

科学概念演化视野下的中学物理 课程内容现代化研究

罗 莹

(北京师范大学 物理系, 北京 100875)

摘要:在科学概念演化视野下, 研究中学物理课程内容现代化是一个全新的视角。从科学概念演化的角度对力概念的形成、优势、缺陷及其在现代物理学的地位等进行全面分析, 有助于在现代物理学的理论体系框架下揭示现行中学物理课程内容存在的问题。因此, 科学概念演化视野下的中学物理课程内容现代化内涵应包括以下内容: 适应物理学发展并与现代物理学体系相一致, 避免因科学概念演化引起学生的物理学习困难和偏差, 选择物理知识体系中的“快速路”构建概念体系。这对我国中学物理课程内容现代化具有重要的启示意义。

关键词:科学概念演化; 中学物理; 课程内容现代化

中图分类号:G633.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0186(2016)12-0073-06

长期以来, 我国中学物理教学中一直存在一个现象, 那就是尽管现代物理学已不需要力的概念, 但以力为基本概念的经典物理学仍然主导着中学教科书和课堂, 教师和学生需要花费大量时间和精力去教授和学习力的概念。^[1-4]究其原因, 笔者认为, 这是由于中学物理课程知识体系按照物理学发展进程设计所导致。

鉴于此, 课程内容的现代化一直是物理课程设计与研究的重点问题。从课程理论上讲, 课程设计与实施受到社会与科技进步水平、学生身心发展水平、学科结构、师资、仪器设备等诸多因素的制约, 其中学科结构是设计课程内容和概念

体系的重要依据。随着科学技术的迅速发展, 物理学的学科结构也随之发展且不断变化。因此, 如何保持中学物理课程内容的现代化, 使其具有时代性与前瞻性, 是今天物理教育工作者面临的重要挑战。

一、力概念的演化

科学概念随着人们对自然界认识的深入而不断完善和改变。科学的发展不但会产生和发展新的概念, 也会改变或完善原有概念的内涵以及不同概念之间的相互关系与地位。科学概念的演化过程反映了科学家对自然世界的认知和探索过

基金项目: 北京市教育科学“十三五”规划 2016 年度课题“基于学习进阶的北京高中生学业水平考试等级评定模型研究”(CADA16039); 北京市未来教育高精尖创新中心项目 (BJAICFE6SR-005)

收稿日期: 2016-07-10; 修回日期: 2016-09-20

作者简介: 罗莹, 1962 年生, 女, 吉林长春人, 北京师范大学物理系副教授, 硕士生导师, 主要从事物理课程与教学论、物理教育测量与评价等研究。

程。下面以力概念的演化为例,来分析科学发展历程中概念演化过程。

(一) 力概念的形成与优势

力是与人类生产与生活密切相关的概念之一。世界上最早明确给出力的定义是在公元前468至公元前376年间出现的《墨经》:“力,形之所以奋也。”^[5]这里“力”指相互作用,“形”指物体,“奋”指由静止而动,或由慢而快的运动。

西方关于力的认识也是与运动相联系的。早在公元前384至公元前322年间,亚里士多德就指出,抛体离开人手后,在排开前方空气的同时,必定受到后方空气的推动。也就是说,物体必须有推动者的推动才能运动,一旦推动停止则运动停止。与此相反,古希腊的原子论者则认为:抛体凭着原先被授予的冲力而维持运动,无需外界一直推动。

伽利略推翻了亚里士多德的观点,指出物体的运动不需要力来维持。伽利略对落体运动、斜面运动的研究表明,外界对物体运动的影响在于改变其速度,也就是引发加速度。此后,牛顿站在巨人的肩膀上,以惊人的洞察力建立了牛顿力学。他的《自然哲学的数学原理》一书可以说是用“力”的语言写成的,其中每一条运动定律都离不开“力”的概念。他甚至称“哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象中来研究各种自然的力,以后用这些力去论证其他现象”。书中有各种力,如惰性力(物体的惯性)、运动力、加速力和绝对力等。尽管科学家对力有各种论述,但牛顿并没有回答力究竟是什么,也没有给出力的精确定义。^[6]此后,力这一概念具有多重含义。例如:达兰贝尔所说的“运动物体的力”是指动量或动能,而亥姆霍兹的《论力的守恒》则是指能量守恒定律。

19世纪下半叶,物理学作为一门完整的学科已经达到了概念准确、逻辑统一的新高度,形成了自己特有的理论体系,物理学现象都可以用统一的科学框架来进行解释。^[7]作为经典物理的重要概念——力,也被其他学科引入以解释各种现象,形成了试图通过把各种现象还原成物质粒子间的作用力后,再采用完备的力学原理进行解释的观念。力的概念也因此经典物理中具有了

超越其他概念的明显优势。

(二) 力概念的缺陷及其在现代物理学中的地位

令人遗憾的是,对于经典物理中具有绝对优势的力的概念,牛顿的力学体系却没有给出精确定义。著名物理学家费恩曼曾指出:“如果非要给出力的精确定义,那么你永远也得不到。”^[8]这既说明了力概念的复杂,也反映了力概念的缺陷。

在中学物理教材与参考书中,人教版《初中物理》力的定义是:力是物体对物体的作用^[1];北师大版《初中物理》力的定义为:我们把一个物体对另一个物体的作用叫作力^[2]。人教版《高中物理》对力的定义是:在物理学中,人们把物体间的相互作用称作力。^[3]在被广泛使用的赵凯华、张维善编著的《新概念高中物理读本》对于力的定义则为:外界因素(其他物体)的作用是改变物体运动状态(静止或匀速直线运动)的原因,力是物体对物体的作用。^[4] Horst Stocker著、吴锡真等译的《物理手册》关于力的定义为:力是它对物体产生的加速度与该物体质量的乘积。^[9]

以上仅列举了教科书中几种典型的、从不同侧面给出的力的定义。中学物理教科书基本上都是从相互作用的角度给出力的定义。这种表述存在的问题是:若承认力是物体间的相互作用,也就必须承认这种相互作用具有不需要传播时间的“超距作用”。牛顿本人就持有超距作用的观点,因为如果不承认这种超距作用,就没有办法解释牛顿第三定律所描述的作用力与反作用力间的同时性。例如:如果地球在某一时刻 t 受到了太阳的引力 f ,地球感受到引力 f 后才对太阳施以一个反作用力 f' ,经过一段时间后才能传给太阳,这种情况就违背了牛顿第三定律的作用力与反作用力同时产生、同时消失的描述。

把力的定义建立在惯性概念之上,就需要对惯性给出清楚的定义,但经典力学中的惯性概念只有在牛顿第一定律中给出了定义。同样将力定义为“物体产生的加速度与该物体质量的乘积”也存在质量没有精确定义的问题,因为质量定义为惯性的量度。

虽然牛顿第一定律中给出了经典力学中的两

个基本物理量——力和质量的定义，但因其中存在力与惯性的循环论证，使得牛顿第一定律给出的力与质量的定义是不完善和不精确的，这也是牛顿力学不能给出力概念精确定义的问题所在，由此可见经典力学的基石如此脆弱。尽管力的概念存在诸多缺欠，但仍然在经典物理占据统治地位。

在现代物理学中，力概念失去了原来的主导地位 and 必要性，退化为从属于能量与动量的次级概念。在相对论和量子论的理论框架下，从恰当形式的能量定理和动量定理出发，可以给出确定唯一的质量与力的概念。

在相对论中，实物粒子的相对论动量形式为 $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ，其中， v 是粒子的运动速度， m_0 是静止质量。从动量 $p = mv$ 的形式就能够得到相对论质量 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 的表达式。

另一方面，力 F 则由相对论动量 p 对时间 t 的变化率 dp/dt 定义。依据这个 F 的定义来计算通过位移 dl 所做的功 Fdl ，可以获得粒子的相对论动能 T 的表达式， $T = (m - m_0) c^2$ 。据此获得粒子总能量公式 $E = T + m_0 c^2 = mc^2$ ，即质量与能量的关系，说明了质量与能量的相关性。上面的论述给出现代物理对力的定义：力是物质动量转移的变化率。^[10] 这个定义可以很好地体现力的矢量性、物质与运动的转移，还克服了力的超距作用，避开了惯性定义的循环，体现了物质与运动的转移。

二、中学物理课程内容体系存在问题分析

现行的中学物理课程是从亚里士多德、伽利略、牛顿到爱因斯坦，沿着物理学曲折复杂的发展道路设计的。不论是中学物理课程，还是大学的基础物理课程，都遵循物理学的发展历程。在课程内容上表现为先学习经典物理，再进行现代物理内容的学习，这也使力的概念在现行中学物理课程中占有重要的、绝对的地位。可以说，对力的概念理解和掌握的程度，在某种意义上决定了学生中学物理课程学习的成绩。因此，基于现代物理学的理论体系，从科学概念演化的视角来看，目前中学物理课程内容体系设计存在两个主要问题。

（一）力概念的“本身缺陷”导致学生学习中学物理的困难

2004 年物理诺贝尔奖获得者 Frank Wilczek 在《 $F=ma$ 的力从何而来：文化冲突》一文中指出，在他的学生时代，经典力学是最让他费神的一门课程，而在学习那些通常被认为更难的高级课程（现代物理）时却并不觉得困难。他将这一现象归因于经典物理与现代物理引起的“文化冲突”。经典物理的核心概念——力，代表着一种“力的文化”。^[11] 例如：在公式 $F=ma$ 中， F 表示物体受到的合外力，而物体受到的力可以有重力、拉力、摩擦力、压力等。这些力的合成需要遵循平行四边形法则。可以说 $F=ma$ 是一种用以表达力学体系中各种不同的、有用的关于力的公共语言。

学习经典力学实质上是学习这种力的文化。学生必须通过大量的练习才能理解力的概念，领会力到底是什么，这是一个吸收许多假定构成的、一种默认的文化学习过程。

力的文化同样也会对学习者产生负面影响。正如诺贝尔奖获得者 Frank Wilczek 在学生时代所感受的那样，高中物理难学、难教是很多高中生和物理教师长期面临的挑战，也是现行高中物理学习普遍存在困难的原因之一。因为学习物理必须要学习理解和掌握与力的概念相关的一系列表述、规则（力的文化）。这也可称为力的语言，且这种语言与人们的日常用语间存在很大差异。因此，学生需要花费大量时间和精力克服“力的文化”带来的困惑与偏差。

（二）力概念的“文化冲突”导致学生学习现代物理的困惑

现代物理的基石之一量子理论采用哈密顿形式和拉格朗日形式，这个框架下的基本物理量是动量与能量。从拉格朗日形式（或分析力学）出发，由时间和空间的平移不变性可以分别推导出能量和动量守恒定律，这种与时空对称性之间的关系是力的表象所无法直接表达的。因此，现代物理学采用了一套比力概念更为精确、简单和基本的概念体系，且这个概念体系完全不同于“力的文化”，这就使得在现代物理学框架下，力的概念失去了主导地位。

与现代物理概念体系不同的是，在目前中学

物理课程中,能量与动量概念是从属于力的概念的,是分别从力在空间和时间上的积累效应引入。显然,中学物理课程中的概念体系与现代物理学概念体系间的巨大差异,无疑会对后续现代物理的学习产生阻碍。例如,在学习现代物理学内容时,学生往往会问:为什么不使用力的概念?由于力概念根深蒂固的影响,进而影响对能量、动量概念在物理学中的地位及与其他概念关系的理解和认识。因此,出现这些负面效应显然违背了前置课程为后续课程提供学习基础和支持的基本课程设计原则。

三、科学概念演化视野下中学物理课程内容现代化

力概念的演化展示了物理学发展过程中科学概念地位的变迁,论证了科学概念的演化是科学发展过程中的必然结果。例如,对于遗传基因,从19世纪末孟德尔提出的遗传因子,到20世纪初摩尔根提出的染色体上的基因,再到20世纪后期开始的现代人类基因组计划,基因概念的内涵一直在不断变化。^[12]事实上,科学的发展不仅包括新概念和规律的产生,更包括已有概念内涵的发展和完善,以及概念间的相互关系和地位的变化。后者也反映了科学家对物质世界的探索和认知的过程。

站在现代科学的前沿回顾科学概念体系构成的演化进程,可以发现,对于相同的目标,存在到达目标的多条路径和暗含的“捷径”。人们对科学的探索和认知受历史因素的局限,所走过的更多是曲折、坎坷的探索道路。但随着现代科学的迅猛发展,使我们有更多机会和可能,去发现和获取更加快速高效的学习“捷径”。这类“捷径”给学习者提供了一条节省时间和精力学习方法,可以更加科学、有效、准确地理解和掌握科学概念,是学习科学的“快速路”。特别是在科学知识爆炸的今天,如何借助这类学习的“快速路”使学习者更加高效、准确地理解科学概念,构建简洁、清晰的科学体系,就显得尤为重要。

为了培养符合未来社会发展要求的高素质人才,中学物理课程的内容应当具有现代化内涵与前瞻性设计。上述研究表明,在力概念演化与物

理学发展的视角下,中学物理课程内容现代化的内涵绝不仅仅是增加现代物理学内容,更是构建符合现代物理学发展的概念体系。因此,中学物理课程内容体系现代化的构建应在以下方面认真考量。

(一) 中学物理课程概念体系应符合物理学的发展,与现代物理概念体系相一致

当前的中学物理课程是依据物理学的发展历程来设计的,这种设计最大优势之一是展示了人类认识自然的过程,基本上符合人们认识和了解自然的认知规律。在科学发展的早期和中期,积累的知识和认知手段有限,这种设计无疑是当时最合适的选择。但是,在科学技术迅猛发展、知识爆炸的今天,学习者仍从起点开始,沿着科学发展的曲折复杂的路径进行学习,就会面临两个重要问题。一是随着科学知识积累的增多,不但学生学习需要花费的时间越来越多,还需要经历多次概念的修正与转变,从而造成了极大的学习困惑和负担;二是所学习的有些概念会对现代科学的学习和理解产生负面影响,并可能面临学完即废的尴尬局面。因为科学概念随着科学的发展而不断地改变着自身的内涵与外延。

比如,力概念的演化过程就反映了物理概念体系的变迁和力概念存在的缺陷。目前中学物理课程中以力的概念为主线的概念体系与现代物理概念体系存在着明显的矛盾。因此,中学物理课程内容应选择与现代物理体系相同的概念,建构以能量与动量为中学物理课程的基本概念的课程体系。

德国的卡尔斯鲁厄《物理课程》KPK的教育实践,证明了以现代物理知识体系构建的中学物理课程是可行的。作为卡尔斯鲁厄物理课程系列的一部分,供初中学生使用的KPK物理课程在20世纪90年代就正式在德国出版。到2007年止,已有近万名德国学生使用了这一课程。^[13]2010年9月,上海的一批中学也开展KPK教学实验,经过两年的实践,取得了初步进展。^[14]

因此,科学概念演化视角下的中学物理课程内容现代化是目前解决这两个问题的有效途径之一。当然,还应该指出的是,尽管德国的卡尔斯鲁厄《物理课程》KPK放下了历史的包袱,实现了课程内容的现代化,选择了学习物理的“快

速路”，并在教学实践中取得了长足的进步，但在大多数国家和地区推广，还有很长的路要走。

（二）中学物理课程内容体系应避免因科学概念演化引起的学习困难和偏差

以科学概念演化的角度审视与构建中学物理课程知识体系，可以避免在学习物理课程的过程中，前面的物理概念对后续物理内容的学习产生阻碍和偏差。例如，中学物理的教学中学生花费大量精力与时间学习了力概念，而令人遗憾的是，力的概念体系对于现代物理学习非但没有产生积极作用，反而因力的“文化冲突”引起了负面影响。

如前所述，课程的设计与实施受诸多因素的制约。因此，我国目前的中学物理教学还不能够广泛地实施 KPK 课程。这是因为，从科学概念演化的视角看，在目前中学物理教学条件下实现中学物理课程内容现代化转型有两条途径。

一是弱化、修正力概念在物理课程体系中的地位。因为在中学阶段，力的概念很难给出精确定义，不论从哪个角度给出力的定义描述都存在着缺陷，并且力概念已不是现代物理学中的基本概念。因此，在教学中应对力概念采用物理描述，减少或避免对力概念给出定义。同时，弱化中学物理课程中牛顿三定律的力学体系。这种做法在美国的物理教材中已经被采用。^[15] 例如，将牛顿第一定律的节标题变换为“惯性与平衡：牛顿第一定律”，牛顿第三定律的节标题变换为“相互作用对：牛顿第三定律”等。同时在牛顿第三定律的教学过程中，避免强调相互作用力的同时性、瞬时性，特别是要删掉与之相关的习题，以减少因为学习牛顿力学而对于现代物理学习产生阻碍作用。

二是加强能量概念，使其贯穿整个中学课程体系。目前的中学物理课程中能量概念分布非常散，如力、电与磁、热等内容都涉及了能量概念，但各个部分间的联系并未充分体现。这种设计非常不利于学生建立一个整体科学的能量概念体系，应将分散在各个部分的能量概念有机地整合起来，在教学中构建能量概念发展的知识主线。为学生在今后的学习研究过程中搭建科学的概念体系和学习现代科学知识打下坚实的基础。

（三）中学物理课程内容体系应规避物理学发展所走过的弯路，选择物理学习的“快速路”

中学物理课程现代化不仅要关注现代物理内容的选择，更应从现代物理的角度审视物理概念间的关系，关注物理概念的演化，构建既符合学生认知发展水平，又符合现代物理发展的概念体系。因此，中学物理的内容体系并不是一定要重复物理学发展的曲折道路，而应选择能够达到同样目标的“快速路”。

现行的中学物理教育留给大多数人的印象是力学只有牛顿的力学体系。而事实是各种理论体系同时存在，例如，拉格朗日体系、哈密顿体系、最小作用原理体系等。这些体系中尽管没有牛顿定律，却是现代物理学理论体系的发源地。现行的中学物理沿着物理学的发展道路，课程体系以描述宏观世界的经典物理（牛顿力学）内容为主，现代物理内容很少，仅简单介绍了原子结构、原子核、量子论、相对论等内容。这很容易使学生认为：尽管物理学由经典物理和现代物理构成，但经典物理与现代物理学有着明显的界限，因为经典物理适用于宏观世界，而现代物理适用于微观世界。显然，这种观点是错误的。实际上，经典物理与现代物理之间没有明确的界限，物理学是一个整体。许多在经典物理中建立的速度、能量、波长等概念，在现代物理中仍然起着重要作用。

德国的卡尔斯鲁厄物理课程（简称 KPK）的内容体系放下了沉重的历史包袱（牛顿力学），选择了学习物理的“快速路”，充分利用经典物理与现代物理中都与能量密切相关的一类物理量——广延量，来构建 KPK 物理课程的概念体系。^[16] 因为物理学研究的物理过程，都离不开能量的流动，能量又离不开能量的载体，所以能量转移和转化的过程都可以看到这些广延量“流动”的身影。KPK 在确定了各物理学分支学科中与能量相关的广延量后，研究这些广延量在物理过程中流动的相似规律，建立了以能量为主线，以守恒量和广延量为基础的 KPK 内容体系。这个内容体系，从一开始就为学生今后有可能在物理学领域的研究和取得革命性成果扫清了思维和概念上的障碍，值得我们认真学习与借鉴。

参考文献:

- [1] 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 八年级下 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2012: 2.
- [2] 北京教育科学研究院. 物理 八年级全一册 [M]. 北京: 北京师范大学出版社. 2013: 62.
- [3] 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. 高中物理 必修一 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2004: 52.
- [4] 赵凯华, 张维善. 新概念高中物理读本: 第1册 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2006: 53.
- [5] 孙长友. 力学史稿 [M]. 贵阳: 贵州教育出版社, 1991: 6.
- [6] 关洪, 罗蔚茵. 力的基本概念 [J]. 大学物理, 1985 (7): 7-9.
- [7] 李东升. 力学自然观与能量、力和物质概念 [J]. 广西民族大学学报 (自然科学版), 2010 (5): 17-22.
- [8] 费恩曼. 费恩曼物理讲义: 第1卷 [M]. 上海: 上海科技出版社, 2013: 125.
- [9] HORST STOCKER. 物理手册 [M]. 吴锡真, 等, 译. 北京: 北京大学出版社, 2004: 31.
- [10] 邓人忠, 林定远. 关于“力”概念的思考 [J]. 江苏教育学院学报, 2009 (1): 20-22.
- [11] FRANK WILCAEK • Whence the Force of $F=ma$? I: Culture Shock [J]. Physics Today, 2004 (10): 11-12.
- [12] 史辉, 叶祖云. 基因概念的演变 [J]. 生物学教学, 2011 (12): 10-12.
- [13] 陈敏华. 德国卡尔斯鲁厄物理课程的结构和特色 [J]. 物理教学, 2007 (11): 56-58.
- [14] 赫尔曼, 陈敏华. 卡尔斯鲁厄物理课程 [J]. 物理教学探讨: 中学教学教研专辑, 2015 (4): 1-4.
- [15] ALAN GIAMBATTISTA, BETTY MCCARTHY RICHARDSON, ROBERT C. RICHARDSON. 物理学卷1 (力学和热学) [M]. 刘兆龙, 罗莹, 冯艳全, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [16] F HERRMANN. 新物理教程 (高中版) [M]. 戚华, 译. 上海: 上海教育出版社, 2009.
- (衷心感谢郭玉英教授、邢红军教授在本论文写作过程中给出的中肯建议与宝贵意见。)
- (责任编辑: 钮 瑛)

On the Modernization of Physics Curriculum in Secondary School from the Perspective of the Evolution of Scientific Concept

Luo Ying

(School of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Scientific concept evolution is a new perspective to study the modernization of physics curriculum content in middle school. We could reveal the problems existing in the current secondary school physics' content in the theoretical framework of modern physics by comprehensive analysis the formation of the concept of force, its advantages, defects and its position from the perspective of scientific concept. So, it is pointed out that the connotation of the modernization in the secondary school physics curriculum from scientific concept evolution should be included the following aspects: To adapt to the development of physics and to be consistent with the modern physics system; To avoid learning difficulties and deviations caused by the evolution of scientific concepts; To chose "Express way" in the physical knowledge system for building concept systems. Finally, the suggestions for the modernization of physics curriculum in secondary school are put forward.

Key words: evolution of scientific concepts; Physics curriculum of secondary school; the modernization of curriculum content