

目 录

前言

第一章 单相和三相交流电势	1
一、电磁感应现象	1
二、正弦交流电势	2
三、正弦交流电的有效值	4
四、交流电的相位和相位差	5
五、三相交流电势	6
第二章 电阻、电容、电感在电路中的作用	7
一、电阻	7
1. 电阻的基本参数和欧姆定律	7
2. 电阻的串联和并联	8
二、电容	9
1. 电容的基本参数和特性	9
2. 电容的充电和放电	10
3. 电容的串联和并联	11
4. 电容在交流电路中的作用	12
三、电感	12
四、交流电路的功率和功率因数	16
第三章 电力拖动简介	17
一、生产机械和电动机的机械特性	17
1. 生产机械的机械特性	17
2. 电动机的机械特性	18
3. 电力拖动稳定工作的条件	18
二、他励直流电动机的机械特性	19
1. 直流电动机的工作原理	19
2. 他励直流电动机的机械特性	20
三、他励直流电动机的制动状态	22
1. 再生发电制动状态	23
2. 动能制动状态	23
3. 反接制动状态	24
四、三相异步电动机的机械特性	26
1. 三相异步电动机的工作原理	26
2. 三相异步电动机的机械特性	29
3. 三相异步电动机电源电压改变时的机械特性	30
4. 三相异步电动机转子电阻改变时的机械特性	30

五、异步电动机的制动状态	31
1. 再生发电制动状态	31
2. 反接制动状态	31
3. 动能制动状态	32
六、他励直流电动机的转速调节	32
1. 电动机调速的主要指标	33
2. 改变电枢回路电阻调速	34
3. 改变励磁电流调速	34
4. 改变电枢电压调速	35
5. 发电机-电动机系统	35
七、异步电动机的转速调节	38
1. 改变极对数调速	38
2. 转子串接电阻调速	39
3. 变频调速	40
第四章 异步电动机继电-接触控制线路的基本环节	41
一、电力拖动系统图的图形符号和文字符号	41
二、电力拖动系统原理图	58
三、电气线路接线图	58
四、鼠笼式异步电动机直接起动控制线路	60
1. 三相鼠笼式异步电动机单方向起动的控制线路	60
2. 鼠笼式异步电动机正反转控制线路	62
五、三相鼠笼式异步电动机的降压起动	63
1. 自耦变压器(补偿器)起动控制线路	63
2. 三相鼠笼式异步电动机的星-三角起动	65
六、三相鼠笼式异步电动机的动能制动控制线路	67
1. 手动控制的异步电动机动能制动控制线路	67
2. 自动控制的异步电动机动能制动控制线路	67
3. 整流直流电源	68
七、三相鼠笼式异步电动机的反接制动控制线路	69
1. 反接制动继电器的工作原理	69
2. 异步电动机单向起动反接制动控制线路	70
3. 异步电动机正反转反接制动控制线路	71
八、三相线绕式异步电动机的起动控制线路	72
1. 线绕式异步电动机的控制线路	72
2. 线绕式异步电动机起动电阻计算	73
3. 频敏变阻器的应用	75
第五章 普通车床的电气线路	76
一、G620-1型普通车床电气线路	76
1. 主电路	76

2. 控制线路	77
二、L-3 型普通车床电气线路	77
三、主要电器的选择	79
1. 接触器的选择	79
2. 熔断器的选择	79
3. 热继电器的选择	80
第六章 钻床的电气线路	81
一、Z 3040 摇臂钻床的主电路	83
二、Z 3040 摇臂钻床的控制线路	83
1. 电源接触器和冷却泵的控制	83
2. 主轴电动机和摇臂升降电动机的控制	84
3. 摇臂升降和夹紧工作的自动循环	84
4. 立柱和主轴箱的夹紧控制	85
第七章 铣床的电气线路	86
一、X 52 K 立式升降台铣床的电气线路	86
1. 主轴电动机的控制线路	86
2. 进给电动机的控制线路	88
二、X 62 W 万能升降台铣床的电气线路	90
1. 主轴电动机的控制线路	90
2. 工作台进给电动机的控制线路	92
第八章 镗床的电气线路	95
一、T 617 卧式镗床的电气线路	95
1. 开动机床前的准备工作	95
2. 主轴电动机的起动和反接制动	95
3. 主轴和进给机构的速度调节	97
4. 机床部件的快速移动	99
5. 机床的保护装置	99
二、T 610 卧式镗床的电气线路	99
1. 主拖动控制线路	99
2. 进给运动控制线路	104
3. 工作台回转控制线路	106
三、T 4163 A 单柱座标镗床的电气线路	109
1. 可控硅整流电源	109
2. 触发脉冲电路	115
3. 测速发电机 f_c 的作用	117
4. 电气线路中的其他环节	121
5. T 4163 A 座标镗床继电-接触控制线路的工作情况	122
第九章 磨床的电气线路	128
一、MM 7120 平面磨床的电气线路	128

1. MM 7120 平面磨床的运动情况	128
2. 交流拖动电气线路	128
3. 横向进给直流拖动电气线路	130
4. 电磁工作台直流电源及退磁装置	135
二、M 7475 B 立轴圆台面平面磨床的电气线路	136
1. 拖动控制线路	136
2. 可控硅退磁器工作原理	136
三、MB 1332 半自动外圆磨床电气线路	141
1. 切入半自动外圆磨削	144
2. 纵磨自动周期进给外圆磨削	146
第十章 立式车床的电气线路	149
一、主拖动电气线路(工作台)	149
1. 工作台的起动和制动	151
2. 工作台导轨温度测量	152
3. 工作台转速调节	152
二、横梁升降控制线路	153
三、刀架控制线路	154
1. 刀架进给控制	154
2. 刀架快速移动控制	156
3. 刀架调整移动控制	156
4. 刀架进给速度的控制	156
第十一章 龙门刨床的电气线路	166
一、B 2012 A 龙门刨床的电气线路	166
1. 龙门刨床生产工艺对电气控制系统提出的要求	166
2. 电机放大机(又称交磁放大机)的工作原理及特点	171
3. 电机放大机控制回路中各控制环节的作用	178
4. 控制线路的工作	196
5. 机床电气设备的试车与调整	204
二、B 220 龙门刨床的电气线路	212
1. 发电机电压自动调整系统	212
2. 直流电动机励磁电流自动调整环节	216
三、B 210 龙门刨床的电气线路	224
1. 转控机的工作原理	225
2. 转控机在控制系统中的作用	226
3. 刨床工作台的自动工作	228
4. B 210 龙门刨床主传动系统的试车调整	230
5. 带转控机的控制系统与带电机放大机的控制系统优缺点比较	231

第一章 单相和三相交流电势

阅读机床的电气线路图，首先接触到的就是电源问题。机床采用的电源绝大部分是交流电源，有单相电源和三相电源。某些机床需用直流电源，一般也是由交流电源经过整流而得到的。即使象龙门刨床那样用直流发电机对直流电动机供电，但直流发电机仍需要用一台交流电动机来拖动。因此对使用、维护和设计机床电气线路的人来说，对交流电的性质和特点必须有一定的认识。

为了便于说明交流电的变化规律，以及了解某些电气设备的工作原理，我们先介绍电气工程中的一个基本现象，即电磁感应现象。然后分别介绍正弦交流电势的产生，正弦交流电的变化规律，正弦交流电的有效值，交流电的相位和相位差，以及三相交流电势的规律等。

一、电磁感应现象

大家知道，发电机要发电，必须有一个磁场，如果没有磁场，电就发不出来。这个现象说明磁和电有一定的内在关系。我们可以用一个简单的实验来研究磁和电之间的关系。如图 1-1 所示，把一根磁铁棒插进一个用导线绕成的线圈。当磁铁棒向线圈里面移动的时候，接在线圈两端点之间的灵敏电流计的指针会偏转起来。磁铁棒不动，电流计指针也就回到零点。把磁铁棒拉出线圈时，电流计指针也会发生偏转，但转动的方向与前者恰好相反。这个现象表明，当穿过线圈的磁场发生变化时，线圈里面有电势产生，使电流流动。电势的方向则与磁铁棒的运动方向有关。这个现象称为电磁感应现象。

图 1-2 表示电磁感应的另一种表现形式。一根直导线放在一个均匀的磁场里面，导线与磁场互相垂直。当导线向上或向下运动，切割磁力线时，导体里面也会产生一个电势，使电流计指针发生偏转。导线的运动方向相反时，电流计指针的偏转方向也相反。如果导线的运动方向不变，而调换磁场指南极 S 和指北极 N 的位置，即改变磁场的方向，则电流计指针的偏转方向也会改变。可见感应电势的方向与导线的运动方向有关，也与磁场的方向有关。经过多次实践，人们总结出决定感应电势方向的右手定则。

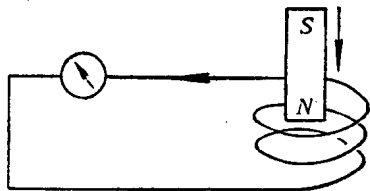


图 1-1 电磁感应现象之一

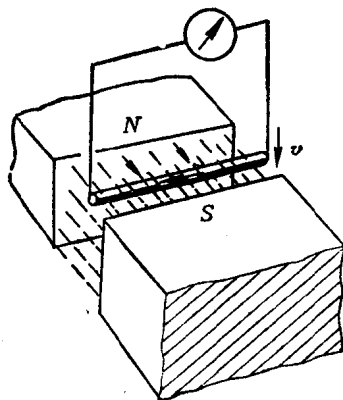


图 1-2 电磁感应现象之二

右手定则——将右手摊平，四指伸直，大拇指与四指互相垂直。使掌心向着指北极 N ，让磁力线从掌心穿向掌背。如果大拇指指向导线的运动方向，四指所指的就是导体感应电势的方向。

科学实验证明，导线在均匀磁场中运动时，感应电势的大小与磁场的强弱、导线长度及导线的运动速度成比例。如果用字母 e 代表感应电势、 B 代表磁通密度（穿过单位面积的磁通数量）、 L 代表导线长度（在磁场内的有效长度）、 v 代表导线运动速度，可以得出下列关系式：

$$e = BLv \quad (1-1)$$

导线在磁场中运动，产生感应电势，这是发电机发电的基本原理。

二、正弦交流电势

工农业中应用的交流电源一般都是正弦交流。什么是正弦交流呢？

正弦是数学上的一个名词。如果一个三角形的一个内角等于 90° ，这个三角形就叫做直角三角形。图 1-3 所示的是一个直角三角形， AC 和 BC 两条边互相垂直，它们的夹角等于 90° 。 α 和 β 是三角形的另两个内角。对 α 角来说， AC 边称为底边， BC 边为对边， AB 边为斜边。三角形的边和角之间有密切的关系。如果斜边 AB 的长度保持不变， α 角的大小改变时， AC 和 BC 两边的长度都随之改变。直角三角形 BC 边与 AB 边的比值称为 α 角的正弦，用符号 $\sin \alpha$ 表示。 $\sin \alpha$ 的值随着 α 角的大小而变。表 1-1 列举的数值可以看出 $\sin \alpha$ 与 α 角的关系。从表中看到， α 角从 0° 变到 360° 时， $\sin \alpha$ 的值从零增加到 $+1$ ，然后减小到零，又从负的方向增加到 -1 ，然后又回复到零。将 α 角和对应的 $\sin \alpha$ 值画成一条连续曲线如图 1-4 所示，称为正弦曲线，在电工上常称为正弦波。

表 1-1 正 弦 值

α	0°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	0

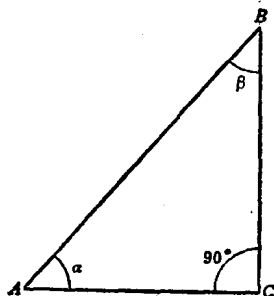


图 1-3 直角三角形

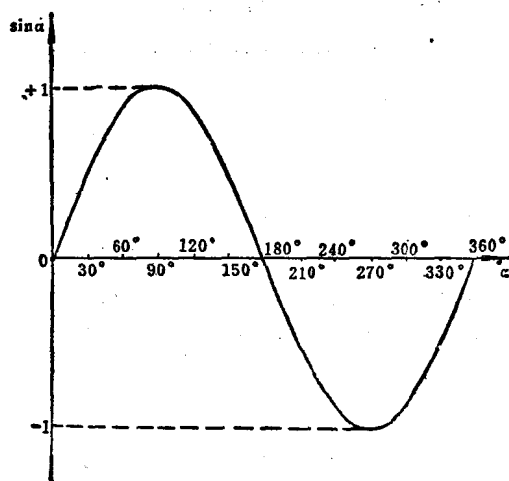


图 1-4 正弦曲线

图 1-3 直角三角形底边 AC 与斜边 AB 的比值称为 α 角的余弦, 用符号 $\cos \alpha$ 代表。 $\cos \alpha$ 的值也在 $+1$ 和 -1 之间变化, $\cos 0^\circ = +1$, $\cos 90^\circ = 0$, $\cos 180^\circ = -1$, $\cos 270^\circ = 0$, $\cos 360^\circ = +1$ 。

电气工程的长期实践表明, 如果交流电势的变化符合正弦曲线的变化规律, 则无论在电力传输以及使用方面都有明显的优点, 所以尽可能使交流发电机产生的电势与正弦曲线相符合。图 1-5 是一台两极交流发电机的示意图。发电机磁极与电枢之间的气隙是不均匀的, 磁极中心的气隙最小, 向两边逐渐增大。这样, 气隙中的磁通分布也是不均匀的, 磁极中心的磁通密度最大, 两边逐渐减小, 如图 1-6 所示。磁通密度 B 与角度 α 成正弦关系, α 为零度

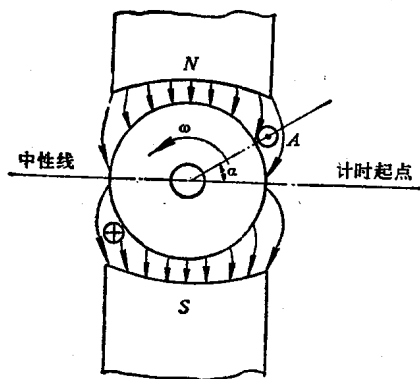


图 1-5 两极交流发电机示意图

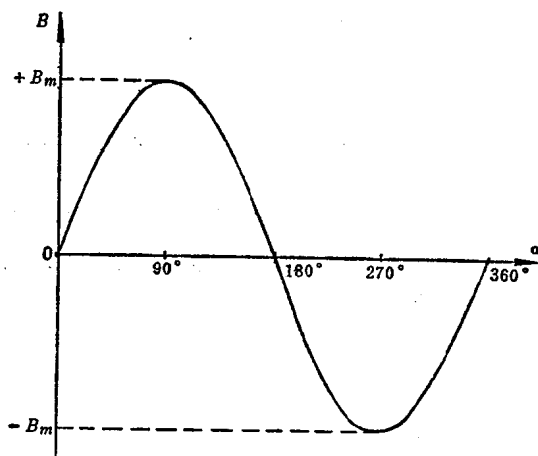


图 1-6 交流发电机气隙磁场分布规律

时, B 等于零, α 为 90° 时, B 等于最大值 B_m , α 为 180° 时, B 又等于零。 α 超过 180° , 进入另一个磁极区域, 磁场的方向改变了 (从电枢到磁极), 磁通密度可用 $-B$ 表示。这样, 磁通密度的变化也可用正弦曲线来表示, $B = B_m \sin \alpha$ 。

当电枢以均匀的速度逆时针方向旋转时, 导线 A 就以均匀的速度 v 切割磁力线。由于导线长度 L 及运动速度都是常数, 所以从公式 (1-1) 可知感应电势 e 的变化规律应与磁通密度 B 的变化规律一致, 也是正弦曲线, 可以用数学式 $e = E_m \sin \alpha$ 表示, E_m 表示电势的最大值。正弦交流电势的变化如图 1-7 所示。

在电气工程中, 角度 α 常用弧度来表示, 圆周一周为 360° , 也等于 2π 弧度。如果电枢的旋转角速度为 ω 弧度/秒, 用 t 代表时间, 则 $\alpha = \omega t$ 。感应电势可写成

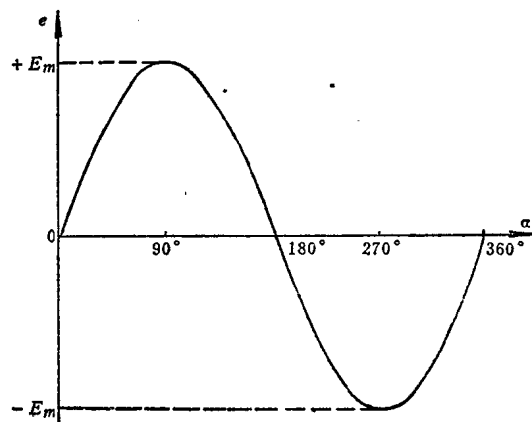


图 1-7 正弦交流电势

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

从图 1-7 可以看到, α 角从 0° 到 360° , 感应电势的大小和方向经历了一次完整的变化, 称为一周。1 秒钟内交流电变化的周数称为频率, 用符号 f 代表。我国电力系统的标准频率

定为 50 周/秒, 1 周/秒称为赫兹, 简称赫。

正弦交流电完成一次变化的时间称为周期, 用符号 T 代表。周期与频率成倒数关系, 即 $T=1/f$ 。

知道交流电势的频率, 就可以定出角速度 ω 。因为频率 f 表示 1 秒钟内的周数, 每一周为 2π 弧度, 所以角速度 ω 与频率 f 有下列关系

$$\omega = 2\pi f \text{ (弧度/秒)} \quad (1-3)$$

应当指出, 空间角度与感应电势中的角度不一定相等。例如一台四极发电机, 四极按 S 、 N 、 S 、 N 的顺序排列。当电枢转过一周, 从空间来说是转了 2π 弧度。但是导体中感应电势却经历了两次完整的变化, 即经过了两周, 相当于 4π 弧度。所以感应电势中的角度称为电角度, 以示与空间角度有所区别。两极发电机的电角度等于空间角度, 四极发电机的空间角度为 1 弧度, 电角度就等于 2 弧度, 六极发电机空间角度为 1 弧度时, 电角度为 3 弧度。公式 (1-3) 中的角速度 ω 是每秒钟内经过的电角度, 除了两极发电机, 它都不等于电枢在空间旋转的角度。

由线性元件如电阻、空心电感、电容等组成的电路中, 正弦交流电势所产生的电流也是正弦交流电流。用 i 代表正弦交流电流的瞬时值, 用 I_m 代表正弦交流电流的最大值, 则正弦交流电流可写成

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-4)$$

从上面的分析中, 可以看到最大值和频率是正弦交流电的两个要素, 这两个要素一经确定, 正弦交流电势或电流的变化规律也就确定。

三、正弦交流电的有效值

用正弦的数学式来表示正弦交流电是一种严格的表示方法, 但在简单计算和日常应用中却不需要这种复杂的表示方式。例如一般的交流电压表和电流表, 指出电压是多少伏, 电流是多少安培, 这些读数不是交流电压和电流的最大值, 而是指它们的有效值。交流电压和电流的有效值是从能量观点来确定的。我们知道, 电流通过电阻时要产生热量, 也就是电能转换为热能。我们以正弦交流电流与直流电流来作比较。如果一个正弦交流电流和一个直流电流通过相同的电阻, 在同样的时间内产生的热量相同, 那末这两个电流从能量关系方面来看是相等的, 所以可以用这个直流电流的值来表示正弦交流电流的大小, 称它为正弦交流电流的有效值。正弦交流电流的有效值和最大值之间有简单的比例关系, 如公式 1-5 所示:

$$I = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m = 0.707 I_m \quad (1-5)$$

式中 I ——正弦交流电流的有效值;

I_m ——正弦交流电流的最大值。

根据相同的理由, 我们得出正弦交流电势和正弦交流电压的有效值,

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} E_m = 0.707 E_m \quad (1-6)$$

$$U = \frac{\sqrt{2}}{2} U_m = 0.707 U_m \quad (1-7)$$

式中 E ——正弦交流电势的有效值；

U ——正弦交流电压的有效值。

应用有效值，我们就可以进行许多简单的计算。第二章和第三章中的一些有关交流电路的计算公式，都是用有效值来计算的。

四、交流电的相位和相位差

在应用交流中的时候，我们常常会碰到这样的问题，即两个交流电压的相位关系怎样？或者说它们的相位差是多少？在交流电压和电流之间也存在相位问题。那末什么是相位和相位差呢？我们可以用图 1-8 交流发电机电枢导体 1 和 2 中的电势来说明相位问题。

图 1-8 中是一台两极交流发电机，电枢上有两根导体 1 和 2，它们在电枢圆周上的位置相差 90° 。当电枢以角速度 ω 逆时针方向旋转时，导体 1 和 2 里面都产生感应电势。假定导体 1 和 2 的有效长度 L 相同，它们的运动速度也相同，切割的是同一个磁场，因此，它们的感应电势的最大值和频率必然相同。那末这两个感应电势是不是还有差别呢？

我们知道，发电机气隙中磁场的分布是不均匀的，磁极中心的磁通密度最大，中性线上的磁通密度等于零。导体的位置不同，同一时刻内它们的感应电势是不相同的。如果以图 1-8 所示位置为计时的开始点，时间 t 等于零。这时候导体 1 在中性线上，相应的 α 角为零，它的感应电势 e_1 也等于零。同一时刻导体 2 在 N 极的中心， α 角为 90° ，它的感应电势等于正最大值。随着电枢的转动，导体 1 向 N 极的中心移动，感应电势 e_1 从零增加到 $+E_m$ ，导体 2 从 N 极的中心移向中性线，感应电势 e_2 从 $+E_m$ 减小到零。电枢旋转一周， e_1 和 e_2 都经历了一次完整的变化，如表 1-2 所示。

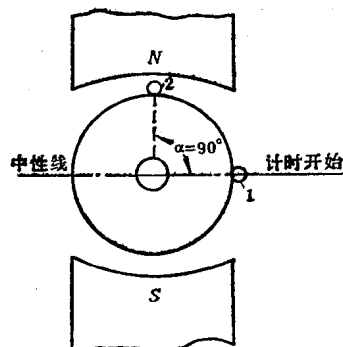


图 1-8 交流发电机电枢上各导体的感应电势的相位差

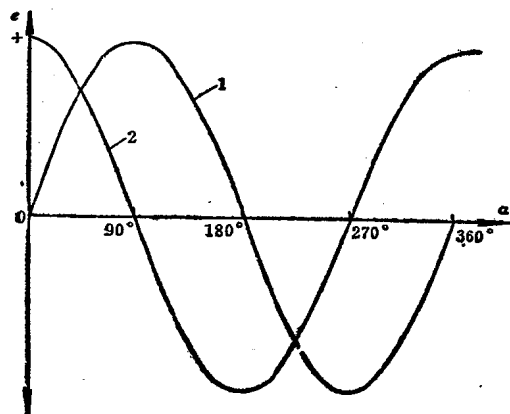


图 1-9 相位不同的两个正弦电势

表 1-2

α	e_1	e_2
0°	0	$+E_m$
90°	$+E_m$	0
180°	0	$-E_m$
270°	$-E_m$	0
360°	0	$+E_m$

e_1 和 e_2 都是正弦交流，将 e_1 和 e_2 与角度 α 的对应关系画在座标上，就得到图 1-9 的两条正弦曲线。从图中看到， e_1 和 e_2 每一瞬时的值是不相同的，它们到达正最大值和通过零

点的时间有先后之差。我们用相位这一概念来表示这种差别。正弦交流电势 e_1 和 e_2 的最大值和频率都相等, 但有相位上的差别。 e_2 比 e_1 先达到正最大值, 我们说 e_2 的相位超前于 e_1 , 或者说 e_1 的相位落后于 e_2 。相位差就是两个正弦交流电势相邻两个正最大值之间的角度差, e_2 和 e_1 的相位差为 90° , 我们说 e_2 比 e_1 超前 90° , 或 e_1 比 e_2 落后 90° 。

应该指出, 任何两个正弦交流电量之间, 只要它们的频率相同, 就可以比较它们的相位, 如电流可以比电压落后或超前一个角度, 在各个周期中, 相位差保持不变。如果两个正弦交流电量的频率不同, 就不能作相位的比较, 因各周期中它们最大值间的角度差是不一样的。

五、三 相 交 流 电 势

三相电源, 三相交流电动机等都是大家很熟悉的。发电厂都用三根电力线送出电能, 就是所谓三相电源。这三根电力线同时送出三个正弦交流电势, 它们的最大值和频率都相同, 但有相位的差别, 所以称为三相电势。三相供电系统是劳动人民经过长期的生产实践和科学实验而创造出来的, 能够高效率地输送电力, 又可以对三相交流电动机供电, 对生产力的发展起了重要的促进作用。

三相交流电势一般由三相同步发电机产生。发电机的定子上嵌有三组线圈, 三组线圈的尺寸、匝数都相同, 但在空间位置上互相间隔为 120° 。当发电机磁极转动时, 三个绕组产生的感应电势有相同的最大值和频率, 但相位上各相差 120° 。这样的三相电势称为对称三相正弦电势。

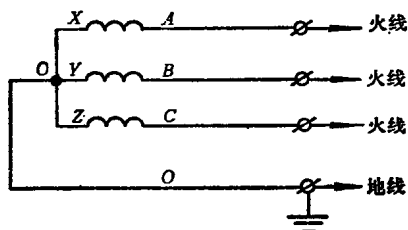


图 1-10 三相电源的星形联接

三个绕组习惯上称为 A 相、 B 相、 C 相。每一相绕组的电势称为相电势, 一般用 e_A , e_B , e_C 代表。各相电势达到正最大值的次序称为相序。三相绕组各有首端和尾端, 如图 1-10 所示, A 、 B 、 C 为三相绕组的首端, X 、 Y 、 Z 为三相绕组的尾端。供电工程上常把三个尾端联接在一起, 从三个首端接出导线, 这就是三相电源的星形联接。

三相绕组尾端联接点称为中点或零点, 从中点引出的导线称为中线, 中线接地时就叫地线。从三相绕组首端引出的导线称为端线, 一般叫火线。

A 、 B 、 C 三相电势的相位关系如果是 e_A 比 e_B 超前 120° , e_B 比 e_C 超前 120° , 则它们的相序就是 $A-B-C$ 。这个相序一般称为正序。

在日常应用中, 我们常用到两点之间的电压。三相绕组每相的首端和尾端之间的电压称为相电压, 如图 1-10 中的 U_{AO} 、 U_{BO} 、 U_{CO} 。两根火线之间的电压称为线电压, 如 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 。三个线电压组成三相对称电压。三相绕组星形联接时, 线电压不等于相电压, 例如线电压为 380 伏, 相电压只有 220 伏, 线电压与相电压的值(有效值)存在下列比例关系:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \sqrt{3} U_{AO} = \sqrt{3} U_{BO} = \sqrt{3} U_{CO} \quad (1-8)$$

三相绕组星形联接时, 线电压与相电压的相位也不相同: U_{AB} 比 U_{AO} 超前 30° ; U_{BO} 比 U_{BO} 超前 30° ; U_{CA} 比 U_{CO} 超前 30° 。

三相绕组星形联接时, 除 380 伏的线电压外, 还可从火线和中线之间引出 220 伏电压。这是三相星形联接的一个优点。

第二章 电阻、电容、电感在电路中的作用

机床电气线路中包含各种电气元件,如电阻,电容,照明灯,信号灯,继电器、接触器的线圈,电机的绕组等。从电气元件的作用来看,可以认为各种电气元件都是由最基本的元件:电阻、电容和电感组合而成的。例如继电器的电磁线圈就包含着电阻、电感和电容,但在一般情况下,电容的作用不显著,所以我们把电磁线圈看作是电阻和电感的串联组合。为了更好地掌握机床电气线路的作用,我们先介绍电阻、电容和电感等基本元件在电路中的作用规律。

一、电 阻

我们日常生活和工作中经常使用的电灯、电炉、电烙铁等设备的电阻丝都看作是纯电阻元件,因为在这些电器中,电阻是一个主要矛盾。电阻是导体对电流的一种阻力,当电流通过电阻时,电能会转变为热能,而在电阻的两端会出现一个电压降。各种物质都具有电阻,但阻力有大有小。例如金属导体的电阻很小,半导体材料的电阻就较大,绝缘材料的电阻最大。我们可以用金属和非金属材料制成各种电阻元件,如线绕电阻,金属膜电阻,炭膜电阻等。

1. 电阻的基本参数和欧姆定律

(1) 电阻元件的基本参数 电阻值和容量是电阻元件的两个主要参数。

电阻值的单位为“欧姆”,简称“欧”,用符号“ Ω ”表示。如果有一安培的电流通过电阻元件,电阻两端的电压降为一伏,电阻值就是一欧。较大的电阻值可用“千欧”或“兆欧”为单位,可写成“ $K\Omega$ ”和“ $M\Omega$ ”,或“ K ”和“ M ”。 $1 K\Omega = 1000 \Omega$, $1 M\Omega = 1000 K\Omega = 1000000 \Omega$ 。

电阻的容量就是允许消耗的功率,它是根据发热条件而决定的,如果消耗的功率大于规定的数值,电阻元件就会过热而损坏。较小的容量用“瓦”作单位,可写成“ W ”。较大的容量用“千瓦”作单位,可写成“ KW ”。电阻元件消耗能量的瓦数等于通过电阻的电流(安培)乘电阻两端的电压降(伏)。如用 P 代表容量,可写出下列关系式:

$$P = UI \quad (\text{瓦}) \quad (2-1)$$

(2) 欧姆定律 电流通过电阻,在电阻两端就有一个电压降,这是大家很熟悉的现象。欧姆定律是从实践中总结出来的一条基本规律,说明电压、电流与电阻之间的关系。用 R 代表电阻值(单位用欧姆), I 为通过电阻的电流(安培), U 为电阻两端的电压降(伏),则欧姆定律可写成下式:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2-2)$$

欧姆定律也可以写成其他形式,如:

$$U = IR \quad (2-3)$$

或

$$R = \frac{U}{I} \quad (2-4)$$

欧姆定律适用于直流电路和交流电路。欧姆定律用于交流电路时， U 和 I 代表电压和电流的有效值。

欧姆定律虽然很简单，却可以帮助我们解决许多实际问题。例如应用欧姆定律，我们可以测定电气元件的电阻，万用表就是根据欧姆定律制成的检测工具。又如在电气线路中，常碰到电源电压高于电气元件的额定电压，我们可以串接一个适当的电阻，使电气元件两端的电压恰好等于额定电压。例如一只信号灯泡的额定电压为 6 伏，电源电压为 12 伏，我们可以串接一只电阻来降压。如果信号灯的电流为 0.1 安培，则根据欧姆定律取电阻值为 60 欧，电阻的电压降就等于 60×0.1 即 6 伏，于是信号灯两端的电压也等于 6 伏。

有许多电器如电烙铁、电炉，往往只知道它们的额定电压和瓦数，应用公式 (2-1) 和欧姆定律，就可以求出它们的电阻和允许通过的电流。同样，知道一个电阻性元件的电阻和瓦数，也就可以求出允许通过的电流和可以承受的电压。根据公式 (2-1)、(2-2)、(2-3)、(2-4)，可以得出容量（功率），电压，电流和电阻的关系式：

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (2-5)$$

或

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

2. 电阻的串联和并联

(1) 电阻的串联 几个电阻串联工作时，总的电阻值等于各电阻值之和，

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (2-7)$$

式中 R_0 为串联后的总电阻（图 2-1）。

电阻元件串联工作时，通过各电阻的电流应当相等。根据欧姆定律，各电阻上的电压降为：

$$U_1 = IR_1$$

$$U_2 = IR_2$$

$$U_3 = IR_3$$

总的电压降等于各电阻电压降之和，

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2-8)$$

这就是说，当几个电阻元件串联工作时，各电阻元件上的电压分布与元件的电阻值成比例。根据这个原理，可以设计出各种分压电路。

(2) 电阻的并联 几个电阻元件并联工作时，如果忽略联接导线的电阻，则各电阻元件所承受的电压应该相等。图 2-2 中 U 是电源电压， I 为总的电流， I_1 和 I_2 为分路电流。根

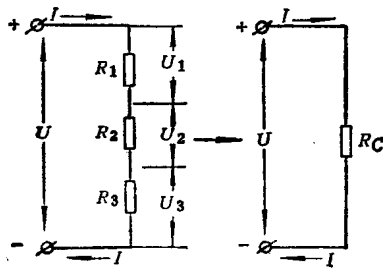


图 2-1 电阻的串联

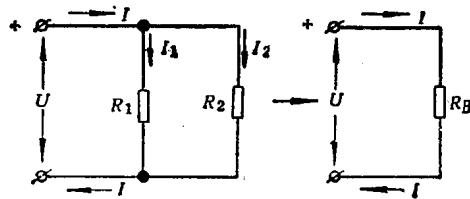


图 2-2 电阻的并联

据欧姆定律, 我们知道

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

总的电流等于各分路电流之和

$$I = I_1 + I_2$$

如果以 R_B 代表并联后的总电阻值, 则可得下列关系式:

$$I = \frac{U}{R_B} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad (2-9)$$

从公式 (2-9) 可得

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2-10)$$

经过变换, 可得

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-11)$$

应用上面的方法, 我们可以求出三个或三个以上电阻并联时的总电阻值。注意, 总电阻值比任何一个分路电阻的值都小。

二、电 容

电容是一种能够储存电荷的电气元件。两片金属叠在一起, 中间用空气或其他绝缘材料隔开, 就成为一个电容器。

电气线路里面应用各种电容器, 如陶瓷电容、涤纶电容、云母电容、纸质电容、电解质电容等。电容元件常用文字符号 C 代表。

实际上任何两个导体之间都有电容存在。例如导线与导线之间, 输电线与地之间, 甚至一个线圈的各匝导线之间都有电容, 这种电容常称为分布电容。在一般情况下, 这种电容的影响很小, 所以常忽略不计。如果碰到特殊情况, 如频率很高, 或导线很长时, 分布电容的作用就不能忽略。

1. 电容的基本参数和特性

电容元件有两个基本参数, 即电容量和额定工作电压。

电容量表示在一定的电压作用下, 电容器储存电荷能力的大小。电容量的单位用“法拉”, 简称“法”, 可写为“F”。我们知道电荷量的单位是“库伦”, 一库伦的电荷相当于一安培的电流在一秒钟内通过导线某一截面的电荷量。如果将一库伦的电荷充进一法拉电容量的电容器, 电容器两端就有一伏电压。一般电气线路中应用的电容器的电容很小, 常用“微法”作为单位, 一微法等于百万分之一法拉, 可写成“ μF ”或“ μ ”。更小的电容单位为“微微法”, 等于百万分之一微法, 可写成“ $\mu\mu F$ ”或“PF”或“P”。

电容器储存电荷量 Q 的大小与电容量 C 成比例, 也与电容两端的电压 U 成比例:

$$Q = CU \quad (2-12)$$

电容元件能够承受的电压有一定的限度, 这个限度就定为电容元件的额定工作电压。如果外加电压超过额定工作电压, 电容器的寿命就要缩短, 甚至要被击穿。一般电容器上标明的工

作电压都是直流电压，如果用在 50 赫的交流电路里面，外加电压只能达到额定工作电压的三分之一左右。

电容器通常不标极性，它的任何一端都可以接到电源的正极。只有电解电容是有极性的，它的正极必须接到电源的正极。电解电容的极性如果接错，它就要被破坏，所以电解电容只能用在直流电路或含有脉动成分的直流电路里，而不能应用于交流电路。

2. 电容的充电和放电

充电和放电是电容在电路里工作时的基本运动形式。例如整流电路的滤波电容，就可以用充电和放电作用来说明其工作原理，又如控制可控硅导通时间的双基极二极管触发电路，也是利用电容的充电和放电作用来产生脉冲电压信号。

图 2-3 是电容与电阻串联作用的直流电路，直流电源的电势为 E 。如果在合上开关 G 以前电容 C 的电压 u_C 等于零，则合上开关 G ，电源就对电容充电，电路中有充电电流 i_C 出现。充电开始时只有电阻 R 限制充电电流，充电电流为

$$i_{C0} = \frac{E}{R} \quad (2-13)$$

随着充电过程，电容积聚起电荷，电容两端出现电压 u_C ， u_C 的值逐渐增加。电容电压 u_C 的极性与电源相反，它的作用是使充电电流逐渐减小，充电电流 i_C 由下式决定：

$$i_C = \frac{E - u_C}{R} \quad (2-14)$$

电荷进入电容需要一定的时间，所以电容电压是逐渐增加起来的，不可能突然变化，充电电流也是从开始的最大值逐渐减小。最后电容电压 u_C 等于电源电势 E ，充电电流 i_C 就等于零。电容电压不能突变，这是很重要的一个概念。

电容充电的快慢与电容量的大小有关，也与充电电流的大小有关。充电电流大，电容电压 u_C 的增长速度就快，而电容量大时，就需要较长的充电时间。充电电流的大小与电阻有密切的关系，所以电容量 C 和电阻 R 是决定充电速度的两个重要因素，而与电源电压无关。电容 C （法拉）与电阻 R （欧）的乘积称为电阻电容回路的时间常数，常用符号 τ （秒）代表：

$$\tau = RC \quad (2-15)$$

τ 大，充电就慢； τ 小，充电就快。

图 2-4 画出充电电压 u_C 及充电电流 i_C 与时间 t 的关系曲线，电阻 R 的数值不同时，充电的快慢也就不同。

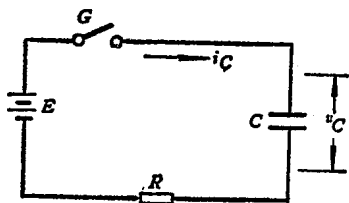


图 2-3 电容充电

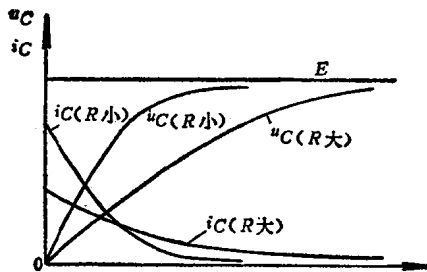


图 2-4 电阻对电容充电速度的影响

电源电压高于电容电压的时候, 电荷进入电容, 这是充电过程。如果电容器有了一定的电压, 电源电压突然变得低于电容电压, 或变为零, 电容就要放出电荷, 这就是电容放电。充电与放电是存在于电容中的一对矛盾。

图 2-5 中的电容预先被充电到电压 u_C , 然后合上开关 G , 电容就进行放电, 电路中出现放电电流 i_f 。如果开关 G 不合上, 电荷就不能流动, 电容器就不能放电, 而长期保持充电后得到的电压。

电容的放电过程与充电过程相似, 开始时电容电压为 u_C , 放电电流 $i_f = u_C / R$ 。随着放电过程, 电容电压逐渐降低, 放电电流也逐渐减小。最后电容电压等于零, 放电电流也等于零。放电的快慢也由电容量 C 和电阻 R 的乘积决定, 乘积 RC 也称为时间常数, 仍用符号 τ 代表。 τ 大, 放电慢, τ 小, 放电就快。利用电容的放电, 我们可以得到一个尖顶的电流脉冲。

3. 电容的串联和并联

在电工工作中, 我们常要用几只电容串联或并联使用。例如在需要大容量的电容时, 我们可以用几只小电容量的电容并联起来, 而在单只电容的工作电压不够高时, 我们也可以用几只电容串联起来使用。图 2-6 a 和 b 是电容并联和串联使用的电路图。

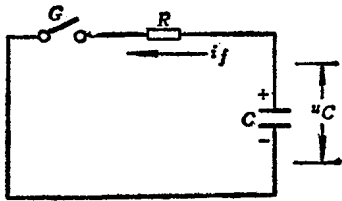


图 2-5 电容放电回路

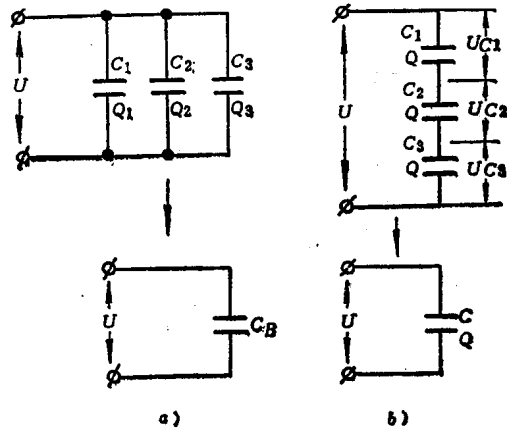


图 2-6 电容的并联和串联

几个电容并联时, 每一个电容积聚一定数量的电荷如图 2-6 a 所示。总的电荷量为各电容电荷量之和, 各电容的电压则相等。如以 C_B 代表电容并联后的总电容量, 以 Q 代表总电荷量, 可得下列关系:

$$Q = C_B U = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 U + C_2 U + C_3 U$$

于是得到

$$C_B U = (C_1 + C_2 + C_3) U$$

从上式可得出总电容量与各分路电容量的关系:

$$C_B = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2-16)$$

电容并联后的总电容量等于各电容量之和。

几个电容串联时, 通过各电容的充电电流应该相等, 经过相同的充电时间, 各电容积聚的电荷量也应相等。图 2-6 b 中各电容的电荷量为 Q , 电源电压为 U 。如果用 C 代表串联后的总电容量, 用相同的充电电流充电, 经过同样的充电时间, C 中积聚的电荷量也应为 Q 。电容串联时, 总的电压 U 应等于各电容电压之和

$$U = U_{C1} + U_{C2} + U_{C3}$$

根据公式(2-12)可得

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

于是得出

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (2-17)$$

或

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3} \quad (2-18)$$

可见串联后的总电容量比各电容中的最小电容量还要小。

应当指出,几个电容串联经过充电以后,总的电荷量并不是等于各个电容积聚的电荷量之和,而只等于一个电容所积聚的电荷量。参看图 2-7,如果将正电荷“+Q”送进电容 C_1 的正极板,由于电荷同性相斥,异性相吸的作用, C_1 负极板中的原有电荷中的“+Q”被排斥,而只留下“-Q”。 C_1 负极板中的“+Q”跑到 C_2 的正极板上,将 C_2 负极板中的“+Q”排斥掉,也只留下“-Q”。看起来 C_1 和 C_2 中都积存有电荷 Q ,而实际上外面送来的电荷(正电荷)也只有 Q 。所谓电容器的充电,实际上是一块极板上增加了一部分正电荷,而在另一块极板上则失去了同等数量的正电荷。由于两块极板上存在不同极板性的电荷,所以就有一个电压或电位差。还应当说明的是,正电荷的流动是习惯上的说法,事实上在固体导体中迅速移动的是负电荷,即电子。

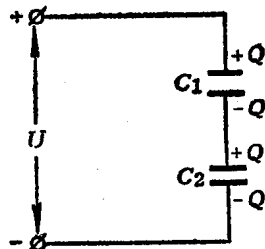


图 2-7 电容串联时的电荷储存量

4. 电容在交流电路中的作用

上面介绍的是电容在直流电路中的作用情况,接通直流电源,电容被充电,电路中有充电电流,最后充电电流趋向于零。在电容放电的时候,电路中出现放电电流,放电电流也趋向于零。一般认为,经过时间等于 $(4 \sim 5)\tau$ 时,充电或放电过程就可以接近结束。在交流电路里,电源电压是正弦交流,大小和方向都在变化,因此电容器有时候被充电,有时候则在放电,充电和放电作用不断地交替进行,所以通过电容器的电流的大小和方向也在不断地变化。电源是正弦电压时,通过电容的电流也是正弦交流,但电流的相位比电压超前 90° 。

电容在交流电路里表现为对电流的一种阻力,这个阻力称为容抗,常用符号 X_C 代表,容抗的单位也是欧姆。电容量越大,电流越容易通过电容器,电源的频率越高,电流也越容易通过电容器,所以电容的容抗与电容量 C 及电源频率 f 成反比:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} \quad (2-19)$$

三、电 感

电感是大家很熟悉的一种电气元件,例如日光灯电路里的镇流器就是一个典型的电感元件。实际上电感也是到处都存在着的,不过有时它的作用很小,我们不加以注意罢了。例如我们在断开电机的磁极电路或电磁铁电路的时候,会出现强烈的火花,我们就说这是由于它

们的电感很大。又如继电器接触器等电器的主要组成部分电磁线圈也是一个电感元件。把导线绕成线圈就成为一只空心电感，如果在线圈中放置铁心，可以大大增强电感作用，称为铁心电感。断开电感电路会产生火花，这是电感表现出来的一种现象。

电感常用符号“ L ”代表，电感的单位为“亨利”简称“亨”。千分之一亨称为“毫亨”。

我们知道，电感线圈中通有电流时会产生磁场，这是电感所表现的另一个重要现象。通过磁场及火花这些现象，我们可以进一步探讨电感的特性。

从生产实践中，我们知道导体中通有电流时，导体周围就会产生磁场。平常我们可以用一只指南针来探测磁场的存在和磁场的方向，我们以指南针指北极所指的方向作为磁场的方向。如果将指南针放在载流导体周围的各点上，指北极所指的方向在各处是不同的。导体中的电流方向如果改变，周围磁场的方向也跟着改变。

根据磁场的特点，我们用磁力线来描述磁场的分布情况。磁力线是无头无尾的闭合曲线，它围绕在载流导体的周围。磁力线的密集程度可以代表磁场的强弱，磁力线的方向就代表磁场的方向。图 2-8a 表示导体周围磁力线的形状，图 2-8c 则表示螺线管或线圈内外的磁力线的分布情况。

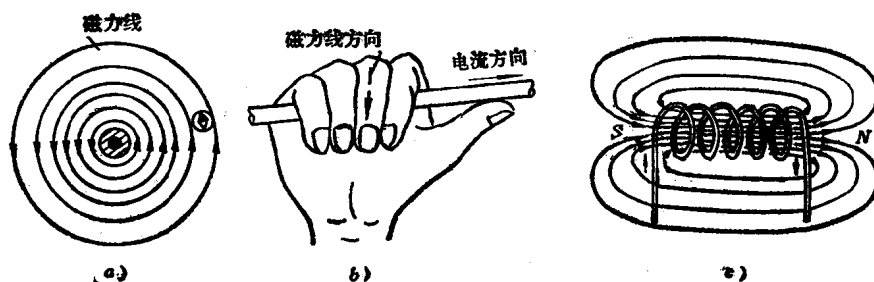


图 2-8 决定磁场方向的右手螺旋定则

通过长期实践，劳动人民总结出决定磁场方向的右手螺旋定则。右手螺旋定则有两种表示方式，第一种方式用于决定载流导体周围的磁场方向，第二种方式用于决定螺线管或线圈内部的磁场方向。图 2-8b 所示的是右手螺旋定则的第一种方式，右手四指握住导体，大拇指伸直与导体平行。如果大拇指指向电流的方向，其他四指所指的就是导线周围磁场的方向。右手螺旋定则的第二种方式与图 2-8b 相似，将右手四指握住螺线管或线圈，大拇指伸直与螺线管的轴心线平行。四指指着各匝线圈中的电流方向，大拇指就指出螺线管内部磁场的方向。

线圈磁场的强弱与电流的大小及线圈匝数的多少有关，也与磁力线通过的材料有关。如果空心线圈的磁场不强，我们只要在线圈里装上铁心，就可以使磁场增强许多倍。所以一般电感元件如继电器、接触器的电磁线圈都装有铁心。

上面曾提到断开电感电路时会发生强烈的火花，如果电路里面没有电感元件而只有电阻，火花就小得多。我们知道，火花的产生是由于有电势将空气击穿，电流通过空气而产生电弧。火花大就表示作用的电势很强，也就是说断开电感电路时，除了电源电势，还存在另一个电势，两个电势联合作用，所以火花很大。而在断开纯电阻电路时，只有电源电势在起作用，所以火花不大。