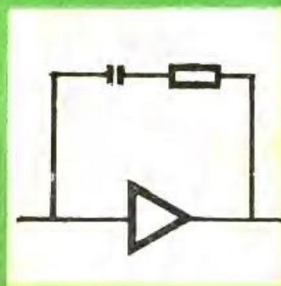
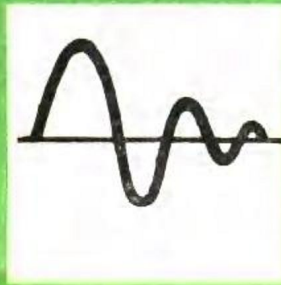
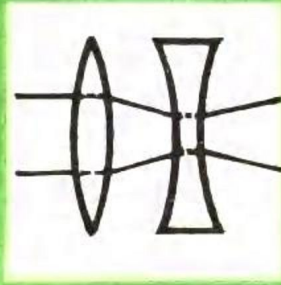
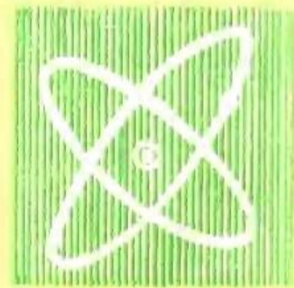


高等学校试用教材



# 低压电器 及其测试技术

西安交通大学方鸿发 主编



机械工业出版社

**低压电器及其测试技术**

西安交通大学方鸿发 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $19 \frac{1}{2}$  · 字数 470 千字

1982 年 7 月北京第一版 · 1982 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—8,500 · 定价 2.00 元

\*

统一书号: 15033 · 5125

## 前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等院校一机部对口专业座谈会精神,及同年 6 月在山东泰安召开的全国电器专业教材会议制订的《低压电器及其试验技术》编写大纲编写的。

全书共分为三篇。第一篇是低压配电电器与控制电器,第二篇是基本元件的设计计算,第三篇是低压电器试验技术。

本书为高等学校电器专业试用教材,也可供其他电类专业以及有关工程技术人员参考。

本书由西安交通大学方鸿发副教授主编,华中工学院罗陶副教授主审。书稿中第二、四、七、十一、十三章由方鸿发副教授编写,第一、八、九、十、十二章由陈德桂副教授编写,第三、五、六章由袁崇军同志编写。

本书编写的体系结构上作了改进,先从低压供电线路与用电设备对电器提出的要求讲起,再讨论电器本身的有关问题。将电器设计计算的共性问题集中起来,并适当增加了电磁铁最佳设计等新内容。试验技术一篇中除讨论一般型式试验的原理及方法外,增添了一些研究性的试验内容。

在编审过程中得到了各有关电器工厂、科研单位及兄弟院校的大力支持,提供资料和提出许多宝贵意见,另承华中工学院罗陶副教授对本书初稿和定稿进行数次审阅,付出了巨大的精力,谨致以衷心的感谢。

由于编写时间短促,水平有限,书中一定还有不少错误和不妥之处,希读者予以批评指正。

1981年7月

## 主要符号表

$A$ —电磁铁作功, 机械功, 组成物含量, 电流表	$G$ —磁系统的总磁导, 重量, 重力
$a$ —相似比, 弧柱到邻近栅片边缘的距离	$G_0$ —非工作气隙磁导
$B$ —磁感应强度, 磁通密度, 变压器	$G_s$ —工作气隙磁导
$b$ —宽度, 盆边高度	$G_c$ —导磁体磁导
$C$ —触头间隙两端分布电容, 相电容, 接触器, 电磁铁价格	$H$ —磁场强度, 铁心部分磁场强度
$c$ —比热, 系数, 螺管电磁铁线圈外半径, 吸盘电磁铁磁轭厚度, 弹簧刚度, 调节恢复电压用电容, 线圈半径	$h$ —螺管电磁铁颈部的高度, 行程, 位移, 触头厚度, 线圈高度
CJ—交流接触器	$I$ —电流, 脉冲放电等效电流
$D$ —电动机, 二极管	$I_0$ —直流分断电流值, 交流分断电流的有效值, 电流中直流分量的起始值, 临界电流, 最小熔化电流
$d_h$ —电弧直径	$I_e$ —额定电流
$d_p$ —盆式电磁铁挡铁盆边外径	$I_q$ —起动电流
$d_n$ —盆式电磁铁挡铁盆边内径	$I_x$ —吸合电流
$d_c$ —铁心内径	$I_m$ —电流幅值
$d$ —导体直径	$I_c$ —触头电流
DJ—电极	$I_w$ —线圈的稳定电流
DW—自动开关	$\bar{I}$ —三相电流平均值
$E$ —弹性模数, 线圈反电势, 干电池	$I_M$ —生弧极限电流
$E_h$ —电弧电压梯度	$I_{t-t}$ — $t$ 秒热稳定电流
$E_p$ —拉力极限强度	$I_{r_0}$ —熔焊电流
$F$ —电磁吸力, 放大器, 力, 电动斥力	$I_{d_n}$ —短路电流(有效值)
$f$ —单位铁心长度的磁动势, 挠度, 摩擦系数, 频率	$I_{d_{sm}}$ —短路的冲击电流(幅值)
$f_0$ —线路固有振荡频率	$i_{\sim}$ —短路电流的周期分量
$F_c$ —触头压力	$i_{-}$ —短路电流的非周期分量
$F_{cc}$ —触头初压力	$i_h$ —直流电弧电流, 交流电弧电流(瞬时值)
$F_{zc}$ —触头终压力	$I_h$ —直流电弧电流, 交流电弧电流(有效值)
$F_{f_{cc}}$ —主触头弹簧力产生的初反力	$j$ —电流密度
$F_{f_{zc}}$ —主触头弹簧力产生的终反力	$J$ —截面惯性矩, 继电器
FL—低感分流器	JX—继电器线圈
FC—反转交流接触器	$K$ —杠杆比, 被试电器, 系数, 开关, 热电偶常数, 比值, 比弯曲
$F_{ch}$ —电动斥力	$K_r$ —综合散热系数, 线圈表面综合散热系数
$F_f$ —释放弹簧力, 反作用力(反力)	$K_z$ —栅片的介质恢复强度的增长速度
$F_0$ —吸力特性上设计点上的力, 单位长度电弧上的作用力	$K_{\beta}$ —线圈内表面与外表面散热率之比
$F_c$ —操作力	$K_{c_{i_0}}$ —短路电流冲击系数
$F_I$ —惯性力	$K_f$ —返回系数, 纵缝灭弧介质恢复强度增长速度
	$K_{t_0}$ —线圈填充系数

- $K_{jf}$ —介质恢复强度增长速度  
 $k$ —比例常数, 变压器变比, 系数  
 $k_c$ —铁心叠片真空系数  
 $L$ —电感  
 $L_j$ —回路寄生电感  
 $L_{dz}$ —等值电感  
 $L_x$ —线圈电感  
 LH—电流互感器  
 $l$ —线圈长度, 导体长度, 距离, 磁路长度, 双金属片长度  
 $l_h$ —电弧长度  
 $l_p$ —栅片长度  
 $l_c$ —铁心长度  
 $M$ —电磁铁总重量, 弯矩, 互感, 吸引力矩  
 $M_c$ —操作力矩  
 $M_h$ —合闸力矩  
 $M_0$ —系数, 开始运动时互感的起始值  
 $M_j$ —反作用力矩  
 $M_e$ —电动机额定转矩  
 $m$ —质量, 运动系统归化质量, 系数, 磁极侧面出来的磁力线所占的高度  
 $m_c$ —触头重量  
 $m_0$ —归化质量  
 $N$ —匝数, 触头的分断次数  
 $n$ —系数, 比例常数, 设计变量个数, 磁路计算中铁心分段数, 电弧燃烧半波数, 短弧段数, 双金属片叠片数  
 $n_{du}$ —断口数  
 $P$ —线圈功率, 功率, 转换开关, 刀开关, 热流量  
 $p$ —导体横截面的周长, 瞬时功率, 极对数, 气体压力, 系数, 比值, 过载倍数  
 $P_c$ —铁心的磁滞和涡流损耗, 单位重量的铁心损耗  
 $P_0$ —电弧单位长度上散出的功率  
 $p_0$ —临界过载倍数  
 $P_e$ —额定功率  
 $Q$ —触头磨损重量  
 QA—起动按钮  
 $\bar{Q}$ —三相无功功率之和  
 $Q_{ro}$ —溶化热  
 $Q_{zf}$ —蒸发热  
 $q$ —反作用力系数  
 $q_0$ —分断电路时, 电路流过的电量  
 $R$ —电阻, 线圈电阻, 磁阻  
 $R_0$ —螺管电磁铁非工作气隙磁阻,  $0^\circ\text{C}$ 时线圈电阻  
 $R_i$ —电源内电阻  
 $R_j$ —触头接触电阻, 回路电阻  
 $R_{dz}$ —等值电阻  
 $\bar{R}$ —三相电阻平均值  
 $R_m$ —最高介质温度时热态下的线圈电阻  
 $R_b$ —气隙磁阻  
 $r_c$ —铁心半径  
 $r_d$ —分磁环电阻  
 $r_p$ —极靴半径  
 $R_{h_0}$ —电弧单位长度的电阻  
 $R_{f_0}$ —非工作气隙的磁阻  
 $S$ —散热面积, 线圈截面积, 导体截面积, 示波器振子  
 $S_x$ —线路的短路容量  
 $S_0$ —触头压约面积  
 $S_h$ —电弧截面  
 $S_c$ —铁心截面积  
 $S_{ob}$ —变压器的额定容量  
 $S_b$ —工作气隙的计算截面  
 $S_{ch}$ —铁心窗口面积  
 $T$ —时间常数  
 $t$ —时间  
 $t_c$ —触动时间  
 $t_d$ —运动时间, 动作时间  
 $t_{xh}$ —熄弧时间  
 $t_F$ —可返回时间  
 $t_{li}$ —临界时间  
 $U, u$ —电源电压  
 $U_\phi$ —相电压  
 $U_h, u_h$ —电弧电压  
 $\bar{U}$ —三相线电压平均值  
 $u_{hf}$ —恢复电压  
 $u_{jf}$ —介质恢复电压  
 $u_{rh}$ —燃弧电压  
 $u_{xh}$ —熄弧电压  
 $U_{g_0}$ —电流过零瞬间工频恢复电压  
 $U_{kc}$ —接触电阻电压降  
 $U_{ro}$ —材料熔化电压

- $U_{ya}$ —阳极电压降  
 $U_{yi}$ —阴极电压降  
 $U_{zo}$ —弧柱电压降  
 $U_M$ —生弧极限电压  
 $U_\delta$ —气隙磁压降  
 $U_{li}$ —电动机临界电压  
 $U_{jfo}$ —相应电流过零瞬间的起始介质恢复强度  
 $V$ —体积, 电磁铁体积  
 $V_o$ —触头被磨损体积  
 $v$ —比值, 螺管电磁铁挡铁高度  
 $v_h$ —电弧运动速度, 电弧平均运动速度  
 $W$ —功率, 磁场能量, 稳压管  
 $\overline{W}$ —三相有功功率平均值  
 $W_h$ —电弧能量  
 $W_y$ —拟定功  
 $x$ —位移  
 $X$ —继电器输入量, 限幅器,  $n$  个分量的列向量相当于  $n$  维空间中的一个点, 分磁环的磁抗  
 $X_x$ —系统的电抗  
 $\overline{X}$ —三相电抗平均值  
 $X_c$ —继电器的动作值  
 $X_f$ —继电器的返回值  
 $Y$ —继电器输出量  
 $y$ —目标函数  
 $Z$ —阻抗值, 短路点  
 $\overline{Z}$ —三相阻抗平均值  
 $\alpha$ —线膨胀系数, 复形法反射系数, 角度  
 $\alpha_c$ —比热温度系数  
 $\alpha_w$ —电阻温度系数  
 $\beta$ —触头开距, 角度, 窗口高度与宽度之比 ( $\beta = h / \Delta$ )  
 $\beta_c$ —系数  
 $\gamma$ —比重, 振幅系数, 空气密度  
 $\gamma_c$ —在放电状态下单位电量所消耗的金属系数  
 $\gamma_{i,j}$ —伪随机数  
 $\delta$ —工作气隙, 厚度  
 $\delta_0$ —初始气隙  
 $\delta_2$ —最终气隙  
 $\delta_p$ —栅片之间距离  
 $\delta_{lg}$ —非工作气隙  
 $\delta_{ca}$ —超行程  
 $\delta_f$ —磁分路与极靴间气隙, 缝宽  
 $\Delta$ —线圈厚度, 吸盘电磁铁窗口高度, 垫片厚度, 极板之间的距离, 弧室壁厚, 栅片厚度  
 $\Delta_b$ —盆边厚度  
 $\Delta P_b$ —变压器短路损耗  
 $\varepsilon$ —铁心截面厚度与宽度之比, 应变, 给定的很小正数  
 $\eta$ —螺管电磁铁挡铁高度, 螺管电磁铁动铁心伸入线圈的深度, 机械利益  
 $\theta$ —温度  
 $\theta_0$ —周围介质温度  
 $\theta_j$ —接触点的加热温度  
 $\theta_{ro}$ —熔点温度  
 $\theta$ —电弧热时间常数  
 $\lambda$ —导热系数, 螺管电磁铁铁心伸入线圈的深度, 螺管电磁铁挡铁高度, 异步电动机最大转矩与额定转矩的比值  
 $\mu$ —磁导率, 双金属片的温曲率  
 $\mu_0$ —真空中的磁导率  
 $\xi$ —E型铁心边柱截面与中柱截面之比  
 $\rho$ —电阻系数, 曲率半径  
 $\rho_0$ — $0^\circ\text{C}$ 时的导体电阻系数  
 $\rho_\tau$ —温升为  $\tau$  时导体的电阻系数  
 $\sigma$ —触头磨损, 漏磁系数, 应力  
 $\sigma_y$ —触头材料的压约系数  
 $\tau$ —温升  
 $\tau_w$ —稳定温升  
 $\Phi$ —磁通  
 $\Phi_b$ —工作气隙磁通  
 $\Phi_c$ —通过铁心颈部的磁通, 无分磁环时衔铁吸合位置的铁心磁通  
 $\Phi_s$ —剩磁磁通  
 $\Phi_w$ —稳定磁通  
 $\Phi_f$ —释放磁通  
 $\Phi_c$ —铁心磁通  
 $\varphi$ —功率因数角, 电流与电压相位角, 湿度  
 $\psi$ —电流合闸相位角, 短路产生瞬间的合闸相位角, 相角差, 磁链  
 $\omega$ —电源角频率

# 目 录

## 主要符号表

绪论 ..... 1

## 第一篇 低压配电电器与控制电器

### 第一章 低压配电线路与用电设备中的

几个问题 ..... 5

§ 1-1 概述 ..... 5

§ 1-2 短路电流的分析与计算 ..... 7

§ 1-3 系统对开关电器的要求 ..... 14

§ 1-4 配电线路与用电设备的保护 ..... 17

§ 1-5 保护特性的配合 ..... 23

### 第二章 控制电器 ..... 26

§ 2-1 概述 ..... 26

§ 2-2 控制继电器 ..... 26

§ 2-3 接触器 ..... 38

§ 2-4 起动机 ..... 46

### 第三章 配电电器 ..... 48

§ 3-1 概述 ..... 48

§ 3-2 熔断器 ..... 48

§ 3-3 自动开关 ..... 58

## 第二篇 基本元件的设计与计算

### 第四章 触头与灭弧系统的设计计算 ..... 73

§ 4-1 概述 ..... 73

§ 4-2 触头工作的一些问题 ..... 78

§ 4-3 灭弧过程中参数之间的关系 ..... 92

§ 4-4 灭弧室的计算 ..... 97

§ 4-5 交流灭弧系统中的介质恢复强度 ..... 101

§ 4-6 直流灭弧系统的计算 ..... 103

§ 4-7 交流灭弧系统的计算 ..... 106

### 第五章 双金属元件的计算基础 ..... 114

§ 5-1 概述 ..... 114

§ 5-2 双金属材料 ..... 115

§ 5-3 双金属元件的计算基础 ..... 118

§ 5-4 双金属机构的安秒特性及时

间常数 ..... 128

§ 5-5 双金属机构的温度补偿 ..... 131

### 第六章 开关机构的分析与计算 ..... 133

§ 6-1 对开关机构的要求 ..... 133

§ 6-2 典型开关机构的分析 ..... 133

§ 6-3 合闸力矩与反作用力矩的分  
析计算 ..... 137

§ 6-4 脱扣力的计算 ..... 141

§ 6-5 触头的开断速度及开断弹簧  
的计算 ..... 143

### 第七章 电动斥力机构 ..... 149

§ 7-1 概述 ..... 149

§ 7-2 斥力机构的供电线路 ..... 150

§ 7-3 斥力机构的计算 ..... 151

### 第八章 电磁铁的设计与计算 ..... 161

§ 8-1 概述 ..... 161

§ 8-2 电磁铁结构型式的选择 ..... 163

§ 8-3 直流电磁铁的设计 ..... 171

§ 8-4 交流电磁铁的设计 ..... 183

§ 8-5 用相似法设计电磁铁 ..... 196

### 第九章 电子计算机在电磁铁最佳设计 中的应用 ..... 202

§ 9-1 概述 ..... 202

§ 9-2 非线性规划 ..... 205

§ 9-3 电磁铁最佳设计的目标函数  
与约束条件 ..... 213

§ 9-4 直流螺管电磁铁的最佳设计 ..... 220

§ 9-5 复形法在电磁铁最佳设计中  
的应用 ..... 223

### 第十章 典型电器的设计步骤举例 ..... 235

§ 10-1 接触器的设计步骤 ..... 235

§ 10-2 接触器设计举例 ..... 241

## 第三篇 低压电器试验技术

### 第十一章 接通与分断能力试验 ..... 246

§ 11-1 概述 ..... 246

§ 11-2 试验线路及其参数的确定 ..... 250

## IV

§ 11-3 试验设备及其要求 .....	263	第十三章 电弧熄灭过程的试验方法 ...	291
§ 11-4 试验要求与试验结果分析 .....	267	§ 13-1 概述 .....	291
§ 11-5 等效试验方法的概念 .....	269	§ 13-2 低压电网固有频率与振幅系 数的测量 .....	291
第十二章 其他试验 .....	272	§ 13-3 电弧能量的测量 .....	292
§ 12-1 电器动作值的测定 .....	272	§ 13-4 电弧运动速度与直径的测量 .....	293
§ 12-2 绝缘试验 .....	276	§ 13-5 开断间隙中介质恢复强度的 测量 .....	294
§ 12-3 发热试验 .....	280	§ 13-6 用分光法试验研究电弧熄灭 过程 .....	296
§ 12-4 动稳定、热稳定和保安电流 试验 .....	285	§ 13-7 剩余电流的测量 .....	298
§ 12-5 寿命试验 .....	286		



# 绪 论

## 一、低压电器在国民经济建设中的作用与地位

随着科学技术的不断发展，社会生产、生活等各方面对能源的消耗越来越大。在各种能源中又以电能的使用最为广泛，这是由于电能的使用极为方便。电能宜于大量的生产，宜于集中管理和自动控制，而且电能的传输损耗小，可以远距离地输送，所以世界各国都以电能的产量表征国民经济的生产水平。

电能的生产与传输均采用高电压，而对电力的使用，却大多数是低压供电。无论是在工业、农业、交通运输业、国防、文教、商业及人民生活设施等一切用电部门都不例外。据统计，发电厂生产的电能约有80%以上是通过低压电力而使用。电能的应用大多数是将电能转变为机械能和热能等，例如用电动机将电能转换为机械能去带动机械负荷，用电炉去加热工件等。而对于电网、电机及其他设备进行转换、控制、保护和调节却要依靠各种电器来完成。根据统计，每生产10000千瓦容量的发电机设备需要生产40000件以上的各类低压电器元件与之配套，低压电器与电动机产量的比例一般为4:1。随着国民经济的不断发展，农业机械化、工业自动化程度不断地提高，低压电器的使用范围将日益扩大，品种与产量也将日益增加。

## 二、低压电器发展概况

电能的发明与使用已有一百多年的历史，十九世纪中叶开始应用电能的初期，依靠手动的刀开关和熔断器就能满足当时控制与保护的要求。以后开始使用直流电动机做为机械的动力传动，为了调速的需要又出现了控制器和磁场变阻器。由于电话的发明与使用，出现了电话继电器等元件，电器开始由手控逐步进入自动电器。

本世纪以来，发明了三相交流输电线路，电力使用的范围不断扩大，电网的容量也相应增加，对供电电网的运行与保护，也不断提高要求，为此发展了自动开关。随着由单台电动机的电力拖动逐渐发展为多台电动机的运行，由手动操作进入到自动的远距离的和频繁的操作，于是发展了接触器、起动器和各种继电器等自动电器。电器基础理论逐步地研究与建立，低压电器在结构原理、材料、容量、性能与品种方面又有了发展。

五十年代以后，由于生产和科学技术的进步，电网容量日益增大，对电源质量与可靠性供电的要求又有了提高，同时对一系列的低压电器也提出了新的要求。例如对1500安框架式自动开关，50年代要求的开断能力仅为20千安，而到了70年代提高到40千安。又如对有填料的熔断器极限分断能力，50年代仅为50~70千安，70年代则要求提高到100~200千安。对于控制电器方面的接触器，机械寿命由50年代的数十万次，提高到70年代的上千万次等等。

为了满足系统容量扩大的要求，和解决小容量自动开关开断能力不够的问题，发展了自复熔断器和限流线等新原理的电器元件。随着大功率半导体硅整流元件的发展，出现了快速限流熔断器。

由于六十年代大功率半导体器件的发展，无触点电器也得到了迅速的发展。因为无触点

电器有一系列的优点，因而在六十年代末国内外发生了一场是否能用无触点电器来取代有触点电器的学术争论。但经事实证明，无触点是不能完全代替有触点电器的，它们不应是相互排斥，相互取代，而应是相互结合与相辅相成。例如用晶闸管与普通的接触器组成的无电弧接触器，利用晶闸管无电弧通断线路的优点，而同时利用有触点接触器解决线路压降大和晶闸管的温升问题。试验结果证明，在重负荷任务下，电气寿命可达几百万次。目前，有触点与无触点电器都在不断地发展中。

目前，低压电器的发展特点是：

#### （一）提高低压电器的技术参数

##### 1. 提高额定电压

60年代供采矿业用的交流电压等级由380伏提高至660伏后，由于现代矿井的深度与长度的增加及供电容量的增大，供电电源的额定电压进一步提高到1140伏。随着硅整流与晶闸管整流装置容量与使用范围的不断提高与扩大，对电器元件的额定电压与绝缘电压的要求有所增加。我国已将低压电器的最高交流电压的范围由1000伏提高为1200伏。按我国现行标准，交直流电压为1200伏及以下者属低压电器。从国际上看，低压电器的额定电压有可能进一步地提高。

##### 2. 提高额定电流

由于用电设备功率日益增大，配电电器的额定电流也相应增大。目前我国现有低压配电电器的最大额定电流为30千安，国外已出现100千安的额定电流，我国也正在发展大电流的等级。

##### 3. 提高通断能力

用电设备的功率增大后，除采用大容量的单台配电变压器供电外，也采用多台配电变压器的并联供电。回路额定电流增大后，相应回路的短路电流也增大，它对电器的开断能力也提出了更高的要求。目前国外的交流420伏低压线路中，短路电流的有效值可达200千安。因此，对一些低压电器的开断能力提出了新的要求。

##### 4. 改善技术性能

改善低压电器的技术性能、提高工作的可靠性是发展方向之一。例如保护半导体整流元件用的快速熔断器，要求它的动作时间短，极限分断能力高，限流作用强，开断时的过电压低，保护特性稳定和准确。如果上述的技术性能越好，那么它对于线路的保护就越可靠。电器工作性能改善后，对于电器的参数选用以及选用电器之间的特性配合将更为合理。

##### 5. 提高寿命

为了提高产品的质量，提高产品的寿命有重要意义。对于操作特别频繁的电器，如接触器、控制继电器、主令电器等，要求它们的机械寿命可高达1000~3000万次，相应它们的电寿命也要求高达数百万至上千万次。

#### （二）提高低压电器的经济性能

提高产品质量与缩小产品的体积，降低产品的重量与成本是提高低压电器技术经济的发展方向。由于新结构、新工艺及新材料的运用，电器的结构与安装尺寸逐渐缩小，因而成套电器设备的尺寸与重量也趋于减小。

在产品的结构设计与安装方式的设计中，趋向发展为装配方便且迅速、便于大量生产、成本低的产品，同时应尽量降低产品的安装、运行与维修等方面的费用。

产品的标准化、系列化和通用化是技术经济的一项重要政策，它对于生产、使用、维修、配套都有重要的意义。产品的发展应遵循上述“三化”的规定。同时，国内的“三化”标准应与国际标准相适应，以利加强国内外的技术交流与经济贸易。

### （三）发展与使用新材料和新工艺

电器元件性能的优劣在很大程度上决定于使用的材料及其加工工艺。例如开关电器的通断能力与使用的触头材料和工艺密切相关，由于使用了新的优质触头材料，才能保证开关通断能力的提高。又如在接触器方面，由于新的缓冲吸振材料的使用，大容量交流接触器开始出现了直动式结构。材料与工艺的研究，对产品的性能与质量是相当重要的，因此必需加强这方面的工作。

### （四）加强基础理论与应用技术研究

电器性能的改进及新型电器的出现都是与科学研究分不开的。目前电器基础理论的研究比较广泛，但重点有以下几个方面：

1. 电磁机构的研究 如电磁铁磁场分布；衔铁在运动过程中磁场的变化以及电磁铁吸引力的精确计算；电磁铁动特性的精确计算；利用电子计算机对电磁机构进行精确计算和最优化设计等。

2. 电接触理论的研究 如研究电接触的物理化学过程；接触时的热、电、磁及半导体等各种效应；接触电阻的物理本质及其计算；触头对电弧的作用；触头表面弧根移动时金属斑点对电子放射的影响等。

3. 电弧理论的研究 如研究触头分离时引弧与熄弧的理论；气体放电的各个过程；极旁和弧柱理论；剩余电流热积累；电击穿和热击穿的过程；电弧的动、静特性；电弧的能量与过电压；电弧特性的工程计算；电弧的数学模型等。

4. 电器的发热和电动力理论 如研究在大电流和强交变磁场下，载流导体间产生的集肤效应、邻近效应和巨大的电动力；电器中快速电动斥力机构的计算等。

在应用技术方面有：电子计算机在电器设计中的应用；低压电器中不同限流原理技术的应用；无电弧转换技术的应用；真空断开技术的应用；强电流转换技术的应用以及低压电器试验技术的应用等。

## 三、低压电器的主要类别

低压电器的用途广泛，种类很多，从应用场所提出的不同要求可以分成配电电器与控制电器两大类。配电电器主要用于配电系统中，系统对配电电器的要求是在正常工作及在故障工作情况下，工作可靠，有足够的热稳定与动稳定性。这类电器有：刀开关、自动开关、熔断器及电力网用保护继电器。控制电器主要用于电力拖动控制系统和用电设备中，对控制电器的要求是工作准确可靠、操作频率高、寿命长等。这类电器有：接触器、控制继电器、主令电器、起动机、电磁铁等。

低压电器按工作条件主要分为

1. 一般用途的低压电器——即在一定的海拔高度下、正常工作环境温度与湿度下、安装在一定倾斜度内、使用场合无显著摇动和冲击、无爆炸危险、无腐蚀金属、无破坏绝缘的气体与尘埃和无雨雪侵袭的地方。

2. 牵引低压电器——用于电气机车中并有震动、倾斜、冲击等的工作条件下。

3. 矿用低压电器——用于矿井井下，主要要求是防爆。

4. 航空低压电器——用于飞机中，主要要求是电器在任何位置均能可靠地工作，耐震动和耐冲击，体积小和重量轻。

5. 船用低压电器——用于船舶中，主要要求是可在较大的倾斜条件下工作，耐震动和耐冲击，耐潮和防盐雾等。

本课程主要讨论一般用途的低压电器。一般用途的低压电器按产品可分为以下十三大类：

1. 刀开关和转换开关；
2. 熔断器；
3. 自动开关；
4. 接触器；
5. 控制器；
6. 控制继电器；
7. 主令电器；
8. 起动器；
9. 电阻器；
10. 变阻器；
11. 调节器；
12. 电磁铁；
13. 其他——包括触电保护器、信号灯与接线盒等。

#### 四、本课程的任务

本课程是电器学的后续专业课程。第一篇是论述低压供电系统与用电设备对电器提出的基本要求，为了满足这些要求，配电电器与控制电器的主要技术要求有哪些？并介绍它们的典型结构、工作原理及其特性，通过典型结构的分析，了解它们的结构特点。第二篇重点讲授具有一般共性的基本元件的设计与计算，分别论述触头与灭弧系统的设计与计算、双金属元件的分析与计算、开关机构的分析与计算、斥力机构的分析与计算、电磁铁的设计与计算以及用计算机进行电磁铁最佳方案设计计算的方法，同时用接触器的设计举例，将一些基本设计计算内容贯穿起来。掌握了一般的基本设计计算方法后，就比较容易解决个别的电器元件的设计计算问题。第三篇是讨论低压电器的基本试验与某些研究性试验的方法和技术。要从事低压电器专业工作，就必须掌握基本试验的方法和技术。低压电器的设计离不了试验的研究，产品的研制与鉴定也必需通过试验以及实际运行的考核，所以掌握低压电器的试验技术也是很重要的方面。

低压电器制造工业是国民经济建设中重要的一环。必须迅速培养专业科技人材，加快科学研究，为发展我国新的低压电器而努力。

# 第一篇 低压配电电器与控制电器

## 第一章 低压配电线路与用电设备中的几个问题

### § 1-1 概 述

在低压线路中应用着各种类型的低压电器，它们对配电线路或用电设备起保护、控制或调节作用。图 1-1 所示为一工矿企业的典型配电线路，线路上装置着各种低压电器，这个线路分为三个区间：供电变压器

至中央配电盘母线称主线路；

中央配电盘母线至车间动力配

电盘称分支线路；动力配电盘

至负载（一般为电动机）称电

动机馈电线路。在这三个区间

各装置了一些低压电器。通常，

前面两个区间装置的低压

电器大多属于配电电器，如图

中的自动开关 ZK<sub>1</sub> 和 ZK<sub>2</sub>，刀

开关 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 等。后面一个区间的低压电器，如接触器 C、热继电器 RJ 都是用于控制和操作负载，属于控制电器，但这个区间也装有配电电器，如熔断器 RD。自动开关 ZK<sub>1</sub> 和 ZK<sub>2</sub> 是一种多职能的保护电器，当线路呈现过载、短路或欠电压等故障情况时，能自动分断故障线路，它也可以用于不频繁地接通和分断电力线路。

刀开关 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 用于维修线路时隔离电源用，它有明显的断口以保证维修工作的安全进行。接触器 C 是一种应用最广泛的控制电器，它是一种远距离操作的电器，用于在正常工作条件下频繁地接通或分断主线路。接触器也能分断被控制对象处于非正常工作条件下的主线路，但不能分断短路电流，所以当图 1-1 中电动机 D<sub>1</sub> 的出线端处发生短路时，要依靠熔断器 RD 进行保护，这时短路电流通过熔断器的熔体，它本身产生的热量使熔体熔化而分断短路电流。热继电器 RJ 用作电动机 D<sub>1</sub> 的过载保护。

图 1-2 是由接触器 C 和热继电器 RJ 组成的控制线路，用于控制和保护鼠笼型电动机。图中 QA 和 TA 为起动和停止按钮，是一种用来下达操作指

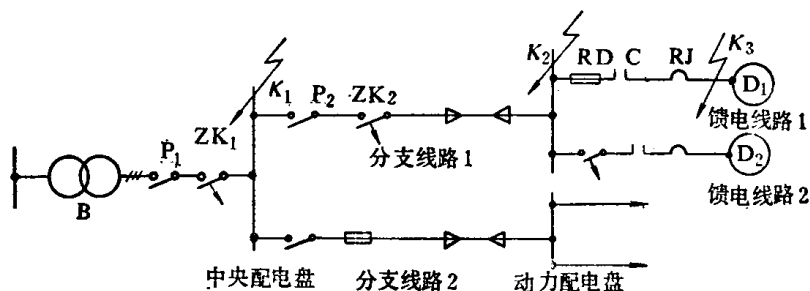


图 1-1 工矿企业典型配电线路

B—供电变压器 ZK<sub>1</sub>, ZK<sub>2</sub>—自动开关 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>—刀开关 RD—熔断器 C—接触器 RJ—热继电器 D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>—负载电动机

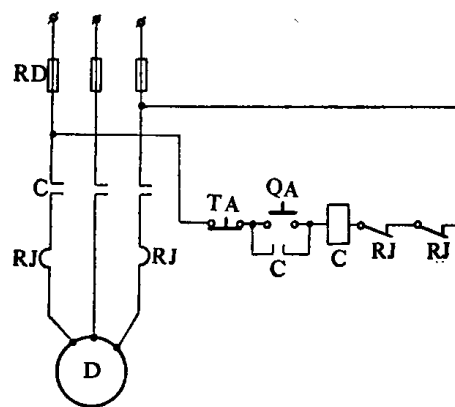


图 1-2 控制和保护鼠笼电动机的线路

QA, TA—起动和停止按钮 C—接触器 RJ—热继电器 RD—熔断器 D—电动机

路，用于控制和保护鼠笼型电动机。图中 QA 和 TA 为起动和停止按钮，是一种用来下达操作指

令的主令电器。按下起动按钮 QA，接触器线圈通电，它的操作电磁铁带动触头系统，主触头接通了主回路，使电动机开始起动。并联在按钮 QA 两端的常开联锁触头闭合，使松开起动按钮后，接触器线圈回路自保持。当运行中的电动机发生过载时，过载电流通过串联在主回路中的热继电器的热元件，热元件发热到足够温度使双金属片发生弯曲，推动串联在接触器线圈回路的常闭触头，接触器电磁铁释放而切断电动机电源。这时即使热继电器触头自动复位，因并联在按钮 QA 两端的接触器联锁触头已断开，主回路不能接通。另外，在电动机正常运转时，按下按钮 TA，可使电动机停转。

从图 1-1 和图 1-2 线路中各种电器的作用来看，低压电器主要用作配电线路和用电设备的保护和控制。在线路中，不同的电器所承担的任务是不同的。对能够开断短路电流的电器，例如自动开关，接通和分断短路电流是它的主要任务，对用于控制电动机的控制电器，例如接触器，它的工作与电动机工作状态有关。由图 1-2 线路可见，当接触器主触头闭合，电动机开始起动，接触器接通的是电动机的起动电流，它一般是电动机额定电流的 6~7 倍，而当电动机带额定负载正常运转后，断开主触头，则接触器分断的是电动机的额定电流。由于通断线路的任务不同，通断条件也不相同，因此对不同的低压电器的技术要求也各不相同。

一些低压电器的技术要求与使用线路的工作要求有关，例如与配电线路的短路电流有关。所谓短路是指相与相之间通过较小阻抗的一种非正常短接或通过电弧的短接，或相与地之间的相联。在三相配电线路中，短路的基本型式有三相短路、两相短路和单相短路（图 1-3 a、b、c）。其中单相短路发生在中性点直接接地的电力系统或低压三相四线制的电力系统中。在 400 伏以下的低压供电系统，由于电源中性点的接地电阻  $R_{jd}$  的存在（见图 1-3c），限制了单相接地短路电流，使单相短路电流值不超过三相短路电流。两相短路电流值通常小于三相短路电流值。所以讨论低压电器技术要求时，是以三相短路的故障考虑的。

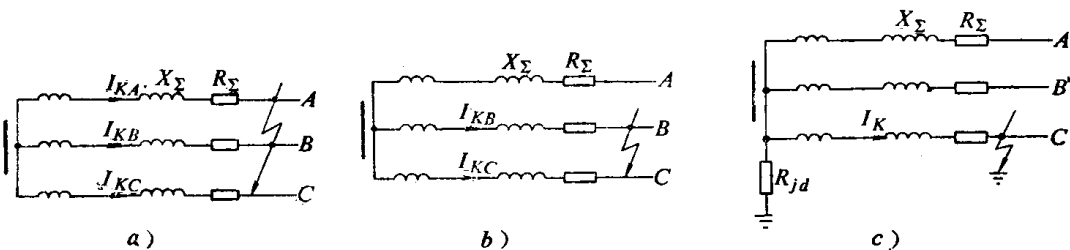


图1-3 短路的几种型式

a) 三相短路 b) 两相短路 c) 单相短路

$R_{\Sigma}$ —电阻  $X_{\Sigma}$ —电抗  $R_{jd}$ —接地电阻

发生短路时，由于线路总阻抗减小，短路电流超过该线路的额定电流许多倍，大容量的低压配电系统，短路电流可能达到几万到几十万安培。短路电流产生的巨大热效应和电动效应会使导体变形、绝缘破坏，短路回路中的电气元件损坏。同时短路也引起线路电压降低，尤其是靠近短路点的地区影响更大，造成用电负荷甚至广大供电区域停电，甚至影响整个电力系统的稳定运行。为了保证电气装置安全可靠地运行，减轻短路的影响，应尽快地按需要切除线路的故障部分。不少低压电器就是为了能正确反映短路故障，可靠地分断短路电流而设计制造的（如自动开关、熔断器），至于装置在线路上、不担负分断短路电流任务的电器，也要求在短路故障的短暂时间内，能经受住短路电流的冲击，不受破坏。

本章是通过阐明低压配电线路与用电设备中的几个问题，来介绍低压电器的几个主要技术要求。这些问题是

1. 短路电流的分析与计算；
2. 系统对开关电器的要求；
3. 低压电器的各种保护职能和保护特性。

## § 1-2 短路电流的分析与计算

### 一、低压线路的短路电流

实际运行的配电系统，容量和阻抗都有一定的数值。因此，当发生短路时，系统的端电压相应地改变。只有在无限大容量的配电系统，系统阻抗为零，才能认为系统电压不随电流变化。对于1千伏以下的低压线路，如果系统的阻抗不超过短路回路总阻抗的5~10%，便可以不考虑系统的阻抗，并认为降压变压器高压侧电压，即系统的端电压不变。

设短路产生前的负载电流为零，短路时整个线路阻抗为 $Z = R_z + jX_z$ ，电源容量为无限大，则单相短路的过程，相当于电感性电路接通电源的过程，见图1-4 a)。由电工原理中对电感性电路暂态过程分析可知，若电源电压为 $u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi)$ ，则短路电流 $i$ 由周期分量 $i_{\sim}$ 和非周期分量 $i_{-}$ 两部分组成，见图1-4 b)，可用下式表示：

$$i = i_{\sim} + i_{-} = \sqrt{2} I_{\sim} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}} \right\} \quad (1-1)$$

式中  $I_{\sim}$ ——短路电流周期分量有效值， $I_{\sim} = \frac{U}{|Z|}$ ；

$\psi$ ——短路产生瞬间的电压相位角；

$\varphi$ ——功率因数角， $\tan \varphi = X_z / R_z$ ；

$\omega$ ——电源电压的角频率；

$T$ ——时间常数， $T = X_z / \omega R_z$ 。

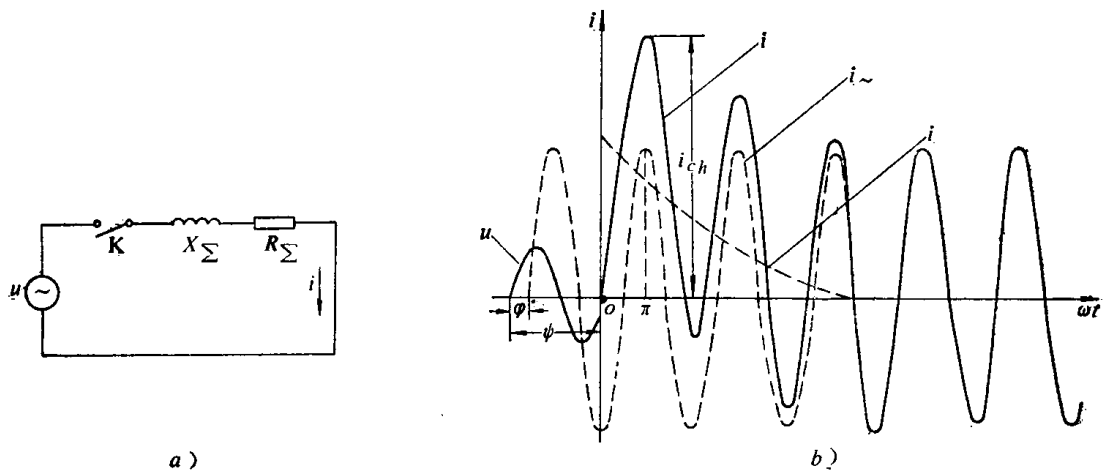


图1-4 单相短路的等值电路与电流波形图

a) 等值电路 b)  $\psi - \varphi = -\frac{\pi}{2}$ 时的电流波形

由上式可知，短路电流的非周期分量  $i_-$  与电压相位角有关，当  $\psi - \varphi = -\frac{\pi}{2}$  时， $i_-$  具有最大值，并等于

$$i_- = \sqrt{2} I_{\sim} e^{-\frac{t}{T}}$$

这时周期分量为

$$i_{\sim} = \sqrt{2} I_{\sim} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

在这一条件下，由图 1-4 b) 可知，当短路发生后经半个周期 ( $t = 0.01$  秒)，短路电流的瞬时值将达到最大幅值  $i_{ch}$ ， $i_{ch}$  称为冲击电流，它产生最大的机械效应。此时，因短路电流的周期分量和非周期分量的方向相同，所以

$$\begin{aligned} i_{ch} &= \left(1 + e^{-\frac{0.01}{T}}\right) \sqrt{2} I_{\sim} \\ &= K_{ch} \sqrt{2} I_{\sim} \quad (1-2) \end{aligned}$$

式中  $K_{ch} = \left(1 + e^{-\frac{0.01}{T}}\right)$ ，称为短路电流冲击系数。

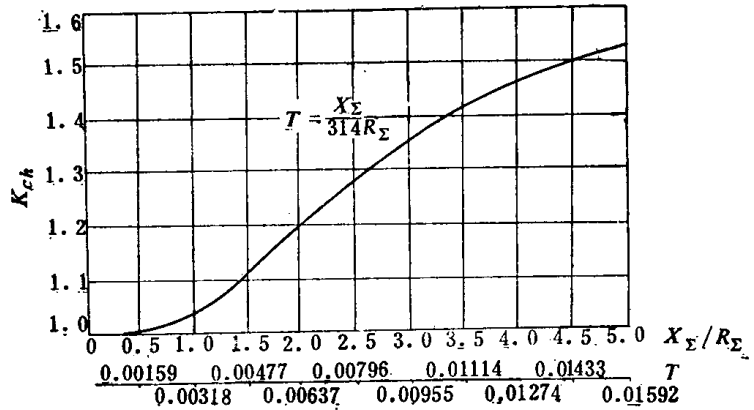


图1-5  $K_{ch}$ 与 $X_{\Sigma}/R_{\Sigma}$ 或 $T$ 的关系曲线

$K_{ch}$  值的大小由时间常数  $T$  确定，若线路中仅具有电抗  $X_{\Sigma}$  ( $R_{\Sigma} = 0$ )，则  $T = \infty$ ， $K_{ch} = 2$ ，即短路电流非周期分量不衰减。若线路中仅有电阻  $R_{\Sigma}$  ( $X_{\Sigma} = 0$ )，则  $T = 0$ ， $K_{ch} = 1$ ，即非周期分量不会产生。但在实际线路中， $R_{\Sigma}$  和  $X_{\Sigma}$  同时存在， $2 > K_{ch} > 1$ 。不同  $X_{\Sigma}/R_{\Sigma}$  或  $T$  值的短路电流冲击系数可由图 1-5 中曲线查取。

在三相线路中，由于发生三相短路的瞬时，各相的电压瞬时值不同，所以各相的短路电

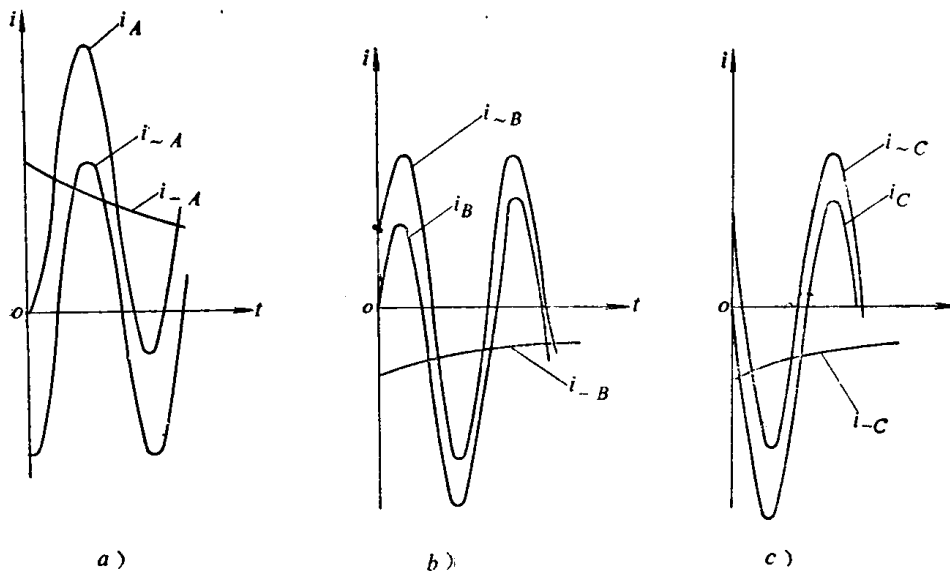


图1-6 由无限大容量系统供电的线路内，发生三相短路时，各相的短路电流  
a) A相电流 b) B相电流 c) C相电流



流周期分量和非周期分量的初始值不同，短路电流也不相同。如某一相具有最大的非周期分量起始值，则冲击短路电流值将出现在这一相内，而其它两相短路电流达到的最大值将低于这个冲击短路电流值，所以三相线路中，仅在一相中可能出现最大冲击短路电流值。图 1-6 为由无限大容量系统供电的线路内，发生三相短路时，各相的短路电流波形。其中由于 A 相具有最大非周期分量起始值，所以出现最大冲击短路电流值，其它两相具有不同的非周期分量起始值，短路电流幅值较低。但由于周期分量仅决定于电源电压和系统总阻抗，所以各相的周期分量相等。

## 二、电力系统中各元件的阻抗

计算短路电流时，必须知道电力系统中各元件的阻抗值。在高压线路的短路电流计算中，一般只考虑各主要元件的电抗，如同步电机、电力变压器、电抗器、架空线路及电缆的电抗，各主要元件的电阻仅在电阻大于总电抗值的三分之一时才计入。在低压线路的计算中，不仅要考虑各主要元件的电阻和电抗，并且要考虑不太长的母线和电缆的阻抗，电流互感器的阻抗，自动开关的过电流线圈的阻抗和开关触头的接触电阻等。通常，为了简化计算程序，使短路电流计算值偏于安全，容许不考虑占回路总阻抗值不超过 10% 的元件。因此一般情况下，只需计及馈电电缆、长度超过 10 米的母线及 300/5 安以下的电流互感器的阻抗值。

### (一) 配电系统电抗的计算

一般计算低压线路短路电流时，可以认为高压侧供电电源有无限大的容量，因而可将高压系统的阻抗略去不计，但在较精确的计算中应计入系统阻抗。由于电业部门往往不对用户提供系统阻抗的数据或系统容量，而仅给用户提供的馈电线路高压受端的系统短路容量，此时系统的阻抗可按式确定：

$$X_x = \frac{U_e^2}{S_x} \times 10^3 \quad (1-3)$$

式中  $X_x$ ——系统的电抗（毫欧）；

$U_e$ ——线路的额定线电压有效值（千伏）；

$S_x$ ——线路的短路容量（兆伏安）。

### (二) 配电变压器阻抗值的计算

计算变压器的阻抗值时，必须首先知道制造厂提供的变压器有关的技术参数，并按下式换算到变压器副边的阻抗值。

变压器的有效电阻

$$R_b = \frac{\Delta P_d U_e^2}{S_{eb}^2} \times 10^3 \quad (1-4)$$

变压器的电抗

$$X_b = \frac{10 U_e^2 \times \sqrt{U_d\% - \left(\frac{\Delta P_d}{10 S_{eb}}\right)^2}}{S_{eb}} \times 10^3 \quad (1-5)$$

上两式中  $R_b$ 、 $X_b$ ——变压器的电阻和电抗（毫欧）；

$\Delta P_d$ ——由制造厂提供的变压器短路损耗（瓦）；

$U_d\%$ ——由制造厂提供的变压器短路电压百分比；