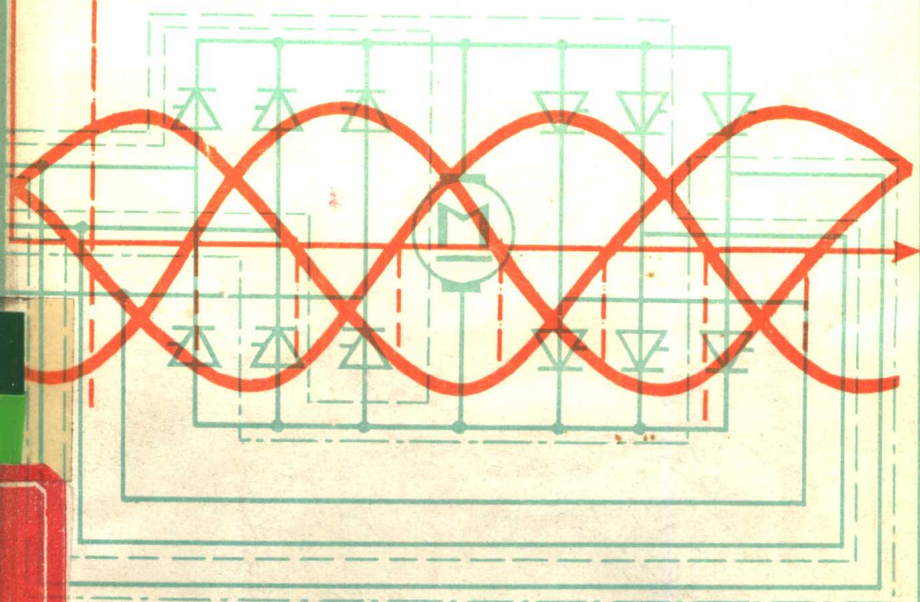


直流调速传动

整流和调节技术的实际应用

〔西德〕J. 郎霍夫 E. 拉 茨



煤炭工业出版社

直 流 调 速 传 动

整流和调节技术的实际应用

〔西德〕J.郎霍夫 E.拉茨
俞静涛译 谢寿炽校

煤 炭 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书具有手册的特点。全书介绍了整流器供电的直流调速传动, 详尽介绍了整流和调节技术的实际应用。

本书可供从事电力传动技术的工程技术人员、科研、设计人员和院校师生学习参考。

Jürgen Langhoff und Eckart Raatz
GEREGELTE GLEICHSTROMANTRIEBE
Einführung in die Praxis
der Stromrichter- und Regelungstechnik
Berlin Elitera-Verlag 1977

*

直流调速传动整流和调节技术的实际应用

俞静涛译 谢寿炽校

*

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$	印张 6 $\frac{7}{8}$
字数 149 千字	印数 1—9,000
1980年6月第1版	1980年6月第1次印刷
书号 15035·2303	定价 0.72元

前 言

作者编写本手册有两个目的：其一是作为从事电力传动技术工作的工具书；第二是便于读者重点掌握调节技术、大功率电子技术或传动技术。

书中以整流器供电的直流调速传动装置为例，说明上述专业的基本问题。本书不作广泛的数学推导，只着重于简要的说明，特别强调整流器系统和调节系统的实际应用。

各章节都围绕一个主题，只说明有关专题。这样分述的目的，是使读者能够分章阅读本手册。为了深入研究本书内容，读者需要有直流和交流电路等基础知识。

目 录

第一章 整流器	1
第一节 概述	1
第二节 整流管的特性	2
一、不可控整流管（二极管）	2
二、可控整流管（可控硅）	3
1. 可控硅的触发	4
2. 可控硅的关断	5
第三节 负载类别	5
一、纯电阻负载	5
二、纯电感负载	6
三、纯电容负载	7
四、电阻负载和电感负载组合	8
五、纯电阻负载和反电势	9
1. 正的反电势	9
2. 负的反电势	9
六、纯电感负载和反电势	10
七、半波整流器的组成	10
1. 电阻负载	10
2. 电感负载	11
第四节 基本电路	11
一、带中心抽头的全波整流电路	11
1. 中心抽头全波整流电路的直流电压波形	12
2. 电路特点	14
3. 负载类别的影响	14

二、换向	20
三、逆变器颠覆	24
四、全波桥式电路	27
1. 全波半控不对称桥式电路	29
2. 全波半控对称桥式电路	31
3. 全波、全控桥式电路	34
4. 断续直流电流的工作状态	34
5. 控制特性曲线	38
第五节 无功功率问题	39
第六节 三相桥式整流电路	46
一、三相全控桥式整流电路	50
二、触发脉冲的顺序和限位整定	51
第七节 桥式可逆整流电路	60
一、有环流的反并联电路	62
二、无环流的反并联电路	63
第八节 可控硅的触发装置	64
一、触发装置的工作原理	67
1. 同步级	68
2. 锯齿波发生器	68
3. 电压比较器	68
4. 脉冲发生器	68
5. 通道分配器	68
6. 脉冲输出器	68
二、触发装置的技术数据	69
第九节 可控硅的保护	69
一、过电压保护	69
1. 可控硅元件的阻尼电路	70
2. 变压器阻尼电路	71
3. 负载阻尼电路	71

二、过电流保护	71
第二章 直流电动机和电抗器	76
第一节 概述	76
第二节 机械结构和电气结构	76
第三节 基本方程式	78
第四节 整流器供电的直流电动机的问题	81
一、脉动的直流电流的影响	82
二、断续电流的影响	83
三、滤波电抗器的电感值	84
第三章 放大器电路	87
第一节 概述	87
第二节 基本原理	87
第四章 传动装置的最佳调节	114
第一节 定义	114
第二节 传动调节系统的说明	116
一、直流电动机 (图126)	116
二、直流电源 (整流器和触发装置)	117
三、调节器	118
第三节 方程式的化简和参数的定义	118
第四节 用测定法求参数及计算数据	122
一、电动机	122
二、整流器部分	125
1. 整流部分的放大系数 K_t	125
2. 整流器的延迟时间 T	126
三、调节器	126
第五节 用信号流图表示的调节系统	127
第六节 过渡过程、方框图及阶跃函数	129
第七节 调节系统的动态特性	133
一、稳定性的定义	134

二、被调量的控制响应	135
三、最佳扰动响应	135
四、调节误差	136
1. 可抵消的扰动量	136
2. 不能抵消的扰动量	136
第八节 关于传动装置调节系统最佳化说明	137
一、电枢电流调节系统	137
二、控制响应的设计	138
三、扰动响应的设计	139
四、调节器线路的确定	142
五、等效时间常数 T_s 的计算	143
六、后接电流调节器的转速调节器最佳化(电枢供电)	145
第五章 直流调速传动装置的特殊问题	149
第一节 概述	149
第二节 电动机磁场参数的改变	150
第三节 电枢回路参数的改变	155
第四节 自适应调节器的工作原理	160
第五节 电动机和工作机械之间弹性连接的影响	164
第六节 多个转动体传动装置的调节系统	173
第七节 联轴节间隙和齿轮间隙的影响	176
第六章 传动技术的调节方式	182
第一节 概述	182
一、单向传动装置	182
1. 动力部分	182
2. 电流调节回路	183
二、双整流器电路	
——动力装置和电流调节回路	183
第二节 单方向旋转的、后接电枢电流调节器的转速 调节系统	184

第三节	正反转传动, 有环流电路	185
第四节	无环流反并联电路	187
第五节	取决于电枢电压的磁场减弱系统	192
第六节	具有磁场反向的转速调节系统	193
第七章	传动装置调节系统最佳化的实用方法	196
第一节	整流器部件	196
第二节	电流调节回路的试运转	198
一、	预调	198
二、	电流调节系统的被调量的校准	199
三、	给定值跃变的规定	199
1.	整流器无效时间	199
2.	断续电流	200
3.	电流调节系统的线性	200
四、	电流连续时电流调节回路的最佳化	201
五、	电流断续时调节回路的最佳化	202
六、	检验整个控制区的调节动态	204
七、	电流给定值的滤波, 电流上升率限制器	205
第三节	转速调节回路的试运转	206
一、	校准转速和确定实际值的极性	206
二、	电流极限值的整定	207
三、	调节回路的最佳化 (选择给定值)	207
四、	传动装置的最佳响应	207
五、	转速调节回路的稳定性	208
六、	对振动大的机械的转速调节系统的稳定	210
七、	电流断续时的转速调节回路的稳定性	210
八、	所连接的工作机械对转速调节系统整定的影响	210
九、	对转动质量变化的转速调节系统的整定	210
	参考文献	212

第一章 整 流 器

第一节 概 述

在传动技术中，可控硅整流器作为电动机械的供电设备，已取代了过去所用的汞弧整流器。可控硅整流器，除了广泛用于直流传动装置的调速外，也用于向交流电动机供电。下面所谈，仅限于用于直流传动装置调速的整流器系统。这种系统一般接成桥式电路，并属于所谓自然换向的电网供电的整流器。下面先谈谈整流器、整流管和整流电路的定义。

人们把转换或控制电能的电气设备称为整流器。转换（例如将交流转换成直流）是由整流管实现的。整流管的特点是具有导通和关断两种状态。在理想情况下，导通电阻 $R_{\text{整流管、导通}} = 0$ ，关断电阻 $R_{\text{整流管、关断}} = \infty$ 。整流管组合成整流电路。通常由几个电路共同进行电能的转换。因此，在一段时间内，一个电路流有电流，而另一电路没有电流。

换向：

从以前有电流流通的电路（即整流管）转换到以前无电流流通的电路（即整流管）的电流过渡过程，叫做换向。在换向期间，两个电路都有电流流通。换向是在换向电压影响下，完成这一过渡过程的。如果换向电压由供电电网提供，则称为电网供电整流器（为自然换向），其换向周期与电网

频率有关。

如果整流电路采用可控整流管，则输出电压以及整流器的输出能量都可被控制。以后将详细讨论各种利用移相控制而改变输出电压的电路。

上面只从主要的定义方面，对可控硅的工作原理作了扼要说明。下面用最简单的电路，说明整流电路的各种工作方式。

在说明这个问题时，不作详尽的数学推导，因为不是非要用数学推导，才能说清楚整流电路的工作原理。有关数学、物理特性的详细说明，可参看有关文献〔1〕、〔2〕、〔3〕。

第二节 整流管的特性

要想了解整流器技术的基本电路特性，只需简单说明整流管的特性就可以了。下面以半导体整流管作为进一步探讨的基础。

一、不可控整流管（二极管）

理想的二极管是一个具有导通和阻断状态的开关（图1）。

实际上，半导体二极管的特性与理想特性曲线并不一致，只有在阳极和阴极之间加以一定的正电压情况下（约1伏），才能使二极管导通。导通后，电流随电压增加而直线上升，与纯电阻特性类似（如图1的③）。在反向阻断状态下（特性曲线①），阳极和阴极之间加以反向电压，就有一很小的阻断电流（毫安）反向流过。当加以反向击穿电压（②点）时，就会大大偏离理想反向阻断特性曲线，这时半导体整流管将失去阻断能力，并且会迅速烧毁。

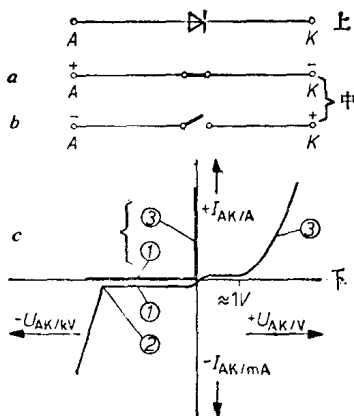


图 1 半导体二极管

上一符号图: A —阳极; K —阴极
 中—等效图: a —导通; b —阻断
 下一理想和实际二极管的特性曲线;
 c —理想二极管; I_{AK} —通过二极管的电流;
 U_{AK} —阳极和阴极之间的电压;
 ①—反向阻断特性曲线; ②—反向击穿电压;
 ③—正向导通特性曲线

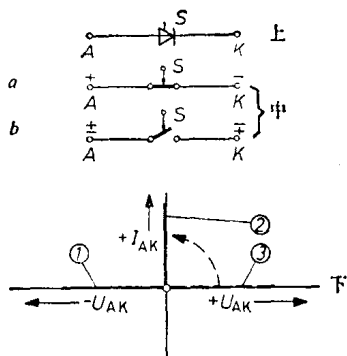


图 2 理想可控整流管

上一符号图: A —阳极; K —阴极;
 S —控制极; 中—等效图: a —导通
 (有触发脉冲); b —阻断 (无触发脉冲)
 下一工作特性曲线; I_{AK} —从阳极流向阴极的电流;
 U_{AK} —阳极和阴极之间的电压;
 ①—反向阻断特性曲线 (无触发脉冲); ②—
 导通特性曲线 (有触发脉冲); ③—
 正向阻断特性曲线 (无触发脉冲)

二、可控整流管 (可控硅)

一个理想的可控整流管有以下特点:

- 1) 只有一个导通方向, 也就是电流只能在一个方向流通。
- 2) 在阻断方向不流通电流 (与二极管同)。
- 3) 当触发脉冲未加到控制极上时, 整流管在导通方向也是阻断的 (图 2)。

可控硅与理想可控整流管不同, 它有以下特性 (图 3),

导通特性曲线:

在完全导通时, 可控硅和一般二极管特性相同。导通特性曲线相当于施加导通电压 U_T 时的二极管特性曲线的直线部分。

正向阻断特性曲线:

如果可控硅未被触发, 则既便在阳极和阴极之间施加正电压 U_{AK} , 可控硅仍是阻断的。导通点取决于触发脉冲的大小 (I_{G0} 、 I_{G1} 和 I_{G2})。当施加的正电压 $U_{AK} < U_{B0}$ 时, 只有很小的漏电流 (正向阻断电流 I_D) 流经阳极—阴极。

反向阻断特性曲线:

可控硅反向阻断特性曲线和二极管一样。

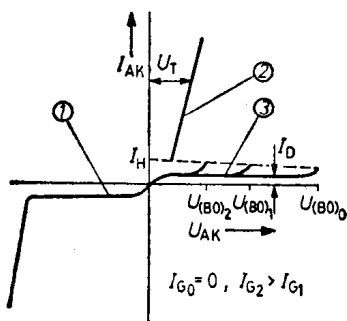


图 3 可控硅特性曲线

①—反向阻断特性曲线; ②—正向导通特性曲线; ③—正向阻断特性曲线 (以触发电流 I_G 作为参变量)

1、可控硅的触发

在控制极—阴极结流通一触发电流, 可使可控硅导通 (图 4)。

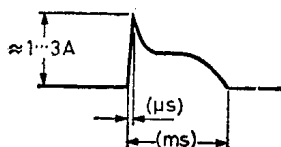


图 4 大功率可控硅的触发脉冲

为了使可控硅迅速而可靠的导通, 触发脉冲要有一个陡而高的前沿。该前沿在以后变平缓。

除利用触发脉冲进行正常工作触发外, 必须防止由于超过转折电压 (U_{B0}) 或临界的电压上升率 (dU_{AK}/dt), 而产生

意外的导通。必须满足以下正常工作触发条件:

1) 电压 U_{AK} 必须在沿导通方向为正, 即阳极电位必须高于阴极电位。

2) 触发电流必须流入控制极, 即控制极的电位相对于阴极必须是正的。

2. 可控硅的关断

一个被触发而导通的可控硅, 不会再受触发电流影响。只有在导通电流 I_{AK} (可控硅电流) 降低到低于维持电流 I_H 时, 可控硅才会关断 (图 3)。也就是说, 当电压为零或为负而电流仍流通时 (例如流经电感), 可控硅还可保持导通。

第三节 负载类别

下面以理想可控硅最简单的电路来研究带各种负载的工作原理 (图 5)。

一、纯电阻负载

图 6 为纯电阻负载电路图。

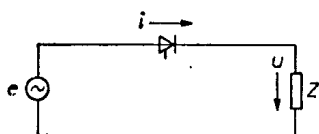


图 5 带负载的可控硅半波整流电路

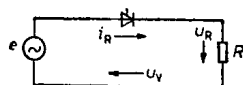


图 6 负载为电阻的半波整流电路

图 7 为不同触发时间的特性曲线 (触发时间以控制角 α 表示)。图中 $u_{d\alpha}$ 为控制角为 α 时的直流电压 u_d 的平均值 (例如 U_{d00})。特点如下:

- 1) u_R 有一正的直流电压平均值 $u_{d\alpha}$ 。
- 2) 导通时, i_R 与 u_R 成正比。

- 3) 当 $u_R = 0$ 时, 可控硅关断。
 4) 可控硅必须能阻断峰值电压 $\hat{e}$ 。

图 8 示出控制特性曲线。

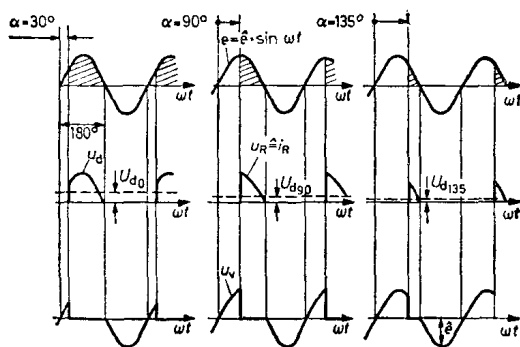


图 7 半波整流、电阻负载时的直流电压波形

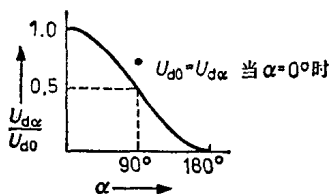


图 8 半波整流、电阻负载时的控制特性曲线

二、纯电感负载

图 9 为纯电感负载电路图。电感电路公式如下:

$$u_L = -L \frac{di}{dt}$$

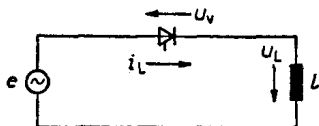


图 9 带电感负载的半波整流电路

图10为不同触发时间的电压波形。

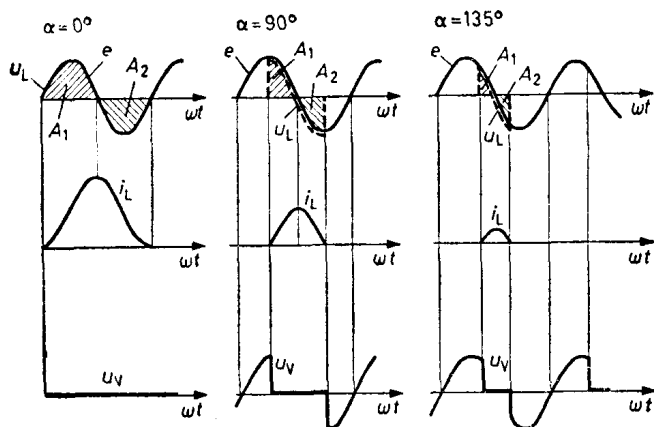


图 10 半波整流、电感负载时的直流电压波形

特点如下:

- 1) 直流电压 u_L 的平均值为零。加在电感上的正电压-时间面积和负电压-时间面积相等 ($A_1 = A_2$)。
- 2) i_L 相对于交流电源电压有一个相位移。
- 3) 当满足 $A_1 = A_2$ 条件时, 可控硅才关断。
- 4) 可控硅必须能阻断 $\hat{e}$ 。

这里不可能得到如同电阻负载时的直流电压控制特性曲线, 因为所有控制角的直流电压平均值都等于零。

三、纯电容负载

电容充电公式如下 (图11):

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

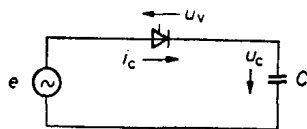


图12为不同触发时间的特性曲线。 图 11 带电容负载的半波整流电路

- 1) 电容器充电到供电电压的峰值 $\hat{e}$, 并保持该值。
- 2) 只有一个电流脉冲流经可控硅。

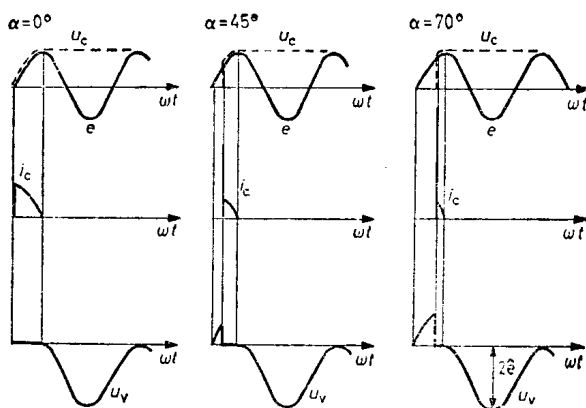
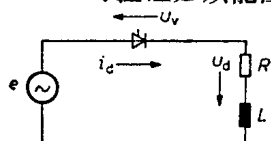


图 12 半波整流、电容负载的直流电压波形

3) 可控硅必须能阻断 $2\hat{e}$ 。



所有控制角 α 的直流电压都相同 ($u_d = \hat{e}$)。

四、电阻负载和电感负载组合

电阻负载和电感负载组合的基本特性如下 (图13):

根据 R/L 的比值的不同, 电流持续时间介于纯电阻负载和纯电感负载时的电流持续时间之间, 同时必须始终满足 $A_1 = A_2$ 。

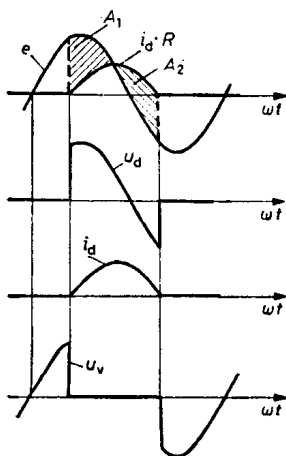


图 13 半波整流、电阻负载和电感负载组合时的直流电压波形