

## 压缩空气储能与可再生能源的综合利用

### ——浅谈能量的转换、存储和分配

梅生伟、薛小代 清华大学电机系

世界万物是不断运动的，在物质的一切属性中，运动是最基本的属性，其余属性都是运动属性的具体表现。物质的运动形式是多种多样的，对于每一个具体的物质运动形式均存在相应的能量形式，但当运动形式不相同，可以相互描述和比较两个物质的运动特性的物理量就是能量，即能量特性是一切运动物质的共有特性，能量尺度是衡量一切运动形式的统一客观尺度。任何形式的能量均可以转换成另一种形式，尽管在所有能量转换的过程中，总能量保持不变，但能量的品位可能会在转换过程中下降，如从电能降级为热能，甚至降级为不便于利用的形式，如低品位的内能。

本文主要介绍大规模储能技术及其在可再生能源中的应用，在此之前，有必要对能量的存储和转化规律进行初步的探讨，这将会有助于我们深入地理解储能技术的重要性和复杂性。自然界中存在多种形式的能量，例如常见的热能、机械能、电能等，不同形式的能量体现出不同的功用

特性。如何对这些能量进行对比，如何确定不同形式能量之间的转换特性，是非常棘手的问题。幸运的是，热能科学为我们提供了有效的工具，这就是热力学的三大定律。通过这三大定律，我们可以很好地理解和解决能量转换中的问题。

能量守恒与转换定律是自然界的普适规律之一，自然界中的一切物质都具有能量，能量不可能被创造，也不可能被消灭，但可以从一种形态转变为另一种形态，而在能量的转换过程中能量的总量保持不变。将此定律应用于热现象中，就引申出了热力学的第一定律，即“热可以变为功，功也可以变为热，一定量的热消失时必产生相应量的功，消耗一定量的功时必出现与之对应的一定量的热”。这是一个朴实的道理，通俗地讲就是一定数量的能量在传递和转换过程中，其能量的形式可能会发生变化，但是其总量保持不变。

在总量守恒的前提下，不同形式的能量是否可以任意转换呢？这正是热力学第二定律所要解



决的问题，它阐明了与热现象相关的各种过程进行的方向、条件及限度。热力学第二定律有多种表达方式，其中克劳修斯说法是一种被广泛采用的表述形式，即“热不可能自发地、不付代价地从低温物体传至高温物体”。机械能、电能等理论上可100%地全部转换为热能，在热力学中我们将这部分可无限转换的能量称之为焓，因此电能或机械能全部为焓。但是，反过来，热能只能部分地转换为机械能或者电能，也就是说热能中所包含的能量只有一部分为焓。因此，从技术使用和经济价值角度来看，机械能或电能的品位要高于热能。同时，热能本身也有品位高低的差异，温度越高，热能中能够转换为机械功的能量越多，热能的品位也就越高。而不能转换为机械功的那部分热能我们称之为“火无”（anergy,  $A_n$ ），也就是所谓的废热。因此，任何能量（ $E$ ）都是由焓（ $E_x$ ）和“火无”（ $A_n$ ）两部分组成，即

$$E = E_x + A_n$$

在能量的转换过程中，流动摩擦、温差传热等不可逆过程都会导致能量焓的损失，在热力学中称之为熵（entropy）增。从某种意义上讲，熵增的大小代表了系统运行过程中的能量损失的程度，我们也可以借此来寻找系统中能量损失的缘由，从而发现提升系统效率的方向。而热力学第三定律也可以用熵的概念进行表述，即“在绝对零度（0K）下，任何纯粹物质完整晶体的熵等于零”。此定律较为抽象，可以将其理解为绝对零度不可能达到，即物质中的与热能有关的运动不可能完全被停止，这也从另一个方面阐述了运动是物质的基本属性。

在以上理论的基础上，我们下面来探讨储能的问题。

电能是一种高品位能源，但时至今日电能仍

不能实现大规模工程化储存。为解决电能大规模存储问题，电力科技界和工程界耗费了大量人力和物力。电力系统渴望发明一种大容量、长寿命、快响应、无污染且价格合理的储能系统。

随着我国电网容量的不断增长，峰谷差不断增大，可再生能源、分布式供能和智能电网的蓬勃发展，对大规模储能的需求也越来越大。大规模储能技术可以有效地解决风能、太阳能等间歇式可再生能源发电不稳定的问题，实现“削峰填谷”，平滑波动性电能输入，提高可再生能源发电的利用率，增强电网运行的安全性。目前已有的储能技术主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、电池储能、飞轮储能和超导储能等。抽水蓄能和压缩空气储能由于储能容量大、转换效率高，因而属于适合商业化应用的大规模储能技术，也是解决可再生能源波动性问题的关键技术。

抽水蓄能和压缩空气储能的基本运行原理有异曲同工之妙，两者皆属于物理储能，都是通过将电能转换为储能介质的势能而实现电能的存储。不同之处在于抽水蓄能是将电能转换为水的重力势能，即将水抽到高处；而压缩空气储能是将电能转换为空气的分子内势能，即将空气压缩至高压状态。因而从系统运行的本征原理上来看，两者都是遵循电能—势能—电能的转换流程从而实现储能发电。

如图1所示，抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库，在电力负荷高峰时再放水至下水库发电，因而又称为蓄能式水电站。它可将电网负荷低谷时的多余电能，转变为电网高峰时期的高价值电能，从而起到调峰的功能。目前应用于电网的大规模储能技术，主要是抽水蓄能技术。然而，抽水蓄能电站的建设，严格受到地理条件限制。需要具有丰富的水资源，同时还需要有适宜于建设上库和下库的地质地理条件。在



图1 抽水蓄能电站示意图



图2 压缩空气储能电站示意图

高纬度地区，由于严寒而出现结冰的现象，导致抽水蓄能电站不易于建设。此外，抽水蓄能对环境生态具有不可低估的消极影响。如此种种条件的限制，使抽水蓄能电站无法满足未来能源发展对于大规模储能技术的需求。

压缩空气储能（如图2所示）则不然，几乎对地理条件无特殊要求，且建造成本与抽水蓄能电站相当。传统的压缩空气储能系统的工作原理与抽水蓄能相类似，系统储能时，利用电网中的富余电量或者弃风、弃光电，驱动空气压缩机压缩空气，把能量以压缩空气的形式储存在储气室中；当电网处于用电高峰时，系统释能，储气室中的压缩空气进入燃烧室同燃料一起燃烧，然后驱动透平发电。为了解决传统压缩空气储能存在的依赖化石燃料和排放问题，非补燃压缩空气储能系统应运而生。压缩空气储能系统在压缩空气的过程中，会产生大量的热量（即我们所熟知的压缩热），非补燃压缩空气储能系统通过储热装置，回收并存储这部分热量，当透平发电时，再将这部分热量返还给进入透平的高压空气，提高空气的温度，从而起到与燃烧燃料加热空气类似

的作用。这是一种设计非常巧妙的储能技术，充分利用了系统自身产生的热量，摒弃了燃料补燃的技术路线。

### 1. 压缩空气储能的早期发展

压缩空气储能尤其是传统的补燃式压缩空气储能发展历史比较悠久，早在1949年，Stal Laval就提出了利用地下洞穴来进行压缩空气储能。此后，国内外学者围绕压缩空气储能技术开展了大量的研究和实践工作，并先后有两座补燃式的压缩空气储能电站分别在德国和美国投入商业运行，积累了大量成熟的运行经验。

1978年，Nordwest Deutsche Kraftwerke公司在德国建成世界上第一个压缩空气储能电站—Huntorf电站（如图3所示），位于下萨克森州（Niedersachsen）的Huntorf，距离不莱梅市西北约30km处。该电站采用地下600米深的两个盐穴作为储气室，总计31万立方米的容积，该储气室是在一个盐岩层利用溶蚀法人工制作出来的，储气压力在4.6–6.6 MPa之间。电站储能时，通过压缩机将气体压缩至高压，然后存储在地下盐穴中；释能时，盐穴中的高压气体进入燃气轮机，



图3 德国Huntorf压缩空气储能电站实景照片（左）及地下盐穴储气库示意图（右）



图4 McIntosh压缩空气储能电站实景图（左）和系统流程图（右）

在燃烧室中与天然气混合燃烧，驱动燃气轮机发电系统对外输出电能。系统中机组的压缩机功率为60 MW，释能输出功率为290 MW，压缩机连续充气8小时，可实现连续发电2小时，系统循环效率为33.0%–46.9%。

1991年，Alabama Electric Cooperative公司在美国Alabama建成了世界上第二个商业性的压缩空气储能电厂—McIntosh电站，位于阿拉巴马州(Alabama)的华盛顿郡(Washington county)，莫比尔市(Mobile)北部约64 km处。该电站采用位于地下450米的盐穴作为储气室，总容积约53.8万立方

米，储气压力在5.1– 7.9 MPa之间。压缩机组功率为50 MW，发电功率为110 MW，连续压缩41小时可发电26小时。该电站基于Huntorf电站发展而来，不同之处在于其采用了回热流程，利用燃气轮机排气中的热量加热进口空气，提高了热效率，系统循环效率达到了54%。

## 2. 压缩空气储能的最新研究方向

通过前面的介绍，我们知道这两座压缩空气储能电站均采用燃料补燃，系统在运行过程中需要消耗天然气，并由此带来排放问题。对于

电能来讲,其本身属于清洁能源,但若在其存储和转换过程中带来新的污染或排放则得不偿失。近年来,随着环保意识的增强和化石类燃料的短缺,研究人员开始探索无需燃料补燃的新流程,非补燃式的压缩空气储能逐渐成为研究的热点,诸如液态空气储能(Liquid Air Energy Storage, LAES)、先进绝热压缩空气储能(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES)、基于压缩热回馈的非补燃压缩空气储能(Non-supplementary Fired Compressed Air Energy Storage, NF-CAES)等新流程相继出现,并有相应的实验示范系统投入运行。

液态空气储能(Liquid Air Energy Storage, LAES)最早由英国Highview Power Storage公司提出,顾名思义就是通过将空气降温液化,实现空气的液化存储。在此流程中(如图5右图所示)低温液化系统能够利用电能将空气变成液态,并存储在一个绝热容器中,从而完成电能的存储。在释能时,液态空气经过加压升温气化后,推动透平发电。若将该系统与一个产生废热的设备相连,该转化效率可从25%大幅提高至70%。但是该系统对于蓄冷装置提出了非常高的要求,这是制约其商业应用的一大技术难题。Highview Power Storage已在苏格兰启动一

个试验项目(如图5左图所示),计划建造一个3.5 MW的示范系统,目前该系统正在建设中。

作为先进绝热压缩空气储能(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES)的典型,ADELE系统则代表着另一类非补燃式的压缩空气储能的技术发展方向。2010年开始,由德国莱茵集团与通用电气、德国宇航中心和德国旭普林(Ed. Z ü blin AG)共同启动了一套压缩空气储能发电示范电站(Adele)的建设(如图6左图所示)。ADELE电站储能时(如图6右图所示),压缩机组排气温度可以达到600℃,通过蓄热装置回收并储存这部分热量;释能时,将储存的热量反馈给透平进口空气,以提高空气的做功能力。显然如此高的排气温度对压缩机及蓄热系统提出了严苛的要求,项目的技术难度颇大。但由于高技术的投入,也使系统获得了可观的储能效率(系统的理论设计循环效率可达70%),未来一旦获得突破,将会是一种理想的储能技术。

基于目前常规设备的技术现状,为了获得高效、可靠、可行的压缩空气储能系统,清华大学

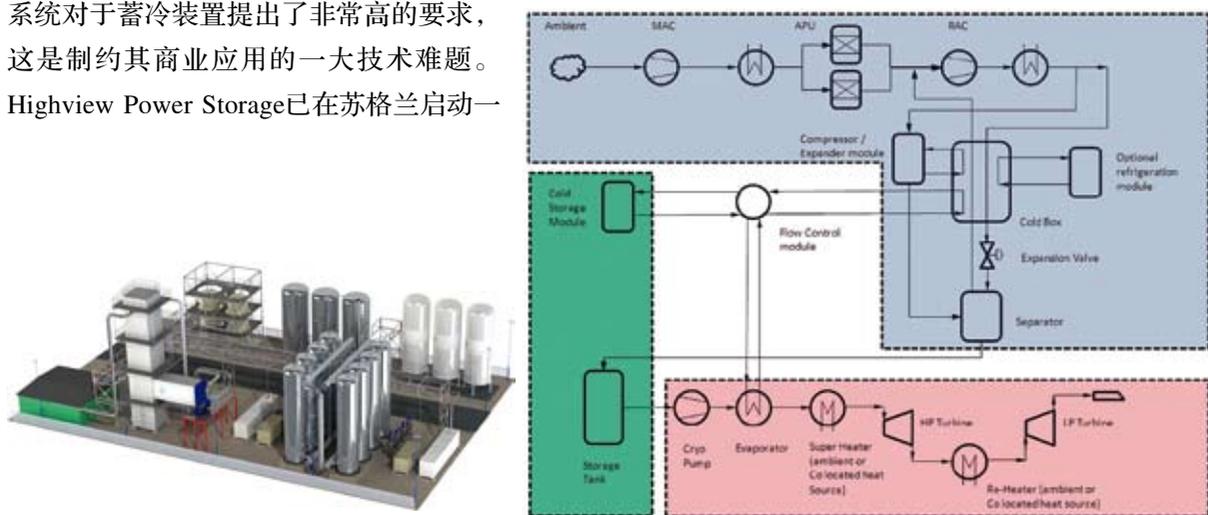


图5 Highview公司的液态空气储能系统示意图(左)及流程图(右)

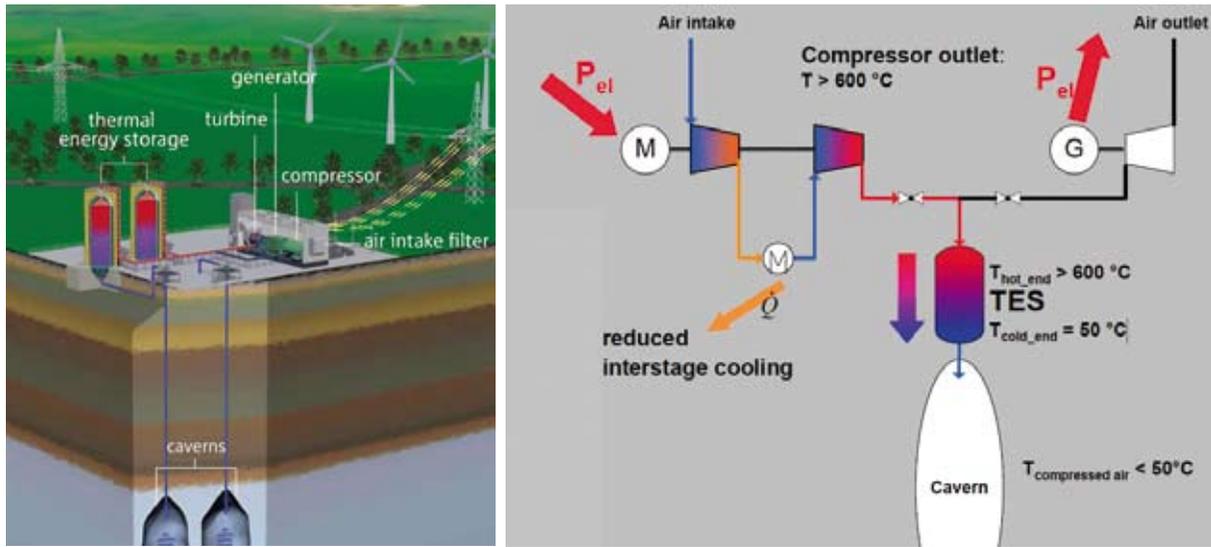


图6 德国ADELE系统示意图（左图）及流程图（右图）

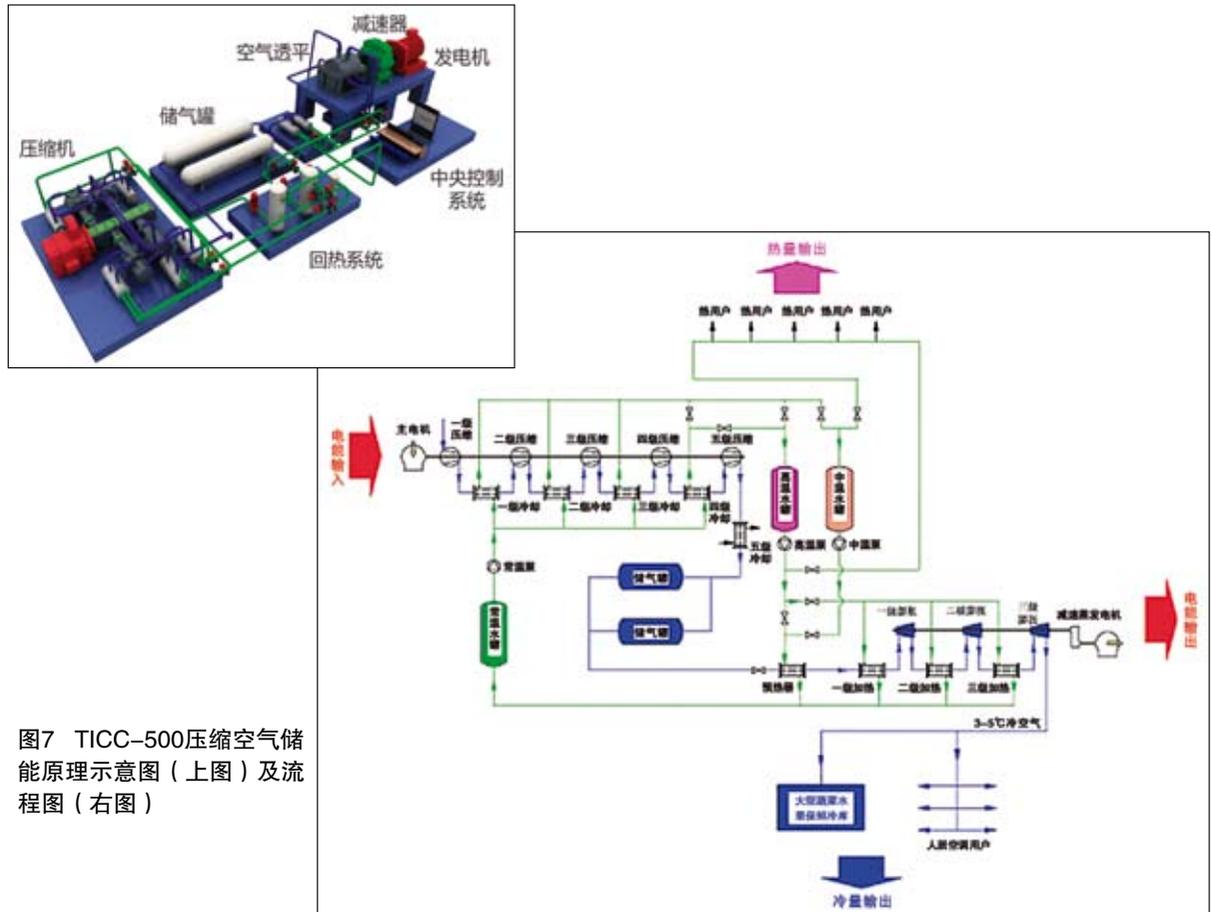


图7 TICC-500压缩空气储能原理示意图（上图）及流程图（右图）



图8-1 TICC-500系统正视图



图8-2 TICC-500系统侧视图

提出了基于压缩热回馈的非补燃压缩空气储能技术方案（Non-supplementary Fired Compressed Air Energy Storage, NF-CAES）（如图7所示）。NF-CAES利用回热装置实现压缩热的回收、存储和再利用，进而摒弃了燃料补燃，系统运行过程中无污染、无排放。此外，系统在储能发电的同时，还可以利用压缩热对外供暖，以及利用透平的低温排气进行供冷，因而具有冷、热、电三联供的能力（Combined Cooling, Heating and Power system, CCHP），能量的综合利用效率较高。在国家电网的资助下，清华大学主导开展了相关的研究工作，并在芜湖建成装机容量为500 kW的TICC-500非补燃压缩空气储能发电系统（如图8所示）。该系统已实现储能发电的循环运行，系统电换电的实验效率为40%，能量综合利用效率达到72%，为目前世界上首套实现储能发电循环运行的非补燃式压缩空气储能系统。

### 3. 压缩空气储能过程中的能量转换浅析

效率是衡量储能系统性能优劣的关键因素，高效电能存储和转换是储能系统追求的最终目标。虽然压缩空气储能较抽水蓄能具有许多优点，但目前其效率低于抽水蓄能（抽水蓄能效率可达75%以上）。为了探索影响压缩空气储能效率的因素，下面我们对其能量转换过程进行简单的剖析。

压缩空气储能属于多过程耦合系统，其涉及电能、热能、分子势能、机械能等多种形式能量的存储和转换，过程复杂。为了便于理解和分析系统储能过程中的能量转换机理，以TICC-500压缩空气储能系统为例，我们采用热力学的焓（exergy, Ex）理论来对系统进行分析，简要说明其能量损失的机制，探索提高系统储能效率的方向。

TICC-500系统的主要参数配置如表1所示。

发电功率	500 kW
发电时间	1 h
储气室容积	100 m <sup>3</sup>
储气室工作压力	3-10 MPa
透平进气压力	2.7 Mpa
压缩机绝热效率	80%
透平绝热效率	80%
透平绝热效率	120℃

表1 TICC-500系统配置参数

通过热力分析计算,可以获得压缩、储热、储气和透平膨胀发电等每个过程的能量传递和转换状态,进而得出系统熵损失的分布规律(如图9所示)。

发电机输出的电能和压缩机消耗的电能均

全部为焓,两者的比值即为系统的储能效率(42%),两者的差值即为系统储能过程的焓损失。压缩过程、储热过程以及膨胀发电过程为系统焓损失的三个主要方面,在压缩和膨胀过程中,而由于机械部件之间的摩擦以及空气的流动阻力损失造成熵增,同时由于节流也会产生熵增。而在储热规程中,换热过程的温差传热同样也会引起系统熵的增加。而由于熵的增加,导致系统所存储的能量的损失,从而降低了系统的储能效率。另一方面,我们也可以根据系统熵增情况,来探讨CAES效率提升的途径。首先,可以提高压缩机和膨胀机的机械效率,减少机械损失;其次,提高储热的温度,减小热量传递过程中的焓损失;最后,尽量采用大型的储气空间,降低高压气体的节流损失。事实上,这也是目前非补燃压缩空气储能的技术改进方向。相信未来随着水平的提高,压缩空气储能的效率也将会获得提高,有朝一日可以与抽水蓄能相媲美(压缩空气的理论储能效率可达70%以上,接近抽水蓄能的效率)。

#### 4. 压缩空气储能在新能源领域中的应用

如本文开篇所提到的,新能源发电具有波动性和随机性,其大规模并网给电力系统的安全稳定运行和电能质量带来了严峻挑战,实际运行中存在大量的弃风、弃光现象,

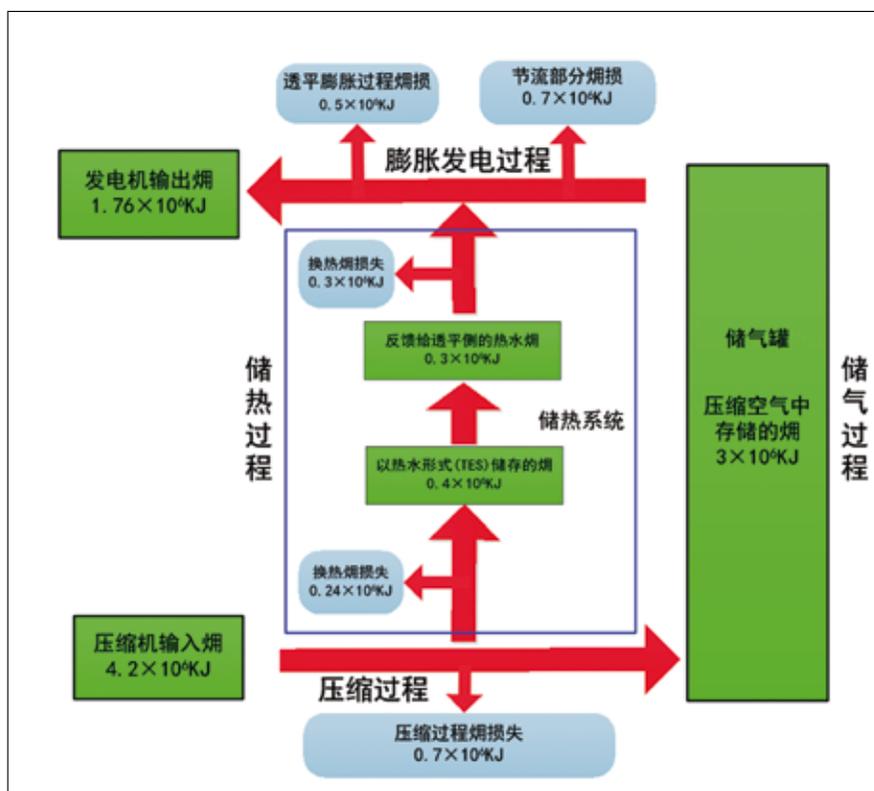


图9 压缩空气储能系统焓损失分析

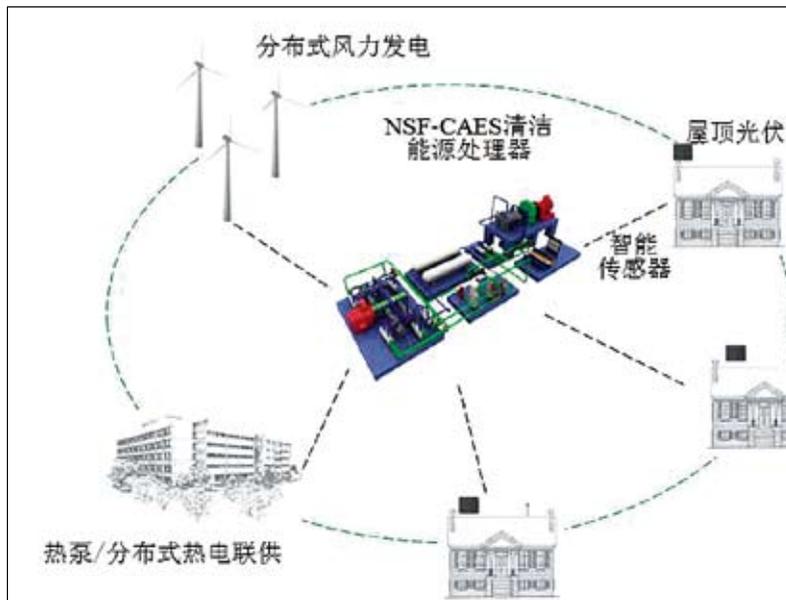


图10 “应用服务器”功能示意图

使得新能源的利用率处于较低的水平，而能源互联网的出现为解决上述问题提供了契机。能源互联网可理解为是综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术，将大量由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络等能源节点有机互联，以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。能源互联网可以有效地解决新能源的大规模消纳问题，促进新能源产业的快速健康发展。非补燃压缩空气储能作为一种高效、清洁的储能技术，以其为基础可以构建清洁能源处理器，未来在能源互联网中可以起到应用服务器和能量中心的功能。

#### (1) 面向分布式供能系统的应用服务器

分布式供能系统是未来能源互联网的重要组成部分，能够完成可再生能源发电的就地消纳，并实现多种形式能源的综合利用（如图10所示）。基于非补燃压缩空气储能的清洁能源处理

器具有冷、热、电等多种形态能量存储、转换的能力，在分布式供能系统中能够实现不同类型的能量的时空转换，进而具有多种不同的应用功能。所产生的作用类似于信息系统中的应用服务器，可以对不同形态的数据进行处理，使之成为高效能、高价值的信息。进一步，该处理器能够消纳、缓冲来自于间歇式可再生能源发电产生的电能，实现新能源的高效利用；能够进行不同形式能量的转换，实现冷、热、电联供，提高能量的利用效率；此外，还可响应公共电网调控需求，提供必要的频率和电压支撑，改善电网韧性（Resiliency）。

此外，还可响应公共电网调控需求，提供必要的频率和电压支撑，改善电网韧性（Resiliency）。

#### (2) 面向大型可再生能源发电的能量中心

为了应对能源消费和供给两方面的峰谷差所带来的调控和运行压力，类似于信息网络中所建立的高性能数据中心，未来能源互联网中需要建立大规模能量中心，以实现“削峰填谷”和“应

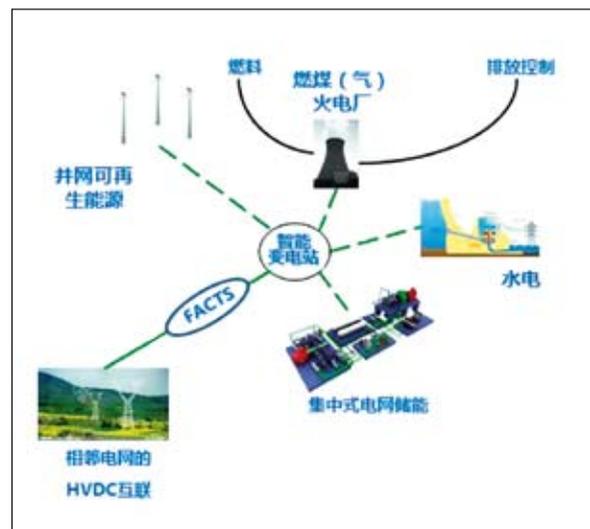


图11 “能量中心”功能示意图



需而变”的能源消费和供给模式。大规模储能技术是建立“能量中心”的关键支持条件。非补燃压缩空气储能具有储能容量大、储能效率高、使用寿命长、造价低、环保无污染等优点，是一种较为理想的大规模储能方式。在电网中关键的枢纽智能变电站附近（或其中），建设大规模压缩空气储能，一方面可以帮助消纳大规模可再生能源产生的间歇式电能，另一方面还可以缓冲电网中发电和负荷的不平衡功率，从而改善整个系统的安全、经济和高效运行水平（如图11所示）。

因此，不论是作为电网“削峰填谷”的大规模储能系统，还是与新能源结合构建大规模消纳系统或者特殊电力系统，压缩空气储能都以其优越的高效性和灵活性，显示出广阔的应用前景。

## 5. 结束语

压缩空气储能不受地理条件限制，且具有储能容量大、转换效率高、造价成本低、环保无污染等优点，其大规模应用一方面可以实现电网的削峰填谷和旋转备用等功能，提高电网的安全性；另一方面，还可以显著提高低谷电，特别是弃风电和小水电弃电的利用率，促进可再生能源的发展。此外，非补燃压缩空气储能还具有冷、热、电三联供的功能，在进行储能发电的同时，可以实现供暖和供冷，从而大大拓展了其应用空间，特别在能源互联网中将发挥重要作用。可以预见，未来压缩空气储能作为一种清洁的电能存储方式，将会具有广阔的应用前景，对可再生能源的健康快速发展起到积极的推动作用。