



电力电子技术

POWER ELECTRONICS

哈尔滨工业大学 王明彦

第1章 绪论



1.1 什么是电力电子技术

1.2 电力电子技术的发展史简述

1.3 电力电子技术的应用概述

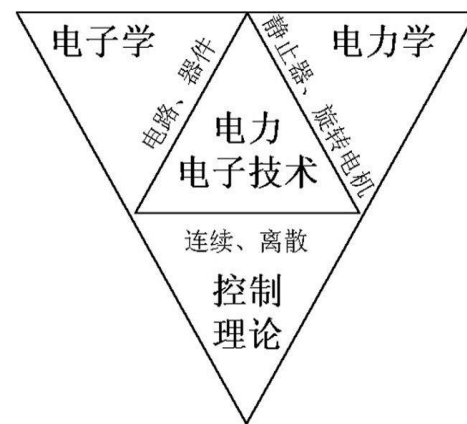
1.4 教学大纲简介

1.1 什么是电力电子技术

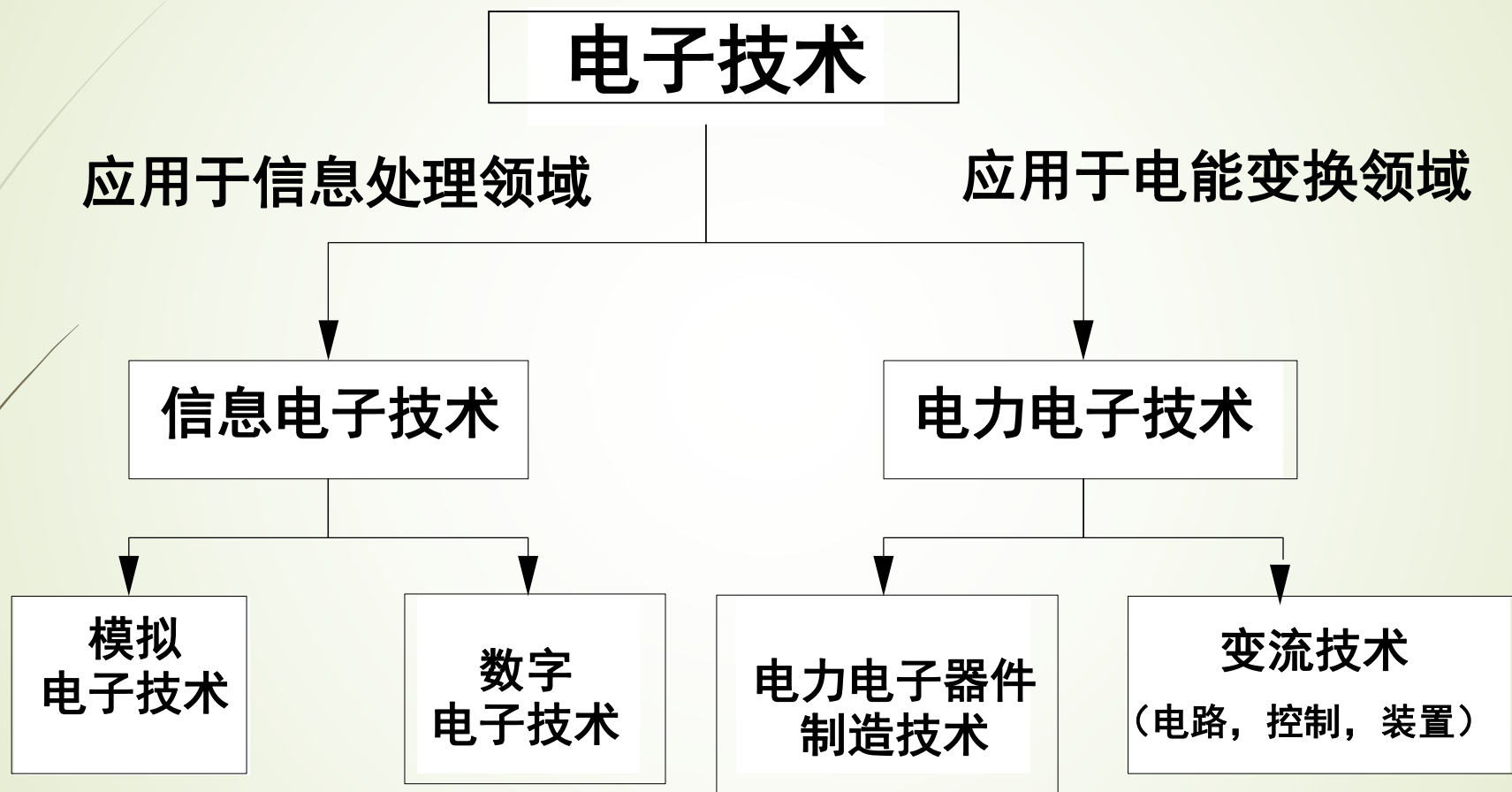
- **电力电子技术——问题的提出：电力电子技术的关键问题之一是“电能变换”技术**
在直接从公用电网/蓄电池得到的交流/直流电的性能不能满足负载需求的场合，需要进行电能变换
- **电力电子技术是电子技术发展的两大方向之一：信息电子技术和电力电子技术**
- **信息电子技术领域**（包括模拟电子技术和数字电子技术）
 - 处理对象：信号和信息——发生、放大、转换、传输等（器件：Transistor、IC、LSI、……）
 - 处理对象的特征：以较低电压/较小电流承载的“信息/信号”
- **电力电子技术**（应用于电力领域的电子技术）
 - **通过对电子运动的控制实现对电能进行变换和控制的电子技术**（器件：Power Transistor 等）
 - 表征电能状态的参数：电压/电流（种类和幅值）、频率、相位、相数、……
 - 电能变换控制：对电力的种类和电能的一个或多个参数进行变换控制
 - 处理对象的特征：以较高电压/较大电流承载的“电力/电能”。

1.1 什么是电力电子技术

- **进一步认识电力电子技术**——用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术
 - 对电子的运动进行控制：Based on 电力电子器件，例如 Power Transistor，Power-MOSFET，IGBT等
 - 对电能进行变换和控制：Based on 电力电子电路，由电力电子器件组成的变流电路——整流电路、逆变电路等
 - 分成两个分支：电力电子器件制造技术（半导体物理）、变流技术（电路 + 控制）→ 变得了、变得好
 - 电力电子器件的制造技术——电力电子技术的基础
 - 变流（电能变换）技术——电力电子技术的核心
- **电力电子学**——**电力学、电子学**和**控制理论**三个学科交叉
- **电力与电能的区别**
 - 电力是一种能在电路中流动的力量；电能 (Electric energy) 是一种可以转换为其他形式能量的二次能源；
 - 电能是在电力作用下产出的可以被使用的一种二次能源，而电力则描述了这种力量及其在电路中的作用过程。

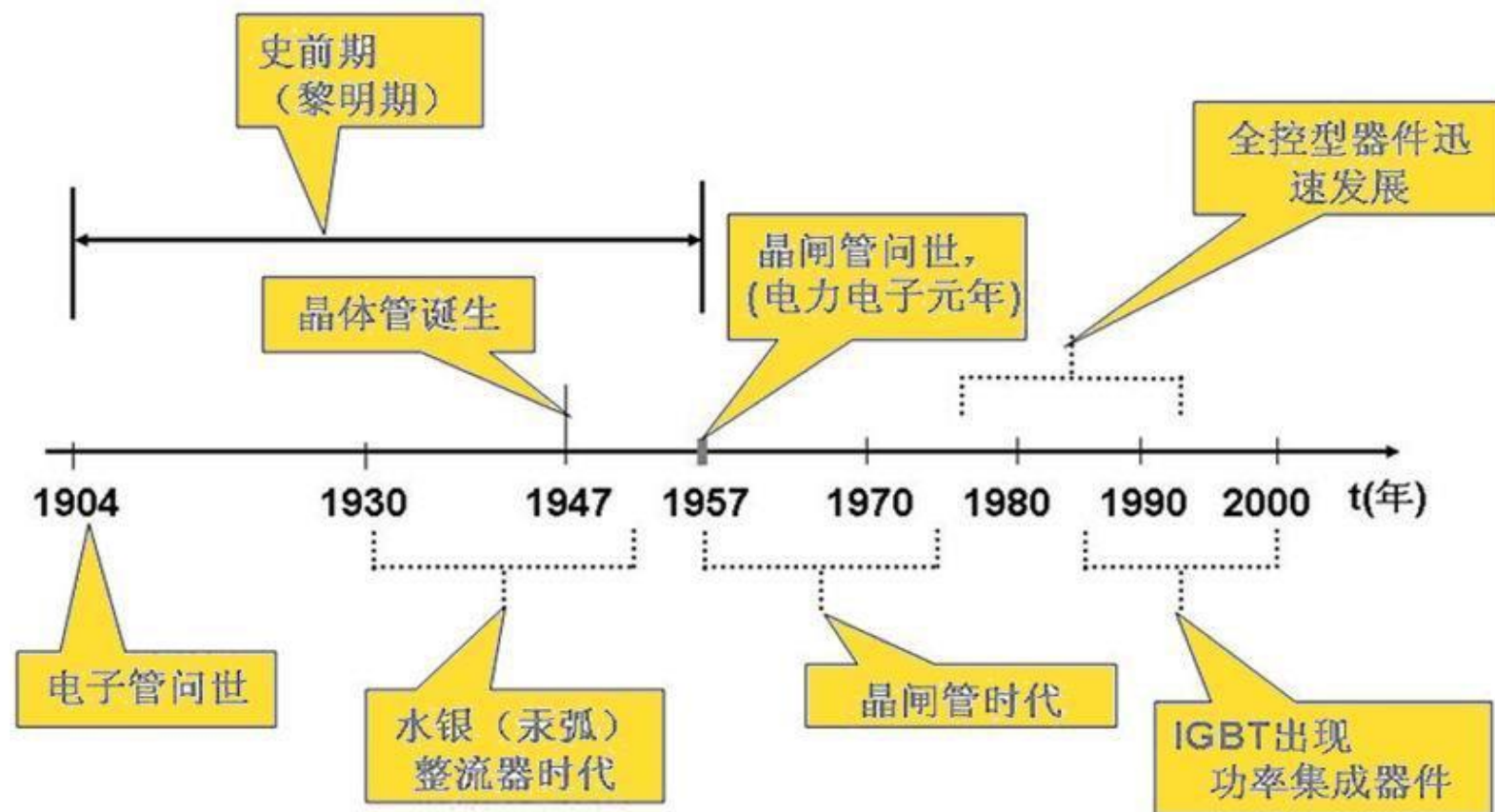


1.1 什么是电力电子技术



1.2 电力电子技术的发展史简述

□ 电力电子技术的发展史



□ **1957年：**“通用电气”研制出晶闸管，标志电力电子技术的诞生。

1.2 电力电子技术的发展史简述

晶闸管出现前的时期：电力电子技术的史前期/黎明期

✎ 1904年电子管：

在真空中对电子流进行控制——开启了电子技术用于电力领域的先河

✎ 20世纪30年代到50年代水银整流器和直流发电机组：

广泛用于电化学工业、直流输电、电气铁道、直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动

各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用

✎ 1947年贝尔实验室晶体管：

引发了电子技术的一场革命。

1.2 电力电子技术的发展史简述

晶闸管时代

- ❑ 晶闸管优越的电气性能和控制性能→很快取代了水银整流器和旋转变流机组、应用范围也迅速扩大
- ❑ 电力电子技术的概念和基础——由晶闸管及其变流技术的发展而确立
- ❑ 通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件→半控型器件
- ❑ 通常依靠电网电压等外部条件来实现关断→使得应用受到了很大的限制
- ❑ 对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，简称相控方式。

1.2 电力电子技术的发展史简述

全控型器件和电力电子集成电路（PIC）

- 20世纪70年代后期，以门极可关断晶闸管（GTO）、电力双极型晶体管（BJT）和电力场效应晶体管（Power-MOSFET）为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是，通过对门极（基极、栅极）的控制既可使其开通又可使其关断
- 采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制（PWM）方式。相对于相位控制方式，可称之为斩波控制方式，简称斩控方式
- 在20世纪80年代后期，以绝缘栅极双极型晶体管（IGBT）为代表的复合型器件异军突起。它是MOSFET和BJT的复合，综合了两者的优点。与此相对，MOS控制晶闸管（MCT）和集成门极换流晶闸管（IGCT）复合了MOSFET和GTO
- 把驱动、控制、保护电路和电力电子器件集成在一起，构成电力电子集成电路（PIC），这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。电力电子集成技术包括以PIC为代表的单片集成技术、混合集成技术以及系统集成技术
- 随着全控型电力电子器件的不断进步，电力电子电路的工作频率也不断提高。与此同时，软开关技术的应用在理论上可以使电力电子器件的开关损耗降为零，从而提高了电力电子装置的功率密度。

1.2 电力电子技术的发展史简述

例：第1代至第7代 IGBT 的结构和性能对比如下表所示，每一代 IGBT 芯片在电流密度、耐压性能、开关性能和导通性能方面，都比上一代产品更具明显优势，达到了对半导体材料更高效利用的目的。

表 1 不同代次 IGBT 芯片结构和性能对比

Table 1 Comparison of structure and performance between different generation IGBTs

MOS 结构 + 体结构	芯片面积 (相对值) /%	工艺线宽 / μm	通态饱和压降 / V	关断时间 / μs	功率损耗 (相对值) /%	断态电压 / kV	年份
平面 + 穿通	100	5.0	3.0	0.50	100	0.6	1988
改进平面 + 穿通	56	5.0	2.8	0.30	74	0.6	1990
沟槽 + 穿通	40	3.0	2.0	0.25	51	1.2	1992
平面 + 非穿通	31	1.0	1.5	0.25	39	3.3	1997
平面 + 场截止	27	0.5	1.3	0.19	33	4.5	2001
沟槽 + 场截止	24	0.5	1.0	0.15	29	6.5	2003
微沟槽 + 场截止	20	0.3	0.8	0.12	25	7.0	2018

1.2 电力电子技术的发展史简述

- 经过近 60 多年的持续开发与迭代，传统硅基功率器件性能已经逼近硅材料的极限
- 21 世纪初，各国相继开始了以 SiC 和 GaN 为代表的宽禁带（Wide Bangap, WBG）器件的研发
- 由于 WBG 材料在跃迁能级、饱和漂移速率和导电导热性能方面具有优势，SiC MOSFET 和 GaN 高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistor, HEMT）等器件非常适合应用于高压、高温、高频和高功率密度等领域，带来了电力电子器件发展的新机遇
- 宽禁带半导体器件的成熟与应用，极大地拓展了功率半导体器件家族的应用领域，具有了更优异的器件性能和更广阔的开关频率范围。

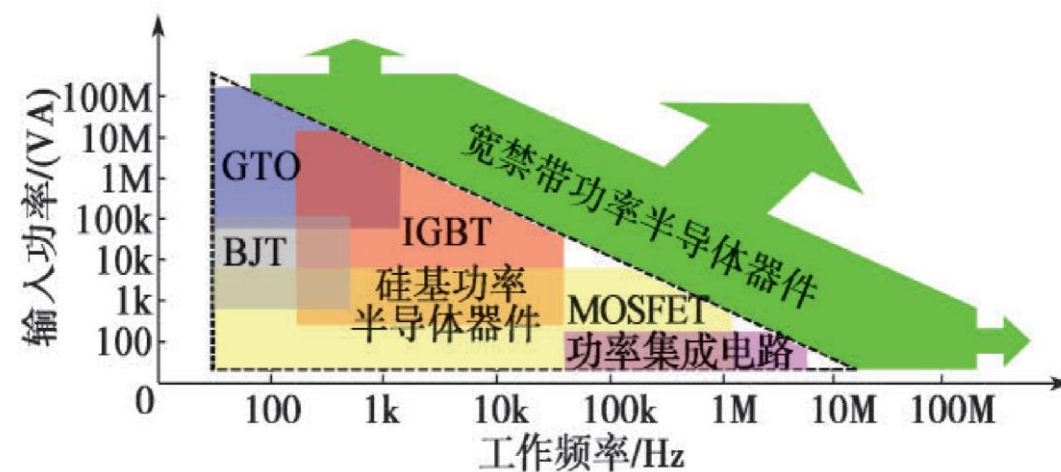


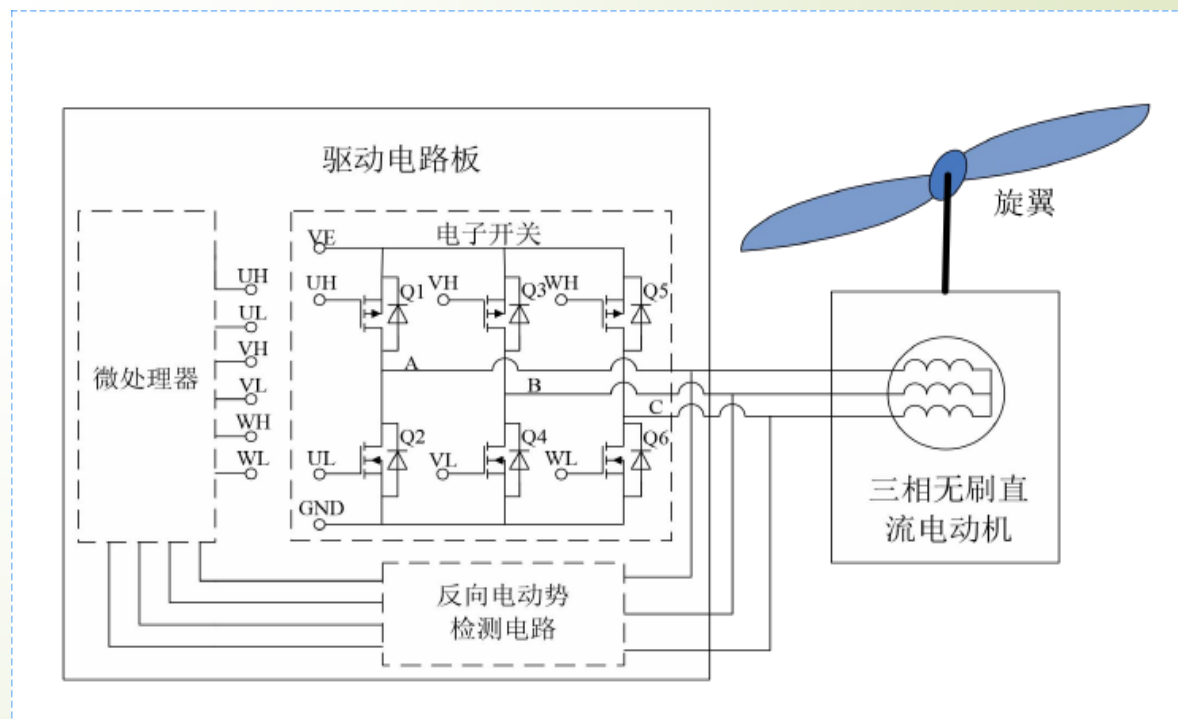
图 10 硅基和宽禁带器件的应用范围

Fig. 10 Application areas of Si and WBG power devices

1.3 电力电子技术的应用概述

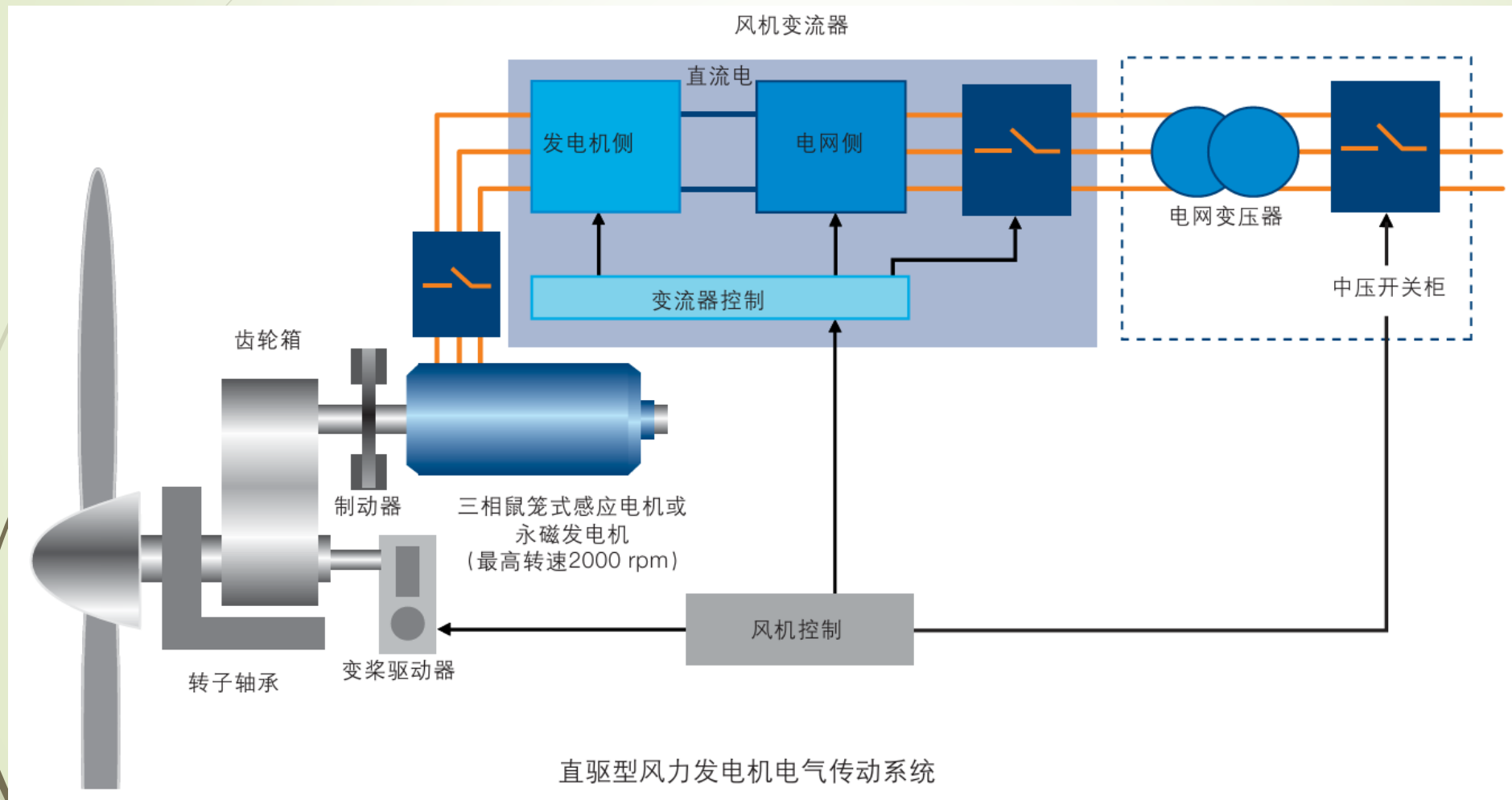
- 电力电子技术的应用范围十分广泛
- 一般工业，交通运输，电力系统，通信系统，计算机系统，新能源系统，家用电器等领域

➤ 无人机：电驱动及其控制系统



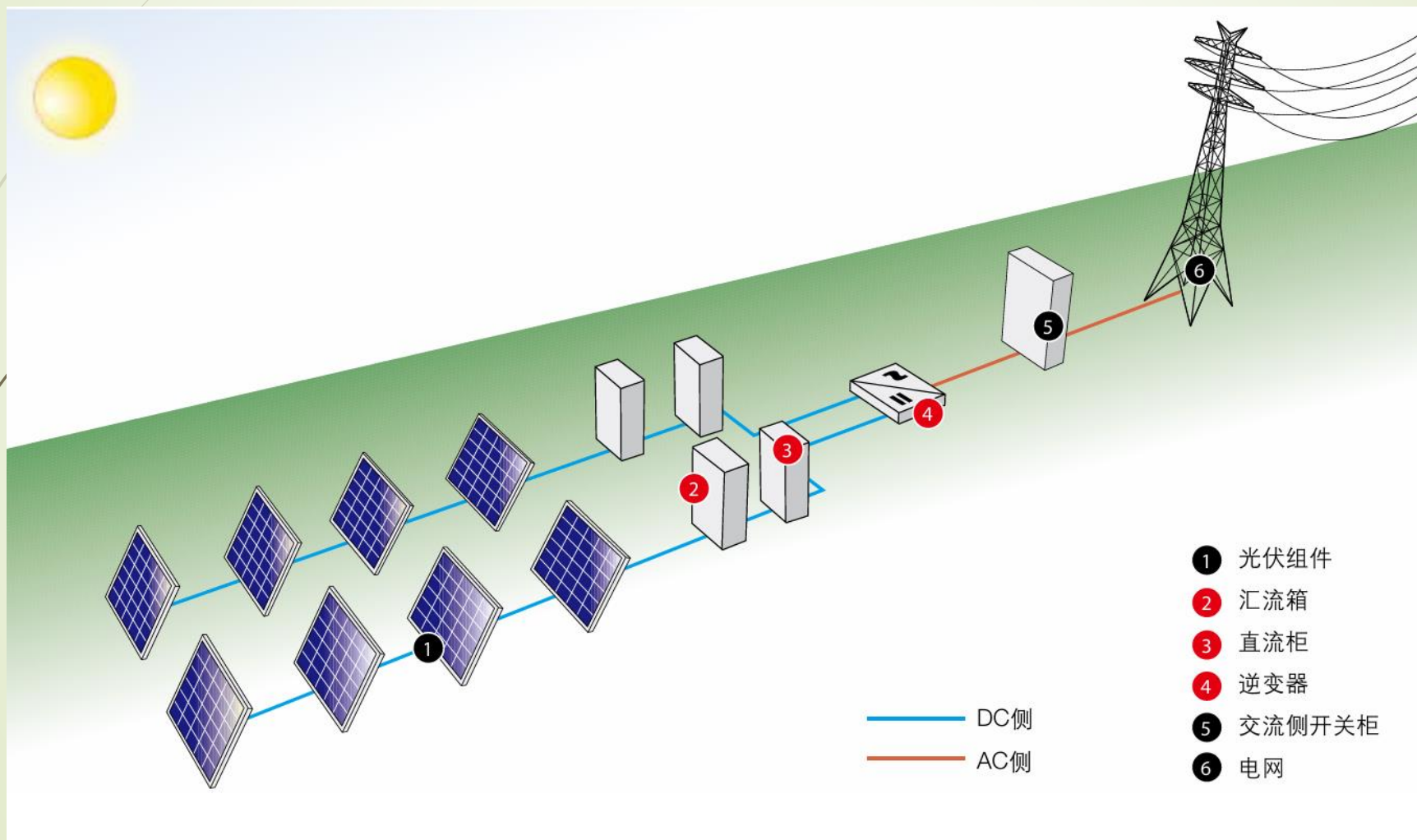
1.3 电力电子技术的应用概述

➤ 直驱型风力发电机电气传动系统



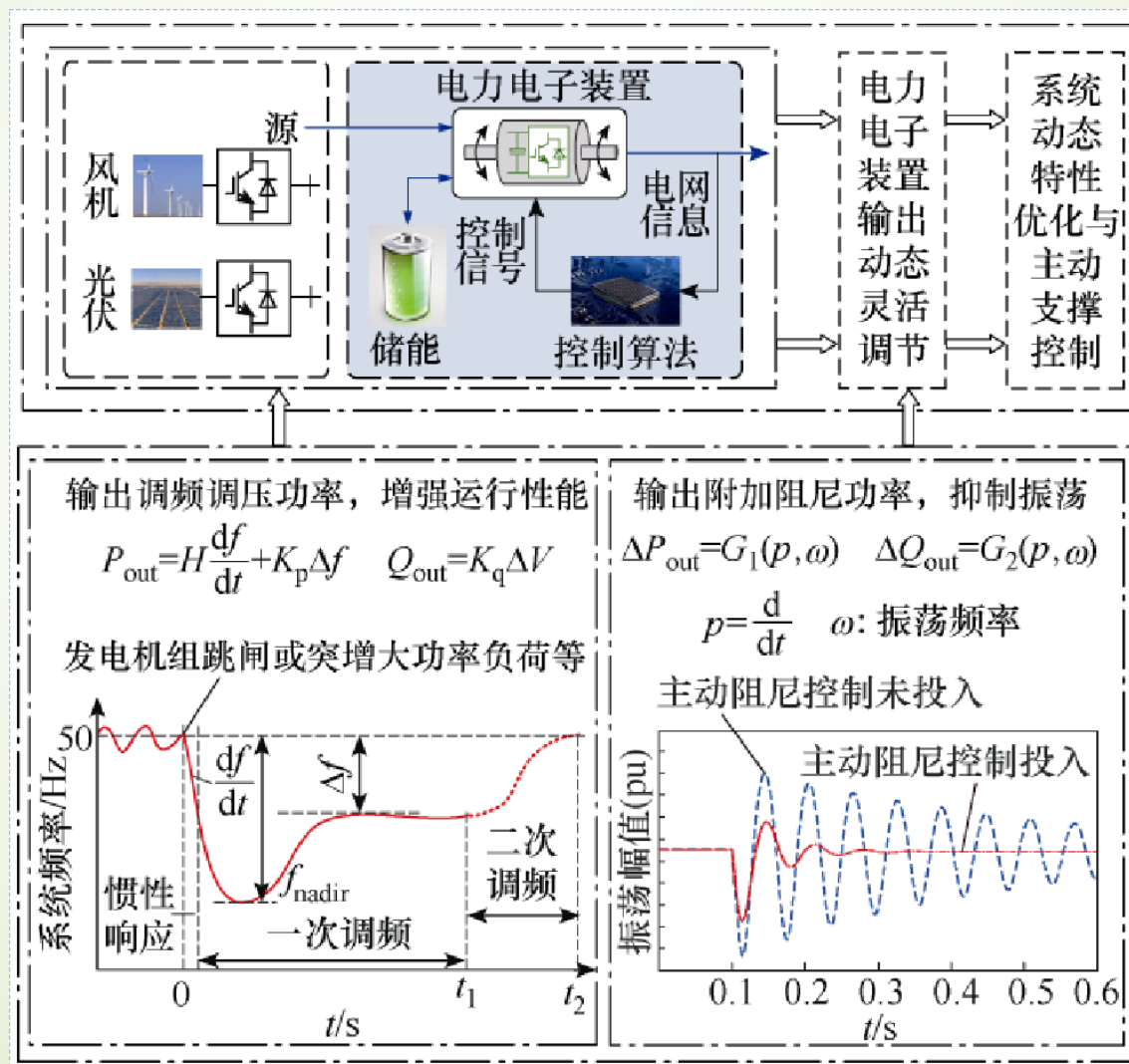
1.3 电力电子技术的应用概述

➤ 光伏并网系统



1.3 电力电子技术的应用概述

➤ 太阳能、风能等新型能源并网（分布式电网）、智能电网



1.3 电力电子技术的应用概述

➤ 高铁：动车组/高速动车组——电气牵引系统

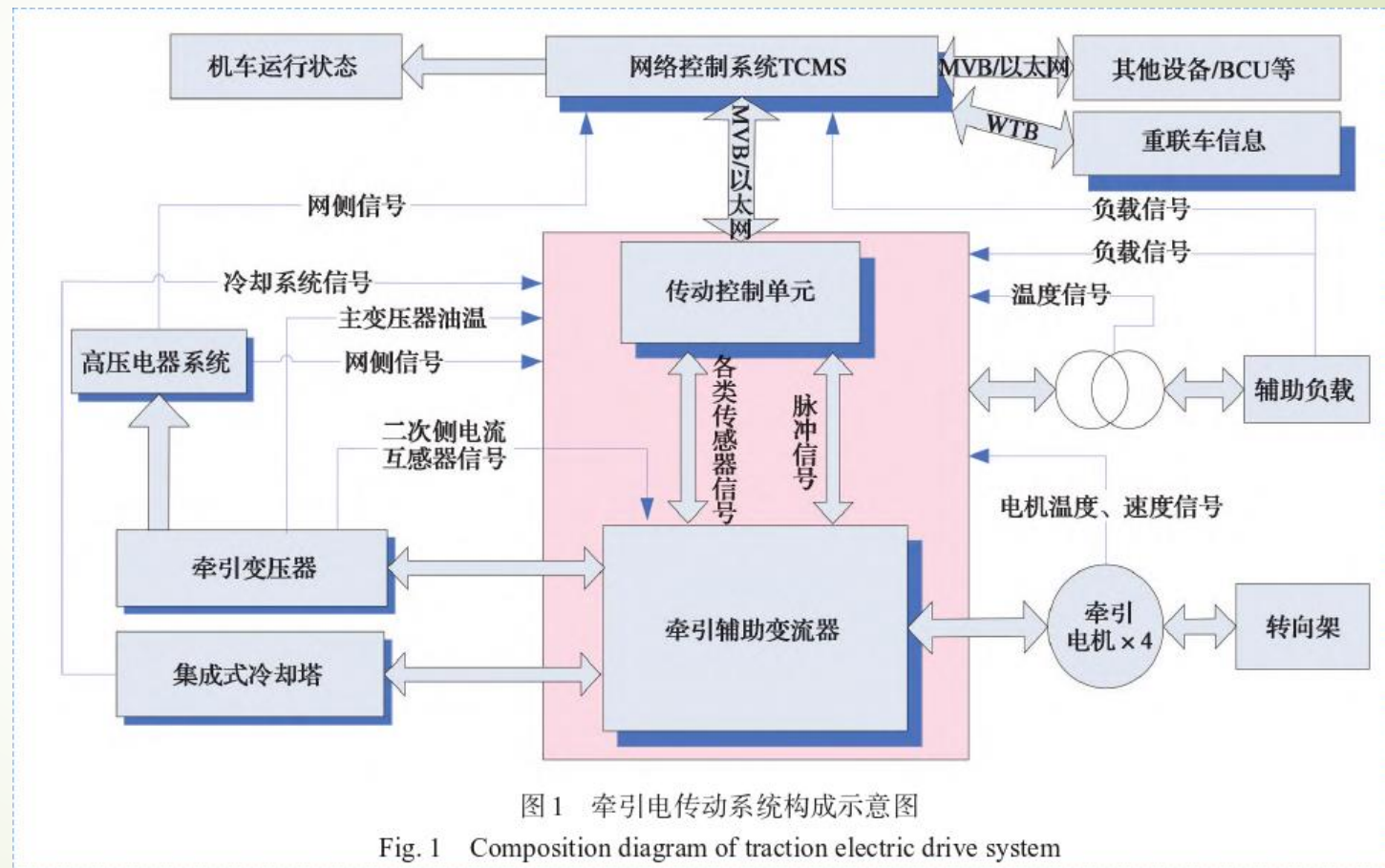


图1 牵引电传动系统构成示意图

Fig. 1 Composition diagram of traction electric drive system

1.3 电力电子技术的应用概述

➤ 以燃料电池为主电源的零污染排放全电船舶

Cold ironing: 船舶接用岸电

Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC:
质子交换膜燃料电池

Battery bank: 电池组; 蓄电池组

Hydrogen tank: 氢燃料电池

Photovoltaic, PV: 光伏发电系统

Diesel Generator, DG: 柴油发电机

Control unit: 控制器

Buck converter: 降压斩波器 (一种电能变换器)

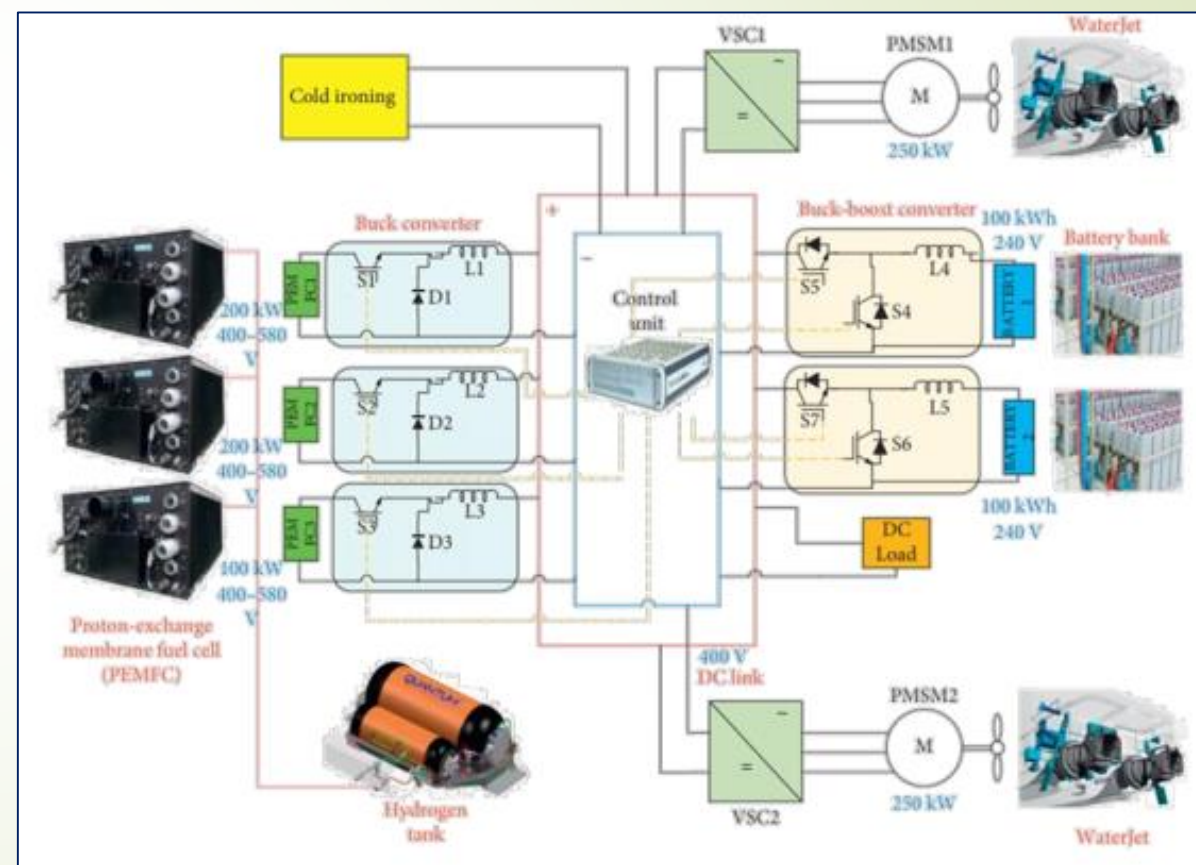
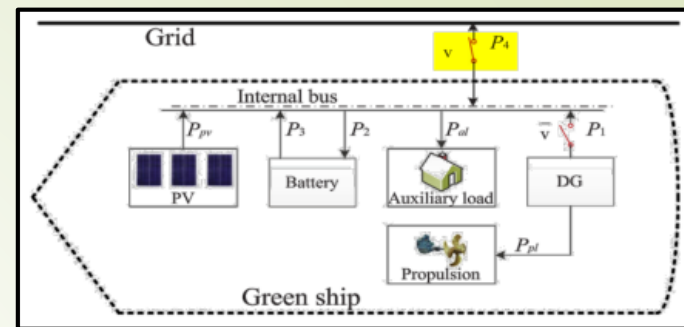
Buck-boost converter: 升降压斩波器 (一种电能变换器)

VSC: 电压源型逆变器 (一种电能变换器)

PMSM: 永磁同步电机

Waterjet: (船舶) 喷水推进器

Propulsion: 推动力



电力电子技术：腾飞的翅膀

□ 2023届电气工程专业本科生

1. 已录取研究生约60%（保研率>24%、国外留学>14%）

- **境内高校：**清华大学（2人）、浙江大学（3人）、上海交通大学、哈工大深圳等
- **境外高校：**香港理工大学、墨尔本大学、丹麦技术大学、查尔姆斯理工大学、新加坡国立大学、瓦格宁根大学、瑞典皇家理工大学等国际知名大学

2. 已签约深圳、广州等华南地区企业占98%以上

- 华为、大疆、比亚迪、南方电网、深圳供电局、日立能源等

1.4 课程教学大纲

1.4.1 课程基本信息

课程编码：EE3002

课程名称：电力电子技术（Power Electronics）

课程性质：必修课

课程学时/学分：48（40+8）/ 3

授课对象：电气工程及其自动化

开课学期：3秋

先修课程：电路；模拟电子技术基础；数字电子技术基础；电机学；自动控制理论

1.4 课程教学大纲

1.4.2 知识结构体系的构建——课程地位与能力培养

■ 课程地位

- 电气专业学生非常重要的理论与实践深入结合的专业核心课（必修）
- 后续专业课程群的基础：电力电子系统建模与仿真、开关电源原理与设计、电气传动自动控制系统、电力传动系统驱动与控制技术、电力系统分析、分布式电源与新能源发电、高电压技术、高压直流输电技术、电磁兼容基础、电能质量分析和智能电网等

■ 能力培养 电气系统综合分析能力、综合设计能力

1.4 课程教学大纲

■ 课程学习目标

课程目标1.

掌握各种典型电力电子开关器件的静态和动态特性以及器件开关控制方法；掌握基本电力电子/电能变换电路的结构原理、工作原理分析和变换控制技术；

课程目标2.

掌握基本电力电子电路的主要技术参数的计算方法、基本性能的分析方法，掌握各种典型电力电子电路的电气性能和应用领域；

课程目标3.

熟悉和掌握基本电力电子电路的分析和调试的基本方法，受到电能变换电路的设计和实验研究的基本训练，初步具有应用先进分析工具分析和解决工程实际问题的能力；

课程目标4.

了解电力电子技术的研究热点、发展趋势及工程应用前景。

1.4 课程教学大纲

1.4.3 课程考核安排

- 课程考核以检验课程目标的达成度为手段，进而评价学习成果的达成度。
- 考核环节包括实验、期中测验（笔试：开卷或闭卷）以及期末考试（闭卷、笔试）
- 总成绩100分，各考核环节所占分值比例及考核细则如下表。

考核环节	所占分值	考核与评价细则	对应课程目标
期中测验	20	闭卷笔试： 考核阶段学习、分析问题和解决问题的能力	课程目标1
实验考核	20	考核实验操作和总结报告的能力	课程目标3
期末考试	60	闭卷笔试； 考试命题范围以教学大纲中的基本要求为原则； 题型包括填空/判断、简答、图解和分析计算。	课程目标2

1.4 课程教学大纲

1.4.4 其他信息

□教材：刘进军 等. 电力电子技术（第6版）. 机械工业出版社. 2023

教材的基本内容：

- 电力电子器件
- 4种变换电路及变换技术
- 2种关键技术
- 器件应用的共性问题
- 电力电子技术的应用简介

□参考文献：教师推荐中英文阅读文献

□课程群交流码 QQ：1006374390 （24秋电力电子技术教学群）

□任课教师：王明彦 王丹丹 陈冠帆。



The End