

# 超导“小时代”之四 电荷收费站

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-11-22收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151208

古代劫匪：“此路是我开，此树是我栽，要想从此过，留下买路财！”

现代路政：“前方500米收费站，请减速慢行！”

18世纪末到19世纪初，牛顿力学的大厦已经落成，整个物理学界正以一个名门正派的身份走向体制化时代。研究物理的基本套路走向成熟：发现新物理现象——总结基本现象规律——针对特征现象进行详细实验测量及定量表征——从大量实验数据里找到合适的数学描述——得出相应公式化的定律——用定律来解释或预测新的现象。至今，以实验为基、理论为辅的科学研究仍然是八股范式，几乎所有的自然科学研究都是这个模式。长期以来，它在描述我们生活的自然过程中取得的成功证明了：实践是检验真理的唯一标准。对于实验物理来说，关键在于获得可靠的量化

的实验数据，否则建立理论只能是空谈。在当时如火如荼的电学研究领域，如何定量地描述电学实验现象，成为各位科学玩家最头疼的问题。

要想玩得起电，首先你得学会怎么“发电”。尽管古希腊人告诉我们摩擦摩擦就能搞定，但毕竟这就像钻木取火一样麻烦，而且得到的静电也不太稳定。富兰克林抓雷电的方法是获得动电的可能途径之一，但又实在太危险了，弄不好被烤焦，灵魂跟风筝一起升天了。不必担心，又是一个着迷科学的富家子弟出马，解决了这个问题。

亚历山德罗·伏特(图1)，出生于一个传统天主教家庭，优哉游哉

的生活里同时隐藏了一颗不羁的内心。他和奥斯特同学一样，喜欢诗词歌赋，也喜欢科学，诗歌用来泡妞，科学用来娱乐。他不惧礼教，和一位歌女同居到50岁，然后和另一个女人结了婚。他也不被当时科学大牛们的条条框框束缚，而是自由地探索他所向往的科学。莫森布鲁克发明莱顿瓶后，伏特也搞来一个玩玩，为了实现不断往莱顿瓶中充电，他最早设计了一个静电起电盘。基本原理还是靠金属和绝缘树脂圆盘之间的摩擦，然后通过静电感应让接地的金属带同种电荷，再把电荷转移到莱顿瓶。显然这种方法和后来盖吕克发明的转动摩擦起电盘一样，需要人工发电，做的体力活太多，不太适宜用来做电学实验。不过，靠这个紧跟时代潮流的小发明，伏特就以29岁的年龄成为了大学教授，然后以此身份名正言顺地周游欧洲列国，拜访伏尔泰、拉普拉斯、拉瓦锡等当时的大科学家和名人。深入广泛地科学文化交流同时，伏特还紧跟时代步伐，阅读新发表的文献。

1791年，伽伐尼的青蛙电学实验引起了伏特的注意，但他的兴趣点不是那只可怜的青蛙，而是伽伐尼手上的金属刀片。伏特尝试着把不同的金属片放在一起，然后发现

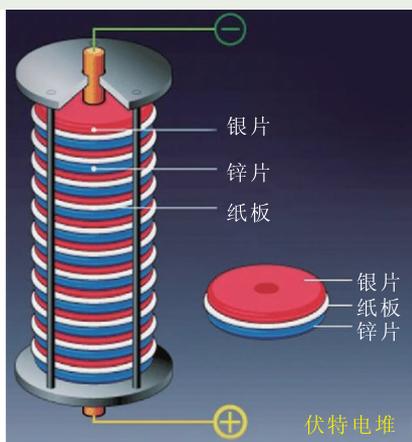


图1 伏特和他发明的电堆 ([http://news.xinhuanet.com/science/2015-11/03/c\\_134757898.htm](http://news.xinhuanet.com/science/2015-11/03/c_134757898.htm))

了一件神奇的事情——不同的金属接触会造成电势差，也就是说，起电的方法很简单，就是把两块不同的金属叠在一起，自然就有了电！伏特还发现金属和液体(主要是电解质)接触则不会产生电势差，因此伽伐尼之所以看到青蛙腿被电，是因为他手上的金属刀片本身带电。伏特号称他的发现“超出了当时已知的一切电学知识”。已经45岁的伏特，突然获得了一个极其重要的灵感——如果把不同金属块按照一定顺序堆叠，自然就可以产生很高的电动势，他把这种浸在酸溶液中的一大堆锌板、铜板和布片称之为“电堆”，后被人叫做伏特电堆(或伏打电堆)(图1)。有了电堆，就等于有了一个持续输出的电源，电学研究从此告别摩擦或抓电的时代，同时也朝着应用迈开了坚实的脚步<sup>[1]</sup>。

伏特发明电堆的时候，已经是55岁接近退休的年龄了。1801年，伏特带着他发明的电堆到欧洲各国做巡回秀，在法国巴黎表演的时候，还吸引了拿破仑皇帝来观看(图2)。拿破仑对伏特的发明特别赞赏，于是大手一挥，给他颁发了一枚金质奖章和一笔丰厚奖金。后来伏特推辞自己廉颇老矣想退休，拿破仑不仅不同意，还给他加封爵位挽留<sup>[2]</sup>。只是，伏特觉得科学家玩政治太危险，人生的最后8年都是在隐居的状态中度过，直到拿破仑倒台之后的1827年，伏特于82岁的高龄去世。后人为了纪念伏特的科学贡献，特把电动势(电势差、电压)的单位取为伏特，简称伏，符号为V。

有了电源，下一个问题就是如何精确测量各种电学现象。按照富兰克林的推论，电现象的本质是电荷，电荷的转移导致了静电现象，

电荷的运动则导致了电流。那么，如何衡量电流的大小呢？因为电流中电荷是运动的，你可不能像密立根那样去数油滴，而且你也无法“看到”电荷，更何况，实际上电荷的数目是如此之多，你数也数不过来呀！幸亏奥

斯特的童话魔法发现了电流可以让磁针偏转，因此电流大小，就能用可观测的磁针偏转角度来衡量。德国的施威格很快注意到这一点，他发明了利用电流磁效应度量电流大小的磁针电流计。由于牛顿力学深入人心，人们很轻松就可以把磁针偏转造成的扭力大小测量出来，最终，电流大小对应了某种力的大小，电学研究回归到了人们熟知的力学研究范畴，一切变得容易起来<sup>[3]</sup>。

说起来容易，做起来难！

系统测量不同媒质里电流大小的第一人，并不是某位出名的大学教授，也不是某位富家子弟。在人人都能玩科学的时代，德国一个穷苦人家孩子，一个博士毕业找不到好工作，被迫为了生计而经常做家教的中学教师，成为了定量研究电学的先驱。他叫乔治·欧姆(图3)，有一个锁匠父亲和一个裁缝母亲，年幼的生活是十分艰苦的，家里许多兄弟姐妹挨不过饥饿寒冷和病痛一个个夭折，母亲在乔治10岁时也撒手人寰，最终只有兄妹三人靠父亲的技艺活了下来。锁匠父亲深谙知识改变命运的道理，一边自学数学物理知识，一边教授兄弟两人

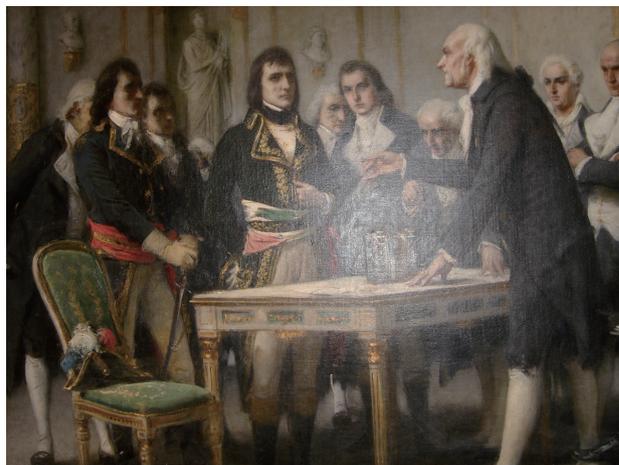


图2 伏特向拿破仑介绍电堆原理([https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta))



图3 乔治·欧姆([https://en.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Ohm](https://en.wikipedia.org/wiki/Georg_Ohm))

——乔治·欧姆和马丁·欧姆。兄弟俩很快就展露数学天赋，年仅15岁的乔治就被大学教授赞赏有加，马丁之后也成为著名的数学家。1805年，老欧姆把16岁的乔治·欧姆送到了埃尔朗根大学，显然这位年青人还没意识到学习的重要性，大一净在玩跳舞、台球、滑冰之类。老爸很愤怒，后果很严重，家里这么穷，你还这么玩。老锁匠说让他转学去瑞士，估计还停了生活费，以至于他不得不中途辍学去中学教书，好挣点钱糊口。后来乔治又想好好学习天天向上，找了欧拉和拉

普拉斯的数学著作来自学，并于1811年在埃尔朗根大学获得了博士学位。话说，六七年时间就能读完大学到拿博士学位，还包括玩物丧志和打工挣钱的时间，实在说明这位仁兄在理科上有一定的天赋。博士毕业并不意味着能找到一个好工作，乔治同学也许觉得父亲骗了他，无奈又回到中学当普通教师去了。一晃又是八九年，1820年，眼看奔四的乔治·欧姆，还觉得自己事业一无所成，对不起自己的聪明才智。也许某一天，突然醒悟，该做点什么。做什么呢？就当下最火热的电学研究吧！

还是那句话，想起来容易，做起来难！



图4 欧姆在做实验(<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/o/ohm>)

乔治·欧姆要做电学实验研究，他面临着巨大的困难。首先，他工作太忙，要知道，一名中学教师是要不停备课、上课、改作业、监考等等的，要想做自己的研究只能利用极其有限的业余时间；其次，他资源缺乏，查文献基本靠图书馆残缺不全的资料，仪器基本没有；再者，他经费困难，微薄的工资还得养活家人，要抽出来搞研究，就得勒紧裤腰带。即使这样，不再年轻的这位中学教师还是义无反顾地开始了他的物理科研生涯。

乔治·欧姆要解决的问题，是测量不同材料在相同条件下通导电流的大小。施威格发明的电流计无疑给了他很大的启发，他自己动手做了一个电流扭秤，在磁针偏转的刻度盘上标出角度，从而有了相对准确地测量电流的仪器。有了测量仪器，等于巧妇有了锅，米相对比较容易——市场上各种金属导线并不贵，剩下就缺一个灶了，也就是电流源。

乔治·欧姆选择了伏特电堆作为电源，就这样，匆匆几年过去了，他从一堆数据里勉强凑出来一个规律。也许是因为他急于表现自己的科学能力，也不知道是不是他们的中学评职称要求论文数目，反正欧姆老师很快把他的初步实验结果发

表了。但不幸的是，他随后发现无法重复实验结论，显然之前的研究还有问题，只是覆水难收，论文都发出来了，除了被大家嘲笑不专业瞎搞，估计也就那样了。有幸的是，一位正直的科学家发现了这位中学教师的努力，他鼓励欧姆不要这么快放弃自己的理想，并给出了一个关键性的建议：伏特电堆的电压并不是特别稳定，这会直接影响电流的测量结果，不如采用更加稳定的温差电池。所谓温差电池，是由德国另一位物理学家塞贝克发明的，他于1821年发现金属两端温度不一样的时候，就会产生电动势，形成电流，温差越大，电流越大。由于温差电池是靠温差驱动，只要保持两端的温度不变(如一头沸水，一头冰水)，输出的电流就能稳定。可怜的欧姆，为了追逐自己的科学之梦，天天在冰火两重天的实验室猛干(图4)。终于，积累了大量的数据之后，乔治·欧姆发现了一个非常简单的线性规律：通过金属的电流强度和它两端的电势差成正比。因此，衡量金属导电能力可以用通过它的电流强度和电势差的比值来定义，即是电导，表示传导电流能力；两者反过来相除，就是电阻，表示阻碍电流能力(图5)。欧姆还发现金属导线的横截面积越大，长度越短，导电能力越好，也就是说，电阻与长度成正比且与横截面积成反比，这点在情理之中<sup>[4]</sup>。

乔治·欧姆的结论非常简洁漂亮，然而长期以来，许多自命不凡的科学家、教授们都不喜欢这位中学老师做的土实验，认为金属导电性质没有那么简单，甚至嘲笑他的著作是“对自然尊严的亵渎”。当然，也有人持支持态度，比如电流计的发明者施威格就跟他说“是金

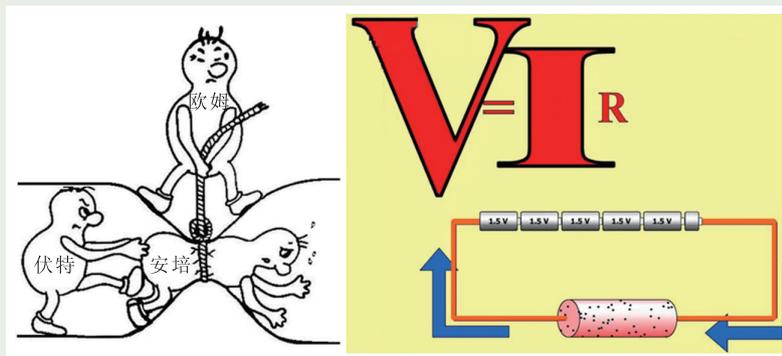


图5 欧姆定律(<http://www.sengpielaudio.com/calculator-ohmslaw.htm> <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/ohms-law>)



图6 电荷收费站

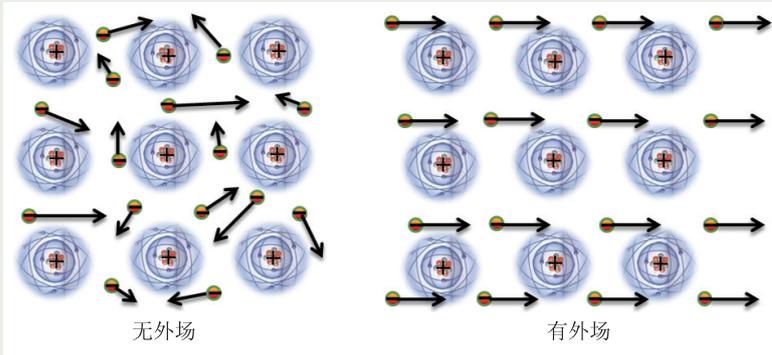


图7 电子在材料内部的运动状态

子总会发光”。乔治·欧姆本人也极感郁闷，觉得四旬年纪来玩科学是一种失败，他甚至辞去了科隆大学的教职，又去干起了老本行——收入较高一些的私人教师。1831年，有人重复出了相关的实验结果，人们才开始将信将疑。直到1841年，英国皇家学会授予乔治·欧姆“科普利金质奖章”，算是给了他科研工作的一个公开的肯定<sup>[5]</sup>。乔治·欧姆总结出的金属导电规律被命名为欧姆定律，后人为了纪念他，把电阻的单位命名为欧姆，简称“欧”，符号为 $\Omega$ 。

如今，人们知道，产生电阻的根本原因，在于电子在材料内部运动时会遇到各种阻碍。就像你开车

上了高速公路，每每遇到收费站都可能堵车一样，因为堵车导致整个车流变慢。电子在运动过程也要付出它自己的“买路财”，它可能发生碰撞导致能量损失，部分电子跑得慢了甚至被材料困住跑不动了(图6)。电子大军从进入材料，到奔出材料，需要一路厮杀，难免损兵折将，也难免有大量伤病，最终导致出来的电子部队不一样，这就是电阻的起源。麦克斯韦的电磁理论和法拉第的电磁场概念告诉我们，电子之所以能够运动，是因为受到了电场或磁场的作用力。在没有外电场情况下，电子在材料内部运动是杂乱无章的，无法形成固定方向的电流；但是一旦建立电场，电子就

会受到一致方向的作用力，从漫天飞的状态秒变成齐步走的状态，形成方向稳定的电流(图7)。需要注意的是，电子在材料内部的运动速度并不是想象中那么快，尽管电场或磁场可以光速建立起来，但是电子毕竟有一定的质量，跑起来还是要远远低于光速。一般来说，电流传播速度指的是接近光速的电磁场速度，而非电子运动的速度。而决定电子在材料内部的运动方式，以及运动过程会受到怎么样的阻碍，关键在于材料内部电磁场的分布。至于材料内部电磁场是怎么分布的，它们又是如何影响电子的运动状态呢？直到今天，这仍然是物理学的主要研究内容之一<sup>[6]</sup>。

## 参考文献

- [1] 宋德生, 李国栋. 电磁学发展史(修订版). 广西人民出版社, 1996  
 [2] 刘晓. 拿破仑对法国科学技术研究的推动. 中国社会科学报, 2014年01月08日  
 [3] (美)麦克莱伦第三, (美)多恩 著, 王鸣阳

- 译. 世界科学技术通史, 上海科技教育出版社, 2007  
 [4] 原鸣. 欧姆定律的发现. 中国科学报, 2014年5月16日  
 [5] 学科王(<http://zixun.xuekewang.com/>). 乔

- 治·西蒙·欧姆——欧姆定律. 2010年10月30日  
 [6] 罗会仟. 若水阁科学博客(<http://blog.sciencenet.cn/u/Penrose>), [水煮物理](21): 电荷的“买路财”