



# 新课程背景下建立 物理概念科学思维方法的研讨\*

冯杰 叶翔 张悦 姚黄涛

(上海师范大学数理学院物理系 上海 200234)

(收稿日期:2015-06-28)

**摘要:**概念是人类科学思维的最基本单元. 概念的内涵和外延之间呈反变的逻辑关系. 中学物理新课程强调科学思维方法教育, 因为, 影响物理概念教与学效率的关键因素是科学思维方法的恰当运用. 根据这个思想, 本文研讨了如何应用科学思维方法, 来建立物理概念, 其中包括物理教师必须针对不同类型物理概念的特点, 有意识地运用相应的科学思维方法, 引导学生进行实验、分析、综合、归纳、类比、概括、抽象、演绎和理想化等. 最后, 落实于物理概念的定义, 强调阐述了比值定义法意义.

**关键词:**物理概念 科学思维方法 实验归纳方法 定义法

概念是人们对事物本质的认识, 是逻辑思维最基本的单元和形式. 概念既具有客观属性, 又具有主观属性. 其客观属性是指概念的对象是客体, 是客观的, 其主观属性是指概念的定义是主观的, 随人们认识事物本质的程度、深度或目的不同而不同. 概念是理性认识的第一阶段. 概念的建立必须借助于感性的材料、理性的逻辑思维方法. 科学思维方法作为物理学研究和发展的逻辑工具, 为物理学提供了建立物理概念(发现规律、形成物理原理和提供实验探究和检验)的根本途径, 同时, 也是物理学技术应用的必由之路. 物理教师必须针对不同类型物理概念的特点, 有意识地融入相应的科学思维方法, 引导中学生追忆物理学的思维发展历程, 恰当地运用实验、分析、综合、归纳、类比、概括、抽象、演绎和理想化等方法, 才能真正激发其物理学习动机, 从根本上改变中学生物理学习的被动局面, 有效地培养中学生科学思维能力, 有效达成物理概念教学的目标.

## 1 物理概念的特点

物理概念是自然科学基本概念的一个子范畴, 所以, 物理概念既有一般自然科学概念的共性, 又有其自身的个性, 根据物理学本身的特点, 物理概念特

性可以概括为: 其一是确定性, 即物理概念是从同一类物理现象中概括和抽象出来的, 其反映了物理研究对象的本质属性和内在联系, 而这种本质属性和内在联系是物体固有的客观存在, 因而具有确定性, 这种确定性是客观性和主观性共同作用的结果; 其二是抽象性, 即物理概念的起源与物理的感性经验、实践内容和原有物理基础有关, 但是又不能从感性经验逻辑地推导出来. 既与具体客体和过程(比如, 必须借助于观察实验和归纳方法)有密切联系, 但又超越了具体的客体和过程(比如, 必须借助于分析、综合和概括方法), 最终形成物理概念; 其三是阶段性, 根据中学生的思维特点和学习能力, 物理概念随着学生物理知识掌握的不断增长, 物理问题研究的不断深入而不断地变化和发展, 即一个完整物理概念的形成需要一个发展过程.

因此, 物理新课程改革顺应新时期对青少年科学素养教育的时代要求, 努力贯穿辩证立体的“观察与实验 → 假说 → 科学方法 → 反复曲折 → 数学工具 → 物理学理论 → 实验检验 → 技术应用 → 新问题……”逻辑链条不断发展, 蕴含了丰富的科学方法教育元素.

\* 本文曾获第七届(2015年)“物理科学方法教育”学术研讨会论文一等奖.

作者简介: 冯杰(1961-), 男, 博士, 教授, 物理课程论学科带头人, 导师组组长, 从事物理学(师范)教育教学实践及研究.

## 2 物理概念的内涵和外延

按照逻辑学的原理,概念不仅有明晰的内涵,而且必须限定其确定的外延,同时,概念的内涵和外延之间呈现反变的逻辑关系。

### (1) 物理概念的内涵

物理概念的内涵就是那个概念所包括的一切对象共同的本质属性的总和.下定义就是解释概念的内涵,亦指出它所反映的对象所共有的本质属性的逻辑活动.例如,密度是“单位体积某种物质的质量”.其概念是描述物体疏密程度的物理量,这就是密度的内涵,其定量关系可用公式  $\rho = \frac{m}{V}$  来量度.密度概念的本质属性唯一地来源于物质本身的性质,而与物体的形状、质量和体积无关.所以说,物理概念的内涵是该物理概念的本质属性的描述.

### (2) 物理概念的外延

物理概念的外延就是适合于那个概念的一切对象的范围.例如,重力、弹力、摩擦力、静电力、洛伦兹力、浮力、压力、支持力、下滑力、张力等等的全体,就是“力”概念的外延.同样在“机械运动”概念的外延中,包含着一切类型的机械运动,如匀速直线运动、匀变速直线运动、自由落体运动、竖直上抛运动、平抛、斜抛、圆周运动和机械振动等.

### (3) 概念的内涵和外延之间的反变关系

概念的内涵和外延除了相互依存,同时又是相互制约的.一方面,概念的内涵确定了,在一定条件下,概念的外延也跟着确定了;另一方面,概念的外延确定了,在一定条件下,概念的内涵也就跟着确定了.逻辑学研究表明:概念内涵的多少与概念外延的宽窄存在着反变关系;即如果一个概念的内涵属性越少,其外延就越大;反之亦然.例如,机械运动:“我们把一个物体相对于另一个物体的位置变化叫做机械运动”;直线运动:“运动路径是直线的运动叫做直线运动”;匀速直线运动:“物体沿直线运动时,在相等时间内通过的路程相等,这种运动称之为匀速直线运动”.不难看出,机械运动  $\rightarrow$  直线运动  $\rightarrow$  匀速直线运动,其内涵在增加,而外延则在减小,这就是概念的内涵和外延之间的反变关系.再比如,力  $\rightarrow$  摩擦力  $\rightarrow$  滑动摩擦力,其外延也是随着内涵的增加而减小.等等,请读者自行分析考察.

## 3 科学方法指导下的物理概念的构建模式

根据物理概念性质不同,物理概念建立的过程不仅需要借助于截然不同的科学思维方法,而且观察和实验的“情景材料”不同、呈现的程序不同、认知的难易度不同,其教学模式也有比较大的差别.

### 3.1 理想化方法

理想化方法的思维特点是忽略或摒弃原型中的次要因素,集中突出原型主导因素,突出主要矛盾.

#### (1) 理想化方法的思维特点

首先,理想化方法具有客观性.理想化的研究对象是客观的物理事实,是客观物质对象的确切属性的反映;经过理想化方法加工的客观物理事实,必须能够突出物理事实的客观本质特征.其次,理想化方法具有绝对性.在进行理想化方法加工时,必须忽略或摒弃原型中的次要因素,必须集中突出原型主导因素,否则,就不可能突出主要矛盾,模型就不是理想的,理想过程不可能形成,理想实验不可能实现.比如,作为经典力学基础的惯性定律,不可能直接从现实的具体实验中得出,伽利略必须借助于“理想实验”的逻辑推论,才能够得出定律的绝对表述.第三,理想化方法具有相对性.即理想模型、理想过程和理想实验必须实践于特定环境的具体物质运动.不同的运动环境,对研究对象的要求不尽相同,也就是异化了理想化方法的绝对条件,放宽了思维加工的严密性.而且,理想化方法不可能完全地进行到底.比如,无论是万有引力定律还是库仑定律,当其适用对象的“质点”或“点电荷”之间的距离趋于零时,两个定律就都不能成立了.

#### (2) 理想化方法建立物理概念的教学模式结构

物理教学中理想模型方法的应用主要有3种形式:理想模型、理想过程和理想实验.“理想模型”是为了便于研究而建立的一种高度抽象的理想客体.实际的物体都是具有多种属性的,当我们针对某种目的,从某种角度对某一物体进行研究时,有许多对研究问题没有直接关系的属性和作用却可以忽略不计.“理想过程”就是传质阻力又可不计的物理状态演化过程.比如,简谐波的传播过程和准静态的等值过程等.“理想实验”又叫做“假想实验”、“抽象的实验”或“思想上的实验”,它是人们在思想中塑造的理想过程,是一种逻辑推理的思维过程和理论研究

的重要方法。

### 3.2 实验 归纳 概括 抽象 —— 实验举例方法

#### (1) 实验举例方法的思维特点

实验举例方法的思维特点是先运用枚举方法,对多个感性材料进行分析、概括和抽象,得到其本质属性,然后给出文字表达及其(物理量)定义式,再分析和说明其物理意义(质和量)和适用范围;并与有关概念对比分析;最后明确它们之间的区别和联系.其思维流程可以简化为:提供感性材料 → 归纳事例特征 → 概括共同特征 → 抽象本质属性 → 表征定性定义(文字表达) → 演绎定义式(物理量) → 讨论物理意义(质和量,单位,测量方法) → 确定适用范围 → 对比应用(有关概念的区别和联系) → 解决物理实践问题等。

#### (2) 实验举例方法建立物理概念的教学模式结构

关于“机械振动”概念的建立。

第一步是提供感性材料 —— 举事例。

**事例 1:** 竖直的摆动,用单摆装置演示,突出摆动特征;(注意:不是研究单摆模型)。

**事例 2:** 水平的摆动,用橡皮筋穿过一个乒乓球演示,突出摆动特征;

**事例 3:** 点的摆动,用手压住塑料米尺的一段.拨动另一端,叫学生们一起做.突出摆动特征;

第二步是找特征 —— 找共性.即,在以上 3 个事例中寻找。

**事例 1:** 竖直的摆动,单摆球在做往复运动;

**事例 2:** 水平的摆动,乒乓球在做往复运动;

**事例 3:** 塑料米尺的一端在做往复运动;

找到的共性 1 是“往复运动”;则 3 个事例演变为:

**事例 1:** 竖直的摆动,单摆球在竖直位置做往复运动;

**事例 2:** 水平的摆动,乒乓球在水平位置做往复运动;

**事例 3:** 塑料米尺的一端在钢锭位置做往复运动;

找到的共性 2 是“平衡位置”;则 3 个事例进一步演变为:

**事例 1:** 竖直的摆动,单摆球在竖直位置附近做往复运动;

**事例 2:** 水平的摆动,乒乓球在水平位置附近做往复运动;

**事例 3:** 塑料米尺的一端在钢锭位置附近做往复运动;

找到的共性 3 是“平衡位置附近”。

第三步是归纳、概括 —— 共性 —— 共同特征.归纳 3 个事例共性;忽略原型的次要因素,集中突出原型主导因素,摒弃次要矛盾,突出主要矛盾.概括出一般性共性 —— 共同特征.3 个事例的运动物体(单摆球、乒乓球、塑料米尺的一端)都是在某一平衡位置附近做往复运动。

第四步是抽象本质特征.某一物体(单摆球、乒乓球、塑料米尺的一端)都是在某一平衡位置附近做往复运动。

第五步是下定义 —— 文字表达.定义:我们把某一物体在某一平衡位置附近的往复运动叫做机械振动。

### 3.3 演绎教学模式建立物理概念

#### (1) 演绎方法的思维特点

演绎,是以一般概念、原则为前提推导出个别结论的思维方法,即依据某类事物都具有的一般属性、关系来推断该类事物中个别事物所具有的属性、关系的推理方法。

#### (2) 演绎方法建立物理概念的教学模式结构

物理学的发展离不开数学,数学是研究和解决物理问题的工具.依据新知识 → 旧知识 → 逻辑关系,采用数学的方法从旧知识中得到新知识.比如,关于“冲量”的概念的建立.由牛顿第二定律出发

$$F = ma = \frac{m\Delta v}{\Delta t} = \frac{m(v_2 - v_1)}{\Delta t} = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t}$$

通过数学演绎

$$F\Delta t = mv_2 - mv_1 = p_2 - p_1$$

即只在数学方法上进行了恒等变换,但是其物理上实质就发生变化:牛顿第二定律的状态“时刻”“瞬时力”演绎出了过程“时间间隔”的“冲力”,进而引入了过程量新概念“冲量”,通过对动量变化量的讨论,在明确“冲量”的物理意义的基础上,逐步领会物理过程量的物理本质。

### 3.4 实验探究教学模式

#### (1) 实验探究教学模式的思维特点

实验探究的教学模式就是课程标准提出的科学

探究模式——按照7个要素进行.通常是在教师的指导和帮助下,让学生实际动手进行实验,使学生经历与科学工作者进行科学探究时的相似过程,这种教学模式重在探索的过程,重在体验科学探究的乐趣.

### (2) 实验探究建立物理概念的教学模式结构

实验探究教学模式的基本实施途径即是应用变量控制方法,其具体结构就是科学探究(关于该教学模式的研究成果已经很多,本文不再赘述).

## 3.5 类比教学模式

### (1) 类比的思维特点

类比方法就是运用比较的途径和逻辑推理的方法探究两个或两类事物某些方面相同或相似特性的相同点.类比方法的目的是要寻找未知的某些必然的联系.从操作层面上,类比是一种主观的不充分的似真推理.虽然类比方法的逻辑论证过程只能够限于合情推理本身(而且合理推理只是得出合情的联系),但是,它却给予人们获得新思路新发现的一种观点、手段和方法,所以,它对于科学研究和创新思维能力的培养都是很重要的.

### (2) 类比方法建立物理概念的教学模式结构

传统类比结构可以归纳为两类.其一,特殊→特殊;比如,机械波具有干涉和衍射的特性,光也有干涉和衍射的特性,所以光具有波动性,等等.其二,一般→一般;比如,电生磁、磁生电;电压和水压进行类比,静电场与重力场保守特性的类比,等等.实际上,在物理概念教学中的类比,不仅具有丰富多彩的形式和结构,而且具有多重的教学功能.比如,迁移思维类比:势阱和势垒类比原子的能级结构,可以清晰和量化地表征原子的能量状态;经典概念的对照类比:机械振动类比电磁振荡,可以有效地降低学习难度;物理假说类比:电磁波类比引力波,可以激发学生探寻物理世界的远景动机;实证类比:讲授卢瑟福的原子散射实验,以太星系类比原子的核式结构,可以浅显地呈现原子的结构;对称思维类比,光的波粒二象性类比物质波,促使学生自然而然地理解德布罗意波的概念,等等.因此,新课程物理概念教学运用类比方法能启发和开拓中学生的思维,提供建立物理概念的线索,有效缩短概括抽象的思维进程,加快形成概念的思维成熟速度.

## 4 物理概念的定义方法

定义就是对于一种事物的本质特征或一个概念的内涵和外延所作的确切表述.定义的要求是对认识主体使用判断或命题的语言逻辑形式,确定一个认识对象或事物在有关事物的综合分类系统中的位置和界限.定义的逻辑程序是:基于实践和逻辑方法得出基本概念,然后借用形式逻辑来导出概念.就物理学的概念来说,物理概念的定义,一般是揭示概念内涵.所以,对于基本物理概念,其定义的逻辑程序首先是基于实践(观察、实验),然后通过逻辑方法(概括、抽象等),人为规定之;对于物理导出概念,其定义的逻辑程序首先是借用已知的基本物理概念,采用形式逻辑方法进行之.

### 4.1 基本概念物理量的定义方法

如上所述,基本物理概念定性定义的思维操作程序是:举例→分析→概括→抽象→形式逻辑→下定义.

#### (1) 定性定义

运用实证和逻辑方法人为规定物质或运动的某一基本的属性.比如,“长度”是指丈量空间距离上的基本单元,是人类为了规范长度而制定的基本单位.其国际单位是“米”(符号“m”),常用单位有毫米(mm)、厘米(cm)、分米(dm)、千米(km)等等.长度单位在各个领域都有重要的作用.又比如,时间是物理学中的7个基本物理量之一,符号 $t$ .在国际单位制(SI)中,时间的基本单位是秒,符号s,等等.

#### (2) 定量定义或操作性定义

定量物理概念的物理量是用数学的方法来定义的.依据一定的物理实事或客观事件,人为规定单位标准和测量(或度量)标准.比如,长度的最新定义:1983年,巴黎世界度量衡大会定义1m等于光在真空中经历 $\frac{1}{299\,792\,458}$ s所经过的距离.

### 4.2 基本物理概念的定性定义

基本物理概念的定性定义必须借助于形式逻辑方法.形式逻辑定义法最有代表性的是所谓的“种差+属”定义方法,即把某一概念包含在它的属概念中,并揭示它与同一个属概念下其他种概念之间的差别.这里先介绍逻辑学关于“分类”的几个概念.一是关于“种”和“属”的规定(也是定义):按照分类

方法,其大类称之为“属”,该“属”包含的几个小类称之为“种”,上一级种是下一级属.二是关于“种差”的规定(也是定义):在属概念之下的其他并列(注意,一定是要并列,属种关系是不能构成并列的)的种概念所反映的对象的差别,即种差;三是“临近属”的规定,即与这一概念最靠近的“属概念”.比如,“力”是“各种力”的临近属;四是“种”之和应当是“属”的全部(外延).

#### (1) 种差加临近属定义法

种差加临近属定义又称真实定义或实质定义.定义项是由被定义概念的邻近的属和种差所组成.它的公式是:被定义项=种差+邻近的属.运用该方法下定义时,首先应找出被定义项邻近的属概念,即确定它属于哪一个大类,然后,把被定义项所反映的对象同该属概念下的其他并列种概念进行比较,找出被定义项所反映的对象不同于其他种概念所反映的对象的特有属性,即寻找种差,最后把属和种差有机地结合起来.比如,“只用数值就能完全确定的物理量称为标量”.这里的“物理量”是“标量”的临近属,“只用数值就能完全确定”是“标量”相对于其他“物理量”的种差.又比如,“反应过程中有电子转移的反应称为氧化还原反应”.这里的“反应”是“氧化还原反应”的临近属,“反应过程中有电子转移”是“氧化还原反应”相对于其他“反应”的种差.找到了临近属和确定了种差,定义也就容易得出了.种差加临近属定义法应当满足以下4条规则:其一,属概念和种概念的外延要相应相称,即“外延不能过窄或过宽”;其二,并列的概念一般不应是否定判断.比如,“摩擦力不是重力”,这样表述毫无意义;其三,构成属种关系的概念不能倒置(有时可以顺置,比如,可以说“摩擦力是力”,但是不能说“力是摩擦力”);其四,“种差”应尽可能详细确切.

#### (2) 词语定义法

其一,内涵定义法:即运用学科词语列出被定义概念的本质属性.比如,“机械运动:一个物体相对于另一个物体位置的变化”.这里运用物理学的学科术语明确列出了机械运动的两个基本属性:位置的变动;有相对性.其二,外延定义法:列举概念所指事物的范围——优缺点.比如,“机械能的定义:物体系的动能、重力势能和弹性势能,统称为机械能”优点:直观、具体;缺点:难以列举外延全部;内涵仍然

不明确;其三,最佳定义法:内涵为主,外延为辅.比如,“机械能的另一种定义:机械能是物体做机械运动时所具有的能量,它包括动能、重力势能和弹性势能.

#### 4.3 导出物理概念的定义方法

按照进一步量度物质的属性或描述物质的运动状态来定义由基本物理量组合而成的,叫做导出物理量.在选定了基本单位和辅助单位之后,按物理量之间的关系,导出单位是用基本单位或辅助单位以代数式的乘、除数学等运算所表示的单位.

##### (1) 导出物理概念的定性定义

由基本概念物理量按形式逻辑的法则,给出反映物质或运动的某一方面的本质特性.比如,“力是物体之间的相互作用”;“力是改变物体运动状态的原因”;又比如,“速度是描述物体运动快慢的物理量”;“速度是位移对时间的变化率”;等等.

##### (2) 导出物理概念的定量定义或操作性定义

人为规定单位标准和定量计算式.比如,力的定量定义式  $F = \frac{d(mv)}{dt}$ ,力的单位为牛顿,简称“牛”,英文缩写:N.

定量定义.定量定义式由一定的实验规律得出;反映导出概念物理量与已知量之间的逻辑关系.物理量的定量定义式在选择原则上是任意的.比如,就电阻来说,可以用基于实验规律的比值定义法,即  $R = \frac{U}{I}$ ;可用基于实验归纳的控制变量法,即  $R = \rho \frac{L}{S}$ ;也可以用基于实验规律的数学演绎法,即  $R = \int \rho \frac{dL}{S}$ ,等.另外,定量式要反映出方向性质,即是标量、矢量、还是张量.比如,点电荷电场强度的定性定义:单位正电荷所受的电场力.其定量定义是  $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$ .当然,不能循环或同义反复.比如,“能量是物体具有做功的本领,功是能量变化的量度”.

##### (3) 比值法定义导出物理概念

所谓比值定义法,就是在定义一个物理量的时候采取比值的形式定义.大部分导出物理概念的定量定义都由比值法来完成.比值法适用于物质属性或特征、物体运动特征的定义.应用比值法定义物理量,往往需要一定的条件;一是客观上需要,二是间

接反映特征属性的两个物理量可测,三是两个物理量的比值必须是一个定值.

### 1) 比值定义法的思维特点

适用于比值法定义的物理量有两类.

第一类是定义物质或物体属性特征的物理量.这类物理量的定义特征是:其属性由本身所决定,其定义或测量需要借助于一个与其属性完全相同的辅助量(绝对量)来完成,即需要选择一个能反映某种性质的检验实体来研究.比如,定义电场强度  $E$ ,需要选择检验电荷  $q$ ,观测其检验电荷在场中的电场力  $F$ ,采用比值  $\frac{F}{q}$ .

第二类是对描述物体运动状态特征的物理量的定义.该类物理量的定义特征是:其属性由外部条件决定,需要两个增量(相对量)的比值决定.如速度  $v$  的定义,电容  $C$  的定义等.这些物理量是通过另外的实验引入的.

### 2) 比值定义法的教学模式结构

被定义量  $\rightarrow$  确定两个间接相关的物理量(属性完全相同)  $\rightarrow$  文字定义  $\rightarrow$  比值演绎  $\rightarrow$  获得定义式  $\rightarrow$  讨论物理意义  $\rightarrow$  应用.比值演绎的含义有两类,其一是两个量的绝对量的比值,其适用于物质或物体属性特征,比如,电场强度的定义;其二是两个量的相对量(增量或变化量)的比值,描述物体稳定的动态特征,比如,电流强度的定义和导体电容的定义;或描述物体运动状态特征,比如,速度和加速度的定义,等等.

以电场强度为例,说明适用于物质或物体属性特征的比值定义法.第一步是确定被定义量:电场强度.引入目的是为了描写电场的强弱;第二步是确定两个间接相关物理量:需要选择检验电荷——借助于理想模型点电荷  $q$ ,观测正的检验电荷在场中的不同位置所受电场力  $F$ ;第三步是运用概括抽象等方法,给出文字定义:放入电场某点的正的检验点电荷所受电场力  $F$  与该检验点电荷所带电荷量  $q$  的比值对于电场中的同一个位置是一个定值,此定值就是该点的电场强度.第四步是获得比值定义式

$$E = \frac{F}{q_0}$$

第五步是讨论其物理意义,包括其单位、矢量性及其点电荷电场强度的决定式为  $E = k \frac{Q}{r^2}$

对于描述物体稳定的动态特征的比值法定义的物理量,以电容为例再进一步说明.我们知道,电容器的电容是不变的,是电容器本身的固有性质,根据比值法,电容的定义式  $C = \frac{Q}{U}$ ,其物理意义不在于在  $U$  不变的前提下,  $C$  增大时,  $Q$  必然增大,也不是  $U$  不变的前提下,要达到该电容器的电容量  $C$ ,需要增大电荷量  $Q$  的值,而是在于:如果增加一个伏特的电势差,该电容器多储存了多少电荷量,即其电容的真正含义是  $C = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$ .

## 5 结论

物理概念教学是中学物理教学的中心任务之一.物理概念是建立物理规律的基础,物理概念之间的相互联系和数量依存关系就构成了物理规律.物理教师结合物理新课程的教学理念,有意识运用科学方法指导物理概念教与学,对于培养学生的科学思维能力,具有重要的促进意义.在大量物理事实及复杂物理现象中,运用各种逻辑规律和思维方法,把物理事实的本质特征综合起来加以概括,在人脑中形成的具有相对稳定性的反映,并用“词”这个语言单位来标志,如此说来物理概念教学是中学物理教学的基础性工程.

## 参考文献

- 1 张光涛.物理学方法论.济南:山东科技出版社,1990
- 2 张宪魁.物理科学方法教育.青岛:中国海洋出版社,2000
- 3 张宪魁,李晓林,阴瑞华.物理方法论.青岛:中国海洋出版社,2007
- 4 中华人民共和国教育部.义务教育物理课程标准.北京:北京师范大学出版社,2011
- 5 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准.北京:人民教育出版社,2003
- 6 张越,徐在新.高中物理.上海:华东师范大学出版社,2008
- 7 赵凯华.新概念物理学·力学.北京:高等教育出版社(第二版),2005
- 8 刘风领.中学生理解力学基本概念的困难分析及教学策略研究:[学位论文].银川:宁夏大学,2010
- 9 冯杰,陆伟,等.物理概念的内涵与外延的反变关系及其教学启示刍议.物理教师,2014(5)(人大复印资料全文转载)
- 8 冯杰.大学物理专题研究.北京:北京大学出版社,2011