

第2章 动力学原理

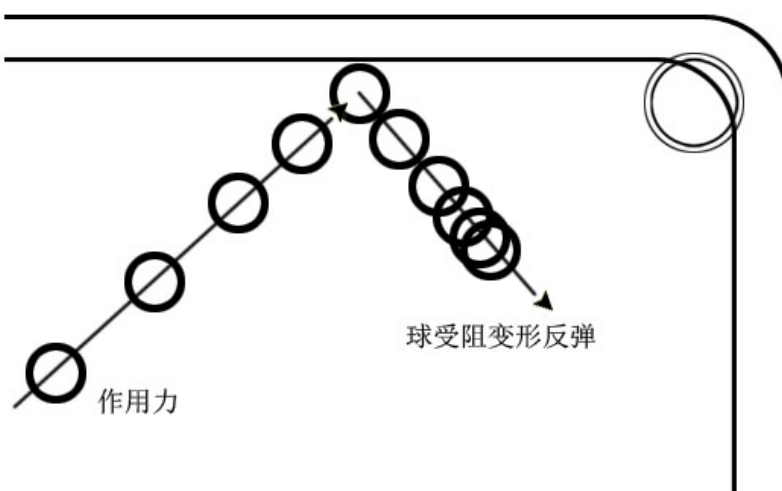
2.1 力的来源 | <<

在物理学中，力是任何导致自由物体历经速度、方向或外形变化的影响。力是一种造成物体加速的影响，也可以感官体验为一种推挤或拖拉，这会造成物体改变方向、改变速度、暂时性或永久性地形变。大小、方向和作用点是力的三要素。

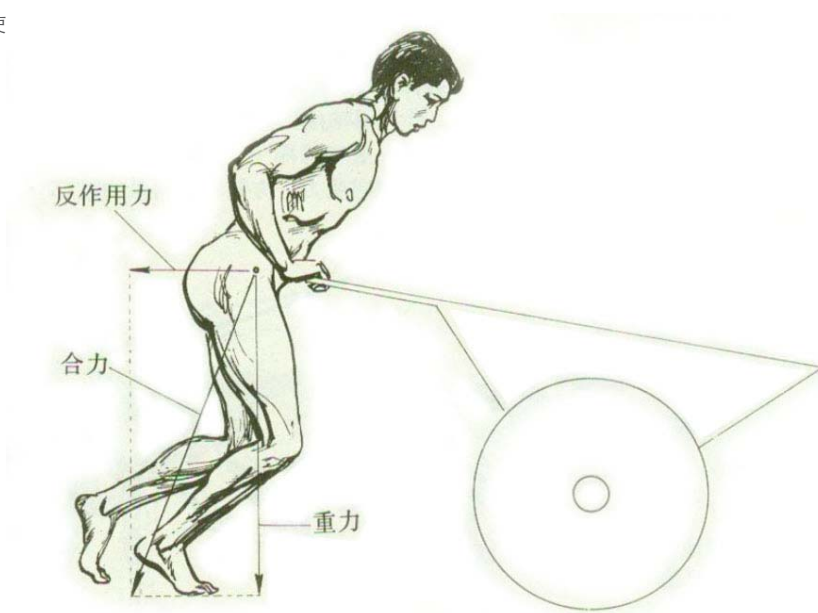
力是物体对物体的作用，所以力都是成对出现的。有力就有施力物体和受力物体。外在事物的影响，对于人类感觉器官所产生的作用，也在脑海中衍生成一种形象，归纳起来，影响力包括同化作用及消化作用。作用于物体上的力，称为作用力。至于承受作用力的物体，对于施力物体所产生的作用，也即反作用力。

自然界的一切物体在受到外力的作用影响时才能产生运动。物体在运动的过程中随时间变化和物体位移，以及各种力的互相影响和制约，从而使物体发生千变万化的运动状态。例如从空中自由下落到静止的皮球。在空中受到地心引力下落，同时还受到反作用的空气阻力，球体触碰地面时受到地面摩擦力和弹性等反作用力影响，使皮球再弹离地面。如此反复多次被外力影响下，皮球弹跳高度和位移距离逐渐减小直到静止，最后停留在地面上。

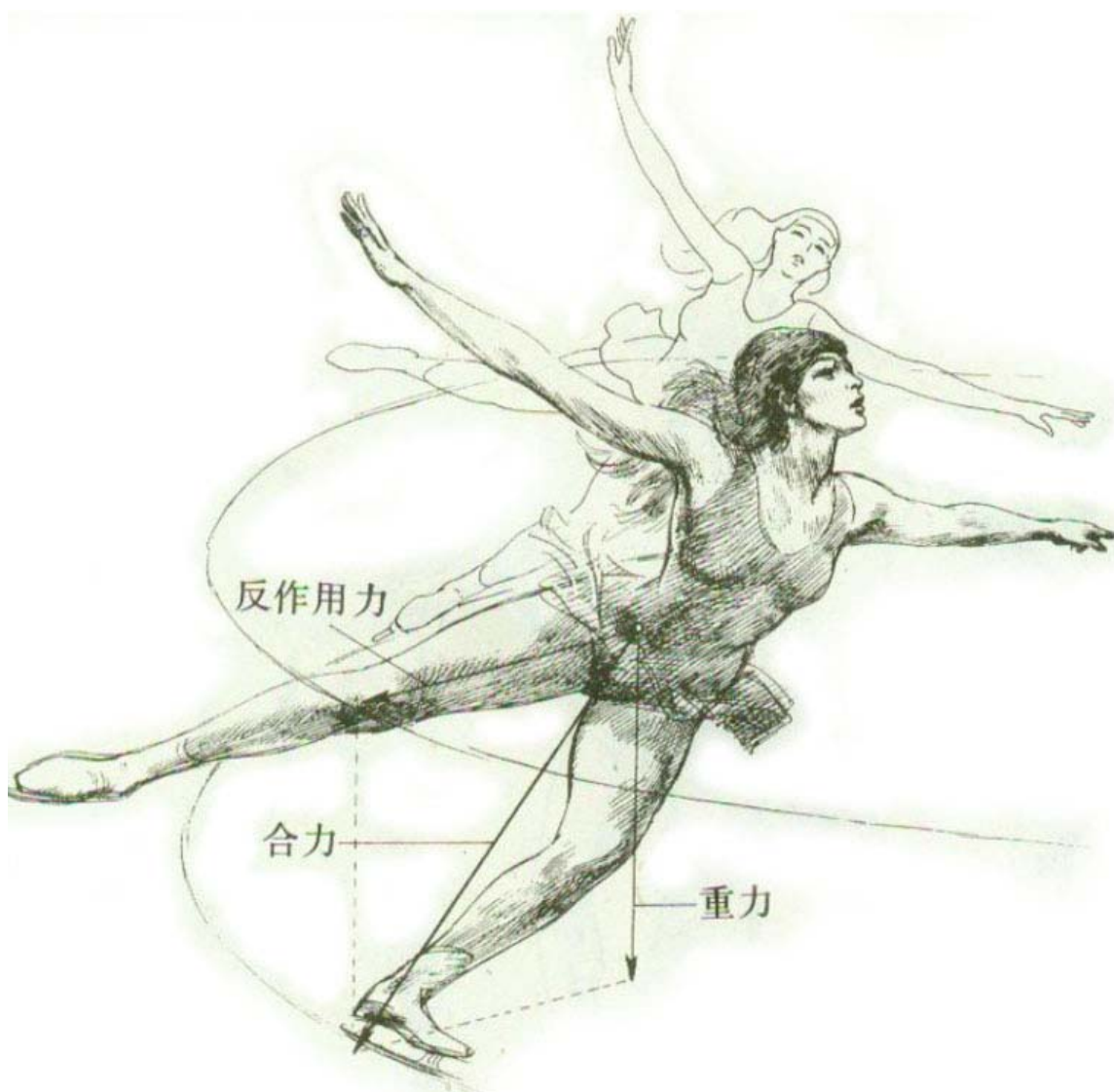
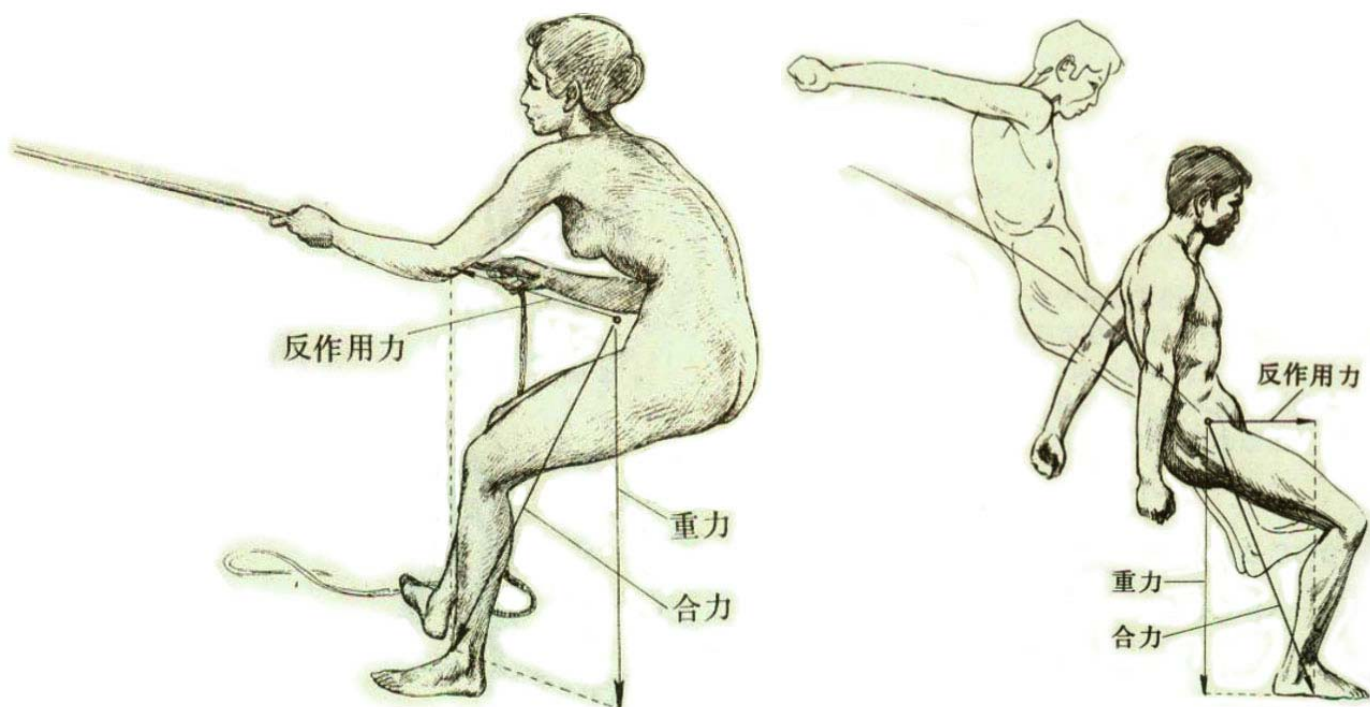
右图例子是台球在台面上运动的过程。台球在桌面上，球杆撞击球体施力，球体受到作用力向前直线滚动。当球体撞到球台边界时，球台受到反作用力发生反弹，改变滚动方向，然后受到球台表面摩擦力和地心引力的影响，球体滚动速度逐渐减慢直到最后静止不动。



人和其他动物的运动都是由筋络肌肉发力带动骨骼，使其做出各种运动姿态，当然在运动过程中也会受到地心引力、摩擦力、惯性等作用力和反作用力的影响。



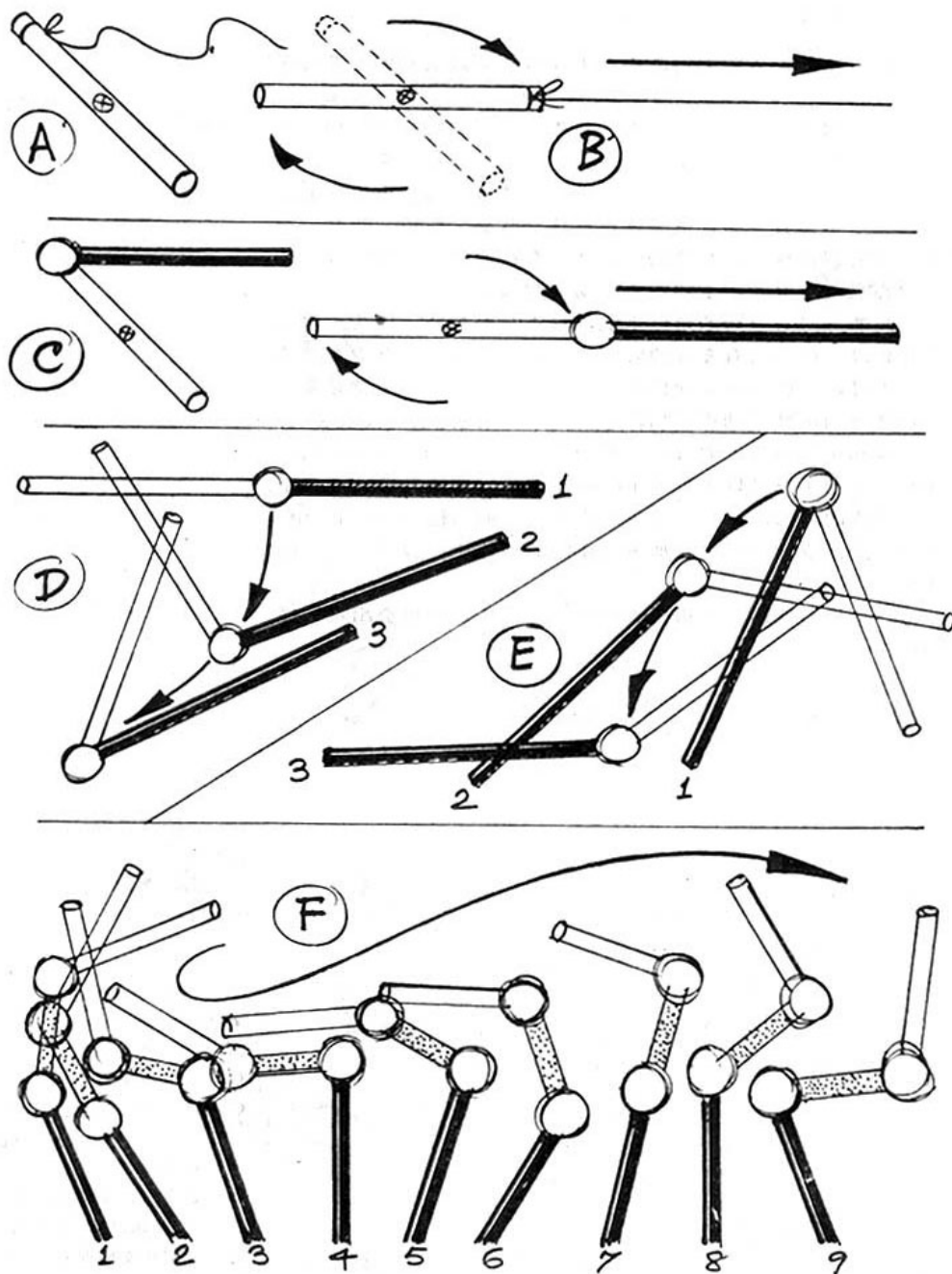
人推车时的作用力



各种作用力

2.2.1 力是通过活动关节传递

如下A和B图例子,白棒中心被旋转轴固定摆放在光滑的表面上,白棒的一端捆绑上绳子。当朝右方水平拉动绳子时,绳子从自然弯曲状态到绷直后,才开始拖动白棒移动。力是从捆绑点传递到轴心点后使白棒产生转动。图C是用黑色棒替代绳子,拉动黑棒后看到白棒的转动表现和A和B图非常相似,说明力从黑白棒之间的关节传递到白棒的转轴上。图D例子是黑白棒间有关节相连,当向黑棒施加作用力使其逆时针转动,力通过关节传递后,白棒发生逆时针转动。图E也是力从黑棒通过关节传递到白棒,黑棒逆转、白棒顺转的运动过程,与图D例子正好相反。图F例子是更为复杂的双节棒的力传递分解图。黑棒受到外界作用力后,通过关节从斑点棒传递到白棒,黑棒1~6帧是顺时针转动,7~9帧是逆时针转动。

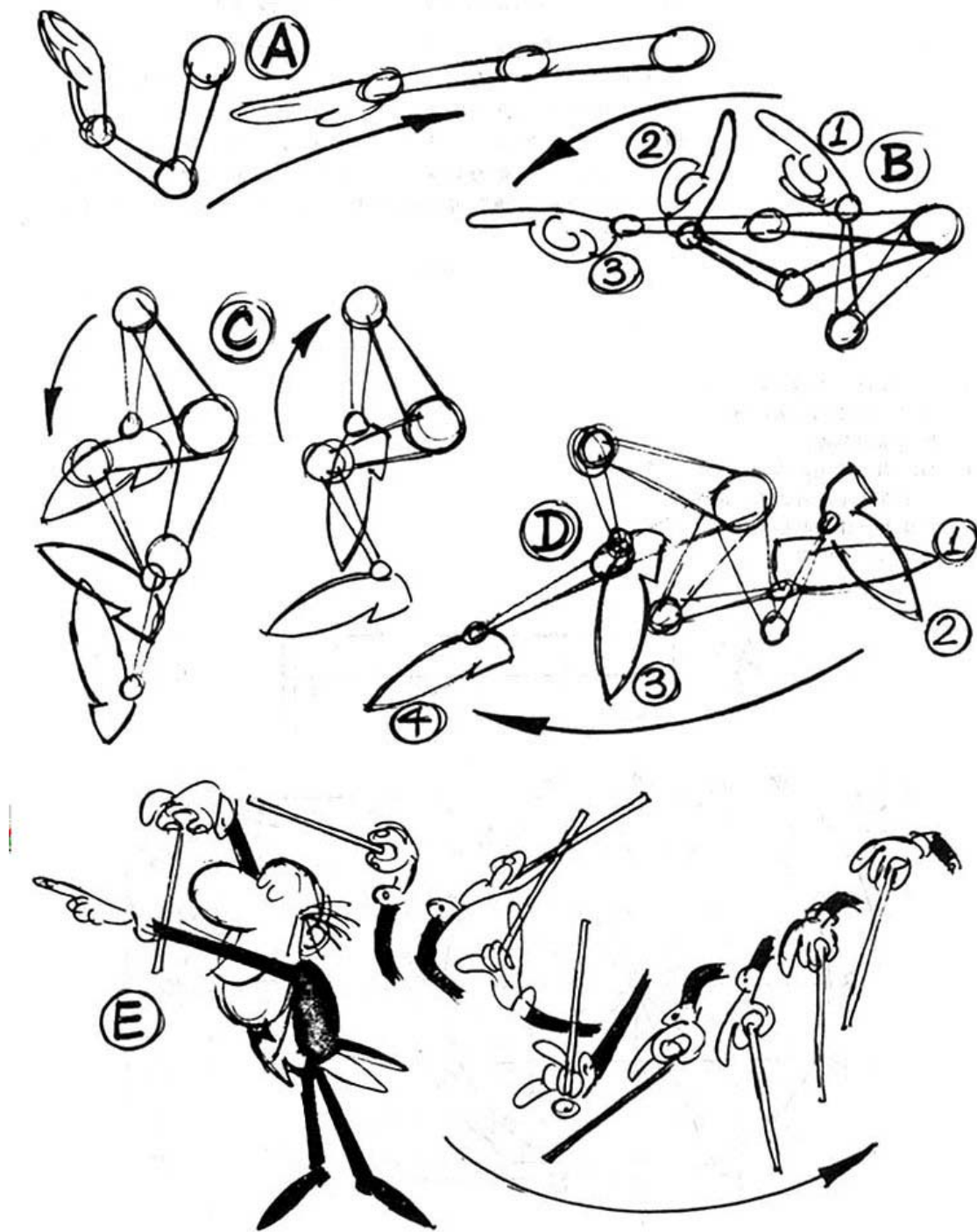


通过活动关节的传递

2.2.2 力通过有关节的肢体传送

我们知道人和动物都是骨骼与肌肉、肌腱、韧带等组织协同完成运动功能。骨骼提供运动必需的支撑，肌肉、肌腱提供运动的动力，韧带的作用是保持骨骼的稳定性，使运动得以连续地进行下去。相连着骨骼有许多关节，人和动物的各种运动姿态都是由这些关节的旋转产生的。肩部关节是人体活动范围最大的关节，能内收、外展、前屈和旋转运动，是连接手臂的重要关节。膝关节是下肢的重要关节，骨骼大而有力，能前伸站立、后屈下蹲。颈椎是头部与躯干相连接的部位，能前伸、后仰、左右旋转。腕关节是臂部主要关节，靠韧带连接，活动范围较大，能前屈、后仰、内收、外展和旋转运动。动画设计师根据力通过活动关节传递的原理，夸张地运用在卡通角色运动的制作中，使观众觉得既真实自然又生动活泼。

下图例子中卡通人物的手臂和腿，还有手持指挥棒的手臂，我们可以简单地看做是由三个活动关节相互连接的三截棒。图 A 例子是手臂的弯曲和伸直。图 B 例子是手臂向前一指的运动过程，力从肩部一直传送到指尖。图 C 是腿部踩踏和抬腿的过程。图 D 例子是踢腿的动作分解，力从胯部通过膝关节到踝关节最后到脚趾尖。图 E 例子中乐师挥舞手中的棒子，看似眼花缭乱，只要注意发力点和活动关节旋转的方向，手臂持棒舞动并不复杂。

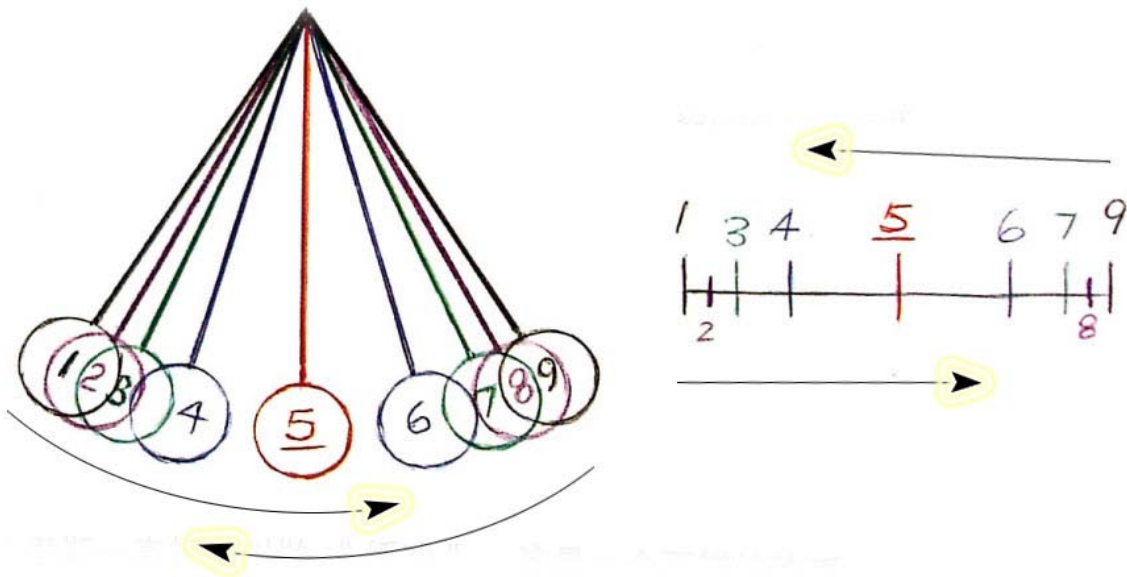


通过有关节的肢体传送

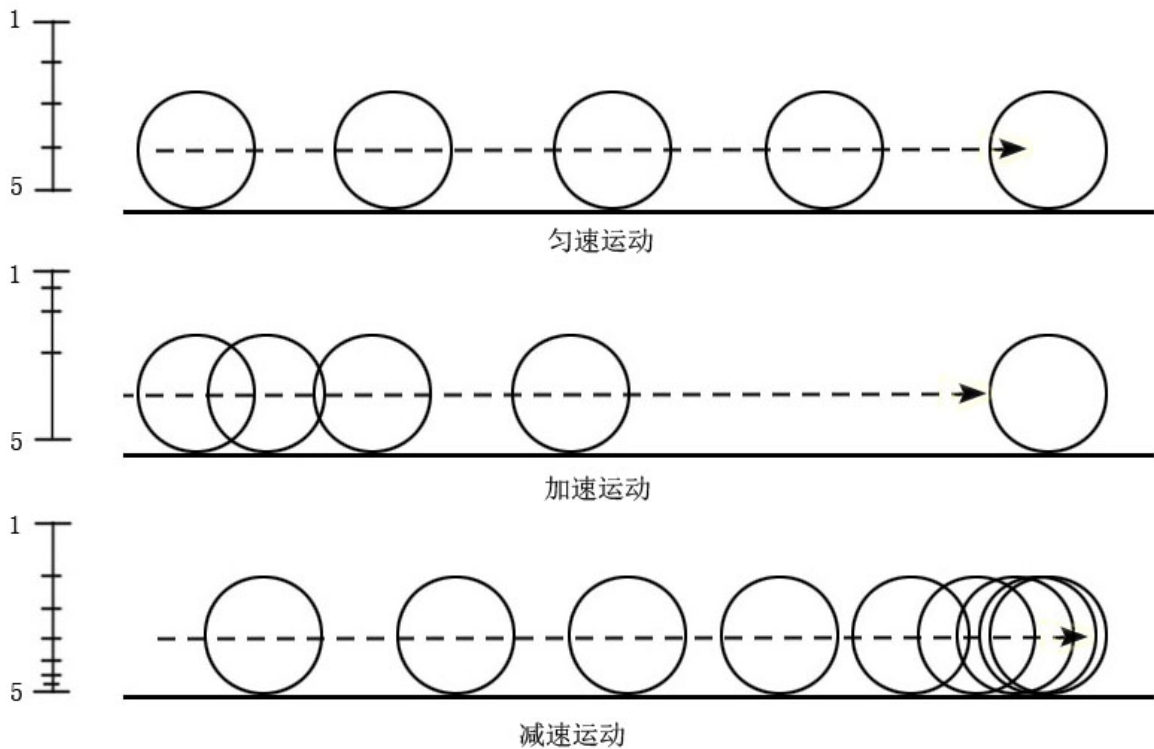
2.2.3 速度

速度表示物体运动的快慢程度。速度是矢量，有大小和方向，速度的大小也称为“速率”。 $v(\text{速度}) = s(\text{距离}) / t(\text{时间})$ 。物理学中提到的“速度”一般指瞬时速度，而通常所说的火车、飞机的速度都是指平均速度。在实际生活中，各种交通工具运动的快慢经常发生变化。

同样的物体在一样的环境条件下受到的外力作用大，物体的运动速度就快，受到的外力作用小，物体的运动速度就慢。在 3D 动画角色的动作制作中需要对运动的速度反复调节，根据速度公式，得知影响速度的两个因素是时间和距离。所以要使物体运动速度变快，则减少运动时间或者增加运动距离。相反，要使物体运动速度变慢，需要增加运动时间或者减少运动距离。自然界中各种力是相互影响制约的，物体在运动过程中受到一个主力影响，当这个主力逐渐减到最弱时，会被另一种作用力继承或替代。如钟摆运动和荡秋千运动都是有各种作用力和反作用力交替影响的结果。

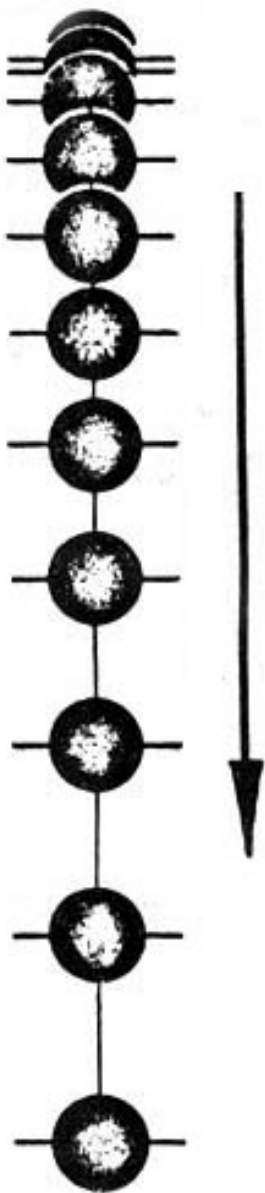


在同样的时间和距离条件下，动画世界里物体移动过程的速度变化可分三种类型：第一种是匀速运动。两张关键动态原画之间，每一帧动画移动的距离都是相等的。第二种是加速运动。两张关键动态原画之间，每一帧动画移动的距离逐渐增多。第三种是减速运动。两张关键动态原画之间，每一帧动画移动的距离逐渐减少。

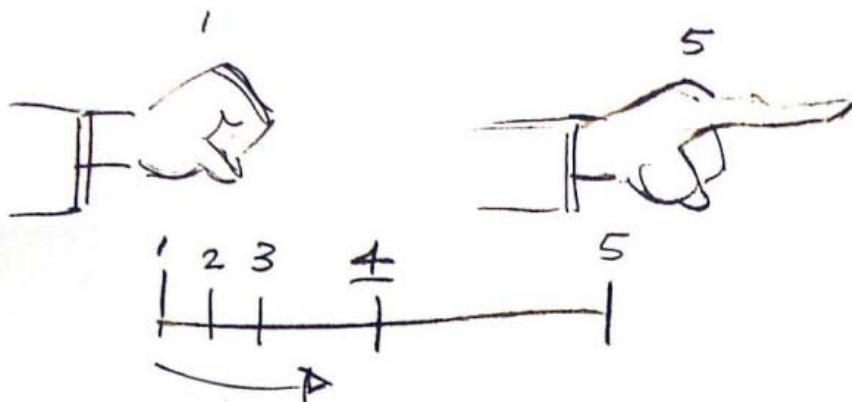


1. 加速度

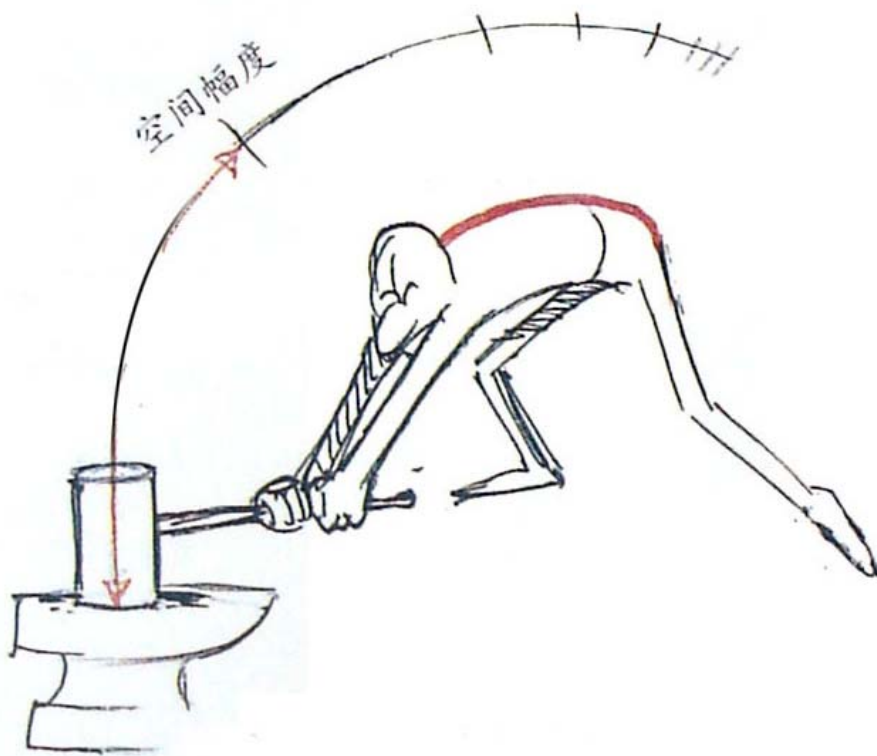
物体在空中自由下落的过程中，受到地心引力和物体自身重量的影响下，便产生加速运动。例如田径运动员向高空投掷铅球，受力的铅球快要运动到最高点后，下落的速度逐渐加快，最后触碰地面。铅球从最高点到接触地面的过程，就是加速运动。



下图例子是人手握拳弹直食指的过程。人手握拳收拢食指搭拇指里，1~3帧通过两指互相摩擦食指逐渐发力，4~5帧位移较大，瞬间弹直手指。食指从收拢到弹直的过程是加速运动。



下图例子是卡通人物双手持锤砸击物体。人物举起铁锤下砸的动作从慢到快，铁锤移动的距离随时间增加而加大。铁锤砸击的下落过程就是加速运动。



2. 减速度

士兵甩动手臂将手雷扔到空中，手雷受到地心引力和自身重量的影响下，初始主动力逐渐减弱，直到停止，手雷被抛到最高点时移动的速度也逐渐减到最慢。手雷离手被抛到最高点的过程就是减速运动。在转换剧烈动作之前的准备状态，或某个剧烈动作速度逐渐减慢最后完全停止也是减速运动，例如人物快速跑动中紧急止步暂停，汽车公路上快速行驶中突然急刹车等。



下图例子是硬币的移动。在一般情况下，硬币是每一帧距离的间隔都同样的匀速运动，得到的动画效果机械、生硬。在动画的世界里，移动的开始和结束都会减少位移的距离，表现出整个移动过程的柔和感，使观众的感官更舒适和自然。在真实的世界里，一般的运动规律下，加速运动和减速运动总是交替转换。减速运动的结束就意味着切换到下一个加速运动的开始，相反，加速运动的结束就切换到下一个减速运动的开始。



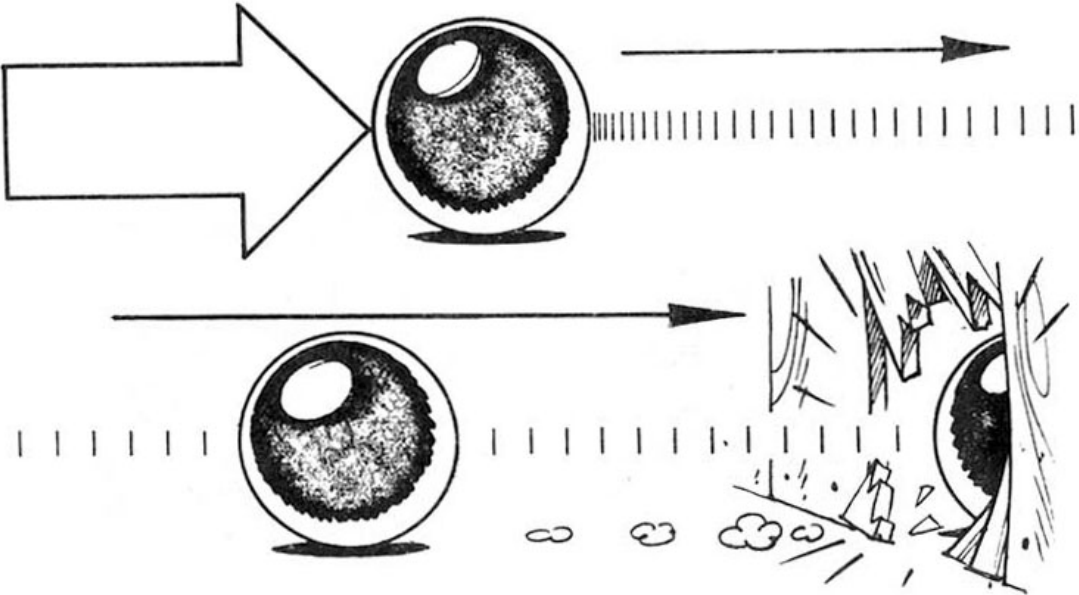
2.2.4 惯性

惯性是物质固有的力，是一种抵抗的现象，它存在于每一物体当中，大小与该物体相当，并尽量使其保持现有的状态，不论是静止状态，还是匀速直线运动状态。

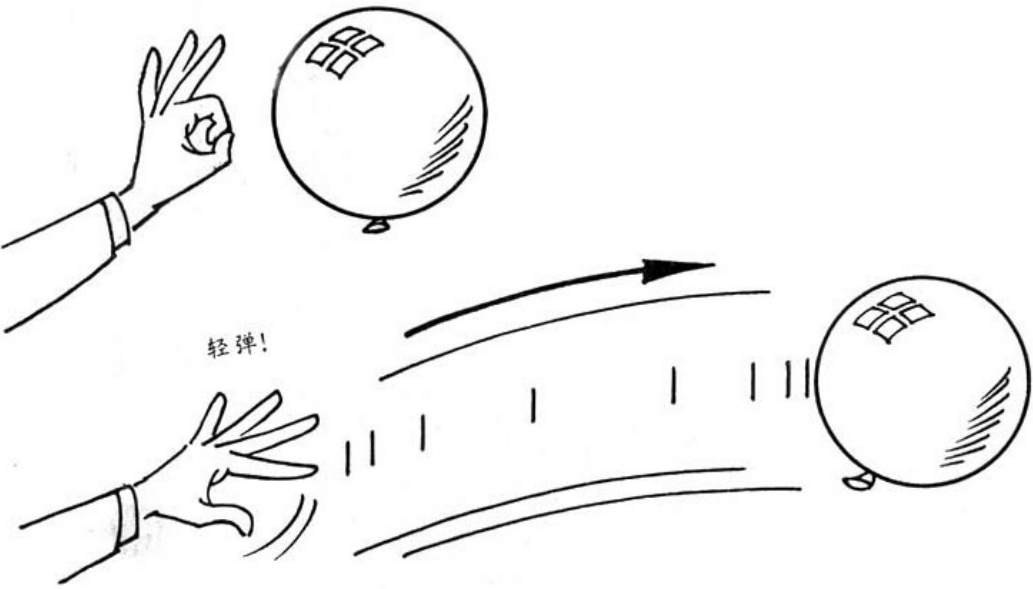
牛顿关于运动第一定律：一切物体在没有受到力的作用时，总保持匀速直线运动状态或静止状态，除非作用在它上面的力迫使其改变这种运动状态。由于物体保持运动状态不变的特性叫做惯性，所以牛顿第一定律也叫惯性定律。物体的重量越大，移动它需要的力也越大。一个重的物体比轻的物体有更大的惯性和动能。

例如沉重的铁球炮弹在静止的状态中，用人力投掷，得到的初始动力和速度都很弱小。如果把炮弹放置在炮膛里用引爆炸药，爆炸巨大的能量使炮弹快速到达一定高度后，由于惯性和自身的重量，炮弹下落时携带着惊人的破坏力。

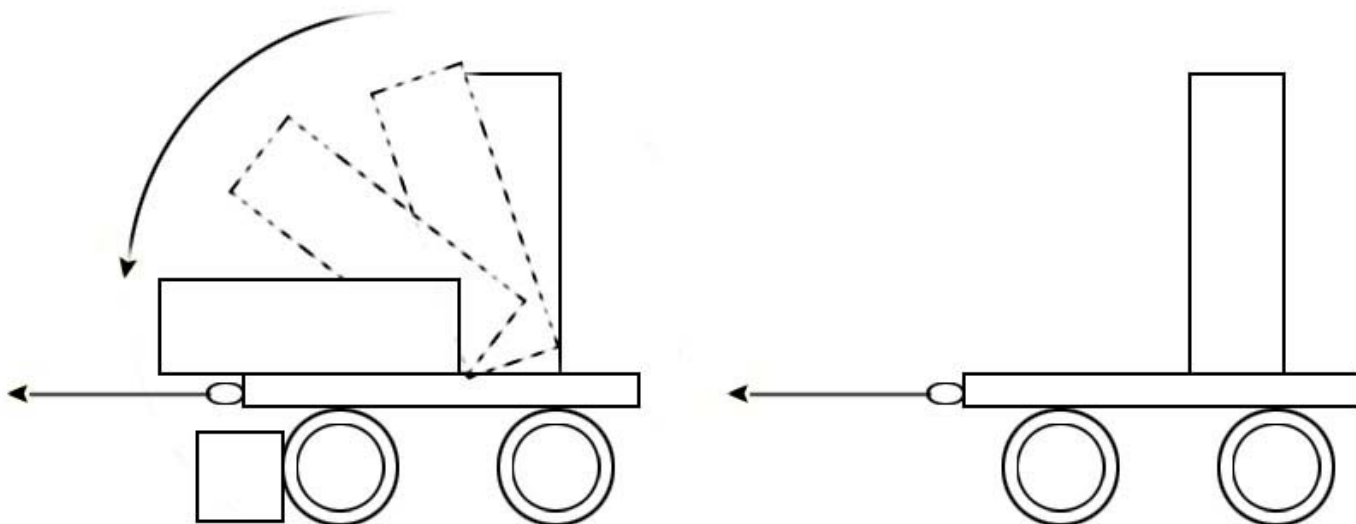
下图例子是铅球受到外力后匀速运动的过程。铅球从静止不动状态被外力推动前滚，如果外界对铅球起反作用的摩擦力、地心引力、空气阻力等都很小，铅球将一直保持匀速向前滚动。碰到薄弱的障碍物也不会改变匀速运动的状态。



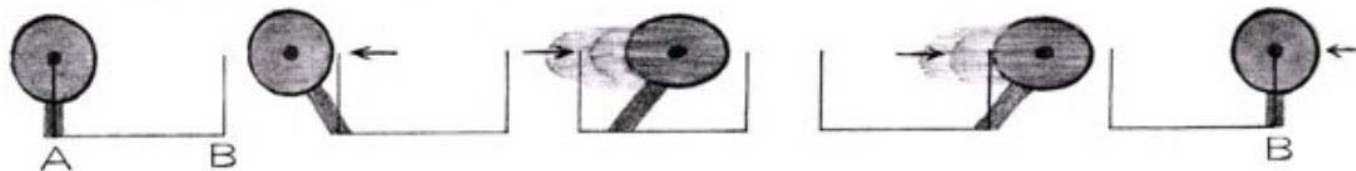
下图例子是人手指弹气球运动的过程。气球自身重量很轻，用手指轻轻一弹，很短时间内就可以使气球产生较大的位移飘动。但手指的弹力很小，在空气的摩擦力和地心引力反作用下，惯性运动并不明显，气球很快减速下落到地面停止移动。



一辆小车上载着一块直立的木块，小车直线前进，当小车在行走的过程中突然碰到障碍物陡然停止，木块在自身重力的影响下，也跟随小车停止运动。但是在惯性作用下，木块还保持着和行车方向一致的前行移动，木块在底部和车面的摩擦力制约下，向前倒下。



例如：乘客站在公交车里，当公交车向前行驶时，因为惯性的作用使乘客保持静止时的站立状态所以身体向后倾斜。当公交车突然刹车停止向前行驶时，在惯性的作用下乘客依然保持向前移动的状态，虽然公交车已经停止运动但乘客会发生身体向前倾斜的运动。



惯性质量：衡量当物体受力时，它对于改变其运动状态的抵抗程度。惯性质量可以通过给物体施加一个力，测量由此导致的加速度而测定。施以同样大小的力，惯性质量较小的物体会比惯性质量较大的物体获得更大的加速度。一个质量较大的物体，我们说它有较大的惯性。

物体的质量和重量既有区别又有联系，一般来说，物体的质量越大，重量也越大，物体的质量越小，重量也越小。
一部几百吨大型板车的质量和重量比一部小轿车要大得多，它的惯性也比轿车大得多，因此，大型板车起步较慢，小轿车起步较快。大型板车的运动状态不容易改变，小轿车的运动状态则容易改变。

汽车刹车时只需刹后轮即可，火车却不行，它的每个轮子都有刹车装置。这是因为火车的惯性比汽车的大，因为改变原来的运动状态比汽车可能。

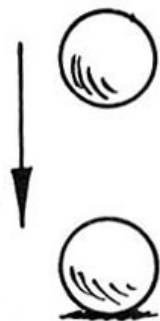
2.2.5 弹性运动

物体在受到外力作用之后会发生形态变化，有除去作用力之后并能够恢复原来形状的特性。物体发生变形状态时，会产生弹力，变形状态消失，则弹力也消失。

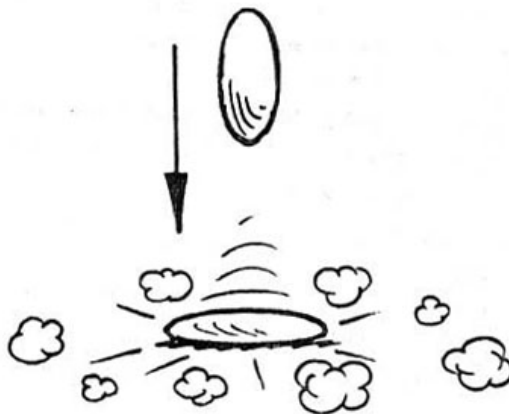
皮球从空中下落到地面，由于自身的重量和地面反作用力的影响，皮球发生变形和弹力。皮球弹到一定高度，弹力逐渐消失，在地心引力作用下，皮球又回落到地面，再次产生变形的弹跳运动，多次弹跳后直到最后弹力消失，皮球恢复原来的形状。

皮球具有弹性，在空中下落到地面后会反复弹跳，其他物体例如坚硬的金属等也会在受力时发生变形吗？物理学的研究已经证明：任何物体受到任何大小的作用力时，都会产生变形，只是有些物体变形明显，有些物体变形细微，我们的肉眼无法察觉。

现实中的运动

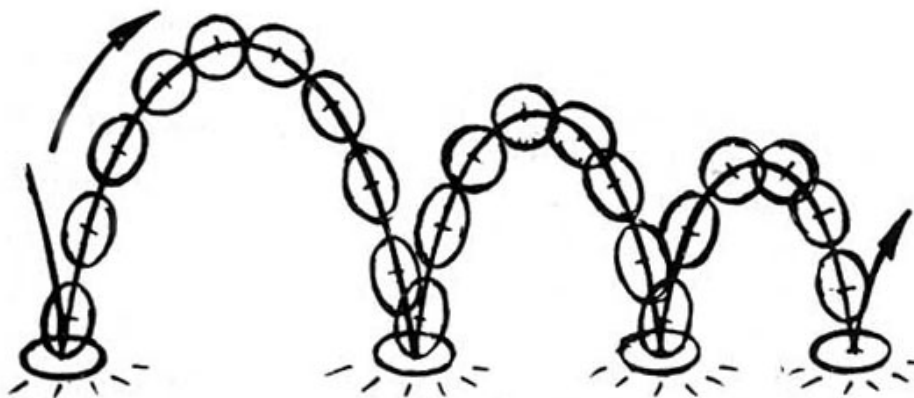


动画中的运动

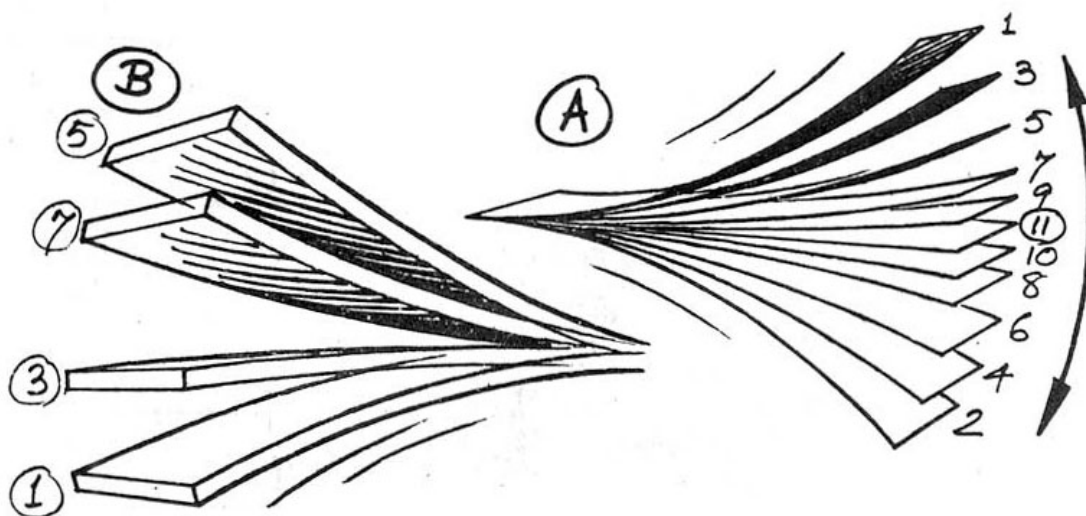


由于物体的物质结构不同和受到作用力的大小不同，产生的变形效果和弹力大小也不相同。

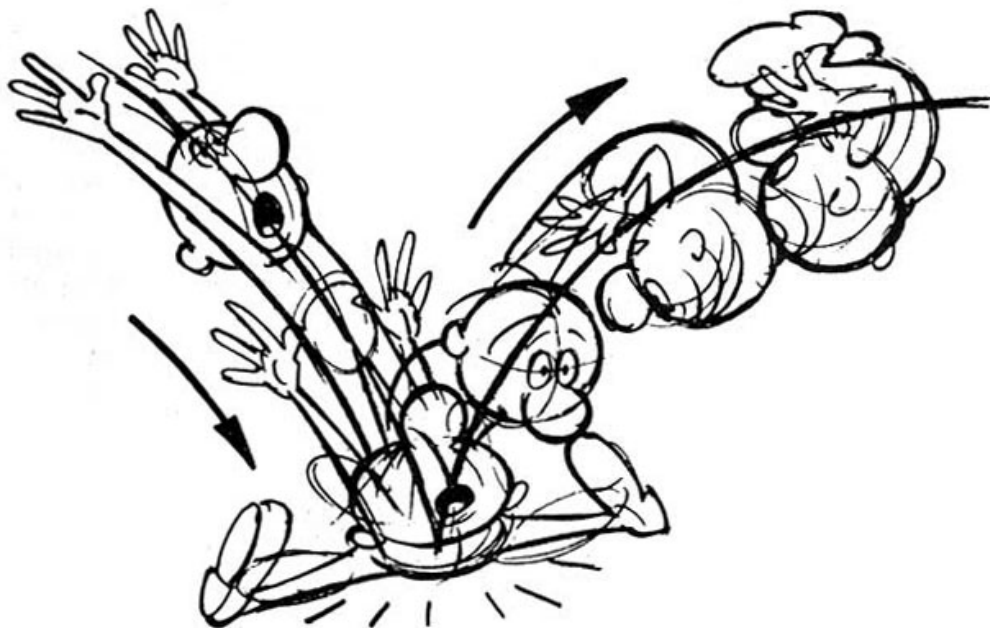
橡胶制造的皮球质地较软，皮球里头有充足的空气，受力后产生的弹力大，弹跳高，变形明显，可以多次连续弹跳。如果是相同体积的实心金属球，受到相同力的作用后变形和弹力则小得多。肉眼不易察觉变形的物体，当其碰撞过程用高速摄像机拍摄后，在慢速度播放下则可以看到物体变形效果相当明显。



下图例子是跳板的上下摆动过程。跳水运动的跳板是在一端固定，另一端有弹性的金属或玻璃钢制成。运动员用自身重量对跳板一端施加作用力，跳板变形下摆到一定角度时，产生更强的反作用弹力，把运动员弹到空中，运动员离开跳板后，跳板上下摆动多次，弹力逐渐减弱，直到恢复初始的静止状态。



下图的例子是卡通人物下落弹起的过程。在动画制作中，惯用手法是夸张弹性的表现，人物从高处下落时躯体和脸部都被拉长，落到地面的瞬间身体被挤压到比脑袋还小，弹起后到空中再恢复正常人形状状态。



在现实生活中，物体与物体之间的碰撞必定会产生变形和弹力。但要注意物体的变形及位移的幅度和节奏的速度，适当地把握好这些特性，可以使物体在发生弹性运动时，显得更加自然、流畅。

2.2.6 曲线运动

物体运动轨迹是曲线的运动，称为“曲线运动”。当物体所受的合外力和其速度方向不在同一直线上，物体就是在做曲线运动。

