浙江大学实验报告

专业：
姓名：
学号：
日期：2026-03-22
地点：东 3-208

课程名称：电工电子学实验　指导老师：　成　绩：
实验名称：叠加定理和等效电源定理的验证　实验类型：验证型　学　期：25-26 春夏

一、实验目的和要求　二、实验内容和原理
三、主要仪器设备　四、实验数据记录和处理
五、实验结果与分析　六、讨论、心得

一、 实验目的和要求

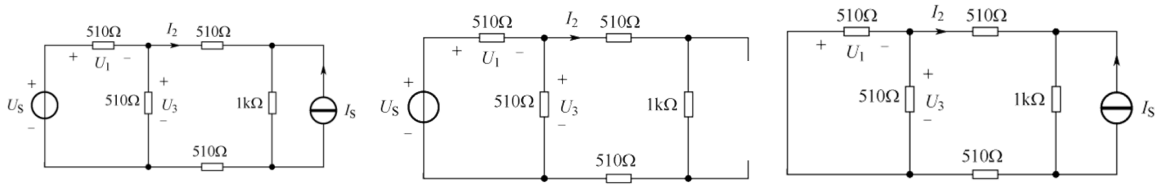
1. 验证线性电路中的叠加定理，加深对叠加定理的理解。
2. 验证等效电源定理，理解戴维宁等效与诺顿等效的物理意义。
3. 掌握含源二端网络外特性的测量方法。
4. 通过原网络、戴维宁等效电路、诺顿等效电路外特性曲线的对比，分析实验误差与非理想因素影响。

二、 实验内容和原理

1.叠加定理

在线性电路中，多个独立电源共同作用时任一支路的电压或电流，等于各独立电源单独作用时在该支路产生的电压或电流的代数和。实验中采用如下处理原则：

1. 电压源单独作用时，其余独立电流源开路。
2. 电流源单独作用时，其余独立电压源短路。



（a）主电路　（b）仅 U_S 作用　（c）仅 I_S 作用

图 1: 叠加定理验证相关电路图

2.等效电源定理

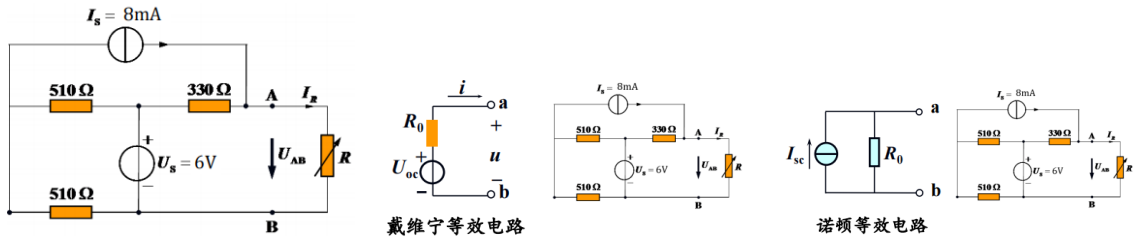
对外等效的线性有源二端网络可用戴维宁等效电路或诺顿等效电路表示：

1. 戴维宁等效：电压源 U_{oc} 与等效电阻 R_0 串联；
2. 诺顿等效：电流源 I_{sc} 与等效电阻 R_0 并联。

二者满足等效关系

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}, \qquad U_{oc} = I_{sc} R_0.$$

如图 2 所示，实验通过改变负载电阻 R，测量端口电压 U_{AB} 与负载电流 I_R，比较原网络、戴维宁等效电路和诺顿等效电路的外特性一致性。



（a）原网络　　（b）戴维宁等效　　（c）诺顿等效

图 2: 等效电源定理验证相关电路图

3.实验内容

结合教材步骤与实际测量过程，本实验主要包括以下四部分内容：

1. 验证叠加定理：按图 1 连接电路，分别测量“仅电压源作用”“仅电流源作用”以及“两源共同作用”三种情况下的 U_1、I_2、U_3，并比较前两者代数和与共同作用测量值是否一致。
2. 测量原网络外特性：改变 AB 端外接负载电阻 R，记录端口电压 U_{AB} 与负载电流 I_R，同时测量开路电压 U_{oc} 与短路电流 I_{sc}。
3. 测量含源二端网络等效电阻：将独立电压源短路、独立电流源开路，在 AB 端不接负载，用万用表直接测量等效电阻 R_0。
4. 分别搭建戴维宁等效电路与诺顿等效电路，重复外特性测量，并将所得结果与原网络比较。

三、 主要仪器设备

1. 电工电子综合实验台；
2. 电路实验板；
3. 电阻元件若干（含 330Ω、510Ω、1kΩ、可调电阻）；
4. 电压源与电流源模块；
5. 万用表、电流表及电压测量仪表。

四、 实验数据记录和处理

1.验证叠加定理（表 5.3-1）

工况	U_1 / V	I_2 / mA	U_3 / V
电压源 U_S 单独作用	4.989	1.937	4.007
电流源 I_S 单独作用	-1.134	-4.50	1.134
上两者叠加结果	3.855	-2.563	5.141
电压源 U_S 与电流源 I_S 共同作用	3.866	-2.53	5.131

表 1: 验证叠加定理

叠加结果与共同作用实测值比较：

$$\Delta U_1 = |3.855 - 3.866| = 0.011\ \text{V}, \qquad \delta_{U_1} = \frac{0.011}{3.866} \times 100\% \approx 0.28\%;$$

$$\Delta I_2 = |-2.563 - (-2.53)| = 0.033\ \text{mA}, \qquad \delta_{I_2} = \frac{0.033}{2.53} \times 100\% \approx 1.30\%;$$

$$\Delta U_3 = |5.141 - 5.131| = 0.010\ \text{V}, \qquad \delta_{U_3} = \frac{0.010}{5.131} \times 100\% \approx 0.19\%.$$

三项测量量中，最大相对偏差为 1.30%，说明在本次仪表精度和接线条件下，叠加关系成立。

2.原网络外特性（表 5.3-2）

可调电阻 R / Ω	0	100	200	500	1000	∞
U_{AB} / V	0	2.001	3.249	5.204	6.47	8.67
I_R / mA	25.8	19.93	16.22	10.37	6.52	0

表 2: 验证等效电源定理：原网络外特性

注：$R=0$ 时测得短路电流 I_{sc}，$R=\infty$ 时测得开路电压 U_{oc}。

$$R_0 \approx \frac{U_{oc}}{I_{sc}} = \frac{8.67}{25.8\times10^{-3}} \approx 336\,\Omega.$$

3.含源二端网络等效电阻 R0 的直接测量

按教材步骤，将独立电压源置零（短路）、独立电流源置零（开路），在 AB 端不接负载电阻 R，用万用表电阻档直接测量端口等效电阻，得到

$$R_0(\text{实测}) = 329.1\,\Omega.$$

将该值与原网络外特性反演结果比较：

$$\delta_{\text{端点法}} = \frac{|329.1-336.05|}{336.05}\times100\% \approx 2.07\%, \qquad \delta_{\text{拟合法}} = \frac{|329.1-335.39|}{335.39}\times100\% \approx 1.88\%.$$

若以 $R_0=329.1\Omega$ 为参考，则原网络、戴维宁等效电路、诺顿等效电路在对应开路电压下应有的短路电流约为

$$I_{sc,\text{原}} \approx \frac{8.67}{329.1} = 26.34\ \text{mA}, \qquad I_{sc,\text{戴}} \approx \frac{8.66}{329.1} = 26.31\ \text{mA},$$

$$I_{sc,\text{诺}} \approx \frac{8.52}{329.1} = 25.89\ \text{mA}.$$

而实际测得的短路电流分别为 25.8 mA、25.4 mA、25.4 mA，均略小于上述反算值。这说明用 U_{oc}/I_{sc} 或外特性斜率求 R_0 时，只要电流读数偏小，算出的 R_0 就会偏大，因此本次“直接测得的 R_0 偏小、外特性反算值偏大”的现象是可以解释的。

4.戴维宁等效电路外特性（表 5.3-3）

可调电阻 R / Ω	0	100	200	500	1000	∞
U_{AB} / V	0	2.006	3.254	5.205	6.47	8.66
I_R / mA	25.4	19.98	16.23	10.36	6.50	0

表 3: 戴维宁等效电路外特性测量

注：$R=0$ 时测得短路电流 I_{sc}，$R=\infty$ 时测得开路电压 U_{oc}。

$$R_0 \approx \frac{8.66}{25.4\times10^{-3}} \approx 341\,\Omega.$$

5.诺顿等效电路外特性（表 5.3-4）

注：$R=0$ 时测得短路电流 I_{sc}，$R=\infty$ 时测得开路电压 U_{oc}。

$$R_0 \approx \frac{8.52}{25.4\times10^{-3}} \approx 335\,\Omega.$$

可调电阻 R / Ω	0	100	200	500	1000	∞
U_{AB} / V	0	1.976	3.204	5.204	6.37	8.52
I_R / mA	25.4	19.67	15.98	10.22	6.42	0

表 4: 诺顿等效电路外特性测量

6.线性拟合与参数反演

采用 Python 对三组外特性数据进行线性拟合，模型写为

$$I_R = kU_{AB} + b,$$

其中 I_R 单位 A，U_{AB} 单位 V。对线性有源二端网络有

$$k = -\frac{1}{R_0}, \qquad b = \frac{U_{oc}}{R_0},$$

从而可反演得到

$$R_0 = -\frac{1}{k}, \qquad U_{oc} = bR_0.$$

电路	拟合方程 $I_R = kU_{AB} + b$	R^2	R_0 / Ω	U_{oc} / V
原网络	$k = -0.0029816,\ b = 0.0258585$	0.99998	335.39	8.673
戴维宁	$k = -0.0029542,\ b = 0.0256804$	0.99960	338.50	8.693
诺顿	$k = -0.0029841,\ b = 0.0255184$	0.99980	335.11	8.551

表 5: 外特性线性拟合结果

由拟合结果可见，原网络、戴维宁等效电路、诺顿等效电路的 R^2 分别为 0.99998、0.99960、0.99980，均接近 1，其中原网络线性度最好。与端点法相比，拟合法利用了全部负载点数据，不会只由开路点和短路点两个读数决定，因此更适合用来比较三种电路的外特性。本次原网络由端点法得到 $R_0 \approx 336.05\Omega$，由拟合法得到 $R_0 \approx 335.39\Omega$，两者只差 0.66Ω，说明整组数据比较稳定。

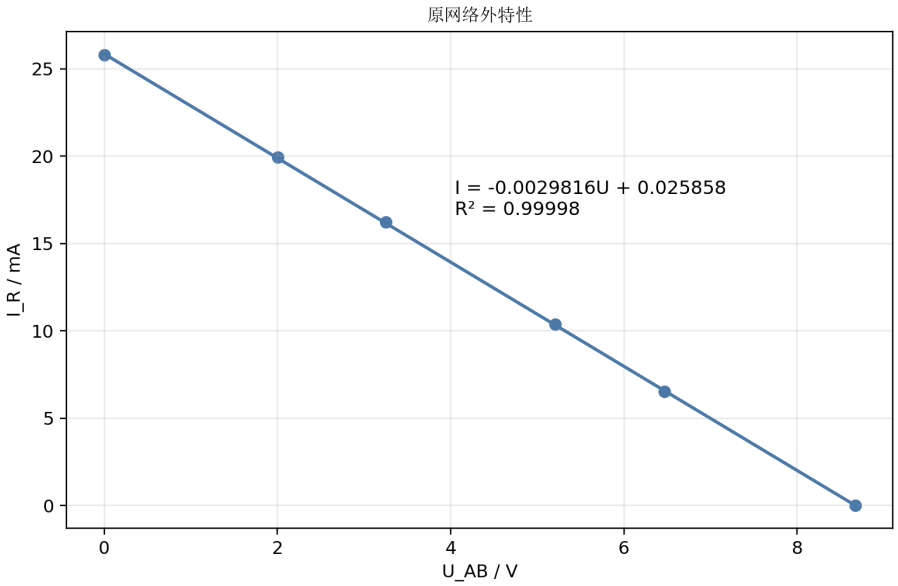
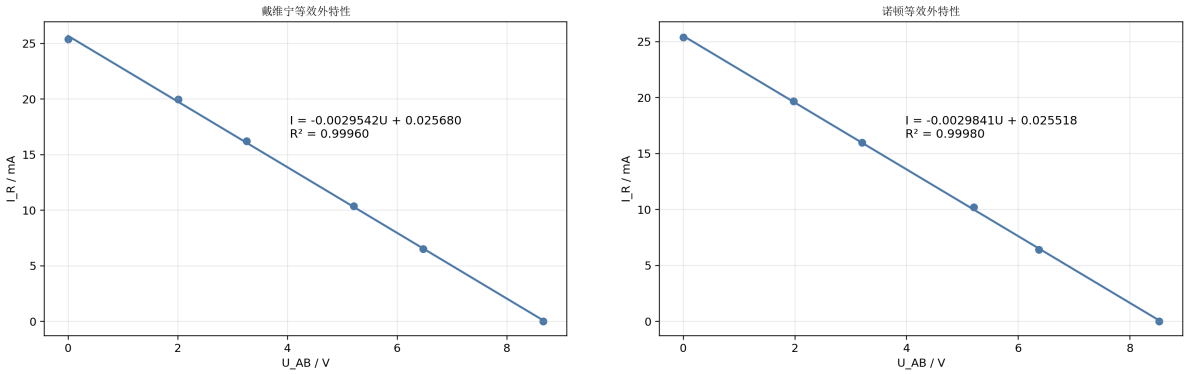


图 3: 原网络外特性拟合结果（$I_R - U_{AB}$）



（a）戴维宁等效外特性（$I_R - U_{AB}$）　　（b）诺顿等效外特性（$I_R - U_{AB}$）

图 4: 等效电路外特性拟合结果

五、 实验结果与分析

1.叠加定理验证结果

三个量的最大相对偏差为 1.30%，平均相对偏差约为 0.59%。其中 U_1 和 U_3 的误差都只有 0.3% 以内，说明电压测量比较稳定；I_2 的偏差最大，主要是因为电流表需要串入支路，容易改变原来的工作状态，而且 I_2 本身数值较小，几百分之一毫安的读数变化就会把相对误差放大。综合这三项数据，可以认为在本次实验精度下，叠加关系成立。

2.等效电源定理验证结果

原网络、戴维宁等效电路、诺顿等效电路的外特性都接近直线，说明三者的端口关系基本一致，等效电源定理得到了验证。进一步比较可见，戴维宁等效与原网络最接近：除短路点外，各负载点的端口电压差基本不超过 0.005 V，电流差不超过 0.05 mA。诺顿等效则整体偏低一些，例如 $R = 100\Omega$ 时 U_{AB} 低 0.025 V、I_R 低 0.26 mA，$R = 1000\Omega$ 时 U_{AB} 低 0.10 V、I_R 低 0.10 mA，开路电压也低 0.15 V。也就是说，诺顿曲线相对原网络有轻微下移，说明本次实验中电流源的设定值和并联支路参数更容易带来系统偏差。

3.等效参数一致性分析

由端点法得到的 R_0 分别约为 336.05Ω、340.94Ω、335.43Ω；由拟合法得到的 R_0 分别约为 335.39Ω、338.50Ω、335.11Ω；直接测量得到 $R_0 = 329.1\Omega$。原网络的端点法和拟合法只差 0.66Ω，诺顿两种求法只差 0.32Ω，说明这两组数据本身比较一致。戴维宁两种结果相差 2.44Ω，主要是因为它的短路电流比原网络小了 0.4 mA，而开路电压几乎没有变化，结果 $R_0 = U_{oc}/I_{sc}$ 被放大了。直接测得的 R_0 又比这些反算值偏小，说明本次差异主要还是出在短路电流测量和等效电路参数设定上，而不是简单的接触电阻问题。

4.理论值对比

按电路标称参数，可取理论等效电阻 $R_{0,\mathrm{th}} = 330\Omega$。于是

$$U_{oc,\mathrm{th}} = U_s + I_s R_{0,\mathrm{th}} = 6 + 0.008 \times 330 = 8.64 \text{ V},$$

$$I_{sc,\mathrm{th}} = \frac{U_{oc,\mathrm{th}}}{R_{0,\mathrm{th}}} = \frac{8.64}{330} \approx 26.18 \text{ mA}.$$

将这组理论值与实验结果比较：

1. 原网络开路电压实测为 8.67 V，比理论值高 0.03 V，相对偏差约 0.35%；
2. 原网络短路电流实测为 25.8 mA，比理论值低 0.38 mA，相对偏差约 1.46%；

3. 直接测得 $R_0 = 329.1\Omega$，比理论值低 0.27%；
4. 原网络端点法求得 $R_0 \approx 336.05\Omega$，比理论值高 1.83%；
5. 原网络拟合法求得 $R_0 \approx 335.39\Omega$，比理论值高 1.63%。

由此可见，开路电压和短路电流与理论值比较接近，外特性反算得到的 R_0 也只比理论值高约 2% 以内；直接测得的 R_0 反而最接近 330Ω。这说明本次实验中，端口特性总体上与标称参数相符，偏差主要来自短路电流测量和等效电路搭建时的实际调节误差。

5.定量偏差比较

以原网络为基准，戴维宁等效电路的 U_{AB} 平均绝对误差约为 0.0035 V，I_R 平均绝对误差约为 0.0817 mA；诺顿等效电路的 U_{AB} 平均绝对误差约为 0.0533 V，I_R 平均绝对误差约为 0.1917 mA。原网络的 R^2 为 0.99998，高于戴维宁的 0.99960 和诺顿的 0.99980，说明原网络本身的线性最好，等效过程引入了轻微扰动。若看最大点偏差，戴维宁的最大电压偏差只有约 0.01 V，而诺顿达到 0.15 V，因此本次实验中戴维宁等效的复现效果更好。

6.误差来源分析

1. 叠加定理部分的主要误差来自电流测量。电流表串入支路后会改变原电路状态，因此 I_2 的偏差明显大于 U_1 和 U_3。另外，I_2 数值本来就不大，所以同样大小的绝对误差更容易表现成较大的相对误差。
2. 外特性测量中，短路电流 I_{sc} 对 R_0 的计算影响很大。因为 $R_0 = U_{oc}/I_{sc}$，只要 I_{sc} 偏小，算出的 R_0 就会偏大。以原网络为例，如果短路电流从 26.34 mA 降到实测的 25.8 mA，反算电阻就会从 329.1 Ω 抬高到 336 Ω 左右。
3. 戴维宁等效和原网络差别较小，而诺顿等效整体偏低，说明本次实验中电流源调节和并联支路参数更容易带来系统误差。尤其是诺顿开路电压偏低 0.15 V，这不是单个点的偶然波动，而是整条曲线都偏低一些。
4. 直接测量 R_0 时，需要把电压源短路、电流源开路。若电流源关断后不是理想开路，或者实验板存在并联泄漏通路，万用表测得的 R_0 就会偏小。这一点和本次 329.1 Ω 明显低于 336~339 Ω 的结果是吻合的。

六、 讨论、心得

1. 本实验通过叠加验证与三种外特性曲线对比，将线性电路理论与实际测量结果建立了直接对应，便于理解叠加定理和等效电源定理的物理意义。
2. 戴维宁等效和诺顿等效描述的是同一个端口的对外特性，只是表达方式不同。在本次实验里，戴维宁等效更容易调到接近原网络的状态。
3. 直接测得的 $R_0 = 329.1\Omega$ 与外特性反算值有一定差别，说明测阻过程和短路电流测量都可能带来误差。以后做这类实验时，应特别注意关断状态是否理想，以及短路测量时仪表是否对电路造成明显影响。
4. 从数据处理方法看，拟合法比只用开路点、短路点的端点法更稳，因为它利用了全部负载点信息。后续若能在实验前先给出理论值或软件参考值，再和实测数据逐项比较，误差分析会更完整。