# 58．如何认识平行板电容器的电荷分布与存储的能量？

平行板电容器是最简单、最基本的电容器。电容器的功能一是储存电荷，二是储存能量。平行板电容器的电荷都均匀地分布在内表面，其电场强度由面电荷密度决定。它储存的能量可以认为是两板间电场的能量。

平行板电容器是最简单、最基本的电容器，其他各种实用的电容器都可以看作是平行板电容器的变形。电容器是一种能够存储电荷和电能的装置，下面对这两个方面进行一些讨论。

## 一、平行板电容器的电荷分布

平行板电容器由两块面积相等的金属板平行正对放置而成，中间充有介质（可以是空气或其他介质），两板带有等量异种电荷，一个板上的电荷量 *Q* 称为它的带电量，这些电荷都均匀地分布在相对的两个表面上，其内部是匀强电场（本文不讨论边缘的效应，下同），如图 1 所示。

图 1 平行板电容器电荷均匀分布在内表面

电荷为什么会这样分布，有如下几种解释：

①通俗的定性解释：两板带有等量异种电荷 + *Q* 和 − *Q*，它们相互吸引，因此聚集在两个相对的表面，而两板的外侧则没有电荷。同一个极板上的电荷是同种电荷，它们之间相互排斥，尽可能均匀地分散开来。

②用电场线解释：某面积为 *S* 的平行板电容器带上电量为 *Q* 的电荷，其内部是匀强电场，它酌电场线相互平行且间距相等，设共有 *N* 条，则每一条电场线对应着极板上 *S*/*N* 的面积。而每一条电场线都是由电量为 *Q*/*N* 的电荷产生的，则意味着每一块 *S*/*N* 的面积上分布着 *Q*/*N* 的电荷，因此电荷在极板上是均匀分布的。

③用高斯定理解释：高斯定理是静电学中的重要定理，它可以由库仑定律和场强叠加原理推导出来，我们这里不做推导，只是把定理写在下面：穿过任意闭合曲面的电场强度通量 *ΦE*，等于该面所包围的所有电荷的代数和 $\sum\_{(S内)}^{}q\_{i}$ 除以 *ε*0，与闭合曲面外的电荷无关。即

*ΦE* = $\sum\_{(S内)}^{}q\_{i}$

在平行板电容器所在的空间取一个长方体形状的高斯面，如图 2 中的虚线长方形 ABCD 所示，它包围了整个上面极板，只有 AB 面有电场线穿过，穿过它的电场强度通量 *ΦE* = *E*·*S*，式中 S 为两极板正对的面积，根据高斯定理，它等于该高斯面内部的所有电荷除以 *ε*0，*ΦE* = *E*·*S* = ，*Q* 为一个极板所带电荷的电荷量。

图 2 取高斯面 ABCD

A

B

C

D

把所取的高斯面缩小为 AʹBʹCʹDʹ，使它的 AʹBʹ 面的面积为 *S*/*N*，穿过它的电场强度通量为 *ΦE*ʹ = *E*·*S*/*N* = ，由于我们所取高斯面 AʹBʹCʹDʹ 的位置可以左右任意移动，这就说明了电荷在整个极板的表面上的分布是均匀的。

图 3 高斯面缩小为 AʹBʹCʹDʹ

Aʹ

Bʹ

Cʹ

Dʹ

平行板电容器内部的电场强度 *E* 决定于极板上的面电荷密度 *σ*，即单位面积上的电荷量 *σ* = ，电容器内部电场强度的大小为 *E* = 。

## 二、平行板电容器的储能

电容器充电后，极板带上一定量的电荷，同时存储了一定的能量．这个能量一般称为电能。什么是电能？它是由谁做功，由什么能量转化而来的？用什么形式，存储在什么地方？

电容器充电一般是由电源完成的，如图 4 所示，把一个平行板电容器的两个极板分别连接到一个直流电源的两极上，电路中还串联着一个保护电阻 *R* 以及一个开关 K。未充电前，两极板没有带电，也就没有电压，当然也没有存储电能。闭合开关 K，接通电源，给电容器充电，使得电容器的 A 板带上正电荷、B 板带上等量负电荷。充电过程可以等效于把自由电子从 A 板陆续转移到 B 板，在电容器两极板已经充有电荷的情况下，转移电子的过程需要克服静电斥力的阻碍作用而做功，做功所需的能量由电源提供，这部分能量转化为电势能存储在电容器中。

图 4 充电过程电源做功

A

B

K

*R*

我们用“慢镜头”的形式看这个充电过程：假设自由电子是一个一个陆续被转移过来的，移动第 1 个电子的过程，由于 A、B 两板没有电荷，也就没有电压存在，因此不需要做功，而从移动第 2 个电子开始，由于电容器两板间有了电压，它起到了阻碍充电电流的作用，因此需要为克服这个阻碍作用而做功并消耗电源的能量。设电容器电容为 *C*，电容器已带电荷为 *q*，则两板间电压 *U* = ，则再移动一个电子需做的功为 *Wi* = *Ue* = *e*。我们把各次移动电子所做的功分别写下来：

移送第 1 个电子做功 *W*1 = 0；

移送第 2 个电子做功 *W*2 = ；

移送第 3 个电子做功 *W*3 = ；

移送第 4 个电子做功 *W*4 = ；

……

移送第 *N* 个电子做功 *W*N =

所做的总功就等于电容器储存的能量，

即 *E*电容器储能 = $\sum\_{1}^{N}W\_{i}$ = （0 + 1 + 2 + … + *N* − 1）= 。

由于 *Ne* = *Q*，可以近似地把（*N* − *1*）看作 *N*，因此得 *E*电容器储能 = 。

电容器存储的电荷 *Q*、电压 *U* 与电容 *C* 间的关系是 *Q* = *CU*，因此也可以用另外的形式表示，即 *E*电容器储能 = = *QU* = *CU*2。

## 三、电容器的能量储存在哪？

对于充电后保持稳定的电容器来说，它内部的电场是静电场，静电场与电荷是密不可分的，电容器储存的电能，可以有两种理解。

①认为这部分电能由电荷携带和储存，从我们上面简单的推导过程看，就是从一个原来没有带电的电容器到带电荷量为 *Q*（相应的电压为 *U*）的过程中外界对它做的功，这部分能量就是该带电系统的静电能，即电势能。

②认为这部分能量由电场携带和保存，电场散布在空间，对于平行板电容器来说，其电场完全分布在两极板之间的空间内，该电场是匀强电场，电场强度处处相同，方向相同，且大小都是 *E* = 。

设该电容器的两极板正对面积为 *S*，两极板间距离为 *d*，则它的电容 *C* = = 。已知电场的能量密度 *ρ*电场 = *ε*0*E*2，则上述平行板电容器内部电场的总电场能为

*E*电场 = *ρ*电场·*Sd* = *ε*0（）2·*Sd*

而 *σ* = ，*C* = ，因此 *E*电场 = *ε*0（）2·*Sd* = 。

这与我们前面计算出的 *E*电容器储能 的结果相等，说明电容器存储的电能，既可以说成是电荷携带和储存的电势能，也可以说成是电场这种物质携带的电场能。

但是，电容器主要应用在交流电路中，这时的电容处于不断地充电与放电交替进行的过程中，其电场不再是静电场，特别是高频振荡电路中的电容器，其电场迅速变化而产生同频率的变化的磁场，变化的磁场又产生变化的电场，这样，变化的电场和磁场交替产生并向外传播，即产生电磁波，电磁场携带着能量向外传播，因此，说电容器储存的电能是电场能，则更为确切。