

诸“势”同一理，举一反三

祖宏迪^{1,2} 强艳^{3,†} 白欣¹

(1 首都师范大学 北京 100089)

(2 北京科技创新研究中心 北京 100744)

(3 北京大学附属中学 北京 100080)

2022-04-29收到

† email: qiangyanzhao@sohu.com

DOI: 10.7693/wl20220510

1 引子

将英文 potential 翻译为“势”，是物理学名词翻译中很传神的一例。从“因势利导”、“蓄势待发”、“仗势欺人”等词汇中，我们能够品读出“势”是因姿态、地位而具有的某种“东西”，这种“东西”并不需要直接表现为行为和动作，但我们能切实感受到它的存在^[1]。物理学中的“势”正是这样的概念，它是一个只和状态、位置有关的物理量，当对象处于这些状态、位置时便会具有一定的“做功”能力——势能(或称位能)。势能的引入简化了许多力学问题，如将动能守恒转化为适用条件更广泛的机械能守恒，将动能定理转化为使用更方便的功能原理等。作为科学教育研究者和一线教师，笔者注意到在中学物理阶段，重力势能、弹性势能、电势能、电势等概念多是直接引入，并未对其来源、思路以及相互之间的关联做充分阐述，学生的学习仍处于“知识点集邮”的状态，无法构建起较为完整的认知，成为了基础物理教学的难点。

2 基础物理教材中的“势能”与“势”

中学物理中对势能的定义是“相互作用的物体凭借其位置而具有的能量”，具体到重力势能的定义为“物体由于被举高而具有的能叫做重力势能”；弹性势能的定义为“发生

弹性形变的物体的各部分之间，由于有弹力的相互作用，也具有势能，叫做弹性势能”；分子势能的定义为“分子势能是分子间由于存在相互的作用力，从而具有的与其相对位置有关的势能”；电势能的定义为“电荷在电场中具有的电势能叫做电势能”。唯一一个涉及的“势”是电势，其定义为“电场中某点的电荷的电势能跟它电量的比值，叫做这一点的电势。”^[2]

大学普通物理会在中学物理对势能的粗糙证明基础上更进一步：通常以平方反比有心力相互作用下两个质点间的作用力与反作用力做功问题出发，证明这一对力的功只和两个质点的相对位移有关。然后将其中一个质点选做坐标原点，则一对力对两个质点的合功，可以简化成为另一个质点在一个力的作用下移动做功的问题。对于平方反比有心力作用下的质点，在任意两点之间移动时，作用在其上的力所做的功只和初、末位置有关而与路径无关；或者说作用在其上的力沿任意闭合回路所做的功为0，具有这种特点的力被称为保守力。而保守力做功可以看做一个以位置为变量的函数在初、末位置取值之间的差值，这个以位置为变量的函数又具有能量量纲，于是定义为势能。由于保守力、势能都是建立在一对力做功的基础上，因此势能属于整个系统而非单一物体本身^[3]。

这些论述总体上还是比较系统

的和准确的，但缺憾在于直接给了我们这些概念的定义、特点，却没有说明为什么要构建这样的概念，它们背后的物理思想是什么，它们的共性是什么，等等。往往老师们花费了大量精力来对每个概念做重复讲授，学生却难以真正掌握其中的核心思想，从而难以拥有从少量应用举例中举一反三的能力。

3 “势”与“势能”概念的形成

经典的牛顿力学体系虽然完备，但当研究对象稍微复杂一点时，受力分析就变得十分困难，在解决实际问题时常常陷入困境。为了解决这个问题，18到19世纪期间，拉格朗日、拉普拉斯、哈密顿等人采用新的数学语言构建起了一套新的牛顿力学表述体系——分析力学。势和势能的概念是伴随分析力学的建立而产生的。

虽然现代教科书上通常由势能来推出“势”，但历史上“势”的概念形成要早于“势能”。早在1773—1777年间，法国数学家拉格朗日在研究月亮的特征方程问题时就提出了“势”的概念，他对势的描述是物体的质量与位置之比。1784—1785年间，拉普拉斯在研究万有引力问题时，求得天体对其外任意质点的引力分量可以用一个标量函数 ψ 对坐标的一阶导数来表示，而这个标量函数满足一个偏微分方程，即著名的拉普拉斯方程((1)式)，这个标量函数 ψ 后来被格林

赋予了“势函数”的名称^[4]。

$$\nabla^2\psi=0, \quad (1)$$

$$\nabla^2\psi=f, \quad (2)$$

$$\nabla^2V=-\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

$$-\nabla^2V=\mathbf{E}, \quad (4)$$

$$-\mu_0\nabla V_m=\mathbf{B}, \quad (5)$$

$$\left(\nabla=\frac{\partial\psi}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial\psi}{\partial y}\mathbf{j}+\frac{\partial\psi}{\partial z}\mathbf{k}\right). \quad (6)$$

事实上,用拉普拉斯方程的解——势函数对坐标的一阶导数表示的不只可以是引力的分量,它可以是各种描述力、热、电、磁等物理现象的各种矢量,所以这个方程包罗万象,能被用来描述电场、引力场、流场甚至表面张力等各种问题。

拉格朗日和拉普拉斯的学生泊松在拉普拉斯方程的基础上提出了描述有源场的方程——泊松方程(2)式),并把它应用在对静电问题的研究中。泊松在1812年发表的论文中证明静电学的许多问题可以用“静电势”来简化,而这个静电势正是泊松方程(3)式的解,静电势对空间坐标的一阶导数则表示了电场的场强矢量((4)式)。泊松在1826年又针对磁场提出了势函数——静磁势,由于磁场是无源场,因此静磁

势是拉普拉斯方程的解,而这个势函数对空间坐标的一阶导数表示了磁场的磁感应强度矢量((5)式)^[5]。

“势函数”和拉普拉斯方程、泊松方程是分析力学中研究各类问题的重要工具。势能的概念是在1829年科里奥利引入功的概念、1850年前后威廉·汤姆逊(开尔文勋爵)引入动能术语后,由兰金在1853年建立起来的。

4 “势”视角下静电场与重力场的类比

对于中学物理和大学普通物理的学习者而言,分析力学中对势的论述接受起来可能有一定难度,笔者也无意要求基础物理的教师和学习者学习分析力学。上述介绍的目的在于让我们意识到一点,基础物理中遇到的所有的“势能”都对应着一个“势函数”,而各种势函数都是拉普拉斯方程(无源)或泊松方程(有源)的解。它们虽然描述了不同的物理现象,但其数学模型是完全一样的。

如在静电场中,静电势 $V_e = -K\frac{Q}{r}$, 对应的静电势能 $E_p = qV_e = -K\frac{Qq}{r}$, 静电势能对空间坐标的一

阶导数可表示静电力 $F_e = -\nabla V_e = K\frac{Qq}{r^2}\mathbf{e}_r$, 静电势对空间坐标的一阶导数可表示引力场强 $\mathbf{E} = -\nabla V = K\frac{Q}{r^2}\mathbf{e}_r$ 。而在引力场中,引力势为 $V = -G\frac{M}{r}$, 对应的引力势能 $E_p = mV = -G\frac{Mm}{r}$, 引力势能对空间坐标的一阶导数可表示引力 $\mathbf{F} = -\nabla E_p = G\frac{Mm}{r^2}\mathbf{e}_r$, 引力势对空间坐标的一阶导数可表示引力场强 $\mathbf{E} = -\nabla V = G\frac{M}{r^2}\mathbf{e}_r$, 当你仔细审视引力场强,赫然发现它其实就是引力加速度。通过对静电场和引力场中“势”和相关量的对比,不难发现它们在数学意义上相同,于是我们完全可以用最容易理解和最容易构建直观图像的引力问题中的图像,来作为所有类型“势”和“势能”问题的图像。

中学物理常处理的重力场本质上是引力场的一个近似情况,重力势能其实就是引力势能,重力就是引力,重力加速度就是引力强度,那么也不难看出重力势是重力加速度与相对高度的乘积。由于地表附近的重力加速度近似可以看做常量,那么重力势与海拔高度便一一对应。于是,我们就可以把抽象的电场中的电势、场强等物理量,用一幅立体地图沙盘的图像呈现出来:电势对应空间位置的海拔高度,电场强度对应海拔高度对位置坐标的一阶导数——梯度,形象地看起来就是“山坡”的陡峭程度,一个电荷在场强越大的地方受力越强,而山坡越陡的地方放一个重物,其可能获得的加速度也越大,且指向海拔高度降低的方向(请注意,当在重力场中把海拔高度

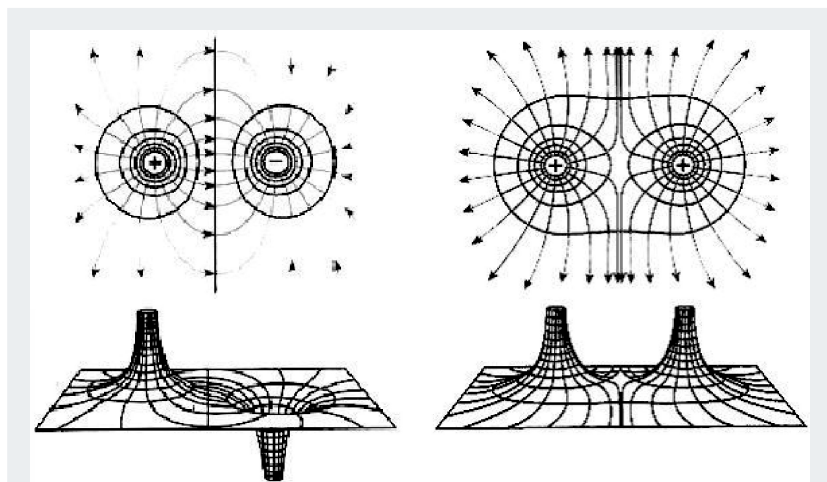


图1 用“沙盘”方式构建电场的直观图像(图片来源网络)

与引力势对应时，空间坐标只有地表 XY 二维，陡峭山坡上滚落的重物，我们只考察其在 XY 方向上的分量)。

借助这样的类比，我们就可以信心十足地为初学物理的低年级学生提供一个直观易懂的图像：把电压(电势差)类比成海拔高度差，把电流类比成一汪水流，把回路类比成水管。对于一条确定的回路，电压越高电流越大，就好像海拔越高水流越大，单位时间流下的水就越多一样。

5 结语

以上的讨论对物理专业的学生以及教师、研究者而言具有一定的参考价值。在处理静磁势、分子势等物理问题时都可以采用与静电势类似的方式，以图1那样的形式来做形象化地描述，从而更易于思考。更重要的是，“势函数”和拉普拉斯方程、泊松方程蕴藏的物理思想，正符合物理学追求的“简洁、完备、精确”的要义，为我们探索未知问题提供了十分有益的指引。

参考文献

- [1] 曹则贤. 物理学咬文嚼字. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2019
- [2] 人民教育出版社, 课程教材研究所, 物理课程教材研究开发中心. 物理. 北京: 人民教育出版社, 2010
- [3] 吴柳. 大学物理学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2021
- [4] 麦克斯韦. 电磁通论. 北京: 北京大学出版社, 2010
- [5] 马尔科姆·朗盖尔. 物理学中的理论概念. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2017

悟理小言

我的超导体研究经验——超导爱恋小语

人类对天上的星星充满想象与期待，对地球上的超导体，也同样满怀憧憬。我个人有幸对超导体不算陌生，长年若即若离，有时投身其中。

超导体并不是我的研究主轴，但在低温下，超导的金属比不超导的金属种类还多得多，因此超导体可谓是低温实验物理学家的紧邻密友，经常耦合在一起，难舍难分。

我在密歇根大学安娜堡分校担任第一任博士后研究期间，恰逢高温超导体的爆炸性世纪大发现，因此我转往第二任博士后研究工作，到弗吉尼亚大学夏洛茨维尔分校参与杜邦公司的应时炽热高温超导体计划。

返回台湾后，在台湾大学物理系继续高温超导体的研究，因实验室草创，只需液氮温度($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)即可。约四五年后，有了难得但昂贵的液氦($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$)系统，就不再专注/专情于超导课题了。但如上所说，低温实验室与超导物性总是藕断丝连，有时暗通款曲。

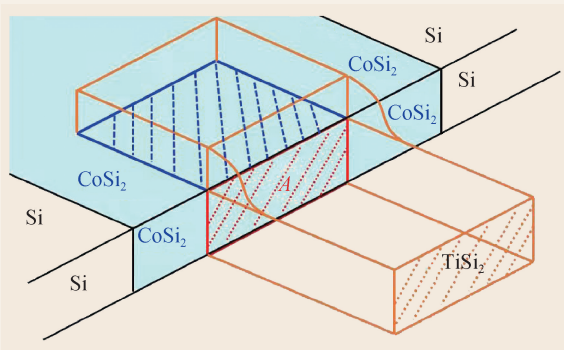
岁月静流，20多年过去了。最近我们实验室在二硅化钴/二硅化钛异质结构中(下图)发现了拓扑超导特征，这应将是从事科学研究40年来的最后一记重击——持续进行中！(*Science Advances*, 2021, 7: eabg6569)

这一个崭新超导组件系统的设计、制作和测量，都是由邱劭斌博士后主导的。我们的发现发表之后不到半年，已经接获几个国外大学和国际会议的邀请演讲，包括今年8月将盛大举行的第29届国际低温物理会议(新冠肺炎疫情前，这个系列会议每三年举办一次，每届参加人数常多达1200至1500人)。

二硅化钴/二硅化钛异质结是一个自旋三重态手性 p -波配对超导体，其制程与当今炉火纯青的硅基集成电路技术兼容，有利于制作新世纪量子位元组件，为开发量子计算机铺路。

低温物理实验室与超导体共舞。

(台湾交通大学 林志忠 供稿)



二硅化钴/二硅化钛异质结结构示意图，其中 A 代表结面积

Scryo® 连续流型低温恒温器

- ▶ 新型高效热交换器结合超绝热轻质柔性液氮传输管线，超低液氮消耗率，最低温度<1.8K
- ▶ Scryo-S-200/300和500采用特殊温度漂移补偿设计和优化的超绝热支撑设计
- ▶ 与Qcryo®结合可升级为无液氮闭环系统，无需消耗液氮即可获得<1.8K，并保持低振动和漂移特性



Scryo-S-500显微



Scryo-S-300紧凑显微



Scryo-S-200通用



Scryo-S-400超高真空插件

Scryo® 系列低温恒温器典型特性

类型 典型特性	Scryo-S-500 显微	Scryo-S-300 紧凑显微	Scryo-S-200 超高真空显微	Scryo-S-100 通用	Scryo-S-400 超高真空插件
样品环境	真空	真空	超高真空	真空	超高真空
温度范围	<1.8K-420K	<1.8K-420K	<1.8K-420K	<1.8K-500K	<1.8K-500K
振动水平	<5nm	<10nm	<5nm	-	-
漂移水平	<2nm/min	<3nm/min	<2nm/min	-	-
温度稳定性	<10mK	<10mK	<10mK	<25mK	<25mK
制冷剂消耗率	<0.55L/hr@5K	<0.55L/hr@5K	<0.55L/hr@5K	<0.5L/hr@5K	<0.5L/hr@5K
典型应用	显微(磁光)、 低维材料、拉 曼/傅里叶/布 里渊散射、高 压/高能物理等	(正置/倒置/ 红外)显微 镜、显微磁 光、低维材 料、拉曼/傅 里叶光谱、高 压/高能等	STM、AFM、 离子阱、显 微、低维材 料、拉曼、高 能物理等	紫外 / 可见 光 / 红外 /THz,傅里叶 光谱,基质隔 离,穆斯堡尔 谱,高压 / 高 能物理等	ARPES、 MBE、STM、 AFM、离子 阱、ESR、高 能物理、 X-ray等

