# 第五章 二、牛顿第二定律

## 物体运动状态的改变

从牛顿第一定律知道，物体不受外力作用时，它的运动状态不变，即物体运动的速度的大小和方向都保持不变。那么，力是怎样使物体运动状态发生改变的呢？

列车出站时，由静止开始运动，并且速度不断增大，这是由于受到机车牵引力的作用。列车进站时，速度不断减小，最后停下来，这是由于受到制动阻力的作用。射出的炮弹，运动速度的方向不断发生变化，炮弹做曲线运动，这是由于炮弹受到重力的作用。总之，物体运动的速度的大小或方向发生变化时，都是由于受到了力的作用。力是使物体运动状态发生改变的原因，而物体运动状态发生改变时，物体就有了加速度。所以说，**力是使物体产生加速度的原因**。

### 问题探讨

S：力使物体的运动状态发生改变，是不是力的作用使物体失去了惯性？

T：不！应当想一想，为什么要在外力的迫使下，物体的速度才会改变？为什么物体做变速运动时，一刻也离不开外力的作用，外力一旦停止对它的作用，物体便又立即做匀速直线运动呢？这不正是由于物体总是顽固地要保持自己的运动状态不变吗？所以无论在哪一种情况下，物体都不会失去它的固有属性——惯性。

## 加速度和力的关系

一辆静止的汽车，发动后，可在十几秒钟的时间里达到20米/秒的速度，而一辆赛车则要求在起动后几秒钟内，速度就增大到60米/秒或者更大，对这两种不同的汽车应该分别装备什么样的发动机？发动机应该分别提供给它们多大的牵引力呢？长征系列运载火箭发射时，推力高达106牛，它将使火箭产生多大的加速度呢？既然力是使物体产生加速度的原因，那么，对相同质量的物体来说，加速度和力之间是否存在着一定的数量关系呢？

现在让我们通过实验来进行研究。

取两辆相同质量的小车分别放在上、下两块带有定滑轮的光滑水平板上，小车的前端各系上细绳，细绳的另一端跨过定滑轮各挂一个小盘，盘中分别放上不同数值的砝码，使两辆小车在不同的拉力作用下做匀加速运动。在两辆小车的后端也分别系上细绳，用一个夹子夹住这两根细绳以同时控制两辆小车，使它们同时开始运动和同时停止运动（图5-4）。

**图5-4**

小车所受水平拉力*F*的大小可以认为等于砝码和小盘所受总重力的大小[[1]](#footnote-1)。利用这一实验装置可以测出这两辆质量相同的小车，在大小不等的恒定的拉力*F*作用下，在相同时间里发生的位移。多次实验结果表明：质量相等的两辆小车在相同时间内发生的位移*s*，跟小车所受的拉力*F*成正比。由运动学公式*s*＝*at*2，又可知道在相同时间里物体的位移*s*是跟它们的加速度*a*成正比的。因此我们可以得到结论：**在物体质量相同的情况下，物体的加速度跟作用在物体上的外力成正比**。即

＝，或*a*∝*F*。

这一规律给人们以启示，要使物体得到很大的加速度，就必须提供很大的作用力，所以竞赛用的汽车都要求所装备的发动机，能提供比一般汽车更大的牵引力。巨型喷气客机，起飞后要求在短时间内达到800千米/时～900千米/时的巡航速率，所用发动机的推力就必须达到几十万牛，甚至近百万牛。

## 加速度和质量的关系

经验告诉我们，驾驶员开车时，在相同的牵引力作用下，空车加速得快，满载的车辆加速得慢，这就表明加速度还和质量有关系。在外力作用下物体产生的加速度大小和它本身的质量有怎样的关系呢？下面我们再通过实验来进行研究。

利用图5-4的实验装置，在两辆小车所挂的小盘中放入相同的砝码，使它们所受拉力相同，而在其中一辆小车上加放砝码，使它们的质量不同。重做前面的实验，量得它们在相同时间里发生的位移。经过多次实验，可以得出如下的结论：**在相同外力作用的情况下，物体的加速度跟物体的质量成反比**。即

＝，或*a*∝。

这一规律使我们看到力是使物体运动状态发生改变的原因，而物体质量的大小，反映了物体运动状态改变的难易程度。所以为了使物体产生一定的加速度，对物体施加作用力的时候，还必须同时考虑物体的质量。

## 牛顿第二定律及其公式

我们从实验中，已经得出不同大小的力作用于质量相同的物体时，加速度和力的关系；以及相同的力作用于不同质量的物体时，加速度和质量的关系。现在把这些研究结果综合起来，就可以得出加速度跟力或质量两者之间的关系：

**物体的加速度跟所受作用力成正比，跟物体的质量成反比**，这就是**牛顿第二定律**。写成公式就是

*a*∝，

上式也可以改写成等式*a*＝*k*，式中*k*是比例常数。

即*F*＝*kma*。

国际单位制（SI）所规定的力的单位牛顿就是用这个公式定义的：使质量是1千克的物体产生1米/秒2加速度的力是1牛。所以，

1牛＝1千克·米/秒2。

可见，如果加速度用米/秒2做单位，质量用千克做单位，力用牛顿做单位，则前面公式中的比例常数*k*＝1，公式就可以简化成

*F*＝*ma*。

运用牛顿第二定律的公式计算问题时，应该分别用牛顿、千克和米/秒2作为力、质量和加速度的单位。并且要知道公式中*F*和*a*都是矢量，而且加速度*a*的方向和产生加速度的力*F*的方向总是相同的。

**对牛顿第二定律的进一步认识**

“力是使物体产生加速度的原因”这句话定性地反映了加速度和力的关系。而牛顿第二定律则定量地揭示了加速度跟力和质量的关系。物体的加速度由作用力所决定，同时又受到物体质量的制约。在这些问题的研究中，我们还可以从以下几方面更深刻地认识加速度跟力的关系：

1．独立性：作用在物体上的一个确定的力必定产生一个确定的加速度，不会因为物体同时受有其他作用力而有所影响——力的独立作用原理。

2．矢量性：加速度的方向始终跟产生这个加速度的力的方向一致。

3．瞬时性：加速度的大小和方向任何时刻都取决于力的大小和方向。物体在恒力作用下，产生恒定的加速度，做匀变速运动；力发生变化，加速度随之同时发生变化，物体就做交加速运动。

以上所讨论的是物体受到一个力作用时，产生加速度的情况。事实证明，物体同时受到几个力作用时，物体的加速度由这几个力的合力所决定，合力产生的加速度仍可用牛顿第二定律描述。这样，牛顿第二定律就可以推广为：

物体的加速度跟物体所受外力的合力成正比，跟物体的质量成反比；加速度的方向跟合外力的方向相同。写成公式就是

*F*合＝*ma*。

从牛顿第二定律公式我们还可以看到：（1）当作用在物体上的合外力*F*合＝0时，物体的加速度*a*＝0，这时物体就处于平衡状态，即保持静止或者作匀速直线运动；（2）当合外力*F*恒定不变时，物体的加速度*a*也恒定不变；（3）如果合外力*F*随时间变化，那么物体的加速度*a*也随时间作相应变化。

把牛顿第一、第二定律的内容联系起来研究，我们就不但对物体保持静止或匀速直线运动以及作变速运动的原因可以有全面的认识，而且对惯性和力这两个概念也可以有更为深刻的理解。

### 思考

1．你能理解日常所说的“船大调头难”的道理吗？

2．下面四种说法，哪些是对的，哪些是不对的，为什么？

（1）物体受到的合外力越大，物体的加速度越大；

（2）物体受到的合外力越大，物体的速度越大；

（3）物体受到的合外力越大，物体速度的变化越大；

（4）物体受到的合外力越大，物体速度的变化越快。

3．小汽车以恒定的牵引力加速行驶的过程中，如果遇到的阻力越来越大，在阻力还没有大于牵引力的情况下，小汽车的速度会不会减小，以致停车？

4．本章导图4中，歼击机着陆后，为什么要张开尾部的阻力伞？

**导图4 歼击机着陆**

### 练习二十五

1．质量为14吨的客车，起动时最大加速度为1.6米/秒2，求客车发动机的最大牵引力。

2．长征系列运载火箭CZ-2E（捆绑式大推力火箭）的质量为4.64×102吨，火箭发动机产生的推力为6×106牛，那么它发射时能产生多大的加速度？

3．一个铁块在16牛的力作用下产生的加速度是2米/秒2，这个铁块的质量是多大？要使它产生3米/秒2的加速度，需要对它旅加多大的力？

4．10牛的力使一个物体得到2米/秒2的加速度，这个物体的质量是多大？从这道习题的解答过程中，你是不是可以得出“物体质量跟它所受的外力成正比”的结论呢？为什么？

5．一个物体的质量是2千克，若同时受到一个向东的力*F*1＝10牛，一个向西的力*F*2＝6牛的作用，问它的加速度是多大？方向怎样？如果向西的力方向改为向南，这时它的加速度是多大？方向怎样？

## 质量和重力

当你去粮店买米时，首先关心的是要买多少千克的米，也就是关心米的质量数。买米后，准备把米袋扛上肩时，你关心的是这袋米能背起来吗？也就是关心这袋米所受的重力你是否能够承担。这表明物体的质量和它所受的重力是两个有着不同含义的概念。

质量（mass）表示物体所含物质的多少。质量是没有方向的，是标量。

在研究加速度和力的关系的实验中，我们看到：在相同的力作用下，质量小的实验小车，加速度大，它起动得快，加速得快；质量大的实验小车，加速度小，它起动得慢，加速得慢。这说明质量不同的物体，运动状态改变的难易程度是不同的。

在外力迫使物体改变运动状态时，物体运动状态改变的难易程度，是随惯性的大小而不同的。由此可见，质量大的物体惯性大，运动状态较难改变；质量小的物体惯性小，运动状态容易改变，**质量是物体惯性大小的量度**。就行驶中的车辆来说，满载的车辆远比空载的车辆难于加速和制动，这就是质量大，惯性大，运动状态难以改变的实例。

### 问题探讨

S：质量是物体所含物质的多少，质量又是物体惯性大小的量度，这两者有什么联系吗？

T：质量的这两种不同定义是有联系的。在初中我们是从质量是物体所包含的物质的多少来引入的。物体所包含的物质越多，它的运动状态越不容易改变，也就是它的惯性越大。反之，物体所包含的物质越少，它的惯性越小。所以质量也是物体惯性大小的量度。

重力（gravity）是由地球对物体的吸引而产生的。重力是使物体产生重力加速度的原因。物体所受的重力和物体的质量虽有本质的不同，但却有密切的关系。如果用*G*表示物体所受的重力，用*m*表示物体的质量，当物体自由下落时，产生的重力加速度等于*g*，根据牛顿第二定律就可得到

*G*＝*mg*。

上式表明了物体所受重力*G*和它的质量*m*之间的关系。

重力和质量的关系在伽利略时代还没有被人们认识。1671年，法国人里希尔从巴黎到法属圭亚那的卡宴去作天文观察，发现他那个在巴黎走时准确的摆钟变慢了。他只好缩短摆长来校正，但是回到巴黎，他发现钟又变快了。思想敏捷的荷兰科学家惠更斯听到之后，立即领悟了其中的原因——在巴黎和在卡宴摆所受的重力不一样，但是惠更斯没有公开发表他的见解。后来人们才认识到，在地球上不同纬度的地方，物体所受到的重力是不一样的，而质量则是不变的。

现在我们必须指出的是：同一物体在地球上不同纬度或高度的地方，所受重力的差别是很小的（最多也只差千分之几），因此在一般情况下，可以不考虑这样的差别，而认为质量是1千克的物体在地球上任何地方所受重力都是9.8牛。这跟在一般情况下，可以不考虑重力加速度*g*在地球上不同地方的差别，而总取*g*＝9.8米/秒2也是一致的。在学习初中物理时，我们把*g*看成是一个常数，它表示质量是1千克的物体所受重力是9.8牛，实际上就是根据这个道理。

由于在地球上同一个地方，不同物体的重力加速度*g*是相同的，根据*g*＝，如果在同一地方，两个物体的质量分别是*m*1和*m*2它们所受重力分别是*G*1和*G*2，则可以得到如下的关系式

＝。

这就是说，在地球上同一地点，如果两个物体所受重力相等，它们的质量也必定相等。一般天平就是利用平衡时砝码和被测物体所受重力相等的条件，根据砝码的质量数来称量物体的质量的。如果把天平移到另一地点，虽然砝码和被测物体所受重力都发生了改变，但它们仍然相等，天平仍保持平衡，所以用天平可以在地球上任何地方测出物体的质量。

### 思考

据说历史上有个荷兰商人，把货物从荷兰的一个港口运到靠近赤道的非洲某一港口时，发现货物仍然包装完好，但却缺斤少两了。你能解释其中的道理吗？他是不是用天平称量的？

## \*力学单位制

一般说来，物理量的计量单位是可以任意选定的，选择时要考虑使用方便，尽可能符合近代物理观念，并能制成物质原型或利用复制设施来稳定、可靠地显示所选定的单位。另外，由于各物理量间存在着相互联系，可以通过一些确定的单位导出另一些单位来量度另一些物理量，例如长度的单位已确定是米，时间单位已确定是秒，速度就可用米/秒来量度，加速度就可用米/秒2来量度。

根据上述原则制定出基本物理量的单位叫做**基本单位**，如长度单位和时间单位N由基本单位根据物理公式推导出的单位叫做**导出单位**，如速度单位和加速度单位。基本单位和导出单位组成了**单位制**。

1971年第14届国际计量大会通过了国际单位制（SI）采用7个基本单位，其中力学单位：米、千克、秒分别是长度、质量、时间这三个基本物理量的单位。这三个基本单位选定后，若干导出单位也就被确定，组成国际单位制的力学单位制。我国法定计量单位是以国际单位制为基础制定的，其他导出单位，如速度（*v*＝）的单位是米/秒，加速度（*a*＝）的单位是米/秒2，力（*F*＝*ma*）的单位是千克·米/秒2，也就是牛。

在进行物理计算时，要注意所有的已知量都必须使用同一种单位制的单位来表示。这样，应用物理公式计算的结果也就是用这个单位制中的单位来表示的。例如，若已知某物体的质量为若干吨，经过几分钟后，速度由零增大到若干千米/时，要求加速度或力时，就必须把质量的单位换算成以千克表示，时间单位换算成以秒表示，速度单位换算成以米/秒表示。这样，计算出的加速度的单位就是米/秒2，力的单位就是牛。

### 练习二十六

1．下面对质量和重力的叙述中哪些是正确的？

（1）质量和重力是用不同单位表示的同一个物理量；

（2）物体所受重力正比于它的质量；

（3）物体的质量随着它在各地所受重力的不同而改变；

（4）厦量是物体本身的属性，重力是由于地球对物体的吸引而引起的。

2．做验证牛顿第二定律实验时，所用砝码和砝码盘的总质量是215克，它们所受的总重力是多少牛？

3．武装伞兵连同装备的总质量是85千克，降落伞张开后达到匀速下降，问这时空气对他的阻力是多大？

4．月球表面的引力加速度约是地球表面重力加速度的1/6，连同装备在内，总质量为180千克的宇航员在月球表面受到的月球引力为多大？

## 牛顿第二定律的应用

牛顿第二定律指出了力和物体运动状态变化之间的联系．，并进一步阐明了物体做变速运动时，加速度跟所受合外力和物体质量之间的数量关系，这样，就为人们解决有关力和运动的问题提供了依据。牛顿第二定律不但适用于地球表面附近常见的一般物体的运动，还适用于航天、航宇等比较复杂的机械运动。例如，1966年9月12日在地球高空，就完成了一次以牛顿第二定律为基础、富有戏剧性的实验。在这个实验中，由一个“双子星号”宇宙飞船去推一下正在轨道上运行的火箭组，使它加速，再根据这个加速度用牛顿第二定律公式计算出这个火箭组的质量，取得了误差在5%以内的正确答案。这就证明，应用牛顿第二定律确实可以解决许多有关力和运动的问题。经过归纳，解决这类问题通常可以分为两种基本类型：

1．知道了物体的受力情况，用牛顿第二定律求出物体的加速度，结合物体运动的初始条件，应用运动学公式，可确定物体在任一时刻的位置、速度和运动的轨迹。

2．知道物体的运动情况，求出物体的加速度，应用牛顿第二定律判断物体的受力情况，并确定受力的大小与方向。

概括起来，可以这样表示：

物体的运动情况

加速度

牛顿第二定律

→

←

物体的受力情况

运动学公式

→

←

→

←

→

←

这两种类型的应用都体现了人类认识客观世界、进行科学研究的重要途径。第一种类型，运用已知的力学规律，做出正确的预测，是物理学在工程技术应用中进行分析和设计的基本方法。发射人造地球卫星，使它进入预定轨道；制造加速器，使基本粒子获得预期的速度等等，都是逯用这种类型来解决的。第二种类型，根据观察到的现象，结合已知的自然规律去探求未知的物理规律。牛顿从研究天体运动发现万有引力定律，就是属于这种类型的应用。

【例题1】

总质量是2.75×103千克的卡车，在水平公路上行驶，遇到突发事故而紧急刹车，车轮在公路上留下了16.2米的滑动“拖印”后停住。如果把卡车刹车后的运动看成是匀变速直线运动，你能从滑动痕迹推算出卡车在紧急刹车前一瞬间的车速吗？

【解】这个问题是根据已知的受力情况来推算物体的运动情况。卡车刹车后，在竖直方向受到重力*G*和路面的弹力*N*的作用，两力互相平衡；水平方向只受阻力*f*的作用，根据牛顿第二定律*f*＝*ma*，就能求出加速度*a*。由于卡车末速度为零，加速度*a*大小不变且与运动方向相反，又知道卡车滑行16.2米是做匀减速运动，利用运动学公式*v*t2－*v*02＝2*as*，就可以求出卡车在紧急刹车前瞬间的速度。

已知*m*＝2.75×103千克，*s*＝16.2米，*N*＝*G*＝*mg*＝2.75×103×9.8牛＝2.70×104牛，查表得知干路面和橡胶轮胎间的动摩擦因数*μ*＝0.71。

*f*＝*μN*＝0.71×2.70×104牛＝1.92×104牛，

*a*＝＝米/秒2＝6. 98米/秒2。

因为末速度*v*t＝0，所以开始刹车时卡车的速度是

*v*0＝＝米/秒＝15.0米/秒。

【例题2】

雪橇和孩子的总质量是60千克，从静止开始沿雪坡匀加速滑下，10秒内滑下了65米，雪坡的倾角是10°，求滑下时雪橇受到的阻力。

**图5-5**

【解】这个题目是根据已知的运动情况来求解物体的受力情况。

雪橇和孩子沿雪坡下滑是做初速为零的匀加速运动，加速度*a*可以由*s*＝*at*2公式求得。这个加速度是雪橇和孩子所受的合外力*F*合引起的，根据牛顿第二定律公式*F*合＝*ma*，可以求得*F*合。雪橇和孩子共受到三个力：重力*G*，雪坡的弹力*N*和阻力*f*（图5-5）。在垂直于雪坡方向上，弹力*N*和重力的分力*F*2是平衡的，所以合外力*F*合就是重力平行于雪坡的分力*F*1和阻力*f*的合力，即*F*合＝*F*1－*f*，其中*F*1＝*mg*sin*θ*。

已知*m*＝60千克，*s*＝65米，*t*＝10秒，*θ*＝10°。从*s*＝*at*2可以得到

*a*＝＝米/秒2＝1.3米/秒2。

*F*1－*f*＝*ma*，

*mg*sin*θ*－*f*＝*ma*，

所以雪橇滑下时受到的阻力

*f*＝*mg*sin*θ*－*ma*＝60×9.8×sin10°牛－60×1.3牛＝24.1牛。

### 思考

一个物体在两个平衡的力作用下处于静止状态，现在把其中一个力逐渐减小到零，这个物体的加速度和速度的大小将怎样变化？如果再逐渐恢复这个力，这个物体的加速度和速度的大小又将怎样变化？当这两个力恢复平衡时，物体将处于什么运动状态？

### 练习二十七

1．质量是0.096千克的子弹，穿过木块前的速度是820米/秒，穿过木块后速度减为722米/秒，若通过木块的时间是2×10-5秒，求木块对子弹的平均阻力。

2．起重机的钢索至多可以承担1.75×105牛的拉力，在起重一个所受重力为1.47×105牛的物体时，如果要它在0.4秒内从静止得到1.2米/秒的上升速度，钢索会不会断裂？

3．由斜面滑下的A、B两物体以相同的速度，同时滑到一个粗糙水平面上。若物体A的质量大于物体B的质量，A、B两物体与粗糙水平面间的动摩擦因数相等。试比较A、B两物体所受到的摩擦力的大小以及它们在平面上能够滑行的距离。

4．质量为10千克的物体，沿倾角为30°的斜面由静止开始匀加速下滑，物体和斜面间的动摩擦因数为0.25，在2秒内物体从斜面顶端滑到底端，问这斜面有多长？

5．质量是12.5吨的电车在水平道路上作匀变速直线运动，10秒内速度从5.0米/秒增大到6.2米/秒，它所受的阻力是2.5×103牛，求电动机所产生的牵引力。

6．用2牛的水平恒力拉质量为0.8千克的木块，沿水平桌面由静止开始做匀变速直线运动。如果木块在5秒内移动的距离是2.5米，求木块运动的加速度以及木块和桌面间的动摩擦因数。

7．一个质量为80千克的人站在电梯里，电梯以1米/秒2的加速度加速上升时，电梯的地板对人的支持力多大？如果电梯以1米/秒2的加速度加速下降，支持力又是多大？

8．一个初速为零的电子在真空管里，从阴极沿直线匀加速运动到阳极，到达阳极时速度为6.0×106米/秒，其间经过1.0厘米的距离。已知电子质量为9.1×10-31千克，电子在运动过程中受到的作用力多大？它是电子所受重力的多少倍？

## 牛顿定律的局限性

自17世纪以来，牛顿定律在广阔的科技领域中解决了许多实际问题，充分证明了它的正确性。以牛顿定律为基础的经典力学体系，不断得到发展，取得了巨大的成就，成了许多工程技术的重要基础。牛顿定律被人们视为经典力学的精髓。

但是随着物理学的发展，特别是1 9世纪末和20世纪初以来对电磁理论的研究，和随之而来的对微观高速粒子的研究，把人们带进了一个崭新的科学领域。人们开始发现，牛顿运动定律在这些新的科学领域中，常常显得无能为力。如高速运动电子的质量会随速度增大而变大的事实，牛顿定律就不能作出切合实际的解释。20世纪初，著名物理学家爱因斯坦（Albert Einstein，1879-1955）提出了狭义相对论，从根本上改变了我们通常对时间和空间的认识，阐述了长度和时间跟速度的密切关系，以及物体质量随物体运动速度增大而变大等牛顿运动定律所不能解释的问题。相对论力学不但在微观、高速的情况下，取代了经典力学，而且还在宏观、低速的情况下包容了经典力学。

物理学的发展向人们揭示了一个真理：任何理论总不是一成不变的，即使相对论也是在发展的；任何理论也不是包罗万象的，不存在经典理论是错误的而近代理论是正确的这样的问题。重要的是我们应该知道，一种理论所能描述的物理现象与有关规律的适用范围，总是有限度的。经典力学是在研究宏观物体的低速运动的基础上总结出来的规律，它不能用来处理微观粒子高速运动的问题，这就是牛顿定律的适用范围和局限性。

1. 在砝码盘和盘中砝码的总质量远小于小车质量的情况下，砝码盘通过细绳对小车的拉力可以近似地看作等于砝码盘和盘中砝码所受的总重力。 [↑](#footnote-ref-1)