

电子工程师手册

ELECTRONICS ENGINEERS' HANDBOOK

上册

THE HISTORY OF THE

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

第10篇 电力电子技术

主 编	张 立
执 笔	吴爱国
	李云德
	王 江
主 审	顾廉楚

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

下 册



机械工业出版社

(京)新登字054号

本手册系统地概括了电子技术基础及其应用领域的主要技术内容，有一定的深度和广度。

全书按其内容，大体上可分为如下三个部分：

1. 基础知识部分，包括：常用符号、物理化学常数、单位、标准和数学公式；电磁学与电路基础；信号与系统分析等。

2. 技术基础部分，包括：电子材料；电子元器件，模拟电路；数字电路；微波、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构、电磁兼容与可靠性。

3. 技术应用部分，包括：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机与人工智能；自动控制系统与控制仪表；数控技术与机器人；广播、电视与声像处理技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

本书在编写上，力求简明扼要、深入浅出、直观易懂、归类便查。注意理论阐述的严谨和采用数据、图表和公式的准确可靠。努力做到既反映我国电子技术近年来的主要成就，也介绍国外的先进技术和发展动向。

本手册主要供机电工业系统和其他行业系统的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

责任编辑：贾 馨 版式设计：霍永明
封面设计：姚 毅 责任校对：肖新民
责任印制：路 琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 182¹/₂·插页 8·字数 5756 千字

1995年4月北京第1版·1995年4月北京第1次印刷

印数 00,001—10 000 定价：上、下册共198.00元

ISBN 7-111-04178-X/TM·523

发展电子技术促
进经济繁荣与社
会进步

孙俊人

一九八二年六月

电子工程师手册编委会

主任委员	吴咏诗				
副主任委员	胡健栋	邹洵	罗命物(常务)		
委 员	翁瑞琪	(常务)	秦起佑	(常务)	张长生
	黄仕机	周孝琪	闾石	俞斯乐	丁润涛
	郭维廉	徐苓安	张国雄	朱梦周	
总 编 辑	吴咏诗				
副 总 编 辑	秦起佑	翁瑞琪			
秘 书	尹明丽				

序

电子技术是一门发展迅速，应用广泛的技术。它的发展可以说是日新月异，新技术层出不穷。它的应用则已遍及工业、农业、国防、科技、文教和人民日常生活的各个领域，对于经济发展和社会进步有着重要的促进作用。当前第三次新的技术革命正在兴起，如果说第一次技术革命是以机械化为标志，第二次技术革命是以电气化为标志的话，那么，第三次新的技术革命就应该说是以电子化作为标志。前两次技术革命主要都是人类体能的延伸，而第三次新的技术革命则主要是人类智能的扩展，其基础就是电子技术。也有人说目前已是信息时代，而信息的获取、处理、传输也是要依赖于电子技术的。所以为了加速我国的现代化建设，体现“科学技术是第一生产力”的伟大作用，在各个领域，尤其是机电工业系统中推广与普及电子技术是十分重要的。在这种情况下，编写和出版这部《电子工程师手册》是很有必要的。

这部手册是为机电工业系统和其他行业系统中具有中等以上技术水平的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅而编写的，是以应用为主的、综合性的电子技术手册。它是一部工具书，主要为工程技术人员在研究、处理电子技术问题时起备查、提示和启发的作用。它也可作为高等学校有关专业师生及其他有关人员提供参考。

这部手册系统地概括了电子技术及其主要应用领域的基本技术内容。在内容取舍上力求做到：科学性、实用性和先进性。科学性是要体现现代电子科学技术的基本内容，介绍必要的基础知识，注意理论阐述的严谨，采用数据、图表的准确可靠；实用性是要从实用出发建立自己的体系，主要提供一些结论性的技术内容以及这些结论的应用，在编写上简明扼要，深入浅出，直观易懂，归类便查；先进性则是既要反映我国电子技术近年的主要成就，也要介绍国外的先进技术和发展动向，注意反映电子技术的时代特征。

整个手册共17篇，按其内容大体上可分为以下三个部分：

(1) 基础知识 共2篇，分别是：常用资料（符号、常数、单位、标准和数学公式），电磁学与电路基础。

(2) 技术基础 共6篇，分别是：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波技术、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构与可靠性。

(3) 技术应用 共9篇，分别是：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机；自动控制与控制仪表，电子技术在机械制造方面的应用；广播、电视与声像技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

这部手册的编写方式也是一种改革的尝试。过去一部综合性手册的编写一般是组织全国各地的有关专家分头编写，然后集中统稿编辑的。由于专家分散在全国各地，联系讨论不便，统稿、编辑过程中也要往返于各地进行讨论、修改，这就不能不拖延时日，往往要5~6年，大型的甚至要8~10年才能出版。电子技术发展非常迅速，如果从编写到出版要花这样长的时间，那么，手册出版之日可能已是内容陈旧之时。因此，这部手册是主要聘请天

津、北京两地的有关专家编写、审稿，而且由机械工业出版社委托天津大学承担了具体的组织工作。由于编写人员居住相对集中，便于交流与讨论，主编与主审也能及时交换意见，除出版社外，还有一个专业面较宽的学术单位负责组织工作，这就使整个手册的编写、审稿和定稿工作在两年之内顺利完成，而且保证了质量，基本上达到了预定的目标和要求。应该说这种做法是成功的，不足之处则可能是未能充分反映其他各地有关专家的经验与成就，这就希望各位专家和广大读者对本手册多提宝贵意见，以便今后能予以修改和补充。

这部手册能以顺利地完成和出版，我愿诚挚地感谢编委会各位委员、各篇的主编、主审以及全体编者所付出的辛勤劳动，感谢他们认真负责的态度和友好合作的精神。我还要特别感谢机械工业出版社的罗命钧、秦起佑、贾馨三位同志和天津大学的翁瑞琪教授，他们为本手册的组织编写、统稿定稿、编辑出版做了大量的工作，为保证手册的质量做出了重要的贡献。

我希望，这部手册的出版，能为有关专业的工程技术人员和高等学校的师生，在从事电子技术应用与推广工作中提供一本实用的工具书。如果它能为我国电子技术的广泛应用起到一些促进作用的话，这将使我们所有这些参加手册编写、出版工作的同志感到荣幸和欣慰。

吴咏诗

目 录

第1章 概 论

- 1 电力电子技术的定义10-1
- 2 电力电子器件10-1
 - 2.1 分类10-1
 - 2.2 半控型器件10-1
 - 2.3 全控型器件10-2
 - 2.4 各种器件的发展10-4
- 3 变流电路及其应用10-5

第2章 整 流 管

- 1 硅整流管10-7
 - 1.1 结构与原理10-7
 - 1.2 基本参数10-7
 - 1.3 基本特性10-7
- 2 快速硅整流管10-8
 - 2.1 主要参数10-8
 - 2.2 基本特性10-9
- 3 肖特基整流管10-9
 - 3.1 结构与原理10-9
 - 3.2 基本参数10-10
 - 3.3 基本特性10-10

第3章 晶 闸 管

- 1 普通晶闸管10-12
 - 1.1 结构与原理10-12
 - 1.2 基本参数10-13
 - 1.3 基本特性10-13
- 2 可关断晶闸管10-16
 - 2.1 概述10-16
 - 2.2 结构与原理10-16
 - 2.3 基本参数10-17
 - 2.4 基本特性10-19
- 3 MOS控制晶闸管10-20
 - 3.1 结构与原理10-20
 - 3.2 基本参数10-21
 - 3.3 基本特性10-21
- 4 静电感应晶闸管10-22

- 4.1 结构与原理10-22
- 4.2 基本参数10-23
- 4.3 基本特性10-23

第4章 晶 体 管

- 1 MOS场控晶体管10-25
 - 1.1 结构与原理10-25
 - 1.2 基本参数10-25
 - 1.3 基本特性10-29
 - 1.4 VDMOS晶体管与双极晶体管的比较10-30
- 2 绝缘门极晶体管10-31
 - 2.1 结构与原理10-31
 - 2.2 基本参数10-31
 - 2.3 基本特性10-32
- 3 静电感应晶体管10-33
 - 3.1 常开型静电感应晶体管10-33
 - 3.2 常闭型静电感应晶体管10-35
- 4 电力晶体管10-36
 - 4.1 结构与原理10-36
 - 4.2 基本参数10-37
 - 4.3 基本特性10-37

第5章 驱 动 电 路

- 1 概述10-41
 - 1.1 分类10-41
 - 1.2 设计原则10-41
- 2 电压控制型驱动电路10-41
 - 2.1 功率MOSFET的驱动电路10-41
 - 2.2 IGBT驱动电路10-42
- 3 电流控制型驱动电路10-43
 - 3.1 GTR驱动电路10-43
 - 3.2 GTO驱动电路10-45

第6章 保护及散热技术

- 1 缓冲电路10-48
 - 1.1 缓冲电路的作用10-48
 - 1.2 缓冲电路的分类10-49

1.3 缓冲电路举例	10-50
2 过电流保护	10-51
2.1 过电流特性	10-51
2.2 状态识别保护法	10-51
2.3 桥臂互锁保护法	10-51
2.4 逆变器的过电流保护	10-52
3 散热技术	10-53
3.1 稳态热路图与热阻	10-53
3.2 瞬态热路图和瞬态热阻抗	10-53
3.3 散热措施	10-54

第7章 串并联运行

1 SCR的串并联运行	10-57
1.1 SCR的串联运行	10-57
1.2 SCR的并联运行	10-58
2 GTO串并联的特点	10-59
2.1 GTO的串联运行	10-59
2.2 GTO的并联运行	10-60
3 GTR的并联运行	10-61
3.1 静态均流	10-61
3.2 动态均流	10-61
4 功率MOSFET的并联运行	10-62
4.1 静态均流	10-62
4.2 动态均流	10-62

第8章 相控变流电路

1 原理与分类	10-64
1.1 原理	10-64
1.2 分类	10-64
1.3 用途	10-64
2 单相相控整流电路	10-67
2.1 单相半波和全波整流电路	10-67
2.2 单相桥式整流电路	10-67
3 三相相控整流电路	10-67
3.1 三相半波整流电路	10-67
3.2 三相桥式整流电路	10-67
4 有源逆变电路	10-67
4.1 有源逆变的原理	10-67
4.2 常用有源逆变电路	10-68

第9章 脉宽调制型变换电路

1 原理与分类	10-74
---------	-------

1.1 基本原理	10-74
1.2 分类及用途	10-74
2 直流PWM型变换电路	10-74
2.1 PWM型斩波电路	10-74
2.2 全桥式变换电路	10-75
2.3 各种PWM型DC-DC变换电路的比较	10-80
3 交流PWM型变换电路	10-80
3.1 单相逆变电路	10-80
3.2 三相逆变电路	10-82

第10章 软开关谐振电路

1 概述	10-83
1.1 原理	10-83
1.2 特点	10-83
1.3 分类	10-83
2 基本谐振电路	10-84
2.1 串联谐振电路	10-85
2.2 并联谐振电路	10-86
3 DC-DC准谐振开关变换电路	10-86
3.1 零电流开关准谐振变换电路	10-87
3.2 零电压开关准谐振变换电路	10-89
3.3 零电流和零电压开关准谐振变换电路的比较	10-92
4 DC-AC谐振开关变换电路	10-92
4.1 基本原理	10-92
4.2 基本分析	10-93
4.3 参数设计	10-94

第11章 直流开关稳压电源

1 原理与特点	10-96
1.1 基本原理	10-96
1.2 主要特点	10-96
2 高频变换电路	10-97
2.1 高频斩波电路	10-97
2.2 高频逆变电路	10-98
3 PWM控制电路	10-101
3.1 开关电源控制器	10-101
3.2 控制器应用举例	10-104
参考文献	10-104

第1章 概 论

1 电力电子技术的定义

以电力为对象的电子技术称作电力电子技术(Power Electronics),它是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的学科。如果说微电子技术是信息处理技术,那么电力电子技术就是电力处理技术。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路等三个部分,其中电力电子器件的制造技术为核心技术。电力电子技术与其他学科的关系如图10-1-1所示。由图可以看出,电力电子技术是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科。随着科学技术的发展,电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、计算机辅助分析和辅助设计、微型计算机等许多领域密切相关。目前,电力电子技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术。

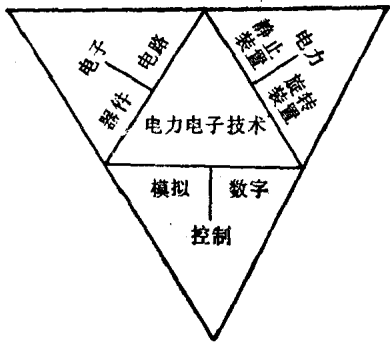


图10-1-1 电力电子技术与其他学科的关系

当代许多高新技术均与电网的电流、电压、频率和相位等基本参数的转换与控制相关。现代电力电子技术能够实现这些参数的精确控制和高效率的处理,特别是能够实现大功率电能的频率变换,从而为多项高新技术的发展提供了有力的支持。因此,现代电力电子技术不但本身是一项高新技术,而且还是其他多项高新技术必不可少的发展基础。电力电子技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能,降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的

手段,并为现代生产和现代生活带来深远的影响。

通常认为,1956年第一个晶闸管(曾称可控硅)发明之日即为电力电子技术诞生之时,在30多年的发展历程中大体分为两个阶段。由1957年至1980年称为传统电力电子技术阶段,在这个阶段电力电子器件以半控型器件为代表,变流电路主要是相控电路,控制技术主要是模拟电路技术。由1980年至今为现代电力电子技术阶段,在这个阶段电力电子器件以全控型器件为代表,变流电路主要是变频电路,控制技术转为数字电路技术。

2 电力电子器件

2.1 分类

电力电子器件种类很多,有许多分类方法。从功能上来分,通过门极信号只能控制开通而不能控制其关断的器件称为半控型器件;通过门极信号既能控制开通,又能控制其关断的器件称为全控型器件。从器件内载流子导电情况来看,只有多数载流子导电的器件称为单极型器件;既有多数载流子又有少数载流子导电的器件称为双极型器件;用上述两种器件集成为一个新型器件的称为复合器件,又称混合型器件。具体分类如图10-1-2所示。图中各种器件又可分为全控型和半控型两大类。

2.2 半控型器件

半控型器件的主要代表为普通晶闸管(曾称可控硅,简称SCR)[⊖]。晶闸管的派生器件还有逆导晶闸管(简称RCT)、快速晶闸管、不对称晶闸管(简称ASCR)、双向晶闸管(简称TRIAC)以及光控晶闸管等。

半控型器件的主要特征是:

- (1) 高电压大电流;
- (2) 低频率,它的工作频率限于400Hz以下;
- (3) 器件为分立结构或几个分立结构的组合;

⊖

[⊖] 晶闸管的英文名为 thyristor,无英文简称名,SCR是Silicon Controlled Rectifier的缩写,即硅可控整流器,是早期的名称,为叙述方便这里仍借用SCR代表晶闸管。

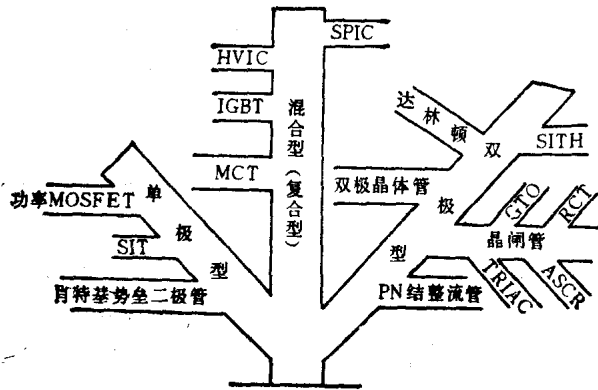


图10-1-2 器件分类示意图

- SPIC (Smart Power Integrated Circuit, 智能功率集成电路)
- HVIC (High Voltage Integrated Circuit, 高压集成电路)
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘门极晶体管)
- MCT (Mos Controlled Thyristor, MOS控制晶闸管)
- SITH (Static Induction Thyristor, 静电感应晶闸管)
- GTO (Gate Turn-off Thyristor, 可关断晶闸管)
- RCT (Reverse Conduction Thyristor, 逆导晶闸管)
- ASCR (Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier, 不对称硅可控整流器)
- TRIAC (triac, 双向晶闸管)
- SIT (Static Induction Transistor, 静电感应晶体管)

表10-1-1 常用半控型器件

名称	特征	图型符号	代号	主要用途
普通晶闸管 (可控硅)	反向阻断, 门极信号 开通		SCR	可控整流器、逆变器、 斩波器
快速晶闸管 (快速可控硅)	反向阻断, 门极信号 开通, 关断时间短		快速 SCR	中频电源、超声波电 源等
逆导晶闸管 (逆导可控硅)	反向导通, 门极信号 开通, 关断时间短		RCT	斩波器、逆变器
双向晶闸管 (双向可控硅)	双向均可由门极信号 开通		TRIAC	电子开关、调压器、 调光器、调温器等

(4) 半控型功能。

常用的各种半控型器件如表10-1-1所示。

2-3 全控型器件

全控型器件又称自关断器件, 它的主要特征是:

- (1) 高电压大电流;
- (2) 高频率, 工作频率可达1kHz至10MHz;
- (3) 器件为集成器件结构, 它由许多功能相同的功率元胞并联而成;

(4) 全控型功能。

目前已经实用化或即将实用化的全控型器件有: 电力晶体管(简称GTR)、达林顿晶体管模块(简称GTR模块)、可关断晶闸管(简称GTO)、静电感应晶闸管(简称SITH)、场控晶体管(简称MOSFET)、绝缘门极晶体管(简称IGBT或IGT)以及MOS控制晶闸管(简称MCT)。以上各器件

表10·1-2 全控型器件的符号及其等效电路

		双 极 型 器 件			单 极 型 器 件		
名称	晶 体 管	达林顿管	可关断晶闸管	静电感应晶闸管	场控晶体管	静电感应晶体管	
代号	GTR	Darlington	GTO	SITH	功率MOSFET	功率SIT	
等效电路							
复 合 器 件 (BI-MOS)							
名称	绝 缘 门 极 晶 体 管	MOS 晶 闸 管 (MOS 可 关 断 晶 闸 管)	MOS 晶 体 管 (MGT)				
代号	IGBT(IGBT)	MCT (MOS-GTO)	达林顿式	并联式	串联式	混合式	
等效电路							

表10-1-3 各种全控型器件的比较

器件名称	GTR	GTO	IGBT	VDMOS	SIT (BSIT)	SITH
控制方式	电流	电流	电压	电压	电压	电压
常 态	阻断	阻断	阻断	阻断	导通或关断	导通或关断
反向电压阻断能力 (V)	≤50	500~6500	200~2500	0	0	500~4500
正向电压阻断范围 (V)	100~1400	500~9000	200~1500	50~1000	50~1500	500~4500
正向电流范围 (A)	400	3500	400~100	100~12	200	2200
正向导通电流密度 (A/cm ²)	30	40	60	6	30	100~500
浪涌电流耐量	3倍额定值	10倍额定值	5倍额定值	5倍额定值	5倍额定值	10倍额定值
最大开关速度(kHz)	50	10	50	20000	200000	100
门极驱动功耗	高	中等	很低	低	低	中等
du/dt	中等	低	高	高	高	高
di/dt	中等	低	高	高	高	中等
最高工作结温(°C)	150	125	200	200	200	200
抗辐射能力	差	很差	中等	中等	好	好
制造难易	复杂	复杂	很复杂	很复杂	很复杂	很复杂
典型线宽(μm)	20	50	10	5~10	5	5
使用难易	较难	难	中等	很容易	容易	容易

中IGBT和MCT被认为是最有发展前途的电力电子器件。各种器件的等效电路及其符号见表10-1-2。这些全控型器件的发展改变了电力电子技术的面貌，它们各有特点，在不同的应用领域中得到迅速的发展。目前已实用化的全控型器件的相互比较见表10-1-3，此外，近几年高压集成电路（简称HVIC）和智能功率集成电路（简称SPIC）发展很快。这些

功率集成电路将器件和电路集成为一个芯片上，使电力电子技术发展到一个更高的层次。

2.4 各种器件的发展

由于微细加工技术与大功率半导体技术的紧密结合，电力电子器件发展很快。有些器件处于引入期、生长期，有些器件则处于成熟期、饱和期，还有些器件则处于衰减期。具体情况如图10-1-3所示。

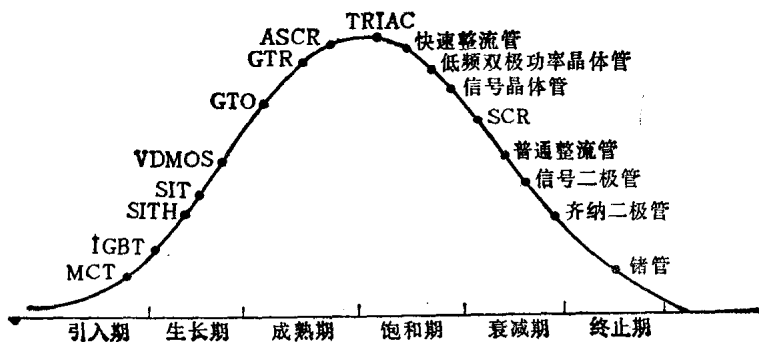


图10-1-3 各种器件的发展周期

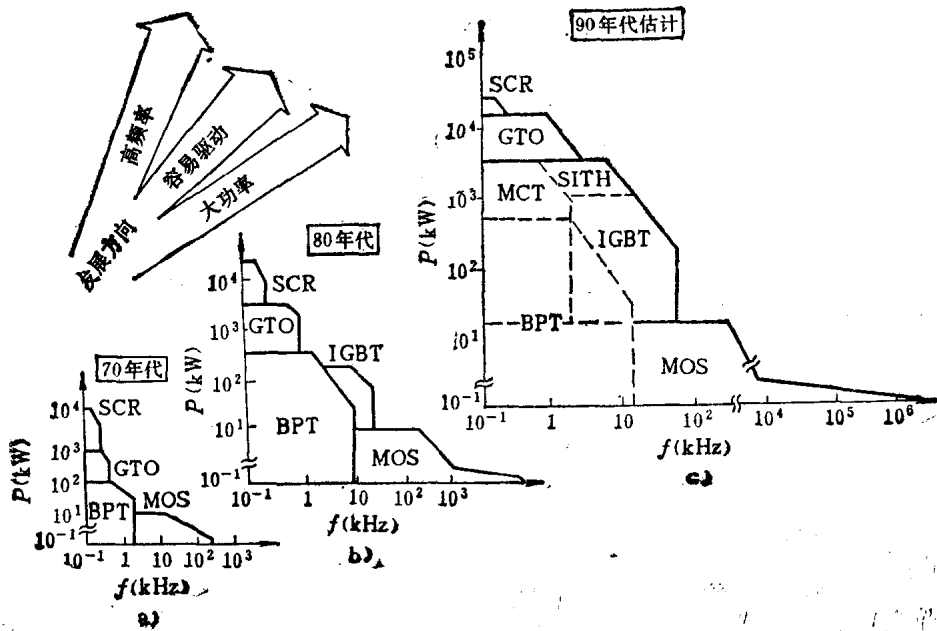


图10-1-4 各种器件的发展概况

a) 70年代 b) 80年代 c) 90年代

今后10年内，全控型器件将在高频率、易驱动和大功率三个方向发展。图10-1-4给出了70年代、80年代和90年代各种全控型器件在不同应用领域的发展情况。由图可知，SCR的应用范围逐步缩小，其他新型器件将迅速发展。

3 变流电路及其应用

如图10-1-5所示，变流电路有如下四种功能：

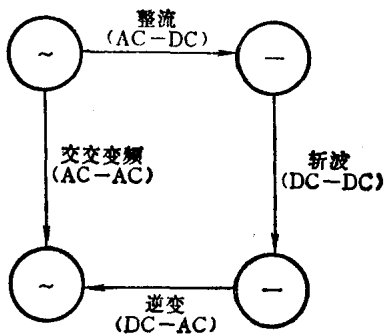


图10-1-5 变流电路的基本功能

1) 整流 把交流电(AC)变换成直流电(DC)，全国有19%~20%的发电量必须由交流电变成直流电后才能供直流负载使用。这种变换称为整流。

2) 逆变 把直流电(DC)变换成交流电(AC)这种变换又分为VVVF电源(变压变频电源)和CVCF电源(恒压恒频电源)两种。前者用于交流电机调速系统，后者用于不间断电源装置。

3) 周波变换 把一种频率的交流电变换成更低频率的交流电。因为这种变换不经过直流环节直接使交流变频，所以也称交-交频率变换，它可用于特大容量交流电机的调速系统。

4) 斩波 把一种直流电变换成不同电压的另一种直流电，这种变换将不可控的直流电压变成可控的直流电压，它广泛应用于直流电机调速系统以及开关型直流电源中。

为了实现上述四种变流功能，人们研制了许多具体电路，如相控整流电路、脉宽调制逆变电路、高频斩波电路、以及各种零电压零电流开关谐振电路。

由于半控型器件功能上的缺陷，用它组成的相控电路虽然沿用了40多年，但是因为功率因数低，谐波严重，这种电路正逐渐被淘汰。与之相反，用各种全控型器件组成的变频器和斩波器等变流电路已被广泛采用。

由图10-1-6所示曲线表明，电力电子器件在不同功率和频率范围内得到广泛应用。从直流输电到

家用电器，从工业到民用，从交流电到直流电，几乎到处有电力电子技术的应用场合。

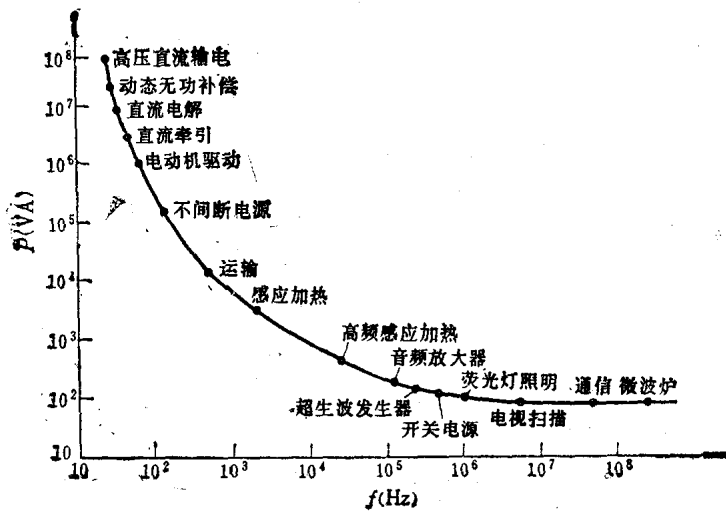


图10-1-6 电力电子技术的应用领域