

## 常用符号表

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| $\alpha$ ——相似比         | $\gamma$ ——比重, 过振荡系数         |
| $B$ ——磁感应强度            | $T$ ——时间常数, 自燃温度             |
| $B_{\delta}$ ——气隙磁感应强度 | $t_F$ ——可返回时间                |
| $\mathcal{C}_R$ ——热电常数 | $t_p$ ——燃弧时间                 |
| $E$ ——电位梯度, 弹性模量       | $t_K$ ——动作时间                 |
| $F$ ——吸力               | $t_0$ ——固有动作时间               |
| $F_c$ ——触头初压力, 电动斥力    | $t_s$ ——释放时间                 |
| $F_s$ ——反作用力           | $U_j$ ——额定绝缘电压               |
| $F_{-}$ ——吸力的直流分量      | $\alpha$ ——电阻温度系数, 压力角, 合闸相角 |
| $F_{\sim}$ ——吸力的交变分量   | $\beta$ ——幅值系数               |
| $f_n$ ——线圈填充系数         | $\delta$ ——气隙长度, 厚度          |
| $K_b$ ——返回系数           | $\epsilon_0$ ——真空介电常数        |
| $K_l$ ——限流系数, 均流系数     | $\Delta$ ——磁导                |
| $K_j$ ——整定电流倍数         | $\Delta_{\delta}$ ——气隙磁导     |
| $k_t$ ——铁心填充系数         | $\Delta_{\phi}$ ——磁通漏磁导      |
| $I_A$ ——整定电流           | $\Delta_{\psi}$ ——磁链漏磁导      |
| $I_t$ ——临界电流           | $\mu$ ——磁导率                  |
| $I_k$ ——最大分断电流         | $\mu_0$ ——真空磁导率              |
| $I_{SCR}$ ——可控硅元件额定电流  | $\Phi$ ——磁通                  |
| $IW$ ——激磁安匝            | $\Phi_{\delta}$ ——气隙磁通       |
| $P_j$ ——发热功率           | $\Psi$ ——磁链                  |
| $R_J$ ——接触电阻           |                              |

# 第1章 概述

低压电器广泛应用于发电厂、变电所、工矿企业、交通运输、农业及国防工业等的电力输配系统与电气传动和自动控制设备中。它对电能的产生、输送、分配与应用起着开关、控制、保护与调节等作用。

低压电器通常是指工作在交流电压为1200伏及以下电路中的电器设备。随着工农业生产的不断发展,低压电器电压等级范围有相应提高的趋势,同时电子技术也日益用于低压电器中。

## 1 低压电器的分类

低压电器根据它在电气线路中所处的地位和作用,可归纳为低压配电电器和低压控制电器两大类。按照它的动作方式可分为自动切换电器和非自动切换电器两类。自动切换电器在完成接通、分断或起动、反向以及停止等动作时,依靠本身参数的变化或外来讯号而自动进行工作;非自动切换电器主要依靠外力(如手控等)直接操作来进行切换等动作。低压电器产品的分类及其用途,见表30·1-1。

一般用途的低压电器(称为基本系列)的使用环境条件为:海拔高度不超过2500米;周围空气温度 $-25\sim 40^{\circ}\text{C}$ ;空气相对湿度90%;安装倾斜度不大于 $5^{\circ}$ ;无爆炸危险的介质以及无显著摇动和冲击振动的场合。对于在特殊环境和工作条件下使用的各类低压电器,常在基本系列产品的基础上进行派生,构成如防爆电器、船舶电器、化工电器、热带电器、高原电器以及牵引电器等等。

## 2 低压电器的基本特点

据一般统计,发电厂发出的电能,80%以上(按千瓦计算)是通过低压电器分配使用的;每新增加1万千瓦发电设备,约需要使用4万件以上各类低压电器或元件与之配套,组成开关板或控制屏等(如图30·1-1所示,即为一例)。在大型现代化成套设备中,低压电器或元件与电动机总安装容量之比,达0.5件/千瓦左右。低压电器的需要量是随电气化水平的提高而急剧增长的。

在成套电器设备或电力系统中,低压电器是用

来控制电机或者与变压器等配合使用的。一般称电机或变压器等为主机,称低压电器为配套设备。由于配套设备需用的数量多,它的投资总费用往往接近或甚至超过主机的投资费用。对配套设备如有忽视或对它的品种规格、性能参数等选用不当,即使主机完善,也会导致成套设备不能有效地投入运行或不能充分发挥效能。在技术质量的要求上,配套设备中的个别元件,若有失灵或误动作,也会导致整个线路故障或成套设备无法工作,有时甚至造成重大的设备或人身事故。

由于低压电器在运行时存在着电、磁、热、光、机械力等能量的转换,这些转换过程的规律大多是非线性的,而且“开”与“关”的动作又是一种瞬变过程,因此在技术理论上也是较为复杂的。这使得低压电器产品的设计工作,除了依靠理论分析和计算推导外,还必须依赖成熟可靠的经验数据,并由试验结果来给予验证。

低压电器在结构上种类繁多,没有最终固定的型式。但一般均有两个共同的基本部分:一是感受部分,它感受外界的讯号,作出有规律的反应。在手控电器中,它的感受部分即为人手操纵的手柄或手轮等;在自动切换电器中,则大多是电磁系统。二是执行部分,它根据感受部分的指令,对电路执行“开”与“关”的任务。触头灭弧系统属于执行部分。对于自动开关类的低压电器,还具有中间(传递)部分,它的任务是把感受和执行两部分联系起来,使它们协同一致,按一定的规律动作。

低压电器产品需要量大,使用面广,品种规格繁多,技术性能各异,因此标准化、系列化、通用化的工作甚为重要。可以分析归纳它的共性,制定若干技术标准,并按结构特点和使用要求的不同,分别设计成产品的基本系列以及相应的派生系列,而将系列产品中的零部件尽量予以通用化。这样做大大有利于组织大规模机械化自动化的专业生产,并且对于保证质量、提高劳动生产率、降低成本、节约材料等均有较大的技术经济效益。同时,也将为用户的选用、安装和维护等创造有利的条件。

表 30-1-1 低压电器产品分类及其用途

| 产 品 名 称          |         | 主 要 品 种                                               | 用 途                                        | 主 要 技 术 指 标①                                                         |
|------------------|---------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 配<br>电<br>电<br>器 | 自 动 开 关 | 框架式自动开关<br>塑料外壳式自动开关<br>限流式自动开关<br>直流快速开关<br>漏电保护自动开关 | 用作线路过载、短路或欠压保护，也可用作不频繁接通和分断电路              | 1. 额定电流交流至 4000 安，直流至 6000 安<br>2. 极限分断能力达 380 伏 80 千安               |
|                  | 熔 断 器   | 有填料熔断器<br>无填料熔断器<br>快速熔断器<br>自复熔断器                    | 用作线路和设备的短路和过载保护                            | 1. 额定电流至 1000 安<br>2. 极限分断能力达 380 伏 100 千安                           |
|                  | 刀 开 关   | 大电流刀开关<br>熔断器式刀开关<br>开关板用刀开关<br>负荷开关                  | 主要用作电路隔离，也能接通分断额定电流                        |                                                                      |
|                  | 转 换 开 关 | 组合开关<br>换向开关                                          | 主要作为两种及以上电源或负载的转换和通断电路之用                   |                                                                      |
| 控<br>制<br>电<br>器 | 接 触 器   | 交流接触器<br>直流接触器<br>真空接触器                               | 主要用作远距离频繁地起动或控制交直流电动机，以及接通分断正常工作的电路和控制电路   | 1. 机械寿命为 600 万次，小容量接触器达 1000 万次；电寿命为机械寿命的 1/5<br>2. 操作频率最高为 1200 次/时 |
|                  | 控制继电器   | 电流继电器<br>电压继电器<br>时间继电器<br>中间继电器<br>热继电器              | 主要用于控制系统中，控制其他电器或作主电路的保护之用                 | 1. 电磁式控制继电器机械寿命达 1000 万次<br>2. 操作频率为 1200 次/时                        |
|                  | 起 动 器   | 电磁起动器②<br>减压起动器                                       | 主要用作交流电动机的起动和正反向控制                         | 电磁起动器机械寿命最高为 600 万次，电寿命为机械寿命的 1/5                                    |
|                  | 控 制 器   | 凸轮控制器<br>平面控制器                                        | 主要用于电气控制设备中转换主回路或励磁回路的接法，以达到电动机起动、换向和调速的目的 |                                                                      |
|                  | 主 令 电 器 | 按 钮<br>限位开关<br>微动开关<br>万能转换开关                         | 主要用作接通分断控制电路，以发布命令或用作程序控制                  |                                                                      |
|                  | 电 阻 器   | 铁基合金电阻                                                | 用作改变电路参数或变电能热能                             |                                                                      |
|                  | 变 阻 器   | 励磁变阻器<br>起动变阻器<br>频敏变阻器                               | 主要用作发电机调压以及电动机的平滑起动和调速                     |                                                                      |
|                  | 电 磁 铁   | 起重电磁铁<br>牵引电磁铁<br>制动电磁铁                               | 用于起重、操纵或牵引机械装置                             |                                                                      |

① 各类产品的技术参数可参见有关章节及附录。

② 习称磁力起动器。



## 第2章 一般理论基础

本章叙述低压电器设计计算的一般理论基础,其主要内容有磁路计算,电磁系统的静特性和动特性的计算,电磁铁的设计,发热和电动力的计算,电接触以及电弧和灭弧方法等。

### 1 磁路计算

电磁系统是由导磁体(包括铁心和衔铁)和激磁线圈组成(见图 30·2-1),它把电讯号转化为机械动作。导磁体的铁心、衔铁以及其间的工作气隙组成主磁路。

磁路计算的主要目的是确定衔铁在不同工作气隙下磁通和激磁电流或激磁安匝之间的关系,用以计算吸力特性和设计线圈。计算磁路的基本公式如下:

磁感应强度

$$B = \mu H \quad \text{Wb/m}^2 \quad (30\cdot2-1)$$

磁通

$$\Phi = I W \quad \text{Wb} \quad (30\cdot2-2)$$

$$\sum \Phi = 0 \quad (30\cdot2-3)$$

激磁安匝

$$I W = \sum H l \quad \text{A} \quad (30\cdot2-4)$$

磁导

$$\Delta = \mu \frac{S}{l} \quad \text{H} \quad (30\cdot2-5)$$

式中  $l$ ——磁路的平均长度  $\text{m}$

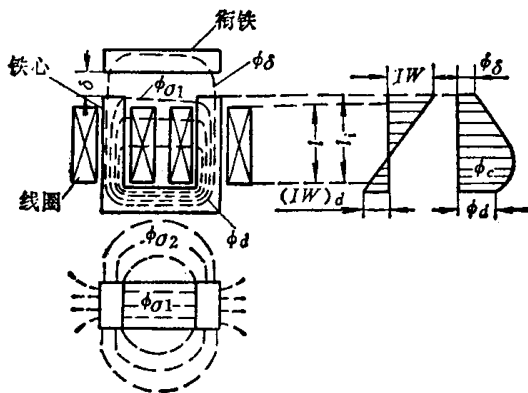


图 30·2-1 电磁系统与磁势、磁通分布图

$\Phi_{\sigma 1}$ 、 $\Phi_{\sigma 2}$ —漏磁通  $\Phi_d$ —底铁磁通  $\Phi_c$ —总磁通  
( $I W$ )<sub>d</sub>—底铁磁势  $\Phi_g$ —气隙磁通

$S$ ——与磁通垂直的截面积  $\text{m}^2$

$H$ ——磁场强度  $\text{A/m}$

$\mu$ ——磁导率  $\text{H/m}$

#### 1.1 空气中磁导的计算

由于气隙磁场分布相当复杂,准确计算磁导非常困难。为了简化计算,工程上常假定:

(1) 空气中磁导率  $\mu$  等于真空中磁导率  $\mu_0$

$$\mu = \mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

(2) 把导磁体表面看作等磁位面,磁力线都垂直于导磁体的表面。

以此作为推导磁路计算和吸力计算等公式的基本条件。由于将真实磁场作了一些简化,所以不论用哪种计算方法,其结果都是近似的。

##### 1.1.1 气隙磁导的计算

工作气隙磁导计算的准确度,对磁路计算的结果影响很大,在设计计算中常用数学分析法或分割磁场法。

a. 数学分析法 在平行平面磁极的条件下,用下列公式计算气隙磁导:

$$\Delta_0 = \mu_0 \frac{C}{\epsilon_0} \quad \text{H} \quad (30\cdot2-6)$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空介电常数  $\text{F/m}$

$C$ ——极间电容  $\text{F}$

只要求出  $C$ ,就可算出对应的气隙磁导  $\Delta_0$ ,由此近似推导出其他磁极形状的气隙磁导,列于表 30·2-1 中。

b. 分割磁场法 根据磁极间磁力线的可能路径,把整个磁场分割成若干个具有简单几何形状的磁分路,用下列公式计算各磁分路的磁导:

$$\Delta_n = \mu_0 \frac{S_n}{\delta_n} \quad \text{或} \quad \Delta_n = \mu_0 \frac{V}{\delta_n^2} \quad \text{H} \quad (30\cdot2-7)$$

式中  $V$ ——磁分路体积  $\text{m}^3$

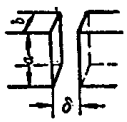
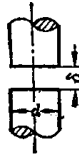
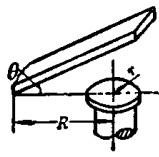
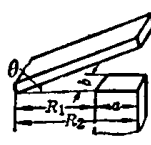
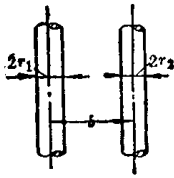
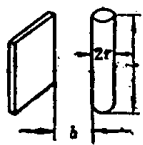
$S_n$ ——与磁通垂直的平均截面积  $\text{m}^2$

$\delta_n$ ——沿磁通方向的磁分路平均长度  $\text{m}$

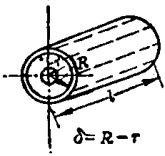
总的气隙磁导为各磁分路气隙磁导之和:

表 30.2-1 用数学分析法计算气隙磁导的公式

H

| 序 号 | 几 何 图 形                                                                             | 磁 极 形 状   | 磁 导 公 式                                                                                                                                                                                                                                                          | 备 注                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1   |    | 矩 形 磁 极   | 当 $\frac{\delta}{a} \leq 0.2$ 和 $\frac{\delta}{b} \leq 0.2$ 时<br>$\Delta_\delta = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$                                                                                                                                                       | 适用于平行平面磁极, 且磁场均匀分布的部分                |
|     |                                                                                     |           | $\Delta_\delta = \frac{\mu_0}{\delta} \left( a + \frac{0.307\delta}{\pi} \right) \left( b + \frac{0.307\delta}{\pi} \right)$                                                                                                                                     | 考虑了在 $\delta$ 较大时边缘磁通的扩散磁导           |
| 2   |    | 圆 柱 磁 极   | 当 $\delta < 0.2d$ 时<br>$\Delta_\delta = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}$                                                                                                                                                                                           | 磁场分布较均匀                              |
|     |                                                                                     |           | $\Delta_\delta = \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0.58d \right)$                                                                                                                                                                                           | $\delta$ 较大时考虑了边缘扩散磁导                |
| 3   |   | 锥 形 磁 极   | $\Delta_\delta = \frac{\mu_0 \pi d}{2\delta \cos \alpha} \left( \delta \sin \alpha - \frac{d}{2 \cos \alpha} \right)$                                                                                                                                            | 同 上                                  |
| 4   |  | 圆柱铁心和平板衔铁 | $\Delta_\delta = \mu_0 \frac{2\pi R}{\theta} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}} \right)$                                                                                                                                                                      | 适用于气隙长比磁极尺寸甚小时, 且不计极靴厚度表面上的磁导和边缘突出磁导 |
| 5   |  | 矩形铁心和平板衔铁 | $\Delta_\delta = \mu_0 \frac{b}{\theta} \ln \frac{R_2}{R_1}$                                                                                                                                                                                                     | 同 上                                  |
| 6   |  | 两平行圆柱体无限长 | $\Delta_\delta = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln(k + \sqrt{k^2 - 1})}$<br>当 $r_1 \neq r_2$ 时 $k = \frac{b^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}$<br>当 $r_1 = r_2 = r$ 时 $k = \frac{b^2 - 2r^2}{2r^2}$<br>当 $b > 8r$ 时, 则<br>$\Delta_\delta = \frac{\mu_0 \pi l}{\ln \frac{b}{r}}$ | 适用于铁心直径与铁心长之比甚小时                     |
| 7   |  | 圆柱体与平行平面  | $\Delta_\delta = \frac{2\mu_0 \pi l}{\ln \frac{b + \sqrt{b^2 - r^2}}{r}}$<br>当 $b > 4r$ 时, 可简化为:<br>$\Delta_\delta = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln \frac{2b}{r}}$                                                                                                      |                                      |

(续)

| 序号 | 几何图形                                                                              | 磁极形状                | 磁导公式                                                                                                                                                              | 备注          |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 8  |  | 同心圆筒                | $\Delta_\delta = \frac{\mu_0 2\pi l}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r \gg \delta$ 时<br>$\Delta_\delta = \mu_0 \frac{2\pi \left(r + \frac{\delta}{2}\right) l}{\delta}$      | 不计及端部边缘扩散磁导 |
| 9  |  | 具有 $\theta$ 角的两同心圆面 | $\Delta_\delta = \frac{\mu_0 \theta b}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r \gg \delta$ 时<br>$\Delta_\delta = \mu_0 \frac{\left(r + \frac{\delta}{2}\right) b \theta}{2\delta}$ | 同上          |

$$\Delta_\delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad H \quad (30.2-8)$$

利用上述方法, 将图 30.2-2a 和图 30.2-2b 的磁场所分成的若干个较规则的几何体(图中编号与表 30.2-2 中的编号相同)的磁导列于表 30.2-2 中。

当计算衔铁处在闭合位置的气隙磁导时, 气隙的大小应考虑磁极表面光洁度(一般为  $\nabla 7$ ) 和镀锌层的厚度(一般为 0.015 毫米)以及表面的接触情况等。

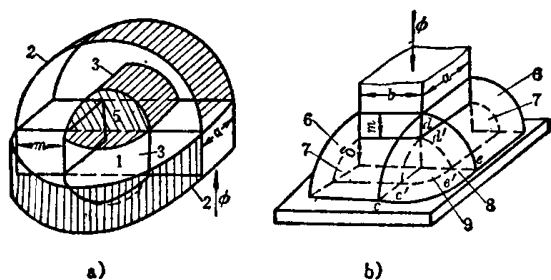


图 30.2-2 矩形极间简化磁场图

### 1.1.2 漏磁导的计算

随着磁极间磁位差的变化, 沿磁路分布的漏磁通极不均匀, 同时磁系统的结构形状又使得空间的漏磁场更为复杂。为了简化计算, 通常用实验的方法测出磁漏系数, 图 30.2-3 是几种常用磁系统并由实验测出的磁漏系数曲线。如用计算求磁漏系数, 则可使用下列公式:

磁通的磁漏系数

$$\sigma_\phi = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = \frac{\Delta_\delta + \Delta_\psi}{\Delta_\delta} \quad (30.2-9a)$$

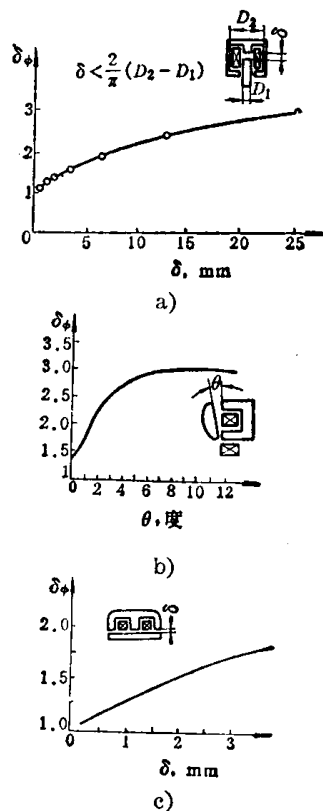


图 30.2-3 磁漏系数试验曲线

磁链的磁漏系数

$$\sigma_\psi = \frac{\psi_\delta + \psi_\sigma}{\psi_\delta} = \frac{\Delta_\delta + \Delta_\psi}{\Delta_\delta} \quad (30.2-9b)$$

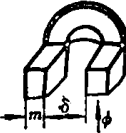
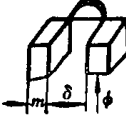
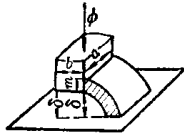
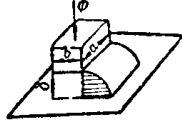
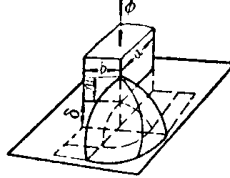
式中  $\Delta_\delta$ ——工作气隙磁导(包括边缘磁导在内)  
H

$\Delta_\phi$ ——同漏磁通  $\Phi_\sigma$  对应的漏磁导 H

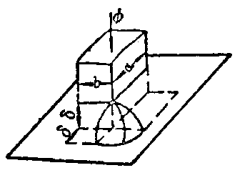
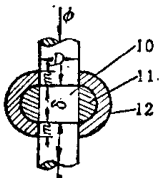
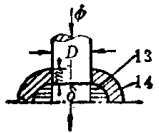
$\Delta_\psi$ ——同漏磁链  $\psi_\sigma$  对应的漏磁导 H

表 30-2-2 用分割磁场法计算磁导的公式

H

| 序号 | 几何图形                                                                                | 名称                           | 计算公式                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  |    | 长方体                          | $\Delta = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$                                                                                                                                                                                                                 |
| 2  |    | 厚为 $m$ 的 $\frac{1}{2}$ 空心圆柱体 | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = \mu_0 \frac{2ma}{\pi(\delta+m)}$<br>$\delta_{av} = \pi \frac{\delta+m}{2} \quad A_{av} = ma$                                                                                                          |
| 3  |    | $\frac{1}{2}$ 圆柱体            | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.26a\mu_0$<br>$\delta_{av} = 1.22\delta \quad A_{av} = \frac{\pi a \delta^2}{8\delta_{av}}$                                                                                                          |
| 4  |   | 厚为 $m$ 的 $\frac{1}{4}$ 空心球壳  | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.25m\mu_0$<br>$\delta_{av} = \frac{\pi}{2}(\delta+m)$<br>$A_{av} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{\delta}{2} + m \right)^2 - \frac{\pi}{4} \left( \frac{\delta}{2} \right)^2 \right]$ |
| 5  |  | $\frac{1}{4}$ 球体             | $\Delta = \mu_0 \frac{V}{\delta_{av}^2} = 0.077\delta\mu_0$<br>$\delta_{av} = 1.3\delta$<br>$V = \frac{1}{4} \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{\delta}{2} \right)^3 \right]$                                                                     |
| 6  |  | 厚为 $m$ 的 $\frac{1}{4}$ 空心圆柱体 | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = \mu_0 \frac{4ma}{\pi(\delta+m)}$<br>$\delta_{av} = \frac{\pi}{4}(\delta+m)$<br>$A_{av} = ma$                                                                                                          |
| 7  |  | $\frac{1}{4}$ 圆柱体            | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.52a\mu_0$<br>$\delta_{av} = 1.22\delta$<br>$A_{av} = \frac{\pi a \delta}{4 \times 1.22}$                                                                                                            |
| 8  |  | 厚为 $m$ 的 $\frac{1}{8}$ 空心球壳  | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.50m\mu_0$<br>$\delta_{av} = \frac{1}{4} \pi (2\delta+m)$<br>$A_{av} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi}{4} (\delta+m)^2 - \frac{\pi}{4} \delta^2 \right]$                                               |

(续)

| 序号 | 几何图形                                                                               | 名称                           | 计算公式                                                                                                                                                                                                                      |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9  |   | $\frac{1}{8}$ 球体             | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.308\delta\mu_0$ $\delta_{av} = 1.3\delta$ $A_{av} = \frac{V}{\delta_{av}} = \frac{\pi\delta^3}{6 \times 1.3\delta}$                                                        |
| 10 |   | 圆柱体                          | $\Delta = \mu_0 \frac{\pi D^2}{4\delta}$                                                                                                                                                                                  |
| 11 |                                                                                    | $\frac{1}{2}$ 圆面旋转体          | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = 0.82D\mu_0$                                                                                                                                                                  |
| 12 |                                                                                    | 厚 $m$ 的 $\frac{1}{2}$ 圆环旋转体  | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = \mu_0 \frac{2Dm}{\delta+m}$ $\delta_{av} = \pi \frac{\delta+m}{2}$ $A_{av} = \pi Dm$                                                                                         |
| 13 |  | $\frac{1}{4}$ 圆面旋转体          | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = \mu_0 \frac{V}{\delta_{av}} \times \frac{1}{\delta_{av}} = 1.64D\mu_0$ $\delta_{av} = 1.22\delta \quad a = \pi D$ $V = \frac{1}{4} \pi \left( \frac{2\delta}{2} \right)^2 a$ |
| 14 |                                                                                    | 厚为 $m$ 的 $\frac{1}{4}$ 圆环旋转体 | $\Delta = \mu_0 \frac{A_{av}}{\delta_{av}} = \mu_0 \frac{4Dm}{\delta+m}$ $A_{av} = \pi Dm$ $\delta_{av} = \frac{\pi(\delta+m)}{4}$                                                                                        |

计算漏磁导时,对直流或交流串联激磁的磁系统(恒磁通势),用漏磁导  $\Delta_\phi$  来计算磁漏系数。当磁系统中的磁感应强度在 11000~12000 高斯的不饱和情况下,用:

$$\Delta_\phi = \frac{1}{2} \lambda_i \quad \text{H} \quad (30.2-10a)$$

磁感应强度大于上述数值时,取

$$\Delta_\phi = \frac{1}{3} \lambda_i \quad \text{H} \quad (30.2-10b)$$

对具有交流电压线圈的磁系统(恒磁链)用  $\Delta_\psi$  来计算磁漏系数。此时

$$\Delta_\psi = \frac{1}{3} \lambda_i \quad \text{H} \quad (30.2-11a)$$

如考虑饱和时的影响,则

$$\Delta_\psi = \frac{2}{9} \lambda_i \quad \text{H} \quad (30.2-11b)$$

式中  $\lambda$ ——磁极间单位长度上的漏磁导 H/m,

可按表 30.2-1 相应求出

$l_i$ ——产生漏磁的铁心长度 m

## 1.2 直流磁路的计算

一般直流磁路的计算是由已知工作气隙磁通求总激磁安匝或由已知总激磁安匝求工作气隙磁通。采用等效磁通计算磁路是较简便的近似计算方法,计算步骤如下:

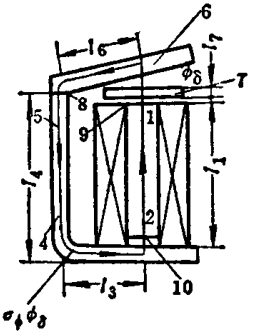
(1) 在某一气隙下给定  $\Phi_o$ , 设总磁通势产生的总磁通为  $\Phi_o$ , 利用公式(30.2-9)和(30.2-10)或图 30.2-3 求出磁漏系数, 则  $\Phi_o = \sigma_\phi \Phi_o$ ,

(2) 由  $\frac{\Phi_o}{S_i} = B_1$  和  $\frac{\sigma_\phi \Phi_o}{S_i} = B_2$  在铁心磁性材料  $B=f(H)$  曲线上, 找出相应的  $H_1$  和  $H_2$ 。并以  $\frac{H_1+H_2}{2}$  作为铁心的磁场强度。

(3) 根据给定的  $\Phi_o$  以及  $\sigma_\phi \Phi_o$  算出磁系统各部分所需的安匝和气隙中的安匝(见表 30.2-3)。

(4) 在同一气隙下, 给定若干个磁通, 重复表 30.2-3 的步骤, 得出  $\Phi_o = f(IW)$  磁化曲线, 如图 30.2-4 所示。

表 30·2-3 给定  $\Phi_0$  求  $IW$  的计算单

| 磁 系 统                                                                             | 磁路部分     | 磁 通<br>Wb            | 导磁体<br>截 面<br>m <sup>2</sup> | 磁感应<br>强 度<br>Wb/m <sup>2</sup> | 磁 场<br>强 度<br>H | 铁 心<br>长 度<br>m | $IW$<br>A                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
|  | 铁心 1     | $\Phi_0$             | $A_1$                        | $B_1$                           | $H_1$           | $l_1/2$         | $H_1 l_1/2$                      |
|                                                                                   | 铁心 2     | $\sigma_\phi \Phi_0$ | $A_1$                        | $B_2$                           | $H_2$           | $l_1/2$         | $H_2 l_1/2$                      |
|                                                                                   | 铁轭 3     | $\sigma_\phi \Phi_0$ | $A_3$                        | $B_3$                           | $H_3$           | $l_3$           | $H_3 l_3$                        |
|                                                                                   | 铁轭 4     | $\sigma_\phi \Phi_0$ | $A_4$                        | $B_4$                           | $H_4$           | $l_4/2$         | $H_4 l_4/2$                      |
|                                                                                   | 铁轭 5     | $\Phi_0$             | $A_4$                        | $B_5$                           | $H_5$           | $l_4/2$         | $H_5 l_4/2$                      |
|                                                                                   | 衔铁 6     | $\Phi_0$             | $A_6$                        | $B_6$                           | $H_6$           | $l_6$           | $H_6 l_6$                        |
|                                                                                   | 极靴 7     | $\Phi_0$             | $A_7$                        | $B_7$                           | $H_7$           | $l_7$           | $H_7 l_7$                        |
|                                                                                   | 楞角气隙 8   | $\Phi_0$             |                              |                                 |                 |                 | $\Phi_0/\Delta_8$                |
|                                                                                   | 非工作气隙 9  | $\Phi_0$             |                              |                                 |                 |                 | $\Phi_0/\Delta_9$                |
|                                                                                   | 非工作气隙 10 | $\sigma_\phi \Phi_0$ |                              |                                 |                 |                 | $\sigma_\phi \Phi_0/\Delta_{10}$ |
| $(IW) = \sum Hl + \sum \frac{\Phi}{\Delta}$                                       |          |                      |                              |                                 |                 |                 |                                  |

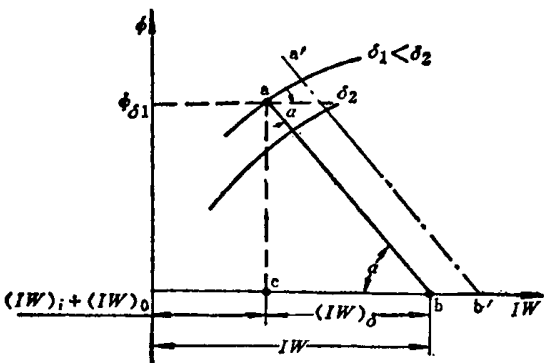


图 30·2-4 图解法求磁通或激磁安匝

(5) 设曲线上 a 点为工作气隙  $\delta_1$  时的工作磁通  $\Phi_{\delta 1}$ , 过 a 点作  $\text{tg } \alpha = \Delta_\delta$ , 使与横轴相交于 b 点, 则 ob 为所求的总激磁安匝  $IW$ , cb 为气隙安匝  $(IW)_a$ , 而 oc 为铁心和非工作气隙所需的安匝,  $\Delta_\delta$  可参考表 30·2-1 或表 30·2-2 求得。

由已知  $IW$  求  $\Phi_0$ , 则可取  $ob = IW$ , 并自 b 点作  $\text{tg } \alpha = \Delta_\delta$ , 即可求得工作气隙磁通  $\Phi_0$ 。

这一方法的特点是比较简单, 而且无论已知总激磁安匝或已知  $\Phi_0$  都可利用图 30·2-4 中曲线求解。在设计磁系统的过程中, 如需要改变  $\Phi_0$  或  $IW$  时, 则不必重新进行磁路计算, 只需将 ab 平行移动至同调整后的  $\Phi_0$  或  $IW$  相应的 a'b', 即可得相应的待求值。

在其他气隙下, 磁系统磁化曲线的计算步骤同上。

1.3 交流磁路的计算

1.3.1 交流磁路的特点

(1) 磁系统的激磁线圈  $W$  接在交流电源上, 在任一瞬间  $t$ , 交变磁通  $\phi$ 、激磁电流  $i$ 、线圈端电压  $u$ , 具有下列关系:

$$u_i = W \frac{d\phi_t}{dt} + i_i R \quad \text{V} \quad (30\cdot2-12)$$

式中  $R$ ——激磁线圈电阻

(2) 由交流磁通产生的电磁吸力也是交变的, 使交流电磁式电器产生不允许的振动和噪声, 为此对单相交流磁系统, 采取加装分磁环(短路环)的措施, 见图 30·2-5。

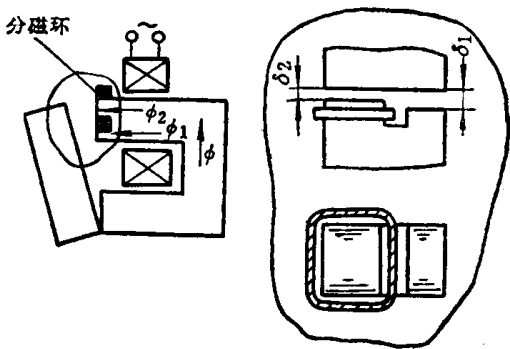


图 30·2-5 交流磁系统

(3) 由于交变磁通的作用, 在导磁体内产生磁滞涡流等铁耗, 同时也在分磁环内产生铜耗。这些

损耗起到磁阻尼和发热的不良效果,并使激磁电流增大。

(4) 沿磁路分布的磁势、磁通、漏磁通等,在磁路各处,不仅大小不等,且相位也不同,各量的相量关系见图 30·2-6。

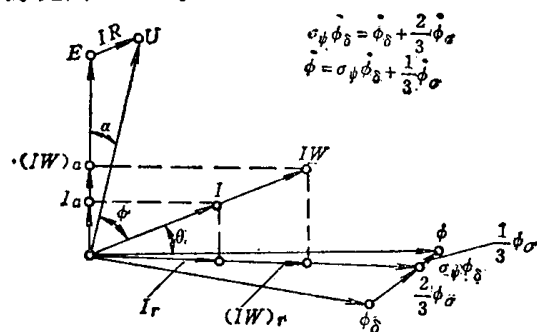


图 30·2-6 交流磁系统的相量图

(5) 激磁线圈的电抗,主要随磁路的气隙磁导而变,气隙大时磁导小,电抗也小,激磁电流则大;气隙小时则相反。为了简化计算,在街铁吸合前,不考虑铁磁阻和分磁环的作用,而在吸合位置上,则不考虑线圈的电阻压降。

### 1.3.2 计算交流磁路的公式

由于交流磁路具有上述特点,使它的计算比直

流磁路更为复杂。所以在实际计算中,为了简化起见,常假设磁路不饱和,使  $\phi_i$  和  $i_i$  同  $u_i$  一样都为正弦波,在这一条件下,可作出如图 30·2-6 的相量图,以便在各参数间建立适于计算的关系式。

计算时,除用公式(30·2-1~5)和(30·2-9、11)以外,还需使用根据交流磁路的特点和相量图所推得的公式见表 30·2-4。

### 1.3.3 计算方法和步骤

(1) 同计算直流磁路一样,用图解法来解决交流磁路的计算问题。不同的是:交流电压线圈的磁系统、磁链是由电压来确定,其总磁链  $\psi_\sigma = \sigma_\psi \psi_\delta$ 。

(2) 在某一指定气隙  $\delta$  下,不论给定的是  $\Phi_\delta$ ,  $IW$ ,  $U$  中的哪一个参数,都采取给定若干个不同的  $\Phi_\delta$ ,用表 30·2-3 的步骤和表 30·2-4 中的公式,计算出  $\Phi_\delta = f(IW)$  和  $\Phi_\delta = f(U)$ ,即图 30·2-7 中的曲线 1 和曲线 2。

(3) 如已知线圈端电压  $U_1$ ,则在曲线 2 上可求得对应的  $\Phi_{\delta 1}$  和在曲线 1 上求得  $(IW)_i$ ;利用表 30·2-4 中的有关公式,可算出气隙安匝、功率因数等其他数据;作  $\tan \alpha = A_\delta$  可求得工作气隙的  $(IW)_\delta$  和总的  $(IW)$ 。

表 30·2-4 计算交流磁路的公式

| 序号 | 参数    | 公式                                                                                         | 单位  | 说明                                                              |
|----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------|
| 1  | 线圈电压  | $U = \sqrt{E^2 + 2EIR \sin \theta + (IR)^2}$                                               | V   | 有效值(下同),见图 30·2-6                                               |
| 2  | 线圈反电势 | $E = \frac{\omega W}{\sqrt{2}} \sigma_\psi \Phi_\delta$                                    | V   | $\omega = 2\pi f$ , $f = 50\text{Hz}$ , $\Phi_\delta$ 为最大值      |
| 3  | 总激磁安匝 | $IW = \sqrt{(IW)_r^2 + (IW)_a^2}$                                                          | A   | 见图 30·2-6                                                       |
| 4  | 总磁化安匝 | $(IW)_r = (IW)_\delta + (IW)_i$                                                            | A   | $(IW)_\delta$ 和 $(IW)_i$ 为磁化空气隙和铁心所需安匝                          |
| 5  | 总去磁安匝 | $(IW)_a = \frac{\sqrt{2}(P_1 + P_2 + P_3)}{W \sigma_\psi \Phi_\delta}$                     | A   | $P_1$ 为焦耳损耗, $P_2$ 为磁滞涡流损耗,见本章 5·2·2 节<br>$P_3$ 分磁环损耗,由允许环境温度确定 |
| 6  | 总激磁电流 | $I = \sqrt{I_r^2 + I_a^2}$                                                                 | A   | 见图 30·2-6                                                       |
| 7  | 总磁化电流 | $I_r = (IW)_\delta + (IW)_i / W$                                                           | A   |                                                                 |
| 8  | 总去磁电流 | $I_a = \frac{(IW)_a}{W}$                                                                   | A   |                                                                 |
| 9  | 损耗角   | $\theta = \tan^{-1} \frac{(IW)_a}{(IW)_r} = \tan^{-1} \frac{I_a}{I_r}$                     | rad | 见图 30·2-6                                                       |
| 10 | 功率因数角 | $\varphi = \cos^{-1} \left[ \sin \left( \frac{IR \cos \theta}{U} \right) + \theta \right]$ | rad | 见图 30·2-6                                                       |

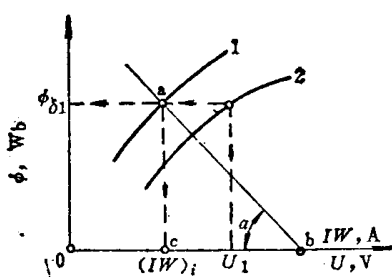


图 30-2-7 磁系统  $\Phi_0 = f(IW)$  和  $\Phi_0 = f(U)$   
曲线 1— $\Phi_0 = f(IW)$ ; 曲线 2— $\Phi_0 = f(U)$

## 2 电磁系统静特性的计算

电磁系统的静特性主要是指电路在稳定状态下, 衔铁极缓慢运动时电磁吸力同衔铁行程间的关系, 即  $F = f(\delta)$ 。

根据能量平衡可得出计算电磁吸力的一般公式, 即任一瞬间  $\Delta t$  从线路输入的能量  $E I \Delta t$ , 除去消耗在电阻上的能量  $I^2 R \Delta t$  以外, 所得的电磁能  $\Delta W_e$  应该等于电磁力在位移方向上的分力对衔铁所作之机械功  $\Delta W_M$ , 加上电磁系统增加的电磁能  $\Delta W_m$ , 即

$$\Delta W_e = E I \Delta t - I^2 R \Delta t = I \Delta \Psi = \Delta W_M + \Delta W_m$$

由于  $\Psi = f(I)$  的关系是非线性的(图 30-2-8), 吸力  $F = \frac{\Delta W_M}{\Delta \delta}$  不易求出。在工程计算中, 常设磁路不饱和以及漏磁场不随  $\delta$  而变, 使  $\Psi = f(I)$  线性化, 于是可得计算吸力的一般公式:

$$F = 5.1 \left( I \frac{d\Psi}{d\delta} - \Psi \frac{dI}{d\delta} \right) \text{ kgf} \quad (30-2-13)$$

### 2.1 直流磁系统吸力特性的计算

直流磁系统因  $I = \text{常数}$ , 由式(30-2-13)得出计算吸力的公式:

(1) 对直动式磁系统, 吸力

$$F = 5.1 (IW)_0^2 \frac{d\Delta_0}{d\delta} \text{ kgf} \quad (30-2-13a)$$

(2) 对转动式磁系统, 力矩

$$M = 5.1 (IW)_0^2 \frac{d\Delta_0}{d\theta} \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (30-2-13b)$$

式中  $(IW)_0$ ——气隙安匝 A

$\delta$ ——气隙长 cm

$\theta$ ——转角 rad

$\Delta_0$ ——工作气隙磁导(包括边缘扩散磁导) H

$\Delta_0$  用表 30-2-1 或 30-2-2 中的公式计算, 直接求

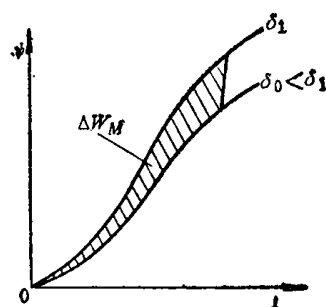


图 30-2-8  $\Psi = f(I)$  曲线

出  $\frac{d\Delta_0}{d\delta}$ ; 或用作图法, 对计算中所确定的各  $\delta$  值, 作曲线  $\Delta_0 = f(\delta)$  的切线求得,  $(IW)_0$  的计算见磁路计算。

(3) 对气隙较小、磁场较均匀の場合, 可用下式计算:

$$F = 5.1 \frac{B_0^2 S_0}{\mu_0} \text{ kgf} \quad (30-2-14)$$

式中  $B_0$ ——工作气隙磁感应强度 Wb/m<sup>2</sup>

$S_0$ ——磁极截面积 cm<sup>2</sup>

(4) 对于螺管形电磁铁(见表 30-2-6、序号 5 图), 除  $\Phi_0$  产生吸力  $F_0$  外, 还有由漏磁通  $\Phi_\sigma$  产生的吸力  $F_\sigma$ , 其合力  $F_P = F_0 + F_\sigma$  (见图 30-2-9)。

当气隙大时, 吸力主要由  $\Phi_\sigma$  决定, 此时  $\Phi_0$  产生的吸力可以忽略。  $\Phi_\sigma$  产生的吸力可用下式计算:

$$F_\sigma = 0.102 H \Phi_\sigma \text{ kgf} \quad (30-2-15)$$

或  $F_\sigma = 0.102 S_0 H (B_P - \mu_0 H) \text{ kgf}$

式中  $\Phi_\sigma = \Phi - \mu_0 H S_0 \text{ Wb}$

$$H = \frac{IW}{h_w} \text{ A/m}$$

$$B_P = \frac{\Phi}{S_0} \text{ Wb/m}^2$$

$IW$ ——总激磁安匝 A

$h_w$ ——激磁线圈高度 m

$\Phi$ —— $IW$  产生的总磁通 Wb

$B_P$ ——衔铁未吸入前磁极端面最大的磁感应强度 Wb/m<sup>2</sup>

$S_0$ ——衔铁截面积 m<sup>2</sup>

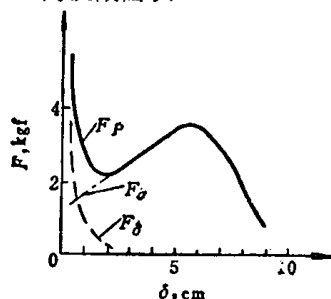


图 30-2-9 螺管形电磁铁吸力特性

在吸入过程中, 衔铁逐渐饱和,  $F_{\sigma}$  随  $\Phi_{\sigma}$  的减小而成比例减小,  $F_{\sigma}$  可近似地由下式计算:

$$F_{\sigma} = 8.7 S_{\delta} H B_P \times 10^{-2} \text{ kgf} \quad (30.2-16)$$

当气隙小时,  $\Phi_{\sigma}$  小,  $F_{\sigma}$  也小, 而  $\Phi_{\delta}$  产生的吸力  $F_{\delta}$  则显著增加, 此时则可忽略  $F_{\sigma}$ , 而只计  $\Phi_{\delta}$  产生的吸力  $F_{\delta}$ , 这可用公式(30.2-14)计算。

由于螺管力的这种变化, 在设计中可以较容易地根据技术任务的要求调整吸力特性。

## 2.2 交流磁系统吸力特性的计算

a. 对于交流(恒磁链)磁系统 因  $\Psi = \text{常数}$ , 由公式 30.2-13 得吸力:

$$F = 5.1 \left( \frac{\Psi}{\delta_{\Psi} W A_{\delta}} \right)^2 \frac{dA_{\delta}}{d\delta} \text{ kgf} \quad (30.2-17)$$

$$\text{或} \quad F = 5.1 \frac{k_i B_m^2 S_{\delta}}{\mu_0} \text{ kgf} \quad (30.2-18)$$

式中  $\Psi$ ——磁系统全磁链 Wb

$k_i$ ——铁心的填充系数, 可取  $k_i = 0.9$

b. 瞬时吸力的计算(无分磁环) 设磁感应强度为正弦波, 即  $B_i = B_m \sin \omega t$ , 由公式(30.2-18)得出瞬时吸力公式:

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{5.1}{2\mu_0} k_i B_m^2 S_{\delta} (1 - \cos 2\omega t) \\ &= F_{-} + F_{+} \text{ kgf} \end{aligned} \quad (30.2-19)$$

式中  $B_m$ ——磁感应强度最大值 Wb/m<sup>2</sup>

$F_{-}$ ——吸力的直流分量, 不随时间而变

$F_{+}$ ——吸力的交变分量, 随时间以两倍电源频率使衔铁产生振动

c. 分磁环产生的吸力 衔铁在闭合位置上分磁环作用显著, 此时吸力的计算和分析如下: 设磁系统中的主磁通  $\Phi$  由于分磁环的影响分成  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  (见图 30.2-10a)。这时, 分磁环与激磁线圈间的作用原理和变压器一样。  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  通过磁极时, 使气隙和分磁环部分的磁场发生了变化, 产生两个相位不同的磁通  $\Phi'_1$  和  $\Phi'_2$  (见图 30.2-10b),  $\Phi'_1$  和  $\Phi'_2$  分别产生的吸力  $F'_1$  和  $F'_2$  (见图 30.2-10c) 不同时过零。

设工作气隙中各磁通皆为正弦波, 由公式(30.2-19)得吸力的瞬时值为:

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{5.1}{2\mu_0} \left\{ \left( \frac{(\Phi'_1)^2}{A_1} + \frac{(\Phi'_2)^2}{A_2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left[ \frac{(\Phi'_1)^2}{A_1} \cos 2\omega t + \frac{(\Phi'_2)^2}{A_2} \cos 2(\omega t - \alpha) \right] \right\} \\ &= F'_{-} + F'_{+} \end{aligned} \quad (30.2-20)$$

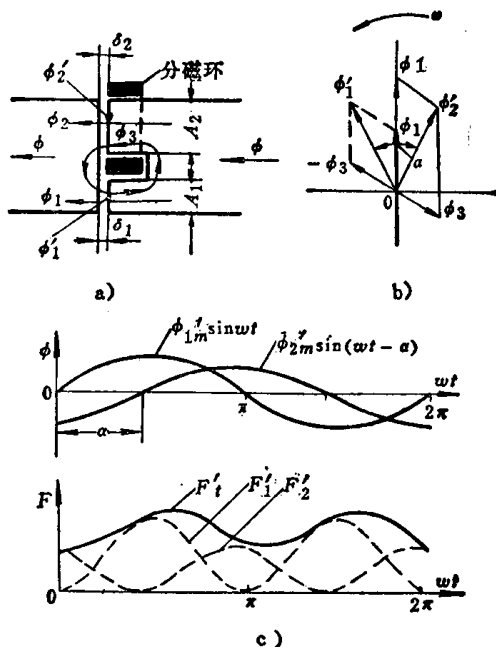


图 30.2-10 带分磁环交流电磁铁磁通分布和相量图

$\Phi$ ——主磁通, 且  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$   $\Phi'_1$ ——分磁环外磁极端部合成磁通,  $\Phi'_1 = \Phi_1 - \Phi_3$   $\Phi'_2$ ——分磁环内磁极端部合成磁通,  $\Phi'_2 = \Phi_2 + \Phi_3$   $\Phi_3$ ——由分磁环中短路电流所产生的磁通  $A_1, A_2$ ——分磁环外和分磁环内的磁极截面积

式中  $F'_{-}$ ——吸力的直流分量, 为  $\Phi'_1$  和  $\Phi'_2$  的直流分量所产生, 即上式中前两项之和

$F'_{+}$ ——吸力的交变分量, 为  $\Phi'_1$  和  $\Phi'_2$  的交变分量所产生, 即上式中后两项之和

$\alpha$ —— $\Phi'_2$  滞后于  $\Phi'_1$  的相角

带分磁环磁极部分(图 30.2-10a)的磁路, 利用公式(30.2-5)和(30.2-20), 在磁路不饱和的情况下, 可得:

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{tg}^{-1} \sqrt{\left( \frac{A_{\delta_2}}{A_{\delta_1}} \right)^2 \frac{A_1}{A_2} - 1} \\ &= \text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{A_2}{A_1} \left( \frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 - 1} \end{aligned} \quad (30.2-21)$$

又

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{\mu_0 \omega A_2}{r_2 \delta_2} \quad (30.2-22)$$

式中  $r_2$ ——分磁环电阻

$\omega$ ——电源角频率

在理想情况下, 振动完全消除, 即  $F'_{+} = 0$ , 此时对式(30.2-20)来说, 应同时满足下列两个条件:

$$\frac{(\Phi'_1)^2}{A_1} = \frac{(\Phi'_2)^2}{A_2} \quad \alpha = \frac{\pi}{2}$$

但实际上是不能完全满足, 只能使  $A_2/A_1$  和  $\delta_1/\delta_2$  的值相对地尽可能的大, 即  $A_1$  和  $\delta_2$  选小些或尽量减小  $r_2$  值, 但  $A_1$  受磁感应强度饱和的限制, 不能过

小;  $\delta_2$  由加工精度决定;  $r_2$  受分磁环发热的限制。在设计时, 常从分磁环的允许温升出发, 考虑到工艺制造上的便利, 使吸力交变分量的最小值  $F_{\min}$  尽可能大, 以便有可能使  $F_{\min} > F_s$  (使衔铁分开的反作用力), 就可消除振动。制造上, 常取  $A_1$  和  $A_2$  之比在 1~2 之间, 最后由实验决定。

### 2.3 磁系统释放特性的计算

磁系统的释放特性是指激磁线圈断电后, 衔铁从闭合位置回到原来打开位置时, 吸力和工作气隙间的函数关系, 即  $F_0 = f(\delta)$  特性。其计算方法与 2.1 和 2.2 节相同, 不过此时要用磁性材料的去磁曲线。

释放特性对电磁式电器的影响主要是剩磁吸力, 返回系数, 返回速度等。

**a. 剩磁吸力的计算** 当磁系统的衔铁工作在闭合位置上, 如将线圈电源切断, 由于磁性材料的磁滞特性, 磁系统中仍有产生吸力的剩磁通存在。计算磁路时, 要从未断电前的稳定磁通  $\Phi_w$  开始, 并借助磁性材料的去磁曲线(图 30·2-11), 用同 1·2 和 1·3 节一样的方法和步骤进行磁路计算。根据衔铁在闭合位置上的气隙磁导  $\Delta_0$ , 作  $\tan \alpha = \Delta_0$ , 在曲线上即可求出剩磁通  $\Phi_0$  及相应的剩磁通势  $(IW)_0$ 。又  $B_0 = \Phi_0 / S_0$ , 利用公式(30·2-14)计算剩磁产生的吸力。

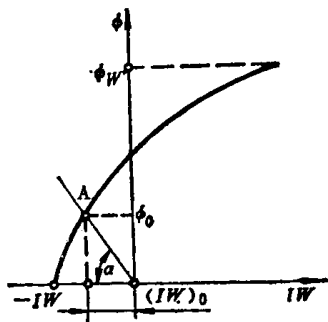


图 30·2-11 磁系统的去磁曲线

**b. 返回系数的计算** 稳态下  $\delta=0$  时的返回系数为:

$$K_b = \frac{I_s}{I_w} = \sqrt{\frac{F_0}{F_w}} \quad (30·2-23)$$

式中  $K_b$ ——返回系数

$I_s$ —— $F_0$  等于  $F_s$  时的电流 A

$I_w$ ——衔铁吸合后的稳定工作电流 A

$F_w$ —— $I_w$  时的吸力

由上式可知,  $F_w$  大时, 则返回系数就低。U 型磁系统(图 30·2-1)在闭合位置时的吸力很大, 所以用该类磁系统构成的电器返回系数是不高的。

**c. 返回速度的计算** 激磁线圈断电后,  $F_s$  在克服剩磁力和运动系统的反力后, 使衔铁返回到初始位置。返回速度  $v$  为

$$v = \sqrt{\frac{2(P_s - P_0)}{m}} \quad \text{m/s} \quad (30·2-24)$$

式中  $P_s$ —— $F_s$  释放的能量 J

$P_0$ ——克服剩磁力和运动系统反力所耗能量 J

$m$ ——运动系统的归化质量 kg

可以看出,  $P_0$  越小, 运动系统的分断速度越大, 且完全由  $P_s$  来决定。

### 3 电磁系统动特性的计算

电磁系统的动特性是指衔铁在运动过程中吸力  $F_D$ 、速度  $v$ 、时间  $t$ 、激磁电流  $i$  以及电源电压  $u$  之间的函数关系, 充分表征了产品的工作特性。通过对动特性的分析, 将使产品获得最佳的设计方案。动特性计算的基本方程式如下:

电磁方程

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad \text{V} \quad (30·2-25)$$

运动方程

$$F_D = m \frac{dv}{dt} + F_s \quad \text{N} \quad (30·2-26)$$

式中  $R$ ——激磁线圈电阻  $\Omega$

$L$ ——线圈电感 H

$m$ ——运动部分的归化质量 kg

$F_s$ ——反作用力(不包括摩擦力) N

用数学分析法解上述方程非常复杂繁冗, 近年来逐步采用电子计算机求解。

#### 3.1 动作时间和释放时间的计算

从磁系统接入电源到衔铁开始动作(闭合)的触动时间  $t_x$  以及从衔铁开始运动到触头开始接触的运动时间  $t_v$  (见图 30·2-12)合称为动作时间  $t_K$ 。从断电开始到衔铁开始动作(分开)的释放触动时间  $t_{sx}$ , 以及从衔铁开始离开静铁心运动到初始位置的释放运动时间  $t_{sv}$  合称为释放时间  $t_{s0}$ 。

**a. 直流电磁系统触动时间的计算** 设线圈接通瞬间, 衔铁处于打开位置, 磁路不饱和, 忽略漏磁

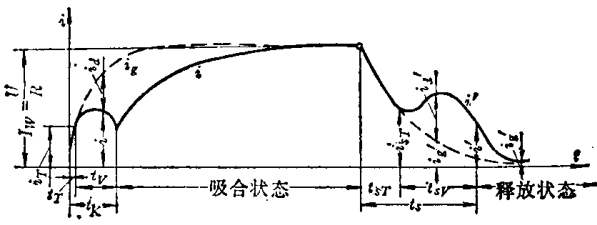


图 30·2-12 电磁铁工作循环的电流波形

$i_T$ —衔铁的触头电流  $i_{ST}$ —衔铁的释放电流  $i_g$ —衔铁固定在释放位置不动时的静态吸合电流  $i_g'$ —衔铁固定在吸合位置不动时的静态释放电流  $i_d$ —衔铁运动时产生的动态电流  $i$ —衔铁吸合时线圈内的实际电流,  $i=i_g-i_d$   $i'$ —衔铁释放时线圈内的实际电流,  $i'=i_g'+i_d$   $I_W$ —线圈稳定电流  $t_T$ —衔铁触头时间  $t_V$ —衔铁吸合运动时间  $t_K$ —电磁铁的动作时间  $t_{ST}$ —衔铁释放触头时间  $t_{SV}$ —衔铁释放运动时间  $t_S$ —电磁铁的释放时间

和铁磁阻, 此时  $\frac{dL}{dt}=0$ 。当电流  $i$  增长至  $i_T$ , 所产生的吸力等于衔铁打开位置的反作用力  $F_s$  时, 衔铁开始运动。触头电流和触头时间为

$$i_T = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{F_s \delta}{5.1 A_0}} \quad \text{A} \quad (30.2-27)$$

$$t_T = T \left( 1 + \frac{R}{r'} \right) \ln \frac{I_W}{I_W - i_T} \quad \text{s} \quad (30.2-28)$$

式中  $\delta$  和  $A_0$ ——分别为衔铁打开时的工作气隙长度和相应的气隙磁导

$T$ ——时间常数 s

$W$ ——激磁线圈匝数

$I_W$ ——线路稳定电流,  $I_W = U/R$  A

$r'$ ——导磁体中的涡流效应归算到激磁线圈  $W$  的等效电阻

$$r' = \sum_{i=1}^n \frac{8\pi W}{l_i} \rho \quad \Omega \quad (30.2-29)$$

其中  $l_i$ ——沿磁通方向各段导磁体长 m

$\rho$ ——导磁体的电阻率  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

b. 衔铁运动时间的计算 忽略运动过程中的摩擦力以及漏磁等, 并认为导磁体不饱和, 衔铁运动时间  $t_V$  为

$$t_V = \sqrt{\frac{2m\delta_K}{\Delta F}} \quad \text{s} \quad (30.2-30)$$

式中  $\Delta F = \frac{S_1}{\delta_K}$

其中  $S_1$ ——静吸力特性  $F_K = f_1(\delta)$  同反力特性  $F_S = f_2(\delta)$  间的面积 (见图 30·2-13)

$\delta_K$ ——衔铁最大行程

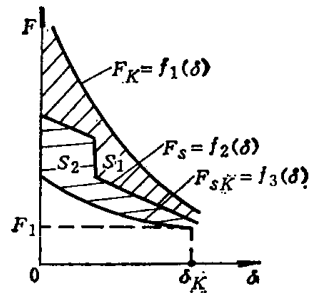


图 30·2-13 电磁系统的静特性

c. 衔铁释放时间的计算 直流电磁系统释放触头时间  $t_{ST}$ , 对用一般开关以简单断开电磁铁的线圈电路来说是很小的, 释放时间  $t_S$  近似等于释放运动时间  $t_{SV}$ 。用释放时吸力特性  $F_{SK} = f_3(\delta)$  与反力特性  $F_S = f_2(\delta)$  之间的面积  $S_2$  (见图 30·2-13) 代以公式 (30·2-30) 中的  $S_1$ , 即可求得释放运动时间  $t_{SV}$ 。

d. 交流电磁系统动作时间和释放时间的计算 设磁路是线性的, 以激磁电压  $u = U_m \sin(\omega t + \alpha)$  代入公式 (30·2-25), 解得线圈电流  $i$ :

$$i = \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T}}] \quad (30.2-31)$$

式中  $Z$ ——线圈阻抗  $\Omega$

$\alpha$ ——合闸相角

$\varphi$ ——线圈功率因数角

$T$ ——线路时间常数

根据上式, 当  $i = i_T$  时, 则可求得  $t = t_T$ 。交流电磁系统触头时间  $t_T$  很小, 合闸相角  $\alpha$  对  $t_T$  有影响。

交流电磁系统的吸合运动时间的近似计算, 仍可用公式 (30·2-30), 此时应该用交流电磁系统吸合时的静吸力特性来确定面积  $S_1$ 。

交流电磁系统的释放触头时间, 如不考虑电弧时间, 由于其铁心为硅钢片迭成, 涡流比直流磁系统为小, 所以释放触头时间要比直流的更短。

交流电磁系统的释放运动时间也用公式 (30·2-30) 估算, 但需用交流电磁系统释放时的静吸力特性来确定面积  $S_2$ 。

### 3.2 吸合速度的计算

衔铁在吸合运动过程中不断加速, 运动系统的动能不断增加, 行程接近终了时, 电器常分触头闭合 (图 30·2-14 中 a 点) 产生振动, 当衔铁行程终了,

吸力特性更陡,加速度更大,动能也更大,于是衔铁与铁心碰撞(图中b点),使已闭合的触头第二次产生振动,这对触头的熔焊、电器的机械寿命和电寿命都要产生严重影响。图30·2-14中 $t_1$ 为触头第一次振动时间, $t_2$ 为衔铁碰撞时产生的第二次振动时间。因此,铁心的吸合速度对触头工作的可靠性以及电器的寿命都起着极重要的作用。

由公式(30·2-26)可得出:

速度

$$v = \int_{t_r}^{t_k} \frac{F_D - F_S}{m} dt \quad \text{m/s} \quad (30·2-32)$$

动能

$$E = \frac{mv^2}{2} = \int_{\delta_m}^{\delta_0} (F_D - F_S) d\delta \quad \text{J} \quad (30·2-33)$$

式中 $\delta_m$ 和 $\delta_0$ 为衔铁打开和闭合时的工作气隙。

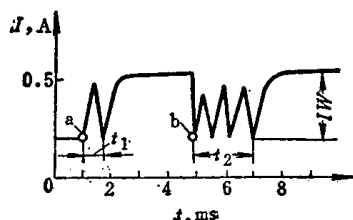


图 30·2-14 电磁铁吸合过程  $i=f(t)$

## 4 电磁铁的设计

电磁铁的设计就是根据电磁铁的工作任务和特性要求,来选择合适的结构,并确定结构尺寸和线圈参数。

### 4.1 选型

选型的目的是根据设计任务书订出的技术条件来选定合适的结构。

交直流电磁铁的比较见表30·2-5。交流电磁铁  $U \approx E$ , 即  $\Psi = \text{常数}$ , 吸力  $F \sim$  正比于  $U^2$  而反比于  $\sigma_\psi^2$ , 即:  $F \sim \left(\frac{U}{\sigma_\psi}\right)^2$ 。工作气隙  $\delta$  的变化,对  $\sigma_\psi$  有一定影响,但变化范围不大,因此  $F \sim f(\delta)$  曲线比较平坦。

直流电磁铁  $IW = \text{常数}$ , 吸力  $F \sim$  正比于  $(IW)^2$ , 反比于  $\sigma_\psi^2$  和  $\delta^2$ , 即:  $F \sim \left(\frac{IW}{\sigma_\psi \delta}\right)^2$ 。除受  $\sigma_\psi$  的影响外,同时还受  $\delta$  的影响。因此  $F \sim f(\delta)$  曲线陡峭(见图30·2-15)。

电磁铁结构形状不同,工作特性也不相同。即使同一结构形状,在几何尺寸或电磁参数发生改变

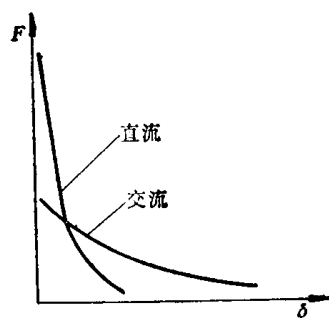


图 30·2-15 交直流  $F=f(\delta)$  特性比较

表 30·2-5 交直流电磁铁的比较表

| 项 目  | 直 流                 | 交 流                    | 说 明                        |
|------|---------------------|------------------------|----------------------------|
| 铁 心  | 圆柱体                 | 迭片                     | 交流有铁耗,防剩磁的气隙直流的比交流的长       |
| 振动噪音 | 无                   | 有                      | 交流有脉动电磁吸力 $F_{\sim}$ , 直流无 |
| 机械强度 | 强                   | 弱                      | 交流迭压成型,机械强度弱               |
| 起动电流 | $0 \rightarrow I_0$ | $nI_0 \rightarrow I_0$ | 交流电抗与气隙近似反比                |
| 吸合时间 | 慢                   | 快                      | 直流时间常数大,磁通建立缓慢             |
| 吸力特性 | 陡                   | 平坦                     | 见图30·2-15                  |
| 操作频率 | 高                   | 低                      | 交流铁心机械强度弱,起动电流大,线圈温度高      |
| 线圈形状 | 细长                  | 扁平                     | 采用扁平线圈,改善交流电磁铁特性配合         |

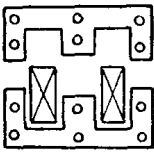
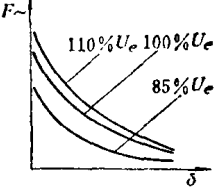
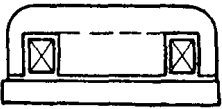
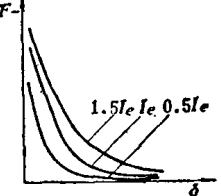
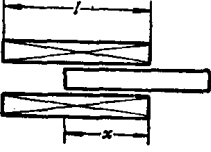
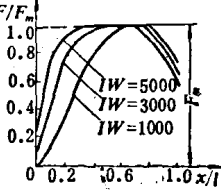
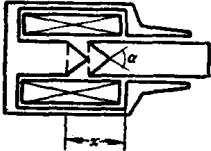
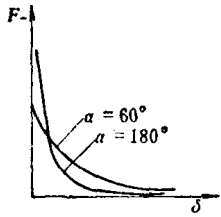
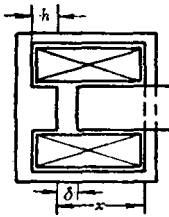
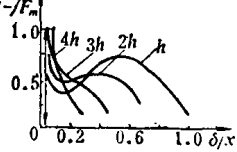
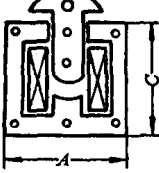
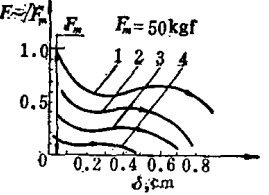
时,电器的工作特性也随之变化。表30·2-6中序号1~3表示电流、电压、磁路饱和等电磁参数对静吸力特性的影响,序号4~6表示磁系统几何尺寸对静吸力特性的影响。

### 4.2 相似设计方法

a. 相似原则 相似法的内容包括几何尺寸相似和物理参数相似(如产品的电、磁、热和吸力等)两个方面。

(1) 几何相似: 两个电磁铁几何形状相似,即所有线性尺寸的对应边都成比例。如  $\frac{\delta_1}{\delta_0} = a; \frac{S_1}{S_0} = a^2$  ( $a$  称为相似比,脚号“0”表示样机数据,脚号“1”表示待设计产品的数据)。

表 30.2-6 典型电磁系统特性的分析比较

| 序号 | 结 构 形 式                                                                             | 工 作 特 性                                                                             | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  |    |    | 电压对静吸力特性的影响, 当 $U \approx E$ 时<br>$F \propto \left( \frac{U}{\sigma_{\psi}} \right)^2$ <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在相同电压下, 吸力仅受 <math>\sigma_{\psi}</math> 的影响</li> <li>2. 在不同的电压下, 还受 <math>U</math> 的影响, <math>U</math> 越小, 吸力特性越平坦</li> </ol>                                                             |
| 2  |    |    | 电流对静吸力特性的影响, 当 $IW = \text{常数}$ 时<br>$F \propto \left( \frac{IW}{\sigma_{\psi} \delta} \right)^2$ <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在相同电流下, 吸力受 <math>\sigma_{\psi}</math> 和 <math>\delta</math> 两个因数的影响, 故比交流吸力特性要陡些</li> <li>2. 在不同电流下, 还受 <math>IW</math> 的影响, 故随 <math>IW</math> 的增加, 特性陡度增大</li> </ol>        |
| 3  |   |   | 磁路饱和对静吸力特性的影响<br><ol style="list-style-type: none"> <li>1. 因为空心直流螺管的吸力, 由 <math>\Phi_{\phi}</math> 决定, 当 <math>IW</math> 增加时, 衔铁不到 <math>x=0.5l</math> 处, 提前饱和</li> <li>2. 在同一 <math>x</math> 下, 吸力随 <math>IW</math> 的增加而增加, 同时最大吸力范围增大</li> </ol>                                                                         |
| 4  |  |  | 衔铁极面形状对吸力的影响<br><ol style="list-style-type: none"> <li>1. 对于 <math>\alpha=60^\circ</math> 的极面, 漏磁小, 同时在整个行程 <math>x</math> 中, 吸力变化也小, 故特性平坦</li> <li>2. 对于 <math>\alpha=180^\circ</math> (即平板), 边缘扩散磁通影响大。在 <math>x</math> 大时, 漏磁变化比 <math>\alpha=60^\circ</math> 的小, 而在气隙 <math>\delta</math> 小时, 漏磁剧变, 特性陡然上升</li> </ol> |
| 5  |  |  | 底铁高 $h$ 对吸力的影响<br>$h$ 增加, 漏磁作用减弱, 小气隙时陡度增大                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 6  |  |  | 结构尺寸对静吸力特性的影响<br>尺寸增大, 吸力增大, 衔铁行程也增长。由于漏磁的影响, 吸力特性出现波浪<br>图中尺寸 $A=C$<br>曲线 1、2、3、4 相应于尺寸 $A \times B (\text{mm}^2)$ 为 $210 \times 65, 145 \times 59, 145 \times 35.5, 95 \times 28.5$ 的吸力特性 ( $B$ 为厚度)                                                                                                                     |