

高等职业技术教育精品教材

电力电子技术 项目教程

主 编 崔 晶 王 博
副主编 王晓琴 李宏菱
主 审 黄 彧 王小峰

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电力电子技术项目教程 / 崔晶, 王博主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2022.7
ISBN 978-7-5643-8768-6

I. ①电… II. ①崔… ②王… III. ①电力电子技术
—高等职业教育—教材 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 117809 号

Dianli Dianzi Jishu Xiangmu Jiaocheng

电力电子技术项目教程

主编 崔晶 王博

责任编辑 梁志敏
封面设计 曹天擎

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
邮政编码 610031
发行部电话 028-87600564 028-87600533
网址 <http://www.xnjdcbs.com>
印刷 成都中永印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 14.25
字数 347 千
版次 2022 年 7 月第 1 版
印次 2022 年 7 月第 1 次
定价 38.00 元
书号 ISBN 978-7-5643-8768-6

课件咨询电话: 028-81435775
图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

PREFACE

电力电子技术项目教程

本书为轨道交通、机电类职业技术教育教材之一，可作为高职高专“轨道交通”“电气工程”“自动化”“机电一体化”等专业“电力电子技术”课程的教材，也可作为相关专业师生、从事电力电子技术工作技术人员的参考用书。

电力电子技术的发展以新型器件与先进的控制技术为原动力。随着半导体技术控制技术的长足发展，电力电子技术跟随新技术发展的潮流，其研究领域不断变化、革新。为适应新技术发展的需求，改变传统课堂单一教学的局限性，本教材在讲述电力电子技术经典理论的基础上，结合应用前沿的项目实例，并对近几年全国电子技术大赛的相关题目进行了分析，通过理论与实践相结合的方式，及时跟进技术革新发展的步伐。

本教材中涉及的项目结合实际、难易适宜、可行性高，并且在电力电子技术领域具有实时性、前瞻性。在教学活动中以任务驱动为导向，在理论知识课堂教学的基础上，进行项目实例训练。在项目实例训练的过程中，按照实际项目开展的一般顺序，锻炼学生认知电力电子技术电路、焊接与调试电路、分析与解决项目相关问题等的综合能力。

本教材由西安铁路职业技术学院崔晶、王博担任主编并负责统稿工作；西安铁路职业技术学院王晓琴、李宏菱担任副主编，西安铁路职业技术学院虞梦月、刘芳璇、侯艳、周磊、西安局集团公司宝鸡机车检修厂史晓冬参与编写；北京交通大学黄彧、西安集团公司西安机务段王小峰担任主审。全教材共分八个项目，崔晶编写项目一；王博编写绪论、项目七模块一至模块五、项目八模块一和模块二；王晓琴编写项目二；虞梦月编写项目三；刘芳璇编写项目四；侯艳编写项目五；周磊编写项目六；史晓冬编写项目七模块六；李宏菱编写项目八模块三。在本教材编写的过程中，各位老师辛勤付出，对本教材的规划、方案提出了宝贵的建议，在此表示衷心的感谢。教材中参阅了大量的著作、文献、论文、专利及互联网资料，在此向相关文献的原作者表示由衷的谢意。

需要特别说明是，教材中部分插图系采用国际上广泛使用的电路设计软件绘制，图中某些标注和符号与我国现行标准不完全一致。为便于学生学习实践，对这些电路图未做改动。

限于编者水平有限，教材中难免存在不当之处，恳请广大读者批评指正！

编 者

2022年3月

目 录

CONTENTS

电力电子技术项目教程

绪 论	001
项目一 电力电子器件	005
模块一 电力电子器件概述	006
模块二 电力二极管	008
模块三 晶闸管	011
模块四 全控型器件	016
模块五 其他新型器件	021
模块六 电力电子器件的驱动	023
模块七 电力电子器件的保护	025
模块八 电力电子器件的串并联	028
模块九 全控型器件驱动电路	030
习题及思考题	035
项目二 整流电路	037
模块一 单相可控整流电路	038
模块二 三相可控整流电路	049
模块三 整流电路的有源逆变状态	056
模块四 电容滤波的不控整流电路	060
模块五 整流电路的功率因数与谐波问题	062
模块六 小功率整流电路	066
模块七 调光灯	071
实验任务	075
习题及思考题	083
项目三 直流斩波电路	086
模块一 直流斩波电路	087
模块二 降压式斩波电路	089
模块三 升压式斩波电路	092
模块四 升降压式斩波电路 (Boost-Buck Chopper)	094
模块五 Cuk 斩波电路	095
模块六 Sepic 斩波电路	096
模块七 Zeta 斩波电路	097

模块八 Buck 变换电路	098
实验任务	101
习题及思考题	104
项目四 交流电力控制电路和交-交变频电路件	105
模块一 交流调压电路	106
模块二 其他交流控制电路	115
模块三 交-交变频电路	116
模块四 电风扇无级调速电路	119
实验任务	122
项目五 逆变电路	125
模块一 基本逆变原理	126
模块二 电压型逆变电路	129
模块三 电流型逆变电路	135
模块四 多重逆变电路和多电平逆变电路	140
模块五 1 kW 单相逆变器设计	143
习题及思考题	153
项目六 PWM 控制技术	155
模块一 PWM 控制的基本原理	155
模块二 PWM 逆变电路	157
模块三 PWM 跟踪控制技术	161
模块四 PWM 整流电路	162
习题及思考题	165
项目七 电力电子实用新技术	167
模块一 软开关与谐振变换技术	168
模块二 光伏发电技术	173
模块三 风力发电技术	176
模块四 动力电池技术	178
模块五 超级电容技术	180
模块六 网络化能源技术	183
习题及思考题	186
项目八 近年全国电子设计竞赛电力电子(电源)相关试题解析	187
模块一 开关电源类赛题解析	187
模块二 逆变电源类赛题解析	195
模块三 微电网模拟系统赛题解析	214
参考文献	222

一、电力电子技术的概念

电力电子技术与信息电子技术(模拟电子技术与数字电子技术)是电子技术的两大分支。电力电子技术是应用于电力领域的电子技术,主要研究应用各种电力电子器件,以及由这些电力电子器件所构成的各式各样的电路或装置,实现对电能的变换和控制。

电力电子技术是建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础上的一门边缘学科。它既是电子技术在强电(高电压、大电流)或电工领域的一个分支,又是电力技术在弱电(低电压、小电流)或电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的新科学。它运用弱电(电子技术)控制强电(电力技术),是强弱电相结合的新学科,是横跨“电子”“电力”和“控制”三个领域的一个新兴工程技术学科。1974年,美国的 W.Nwell 用图 0-1 所示的倒三角形对电力电子技术进行了描述。

电力电子技术是目前最活跃、发展最快的一门学科,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、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关,已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

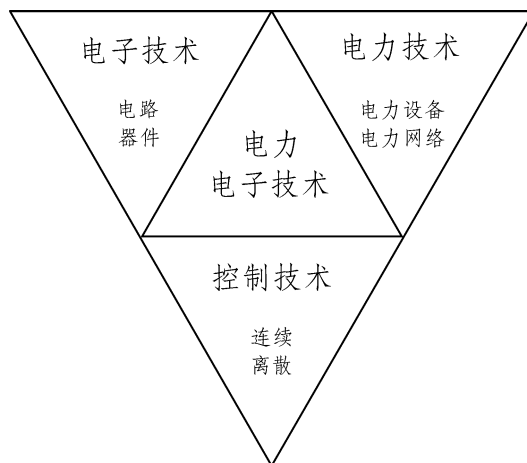


图 0-1 电力电子技术倒三角

二、电力电子技术的发展历史

电力电子技术是以电力电子器件为核心发展起来的。在有电力电子器件以前,电能转换

是依靠旋转机组来实现的。与这些旋转式的交流机组相比，利用电力电子器件组成的静止的电能变换器，具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、易于控制、响应快及使用方便等优点。

从 1957 年第一只晶闸管诞生至 20 世纪 80 年代为传统电力电子技术阶段。此期间的主要器件是以晶闸管为核心的半控型器件，由最初的普通晶闸管逐渐派生出快速晶闸管、双向晶闸管等许多品种，形成一个晶闸管大家族。器件的功率越来越大，性能越来越好，电压、电流、 di/dt 、 du/dt 等各项技术参数均有很大提高。目前，单只晶闸管的最高耐压可达 8 000 V，最大电流可达 6 000 A。

20 世纪 70 年代以后，出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件（亦称自关断型器件），例如，门极可关断晶闸管（GTO）、双极型功率晶体管（BJT/GTR）、功率场效应晶体管（P-MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等。

控制电路经历了由分立元件到集成电路的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路，使变换器的控制电路大为简化。

微处理器和微型计算机的引入，特别是它们的位数成倍增加，运算速度不断提高，功能不断完善，使控制技术发生了根本的变化，控制不仅依赖硬件电路，而且可利用软件编程，既方便又灵活。

各种新颖、复杂的控制策略和方案得到实现，并具有自诊断和智能化的功能。目前还可将新的控制理论和方法应用在变换器中。

综上所述，微电子技术、电力电子器件和控制理论是现代电力电子技术的发展动力。

三、电力电子技术的应用

电能存在的形式有直流（DC）和交流（AC）两大类。前者有电压幅值和极性的不同，后者除电压幅值和极性外，还有频率和相位的差别。实际应用中，常常需要在两种电能之间，或对同种电能的一个或多个参数（如电压、电流、频率和功率因数等）进行变换。

电力电子变换共有四种类型：交流-直流（AC-DC）变换，将交流电转换为直流电；直流-交流（DC-AC）变换，将直流电转换为交流电，这是与整流相反的变换，也称为逆变，当输出接电网时，称之为有源逆变，当输出接负载时，称之为无源逆变；交流-交流（AC-AC）变换，将交流电能的参数（幅值或频率）加以变换，其中改变交流电压有效值称为交流调压，将工频交流电直接转换成其他频率的交流电称为变频；直流-直流（DC-DC）变换，将恒定直流变成断续脉冲输出，以改变其平均值。

电力电子技术的应用领域相当广泛，遍及庞大的发电厂设备到小巧的家用电器等几乎所有电气工程领域。容量可达 1 吉瓦至几瓦不等，工作频率也可由几赫兹至数兆赫兹。

1. 一般工业应用

一般工业中大量应用各种交直流电动机。直流电动机有良好的调速性能。为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来，由于电力电子变频技术的迅速发展，使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美，交流调速技术大量应用并占据主导地位。

上至数千千瓦的各种轧钢机，下至几百瓦的数控机床的伺服电动机都广泛采用电力电子交流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置，以达到节能的目的。还有一些不调速的电动机为了避免启动时的电路冲击而采用了软启动装置，这种软启动装置也是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源，电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源。电镀装置也需要整流电源。

电力电子技术还大量用于冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源等场合。

2. 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。电力机车中的直流机车采用整流装置，交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在未来的磁悬浮列车中，电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外，车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制，其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车需要许多控制电机，它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。

飞机、船舶需要很多不同要求的电源，因此航空和航海都离不开电力电子技术。

如果把电梯也算作交通运输工具，那么它也需要电力电子技术。以前的电梯大都采用直流调速系统，而近年来交流调速已成为主流。

3. 电力系统

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据估计，发达国家在用户最终使用的电能中，有 60% 以上的电能至少需经过一次电力电子变流装置的处理。在通向电力系统现代化的进程中，电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说，如果离开电力电子技术，电力系统的现代化就是不可想象的。

直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势，其送电端的整流阀盒、受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电也是依靠电力电子装置才得以实现。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波器（APF）等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统中，电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等，以进行电能质量控制，改善供电质量。

在变电所中，给操作系统提供可靠的交直流操作电源、给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

4. 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源也都采用高频开关电源。在各种电子装置中，以前大量采用线性稳压电源供电，由于开关电源体积小、重量轻、效率高，现在已逐步取代了线性电源。因为各种信息技术装置都

需要电力电子装置提供电源，所以可以说信息电子技术离不开电力电子技术。

5. 家用电器

种类繁多的家用电器，下至一台调光灯具、高频荧光灯具，上至通风取暖设备、微波炉以及众多电动机驱动设备都离不开电力电子技术。

电力电子技术广泛用于家用电器，使得它和我们的生活变得十分贴近。

6. 其他

不间断电源（UPS）在现代社会中的作用越来越重要，用量也越来越大。目前，UPS 在电力电子产品中已占有相当大的份额。

以前电力电子技术的应用偏重中、大功率。现在，在 1 千瓦以下甚至几十瓦以下的功率范围内，电力电子技术的应用也越来越广，其地位也越来越重要。这已成为一个重要的发展趋势，值得引起人们的注意。

总之，电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索，到国民经济的各个领域，再到我们的衣食住行，到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。

四、电力电子技术课程的学习要求

（1）熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数，能正确选择和使用电力电子器件。

（2）熟悉和掌握各种基本变换器的工作原理，特别是各种基本电路中的电磁过程，掌握其分析方法、工作波形分析和变换器电路的初步设计计算。

（3）了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。

（4）在项目实例中理解各种形式的变换电路、控制电路、缓冲电路和保护电路。

（5）掌握基本实验方法与训练基本实验技能。

20 世纪 50 年代，电力电子器件主要是汞弧闸流管和大功率电子管。60 年代，晶闸管发展起来，因其工作可靠、寿命长、体积小、开关速度快等特点，在电力电子电路中得到广泛应用，并于 70 年代初期逐步取代了汞弧闸流管。80 年代，普通晶闸管的开关电流已达数千安，能承受的正、反向工作电压达数千伏。在此基础上，为适应电力电子技术发展的需要，又开发出门极可关断晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管、逆导晶闸管等一系列派生器件，以及单极型 MOS 功率场效应晶体管、双极型功率晶体管、静电感应晶闸管、功能组合模块和功率集成电路等新型电力电子器件。

国际电力电子器件的发展也潜移默化地推动着国内电力电子市场蓬勃向上。就目前而言，我国的电力电子器件市场在全球市场中占据的份额逐年增长，年增长率接近 20%，已成为全球最大的功率电力电子器件需求市场。电力电子器件在当今主要的应用领域包括电力系统、消费电子、计算机、网络通信、工业控制、汽车电子等。其中前三个领域为电力电子器件的重要应用领域，占据着最大的市场份额。因此，学好电力电子技术，不仅是完成学业或感兴趣的工业产品，更是今后从事机车运用或检修岗位的强大辅助，兼具广阔的国内和国际职业前景。

通过本项目的学习，应达到以下学习目标。

1. 知识目标

- (1) 了解电力电子器件的特征与分类。
- (2) 掌握电力二极管和晶闸管的工作原理。
- (3) 了解全控型器件和其他新型器件的发展趋势。
- (4) 了解电力电子器件的驱动、保护和串并联方法。
- (5) 理解全控型器件驱动电路的设计方法。

2. 能力目标

- (1) 具备电力二极管和晶闸管的分析能力。
- (2) 具备全控型器件驱动电路的设计和应用能力。

3. 素养目标

- (1) 树作风：树勤奋好学、一丝不苟、勇于开拓的学习态度和工作作风。
- (2) 立素养：立谦虚谨慎、诚实守信、团结务实的职业道德和业务素养。
- (3) 提志向：提兢兢业业、锐意进取、崇德向善的职业志向和价值追求。

知识导入

“欲穷千里目，更上一层楼。”“问渠哪得清如许，为有源头活水来。”古人用朴实无华的诗词告诉我们浅显的道理：想要对知识有进一步了解，就要进入书本，领略知识的魅力和力量。欲知电力电子器件的特征与分类、工作原理与发展趋势、驱动保护和设计方法，就让我们依托图文辨识能力，怀抱谦虚谨慎、诚实守信、团结务实的职业道德和业务素养的“敬业情”，进入到电力电子器件知识的学习吧。

模块一 电力电子器件概述

一、电力电子器件的特征

电力电子器件又称功率半导体器件，应用于电气设备或电力系统中，实现电能的变换和控制。它是电力电子装置的核心，因此，掌握各种电力电子器件的特性和使用方法，是学好电力电子技术的前提。

电力电子器件的特征：

(1) 电力电子器件所能处理的电功率，下至毫瓦级，上至兆瓦级，一般来说，远大于处理信息的电子器件。

(2) 电力电子器件一般工作在开关状态。开通时阻抗很小，管压降接近于零；关断时阻抗很大，流过的电流几乎为零，接近于断路。因此，电力电子器件的开关特性（即动态特性）和参数，是电力电子器件特性中很重要的方面。对比模拟电子电路中的电子器件，一般都是工作在线性放大状态。数字电子电路中的电子器件，虽然一般也工作在开关状态，但其目的是以开关状态来表示不同的信息。

(3) 电力电子器件的工作一般需要信息电子电路来控制。信息电子电路和电力电子电路处理的功率差异很大，信息电子电路的信号往往不能直接处理电力电子器件的导通或关断，需要一定的中间电路（即电力电子器件的驱动电路）对这些信号进行适当的放大。

(4) 电力电子器件还需要考虑散热设计。相比信息电子器件，电力电子器件在开通和关断过程中会有较大的功率损耗，从而导致电力电子器件温度过高。为了防止器件损坏，不仅需要考虑器件封装上的散热，在其工作时往往还需要配备相应的散热器。

二、电力电子器件的发展历程

第一代的电力电子器件以普通晶闸管为代表。通过控制极只能控制其开通，而不能控制其关断，是一种半控型器件。它的开关特性较差，适用工作频率较低。随着新型自关断器件的发展，晶闸管的应用领域已经缩小，但因其具备耐高电压、大电流的特性，时至今日，在某些场合仍然占据重要的地位。

自 20 世纪 70 年代末开始发展起来的第二代电力电子器件，包括电力晶体管（GTR）、门

极可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(Power MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。它们的特点是：通过控制极既可以控制其开通，又可以控制其关断，是全控型器件；开关特性好，适用工作频率较高。

随着工艺水平的不断提高，功率集成电路(PIC)于20世纪80年代中期开始出现。它属于第三代电力电子器件，特点是把功率器件和驱动电路、控制电路、保护电路等不同功能的单元集于一体，具有电路的特征，实现了器件与电路的集成、强电与弱电的结合。

三、电力电子器件的分类

1. 根据开通、关断时器件的受控性分类

根据开通、关断时器件的受控性，可将电力电子器件分为：不可控器件、半控型器件和全控型器件三类。

1) 不可控器件

不可控器件是不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件，因此也就不需要驱动电路。这类器件主要就是电力二极管，它的开通与关断由其在电路中所承受的电压决定，具有单向导电性。

2) 半控型器件

通过控制端来控制器件的开通，但是不能控制其关断的电力电子器件，属于半控型器件，典型的代表是普通晶闸管及其派生器件。这类器件的特点是：其控制端在器件导通后即失去对器件的控制能力，即无法通过控制端来关断器件；器件的关断由其承受的电压和电流来决定。

3) 全控型器件

全控型器件是一类既可以通过控制端控制其开通，又可以控制其关断的电力电子器件。与半控型器件相比，这类器件可以通过控制端实现器件的关断，因此又称为自关断器件。门极可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(Power MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等常用器件都属于全控型器件。

2. 根据驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的不同分类

根据驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的不同，可将电力电子器件分为电流控制型器件和电压控制型器件两类。

1) 电流控制型器件

电流控制型器件即通过向控制端注入或抽出电流来控制其开通和关断的电力电子器件。属于电流控制型的器件有普通晶闸管、门极可关断晶闸管(GTO)等。

2) 电压控制型器件

电压控制型器件即通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号来控制其开通和关断的电力电子器件。属于电压控制型的器件有电力场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。与电流控制型器件相比，电压控制型器件控制端的驱动功率要小得多。

3. 根据器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分类

根据器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，可分为单极型、双极型和复合型三类。

1) 单极型器件

单极型器件由一种载流子（电子或者空穴）参与导电，如电力场效应晶体管（Power MOSFET）。单极型器件只有多数载流子导电，没有少数载流子的存储效应，故开通、关断时间短。

2) 双极型器件

双极型器件由电子和空穴这两种载流子参与导电，如电力二极管、普通晶闸管、门极可关断晶闸管（GTO）等。它的导通压降较低，阻断电压较高，电压和电流的额定值较高，适用于大中容量的电力电子装置。

3) 复合型器件

复合型器件是由单极型器件和双极型器件组合而成的复合电力电子器件，即为复合型器件，如绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等。它兼有单极型器件响应速度快和双极型器件电流密度高、导通压降低的优点，具有良好的发展前景。

模块二 电力二极管

用于电力变换的二极管，也称为电力二极管，其基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的，都是以半导体 PN 结为基础。电力二极管的电压、电流额定值相比而言更高。它是 P 型半导体和 N 型半导体相结合（称为 PN 结）的两层结构器件，在 P 型半导体上设置正极端，在 N 型半导体上设置负极端，再用外壳加以密封，如图 1-1 所示。

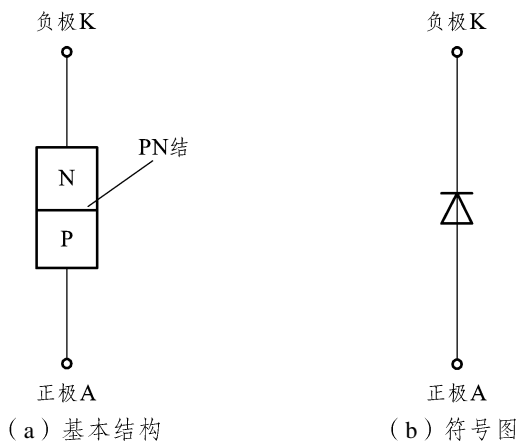


图 1-1 电力二极管的基本结构和符号

一、电力二极管的基本特性和主要参数

电力二极管的静态特性（即伏安特性），如图 1-2 所示。

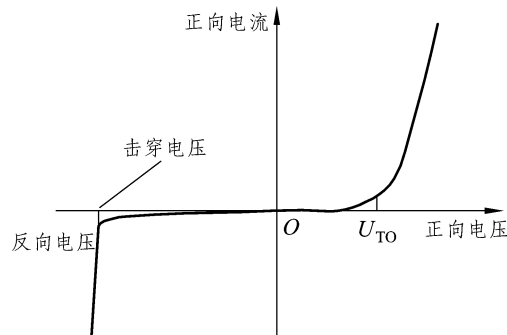


图 1-2 电力二极管的伏安特性

当电力二极管承受的正向电压大于阈值电压 U_{TO} 时，正向电流开始明显增加，此时电力二极管处于导通状态；当电力二极管承受反向电压时，只有少数载流子引起微小而数值恒定的反向漏电流。当反向电压超过一定的数值时，反向电流会急剧增加，这种现象称为击穿现象，此时的反向电压值称为击穿电压。加在电力二极管两端的电压不能超过击穿电压，否则易造成器件的损坏。由以上特性，可将电力二极管视为一个正方向导电、反方向阻断电压的静态单向电力电子开关。

电力二极管的主要参数：

1. 额定电压 U_{RR}

电力二极管的额定电压 U_{RR} 是指它能承受的反向重复施加的最大峰值电压。额定电压 U_{RR} 应该小于电力二极管的反向击穿电压。

2. 正向平均电流 $I_{F(AV)}$ （额定电流）

电力二极管长期运行，在规定的管壳温度（即壳温）和散热条件下，其允许通过的最大工频正弦半波电流的平均值，称为正向平均电流。将此电流值取规定系列的电流等级值，即为元件的额定电流。

此参数是按照正向电流造成器件本身的通态损耗的发热效应来定义的，其热效应仅和电流的有效值有关。使用时，应按照实际波形的电流有效值与平均电流有效值相等的原则来选取电力二极管的额定电流，并留有一定的安全裕量。

3. 正向压降 U_F

正向压降是指电力二极管在规定温度下，流过一定的稳态正向电流时所对应的二极管导通压降。它对电力二极管的通态损耗产生影响。

4. 浪涌电流 I_{FSM}

浪涌电流是指电力二极管所能承受的最大的、连续一个或几个工频周期的过电流。

5. 反向恢复时间 t_{rr}

由半导体的知识可知，电力二极管 PN 结中的电荷随外加电压而变化，呈现电容效应，称为结电容。由于结电容的存在，给处于正向导通状态的电力二极管施加反向电压时，电力二极管不能立即转为截止状态，因为结电容中的电荷需要一定的时间来恢复。只有当存储的电荷完全复合后，电力二极管才能完全恢复阻断状态。如图 1-3 所示，这一过程称为二极管的反向恢复过程。反向恢复时间 t_{rr} 通常定义为从电流下降为零至反向电流衰减至反向恢复电流峰值一定数值（一般取 10% 或 25%）的时间，它与结温、正向导通时的最大正向电流以及反向电流上升率有关。定义其中的电流下降时间 t_f 与延迟时间 t_d 的比值为软化系数 SF (Softness Factor)。软化系数越大，表明在同样的外电路条件下，电力二极管在关断过程中反向电流衰减缓慢，所产生的反向电压尖峰也越小。

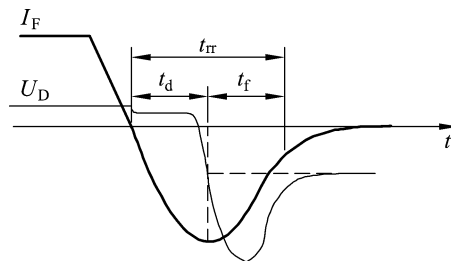


图 1-3 电力二极管的反向恢复过程

二、电力二极管的主要类型

常用的电力二极管按半导体物理结构和工艺的差别，可分为以下几类，同时它们的性能（如正向压降、反向压降、反向漏电流，反向恢复时间等）存在着差异。

1. 整流二极管

整流二极管多使用在低开关频率（1 kHz 以下）的整流电路中，其反向恢复时间较长，一般在 $5 \mu\text{s}$ 以上；其正向额定电流和反向额定电压较高，可达到数千安和数千伏以上。

2. 快速恢复功率二极管

快速恢复功率二极管的恢复过程很短，特别是反向恢复过程，一般反向恢复时间小于 $5 \mu\text{s}$ ，所以通常也可简称为快速二极管，其中超快速二极管的反向恢复时间甚至可以达到 $20 \sim 30 \text{ ns}$ 。快速恢复功率二极管的正向额定电流和反向额定电压要低于整流二极管。

3. 肖特基二极管

以金属和半导体直接接触形成的势垒为基础的二极管，称为肖特基二极管。与以 PN 结为基础的电力二极管相比，肖特基二极管的优点在于：反向恢复时间很短（ $10 \sim 40 \text{ ns}$ ），反向恢复的过程中没有明显的反向电压尖峰，允许的工作频率高，正向压降小（一般小于 0.5 V ），功耗低。但以上优点只限于低耐压（通常在 200 V 以下）的场合，若承受的反向耐压数值升

高，其正向压降也会随之增大，且反向漏电流较大，并对温度敏感，由此带来的反向稳态损耗不能忽略。



PPT: 晶闸管

模块三 晶闸管

晶闸管是晶体闸流管的简称，又称为可控硅整流器。广义上讲，晶闸管包括普通晶闸管及其所有派生器件，如快恢复晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等。但在实际中，晶闸管这个名称通常专指普通晶闸管。它属于一种半控型器件，所能承受的电压和电流容量是目前电力电子器件中最高的。

一、晶闸管的结构和工作原理

晶闸管有 3 个电极：阳极 A、阴极 K 和门极 G，它是一个四层（PNPN）三端器件，形成 J_1 、 J_2 、 J_3 共 3 个 PN 结。其基本结构和电气符号如图 1-4 所示。

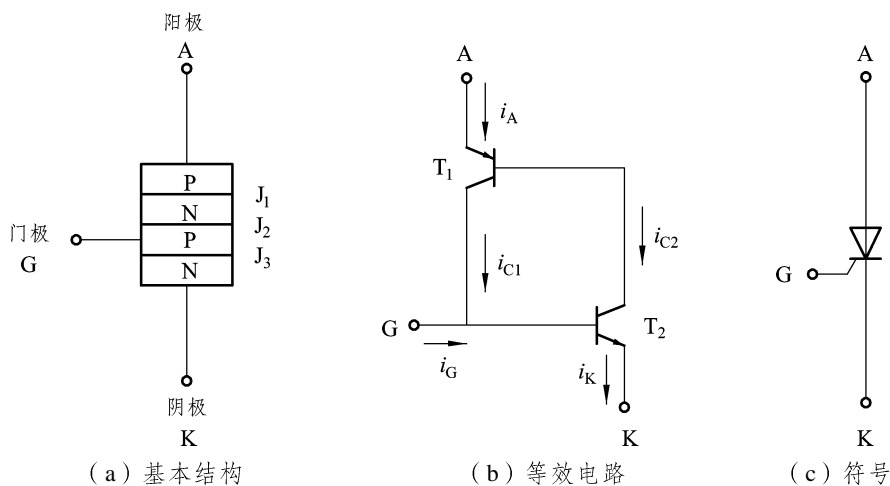


图 1-4 晶闸管的基本结构、等效电路和符号

一个晶闸管可以等效为 1 个 PNP (T_1) 和 1 个 NPN (T_2) 组合而成的复合管，如图 1-4 (a) 和 (b) 所示。当门极 G 电压信号为零时，即使在阳极 A 和阴极 K 两端施加正电压，由于中间的 PN 结 J_2 为反偏置，所以晶闸管不导通；或者在阳极 A 和阴极 K 两端施加反电压，中间的 PN 结 J_2 为正偏置，但 PN 结 J_1 和 J_3 为反偏置，呈反向阻断状态，所以晶闸管仍然不会导通。

只有当在阳极 A 和阴极 K 两端施加正向电压，同时在门极 G 和阴极 K 之间也施加正向触发信号，此时晶闸管可等效为两个互补的三极管，门极有足够的电流 i_G 流入时，就形成强烈的正反馈，使 2 个三极管饱和导通，即晶闸管导通。此工作过程可简单表示为：

$u_{GK} > 0 \rightarrow$ 产生 $i_G \rightarrow T_2$ 导通 \rightarrow 产生 $i_{C2} \rightarrow T_1$ 导通 $\rightarrow i_{C1} \nearrow \rightarrow i_{C2} \nearrow \rightarrow$ 出现强烈的正反馈。

一旦晶闸管被触发导通后，只要晶闸管中流过的电流达到一定临界值（该临界电流值称为擎住电流）以后，即使此时门极信号 i_G 为 0，晶闸管仍然能够自动维持导通。要使晶闸管关断，只能利用外电路使晶闸管电流降到接近于零的某一数值以下。

需要注意的是，以下 3 种情况，晶闸管没有施加门极触发信号也可以由关断状态转变成导通状态，在使用的过程中要避免。

(1) 正向转折导通：提高 u_{AK} 正向电压，阳极电流 i_A 增加，直至晶闸管转入导通。

(2) 温度导通：当温度增加时，流过 PN 结 J_2 的反偏漏电流也增加，直至晶闸管转入导通。

(3) du/dt 导通：由于各 PN 结都存在着结电容，在阳极 A 和阴极 K 两端加正向变化的电压时，各 PN 结将流过充电电流，其作用也相当于阳极电流 i_A 增加，直至晶闸管转入导通。

二、晶闸管的特性

1. 晶闸管的静态伏安特性

晶闸管的静态伏安特性如图 1-5 所示，位于坐标的第 I 象限和第 III 象限。第 I 象限表示的是正向特性，第 III 象限表示的是反向特性。



视频：晶闸管的特性和参数

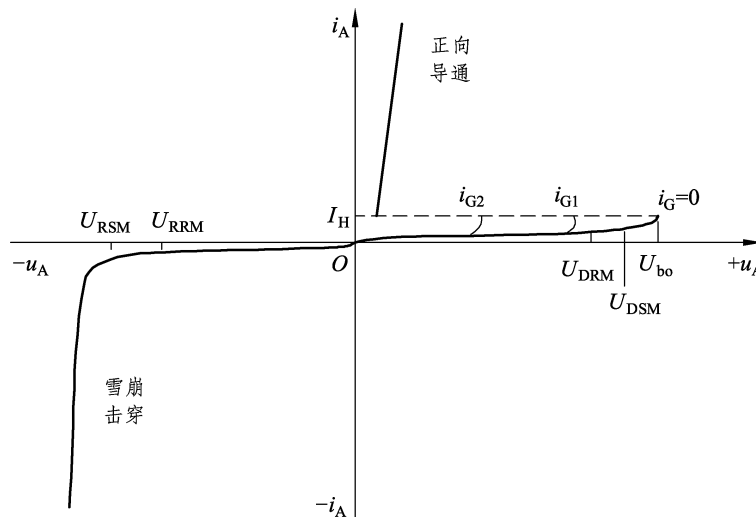


图 1-5 晶闸管的静态伏安特性

晶闸管的正向特性有阻断状态和导通状态之分。门极电流 i_G 为 0 时，在器件的阳极 A 和阴极 K 两端施加正向电压，晶闸管呈现正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} 时，漏电流急剧增大，特性从高阻区（阻断状态）经负阻区（虚线）到达低阻区（导通状态）。晶闸管在导通状态下，通过较大的阳极电流，晶闸管本身的压降很小，约为 1 V。在正常工作时，不允许在 i_G 为 0 时把正向阳极电压加到转折电压 U_{bo} ，而是应该从门极输入触发电流 i_G ，使晶体管导通。随着门极电流 i_G 幅值的增大，正向转折电压 U_{bo} 降低。导通后的晶闸管特性和二极管的正向特性类似。导通期间，如果门极电流 i_G 为零，并且阳极电流降至接近于零的某一数值 I_H 以下，则晶闸管又回到正向阻断状态， I_H 称为维持电流。

晶闸管施加反向电压时，其伏安特性类似二极管的反向特性。在这种情况下，无论门极是否有触发电流 i_G ，晶闸管总是处于反向阻断状态，只有极小的反相漏电流流过。当反向电压超过一定限度到反向击穿电压时，外电路若没有限制措施，则反向漏电流急剧增加，导致晶闸管发热损坏。

2. 晶闸管的动态特性

晶闸管只有导通和阻断这两种稳定状态，不能作为波形放大使用。晶闸管在电路中的工作过程如图 1-6 所示。

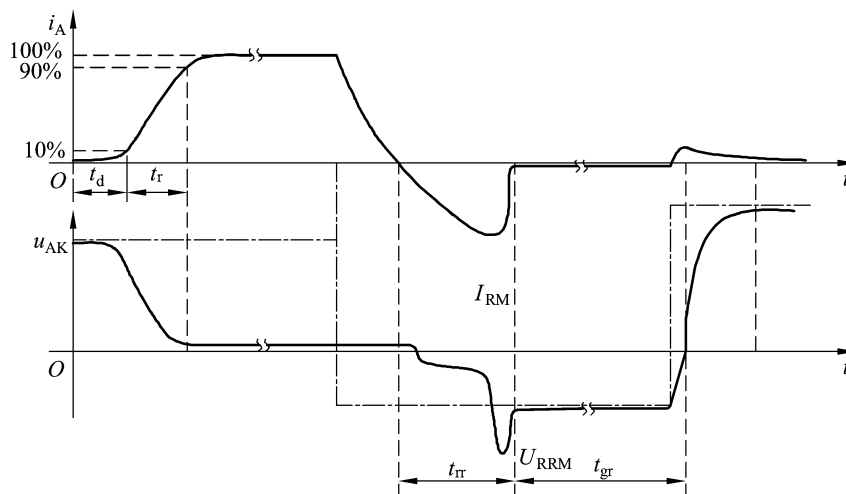


图 1-6 晶闸管的开关过程波形

在坐标轴原点时刻，施加理想的门极触发信号，由于晶闸管内部的正反馈过程需要时间，同时有外电路中电感的限制，阳极电流不能瞬时增加。门极电流从阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的 10% 的时间称为延迟时间 t_d ，同时晶闸管的正向压降也减小。阳极电流从 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间称为上升时间 t_r ，开通时间即为 t_d 和 t_r 两者之和。普通晶闸管的延迟时间 t_d 为 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$ ，上升时间 t_r 为 $0.5 \sim 3 \mu\text{s}$ 。

在某一时刻，外加的阳极电压突然反向，此时门极没有触发信号，由于外电路中电感的存在，阳极电流的衰减也存在着过渡过程。阳极电流逐渐衰减到零，在反方向流过反向恢复电流，到达最大值 I_{RM} 后，再反方向衰减。在恢复电流快速衰减的同时，由于外电路中电感的作用，会在晶闸管两端引起反向的尖峰电压 U_{RRM} ，其大小与外电路电感有密切关系。反向恢复电流最终衰减至接近于零，晶闸管恢复其对反向电压的阻断能力。从正向电流降为零到反向恢复电流衰减至接近于零的这段时间，称为反向阻断恢复时间 t_{rr} 。晶闸管要恢复其对正向电压的阻断能力还需要一段时间，这就是正向阻断恢复时间 t_{gr} 。在正向阻断恢复时间内如果重新对晶闸管施加正向电压，晶闸管会重新正向导通。在实际应用中，应对晶闸管施加足够长时间的反向电压，使晶闸管充分恢复其对正向电压的阻断能力，电路才能可靠工作。晶闸管的关断时间即为 t_{rr} 和 t_{gr} 两者之和，普通晶闸管的关断时间为几百微秒。

三、晶闸管的主要参数

1. 晶闸管的电压参数

1) 断态重复峰值电压 U_{DRM}

断态重复峰值电压是晶闸管处于额定结温且门极开路时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。此电压规定为断态不重复峰值电压（即断态最大瞬时电压） U_{DSM} 的 90%。

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

反向重复峰值电压是晶闸管处于额定结温且门极开路时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。此电压规定为反向不重复峰值电压（即反向最大瞬时电压） U_{RSM} 的 90%。

3) 额定电压

通常取晶闸管的断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 中较小的标值作为该器件的额定电压，并按标准电压等级取整数。实际选用时，额定电压一般取正常工作时晶闸管所承受峰值电压的 2~3 倍作为安全裕量。

2. 晶闸管的电流参数

1) 通态平均电流 $I_T(AV)$

在环境温度为 40 °C 和规定的冷却状态下，稳定结温不超过额定结温时所允许连续流过的最大单相工频正弦半波电流的平均值，定义为通态平均电流。将此电流按照晶闸管标准电流系列取相应的电流等级，作为该晶闸管的额定电流。和电力二极管一样，这个参数是按照正向电流造成的器件本身的通态损耗的发热效应来定义的，因此在使用时应按实际电流有效值与通态平均电流有效值相等的原则来选取晶闸管的电流定额，并预留一定的裕量，一般为实际电流最大值的 1.5~2 倍。

2) 维持电流 I_H

晶闸管被触发导通后，若流过晶闸管的阳极电流下降，能保持晶闸管继续导通的最小阳极电流称为维持电流 I_H ，一般为几十到几百毫安。它的大小与结温有关，结温越高，则维持电流 I_H 越小。维持电流越大的晶闸管更容易关断。

3) 擎住电流 I_L

晶闸管刚从断态转入通态即移除触发信号，在这种情况下能维持晶闸管导通所需的最小阳极电流，称为擎住电流 I_L 。对同一晶闸管来说，通常擎住电流比维持电流大。

4) 浪涌电流 I_{TSM}

浪涌电流是指结温为额定值时，晶闸管在工频正弦波半周期内器件所能承受的最大过载峰值电流，并且紧接浪涌后的半周期应能承受规定的反向电压。在晶闸管的寿命期内，浪涌的次数应该有一定的限制，这个参数可用来作为设计保护电路的依据。

3. 晶闸管的动态参数

1) 断态电压临界上升率 du/dt

断态电压临界上升率是指在额定结温和门极开路的情况下，使晶闸管保持断态所能承受的最大电压最大上升率，常用的单位为伏特每微秒 ($V/\mu s$)。 du/dt 过大，图 1-4 中等效于电容的 PN 结 J_2 中会有充电电流流过。此电流类似于触发电流的作用，一旦电流值足够大，即使所施加的阳极电压低于转折电压 U_{bo} ，也会使晶闸管在不加触发信号的情况下误导通。

2) 通态电流临界上升率 di/dt

通态电流临界上升率是指在规定条件下，由门极触发晶闸管使其导通时，晶闸管能承受而无有害影响的最大通态电流上升率。如果通过晶闸管的电流上升过快，则晶闸管刚一开通时的大电流集中在门极附近的小区域内通过，会造成晶闸管局部过热而损坏。因此，晶闸管触发导通时，实际出现的电流上升率应小于器件允许的临界上升率。

四、晶闸管的派生器件

1. 快速晶闸管

快速晶闸管是在普通晶闸管的基础上进行了改进，它包括常规的快速晶闸管和工作频率较高的高频晶闸管。它们的开关时间以及 du/dt 和 di/dt 承受能力都有明显改善。从关断时间看，普通晶闸管一般为数百微秒，快速晶闸管为数十微秒，高频晶闸管则为 $10\mu s$ 左右。但与普通晶闸管相比，高频晶闸管的不足在于其电压和电流定额不高，同时由于其工作频率较高，开关损耗造成的发热不能忽略。

2. 双向晶闸管

双向晶闸管可认为是一对反并联连接的普通晶闸管的集成。它有两个主电极 T_1 和 T_2 、一个门极 G 。门极使双向晶闸管在主电极的正反两方向均可触发导通，所以双向晶闸管在第 I 象限和第 III 象限有对称的伏安特性。与一对反并联晶闸管相比，双向晶闸管控制电路简单，在交流调压电路、固态继电器和交流电机调速等领域应用较多。由于双向晶闸管通常用在交流电路中，因此不用平均值而用有效值来表示其额定电流值。

3. 逆导晶闸管

逆导晶闸管是将晶闸管反并联一个二极管，制作在同一管芯上的功率集成器件。因此，它不具有承受反向电压的能力，一旦承受反向电压即开通。与普通晶闸管相比，它具有正向压降小、关断时间短、耐高温特性好、额定结温高等优点，适用于不需要阻断反向电压的电路。逆导晶闸管的额定电流有两个：一个是晶闸管电流，另一个则是与之反并联的二极管电流。

4. 光控晶闸管

光控晶闸管又称光触发晶闸管，它是利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管。光照

信号施加于门极的中心光敏区，产生的载流子通过多重放大门极使光控晶闸管导通。小功率光控晶闸管只有阳极和阴极两个端子，大功率光控晶闸管则还带有光缆，光缆上装有作为触发光源的发光二极管或半导体激光器。由于光触发保证了主电路与控制电路之间的绝缘，可避免电磁干扰的影响，且比普通晶闸管具有更高的 du/dt 和 di/dt 承受能力，因此在高电压大功率的场合占据了重要的地位。

模块四 全控型器件



PPT: 全控型器件

一、电力场效应晶体管 (Power MOSFET)

电力场效应晶体管又称电力 MOSFET，是一种全控型电力电子器件。它显著的特点是用栅极电压来控制漏极电流，因此所需驱动功率小，驱动电路简单；又由于是靠多数载流子导电，没有少数载流子导电所需的存储时间，开关速度快，工作频率高。但此类器件的电流容量小、耐压低，一般只适用于功率不超过 10 kW 的电力电子装置。

1. 电力场效应晶体管的基本结构和工作原理

电力 MOSFET 与电子电路中应用的 MOSFET 类似，按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道。电力 MOSFET 在导通时只有一种极性的载流子（多子）参与导电，属于单极型晶体管。与小功率 MOSFET 不同的是，电力 MOSFET 的结构大都采用垂直导电结构，以提高器件的耐压和耐电流能力。图 1-7 (a) 为 N 沟道增强型电力 MOSFET 的结构图，图 1-7 (b) 为电力 MOSFET 的图形符号，其中 G 为栅极，S 为源极，D 为漏极。

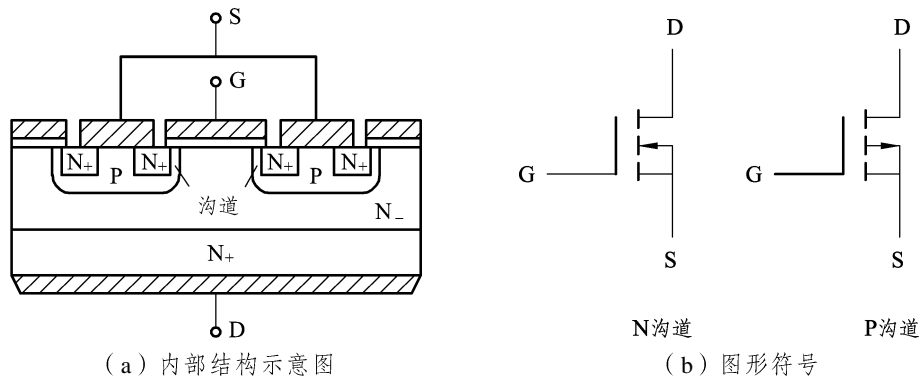


图 1-7 电力 MOSFET 的结构与图形符号

图 1-7 (a) 所示的 N 沟道增强型电力 MOSFET，当漏极 D 接电源正极，源极 S 接电源负极，栅极 G 和源极 S 间的电压 u_{GS} 为零时，由于 P 基区与 N 漂移区之间形成的 PN 结为反向偏置，故漏极 D 和源极 S 之间不导电。如果施加正电压 u_{GS} 于栅源之间，由于栅极 G 是绝缘的，没有栅极电流流过。但栅极 G 的正电压会将 P 区中的少子——电子吸引到栅极 G

下面的 P 区表面。当 u_{GS} 大于开启电压 U_T 时，栅极下 P 区表面的电子浓度将超过空穴浓度，从而使 P 型半导体反型成 N 型半导体，形成反型层，该反型层形成 N 沟道使 PN 结消失，漏极 D 和源极 S 之间形成导电通路。栅源电压 u_{GS} 越高，反型层越厚，导电沟道越宽，则漏极电流 i_D 越大。

2. 电力场效应晶体管的基本特性

漏极电流 i_D 不仅受到栅源电压 u_{GS} 的控制，而且与漏极电压 u_{DS} 也密切相关。以栅源电压 u_{GS} 为参变量，反映漏极电流 i_D 与漏源电压 u_{DS} 间关系的曲线族称为电力 MOSFET 的漏极伏安特性，即输出特性。漏极电流 i_D 和栅源电压 u_{GS} 的关系反映了输入电压与输出电流的关系，称为电力 MOSFET 的转移特性。这两个特性，可称为电力 MOSFET 的静态特性，如图 1-8 所示。

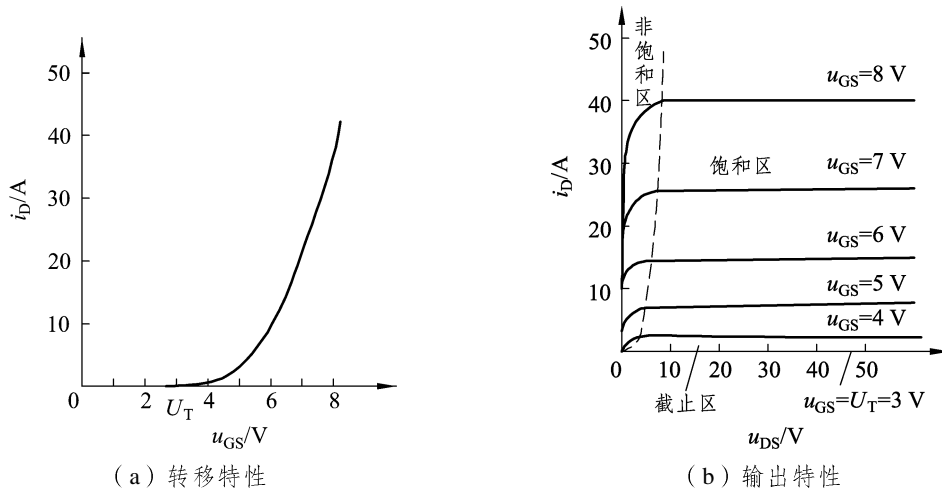


图 1-8 电力 MOSFET 的静态特性

从图 1-8 (a) 可知，当漏极电流 i_D 较大时，漏极电流 i_D 和栅源电压 u_{GS} 的关系近似为线性，这段线段的斜率称为电力 MOSFET 的跨导 G_{fs} ，即 $G_{fs} = di_D / du_{GS}$ 。

图 1-8 (b) 有截止区、饱和区和非饱和区三个区域。这里的饱和是指漏源电压 u_{DS} 增加时漏极电流不再增加，非饱和是指漏源电压 u_{DS} 增加时漏极电流相应增加。电力 MOSFET 工作在开、关两种状态，即指它在截止区和非饱和区之间反复切换。

电力 MOSFET 的开关过程见图 1-9，它体现了电力 MOSFET 的动态特性。图 1-9 (a) 所示的电路可用于测试其开关特性。

开通时，由于电力 MOSFET 存在输入电容，栅极电压 u_{GS} 波形呈指数规律上升。当 u_{GS} 上升到开启电压 U_T 时，电力 MOSFET 开始导通，漏极电流 i_D 出现，且随着 u_{GS} 的上升而增加。当 u_{GS} 达到使电力 MOSFET 进入非饱和区的栅源电压 U_{GSP} 后，电力 MOSFET 进入非饱和区，虽然此时 u_{GS} 继续升高，但 i_D 已不再变化。从 u_{GS} 开始上升至电力 MOSFET 开始导通，这段时间称为开通延迟时间 $t_{d(on)}$ ； u_{GS} 从 U_T 上升到 U_{GSP} 的时间段称为上升时间 t_r 。电力 MOSFET 的开通时间 t_{on} 定义为开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 与上升时间 t_r 之和。

关断时，同样由于输入电容的影响， u_{GS} 波形呈指数规律下降。当 u_{GS} 低于 U_{GSP} 时，漏极电流 i_D 开始下降，直至 u_{GS} 低于开启电压 U_T ， i_D 下降到零。从 u_{GS} 开始下降至电力 MOSFET 开始关断的时间称为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 。 u_{GS} 从 U_{GSP} 下降到 u_{GS} 小于 U_T 时沟道消失， i_D 从通态电流下降到零，这段时间称为下降时间 t_f 。电力 MOSFET 的关断时间 t_{off} 定义为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 与下降时间 t_f 之和。

电力 MOSFET 只靠多子导电，不存在少子储存效应，因而关断过程非常迅速，开关时间在 10 ~ 100 ns，其工作频率可达 100 kHz 以上。

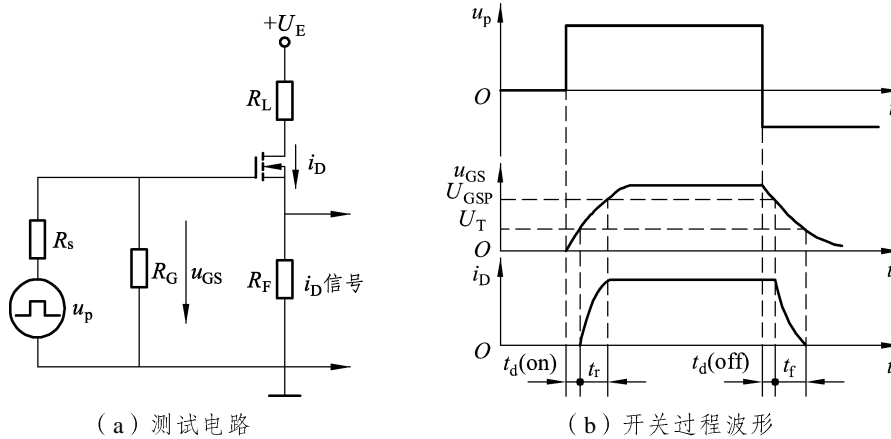


图 1-9 电力 MOSFET 的动态特性

3. 电力场效应晶体管的主要参数

1) 漏源击穿电压 U_{DSB}

U_{DSB} 是指结温为 25 ~ 150 °C 的漏源极击穿电压。该参数决定了电力 MOSFET 的最高工作电压，常用的电力 MOSFET 的 U_{DSB} 通常在 1 000 V 以下。需要注意的是常用的电力 MOSFET 的漏源击穿电压具有正温度系数，因此在温度低于测试条件时， U_{DSB} 会低于产品手册数据。

2) 漏极连续电流额定值 I_D 和漏极脉冲电流峰值 I_{DM}

I_D 和 I_{DM} 是标称电力 MOSFET 电流定额的参数，一般情况下， I_{DM} 是 I_D 的 2 ~ 4 倍。工作温度对器件的漏极电流影响很大，在实际器件参数计算时，必须考虑其损耗及散热情况得出壳温，由此核算器件的电流定额。如在壳温为 80 ~ 90 °C 时，器件可用的连续工作电流只有壳温为 25 °C 时 I_D 的 60% ~ 70%。

3) 栅源电压 u_{GS}

由于栅源之间的绝缘层很薄，当 $|u_{GS}| > 20$ V 将导致绝缘层击穿，因此在焊接、驱动等方面必须注意。

4) 极间电容

电力 MOSFET 的 3 个电极之间分别存在极间电容 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} ，极间电容是影响开

关工作速度的主要因素。其中栅源电容 C_{GS} 和栅漏电容 C_{GD} 是由电力 MOSFET 结构的绝缘层形成的，其电容量的大小取决于栅极的几何形状和绝缘层的厚度。漏源电容 C_{DS} 由电力 MOSFET 内部的 PN 结形成，其电容量的大小取决于沟道面积和 PN 结的反偏程度。

二、绝缘栅双极型晶体管

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是一种电压控制型器件，具有耐高电压和大电流、工作频率高、易于驱动、低功耗等优点，成为当前在工业领域应用最广泛的电力电子器件。

1. IGBT 的结构与工作原理

IGBT 是一种三端器件，有栅极 G、集电极 C 和发射极 E。图 1-10 为 N 沟道 IGBT 的基本结构和图形符号。对比图 1-7 (a) 可知，N 沟道 IGBT 的结构是在 N 沟道电力 MOSFET 的漏极一侧附加 P 层而构成的，形成一个大面积的 PN 结 J_3 。相应的还有 P 沟道 IGBT，将图 1-7 (b) 的箭头反向即为 P 沟道 IGBT 的图形符号。在实际使用中，N 沟道 IGBT 应用较多，以下均以其为例进行介绍。

当在 IGBT 的栅极施加正电压时， P^+ 区向 N^+ 区发射少子，从而对 N^- 漂移区电导率进行调制， N^- 漂移区的电阻急剧降低，使高耐压的 IGBT 也具有低的通态压降。当 IGBT 的栅极电压降到临界电压以下时，沟道消失，IGBT 关断，但 IGBT 在正向导通时 N^- 漂移区储存的大量载流子没有排放回路，只能在 N^- 漂移区内通过再结合慢慢消失，这就导致 IGBT 的关断时间要大于电力 MOSFET 的关断时间。

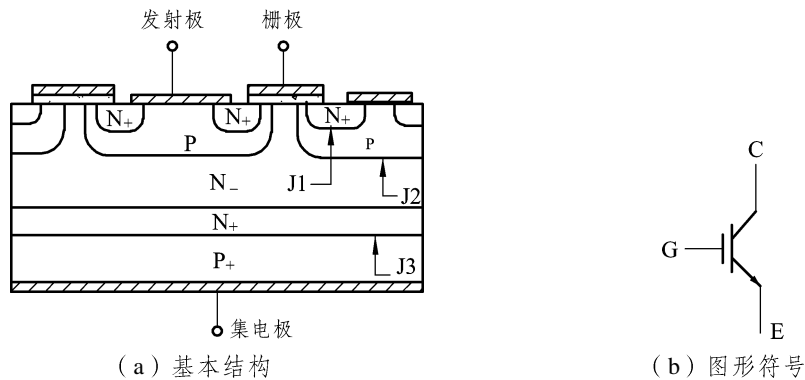


图 1-10 IGBT 的基本结构和图形符号

2. IGBT 的基本特性

IGBT 的静态特性包括转移特性和输出特性。与 MOSFET 类似，IGBT 集电极电流 i_C 与栅射电压 u_{GE} 间的关系称为转移特性，集电极电流 i_C 与栅射电压 u_{GE} 、集射电压 u_{CE} 之间的关系为输出特性，如图 1-11 所示。从图 1-11 (a) 可以看出，当栅射电压 u_{GE} 高于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时，IGBT 开始导通， $U_{GE(th)}$ 的值一般为 $2 \sim 6 \text{ V}$ 。图 1-11 (b) 的输出特性，即为 IGBT 的伏安特性。IGBT 的输出特性分为 3 个区域：正向阻断区、有源区、饱和区。当 $u_{GE} < 0$ 时，IGBT

工作在反向阻断区。在电力电子电路中，IGBT 工作在开关状态，即在正向阻断区和饱和区之间反复切换。

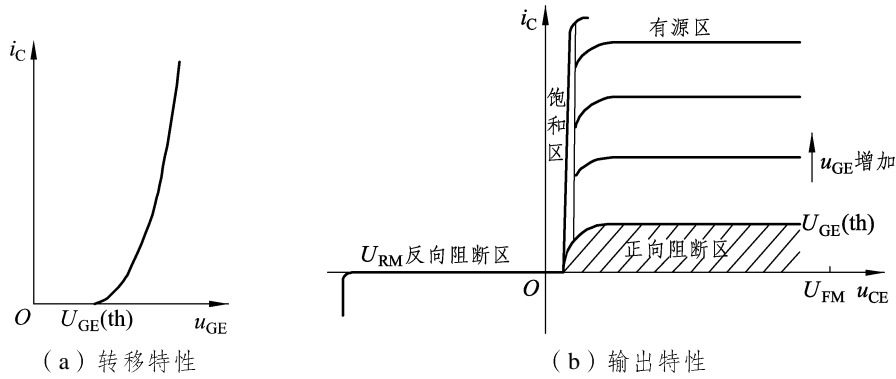


图 1-11 IGBT 的转移特性和输出特性

IGBT 的开关过程见图 1-12，它体现了 IGBT 的动态特性。

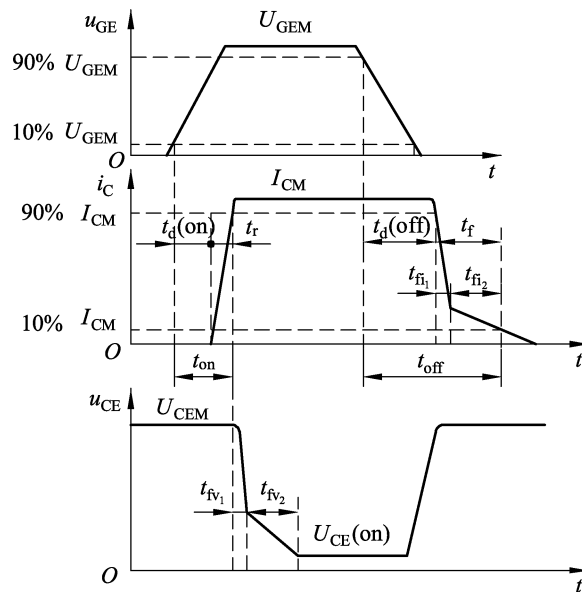


图 1-12 IGBT 的开关过程

IGBT 的开通过程与电力 MOSFET 十分相似，这是因为 IGBT 在开通过程中大部分时间是作为电力 MOSFET 器件工作的。从驱动电压 u_{GE} 上升至其幅值的 10% 至集电极电流 i_c 上升到稳态值的 10%，这段时间称为开通延迟时间 $t_{d(on)}$ ； i_c 从 10% 稳态值上升至 90% 稳态值，这段时间称为上升时间 t_r 。IGBT 的开通时间 t_{on} 定义为开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 与上升时间 t_r 之和。在 IGBT 开通过程中，集射极间的电压 u_{CE} 的下降过程可分为 t_{fv1} 和 t_{fv2} 两个阶段。前者为 IGBT 中等效的 MOSFET 单独工作时的电压下降过程；后者为 IGBT 中等效的 MOSFET 和 PNP 晶体管同时工作时的电压下降过程。只有当 t_{fv2} 阶段结束时，IGBT 才完全进入饱和区域。

在关断过程中，从驱动电压 u_{GE} 下降至其幅值的 90% 到集电极电流 i_c 下降为稳态值的

90%，这段时间称为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ ；集电极电流 i_C 从稳态值的 90% 下降至 10%，这段时间称为下降时间 t_f 。IGBT 的关断时间 t_{off} 定义为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 与下降时间 t_f 之和。同样，集电极电流 i_C 的下降过程也分为 t_{fi_1} 和 t_{fi_2} 两个阶段。前者对应于 IGBT 中等效的 MOSFET 的关断过程，后者对应于 IGBT 中等效的 PNP 晶体管的关断过程。

3. IGBT 的主要参数和性能

1) 最大集射极间电压 U_{CES}

该参数决定了器件的最高工作电压，由内部等效的 PNP 晶体管所能承受的击穿电压确定。

2) 集电极额定电流 I_{CN}

I_{CN} 是指在额定的测试温度（壳温为 25 °C）条件下，所允许的集电极最大直流电流。一般选取实际使用的平均电流值 $I_C = (1/3 \sim 1/2)I_{CN}$ 。

3) 集射饱和压降 $U_{CE(sat)}$

$U_{CE(sat)}$ 是指栅射间施加一定电压，在一定的结温及集电极电流条件下，集射间饱和通态压降。此压降在集电极电流较小时为负温度系数，较大时为正温度系数。它表征了 IGBT 的通态损耗，应该选取 $U_{CE(sat)}$ 较小的 IGBT。

4) 栅射电压 u_{GE}

与 MOSFET 相似，当 $|u_{GE}| > 20\text{ V}$ 将导致绝缘层击穿，因此在焊接、驱动等方面必须注意。

5) 结温

这里的结温是指 IGBT 工作时不导致其损坏所允许的最高结温。

6) IGBT 的擎住效应

IGBT 的擎住效应是指由于某种原因，IGBT 的栅极失去了对集电极电流的控制作用，导致集电极电流急剧增大，从而造成器件功耗过高而损坏。引发擎住效应的原因，可能是集电极电流过大（静态擎住效应），也可能是 du_{CE}/dt 过大（动态擎住效应），温度升高也会增加发生擎住效应的风险。在实际使用中，要避免以上情况的发生。

模块五 其他新型器件

一、MOS 控制晶闸管

MOS 控制晶闸管（MOS Controlled Thyristor, MCT）是将 MOSFET 与晶闸管组合而成的复合型器件。MCT 将 MOSFET 的高输入阻抗、低驱动功率、快速的开关过程和晶闸管的高电压大电流、低导通压降等优点结合起来。另外，MCT 还可承受极高的 du/dt 和 di/dt ，使其保护电路简化；MCT 可在结温为 200 °C 的条件下工作，而一般的额定结温为 150 °C。

MCT 曾一度被认为是一种最有发展前途的电力电子器件，但经过多年的努力，其关键技术没有大的突破，电压和电流容量都远未达到预期的数值，未能投入实际应用。

二、静电感应晶体管

静电感应晶体（Static Induction Transistor, SIT）是一种结型场效应管。它依靠场效应控制器件中导电沟道的形成或消失来实现器件的开关操作。SIT 是多子导电的器件，工作频率与电力 MOSFET 相当，甚至更高，功率容量也更大，因而适用于高频大功率场合。但其不足之处是栅极不加信号时导通，加负偏压时关断，称为正常导通型器件，使用不太方便；通态电阻较大，通态损耗也大。

三、静电感应晶闸管

静电感应晶闸管（Static Induction Thyristor, SITH）是一种大功率场控开关器件，它是在 SIT 的漏极层上附加一层与漏极层导电类型不同的发射极层而得到。SITH 是两种载流子导电的双极型器件，具有电导调制效应，通态压降低、开关速度快、开关损耗小、通流能力强、承受 du/dt 和 di/dt 高的特点。SITH 一般也是正常导通型，但也有正常关断型。其制造工艺较复杂，电流关断增益较小，因而其应用范围还有待拓展。

四、集成门极换流晶闸管

集成门极换流晶闸管（Integrated Gate-Commutated Thyristor, IGCT）于 20 世纪 90 年代后期出现。它是将 GTO（门极可关断晶闸管）芯片与反并联二极管和门极驱动电路集成在一起，再与其门极驱动器在外围以低电感方式连接。IGCT 具有电流大、电压高、开关频率高、可靠性高、结构紧凑、损耗低的优点，目前正在与 IGBT 等新型器件激烈竞争，试图最终取代 GTO（门极可关断晶闸管）在大功率场合的应用。

五、功率模块与功率集成电路

目前，电力电子器件的主要发展趋势是模块化。按照典型电力电子电路所需要的拓扑结构，将多个相同的电力电子器件或多个相互配合使用的不同电力电子器件封装在一个模块中。其优点是：缩小装置的体积，降低成本，提高可靠性，更重要的是对工作频率较高的电路，可以达到减小线路电感，从而简化对吸收或缓冲电路的要求。这种模块称为功率模块（Power Module），如 IGBT 模块（IGBT Module）。

电力电子器件的另一个发展趋势是将电力电子器件与它的逻辑、控制、保护、检测、传感、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上，称之为功率集成电路（Power Integrated Circuit, PIC）。在功率集成电路方面，已有许多实例，如智能功率模块（Intelligent Power Module, IPM），将保护和驱动电路与 IGBT 器件集成在一起，由于采用了能连续监测功率器件电流的有电流传感功能的 IGBT 芯片，从而实现了高效的过流保护和短路保护。IPM 还集成了过热和欠压锁定保护电路，使系统的可靠性得到了进一步提高。

模块六 电力电子器件的驱动

一、电力电子器件驱动电路概述

电力电子器件的驱动电路是电力电子电路和控制电路之间的接口，其功能是将控制电路输出的微弱信号处理成足够大的电压或者电流，提供给电力电子开关器件的控制极，使器件立即开通或者关断。采用性能良好的驱动电路，可使电力电子器件工作在较理想的开关状态，缩短开关时间，减小开关损耗，对变流器的运行效率、可靠性和安全性都有重要的意义。驱动电路通常还是控制电路与主电路之间的电气隔离环节，一般采用磁隔离（采用隔离变压器）和光隔离（采用光电耦合器）。

按半控型器件的特性，只需给其提供开通控制信号；全控型器件则既要提供开通控制信号又要提供关断控制信号。按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的不同，可以将电力电子器件分为电流驱动型和电压驱动型两类。晶闸管属于电流驱动型器件，电力 MOSFET 和 IGBT 属于电压驱动型器件。

二、晶闸管的触发电路

晶闸管是电流驱动型器件，对其门极触发信号的要求是：

(1) 触发脉冲的宽度应保证晶闸管可靠导通，对感性和反电动势负载的变流器应采用宽脉冲或脉冲列触发，如三相全控桥式电路的触发脉冲应宽于 60° 或采用相隔 60° 的双窄脉冲。

(2) 触发脉冲应有足够的幅度，对工作温度较低场合（ 0°C 以下），脉冲电流的幅度应增大为器件最大触发电流的 $3 \sim 5$ 倍，脉冲前沿的陡度也需增加，一般需达 $1 \sim 2 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。

(3) 所提供的触发脉冲应不超过晶闸管门极的电压、电流和功率定额，且在门极伏安特性的可靠触发区域内。

(4) 应有良好的抗干扰性能和温度的稳定性，与主电路电气隔离。

比较理想的晶闸管触发脉冲波形如图 1-13 所示， $t_1 \sim t_2$ 为脉冲前沿上升时间（ $< 1 \mu\text{s}$ ）； $t_2 \sim t_3$ 为强脉冲宽度（约 $10 \mu\text{s}$ ）； $t_1 \sim t_4$ 为脉冲宽度； I_m 为强脉冲幅值（ $3I_{GT} \sim 5I_{GT}$ ）； I 为脉冲平顶幅值（ $1.5I_{GT} \sim 2I_{GT}$ ）。

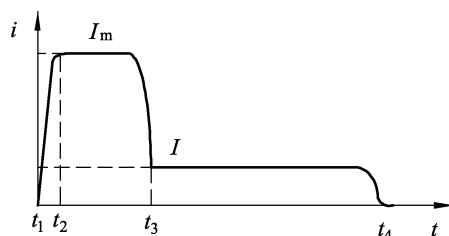


图 1-13 理想的晶闸管触发脉冲波形

三、电力 MOSTET 和 IGBT 的栅极驱动

电力 MOSTET 和 IGBT 是电压驱动型器件。电力 MOSTET 的栅源极之间和 IGBT 的栅极之间都有数千皮法的极间电容，为快速建立驱动电压，要求驱动电路具有较小的输出电阻。MOSTET 开通的驱动电压一般取 $10 \sim 15 \text{ V}$ ，IGBT 开通的驱动电压一般取 $15 \sim 20 \text{ V}$ 。同样，关断时施加一定幅值的负驱动电压（一般取 $-5 \sim -15 \text{ V}$ ），有利于减小关断时间和关断损耗。在栅极串入一只低值电阻（数欧至数十欧）可以减小寄生振荡，该电阻阻值应随被驱动器件电流额定值的增大而减小。

图 1-14 为电力 MOSTET 驱动电路，包括电气隔离和晶体管放大电路两部分。当无输入信号时高速放大器 A 输出负电平， T_3 导通输出负驱动电压。当有输入信号时，A 输出正电平， T_2 导通输出正驱动电压。栅极和源极之间的两只稳压二极管（稳压值为 $18 \sim 20 \text{ V}$ ）反向串联，起双向限幅保护的作用。

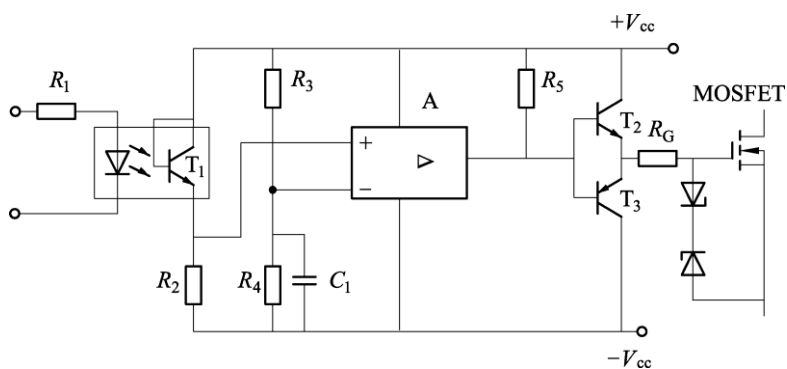
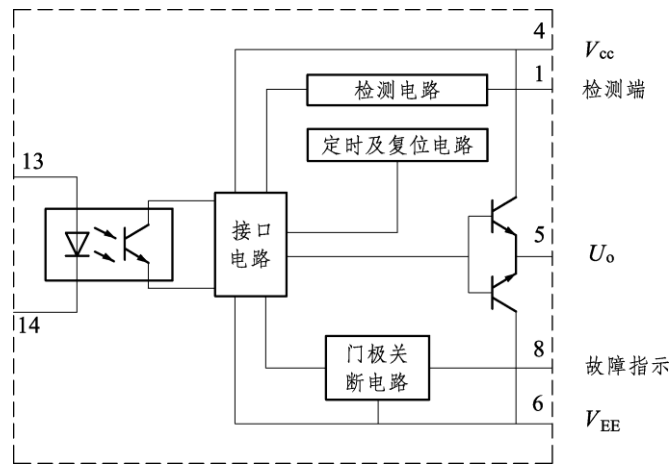


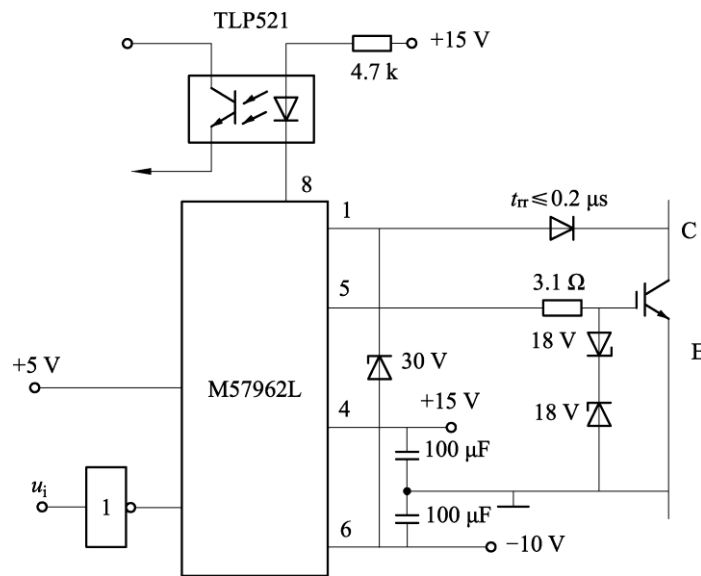
图 1-14 电力 MOSTET 的一种驱动电路

IGBT 的驱动多采用专用的混合集成驱动器，例如富士公司的 EXB 系列（如 EXB840、EXB841、EXB850 和 EXB851）和三菱公司的 M579 系列（如 M57962L 和 M57959L）。同一系列的不同型号其引脚和接线基本相同，只是适用的被驱动 IGBT 器件的容量、开关频率和输入电流幅值等参数有所不同。

图 1-15 给出了三菱公司 M57962L 型 IGBT 驱动器的原理和接线图。该驱动器内部都有退饱和检测和保护环节，当发生过电流时能够快速响应但慢速关断 IGBT，并向外部电路给出故障信号。由引脚 1 经高压快恢复二极管检测主开关管的集电极电位，若电流过大，集电极电位升高，引脚 1 电位也升高。内设的逻辑判断环节在输入光耦导通时，若检测到引脚 1 电位为高电平，则表明工作异常，迅速将输出关断，同时将故障指示的引脚 8 电位拉低，再将故障信号传递给外部的微处理器或其他控制逻辑电路，以便能在数毫秒之内切断引脚 13 的输入控制信号（即在过流时的快速响应和慢速关断）。若在数毫秒内未能切断输入信号，则驱动电路将恢复故障前的导通驱动，如果此时仍然过流，则再检测，再响应。引脚 1 所接的 30 V 稳压二极管起防止高电压串入、保护驱动片的作用。栅极和射极之间两只稳压二极管反向串联，起双向钳位保护作用。M579P62 型驱动器输出的正驱动电压为 $+15 \text{ V}$ 左右，负驱动电压为 -10 V 。



(a) 原理图



(b) 接线图

图 1-15 M57962L 型 IGBT 驱动器原理和接线图

模块七 电力电子器件的保护

电力电子变换和控制系统在运行中，往往会有一些异常情况或者发生故障，对其中的电力电子器件而言，在这些工况下易遭受损坏。同时，由于系统的功率往往比较大，故障的发生也会给人身安全带来隐患。因此，在系统的设计中，除了选择恰当的电力电子器件参数和良好的驱动电路外，还应该配备合适的过电压保护、过电流保护、过热保护、 du/dt 保护和 di/dt 保护措施。

一、过电压保护

造成过电压的原因，可以分成外因和内因两类。

外因如雷电、输入源电压过高或者存在浪涌尖峰电压、突卸负载以及某些非正常的系统操作等。

内因则来自电力电子装置内部器件的开关过程，可以分为换相过电压和关断过电压两种。

1. 换相过电压

晶闸管或电力二极管在导电结束时，不能立即恢复反向阻断能力。如果有反向电压的作用，则会有较大的反向电流通过，使内部残存的载流子消失。当其恢复阻断能力时，反向电流急剧减小，线路中的杂散电感会因为电流的突变而感应出较大的反电动势，从而在晶闸管或电力二极管两端产生过电压。

2. 关断过电压

全控型器件在较高频率下工作，当器件关断时，其流通的正向电流迅速减小，电流变化率很大，即使线路中的寄生电感很小，也能感应出很高的尖峰电压。

对于过电压的情况，保护措施如下：

(1) 采用输入电压检测保护电路。检测到输入过压时，停止变换器的工作。

(2) 采用输出电压检测保护电路。检测到输出过压时，关断开关管使其输出电压降低，回到允许范围后再允许开通工作。

(3) 采用 RC 过电压抑制电路或在交流线路间放置金属氧化物压敏电阻，适用于抑制外因过电压。

(4) 采用关断缓冲或软开关技术，适用于抑制内因过电压。

二、过电流保护

过载和短路这两种情况，都会导致过电流。过电流保护包括限制电流峰值和限制电流均值。一旦电路中出现过流的情况，应该立即关断开关管。所以全控型开关器件的控制或驱动电路中一般都设置了过电流保护环节，它对器件的过电流响应最快。如 IGBT，它的饱和压降会随着电流的增加而增加，当主电路电流过大或发生负载短路故障时，饱和压降超过限定值，驱动电路立即控制关断 IGBT。

为了提高保护的可靠性和合理性，在一般的电力电子装置中，通常都会同时采用几种过电流的保护措施，除了以上的电子保护电路作为第一保护措施之外，还有快速熔断器、过电流继电器等措施，如图 1-16 所示。

快速熔断器是电力电子装置中常用的一种过电流保护措施，在选取时应考虑：

(1) 电压等级应根据熔断后快速熔断器实际承受的电压来确定。

(2) 快速熔断器的发热量 I^2t 值应小于被保护器件的允许 I^2t 值。

(3) 快速熔断器的电流容量应保证其在电路正常过载情况下不熔化。

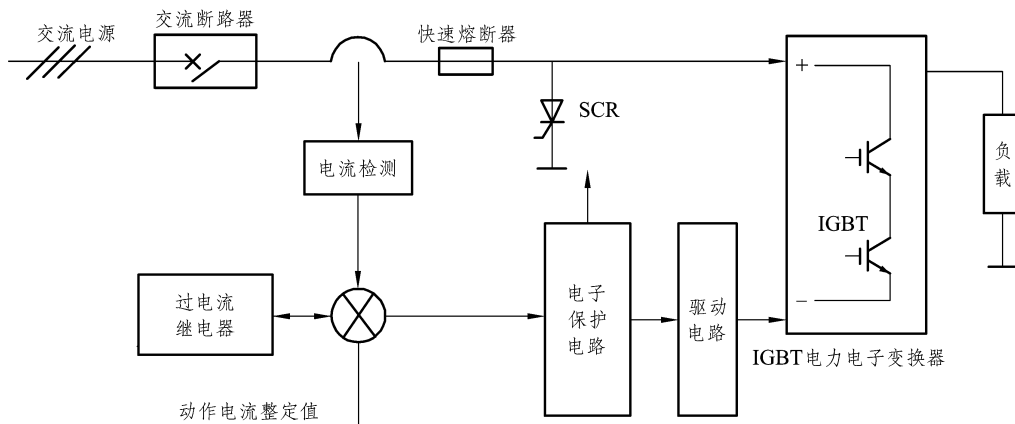


图 1-16 电力电子装置中常用的过流保护措施及保护装置

三、缓冲电路

缓冲电路又称为吸收电路，它主要抑制开关器件在开通和关断的瞬间所承受的内因过电压 du/dt 或者过电流 di/dt 。缓冲电路可分为开通缓冲电路和关断缓冲电路。开通缓冲电路又称为 di/dt 抑制电路，用于抑制器件开通时的电流过冲和 di/dt ，减小器件的开通损耗。关断缓冲电路又称为 du/dt 抑制电路，用于吸收器件的关断电压和换相过电压，抑制 du/dt ，减小器件的关断损耗。

一种常用的开通缓冲电路如图 1-17 所示，当 IGBT 开通时，集电极的电压下降，与之串联的电感 L_s 抑制电流的上升率 di/dt ；当 IGBT 关断时，之前储存在电感 L_s 的能量 $L_s I_m^2 / 2$ ，通过二极管 D_s 续流，以热量的形式消耗在缓冲回路的电阻 R_s 中。图 1-18 表示无缓冲和有缓冲电感时 IGBT 的开通波形。

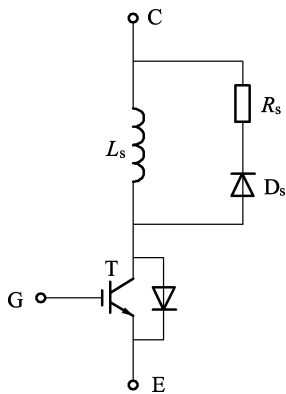


图 1-17 常用的开通缓冲电路

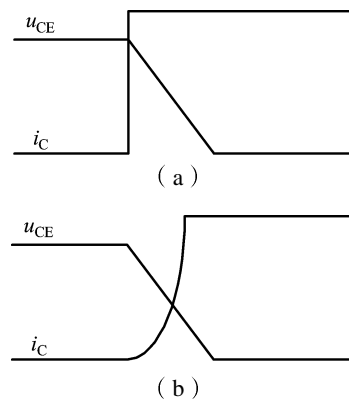


图 1-18 IGBT 开通时的电压和电流波形

图 1-19 为常用的 RCD 关断缓冲电路，它是由电阻 R_s 、电容 C_s 和二极管 D_s 组成的电路网络，与 IGBT 相并联。当 IGBT 关断时，由于二极管 D_s 的单向导电性，电容 C_s 通过二极管 D_s 充电，且电容两端不能突变，抑制了 IGBT 集电极和发射极两端的电压上升率 du/dt 。当 IGBT 开通时，电容 C_s 通过电阻 R_s 放电。电容 C_s 的缓冲作用，使得 IGBT 在关断时其集电极

被电容电压牵制，不会出现集电极电压和电流同时达到最大值的情况。图 1-20 表示无缓冲和有缓冲电容时 IGBT 的关断波形。

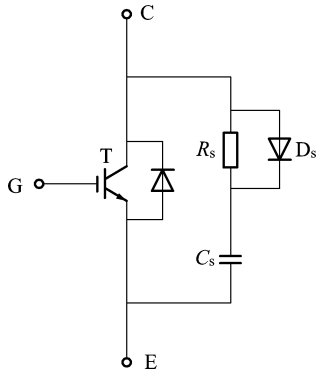


图 1-19 RCD 关断缓冲电路

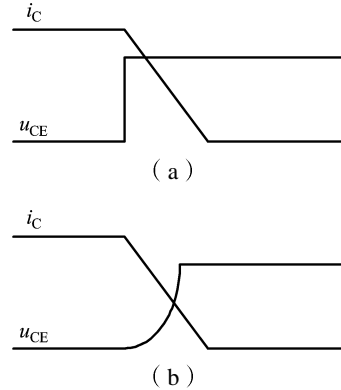


图 1-20 IGBT 关断时的电压和电流波形

在实际中可将开通缓冲电路和关断缓冲电路组合起来使用，称为复合缓冲电路。

四、过热保护

电力电子器件的特性和安全工作区与温度也有密切的关系。器件的结温升高，其安全工作区将缩小；当结温超过最高允许值时，器件将永久性损坏。环境温度高以及器件本身工作时的开关损耗和导通损耗大，都是导致器件过热的原因。解决措施如下：

(1) 加强散热措施。限制温升是过热保护的基础。将温升控制在安全范围内，一方面应使电力电子装置工作在合适的环境温度下，另一方面应配备合理的散热或冷却设备，如风机、散热器等。

(2) 降额使用。电力电子器件若不考虑裕度，长时间在额定参数下工作，局部可能会出现高于允许结温的情况，从而导致器件损坏。因此，在器件最初的选型设计中，应该留出一定的裕度，降额使用。降额的幅度视环境温度和设备可靠性的不同要求而定。

(3) 增加过热保护装置。如果电力电子装置在工作过程中出现异常情况，如环境温度过高，散热设备失效等，都会导致器件温度急剧上升，此时应该停止设备工作，常用方式为热继电器保护。热继电器通常安装在散热器上，直接感受温度的变化，接点接在主电路或控制电路中。当检测到的温度超过设定阈值时，直接切断主电路或者通过控制电路停止工作。也可采用包含热敏电阻的过热检测电路来进行温度检测，温度变化导致热敏电阻的阻值变化，输出相应的信号控制开关管的开通或关断。

模块八 电力电子器件的串并联

当单个器件的电压或电流定额不能满足要求时，需将器件串联或并联，或将装置串联或并联来工作。

一、晶闸管的串联

当晶闸管额定电压小于要求时，可以用两个以上同型号的器件相互串联。理想的串联希望每个器件分压相等，但因特性差异，实际上往往存在着器件电压分配不均匀的问题。

串联的器件流过的漏电流相同，但因静态伏安特性的分散性，各器件分压不等，承受电压高的器件首先达到转折电压而导通，使另一个器件承担全部电压也导通，失去控制作用。同样在反向时，也可能使其中一个器件先反向击穿，另一个随之击穿。这种由于器件静态特性不同而造成的均压问题称为静态不均压问题。

为达到静态均压，应尽量选用参数和特性一致的器件，也可采用电阻均压，如图 1-21 所示， R_p 为均压电阻，并联在晶闸管阴极和阳极两端，其阻值应比器件阻断时的正、反向电阻小得多，这样才能使每个晶闸管分担的电压取决于均压电阻的分压。

由于晶闸管器件动态参数和特性的差异造成的不均压，称为动态不均压问题。采取的动态均压措施包括选择动态参数和特性尽量一致的器件；用 RC 并联支路作动态均压，如图 1-21 所示。此外，采用门极强脉冲触发也可以显著减小器件开通时间上的差异。

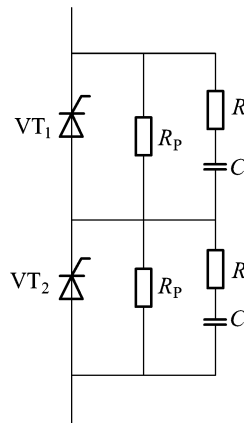


图 1-21 晶闸管串联运行均压措施

二、晶闸管的并联

让晶闸管并联的目的是使用多个器件来共同承担较大的电流，晶闸管并联时出现的问题为：因器件静态和动态特性参数的差异而导致电流分配不均匀。均流不佳，会导致有的晶闸管过载，有的晶闸管电流不足，影响整个电力电子装置的输出。

解决均流问题首要的措施是挑选特性参数尽量一致的器件，此外还可以采用均流电抗器。同样，在门极采用强脉冲触发信号也有助于动态均流。

当需要同时串联和并联晶闸管时，通常采用先串联后并联的方法连接。

三、电力 MOSFET 和 IGBT 并联运行的特点

由于电力 MOSFET 的通态电阻 R_{on} 具有正温度系数，在并联使用时具有电流自动均衡的

能力，因此容易并联使用。但是注意尽量选用通态电阻 R_{on} 、开启电压 U_T 、跨导 G_{fs} 等参数相近的器件并联，同时电路走线和布局应尽量对称，也可在源极电路中串入小电感，起到均流电抗器的作用。

对于 IGBT 的并联运行，由于在 $1/2 \sim 1/3$ 额定电流以下的区段，通态压降具有负的温度系数；在 $1/2 \sim 1/3$ 额定电流以上的区段，通态压降具有正的温度系数。因而 IGBT 在并联使用时也具有一定的电流自动均衡能力，和电力 MOSFET 类似，易于并联使用。同样，在并联时，要注意器件参数的选取和布局走线的设计。

模块九 全控型器件驱动电路



PPT: 全控型器件

一、驱动电路的一般原理

1. 驱动电压

IGBT 在驱动正电压为 $+15\text{ V}$ 左右时，其饱和压降较低，工作特性达到最佳。因此，为使 IGBT 在变流装置中尽可能降低导通损耗，提高变流装置的效率，应尽量减小 IGBT 的饱和导通压降。

要使 IGBT 可靠关断，防止 IGBT 关断的拖尾电流，防止米勒效应在 IGBT 开关动作时使其误导通，采用负压使 IGBT 关断的方案，可设置负压为 -10 V 左右。

2. 隔离电源

一般为保证低压控制高压、小功率控制大功率、弱电控制强电的目的。由 IGBT 的驱动及关断电压可以看出，IGBT 驱动必须匹配合适的隔离电源，即 $+15\text{ V}$ 和 -10 V 。

对于中大规格的 IGBT，隔离电源需要一定的功率，来保证一定的驱动能力。一般采用 PWM 发生器开环的工作方式，将低压侧的电源变换为高压侧的电源。而正负电源的产生采用变压器，按照一定的变比变换而获得。正向的电源可通过齐纳二极管将其稳压处理在 $+15\text{ V}$ 左右，而负压即为总电压减去正向电压。如果通过变换高压侧总电压为 25 V ，减去正向的 15 V ，负向电压即为 10 V 。

图 1-22 中，UC2844 控制器为 PWM 发生器，如图 1-22 中的电路是开环输出 PWM 的一般处理。其中 R_1 、 C_{10} 组成振荡器，为 PWM 设置频率。PWM 频率为

$$f = \frac{1}{1.72 \times R_1 \times C_{10}} \approx 125 \text{ (kHz)} \quad (1-1)$$

为使 UC2844 开环输出 PWM，采用 $10\text{ k}\Omega$ 的下拉电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 。 C_2 为 V_{ref} 脚的滤波电容， R_{11} 、 C_{29} 及二极管 D_3 组成 UC2844 的软启动电路，避免在上电瞬间，由于快速将 PWM 波展开而导致原边三极管电流过大。 C_8 为 PWM 波的杂波滤除处理， R_6 为 PWM 上升、下降沿微调，即可通过调整 R_6 调整上升、下降的速率。

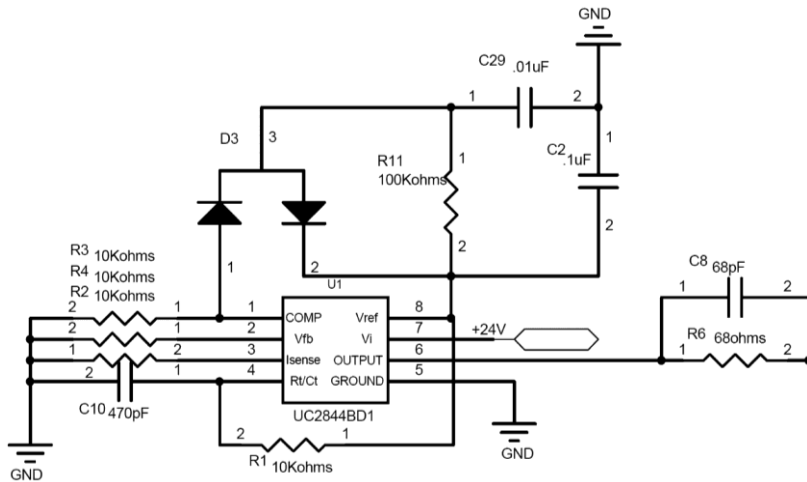


图 1-22 驱动隔离电源 PWM 信号产生

图 1-23 中， Q_1 、 Q_4 为推挽连接的三极管，其为隔离电源工作的开关管，即，当 PWM 为高电平时， Q_1 导通，变压器电压为上正下负，将能量传递到高压侧；当 PWM 为低电平时， Q_4 导通，变压器电压为上负下正，高压侧电压也会翻转。在 PWM 高低电平转换的过程中，在高压侧通过如图 1-23 所示的连接方式，可将正负交替的电压通过二极管整流为直流电压，通过设置变压器匝比为 11 : 13。

$$\text{匝比} = \frac{24 \text{ V} \times 45\% \times 2}{25 \text{ V}} \approx 11 : 13$$

其中，24 V 为低压侧电压，即驱动的供电电压；45% 为 PWM 开环占空比；25 V 为输出总电压，由于副边为倍压整流电路，因此变压器变比要乘以 2。

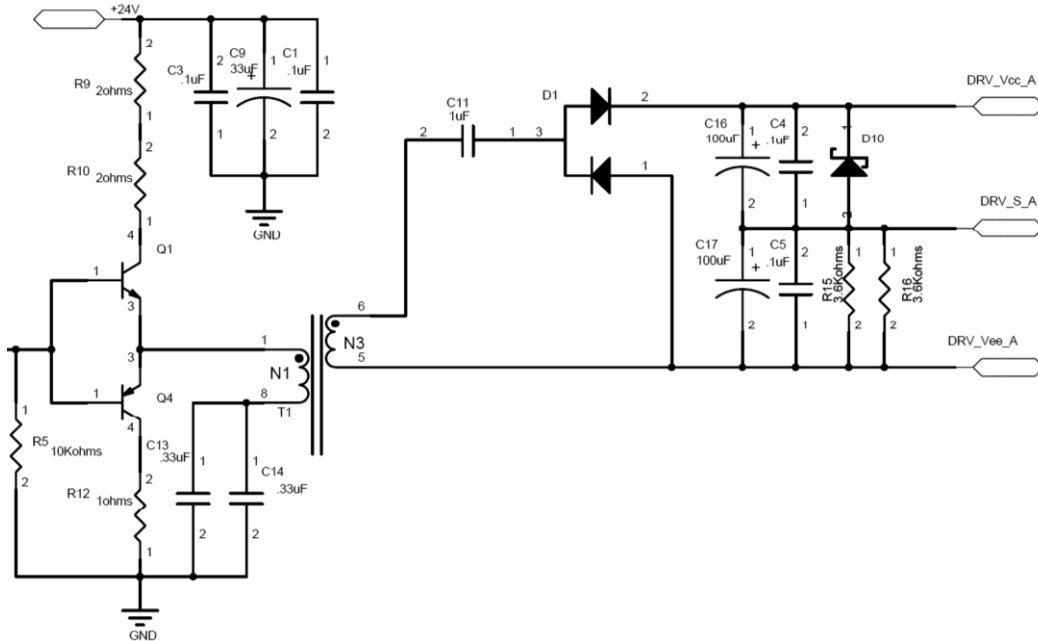


图 1-23 驱动隔离电源

R_9 、 R_{10} 、 R_{12} 分别为当 Q_1 、 Q_4 导通时冲击电流过大而引入的限流措施。 R_5 为防止 Q_4 误导通而放置的放电电阻。 C_{13} 、 C_{14} 为谐振电容，当 Q_1 关断， Q_4 导通时，可以为高压侧提供能量，也可为变压器起到退磁的作用。

高压侧的 C_{11} 、 D_1 为倍压整流的标准接法，该方式可使输出端电压增大一倍。输出端连接方法为正负电压的形式，即正电压通过齐纳二极管 D_{10} 进行稳压处理， R_{15} 、 R_{16} 为输出端的负载，为防止电压过高而放置。 C_4 、 C_5 和 C_{16} 、 C_{17} 为输出滤波电容，用于稳压及滤波。

3. IGBT 驱动信号

IGBT 驱动信号一般由变流器控制器发出，特点是电压较低，信号较弱。为此，需要对其进行处理，转换为有一定功率，具备一定驱动能力的驱动波形来驱动 IGBT。如图 1-24 所示，驱动信号输入从左端进入。

其中 R_{19} 与 C_{20} 形成 RC 低通滤波器，滤除无效的杂散信号。 Q_7 为 2 V 的齐纳二极管，其作用是当输入端信号超过 2 V 时才能将该二极管击穿，才能视为有效信号。 D_4 的作用是防止输入信号的负向电压损坏光电耦合器 U_2 ， R_{21} 和 R_{17} 为调整光电耦合器的输入电流而设置。光电耦合器右侧连接隔离电源的正和负，即 +15 V 与 -10 V，输出端通过推挽的 2 个三极管来提高驱动能力。同时，驱动在 IGBT 的门极与源极加入电容 C_{21} 用来调整其开关特性。

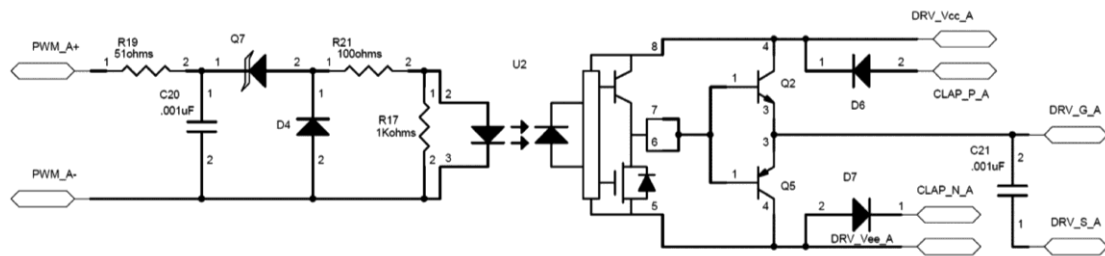


图 1-24 IGBT 驱动信号处理

二、驱动电路板设计

一般来讲，电路板从图纸设计到印制板生产制造，必须要经过以下过程。

1. IGBT 驱动电路原理图设计

在深入分析驱动电路基本功能、性能需求的基础上，详尽地计算 IGBT 基本功耗、驱动电路基本参数。按照分析、计算结果，进行电路原理图设计，所需元器件选型、设计，完成驱动原理图设计的关键一步，为下一步做好充分准备。原理图设计直接决定最终电路能否满足项目的功能、性能需求。

2. PCB 印制电路板设计

对上一步获得的原理图涉及的所有器件进行建库工作，建库重点关注器件在 PCB 板上的形状、基本尺寸、管脚电气属性等内容。对于一些定制器件，比如变压器、电感等非标准封

装的定制件尤其要注意。建库完成后，即可将原理图及图中涉及的器件放入 PCB 中进行 PCB 电路板设计工作。PCB 设计时，首先，根据电路板工作原理，充分考虑电气安全规范等因素，顺序进行布局；其次，根据原理图中器件与器件相互连接的电气网络，进行布线。布线时要充分评估电路工作特性，决定走线方式、走线宽度等。经过布局、布线、优化等过程，得到 PCB 最终的生产文件。

3. PCB 电路板生产制造

由上一步获得的 PCB 生产文件，送交 PCB 印制板制造厂家进行打样制作。PCB 制造厂家拿到 PCB 生产文件后，启动自动化的生产设备，进行 PCB 中铜箔、绝缘层等必需品的准备工作。根据 PCB 走线、过孔位置、过孔大小等细节进行铜箔生产，最后将各层 PCB 与绝缘层按设计胶合在一起，并在表层进行必要的处理，PCB 制造完成。

4. 器件采购、定制

在完成 PCB 设计后，将 PCB 制造文件交到制造厂家后，即可启动器件采购及定制件打样工作。按照原理图设计中选型、设计定型的器件，由原理图设计软件导出器件清单，标准件按照厂家、型号进行采购。定制件与器件生产厂家进行必要的沟通，充分描述清楚需求细节，安排打样生产。所需器件如表 1-1 所示。

表 1-1 IGBT 驱动板器件清单

序号	厂家型号	项目描述及相关参数	数量	位号
1	MMSZ4679T1G	稳压二极管，16 V/1.5 W/SMA	2	D ₁₀ , D ₁₁
2	CC0805JRNPO9BN680	电容，50 V/68pF/5%/NPO/0805	1	C ₈
3	CC0805KRX7R9BB102	电容，50 V，1 nF，10%，，X7R，0805	4	C ₁₉ , C ₂₀ , C ₂₁ , C ₂₂
4	CC0805KRX7R9BB103	电容，50 V，10 nF，10%，X7R，0805	1	C ₂₉
5	CC0805KRX7R9BB104	电容，50 V/0.1 μF/10%/X7R/0805	7	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₇
6	CC0805KRX7R9BB334	电容，50 V/0.33 μF/10%/X7R/08050	2	C ₁₃ , C ₁₄
7	CC0805KRX7R9BB471	电容，50 V，470 pF，10%，X7R，0805	1	C ₁₀
8	CC1210KKX7R9BB105	电容，50 V/1 μF/10%/X7R/1210	2	C ₁₁ , C ₁₂
9	DK15X1593	18 : 24 : 24	1	T ₁
10	EMZA350ADA101MF80G	铝电解电容， 35 V/100 uF/20%/105/2000h/6.3×7.7	4	C ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇ , C ₁₈
11	EMZA350ADA330MF61G	铝电解电容， 35 V/33 uF/20%/105C/2000h/6.3×5.8	1	C ₉
12	HCPL-3120-WG	驱动光耦，HCPL3120, Single Channels, GW8	2	U ₂ , U ₃
13	J2125-04M-2113	插针 4pin	2	J ₂ , J ₃
14	J2125-08M-2113	双排插针 8PIN	1	J ₁
15	MMBD7000	二极管，70 V/0.2 A/1.25 V/SOT23	3	D ₁ , D ₂ , D ₃

续表

序号	厂家型号	项目描述及相关参数	数量	位号
16	MMSZ4679T1G	稳压二极管, 2 V/5%/0.5 W/SOD-123	2	Q ₇ , Q ₈
17	PBSS4350Z	三极管, NPN, 50 V, 3 A, 1.35 W, SOT223	3	Q ₁ , Q ₂ , Q ₃
18	PBSS5350Z	三极管, PNP, 50 V, 3 A, 3 W, SOT223	3	Q ₄ , Q ₅ , Q ₆
19	RC0805FR-071 kL	电阻, 1 kΩ/1%/0.125 W/0805	2	R ₁₇ , R ₁₈
20	RC0805FR-073 k6L	电阻, 3.6 kΩ/1%/0.125 W/0805	4	R ₁₃ , R ₁₄ , R ₁₅ , R ₁₆
21	RC0805FR-0710KL	电阻, 10 kΩ/1%/0.125 W/0805	5	R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ , R ₅
22	RC0805FR-07100RL	电阻, 100 Ω/1%/0.125 W/0805	2	R ₂₁ , R ₂₂
23	RC1206FR-07100KL	电阻, 100 kΩ/1%/0.25 W/1206	1	R ₁₁
24	RC1210FR-0751RL	电阻, 51 Ω/1%/0.33 W/1210	2	R ₁₉ , R ₂₀
25	RC2010FK-071RL	电阻, 1 Ω/1%/0.75 W/2010	1	R ₁₂
26	RC2010FK-072RL	电阻, 2 Ω/1%/0.75 W/2010	2	R ₉ , R ₁₀
27	RC2010FK-0768RL	电阻, 68 Ω/1%/0.75 W/2010	1	R ₆
28	UC2844BD1	UC2844PWM controller	1	U ₁
29	1N4148WS-V	二极管, 100 V/0.15 A/1.0 V/Trr3 nS/SOD323	2	D ₄ , D ₅
30	1PS79SB30	肖特基二极管, 40 V/0.2 A/0.36 V	4	D ₆ , D ₇ , D ₈ , D ₉

三、项目焊接与调试

生产出的 PCB 及采购的元器件均到位后, 即可启动焊接工作。焊接时, 按照原理图逐个将所需器件及 PCB 中对应的位置进行焊接。

焊接好的 PCB 板即可进行调试。调试工作包含驱动电路所要实现的所有功能、性能的验证, 即按照设计的要求, 逐一验证 IGBT 驱动板所有的需求。调试一般按照以下步骤进行。

1. 驱动电路系统电源的调试

按照电路原理, 给单板提供必要的电源, 测试关键点电压情况, 与设计图纸比对, 判断电路工作是否正常。如果正常则进行下一步调试; 如果异常, 一般检查的方法是: 按照电路工作原理, 从输入端到输出端逐一排查, 即检查电路中关键部位的电压、信号是否与理论分析一致。如果不一致, 一般检查的思路是从原理推敲, 检查器件是否焊错、焊反等。按照排查的基本方法进行, 直到电路工作正常。

2. 驱动信号调试

驱动电路电源调试排查完所有问题后, 即可进行信号处理部分调试。按照原理图中给驱动板相应位置输入驱动信号, 与电源部分共同工作, 检查驱动板输出端是否有驱动信号输出。如果不能得到预计的信号, 按照电路工作原理逐一排查, 包括是否存在器件损坏、焊接问题等。

3. 驱动电路联调

以上两步完成后，即可进行驱动电路系统调试。按照原理图给驱动板供上必要规格的电
源，同时将驱动输入信号加入驱动电路中，在驱动输出端与 IGBT 连接好，通过示波器等仪
器检查输出是否正常。如果不正常，分别检查上两步输出情况，逐一排查异常并修改，直到
输出正常为止。

四、小 结

通过本项目实验，学生可大致掌握全控型器件驱动电路的一般应用方法。同时，还可通
过学习设计思路、PCB 焊接、驱动电路调试等环节，掌握 MOSFET 或 IGBT 的开关特性。结
合驱动电路调试结果、全控型器件开关特性及通态特性，对于以下问题应加深思考。

(1) IGBT 驱动 U_{ge} 极限值为 $\pm 20\text{ V}$ ，为此，使其处于 15 V 时，通态压降较低，开关特
性最佳。防止超过 20 V 的电压尖峰，也可保证较低的通态压降，较低 IGBT 损耗。

(2) IGBT 驱动 U_{ge} 关断电平设计为 -10 V 左右，采取负压可快速关断 IGBT，防止电流
拖尾，也可将 IGBT 可靠关断，防止其误导通。



习题及思考题

一、填空题

(1) 电力电子器件可分为_____、半控和_____3 种类型。

(2) 晶闸管是_____半导体开关器件，共有_____个 PN 结。其中 N1 和 P2 区既是一
个三极管的_____，同时又是另一个三极管的_____。

(3) 电力二极管是由一个_____结组成的，它有_____和_____两个极。

(4) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 是_____和_____的复合管，属于_____型
器件。

(5) 电力电子技术是以电力电子器件为核心发展起来的，_____的诞生标志着电力电子
技术学科的诞生。

(6) 晶闸管是一种典型的_____型开关器件，即通过门极与阴极的触发信号来控制其开
通，而其关断无法通过门极控制。

(7) 晶闸管的关断需要利用电网或负载等外电路特性，使流过晶闸管的电流在_____以
下而关断，该关断特性被称为过零关断。

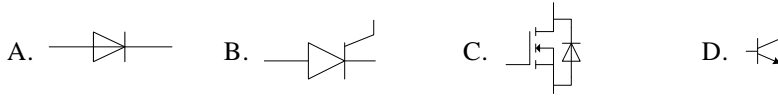
(8) 电力二极管是常用的半导体器件，按照应用场合及特性可分为整流二极管、快恢复
二极管及肖特基二极管，这 3 种二极管中_____的开关速度最高，可达到的功率容量最大
的是_____，反向耐压最低的是_____。

(9) 电力场效应晶体管 MOSFET 是一种典型的_____型单极性器件，MOSFET 管的工
作频率与晶闸管相比，其开关速度_____、开关性能优良，是一种较为理想的电力电子开关元件。

(10) IGBT 中文名称为_____晶体管，在中大功率等级的电力电子变换中有广泛的应用。

二、选择题

(1) 晶闸管是世界上最早的电力电子功率器件，以下符号中哪个是晶闸管 ()。



(2) 以下哪种电力电子器件属于半控型 ()。

A. 二极管 B. 晶闸管 C. MOSFET D. IGBT

(3) IGBT 是常用的大功率电力电子器件，其电路中符号为 ()。



(4) 晶闸管的额定电流为其流过工频正弦半波电流的 ()。

A. 有效值 B. 平均值 C. 最大值 D. 峰-峰值

(5) MOSFET 管与晶闸管相比，MOSFET 管在电路中的工作频率即开关频率可以更 ()。

A. 高 B. 低 C. 相同 D. ABC 均不对

三、简答题

(1) 可控型器件有哪些？不可控型器件有哪些？

(2) 哪些器件是电流控制型？哪些器件是电压控制型？

(3) 维持晶闸管导通的条件是什么？怎样使晶闸管由导通变为关断？

(4) 试分析 IGBT 的导通关断过程。

(5) 电力电子器件过电压保护和过电流保护各有哪些主要方法？

(6) 晶闸管串联使用时应注意哪些问题？电力 MOSFET 和 IGBT 各自并联使用时应注意哪些问题？

(7) 电力 MOSFET 的极间电容包括哪些？输入电容、输出电容和反馈电容与极间电容存在什么关系？

(8) 说明电力 MOSFET 的结构特点。