

# 静电场中的模型建构例析\*

陈伟孟

(中国人民大学附属中学 北京 100080)

马朝华

(北京市海淀区教师进修学校 北京 100195)

(收稿日期:2019-12-19)

**摘要:**依据中学物理基础知识,就静电平衡时导体表面的净电荷分布情况进行模型建构,对电荷分布密度和尖端易放电等物理现象进行力学和能量角度的建模解释和科学推理分析,对相关静电力和重力进行类比诠释,实现学生学习电学问题的科学认知进阶,以及模型结构和科学推理能力的发展.

**关键词:**电荷密度 静电平衡 物理建模 科学推理 知识进阶

物理观念、科学思维和科学探究是高中物理核心素养的重要方面,应在物理教学中形象建构、诠释一些物理概念和现象,以达到降低思维难度的目的.2017年版《普通高中物理课程标准》就“静电场”部分给出的活动建议:“通过观察、查阅资料等方式,了解避雷针的结构和基本原理,撰写一篇研究报告.”静电现象特别是静电平衡属于高中物理中需要定性了解的知识要点,同时也是教学难点,对于“了解”层次的知识点,应以直观性和科学性为指导原则进行形象化和直观化的处理,以达到有效提升教学效果和发展学科核心素养的目的<sup>[1]</sup>.模型建构和科学推理是构成科学思维的主要成分,建模方法是科学研究的常用方法,模型思维是一种重要的科学思维,创设基于建模的科学学习环境,促进学生建模思维的发展<sup>[2]</sup>.

## 1 模型建构

一个导体,不论原来是否带电,将其放入电场区域以后,都会由于静电感应而在导体的不同部位出现电荷.静电平衡时,导体上的电荷分布有以下两个特点:

(1) 导体内部没有净电荷,净电荷只分布在导体的表面.教材对此利用反证法解释如下:这是因为,假如导体内部有电荷,导体内部的电场就不可能

为零,自由电荷就会发生定向移动,导体也就还没有达到静电平衡状态.

(2) 在导体外表面,越尖锐的位置,电荷的密度(单位面积的电荷量)越大,凹陷的位置几乎没有电荷.教材对此给出的解释如下:关于这一点,不妨设想一个极端情形的例子,一支缝衣针,带电后由于同种电荷相互排斥,电荷自然要被“挤”到针的两端.

这两个特点在人教版高中物理教材中均有描述,如何让这些科学结论更容易被学生理解接受,是教学中需思考的问题,此处适合进行物理模型的构建.关于特点(1),反证法可以达到直观证明的目的,因为电荷会形成电场线,电场线从正电荷出发,到负电荷截止.适合直接采用反证的思维:如图1所示,若导体内部有净电荷,内部的电场就不可能为零,自由电荷就会在电场力作用下发生定向移动,即非静电平衡状态,因此矛盾.这个结论在大学物理阶段可用高斯定理进行论证,在高中阶段用反证思维更直观妥当<sup>[3]</sup>.

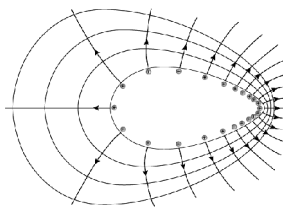


图1 非球状导体表面电荷分布

\* 北京物理学会2020—2021年度重点课题“科学研究视角的高中物理教学研究”,课题编号:WLXH201013;北京市海淀区教育科学“十三五”规划重点课题“物理学业质量评价中的核心素养研究”,课题编号:HDGH20190204

至于特点(2),教材中如图1呈现的“一头大一头小”的非球状导体周围的电场线和等势面定性地描述了该特点:在导体外表面,越尖锐且凸出的位置,电场线越密,意味着电荷的密度越大.但教材中给的缝衣针针尖的例子并不能有效解释和解决学生的困惑,可进行更形象化的力学建模方式处理.自由电荷分布在导体的表面,此处“自由电荷”中“自由”的含义并非绝对的,而是相对的:电子可以在导体表面自由移动,但是要想摆脱金属的吸引离开导体,至少得克服“逸出功”,犹如我们人类能“自由”地在地球表面行走,但是本身不能摆脱引力的束缚而离开地球,而需要借助于火箭等外在工具实现.

**【模型1】**运用最基本力学知识进行分析:如图2所示,除了导体对电荷的表面吸附力之外,同种电荷间还存在着库仑排斥力,位于尖端处的代表电荷A、B间相互排斥,将该排斥力进行正交分解成沿着表面的切向矢量 $F_{\parallel}$ 和垂直表面的法向矢量 $F_{\perp}$ .法向分量的作用效果是使电子具有离开表面的趋势,但通常情况下该力要比金属表面的吸附力要小,不足以使电子离开;切向分量的作用效果是让电子在表面移动,由图2可知,尖端处的切向分量占的比例要小得多.同理,若电荷C、D是位于较平缓的表面,在相同间隔距离的情形下,排斥力的切向分量会占绝大部分,容易使电子间的距离较大,即宏观效果是使得电荷面密度较小.因此,学生就容易明白为什么曲率越大的地方,面电荷密度会越大.

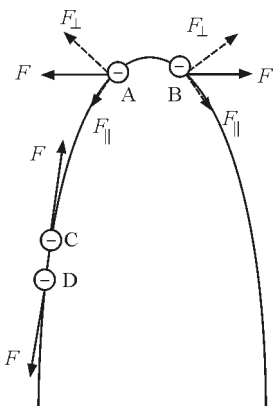


图2 导体不同曲率半径表面电荷受力比较

**【模型2】**空间中若存在半径为 $R$ 的孤立导体球,所带净电荷量为 $Q$ ,在这种情况下,电荷均匀分布在球体表面,导体球是一等势体,导体球外空间的场强和电势等效于将 $Q$ 的电荷量集中在球心位置.

导体球表面电势为 $\frac{kQ}{R}$ ,球外空间距离球心为 $r$ 处的电势为 $\varphi_P = \frac{kQ}{r}$ ,犹如所有的电荷都集中在球心一样.该球处与无限远处的电势差为 $U = \varphi_P - \varphi_{\infty} = \frac{kQ}{R}$ .导体球能存储电荷,相当于一电容器,根据电容定义式得 $C = \frac{Q}{U} = \frac{R}{k}$ ,即导体球的电容与球半径成正比.如图3所示,两个半径分别为 $R_1$ 和 $R_2$ 的带电导体球通过一足够长导线连接,由于静电平衡,电势相等,其所带电荷量应满足 $\frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2}$ ,换算成电荷在导体球表面的面密度 $\sigma$ 则是 $\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2$ ,可知曲率半径越大的地方,电荷密度和场强是越小的.显然,通过导线连接的两导体球并不构成典型的具有可变曲率半径的导体.然而,该结果有助于学生对导体表面电荷密度的变化情况形成定性的了解.

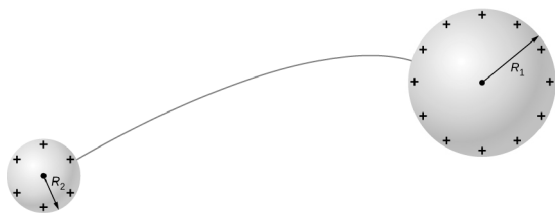


图3 一长导线连接的两带电导体球

## 2 模型类比

“在导体外表面,越尖锐的位置,电荷的密度越大,凹陷的位置几乎没有电荷.”教科书如是阐述,学生肯定会有疑问“为什么凹陷的位置几乎没有电荷呢?”教学中可以应用上述模型进行如下科学推理,通过力学平衡和机械能最小来解释.

如图4所示,处于平衡状态的物体,由于外界某种微小的作用而偏离了平衡状态时,所谓稳度的不同,物体的平衡状态可分为几种基本情形:稳定平衡;不稳定平衡;随遇平衡.这些平衡状态的区分,应视我们放置该物体的平衡位置而定,结合学生的日常生活实际理解.

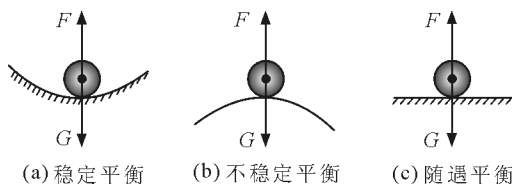


图4 平衡类型

(1) 稳定平衡:凡能在被移动离开它的平衡位置后,仍试图回到其原来位置(此时其重心比较低)从而恢复到原来的平衡状态的物体,它原来的平衡状态叫“稳定平衡”,同时平衡时也对应着机械能最小的状态.例如,圆球体在一个凹进的圆盘中时属于稳定平衡状态[如图4(a)].

(2) 不稳定平衡:处于平衡状态的物体,由于受到某种外界微小的作用,如果物体稍有偏离就不能恢复到原来的平衡状态,这种情况叫“不稳定平衡”.例如,当一个圆球体放在一个凸起的圆盘上[如图4(b)],或是一个圆锥体,以其尖端竖立在一个平面上,这些物体都处于不稳定平衡状态.翻倒后,一直要等到它们的重心相对地取得最低位置时,这些物体才会静止不动.即任何微小的运动都能使其重心降低的物体,一定处于不稳定平衡状态之下.

(3) 随遇平衡:如果物体在外界作用下,它的平衡状态不随时间和坐标的变化而改变,这种状态叫“随遇平衡”.例如,当一个圆球体停在一个水平平面上时[如图4(c)],或是一个圆锥体以其外壳的一条边线与平面相接触,即横向放在一个水平平面上时,都会出现随遇平衡状态.这些物体如被移置到一个新的位置时,虽然它们不能自动地恢复其原来的位置,但它们在新的位置上,却仍能停住不动,其重心之高度,亦保持不变.一般说来,任何微小之运动,既不能将其重心提高,亦不能使其重心降低之物体,一定处于随遇平衡状态之下.

上述几种平衡状态,是处于重力场以及其他有势场的物体在场作用下的平衡情况,处于有势场的物体都有向势能较小位置运动的趋势.稳定平衡是指物体处于势能最小位置,当稍有微小扰动,令其离开平衡位置,外界必须对它做功,势能增加,在扰动后物体将自动回到原来势能最小的位置.所谓不稳定平衡是指物体处于势能最大时的平衡.任何微小的扰动即能引起重力对它做功,势能继续减小,不能再自动恢复原状.而随遇平衡的物体,受到扰动,势能将保持不变,在任意位置可继续保持平衡.根据静电力和重力的共性进行类比,对应于导体表面的净电荷,由于净电荷都分布于表面,且相互之间具有电场排斥力,即处于有势场的作用中,电荷处于电场排斥力和金属表面吸附力的作用中.因此,尖端位置对应于图4(a)所示的稳定平衡位置,因此电荷密度较

大;凹陷位置对应于图4(b)所示的不稳定平衡位置,因此凹陷处几乎没有电荷.

### 3 总结

综上所述,根据模型建构和科学推理,围绕静电场力的性质和能的性质,在通常情况下,处于静电平衡状态的导体在凹陷处几乎没有电荷,而越尖端处电荷密度越大,电场线越密集,容易引起尖端放电.如图5所示,足够大的场强可能会导致空气分子发生电离的现象,解释该现象后能进一步促进学生了解和解释避雷针的结构和基本原理,运用所学的科学知识去解释生活中的自然现象,关联能量观念的形成.建构模型有助于帮助学生抓住事物的关键要素,加深对概念、过程和系统的理解,形成系统思维.高中阶段的学生能正确理解和应用一般的科学思维方法,从定性的角度进行科学推理,找出规律,形成结论,并能解释自然现象和解决实际问题.通过观察、实验与科学思维相结合,是物理学科的基本特征,围绕物理学科的核心素养进行逐步的模型建构,进行静电场与重力场中“力”和“势”的类比,达到深化认识电荷分布、尖端放电、力电综合等物理本质的目的,实现学生的学科认识由力学到电学的过渡和进阶<sup>[4]</sup>.



图5 避雷针与放电现象

### 参考文献

- 1 普通高中教科书物理·选修3-1[M].北京:人民教育出版社,2010
- 2 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准(2017年版)[S].北京:人民教育出版社,2018
- 3 沈宗绍.静电平衡时导体上电荷的分布初探[J].物理通报,2013(8):46~49
- 4 马朝华.对物理教学中科学论证的认识与实践[J].物理教学,2018(11):9~11