



电 工 学

中 册

上海交通大学

目 录

第六章 电路参数及其性能	1
6-1 电路的参数.....	1
6-2 电阻的性能.....	8
6-3 电感的性能.....	13
6-4 电容的性能.....	23
练习题.....	37
第七章 交流电路	42
7-1 交流串联电路.....	42
7-2 交流并联电路.....	56
7-3 三相交流电路.....	65
7-4 非正弦交流电路.....	81
练习题.....	92
第八章 电工测量	101
8-1 电工测量仪表的分类及选择.....	101
8-2 电流、电压、功率和电能的测量.....	121
8-3 电阻的测量.....	137
8-4 万用电表.....	150
8-5 电感和电容的测量.....	162
8-6 直流电势的测量——直流电位差计.....	173
8-7 磁场的测量——高斯计.....	179
8-8 电量变化过程的记录——光线示波器.....	186
练习题.....	195

第九章 交流电动机及其控制	198
9-1 三相异步电动机的构造及工作原理.....	198
9-2 三相异步电动机的工作特性.....	208
9-3 异步电动机的功率、损耗和转矩.....	221
9-4 三相异步电动机的起动.....	225
9-5 三相异步电动机的调速.....	242
9-6 三相异步电动机的制动.....	247
9-7 交流微电机.....	253
练习题.....	280
第十章 直流电机及其控制	287
10-1 直流电机的工作原理和构造.....	287
10-2 直流电机的特性.....	299
10-3 直流电动机的起动.....	310
10-4 直流电动机的调速.....	315
10-5 直流电动机的反转和制动.....	322
10-6 直流微电机.....	326
10-7 电动机的选择.....	330
练习题.....	341

第六章 电路参数及其性能

6-1 电路的参数

一、负载与参数

在电路中，电源和负载是相对立的两个方面，电源供给电能，而负载则消耗电能。电源有直流和交流之分，交流电又具有不同的频率和波形。至于用电负载，根据其用途及结构更是多种多样。但是当负载作为电路元件而接入电路以后，从它们在电路中所起的作用来看，可以用电阻 R 、电感 L 及电容 C 这样三个参数来表示他们的特征。电路所具有的参数不同，其性质就不同。这种不同反映在电流和电压的关系上，也反映在能量的消耗和转换上。

对实际的负载来说，电阻、电感和电容都是同时存在的；任何导电部分都有电阻；有电流就有磁场，而磁场的变化就会在电路中显示出电感的作用；任何两个互相绝缘的导体之间就具有电容。因此在实际电路中所发生的物理过程往往是比较复杂的，要严格计算这种过程是比较困难的。所以通常在工程上先要把这三个参数的作用进行比较，当某一个或两个参数起主要作用，构成事物发展的主要矛盾，其余的参数，由于作用相对的比较微弱而可予以忽略不计，则这个电路的性质可以认为就由这一个或两个参数所决定。同时，还必须根据某些假设，将实际情况予以适当的科学抽象和理想化，然后再来进行分析。因此在电路中引入的电阻 R 、电感 L 及电容 C 三个参

数，也称为三个理想元件，并不一定是实际电工设备中的一个组成部分，而只是理想模型。通过这些模型或它们的组合，可以近似地反映实际电路中所发生的真实现象。例如，可以认为白炽灯、电阻炉只具有电阻；电磁铁、日光灯电路中的镇流器主要具有电感；一个实际的线圈，则可以用电阻和电感的串联来等效代替。至于在什么条件下，对那一个或两个参数的影响可以忽略的问题，只要其结果能满足工程要求即可。当然，我们也可以利用具有不同参数的元件，通过适当的连接，以获得所需的性能。

二、三个参数的性能方程

由于电阻、电感和电容三个参数具有不同的内在本质，因此在电路中就起着不同的作用。有关这三个参数的物理意义，在上册中已分别讨论过，在此再作简单的回顾，并由此而得出表征各个参数特性的性能方程，作为以后讨论的基础。

1. 电阻

电流并不是无条件的能在各种物体中通过，有些物质具有大量的自由电子，比较容易传导电流，这种物质称为导体。有些物质自由电子极少，不善于传导电流，叫做绝缘体。

导体固然善于传导电流，但另一方面也有阻碍电流通过的作用。这是由于自由电子在作有规律移动以形成电流时，既要克服导体内带正电荷的原子核对它的引力；又要克服同其他原子相碰撞而受到的阻力。材料对电流所具有的这种阻力称为电阻，用字母 R 或 r 表示，它的单位是欧姆 (Ω)，较大的单位是千欧 ($K\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。

认识开始于实践，让我们用实验来观察电阻的性能。利用图 6-1 的线路，可以比较将电阻分别接到直流电源、工频 (50 周/秒) 交流电源及高频交流电源上以后，电阻对电路所起

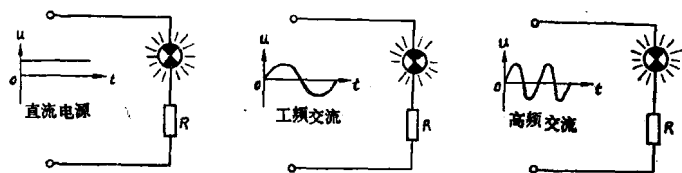


图 6-1 观察电阻性能的实验

的作用。图中将电阻 R 与一个小灯泡串联后分别接至三种电源，并予先调整好使交流电压的有效值与直流电压的数值相同。接入小灯泡是用来观察其亮暗程度，以比较通过电阻 R 的电流的大小。

经过反复观察和比较，可以看出在三种电源情况下，灯泡的亮度是相同的。也就是说，电阻在直流及交流（工频及高频）电路中的作用是相同的。

将电阻 R 接入电路，如设电阻两端的电压为 u ，则流过电阻的电流 i 可用下式来表示：

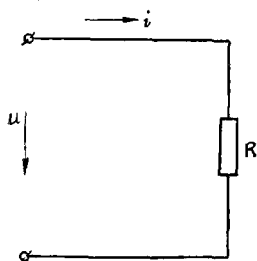


图 6-2 电阻电路

$$i = \frac{u}{R}$$

或 $u = Ri$ (6-1)

这就是电阻的性能方程，它也就是通常的欧姆定律表达式。

2. 电感

无论在电力电路或电子电路中，有许多设备是由线圈元件组成的，例如电磁铁、励磁绕组、电抗器、振荡线圈以及扼流圈等。从电磁

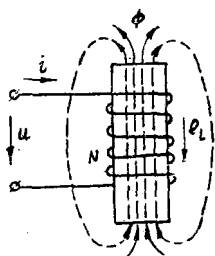


图 6-3 线圈

感应原理可知,当线圈中的电流变化时,穿过线圈的磁力线也将随之变化,因而线圈中便有感应电动势产生,这种现象称为自感现象,由此而产生的感应电动势称为自感电动势,见图 6-3。其数学表示式为:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

式中 L 称为电感,在没有铁磁材料的影响时,它是个常数。电感的单位是亨 (H), $1 \text{ 亨} = 1 \text{ 欧秒}$ 。较小的单位是毫亨 (mH)。

电感是线圈的固有特性,它反映产生自感电动势的能力,它本身与电流的大小无关,而是由线圈的匝数、形状和尺寸,以及介质的导磁系数等因素来决定的。

对于电感也可通过实验来观察其性能,实验的接线如图 6-4 所示。实验的方法同上面观察电阻性能时相同。

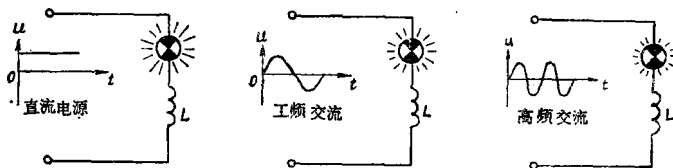


图 6-4 观察电感性能的实验

通过观察和比较,可以看出在三种电源情况下,灯泡的亮度各不相同:在直流电源时,灯泡最亮;工频交流电源时次之;而在高频交流电源时为最暗。由此可知,电感对直流或交流,工频或高频的作用是各不相同的。

电感的这种性能,是由电感的物理本质所决定的。因为电

感的作用乃是感应电动势以反抗电流的变化, 因此它必须通过电流的变化才能显示出来。在直流电路中, 电流为定值, 它不随时间而变化, 因此在电感上不产生自感电动势, 由于没有自感电动势的反作用, 所以这时灯泡最亮。在交流电路中, 电流随时间而变化, 因此电感上有自感电动势产生, 由于它的反作用, 所以灯泡的亮度要下降。而当频率越高时, 电流变化就越快, 自感电动势也就越大, 因此灯泡也就越暗, 所以高频电路中的灯泡比工频电路中的灯泡要暗些。

将电感 L 接入交流电路, 设电感两端的电压为 u , 并设流过电感的电流为 i , 则由于电流的变化将在电感上产生自感电动势 e_L , 又由于外加电压 u 与电感上的自感电动势 e_L 在任何时刻都是保持平衡的, 因此可得:

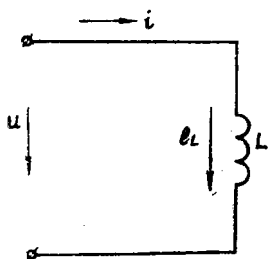


图 6-5 电感电路

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (6-2)$$

这就是电感的性能方程。

3. 电容

由两个导体中间隔以绝缘介质所组成的电器, 在它的导体上具有积聚电荷的能力, 故称为电容器。它是电子技术、自动控制及电力工程中的重要元件之一。电容器的两个导体称为两个极, 一般电容器的两个极大都是片状的, 这时就称为极板。

图 6-6 所示为平板电容器。

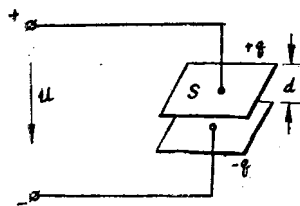


图 6-6 平板电容器

电容器积聚电荷的能力，与加在其极板上的电压成正比，而且还与电容器本身的特性有关，其数学关系式为：

$$q = Cu$$

式中： u 是两极板间的电压，单位为伏；

q 是极板上积聚的电荷量，单位为库；

C 称为电容器的电容量(简称电容)。

电容是电容器的固有特性，它表示电容器贮存电荷的能力，电容的大小决定于极板的形状和尺寸，以及绝缘介质的性能，而与电荷的多少无关。电容的单位是法(F 或 f)，

1 法 = 1 $\frac{\text{库}}{\text{伏}}$ = 1 $\frac{\text{秒}}{\text{欧}}$ 。实用上常采用较小的单位微法(μf)或

微微法(pf)。

对于电容也可通过类似的实验来观察其性能，实验的接线如图 6-7，实验的方法同上。

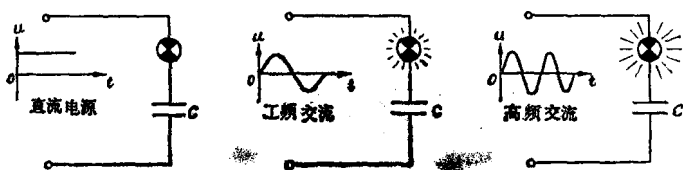


图 6-7 观察电容性能的实验

从实验可以看出，在直流电源时，只是在电源接通的一瞬间，灯泡是亮的，然后很快就熄灭了。在交流电源时，灯泡均发亮，但亮度不同，在工频交流时灯泡较暗，而在高频交流时则较亮。从此可知，电容具有隔断直流使之不能通过的作用，只有当加于电容器极板上的电压有变化时(直流电源接通的一瞬间，或外加交流电压时)电路中才能通过电流。并且，电压变化越快(即交流的频率越高)，则电容器阻碍电路中电流通

过的能力愈弱。或者说，电容器在频率越高的电路中，电流越容易通过。

电容的这种性能，也是由它的物理本质所决定的。因为电容的作用乃是积聚电荷，而其所积聚的电荷量 q 是与加在其极板上的电压 u 成正比的，即 $q = Cu$ 。另一方面，从电流的定义可知，电荷有规律移动则形成电流，且电流的表示式为：

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

故电容的作用必须通过电压的变化才能显示出来。在直流电路中，电压为定值，它不随时间而变化，于是电路中无电流通过，所以灯泡不亮。只有在接通直流电压，电容器进行充电的一瞬间，电压从无到有，此时电路中才有短暂的充电电流通过，使灯泡暂时发亮。在交流电路中，电压随时间而变化，因此电路中有电流通过，使灯泡发亮。而当频率越高时，电压变化就越快，通过电容电路的电流就越大，灯泡就越亮，所以高频电路中的灯泡比工频电路中的灯泡要亮些。

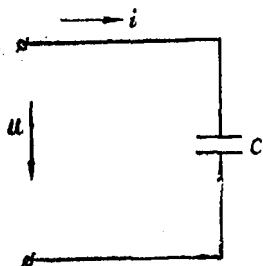


图 6-8 电容电路

将电容 C 接入交流电路，设外加于电容两端的电压为 u ，电路中的电流为 i ，则从上面的讨论已得到：

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (6-3)$$

或

$$u = \frac{1}{C} \int i dt$$

这就是电容的性能方程。

综合上面的讨论可知，由于电阻、电感和电容具有不同的内在本质，这就决定了它们在电路中起不同的作用。它们的性能方程就是其内在本质在“电路”这一外界条件下的反映。为了要较为透彻地了解它们在电路中的作用，本章和下章将对这

些参数在电路中的作用作进一步的讨论。在本章分别讨论上述三种参数在直流以及交流供电情况下电路中电流与电压关系和功率问题。下章将进一步讨论较复杂的电路以及工程上常用的一些电路。

6-2 电阻的性能

一、直流电源供电下的电阻电路

电阻对电流具有阻力，电流流过电阻将电能转化为热能，在工程技术上我们应用电阻这些物理现象做成许多电气设备，这类负载称为电阻负载，如电灯、电炉、电烙铁、电阻器等就是最常见的电阻负载。具有电阻负载的电路称为电阻电路。

直流电源供电下的电阻电路在上册已讨论过，在此再作一次归纳。

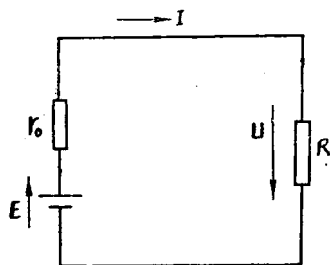


图 6-9 直流电阻负载电路

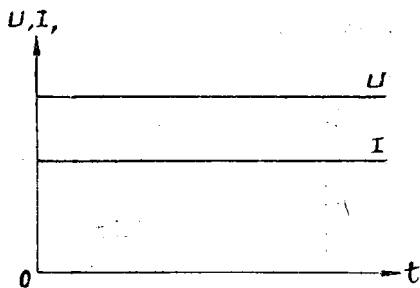


图 6-10 直流电路中的电压和电流

图 6-9 为具有电阻 R 的直流电路。在直流电动势 E 的作用下，在电路中就有直流电流 I 流过。电流 I 、电阻两端的电压 U 和电阻 R 这三者之间遵循欧姆定律，即为：

$$I = \frac{U}{R}$$

且

$$U = E - I r_0$$

其中 r_0 为电源的内阻。

显然，因电动势 E 是恒定不变的，故电路中的电压 U 及电流 I 也是恒定不变的，见图 6-10。

电路是进行能量转换的。在电阻电路中，电阻消耗电能产生热能，电阻所消耗的电能是由电源提供的。电阻在单位时间内所消耗的电能称为电阻消耗的电功率，以符号 P 表示，表达式为：

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (6-4)$$

电功率的单位为瓦(W)或仟瓦(KW)。

电源在单位时间提供的电能，即电源的电功率为：

$$P_E = EI$$

由于电源具有内阻 r_0 ，当电源向负载输出电流时，此电流流过电源内阻也将消耗一部份电功率 $I^2 r_0$ 。因此电阻 R 获得的电功率 P ，应等于电源提供的电功率 P_E 扣除电源内部消耗的电功率 $I^2 r_0$ ，即

$$P = P_E - I^2 r_0$$

$$UI = EI - I^2 r_0$$

此功率关系式也可从 $U = E - Ir_0$ 一式左右各乘以 I 而得到。

电阻负载在时间 t 内消耗的电能，显然应等于电功率与时间的乘积，用 A 表示电能，则：

$$A = Pt = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (6-5)$$

它的单位为瓦·秒（即焦耳）。在电工实用上嫌瓦·秒太小，计算电能常以千瓦·小时为单位。

$$1 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} = 3.6 \times 10^6 \text{ 瓦} \cdot \text{秒}$$

1 千瓦·小时的电能，就是我们通常称的 1 度电。

电阻所消耗的电能被转变为热能，电热器（如电炉、电烙

铁等)就是利用这些热能产生的热量来工作的。在另一些场合, 这些热量使电气设备的温度升高, 给使用带来麻烦, 而应尽量设法使热量散发掉。

〔例 6-1〕有一直流发电机, 接有电阻负载 R , 其端电压 $U=230$ 伏, 内阻 $r_0=0.2$ 欧, 发出的电流 $I=50$ 安。试求发电机的电动势 E 和这时的负载电阻 R , 并求电源发出的功率、电源内阻消耗的功率, 以及发电机输给负载的功率。

〔解〕

发电机的电动势 $E=U+Ir_0=230+50\times 0.2=240$ 伏

负载电阻 $R=\frac{U}{I}=\frac{230}{50}=4.6$ 欧

发电机发出的功率 $P_E=EI=240\times 50=12000$ 瓦 $=12$ 千瓦

发电机内阻消耗的功率 $I^2r_0=50^2\times 0.2=500$ 瓦 $=0.5$ 千瓦

负载获得的功率 $UI=230\times 50=11500$ 瓦 $=11.5$ 千瓦

二、交流电源供电下的电阻电路

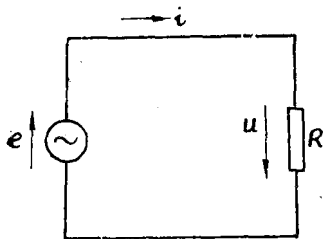


图 6-11 交流电阻负载电路

将电阻 R 接至交流电源, 见图 6-11, 设加在电阻两端的电压为:

$$u=U_m \sin \omega t$$

根据电阻参数的性能方程, 即欧姆定律, 可知, 电路中的电流 i 为:

$$\begin{aligned} i &= \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \\ &= I_m \sin \omega t \end{aligned}$$

式中 I_m 为电流的最大值, 显然

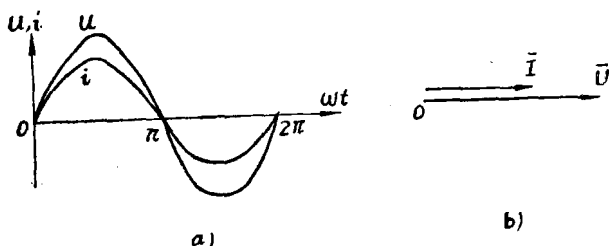


图 6-12 交流电阻电路中电压与电流的波形图(a)及矢量图(b)

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

电路中电压及电流的波形见图 6-12 (a)。由上可见，在交流电阻电路中，电流 i 按照与电压 u 相同的频率随时间作正弦变化，且与电压同时为正，同时为负，同时到达零值或最大值，我们称两个变化步调完全一致的交流量为“同相”，故在交流电阻电路中，电流与电压是同相的。

将上式等号两边同除以 $\sqrt{2}$ ，则得到电压与电流之间的有效值关系为：

$$I = \frac{U}{R} \quad (6-6)$$

电压与电流的矢量图如图 6-12(b) 所示。

从上式可以看到，在交流电阻电路中，电压、电流的有效值与电阻三者之间的关系同直流电阻电路完全相同，都遵循着欧姆定律。

由于将电阻负载接到交流电源以后，电路中的电压和电流都随时间而变化，因此在电阻上所消耗的功率也必然是时刻在变动着的。

在任何瞬时，电压瞬时值 u 与电流瞬时值 i 的乘积称为瞬时功率，用小写字母 p 表示，即

$$\begin{aligned}
 p &= ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \\
 &= U_m I_m \sin^2 \omega t
 \end{aligned}$$

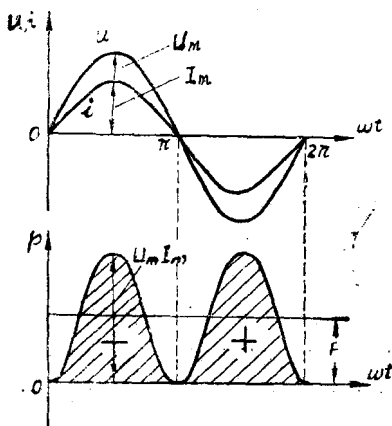


图 6-13 交流电阻电路的功率曲线

功率变化曲线如图 6-13 所示。由于电压与电流同相位，所以 p 在任一瞬时的数值均为正值，这表明电阻 R 在任一时刻都向电源取用电能。

瞬时功率的实用意义不大。对交流电路而言，我们着重讨论的是在一周期时间内电路消耗的平均功率，也称有功功率，简称功率，用大写字母 P 表示。即 $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$

在电阻电路中

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin^2 \omega t dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m I_m (1 - \cos 2\omega t)}{2} dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T UI (1 - \cos 2\omega t) dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T UI dt - \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos 2\omega t dt \\
 &= UI \quad (6-7)
 \end{aligned}$$

从上式可知，交流电阻电路消耗的功率等于电路中电压与电流有效值的乘积。所得结果，在公式的形式上与直流电阻电路是一样的，只是在交流电路中的功率计算式中，用的是电压

和电流的有效值。

伟大领袖毛主席教导我们：“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”我们掌握了电阻负载的这些规律性，也主要在于为工农业生产服务，改造世界。

[例 6-2] 有一 220 伏、60 瓦的电灯，接在 $U=220$ 伏的交流电源上，求通过电灯的电流和电灯的电阻。如接到 110 伏的电源上，则此时功率有多少。

$$[\text{解}] \quad I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273 \text{ 安}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 806 \text{ 欧}$$

也可用下法求

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{60} = 806 \text{ 欧}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{806} = 0.273 \text{ 安}$$

如接到 110 伏的电源上，则由于功率与电压的平方成正比，故此时的功率将为

$$\frac{P'}{P} = \frac{U'^2}{U^2}$$

$$P' = P \left(\frac{U'}{U} \right)^2 = 60 \left(\frac{110}{220} \right)^2 = 15 \text{ 瓦}$$

此时灯泡的亮度将大减。

6-3 电感的性能

一、直流电源供电下的电感电路

1. 稳定情况

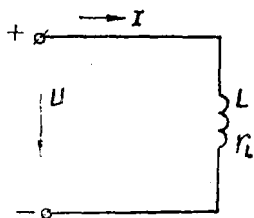


图 6-14 线圈接在直流电源上

当将线圈接上直流电压 U ，如图 6-14 所示，线圈中便有直流电流 I 通过。在稳定情况下电流是不变化的，即 $\frac{dI}{dt} = 0$ ，因此线圈的电感 L

的作用就不会显示出来，即线圈不会产生自感电动势。这说明线圈的

电感 L 对直流电流不发生限制作用。这时的线圈相当于一根长导线，只有导线的电阻 r_L 来限制电流，其值为 $I = \frac{U}{r_L}$ ，在

一般情况下，线圈本身的电阻 r_L 是不大的，故如果将交流电器的线圈错接到直流电源上，则将会由于电流过大而烧毁设备。所以电抗器、变压器、交流电动机和交流电器的线圈都不能接到直流电源上使用。

但是，“对于具体情况作具体的分析”，由于生产实际的需要，只要我们掌握了电感的特点，考虑到通过线圈的电流不超过线圈导体的允许电流，有不少线圈元件是使用直流电源的，例如磨床上的电磁吸盘，直流电机和直流电器的励磁线圈等。

2. 电感线圈接通直流电源时的情况

线圈的电感在直流电路上是否始终不起作用呢？不。当线圈刚接通直流电源时，电路中的电流是从零逐渐上升到某一恒定值的。在电流增长的过程中，线圈的电感是要起作用的。虽然这个过程经历的时间是极为短暂的，一般情况下可以不予考虑，但在某些生产实践中，例如电力拖动自动控制的某些环节中，却有较大的影响，就不能忽视。为了便于分析在这一短暂的过程中所发生的情况，我们把线圈导体的电阻 r_L 和线圈的电感