文章编号:1007-2284(2024)08-0222-06

China Rural Water and Hydropower

水电与新能源

# 压缩空气抽水蓄能系统蓄能罐参数配置分析

# 鲍文龙1,冯 陈2,蔡文方1,汪 春3,杨 丹3,汤络翔2

(1.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江杭州 310014; 2.河海大学能源与电气学院,江苏南京 210098;3.杭州意能电力技术有限公司,浙江杭州 310014)

摘 要:为获得压缩空气抽水蓄能(pumped hydro combined with compressed air energy storage system, PHCA)系统蓄能 罐子系统在实际运行中具有较高能量密度与蓄能效率的参数配置,对系统中蓄能罐子系统进行热力学建模,分析了其压 力配置、换热条件、流量配置对于蓄能罐子系统效率和能量密度的影响规律,结果表明:对于额定存储压力,总有与之对 应的一个最优初始压力可以使得能量密度达到最大值,存储压力与最优初始压力的比值在2~3之间,对应压力配置的蓄 能效率稳定在92%~93%之间;传热系数和存储时间在一定配置范围内会使系统陷入低效率区,在蓄能罐的设计中,应当 评估出其换热能力避免低效率区;运行过程中,存储时间对于蓄能效率的影响较大,选择合适的水泵水轮机工作流量可 以保证效率,在短存储时间时,采用的配置方法为高压缩、高膨胀流量,当存储时间变长后,应当同时减少压缩和膨胀流 量。研究结果可为该系统的设计与运行提供理论依据。

关键词:压缩空气储能;抽水蓄能;蓄能罐;参数配置

中图分类号:TK02 文献标识码:A **DOI**:10.12396/znsd.232043

鲍文龙,冯 陈,蔡文方,等. 压缩空气抽水蓄能系统蓄能罐参数配置分析[J]. 中国农村水利水电,2024(8):222-227. DOI:10.12396/znsd.232043. BAOWL, FENGC, CAIWF, et al. Parameter configuration analysis of storage tank in pumped hydro combined with compressed air energy storage system[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(8):222-227. DOI:10.12396/znsd.232043.

# Parameter Configuration Analysis of Storage Tank in Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System

## BAO Wen-long<sup>1</sup>, FENG Chen<sup>2</sup>, CAI Wen-fang<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>3</sup>, YANG Dan<sup>3</sup>, TANG Luo-xiang<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Electric Power Research Institute of Stare Grid Corporation, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;

3. Hangzhou Yineng Electric Technology Co.Ltd, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China)

Abstract: In order to obtain the parameter configuration of storage tank in pumped hydro combined with compressed air energy storage system (PHCA) with high energy density and energy storage efficiency in actual operation, in this paper, the thermodynamic modeling of the energy storage tank system in the system was carried out, and the influence laws of its pressure configuration, heat exchange conditions and flow configuration on the efficiency and energy density of the energy storage tank system were analyzed. The results showed that: For the rate d storage pressure, there is always an optimal initial pressure corresponding to it, which can make the energy density reach the maximum. The ratio between the optimal initial pressure and the storage pressure is between 2 and 3, and the storage efficiency of the corresponding pressure configuration is stable between 92% and 93%. When the heat transfer coefficient and storage time are in a certain configuration range, the system will fall into the low efficiency zone. In the design of storage tank, the heat transfer capacity should be evaluated to avoid the low efficiency zone. During operation, the storage time has a great impact on the energy storage efficiency, and choosing the suitable

#### 收稿日期:2023-12-06 接受日期:2024-04-08

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目资助(新型分布式压缩空气抽水蓄能储能系统研究 5211DS23000K)。 作者简介:鲍文龙(1989-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为压缩空气抽水蓄能系统建模与仿真。E-mail:787396373@qq.com。 通讯作者:冯 陈(1992-),男,讲师,博士,主要研究方向为压缩空气抽水蓄能系统协调控制。E-mail:windycity@hhu.edu.cn。 working flow of pump turbine can ensure efficiency. When the storage time is short, the configuration method adopted is high compression flow and high expansion flow. When the storage time becomes longer, the compression and expansion flow should be reduced at the same time. The research results can provide a theoretical basis for the design and operation of the system.

Key words: compressed air energy storage; pumped hydro storage; energy storage tank; parameter configuration

# 0 引 言

应对传统能源所带来的气候变化与环境污染的有效手段 是开发以风、光为代表的可再生清洁能源<sup>[1]</sup>。然而,风能、太阳 能等间歇式可再生能源大规模并网发电的供应能力随着时间 的波动性会导致电力系统的供需不平衡,给电力系统的安全稳 定运行带来了严峻挑战,亟需同步建设与之配套的规模化储能 系统以应对电力系统调峰调频要求<sup>[2,3]</sup>。

目前已有电力存储技术已在大型商业系统中运行的只有 抽水蓄能(pumped hydro storage, PHS)和压缩空气储能(compressed air energy storage system, CAES)两种, PHS技术是一项 成熟的储能技术,可以很好地参与到电网新能源调度中<sup>[4]</sup>,但是 其建设地点需要满足一定的自然地理条件,投资回报周期较 长;国内外学者对CAES系统已经进行了诸多研究<sup>[5]</sup>,在国内外 也有实际项目落地<sup>[6,7]</sup>,其具有储能容量大、可充分利用废弃盐 穴等优点,但是仍然存在选址条件苛刻、热管理复杂、电-电转 换效率不高等缺点<sup>[8]</sup>。

为综合利用PHS和CAES系统的特点,国内外研究人员陆续开展了压缩空气与抽水蓄能耦合(PHCA)的新型储能系统研究,其系统主要由一个压缩空气蓄能罐和一个由水泵水轮机驱动的压力输送系统组成。特点在于将空气作为储能介质并且把能量交换过程在蓄能罐而非空压机中进行,实现了能量的集中管理。ODUKOMAIYA<sup>[9]</sup>从模型和实验两方面研究了采用液体推动压缩空气储能的地面层集成多样化储能(ground-level integrated diverse energy storage,GLIDES)技术,结果表明系统具有较高的往返效率和能量密度,证明了类PHCA系统的可行性。WANG<sup>[10]</sup>在传统CAES系统基础上建立了PHCA系统数学模型并进行了系统性能指标分析,阐释了系统功密度与容器容积、水泵水轮机效率等指标的内在联系。李丞宸<sup>[11]</sup>对PHCA储能系统各子系统进行效率及能量损失统计,并进行了系统敏感性分析。

但是,发展PHCA系统仍然面临成本、技术和安全性的问题,蓄能罐作为能量存储和转换设备的核心设备,其设计和运行直接影响PHCA系统的储能和释能效率、经济性和可靠性。 建设PHCA系统其设备投资超过6000元/kW,接近于PHS系统成本<sup>[12]</sup>,而蓄能罐成本又占其设备成本的50%以上<sup>[13]</sup>,合理高效利用蓄能罐进行能量转换有利于提高系统整体经济性。MO-ZAYENI<sup>[14]</sup>通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对PHCA系统进行数值模拟,分析了蓄能罐在充放气体过程中的内部流场变化以及传热。在PHCA系统的运行过程 中还要解决各部分匹配和调节的技术问题<sup>[15]</sup>,由于PHCA系统 中蓄能罐和水泵水轮机的运行参数时刻变化,确认最优的初始 配置参数并研究其在充放能量过程中对系统的影响作用十分 重要。目前对于压缩空气抽水蓄能系统相关研究主要关注 PHCA系统及其改进系统的整体可行性和效率分析,很少具体 涉及储气子系统的影响因素分析与参数配置方法,本文首先建 立PHCA的蓄能罐子系统热力学模型,再以压力配置、换热条 件、流量配置作为自变量分析了其能量密度与效率的变化规 律,找到兼具效率与能量密度的压力配置方法,指出在不同换 热条件和存储时间下的低效率区,给出了蓄能罐参数配置建 议,为优化PHCA系统的参数、提高系统的效率和安全性、降低 系统维护的成本和费用提供了参考。

# 1 系统及热力学建模

## 1.1 系统模型

本文研究的压缩空气抽水蓄能系统采用高压储气罐作为 蓄能罐,气体的能量转换过程发生在蓄能罐中,与传统的CAES 系统相比,省去了换热器的部分,并且采用水泵水轮机同时作 为水泵和水轮机工作,结构更为小巧简单,安装地点选择灵活, 系统整体大小可以自由调整为多蓄能罐式。

系统模型如图1所示,主要由4个部分组成:蓄能罐、水泵 水轮机、蓄水罐、电机及机械结构,水流通过水泵水轮机及其管 道在蓄能罐和蓄水罐之间来回流动,以完成吸收/放出能量的过 程;其中蓄能罐是储能的主要部件,其中气体主要有压缩和膨 胀两个过程,分别代表了储能和释能的过程,压缩过程中水泵 水轮机为水泵工况,蓄能罐内液面不断上升水流对蓄能罐内气 体做功,将能量以蓄能罐的高压气体形式存储起来,膨胀过程 高压气体对液面做功驱动水泵水轮机反向旋转,此时水泵水轮 机为水轮机工况对外做功。



Fig.1 Schematic diagram of pumped hydro combined with compressed air energy storage system

# 1.2 蓄能罐热力学建模

为了简化热力学模型,本文对于蓄能罐的热力学建模过程 采用如下假设: 蓄能罐内用以压缩和膨胀做功的气体为空气,视为理想气体,遵循理想气体状态方程,水视作不可压缩流体。

蓄能罐内由于温度变化导致的气液两相的质量交换可以 忽略不计。

蓄能罐壁厚度足够小,罐内压缩空气直接与环境进行换 热,换热形式为对流换热。

蓄能罐内压缩空气的基本能量方程可由下式描述[16]:

$$\mathrm{d}U = Q - P \,\mathrm{d}V \tag{1}$$

式中:U为气体的内能;Q为压缩空气和外部整体的换热量;P、V 分别为气体的压强和体积。

从而可以进一步得到蓄能罐内气体的能量方程<sup>[17]</sup>,其表达 式为:

$$mC_{v}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = Q - T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{v}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$$
(2)

$$m = \frac{P_0 V_0}{R_s T_0} \tag{3}$$

式中:m为蓄能罐内气体的质量; $C_v$ 为质量定容比热容;T为蓄 能罐内压缩空气的温度; $R_s$ 为气体常数; $T_0$ 、 $P_0$ 、 $V_0$ 分别为压缩空 气的初始温度、初始压强、初始体积。

对于蓄能罐内气体与外界换热量,可以用对流换热公式<sup>[18]</sup> 来描述,0可以表示为:

-D<sup>2</sup>

$$Q = h_g S \left( T_a - T \right) \tag{4}$$

$$S = \frac{\pi D}{2} + \pi DL \tag{5}$$

式中:h<sub>g</sub>为整体的对流换热系数;S为压缩空气与蓄能罐壁面和 水的接触面积;T<sub>a</sub>为蓄能罐所在环境温度;D为圆柱形蓄能罐的 直径;L为特征长度。

最终可将能量方程写为:

$$mC_{v}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = h_{g}S\left(T_{a} - T\right) - T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{v}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$$
(6)

要能够准确描述蓄能罐内气体的状态变化,h<sub>e</sub>通过其气体 对应的努赛尔数进行计算,努赛尔数反映了流体传热的强度:

$$Nu = \frac{h_g L}{\lambda(T)} \tag{7}$$

同样求出其瑞利数,瑞利数反映了流体对流传热的水平, 其表达式为<sup>[19]</sup>:

$$Ra^* = \frac{\rho^2 g \beta' |T_a - T| L^3 C_v(T)}{\mu(T) \lambda(T)}$$
(8)

式中: $\rho$ 为气体密度;g为重力加速度取9.81 m/s<sup>2</sup>; $\beta$  为经验数,取 3 670, $\mu(T)$ 、 $\lambda(T)$ 分别为气体的动力黏度与导热系数,可以近 似为温度的函数<sup>[20]</sup>。

圆柱形蓄能罐内气体的几何特征用体积*V*、底面积*S*、底面 直径*D*来描述,几何特征数*F*可由以下式计算:

$$F = \frac{V}{SD} \tag{9}$$

*Nu*与其他参数之间的经验关系是通过对对数进行线性回归得到的,可用下式进行计算<sup>[20]</sup>:

$$Nu = 3.25Ra^{*0.272}F^{0.765} \tag{10}$$

在 Matlab-Simulink 软件中对以上能量方程进行建模,所得到的蓄能罐子系统热力学模型如图2所示。



图2 蓄能罐子系统热力学模型

#### Fig.2 Thermodynamic model of storage tank subsystem

# 2 性能评价指标

采用蓄能效率 $\eta$ 和能量密度 $\varepsilon$ 作为蓄能罐的性能评价指标。

蓄能效率反映了蓄能罐子系统在一个压缩和膨胀的周期 中储存能量的能力,其计算方式为膨胀过程罐内高压气体对于 液体做功与蓄能过程中液体对气体做功之比。

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{\int_{V_1}^{V_2} P \, \mathrm{d}V}{\int_{V_0}^{V_1} P \, \mathrm{d}V}$$
(11)

式中:W<sub>out</sub>为膨胀过程压缩空气对水做的功;W<sub>in</sub>为压缩过程气体 被水压缩所吸收的功;P为蓄能罐内压缩空气的压强;V<sub>0</sub>为蓄能 罐内空气的初始体积;V<sub>1</sub>为膨胀过程蓄能罐内气体初始体积;V<sub>2</sub> 为膨胀过程蓄能罐内气体最终体积。

能量密度是单位体积蓄能罐在膨胀过程中对外提供能量 能力的度量,其计算式为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{\int_{V_1}^{V_2} P \mathrm{d}V}{V_0} = \frac{\int_{V_1}^{V_2} \frac{m_0 R_s T_0}{V} \mathrm{d}V}{V_0} = m_0 R_s T_0 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) / V_0^{(12)}$$

式中: $m_0$ 为气体质量; $R_s$ 为气体常数; $T_0$ 为气体初始温度; $P_1$ 为膨胀过程罐内气体的初始压力; $P_2$ 为膨胀过程罐内气体最终压力。

# 3 计算结果与分析

蓄能罐内气体的初始温度与环境温度保持一致,在不考虑 存储时间的情况下对存储压力在4.0~5.5 MPa、预设压力0.1~ 3.0 MPa的配置范围内进行仿真实验,系统参数见表1。图3展 示了蓄能罐的压力配置对于蓄能效率的影响,随着初始压力从 0.1 MPa增加到3.0 MPa,在不同的存储压力下蓄能效率都得到 了较大提高,这是因为初始压力的增加,压缩和膨胀过程都会 更快地达到预设的停止压力,罐内压缩气体与外界的对流换热 时间和强度都将减少,在4.0 MPa的存储压力下,初始压力为 2.5 MPa时的蓄能效率比存储压力为1.5 MPa时提高约5.55%; 对于相同初始压力,存储压力的增加会使得蓄能器效率变低, 在1.5 MPa初始压力下,存储压力为4.0 MPa时的蓄能效率比存 储压力为5.0 MPa时降低约2.67%;综上可以发现,若要提高蓄 能效率,应当减少初始压力与存储压力的差值,即在配置时降

表 1 系统参数表 Tab.1 System parameters	
蓄能罐体积 V <sub>0</sub> /m <sup>3</sup>	0.8
蓄能罐底部直径D/m	0.7
蓄能罐额定初始压力 $P_0$ /MPa	1.5
蓄能罐额定存储压力 $P_1$ /MPa	4.0
环境温度T <sub>a</sub> /K	293
蓄能罐气体初始温度 $T_0/K$	293
液体额定充放流量q/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	30
气体常数Rs	287
空气质量定容比热容 $Cv/(kJ\cdot kg^{-1}\cdot k^{-1})$	0.719



**Fig.3 The relationship between pressure configuration and efficiency** 低存储压力或者提升初始压力。

在追求较高蓄能效率的同时,需要同时考虑到能量密度, 因为能量密度反映了在膨胀过程中蓄能罐对外界能够放出多 少功,是评价蓄能罐运行水平的重要因素。图4展示了压力配 置对于能量密度的影响,可以发现,在相同的初始压力下,能量 密度随着存储压力的增加而增加,在1.5 MPa的初始压力下,随 着存储压力从 4.0 MPa 增加到 5.5 MPa,能量密度从 333 Wh/m<sup>3</sup> 增加到447 Wh/m3这是因为存储压力的提升使得更多的水进入 蓄能罐中,蓄能罐中的空气被进一步压缩,从而能够在发电过 程中释放更多能量。然而在相同存储压力下,随着初始压力的 增加,能量密度呈现先增大后减小的趋势,在存储压力为4.0 MPa时,能够使能量密度达到最大的初始压力约为1.5 MPa,这 是因为更大的初始压力意味着在膨胀过程中空气对外做功的 平均功率会更大,但是也会更快达到给定的压力配置值,做功 的时间相应减少。上述分析说明对于给定的存储压力,总有一 个初始压力与之对应,能够使蓄能器的能量密度达到最大值, 也就是能够释放的能量达到最多,且随着存储压力的增加,这 个初始压力也会逐渐增大,将其称作最优初始压力。

用三次方程 $\varepsilon = aP_0^3 + bP_0^2 + cP_0 + d$ 拟合上述压力一能 量密度曲线,并且求出所得拟合曲线最大值所对应的初始压力 值,就可以近似得到其最优初始压力 $P_a$ ,如图5所示,可以发现





其存储压力和最优初始压力近似为线性关系,最优初始压力随 着存储压力的增大而增大,存储压力与最优初始压力的比值在 2~3之间,对应压力配置的蓄能效率稳定在92%~93%之间。这 是在保证一定效率情况下系统又能最大程度吸收/输出功的权 衡结果。

将压力配置在初始压力1.5 MPa和存储压力4.0 MPa,压缩 膨胀过程中流量都为30 m<sup>3</sup>/s的情况下进行仿真实验,研究换热 水平对于存储效率的影响,影响换热水平的参数主要有传热系 数h、和存储时间比TD,存储时间比TD是存储时间和压缩时间 的比值,其大小反映了存储时间的长短,图6为不同参数配置下 所获仿真数据作的等高线图,可以发现,在以传热系数和存储 时间比为自变量的等高线图中出现了椭圆形的低效率区,其最 低效率只有约80%,在较小的传热系数下,蓄能效率维持在较 高水平且受存储时间比影响不大,整个过程近似于可逆绝热过 程,而当传热系数为45 W/K时,蓄能效率随着存储时间比从0 增加到5时效率降低了约15%,当传热系数进一步增大,蓄能效



storage time and efficiency

率随存储时间增加而降低的程度变小,在传热系数为120 W/K 时,蓄能效率随着存储时间比从0增加到5时效率降低了约 5%,这是因为较高的换热水平使得蓄能罐内气体在膨胀过程中 能够充分从环境吸收能量用以做功,整个压缩膨胀接近等温过 程;实际过程中,蓄能罐内气体与外界换热是通过蓄能罐壁面 进行的,壁面的材料参数一定程度上会影响传热系数,在蓄能 罐的设计中,应当评估出其换热能力,根据所拟定的存储时间 适当增加或减少换热水平以在实际运行中避开低效率区。

系统实际运行中,水轮机工况的膨胀流量q<sub>aut</sub>也会影响系统 的效率,图7展示了不同流量配置与存储时间对于效率的影响, 设置6组不同的压缩流量和存储时间,观察效率随膨胀流量的 变化规律,在存储时间为150s和300s时,效率随着膨胀流量的 增加而降低,而在较低的存储时间时(*T*=0s),随着膨胀流量的 增加,效率提高。这是因为当存储时间较小时,蓄能罐内气体 在压缩过程后温度上升后立即进行膨胀过程,蓄能罐内空气始 终高于环境温度,不断向外界损失能量,增大膨胀流量相当于



及时利用存储的能量;随着存储时间的提升(T=300 s),蓄能罐 内气体有充足时间与环境充分换热,最终将和环境温度保持一 致,相当于一部分能量"储存"进了环境中,膨胀过程中环境中 的热能也变为了提供做功的能量来源,如果膨胀流量过大,则 蓄能罐内气体温度急剧下降,无法及时从外部环境吸热,能量 利用效率降低,则整体蓄能效率降低。与此同时,将压缩流量 利用效率降低,则整体蓄能效率降低。与此同时,将压缩流量 利用效率降低,则整体蓄能效率降低。与此同时,将压缩流量 利用效率降低,则整体蓄能效率降低。与此同时,将压缩流量 利用效率降低,则整体蓄能效率降低。与此同时,将压缩流量 前量的面当,在较长存储时间(T=300 s),压缩过程蓄能 罐内气体对外界损失能量较多。因此,在短存储时间时,采用 的配置方法为高压缩流量高膨胀流量,当存储时间变长后,应 当同时减少压缩和膨胀流量。

图8给出了蓄能效率η与存储时间T和膨胀流量q<sub>out</sub>在额定 压缩流量q<sub>in</sub>为30m<sup>3</sup>/h的等高线图,高效率区域集中在低存储时 间和高膨胀流量时。图中的等高线延伸方向大致与y轴相同, 说明存储时间对于效率的影响比膨胀流量大得多,要想获得较 高的蓄能效率,应随着不同的存储时间的要求适当调整膨胀流 量的大小,在实际运行过程中应避免较长的存储时间,若存储 时间较长,则应当设置较低的膨胀流量,使得膨胀过程中充分 利用外界能量提高蓄能效率。



## 4 结 论

(1)随着初始压力的增加,蓄能器能量密度呈现先增大后 减小的趋势;对于给定的存储压力,可以找到一个对应的最优 初始压力使得能量密度最大。存储压力与最优初始压力的比 值在 2~3之间,对应压力配置的蓄能效率稳定在 92%~93% 之间。

(2)存储时间较短时,传热系数对于蓄能效率影响不大;存 储时间增加,传热系数在一定范围内会使效率急剧降低。在蓄 能罐的设计中,应当评估出其换热能力,根据所拟定的存储时 间适当增加或减少换热水平以在实际运行中避开低效率区。 (3)运行过程中,蓄能效率受存储时间的影响较大,当存储 时间改变,可以通过增加或减少水泵水轮机工作流量来提高效 率。在短存储时间时,采用的配置方法为高压缩、高膨胀流量, 当存储时间变长后,应当同时减少压缩和膨胀流量。

# 参考文献:

- [1] 吴 优. 气候变化背景下江苏低碳经济发展模式与路径研究
   [D]. 南京:南京信息工程大学, 2015. (WU Y. Jiangsu development mode and paths of low carbon economy under climate change
   [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.)
- [2] 李艳生.储能参与含风电的电力系统调峰调频研究[D].乌鲁木 齐:新疆大学, 2020. (LI Y S. Research on energy storage participating in peak and frequency regulation of power system containing wind power[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.)
- [3] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等.风电并网中的储能技术研究进展
  [J].电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153. (LIU S L, WEN J Y, SUN H S, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013(23):145-153.)
- [4] 刘 军,李凌阳,吴梦凯,等.分布式抽水蓄能电站与新能源发 电联合参与现货市场的两阶段优化运行策略[J].浙江电力, 2023,42(2):50-58.(LIUJ,LILY,WUMK, et al. A two-stage optimal operation strategy of distributed pumped storage power plant and new energy power generation jointly participating in spot market [J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(2):50-58.)
- [5] 纪 律,陈海生,张新敬,等.压缩空气储能技术研发现状及应 用前景[J].高科技与产业化,2018(4):52-58.(JIL, CHENHS, ZHANGXJ, et al. Research and development status and application prospects of compressed air energy storage technology [J]. High-Technology & Commercialization, 2018(4): 52-58.)
- [6] 李广阔,王国华,薛小代,等.金坛盐穴压缩空气储能电站调相 模式设计与分析[J].电力系统自动化,2021,45(19):91-99.
  (LIGK,WANGGH,XUEXD,et al. Design and analysis of condenser mode for jintan salt cavern compressed air energy storage plant of china[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45 (19):91-99.)
- DIEZMARTÍNEZ C V. Clean energy transition in Mexico: Policy recommendations for the deployment of energy storage technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021,135:110 407.
- [8] 王富强,王汉斌,武明鑫,等.压缩空气储能技术与发展[J].水 力发电,2022,48(11):10-15.(WANG F Q, WANG H B, WU M X, et al. Compressed air energy storage technology and development [J]. Water Power, 2022,48(11):10-15.)
- [9] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GRAHAM S, et al. Experimental and analytical evaluation of a hydro-pneumatic compressed-air Ground-Level Integrated Diverse Energy Storage (GLIDES) system [J]. Applied Energy, 2018, 221:75–85.

- [10] WANG H, WANG L, WANG X, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. Energies, 2013,6(3):1554-1567.
- [11] 李丞宸,贺 新,陶飞跃,等.一种压缩空气与抽水蓄能耦合的 新型储能系统及热力学分析[J].西安交通大学学报,2022,56 (4):40-49+71.(LI C C, HE X, TAO F Y, et al. A new energy storage system coupled with compressed air and pumped-hydro energy storage and related thermodynamic analysis [J]. Journal of Xi´An Jiaotong University, 2022,56(4):40-49+71.)
- [12] 张学清,海晓涛,高 轩,等.基于协同博弈法的抽水蓄能电站 建设成本优化研究[J].水力发电,2023,49(7):78-81+87.
  (ZHANG X Q, HAI X T, GAO X, et al. Research on construction cost optimization of pumped-storage power station based on cooperative game method[J]. Water Power, 2023,49(7):78-81+87.)
- [13] 严 凯,侯付彬,刘明明,等.恒压型抽水压缩空气储能系统的 热力学及经济学多目标优化[J].工程热物理学报,2020,41(1): 135-140.(YAN K, HOU F B, LIU M M, et al. Multi-objective optimization on thermodynamics and economics of a constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41 (1): 135-140.)
- [14] MOZAYENI H, WANG X, NEGNEVITSKY M. Thermodynamic and exergy analysis of a combined pumped hydro and compressed air energy storage system[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 48:101 527.
- [15] 姚尔人,席 光,王焕然,等.一种新型压缩空气与抽水复合储 能系统的热力学分析[J].西安交通大学学报,2018,52(3):12-18.(YAO E R, XI G, WANG H R, et al. Thermodynamic analysis on a novel compressed-air based pumped hydro energy storage system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018,52(3):12-18.)
- [16] KIM Y, SHIN D, FAVRAT D. Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis. Energy, 2011,36(10):6 220-6 233.
- [17] 沈维道.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,2007.(SHEN W D. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.)
- [18] 李雪梅,杨 科,张 远.AA-CAES系统储气室热力学特性研究[J].工程热物理学报,2015,36(3):513-516.(LIXM,YANGK,ZHANGY.Thermodynamic analysis of storage cavern in advanced adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015,36(3):513-516.)
- [19] POURMOVAHED A, OTIS D R. An experimental thermal time constant correlation for hydraulic accumulators [J/OL]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112 (1): 116– 21. http://dx.doi.org/10.1115/1.2894128. DOI: 10.1115/1.2894128.
- [20] KADOYA K, MATSUNAGA N, NAGASHIMA A. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1985,14(4):947-970.