

# 物理学咬文嚼字之七十三

## 劳—功的篇章

曹则贤<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-05-29收到

† email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150609

Arbeit zieht Arbeit nach sich<sup>1)</sup>

——德国谚语

**摘要** 功、能量、熵、遍历性，还有协同学，这些看似不同的概念有着相同的词源和思想渊源。物理学是劳—功的篇章。

### 1 劳动

弗里德里希·恩格斯是一个了不起的学者。劳动创造了人，原句为“Sie (die Arbeit) hat den Menschen selbst geschaffen”，是恩格斯著作《自然辩证法》中的一个命题<sup>[1]</sup>。人与动物的区别，始于猿之四肢中手与脚的分化。手因为劳动不断获得更大的灵活性，千百万年的劳动积累使得人类的手得以高度地完善，其发展的每一步都扩展了人类的境界。真正意义上的劳动始于工具制造，实际上，恩格斯的原文中是把手本身也当成工具(Werkzeug)的。手不仅是劳动的器官，它还是劳动的产物(Thus the hand is not only the organ of labour, it is also the product of labour)。劳动还带来了协作的需求，从而产生了语言。语言的出现，又促进了人类智力的发育，后来有了规划劳动的智力之可能，甚至有了今天智力游戏也成了劳动本身的局面。尤为重要的是，劳动甚至成了人的存在方式，放弃劳动或

者失去劳动能力或许会对生命力带去强烈的负面冲击。

既然劳动(德语 die Arbeit)对人类具有决定性的意义，作为人类智力之塔尖的物理学，怕是不能摆脱来自劳动的影响，不，劳动的概念简直就是物理学恒久的主题。

### 2 功

如果阅读《自然辩证法》的英文版，可能看不出劳动的概念是物理学的主体，因为那里劳动用的是 labor 一词，它更多地是和艰难困苦相联系。在德语中，劳动一词为 Arbeit，它也是物理学的基本概念——功。

功，是关于劳动(部分意义上)的度量。做功的多少，一个比较容易严格度量的情景是举起重物，因此“重量×高度差”天然地就成了功的单位，其量纲为[公斤·米]或者如今的[牛顿·米]。“重量×高度差”特别适合度量搬煤气罐上楼，从量纲上容易看出它等同于“拉力×距离”，因此可以用来量化拉板车的

辛苦。宋人有诗句“向来枉费推移力”，所谓“推移×力”，那就是“费功夫”的功了。

中文的“功”作为物理学概念，是对英文 work，德语 die Arbeit，法语 travail 的翻译。这些西文词的本意就是劳动、工作、干活的意思，很平常的词汇。但是，这些词作为物理学的概念，是抽象出来描述物理过程的量，它自然同其日常意义是有些区别的。它们是对劳动的“部分意义上的度量”，这就是为什么有“劳而无功”，“无惛惛之事者，无赫赫之功(荀子《劝学》)”等说法的原因。至于“部分意义”怎样理解，一言难尽。试举一例说明：你扛着一坨重物在那里一动不动，很辛苦的，但是却没有做功。又，试体会如下的句子：Arbeit ist also Formwechsel der Bewegung, betrachtet nach seiner quantitativen Seite hin (功，从其量的方面来看，可看成是运动的形式转换)。有兴趣理解这句的读者请阅读《自然辩证法》。值得注意的是，中文物理学因为是拿来的，其词汇选择有故意走

1) 工作会招来更多的工作。——笔者注



12. A *perfect* thermo-dynamic engine of any kind, is a machine by means of which the greatest possible amount of mechanical effect can be obtained from a given thermal agency; and, therefore, if in any manner we can construct or imagine a perfect engine which may be applied for the transference of a given quantity of heat from a body at any given temperature, to another body, at a lower given temperature, and if we can evaluate the mechanical effect thus obtained, we shall be able to answer the question at present under consideration, and so to complete the theory of the motive power of heat.

图1 Thomson和他1849年的文章，其中他首次提出了thermo-dynamic一词

高大尚路线的习惯，故而“功”一词本来就有对劳动的“部分意义上的度量”的意思，毕竟“功”是值得犒赏的、有成就的劳作。中文不是有“没有功劳也有苦劳”的说法吗？

中文物理学有一个与“功”的概念有关的大隐患。Thermodynamics，中文习惯将之译成热力学，因此它也容易被当成所谓的力学<sup>2)</sup>。但是，thermodynamics在1849年首次被Thomson，即后来的Kelvin爵士，引入时可是写成thermo-dynamics的(图1)，它摆明了是关于两个平行概念的学问。Thermo和dynamics分别来自希腊语的热与力，将thermodynamics译成热力学似乎不能算错。但是，我们必须知晓，物理学初期来自日常生活的概念其意义是含混的，force, power, work常常是混为一谈的。Thermodynamics是讲述热—功之间转换关系的一门学问，其主角是热和功(Thomson在文中甚至用的是mechanical effect而非work)，而没有现代物理意义上力的位置。仔细看看热力学的主方程(cardinal equation)  $dU=TdS-pdV$ 就能明白这一点。其右边第一项与热有关，第二项与功

有关，热力学就是关于具有内能 $U$ 的体系之热—功转化的故事(图2)，而非关切力或者动力学过程。实际上，热力学的建立，是一直回避动力学问题的，故才有不可逆过程这样的一般教科书都不明所以的概念。有了主方程或者扩展的主方程，会一点关于Pfaffian form或者外微分的数学，热力学应该是不难学会的。

注意，work来自德语的Werk，但是物理意义上的work(功)对应的却是德语的Arbeit。德语的Werk除了平常的劳动、工作的意思以外，还对应汉语的作品，如Kunstwerk(艺术品)，杰作，如die Werke der Natur(大自然的杰作)，工厂，如Wasserwerk(水厂)，等等，而Werkarbeit干脆指手工制作，Werkstatt指作坊或者艺术家的工作室。显然，Werk的意思还是围绕离手之劳动不远的具体工作，而Arbeit，工作，偏抽象一些，因而成了一个物理量。

### 3 能量

能量是物理学的核心概念，但

它同样也只是个日常词汇。它和劳作有关，这个词的希腊语为ενέργεια(energeia)，其词干为έργον(ergon, work)。厘米—克—秒制下功和能量的单位，erg，就取自έργον一词。

据说energy一词记录最早的使用见于亚里斯多德的著作<sup>2)</sup>。在图3所示的截图中，亚里斯多德谈到荷马习惯把无生命的事物用有生命物(animated<sup>3)</sup>)加以比喻。但是如果事

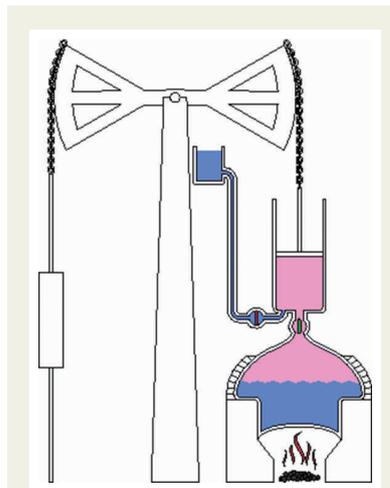


图2 最原始的热机，右侧的加热—冷却装置是为了左侧的机械部分能做功，即把水从矿井中提上来。这样的装置就有了能力，按照图3里的说法，appear to energize

2) 中文有所谓的四大力学的说法，不知始作俑者谁。除了理论力学外，其它的三大力学与“力”几乎没有关系，也不可以当“力学”，Kraftlehre，来理解。——笔者注

3) Animal，动物，能动的，本意为“喘气的”。——笔者注

物是可以 animated 的，那若将之看作是能动的 (because the things are animated, they appear to energize), 也是合理的。为各种事物引入一个指代其行为能力，即对它者产生效应的能力，的物理量，这说不定是能量概念被引入物理学的思想基础。

势(潜)能的概念恐早已经出现在亚里斯多德关于潜能—实现 (potentiality—actuality) 的论述中了，动能概念的引入则要费些周折。运动物体速度的平方，乘以质量，即  $mv^2$ ，先前是被称为 vis viva (活力、生命力) 的。Daniel Bernoulli 在 1741 年通过积分  $\frac{1}{2}mvv = \int p dx$  (这里  $p = d(mv)/dt$ , 是力) 才确定了动能的形式为  $\frac{1}{2}mv^2$ 。

同能量相关联的重要物理学思想是能量守恒原理。Willem's Gravesande (1688—1742) 发现自由落体的下落高度同其获得的速度之平方成正比，这可表示成  $\Delta H \propto v^2$ 。两边加上合适的比例因子，即找到

正确的等价量 (equivalency), 进一步地可表示为  $mg(H_1 - H_2) = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$  (系数的选取的一个约束是，两侧的量纲要相等；我们管  $mgH$  叫做重力势能)，也即  $mgH_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgH_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ 。此即关于自由落体运动的能量守恒定律：速度和高度的变化互相转换，但其“等价量”的总和不变。引入一个叫做机械能的量， $E$ ，对于一个落体，有  $E = mgH + \frac{1}{2}mv^2$ 。如果高度和速度 (比如通过碰撞) 独立地变化，则我们说这引起了体系之机械能的变化。

上述得到机械能守恒定律的过程，我猜可能也同样应用于热力学第一定律的获得了。功和热有相同的气质，功是把一定量的重物之高度提升多少之能力的度量，而热是把一定量的物质之温度提升多少之能力的度量。功可以完全转化成热的，那就有一个比例关系，1 Cal. = 4.18 J。1850 年克劳修斯关于热力

学第一定律的表述就是：如果用热做功，一定要成比例地消耗一些热；反过来，若这些功被消耗了，则会产生等量的热。它们可类比上节中的重力势能和动能，因此相应地可引入一个叫做内能的物理量，也就有了如下的热力学版的能量守恒定律： $\Delta U = Q + W$ 。其微分形式即是热力学的主方程  $dU = TdS - pdV$ <sup>4)</sup>。不过，读者请注意，内能虽然有能量的量纲，但它本质上是个势函数，而且是个统计量。

守恒定律常常被表述为“(某物理量)既不会被创造，也不可会被消灭”，具体到能量，就是“能量既不会被创造，也不可以被消灭”<sup>[3]</sup>。每当看到这种表述时，我总是感到好笑。能量，除了作为概念被人类创造的时候，它何曾被什么过程创造或消灭过？物理学不就是努力通过引入诸如  $h\nu$ ,  $kT$ ,  $mc^2$ ,  $\frac{1}{2}kx^2$  这样的不同能量 (表达形式) 而去构造一个自洽的物理理论的吗？至少从上节能量被引入的过程来看，能量实际上是个虚的、数学的概念。可逆过程、空间可能也是具有类似品质的概念。我们不能把虚的、数学的概念当成存在，虽然我们是依靠数学的概念去构造关于存在的物理学的。有趣的是，能量如今被当成了比实在还实在的东西。如何脱离存在去理解能量，对愚如笔者流确实是个挑战。我总觉得被消耗的不是能量或者卡路里而是实实在在的物质，比如猪消耗的是饲料，车消耗的是油。而  $E=mc^2$  也是体现在  $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$  这样的过程中的。电子—正电子湮灭成了一对具有一定能量的

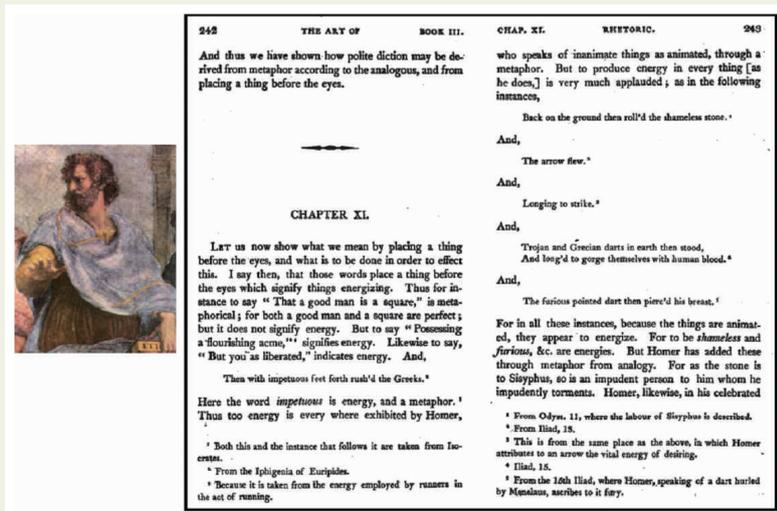


图3 亚里斯多德著作英译本中论及能量的一节

4) 有了  $S$ ,  $V$  及其对应的强度量  $T$ ,  $p$  就能描述一个热力学体系，内能的概念就是多余的，或者是仅为理论的目的。就象对于落体，知道了高度和速度平方，其相应的强度量由质量同重力加速度的组合给出，就知道了一切，而不再需要什么机械能。基于此，我觉得那个把理想气体的熵表达为内能和体积的函数的公式，就显得有点荒唐。一点愚见，不一定正确。——笔者注

光子，而不是湮灭成了 pure energy。

## 4 熵

熵是热力学的关键概念。因为很少转述者肯去理解它被抽象出来的过程，这个概念在热力学文献中常给人以一种云里雾里的感觉。在中文语境中，熵简直是“热力学之殇”。其实，熵概念的抽取同能量守恒定律的抽取一脉相承，都是自一个关于刺激—响应的比例关系引入一个等价量，即克劳修斯所谓的 Aequivalenz(英文 equivalency)，从而将过程表达为守恒定律的形式。此过程的关键，是为刺激—响应，或者原因—结果，各找到一个同量纲的量<sup>[3]</sup>。量的守恒和量之变化为零这两种表述是等价的。理解了这一点，就明白了热力学中的所谓“能量守恒”表示  $dU=TdS-pdV$  和熵概念赖以提出的等式  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ ，其依据的是同样的哲学，遵循的是同样的数学路径；进一步地我们也就理解为什么热力学第一定律和第二定律其实是深度耦合的了。 $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$  意味着存在一个积分不依赖于路径的势函数，即熵，entropy。

克劳修斯是将 Energie(能量)和 trope(转换)合在一起创造出的 Entropie 一词，其用意是强调这是一个描述能量转换过程的等价量。虽然从字面上已经看不到工作(ergon)一词了，但是，其词头 en 表示能量，它依然是一个关于劳—功的关键物理概念。关于熵，本系列已有两篇专门讨论过<sup>[4, 5]</sup>，此处不再赘述。

5) Method, 方法, 就来自 μετα+οδος。——笔者注

6) 仔细玩味玻尔兹曼这样的思想家对物理学的贡献，发现那个按照“非功不侯”原则颁发的诺贝尔奖之得主，其大部分确实和这些思想家不在一个层面。有些地方大肆宣扬居里夫人，却不知居里先生才对物理学有更深刻的、带思想性的贡献，不能不说是一种悲哀。——笔者注

7) 这位伟大的思想家、几何学家、建筑师如果知道他的名字在中文中是和恶俗的富勒烯、石墨烯相联系的，不知会作何感想。——笔者注

## 5 遍历理论

Ergodic 一词来自希腊语的 ἐργον (ergon, work) 和 ὁδός<sup>5)</sup> (odos, path or way), 字面意思是“做功路径”。该概念由玻尔兹曼在研究统计物理问题时提出<sup>[6]</sup>。它指的是如下的假设：对于一个处于平衡态的由足够大数目的相互作用粒子构成的体系，其(性质)沿单一轨迹(路径，ὁδός)的时间积分等于对相空间的积分，即时间平均等于系综平均。玻尔兹曼的 ergodic 假设一般来说是没根据的，但是关于这两个量，即沿单一路径的时间积分和关于相空间的积分，得以相等之条件的研究导致了 ergodic theory 这门学科的诞生。关于 ergodic theory 的现代描述是：这是一门研究随时间演化系统之长期平均行为的学问<sup>[7]</sup>。Ergodic theory 如今更多是一门数学，是关于概率空间之保测度变换的研究，其构成包括概率空间， $\sigma$ -代数，测度和变换。

Ergodic theory 被汉译成遍历理论，表意层面来说不好说它偏离原意，但字面上肯定未传达原意。遍历理论，仅从字面理解，笔者常会由它想到费曼的路径积分的图像：在那里，从一点到另一点的所有可能路径都原则上会被经历，并被赋予不同的几率(幅!)。

Ergodic theory 是统计物理的基础。体系的状态可用相空间里的点描述。对于给定的一组  $(x_i, p_i)$ ，这就构成了系统的一个态，对决定系统的行为有同样的权重！这样，系

统处于能量  $E$  的概率就正比于能量  $E$  所容许的状态数<sup>6)</sup>，这便是统计物理的基本假设，热力学入门课程中的分子动力学所涉及的气体粒子数关于速率的分布——Maxwell—Boltzmann 分布——即由此而来。笔者的统计物理和数学知识不足以讨论这个 ergodic theory 的深入内容，就此打住，有兴趣的读者可参阅文献[8]。

## 6 协同学

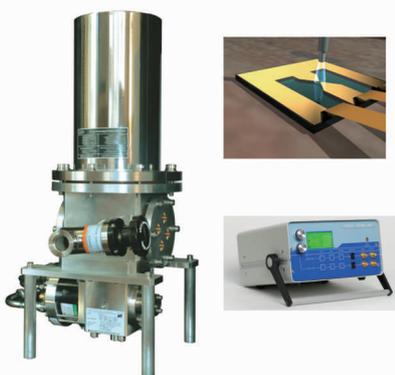
协同学也是关于劳—功的一门学科。所谓的协同学，synergetics，来自希腊语 συν + ἐργον，字面上的意思就是 working together，大致可理解为 cooperation。笔者最先接触到的协同学是 Hermann Haken 受激光理论的启发所建立起来的一门交叉科学<sup>[9]</sup>。Haken 把激光原理诠释为非平衡态系统的自组织，并进一步试图解释远离平衡态的热力学开放系统中花样与结构的自组织形成过程。自组织要求系统包含许多非线性相互作用的子系统，其关键概念是序参数。笔者当年稀里糊涂选择了激光专业，毕业论文就是参考 Haken 的协同学去模拟有序花样的产生。可惜的是，笔者基础太差，未能理解那本书的内涵，自然也谈不上能做出一篇研究论文。

Synergetics 是由 Buckminster Fuller<sup>7)</sup> 造的词，以指代对变化中的系统的经验研究，强调系统之不能基于其单元行为可预测的整体行为(类似于“整体大于个体之和”的思想，这里强调的是整体的行为超越



## Count Photons

### 超导单光子探测系统 THz & Mid-IR探测系统



- ☑ 时间响应低至 50ps
- ☑ 10 cps 超低暗噪声
- ☑ 高量子效率(高达25%)
- ☑ 标准单模光纤输入
- ☑ 多通道可选



### 时间相关单光子计数器 德国 B&H 公司 TCSPC 产品

北京鼎信优威光子科技  
010-8350 3853  
info@dyna-sense.com  
www.dyna-sense.com

基于个体行为所能作的预期)。富勒的协同学影响了很多人<sup>8)</sup>，结出了几大硕果，除了 Haken 的自组织以外，还有 Amy Edmondson 对四面体和二十面体几何的探索(富勒自己是这方面的大拿<sup>10)</sup>)，Stafford Beer 关于社会语境下的 geodesics 的研究。Geodesics, earth + to divide, 中文随便被翻译成了测地学，在广义相对论中 geodesic 被译成测地线。其实，geodesics 更多地是关切划分而非测量，其研究对象为(如何找到)曲面上的短程线。我一直容易把 geodesics 和 ergodicity 这两个词弄混，原因不明。

## 7 多余的话

恩格斯的《自然辩证法》

## 参考文献

- [1] Engels F. Anteil der Arbeit an der Menschwerdung des Affen (劳动在从猿到人的进化过程中的作用). 此文写于 1876 年, 是恩格斯一篇未完成的文章, 后收录为 Dialektik der Natur 的第四部分. 英文题为 The Part played by Labour in the Transition from Ape to Man
- [2] Aristotle. The Rhetoric, Poetic, and Nicomachean Ethics. Book III, Ch. XI English translation by T. Taylor, Black, 1818. pp. 242-243
- [3] Herrmann. F., Job G. Altlasten der Physik. Aulis Verlag, 2002
- [4] 曹则贤. 物理, 2009, 38(9): 675
- [5] 曹则贤. 物理, 2015, 44(5): 343
- [6] Boltzmann L. Vorlesungen über Gastheorie. J.A. Barth, 1898. p. 89 (in the 1923 reprint)
- [7] Dajani K, Dirksin S. A Simple Introduction to Ergodic Theory. 2008, unpublished
- [8] Diu B *et al.* Grundlagen der Statistischen Physik. de Gruyter, 1994. 其附录有一章 Genaue Begriffsbildung zur Ergodenhypothese (遍历假设的精确概念构造)
- [9] Haken H. Synergetics: An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology. Springer, 1983
- [10] Fuller R B. Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking. Macmillan, 1975

用大量的篇幅讨论劳动(功), 真可拿来作为学物理的入门书。恩格斯太伟大了, 他不仅认识到了劳动创造了人, 而且还认识到劳动创造出了职业的劳动成果占有者。忽然想起, 这学术的研究也一样是人类的劳动形式, 恐也不能逃离恩格斯指出的普遍规律吧: “依靠自身劳动的私营业者也必然会发展起对劳动者(workers)的剥削, 而财富也会越来越集中到非劳动者(non-workers)的手中。” 诚哉斯言。只是不知道当其时也, 恩格斯是否也如宋朝“昨日入城市”的蚕妇, 在认清了“遍身罗绮者, 不是养蚕人”此一太过正常的现实时, 不由得泪流满面?

物理, 是关于存在的道理。有抽象的内容, 使用抽象的工具与方法, 却永不可脱离存在的现实。这是笔者这些年来获得的对物理学的一点粗浅认识。

8) 读到富勒的“Life begins with awareness of environment”这句时, 我觉得好象对生命作为非平衡态热力学系统的理解更深了一步。热力学考虑的是系统+环境, 其主方程  $dU = TdS - pdV$  的几何是所谓的接触几何。关于自然的学问, 相通性可能是其正确性的一个表现。——笔者注