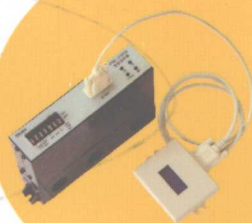


用户侧电气设备 电子保护技术

叶芃生 凌志斌 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM07/11

2008

用户侧电气设备 电子保护技术

叶芑生 凌志斌 编著



中国电力出版社

www.cespp.com.cn

内 容 提 要

因为供电质量影响、使用条件恶劣以及使用方法不当,常常造成各种电气设备损坏并引发各种安全事故,甚至造成人身伤亡,带来巨大的经济损失。本书系统介绍了用户侧各种电气设备通过电子技术手段的保护问题,包括:电气设备的过负荷故障及其保护、短路故障及其保护、断相故障及其保护、漏电保护及电子保护装置的可靠性设计。

书中既有电子保护装置电路的分析,又详细讲述了装置的设计方法,适合广大非电力系统自动化专业的学生及从事用户侧电气设备运行、维修的工程技术人员阅读,希望能对他们掌握电气设备电子保护装置的工作原理及电路分析方法提供有益的帮助。

图书在版编目 (CIP) 数据

用户侧电气设备电子保护技术/叶芃生,凌志斌编著.
北京:中国电力出版社,2008
ISBN 978-7-5083-6709-5

I. 用… II. ①叶…②凌… III. 电气保护 IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 012173 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 10.625 印张 289 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

电气设备是指以电能为动力的各种用电装置，大至电力系统的各种输配电装置以及工农业各部门使用的电动机、电力电子装置等，小至工厂、农村、商店、机关、学校、部队、科研部门乃至家庭广泛使用的各种电器、计算机及仪器。电气设备与工农业生产及人们的日常生活关系密切。

粗略划分，从发电厂发出的电能，经电力系统的输配电网供应各种用户，然后通过用户变电站（主要为 10kV）降至低压电压等级（380V、660V 及 1140V）供应一个单位各部门的各种电气设备。如图 1 所示，虚线左侧一般由电力部门工程技术人员管理，而虚线右侧由各用户的工程技术人员管理。

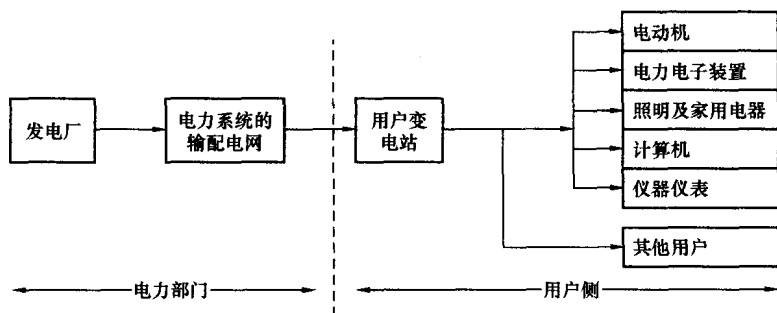


图 1 供电网络

目前论述与电力系统直接相关的电气设备有关保护问题的书籍较多，但系统介绍与用户侧各种电气设备有关保护问题的书籍却较少。而大量分散在各单位的电气工程技术人员许多人又非毕业于电力系统自动化专业，缺乏有关电力系统深入、全面的专业知识。因此作者希望能编写一本《用户侧电气设备的电子保护技术》的书籍，以便为广

大非电力系统自动化专业的学生及从事用户侧电气设备运行、维修的工程技术人员掌握电气设备电子保护装置的工作原理及设计方法提供有益的帮助。限于作者的水平，书中不妥之处在所难免，望大家批评指正。

因受供电质量的影响或因使用条件（工况）的恶劣以及因使用方法的不当，常造成各种电气设备的损坏并引发各种安全事故乃至造成人身伤亡，带来巨大的经济损失。

例如，在我国 20 世纪 80 年代根据对北京、阳泉、西山、徐州、淮南五大矿务局的不完全统计，由于煤矿井下条件恶劣，加上电气设备保护手段落后，曾使煤矿电动机平均损坏率高达 0.73 台/万吨煤，约合 17.3kW/万吨煤。

又如，随着用电量的逐步增加，因电气设备事故引发的电气火灾的数量也逐步增加。表 1 为北京地区火灾统计表。据统计，在全国范围，1980 年电气火灾数占火灾总数的 7.29%，1987 年上升到 17.54%。目前平均消耗 0.5 亿 kWh 电能就要发生一次电气火灾。

表 1 北京地区火灾统计表

年 份	1952 年	1975 年	1985 年
年用电总量	2.04 亿 kWh	58.87 亿 kWh	110.6 亿 kWh
年火灾总数	338	875	674
年电气火灾数	10	100	107
电气火灾所占比例	2.96%	11.42%	15.58%

此外，电气设备的故障还会造成人身伤亡，如农村触电死亡人数 1985 年为 8000 人，1990 年上升到 20000 人。以下是电气设备损坏原因的部分统计数字，表 2 为我国某煤矿电动机烧损分类，表 3 为美国某电动机维修部门电动机损坏情况的分析数据，表 4 为北京地区某年电气火灾诱因分类统计数据。

表 2 我国某煤矿电动机烧损分类

分类 设备名称	烧损 台数	过 载		断 相		短 路		受 潮		其 他	
		台数	所占比例	台数	所占比例	台数	所占比例	台数	所占比例	台数	所占比例
溜子皮带电动机	772	555	72%	52	6.7%	66	8.6%	30	3.9%	69	8.9%

续表

分类 设备名称	烧 损 台 数	过 载		断 相		短 路		受 潮		其 他	
		台 数	所 占 比 例	台 数	所 占 比 例	台 数	所 占 比 例	台 数	所 占 比 例	台 数	所 占 比 例
风 扇	167	34	20.3%	66	39.5%	38	22.8%	10	6%	20	12%
调度绞车	25	8	31.6%	0	0	0	0	0	0	17	68.4%
回柱绞车	36	30	83.8%	0	0	4	11.2%	0	0	2	5.5%
小水泵	55	16	29.4%	0	0	31	55.9%	6	11.8%	2	3.6%
其他电动机	83	40	48.1%	6	7.4%	2	2.4%	6	7.4%	29	35.4%
合 计	1138	683	60%	124	11%	143	12.6%	52	4.6%	139	12.2%

表 3 美国某电动机维修部门电动机损坏情况的分析数据

损坏原因	过载	绝缘损坏	断相	沾 污				其他	轴承损坏
				水分	油脂	化学	粉尘		
占损坏总数的比例	25%	5%	10%	17%	20%	1%	5%	5%	12%
				43%					

表 4 北京地区某年电气火灾诱因分类

电气火 灾诱因	过 载	短 路				绝缘损坏	电线击穿	其 他
		相间	相地	插座	其他			
占火灾总数的比例	11%	14%	6%	6%	10%	24%	10%	19%
		36%						

综上所述，电气设备损坏，从技术角分析，其主要原因可归结为过载故障、短路故障、断相故障、漏电故障及其他故障等。

对上述各种故障的传统保护方法是采用热继电器、感应继电器、电磁继电器及熔断器等元件，它们存在灵敏度低、整定范围小及不能满足复杂保护要求等缺点。随着科学技术的发展与人们对电气设备可靠性要求愈来愈高，使对电气设备保护逐步发展到以电子技术为基础，结合微处理器技术、自动控制技术综合运用的新阶段，并有取代传统保护手段的趋势。

目 录

前言

第一章 电气设备的过负荷故障及其保护	1
第一节 电气设备的过负荷特性	1
第二节 电气设备过负荷保护的主要方法	9
第三节 电气设备温度采样过负荷保护装置的设计	12
第四节 铁心电流变换器	21
第五节 电流互感器的主要参数及保护用电流互感器	26
第六节 电子保护器用低功率铁心电流 互感器的设计	31
第七节 铁心电流互感器对暂态电流的传变	37
第八节 空心电流变换器	41
第九节 霍尔元件电流变换器	45
第十节 信号整定电路	50
第十一节 电气设备过载热特性的模拟电路模拟	57
第十二节 电平检测电路	66
第十三节 电气设备过载热特性的数字电路模拟	74
第十四节 执行与接口电路	82
第二章 电气设备的短路故障及其保护	91
第一节 电气设备短路故障分类、成因及其危害	91
第二节 “无限大”容量电力系统三相短路电流分析	96
第三节 不对称短路故障短路电流的分析	101
第四节 短路电流数值的计算	111
第五节 短路保护的基本要求与基本方法	118

第六节	三段式过电流保护的实施·····	126
第七节	双侧电源网络方向过电流保护电路·····	129
第八节	电力变压器内部短路故障的纵差动保护·····	135
第九节	电力半导体装置的短路保护电路·····	140
第三章	电气设备的断相故障及其保护 ·····	161
第一节	断相故障的一般分析·····	161
第二节	断相保护的设置原则·····	168
第三节	与逻辑断相保护电子电路的设计·····	171
第四节	负序滤过器断相保护电子电路的设计·····	176
第五节	谐波分析法断相保护电子电路的设计·····	184
第六节	差值不平衡断相保护电路·····	190
第四章	电气设备的漏电保护 ·····	193
第一节	漏电保护的基本概念·····	193
第二节	接地和接零·····	198
第三节	中性点直接接地供电系统的漏电保护·····	206
第四节	中性点不接地供电系统漏电分析·····	217
第五节	中性点不接地供电系统漏电保护的基本方法·····	222
第六节	中性点不接地供电系统的选择性漏电保护·····	231
第五章	基于微处理器的智能化电子保护装置 ·····	236
第一节	基于微处理器的智能化电子保护装置 特点与构成·····	236
第二节	信号调理电路·····	241
第三节	微处理器的选取·····	248
第四节	外围电路·····	253
第五节	通信接口·····	271
第六节	基于微处理器的智能化电子保护装置 实用电路·····	279

第六章 电子保护装置的可靠性设计	291
第一节 电磁兼容设计	291
第二节 降额设计	307
第三节 热设计和散热措施	314
第四节 其他可靠性设计方法	320
参考文献	328

第一章

电气设备的过负荷故障及其保护

第一节 电气设备的过负荷特性

为了设计出优良的过负荷装置,首先必须研究各种电气设备的过负荷特性。

如图 1-1 所示,设电气设备 E 运行于周围介质温度 t_0 的工作环境,当电气设备流过电流 I 时,如其等效发热电阻为 R_e ,则该电气设备在单位时间所产生的热量 Q_1 应为

$$Q_1 = I^2 R_e \quad (1-1)$$

设备产生的热量将使其温度升高,如用 t 表示电气设备的平均温度,由于 $t > t_0$,则电气设备在单位时间向周围环境散发的热量 Q_2 可表示为

$$Q_2 = A(t - t_0) = A\tau \quad (1-2)$$

$$\tau = t - t_0$$

式中: τ 为电气设备的温升, K; A 为电气设备的散热系数, $W/^\circ C$ 。其倒数又称电气设备与周围环境间的等效热阻 R_T , 为

$$A = 1/R_T \quad (1-3)$$

设电气设备等效的热容量为 C

$$C = C_V \cdot M \quad (1-4)$$

式中: C 为热容量, $J/^\circ C$; C_V 为其等效比热; M 为其等效质量,则电气设备在通电运行而未达到稳定温升时,其热平衡方程为

$$Q_1 - Q_2 = C \frac{d\tau(I, t)}{dt} \quad (1-5)$$

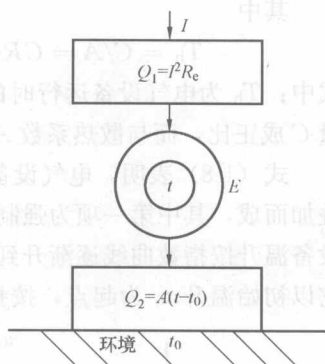


图 1-1 电气设备升温示意图

以 $\tau_{\infty}(I)$ 表示电气设备的稳态温升, 此时 $d\tau/dt=0$, 故有关系

$$\tau_{\infty}(I) = Q_1/A = Q_1 R_T = I^2 R_e R_T \quad (1-6)$$

上式表明, 电气设备的最终温升与电气设备的热损耗 Q_1 成正比, 而与散热系数 A 成反比。当电气设备的热损耗一定时, 用降低与环境间的热阻就可以降低电气设备的最终温升。各种电动机在运行时加强通风, 各种电力半导体器件用散热器加风冷或水冷都可以降低其最终的温升值。

将式 (1-6) 代入式 (1-5), 可将电气设备通电流后的热平衡方程改写为

$$\tau(I, t) + C/A \frac{d\tau(I, t)}{dt} = \tau_{\infty}(I) \quad (1-7)$$

设电气设备在 $t=0$ 的初始温升为 τ_0 , 当通工作电流 I 后, 其温升变化应满足以下关系

$$\tau(I, t) = \tau_{\infty}(I)(1 - e^{-t/T_h}) + \tau_0 e^{-t/T_h} \quad (1-8)$$

其中

$$T_h = C/A = CR_T \quad [T_h] = J/^{\circ}C/W/^{\circ}C = s \quad (1-9)$$

式中: T_h 为电气设备运行时的发热时间常数, 它与电气设备的热容量 C 成正比, 而与散热系数 A 成反比。

式 (1-8) 表明, 电气设备通电发热时其温升曲线由二部分线性叠加而成, 其中第一项为强制分量, 它是在电流 I 的激励下, 使电气设备温升按指数曲线逐渐升到稳态值 $\tau_{\infty}(I)$; 而第二项为自由分量, 它以初始温升 τ_0 为起点, 按指数曲线衰减到零, 电气设备发热温升

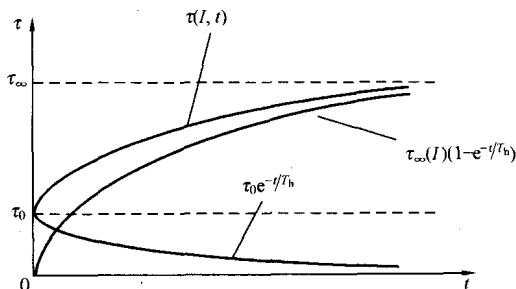


图 1-2 电气设备发热温升曲线

曲线如图 1-2 所示。

在式 (1-8) 中, 如将 τ_0 理解为一台运转中的电气设备于某一瞬间突然停止运转时的实际温升值, 因已停止通电, 故激励项为零, 则我们可将式 (1-8) 改写成电气设备停止通电后温升的冷却曲线

$$\tau(t) = \tau_0 e^{-t/T_c} \quad (1-10)$$

$$T_c = C/A' \geq T_h \quad (1-11)$$

特别应指出, 电气设备停止运转后的散热系数 A' 一般小于或等于运转时的散热系数 (如电动机停止运转后风叶也停止旋转), 故冷却时间常数 T_c 也可能大于或等于发热时间常数 T_h , 这表明在冷却时电气设备的温升下降得更加缓慢。电气设备温升的冷却曲线如图 1-3 所示。

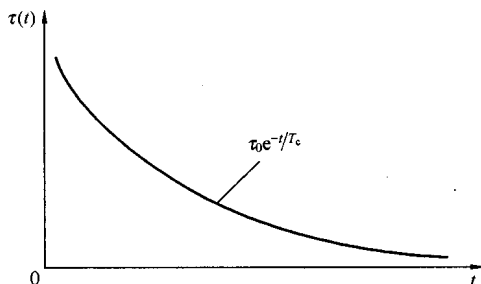


图 1-3 电气设备温升的冷却曲线

从式 (1-8) 出发可进而导得电气设备在过负荷运行时允许的过负荷运行时间。

用 τ_n 表示某电气设备通过额定工作电流 I_n 时的稳态温升值, 用 τ_m 表示该电气设备允许的极限温升, 它依赖于电气设备本身的固有性质, 如电动机依赖于所采用绝缘材料的等级, 电力半导体器件依赖于构成 P-N 结的半导体材料性质。

进而定义电气设备的允许过温升倍数为

$$\alpha = \tau_m / \tau_n \quad (1-12)$$

电气设备运行时的过负荷倍数为

$$\beta = I / I_n \quad (1-13)$$

电气设备的初始温升系数 γ 为

$$\gamma = \tau_0 / \tau_n \quad (1-14)$$

则从式 (1-8) 可导得一台允许极限温升为 τ_m , 初始温升为 τ_0 的电气设备, 从 $t=0$ 开始通过工作电流 I 时, 其允许的过负荷时间 t_a 为

$$t_a = T_h \ln \left(\frac{\beta^2 - \gamma}{\beta^2 - \alpha} \right) \quad (1-15)$$

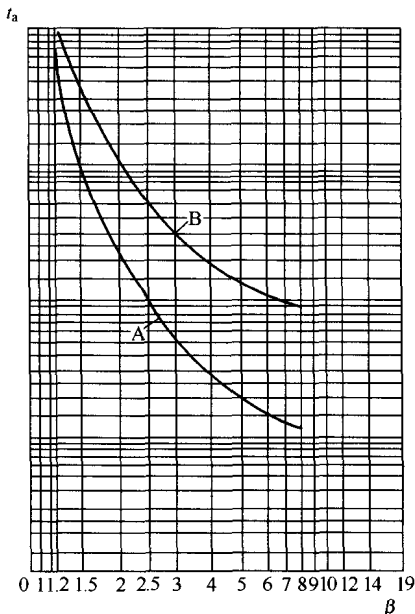


图 1-4 电气设备允许的
过负荷运行时间

A—热态允许过负荷时间;

B—冷态允许过负荷时间

许过负荷时间作一具体讨论。

一、中小电动机允许过负荷运行时间

根据国家有关标准规定, 由于选用绝缘材料等级不同, 在标准环境温度 (40°C), 电动机不同绝缘材料等级允许温升 τ_m (测量绕组的电阻值法) 见表 1-1。

特别在 $\gamma=0$ 时, 表明电气设备从冷态开始通电运行, 这时的 t_a 又习惯称为冷态允许过负荷时间 t_{ac} , 为

$$t_{ac} = T_h \ln \left(\frac{\beta^2}{\beta^2 - \alpha} \right) \quad (1-16)$$

在 $\gamma=1$ 时, 表明电气设备原先处于额定工作状态, 然后从某时刻开始过负荷运行, 使温升从 τ_n 逐步上升, 这时的 t_a 又习惯称为热态允许过负荷时间 t_{ah} , 为

$$t_{ah} = T_h \ln \left(\frac{\beta^2 - 1}{\beta^2 - \alpha} \right) \quad (1-17)$$

显然, $t_{ah} < t_{ac}$, 电气设备允许的过负荷运行时间如图 1-4 所示。

以下将以几种典型负荷对允

表 1-1 电动机不同绝缘材料等级允许温升

绝缘材料等级	A	E	B	F	H
允许温升/K	65	80	90	115	140

电动机的额定温升 τ_n 与发热时间常数 T_h 可通过手册或由实验得到。图 1-5 是在现场条件下对 JBJ-62-4 (14kW、E 级绝缘) 的防爆风扇电动机在额定负载下长期工作以及停转后用电阻法测得的温度曲线 (环境温度为 30°C)，由曲线可求得 $T_h = 25\text{min}$ ， $T_c = 80\text{min}$ ， $\tau_n = 58^\circ\text{C}$ 。于是，根据式 (1-15) 可求得允许过负荷时间的理论预期值，中小电动机允许过负荷运行时间见表 1-2。

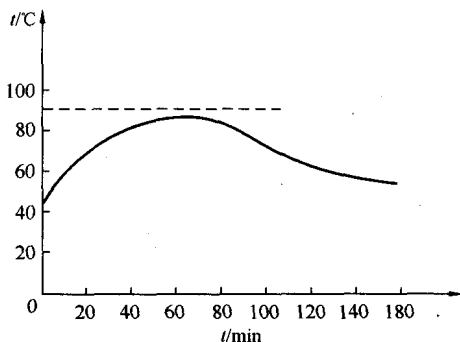


图 1-5 用电阻法测得的温度曲线

表 1-2 中小电动机允许过负荷运行时间

允许过负荷运行时间	$t_{ah}^{1.2}$	$t_{ah}^{1.5}$	t_{ac}^6
理论计算值	15min	4min20s	49s

电动机过负荷运行允许的过负荷时间一直是国内外学者关注的问题。

我国原在热继电器标准中规定，热态 120% 过负荷运行允许的时间 $t_{ah}^{1.2} < 20\text{min}$ ，热态 150% 过负荷运行的时间 $t_{ah}^{1.5} < 3\text{min}$ ，而用冷态 6 倍电流的允许时间 t_{ac}^6 来描绘电动机起动可返回时间并将 t_{ac}^6 分为 t_{ac}^6

$\geq 1s$ (电动机额定电流 $I_n \leq 50A$)、3s、5s、8s、15s。

国际电工委员会 IEC 与德国 VDE 标准则规定：105% 负荷时 2h 不动作； $t_{ah}^{1.2} < 2h$ ； $t_{ah}^{1.5} < 2min$ ； t_{ac}^6 对轻载大于 2s，对重载大于 5s。

美国全国电气制造商协会对电动机过载与失速（堵转或刚起动）规定，对小于 500HP (368kW)、电压等级小于 1kV 的多相电动机在正常工作温度初次起动而经 1.5 倍额定电流的过负荷运行，其允许时间不小于 2min，而承受锁定转子电流的失速时间不小于 12s。

考虑到 Y 形笼型电动机起动电流可为额定电流 I_n 的 5、5.5、6、6.5、6.8、7 六种情况，故在我国新颁布的等效于 IEC 947—4 的国家标准 GB 14048.4—《低压开关设备和控制设备 低压机电接触器和电动机起动器》中规定：

$I = 1.0 I_n$ ， $t_{ah}^{1.0} > 2h$ ； $I = 1.2 I_n$ ， $t_{ah}^{1.2} \leq 2h$ ； $I = 1.5 I_n$ ， $t_{ah}^{1.5} \leq 2、4、8、12min$ ；

$I = 7.2 I_n$ ， $2s < t_{ac}^{7.2} \leq 10s$ ； $4s < t_{ac}^{7.2} \leq 10s$ ； $6s < t_{ac}^{7.2} \leq 20s$ ； $9s < t_{ac}^{7.2} \leq 30s$

二、输电线路允许的过负荷运行时间

输电线路的过负荷运行将使输电线路的温度升高。

一般硬铜线允许的极限温度为 $106^{\circ}C$ ，钢芯铝线为 $120^{\circ}C$ 。可以对每一种截面的导线作出过负荷的温升曲线。图 1-6 即为一种钢芯铝线过负荷温升曲线实验结果。根据温升曲线可粗略计算出输电导线的发热时间常数 T_h ，并由过温升倍数 α ，由式 (1-15) 求得不同负荷时

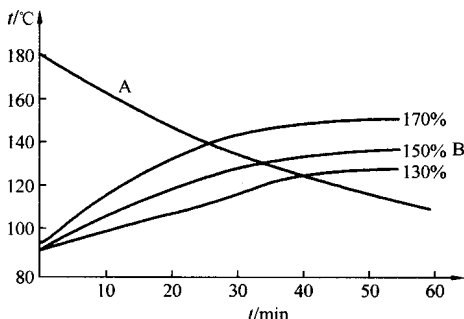


图 1-6 钢芯铝线过负荷温升曲线

的允许过载时间。

表 1-3 给出对给定一组参数 $T_h=18\text{min}$ 、 $\alpha=1.4$ 时的计算值及现有实验资料给出的对应限值。

对线路的过负荷保护主要由断路器实现。

对配电型断路器其保护特性还兼顾配电变压器的过负荷特性，一般规定见表 1-4。其中返回特性是考虑到供电线路可能带几台电动机，由于各台电动机不会同时起动，故返回特性取 $3.0I_n$ 值。

对输电线路末端通常用家用和类似场所用断路器实现对输电线路的过负荷保护，其保护特性见表 1-5。

在表 1-5 中考虑到供电末端电压的下差为 7%，而对应的电流可达 $1.025I_n$ ；再加上正常电压的 +5% 波动，可使电流达 $1.125I_n$ ，因此不脱扣电流约定 $1.13I_n$ 。

表 1-3 输电线路允许的过负荷运行时间

允许过负荷运行时间	$t_{ac}^{1.2}$	$t_{ac}^{1.45}$
理论计算值 ($T_h=18\text{min}$, $\alpha=1.4$)	64.5min	21min
导线截面大于 240mm^2 实验限值	60min	30min
导线截面 50mm^2 及以下实验限值	长期	$<60\text{min}$ ($I_n\leq 63\text{A}$) $<120\text{min}$ ($I_n>63\text{A}$)

表 1-4 配电型断路器的保护特性

类 别	$I_n\leq 63\text{A}$	$I_n>63\text{A}$
约定不脱扣电流 $I=1.05I_n$	$\geq 1\text{h}$	$\geq 2\text{h}$
约定脱扣电流 $I=1.30I_n$	$< 1\text{h}$	$< 2\text{h}$
返回特性 $I=3.0I_n$	5s、8s、12s	

表 1-5

家用和类似场所用断路器的保护特性

类 别	$I_n \leq 32A$	$I_n > 32A$
约定不脱扣电流 $I = 1.13I_n$	长 期	长 期
约定脱扣电流 $I = 1.45I_n$	$< 1h$	$< 2h$
$I = 2.55I_n$	$60s > t_p > 1s$	$120s > t_p > 1s$
B 型	$I < 3I_n, \geq 0.1s$ 不动作; $I > 5I_n, < 0.1s$ 动作	
C 型	$I < 5I_n, \geq 0.1s$ 不动作; $I > 10I_n, < 0.1s$ 动作	
D 型	$I < 10I_n, \geq 0.1s$ 不动作; $I > 50I_n, < 0.1s$ 动作	

三、功率半导体器件允许过负荷运行时间

功率半导体器件主要由 P-N 结组成, 器件承受的最大结温因材料而异。对于锗半导体器件一般为 $80 \sim 100^\circ\text{C}$, 硅半导体器件一般为 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 。我国半导体器件厂目前规定为: 锗管最大允许结温 $t_{jm} = 90^\circ\text{C}$, 硅管最大允许结温 $t_{jm} = 175^\circ\text{C}$ 。

P-N 结的等效质量 M 一般很少, 故其发热时间常数 $T_h = C_v M / A$ 也很少, 因此其允许过负荷运行的时间也较短。以晶闸管为例, 设极限结温为 175°C , 额定结温为 128°C , 环境温度为 40°C , 发热时间常数 T_h 取 $60s$, 则可求得允许过温升倍数, 进而由式 (1-16) 可求得不同过载倍数时允许的冷态运行时间, 功率半导体器件允许过负荷运行时间见表 1-6。

表 1-6

功率半导体器件允许过负荷运行时间

允许过负荷 运行时间	$t_{ac}^{1.25}$	t_{ac}^2	t_{ac}^5
计算值	4min	29s	3.8s
实验值	5min	5s	20ms

从表 1-6 知, 对功率半导体器件, 根据一阶热模型计算的允许过负荷运行时间与实验给出的允许时间在高倍过载时偏离较大, 探其原因