



低压电器新技术丛书

低压断路器的开关电弧 与限流技术

陈德桂 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

低压电器新技术丛书

低压断路器的开关电弧与 限流技术

陈德桂 著



机械工业出版社

作者在国家自然科学基金、国家机械工业技术发展基金和教育部博士点专项科研基金等六项基金资助下,根据多项科研成果和综合了国际上这个领域的最新研究成果。结合低压断路器的开断过程,全面地叙述了开关电弧在各个阶段的物理特征,包括开断初期的电弧停滞现象,电弧运动过程的气吹和磁吹,动触头斥开过程和机构动作的配合,电弧进入灭弧栅片后的背后击穿现象等最新内容,并分析了各种因素对这些物理现象的影响以及提高断路器开断性能的各种措施。在分析空气介质电弧基本物理特征的同时,提出了一种依靠现代测试技术的低压断路器灭弧系统新的研发方法,即以振荡回路为电源,可拆式灭弧室为研究对象,采用电弧运动快速摄像系统和各种传感器的现代测试手段,分析不同结构灭弧室的宏观与微观性能。对于加快低压电器产品的研发速度,降低开发成本具有重要意义。

本书可供从事低压电器设计、制造、试验和运行方面有关工程技术人员参考,并可作为高等院校有关专业的教学科研和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

低压断路器的开关电弧与限流技术/陈德桂著. —北京:机械工业出版社, 2006.10
(低压电器新技术丛书)
ISBN 7-111-19986-3

I. 低... II. 陈... III. 低压电器 - 断路器
IV. TM561

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 116406 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:林春泉 版式设计:冉晓华 责任校对:樊钟英
封面设计:陈沛 责任印制:李妍
北京铭成印刷有限公司印刷

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
140mm × 203mm · 6.25 印张 · 164 千字
0001—3000 册
定价:20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379768
封面无防伪标均为盗版

前 言

低压断路器是低压供配电系统的主要开关电器，随着电力事业的发展，人们对低压断路器的需求数量不仅大幅增加，对产品性能和可靠性方面也提出了更高的要求。当前单台低压配电变压器容量增大，低压配电系统进入城市高层建筑，设备安装的空间要求越来越小，因而开发高性能、小尺寸、智能化和节能型产品是当前低压断路器的发展方向。我国国民经济的飞速发展给低压电器行业带来了前所未有的机遇，要把握好这个机遇，就必须走自主创新的道路，开发具有自主知识产权的低压断路器新一代产品，以适应国内外市场竞争的需要。

近年来，国内外专业技术人员在低压断路器开关电弧的物理机理方面作了大量的研究工作，低压断路器新的开断技术也不断出现。为了推动我国低压断路器新一代产品的自主开发，实现创新设计，也为了提高低压电器开关电弧和灭弧系统的理论水平，改变我国长期以来以反复样机制作和短路试验为主的经验设计方法，西安交通大学低压电器研究组研究人员将低压断路器开关电弧理论和灭弧系统的现代研发技术的科研成果，结合国际上近年来在低压电器领域有关科技进展进行了整理和总结。

本书的内容以低压断路器的开断过程为枢纽贯穿全书，分8章加以叙述。除第1章中提供一些断路器基本知识、开关电弧理论基础和断路器开断技术发展外，第2至第7章主要介绍了开断过程中，从电弧停滞、运动和电弧背后击穿到电弧电流过零后的介质恢复的多种物理现象，这对于提高低压电器开断性能有重要的影响，近年来国内外学者在这方面作了大量研究工作。第3章对当前低压断路器最新开断技术，即气吹灭弧，作了详细的分析。第5章把塑壳断路器中触头开断过程与操作机构动态特性的

配合作为一个专题加以讨论。第6章阐述了提高低压断路器的开断性能的方法和措施，并介绍了以现代测试技术为基础的低压灭弧系统新的研发方法。第8章介绍了低压断路器新的限流技术。本书的内容以低压塑壳断路器为主要对象加以叙述，但书中内容作为低压电器开关电弧的理论基础，也同样适用于其他低压电器，如框架断路器、交流接触器等。

本书应用了作者指导下的博士研究生陈勇、袁海文、陈旭、辜晓川、孙海涛、刘洪武、李兴文、李志鹏等的研究成果，特此表示感谢。

本书内容若有不当之处，希望读者予以指正。

作 者

2006年6月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪 论

1.1	对低压断路器开断性能的要求	1
1.2	塑壳限流断路器的开断过程	5
1.3	塑壳限流断路器的结构方案	7
1.4	本书实验研究所用测试设备	9
1.4.1	单频振荡回路和各种传感器	9
1.4.2	二维光纤阵列电弧运动测试系统	10
1.5	开关电弧基础	13
1.5.1	空气介质中的开关电弧	13
1.5.2	交流电弧的开断	16
1.6	低压电器开断技术发展简介	18
	参考文献	21

第 2 章 塑壳断路器触头斥开与电弧停滞过程

2.1	决定触头斥开时间的因素	24
2.2	电弧停滞现象	29
2.2.1	电弧停滞时间的定义	29
2.2.2	电弧停滞时间对低压电器性能的影响	29
2.3	电弧停滞现象的机理	31
2.3.1	金属相电弧向气相电弧的转变	31
2.3.2	电弧在磁场作用下的速度场	33
2.3.3	限流断路器在电弧停滞过程中的气体动力学	34
2.4	影响电弧停滞时间的各种因素	37

2.5 电弧从触头到弧角的转移	42
参考文献	45

第3章 磁吹和气吹对电弧的冷却和驱动作用

3.1 断路器触头系统的自励磁场	48
3.2 电弧在跑弧道中运动的速度	51
3.2.1 静止介质中电弧运动速度的计算	51
3.2.2 不同条件下的电弧运动速度	54
3.3 基于灭弧室内气体高温形成的气吹	56
3.3.1 灭弧室内的压力	56
3.3.2 存储气体压力产生气吹的灭弧室结构	58
3.4 基于电弧对产气材料的侵蚀造成的气吹	59
3.4.1 绝缘材料产气与灭弧室压力	59
3.4.2 利用绝缘材料产生气吹的灭弧室结构	60
3.5 不同灭弧室结构条件下气吹灭弧的实验研究	61
3.5.1 实验模型	61
3.5.2 上下出气口不同配置时的开断性能	63
3.5.3 不同器壁产气材料时的开断特性	66
3.6 电弧等离子体温度的光谱诊断	69
3.6.1 电弧等离子体的光谱诊断方法	69
3.6.2 实验装置、测试系统与试验线路	72
3.6.3 实验结果与分析	73
参考文献	75

第4章 电弧进入灭弧栅片后的背后击穿现象

4.1 电弧的背后击穿现象的电路模型	78
4.2 观察电弧的背后击穿现象	81
4.3 背后通道热击穿条件分析	85
4.4 具有收缩型跑弧通道的灭弧室	88
4.5 一种带产气材料夹层的栅片灭弧室	91

4.6	消除和减弱背后击穿现象的其他方法和措施	94
4.7	用磁流体动力学电弧动态数学模型仿真电弧背后 击穿现象	96
4.7.1	磁流体动力学电弧数学模型	96
4.7.2	背后击穿现象的仿真	99
	参考文献	104

第5章 动触头斥开过程与机构动作的配合

5.1	概述	107
5.2	气动斥力	107
5.3	分析两种过程的配合	112
5.3.1	斥开过程中动触头受力分析	112
5.3.2	两个过程配合与动触头跌落现象	115
5.4	操作机构起动时间 t_1 和动作时间 t_2 的测量	117
5.5	动触头跌落现象与短路电流合闸相角的关系	119
5.6	防止动触头斥开后跌落现象的措施	122
	参考文献	126

第6章 电弧电压的提高与灭弧系统研发新技术

6.1	电弧电压的组成部分	128
6.2	电弧电压两个分量的作用	129
6.2.1	电弧电压的经验公式	129
6.2.2	两种压降作用的实验验证	130
6.3	提高电弧电压时两个分量的相互联系	132
6.3.1	双向斥开触头的电弧电压	132
6.3.2	双断点开断的电弧电压	133
6.4	屏幕开断与窄缝灭弧的电弧电压	137
6.4.1	屏幕开断与窄缝灭弧的灭弧室结构原理	137
6.4.2	窄缝灭弧室的电弧电压	138
6.4.3	两种灭弧室的对比试验	140

6.5 基于现代测试手段的低压灭弧系统研发新技术	142
6.5.1 低压灭弧系统研发新技术	142
6.5.2 塑壳断路器灭弧室的优化设计	143
6.5.3 用引弧板改进灭弧室的开断性能	145
参考文献	149

第7章 电弧电流过零后的介质恢复

7.1 概述	151
7.2 两种重击穿现象的计算与分析	155
7.2.1 介质击穿过程的计算与分析	155
7.2.2 击穿电压的热重燃模型	159
7.3 介质恢复强度的测量方法	160
7.3.1 单电源一次击穿法	161
7.3.2 双电源多次击穿法	162
7.4 不同开断电流和栅片厚度的介质恢复与重燃过程	165
7.5 产气材料与灭弧室出气口尺寸对介质恢复过程的影响	168
参考文献	173

第8章 新的限流技术

8.1 概述	175
8.2 PTC 限流元件	175
8.2.1 导电聚合物 PTC 材料	176
8.2.2 导电聚合物 PTC 元件与断路器的组合	177
8.3 基于粉末颗粒的限流开断技术	179
8.4 液体金属限流器	181
参考文献	183

附录 几种新型低压断路器的技术数据

第 1 章 绪 论

1.1 对低压断路器开断性能的要求

低压断路器是用于低压电网的配电电器，它能接通、承载及分断正常工作电流，也能分断过电流及短路故障电流。它能起多种保护功能，如过载、短路、欠电压、单相接地和漏电等。低压断路器按其结构可分为三大类：框架断路器；塑壳断路器和小型断路器。国际电工委员会的 IEC 标准和我国国家标准按使用类别把断路器分成 A 类和 B 类两种类型，其中 A 类断路器在短路情况下，无明确指明具有选择性保护功能，而 B 类断路器则明确指明具有选择性保护功能。图 1-1 表示两类断路器安装位置如图 a 所示及其保护特性配合，如图 b 所示，其中断路器 Q_1 作为主

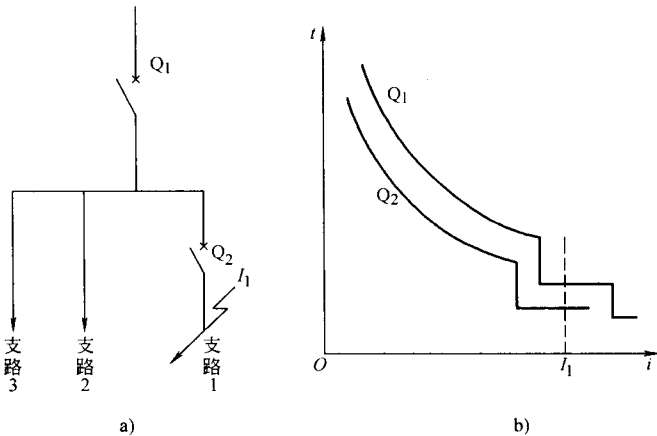


图 1-1 选择性保护的特性配合

a) 两类断路器的安装位置 b) 保护特性配合

回路馈电侧断路器，其保护特性具有作为线路过载保护的长延时，短路情况下的短延时和瞬时三段保护，而断路器 Q_2 作为负载侧的支路开关，仅具有长延时和短路情况瞬时动作的两段保护。当负载侧支路 1 短路时，若短路电流为 I_1 ，从图 1-1b 的保护特性配合来看，短路电流使断路器 Q_2 首先动作，而断路器 Q_1 由于具有短延时特性延缓动作，因而由断路器 Q_2 开断短路故障，而作为主开关的断路器 Q_1 不动作，这就保证了其他支路的正常运作，实现了选择性保护，即仅有产生短路故障的支路开断。目前，大量的塑壳断路器、小型断路器和一部分小电流规格的框架断路器属于 A 类，而绝大多数框架断路器和大规格塑壳断路器属于 B 类。

断路器的短路分断能力分极限分断 I_{cu} 和运行分断能力 I_{cs} 两种：极限分断能力 I_{cu} 是在规定试验条件下，按 O—t—CO 的试验程序所能分断的短路电流，用预期电流的有效值表示，其中 O 表示分断，t 表示停歇时间，一般为 3min，CO 表示接通后即分断；运行短路分断能力 I_{cs} 是在规定试验条件下，按 O—t—CO—t—CO 的试验程序所能分断的短路电流。

由于运行短路分断能力试验后，还要求被试断路器能继续承载额定电流，试验后还必须进行温升试验和 5% 的电器寿命试验，因而它比极限分断能力的试验更为严酷，因而一般断路器的 I_{cs} 较 I_{cu} 值要低。

为了提高开断性能和缩小体积，降低短路电流对电网中其他电气设备的电动力与热效应，A 类断路器常具有有限流性能，利用快速增长的电弧电压来限制短路电流，一般用限流系数来表示断路器的限流能力，限流系数是开断时的最大通过电流峰值 (kA) 与预期的短路电流的周期分量有效值 (kA) 之比。对于限流断路器，限流系数越小，表示该断路器的限流性能越好。断路器的限流能力也可用特性曲线来表示，纵坐标为最大通过的电流峰值，横坐标为预期短路电流有效值，它表示在开断短路电流时，实际分断的电流峰值与发生的预期短路电流有效值的关系。塑壳断路

器的限流特性如图 1-7 所示。

塑壳断路器一般采用电动斥力原理来达到限流目的，如图 1-2a 所示的结构，当短路电流通过 U 型静触头回路和动触头导电杆时，由平行导体产生的电动斥力 F_L 及触头接触点处由于电流线的收缩产生的霍姆(Holm)力 F_H ，使动触头快速打开，产生电弧电压而限流。另一种结构为用一与主回路串联的冲击电磁铁，如图 1-2b 所示，当短路电流通过电磁铁线圈时，动铁心作为一种快速打击器直接顶开动触头。

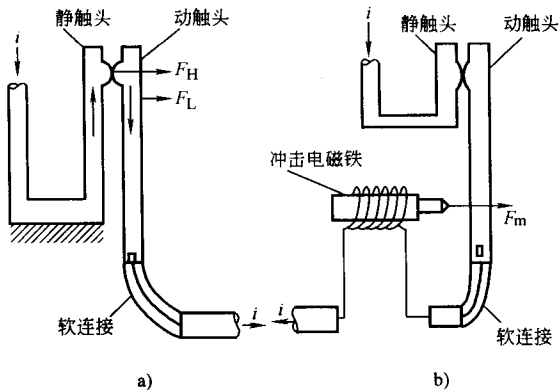


图 1-2 限流开断的两种结构

a) 电动斥力 b) 冲击电磁铁

低压断路器的灭弧系统一般都采用栅片短弧原理，依靠触头导电回路产生的磁场驱使电弧进入灭弧室，近年来气吹灭弧在低压断路器中也得到应用，放置产气绝缘材料于灭弧室器壁，在电弧高温下产生含氢的气体，一方面有利于冷却电弧，另一方面依靠气流驱使电弧进入栅片。

低压断路器分为：框架断路器、塑壳断路器和小型断路器，它们结构上有所不同，工作性能和应用场合也不同。其中小型断路器和大部分塑壳断路器都具有限流开断性能。

塑壳断路器或称 MCCB (Molded-case Circuit Breaker)，一般

属于 A 类断路器，利用上述图 1-2a 所示的电动斥力结构起短路电流限流作用，这样可在小尺寸条件下获得大的开断能力，这种断路器一般作为低压配电系统的分支开关，它的所有部件，包括机构、触头和灭弧系统以及脱扣器都装在一个塑料外壳上，既起支撑体作用，又起绝缘作用，它的额定电流在几十安至千余安之间，图 1-3 为塑壳断路器的结构，图中左侧为触头和灭弧系统，上部为机构，右侧为脱扣器，塑壳顶部为操作手柄，塑壳断路器的脱扣器有两种结构，一种为热-磁脱扣器，另一种为数字脱扣器，又称智能脱扣器，热-磁脱扣器中热双金属起过载保护作用，磁脱扣器作短路瞬时保护，智能脱扣器以单片微处理器为基础，采用数字电路实现保护功能多样化，并可与上级配电系统双向通信。

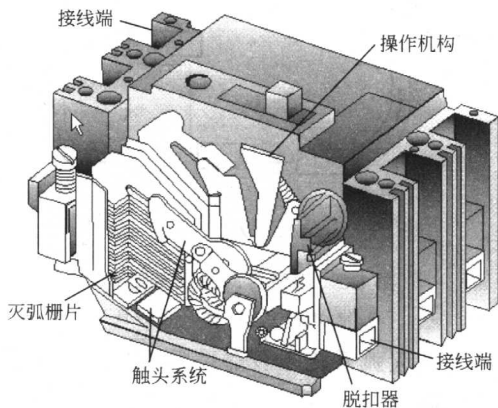


图 1-3 塑壳断路器的结构

小型断路器又称微型断路器 MCB (Miniature Circuit Breaker)，一般用于家用或类似场合的电气线路和设备的过载和短路保护，额定电流较小，一般为 125A 以下，额定电压为民用等级，限于 220/380V，它也可在工业上作电缆和电动机保护。小型断路器也是一种塑料外壳断路器，它采用图 1-2b 的冲击电磁铁结构来达到限流的目的，但通常做成单极，它可由几个单极断路器拼装成多

极的，以适应三相电路的使用。小型断路器的脱扣器采用热-磁式。

图 1-4 为一种小型断路器的结构，当短路电流通过螺管式冲击电磁铁的线圈时，其动铁心一端直接顶开动触头，另一端推动脱扣钩，使机构脱扣。

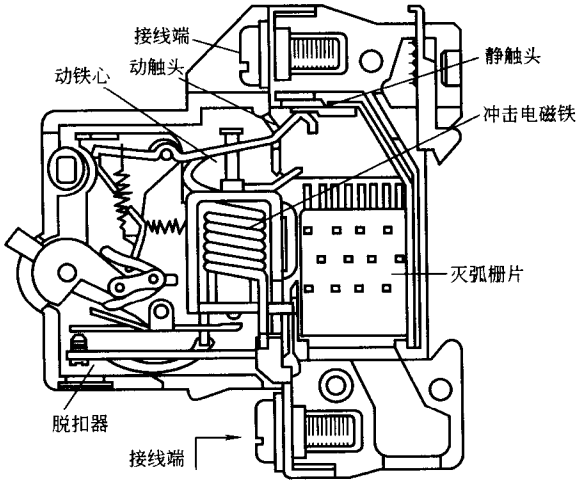


图 1-4 一种小型断路器的结构

1.2 塑壳限流断路器的开断过程^[1-1]

塑壳断路器采用栅片灭弧，采用这种灭弧室的开断过程一般可分为 4 个阶段，如图 1-5 所示。

(1) 从短路电流出现瞬间 $t=0$ 到触头始动时刻 t_0 ，这段时间为限流机构的动作时间，对塑壳断路器来说，是指动触头上的电动斥力随短路电流增长，至电动斥力等于触头压力，而使触头开始斥开所需时间。这段时间内触头尚未分开，因而触头两端电弧电压 $U_{arc}=0$ 。

(2) t_0 到 t_1 段时间。动触头在 t_0 时刻开始打开，触头上出现电弧，由于电弧停滞现象，电弧在触头上保持不动，这段时间称为电弧停滞时间 $t_i = t_1 - t_0$ ，它决定于触头材料、吹弧磁场与

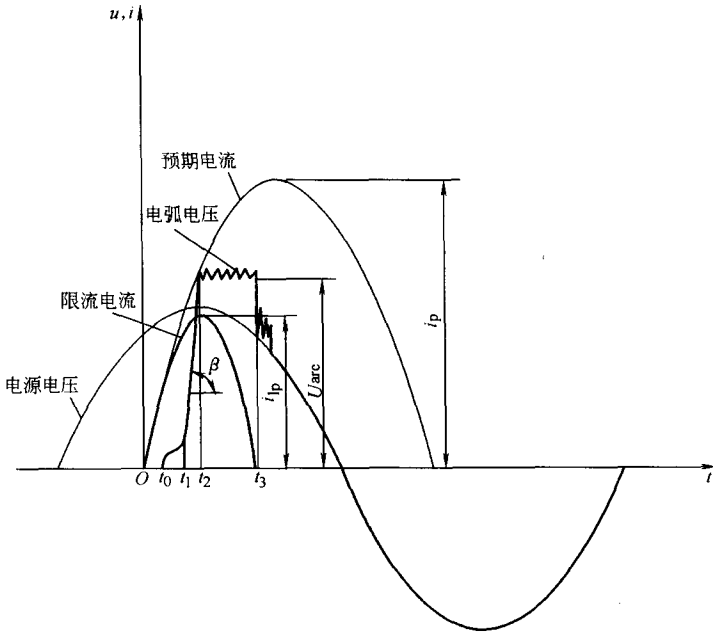


图 1-5 灭弧室的开断过程

触头打开速度等因素，这一阶段中电弧电压变化不大。

(3) 到 t_1 瞬间，电弧拉长到一定长度，这时电弧在自励磁场产生的电动力作用下，离开触头并通过弧角进入灭弧栅片，这一阶段电弧电压很快地增长，其增长速度 β 决定了电弧运动速度和进入灭弧栅片的时间 t_2 ， $t_2 - t_1$ 这段时间为电弧运动时间。

(4) 当电弧进入灭弧栅片后，电弧电压达到其最大峰值 $U_{arc\ m}$ ，此时电弧电压已大于电源电压瞬时值，电流被强制减小，到 t_3 瞬间电流降低到零，电弧熄灭。

若用限流断路器分断一负载为 R 、 L 的单相回路，则可用下述微分方程来描述电流、电压关系

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di}{dt} + Ri + U_{arc} \quad (1-1)$$

式中 U_m ——电源电压幅值；

ψ ——短路合闸相角。

将式(1-1)改写为下述形式

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [U_m \sin(\omega t + \psi) - Ri - U_{arc}] \quad (1-2)$$

电流在 t_3 瞬间达到峰值 I_p , $di/dt = 0$, 电弧电压等于 $U_m \sin(\omega t + \psi) - Ri$, 随之电弧电压继续上升, 并一直大于电源电压, 此时 di/dt 为负, 电流逐渐减小直至为零。图 1-5 中预期短路电流波形, 其幅值为 I_p , 很明显, 由于限流作用的存在, 实际分断电流的幅值 i_p 较 i_p 要小得多, 燃弧时间也缩短了, 因而允通能量 $\int i^2 dt$ 和电弧能量 $\int u_{arc} idt$ 都减小了, 前者可降低断路器本身和电网中其他设备的短路电流电动力和热效应, 后者减小了断路器开断的电弧能量。由图 1-5 可见, 决定电弧电压的参数有 4 个, 它们是限流机构动作时间 t_0 , 电弧停滞时间 t_i , 电弧电压上升率 β 和电弧电压幅值 $U_{arc m}$ 。显然, 若能减小 t_0 和 t_i , 增大 β 和 $U_{arc m}$, 则能增强低压断路器的限流作用。

1.3 塑壳限流断路器的结构方案^[1-1]

20 世纪 80 年代中期, ABB 公司的低压电器开发部门对图 1-6 所示的五种不同的结构方案的限流特性进行了实验对比和计算机模拟, 五种方案实验和仿真结果, 如图 1-7 和图 1-8 所示。

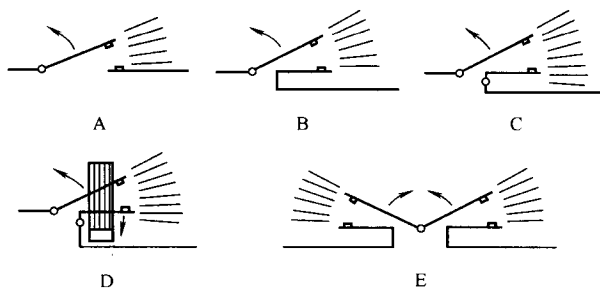


图 1-6 五种不同的限流断路器机构方案

其中，图 1-7 为限流峰值与预期短路电流的关系，图 1-8 为允通能量与预期电流的关系。

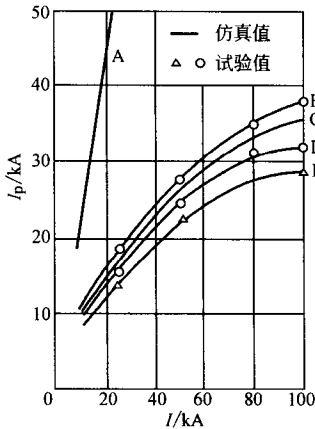


图 1-7 限流峰值与预期
短路电流的关系

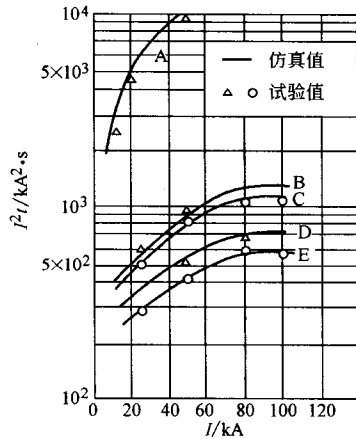


图 1-8 允通能量与
预期电流的关系

这五种方案结构上的区别在于：其中方案 A 为传统的非限流型结构；方案 B 的静触头做成 U 型导电回路，增强了磁场和作用在动触头上的电动斥力，这种结构仅动触头能斥开，是动触头一方能绕轴斥开的单面斥开结构；方案 C 与 B 不同之处为静触头也可在电动力作用下斥开，因而是双面斥开结构，这里静触头也可绕轴转动；方案 D 的结构是在 C 方案基础上，在利用电动机槽效应来增强斥开磁场，即用一 U 型磁铁套在静触头导电板上以增强触头区导电回路的自励磁场，和增强作用在触头臂上的电动斥力；方案 E 为双断点结构，两个触头串联起来，在电动力作用下同时斥开。从图 1-7 和图 1-8 可知，方案 C 的限流效果较方案 B 略好，但从结构简单、成本低和工作可靠上看，方案 B 更显出它的优越性，并且和传统结构 A 相比，方案 B 实际分断的短路电流峰值为后者的 1/10，允通能量为 1/3 ~ 1/5。目前采用这种结构的中等限流效应的塑壳断路器已大量生产，额定