# 51．库仑定律的适用范围是什么？能实验验证吗？

库仑定律的适用范围：①点电荷，真实的带电物体如果它的本身大小与它们之间的距离相比较可以忽略，则可以认为是点电荷。球形的绝缘体，如果电荷均匀分布，可以看作电荷位于球心处的点电荷。②电荷是静止的，其周围电场是静电场，电场线呈对称的放射形分布，如果电荷是运动的，则其周围电场的分布情况要发生改变。③电荷位于真空中，如果有介质存在，它会被极化，从而影响相互作用力。

库仑定律是静电学中第一个定量的基本规律，是整个电磁学的基础。高中物理教科书关于库仑定律的表述一般是：两个静止的点电荷 *q*1 和 *q*2 在真空中相互作用力 *F* 的大小跟 *q*1 和 *q*2 的乘积成正比，跟它们距离 *r* 的平方成反比；*F* 的方向在它们的连线上，同种电荷相斥，异种电荷相吸。这段话中的“点电荷…”“静止”“真空中”就是库仑定律的适用条件，或者说是适用范围。下面分别对这三个条件进行必要的说明。

## 一、库仑定律是点电荷的相互作用规律

相互作用的电荷必须是“点电荷”。点电荷是指没有大小的电荷，显然，它是一种理想模型，可以说任何带电物体都有大小，不存在真正的点电荷。但只要电荷本身的大小对于两个电荷间的距离而言可以忽略不计，这两个电荷间的相互作用力就满足库仑定律，就可以认为是点电荷。

万有引力定律是两个质点间的相互作用规律，在学习万有引力定律时我们知道，质量均匀分布的球形物体，不论与其他物体距离的远近，都可以看作质量集中于球心处的质点。与此相似，绝缘球形物体均匀带电，不论与其他带电体距离的远近，都可以看作一个电荷集中于球心处的点电荷。

球形导体带电后，如果不受外界电场的影响，其电荷均匀分布于外表面，可以将其看作电荷集中于球心处的点电荷，但当两个带电球体之间的距离不满足远大于导体球本身的线度时，导体球上的电荷分布要发生改变，不再均匀分布。例如，两个带同种电荷的金属球相距较近时，就不能被看作电荷集中于球心的点电荷。

## 二、库仑定律只适用于静止电荷

只有两个静止的点电荷的相互作用，才遵守库仑定律，这是因为静止电荷周围的电场是静电场。静止的点电荷的电场线呈放射状均匀分布，如图 1（a）所示。如果该点电荷是运动的，则它电场线的分布情况要发生改变，如图 1（b）所示，当电荷处于运动状态时，沿运动方向电场线的分布变得稀疏，而垂直于运动方向电场线的分布则变得密集。

图 1 正点电荷的电场线分布情况

（a）静止点电荷的电场线

（b）运动点电荷的电场线

*v*

运动和静止都是相对的，它与选择的参考系有关。如果有两个点电荷，带电量分别是 *q*1 和 *q*2，相距为 *l*，保持相对静止，对于某个参考系，它们都是静止的，它们之间相互作用的静电力 *F* 满足库仑定律，其大小 *F* = *k* ，但如果变换到另一个参考系，这两个电荷虽然仍保持相对静止，但都已经变成了运动电荷，它们之间相互作用的静电力就不能用库仑定律计算了，即 *F* ≠ *k* 。还要说明一点，两个相对静止的点电荷，在与它们相对静止的参考系中，相互间的作用力只有电场力，而没有磁场力，而对于另外的参考系而言，它们都是运动的电荷，它们之间的相互作用力，既有电场力，也有磁场力。因此，有必要提醒教师，在电磁学的教学过程中，我们一般以地面为参考系（当作惯性参考系），注意不能随便变换参考系，即使是惯性参考系，这与在力学的教学中是不同的。在力学中，从一个惯性参考系变换到另一个惯性参考系，变换遵守的规律是伽利略变换规律，而在涉及电磁场的问题时，不论运动速度多大，都不再遵守伽利略变换规律，而是遵守洛伦兹变换规律，即相对论的变换规律。对于电磁变换的深入讨论，请参看大学物理有关书籍，本文不做深入讨论，仅给出几个简单的结论。

①普遍的洛伦兹力的公式是 ***f*** = *q****E*** + *q****v***×***B***，其中第一项是电场力，第二项是磁场力。

②与运动点电荷 *q* 距离为 *r* 的点电场的大小 *E* = ··，式中 *β* = *v*/*c*，*v* 为点电荷 *q* 的运动速度，*c* 为光在真空中的速度，*θ* 为径矢（即从 *q* 到另一个与其发生作用的点电荷处的矢量）与速度 *v* 之间的夹角，可见，运动的点电荷的电场线不再是呈放射状均匀分布的。

③运动点电荷的磁场 ***B*** = ***v***×***E***。可见磁场与电场是相互联系的。

如果有甲、乙两个点电荷，甲保持静止而乙在运动，是否可以应用库仑定律计算二者间的相互作用力呢？由于甲电荷静止，甲的周围只有电场而没有磁场，乙受到甲的电场的作用力，可以利用库仑定律进行计算；而甲受到乙的作用力不能应用库仑定律计算，因为乙是运动的电荷，它的电场的电场线分布情况与静止时不同，同时乙的周围还有磁场，甲受到乙的作用力包括电场力和磁场力两项。

## 三、库仑定律要求电荷处于真空中

在真空环境中，库仑定律显然是成立的，问题是如果所在的空间中存在介质，是否库仑定律就不成立了呢？对此存在着不同的理解。

如果两个点电荷所在空间充满了某种介质，则介质在电场中会被极化，极化产生的束缚电荷对两个点电荷都有作用力，这个作用力与原来两个点电荷之间的相互作用力叠加，使得点电荷所受的电场力与在真空中相比发生了改变。

①如果把“两介点电荷间的相互作用力”与“介质极化产生的束缚电荷对点电荷的作用力”分开来看，仅就“两个点电荷间的相互作用力”而言，它并不因为束缚电荷的存在而有所改变，因此库仑定律仍然成立。

②如果认为库仑定律中所说的“相互作用力”是指“两个点电荷间的相互作用力”与“介质极化产生的束缚电荷对点电荷的作用力”的合力，那么介质的存在的确是有影响的，这又要分两种情况讨论：

a．如果介质是均匀的，则库仑定律仍然成立，即“相互作用力”仍然跟两电荷的电量乘积成正比、跟它们距离的平方成反比，只是比例系数 *k* 要发生改变。

b．如果介质是不均匀的，则库仑定律不成立，特别是“相互作用力”不能保证跟它们距离的平方成反比。

中学阶段一般不涉及存在电介质的情况，而空气可以近似认为是真空，说库仑定律必须在真空中适用，是准确的。但中学阶段也不是完全不涉及电介质，在讲平行板电容器的电容的影响因素时，就要涉及电介质，而这时两极板所带的电荷不能看作点电荷，在计算电荷受到的电场力时，就不能简单地应用库仑定律了。

## 四、课堂上验证库仑定律的实验

库仑定律是 18 世纪 80 年代由库仑通过扭秤等实验总结出来的。库仑当时是用介质小球做的实验，他只验证了“相互作用的斥力与它们距离的平方成反比”，根据与万有引力定律的类比而认定这个结论对于两个异种电荷的引力也适用，并且相互作用力的大小还与两电荷量的乘积成正比，从而总结出规律，后人称之为库仑定律。我们在教学中应该让学生对“相互作用力与两电荷量的乘积成正比”有所认识，可以用下面的方法控制小球所带的电荷量：使用两个相同的金属小球，使其中一个带上电荷，另一个不带电荷，二者相互接触一下，电荷量即平分，设二者带电荷量都为 *q*。用手指接触一下其中的一个已经带上电的小球，所带的电荷就会失去而成为不带电的小球，再让它与另一个带电小球接触，则两个小球的带电荷量均变为 *q*/2。用这样的方法还可以得到 *q*/4、*q*/8……的电荷。电子秤用来测量力，其精确度一般可以满足实验的要求。

库仑的实验原理并不复杂，但扭秤结构精细，灵敏度太高，实验不便于在课堂上演示，因此多年来课堂教学中都只讲扭秤的结构和原理，并不真正使用扭秤进行实际操作。现在使用电子秤测量力，其精确程度虽然远不及扭秤，但对于课堂实验已经足够准确，而且很方便，因此在课堂教学中用实验验证库仑定律已经变得可行。如图 2 所示，把一个半径为 *R* 的导体球 A 放在电子秤水平台面上的绝缘杆上，用手指接触一下，使它不残存电荷。按下电子秤的“清零”开关，显示屏上显示的示数为“0”。另一个与 A 相同的导体球 B 固定在绝缘杆上，设法使它带上电，手持绝缘杆，使 B 与 A 接触一下，则 B 与 A 带上等量的电荷 *q*。

图 2 验证库仑定律的实验装置

金属球 B

绝缘杆

金属球 A

绝缘杆

2*R*

*l*

电子秤

显示屏

把导体球 B 固定在 A 的竖直上方一定距离 *l* 处（*l* 为两球的球心的距离，图 2 中未画出夹持金属球 B 绝缘杆的铁架台及夹持器件），测量并记录下二者球心的距离 *l*1，电子秤显示屏上显示出的示数就是两个带电物体间的相互作用力，记为 *F*1。保持两球带电量不变，调整二者球心间的距离为 *l*2、*l*3……相应的显示屏的示数为 *F*2、*F*3……通过多次测量可验证相互作用力的大小跟二者距离的二次方成反比。

用手再接触一次导体球 A，使它恢复成不带电状态，而后使导体球 B 与 A 再次接触一下，则 B 与 A 带上相等的电荷 *q*/2。把导体球 B 移到二者相距为 *l*1 处，记下显示屏的示数 *F*1ʹ；再进行同样的操作，使二者带电荷量变为 *q*/4、*q*/8……记下显示屏相应的示数 *F*2ʹ、*F*3ʹ……通过多次测量可验证相互作用力的大小跟二者电荷量的乘积成正比。

但这个实验有一个致命的弱点，就是它无法满足“点电荷”的条件。如果金属球体积很小，并且距离较远，会带来两个问题：①金属球的电容很小，而它的电势也不可能太高，所带电荷量就不可能很大；②由于距离较远，二者间的相互作用力很小，力的测量就难以精确。如果采用较大的金属球，两球距离又不算太远，则两带电金属球间的相互作用使得电荷在球表面上的分布发生较大的改变，如果仍把带电金属球看作电荷集中于球心处的点电荷进行计算则会产生太大误差。正是由于以上两个因素的影响，这个实验不可能得到很精确的结果，只能粗略地验证库仑定律。

为了增加一些感性认识，下面给出几种具体的数据，估算一下相互作用力的大小。孤立的球形导体的电容可用下面公式计算：*C* = 4π*ε*0*R*，式中 *R* 为导体球的半径，把空气介质近似当作真空对待，4π*ε*0 = 1/*k*。为了简便，估算时取 *k* = 1010 N·m2/C2。课堂上使绝缘导体球带电的方法一般是利用摩擦起电使硬橡胶棒或玻璃棒先带上电，然后与导体球接触而使它带电，当然用感应起电的方法也可以。用这样的方法使导体球带电，其电势一般在几千伏至一万伏，下面估算时我们假设导体球带电后的电势为 1 万伏（104 V）。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | ① *R*= 1 cm，*l* = 10 cm | ③ *R* = 5 cm，*1* = 20 cm | ③ *R* = 10 cm，*1* = 30 cm |
| 电容 *C* = *R*/*k* | 10−12 F | 5×10−12 F | 10−11 F |
| 电势为 104 V 时所带的电荷 *q* = *CU* | 10−8 C | 5×10−8 C | 10−7 C |
| 两带电物体的相互作用力 *F* = *k*·*q*2/*l*2 | 10−4 N | 6×10−4 N | 10−3 N |

对于第①种情况，二者间的距离 *l* 与其半径 *R* 的比值为 10，即 *l* = 10*R*，虽然不能说完全满足 *R* ≪ *l* 的要求，但对于实验也还说得过去，二者间的相互作用力只有 10−4 N 的量级，仅相当于在电子秤盘上增加 10 mg 砝码的重力，一般电子秤能够显示，但不可能很精确。

对于第三种情况，我们计算出来的二者的相互作用力增大到 10−3 N 的量级，相当于在电子秤盘上增加 0.1 g 砝码的重力，一般电子秤的精度可以满足要求，但 *l* = 3*R*，即两球心间的距离只等于 3 倍球的半径，两球边缘相距最近处的距离只有一个球的半径，与点电荷的要求距离太远了，计算出来的相互作用力与实际测量得到的数值相差太远，不能这样做！真正要在课堂上做验证库仑定律的实验，球的半径不能太大，但也不能太小，乒乓球大小可能合适，而 *l* 控制在 8 ~ 10*R* 可能较为合适，还需要尽可能选用灵敏度较高的电子秤，才能取得较力理想的效果。总之，在做验证库仑定律的实验时，必须要强调“点电荷”，因此要尽可能满足“点电荷”的条件，至少不要偏离太远，同时，必须使电子秤有明显的示数，这需要教师事前做大量的实验，在上述二者间尽可能取得合理的平衡。