

教学改革

## 德国卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)的结构

吴国玠<sup>1</sup>, 章琢之<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海教育出版社, 上海 200031)

**摘要:**较为系统地对德国卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)的基本概念和结构进行了简要的介绍,同时探讨了物质型物理量、一种新的能量观,以及贯穿整个课程的类比方法等相关重要内容.作者以为,该课程既具有鲜明的创新特色,而又不乏其科学性、先进性和有效性,值得借鉴.

**关键词:**卡尔斯鲁厄物理课程(KPK);物质型物理量;动量流强度;动量流密度;类比;吉布斯关系式

**中图分类号:**O 4;G 642.0

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0712(2012)10-0042-04

德国卡尔斯鲁厄物理课程(KPK)以它的诞生地卡尔斯鲁厄大学(University of Karlsruhe)(注:此大学于2010年改名为卡尔斯鲁厄理工学院 Karlsruhe Institute of Technology, KIT)的名称命名,是一门概念新、结构新、内容丰富的引进课程.本文认为,它有可能会引发物理学教育史上最重大的一次改革创新.

经过两代人40余年的辛勤耕耘,至今已开发出从初中、高中一直到大学的系列KPK教材.其中,初中和高中的中文版<sup>[1,2]</sup>已先后于2007年和2010年由上海教育出版社出版.后者直接根据德文原版<sup>[3]</sup>改编.2010年9月初,在上海市教委教研室的有力支持和组织领导下,该教材开始在上海市一批以重点中学为骨干的学校内开展教学实验.迄今为止,实验已取得初步进展,我们相信,所取得的这些成果(包括经验和教训)可以为我国大学物理教学引入KPK教学内容和理念奠定坚实的基础.

作为一门引进的物理课程,KPK与任何引进的技术和产品一样,若要想使它在中国生根发芽结果,首先必须加以消化吸收,即牢固地掌握其基本概念,透彻地理解其全部内容,仔细地弄清其来龙去脉.由于中西方文化和语言有不少差异,尤其由于KPK与传统物理学之间在表述上存在着显著差别,因此对它进行深入细致的诠释十分必要;否则容易引起许多误解并导致在教学中产生差错.为了避免出现这些情况,笔者自2010年夏季以来一直试图通过陆续发表一系列探索性的文章来对KPK加以诠释.本文

其实就是其中之一.一年多来,笔者深感此项诠释工作之量大面广而且不易.它除了要求笔者不时查阅原著以外,还要求对原著深读,即深入到文字后面的思想方法、思维方式中去,探究原作者的真实意图及其背景,同时认真思考如何使之与我国目前的实际情况紧密结合.确切地说,这个诠释的过程就是吃透原著,与中国国情相结合,注入中国文化元素,使之变成我们自己的东西,即实现本土化的过程.

### 1 KPK的起因、目标和任务

编写KPK的初衷是想解决迅猛增长的物理学知识量和基本不变的物理教学课时数之间的矛盾,因为这始终是长期困扰着物理教育界的一个难题.由于对物理课程实行简化看来是解决这个难题的唯一途径,所以KPK的作者所设定的目标就是在引入现代物理学最新研究成果的基础上,通过简化来实现物理教育的现代化.总的说来,这种简化包括量和质两个方面:首先是要以现代物理学的观念和视角对传统物理教学大纲和教材进行梳理和重新审视,清理掉一些过时的概念和冗余的内容,从而在数量上实行精简;其次是通过理顺课程的概念体系来揭示出各分支学科之间的内在联系,寻找出它们在结构上的相似性或共性,从而把它们整合在一个统一的结构框架内,同时又保持它们各自的个性.这种从概念体系上和认知结构上进行的简化是一种质的简化,效果更为显著,意义更加深远.

综上所述,可知KPK的开发起因于物理教育改

革的客观需求.作为卡尔斯鲁厄大学物理教育研究所所长,赫尔曼(F. Herrmann)教授在继承前人研究成果的基础上,经过多年努力,编写成功了一套体现上述两种简化的物理教材.由于实行了质和质量两方面的简化,KPK形成了自己的特色:物理概念的建立从日常生活经验入手、思路独特、方法先进、结构合理、内容丰富、面貌全新.相对于传统物理学而言,它并非只是与之平行的另一话语体系,而是一种真正的改革创新.换言之,与传统物理学相比,KPK要胜出一筹,更加现代化.

## 2 物质型物理量——KPK结构的“顶梁柱”

在前面提及的KPK课程的统一结构中,有一类物理量,即所谓的物质型物理量(substance-like quantity)起着举足轻重的作用.物质型物理量的概念最早由卡尔斯鲁厄大学的另一位教授G. Falk提出<sup>[4]</sup>.此类物理量属于广延量,但并不能覆盖所有的广延量,因此有必要另行命名.为这部分广延量起一个专门名字的主要目的是突出其重要的共同特性:它们占据一定的空间区域而且能从一个空间区域转移到另一个空间区域;在数学上,某空间区域内的物质型物理量 $X$ 与时间空间的关系满足以下连续性方程:

$$\frac{dX}{dt} = I_x + \Sigma_x \quad (1)$$

式(1)中 $I_x$ 是单位时间内从该区域表面流入的 $X$ 量; $\Sigma_x$ 是单位时间内该区域中所生成的 $X$ 量; $dX/dt$ 是该区域内 $X$ 量的时间变化率.连续性方程是流体力学基本方程式之一,其实质就是质量守恒或物质守恒,所以人们可以把物质型物理量想象成一种流体或物质来加以处理,让它们在空间内随着时间“流动”起来.这些量的时间变化率称作为流强度(current intensity),简称流.物质型物理量有:质量、能量、动量、角动量、电荷量、熵和物质的量等.体积是一个广延量,但并不是物质型物理量.

显然,方程式(1)中的 $X$ 必须是空间坐标和时间的连续函数时该方程才能成立,否则不能应用数学分析这个工具.这就意味着,我们实际上必须把物质型物理量想象成连续介质——一种连续地分布在空间内的假想物质<sup>[5]</sup>.在理解物质型物理量时,以下几点值得注意:

1) 物质型物理量的值是指它在某空间区域内的数量.每一个物质型物理量的时间变化率,即其流强度也是一个物质型物理量.这就是说,每一个物质

型物理量都有另一个物质型物理量——它的流强度与之相对应.

2) 物质型物理量虽然在某一方面像物质,但它们毕竟不是物质,所以其流动与物质的流动是两回事,应当注意严格区分.换句话说,物质型物理量的流动并不意味着有物质在流动.比如,动量在流动时并不一定有物质伴随着在流动,动量可以在静止的物体内部流动.

3) 物质型物理量应理解为独立的量,它们在流动过程中是不可拆分的整体.例如,我们不应把动量的流动理解为分别有质量或速度在动量导体内流动.而且,物质型物理量既可以是标量,也可以是矢量(如动量、角动量).所以在理解像动量这样的物理量的流动时,需要具备一定的想象力或抽象思维能力.

4) 作为广延量,每一个物质型物理量都对应于一个强度量.例如,动量对应于速度 $v$ ;熵对应于热力学温度 $T$ ;电荷量对应于电势 $\varphi$ .

5) 物理学各分支学科中的物质型物理量满足同样的数学方程式,它们本身及其流强度和流密度(current density,单位面积上的流强度)等都直接与空间和时间相关.这些共性使得物质型物理量在物理学结构的构成中起着某种核心的作用,成为这种结构的“顶梁柱”.

## 3 各分支学科之间的类比表——KPK结构的表格表述形式

各分支学科的物质型物理量、它们的流(强度)、相应的强度量,以及能(量)流构成了KPK课程的基本结构(见表1).容易看出,强度量和流强度的乘积就是能流的强度(习惯上称为功率) $P$ ,能流强度一般简称能流.由于这张表实际上无论在横向还是纵向上都还能进行延伸,因此所列出的这4个物理量仅仅构成KPK类比表的主干部分.KPK的主要特色之一就是在物理学各分支学科之间广泛地采用类比(analogy)这一逻辑推理方法.通过类比,这些分支学科之间在结构上的相似性或规律性得以凸显出来,成为构建一个统一的结构框架的依据.实际上,各分支学科之间的这种可类比性所反映出来的是客观世界或宇宙的统一与和谐,具有丰富的内涵.应用上述类比表,我们可以得知电学、力学和热学的教学理应分别从各自的物质型物理量电荷、动量和熵开始;可以弄明白熵应当理解为热量但不具有能量的性质;还能够搞清楚牛顿三大定律的真实

含义、地位和作用等等,不一而足<sup>[6]</sup>.

表1 各分支学科之间的类比表

分支学科	物质型物理量	强度量	流	能流
电学	电荷量 $Q$	电势 $U$	电流 $I$	$P=UI$
力学	动量 $p$	速度 $v$	动量流 $F$	$P=vF$
热学	熵 $S$	温度 $T$	熵流 $I_S$	$P=TI_S$

不难看出,物质型物理量在 KPK 类比表中发挥着一种不可替代的主导作用. 通过建立这些量的流强度和流密度等与时间直接相关的概念,使得它们不仅与空间有关,而且与时间有关. 这样的处理方式仿佛是在替它们注入一种生命力,使那些原来看上去静止的物理量得以在空间内“流动”起来. 以动量为例,其时间变化率即动量流强度实际上就是力<sup>[7]</sup> (Planck, 1908). 在传统力学中,力的概念的引入相当繁琐,而且是以一种与时间无关的静态或凝固的方式引入的. 然而在 KPK 中,由于时间因素的介入,用动量流的概念来解释一些物理现象更加符合自然规律的本相和全貌,更加令人信服. 事实上,时间和空间因素的同时引入十分符合“时间和空间是运动物质的存在形式”这一辩证唯物主义观点,更接近于反映客观世界的本来面貌<sup>[8]</sup>. 换言之,与力的概念相比,动量流的概念具有更为先进的哲学基础,因而更胜一筹.

就物理教学而言, KPK 类比表的积极意义同样显而易见. 事实证明,让学生掌握这一具有高度可比性的统一结构不但有利于学生的理解和记忆,而且还能帮助他们融会贯通、举一反三,产生触类旁通、事半功倍的效果,即只要牢固掌握一门分支学科,就比较容易掌握其他各门分支学科,从而大大提高学习效率,改进教学效果. 在 KPK 课程中,旋转运动的力学其实就是直接从直线运动的力学类过来的. 动量和速度直接与角动量和角速度分别一一加以对应,从而节省了大量繁复的叙述和推导.

#### 4 吉布斯关系式——KPK 结构的数学表述形式

除了表格形式以外, KPK 物理学还可以利用吉布斯 (Gibbs) 关系式从数学上来表述其结构<sup>[9]</sup>

$$P = \varphi I_Q + v I_p + T I_S + \mu I_n + \dots \quad (2)$$

式(2)中  $P, I_Q, I_p, I_s$  和  $I_n$  分别代表能流、电流、动量流、熵流和摩尔流;  $\varphi, v, T, \mu$  则分别代表电势、速度、热力学温度和化学势. 式(2)给出了 KPK 物理学的系统结构. 式(2)右边的每一项都具有相同的结构

$y I_x$ , 其中  $y$  是强度量,  $I_x$  是物质型物理量  $X$  的流 (强度). 换言之, 每一项都由一个物质型物理量的流及其相应的强度量所组成. 根据这些量的属性, 很容易分辨出右边每一项所对应的物理学分支学科, 以及所代表的能流过程. 它们分别是电学、力学、热学和化学, 代表着相应的能量输运过程. 值得注意的是, 当能量流动时, 至少有一个物质型物理量在同时流动. 换句话说, 能量从不单独流动. 这个事实看似简单, 一般容易受到忽略, 但实际上却十分重要. 从式(2)中还不难看出, 根据吉布斯关系式对能量流进行分类事实上非常简单. 按照传统的观点, 式中右边每一项代表一种能量形式 (energy form), 并由此引出许多种不同的能量形式. 不同的能量形式容易被误解为不同的物理量, 而且容易使人误认为能量具有一种其他物理量所没有的善于“变脸”的奇怪特性<sup>[5]</sup>.

现代物理学告诉我们, 能量和质量所描述的实际上是同一个物理量. 能量不是导出量, 而是一个独立的量. 换言之, 能量只有一种. 因此, 我们完全没有必要采用能量形式这种提法, 而只需要指明是哪一个物质型物理量在伴随着或承载着能量一起传输或流动就可以了. 也就是说, 这个与能量一起流动的物质型物理量可以看成是能量的一种载体, 称为能量载体 (energy carrier). 按照这样的观点, 我们应该使用能量载体的概念来代替能量形式; 所谓能量形式的转换实际上只不过是能量载体的转换; 所谓的能量转换器 (将能量从一种形式转换成另一种形式的装置) 应当正确地理解为“能量转载器” (将能量从一种载体转移到另一种载体上去的装置). 比如在热机里所发生的实际上是, 能量从载体“熵”转载到另一种载体“角动量”上. 我们可以方便地说, 能量随着其载体熵一起流动, 而不必说能量采取了热这种形式, 热能转化为机械能, 等等<sup>[10]</sup>. 如果式(2)右边各项中只有一项不为零, 则方程就可简化为

$$P = y I_x \quad (3)$$

这就是描述与物质型物理量  $X$  相对应的分支学科的能量输运方程式或能流方程.

最后, 根据前面的表格和公式, 我们应当在每一个分支学科中, 总是有两个物质型物理量同时在起主要作用. 一个是构成该分支学科本身的物质型物理量, 另一个则是能量<sup>[11]</sup>. 显然, 对于描述每一个分支学科而言, 二者缺一不可. 事实上, 能量不但并不多余, 而且正是能量这个物质型物理量把各个不同的分支学科串在了一起.

## 5 结束语

KPK采用表格和公式两种形式来表述物理学的有序结构,从而实现了将各分支学科归纳在一个统一的结构框架内的目标.关系式(2)和KPK类比实际上是完全一致的.二者虽然在表述上用法上有所区别,但相互补充、相互呼应、相得益彰.KPK所表述的物理学结构成为在各分支学科之间开展广泛类比,以及对物理教学实行简化即实现现代化的基础.类比可以在十分广泛的范围内进行,所涉及的类比内容包括各种物理量、关系式、过程、现象或状态、方法(包括实验、观察和分析方法)等诸多方面.

物质型物理量是构成物理学统一结构框架的主干或中心物理量(central quantities).正确而透彻地理解物质型物理量,以及它们的流强度和流密度等相关概念,对于牢固掌握KPK课程,取得良好的教学效果来说至关重要.

与传统物理学相比,KPK的时空观或哲学基础更加先进,其科学性、合理性、简洁性和有效性均占上风,是一部值得借鉴的优秀物理教材.教学实验结果表明,KPK所包含的现代物理学内容,所具有的鲜明创新特色,所采用的先进思想方法,颇受参试师生的好评,非常值得进一步推广.

由于中西方文化语言方面的差异,以及KPK与传统物理学之间在表述上存在着明显差别,开展系统而全面的诠释对于有效地消化吸收改造KPK而言极其必要.事实上,这种诠释本身就是一种吃透原

著,结合中国国情再创新,为我所用,实现本土化的过程.

## 参考文献:

- [1] Herrmann F. 德国卡尔斯鲁厄物理课程中文版·中学物理(初中版)[M].上海:上海教育出版社,2007.
- [2] Herrmann F. 德国卡尔斯鲁厄物理课程中文版·新物理教程(高中版)[M].上海:上海教育出版社,2010.
- [3] Herrmann F. Der Karlsruher Physikkurs Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II [M]. Berlin: AULIS Verlag,2008.
- [4] Falk G. Was an der Physik geht jeden an? [J]. Phys Blatter,1977(33):616-620.
- [5] 吴国玠,Herrmann F. 试论一种新的能量观[J].物理与工程,2010,20(6):3-6.
- [6] 吴国玠.关于德国物理课程教学实验中若干问题的讨论[J].物理与工程,2011,21(3):43-51.
- [7] Planck Max. Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik [J]. Physikalische Zeitschrift,1908(23):828-830.
- [8] 吴国玠.动量流强度和动量流密度及其破坏作用[J].物理与工程,2012,22(1):47-55.
- [9] Falk G,Ruppel W. Energie und Entropie [M]. Berlin: Springer Verlag,1976.
- [10] Falk G, Herrmann F, Schmid G B. Energy forms or energy carriers? [J]. Am J Phys,1984,(52):794-799.
- [11] 吴国玠.浅谈德国KPK教材的基本特点[J].物理与工程,2010,20(5):6-9.

## Structure of the German Karlsruhe physics course

WU Guobin<sup>1</sup>, ZHANG Zhuozhi<sup>2</sup>

(1. Power Engineering College, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Educational Publishing House, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** The basic concepts and structure of the German Karlsruhe physics course (KPK) are systematically but briefly introduced in this paper. Such important ideas as substance-like quantities, the new concept of energy and the analogy method used in the entire course are also discussed. The authors believe that this physics course with distinctive innovative features is scientific, advanced and effective, and therefore worth adopting for reference.

**Key words:** Karlsruhe physics course; substance-like quantities; momentum current intensity; momentum current density; analogy; Gibbs relationship