



绪 论

1.1 概 述

电力电子学(power electronics)这一术语出现在 20 世纪 60 年代,目前国内外普遍接受的定义是:电力电子学是关于“利用电力电子器件组成不同拓扑结构的电路,并以此完成电能控制和不同形式电能之间转换”的理论。电力电子相关技术拓宽了传统电子学的应用领域,为现代通信、计算机、工业自动化、电力工业、航天、汽车等高新技术领域提供高性能、高精度和高效率的电能转换和控制设备,成为发展高新技术的基础和关键。

汽车电力电子学(automotive power electronics)是一门多学科交叉的综合性学科,其以汽车构造与原理、现代电力电子学、计算机科学、电工学、电子学、控制理论等学科为基础,研究电力电子器件、电力电子电路及电力电子装置在汽车上的应用。汽车电力电子学可以简单概括为电力电子技术应用于汽车领域时的相关知识或理论。

电力电子器件是电力电子学应用的物质基础,传统电子学领域的电子器件与电力电子器件存在许多联系和区别,前者更多地用于进行模拟或数字类电信号的处理,体现出低电压、小电流和小功率的特点;而后者往往工作在高电压、大电流和大功率条件下。虽然有些文献将额定电流大于 1A 的电子器件归类为电力电子器件^[1],但两者的界限并不是非常清晰。与此相关,“汽车电子”与“汽车电力电子”这两个术语之间也具有一定的关联和区别。例如,发动机控制系统中的点火系统以及燃油喷射系统,由于采用了功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(功率 MOSFET)作为执行器件,可以看作是汽车电力电子技术的应用,但在现有的技术体系中,往往将其归为汽车电子领域。表 1-1 给出了“汽车电力电子”和“汽车电子”各自具有的技术特征。

表 1-1 “汽车电力电子”与“汽车电子”的技术特征

类 别	汽车电力电子	汽 车 电 子
电压	12~1200 V	3.3/5 V
电流	1A 至数百安	数百毫安
功率	数十瓦至数百千瓦	数瓦至数十瓦
目的	电能转换或控制	模拟或数字信号处理
器件	电力电子器件	模拟或数字电子器件

汽车电力电子系统可定义为：为执行不同形式车载电能之间转换任务所必需的所有元件的完整集合。汽车电力电子部件的定义为：组成汽车各个部分的具有不同形式电能之间转换技术特征的基本单元。因此，汽车电力电子系统可以指单一的汽车电力电子部件，也可以是多个汽车电力电子部件的集成或组合。图 1-1 给出了一个乘用车的燃料电池汽车动力系统结构示意图，图中与燃料电池输出侧连接的直流-直流变换器（也称为主 DC-DC 变换器，main DC-DC converter）、辅助直流-直流变换器（也称为辅助 DC-DC 变换器，auxiliary DC-DC converter）、电机控制器（motor controller）三个汽车电力电子部件组成了一个汽车电力电子系统。

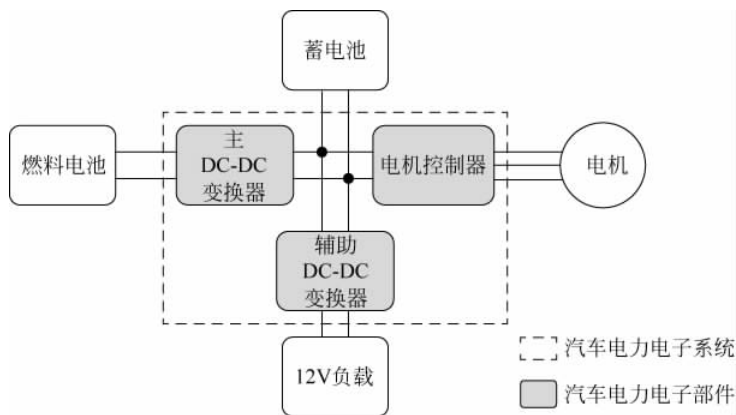


图 1-1 燃料电池汽车动力系统结构示意图

一个汽车电力电子部件应具有下列特征。

- （1）功能上：完成一种形式电能到另一种形式电能的变换。
- （2）电气结构上：包括电力电子电路及维持其正常工作所需的辅助电路，如驱动电路（driving circuit）、保护电路（protection circuit）、微控制单元（micro controller unit, MCU）、数据采集电路（DAQ circuit）、通信电路（communication circuit）、电源电路（supply circuit）等。一般把电力电子电路称为主电路（main circuit），而把所有的辅助电路统称为控制电路（control circuit）。
- （3）机械结构上：包括导电母排、机械安装接口、各类连接器、散热子系统、防护外壳等。
- （4）满足车用条件：具有较高的功率密度和效率；具有一定的防护等级和电气绝缘性能；具有较强的环境适应性和电磁兼容性（electromagnetic compatibility, EMC）。

图 1-2 所示为典型的电动汽车永磁同步电机（permanent magnet synchronous motor, PMSM）驱动系统的构成，包括作为电源的动力蓄电池、实现直流-交流电能变换的驱动电机控制器以及实现电能-机械能变换的永磁同步电机。在图 1-2 所示系统中，电机控制器是一个汽车电力电子部件，其内部主要包括主电路和控制电路两大部分。主电路主要由电力电子器件构成，用来完成直流-交流之间的电能变换，如图 1-3 所示。三相电机控制器的主回路普遍采用三相桥式电路结构，每相桥臂由上下两组电力电子器件构成，图中的 V_1 与 V_4 、 V_3 与 V_6 、 V_5 与 V_2 分别构成 A、B、C 三相桥臂。同时，直流侧连接有电容 C_{DC} 。控制电路由数字信号处理器（digital signal processor, DSP）、驱动电路、保护电路等组成。

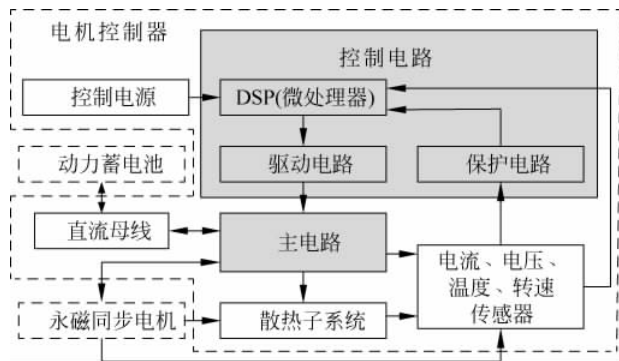


图 1-2 电动汽车永磁同步电机驱动系统的组成

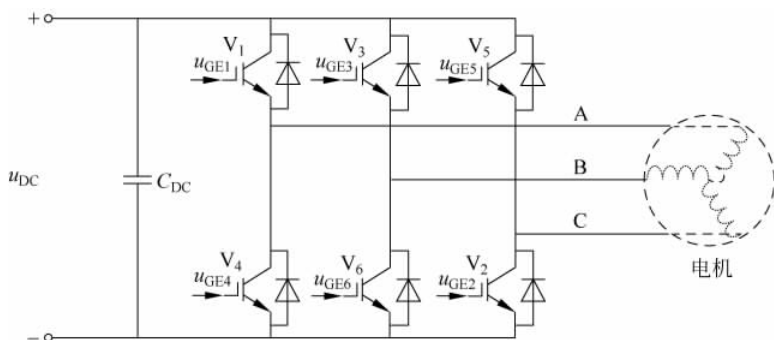


图 1-3 三相电机控制器主电路

当电机驱动车辆行驶时,电机工作在电动(motoring)状态,电能从蓄电池经电机控制器流向电机,电机控制器将直流形式的电能逆变为交流形式的电能;当车辆制动时,电机工作在发电(generating)状态,电能从电机经电机控制器流向蓄电池,电机控制器将交流形式的电能整流为直流形式的电能。电机控制器中的控制电路根据电机实际工作状态,并基于驾驶员意图,对主电路中电力电子器件(图 1-3 中 $V_1 \sim V_6$)的通断进行控制,从而实现对电机转矩或转速的控制。换言之,在电机控制器中,大功率电能的转换是通过通过对主电路中电力电子器件工作状态的控制来实现的。而如何让电力电子器件按正常工作时序通断,则是控制电路的功能。除具有主电路和控制电路外,电机控制器还有各类传感器、散热子系统、连接母排、控制电源以及图 1-2 中没有画出的连接器、防护壳体等构件或子系统。

电力电子技术在汽车上的应用越来越多,作用也越来越明显,这一点已获得汽车厂商和研发机构的广泛认同。在以内燃机为动力的传统汽车上,从发电机到起动机,从照明系统到发动机控制系统,处处都存在电力电子技术。传统汽车正在发展中的一些前沿技术,如智能电气系统、底盘电气化以及各类线控(x-by-wire)技术等,更是离不开电力电子技术。进入 21 世纪以来,随着人们对能源严重短缺和环境污染等问题的重视,新能源汽车开始成为汽车厂商和研发机构的研究热点,部分产品如丰田公司的混合动力汽车普锐斯(Prius)等已经产业化较长时间。从目前来看,无论是纯电动汽车还是混合动力汽车乃至被人们视为更加绿色环保的燃料电池汽车,电力电子技术都在其中扮演着重要角色。近年来受到普遍关注

的智能汽车,由于采用了更多的电气执行部件,电力电子相关技术将会得到更广泛的应用。

汽车电力电子部件已经成为汽车的重要组成部分,其自身的性能对汽车的动力性、经济性、可靠性、安全性、稳定性和舒适性等会产生直接而重要的影响。汽车电力电子技术已经成为现代汽车领域关注和研究的热点。同时,汽车高温、高寒、高湿、高振动、高海拔等特殊的工作环境也对电力电子器件、电力电子电路、电力电子控制等方面提出了非常高的要求。汽车技术的进步也推动了电力电子技术的发展。

汽车电力电子学相关知识的普及以及相关理论的进一步深入研究具有非常重要的意义。

1.2 汽车电力电子学的发展历程

电力电子技术的起源可以追溯到 1957 年晶闸管的问世。1963 年汽车部件生产商德国 BOSCH 公司开始将大功率二极管用于交流发电机输出侧的整流电路,开创了电力电子技术在汽车领域应用的先河,因此可以把这个时间看作汽车电力电子技术发展的起点。

20 世纪 70 年代,不断地有研发机构和厂商将晶闸管、功率场效应晶体管用于整车电气系统或发动机控制系统,但电力电子器件在汽车领域应用的范围很小,相应地,汽车电力电子技术发展比较缓慢。

1989 年,电气与电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers,IEEE)以 Automotive Power Electronics 为标题出版了论文集,这本论文集收录论文的内容以电力电子技术在汽车电气系统上的应用为主^[2]。

20 世纪 90 年代,不断地有学者发表以 Automotive Power Electronics 为主要内容的论文,阐述电力电子技术在汽车领域应用方面取得的新研究成果。

进入 21 世纪后,随着新能源汽车尤其是电动汽车相关技术的发展,电力电子技术在汽车领域的应用范围得到了极大的拓展。一方面,电力电子技术的进步对车辆的相关技术产生了非常大的推动作用;另一方面,汽车技术的不断发展,也对电力电子技术提出了更高的要求。

1.3 汽车电力电子学的应用领域

1.3.1 传统汽车上的应用

在以内燃机为动力的传统汽车上,汽车电力电子技术的应用主要集中在整车电气系统、发动机控制系统、制动系统、转向系统、底盘系统、车身电气设备等,具体为

- (1) 整车电气系统:发电机控制、起动机控制、多电压电气系统等;
- (2) 发动机控制系统:点火系统、燃油喷射系统、节气门控制等;
- (3) 制动系统:气制动阀、液压制动阀控制等;
- (4) 转向系统:电动助力电机控制、电动液压泵电机控制等;
- (5) 底盘系统:主动悬挂控制等;
- (6) 车身电气设备:照明系统、车窗控制、车门控制、冷却风扇控制等。

除以上应用领域外,传统汽车上先进车辆控制技术的使用也往往对汽车电力电子技术具有很强的依赖性。

1.3.2 新能源汽车上的应用

与传统汽车相比,汽车电力电子部件或系统在新能源汽车上的应用更为明显和重要,其中不仅包括处于动力系统重要地位的直流-直流变换器、驱动电机控制器等核心部件,也包括充电系统、电动助力转向系统、电动空调等新能源汽车所需辅助部件或系统。

(1) 直流-直流变换器。主要包括两类:一类为电动汽车用小功率辅助直流-直流变换器,其主要功能是将动力蓄电池提供的高压直流电能变换为 12 V 或 24 V 低压直流电能,供整车控制系统、车身电气系统等使用。这类直流-直流变换器,对于乘用车,功率为 1~3 kW;对于商用车,功率为 3~5 kW。另一类为用于燃料电池和动力蓄电池两个动力源电压匹配和功率分配的大功率直流-直流变换器,这类直流-直流变换器的功率可达几十至近百千瓦。

(2) 电机控制器。电动汽车普遍采用交流异步电机或永磁同步电机来驱动车辆,电机控制器将动力蓄电池的直流电能变换为驱动电机所需的交流电能,是电动汽车的核心部件。对于部分新能源汽车,在电机控制器与动力蓄电池之间还会配有双向直流-直流变换器,用于提高电机控制器输入电压,进而提升驱动系统的综合性能。从功能角度看,这种复合电力电子装置仍可以看作电机控制器。车用电机控制器的功率范围通常为几十至数百千瓦。

(3) 充电系统。充电系统集成了整流、逆变、直流-直流等多个电能变换环节,具有非常复杂的电力电子拓扑结构。它反映了电力电子器件、电力电子控制、电力电子电路等电力电子学核心理论体系在汽车领域的综合应用,可以说是汽车电力电子学应用方面的典型代表。充电系统的功率范围一般为几千瓦至数十千瓦。

对于新能源汽车,除上述应用领域外,电力电子技术还在锂离子电池管理与均衡、燃料电池空气压缩机驱动与控制、电动空调、电动转向、电动制动等领域有所应用。

1.4 汽车电力电子技术的特点和发展趋势

1.4.1 汽车电力电子技术的特点

现代汽车电力电子技术的主要特点表现在以下几个方面。

1) 高效率

高效率体现在汽车电力电子器件和汽车电力电子部件两个层次。对于器件来说,由于导通损耗和开关损耗不断降低,尤其是一些宽禁带(wide band gap, WBG)材料功率器件(如碳化硅器件)的出现和使用,大大提高了器件的工作效率;对于部件来说,采用一些先进控制技术或进行电路拓扑结构优化,可以有效提高汽车电力电子部件的工作效率。

2) 高频率

高频工作是汽车电力电子器件的一个典型特征。大功率直流-直流变换器、电机控制器等电力电子器件的开关频率普遍不低于 20 kHz;在无线充电系统中,开关器件工作频率往往接近 100 kHz。较高的频率可以减轻因器件通断引起的部件工作噪声对车辆司乘人员产生的影响,但同时也会增加设备的开关损耗,并且可能带来突出的汽车电磁兼容问题。

3) 高密度

由于汽车空间有限,同时各部件之间有机电、电气之间的连接和耦合,因此汽车部件的结构设计非常关键。汽车电力电子部件应在满足整车的电气、机械、冷却的需求以及整车安装空间的要求前提下,尽可能提高质量功率密度(功率与质量的比值,单位 kW/kg)以及体积功率密度(功率与体积的比值,单位 kW/L)。汽车电力电子器件越来越高度集成化,分立器件的使用越来越少。多器件模块化以及采用先进工艺可使汽车电力电子器件以及汽车电力电子部件的功率密度越来越高。

4) 智能化

传统汽车上的电力电子器件往往作为电子控制单元(electronic control unit, ECU)的执行器件出现,在一定程度上可将信息处理和功率处理合二为一,这样使电力电子器件的工作呈现智能化的特点。而对于新能源汽车,大功率电力电子部件多采用控制类数字信号处理芯片或高性能微控制单元,从而具有较好的控制精度和数据处理的实时性。虽然目前汽车电力电子电路和智能化控制技术的结合程度已经很高,但还有很大的发展空间。

5) 高性能电力电子器件的应用

与汽车电子领域类似,许多半导体厂商针对汽车应用领域陆续推出了汽车级电力电子器件(automotive qualified power electronic devices),这类器件为适应汽车恶劣的工作环境以及满足安全性、可靠性和耐久性的要求,普遍具有高结温、高效、高可靠性和长寿命的特点。这类器件成本往往也较高。

6) 复杂的工况和频繁的变载

和一些工业用电力电子设备不同,汽车电力电子部件工作在较复杂的工况下,其电气载荷经常会发生剧烈变化。以纯电动汽车为例,驱动车辆所需的能量几乎全部经过电机控制器,而车辆自身质量的变化、驾驶员的操作习惯、实际道路条件等都对电机的输出功率产生较大的影响。相应地,电机控制器输出的电流、电压随之发生剧烈的波动。同样,对于一些车载直流-直流变换器来说,工况仍然比较复杂,只是相对电机控制器,负载变化相对平缓。频繁的变载对汽车电力电子部件的自身控制提出了很大的挑战,同时对电力电子器件的选择以及系统热管理提出了更严格的要求。

7) 突出的电磁兼容问题

汽车电力电子部件工作在高频开关状态,汽车电力电子部件主电路总是在两个或几个不同的电路结构之间不断切换,电路中的电压和电流会含有丰富的高次谐波成分。高电压、大电流是汽车电力电子电路的普遍特点,较高的 di/dt 和 du/dt 除对电力电子器件本身产生较大的电气应力外,还会引起对外的电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)。

1.4.2 汽车电力电子技术的发展趋势

现代汽车电力电子技术的发展与汽车自身特点密切相关,汽车电力电子技术的发展趋势主要体现在五个方面。

1) 节能高效

节能高效是汽车电力电子技术持续追求的目标。低效的汽车部件不仅会降低整车动力系统的性能,而且可能增加车辆散热系统成本和重量,进而增加整车整备质量,降低整车经济性和续航里程。汽车电力电子部件的工作效率与电力电子器件的损耗、电路中无源元件

(电感、电容等)的损耗密切相关,也与控制方法、电路工作模式具有很大的关联性。

2) 电磁环境友好

电磁兼容性是电力电子技术应用中的一个难点,如何抑制和降低汽车电力电子部件对汽车其他电气部件或系统产生的电磁干扰,进而改善整车的电磁环境是汽车电力电子学研究的热点问题。

3) 安全可靠

安全可靠是汽车上任何新技术被采用的一个前提,汽车电力电子技术也不例外。如何保证电力电子部件安全、可靠地工作,并不对车辆其他部件产生不良影响,是摆在研发人员面前的一个重要课题。

4) 器件的定制化和模块化

由于受车辆空间和部件布置的限制,不同厂家、不同类型的车辆对汽车电力电子部件的外形、体积和重量提出了不同的要求。作为汽车电力电子部件核心的电力电子器件的需求也会呈现差异化的特点,按不同整车或部件厂家提出的要求,实现电力电子器件定制化和模块化生产,是汽车电力电子器件的一个发展趋势。

5) 先进控制理论和控制方法的应用

电力电子系统是一种非线性、变结构、电压电流经常突变的离散系统,特别是与一些负载(如电机)构成的系统更是具有强耦合、多变量、非线性的特征。经典的电路理论和控制方法有时无法直接处理电力电子系统的控制问题,也不能满足汽车对电力电子部件的安全、可靠、动态响应快等方面的要求。此外,汽车多采用分层控制,如分为整车控制、动力系统控制以及部件控制,汽车电力电子部件除了要满足整车对自身的性能要求外,还要满足其他层次的控制要求。高性能 DSP 或 MCU 在电力电子控制领域得到了普遍的应用,为一些复杂的控制算法提供了较好的实现手段。现代控制理论与控制方法由于具有自适应、自学习等特点,在电力电子控制领域具有较好的发展前景。

2

汽车电力电子器件

2.1 汽车电力电子器件概述

电力电子器件是汽车电力电子系统或部件中最基本和最重要的组成部分,是车载电能控制和转换的核心。汽车上常用的电力电子器件有四种,分别是功率二极管(power diode)、晶闸管(thyristor)、功率 MOSFET,即功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(power metal-oxide-semiconductor field effect transistor, power MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar translator, IGBT)。其中,应用最广泛的是功率二极管,车上几乎所有电能变换和控制的地方,都能看到它的存在;晶闸管多应用于以电压调节或可控整流为目的的系统或部件;功率 MOSFET 多应用于低电压(如 12~200 V)和小功率(如小于 10 kW)场合;而高电压(如大于 200 V)和大功率(如数十千瓦~数百千瓦)系统或部件,则普遍采用 IGBT 作为主电路器件。近年来,在新能源汽车高电压、中小功率场合,碳化硅功率 MOSFET 有取代硅 IGBT 的趋势。四种电力电子器件在汽车上的应用情况如图 2-1 所示。

功率二极管、晶闸管、功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管等四种汽车电力电子器件的电气符号和理想特性曲线如表 2-1 所示。

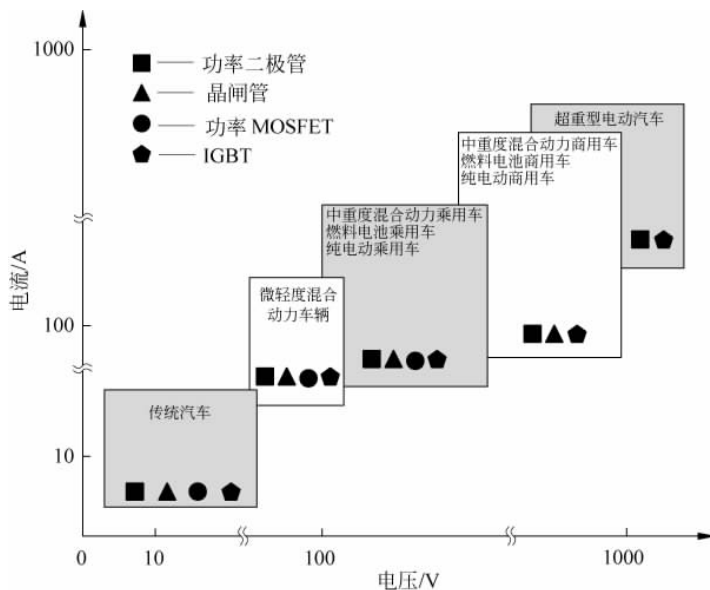
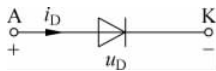
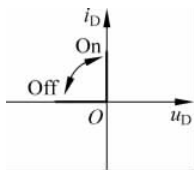
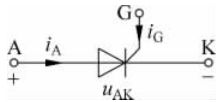
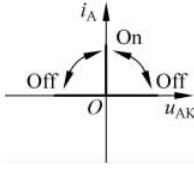
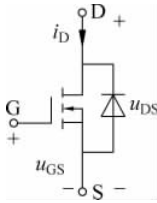
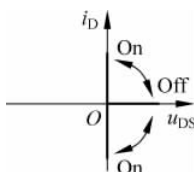
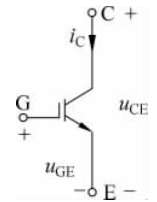
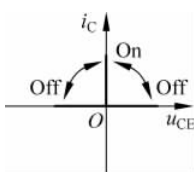


图 2-1 汽车电力电子器件应用情况

表 2-1 四种汽车电力电子器件比较

名 称	符 号	理想特性曲线
功率二极管		
晶闸管		
功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (功率 MOSFET)		
绝缘栅双极晶体管		

汽车上用的电力电子器件与其他工业领域用的电力电子器件在性能上有一定区别,主要原因是汽车电力电子器件的应用环境更为恶劣,车辆有时会处于高温、高湿、强振动、负载变化剧烈、复杂的电磁环境,甚至高海拔的场合,因而汽车电力电子器件需要具有高结温、低通态损耗、长寿命(高于整车寿命)、高可靠性等特点,同时要满足国内外相关汽车标准和规范的要求或通过相关认证。这就要求半导体厂商在材料选取、结构设计、制造工艺上都应予以特殊考虑。但汽车电力电子器件与普通电力电子器件的工作原理与基本电气特性没有区别。

电力电子器件工作在开关状态,并和电路中其他元器件(如电感、电容等)配合,完成对电能的变换或控制。在实际工作过程中,电力电子器件的实际特性与理想特性存在很大区别,具体如表 2-2 所示。

表 2-2 电力电子器件实际特性与理想特性比较

类 别	电力电子器件实际特性	理 想 特 性
关断状态	阻断电压：有限	阻断电压：无穷大
	漏电流：微小	漏电流：0
开通状态	导通压降：数百毫伏至数伏	导通压降：0
	导通电流：有限	导通电流：无穷大
开通过程	所需时间：数纳秒至数微秒	所需时间：0
关断过程	所需时间：数纳秒至数微秒	所需时间：0
驱动与控制	需要复杂的驱动与控制电路，消耗一定的驱动功率或能量	简单的驱动与控制方法，需要的驱动与控制功率或能量为零

2.2 半导体物理基础

2.2.1 半导体中的电子状态和能带

半导体是指导电性能介于导体和绝缘体之间的材料，其电阻率约为 $10^{-6} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 。固体半导体材料分为晶态半导体和非晶态半导体两类。组成晶体的原子(或离子)按一定的方式规则排列，具有一定的外形和固定的熔点。晶体又可以分为单晶体和多晶体。单晶体是指整个晶体由大量原子按一定的方式周期性重复排列而成，单晶体的原子间距通常只有零点几纳米；多晶体由很多小晶粒无规则地杂乱结合而成，每个小的晶粒可以看成是单晶体。制造半导体器件的材料多为单晶体，如金刚石(碳的同素异形体)、硅、锗、氮化镓、碳化硅等。其中，硅与锗等是由单一元素构成的，称为元素半导体；而氮化镓、碳化硅等是由两种元素以确定的原子配比形成的化合物，称为化合物半导体。目前，单晶硅、单晶碳化硅是汽车电力电子器件的主要制造材料。

一个孤立的原子，其全部束缚电子都按一定规律分布在距离原子核远近不同的分离轨道上。由于各轨道与原子核之间的距离不同，各轨道上的电子因原子核静电吸引作用而具有的势能不同，因而核外电子的空间相对位置对应于一定的能量关系，也就是说核外电子按能级(energy level)分布。当一个电子处于带电原子核影响范围之外，也就是在距离原子核无限远的位置时，其能级被称为真空能级(vacuum level)，这样的电子被称为自由电子。可以用一组间隔不同的平行线来表示电子的能级，称为能级图。图 2-2 所示为孤立硅原子模型及其核外电子的能级图，平行线之间的间隔大小表征相应轨道电子的势能之差。

不同于孤立原子，晶体内部每个电子除受到自己所属的原子核作用外，还会受到其他原子核的库仑引力作用，能级将发生分裂。晶体中有多少原子，能级就会分裂为多少条。把由孤立原子的一条能级分裂而成的多个能级的集合称为能带(energy band)，如图 2-3 所示。不同轨道上的电子受其他原子核的影响程度是不同的，所以不同能级分裂而成的能带在疏密程度上也会不同。自由电子和外层束缚电子受到的其他原子核影响较强，因而分裂能级距离较大，能带也较宽；而内层束缚电子受到其他原子核影响较弱，因而分裂能级很密集，能带较窄。轨道越是靠近原子核的电子越是如此，甚至可能“带状特征”不明显，与孤立原子