



汽轮机基础知识

吉林电力学院

水利电力出版社

内 容 提 要

本书比较全面地介绍汽轮机本体、辅助设备、调节和保护设备的基础知识；在编写时力求文字通俗易懂，说理清楚，并附有少量的例题，对国外汽轮机的发展和现状也作了适当的介绍。为了便于有初中文化水平的汽机工人以及对汽机专业感兴趣的知识青年阅读，本书在开始时还介绍了必备的热工学基础知识。

汽轮机基础知识

吉林电力学院

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

1975年9月北京第一版

1975年9月北京第一次印刷

印数 00001—27273 册 每册 0.88 元

书号 15143·3151

毛主席语录

团结起来，为了一个目标，就是巩固无产阶级专政，要落实到每个工厂、农村、机关、学校。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路

工业学大庆

前 言

本书是在汽轮机工人丛书之一《汽轮机工作原理》的基础上改编而成的。从原书出版到现在已经过去十六个年头，十六年来在毛主席革命路线指引下，通过无产阶级文化大革命和正在开展的批林批孔运动，我国社会主义革命和社会主义建设事业有了飞跃的发展。汽轮机制造业在独立自主、自力更生的道路上发展也很迅速，电业部门中汽轮机工人队伍越来越壮大，他们的文化和技术水平越来越高。

根据这样的情况，本书在改编时，把原书的理论水平略为加深，把内容的范围适当扩大。同时，仍然注意到通俗易懂，由浅入深，由感性到理性的原则。

革命导师恩格斯有许多直接涉及到热工理论方面的论述，这是我们热力工作者的宝贵财富，本书结合有关内容的叙述摘引了一部分。同时，在力所能及的范围内，努力以《实践论》、《矛盾论》作为写作的理论指导。

在图例和取材方面，尽量以本国设备为主，外国设备为辅，在引用外国设备的地方，有的为了作参考，有的作为批判比较之用。例如在第四章中我们引用了国外的低参数五万千瓦机组，就是为了后一个目的。

书稿刚刚写完，正好赶上具有重大历史意义的党的十届二中全会和四届人大胜利召开。伟大领袖毛主席教导我们：“自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。”我们一定要按照这一教导去做。

本书是为从事汽轮机工作的工人同志写的，着重在原理方面。执笔人是动力系吴泽林和叶荣学两位同志。我们把本书的编写当作一项政治任务来对待，但是，由于我们的路线觉悟不高，业务水平和工作经验不足，因之很难达到预期目的，请同志们批评指正，并对给予我们以指导和帮助的 507 电厂汽机车间、河北电力学院、苏州电力技工学校等单位 and 同志们表示感谢。

吉林电力学院

1975.1

目 录

前 言

第一章 热工学理论基础.....	1
第一节 热工量度单位.....	2
第二节 能量转化规律和热力学参数.....	11
第三节 水蒸汽.....	25
第二章 火力发电厂的热循环.....	33
第一节 郎肯循环.....	33
第二节 回热循环.....	39
第三节 再热循环.....	43
第四节 热能和电能联合生产的循环.....	47
第三章 在汽轮机内发生的能量转化.....	51
第一节 蒸汽在喷嘴内发生的能量转化.....	51
第二节 蒸汽在叶片内发生的能量转化.....	60
第四章 汽轮机的工作原理.....	77
第一节 冲动式汽轮机.....	77
第二节 反动式汽轮机.....	93
第五章 汽轮机的损失和效率.....	97
第一节 汽轮机的损失.....	97
第二节 汽轮机的效率.....	115
第三节 汽轮机的汽耗及热耗.....	119
第六章 工况改变时汽轮机的工作.....	122
第一节 工况改变时汽轮机的工作.....	122
第二节 蒸汽流量变化时对各种参数的影响.....	126

第三节	蒸汽参数不同于设计工况下汽轮机的工作	135
第四节	汽轮机超出力运行	137
第七章	汽轮机的热膨胀、温差和热应力	142
第一节	汽轮机起停当中的热膨胀与热应力	142
第二节	汽缸壁的传热与温差	145
第三节	转子在反复热应力作用下的疲劳问题	154
第八章	汽轮机调节	157
第一节	自动调节系统作用原理	157
第二节	汽轮机调节系统	161
第三节	汽轮机调节系统静态特性	166
第四节	同步器及汽轮机并列运行	180
第五节	供热机组和中间再热机组调节特点	186
第六节	汽轮机的保护装置	193
第七节	汽轮机供油系统	196
第八节	汽轮机功频电液调节	200
第九章	凝汽设备	205
第一节	凝汽器的工作原理	205
第二节	凝汽器的传热	210
第三节	复压式凝汽器	216
第四节	抽气设备	218

第一章

热工学理论基础

历史上，第一台热机是生产的实践者工人发明的。自从发明蒸汽机以来，各类热力原动机跟着相继发展起来，先后出现了汽油发动机、柴油机、汽轮机和燃气轮机等。而汽轮机以功率大、效率高、运行可靠著称，成为带动发电机的理想的原动机。而热工理论，正是在这些热机的生产实践的基础上形成的。

蒸汽机的出现是划时代的事情，正如革命导师恩格斯指出的：“十七世纪和十八世纪从事创造蒸汽机的人们也没有料到，他们所造成的工具，比其他任何东西都更会使全世界的社会状况革命化，特别是在欧洲，由于财富集中在少数人手里，而绝大多数人则一无所有，起初是资产阶级获得了社会的和政治的统治，而后就是资产阶级和无产阶级之间发生阶级斗争，这一阶级斗争，只能以资产阶级的崩溃和一切阶级对立的消灭而告终。”

实际上，汽轮机的发明比蒸汽机还要早很多。但是，当时生产力发展的水平太低，汽轮机没能在生产上应用，所以在历史上起的作用远不如蒸汽机。恩格斯曾经说过：“在发现摩擦取火以后，一定经过了好几千年，亚历山大里亚的希罗（公元前120年左右）才发明了一种用本身发出的水蒸汽使之转动的机械。又过了差不多两千年，才造成了第一部蒸汽机，第一个把热转化为真正有用的机械运动的装置。”

“这样，实践以它自己的方式解决了机械运动和热的关系问题。它先把前者转化为后者，然后再把后者转化为前者。”

在这里，希罗发明的那个转动的机械，是一个玩具一样的汽轮机，如图3-12所示。

根据恩格斯的教导，我们认识到，只有摩擦取火这样的由机械运动转化为热的过程，还是片面的。必须再反过来，把热转化

为机械运动。只是在这个时候，过程的辩证法才充分地实现，过程才完成一个循环。

我国解放前，由于满清封建王朝和国民党反动派的长期统治，汽轮机在国内是不能生产的，只是到了解放后，我国工人阶级才在自己的政党——中国共产党的领导下，本着毛主席“独立自主、自力更生”的方针，经过几年的艰苦奋斗，很快地生产出首批国产汽轮机。由开始的六千瓩机组，很快就把单机功率提高到五万、十万、十二万五、以至二十万、三十万瓩。这中间还不到二十年，速度之快是历史上没有的。在这中间蒸汽参数（温度、压力）的提高也是非常显著的，由中参数很快提高到高参数，然后又达到亚临界参数。

本书准备在正式介绍汽轮机的工作原理之前，先介绍一些有关热工理论方面的知识。因为后者对理解或研究前者是不可缺少的。

第一节 热工量度单位

自然界中存在的物质有固体、液体、气体三种状态。每一种物质随着外界条件的变化，它本身的状态也发生变化。比如，水是液体，当加热时，它的温度升高，变成气体；反过来，如将水冷却，它的温度下降，又变成固体——冰。

在热力原动机中，都是用气体来推动机件运动的；所以，了解气体性质是很重要的。气体的变化规律，是通过温度、压力、比容、焓、熵等数量来表明的。这些表明气体状态的量，统称为状态参数。

一、温 度

温度是表明物体冷热程度的量。在发电厂里，需要测量温度的地方很多，如进入汽轮机的蒸汽温度，冷却水温度，油温度等等。不知道各处的温度，就不能了解运行的情况。

常用的测量温度的标准是摄氏温度，它取在标准大气压（水银柱 760 毫米）下的纯水的冰点为零度，取水的沸点为100度。

用摄氏温度表测量的温度，要在温度数值的旁边附记一个字母“C”，如果测得的温度是50度，就写成50°C。

摄氏温度为我国、欧洲及世界许多国家所采用。除摄氏温度外，还有华氏温度，这种温度标准为英美等国所采用。

用华氏温度表测得的温度，书写时要在温度数值的旁边标记一个字母

“F”，例如测得的温度是80度，就写成80°F。华氏温度的冰点为32°F，相当于摄氏温度的 0 °C；沸点为 212°F，相当于摄氏温度的100°C。两种温度标准的比较，如图1-1所示。两种温度的换算，可利用下列公式进行：

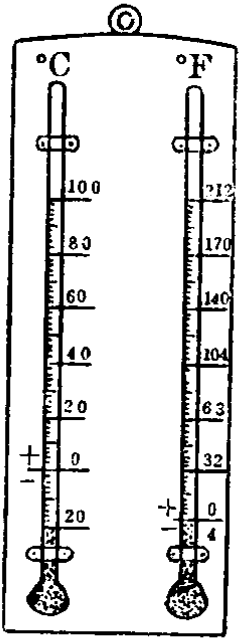


图 1-1 摄氏温度与华氏温度的比较

华氏换算为摄氏 $\text{°C} = \frac{5}{9}(\text{°F} - 32);$

摄氏换算为华氏 $\text{°F} = \frac{9}{5}\text{°C} + 32.$

}

(1-1)

温度表在 100°C 以上和 0 °C 以下，还应划分度数。当温度低于 0 °C 时，要在温度数字的前面标记一个“-”号（负号），比如，测得的温度是零下20度，就写成-20°C。零度以上的温度为正值，习惯上不标记正号。

测量温度的仪器，叫做温度表（或计），一般用得较多的是水银温度表。水银温度表的应用范围，在-39°C到 550°C 之间。温度若低于-39°C，水银液体就要凝固；高于 550°C，就超过了玻璃的容许强度。要测量高于 550°C 的温度，可用其他种类的温度表，如热电偶温度计等。

还有一种温标，叫做绝对温度，在理论上经常使用。它的标准是取水的三相点温度为 273.16°K ，也就是说，它的零度在三相点下 273.16°K ，这里， K 是这种温度的标志。

和摄氏温度比较，摄氏 0°C 为绝对温度 273.15°K 。但在实用上，往往省略零数，而取 273°K 为 0°C 。对于摄氏 100°C ，换算为绝对温度就是 373°K 。

二、压 力

在汽轮机运行中，我们要经常监督各处的压力，比如蒸汽的压力，油的压力，水的压力等。通过检查各处压力表的指示，就可以判断汽轮机各部分工作是否正常。

压力的意义就是作用在单位面积上的力，也叫压强。压力可用下列公式表示：

$$\text{压力} = \frac{\text{力}}{\text{受力的面积}} \quad (1-2)$$

工业上，取 1 平方厘米的面积上，作用有 1 公斤的力为压力单位，称为 1 工程大气压。书写时可写成 1 大气压 或 1 公斤/厘米²。

在锅炉汽鼓或蒸汽管道中均匀地充满蒸汽，汽鼓或管道内壁就受有蒸汽均匀作用的压力。比如蒸汽管内蒸汽压力是 100 大气压，这就是说，在管壁每一平方厘米的面积上，有 100 公斤的力作用着。

下面介绍在发电厂中常遇到的几种压力的概念。

1. 大气压力和大气压。地面上的一切物体，因受地球的吸引力，都具有一定的重量；这个重量也叫做重力。在地球的周围，围绕着很厚的空气层，地面上的一切物体，都处在空气层的下面。空气也受地球吸引而有重量，在标准状态下 1 立方米空气的重量是 1.293 公斤。因此，地面上所有物体，都承受着空气重力的作用。由空气重力所产生的压力，叫做“大气压力”。

大气压力的存在，可以用实验的方法来证明。取一端封闭

的，长约 1 米的玻璃管，管内充满水银（图1-2），用手指堵紧管口，然后将玻璃管倒立在水银杯中。如果将手指松开，管中水银即行下降，但下降到一定高度后，就不再下降了。这时在管的上部，就形成了没有空气的“真空”。因为管子上端没有空气压力，而管子下端水银面上受有大气压力，所以管内的水银面就比管外高出大约 750 多毫米。这说明 750 毫米水银柱所产生的压力正好与大气压力相等。

大气压力是随地面的海拔高度和季节气候而变化的。物理大气压相当于海平面上空气的平均压力，这个大气压力等于 760 毫米水银柱高度（此时水银温度为 0°C ），以此为标准大气压力。

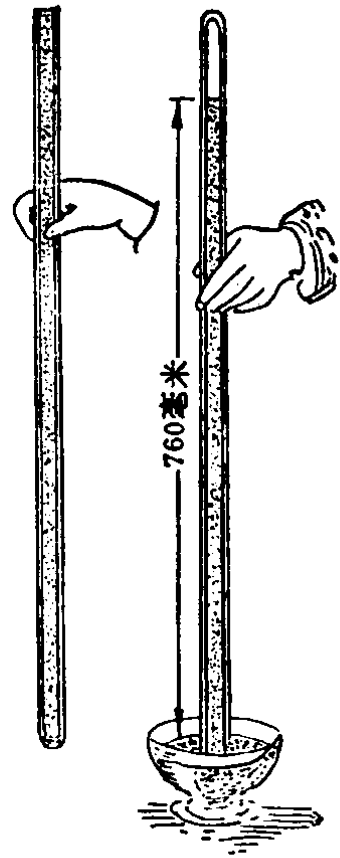


图 1-2 大气压力的测定

现在来说明标准大气压力与工程大气压的关系。这里要注意：大气压力与大气压，只有一字之差，但二者的意义完全不同。今取水银柱高度为 760 毫米，水银温度为 0°C ，管内断面积为 1 平方厘米，那么管中水银重量就等于 1.033 公斤。如用公斤/厘米²单位表示，就是 1.033 公斤/厘米²，这就是大气压力，或标准大气压力的大小。而 1 工程大气压等于 1 公斤/厘米²，可见标准大气压力等于 1 工程大气压的 1.033 倍。反过来，若把 1 工程大气压换算为 0°C 时水银柱的高度，则得 735.6 毫米水银柱。

上面所讨论的各压力间的关系，可归纳如下：

- 1 标准大气压力 = 760 毫米水银柱；
- 1 标准大气压力 = 1.033 工程大气压；
- 1 工程大气压 = 735.6 毫米水银柱。

测量大气压力时可用压力表。

2. 表压力和绝对压力。在锅炉汽鼓、蒸汽管道及汽轮机汽缸

中，蒸汽的压力都是高于大气压力的。在汽轮机的后几级和凝汽器中，蒸汽的压力是低于大气压力的。现在来研究一下在这两种情况下，压力的量度方法和量度的单位。

设容器内盛有气体（图1-3），在容器的一端连接一个弯管，弯管中注入一些水银，让弯管的一端和容器内部连通，另一端开口，与大气接触。这样，管中水银一端承受气体压力，另一端承受大气压力。若水银的位置如图所示，弯管的右边比左边高，就表示容器内气体的压力比大气压力高。弯管两边液面的高度差 l ，表示容器内气体压力高于大气压力的数值。换句话说，测量液柱高度 l 的压力，就可得出容器内部压力大于大气压力的数值，这样测得的压力，叫做剩余压力。

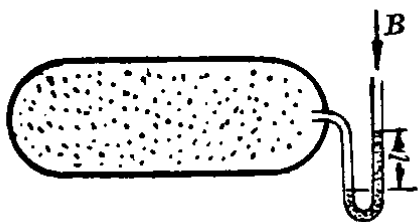


图 1-3 容器内气体余压的量度

面的高度差 l ，表示容器内气体压力高于大气压力的数值。换句话说，测量液柱高度 l 的压力，就可得出容器内部压力大于大气压力的数值，这样测得的压力，叫做剩余压力。

若剩余压力用符号 P_{sh} ① 表示，大气压力用符号 B 表示，那么 $P_{sh} + B$ 等于容器内的总压力，这总压力叫做“绝对压力”，用符号 P_j 表示。这样一来，绝对压力和剩余压力的关系可由下列公式表示：

$$P_j = P_{sh} + B. \quad (1-3)$$

测量剩余压力的仪器叫做压力表。也就是说，用压力表测得的压力，都是剩余压力。因此，我们通常将剩余压力称为表压力。

绝对压力和表压力的关系，用图 1-4 表示。从图中可以看出，表压力是以大气压力为起点来测量的，绝对压力是以完全真空为起点来测量的。表压力常写成 at ，绝对压力常写成 ata ，在本书的图和公式中也如此。

通常锅炉或蒸汽管中蒸汽的表压力比大气压力大得多，在这

① 本书中的下角注，采用中文字汉语拼音的第一个字母，如剩余的剩，汉语拼音为 *Sheng*，故采用 *Sh*，即剩余压力 $P_{\text{剩余}}$ 写成 P_{sh} 。其他也同，请读者逐步习惯起来。

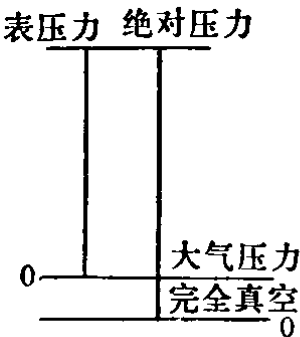


图 1-4 表压力与绝对压力比较

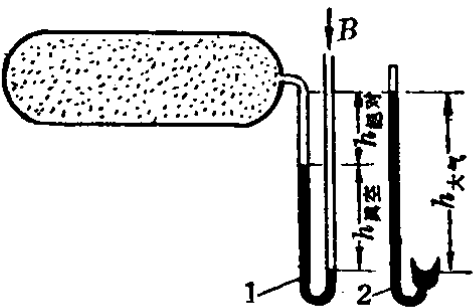


图 1-5 容器内气体真空的量度
1—测压弯管；2—气压表

种情况下，大气压力一律可以近似认为等于一个工程大气压（即 1 公斤/厘米²）。例如压力表指示的压力为20大气压，那么绝对压力就等于21绝对大气压。

在研究热工学理论时，都使用绝对压力。

3.真空。当水银弯管与盛有气体的容器连通时，弯管中水银位置如图1-5所示，即左边的液面比右边的高；这表示管中右边液面所受压力（即大气压力）比容器内气体的绝对压力高。容器内压力加上水银柱高度 h 的压力和，等于大气压力。换句话说，测得水银柱高度 h ，就能求得容器内的绝对压力低于大气压力的数，我们称此数为真空。若真空的水银柱高度用 h_{zh} 表示，那么，上述关系可写成：

$$\left. \begin{aligned} h_{zh} + h_j &= h_d \\ h_{zh} &= h_d - h_j \\ h_j &= h_d - h_{zh} \end{aligned} \right\}, \tag{1-4}$$

式中 h_d ——大气压力的水银柱高度，毫米。

h_j ——相当于容器内绝对压力的水银柱高度，毫米。

凡是压力比大气压力低的情况，都称为真空；但真空是有程度上的区别的。当容器内完全没有压力，也就是绝对压力等于零时，叫做完全真空；其余情况都不是完全真空。比如凝汽器内的真空就不是完全真空。

真空也可以用百分比表示，称为真空度。完全真空的真空度

是100%，非完全真空都小于此数。

在完全真空的情况下，真空的水银柱高度 h_{zh} 等于大气压力的水银柱高度 h_d 。真空度可用大气压力的水银柱高度去除测得的真空水银柱高度来求出，计算公式是：

$$\text{真空度} = \frac{h_{zh}}{h_d}. \quad (1-5)$$

在凝汽器内绝对压力不变的情况下，真空度可能随着大气压力的变化而改变。所以在理论计算上，使用绝对压力来表示汽轮机凝汽器内的真空较为妥善。在已经测得大气压力和凝汽器内真空的水银柱高度之后，绝对压力可由下列公式计算：

$$P_j = \frac{h_d - h_{zh}}{735.6}, \quad (1-6)$$

单位是工程大气压（公斤/厘米²）。

例题 今测得汽轮机凝汽器内的真空等于 720 毫米水银柱，另由气压表测得当时的大气压力是 750 毫米水银柱，试计算凝汽器内的绝对压力和真空度。

根据公式（1-4），凝汽器内的绝对压力是：

$$h_j = h_d - h_{zh} = 750 - 720 = 30 \text{ 毫米水银柱。}$$

化为工程大气压单位，由公式（1-6）得：

$$\frac{30}{735.6} = 0.041 \text{ 大气压。}$$

由公式（1-5），算出凝汽器内的真空度是：

$$\text{真空度} = \frac{h_{zh}}{h_d} = \frac{720}{750} = 0.96 = 96\%.$$

测定压力的表计有两种基本型式：一种为液体压力表，用以测量较小的压力或真空，测量单位为液柱高度（毫米）；另一种为弹簧管式压力表，用它可以测量任意大小的压力，它的测量单位一般是公斤/厘米²。此外，还有一种压力单位叫作“巴”，1 工程大气压=0.980665巴。

三、比重和比容

比重是物体单位体积所具有的重量。对于气体来说，以1立方米体积所具有的公斤数，做为比重的单位，写成公斤/米³。空气在标准大气压力下，温度为0℃时的比重是1.293公斤/米³。

单位重量物体所占的体积，称为比容。工业上以1公斤气体所占有的体积立方米数，做为比容的单位，写成米³/公斤。

比容是比重的倒数。例如空气的比重在标准状态下是1.293公斤/米³，那么在同样状态下它的比容应是 $1/1.293=0.7734$ 米³/公斤。

气体的比容是和压力、温度有密切关系的。当温度不变，压力提高时，气体的体积收缩，比容变小。如果压力保持不变，只提高温度，则气体的体积膨胀，比容增大。以过热蒸汽为例，当压力为1绝对大气压，温度为200℃时，蒸汽的比容为2.214米³/公斤。如温度保持不变，压力提高到10绝对大气压，蒸汽比容就变为0.2103米³/公斤。另一种情况，如果蒸汽压力不变，而将温度由200℃提高到400℃，比容就增加为3.163米³/公斤。总之，压力提高，比容缩小；温度升高，比容增大。

比容是气体的主要状态参数之一，在研究汽轮机理论上，是很重要的。各种气体的比容，都能从现成的表中查出。

四、热和比热

工业上采用大卡（或叫千卡）做为量度热量的单位。大卡热量是这样规定的：1公斤水，温度升高1℃所需要的热量是1大卡。并不是所有物体的温度升高1℃都等于1大卡。1公斤钢温度升高1℃，只需热量0.11大卡。压力为100绝对大气压、温度为500℃的水蒸汽1公斤，温度升高1℃只需要0.6大卡的热量。

各种物体重1公斤，温度升高1℃所需要的热量大卡数，叫做该物体的比热。比热的单位是大卡/公斤·℃（每公斤每度大卡）。

如已知物体的比热，就容易算出任意重量的物体，升高到任意温度所需要的热量。比如汽轮机在起动以前进行暖管，假如要加热的这段蒸汽管的总重量是2000公斤，管子未通蒸汽以前的温度是 30°C ，暖管后使它的温度达到 530°C ，那么暖管所需要的热量，可这样计算：从工程手册中查出钢的比热是 0.11 大卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ ，那么暖管所需热量是：

$$2000 \times 0.11 \times (530 - 30) = 110000 \text{大卡}.$$

根据这个热量，还可以算出暖管所需要的蒸汽量和产生的疏水量。假如在暖管过程中，每公斤蒸汽放出的热量是 500 大卡，那么暖管所用蒸汽量是：

$$110000 \div 500 = 220 \text{公斤}.$$
 生产的疏水量也是220公斤。

五、功 和 功 率

在发电厂的汽机车间内，吊车将汽轮机大盖由原位置吊起来，我们说吊车对汽轮机大盖做了功。很明显，大盖越重，吊起的越高，吊车做的功越大。

所以，功的大小要根据作用力的大小和物体在力的作用方向上所通过的距离来决定。

为了量度功的大小，必须规定出功的单位。我们采用以 1 公斤的力将重物移动 1 米，定为功的单位。这个单位叫做公斤 $\cdot$ 米。例如以10公斤的力，使物体移动 2 米，那么力所完成的功就是： $10 \times 2 = 20$ 公斤 $\cdot$ 米。

但是，功的数值还不能说明完成功的强度。比如人们将同样重量的车子由甲地推到乙地，一种办法是用很短的时间很快的速度，另一种办法是用较长时间较慢的速度，那么两种办法所完成功的强度显然是不同的，前者完成功的强度一定大于后者。因此，要知道完成功的强度，必须知道在单位时间内，例如 1 秒，所完成的功。单位时间内完成的功，称为功率。

功率的单位有三种。一种是在 1 秒钟内完成 1 公斤 $\cdot$ 米的功，用公斤 $\cdot$ 米/秒来表示；这个单位很小，在工业上使用不便。另一