

储能技术 第1章习题答案

1-1 简述广义的储能方式与狭义的储能方式的联系与区别。

解：

联系：广义的储能方式包含狭义的储能方式。

区别：广义的储能方式包括基础燃料(煤、石油和天然气等)、二次燃料(氢、煤气和太阳能燃料等)、电能和热能等各种形式的能量的存储；而狭义的储能方式通常指储电和储热。

1-2 简述能量密度与功率密度的区别。

解：

能量密度是指单位质量或体积的储能系统所具有的有效储存能量，又称比能量，包括质量能量密度(质量比能量)与体积能量密度(体积比能量)，常用单位分别为Wh/kg 或 Wh/L。

功率密度功率密度是指单位质量或体积的储能系统所能输出的最大功率，又称比功率，包括质量功率密度(质量比功率)与体积功率密度(体积比功率)，常用单位分别为 W/kg 或 W/L。

1-3 简述储能技术在三个历史时期的发展特点。

解：

根据各历史阶段储能使用的不同特点，可以把整个储能发展历史大致分为三个时期，即初步探索期、多元发展期和高速发展期。

初步探索期：以电力储能技术为代表的多种储能技术逐渐登上了历史舞台。其中，电化学储能和抽水蓄能的发展相对较快，并得到了一定程度的应用；氢储能也得到了初步的探索，并在少数领域中得到了使用。

多元发展期：电化学储能、抽水蓄能等多种储能技术进入了新的发展阶段，一些新的储能技术，如压缩空气储能、超导磁储能和热储能逐渐登上了储能的历史舞台。

高速发展期：新能源的推广使用和科学技术的发展大大推动了储能技术的推广与应用。其中，抽水蓄能储能技术发展较为成熟，装机容量大幅提升；电化学储能逐步实现大规模产业化，具有广泛的应用前景；超级电容储能、超导磁储能、飞轮储能、压缩空气储能发展迅速，并得到了一定的应用；热储能和氢储能也展示了良好的发展态势和应用前景。

1-4 简要对比分析抽水蓄能与压缩空气储能的工作特性。

解：

抽水蓄能电站具有上、下游两个水库。负荷低谷时段抽水蓄能设备工作在电动机状态，将下游水库的水抽到上游水库保存；负荷高峰时抽水蓄能设备工作于发电机状态，利用储存在上游水库中的水发电。

压缩空气储能是利用压缩空气作为载体来实现能量存储和利用的一种能源系统。储能时，电能或机械能驱动压缩机由环境中吸取空气将其压缩至高压状态并存入储气装置，电能或机械能在该过程中转化为压缩空气的内能和势能；释能时，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平中膨胀做功发电，压缩空气中蕴含的内能和势能在该过程中重新转化为电能或机械能。

1-5 简要对比分析铅炭电池与传统铅酸电池的特性。

解：

传统铅蓄电池的电极由铅及其氧化物制成，电解液为硫酸溶液。在充电状态下，铅蓄电池的正极主要成分为二氧化铅，负极主要成分为铅；在放电状态下，正负极的主要成分均为硫酸铅。

铅炭电池将活性炭按一定比例混入铅负极板活性物质中，有效改善了铅蓄电池的倍率放电性能、脉冲放电寿命和接收电荷的能力。铅炭电池继承了传统铅酸电池的安全优势，本身没有易燃材料，不燃不爆。但是，铅炭电池较传统铅酸电池的析氢量有所增加，需要注意电池排气的问题及其带来的安全隐患。

1-6 简要对比分析锂离子电池、液流电池和钠流电池的特性。

解：

锂离子电池主要由电极材料(正极、负极)、电解液、隔膜、导电剂、粘结剂和极耳等组成。锂离子电池以含锂的化合物作正极，如钴酸锂 (LiCOO_2)、 锰酸锂 (LiMn_2O_4) 和磷酸铁锂 (LiFePO_4) 等二元或三元材料；负极采用锂-碳层间化合物，包括石墨、软碳、硬碳和钛酸锂等；电解质由溶解在有机碳酸盐中的锂盐组成。充电时，锂原子变成的锂离子通过电解质向碳极迁移，在碳极与外部电子结合后作为锂原子储存；放电时为充电时的逆反应。与其他化学电池相比，锂电池具有显著的优点，主要有：高能量密度、长寿命、低自放电率、无记忆效应、易快充快放等。

液流电池全称为氧化还原液流电池，由电解液罐、电堆、泵体、功率转换器以及热交换器构成。与以固体作为电极的一般电池不同，液流电池的活性物质是具有流动性的电解质溶液。液流电池的输出功率与电池容量互相独立(功率大小取决于电堆，而容量大小取决于电解液容量)，因此可通过增加电解液量或提高电解液浓度达到增加电池容量的目的。由于电解液分别存储于两个储液罐中，一般不存在电池自放电和电解液变质问题。

钠硫电池由正极、负极、电解质、隔膜和外壳组成。与一般二次电池不同，钠硫电池是由熔融电极和固体电解质组成，负极的活性物质为熔融金属钠，正极活性物质为液态硫和多硫化钠熔盐。钠与硫通过化学反应，将电能储存起来；当电网需要电能时，再将化学能转化成电能并释放出去。钠硫电池具有体积小、容量大、寿命长和效率高等优点。此外，钠硫电池的“蓄洪”性能突出，即可使输入的电流突然达到额定功率5-10 倍，它也能稳定地进行能量存储与释放。但是，钠硫电池需要在300-350℃的高温下工作，其安全性能相对较差。

1-7 为什么说储能是促进规模化新能源应用的前提？

解：

由于风能、太阳能等新能源的波动性、随机性以及反调峰、极热无风、晚峰无光等特性，新能源的规模化并网消纳极为困难，轻则产生“弃风、弃光”现象，重则诱发大规模连锁脱网事故，给安全运行带来严重威胁。储能技术是支撑高比例新能源并网的关键技术。一方面，通过引入储能系统，可以实现太阳能、风能等新能源发电功率的平滑输出，降低新能源并网给系统带来的冲击，提高并网消纳率。另一方面，通过引入储能系统，还可有效调控新能源发电所引起的电网电压、频率及相位变化，提高新能源电力系统的安全性及电能质量，从根本上促进新能源的开发利用。

1-8 为什么说储能是构建能源互联网的支撑技术？

解：

能源互联网通过电能、热能和化学能等多种能源的相互转换和互补，使能量可以在电网、气网、热力网和交通网等能源网络之间流动，提升能源的综合利用率。储能包括电化学储能、压缩空气储能、储热和储氢等不同形式的能源储存方式，可以建立多种能源之间的耦合关系，发挥能量中转、匹配和优化等作用，是构建能源互联网的关键支撑技术。

第2章习题答案

2-1 试阐述抽水蓄能电站的定义。

答：抽水蓄能电站是利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库，在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的水电站，又称蓄能式水电站。

2-2 试阐述抽水蓄能电站的基本结构。

答：抽水蓄能电站，一般由上水库、输水系统、厂房和下水库等组成。

2-3 试从能量转换的角度阐述抽水蓄能电站的工作原理及其本质。

答：抽水蓄能电站的工作原理是利用电力系统负荷低谷时过剩的电能，通过电动机水泵将低处的下水库的水抽到高处的上水库中，从而将过剩的电能转换为水的势能并加以储存，待电力系统负荷转为高峰时，再将这部分水从上水库放到下水库，推动水轮发电机发电。本质是采用水作为能量载体，实现能量存储、跨时空转移和利用的一种储能技术。

2-4 试阐述抽水蓄能电站在电力系统中所承担的功能，以及这些功能对维持电力系统运行起到的作用。

答：抽水蓄能电站集储能与发电两大功能于一体，可有效调节电力系统的供需，使其达到动态平衡，大幅度提高电网的运行安全和供电质量。具体功能包括削峰填谷、调频(快速跟踪负荷)、调相(调压)、事故备用和黑启动等。

2-5 试阐述抽水蓄能电站的主要分类方式，以及各分类方式对应的具体抽水蓄能电站类型。

答：抽水蓄能电站主要有7种分类方式：按开发方式分类、按天然径流条件分类、按水库座数分类、按发电厂房形式分类、按水头高度分类、按机组型式分类和按水库调节周期分类。

(1) 按开发方式分类，抽水蓄能电站可分为引水式抽水蓄能电站和抬水式抽水蓄能电站两类。

(2) 按天然径流条件分类，抽水蓄能电站可分为纯抽水蓄能电站和混合式抽水蓄能电站两类。

(3) 按水库座数及位置分类，抽水蓄能电站可分为两库式抽水蓄能电站和三库式抽水蓄能电站。

(4) 按发电厂房形式分类，抽水蓄能电站可分为地面式、地下式和半地下式抽水蓄能电站三种。

(5) 按水头高低分类，抽水蓄能电站可分为低水头抽水蓄能电站、中水头抽水蓄能电站和高水头抽水蓄能电站。

(6) 按机组型式分类，抽水蓄能电站可分为分置式(四机式)抽水蓄能电站、串联式(三机式)抽水蓄能电站和可逆式(两机式)抽水蓄能电站。

(7) 按水库调节周期分类，抽水蓄能电站可分为日调节、周调节、季调节和年调节等类型。

2-6 试解释以下抽水蓄能电站专有名词：(1)正常蓄水位；(2)死水位；(3)水头特性；(4)能量特性。

答：

(1)正常蓄水位和死水位是水库的特征水位。正常蓄水位指抽水蓄能电站正常运行情况下，水库蓄水能达到的最高水位。

(2)死水位指抽水蓄能电站正常运行情况下，水库蓄水的最低工作水位。

(3)抽水蓄能电站的水头特性是指电站的水头值与上水库的放水量间的关系。

(4)蓄能水库的能量特性是指抽水蓄能电站的发电量与上水库蓄能库容的放水量之间的关系。

2-7 已知某抽水蓄能电站上水库正常蓄水位 $Z_{uN}=800\text{m}$ ，上水库死水位 $Z_{up}=780\text{m}$ ，下水库正常蓄水位 $Z_{LN}=300\text{m}$ ，下水库死水位 $Z_{Lp}=260\text{m}$ 。求此抽水蓄能电站的最大水头 $H_{\max}$ 、最小水头 $H_{\min}$ 值。

解：

由公式(2-1)和(2-2)可得

$$\text{此抽水蓄能电站的最大水头 } H_{\max} = Z_{uN} - Z_{Lp} = 800 - 260 = 540\text{m}$$

$$\text{此抽水蓄能电站的最小水头 } H_{\min} = Z_{up} - Z_{LN} = 780 - 300 = 480\text{m}$$

2-8 某抽水蓄能电站的蓄能库容为 $2.3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，按最大的容量进行削峰填谷。在抽水工况下，变压器、电动机、水泵和输水系统的运行效率分别为99%、97%、92%和98%；在发电工况下，输水系统、水轮机、发电机和变压器的运行效率分别为97%、90%、97%和99%；水库表面蒸发、水库渗漏和事故库容等因素引起的损失系数为1.2；发电运行5个小时。假定运行时段平均水头为600m。试求：

(1)抽水蓄能电站的抽水工况运行效率、发电工况运行效率、综合效率；

(2)发电运行状态下的调峰容量(功率)和调峰电量(能量)。

解：

(1)由公式(2-8)和式(2-9)可知：

$$\text{抽水工况运行效率为 } \eta_r = 0.99 \times 0.97 \times 0.92 \times 0.98 \times 100\% = 86.6\%$$

$$\text{发电工况运行效率为 } \eta_p = 0.97 \times 0.90 \times 0.97 \times 0.99 \times 100\% = 83.8\%$$

由公式(2-7)可知：

$$\text{综合效率为 } \eta = \eta_r \times \eta_p = 0.866 \times 0.838 \times 100\% = 72.6\%$$

(2)由公式(2-3)可知：

$$\text{调峰容量为 } N = \frac{9.81 \eta_T \bar{H}}{3600 h K} V_S = \frac{9.81 \times 0.866 \times 600}{3600 \times 5 \times 1.2} \times 2.3 \times 10^{10} = 5.4277 \times 10^9 \text{ (kW)}$$

$$\text{调峰电量为 } E_T = \frac{\eta_T \bar{H}}{367 K} V_S = \frac{0.866 \times 600}{367 \times 1.2} \times 2.3 \times 10^{10} = 2.71362 \times 10^{10} \text{ (kWh)}$$

2-9 试阐述抽水蓄能机组调相基本原理。

答：电机的空载电势与励磁电流正相关。假设初始时机组输出电流为零。

(1)在此基础上增加励磁电流，此时空载电势增加，由相量图可知机组此时输出滞后的无功电流，机组输出感性无功功率。

(2)在此基础上减少励磁电流，此时空载电势减少，由相量图可知机组此时输出超前的无功电流，机组消耗感性无功功率。

2-10 试阐述抽水蓄能机组发电调相和抽水调相在运行时的区别。

答：抽水蓄能机组的发电调相工况和抽水调相工况主要存在以下三点区别

(1)转子不同。对于可逆式机组来说，发电调相工况和抽水调相工况下转子转向相反。

(2)继电保护配置不同。由于可逆式机组的转向不同，一些与相位相序有关的双向配置的保护就会设置得不一样，如负序过流保护、相序保护、失磁保护和失步保护等。

(3)使用频率不同。抽水调相工况是机组由静止工况切换至抽水工况的一个过渡状态，而发电调相工况只有在电网遇到紧急情况时才会使用，因此抽水调相工况的使用频率要远高于发电调相工况。

2-11 试列举常见的抽水蓄能机组的基本工况及切换方式。

答：

(1)抽水蓄能机组有静止、抽水、发电、抽水方向调相和发电方向调相五种基本工况。

(或：抽水蓄能机组有静止、抽水、发电、调相四种基本工况)

(2)常见的工况切换共有12种，包括：1)静止至发电；2)发电至静止；3)静止至发电方向调相；4)发电方向调相至静止；5)静止至抽水；6)抽水至静止；7)静止至抽水方向调相；8)抽水方向调相至静止；9)发电至发电方向调相；10)发电方向调相至发电；11)抽水至抽水方向调相；12)抽水方向调相至抽水。

2-12 试列举二机可逆式机组的起动方式，并进一步细分异步起动方式和同步起动方式的区别。

答：二机可逆式机组的起动方式包括起动电动机起动、异步起动、同步起动和半同步起动共四种。异步起动方式包括全压起动、降压起动和部分定子绕组起动三种。同步起动包括背靠背同步起动和静止变频器起动两种。

2-13 试阐述抽蓄机组制动时转子所受的制动力及其与转速的对应关系。

答：制动时机组受到的制动力有水流制动力、空气阻力、轴承阻力、铜损等效阻力和外接电阻等效阻力五种。阻力与转速关系如下表所示：

阻力	与转速n关系
水流制动力	cn ²
空气阻力	xn ^{1.8}
轴承阻力	xn ^{0.5}
铜损等效阻力	xn ⁻¹
外接电阻等效阻力	xn ⁻¹

2-14 试阐述机组运行可用率指标和起动成功率指标之间的内在关系。

答：主要体现在可用率和起动成功率这两个指标。两个指标之间的联系是：

(1)追求高可用率会减少机组停运检修的时间，当机组本身存在隐患而无法排除时，会造成机组起动成功率降低。当隐患进一步扩大，机组将会损坏而反作用于可用率，导致其下降。

(2)随着技术的不断发展，带有一定盲目性的计划检修会逐步减少，取而代之的是更为先进的在线维护和状态检修。在这种情况下，在保障高可用率的同时也可以维持机组的可靠运行，提高起动成功率。

2-15 今有一抽水蓄能机组运行调相工况，定子绕组 Y 接。初始时机组的励磁电流 $I_{f1}=1000A$ ，输出感性无功功率为200MVar。现接到调度指令需要增发50MVar 感性无功功率。假定其空载电势与励磁电流成正比，电网线电压 $U_1=18kV$ 保持不变，机组每相同步电抗 $X_s=0.5\Omega$ ，不计电阻压降。试求此时的励磁电流。

解：由线电压可求解得到相电压

$$U=U_1/\sqrt{3}=18/\sqrt{3}=10.4(kV)$$

调相状态下机组与电网无有功功率交换，因此 $\delta_1=\delta_2=0^\circ$ ， $\phi_1=\phi_2=90^\circ$ 。故电枢电流可由无功功率求解得到

$$I_{a1}=\frac{Q_1}{\sqrt{3}U_1\sin\varphi_1}=\frac{200}{\sqrt{3}\times18\times\frac{\sqrt{3}}{2}}=7.4(kA)$$
$$I_{a2}=\frac{Q_2}{\sqrt{3}U_1\sin\varphi_2}=\frac{250}{\sqrt{3}\times18\times\frac{\sqrt{3}}{2}}=9.2(kA)$$

进而可求解得到空载电势

$$E_{01}=U+IX_4=10.4+7.4\times0.5=14.1(kV)$$
$$E_2=U+I_2X=10.4+9.2\times0.5=15(kV)$$

由空载电压与励磁电流成正比可得

$$I_{f2}=\frac{E_{02}I_{f1}}{E_{01}}=\frac{1000\times15}{14.1}=1063.8(A)$$

2-16 今有一抽水蓄能机组，其故障率 $\lambda = \frac{1}{7}$ ，修复率 $\mu = \frac{1}{9}$ ，试求其故障密度函数，修复密度函数和可用率。

解：

依题意，机组的故障率 λ 和修复率 μ 均为常数，由2.3.3节中关于故障率的相关推导可知机组的故障密度函数为：

$$f(t) = \frac{1}{7} e^{-\frac{1}{7}t}$$

修复密度函数为：

$$r(t) = \frac{1}{9} e^{-\frac{1}{9}t}$$

故障率A为：

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\frac{1}{9}}{\frac{1}{7} + \frac{1}{9}} = \frac{7}{16} = 0.4375$$

2-17 抽水蓄能电站中有机组1和机组2 两台抽水蓄能机组，其中机组1的故障率 $\lambda_1 = \frac{1}{24}$ ，修复率 $\mu_1 = \frac{1}{4}$ ；机组2的故障率 $\lambda_2 = \frac{1}{6}$ ，修复率 $\mu_2 = \frac{1}{34}$ ，忽略其他因素的影响。试求：

- (1) 当机组1和机组2串联组合时，抽水蓄能电站的可用率；
- (2) 当两台机组并联组合时，抽水蓄能电站的可用率。

解：

根据定义求得机组1的可用率 A_1 ，机组2的可用率 A_2 分别为

$$A_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{24} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{3} \approx 0.33$$

$$A_2 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{6} + \frac{1}{3}} = \frac{2}{3} \approx 0.67$$

当机组1和机组2串联组合时，根据定义可求解得到抽水蓄能电站的可用率为：

$$A = A_1 \cdot A_2 = 0.33 \cdot 0.67 \approx 0.22$$

当两机组并联组合时，根据定义可求解得到抽水蓄能电站的可用率为：

$$A = 1 - (1 - A_1) \cdot (1 - A_2) = 1 - 0.67 \cdot 0.33 \approx 0.78$$

第3章 习题答案

3-1 简述压缩空气储能的工作原理及系统组成。

答：压缩空气储能就是采用压缩空气作为能量载体，实现能量存储和跨时间、空间转移和利用的一种能源系统，其主要包括空气压缩机和空气透平膨胀机两大能量转化设备及高压空气储气装置。压缩空气储能系统主要可以分为储能和释能两个基本工作过程：储能时，电动机驱动压缩机由环境中吸取空气将其压缩至高压状态并存入储气装置，电能在该过程中转化为压缩空气的内能；释能时，储气装置中存储的压缩空气进入空气透平中膨胀做功发电，压缩空气中蕴含的内能和势能在该过程中重新转化为电能。当然，也可以直接采用外部机械能驱动空气压缩机，或使空气膨胀机直接对外输出机械能。

3-2 简述压缩空气储能和抽水蓄能在工作原理上的相似之处。

答：和抽水蓄能一样，压缩空气储能也是一种采用机械设备实现能量存储和转移的物理储能技术。根据工作流程，压缩空气储能系统通常包括空气压缩机和空气透平膨胀机两大能量转化设备，其功能分别和抽水蓄能中的水泵和水轮机相类似。此外，类似于抽水蓄能具有的低位水库和高位水库，压缩空气储能系统还包括由大气环境和储气装置形成的开放式低压气库和封闭式高压气库。

3-3 下列压缩空气储能电站不是采用盐穴储气方式的是(C)

A、Huntorf 电站 B、McIntosh 电站 C、TICC-500电站 D、江苏金坛电站

3-4 德国ADELE 项目属于哪种压缩空气储能技术路线?简述该项目终止的主要原因。

答：德国ADELE 项目属于高温绝热压缩空气储能技术路线，由于超高温压缩和超大容量的高温高压固体填充式蓄热技术难以实现，受限于上述技术瓶颈和超预算的设备研发制造成本，该项目最终终止。

3-5下列压缩空气储能技术路线中，不适宜建设大容量储能电站技术的是(C)

A、传统补燃式压缩空气储能 B、中温绝热压缩空气储能
C、等温压缩空气储能 D、复合式压缩空气储能

3-6 简述深冷液化空气储能的技术原理及其优缺点。

答：深冷液化空气储能又称作液态空气储能技术，其在压缩、膨胀和储热方面与绝热式压缩空气储能是类似的。所不同的是，其在传统压缩空气储能技术的基础上引入了低温过程和蓄冷装置，将高压空气液化后常压存储液态空气，其增加了储能过程中空气的冷却、液化、分离、储存和释能过程中空气的气化过程。因此，液态空气储能技术更为复杂。

和压缩空气储能技术相比，液态空气储能技术最大的优点是空气以常压液态形式储存，储能密度高，可大大减少储气系统的容积，减少电站对地形条件的依赖。但由于增加蓄冷系统，导致系统结构更为复杂。同时，由于蓄冷系统在储能和释能过程中动态损失较大，导致系统的储能效率偏低。

3-7 关于复合式压缩空气储能，以下说法错误的是(B)

- A、可以与光热、地热和工业余热相结合 B、需要化石燃料补燃
C、具备多能联储、多能联供能力 D、电站容量可达百兆瓦级别

3-8 补燃式压缩空气储能的技术原理是什么?其与传统燃气动力循环有什么联系和区别?
补燃式压缩空气储能的优点和局限性又是什么?

答：传统的燃气动力循环在吸热过程中采用天然气与压缩空气混合燃烧的方式提升燃气轮机进气温度。通过借鉴燃气动力循环，在压缩空气储能系统膨胀机前设置燃烧器，利用天然气等燃料与压缩空气混合燃烧，以提升空气透平膨胀机进气温度。这种采用化石燃料与压缩空气混合燃烧的方式来实现压缩空气储能的技术路线称为补燃式压缩空气储能系统。

补燃式压缩空气储能系统与传统燃气动力循环存在较多相似之处，但两者结构上最显著的区别在于，燃气动力循环中空气压缩机与燃气轮机同轴，燃气轮机输出的部分轴功用来驱动空气压缩机，而补燃式压缩空气储能系统中的空气压缩机与燃气轮机相对独立。

补燃式压缩空气储能结构简单，技术成熟度高、设备运行可靠、投资成本低，具有较长的使用寿命，具备与燃气电站类似的快速响应特性。然而，在当前大力发展绿色能源、控制碳排放量的大背景下，补燃式压缩空气储能的碳排放已成为其最大弊端之一。

3-9 非补燃压缩空气储能主要有几种技术路线?分别阐述其优点及局限性。

答：非补燃压缩空气储能主要包括绝热式、等温式和复合式，其中，绝热式压缩空气储能又分为高温绝热压缩空气储能和中温绝热压缩空气储能。

高温绝热压缩空气储能系统效率较高，然而，高温压缩机内部的密封结构和润滑结构目前均存在重大技术瓶颈，固体式填充床易存在温度梯度和换热不均。因此，在当前的设备技术和工艺水平条件下，高温绝热压缩空气储能系统难以实现工程应用。中温绝热压缩空气储能关键设备技术成熟、成本合理，可基于当前成熟的关键设备技术和工艺水平开展设计和制造；系统稳定性、可控性较强，具备多能联储、多能联供的能力，易于实现工程化应用，但其效率还需要进一步提升。

等温压缩空气储能系统的优点是系统结构简单、运行参数低，但其装机功率一般较小，储能效率较低，等温的压缩过程和膨胀过程也难以实现，仅适用于小容量的储能场景，例如分布式储能、家庭储能。

复合式压缩空气储能系统形式较多，可在理论研究或工程应用中根据需求进行多样化的设计和调整。复合压缩空气储能系统具有较强的多能联储、多能联供的能力，可以实现多种能量形式的储存、转换和利用，满足不同形式的用能需求，提升系统能量综合利用效率。

3-10 下列对于中温绝热压缩空气储能系统的描述中错误的是(A)

- A、一般采用固体填充床进行蓄热 B、关键设备技术成熟、成本合理
C、系统稳定、可控性强 D、具备多能联供能力

3-11 简述常用的压缩空气储能空气存储设备及其优缺点。

答：压缩空气储存设备主要分为等容型和等压型。等容型储气装置主要包括钢制压力容器、管线钢钢管和深地空间。普通钢制压力容器在压缩气体领域的应用非常广泛，然而，当应用于中等容量以上的储能场景时，普通钢制压力容器储气库的成本将成为限制其应用的主要因素。管线钢钢管最初的用途是输送石油或天然气，采用管线钢钢管进行储气时，可以将其阵列化布置于地上，或浅埋于地下以节省地面空间。在中小容量等级的压缩空气储能系统中，采用管线钢钢管阵列进行储气成为最佳选择之一，但在大规模压缩空气储能系统中，其储气成本仍然偏高。以地下盐穴、煤矿巷道等地下洞穴为代表的地下储气库容量大、占地少，是目前建造大容量压缩空气储能系统的有利支撑条件。

等压储气装置主要包括水下承压气囊和重力恒压储气装置等。恒压储气装置受限于材料技术、加工工艺和成本等条件，目前只适用于小容量压缩空气储能系统或实验系统。

3-12 目前可用于压缩空气储能系统的压缩机有哪几种？它们各有什么优缺点？应用于压缩空气储能系统时，压缩机应该按照什么方法进行选型？

答：目前适用于压缩空气储能系统的压缩机类型主要为往复式压缩机、离心式压缩机和轴流式压缩机。

往复式空气压缩机的优点是机械效率高，排气稳定，排气压力覆盖范围广，排气压力高。但其转速低、结构复杂、易损件多、日常维修量大；周期性往复运动导致动平衡性差，运转时有振动。

离心式压缩机转速高、排气量大、排气均匀，密封良好、泄漏量少，性能曲线平坦、操作范围宽。同时，离心式压缩机易损件和维修量较少，易于实现自动化和大型化，非常适合应用于压缩空气储能系统。但离心式压缩机气流速度大，流道内的零部件有较大的摩擦损失；存在喘振现象，危害压缩机本身和系统的运行安全。

轴流式压缩机具有通流能力大、流量大、阻力损失小、效率高等优点，同时其结构简单、运行维护方便、占地面积小。但轴流式压缩机一般压比较小，制造工艺要求较高，稳定工况区比较窄，流量可调节的范围比较小。轴流式压缩机在用于压缩空气储能系统时，一般需要和离心压缩机串联使用。

3-13 关于轴流式膨胀机，以下描述错误的是(C)

A、 通流能力大 B、 流量大 C、 结构简单、制造工艺要求低 D、 损失小、效率高

3-14和管壳式换热器相比，板式换热器具有什么优点和缺点？其是否可应用于压缩空气储能系统？

答：板式换热器具有换热效率高、热损失小、结构紧凑轻巧、占地面积小、安装清洗方便、应用广泛、使用寿命长等特点。但板式换热器无法承受高温高压，密封难度高，使用过

程中容易出现泄漏问题。尽管在换热能力和体积上板式换热器有一定的优势，但是对于高温过程和带压的换热过程，实施过程中还是应该主要考虑采用管壳式换热结构。

3-15 已知某压缩机进口空气的焓值 h_1 为298.45 kJ/kg, 流速 c_{f1} 为55m/s; 压缩机出口空气焓值 h_2 为621.28 kJ/kg, 流速 c_{f2} 为22m/s; 散热损失和势能差可以忽略不计。试求1 kg空

气流经压缩机时压缩机对其做功的量。若空气流量为120t/h, 试求压缩机的功率。

解：由式(3-11)可知压缩机的能量方程为

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) - w_c$$

根据题意可知, $q=0, g(z_2 - z_1)=0$, 于是压缩1kg 空气所需要的技术功为

$$\begin{aligned} w_c &= (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) \\ &= (621.28 \text{ kJ/kg} - 298.45 \text{ kJ/kg}) + \frac{1}{2}[(22 \text{ m/s})^2 - (55 \text{ m/s})^2] \times 10^{-3} \\ &= 322.83 \text{ kJ/kg} - 1.27 \text{ kJ/kg} = 321.56 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

压缩机的功率为

$$P = \frac{mw_c}{3600} = \frac{120 \times 10^3 \text{ kg/s} \times 321.56 \text{ kJ/kg}}{3600} = 10718.7 \text{ kW}$$

3-16 空气的初始状态为 $p_0=0.1\text{MPa}$ 、 $t_0=20^\circ\text{C}$, 经三级压缩后空气压力达到12.5MPa。各级压缩均为等熵压缩且等熵效率均为90%, 压缩机的质量流量为10 kg/s, 空气的绝热系数为1.4, 气体常数为0.287kJ/(kg·K)。假设各级压缩机的入口温度均相同, 试求压缩系统的最小功率和排气温度分别是多少?如果采用单机压缩达到12.5 MPa, 则压缩机的功率和排气温度分别为多少?

解：压缩机功耗最小时各级压缩比相等，即

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{p_3}{p_0}} = \sqrt[3]{\frac{12.5 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}}} = 5$$

则第一级压缩机的功耗为

$$\begin{aligned} w_1 &= m \frac{1}{\eta} \frac{k}{k-1} R_g T_0 \left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \\ &= \frac{10 \text{ kg/s}}{90\%} \times \frac{1.4}{1.4-1} \times 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times (273.15 + 20) \text{ K} \times \left(5^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right) \\ &= 1910.19 \text{ kW} \end{aligned}$$

第一级压缩机的出口温度为

$$t_1 = T_0 \left(1 + \frac{\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta} \right) - 273.15 = 293.15 \text{ K} \times \left(1 + \frac{5^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1}{90\%} \right) - 273.15 \text{ K} = 210.16 \text{ }^\circ\text{C}$$

由于一、二、三级入口温度相等，则可以求得其功耗分别为

$$W_2=W_3=w_1=1910.19 \text{ kW}$$

第二、三级的排气温度为

$$t_2=t_3=t_1=210.16 \quad ^\circ\text{C}$$

则该压缩空气储能系统压缩机的总功耗为

$$w = \sum_{i=1}^3 w_i = 1910.19 \text{ kW} \times 3 = 5730.57 \text{ kW}$$

若采用单级压缩，则其压缩比 β 为125, 其功耗为

$$\begin{aligned} w_1 &= m \frac{1}{\eta} \frac{k}{k-1} R_g T_0 \left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \\ &= \frac{10 \text{ kg/s}}{90\%} \times \frac{1.4}{1.4-1} \times 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times (273.15 + 20) \text{ K} \\ &\quad \times \left(125^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right) = 9727.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

压缩机排气温度为

$$\begin{aligned} t_1 &= T_0 \left(1 + \frac{\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta} \right) - 273.15 = 293.15 \text{ K} \times \left(1 + \frac{125^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1}{90\%} \right) - 273.15 \text{ K} \\ &= 988.37 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3-17 某压缩空气储能系统膨胀部分采用三级膨胀、级间再热的方式。一级空气透平进气压力 $p_1=6.4 \text{ MPa}$ 、 $t_1=180^\circ\text{C}$ ，三级膨胀完毕后的压力为环境压力0.1 MPa。各级透平均为等熵

膨胀，三级透平的等熵膨胀效率分别为90%、88%和85%，膨胀比均为5，透平的质量流量为2.5kg/s，空气的绝热系数为1.4，气体常数为0.287kJ/(kg·K)。假设各级空气透平的入口温度相同且不考虑换热器的流动阻力损失，试求透平的输出功率及各级透平排气温度。

解：一级透平的排气温度为

$$T_2 = T_1 \left[1 - \left(1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta \right] = (180 + 273.15) \text{ K} \times \left[1 - 90\% \times \left(1 - 5^{\frac{1-1.4}{1.4}} \right) \right] = 302.82 \text{ K}$$

$$t_2 = T_2 - 273.15 = 29.67 \quad ^\circ\text{C}$$

一级透平的输出功率为

$$\begin{aligned} w_1 &= m T_1 \frac{k}{k-1} R \left(1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} \right) \eta \\ &= 2.5 \text{ kg/s} \times (180 + 273.15) \text{ K} \times \frac{1.4}{1.4-1} \times 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 90\% \\ &\quad \times \left(1 - 5^{\frac{1-1.4}{1.4}} \right) = 377.53 \text{ kW} \end{aligned}$$

类似可求得，二级、三级透平的温度分别为33.01℃和38.02℃；二级、三级透平的输出功率为369.14 kW 和356.55 kW，透平的总输出功率为

$$w = \sum_{j=1}^3 w_j = 377.53 \text{ kW} + 369.14 \text{ kW} + 356.55 \text{ kW} = 1103.22 \text{ kW}$$

3-18 某深冷液化空气储能系统，采用两级压缩、两级膨胀的布置方式，其储能时间和释能

时间均为6小时。除了输出电力外，该系统还可同时实现供热和制冷应用。储能阶段，一、二级压缩机的功率分别为10.32MW 和9.75MW，释能阶段，一、二级空气透平的输出功率分别为5.42 MW 和4.98 MW，其供热和制冷功率分别为1.84 MW 和870kW。试求该系统的电-电效率和循环效率。

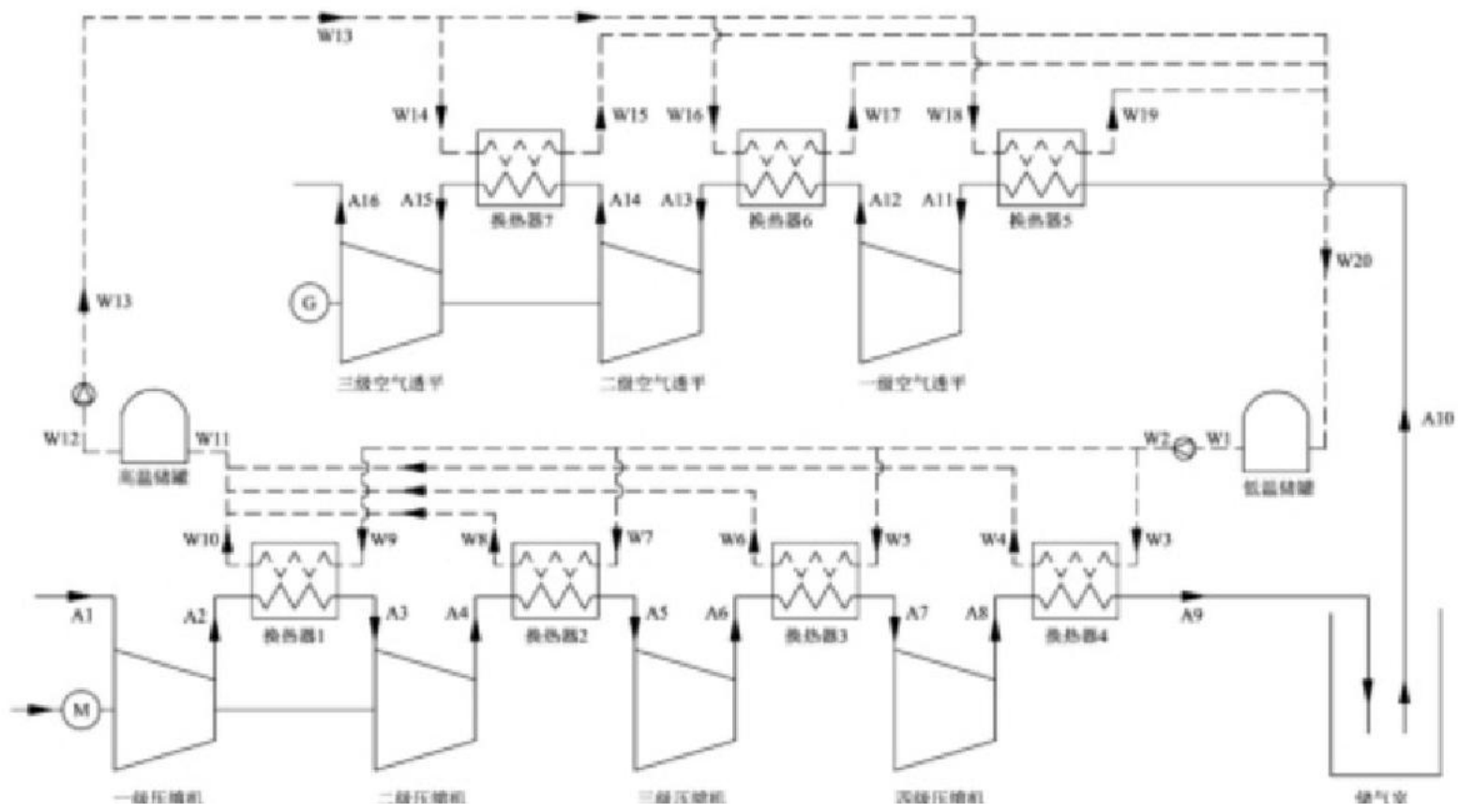
解：该系统的电-电效率为

$$\eta_{ESE} = \frac{w_t \tau_{dis}}{w_c \tau_{ch}} = \frac{(5.42 + 4.98) \text{MW} \times 6\text{h}}{(10.32 + 9.75) \text{MW} \times 6\text{h}} \times 100\% = 51.82\%$$

循环效率为

$$\eta_{RTE} = \frac{(w_t + q_h + q_c) \tau_{dis}}{(w_c + q_{in}) \tau_{ch}} = \frac{(5.42 + 4.98 + 1.84 + 0.87) \text{MW} \times 6\text{h}}{(10.32 + 9.75) \text{MW} \times 6\text{h}} \times 100\% = 65.32\%$$

3-19 某非补燃压缩空气储能系统采用四级压缩、三级膨胀的技术方案，采用加压水作为传热和储热工质，其方案如下图所示。图中，各物流节点都进行了标注，A 代表空气，W 代表水，各节点的压力、温度、流量、比焓如下表所示。该方案中，压缩时间为8小时，膨胀时间为4小时。1-4级压缩机的功率分别为3.607 MW、3.907 MW、3.907 MW 和3.914 MW，1-3级透平的功率分别为5.564MW、5.591 MW和5.552MW。试求：（1）该压缩空气储能的循环效率；（2）各压缩机、透平和换热器的焓损失。



习题3-19附图某非补燃压缩空气储能流程图

习题3-19附表某非补燃压缩空气储能节点参数表

节点	P/MPa	t/□	m/(kg/s	ex/(kJ/kg)
A1	0.101	20	27.78	0.0632
A2	0.30	149.67	27.78	113.54
A3	0.30	40	27.78	93.20
A4	0.90	179.86	27.78	217.3
A5	0.90	40	27.78	186.94
A6	2.70	180.2	27.78	311
A7	2.70	40	27.78	280.1
A8	8.10	180.7	27.78	404.5
A9	8.10	40	27.78	372
A10	4.30	25	55.56	318.8
A11	4.30	110	55.56	329.6
A12	1.225	6.625	55.56	213.4
A13	1.225	110	55.56	223.2
A14	0.35	8.139	55.56	106.5
A15	0.35	110	55.56	116.3
A16	0.101	9.506	55.56	0.434
W1	0.101	30	39.01	0.179
W2	0.6	30.03	39.01	0.769
W3	0.6	30.03	10.83	0.769
W4	0.3	120	10.83	55.11
W5	0.6	30.03	10.28	0.769
W6	0.3	120	10.28	55.11
W7	0.6	30.03	10.07	0.769
W8	0.3	120	10.07	55.11
W9	0.6	30.03	7.83	0.769
W10	0.3	120	7.83	55.11
W11	0.3	120	44.50	55.11
W12	0.3	115	44.50	49.84
W13	0.6	115	44.50	50.23
W14	0.6	115	15.31	50.23
W15	0.3	30	15.31	0.645
W16	0.6	115	15.73	50.23
W17	0.3	30	15.73	0.645
W18	0.6	115	13.46	50.23
W19	0.3	30	13.46	0.645
W20	0.3	30	44.50	0.645

解：

(1) 该压缩空气储能系统无其他热量输入也没有供热、制冷输出，其电-电效率和循环效率相等，即

$$\eta_{ESE} = \frac{w_t \tau_{dis}}{w_c \tau_{ch}} = \frac{(5.564 + 5.591 + 5.552) \text{ MW} \times 4 \text{ h}}{(3.607 + 3.907 + 3.907 + 3.914) \text{ MW} \times 8 \text{ h}} \times 100\% = 54.47\%$$

(2) 一级压缩机的烟损失为

$$\begin{aligned} \Delta E_{x,c1} &= w_{c1} - m_{c1}(e_{x,A2} - e_{x,A1}) = 3.607 \text{ MW} - 27.78 \text{ kg/s} \times \frac{(113.54 - 0.0632) \text{ kJ/kg}}{1000} \\ &= 0.455 \text{ MW} \end{aligned}$$

按相同的计算方法可得，二级、三级、四级压缩机的烟损失分别为0.459MW、0.461MW、0.458MW。

一级透平的烟损失为

$$\begin{aligned} \Delta E_{x,t1} &= m_{t1}(e_{x,A11} - e_{x,A12}) - w_{t1} = 55.56 \text{ kg/s} \times \frac{(329.6 - 213.4) \text{ kJ/kg}}{1000} - 5.564 \text{ MW} \\ &= 0.89 \text{ MW} \end{aligned}$$

按相同的计算方法可得，二级、三级透平的烟损失分别为0.893MW、0.886MW。

换热器1的烟损失为

$$\begin{aligned} \Delta E_{x,he1} &= m_{A2}(e_{x,A2} - e_{x,A3}) - m_{w1}(e_{x,w1} - e_{x,w2}) \\ &= \frac{27.78 \text{ kg/s} \times (113.54 - 93.20) \text{ kJ/kg} - 7.83 \text{ kg/s} \times (55.11 - 0.769) \text{ kJ/kg}}{1000} \\ &= 0.139 \text{ MW} \end{aligned}$$

按相同的计算方法可得，换热器2~换热器7的烟损失分别为0.296MW、0.299MW、0.314 MW、0.067 MW、0.235MW、0.214MW。

第4章 习题答案

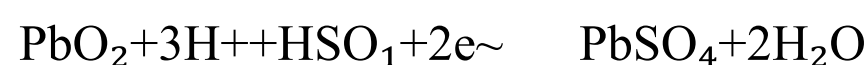
4-1 铅酸电池的原理是什么?请写出它的反应方程式。

解：

传统铅酸电池的电极由铅及其氧化物制成，电解液采用硫酸溶液。在充电状态下，铅酸电池的正极主要成分为二氧化铅，负极主要成分为铅；放电状态下，正负极的主要成分均为硫酸铅。放电时，正极的二氧化铅与硫酸反应生成硫酸铅和水，负极的铅与硫酸反应生成硫酸铅；充电时，正极的硫酸铅转化为二氧化铅，负极的硫酸铅转化为铅。

铅酸电池反应如下。

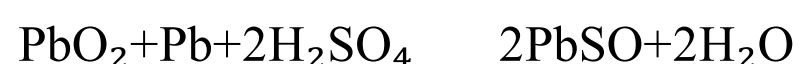
正极：



负极：



总反应：



4-2 请简述铅酸电池的工作方式。

解：

铅酸电池主要有充电放电制和定期浮充制两种充电方式。

充电放电制是指铅酸电池组充电过程与放电过程分别进行的一种工作方式，即先用整流装置给铅酸电池组充满电后，再由铅酸电池的负载供电(放电)，然后再充电、再放电的一种循环工作方式。充电放电制主要用于移动型铅酸电池组。例如，汽车摩托车启动用铅酸电池组、铅酸电池车辆用铅酸电池组等，当有两组相同型号的固定型铅酸电池组，一组工作，而另一组备用时，一般也采用这种工作方式。

定期浮充制就是整流设备与铅酸电池组并联并定期轮流向负载供电的一种工作方式。也就是说，由整流设备和铅酸电池组所构成的直流电源，部分时间由铅酸电池向负载供电；其他时间由整流设备浮充铅酸电池组供电，即整流设备在直接向负载供电的同时，还要向铅酸电池充电(浮充)，以补充铅酸电池放电时所消耗的能量以及因局部放电所引起的容量损失。

4-3 简述铅酸电池的充放电特性。

解：

铅酸蓄电池充电曲线如下图所示，其内部反应如下：

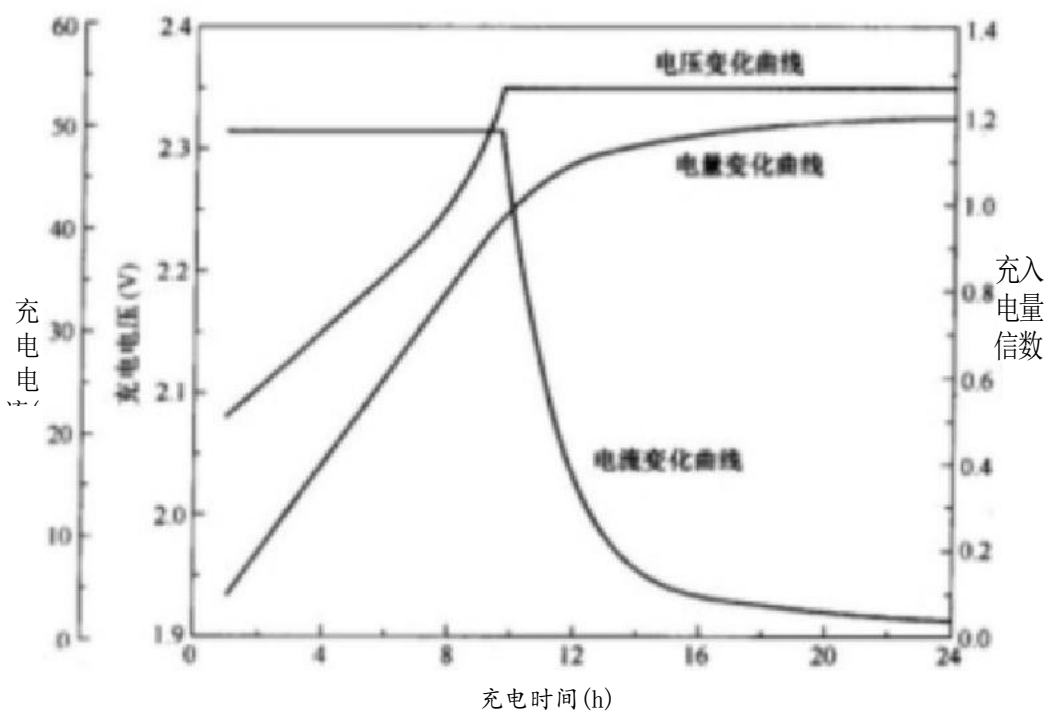


图4-17 习题4-3示意图

(1) 在电池充入电量至70%~80%之前，利用整流器的限流特性维持充电电流不变，此过程电池端电压几乎呈直线上升；

(2) 当电流的端电压上升至稳压点附近时，由于充电历程已到中后期，此时正极板上 PbSO_4 数量已不多，使交换电流密度随反应面积的变小而增大，所以电化学反应极化作用已经变小，而电池内阻也明显减少。但是，充电的真实表面积已经变小了，故引起了电极真实电流密度的增大。继而使电极表面附近电解液浓度增高，导致浓差极化影响严重，造成电池内电流迅速衰减。

(3) 当充电至后期，电池电流已明显变小，所以浓差极化作用随之减小。而电化学反应极化作用影响又增加，所以电池电流继续衰减，只是衰减速度变慢。

(4) 充电末期，充入电池的电流大部分用于维持电池内氧循环，仅极小的电流用于维持活性物质的恢复，因而电池电流稳定不变。

铅酸蓄电池放电曲线如下图所示，其内部反应如下：

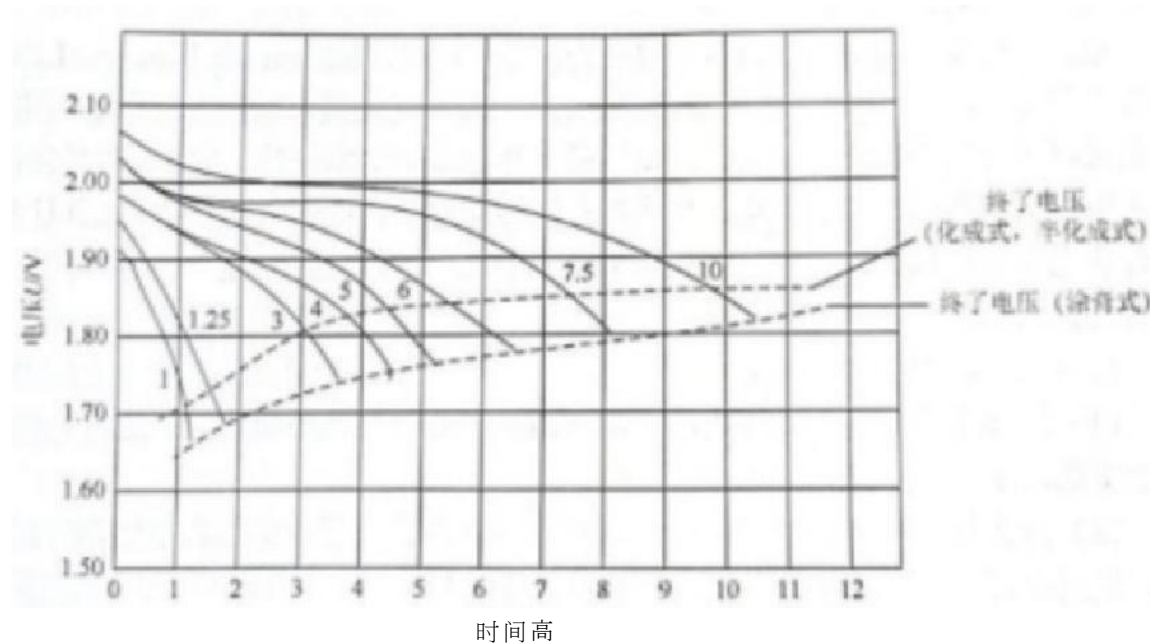


图4-18 习题4-3示意图

(1) 在放电初期，端电压 U 下降很快，这是因为在放电初期，活性物质微孔内的电解液浓度下降很快，使电动势 E 明显减小，同时内电阻 r 的明显减小也使内电阻电压降 I_r 有较大减小，端电压 U 也将快速减小。

(2) 在放电中期，由于活性物质微孔内的电解液逐渐扩散，其浓度趋于平衡，使电动势 E 和内电阻 r 的减小变得缓慢，也使端电压 U 缓慢减小。临近放电中期末尾时，正负极板表面上的活性物质[二氧化铅(PbO_2)和海绵状金属铅(Pb)]已经大部分转换成硫酸铅($PbSO_4$)。

(3) 放电后期，极板上活性物质转换成硫酸铅的转换作用已经很微弱，这时，端电压的下降将变快，当放电电压下降到终止电压(1.8V)时，蓄电池应立即停止放电，这时，端电压将很快恢复到2.0V左右，如果不立即停止放电，蓄电池的端电压将急剧下降，同时对蓄电池的使用寿命也将产生不利影响。

4-4 请简述铅炭电池的特点。

解：

在负极引入活性炭，使电池兼具铅酸电池和超级电容器的优势，能够显著提高铅酸电池的寿命，同时可有效抑制普通铅蓄电池负极不可逆硫酸盐化的问题，使其大电流充放电性能和循环寿命得到显著提升。

其优势在于：(1) 成本低廉、制造工艺简便；(2) 能量成本低；(3) 工作温度范围宽泛，低温性能好于锂电池无需单体BMS。

其劣势在于：(1) 比功率、比能量偏低充电速率低，满充需要14-16小时；(2) 需防止不可逆硫酸盐化；(3) 循环寿命短，重复深度充放减少电池寿命；(4) 回收困难，对环境有害。

4-5 锂离子电池的原理是什么?请写出它的反应方程式。

电池充电时，正极上的电子通过外部电路跑到负极上，而锂离子从正极脱嵌，穿过电解质和隔膜嵌入负极，与从正极跑过来的电子结合，使得负极处于富锂态，正极处于贫锂态，同时电子的补偿电荷从外电路供给到负极，保证负极的电荷平衡；放电时则相反，电子从负极经过外部电力电子器件跑到正极，锂离子从负极脱嵌，穿过电解质和隔膜重新嵌入正极，与从负极跑过来的电子结合。因此锂离子电池实质为一种锂离子浓差电池，依靠锂离子和电子在正负极之间的转移来完成充放电工作。

锂离子电池的化学反应式：



正极反应：

