

## 物理学咬文嚼字之八十四

## Energy

曹则贤<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2017-01-22收到

† email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170309

你师兄叫做悟空，你叫做悟能，其实是我法门中的宗派。

——吴承恩《西游记》

流俗多错误，岂知玉与珉。

——李白《古风》五十一

Ex nihilo nil fit—nil fit ad nihilum<sup>1)</sup>

**摘要** Energy 是物理学的基本概念，却不幸被汉译成了能量。Energy 与 force, power, work, action, momentum, potential 等概念有着千丝万缕的联系。悟能和悟空一样不容易。

## 1 做工与做功

人类在进化过程中取得优势地位的关键是某一天人类竟然有了做工的自觉性。在汉语中，做工的主角，人中男者，就是田+力，意为 working force in field。做工，或者做功，该如何量化呢？一个人或者



图1 举重，原初的做功情形

一匹马，其做工的自然情境就是往高处托举重物(图1)或者拖拉重物前行，所以，度量做功的自然选择是重量乘以托举高度或者拉力乘以拖行距离。高度与距离是一回事，物重和拉力可以经由对同一物体的拉伸效果等价起来，这样，我们就有了关于功(work, Arbeit, travail, lavoro)的统一度量，即(重)力×长度。功，work，法语词为 travail<sup>2)</sup>，是法国科学家 Gaspard-Gustave Coriolis 于1826年首次引入的<sup>1)</sup>，就是用来描述热机的做工能力的，即看它自多深的矿井提出了多少桶水。

在近代物理中，功的单位是焦耳(Joule)<sup>3)</sup>，对应将1 kg 质量的物体在加速度为1 m/s<sup>2</sup>的重力场中提升1 m 所做的功。如果采用 cgs 制，则将1 g 质量的物体在加速度为1 cm/s<sup>2</sup>

的重力场中提升1 cm 所做的功，为1 耳格。Erg，来自 ergon，即希腊语的 work, έργο。Ergon 加上前缀 a-，就是 argon，就是不干活、不活跃，这词用来描述第18号元素正合适。Argon 被汉译为莫名其妙的氩字。

功的量纲是 N·m，但还是用 Joule 好一些，以免和力矩混淆。不过，注意到功 ( $\int \vec{F} \cdot d\vec{r}$ ) 和力矩 ( $\vec{r} \times \vec{F}$ ) 两者的定义，联想到两矢量的乘积本来就有内积和外积之说，就能明白力矩和做功之间的关系了。某种意义上说，把功和力矩截然分开可能是不合适的。

## 2 做功的能力

能量，energy，是做功能力的

1) 没有任何东西来自于无，没有任何东西会归于无。拉丁语。此为古希腊的智慧，有不同的描述。  
2) 法语词 travail 在英文中被保留了下来，用来文绉绉地表示艰苦劳动、辛勤努力，比如见于 painful travail (艰辛的努力)，the travail of giving birth to a child (分娩的艰难)，等等。  
3) 以法国科学家 James Prescott Joule (1818—1889) 的名字命名，译音应是儒勒，比如儒勒·凡尔纳。

度量，欧洲的课本里大约都是这样表述的，如“energia, la capacità di compiere lavoro”，“énergie, la capacité à produire un travail”，“Energie, die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten”。有人把它表述得稍微细致点，谓energy constitutes a fundamental limitation on the capacity of a system to perform work (energy构成一系统之做功能力的上限)。不过，这些都是一般入门教科书中关于energy的直观的、但却未必普适的定义。

Energy是一个古老的概念，来自希腊语的ἐνέργεια，即en+ergon。前缀en，意大利人理解为particella intensive (强调冠词)。法国人把énergie直接理解为force en action (作用着的力)，它的对立面是δύναμις (dynamis，今译动力学)，其意思是force en puissance (蕴藏之力)。亚里士多德在公元前四世纪就用到ἐνέργεια了，使用的就是完成时，用其表示la réalité effective (成就的现实)，与la réalité possible (可能的现实)相对照。而按照德国人的理解，Energie这个古老的词汇具有纯粹的哲学意义(eine rein philosophische Bedeutung)，表示活生生的现实与功效(von lebendiger Wirklichkeit und Wirksamkeit)。作用着的力与具有潜能的力，成就的现实与可能的现实，动能与势能，或者作用与势(Akt und Potenz)，这些一一对应的几组词或许有助于我们深入理解energy这个概念。

Energy，按说将之汉译为“能”就挺好，实际上在动能、势能、热能等概念中就是这么用的。可是，偏偏在尤其是单独讨论energy的时

候，energy被译成了“能量”，那应该是给quantity of energy保留的翻译好嘛！

### 3 活力与动能

一个具有一定向上速度的物体会自动升到一定的高度，这相当于说，一个具有初始速度的物体被自己举起了。反过来说，一个以一定速度落地的物体能把地面砸个坑——如果这速度是自高处下落得来的，则下落高度越高，其所砸的坑就越深。这是说运动物体是有干事的能力的。那么，如何表征一个运动物体的(能)力(the force of a body in motion)呢？这就是经典力学中的经典问题。

今天我们知道描述一个运动的物体所用的物理量为动量(momentum)， $m\vec{v}$ ，和活力(vis viva, live force)， $mv^2$ 。量 $m\vec{v}$ 和 $mv^2$ 的成型(shape up)都有一部曲折的历史。动量 $m\vec{v}$ 是个来自古代的概念，而vis viva则是个相对较新的概念，其演化确实是有迹可循的。Willem Jacob's Gravesande (1688—1742)，荷兰数学家、天文学家和自然哲学家，研究下落的球冲击黏土。他发现当球的速度加倍的时候，其在泥巴中造成的压痕会变成4倍深<sup>4)</sup>，由此可得出结论，运动物体的活力正比于 $mv^2$ 。意大利人Giovanni Poleni(1683—1761)也独立发表了此一结果。图2是Poleni的实验装置<sup>2)</sup>。Gravesande把落体冲击(the impact of falling weights)实验的结果告诉了法国的Émilie du Châtelet侯爵夫人，而她又在其翻译牛顿的原理一书时加入了Gravesande

关于动能，即活力，的发现。有文献说，vis viva这个概念是莱布尼兹于1686年最先推测其存在的。后来，Johann Bernoulli用牛顿时力学研究力带来的vis viva的改变，发现 $\frac{1}{2}mv^2$ 才是更合适的概念。之所以欧洲人用活力这个词，是因为那时候人们认为一个物体能对外引起的作用来自其内在的力量。据说Thomas Young于1807年用energy一词代替了vis viva，所用的energy是我们当下理解的意义。Gaspard-Gustave Coriolis(1792—1843)在其1829年的*Du Calcul de l'Effet des Machines*书中论述了动能的数学<sup>1)</sup>，而动能这个词，kinetic energy，是开尔文爵士在1849—1851年造的<sup>3)</sup>。

Vis viva， $mv^2$ ，是moving power (动量随时间的变化)和长度的乘

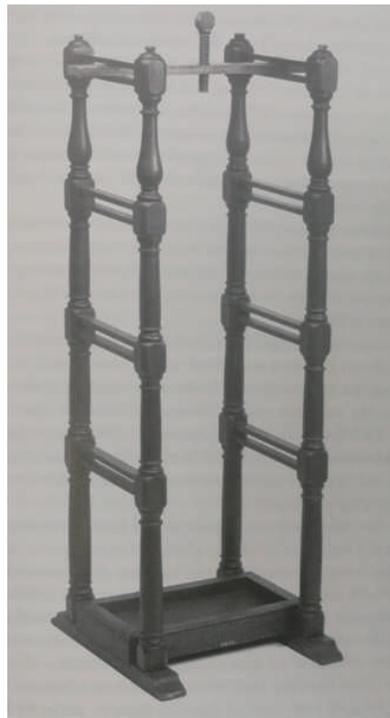


图2 Poleni的研究自由落体砸黏土的装置

4) 别信这个！就算这是真的，也可以有别的解释。物理学的建立，关键方法包括蒙、猜、试、类比等不好意思明说的把戏。再者，那时候没有任何人有精确数据可支持这个正比关系。其实，也没这个必要！所谓的精确测量，技术意义可能大于对物理学的意义——实验能引起对新现象的注意才是第一要义。

积,在这个意义上, vis viva is latent (是一种潜在的力)。与 vis viva 对应的有 vis insita, vis inertiae, 现在通用的英文词为 inertia, 即惯性。其实, energy 和 inertia, 就是汉语的勤与懒。

必须提及的是, 运动物体的  $v^2$  受到关注有另外一条线索, 即碰撞。惠更斯 (Christiaan Huygens, 1629—1695) 在牛顿发展力学之前就曾证明, 碰撞过程中某个正比于  $v^2$  的量是守恒的。一般教科书中, 都会把  $\frac{1}{2}mv^2$  说成是某个粒子或者物体的动能。注意到速度  $v$  是相对的,  $\frac{1}{2}mv^2$  从来就不是哪个单一粒子的性质。

#### 4 势能与潜能

Vis viva, 活力, 的另一个反义词是 vis mortua (死力), dead force, force doing no active work, but only producing pressure (不做功, 但是产生压力)。设想一个被压缩的弹簧, 一动不动, 所以它没做功, 但是显然能感觉到它产生的压力。这个死力, 应该就是今天所说的势能。势能, potential energy, 该词由苏格兰科学家 William Rankine (1820—1872) 于 1853 年所造。

势能, potential, 以及可以用来正确描述势能的势函数, 是物理学的基础内容<sup>[4]</sup>。热力学中的几个重要概念, 内能, 自由能, 焓, 都是热力学势——这就是为什么笔者说不涉及庞加莱引理和外微分的热力学教科书不够深入的原因。势能与相互作用的构型有关, potential energy is “energy of configuration in

a space”。Coopersmith 云热是统计能 (Heat is statistical energy)<sup>[2]</sup>, 应该也是这个意思。

力学中的势能比较好理解。压缩一个弹簧, 若胡克定律<sup>5)</sup>成立, 在压缩长度达  $x$  时, 外力对弹簧做功为  $\frac{1}{2}kx^2$ 。压着的弹簧一动不动 (motionless), 但若是撤去约束, 弹簧可是会迅速回弹的, 这说明其是有能力 (potential) 释放出运动的。这个过程是可重复的<sup>6)</sup>, 容易想到储藏的能量就是外力曾对弹簧做的功  $\frac{1}{2}kx^2$ 。再者, 考察重物下落, 观察表明下落高度同物体下落速度的平方之差成正比, 即  $H_2 - H_1 \propto (v_1^2 - v_2^2)$ , 加比例系数将之变成等式,  $mg(H_2 - H_1) = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)$ , 移项得  $mgH_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgH_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ 。噢, 这好像是某种守恒关系。这个量  $mgh$ , 就是举重过程做功的度量啊。由  $mgh$  可得运动的力 (the force of matter in motion), 它就是某种 potential energy。

Potential, potent, 有个近义词 latent (潜藏, 潜行)。热力学中有 latent heat (潜热) 的说法。Latent energy 也是物理学中的概念, 而且由其能导出质—能关系, 而这与相对论无关 (见下)。

#### 5 Energy 的转换与守恒

由对自由落体的观察得到了关系式  $mgH_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgH_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ , 这被解释为机械能守恒。何时能量守恒成了力学中的 mantra (颂歌, 咒语), 这一点笔者一时还没能理清

楚。Julius Robert von Mayer 1841 年曾有表述 “能量既不能被创造也不能消灭”, 1842 年他指出有机体的能量来源是化学过程 (氧化), 也是他指出了植物把光转化成化学能。常被理解为能量守恒定律的热力学第一定律, 其发展过程长达半世纪。1850 年, 克劳修斯和 William Rankine 率先给出了表述: “在热力学过程中, 一个封闭体系的内能变化等于其积聚的热加上其所做的功。”这些能量守恒定律奠基人曾受到哲学思想的长期浸淫<sup>[5]</sup>。比如, 对 Mayer, 这句以拉丁语流传的古希腊智慧 Ex nihilo nil fit—nil fit ad nihilum 就有深刻的影响。对于开尔文爵士来说, 他所受的教育是上帝是永恒的创造者, 无法想象人类怎么创造或者摧毁什么<sup>[6]</sup>。毁灭机械功这种事是上帝的特权, 而在人类的热机中, 消耗的功一定还在, 不过是换了种形式。此一思想显然要求物理的世界, 进而物理的理论, 表现某种守恒或者稳定性。

把热力学第一定律和其它物理学领域中能量守恒定律相混淆, 笔者以为可能有点儿不合适的。力学中的能量守恒, 后来成了 Noether 定理的结论。由拉格朗日量描述的力学系统, 若拉格朗日量具有时间平移对称性, 则其能量是守恒量。这里, 能量是时间的共轭量。但是, 在 (平衡态) 热力学中, 不论及时间。

能量是否守恒, 或者一个力学体系是否可用某种形式的拉格朗日量描述, 某种意义上说, 是一种信念。神圣的能量守恒定律 (sacrosanct principle of energy conservation) 作为一种信念, 且不论对其使用的形式

5) 实话说, 胡克定律就不是个定律。它和别的类似定律, 比如欧姆定律等, 一样, 反映的是一种信念, 即当刺激很小时, 响应总是正比于刺激。这个刺激—响应之间的比例系数就是所研究体系的性质。各位现在明白了线性代数为什么在物理学中那么重要了?

6) 能够恢复原状的 (resilient) 弹簧在力学建立过程中的作用应该给予充分肯定。它的过程是可重复的, 而可重复性 (reproducibility) 是建立物理学定律的前提。

与过程是否正确，曾结出了累累硕果。硕果之一是中微子概念的提出。考察 $\beta$ -衰变过程，即通过弱相互作用放出电子的过程，其能量和动量，还有角动量，都不守恒，所放出电子的能量是宽谱的连续分布。玻尔用统计版的能量守恒来和稀泥，而泡利则认为能量是守恒的——他于1930年提出存在neutrino<sup>7)</sup>(中微子)的概念。把中微子计算在内，则守恒律是成立的。1956年中微子被实验探测到。

把能量守恒用于原子核衰变现象得出重大物理结论的是意大利人Olinto de Pretto。几乎静止的原子核裂变后，其碎片的动能动辄都是MeV量级的，这些能量，如果能量守恒的话，是打哪儿来的？原子核就那么小，那么单纯，它能藏着掖着能量的地方只能是它自身。Pretto认为，原子的质量整体是在振动着的，其振动表现的速度就是以太的振动速度 $v$ ，即光速。这样，质量为 $m$ 的粒子，其潜藏的能量(energia latente)就是其以以太速度运动的vis viva,  $mv^2$ 。这个质能关系发表于1903年(图3)，比爱因斯坦1905年的文章早两年，且无涉相对论的思想<sup>[7]</sup>。爱因斯坦得到质能关系的出发点是“对于任何运动的光源，观测者测量到的是同样的光速”，考察一个原子发出两个方向相反光子的过程，写下在静止坐标系和运动坐标系下的动量守恒和能量守恒，相减，得 $E=\Delta mc^2$ ，即两光子的能量等于原子质量亏损乘上光速平方。招牌式的相对论质能关系 $E=mc^2$ ，其意义是说质量 $m$ 等价的latent energy(不是什么粒子的rest energy)是 $mc^2$ 。这个公式用于电子—

正电子湮灭时，可以写成 $E=mc^2$ ，不过左边的能量是发射光子的能量，而右边的 $mc^2$ 是电子质量对应的latent energy。质能关系用于不同物理过程时有不同的写法，希望读者把握好公式同物理图像的对应。质能关系的一个naive的推论，就是相信能量是质量的起源——因为每一层次粒子都等于下一层次粒子质量与结合能之和——并认定此逻辑链条的终端是无质量的某种粒子。质能关系把物质、能量，相应地还有空间与时间，给联系到一起了。其深意，应该还有待挖掘的地方。

关于能量守恒，常见的表述是能量既不能被产生，也不会被毁灭。能量只是被转换或者传递(converted or transferred)。这种表述，不是给物理学家准备的。这个宇宙中真实发生的是物理过程，对这些过程我们提取出了不同的同量纲物理量，统一名之为energy，加以方便地描述(图4)。能量是一个用来方便描述的量，quantity! 人们应该学会理解具体的物理过程，而不是用不着调的“能量转化”或者“能量传递”大而化之地一笔带过。能量是一个抽象的、普适的量，它不转化！然而，对能量转换的迷信，可以说到了失心疯的地步！类似Dampfmaschinen wandeln Wärme in mechanische Energie um (蒸汽机把热转化成了机械能)或者Ein Feuer wandelt chemische Energie in Wärme um (火把化学能转化成了热能)，这种话随处可见。火把化学能转化成了热能，那火是什么？化学能是啥？热是啥？火还发光呢，还往外吹热风呢，还噼啪作响呢！费曼曾嘲笑过美国中学物理课本中“energy

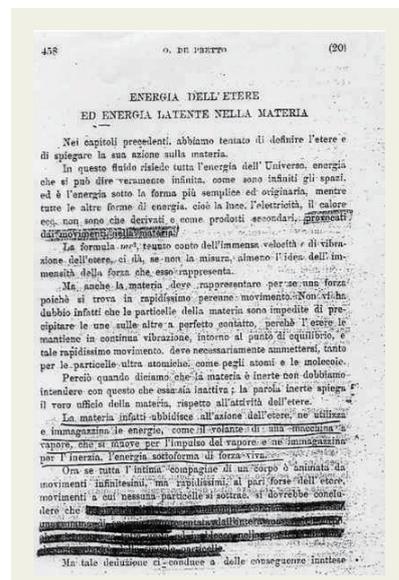


图3 意大利人de Pretto的论文“以太的能量与物质的潜能”



图4 形形色色的能量概念(取自文献[2]的封面)

驱动自行车”的说法，而这只需指明按照这个逻辑，把自行车逼停的也是energy! 这种表述不在于有什么错，而是啥有用的也没说。

## 6 Dark energy

Dark energy(暗能量)，以及与之焦不离孟的dark matter(暗物质)，这两个概念超出笔者的理解能力之外。想起了徐一鸿的一句话：“我是物理学家，不是玄学家。”把抽象概

7) 泡利用的词是neutron, 1932年查德威克用这个词描述中性的核子，即中子。1932—1933年间，费米把泡利的neutron改成neutrino，中性的小家伙，即今天所谓的中微子。中微子这类粒子，都是理论，包括测量理论，齐备的时候才会被探测到的。

念“能量”当成具体的、可以和物质并列的、且只就一个可能并不正确的引力方程而言才有语境的存在，这样的物理，笔者不太相信其是物理。一个谐振子就是一个谐振子，我们可以引入  $\frac{1}{2}m\dot{x}^2$  和  $\frac{1}{2}kx^2$  方便地描述谐振子，甚至我们借助算符  $\hat{H} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2$  能进入到更加抽象的世界从而得到更多的知识，但这都不意味着除了运动着的谐振子以外还存在着一个冷眼旁观的 Mr. energy。

## 7 Exergy 和 energy

Energy 来自 en+ergon，前缀 en- 的反义词是 ex-，于是有人于 1956 年造了个词 exergy，用以表示一个系统和环境从初始的非平衡状态开始到达到平衡时系统对环境做的功，所以也叫 availability，available energy(可用能)<sup>[8]</sup>。不过，据说这个概念吉布斯在 1873 年就开始琢磨了。显然，exergy 不是某个系统的性质，而是系统和环境两者联合决定的一个量。有人为 exergy 造了个新汉字焯，估计是仿照的熵。一个系统的 exergy 是其 energy 的对环境做功的那部分，剩下的部分称为

## 参考文献

- [1] Coriolis G. Du calcul de l'effet des machines, ou considérations sur l'emploi des moteurs et sur leur evaluation. Carilian-Goeury, 1829
- [2] Coopersmith J. Energy: the subtle concept. Oxford University Press, 2010. pp97,333
- [3] Smith C, Wise M N. Energy and empire: a biographical study of Lord Kelvin. Cambridge University Press, 1989. p866
- [4] 曹则贤. 物理学咬文嚼字之六十七: 势两立. 物理, 2014, 43: 835
- [5] Bohn. On the history of conservation of

energy<sup>[9]</sup>。Exergy 还被称为 exergic energy，或者 essergy。笔者猜测，热力学被创立的过程中，thermodynamis, entropie 这些词都是应时而造的，显然，做学问的最高境界是自创领域自造词，这让人有模仿的冲动。不过，exergy 不过是 available energy 或者 maximum work (可用能或者最大功)，而 anergy 不过是 wasted heat (废热) 而已。为这样的概念生造一个词，以为由此可获得开尔文爵士和克劳修斯那样的地位，想法未免天真了些。至于 The second law implies that the universe is running out of exergy (热力学第二定律意味着宇宙在不断耗尽其焯) 这样的句子，不过反映研究宇宙热力学的学者常犯的错误。宇宙是个孤立体系，接触几何才是热力学的正解(exergy 是系统及其环境两者决定的量!)，热力学和宇宙学如何搭上话，还要拜托有此志向的“物理学家们”多动点脑筋。

## 8 结语

历史上，force, vis viva, work, momentum of force, mechanical power, energy, potential, action 等词都曾被胡乱地使用过，甚至被同

- energy, and its application to physics. Phil. Mag. Series 4, 1865, 29(195): 215 (原文只注明作者是 Prof. Bohn)
- [6] Flood R, Mccartney M, Whitaker A (Eds.). Kelvin: Life, Labours and Legacy. Oxford University Press, 2008. p294
- [7] de Pretto O. Ipotesi dell'etere nella vita dell'universo. Atti del Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Anno Accademico vol. LXIII, parte II, pp.439-500 (1903-1904). 译文见: 曹则贤. 非英文数理经典译评之五——德·普莱托: 以太能与物质的潜能

一个作者在同一篇文章中胡乱使用过。他们都是 anthropocentric concepts (人本的概念)。今天，经典力学和热力学已臻完备，至少其话语系统已经确定了下来。这些概念如今还被用到，但是角色分明，不应该再被混淆了。在经典力学中，action，量纲为[能量×时间](角动量也是这个量纲)，在一个层次；能量，势，功，后两者的量纲与能量同(力矩也是这个量纲)，在一个层次；功率和力在一个层次，功率的量纲为[能量/时间]，力的量纲为[能量/长度]。而在热力学中，内能，焓，自由能等是各种热力学势，量纲为[能量]；功和热量的量纲也是[能量]，但它们是一组特定的广延量和强度量的积，而强度量是其对应的广延量关于能量的共轭，这个共轭关系是非常强的限制。这些决定了热力学概念体系与经典力学的不同。这一点，学习热力学的读者应该格外留心。

学物理者，对物理学抱有一点敬畏心应该不是太过分的要求。看着 dark energy 和 exergy 这类词，我觉得物理学还是没能赢得足够的尊重，还有一些人总是随心所欲而心中无矩。别的一些也时常标榜为物理学的领域，那里面的随心所欲更多吧!

- [8] Rant Z. Exergie, Ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit". Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1956, 22: 36
- [9] Honerkamp J. Statistical physics. Springer, 2002. p298. 原句为: The maximum fraction of an energy form which (in a reversible process) can be transformed into work is called exergy. The remaining part is called anergy, and this corresponds to the waste heat.