

11.3 如何提高机械效率

与教材不同之处

更详细描述有用功，额外功，总功概念，更详细描述三大机械的机械效率的求解，更详细分析机械效率的影响因素。

有用功、额外功、总功

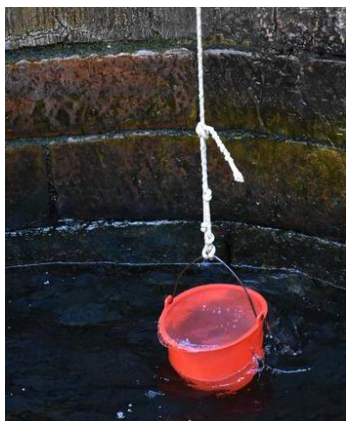


图 11-3-1

如图 11-3-1 所示，当我们用桶从井中打水时，在拉力作用下，我们对水和桶都做了功。其中，对水做功是我们需要的，有价值的功。物理学上，人们有价值的功叫做**有用功**，记作 $W_{\text{有用}}$ 。

打水时，我们将不得不同时将桶拉起，所以，对桶做的功其实是我们不想做的，是多余的，但又不得不做的功。像这类不需要，但又不得不做的功，我们称为**额外功**，记作 $W_{\text{额外}}$ 。

物理学上，有用功和额外功的总和叫做总功，用 $W_{\text{总}}$ 表示。

$$W_{\text{总}} = W_{\text{有用}} + W_{\text{额外}}$$

使用机械时的有用功

如图 11-3-2 所示，此滑轮组的有用功、额外功、总功分别指的是什么？

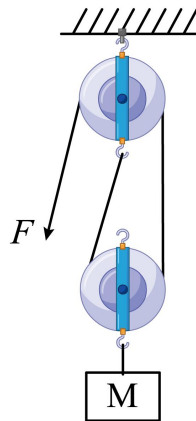


图 11-3-2

此滑轮组运作的目的是什么？

把重物提升到某一高度。

我们知道，重物被提升的过程，其实是重物克服重力做功的过程。

也就是说，此滑轮组的有用功是指重物克服重力做的功。

因此，有用功的大小为：

$$W_{\text{有用}} = G \cdot h$$

其中 G 为物体的重力， h 为物体上升的高度。

如图 11-3-3 所示，我们利用滑轮组水平拉动一个物体前进。

此滑轮组运作的目的是什么？

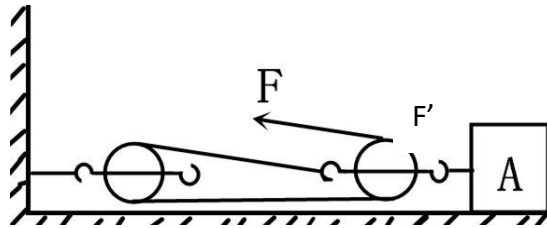


图 11-3-3

把物体水平移动一段距离。

我们知道，物体在水平移动过程中，其实是物体克服地面摩擦力做功的过程。

也就是说，此水平放置的滑轮组的有用功是指物体克服摩擦力做的功。

因此，有用功的大小为：

$$W_{\text{有用}} = f \cdot s_{\text{物}}$$

其中 f 为物体所受到的阻力， $s_{\text{物}}$ 为物体在水平方向上移动的距离。

可以看得出来，当滑轮组以水平方式使用时，有用功与物体重力的大小无关。

如图 11-3-4 所示，我们将货物通过斜面推上车，在这个过程中，斜面的作用是什么呢？

显然，此斜面的作用是为了将重物提升到某个高度上。

所以，斜面的有用功与竖直吊挂的滑轮组的有用功是一样的——重物克服重力做功。

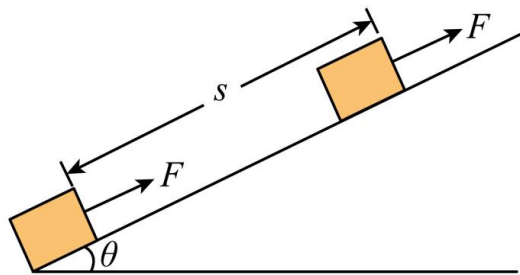


图 11-3-4

即：

$$W_{\text{有用}} = G_{\text{物}} \cdot h$$

通过上述的三种机械，我们不难得出这么一个规律：使用机械时，无非是提升物体沿竖直方向上升，或者拉着物体沿水平方向前进，因此，使用机械做的有用功，要么是 $W_{\text{有用}}=Gh$ ，要么是 $W_{\text{有用}}=fs$ 。

我们还可以这样认为，所谓有用功是指不使用机械时，对物体所做的功。

比如，没有竖直滑轮组或斜面时，对物体所做的功与物体克服自身重力做的功是相等的。

使用机械时的额外功

由于滑轮组有两种使用方法，分别是竖直方式（如图 11-3-2 所示）、水平方式（如图 11-3-3 所示），对于这两种不同的使用方式，不但它们的有用功不同，额外功也是不同的。

（1）竖直滑轮组的额外功：

对于竖直滑轮组，要做的额外功是由动滑轮的自重、绕在滑轮上的绳重以及跟滑轮有关的摩擦造成的，公式可写成

$$W_{\text{额外}} = W_{\text{动}} + W_{\text{绳}} + W_{\text{摩擦}}$$

一般地，最主要的额外功来自动滑轮的自重，所以，当我们忽略绳重与摩擦的影响时，竖直滑轮组的额外功只来自动滑轮的自重，则公式可变为

$$W_{\text{额外}} = W_{\text{动}} = G_{\text{动}} \cdot h$$

其中 $G_{\text{动}}$ 是指动滑轮的自重， h 为动滑轮上升的高度（ h 也是物体上升的高度，这是因为动滑轮与物体的上升是同步的）。

需要强调的是，额外功与定滑轮的重力无关。

（2）水平滑轮组的额外功：

对于水平滑轮组，额外功主要是来自绕在滑轮上的绳重以及跟滑轮有关的摩擦造成的。

（3）斜面的额外功：

如果有斜面的表面是粗糙的，物体在沿斜面向上运动过程中克服斜面摩擦做的功，就是额外功了，公式可写成：

$$W_{\text{额外}} = f \cdot s$$

其中， f 表示物体在斜面滑动时所受到的摩擦力， s 表示斜面的长度。

斜面的额外功与摩擦力有关，水平滑轮组的有用功也与摩擦力有关。这说明，我们不能依据物体克服摩擦力做功，就断定物体一定在做额外功。

区分有用功和额外功，最根本的技巧是：假定没有机械，为完成指定目标时该物体克服某个力做的功就是有用功。

使用机械时的总功

无论是哪种机械，总功总是有用功与额外功之和。

对具体的某种机械，总功的求法还是存在一些差别。

对于滑轮组，无论是竖直滑轮组，还是水平滑轮组，都是在滑轮的绳子自由端施加一个

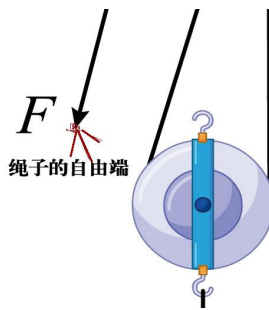


图 11-3-5

拉力的作用，如图 11-3-5 所示。也就是说，我们施加的拉力并没有直接作用在物体上，而是作用在机械上，再通过机械对物体做功。

这就意味着，我们施加的拉力，不但要提升物体（做有用功），还要克服机械的摩擦等

其他因素（做额外功）。

因此，两种方式的滑轮组的总功都是拉力 F 与拉力方向上通过的距离 s 的乘积，公式可表示为

$$W_{\text{总}} = F \cdot s$$

其中 F 为作用在绕在滑轮组上的绳子自由端上的拉力， s 为绳子末端沿着拉力 F 方向上通过的一段距离。

对于斜面，沿斜面向上推动物体上升到指定高度的过程中，不但要提升物体（做有用功），还要克服机械的摩擦等其他因素（做额外功）。

所以，推力做的功是总功，总功等于推力 F 与物体在斜面上通过的一段距离 s 的乘积，公式可表示为

$$W_{\text{总}} = F \cdot s$$

其中 F 为作用在物体上推力， s 为物体沿着推力 F 方向上通过的一段距离。

需要注意的是，由于物体一般都是由斜面的底部被推至斜面的顶端，所以物体被推动的距离与斜面的长度 s 相同的。

有关滑轮组的有用功、额外功、总功的计算

例题，如图 11-3-6 所示，工人利用滑轮组将沙子从地面提升到距地面 6m 高的三楼，沙子的重量为 500N，动滑轮的重量为 100N，工人匀速拉绳子的力为 300N，忽略摩擦、绳重、桶重。

求：（1）工人做的有用功；（2）工人做的额外功；（3）工人做的总功。

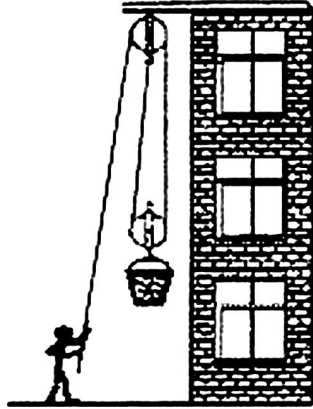


图 11-3-6

【分析】求有用功时，我们不妨假定没有滑轮组时，物体上升时需要克服物重做的功；求额外功时，要区分好是题目中的情境是半理想（只忽略摩擦、桶重和绳重，没有忽略动滑轮重），还是真实情境（摩擦、绳重、动滑轮重和桶重都不能忽略）。求总功的方法有两种：一是总功等于有用功与额外功的和；二是总功等于拉力与拉力（或绳子自由端）通过的距离的乘积。

解：（1）工人做的有用功

$$W_{\text{有用}} = G_{\text{物}} \cdot h = 500\text{N} \cdot 6\text{m} = 3000\text{J}$$

（2）工人做的额外功

$$W_{\text{额外}} = W_{\text{动}} = G_{\text{动}} h = 100\text{N} \times 6\text{m} = 600\text{J}$$

（3）工人做的总功

方法一：
$$W_{\text{总}} = W_{\text{有用}} + W_{\text{动}} = 3000\text{J} + 600\text{J} = 3600\text{J}$$

方法二：
$$W_{\text{总}} = F \cdot s = 300\text{N} \cdot 12\text{m} = 3600\text{J}$$

答：(1) 工人做的有用功 3000J；(2) 工人做的额外功为 600J。(3) 工人做的总功为 3600J。

题目中第（3）问的答案是通过两种方法求解出来的，这说明，拉力做的功就是总功。

有关斜面的有用功、额外功、总功的计算

例题，如图 11-3-7 所示，工人借助斜面，在 100N 的推力下将重 400N 的物体由底部推至顶部，斜面长 5m，高为 1m。

求：(1) 工人做的有用功；(2) 工人做的总功；(3) 工人做的额外功；(4) 物体受到斜面的摩擦力。

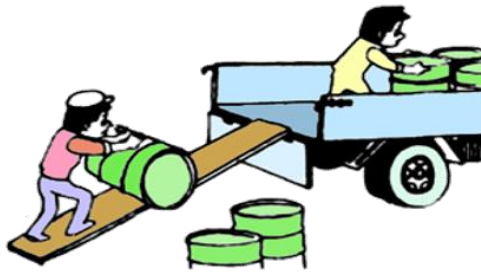


图 11-3-7

【分析】要算有用功大小，假定不利用斜面时，把货物搬上货车时做的功，显然，有用功等于物体克服物重做的功；总功是推力做的功。

由于题目没有告之摩擦力的大小，额外功的求解不能通过公式 $W_{\text{额}}=fs$ 来解答了。但可以通过总功减去有用功的方法来求解额外功。

欲求解物体在斜面上滑行的摩擦力，则需先求解额外功。

解：

(1) 工人做的有用功

$$W_{\text{有用}} = G_{\text{物}} \cdot h = 400\text{N} \cdot 1\text{m} = 400\text{J}$$

(2) 工人做的总功

$$W_{\text{总}} = F \cdot s = 100\text{N} \cdot 5\text{m} = 500\text{J}$$

(3) 工人做的额外功

$$W_{\text{额外}} = W_{\text{总}} - W_{\text{有用}} = 500\text{J} - 400\text{J} = 100\text{J}$$

(4) 物体受到斜面的摩擦力

$$f = \frac{W_{\text{额外}}}{s} = \frac{100\text{J}}{5\text{m}} = 20\text{N}$$

答：(1) 工人做的有用功 400J；(2) 工人做的总功 500J；(3) 工人做的额外功 100J；(4) 物体受到斜面的摩擦力 20N。

通过这个题目，我们要意识到：要求出物体在斜面上受到的摩擦力，往往先要求出斜面的额外功。

什么是机械效率

有两台塔吊正在忙着提升一些货物，如图 11-3-8 所示。



图 11-3-8

当两台塔吊消耗相同的电能，有一台提升的货物更多一些，这说明了什么？这说明，提升更多货物的塔吊做的有用功更多，或者说，做的额外功更少。

在生产和生活中，我们当然都希望机械做的有用功越多越好（总功一定时），或者说，机械做的额外功越少越好（总功一定时）。如果机械具有这种性质，说明这种机械具有节省能源的优点。

需要强调的是，“总功一定，有用功更多”其实是指有用功占总功的比例大。

“总功一定，额外功少”其实指的是额外功占总功的比例小。

物理学上，将有用功与总功的比值叫做**机械效率**，用 η 表示， η 读作“eta”。公式表示为

$$\eta = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} \times 100\%$$

η 一般用百分数表示，没有单位。

因此，机械效率 η 的大小能直观地反映出机械性能的好坏——节省能源的性能。机械效率 η 越大，意味着该机械的更节省能源。比如汽车，如果汽车的效率高，则意味着这样的汽车更省油。

需要强调的是，在真实情境中，任何机械都做额外功，也就是说，有用功总是比总功小，所以，机械效率不可能大于 1，只会小于 1。除非在理想情况下，机械的机械效率才可能等于 1。

如果某起重机的机械效率是 60%，它表示什么意思？

这说明使用起重机提升重物时，有用功在总功中占有 60%，另外的 40% 是额外功占总功的比例。

有关机械效率的计算

例题，如图 11-3-9，某起重机将重 6000N 的物体上升了 5m，动滑轮重 400N，绳重和摩擦忽略不计，求：

- (1) 起重机做重物做的有用功是多少？
- (2) 起重机做的额外功是多少？
- (3) 起重机做的总功是多少？

(4) 起重机的机械效率是多少？

(5) 当起重机提升的重物变为 7600N 时，它的机械效率又是多少？



图 11-3-9

【分析】本题的额外功只来自克服动滑轮自重而做的功；从题目看，总功的求解可能过有用功和额外功之和来求解。

解：

(1) 起重机做重物做的有用功

$$W_{\text{有用}} = G_{\text{物}} \cdot h = 6000 \text{ N} \cdot 5\text{m} = 30000 \text{ J}$$

(2) 起重机做的额外功

$$W_{\text{额外}} = G_{\text{动}} \cdot h = 400 \text{ N} \cdot 5\text{m} = 2000 \text{ J}$$

(3) 起重机做的总功

$$W_{\text{总}} = W_{\text{有用}} + W_{\text{额外}} = 30000 \text{ J} + 2000 \text{ J} = 32000 \text{ J}$$

(4) 起重机的机械效率

$$\eta = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} = \frac{30000\text{J}}{32000\text{J}} = 93.75\%$$

(5) 若物重 $G_2=7600\text{N}$ 时，则此时的机械效率

$$\eta' = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{有用}} + W_{\text{额外}}} = \frac{G_2 \cdot h}{G_2 \cdot h + G_{\text{动}} \cdot h} = \frac{G_2}{G_2 + G_{\text{动}}} = \frac{7600\text{N}}{8000\text{N}} = 95\%$$

答：(1) 起重机做重物做的有用功是 30000J, (2) 起重机做的额外功是 2000J, (3) 起重机做的总功是 32000J, (4) 起重机的机械效率是 93.75%, (5) 当起重机提升的重物变为 7600N 时, 它的机械效率又是 95%。

有关竖直滑轮组机械效率的其他推导公式

(1) 从上面的例题, 我们发现, 当忽略绳重和摩擦时, 机械效率还可以通过物重和动滑轮重力求出, 求解表达式如下:

$$\eta = \frac{G_{\text{物}}}{G_{\text{物}} + G_{\text{动}}}$$

(2) 针对竖直滑轮组的机械效率, 我们利用 $s=nh$ 的关系, 还有其他的推导公式:

$$\eta = \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} = \frac{G_{\text{物}} \cdot h}{F \cdot s} = \frac{G_{\text{物}} \cdot h}{F \cdot nh} = \frac{G_{\text{物}}}{F \cdot n}$$

从上面的推导式, 我们可以看出, 机械效率通过物重、拉力和绳子的股数求出, 最终的表达式如下:

$$\eta = \frac{G_{\text{物}}}{F \cdot n}$$

需要强调的是, 第 (1) 个推导式具有物理意义, 因为它可以让我们看出, 机械效率是由物重和动滑轮重决定的 (绳重和摩擦忽略不计); 但第 (2) 个推导式却没有物理意义, 只有计算意义, 也就是说, 第 (2) 个推导式不能说明机械效率与拉力、绳子股数有关。

竖直滑轮组的机械效率的影响因素

从图 11-3-7 的例题的第（4）问答案和第（5）问答案的比较，我们发现，竖直滑轮组的机械效率与物重有关。即物重越大，机械效率越大。

但竖直滑轮组的机械效果不仅仅是与物重有关，若保持物重不变时，减少动滑轮重、绳重、绳与滑轮的摩擦，可以减少额外功占总功的比例，也可以提高竖直滑轮组的机械效率。

因此，影响竖直滑轮组的机械效率的影响因素有：物重、动滑轮重、绳重、绳与滑轮的摩擦等四个因素。

与机械效率无关的因素

前面我们说了，竖直滑轮组的机械效率与绳子股数无关？

可能有人会困惑，第（2）推导式明明显示机械效率与绳子股数啊，因为只改变滑轮组的绳子的绕法（即改变滑轮组的绳子的股数），一定会改变了拉力的大小，总功看似也会发生改变。真的是这样的吗？

例题，如图 11-3-10 所示，有甲乙两个滑轮组，分别提升 10N 的钩码，提升的高度均为 1m，动滑轮重 2N，忽略绳重和摩擦。试求两个滑轮组分别做的总功。

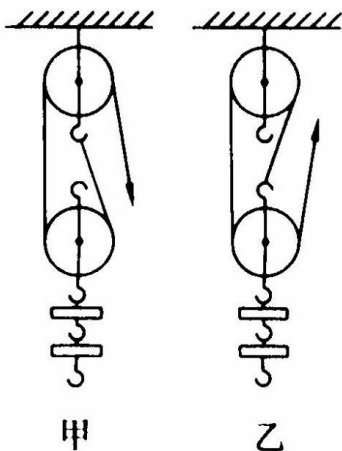


图 11-3-10

【分析】两个滑轮组提升的重物的重力是一样的，提升的高度也是一样的，所以，两个滑轮组做的有用功是一样的。

解：

甲滑轮组的拉力

$$F_{\text{甲}} = \frac{1}{n}(G_{\text{物}} + G_{\text{动}}) = \frac{1}{2}(10\text{N} + 2\text{N}) = 6\text{N}$$

甲滑轮组的绳端移动的距离

$$s_{\text{甲}} = n \cdot h = 2 \times 1\text{m} = 2\text{m}$$

则甲滑轮组的拉力做的总功

$$W_{\text{甲、总}} = F_{\text{甲}} \cdot s_{\text{甲}} = 6\text{N} \cdot 2\text{m} = 12\text{J}$$

乙滑轮组的拉力

$$F_{\text{乙}} = \frac{1}{n}(G_{\text{物}} + G_{\text{动}}) = \frac{1}{3}(10\text{N} + 2\text{N}) = 4\text{N}$$

乙滑轮组的绳端移动的距离

$$s_{\text{乙}} = n \cdot h = 3 \times 1\text{m} = 3\text{m}$$

则乙滑轮组的拉力做的总功

$$W_{乙、总} = F_{乙} \cdot s_{乙} = 4\text{N} \cdot 3\text{m} = 12\text{J}$$

由数据可知

$$W_{甲、总} = W_{乙、总}$$

答：两个滑轮组分别做的总功是一样大的。

从这个题目可以看出，改变绳子股数，虽改变了拉力，但拉力变小时，拉力移动的距离却增大，最终造成拉力做的功并没有发生改变。因此，只有绳子股数的变化，并不能改变滑轮组的机械效率。

只是改变匀速上升的速度大小，也不能改变滑轮组的机械效率。比如物体以 1m/s 的速度匀速上升变为以 2m/s 的速度匀速上升时，滑轮组的机械效率也不会发生改变的，但拉力做功的功率（也称总功率）和物体克服物体重力做功的功率（也称有用功率）都会变大。

这个事实也说明了，虽然功率与机械效率都能反映机械的性能好坏，但功率反映了做功的快慢性能，机械效率反映了做功的节能性能。

机械效率与功率是相互独立的、互不影响的物理量，两者之间不存在必然关系。也就是说，功率大的机械，它的机械效率可能小，也可能大。

水平滑轮组的机械效率的影响因素

对于水平滑轮组，物体克服水平地面摩擦所做的功是有用功，而克服绳与滑轮的摩擦做的功是额外功。所以，减小绳与滑轮的摩擦也可以增大机械效率。

水平滑轮组的机械效率的公式如下：

$$\eta = \frac{W_{有用}}{W_{总}} = \frac{f \cdot s_{物}}{F \cdot s_{拉}}$$

其中 $s_{物}$ 是指物体在水平地面滑行的距离， $s_{拉}$ 是指绳子自由端在拉力的作用下沿拉力方向通过的距离。滑轮组虽然是水平方向的，但 $s_{拉}$ 与 $s_{物}$ 之间存在固定的比例关系，即

$$S_{\text{拉}} = n \cdot S_{\text{物}}$$

其中， n 是滑轮组的绳子的股数。所以，求解水平滑轮组的机械效率的公式可推导为

$$\eta = \frac{f}{F \cdot n} \times 100\%$$

竖直滑轮组与水平滑轮组的机械效率辨析

我们将竖直滑轮组与水平滑轮组进行比较，我们不难发现以下异同点：

机械种类		竖直滑轮组	水平滑轮组
有用功		克服物重做功	克服水平地面摩擦做功
额外功		克服动滑轮重做的功，克服绳重做的功，克服绳与滑轮的摩擦做的功	克服绳与滑轮的摩擦做的功
可能对机械效率 η 有影响的因素	物重	增大物重，机械效率 η 变大	无关
	动滑轮重	减小动滑轮重，机械效率 η 变大	无关
	绳重	减小绳重，机械效率 η 变大	无关
	绳与滑轮的摩擦	减小绳与滑轮的摩擦，机械效率 η 变大	
	绳子股数	无关	
	物体上升的高度	无关	
	物体上升的速度	无关	
	拉力的大小	无关	无关
	拉力移动的距离	无关	无关

斜面的机械效率的影响因素

对于斜面，如图 11-3-11 所示，物体克服物体重力上升时所做的功是有用功。

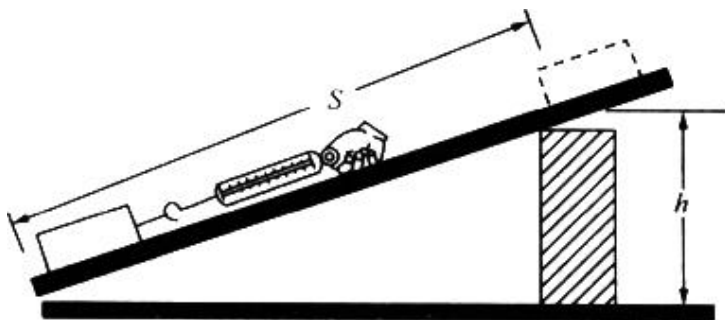


图 11-3-11

所以，增加物重是可以斜面的提高机械效率的。

斜面的额外功是指克服斜面的摩擦力做的功，

很显然，在保持物重不变的情况下，增加斜面的倾斜程度（或增大倾角）和减小斜面的粗糙程度可以大大减小斜面对物体的摩擦力，从而可以提高机械效率。

所以，提高斜面的机械效率的方法有：

- 1、增加物重；
- 2、增加斜面的倾斜程度(即增大斜面的倾角)；
- 3、减小斜面的粗糙程度。



本节我们学习的物理规律

1、有用功、额外功、总功的定义

我们需要的、有价值的功,叫做有用功,记作 $W_{\text{有用}}$;

像这类不需要,但又不得不做的功,我们称为额外功,记作 $W_{\text{额外}}$ 。

有用功和额外功的总和叫做总功,用 $W_{\text{总}}$ 表示。

2、机械效率的定义

物理学上,将有用功与总功的比值叫做机械效率,用 η 表示。

3、机械效率的影响因素

- (1) 竖直滑轮组: 物重、动滑轮重、绳重、绳与滑轮的摩擦。
- (2) 水平滑轮组: 物体与水平地面的摩擦、绳与滑轮的摩擦。
- (3) 斜面: 物重、斜面的倾斜程度、斜面的粗糙程度。



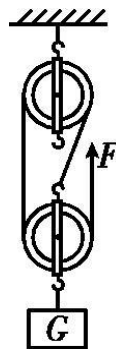
自我检测与巩固

1、下列有关机械做功、功率、机械效率的说法,正确的是 ()

- A. 机械效率越高的机械, 功率越大。
- B. 做功越多的机械, 功率越大。
- C. 做有用功越多的机械, 机械效率越高。
- D. 功率越大的机械, 做功越快。

2、如图所示,用滑轮组将重为 540 N 的重物匀速提升 2 m, 所用拉力 F 为 200 N, 则 (1) 该滑轮组的机械效率为多少?

(2) 如果要提高滑轮组的机械效率, 你的做法是什么? (答出一条即可)



3、如图所示的滑轮组拉动重 300 N 的箱子，以 0.2 m/s 的速度在水平地面上做匀速直线运动，箱子与地面间的摩擦力为自身所受重力的 0.2 倍，滑轮组的机械效率为 75% ，则

- (1) 拉力是多少？
- (2) 拉力做功的功率是多少？

