



浅析欧姆定律形成过程中蕴含的科学思想和方法

刘展鸥

(上海市民办新复兴初级中学 上海 200081)

(收稿日期:2023-12-19)

摘要:目前欧姆定律相关的中文物理学史资料不够全面.通过文献比对、概念溯源、理论推演等方法可找寻出欧姆在3个探索阶段中用到的一些科学思维方式和科学研究方法,并初步发掘其育人功能.有利于物理教师把握欧姆探索过程和思维演进的全貌.

关键词:物理学史;科学方法;欧姆;欧姆定律;电阻;电张力

1 欧姆定律学史资料现状

欧姆(G. S. Ohm)的探索历程可以“凝练、升华的科学思维方式和科学研究方法”^[1]很多.然而课堂中展现给学生的基本是欧姆1826年初的实验研究成果.这样会导致学生认为欧姆是在前人电压、电流概念的基础上获得成果.欧姆更像是一个“勤勉且仔细的观察者”^[2].

究其原因是一般的学史著作,如文献[3-4]等,涉及欧姆定律的篇幅较少,且极少发掘其科学方法与思想.电磁学为主的文献[5-6]中欧姆定律内容较详实,可惜从引用量看,中学教师很少关注.英文区也有类似情况:“……其中大多数都是德文,而且使用的术语是欧姆那个时代的,因此很难理解他的工作.”^[7]所以文献[2,7-10]从不同角度进行了研究,这些文献绝大多数未被国内教师引用.

2 概念溯源

在欧姆所处的时代,电压、电流、电阻3个概念要么是模糊的,要么根本不存在.当时人们认为电是一种可以流动的物质,称为电流体,且有所谓“一流体”和“二流体”之争.“二流体”假说认为有正负两种电流体,若物体中有等量异种电流体时,呈电中

性.“一流体”假说则认为只有一种电流体,物体多余电流体而带正电,失去电流体而带负电^[5].从这里我们可以看出前人在电现象解释过程中构建模型的科学思想.

如表1所示,人们把“电流体”和“热量”作类比^[11],还用温度来比拟电势(electric tension).

表1 电现象和热现象类比

热现象	电现象
温度计接触被测物体后,达到与物体同样的温度,从而测出物体的温度	验电器接触物体,金属箔达到与物体相同的电势,从而显示出物体的电势
热量会自发向空气中散失,物体温度下降	电流体会自发向空气中散失,物体电势下降

如图1所示,两个金属板分别带正负电,连接金属板的验电器金属箔张开,表明金属板有电势,张开角度越大,说明电势越大^[2].如果用导线将两块金属板连接起来,会产生瞬间的电流,伴随着电中和金属板上的电势消失.

如图2所示,当时人们认为伏打电池中的激励力(exciting force)将正负电荷分离后产生电势,情况就像图1(a)一样^[2].当导线将电池两端连接起来后,电池的电势就会像图1(b)一样消失^[2,7].

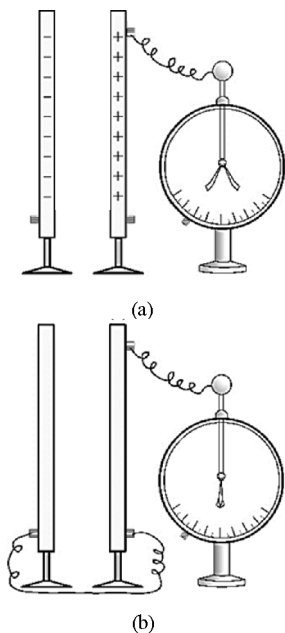


图1 验电器测电势

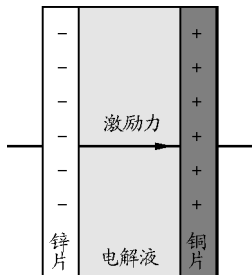


图2 激励力将正负电荷分离

因此,1820年安培(A. M. Ampère)区分了两种电现象:电势可以吸引轻小物体,能让验电器金属箔张开等。电流则可以产生化学效应、热效应和磁效应,电势与电流是相互独立的^[2,8]。

在欧姆那个时代,电流(intensity of current)与电荷量(electric quantity)两个概念有时边界不清,电流与导体导电性能两者的因果关系有时会颠倒^[5,8]。欧姆就是在这样的背景下,开始了自己的探索,其工作大致可分为3个阶段。

3 欧姆的探索

3.1 第一阶段——导电性能

在第一阶段欧姆想探索金属导线的导电性能。在图3^[10]所示的实验电路中,M、N和O是3个盛有水银的杯子,欧姆通过观察磁针的偏转情况,判断电流大小。

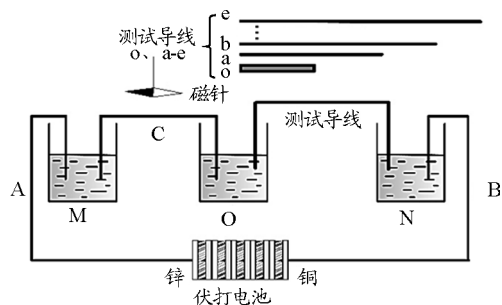


图3 欧姆第一阶段实验电路

由于伏打电池极其不稳定,欧姆将一根又短又粗的导线o作为标准导线,每次先把标准导线o接入电路中的O和N之间,观察磁针的偏转作为“标准力”,然后再接入a~e中的某一根待测导线,观察磁针的偏转作为“较小力”^[2,5]。最后欧姆用以下公式计算了力损失(德语:kraftverlust, 英语:loss of force)

$$\text{力损失} = \frac{\text{标准力} - \text{较小力}}{\text{标准力}} \quad (1)$$

欧姆为了克服电池不稳定所造成的影响,每次用普通待测导线a~e做实验的前后,都要测量标准导线o的情况作为基准,用式(1)对相关数据做归一化(normalization)处理,使得不同电源电压下的测量结果可以相互比较。这种测量方法在复杂多变的环境中,始终“锚定”一个参照物作为基准,本质上是一种相对测量,在经济学和信息学中也大量应用。

欧姆还运用了插值法(表2)处理数据。

表2 欧姆对数据进行插值运算

数据类型	力损失	标准力
实验得出	0.78	168
插值运算	0.77	150
实验得出	0.75	130

插值运算并非捏造数据,而是依据数据变化趋势并遵循一定原则进行的,插值运算过程本身也是一种拟合。通过插值的运算可以反推基于有限数据的初步结论是否正确,比如探究向心力 F 与角速度 ω 的关系时,可以让学生基于他们的结论进行插值运算来验证,他们的体验一定更深刻。在实验基础上,欧姆先得出一个经验公式,然后再将其推广为以下公式

$$v = m \lg \left(1 + \frac{x}{a} \right) \quad (2)$$

其中 v 是力损失, m 是一个和电路相关的常量, x 是测试导线的长度. a 与图 3 中其余部分导线 A、B、C 的长度有关. 式(2) 和欧姆定律相去甚远, 但是并非毫无意义, 将其用泰勒级数展开并忽略高次项, 可以得到

$$v \approx m \frac{x}{a} \quad (3)$$

若图 3 中电源电动势为 E , 除测试导线以外的其余部分电阻与电源内阻之和为 r . 因为磁针的偏转程度可以认为与测试导线中电流大小成正比, 所以“标准力”和“较小力”都可以用电流 I 来表示. 由于测试线 o 的电阻小到可以忽略不计, 当 o 接入电路时的电流为

$$I_0 = \frac{E}{r}$$

设某测试导线的电阻为 R , 接入电路后电流为

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

“力损失”为

$$\frac{I_0 - I_n}{I_0} = \frac{R}{R+r}$$

由于 R 远小于 r , 则“力损失”近似为 $\frac{R}{r}$, 正好与式

(3) 相契合. 所以, 式(2) 在测试导线电阻远小于电源内阻的时候是成立的. 这说明科学研究并非一蹴而就, 而是逐步深入的.

欧姆又用图 3 所示装置找出了若干根导电性能相同的金属导线, 这些导线的横截面积相同而材料不同, 其长度与金属导电性能成正比, 如图 4 所示. 在这个实验中欧姆将不同金属的导电性能转化为可直接测量的导线长度. 这种方法称为“转化法”.



图 4 用长度表示不同金属的导电性

当时的物理学家认为电路中的电流会因耗散而损失一部分, 英国物理学家巴洛(P. Barlow) 这样设想, 如果一流体理论正确, 且电流在电路中会耗散, 那电流从正极流向负极的过程中会越来越小, 就会出现正极附近电流大于负极附近电流的情况. 如果

二流体理论正确, 则即便不考虑电流耗散, 两种流体各自从电池的正负极出发, 在中间会合后电中和, 必定是电路中间的电流小于正负极附近的电流^[5,8], 巴洛的这种科学方法称为“理想实验”. 最后巴洛通过实验证明在同一个电路中, 电流处处相等^[8], 说明了电流并非被电源内部的激励力“推”出来后, 就在电路中自由流动, 这一结论对欧姆影响很大.

3.2 第二阶段——基于证据

这一阶段欧姆改用稳定的温差电池作为电源, 并制作了一套如图 5^[9-10] 所示的专用器材, 其主要部分如图 6 所示.

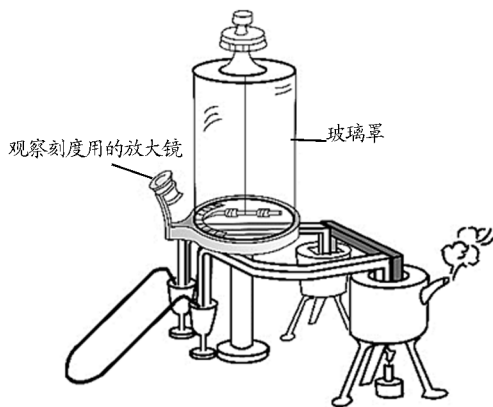


图 5 欧姆的实验装置

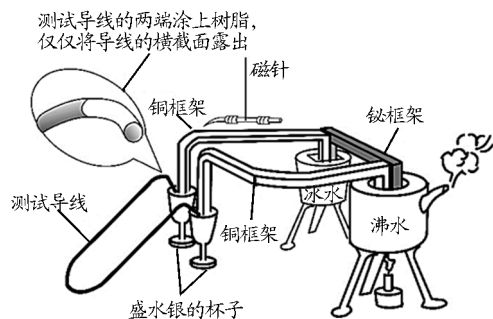


图 6 实验装置主要部分

欧姆用 8 根直径相同长度不同的镀铜铁线分别接入电路进行实验^[5], 一共进行了 5 次实验, 导线的长度和第 1 次实验数据^[6] 如表 3 的第二列和第三列所示.

欧姆依据这些数据得出了以下公式

$$X = \frac{a}{b+x} \quad (4)$$

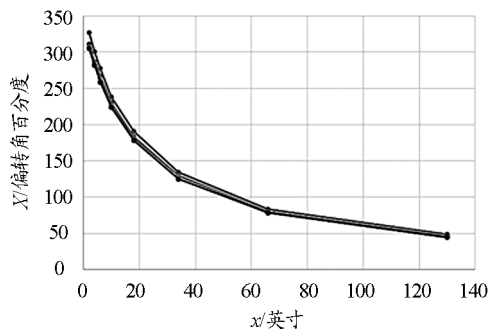
其中 X 是磁针偏转角的百分度, 可认为正比于电路中的电流, a 与温差电池的温度差有关, 相当于电源电动势. b 取决于除待测导体以外的电路其他部分的电阻, x 是待测导体的长度.

表3 欧姆部分数据和验算

导线序号	导线长度(英寸)	第1次实验偏转 X	第1次实验验算
1	2	$326 \frac{3}{4}$	328
2	4	$300 \frac{1}{2}$	$300 \frac{1}{2}$
3	6	$277 \frac{3}{4}$	$277 \frac{1}{2}$
4	10	$238 \frac{1}{4}$	$240 \frac{3}{4}$
5	18	$190 \frac{3}{4}$	$190 \frac{1}{2}$
6	34	$134 \frac{1}{2}$	$134 \frac{1}{2}$
7	66	$83 \frac{1}{4}$	$84 \frac{1}{4}$
8	130	$48 \frac{1}{2}$	$48 \frac{1}{2}$

为了验证这个公式是否符合实际情况,欧姆令 $b=20.25$,为每次实验中的 a 赋了不同的值,比如第1次实验中 $a=7\ 285$,验算结果如表3的第四列所示.欧姆依据实验数据反复演算推导出公式,验算后再实验验证.这种科学研究方法称为“尝试法”^[5].

笔者利用软件绘制了欧姆5次实验的 X 随 x 变化的图像(图7),发现欧姆选取的8根待测导线的长度也是很有讲究的.前4根比较短,后4根长度陡然增大,长度之比接近 $1:2:4:8$,呈指数级增长.从图像可以看出数据覆盖非常完整,导线虽少但是具有普遍性,这种数据采样的方法值得老师们学习.

图7 $X-x$ 图像

3.3 第三阶段——基于论证

1826年欧姆先后发表了两篇论文,在第二篇论文中,欧姆将公式改写为

$$X = kS \frac{a}{l} \quad (5)$$

式中的 X 表示电流大小, a 为导线两端的电势之差, k 表示电导率, l 和 S 分别为导线的长度和横截面

积^[5]. 欧姆把 $\frac{l}{kS}$ 称为等效长度(德语: *reduziert Länge*, 英语: *reduced length*), 用字母 L 表示, 代入式(5)可得

$$X = \frac{a}{L} \quad (6)$$

1827年欧姆又基于3条基本原理(basic postulates), 从理论上推导出了他之前发现的定律. 第一条基本原理可以理解为: 电流在导体内均匀分布. 把导体看成由一个个极小的微粒(*particle*) 所组成, 电流只能从一个微粒传递到下一个微粒, 并被这个微粒传递到再下一个微粒, 其传递速度与两个微粒之间的电势之差成正比^[7,9]. 下面笔者尝试用现代理论来分析一下欧姆的第一条基本原理. 如图8所示在导体中沿着与电流平行的方向取一个柱形导体元, 恰好包含了两个导体微粒. 每秒钟流过导体元横截面的电流体的量(电荷量)即为电流 I , 其大小正比于相邻两个微粒之间的电势差 ΔU , 反比于导体元对电流的阻碍作用 $\frac{\Delta l}{kS}$, 则有

$$I = kS \frac{\Delta U}{\Delta l}$$

推导可得

$$\frac{I}{S} = k \frac{\Delta U}{\Delta l}$$

由于横截面足够小, 所以 $\frac{I}{S}$ 其实就是电流密度 J .

对比现代欧姆定律的微分形式

$$J = \sigma \frac{dU}{dl} = \sigma E$$

一定会被这种微元法所折服. 欧姆将复杂的情况进行理想化并抽象出本质的做法, 是物理学理论研究的一种基本方法^[6].

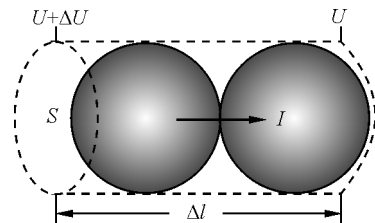


图8 导体元

对比3个阶段的工作就会发现, 欧姆最终的观点已经超越了他所处的时代^[2,7]. 首先, 他在第三阶段工作中精确定义了电流的概念, 而不是简单地用

磁针的偏转角度 X 来表示电流. 其次, 从式(5) 和式(6) 可以看出欧姆已经认定了等效长度 L 是一个和电流、电势差没有关系的物理量, 在后来的著作中, 欧姆把这个物理量称为电阻(德语: *widerstand*, 英语: *resistance*)^[7].

最为重要的是: 欧姆引入了一个叫“电张力”(德语: *spannung*, 英语: *tension*) 的概念, 因为术语对应的关系也被称为电势, 但欧姆的电势概念不同以往, 而是在一个闭合电路中, 每一点都有一个电势^[2]. 从电源的正极到负极, 电势会逐渐下降, 电流则由电势差和电阻共同决定. 这说明欧姆的电势概念已经很接近今天电势(electric potential) 的概念了.

下面笔者用两个模型来对比一下两者的差别(图9). 如果采用适切的课堂活动让初中生大致了解图9 中欧姆的电路模型, 则更有利于他们建立正确的电压概念. 相信文献[12] 了解了上述史实, 一定会结合欧姆的模型, 引入电路的“人工瀑布”和“小朋友搬球”模型.

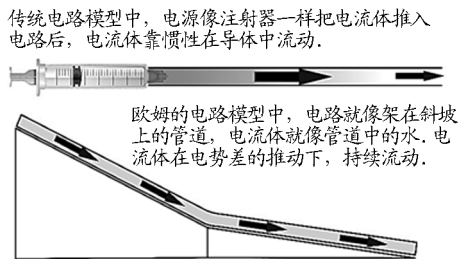


图9 两种电路模型的对比

综上所述, 毫不夸张地说“欧氏乃倡导电动势, 电流之强及电阻之精确观念第一人!”^[4]“他理应得到伟大的荣誉”^[3].

4 科学本质

欧姆的研究成果发表后, 招致了很多批评. 有人认为这是当时德国黑格尔主义盛行所致^[3,5-6]; 也有人认为是欧姆的数学推导艰涩难懂^[6,10], 而文献[2, 7] 分析后认为事情的本质是欧姆的理论创新和旧观念产生了巨大的冲突, 当时的物理学家鲍尔(G. F. Pohl) 这样批评欧姆: “闭合电路的定量磁效应取代了开路时的电现象, 这是一个错误, …… 就像磁针突然代表了验电器的功能一样^[2].” 就这样欧姆定律沉寂了十几年后才被认可.

欧姆的探索历程多被作为励志故事加以宣扬, 然而笔者认为其有更大的育人价值——“认识科学本质”^[1]. 第一, 欧姆敢于挑战有着“电学牛顿”之称的安培, 说明科学讲求质疑与创新, 没有绝对权威. 第二, 欧姆研究过程中概念逐渐清晰、模型日臻完善的过程, 说明科学本质上是人类在观察和推理的基础上对客观世界的逐步理解, 而非绝对真相. 第三, 欧姆定律的建立运用了实验研究、对比分析、数学推导等多种方法, 说明了没有绝对可靠的科学方法. 第四, 旧理论被否定, 欧姆定律建立, 欧姆定律又被证明有适用条件, 说明科学定律只能在一定的条件范围内是可靠的, 不可能被绝对证明. 这就是科学.

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2018: 69-70.
- [2] SCHAGRIN M L. Resistance to Ohm's law[J]. *American Journal of Physics*, 1963, 31(7): 536-547.
- [3] 弗·卡约里. 物理学史[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2002: 167-176.
- [4] 弓场重泰. 物理学史[M]. 郑州: 河南人民出版社, 2017: 119-130.
- [5] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1987: 30-196.
- [6] 纪辰, 石云里. 电磁学简史[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2021: 69-82.
- [7] GUPTA M S. Georg Simon ohm and Ohm's law[J]. *IEEE Transactions on Education*, 1980, 23(3): 156-162.
- [8] KIPNIS N. A law of physics in the classroom: The case of Ohm's law[J]. *Science & Education*, 2009, 18(34): 349-382.
- [9] LUCHETTI M. From successful measurement to the birth of a law: Disentangling coordination in Ohm's scientific practice[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 2020, 84: 119-131.
- [10] CONNELLY C. A history of Ohm's Law: Investigating the flow of electrical ideas through the instruments of their production[D]. University of Cambridge, 2023.
- [11] 阿尔伯特·爱因斯坦, 利奥波德·英菲尔德. 物理学的进化[M]. 北京: 商务印书馆, 2019: 54-62.
- [12] 李林静, 钱长炎, 谭小凤. 高中物理“闭合电路欧姆定律”认知负荷分析及教学设计[J]. 物理通报, 2022(10): 26-30.