

# 万象同一理 触类可旁通

陈伟孟<sup>1</sup> 张玉峰<sup>2,†</sup> 陈征<sup>3</sup> 魏红祥<sup>4</sup>

(1 中国人民大学附属中学 100080)

(2 北京教育科学研究院 100036)

(3 北京交通大学理学院 100044)

(4 中国科学院物理研究所 100190)

2021-07-28 收到

† email: zhangyf318@163.com

DOI: 10.7693/wl20210813

物理的概念、规律间是存在横向联系的, 这种联系既能简化新概念规律的建构过程, 又能深化原有的认知, 体现物理体系的共性与系统性。将未知的研究对象与熟悉的概念规律进行适切的横向联系, 也是我们解决问题、整合体系和创新认识的重要方式。

## 1 引言

物理现象丰富多彩, 在对其认识的过程中, 人们建立了大量的物理概念, 发现了许多物理规律。这些物理概念和规律种类繁多又纵横交错, 看起来着实让人目眩, 然而物理学家在对其进行研究的过程中, 遵循了相同的原则、范式和方法, 因而随着认识的深入, 在电、磁、原、力、热、光、声等分支中, 其概念和规律逐渐显现出体系, 而各分支之间又统一在流体、波、场等几个基本物理图像之下, 遵循守恒的基本原则, 采用相似的概念定义方法和同一套数学工具, 因而表现出明显的横向关联。

对这种物理学不同分支横向联系的认识于学习物理的人而言, 能发展其面对不同概念和规律时的迁移能力, 起到深化认知和建构新知的的作用, 正如卢瑟福所言“物理”并非“集邮”。而对研究和应用者而言, 也是突破桎梏, 开拓创新的源泉。

## 2 流体图像下的力与电

电磁学通常因为比较抽象而让许多人觉得困扰。但实际上, 它的物理图像和相应的物理概念与直观

可见的力学现象有着大量共通之处。如电流使电路中的灯泡发光、电炉丝发热, 就如水在流动中可以冲击水轮机使其转动; 水从水位高的地方流向水位低的地方, 电流从电势高的地方流向电势低的地方, 背后是相同的流体图像, 而水位高低和电压高低背后则是相同的势能概念。

受法拉第的启发, 麦克斯韦于1855年发表了《论法拉第力线》一文, 将法拉第的力线延伸为装满了不可压缩流体的“力管”。这力管的方向代表力场(电场或磁场)的方向, 力管的截面面积与力管内的流体速度成反比, 而这流体速度可以比拟为电场或磁场。不可压缩流体任何部分的体积不会因为时间而改变, 这是一种假想的理想流体。麦克斯韦更进一步假设流体的流动是稳定的, 在任何位置, 流动的方向和速率不随时间变化, 流体内部任

意元素, 随着流动会描绘出一条曲线, 称为“流动线”。法拉第的力线被比拟为流动线, 于是借用流体力学的一些数学框架推导出了一系列初步成形的电磁学理论。法拉第的思想为电磁场描绘出一幅形象的图像, 这是“场”概念上的重大发展, 为麦克斯韦从数学上建立电磁场的理论奠定了基础。这里的“场”虽然还不是近代物理学意义上的“场”, 但是打破了“超距作用”在物理学上的地位, 使人们对场的认识向着客观实在方向跨出了关键性的一步。后来, 汤姆孙评论法拉第的成就时说: “在法拉第的许多贡献中, 最伟大的就是力线概念了。我想电场和磁场的许多性质, 借助它就可以最简单而且富有暗示地表述出来。”

流体的流量  $Q$  是单位时间内流过管道横截面的液体体积, 同理, 电流  $I$  是单位时间内流过某一

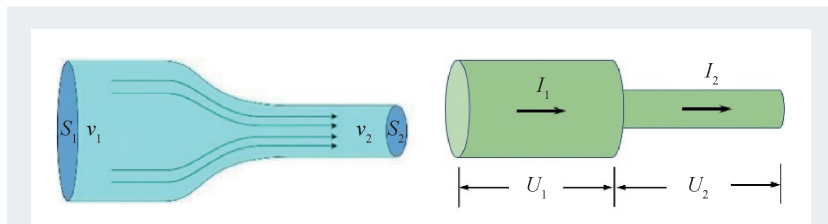


图1 流体与电流

横截面的电荷量。如图1所示,当理想流体通过一段封闭管道,流量是处处相同的,若管道是不同粗细的,则流速 $v$ 是和横截面积 $S$ 成反比的。将流体与电流进行对照,则流速 $v$ 与场强 $E$ 就有了直观的对应关系。

在三维空间里,假设位于参考系原点有一个流体“源”,单位时间流出的流体体积为 $Q$ ,在与此流体源径向距离为 $r$ 的位置流速大小为 $v = \frac{Q}{4\pi r^2}$ 。假设有一个流体“汇”,在与此流体汇径向距离为 $r$ 的位置流速大小为 $v = -\frac{Q}{4\pi r^2}$ 。这种流体系统遵守矢量叠加原理,则流速 $v$ 与点电荷的场强 $E$ 也就有了对应关系。如图2所示,一正电电荷的电场线会从原点出发,一直到无穷远处,通过每一个闭合曲面的电场线的条数是不变的,即通量是不变的。此即电通量的概念,与流量是具有类似性的。进一步联系我们熟悉的磁通量,拓展不熟悉的引力场通量,能够让我们对物理中的不变

量有更深刻的认识。

1686年,牛顿提出了著名的万有引力定律: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 。由该定律可得:一个密度均匀分布的球壳,对其内部质点的引力为零。后来物理学家富兰克林发现,放在绝缘架上的带电金属筒内表面不存在电荷,并且筒内用丝线吊住的一带电小球不会受到静电力的作用。普利斯特里重复了富兰克林的实验,他猜想由这个奇怪的现象也可以得到点电荷静电力的“平方反比”关系,最终库仑结合实验得出了与万有引力定律类似的库仑定律: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 。可以发现库仑定律和万有引力定律的相似性有着必然的联系,这也是规律间的横向联系。

### 3 概念规律间的横向联系

“场”的概念是物理学的一个重要概念,也是近代物理学与经典力学在物质观的认识上的最大区别。这种物质与通常的实物不同,不是由分子原子组成,却也是客观存

在。带电体周围存在电场,人们会引入试探电荷 $q$ 来探究电场的性质。对于电场中的同一点,试探电荷受到的电场力与其电荷量之比 $\frac{F}{q}$ 是一定的,而对电场中的不同点, $\frac{F}{q}$ 一般是不同的,与其在电场中的位置有关。因此, $E = \frac{F}{q}$ 反映了电场的性质,被称为电场强度。相应地,在探究磁场时,人们常引入类似于试探电荷的“电流元”,在磁场中的某一位置垂直于磁场方向放入一小段通电直导线,通电直导线受到的力 $F$ 跟电流 $I$ 和直导线长度 $L$ 的乘积成正比。因该比值 $B = \frac{F}{IL}$ 与该通电导线的长度和电流无关,可用其描述磁场的强弱程度,即磁感应强度。如图3所示,由电场、磁场到重力场,那么 $g = \frac{G}{m}$ 就不仅是

我们熟知的重力加速度,也是描述重力场的重力场强度,进一步到引力场强度,以及能量角度的电势、重力势和引力势概念,这都是概念间的横向联系。

在会计算点电荷电场的基础上,人们还想知道一般带电体产生的电场强度 $E$ 和电势 $\varphi$ 的定量计算的数学方法。笛卡儿在关于自然科学的哲学本质上提出了一个“指导法则”:为了解决所遇到的难题必须把它们分成几部分,必须从最简单的(对象)开始,逐步进入到对复杂的(对象)认识。这种方法系统地渗透在从力学、电学到原子物理等物理学各个分支中。例如,运动的合成、力的合成等都体现了这样的思想,其前提条件是“部分”之间的相加必须服从“叠加原理”。力学部分从质点运动开始,再到质点系;电学部分从点电荷产生的电场引

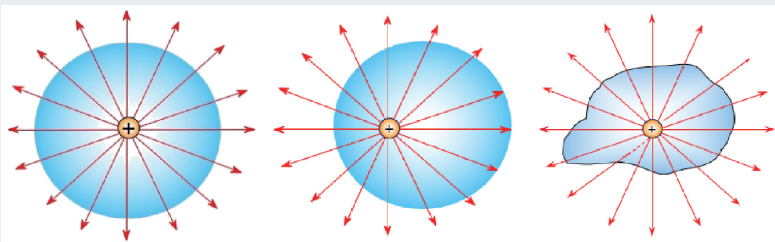


图2 点电荷位于不同闭合球面内部

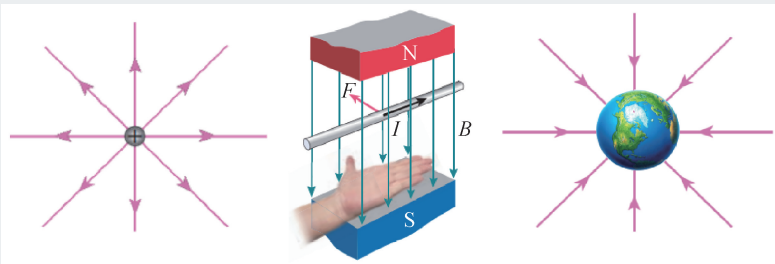


图3 静电场、磁场与引力场

入,再到电荷系;对于连续体层次上的力学和电学的讨论方法体现了“从简单到复杂”的思维原则。当然,线性系统只是自然界的一种近似的、理想化的模型系统,真实的系统更多的是非线性系统。

在力学中,描述质点运动状态的物理量是位置 $x$ 、动量 $p$ 等物理量,这些物理量是质点所在空间位置的函数。位置的改变产生位移 $\Delta x$ ,位置随时间的改变得出速度 $v$ ,速度随时间的改变产生加速度 $a$ 。在力学中描述质点状态的物理量是位置 $x$ 和速度 $v$ ,它们之间体现的是在时间上的变化率关系 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 。

在静电学中描述电场状态的物理量是电场强度 $E$ 和电势 $\varphi$ ,它们的定义之间体现的是在空间上的变化率关系 $E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$ ,从时间变化率的关系到空间变化率的关系。

力学平衡是指质点受两个外力作用达到平衡,合力为零,质点保持静止或匀速直线运动状态;如果把“静止”称为“静平衡”,那么“匀速直线运动”就可以称为“动平衡”。热学中的平衡态是指系统内部

没有“质量流”和“热量流”,不随时间改变的宏观状态,但系统内部分子还在做无规则的热运动,因此称为“热动平衡状态”。与此类似,电学中的静电平衡态指的是受外部电场和内部电场的共同作用,导体内部处处净电荷为零以及内部电场强度为零,导体表面没有电荷定向移动的状态,也是另一个意义上的“动态平衡”,是电场强度和电荷分布之间相互影响而达到的一种动态平衡。因此,导体的静电平衡在平衡思想上是对力学平衡和热学平衡的横向联系的深化和发展。

在物理系统里,一个粒子从起点移动到终点,若受作用力且该作用力所做的功不因为路径的不同而改变,则称此力为保守力。如果物体沿闭合路径绕行一周,则保守力对物体所做的功恒为零,即势能与其他形式的能量转化为零,于是系统间的势能不变。当相对位置确定时,它们之间的势能就是确定的、唯一的,因此保守力是与势能关系密切的概念。重力、万有引力、弹力、静电力和分子力等都具有这个性质,重力对应着重力势能,弹力

对应弹性势能,静电力对应着电势能,分子力对应着分子势能等。因此,卫星绕着地球转,地球绕着太阳转,电子绕着原子核转等宏观和微观的稳定模型系统,都属于保守力系统。

#### 4 结语:横向联系拓展物理视界

横向联系不仅适用于物理学科内不同内容的联系,也适用于不同学科间的关联拓展。例如变化量与变化率、稳定性与变化、结构与功能、系统和系统模型等跨学科的概念在其他学科中也有着广泛的应用。进行学科内以及跨学科间概念的横向联系,不仅能深化对概念和规律的认识,而且能拓展我们的物理视界,更是解决问题和认识未知的重要方式。

#### 参考文献

- [1] 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的与结构. 北京:商务印书馆,2011
- [2] 朱铨雄. 物理学思想概论. 北京:清华大学出版社,2009
- [3] 郭奕玲,沈慧君. 物理学史. 北京:清华大学出版社,2005

读者和编者

### 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

#### (1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190  
收款人姓名:《物理》编辑部

#### (2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行  
户名:中国科学院物理研究所  
帐号:11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn