



电气工程导论

陈洪东 王玉华 主编 / 李智超 弭洪涛 副主编



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本教材共 5 章,第 1 章主要介绍电气工程学科的定义、国内外发展状况、专业知识体系构成及相关技术、专业培养规格和要求、培养目标等内容。第 2 章主要介绍电力电子技术。第 3 章主要介绍电机及其控制系统。第 4 章主要介绍电力系统自动化。第 5 章主要介绍电气领域新技术。

本教材是由多年在电气工程领域从事教学、科研和企业供配电设计的教授和工程师编写的。本教材适合普通应用型高等院校电气工程及其自动化专业大一新生专业启蒙,帮助其建立起对本专业的整体认知;也可作为电气工程领域从业人员知识更新的参考书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程导论 / 陈洪东, 王玉华主编. -- 北京: 清华大学出版社, 2026. 9.
ISBN 978-7-302-72723-1

I. TM

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026XZ4798 号

责任编辑: 王 欣

封面设计: 常雪影

责任校对: 薄军霞

责任印制: 刘海龙

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 河北龙大印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 11.25

字 数: 269 千字

版 次: 2026 年 9 月第 1 版

印 次: 2026 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

产品编号: 115463-01



前言

电气工程是研究电能生产、传输、转换及应用的综合性学科,涉及电磁理论、电力系统、自动化控制等知识体系,支撑现代工业、交通、通信等关键领域的发展,其技术革新直接推动社会能源结构转型与生产效率提升。

作为电气工程及相关专业学生接触专业知识的入门课程,“电气工程师导论”承载着引导学生认识学科、搭建知识框架、激发学习兴趣、培养工程素养的重要使命。本教材打破了传统专业教材的细分壁垒,以“宽口径、重基础、强引导”为原则,系统梳理电气工程的发展历程、学科体系、核心理论与应用领域,既涵盖电路理论、电磁场理论等基础核心知识,也兼顾电力电子、电机与电器、电力系统等主要分支的核心内容(由于应用型高校电气专业培养方案的限制,本教材只在上述三个方面展开),同时融入学科前沿技术与行业发展趋势,在不涉及过多深奥理论的前提下,让学生全面、系统地了解电气工程的专业概貌,建立起对专业的整体认知。另外,强调电气工程在智能化与可持续发展中的角色,如智能电网优化能源分配、电力电子器件提升能源效率等,引导学生关注技术变革与社会需求。

本书由广州应用科技学院陈洪东和王玉华任主编,负责全书的章节安排、统稿及协调工作;由李智超和弭洪涛任副主编。陈洪东编写第2章,王玉华编写第1章和第3章,李智超编写第4章,弭洪涛编写第5章,书中部分插图绘制得到了周智彬老师、古展其老师的大力帮助。由于电气工程领域知识体系庞大、技术更新迅速,加之编者水平有限,书中不足之处恳请读者和同行多多指教,编者非常感谢。

编者

2026年3月



目录

第 1 章 绪论	1
1.1 电气工程的定义与范畴	2
1.2 国内电气工程及其自动化专业的发展	4
1.3 国外电气工程及其自动化专业的发展	5
1.3.1 学科奠基与早期工业化(19 世纪末—1940 年代)	5
1.3.2 电子革命与自动控制兴起(1950 年代—1990 年代)	6
1.3.3 数字化与能源转型(2000 年代—2010 年代)	6
1.3.4 AI 融合与碳中和战略(2020 年至今)	6
1.3.5 发展逻辑与中外差异	7
1.4 电气专业的基本知识构成及相关技术	8
1.4.1 电气专业的基本知识构成	8
1.4.2 知识与技术的关联性	14
1.5 电气工程及其自动化专业的培养要求	15
1.5.1 知识要求	15
1.5.2 能力要求	15
1.5.3 素质要求	16
1.5.4 毕业要求	16
1.6 电气技术应用领域	16
1.7 电气技术应用案例与电气技术未来发展趋势	19
1.7.1 电气技术应用案例	19
1.7.2 电气技术未来发展趋势	21
本章小结	22
思考题	22
第 2 章 电力电子技术概述	23
2.1 电力电子技术的定义及电力电子器件的发展历程	24
2.1.1 电力电子技术的定义	24
2.1.2 电力电子器件的发展历程	25
2.2 电力电子技术的基本知识构成与知识体系	27
2.2.1 电力电子器件基础	28
2.2.2 电力变换电路体系	28



2.2.3 电力电子控制技术方法	29
2.2.4 电力电子器件驱动与保护体系	29
2.2.5 电力电子技术知识体系	30
2.3 电力电子技术的应用	35
2.3.1 电力电子技术在新能源汽车中的应用	35
2.3.2 电力电子技术在智能电网中的应用	38
2.3.3 电力电子技术在电气工程智能化升级中的应用	42
2.3.4 电力电子技术在光伏发电高效转换中的应用	45
2.3.5 电力电子技术在风力发电系统中的应用	47
2.3.6 电力电子技术在开关电源中的应用	50
2.3.7 电力电子技术在电气化交通系统中的应用	51
2.4 电力电子技术的发展趋势	54
本章小结	56
思考题	56
第3章 电机及其控制系统	57
3.1 电机及其控制系统概述	58
3.1.1 电机及其控制系统的定义和范畴	58
3.1.2 电机及其控制系统的发展历程以及发展趋势	60
3.2 电机及其控制系统的基本知识构成及课程体系	73
3.2.1 基本知识构成	73
3.2.2 课程体系	75
3.3 电机及其控制系统的主要内容	76
3.3.1 直流电动机与交流电动机	76
3.3.2 电机控制方法	77
3.4 电机及其控制系统的应用	77
3.4.1 电机及其控制系统的应用场景	77
3.4.2 电机及其控制系统的典型实例	82
本章小结	84
思考题	85
第4章 电力系统自动化	86
4.1 电力系统及电力系统自动化概述	88
4.1.1 电力系统的组成	88
4.1.2 电力系统的运行特点	89
4.1.3 电力系统自动化的内涵及作用	90
4.2 电力系统自动化的基本知识构成及课程体系	91
4.2.1 电力系统自动化的基本知识构成	91
4.2.2 电力系统自动化的课程体系	92



4.3 电力系统自动化的主要内容	95
4.3.1 同步发电机并列控制	95
4.3.2 电力系统频率和有功功率综合控制	96
4.3.3 电力系统电压和无功功率综合控制	98
4.3.4 电力系统继电保护和安全自动控制	100
4.3.5 电力系统通信技术	102
4.3.6 新能源并网技术	105
4.4 电力系统自动化的应用	107
4.4.1 电力系统调度自动化	107
4.4.2 发电控制自动化	108
4.4.3 变电站综合自动化	110
4.4.4 配电网自动化	111
4.4.5 电力系统新技术	113
本章小结	116
思考题	116
第5章 电气领域新技术	117
5.1 新材料技术及其在电气行业的应用	118
5.1.1 新材料技术是电气技术创新的基石	118
5.1.2 典型新型电气材料及其应用	119
5.1.3 新材料技术在电气行业发展中的意义与挑战	129
5.2 人工智能技术在电气行业的应用	133
5.2.1 AI 助力电气工程智能化转型	133
5.2.2 AI 技术在电气领域的应用概览	134
5.2.3 AI 在电气行业应用的典型案例	137
5.2.4 AI 技术应用面临的挑战与展望	139
5.3 电力物联网技术	140
5.3.1 万物互联时代的电力系统	140
5.3.2 电力物联网的体系架构	141
5.3.3 电力物联网的关键技术	149
5.3.4 电力物联网在电气行业的应用场景	152
5.3.5 电力物联网发展的机遇与挑战	157
5.4 未来电气领域的发展趋势	158
5.4.1 迈向清洁低碳、安全高效、智能灵活的能源新时代	158
5.4.2 主要发展趋势展望	159
5.5 未来电气工程师的使命与素养	166
本章小结	167
思考题	168
参考文献	170

第1章



绪 论

本章学习目标

1. 知识层面

- (1) 掌握电气工程的基本范畴,理解其作为工程科学分支的核心定义。
- (2) 熟悉国外电气工程专业的发展特点,理解电气专业的基本知识体系及相关核心技术。
- (3) 明确电气工程及其自动化专业的培养要求,掌握该专业对学生在工程基础、专业技能和综合应用方面的能力要求。
- (4) 认识电气技术的主要应用领域,涵盖电力工业、工业自动化、交通运输、医疗设备、航空航天、新能源系统等多个国民经济关键部门。

2. 能力层面

- (1) 能够梳理电气工程学科的知识结构与发展脉络,具备从历史演进角度分析专业变革的能力。
- (2) 具备比较国内外电气工程教育模式差异的能力,理解全球化背景下工程人才培养的趋势与挑战。
- (3) 能够将电气工程的基础理论与实际工程问题相联系,初步建立解决复杂工程问题的知识框架。
- (4) 能够识别不同应用场景中电气技术的作用机制。初步具备规划个人学习路径的能力,根据专业培养目标设定阶段性学习重点,为后续学习专业课程打下基础。

3. 素养层面

- (1) 建立工程责任感与安全意识,理解电气工程在保障能源安全、设备可靠运行和人身防护中的社会价值。
- (2) 培养跨学科思维与系统观,认识到电气工程与计算机、通信、机械等领域的深度融合趋势,适应现代工程技术的集成化发展。
- (3) 激发专业认同感与行业使命感,了解电气工程在推动科技进步、实现“双碳”目标和建设智慧社会中的关键作用。



(4) 树立持续学习与终身发展的意识,面对快速迭代的技术环境(如新能源、人工智能融合),保持开放心态与探索精神。

本章重点与难点

1. 重点

- (1) 电气工程的范畴。
- (2) 国内电气工程及其自动化专业的发展。
- (3) 电气工程及其自动化专业相关课程体系。
- (4) 电气工程及其自动化专业的培养要求。
- (5) 电气技术应用领域。

2. 难点

(1) 易将“电气”误解为“电器”或仅限强电系统,忽视其与信息系统的深度融合,可结合实例理解。

(2) 对数学素养的要求高,物理图像不直观;感性认识系统级思维建立从单一元件(如电机)到整体系统(如电力网络)的认知跃迁困难。

(3) 理论知识难以直接应用于实际项目,缺乏动手经验,应积极参与实验、实训与竞赛(如电子设计大赛、智能车竞赛)。

本章导读: 本章作为《电气工程导论》的开篇,是开启整个学科学习的钥匙,核心在于引导大家认识电气工程的内涵、发展脉络与时代价值,搭建起对本学科的整体认知框架。内容上,主要介绍电气工程学科的定义、国内外发展状况、电气工程及其自动化专业知识体系构成及相关技术、专业培养规格和要求、培养目标等核心内容。通过电气技术应用领域实际案例展示电气专业知识的内涵和外延,介绍本专业在国民经济中的重要性以及电气工程在能源、交通、通信等领域的重要作用。

学习本章需重点理解电气工程的学科特点与发展趋势,明确本专业的学习目标与核心任务,激发学习兴趣,为后续深入学习电路、电机、电力系统等专业知识,树立正确的工程思维奠定基础。

1.1 电气工程的定义与范畴

电气工程(electrical engineering)是一门涉及电能及其应用的工程学科,是工学门类下的一级学科,代码为 0808,在工程领域中占据核心地位。电气工程研究电能的生产、传输、分配、转换、控制、测量以及利用电能驱动设备、处理信息和实现自动化,涵盖电能的产生、传输、转换、利用、控制、存储和管理中的前沿理论与关键技术。

电气工程及其自动化(教育部本科专业编号 080601)专业隶属于电气工程学科。

以下是电气工程的范畴。

1. 核心研究对象

电气工程以电(电压、电流、电磁场)为核心研究对象。

电是自然界中一种由电荷运动引起的基本物理现象,它既是能量的一种形式,也是现



代科技和生活的基石。简单来说,电的本质是电荷的定向移动,这种移动形成了我们日常所说的电流。“电如何表征”其实是怎么量化和描述电的各种特性和行为,这在电学和电子学里非常重要。

电的表征主要通过以下物理量来描述:

- (1) 电荷(Q): 电的基本属性,单位是库[仑](C)。
- (2) 电流(I): 电荷的定向移动,单位是安[培](A)。
- (3) 电压(U): 电荷移动的驱动力,单位是伏[特](V)。
- (4) 电阻(R): 物质对电流的阻碍作用,单位是欧[姆](Ω)。
- (5) 电场强度(E): 电荷周围存在的一种特殊物质,单位是伏[特]每米(V/m)。
- (6) 电势(φ): 描述电场中某点能量性质的物理量,单位是伏[特](V)。

电能的表征侧重于能量的计量:

- (1) 电能(W): 电流做功的能力,单位是焦[耳](J)或千瓦时(kW·h)。
- (2) 电功率(P): 单位时间内消耗的电能,单位是瓦[特](W)。

专门测量电能和功率的仪表是电能表和功率表,如家用电能表(电度表)。

2. 主要目标

(1) 安全、可靠、高效地产生、输送和分配电能: 这是电力系统的核心任务,覆盖从发电厂、高压输电线路、变电站到最终用户的整个链条。

(2) 将电能转换为其他形式的能量: 例如,通过电动机将电能转换为机械能(驱动风扇、机床、电动汽车等),通过电加热器将电能转换为热能,通过照明设备将电能转换为光能。

(3) 将其他形式的能量转换为电能: 例如,通过发电机将机械能(如水力、风力、蒸汽轮机)转换为电能,通过光伏电池将太阳能转换为电能,通过化学电池将化学能转换为电能。

(4) 设计、分析和应用电气与电子设备及系统: 包括发电机、电动机、变压器、电力电子变流器、开关设备、控制系统、照明系统、家用电器、工业自动化设备等。

(5) 利用电信号进行信息处理、传输和通信: 这与电子工程高度交叉,涉及电路设计(模拟/数字)、信号处理、通信系统、嵌入式系统、计算机硬件等。

(6) 实现自动化和控制: 设计控制系统(基于计算机、可编程控制器(PLC)、微控制器等)来精确、自动地控制各种物理过程、机器和系统。

3. 主要研究与应用领域

(1) 电力系统工程: 发电、输电、配电、电力系统分析、稳定与控制、保护、智能电网。

(2) 电力电子技术: 利用半导体器件(如晶闸管、绝缘栅双极晶体管(IGBT))高效地进行电能变换和控制(整流、逆变、变频、斩波等),应用于新能源并网、变频驱动、不间断电源、电动汽车充电器等。

(3) 电机与电器: 设计、分析、控制发电机、电动机、变压器、继电器、断路器等。

(4) 控制系统工程: 设计反馈控制系统,实现自动化(工业过程控制、机器人控制、飞行控制等)。

(5) 电气照明: 光源、照明系统设计、智能照明控制。

(6) 可再生能源系统: 风能、太阳能等分布式发电系统的设计与集成。



(7) 电气化交通: 电动汽车、混合动力汽车、电力机车、高铁的驱动和充电技术。

(8) 电磁兼容: 设备和系统在电磁环境中正常工作且不产生不可容忍的电磁干扰的能力。

(9) 高电压工程: 绝缘技术、高压设备测试、电磁场分析、雷电防护。

(10) 电工材料: 研究绝缘材料、导电材料、磁性材料等的性能与应用。

(11) 电气测量与仪器: 设计用于测量电压、电流、功率、能量、频率等的仪器和方法。

4. 理论基础

电气工程主要建立在物理学(特别是电磁学)和数学的基础上,同时融合了计算机科学、材料科学、控制理论、人工智能等多个学科的知识。

虽然电气工程与电子工程两者密切相关且有很大重叠(常合称为“电气与电子工程”),但侧重点有所不同,其具体区别如下:

电气工程: 更强调整体电能系统(发电、输电、配电、大功率转换)以及利用电能驱动大型设备(电机)、实现强电控制(工业自动化),通常涉及高电压、大电流、大功率的系统(如电网、大型电机、重型工业设备),核心是“能量”。

电子工程: 更侧重于利用电子器件(晶体管、集成电路)来处理信息、设计电子电路和系统(计算机硬件、通信设备、传感器、嵌入式系统、消费电子产品),通常涉及低电压、小电流、小功率信号的处理和放大,核心是“信息”。

总体而言,电气工程是研究如何产生、输送、控制和使用电能的科学和工程实践,其成果驱动着从城市电网、工业生产设备、交通工具到家用电器等现代社会运转所需的基础设施和设备。

电气工程师的工作涵盖了从设计单个元器件(如变压器线圈),到构建复杂的电力网络和自动化系统,再到开发新的能源技术(如高效太阳能逆变器)等方方面面。

1.2 国内电气工程及其自动化专业的发展

这里主要介绍电气工程及其自动化专业的进程。电气工程的发展历程就像一部国家工业化的“电力史诗”,从早期的电机专科起步,到如今成为支撑新能源、智能电网等国家战略的核心力量。

1. 专业奠基与早期探索(1900 年代—1940 年代)

学科起源: 中国于 1908 年在交通大学(前身南洋公学)设立“电机专科”,院系独立化,核心课程聚焦直流电机、电力传输等基础理论,标志着我国大学电气工程教育的开端。其培养目标是电网设计与维护工程师。1933 年,北洋大学(现天津大学)正式成立电机工程系,标志着电气工程脱离机械学科成为独立专业体系,课程增设交流电机与发电厂设计。

2. 发展与调整(1950 年代—1970 年代)

1950 年代,仿照苏联教育体系,专业更名为“发电厂电力网及电力系统”,强化高压输电与继电保护技术教学,服务于新中国成立初期电力基建需求。在苏联模式影响下,高校进行院系调整,电机工程系被重点建设,为专业发展奠定了初步基础。

1952 年,在唐山工学院(现西南交通大学)设立电机工程系,是新中国最早成立的电气



工程系之一。

1960—1970 年代,专业名称和归属经历多次调整,如“电气运输”“电气化铁道供电”等,反映了国家在特定领域(如铁路)对电气人才的迫切需求。

3. 强弱电融合与自动化启蒙(1980 年代—2000 年代)

1986 年,国务院批准“电力系统及其自动化”为博士学位授权学科,这是专业迈向高层次人才培养的关键一步。

技术交叉转型:半导体技术推动专业内涵变革,弱电控制(PLC 编程、微机原理)与强电传输(超高压技术)融合,专业名称统一为“电气工程及其自动化”。

方向分化与升级:1998 年教育部专业目录调整,将工业自动化、电力系统自动化并入本专业,形成“强电为主、强弱电结合”的课程体系,多个专业合并为新的“电气工程及其自动化”专业,专业口径大大拓宽,体系基本定型。

实验平台建设:高校大规模建设电能质量实验室、电力市场模拟平台,引入数字仿真技术替代传统实验设备。

4. 数字化与能源革命(2010 年代—2020 年代)

2010—2020 年:专业深度融入国家“双碳”战略,重点发展智能电网、新能源、电动汽车等方向。众多专业入选国家级一流本科专业、“双万计划”,并通过工程教育认证,人才培养质量得到国际认可。

智能电网驱动课程重构:物联网技术催生智能配电网课程模块,增设新能源并网技术、储能系统设计等前沿内容,传统课程(如直流电机相关课程)占比整体下调约 30%。

中外合作办学兴起:2020 年教育部批准成都大学与韩国嘉泉大学合作办学项目,引入 24 门国际课程,聚焦新能源与电力电子跨学科培养。

5. 学科重构与未来布局(2025 年至今)

二级学科革命性调整:2025 年,国务院学位委员会将电气工程一级学科下原有的 5 个二级学科扩展为 10 个,新增电力电子与电能变换、新能源发电与电能存储、生物电磁技术等方向,呼应“双碳”战略与交叉学科需求。

跨学科培养强制化:教育部学科专业调整方案要求淘汰 20% 的传统课程,增设嵌入式开发、机器视觉等模块,国家级一流专业点突破 1 万个。

继续教育扩张:2025 年,高等学历继续教育新增电气工程本科专业,面向制造业升级与乡村振兴培养在职工程技术人员。

就业市场多元化:国家电网岗位竞争加剧(2025 年报录比达 1:30),毕业生流向光伏企业(逆变器开发)、车规级芯片设计等新兴领域,年薪差距拉大至 20 万~40 万元。

1.3 国外电气工程及其自动化专业的发展

1.3.1 学科奠基与早期工业化(19 世纪末—1940 年代)

1. 技术起源与学科萌芽

1866 年西门子研制发电机,开启了电气化进程;1879 年爱迪生发明白炽灯并建成首个



火力发电站,奠定了电力应用基础;1883年英国布莱顿建成全球首条电气化铁路(volks electric railway),标志着强电工程实践落地。欧美高校率先设立专业:德国柏林工业大学于1899年开设电气工程课程,美国麻省理工学院于1882年建立电气工程系,早期课程聚焦直流电机、输电原理及照明工程。

2. 教育体系初建

欧洲推行“理论实验室一体化”模式,如苏黎世联邦理工学院将电磁场理论与电机设计实验捆绑教学;美国引入“Co-op”校企合作制(辛辛那提大学,1906),学生需完成电厂实习方可毕业。

1.3.2 电子革命与自动控制兴起(1950年代—1990年代)

1. 弱电技术颠覆格局

半导体技术推动专业分化:英国剑桥大学于1960年代开设“电力电子与驱动”方向课程,可编程逻辑控制器(programmable logic controller,PLC)技术催生工业自动化课程,替代传统继电器控制教学。

2. 学科重组与认证标准化

1980年代欧美推行“强弱电融合”:德国亚琛工业大学将电气工程与信息技术合并为电气工程与信息技术(electrical engineering and information technology,EEIT)专业;美国ABET工程认证强制要求课程加入微机原理与自动控制基础,淘汰30%传统电机学内容。

1.3.3 数字化与能源转型(2000年代—2010年代)

1. 智能电网驱动课程重构

欧盟于2010年启动“电网数字化计划”,丹麦技术大学增设风电预测算法、储能系统设计课程;美国能源部资助麻省理工学院开发智能电表通信协议实验平台,替代传统输配电实验。

2. 全球人才竞争加剧

澳大利亚推行“EA工程师快速认证”(2015年),毕业生可直通英联邦就业;美国硅谷企业联合斯坦福开设“电力电子+人工智能(AI)”双学位;特斯拉定向招募电机控制算法人才,起薪达12万美元/年。

1.3.4 AI融合与碳中和战略(2020年至今)

1. 前沿领域学科重构

欧盟:2022年《能源系统数字化行动计划》强制高校增设碳足迹监测、区块链能源交易课程。

美国:麻省理工学院设立“生物电磁技术”实验室,研究脑机接口供电微型化(2024年)。

澳大利亚:墨尔本大学开发“数字孪生电网”虚拟实验平台,学生可模拟极端天气下的新能源并网故障。

2. 就业市场结构性变革

传统领域升级:欧洲电网公司要求工程师掌握AI故障诊断(如意大利ENEL部署



AVEVA 数字孪生系统)。

新兴赛道爆发：美国 DeepMind 与英国国家电网合作开发电力需求 AI 预测模型，光伏逆变器设计岗位年新增幅达 40%。

绿色认证壁垒：欧盟 CBAM(碳关税调节机制)倒逼人才掌握 ISO 50001 能源管理体系认证标准。

1.3.5 发展逻辑与中外差异

起源与使命：19 世纪诞生于规模化生产与传输电能的需求，核心是高效利用能源。

自动化转型：20 世纪中叶，电子与控制技术(如可编程控制器)推动其从“电气工程”向“电气工程及其自动化”转型，实现自动调控。

智能化与集成化：21 世纪深度融合物联网、人工智能、大数据，向“电力电子化、控制智能化、系统集成化”发展，支撑能源革命与工业智能化。

电气工程及其自动化专业中外核心差异见表 1-1。

表 1-1 电气工程及其自动化专业中外核心差异

维 度	中 国	美国等发达国家
研究方向	以应用技术与工程实践为主，聚焦电力系统、电力拖动、电力电子等，服务庞大电力需求	研究范围更广，涵盖电力、电子、通信、自动化等，更注重基础理论与科研创新
强弱电侧重	强电方向(电力系统、电气能源)相对重要和发达	弱电方向(电子、通信技术)更受重视，实力更强
教育体系	课程设置相对统一，强调基础与专业课程学习	课程选择灵活性更高，学生可根据兴趣选择研究方向
实践培养	注重实践能力与工程实践培养，常见形式为实习与项目实践	更强调项目驱动学习，通过实际项目和实验室实践提升技术能力

简单来说，在中国，该专业像“全能工程师”，解决大规模实际工程问题；而在国外则更像“专业科学家”，在细分领域深入钻研理论创新。

欧美特点：产业需求主导课程迭代。

中国特点：政策驱动体系整合。

共性趋势：AI+能源+自动化融合。

核心差异：欧美强在“企业-高校”技术转化(如西门子捐赠实验室设备)，中国胜在政策资源整合；但全球均指向跨学科能力重构——电力电子工程师需同时掌握电磁兼容设计、Python 建模与碳核算规则。

电气工程的发展历程是一部贯穿近现代科技文明演进的壮阔史诗，从电磁理论奠基到智能电网兴起，经历了奠基与理论突破、电力时代开启、理论深化与技术扩展、现代融合与智能化四大阶段。电气工程发展历程如图 1-1 所示。

1. 奠基与理论突破(1700 年代—1870 年代)

核心事件：库仑定律(1785 年)奠定静电学基础，奥斯特发现电流磁效应(1820 年)，法拉第发现电磁感应(1831 年)，基尔霍夫提出电路定律(1845 年)，麦克斯韦建立电磁场理论(1873 年)。

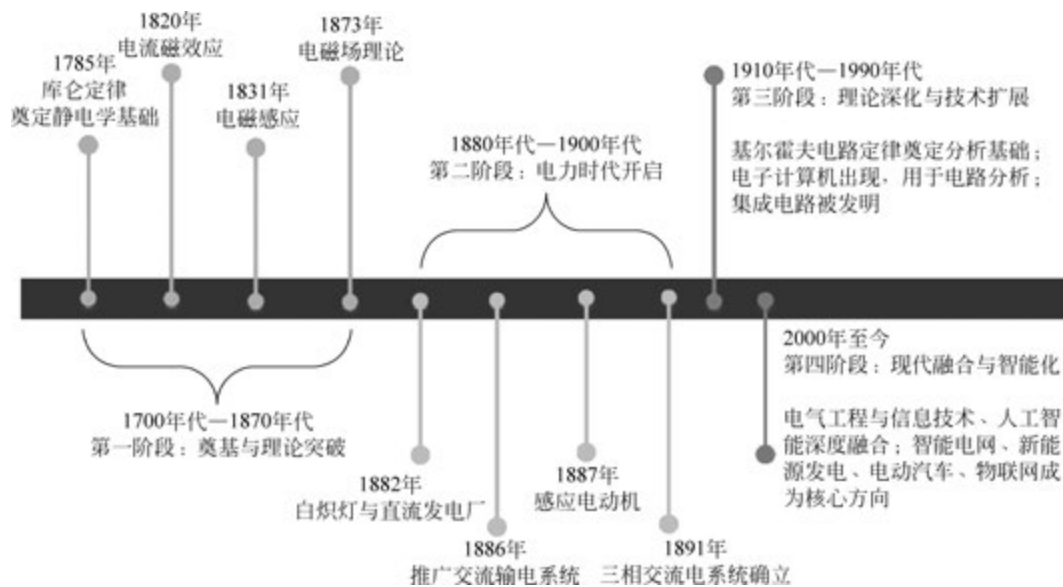


图 1-1 电气工程发展历程

意义：从现象观察进入定量研究和理论统一阶段。

2. 电力时代开启(1880 年代—1900 年代)

核心事件：爱迪生发明电灯并建立直流发电厂(1882 年)，威斯汀豪斯推广交流输电系统(1886 年)，特斯拉发明交流感应电动机(1887 年)，三相交流电系统确立(1891 年)。

意义：电力工业诞生，交流电在远距离输电中成为主导模式。

3. 理论深化与技术扩展(1910 年代—1990 年代)

核心事件：电子计算机出现，用于电路分析；集成电路被发明(1958 年)。

意义：电路理论系统化，为电子工程和计算机工程分支奠定基础。

4. 现代融合与智能化(2000 年至今)

核心趋势：与信息技术、人工智能深度融合；智能电网、新能源发电、电动汽车、物联网成为核心方向。

电气工程正处于能源转型与技术革新的双重驱动期。国内凭借特高压、新能源装机等优势领跑应用层，国外在基础研究和高端材料领域保持领先。未来，智能化、绿色化、跨学科融合将成为核心趋势，而政策支持、技术突破与人才培养是应对挑战的关键。这一领域的发展不仅关乎能源安全与产业升级，更将深刻影响全球可持续发展进程。

1.4 电气专业的基本知识构成及相关技术

电气工程是一门融合理论与实践、跨学科的工程学科，其知识体系既包含基础理论支撑，又涉及广泛的工程应用技术。

1.4.1 电气专业的基本知识构成

电气工程及其自动化专业是典型的强应用型工科专业，毕业生就业面非常广泛，技术

含量高、行业需求大,绝大多数毕业生都能实现高质量就业,主要集中在电力系统、智能制造、新能源、自动化控制等国家战略型产业。因此,本专业对学生的工程意识与实践动手能力提出了较高要求。

以下从基本知识构成和核心相关技术两方面展开说明。本专业课程的基本设置一般有公共基础课、专业基础课、专业课、集中实践课和课外创新实践课。

核心逻辑框架以“公共基础→专业基础→专业核心→实践创新”为递进主线,融合电力系统、电力电子与电力驱动、控制工程三大方向,形成“基础支撑—方向分化—应用落地”的课程体系。

1. 课程关联逻辑

递进关系:公共基础为专业学习奠基,专业基础支撑核心课程,实践课程强化理论应用。

交叉融合:三大专业方向课程相互渗透(如电力电子技术同时支撑电力系统和控制工程方向)。

实践导向:实验、设计、实习贯穿全流程,培养工程问题解决能力。

电气专业的知识体系从基础科学到专业理论,再到工程应用,层层递进、相互支撑。电气工程及其自动化专业课程体系如图 1-2 所示。



图 1-2 电气工程及其自动化专业课程体系

2. 基础课程

数学与自然科学基础是电气专业的“底层逻辑”,为后续专业知识提供分析工具和理论依据。

1) 数学基础

主要涵盖微积分(用于电路暂态分析、电磁场积分计算),线性代数(用于电路矩阵分



析、控制系统状态方程求解),复变函数与积分变换(用于交流电路相量分析、信号频谱分析),概率论与数理统计(用于电力系统可靠性分析、电气设备寿命预测)等课程。

2) 大学物理

主要涵盖力学、电磁学、热学、光学、振动与波动、近代物理(如相对论和量子物理)等核心内容,是工科各专业的重要基础课程。它旨在帮助学生掌握物理学的基本概念、定律及研究方法,培养科学思维与解决实际问题的能力。课程内容通常分为以下几个模块:

(1) 经典物理部分:包括质点运动学、牛顿力学、刚体转动、动量与能量守恒、静电场与稳恒磁场、电磁感应、电路基础等。

(2) 热学与统计基础:涉及气体分子动理论、热力学第一与第二定律、熵的概念及其物理意义。

(3) 振动与波动:讲解机械振动、机械波、声波以及波动的干涉、衍射和偏振现象。

(4) 光学:涵盖几何光学与波动光学,重点包括光的干涉、衍射、偏振及现代光学技术应用。

(5) 近代物理:引入狭义相对论、量子物理基础、原子结构、波粒二象性、不确定性原理等内容,为后续专业学习和科研打下基础。

3) 电路分析

研究电路中电流、电压的分布与变化规律,是所有电气技术的基础。核心内容包括欧姆定律、基尔霍夫定律(KVL/KCL)、等效电路分析、正弦交流电路(相量法)、暂态分析(RC/RL 电路过渡过程)、三相电路(对称/不对称系统分析)。从手电筒电路到高压输电网络,所有电气系统的电流、电压计算均基于此。

4) 模拟电子技术

主要内容包括半导体器件、放大电路、反馈电路、集成运算放大器、功率放大电路、信号产生与处理电路、直流稳压电源等核心模块。这门学科专注于处理连续变化的模拟信号(如声音、温度、光照等),通过电子器件对信号进行放大、滤波、调制、运算和转换,是电子工程领域的基础与核心。

5) 数字电子技术

主要内容包括数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、数模/模数转换、半导体存储器及可编程逻辑器件等核心模块。这门学科以“0”和“1”二进制信号为核心,研究数字信号的表示、运算、存储与控制,是现代电子系统(如计算机、通信设备、智能控制)的底层支撑技术。相比模拟电子技术处理连续信号,数字电子技术更强调抗干扰能力强、信息处理精确、易于集成与自动化的优势。

3. 专业核心课程

1) 自动控制原理

研究控制系统的建模、分析与设计,实现设备或系统的自动调节。

核心内容:传递函数、时域响应(阶跃响应)、频域分析(伯德图)、PID 控制(比例-积分-微分,最常用的控制算法)、状态空间法。

应用:电机调速系统(如电梯速度控制)、电网频率稳定控制(通过调节发电机出力维持 50Hz 频率)。



2) 单片机原理与应用

主要内容包括单片机的基本结构、工作原理、指令系统、编程方法、定时器/计数器、中断系统、串行通信接口、I/O 端口控制、系统扩展技术以及各类嵌入式系统中的实际应用。这门课程是电气、电子、自动化、计算机等专业的重要核心课,旨在培养学生掌握从底层硬件到上层软件的综合开发能力,是通往嵌入式系统设计的关键桥梁。它融合了数字电路、C 语言编程、微机原理等先修知识,强调“软硬结合、动手实践”。

3) 传感与检测技术

主要内容包括传感器的基本原理与分类、各类常用传感器的工作机制及应用、检测信号的转换与调理、抗干扰技术、自动检测系统设计以及现代检测技术的发展趋势。这门学科是自动化、测控技术与仪器、电气工程等专业的核心基础课,旨在培养学生对物理世界各类信息(如温度、压力、位移、光强等)进行感知、采集、处理与控制的综合能力。它连接现实世界与数字系统,是实现智能制造、物联网、智能控制的关键技术支撑。

4) 电力电子技术

研究电力半导体器件对电能的变换与控制(整流、逆变、斩波、变频)。

核心内容:功率二极管、晶闸管、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、SiC/GaN 器件的特性,AC/DC(整流)、DC/AC(逆变)、DC/DC(斩波)电路拓扑,脉冲宽度调制(PWM)控制技术。

应用:新能源汽车逆变器(电机驱动)、光伏逆变器(直流电转交流电)、高铁牵引变流器(电网交流电转电机用直流电)。

5) 电机与拖动控制技术

主要内容包括电机的基本原理与结构、电力拖动系统的运行特性、电动机的启动/制动/调速控制方法、典型生产机械的电气控制系统设计以及现代智能控制技术在电机控制中的应用。这门技术是电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等专业的核心课程,融合了电机学、电力电子、自动控制理论和工程实践,旨在实现对电动机的精确、高效、可靠控制,广泛应用于工业生产、交通运输、智能制造等领域。

6) 电力系统分析

研究发电、输电、配电系统的运行规律与优化。主要内容包括电力系统潮流计算(功率分布)、短路电流计算(设备选型)、暂态稳定分析(故障后系统能否恢复稳定)、无功补偿与电压控制。

应用:国家电网调度中心通过潮流计算优化电力分配,确保西电东送通道稳定运行。

7) 供配电技术

主要内容包括电力系统与供配电系统的基本构成、负荷计算与短路分析、变配电所设计、电气设备选型、供配电系统主接线、继电保护与二次回路、电气安全与防雷接地、电能质量与节能技术以及现代智能配电系统的运行与管理。这门课程是电气工程及其自动化、建筑电气、供用电技术等专业的核心主干课,旨在培养学生掌握从电源接入到终端用电的全过程电能分配与控制能力。它不仅涵盖理论计算,更强调工程实践与系统安全,是连接发电侧与用户侧的关键技术桥梁。

8) 电力系统继电保护

主要内容包括继电保护的基本原理与任务、四大基本要求(选择性、速动性、灵敏性、可靠性)、常见保护类型(如过电流保护、差动保护、距离保护、零序保护等)、保护对象分类(输



电线路、变压器、发电机、母线等)以及微机型保护装置的构成与发展趋势。该技术是电力系统安全运行的核心保障,被誉为电力系统的“保护神”,其核心目标是在发生故障或异常工况时,自动、迅速、有选择性地切除故障元件,防止事故扩大,保障非故障部分继续运行。

4. 实践环节

1) 金工实习

主要内容包括学习机械制造的基础工艺知识,掌握铸造、锻造、焊接、车削、铣削、钳工、数控加工等传统与现代制造技术的操作技能,并通过实践项目(如制作小锤子、陀螺、印章等)培养学生的工程实践能力、安全意识和工匠精神。这门课程是工科类专业重要的实践教学环节,尤其针对机械、电气、自动化等专业学生设置,旨在将理论知识与动手操作结合,帮助学生理解从原材料到成品的完整制造流程,为后续学习专业课和培养工程素养打下坚实基础。

2) 电路电子实验

主要内容包括电路基本定律验证、元件伏安特性测绘、电源等效变换、一阶/二阶电路动态响应、交流电路分析、谐振现象研究、变压器特性测试、滤波器设计、运算放大器应用、数字逻辑电路搭建与测试、可编程逻辑器件(PLD)开发以及常用电子仪器(如万用表、示波器、信号发生器)的操作使用。这门课程是电气、自动化、电子类及相关工科专业的重要实践环节,旨在通过动手操作使学生加深对电路原理、模拟电子技术、数字电子技术等理论课程的理解,培养学生的实验技能、数据分析能力和工程思维。

3) 电子实习

主要内容包括安全用电规范、基础电子元器件识别与检测、手工焊接技术(如电烙铁使用)、电路图识读与印制电路板(PCB)设计、常用电子仪器(万用表、示波器、信号源等)操作、模拟与数字电路的组装调试、收音机或充电器等典型电子产品制作,以及故障排查与维修思路训练。该实习是电子、电气、自动化等工科专业重要的实践环节,旨在将理论知识转化为动手能力,培养学生对电子系统的整体认知和工程素养,为后续专业学习和职业发展打下坚实基础。

4) 电力电子与电机控制实验

主要内容包括电力电子器件特性测试、基本电力变换电路实验(如整流、逆变、斩波电路)、脉冲宽度调制(PWM)技术应用、直流电机与交流电机调速系统搭建、开环与闭环控制系统调试、基于DSP或单片机的数字控制实现以及典型工业驱动系统的仿真与实物验证。这些实验是电气工程、自动化、机电一体化等专业的重要实践环节,旨在将电力电子技术、电机与拖动、自动控制原理等课程的理论知识与工程实际结合,培养学生对电能变换与电机控制系统的综合设计、调试与故障分析能力。

5) 电力系统实验

主要内容包括电力系统稳态与暂态运行特性分析、潮流计算与控制、对称及不对称故障模拟、继电保护装置测试、发电机并网与同步运行、调频调压控制、电力系统稳定性研究(静态、暂态、动态)、微电网与新能源接入仿真以及数据采集与监控系统(SCADA)的实操应用。这些实验是电气工程及其自动化专业的重要实践环节,旨在通过物理模拟或数字仿真平台,将电力系统分析、电力系统继电保护、电力系统自动化等课程理论知识具象化,帮助



学生深入理解复杂电力网络的运行规律与控制逻辑,培养其工程实践与系统思维能力。

6) 生产实习

学生深入生产一线,系统了解企业的生产流程、工艺技术、设备操作与组织管理,掌握典型产品的制造全过程;参与实际生产操作,学习安全规范与5S现场管理;结合理论知识分析实际问题,完成数据记录、工艺优化与实习报告撰写,实现理论与实践的深度融合。该实习是工科、理科、财经等多个专业教学计划中的核心实践环节,旨在帮助学生完成从“学生”到“职业人”的初步角色转换,为后续专业学习和职业发展奠定坚实基础。

7) 毕业设计

学生综合运用专业知识完成一项实践性、综合性课题,涵盖选题、开题报告、课题研究或工程设计、论文撰写、中期检查、成果提交与答辩等环节,最终形成设计图纸、程序代码、实物模型、研究报告等成果,并通过答辩考核。毕业设计是高校人才培养的重要实践环节,旨在检验学生独立分析与解决实际问题的能力,不同专业方向内容侧重各异,但核心流程与要求高度一致。

5. 工程应用知识

1) 电路与电子系统设计

掌握电路原理、模拟/数字电子技术,能进行电子系统设计与实践。

2) 电气控制与 PLC 应用

学习电气控制与 PLC 技术,能设计工业自动化控制逻辑。

3) 电力系统分析与保护

通过学习电力系统分析、电力系统继电保护等课程,掌握电网短路计算、继电保护整定等工程技能。

4) 电机与电力电子控制

学习电机学、电力电子技术,能进行电机控制、电力电子装置设计与优化。

5) 现代工程工具与仿真技术

(1) 工程制图与计算机辅助设计:使用 AutoCAD、EPLAN 等进行电气图纸设计。

(2) 系统仿真与建模:熟练运用 MATLAB/Simulink、PSCAD 等工具进行电力系统、电机控制仿真。

(3) 编程与数据处理:通过 C 语言、Python 等进行控制系统开发、数据分析。

6) 行业应用与前沿技术方向

(1) 智能电网与新能源:涉及新能源发电并网、电力系统规划等知识。

(2) 工业自动化与机器人:涵盖工业机器人控制、运动控制系统等。

(3) 建筑与交通电气化:包括建筑供配电、城市轨道交通电气化等应用。

课程通过“基础训练→专业课程设计→创新实践→工程实习”这四个阶段的培养,强调强弱电结合、软硬结合的工程素养,形成工程能力培养体系。

6. 电气专业的核心相关技术

基于上述基础知识,电气专业衍生出一系列支撑现代社会运转的关键技术,具体如下。

1) 新能源发电技术

(1) 光伏发电技术:利用半导体光伏效应将太阳光能转化为电能,核心是光伏组件(单



晶硅/多晶硅电池片)、组串式逆变器(采用最大功率点跟踪(MPPT)技术,提升发电效率)。

(2) 风力发电技术:通过风力机叶片捕捉风能,转化为机械能,再由双馈异步发电机或永磁同步发电机转化为电能,配套变桨控制系统(风速过高时调整叶片角度,避免机组过载)。

(3) 生物质能/地热能发电技术:通过燃烧生物质(秸秆、垃圾)或利用地热水蒸气驱动汽轮机发电,适合分布式能源场景。

2) 智能电网与能源互联网技术

(1) 智能电网:是融合物联网(IoT)、大数据、人工智能的电力系统,实现“源网荷储”协同。例如,智能电表实时上传用户用电数据,电网根据负荷变化动态调整发电量。

(2) 微电网技术:是由分布式电源(光伏、风电)、储能、负荷组成的小型自治系统,既可并网运行也可孤网运行(如海岛微电网,解决供电可靠性问题)。

(3) 数字孪生技术:构建电力系统的虚拟副本,通过实时数据映射模拟系统运行状态,提前预测设备故障(如变压器数字孪生模型可预警绝缘老化问题)。

3) 储能与氢能技术

(1) 电化学储能:锂离子电池(家用储能)、钒液流电池(大规模储能,如青海海西州100MW/400MW·h储能项目)、钠离子电池(低成本,适合电网调峰)。

(2) 机械储能:抽水蓄能(最成熟的大规模储能,如广东抽水蓄能电站,效率达70%~80%)、飞轮储能(响应快,用于电网调频)。

(3) 氢能技术:电解槽(利用低谷电制氢)、燃料电池(氢能发电,效率在60%以上),应用于氢能重卡、分布式发电站。

4) 电动汽车与电驱动技术

(1) 电驱动系统:由电机(以永磁同步电机为主)、逆变器(IGBT/SiC器件)、减速器组成,核心是提升功率密度(如特斯拉Model 3电机的功率密度达4.7kW/kg)。

(2) 电池管理系统(BMS):实时监测电池电压、温度、荷电状态(SOC),防止过充与过放,延长电池寿命(如宁德时代BMS可将电池循环寿命提升至3000次以上)。

(3) 充电技术:直流快充(功率达480kW,10min充电至80%)、无线充电(电动汽车停放时通过电磁感应充电)。

5) 电磁兼容与电气安全技术

(1) 电磁兼容(EMC):解决电气设备间的电磁干扰(EMI),例如新能源汽车电机控制器需通过EMC测试,避免干扰车载雷达。

(2) 电气安全技术:绝缘监测(如光伏阵列绝缘电阻监测)、漏电保护(剩余电流保护器(RCD),触电时0.1s内跳闸)、防雷接地(避雷针与接地网配合,将雷电流导入大地)。

1.4.2 知识与技术的关联性

电气专业的知识与技术形成了“理论支撑技术,技术反哺理论”的闭环。

例如,电力电子技术的突破(SiC器件的应用)依赖于电力电子理论中器件特性的研究,而SiC器件的高耐压、高频特性又推动了光伏逆变器效率从96%提升至99%,反过来要求重新优化逆变电路拓扑理论。

又如,智能电网的发展需要电力系统分析(潮流计算)、自动控制(PID调节)、计算机技术(大数据算法)的深度融合,体现了跨学科知识的协同。



电气专业的知识体系以数学与自然科学为根基,以电路、电磁场、电力电子等理论为核心,通过工程应用知识连接实际技术;而相关技术则聚焦能源转换、系统运行、智能化升级等方向,既依赖经典理论,又在实践中推动理论创新。这一体系支撑了从家用电器到特高压电网的所有电气系统,是现代工业与社会运转的“神经中枢”。

1.5 电气工程及其自动化专业的培养要求

电气工程及其自动化专业旨在培养具备电气工程领域扎实理论基础、实践能力和创新意识,能在电力系统、电气装备、自动化控制等领域从事设计、研发、运行、管理等工作的复合型工程技术人才。其培养要求通常涵盖知识、能力、素质三个核心维度,具体如下。

1.5.1 知识要求

1. 数学与自然科学基础

掌握高等数学、线性代数、概率论与数理统计等数学知识,能用于工程问题的建模与分析。理解大学物理(电磁学、力学、热力学等)的基本原理,掌握电路、电磁场等电气相关的自然科学规律。

2. 工程基础与专业知识

核心基础:电路理论、模拟电子技术、数字电子技术、电机学、电力电子技术、自动控制原理等。

专业知识:电力系统方向,包括电力系统分析、电力系统继电保护、电力系统自动化、新能源并网技术等;电力电子与电力驱动方向,包括电力电子技术、电机与拖动控制技术、开关电源技术等。智能检测与控制方向,包括传感与检测技术、电气控制与PLC控制技术、智能控制(如模糊控制、神经网络)等。

3. 交叉学科与人文社科知识

了解计算机科学(编程语言、嵌入式系统、数据库)、信息技术(物联网、人工智能)等交叉学科知识。掌握工程经济学、管理学、法律法规(如电力行业标准、安全生产规范)等相关内容。

1.5.2 能力要求

1. 实践与工程应用能力

(1) 具备实验设计与操作能力:能独立完成电路、电子、电机等基础实验,分析实验数据并解决问题。

(2) 掌握工程软件与工具:能熟练使用CAD(如AutoCAD)、仿真软件(如MATLAB/Simulink、PSCAD)、PLC编程软件等。

(3) 具备系统设计与开发能力:能参与电气设备、控制系统或电力系统的设计、调试与优化。

2. 创新与解决问题能力

(1) 能针对复杂工程问题(如电网故障诊断、新能源并网稳定性)提出创新性解决方案。



(2) 具备初步的科研能力:了解科技文献检索方法,能参与课题研究或技术攻关。

3. 沟通与协作能力

(1) 具备清晰的书面与口头表达能力,能撰写技术报告、学术论文或进行工程方案汇报。

(2) 适应团队工作模式,能在跨学科团队中有效协作(如与机械、计算机专业人员共同完成项目)。

4. 终身学习能力

了解电气领域的前沿技术(如新能源、储能技术、智能电网)和发展趋势,能主动更新知识体系。

1.5.3 素质要求

1. 职业道德与责任意识

遵守工程伦理,重视安全生产与质量标准,在电力系统等涉及公共安全的领域中坚守责任。具备环保意识,在工程设计中考虑节能、减排等可持续发展要求。

2. 国际视野与跨文化素养

了解国际电气领域的标准(如 IEC、IEEE 标准)和技术动态,能适应全球化工程合作环境。

3. 身心素质

具备良好的身体素质,能适应工程现场工作环境(如户外电力巡检、车间调试)。拥有抗压能力和团队协作精神,能应对复杂工程任务中的挑战。

1.5.4 毕业要求

(1) 完成规定学分的课程学习(包括通识课、专业课、实践课)。

(2) 通过毕业设计(论文):需结合实际工程问题,完成从选题、设计、实验到报告撰写的完整过程,体现综合应用能力。部分高校要求获得计算机等级证书、英语等级证书,或参与学科竞赛、科研项目等实践经历。

通过培养,希望该专业学生能够具备“强电与弱电结合、电力与控制结合、软件与硬件结合”的特色,适应电气行业的多元化需求,成为兼具技术深度和应用广度的工程人才。

1.6 电气技术应用领域

电气技术是现代工业、家庭和新兴领域的核心驱动力,其应用广泛且深入,涵盖从基础供电到智能管理的多个层面。以下分领域介绍电气技术的典型应用,并结合实例说明其实际价值。

1. 工业领域——高效供电与智能管理

如图 1-3 所示,智能电气设备主要包括智能变压器、智能开关柜、智能电容器组、智能电力仪表、智能电子设备(IED)等,广泛应用于配电系统、工业自动化和智能建筑中,具备远程



监控、自动控制、状态监测和能效优化等功能。



图 1-3 智能电气设备

根据应用场景和技术构成,常见的智能电气设备类型如下。

(1) 智能变压器:作为配电系统的核心,智能变压器不仅承担电压转换任务,还集成状态监测、远程调控和能效优化功能。通过传感器实时采集温度、负载、局部放电等数据,实现故障预警与节能运行。

(2) 智能开关柜:集成电流/电压传感器、温湿度控制器和通信模块,支持遥测、遥信、遥控、遥调、遥设五大功能。可实时监测电气参数,识别过载或短路,并具备自动分闸能力,提升系统安全性。

工业场景对电气技术的需求尤为严苛,强调稳定性、能效和智能化。例如,在连续性生产行业,电压暂降和瞬时供电中断是常见挑战,可能导致生产线停滞和重大经济损失。针对这些问题,引入固态切换开关(SSTS)技术,通过快速切换备用电源,保障关键设备在电网波动时持续运行。在唐山某企业配电系统改造中,SSTS的应用显著缩短了停机时间,提升了生产连续性。

变压器技术也在工业中发挥着关键作用。三相干式变压器通过优化设计,如采用高导磁硅钢片和环氧树脂浇注工艺,实现了低损耗、高可靠性和易维护性。常州创稳电气的案例显示,某汽车零部件厂使用其干式变压器后,每年可节省电费数千元,维护成本大幅降低,设备故障率趋近于零。这类变压器还支持定制化设计,如针对高粉尘环境增加防尘滤网,体现了技术对多元场景的适应性。

2. 家庭领域——智能家居与节能优化

家庭电气应用聚焦于便利性和能效提升。智能家居系统通过物联网技术整合照明、温控等设备,用户可通过手机或语音助手远程控制,实现自动化管理。例如,智能恒温器能学习用户习惯,自动调节室内温度,在提升舒适度的同时降低能耗。研究表明,此类系统可减少15%~20%的家庭电费支出。

安全防护也是家庭电气的重要方向。过电压保护电路利用压敏电阻等元件,在雷击或电网异常时迅速泄流,限制电压峰值,保护家用电器免受损坏。这类电路设计简单,易于集成到家庭配电系统中,为日常用电提供可靠屏障。智能家居设备如图1-4所示。

3. 新兴领域——新能源与智能电网

随着可再生能源的普及,电气技术向分布式能源管理扩展。分布式能源管理系统



图 1-4 智能家居设备

(DEMS)通过“边缘计算+云端协同”架构,实时整合光伏、储能等资源,优化能源调度。在长三角某科创园区,DEMS 的应用使绿电自给率显著提升,并在电网限电时通过孤岛模式保障核心实验室供电,实现了能效与稳定性的双重突破。

储能领域同样受益于电气创新。非线性智能型储能变压器针对频繁充放电场景,集成传感器和智能监控模块,实现数据实时采集和故障预警。佛山某储能电站采用该技术后,年节电量可观,运维成本大幅下降,设备运行零故障,展示了电气技术在新能源消纳中的潜力。新能源与智能电网示意图如图 1-5 所示。



图 1-5 新能源与智能电网示意图



4. 其他应用场景

交通领域：电动汽车的兴起高度依赖高效电气系统，如大功率直流快充技术（以特斯拉超级充电网络为代表），显著减少了化石燃料的使用，推动了绿色出行。

特殊环境：在户外或恶劣条件下，电气设备通过提升防护等级（IP 等级）确保稳定运行，广泛应用于建筑工地或偏远地区等场景，保障供电可靠性与设备安全性。

医疗与生活：简易电路设计（如婴儿尿布湿度检测器）利用电极和指示灯实现家庭健康监测，体现了电气技术在民生领域的普惠性。

电气技术的应用场景揭示了其核心价值：在工业中保障生产稳定，在家庭中提升生活品质，在新兴领域推动能源转型。这些场景不仅展示了技术方案的工程化落地能力，也强调了定制化和智能化设计的重要性。未来，随着需求的多样化，电气技术将继续创新，为各行业提供高效、可靠的解决方案。

1.7 电气技术应用案例与电气技术未来发展趋势

1.7.1 电气技术应用案例

以下为全球范围内具有里程碑意义、技术突破性与广泛影响力的电气技术应用案例，涵盖特高压输电、柔性直流、超导电缆、智能储能与 AI 赋能制造等前沿领域，均基于权威工程实践与行业认证成果。

1. 特高压直流输电工程——全球能源大动脉

特高压输电是我国的一项超级工程，具有输电容量大、距离远、效率高、损耗低等显著优势，是“西电东送、北电南供、水火互济、风光互补”的能源运输“主动脉”。中国在特高压直流输电领域实现全球引领，多项工程刷新世界纪录，具体如下。

昌吉—古泉±1100kV 特高压直流工程：世界电压等级最高、输送容量最大（1200 万 kW）、输电距离最远（3284km）的直流输电工程，2019 年投运，累计输送电量超 3000 亿 kW·h，支撑新疆新能源外送，日送电量创世界直流输电最高纪录。

白鹤滩—江苏±800kV 特高压直流工程：将四川白鹤滩水电站清洁电能高效输送至长三角，输电损耗低于 1.5%，7ms 内完成跨域电力传输，是“西电东送”战略的核心通道。

榆横—潍坊 1000kV 特高压交流工程：全球首台现场模块化组装的特高压变压器的成功应用，突破运输限制，实现复杂地形区域高电压等级电力接入。特高压直流输电工程如图 1-6 所示。

2. 柔性直流输电——新能源并网的“金钥匙”

柔性直流技术破解了风电、光伏等间歇性能源并网难题，中国实现从追赶到领跑。

张北柔性直流电网试验示范工程：全球首个集风电、光伏、储能于一体的直流电网，采用模块化多电平换流器（MMC）技术，2023 年获中国工业大奖，实现 100% 绿电供应冬奥场馆。

厦门±320kV 柔性直流输电工程：世界首个真双极接线、±320kV 电压等级的柔性直流工程，2015 年投运，十年累计送电超 170 亿 kW·h，首次实现国产±320kV 换流阀与高压直流电缆工程化应用。



图 1-6 特高压直流输电工程

3. 超导输电——城市核心区的“电力隐形高速公路”

上海 35kV 公里级超导电缆示范工程：全球首个公里级商业化运行的超导输电项目。全长 1.2km, 输电能力为常规电缆的 4~6 倍, 累计安全运行超 3.5 万 h, 输送电量近 7.6 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。创新采用“全程排管冷缩补偿”技术, 攻克城市密集区敷设难题, 构建“无人机+机器狗”立体巡检系统, 实现全数字化运维。

4. 非线性智能型储能变压器——新型电力系统的“智慧心脏”

广东广特电气非线性智能型储能变压器(佛山储能电站)：集成多传感器与智能监控模块, 实现空载损耗降低 32%、负载损耗优化 12%, 单台年节电约 1.2 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。支持预测性维护, 巡检频次降低 50%, 运维成本节约 3 万元/(台·年), 投运以来实现零故障运行。非线性智能型储能变压器如图 1-7 所示。

5. AI 赋能电气制造——从经验驱动到数据智能

温州电气行业发布首批 AI 应用典型案例, 推动产业智能化升级。

天正电气“天正智瀚”大模型：国内首个通过生成式 AI 服务备案的电气行业大模型, 可自动生成合规配电方案, 客户响应效率提升 50% 以上。

正泰电器“电镀工艺智能优化系统”：通过 AI 建模优化工艺参数, 关键质量指标过程能力达到行业领先水平, 实现从“老师傅经验”到“AI 双核驱动”的范式变革。

6. 国家级创新成果与国际权威认可

中国电气装备：11 项成果获 2025 年度电力科学技术奖, 包括 170kA 发电机断路器(应用于白鹤滩水电站)、环保型真空开关设备等, 填补国内空白, 打破“卡脖子”技术壁垒。

清华大学施博辰：获 CIGRE 最佳博士论文奖, 研发国产电力电子仿真软件 DSIM, 仿真速度提升百倍, 打破国外垄断, 应用于全球 200 余家机构。



图 1-7 非线性智能型储能变压器

清华大学文艺林: 获 IEEE PES 博士论文最佳研究奖, 提出大规模分布式资源聚合理论, 为虚拟电厂与主配协同调度提供核心算法支持。

以上这些案例展示了电气工程在技术创新、效率提升和可持续发展方面的实际应用。

1.7.2 电气技术未来发展趋势

1. 智能化与数字化

智能电网：AI 和大数据让电网更“聪明”，能自主优化调度，提升稳定性和效率。

工业 4.0: PLC、SCADA 系统升级为工业互联网平台,机器人和数字孪生工厂成为标配。

数据驱动：电网监控、预测性维护等依靠实时数据决策，数据驱动的理念日益关键。

2. 绿色化与可持续化

新能源：光伏、风电等并网技术是重点，储能系统（如锂电池）研发加速。

政策驱动：国家“双碳”目标推动能源绿色转型，微电网、虚拟电厂等技术受政策支持。

绿色技术：高效节能设备、氢能技术等是研发热点。

3. 新能源与电动化

新能源汽车：电机驱动技术、电池管理系统(BMS)和快充技术是核心需求。

轨道交通：电力驱动技术、充电设施发展推动交通能源转型。

4. 跨学科融合深化

交叉创新：电气工程与计算机、材料科学等融合，催生智能传感、电力电子新器件。

前沿领域：核聚变能源装备、量子技术应用等是未来突破方向。

5. 安全与可靠性提升

网络安全：电网和分布式能源系统需加强网络安全防护。



故障诊断：自愈技术、AI 故障诊断等提升系统可靠性。

本章小结

本章作为电气工程导论的开篇，系统阐述了电气工程的核心内涵与学科体系，通过系统阐述电气工程学科的发展脉络、知识体系、培养目标与应用场景，围绕学科范畴、国内外发展、知识构成、培养要求及应用领域五大核心板块，强调了树立工程思维、掌握核心知识、关注行业前沿的重要性，帮助初学者建立对电气工程及其自动化专业的整体认知，明确专业学习的核心重点与应用方向，为后续专业课程的深入学习筑牢认知根基。其研究范畴涵盖电力电子、电机与电器、电力系统等多个领域。同时介绍了电气工程在国民经济中的核心地位，以及在新能源、智能制造、轨道交通等领域的广泛应用。

思考题

- 1-1 简述电气工程及其自动化专业的应用领域。
- 1-2 论述电气工程及其自动化专业课程体系的构成。
- 1-3 简述你所在学校电气工程及其自动化专业的培养规格。
- 1-4 举例说明电气工程及其自动化专业的新技术。
- 1-5 思考如何学、怎样学好电气工程及其自动化专业。
- 1-6 根据你的理解，并查找资料，简述人工智能及大数据在电气工程领域的应用。
- 1-7 简述电气专业的发展逻辑与中外差异。

第2章



电力电子技术概述

本章学习目标

1. 知识层面

- (1) 掌握电力电子技术的概念；掌握电力电子器件的概念、特征、分类、工作原理、工作方式、选型要点及损耗类型，明确各类器件的开通与关断条件及参数差异。
- (2) 理解电力电子技术的核心内涵、四种电能变换形式的工作原理及其典型应用。
- (3) 了解电力电子技术的发展历程、知识体系及前沿技术(宽禁带器件等)。
- (4) 了解软开关技术的目的和分类，在驱动电路中电力电子主电路和控制电路进行电气隔离的原因、实现的基本方法和原理。
- (5) 掌握典型的脉冲宽度调制方法、软开关技术及软开关电路的分类、零电压和零电流软开关电路的定义。
- (6) 了解电力电子装置的基本构成，电力电子技术在一般工业领域、交通运输、电力系统、新能源系统以及家用电器等领域中的主要应用。
- (7) 了解电力电子装置在电力系统中的应用，高压直流输电、无功补偿、谐波抑制等装置的结构及基本控制方法。

2. 能力层面

- (1) 具备梳理电力电子技术知识体系的能力，能将器件特性、变流原理与工程应用场景结合，形成完整的知识应用逻辑，能分析简单的电力电子工程问题。
- (2) 具备自主检索文献、梳理知识难点、分析器件适配性及变流电路工作规律的能力，能将自主学习成果应用于工程问题的分析与解决。

3. 素养层面

- (1) 树立电力电子系统“高效、稳定、安全”的运行理念，培养严谨务实的工程思维和责任意识，重视电力电子技术对能源结构转型、节能减排的重要意义。
- (2) 激发对电力电子领域前沿技术的探索兴趣，培养精益求精的工匠精神和科技报国的使命感及团队协作与创新思维。



本章重点与难点

1. 重点

(1) 电力电子器件的分类、工作原理、基本特性,明确不可控、半控型、全控型器件的核心差异。

(2) 电力电子技术的核心内涵、四种电能变换形式的工作原理及应用场景。

(3) 电力电子器件驱动与保护体系的基本要求及典型电路原理、软开关技术的核心思路,明确电力电子技术在新能源、工业、交通等领域的工程应用价值。

2. 难点

(1) 电力电子器件的开通和关断过程分析,全控型器件与半控型器件的应用适配性分析。

(2) 软开关技术的基本原理、谐振过程分析,电力电子器件驱动与保护电路的设计要点及适配性评价,严格贴合教学大纲难点要求。

本章导读: 电力电子技术是电气工程及其自动化专业的重要支撑性技术之一,承担着实现电能高效变换、精准控制与灵活调节的关键功能。在新能源汽车驱动、可再生能源并网、智能电网构建、轨道交通牵引等众多现代电气工程应用场景中,电力电子技术均扮演着不可或缺的核心角色。

本章将系统阐述电力电子技术的基本概念与发展历程,重点围绕电力电子器件、变换电路、控制方法、驱动与保护体系四个层面,构建电力电子技术的知识框架。结合典型的电能变换形式,阐述各类变换电路的工作机制与应用场景;在此基础上,进一步介绍软开关技术的基本思路、脉冲宽度调制方法以及驱动电路中的电气隔离原理,为后续深入学习电力电子相关课程奠定理论基础。

在知识应用层面,本章将结合新能源汽车、智能电网、光伏与风力发电、开关电源及电气化交通等典型工程领域,分析电力电子技术在实际系统中的具体应用形式与工程价值,有助于建立从器件特性、电路结构到工程适配的系统性认知。

通过本章的学习,应掌握电力电子技术的核心内涵与基本构成,形成对电力电子知识体系的整体认识,理解器件选型与电路设计在工程实践中的适配逻辑,树立“高效、稳定、安全”的系统运行理念,为后续专业课程的学习及工程实践能力的培养夯实基础。

2.1 电力电子技术的定义及电力电子器件的发展历程

本节作为入门内容,将明确电力电子技术的定义与核心功能,梳理其发展脉络,并重点介绍以氮化镓(GaN)、碳化硅(SiC)为代表的宽禁带半导体材料——它们突破了传统硅基器件的物理特性瓶颈,凭借优异的性能显著提升了功率变换器的能量转换效率和功率密度,进而在助力节能减排中发挥关键作用。通过本节的学习,理解电力电子技术前沿与社会发展的紧密关联。

2.1.1 电力电子技术的定义

电力系统中存在两种基本的电能形式,一种是交流电(alternating current, AC),其大小

和方向随时间呈周期性变化,时而为正,时而为负;另一种则是直流电(direct current,DC),它的方向保持不变,如图 2-1 所示。

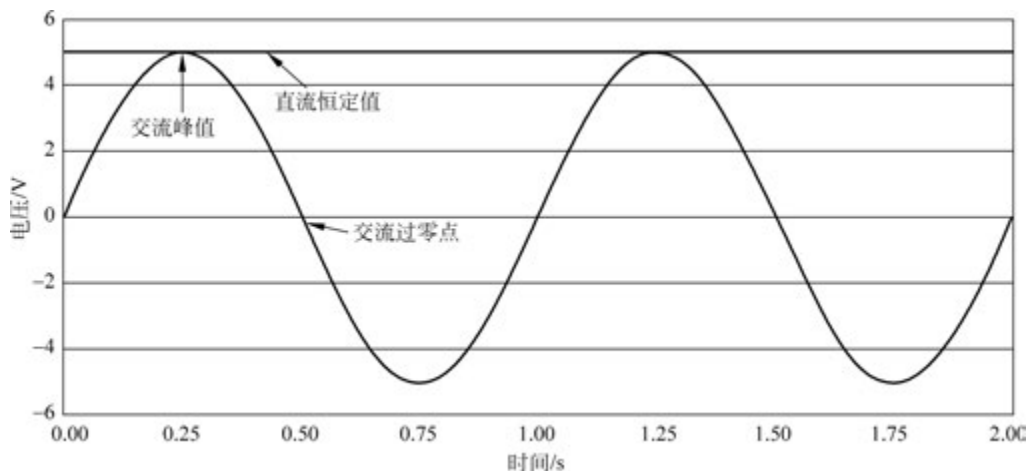


图 2-1 交流电和直流电的波形比较

在日常的工农业生产与生活中,电能形式的转换无处不在。不同用电设备的工作原理、使用场景存在明显差异,对电能形式、电压等级等的要求也各不相同,因此,需要根据用电要求,对现有电能进行针对性的变换与调节,才能保障各类用电设备正常、稳定运行。

手机充电器将电网提供的交流电转换为直流电,以满足手机电池充电的需要;在光伏发电系统中,单相并网逆变器将光伏组件发出的直流电逆变为交流电,并向电网进行输送;手机内部的电源管理电路通过对直流电压进行升降压调节,为不同功能模块提供合适的工作电压;变频空调则需要根据运行工况对交流电的频率和幅值进行灵活调节,从而实现节能与高效控制。实现上述电能变换与控制功能的工程技术统称为电力电子技术。与之相对应,用于实现对电子运动进行控制的器件称为电力电子器件。

由此可见,电力电子技术就是利用功率半导体器件对电能进行变换和控制的技术,包括对电压、电流、频率及波形的变换,以满足各种不同用电设备的需求。它既是现代电子学在强电(高电压、大电流)领域的重要分支,也是电工技术在弱电(低电压、小电流)领域的重要组成部分,是一个强弱电结合、弱电控制强电的新领域。电力电子技术的发展历程始终以电力电子器件的演进为主线。器件的不断革新是推动电力电子技术进步的重要支撑,不仅决定着学科未来的发展方向,更有望催生新一轮的科学技术变革。

2.1.2 电力电子器件的发展历程

电力电子器件的发展是电力电子技术进步的核心支撑,其发展历史如图 2-2 所示。图 2-2 以时间轴为脉络,清晰呈现了关键节点,完整勾勒出电力电子器件从雏形到前沿的发展路径。

1. 史前期

1904 年,真空二极管的问世,开启了电力电子技术雏形的探索;1930—1947 年,水银(汞弧)整流器投入工业应用,为电能转换技术奠定基础。此阶段,真空管(电子管)等电真

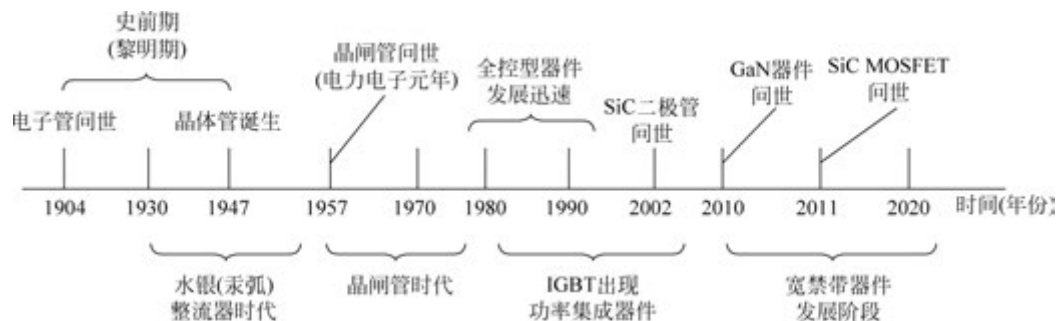


图 2-2 电力电子技术发展史

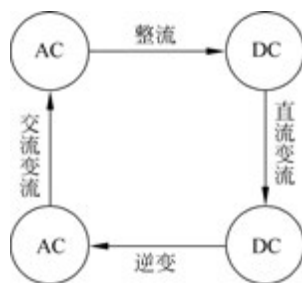
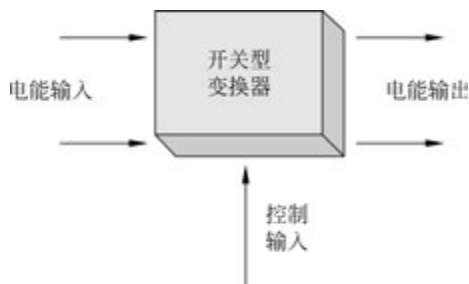
空装置仍主导电子工业体系，而半导体晶体管仅在低功率电路中开始初步应用。这一技术迭代的过渡期被视为电子工业时代的“史前期”。

2. 晶闸管时代

1957年晶闸管问世，被视为电力电子元件的起点，晶闸管的诞生使电力电子从一个边缘技术逐渐发展成为支撑现代能源体系的核心技术之一，具有深远的历史意义。

(1) 首次实现可控大功率电能控制。晶闸管首次实现了对高电压、大电流的可控整流与开关控制，填补了当时在高压大功率电路中缺乏有效控制手段的空白，开启了电力电子从“不可控”到“可控”的新时代。

(2) 推动电能变换技术的革新。晶闸管的出现，极大推动了电能变换技术的发展。它能够实现交流-直流、直流-交流、交流-交流及直流-直流等多种形式的电能转换，为现代工业中的电机控制、电源变换等领域提供了核心技术支持。开关型电力变换器工作示意图如图 2-3 所示，电能变换的四种类型如图 2-4 所示。晶闸管的广泛应用标志着电力电子已从单纯的整流走向高效的电能控制与变换。



(3) 奠定现代电力电子技术体系的基础。晶闸管不仅是第一个实用化的可控功率元器件，更成为后续电力电子器件（如门极可关断晶闸管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管等）发展的技术起点。同时，它的结构原理、制造工艺、控制机制为后续的半导体电力电子器件设计提供了理论基础和工程经验。

象征意义：电力电子从“工具”走向“系统”。晶闸管的出现不仅是一个技术事件，更具有深刻的象征意义。它标志着电力电子技术实现了关键性跨越——从传统的“被动使用电



能”转向“主动控制电能”，从单一的“电力工程”升级为综合的“电力电子系统工程”。

时至今日，晶闸管在超高电压、超大功率应用场景中仍占据主流地位，但其作为半控型器件，存在开关频率较低、开关机制复杂的劣势，这一劣势也进一步限制了它的发展空间。功率半导体器件根据控制信号对器件开通与关断的控制能力可分为三类：不可控器件，无法通过控制信号控制其开通与关断；半控型器件，可通过控制信号控制其开通，却无法控制其关断；全控型器件，可通过控制信号灵活地实现开通与关断的双重控制。

3. 全控型与集成器件发展

20 世纪 70 年代，以门极可关断晶闸管 (gate turn-off thyristor, GTO)、电力晶体管 (giant transistor, GTR) 和电力场效应晶体管 (power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 电力 MOSFET) 为代表的全控型器件迅速发展。与之前仅能控制开通的半控型器件 (如晶闸管) 不同，这些器件均可通过控制端 (门极、基极或栅极) 来实现器件的开通与关断。其中，GTO 和 GTR 为电流驱动型，通流能力强，但开关速度较慢、驱动复杂。电力场效应晶体管为电压驱动型，具有开关速度快、输入阻抗高、驱动简单的优点，但功率处理能力相对较弱，耐压较低、通态压降较高，因此适合应用于高频、小功率电力电子装置。全控型器件的出现，使得更灵活的控制 (如脉冲宽度调制技术) 成为可能，并推动了电力电子技术向更高频率、更优性能的方向发展。20 世纪 80 年代后期，结合 GTR 通流能力强与电力场效应晶体管开关速度快、输入阻抗高的优势，诞生了绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)，它成为一种主导中、大功率应用的电压控制型开关器件，但其关断时存在的电流拖尾现象限制了开关频率的进一步提升。

4. 宽禁带器件发展阶段

当前，电力电子器件所用的主要半导体材料是硅，然而，随着其结构设计和制造工艺的不断完善，在功率变换领域，硅基器件的物理特性使功率变换器的发展陷入瓶颈，硅基器件的不可控器件无法通过控制信号实现开通与关断控制，各方面性能已越来越接近其由材料特性决定的理论极限，很多学者认为，依靠硅基器件继续完善和提高电力电子装置与系统性能的潜力已十分有限，因此，其注意力转到了基于宽禁带半导体材料的电力电子器件。相较于硅材料，以氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 等化合物为代表的宽禁带半导体材料具备禁带宽度更宽、饱和电子漂移速率更高、击穿电场更高和热导率更高等优势，能够使功率变换器实现高电压平台、大功率、高能量密度、高能量转换效率及耐高温性能。目前对功率变换器的研究主要集中于采用新型高性能电子元器件、设计新型的高效功率电路拓扑、发明与应用新型技术等方向，以进一步提升功率变换器的性能。

2.2 电力电子技术的基本知识构成与知识体系

本节旨在阐述电力电子技术的核心知识体系与基本构成。电力电子技术是一门以电能变换为核心，融合了电力学、电子学及控制理论三个学科知识的综合性工程技术。其知识体系主要围绕电力电子器件、变换电路等五大核心模块构建，各模块之间相互关联、协同支撑，共同构成该领域的理论基础与技术核心。以下将对这五大知识模块进行具体介绍。



2.2.1 电力电子器件基础

电力电子器件是指直接用于处理电能的主电路中,实现电能变换或控制的电子器件。通俗而言,它是一种用于电能变换或控制的“电子零件”。比如日常使用的手机充电器、笔记本电源适配器,就是依靠这类器件把市电的交流电变成设备用的直流电。平常所说的电力电子器件,通常指的就是电力半导体器件,主要材料是硅。相较于用来处理信息的电子器件(比如手机里的芯片),用于主电路处理电能的电力电子器件具有以下特征。

(1) 电力电子器件最重要的参数就是处理电功率的大小,即它能承受多大的电压与通过多大的电流。

(2) 一般工作在开关状态,即处于导通(工作)或关断(不工作)两种状态之一。

(3) 器件的开通与关断一般由驱动电路控制,驱动电路相当于一个“指挥器”,控制其开通与关断的时机。

(4) 器件的功率损耗一般较大,通常需要安装散热器。

2.2.2 电力变换电路体系

电力变换的实现依赖四大基础电路,它们是电能变换的核心载体,结合前文所述的电力电子器件特性,各类电路的功能、工作原理、分类及应用具体如下。

(1) 整流电路:核心功能是实现交流电到直流电的转换,这种变换称为正变换,实现该变换的装置称为整流器。整流电路可从多种角度分类,主要分类方法为:按组成器件可分为不可控电路、半控电路、全控电路三种,按电路结构可分为桥式电路和零式电路,按交流输入相数可分为单相电路和多相电路,按变压器二次侧电流的方向(单向或双向)可分为单拍电路和双拍电路。该电路主要应用于充电、电镀、电解及直流电动机调速等场景。

(2) 逆变电路:与整流变换方向相反,核心功能是实现直流电到交流电的转换,这种变换称为逆变换,所用的变换装置称为逆变器。逆变电路可从多种角度分类,主要分类方法为:按输入方式可分为电压型逆变器和电流型逆变器两大类,按交流输出接入方式可分为有源逆变器和无源逆变器,按输出波形可分为方波逆变器、阶梯波逆变器、正弦波逆变器等,按输出交流电相数可分为单相逆变器、三相逆变器、多相逆变器,按输入与输出是否具有电气隔离可分为非隔离型逆变器和隔离型逆变器。其主要应用于各类变频电源、中频感应加热以及交流电机的变频调速等领域。

(3) 直流-直流变流电路:核心作用是转换直流电的参数(如幅值大小、极性),即实现直流到直流的变流。其中,直接直流变流电路也称为斩波器,其输入与输出间无电气隔离,称为非隔离型直流-直流变流器;间接直流变流电路增加了交流环节,并通过交流环节中的变压器实现输入与输出间的隔离,称为隔离型直流-直流变流器。该电路主要应用于电车、地铁、矿车、搬运车等直流电动机的牵引驱动场景。

(4) 交流-交流变流电路:核心作用是转换交流电的参数,如电压(电流)、频率、相数等,即实现交流到交流的变流。按是否存在中间直流环节,可将其分为直接方式和间接方式两类。该电路主要应用于灯光控制及异步电动机软启动与调速等场景。



2.2.3 电力电子控制技术方法

前文介绍的各类电力变换电路,要实现精准、高效运行,离不开控制技术的支撑。其控制技术方法主要包括以下三类。

(1) 相控方式:通过控制信号改变电力电子器件的导通相位,利用导通相位的变化调节输出电压的大小。晶闸管构成的相控整流电路、交流调压电路等均采用这种控制方式。

(2) 斩控方式:电力电子器件以远高于电路工作频率的开关频率运行,通过控制信号调节一个开关周期内器件的导通占空比,从而实现电能的变换与控制。该控制方式的典型代表为脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)技术。因此,采用全控型器件的电力电子电路普遍采用 PWM 控制,可显著提升系统控制性能。该技术通过调制脉冲宽度等效合成目标波形,具备谐波含量低、控制精度高等优势,能够广泛应用于逆变、直流斩波、整流、交流-交流控制等各类电力电子电路,不仅大幅改善了电路控制性能,还实现了诸多传统控制方式难以完成的功能。

(3) 软开关技术:在电力电子技术的入门学习中,为简化理论分析,通常将 IGBT 等开关器件视为理想开关。然而在实际工程应用中,器件的开通与关断过程存在过渡阶段,电压与电流的交叠会产生开关损耗,这种工作状态被称为硬开关。开关损耗是器件的固有特性,无法通过改进器件结构消除,只能通过外部技术优化。开关损耗的存在与器件散热能力形成矛盾,直接限制了电力电子变换器的开关频率、功率密度及小型化发展。随着开关频率的不断提高,硬开关的损耗问题愈发突出,软开关技术应运而生。软开关技术通过引入电容和电感构成的外部谐振电路,对开关管的电压、电流变化轨迹进行精准整形,大大减小甚至消除开关损耗,显著提升系统效率与功率密度。该技术主要分为全谐振型变换器、准谐振变换器、零开关 PWM 变换器和零转换 PWM 变换器四类,是实现电力电子设备高效化、小型化的关键技术。

2.2.4 电力电子器件驱动与保护体系

结合前文所述,电力电子器件多工作在高电压、大电流的复杂环境下,极易因工况异常受损,因此,构建完善的驱动、检测与保护体系是保障器件安全及系统稳定运行的关键。一个完整的电力电子系统由主电路和控制电路两大部分组成,其中控制电路进一步细分为检测电路和驱动电路,并辅以必要的保护电路与电气隔离措施。

(1) 驱动电路:连接电力电子主电路与控制电路的接口,也是影响装置整体性能的重要环节。其主要任务是按照控制目标,将控制电路输出的信号转换为可使器件开通或关断的驱动信号,并施加于器件的控制端与公共端之间。同时,驱动电路还需实现控制电路与主电路的电气隔离,常用方式包括光隔离和磁隔离。其中光隔离一般采用光耦合器,磁隔离通常采用脉冲变压器。

(2) 检测电路:部分电力电子系统需实时检测主电路或现场的运行信号,并据此调整控制信号,因此需要专门增设检测电路,以保障控制精度。

(3) 保护电路:针对高电压、大电流的工作特点,配置过电压保护、过电流保护、缓冲保护等功能,能够有效避免器件在异常工况下受损,提升电力电子系统运行的可靠性。

在实际应用中,由信息电子器件构成的电路会根据系统工作要求生成相应的控制信

号,再通过驱动电路传递至主电路,进而控制电力电子器件的开通与关断,最终实现系统的整体功能。此外,主电路在运行过程中容易出现电压、电流过冲现象,而电力电子器件耐受过电压、过电流的能力相对较弱。为此,需在主电路和控制电路中增设相应的保护电路,以此保障电力电子器件及整个电力电子系统安全、可靠地运行。电力电子器件应用系统具体组成关系详见图 2-5。

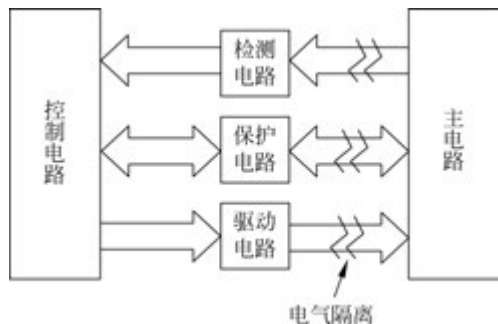


图 2-5 电力电子器件应用系统组成

2.2.5 电力电子技术知识体系

电力电子技术知识体系以“理论奠基—能力培养—素质塑造”为主线,聚焦应用型本科高校电气工程及其自动化专业人才培养需求,构建层次分明、贴合工程实际的知识框架,如图 2-6 所示。通过生活与工程案例解析核心知识点,兼顾理论深度与实践应用,逐步建立系统认知。下面围绕知识体系中的四个模块讲解,内容如下。

1. 电力电子器件

电力电子器件是电气工程能量转换与控制的核心部件,其性能直接决定了电力电子装置的效率、可靠性与适用范围。

电力电子器件的分类如图 2-7 所示。按电力电子器件开通/关断受控情况,可分为不可控器件(不能用控制信号控制其开通和关断的器件,如电力二极管)、半控型器件(只能控制其开通的器件,如晶闸管)和全控型器件(既可控制其开通又能控制其关断的器件,如电力场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管);按照驱动电气量的性质,可将可控型(半控型和全控型)器件分为电压控制型器件(如电力场效应晶体管)和电流控制型器件(如电力晶体管);按驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端间有效信号的波形,分为脉冲触发型器件(如晶闸管和门极可关断晶闸管)和电平控制型器件(如电力晶体管);按器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况,分为单极型器件(如电力场效应晶体管)、双极型器件(如电力二极管、晶闸管、门极可关断晶闸管、电力晶体管等)和复合型器件(如绝缘栅双极型晶体管)。

典型器件主要分为四类。

第一类是不可控与半控型器件,包括普通二极管、快恢复二极管、肖特基二极管和晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR),其基本工作原理、开通与关断机制,决定了它们在整流、调压等传统电路中的基础应用。

第二类是电流驱动型全控器件,典型代表为门极可关断晶闸管(GTO)和电力晶体管(GTR),

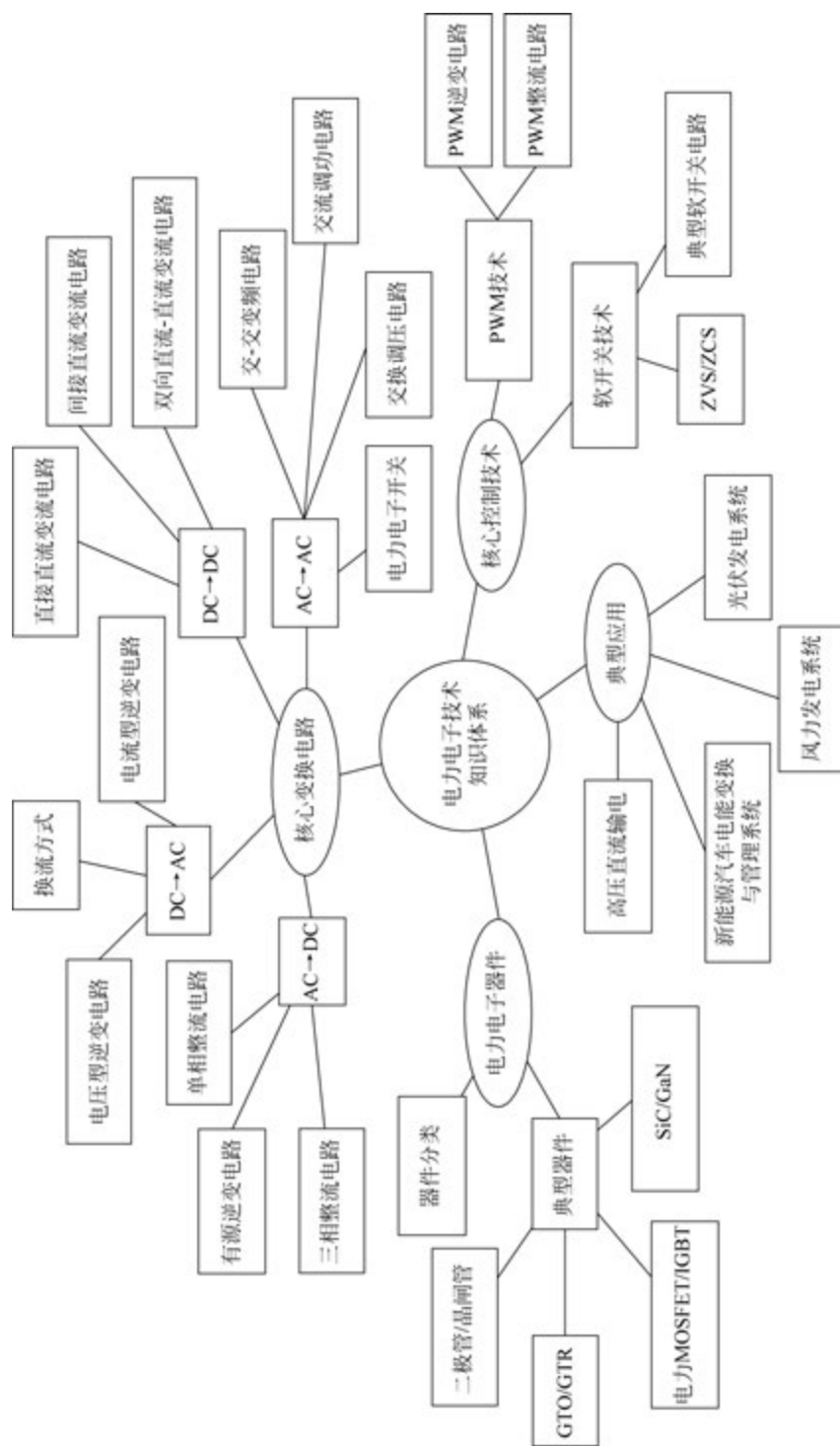


图 2-6 电力电子技术知识体系



图 2-7 电力电子器件分类思维导图

其开关过程与特性各有优劣。

第三类是电压驱动型全控器件,典型代表为电力场效应晶体管和 IGBT。其工作原理、特性参数和驱动电路设计是应用关键,这类器件凭借高输入阻抗、高频特性与低驱动功耗等优势,在现代变频器、开关电源等高频中小功率领域占据主导地位。

第四类是新型宽禁带半导体器件。受硅材料物理特性的限制,上述硅基器件的性能提升已日趋困难。以碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)为代表的新型宽禁带半导体器件应运而生,正逐步走向应用,为突破这一瓶颈带来了新的契机。这类器件有望突破传统硅基器件的物理局限,构成新一代功率变换器的核心,在效率、耐热和功率密度等方面引领电力电子技术进入新的发展阶段。

2. 核心变换电路

核心变换电路模块是电能质量控制与电力电子系统设计的核心内容,构成了现代电力电子技术的完整方法论体系。这些变换电路通过不同拓扑结构和控制策略,实现了交流到直流、直流到交流、直流到直流以及交流到交流的高效能量转换与质量调控,为工业生产、能源转换、交通运输、智能电网等领域提供了关键技术支撑。

1) AC/AC 电路

单相整流电路是电力电子变换的基础,按照是否具备可控性分为不可控与可控两大类。其核心拓扑有三种。①单相半波整流仅利用交流正半周,结构最简单,但输出脉动大。②单相全波整流借助中心抽头变压器实现正负半周的全利用,显著提升了效率。③单相桥式整流应用最为广泛,通过四只二极管构成的桥式结构,在无需特殊变压器的情况下即可将交流电完整转换为脉动直流,兼顾了电路复杂度与整流性能。

三相整流电路凭借高功率密度和高效率,成为工业应用中的主流选择。其核心拓扑主要有两种。最基本的三相半波整流电路仅用三个晶闸管,每个轮流导通 120° ,实现了基本的电压可控。性能更强的三相桥式全控整流电路采用六个晶闸管搭建全桥,每个导通 60° ,能通过对触发角的精准控制实现输出电压的灵活调节。这两种电路构成了工业大功率电能变换的主力军。

有源逆变是实现电能双向流动的关键环节,其核心功能是将直流电高效转换为与公共电网同频同相的交流电,并回馈至电网。有源逆变通过精确控制全控型开关器件(如 IGBT)的开通与关断,使输出电流严格跟踪电网电压的相位和频率,从而实现能量的反向传输。这与直接为负载供电的无源逆变形成对比,前者强调能量的可控回馈。有源逆变在工



程中具有重要价值。以电力机车再生制动为例,可将电机制动产生的直流电逆变为交流电回馈电网,显著提升能源利用效率。同时,该技术也是直流可逆调速系统、高压直流输电换流站及新能源并网装置的核心,为现代电气工程的节能化与智能化发展提供了重要支撑。

2) DC/AC 电路

逆变是电力电子技术的核心功能之一,其电路分析主要围绕换流方式、电路拓扑和控制策略展开。换流是实现电流支路转移的基础机制,可分为器件换流、电网换流、负载换流和强迫换流,换流方式的选择决定了器件的选型与应用场景。在拓扑层面,逆变电路按直流侧电源性质分为电压型和电流型两大类。电压型逆变电路直流侧并联大电容,呈电压源特性。其交流侧输出电压为矩形波,波形与负载阻抗角无关;输出电流的波形和相位则取决于负载。带阻感负载时,需反并联二极管为无功电流提供续流通道。电流型逆变电路直流侧串联大电感,呈电流源特性。其交流侧输出电流为矩形波,同样与负载阻抗角无关;输出电压的波形和相位取决于负载。由于直流侧电流方向不变,电流型电路无需反并联二极管即可处理无功功率。两者在储能元件、输出特性及无功处理机制上存在显著差异。

3) DC/DC 电路

直流-直流变流是电能形态转换的关键环节,实现这一变换的核心电路统称为直流-直流变流(DC/DC)电路。根据电能变换过程是否经过交流环节,分为直接与间接两大类。直接直流变流电路又称斩波电路,通过功率开关的周期性通断,对直流电压先进行“斩波”再进行滤波,从而直接得到新的直流电压。基本拓扑包括降压(Buck)、升压(Boost)、升降压(Buck-Boost)和丘克(Cuk)等电路,通过工作模态分析,可获得表征变换能力的电压传输比。间接直流变流电路则引入高频变压器实现电气隔离和电压变换,基本结构为“直流-交流-直流”,典型拓扑有正激、反激、半桥、全桥和推挽等,分析其工作原理同样可获得电压传输比。针对现代能源互联网与电动交通中能量双向流动的需求,双向直流-直流变流电路发挥着重要作用,其原理与典型应用涵盖蓄电池储能系统、电动汽车车载充放电等场合。以上电路覆盖了从非隔离到隔离、从单向到双向变换的完整体系。

4) AC/AC 电路

交流-交流变流技术直接对交流电的电压、频率等参数进行变换,无需经过直流中间环节。这类技术主要包括以下四类:①交流调压电路通过相位控制实现输出电压的连续调节;②交流调功电路的主电路拓扑与交流调压电路相同,但以电源周期为单位控制通断,通过改变导通周波数来调节负载平均功率;③交流电力电子开关利用反并联晶闸管实现无触点快速通断,具有响应快、寿命长的特点;④交-交变频电路(周波变换器)能直接将工频交流电转换为频率与电压均可调的低频交流电。这些技术共同构成了对交流电能进行直接控制与变换的基础体系,在工业加热、电机驱动等领域发挥着重要作用。

3. 核心控制技术

核心控制技术相当于电力电子系统的“大脑”,它负责协调各部分的运行,决定着电能能否实现高效、精确、可靠的转换,同时也直接关系到整个系统的性能表现与智能化水平。

1) 脉冲宽度调制(PWM)技术

PWM 技术是现代电力电子技术中最基础与最核心的控制方法。电力电子开关器件



(如 IGBT)本质上仅能工作于开通与关断两种状态,而负载通常需要连续平滑且幅值、频率可控的电压或电流波形。PWM 技术通过控制开关器件,以远高于目标波形(即信号波)频率的载波频率进行周期性通断,并在每个开关周期内精确调节导通脉冲的宽度,也就是占空比。通过改变一系列脉冲的宽度,使这些脉冲构成的序列在整体效果上等效于所需的连续波形(如正弦波或其他特定波形)。由此,调节占空比即可实现对输出量平均值的连续控制。

PWM 技术的核心应用主要体现在两个电能变换方向上,即 PWM 整流电路和 PWM 逆变电路。这两个方向共同体现了电能可实现双向、可控转换的现代电力电子技术理念。下面对这两个方向分别进行介绍。

PWM 整流电路是实现交流-直流变换的一种先进拓扑结构。与传统的不控整流或相控整流不同,PWM 整流电路采用全控型开关器件(如 IGBT、电力场效应晶体管),通过高频 PWM 控制技术,使输入电流波形与电网电压波形保持同相位,从而实现单位功率因数运行。其核心优势体现在两个方面:一是能够显著降低输入电流的谐波含量,减少对电网的污染;二是具备电能双向流动能力,即能量既可以从交流侧向直流侧传输(整流状态),也可以从直流侧向交流侧回馈(逆变状态)。这种双向可控特性使 PWM 整流电路在可再生能源并网、储能系统、电动汽车充放电等需要能量双向交换的场合得到广泛应用。

PWM 逆变电路是实现直流-交流变换的核心环节,广泛应用于变频调速、新能源并网、不间断电源等领域。其基本原理是通过控制开关器件的通断,将直流电转换为频率、幅值均可调节的交流电。PWM 逆变电路的关键技术在于调制策略,常用的调制方式包括正弦脉冲宽度调制、空间矢量脉冲宽度调制等。通过调节调制波的幅值和频率,可以精确控制输出电压的幅值、频率及波形质量,实现对交流负载的高性能驱动。在光伏发电系统中,PWM 逆变器负责将光伏电池发出的直流电转换为与电网同步的交流电;在变频器中,PWM 逆变器则通过调节输出电压的频率和幅值,实现对交流电动机转速的精确控制。

综上所述,PWM 整流电路与 PWM 逆变电路分别从交流一直流和直流-交流两个方向,共同支撑起电能双向、可控转换的现代电力电子技术体系,为实现高效、灵活、智能化的电能变换提供了核心技术保障。

2) 软开关技术

软开关技术是为解决传统电力电子电路中开关损耗与电磁干扰等关键问题而发展起来的技术。在传统硬开关工作模式下,功率器件在开通和关断瞬间同时承受较高的电压和较大的电流,这会导致较大的开关损耗(降低效率并增加散热负担)和急剧的电压、电流变化(引发严重的电磁干扰)。软开关技术通过巧妙的电路设计,在功率器件开关动作瞬间,创造条件使其两端的电压为零(零电压开关,zero voltage switching,ZVS)或流经其的电流为零(零电流开关,zero current switching,ZCS),从而极大地减小甚至消除了开关损耗与电磁干扰。这为实现电路的高频化、高效率、高功率密度及低噪声运行奠定了坚实基础。

软开关技术形成了四类典型的电路结构:一是谐振型变换电路,利用电感与电容构成的谐振槽路产生正弦波电压或电流,使开关器件在自然过零点完成切换;二是零开关 PWM 变换电路,在保持传统定频脉冲宽度调制特性的前提下,于开关动作前瞬时引入谐振环节,实现零电压或零电流切换;三是移相全桥型 ZVS PWM 变换电路,通过移相控制方式,利用变压器漏感与开关管结电容谐振,使超前臂与滞后臂依次实现零电压开通,但需重



点处理环流与占空比丢失问题；四是零转换 PWM 变换电路，在主电路旁增设辅助谐振网络，仅在开关切换时刻辅助主开关实现零电压开通，同时辅助开关自身也工作于软开关状态。上述四类电路从不同技术路径实现了开关过程的低损耗、低干扰目标，共同构成了软开关技术的核心知识体系，为开关电源、逆变器等设备的高频小型化与高效化提供了重要理论支撑。

4. 典型应用

电力电子技术是能源转换与管理的“使能技术”，其应用已渗透到国民经济的各个关键领域。其典型应用如下：

1) 高压直流输电

高压直流输电技术是解决超远距离、跨区域、异步电网互联输电的核心技术。其送端和受端均采用由大量晶闸管串联构成的换流阀，实现交流-直流-交流的变换，具有线路损耗低、输送容量大、控制灵活等突出优点。

2) 光伏发电系统

电力电子变换器是光伏系统并网发电的“咽喉”。DC/DC 变换器实现光伏阵列的最大功率点跟踪，以最大化太阳能利用率。DC/AC 并网逆变器将直流电转换为与电网同频同相的优质交流电，并实现并网控制、孤岛保护等功能。

3) 风力发电系统

现代风电机组（特别是双馈式和直驱式）的核心是全功率或部分功率变流器。它们负责将风机发出的频率、幅值变化的交流电转换为与电网严格同步的恒频恒压交流电，并实现并网、有功无功解耦控制、低电压穿越等复杂功能，是风电成为“友好电源”的关键。

4) 新能源汽车

电力电子装置是汽车的“电能中枢”。

(1) 电机驱动器：将电池的直流电逆变为三相交流电，驱动电机，并实现精确的转矩、转速控制。

(2) 车载充电机：将电网的交流电转换为直流电，为动力电池充电。

(3) DC/DC 变换器：将高压动力电池的电压转换为低压，为 12V/24V 低压系统供电。

这些变换器的性能直接决定了车辆的续航里程、动力性、充电速度和整体能效。

2.3 电力电子技术的应用

本节将介绍电力电子技术的热门应用场景，涵盖新能源汽车电驱系统、智能电网柔性调控、光伏与风力发电并网逆变、高频开关电源及电气化轨道交通牵引等领域，通过解析其在能量转换、效率提升及系统优化中的关键作用，展现该技术如何深度赋能现代工业与日常生活，构建理论与实际应用间的桥梁。

2.3.1 电力电子技术在新能源汽车中的应用

电力电子技术作为新能源汽车实现能量高效转换、动力精准控制与系统稳定运行的核心支撑，贯穿于车载动力系统与充电设施两大场景。从驱动电机到充电桩，其技术水平直



接决定车辆性能、能源效率及用户体验。

1. 车载电力电子系统

接下来聚焦车载电力电子系统,结合新能源汽车领域的实际工程案例,阐述其在能量转换与系统控制中的关键技术应用。

1) 电机驱动与调速

当前新能源汽车主要采用永磁同步电机,借助电力电子装置实现转速与转矩的动态调控。

高性能逆变器:某纯电动 SUV(图 2-8)的电机控制系统采用矢量控制策略,其核心部件为三桥臂 IGBT 逆变器。该逆变器基于空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)技术,将动力电池的直流电转换为三相交流电。在急加速工况下,逆变器可在 10ms 内将输出频率从 50Hz 提升至 300Hz,驱动电机转矩由 0 迅速升至 $350\text{N}\cdot\text{m}$,为整车实现 $0\sim 100\text{km/h}$ 加速仅需 5.8s 提供关键支撑。

斩波器能量调节:对于采用直流电机的驱动系统,主要通过直流斩波器及其 PWM 技术来动态调整输出电压。某电动公交车(图 2-9)在爬坡时将占空比从 60% 升至 90%,输出电压从 300V 增至 450V,以满足大负载需求;在制动动能回收阶段,反向切换为升压模式,将电机回馈的 200V 低压直流电升至 380V 电池电压,回收效率超过 75%,有助于延长单次充电续航里程约 15km。



图 2-8 纯电动 SUV



图 2-9 电动公交车

2) DC/DC 变换器

DC/DC 变换器主要用于实现动力电池高压直流电(如 380V)向多设备电压(12V/48V 等)的转换。

双向升降压设计:某插电混动车型搭载双向 DC/DC 变换器,行驶时将 380V 高压转为 14V 低压供车载设备,效率达 96%;熄火后自动切换为升压模式,利用低压蓄电池(12V)为高压系统预充电,避免高压冲击风险,提高电路的安全性。

模块化多场景适配:商用车(如电动货车)集成式 DC/DC 变换器支持同时输出 12V(50A)、24V(30A)、48V(20A)三路电压,分别驱动空调、液压系统及导航设备。相比分立电源方案,体积缩减 40%,故障率降低 60%。

3) 电池管理与能量回收

通过电力电子技术实现电池充放电保护、均衡管理及动能回收。

主动均衡电路:某磷酸铁锂电池组(100 节单体)如图 2-10 所示,采用电力电子开关网络,实时监测单体电压(精度 $\pm 5\text{mV}$)。当单体电压低于平均值 50mV 时,自动转移能量至该单元,将整组电池压差控制在 20mV 内,循环寿命由 800 次提升至 1200 次。

制动能量回收系统：某纯电动轿车(图 2-11)制动时，驱动电机转变为发电机运行状态，所产生的交流电经整流电路转换为直流电，再通过 DC/DC 升压变换器将电压提升至与动力电池匹配的等级(例如 350~400V)，从而完成能量回收。该系统在城市拥堵路况下，能够有效回收约 15% 的制动能量，增加车辆续航里程，是电力电子技术在汽车节能领域的重要应用。



图 2-10 磷酸铁锂电池组



图 2-11 纯电动轿车

2. 充电桩技术

接下来聚焦充电桩技术，结合新能源充电设施的实际工程案例，解析其在电能转换与系统控制中的关键技术应用。

1) 直流快充技术

直流快充桩需将电网交流电高效转换为适配车辆的直流电，这一过程依赖于高功率变流器及优化的电路拓扑结构。充电桩将交流电转换为直流电的过程如图 2-12 所示。

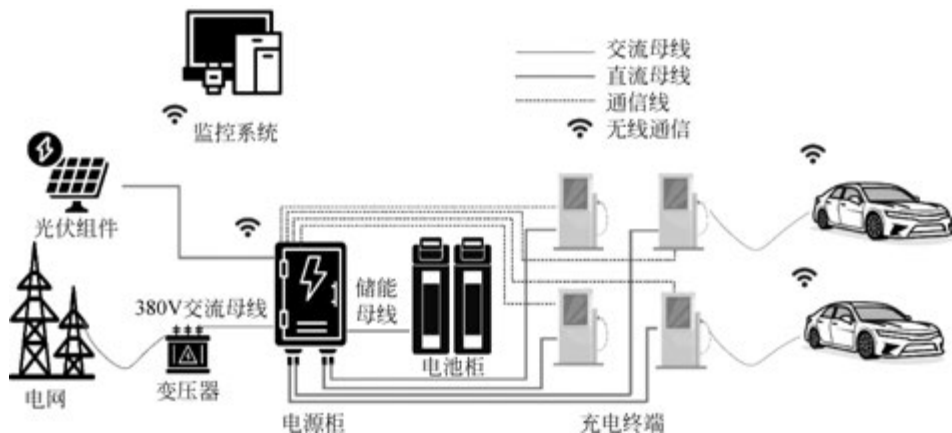


图 2-12 直流充电桩电能转换过程示意图

两级转换架构：直流快充桩常采用两级功率变换架构以实现高效、快速的充电功能。典型应用如某 60kW 直流快充桩，其采用“三相功率因数校正(PFC)整流电路+隔离型 DC/DC”架构。第一级为三相 PFC 整流电路，通过 IGBT 整流桥将 380V 交流电转换为 540V 直流电，并实现高于 0.99 的功率因数；第二级为隔离型移相全桥 DC/DC 变换器，将直流电压在 200~750V 范围内进行调节，以适配不同车型的电池电压，系统整体转换效率可达 95.2%。实际表明，采用该技术的充电桩可在 10min 内为续航里程 500km 的电动汽车补充约 300km 的续航里程，从而有效满足用户对快速充电的需求。新能源汽车充电桩基本结构如图 2-13 所示。

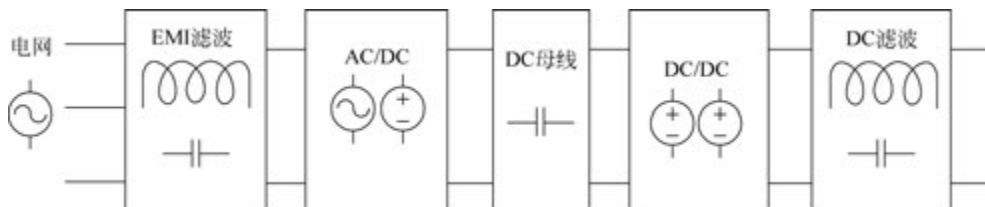


图 2-13 新能源汽车充电桩基本结构

高功率密度设计：采用碳化硅(SiC)器件的 120kW 快充桩，开关频率从 20kHz 提升至 100kHz，变压器体积缩小 50%，整机质量降至 80kg，支持城市停车场灵活部署，单桩日均服务车次超 20 次。

2) 智能控制与电网协同

智能充电桩系统通过电力电子技术与实时通信实现了动态功率调节与快速安全保护。在功率调节方面，充电桩群能与电网实时交互。例如，在 18:00—20:00 的负荷高峰时段，将单桩输出功率从 60kW 动态下调至 40kW，以避免台区变压器过载；在 0:00—6:00 的低谷时段，则可将功率提升至 80kW，从而缩短充电时间约 25%，并利用波谷电价降低用户成本。在安全保护方面，系统通过内置监测电路实时检测关键参数，当检测到电压异常波动超过额定值 $\pm 15\%$ 时，能在 5ms 内快速关断 IGBT 开关管；其漏电流检测精度可达 $\pm 1\text{mA}$ ，能及时识别接地故障并切断电源，有效保障人身与设备安全。这些功能共同体现了电力电子技术 in 提升充电设施智能化水平与运行可靠性中的关键作用。

3) 变频调节

宽范围电压输出：某商用充电桩采用 LLC 谐振变换器，通过调节开关频率(50~200kHz)，实现 150~900V 连续输出电压，适配微型电动车(240V)至电动卡车(750V)的多样化车型，无需更换充电枪即可完成充电。

谐波抑制：通过有源电力滤波器(active power filter, APF)补偿 3 次、5 次谐波，将电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)从 20%降至 5%以下，避免对电网敏感设备(如电视机、路由器)造成干扰。

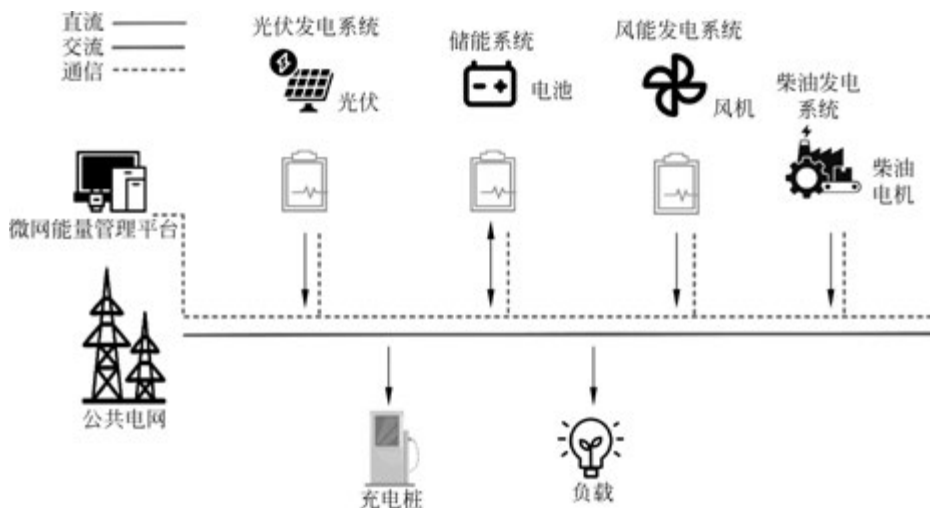
通过车载系统实现“动力强、续航远、安全稳”的核心目标，并依托充电桩技术突破“充电慢、适配差”的行业瓶颈。在动力控制层面，IGBT 逆变器以毫秒级响应提升加速性能；在能源转换环节，SiC 快充桩通过高效功率变换将充电时间缩短 30%以上。这些技术突破直接转化为用户可感知的体验跃升——加速响应速度提升 50%、续航里程增加 15%、充电时间压缩至 15min 内。未来，随着宽禁带半导体(SiC/GaN)的规模化应用与智能协同控制系统的迭代升级，电力电子技术将持续驱动新能源汽车向“高效、安全、智能”三大维度深度演进。

2.3.2 电力电子技术在智能电网中的应用

1. 新能源发电并网

智能电网结构如图 2-14 所示。在智能电网的发电环节，电力电子技术发挥着关键作用，其核心任务在于解决风能、太阳能发电的间歇性与波动性问题，确保清洁电力稳定并

网,保障电网的安全可靠运行。



以风力发电为例,电力电子技术承担着系统稳压的关键作用。通过变流器设备对发电过程进行调控,能够抵消风速波动带来的影响,即使风速时刻发生变化,风力发电机组也可以保持稳定的发电状态,持续向外输出合格的电能。

在陆上风电场中,应用最广泛的是双馈感应发电机。这款发电机所搭配的变流器设计十分巧妙,它不需要处理风机旋转发出的全部电能,只需处理其中大约 30% 的电能,就可实现对风能的高效捕捉与利用。这种工作方式既能够降低设备能耗,又能节约项目建设与运行成本,即使外界风速频繁波动,也可使发电机的发电功率保持平稳。

相较于陆地,海上风电场的自然环境更为复杂,因此主流选用永磁同步发电机。其配套的全功率转换器可以将风能高效转化为电能;在雷击引发电网电压骤降的故障工况下,能够通过专属电路泄放冗余能量,发挥类似安全气囊的保护作用,维持风机与电网的持续并网,保障发电状态稳定。

以光伏发电为例,电力电子技术扮演着“转换器”的关键角色。光伏电池输出直流电,而电网需要的是交流电,因此需要借助逆变器实现直流—交流的变换,使电能能够顺利并入电网。大型光伏电站里常用集中式逆变器,它可使整片光伏板输出最大功率,还能精准匹配电网的电压和频率,保证供电稳定。而屋顶光伏、山地光伏这类分布式发电场景更适合选用组串式逆变器。这类逆变器灵活性很强,每一串光伏组件都配有独立的控制单元,即便其中一部分光伏板被树木、建筑物遮挡光照,也不会干扰其他组串的正常发电,整体发电量通常优于集中式逆变器。针对偏远乡村、通信基站等没有电网接入的区域,组串式逆变器还可以切换为独立供电模式,配合储能电池使用,维持电压和频率稳定,满足当地的基础用电需求。

电力电子技术为风电、光伏新能源系统提供了稳压与变流支撑,能够适配多变的自然环境,实现新能源的高效发电与可靠并网,是绿色电力稳定供应的重要保障。

2. 先进输电技术

在智能电网输电环节,电力电子技术是保障电力高效传输的核心,其中有三种关键技



术各司其职、协同发力。首先是高压直流输电(high voltage direct current, HVDC),它堪称远距离送电的“高速直达专线”,专门解决长距离、大容量送电问题,堪比电力运输中的高铁,效率远高于传统交流输电。它广泛应用于“西电东送”等跨区域输电工程,也适用于海上油田、偏远海岛等孤岛供电,以及西部光伏、风电基地的电力外送。发电端换流站将交流电转为直流电(因为直流电远距离传输损耗低),送达用电端后再转成交流电,接入当地电网。这项技术既化解了东西部电力供需矛盾,助力清洁能源高效利用,也能为偏远地区提供独立可靠供电。

如果说 HVDC 解决了电力“送得远”的难题,那么柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)就聚焦于“送得稳”,它相当于电网的“智能调度员+稳定器”,能灵活应对输电波动,保障电力传输平稳。其中,静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)如同电压稳压器,当工厂启动大功率设备、新能源发电量波动时,可快速补能或吸能,稳住电压、减少杂波,避免设备停机;统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)则像智能交通指挥员,既能调节线路输电量、稳定电网节点电压,故障时还能快速转移电力,避免线路超载跳闸,提升送电能力。

除了 FACTS,静止无功补偿(static var compensator, SVC)也是稳定电压的“贴心小帮手”,主要化解电网小幅波动,如同给电网装了减震器,兼顾电压稳定与输电效率提升。它适用于电压易波动、易出现低频振荡的区域,以及钢铁厂、化工厂集中的工业园区。通过晶闸管等器件动态补充电网辅助能量,实时调整电压与运行状态,可避免电压突降,保障精密设备正常运转,同时减少电力传输浪费。

这三种技术共同构成输电环节的“黄金组合”: HVDC 负责远距离、大容量送电,解决“送得远、送得多”的问题; FACTS 与 SVC 侧重稳定传输、降低损耗,解决“送得稳、浪费少”的问题。三者协同发力,为智能电网高效运行筑牢基础。

3. 配电自动化与电能质量

智能配电变压器是传统变压器的“多功能升级款”,彻底摆脱了传统变压器“又大又重、只能简单变压”的局限,成了配电环节的“多面手”,特别适合城市里居民与工厂混合用电的配电网、园区里的分布式能源系统,以及偏远小区或工业园区这些需要远程管理的区域。工作时,它先把电网里的普通交流电转换成直流电,再通过内部的小型高频变压器做好安全隔离,最后根据不同需求输出对应电压——给居民家供 220V 的日常用电,给工厂设备供 380V 的工业用电,甚至能直接输出直流电满足特殊设备的需求。除此以外,它还能远程监控自身运行状态,一旦电网电压出现波动,无需运维人员到现场操作,即可自动快速调整补偿,保持电压稳定;在微电网中,它还能当“能量路由器”,灵活接入光伏板、储能电池等分散的能源设备,把这些电能整合起来合理分配,避免出现供电缺口;而且它采用模块化设计,三相电压能分开独立调节,即使某一相电压出现异常,也不会影响其他相的正常供电,可靠性更高。

除了精准分配电力,电力电子技术还能当电力的“清洁卫士”,解决电压暂降、谐波等电能质量问题。动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)就像电压暂降的“毫秒级急救员”,专门守护对电压特别敏感的场所,比如芯片制造工厂的精密仪器、医院的手术器械和监护仪、数据中心的服务器。这些设备一旦遇到电压突然降低,很可能停机甚至损坏,而

DVR 反应速度能到毫秒级,能瞬间检测到电网电压跌落(比如雷击、线路故障导致的电压突然下降),并立刻注入补偿电压,就像给设备装了“电压安全气囊”,瞬间把设备侧的电压拉回正常范围,避免生产线停工、医疗设备故障或数据丢失,保障关键场景的供电不中断。DVR 一般由储能装置、串联变压器、逆变单元和滤波器四部分组成,如图 2-15 所示。

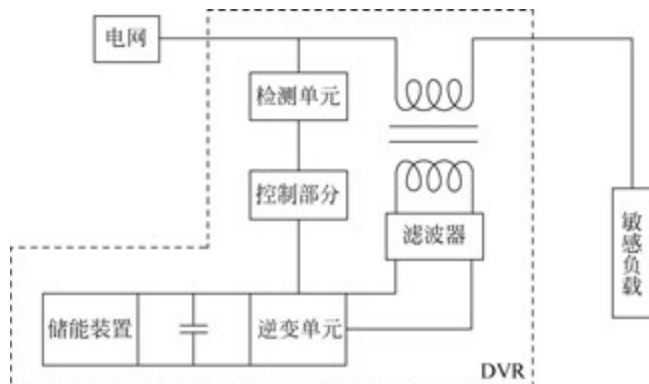


图 2-15 动态电压恢复器结构示意图

有源电力滤波器(APF)工作原理如图 2-16 所示。APF 是谐波的“专业清洁工”,常见于钢铁厂、化工厂等工业园区,以及写字楼这类中央空调等大功率设备集中的区域。这些大功率设备工作时会产生谐波,如同电力系统中的干扰信号,会干扰电脑、精密机床等其他设备的正常运行。APF 能实时检测电网中的谐波信号,并生成反向的补偿电流注入电网,从而抵消谐波,通常与传统无源滤波器搭配使用,形成混合滤波系统,清洁效果更好。它能精准滤除不同频率的谐波,让电网电流更纯净,不仅能保护设备不受干扰、延长设备使用寿命,还能降低电网线路的能量损耗,提高配电效率。

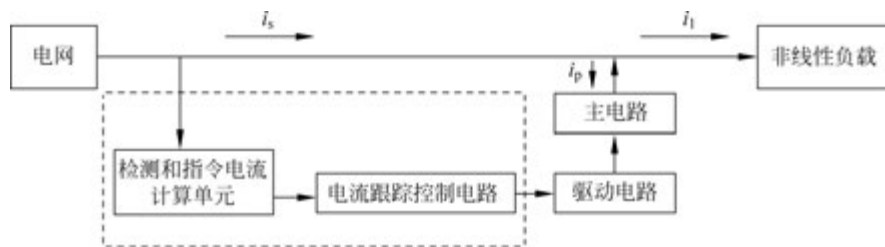


图 2-16 有源电力滤波器组成部分

总的来说,智能配电变压器解决了“电力怎么精准分配”的问题,动态电压恢复器和有源电力滤波器解决了“电力怎么高质量供给”的问题,三者协同配合,让配电环节既能灵活适配不同用户的电压需求,又能守住电能质量的“底线”,确保电力被安全、稳定、高质量地送往每一位用户。

4. 电网支撑技术

在智能电网中,除发电、输电、配电核心环节外,一批电力电子技术兼具“安全保障”与“效率提升”功能,核心是让电网更安全、智能、节能,保障电力稳定、高效供应,具体介绍如下。



智能故障诊断技术(AI + 大数据)是电网的“智能医生”,通过智能巡检平台 24h 监控设备,以 AI 图像识别、机器人替代人工巡检,快速捕捉故障痕迹;搭配高精度传感器采集电流、电压、温度数据,AI 分析后预警异常、预测设备寿命,避免小故障演变为重大事故。

无功补偿技术是电网的“能量优化师”,解决运行中的“隐性浪费”。电网中的无功功率供需失衡会引发电压波动、传输效率降低。借助晶闸管等器件,该技术可动态调节无功功率,解决无功功率失衡问题,使电网功率因数达到 0.9 以上,提升传输效率、减少能耗,使电力传输更经济。

智能开关技术是电网的“安全卫士”,集成先进传感与微电子技术,实时监测线路电流、电压,检测到漏电、过流、短路等故障时,迅速切断故障线路并定位,方便抢修,避免故障蔓延,降低停电影响与设备损耗,提升电网调配效率与稳定性。

能源储存与转化技术相当于电力“智能中转站”,破解新能源发电“供需不同步”难题。风电、光伏白天发电量高但非用电高峰,夜间需求大却无光伏发电。该技术通过大功率变换器将多余电能储存在储能设备中,在用电高峰期释放,实现“削峰填谷”,优化电力分配,保障生产与生活用电稳定。

高压变频技术是工业节能利器,可降低工厂能耗、减少电网干扰。工厂大型电机在传统模式下固定转速、满负荷运转,既浪费电能又冲击电网。该技术通过改变交流电频率调节电机转速,适配生产需求,避免无效耗电,节能可达 30% 左右,降低企业成本并减少电网谐波污染。

这些技术从安全、效率、节能多维度发力,与发电、输电、配电核心技术配合,使智能电网“送得出、配得准、跑得稳、用得省”,全方位支撑电力系统向清洁化、智能化、高效化发展。

2.3.3 电力电子技术在电气工程智能化升级中的应用

电力电子技术作为电气工程领域的核心支撑技术,通过对电能的高效转换、精准控制与智能管理,已深度渗透能源生产、传输、分配及消费全链条。其实际应用不仅提升系统效率与稳定性,更推动电气工程向智能化、绿色化转型。以下从六大应用场景展开分析。

1. 电能转换与控制

电能转换与控制作为电力电子技术的核心功能,承担着电能形式转换(如交直流变换)的关键任务,是能源系统高效运行的技术桥梁。电能转换是电力电子技术的基础应用,通过整流器、逆变器等装置实现交直流高效互转,主要应用于以下三个方面。

(1) 高压直流输电工程:在“西电东送”等远距离输电项目中,采用三相桥式全控整流器(由数千只晶闸管构成),将交流电网电压转换为 $\pm 800\text{kV}$ 高压直流电,输电损耗较交流方式降低 20% 以上。例如,某跨区输电工程单条直流线路年输送电量达 600 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,且规避了交流输电的同步稳定性问题。

(2) 光伏发电并网:分布式光伏电站通过组串式逆变器(基于 IGBT 等全控器件),将太阳能电池板直流电转换为符合电网标准的交流电。某 10MW 光伏项目采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术,逆变器转换效率达 98.5%,年增发电量超过 50 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。组串式逆变器光伏发电系统如图 2-17 所示。

(3) 工业直流电源:晶闸管整流装置将 380V 交流电转换为可调直流电压,输出纹波系

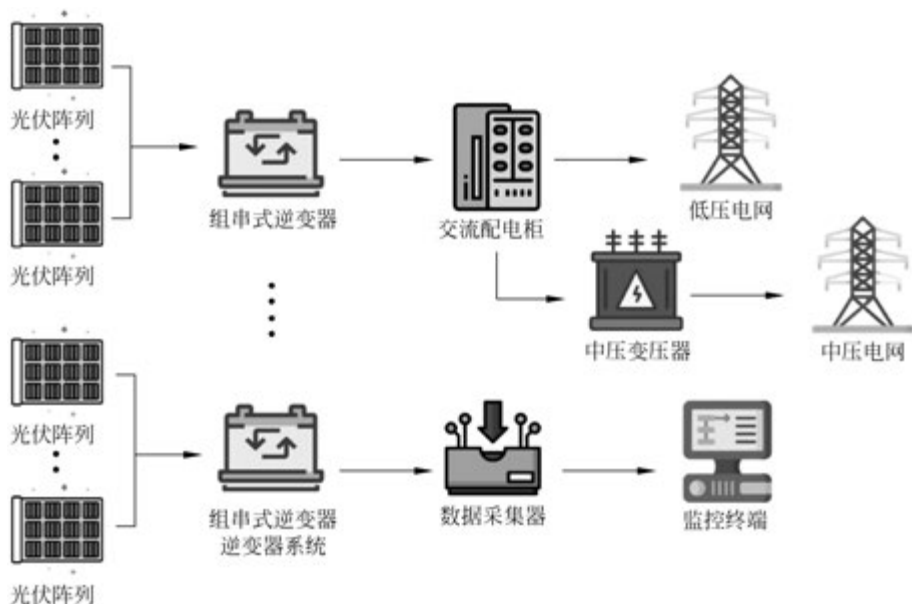


图 2-17 组串式逆变器光伏发电系统示意图

数低于 1%，满足电镀、电解等精密加工对电流稳定性的要求。

2. 功率因数校正与无功补偿

功率因数校正与无功补偿技术通过动态电流整形、谐波抑制及无功功率动态补偿，构建电网-设备协同优化机制。该技术可有效降低线路传输损耗（通常降低 5%~15%），释放变压器冗余容量（提升约 20% 供电能力），并抑制电压波动，是构建高效、稳定、低碳电网体系的关键技术支撑。针对工业负载谐波污染与无功损耗，电力电子技术提供成熟的解决方案。

（1）工业厂房功率因数优化：某汽车制造厂车间变频器、焊接设备等非线性负载导致功率因数低至 0.65，通过有源电力滤波器（APF）实时注入反向谐波电流，功率因数提升至 0.95 以上，年减少电费支出超过 30 万元。

（2）商业楼宇无功补偿：大型商场的空调、电梯启动时产生无功功率导致电压波动，采用晶闸管投切电容器（TSC）动态补偿，响应时间小于 20ms，电压稳定度提升至 $\pm 2\%$ ，消除照明闪烁问题。

（3）数据中心谐波治理：服务器开关电源高次谐波干扰通信系统，某云计算中心部署模块化 APF，总谐波畸变率（THD）从 25% 降至 5% 以下，保障数据传输的稳定性。

3. 电机驱动与调速

电机驱动与调速技术通过电力电子变换拓扑（如两电平/三电平逆变器）、先进控制算法（如模型预测控制（model predictive control, MPC））及多机协同策略，构建工业动力系统的精密调控体系。该技术不仅实现电机转速/转矩的动态精确控制（响应时间 $< 50\text{ms}$ ），更通过能效优化（IE4 级超高效电机（IEC 标准能效等级 4 级））、工艺参数闭环控制（如纺织张力恒定）及智能启停调度，成为现代工业生产流程的核心支撑技术，支撑智能制造与工业 4.0 发展。变频器作为电力电子技术的典型应用，实现电机节能与精准控制。

(1) 流水线智能制造: 某电子厂贴片生产线通过变频调速系统实时调整传送带速度与机械臂匹配, 生产效率提升 15%, 电机能耗降低 20%。

(2) 中央空调节能改造: 某商业大厦变频空调根据室温动态调整压缩机转速, 制冷量精度控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 年节电 40 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

(3) 风力发电变速控制: 兆瓦级风电机组通过变频器实现变速恒频运行, 在风速 $3\sim 25\text{m/s}$ 范围内动态调整发电机转速, 风能利用率提升 10%~15%, 使某风电场年增发电量超过 800 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。风力发电机组控制系统如图 2-18 所示。

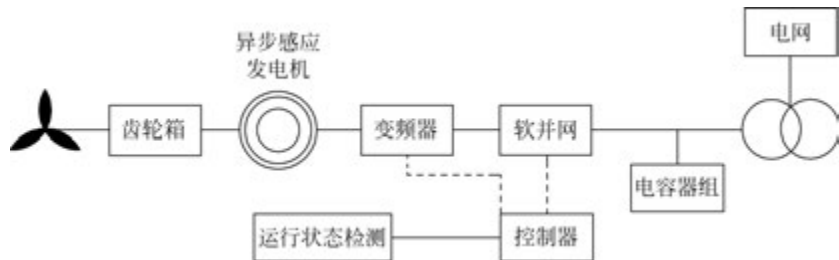


图 2-18 风力发电机组控制系统

4. 电力系统稳定与控制

电力系统稳定与控制通过构建多时间尺度(秒级—分钟级—小时级)的智能防御体系, 实现电网运行全周期安全管控。该体系依托同步相量测量(phasor measurement unit, PMU)实现全网动态感知, 结合模型预测控制(MPC)与数字孪生技术, 形成“监测—预警—决策—执行”闭环控制链。在新能源高渗透场景下, 通过虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)、储能协同控制等关键技术, 将系统惯量响应时间缩短至 50ms 以内, $N-1$ 通过率提升至 99.99%, 为新型电力系统提供毫秒级安全屏障。柔性交流输电系统(FACTS)依托电力电子装置提供快速调控能力, 具体如下。

(1) 区域电网联络线控制: 两区域电网联络线安装可控串联补偿装置(thyristor controlled series capacitor, TCSC), 负荷波动时在 5ms 内调整线路阻抗, 输送能力提升 30%, 避免传统拉闸限电。

(2) 新能源并网稳定: 某 200MW 光伏电站并网点安装静止同步补偿器(STATCOM), 光照突变时快速提供无功支撑, 电压波动幅度从 $\pm 10\%$ 降至 $\pm 2\%$, 满足并网要求。

(3) 城市配网故障隔离: 固态断路器替代传统机械开关, 发生故障时在 2ms 内切断电流, 隔离范围缩小至单个台区, 减少停电影响用户数 90% 以上。

5. 精密工业系统

电力电子技术凭借高频响应特性与动态调节能力, 在高精度控制领域彰显独特的技术价值。精密工业系统作为特殊工况环境下的核心控制枢纽, 通过集成电力电子驱动单元, 实现亚微米级加工精度(如齿轮磨削时公差达 0.001mm), 为半导体制造、航空航天等高附加值产业提供关键支撑。电力电子技术在高精度领域展现独特优势。

(1) 精密过滤器自动冲洗: 某污水处理厂通过电力电子控制模块监测压差, 驱动减速机自动清洗, 冲洗时间误差小于 1s, 过滤器寿命延长至 3 年以上。

(2) 医疗设备电源: 核磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)设备采用高频逆变



技术将 220V 交流电转换为 30kHz、 $\pm 0.1\%$ 精度的高频电压,保障成像清晰度。

(3) 半导体制造设备:光刻机精密运动平台由伺服电机驱动,通过电力电子伺服控制器实现纳米级速度调节,满足芯片制程精度要求。

6. 故障诊断与维护

电力电子技术通过高频信号采集与动态阻抗分析,为设备故障诊断提供精准检测工具。故障诊断与维护体系作为保障设备可靠运行的核心环节,依托电力电子驱动单元的实时监测能力,实现“故障检测—定位—预警—维护”的全流程智能闭环,显著提升工业设备无故障运行时间(mean time between failures, MTBF)达 40%。电力电子技术为设备故障排查提供精准手段。

(1) 工业电机故障检测:某钢厂轧机电机有异响,通过示波器检测变频器输出波形,发现 IGBT 模块开关异常,及时更换后避免了停机事故,减少损失超过 50 万元。

(2) 家电维修应用:家用脱水机脱水无力时,通过万用表检测电机控制器驱动信号,快速定位晶闸管损坏或触发电路故障,维修效率提升 60%。

(3) 风电设备状态监测:风电机组变频器内置传感器实时监测 IGBT 结温、电容值等参数,提前预警潜在故障,使某风场故障率降低 25%。

从高压输电到家用设备,从工业生产到新能源并网,电力电子技术以“高效转换、精准控制、智能响应”的特性,成为电气工程不可或缺的核心技术。其应用不仅带来显著节能效益与经济价值,更支撑电网智能化、能源清洁化转型。未来,随着人工智能、物联网的深度融合,将进一步拓展其应用边界,推动电气工程持续创新。

2.3.4 电力电子技术在光伏发电高效转换中的应用

在太阳能光伏发电系统中,电力电子技术是实现能量高效转换、稳定输出与电网适配的关键支撑技术。从太阳能电池板产生的直流电到最终可供用户或电网使用的交流电,整个能量转换过程均依赖于电力电子器件与技术的精确调控。以下从三大核心技术的实际应用场景展开详细阐述。

1. MPPT 技术

在光伏发电系统的能量转换链中,最大功率点跟踪(MPPT)技术作为电力电子控制策略的核心应用,通过动态调节光伏阵列的工作点,实现光能捕获效率的最大化。其本质是构建一个闭环智能控制系统,实时响应光照强度、温度等环境扰动,使光伏阵列始终工作在动态变化的最大功率点(MPP),从而提升系统整体发电效率。MPPT 系统原理框图如图 2-19 所示。

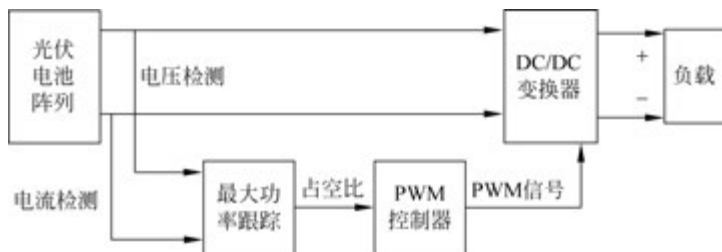


图 2-19 MPPT 系统原理框图