

# 德国卡尔斯鲁厄物理课程的结构和特色

陈敏华 (绍兴县柯桥中学 浙江 312030)

## The Karlsruhe Physics Course of Germany Chen Minhua

摘要：德国卡尔斯鲁厄物理课程以能量、信息和它们的携带者这些实物型物理量为中心概念，以它们在相应的“驱动力”（或叫“势差”）的作用下的流为基本结构。这个课程的开发已有二十多年了。经过几年的实施，课程已趋成熟。本文的目的是介绍该课程的结构和特色。

关键词：物理课程；携带者；实物型物理量；势差；流

### 一、引言

1888年，著名物理学家赫兹在德国卡尔斯鲁厄大学发现了电磁波。卡尔斯鲁厄物理课程（Der Karlsruher Physikkurs，简称KPK）就是在这所大学的物理教学研究所产生的。最早主持这一课程开发规划的是福尔克(G.Falk)教授，而福尔克在这方面所做工作的理论基础是吉布斯的热力学理论。福尔克去世后，这一课程的开发工作由他的同事赫尔曼（F.Herrmann）教授主持。作为卡尔斯鲁厄物理课程的一部分，为初级中学学生用的物理课程在上世纪九十年代就已正式在德国出版。到目前为止，已有近万名德国学生使用了这一课程。除此之外，他们还开发了大学水平的物理课程，并正在开发为高级中学学生用的物理课程。本文所介绍的内容主要是为初级中学学生用的物理课程。他们所开发的任何水平的物理课程，其课程结构是相同的。

### 二、课程结构

#### (一) 实物型物理量

传统的物理教学把力学作为中心内容：对于一个物理问题，如果它能在力学方面得到解释，那么就认为我们对这个问题至少大体上理解了。从而，宇宙就被描述为组成它的粒子（质点）和这些粒子间的相互作用。这种图像通常叫做宇宙的原子图像。

然而，过多地强调上述原子图像会妨碍我们对近代物理的理解。量子力学中的基本物理量是能量、动量、角动量、电量等。这些量不同于牛顿力学中描述质点运动规律的物理量（如速度、力等）。当然，在牛顿力学中也出现能量、动量、角动量，但它们仅仅在计算上起方便的作用，而并不是基本物理量。在牛顿力学中，基本的物理量是位移、速度、质量和力；而动量只不过是质量和速度的乘积的别名，能量只不过是质点运动的一个恒量。在量子力学中，对能量和动量的处理就大不相同了。这可以由以下事实加以说明：能量和动量可以量子化，而那些在牛顿力学中构成能量和动量的物理量（如速度和

力) 却不可以量子化。

量子力学中的基本物理量跟热力学中的广延量 (extensive quantity) 具有类似的性质。这些量有一个共同的特点: 它们都可以被看作是包含在一个物理系统中, 并能从一个系统流到另一个系统。因此, 它们都可以被描述为一种“实物”。由此, 我们把它们叫做实物型物理量 (substance-like quantity) [1]。实物型物理量还包括熵, 虽然这个量是半守恒的, 而其他实物型物理量都是守恒的。因此, 实物型量未必一定是守恒的。然而, 任何守恒量一定是实物型的。实物型物理量也不一定是标量, 如动量和角动量都是矢量。

因此, 物理学中的广延量, 如能量、动量、角动量、电量、物质的量和熵, 在经典物理和现代物理中都扮演着基本的角色。

## (二) 能量和能量携带者

既然能量、动量、电量和熵都是实物型物理量, 这些量就可以被看作包含在一个物理系统中, 并能从一个系统流到另一个系统。

一般地, 我们有所谓的吉布斯基本方程式 (Gibbs fundamental form) :

$$dE = U dQ + v dp + T dS + \mu dn + \dots$$

相应的能流公式为:

$$I_E = UI_Q + \mathbf{v} \cdot \mathbf{I}_p + T I_s + \mu I_n + \dots$$

式中  $I_E$ 、 $I_Q$ 、 $\mathbf{I}_p$ 、 $I_s$  和  $I_n$  分别为能流 (即功率  $P$ )、电流、动量流 (即力  $F$ )、熵流和物质流;  $U$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $T$  和  $\mu$  分别为电势、速度、温度和化学势, 它们都是内涵量 (intensive quantity)。

由上式我们可以容易地找出物理学各分支学科间的类比关系。由此可知, 电学过程实质上是能量  $E$  和能量携带者电量  $Q$  在电势差  $\Delta U$  作用下的流动, 它们的流动形成能流  $I_E$  和电流  $I_Q$ ; 力学过程实质上是能量  $E$  和能量携带者动量  $p$  在力势 (mechanical potential) [2] 差  $\Delta v$  作用下的流动, 它们的流动形成能流  $I_E$  和动量流 (momentum current) [3]  $I_p$ ; 热学过程实质上是能量  $E$  和能量携带者熵  $S$  在热势 (thermal potential) [4] 差  $\Delta T$  作用下的流动, 它们的流动形成能流  $I_E$  和熵流  $I_s$ ; 化学过程实质上是能量  $E$  和能量携带者物质的量  $n$  在化学势 (chemical potential) 差  $\Delta \mu$  的作用下的流动, 它们的流动形成能流  $I_E$  和物质流  $I_n$ 。因而, 一个物理学分支学科的知识为其他分支学科 (包括化学和生物学) 提供了一种类比 (analogy) 方法。由此就形成了 KPK 清晰的课程结构 (见表 1)。

表 1: 物理学各分支学科(包括化学)间的类比关系

分支学科	能量及其携带者	势	流	能流
电学	能量 $E$ 和电量 $Q$	电势 $U$	电流 $I$	$I_E = UI_Q$
力学	能量 $E$ 和动量 $p$	速度 $v$	力 $F$	$I_E = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$
热学	能量 $E$ 和熵 $S$	温度 $T$	熵流 $I_s$	$I_E = T I_s$
化学	能量 $E$ 和物质的量 $n$	化学势 $\mu$	物质流 $I_n$	$I_E = \mu I_n$

相同的规律和结构重复出现在电学、力学、热学和化学中，也不同程度地出现在光学、声学 and 电子学中。这些普遍的规律我们只需学习一次。利用这一结构开发的课程可以达到使物理教学更现代化和精简化的目的。

### 三、课程特色

KPK以实物型量为中心概念，用实物型量的流来构建整个课程结构。用这种结构建立起来的物理课程至少具有以下特色：

(一) 有利于培养学生的系统思维（**systems thinking**）能力。

某个实物型量必定属于空间某一区域的，即属于某一系统的。系统具有一定的边界。实物型物理量通过系统的边界流动。我们可以说“一个系统具有较多或较少的能量”，但不能说“一个系统具有较多或较少的温度”。我们也可以说“一个系统没有电量或没有动量”，但不能说“一个系统没有电势或速度”。我们也不能说“力可以使物体产生加速度”，因为加速度不是实物型量。而这种类似的错误说法在传统的物理课程中经常能看到。这是因为，传统的物理课程在强调“研究对象”时没有关注它的边界，也没有把实物型物理量和其他量区分开来。

用系统思维的方法所产生的物理图像是局域的、完整的，因而更符合实际。例如，KPK是这样来分析失重现象的：

先画出站在地面上的人的动量流图（图1）。

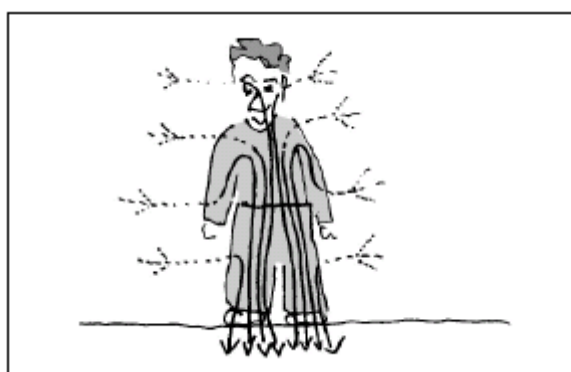


图1.动量从引力场流入人体，再从人体流入大地。

然后，将人体简化为由两个相同物块组成的模型（图2）。这两个物块一个在上，一个在下，它们分别代表人的上半身和下半身。从图中我们可以看出，流过下面的物块的底部的动量流是流过上面的物块的底部的两倍。

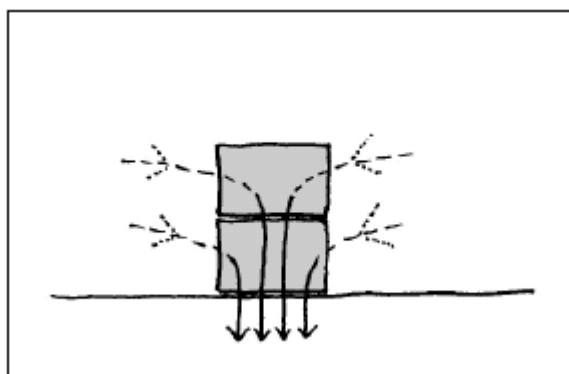


图2.人体模型。它由上半身和下半身组成。

现在我们把这个模型置于一种失重状态：一种没有动量流过它的状态。我们让这个人体模型自由落下（图3），让动量流入这个模型，但不让动量再流出。这时，动量没有流过这个人体模型，它处于失重状态。

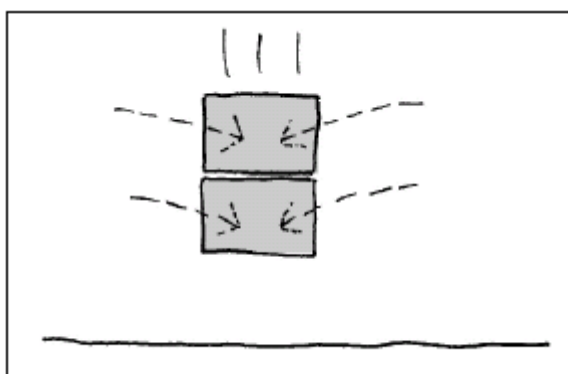


图3. 自由落体处于失重状态。在物体内部没有动量流在流动。

最后，KPK设计了一个巧妙的实验（图4）。

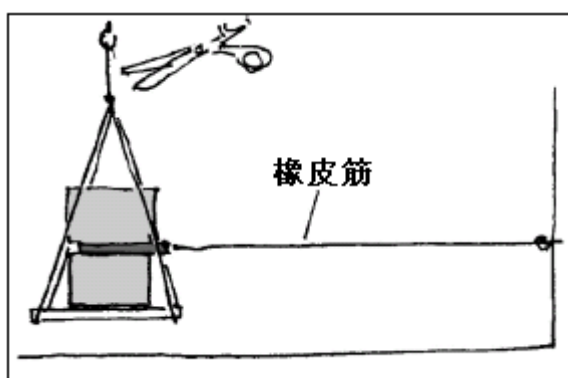


图4. 在自由下落过程中，物块处于失重状态。物块之间的薄板就被释放了。

把两个物块放在一块平板上。将平板挂在一根细线下。在两个物块之间有一块薄板，薄板用一根拉紧的橡皮筋与墙壁相连。我们将拉着整个装置的细线剪断。这时，薄板在橡皮筋的拉力作用下，在两物块之间冲了出来。这是为什么？两个物块在短时间内作自由落体运动，它们处于失重状态。上面的物块对下面的物块没有压力，它让薄板被拉出了。

显然，这种方法来分析失重现象比传统的用力的方法要好。它能使学生明确在人体这个系统中动量到底在发生什么变化，失重的本质到底是什么。

在物理学的其他分支学科中都有相应的实物型量。因此，我们同样可以用

系统的方法来分析物理学其他分支学科中的现象。

实物型物理量的概念也有利于我们将系统动力学模型工具（**system dynamics modeling tool**）（如美国的Stella、Dynamo、ithink，挪威的Powersim等软件）作为重要的学习工具应用于物理教学中。这里因篇幅有限不作具体介绍。

（二）有利于学生对知识进行类比和迁移。

根据上面所给出的KPK课程结构我们很容易知道，对于不同的物理过程（力的过程、电的过程、热的过程等），我们可以根据不同过程中相应的实物型物理量的增加、减少和流动来写出相同形式的表达式。这样，仅仅一个物理学分支学科的知识就已经给我们提供了一个描述其他分支学科（以及化学）的类比方法。只要学生掌握了某一分支学科的节奏和结构，他们就可以通过类比将这种节奏和结构迁移到其他分支学科中。

在传统的物理课程中，只有电学具有这种以实物型物理量的流所形成的结构。因此，我们需要对力学、热学等分支学科的课程结构进行改革。KPK在这方面作了有益的尝试。

KPK从动量开始展开对力学现象的分析。动量在力学中扮演着和电学中的电量相同的角色。在KPK的力学课程中，有和电学课程中相似的概念，如动量流、动量流路、动量导体和动量绝缘体。在动量导体中，只要有速度差，动量就能从一个物体流到另一个物体，形成动量流。弹簧不但能测出动量流的大小，还能显示动量流的方向。图5用弹簧显示了一个闭合的动量流回路。

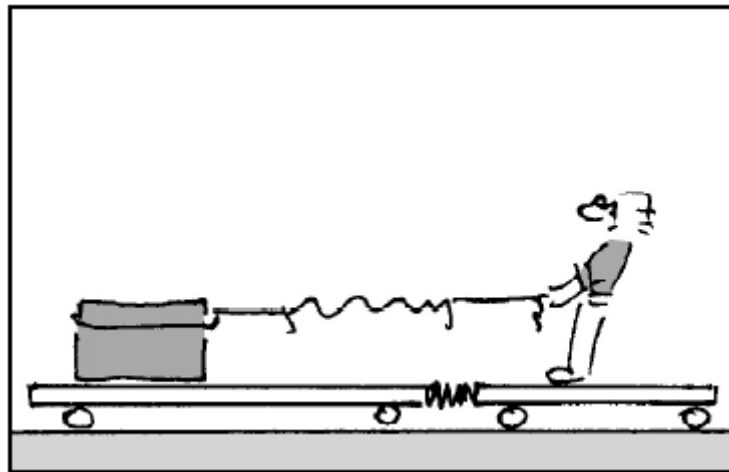


图5. 一个闭合的动量流回路。上、下两个弹簧分别显示了朝不同方向流动的动量流

在电学中，电源能使电量从低电势流到高压电势。这正像水泵能使水从低压处流到高压处。因此，在KPK中我们把电源又叫做电泵。同样，在力学中也存在这样一种泵，这种泵叫做动量泵（**momentum pump**）。汽车中的发动机

就是动量泵。

在KPK中，用同样的结构展示了比较难学的转动现象。由于已经有了描述直线运动的规律，用类比的方法来研究转动现象就能节省许多工作。当然，角动量这一实物型物理量能在一定条件下从角速度大的系统流到角速度小的系统。如果要从角速度小的系统流到角速度大的系统，就必须有角动量泵。

KPK用大量的演示实验来说明角动量流动的规律。例如，我们可以用装有离合器的两个轮子来演示角动量从一个轮子流到另一个轮子的情形（图6）。

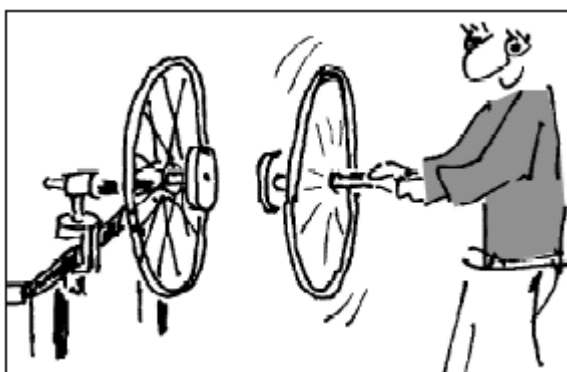


图6. 当离合器的盘子相互接触时，角动量就开始从右边的轮子流到左边的轮子。

和在力学中一样，KPK从熵开始展开对热学现象的分析。大家都知道，熵是一个难以理解的概念。正因为这个原因，熵在中学物理课程中是一个被回避的概念。在中学物理课程中，即使出现熵这个概念，也只简单地作一介绍，没有把它作为一个中心概念来处理。在KPK中，既没有用克劳修斯的方法来引入熵，也没有用统计的方法来引入熵，而是把熵看成为与热量的日常概念相一致的概念。

在KPK中，熵在热学中扮演着与电量在电学中以及动量在力学中相同的角色。在这里，我们同样可以看到一种能驱动熵和能量流动的热泵(heat pump)。

在KPK中，类似的结构也应用于信息学、化学和近代物理学中。例如，在化学中，我们也能看到一种能驱动物质的量和能量流动的反应泵(reaction pump)。

(三) 有利于消除陈旧的物理概念。

物理学的发展历史是一条错综复杂的道路。尽管存在着更容易到达相同目标的捷径，但我们在教学中还是把这条复杂的道路强加于我们的学生身上<sup>[5]</sup>。由于当时的历史局限性，物理学中的一些陈旧概念在现在看来已经成为历史的负担。我们应该消除这些陈旧的物理概念。KPK在这方面做了很大的努力。下

面略举几例。

### 1. 用动量流代替力

传统的力学总体上与牛顿所给出的形式相同：超距作用理论。例如，我们在说“物体A作用给物体B一个力”时，我们没有提及在它们之间的介质（如弹簧或场）。

传统的物理课程将力定义为“物体间的相互作用”。学生对这个定义的理解是模糊的。他们不知道这种相互作用的具体内容是什么。

虽然F作为动量流这点几乎在一百年前就被认识了，但这一概念还没有在中学物理课程中建立起来。人们还从来没有认识到这一概念可以被初学者所理解。

KPK明确用动量流来代替传统的力的概念。表2给出了KPK用动量流的语言所表述的牛顿定律。

表2. 用动量流的语言来表述牛顿定律

	传统的表述	用动量流图像来表述
牛顿第一定律	如果没有力作用在物体上，物体将保持静止或作匀速直线运动。	如果没有动量流流入或流出物体，物体的动量将保持不变。
牛顿第二定律	一个物体的动量的时间变化率 $dp/dt$ 等于作用在物体上的力F： $F=dp/dt$	一个物体的动量的时间变化率 $dp/dt$ 等于流入这个物体的动量流F： $F=dp/dt$
牛顿第三定律	如果物体A将力F作用在物体B上，则物体B将大小相等、方向相反的力 $-F$ 作用在物体A上。	如果动量流从物体A流出，并流入物体B，则从A流出的动量流强度和流入B的动量流强度相同。

根据 $F=dp/dt$ ，我们可以说力等于动量流；但我们不能说力就是动量流。力和动量流还是有区别的。例如，人在太空中和坐在椅子上这两种情况中，受的合外力都为零，但在这两种情况中的感觉是不同的。在太空中没有合力作用在人体上，也没有动量流过人体；而在椅子上虽然没有合力作用在人体上，但有动量流过人体，因而人能感觉到动量的流动。其实，我们能感觉到的不是力，而是动量流。如果我们不引入动量流的概念，学生就会对一些常见的力学现象感到疑惑。

### 2. 用能量携带者代替能量形态

将能量分成不同形态的能量发生在十九世纪中期，那时能量的概念刚产生。“能量形态”这一名词常与静止能、动能、热能、重力能、结合能、辐射能、弹性能、势能、电能、化学能、原子核能等大量不同的名称一起使用。细心的学生当他想弄清楚包含在蓄电池中的能量是电能还是化学能时当然会感到困惑。

现在我们知道，能量总与至少一个别的实物型物理量同时流动。在所谓的“能量转换器”中，能量实际上并没有转换。正确的说法是，与能量一起流动的其他实物型物理量在这种装置中转变了。能量通常在几个能量携带者之间多次传递。图7是KPK用一种把能量和能量携带者分开的能流图来表示能量从水力发电厂传到灯泡的情形。

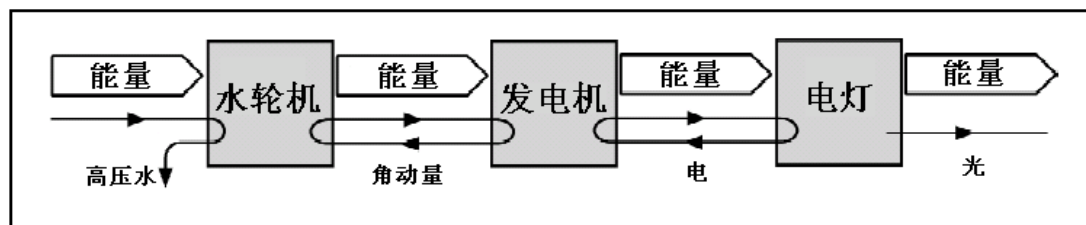


图7. 能量在传输过程中，其携带者变换了三次。

在这种图像中，能量不是从一种形式转换成另一种形式，而是改变了它的携带者。这样，我们就得到了一个严格有效的、简单而容易的、甚至能在初等水平的学生中介绍的关于能量传递过程的图像。

#### 四、结束语

物理课程的现代化需要我们不断为之努力。从某种程度上说，以前物理教学工作者忽视了这个任务，因而就积累了这种改革的需要。卡尔斯鲁厄物理课程就是这种改革的一个例子。KPK的课程结构是全新的。它以实物型量为中心概念，用实物型量的流来构建整个课程结构。这样，它不但把物理学各分支学科综合在这个统一的结构内，而且还把化学、信息学和近代物理的部分内容整合在这一结构中。体现在这一结构中的一些新概念（如动量流、熵流、能量携带者等）使我们能够以一种新的眼光来看待传统的物理课程的不足，从而坚定进行物理课程改革的信心。KPK的初级水平课程的中文版已由上海教育出版社出版。我们相信，KPK所包含的物理思想和课程结构将被我们所吸收和消化，从而来推进我国的物理课程改革。

#### 参考文献

[1]G.Falk(1968). Theoretische physik, Vol.2, Thermodynamik (Berlin:Springer)

[2]F.Herrmann and G.B.Schmid(1985). Analogy between mechanics and electricity, Eur.J.Phys.6,16-21

[3]F.Herrmann and G.B.Schmid(1984). Statics in the momentum current picture, Am.J.Phys. 52,146-152

[4]H.Fuchs(1987). Entropy in the teaching of introductory thermodynamics, Am.J.Phys. 55, 215-219



[5] F.Herrmann and G.Job(1996). The historical burden on scientific knowledge, Eur.J.Phys. 17,159-163

(此文发表在中国物理学会《物理教学》2007年第11期)