# 63．小灯泡的“非线性”是否说明它不遵守欧姆定律？

小灯泡中的通电导体是金属丝（一般是钨丝），它遵守欧姆定律。我们在实验中测量并描绘出来的小灯泡的 *I* – *U* 特性曲线，其电压变化范围是从零开始而到其额定电压值，在这个过程中，灯丝的温度从室温一直升高到一千摄氏度以上，它表现出来的非线性是由于温度变化而引起的。

通过实验实际测量并且描绘出小灯泡的“*I* – *U* 特性曲线”，它是一条逐渐向上弯曲的曲线，那么是否可以此为依据，说小灯泡不遵守欧姆定律呢？

## 一、正确理解欧姆定律

中学物理教科书关于欧姆定律的一般表述为：导体中的电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比，跟导体的电阻 R 成反比。

赵凯华和陈熙谋合著的《电磁学》（第三版，高等教育出版社 2011 年出版）第 160 页关于欧姆定律的表述是：在恒定条件下，通过一段导体的电流和导体两端的电压成正比，即 I ∝ U，这个结论叫作欧姆定律。

这两种表述的差别主要有两点：①中学的表述中说了两条，一是 I ∝ U，另一是 *I* ∝ 1/*R*，而《电磁学》中的表述只说了一条，即 I ∝ U，其实欧姆定律有这一条就够了，由于 I ∝ U，那么 *U*/*I* = 常量，这个常量就是反映导体对电流阻碍作用大小的物理量，定义它为电阻 *R*，即 *R* = *U*/*I*；②《电磁学》的表述比中学的表述前面多一句话“在恒定条件下”，这里的恒定条件指的是什么呢，我们在初中就学过，导体的电阻与导体的材料、长度、横截面积以及温度有关，这个“恒定条件”就是指这四项都保持不变。中学的表述中没有这个“恒定条件”，但其中包含的两条要分开来理解：当我们说“电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比”这句话时，必须理解这是对同一段导体而言的，即导体的材料、长度、横截面积都不能变；当我们说“电流 I 跟导体的电阻 R 成反比”时，就是在保持两端电压不变的条件下，变换通电的导体，即改变导体的材料、长度、横截面积。这样的理解基本正确，但常常忽略了“温度”这个条件。在我们讨论电流是否与两端电压成正比时，应该保证通电的导体不能变，而且温度也不能变；而讨论电流是否与导体的电阻成反比时，要变换导体，同样要改变温度。

## 二、怎样判断导体是否遵守欧姆定律？

《电磁学》的表述就是最好的判据：在恒定条件下，通过一段导体的电流和导体两端的电压成正比，即 I ∝ U。所谓恒定条件，包括温度保持不变。对于同一段导体，在温度保持不变的条件下，如果通过它的电流和它两端的电压成正比，则遵守欧姆定律；反之，则不遵守欧姆定律。

电流的热效应是普遍的效应（除了超导体以外），只要导体中有电流通过，就要发热，但实验必须在有电流的情况下进行，因此要严格地保持温度不变并不容易，我们只能尽量减少通电时间，在实验过程中尽可能地使导体温度的变化被控制在一个很小的范围内。我们在做验证欧姆定律的实验时，强调每次通电渎取数据的过程要尽可能短，读完数据后要立即断开电路，休息一段时间再开始下一次测量，就是为了尽可能保证实验过程中导体的温度保持不变。金属导体遵守欧姆定律，就是经过了这样的实验验证。

小灯泡的灯丝一般由耐高温的钨丝制成，它是金属：按照上面我们说的要求用实验测量通过钨丝的电流 *I* 及两端的电压 *U*，即每次在开关断开的情况下，调节好电压 *U* 的值，闭合开关后用最短的时间读取电流 *I* 的数据，随即断开开关，停歇一段时间，再测量下一组数据。这样就能基本保证导体温度变化不大？根据这样的实验所得的数据做出 *I* – *U* 图像，如果是一条过原点的直线，则说明小灯泡的灯丝是遵守欧姆定律的。

但我们采用的是另一套操作程序：在保持开关接通的情况下，缓慢地调节电压 *U* 的数值，从零开始，每次使电压升高一定的数值，直至达到小灯泡的额定电压为止，这其间灯丝中一直有电流通过，而电流的热效应会使灯丝的温度升高。随着所加电压的升高，通过的电流也逐渐增大，灯丝温度升高加快。往整个实验的过程中，灯丝的温度从室温一直升高到一千摄氏度以上，到正常发光所需的温度。这样做出的 *I* – *U* 图像是一条明显的逐渐向上弯曲的曲线，造成这一结果的原因是温度的变化会引起钨丝电阻率 *ρ* 的变化，因此不能仅仅根据图像的非线性就说小灯泡的灯丝不遵守欧姆定律。

半导体二极管是典型的不遵守欧姆定律的元件，常用 *I* – *U* 特性曲线来描述它。一般物理教科书给出的二极管的 *I* – *U* 特性曲线只是为了说明它的非线性特征，既没有说明它的具体型号，也没有注明测量时的温度值，如图 1 所示。正是由于它没有注明测量时的温度值，有人往往忽略了测量过程须保持温度不变这一重要条件。一些稍微专业的书籍会标明半导体在测量时的温度值，如图 2 所示就是从《半导体逻辑元件及其应用》一书中摘录的一张图，它是硅半导体逻辑元件中常用的 2CP10~20 系列的二极管的 *I* – *U* 特性曲线，它分别呈现了常温（20℃）、高温（75℃）、低温（− 50℃）三种情况下的 *I* – *U* 特性曲线，它们都是非线性的，但拐点的位置各不相同。

图 1 不严格的二极管的 *I* – *U* 特性曲线

正向电压/V

正向电流/mA

反向电压/V

反向电流/μA

−40

−20

20

10

0

−100

−200

−300

0.5

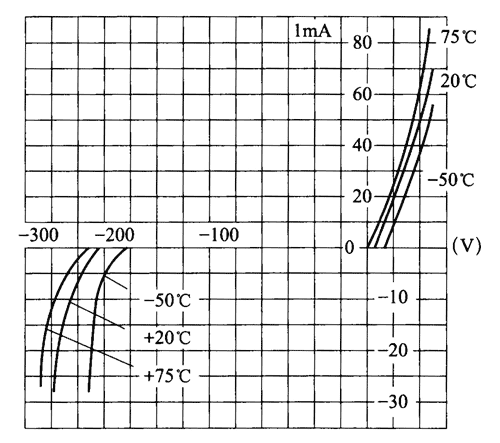


图 2 二极管 2CP10~20 的 *I* – *U* 特性曲线

## 三、关于非线性元件

线性元件和非线性元件的确定要看是怎么定义的。有一种说法：对欧姆定律不适用的导体和器件，电流和电压不成正比，*I* – *U* 特性曲线不是直线，这种电学元件叫作非线性元件。这是把是否遵守欧姆定律作为是线性元件还是非线性元件的判据。在作为基础教育的物理教科书中，有很多版本持这种观点。按照这种说法，白炽灯属于线性元件，因为它的 *I* – *U* 特性曲线要求在温度不变（或者温度变化范围很小）的条件下获取数据并做出图像，半导体二极管这类元件属于非线性元件。

但并不是所有人都认同上述观点，特别是关注技术和实际应用的人，他们常常根据实际应用的元器件是线性还是非线性来区分，而不强调造成非线性的原因是不是温度变化，只要这些元器件应用的是它的非线性，都可以称为非线性元件。最典型的例子就是热敏电阻，它对温度很敏感，温度稍有变化，其电阻就有较大的改变，它在自动控制温度的电路中起关键作用，这类元器件被称为非线性元件。有人问，如果设法保持温度不变，测量通过热敏电阻的电流和电压的数值，其 *I* – *U* 图像是线性的还是非线性的。但人们并不热心去做这个实验。一方面，要严格保证温度不变这个条件是非常困难的，因为只要有电流通过，它的温度就会升高，而温度稍有变化，电阻值就会发生明显的改变；另一方面，更主要的原因是我们应用的正是它对温度敏感的特点，或者说我们要应用的正是在温度变化时它的 *I* – *U* 图像的非线性，因此它被公认为是非线性元件。

金属遵守欧姆定律，这是从欧姆本人开始就得到科学界公认的，但这只是在温度保持不变，或基本保持不变的条件下得到的结论，如果温度大幅度变化，其电阻也会有很大变化。如果不把是否遵守欧姆定律作为是不是线性元件的标准，那么去掉实验时必须保持温度不变这个条件，只要 *I* – *U* 图像是曲线，就称为非线性元件。金属电阻温度计就是应用金属的电阻随温度变化的非线性制成的，从这个意义上说，把金属电阻温度计称为非线性元件也是可以的。