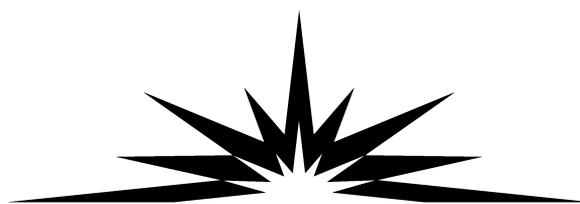


中国可持续能源项目

大卫与露茜尔·派克德基金会  
威廉与佛洛拉·休利特基金会  
能 源 基 金 会  
项目资助号：G-1006-12630



# 中国电力行业低碳技术中长期发展战略规划

## 分报告一

### 电力行业低碳技术特点综述

华北电力大学

2011年6月

# 目 录

第一章 发电环节低碳技术特点综述 .....	1
1.1 洁净煤低碳发电技术特点综述 .....	1
1.1.1 超临界和超超临界发电技术 .....	1
1.1.2 循环流化床技术 .....	3
1.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术 .....	6
1.1.4 整体煤气化联合循环发电技术 .....	11
1.1.5 燃煤电厂碳捕集和封存技术 .....	13
1.2 常规低碳发电技术特点综述 .....	19
1.2.1 核电技术 .....	19
1.2.2 水电技术 .....	23
1.3 新兴低碳发电技术特点综述 .....	26
1.3.1 风力发电技术 .....	26
1.3.2 太阳能发电技术 .....	30
1.3.3 生物质能发电技术 .....	32
第二章 电网环节低碳技术特点综述 .....	35
2.1 低碳输电技术特点综述 .....	35
2.1.1 柔性交流输电技术 .....	35
2.1.2 超导输电技术 .....	37
2.1.3 特高压输电技术 .....	38
2.2 低碳配电技术特点综述 .....	41
2.2.1 配电自动化技术 .....	41
2.2.2 柔性配电技术 .....	43
2.3 低碳调度技术特点综述 .....	44
2.4 低碳储能技术特点综述 .....	45
2.4.1 飞轮储能技术 .....	45
2.4.2 压缩空气储能技术 .....	46
2.4.4 超级电容器储能技术 .....	47
2.4.3 超导储能技术 .....	48
第三章 电能消费终端低碳技术特点综述 .....	51
3.1 智能用电技术特点综述 .....	51
3.3.1 高速通信技术 .....	51
3.3.2 智能电表技术 .....	51
3.3.3 智能采集技术 .....	52
3.3.4 交互终端技术 .....	54
3.3.5 需方响应技术 .....	55
3.2 电动汽车技术特点综述 .....	55
3.2.1 纯电动汽车 .....	56
3.2.2 混合动力电动汽车 .....	62
3.2.3 燃料电池电动汽车 .....	71

# 第一章 发电环节低碳技术特点综述

## 1.1 洁净煤低碳发电技术特点综述

### 1.1.1 超临界和超超临界发电技术

#### (1) 技术简介<sup>1</sup>

超临界机组是指主蒸汽压力大于水的临界压力( 22.12MPa )的机组。习惯上又将超临界机组分为 2 个层次：①常规超临界参数机组，其主蒸汽压力一般为 24MPa 左右，主蒸汽和再热蒸汽温度为 540~560℃；②高效超临界机组，通常也称为超超临界机组或高参数超临界机组，其主蒸汽压力为 25~35MPa 及以上，主蒸汽和再热蒸汽温度为 580℃及以上。理论和实践证明常规超临界机组的效率可比亚临界机组高 2%左右，而对于高效超临界机组，其效率可比常规超临界机组再提高 4%左右。

超超临界机组蒸汽参数 25MPa/600℃/600℃ ( 发电效率约 44.63% ,发电煤耗率 275g/kWh ) ;同时 ,不排除蒸汽参数 28MPa/600℃/600℃ ( 发电效率约 44.99% ,发电煤耗率 273g/kWh ) 的可能。蒸汽参数愈高，热效率也随之提高。热力循环分析表明，在超超临界机组参数范围的条件下，主蒸汽压力提高 1MPa，机组的热耗率就可下降 0.13%~0.15%；主蒸汽温度每提高 10℃，机组的热耗率就可下降 0.25~0.30%；再热蒸汽温度每提高 10℃，机组的热耗率就可下降 0.15%~0.20%。在一定的范围内，如果采用二次再热，则其热耗率可

<sup>1</sup> 《火力发电机组超超临界发电技术的研究》。张国盟，张衡。黑龙江科技信息，2007.

较采用一次再热的机组下降 1.4%~1.6%。

经研究分析，为保证机组的技术经济合理性，超超临界机组的单机容量应在 350MW 以上。1000MW 级超超临界机组推荐采用单轴布置。对常规背压 ( 4.9kPa ) 条件，1000MW 级汽轮机可采用 43~48 英寸(1092.2~1219.2mm)末级叶片四缸四排汽结构，其排汽损失在设计规范内；600MW 级汽轮机采用 1000mm 末级叶片四缸四排汽结构是合适的，同时可采用 48 英寸末级长叶片的两排汽结构。

## ( 2 ) 特点概述<sup>2</sup>

超临界火电技术由于参数本身的特点决定了超临界锅炉只能采用直流锅炉，在超临界锅炉内随着压力的提高，水的饱和温度也随之提高，汽化潜热减少，水和汽的密度差也随之减少。当压力提高到临界压力 ( 22.12Mpa ) 时，汽化潜热为零，汽和水的密度差也等于零，水在该压力下加热到临界温度 ( 374.15℃ ) 时即全部汽化成蒸汽。超临界压力时情况相同，当水被加热到相应压力下的相变点( 临界温度 ) 时即全部汽化。因此超临界压力下水变成蒸汽不再存在汽水两相区，由此可知，超临界压力直流锅炉由水变成过热蒸汽经历了两个阶段即加热和过热，而工质状态由水逐渐变成过热蒸汽。因此超临界直流锅炉没有汽包，启停速度快，与一般亚临界汽包炉相比，超临界直流锅炉启动到满负荷运行，变负荷速度可提高 1 倍左右，变压运行的超临界直流锅炉在亚临界压力范围内超临界压力范围内工作时，都存在工

---

<sup>2</sup> <http://baike.baidu.com/view/2302964.htm>

质的热膨胀现象，并且在亚临界压力范围内可能出现膜态沸腾；在超临界压力范围内可能出现类膜态沸腾。超临界直流锅炉要求的汽水品质高，要求凝结水进行 100%除盐处理。由于超临界直流锅炉水冷壁的流动阻力全部依靠给水泵克服，所需的压头高，即提高了制造成本又增加了运行耗电量且直流锅炉普遍存在着流动不稳定性、热偏差和脉动水动力问题。另外，为了达到较高的质量流速，必须采用小管径水冷壁，较相同容量的自然循环锅炉超临界直流锅炉本体金属耗量最少，锅炉重量轻，但由于蒸汽参数高，要求的金属等级高，其成本高于自然循环锅炉。

超临界机组具有无可比拟经济性，单台机组发电热效率最高可达 50%，每 kWh 煤耗最低仅有 255g（丹麦 BWE 公司），较亚临界压力机组（每 kWh 煤耗最低约有 327g 左右）煤耗低；同时采用低氧化氮技术，在燃烧过程中减少 65%的氮氧化物及其它有害物质的形成，且脱硫率可超 98%，可实现节能降耗、环保的目的。

### 1.1.2 循环流化床技术<sup>3</sup>

#### （1）技术简介

循环流化床锅炉的燃烧技术是在鼓泡床锅炉的燃烧技术基础上发展起来的，在鼓泡床中进一步增大气流速度，则床层进一步膨胀。当气流速度超过平均粒径终端速度（终端速度也称带出速度，是指颗粒在气体对其作用的拽力和浮力及自身重力的合力作用下，最终达到

---

<sup>3</sup>《循环流化床锅炉的简单介绍和发展前景分析》，杨红红，姜森，锅炉制造

的颗粒的稳定速度)时,大量颗粒会被气流带出床层,在整个炉膛空间内燃烧并随气流逸出炉膛。在颗粒分布方面炉膛上部为浓度教均匀的稀相区,下部为密相区。炉膛中心区的颗粒与气流垂直向上流动,四周环形区域则存在颗粒反流,这种燃烧方式称为快速流化床。燃烧循环流化床锅炉的主要类型如表 1-1 所示。

表 1-1 循环流化床的主要类型

序号	分类依据	具体类别	备注
1	按分离器工作温度	采用高温分离器的循环流化床锅炉、采用中温分离器的循环流化床锅炉、采用低温分离器的循环流化床锅炉	采用高温分离器的循环流化床应用较多
2	按分离器结构形式分类	采用旋风分离器的循环流化床锅炉、采用惯性分离器的循环流化床锅炉、采用组合分离系统的循环流化床锅炉、采用旋涡分离器的循环流化床锅炉	中、小循环流化床锅炉采用旋风分离器的比较多
3	按换热器分类	有外置式换热器循环流化床锅炉和无外置式换热器循环流化床锅炉	大型循环流化床锅炉采用外置式换热器的比较多
4	按物料循环倍率分类	高循环倍率循环流化床锅炉、中循环倍率循环流化床锅炉、低循环倍率循环流化床锅炉	—
5	按固体物	内循环的循环流化床锅炉和外循环的循环	内循环只限在小

	料循环方	流化床锅炉	型循环流化床锅
	式分类		炉中应用
6	按炉膛压	常压循环流化床锅炉和增压循环的循环流	—
	力分类	化床锅炉	
7	按工质蒸	分为低压、中压、高压、超高压、亚临界	—
	汽压力	压力、超临界压力循环流化床锅炉	
8	按锅炉水	自然循环循环流化床锅炉和强制循环循环	—
	循环方式	流化床锅炉	
	分类		

循环流化床锅炉一般由給料系统、循环床燃烧室、高温分离装置、循环物料回送装置和尾部受热面(有些炉型与返料机构结合设置有外置换热器)等组成。循环流化床锅炉的工作原理：在煤灰系统方面，燃料和脱硫剂在循环床燃烧室下部送入，一次风从布风板下部送入，二次风由燃烧室中部送入。循环流化床流化速度一般为 4~8m/s，使炉内产生强烈的扰动，并将物料带离燃烧室。循环床燃烧室内布置有水冷壁受热面，炉温控制在 850~950℃以利于石灰石充分固硫。气流从燃烧室携带出来的高温物料，经分离器分离后送回燃烧室完成循环。分离器引出的高温烟气经尾部受热面冷却后经除尘器排入大气。

在汽水系统方面，首先，给水由给水泵压入省煤器吸热后进入锅筒，随后，通过下降管进入水冷壁，在水冷壁中汽化吸热后通过引出管再回到锅筒，然后，通过连接管进入位于对流烟道的过热器，并在其中进一步被加热到规定的过热器温度和过热器压力，最后，过热蒸

汽流入发电机组推动汽轮机带动发电机组发电。

## (2) 特点综述

1) 蓄热量极大、燃烧稳定、对燃料的适应性好。由于循环流化床锅炉燃烧室内存在大量高温固体颗粒物料,循环流化床锅炉不需要辅助燃料即可燃用任何燃料,这些燃料包括高硫分和高灰分的煤、油页岩和煤矸石、石油焦、废木料、甚至可以烧垃圾等。循环流化床锅炉为有效利用这些其他燃烧方式根本无法利用的劣燃料提供一条很好的途径。

2) 燃烧效率好,与煤粉炉相当。循环流化床燃烧是介于煤的固定床燃烧和煤粉悬浮燃烧之间的一种处于流态化下的煤燃烧方式,流态化形成的优越湍流气固混合条件,可大大强化燃烧,提高床层内的传热和传质效率。设计合理的循环流化床锅炉燃烧效率可达到99%,与煤粉炉相当,但是在燃烧低品位煤方面,则其燃烧效率将大大优于煤粉炉,而且循环流化床的燃烧效率不受炉内脱硫过程的影响。

3) 低温燃烧、污染较轻。由煤的灰渣变形温度所决定,燃煤流化床锅炉的温度处于850~950°C的范围内。这种低温燃烧特性使得气体污染物NO和NO<sub>2</sub>的排放量大大减少(比煤粉炉减少50%以上),此外,还可以在炉内采取分级燃烧等进一步降低NO<sub>x</sub>排放的技术措施,因此,一般无需烟气脱除氮氧化物的设备。

### 1.1.3 增压流化床燃烧联合循环技术<sup>4</sup>

#### (1) 技术简介

---

<sup>4</sup>《增压流化床联合循环(PFBC-CC)发电技术综述》,周一工,大众用电,1997.

增压流化床联合循环是从常压流化床发展而来的一种新型燃煤热力发电系统，它是将鼓泡床或循环流化床锅炉增压运行（0.6~1.6MPa），炉膛出口的高温高压烟气经除尘后驱动燃气轮机，燃气轮机一方面作为提供压缩空气的动力，另一方面带动发电机发电；同时，锅炉产生的过热蒸汽进入汽轮机，带动发电机发电。

### 1) 增压流化床联合循环的技术关键

机组运行的动态特性和低负荷调节性能。对此，有关专家进行过动态特性及低负荷调节性能的仿真模型试验。但是由于实际机组的运行系统非常复杂，模型描述存在较大误差，所以要全面掌握机组运行的动态特性和低负荷调节性能，还需要在已有的中间试验电站和商业示范机组上进行大量的试验研究工作。

床层动力学特性和床内传热特性。现在应用于商业示范机组设计的有关床层动力学和床内传热的经验和数据来自于半工业性试验研究，其不精确性已在商业示范机组的运行中反映出来。几台商业示范机组都存在床内燃烧不均匀、部分出灰管堵塞、床内受热面布置不够而达不到预定出力等与床层动力学特性和床内传热特性有关的问题。同样，这也需要在已有的中试电站和商业示范机组上进行有关的试验研究，以获得比较准确的床层动力学和床内传热的实用数据。

机组的自动控制系统。增压流化床联合循环系统比较复杂，它不仅是一个分布参数、非线性、时变、多变量紧密耦合的系统，同时还有许多特殊的控制要求（如防止增压流化床逆流、压气机防喘振、压气机防阻塞等）。所以，要准确地对全系统实行全面控制，就必须建

立系统的静态与动态数学模型，全面仿真，同时，把数学模型的控制方法与专家系统相结合，以保证系统控制的综合性能指标。

高温分离器。高温分离器面临的主要问题是提高分离效率，使其满足燃气轮机入口的含尘要求，减少磨损使其延长使用寿命。目前，为提高分离效率，采用多级分离法；为减少分离器磨损，采用金属表面涂层或陶瓷材料。新型高温分离器一般采用两级分离，第一级用两组串联的金属表面涂层(碳化硅)的旋风分离器，第二级用陶瓷过滤器。目前正在研究的陶瓷过滤器有三种：棒式过滤器、管式过滤器和错流式过滤器。最新研究报告称新型两级分离法可使烟气含尘率下降到  $2\text{mg}/\text{m}^3$ ，所有粒子均小于  $3\mu\text{m}$ 。

燃气轮机技术。燃气轮机面临的主要问题是，灰粒对叶片的磨损及含有  $\text{SO}_x$  和腐蚀性碱金属的蒸汽对叶片的腐蚀。目前正在研制各种金属和非金属涂层以增加叶片表面硬度和使叶片不受有害气体的腐蚀。

增压流化床联合循环系统。典型增压流化床联合循环系统是由煤预处理系统、煤和脱硫剂添加系统、锅炉燃烧系统、锅炉汽水系统、灰渣排放系统和压缩空气系统组成的。煤预处理系统：采用风选技术，使煤粒的粒径在  $0\sim 6\text{mm}$  范围内，并用燃气轮机排出的烟气干燥原煤；煤和脱硫剂添加系统：煤和脱硫剂在进入常压料斗前按比例混合，采用加压锁斗系统将燃料用气力输送至流化床燃烧室内，气力输送的固气比一般为  $8\sim 10:1$ 。也可将煤和脱硫剂制成水煤浆，用泵将其注入流化床燃烧室内；锅炉燃烧系统：由空气压缩机提供的压缩空气经炉

底风室和布风板进入床内，使燃料流化、燃烧。炉膛出口烟气经高温除尘后进入燃气轮机，然后，烟气经余热锅炉吸热后排入烟囱。锅炉点火由启动燃烧室完成。在系统中有两个旁路，一个是启动旁路，作为锅炉常压启动时的烟气通道，另一个是安全旁路，用于燃气轮机甩负荷或发生故障时的烟气排放，在安全旁路上装有减温减压装置，以使高温高压的烟气安全排放；锅炉汽水系统：增压流化床锅炉的汽水循环一般采用由自然循环和强制循环组成的混合循环系统。从凝汽器排出的凝结水由凝结水泵加压后进入低压加热器，再经除氧器除氧后，由给水泵分流进入高压加热器和余热锅炉的低温省煤器，继而合并进入余热锅炉的高温省煤器再至汽包。然后，一路给水自汽包下降管至膜式水冷壁构成自然循环，另一路经循环泵至水冷风室、水冷布风板和床内蒸发埋管构成强制循环。汽包出口的饱和蒸汽进入床内低温过热埋管，经喷水减温后再至高温过热段。过热蒸汽经母管进入汽轮机；灰渣排放系统：包括锅炉出渣系统和高温除尘器排灰系统。流化床内产生的高温灰渣通过一个非机械控制阀排至炉渣冷却罐，由空气将其冷却，经锁斗排至常压渣罐，再送至渣库。高温除尘器分离下来的细灰则经过减温减压装置冷却后送至灰库；压缩空气系统：压缩空气由燃气轮机驱动的空气压缩机提供，它主要供以下几个用途：燃料气力输送气源，控制系统和特殊测量系统气源，仪表测点的吹扫，压力料罐的充压及松动气源等。

## 2) 第二代增压流化床联合循环

由于受到增压流化床燃烧温度的限制，燃气轮机进口的温度最高

只能达到 950℃，而现代燃气轮机允许的最高进口温度为 1200℃，为了充分发挥设备性能，进一步提高循环效率，目前正在开发第二代增压流化床联合循环。第二代增压流化床联合循环系统如图 3 所示。它是将煤先送入一个加压的气化炉，用以产生低热值煤气，剩余的焦炭和另一些煤一起送入增压流化床锅炉中，通以高的过量空气燃烧。增压流化床排出的高温含氧烟气经除尘后与气化炉产生的煤气(经除尘)共同进入一个前置燃烧室中燃烧，然后再进入燃气轮机，并带动空气压缩机做功和发电机发电，这样可使燃气轮机进口温度提高到 1150℃左右，预计循环效率可达 45%。

## (2) 特点综述

1) 燃烧效率高。由于燃烧反应在增压燃烧室进行(压力为 0.6~1.6MPa)，煤燃烧反应速度大大加快。在商业示范机组上测得的燃烧效率在 99%以上。

2) 发电效率高。增压流化床联合循环的热力学特性是蒸汽、燃气联合循环，热力学分析证明了该循环的效率高于朗肯循环的效率。示范机组的运行实践也证明了发电效率比同参数的常压燃煤热力发电机组的效率相对高出 8%~10%，可达 40%~42%。

3) 低污染。在示范机组上的测定结果表明增压流化床联合循环的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  及颗粒的排放浓度可以满足严格的环保控制要求， $\text{NO}_x$  的排放浓度为 20mg/MJ、 $\text{SO}_x$  的排放浓度为 60mg/MJ，颗粒排放浓度为 10mg/MJ。

4) 结构紧凑、成本低。增压流化床的体积比同等容量普通锅炉

的体积小得多，可减少使用土地面积。另外，主要部件可以做成模块结构，其中绝大部分可以在工厂的车间内组装。这样可以降低成本，提高产品质量，缩短工期。

#### 1.1.4 整体煤气化联合循环发电技术<sup>5</sup>

##### (1) 技术简介

整体煤气化联合循环发电系统，是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。它由两大部分组成，即煤的气化与净化部分和燃气-蒸汽联合循环发电部分。第一部分的主要设备有气化炉、空气分离装置、煤气净化设备，第二部分的主要设备有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。

IGCC 的工艺流程为：煤(以水煤浆或干煤粉的形式)进入气化装置，在气化装置中与气化介质(蒸汽、氧或空气)发生气化过程，成为中低热值煤气(以 CO、H<sub>2</sub> 为主要成分)，生成的煤气进入净化系统，煤气中的颗粒、硫、汞等污染成分被分离出来，净化后的煤气进入燃气轮机的燃烧室中燃烧并做功，拖动发电机；从燃气轮机排出的高温气体进入余热锅炉，产生的蒸汽推动汽轮发电机组，形成联合循环发电系统。整体煤气化联合循环中的/整体 0 有两个含义：1) 在这个系统中，气化炉所用的蒸汽和空气多数情况下都直接来自于系统内的汽轮机和燃汽轮机。同时，气化过程中产生的各种显热，都在系统适当的工艺环节中充分地利用，这样的系统是一个有机的整体；2) 系统

---

<sup>5</sup> 《洁净煤发电技术》。阎维平。中国电力出版社，2008.

流程及系统内各处的参数都要从机组整体性能最优的角度仔细考虑和设计。

## (2) 特点综述

IGCC 装置自 20 世纪 70 年代初期研发，至今已有 30 多年了，在整个技术的总体上已经取得了重大发展，进行了商业示范运行，取得了不少经验，验证了其本身所具有的优势。

1) 优良的环保性能。IGCC 系统在将固体燃料比较经济地转化成燃气轮机能燃用的清洁气体燃料的基础上，很好地解决了燃煤污染严重且不易治理的问题，因此，它具有大气污染物排放量少，废物处理量小等突出优点，足以满足对未来燃煤发电系统日益严格的环保指标要求。由于燃气轮机的入口煤气的含尘浓度有比烟气排放标准要求高得多的限制，因此，在煤气进入燃气轮机前要进行严格的除尘，一般情况下，IGCC 发电装置的粉尘排放均低于  $10\text{mg}/\text{m}^3$ ，基本上不排放粉尘。

2) 节能，具有进一步提高效率的前景。IGCC 的净效率取决于燃气透平的进口温度、煤气化显热的利用程度、电站系统的整体化水平以及厂用电率等。先进的煤气化技术可达到 99% 的碳转化率，气化炉的总效率可达 94%。但由于在煤气化和粗煤气的净化过程中能量转化所造成的损失，再加上目前富氧作为气化剂，空气分离装置所消耗的电力，使整体煤气化联合循环的效率低于燃气蒸汽循环机组的效率，但是随着未来采用成熟可靠的高温煤气净化技术，IGCC 具有较大幅度提高燃煤发电效率的潜力。

3) 能充分综合利用煤炭资源和煤化工结合成多联产系统, 便于与生产甲醇、醋酸、尿素等化工过程相结合, 使煤得以充分综合利用, 同时生产电、热、燃料气和化工产品, 有利于降低生产成本。

4) 当天然气和石油枯竭时, 可用 IGCC 改造现有燃油气的联合循环。IGCC 也可用于对现有蒸汽电站的增容改造, 便于实施电站的分阶段建设, 能有效的利用建设资金。

### 1.1.5 燃煤电厂碳捕集和封存技术<sup>6</sup>

#### (1) 技术简介

地下是地球最大的碳接收器, 世界上绝大部分的碳都贮藏在这里, 如煤、油、煤气、有机页岩、石灰石和白云石。作为地球外壳内一种自然过程, CO<sub>2</sub> 的地质存储已进行了数亿年。生物行为、点火行为和岩石与流体间化学反应形成的 CO<sub>2</sub> 已被捕获, 并在自然界的地下环境中以碳酸盐矿物形式、溶液形式、气体或超临界形式存储。在工程上 CO<sub>2</sub> 被注入地下地质岩层, 首先于 20 世纪 70 年代初在美国得克萨斯州被采用, 其目的主要是作为 EOR (提高石油采集率) 的一部分。之后人为 CO<sub>2</sub> 的地质存储, 也在 70 年代首先作为温室气体减排可选方案被提出, 但随后的研究工作很少, 直到 20 世纪 90 年代初, 通过一些个人和研究小组的工作, 这种概念才得到认可。目前 CO<sub>2</sub> 地质存储方案作为 CO<sub>2</sub> 减排方案之一, 取得了一定的进展, 示范性和商业性项目初步取得了成功, 技术可信度的水平有了提高。但是, 这种可能性要变成现实, 其技术必须是安全的, 在环保上要有持久性,

<sup>6</sup> 《二氧化碳地质封存技术发展现状与展望》. 庞忠和等. 第二届废物地下处置学术研究会论文集. 2008.

其成本可以接受，并能够被广泛应用。

碳捕获和存储技术主要由 3 个环节构成：

### 1) 碳捕获

对于大量分散型的  $\text{CO}_2$  排放源是难于实现碳的收集，因此碳捕获的主要目标是化石燃料电厂、钢铁厂、水泥厂、炼油厂、合成氨厂等  $\text{CO}_2$  的集中排放源。针对电厂排放的  $\text{CO}_2$  的捕获分离系统主要有 3 类：燃烧后系统、富氧燃烧系统以及燃烧前系统。

燃烧后捕获与分离主要是烟气中  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2$  的分离。化学溶剂吸收法是当前最好的燃烧后  $\text{CO}_2$  收集法，具有较高的捕集效率和选择性，而能源消耗和收集成本较低。除了化学溶剂吸收法，还有吸附法、膜分离等方法。化学吸收法是利用碱性溶液与酸性气体之间的可逆化学反应。由于燃煤烟气中不仅含有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ，还含有  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、尘埃、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  等污染物。杂质的存在会增加捕获与分离的成本，因此烟气进入吸收塔之前，需要进行预处理，包括水洗冷却、除水、静电除尘、脱硫与脱硝等。烟气在预处理后，进入吸收塔，吸收塔温度保持在  $40\sim 60^\circ\text{C}$ ， $\text{CO}_2$  被吸收剂吸收，通常用的溶剂是胺吸收剂（如一乙醇胺 MEA）。然后烟气进入一个水洗容器以平衡系统中的水分并除去气体中的溶剂液滴与溶剂蒸汽，之后离开吸收塔。吸收了  $\text{CO}_2$  的富溶剂经由热交换器被抽到再生塔的顶端。吸收剂在温度  $100\sim 140^\circ\text{C}$  和比大气压略高的压力下得到再生。水蒸汽经过凝结器返回再生塔，而  $\text{CO}_2$  离开再生塔。再生碱溶剂通过热交换器和冷却器后被抽运回吸收塔。

富氧燃烧系统是用纯氧或富氧代替空气作为化石燃料燃烧的介质。燃烧产物主要是  $\text{CO}_2$  和水蒸气，另外还有多余的氧气以保证燃烧完全，以及燃料中所有组成成分的氧化产物、燃料或泄漏进入系统的空气中的惰性成分等。经过冷却水蒸汽冷凝后，烟气中  $\text{CO}_2$  含量在 80%~98% 之间。这样高浓度的  $\text{CO}_2$  经过压缩、干燥和进一步的净化可进入管道进行存储。 $\text{CO}_2$  在高密度超临界下通过管道运输，其中的惰性气体含量需要降低至较低值以避免增加  $\text{CO}_2$  的临界压力而可能造成管道中的两相流，其中的酸性气体成分也需要去除。此外  $\text{CO}_2$  需要经过干燥以防止在管道中出现水凝结和腐蚀，并允许使用常规的碳钢材料。在富氧燃烧系统中，由于  $\text{CO}_2$  浓度较高，因此捕获分离的成本较低，但是供给的富氧成本较高。目前氧气的生产主要通过空气分离方法，包括使用聚合膜、变压吸附和低温蒸馏。燃烧前捕获系统主要有 2 个阶段的反应。首先化石燃料先同氧气或者蒸汽反应，产生以  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$  为主的混合气体(称为合成气)，其中与蒸汽的反应称为“蒸汽重整”，需在高温下进行；对于液体或气体燃料与  $\text{O}_2$  的反应称为“部分氧化”；对于固体燃料与氧的反应称为“气化”。待合成气冷却后，再经过蒸汽转化反应，使合成气中的  $\text{CO}$  转化为  $\text{CO}_2$ ，并产生更多的  $\text{H}_2$ 。最后，将从  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2$  的混合气中分离，干燥的混合气中  $\text{CO}_2$  的含量可达 15% ~ 60%，总压力 2 ~ 7MPa。 $\text{CO}_2$  从混合气体中分离并捕获和存储， $\text{H}_2$  被用作燃气联合循环的燃料送入燃气轮机，进行燃气轮机与蒸汽轮机联合循环发电。这一过程也即考虑碳的捕获和存储的煤气化联合循环发电(IGCC)。从  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$  的混合气中分离  $\text{CO}_2$

的方法包括：变压吸附、化学吸收(通过化学反应从混合气中去除 CO<sub>2</sub>，并在减压与加热情况下发生可逆反应，同从燃烧后烟道气中分离 CO<sub>2</sub> 类似)、物理吸收(常用于具有高的 CO<sub>2</sub> 分压或高的总压的混合气的分离)、膜分离(聚合物膜、陶瓷膜)等[4][5][6]。

## 2) 碳运输

输送大量 CO<sub>2</sub> 的最经济方法是通过管道运输。管道运输的成本主要有 3 部分组成：基建费用、运行维护成本，以及其它的如设计、保险等费用。特殊的地理条件，如人口稠密区等对成本很有影响。陆上管道要比同样规模的海上管道成本高出 40% ~ 70%。

## 3) 地质存储

CO<sub>2</sub> 的地质存储包括在废弃油、气中的存储、用于强化开采油的碳存储、在煤层中的碳存储以及在盐水层中的碳存储。

地下地质岩层由颗粒(如石英)或矿石(如碳酸钙)组成。在颗粒或矿石之间孔隙性空间充有流体(如水、油、气)。开口的断层和洞穴也会充满流体。向浸透性岩层的孔隙性空间和断层注入的 CO<sub>2</sub> 能够替代原有位置的流体，或者 CO<sub>2</sub> 可以溶解在流体中，或者与矿石颗粒发生反应，或可能出现这些过程中某些组合。

用泵向井下注入 CO<sub>2</sub>，通过在井底部的凿孔或筛子使 CO<sub>2</sub> 进入岩层。凿孔或筛子的间隔距离通常是在 10~100m 的量级，这取决于岩层的可渗透性和厚度。CO<sub>2</sub> 的注入会提高井附近岩层的压力，从而使 CO<sub>2</sub> 进入该岩层原先由岩层流体所占据的孔隙性空间。在岩层内建立的压力大小和空间分布取决于注入岩层的可渗透性和厚度、其中是否

有影响渗透性的屏障以及区域水文地质系统的几何大小等。

当  $\text{CO}_2$  注入到一个气贮藏库时，会形成由天然气和  $\text{CO}_2$  组成的单一流体相。当  $\text{CO}_2$  注入深盐水层时，也许是一种流体相，或是一种超临界的密相流化床，它在水中是不混合的。 $\text{CO}_2$  注入到油贮藏库，也许是易混合的，也许是不易混合的，这取决于油的组成和系统的热力学状态。当  $\text{CO}_2$  注入到煤层时，发生的过程更为复杂，不仅涉及上面列出的过程，还有气体的吸附和解吸的问题，特别是对于先前在煤上吸附的甲烷，还有煤本身的肿胀或收缩问题。

当  $\text{CO}_2$  移动通过岩层时，会有一部分  $\text{CO}_2$  溶解在岩层水中。在开放式的流体系统中，按贮藏库规模的数值模拟表明，注入的  $\text{CO}_2$  在几十年内会有很大一部分（可高达 30%）溶解在岩层水中。如果注入的  $\text{CO}_2$  包在一个封闭的结构（如贮藏库）中，因为与非饱和的岩层水接触变少了，完全溶解  $\text{CO}_2$  将需要更长的时间。一旦  $\text{CO}_2$  溶解在岩层的流体中， $\text{CO}_2$  就会按区域水力梯度沿着区域地下水移动。对于低渗透性和高盐分的深层沉积性盆地，地下水流动速度是很低的，典型的只有每年数厘米的量级。因此，溶解  $\text{CO}_2$  的移动速率比单相  $\text{CO}_2$  的移动速率低得多。

在  $\text{CO}_2$  移动通过岩层时，会有一些  $\text{CO}_2$  因毛细作用力而滞留在孔隙性空间中，这种现象通常称为“残留气体的捕获”，它可以使一定量的  $\text{CO}_2$  固定不动。当捕获程度高并且  $\text{CO}_2$  被注入到厚岩层的底部时，所有的  $\text{CO}_2$  都可以通过这种机理被捕获，甚至在达到盖岩（岩层顶部）以前。“残留气体饱和值”是与岩层密切相关的，对于许多典型

的存储岩层，残留气体饱和度可以高达 15%~25%。随着时间的推移，所捕获的大部分 CO<sub>2</sub> 可以溶解在岩层水中。除了 CO<sub>2</sub> 在岩层水中溶解之外，CO<sub>2</sub> 还会有进一步的地球化学反应。

地质存储的有效性与物理和地球化学捕获机理有关。最有效的存储场址是 CO<sub>2</sub> 不移动的场址，它被永久地捕获在厚厚的低渗透性的密封层内，或者 CO<sub>2</sub> 转换成固态的矿石或被吸附在煤微孔的表面。某些存储场址可以通过物理和化学捕获的结合得到合适的存储效率。在密封的岩层（如很低渗透性的页岩、盐层等）下的物理捕获是地质存储 CO<sub>2</sub> 的基本手段。有许多沉积性盆地已经关闭，在物理上是受约束的圈闭或是构筑物；某些圈闭已被油和气所占据，余下的圈闭被盐水所占据。在沉积性盆地内有各种类型的物理圈闭，最为普通的是 2 种：地层性圈闭和结构性圈闭。这两种圈闭都适宜 CO<sub>2</sub> 的存储，但是必须小心处理，贮藏库不能过压，不使盖岩产生断裂，不使现有的断层成为活动断层。

地下的 CO<sub>2</sub> 可能同岩石发生一系列的地球化学相互作用，从而进一步增加存储容量和效率。首先，当 CO<sub>2</sub> 溶解在岩层水中，会出现通常称为溶解捕获的过程。其次，将形成离子形式，出现称为离子捕获的过程，随着 pH 值的提高，许多岩石会溶解。最后，有一些可能转化成稳态的碳酸盐矿物相，这一过程称为矿物捕获，是最持久的地质存储形式。矿物捕获是比较慢的，可能要上千年或者更长。尽管如此，矿物存储的持久性，连同在某些地质环境下可能出现大的存储容量，是长期存储所需要的特性。

在合适的岩层、在没有明显泄漏途径、或没有开口的裂缝或断层情况下，注入的 CO<sub>2</sub> 可以滞留很长的时间。而且由于多重捕获机理的共同作用，随着时间的推移，CO<sub>2</sub> 的移动性将越来越小，泄漏的可能性将减少。只要给出合适的操作程序，在一个合适的、有良好特性的地质岩层中存储的 CO<sub>2</sub> 将能够存储数百万。

## (2) 特点综述

目前的减排技术都不是很成熟，对于碳捕获和封存技术的改进研究一直都在进行。基于煤气化的燃烧前脱碳技术在减排 CO<sub>2</sub> 工艺上最易实现，成本也是三种技术中最低的，如果能在燃气机轮、气化炉设计、制氧技术及整个联合循环系统集成和优化四方面得到改进，减排成本可以在现有的水平上下降 20% 以上，但目前最重要的是解决煤基 IGCC 电站系统可靠性，降低投资费用，使该技术更具投资费用，是该技术更具竞争力。

富氧燃烧技术的前途主要取决于大规模和低成本制氧技术的发展，因为只有制氧投资和成本的降低，才能具备与其他技术的竞争力。其他一些减排技术，如化学链燃烧技术，从理论上减排过程没有能量损失，因此减排成本最低，但目前其许多技术正处于研究阶段，距商业化尚远，一旦突破，将有很好的前景。

## 1.2 常规低碳发电技术特点综述

### 1.2.1 核电技术<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> 《核能发电的优点及世界核电发展动向》，史永谦，研究与探讨，2007.

## (1) 技术简介

1939年，德国科学家奥托·哈恩发现了元素铀的同位素 $^{235}\text{U}$ 原子核在中子的轰击下可以发生核裂变并同时放出能量，很多重核同位素，如 $^{233}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 等，都能产生核裂变反应。而核裂变反应放出的能量比化学反应大的多，这预示了核能利用的前景。 $^{235}\text{U}$ 原子核在裂变后生成裂变碎片并同时放出2~3个中子，如果新产生的中子能够轰击其它的 $^{235}\text{U}$ 原子核并导致新的核裂变，裂变反应就可以不断持续下去，我们将这个过程形象地称作“链式反应”。在不断的链式反应下，核能被源源不断地释放出来。除了 $^{235}\text{U}$ 等裂变可以放出核能外，氢的同位素，如氘( $^3\text{H}$ )的原子核在一定条件下也可以聚合成氦( $\text{He}$ )原子核，同时放出能量，这也是核能的一种形式。我们通常将核裂变反应放出的核能称为“裂变能”，而核聚变反应放出的核能称为“聚变能”。据科学家估计，以目前的能源利用规模来看，仅海洋中存在的聚变核素就可以供应人类上万年使用，这将彻底解决人类的能源问题。但目前人类离实现可控的核聚变，特别是达到商用水平，还有较大的距离，因而现在核能和平利用的方式主要是对裂变能的利用。

核能发电的历史与动力堆的发展历史密切相关。动力堆的发展最初是出于军事需要。核能发电是利用裂变能将水加热为蒸汽，蒸汽推动汽轮机带着发电机一起旋转，电就源源不断地产生出来，并通过电网送到四面八方，这类发电厂就叫核电站。核电站的核心是反应堆，

反应堆放出的核能以热的形式由一回路的冷却剂带出，通过蒸汽发生器产生的蒸汽，这整个系统称为“核蒸汽供应系统(一回路系统)”，也称为核岛。蒸汽驱动汽轮发电机组进行发电，与常规火电厂的“汽轮发电机系统(二次回路系统)”基本相同，也称为常规岛。1954年，苏联建成世界上第一座装机容量为5兆瓦(电)的核电站。英、美等国也相继建成各种类型的核电站。到1960年，有5个国家建成20座核电站，装机容量1279兆瓦(电)。由于核浓缩技术的发展，到1966年，核能发电的成本已低于火力发电的成本。核能发电真正迈入实用阶段。1978年全世界22个国家和地区正在运行的30兆瓦(电)以上的核电站反应堆已达200多座，总装机容量已达107776兆瓦(电)。80年代因化石能源短缺日益突出，核能发电的进展更快。到1991年，全世界近30个国家和地区建成的核发电机组为423套，总容量为3.275亿千瓦，其发电量占全世界总发电量的约16%。世界上第一座核电站—苏联奥布宁斯克核电站。

目前世界上比较成熟的发电堆主要有四种：轻水堆(压水堆和沸水堆)、重水堆和石墨堆和气冷堆。压水堆核电站的一回路系统与二回路系统完全隔开，它是一个密闭的循环系统。该核电站的原理流程为：主泵将高压冷却剂送入反应堆，一般冷却剂保持在120~160个大气压。在高压情况下，冷却剂的温度即使300~C多也不会汽化。冷却剂把核燃料放出的热能带出反应堆，并进入蒸汽发生器，通过数以千计的传热管，把热量传给管外的二回路水，使水沸腾产生蒸汽；冷却剂流经蒸汽发生器后，再由主泵送反应堆，这样来回循环，不断

地把反应堆中的热量带出并转换产生蒸汽。从蒸汽发生器出来的高温高压蒸汽，推动汽轮发电机组发电。做过功的废汽在冷凝器中凝结成水，再由凝结给水泵送入加热器，重新加热后送回蒸汽发生器。这就是二回路循环系统采用低浓（铀-235 浓度约为 3%）的二氧化铀作燃料，高压水作慢化剂和冷却剂。是目前世界上最为成熟的堆型。

## （2）特点综述

结构和运行都比较简单，尺寸较小，造价也低廉，燃料也比较经济，具有良好的安全性、可靠性与经济性。

必须使用低浓铀，轻水堆对天然铀的利用率低。如果系列地发展轻 7K 堆要比系列地发展重水堆多用天然铀 50% 以上。

核电站靠核裂变链式反应产生的热量加热产生的蒸汽发电，因此核电站运行，必须保证反应堆有足够完好的冷源，即使是反应堆停闭期，如果失去冷源，反应堆内的核衰变产生的余热也足够使反应堆烧毁。

移动控制棒和改变冷却剂中硼浓度都可以调节反应堆功率，移动控制棒可以快速地升降负荷，而改变硼浓度来调节功率，速率较慢，通常采用这两种方法共同调节。任何工况下，必须保证核反应堆可控，即保证反应性的控制，反应性的失控将导致重大核事故。

机组快速升降负荷，特别在燃耗末期由于氙毒的变化，将导致反应堆轴向功率偏差控制困难，易产生堆芯局部热点，有造成堆芯烧毁的潜在风险；若频繁进行负荷跟踪，将产生大量的放射性废气、废液，对环境产生潜在威胁，故核电机组必须相对稳定地带基本负荷运行。

压水堆机组每年所需燃料一次性装入。停机换料时，机组利用这一机会进行必要的维修和试验，以使机组保持良好的性能和安全水平，所以压水堆的机组每年有一次机组换料大修。

## 1.2.2 水电技术

### (1) 技术简介<sup>8</sup>

水力发电就是利用水力（具有水头）推动水力机械（水轮机）转动，将水能转变为机械能，如果在水轮机上接上另一种机械（发电机）随着水轮机转动便可发出电来，这时机械能又转变为电能。水力发电在某种意义上讲是水的势能变成机械能，又变成电能的转换过程。

将水能转换为电能的综合工程设施，又称水电厂。它包括为利用水能生产电能而兴建的一系列水电站建筑物及装设的各种水电站设备。利用这些建筑物集中天然水流的落差形成水头，汇集、调节天然水流的流量，并将它输向水轮机，经水轮机与发电机的联合运转，将集中的水能转换为电能，再经变压器、开关站和输电线路等将电能输入电网。有些水电站除发电所需的建筑物外，还常有为防洪、灌溉、航运、过木、过鱼等综合利用目的服务的其他建筑物。这些建筑物的综合体称水电站枢纽或水利枢纽。

水电站有各种不同的分类方法。按照水电站利用水源的性质，可分为三类。①常规水电站：利用天然河流、湖泊等水源发电；②抽水蓄能电站：利用电网中负荷低谷时多余的电力，将低处下水库的水抽

---

<sup>8</sup> <http://baike.baidu.com/view/1752027.htm>

到高处上水库存蓄，待电网负荷高峰时放水发电，尾水至下水库，从而满足电网调峰等电力负荷的需要；③潮汐电站：利用海潮涨落所形成的潮汐能发电。

按照水电站对天然水流的利用方式和调节能力，可以分为两类。

①径流式水电站：没有水库或水库库容很小，对天然水量无调节能力或调节能力很小的水电站；②蓄水式水电站：设有-一定库容的水库，对天然水流具有不同调节能力的水电站。

在水电站工程建设中，还常采用以下分类方法。①按水电站的开发方式，即按集中水头的手段和水电站的工程布置，可分为坝式水电站、引水式水电站和坝 - 引水混合式水电站三种基本类型。这是工程建设中最通用的分类方法。②按水电站利用水头的大小，可分为高水头、中水头和低水头水电站。世界上对水头的具体划分没有统一的规定。有的国家将水头低于 15m 作为低水头水电站，15~70m 为中水头水电站，71~250m 为高水头水电站，水头大于 250m 时为特高水头水电站。我国通常称水头大于 70m 为高水头水电站，低于 30m 为低水头水电站，30~70m 为中水头水电站。这一分类标准与水电站主要建筑物的等级划分和水轮发电机组的分类适用范围，均较适应。③按水电站装机容量的大小，可分为大型、中型和小型水电站。各国一般把装机容量 5000kW 以下的水电站定为小水电站，5000~10 万 kW 为中型水电站，10~100 万 kW 为大型水电站，超过 100 万 kW 的为巨型水电站。中国规定将水电站分为五等，其中：装机容量大于 75 万 kW 为一等〔大(1)型水电站〕，75~25 万 kW 为二等〔大(2)型水电站〕，25~2.5

万 kW 为三等〔中型水电站〕, 2.5~0.05 万 kW 为四等〔小(1)型水电站〕, 小于 0.05 万 kW 为五等〔小(2)型水电站〕; 但统计上常将 1.2 万 kW 以下作为小水电站。

## (2) 特点综述<sup>9</sup>

水能是取之不尽、可再生的能源。地球表面是以海洋为主的水体, 在太阳的作用下, 蒸发成水汽升至高空, 转成雨雪, 一部分降到陆地, 汇集补给河川径流, 流向海洋或内陆湖泊。这是一个以太阳热能为动力的水循环。

1) 水电成本低廉。水电的“燃料”是廉价的水, 而火电站发电的燃料是煤和石油等。很明显, 水电的发电成本低。水电发电的效率高。常规水电站水能的利用效率在 80%以上; 而火力发电的热效率只有 30%~40%。电能输送方便, 减少交通运输负荷。

2) 水电机组启停迅速, 操作方便, 运行灵活, 可变幅度大, 易于调整出力, 所以水电是电力系统中理想的调峰、调频和事故备用电源。随着经济的发展, 电力系统日益扩大, 机组的单机容量迅速增加, 为了保证系统的供电质量和避免严重停电事故, 水电是系统中不可缺少的组成部分。

3) 水电能源无污染。同时建设水电站投资较多, 施工期较长, 建坝条件较好和水库淹没损失较小的大型水电站的站址, 往往位于远距离用电中心的偏僻地区, 需要建设较长的输电线路, 增加了造价和

---

<sup>9</sup> 《可再生能源及其发电技术》。姚兴佳等。科学出版社, 2010.

输电损失。

## 1.3 新兴低碳发电技术特点综述

### 1.3.1 风力发电技术<sup>10</sup>

#### (1) 技术简介

风力发电的原理，是利用风力带动风车叶片旋转，再透过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电。依据目前的风车技术，大约是每秒三米的微风速度（微风的程度），便可以开始发电。风力发电正在世界上形成一股热潮，因为风力发电没有燃料问题，也不会产生辐射或空气污染。

##### 1) 小型独立风力发电系统

小型独立风力发电系统一般不并网发电，只能独立使用，单台装机容量约为 100 瓦-5 千瓦，通常不超过 10 千瓦。它的构成为：风力发电机、充电器和数字逆变器。风力发电机由机头、转体、尾翼、叶片组成。叶片用来接受风力并通过机头转为电能；尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能；转体能使机头灵活地转动以实现尾翼调整方向的功能；机头的转子是永磁体，定子绕组切割磁力线产生电能。因风量不稳定，故小型风力发电机输出的是 13~25V 变化的交流电，须经充电器整流，再对蓄电池充电，使风力发电机产生的电能变成化学能。然后用有保护电路的逆变电源，把电瓶里的化学能转变成交流 220V 市电，才能保证稳定使用。

##### 2) 并网风力发电系统

<sup>10</sup> <http://wenku.baidu.com/view/098da2946bec0975f465e2d5.html>

德国、丹麦、西班牙等国家的企业开发建立了评估风力资源的测量及计算机模拟系统，发展变桨距控制及失速控制的风力机设计理论，采用新型风力机叶片材料及叶片翼型，研制出变极、变滑差、变速恒频及低速永磁等新型发电机，开发了由微机控制的单台及多台风力发电机组成的机群的自动控制技术，从而大大提高了风力发电的效率及可靠性。在此基础上，风力发电机单机装机容量可以达到 600 千瓦以上。不少国家建立了众多的中型及大型风力发电场，并实现了与大电网的对接。

现代风力发电机多为水平轴式。一部典型的现代水平轴式风力发电机包括叶片、轮毂(与叶片合称叶轮)、机舱罩、齿轮箱、发电机、塔架、基座、控制系统、制动系统、偏航系统、液压装置等。其工作原理是：当风流过叶片时，由于空气动力的效应带动叶轮转动，叶轮透过主轴连结齿轮箱，经过齿轮箱(或增速机)加速后带动发电机发电。目前也有厂商推出无齿轮箱式机组，可降低震动、噪音，提高发电效率，但成本相对较高。

风力发电机并不能将所有流经的风力能源转换成电力，理论上最高转换效率约为 59%，实际上大多数的叶片转换风能效率约介于 30~50% 之间，经过机电设备转换成电能后的总输出效率约为 20~45%。一般市场上风力发电机的启动风速约为 2.5~4m/s，于风速 12~15m/s 时达到额定的输出容量。当风速更高时，风力发电机的控制机构将电力输出稳定在额定容量左右，为避免过高的风速损坏发电机，大多于风速达 20~25m/s 范围内停机。一般采用旋角节制或失速

节制方式来调节叶片之气动性能及叶轮的输出。依据目前的技术，3m/s 左右的风速(微风的程度)便可以进行发电。但在进行风场评估时，通常要求离地 10 米高的年平均风速达到 5~5.5m/s 以上。

风机叶片从风的流动获得的能量与风速的三次方成正比。风速之外，叶轮直径决定了可摄取风能的多寡，约与叶轮直径平方成正比。叶片的数量也会影响到风机的输出。一般来说，2 叶、3 叶风机效率较高，力矩较低，适用于发电。此外。现代风机的叶片多采用机翼的翼型。

近年来，风电机组技术改进的主要方向是降低制造成本、提高单机容量、提高风能转换效率、自动控制等。主流风电机组的单机容量为 600~2000kW，容量越大，发电效率越高，技术难度越大。目前，国内单机容量 750~2000 kW 的机组最受欢迎。国外正在开发、应用的机组单机容量是 3000~5000 kW。2003 年，德国 Enercon 公司安装了第一台 4500 kW 的风电机组样机。

目前商用大型风力发电机组一般为水平轴风力发电机，它由风轮、增速齿轮箱、发电机、偏航装置、控制系统、塔架等部件所组成。风轮的作用是将风能转换为机械能，它由气动性能优异的叶片(目前商业机组一般为 2~3 个叶片)装在轮毂上所组成，低速转动的风轮通过传动系统由增速齿轮箱增速，将动力传递给发电机。上述这些部件都安装在机舱平面上，整个机舱由高大的塔架举起，由于风向经常变化，为了有效地利用风能，必须要有迎风装置，它根据风向传感器测得的风向信号，由控制器控制偏航电机，驱动与塔架上大齿轮咬合的

小齿轮转动，使机舱始终对风。风电机组的功率调节有两种方式，一种是失速调节，另一种是变桨距调节——即叶片可以绕叶片上的轴转动，改变叶片气动数据，实现功率调节；整台机组由电控系统进行监视与控制，可以实现无人操作管理。

风力发电机主要包括水平轴式风力发电机和垂直轴式风力发电机等。其中，水平轴式风力发电机是目前技术最成熟、生产量最多的一种形式。它由风轮、增速齿轮箱、发电机、偏航装置、控制系统、塔架等部件所组成。风轮将风能转换为机械能，低速转动的风轮通过传动系统由增速齿轮箱增速，将动力传递给发电机。整个机舱由高大的塔架举起，由于风向经常变化，为了有效地利用风能，还安装有迎风装置，它根据风向传感器测得的风向信号，由控制器控制偏航电机，驱动与塔架上大齿轮啮合的小齿轮转动，使机舱始终对风。

风力发电场（简称风电场），是将多台大型并网式的风力发电机安装在风能资源好的场地，按照地形和主风向排成阵列，组成机群向电网供电。风力发电机就像种庄稼一样排列在地面上，故形象地称为“风力田”。风力发电场于 20 世纪 80 年代初在美国的加利福尼亚州兴起，目前世界上最大的风电场是洛杉矶附近的特哈查比风电场，装机容量超过 50 万千瓦，年发电量为 14 亿千瓦·时，约占世界风力发电总量的 23%。

## （2）特点综述

建造风力发电场的费用低廉，比水力发电厂、火力发电厂或核电站的建造费用低得多；不需火力发电所需的煤、油等燃料或核电站所

需的核材料即可产生电力，除常规保养外，没有其他任何消耗；风力是一种洁净的自然能源，没有煤电、油电与核电所伴生的环境污染问题。

### 1.3.2 太阳能发电技术<sup>11</sup>

#### (1) 技术简介

照射在地球上的太阳能非常巨大，大约 40 分钟照射在地球上的太阳能，便足以供全球人类一年能量的消费。可以说，太阳能是真正取之不尽、用之不竭的能源。而且太阳能发电绝对干净，不产生公害。所以太阳能发电被誉为是理想的能源。

太阳能电池是一类对光有响应并能将光能转换成电力的器件。能产生光伏效应的材料有许多种，如：单晶硅，多晶硅，非晶硅，砷化镓，硒碲铜等。它们的发电原理基本相同，现以晶体为例描述光发电过程。P 型晶体硅经过掺杂磷可得 N 型硅，形成 P - N 结。当光线照射太阳能电池表面时，一部分光子被硅材料吸收；光子的能量传递给了硅原子，使电子发生了越迁，成为自由电子在 P - N 结两侧集聚形成了电位差，当外部接通电路时，在该电压的作用下，将会有电流流过外部电路产生一定的输出功率。这个过程的实质是：光子能量转换成电能的过程。

太阳能发电系统是由太阳能电池方阵，蓄电池组，充放电控制器，逆变器，交流配电柜、自动太阳能跟踪系统、自动太阳能组件除尘系

---

<sup>11</sup> <http://baike.baidu.com/view/357358.htm>

统等设备组成。其中部分设备作用为：

太阳能电池方阵。在有光照（无论是太阳光，还是其它发光体产生的光照）情况下，电池吸收光能，电池两端出现异号电荷的积累，即产生“光生电压”，这就是“光生伏特效应”。在光生伏打效应的作用下，太阳能电池的两端产生电动势，将光能转换成电能，是能量转换的器件。太阳能电池一般为硅电池，分为单晶硅太阳能电池，多晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池三种。

蓄电池组。其作用是贮存太阳能电池方阵受光照时发出的电能并可随时向负载供电。太阳能电池发电对所用蓄电池组的基本要求是：a.自放电率低；b.使用寿命长；c.深放电能力强；d.充电效率高；e.少维护或免维护；f.工作温度范围宽；g.价格低廉。配套 200Ah 以上的铅酸蓄电池，一般选用固定式或工业密封式免维护铅酸蓄电池，每只蓄电池的额定电压为 2VDC；配套 200Ah 以下的铅酸蓄电池，一般选用小型密封免维护铅酸蓄电池，每只蓄电池的额定电压为 12VDC。

充放电控制器。是能自动防止蓄电池过充电和过放电的设备。由于蓄电池的循环充放电次数及放电深度是决定蓄电池使用寿命的重要因素，因此能控制蓄电池组过充电或过放电的充放电控制器是必不可少的设备。

逆变器。是将直流电转换成交流电的设备。由于太阳能电池和蓄电池是直流电源，而负载是交流负载时，逆变器是必不可少的。逆变器按运行方式，可分为独立运行逆变器和并网逆变器。独立运行逆变器用于独立运行的太阳能电池发电系统，为独立负载供电。并网逆变

器用于并网运行的太阳能电池发电系统。逆变器按输出波型可分为方波逆变器和正弦波逆变器。方波逆变器电路简单，造价低，但谐波分量较大，一般用于几百瓦以下和对谐波要求不高的系统。正弦波逆变器成本高，但可以适用于各种负载交流配电柜。其在电站系统的主要作用是对备用逆变器的切换功能，保证系统的正常供电，同时还有对线路电能的计量。

## (2) 特点综述

从太阳能获得电力，需通过太阳电池进行光电变换来实现。它同以往其他电源发电原理完全不同，具有以下特点：①无枯竭危险；②绝对干净（无公害）；③不受资源分布地域的限制；④可在用电处就近发电；⑤能源质量高；⑥使用者从感情上容易接受；⑦获取能源花费的时间短。不足之处是：①照射的能量分布密度小，即要占用巨大面积；②获得的能源同四季、昼夜及阴晴等气象条件有关。但总的说来，瑕不掩瑜，作为新能源，太阳能具有极大优点，因此受到世界各国的重视。要使太阳能发电真正达到实用水平，一是要提高太阳能光电变换效率并降低其成本，二是要实现太阳能发电同现在的电网联网。

### 1.3.3 生物质能发电技术<sup>12</sup>

#### (1) 技术简介

生物质直燃发电是指将生物质代替煤炭直接燃烧产生热和水蒸气进行火力发电的形式。其适用于生物质资源比较集中的区域，如谷

<sup>12</sup> 《可再生能源及其发电技术》。姚兴佳等。科学出版社，2010。

米加工厂、木料加工厂等附近，因为只要工厂正常生产，谷壳、锯屑和柴枝等就可源源不断地供应，从而为生物质直燃发电提供了物料保障。由于生物质具有分散、热值低的特点，生物质在收集、运送过程中可能需要致密成型，在固化后将其分批次、每次多量地运送到传输半径合理的区域进行直燃发电。但不论是直接燃烧发电还是固化后燃烧发电，都属于生物质直燃发电的范畴。

生物质气化发电。生物质气化发电是将生物质首先转化成生物质气，用生物质气供给内燃机或是燃气轮机带动发电装置对外提供动力。生物质气来自生物质的气化、裂解或生物厌氧发酵过程产生的 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 和其他多元混合气体，将这些可燃气体供给内燃机或燃气轮机，带动发电装置对外提供动力。

沼气发电。沼气来自畜禽粪污或是含有机物的工业废水，经过厌氧发酵产生以 $CH_4$ 和 $CO_2$ 为主体的混合气体。 $CH_4$ 含量的多少决定沼气热值的高低，从而对沼气的发电效率产生影响。此技术发电容量较小，氧消化产气率低且不稳定，系统运行和管理的自动化水平低，产业化发展缓慢，我国自20世纪70年代起，沼气发电技术曾在农村多次推广，该技术适用于农户家庭，使农户用电自给，不宜作为公用电源建设。

## (2) 特点综述

固体直接利用方式锅炉燃烧发电利用方式是技术相对比较成熟的利用方式。如城市生活垃圾等资源进行合理的燃烧发电既解决了填埋占用大量土地的问题，又最大限度的利用现有资源，一举两得。同

时，由于生物质燃气热值低(约  $5\ 023.2\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )，加之气化炉出口气体温度较高，因此生物质气化联合发电技术的整体效率一般要低于35%。

沼气发电及其综合利用则应该大力推广。我国有着广袤农村地区，每年产生大量的农业秸秆和其他废弃物以及牲畜粪便等大量的有机物，白白浪费太可惜，如能结合先进的技术加以综合利用对我国的能源将会带来莫大益处。

通过蒸馏可将乙醇提纯，1t 干玉米可以生产 450l 乙醇。淀粉类生物质通常比含糖生物质便宜，但需要进行额外的处理。纤维素的生物质主要是木材、植物的根茎等，由于存在长链的多聚糖分子，转化预处理过程相对复杂，需将纤维素经过几种酸的水解才能转化为糖，然后再经过发酵生产乙醇，故其预处理费用昂贵。但这种技术目前还不是很成熟，处在研究、完善、论证阶段。

## 第二章 电网环节低碳技术特点综述

电网环节低碳技术包括低碳输电技术、低碳配电技术、低碳调度技术、低碳储能技术。本章主要从提高电网运行效率、改善电能质量、降低电网运行维护成本等方面，分析上述低碳技术的特点，如图 2-1 所示。

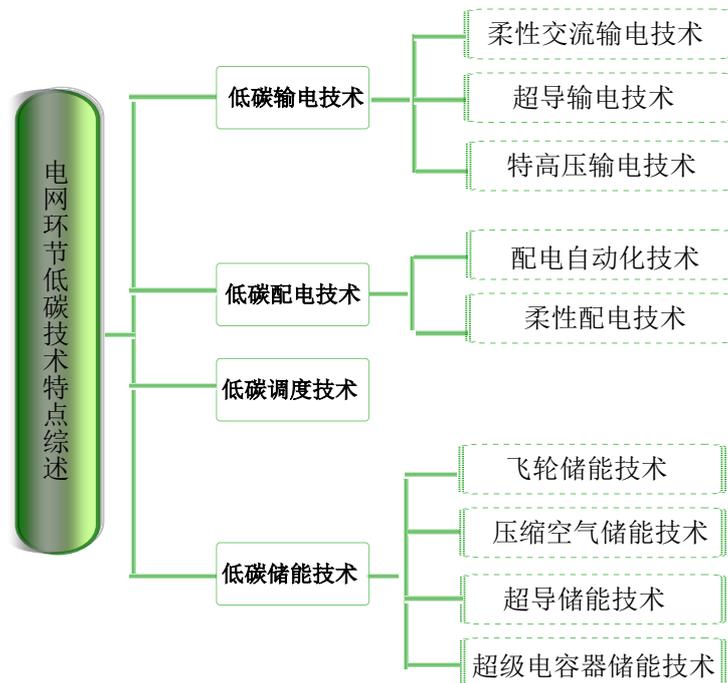


图 2-1 电网环节低碳技术特点综述

### 2.1 低碳输电技术特点综述

#### 2.1.1 柔性交流输电技术

柔性交流输电技术 ( FACTS 技术 ) 采用具有单独或综合功能的电力电子控制装置，使其比常规的输电控制技术具有更快速、更灵活的控制性能。该技术能够控制交流输电系统相关参数 ( 如串联阻抗、相角 )、抑制系统中出现的振荡，控制输电线路运行在热稳定的额定

范围内，连续控制电力潮流、增加控制区域内转换功率。具体而言，柔性交流输电技术可实现电能存储，能够控制系统电压、电流及无功功率，提高系统稳定性等，其特点可概括为：

(1) 提高输电线路的输送容量。采用 FACTS 技术可以充分利用现有输电线路的能力和资源，使输电线路的输送功率极限大幅度提高至接近导线的热极限，可减缓新建输电线路的需要和提高输电线路的利用率，间接降低 CO<sub>2</sub> 排放量。FACTS 的出现对电网的建设规划和设计将产生重大的影响。提高电能输送效率，减少输电阻塞，

(2) 优化输电网络的运行条件。FACTS 控制器有助于减少和消除环流或振荡等大电网痼疾，有助于解决输电网中“瓶颈”环节的问题；有助于在电网中建立输送通道，为电力市场创造电力定向输送的条件，有助于提高现有输电网的稳定性、可靠性和供电质量；可以保证更合理的最小网损并可以减小系统热备用容量，可从典型的 18% 减少到 15%<sup>13</sup>，甚至更少；有助于防止连锁性事故扩大，减少事故恢复时间及停电损失。通过对 FACTS 设备的快速、平滑的调整，可以方便、迅速地改变系统潮流分布，有利于在正常运行方式下控制功率走向，以充分挖掘现有网络的传输能力以及在事故情况下防止因某些线路过负荷而引起的连锁跳闸。

(3) 改变交流输电的传统应用范围。高压直流输电的控制手段快速灵活，可通过建设直流线路，解决输送容量与稳定的矛盾问题，但是换流站的一次投资很高。而应用 FACTS 控制器的费用小于新建

---

<sup>13</sup> 《浅谈柔性交流输电技术》，能源及环境，2007.

线路或换流站的投资费用。FACTS 控制器组的整套应用、协调控制可使常规交流电柔性化，改变交流输电的功能范围，使其在更多方面发挥作用，甚至扩大到原属于高压直流输电专有的那部分应用范围，如定向传输电力、功率调制、延长水下或地下交流输电距离等。

### 2.1.2 超导输电技术

超导输电技术无需高压，可将输电损耗、电磁污染、占用走廊宽度降至最低，代表了世界最先进的技术方向。从目前看来，高温超导电力电缆的应用是其中研究发展较快的一个方向，极有可能首先广泛运用于电力系统中。与普通电力电缆相比，超导电缆具有如下特点：

(1) 减少环境污染。超导电缆采用地下输电，可避免超高压高空输电所带来的噪声、电磁污染和可能产生对人身安全的隐患，保护生态环境；而充油常规电缆则存在着漏油而导致污染环境的危险性。

(2) 节约传输材料，传输容量大。具有同样传输能力的超导电缆使用相对较少的绝缘材料。同样截面的超导电缆的电流输送能力是常规电缆的 3 至 5 倍<sup>14</sup>。

(3) 减少能量损耗。超导电缆一般采用在液氮汽化的温度下的无电阻来传输电流，导体的能量损耗不到常规电缆的十分之一，加上液氮汽化所需要的能量损耗，其运行的总损耗也仅仅是常规电缆的 50%至 60%<sup>2</sup>。

随着大城市用电负荷的日益增加，往往需要采用地下电缆将电能

---

<sup>14</sup> 《关于我国采用超导输电的分析研究》，科技创新导报，2009.

输往城市负荷中心，此时采用超导输电电缆有明显的优势，是解决大容量、低损耗输电的一个重要途径。超导电缆的发展经历了直流低温超导电缆、交流低温超导电缆、交流高温超导电缆（HTS）等几个阶段。目前，HTS 已成为超导电缆的发展主流，并逐步走向并网运行阶段。HTS 电缆适用于百万千瓦级以上的远距离电力输送，可以大幅度降低电力在输电线路上的损耗，是解决输电网大容量、低损耗输电、节约输电走廊、提高输电能力和长距离输电的一个重要途径。在配电网和密集的城市建筑区，用 HTS 电缆取代常规电缆，不但能将传输容量提高 3 倍以上，而且能将总费用降低 20%，电网线损降低 70% 以上<sup>15</sup>，从而显示出巨大的减排潜力。除了可以大幅度减少输电损耗外，HTS 电缆还可以提高输电能力，尤其在受环境保护的制约下，可使资源利用最大化。HTS 电缆是满足不断增加的电力需求、降低损耗、提高电力系统运行的稳定性和可靠性、改善电能质量、最终降低电力系统运行成本和温室气体排放，从根本上推进电力工业可持续发展的重要技术。

### 2.1.3 特高压输电技术

特高压电网是由 1000kV 交流和±800kV 直流系统组成。特高压交流电网将作为骨干网架，跨接各大区域电网，是实现跨大区跨流域输电、水火电互济调节和整体能源资源优化配置的主要能源通道，同时作为接受以直流传输的远方电力的坚强受端，一回特高压交流线路可输送电力 5000MW 左右，是 500kV 交流线路输送能力的 5 倍。特

---

<sup>15</sup> 《高温超导输电电缆的现状与发展》，电力设备，2007.

高压直流输电则定位于大水电基地和大煤电基地的超远距离、超大容量外送，一回特高压直流线路可输送电力 6400MW，是 $\pm 500\text{kV}$  直流线路输送能力的 2 倍以上，输电距离可达 2500km<sup>16</sup>。

### (1) 特高压交流输电技术

特高压交流输电技术，具有输送量大、送电距离长、线路损耗低、工程投资省、走廊利用率高、联网能力强等特点，具体可概括为：

1) 输送容量大。自然功率是交流输电线路送电能力的一项重要指标，与电压平方成正比，该阻抗与波阻抗成反比。1 000 kV 交流线路的电压是 500kV 线路的 1 倍，波阻抗一般也较低，因此输电能力大幅度提高，自然功率约为 500kV 线路的 5 倍，接近 5 000MW<sup>17</sup>。

2) 送电距离长。电网中两节点之间的电气距离可以用归算到某一电压的等效串联阻抗值来表示，与线路电压平方成反比，与线路长度及单位阻抗成正比。电气距离越短，说明电气联系越紧密，稳定水平越高。采用 1000kV 交流特高压输电，其电气距离不到同长度 500kV 输电线路的 1/4，可提高系统的稳定水平。换言之，在输送相同功率的情况下，1000kV 线路的最远送电距离可以达到 500kV 线路的 4 倍<sup>18</sup>。

3) 线路损耗低。线路电阻损耗是影响电网经济运行的一项重要指标，它与线路电阻及线路电流平方成正比。在导线总截面、输送容量均相同的情况下，1000kV 交流线路的电阻损耗是 500kV 交流线路

<sup>16</sup> 《浅谈我国特高压输电技术的发展趋势》，电力与能源，2008.

<sup>17</sup> 《交流特高压输电的主要特征与关键技术》，华东电力，2006.

<sup>18</sup> 《交流特高压输电的主要特征与关键技术》，华东电力，2006.

的 1/4<sup>19</sup>。

4) 工程投资省。采用特高压输电技术，可以节省大量导线和铁塔材料，从而降低建设成本。根据有关设计部门的计算，1000kV 交流输电方案的单位输送容量综合造价约为 500kV 输电方案的 73%，节省工程投资的效益显著。

5) 走廊利用率高。对于 1 000 kV 交流特高压输电，考虑电磁环境影响后，典型的同塔双回和猫头塔单回线路的走廊缓冲区宽度分别为 75m 和 81m，单位走廊输送能力分别为 133MW/m 和 62MW/m，约为同类型 500kV 线路的 3 倍。特高压输电技术的应用，可大大提高输电走廊利用率，节省土地资源。

6) 联网能力强。通过交流特高压同步联网，可大幅度缩短电网间的电气距离，加强电气联系，提高稳定水平，充分发挥大电网互联的水火互济、错峰、跨流域互补、减少系统装机备用容量等各种联网效益。利用特高压联网，增强网间功率交换能力，可在更大范围内优化能源资源配置，有利于改善电网结构，从根本上解决短路电流超标等问题。

## (2) 特高压直流输电技术<sup>20</sup>

特高压直流输电技术具有送电容量大、距离远、不受系统稳定极限限制、提高线路走廊资源利用率等特点，具体包括：

1) 送电容量大、距离远。规划的特高压直流输电工程的送电容量高达 5GW 和 614GW，相应的直流额定电流将达到 3125A 和 4000A。

<sup>19</sup> 《交流特高压输电的主要特征与关键技术》，华东电力，2006。

<sup>20</sup> 《特高压直流输电的技术特点与工程应用》，电力设备，2006。

送电距离长，长达 1500km，甚至超过 2 000km。

2) 不受系统稳定极限限制。特高压直流输送功率的大小和方向可以快速控制和调节。直流输电的接入不会增加原有电力系统的短路电流容量，也不受系统稳定极限的限制。直流电缆线路不受交流电缆线路那样的电容电流困扰，没有磁感应损耗和介质损耗，基本上只有芯线电阻损耗，绝缘水平相对较低。

3) 提高线路走廊资源利用率。直流输电可以充分利用线路走廊资源，其线路走廊宽度约为交流输电线路的一半，且送电容量大，单位走廊宽度的送电功率约为交流的 4 倍。如直流 $\pm 500\text{kV}$  线路走廊宽度约为 30m，送电容量达 3GW；而交流 500kV 线路走廊宽度为 55m，送电容量却只有 1GW。

4) 减少功率损失。特高压直流输电工程的一个极发生故障时，另一个极能继续运行，并通过发挥过负荷能力，可保持输送功率或减少输送功率的损失。

## 2.2 低碳配电技术特点综述

### 2.2.1 配电自动化技术

配电自动化技术是指利用现代电子技术、通信技术、计算机及网络技术与电力设备相结合，将配电网在正常及事故情况下的监测、保护、控制、计量和供电部门的工作管理有机地融合在一起，改进供电质量，与用户建立更密切更负责的关系，以合理的价格满足用户要求的多样性，力求供电经济性最优化，企业管理更高效化的一种技术。

配电自动化技术包括配电网运行自动化技术、配电网管理自动化技术。其中，配电网运行自动化技术是指实现配电网实时监控、自动故障隔离及恢复供电、自动读表等功能；配电网管理自动化技术是指实现离线的或实时性不强的设备管理、停电管理、用电管理等功能。配电自动化技术特点可概括为：

(1) 缩短停电时间和提高供电可靠性。利用配电网自动化系统，可以快速、有效的监测出来线路故障发生的具体位置，并进行有效的隔离处理，恢复健康线路的供电，这样可以大大缩短故障停电的范围，缩短用户停电的时间，从而达到提高供电可靠性的目的。配电自动化技术通过提高电网正常的施工、检修和事故抢修工作效率，减少计划及故障停电时间；通过对电网的实时监视，及时发现、处理事故隐患，实施状态检修，提高设备可靠性，避免停电事故的发生。

(2) 提高电压质量，降低损耗。配电自动化系统可以通过各种现场终端实时监视供电电压的变化，及时地调整运行方式，调节变压器分接头档位或投切无功补偿电容器组等措施，保证用户电压在合格的范围内；同时，还能够使配电网无功功率就地平衡，减少线路损耗。

(3) 节省总体投资减少检修费用。使用配电网自动化技术，还可以起到节约供电单位投资成本的效果。单从一条线路来看，实施配电线路自动化技术的投资成本较大，但是，从整体来看，则该技术具备节省投资的潜力。若采用传统的向用户提供多路供电，作为停电备用，一方面将造成设备的利用率低，另一方面使整个配电线路复杂化，投资费用较高。若实施配电网自动化技术，则可以有效的控制上述问

题的产生。配电网自动化技术可以合理安排网络结构，若同一条线路的用户因为线路故障和维修出现停电问题时，则可通过网络操作联络开关，使健康区域通过其他供电线路供电。由此可见，实行配电网自动化技术可以充分节省线路的投资，减少不必要的停电时间和维修费用，并能及时、准确的检测出线路故障和维修位置，大大缩小了维修的时间，缩短为用户供电的时间。

(4) 提高运行管理水平、改善供电质量。利用配电网自动化技术，可以有效减少恢复供电和维修电网的人力资源消耗，防止由于过负荷而产生的供电质量下降问题，减少线路损耗。通过实行配电网进行监控，可以及时发现线路过负荷现象，自动计算线损的程度，有效防止窃电现象的发生。

(5) 为推行电力商业化运行提供现代化工具。配电网自动化技术，可以有效的减少用户交付电费时的一些不必要的程序，大大提高了配电企业的运营效率。配电网自动化技术实现了从用户电能表自动抄表到记收电费的全过程自动化，为用户提供新结构的电价实施方案，节省供需双方的总费用。

### 2.2.2 柔性配电技术

柔性配电技术是在中、低压配电系统中引入的包括电力电子技术、微处理机技术、控制技术的一种新型综合技术。它通过远程控制获得配电网中各种设备及相关的馈线负荷的运行数据，能够及时检测电网中可能存在的各种潜在问题，改正功率因子，有效控制无功电流，减少谐波污染，提高供电可靠性。柔性配电技术具有如下特点：

(1) 提高供电质量。柔性配电技术独立工作时可满足特殊负荷对供电质量的严格要求，与配网自动化技术相结合时，可实现无瞬时停电、实时控制的柔性化配电，满足用户对电能质量更高层次的要求。

(2) 降低线路线损，实现节能减排目标。在配电环节，存在用户配电终端电压过高、用户低压侧功率因数低等问题，如对于白炽灯等电阻负荷，当电压超过额定电压 5% 时，亮度基本不变，用电量将增加 10.25%<sup>21</sup>；对于配电变压器，进线电压过高，使线路无功电流增大，线路有功损耗增大。此外，用户低压侧功率因数过低，也会导致大量的无功电流在高压侧得到补偿，致使线路电能损耗增大。而利用柔性配电技术，能够有效控制电压变化，减少用户段的电能浪费；降低配电网中的谐波损耗，调整用户电压侧的功率因素，降低线损，优化整个电网的运行状况。

### 2.3 低碳调度技术特点综述

智能调度技术低碳调度技术，即智能调度技术，采用调度数据集成技术，有效整合并综合利用电力系统的稳态、动态和暂态运行信息，实现电力系统正常运行的监测与优化、预警和动态预防控制、事故的智能辨识、事故后的故障分析处理和系统恢复，紧急状态下的协调控制，实现调度、运行和管理的智能化、电网调度可视化等高级应用功能，并兼备正常运行操作指导和事故状态的控制恢复，包括电力市场运营、电能质量在内的电网调整的优化和协调。智能调度技术具有如下特点：

---

<sup>21</sup> 《基于 DFACTS 的电能质量调节装置研制》，大连理工大学，2009.

(1) 提高电网调度运行水平。智能化调度是对现有调度控制中心功能的重大扩展,对于有效地提高电网调度运行人员驾驭现代化大电网的能力,保障电网的安全、稳定、经济、优质运行,具有十分广阔的应用前景,是未来电网发展的必然趋势。

(2) 间接实现节能减排目标。调度智能化的最终目标是建立一个基于广域同步信息的网络保护和紧急控制一体化的新理论与新技术,当发现有危及系统静态安全的预想事故时,调用安全约束调度软件,以系统控制量调整最小或生产费用最低或网损最小为目标函数,提出解除有功、无功、电压越限并使系统进入新的安全状态的对策,间接实现节能减排的目标。

## 2.4 低碳储能技术特点综述

### 2.4.1 飞轮储能技术

飞轮储能技术是利用电动机带动飞轮高速旋转,将电能转化成机械能储存起来,在需要时飞轮带动发电机发电的一种技术。飞轮储能技术可用于调节电力系统峰谷电量,降低甚至消除电网的低频功率振荡,改善电网的电压和频率特性,调节无功和功率因素改善电力系统的稳定性。飞轮储能系统运行于真空度较高的环境中,其优点是没有摩擦损耗、风阻小、效率高、寿命长、对环境没有影响,几乎不需要维护。飞轮储能的缺点是能量密度比较低、系统复杂,对转子、轴承要求较高。飞轮储能技术具有效率高、建设周期短、寿命长、高储能量,充电快捷,充放电次数无限,对环境无污染等优点,其特点具体

可概括为：

(1) 改善电能质量。利用飞轮储能电池取代传统的柴油发电机和蓄电池来充当孤岛型风力发电系统中的电能调节器和储存器，能够有效地改善电能质量，解决风力发电机的输出功率与负载吸收功率相匹配的问题。

(2) 新能源发电的平滑输出。飞轮储能技术发展一定程度后，能在很大程度上解决新能源发电的随机性、波动性问题，实现新能源发电的平滑输出，有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化，使大规模风电和太阳能发电方便可靠地并入常规电网。作为一种蓄能供电系统，飞轮储能在太阳能、潮汐、地热等发电方面都具有良好的应用前景。

(3) 有助于风力发电的大规模应用。风力发电由于风力资源的不确定性造成供电不稳定。传统而言，主要利用风力/柴油机组、风力/蓄电池机组进行储能调节。而飞轮储能系统在技术和经济上均优于柴油发电、蓄电池，因此，该技术的应用可降低成本，提高储能调节效率，促进风力发电的大规模并网，减少电力系统中常规能源发电比例，提高能源的利用效率，减少温室气体的排放。

#### 2.4.2 压缩空气储能技术

压缩空气储能技术是指在电网负荷低谷期利用电能，将空气高压密封在报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井中，在电网负荷高峰期释放压缩的空气推动汽轮机发电的一种技术。压缩空气储能安全系数高、寿命长，可以冷启动、黑启动，响应

速度快，主要用于峰谷调节、负荷平衡、频率调整、分布式储能和发电系统备用等。压缩空气储能技术具有如下特点：

(1) 节约燃料，减少温室气体排放。压缩空气储能常用于调峰用燃气轮机发电厂，对于同样的电力输出，采用压缩空气储能的机组所消耗的燃气要比常规燃气轮机少 40%<sup>22</sup>。利用压缩储能技术建立压缩空气蓄能电站，替代传统的发电厂，可提高发电效率，实现削峰填谷的作用，大大减少温室气体的排放。

(2) 提高电力产能。利用燃煤电站的低谷电能或风电站的富余电力用于压缩空气操作大大降低成本。涡轮机组由于脱离了压缩操作的负荷使得电力的产能提高 2.5 倍，这种效应通过提高压缩空气的压力可进一步加强<sup>23</sup>。

(3) 消除风力发电的间断性、不稳定性问题。压缩空气技术，能够将风能以一种可以控制的能量存储，在此基础上，将其转化为电能，有利于消除能量转换环节间的相互影响，提高能量转换效率。

#### 2.4.4 超级电容器储能技术

超导储能技术是利用超导线圈直接储存电磁能，需要时再将电磁能返回电网或其他负载的一种电力设施，可以促进清洁能源的高效利用，推动新能源产业的快速发展。高温超导和电力电子技术的发展促进了超导储能装置在电力系统中的应用。在分布式发电系统中，超导储能常用于孤岛型的风力发电系统和光伏电池发电系统，随着风力发

<sup>22</sup> 《储能技术——一种在未来电气工程学科中可以发挥重要作用的技术》，电气技术，2008(增刊)。

<sup>23</sup> 《储能技术——一种在未来电气工程学科中可以发挥重要作用的技术》，电气技术，2008(增刊)。

电向规模化、产业化发展及装置成本的降低，超导储能也会在并网型风电系统中大量应用。超导储能技术在电力系统中的应用包括：负荷均衡、动态稳定、暂态稳定、电压稳定、频率调整、输电能力提高以及电能质量改善等。超导储能与其它储能技术相比具有如下特点：

(1) 响应速度快 (ms 级)，转换效率高 ( $\geq 96\%$ )、比容量 ( $1\sim 10\text{Wh/kg}$ ) /比功率 ( $10^4\sim 10^5\text{kW/kg}$ ) 大。超导储能技术的发展主流是小型分布式储能系统，适用于电网的快速功率支撑、系统动态性能、可靠性和电能质量改善等场合<sup>24</sup>。

(2) 保障系统稳定和提高电能质量。超导储能技术可用于调节电力系统峰谷，降低甚至消除电网的低频功率振荡，改善电网的电压和频率特性，调节无功和功率因素，保障系统稳定和提高电能质量。

(3) 调整频率、补偿负荷。超导储能技术与包括风能等可再生能源及分布式发电领域结合，可提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动。超导储能技术可长期无损耗低储存能量，其转换效率超过 90%，超导储能技术的应用，可以促进清洁能源的高效利用，推动新能源产业的快速发展，改善能源构成比例，促进节能减排<sup>25</sup>。

### 2.4.3 超导储能技术

超级电容器是一种电化学元件，储能过程中不发生化学反应且是可逆的，可反复充放电，无环境污染。超级电容器储能技术适用于电动汽车储能，可降低电动汽车的使用成本，促进电动汽车产业的发展，

<sup>24</sup> 《储能技术在分布式发电中的应用》，安徽电力，2006.

<sup>25</sup> 《储能技术在分布式发电中的应用》，安徽电力，2006.

减少常规能源的消耗，降低汽车尾气的排放。具体而言，与传统的蓄电池相比超级电容器储能技术的特点可概括为：

(1) 功率密度高、充放电循环寿命长、充电时间短。超级电容器的内阻很小，而且在电极/溶液界面和电极材料本体内均能实现电荷的快速储存和释放；超级电容器在充放电过程中没有发生电化学反应，其循环寿命可达万次以上；超级电容器完全充电只需数分钟。

(2) 超级电容器在工作过程中没有运动部件，维护工作极少，相应的可靠性非常高。该特点使其在小型的分布式发电装置应用中有一定优势。在边远的缺电地区，作为太阳能和风能的储能系统，蓄电池有使用寿命短，有污染的弱点，超导储能和飞轮储能成本太高，超级电容器则成为较理想的储能装置。

(3) 基于双电层电容储能的静止同步补偿器 (STATCOM)，可用来改善分布式系统的电压质量，特别是在 300~500kW 功率等级，将逐渐替代传统的超导储能。经济方面，同等容量的双电层电容储能同超导储能装置费用相差无几，但双电层几乎不需运行费用，而超导储能则需相当的制冷费用<sup>26</sup>。

(4) 提高电力系统运行效率。当前，电力系统中出现无功功率不平衡引起的供电电压方面的问题，包括电压波动和闪变、电压波形畸变、三相不平衡等，以及电力系统故障、操作等引起的电压凹陷、电压凸起等问题。上述问题，在一定程度上，导致输配电线路损耗增加，造成发电能源浪费。利用超级储能技术，能够补偿电网无功功率，

---

<sup>26</sup> 《超级电容器储能技术及其应用》，水电能源科学，2006.

提供有功功率，以消除电压跌落、闪变、电压谐波、电压三相不平衡等电能质量问题，使负荷侧不受这些电压扰动的影响，提高电力系统运行效率。

## 第三章 电能消费终端低碳技术特点综述

### 3.1 智能用电技术特点综述<sup>27</sup>

智能用电技术涵盖了高速实时通信、智能电表、智能采集、双向交互和需方响应等多方面的技术,是计算机应用技术、现代通信技术、高级量测技术、控制理论和图形可视化等学科交叉的技术集群。

#### 3.3.1 高速通信技术

高速实时通信技术是支撑智能电网的关键技术,也是支撑智能用电系统的关键技术之一。其主要特征如下:

- 1) 骨干、大容量光纤通信网络到台区和到有条件的小区 and 居民家中,满足用电数据采集和交互信息传输。
- 2) 基于广域同步时钟(如 IEEE 1588) 对时功能,确保重要节点负荷、功率等采集量在同一时间断面上。
- 3) 抗干扰能力强的无线通信技术和无线组网技术,应用包括 Zigbee 在内的微功率无线通信方式。
- 4) 公网通信(包括 3G 在内的新一代公网通信方式),基于语音、数据、视频的传输。
- 5) 在条件不具备的地区,可考虑电力线载波作为补偿。
- 6) 信息安全加密。

#### 3.3.2 智能电表技术

---

<sup>27</sup> 《智能用电新技术》。杨永标等。农村电气化, 2009。

安装在用户侧智能电表是对传统电能表的全面技术变革，应满足自动抄表，自动测量管理的功能。其主要特征如下：

1) 智能电能表应满足分布式电源双向供电模式下，双向独立计量；

2) 具备动态浮动电价的快速响应，快速切换、电价实时结算等功能；

3) 具备用于存储双向计量电度独立的存储区间，可对月度电能数据，当日整点数据及有特定要求的数据进行快速冻结；

4) 用电异常事件记录功能；对双向的需量数据进行计算，最大需量数据的统计和保存；负荷曲线数据的保存和检索；

5) 具备抄收和存储智能燃气表，智能水表的功能，具备自动管理、自动抄收气表和水表的功能；具备对居民家居参数的采集，实现对智能家居电器的有序，合理化和最经济用电管理；

6) 就计量误差进行自我修复，自我矫正，确保计量精度在表计生命周期能满足计量精度要求；

7) 可对自身硬件运行状况进行自诊断，自评估和自修复。

### 3.3.3 智能采集技术

智能采集终端对大用户专变、公变和低压居民用户用电信息进行自动采集。实现用户侧电能量、负荷数据采集，用电设备数据采集及在线诊断，支持实时数据的远传。其主要特征如下：

1) 实时采集电力用户侧电能量信息，并计算出实时负荷、整点电量、月累计电量、已购电费（电量）、剩余电费（电量）等用电数

据以及计量工况。

2) 根据主站设置的超限定值，对采集的用电信息进行统计、分析，判断数据是否超限，并根据统计结果生成相应的事件记录。

3) 根据主站设置，终端定时冻结日、月、抄表日用户负荷数据，以及终端设备运行工况，生成用电负荷曲线。

4) 根据主站下发的控制定值，实时监测用户用电情况，自动执行本地功率闭环控制、本地电量闭环控制，并能够执行主站遥控、保电/剔除、催费告警、控制解除等控制命令，引导用户合理有序用电。

5) 进行变压器、开关、电源分配箱等设备数据的采集，进行在线设备故障诊断和分析，提高设备使用的安全性。

6) 采集更多的电网实时运行数据(电压、电流、功率等)，从而掌握更加详细的用户负荷情况，加强需求侧管理，为电网规划和扩容提供决策支持数据。

7) 采集终端间支持快速通信，可装置级在线分析用电异常情况。

8) 电能质量的实时监测和预警，必要时提供无功补偿和谐波治理方案。

9) 支持装置级的线损和变损分析，统计和曲线的存储。

10) 基于 IPV6 技术下的终端设备的管理，实现采集终端与主站、电能表及终端之间数据的无缝传输。

11) 实现用户定制模式下的个性化数据采集。

12) 能够实现厂矿、企业、家庭电器工作参数、环境参数等多种数据的定时采集和召唤采集。

13) 可进行用电效能分析，为客户提供经济、安全的电能。

### 3.3.4 交互终端技术

智能交互终端为电力企业和电力用户之间的交互提供了友好、可视的交互平台。是电力企业提供人性化管理，联接客户的桥梁。

1) 基于网络化、人机交互，融合业务与功能的原则，凭借用电信息采集系统的网络平台，直接向用户显示用电信息、用电方式、告警信息以及电价政策等相关内容。

2) 对于居民用户，将用电信息采集系统通信网络向用户家庭延伸，可在家中安装用电显示终端，终端采用 TFT 液晶屏显示，可以直接连接到家庭电气线路上，以采集器或者电能表为网关，通过电力载波通道，自动监测自家的电能表，提供实时用电信息，也可以接收用户用电信息采集系统下发的各类信息。

3) 用户还可以通过简单操作，主动查询历史用电记录、历史交费记录、历史数据统计图形等其他信息服务。

4) 居民及大专变用户可及时获得用电量、电价、预付电费、剩余电费等信息。

5) 供电局可根据剩余电量情况对居民发送停电通知、缴费通知以及电价政策宣传等。

6) 欠费、违约金提醒，家中购电，社区信息发布。

7) 查询功能，用户通过各类终端设备（手机、网络等）进行用电信息的查询。

8) 对用户用电设备的监测，及时发现客户受电装置隐患，以“隐

患整改通知书”等书面形式通知客户，履行告知义务，避免出现安全事故，减少企业不必要的经济损失。

9) 终端具备可视化功能，满足电力企业和电力用户之间的可视化交互沟通。

### 3.3.5 需方响应技术

需方响应技术通过电力用户接收电力企业发布用电信息，及时响应用电负荷变化的措施，以达到削峰填谷，减少负荷波动的目的。其主要特征如下：

1) 通过用户改变自己的用电方式主动参与市场竞争，获得相应的经济利益，而不像以前那样被动地按所定价格行事。

2) 电力企业基于负荷特征召唤用户接入或退出分布式电源，制定有客户参与需方响应的补偿结算机制。

3) 用户可得到连续即时的计量信息，负荷信息。用户可得到获得连续即时的电价信息。

4) 对参与市场的用户提供实时电价，并实现同实时电价相结合的自动负荷控制。

5) 编制和发布有序用电方案，远程监视电能质量与实施电压控制，快速的系统故障定位和响应，能量损耗的检测。

6) 为系统调度、规划和运行提供精确的系统负荷信息，在新一代的智能设备和高级服务之间实现信息共享。

## 3.2 电动汽车技术特点综述

### 3.2.1 纯电动汽车

早期的电动汽车,主要是应用电动机驱动装置和蓄电池组件替代了内燃机和燃油箱,而保留了内燃机车辆的其他组件(如图 3-1)。但诸如笨重的重量、较低的灵活性以及车辆性能下降等缺陷已导致这类型式电动汽车的逐渐消失。基于新颖的本体及其结构设计,现代电动汽车已确立其应有的地位。它满足了只有电动汽车才有的结构要求,并利用了电驱动的名副其实的灵活性。

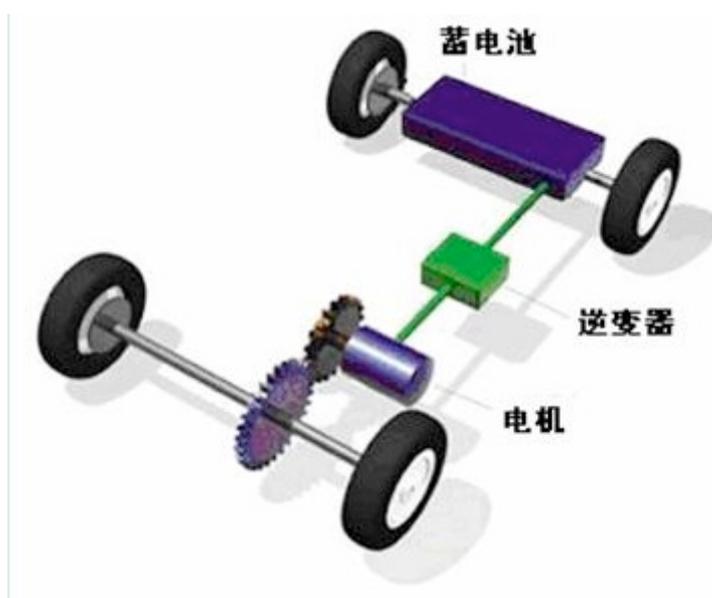


图 3-1 纯电动汽车原理图

现代电驱动系概念性地示于图 3-2 中。该电驱动系由三个主要的子系统组成:电动汽车由电力电子驱动系统、电源系统和辅助系统。电力电子驱动系统包括电子控制器、功率转换器、电动机、机械传动装置和车轮,其功用是将存储在蓄电池中的电能高效地转化为车轮的动能,并能够在汽车减速制动时,将车轮的动能转化为电能充入蓄电池。后一种功能称作再生制动。电源系统包括电源、能量管理系统

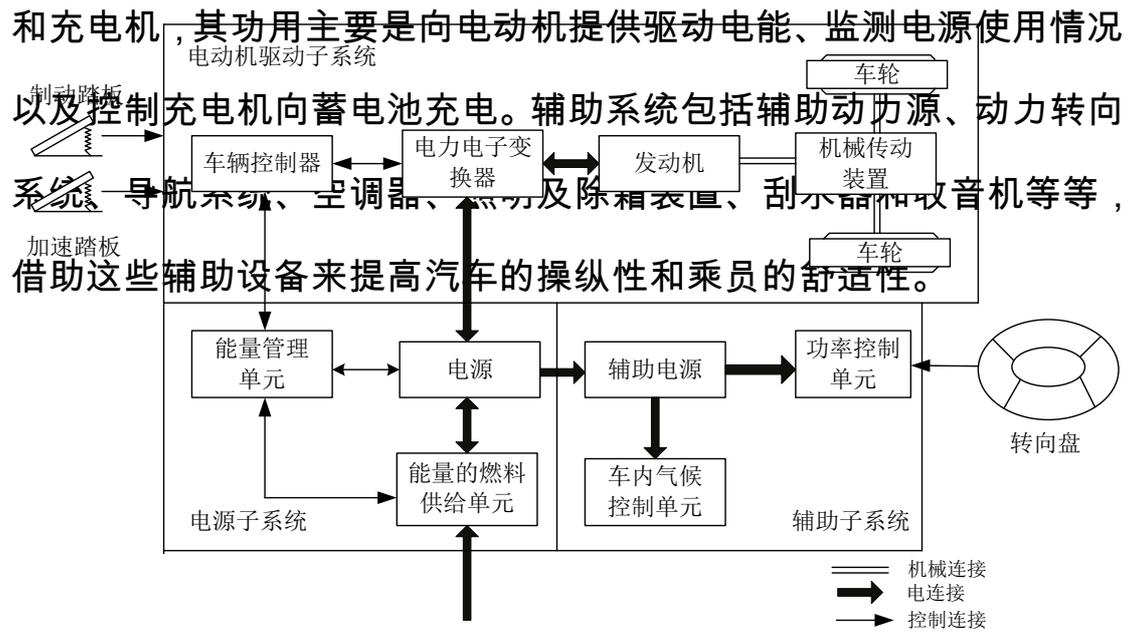


图 3-2 通用 EV 结构的概念性图示

同时，由于在电驱动特性和电源方面的特性，再加上能量的传输时通过柔性的电线进行而非通过刚性联轴器和转轴，因此电动汽车各个系统或各个部件的布置会有很大的灵活性。例如一辆电动机前置，前轮驱动的电动汽车，充电机经汽车前端的充电接口向置于汽车尾部的蓄电池充电，在汽车行驶时，蓄电池经控制器向电动机供电，来自加速踏板的信号输入控制器并通过控制器调节电动机输出的转矩或转速，电动机输出的转矩经汽车传动系统驱动车轮。

### (1) 电力电子驱动系统

电动汽车的电力驱动方式基本上可分为电动机中央驱动和电动

轮驱动两种。由电动机、固定速比减速器和差速器等构成的电动机中央驱动系统中，由于没有离合器和变速器，因此可以减少机械传动装置的体积和质量。另一种电动机中央驱动系统的布置形式，与前轮驱动、横向前置发动机的燃油汽车的布置形式相似，将电动机、固定速比减速器和差速器集成一体，两根半轴连接两个驱动车轮，这种布置形式在小型电动汽车上应用最普遍。

电动机和固定速比的行星齿轮减速器安装在车轮里面，没有传动轴和差速器，从而简化了传动系统。但是，电动轮驱动方式需要两个或四个电动机，其控制电路也比较复杂，这种驱动方式在重型电动汽车上有较广泛的应用。

电动机与驱动系统是电动汽车的关键部件，要使电动汽车有良好的使用性能，驱动电机应具有调速范围宽、转速高、启动转矩大、体积小、质量小、效率高且有动态制动强和能量回馈等特性。目前，电动汽车用电动机主要有**直流电动机 ( DCM )**、**感应电动机 ( IM )**、**永磁无刷电动机 ( PMBLM )**和**开关磁阻电动机 ( SRM )** 4类。

电动汽车的驱动电动机在 20 世纪 90 年代以前主要采用**直流电动机**。它具有起动力大、调速控制简单、技术成熟等优点。但是直流电动机的电枢电流由电刷和换向器引入，换向时产生电火花，换向器容易烧蚀，电刷容易磨损，需经常更换，维护工作量大。接触部分存在摩擦损失，不仅使电机效率降低，而且限制了电动机的工作转速。

**无换向器直流无刷电动机**，由电动机本体、转子转角传感器和

电子开关控制电路组成。其中电子开关控制电路起到了普通直流电动机中换向器的作用。直流无刷电动机既有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等诸多优点，又具备运行效率高、无励磁损耗、运行成本低和调速性能好等特点。因此，它在电动汽车上的应用与日俱增。例如，宝马公司生产的 BMW 电动汽车和东京电力公司开发的 IZA 电动汽车，均采用永磁直流无刷电动机作为电动轮。

**交流感应电动机**在电动汽车上广为应用，这是因为感应电动机采用变频调速时，可以取消机械变速器，实现无级变速，使传动效率大为提高。另外，感应电动机很容易实现正反转，再生制动能量的回收也更加简单。当采用鼠笼型转子时，感应电动机还具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、工作可靠、效率高和免维护等优点。

另一种用于电动汽车上的交流电动机是**交流同步电动机**。当以永磁材料替代同步电动机的励磁绕组时，则这种永磁同步电动机可以取消电刷和滑环，而且没有励磁绕组的铜损，它比感应电动机的效率还要高，体积还要小。□

**开关磁阻电动机**被公认是一种极有发展前途的电动汽车驱动电动机。它的定子和转子均由普通硅钢片叠压而成，转子上既无绕组，也无永磁体，只在定子上绕有集中绕组。开关磁阻电动机具有普通直流电动机和交流电动机所不能比拟的优点：①结构简单、坚固耐用、成本低，可在极高的转速下工作，能适应高温和强振动的工作环境；②起动转矩大，低速性能好；③调速范围广，控制灵活，易于实现各种特殊要求的转矩-转速特性；④在宽广的转速和功率范围内都有很

高的效率。

电动汽车用的**功率转换器**用作不同频率的 DC-DC 转换和 DC-AC 转换。DC-DC 转换器又称直流斩波器，用于直流电动机驱动系统。两象限直流斩波器能把蓄电池的直流电压转换为可变的直流电压，并能将再生制动能量进行反向转换。DC-AC 转换器通常称作**逆变器**，用于交流电动机驱动系统，它将蓄电池的直流电转换为频率和电压均可调的交流电。电动汽车一般只使用电压输入式逆变器，因其结构简单又能进行双向能量转换。

而随着电动机及驱动系统的发展，**控制系统**趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络、自适应控制、专家控制、遗传算法等非线性智能控制技术，都将各自或结合应用于电动汽车的电动机控制系统。

## (2) 电源系统 □

电池系统是电动汽车动力源泉，同时也是一致制约电动汽车发展的关键因素。目前用于电动汽车上的电源主要是蓄电池。蓄电池是能量存储装置，通过外界充电实现储能。蓄电池的主要性能指标有：①比能量—单位电池质量所能存储的电量 ( $W \cdot h/kg$ )，是评价电动汽车整车质量和续航里程的指标；②能量密度—单位电池体积所存储的电量 ( $W \cdot h/L$ )，它影响蓄电池的尺寸；③比功率—单位电池质量所能输出的功率 ( $W/kg$ )，是评价电动汽车加速性、爬坡能力及最高车速的指标；④功率密度—单位电池体积所能输出的功率 ( $W/L$ )；⑤循环寿命—蓄电池充、放电一次称为一个循环，循环寿命表示更换电池前

所能完成的循环数。循环寿命短，将增加电动汽车的维护费用。

到目前为止，广泛应用与电动汽车的蓄电池种类主要有：铅酸电池（VRLA）和碱性电池，碱性电池又包括镍镉（Ni-Cd）、镍氢（Ni-MH）、钠硫（Na/S）和锂离子（Li-ion）等多种电池。

**铅酸蓄电池**广泛地应用于电动汽车上，其主要原因是技术成熟，价格便宜，可靠性好，单体额定电压高（2.0V）。另外，输出电流大以及良好的高、低温性能等均适合电动汽车使用。但是铅酸蓄电池存在比能量低，充电时间长，使用寿命较短等缺点。

**镍镉（Ni-Cd）**电池比功率大，比能量高，可快速充电，使用寿命长，抗电流冲击能力强，工作温度范围宽（-40°C ~ 85°C），在较大的放电电流范围内电压变化较小等，成为电动汽车很具吸引力的电源。但是生产成本低（约为铅酸电池的2~4倍），单体额定电压只有1.2V，重金属镉具有致癌性等，限制了它在电动汽车上的广泛应用。

**镍氢（Ni-MH）**电池与Ni-Cd电池有许多相同的特性，但由于无镉，因此不存在重金属污染问题，被称为“绿色电池”。批量生产的成本约为铅酸电池的四倍。Ni-MH电池单体额定电压为1.2V，其负电极为经吸氢处理后的储氢合金，正电极为氢氧化镍，电解液为KOH溶液。

**钠硫（Na-S）**电池有很高的比功率和比能量，但其工作温度高，再加上钠的活化性和腐蚀性，因此在结构设计上必须保证坚固和安全。Na-S电池以熔融态钠为负电极，熔融态硫为正电极，陶瓷 $\beta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作电解质，并作为离子传导媒介和熔融态电极的隔离物，以避免电池

自放电。

锂离子 ( Li-Ion ) 电池自 20 世纪 90 年代初问世以来发展很快。虽然目前锂离子电池仍处于开发阶段 ,但在 Nissan FEV、Nissan Prairie Joy 和 Altra 等电动汽车上都采用锂离子电池。它具有单体额定电压高 ,比能量和能量密度高和使用寿命长等优点 ,缺点是自放电率高。

### 3.2.2 混合动力电动汽车

混合动力电动汽车通常是指车上装有两个以上动力源 ,由电机驱动 ,符合汽车道路交通、安全法规的汽车 ,车载动力源有多种 :蓄电池、燃料电池、太阳能电池、内燃机车的发电机组 ,当前复合动力电动汽车一般是指内燃机车发电机 ,再加上蓄电池的电动汽车。图 3-3 展示了混合动力电驱动系的概念 ,以及可能的各种动力流的通路。

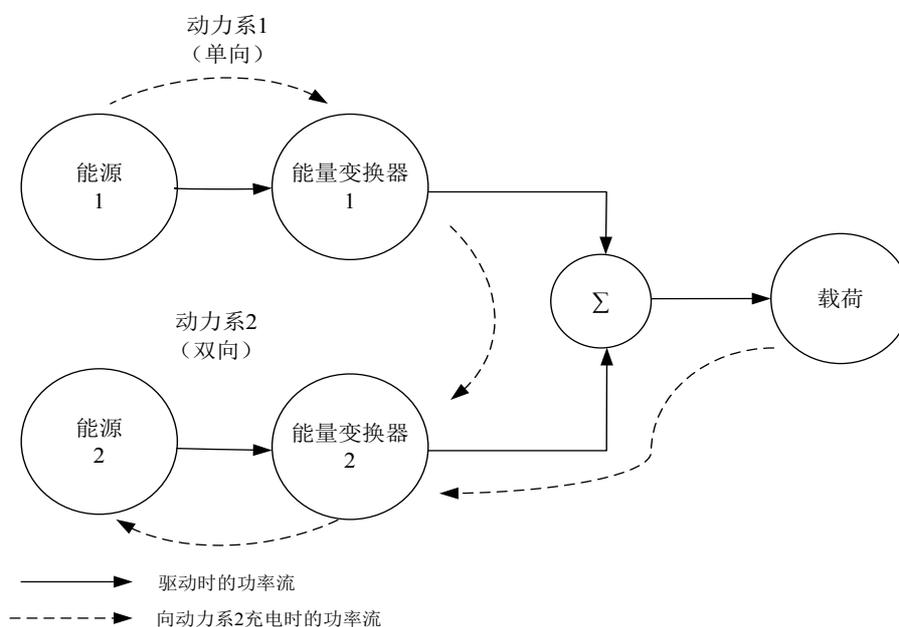


图 3-3 混合动力电驱动系的概念图示

混合动力电驱动系通过被采用的动力系向载荷供应动力。许多鱼载荷需求相配合的由两动力系运作的有效模式如下 :

- 1) 动力系 1 单独向载荷提供动力；
- 2) 动力系 2 单独向载荷提供动力；
- 3) 动力系 1 和动力系 2 两者都向载荷提供动力；
- 4) 动力系 2 有载荷获得功率 ( 再生制动 )；
- 5) 动力系 2 从动力系 1 中获得功率；
- 6) 动力系 2 从动力系 1 和载荷中同时获得功率；
- 7) 动力系 2 同时向载荷和动力系 2 提供动力；
- 8) 动力系 1 向动力系 2 提供功率，同时动力系 2 向载荷提供动力；
- 9) 动力系 1 向载荷提供动力，同时载荷向动力系 2 提供功率。

在由汽油 ( 柴油 )—内燃机 ( 动力系 1 ) 和蓄电池—电动机 ( 动力系 2 ) 混合集成的情况下，模式 1 是单发动机驱动模式。这一模式可应用于蓄电池组近乎完全放电而发动机没有剩余功率给蓄电池组充电的情况；或者可应用于蓄电池组已完全充电而发动机能供应足够的动力去满足车辆动力需求的情况。模式 2 是纯粹的电驱动模式，其中发动机是关闭的。这一模式可应用于发动机不能有效地运行的场合，例如极低速状态，或在严禁排放的区域内行驶的情况。模式 3 是混合牵引模式，可应用于需要大量动力供给的情况，例如当急剧加速或爬坡时。模式 4 是再生制动模式，由此借助于电动机运行在发电机状态，车辆的动能或位能得以回收。回收的能量储存于蓄电池组，并在以后重复利用。模式 5 是发动机向蓄电池组充电的模式，这是车辆处于停止、惯性滑行或小坡度下坡运行状态，没有动力应用于载荷或



功率变化器中两个电功率被相加在一起。该功率变换器起电功率耦合器的作用，控制从蓄电池组和发电机到电动机的功率流；或反向控制从电动机到蓄电池组的功率流。燃油箱、内燃机和发动机组成基本能源，而蓄电池组则起能源缓冲器的作用。

图 3-4 中 b) 是传统意义上成为**并联式混合动力电动汽车 ( Parallel Hybrid Electric Vehicle , PHEV )**的构造。这一构造的关键特征是在机械耦合器中两个机械功率被相加在一起。内燃机是基本能源设备，而蓄电池组和电动机驱动装置则组成能量缓冲器。此时，功率流仅受动力装置—发动机和电动机所控制。

图 3-4 中 c) 是传统意义上称为**混联式混合动力电动汽车 ( Series-parallel Hybrid Electric Vehicle , SPHEV )**的构造。这一构造的明显特征是使用两个功率耦合器—机械的和电气的耦合器。实际上，这一构造是串联式和并联式结构的组合，它具有两者的主要特征，并且相比于串联式或并联式的单一结构，有用更多的运行模式。从另一方面来说，它的结构相对更为复杂，成本较高。

图 3-4 中 d) 是**复合式混合动力汽车 ( Complex Hybrid Electric Vehicle , CHEV )**的构造，它具有与混联式相似的结构。唯一的差异在于电耦合功能由功率转换器转移到蓄电池组，并且在发动机/发电机组和蓄电池组之间加入了一个功率变换器。

由此看出，对于混联式和复合式混合动力电动汽车无非是传统的串联式与并联式混合动力电动汽车的延伸与扩展，因此下文中着重对串联式和并联式两类混合动力电动汽车进行阐述。

### (1) 串联式混合动力汽车 (电耦合)

串联式混合动力电动汽车是一个由两个电能源向单个电动力装置 (电动机) 供电, 以推动车辆的驱动系统。串联式混合动力电动汽车的一般组成如图 3-5 所示。其中, 单向能源为燃油箱, 而单向的能量变换器 (动力装置) 为发动机和发电机的组合。发电机的输出通过可控的电子变流器 (整流器) 连接到电力 (DC) 总线。双向能源为蓄电池组单元, 并通过可控的双向电力电子变换器 (DC-DC 变换器) 连接到电力 (DC) 总线。电力总线也连接到电动机的控制器, 牵引电动机将被控制为或是电动机或是发电机, 并以正向或反向运转。该电力驱动系统需要一个蓄电池的充电器, 以通过墙插座由电网向蓄电池组充电。串联式混合动力电动汽车的驱动系统原先来自于电动汽车, 当时受制于蓄电池组的低能量密度, 为拖延电动汽车的行驶里程, 在电动汽车上添加了辅助的发动机—发电机组。

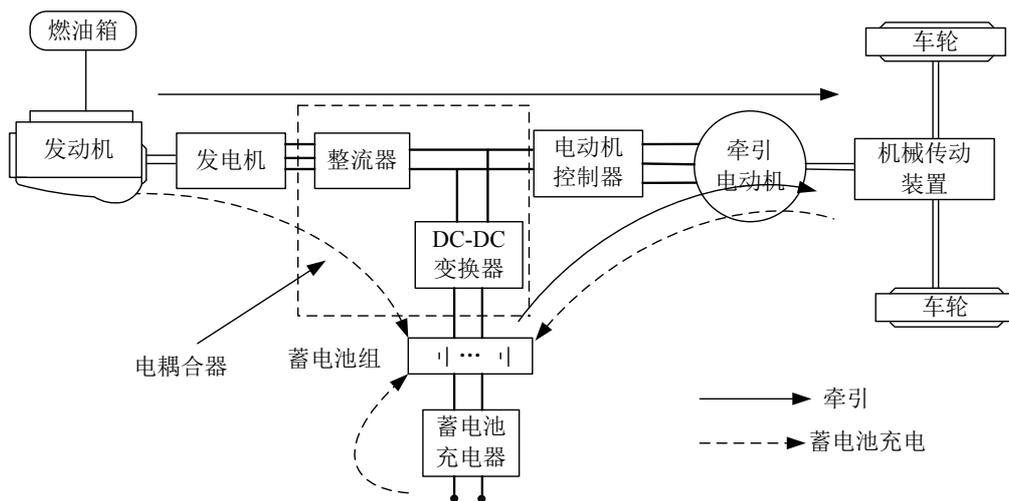


图 3-5 串联式混合动力电动汽车的组成结构

根据驾驶员通过加速和制动踏板给出运行指令, 以及来自组成部分 (辅助系统) 的其他反馈信息, 电驱动系统通过车辆控制器来控制

车辆的运行及功率流。车辆控制器通过内燃机的节气门、电耦合器(可控整流器和 DC-DC 变换器)以及牵引电动机,按以下的某一种与运行模式控制内燃机产生所要求的驱动转矩和可再生制动转矩:

- 1) 纯粹的电牵引模式:发动机关闭,车辆仅由蓄电池组供电、驱动。
- 2) 纯粹的发动机牵引模式:车辆牵引功率仅源于发动机—发电机组,而蓄电池组既不供电也不从驱动系统中吸收任何功率。电设备组用作从发动机到驱动轮的电传动。
- 3) 混合牵引模式:牵引动力由发动机—发电机组和蓄电池组两者在电耦合器中交汇,共同提供。
- 4) 发动机牵引和蓄电池组充电模式:发动机—发电机组同时供给向蓄电池组冲带你和驱动车辆所需功率。该发动机—发电机组功率在电耦合器中实施分解。
- 5) 再生制动模式:发动机—发电机组关闭,而牵引电动机运行如同一台发电机,由车辆的动能或位能富裕动力。他所产生的电功率用于向蓄电池组充电以及重复利用于后期的汽车驱动动力。
- 6) 蓄电池组充电模式:牵引电动机不接受功率,发动机—发电机组尽享蓄电池组充电。
- 7) 混合蓄电池充电模式:发动机—发电机组和运行在制动的发电机状态下的牵引电动机两者都向蓄电池组充电。

对于串联式混合动力电动汽车而言,发动机输出的机械能首先通过发电机转化为电能,转化后的电能一部分用来给蓄电池充电,另一

部分经由电动机和传动装置驱动车轮。尽管串联式混合动力的结构简单，但它需要三个驱动装置：发动机、发电机和电动机。因而，这种混合方式的车辆的效率通常较低。如果串联式混合动力车设计时考虑到要爬长坡，那么提供最大功率的驱动装置的尺寸就会较大；如果用作短途运行，如当通勤车或购物车，相应的内燃机/发电机装置应采用较低功率。

## (2) 并联式混合动力电动汽车 (机械耦合)

如同传统内燃机车一样，并联式混合动力电动汽车是一个由发动机直接向驱动轮供给机械动力的驱动系统，它由机械上与传动线相配合的电动机予以辅助，并通过机械联轴器两者共同配合提供动力，如图 3-6 所示。这一结构的特性能是利用机械联轴器将发动机和电动机提供的两个机械功率组合在了一起。

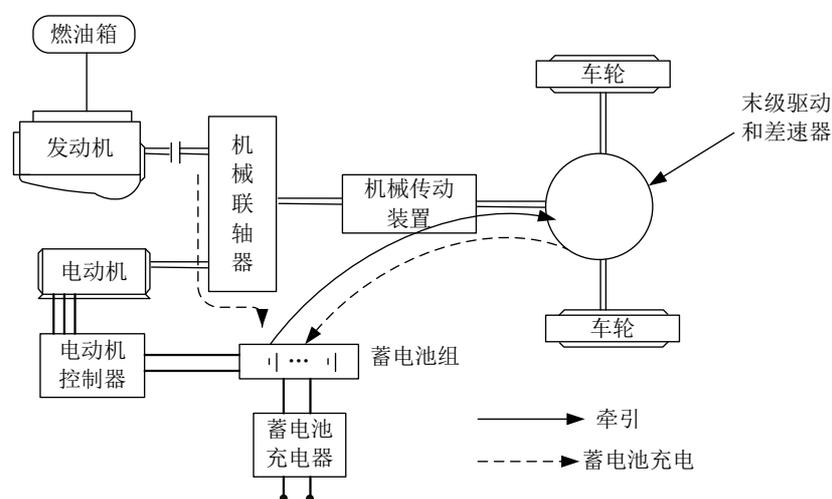


图 3-6 并联式混合动力电动汽车的结构

在串联式混合动力电动汽车中，已经阐述的多有可能运行模式依然有效。并联式混合动力电动汽车的主要优点如下：①发动机和电动机都直接向驱动轮提供转矩，不存在能量形式的转换，因而能量损失

较小；②由于不需要附加的发电机，以及牵引电动机相比于串联式电驱动系统中的牵引电动机要小，因此其结构紧凑。并联式混合动力电动汽车的主要缺点是，发动机和驱动轮之间存在着机械联轴器，由此发动机的运行点就不可能固定在一个狭小的转速和转矩区域内。另外的缺点就是其结构和控制较为复杂。

通常，机械耦合包括转矩耦合和转速耦合。在转矩耦合中，机械联轴器将发动机和电动机的转矩相加在一起，并将总转矩传递给驱动轮。发动机和电动机的转矩可以分别独立控制。但是，由于功率守恒的约束条件，发动机、电动机的转速以及车速是以一个确定的关系相互耦合在一起的，不可能对控制。类似地，在转速耦合中，发动机和电动机的转速可相加在一起，且所有的转矩被耦合在一起，并不能独立控制。

对于混合动力电动汽车的分类，还可以按照两种不同的能量的搭配比例不同的，将其分为四种类型，即：

(1) **微混合**，也称为“起 - 停混合”(Micro hybrids)：在微混合动力系统中，电机仅作为内燃机的启动机/发电机使用。现在通常使用的启动机/发电机系统是指在传统内燃机的启动电机(一般为12V)上加装了皮带驱动启动电机(也就是常说的 Belt-alternator Starter Generator，简称 BSG 系统)。该电机为发电启动(Stop-Start)一体式电动机，用来控制发动机的启动和停止，从而取消发动机的怠速，降低了油耗和排放。从严格意义上来讲，微混合动力系统的汽车不属于真正的混合动力汽车，因为它的电机并没有为汽车行驶提供持续的动

力。

( 2 ) 轻混合 , 也称辅助驱动混合 ( Mild hybrids ): 与微混合相比 , 驱动车辆的两种动力源中 , 依靠电池-电机功率的比例增大 , 内燃机功率的比例相对减少。通常 , 此种混合动力系统采用集成启动电机 ( 也就是常说的 Integrated Starter Generator , 简称 ISG 系统 ) , 车辆还是以发动机为主要动力来源 , 助动电机被安装在发动机和变速器之间 , 作为辅助动力来源与主要动力相联。当行驶中需要更大驱动力时 , 它被用作电动机。当需要重新启动熄火的发动机时 , 它被用作为一个起动机。其能够实现 : 在减速和制动工况下 , 对部分能量进行吸收 ; 在行驶过程中 , 发动机等速运转 , 发动机产生的能量可以在车轮的驱动需求和发电机的充电需求之间进行调节。

( 3 ) 全混合 ( Full hybrids ): 全混合动力系统是指既可以使用汽油引擎或电动机单独驱动车辆也可以同时使用两种动力的汽车。它们普遍采用大容量电池以供给电动机做纯电动模式运行 , 同时还具有动力切换装置用以发动机、电动机各自动力的耦合和分离。在起步、倒车、缓加速 ( 如频繁起步-停车 )、低速行驶等情况下 , 车辆可以纯电动模式行驶 ; 急加速时 , 电机和内燃机一起驱动车辆 , 并具有制动能量回收的能力。与轻混合系统相比 , 驱动车辆的两种动力源中 , 依靠电池-电机功率的比例更大 , 内燃机功率的比例更小。

( 4 ) 插电式混合 ( Plug - in hybrids ): 插电式混合动力系统通过接入家用电源为系统中配备的充电电池充电 , 充电后可仅凭充电电池作为电动汽车行驶。另外 , 在充电电池的剩余电量用完后 , 并不

是切换至发动机行驶模式，而是通过发动机旋转发电机，利用由此产生的电力为蓄电池充电，继续用电动机行驶，从而形成了串联方式的插电式混合动力车。这种混合动力汽车比全混合动力汽车有较长纯电动行驶里程。该系统电机功率比例与纯电动情况基本相同（或稍小），内燃机功率比例与全混合系统基本相同，电池容量一般比全混合系统的大，比纯电动车辆的小。

### 3.2.3 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车实质上是电动汽车的一种，在车身、动力传动系统、控制系统等方面，燃料电池电动汽车与普通电动汽车基本相同，主要区别在于动力电池的工作原理不同。燃料电池电动汽车主要由作为电源的燃料电池系统、峰值电源（PPS）、电动机驱动装置（电动机及其控制器）、车辆控制器和燃料电池系统与峰值电源之间的电子接口设备所组成，基本构造如图 3-7 所示。

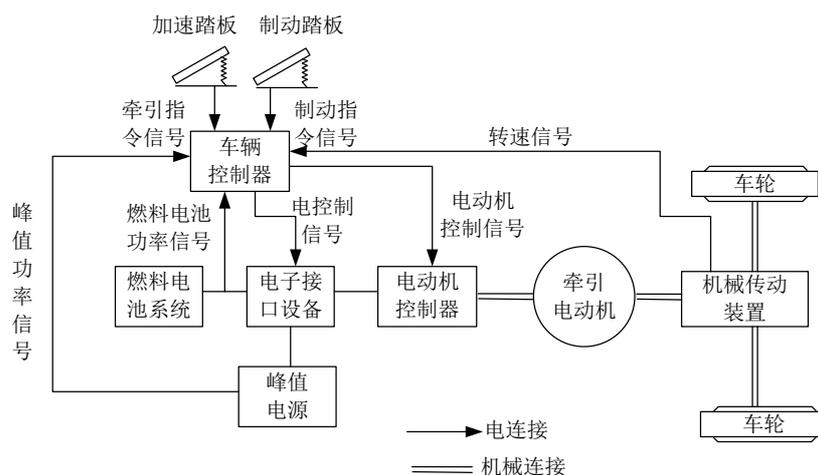


图 3-7 典型燃料电池电动汽车的结构

燃料电池（Fuel Cell）是一种把氢在氧化时的化学能直接转换为电能的发电装置，能量的转换不受卡诺循环规律的限制，热效率可达

到 70%~80%。燃料电池在运行过程中,不需要复杂的机械传动装置,不需要润滑剂,没有振动与噪声,燃料电池向驱动电动机提供电源来驱动 FCEV 行驶。在 FCEV 上主要采用的是质子交换膜燃料电池组(堆) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)。质子交换膜燃料电池 PEMFC 又名固体高聚合物电解质燃料电池,PEMFC 用可传导质子的聚合膜作为电解质,这种聚合膜具有选择透过 H<sup>+</sup> 离子的功能,是 PEMFC 的关键技术。PEMFC 的能量转换效率理论上可达到 80%,并且具有比功率大、体积小、启动快、能耗少、寿命长、工作温度低等特点,现在各国研发的 PEMFC 实际能量转换效率已达到 50%~60%,体积和质量较小,有利于在电动车辆上布置。

燃料电池是由负极(燃料极)、正极(氧化极)、和正负极之间的电解质共同组成,根据不同种类的燃料电池采用了不同的电解质,有酸性、碱性、熔融盐类或固体电解质。在燃料电池负极一侧输入氢气,在燃料电池正极一侧输入空气或氧气,氢气与氧化剂经催化剂的作用,在电化学反应过程中转化为电能和生成水 H<sub>2</sub>O,因此,不会排放氮氧化物 NO<sub>x</sub> 和碳氢化合物 HC 等对大气环境造成污染的气体。

### (1) PEMFC 的工作原理

PEMFC 的工作原理如图 3-8 所示。

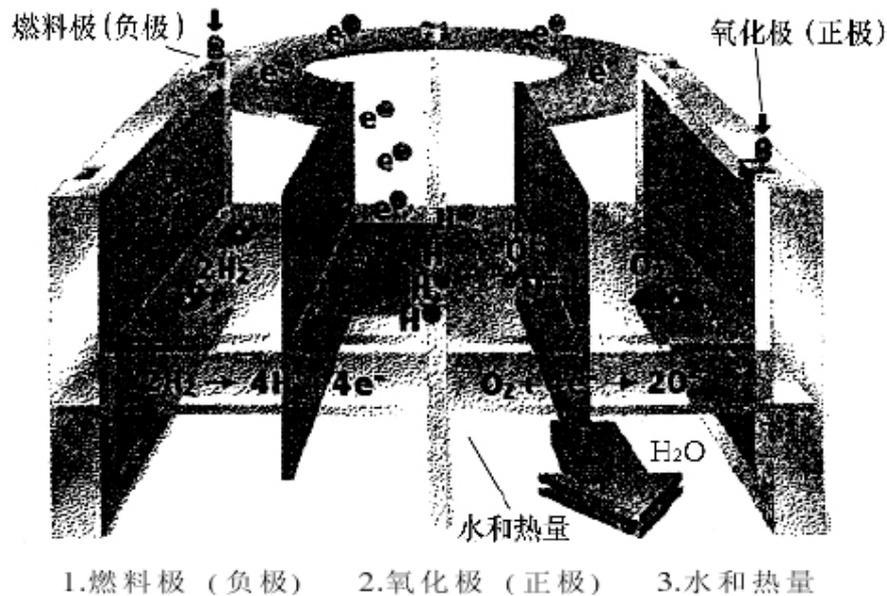


图 3-8 质子交换膜燃料电池的工作原理

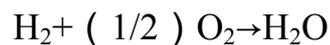
PEMFC 的负极 ( 燃料极 ) 上产生的化学反应方程式如下 :



PEMFC 的正极 ( 氧化极 ) 上产生的化学反应方程式如下 :



PEMFC 总的化学反应如下 :



PEMFC 中氢离子  $\text{H}^+$  从负极以水合物作为载体向正极移动。因此，在 PEMFC 的正负极间，必须保持有 53kPa ( 400mmHg ) 的压力的水气，并在工作过程中不断地补充水分，使得燃料气体流和氧化剂 ( 空气等 ) 气体流被湿润，保持一定的“保湿性”。在氢离子  $\text{H}^+$  流过质子交换膜时，将水分附着在质子交换膜上，保持质子交换膜处于湿润状态，来防止电极处质子交换膜脱水，质子交换膜脱水时会使得燃料电池的内电阻大幅度上升。

## ( 2 ) 单体 PEMFC 的构造

图 3-9 为单体 PEMFC 的构造示意图。单体 PEMFC 关键部件包括：负极（燃料极）、正极（氧化极）、质子交换膜和催化剂等。它们的结构形式和理化特性是决定 PEMFC 性能的内在因素。

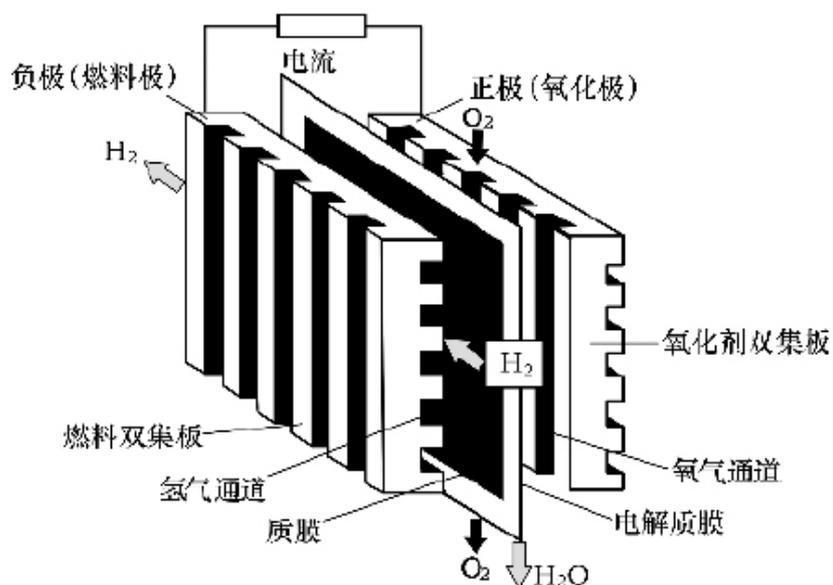


图 3-9 单体 PEMFC 的基本结构

### 1) 膜电极

正、负电极通常称为膜电极 MEA ( Membrane Electrode Assembly )。膜电极中包括正极、负极、质子交换膜和催化剂。正、负极是以多孔碳或石墨为载体，在电极内浸入氟磺酸并与质子交换膜压合，在负极和正极之间为催化剂和电解质层，它们共同组成单体电池。

### 2) 质子交换膜

质子交换膜 IEM ( Ion Echange Membrane ) 是 PEMFC 的核心。质子交换膜有酚醛树脂磺酸型膜、聚苯乙烯磺酸型膜、聚三氟乙烯磺酸型膜、部分氟化质子交换膜、全氟磺酸质子交换膜和非氟化质子交换膜等。全氟磺酸质子交换膜兼有电解质、电极活性物质的基底和能

够选择透过  $H^+$  离子的功能，它只允许  $H^+$  离子透过，但不允许其他离子和  $H_2$  氢分子透过，而普通多孔性的电解质膜不具备这些功能。

### 3) 催化剂

PEMFC 需要用铂等贵金属作为催化剂，在催化剂的催化作用下，才能促成氢离子  $H^+$  从负极向正极移动，并与  $O_2$  发生化学反应生成电能和水。如果燃料气体中含有  $CO$ ， $CO$  会优先附着在铂  $Pt$  的表面上，阻碍了氢离子  $H^+$  与铂表面相接触，使铂出现中毒现象，降低了 PEMFC 的性能，甚至使得 PEMFC 失效。 $CO$  的吸附作用与燃料电池的温度成反比，温度愈低， $CO$  的吸附作用愈强。因此，在燃料气体中必须严格控制  $CO$  的含量，用增加燃料气体中的  $H_2$  的方法，使  $CO$  的值控制在允许的范围以内。甲醇经过改质后所获得的干氢气中含有  $0.5\% \sim 1.0\%$  的  $CO$ ，对燃料电池带来不利的影响。因此，在甲醇改质装置的系统中，必须设置  $H_2$  的净化处理装置，通过净化器使  $H_2$  中  $50\%$  以上的  $CO$  被氧化成二氧化碳  $CO_2$ 。并控制  $H_2$  中的  $CO$  的含量不超过  $10 \times 10^{-6}$ ，才能将改质后产生的  $H_2$  输送到 PEMFC 的氢电极中去。催化剂的关键技术在于减少催化剂中铂  $Pt$  的用量。

### 4) 双极性集流板

在正、负膜电极的两侧装有双极性集流板，集流板的材料有石墨板、表面改性的金属集流板和碳-聚合物复合材料板等。在正集流板面向膜电极的一面，刻有用于输送氧气  $O_2$  的凹槽，通过凹槽将  $O_2$  扩散到整个正极中，在负膜电极集流板面向膜电极的一面，刻有用于输送氢气  $H_2$  的凹槽，通过凹槽将  $H_2$  扩散到整个负极中。负电极集流

板中的氢  $H_2$  在催化剂的作用下转化为电子  $e$  和氢离子  $H^+$ ，氢离子  $H^+$  通过质子交换膜到达正极，与正电极集流板中的氧  $O_2$  发生氧化作用后转化为水。在正、负膜电极集流板的背面刻有输送冷却水的凹槽，冷却水在凹槽中流动将热量导出。双极性集流板对燃料电池气体均匀分布程度、水和热量导出的效率、导电性能、以及燃料电池的密封性等都有重要作用。

### (3) PEMFC 电池组 (堆) 的构造

单体 PEMFC 的电压一般在 1V 左右，需要用多个单体 PEMFC 串联成实用的 PEMFC 电池组 (堆)，才能获得 FCEV 驱动电动机所需要的工作电压。用端板将不同个数单体 PEMFC 紧密地装配到一起组成不同规格 (电压和容量) 的 PEMFC 组 (图 3-10)。在模压成整体的 PEMFC 组中，各单体电池之间的密封性要求很高，密封不良会因为氢气泄漏而降低氢气的利用率，使 PEMFC 的效率降低。

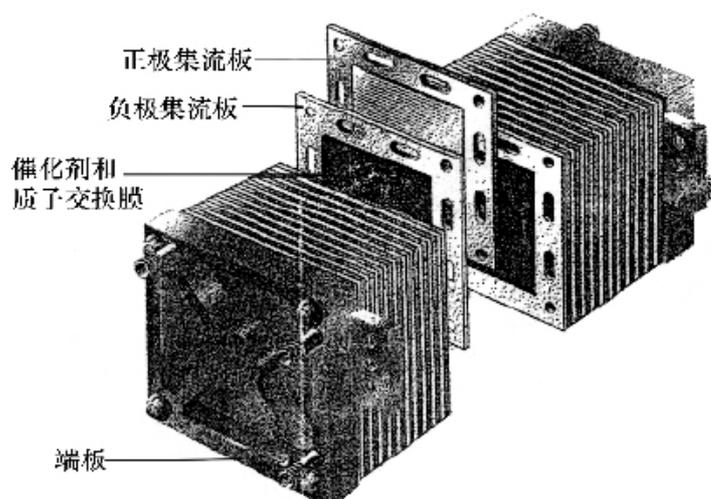


图 3-10 燃料电池组 (堆) 结构

### (4) PEMFC 的特点

1) PEMFC 的能量密度大，比能量可达到 200Wh/kg 左右。FCEV

要求采用氢气作为燃料电池的质量比功率不小于 150W/kg ,采用甲醇作为燃料电池的质量比功率不小于 100W/kg。

2 ) PEMFC 一般在常温条件下运行 , 当温度在 80°C 左右易于快速启动。减少了温度对燃料电池材料的影响 , 提高了电池性能 , 延长了电池的寿命。

3 ) PEMFC 可以连续不断地工作 , 适合部分负荷特性的要求 , 这些优越的性能为 PEMFC 在 FCEV 上使用带来了很大便利。

4 ) PEMFC 的单体电池的电压高 , 是电动汽车较理想的一种电源 , 有利于减轻电动车辆的整备质量和降低电动车辆使用费用。