

# 对闭合电路的欧姆定律相关知识疑点的透析

刘向前

(西南大学洁净能源与先进材料研究院 重庆 400715)

袁 德

(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

(收稿日期:2016-01-15)

“闭合电路的欧姆定律”是人教版普通高中课程标准实验教科书选修3-1第二章第七节的内容,主要讲述电源内部的电场分布、闭合回路的电势分布以及能量转化,也是电学中重要的基础知识.在教学的过程中,很多学生会提出一些疑难问题,而且这些问题容易使学生对闭合电路欧姆定律的理解产生混乱.比如:在外电路,沿电流方向电势降低,但是在电路分析的时候往往又把导线当作等势体处理,导线上并没有电势降低;在第二节“电动势”中,由于正、负极总保持一定数量的正负电荷,所以电源内部总存在着由正极指向负极的电场,即沿着电流方向从电源负极到正极电势一直升高,但是在第七节“闭合电路的欧姆定律”中,沿着电流方向从电源负极到正极,电势首先升高然后下降最后再升高.诸如这些问题严重冲击了学生对新知识的正确理解.下面就闭合电路的欧姆定律的相关知识疑点,说说自己的看法.

## 1 在外电路 沿电流方向电势降低

很多学生都觉得第二章第七节中“在外电路,沿电流方向电势降低”的说法有误,他们认为导线是等势体,导线上没有电势降低.要深刻理解“在外电路,沿电流方向电势降低”,首先认识一下闭合电路导线中的电场分布.在电路中取任意形状的导线为研究对象,电场分布如图1(a)所示,将导线中某点的电场沿着导线切线方向和垂直方向分解,即可以得到沿着导线切线方向的电场 $E_{//}$ 和垂直于导线的电场 $E_{\perp}$ ,如图1(b)所示.在电场 $E_{\perp}$ 的作用下,电子

逆着电场线运动,因此在导线两侧累积等量异种电荷,累积电荷产生和 $E_{\perp}$ 方向相反的电场 $E'$ ,反向电场 $E'$ 削弱了电场 $E_{\perp}$ ,当 $E' = E_{\perp}$ 时垂直于导线方向不再有电子移动且合场强为零,最终导线中只有沿着导线切线方向的电场 $E_{//}$ ,如图1(c)所示,电源电场在外电路沿着导线的切线方向分布.

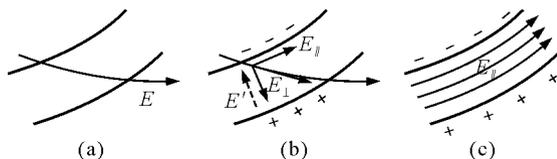


图1

金属导体中能够自由移动的是自由电子,由于电子带负电,电子在某一方向上的定向移动相当于正电荷向相反方向的定向移动,为了方便下面我们按照正电荷的定向移动来讨论问题.

图2所示是 $R_1$ 和 $R_2$ 的串联电路,其中 $ABCD$ 段是电路的局部放大图, $AB$ 和 $CD$ 分别是电阻 $R_1$ 和 $R_2$ , $BC$ 段是导线,这里取部分电路为代表进行研究.电源电场在外电路从正极出发终止于负极,由上面的论述可知,电源电场在外电路沿着导线和电阻的切线方向分布,如图2中的电场 $E$ .闭合开关 $S$ 的瞬间,外电路在电源电场的作用下,电源正极以及导线中的正电荷向负极移动形成电流,由于有电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 对电流的阻碍作用,电阻左端( $A, C$ 处)出现正电荷累积,电阻右端( $B, D$ 处)因少了正电荷而出现负电荷累积.累积在电阻两端的正负电荷会在电阻中产生和电场 $E$ 方向一样的附加电场,所以电阻中的电场 $E$ 增大,由电势差 $\Delta\varphi = \int_A^B E dl$ 得出,在电

阻中沿着电流方向电势降低得很快.若忽略导线的电阻, $B,C$ 两端累积的电荷产生与电场 $E$ 方向相反的电场 $E'$ ,反向电场 $E'$ 削弱电源电场 $E$ ,在电源电场 $E$ 的作用下累积电荷不断增多,反向电场 $E'$ 不断增大,当 $E'=E$ 时导线中的正电荷不再移动,导线中的合场强为零,根据电势差 $\Delta\varphi=\int_B^C E_{\text{合}} dl$ 可知,在导线中沿着电流方向电势降为零,即导线是等势体.若考虑导线中的电阻,正电荷在定向移动的同时,也会受到导体电阻的阻碍作用,导致在 $B,C$ 两端分别累积的负电荷和正电荷比忽略电阻时要少一些,累积电荷产生的反向电场 $E'$ 始终比电源电场 $E$ 小,导线中的合场强并不为零且依然沿着电源电场 $E$ 的方向,根据电势差 $\Delta\varphi=\int_B^C E_{\text{合}} dl$ 可知,沿着电流方向导线上的电势是降低的,导线并不是等势体.

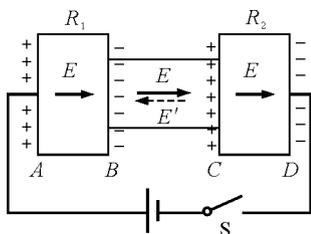


图2

通过上面的论述可以发现,“在外电路,沿电流方向电势降低”与将导线当作等势体处理并不矛盾,原因在于在实际电路分析时,由于导线电阻很小,为了处理问题的简便,我们往往忽略了导线的电阻,这样在导线上才没有电势降低,所以当作等势体处理.如果我们考虑导线的电阻,在外电路沿电流方向导线上依然存在有电势降低.

## 2 忽略电阻的导线变成等势体 导线中为什么会有电流

很多学生都很疑惑,忽略电阻的导体是等势体,导体内没有电场也没有电荷移动,回路中为什么还会有电流?学生之所以这么想,是受到静电平衡的影响,导线处于静电平衡状态后,导线变成等势体且内部电场为零,导体内没有电荷移动,当然也就没有电流.

为了解答学生的疑惑,我们依然以图2为例,忽略导线电阻,从前面的论述可知,在闭合开关 $S$ 的瞬间,电阻两端会产生累积电荷,导线 $BC$ 中的电场为

零,导线变成等势体.值得注意的是,电阻对电流的阻碍作用并不是完全束缚了电荷的移动,而是减缓了电荷定向移动的速度.在极短的时间内,由于电阻内电场的作用,电阻左端( $A,C$ )的正电荷会移到右端( $B,D$ )中和部分负电荷,使导线 $BC$ 两端的累积电荷减少,反向电场 $E'$ 减小,这时电源电场 $E$ 略微大于反向电场 $E'$ ,合场强与电源电场 $E$ 方向相同.在合场强的作用下,导线 $BC$ 两端继续累积负电荷和正电荷,直到累积电荷产生的反向电场 $E'$ 等于电源电场 $E$ 为止,这时导线 $BC$ 再一次变成等势体.由此可知,导线虽然是等势体,但是导线两端累积的电荷会在导线内定向移动产生电流,流走的电荷由其他电荷补充上去,导线两端累积电荷的分布是稳定的不随时间变化的,导线并非处于静电平衡状态,而是处于一个动态平衡状态.

## 3 电源内部电场和电势的分布

在讲解了第七节“闭合电路的欧姆定律”之后,学生提出前面学习的第二节“电动势”与本节所学知识有些不符,而且对第七节中的电源内部电势分布的理解很困难.在第二节“电动势”的学习中,由于正、负极总保持一定数量的正、负电荷,所以电源内部总存在着由正极指向负极的电场,即从电源负极到正极电势一直升高,但是在第七节“闭合电路的欧姆定律”中,从电源负极到正极电势首先升高然后下降最后再升高,这使得学生对电源内部电场、电势分布的认识更加混乱.

下面以丹聂耳电池(如图3)为例,通过研究其工作原理来分析电源内部的电场、电势分布.丹聂耳电池由两个相邻的液池组成,左边池中装有 $\text{CuSO}_4$ 溶液,插有铜棒,右边池中装有 $\text{ZnSO}_4$ 溶液,插有锌棒,中间用多孔的陶瓷板隔开,离子可以自由通过.

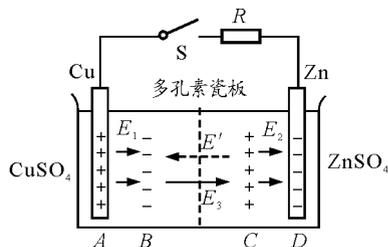


图3

丹聂耳电池的工作原理是这样的:将铜棒和锌棒分别插入 $\text{CuSO}_4$ 和 $\text{ZnSO}_4$ 溶液中,由于化学作用,溶液中铜棒附近的铜离子被吸附到铜棒上,使铜

棒带上正电荷(铜棒为正极),铜棒上的正电荷通过静电作用吸引溶液中的负电荷,使得在铜棒和溶液的交界面两侧形成极薄的偶电层  $AB$ (厚度为  $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}$ ),偶电层中会产生由铜棒指向溶液的电场  $E_1$ ,电场  $E_1$  会阻碍铜离子的进一步吸附,随着化学作用使偶电层电荷的增多,偶电层中电场  $E_1$  不断增大,当铜离子受到的电场力与化学作用相等时,铜离子不再往铜棒上吸附,在铜棒和溶液的交界面两侧形成稳定的偶电层.在锌棒上,锌通过化学作用以锌离子的形式溶解在溶液中,锌棒因缺少正电荷而带上负电荷(锌棒为负极),锌棒上的负电荷吸引溶液中的正电荷,在溶液和锌棒的交界面两侧形成极薄的偶电层  $CD$ (厚度为  $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}$ ),偶电层中会产生由溶液指向锌棒的电场  $E_2$ ,电场  $E_2$  会阻碍锌离子的进一步溶解,随着化学作用使偶电层电荷的增多,偶电层中  $E_2$  不断增大,当锌离子受到的电场力与化学作用相等时,锌棒上的锌离子不再向溶液中溶解,在溶液和锌棒的交界面两侧形成稳定的偶电层.在形成偶电层的过程中,化学作用使正电荷逆着电场方向运动,化学作用克服电场力做正功,使正电荷从低电势点移动到高电势点,将化学能转化成电能,这种化学作用正是电源内部将其他形式的能量转化成电能的非静电力.

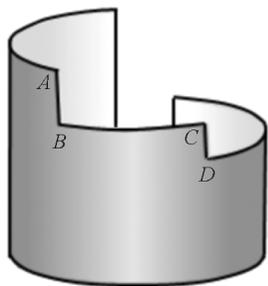


图4

如图3所示,闭合开关  $S$  之前,在形成稳定偶电层的同时, $AD$  两个电荷层在溶液中产生由正极指向负极的电场  $E_3$ , $BC$  两个电荷层在溶液中产生由负极指向正极的反向电场  $E'$ ,偶电层达到稳定时这两个电场大小相等,溶液中的合场强为零,溶液呈等势状态.在开路状态下,电源内部的电场分布为:在电极和溶液交界面电场由正极指向负极,溶液中电场为零.电势分布如图4所示,从负极到正极,在偶电层  $CD$  中电势会升高  $\Delta\varphi_2$ ,溶液中电势不变  $\Delta\varphi' = 0$ ,在偶电层  $AB$  中电势再一次升高  $\Delta\varphi_1$ , $\Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_1$

正好是我们通常所说的开路情况下的电源电动势  $E$ .

如图3所示,闭合开关  $S$  之后,回路中会产生电流,锌棒上的电子会沿着导线流向正极,并中和铜棒上的正电荷.在电极附近, $AD$  两个电荷层的电荷量减少,偶电层中的电场  $E_1$ , $E_2$  和溶液中的电场  $E_3$  都会减小,电极附近的化学作用占优势,铜棒继续吸附铜离子,锌棒继续溶解锌离子,偶电层中电场增大,直到再次形成稳定的偶电层为止.在这个过程中  $BC$  两个电荷层上的电荷增多,溶液中的反向电场  $E'$  大于电场  $E_3$ ,溶液中合场强由负极指向正极,在合场强作用下溶液中正负离子分别向  $BC$  两个电荷层移动形成电流,由于溶液电阻对电流有阻碍作用,最终  $BC$  两个电荷层会分别累积一定数量的负电荷和正电荷,使溶液中形成稳定的由负极指向正极的合场强.闭合开关  $S$  之后,电源内部电场分布为:在电极附近电场由正极指向负极,在溶液中电场由负极指向正极.全电路电势分布如图5所示,电源内部从负极到正极,偶电层  $CD$  中电势升高  $\Delta\varphi_2$ ,溶液中电势沿着合场强方向降低  $\Delta\varphi'$ ,偶电层  $AB$  中电势再一次升高  $\Delta\varphi_1$ , $\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi'$  即是通常所说的路端电压  $U$ ;外电路从正极到负极,结合前面的论述,导线电阻很小,电阻  $R$  电阻值很大,沿着电流方向导线上电势降低缓慢,电阻  $R$  上电势降低很快.

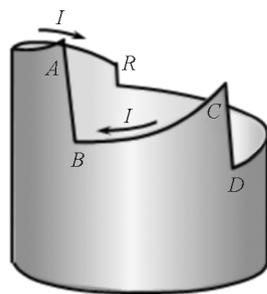


图5

通过以上的论述,我们对电源内部的电场和电势分布情况有了清楚的认识,学生提出的关于第七节“闭合电路的欧姆定律”和第二节“电动势”所学知识有些不符的情况,个人看来并非是前后知识点不符合,而是编排课时考虑到学生现有的知识水平以及本小节旨在理解电动势的物理意义,而故意简化了电源的模型,以方便学生更直观地理解电源电动势的物理意义.

## 4 闭合电路的欧姆定律及电路中能量转化

在学习闭合电路的欧姆定律之后,很多学生对该定律及电路中能量转化的理解不够透彻,更有学生只是停留在对公式的记忆上.下面以丹聂耳电池作为电源,从做功的角度来分析闭合电路的欧姆定律以及电路中的能量转化,如图3所示.

在整个闭合回路中,忽略导线上的电阻.正电荷 $q$ 经外电路从电源正极移动到负极,在外电路沿着电流方向电势降低,在电阻 $R$ 中电场 $E_R$ 对正电荷 $q$ 做正功 $W_R = q \int_R E_R dl$ ,然后正电荷 $q$ 从负极经电源内部回到正极,在电源内部沿着电流方向电场力做的功为

$$W_{DC} + W_{CB} + W_{BA} = -q \int_D^C E_2 dl + q \int_C^B E_{\text{合}} dl - q \int_B^A E_1 dl$$

其中, $W_{DC}$ 和 $W_{BA}$ 是电偶层中电场力做的负功.在溶液中合场强 $E_{\text{合}}$ 由负极指向正极,电场力做正功 $W_{CB}$ .

正电荷 $q$ 从电源正极经外电路和电源内部又回到了正极,整个过程中电荷 $q$ 的电势能不变,全过程电场力做的总功为零,即

$$W_R + W_{DC} + W_{CB} + W_{BA} = 0$$

所以

$$q \int_D^C E_2 dl + q \int_B^A E_1 dl = q \int_R E_R dl + q \int_C^B E dl$$

等式左边恰恰是偶电层中化学作用(非静电力)克服电场力对正电荷 $q$ 做的正功 $W$ ,化学作用将化学能转化为电能;等式右边是电场力在 $R$ 中和电源内部对正电荷 $q$ 做的正功,将电能分别转化成了外电路电阻 $R$ 和电源内阻 $r$ 上的焦耳热 $Q_{\text{外}}$ 和 $Q_{\text{内}}$ ,即 $W = Q_{\text{外}} + Q_{\text{内}}$ .在回路中,非静电力将其他形式的能量转化成电源中的电能,电源将电能转化为其他形式的能量.

根据电源电动势的定义,电动势在数值上等于非静电力把单位正电荷在电源内部从负极移送到正极所做的功,即

$$E = \frac{W}{q}$$

所以电源电动势

$$E = \int_D^C E_2 dl + \int_B^A E_1 dl$$

所以

$$E = \int_R E_R dl + \int_C^B E dl = \Delta\varphi_{\text{外}} + \Delta\varphi_{\text{内}}$$

即

$$E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$$

其中, $\Delta\varphi_{\text{外}}$ 是外电路 $R$ 上的电势降, $\Delta\varphi_{\text{内}}$ 是电源中溶液上的电势降, $U_{\text{外}}$ 是路端电压, $U_{\text{内}}$ 是电源内阻 $r$ 上的电压.

设闭合电路中电流为 $I$ ,根据欧姆定律有

$$U_{\text{外}} = IR \quad U_{\text{内}} = Ir$$

所以

$$I = \frac{E}{R + r}$$

上式表示:闭合电路中的电流跟电源电动势成正比,跟内、外电路的电阻之和成反比,即闭合电路的欧姆定律.

结合静场所学的电场力做功的知识,对闭合电路的欧姆定律以及能量转化进行讲解,能够让学生更加深刻地理解这些知识点,而不是停留在对公式的记忆上.

综上所述,闭合电路的欧姆定律及其相关的知识点是电学中的重要内容,也是学生理解上的难点,一些学生对公式死记硬背而没有做到真正的理解,对一些知识点的理解混乱或是将信将疑.通过以上的论述,认识到教材上编排的内容并没有矛盾的地方,只是根据学生已有的知识水平以及某些知识的侧重点,将一些物理模型简化以便学生对新知识的理解更加深入透彻,同时内容编排上也结合实际问题的需要,将一些物理模型理想化,使实际问题变得简单易解.以上是笔者的一些不成熟的观点,恳请同行和专家指正.

## 参考文献

- 1 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-1.北京:人民教育出版社,(2004)
- 2 贾起民,郑永令,陈暨耀.电磁学.北京:高等教育出版社,2001
- 3 傅献彩,沈文霞,姚天杨,等.物理化学(下册).北京:高等教育出版社,2005