

# 基于系统论的 STEM 课程设计策略<sup>\*</sup>

陈敏华

(绍兴市柯桥区鉴湖中学, 浙江绍兴 312031)

**【摘要】**STEM 是一种整合的科学课程。本文从系统论的角度, 用广延量构建学科核心观念, 以能量和信息量为跨学科共同概念, 并用这些观念和概念来整合科学课程, 提出了一种基于系统论的 STEM 课程设计策略。

**【关键词】**STEM; 系统论; 学科核心观念; 跨学科共同概念; 学习进阶

## 一、STEM 教育

STEM 教育起源于美国。1986 年, 美国国家科学委员会发表《本科的科学、数学和工程教育》报告, 提出“科学、数学、工程和技术教育集成”的建议, 强调要“加强大学教育并追求卓越, 以使美国下一代成为世界科学和技术领导者”。从此, STEM 教育的序幕正式拉开。当时, “科学、数学、工程和技术教育的集成”被称为 SMET。到了 20 世纪 90 年代, SMET 这一名称被改为 STEM。

目前, STEM 教育正在全球如火如荼地开展着。在课程整合的方法上, 使用最多的有两类: 一类是基于项目的课程, 一类是基于工程的课程。实际上, 这两类课程都体现了以工程为中心。

以工程为中心进行的 STEM 教育收到了较好的效果, 能较好地培养学生的合作能力、社交能力和实际操作能力, 尤其是解决非常规问题的能力。然而, 教育实践表明, 现行的 STEM 教育在克服传统科学教育重理论轻实践、重常规问题解决轻实际问题解决的不足的同时, 容易偏向科学教育的另一个极端, 使学生所掌握的知识碎片化。这样的 STEM 教育也不利于创新人才的培养。一个创新人才必须既掌握系统的理论, 又能在理论指导下在实践中发现问题和解决问题。为此, 我们需要寻找一种既重理论又重实践的 STEM 教育模式。

奥地利生物学家贝达朗菲 (Ludwig von Bertalanffy, 1901-1971) 在 1937 年提出的一般系统理论 (general system theory) 为我们提供了一个独特的视角。<sup>[1]</sup>

## 二、一般系统理论

亚里士多德在《范畴集》中所提出的十大范畴 (category) 里, 系统 (system) 属于其中的第一范畴, 即实体或物质 (substance)。系统通常指物体、机器、动物和人等。

然而, 正如亚里士多德所说, “实体无增损”,<sup>[2]</sup> 我们无法对物质说“增加”或“减少”; 也就是说, 我们无法对物质进行测量。我们只能用“数量” (quantity) (亚里士多德十大范畴中的第二范畴) 这一工具对物质的性质 (quality, property) (亚里士多德十大范畴中的第三范畴) 进行测量。比如, 由很多人组成的一个系统属于物质范畴, 这个系统中的人的规模属于性质范畴, 描述这个系统中的人的多少的“人数”属于“数量”的范畴。我们可以测量人数, 但不能测量人。我们平常所说的“人多”实质上是“人数多”。说“人多”是无意义的。

关系 (relation) 是亚里士多德十大范畴中的第四范畴。贝达朗菲在他的一般系统理论中给出了一个开放系统的一般关系式:<sup>[3]</sup>

\* 本文系浙江省教科规划 2013 年重点研究课题“传统物理课程的不足之研究: 课程考古学的方法” (课题编号: SB067) 的阶段性研究成果

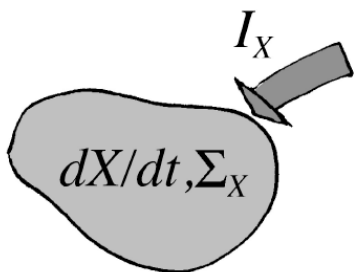
$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = T_i + P_i$$

式中  $P_i$  表示量度系统要素的量  $Q_i$  在系统空间区域内的产生率（其负值的绝对值为消灭率）， $T_i$  表示通过系统与外界环境的边界面的  $Q_i$  的传递速率（ $Q_i$  的流，其负值表示  $Q_i$  向系统外流出）。

实际上，上式中的  $Q_i$  专指分布在系统空间区域内的量，即广延量（extensive quantity）。后来，有人把这一传递公式用广延量表示为：<sup>[4]</sup>

$$\frac{dX}{dt} = I_X + \Sigma_X$$

式中  $X$  表示广延量， $\Sigma_X$  表示系统内  $X$  的产生率， $I_X$  表示通过系统边界面的  $X$  流。上式也可以用图表示为<sup>[5]</sup>：



此图表示系统内广延量  $X$  的值的变化的由  $X$  的流入、流出或  $X$  的产生、消灭引起。

上式表明，引起系统内  $X$  变化的原因有两个：系统空间区域内  $X$  的产生（或消灭）和通过系统边界面的  $X$  流（流入或流出）。上式还清晰地告诉我们，当  $\Sigma_X=0$  时，即当  $X$  既不产生也不消灭时， $X$  是守恒的。 $X$  是否守恒，是对  $X$  测量的结果。

### 三、跨学科共同概念

在美国《新一代科学标准》（NGSS）中，强调了学生科学学习的三个关键维度：学科核心观念（disciplinary core ideas, DCIs）、科学与工程实践（science and engineering practices）和跨学科共同概念（crosscutting concepts）<sup>[6]</sup>。

要整合各学科，就要梳理出跨学科共同概念。系统论能帮助我们梳理出跨学科共同概念。根据吉布斯（Josiah Willard Gibbs, 1839-1903）基本方程（Gibbs fundamental form）<sup>[7]</sup>

$$dE = v \cdot dp + \varphi \cdot dq + T \cdot dS + \mu \cdot dn... \quad (1)$$

描述一个系统的某种性质的基本物理量是广延量（能量  $E$ 、动量  $p$ 、电荷  $q$ 、熵  $S$  和物质的量  $n$  等）和

强度量（速度  $v$ 、电势  $\varphi$ 、热力学温度  $T$  和化学势  $\mu$  等）。从（1）式我们可以看出，动量  $p$  是描述系统所含运动多少的物理量，电荷  $q$  是描述系统所含电的多少的物理量，熵  $S$  是描述系统所含热的多少的物理量，物质的量  $n$  是描述系统所含物质个数多少的物理量。在这个式子中，运动、电、热和物质个数都属于性质的范畴，物理量属于数量的范畴。

（1）式是微分形式，其导数形式是：

$$I_E = v \cdot I_p + \varphi \cdot I_q + T \cdot I_S + \mu \cdot I_n... \quad (2)$$

公式中， $I_E (=dE/dt)$  表示能流（即功率  $P$ ）， $I_p (=dp/dt)$  表示动量流（即力  $F$ ）， $I_S (=dS/dt)$  表示熵流， $I_n (=dn/dt)$  表示物质的量流。

上式表明，动量和能量在速度差的驱动下会从高速处一起流到低速处，形成动量流和能流；电荷和能量在电势差的驱动下会从高电势处一起流到低电势处，形成电流和能流；熵和能量在温差的驱动下会从高温处一起流到低温处，形成熵流和能流；物质的量和能量在化学势差的驱动下会从高化学势处一起流到低化学势处，形成物质的量流和能流。显然，能量不会单独流动，一定与别的广延量一起流动（与能量一起流动的广延量叫作能量携带者，energy carrier）；能量是物理学各分支学科和化学、生物学的共同概念。

这里有必要提及另一个重要的跨学科共同概念：信息量（amount of data）。信息量是声学、光学、信息学和计算机技术等学科的共同概念。跟能量一样，信息量也不会单独流动，也有相应的携带者。信息量的单位是比特（bit）。

### 四、基于系统论的 STEM 课程设计策略

系统论启示我们，用广延量来构建科学教育的核心观念，把其中的能量和信息量作为跨学科共同概念。在这里，我们提出基于系统论的 STEM 课程设计的三大策略：用跨学科共同概念能量和信息量来整合科学课程，把测量和数学建模作为科学与工程实践的核心内容，用物质、性质、数量和关系诸范畴来确定学习进阶。

（一）用跨学科共同概念能量和信息量来整合科学课程

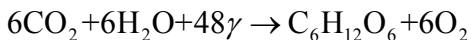
由于能量和信息量是自然科学中各学科的共同概念，能量和信息量成为整合科学课程的重要方法。这一方法基于这样一个基本思想：在自然界、科学技术和日常生活中，许多过程的基本特征可以用能量和信息量及其它们的携带者在系统间的流动来描述。

在这样整合后的科学课程中，我们强调以下内容：

1. 能量和信息量的携带者

在普遍的能量守恒定律表述中，都提到能量形式 (energy form)：能量只能从一种形式转化为另一种形式。根据这一观念，能量被划分为机械能、化学能、电能、内能等。然而，这种划分会导致人们把各种形式的能量误认为不同的物理量。在能量守恒定律中只涉及一个相同的物理量：能量。如果把它们当作不同的物理量，那么，各种不同形式的能量是不守恒的，如机械能是不守恒的，电能是不守恒的。并不是各种形式的能量描述了不同的性质，而是与能量同时流动的能量携带者描述了不同的性质。

例如，在用电动机提升一个物体的过程中，能量与煤和氧气的物质的量一起流到发电厂，然后与电荷一起从发电厂流到电动机，再与动量一起流到物体和引力场，最后储存在引力场中。又例如，在用电冰箱制冷的过程中，能量与电荷一起流入电冰箱中的压缩器，再与熵一起从电冰箱流出。再例如，在光合作用过程中，能量与光子的物质的量一起从太阳流到植物的叶片上，最后储存在植物中，其反应方程为：



将动量、电荷、熵和物质的量作为能量携带者，这是基于(2)式所得出的结论。在抽象程度要求不高的情况下，我们也可以用物质或性质来作为能量携带者。例如，在光合作用的过程中，我们可以认为能量与光子这种物质从太阳流到地球上的植物。又例如，在用电冰箱制冷的过程中，我们可以认为能量与热这种性质一起从电冰箱流出。

对于信息量，由于没有类似于(2)式的公式，我们只能用某些物质或性质作为信息量的携带者。例如，光子这种物质和所携带的信息量从电视机显示屏一起流到我们的眼睛。又例如，电这种性质和所携带的信息量从话筒一起流到喇叭。

2. 能量和信息量的储存

能量和信息量都可普遍地储存在物质中。例如，能量可以储存在运动着的物体中，也可储存在燃料和电池中，也可储存在引力场中。又例如，信息量可储存在大脑中，也可储存在书和计算机中，也可储存在DNA中。

3. 能量和信息量的测量

根据(1)式，测量能量的途径有很多种。在日常生活中，家里的电度表就是测量能量的仪器；当电度表上的读数增加1度(千瓦时)时，我们就知道有 $3.6 \times 10^6$ 焦耳的能量从发电厂流到了家里。

能量的大小还可以根据相应的公式计算出来。由此，

我们可以告诉学生日常生活中大量的能量数据。例如，给汽车加20升的汽油后，根据汽油的燃烧值(43000kJ/kg)我们就可算出油箱中增加了800MJ左右的能量；食品所含的能量值通常标在包装袋的营养成分表中；用电器的耗能情况通常标在其效能标识中(如一台电冰箱每天的耗能量为0.36千瓦时)；一个完全充满电的4.5V的电池含有大约10kJ的能量；一个完全充满电的汽车电池大约含有2000kJ的能量，相当于一条巧克力所含的能量；货运列车的发动机每小时大约要消耗10000MJ的能量，等等。

能量值要通过复杂的测量和计算才能得到，而信息量的值基本上可以在测量信息源的符号数的基础上通过计算得到。

信息量由香农(Shannon, Weaver, 1949)最早定义。这个量被广泛地应用于通讯工程中。香农的信息量是这样定义的：

$$H = -\sum_{i=1}^N p(i) \log_2 p(i)$$

公式中N是所用符号的总数。 $p(i)$ 是第*i*个符号出现的概率。初看起来，这个量好像对学生来说太难了。它看上去要求学生具有对数和概率的准备知识。然而，如果所有N个符号出现的概率是相同的，这个定义式就简化为：

$$H = \log_2 N$$

在这个表达式中没有出现概率，但含有对数。因为上面的公式相当于

$$2^H = N$$

所以，即使学生还不知道对数也容易确定H的值，他们只需找出2的多少次幂最接近于N。例如，因为 $2^1=2$ ，所以，回答一个“是一否”问题所需的信息量为1bit；因为常用汉字为2000个左右，而 $2^{11} \approx 2000$ ，所以每一个汉字所携带的信息量大约为11bit。

(二)把测量和数学建模作为科学与工程实践的核心内容

物理量是用来测量的工具(tool)，测量是获取信息量的过程。由此，我们完全可以毫不夸张地说，物理学(和科学的其他学科)是一门测量科学<sup>[8]</sup>。

测量的目的是为了从物质世界中获取信息量，从而找出量与量之间的关系，建构起数学模型，作为我们对这个物质世界的一种表征(representation)。而建构数学模型的目的是为了解释(interpretation)这个世界，并通过科学与工程实践来改变这个世界。数学建模是科学实践活动的核心<sup>[9]</sup>。

设计和制造的基础是数学建模，数学建模的基础是测量。测量和数学建模应该与设计 and 制造一起成为科学与工程实践的核心内容。

(三)用物质、性质、数量和关系诸范畴来确定学习进阶

学习进阶 (learning progressions, LPs) 是近年来国际科学教育界的一个研究热点。这一术语很早就有人提出，然而，在国家层面上，最早出现这一概念的要算美国国家研究理事会 2005 年出台的关于 K-12 年级科学成就测验的政府工作报告。学习进阶是对学生在学习某个核心概念时由浅入深的描述，提出适合不同阶段学生认知发展的表现期望，从而使学生的科学素养随着学习阶段的延伸实现连贯一致的进阶发展<sup>[10]</sup>。

然而，进阶的确定仍是一个难以突破的难题。用物质、性质、数量和关系诸范畴来确定学习进阶，是我们解决这一问题的较好方案。

对照皮亚杰 (Jean Piaget, 1896-1980) 儿童认知发展理论<sup>[11]</sup>，我们发现，学生在从幼儿园到高中的学习阶段中所关注的内容是按“物质 - 性质 - 数量 - 关系”这四个范畴的顺序递进的。例如，对于汽车的运动 (如下表所示)，处于感知运动阶段的幼儿 (0-2 岁) 和前运算阶段的幼儿 (2-7 岁) 主要关注汽车这一实体，处于具体运算阶段小学生 (7-11 岁) 开始关注运动这一性质；处于形式运算阶段的初中学生 (11-15 岁) 会用动量、速度等物理量描述运动这一性质的某些方面 (运动的多少和运动的快慢)，高中学生 (15-18 岁) 能理解动量守恒定律。类似的结论在一些国际权威文献中也得到了印证<sup>[12][13][14]</sup>。这一结论对于 STEM 教育具有重大的理论和实践意义。

汽车的运动：学习进阶的确定表

学习阶段	幼儿园	小学	初中	高中
学习主题	行驶的汽车	汽车的运动	汽车的动量	动量守恒定律
范畴递进	物质	性质	数量	关系

### 五、结论

本文将贝达朗菲的一般系统理论应用于广延量，从中构建出各学科的核心观念和梳理出跨学科共同概念，并用这些观念和概念来整合科学课程；提出了基于系统论的 STEM 课程设计策略，并阐述其意义。由于这里所强调的学科核心观念和跨学科共同概念都是物理量 (physical quantity)，因此，用系统论的方法所整合而成的 STEM 课程将突出测量 (measuring) 和数学建模

(mathematical modeling) 这两项科学实践活动，使之与设计 and 制造一起成为科学与工程实践的主要内容。

### 参考文献：

[1] Bertalanffy, L. von. *General System Theory* (George Braziller, New York, 1968).

[2] 亚里士多德. 形而上 [M]. 北京: 北京时代华文书局, 2014: 83.

[3] Bertalanffy, L. von. The Theory of Open Systems in Physics and Biology[J]. *Science*, January 13, Vol. 111, 1950: 23-29.

[4] [5] Herrmann, F. *Der Karlsruher Physikkurs* (Gesamtband für Lehrer) [M]. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2003: 10.

[6] National Academy of Science. *Next Generation Science Standards* [EB/OL]. <http://nap.edu/18290>, 2013-05.

[7] Gibbs, J. W. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances. *Trans. Conn. Acad.* III (1875).

[8] Francis W. Sears, Mark W. Zemansky and Hugh D. Young. *University Physics* [M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1976: 1.

[9] Hestenes David. A role for physicists in STEM education reform[J]. *Am. J. Phys.*, 2015, 83(02): 101-103.

[10] 郭玉英, 姚建欣, 张静. 整合与发展 —— 科学课程中概念体系的构建及其学习进阶 [J]. *课程·教材·教法*, 2013, 33(2): 44-49.

[11] 皮亚杰. 发生认识论原理 [M]. 王宪钊等译. 北京: 商务印书馆, 1994: 21-57.

[12] Robert Karplus. Physics for beginners[J]. *Physics Today*, June 1972: 36-47.

[13] Robert Karplus. Educational aspects of the structure of physics[J]. *Am. J. Phys.*, 1981, 49(03): 238-241.

[14] Martin Monk. What do epistemology and ontology have to offer in considering progression in physics education[M]. Carlo Nernardini, Carlo Tarsitani and Matilde Vicentini. *Thinking Physics for Teaching*. Springer Science + Business Media, LLC, 1994: 127-137.

责任编辑：欧阳慧玲