



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114320828 A

(43) 申请公布日 2022.04.12

(21) 申请号 202111513842.3

F04B 41/02 (2006.01)

(22) 申请日 2021.12.13

F04B 51/00 (2006.01)

G06F 30/27 (2020.01)

(71) 申请人 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司

地址 210036 江苏省南京市鼓楼区渡江路10号

(72) 发明人 唐炜洁 董宸 王新超 王海涛 钱烽雷 刘莘稷

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限公司 32224

代理人 董建林

(51) Int. Cl.

F04B 37/12 (2006.01)

F04B 39/06 (2006.01)

F04B 39/12 (2006.01)

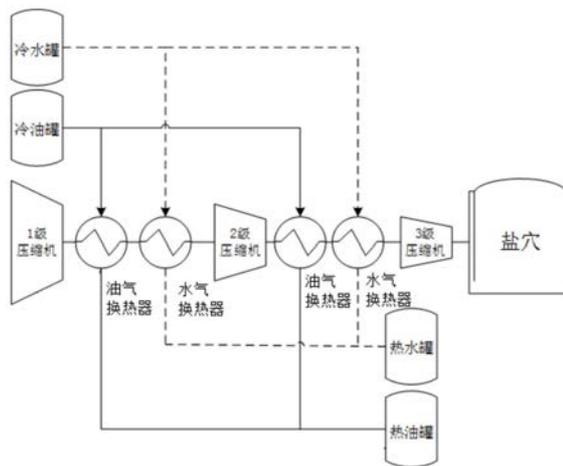
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种蓄热式压缩空气储能系统及控制方法

(57) 摘要

本发明公开了储能系统领域的一种蓄热式压缩空气储能系统及控制方法,包括依次连接的第一级压缩机、第一换热器、第二级压缩机、第二换热器、第三压缩机和盐穴储能装置;所述第一换热器、第二换热器包括水气换热器、油气换热器;所述水气换热器一端与冷水罐连接,所述水气换热器另一端与热水罐连接;所述油气换热器一端与冷油罐连接,所述油气换热器另一端与热油罐连接;根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型;对储能系统模型进行优化求解,获取储能系统的资源分配方案;本发明填补了目前盐穴建模方法的空缺,并且根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型,提高了系统模型的通用性和准确度。



1. 一种蓄热式压缩空气储能系统,其特征在于,包括依次连接的第一级压缩机、第一换热器、第二级压缩机、第二换热器、第三压缩机和盐穴储能装置;

所述第一换热器、第二换热器包括水气换热器、油气换热器;所述水气换热器一端与冷水罐连接,所述水气换热器另一端与热水罐连接;所述油气换热器一端与冷油罐连接,所述油气换热器另一端与热油罐连接。

2. 一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,包括:

获取压缩机的流量 G 、转速 n 、温度 T 、压强 P ;建立压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量 G 和转速 n 表示的比折合函数,以及压缩机的进出口压比 β 、流量 G 和转速 n 通过温度 T 和压强 P 表示的比折合函数;

通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解,建立压缩机模型;

通过集总参数建模方法建立换热器模型;基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响,建立盐穴模型;

根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型;对储能系统模型进行优化求解,获取储能系统的资源分配方案。

3. 根据权利要求2所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量 G 和转速 n 表示的比折合函数,公式为:

$$\dot{\beta} = c_1(\dot{n})\dot{G}^2 + c_2(\dot{n})\dot{G} + c_3(\dot{n})$$

$$\dot{\eta} = [1 - c_4(1 - \dot{n})^2](\dot{n} / \dot{G})(2 - \dot{n} / \dot{G})$$

$$c_1(\dot{n}) = \dot{n} / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

$$c_2 = (d_1 - 2d_1\dot{n}^2) / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

$$c_3 = -(d_1d_2\dot{n} - d_2\dot{n}^3) / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

其中, $\dot{\beta}$ 表示为 B 的比折合参数, B 代表进出口压比 β 、效率 η 、流量 G 和转速 n ;所述 d_1 、 d_2 和 c_4 是待定系数。

4. 根据权利要求3所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,压缩机的进出口压比 β 、流量 G 和转速 n 通过温度 T 和压强 P 表示的比折合函数,计算公式为:

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_{11}\sqrt{T_{11}}}{\beta_{01}T_{01}}$$

$$\dot{n} = \frac{n_{11}\sqrt{T_{11}} / P_{11}}{n_{01}\sqrt{T_{11}} / P_{11}}$$

$$\dot{G} = \frac{G_{11}\sqrt{T_{11}}}{G_{01}T_{01}}$$

其中, β_{11} 为工况后的压缩机的进出口压比, β_{01} 为工况前的压缩机的进出口压比, n_{11} 为工况后的压缩机的转速, n_{01} 为工况前的压缩机的转速, T_{11} 为工况后的压缩机进汽的温度, T_{01} 为工况前的压缩机进汽的温度、 P_{11} 为工况后的压缩机进汽的压强、 P_{01} 为工况前的压缩机进汽的压强。

5. 根据权利要求4所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解,过程包括:

在设定流量G的范围内,以计算进出口压比 β 接近实际压比 β_r 为目标,建立以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为变量的适应度函数 f ,计算公式为:

$$\min f = [\dot{\beta}(G, d_1, d_2, c_4) - \dot{\beta}_r(G)]^2$$

其中, β_r 表示实际压比;

以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为学生变量 X_i ,通过教与学算法建立学生迭代学习模型,计算公式为:

$$X_i^j = X_i^{j-1} + r_1^j \left(\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) X_i^{j-1} + \left(\frac{t}{t_{\max}}\right) X_{i,\max} - X_i^{j-1} \right)$$

其中, X_i^j 表示为第j时段的第i个学生变量; t 表示迭代次数, t_{\max} 表示最大迭代次数;

通过学生迭代学习模型计算获得 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数。

6. 根据权利要求5所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为学生变量 X_i ,通过教与学算法建立学生迭代学习模型,过程包括:

初始化学生变量并找出最优学生变量作为老师变量 Te ,计算第j时刻的差异性 D_i^j ,计算公式为:

$$D_i^j = r_1^j (Te^j - R \cdot A^j)$$

$$A^j = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{1}{l_i^j}\right) X_i^j}{\sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{l_i^j}}$$

$$R = R_{\max} - \frac{t}{t_{\max}} (R_{\max} - R_{\min})$$

公式中, r_1^j 是随机数, R 是教学因子, A^j 表示第j时刻的学生变量的平均成绩,成绩差距 $l_i^j = f(T_e) - f(X_i^j)$, N_1 表示学生的个数; Te^j 表示为第j时刻的老师变量;

引入变异概率 h ,当随机发生概率 $r < h$,则 D_i^j 发生变异为 $D_{i,\text{new}}^j$,计算公式为:

$$h = \gamma \left(\frac{l_{i,\max}^j - l_i^j}{l_{i,\max}^j} \right)^2$$

$$D_{i,\text{new}}^j = D_i^j (1 + e^{-t} \cdot \phi_{ij})$$

$$X_i^j = X_i^{j-1} + D_{i,\text{new}}^j$$

其中, γ 是概率调节因子, ϕ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 内的随机数;

通过对学生变量 X_i 进行迭代更新计算,获得学生迭代学习模型。

7. 根据权利要求4所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,建立压缩机模型,计算公式为:

$$\begin{cases} P_{12} = \beta P_{11} \\ T_{12} = T_{11} [1 + (\beta^k - 1) / \eta] \end{cases}$$

其中, P_{12} 表示为压缩机出口工况后的压强; P_{11} 表示为压缩机进口工况后的压强; T_{12} 表

示为压缩机出口工况后的温度; T_{11} 表示为压缩机进口工况后的温度; k 是空气的比热系数。

8. 根据权利要求2所述的一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,其特征在于,基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响建立盐穴模型,过程包括:

盐穴内总气体体积 V_t 、工作气体体积 V_o 、垫底气体体积 V_d 和地下不溶物膨胀体积 V_i 的关系公式为:

$$\begin{cases} V_t = V_o + V_d + V_i \\ V_i = V_i \phi \alpha \\ \phi = f(p) \end{cases}$$

其中, ϕ 表示为不溶物的膨胀系数, α 是不溶物含量;

盐穴内温度和密度的计算公式为:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \frac{\dot{m}_{o,in} - \dot{m}_{o,out}}{V_o} \\ \frac{dm_o U_o}{dt} = (\dot{m}_{o,in} h_{o,in} - \dot{m}_{o,out} h_{o,out}) - \xi A_o (T_o - T_{wall}) - \zeta A_d (T_o - T_d) \\ \frac{dm_d U_d}{dt} = \zeta A_d (T_o - T_d) \end{cases}$$

公式中, $\dot{\rho}$ 表示为盐穴内工作气体密度的比折合参数, $\dot{m}_{o, in}$ 表示盐穴进口的工作气体的比折合参数, $\dot{m}_{o, out}$ 表示盐穴出口的工作气体的比折合参数, t 表示时间, U_o 表示工作气体的内能, U_d 表示垫底气体的内能, m_o 表示工作气体的质量, m_d 表示垫底气体的质量, $h_{o, in}$ 表示为盐穴进口的工作气体的焓值, T_{wall} 表示盐穴壁温, T_o 表示盐穴内工作气体的温度, A_o 表示工作气体的换热面积, A_d 表示垫底气体的换热面积, ξ 表示工作气体的换热系数, ζ 表示垫底气体的换热系数;

理想气体方程以及内能 U 和焓值 h 计算公式为:

$$\begin{cases} p_o V_o = R_g T_o \\ p_d V_d = R_g T_d \\ U_o = c_o T_o, U_d = c_d T_d \\ h_{o,in} = c_{in} T_{in}, h_{o,out} = c_{out} T_{out} \end{cases}$$

推导获得盐穴模型,计算公式为:

$$\begin{aligned} \frac{dp_o}{dt} = & \frac{\dot{m}_{o,in}(c_{in} T_{in} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} - \frac{\dot{m}_{o,out}(c_{out} T_{out} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} \\ & - \frac{\xi}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} A_o (T_o - T_{wall}) \end{aligned}$$

公式中, p_o 表示为盐穴内工作气体压强, R_g 是理想气体常数, c_o 表示盐穴内工作气体的比热容, c_{in} 表示盐穴进口的工作气体的比热容, c_{out} 表示盐穴出口的工作气体的比热容, T_d 表示垫底气体的温度, T_{in} 表示盐穴进口的工作气体的温度, T_{out} 表示盐穴进口的工作气体的温度。

一种蓄热式压缩空气储能系统及控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于储能系统领域,具体涉及一种蓄热式压缩空气储能系统及控制方法。

背景技术

[0002] 我国进一步将可再生能源作为能源体系的发展重点,提出要上调可再生能源比例,这意味着其逐步成为能源消费增量主体;但可再生能源存在间歇性和不稳定性等固有缺点,这使得其发电无法快速调峰,在一定程度上破坏了电网负荷平衡。压缩空气储能发电因其具有规模大、灵活性强等特点,可以增强电网对故障的应对能力,弥补可再生能源无法调峰的缺陷,对建设坚强智能电网有重要的战略意义。在实际应用中,中科院工程热物理研究所于2013年在河北廊坊建造国内第一套1.5MW蓄热式压缩空气储能示范系统,并于2014年完成了600小时试验运行与性能测试,效率约为52%;2016年在贵州毕节建成10MW示范系统,系统在额定工况下的效率达到了60.2%,是全球目前效率最高的压缩空气储能系统。

[0003] 因高温压力容器制造难度大、安装难以解决,以及设备的工作温度限制等原因,这意味着获得较高的储气压力需要采用多级压缩机和多级冷却方式,蓄热式压缩空气储能系统应运而生,但对蓄热式压缩空气储能系统的特性研究还未深入,而研究该系统的建模方法,可以为特性研究奠定基础。目前国内外在建模方面的研究有了一定的基础,但更多是考虑储能系统电能传输,介质流动的稳态过程建模,对于热力学特性的研究缺乏或者不够深入。同时,在目前的研究中,均利用储气库、储气罐作为储气装置,但其实储气罐的使用限制了储存空气的容量和压力,因此局限了整个系统的容量上限。

[0004] 综上所述,如何克服现有技术所存在的不足已成为当今储能领域中亟待解决的难题之一。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种蓄热式压缩空气储能系统及控制方法,填补了目前盐穴建模方法的空缺,提高了储能系统模型的通用性和准确度

[0006] 为达到上述目的,本发明所采用的技术方案是:

[0007] 本发明一方面提供了一种蓄热式压缩空气储能系统,包括依次连接的第一级压缩机、第一换热器、第二级压缩机、第二换热器、第三压缩机和盐穴储能装置;

[0008] 所述第一换热器、第二换热器包括水气换热器、油气换热器;所述水气换热器一端与冷水罐连接,所述水气换热器另一端与热水罐连接;所述油气换热器一端与冷油罐连接,所述油气换热器另一端与热油罐连接。

[0009] 本发明另一方面提供了一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法,包括:

[0010] 获取压缩机的流量 G 、转速 n 、温度 T 、压强 P ;建立压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量 G 和转速 n 表示的比折合函数,以及压缩机的进出口压比 β 、流量 G 和转速 n 通过温度 T 和压强 P 表示的比折合函数;

[0011] 通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解,建立压缩机模型;

[0012] 通过集总参数建模方法建立换热器模型;基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响,建立盐穴模型;

[0013] 根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型;对储能系统模型进行优化求解,获取储能系统的资源分配方案。

[0014] 优选的,压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量 G 和转速 n 表示的比折合函数,公式为:

$$[0015] \quad \dot{\beta} = c_1(\dot{n})\dot{G}^2 + c_2(\dot{n})\dot{G} + c_3(\dot{n})$$

$$[0016] \quad \dot{\eta} = [1 - c_4(1 - \dot{n})^2](\dot{n} / \dot{G})(2 - \dot{n} / \dot{G})$$

$$[0017] \quad c_1(\dot{n}) = \dot{n} / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

$$[0018] \quad c_2 = (d_1 - 2d_1\dot{n}^2) / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

$$[0019] \quad c_3 = -(d_1d_2\dot{n} - d_2\dot{n}^3) / [d_1(1 - d_2 / \dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

[0020] 其中, \dot{B} 表示为 B 的比折合参数, B 代表进出口压比 β 、效率 η 、流量 G 和转速 n ;所述 d_1 、 d_2 和 c_4 是待定系数。

[0021] 优选的,压缩机的进出口压比 β 、流量 G 和转速 n 通过温度 T 和压强 P 表示的比折合函数,计算公式为:

$$[0022] \quad \dot{\beta} = \frac{\beta_{11}\sqrt{T_{11}}}{\beta_{01}T_{01}}$$

$$[0023] \quad \dot{n} = \frac{n_{11}\sqrt{T_{11}} / P_{11}}{n_{01}\sqrt{T_{11}} / P_{11}}$$

$$[0024] \quad \dot{G} = \frac{G_{11}\sqrt{T_{11}}}{G_{01}T_{01}}$$

[0025] 其中, β_{11} 为工况后的压缩机的进出口压比, β_{01} 为工况前的压缩机的进出口压比, n_{11} 为工况后的压缩机的转速, n_{01} 为工况前的压缩机的转速, T_{11} 为工况后的压缩机进汽的温度, T_{01} 为工况前的压缩机进汽的温度、 P_{11} 为工况后的压缩机进汽的压强、 P_{01} 为工况前的压缩机进汽的压强。

[0026] 优选的,通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解,过程包括:

[0027] 在设定流量 G 的范围内,以计算进出口压比 β 接近实际压比 β_r 为目标,建立以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为变量的适应度函数 f ,计算公式为:

$$[0028] \quad \min f = [\dot{\beta}(G, d_1, d_2, c_4) - \dot{\beta}_r(G)]^2$$

[0029] 其中, β_r 表示实际压比;

[0030] 以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为学生变量 X_i ,通过教与学算法建立学生迭代学习模型,计算公式为:

$$[0031] \quad X_i^j = X_i^{j-1} + r_1^j \left(\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) X_i^{j-1} + \left(\frac{t}{t_{\max}}\right) X_{i, \max} - X_i^{j-1} \right)$$

[0032] 其中, X_i^j 表示为第 j 时段的第 i 个学生变量; t 表示迭代次数, t_{\max} 表示最大迭代次

数；

[0033] 通过学生迭代学习模型计算获得 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数。

[0034] 优选的，以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为学生变量 X_1 ，通过教与学算法建立学生迭代学习模型，过程包括：

[0035] 初始化学生变量并找出最优学生变量作为老师变量 Te ，计算第 j 时刻的差异性 D_1^j ，计算公式为：

$$[0036] \quad D_i^j = r_1^j (Te^j - R \cdot A^j)$$

$$[0037] \quad A^j = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (\frac{1}{l_i^j}) X_i^j}{\sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{l_i^j}}$$

$$[0038] \quad R = R_{\max} - \frac{t}{t_{\max}} (R_{\max} - R_{\min})$$

[0039] 公式中， r_1^j 是随机数， R 是教学因子， A^j 表示第 j 时刻的学生变量的平均成绩，成绩差 $l_i^j = f(T_e) - f(X_i^j)$ ， N_1 表示学生的个数； Te^j 表示为第 j 时刻的老师变量；

[0040] 引入变异概率 h ，当随机发生概率 $r < h$ ，则 D_1^j 发生变异为 $D_{i, \text{new}}^j$ ，计算公式为：

$$[0041] \quad h = \gamma \left(\frac{l_{i, \max}^j - l_i^j}{l_{i, \max}^j} \right)^2$$

$$[0042] \quad D_{i, \text{new}}^j = D_i^j (1 + e^{-t} \cdot \varphi_{ij})$$

$$[0043] \quad X_i^j = X_i^{j-1} + D_{i, \text{new}}^j$$

[0044] 其中， γ 是概率调节因子， φ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 内的随机数；

[0045] 通过对学生变量 X_1 进行迭代更新计算，获得学生迭代学习模型。

[0046] 优选的，建立压缩机模型，计算公式为：

$$[0047] \quad \begin{cases} P_{12} = \beta P_{11} \\ T_{12} = T_{11} [1 + (\beta^k - 1) / \eta] \end{cases}$$

[0048] 其中， P_{12} 表示为压缩机出口工况后的压强； P_{11} 表示为压缩机进口工况后的压强； T_{12} 表示为压缩机出口工况后的温度； T_{11} 表示为压缩机进口工况后的温度； k 是空气的比热系数。

[0049] 优选的，基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响建立盐穴模型，过程包括：盐穴内总气体体积 V_t 、工作气体积 V_o 、垫底气体积 V_d 和地下不溶物膨胀体积 V_i 的关系公式为：

$$[0050] \quad \begin{cases} V_t = V_o + V_d + V_i \\ V_i = V_t \phi \alpha \\ \phi = f(p) \end{cases}$$

[0051] 其中， ϕ 表示为不溶物的膨胀系数， α 是不溶物含量；

[0052] 则盐穴内温度和密度的计算公式为:

$$[0053] \begin{cases} \dot{\rho} = \frac{\dot{m}_{o,in} - \dot{m}_{o,out}}{V_o} \\ \frac{dm_o U_o}{dt} = (\dot{m}_{o,in} h_{o,in} - \dot{m}_{o,out} h_{o,out}) - \xi A_o (T_o - T_{wall}) - \zeta A_d (T_o - T_d) \\ \frac{dm_d U_d}{dt} = \zeta A_d (T_o - T_d) \end{cases}$$

[0054] 公式中, $\dot{\rho}$ 表示为盐穴内工作气体密度的比折合参数, $\dot{m}_{o, in}$ 表示盐穴进口的工作气体的比折合参数, $\dot{m}_{o, out}$ 表示盐穴出口的工作气体的比折合参数, t 表示时间, U_o 表示工作气体的内能, U_d 表示垫底气体的内能, m_o 表示工作气体的质量, m_d 表示垫底气体的质量, $h_{o, in}$ 表示为盐穴进口的工作气体的焓值, T_{wall} 表示盐穴壁温, T_o 表示盐穴内工作气体的温度, A_o 表示工作气体的换热面积, A_d 表示垫底气体的换热面积, ξ 表示工作气体的换热系数, ζ 表示垫底气体的换热系数;

[0055] 理想气体方程以及内能 U 和焓值 h 计算公式为:

$$[0056] \begin{cases} p_o V_o = R_g T_o \\ p_d V_d = R_g T_d \\ U_o = c_o T_o, U_d = c_d T_d \\ h_{o,in} = c_{in} T_{in}, h_{o,out} = c_{out} T_{out} \end{cases}$$

[0057] 推导获得盐穴模型, 计算公式为:

$$[0058] \frac{dp_o}{dt} = \frac{\dot{m}_{o,in} (c_{in} T_{in} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} - \frac{\dot{m}_{o,out} (c_{out} T_{out} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} - \frac{\xi}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} A_o (T_o - T_{wall})$$

[0059] 公式中, p_o 表示为盐穴内工作气体压强, R_g 是理想气体常数, c_o 表示盐穴内工作气体的比热容, c_{in} 表示盐穴进口的工作气体的比热容, c_{out} 表示盐穴出口的工作气体的比热容, T_d 表示垫底气体的温度, T_{in} 表示盐穴进口的工作气体的温度, T_{out} 表示盐穴出口的工作气体的温度。

[0060] 与现有技术相比, 本发明所达到的有益效果:

[0061] (1) 本发明中通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解, 建立压缩机模型; 通过集总参数建模方法建立换热器模型, 通过教与学算法降低换热器模型的误差, 以便提高换热器的控制精度。

[0062] (2) 本发明中通过集总参数建模方法建立换热器模型; 基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响, 建立盐穴模型; 根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型; 对储能系统模型进行优化求解, 获取储能系统的资源分配方案; 本发明填补了目前盐穴建模方法的空缺, 并且根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型, 提高了系统模型的通用性和准确度。

附图说明

- [0063] 图1为本发明提供的一种蓄热式压缩空气储能系统的示意图；
 [0064] 图2为本发明提出的改进教与学方法的流程图；
 [0065] 图3为压缩机压比比折合参数和流量比折合数的特性曲线；
 [0066] 图4为压缩机效率比比折合参数和流量比折合数的特性曲线；
 [0067] 图5是盐穴输入气体质量流量的变化曲线；
 [0068] 图6是盐穴内部压力的变化曲线。

具体实施方式

[0069] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案，而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0070] 实施例一

[0071] 如图1所示，本发明一方面提供了一种蓄热式压缩空气储能系统，包括依次连接的第一级压缩机、第一换热器、第二级压缩机、第二换热器、第三压缩机和盐穴储能装置；

[0072] 所述第一换热器、第二换热器包括水气换热器、油气换热器；所述水气换热器一端与冷水罐连接，所述水气换热器另一端与热水罐连接；所述油气换热器一端与冷油罐连接，所述油气换热器另一端与热油罐连接；所述第一换热器和第二换热器连接同一冷水罐、热水罐、冷油罐和热油罐。

[0073] 本发明另一方面提供了一种蓄热式压缩空气储能系统的控制方法，包括：

[0074] 获取压缩机的流量G、转速n、温度T、压强P；建立压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量G和转速n表示的比折合函数，以及压缩机的进出口压比 β 、流量G和转速n通过温度T和压强P表示的比折合函数；

[0075] 压缩机的进出口压比 β 和效率 η 通过流量G和转速n表示的比折合函数，公式为：

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= c_1(\dot{n})\dot{G}^2 + c_2(\dot{n})\dot{G} + c_3(\dot{n}) \\ \dot{\eta} &= [1 - c_4(1 - \dot{n})^2](\dot{n}/\dot{G})(2 - \dot{n}/\dot{G}) \end{aligned}$$

[0076] $c_1(\dot{n}) = \dot{n} / [d_1(1 - d_2/\dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$ (1)

$$c_2 = (d_1 - 2d_1\dot{n}^2) / [d_1(1 - d_2/\dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

$$c_3 = -(d_1d_2\dot{n} - d_2\dot{n}^3) / [d_1(1 - d_2/\dot{n}) + \dot{n}(\dot{n} - d_2)^2]$$

[0077] 其中， \dot{B} 表示为B的比折合参数，B代表进出口压比 β 、效率 η 、流量G和转速n；所述 d_1 、 d_2 和 c_4 是待定系数。

[0078] 压缩机的进出口压比 β 、流量G和转速n通过温度T和压强P表示的比折合函数，计算公式为：

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_{11}\sqrt{T_{11}}}{\beta_{01}T_{01}}$$

[0079] $\dot{n} = \frac{n_{11}\sqrt{T_{11}}/P_{11}}{n_{01}\sqrt{T_{11}}/P_{11}}$ (2)

$$\dot{G} = \frac{G_{11}\sqrt{T_{11}}}{G_{01}T_{01}}$$

[0080] 其中, β_{11} 为工况后的压缩机的进出口压比, β_{01} 为工况前的压缩机的进出口压比, n_{11} 为工况后的压缩机的转速, n_{01} 为工况前的压缩机的转速, T_{11} 为工况后的压缩机进汽的温度, T_{01} 为工况前的压缩机进汽的温度、 P_{11} 为工况后的压缩机进汽的压强、 P_{01} 为工况前的压缩机进汽的压强。

[0081] 建立压缩机模型, 计算公式为:

$$[0082] \quad \begin{cases} P_{12} = \beta P_{11} \\ T_{12} = T_{11}[1 + (\beta^k - 1) / \eta] \end{cases} \quad (3)$$

[0083] 其中, P_{12} 表示为压缩机出口工况后的压强; P_{11} 表示为压缩机进口工况后的压强; T_{12} 表示为压缩机出口工况后的温度; T_{11} 表示为压缩机进口工况后的温度; k 是空气的比热系数。

[0084] 通过教与学算法对比折合函数的待定系数进行优化求解, 建立压缩机模型, 过程包括:

[0085] 在设定流量 G 的范围内, 以计算进出口压比 β 接近实际压比 β_r 为目标, 建立以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为变量的适应度函数 f , 计算公式为:

$$[0086] \quad \min f = [\dot{\beta}(\dot{G}, d_1, d_2, c_4) - \dot{\beta}_r(\dot{G})]^2 \quad (4)$$

[0087] 其中, β_r 表示实际压比;

[0088] 以 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数为学生变量 X_i , 如图2所示, 通过教与学算法建立学生迭代学习模型, 过程包括:

[0089] 初始化学生变量并找出最优学生变量作为老师变量 T_e , 计算第 j 时刻的差异性 D_i^j , 计算公式为:

$$[0090] \quad D_i^j = r_1^j (T_e^j - R \cdot A^j) \quad (5)$$

$$[0091] \quad A^j = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (\frac{1}{l_i^j}) X_i^j}{\sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{l_i^j}} \quad (6)$$

$$[0092] \quad R = R_{\max} - \frac{t}{t_{\max}} (R_{\max} - R_{\min}) \quad (7)$$

[0093] 公式中, r_1^j 是随机数, R 是教学因子, A^j 表示第 j 时刻的学生变量的平均成绩, 成绩差距 $l_i^j = f(T_e) - f(X_i^j)$, N_1 表示学生的个数; T_e^j 表示为第 j 时刻的老师变量;

[0094] 引入变异概率 h , 当随机发生概率 $r < h$, 则 D_i^j 发生变异为 $D_{i, \text{new}}^j$, 计算公式为:

$$[0095] \quad h = \gamma \left(\frac{l_{i \max}^j - l_i^j}{l_{i \max}^j} \right)^2 \quad (8)$$

$$[0096] \quad D_{i, \text{new}}^j = D_i^j (1 + e^{-t} \cdot \varphi_{ij}) \quad (9)$$

$$[0097] \quad X_i^j = X_i^{j-1} + D_{i, \text{new}}^j \quad (10)$$

[0098] 其中, γ 是概率调节因子, Φ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 内的随机数;

[0099] 通过教与学算法建立学生迭代学习模型, 计算公式为:

$$[0100] \quad X_i^j = X_i^{j-1} + r_1^j \left(\left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right) X_i^{j-1} + \left(\frac{t}{t_{\max}}\right) X_{i, \max} - X_i^{j-1} \right) \quad (11)$$

[0101] 其中, X_i^j 表示为第 j 时段的第 i 个学生变量; t 表示迭代次数, t_{\max} 表示最大迭代次数;

[0102] 通过学生迭代学习模型计算获得 d_1 、 d_2 和 c_4 待定系数; 将待定系数确定之后, 如图3所示, 可画出压缩机压比比折合参数和流量比折合数的特性曲线, 如图4所示, 画出压缩机效率比折合参数和流量比折合数的特性曲线。

[0103] 如图5所示为盐穴输入气体质量流量, 如图6所示为盐穴内部压力的变化曲线, 具体实施方案是考虑不溶物膨胀和垫底气的影响, 提出盐穴储气装置模型, 基于盐穴内不溶物的膨胀和垫底气的影响建立盐穴模型, 过程包括:

[0104] 盐穴内总气体体积 V_t 、工作气体体积 V_o 、垫底气体体积 V_d 和地下不溶物膨胀体积 V_i 的关系公式为:

$$[0105] \quad \begin{cases} V_t = V_o + V_d + V_i \\ V_i = V_i \phi \alpha \\ \phi = f(p) \end{cases} \quad (12)$$

[0106] 其中, ϕ 表示为不溶物的膨胀系数, α 是不溶物含量;

[0107] 则盐穴内温度和密度的计算公式为:

$$[0108] \quad \begin{cases} \dot{\rho} = \frac{\dot{m}_{o, in} - \dot{m}_{o, out}}{V_o} \\ \frac{dm_o U_o}{dt} = (\dot{m}_{o, in} h_{o, in} - \dot{m}_{o, out} h_{o, out}) - \xi A_o (T_o - T_{wall}) - \zeta A_d (T_o - T_d) \\ \frac{dm_d U_d}{dt} = \zeta A_d (T_o - T_d) \end{cases} \quad (13)$$

[0109] 公式中, $\dot{\rho}$ 表示为盐穴内工作气体密度的比折合参数, $\dot{m}_{o, in}$ 表示盐穴进口的工作气体的比折合参数, $\dot{m}_{o, out}$ 表示盐穴出口的工作气体的比折合参数, t 表示时间, U_o 表示工作气体的内能, U_d 表示垫底气体的内能, m_o 表示工作气体的质量, m_d 表示垫底气体的质量, $h_{o, in}$ 表示为盐穴进口的工作气体的焓值, T_{wall} 表示盐穴壁温, T_o 表示盐穴内工作气体的温度, A_o 表示工作气体的换热面积, A_d 表示垫底气体的换热面积, ξ 表示工作气体的换热系数, ζ 表示垫底气体的换热系数;

[0110] 理想气体方程以及内能 U 和焓值 h 计算公式为:

$$[0111] \quad \begin{cases} p_o V_o = R_g T_o \\ p_d V_d = R_g T_d \\ U_o = c_o T_o, U_d = c_d T_d \\ h_{o, in} = c_{in} T_{in}, h_{o, out} = c_{out} T_{out} \end{cases} \quad (14)$$

[0112] 将公式(14)和(12)代入公式(13),推导获得盐穴模型,计算公式为:

$$[0113] \quad \frac{dp_o}{dt} = \frac{\dot{m}_{o,in}(c_{in}T_{in} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} - \frac{\dot{m}_{o,out}(c_{out}T_{out} - c_o p_o V_o / R_g)}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} - \frac{\xi}{m_o c_o V_o / R_g + m_d V_d / R_g} A_o (T_o - T_{wall})$$

[0114] 公式中, p_o 表示为盐穴内工作气体压强, R_g 是理想气体常数, c_o 表示盐穴内工作气体的比热容, c_{in} 表示盐穴进口的工作气体的比热容, c_{out} 表示盐穴出口的工作气体的比热容, T_d 表示垫底气体的温度, T_{in} 表示盐穴进口的工作气体的温度, T_{out} 表示盐穴进口的工作气体的温度。

[0115] 通过集总参数建模方法建立换热器模型;根据压缩机模型、换热器模型、盐穴模型搭建储能系统模型;对储能系统模型进行优化求解,获取储能系统的资源分配方案。

[0116] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0117] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0118] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0119] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0120] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以做出若干改进和变形,这些改进和变形也应视为本发明的保护范围。

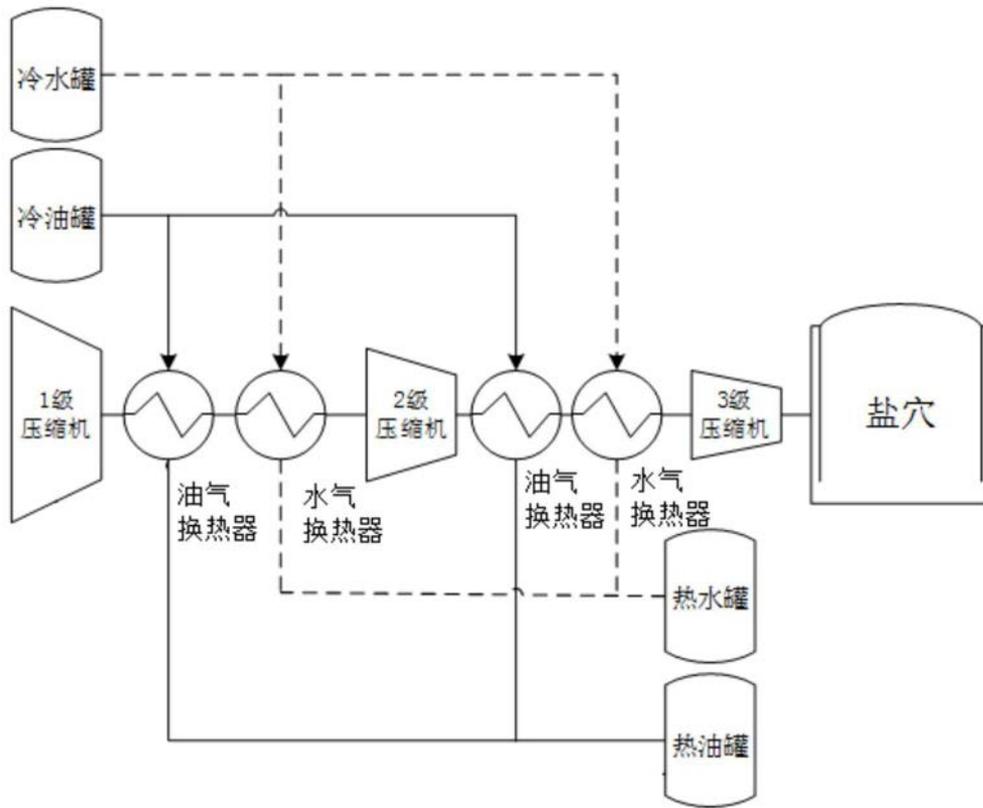


图1

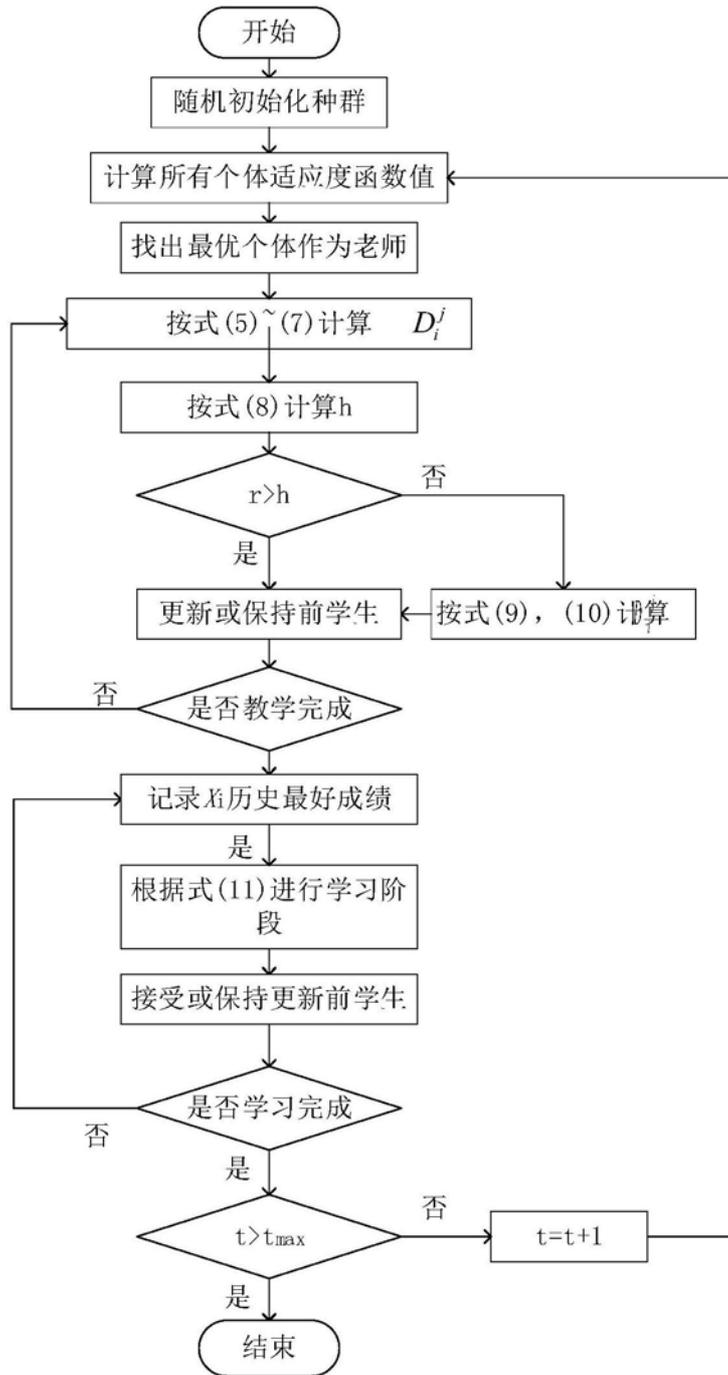


图2

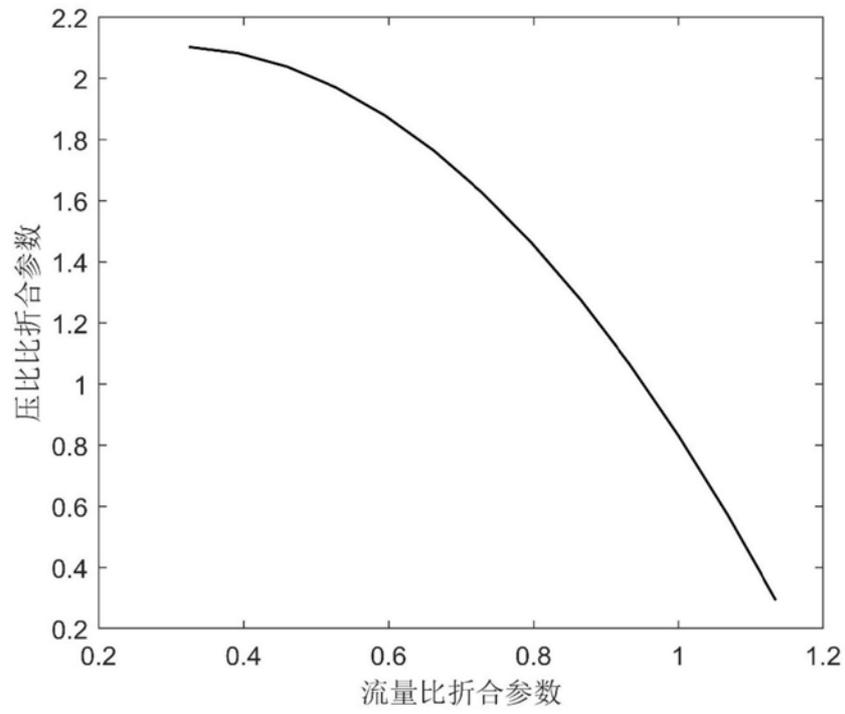


图3

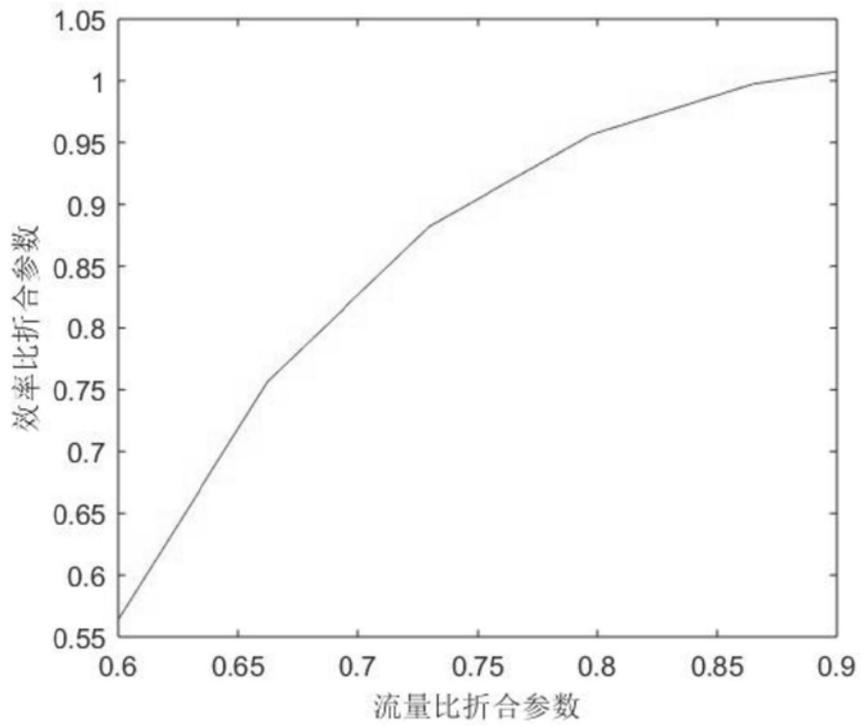


图4

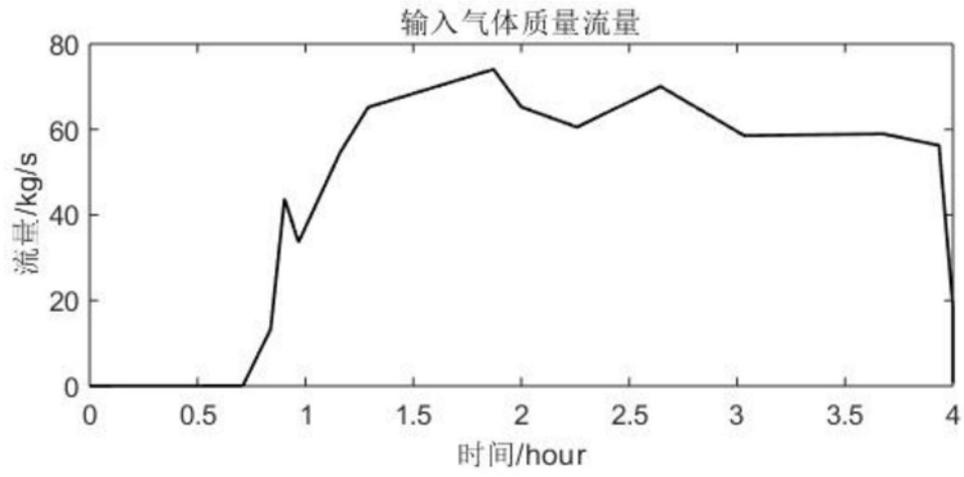


图5

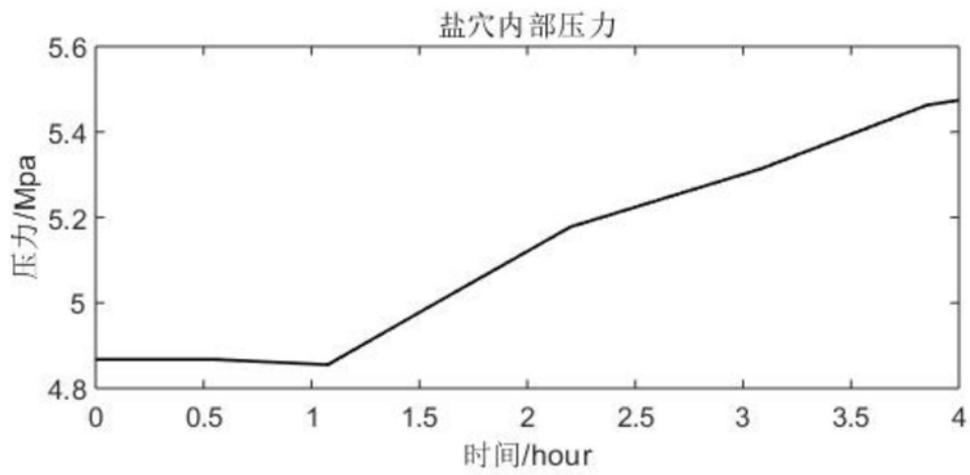


图6