

教学拓展

疑难问题解析

物理基本概念 —— 场与实物比较研究

唐玲琪 涂 泓
(上海师范大学数理学院 上海 234000)
(收稿日期:2020-11-19)

摘 要:电磁学是研究电磁现象规律的科学,是采用场的思想来讨论问题的.电磁学中的场主要是电场、磁场,深刻认识场的本质,对学好物理具有十分重要的意义.牛顿曾认为物质的相互作用是超距作用,作用传播是不需要时间的,场仅仅是辅助概念.随着现代科学的发展,大量事实已证实引力场、电场、磁场等都是物质.本文将从电磁学的角度对场和实物的各种基本属性作比较性阐述,供教学时参考.

关键词:电磁学 场 实物 波粒二象性

1 实物与场的历史发展历程

1.1 关于实物

实物通常是定域在空间的确定区域内,实物是物质的基本形态,在这里实物是指静止质量不等于

零的物质.也就是说,物质世界是由大量不可分割的实物粒子所组成,这些粒子具有广延性,不可入性和不变质量.生活中,小到分子、原子以及更小的组成颗粒,大到星球、星系、各种宇宙星体,都是实物.关于目前实物基本存在的形态如表 1 所示.

表 1 实物存在的形态

状态	形态	存在形式
日常状态	固、液、气、非晶态、液晶态	冰、水、空气、玻璃等
超高温	等离子态	存在恒星内部中的等离子体
超高压	超固态	恒星后期“白矮星” 原子塌缩,形成致密天体,密度远超固态物质
	中子态	恒星后期“中子星” 原子核塌缩,原子变成中子,密度比超固态高 9.6 万倍
超低温	超导态	水银的温度降到 4.173 K,即 - 269 ℃ 时,水银失去电阻
	超流态	液态氮的温度降到 2.17 K,即 - 270.98 ℃ 时,出现超流动态

1.2 关于场

通常把某个物理量在空间的一个区域内的分布称为场,场是物质存在的另一种形式.这种形式主要特征在于场是弥散于空间的,空间充满着各种不同的场,它们互相渗透和相互作用着.例如,在高压线附近存在着强大的电场,在我们周围的空间中传播着各种形式的电磁波.

1.2.1 场概念的萌芽

从古希腊起,哲学家就对场进行了探讨.亚里士多德指出所谓的“虚空”根本就不存在,空间是物体存在和运动的场所.17 世纪笛卡尔^[1] 追随亚里士多

德,主张真空不空,充满了各种以太旋涡产生作用,没有瞬时穿越虚空的超距作用.但是笛卡尔的以太物理学在定量描述方面存在困难,而且在经验事实受到反驳,在与牛顿力学的竞争中很快衰弱.从 18 世纪起,牛顿的超距作用观点占统治地位将近一个半世纪.他认为物体间的作用力不借助媒介,都是一种超距作用,这种传递不需要时间,而是一种直接、瞬息的相互作用.即物体 A 直接作用在物体 B 上,这种方式具体表现为 $A \Rightarrow B$.

1.2.2 场概念的诞生

19 世纪 30 年代,法拉第发现,当磁棒插入导线

圈时,导线圈中就产生电流.从而提出另一种观点,认为电流周围存在着由它所产生的“电应力状态”^[2].物体 A 对物体 B 的作用力,就是通过物体 A 的场对物体 B 的作用;物体 B 对物体 A 的作用力,就是通过物体 B 的场对物体 A 的作用.这种方式表现为

$$A \rightleftharpoons \text{媒介} \rightleftharpoons B$$

为此法拉第引进了磁场线的概念,认为电流产生围绕导线的磁场线,电荷向各个方向产生电场线,进一步建立起以介质中粒子的互邻作用为基础的静电感应理论,明确提出近距作用观点,并提出场的概念.他认为:电的相互作用是通过以太而传递的过程,并假定在电和磁体的周围存在着“场”.

1.2.3 场概念的发展

1856 年,在法拉第的基础上,麦克斯韦总结了电磁现象的规律,先后发表了《论法拉第线》《论物理力线》《电磁场的动力学理论》这 3 篇重要论文,并引进位移电流的概念.这个概念的核心思想是:变化着的电场能产生磁场.并且认识到物体之间相互作用的场相互独立的,即这种作用的表现形式如图 1 所示.

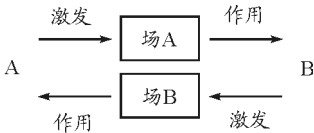


图 1 物体间场的相互作用表现形式

1865 年,在此基础上他提出了一组偏微分方程来表达电磁现象的基本规律^[3].

电场高斯定律

$$\oint_B \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{S} = q_0$$

磁场高斯定律

$$\oint_B \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$$

电磁感应定律

$$\oint_L \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$

安培环路定律

$$\oint_L \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = I_0 + \iint_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$

这套方程称为麦克斯韦方程组,它在电磁学中

的地位相当于力学体系中牛顿运动定律.麦克斯韦的电磁理论预言了电磁波的存在,并算出了其传播速度等于光速,这一预言的正确性后来为赫兹的圆弧形导线的放电实验和近代无线电的广泛实践所证实.于是人们认识到麦克斯韦的电磁理论能正确地反映了电磁现象的规律,并肯定了光也是一种电磁波.

1887 年,迈克尔孙和莫雷利用干涉实验否定了以太的存在.1905 年,爱因斯坦创立了相对论,加深人们对物质运动的认识和了解,并向统一场论的方向努力.场的发展历程如图 2 所示.

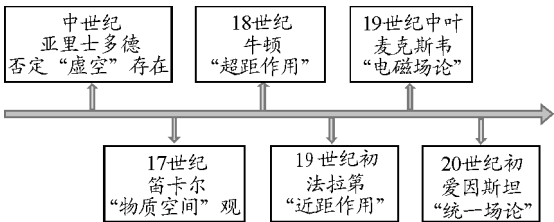


图 2 场的发展历程

2 场与实物的辩证统一

2.1 场和实物都是物质 不依赖于人们的意识而存在着

场和实物一样,有各种不同的形式,电场、磁场、核力场等.我们虽不能直接感受到场的存在,但可由场的作用而显现它的存在,如静电场,可用检验电荷受力显示它的存在,所以各种场都是客观存在的物质.

2.2 场和实物一样 具有物质的一切属性

(1) 场和粒子都具有动量,并遵守动量守恒定律.麦克斯韦根据电磁理论指出,当平行光垂直照射物体时,单位体积的电磁波动量^[4] 为

$$\boldsymbol{g} = \frac{1}{c^2} \boldsymbol{S} = \frac{1}{c^2} \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$$

1901 年,俄国物理学家彼得·尼古拉耶维奇·列别捷夫设计了一个实验,首次发现了光压,并测量了数据,取得的数据与理论一致.与此同时,美国物理学家尼科尔斯和哈尔也分别用精密实验测定了光的压力.光具有物质性,所以到达物体上,会对此物体产生一定的压力,而大量的光子长时间作用就会形成一个稳定的压力,宏观作用即有动量.如彗星在

我国民间有个形象的称号叫做“扫把星”，如图 3 所示哈雷彗星. 彗星的尾巴背着太阳就是太阳的光压造成的，彗星尾有大量的尘埃组成，大量的光子长时间对尘埃微粒作用就会产生一个稳定的压力. 当彗星靠近太阳的时候，这些尘埃微粒所受太阳的光压比太阳的引力大，所以它被太阳的辐射压推向远离太阳的方向而形成很长的彗尾. 我们所看到的“扫把星”的“扫把”就是这样形成的.



图 3 哈雷彗星

(2) 场和粒子都具有能量，并遵守能量守恒定律. 太阳光照在人们身上，把温暖传递给人们，这说明光具有能量. 场和粒子都具有能量，电磁场和电荷能量就到场和电荷之间转移. 如接收电磁波的过程中，电磁场作用于接收天线的自由电荷上，引起天线的电流，电磁波的一部分能量转移为接收系统上的电磁能量，且在转换过程中总能量是守恒的.

(3) 同时场和粒子都具有波粒二象性. 场是一种具有连续分布的物种形态，即具有连续性——波动性. 电磁场的基本粒子叫光子，光子的波动性由它产生的干涉、衍射等现象表现出来. 另一方面，场又具有微粒的特性，即不连续性——粒子性. 光的粒子性已被光电效应等许多实验所证实.

与场相似，实物由粒子组成，如电子、分子、原子等具有微粒性，表现不连续性，还具有波动性. 近代实验证实电子具有波动性，也具有干涉、衍射现象，其波长遵守 $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{h}{p}$ ，有力地证实了粒子的波动性.

2.3 场和实物粒子的相互作用

现代实验研究已表明，场和实物彼此是密切地相互关联着的，例如，1932 年发现：电子和正电子结合后能转变为巨大能量的光子. 电子、正电子“消失”，绝不是“物质的消灭”或“质量转变为能量”，电

子偶湮灭的同时产生了 γ 射线的形式的电磁波. 如

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma'$$

上式为实物粒子转变为场的实例.

反之当一个高能光子与一个带电荷量为 Ze 的重原子核作用时，光子消失，电子和正电子成对出现，这时电磁场又能转变为实物粒子（电子、正电子对）.

$$\gamma + Ze \rightarrow e^+ + e^- + Ze$$

上式为场产生实物粒子的实例. 场和实物的辩证统一如表 2 所示.

表 2 场和实物的辩证统一

项目	内容
性质	都是物质，存在形式多样
物理属性	具有动量、质量、能量、角动量、波粒二象性等
遵循基本规律	遵循电荷守恒定律、能量守恒定律、动量及动量矩守恒定律
互相转化	场和实物在一定的条件下，可以相互作用，相互转化

3 场和实物的特殊性

自然界中的物质存在形态多种多样，场和实物作为物质的两种基本形态，既有许多的相似点，同时也有它自己本身的特殊性.

3.1 场和实物的存在形式不同

一切实物都是由原子分子组成的，占有一定的空间，但是同一个空间不能同时为其他实物所占据. 与此相反，场是一种弥漫在空间的特殊物质，遵从叠加性. 同一空间内可存在许多不同的场，彼此保持独立，互不影响. 例如同一空间可以存在许多不同源的无线电波和光波. 不同场不仅可占有同一空间，实物和场还可以相互渗透，两者也可占有同一空间，这时对实物存在作用，而实物也影响场.

3.2 场和实物的质量与运动速度关系不同

洛伦兹把收缩假设用于电子，得到其关系式为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

但是光子没有静止质量，光子的质量和速度分别为

$$m_0 = 0 \qquad v = c$$

则电磁场的质量根据质能方程为

$$m=\frac{E}{c^2}$$

因此,电磁场的质量和实物的质量是不同的.真空中的电磁场始终以光速传播,因此物体始终无法达到光速.由于低速时遵循牛顿力学定律,所有物体都可以在力的作用下进行加速运动.但是对于电磁场,不存在加速度.真空中,光子只能以光速移动,否则根本不存在.当实物粒子遇到无弹性的障碍物时,它只会失去其动能和动量,并将其传递给障碍物;而电磁场碰到吸收的障碍物时,就会停止存在,并转化成为实物.

3.3 实物具有比场大得多的质量密度和能量密度

由于光速等于 $c=3\times10^8\text{ m/s}$,所以场的质量密度极其微小,只有在核反应时才能衡量场的质量大小.场的质量虽然小,但我们却容易发现场的能量,其原因就在于能量是质量的 c^2 倍.当用实物和电磁场运输同样的功率时,通过电磁场进行能量传递的

特征是质量几乎等于零,速度非常大,这正是现代生活中电磁场容易被利用的原因.

4 结论

综上所述,场和实物作为物质的两种存在形式,相辅相成,与我们的生活息息相关.因此学习电磁学知识离不开对物理基本概念的理解,不仅需要掌握好场所具有的物质的一般属性,同时也要清楚认识到它所具有的特殊性,才能形成正确的科学意识去解决相关问题.

参 考 文 献

1 张桂权.笛卡尔的空间观念及其现代意义[J].四川师范大学学报(社会科学版),2014(3):28~32
2 郭奕玲,沈慧君.物理学史[M].北京:清华大学出版社,2005.115
3 郭硕鸿.电动力学[M].北京:高等教育出版社,2008.14
4 赵凯华.电磁学[M].北京:高等教育出版社,2013.423~425

(上接第 81 页)

由柯尼希定理和碰撞过程的机械能守恒得

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}m_1v_{C10}^2+\\ &\frac{1}{2}J_1\omega_{10}^2+\frac{1}{2}m_2v_{C20}^2+\frac{1}{2}J_2\omega_{20}^2=\\ &\frac{1}{2}m_1v_{C1}^2+\frac{1}{2}J_1\omega_1^2+\\ &\frac{1}{2}m_2v_{C2}^2+\frac{1}{2}J_2\omega_2^2 \end{aligned} \tag{16}$$

将式(12)~(15)代入式(16),化简可得

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C10}+\boldsymbol{\omega}_{10}\times\boldsymbol{r}_{C_1A_1})-\boldsymbol{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C20}+\boldsymbol{\omega}_{20}\times\boldsymbol{r}_{C_2A_2})=\\ &\boldsymbol{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C2}+\boldsymbol{\omega}_2\times\boldsymbol{r}_{C_2A_2})-\boldsymbol{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C1}+\boldsymbol{\omega}_1\times\boldsymbol{r}_{C_1A_1})+\boldsymbol{I}_1\cdot\\ &(\boldsymbol{v}_{C2}+\boldsymbol{\omega}_2\times\boldsymbol{r}_{C_2O})+\boldsymbol{I}_1\cdot(\boldsymbol{v}_{C20}+\boldsymbol{\omega}_{20}\times\boldsymbol{r}_{C_2O}) \end{aligned} \tag{17}$$

由于 O 点只能沿着 MN 运动,可得

$$\boldsymbol{I}_1\cdot(\boldsymbol{v}_{C20}+\boldsymbol{\omega}_{20}\times\boldsymbol{r}_{C_2O})=0 \tag{18}$$

$$\boldsymbol{I}_1\cdot(\boldsymbol{v}_{C2}+\boldsymbol{\omega}_2\times\boldsymbol{r}_{C_2O})=0 \tag{19}$$

将式(18)、(19)代入式(17)得

$$\begin{aligned} &\frac{\boldsymbol{I}}{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C10}+\boldsymbol{\omega}_{10}\times\boldsymbol{r}_{C_1A_1})-\\ &\frac{\boldsymbol{I}}{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C20}+\boldsymbol{\omega}_{20}\times\boldsymbol{r}_{C_2A_2})= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\boldsymbol{I}}{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C2}+\boldsymbol{\omega}_2\times\boldsymbol{r}_{C_2A_2})-\\ &\frac{\boldsymbol{I}}{I}\cdot(\boldsymbol{v}_{C1}+\boldsymbol{\omega}_1\times\boldsymbol{r}_{C_1A_1}) \end{aligned}$$

也就是 $v_{10n}-v_{20n}=v_{2n}-v_{1n}$,即碰撞前后,沿碰撞力的方向上相对速度大小相等.

若刚体乙只能绕 O 点无摩擦地定轴转动,则在碰撞过程中刚体乙也会受到一个过 O 点的冲量 $\boldsymbol{I}_2$,则可认为光滑槽沿着与 $\boldsymbol{I}_2$ 垂直的方向,所以 $v_{10n}-v_{20n}=v_{2n}-v_{1n}$ 也显然成立.

由上证明可见,平面平行运动的刚体不管是否受到理想约束,在弹性碰撞过程中,碰撞前后沿碰撞力的方向上相对速度大小相等,利用此关系列出的方程为一次方程,可以代替能量守恒与动量、角动量相关的关系式一起求解碰撞之后刚体运动各参量.

参 考 文 献

1 陈铁松.平面平行运动的刚体弹性碰撞问题的探讨[J].物理通报,2020(7):55~56
2 漆安慎,杜婵英.力学[M].北京:高等教育出版社,2012.97,86,175,154,458