

对静电屏蔽的新认识

姚丽青

(山西大学物理电子工程学院 山西 太原 030013)

(收稿日期:2015-03-18)

摘要:通过对导体静电平衡时静电场中各处电场强度的分析,对静电屏蔽的概念做了新的解释.

关键词:电场强度 导体 静电平衡 静电屏蔽

大学物理教材中关于静电屏蔽现象都是通过导体壳或空腔导体在静电场中达到静电平衡状态时的情况做分析来解释的.我们来引述两个对静电屏蔽现象的解释:“导体壳内部电场不受壳外电荷的影响,接地导体壳使得外部电场不受壳内电荷的影响,内部电荷对外界也不影响.这种现象称为静电屏蔽”^[1];“置于静电场中的导体空腔达到静电平衡时,空腔内部没有电场,电场线只能从导体外表面发出或终止,即使外部电场发生变化,也只能引起导体空腔外表面上电荷的重新分布.这样,导体壳对外界静电场起了‘隔离’作用,这种现象称为静电屏蔽”^[2].这样导致人们对静电屏蔽现象中的导体的印象似乎有了固定形状,那就是导体只能是空腔导体,屏蔽只能对空腔内外.下面我们通过具体例子说明对静电屏蔽可以有新的理解.

1 静电平衡时导体表面处的场强

静电屏蔽现象一定发生在导体处于静电平衡状态时.导体处于静电平衡状态时,导体内部场强处处为零,导体表面外侧场强处处与表面垂直,导体上的电荷只能分布在导体表面上.

导体表面上任一点 P 处的外法线方向单位方向矢量为 \mathbf{n} ,则 P 处的电场强度 \mathbf{E} 与导体表面的面电荷密度 σ 间的关系为

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \mathbf{n} \quad (1)$$

2 对 $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ 式的解析及其应用

公式(1)中的面电荷密度 σ 是导体处于静电平

衡时导体表面任一点 P 的电荷面密度,而 \mathbf{E} 却不只是由导体表面 P 点的电荷产生,而是该导体上的全部电荷和周边其他带电体上的电荷在 P 点处所产生的场强的矢量和,是空间所有电荷对 P 点的场的集体贡献.之所以能够只用导体表面处的面电荷密度来表示场强 \mathbf{E} ,是因为导体静电平衡时各处的面电荷密度 σ 的大小已经由静电场的唯一性定理确定.即“有若干个导体存在时,在给定的一些条件下,空间的电场分布和导体表面的电荷分布是唯一地被确定的.”^[3] 若干个导体共同存在时,各导体上的电荷相互影响相互制约,各处 σ 的大小最终满足静电平衡条件的需要, σ 的大小已经反映出其他电荷存在的因素,是产生电场的电荷源共同协调的结果.在下面的例1中我们用式(1)求解静电场.

【例1】如图1所示,有一大块金属板 A ,面积为 S ,带有电荷 Q_A ,今有另一带电荷为 Q_B 的相同的金属板平行地放在 A 板的右侧(板的面积远大于板的厚度),试求 A, B 两板上电荷的分布及空间电场强度分布^[1].

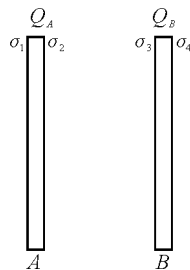


图1

解析: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 为 A, B 两板静电平衡时4个

外表面的面电荷密度,直接用大学物理教材^[1]求得的结果

$$\sigma_1 = \sigma_4 = \frac{Q_A + Q_B}{2S}$$

$$\sigma_2 = -\sigma_3 = \frac{Q_A - Q_B}{2S}$$

教材^[1]在求解空间各区域的场强时,将A,B两板的4个表面看做4个无限大带电平板,先给出它们各自在各区域的场强,然后再叠加求出各区域的场强.我们现根据式(1)求得各区域的场强如下:

A板左侧

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} = \frac{Q_A + Q_B}{2\epsilon_0 S} \quad \text{方向向左}$$

两板之间

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\epsilon_0} = \frac{Q_A - Q_B}{2\epsilon_0 S} \quad \text{方向向右}$$

或

$$E_2 = \frac{\sigma_3}{\epsilon_0} = \frac{Q_B - Q_A}{2\epsilon_0 S} \quad \text{方向向左}$$

B板右侧

$$E_3 = \frac{\sigma_4}{\epsilon_0} = \frac{Q_A + Q_B}{2\epsilon_0 S} \quad \text{方向向右}$$

显然这种方法简单,且通过对式(1)的应用使学生更好地理解静电平衡时导体表面处的场强与表面电荷面密度之间的关系.

【例2】如图2所示,一个半径为 R_1 ,带电荷量为 q_1 的金属球,放在另一个带电同心金属球壳内,球壳内、外半径分别为 R_2 和 R_3 ,球壳上带电荷量为 q .求此系统的电荷、电场分布.

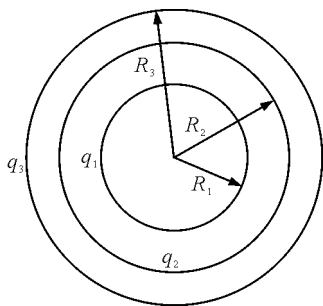


图2

解:求电荷分布.

设球壳内、外表面电荷量为 q_2, q_3 .

由静电平衡条件知 q_1 分布在球表面上,由高斯

定理及电荷守恒定律知

$$q_2 = -q_1$$

$$q_3 = q - q_2 = q + q_1$$

求电场分布.

我们做半径为 r 的同心球面为高斯面,用高斯定理可解得,在 $r < R_1$ 区域,有

$$E = 0$$

在 $R_1 < r < R_2$ 区域, r 处场强为

$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{-q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

也可以表示为

$$E = \frac{q_1}{\epsilon_0 S} = \frac{\sigma_1}{\epsilon_0}$$

或

$$E = \frac{-q_2}{\epsilon_0 S} = \frac{-\sigma_2}{\epsilon_0}$$

方向沿 r 方向, S 为 r 处球形高斯面的面积.

在 $R_2 < r < R_3$ 区域, $E = 0$.

在 $r > R_3$ 区域, r 处场强为

$$E = \frac{q + q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

或

$$E = \frac{q_3}{\epsilon_0 S} = \frac{\sigma_3}{\epsilon_0}$$

方向沿 r 方向, S 为 r 处球形高斯面的面积.

两例中各处场强的大小均可以用式(1)形式表示,面电荷密度的含义与(1)中有些变化.只在导体表面处是场点各处实在分布于导体表面上的面电荷密度,在其他场点处面电荷密度为各区域中“源”电荷或“汇”电荷均匀分布于场点处高斯面上与场强方向垂直部分的面电荷密度大小,这个结果反映了场源间的关系.

3 对静电屏蔽的新解释

例1中的导体是两块平行金属板不是壳形导体,似乎和静电屏蔽无关,下面通过此例我们对导体的静电屏蔽现象做个新的解释.此例的求解会让初学者产生疑问为什么A板左侧区域的场只由 σ_1 产生,B板右侧区域的场只由 σ_4 产生,两板之间区域的场由 σ_2 产生或者 σ_3 产生.此例中两导体静电平衡时

A板内部场强处处为零的条件作为A板左侧区域的右边界条件,使得A板左侧区域的场可以由 σ_1 单独确定,即A板屏蔽了 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 对此区域的影响,此区域中电场线从板指向无穷远处.同理B板右面区域的场可以由 σ_4 单独确定,B板屏蔽了 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 对此区域的影响,此区域中电场线从板指向无穷远处.对于两板间的区域,电场线从A板指向B板,场的左右边界场强都为零.各区域场强只由产生场的“源”(正)电荷面密度 σ_2 或“汇”(负)电荷的面密度 σ_3 确定,不能同时考虑两者,方向从“源”指向“汇”,两板将 σ_1, σ_4 对此区域的影响屏蔽掉.从此例中的3个区域看,各处场强的大小只由电场线一端的电荷决定,各区域的电场线只在场边界处即各导体的表面发出或终止,导体板隔断了电场线,各区域场中电场线连续.例2中 q_1 分布在金属球外表面, q_2 分布在金属球壳的内表面, q_3 分布在金属球壳的外表面.金属球表面屏蔽掉电荷 q_1, q_2, q_3 对 $r < R_1$ 区域电场的贡献;球壳屏蔽掉电荷 q_3 对 $R_1 < r < R_2$ 区域电场的贡献,此区域的场源电荷为 q_1 或 q_2 ;球壳两表面屏蔽掉电荷 q_1, q_2, q_3 对 $R_2 < r < R_3$ 区域电场的贡献,此区域无场源电荷,场强为零;球壳 $r > R_3$ 区域,球壳屏蔽掉电荷 q_1, q_2 对 $r > R_3$ 区域电场的贡献,此区域内场源电荷只有 q_3 .

纵观例1和例2,各导体在静电平衡时,分布于空间的导体将导体外空间分隔成几个区域,导体达到静电平衡时各个区域中的静电场,自成一个连续的局域场,各个场中各点的场强由电场线源点或汇

点的电荷决定,与其他场域的电荷无关.电场线从一个边界出发终止于另一边界,或从一边界出发指向无穷远处(从无穷远处终止于一边界).分隔空间的导体对各个场域空间起到了屏蔽的作用,这是对静电屏蔽概念的新解释.导体在静电场中处于静电平衡状态时导体内部场强处处为零的条件正是导体能够静电屏蔽的原因,我们这里理解的屏蔽不只是各教材上所举例说明提到的空腔导体将导体内外一方电荷的场对另一方屏蔽,而是类似例1那样只要导体足够大可以将空间分区分隔(无限长电缆也可以),导体就可以将静电场阻断对各区域空间产生屏蔽的效果,导体内部空间的零电场起到分隔屏蔽的作用.

4 结束语

通过对两个(多个也一样)导体同时存在时静电场的分析,对静电屏蔽做了新的解释.在求解静电场问题的时候,可以用高斯定理与场强叠加原理求解,也可以用导体的静电平衡条件来求解.

参考文献

- 1 赵近芳,王登龙,等.大学物理学(下)(第3版·修订版).北京:北京邮电大学出版社,2011.26~27
- 2 吴泽华,陈治中,黄正东.大学物理(中).杭州:浙江大学出版社,1998.56
- 3 张三慧编著.大学物理学·力学、电磁学(第三版).北京:清华大学出版社,2009.288

New Understanding on Electrostatic Shielding

Yao Liqing

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030013)

Abstract: When a conductor is at its static balance status, one can get new interpretation of electrostatic shielding based on the analysis of the electric field intensity.

Keywords: electric field strength; conductor; electrostatic equilibrium; electrostatic shielding