

过电流保护 原理及应用

GUODIANLIU BAOHU

YUANLI JI YINGYONG

徐懋生 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

过电流保护原理及应用

徐懋生 等编著



机械工业出版社

目 录

前言		第三节 信号的选择	121
第一章 过电流保护简介	1	第四节 放大及触发门	122
第一节 概述	1	第五节 恒流源及延时环节	122
第二节 过电流保护和过电流保护装置	1	第六节 触发电路	123
第三节 分断过程的物理现象	5	第七节 储能电路及脱扣电路	124
第四节 过电流的消除时间	6	第八节 安秒特性	125
第五节 保护装置简介	12	第九节 调节原理	125
第二章 瞬态过电流	19	第十节 电路仿真分析	127
第一节 概述	19	第七章 电接触和电弧	132
第二节 直流和单相交流感性电路的瞬态 电流	19	第一节 概述	132
第三节 三相交流电路的瞬态现象	25	第二节 触头和触头动力学	132
第四节 电气设备起动瞬态过电流	33	第三节 电弧	139
第三章 低压电网短路电流的计算	42	第八章 固态功率控制器	161
第一节 概述	42	第一节 概述	161
第二节 低压电网中各元件阻抗的计算	42	第二节 SSPC 的定义、分类及功能	161
第三节 短路电流的计算	57	第三节 国内外研究现状	162
第四节 短路电流计算实例	64	第四节 SSPC 与传统机械装置的比较	163
第四章 热式过载电流检测	67	第五节 SSPC 基本构成	163
第一节 过载电流检测和分断电路的一般 概念	67	第六节 功率器件	167
第二节 焦耳热	68	第七节 固态功率控制器设计	173
第三节 熔断器	69	第八节 测试数据及分析	198
第四节 热断路器	77	第九章 标准及法规	202
第五章 磁方法过电流检测	104	第一节 概述	202
第一节 磁力	104	第二节 管理机构	202
第二节 磁路	107	第三节 过电流保护装置标准	204
第三节 磁断路器检测阈值电流	109	第十章 过电流保护装置的应用	206
第四节 磁断路器响应时间	111	第一节 概述	206
第五节 涡流	113	第二节 选择性分断方式与串联分断 方式	208
第六节 磁断路器的延时响应特性	115	第三节 过电流保护应用	210
第六章 电子型断路器	117	第十一章 过电流保护装置的选择	219
第一节 概述	117	第一节 概述	219
第二节 传感元件——电流互感器	118	第二节 低压保护装置选择的一般要求	219
		第三节 保护装置的选择方法	220

第四节 应用实例	224	第四节 过电流保护装置使用中的降额	
第十二章 使用与维护	237	问题	258
第一节 概述	237	第五节 过电流保护装置的维护与	
第二节 过电流保护装置在不同场所、不同		保养	266
条件下的使用	238	参考文献	272
第三节 安装与接线	247		

第一章 过电流保护简介

第一节 概 述

不管军用（飞机、船舶、战车等）还是民用，电能从产生到使用基本都需经过如图 1-1 所示的几个过程。

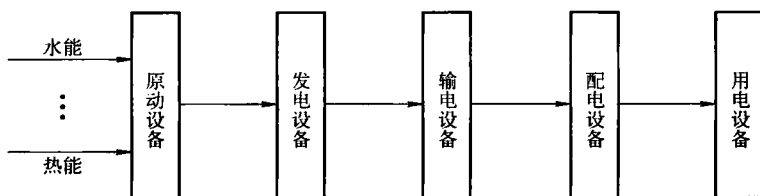


图 1-1 电能传递过程

一般来说，原动设备是将机械能（水能、风能等）、太阳能、核能、热能、化学能、生物能等集中起来，输送给发电设备转换成电能，再经输配电，将电能输送到用电设备。

电能的传输和信号传输都是电能控制电路的流程。电子或电荷的有规则的定向运动形成电流，当电子电流在电源驱动时，电子获得能量；当电子电流流经负载时，电子电流失去能量，转换成所需的功。

电流在一个封闭的回路中流动，将电能从一点传输到另一点。电流路径尺寸应与电流大小相适应，并应能经受电路的电压。超出系统设计值的电流将导致电路设备损伤，甚至损坏。在电路中，我们将超过额定部分的载流量称作过载。过载是不正常的（正常冲击电流除外），常因某些故障引起（如电机堵转）或因回路中的不正常路径引起（如对地短路）。

过载对电路的损害程度取决于两个基本因素：一是与电路额定电流相比过载量的大小；二是过载电流持续时间。为了避免过载电流的有害冲击，应使用能限定过载电流大小和持续时间的保护装置。这种装置称作过电流保护装置。我们将对低压电路过电流保护工程进行研究，这包括

- 1) 电路中过电流随时间变化的暂态特性及其数学描述。
- 2) 过电流保护装置动作原理和局限性。
- 3) 过电流保护装置的选择和安装注意事项。

第二节 过电流保护和过电流保护装置

继伏特发明了第一个电化学电池，法拉第制作第一个圆盘发电机之后，人们就制作出了过电流保护装置。机械式保护装置可以追溯到 19 世纪末。世界上最早的断路器出现于 1885 年，是刀开关与过电流脱扣器的组合。1905 年，由脱扣装置组成的空气断路器诞生了。

2 过电流保护原理及应用

1924 年美国西屋公司已经对装有双金属的自由脱扣操作机构的断路器提出了专利申请。熔断器的概念始于连接发电机与负载间的细小导线，即在电流过载时首先熔断这些细小导线而保护发电机。

从某种意义上讲，没有保护技术的进步，就不可能有电学的发展。电力部门绝不会将新发电机、新变压器、新电气负载接到一个没有过电流保护装置的电路中。同样，设计师也绝不会设计一个在输出短路情况下不能自动保护其固态功率器件的电子电源。为了避免过电流损害所带来的巨大经济损失，应开发具有过电流保护功能的保护装置。

过电流保护装置按其原理分为以下几类：

(1) 断路器

- 1) 磁断路器；
- 2) 热断路器（含无温度补偿断路器、温度补偿断路器、热丝断路器）；
- 3) 热磁断路器；
- 4) 电子型断路器；
- 5) 遥控断路器；
- 6) 机电功率控制器；
- 7) 固态功率控制器。

(2) 熔断器

- 1) 普通熔断器；
- 2) 难熔熔断器；
- 3) 惯性熔断器；
- 4) 限流型熔断器。

(3) 限制器

- 1) 刀闸型限制器；
- 2) 紧固螺栓型限制器；
- 3) 限流器。

(4) 过载继电器

- 1) 热继电器；
- 2) 电子过载继电器。

图 1-2 所示为典型工业试验室配电系统过电流保护装置的应用情况。该配电系统是目前经常采用的放射状配电系统：它从变电站，经工厂，到试验室个人计算机结束。

过电流保护可以看作分断装置级联电流的串联。从末端负载开始，在个人计算机电流输入端装有双元件熔断器或惯性熔断器。如果计算机内部出现过载或短路故障，这个熔断器将切断 220V 电源。当计算机刚开通时，会有一个较大的冲击电流，但由于采用惯性熔断器，未使熔断器动作，但若有更大的故障电流可使熔断器动作，从而使计算机得以保护。

插座上的过电流保护是由插座箱内装的 15A 热断路器提供的。当发生过载时，通过热断路器中的两层结合在一起的具有不同膨胀系数的双金属元件的变形使脱扣器动作，进而推动触头切断电路。

由试验室配电箱给插座提供单相 220V 电源。这个配电箱装有 20A 支路断路器。该断路器是热磁断路器，它具有双金属元件，当它被过载电流加热时能使装置脱扣。它还具有电磁

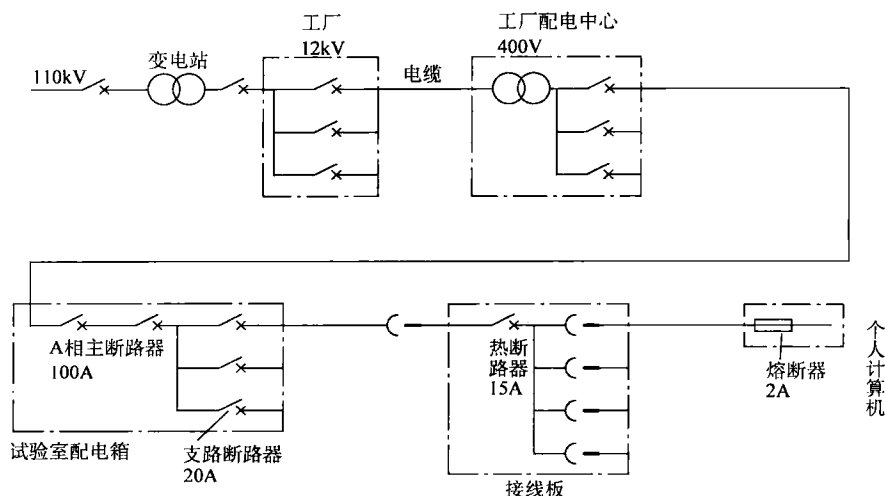


图 1-2 典型工业试验室配电

铁，通过电磁力的作用，在大故障电流时能快速切断电路。

试验室配电箱中三相电源的 A 相的主断路器为 100A 热磁断路器。主断路器用于备用保护，如果由于某种原因，支路断路器不能按规定时间分断过载电流，应在稍做延时后，由主断路器切断电路（即由上一级断路器断开）。

备用保护是过载保护的重要功能。在纯放射系统（图 1-2 所示试验室供电系统）中，可以很容易地看出级联动作，即每个保护装置为下一级保护装置提供备用。如果计算机电源熔断器没能正常动作，经过适当延时，插座板热断路器动作；如果插座板上的热断路器也没动作，将由支路断路器动作。因此，支路断路器是熔断器和插座板断路器的备用。任何备用装置都需要一个适当延时，以给备用保护装置动作的机会，从而缩小断电范围。保护装置动作时间的选择是备用系统选择保护的基本方法，也是系统工程师、成套工程师在选择保护装置时应考虑的因素之一。选择性保护是保护系统的特性，在选用配电系统的保护装置时，首先应选用与线路或电气设备相适应的保护设备。同时还要根据装置间的相互配合，对于重要场所，在发生故障时应采取仅切断故障回路而不涉及无故障回路的方式，即选择性保护。采用选择性保护的能源输送系统较没有选择性保护的能源输送系统更为可靠。

例如，在图 1-2 中试验室供电系统中，当计算机电源线上短路时，只用插座板上的热断路器进行保护，支路上的其他负载仍能够继续供电。即使插座板上的热断路器没能对计算机电源线故障做出反应，则由配电箱中支路断路器做出断路动作。试验室其他支路仍能继续供电。这就是所谓的选择性保护。

过电流保护装置的分断能力与装置灵敏度有关。一般来说，所有保护装置不管动作原理如何，过载电流越大，动作越快。

过电流保护器的保护对象及保护装置之间应匹配，这就要求配电系统工程师要全面了解保护装置的动作特性曲线（通常称为脱扣曲线，也称为安秒特性曲线），即脱扣时间与电流之间的关系曲线。它显示出了保护装置的动作电流区域和动作时间。试验室中保护装置的动作特性曲线如图 1-3 所示。

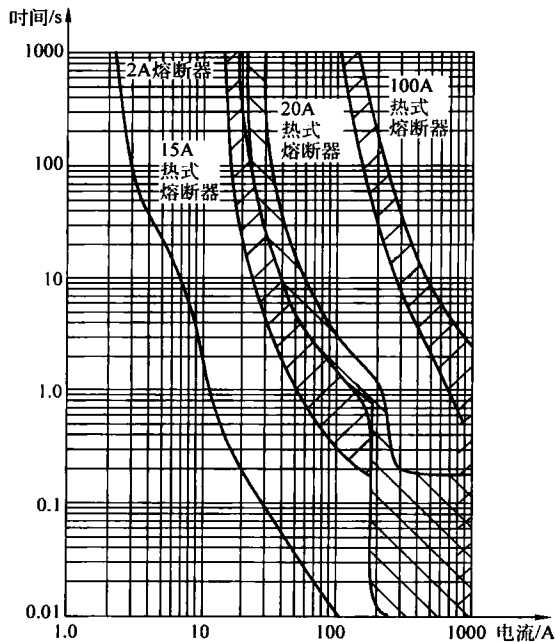


图 1-3 试验室中保护装置的动作特性曲线

保护装置的额定电流是在规定环境条件下能够连续承载，而不脱扣的标称直流或交流有效值。计算机电源熔断器、插座板热断路器、支路热磁断路器和主电路热磁断路器的额定电流分别为 2A、15A、20A 和 100A。从图 1-3 可以看出，除熔断器外每种保护装置的时间 - 电流显示一个阴影区域；它反映保护装置的动作带，这是由于制造公差和材料的不一致性而造成动作曲线呈现带状。在这里熔断器的动作曲线通常以平均熔断时间来表示，因此，反映曲线的是一条线，而不是一个带。

在动作曲线上我们可以看到不同保护装置间的配合关系。对应一个稳态过载电流，可以找出在该电流值上的动作时间，以确定动作顺序。

下面我们对试验室配电系统的三个典型例子进行研究。

例 1 计算机电源的元件故障

假定计算机电源元件故障为桥式整流器两个引线短路，故障电流被限流电阻限制到 70A。

从熔断器动作特性曲线可查出，约在 20ms 内熔断器动作并切断电路。如果熔断器没能动作，则插座热断路器将在 0.6 ~ 3.5s 切断分支电路。因为主断路器额定电流为 100A，故不能为支路断路器提供备用保护。只有在 70A 故障电流条件下，同时插座板上还有超过 30A 的负载，主断路器才有可能动作。

例 2 插座板过载

假设计算机操作人员为了某种需要在插座板上插上两台 3kW 的电吹风，并同时操作，使负载电流接近 30A。

从热断路器动作特性曲线可知，额定电流为 15A 热断路器应在 5 ~ 30s 动作，切断电路。

如果热断路器发生故障而未动作,则支路热断路器在 $3 \sim 190\text{s}$ 内断开电路。从动作特性曲线可以看出,在 100A 及以下,插座热断路器和支路热磁断路器动作曲线有相似性。这是因为在此电流范围内两种断路器都是以热断路器为主造成的。

例3 计算机电源的短路

假如计算机的电源线由于某种原因造成短路,由于电路、接插件及电源线的软线等阻抗可使电流限制在 300A 。

300A 的电流是插座热断路器额定电流的 2000% ,已超出给出的热断路器的动作特性曲线范围。不能由曲线确定动作时间。支路热磁断路器的动作特性曲线在 $150 \sim 200\text{A}$ 动作时间急剧下滑。这是由于在该电流下,磁脱扣部件动作,使动作时间大大缩短。支路热磁断路器与插座板热断路器脱扣曲线相交,两个断路器之间的选择性保护消失。

支路热磁断路器在 300A 时动作时间是 $8 \sim 185\text{ms}$ 。如果插座板断路器和支路断路器都发生故障而未动作,则主断路器将在 $11 \sim 40\text{s}$ 内动作,切断电路。

第三节 分断过程的物理现象

从电工学理论可知,任何电路电流和电压都应遵守基尔霍夫定律。根据电流连续性得出,对于任何节点而言,流出(或流入)该节点的电流代数和恒等于零, $\sum \dot{I} = 0$,也可以说任何节点流出该节点电流 $\dot{I}_0$ 的代数和恒等于流入该节点的电流 $\dot{I}_i$ 的代数和,即 $\sum \dot{I}_0 = \sum \dot{I}_i$,这就是基尔霍夫第一定律。

根据电位的单值性得出从任一固定方向沿任一回路其各段电压的代数和恒等于零,即 $\sum \dot{U} = 0$,也就是说从某一固定方向沿任一回路其各段电压的(包括内部电压)代数和恒等于各段电动势的代数和,即 $\sum \dot{U} = \sum \dot{E}$,这就是基尔霍夫第二定律。

分断电流切断电路路径或打开开关说起来简单,其实物理过程很复杂,使一个导电路径中的稳态电流降到零并不是一个简单的过程。我们需要详细研究这一瞬间到底发生了什么。

当断路器触头开始分离运动时,接触面积逐渐减小,接触处的电流逐渐增大,因此此处金属强烈发热,接触处的金属先是熔化形成液态金属桥,然后一部分变成蒸气进入触头间隙中,炽热的金属表面加剧了电子的热发射。同时触头开始分离时距离很小的触头间的电场强度很高,阴极表面将产生高电场发射。这两种发射使得大量电子从阴极表面进入了触头弧隙,它们在电场作用下通过电场的电离使弧隙中产生更多的电子和大量正离子。电子进入阳极与正电荷复合并释放能量加热阳极表面。正离子走向阴极,一方面在阴极附近产生高的电场和轰击阴极,另一方面从阴极取得电子进行复合并释放能量加热阴极以维持电子的热发射。另外,一部分正离子和电子在弧隙间复合,放出的能量以光的形式进行辐射或增加气体粒子的热运动。结果,弧隙中气体温度迅速升高,热电离越来越起主要作用,气体中带电粒子越来越多,气体的电导率越来越大,因而弧隙两端的电压降(即湿电弧电压)越来越小。直到弧隙中单位时间内产生的带电粒子数和通过复合与扩散作用消失的带电粒子数相等时,过程进入稳定状态,此时电弧稳定燃烧。

电弧电压与电路回路电压串联。当电弧被触头运动而物理加长电弧时，电弧电压将升高；当电弧被触头和周围的空气冷却时，电弧截面变小，电弧电压也升高。

在低压直流电路中电弧电压增大，也就是介质恢复电压增大。当超过电源电压时，电路电流很快变为零。当电流趋于零时，就没有更多的电弧离子产生，也就没有电能输入电弧，电弧冷却得更快，使离子基本复合，很快就冷却到没有导电介质存在，分断过程完成，电路被断开。总之，触头断开形成电弧，电弧熄灭又使电路断开。

用于交流电路的断路器，与直流电路相比，其电弧更容易熄灭，这是因为在交流电路中有自然过零的条件。在交流电路中，一个周期有两次自然过零。在电弧电流 i_h 过零前的一段时间内，电弧输入功率 P_h 小于电弧散出功率 P_s ，弧柱将变冷、变细，电弧电阻 R_h 将变大，使介质恢复电压提高。在电流过零后，加在弧隙上的电压缓慢上升，则因为在较长时间内 $P_h < P_s$ ，弧柱将变得更冷、更细。如果介质恢复电压超过电源电压时，电弧将不再重燃。因此交流电弧比直流电弧容易熄灭。

但是如果有人想把交流电弧在非自然过零时熄灭，也是可以做到的，人们在限流分断技术中就是采用这个原理。图 1-4 表示了交流电路中电流自然过零和强迫电流过零。

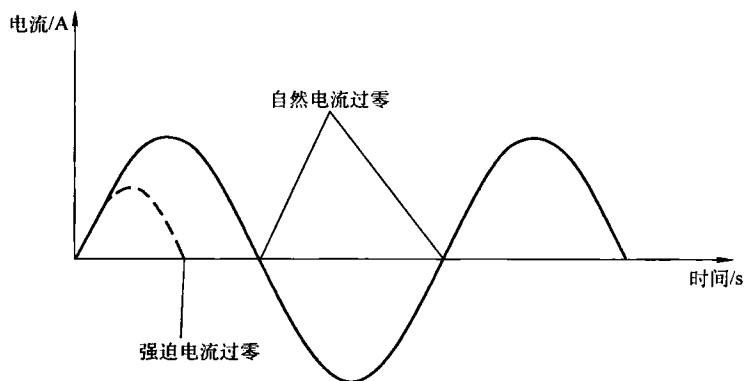


图 1-4 交流电路中电流自然过零和强迫电流过零

所有机械式断路器都是依靠电弧介质快速冷却，提高介质强度或电弧电压来断开电路。而固态开关（固态功率控制器）不需要靠电弧电压断开电路，因为它们提供自身的导电介质，即半导体材料本身。只要从电源或装置向基区或沟道提供载流子（电子或空穴），半导体就可以传导电流。如果半导体器件中载流子在基区被阻断，半导体将转换为绝缘状态，阻碍电流的流动，固态功率控制器截止。固态功率控制器的容许电流比断路器触头允许通过的电流小很多。这样，对于同样额定值的保护装置来说，固态开关的尺寸较机械开关的尺寸大很多。但固态功率控制器控制功能和无运动部件的可靠性，使固态功率控制器有更广阔的发展前景。

第四节 过电流的消除时间

第二节中对分断的物理过程进行了讨论，但没有解释为什么会产生分断动作，这就需要过电流进行检测。在分断过程开始之前，也就是说触头开始打开，固态开关截止之前，保

护装置必须做出脱扣还是不脱扣的判断。根据国际电工委员会（IEC）和我国国家标准（GB）的定义，由直接过电流脱扣器动作的断路器，在电流增大到足以致脱扣器动作的开始瞬间到所有极的弧触头都分开为止的时间间隔称为断开时间，也称为触动时间或检测时间。不同类型的保护装置过电流检测方法也不同。因此，对于同样的过电流条件，不同的保护装置可能有不同的断开时间（检测时间）。

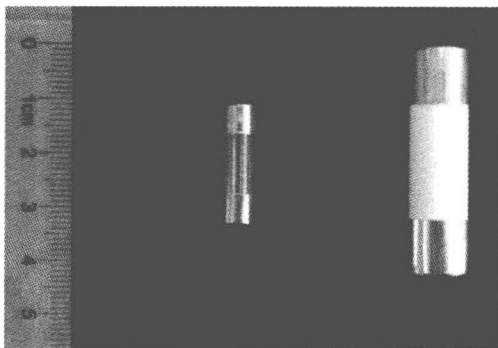
熔断器的检测机构原理是熔断器熔体的熔化和汽化。热断路器是通过两层不同膨胀系数的金属片结合在一起形成的双金属，在过载电流的直接或间接加热下，产生弯曲变形，从而推动脱扣器脱扣，使触头分离。有些热断路器使用双金属本身形成触头。双金属在过载电流作用下，双金属片瞬时翻转，触头立即断开。还有一种热断路器是用高膨胀系数的热电阻丝，在过载电流的作用下，产生纵向膨胀位移，使脱扣机构脱扣，触头断开。

磁断路器的检测部分是由电流驱动的电磁铁组成。当过载电流流过电磁铁线圈时，使电磁铁产生足够磁力，使脱扣机构脱扣，并使触头断开。

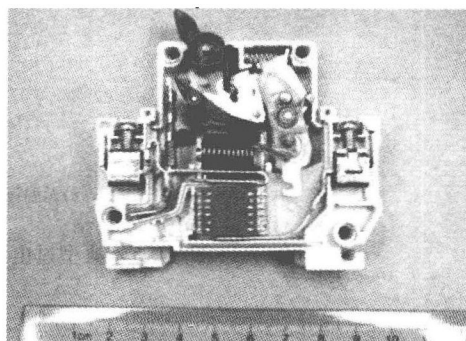
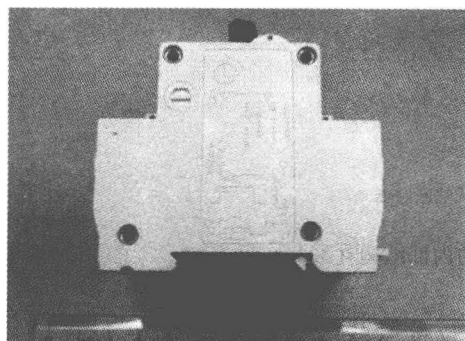
固态开关的传感器使用低阻值电阻，通过测量电阻上的电压降来测量过载电流。当达到动作阈值时，装置截止。

电子型断路器和热继电器都是通过互感器取样，通过检测电路或机构判断电流达到阈值时使产品动作。

图 1-5 给出了典型过电流保护装置的内部结构。

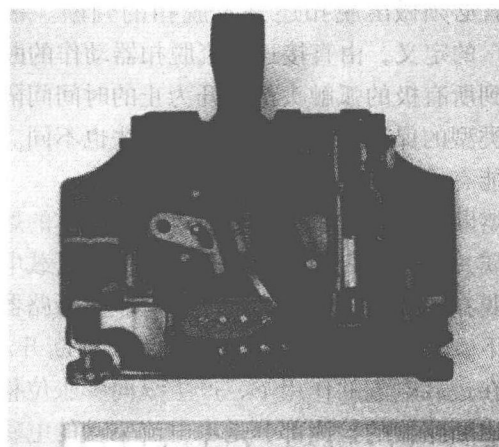


a)熔断器

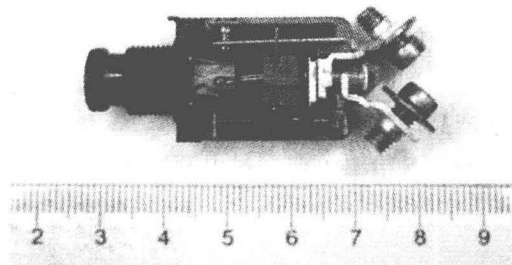
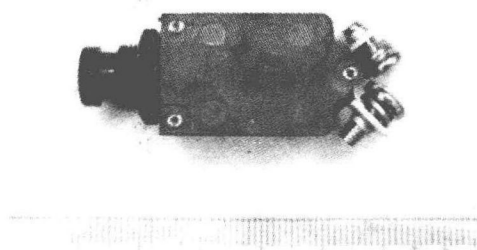


b)热磁断路器

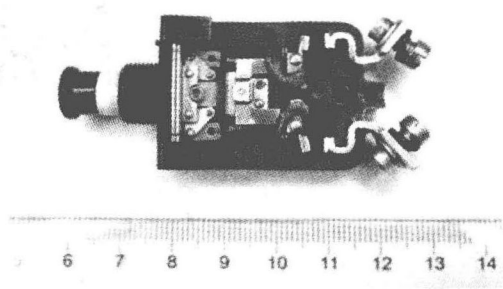
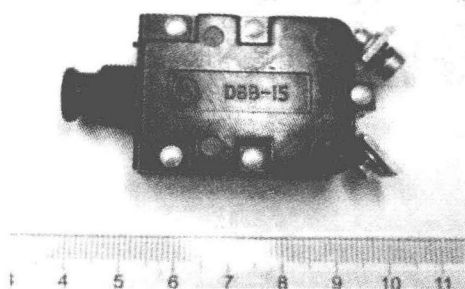
图 1-5 典型过电流保护装置的内部结构



c)热磁断路器

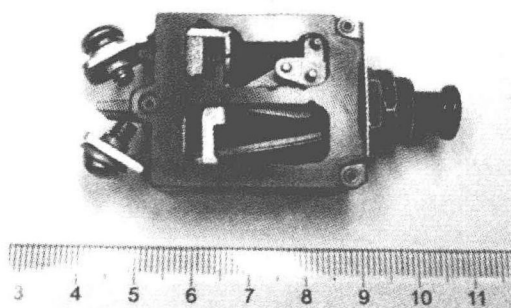


d)带温度补偿的双金属式热断路器

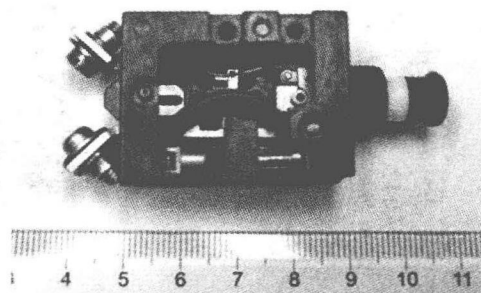
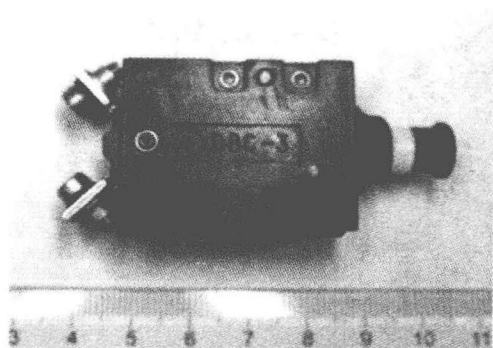


e)无温度补偿的双金属式热断路器

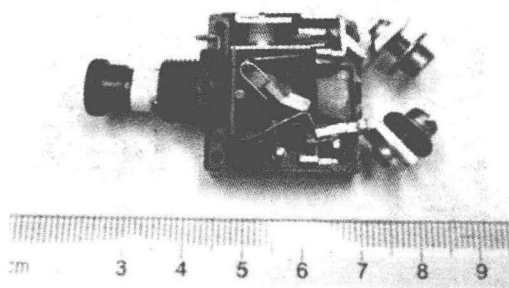
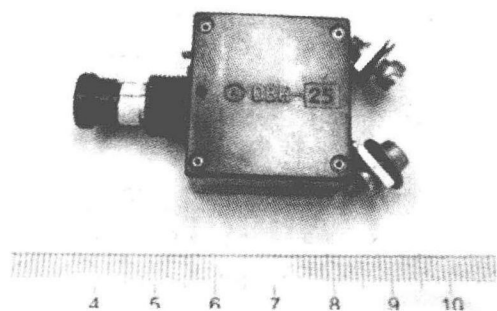
图 1-5 典型过电流保护装置的内部结构 (续)



f)带温度补偿的双金属式热断路器

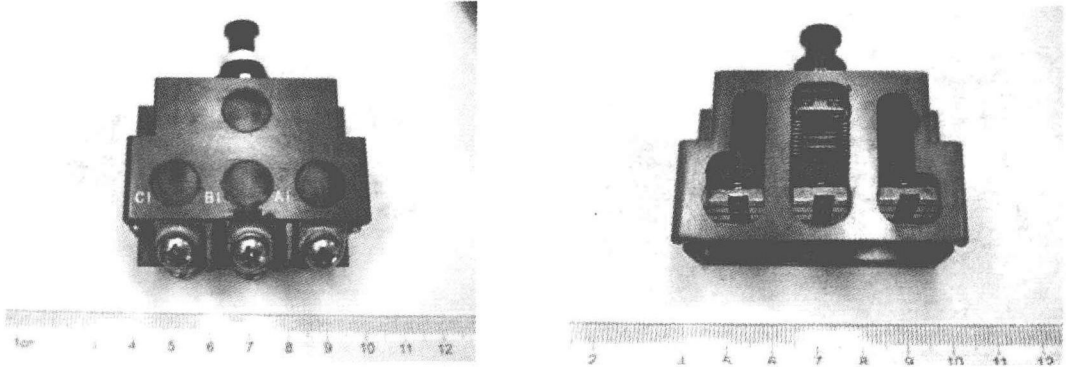


g)热丝断路器

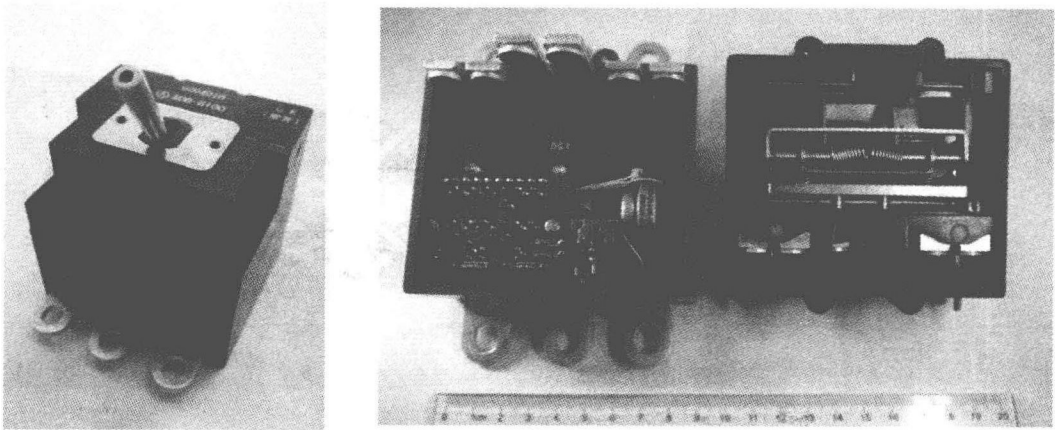


h)带温度补偿的双金属式热断路器

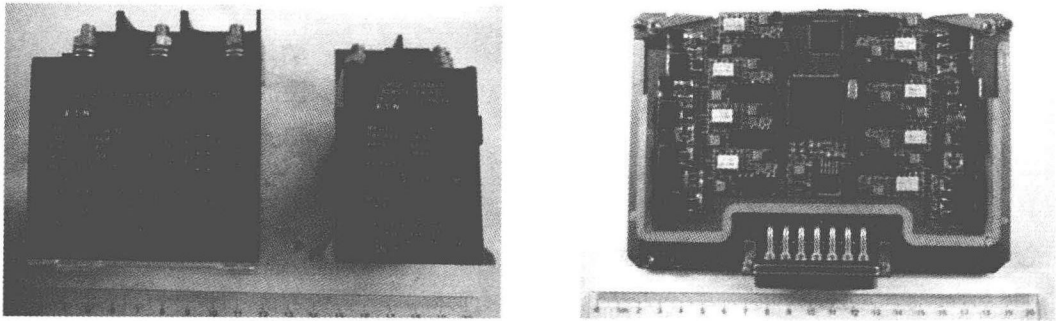
图 1-5 典型过电流保护装置的内部结构 (续)



i)带温度补偿的双金属式热断路器



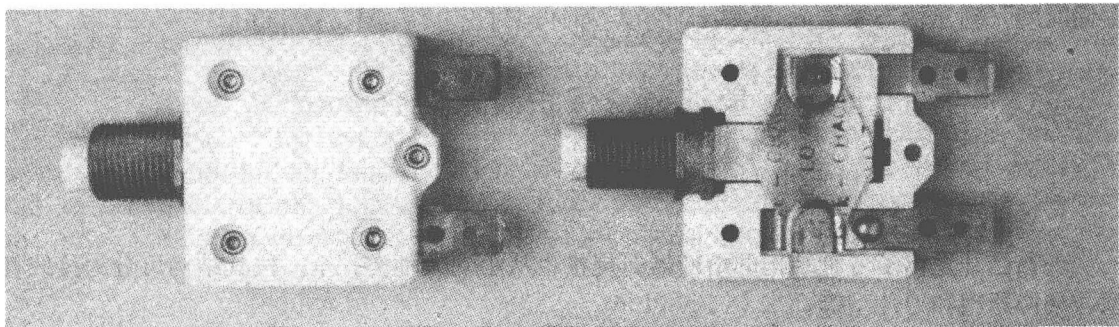
j)电子型断路器



k)遥控断路器

l)固态功率控制器

图 1-5 典型过电流保护装置的内部结构（续）



m)双金属速动热断路器

图 1-5 典型过电流保护装置的内部结构（续）

检测速度越快，断开时间越短。但检测时间必须可控制，而且应与过电流量值相匹配。

分断时间按 IEC 标准和我国国家标准的定义是指，从开关电器的断开时间开始到燃弧时间结束为止的时间间隔。

在级联电路中，电源和负载间串联了多个保护装置。各保护装置必须配合工作，也就是说当额定值较低的保护装置的保护对象发生故障时，额定值较低的保护装置要具有先于额定值较高的保护装置断开的的能力，即遵守最小电流排除原则。这里的动作时间或是清除时间是从过载开始时间到电弧熄灭，电流为零时的时间间隔，即为断开时间和分断时间的总和。因为设计原因，控制过载量的检测时间比控制分断时间容易，所以任何保护装置的動作时间设计时由断开时间确定。

检测装置的断开时间（检测时间）和分断时间的总和为保护装置的動作时间（总清除时间），这些不同的时间间隔如图 1-6 所示。

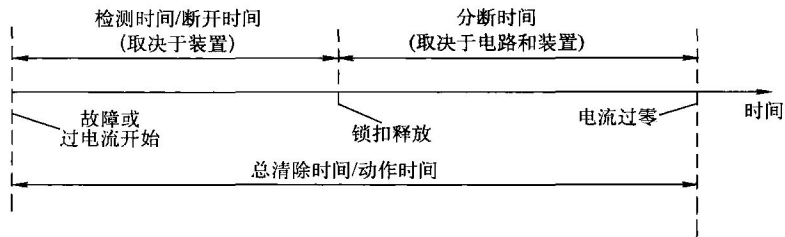


图 1-6 保护装置动作时间分段间隔

与检测时间相反，在工程上当过载量增大时，分断时间不能相应减小，这是由装置的运动特性和熄弧能力及电路参数所决定的。但无论如何都应使分断时间尽量短。因为在此期间，由于过载电流通过触头（或固态功率控制器的功率器件），保护装置吸收能量，如果保护装置（熔断器除外）在此期间没能及时清除故障，由于自身的发热功率，可使保护装置损坏。熔断器分断电流，熔断器也就损坏了。但应注意，在感性电路中，如果电流下降得过快，引起过电压，可使绝缘闪络造成装置损坏。

在交流电路中，分断时间持续到电流第一次自然过零或强制过零。在电流过零时，开关介质（电弧或固态材料）可达到不导电的截止状态。在直流电路中，零电流是装置强迫作用的结果。

在电流分断过程中还有附加时间，如触头行程时间、电弧复燃时间、热恢复时间和电荷

存储时间（对于固态装置），这些都将在后面详细讨论。

第五节 保护装置简介

一、熔断器

现在已开发出了各种结构的熔断器，规格也从小到大种类齐全。按其结构可分为接线柱型、夹持器型和刀片型等。

熔断器不能反复重新使用，只能在故障条件下使用一次。

二、磁断路器

磁断路器是靠流过串接在电路中线圈的电流产生的电磁力而动作，该线圈绕在一密封管的外面，管内有铁心、弹簧和阻尼液，磁断路器的工作原理如下。

如图 1-7a 所示，当线圈中的电流不大于额定电流时，线圈产生的磁通量不足以将铁心吸至极靴，断路器保持正常工作。当电流大于断路器额定值时，线圈的磁通就产生足够大的吸力使铁心朝极靴方向运动。

如图 1-7b 所示，当铁心运动时，密封管内的阻尼液用以调节铁心的运动速度，以产生一个延时，时间与电流大小成反比。如果电路中出现一个大瞬时过载，如电机起动，当延时大于电机起动的瞬态过程，电机安全起动而铁心则返回其初始位置。

如图 1-7c 所示，如过载电流持续存在，则铁心经一定时间延时后就会朝极靴运动，使铁心与极靴面吸住，并借助该吸力使衔铁吸合，机械锁扣释放，触头系统断开，断电后，铁心返回初始位置。

如图 1-7d 所示，当电路出现短路时，线圈产生的磁通量足以将衔铁吸至极靴面，使断路器很快脱扣，这一动作称为断路器的瞬时脱扣。

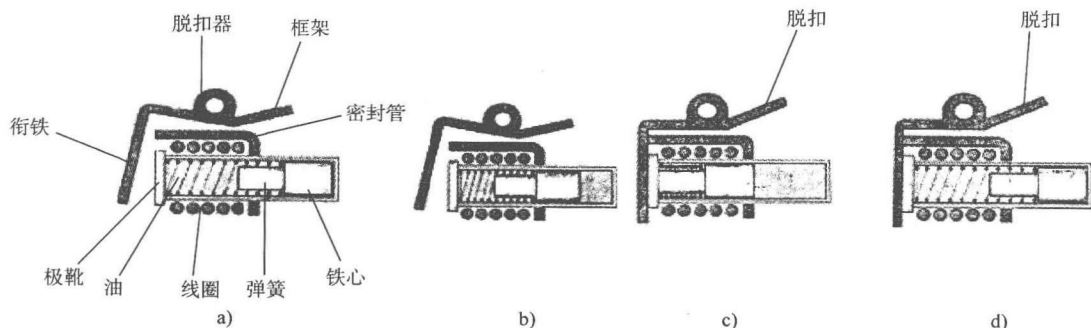


图 1-7 磁断路器工作原理

三、热断路器

（一）无温度补偿热断路器

图 1-8 为无温度补偿热断路器，该产品采取了一种 U 形双金属元件结构，内侧为主动层，在通电后双金属元件向外侧变形，双金属上端与弹簧片止口从挂扣处（I）脱扣，锁

扣机构释放，动静触头分离。

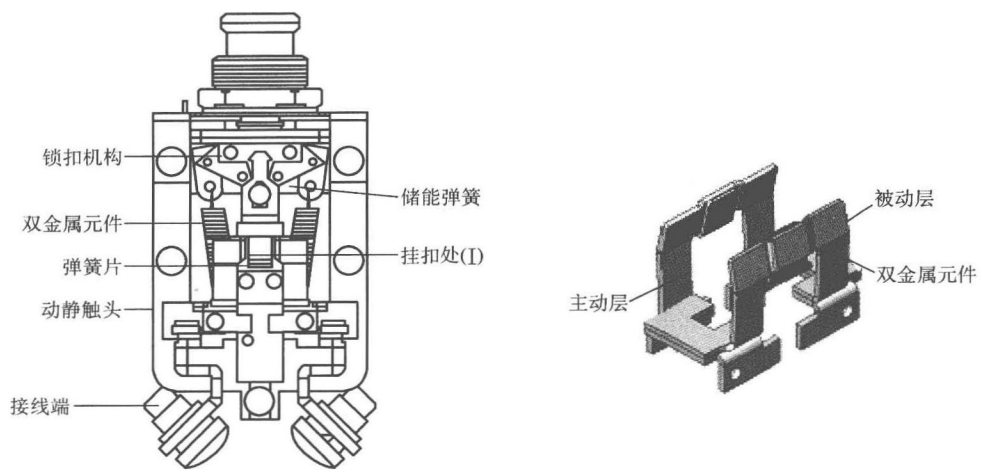


图 1-8 无温度补偿热断路器结构

(二) 温度补偿热断路器

1. 结构与工作原理

图 1-9 所示为带温度补偿的热三相断路器，该产品由 A、B、C 三个独立的断路器组件组成。

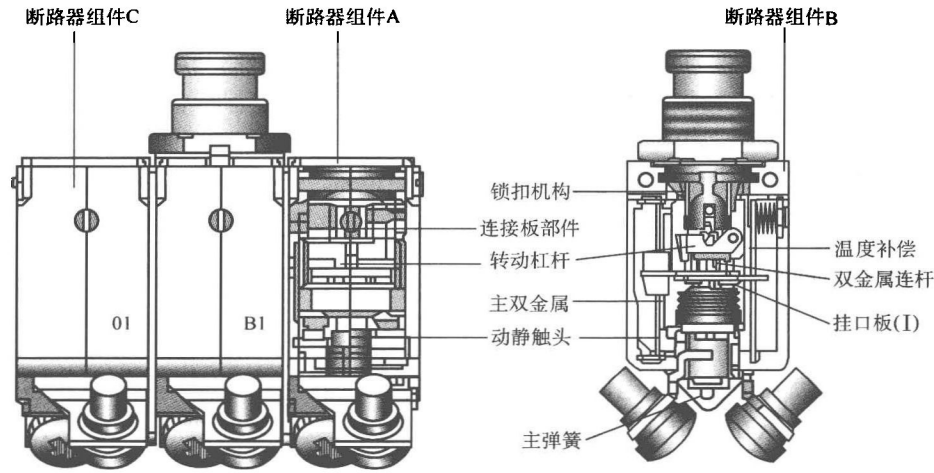


图 1-9 温度补偿热断路器结构

产品的锁扣机构在 B 相中。B 相脱扣原理为：主双金属通过过载电流时向左侧产生变形，拉动连杆在挂扣板（I）处脱扣，B 相主弹簧弹起，动静触头分离，锁扣机构释放，按钮弹出；与此同时，B 相支架部件通过与之相连的连接板部件将 A、C 两相支架部件及触头带动分离，三相电路全部断开。

A、C 相的主双金属热变形原理与 B 相相同，不同之处是，A、C 相的过载脱扣必须通过转动杠杆先将 B 相连杆在挂扣板（I）处脱扣，使 B 相主弹簧弹起，此后的动作过程与 B 相相同。

A、B、C 各相的动作过程无论是单相脱扣还是三相脱扣均为一个联锁联动的动作过程。