

3.1 直流电路

3.1.1 实验目的

- (1) 加深理解叠加定理和戴维南定理。
- (2) 学习基本电工仪表和直流电源的使用方法。
- (3) 学习测定有源二端网络等效内阻的方法。
- (4) 加深对等效电路概念的理解。

3.1.2 实验原理简述

1. 叠加定理

在有几个独立源共同作用下的线性电路中,通过每一个元件的电流或其两端的电压,可以看作由每一个独立源单独作用时,在该元件上所产生的电流或电压的代数和。

如图 3-1(a)所示为叠加定理实验电路,图中 E_1 、 E_2 为直流稳压电源,其内阻可近似看作零, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 均为线性电阻。该电路在 E_1 、 E_2 的共同作用时(K_1 打向左边, K_2 打向右边)所产生的各支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 及各电阻上的电压 U_{AB} 、 U_{CD} 、 U_{AD} 、 U_{DE} 、 U_{FA} 应该分别等于电路中仅有 E_1 作用时(K_1 、 K_2 都打向左边)所产生的各支路电流 I'_1 、 I'_2 、 I'_3 及各电阻上的电压 U'_{AB} 、 U'_{CD} 、 U'_{AD} 、 U'_{DE} 、 U'_{FA} 与仅有 E_2 作用时(K_1 、 K_2 都打向右边)所产生的各支路电流 I''_1 、 I''_2 、 I''_3 及各电阻上的电压 U''_{AB} 、 U''_{CD} 、 U''_{AD} 、 U''_{DE} 、 U''_{FA} 的代数和。

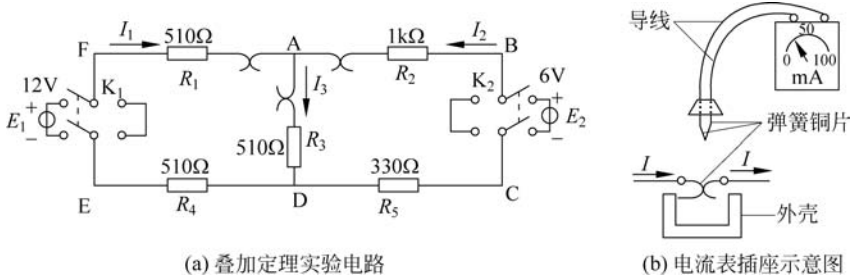


图 3-1 叠加定理实验电路

图 3-1(a)中“X”为电流表插座,测量电流时,只要把电流表两测量端接上电流插头,然后把插头插入插座内,电流表即自动串入该支路,如图 3-1(b)所示。

2. 戴维南定理

任何一个线性有源网络,如果仅研究其中一条支路的电压和电流,则可将电路的其余部分看作一个线性有源二端网络,如图 3-2(a)所示。

戴维南定理指出:任何一个线性有源二端网络,就外部特性来说,可以用一个电压为 U_O 的电压源和阻值为 R_O 的电阻的串联组合等效置换。等效电压源的电压 U_O 等于原有源二端网络的开路电压 U_{OC} ,如图 3-2(b)所示。内阻 R_O 等于原有源二端网络除去全部独立源后的等效电阻。该串联组合即为戴维南等效电路,如图 3-2(c)所示。

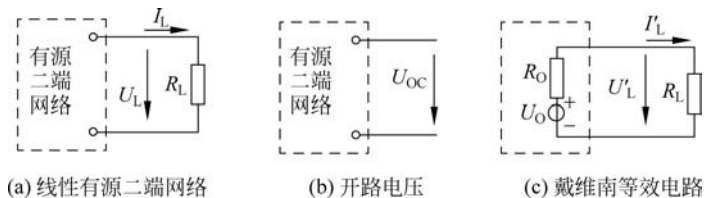


图 3-2 戴维南定理相关电路

用实验的方法直接测出有源二端网络的开路电压 U_{OC} ,即为该网络等效电压源的电压 U_O 。内阻 R_O 可以通过三种实验方法求出。

(1) 方法一:在网络可以除源的情况下(除去理想电压源后,电路中该两端短路,除去理想电流源后,电路中该两端开路),直接用万用表的电阻挡测量除源后网络两端的电阻。

(2) 方法二:在网络允许短路的情况下,用电流表测出该有源二端网络的短路电流 I_{SC} ,再测出该有源二端网络的开路电压 U_{OC} ,则内阻为

$$R_O = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$$

此法称为开路电压、短路电流法。

(3) 方法三:若二端网络内阻很低,不允许短路,可分别测出网络的开路电压 U_{OC} 和网络接上负载 R_L 后,负载两端的电压 U_L ,如图 3-2(a)所示。

因为

$$U_L = \frac{R_L}{R_O + R_L} U_O$$

所以可求得内阻 R_O 为

$$R_O = \frac{U_O - U_L}{U_L} R_L$$

此方法中,若负载 R_L 为可调电阻,当调节负载电阻 R_L ,使得负载电压 U_L 为网络开路电压 U_{OC} 的一半时,此时负载电阻 R_L 的阻值就等于被测有源二端网络的等效内阻 R_O 。此法称为半电压法。

由电压源 U_O 与内阻 R_O 相串联即构成了戴维南等效电路,该等效电路与原有源二端网络的外特性 $U=f(I)$ 完全相同,这个关系将在实验中得到证实。

实验电路如图 3-3(a)所示,它是一个线性有源二端网络。可用以上所述的方法求出它

(3) 根据实验电路图 3-3(a) 进行仿真(计算), 计算二端网络的戴维南等效电路图 3-3(b) 中的参数并填入表 3-3 中。

表 3-3 戴维南等效电路参数的仿真(计算)值

仿真(计算)项目	U_{OC}/V	I_{SC}/mA	R_O/Ω (计算)
仿真(计算)值			

(4) 写出测量二端网络等效电压源的电压 U_{OC} 、短路电流 I_{SC} 的操作步骤。

(5) 本实验可用哪几种方法测出二端网络的等效电阻?

3.1.5 实验步骤

1. 验证叠加定理

E_1 、 E_2 均为可调直流稳压电源, 分别调节 E_1 、 E_2 , 使 $E_1 = +12V$, $E_2 = +6V$ 。根据图 3-1(a), 把电源 E_1 、 E_2 接至电路中, 完成表 3-4 的内容。

表 3-4 各支路电流和电阻电压的测量值

测量项目	E_1	E_2	U_{AB}	U_{CD}	U_{AD}	U_{DE}	U_{FA}	I_1	I_2	I_3
单位	V	V	V	V	V	V	V	mA	mA	mA
E_1 单独作用										
E_2 单独作用										
E_1 、 E_2 共同作用										

2. 验证戴维南定理

按图 3-3(a) 接好线路, 用开路电压、短路电流法, 测定该有源二端网络的戴维南等效电路参数 U_{OC} 、 I_{SC} , 并计算出 R_O , 填入表 3-5。

表 3-5 戴维南等效电路参数的测量值

测量项目	U_{OC}/V	I_{SC}/mA	R_O/Ω (计算)
测量值			

3. 测量二端网络的外特性

按表 3-6 的要求, 调节图 3-3(a) 中负载电阻 R_L (用电阻箱代替) 阻值。测出相应的负载端电压 U_L 与流过负载的电流 I_L , 完成表 3-6 中前两行的内容。

4. 测量等效电压源的外特性

取步骤 2 中的 U_{OC} ($U_O = U_{OC}$) 和 R_O , 按图 3-3(b) 接线, 组成二端网络的等效电压源电路, 测出相应的负载端电压 U'_L 与流过负载的电流 I'_L , 完成表 3-6 中后两行的内容。



叠加定理
实验

表 3-6 二端网络与等效电源电路的外特性

负载电阻/ Ω		0	100	400	500	R_O	550	600	800	1k	2k	5k	∞
测量项目	二端网络												
	U_L/V												
等效电源	I_L/mA												
	U'_L/V												
	I'_L/mA												

3.1.6 实验总结

- (1) 选取表 3-4 中部分电压和电流的实验数据,验证线性电路的叠加性。
- (2) 选取叠加定理实验中部分支路电流与电阻电压的仿真(计算)值与实测值,计算其相对误差。
- (3) 对戴维南实验中 U_{OC} 、 R_O 实测值与仿真(计算)值进行比较,分析其产生误差的原因。
- (4) 在同一坐标上(用方格纸)分别绘出图 3-3(a)、图 3-3(b)的外特性 $U_L = f(I_L)$ 、 $U'_L = f(I'_L)$,验证戴维南定理的正确性。

3.1.7 注意事项

- (1) 直流稳压源不允许短路,直流恒流源不允许开路。
- (2) 接线及测量时,以电路图所标的电流方向为参考方向。

3.2 正弦稳态交流电路相量的研究

3.2.1 实验目的

- (1) 掌握正弦交流电路中电压、电流相量之间的关系。
- (2) 掌握功率的概念及感性负载电路提高功率因数的方法。
- (3) 了解日光灯电路的工作原理,学会连接日光灯电路。
- (4) 学会使用功率表。

3.2.2 实验原理简述

1. RC 串联电路

在单相正弦交流电路中,用交流电流表测得各支路的电流值,用交流电压表测得回路各元件两端的电压值,它们之间的关系应满足相量形式的基尔霍夫定律,即

$$\sum \dot{I} = 0, \quad \sum \dot{U} = 0$$

实验电路为 RC 串联电路,如图 3-4(a)所示,图中 R 为两只白炽灯泡并联时的等效电阻,在正弦稳态信号源 $\dot{U}$ 的激励下,有

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = \dot{I}(R - jX_C)$$

从上述相量关系表达式可以得到相应的相量图,如图 3-4(b)所示。 $\dot{U}$ 、 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{U}_C$ 三个相量构成一个直角三角形。当阻值 R 改变时, $\dot{U}_R$ 与 $\dot{U}_C$ 始终保持着 90° 的相位差,所以 $\dot{U}_R$ 的相量轨迹是一个半圆。从图中可知,改变 C 值或 R 值可改变 $\dot{U}_R$ 与 $\dot{U}$ 之间的夹角 φ 的大小,从而达到移相的目的。

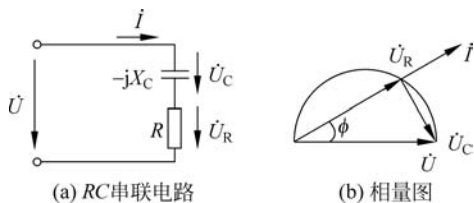


图 3-4 RC 串联电路及相量图

2. 日光灯电路及其功率因数的提高

日光灯电路由启辉器、灯管和镇流器三部分组成。

启辉器(如图 3-5(a)所示)是一个充有氖气的玻璃泡,其中装有一个不动的静触片和一个用双金属片制成的 U 形可动触片,其作用是使电路自动接通和断开。在两电极间并联一个电容器,用以消除两触片断开时产生的火花对附近无线电设备的干扰。

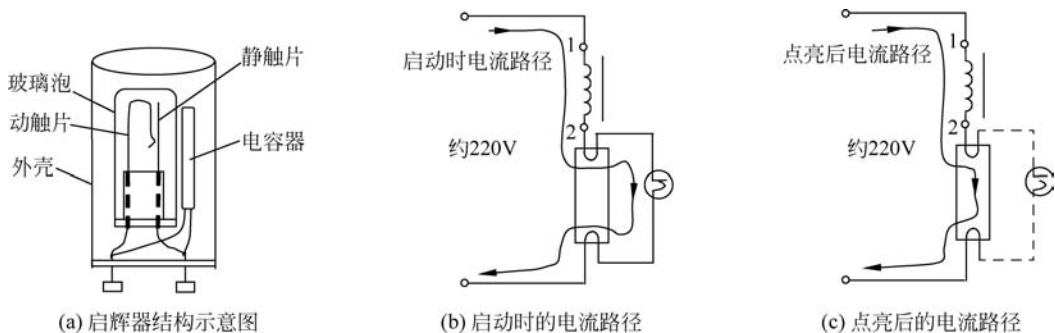


图 3-5 启辉器示意图和日光灯点亮过程

灯管是一根普通的真空玻璃管,管内壁涂上荧光粉,管两端各有一根灯丝,用以发射电子。管内抽真空后充氙气和少量水银。在一定电压下,管内产生弧光放电,发射一种波长很短的不可见光,这种光被荧光粉吸收后转换成近似日光的可见光。

镇流器是一个带铁芯的电感线圈,起动时产生瞬时高电压,促使灯管放电,点亮日光灯。在点亮后又限制了灯管的电流。

日光灯实验电路如图 3-6(a)所示,日光灯的点亮过程如下:当日光灯刚接通电源时,灯管尚未通电,启辉器两极也处于断开位置。这时电路中没有电流,电源电压全部加在启辉器的两电极上,使氖管产生辉光放电而发热,可动触片受热变形,于是两触片闭合,灯管灯丝通过启辉器和镇流器构成回路,如图 3-5(b)所示。灯丝通电加热发射电子,当氖管内两个触片接通后,触片间不存在电压,辉光放电停止,双金属片冷却复原,两触片脱开,回路中的电流瞬间切断。这时镇流器产生相当高的自感电压,它和电源电压串联后加在灯管两端,促使管内氙气首先电离,氙气放电产生的热量又使管内水银蒸发,变成水银蒸气。当水银蒸气电离导电时,激励管壁上的荧光粉而发出近似日光的可见光。

灯管点亮后,镇流器和灯管串联接入电源,如图 3-5(c)所示。由于电源电压部分降落在镇流器上,使灯管两端电压(也就是启辉器两触片间的电压)较低,不足以引起启辉器氖管再次产生辉光放电,两触片仍保持断开状态。因此,日光灯正常工作后,启辉器在日光灯电路

中不再起作用。

日光灯点亮后的等效电路如图 3-6(b) 所示, 其中灯管可近似看作电阻负载 R , 镇流器可用小电阻 r 和电感 L 串联来等效。

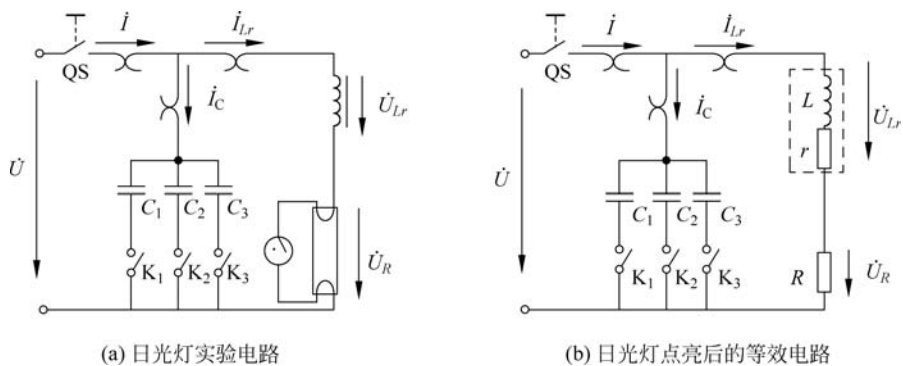


图 3-6 日光灯实验电路及等效电路

若用数字功率表测得镇流器所消耗的功率 P_{Lr} , 也就是等效电阻 r 所消耗的功率, 又用电流表测得通过镇流器的电流 I_{Lr} , 则可求得镇流器的等效电阻 r 。

由于

$$P_{Lr} = I_{Lr}^2 r$$

则

$$r = \frac{P_{Lr}}{I_{Lr}^2}$$

再用数字功率表的交流电压挡测得镇流器的端电压 U_{Lr} , 根据 $U_{Lr}^2 = I_{Lr}^2 (X_L^2 + r^2)$ 可求得镇流器的感抗 X_L 为

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U_{Lr}}{I_{Lr}}\right)^2 - r^2}$$

则镇流器的等效电感为

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

其中, $f = 50 \text{ Hz}$ 。

日光灯灯管 R 所消耗的功率为 P_R , 电路消耗的总功率为 $P = P_R + P_{Lr}$ 。只要测出电路的总功率 P 、总电流 I 和总电压 U , 就能求出电路的功率因数 $\cos\varphi = \frac{P}{UI}$ 。

日光灯的功率因数较低(电容 $C=0$ 时), 一般在 0.6 以下, 且为感性电路, 因此往往采用并联电容器的方法来提高电路的功率因数, 由于电容支路的电流 $\dot{I}_C$ 超前于电压 $\dot{U}_C$ 90° , 抵消了一部分日光灯支路电流中的无功分量, 使电路总电流减少, 从而提高了电路的功率因数。当电容增加到一定值时, 电容电流等于感性无功电流, 总电流下降到最小值, 此时, 整个电路呈现纯电阻性, $\cos\varphi = 1$ 。若再继续增加电容量, 总电流 I 反而增大了, 整个电路呈现电容性, 功率因数反而又降低了。

3.2.3 实验仪器设备

实验仪器设备见表 3-7。

表 3-7 实验仪器设备

序号	名 称	型 号 规 格	数 量	备 注
1	单相电量仪表板	MC1098	1 只	
2	30W 日光灯镇流器	30W	1 只	
3	电容器	$1\mu\text{F}/600\text{V}$ 、 $2.2\mu\text{F}/600\text{V}$ 、 $4.7\mu\text{F}/600\text{V}$	1 组	
4	启辉器		1 只	
5	导线	全封闭式	若干	

3.2.4 预习要求

- (1) 复习 RC 串联电路和功率因数的提高的相关内容。
- (2) 了解功率表的原理和使用,参阅有关内容。
- (3) 了解日光灯电路的组成和工作原理。
- (4) 实验电路的总电压 $\dot{U}$ 、灯管电压 $\dot{U}_R$ 及镇流器电压 $\dot{U}_{Lr}$ 之间存在着什么关系?
- (5) 提高日光灯电路的功率因数为什么只采用并联电容器法,而不用串联法? 所并联电容的电容值是否越大越好?
- (6) 并联电容后,日光灯支路的电流 $\dot{i}_{Lr}$ 是否改变? 电路的总有功功率 P 是否改变? 为什么?
- (7) 分析表 3-9 中各列数据的变化规律,哪些是不变的? 哪些是变化的? 应该怎么变化?

3.2.5 实验步骤

1. RC 串联电路电压三角形的测量

(1) 用两只 220V、15W 的白炽灯泡(并联)和 $4.7\mu\text{F}/450\text{V}$ 电容器串联组成如图 3-4(a)所示的实验电路,将自耦调压器的输出电压调至 220V。测量 U 、 U_R 、 U_C 值,记入表 3-8 中。

表 3-8 电压三角形的测量值

白炽灯盏数	测 量 值			计 算 值	
	U/V	U_R/V	U_C/V	U/V	ϕ
2					
1					

- (2) 改变电阻 R 的阻值(用一只灯泡),重复(1)的内容,验证 U_R 相量轨迹。

2. 日光灯电路及其功率因数的提高

(1) 先打开电源,将电压调至 220V,关断电源待用。按图 3-6(a)接好实验电路,检查电路无误后打开电源,观察日光灯的点亮过程和启辉器的动作情况。



(2) 分别测量未接入电容和接入不同电容时的各种参数,完成表 3-9。

表 3-9 不同补偿电容时的参数测量值

测试条件	U/V	U_{Lr}/V	U_R/V	I/A	I_{Lr}/A	I_C/A	P/W	P_{Lr}/W	P_R/W	计算 $\cos\varphi$
$C=0$										
$C=1\mu F$										
$C=2.2\mu F$										
$C=3.2\mu F$										
$C=4.7\mu F$										
$C=7.9\mu F$										

注:功率表除了可测功率之外,还可以同时测量电压和电流,在测量表 3-9 的数据时, U 、 I 、 P 可同时测量, U_{Lr} 、 I_{Lr} 、 P_{Lr} 可同时测量, U_R 、 P_R 可同时测量(此时电流仍为 I_{Lr}),最后单独测量 I_C 。

3.2.6 实验总结

(1) 根据表 3-9 中的实验数据,在同一张方格纸上画出日光灯电路提高功率因数的电压、电流相量图。

(2) 根据实验原理中计算参数的方法,结合表 3-9 每一行的实验数据,分别计算日光灯管的等效电阻值 R 、镇流器的电感 L 和电阻 r ,取这些计算值的平均值作为最后的结果。

(3) 讨论改善电路功率因数的意义和方法。

3.2.7 注意事项

(1) 在实验操作过程中,应防止触电,注意安全。

(2) 为了保护仪表,日光灯起动时不要将仪表接入电路,待日光灯正常工作后进行测量。

(3) 如电路接线正确,日光灯仍不能起动时,应检查启辉器及其接触是否良好。

(4) 不允许把两根短导线对接后作为一根长导线使用。

3.3 三相交流电路

3.3.1 实验目的

(1) 验证三相对称负载星形、三角形连接时,线电压与相电压、线电流与相电流之间的关系。

(2) 了解不对称负载星形连接时中线的作用。

(3) 学习三相功率的测量方法。

3.3.2 实验原理简述

三相负载根据其额定值和电源电压,可作星形(Y)连接或三角形(Δ)连接,如图 3-7、图 3-8 所示。对称三相负载作 Y 连接时, $U_1=\sqrt{3}U_P$, $I_1=I_P$ 。中线电流 $I_O=0$,可以不接中

线。对称三相负载作 Δ 连接时, $U_l = U_P$, $I_l = \sqrt{3} I_P$ 。 U_l 、 U_P 分别为线电压和相电压, I_l 、 I_P 分别为线电流和相电流。

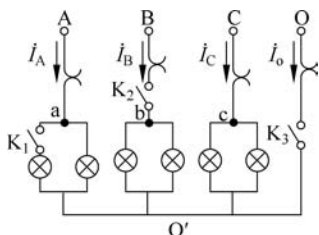


图 3-7 三相负载星形接法

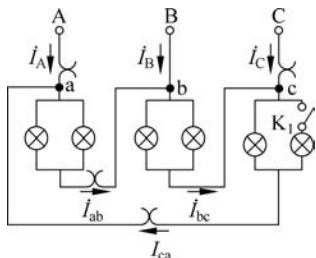


图 3-8 三相负载三角形接法

不对称三相负载作 Y 形连接时, 中线电流 $I_O \neq 0$, 必须有中线。这时仍有 $U_l = \sqrt{3} U_P$, 即负载上的相电压仍对称。如果无中线, 则 $U_l \neq \sqrt{3} U_P$, 负载较小(即负载阻抗较大)的那一相相电压较高, 相电压不对称, 使负载不能正常工作。因此, 照明电路都采用有中线的三相四线制(Y_0)接法。为了防止中线断开, 不允许在中线上安装熔断器和开关。

不对称三相负载作 Δ 连接时, $I_l \neq \sqrt{3} I_P$ 。这时只要电源 3 个线电压对称, 不对称负载的 3 个相电压仍对称, 对电气设备没有影响。

三相负载消耗的总功率等于每相负载消耗的功率之和, 所以对于任何三相负载, 都可以采用三瓦特表法测定功率。三瓦特表法就是用 3 只瓦特表分别测量每相负载的功率, 然后相加; 在负载不变的情况下, 也可以用一只瓦特表依次测量各相负载功率, 然后相加即得三相总功率。

当负载对称时, 每相的有功功率相等, 所以只要用一个瓦特表测出任意一相的功率再乘以 3, 即得三相总功率。这种测量功率的方法叫一瓦特表法, 如图 3-9 所示。以上方法在实际应用中很不方便, 所以较少采用。对于三相三线制电路, 不论负载是否对称, 是星形接法还是三角形接法, 都可以采用二瓦特表法测量其功率, 因此二瓦特表法得到了广泛的应用。下面以星形接法的三相对称负载为例, 说明二瓦特表法的原理。

三相电路的瞬时功率的求解过程如下:

因为

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

所以

$$p = u_A i_A - u_C i_A + u_B i_B - u_C i_B$$

$$= u_{AC} i_A + u_{BC} i_B$$

$$= p_1 + p_2$$

因此平均功率为

$$P = P_1 + P_2 = U_{AC} I_A \cos \alpha + U_{BC} I_B \cos \beta$$

其中, α 为 $\dot{U}_{AC}$ 、 $\dot{i}_A$ 之间的相位差角; β 为 $\dot{U}_{BC}$ 、 $\dot{i}_B$ 之间的相位差角。

因此用两个瓦特表可以测量三相功率, 其接法如图 3-10 所示。第 1 个功率表 W_1 的读数为 $P_1 = U_{AC} I_A \cos \alpha$, 第 2 个功率表 W_2 的读数 $P_2 = U_{BC} I_B \cos \beta$ 。但要注意, 两个功率表