

大型工程机械电路

金君恒

水利电力出版社

TM13
8019

大型工程机械电路

金 君 恒

水利电力出版社

内 容 提 要

本书重点讲述大型工程机械电路的工作原理、电气操作、调试和电路故障的判断。同时扼要地介绍了磁路和电路的基础知识,常用电器的结构、原理、调整和使用维修知识,以及电机学、电力拖动、电子学、自动控制和工程机械结构方面的基础知识。

全书共九章:磁路和电路基础知识;常用电器;砂石料筛分楼电路;混凝土搅拌楼电路;混凝土振捣器和混凝土泵电路;塔式起重机电路;门式起重机电路;缆索起重机电路;单斗挖掘机电路。

本书语言通俗,实用性强。适合于具有中等文化程度的工程机械电气维护人员和运转人员阅读,可供技术人员参考,也可作为技工学校的教学参考书。

大型工程机械电路

金君恒

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 23.25印张 530千字

1985年4月第一版 1985年4月北京第一次印刷

印数0001—6720册 定价4.75元

书号 15143·5612

前 言

本书是作者多年来在水电建筑工地技工学校从事电工专业教学所用讲义的基础上，修改补充而编写成的，借助于各种典型的大型工程机械电路，着重讲解了电路的工作原理，同时扼要地介绍了电气操作、调试和电路故障判断等知识，目的是使工程机械维护人员和运转人员能有一本理论联系实际的电工专业书。

为了使读者易学易懂，本书采取从易到难，从简到繁，循序渐进的编排方式，在讲解每一种工程机械电路之前，先介绍有关的电机学、电力拖动、电子学、自动控制和工程机械结构方面的基础知识。全书偏重于概念的阐述，避免公式的推导，讲解详细，深入浅出，语言通俗。

本书初稿完成后，曾请北京水利电力经济管理学院李绮鹏同志、水利电力部第五工程局刘同济同志审阅，承蒙提出许多宝贵意见。

水利电力部第四工程局何田照、李道武和王占国等许多同志曾为本书提供了资料，刘桂芝同志为全书细心地进行了文字上的推敲。在编写过程中，曾参考了厂家的说明书和有关资料。谨在此对直接或间接帮助过本书编写工作的所有同志，表示深切的感谢。

限于作者的水平和能力，书中难免存在缺点和错误，诚恳地欢迎读者批评，以便有机会时加以改正。

作 者

1984年5月1日于青海龙羊峡

目 录

前 言

第一章 磁路和电路基础知识	1
第一节 磁路和磁化	1
第二节 电磁感应定律和电磁力定律	6
第三节 电容和电感在直流电路中的过渡过程	7
第四节 单相交流电路	11
第五节 三相交流电路	18
第二章 常用电器	25
第一节 主令电器	25
第二节 热继电器和熔断器	29
第三节 低压开关	33
第四节 接触器	37
第五节 电磁式继电器	39
第六节 压力继电器和电磁气阀	44
第七节 电阻器、电力制动器、集电环	47
第八节 高压开关	49
第三章 砂石料筛分楼电路	54
第一节 三相异步电动机的结构和工作原理	54
第二节 三相异步电动机的工作特性	59
第三节 电动机的发热、冷却和定额	64
第四节 电气原理图	66
第五节 筛分楼简介	68
第六节 筛分楼电路	70
第七节 筛分楼的电气操作、试运转和故障判断	78
第四章 混凝土搅拌楼电路	81
第一节 混凝土搅拌楼简介	81
第二节 进料层电路	87
第三节 配料层电路	92
第四节 搅拌层和出料层电路	100
第五节 搅拌楼的电气操作和试运转	108
第六节 搅拌楼电路故障的判断	111
第七节 电子秤的工作原理	112
第八节 电子秤的稳压电源	119
第九节 电子秤的放大器	122
第十节 电子秤的执行机构	134

第十一节 电子秤的操作和故障检查	137
第五章 混凝土振捣器和混凝土泵电路	140
第一节 混凝土振捣器	140
第二节 变频机组	145
第三节 振捣器电路	147
第四节 振捣器的试运转和常见故障	149
第五节 日本700S-1型混凝土泵简介	151
第六节 “星-三角”降压起动	156
第七节 700S-1型混凝土泵电路	157
第八节 700S-1型混凝土泵的操作和电路故障判断	162
第九节 国产HB-30型混凝土泵电路	163
第六章 塔式起重机电路	166
第一节 线绕式电动机的起动	166
第二节 线绕式电动机的正反转和调速	172
第三节 线绕式电动机的制动	172
第四节 QT-60/80型塔式起重机简介	176
第五节 QT-60/80型塔式起重机电路	180
第六节 QT-60/80型塔式起重机的操作和试运转	188
第七节 QT-60/80型塔式起重机电路故障的判断	190
第七章 门式起重机电路	192
第一节 10/30吨门式起重机简介	192
第二节 10/30吨门式起重机电源电路和照明电路	197
第三节 10/30吨门式起重机工作电路	201
第四节 硅整流装置电路	213
第五节 10/30吨门式起重机的电气操作和试运转	216
第六节 10/30吨门式起重机电路故障的判断	219
第七节 SDMQ-1260/60型高架门式起重机电路	221
第八节 SDMQ-1260/60型高架门式起重机的电气操作、测试和调整	242
第八章 缆索起重机电路	245
第一节 国产20吨平移式缆索起重机简介	245
第二节 缆索起重机上的直流电机	248
第三节 F-D系统	253
第四节 F-D系统的过渡过程和阻尼机	256
第五节 交直流电源电路	261
第六节 吊钩起升电路	264
第七节 小车牵引电路	271
第八节 塔架移动电路	274
第九节 自整角机、吊钩位置指示装置和偏斜保护装置	277
第十节 风速保护装置及其它电气设备	283
第十一节 电气操作和试运转	289

第十二节 国产20吨平移式650米高架缆索起重机电路	294
第九章 单斗挖掘机电路	307
第一节 WD400型挖掘机简介	307
第二节 磁放大器	311
第三节 三相内桥推挽磁放大器	317
第四节 电压和电流负反馈	321
第五节 双拍磁放大器触发可控硅励磁电路	325
第六节 主令控制器	332
第七节 磁放大器励磁WD400型挖掘机整机电路	335
第八节 可控硅励磁WD400型挖掘机整机电路	344
第九节 WD400型挖掘机电气调试	352
第十节 WD400型挖掘机的电气故障及处理	356
附录一 电工系统常用图形符号	358
附录二 一般三相异步电动机的常见故障及处理方法	361
附录三 直流电机的常见故障及处理方法	362
附录四 接触器常见故障及处理方法	363
附录五 自动开关常见故障及处理方法	364
主要参考文献	366

第一章 磁路和电路基础知识

电路是由电气元件和设备组成的总体。它提供了电流通过的途径，进行能量的转换、电能的传输和分配，以及信号的处理等。例如，发电机将机械能转换为电能；电动机将电能转换成机械能；变压器和配电线路把电能分配给各用电设备；电子放大器或磁放大器可把所施加的信号经过处理后输出。

一台大型工程机械的电路是由若干简单电路组成的。因此，掌握简单电路的规律、特点和分析方法是学懂整机电路并指导实践的必要基础。为了满足初学电工者的要求和节省查阅参考书的时间，本章对大型工程机械电路中必要的磁路和电路基础知识有重点地作了介绍。

第一节 磁路和磁化

电和磁是紧密相关的，电流能产生磁场，而变动的磁场或导体切割磁力线又会产生电动势。初学电工者往往只注意电而不重视磁。其实在很多情况下没有磁路知识是不可能学懂电路的，例如电机、变压器、互感器、接触器和磁放大器等工作原理都与磁密切相关。

图1-1是一个均匀密绕的空心环形线圈，匝数为 w 。当电流 I 通过线圈时，在环形线圈内就产生磁场。环内磁力线是一些以 O 为圆心的同心圆，其方向可用右手螺旋定则确定。磁力线通过的路径称为磁路，环形线圈的磁路是线圈所包围的圆环。

(一) 磁感应强度

描述某点磁场强弱和方向的物理量称为磁感应强度。它不但有大小而且有方向，是一个矢量。它的方向与该点的磁力线方向一致。环形线圈内中心线上 P 点的磁感应强度

$$B = \mu \frac{Iw}{2\pi r} = \mu \frac{Iw}{l} \quad (1-1)$$

式中 μ —— 表征磁路介质对磁场影响的一个物理量，叫做导磁率；

r —— P 点到圆心的距离；

l —— 磁路的平均长度。

(二) 磁通

为了描述磁路某一截面上的磁场情况，把该截面上的磁感应强度平均值与垂直于磁感应强度方向的面积 s 的乘积称为通过这块面积的磁通，即

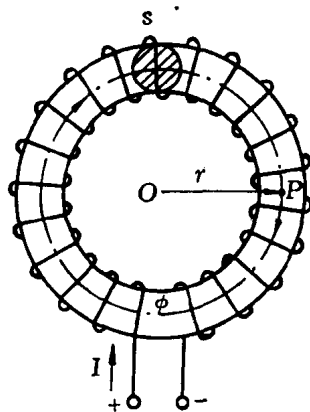


图 1-1 环形线圈

$$\phi = Bs \quad (1-2)$$

(三) 磁场强度

为了排除介质对磁场的影响, 使计算更加方便, 引入磁场强度这个物理量, 其定义是

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-3)$$

环形线圈中P点的磁场强度为

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{Iw}{l} \quad (1-4)$$

(四) 磁势

环形线圈中的磁通是因为在 w 匝的线圈中通过电流 I 而产生的, 所以仿照电路中电势的意义把 w 与 I 的乘积称为磁势

$$[F] = Iw \quad (1-5)$$

(五) 磁阻

描述磁路对磁通阻碍作用大小的物理量称为磁阻。一段磁路的磁阻 R_m 与磁路介质的导磁率以及磁路截面成反比, 与该段磁路的平均长度成正比, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1-6)$$

(六) 磁路欧姆定律

上述环形线圈磁路的截面和介质处处相同, 而且没有分支, 所以磁通也处处相同。对于这种简单磁路有

$$\phi = Bs = \mu \frac{Iw}{l} S = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{[F]}{R_m} \quad (1-7)$$

即简单磁路中的磁通与磁势成正比, 与磁阻成反比。

在一个磁路中绕有几个线圈并若通以不同的电流, 那末该磁路就有几个磁势。磁势在闭合回路中是有方向的, 并决定于电流的方向和线圈的绕向, 即决定于该磁势所产生的磁场的方向, 也用右手螺旋定则确定。在多磁势的磁路中磁通是几个磁势共同作用的结果, 总磁势是几个磁势的代数和, 即

$$[F] = [F_1] + [F_2] + \dots = I_1 w_1 + I_2 w_2 + \dots \quad (1-8)$$

实际磁路的截面或介质经常不是处处相等的。例如接触器的磁路一段是铁芯, 另一段是空气隙。此磁阻要分段计算, 总磁阻是各段磁阻之和, 即

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} + \dots \quad (1-9)$$

对于多磁势多段的无分支磁路, 磁通与总磁势成正比, 与总磁阻成反比, 即

$$\phi = \frac{[F_1] + [F_2] + \dots}{R_{m1} + R_{m2} + \dots} = \frac{[F]}{R_m} \quad (1-10)$$

在磁通、介质和截面都处处相等的一段磁路中, 磁感应强度和磁场强度也沿该段磁路处处相等, 因此该段磁路中的磁通

$$\phi = Bs = \mu Hs = \frac{Hl}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{Hl}{R_m} \quad (1-11)$$

式中的 HI 称为该段磁路的磁压降。上式就是一段磁路的磁路欧姆定律，它说明一段磁路的磁通与该段磁路的磁压降成正比，与该段磁路的磁阻成反比。

(七) 铁磁物质的磁化

图1-2是一个匝数为 w ，磁路平均长度为 l ，截面为 s 的铁芯线圈。在线圈未通电流之前铁芯不带磁性，通电流以后就呈现磁性，而且磁感应强度比空气芯时大得多，这种现象称为铁磁物质被磁化。

(八) 起始磁化曲线

当电流 I 从零逐渐增大时，铁芯中的磁感应强度按下式规律增长，即

$$B = \mu H = \mu \frac{Iw}{l} \quad (1-12)$$

图1-3是用实验方法测得的 B 随 H 而增长的关系曲线，叫做起始磁化曲线。对于已经制成的铁芯线圈， s 、 w 、 l 都是常数， ϕ 与 B 成正比， I 与 H 成正比，故也可把磁化曲线看成 ϕ 与 I 的关系曲线。

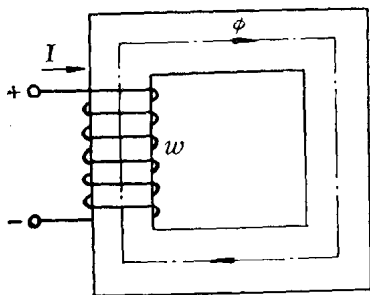


图 1-2 铁芯线圈

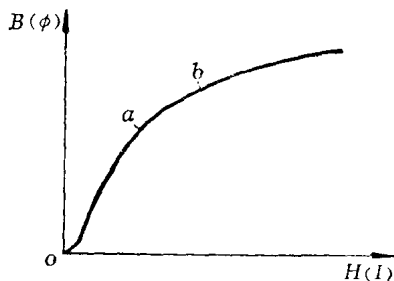


图 1-3 起始磁化曲线

在磁化曲线的 oa 段， B 几乎随 H 直线增长，具有正比关系，电机和变压器等通常工作于这一段。在 ab 段 B 的增长速率减慢，叫做磁化曲线的膝部。在 b 点以后， B 增长得十分缓慢，称为磁化曲线的饱和段。饱和现象是铁磁物质的一个重要特性，对电气设备和电路的工作有重大影响。例如：电机和变压器若因故工作于饱和段，则励磁电流就会大大增加，引起过热，甚至烧坏；而磁放大器则利用饱和现象起放大作用。

(九) 磁滞回线

给线圈通以如图1-4所示的交变电流 i ，使磁场强度在正最大值 H_m 到负最大值 $-H_m$ 之间变化，就可得如图1-5所示的磁化曲线。第一次 H 从零增加到 H_m 时， B 从零沿起始磁化曲线增到 a 点 (H_m, B_m) 。此后 H 减小，但 B 并不沿原曲线而是沿 ab 曲线下降。当 H 减小到零时， B 下降到 b 点 $(0, B_r)$ ，这说明外加磁场强度消失后铁芯中仍保留有一定的磁感应强度 B_r ，称为剩磁。要消除剩磁必须加反向磁场强度，当 H 反向增加到 $-H_c$ 时， B 下降到 c 点 $(-H_c, 0)$ ，剩磁全消去部消除。剩磁所必须的反向磁场强度 $-H_c$ 叫做矫顽力。此后， B 沿曲线 $cdefa$ 而回到 a 点。电流每交变一周， B 就沿闭合回线 $abcdefa$ 循环一周。铁磁物质中的磁感应强度总是滞后于外加磁场强度的变化，故把这条闭合回线叫做磁滞回线。

铁磁物质反复磁化要在铁芯内部损失一部分能量并转变为热能，叫做磁滞损耗。反复磁化一周所损耗的能量与磁滞回线所包围的面积成正比，因此在交变磁化的情况下总希望选用磁滞回线面积小的铁芯材料。

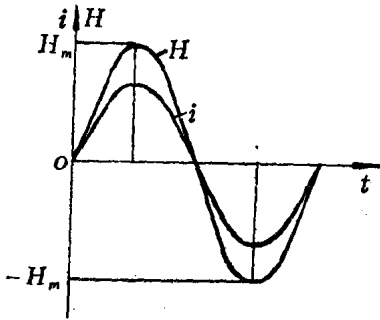


图 1-4 交变磁场强度

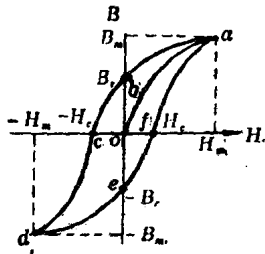


图 1-5 磁滞回线

(十) 平均磁化曲线

以不同的磁场强度最大值对铁芯进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，如图1-6。连接各磁滞回线的顶点即得平均磁化曲线，它与起始磁化曲线很接近。常用的 铸钢、铸铁和型号为D₁₁硅钢片的平均磁化曲线示于图1-7。

(十一) 直流导磁率

在铁芯被直流磁化的情况下应使用直流导磁率 μ_d 。根据式 (1-12)，例如如图1-8P点的直流导磁率为

$$\mu_d = \frac{B_d}{H_d} \quad (1-13)$$

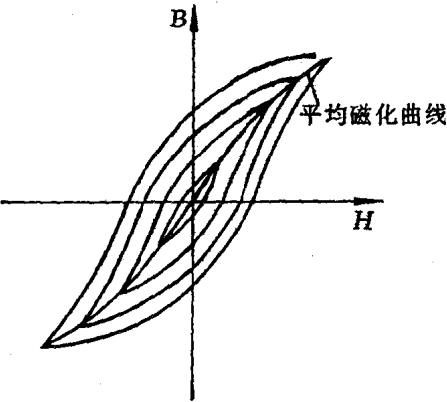


图 1-6 平均磁化曲线

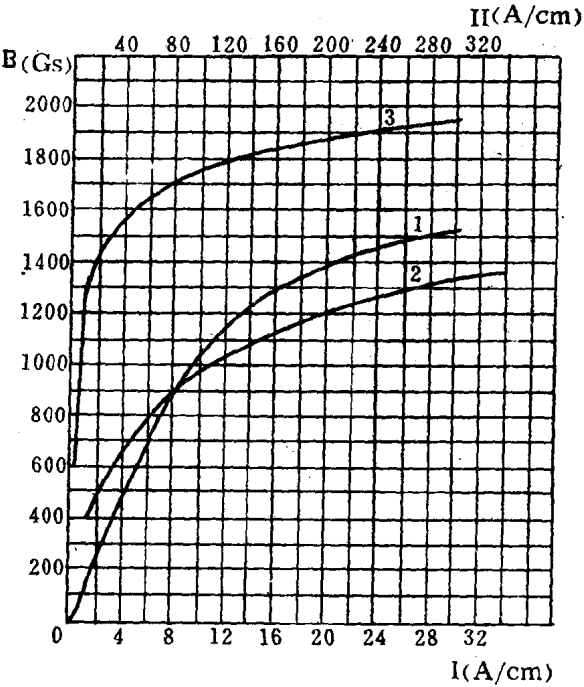


图 1-7 铸钢、铸铁和D₁₁硅钢片平均磁化曲线
1—铸钢(坐标I), 2—铸铁(坐标II), 3—D₁₁硅钢片(坐标II)

实际上 μ_d 就是线段 OP 的斜率, 即 $\tan \alpha_d = B_d / H_d = \mu_d$ 。在磁化曲线的 oa 段 μ_d 可以认为是常数, 以后 μ_d 随 H 的增加而减小, 可见铁磁物质的直流导磁率不是常数。

(十二) 交流导磁率

磁放大器的铁芯处于交直流混合磁化的状态下, 要反映磁场强度交流成分对磁感应强度交流成分的影响, 必须使用交流导磁率 μ_a 。如图1-8, 在磁场强度的直流成分 H_d 上迭加着一个交流成分 $\Delta H = H'' - H'$, 与此相应地在磁感应强度的直流成分 B_d 上迭加着一个交流成分 $\Delta B = B'' - B'$, 铁芯工作在 P' 点和 P'' 点之间。 P 点的交流导磁率为

$$\mu_a = \frac{\Delta B}{\Delta H} \tag{1-14}$$

其实 μ_a 就是线段 $P'P''$ 的斜率, 即 $\tan \alpha_a = \Delta B / \Delta H = \mu_a$ 。当磁场强度的交流成分 ΔH 越来越小时, 线段 $P'P''$ 也越来越靠近磁化曲线在 P 点的切线, 因此磁化曲线某点的交流导磁率 μ_a 可定义为该点切线的斜率。

铁磁物质交流导磁率 μ_a 随直流磁场强度 H_d 的变化曲线 $\mu_a = f(H_d)$ 示于图1-9。

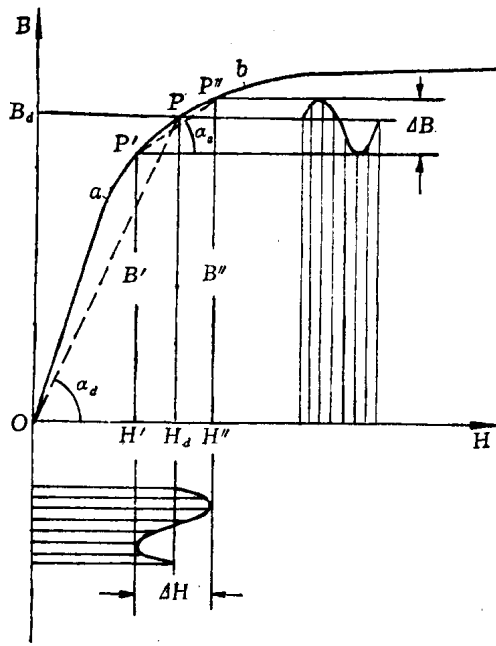


图 1-8 直流导磁率和交流导磁率

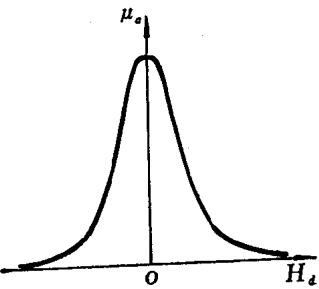


图 1-9 $\mu_a = f(H_d)$ 曲线

(十三) 软磁材料

矫顽力很小的铁磁物质称为软磁材料, 例如铁、硅钢片、坡莫合金等。优良的软磁材料要求剩磁小, 矫顽力小 (容易消除剩磁), 磁滞回线狭长 (磁滞损耗小), 导磁率大, 磁感应强度的最大值大。硅钢片和坡莫合金就是优良的软磁材料。交流铁芯和失电后要求立即失磁的直流铁芯都应优良的软磁材料制成。

铁磁物质是理想软磁材料, 它的交流导磁率等于无穷大, 矫顽力等于零, 磁感应强度最大值很大, 它具有如图1-10的磁滞回线。优良的坡莫合金具有如图1-11的磁滞回线, 很接近于理想的软磁材料。坡莫合金的缺点是价格贵, 受振动或变形会使导磁率大大降低, 因此安装、使用和维修时都要特别注意。

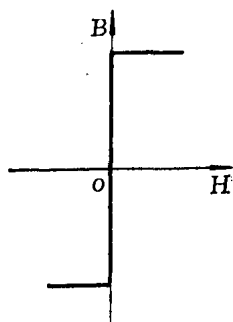


图 1-10 理想软磁材料的磁滞回线

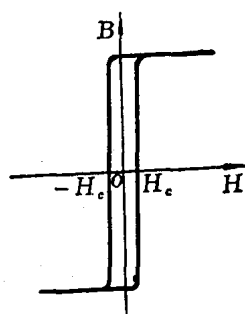


图 1-11 坡莫合金的磁滞回线

第二节 电磁感应定律和电磁力定律

(一) 直线导体中的感应电势

长度为 l 的直线导体以 v 的速度作垂直于磁场方向的运动而切割磁力线时，在导体内将产生感应电势，这种现象叫做电磁感应现象。感应电势 e 的大小与磁感应强度 B ，导体切割磁力线的速度 v 以及导体的长度 l 成正比，即

$$e = Blv \quad (1-15)$$

电势的方向用右手定则确定。

(二) 线圈中的感应电势

当线圈所包围的面积中磁通的大小或方向发生变化时，在线圈中就要产生感应电势。

感应电势的大小与磁通的变化率 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 成正比。单匝线圈的感应电势

$$e = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1-16)$$

线圈的匝数为 w 的感应电势

$$e = - w \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1-17)$$

感应电势的方向用楞次定律确定。楞次定律说：感应电势总是企图沿着自己的方向产生一个感应电流，以便阻碍原来磁通的变化。由于习惯上把磁通和感应电势的正方向规定为符合右手螺旋定则。当磁通增加时， $(\Delta\phi/\Delta t) > 0$ ，根据楞次定律，感应电势的实际方向与正方向相反，应为负值；反之，当磁通减少时， $(\Delta\phi/\Delta t) < 0$ ，感应电势应为正值。为了使式 (1-16)、(1-17) 不仅能表明感应电势的大小，而且还能反映它的方向，故在公式前置一负号。

(三) 自感电势

当流过线圈的电流发生变化时，穿过线圈的磁通也要发生变化而产生感应电势。该电势是由线圈自身电流的变化而产生的，故称为自感电势。根据楞次定律，自感电势的方向总是阻碍电流（或磁通）的变化。

由式 (1-1) 和式 (1-2)，对于环形线圈中的磁通 ϕ 与电流 i 有如下关系，即 $\phi = \mu$

$\times \frac{ws}{l} i$ 。因此, 自感电势

$$e_L = -w \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\mu w^2 \frac{s}{l} \frac{\Delta i}{\Delta t} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1-18)$$

上式说明自感电势与流过线圈的电流变化率 $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ 成正比。

(四) 自感系数

式(1-18)中的系数 L 称为线圈的自感系数, 简称电感。

$$L = \mu w^2 \frac{s}{l} \quad (\text{环形线圈}) \quad (1-19)$$

一个线圈的电感除了与线圈本身的结构有关之外, 还与磁路的介质有关。空气的导磁率是常数, 所以空气芯线圈的电感是一个常数, 可是铁芯线圈的电感不是常数。

(五) 电磁力定律

一根长度为 l 、通过的电流为 I 的直线导体处于磁力线与导体垂直的磁场中, 将受到力的作用。这个力称为电磁力, 其大小

$$F = BIl \quad (1-20)$$

其方向用左手定则确定。

第三节 电容和电感在直流电路中的过渡过程

在大型工程机械的生产过程中, 过渡过程是一种常见的现象。例如缆机要将重物吊到一定的高度至少要经过下列状态: 静止→起动加速→匀速提升→制动减速→静止。其中“静止”和“匀速”属于稳定状态, 简称稳态, “起动”和“制动”则属于过渡状态, 简称动态或暂态。在稳态下, 各物理量(例如转速和电流等)都是确定的, 但是在动态下各物理量则处于变化过程中。无论是机械系统还是电气系统, 从一种稳态转变到另一种稳态的过程就称为过渡过程。

过渡过程的时间一般并不长, 但却很重要, 因为在过渡过程中无论是机械系统还是电气系统都会产生冲击现象, 弄得不好很容易损坏机电设备。

(一) R-C电路的充电过程

图1-12是R-C充电电路。当K接通时直流电源 U 就向电容 C 充电, 电容端电压 u_c 逐渐升高到 $u_c = U$ 时充电才结束, 此后电流 $i = 0$ 。

电容端电压 u_c 和充电电流 i 随时间 t 的变化规律如下

$$u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-21)$$

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-22)$$

根据上两式绘成的电容充电曲线示于图1-13。

(1) 电容的端电压按指数规律从零增长到与电源电压相等。这说明电容器的端电压是不可能跃变的。

(2) 充电电流从开始的 $I_0 = \frac{U}{R}$ 按指数规律衰减到零。这说明, 一个电容器只有在暂态下才能通过直流电, 在稳态下则阻止直流电通过。

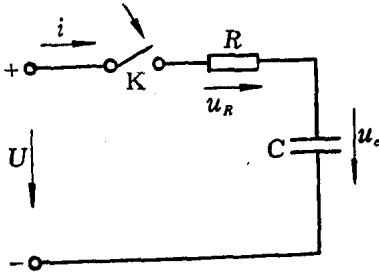


图 1-12 R-C 充电电路

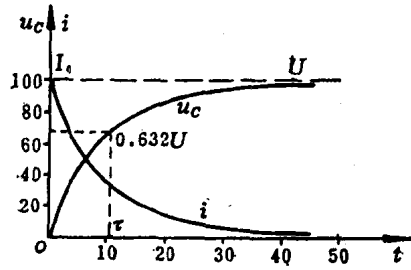


图 1-13 电容充电曲线

(3) $\tau = RC$ 叫做充电时间常数。当 $t = \tau$ 时, $u_c = 0.632U$ 。电容充电的快慢只决定于 RC 值, 它越大充电越慢。

(4) 电容充电过程在理论上要经过无限长时间才能结束。在工程上则认为 $t = 3 \sim 4\tau$ 时充电就已结束。

(二) R-C 电路的放电过程

图1-14是R-C放电电路。设电容器的端电压原来已被充到 U_c , 当K接通时电容器就对电阻放电, 直到电容器上储存的电荷放完为止。

R-C 电路的放电规律如下

$$u_c = U_c e^{-\frac{t}{RC}} = U_c e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-23)$$

$$i = \frac{U_c}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-24)$$

根据上两式绘成的电容器放电曲线如图1-15。

电容器放电时, 其端电压和放电电流都按指数规律下降, 放电的快慢决定于放电时间常数 $\tau = RC$ 。

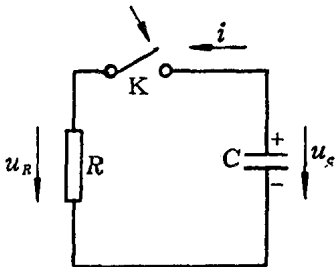


图 1-14 R-C 放电电路

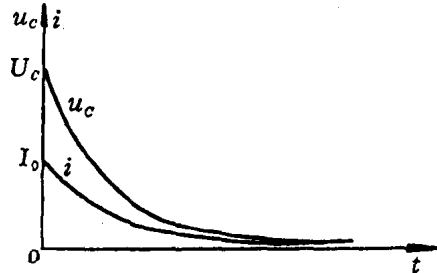


图 1-15 电容放电曲线

(三) R-L 电路的励磁过程

图1-16是R-L励磁电路。当K接通时, 电感线圈L中流过励磁电流而产生磁通, 同时

产生自感电势 e_L ，阻碍电流的变化。在励磁过程中电流是逐渐增大的，所以自感电势的实际方向与电流的方向相反，起阻碍电流的作用，如图中虚线箭头所示。

励磁电流和自感电势都按指数规律变化

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) = I_w \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1-25)$$

$$e_L = U e^{-\frac{Rt}{L}} = U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-26)$$

图1-17是根据上两式绘成的电感励磁曲线。

(1) 励磁电流从零逐渐增长到稳态值 $I_w = \frac{U}{R}$ 。这说明电感中的电流是不可能跃变的。

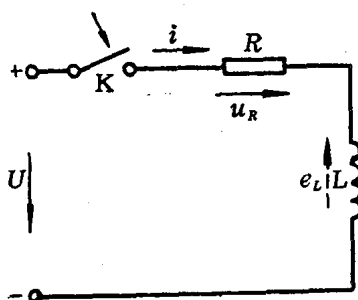


图 1-16 R-L励磁电路

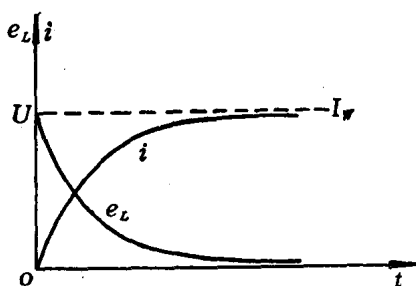


图 1-17 电感励磁曲线

(2) 自感电势从初始值 U 衰减到零，这说明，一个电感只有在暂态下才有阻碍直流电的作用，在稳态下则可以毫无阻碍地通过直流电。

(3) $\tau = \frac{L}{R}$ 是电感线圈的励磁时间常数。电感励磁的快慢决定于比值 $\frac{L}{R}$ ，它越大励磁越慢。

(4) 电感励磁在理论上也要经过无限长的时间才能结束，工程上则认为 $t = 3 \sim 4\tau$ 时就已经结束。

(四) R-L电路的消磁过程

图1-18是R-L消磁电路。在K断开时刻，由于直流电源 U 的作用在电感 L 中已经流过电流 I_0 。K断开以后电感脱离电源，与电阻 R 接成闭合回路，电流逐渐减小，同时产生与电流方向相同的自感电势，企图阻止电流的减小。

消磁电流和自感电势也按指数规律变化

$$i = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-27)$$

$$e_L = u_R = I_0 R e^{-\frac{Rt}{L}} = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-28)$$

图1-19是根据上两式绘成的电感消磁曲线。

在电感的消磁过程中电流和自感电势都是逐渐减小到零的，消磁的快慢决定于消磁时间常数 $\tau = \frac{L}{R}$ 。消磁电阻 R 越大，消磁过程越快，但是初始时刻的自感电势 $E_0 = I_0 R$ 也越

大，这容易造成过电压而损害绝缘或硅元件。

(五) R - L 电路的断开

图1-20是 R - L 电路断开的情况。当 K 断开时，似乎电路中的电流立即从原有值变为零。实际上由于电感电流的减小立即产生一个自感电势，在开关的断开点上出现一个高电压将空气击穿，产生电弧，使电流继续流通，保证电流不发生跃变。以后随着自感电势的减小，开关断开距离的拉大，电流衰减为零，电路才真正断开。

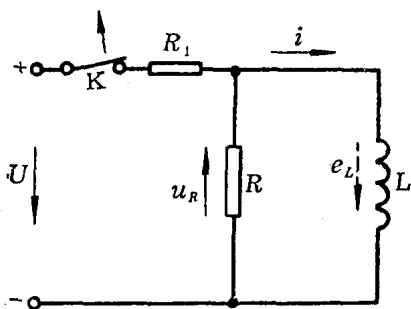


图 1-18 R - L 消磁电路

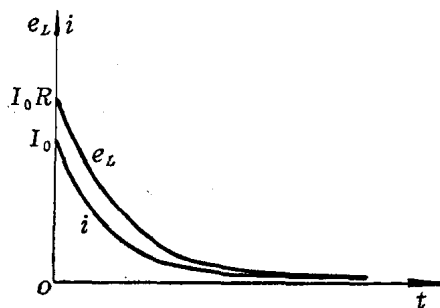


图 1-19 电感消磁曲线

若断开前的电感电流比较大，开关断开的速度又比较快（某些新型号的自动开关和熔断器的断开速度相当快），则自感电势相当大，不但使触头因强烈的电弧而灼伤，而且造成整个电路过电压。这种过电压是因操作而造成的，故称为操作过电压。

为了保证电路的安全运行，必须设法限制操作过电压，或对过电压很敏感的硅元件采取保护措施。图1-21是操作过电压的常用保护方法。

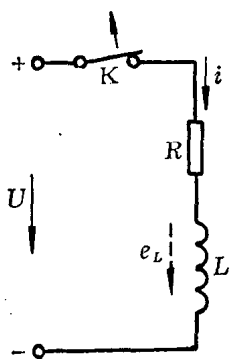


图 1-20 R - L 电路断开

图(a)是在电感线圈两端并联一个消磁电阻 R ，把自感电势的初始值限制在 IR 之内。 R 的阻值应适当选择，阻值过大则自感电势过高，阻值过小，不但浪费电能而且电感消磁过慢，会造成制动电磁铁或接触器等的延时释放。

图(b)是在电感线圈两端并联一个压敏电阻 R_U 。压敏电阻的阻值随所加的电压而变化，在正常电压下呈高阻状态，过电压时阻值急剧减小，电压恢复正常时又自动恢复高阻状态，因此可以起过电压保护作用。

图(c)是在电感线圈两端并联一个串联反接的硒堆 XZ 。硒堆本来是作整流用的，其反向电阻具有与压敏电阻相似的特性，故可以串联反接起来作过电压保护用。

图(d)是在电感线圈两端并联一个 R - C 串联电路，习惯上称为阻容吸收电路。它是利用电容端电压不可能突变的原理而起过电压保护作用的。 R 是阻尼电阻，防止 L 与 C 并联而引起谐振。

图(e)是在电感线圈两端并联一只放电二极管 Z 。正常工作时二极管上加反向电压而