

压缩空气蓄能系统热经济学分析

鹿院卫,刘广林,马重芳,吕鹏飞

(北京工业大学 环境与能源工程学院 传热强化与过程节能教育部重点实验室 北京 100124)

摘 要: 采用热经济学分析方法对超临界压缩空气蓄能系统与压缩空气蓄能系统(CAES)的经济性进行分析。系统输入电能以大工业 110 kV 低谷电价 0.309 9 元/(kW·h)和燃气价格为 2 元/m³为例进行计算,利用 EES 软件进行模拟。结果表明:超临界压缩空气蓄能系统较 CAES 更为经济有效,可以达到调节电网负荷的目的,且可以提高可再生能源(如风能、太阳能)发电系统的效益。

关 键 词: 压缩空气蓄能系统;热经济学;发电;系统评价

中图分类号:TK02;F407.61 文献标识码:A

引 言

随着化石燃料越来越少,人们越来越重视对水能、风能、太阳能等可再生能源的开发和利用。其中风力发电是目前增长最快的可再生能源发电模式,我国风电装机容量 2008 年底已突破 1 200 万 kW,比 2007 年增长 106%。但由于气流多变使得风力资源时强时弱,风力发电不稳定,造成风力发电输出的波动性很大从而使得部分风电浪费,降低了风电的效益。2008 年仅有 800 万 kW 装机容量的风电入网^[1]。利用蓄能技术将系统输出电能储存并在用电高峰时释放是提高可再生能源发电利用效率的可行方法^[2~3]。目前大型的电力蓄能系统主要包括抽水蓄能系统和压缩空气蓄能系统。压缩空气蓄能系统(CAES)的温室气体排放量只有同容量燃气轮机的 1/3,运行成本比同容量的燃气轮机低 1/3,且发电量比同容量燃气轮机高一倍^[4]。CAES 作为一种蓄能技术,其相对于抽水蓄能电站在系统初投资、维护费用和系统选址等方面具有一定的优势。但其仍采用与燃气轮机相结合发电系统,因而系统排放 CO₂等温室气体且随天然气价格升高及对碳关税征收的实施,将最终影响到系统的经济性。陈海生和丁玉龙等人提出了超临界压缩空气蓄能系统^[5],以实现电力系统的移峰填谷,Stefan Zunft 等人研究了

空气为工质的超临界压缩空气蓄能系统的技术可行性^[6],对系统主要设备做了分析,但没对其经济可行性进行分析。

本研究用热经济学(焓经济学)分析方法对以空气为蓄能工质的超临界压缩空气蓄能系统和 CAES 进行经济性分析对比,采用 EES(Engineering Equation Solver)工程计算软件进行模拟计算。将系统设备按照不同功能分成多个子系统,以子系统焓流和单位焓在系统焓形成的现值得到现金平衡式,最终得到系统消耗单位焓与得到单位焓之间的关系,从而得到在市场价格条件下两种系统模式经济性的优劣。

1 蓄能系统

电力蓄能系统的原理是在用电低谷时将电能储存于一定介质中,在用电高峰时将储存的能量释放用于发电,满足高峰负荷需求,以达到移峰填谷,提高电力系统效率的目的。本研究的 CAES 采用文献[7]中优化系统进行分析,如图 1 所示。其原理为:在用电低谷,空气经两级压缩后被常温储存于贮气室中,电能转化为空气压缩能量储存,此过程空气冷却所释放的热量排放于大气中;用电高峰时空气先经回热换热器,利用燃气轮机尾气余热加热后进入汽轮机(AT)做功,然后与天然气在燃烧室混合燃烧进入燃气轮机(GT)做功,完成一个循环。本文研究的超临界压缩空气蓄能系统则采用文献[5~6]所提出的模式,考虑到系统工质参数,蓄能系统采用两级压缩,中间冷却的方式,以降低系统的压缩功,膨胀机采用两级膨胀做功方式,如图 2 所示。系统工作原理为:在用电低谷时将低价电能用于压缩空气进行蓄能,空气先由低压压缩机(LP)压缩后在高温蓄能换热器(HS1)中换热并蓄热后进入高压压缩机

收稿日期:2010-07-19; 修订日期:2010-08-09

作者简介:鹿院卫(1971-),女,陕西蓝田人,北京工业大学副研究员,博士。

(HP) 压缩,再进入高、低温蓄热换热器(HS1、HS2) 换热、蓄能,最后经节流阀节流降温进入储液罐以液态形式储存空气;在用电高峰时,空气由工质泵 P 加压后依次进入低、高温蓄热换热器进行加热,然后进入高压汽轮机(HT) 膨胀做功后再经高温蓄热换热器换热,最后进入低压膨胀机(LT) 做功,完成一个循环过程。

超临界压缩空气蓄能系统与 CAES 的最大区别在于:超临界压缩空气蓄能系统储存工质为储存于低温罐中的常压低温液态空气,解决了 CAES 系统工质以常温高压状态储存于大空间的特殊地理条件的限制,且不需要燃气轮机等设备,系统工艺相对简单,从而大大减少了系统的初投资;其次 CAES 系统的天然气燃烧放热做功过程是整个系统的核心,而超临界压缩空气蓄能系统则无此过程,工质在系统膨胀做功过程需要的热量来自压缩空气蓄能过程中存储于蓄热器中的热量,同时也可利用其它废热或太阳能等可再生能源,提高了能量的利用。

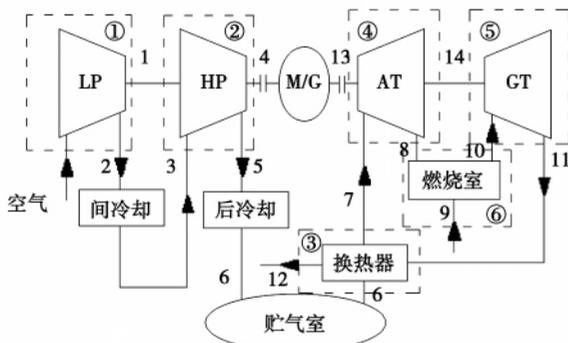


图 1 CAES

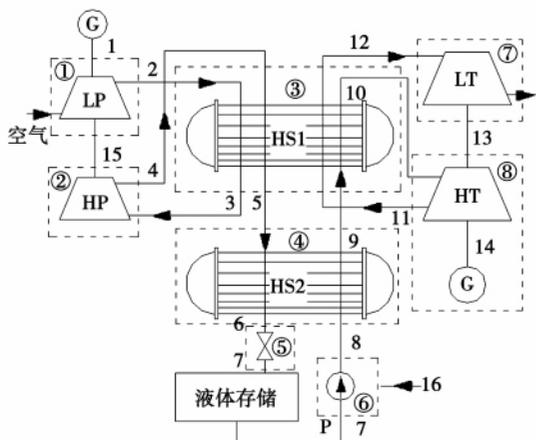


图 2 超临界压缩空气系统

对两系统经济性进行分析时,按照设备功能将

系统分成不同的子系统,如图 1 和图 2 虚线框所示。其中虚线框带圈数字为子系统的编号,数字管道编号为子系统物理焓流的编号,箭头为工质流动方向。

2 热经济学矩阵分析

2.1 热经济学

热经济学(焓经济学)是一种把热力学分析与经济因素相结合的分析方法,即同时考虑系统的物理环境与经济环境。基本思路是把系统内部及系统与外界相互作用的物质、能量和现金都作为流,构建质量平衡、能量平衡和现金平衡关系式,从而得到评价系统的信息。热经济学分析的模式主要有会计模式、优化模式、结构系统模式和符号焓经济学模式。符号焓经济模式也叫矩阵模式^[8],它是以热力学第二定律定义的效率为基础,其焓单价反映系统内部的损失和获得单位产品焓所要付出的代价,是综合前几种模式的热经济学的新成就。本研究采用矩阵模式对系统经济性进行分析。

2.2 系统主要参数

将空气温度和压力($t = 27\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 0.1\text{ MPa}$) 作为基准点计算,CAES 中空气质量流量为 78.8 kg/s ,天然气的质量流量为 1.6 kg/s ,两级压缩机的效率为 85% ,压缩比为 8 ;汽轮机(AT)的效率为 80% ,膨胀比为 4.5 。储气室工质参数为 $p = 6.4\text{ MPa}$ 和 $t = 32\text{ }^\circ\text{C}$ 。超临界压缩空气蓄能系统取工质的质量流量为 1 kg/s ,工质泵效率为 0.75 。工质经节流阀前压力 $p = 6.4\text{ MPa}$ 及温度 $t = -188\text{ }^\circ\text{C}$ 经节流阀后以液态形式储存于储液罐中,压力和温度分别为 $p = 0.1\text{ MPa}$, $t = -194.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。系统的管网的阻力损失为 0.1 MPa ,工质泵的出口压力为 6.3 MPa 。超临界压缩空气系统压缩机和空气膨胀机效为 85% 和 80% ,其压比分别为 8 和 7.9 。换热器传热温差取 $6\text{ }^\circ\text{C}$ 。CAES 用型号为 GT10B 型燃气轮机做仿真计算,具体参数如表 1 所示。

表 1 GT10B 参数

	数值
额定电效率/%	34.2
燃料类型	天然气($q = 37\ 680\text{ kJ/m}^3$)
净功率 P/MW	23.4
压比	14:1
排气温度/K	816
排气流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	80.4

2.3 数学模型的建立

各烟流与子系统之间的关系可用事件矩阵 $A_{i \times j}$ 来表示 其中 i 表示系统中子系统的数目 j 表示系统中烟流通股数。对 CAES 系统 其子系统数目 $i=6$, 烟流通股数为 $j=14$ 。若矩阵中元素 $a_{ij}=0$ 表示第 j

股烟流与子系统 i 没有关系,若矩阵中元素 $a_{ij}=1$ 表示第 j 股火用流流入子系统 i ,若矩阵中元素 $a_{ij}=-1$ 表示第 j 股烟流流出子系统 i 。以图 1 计算结果进行分析,图 2 的具体计算可参阅文献 [9],则矩阵 A 表示为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

由于每个子系统只能建立一个现金平衡方程,即可列 6 个现金方程式,而需求解的烟流现金数目为 14,要使系统计算结果唯一则需要补充 $j-i$ 即 8 个方程,其方程补充原则为^[8]: (1) 从外部输入系统烟流的单位烟成本按市场价格计算; (2) 对于多产品输出的子系统,按各产品单位烟成本相等的原则; (3) 若子系统的“燃料”为双线流,则构成双线流的两股烟流的单位火用成本相等; (4) 若烟流为内部产品,则按单价相等的原则计算。

按照上述原则,建立图 1 中求解所需补充方程式,即:

(1) 按照原则(1),图 1 所示系统中的子系统①、②和⑥中,输入子系统的单位烟流成本按市场价格计算,以子系统①为例,则补充方程为:

$$a_1 \times E_D \times C = W_1 \tag{1}$$

(2) 按照原则(2),则对多产品的子系统④和⑤,各产品烟单价相等的原则建立两个补充方程,研究系统中④号子系统可建立的补充方程式为:

$$\frac{1}{E_{13}} \times E_{13} \times C_{13} - \frac{1}{E_8} \times E_8 \times C_8 = 0 \tag{2}$$

(3) 按原则(3),子系统的“燃料”为双线流,则其输入和输出子系统的烟单价相等,研究系统中可建立 3 个方程式,由于考虑到间冷却器和后冷却器的作用,未对其划分子系统,但输入与输出冷却器的烟流单价相等,即可列两个方程式及子系统③建立补充方程式为:

$$\frac{1}{E_{11}} \times E_{11} \times C_{11} - \frac{1}{E_{12}} \times E_{12} \times C_{12} = 0 \tag{3}$$

在本研究系统中无内部产品,按上述 3 个原则可建立所需 8 个方程式。将式(1)~式(3)写成式(4)的形式,即:

$$a \times E_D \times C = W \tag{4}$$

由事件矩阵 A 及补充方程构建扩展矩阵 \bar{A} ,如表 3 所示,按照方程^[9]:

$$\bar{A} \times E_D \times C = \bar{Z} \tag{5}$$

进行求解得到各相应编号烟流的现金值 C ,单位为元/MJ,用矩阵可表示为:

$$C = (C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14})^T$$

其中: $a_1 = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$; 矩阵 E_D 为由系统按编号点的烟流依次为主对角线点构成的 $(j \times j)$ 阶矩阵; W_1 为输入子系统的总烟价,式(2)和式(3)中 E_j 为图 1 中相应烟流编号点的烟值, a 为与补充方程式各烟流值倒数相关的数,其与矩阵 A 共同构成扩展矩阵 \bar{A} 。矩阵 \bar{Z} (14×1) 由系统输入能量和非能量费用构建的费用向量,如设备折旧费、人工费等。非能量费用对系统日常运行费用及系统经济性有重要的影响,超临界压缩空气蓄能系统与 CAES 相比,没有燃气轮机的燃烧室和所需较大的储存空间所带来的初投资,但增加了蓄能系统的初投资;系统在日常的维护费用也相对 CAES 较少。在研究中考虑到设备初投资及人工费的不确定性,暂不考虑非能量费用对系统的影响,仅考虑初始输入系统的能量费用,即压缩机消耗电能和消耗天然气的费用, $\bar{Z} = (W_1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, W_9, 0, 0, 0, 0)^T$,其中 W_1 和 W_9 为单位时间输入系统的电能和天然气的总价。

在此计算过程中,系统烟是不断减小的,而输入的现金值是平衡的,在烟值减小的过程中,将单位烟值的现金值向产品方向传递。

扩展矩阵 \bar{A} 为:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{E_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{E_2} & -\frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_5} & -\frac{1}{E_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_7} & -\frac{1}{E_8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{10}} & -\frac{1}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{11}} & -\frac{1}{E_{12}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3 计算结果及分析

计算电价以北京市电网峰谷分时市场电价为依据,选取大工业 110 kV 低谷蓄能电价为 0.309 9 元/(kW·h),其高峰电价为 0.753 7 元/(kW·h)。天然气的价格取 2 元/m³,得到两种系统单位成本如表 2 所示。

表 2 相应编号焓值及单位成本

	焓流编号	焓值/GJ·h ⁻¹	焓单位成本/元·GJ ⁻¹
超临界压缩空气蓄能系统	1	1.046	86.1
	15	1.052	86.1
	13	0.699	132.1
	14	0.693	132.1
CAES	1	82.4	86.1
	4	82.5	86.1
	9	200.7	52.9
	13	46.4	153.7
	14	86.4	144.3

从表 2 中的计算结果可以看出,超临界压缩空气蓄能系统的输出电价为 0.475 7 元/(kW·h) (132.1 元/GJ),CAES 输出的电价按加权平均值计算为 0.531 3 元/(kW·h) (空气膨胀机和燃气轮机输

出电价分别为 153.7 和 144.3 元/GJ)。可见超临界压缩空气蓄能系统的电价比 CAES 的略低,且两种系统输出的电价都低于 110 kV 大工业高峰电价 0.753 7 元/kW,因此超临界压缩空气蓄能系统较 CAES 更经济可行,可以达到调节电网的目的;从系统对环境效益方面看,超临界压缩空气蓄能系统在空气膨胀做功过程所需热源为压缩空气在换热器中释放的储存于蓄热器中的热量而不使用天然气燃烧释放的热量,因此系统所排放的温室气体几乎为零。随着碳排放征收关税计入成本及燃气价格的升高,超临界压缩空气蓄能系统相对于 CAES 的环境价值和经济优势更显著。

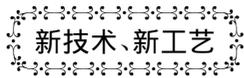
4 结 论

利用热经济学方法对两种蓄能系统经济性对比,输入系统电价以北京区域电网峰谷分时电价 110 KW 低谷电价 0.309 元/(kW·h),天然气价为 2 元/m³ 计算,超临界压缩空气蓄能系统输出电价为 0.475 元/(kW·h) 比 CAES 系统输出电价 0.531 元/(kW·h) 要低,且都低于峰谷电价 0.753 元/(kW·h),表明超临界压缩空气蓄能系统更加经济。

参考文献:

[1] 中国风力发电网. 我国 1/3 风力发电装机容量浪费 [EB/OL].

- http://www.fenglifadian.com/news/247GBD00.html. 2009.
- [2] ALFRED CAVALLO. Controllable and affordable utility – scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage(CAES) [J]. Energy 2007(32): 120 – 127.
- [3] HENRIK LUND ,GEORGES SALGI ,BRIAN ELMGAARD ,et al. Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on electricity spot markets with fluctuating prices [J]. Applied Thermal Engineering 2009(29): 799 – 806.
- [4] 宋卫东. 国外压缩空气蓄能发电概况 [J]. 中国电力, 1997 (9): 53 – 54.
- [5] 陈海生, 丁玉龙, 彼得斯·托比, 等. 存储能量的方法和低温能量蓄能系统 [P]. 200780013983.0 2007.
- [6] STEFAN ZUNFT ,CHRISTOPH JAKIEL ,MARTIN KOLLER ,et al. Adiabatic compressed air energy storage for the grid integration of wind power//Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for offshore Windfarms [C] ,Delft ,Netherlands 2006 1 – 4.
- [7] 刘文毅. 压缩空气蓄能(CAES) 电站热力性能仿真计算 [M]. 北京: 华北电力大学出版社 2008.
- [8] 王加璇, 张恒良. 动力工程热经济学 [M]. 北京水利电力出版社, 1995.
- [9] 刘广林, 鹿院卫, 吕晓峰, 等. 超临界压缩空气蓄能系统热经济学分析 //中国工程热物理学会 [C] ,南京, 2010.



联合循环使老调峰电站输出功率加倍

据《Gas Turbine World》2010 年 9 ~ 10 月报道,加利福尼亚州 IPP(独立电力生产商) CWF Energy 能源公司正在将现有的 170 MW Tracy Peaker Plant 电站改造扩容,提高效率、清洁环境,形成联合循环电站,以便支持与 Pacific Gas & Electric 公司的新电力购买协议。

老调峰电站由额定输出功率为 85.4 MW 的 GE Fr 7EA 燃气轮机发电机组组成,燃气轮机以简单循环方式运行。

正在改建的联合循环电站计划于 2012 年中期启动,其特点如下:

燃气轮机:现有的 PG7121EA 燃气轮机升级并提高性能。

余热锅炉:两台余热锅炉在工厂预先组装,以便现场安装的需求,时间和费用减少。

蒸汽轮机:汽轮机为双进汽、无再热结构。进汽压力为 10.1 MPa,温度为 563℃,额定输出功率为 165 MW。

冷却方式:汽轮机冷凝器采用简化的空气冷却,结合空气冷却的发电机,整个汽轮机发电机组全部采用干式空气冷却方式。

双机组 170 MW 调峰电站改造成基本负荷联合循环电站,额定输出功率增加到 270 MW,热耗率达到 8071 kJ/(kW·h)。补燃可以使输出功率超过 335 MW,热耗率为 8514 kJ/(kW·h)。

(吉桂明 摘译)

高负荷扩压串列转子的设计技术探讨 = **Exploratory Study of Design Technologies for High-load Pressure Diffusion Tandem Rotors** [刊 汉] WANG Peng , GAN Peng , ZOU Zheng-ping (National Level Key Laboratory on Aeroengine Aerodynamics and Thermodynamics , College of Energy Source and Power Engineering , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing , China , Post Code: 100191) , WANG Qiang (China Aviation Power Machinery Research Institute , Zhuzhou , China , Post Code: 412002) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -388 ~ 392

The authors have conducted an exploratory study of design technologies for high load tandem rotors. By combining the speed triangle analysis with the controllable diffusion blade profile reverse problem design technology , a design version for a two-dimensional high load tandem rotor was completed. The numerical calculation results show that the tandem rotor such designed has a superior aerodynamic performance and its efficiency can reach 91% . Furthermore , under the condition that the gas flow deflection angle is 50 degrees and the booster pressure ratio is 1.68 , there exists no separation flow , guaranteeing that its work-doing capacity reaches that of the original two-stage rotor.

Key words: tandem rotor , high-load pressure diffusion stage , reverse problem design , controllable diffusion blade profile

准一维超音速气液两相流数值模拟 = **Numerical Simulation of a Quasi-one-dimensional Supersonic Gas-liquid Two-phase Flow** [刊 汉] RUI Shou-zhen , XING Yu-ming (College of Aeronautical Science and Engineering , Beijing University of Aeronautics and Astronautics , Beijing , China , Post Code: 100191) , LIANG Cai (CSIC Zhengzhou No.713 Research Institute ,Zhengzhou ,China ,Post Code: 450015) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -393 ~ 396

By using the Euler-Lagrange method , the authors conducted a quasi-one-dimensional numerical simulation study of the gas-liquid two-phase flow in the supersonic fuel gas during its spray evaporation inside a fuel gas-steam launching power plant. The method in question considered various influencing factors , including area change , mass addition , evaporation effect and variable physical properties etc. A numerical simulation calculation was performed at different water spray hole diameters , pressure differences and water-gas mass ratios. Furthermore , the liquid drop evaporation under various conditions and its influence on the gas phase flow field were analyzed , thus providing a quick and effective method for optimizing and designing a fuel-gas-steam launching power plant. **Key words:** quasi-one-dimension , spray , two-phase flow , evaporation

压缩空气蓄能系统热经济学分析 = **Thermo-economic Comparison of Compressed Air Energy Storage Systems** [刊 汉] LU Yuan-wei , LIU Guang-lin , MA Chong-fang , LU Peng-fei (Education Ministry Key Laboratory on

Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation , College of Environment and Energy Source Engineering , Beijing University of Technology , Beijing , China , Post Code: 100124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -397 ~ 401

By using a thermo-economic analytic method , the cost-effectiveness of a compressed air energy storage system (CAES) and a supercritical one was analyzed. With the electric energy input to the system being the low valley 110 kV electric power for large-scale industries at a price of RMB 0.3099 yuan/(kW · h) and fuel gas price of RMB 2 yuan/m³ serving as an example a calculation was performed with a simulation being conducted by using the software EES. It has been found that compared with the compressed air energy storage system , the supercritical one is more economic and effective. It can achieve the aim of regulating the load of an electric grid and enhance the economic benefit of a renewable energy source (such as wind and solar energy) power generation system. **Key words:** compressed air energy storage system , thermo-economics , power generation , system evaluation

渐缩型混合室引射式低压加热器加热性能实验研究 = **Experimental Study of the Heating Performance of a Converging Mixing Chamber Ejection Type LP (Low Pressure) Heater** [刊 , 汉] CHEN Yan-rong , WU Wei-di , LIU Zhi-hua , RAN Jing-yu (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems , Chongqing University , Chongqing , China , Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011 26(4) . -402 ~ 405

Presented was an ejection type LP heater with a converging type mixing chamber structure and experimentally studied was the heating performance of the heater in question at a low inlet steam pressure. On this basis , the influence of the inlet parameters of the heater on its ejection coefficient , outlet temperature and heating efficiency was analyzed. It has been found that at a constant steam pressure , the higher the inlet water pressure , the smaller the ejection coefficient. When the inlet water temperature $T_w = 20^\circ\text{C}$, the outlet temperature rise of the heater can reach or exceed 60°C and the heating efficiency can hit 90% . The heater enjoys a good adaptability to any change of inlet parameters , basically eliminating the risk that the HP water enters into the LP steam pipelines. Therefore , the mixing type LP heaters are expected to obtain a wide application in thermal power plants. **Key words:** ejection type LP (low pressure) heater , converging type mixing chamber , heating performance , off-design condition , heating efficiency

氨水竖管降膜蒸发实验和理论研究 = **Experimental and Theoretical Study of Ammonia Water Falling Film Evaporation in a Vertical Tube** [刊 , 汉] BU Xian-biao , MA Wei-bin , GONG Yu-lie (Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Renewable Energy Sources and Natural Gas Hydrates , Guangzhou Energy Source Research