

高等学校试用教材

物理学

电 磁 学

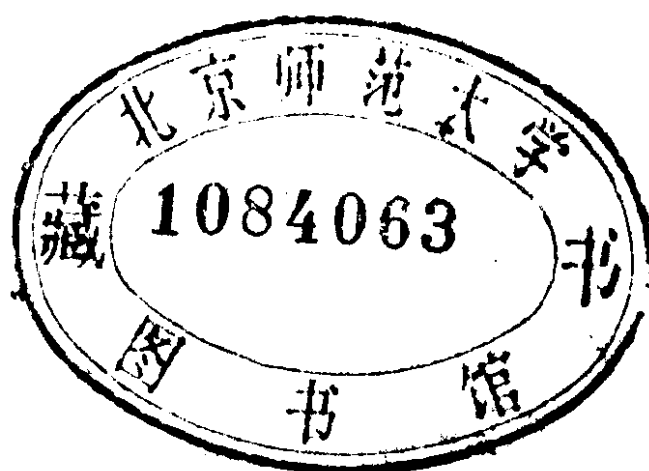
上海科学技术出版社

59145/04
高等学校试用教材

物 理 学

电 磁 学

复 旦 大 学
上海师范大学 物理系编



上海科学技术出版社

高等学校试用教材

物 理 学

电 磁 学

复 旦 大 学 物理系编

上海师范大学

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

总发行所上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 14.75 字数 389,000

1979 年 8 月第 1 版 1983 年 4 月第 4 次印刷

印数 69,501—73,000

书号: 13119·754 定价: 1.65 元

编 者 的 话

本书可作为综合性大学和师范院校物理专业的教学用书。全书共八章,内容包括静电场、静电场中的导体和介质、直流电路、磁场、磁介质、电磁感应、交流电路等。书末附有一定数量的习题。

本书内容如全部讲授,所需学时可能比一九七七年全国物理教材会议所拟定的时数略为多一些。教师使用本书时可按具体情况加以适当取舍。

由于我们水平有限,经验不足,编写时间也较仓促,因此本书中的错误和缺点一定不少。我们恳切希望广大教师和读者提出批评和修改意见。

参加本书编写的人员有:郑广垣、徐在新、宓子宏、瞿鸣荣、郑永令。

目 录

第一章 静电场	1
第一节 电荷 电荷守恒定律	1
一、摩擦起电 电荷	1
二、物质的电结构 电荷守恒定律	3
三、导体 绝缘体 半导体	5
第二节 库仑定律	6
第三节 电场强度	10
一、电场	10
二、电场强度 点电荷的电场	11
三、电场的迭加原理 电场强度的计算	13
四、电力线	21
第四节 高斯定理	25
一、电通量	25
二、高斯定理	28
三、用高斯定理计算电场强度	32
四、高斯定理与库仑定律	40
第五节 电势	41
一、静电场力作功的特点	41
二、电势能	44
三、电势差和电势	46
四、电势的计算	51
五、等势面	56
六、电势梯度和电场强度	58
第六节 带电粒子在电场中的运动	64
一、示波管中电子的运动	64
二、电场中的电偶极子	71
第二章 静电场中的导体和电介质	73
第一节 静电场中的导体	73

一、导体的静电平衡	73
二、导体上的电荷分布和表面附近的场强	75
三、孤立导体面电荷密度和导体表面曲率的关系	76
四、静电屏蔽	79
五、静电加速器	80
第二节 导体的电容 电容器	82
一、导体的电容	82
二、电容器	82
三、电容的计算	85
四、电容器的串并联	88
第三节 静电场中的电介质	93
一、介质对电场的影响	93
二、电介质的电结构和极化现象	94
三、电极化强度矢量 $\mathbf{P}$	97
四、介质中的高斯定理	99
五、介质的击穿	105
第四节 静电场的能量	107
一、电容器储存电能	107
二、带电体系的能量	108
三、静电场的能量	110

第三章 电流和电动势 114

第一节 电流 电阻 欧姆定律	114
一、电流 电流强度	114
二、伏-安特性曲线	119
三、欧姆定律 电阻	120
四、电阻率及其与温度的关系	121
第二节 电流密度 欧姆定律的微分形式	125
一、电流密度	125
二、欧姆定律的微分形式	129
三、欧姆定律的微观解释	130
第三节 电流的功和功率 焦耳定律	133
第四节 电动势 全电路欧姆定律	136
一、电源 非静电力	136

二、电源中的能量转化和电动势	140
三、全电路欧姆定律	141
四、电源的端电压	143
五、电源的输出功率	145
第四章 直流电路	147
第一节 电流的稳恒条件	147
第二节 电阻的串联和并联	149
一、电阻的串联	149
二、电阻的并联	152
第三节 电流表 电压表	157
一、电流表及其量程的扩大	157
二、电压表及其量程的扩大	164
第四节 多回路电路 基尔霍夫定律	168
一、基尔霍夫定律	168
二、用基尔霍夫定律解多回路电路问题	173
第五节 直流电桥 电位差计	176
一、直流电桥	176
二、电位差计	181
第六节 电容器的充放电	186
第五章 磁场	195
第一节 磁现象	195
一、磁现象	195
二、电流的磁效应	197
第二节 磁感应强度	198
一、磁场	198
二、磁感应强度矢量 B	199
三、磁感应强度的单位	201
四、磁感应线	203
第三节 带电粒子在磁场中的运动	204
一、电荷的圆周运动	205
二、回旋加速器	207
三、磁偏转	209

四、磁束·····	212
第四节 带电粒子在电场和磁场中的运动·····	213
一、洛仑兹力·····	213
二、霍尔效应·····	216
第五节 磁场对电流的作用·····	219
一、磁场对直线电流的作用·····	219
二、磁场对回路电流的作用 磁偶极矩·····	222
三、磁电式电表的灵敏度·····	225
第六章 电流的磁场 磁介质·····	228
第一节 安培定律·····	228
一、通电长直导线的磁场·····	228
二、安培定律·····	231
三、通电螺线管的磁场·····	234
第二节 磁学中的高斯定律·····	238
一、磁感应通量·····	238
二、磁学中的高斯定律·····	239
第三节 毕奥-沙伐尔定律·····	240
第四节 磁介质中的磁场·····	247
一、磁介质存在时的安培定律·····	247
二、抗磁质 顺磁质 铁磁质·····	252
第五节 铁磁质的磁化特性·····	256
一、磁化曲线·····	256
二、磁滞回线·····	259
三、铁磁材料·····	261
第六节 简单磁路·····	265
一、磁路·····	265
二、磁阻 磁路欧姆定律·····	270
三、磁屏蔽·····	273
第七章 电磁感应·····	275
第一节 电磁感应现象及其规律·····	275
一、法拉第电磁感应定律·····	275
二、动生电动势·····	279

三、楞次定律	282
第二节 感应电场	286
一、感应电场	286
二、电子感应加速器	288
第三节 电磁感应现象的应用	290
一、正弦交流电的产生	290
二、感应加热	295
三、电磁阻尼	297
四、电磁驱动	300
第四节 变压器	302
一、变压	302
二、变流	303
三、变阻	304
四、变压器的用途	306
五、电源变压器线圈匝数的确定	308
第五节 自感应 互感应	310
一、自感现象和自感系数	310
二、线圈的自感系数	312
三、两线式传输线的自感系数	315
四、互感现象和互感系数	316
第六节 RL 电路的暂态过程 磁场能量	320
一、 RL 电路的暂态过程	320
二、磁场能量	328
第七节 麦克斯韦方程组	331
一、变化的电场产生磁场	331
二、麦克斯韦方程组	335
三、电磁波的特性	338
四、电磁波的能量 能流 动量	343
五、单色波	346
六、电磁波谱	348
 第八章 交流电路	 351
第一节 交流电的特性	351
一、频率和周期	352

二、峰值 有效值 平均值	352
三、位相	354
第二节 电阻、电感和电容在交流电路中的特性	357
一、电阻在交流电路中的特性	358
二、电感在交流电路中的特性	359
三、电容在交流电路中的特性	361
第三节 电路元件的串联	366
一、电阻和电感的串联电路	366
二、电阻和电容的串联电路	371
第四节 复阻抗 交流欧姆定律	372
一、复数的形式和运算	373
二、交流电的复数表示法	376
三、复阻抗 交流欧姆定律	377
第五节 串并联谐振电路	385
一、串联谐振电路	386
二、并联谐振电路	390
第六节 交流电桥	392
第七节 交流电的功率	396
 附录 I 万用电表的工作原理	 404
一、万用电表的电流档	404
二、万用电表的电压档	408
三、万用电表的电阻档	411
 附录 II 电磁量的单位制	 417
习题	424

第一章 静 电 场

电磁运动是物质的一种基本的运动形式。电磁学就是研究物质电磁运动的一门学科。在生产斗争和科学实验中,电与磁有着大量的应用,无论动力、通讯、计量等都离不开电与磁。此外,电磁学还是许多物理理论和工程技术的基础,如电工学、无线电电子学、自动控制和物质的电结构理论等都是在电磁学的基础上建立和发展起来的。在证实光是一种电磁波后,光学也和电磁学联系起来了。在本书中,我们将介绍电磁运动的基本规律及其在生产 and 科研中的一些应用。

电和磁之间有着密切的联系。它们是一个统一体——电磁场的两个侧面。然而,在一定的条件下,根据具体问题的须要,可以分别考察电和磁。我们将先讨论电现象,然后讨论磁现象以及电和磁之间的联系,最后再介绍统一的电磁运动规律。按照这个顺序,我们在这一章里将讨论有关电场的一些基本概念、静电场的特性,以及带电粒子在电场中的运动。

第一节 电荷 电荷守恒定律

一、摩擦起电 电荷

人们对于电的认识最初来自摩擦起电。人们发现一些经过摩擦的物体能够吸引轻小之物,处于这种特殊状态的物体就被称为带电体,或者说物体带上了电荷,简称带电。如果把丝绸摩擦过的一根玻璃棒悬挂起来,再将另一根同样被丝绸摩擦过的玻璃棒去靠近它的一端,如图 1-1 所示,将会发现两根玻璃棒相互排斥;若用一根毛皮摩擦过的硬橡胶棒去接近该悬挂着的玻璃棒,那末两者将互相吸引。但如果使两根被毛皮摩擦过的硬橡胶棒互相靠

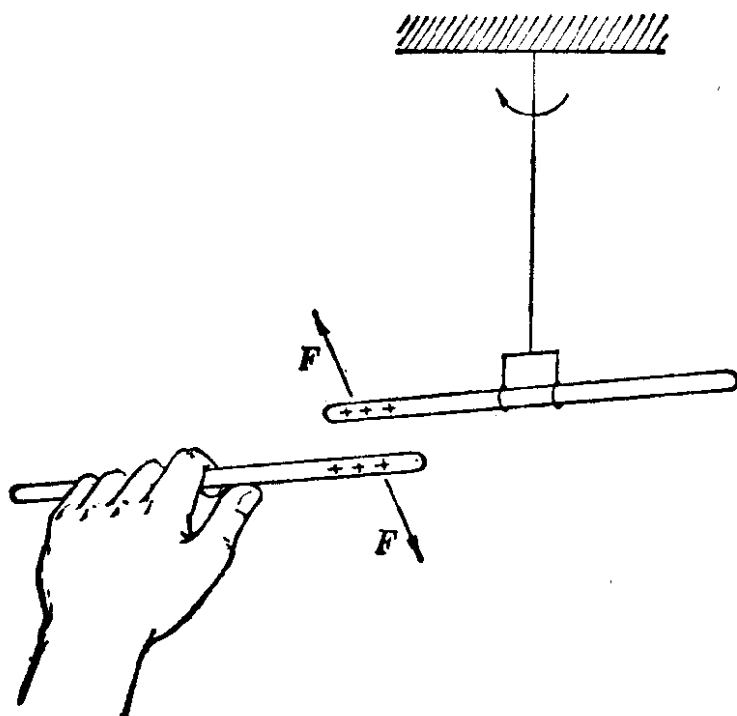


图 1-1 带电玻璃棒之间的相互排斥

近，它们之间又会相互排斥。这说明用丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷与用毛皮摩擦过的硬橡胶棒上所带的电荷是两种性质不同的电荷。为了区别这两种性质不同的电荷，历史上曾规定在室温条件下，被丝绸摩擦的玻璃棒上所带的电荷称为正电荷，通常用“+”号来表示；而硬橡胶棒被毛皮摩擦后所带的电荷称为负电荷，用“-”号表示。这些规定一直沿用至今。

上面所说的摩擦带电实验不仅表明电荷有两种，而且表明电荷之间存在着相互作用：同号电荷相互排斥；异号电荷相互吸引。大量的实验进一步表明：一切物体不论用什么方法使之带电后，不是与丝绸摩擦过的玻璃棒相斥（或与毛皮摩擦过的硬橡胶棒相吸），就是与丝绸摩擦过的玻璃棒相吸（或与毛皮摩擦过的硬橡胶棒相斥）。这说明它们所带的不是正电荷，就是负电荷。自然界里只存在正、负两种电荷。电荷的数量称为电量。

将带有等量异号电荷的物体放在一起时，由于正、负电荷的数量相等，它们对外既显不出带正电，也显不出带负电，或者说呈电中性。这种现象称为电中和。大量的正、负电荷中和时，往往会发生火花，并伴有劈啪声，形成火花放电。飞机的螺旋桨由于在转

动时与空气剧烈摩擦会带上电荷，这些电荷在中和时引起的火花放电要干扰飞机上的无线电通讯。火花放电在一定的条件下还会引起爆炸。在通过管道输送干燥的糖、面粉等粉末状物质时，就可能由于摩擦产生的正、负电荷中和而引起爆炸。

不仅固体有摩擦起电现象，液体在固体上流动时或者分裂成小滴时也会带电。运输汽油的汽车都有铁链拖在地上，就是为了让晃动着汽油与容器摩擦而带上的电荷可以泄放到大地去，以免积累起来引起火花放电事故。很多有机试剂(如苯等)在分装过程中，所用的器具(如漏斗等)都必须很好接地，目的也是为了避免带电引起火花放电事故。

总之，摩擦起电是生产中常见的现象，它在不少场合要影响生产，甚至引起事故，因此必须设法防止。但事物总是一分为二的，摩擦起电也有其可以利用的一面。例如茶叶和茶叶梗彼此摩擦后，两者将分别带上异号电荷，令带电的茶叶和茶叶梗通过一对带正、负电荷的极板，由于同性相斥、异性相吸，两者分别被吸至带相反电荷的极板处，自动地完成了茶叶和叶梗的分拣。

二、物质的电结构 电荷守恒定律

为什么物体摩擦后会带有电荷？这些电荷是从哪里来的？要回答这些问题得从物质的内部结构谈起。

我们知道一切宏观物体(固体、液体和气体)都是由分子组成的。分子由原子组成。原子内部有一个带正电的原子核，周围是一些带负电的电子围绕着原子核运动。原子核也有内部结构，它主要由带正电的质子和不带电的中子组成，原子核所带的正电来自质子。各种不同原子的原子核，其质子数和中子数不一定相同，但在正常情况下，核外的电子数都一定与核内质子数相等。在所有的原子中，氢原子的结构最简单，它的原子核只包括一个质子，核外只有一个电子。

每个电子所带的电量是一样的。每个质子所带的电量也是一样的，并且和电子所带的电量相等。在通常情况下，由于原子中电

子的数目和质子的数目相等,原子作为一个整体呈电中性,由原子组成的物体当然也表现为不带电。当两个物体相互摩擦时,其中一个物体失去一些电子,另一个物体则获得一些电子。例如用丝绸摩擦玻璃棒时,一般情况下,玻璃棒就失去一些电子,丝绸则获得一些电子。这样就破坏了原来两个物体的电中性。当两个物体分开后,失去电子的物体,其体内的正电荷总数多于负电荷,从而表现为带正电;而获得电子的物体正相反,体内的负电荷总数多于正电荷,表现为带负电。所以从物质的电结构来看,无论用摩擦起电,还是用其他方法来使物体带电的过程,都不过是使物体中原有的正、负电荷分离、转移的过程而已。一个物体失去一些电子,必有其他物体获得这些电子。因此,一个孤立体系的电荷总量(正、负电荷的代数和)必定保持不变。这个原理称为电荷守恒定律。它是自然界中的基本守恒定律之一。

在国际单位制中,电量的单位是库仑,符号为C。关于库仑的定义参看第三章第一节。

一个电子所带的电量很小,根据实验测定,只有 1.6×10^{-19} 库仑*。质子所带的电量也是这个值。通常用 e 表示电子或质子所带的电量,用 $-e$ 表示电子的电荷,用 $+e$ 表示质子的电荷。既然带电体上的电荷来源于物体中电子数的增减,那么它所带的电量一定是电子电量的整数倍,而不可能是任意值。迄今为止,我们还没有发现过任何带电体的电量不是电子电量的整数倍。我们可以把带电体所带的电量 Q 写成:

$$Q = ne,$$

式中, n 是正的或负的整数。当物体带正电时, n 取正值;带负电时, n 取负值。显然,如果带电体上的电量发生变化,它也只能按电子电量的整数倍而变化,而不能任意变化。我们把电荷的这些特点称为电荷的量子化。不过在有关生产实践或日常生活的电现象中,我们所遇到的电量要比电子的电量大很多。例如在220伏、

* 电子电量的精确值为 $e=1.6021892(46) \times 10^{-19}$ 库仑。数值中圆括弧内的数字是该数值的最后位数的误差。

25 瓦的灯泡中, 每秒钟就有相当于 7×10^{17} 个电子的电量通过灯丝。对于这样大的电量, 电荷的量子化是显不出来的, 我们在分析这类现象时, 也就不必特别强调它。

三、导体 绝缘体 半导体

取一根铜棒代替玻璃棒和丝绸进行摩擦, 我们发现很难使铜棒带电。但是如将铜棒装在一根塑料棒上, 并用手拿住塑料棒而不和铜棒接触, 这时再用丝绸去摩擦铜棒, 铜棒就容易带电了。同样是铜棒和丝绸摩擦, 为什么在前一情形中很难带电, 而在后一情形中又容易带电呢? 原来铜棒和人体都能传导电荷, 或者说能导电, 用手握住铜棒, 棒上的电荷就通过人体传导到大地, 所以很难使它带电。塑料棒和铜棒不同, 它是不导电的, 铜棒上的电荷不能通过它传导开去, 仍旧留在铜棒上, 所以容易使之带电。

我们把善于传导电荷的物体称为导体。各种金属, 酸、碱、盐的水溶液等都是导体。不善于传导电荷的物体称为绝缘体, 亦称电介质。塑料、橡胶、玻璃、陶瓷、云母、丝绸、干燥的木材等都是绝缘体。

为什么有些物体善于导电, 而有些物体不善于导电呢? 这是因为有些物体中存在着可以自由移动的电荷, 有些物体中则没有。我们知道物体中的电子一方面受到原子核的吸引, 被束缚在该原子核附近; 另一方面, 它们又因本身在运动而具有摆脱原子核束缚的倾向。对金属来说, 其原子中最外层的电子受到原子核的束缚最弱, 它们很容易脱离所属的原子, 成为可以在金属内自由移动的电子。这样的电子称为自由电子。金属中自由电子的数量很大, 在 1 厘米³中就有 10^{23} 个。它们能在金属中自由移动, 起着传导电荷的作用。所以金属是良好的导体。至于在酸、碱、盐的水溶液这类导体中并没有自由电子, 但是有失去电子和得到电子的原子或原子集团, 前者带正电, 称为正离子, 后者带负电, 称为负离子。这些离子都能在溶液中自由移动, 所以也能起传导电荷的作用。总之, 导体之所以能导电, 是由于它具有大量的可以自由移动的带电粒子

(自由电子、离子等)。

对于绝缘体中的电子来说,它们受到原子核的束缚作用很强,很难脱离其所属的原子。在一般情况下,绝缘体中几乎没有可以自由移动的带电粒子,所以不能导电。但是在一定条件下(例如升高温度),绝缘体中的部分电子也能摆脱原子核的束缚,成为自由电子,从而使绝缘体转化为导体。例如固体玻璃是绝缘体,但熔融后则成为导体。

除了导体和绝缘体外,还有一类物体,其中可以自由移动的带电粒子比导体中少,但比绝缘体中多,因此它传导电荷的能力介于导体和绝缘体之间。这类物体称为半导体。半导体还有一个重要的特点,就是其中可以自由移动的带电粒子数量随外界条件(如温度、光照等)极其灵敏地变化。制造晶体管和集成电路等器件的原材料,如硅、锗、砷化镓、锑化铟等都是半导体。

第二节 库 仑 定 律

两个带电体之间存在着相互作用。当它们带有同号电荷时,其相互作用表现为斥力;带有异号电荷时,表现为引力。在一般情况下,带电体之间的相互作用力不仅与它们的电量以及距离有关,而且还与它们的形状有关。但是当带电体的线度比起带电体之间的距离小很多时,带电体形状对相互作用力的影响就可以忽略不计了。我们把这种线度与距离相比小到可以忽略不计的带电体称为点电荷。点电荷之间相互作用的基本规律如下:两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力大小与两者的电量 q_1 、 q_2 之乘积成正比,与两者之间的距离的平方成反比,作用力的方向沿着两电荷间的连线,同号电荷相斥,异号电荷相吸。这就是库仑定律。它是法国科学家库仑从实验中总结出来的。

库仑定律的数学表示式为:

$$\boldsymbol{F}_1 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \boldsymbol{r}_{12}^0, \quad (1-1)$$

式中, F_1 表示点电荷 q_1 所受到的作用力; r_{12} 为点电荷 q_1 和 q_2 之间的距离; r_{12}^0 为电荷 q_2 指向电荷 q_1 的单位矢量, k 为比例系数, 它的数值取决于式中各量的单位。在国际单位制中, 电量的单位是库仑, 距离的单位是米, 力的单位是牛顿, 并且通常把比例系数 k 写成 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, 即

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

ϵ_0 称为真空的电容率, 或称真空的介电常数。根据实验测定

$$\begin{aligned}\epsilon_0 &= 8.8542 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2 \\ &\approx 8.9 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2/\text{牛顿} \cdot \text{米}^2,\end{aligned}$$

于是 k 值相应为:

$$\begin{aligned}k &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2/\text{库仑}^2 \\ &\approx 9 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2/\text{库仑}^2.\end{aligned}$$

在式(1-1)中, 当电荷 q_1 和 q_2 同号时, $q_1q_2 > 0$, F_1 与 r_{12}^0 同方向, 此时 F_1 指离 q_2 , 即 q_1 受到 q_2 的排斥(图 1-2a); 当电荷 q_1 和 q_2 异号时, $q_1q_2 < 0$, F_1 与 r_{12}^0 的方向相反, 此时 F_1 指向 q_2 , 即 q_1 受到 q_2 的吸引(图 1-2b)。

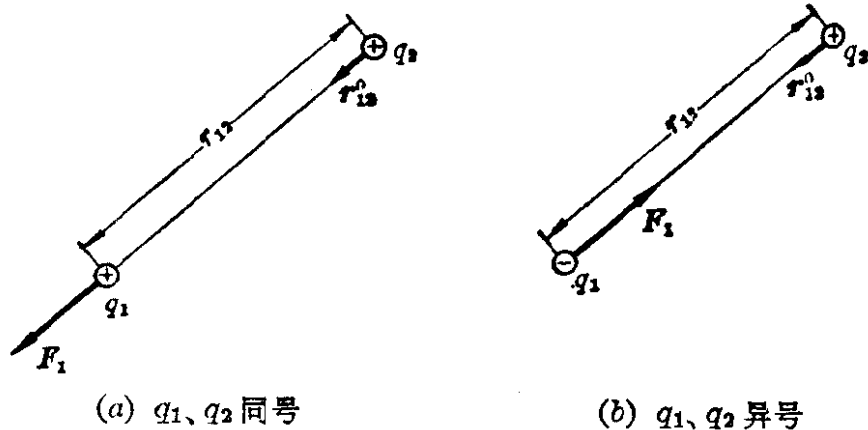


图 1-2 点电荷 q_2 对 q_1 的作用力

根据式(1-1), 电荷 q_2 受到电荷 q_1 的作用力 F_2 应为:

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r_{21}^2} r_{21}^0,$$