

电子式高频加热装置

冶金工业出版社

电子式高频加热装置

潘天明 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书较详细地介绍了电子式高频加热装置的电路原理、设计、调整和维护知识。书中列举了目前工业上普遍应用的各种振荡器。所介绍的控制电路则多为半导体材料工业中实际应用的电路。书中以一定的篇幅讨论了加热器的设计原则。同时，还介绍了几种先进的稳压电路，这些电路不仅适用于高频装置，也适用于其他要求连续调压和稳压的设备。

本书可供从事高频加热装置的设计、制造、使用和维护的工人、技术人员和大专院校有关专业师生参考。

电 子 式 高 频 加 热 装 置

潘 天 明 编 著

*

冶金工业出版社出版
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张17 1/2 字数 415 千字

1977年9月第一版 1978年12月第二次印刷

印数 14,401~32,500册

统一书号：15062·3271 定价（科三）1.45 元

目 录

前 言

第一章 电子管振荡器的基本知识	1
第一节 电容 (C)	1
一、电容器	1
二、交流回路中的电容器	2
三、电容器的主要参数	3
四、电容器的种类	4
第二节 电感 (L)	4
一、电感线圈	4
二、交流回路中的线圈	5
三、线圈的主要参数	5
四、线圈的种类	6
第三节 振荡	6
一、单摆	6
二、电振荡	7
第四节 振荡电路能源的补充	8
第五节 电子管振荡器	11
第六节 工业用电子管振荡器	13
一、用途和特点	13
二、供电方式	14
三、栅极回路	15
四、接地点问题	16
五、振荡器的负载匹配方式	17
六、输出功率的调节方法	19
第二章 一般工业用的典型电子管振荡器	20
第一节 单回路振荡器	20
一、具有附加线圈的回路	20
二、无附加线圈的回路	21
第二节 双回路振荡器	22
第三节 三回路振荡器	23
第三章 振荡器的电源	26
第一节 概述	26
第二节 整流器	26
一、整流元件	27
二、硅整流元件	29
第三节 整流电路	35
第四节 平滑滤波器	39
一、电感滤波器	40

二、电容滤波器	42
三、 Γ 型滤波器	43
四、其他形式的滤波器	45
五、平滑滤波电路的比较	46
六、关于滤波电感的设计问题	47
第五节 可控整流器	48
一、可控整流元件	48
二、可控元件的控制电路	54
三、可控整流电路	62
四、可控整流电路的应用实例	63
第六节 可控硅交流调压	69
一、交流调压电路	70
二、可控硅三相交流调压的实际应用	74
第七节 振荡管的灯丝电源	78
一、振荡管灯丝变压器接法	78
二、振荡管灯丝电路	79
三、灯丝电路实例	81
四、关于有效值问题	82
第四章 高频耦合电路	89
第一节 谐振电路	89
一、串联谐振	89
二、并联谐振	91
三、复合谐振电路	93
四、谐振电路小结	99
第二节 静电耦合电路	100
一、 L 型电路	100
二、 Π 型电路	101
三、 T 型电路	102
第三节 电磁耦合电路	102
一、一次、二次非谐振电路	103
二、二次串联谐振电路	104
三、一次、二次串联谐振电路	105
四、部分谐振和完全谐振	107
五、一次并联谐振、二次串联谐振电路	110
六、一次、二次同是并联谐振电路	110
七、一次并联谐振、二次非谐振电路	112
八、降压电路	112
九、升压电路	113
第四节 耦合电路的实际应用	113
一、 Π 型电路的应用	113
二、解剖三回路振荡电路	115
三、硅区熔用振荡器的槽路计算	116
第五节 各种阻抗的计算	117

一、高频情况下的电阻计算	117
二、高频电感	120
三、谐振线	121
四、线圈的电感和互感计算	122
第五章 振荡器的设计	129
第一节 振荡管的特性	129
一、振荡管的种类	129
二、振荡管的实际静态特性	129
三、振荡管的理想静态特性及其主要参数	132
四、振荡管的等效参数	136
五、振荡管的动态特性	138
六、阳极电流脉冲的分解	142
第二节 振荡器的工作状态选择	148
第三节 设计步骤	151
一、振荡频率的选择	151
二、感应加热的功率选择	153
三、选择振荡管和振荡电路	155
四、工作状态计算	157
五、振荡器中各元件的选择	163
六、元件的制造	173
七、整机的结构、配线	175
八、屏蔽	177
第六章 高频装置的调整和试验	180
第一节 安装和送电前后的检查、整定	108
一、整机各部件的正确安装	180
二、送电前检查	180
三、逐步送电检查和保护参数整定	181
第二节 振荡管阳极电源的调试	182
一、闸流管可控整流电路的调试	182
二、可控硅交流调压式阳极电路的调试	184
三、相序指示器	185
四、系统稳压精度测试	186
五、阳极电源的脉动系数测试	187
六、测量直流高压	188
第三节 振荡器的调试	188
一、决定振荡器工作状态及其性能的因素	188
二、起振试验	190
三、选择最佳参数	191
四、各种参数测试	194
五、连续负荷试验	198
第四节 调试中可能出现的异常现象及其处理	198
一、高压送不上	199
二、间歇振荡	199

三、中途停振	199
四、负阻效应	200
五、频率跃变	200
六、寄生振荡	201
七、高频干扰	203
第七章 加热器	205
第一节 高频加热的物理基础	205
一、导体感应加热	205
二、介质加热	206
三、半导体加热	207
第二节 加热器设计的基本原则	207
一、工作电容器	207
二、感应器	208
三、高频变压器和集流器的设计	212
第八章 目前冶金工业中实际应用的几种高频装置	219
第一节 GP20-2型高频感应加热装置	219
一、概述	219
二、技术性能	219
三、电路原理	219
四、存在问题	224
第二节 GP20-3型高频感应加热装置	224
一、概述	224
二、特点	225
三、电路原理	229
四、存在问题	234
第三节 高频溅射装置	234
一、概述	234
二、电路原理	234
第四节 化合物半导体磁拉单晶炉高频装置	236
一、概述	236
二、电路原理	237
第九章 高频装置的使用和维护	241
第一节 控制和测量系统	241
第二节 闸流管和充气二极管	241
第三节 振荡管	243
第四节 其他部件的维护和使用	245
一、电容器	245
二、高压变压器	246
三、水冷系统	247
第十章 高频加热装置的展望	248
一、整机自动化问题	248
二、振荡器的效率问题	248

三、微波加热	248
附录一、基本整流电路及其计算系数表	250
附录二、各种可控整流电路主要参数	254
附录三、各种可控整流电路允许负载电流	258
附录四、尖顶余弦脉冲的分解系数	259
附录五、冷却水量、温度上升、损失计算图表	264
附录六、几种振荡管的特性曲线	265
1. FU-5S	265
2. FU-10S	266
3. FU-22S	267
4. FU-23	268
5. FU-89S	269
6. F-431	270
7. F-433	271
参考文献	272

第一章 电子管振荡器的基本知识

第一节 电 容 (C)

无论是在工业用的高频装置中，还是在收音机、扩音机、电视机……日常所见到的电器上，都使用了大量的电容器。这些电容器在电路中起着调谐、耦合、滤波、去耦、隔直流电等作用。

一、电 容 器

电容器是一种能储存电能的元件。两块彼此平行而不接触的金属板就构成了一个最简单的电容器。

充了电的电容器具有电能，假如你用手去碰充了电的电容器的接头，你就会受到电“打”。电容器的容量愈大，电压愈高，“打”得就愈厉害。电容器的电压在100~200伏时，除了使人感到震惊和不舒适外，不会引起意外的后果；可是在高电压时（1000伏或更高），就有致命的危险。

电容器这种“打”人的本领是从何而来呢？

如果把两平行金属板的两端，用导线分别接到电池的正极、负极，那么接正极的金属板上带负电荷的电子就被电池正极吸引过去，而接负极的金属板，将从电池负极获得大量电子，也就是说，电池将接正极的金属板上的负电荷转移到接负极的金属板上，这就是所谓电容器“充电”。

大家知道，同性电荷相斥，异性电荷相吸。因此，无论是夺取接正极的金属板上的电子，还是将电子转移到接负极的金属板上去，电池都必须做功，这种功变成了电子的位能而储存在两金属板上。充电的时候，电子在导线中流动而形成电流，但充电不是永无休止的，当两金属板上充的电荷形成的电压与电池电压相等时，充电就停止，电路里就没有电流，这相当于电路断开一样，这就是电容器能隔断直流电的道理。

电容器上储存电荷的多少，与加到电容器两端的电池电压有关，电压越高，电容器所充的电荷就越多。电容器上所充电荷与充电电压之比，即表示电容器的容量，用字母C表示，其关系式如下：

$$C = \frac{q}{U} \quad (1-1)$$

式中 q ——电容器的储电量，库仑；

U ——充电电压，伏特；

C ——电容器容量，法拉。

可以证明，电池所作的功，也即储存在电容器中的电子的位能，即电能为：

$$W_c = \frac{q^2}{2C} \quad (1-2)$$

如果将电容器从电池上拆开，用导线将电容器两金属板接起来，在刚接通的瞬间，电路便有电流流通，这个电流与原充电时的电流方向相反。随着电流的流通，两金属板上积累的电荷逐渐减少，电压逐渐降低，这就是所谓“放电”。显然，放电是使储存在金属板上的电子的位能变成动能，随之变成热能而消耗在导线电阻中。

如果不是用导线，而是用手将充了电的电容器两极板接起来，电容就会通过人的手放电，感到电麻，所以，电容器“打”人是因为它通过人身放电给人予电击，而这种本领也即能量，是由给它充电的电源获得的。

二、交流回路中的电容器

如果电容器的两极接上交流电，则由于交流电的大小和方向在不断地变化，电容器的两端也必然交替地进行充电和放电，因此，电路中的电流就不停地来回流动，这就是电容器能通过交流电的道理。

那么，从电容器上流过的交流电流到底是多大呢？显然，电流大小取决于电容器充放电电流的强度。如果电容器上的电荷是均匀变化而放电电流保持不变，则电容器所能给出的放电电流的强度，等于用放电时间 $T/2$ 来除电容器上储存的电荷 q ，即

$$i = \frac{q}{T/2} = 2CUf \quad (1-3)$$

式中 T ——交流电变化一周的时间，称为周期；

$f = \frac{1}{T}$ ——交流电在单位时间内变化的次数，称为频率。

事实上，人们所见到的交流电源电压 U 都是按谐波规律由零变化到 U_m 的正弦波，因而电容器的电荷 q 以及电路中的电流也按谐波规律由零变化到 q_m 以及 I_m ，也就是说电流不是常数。考虑到电流不是常数，按精确的计算还应补进因数 $\pi=3.14$ ，其精确的公式为：

$$I_m = 2\pi fCU_m \quad (1-4)$$

由公式可知，电容量和外电源的频率 f 愈大，电流就愈大。根据电路原理，电压与电流振幅的比 U_m/I_m 称为阻抗，在此 $U_m/I_m = 1/2\pi fC = X_c$ 。人们用 X_c 来表示常数 $1/2\pi fC$ ，并称为电容器的容抗。

大家知道，一般导线对于电源的阻抗称为“电阻”，用 R 表示。在交流电技术和无线电技术中，称为有效电阻，以便与容抗和下面将叙述的感抗相区别。有效电阻对于电流的阻抗作用是和电能转变成热能而损耗掉的事实相联系的，电流流过导线时，它的一部分电能转变成热，而消耗在导线中，其值为 I^2Rt （ I —电流； t —时间）。

电源电压为一定时，容抗和有效电阻一样能限制电路中的电流。但是容抗不会将电源的能量变成热量而耗掉，它只是不让在该频率下电容器所不能容纳的能量流过电路。

在一个四分之一周期（ $0 \sim \pi/2$ ）内（越前电压 $1/4$ 周期），电源对电容器充电，电能由电源转移到电容器上；下一个四分之一周期（ $\pi/2 \sim \pi$ ）电容器放电，它把能量还给电源。如果不考虑线路的有效电阻和电容的介质损耗，那么当电流流过电容器时，并不耗费任何能量。无论电源功率多大，在电路中所能流通的能量只能是电容器充电时所能“容纳”以及在放电时“交回”电源的能量，所以，电容能限制电路中的电流。

三、电容器的主要参数

电容器的主要参数是容量、电压和功率。

(一) 容量

如前所述,电容器具有储存电荷的特性,它储存电荷的多少,与加到电容器两端的电源电压成正比,其比例常数就是电容器的容量,用字母 C 表示。

电容器的容量表明电容器储存电荷的能力。由公式(1-1)可知,对于某一电容器来说,如果加在它两端的电压为一伏时,它能储存一库仑的电荷,则称它的电容量为一法拉。法拉一般用字母“F”表示。在实用中有时嫌它太大,就用微法(μF)和微微法($\mu\mu\text{F}$ 、PF或P)来表示,它们之间的关系是: $1\text{F}=10^6\mu\text{F}=10^{12}\text{PF}$ 。

实际上,决定电容器的容量的因素是制造电容器的介质的介电系数和电容器极板的几何形状、几何尺寸,因此,有时电容器的单位也用长度单位(米、厘米等)来表示。厘米和法拉之间的换算关系是:一厘米电容相当于 9×10^{11} 法拉,即 $C_{(\text{F})} = \frac{C_{(\text{cm})}}{9 \times 10^{11}} (\text{F})$ 。

(二) 电压

电容器是在极板之间填以介质制成的,因此,电容器的极板间的电压有一极限值,超过此值,介质将被击穿而成短路,电容器就失去了储存电荷的特性(空气介质的电容器击穿后可以恢复)而算报废。

为了保证人们能够正确地使用电容器,所以制造厂规定了电容器的工作电压或试验电压。工作电压是电容器能长期(一般不短于10000小时)可靠的的安全的工作的最高电压,用“W·V”表示。试验电压是电容器能短时期(一般不超过一分钟)承受不被击穿的最高电压,用“T·V”表示。工作电压一般为试验电压的百分之五十到百分之七十。

应该注意,电容器的耐压通常都是标示直流电压,如果用在交流电路中,则应保证交流电压的峰值不应超过该标示值。当然,有的电容器(例如电解电容)根本就不允许用在交流回路中,那就不是耐压多少的问题了。

(三) 功率

电容器既然是用介质制造的,那么当电容器两端接上交流电时,必定要有功率损耗,一般被介质所吸收的有功功率为:

$$P_e = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = P_c \operatorname{tg} \delta (\text{瓦})$$

式中 U ——加在电容器上的电压,伏;

$\omega = 2\pi f$ ——加于电容器的电压角频率,弧度;

C ——电容的容量,法拉;

$\operatorname{tg} \delta$ ——电容中介质损耗角的正切;

P_c ——电容器的无功功率,乏。

电容器中的介质损耗将使电容器发热,显然损耗太大也会使电容器过热而损坏。为了保证电容器的正常使用,必须规定其允许的损耗值。另外,由于 $\operatorname{tg} \delta$ 值只决定于电容器的介质材料(严格说来还与温度、湿度有关),对于某一指定电容器来说就是个定值,同时,在实际工作中,人们最感兴趣的是其无功功率 P_c ,因此一般制造厂都规定电容器的无功功率 P_c ,而不是直接给出有功功率。

最后,有必要指出,在一般的小功率电路中,选用电容器时只要满足容量、电压的要求即可;而在大功率电路中,选择电容除满足容量、电压的要求外,还必须使其无功功率亦满足要求。此外,在某些特殊情况下,还对电容器的“漏电阻”(因其介质不是绝对的绝缘体)加以限制。例如,在自动控制系统中,常用“PID”调节器,其中作为微积分应用的电容就应该选用漏电流小,即漏电阻大的电容,还有一些时延极长的延时电路中的延时电容也要求漏电阻越大越好。对于这些情况使用者应注意选择。

四、电容器的种类

电容器的种类很多。按结构可以分为固定电容器、半可变电容器和可变电容器。按采用的介质材料不同,可分为空气、纸介、电解、云母、瓷介、铁电和真空等电容器,最近又出现一种混介电容器。为了使用方便各种电容器又具有不同形状和大小。

在选用电容器时,除了注意电容器的容量、工作电压、形状均需满足要求外,在高频

线路中应该特别注意电容是用什么介质材料做的,否则,将收不到预期的效果,甚至适得其反。

图1—1所示为几种电容器的频率特性^[1]。由图可知,油浸纸介电容器最好用在频率为 $0.5 \times 10^4 \sim 0.5 \times 10^5$ 赫的线路中,实际上它在频率超过 10^6 赫的线路中,已失去了电容的性质,变成了电感和电阻的综合体。

在频率超过 10^9 赫以后,连陶瓷电容器也会失效,只能用真空或空气电容器,所以在工业高频装置中的高频回路(一般都在100千赫以上)内,应尽量采用云母、陶瓷、铁电、真空等介质的电容器。

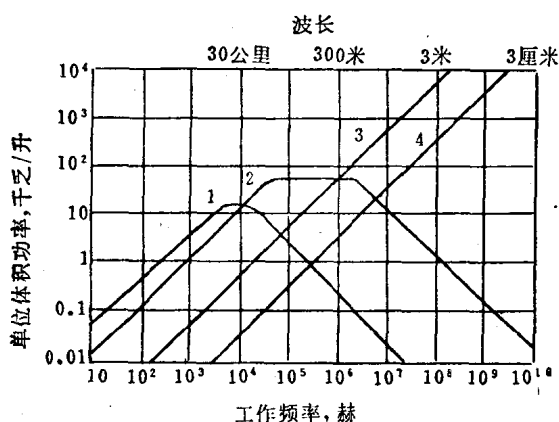


图 1—1 几种电容器的频率特性

1—纸油介质; 2—含80%二氧化钛的陶瓷介质;
3—真空或压缩空气介质; 4—大气压下的空气介质

第二节 电 感 (L)

电感线圈是无线电设备的重要元件之一。那么它到底在电路中起什么作用呢?

一、电 感 线 圈

线圈也是储能元件,当电荷沿导线运动时,便产生电流,电流周围总是伴有磁场,磁场具有一定的能量。当电流 I 沿线圈流过时,线圈的磁场能量,即磁能等于:

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-5)$$

式中: L 对于每一个给定的线圈说来是常数,称为线圈的自感系数或电感。

根据电磁感应定律,任何在导体周围的磁场的变化都会在导体中引起电动势。当流过线圈的电流减少(或增加时)它所产生的磁场也减少(或增加),由于这一磁场的变化,将会在线圈中引起感应电动势。因为电动势就发生在产生磁场的线圈中,因此,人们便把

它叫做自感电动势。自感电动势的作用是反对引起这个电势的电流发生变化的。假如在线圈中的电流减少，自感电动势的方向就与电流的方向相同，力图维持电流不减少；假如线圈中的电流增加，自感电动势与电流的方向相反，力图使电流减少。不过，不管怎么样，电流的变化总是会随着外电源的变化而变化的，自感电动势不能完全阻挡这种变化，只能使这种变化延迟发生，所以说，通过电感线圈的电流不能突变。

二、交流回路中的线圈

现在假定由频率为 f 的交流电源和具有电感 L 的线圈组成电路，电源的电动势按照谐波规律变化。由于线圈具有电感 L ，当电路中的电流发生变化时，会产生自感电动势，这电动势力图阻止电流的变化，因此，电路中的电流只能达到某个一定的值 $I = U/2\pi fL$ （忽略绕制线圈的导线有效电阻）。其中 $2\pi fL$ 表示线圈电感对于频率为 f 的电流的阻挡能力，人们称之为线圈的感抗，用 X_L 表示。显然 X_L 愈大，通过线圈的电流就愈小，而 X_L 与电源的频率和线圈电感成正比，所以，在线圈相同时，电源的频率愈高，流过线圈的电流就愈小，也就是说，高频电流难于通过线圈，而低频电流容易通过。在电流流通（落后于电源电压 $1/4$ 周期）的开始四分之一周期 $0 \sim \pi/2$ 内，线圈中的电流由零逐渐增加，线圈由电源取得能量，并使之变成磁能，在下一个四分之一周期 $\pi/2 \sim \pi$ ，电流开始逐渐减少，磁场被破坏，产生自感电动势，这一电动势将线圈的磁场能量变成电能还给电源。所以，如果忽略线圈的有效电阻的话，电感和电容一样，能限制电路中的电流，但不损耗能量。

三、线圈的主要参数

线圈中流过变化的电流时，线圈上将产生感应电动势，感应电动势的大小与线圈流过的电流变化率成正比例，其比例常数就是电感量，简称电感，用 L 表示。它表明，通过一定变化率的电流时，线圈产生感应电势的能力，其单位是亨利，常用字母 H 表示，此单位的意义是：当线圈中通过每秒变化一安培的电流时，能产生感应电势一伏特，此线圈中的电感就是一亨利。在实际应用中还使用更小的单位：毫亨（mH），微亨（ μH ）。它们之间的关系是，

$$1\text{H} = 1000\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

实际上决定线圈电感的因素是线圈的形状、尺寸、匝数以及线圈中的介质，因此，有时也以长度单位（厘米、米等）来表示电感量，它与亨利的换算关系是， $L_{(\text{H})} = \frac{L_{(\text{cm})}}{10^9}$

（H），即一厘米电感等于 10^9 亨利。

为了表征两个线圈放在一起时的情况，则用互感 M 来表示，其单位亦采用亨（H）等。互感 M 除了与线圈本身的形状、大小、匝数和线圈周围的介质有关外，还与两线圈的相对位置有关。

在无线电中，线圈的分布电容往往对工作有很大影响，因此，除了知道线圈的电感外，还需要知道其分布电容和线圈的电阻所占的比例，而规定线圈的品质，用字母 Q_L 表示，即，

$$Q_L = \sqrt{\frac{L}{R^2 C}}$$

式中 L ——线圈的电感, 亨;
 C ——线圈的电容, 法拉;
 R ——线圈的电阻, 欧。

显然线圈的 Q_L 值越大越好, Q_L 值越大, 意味着线圈内的损耗越小。

此外, 线圈的耐压、允许通过的电流等参数也是不可忽视的, 这要求我们在进行设计和绕制时, 必须使用合理的线圈结构、适当的导线直径。

四、线圈的种类

根据绕法的不同, 可以分为单层螺旋管式线圈, 多层螺旋管式线圈, 蜂房式线圈。单层螺旋管式线圈又有密绕和间绕。

密绕单层螺旋管式线圈是以绝缘纸筒或高频瓷管为骨架, 将导线一圈紧挨一圈进行绕制, 这种绕制法简单、容易制作, 分布电容小, 但其体积较大, 一般在几百千赫的高频装置中, 作为反馈线圈, 在兆赫的高频装置中做扼流圈。

间绕单层螺旋管式线圈, 是将导线的一圈与一圈间隔开一定的间隙进行绕制, 这种线圈具有较好的品质因数和稳定性, 常作为各种高频装置的反馈线圈、槽路线圈、工作线圈。

多层螺旋管式线圈的分布电容大, 品质因数不好, 在高频装置中很少见。

蜂房式线圈的每一匝线圈平面都不与旋转平面平行, 而是相交成一定的角度, 当绕骨架旋转一周时, 导线可能来回弯折二、三次或更多次。这种线圈体积小, 分布电容小, 电感量大, 常用作高频扼流圈, 缺点是绕制困难。

为了调整方便或提高电感量和品质因数, 可以在线圈中插入不同材质的芯子, 做成适合于各种频率交流电路用的电感线圈, 不过, 在目前生产的高频装置中, 除了电源滤波扼流圈外, 在高频回路中均不采用特殊材质芯子, 而一律是空芯的线圈。

第三节 振 荡

振荡现象对于任何人来说并不陌生, 从日常生活中我们就能举出几个以致更多的振荡现象。

一、单 摆

现先来看看单摆振荡现象。如图1—2所示, 将绳子的一端挂在梁上, 另一端绑上重物, 用力将重物推向右边, 松手后, 重物就会左右来回振荡。这种现象就是机械式的单摆。

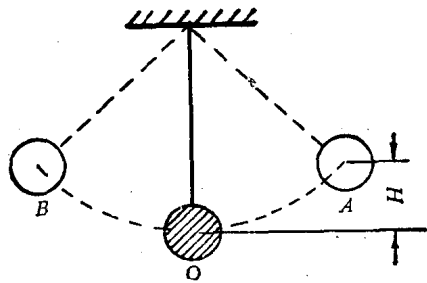


图 1—2 单摆振荡

假如将重物取下来, 只剩下很轻的绳子, 则无论怎样推绳子, 也不会来回振荡(如果绳子是很轻的话), 那么为什么绑上重物就会振荡, 不绑重物就不会振荡呢?

原来重物是个储能元件。当把重物由中心位置(O点)推向右边(A点)时, 实际上是沿着以绳长为半径的圆弧将重物抬高了一段距离 H , 也就是说, 人们做了功, 这个功变成了位能, 储

存在重物中。当人们松手的时候，重物在重力的作用下，力图维持重心最低的位置，因此，重物开始运动，从而逐渐把位能变成动能，当它恢复到原始位置（回到O点）时，位能即变成零，而动能则最大，在动能的作用下，重物会再一次离开O点，向B点摆去，在这过程中，动能逐渐减小，位能逐渐增加。到了B点时，动能减少到零，位能最大，几乎和在A点时一样大，这样重物在B点也停不住，又会往O点摆来，到了O点同样停不住，会继续往A点摆去……。就这样，将重物推一下，作的功就变成了能量，驱使重物来回摆动。大家都知道，如果只推一次，就不再推的话，重物是不会永远摆下去的，因为有空气的阻力，重物在来回摆动的过程中，与空气摩擦产生热量，也就是说，重物储存的能量会变成热能消耗掉而最后停止摆动。要维持重物的摆动，人们就必须经常用手去推它，以补偿能量的消耗。当然，推的时候必须掌握一定的方法，当重物由A向O运动时，将它往O点方向推去，当重物由O点往B点运动时，也顺着运动的方向往B点推去，则振荡就会继续下去，否则，推的方向不对，就会迫使振荡停止。

根据上面单摆的例子，和日常生活中所接触到的振荡的事例，可以得出下面的结论：

- (1) 要产生振荡，必须有储能元件；
- (2) 要维持振荡，必须不断地补充能量，而且所补充的能量必须足以补偿振荡中的能量损失；
- (3) 补充能量必须掌握一定的时机。

二、电 振 荡

研究了较熟悉的机械振荡后，再来看看电振荡，虽然表现的现象不同，而本质是一样的，都是能量的互换过程，也可以说是能量的振荡。如图1—3所示：

电容C、电感L、电源E和开关K组成了电路。其中，电容C和电感L都是储能元件。

人们将开关K拨到电池一边，则电容器立即由电池E进行充电，在充电的过程中，电池对电容做功，这和前述机械振荡中，用手去推重物是一样的，电能变成电容的电场能而储存在电容器中。

当电容器充电完毕时，电容器储存的电能为 $W_c = \frac{q^2}{2C}$ 。人们将

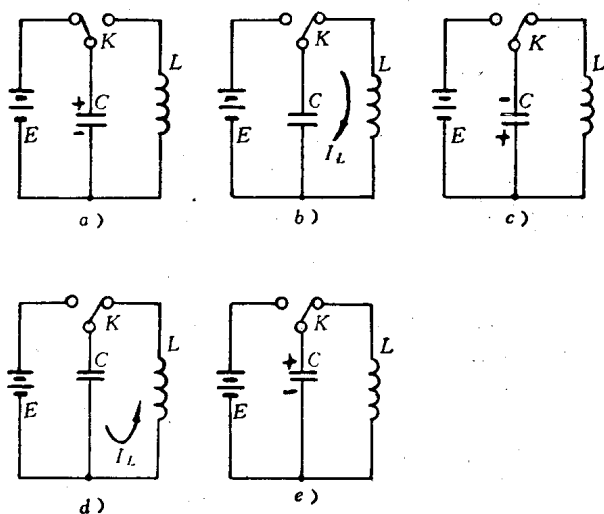


图 1—3 LC振荡回路

开关K拨向线圈（如图1—3b所示），则电容器将通过线圈放电，在开始瞬间，由于线圈作用（电感）电路中的电流强度为零，但由于电压的作用，使电流逐渐增加（变化曲线如图1—4中的O~T/4段）。在这过程中，电容器的电场能逐渐减少，线圈中流过电流就会建立磁场，也就是说磁场能量将逐渐增加，到电容器放电完毕时，电容的电场能消失，而线圈中的电流增到最大值

(电流方向如图 1-3b 所示), 也即磁场能量达到最大值, 电容器的电能全部转变为线圈的磁能 $\frac{q^2}{2C} = \frac{LI^2}{2}$, 这和单摆中位能变成动能的过程相似。在这一瞬间 ($t=T/4$),

电容电压为零。假如没有自感, 电路就应该没有电流了, 但是, 线圈是有自感的, 自感电动势将力图维持电流不变, 因此, 线圈中会继续有同一方向的电流流过, 不过将逐渐减少(如图 1-4 的 $T/4 \sim T/2$ 段), 这时电流使电容器在相反的方向充电(如图 1-3c 所示),

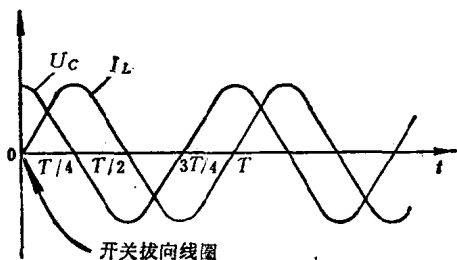


图 1-4 振荡波形

于是, 线圈的磁能又逐渐转变成电容器的电能, 这和单摆中动能转变成位能相当。最后, 电流变成零, 磁能全部变成电容器的电能。然后, 电容器又将放电, 线圈中又开始流过电流, 但方向相反(如图 1-3d 所示, 曲线则如图 1-4 的 $T/2 \sim 3T/4$), 这一电流将达到最大值, 电容的电能再一次全部转变成线圈的磁能, 接着, 电容器再一次被充电

(极性如图 1-3e 所示), 最后达到和开始状态相当的电压(在 $t=T$ 时), 振荡的第一个周期就到此结束, 以后将重复上述过程。

更深入的研究表明, 由电感 L 和电容 C 组成的振荡回路是线性系统, 是正弦振荡, 它的振荡频率与振幅无关, 频率由系统本身的性质来决定, 即 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 振荡周期

为: $T_0 = 1/f_0 = 2\pi\sqrt{LC}$, 振荡角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

实际上电容器和电感都不是纯粹的储能元件, 在电容器中有介质损耗, 在电感中也存在电阻, 因此, 在振荡的过程中, 也即在电磁能量的互相转换过程中, 总是有能量损耗的, 如果不及时补充能量的话, 振荡的振幅便会逐渐减少, 最终将停止振荡。另外, 补充能量同样必须讲究方法, 抓住恰当的时机, 否则, 能量是补充不进去的, 甚至会使振荡更快的停止。

第四节 振荡电路能源的补充

怎样才能使能量补充进电感 L 和电容 C 组成的振荡回路呢?

让我们来研究图 1-5 所示回路的工作情况。

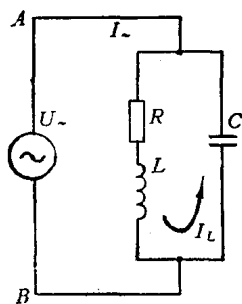


图 1-5 LC 电路

假如电容 C 已充有 A^+B^- 的电压, 并且刚好和电源 $U_~$ 的电势量值相等方向相反, 我们就以此瞬间为起点来研究此回路的工作过程。

在电容电压和外电源电压的共同作用下, 电感 L 中将开始建立电流 I_L , 由于电感线圈的感生电动势的阻挠, I_L 不能突变, 只能从零开始逐渐增大, 这时电容器的电能就逐渐转变成电感线圈的磁场能, 在这种能量转变的过程中, 有一部分就变成电容的介质损耗和电感线圈电阻的热损耗, 这一损耗部分则由外电源输进。当电容放电完毕时, 外电源电压也刚好为零,

在电感中的电流就达到最大值，也即磁场能量为最大，此后，电感将维持电流继续同方向流通，使电容 C 反向充电，也即磁场能又转变成电场能，这时，外电势的方向又刚好是帮助电容充电的，在磁、电能量的转变过程中，能量的损耗亦由电源补充。就这样，外电势在电感 L 和电容 C 之间的电磁能量转换过程中，总是及时补充它们的能量损失，使振荡得以永远进行下去（曲线如图1—6所示），否则，振荡就会很快的衰减（如图1—6中虚线所示）。

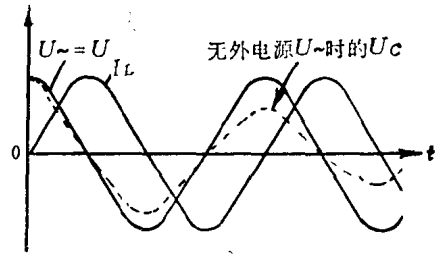


图 1—6 LC电路振荡曲线

实际上，在上面叙述的情况下是外电源的频率 $f_{\sim}$ 与LC回路的固有频率 f_0 相等时的情况，即

$$f_{\sim} = f_0 \approx 1/2\pi\sqrt{LC}$$

这时， $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ ，回路与外电源之间的能量交换是单方向的，只有电源把必需的能量加到回路来补偿回路的损耗，回路不会把能量反送到电源。通常称这种振荡为“谐振”，因为振荡回路是LC的并联回路，谐振时，外电源回路的电流 $I_{\sim}$ 很小，而LC回路的电流 I_L 很大，因此又称为并联谐振或电流谐振。

并联谐振时的回路等效阻抗，称为谐振电阻，以 R_D 表示。 R_D 与回路中的 L 、 C 和 R 之间的关系，可以根据交流电路的理论推导出来。

L 、 C 并联电路的阻抗 Z 为两支路阻抗 Z_L 和 Z_C 的并联：

$$Z = \frac{Z_L \times Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{(R + j\omega L) \left(-j\frac{1}{\omega C}\right)}{R + j\omega L + \left(-j\frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\frac{L}{C} - j\frac{R}{\omega C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (1-6)$$

一般 $\omega C \gg R$ ，因此 $\frac{R}{\omega C}$ 可以忽略，在谐振时 $\omega = \omega_0$ ， $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ ，故谐振阻抗为：

$$R_D = Z_{(\omega=\omega_0)} = \frac{\frac{L}{C}}{R} = \frac{L}{RC} \quad (1-7)$$

或

$$R_D = Z_{(\omega=\omega_0)} = \frac{\frac{L}{C}}{R} = \frac{\frac{\omega_0 L}{\omega_0 C}}{R} = Q \frac{1}{\omega_0 C} = Q \omega_0 L \quad (1-8)$$

式中 ω_0 ——谐振回路的固有振荡角频率；

$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ ——回路的波阻抗或者特性阻抗；

$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$ ——回路的品质因数。

为了计算的方便，往往还引用与 Q 等效的所谓回路的衰减 $\delta = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{R}{\rho}$