# 65．为什么弃用“内外电压之和等于电源电动势”的实验？

在早期中学物理教科书中，有一个式子：*E* = *U*外 + *U*内，一般把它理解为电源的电动势 *E* 等于外电压 *U*外 和内电压 *U*内 之和，当时还特意生产和配备了一个实验仪器——可调内阻电池，把该电池与适当的电阻连接成闭合电路，用电压表实际测量外电路两端电压（外电压）及内电路电阻两端电压（内电压），从而验证 *E* = *U*外 + *U*内 的结论。

然而，现在使用的教科书已经弃用了上述实验，并且上面的式子理解为 *E* = *U*外 + *Ir*，其中的 *Ir* 称为“内部电势降落”。

内外电压之和等于电源的电动势，即 *E* = *U*外 + *U*内，这是以前较为普遍的讲法，当时还为此设计并配备了专用的教学仪器——可调内阻电池，该电池如图 1 所示，其中 A、B 分别为电池的正极和负极，C、D 为两个探针，它们的下端位于电池内部的电解质溶液中，分别靠近正、负极但不与正、负极接触，用来连接测量电池内电压的电压表。向电池内打气，可以改变电池内电解质液面的高度，从而改变电池的内电阻。

图 1 可调内阻电池

测量电池内外电压的实验电路如图 2 所示，虚线框内为可调内阻电池，其中 A、B 分别与电压表 V1 相连接，用来测量外电压；C、D 分别与电压表 V2 相连接，用来测量内电压。闭合开关 S，接通电路，调节变阻器 *R*，分别读出并记录下电压表 V1 和 V2 的示数，即得到多组 *U*外 和 *U*内 的数值，它们之和是一个不变量，即为电池的电动势。

B

C

D

S

*R*

A

V1

V2

图 2 测电池的内、外电压

后来教科书在内容安排时舍弃了这种讲法，可调内阻电池也逐渐淡出了中学物理教学的课堂。但仍有一些教师对此不理解，并仍然采用这种讲法。那么这种讲法有什么问题呢？

## 一、理论上的缺憾

### （1）关于电动势的概念

电动势是恒定电流这一章的重要概念，电流在闭合电路中流动，通过电场力做功把电能转化为内能或其他形式的能量，而提供电能的是电源，电源内通过非静电力做功把其他形式的能量转化为电能。电动势 *E* 是表征电源内非静电力做功能力的物理量，它定义为非静电力把正电荷 *q* 从电源负极沿电源内部移送到电源正极所做的功 *W*非 与电荷量 *q* 的比值，即 *E* = ，电动势在数值上等于电源把单位正电荷从负极沿电源内部移送到正极所做的功。

而用内、外电压之和等于电动势这种说法来讲电动势，则回避了非静电力做功这一最重要的核心问题，不能不说是很大的缺憾。

对于化学电池，内、外电压之和是一个常量，它等于断路时的路端电压，而断路时的路端电压等于电动势，这无疑是正确的，但作为电动势的定义，则不合适，因为它没有涉及事物的本质——非静电力做功。

### （2）关于化学电池电动势

化学电池一般由插在电解质溶液中的两个极板作为正、负极，两个极板一般由两种不同的金属制成，它们与溶液产生化学作用，使得两个极板分别积累一定数量的正、负电荷，而在这个过程中，非静电力（此处是化学作用产生的力，简称为化学力）做功，这就是化学电池电动势产生的原因。

仍以如图 1 所示的可调内阻电池为例。学生在实验时会产生一个问题：A 是电源正极，B 是电源负极，因此电压表 V1 的正接线柱接 A 而负接线柱接 B，A 与 C 距离很近，D 与 B 距离很近，为什么电压表 V2 的正接线柱要接 D 而负接线柱要接 C 呢？

因为我们没有讲化学电池内部电动势产生的原因，学生提出这个问题很正常，要解决这个问题还是要从电池电动势的产生原因说起。A、B 两极板是由不同的金属制成的，它们分别与电解质溶液发生复杂的物理和化学作用，使得 A 板带上一定的正电荷，与它邻近的液体出现一个带负电的薄层 C，B 板则带上一定的负电荷，与它邻近的液体出现一个带正电的薄层 D，即在两个极板与溶液相接触的薄层间产生了电势跃变，图 3（a）所示为开关断开时 A、B、C、D 四点的电势高低关系，由于没有电流流过，导电溶液内的 C、D 两点电势相等，AC 间的电势跃变 *U*AC 和 DB 间的电势跃变 *U*DB 分别是 A 极板与溶液间的化学作用产生的电动势及 B 极板与溶液间的化学作用产生的电动势，它们之和等于电池的电动势，也等于断路时的路端电压 *U*AB。

A

C

*U*AC

*U*AB

*U*DB

D

B

（a）断路时的情况

图 3 A、C、D、B 电势高低比较示意图

A

C

*U*AC

*U*AB

*U*DB

D

B

（b）通路时的情况

如图 3（b）所示是开关闭合情况下，有电流通过时 A、B、C、D 四点的电势高低关系，两个极板与溶液接触处的薄层间的电势跃变 *U*AC 和 *U*DB 都没有变化，只是由于有电流存在，电池内部的电流方向是从 D→C，因此 *U*DC > 0，而路端电压 *U*AB 比起断路时有所降低，并且 *U*AB 降低的数值与 *U*DC 相等。

不涉及这两个电势跃变，就未涉及化学电动势的本质，学生对电动势这个概念仍然懵懂不明。苦心开发设计了专用仪器——可调内阻电池，却没有起到应有的效果，还不如直接把两个电压表分别连接到 AC 间及 BD 间，测量这两个电势跃变，可以发现，不论开关断开或者接通，也不论如何调节滑动变阻器以改变电流的大小，这两个电压表的示数都不发生改变，它们的示数之和就等于电池的电动势，这样对理解电池的电动势效果可能更好。

### （3）内电压与内部电势降落二者间存在着细微差别

所谓内电压，指的是图 2 中电压表 V2 的示数，它反映的是 DC 两点间的电势差，而非静电力移动正电荷做功的路径是 B→D 以及 C→A，其中 BD 间及 CA 间虽然距离很短、电阻很小、一般可以忽略，但终究是存在一定电阻的，把闭合电路欧姆定律写成 *E* = *U*外 + *Ir*，把 *Ir* 称为“内部电势降落”是准确的，而把 *Ir* 称为内电压，并且这个内电压等于 DC 间的电压，就不够准确了，因为它忽略了 BD 间及 CA 间这两个薄层的电阻。

## 二、内电压不易测量，多种电源不存在内电压

对于可调内阻电池，内电压是可测量的（虽然它与内部电势降落并不是同一个概念，在数值上却近似相等），实验所得的结果也比较满意，但这并不具有普遍性。

首先，对于一般实际应用的电池都不能测量内电压。例如，常用的干电池、手机电池、纽扣电池等。

其次，化学电池只是电源中的一种，产生电动势的非静电力也多种多样，很多电源根本就不存在内电压的概念，更谈不上测量内电压。例如，最简单的直流发电机模型，如图 4 所示，当导体棒 CD 沿导轨以速度 *v* 匀速切割磁感线运动时，CD 段导体要产生感应电动势，回路中有感应电流流过。这时 CD 在两导轨之间的部分是内电路，但它没有内电压，即无法测量这个内电压。把电压表并联在 C、D 两点间，测的是路端电压，即外电压。我们知道，这时的感应电动势 *E* = *Blv*，根据闭合电路欧姆定律，有 *U*DC = *E* − *Ir*，其中 *r* 是 DC 段导体的电阻，即内电阻。这时的 *Ir* 只能叫“内部电势降落”，而不能叫“内电压”，更谈不上测量内电压了。

C

*B*

图 4 最简单的直流发电机

D

*v*

*R*

更有甚者，如图 5 所示，一个圆形闭合线圈位于磁场中，在磁场逐渐增强或者减弱的过程中，有感应电场产生，该电场不是静电场，而是涡旋电场，涡旋电场对线圈内的自由电荷施加的作用力就是产生感生电动势的非静电力，由于电路闭合，有感应电流流过，这时根本无法区分内电路与外电路，当然更谈不上内电压与外电压了。

*B*

*i*

图 5 磁场减弱时产生逆时针方向的感应电流