典型物质块在半径为 r 的圆周上绕转动轴（南北轴）运动。若小块的速度为 v ，质量为 m ，它就有在切线方向的动量 $m \times v$ ，它对于转动轴的角动量就是 $m \times v \times r$ 。地球的角动量是由把组成它的所有小块的角动量加在一起而得到的

分成许多小块（正如把一幅画分成小拼块那样）。图中画出了一个典型的小块，在一条圆形轨道上运动，轨道中心就在转动轴上。这个小块的角动量就等于它的动量乘以圆轨道的半径，就像对跑道上的汽车所做的那样。把所有小块对角动量的贡献加起来，就得到地球的总角动量。与动量守恒定律类似，物体系统也遵守角动量守恒定律，条件是该系统不受到试图影响其角运动的净力。角动量的守恒性在许多天体系统的动力学演化中有着重要作用。

最后要讲的重要概念是功和能量。伽利略和牛顿的论证已经澄清了力与运动之间的关系。与亚里士多德所说的相反，力的作用是改变运动状态，而不是使运动维持一个恒定速度。那么，用什么方法来记载力在任一运动阶段所作出的成绩呢？

物理学家已经找到了确定力所做的功的数学方式。由图 1—13 可见，物体在恒定力 F 的作用下由位置 A 移动到了位置 B 。用 d 来表示该物体沿着力 F 方向上的净位移，那么乘积 $F \times d$ 就是力所做的功。



物体因何而动

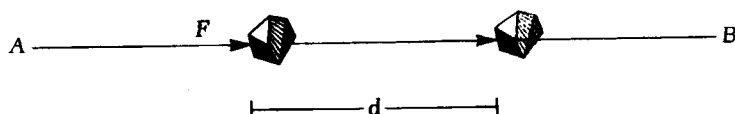


图 1—13 力 F 在使物体从 A 到 B 移动 d 的过程中所做的功是 $F \times d$ 。必须有沿力的方向上的位移才能算是做了功

这个功有什么表现呢？已经知道物体在力作用下会加速。假定该物体在 A 处是静止的，在 B 处具有速度 v 。用牛顿第二运动定律所作的简单计算表明，力 F 所作的功，即刚才定义的 $F \times d$ ，是精确地等于 $\frac{1}{2} m \times v \times v$ ，即 $\frac{1}{2} m v^2$ ，这里 m 是物体的质量。

这个量 $\frac{1}{2} m v^2$ 就是物体的动能，即由于运动而具有的能量。所以，力做功并非徒劳，而是给了物体以等量的动能。

如在前面的手推车被摩擦力停下来的例子里看到的，与物体运动方向相反的外力使物体减速，也就是物体的动能减小。所消耗的动能用于反抗反向的外力而做功。于是适用于运动物体的一般规则可表述为：动能的改变 = 外力所做的功。如果改变是负的（即动能减小），那么功也是负的，即反抗外力而做的。如果改变是正的，那么外力所做的功就是在增强物体的运动。在第 3 章里将进一步把这一规则与能量守恒定律联系起来。

物体因何而动

关于动力学的介绍可以告一段落了，这是一门研究运动的学科，或许是所有学科中最古老的。为什么物体会运动呢？对这个问题的解答是由亚里士多德首先尝试，而后来由伽利略和牛顿正确地给出的。伽利略首先认识到，力的作用在于改变运动的状态，而牛顿给出了力与加速度之间关系的定量表述。

物体因何而动