

欧姆及欧姆定律

宋德生

(桂林电子工业学院)

在所有关于电路的定律中,欧姆定律是最简单、最基本的定律,它以简明的形式、清晰的概念,把握了电路现象的本质和规律。它不仅是固体导体的直流电路计算的基础,而且是交流电路、电解电路的电学基本概念的定量关系。正如其他基本定律的创立过程和提出后的情况一样,欧姆(Georg Simon Ohm, 1789—1854)在创立他的定律时并非一矢中的,他曾为挑选哪些量作为电路的基本量付出过巨大的劳动;他建立定律所使用的方法和他对定律的理解并非我们想象的那样简单;他的定律在提出后的处境也不是我们想象的一帆风顺。所有这些都要求我们对欧姆定律的创立的历史渊源、过程及影响有所了解。

欧姆的初级实验、电导率概念

1825年5月,欧姆发表了第一篇科学论文——《金属导电定律的初步表述》^[1,2]。这篇论文主要论述了电流产生的电磁力的衰减与导线长度的关系,其实验过程如下:

在一个电池的两极上分别接有导线A和B, A, B的另一端分别插入盛有水银的杯M, N中,再在杯M和第三个水银杯O之间接有第三根导线C。欧姆称A, B, C三根导线为“不变导体”。他准备了7根“变量导体”,其中一根短而粗,其余6根长而细,长度从1英尺到75英尺不等。水银杯N, O之间将接欧姆的所谓“变量导体”。实验时他把“变量导体”依次插入杯N, O之间,并在导线C旁通过扭力秤悬挂一根磁针,以便通过磁针转角的大小来观察通过导线的电流强度。显然,“变量导体”愈长,通

过的电流愈小,磁针偏角也愈小。

欧姆把那根短而粗的导线沟通的电流所产生的电磁力称为“参考力”,把其余6根长而细的导线中的任一根产生的电磁力称为“较小的力”。这个实验的目的不是测量电磁力的本身,而是要测量因“变量导体”的增长所引起的电磁力的损失,他称之为“力耗”(Kraftverlust)。根据他的定义,

$$\text{力耗} = \frac{\text{参考力} - \text{较小的力}}{\text{参考力}} \quad (1)$$

他根据实验数据得到如下经验公式:

$$v = 0.41 \log(1 + x) \quad (2)$$

式中 v 表示“力耗”, x 为“变量导体”的长度,单位为英尺。

(2)式的推广式为

$$v = m \log[1 + (x/a)] \quad (3)$$

式中 a 是决定于“不变导体”的当量长度的量, m 是电动势、“变量导体”直径、 a 值和“参考力”的函数。

这就是欧姆在第一篇论文所得的结果。(3)式与今日的欧姆定律有较大的区别,以致使我们看不出它们之间有什么联系。我们不能完全理解欧姆为什么要建立“力耗”与导线长度之间的关系,而不是建立电流与导线的关系。不过应当注意的是,他在这以前还未提出过电流强度的概念,他从开始就着眼于电流的电磁力与导线长度关系。他很可能看到由于导线增长使得电磁力连续减小的现象。加上波根多尔夫(J. C. Poggendorff, 1796—1877)曾经指出电流计的线圈匝数增加到某一极限后,电流计的放大作用就不再与匝数成正比。这显然是导线增长引起电流递减所产生的结果。这种现象本

来就是欧姆要处理的一个问题。有人认为欧姆定律的确立有待于电流计的改进，这种认识是缺乏历史根据的，因为欧姆在他的电路实验的整个过程中未曾使用过电流计^[3]。

另一个值得注意的问题是，欧姆在第一阶段实验中还未把握电势和电势差的概念。电势和电势差必须借助电位计来测量，而欧姆没有利用电位计，他只是用了库仑的扭力秤的方法。我们知道，扭力秤悬吊的磁针反映的是力的强度，在这种力强度和势之间是很难建立一种平行关系的。

由此看出，欧姆在当时还没有一下子就把电势差（或电动势）、电流强度和电阻三个量联系起来。

1825年7月，欧姆用上述实验装置比较了各种导线的电导率^[3,4]。他把各种金属制成直径相同的导线，将它们依次插在水银杯 N 和 O 之间，实验时调节它们的长度，以保证在每次实验中使磁针有相同的偏转角。这样就能根据各种导线相对的实验长度确定金属的相对电导率。他以铜的电导率为基准，定为 1,000，测得其他金属的电导率为：金 574，银 356，锌 333，黄铜 280，铁 174，铂 171，锡 118，铅 97，……。

这个实验较为粗糙，造成不少错误。如银的电导率低于铜就是一个明显差错。欧姆后来发现这个错误是因拉制的银导线的线径不合规格造成的^[5,6]。

在欧姆之前，戴维（1778—1829）曾研究过金属电导，他在《关于由电产生的磁现象的进一步研究》^[7]一文中指出：金属的导电性与由这种金属制成的导线在单位长度上的质量成正比。1825年，法国物理学家贝克勒耳（1788—1878）指出：同一金属的各种导线的导电性相等的条件，是它们的长度之比等于它们的横断面积之比^[8]。同年，英国人巴劳（P. Barlow, 1776—1862）发现，在同一电源条件下，通过导线的电流的强度与导线长度平方根成反比，与导线直径成正比。这显然是错误的。不过，他发现电流在整条导线上不变的事实，对欧姆的电学研究有很大的帮助。欧姆由此想到，电流

不变性表明电流强度可以作为电路的一个重要的基本量，他决定在下一次实验中把它当作一个主要观测量，以列入电路方程。另外，与电流不变性相联系的是导线电导率的不变性（指同温条件下），因此磁针的偏转角也能定量反映金属的相对电导率，这就是欧姆在这次实验中用扭力秤磁针测量金属电导率的思想基础^[9]。

欧姆实验定律的发现

1826年4月，欧姆发表了重要的实验报告——《金属导电定律的确定及伏打装置和斯威格倍加器的理论的初步方案》^[9]，他在这篇论文中提出了电路的实验定律。文章开头简述了他前一段时间关于电导率实验的情况，以及他的结论与贝克勒耳和巴劳的区别；接着他就指出用伏打电池做实验的缺陷。伏打电池输出的不稳定性和电极的极化曾使他大为头痛。经波根多尔夫建议，他改用温差电偶作电源。他设计的温差电池结构大致如图 1 所示。 $abb'a'$ 是用铋铸造成的一个矩形框架，长边为 $6\frac{1}{2}$ 英寸，短边 ab 和 $a'b'$ 为 $3\frac{1}{2}$ 英寸。铋框架每条腿上铆一根铜片 $abcd$ 和 $a'b'c'd'$ ，铜片也弯成框架的样子，并使它们的另一只脚浸在盛有水银的杯 m 和 m' 中。在任一铜框架附近设一磁针（即由扭力秤吊挂的磁针），以测电流的大小。实验时把有关导体插在杯 m 和 m' 之间，并把一个接

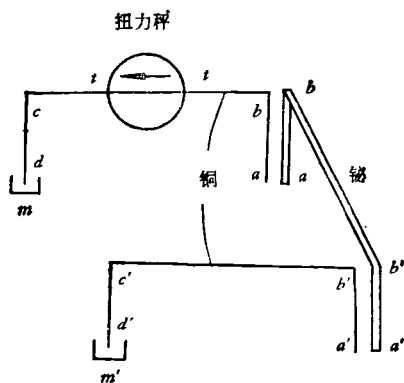


图 1

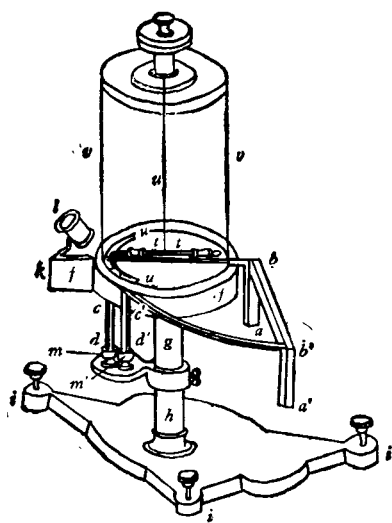


图 2

触端 ab 插入一盆保持沸腾的水中,把另一接触端插入一盆冰水混合物中,以提供 100°C 的温差.

欧姆的整个实验装置如图 2 所示, $fghi$ 为木质座架, vv 为扭力秤的玻璃罩, 玻璃罩上方为扭力秤调零和微调装置, u 是由扭力秤悬丝吊挂的磁针, uu 是刻度盘, l 是用来观察刻度的放大镜, m 和 m' 为水银杯, $abb'a'$ 为铋框架, $abcd$ 和 $a'b'c'd'$ 为铜框架, 铋、铜框架的一条腿是相互接触的.

欧姆准备了 8 根直径为 $7/96$ 英寸的镀铜铁线, 编号为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 长度分别为 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 英寸. 他在 1826 年 1 月 8 日、11 日和 15 日共进行了五次实验, 所得数据如下表所示:

实验日期	实验序号	电 流 的 电 磁 力 (刻度)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1 月 8 日	I	$326 \frac{1}{2}$	$300 \frac{3}{4}$	$277 \frac{3}{4}$	$238 \frac{1}{4}$	$190 \frac{3}{4}$	$134 \frac{1}{2}$	$83 \frac{1}{4}$	$48 \frac{1}{2}$
1 月 11 日	II	$311 \frac{1}{4}$	287	267	$230 \frac{1}{4}$	$183 \frac{1}{2}$	$129 \frac{1}{4}$	80	46
	III	307	284	$263 \frac{3}{4}$	$226 \frac{1}{4}$	181	$128 \frac{3}{4}$	79	$44 \frac{1}{2}$
1 月 15 日	IV	$305 \frac{1}{4}$	$281 \frac{1}{2}$	259	224	$178 \frac{1}{2}$	$124 \frac{3}{4}$	79	$44 \frac{1}{2}$
	V	305	282	$258 \frac{1}{4}$	$223 \frac{1}{2}$	178	$124 \frac{3}{4}$	78	44

从这个表看出, 1 月 8 日测量的数据比 11 日和 15 日的稍高, 欧姆认为那是由于 8 日那一天的气温特别低的缘故, 因为他把金属偶的冷端放在窗台上, 它的实际温度很可能低于零度.

欧姆根据这些数据确定了下述关系:

$$\chi = a/(b+x). \quad (4)$$

χ 为电流产生的电磁力, 用磁针读数表示; a 和 b 为电路的两个参量, x 表示实验导线的长度. 欧姆假设在这五次实验中 a 值分别等于 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, 再令 $b = 20 \frac{1}{4}$, 他把这些值分别代入(4)式, 这样计算得到的数值与表中的实验数值相差甚微. 这样他就能初步判断 b 值决定于温差电池的内部阻抗, 与接入

导线无关.

接着, 他改变温度做实验, 使冷端仍保持为零度, 而使热端降至常温. 他把 8 根导线按 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 的顺序先后插入水银杯 m 和 m' 之间, 磁针读出刻度分别为 $27, 25, 22 \frac{1}{2}, 20, 15 \frac{1}{2}, 10 \frac{3}{4}, 6 \frac{1}{2}, 3 \frac{2}{3}, 6 \frac{1}{2}, 10 \frac{3}{4}, 15 \frac{1}{2}, 20, 23 \frac{1}{2}, 25 \frac{1}{4}, 27 \frac{3}{4}$. 如果假定(4)式中的 b 仍为 $20 \frac{1}{4}$, 把 a 选为 $(27 \frac{3}{8}) \times (22 \frac{1}{4})$, 这时用(4)式计算出的数据与这些读数的最大误差不超过半度. 欧姆通过这组实验最后判断 a 决定于温差电源的

温度差,即决定于温差电源的电动势(“电动势”一词为伏打最先引进的词,而欧姆称之为“激发力”), b 决定于温差电源的内部阻抗。

欧姆用数学方法推导电路定律

1826年4月,欧姆发表了另一篇论文——《由伽伐尼电力产生的静电现象的理论尝试》^[10]。欧姆在这篇论文中把欧姆定律改写为

$$X = \kappa S(a/l). \quad (5)$$

X 在这里表示通过长度为 l 的导线的电流强度, S 表示导线的横断面积, κ 表示电导率, a 为导线两端的电势差。这里使用的是导线的实际长度,如用当量长度即电阻 $l' = l/\kappa S$ 代入(5)式,则得到

$$X = \frac{a}{l'}. \quad (6)$$

这也是欧姆经常使用的形式。这样就得到了与现在教科书相同的欧姆定律了。如果我们把(4)式的各项都按(6)式中各项的意义来定义,就能得到全电路的欧姆定律。

欧姆的电路理论完成于1827年。这一年他发表了《用数学推导的伽伐尼电路》^[11]一书。他在这部重要的著作中提出了导体电量的计算方法及关于电路的三条基本原理,并在此基础上建立起电路的运动学方程,解这个方程便得到一年前通过实验建立的欧姆定律。从这部著作中还可看到欧姆受当时热传导研究的影响。

欧姆第一基本原理是指电从一个物体经导线传到另一物体的量与两个导体电势的差成正比,其微分式可写为

$$dQ = \kappa S \frac{dU}{dx} dt. \quad (7)$$

式中 dU/dx 表示电势梯度, dQ 表示在时间 dt 内通过导线的电量。进而得到电流强度及电流密度:

$$I = \kappa S \frac{dU}{dx}; \quad (8)$$

$$j = \kappa \frac{dU}{dx}. \quad (9)$$

(9)式就是现在所说的欧姆定律的微分形式。由

此可知,欧姆定律可以利用类比并借助数学推导出来,这种类比是电与热的类比,因为(7)式与热扩散公式完全相同。

欧姆第二基本原理是指导体向周围空间散发的电量与导体的电势及表面积成正比,其数学形式为

$$dQ = bcUdxdt. \quad (10)$$

式中 c 表示导线的周长, dx 表示从导线上划出的一段线元, U 表示所考虑的线元上的电势, b 是一个决定于空气状况的常数。这条原理可用于静电情况,也可用于电路。

欧姆第三基本原理是:不同金属的接触电动势等于它们相互接触时产生的电势差,即

$$U_2 - U_1 = a. \quad (11)$$

这个公式也适用于电路情况,这时 U_1 和 U_2 系指导体两端的电势, a 则为它们的电势差。

欧 姆 传 略

1789年3月16日,欧姆出生于德国的巴伐利亚州的埃尔兰根(Erlangen)。他的父亲乌尔夫岗·欧姆(Wolfgang Ohm)是位精通自然科学的锁匠。乌尔夫岗给欧姆和欧姆的弟弟进行严格的数理化及康德哲学的教育。欧姆在15岁时就表现出非凡的数学才能,埃尔兰根大学朗兹多尔夫(K. C. von Langsdorf)教授曾把欧姆兄弟二人比作象伯努利家族一样的天才。1805年5月,欧姆考入埃尔兰根大学。由于他过于喜爱舞蹈、台球和溜冰,他读完三个学期后就被父亲送到瑞士农村,目的是为了让他专心学习。之后的六年,他一边学习,一边担任中学数学教师和家庭教师。1811年他得以重进埃尔兰根大学,同年10月25日获得博士学位。后来他在那里担任了三个学期的无薪大学教员,这是他直到1852年以前在大学的唯一的一次任教。1813—1817年间,他迫于经济困难,在班贝格(Bamberg)一所六年制中学任数理教师。1817年9月11日,他开始在科隆的一所经过改革的耶稣会中学任教,那里的科学教育空气浓厚,他在那里系统研究了拉格朗日、勒让

德、拉普拉斯、毕奥、泊松、傅里叶和非涅耳的经典著作。1820年以后，他开始研究电磁学，并连续做了些电学、磁学实验。1826年他获准半年假期，到柏林研究电路的理论。1827年9月，在他的奠基性著作《用数学推导的伽伐尼电路》(以下简称《电路》)发表后，他就努力寻找进入大学的机会，愿望落空后又返回科隆。1828年3月，他在柏林一所军事学校弄到一分临时工作。1833年10月18日，他进入纽伦堡理工大学担任物理学教授。

欧姆的工作直到1830年代末才获得公认。1839年他当选为柏林科学院和都灵科学院通讯院士。1841年11月30日获得伦敦皇家学会的科普勒奖章(Copley Medal)。1845年当选为巴伐尼亚科学院院士。1849年11月23日，他被调到慕尼黑主持科学院物理学学术委员会工作，并担任慕尼黑大学物理学教授之职。1852年10月1日，他开始担任慕尼黑大学物理学讲座。1854年7月6日在慕尼黑去世，终年65岁。

承认欧姆定律的过程

当《电路》发表后，欧姆给当时普鲁士的教育部长赠送了一本，并附上一封信，请求把自己安排在大学工作。这位部长是黑格尔信徒，对科学实验不感兴趣，对欧姆的工作毫不在意，结果把欧姆安排在柏林一所军事学校以作最大的报酬。此时，德国物理学家鲍尔(G. F. Pohl, 1788—1849)首先发难，撰文攻击欧姆的《电路》。他蛊惑人心地说：“以虔诚眼光看待世界的人不要去读这本书，因为它纯是不可置信的欺骗，它唯一的目的是要亵渎自然的尊严”。面对鲍尔的攻击，欧姆决定给予公开回击，《文学杂志》主编布朗德先生劝他暂时忍气吞声，因为鲍尔是位黑格尔主义者，有很强的实力，这样才能避免了一场风波。

1829年3月30日，欧姆给路德维希一世写信以求庇护，信中写道：“……我的科学著作是具有广泛影响的，它已受到公众的注意。我

遗憾地说，现在我只遇到唯一的反对者——鲍尔，他的观点是建立在黑格尔原理的基础上的”。

国王把欧姆来信交给了巴伐利亚科学院，责令组成一个学术委员会专门讨论欧姆的著作，以断其高低。委员会成员意见不一，最后还得征求哲学家谢林的意见，因为谢林一直与国王保持着通信关系，在科学界颇有影响。但是，谢林拒绝作出任何评价，更不愿意在国王面前说欧姆的好话。这件事竟不了了之。欧姆给斯威格(J. S. C. Schweigger, 1779—1857)的一封信上说道：“《电路》的诞生已经给我带来了巨大的痛苦，我真抱怨它生不逢时，因为深居朝廷的人学识浅薄，他们不能理解它的母亲的真实感情”。

在纯科学范围内还有如下几个客观原因使得承认欧姆定律的时间拖延了。这些原因是：

1. 欧姆的实验是以温差电偶作电源的，而其他重复他的实验时用伏打电池作电源，化学电源的不稳定性及电极的极化总使他们难以得到与欧姆一样的结论。

2. 欧姆定律是关于伽伐尼电路的理论，它是否适合于其他电(如摩擦电、电磁感应电等)尚是一个问题。这就有待电的同一性的证明，这个证明最后在1833年才由法拉第完成。

3. 当时德国电学界正热衷于接触电动势起因的论争，无暇系统地研究欧姆的电路理论。

在德国最先接受欧姆定律的有普法夫(C. H. Pfaff, 1773—1852)、斯威格、费希内尔(G. T. Fechner, 1801—1887)。斯威格自始至终给欧姆发表文章提供方便，欧姆的大部分论文发表在他主办的《化学和物理学杂志》上。1830年4月21日，斯威格写信鼓励欧姆，他说：“你对《年鉴》的贡献是最成功的，我希望你继续经常地把这样重要的论文发表出来”；“请你相信，在乌云和尘埃后面的真理之光最终会透射出来，并含笑驱散它们”。

费希内尔在他的《伽伐尼电学和电化学校书》第三卷上最先应用了欧姆定律，他在序言中高度评价了欧姆的工作，他说：

“……我已经模仿了欧姆的理论,并用我的实验进一步证明了它,因此,这个理论的最基本的结论已被事实所肯定.我迫切要推广这个理论,使它与更多的现象结合.我敢说,唯有这个理论才是第一次给伽伐尼电路的结构输入了真实的意义”。

欧姆定律在很晚的时候才传入英国,至少在1831年还没有任何英国人知道这个定律,有法拉第的事实为证.法拉第在研究电磁感应现象时发现,在相同的电磁感应条件下,导线愈长感生电流愈小,他虽然走到了欧姆定律的边缘,却不知道有欧姆定律.法拉第素以了解科学前沿为快事,如果他对其他国家的科学家的任何新发现特别是电学新发现有所不知的话,那是不太可能的。

1833年,英国科学家克里斯提(S. H. Christie, 1785—1865)通过实验确定了正确的电导率关系,并提出了平衡电桥的原理^[12].这一发现在十年后被惠斯登(1802—1875)在欧姆定律的基础上加以系统化、理论化。

最先得知欧姆定律的美国人富兰克林的孙子巴赫博士(Alexander D. Bache).巴赫在1836—1838年间在英国学习时了解了欧姆定律,回国后又传授给亨利(1797—1878).在此以前,亨利不懂得什么是电阻,什么是电流强度,他把并联的电池组称为“量电池”,把串联的电池组称为“强度电池”,说明他也已经接近了欧姆定律的内容,但还不懂得欧姆定律。

黑格尔在1831年去世后,他的哲学对科学的束缚开始松弛了,作为他的哲学的最后一个牺牲品的欧姆算是获得了解放.高斯(1777—1855)和韦伯(1804—1891)在哥廷根树立的科学风气,逐步向德国各地传播开来,这就为接受

欧姆定律创造了有利条件.截至1840年,已有不少实验家相继证明了欧姆定律,并把它运用到自己的工作中去.不过,欧姆的声誉首先是在英国树立起来的.1841年,伦敦皇家学会授与欧姆科普勒奖章,1843年惠斯登的贝克利亚讲演给予欧姆高度评价,这就引起了德国政府和科学界对欧姆的关注.埃尔曼(P. Ermann, 1764—1851)和多佛(H. W. Dove, 1803—1879)等人竭尽全力地要把欧姆推荐到科学的最高岗位上.1845年2月9日,海尔曼(Hermann)写信给巴伐利亚科学院数理学部秘书长,建议选举欧姆为正式院士.经过这些人的多方努力,欧姆最后得以担任慕尼黑大学的物理讲座.遗憾的是,两年后他就去世了。

参 考 文 献

- [1] G. S. Ohm, *Schweigger's Journal für Chemie und Physik*, 44(1825), 110—118.
- [2] G. S. Ohm, *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, 4(1825), 79—88.
- [3] M. L. Schagrin, *Amer. J. Phys.*, 31(1963), 536—547.
- [4] J. L. McKnight, *Amer. J. Phys.*, 35(1967), 110—114.
- [5] G. S. Ohm, *Schweigger's Journal für Chemie und Physik*, 46(1826), 137—166.
- [6] F. Gajori, *A History of Physics*, Macmillan, New York, (1964), 235.
- [7] H. Davy *Phil. Trans.*, 111 (1821), 425—439.
- [8] A. C. Becquerel, *Annales de Chimie et de Physique*, 32(1826), 420—430.
- [9] K. L. Caneva, *Diet. Sci. Biogr.*, Charles Scribner's and Sons, New York, Vol. 10, (1974), 188.
- [10] G. S. Ohm *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, 6(1826), 459—469; 7(1826), 45—54, 117—118.
- [11] G. S. Ohm, *Die Galvanische Kette*, Mathematische Bearbeitet, T. H. Riemann, Berlin, (1827).
- [12] S. H. Christie, *Phil. Trans.*, 123(1833), 95; 142.