



动画的力学原理

自然界中的运动是受到力的支配而产生的，动画片中的运动同样也要符合力学原理才能给人真实可信的感受。动画师必须熟练掌握力学原理，才能设计出符合事物运动规律、具有戏剧张力的动作。

3.1 作用力与反作用力

牛顿第三定律提到，对于每一个作用力，总有一个大小相等、方向相反的反作用力；或者说，两个物体之间的相互作用力总是大小相等、方向相反。这就是作用力和反作用力，这是生活中最常见的一对力。

3.1.1 作用力与反作用力的定义

作用力与反作用力是物理学中描述物体间相互作用的一对基础概念，它们遵循牛顿第三定律，即作用与反作用定律。

1. 作用力

作用力是指一个物体（称为施力物体）对另一个物体（称为受力物体）施加的力。这个力可以改变受力物体的运动状态（如速度、方向）或形状。例如，当你推一个物体时，

你的手对物体施加的力就是作用力。

2. 反作用力

根据牛顿第三定律，当两个物体互相作用时，彼此施加于对方的力，其大小相等、方向相反。力必会成双结对地出现：其中一个力称为“作用力”；而另一个力则称为“反作用力”，又称“抗力”；两个力的大小相等、方向相反。它们之间是可以互相转换的；任何一个力都可以被认为是作用力，而其对应的力自然地成为伴随的反作用力。例如，当一个人坐在椅子上，我们可以说人给了椅子一个向下压的力，这个力是作用力，而椅子给人一个向上托举的力，这个力是反作用力。也可以反过来，椅子托举人的力是作用力，人给椅子向下的压力是反作用力，这两个力大小相等、方向相反。

3.1.2 生活中的实例

生活中有许多这样的例子。在打排球的时候，人用力将排球击打出去，这个力就是作用力，球会在空中朝前运动。但球在空中因为受到空气阻力的影响，排球向前的动力就会减弱，速度就会减慢，空气的阻力就是反作用力。同时排球也受到重力的制约，这个力也是一个反作用力，促使排球呈抛物线运动，最终落向地面。

划船的时候，划船者用桨向后划水，对水施加向前的作用力。水对桨施加一个向后的反作用力，推动船前进。

骑自行车的时候，骑手的脚对脚踏施加向前的作用力。脚踏通过链条传递力至后轮，对地面施加向后的力。地面则对自行车施加向前的反作用力，使自行车向行驶。

打台球时，球被球杆用力推出，沿直线向前滚动，球杆施加在球上的力是作用力。球在桌面上滚动受到桌面摩擦力的影响，球的速度逐渐慢下来，做减速运动，桌面的摩擦力是反作用力。当球碰到桌子边框的阻挡时，便会终止前进产生反弹，这也是反作用力，这时台球改变方向，向另一方向弹出，然后继续做减速运动。经过对台球运动过程的分析我们得出结论，看似简单的物体运动，其实存在着复杂的力学原理。在设计一套运动规律之前，应先分析该运动的力学原理并将运动方式、速度、运动方向等问题考虑进去（图 3-1）。

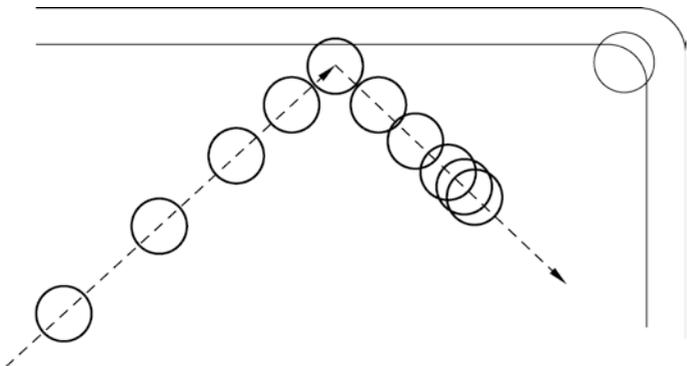


图 3-1
台球在桌面上的运动过程

作用力与反作用力是理解物体间相互作用、分析物体运动状态的基础。在现实世界的各种现象中，如机械运动、流体动力学、电磁相互作用等，都能找到作用力与反作用力的

典型应用。在动画制作中，正确应用作用力与反作用力的原理，有助于创建更加逼真、符合物理规律的动画效果。

随堂作业

- (1) 列举生活中的作用力与反作用力的例子，并加以分析。
- (2) 临摹图 3-1，体会台球在桌面上的运动过程中速度与运动方向的变化。

3.2 力的传送

原来静止的物体受到力的作用，就会从静止状态转变为运动状态。运动中的物体，受到阻力、引力、摩擦力等的影响，运动方式和运动速度就会发生改变。

3.2.1 力通过活动关节传送

物体的运动是受到力的作用而产生的，那么力是如何传递到物体本身，从而改变物体的运动状态的呢？如图 3-2 所示，一根绳子系住木棒的左端，从右边与木棒大致成直角方向拉动绳子时，可以看到首先是绳子被拉紧，木棒的重量好像集中于它的重心，在木棒未与绳子成为直线之前，整根木棒不会朝绳子方向移动，而只是以中心为圆心转动。直到与绳子成为一条直线时才会开始移动。

下面是一组带有活动关节的木棒，在受到不同的力的作用时产生的变化。如图 3-3 所示，当黑色木棒刚开始向右移动时，白色木棒以两根木棒的衔接处为轴心，顺时针（依照图片上箭头指示的方向）旋转，与此同时跟随黑色木棒有水平方向的位移。直到两根木棒处于一条直线上后，白色木棒才跟随黑色木棒运动。

如图 3-4 所示，快速拉扯两根木棒之间的衔接点，由于惯性，起初两根木棒仍然想要

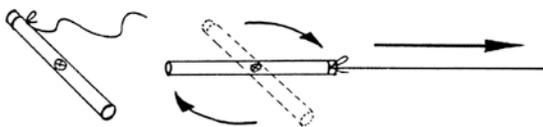


图 3-2
活动关节力的传递（1）

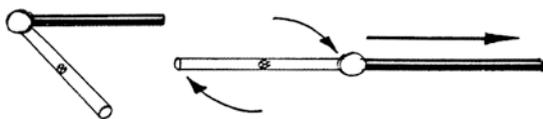


图 3-3
活动关节力的传递（2）

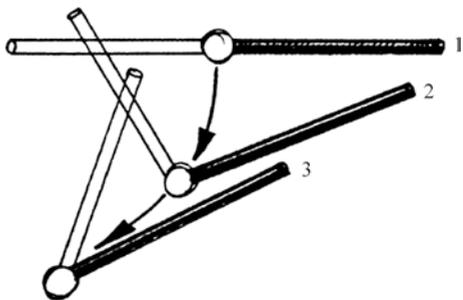


图 3-4
活动关节力的传递（3）

保持原来的状态，两根木棒的末端不动，当力量持续下拉，拉力大于惯性，两根木棒末端则脱离惯性，随着拉力的方向向下运动。

如图 3-5 所示，这是一组更为复杂的带活动关节的木棒的运动示意图。关节有两个。黑色木棒末端是受力点，它受到力的作用跟随带箭头指示方向的曲线运动轨迹运动，带动第二段也就是灰色木棒运动。灰色木棒连同上面的白色木棒由于惯性的作用仍然保持原来的状态（这与急加速时，车中的人会向后倾斜是同一个道理）。同理，当力由黑色木棒传递到灰色木棒时，由于惯性的作用白色木棒仍要保持其原来状态。

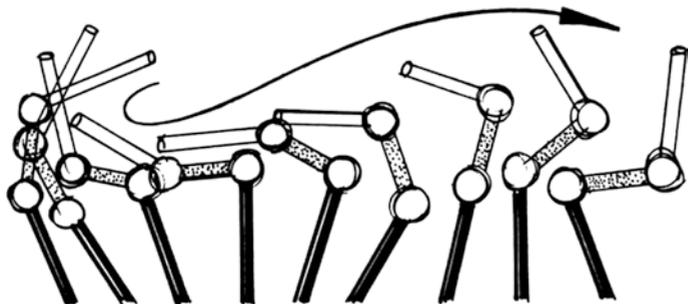


图 3-5
活动关节力的传递（4）

3.2.2 力通过有关节的肢体传送

人物、动物的运动，同样也是通过活动关节传送力量。我们通常把人体或者动物，看作一组由许多部分连接在一起的一个灵活的整体。腿是由大腿骨通过球窝关节与髋部相连，大腿与小腿之间由膝关节连接，脚则由十分灵活的踝关节连接着，手臂也同样地连接肩部。

当然，对于有生命的角色来说，当动作较慢时，肌肉有充分的时间收缩，便会阻止手臂完全被拉直。尽管如此，上述这种倾向性还是存在的。在设计角色动作时，就是要抓住这些有倾向性的动作加以夸张，动作越快，夸张幅度越大。

如图 3-6 所示，当手臂做由弯曲到伸直的动作时，力由肩关节传出，大臂以肩关节为轴心，向前运动。大臂运动的同时带动整个手臂向前运动，随着力逐渐传递到肘关节，肘关节推动带动小臂、腕关节及手掌向前运动，直至整条手臂完全伸直。

图 3-7 所示的动作也是一个手臂屈伸的运动过程，与图 3-6 大致相同，但是这套动作

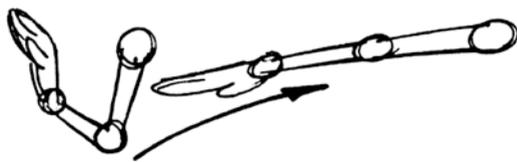


图 3-6（左）
手臂的屈伸运动（1）

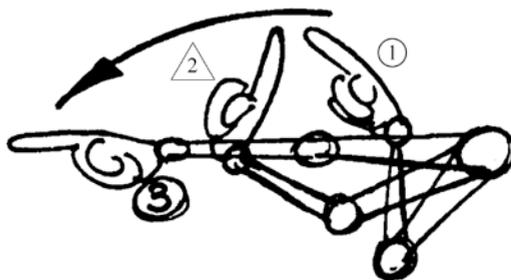


图 3-7（右）
手臂的屈伸运动（2）

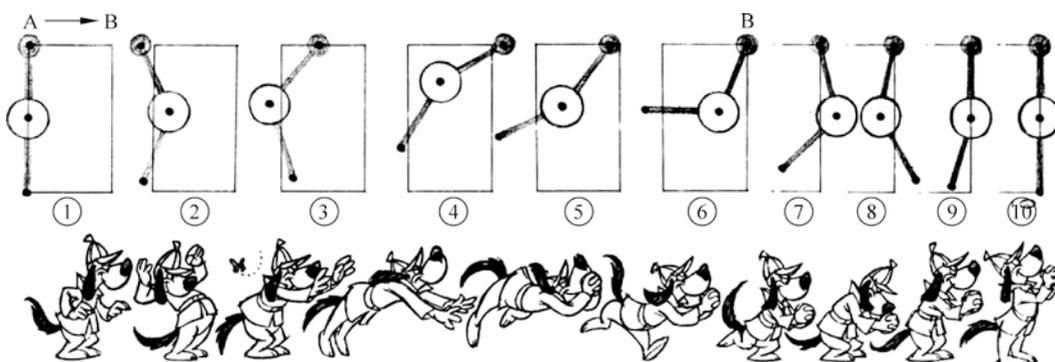
更富有个性、也更加细腻，注意到了运动末端腕关节及手掌的运动。图中①和③是原画，△是小原画，当手臂向前运动的时候手腕和手掌不是机械地向前运动，而是有一个与运动方向相反的运动，这样的设计使运动更生动。

一个松松握在手指中的物体，比如指挥家手里握着的指挥棒（图 3-8），在手移动时，手与指挥棒的衔接处也可以理解为一个活动关节，在手上下挥舞的时候，也可以遵循活动关节运动的方式。另外狗的奔跑、停顿动作（图 3-9），人物的转体动作，松鼠的跳跃、停顿动作也是如此。



图 3-8 (右)
指挥棒的运动

图 3-9 (下)
狗的奔跑、停顿动作



随堂作业

- (1) 列举生活中的力通过活动关节传递和通过肢体关节传递的例子。
- (2) 临摹图 3-2~ 图 3-4 和图 3-8。

3.3 惯性运动

生活中我们会遇见大量的惯性运动，比如汽车急刹车的时候，再比如快速奔跑的人突然急停的时候。这些时候坐在车上的人和奔跑的人都会觉得有一个力迫使他们继续保持原

来的运动，继续向前，这个力就是惯性。

3.3.1 惯性的基本原理

如果一个物体不受任何力的作用，它将保持静止或匀速直线运动，这就是通常所说的惯性定律。这一定律表明：任何物体都具有一种保持它原来的静止状态或匀速直线运动状态的性质，这种性质就是惯性。惯性是一切物体的固有属性，无论是固体、液体或气体，无论物体是运动还是静止，都具有惯性。

一个大方块带着一个小方块匀速向前运动，当大方块前面有一个障碍物，大方块突然停止运动，由于惯性的运动，大方块上面的小方块继续向前做匀速运动（图 3-10）。人坐在行驶的汽车中，当汽车遇到紧急情况突然停车时，这时人的身体仍然保持向前运动，这股持续向前的运动就是惯性在生活中的体现。如果我们细心观察会发现很多这样的例子，在创作动画中的角色运动时，惯性是经常用到的知识点。

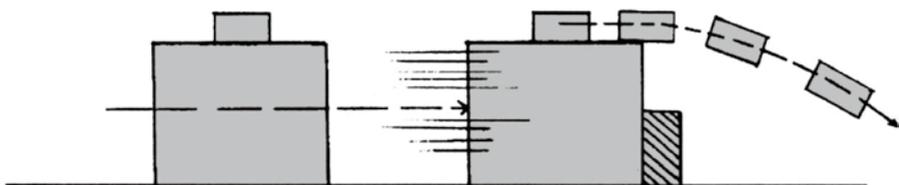


图 3-10
物体的惯性运动

3.3.2 质量与惯性的关系

在物理学中，惯性的大小与物体的质量有关。质量大的物体运动状态相对难改变，也就说质量大的物体惯性大，质量小的物体惯性小。例如，一辆 40 吨的大型平板车的质量比一辆小汽车的质量要大得多，它的惯性也就比小汽车的惯性大得多，因此大型平板车起步很慢，小汽车起步很快，大型平板车的运动状态很不容易改变，小汽车的运动状态则容易改变得多（图 3-11）。

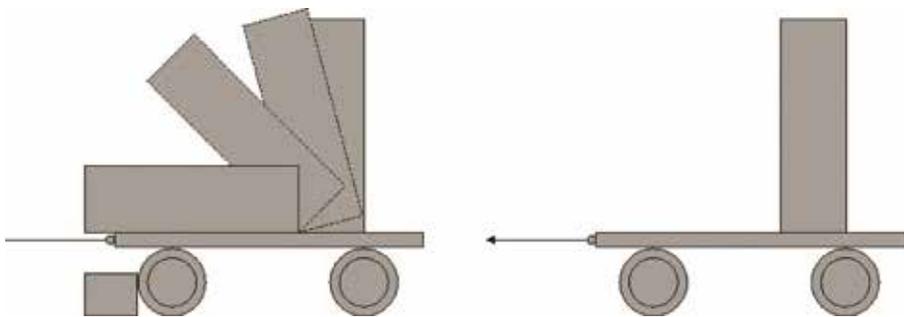


图 3-11
小车的惯性运动

轻的物体惯性很小，当受到外力的作用时，很容易改变运动状态。如推动一只玩具气球只需很少时间，手指轻轻一弹已足够使它加速移动。当它移动时，因动能很小，空气的摩擦力使它很快减速，所以不会移动太远（图 3-12）。

3.3.3 惯性运动在动画片中的应用

动画片中的物体的重量感，需要依靠惯性的强弱来体现。动画师在绘画物体运动时，需要将物体材质、质量及接触面的材质等因素与惯性的关系考虑进去，才能设计出可信的运动。

有的物体运动状态容易改变，有的则不容易改变。这是由于受到物体本身质量、材质等因素的影响。一个静止的铁球，需要很大的力去推动，铁球才会改变原本静止状态向前运动。也就是说处于静止状态的铁球由于惯性的作用，需要足够大的推力才能让铁球摆脱惯性的作用，使之运动起来。同样的道理，一旦铁球滚动起来，它将保持匀速运动，而需要另一个力去阻止它。如果它遇到的障碍物足够坚实，它会被阻止；如果障碍物不够坚实则会被撞碎，它将继续前进。如果它在粗糙的表面上滚动，它会很快地停止，这是由于有很大的摩擦力使它停止运动；但如果它在光滑的桌面上滚动，因摩擦力较小，要滚动相当长的时间才会停止（图 3-13）。

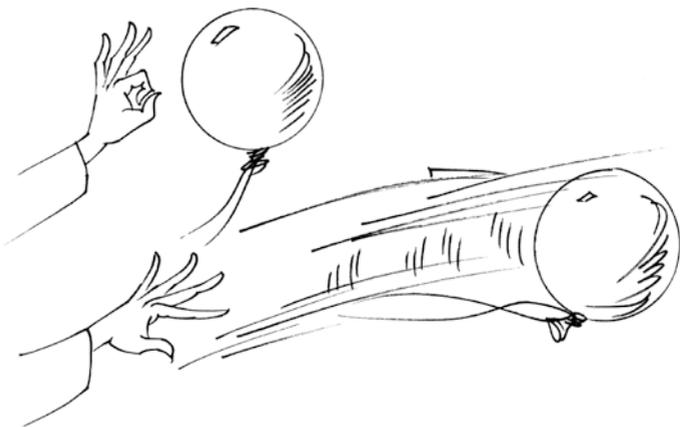
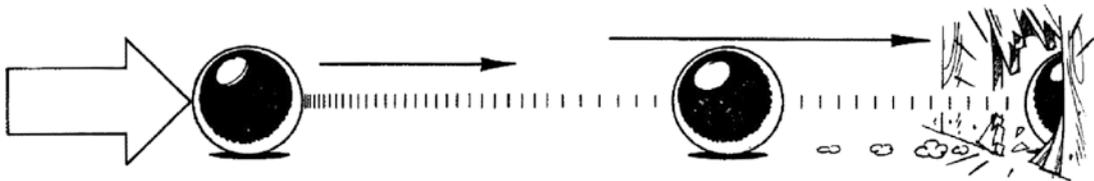


图 3-12 (右)
气球的惯性运动

图 3-13 (下)
铁球的惯性运动



人们骑自行车时如果带有较重的物品，启动、转弯和停车都较骑空车困难，这也是由于惯性的缘故。摩托车驾驶员拐弯的时候，身体都要适当向内倾斜，是为了减小惯性给改变运动状态带来的困难。

当然，动画片在表现物体的惯性运动时，不能只是按照生活中观察到的现象进行简单的模拟，应该在规律的基础上充分发挥想象力，运用动画片夸张变形的手法，设计更为艺术的表现手法。例如，为了营造汽车急刹车的强烈效果，在设计动画时，夸张表现轮胎和车身变形挤压的幅度，并且要让汽车向前滑行一小段距离才完全停下来，恢复到正常状态（图 3-14）。

同样的原理在动物或人的身上也可以应用。动物在奔跑中突然停步，身体会由于惯性向前倾斜，有时要顺势翻一个筋斗或滑行一小段距离，才能完全停下来（图 3-15）。

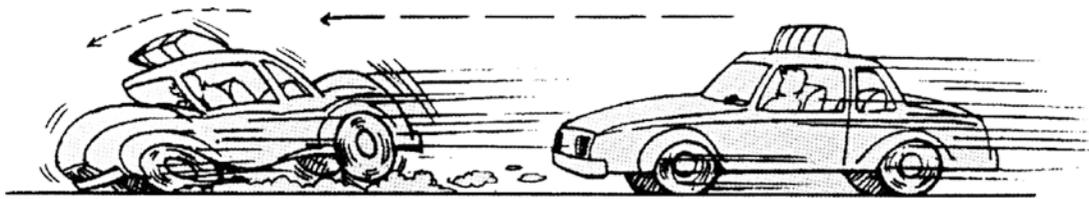


图 3-14
汽车急刹车时的惯性运动

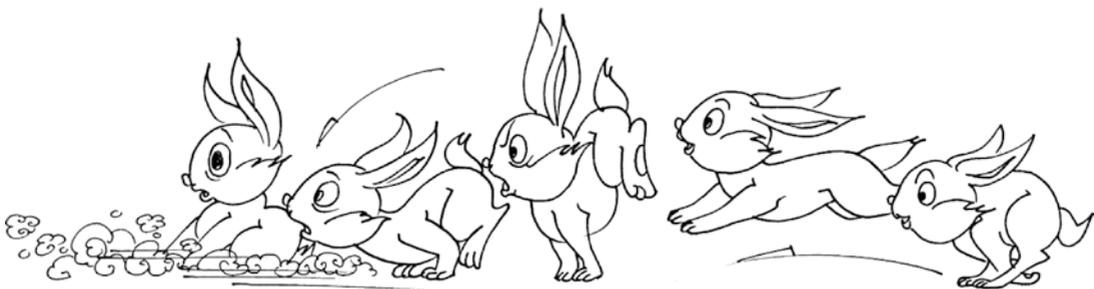


图 3-15
兔子停止奔跑时的惯性运动

在运用夸张变形的手法表现物体的惯性运动时，要掌握好动作的速度与节奏。速度越快，惯性越大，夸张变形的幅度也越大。另外，由于变形只是出现在一刹那，所以只拍几帧就应迅速恢复到正常状态。

随堂作业

- (1) 列举生活中的惯性的例子。
- (2) 临摹图 3-10、图 3-11 和图 3-14。
- (3) 自选一个物体或一个动画角色表现其惯性运动。

3.4 弹性运动

弹性运动在日常生活中十分常见，例如儿童拍的皮球、大街上行走的行人、奔跑的小狗、球拍间飞舞的乒乓球等，只要注意观察，许多运动都包含着弹性运动。

3.4.1 弹性运动的基本原理

物体在受到力的作用时，它的形态和体积会发生变化，这种改变，在物理学中称为

“形变”。物体在发生形变时会产生弹力，形变消失时，弹力也随之消失。

生活中，当看到一个皮球落到地面上时，我们可能会忽略皮球的形态发生了变化，这是因为皮球落地的速度较快，人眼不能识别到皮球的形变，还有一个原因就是皮球下落过程中的形变微乎其微，肉眼几乎看不出改变。但是在动画的世界里，再快的一个动作，动画师也需要把每一个动作分解成若干张动画纸，所以在画一个看似简单的动作之前，要分析物体所受到力的影响。当一个皮球下落，由于自身的重力使皮球下落，这时皮球由于重力的作用球体被纵向拉长，当皮球接触到地面的时候受地面的阻力（反作用力）使皮球被横向压扁，从而产生弹力使球弹起（图 3-16）。

再来看看小球弹跳的例子，当球与地面接触发生形变，从而产生弹力，弹力使小球从地面上弹起，小球向上运动到一定高度，再次由于地心引力落回地面，与地面接触再次发生形变产生弹力，又弹了起来。小球在这个过程中，受到的力逐渐减小，直至弹力消失，球静止。小球受力后会发生形变，产生弹力，那么其他物体受力后是否也会发生形变，产生弹力呢？答案是肯定的。物理学的研究已经表明：任何物体在受到任意小的力的作用时，都会发生形变，不发生形变的物体是不存在的（图 3-17）。

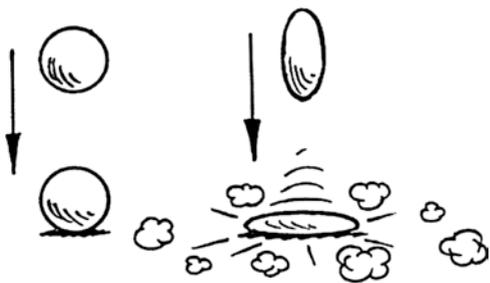


图 3-16
球落地的弹性运动

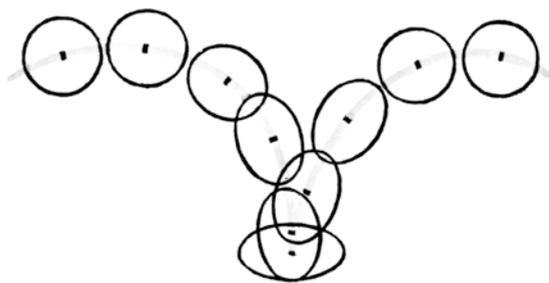


图 3-17
小球落地的弹性运动

皮球是用橡胶做的，质地较软，里面充满了气体，因此在受力后发生的形变明显，产生的弹力大，弹得高，可以连续弹跳多次。如果是实心的木棒，则它受力后所发生的形变和产生的弹力都很小。如果是铅球，那么它的形变和弹力就更小，几乎难以感觉到。所以物体的质地影响着该物体受到的作用力、形变、弹力的大小。

3.4.2 湿面团法

在动画片中，通常夸张强化弹性运动的幅度来增加趣味性。把原本弹性运动不明显的物体画成类似于柔软的面团一样，将弹性变化夸张，这种手法叫作“湿面团法”。例如一只胖嘟嘟的小猪摔倒的过程，当小猪踩到肥皂腾空而起的时候，小猪身上的赘肉也夸张地拉长了，当小猪落地的一瞬间，整个身体压扁，最会恢复原始状态，这种拉长、压扁、还原的过程是湿面团法强化夸张弹性的基本方法（图 3-18）。

同样的道理也可以用到人的身上，人物由高处跳下，像皮球一样着地被压扁再弹起。图 3-19 所示的这套动画也运用了湿面团法。人物从高空下落身体拉长，落地身体压扁，再次弹起恢复原本形态。

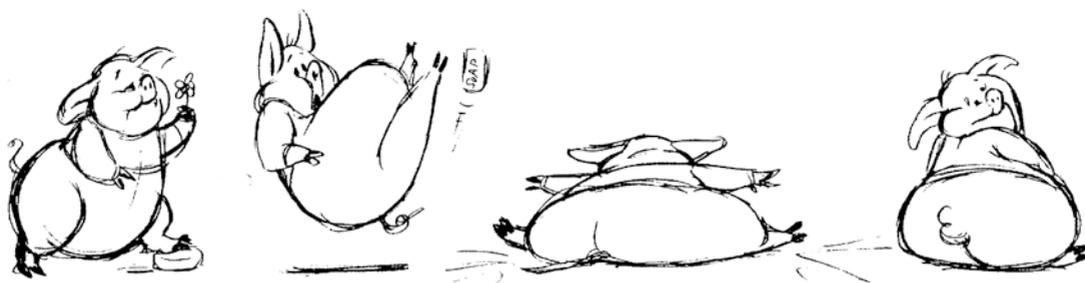


图 3-18
小猪下落（湿面团法）

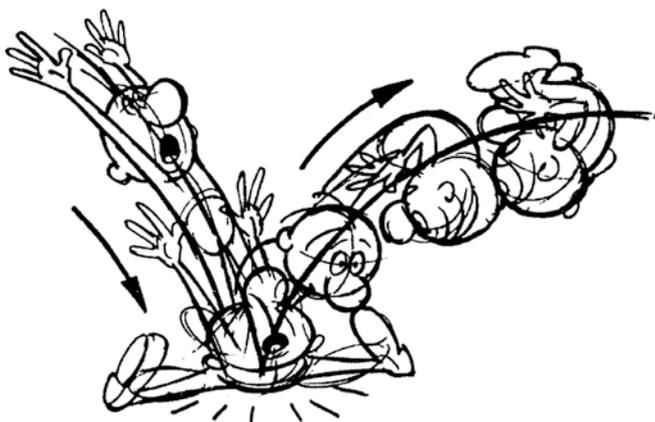


图 3-19
人下落（湿面团法）

在表现弹性运动时，需掌握好速度与节奏，否则就不能达到预期的效果。由于每部动画片的内容和风格样式不同，所以不同物体弹性运动的夸张变形幅度也是不一样的，应该根据剧情和动作风格，合理地把握弹性变化的幅度大小，要灵活运用，不能刻板地生搬硬套该方法。

随堂作业

- (1) 列举生活中的弹性运动的例子并临摹图 3-17、图 3-18。
- (2) 自选一个物体或一个动画角色设计其弹性运动。

3.5 曲线运动

生活中存在着大量的曲线运动，例如飘动的国旗、松鼠的尾巴、艺术体操运动员摆动的丝带等，都是曲线运动。

3.5.1 曲线运动的基本原理

物体运动的轨迹是曲线的运动叫作曲线运动。曲线运动是由于物体在运动中受到与它