



自动化工程学院
School of Automation Engineering



电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

第一章 新能源发电概述



1 新能源发电概述

- ◆ **能源**是可以直接或通过转换提供给人類所需的有用能的资源。
- ◆ 能源可分为**传统能源**与**可再生能源**。传统能源主要包括煤炭、石油、天然气等；新能源主要包括太阳能、风能、海洋能等。

能源重要性

- 关乎国家安危
- 经济发展原动力
- 影响世界格局

传统能源发电面临的问题

- 温室气体
- 资源匮乏
- 颗粒型污染物

- ◆ 研发和应用**新能源技术**、建立高效能源利用体系已刻不容缓。



1 新能源发电概述

- ◆ “**新能源**” 是1978年12月20日联合国第33届大会第148号决议首次使用的一个专业化名称。
- ◆ 1981年8月联合国召开的新能源和可再生能源会议上正式界定了其**基本的含义**，即：**新能源**是以新技术和新材料为基础，使传统的可再生能源得到现代化的开发利用，用取之不尽、用之不竭的可再生能源来不断取代资源有限、对环境有污染的化石能源。
- ◆ **新能源的优点：**
 - 资源丰富，普遍具备**可再生特性**，可供人类永续利用
 - 不含碳或含碳量很少，**对环境影响小**
 - 分布**广**，有利于小规模分散利用



1 新能源发电概述

“新” 与传统的 “旧” 能源利用方式和能源系统相对立。

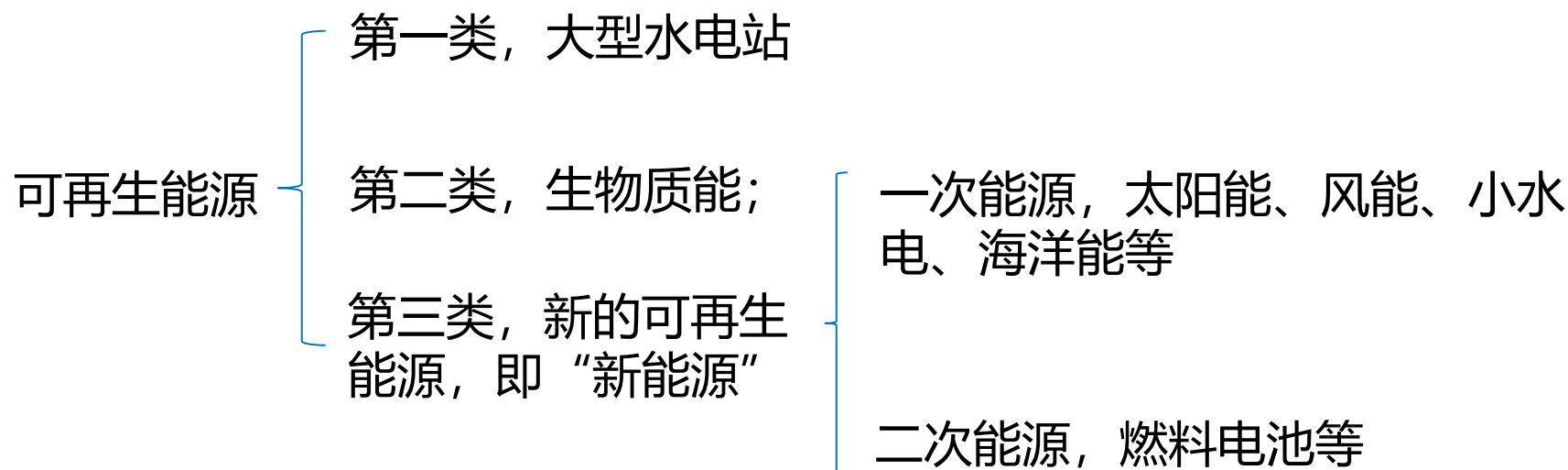
新能源的 “新”：

- 形式新颖
- 更在于它在今天对于环境和资源利用的新意义

旧能源的 “旧”：

- 只强调转换效率，不注重能源需求侧的综合利用效率
- 只强调经济，不注重资源、环境的代价

按照国际能源署（IEA）的推荐，可再生能源分为三类：





1 新能源发电概述

◆ **太阳能**：指太阳所发出的能量，一般以阳光照射到地面的辐射总量来计量。利用形式包括光-热转换、光-电转换和光化学转换，以**光-电转换为主要利用形式**。

◆ **特点**：

- ✓ 太阳能能量巨大，具有典型的可再生性，并决定了几乎所有可再生能源的可再生性。
- ✓ 太阳辐射能巨大，但其能量密度较低，分布不均匀，并具有典型的间隙性和随机性。

◆ **风能**：风能是由于太阳辐射造成地球表面温度不均匀引起各地温度和气压的不同，导致空气运动而产生的能量。

◆ **特点**：

- ✓ 总量大、分布广、无污染。
- ✓ 在利用上也存在能量密度低、随机性大、难存储等问题。



1 新能源发电概述

◆ **小水电**：小水电是指装置容量较小的水力发电系统。

◆ **特点**：

- ✓ 相较于大水电淹没土地少。
- ✓ 生态环境影响小。
- ✓ 造价低、工期短。
- ✓ 发电季节波动性强、负载适应性差。

◆ **海洋能**：海洋能是指蕴藏在大海中的能源，主要产生于太阳的辐射以及其他星球的引力。海洋能包括**潮汐能**、**波浪能**、**海流能**、海水**温差能**和海水**盐差能**等不同的能源形态。

◆ **特点**：

- ✓ 在海洋总体水体中蕴藏量巨大。
- ✓ 单体能量较小，有稳定和不稳定海洋能之分。



1 新能源发电概述

- ◆ **燃料电池**：燃料电池是一种主要使用**氢气**为燃料进行化学反应产生电力的装置，是继水力、火力、原子能发电方式之后的“第四种发电方式”，燃料电池发电属于二次能源。
- ◆ **特点**：
 - ✓ 节能、转换效率高。
 - ✓ 对人体无化学危害、对环境无污染、几乎零排放。
 - ✓ 燃料种类单一、密封要求高、比功率低、造价高等。
- ◆ **新能源发电与电力电子技术**：
 - **新能源发电离不开电力电子技术**。无论是独立发电还是并网发电，无论是大规模发电还是分布式发生，都需要利用电力电子变换器进行**电能变换**和**控制**。电力电子技术是实现新能源安全、稳定、高效、灵活和经济的高性能发电的**技术保障**。



1 新能源发电概述

1.1

光伏发电

1.2

风力发电

1.3

小水利发电

1.4

海洋能发电

1.5

燃料电池发电



1.1光伏发电

1.1.1

概述

1.1.2

光伏发电的原理及分类

1.1光伏发电

1.1.1 概述



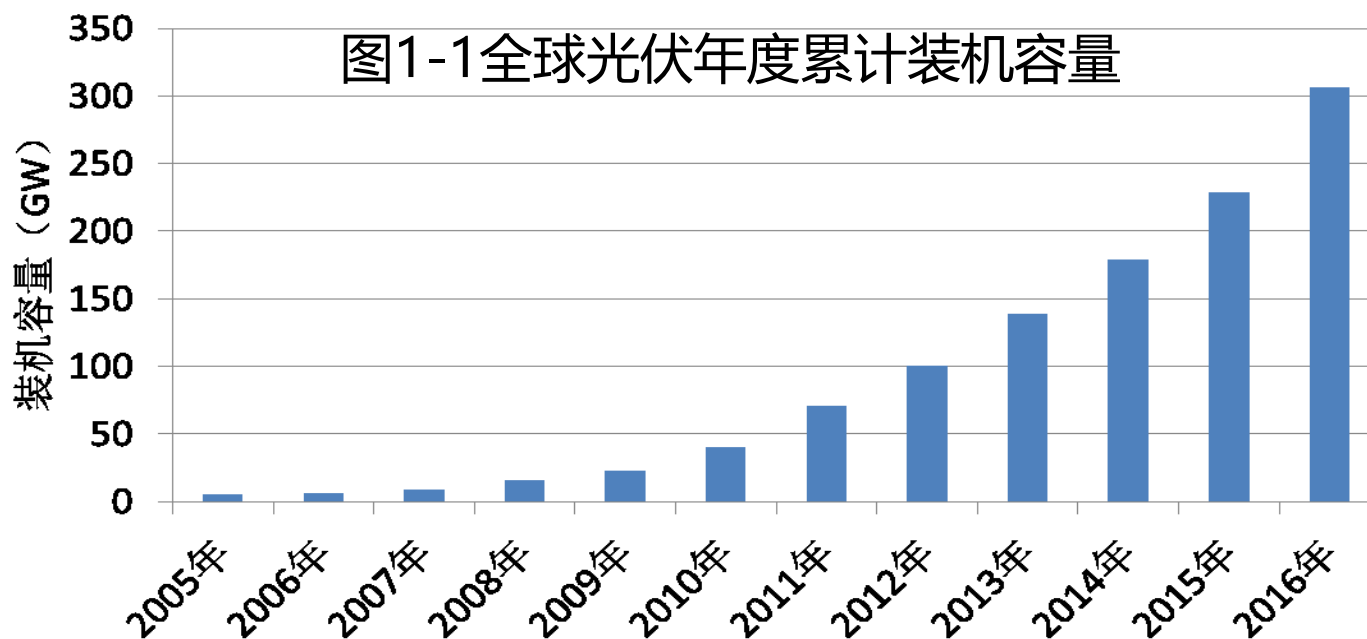
光伏发电

- ◆ 光伏发电是利用**太阳电池**将**光**能直接转变为**电**能的发电方式。
- ◆ 光伏发电是大规模利用太阳能的主要形式和发展方向，是未来世界上发展最快、最有发展前途的新能源技术之一。



1.1光伏发电

1.1.1 概述



- 2016年全球光伏新增装机76.6GW，比2015年增长大约52.9%。
- 2016年中国光伏新增装机为34.54GW，超过了分列2~5位的美国（14.7GW）、日本（8.6GW）、印度（4GW）、英国（2GW）新增装机容量的总和，显示出全球特别是中国太阳能光伏强劲的发展势头。



1.1光伏发电

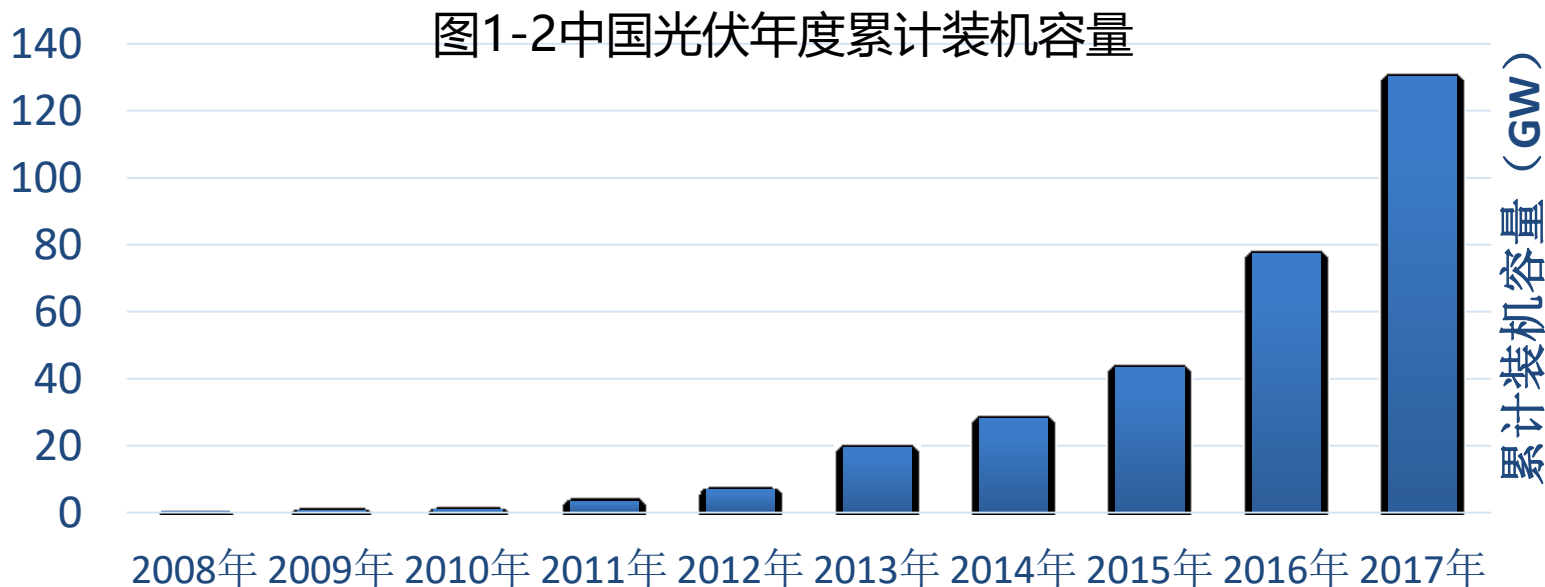
1.1.1 概述

- 2002年“送电到乡”的启动推动了我国光伏市场的起步发展，光伏装机从年几十千瓦，逐步进入到兆瓦级别。
- 2009年我国开始实施金太阳工程，国家能源局开始实行特许权招标制度，自此我国的光伏发电市场进入快速发展通道，规模化发展开始起步。
- 2011年国家上网电价政策出台，进一步推动了我国光伏市场的发展，当年新增并网装机容量达到2.07GW，跻身全球光伏新增装机容量第三位。
- 2017年，我国光伏发电光伏新增装机再创再度刷新历史，达到53.06GW，同比增长53.62%，累计装机容量已达到了130.25GW。
- 目前，中国已经将新能源产业上升为国家战略产业，未来将会继续加大对新能源产业的投资。
- 光伏市场将会从西部向中东部地区转移，光伏电站将会由大型地面电站转向分布式光伏电站，尤其是户用光伏、建筑光伏以及光伏综合应用等，将会成为新的关注点和成长点。



1.1光伏发电

1.1.1 概述



- ◆ 如图所示，至2012年以来，我国光伏发展迅猛，其中光伏新装装机已连续5年位居全球首位，累计装机也连续3年位居**全球第一**。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理

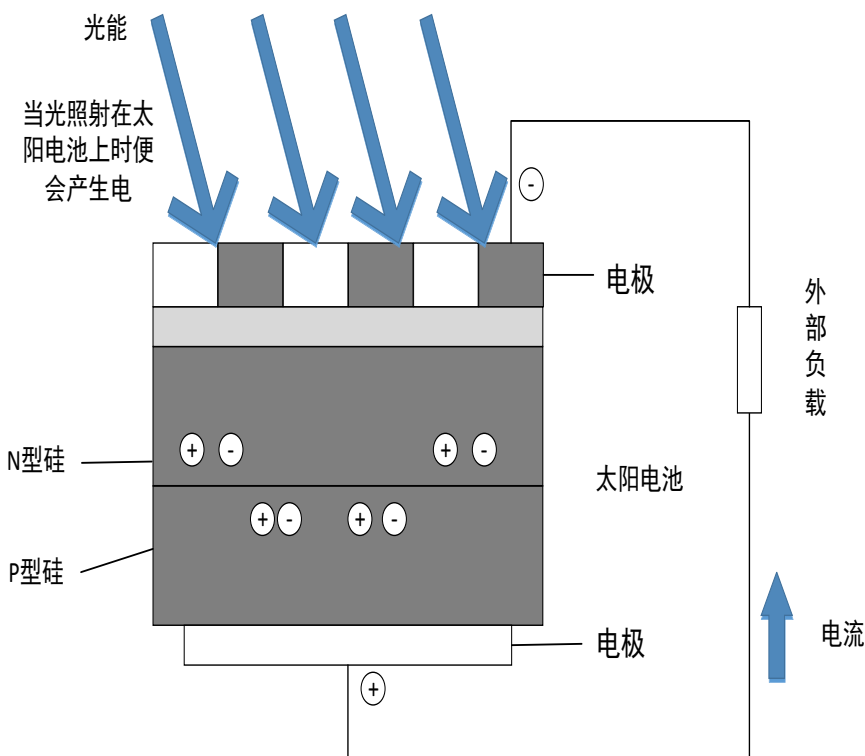


图1-3典型的晶体硅太阳电池结构

- **光伏效应**也称光生伏特效应，是指半导体在受到光照射时产生电动势的现象。
- P型硅片空穴较多，N型硅片内电子很多，因而在P型硅片和N型硅片的交界面形成一个有内电场的空间电荷区，即**P-N结**
- 从电池上表面引出的电极称为上电极，下部引出的电极称为下电极。两电极通过欧姆接触的方式分别与P型硅片（P区）和N型硅片（N区）相连。
- 被太阳电池吸收的光子中，能量大于半导体禁带宽度的光子会激发半导体材料中原子的价电子，产生光生电子-空穴对，又称**光生载流子**。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理

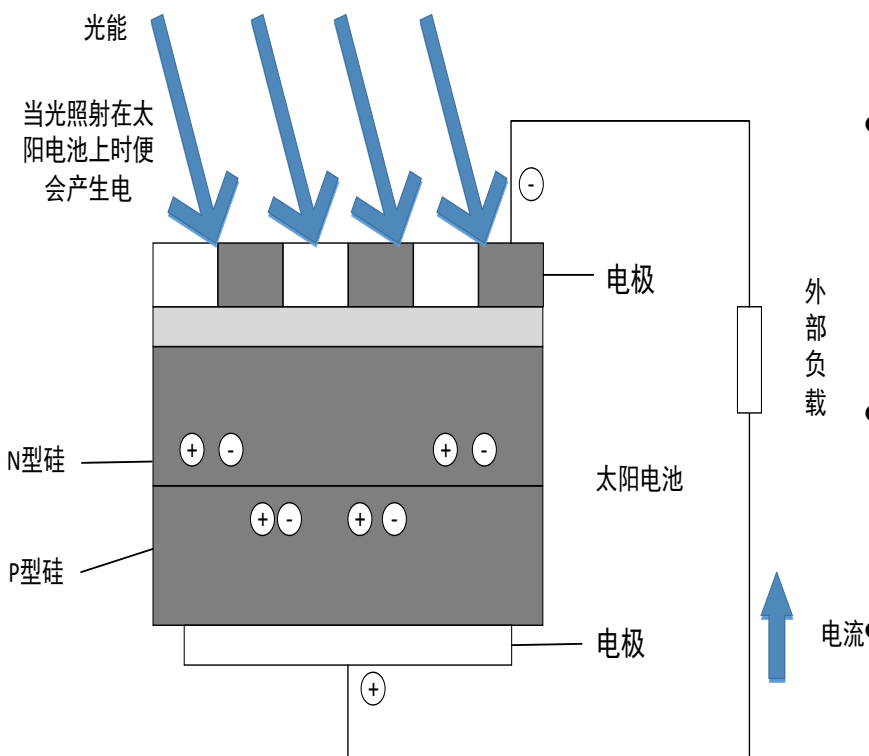


图1-3典型的晶体硅太阳电池结构

- 如果光生载流子产生于空间电荷区中，会立即被内电场分离，电子进入N区，空穴进入P区。
- 如果空穴产生于N区，那么空穴便开始向P-N结边界扩散，一旦到达P-N结边界，便立刻受到内电场的作用，越过空间电荷区进入P区。
- 如果电子产生于P区，则是电子向P-N结边界扩散，并在到达P-N结边界后被内电场推入N区。
- P-N结两侧正、负电荷的累积，形成了与内电场方向相反的光生电场，不仅抵消了内电场的作用，还产生了光生电动势，这就是太阳电池光伏效应的基本过程。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理

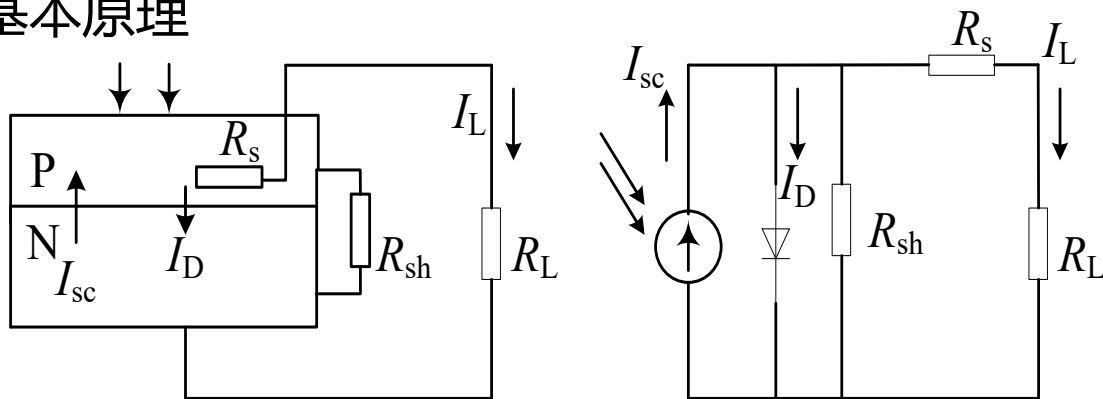


图1-4太阳电池的**等效电路**

- 太阳电池实际上就是一个大面积的平面二极管，其工作原理的**等效电路**如图。
 - ✓ R_L -太阳电池的外接**负载**
 - ✓ I_L -太阳电池的输出电流亦即**负载电流**
 - ✓ U_L -太阳电池的输出电压亦即**负载电压**
 - ✓ I_{sc} -光子在太阳电池中激发的**电流**，其大小取决于光照的强度即**辐照度**、电池的**面积**和本体的**温度 T**



1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理

- I_D -通过P-N结的总扩散电流（即二极管电流），其方向与 I_{sc} 相反， I_D 可定量描述为

$$I_D = I_{D0} (e^{\frac{qE}{AKT}} - 1)$$

- q-电子的电荷， $q=1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ；
- K-玻尔兹曼常数，且 $K=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ；
- A-常数因子，且正偏电压大时 $A=1$ ，正偏电压小时 $A=2$ ；
- I_{D0} -太阳电池在无光照时的**饱和电流**，且满足：

$$I_{D0} = AqN_C N_V \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \right] e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

- A为P-N结面积； N_C 、 N_V 分别为导带和价带的有效态密度；
- N_A 、 N_D 分别为受主杂质和施主杂质的浓度；
- D_n 、 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数；
- τ_n 、 τ_p 分别为电子和空穴的少数寿命；
- E_g 为半导体材料的带隙。

可知， I_D 大小与太阳电池的电动势 E 和温度 T 等有关。

1.1 光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1. 光伏发电基本原理

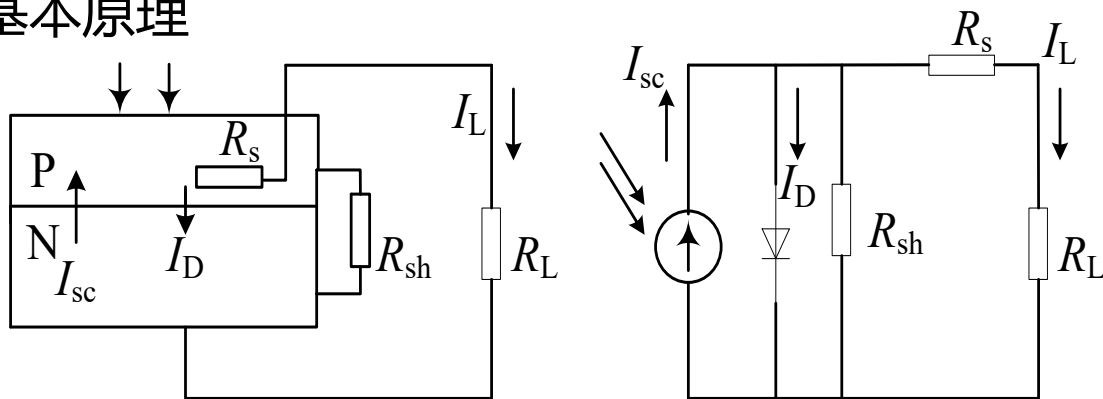


图1-4太阳电池的**等效电路**

- R_s 为串联电阻，主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接接触电阻所组成。
- R_{sh} 为并联电阻，又称之为旁漏电阻，主要是由硅片的边缘不清洁或体内的缺陷引起的。

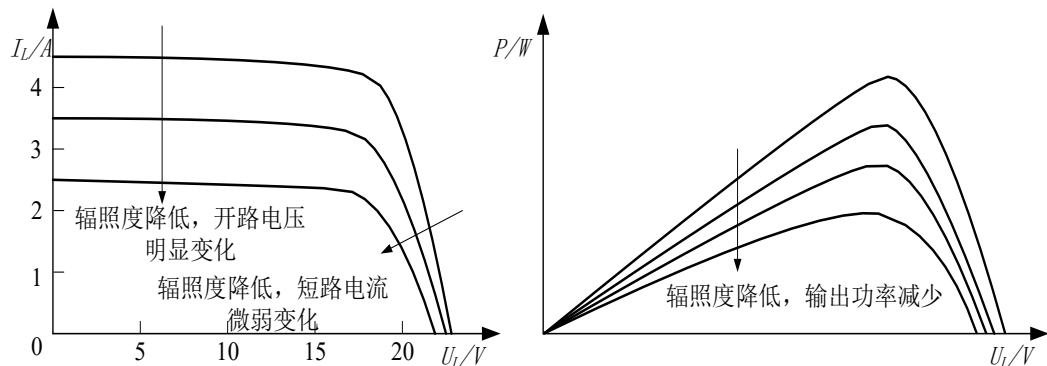
在进行等效电路计算时，通常可以忽略 R_{sh} 、 R_s 的影响，因此可得到理想太阳能电池的特性方程，为

$$I_L = I_{sc} - I_{D0} \left(e^{\frac{qU_L}{AKT}} - 1 \right) \quad \Longrightarrow \quad U_L = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} - I_L}{I_{D0}} + 1 \right)$$

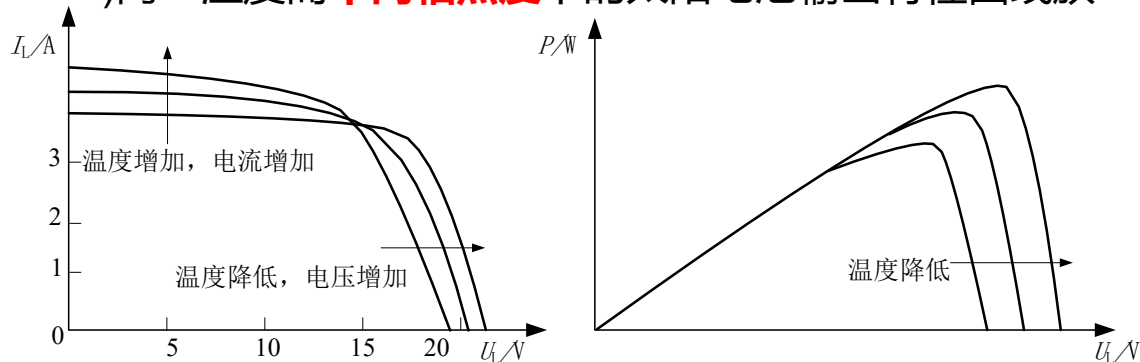
1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理



a)同一温度而**不同辐照度**下的太阳电池输出特性曲线族



b)同一辐照度而**不同温度**下的太阳电池输出特性曲线族

- ◆ 固定温度并改变辐照度，或者固定辐照度并改变温度，可得到太阳电池的输出随负载变化的两个重要的**输出特性曲线族**。



1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.光伏发电基本原理

从输出特性曲线上可以看出：

- 太阳电池是一个**非线性直流电源**。
- 太阳电池提供的功率取决于阳光所提供的能量，不可能为负载提供无限大的功率。
- 固定的温度和辐照度，当太阳电池的电压随着负载电阻值的增加而从0（短路条件下）开始增加时，电池的输出功率亦从0开始增加；当电压达到一定值时，功率可达到最大，负载电阻值继续增加时，功率将跃过最大点并逐渐减少至0，即电压达到**开路电压 U_{oc}** 。
- 太阳电池输出功率达到最大的点，称为**最大功率点**，通常使用**最大功率点跟踪**（Maximum Power Point Tracking, **MPPT**）技术使太阳电池始终能工作在最大功率点。常见的太阳电池**最大功率点跟踪方法**有：
 - 1)功率匹配电路;2)扰动与观察法;
 - 3)滞环比较法;4)实际测量法和二次插值法，等

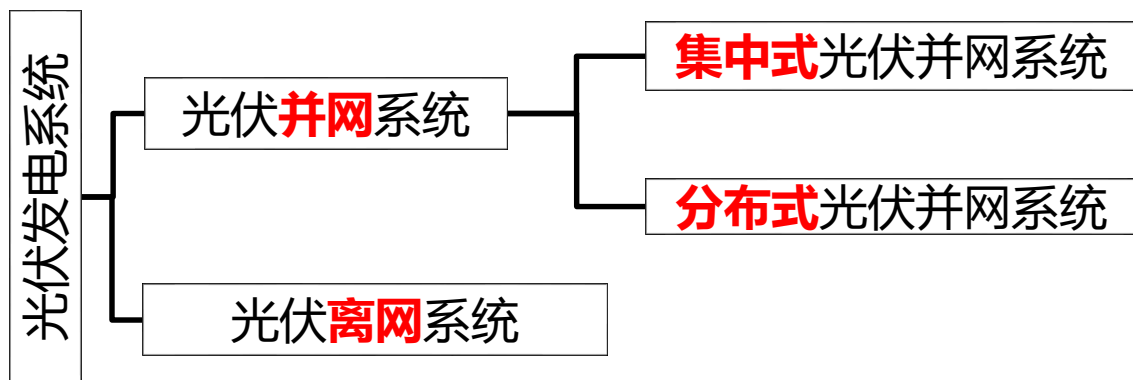


1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

2.光伏发电系统的分类

- 太阳电池经过串并联并且封装后，就可以组成大面积的光伏组件，多个光伏组件构成光伏阵列后，配合功率变换器、连接和汇流线缆、配电开关和保护装置等就形成了**光伏发电系统**。



光伏发电系统的分类

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.集中式并网光伏

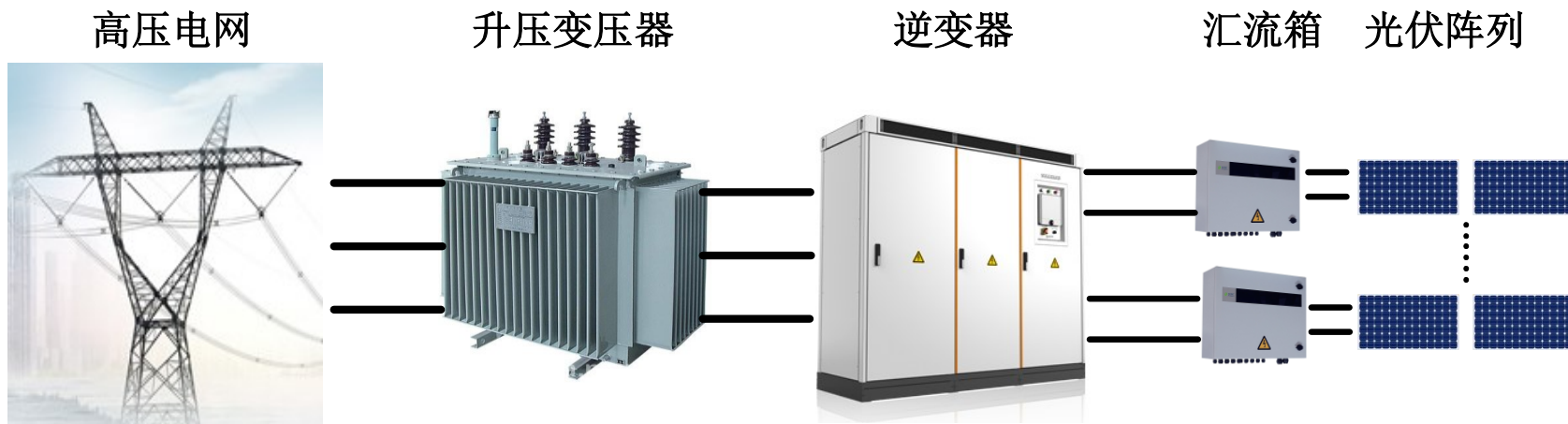


图1-5集中式并网光伏系统结构原理图

◆ 集中式并网光伏系统：

- ✓ 由多组光伏组件串并联构成的光伏阵列，通过汇流箱与大功率集中式光伏逆变器相连，光伏逆变器实现光伏阵列MPPT控制，并将光伏阵列输出的直流电转换成交流电，经过升压变压器传输给高压电网。

◆ 特点：

- ✓ 容量与规模大、离负荷点较远，所发的电量全部输入电网，并由电网统一调配向用户供电，接入的方式大多数使用中压或高压接入。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.集中式并网光伏



图1-6兆瓦级集中式并网光伏电站现场

- 集中式并网光伏系统一般建立在太阳能充足、地形平坦的无人荒漠或空旷地区，发电量较大。集中式并网光伏系统建设周期相对较短，**运维成本也相对较低**，便于集中管理和维护。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

2.分布式并网光伏系统



图1-7光伏户用并网系统效果图

- **分布式并网光伏系统**通常在不同地点接入配电网，以满足特定用户的需求，支持现存配电网的经济运行。
- 分布式光伏并网系统主要基于厂区、公用建筑物表面、户用屋顶以及其他分散空闲场地。

- 图示光伏户用并网系统是一种典型的分布式并网光伏系统。
- 放置在屋顶的太阳电池阵列吸收光能，并通过功率变换器（户用式光伏逆变器）给家庭负荷供电或者将电能输入电网。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

2.分布式并网光伏系统



图1-7光伏户用并网系统效果图

- 光伏户用分布式并网光伏系统接入电网时有两种计量发电量和用电量的方式:
- “**全额上网**”方式，该方式将光伏系统所发电能全部传输到大电网中；
- “**自发自用，余电上网**”方式，该方式光伏系统所发电量由用户负载使用后，多余电量再经户用双向智能电表输送到电网中。

1.1光伏发电

1.1.2 光伏发电的原理及分类

3. 离网型光伏发电系统



图1-8离网型光伏发电系统结构

- 离网型光伏发电系统是由光伏阵列发电，经控制器对蓄电池进行充放电控制管理后，可直接给**直流负载**供电，也可以通过逆变器给**交流负载**供电，蓄电池支持光伏发电系统的持续稳定供电。
- **特点**：独立光伏系统，不与电网连接，通常需要用蓄电池来储存夜晚或阴雨天系统用电的能量。应用于解决边远山区、海岛、通讯基站等地的基本用电需求，设计容量一般不大，通常在100KW以内。



1.2风力发电

1.2.1

概述

1.2.2

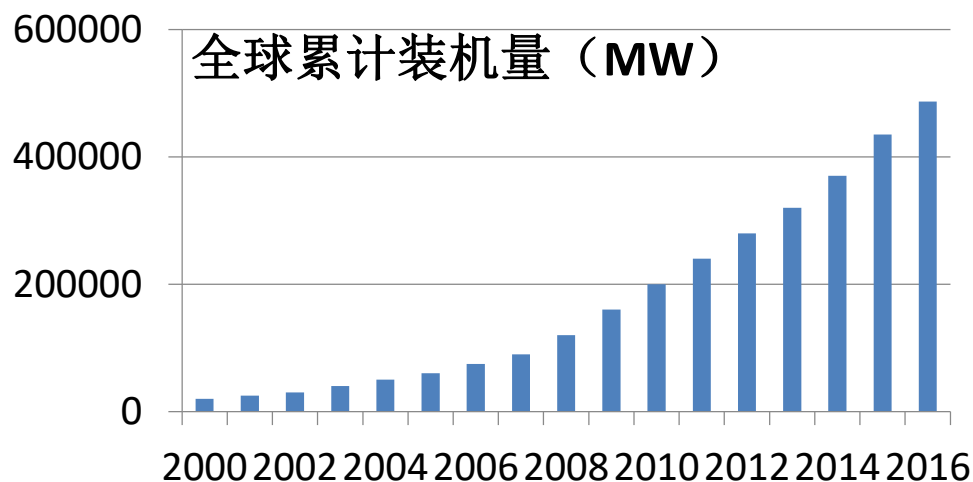
风力发电的原理及分类



1.2风力发电

1.2.1 概述

- **风力发电**是指利用风力发电机组直接将风能转化为电能的发电方式。作为新能源的一种，风力发电对于解决与传统能源有关的环境和社会问题，是一个有效可行的方法。



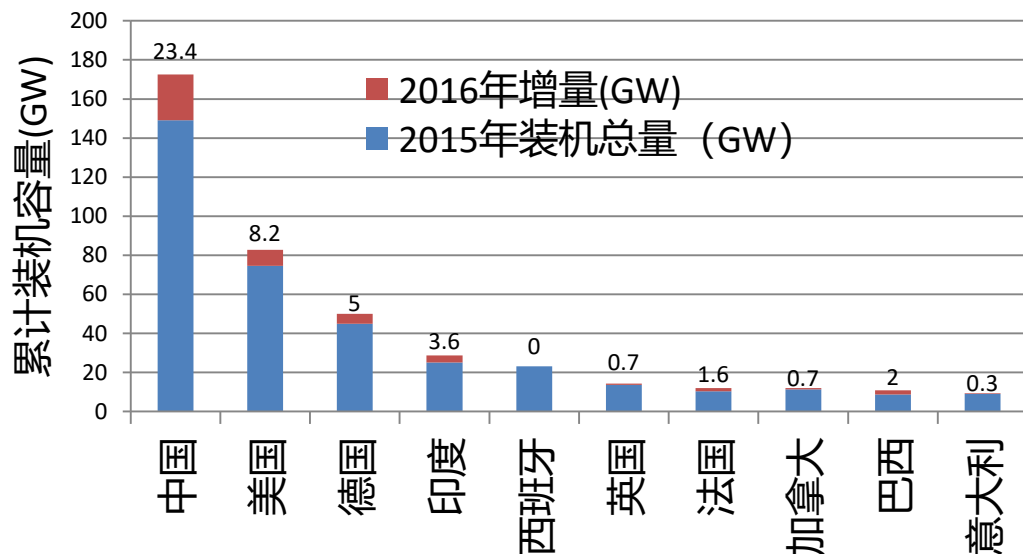
- 2000~2016年全球风电累计容量如图所示。据全球风能协会（GWEC）的统计，2016年全球风电累计和新增装机容量分别为486.7GW和54.6GW

图1-9 2000~2016年全球风电累计容量



1.2风力发电

1.2.1 概述



- 从2016年世界主要国家风电新增和累计装机容量数据看出中国、美国、德国和印度引领了2016年的风电市场，并且中国风电发展已遥遥领先与其他各国。

图1-10 2016年世界主要国家风电新增和累计装机容量



1.2 风力发电

1.2.1 概述

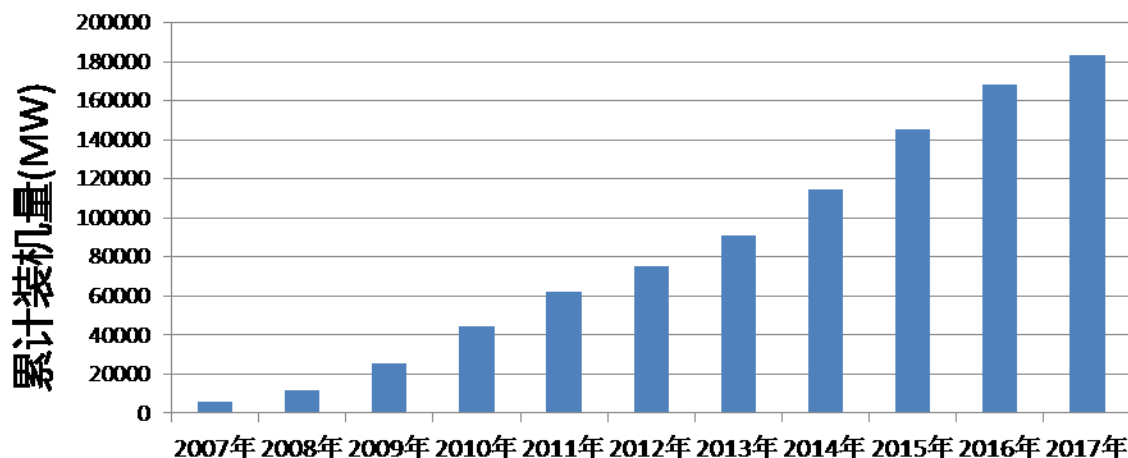


图1-11 2007 ~ 2017年中国累计装机容量

- 从图可知2014年后，中国（大陆地区）新增装机容量达到23.196GW，同比增长44.2%，累计装机容量114.609GW，同比增长25.4%，新增和累计装机容量两项数据均居**世界第一**。2017年，全国新增装机容量15GW，累计装机容量达到184GW，然而，与常规能源发电相比，风电仍占较小的份额。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

1. 风力发电基本原理

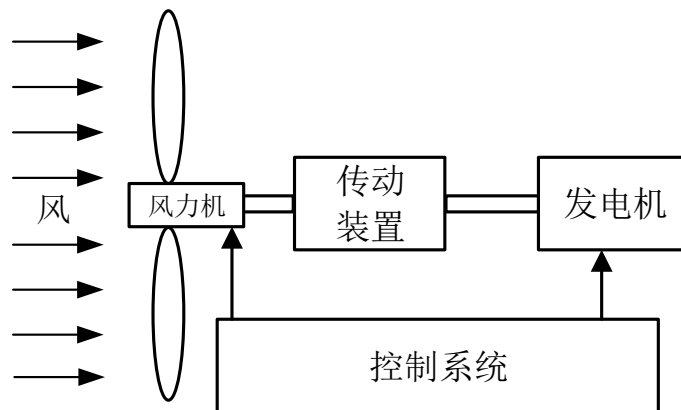


图1-12风力发电原理结构

- 风力发电是利用风力带动风力机旋转，旋转的风力机通过传动装置和控制系统驱动发电机发电，主要由风力机、传动装置、发电机、控制系统等部分组成。
- 在风力发电系统中，**风力机**将风能转换为机械功的动力机械。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

1. 风力发电基本原理



图1-13 水平轴风力机

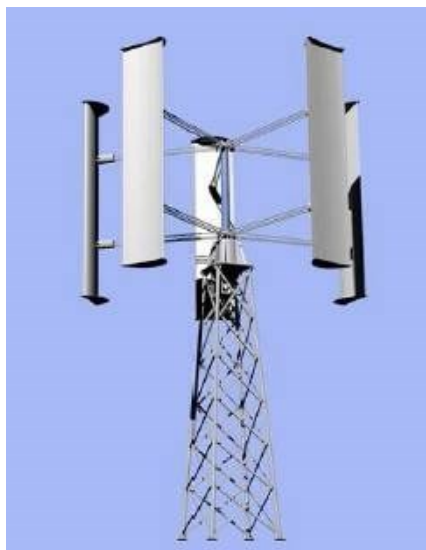


图1-14 垂直轴风力机

- 风力机一般有**水平轴风力机**和**垂直轴风力机**两种机型，在实际风力发电系统工程应用中，大都采用水平轴风力机机型。

- 水平轴风力机通常由**风轮**、**塔架**、**机舱**等数个部分组成，其中：风轮是由轮毂及安装于轮毂上的若干桨叶组成，是风力机捕获风能的部件，塔架作为风力机的支撑结构，可以保证风轮能在具有较高风速的位置运行；机舱内有着传动装置、控制系统以及发电机等。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

1. 风力发电基本原理

- 风力机从大自然中获得的风能转化成的**机械功率** P_m 为：

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho v_1^3 A$$

C_p -**风能利用系数**, ρ -空气密度 (单位为 kg/m^3) , v_1 -当前风速(单位为 m/s), A -桨叶扫过的面积 (单位为 m^2) 。

- ✓ 风能利用系数 C_p 为**叶尖速比 λ** 和叶片**桨距角 β** 的函数。
- ✓ **叶尖速比 λ** 是风轮叶片尖端速度与风速的比值, 或者叶片转速越快, 同风速下的叶尖速比就越大;
- ✓ **桨距角 β** 是叶片顶端翼型弦线与叶片旋转平面的夹角, 在变桨距风力机中, 通过控制桨距角 β 就可以控制风力机叶轮的风能功率, 通常桨距角 $\beta=0$ 时, 风力机风能利用系数 C_p 最大



图1-15水平轴风力机组成结构

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

1. 风力发电基本原理

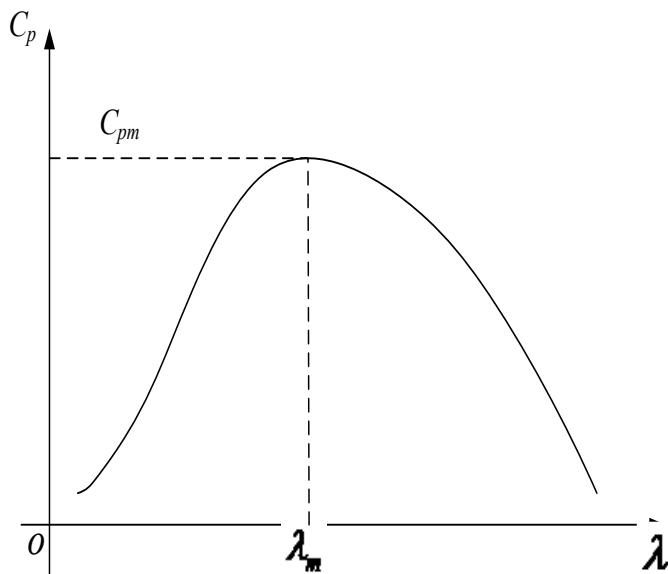


图1-16 风能利用系数与叶尖速比的关系

- 对于已安装完成的风力机，其**输出功率主要取决于风速和风能利用系数**。在桨距角 β 一定时，风能利用系数与叶尖速比 λ 的关系如图。
- 对应于风力机最大的风能利用系数 C_{pm} ，有一个对应的叶尖速比，称之为**最佳叶尖速比 λ_m** 。为了使风力机在不同风速下能维持最大的风能利用系数 C_{mp} 运行，风力机应按当前风速的变化实时进行变速控制，以满足最佳叶尖速比 λ_m 运行控制，从而实现风能的**最大捕获**。

1.2风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

2. 风力发电系统的分类

机械能输入

机械传动系统

发电机类型

转子类型

定子类型

并网方式

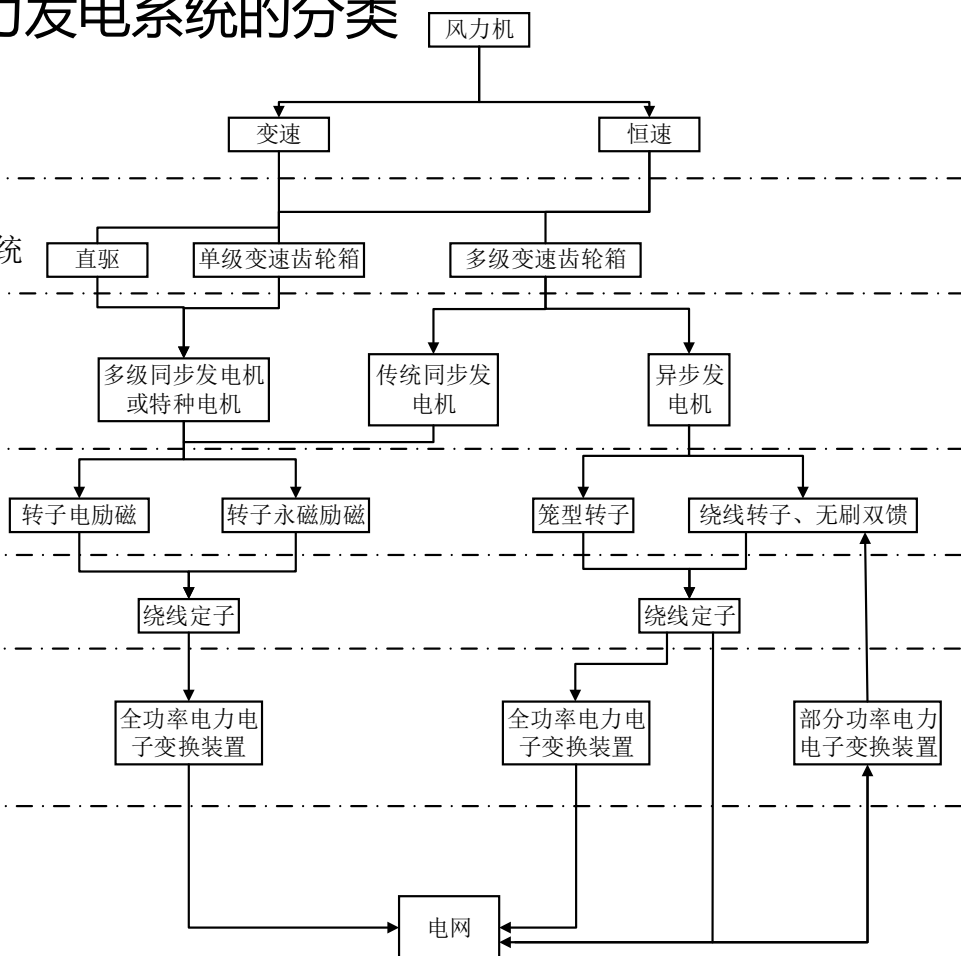


图1-17 风力发电系统结构及配置关系图

- 风力发电系统根据是否并入电网可以分为**并网型**风力发电系统和**离网型**风力发电系统。
- 为使离网型风力发电机组能提供稳定的电力，一般可以配备储能单元。离网型风力发电系统容量占风力发电系统比例较小。
- 并网型风力发电系统与电网连接，并向电网输送电能，**商用风力发电系统**大都是**并网型**风电机组。



1.2风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

2. 风力发电系统的分类

- 当风电机组并网运行时，要求其**输出频率与电网频率保持一致**。因此，并网型风力发电系统可以分为**恒速恒频风力发电系统**和**变速恒频发电系统**两类。

1. 恒速恒频风力发电系统

- 恒速恒频风力发电系统是指风电机组运行过程中，能保持发电机转速恒定并输出与电网频率一致的恒频电能的风力发电系统。主要采用**同步发电机**或**鼠笼式感应发电机**。
- 主要优点:结构简单、造价较低、可靠性高、并网容易。
- 缺点**如下:
 - 由于风力机转速不能随风速而变，因此**风能利用率低**；
 - 不能有效控制无功，需要额外补偿无功；
 - 输出功率具有较高的波动性，降低了供电稳定性；
 - 由于风速大幅突增时，风能不能快速有效传递给主轴、齿轮箱和发电机，因此产生较大的机械应力，从而使很多构件在使用的过程中也会产生比较严重的机械性损坏。
 - 随着大规模风电并网技术的发展，**恒速恒频风力发电系统已被变速恒频发电系统所取代而退出了主流市场**。



1.2风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

2. 风力发电系统的分类

2.变速恒频型风力发电系统

变速恒频风力发电系统是指风电机组运行过程中，能控制发电机的转速随风速而变化并输出与电网频率一致的恒频电能的风力发电系统，**变速恒频型风电系统已成为风电装机的主流机种。**

优点：

- 可以通过发电机的变速恒频控制实现风力机的最大风能捕获，以提高系统的效率及发电量
- 可实现动态无功调节和故障穿越，具有较好的电网适应性。
- 变速恒频风力发电系统有多种形式：

通过发电机与电力电子装置相结合以实现变速恒频发电；

通过改造发电机本身结构而实现变速恒频。

- 不同系统具有各自的特点，适用于各种不同场合。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

3. 交流励磁双馈型风力发电系统

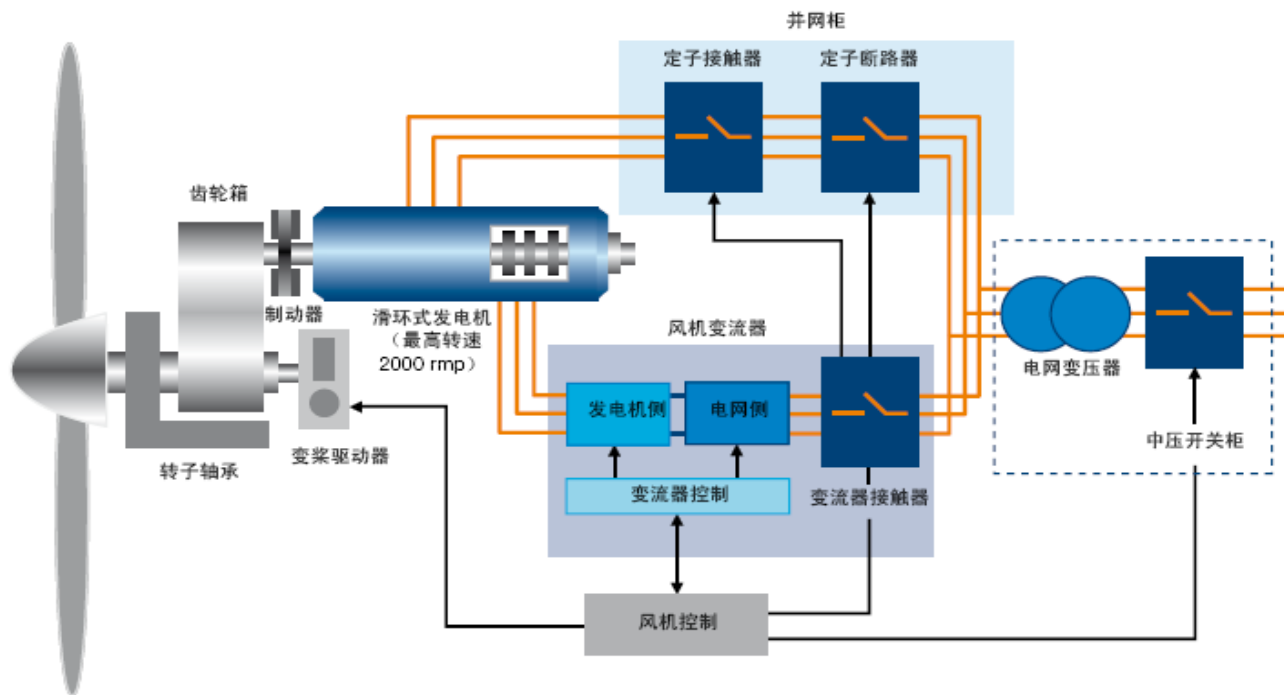


图1-18双馈型风力发电系统结构

- **交流励磁双馈型风力发电系统**: 采用转子交流励磁的双馈型异步发电机设计，双馈型异步发电机的定子直接连接电网，而转子则通过交直交变流器与电网相连，实现基于**转子励磁控制**的双馈型异步发电机变速恒频控制。

- **转子励磁控制的基本原理**: 当风速变化引起发电机转速变化时，通过交直交变流器**控制转子电流频率**以使定子频率恒定（与电网频率相同）。



1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

3. 交流励磁**双馈型**风力发电系统

■ 优点：

转子励磁控制方案是在异步发电机转子电路实现的，而异步发电机转子功率是由发电机转速运行范围所决定的转差功率，且仅为定子额定功率的一部分，因此连接转子的交直交变流器功率就会大幅降低，通常只需发电机功率的三分之一，**变流器的成本将会大幅降低。**

■ 缺点：

双馈发电机的定子与电网直接连接，当电网故障时，就会通过定转子耦合发生暂态电磁冲击，增加了转子变流器的控制难度，降低了风电机组的电网适应性，双馈发电机的滑环和电刷需要定期维护，齿轮箱导致系统噪声增加。

双馈型风力发电系统是当前风电机组的主流机型。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

4. **全功率型**风力发电系统

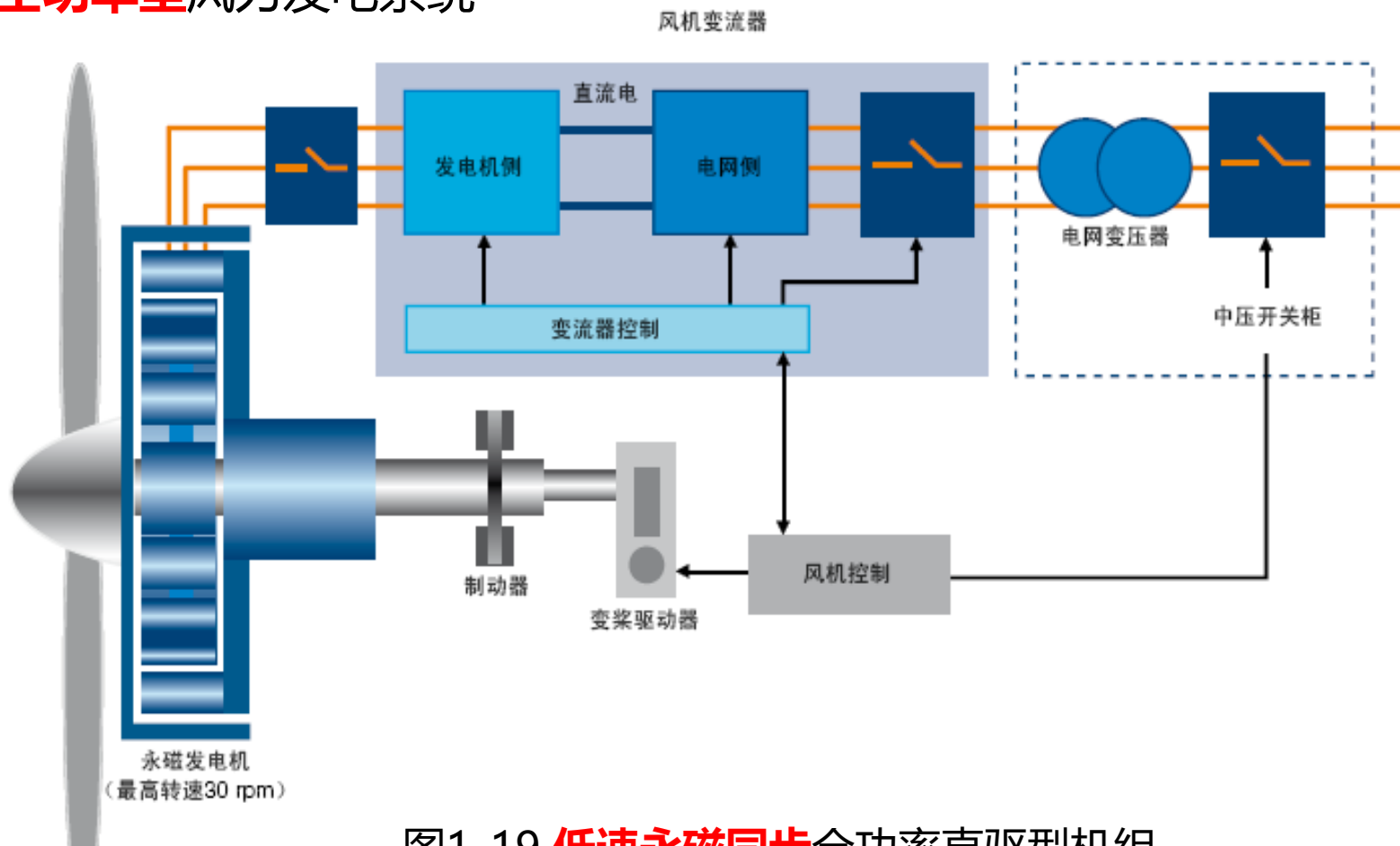


图1-19 **低速永磁同步**全功率直驱型机组

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

4. **全功率型**风力发电系统

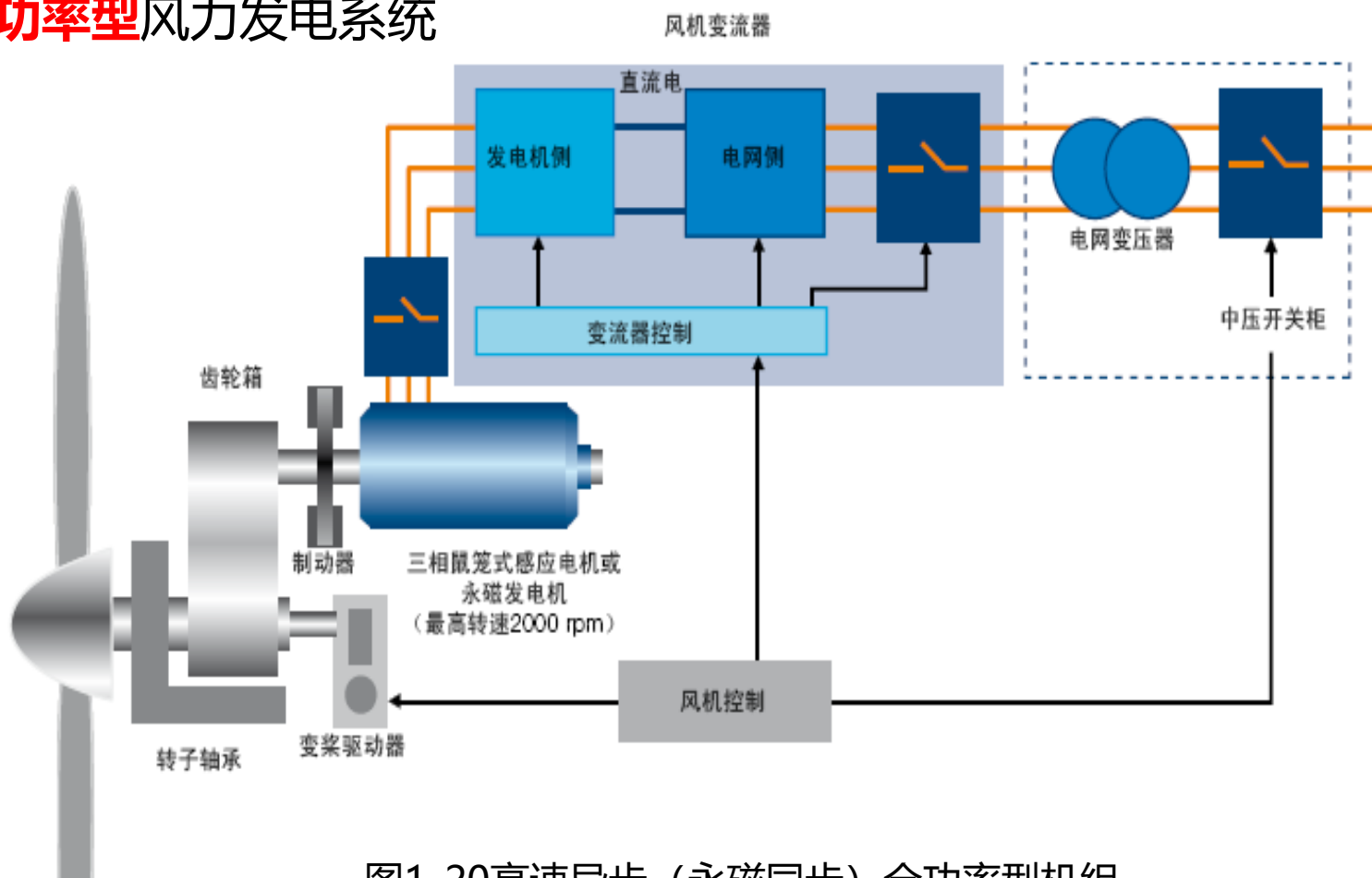


图1-20高速异步（永磁同步）全功率型机组



1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

4. **全功率型**风力发电系统

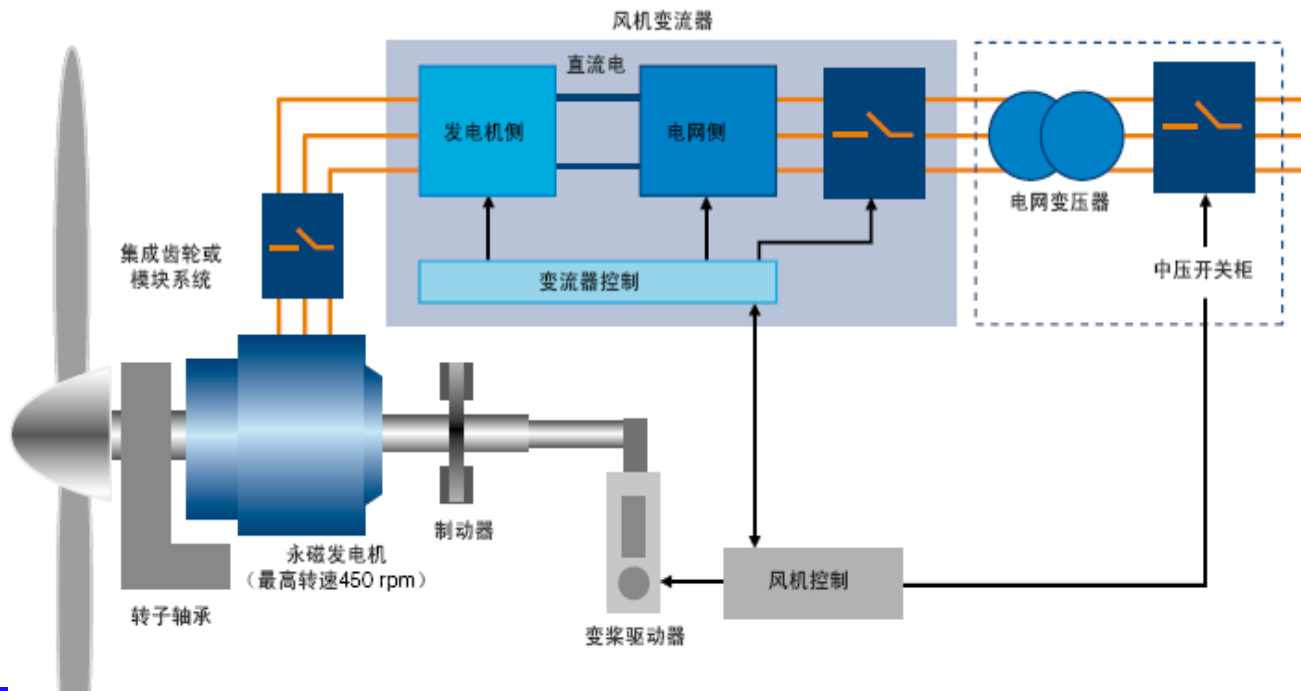
- **全功率型风力发电系统**是将发电机定子输出通过与发动机功率相同的交直交全功率变流器连接并入电网，从而实现变速恒频发电运行，由于这类风力发电系统发电机与电网无直接连接，因而具有较好的电网适应性。
- **采用低速永磁同步发电机的永磁同步直驱型风力发电系统**
- **优点：**
 - 无需外部励磁，有效提高了发电机效率；
 - 风力机与发电机之间采用了无齿轮箱的直驱设计，可有效减小系统运行噪声，提高机组运行的可靠性。
- **缺点：**
 - 发电机体积大、重量重、成本高，另外全功率变流器的应用一定程度上也相应增加了功率变换系统的体积和成本。
 - 为减小发电机体积，可有采用**基于高速异步感应发电机或高速永磁同步发电机的全功率风力发电系统设计**，优点是发电机体积小、重量轻、造价相对较低，然而有齿轮箱的系统设计一定程度上仍然影响了系统运行可靠性。

1.2 风力发电

1.2.2 风力发电的原理及分类

4. **全功率型**风力发电系统

- 随着风力发电系统逐渐由陆上向海上发展，业界出现了采用一级齿轮箱传动设计的**半直驱全功率风力发电系统**，它可以最大限度地降低了低速发电机和多级齿轮转动的不足，其发电机多采用**中速永磁同步发电机**设计，在有效减小发电机、齿轮箱体积、重量的同时，有效提高了发电机运行效率。





1.3小水利发电

1.3.1

小水利发电概述

1.3.2

小水利发电的原理及分类



1.3小水利发电

1.3.1 小水利发电概述

- “**小水电**”是指装机容量很小的水电站或者水力发电装置及电力系统等，其装机容量规模因各国国情而异。在我国，“小水电”是指由地方、集体或个人集资兴办与经营的，装机容量25MW及以下的水电站和配套的地方供电电网。
- 我国的小水电资源储藏量十分丰富，理论蕴藏量估测为1.5亿千瓦，可开发装机容量超过7万兆瓦。至2016年，全国已建成小水电4.5万余座，10年累计发电1.39万亿千瓦时，相当于节约5亿吨标准煤，减排二氧化碳 12亿吨，减排二氧化硫415万吨。依据国家水利部规划，至2020年，中国将建成10个装机容量达500万千瓦以上的小水电强省，100个装机容量达20万千瓦以上的大型小水电基地，300个装机容量达10万千瓦以上的小水电大县。

1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

1.小水利发电的基本原理

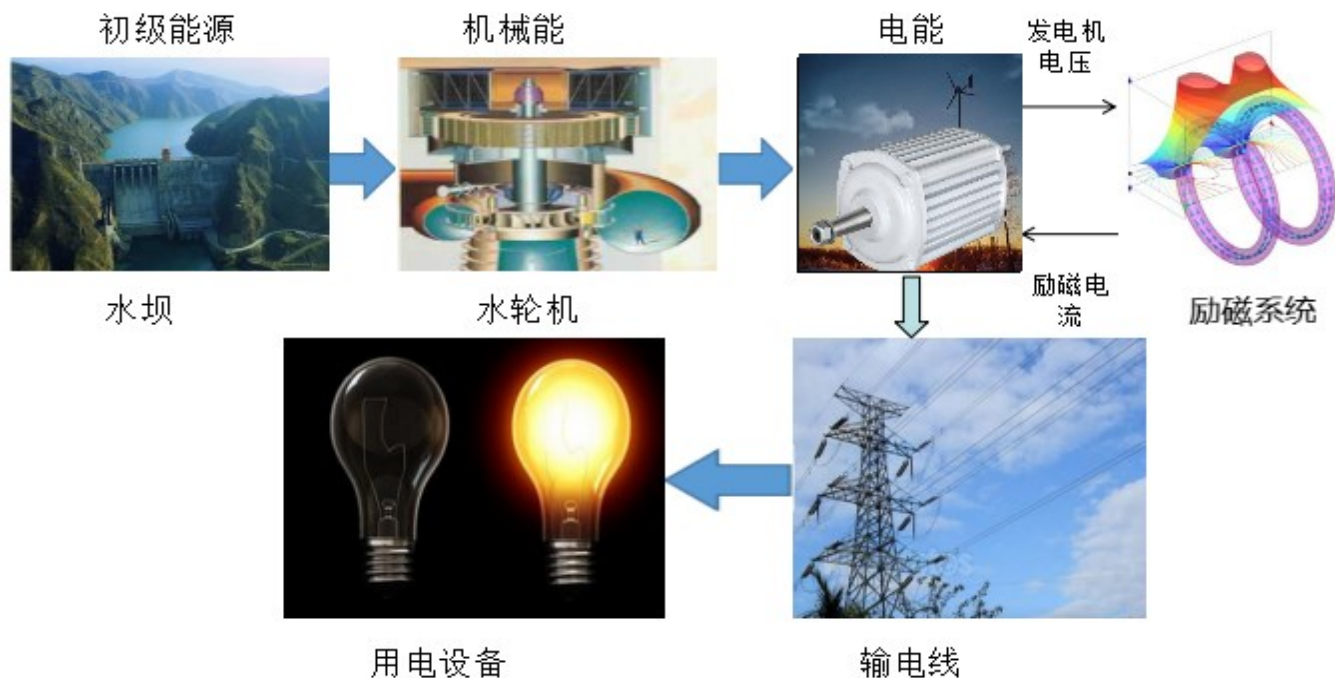


图1-22小水力发电能量流图

水力发电站是通过水轮机把水能转化为电能的发电系统，水轮发电机组是小水电系统实现能量转换的核心装置。



1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

1.小水利发电的基本原理

- 水轮发电机组的能量转换过程分为两个阶段：
- 第一阶段:将水的势能转化为水轮机的机械能。
- 第二阶段:首先将水轮机的机械能转换为电能，再通过电网的输电线路传输给用电设备。
- 在单位时间内，水轮机输出的功，称为**出力**。水力发电机组的出力，取决于所利用的水头（单位重量的水所具有的能量）和流量，实际出力的计算公式为：

$$P=9.81\eta Q(H-\Delta H)$$



1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

1.小水利发电的基本原理

- 在做初步估算时，可用下列简化公式：

$$P=KQH_w$$

P-水力发电机组的实际出力；

Q-为水电站水轮机组的过水流量；

H-水电站上下游的水位差（又称为水电站的水头）；

ΔH -水头损失；

H_w -作用于水轮机的净水头， $H_w = H - \Delta H$ ；

η -机组（包括水轮机、发电机和传动设备等）的总效率；

K-出力系数（一般小水电站 $K=6.0-6.5$ ）。



1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

1.小水利发电的基本原理

- 典型水轮发电机组中主要设备的种类、功能等简介如下：

水轮机：通常用的水轮机有冲击式和反击式两种。

发电机：发电机大部分采用的是电励磁同步发电机。

励磁系统：由于发电机一般为电励磁同步发电机，需要通过对直流励磁系统的控制实现对电能的调压、有功功率的和无功功率的调节，以期达到提高输出电能质量的目的。

调速和控制装置（包括调速器和油压装置）：调速器用于调节水轮的转速，使得输出电能的频率达到供电要求。

冷却系统：小型水轮发电机的冷却主要采用空气冷却，利用通风系统帮助发电机定、转子及铁芯表面进行散热冷却。

制动装置：对额定容量超过一定值的水轮发电机均设有制动装置。

电站控制设备：电站控制设备大都采用计算机数字化控制，从而实现水力发电的并网、调频、调压、调节功率因数、保护和通信等功能。

1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

2.小水利发电的分类

- 小水力发电根据其集中水头的方式可分为引水式、堤坝式和混合式。我国小水力发电站多半是较为经济的引水式小水电站。

- 引水式小水电站

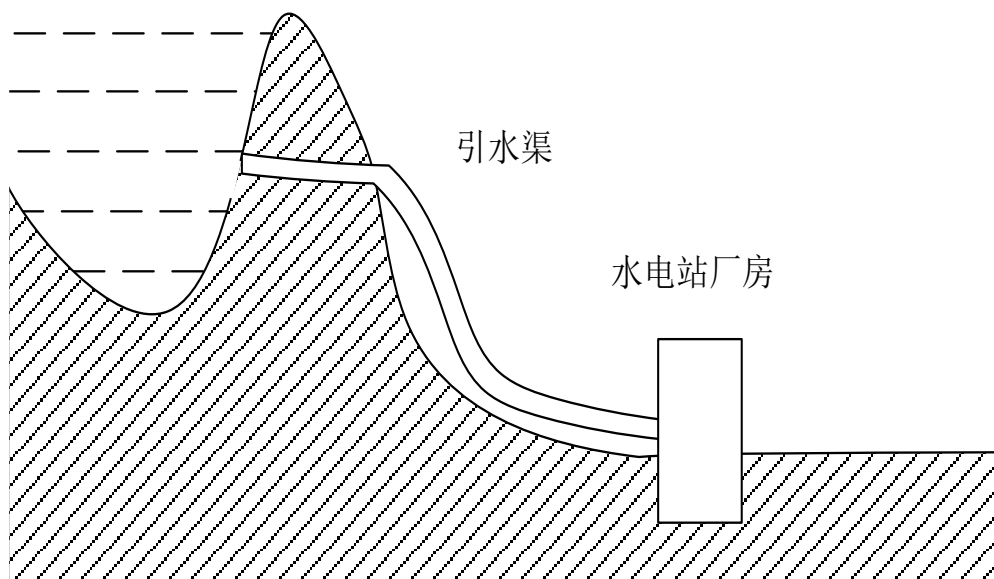


图1-23小水力发电能量流图

- 引水式小水电站:**一般是在河流坡降较陡、落差比较集中的河段，以及河湾或相邻两河河床高程相差较大的地方，修建一个引水低坝或无坝，采用引水渠来集中河段的自然落差，以形成电站的水头

1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

2.小水利发电的分类

- 小堤坝式小水电站

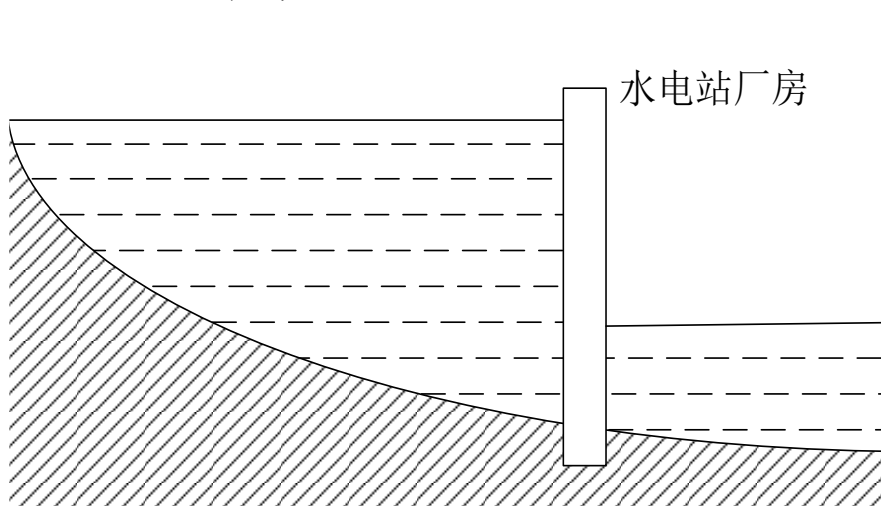


图1-24河床式小水力站

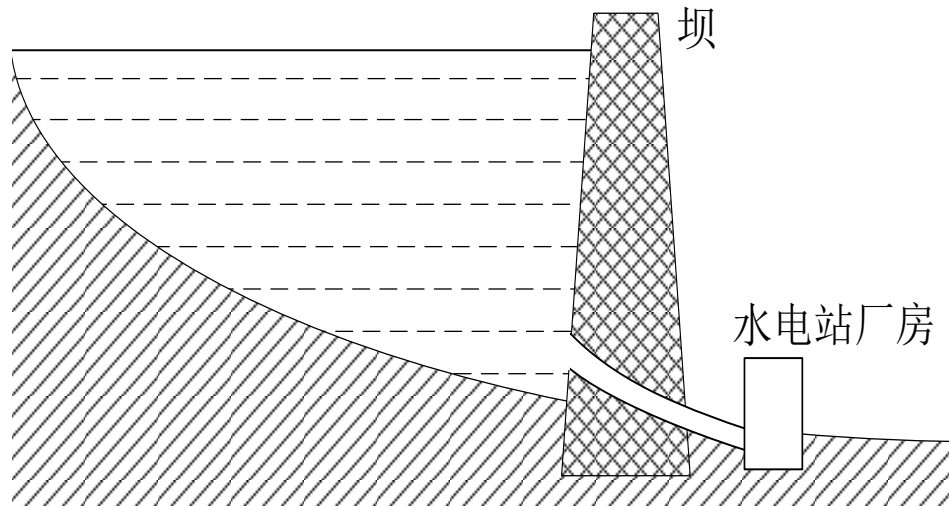


图1-25坝后式小水电站

- **小堤坝式小水电站:**在河道上修建拦水坝（或闸），抬高上游水位以集中落差，并形成水库调节流量，再通过输水管把水库里的水引至水轮发电机组驱动发电机发电。

1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

2.小水利发电的分类

- 小堤坝式小水电站

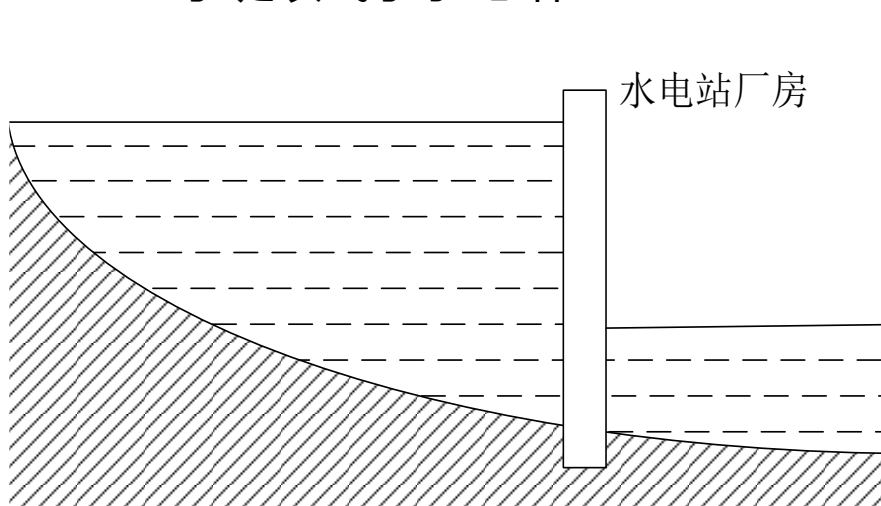


图1-24河床式小水力站

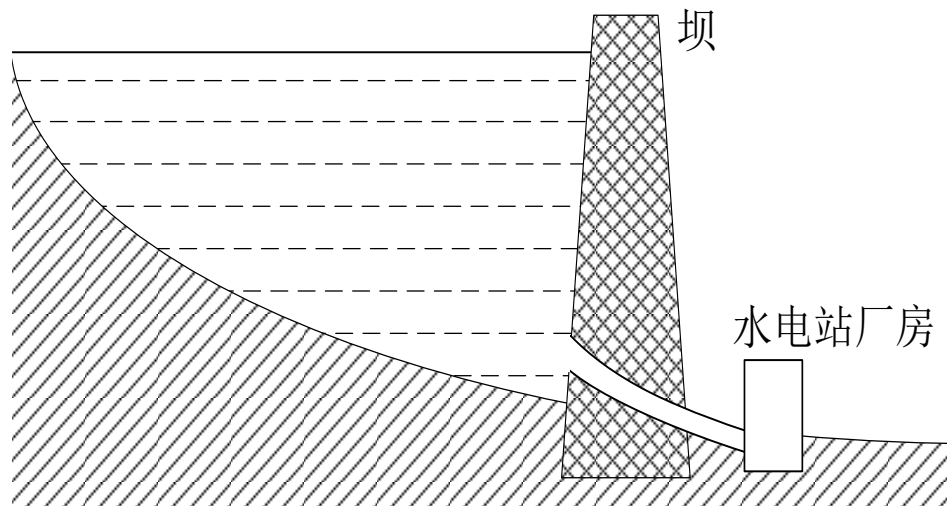


图1-25坝后式小水电站

- **河床式水电站:**大多建在河床平宽、流量较大的河流中、下游平缓的河段上，由厂房和堤坝共同承担起阻挡水的任务。
- **坝后式小水电站:**厂房建在堤坝下游处，有堤岸将水隔挡，汇集水流形成一定落差，再由较短的引水管引水发电，厂房建筑与坝体分开，一般修建在水头较大的河流中、下游处。

1.3小水利发电

1.3.2 小水利发电的原理及分类

2.小水利发电的分类

- 混合式小水电站

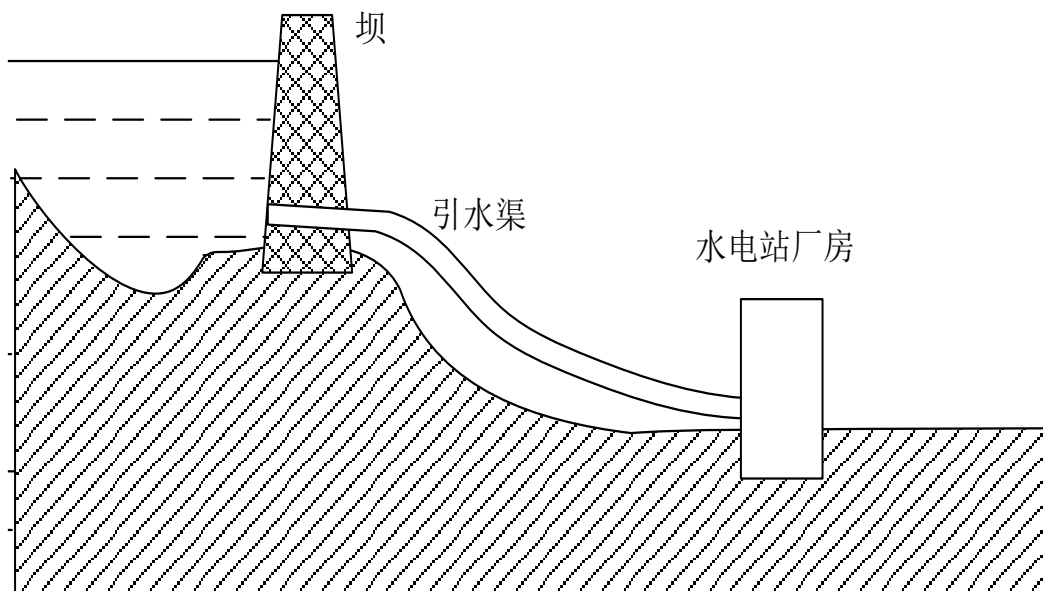


图1-26混合式小水力站

- 混合式小水电站的水位落差有两种获得方式：修建引水工程；大坝蓄水。
- 混合式小水电站具有堤坝式小水电站和引水式小水电站的特点。当上游河段地形平缓，下游河段坡降较陡时，宜在上游筑坝形成水库，调节水量，下游修建引水渠道，集中较大落差。混合式小水电站的水头由坝和引水渠共同形成，且坝一般构成水库。



1.4海洋能发电

1.4.1

海洋能发电概述

1.4.2

海洋能的分类及其发电原理



1.4海洋能发电

1.4.1 海洋能概述

- **海洋能**是指依附在海水中的能源，通过各种物理过程或化学过程接收、存储和散发能量。
- **潮汐能**和**海流能**：源自地球和其他星体之间的引力。
- **波浪能**：因大气运动而产生的，其与波浪高度的二次方和波动水域面积成正比。
- **海水温差能**：一种热能，产生的原因是低纬度的海面接受太阳辐射使得海水表面温度较高，与深层水之间形成的温度差产生热交换，其能量与温差大小成正比。
- **海水盐差能**（或称海水化学能）：在河口水域由于入海径流的淡水与海洋盐水间存在盐度差而产生的。
- **海洋能是可再生的而且储量丰富的清洁能源**。据估算，全球约有30亿千瓦潮汐能、700亿千瓦波浪能、500亿千瓦温差能、50亿千瓦海流能、300亿千瓦盐差能。我国海洋能源十分丰富，据估算：潮汐能资源约为1.9亿千瓦，波浪能的开发潜力约1.3亿千瓦，沿岸波浪能0.7亿千瓦，海流能0.5亿千瓦，海洋温差能和盐差能分别有1.5亿千瓦和1.1亿千瓦。



1.4海洋能发电

1.4.1 海洋能概述

- 受到海洋复杂环境的影响，海洋能发电的转换效率仍然较低，还处于示范和试验阶段。截至2016年底，海洋能发电约536兆瓦，其中超过90%是潮汐能发电。除潮汐能之外，海洋能发电技术尚处于预商业化阶段。为了推进海洋能应用的技术进步，中国、美国、加拿大、智利、韩国和欧洲诸多国家都开展了海洋能研究与示范应用研究。
- 从各国的情况看，潮汐发电技术比较成熟，全世界潮汐电站的总装机容量为265MW，年发电量约达6亿千瓦时。波浪能、海流能、盐差能和温差能发电技术处于初步研发试验阶段，主要制约因素是海洋水深、缺氧、高压的恶劣复杂环境，导致目前开发、利用海洋能存在技术难度大、对材料和设备的要求比较高以及经济性较差等问题。



1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

1.潮汐能

- 潮汐是一种由于月球、太阳引力的变化而导致海水平面周期性升降的自然现象。因潮汐造成的海水涨落和潮水流动所形成的水的动能和势能即为潮汐能。
- 潮汐能的利用一般可以分为两种：
 - 利用潮汐的动能:** 直接利用潮汐前进的力量来推动水轮机发电;
 - 利用潮汐的势能:** 在电站上下游有落差时引水发电。由于潮汐的动能利用困难且效率低, 因此**潮汐发电多采取利用潮汐势能进行发电。**
- 潮汐电站一般在海湾或河口修建拦水堤坝把海湾或河口与大海隔开, 拦水坝中间安装进水闸口、排水闸门和水轮发电机组, 利用坝内外潮水涨落时形成的水的势能变化来发电。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

1.潮汐能

- 汐电站的**装机容量**一般按照以下经验公式进行计算：

H-平均潮差；S-水库面积。

$$P=200H^2s$$

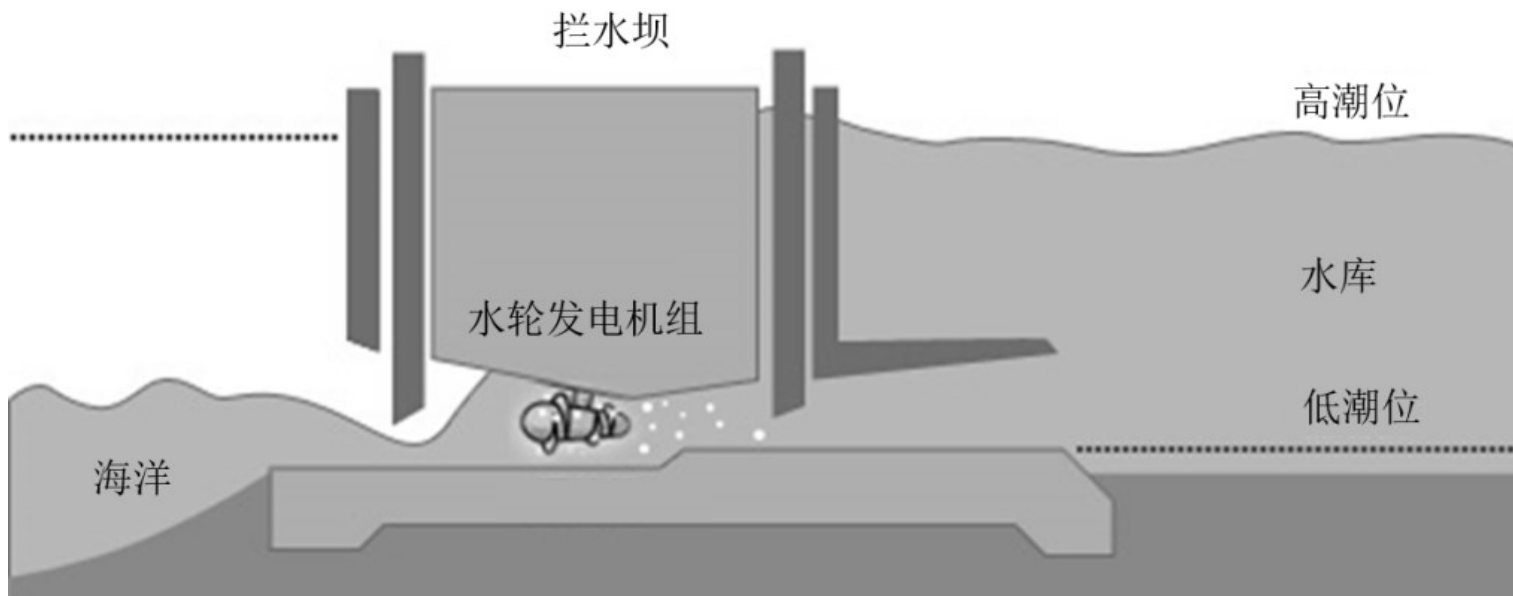


图1-27潮汐发电的原理示意

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

1.潮汐能

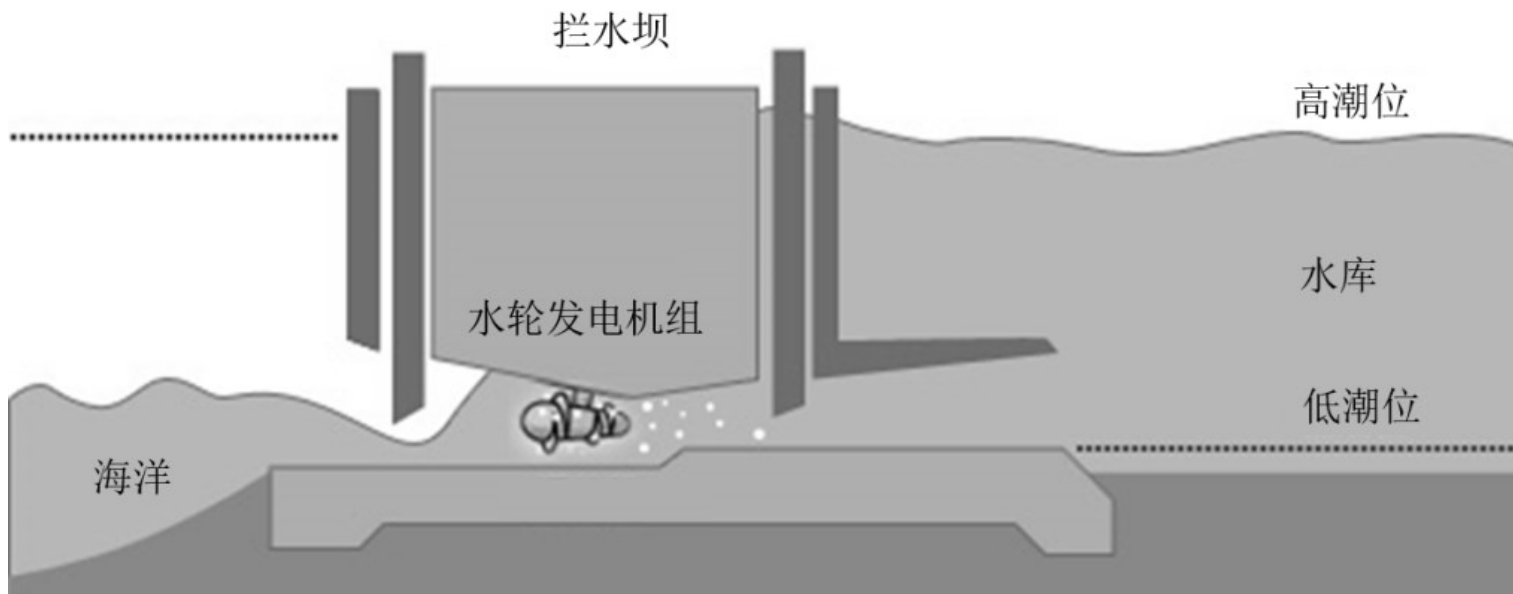


图1-27潮汐发电的原理示意

- **潮汐发电的原理**：涨潮时，打开进水闸门，并关闭排水闸门，海水经闸门流入水库，冲击涡轮机以带动发电机发电；落潮时，关闭进水闸门，并打开排水闸门，水从水库流向大海，又从相反的方向冲击涡轮机以带动发电机发电



1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

2.波浪能

- 波浪能是指海洋表面波浪所具有的动能和势能，是由风推动波浪产生并以海水的动能和势能的形式储存的机械能。
- 波浪能以单位时间在传播峰面单位长度上的能量 P_w 来表示，即

ρ -海水密度； g -重力加速度； H -波浪高； T -波浪周期。

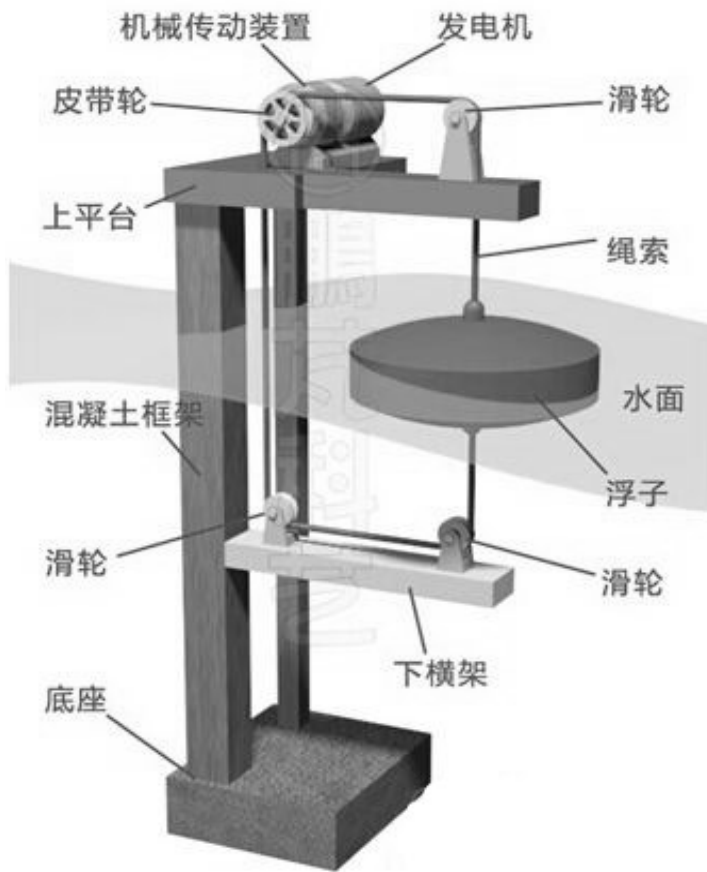
$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T$$

- 波浪能发电的能量转换一般可以分为两次转换阶段：
 - 一次转换阶段:通过波浪能采集系统将波浪转换为机械能；
 - 二次转换阶段:通过涡轮发电机组（可以是空气涡轮机、水轮机、液压马达等动力机械）将机械能转换为电能。
- 波浪能的利用研究已有相当长的历史，其发电方式多种多样，按能量转换的中间环节的不同，波浪能发电可以分为机械式、气动式和液压式三大类。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

2.波浪能



- **机械式波浪能发电:**通过某种传动机构实现波浪能从往复运动到单向旋转运动的传递来驱动发电机发电。
- **机械式波浪能发电系统原理:**
- 浮子漂浮在海平面上，随海浪起伏上下运动，浮子运动通过绳索带动皮带轮正反转；在传动装置内有棘轮机构把正反转变为单向旋转，再通过齿轮增速，飞轮稳速，带动发电机匀速旋转发电。

图1-28机械式波浪能发电系统原理示意

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

2.波浪能

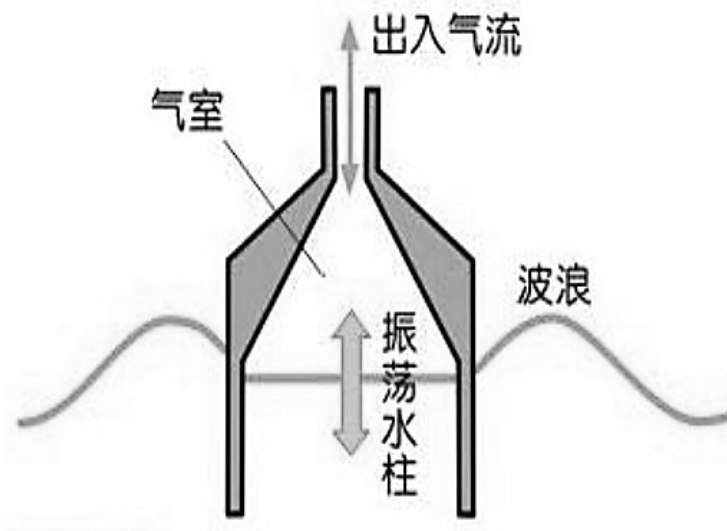


图1-29气动式波浪能发电系统原理示意

- **气动式波浪能发电**:通过气室、气袋等泵气装置将波浪能转换成空气能,再由气轮机驱动发电机发电。
- **气动式波浪能发电系统原理**:
 - 当波峰接近空箱时,水进入空箱,推动箱内水位上升,上升的水位使箱内气压增加,气室内空气通过出入孔排出,由于气孔狭小,气体高速喷出;
 - 在波谷接近空箱时,水从空箱抽出,箱内水位下降,下降的水位使箱内气压降低,外面空气通过出入孔高速进入气室;
 - 在气流通道内安装气动涡轮机,进出的气流就会推动涡轮机旋转,涡轮机带动发电机进行发电。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

2.波浪能

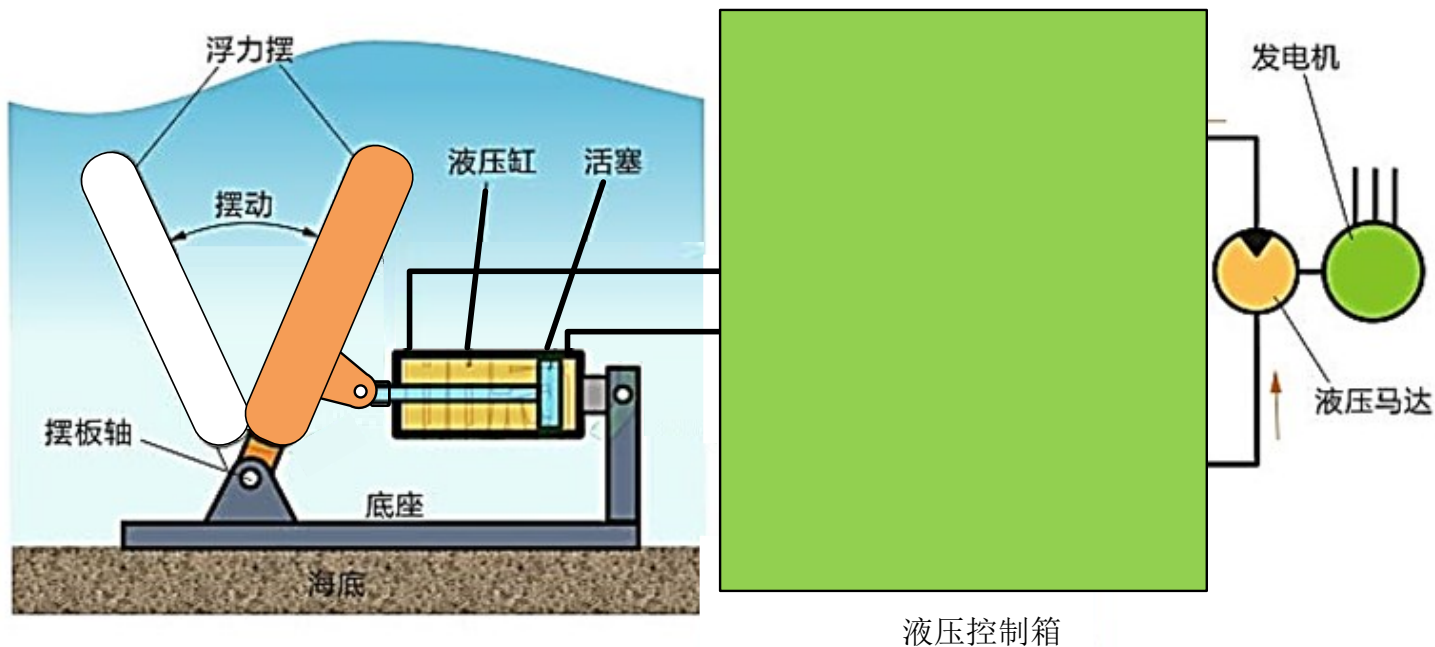


图1-30液压式波浪能发电系统原理示意

- **液压式波浪能发电:**通过某种泵液装置将波浪能转换为液体(油或海水)的势能或压能,再由液压马达或水轮机驱动发电机发电。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

2.波浪能

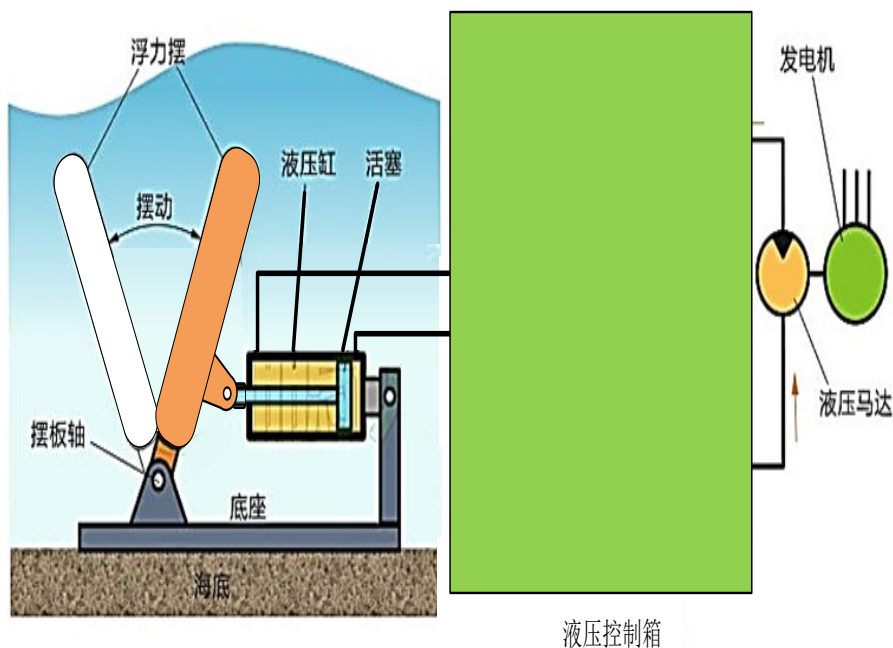


图1-30液压式波浪能发电系统原理示意

•液压式波浪能发电系统原理：

- 该系统利用海水波动推动摆板来回摆动吸收波浪的能量，在海面下的浮力摆就会随波浪来回摆动，摆板来回摆动带动活塞在液压缸内来回移动；
- 油在液压缸两端的管道内来回流动，4个单向阀组成一个全波整流回路，把来回流动的油整成单方向流动的油，整流后的油通过节流阀推动液压马达旋转，液压马达带动发电机进行发电；
- 控制节流阀可以调节液压马达的转速，蓄能器像电路中的电容一样把波动的油压滤得平缓一些，使液压马达均匀旋转；
- 若波浪大而使液压缸输出油压过高时，多余的油通过溢流阀放空返回；



1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

3. 海流能

- **海流能**是另一种以动能形式表现的海洋能，其主要是指海底水道和海峡中较为稳定流动的海水以及由于潮汐导致的有规律的海水流动所产生的能量。

- **海流能平均功率计算公式为**

$$P=0.515AV^2$$

P-海流功率；A-海流横截面积；V-海流的流速。

- 目前，海流能的利用方式主要是发电，其原理和风力发电相似。
- 海流能发电系统归纳起来有两种：
 - **链式发电系统**
 - **旋转式发电系统**

1.4 海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

3. 海流能

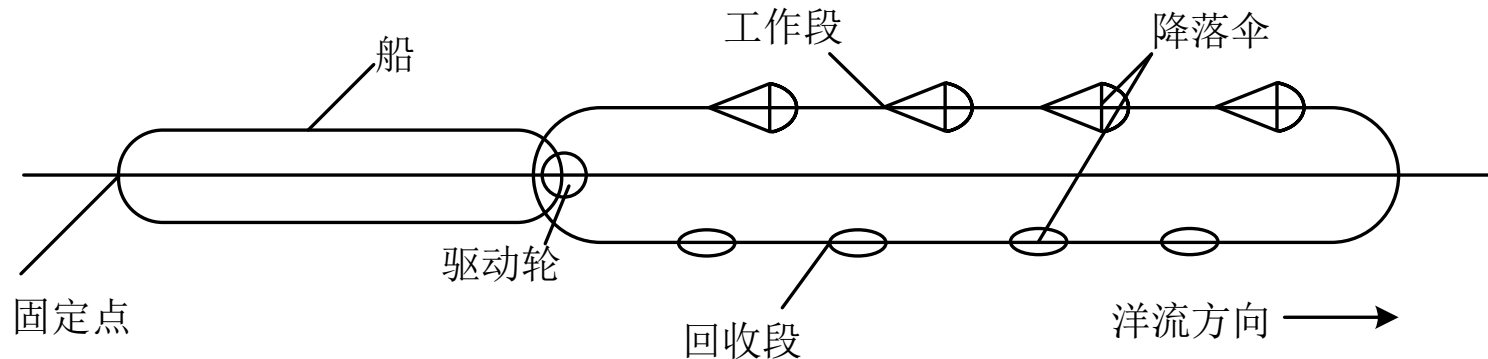


图1-31链式海流发电系统原理示意

- 一种典型的链式海流能发电系统原理：

环状链条上安装有许多降落伞，当降落伞顺着海流方向时，因海流的冲击，降落伞张开；

当降落伞转到与海流相反的方向时，伞口收拢；

挂有降落伞的链条的方向可以一直与流速较大的海流方向保持一致，自动地向驱动轮的下游漂移；

带有降落伞的链条的运动使驱动轮转动，驱动轮与船上的发电机相连，从而驱动发电机发电。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

3. 海流能

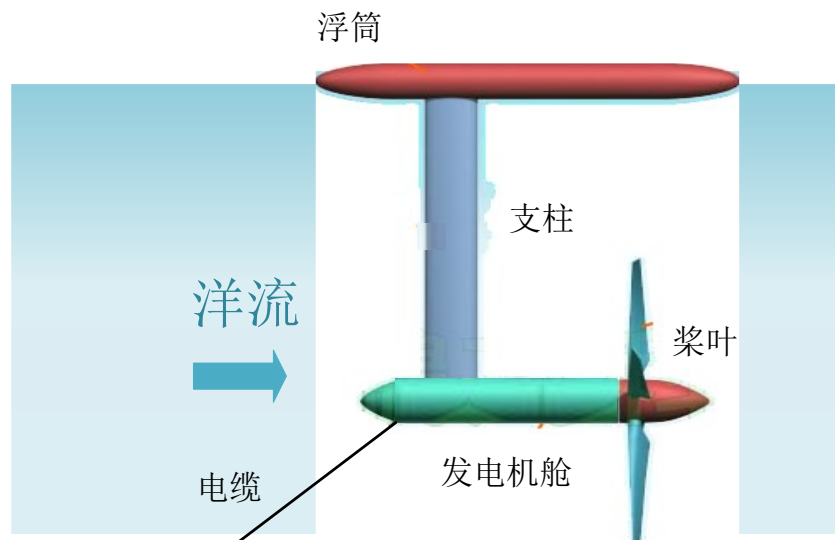


图1-32旋转式海流发电系统原理示意

- 一种典型的旋转式海流能发电系统原理：

该系统工作原理与水平轴风力机相似，利用水流对桨叶产生的升力推动转轮旋转；该系统的转轮通过增速齿轮箱与发电机连接，一同安装在机舱内；机舱通过支柱与上方浮筒固定连接，浮筒与机舱共同产生浮力，使浮筒略浮出海面即可，最后通过海底电缆向陆地送电。



1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

4. 温差能

- **海洋温差能**是指海洋表层海水和深层海水之间温差的热能，是海洋能的一种重要形式。
- **能量转换**：海洋温差能转换是先将海洋热能转换为机械能，再将机械能转换为电能的过程。
- 根据温差能发电工质及循环系统的不同，一般可分为**开式循环**、**闭式循环**和**混合式循环**三种类型。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

4. 温差能

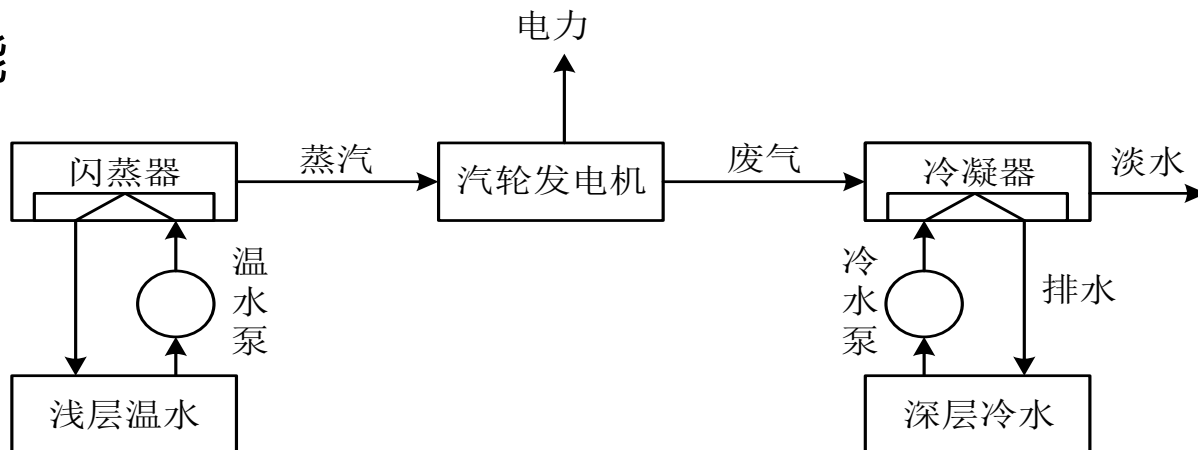


图1-33开式循环海水温差能发电原理示意

- **系统原理**：首先利用真空泵将系统内部抽到一定程度的真空，然后将由温水泵抽出的温海水在闪蒸器内低压沸腾成蒸汽，产生的蒸汽进入汽轮机并推动汽轮机做功，带动发电机发电；从汽轮机排出的蒸汽在冷凝器内被由冷水泵抽出的深层冷海水冷凝，重新凝结成水。
- **优点**：直接以海水为工质，产生电力同时还产生淡水。
- **缺点**：海水沸点高、汽轮机工质压力低、损耗大，同时抽取真空需要消耗大量能量，系统效率低。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

4. 温差能

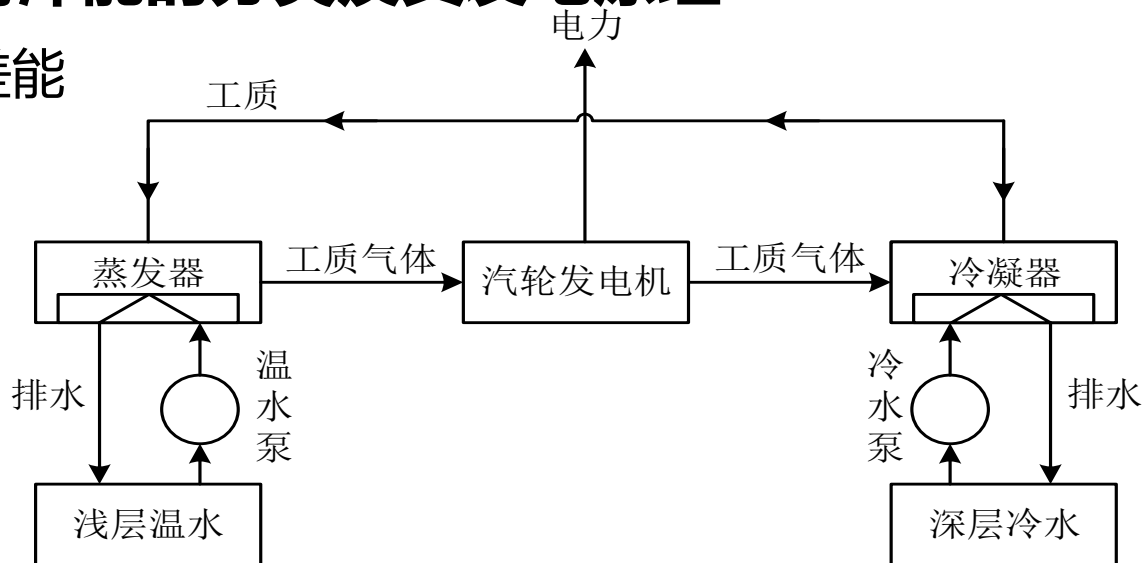


图1-34闭式循环海水温差能发电原理示意

- **系统原理**：低沸点工质通过蒸发器与海洋表层温水进行热交互，使工质蒸发产生高压蒸汽；膨胀的蒸汽推动汽轮发电机旋转，汽轮机排出的工质气体在冷凝器中被深海冷水冷凝成液体，并再次进入蒸发器内，继续进行下一个系统循环
- **优点**：工质沸点低，可以在低温下产生高压气体，又可以在较低的压力下冷凝，提高了汽轮机的压差，增加系统转换效率。
- **缺点**：蒸发器和冷凝器均采用表面式换热器，体积较大，且不能产生淡水。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

4. 温差能

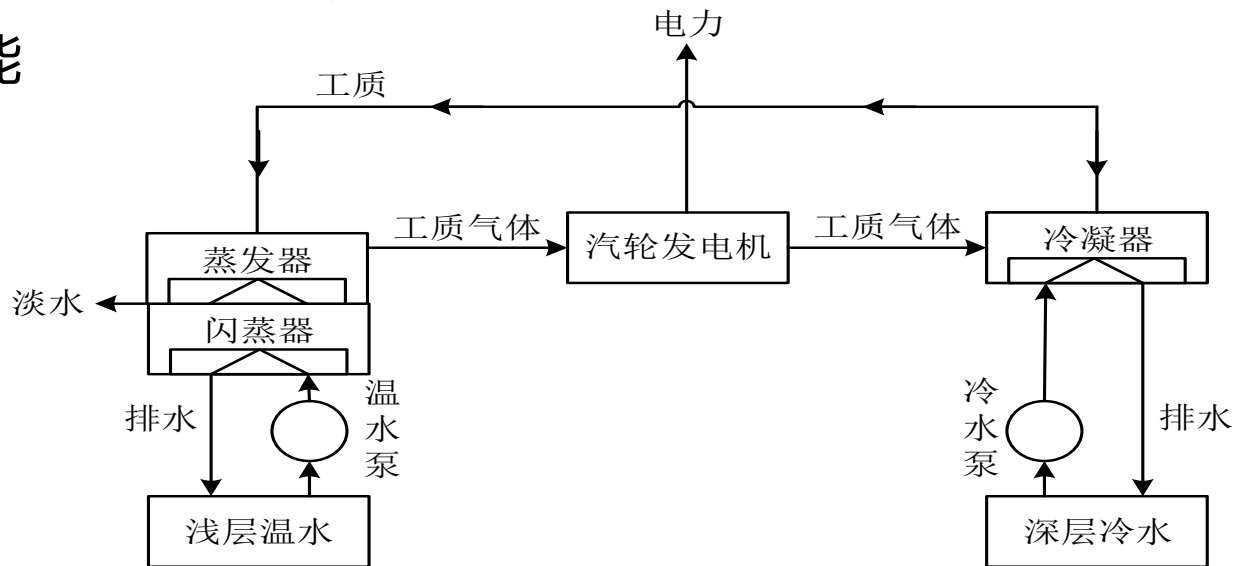


图1-34混合循环温差发电系统原理示意

- **系统原理**：混合循环温差发电系统与开式循环蒸发过程类似，温海水首先进入闪蒸器，迅速蒸发成蒸汽；然后蒸汽进入蒸发器，释放热量以蒸发氨等低温工质；同时海水蒸汽冷凝出淡水，低沸点气体工质驱动涡轮机发电；工质在冷凝器内凝结后再次泵入蒸发器内。
- **特点**：混合式循环系统综合了开式循环和闭式循环的优点，既可以产生淡水，又有较高的效率。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

5.盐差能

- **盐差能**主要存在于河海交界处，是指两种含盐浓度不同的海水之间或者海水和淡水之间的化学电位差能，盐差能是以化学能形态存在的海洋能。

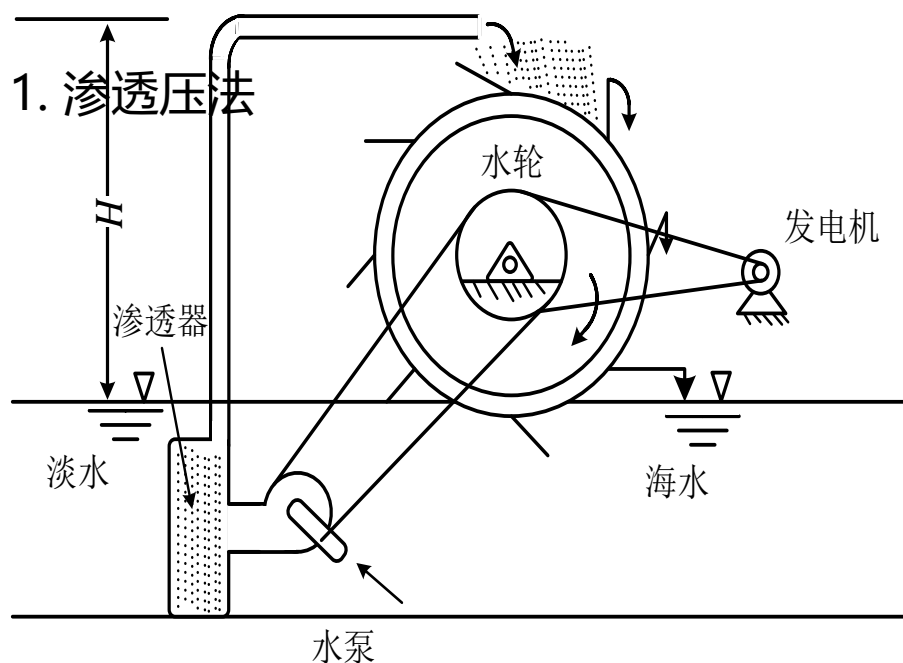


图1-35渗透压法盐差能发电系统原理示意

- **渗透压法**盐差能发电时将含盐浓度不同的海水之间的化学电位差能转换成水的势能，再利用水轮机进行发电的一种盐差能发电方式。
- **发电原理**：水泵将海水送入渗透器（渗透器左侧是半渗透膜），淡水通过半透膜进入海水一侧，使海水一侧的水平面明显高于淡水一侧，海水从更高侧流下推动水轮机旋转，并带动发电机发电。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

5.盐差能

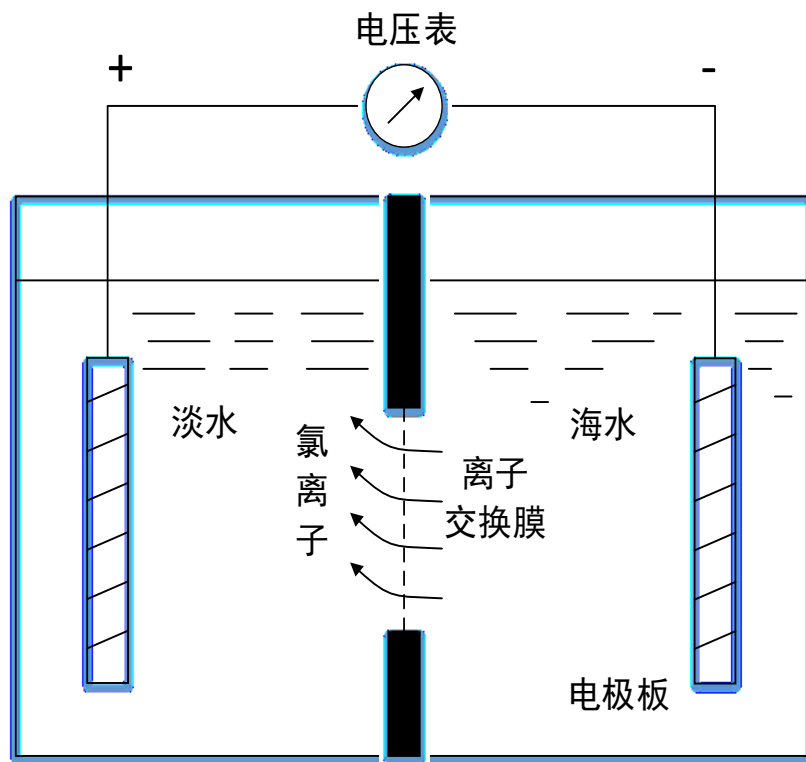


图1-36渗析电池法盐差能发电原理示意

- **渗析电池法:**利用河水和海水之间的电位差能进行发电的一种盐差能发电方式。
- **发电原理:**
 - 氯离子交换膜将海水和淡水隔开，只许氯离子通过；
 - 在淡水与海水中各放一电极板，只要淡水与海水之间的盐度差得以保持，电动势就会一直存在。

1.4海洋能发电

1.4.2 海洋能的分类及其发电原理

5.盐差能

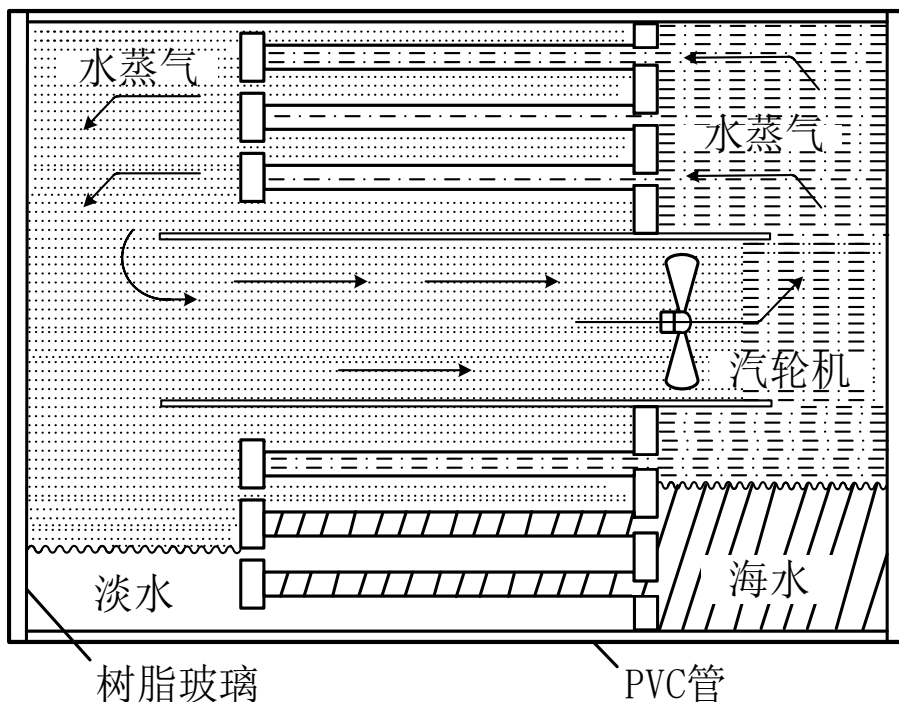


图1-37蒸汽压差法盐差能发电原理示意

- 由于海洋能的能量密度根据海水流速、温度风速等诸多环境因素而变化，需要对海洋能发电系统进行调节，以获得最大的输出功率。

- **蒸汽压差法**:利用淡水与海水的不同蒸汽压进行发电的一种盐差能发电方式。
- 发电原理:
- 在相同加热温度下，淡水比海水蒸发得快，将淡水与海水在同室内隔开加热，水蒸汽很快会从淡水一侧上方流向海水一侧上方，只要在其间安置收集流道，并在流道中装有涡轮发电机组，就可驱动涡轮发电机发电。



1.5燃料电池发电

1.5.1

燃料电池概述

1.5.2

燃料电池的基本原理及分类



1.5燃料电池发电

1.5.1 燃料电池概述

- **燃料电池**是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能按电化学原理转化为电能的能量转化系统。因为燃料电池不存在热机过程，所以**不受卡诺循环的限制**，在其反应过程中不仅不会产生有害污染，而且具有较高的转化效率。
- 燃料电池的**燃料主要是氢气**，而氢气则又可以通过在光伏、风电等新能源获得的电能电解水来获得，从而构成了可再生燃料电池。
- 燃料电池的研究和开发，已取得了较好的理论和应用研究成果，从而使得**燃料电池有望取代传统发电机及内燃机，广泛应用于发电和新能源汽车领域**。更为重要的是，这种重要的新型发电方式实现了电能生产与消费的同步，可显著提高燃料利用率、降低燃料污染以及解决电力供应问题，提高电网安全性。
- **在国际新能源汽车领域**，日本、韩国和欧美等汽车企业相继推出燃料电池电动汽车，如现代汽车的第五代氢燃料电池车——Nexo，其续航里程高达805km，百公里加速仅9.9秒；而丰田的第一款氢燃料电池车Mirai。2017年在美国的销量就已经突破了3000台。日本计划至2040年普及氢燃料电池车，积极推进技术研发，提高燃料电池性能，降低整车的制造成本。未来日本氢燃料电池车的续航里程将达到1000公里，到2040年氢燃料电池车的保有量将由目前的2000辆增加至300万-600万辆。



1.5燃料电池发电

1.5.1 燃料电池概述

- 在我国，燃料电池技术的研究和应用也取得了长足进步。
- 2008年奥运会期间，上海大众推出了直接甲醇燃料电池（DMFC）车；
- 在2010年上海世博会期间，我国展出了196辆氢燃料电池汽车。
- 2015年，上汽推出了续航400公里、“无污染，零排放”的荣威750E燃料电池汽车。
- 2016年，福田汽车集团，推出了欧辉系列12米和8.5米级别（长度）的燃料电池大巴。并进一步推进研究，计划在几年内研发出具备大规模批量生产和商业化应用的原创掌握的燃料电池核心技术、整车以及配套支持设备。
- 现在国家已经计划把燃料电池客车作为燃料电池商业化的突破口。另外，燃料电池舰船尤其是潜艇，以及航空航天领域也得到了广泛的应用。

1.5燃料电池发电

1.5.2 燃料电池的基本原理及分类

1.燃料电池基本原理

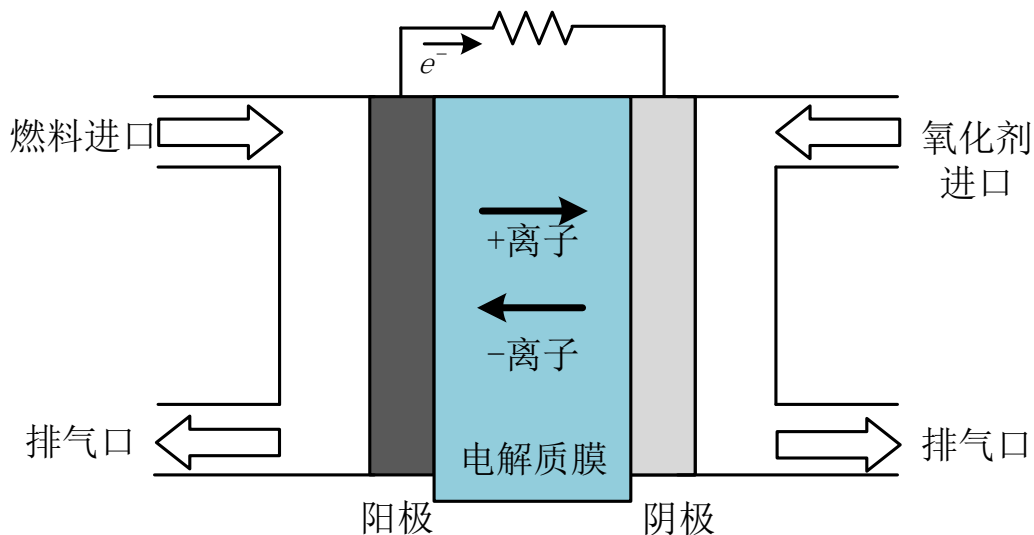


图1-38燃料电池基本原理结构

- 燃料电池单体由**阳极**（燃料电极）、**阴极**（氧化电极）及**电解质膜**组成。
- 工作时，燃料和氧化物由外部供给，进行反应。原则上只要反应物不断输入，反应产物不断排出，燃料电池就能实现连续发电。

1.5燃料电池发电

1.5.2 燃料电池的基本原理及分类

1.燃料电池基本原理

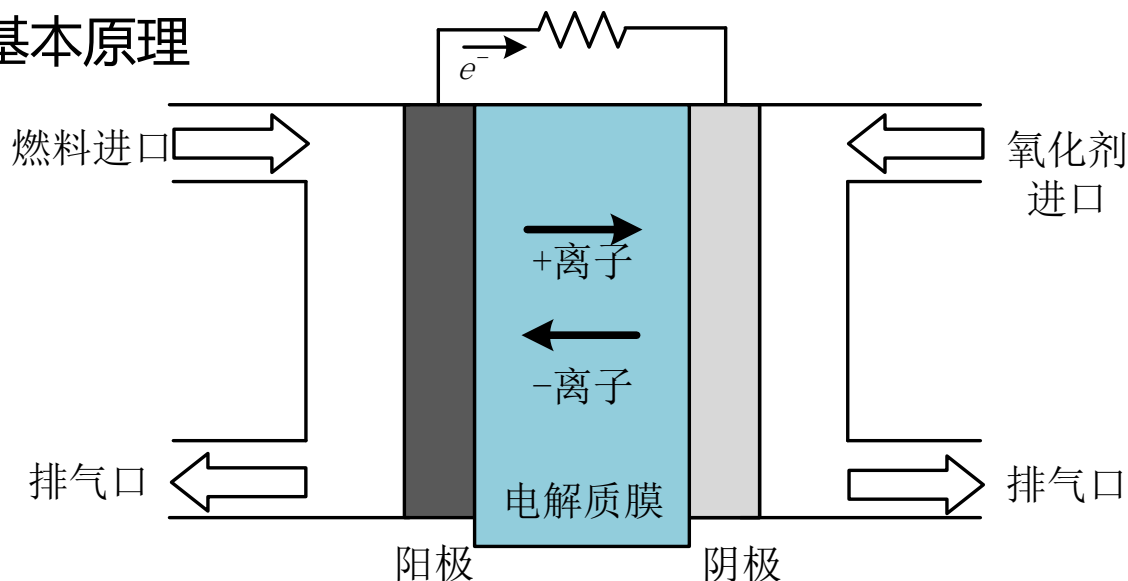


图1-38燃料电池基本原理结构

- 以**氢燃料电池**为例，其电化学反应过程为：
阳极气体通道中的燃料氢气在通过阳极时与催化剂发生化学反应，产生氢离子，并释放出电子；
在阳极侧形成的氢离子经由电解质隔膜转移到阴极的催化层上，而电子则需经过外部电路到达阴极，到达阴极的氢离子便会与阴极上的氧化剂氧气发生化学反应生成水，并消耗电子。

1.5燃料电池发电

1.5.2 燃料电池的基本原理及分类

2.燃料电池的组成



图1-39燃料电池发电系统的构成

- 燃料电池发电系统的组成主要有**燃料重装系统**、**空气供应系统**、**DC-AC变换系统**、**控制系统**和**余热回收系统**等，另外在高温燃料电池中还有**剩余气体循环系统**等。



1.5燃料电池发电

1.5.2 燃料电池的基本原理及分类

2.燃料电池的组成

- 燃料电池发电系统中主要组成部分的功能如下：

燃料重装系统：将得到的燃料转化为燃料电池能使用的以氢为主要成分的一个转换系统。

空气供应系统：可使用电动机驱动的送风机或空气压缩机。

DC-AC变换系统：直流到交流的逆变装置。

控制系统：控制燃料电池发电时的起停、运行、外接负载等的装置。

余热回收系统：用于回收燃料电池发电时所产生的热能。

剩余气体循环系统：在高温燃料电池发电装置中，由于燃料电池排热温度高，因此安装可以使用蒸汽轮机与燃气轮机的剩余气体循环系统。

- **功率变换系统（DC-DC变换器和DC-AC变换器）是燃料电池的核心部分之一。**
DC-DC变换除了升/降压匹配之外，它还可以阻断负载侧向燃料电池流入反相电流，另一方面可避免逆变器直流侧纹波电流对燃料电池的脉冲冲击的不利影响。



1.5燃料电池发电

1.5.2 燃料电池的基本原理及分类

3.燃料电池的分类

- 燃料电池按其所用电解质大致可分为如下五大类型：
- 碱性燃料电池 (AFC) alkali
- 磷酸型燃料电池 (PAFC) phosphoric acid
- 质子交换膜燃料电池 (PEMFC) proton exchange membrane
- 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) molten carbonate
- 固体氧化物燃料电池 (SOFC) solid oxide



1.5燃料电池发电

	低温燃料电池 (60-120°)		中温燃料电池 (160-220°)	高温燃料电池 (600-1000°)	
类型	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
应用	太空飞行、国防	汽车、潜水艇、移动电话、笔记本电脑	热电联产电厂	联合循环热电厂、电厂船	电厂、家庭电源传送
开发状态	在太空飞行中的应用	家庭电源试验项目、轿车、公共汽车	具有200KW功率的电池在工业中的应用	容量为280KW至2MW的试验电厂	100KW的试验电厂
电解质	氢氧化钾溶液	质子可渗透膜	磷酸	锂和碳酸钾	固体氧化钴
燃料	纯氢	氢，甲醇天然气	天然气，氢	天然气，煤气，沼气	天然气，煤气，沼气
氧化剂	纯氧	大气中的氧气	大气中的氧气	大气中的氧气	大气中的氧气
效率	60-90%	43-58%	37-42%	>50%	50-65%
研发机构	美国国际燃料电池公司	加拿大Ballard公司 美国Plug Power 美国Analytic Power 日本三菱、三洋、松下、东芝公司	美国Onsi公司 日本三菱、三洋、东芝公司	美国能源研究 德国MTU 荷兰ECN	德国西门子 美国西屋 日本三菱 日本富士电机

图1-40各类燃料电池基本情况表



本章结束