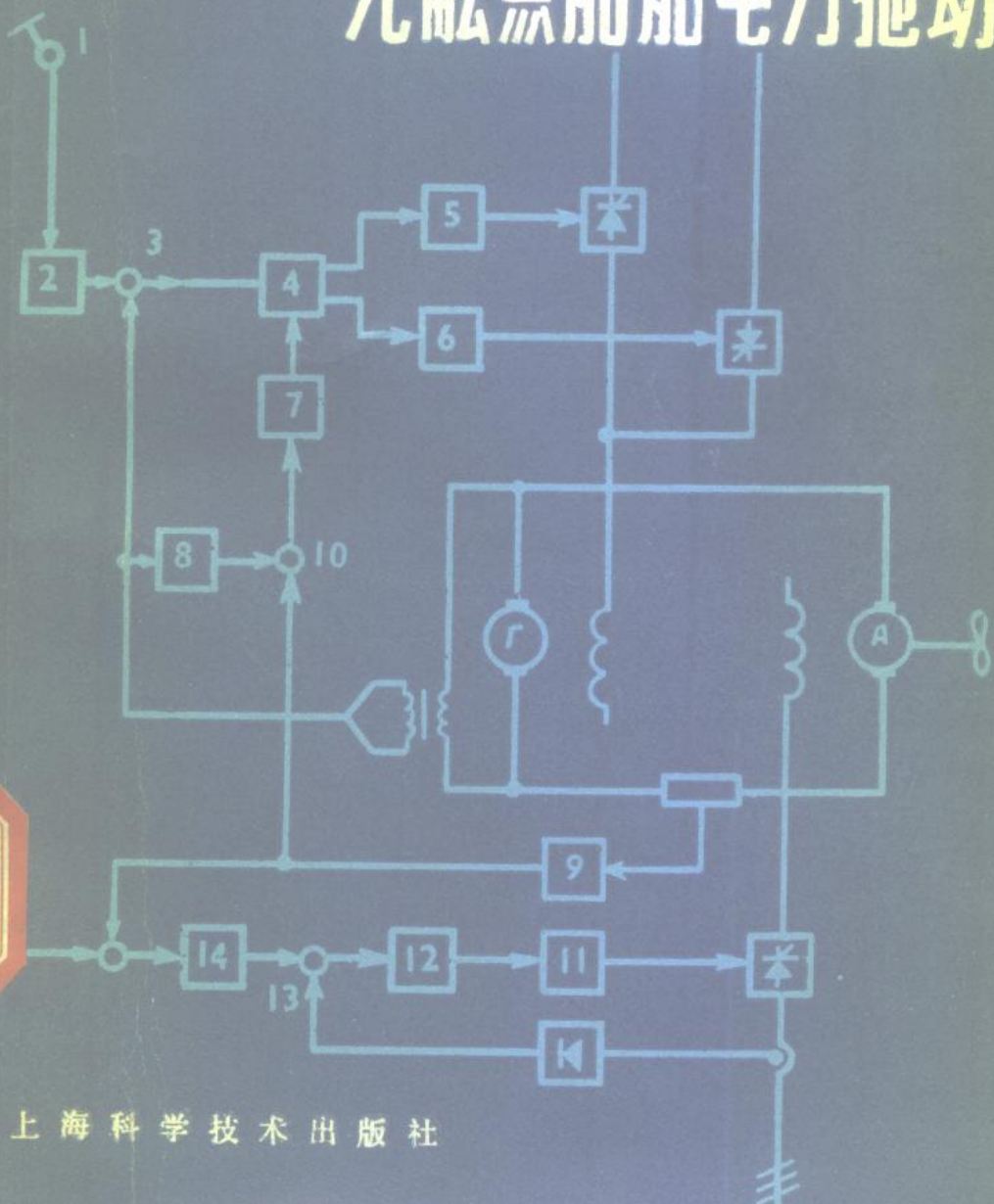


[苏] M. C. 屠加诺夫 著

无触点船舶电力拖动



上海科学技术出版社

无触点船舶电力拖动

[苏] M. C. 屠加诺夫 著

许百春 吴斐文 钱新之 刘曰琳
李永昌 胡铁栋 陈姚玉 杨燮庆 译

上海科学技术出版社

0477/03
内 容 简 介

本书阐述了无触点控制的船舶电力拖动理论的基本问题,大功率半导体元件的作用原理和基本特性,电动机主电路和励磁电路的无触点控制方法和线路。并对无触点控制系统中直流和交流电动机的机械特性和工作特点作了分析和研究。最后对不同用途的各种船舶上采用无触点电力拖动的可能性作了探讨。

本书可供有关造船、电子专业的科研、设计、工程技术人员以及大专院校师生参考。

БЕСКОНТАКТНЫЙ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

М. С. Туганов

Издательство «Судостроение» Ленинград 1972.

无触点船舶电力拖动

〔苏〕M. C. 屠加诺夫 著

许百春 吴斐文 钱新之 刘曰琳

李永昌 胡铁栋 陈桃玉 杨燮庆

译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本850×1156 1/32 印张11.125 字数295,000

1980年11月第1版 1980年11月第1次印刷

印数1-1,500

书号: 15119·2069 定价: (科四) 1.25 元

译 者 序

本书是一本论述无触点电力拖动主要理论问题的书籍。从电机和电力拖动专业角度出发,对无触点控制问题进行分析,意图使无触点控制元件、控制方法和控制系统更加系统化,以阐明无触点船舶电力拖动的理论问题。相比一些内容分散的著作,或者仅从半导体元件或变流器的角度讨论问题;或者仅讨论电力拖动的某些控制方法和系统来说,本书无疑是有一定的特点的。本书的任务是指出通向电力拖动新领域的一般途径,向读者介绍建立无触点电力拖动系统的基本原理,弄清各元件的工作特点,使读者在研究和评价他们在实践中所遇到的各种系统时,得以借鉴和参考。

我国船舶电力拖动技术的发展,在强电技术中,已有舵机、起重機、挖掘机、泥浆泵、电力推进、绞车、照明逆变器、充电装置等各种船舶设备,采用了无触点控制。为了促进我国船舶电力拖动更广泛地采用半导体技术,进一步研究无触点控制的各种问题并总结经验,特翻译出版本书。

由于采用半导体控制的电力拖动属于正在不断发展的技术领域,还没有或缺乏长期的严峻的使用考验,所以本书中提出的一系列新论点以及某些术语和叙述方法,读者应当批判地吸收。

本书第一章由许百春翻译,第二章 § 2.1~2.6 由钱新之翻译,第二章 § 2.7~2.12 由陈姚玉翻译,第三、四、五、六、七章分别由吴斐文、刘曰琳、李永昌、胡铁栋、杨燮庆翻译。全书由许百春、吴斐文校对。由于译者水平有限,谬误之处难免,请广大读者批评指正。

目 录

译者序

第1章 船舶电力拖动半导体控制元件的特性和工作状况	1
§ 1.1 船舶电力拖动控制元件的工作条件和发展远景	1
§ 1.2 不可控整流器	2
§ 1.3 可控雪崩式半导体器件	8
§ 1.4 开关二极管	11
§ 1.5 可控硅	16
§ 1.6 可控硅的控制线路	27
§ 1.7 可控开关器件的主要派生元件	34
§ 1.8 半导体器件的工作可靠性、故障和保护	41
第2章 无触点开关	47
§ 2.1 无触点开关的用途和工作特性	47
§ 2.2 异步电动机在正常接线中的机械特性	49
§ 2.3 鼠笼型异步电动机接通时电磁过渡过程对转矩和电流 的影响	58
§ 2.4 用饱和电抗器的异步电动机的起动和转换	66
§ 2.5 相位控制的单个可控硅	70
§ 2.6 对称可控硅元件	75
§ 2.7 可控硅起动器的主电路	78
§ 2.8 异步电动机在非正弦电压下的工作	82
§ 2.9 直接起动的可控硅起动器	91
§ 2.10 可控起动的可控硅起动器	96
§ 2.11 自动可控硅起动器转换开关	102
§ 2.12 可控起动和制动过程的动力学	106
第3章 带可控硅开关的电力拖动不对称和不正常工作状 态	110
§ 3.1 异步电力拖动的不对称事故状态	110

§ 3.2	电源电压降低时可控硅开关的工作特点	122
§ 3.3	能耗制动的不对称状态	131
§ 3.4	双电流制动	140
第 4 章	直流整流式电力拖动	147
§ 4.1	整流式电力拖动的基本型式	147
§ 4.2	可控整流变换器的工作状态	151
§ 4.3	可控整流变换器-电动机系统电动机的速度和机械特性	157
§ 4.4	无再生能量的单套可控整流变换器-电动机系统	167
§ 4.5	在交流电网中具有再生能量的单套可控整流变换器-电动机系统	174
§ 4.6	双套可控整流变换器-电动机系统	182
§ 4.7	电力拖动的动力学指标与转速调节方式的关系	191
第 5 章	用脉冲控制的直流电力拖动	199
§ 5.1	直流电动机脉冲调速原理	199
§ 5.2	用脉冲控制的电动机的机械特性	203
§ 5.3	用完全可控整流器的宽度-脉冲调节线路	213
§ 5.4	可控硅宽度-脉冲变换器的换流装置	220
§ 5.5	可控硅脉冲变换器的线路	228
§ 5.6	多相脉冲系统	235
第 6 章	异步电力拖动的频率控制	239
§ 6.1	展望频率控制的应用	239
§ 6.2	频率控制的异步电动机机械特性	240
§ 6.3	频率起动	250
§ 6.4	频率制动	258
§ 6.5	作为异步电动机电源的独立逆变器	261
§ 6.6	带有直流环节的静止频率变换器	269
§ 6.7	电路直接联结的频率变换器	272
§ 6.8	静止变频器的参数对异步电动机特性的影响	280
§ 6.9	频率控制电力拖动系统的设计原则	286
§ 6.10	用于频率控制的异步电动机	290
第 7 章	无触点电力拖动在船舶上的应用	299

§ 7.1	船舶电力拖动的选择条件	299
§ 7.2	泵和通风机的电力拖动	304
§ 7.3	起重和锚缆机械的电力拖动	306
§ 7.4	直流电力推进装置	315
§ 7.5	交直流电力推进装置	325
§ 7.6	交流电力推进装置	333
§ 7.7	具有独立直流电源的电力推进装置	342
参考文献		344

第1章 船舶电力拖动半导体控制 元件的特性和工作状况

§1.1 船舶电力拖动控制元件的工作条件和发展远景

在船舶电力拖动控制系统中,通常采用下列电器、元件和成套装置:

1. 起动变阻器、调节变阻器、起动调节变阻器和动力控制器;
2. 接触器、继电器、磁力起动器和控制器;
3. 磁性元件、半导体元件、变换器和控制装置。

随着一般工业用的电力拖动和船舶电力拖动的发展,出现了更完善的元件和控制系统。早期仅采用手动控制的电器和装置,后来由于控制系统的工作范围扩大了,对其工作的准确性、快速性和可靠性的要求也高了,因而系统本身也采用了比较复杂的元件。

对目前设计的和营运中的船舶,最广泛采用的是第二和第三组元件和电器,实行各种形式的组合。

船舶电气设备的使用经验表明,绝大多数的故障都是与继电器-接触器控制设备和成套装置不够完善有关的。

接触器、继电器、动力控制器、主令电器和机械制动器的工作故障和损坏,可以分为机械和电气两类。

属于机械故障的有:电器和装置活动零件歪斜、卡住和变形;行程开关的凸轮轴、按钮元件、杠杆和按钮的定位被破坏,断开弹簧和接触弹簧压力改变。机械原来的状态被破坏之后,即使不直接引起电器或装置的故障,但久而久之,也将成为造成电气故障的原因。

属于电气故障和损坏的主要有:动力电路、励磁电路、起动绕

组、接触器、继电器和电磁制动器的线圈断路,以及绝缘电阻下降、保险装置短路、烧断和上述电路中触点连接损坏。极大部分故障均与触点工作不正常有关(触点熔接、烧坏、腐蚀、氧化、变形和压力不够等)。

通常在造船厂交船之后,成套装置均能满足相应的标准,但在营运期间,由于自然磨损、周围介质的影响、船的振动、元件失调和出现各种故障,电器及其零件就需要更换。这将给维修带来困难,因而需要增加船员人数,并将缩短电气设备正常工作时间和寿命。所以在进一步发展船舶电气设备电工技术,包括船舶电力拖动中,必须应用动力无触点磁性元件和半导体元件。

无触点磁性元件(磁放大器和饱和电抗器)工作可靠,维护简便,但由于其动态特性比较低,所以在快速的控制系统中不能采用。此外,电动机达到一定功率后,动力磁性元件的外形尺寸和重量就会大大增加。

半导体元件具有不少特点:耐振性高,耐冲性强,寿命长,结构紧凑,无噪声和实际上无惯性等。如果不久之前磁性元件,尤其是半导体元件还只用于弱电流电路,即控制和自动装置系统,至多用于励磁电路的话,那末现在已创造了可以直接接入电动机主电路的大功率磁性和半导体元件,这就是现代控制技术的一大成就。

§ 1.2 不可控整流器

整流二极管或不可控整流器,是用于使电源电压由交流变为直流。锗、硅或其它材料中的电子空穴 $p-n$ 是这种整流器的基础。硅整流器由于有一系列的优点,在动力半导体技术中得到了最广泛的应用。与锗相比,硅的 $p-n$ 结可有较高的允许反向电压,较大的允许结温(硅 $140\sim 200^{\circ}\text{C}$,而锗为 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$)和过载的敏感性较低。硅的 $p-n$ 结的允许电流密度比锗大得多,所以硅整流器的体积和重量比锗小。

硅整流器的缺点是电阻率和正向电压降比锗大,而由于这样,其反向漏电流比锗整流器小。尽管硅整流器的正向损失比较大,

但其效率仍然比锗高，因为反向电压较高时，硅整流器的整流功率却大得多。例如 BK1-200 型硅整流器（电压 200 伏），用于功率 40 千瓦的负荷整流，其损耗仅为 200 瓦，即相当于效率为 99.5%。

整流元件以具有导电性能的超纯单晶硅薄片为基础（图 1.1）。

采用扩散法制造 $p-n$ 结时，硅薄片要作热处理，使受主杂质（铝或硼）在硅内扩散。此时，便形成一层具有空穴导电性能的硅薄片 p 。

整流元件用镀镍的钨片作电极，钨片用锡焊在硅片的两面。由于温度线性膨胀系数硅和钨很接近，所以在整流元件温度变化时，可使结保持不变。钨片的镍镀层会使硅和电极间的接触电阻减小。为了提高 $p-n$ 结的电介强度，硅片圆周作成斜角形，以减小整流元件侧面的场强切向分量。硅的整个外表面均涂保护珐琅。

整流器的伏安特性 整流器的性能及其在电路中的使用特点，首先取决于它的伏安特性曲线的形状。

例如在整流式直流电力拖动中，特别是在小负荷范围内，逆变器的外特性和工作状态，决定于伏安特性曲线。

不可控整流器（图 1.2）和其它半导体器件的伏安特性曲线的正向部分，表示整流器的电压降 ΔU_{np} 与正向电流值的关系。

在一般情况下，假使 $p-n$ 结的温度不变，则不可控整流器的伏安特性的正向部分可用下列方程式表示：

$$\Delta U_{np} = a_1 \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^d + b_1 \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^c \quad (1.1)$$

式中： a_1 、 b_1 、 c 、 d ——与整流器的结构特点和制造工艺有关的常数；

S_B ——整流元件的面积，厘米²。

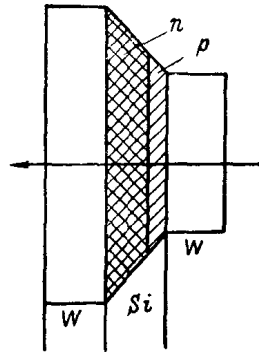


图 1.1 硅整流器的整流元件结构图

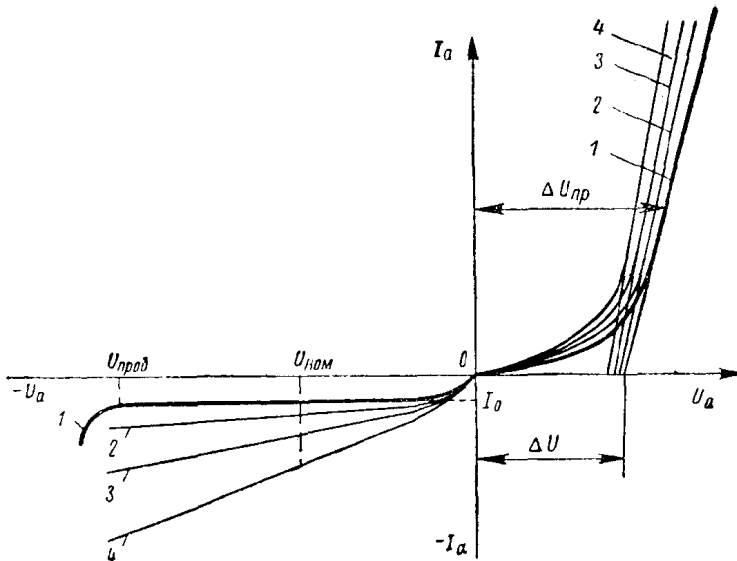


图 1.2 不可控整流器的伏安特性

对于 BK2-50 型整流器, 方程式(1.1)有如下形式:

$$\Delta U_{np} = 0.68 \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^{0.135} + 0.8 \times 10^{-4} \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^{0.918}$$

方程式(1.1)表明, 在正向区, 整流器与两个串联的电阻器等效。在这两个电阻器中, 第一个的电阻显然是非线性的, 而第二个特性则接近于线性。

在正向电流不变的情况下, 整流器上的电压降随温度的升高而减小, 其变化规律接近于线性。电压变化温度系数为负值, 在大电流范围内, 对于 BK Δ 型整流器, 此系数平均为 1 微伏/ $^{\circ}\text{C}$ 。

随着温度增高, 转折电压 ΔU_0 也按接近于线性的规律变化(温度系数约为 1 微伏/ $^{\circ}\text{C}$)。

在实际的整流器结构中, 随着电流 I_a 增大, 温度上升, 与此同时 p - n 结电阻减小, 而触点电阻增大。所以正向部分表示式就有较复杂的形式:

$$\Delta U_{np} = \frac{\left(\frac{a'_1}{\theta_n} \right) \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^{c_1 \theta_n}}{\left(\frac{I_a}{S_B} \right)^{c_2}} + b'_1 (1 + \beta' \theta_n) \left(\frac{I_a}{S_B} \right)^{d_1} \quad (1.2)$$

式中: $a'_1, b'_1, c_1, c_2, d_1, \beta'$ ——与整流器结构特点有关的常数;
 θ_{π} —— $p-n$ 结温度, $^{\circ}\text{K}$.

解析方程(1.2)和分析 BK、BKД 和 BK2 型大功率整流器的实验研究结果表明, 硅二极管的伏安特性曲线的正向部分具有几个区段. 在开始部分, 当 I_a 在 10~20 微安和 ΔU_{np} 在 0.2 伏以下时, 整流器的特性接近于线性. 当电流值达到 200~300 微安和 U_{np} 值达到 0.4 伏时, 其特性与 $p-n$ 结温度关系很大. 在该段, BKД 型整流器电压变化温度系数绝对值在 3~10 微伏/ $^{\circ}\text{C}$ 范围内变化. 电压变化温度系数绝对值随电流增大而减小, 在电流密度很大时, 在 $I_a > 5I_{\text{ном}}$ 区内, 电压变化温度系数改变符号. 这是因为在电流密度约为 10^3 安/厘米² 或更大的情况下受到比较大的触点电阻的影响. 在最有可能的负荷范围内, 当负荷电流 $I = 0.5 \sim 5I_{\text{ном}}$ 时, 伏安特性具有直线形式, 可用如下方程式确定:

$$\Delta U_{np} = \Delta U_0 + R_{\text{диф}} I_a \quad (1.3)$$

式中: $R_{\text{диф}}$ ——正向微分电阻, 其值可按额定数据确定, 即等于:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ном}} - \Delta U_0}{I_{\text{ном}}}$$

伏安特性曲线反向部分为反向电流 I_{o6p} (漏电流 I_{yT}) 与反向电压 U_{o6p} 的关系. 反向部分形状较正向部分复杂(见图 1.2), 但也可分成几个区段.

在特性曲线的开始部分, 电压增大时反向电流增加得很快. 然后出现饱和现象, 之后, 漏电流增加就不显著了. 当反向电压值很大时, 漏电流急剧增加. 在大到击穿电压 $U_{\text{проб}}$ 时, 反向电流的增加过程具有雪崩性质, 接着, $p-n$ 结被击穿.

因为正向电流和反向电压相应地比反向电流和正向电压高 n 次方, 故伏安特性的正向和反向部分采用不同的比例.

由于用解析式计算反向部分很复杂, 故在实践中, 对于特性曲线的中间部分采用近似法计算:

$$I_{o6p} = I_{yT} = I_0 + G_{\text{диф}} U_{o6p}$$

式中: I_0 ——转折电流;

$G_{\text{диф}}$ ——反向微分电导, 计算方法与计算 $R_{\text{диф}}$ 相同。

结温增高会使 p - n 结电阻降低, 造成反向电流随之显著增大。图 1.2 上的伏安特性相应于 p - n 结温为 20°C (曲线 1), 40°C (曲线 2), 60°C (曲线 3) 和 80°C (曲线 4)。由图中可看出, 在伏安特性曲线反向部分受温度影响特别明显。当温升过高时, p - n 结开始失去阻断性能。

对于有温度稳定特性的整流器^[36], 其特性曲线反向部分在 100 到 400 伏的一段上可用下式确定:

$$I_{\text{о6p}} = l_1 U_{\text{о6p}}^{0.5} e^{-\beta' / \theta_n}$$

当电压值 $U_{\text{о6p}}$ 更高时,

$$I_{\text{о5p}} = l_2 U_{\text{о6p}} e^{-\beta' / \theta_n}$$

在这些方程中: l_1 、 l_2 、 β' 为与整流器结构特点有关的常数。

整流器的主要参数 允许发热温度。整流器发热是由 p - n 结、触点电阻和电极电阻中电损耗引起。如果在 p - n 结恢复阻断能力瞬间, 在低频情况下, 非常小的开关损耗 $\Delta p_{\text{ком}}$ 忽略不计, 则总损耗 $\sum \Delta p = \Delta p_{\text{np}} + \Delta p_{\text{о6p}}$ (其中 Δp_{np} 和 $\Delta p_{\text{о6p}}$ ——正向和反向损耗)。

正向损耗取决于正向电流和正向压降, 通常占总损耗的 98~99%。

在稳定状态和过渡状态中, p - n 结的损耗功率、热阻、结温和冷却介质温度之间存在如下关系:

$$\theta_n = \sum \Delta p R_{\text{т(п-в)}} + \theta_{\text{в}} \quad (1.4)$$

$$\delta_n = \sum \Delta p R(t)_{\text{т(п-в)}} + \delta_{\text{в}} \quad (1.5)$$

式中: θ_n 、 δ_n 、 $\theta_{\text{в}}$ 和 $\delta_{\text{в}}$ ——稳定状态(θ)和过渡状态(δ)下 p - n 结温和冷却介质(通风)的温度;

$R_{\text{т(п-в)}}$ 和 $R(t)_{\text{т(п-в)}}$ ——稳定状态和过渡状态下 p - n 结和冷却介质间的总热阻。

由公式(1.4)和(1.5)可知, 允许损耗功率(也就是负荷)与总热阻、冷却介质的温度和整流元件的最大允许发热结温 θ_n 有关。整流器的热阻取决于整流器和散热器的结构特点, 冷却方法和冷却效能。整流元件的最大允许结温受其热稳定性条件的限制, 苏

联生产的硅整流器,其最大允许结温为 140°C . 而某些国外产品可达到 200°C ^[36].

为了防止由于所用材料的热膨胀系数不同而可能发生机械热应力,对整流元件温度的下限作了规定,苏联生产的整流器规定为 50°C .

允许电流和额定电流. 整流元件达到最大容许温度值时的正向电流,为整流器的允许电流. 然而,由于结温度不仅与工作状态和负荷性质有关,而且还与冷却条件、整流器的导通角、曲线形状和电流频率有关,所以仅仅根据整流器本身的参数是不可能确定电流允许值的. 因此下面采用额定电流这个比较肯定的概念.

整流器(包括其它单向导电半导体器件)的额定电流,是指在最大允许结温和额定的冷却介质温度和流动速度的条件下,通以 50 赫工频单相正弦半波电路中(导通角 180°)周期电流平均值. 额定电流值标在器件壳体上. 整流器在通以额定电流的负荷下应能保证规定的使用寿命和正常的工作能力. 冷却空气和冷却水的额定温度,一般相应地取为 40°C 和 30°C . 空气的额定流速取 $v=5\sim 12$ 米/秒. 导通角减小时,由于波形系数增大,必须减小允许电流值. 允许电流与冷却空气的温度和流速及导通角的关系,均在供应技术条件中说明.

额定电压 在击穿电压区,不可控整流器和其它半导体器件的反向部分的伏安特性曲线具有锐角拐点. 在不可控雪崩的普通器件中,只要电压稍许超过击穿电压值,就会造成 $p-n$ 结的不可逆击穿. 因此, BK、BKД 和 BK2 型硅整流器的反向额定峰值电压(以下简称额定电压)取 $U_{\text{ном}}=0.5U_{\text{проб}}$. 所有半导体器件均按 $U_{\text{ном}}$ 值分级. 分级号标在壳体上. 例如 2.5 级的整流器, $U_{\text{ном}}=250$ 伏; 而 8 级的则为 $U_{\text{ном}}=800$ 伏. 目前生产的 BKД 和 BKДБ 不可控整流器(水冷却)额定电压达到 1000 伏,即达到 10 级.

额定正向电压降是指通以单相半波(导通角 180°)周期额定电流的平均电压降.

在整流器或其他半导体器件并联时,为了电流分布均匀,额定

电压降相差应不大于标准器件平均参数的0.02~0.05伏。所以在制造厂里,半导体器件是按组配套的。对于某一组的全部器件,电压降相差不大于平均值的0.01伏。额定电压降数值也标在整流器的壳体上。型号为BKД-200-5-0.58的整流器,表示硅整流器, $I_{HOM}=200$ 安, $U_{HOM}=500$ 伏, $\Delta U_{HOM}=0.58$ 伏。

额定功率 整流器所能变换的最大功率称为额定功率。由表1.1可以看出, BK2型硅整流器的额定功率可达到几百千瓦。不久的将来,这一界限还将突破。

表 1.1 硅整流器的主要特性

整 流 器 型 号	平均整流电流 (安)			I_{HOM} 时正 向平均电 压降(伏)	I_{06p} (微安) 不大 于	热 阻 ($\frac{^{\circ}C}{瓦}$)	$U_a=1$ 伏 时反 向电 容(微 法)	允许 脉冲 (10米 秒)半 波电 流(安)	包括 冷却 器的 重量 (克) $\pm 5\%$
	有冷 却器 的自 然冷 却	有冷却器的 强制风冷或 水冷							
BK2-10	10	15/5*	20/12	0.4~0.7	2	2.5	300~1500	100	--
BK2-25	15	25/3	—	0.4~0.7	5	1.5	450~2000	250	225
BK2-50	25	50/5	100/12	0.4~0.7	10	0.5	1200~2000	1500	1280
BK2-100	30	100/10	—	0.4~0.7	10	0.35	1500~6000	2000	2200
BK2-200	50	150/5	200/12	0.4~0.7	20	0.25	1500~6000	3000	2200
BK2B-350	—	350/4	—	0.4~0.75	35	0.2	1500~6000	3000	1200

* 分母表示冷却风速(米/秒)或冷却水流量(升/分)。

在大功率硅整流器和其它半导体器件的主要指标中,还应当包括其过载特性(参见§1.8)。

§ 1.3 可控雪崩式半导体器件

半导体器件在使用过程中,若反向电压达到击穿电压值,则 $p-n$ 结会被击穿。在实际的 $p-n$ 结构中,不可能在整个结面上得到相同的体电荷区宽度。在不同的部分,尤其是在结的引出端,

由于工艺上的缺点,体电荷区边界有收缩现象^[86]。与结的其它部分相比,这些部分的场强比较高,而击穿电压比较低。所以,在发生击穿的瞬间,电流主要是流过整流元件的表面,而电流密度在伏安特性反向部分的折线的始点甚至可达到 10^6 安/厘米²。因为硅片温度急剧上升,除了表面电击穿之外,还会发生破坏结的热击穿。

为了预防发生击穿的可能性,需要有专门的过电压保护设备,在选择器件的额定电压时要考虑较大的余量。但是,不管采用哪种措施,都会增加电动机控制装置的外形尺寸和重量,使线路复杂化。所以制成可控雪崩式的 $p-n$ 结应当看作是半导体技术发展中的一大成就。由于采用了专门的工艺和构造形式,大大加宽了结引出端的体电荷界限。这样, $p-n$ 结内的击穿电压就比表面上的小了。

可控雪崩式的结是用同质性高、各部电阻率与平均值相差小、表面精加工的硅制造的。这样的结构,击穿将发生于许多部分,所以电流密度不会达到危险值。只要改变原始硅的电阻率和结元件的厚度,就能足够精确地定出开始发生雪崩过程时的电压值。可控雪崩式器件分为雪崩式整流器和稳压管。

雪崩式整流器(或称可控雪崩式整流器),其伏安特性形状与普通整流器大致相同。但由于沿结面的反向电流分布均匀,所以其能量耗散几乎与正向时相同,而比普通整流器反向时的允许能量高几个次方。

雪崩式整流器的反向耗散功率可用下式确定:

$$P_{\text{pac.о6p}} = U_{\text{о6p}} I_{\text{о6p}} \times 10^3 \text{ 千瓦}$$

式中: $U_{\text{о6p}}$ ——与雪崩开始时电压相差不大的反向电压;

$I_{\text{о6p}}$ ——取决于 $U_{\text{нпо6}}$ 值和负载电路电阻的反向电流脉冲峰值。

耗散功率允许值与反向电流脉冲宽度有关。图 1.3 所示为 BKДЛ 型雪崩式整流器的耗散功率临界值与反向电流脉冲宽度的关系曲线。此曲线是在 $\theta_n = 140^\circ\text{C}$ (即预加全负载) 和 $U_{\text{нпо6}} = 720 \sim$

770 伏条件下取得的。如在整流器冷态时施加负载,其容许耗散功率将增大 1~2 倍^[36]。

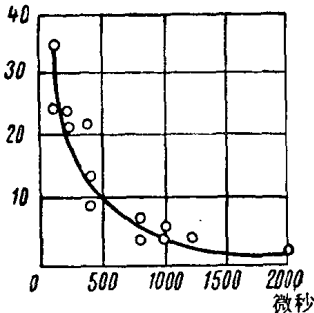


图 1.3 雪崩式整流器耗散功率与反向电流脉冲宽度的关系

БКДЛ, БКДЛБ(表 1.2)和 ПБКЛ型雪崩式整流器工业部门已试制成功,并已投入生产。表上所列主要特性是在 $U_{НОМ} = 300 \sim 1000$ 伏, $I_{обп} \leq 5$ 微安和 $t^\circ = 140^\circ\text{C}$ 得出的。

必须看到雪崩式整流器的额定电压和击穿电压相差很小 ($U_{НОМ} = 0.8 \sim 0.85 U_{проб}$)。表 1.3 所列为 3~7 级的 БКДЛ и БКДЛБ 型整流器特性的

反向部分弯曲始点的电压和额定电压峰值。

表 1.2 雪崩式硅整流器的主要特性

整流器型号	$I_{НОМ}$ (安)			正向平均电压降(伏)	直流稳压状态时损耗功率(瓦)	热阻 ($^\circ\text{C}/\text{瓦}$)
	自然冷却时	强迫风冷或水冷时				
БКДЛ-100	25	75/5	100/15	0.5~0.65	50	0.3
БКДЛ-200	50	150/5	200/15	0.5~0.65	50	0.25
БКДЛБ-350	—	350/5	—	0.5~0.7	300	0.2

- 附注: 1. 在“ $I_{НОМ}$ (安)”栏中, 分数中的分母表示冷却空气流速(米/秒)或冷却水流量(升/分);
2. 允许半波脉冲电流为 3000 安;
3. 在 $U_a = 1$ 伏时, 反向电容为 3500~5500 微微法;
4. 损耗功率是在自然冷却或水冷却(2 升/分)情况下过热温度为 100°C 时取得的。

表 1.3 雪崩式整流器的电压参数

整流器等级	$U_{НОМ}$ (伏)	伏安特性反向部分弯点电压(伏)
3.0	300	360~419
3.5	350	420~479
4.0	400	480~539
4.5	450	540~599
5.0	500	600~659
5.5	550	660~719
6.0	600	720~779
6.5	650	780~839
7.0	700	840~899

舟角