

公式——物理学描述自然的“语句”

陈征^{1,†} 屈真²

(1 北京交通大学 物理科学与工程学院 100044)

(2 中国人民大学附属中学 北京 100080)

2022-07-01 收到

† email: chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220709

1 引言

《时间简史》是20世纪最畅销的物理科普书籍之一，许多评论家在谈到其畅销的原因时常提到这样一句话：“这本书中没有公式”。在科普创作领域也流传这样一句话：“科普内容中出现一个公式，就会损失一半的受众；出现两个公式会损失超过三分之二的受众；而当第三个公式出现的时候，受众基本就跑光了”。“公式”好像是一道鸿沟，横亘在许多物理学习者和爱好者面前，让物理学显得高冷和遥远(图1)。

物理学家眼中的“公式”却是最优美的语言，一条公式胜过千言万语，简洁地完成了对大自然完备、精确地描述^[1]。为何物理学家和普通人对“公式”的感受有如此大的不同呢？很大程度上源于了解和学习物理的过程中遇到了“上屋藏梯”的情况。“公式”是一代代物理学家、数学家依据物理学的目的、特点等逐步探索、凝练形成的描述方式。而在基础物理的学习过程中，大家往往缺失了中间过程而直接面对最终结果，这就好像一个人沿着梯子一级级爬到了楼的高处，然后将经过的阶梯隐藏起来，于是给其他人形成了高不可攀的感觉。若是把这个梯级展现在大家面前，一切便不再神秘，大家要做的只是沿着梯级多下点功夫而已。

2 物理学的“词汇”与“句子”

自然语言的“语法”通常可以大致分为“词法”和“句法”两大部分，前者是按照一定规则构建“音、形、义”的结合体“词汇”来表达名称、动作、状态等基本语义；后者是将“词汇”按照一定规则排列组合形成“句子”来表达思想。

物理学的语言虽然和自然语言表面上看起来差异极大，但基本逻辑类似。物理学在描述自然的过程中，首先要建立描述研究对象各种状态、性质的量化指标——物理量，用简洁的字母、符号等作为其代号，这不也是一种“音、形、义”的结合体，是物理学语言的“词汇”吗？然后将物理量用各种算符连接成为等式或不等式来描述现象或规律，这不就是物理学的“句子”吗？

物理学的语法比自然语言更简单。在“词法”方面，既没有“名词”、“动词”、“形容词”、“副词”、“介词”等等的类型，也没有那么多“词性”、“时态”、“语态”等问题。针对纷繁复杂的自然现象构建的各种物理量，通过算符连接成为公式的过程中(如同自然语言的“组句”过程)，根据操作(运算)规则的不同也就分为两种：没方向的“标量”和有方向的“矢量”。如果引入“张量”的概念，标量和矢量分别是0阶和1阶张量，所有的物理量都是一种张量。当然，物理量从描述对象的性质角度还可以分为广延量和强度量，从描述状态还是描述过程的角度可以分为状态量和过程量，还可以分为建立在实验基础上定义的基本量和由基本量组合构建的导出量，但这些分类并不影响相应物理量与算符的操作(运算)规则。

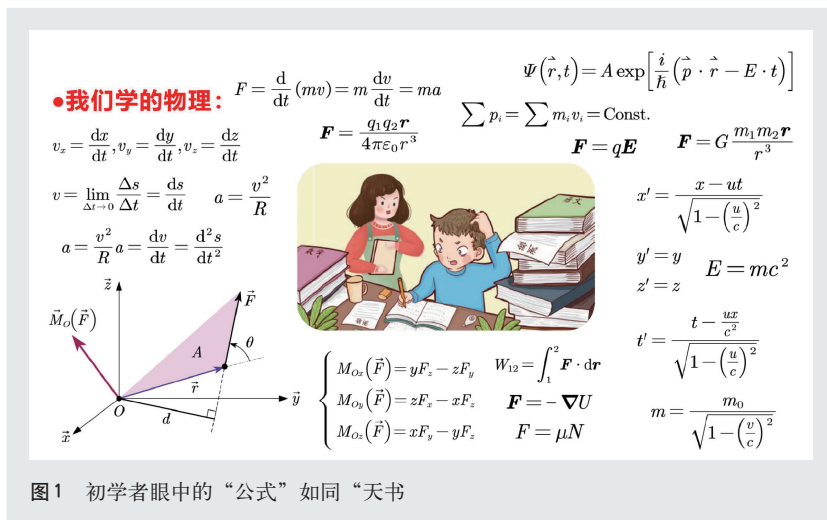


图1 初学者眼中的“公式”如同“天书”

在“句法”方面，物理学也没有祈使句、疑问句、感叹句等等，所有“句子”都是陈述句。通过算符和数学运算规则把代表物理量的符号连接成等式或不等式，客观地描述物理量对应的对象物理性质的定义或它们之间的关系。不过需要注意的是，在这个过程中数学规则也扮演重要的角色。如基础物理公式中常常见到的向量代数算符“ \cdot ”（标量积）和“ \times ”（矢量积），就不但包含了相关物理量之间的数量关系，还包含是否具有方向和方向具体向哪儿的准确信息。按照向量代数矢量积的右手定则，安培力 $d\mathbf{F} = Id\mathbf{l} \times \mathbf{B}$ 、洛伦兹力 $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 等的方向判断完全不需要另外记忆“左手发电机定则，右手电动机定则”之类的判定规则，各个物理量的方向和叉乘顺序已经给出了一切信息。

3 两种不同类型的“公式”

“公式”就是物理学描述自然的“句子”。当我们审视基础物理中的各种“公式”时，会发现它们其实只有两大类——“定义”和“规律”，分别“叙述”了两类不同的内容。

定义类“公式”是在阐述如何量化表达对象的某种性质，也就是描述相应性质物理量的“定义式”。被这类“公式”描述的性质通常无法直接测量，也就无法在测量基础上直接定义物理量，因而必须通过其他物理量以“公式”给出组合的方式来进行表述。如描述运动快慢的物理量“速度”就是一个抽象概念，无法在现实世界中直接测量得到，需要分别测量物体运动位置的变化和发生这段变化所经历的时间，然后通过位置变化(位移)对时间的变化率来作为量化描述运动快慢的物理量——速度($v = \frac{dr}{dt}$)。描述

运动快慢变化率的“加速度”同样是个抽象的概念，我们需要先通过测量位置和时间变化来得到速度，然后以速度对时间的变化率来得到加速度($a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}$)。以什么样的物理量来描述物体的运动状态曾有所争执，牛顿等人使用了质量和速度的乘积，莱布尼茨则主张用质量和速度平方的乘积，经过漫长的历史演变，最终形成了今天动量、动能、功等概念，它们的定义式分别是 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ 、 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 、 $dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 。按照目前我们熟悉的物理量体系，除了7个基本物理量，其他的导出量都有一个定义式，直接或间接地说明如何从基本物理量出发得到描述这个性质的物理量，如静电场中的电场强度 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$ 、电势 $U = \frac{W}{q}$ 、电容 $C = \frac{Q}{U}$ 等等均属此类。

规律类“公式”则是阐述自然现象中不同物理性质(这些性质可以属于同一个对象，也可分属不同的对象)之间的关联关系，也就是所谓“物理规律”。如果按照杨振宁先生以经典力学为例阐述物理规律的层次结构，还可以进一步把物理规律分成“唯象规律”和“理论框架”两个层次。所谓“唯象规律”指的是这些规律只体现了物理过程中不同物理量之间的表面相关关系，而并不揭示其背后的作用机理^[2]。如开普勒行星运动三定律就只描述了行星运动位置、时间和轨道参数之间的相关关系，而并不告诉我们为什么行星会这样运动，这就是一种“唯象规律”。

中学物理课程和大学普通物理涉及的大多数规律都属于唯象规律的范畴。如理想气体三定律只给出

了一定质量理想气体的状态参量压强 P 、体积 V 、温度 T 之间的关联关系 $\frac{PV}{T} = \text{常量}$ ，却不能告诉我们为什么存在这样的关系。胡克定律 $F = -kx$ 也只告诉我们物体发生弹性形变时，弹性力的大小和形变量成正比，其比例系数和物体本身的弹性性质有关，但为什么存在这样的关系？物体内部到底发生了什么？无法通过定律得知。古典摩擦定律(阿蒙顿—库仑定律) $f = \mu N$ 同样只反映了界面上的摩擦力和施加在界面上的正压力成正比，摩擦系数 μ 只是两者的比例系数，虽然通常把它解释为界面粗糙程度的表征，但当你深入了解摩擦现象中复杂的作用机理时就会发现，摩擦系数 μ 并不包含作用机制的信息。欧姆定律 $I = \frac{U}{R}$ 也是这样，它只说明当一定电压施加在电路两端时，电路上能够测量到一定的电流，电流和电压成正比，而比例系数和电路本身的物理因素有关。我们可以用这个比例系数来作为电路导电性质的量化表征，这就是物理量“电导” G ，当然定义比例系数的倒数作为表征参数也没有本质区别，这个物理量我们更熟悉，就是电阻 R 。焦耳定律、库仑定律、毕奥—萨伐尔定律、楞次定律、法拉第电磁感应定律皆是如此。

“理论框架”在“唯象规律”的基础上进一步揭示出自然现象背后的原因和作用机制。描述“理论框架”的公式在整个物理学中都比较少，因为建立理论框架的过程同时也是再一次“思维经济”，力求最终通过少数的几个命题和相应的数学规则就能够解释大量自然现象，完美地体现物理学的“简洁、完备、精确”。如牛顿建立的万有引力定律和牛顿运动三定律，四条简洁的定

律便能解决宏观低速运动物体的大多数力学问题；麦克斯韦方程组更是将电、磁、光现象统一在四条简洁的公式之下，概括了经典电磁学的大多数规律。

4 结语

当我们用自然语言的视角来审视基础物理中常见的“公式”，把表

示物理量的符号看做一个个“词汇”，由这些物理量通过相应的数学算符和规则连接成等式或不等式从而组成的公式看做“句子”，每一条公式无非就是阐述如何定量描述对象的某种性质，即定义物理量；或是阐述物理过程中不同物理性质之间精确定量的关联关系，即描述物理规律。尝试用自然语言去

完备、精确地描述这些信息，再和公式的描述方式做个对比，此时你便能感受到物理学家眼中公式的优美了。

参考文献

- [1] 杨振宁. 物理教学, 2008, 30(05): 10
- [2] 王泽农. 现代物理知识, 2008, (03): 52

悟理小言

卡皮察的意外人生轨迹

20世纪第二个十年下半段，欧洲发生第一次世界大战、俄国“十月革命”、内战、大流感和食物短缺/饥荒等。卡皮察(Peter L. Kapitza, 1894—1984)的父亲、(第一任)妻子和一子一女在1919年底到1920年初一个月之内相继去世，他陷入愁云惨雾，无限哀伤之中。

俄国现代物理学的提倡和奠基者约飞(Abram F. Ioffe)具有爱才、育才之心，于是决定帮助卡皮察脱离悲伤，并让他专注学习和发挥科学潜力。因此几经波折与阴错阳差——因战后国际局势混乱、社会思潮动荡所致，约飞协助安排卡皮察到了英国剑桥大学卡文迪什实验室参观。参观后，卡皮察热切向卢瑟福表达了他想要到卡文迪什实验室访问几个月，参与研究工作的心愿。

据说卢瑟福一开始因实验室人员已多，就婉拒了卡皮察的请求。于是卡皮察问卢瑟福卡文迪什实验室的实验误差通常多大，卢瑟福听了问题后，虽

然一头雾水，但仍回答说他们的实验误差通常约是2%到3%。卡皮察便即刻答道，现在卡文迪什实验室有30位左右的成员，再加一位，也难以引起注意(起伏)，因为还在实验误差范围之内。于是，卢瑟福点头，同意接受卡皮察前来卡文迪什实验室短期访问。

卡皮察这戏剧性的惊人一举，彻底改变了他此后的人生道路及事业轨迹，更进一步，还改变了实验室的规模与方向。不是如一开始预计的过客般地短暂停留几个月，卡皮察此后在剑桥一直待了将近14年(1921—1934)，直到1934年暑假他回国参加学术会议和度假，意外地被苏联政府留置在莫斯科为止。

苏联政府扣留卡皮察，不让他返回剑桥的动机，可能是为了珍惜和运用卡皮察的才能，来发展本国的科学及工业，以便改善经济并迎头赶上西欧。所以苏联政府积极为卡皮察建立了一所与他在剑桥大学主持的实验室(Royal Society Mond Laboratory)一模一样的“现代化”实验室，并且为了不耽误卡皮察的研究进度，还把之前实验室的仪器设备，以及两名技术精湛的技工，一起购买、复制和邀请到了莫斯科。那个年代，实验室的仪器设备还未商业化，通常都需要自己设计和制作。对于这项安排，卢瑟福在英、苏两国政府之间几经奔走，却仍然无法营救卡皮察返回剑桥之后，便豁然改变心意，转而同意慷慨支持卡皮察的崭新一段(低温物理及强磁场)研究事业。

建立实验室时，苏联政府让卡皮察在莫斯科近郊自由挑选喜欢的地点，确定地点之后，除了实验室之外，还为卡皮察及其家人盖了一栋舒适的住宅。同时，也为“卡皮察物理问题研究所(P. L. Kapitza Institute for Physical Problems)”的研究员及职员，盖了宿舍及小区的公共民生设施。

(台湾交通大学 林志忠 供稿)

