

压缩空气储能系统模型预测控制

徐晴晴[†], 宋 凯

(中国石油大学(北京) 安全与海洋工程学院, 北京 102249)

摘要: 压缩空气储能作为一项新型物理储能技术, 利用模型预测控制可降低热力成本、提高能源利用效率. 为实现压缩空气储能系统的温度控制, 分析了压缩空气储能系统中的换热器系统、热能存储系统和盐穴储气系统的热力学特性, 建立压缩空气储能系统的集中参数和分布参数耦合系统模型. 设计耦合系统的模型预测控制策略, 针对控制器中复杂约束优化求解问题, 提出了基于Cayley-Tustin变换的离散化方法, 提高了压缩空气储能系统控制精度. 仿真结果表明模型预测控制可避免天气变化引起的干扰, 可以有效提高压缩空气储能系统热能利用.

关键词: 压缩空气储能系统; 分布参数系统建模; 模型预测控制

引用格式: 徐晴晴, 宋凯. 压缩空气储能系统模型预测控制. 控制理论与应用, 2021, 38(12): 1935 – 1946

DOI: 10.7641/CTA.2021.00690

Model predictive control of compressed air energy storage system

XU Qing-qing[†], SONG Kai

(College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Compressed air energy storage is a new physical energy storage technology, its thermal cost reduction and energy efficiency improvement can be achieved by using model predictive control. In order to realize the temperature control of the compressed air energy storage system, the thermodynamic characteristics of heat exchanger system, thermal energy storage system and salt cavern gas storage system in the compressed air energy storage system are analyzed. Based on the analysis, the lumped parameter and distributed parameter coupled system model of the compressed air energy storage system is established. Then, the model predictive control strategy is designed for the coupled system. For solving controller's complex constrained optimization problems, a discretization method based on Cayley-Tustin transform is proposed to improve the control accuracy of compressed air energy storage system. The simulation results show that the model predictive control can avoid the disturbance caused by the weather change, and can effectively improve the heat energy utilization of compressed air energy storage system.

Key words: compressed air energy storage system; distributed parameter system modelling; model predictive control

Citation: XU Qingqing, SONG Kai. Model predictive control of compressed air energy storage system. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(12): 1935 – 1946

1 引言

压缩空气储能 (compressed air energy storage, CAES) 是一项新型物理储能技术, 如图 1 所示. 目前, 德国 Huntorf 电厂和 McIntosh 电厂是公用事业规模的 CAES 电厂. CAES 在充能期间收集并存储压缩空气过程中产生的热量, 并利用该热量来提高膨胀阶段的空气温度^[1]. 盐穴在大型 CAES 中可高效、经济地存储高流量和多周期的压缩空气^[2], 具有造价低、占地面积小、密封性强、可靠性高、技术成熟、安全性高等优

点^[3], 可以满足 CAES 储气的要求, 因此, 得到广泛使用.

利用盐穴储气的压缩空气储能系统运行包括空气压缩、膨胀期间的热能交换, 压缩空气热能存储以及空气温度控制过程. CAES 系统的建模和控制是通过将电力从高峰时段转移到非高峰时段来实现的, 整个系统包括换热器系统 (heat exchanger, HX), 热能存储系统 (thermal energy storage, TES) 和盐穴储气系统 (salt cavern air storage, SC) 等子系统, 如图 2 所示. 在

收稿日期: 2020-10-13; 录用日期: 2021-03-24.

[†]通信作者. E-mail: xuqq@cup.edu.cn; Tel.: +86 13521970656.

本文责任编辑: 陈虹.

中国石油大学(北京)引进人才科研启动基金项目(2462017YJRC039), 中国石油大学(北京)科研基金资助(2462020YXZZ052), 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项: “一带一路”海外长输管道完整性关键技术研究与应用项目(ZLZX2020-05)资助.

Supported by the Talent Fund Project of China University of Petroleum (Beijing) (2462017YJRC039), the Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (2462020YXZZ052) and the Science and Technology Program for Strategic Cooperation of CNPC-China University of Petroleum (Beijing): Research and Application of the Integrity Key Technology for the Belt and Road Overseas Pipeline (ZLZX2020-05).

储能期间(通常在用电非高峰时段),空气被压缩并注入盐穴中进行存储.在空气压缩过程中,电能转换为热能,再由换热器将压缩空气收集的热能传递给储能

系统.系统暂停运行并将压缩空气存储在盐穴中,在用电需求高峰时,压缩空气利用压缩过程收集的热量加热后,进入涡轮机组透平膨胀发电.

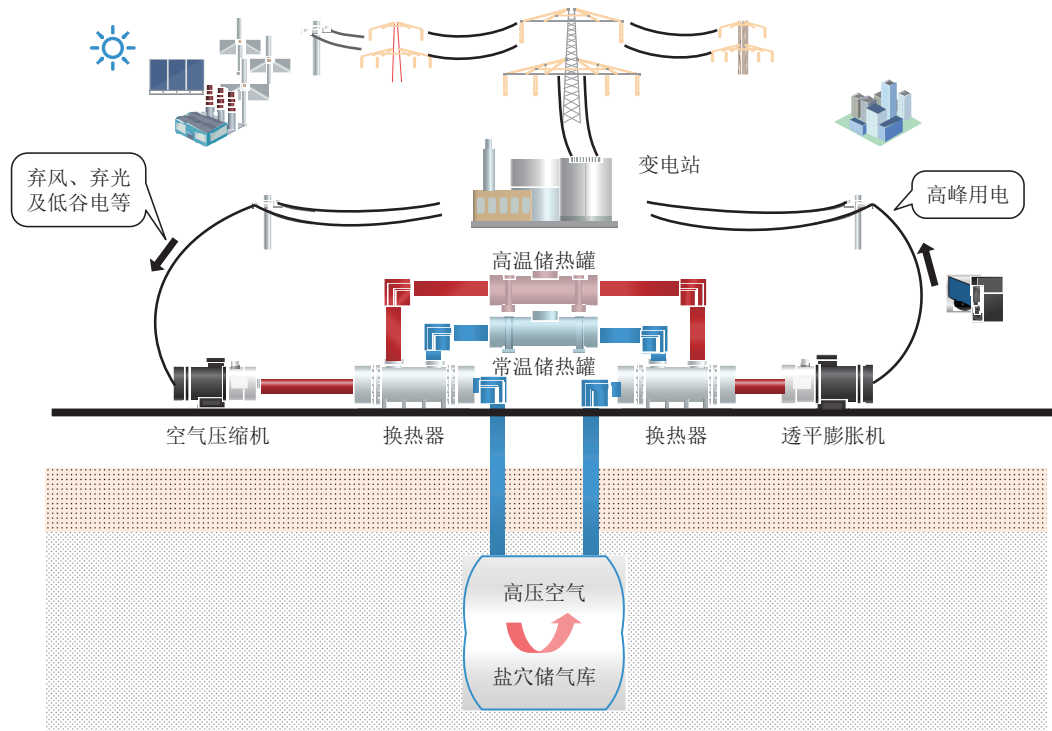


图1 盐穴压缩空气储能系统示意图

Fig. 1 Diagram of the compressed air energy storage system with salt cavern air storage

为了在电网系统中提供稳定的电能,一项重要的性能要求是将压缩空气存储系统流出的压缩空气保持在预先设定的温度(该温度可能会随温度的季节性变化而波动).CAES系统的温度调节具有许多不确定性,例如环境、天气变化和CAES系统设备运行状况的变化.因此,CAES系统控制器设计目标为制定最优控制策略以跟踪所需的温度,并抵抗外界干扰的影响.

为实现CAES系统的温度控制,需对CAES系统进行建模,通过对CAES系统的热力学特性分析,建立分布参数(distributed parameter system, DPS)和集中参数(lumped parameter system, LPS)耦合系统模型.其中,换热器系统建立DPS模型,在数学形式上由偏微分方程(partial differential equations, PDEs)进行描述,具有分布式特性,系统输入、输出参数在时间和空间上变化^[4-8].热能存储系统和盐穴储气系统建立LPS模型,在数学形式上由常微分方程(ordinary differential equations, ODEs)进行描述.最终,CAES系统建立PDEs-ODEs耦合方程模型.

在过去的研究中,许多学者开展了分布参数系统控制研究,包括基于Backstepping的控制方法用以实现PDEs方程的稳定^[9-10],以及用于一维波动方程的自适应控制^[11-12].考虑系统干扰的控制方法有应用于DPS的内模控制^[13],基于Lyapunov方程的控制方法^[14],以及用于多维波动方程的边界反馈控制^[15].以

上方法针对分布参数系统控制器设计,对于PDEs-ODEs耦合系统控制问题涉及较少.针对PDEs-ODEs耦合系统,文献[16]解决了耦合线性系统的可控性问题.文献[17]研究了耦合PDEs-ODEs系统的反馈边界控制设计.考虑耦合系统抗干扰的控制方法有级联波动PDEs-ODEs输出反馈控制^[18-19].上述方法针对耦合PDEs-ODEs系统的控制问题考虑抵抗系统干扰,然而未考虑带约束的最优控制方法.

针对CAES耦合系统模型的温度控制问题,本文提出考虑系统干扰的耦合PDEs-ODEs系统模型预测控制(model predictive control, MPC).模型预测控制是一种通过利用过程模型来计算所需的操作,从而将能源成本和经济损失降至最低的优化方法,可以在控制策略的计算中明确考虑输入、状态、输出约束条件.这里MPC控制器设计的最大难点在于DPS系统的空间无限维特性,利用传统的数值离散化方法,如Euler、Runge Kutta等,随着采样周期的增加,离散时间系统的精度会迅速下降^[20].为了保持PDEs-ODEs耦合系统的固有能量和动力学特性,本文提出了基于Cayley-Tustin变换的离散化方法^[21].Cayley-Tustin时间离散化方法的创新点在于DPS和LPS系统都是在同样的采样时间下进行离散,并且DPS系统在空间上的无限维特性可以保留,提高系统离散化精度^[22].最终实现CAES耦合系统MPC控制策略.

本文第2节对压缩空气储能系统进行热力学建模. 第3节介绍分布参数和集中参数耦合系统模型预测控制. 在第4节中, 对盐穴储气压缩空气储能系统进行仿真并分析模型预测控制的性能.

2 压缩空气储能系统模型

本文针对CAES系统, 通过热力学分析, 建立换热器系统的一阶双曲型偏微分方程模型, 盐穴储气系统和热能存储系统的常微分方程模型, 下面介绍这些子系统的建模以及子系统之间的耦合关系.

2.1 换热器系统

换热器系统由一组耦合的一阶双曲偏微分方程进行建模^[23], 根据热交换平衡, 获得换热器HX-1的偏微分方程

$$\frac{\partial T_{\text{HX-11}}(\zeta, t)}{\partial t} = \frac{F_{\text{HX-11}}}{\rho_{\text{Air}} s_1} \frac{\partial T_{\text{HX-11}}(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \frac{kl}{C_{p\text{Air}} \rho_{\text{Air}} s_1} [T_{\text{HX-11}}(\zeta, t) - T_{\text{HX-12}}(\zeta, t)], \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{\text{HX-12}}(\zeta, t)}{\partial t} = -\frac{F_{\text{HX-12}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} s_2} \frac{\partial T_{\text{HX-12}}(\zeta, t)}{\partial \zeta} + \frac{kl}{C_{p\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} s_2} [T_{\text{HX-11}}(\zeta, t) - T_{\text{HX-12}}(\zeta, t)], \quad (2)$$

其中: ζ 是空间变量, 范围是 $(0, L)$, t 是时间变量, 范围是 $(0, t_f)$. 换热器HX-1系统变量的说明如表1所示.

表 1 热交换器HX-1变量

Table 1 Parameters of heat exchanger HX-1

变量	单位	说明
$T_{\text{HX-11}}(\zeta, t)$	K	HX-1系统中的热流温度
$T_{\text{HX-12}}(\zeta, t)$	K	HX-1系统中的冷流温度
$T_{\text{HX-11}}(L, t) = T_{\text{compressed air}}$	K	流入HX-1系统的热流温度
$T_{\text{HX-11}}(0, t) = T_{\text{salt cavern}}$	K	流出HX-1系统的热流温度
$T_{\text{HX-12}}(L, t) = T_{\text{HT}}$	K	流出HX-1系统的冷流温度
$T_{\text{HX-12}}(0, t) = T_{\text{CT}}$	K	流入HX-1系统的冷流温度
$F_{\text{HX-11}} = F_{\text{compressor}}$	kg/s	流入HX-1系统的热流流速
$F_{\text{HX-12}} = F_{\text{HX}}$	kg/s	流入HX-1系统的冷流流速
k	W/m ² K	热交换系数
$l = 2\pi r_2$	m	热交换器的接触周长
$s_1 = \pi(r_1^2 - r_2^2)$	m ²	热流面积
$r_1 > r_2$		
$s_2 = \pi r_2^2$	m ²	冷流面积

设系统状态函数为

$$x_1 = \frac{T_{\text{HX-11}} - T_r}{T_r} \text{ 和 } x_2 = \frac{T_{\text{HX-12}} - T_r}{T_r},$$

输入变量 $u_1 = \frac{F_{\text{HX-12}}}{F_r}$, 参数

$$F_1 = \frac{F_{\text{HX-11}}}{F_r}, \alpha_1 = \frac{F_r}{\rho_{\text{Air}} s_1}, \beta_1 = \frac{kl}{C_{p\text{Air}} \rho_{\text{Air}} s_1},$$

$$\alpha_2 = \frac{F_r}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} s_2}, \beta_2 = \frac{kl}{C_{p\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} s_2},$$

换热器HX-1系统可以用以下双曲型PDEs描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial x_1}{\partial t} = \alpha_1 F_1 \frac{\partial x_1}{\partial \zeta} - \beta_1 (x_1 - x_2), \\ \frac{\partial x_2}{\partial t} = -\alpha_2 u_1 \frac{\partial x_2}{\partial \zeta} + \beta_2 (x_1 - x_2), \end{cases} \quad (3)$$

其中 T_r 和 F_r 分别为参考温度和流量.

将该系统在稳态下展开, 令 $x_1(\zeta, t) = x_{1\text{ss}}(\zeta) + \tilde{x}_1(\zeta, t)$, $x_2(\zeta, t) = x_{2\text{ss}}(\zeta) + \tilde{x}_2(\zeta, t)$ 和 $u_1(\zeta, t) = u_{1\text{ss}}(\zeta) + \tilde{u}_1(\zeta, t)$, 可得到

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{x}_1(\zeta, t)}{\partial t} = \alpha_1 F_1 \frac{\partial \tilde{x}_1(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \beta_1 [\tilde{x}_1(\zeta, t) - \tilde{x}_2(\zeta, t)], \\ \frac{\partial \tilde{x}_2(\zeta, t)}{\partial t} = -\alpha_2 u_1(t) \frac{\partial \tilde{x}_2(\zeta, t)}{\partial \zeta} + \beta_2 [\tilde{x}_1(\zeta, t) - \tilde{x}_2(\zeta, t)] - \alpha_2 \tilde{u}_1(t) \frac{dx_{2\text{ss}}(\zeta)}{d\zeta}, \end{cases} \quad (4)$$

这里为获得稳态下线性系统, $u_1(t)$ 可由 $u_{1\text{ss}}$ 代替.

换热器将热能传递给TES系统, 流体流出压缩机的温度 x_1 , 同时是换热器在 $\zeta = L$ 处的温度, 因此 $\tilde{x}_1(L, t)$ 是系统干扰. 状态 x_2 在 $\zeta = 0$ 处进入换热器的流量是从常温储热罐系统流出的流量. 由于常温储热罐处于参考温度, 因此可以得到 $\tilde{x}_2(0, t) = 0$.

利用状态转换将边界扰动转换为域内扰动. 令 $\tilde{x}_1(\zeta, t) = z_1(\zeta, t) + B_1(\zeta) \tilde{x}_1(L, t)$, 同时 $z_1(L, t) = 0$, $B_1(L) = 1$, $\tilde{x}_2(\zeta, t) = z_2(\zeta, t) + B_2(\zeta) \tilde{x}_2(0, t)$, 则 $z_2(0, t) = 0$, $B_2(0) = 1$. 假设 $\alpha_1 F_1 = 1$, $\alpha_2 u_{1\text{ss}} = 1$, $\gamma_1 = \alpha_2 \frac{dx_{2\text{ss}}(\zeta)}{d\zeta}$, 以上系统变为

$$\frac{\partial z_1(\zeta, t)}{\partial t} = \frac{\partial z_1(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \beta_1 [z_1(\zeta, t) - z_2(\zeta, t)] - B_1(\zeta) \frac{\partial \tilde{x}_1(L, t)}{\partial t} + \left[\frac{\partial B_1(\zeta)}{\partial \zeta} - \beta_1 B_1(\zeta) \right] \tilde{x}_1(L, t) + \beta_1 B_2(\zeta) \tilde{x}_2(0, t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial z_2(\zeta, t)}{\partial t} = -\frac{\partial z_2(\zeta, t)}{\partial \zeta} + \beta_2 [z_1(\zeta, t) - z_2(\zeta, t)] - B_2(\zeta) \frac{\partial \tilde{x}_2(0, t)}{\partial t} - \left[\frac{\partial B_2(\zeta)}{\partial \zeta} + \beta_2 B_2(\zeta) \right] \tilde{x}_2(0, t) +$$

$$\beta_2 B_1(\zeta) \tilde{x}_1(L, t) - \gamma_1 \tilde{u}_1(t), \quad (6)$$

假设 $\frac{\partial B_1(\zeta)}{\partial \zeta} - \beta_1 B_1(\zeta) = 0$ 以及 $\frac{\partial B_2(\zeta)}{\partial \zeta} + \beta_2 B_2(\zeta) = 0$, 可以得到 $B_1(\zeta)$ 和 $B_2(\zeta)$ 的解析表达式. 最后, 扩展系统可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} z_1(\zeta, t) \\ z_2(\zeta, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \zeta} - \beta_1 & \beta_1 \\ \beta_2 & -\frac{\partial}{\partial \zeta} - \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(\zeta, t) \\ z_2(\zeta, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\gamma_1 \end{bmatrix} \tilde{u}_1(t) + \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(L, t) \\ \tilde{x}_2(0, t) \\ \tilde{x}_1(L, t) \\ \tilde{x}_2(0, t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: $\bar{x}_1(L, t) = \frac{\partial \tilde{x}_1(L, t)}{\partial t}$, $\bar{x}_2(0, t) = \frac{\partial \tilde{x}_2(0, t)}{\partial t}$.

对于换热器HX-2系统, 令状态函数

$$x_7 = \frac{T_{\text{HX-21}} - T_r}{T_r}, \quad x_8 = \frac{T_{\text{HX-22}} - T_r}{T_r},$$

输入变量

$$u_7 = \frac{F_{\text{HX-22}}}{F_r},$$

参数

$$F_7 = \frac{F_{\text{HX-21}}}{F_r}, \quad \alpha_7 = \frac{F_r}{\rho_{\text{Air}} s_7}, \quad \beta_7 = \frac{kl}{C_{p\text{Air}} \rho_{\text{Air}} s_7},$$

$$\alpha_8 = \frac{F_r}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} s_8} \text{ 以及 } \beta_8 = \frac{kl}{C_{p\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} s_8},$$

假设 $x_7(\zeta, t) = x_{7\text{ss}}(\zeta) + \tilde{x}_7(\zeta, t)$, $x_2(\zeta, t) = x_{2\text{ss}}(\zeta) + \tilde{x}_2(\zeta, t)$ 以及 $u_7(\zeta, t) = u_{7\text{ss}}(\zeta) + \tilde{u}_7(\zeta, t)$, 线性系统表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{x}_7(\zeta, t)}{\partial t} = \alpha_7 F_7 \frac{\partial \tilde{x}_7(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \beta_7 [\tilde{x}_7(\zeta, t) - \tilde{x}_8(\zeta, t)], \\ \frac{\partial \tilde{x}_8(\zeta, t)}{\partial t} = -\alpha_8 u_7(t) \frac{\partial \tilde{x}_8(\zeta, t)}{\partial \zeta} + \beta_8 [\tilde{x}_7(\zeta, t) - \tilde{x}_8(\zeta, t)] - \alpha_8 \tilde{u}_7(t) \frac{dx_{8\text{ss}}(\zeta)}{d\zeta}. \end{cases} \quad (8)$$

2.2 热能存储系统

储热系统的质量平衡和能量平衡方程可表示为^[24]

$$\begin{cases} A_{\text{HT}} \frac{dh_{\text{HT}}}{dt} = F_{\text{HT-1}} - F_{\text{HT-2}}, \\ \rho_{\text{H}_2\text{O}} C_{p\text{H}_2\text{O}} A_{\text{HT}} \frac{dh_{\text{HT}} T_{\text{HT}}}{dt} = \\ \rho_{\text{H}_2\text{O}} C_{p\text{H}_2\text{O}} [F_{\text{HX-1}} T_{\text{HT-1}} - F_{\text{HT-2}} T_{\text{HT-2}}], \end{cases} \quad (9)$$

其中 $F_{\text{HT-1}}$ 和 $F_{\text{HT-2}}$ 分别是换热器系统流出流体流速和

高温储罐流出流体流速, 设 $F_{\text{HT-2}} = \frac{1}{K_1} h_{\text{HT}}$, 储热系统变量说明如表2所示.

表2 储热系统变量

Table 2 Parameters of hot tank system

变量	单位	说明
h_{HT}	m	储热罐中的流体高度
$T_{\text{HT-1}} = T_{\text{HX-12}}(L, t)$	K	HX-1系统的热流温度
$T_{\text{HT}} = T_{\text{salt-cavern-in}}$	K	盐穴储气系统的热流温度
$F_{\text{HT-1}} = F_{\text{HX-1}}$	kg/s	HX-1系统的热流质量流速
$F_{\text{HT-3}} = F_{\text{salt-cavern}}$	kg/s	流入盐穴储气系统的热流质量流速
A_{HT}	m ²	储热罐面积

同样, 令状态函数 $x_3 = \frac{h_{\text{HT}}}{h_r}$, $x_4 = \frac{T_{\text{HT}} - T_r}{T_r}$, 输入

变量 $u_2 = \frac{F_{\text{HT-1}}}{F_r}$, $u_3 = \frac{F_{\text{HT-2}}}{F_r}$, 干扰项 $x_{4\text{in}} = \frac{T_{\text{HT-1}} - T_r}{T_r}$,

参数 $\beta_3 = \frac{F_r}{h_r A_{\text{HT}}}$, 储热系统可以用以下常微分方程

描述:

$$\begin{cases} \frac{dx_3}{dt} = \beta_3 (u_2 - u_3), \\ \frac{d[x_3(x_4 + 1)]}{dt} = \beta_3 (u_2(x_{4\text{in}} + 1) - u_3(x_4 + 1)), \end{cases} \quad (10)$$

令 $x_3(t) = x_{3\text{ss}} + \tilde{x}_3(t)$, $x_4(t) = x_{4\text{ss}} + \tilde{x}_4(t)$, $u_2(t) =$

$u_{2\text{ss}} + \tilde{u}_2(t)$ 和 $u_3(t) = \frac{1}{K_1} x_3(t) = \frac{1}{K_1} (x_{3\text{ss}} + \tilde{x}_3(t))$,

围绕平衡状态进行泰勒展开 $x_3(x_4 + 1) \simeq x_{3\text{ss}}(x_{4\text{ss}} + 1) + x_{3\text{ss}} \tilde{x}_4 + (x_{4\text{ss}} + 1) \tilde{x}_3$, 得到线性系统

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}_3(t)}{dt} = \beta_3 [\tilde{u}_2(t) - \frac{1}{K_1} \tilde{x}_3(t)], \\ \frac{d\tilde{x}_4(t)}{dt} = \frac{\beta_3}{x_{3\text{ss}}} [(x_{4\text{inss}} - x_{4\text{ss}}) \tilde{u}_2(t) + u_{2\text{ss}} \tilde{x}_{4\text{in}} - \frac{1}{K_1} x_{3\text{ss}} \tilde{x}_4(t)]. \end{cases} \quad (11)$$

热流体从HX-1换热器进入到高温储罐, 干扰项可以写成 $\tilde{x}_{4\text{in}}(t) = \tilde{x}_2(L, t)$.

在图2中, 进入常温储热罐的流体流量 $F_{\text{CT-1}}$ 来自于与透平机相连的换热器HX-2, 从常温储热罐流出的流体进入换热器HX-1, 流量为 $F_{\text{CT-2}}$. 这里, 假设流出常温储热罐的流体温度处于参考环境温度, 即 $T_{\text{CT-2}} = T_{\text{CT}} = T_r$. 因此, 对换热器HX-1系统的干扰可以被忽略, 在建模中, 本文不对常温储热系统建模.

假设考虑干扰的输入变量为 $\tilde{u}_2(t) = u_{2\text{ss}} \tilde{x}_{4\text{in}} + (x_{4\text{inss}} - x_{4\text{ss}}) \tilde{u}_2(t)$, 可以将式(11)中描述连续系统改写为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}_3(t)}{dt} = -\frac{\beta_3}{K_1}\tilde{x}_3(t) + \frac{\beta_3}{x_{4inss} - x_{4ss}}\bar{u}_2(t) - \frac{\beta_3 u_{2ss}}{x_{4inss} - x_{4ss}}\tilde{x}_{4in}(t), \\ \frac{d\tilde{x}_4(t)}{dt} = -\frac{\beta_3}{K_1}\tilde{x}_4(t) + \frac{\beta_3}{x_{3ss}}\bar{u}_2(t). \end{cases} \quad (12)$$

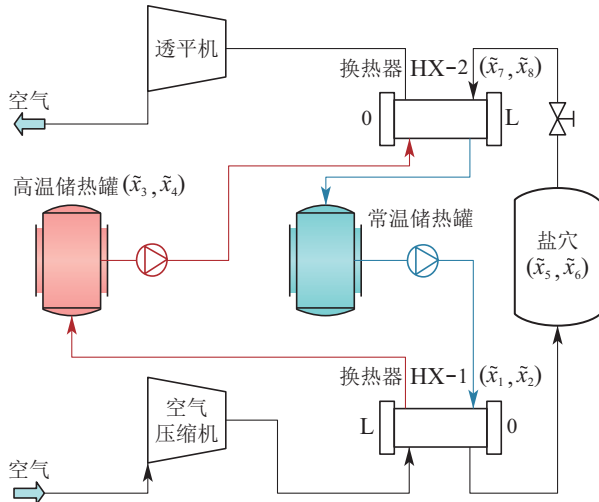


图 2 盐穴压缩空气储能系统示意图: 盐穴储气系统(SC); 换热器系统(HX); 高温储热罐系统(HT); 常温储热罐系统(CT)

Fig. 2 Diagram of the compressed air energy storage system with salt cavern air storage: salt cavern air storage system (SC); heat exchanger system (HX); hot tank system (HT); constant tank system(CT)

2.3 盐穴储气系统

盐穴储气系统的质量和能量守恒方程为^[25-27]

$$\begin{cases} V \frac{\rho}{dt} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out}, \\ V \rho c_v \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in}(h_i - h + ZRT - \rho \frac{\partial u}{\partial \rho}) + \dot{m}_{out}(ZRT - \frac{\partial u}{\partial \rho}) + \dot{Q}, \\ p = Z \rho RT, \end{cases} \quad (13)$$

其中: u 和 h 是比内能和比焓, c_v 是空气的体积比热, V , Z 和 R 分别是空气体积、压缩因子和空气常数, \dot{Q} 表示穿过洞壁的传热通量, p , ρ 和 T 表示盐穴内空气的瞬时压力、密度和温度, 由于空气循环和缓慢的温度变化率, 假设这些参数在整个储存空间内是均匀分布的. \dot{m}_{in} 和 \dot{m}_{out} 表示盐穴入口和出口处的瞬时空气质量流量.

对于盐穴内的空气, 可得到以下方程:

$$\begin{cases} h_i - h = c_p(T_{in} - T), \\ \frac{\partial u}{\partial \rho} = -\frac{RT_0^2(\frac{\partial Z}{\partial T})}{\rho_0}, \end{cases} \quad (14)$$

其中: c_p 是比热容, T_{in} 表示空气的入口温度, T_0 和 ρ_0 是洞穴内的初始温度和密度, 假设空气是理想的空气模型, 则 $\frac{\partial Z}{\partial T} = 0$.

在盐穴边界处, 压缩空气和洞壁之间通过对流和热传导过程进行热交换, 假设洞壁表面接近恒温, 通过洞壁对流换热得到的空气总传热通量为

$$\dot{Q} = h_c A_c (T_{rw} - T), \quad (15)$$

式中: h_c 为平均传热系数, A_c 为洞壁表面积, T_{rw} 为洞壁表面温度. 系统变量的说明如表3所示.

表 3 盐穴储气系统变量

Table 3 Parameters of salt cavern air storage system

变量	单位	说明
ρ	kg/m ³	盐穴储气系统的空气密度
T	K	盐穴空气储存系统中的空气温度
T_{in}	K	盐穴空气储存系统的空气入口温度
p	Pa	盐穴空气储存系统中的空气压力
V	m ³	盐穴空气储存系统中的空气体积
c_v	J(K·kg)	盐穴空气储存系统中空气的体积比热
c_p	J(K·kg)	盐穴空气储存系统中空气的比热容
u	J/kg	盐穴空气储存系统中空气的比内能
h	J/kg	盐穴空气储存系统中的空气比焓
Z		压缩因子
R	J/(kg·K)	空气常数
\dot{Q}	J/s	传热通量
\dot{m}_{in}	kg/s	流入盐穴空气储存系统的空气质量流量
\dot{m}_{out}	kg/s	流出盐穴空气储存系统的空气质量流量
h_c	w/(m ² ·K)	平均传热系数
A_c	m ²	洞壁表面积
T_{rw}	K	洞壁表面温度

令状态函数 $x_5 = \frac{\rho}{\rho_r}$, $x_6 = \frac{T - T_r}{T_r}$, 输入变量 $u_4 = \frac{\dot{m}_{in}}{m_r}$, $u_5 = \frac{\dot{m}_{out}}{m_r}$, 干扰项 $x_{6in} = \frac{T_{in} - T_r}{T_r}$, $u_{in} = \frac{Q}{Q_r}$, 以及参数

$$\beta_5 = \frac{m_r}{V \rho_r}, \alpha_5 = \frac{c_p}{c_v}, \alpha_6 = \frac{ZR}{c_v}, \gamma_5 = \frac{Q_r}{T_r m_r c_v}.$$

盐穴空气储存系统可由以下ODEs描述:

$$\begin{cases} \frac{dx_5(t)}{dt} = \beta_5[u_4(t) - u_5(t)], \\ x_5(t) \frac{dx_6(t)}{dt} = \beta_5 \alpha_5 u_4(t)[x_{6in}(t) - x_6(t)] + \beta_5 \alpha_6 u_4(t)[x_6(t) + 1] - \beta_5 \alpha_6 u_5(t)[x_6(t) + 1] + \beta_5 \gamma_5 u_{in}(t), \end{cases} \quad (16)$$

令 $x_5(t) = x_{5ss} + \tilde{x}_5(t)$, $x_6(t) = x_{6ss} + \tilde{x}_6(t)$, $x_{6in}(t) = x_{6inss} + \tilde{x}_{6in}(t)$, $u_4(t) = u_{4ss} + \tilde{u}_4(t)$, $u_5(t) = u_{5ss} + \tilde{u}_5(t)$ 以及 $u_{in}(t) = u_{inss} + \tilde{u}_{in}(t)$, 可以得到线性化方程

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}_5(t)}{dt} = \beta_5[\tilde{u}_4(t) - \tilde{u}_5(t)], \\ \frac{d\tilde{x}_6(t)}{dt} = \\ -\frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}\tilde{x}_6(t) + \frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}\tilde{x}_{6in}(t) + \\ \frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}(x_{6inss} - x_{6ss}) + \\ \frac{[\beta_5\alpha_5(x_{6inss} - x_{6ss}) + \beta_5\alpha_6(x_{6ss} + 1)]}{x_{5ss}}\tilde{u}_4(t) - \\ \frac{\beta_5\alpha_6(x_{6ss} + 1)}{x_{5ss}}\tilde{u}_5(t) + \frac{\beta_5\gamma_5}{x_{5ss}}\tilde{u}_{in}(t) + \frac{\beta_5\gamma_5}{x_{5ss}}u_{inss}(t), \end{cases} \quad (17)$$

盐穴储气系统释放气体的过程中, 假设: 入口流量扰动 $\tilde{u}_4(t) = 0$, 干扰项 $\tilde{x}_{6in}(t) = \tilde{x}_1(0, t)$, 在稳定状态时, $x_{6ss}(t) = x_{6inss}(t)$ 和 $u_{inss}(t) = 0$, 令输入扰动 $\tilde{u}_5(t) = \alpha_5u_{4ss}\tilde{x}_{6in}(t) - \alpha_6(x_{6ss} + 1)\tilde{u}_5(t) + \gamma_5\tilde{u}_{in}(t)$, 式(17)中描述的连续系统可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}_5(t)}{dt} = \frac{\beta_5}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)}\tilde{u}_5(t) - \frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)} \\ \tilde{x}_{6in}(t) - \frac{\beta_5\gamma_5}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)}\tilde{u}_{in}(t), \\ \frac{d\tilde{x}_6(t)}{dt} = -\frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}\tilde{x}_6(t) + \frac{\beta_5}{x_{5ss}}\tilde{u}_5(t). \end{cases} \quad (18)$$

2.4 压缩空气储能系统模型

对CAES系统中的换热器HX-2系统, TES系统和SC系统建立耦合模型, 耦合系统通过PDES系统的边界点与ODEs进行连接, 为CAES系统的温度控制提供连续时间系统模型, 通常由如下耦合的PDEs-ODEs进行描述:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}_4(t)}{dt} = -\frac{\beta_3}{K_1}\tilde{x}_4(t) + \frac{\beta_3}{x_{3ss}}\tilde{u}_2(t), \\ \frac{d\tilde{x}_6(t)}{dt} = -\frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}\tilde{x}_6(t) + \frac{\beta_5}{x_{5ss}}\tilde{u}_5(t), \\ \frac{\partial\tilde{x}_7(\zeta, t)}{\partial t} = \alpha_7F_7\frac{\partial\tilde{x}_7(\zeta, t)}{\partial\zeta} - \\ \beta_7[\tilde{x}_7(\zeta, t) - \tilde{x}_8(\zeta, t)], \\ \frac{\partial\tilde{x}_8(\zeta, t)}{\partial t} = -\alpha_8u_7(t)\frac{\partial\tilde{x}_8(\zeta, t)}{\partial\zeta} + \beta_8[\tilde{x}_7(\zeta, t) - \\ \tilde{x}_8(\zeta, t)] - \alpha_8\tilde{u}_7(t)\frac{dx_{8ss}(\zeta)}{d\zeta}, \\ \tilde{y}(t) = \tilde{x}_8(L, t), \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\tilde{x}_7(L, t) = \tilde{x}_6(t)$, $\tilde{x}_8(0, t) = \tilde{x}_4(t)$. 令 $\tilde{x}_7(\zeta, t) = z_7(\zeta, t) + B_7(\zeta)\tilde{x}_7(L, t) = z_7(\zeta, t) + B_7(\zeta)\tilde{x}_6(t)$, 同时 $z_7(L, t) = 0$, $B_1(L) = 7$, $\tilde{x}_8(\zeta, t) = z_8(\zeta, t) + B_8(\zeta)\tilde{x}_8(0, t) = z_8(\zeta, t) + B_8(\zeta)\tilde{x}_4(t)$, 以及 $z_8(0, t) = 0$, $B_8(0) = 1$.

假设 $\alpha_7F_7 = 1$, $\alpha_8u_{7ss} = 1$, $\tilde{u}_7(t) = 0$, $\frac{\partial B_7(\zeta)}{\partial\zeta} - \beta_7B_7(\zeta) + \frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}}B_7(\zeta) = 0$, $\frac{\partial B_8(\zeta)}{\partial\zeta} + \beta_8B_8(\zeta) - \frac{\beta_3}{K_1}B_8(\zeta) = 0$, 可以得到 $B_7(\zeta)$, $B_8(\zeta)$ 的解析表达式. 最后, 扩展系统可以表示如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial z_7(\zeta, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial z_8(\zeta, t)}{\partial t} \\ \frac{d\tilde{x}_6(t)}{dt} \\ \frac{d\tilde{x}_4(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(-\beta_7)}{\partial\zeta} & \beta_7 & 0 & \beta_7B_8(\zeta) \\ \beta_8 & -\frac{\partial}{\partial\zeta} - \beta_8 & \beta_8B_7(\zeta) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_3}{K_1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_7(\zeta, t) \\ z_8(\zeta, t) \\ \tilde{x}_6(t) \\ \tilde{x}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\beta_5}{x_{5ss}}B_7(\zeta) & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_3}{x_{3ss}}B_8(\zeta) \\ \frac{\beta_5}{x_{5ss}} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_3}{x_{3ss}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \tilde{u}_5(t) \\ \tilde{u}_2(t) \end{bmatrix}, \quad \tilde{y}(t) = [0 \ C_z \ 0 \ B_8(L)] \begin{bmatrix} z_7(\zeta, t) \\ z_8(\zeta, t) \\ \tilde{x}_6(t) \\ \tilde{x}_4(t) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中: 算子 $C_z[f(\zeta)] = \int_0^L f(\zeta)\delta(\zeta - L)d\zeta = f(L)$.

令状态函数为 $x_c(t) = [z_7(\zeta, t) \ z_8(\zeta, t) \ \tilde{x}_6(t) \ \tilde{x}_4(t)]^T$, 输入变量 $u_c(t) = [\tilde{u}_5(t) \ \tilde{u}_2(t)]^T$, 输出变量 $y_c(t) = \tilde{y}(t)$, 算子

$$A_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial(-\beta_7)}{\partial\zeta} & \beta_7 & 0 & \beta_7B_8(\zeta) \\ \beta_8 & -\frac{\partial}{\partial\zeta} - \beta_8 & \beta_8B_7(\zeta) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\beta_5\alpha_5u_{4ss}}{x_{5ss}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_3}{K_1} \end{bmatrix},$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_5}{x_{5ss}} B_7(\zeta) & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_3}{x_{3ss}} B_8(\zeta) \\ \frac{\beta_5}{x_{5ss}} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_3}{x_{3ss}} \end{bmatrix}$$

和 $C_c = [0 \ C_z \ 0 \ B_8(L)]$. 连续时间耦合系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t), \\ y_c(t) = C_c x_c(t). \end{cases} \quad (21)$$

重新考虑式(7)中描述的热交换器HX-1系统, 并将状态函数设为 $x_p(\zeta, t) = [z_1(\zeta, t) \ z_2(\zeta, t)]^T$, 输入变量 $u_p(t) = \tilde{u}_1(t)$, 干扰项 $g_p(t) = [\tilde{x}_1(L, t) \ \tilde{x}_2(0, t) \ \tilde{x}_1(L, t) \ \tilde{x}_2(0, t)]$, 参数

$$A_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial(-\beta_1)}{\partial\zeta} & \beta_1 \\ \beta_2 & -\frac{\partial}{\partial\zeta} - \beta_2 \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ -\gamma_1 \end{bmatrix},$$

$$E_p = \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 B_2(\zeta) & -B_1(\zeta) & 0 \\ \beta_2 B_1(\zeta) & 0 & 0 & -B_2(\zeta) \end{bmatrix},$$

PDEs系统可以表示如下:

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t) + E_p g_p(t). \quad (22)$$

重新考虑式(12)中描述的储热系统的状态函数 $\tilde{x}_3(t)$ 和式(18)中描述的盐穴储气系统的状态函数 $\tilde{x}_5(t)$, 设状态函数、输入和干扰分别为 $x_o(t) = [\tilde{x}_3(t) \ \tilde{x}_5(t)]^T$, $u_o(t) = [\tilde{u}_5(t) \ \tilde{u}_2(t)]^T$ 和 $g_o(t) = [\tilde{x}_{4in}(t) \ \tilde{x}_{6in}(t) \ \tilde{u}_{in}(t)]^T$, 算子

$$A_o = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_3}{K_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_o = \begin{bmatrix} \frac{\beta_3}{x_{4inss} - x_{4ss}} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_5}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)} \end{bmatrix},$$

$$E_o = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_3 u_{2ss}}{x_{4inss} - x_{4ss}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_5 \alpha_5 u_{4ss}}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\beta_5 \gamma_5}{\alpha_6(x_{6ss} + 1)} \end{bmatrix},$$

ODEs系统可以表示如下:

$$\dot{x}_o(t) = A_o x_o(t) + B_o u_o(t) + E_o g_o(t). \quad (23)$$

整个CAES连续时间系统表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Eg(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases} \quad (24)$$

其中: 状态函数为 $x(t) = \begin{bmatrix} x_p(\zeta, t) \\ x_c(t) \\ x_o(t) \end{bmatrix}$, 输入变量为 $u(t)$

$= \begin{bmatrix} u_p(t) \\ u_c(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix}$, 干扰项为 $g(t) = \begin{bmatrix} g_p(t) \\ g_o(t) \end{bmatrix}$, 输出变量为

$Y(t) = y(t)$, 参数为

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ 0 & A_c & 0 \\ 0 & 0 & A_o \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} B_p & 0 & 0 \\ 0 & B_c & 0 \\ 0 & 0 & B_o \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_p & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & E_o \end{bmatrix}.$$

状态函数 $x_p(\zeta, t) \in H$ 为具有内积的实Hilbert空间 $\langle \cdot, \cdot \rangle$, 状态函数 $x_o(t) \in \mathbb{R}^n$; 输入 $u(t) \in U$, 输出 $y(t) \in Y$, U 和 Y 是实Hilbert空间; 算子 $A_p : D(A_p) \subset H \rightarrow H$, 存在Yosida扩展运算符 A_{p-1} ; $A_o, B_o, E_o \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是矩阵; B_p, E_p, C 和 D 是输出测量相关的线性变量, 即 $B_p \in L(U, H)$, $E_p \in L(U, H)$, $C \in L(H, Y)$ 和 $D \in L(U, Y)$; $A_c \in H \oplus \mathbb{R}^n$ 和 $B_c \in (U, H \oplus \mathbb{R}^n)$ 是通过将边界条件转移到域内条件而获得的.

3 分布参数和集中参数耦合系统模型预测控制

3.1 分布参数和集中参数耦合系统有限维离散时空模型

为了实现压缩空气储能系统模型预测控制, 需要对建立的DPS和LPS耦合系统模型进行时间离散化. 本文利用基于Cayley-Tustin变换的离散化方法, 可得到在空间上保持无限维特性的DPS和LPS耦合离散时间系统模型. 给定时间离散化参数 $h > 0$, Cayley-Tustin时间离散化如下^[28]:

$$\begin{cases} \frac{x(jh) - x((j-1)h)}{h} \approx A \frac{x(jh) + x((j-1)h)}{2} + Bu(jh) + Eg(jh), \\ y(jh) \approx C \frac{x(jh) + x((j-1)h)}{2} + Du(jh) + Fg(jh), \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (25)$$

其中: u_j^h/\sqrt{h} 可以近似等于 $u(jh)$, g_j^h/\sqrt{h} 近似等于 $g(jh)$, y_j^h/\sqrt{h} 近似等于 $y(jh)$, 上述方程组表示为

$$\begin{cases} \frac{x_j^h - x_{j-1}^h}{h} = A \frac{x_j^h + x_{j-1}^h}{2} + B \frac{u_j^h}{\sqrt{h}} + E \frac{g_j^h}{\sqrt{h}}, \\ x_0^{(h)} = x_0, \\ \frac{y_j^h}{\sqrt{h}} = C \frac{x_j^h + x_{j-1}^h}{2} + D \frac{u_j^h}{\sqrt{h}} + F \frac{g_j^h}{\sqrt{h}}. \end{cases} \quad (26)$$

通过一些基本的变换, 离散时间系统采用以下形式:

$$\begin{cases} x(\zeta, k) = A_d x(\zeta, k-1) + B_d u(k) + E_g u(k), \\ x(\zeta, 0) = x_0, \\ y(k) = C_d x(\zeta, k-1) + D_d u(k) + F_g u(k), \end{cases} \quad (27)$$

其中: $\sigma = 2/h$, A_d, B_d, C_d, D_d, E_d 和 F_d 是离散时间线性系统算子, 由下式得出:

$$\begin{bmatrix} A_d & B_d & E_d \\ C_d & D_d & F_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\delta - A]^{-1}[\delta + A] & \sqrt{2\delta}[\delta - A_{-1}]^{-1}B \\ \sqrt{2\delta}C[\delta - A]^{-1} & C[\delta - A_{-1}]^{-1}B + D \\ \sqrt{2\delta}[\delta - A_{-1}]^{-1}E \\ C[\delta - A_{-1}]^{-1}E + F \end{bmatrix}, \quad (28)$$

其中: 变量 A_d 可表示为 $A_d = [\delta - A]^{-1}[\delta + A] = -I + 2\delta[\delta - A]^{-1}$, I 是单位算子.

注1 耦合PDE-ODE系统中的算子 A_c 的解析式为

$$R(s, A_c) = [sI - A_c]^{-1}(\cdot) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} \end{bmatrix},$$

其中 $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{44}$ 如附录所示.

在这一部分中, 本文得到了盐穴空气储存系统、换热器系统和热能存储系统的离散状态空间表示. 在下一部分中, 将设计模型预测控制, 在输出温度保持在期望设定值的同时, 仍然满足电网使用的能量需求.

3.2 模型预测控制

在式(27)中建立的线性离散时间系统模型用于模型预测控制的构建, 控制器由基于采样时间 k 下开环目标函数的最小化计算获得^[29]

$$\begin{aligned} \min_{u^N} \sum_{j=0}^{\infty} & \langle x(\zeta, k+j|k), Qx(\zeta, k+j|k) \rangle + \\ & \langle u(k+j+1|k), Ru(k+j+1|k) \rangle, \quad (29) \\ \text{s.t. } & x(\zeta, k+j|k) = \\ & A_d x(\zeta, k+j-1|k) + B_d u(k+j|k), \\ & u^{\min} \leq u(k+j|k) \leq u^{\max}, \\ & x^{\min} \leq x(\zeta, k+j|k) \leq x^{\max}, \end{aligned}$$

式中: Q 是半正定惩罚空间算子, R 正定惩罚空间算子, 运算符 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示对变量在空间上进行内积运

算, $x(k+j|k)$ 和 $u(k+j+1|k)$ 表示在当前时刻 k 预测的未来时刻 $k+j$ 的状态和输入变量, 向量 X 和 U 表示为

$$\begin{aligned} X &= [x(\zeta, k+1|k) \ x(\zeta, k+2|k) \ \dots \\ & \quad x(\zeta, k+N|k)]^T, \\ U &= [u(k+1|k) \ u(k+2|k) \ \dots \ u(k+N|k)]^T. \end{aligned} \quad (30)$$

式(29)中的无限时域开环目标函数可以表示为具有 $u(k+N+1|k) = 0$ 的有限时域开环目标函数, 如下所示:

$$\begin{aligned} \min_{u^N} J &= \\ & \sum_{j=0}^{N-1} \langle x(\zeta, k+j|k), Qx(\zeta, k+j|k) \rangle + \\ & \langle u(k+j+1|k), Ru(k+j+1|k) \rangle + \\ & \langle x(\zeta, k+N|k), \bar{Q}x(\zeta, k+N|k) \rangle, \quad (31) \\ \text{s.t. } & x(\zeta, k+j|k) = A_d x(\zeta, k+j-1|k) + \\ & \quad B_d u(k+j|k), \\ & u^{\min} \leq u(k+j|k) \leq u^{\max}, \\ & x^{\min} \leq x(\zeta, k+j|k) \leq x^{\max}, \end{aligned}$$

式中: \bar{Q} 被定义为 $\bar{Q} = \sum_{i=0}^{\infty} A_d^i Q A_d^i$. 惩罚算子 \bar{Q} 可由解如下离散Lyapunov函数计算得出:

$$A_d^* \bar{Q} A_d - \bar{Q} = -Q. \quad (32)$$

式(31)中目标函数简化为如下易于计算的带约束二次规划方程:

$$\begin{aligned} \min_U J &= \\ U^T & \langle I, H \rangle U + 2U^T \langle I, Px(\zeta, k|k) \rangle + \\ & \langle x(\zeta, k|k), \bar{Q}x(\zeta, k|k) \rangle, \quad (33) \end{aligned}$$

其中 H, P 为有限维矩阵,

$$\begin{aligned} H &= \\ & \begin{bmatrix} B_d^* \bar{Q} B_d + R & B_d^* A_d^* \bar{Q} B_d & \dots & B_d^* A_d^{*N-1} \bar{Q} B_d \\ B_d^* \bar{Q} A_d B_d & B_d^* \bar{Q} B_d + R & \dots & B_d^* A_d^{*N-2} \bar{Q} B_d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_d^* \bar{Q} A_d^{N-1} B_d & B_d^* \bar{Q} A_d^{N-2} B_d & \dots & B_d^* \bar{Q} B_d + R \end{bmatrix}, \\ P &= \begin{bmatrix} B_d^* \bar{Q} A_d \\ B_d^* \bar{Q} A_d^2 \\ \vdots \\ B_d^* \bar{Q} A_d^N \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

约束条件为

$$\begin{cases} U^{\min} \leq U \leq U^{\max}, \\ X^{\min} \leq SU + Tx(\zeta, k|k) \leq X^{\max}, \end{cases} \quad (34)$$

可表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ -I \\ S \\ -S \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} U^{\max} \\ -U^{\min} \\ X^{\max} - Tx(\zeta, k|k) \\ -X^{\min} + Tx(\zeta, k|k) \end{bmatrix},$$

其中 S, T 为有限维矩阵,

$$S = \begin{bmatrix} B_d & 0 & \cdots & 0 \\ A_d B_d & B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_d^{N-1} B_d & A_d^{N-2} B_d & \cdots & B_d \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} A_d \\ A_d^2 \\ \vdots \\ A_d^N \end{bmatrix}.$$

4 压缩空气储能系统模型预测控制仿真研究

在本节中, 进行模型预测控制的仿真研究, 使压缩空气储能系统稳定在稳态运行并抑制输入干扰. 最优控制器的设计是在满足输入约束并达到能源成本最小化要求的同时, 提高系统能源利用效率. 对于盐穴压缩空气储能系统, 存在两种运行工况, 即高峰期和非高峰期. 该系统是围绕稳定状态建模的, 因此, 以上两种运行工况的控制器设计都采用相同的设计策略.

本节考虑系统在供电高峰期运行工况, 这样压缩空气储能系统向电力系统提供热能. 在空气压缩过程中, 由于天气的变化较大, 压缩空气储能系统受到 2 种来自电力系统的干扰, 即周期性缓慢变化分量干扰和变化剧烈的湍流分量干扰, 如图 3 所示. 系统干扰作为系统的已知输入, 设计控制器来抑制这些已知的干扰, 控制目标是将提供电力系统的热流温度保持在稳定状态, 并消除上述 2 个输入干扰. 在整个系统中, 状态函数 \tilde{x}_1 在 $\zeta = L$ 时为系统扰动, 作为输入扰动被传递给盐穴储气系统和储热系统. 因此, 压缩空气储能系统的模型预测控制器设计为抑制输入干扰 $\tilde{x}_1(L, t)$. 对于盐穴空气存储系统的控制, 输入 $\tilde{u}_2(t)$ 和 $\tilde{u}_5(t)$ 是模型预测控制计算结果.

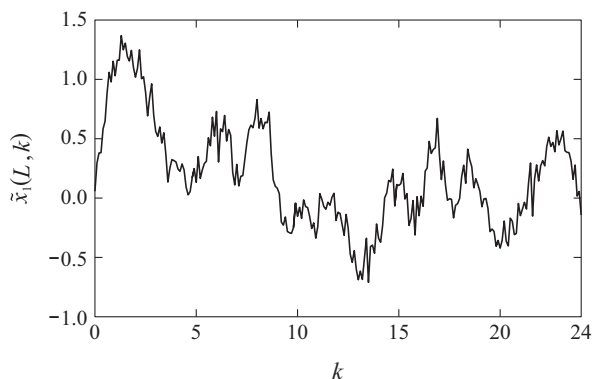


图 3 系统扰动

Fig. 3 System disturbance

在仿真研究中, 式(7)中描述的换热器HX-1系统的

参数为 $\beta_1 = 0.2$ 和 $\beta_2 = 0.1$. 设 $\tilde{u}_1 = 0$, 换热器HX-1系统的仿真结果如图4-5所示, 仿真结果可看出, 外界干扰通过换热器系统作为输入扰动传递到盐穴储气系统和储热系统.

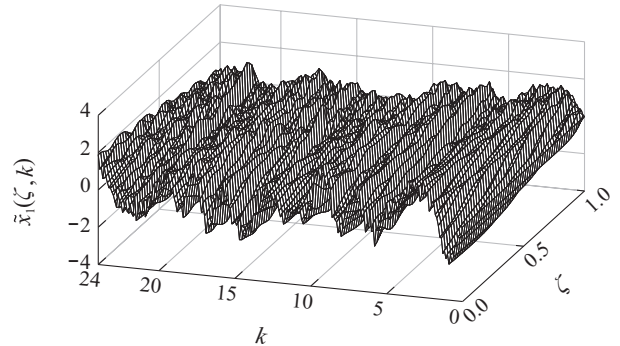


图 4 换热器HX-1系统状态函数 $\tilde{x}_1(\zeta, k)$ 在系统扰动下的仿真结果

Fig. 4 The state $\tilde{x}_1(\zeta, k)$ profile evolution of heat exchanger HX-1 with disturbance

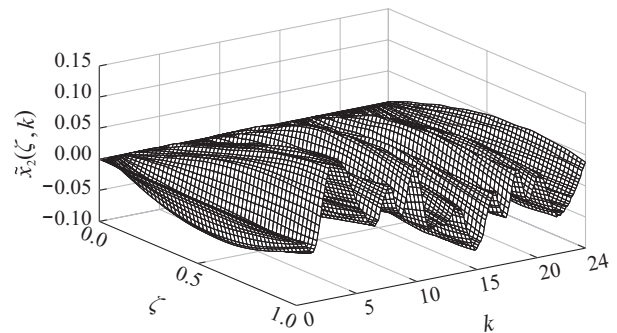


图 5 换热器HX-1系统状态函数 $\tilde{x}_2(\zeta, k)$ 在系统扰动下的仿真结果

Fig. 5 The state $\tilde{x}_2(\zeta, k)$ profile evolution of heat exchanger HX-1 with disturbance

式(20)中描述的耦合系统的参数为 $\beta_7 = 0.8, \beta_8 = 0.3, \beta_3 = 1, K_1 = 0.4, x_{3ss} = 0.8, \beta_5 = 1, \alpha_5 = 3, u_{4ss} = 0.6, x_{5ss} = 0.8$. 离散时间 $h = 0.1$, 可得 $\delta = 20$, 利用 $d\zeta = 0.01$ 进行数值积分. 耦合系统初始条件为 $x_{40} = 3, x_{60} = 3, x_{70} = 1.5 \sin(4\pi\zeta) + x_{60}$ 和 $x_{80} = 1.3 \sin(4\pi\zeta) + x_{40}$, 模型预测控制预测步数 $N = 3$, 输入约束和状态函数约束为 $-3 \leq \tilde{u}_2(k) \leq 1.5, -3 \leq \tilde{u}_5(k) \leq 1.5, 0 \leq \tilde{x}_4(k) \leq 3$ 和 $0 \leq \tilde{x}_6(k) \leq 3$. 模型预测控制仿真结果如图6-9所示, 相应的控制输入在图10-11中给出, 从仿真结果可以看出, 模型预测控制可以稳定式(20)中介绍的PDE-ODE耦合系统, 并具有良好的抗干扰性能.

图10-11给出了从MPC获得的输入操作, 可以看出, 输入满足输入约束, 这是储热系统和盐穴储气系统中实际操作的上限和下限, 该控制器可防止空气输入过多或空气温度超出运行范围, 以免损坏设备或关闭系统.

以上仿真研究表明,在压缩空气储能系统上应用模型预测控制,可以使盐穴储气系统处于平稳运行状态,同时消除来自天气变化的输入干扰.最优控制器在满足输入约束条件下,预防设备损坏以及关闭系统,将能源成本降至最低,从而提高系统效率.

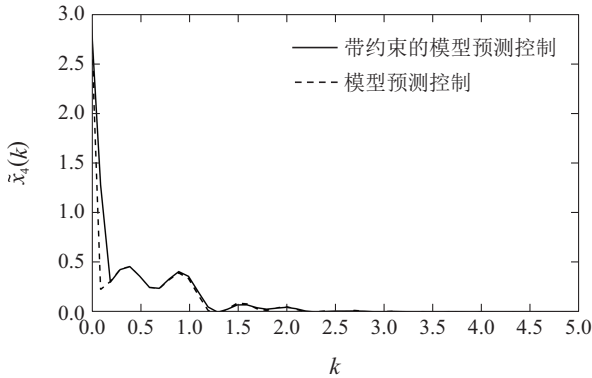


图6 热能存储系统状态函数 $\tilde{x}_4(\zeta, k)$ 在模型预测控制下的仿真结果
 Fig. 6 The state $\tilde{x}_4(\zeta, k)$ profile evolution of hot tank system under the applied model predictive control

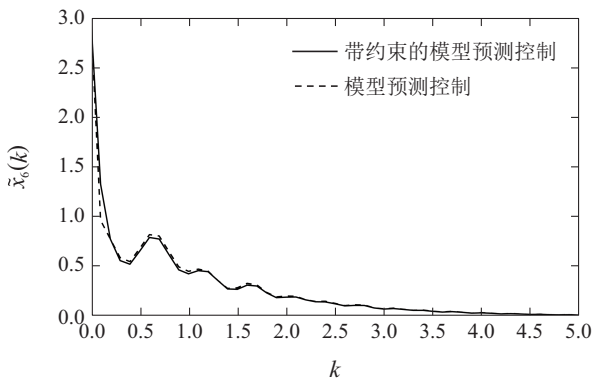


图7 盐穴储气系统状态函数 $\tilde{x}_6(\zeta, k)$ 在模型预测控制下的仿真结果
 Fig. 7 The state $\tilde{x}_6(\zeta, k)$ profile evolution of salt cavern air storage system under the applied model predictive control

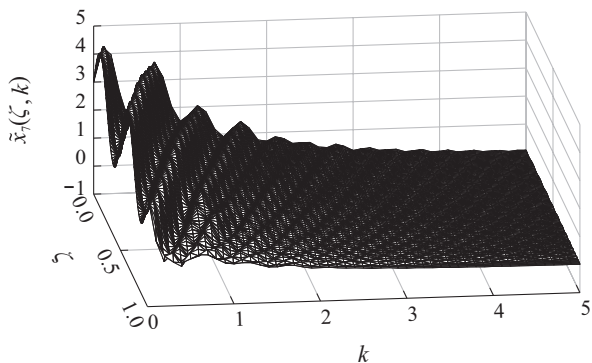


图8 换热器HX-2系统状态函数 $\tilde{x}_7(\zeta, k)$ 在模型预测控制下的仿真结果
 Fig. 8 The state $\tilde{x}_7(\zeta, k)$ profile evolution of heat exchanger HX-2 under the applied model predictive control

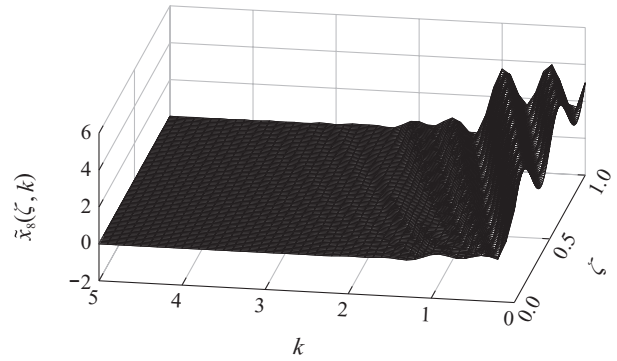


图9 换热器HX-2系统状态函数 $\tilde{x}_8(\zeta, k)$ 在模型预测控制下的仿真结果
 Fig. 9 The state $\tilde{x}_8(\zeta, k)$ profile evolution of heat exchanger HX-2 under the applied model predictive control

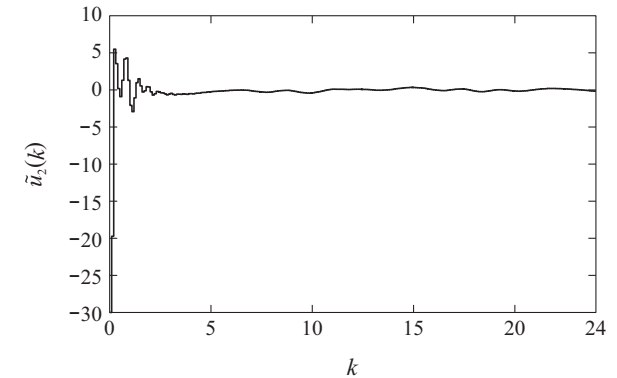
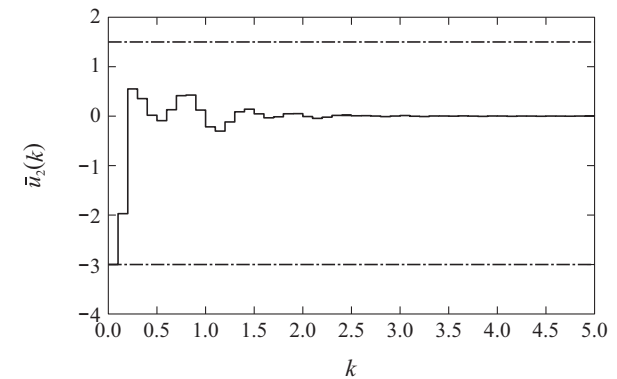
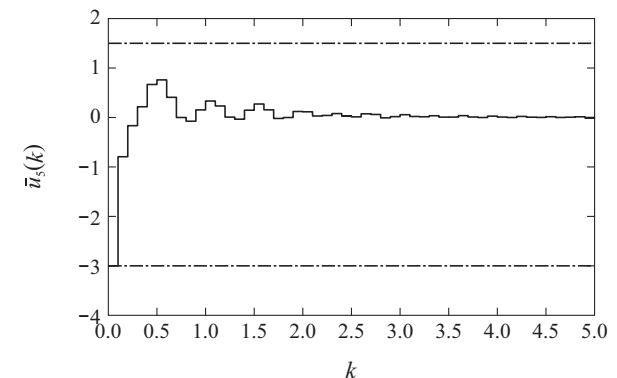


图10 热能存储系统输入 $\tilde{u}_2(t)$ 和 $\tilde{u}_5(t)$ 在模型预测控制下的仿真结果(输入约束由点划线给出)
 Fig. 10 Input $\tilde{u}_2(t)$ and $\tilde{u}_5(t)$ profile evolutions of hot tank system under the applied model predictive control (input constraints are given by dash-dot line)



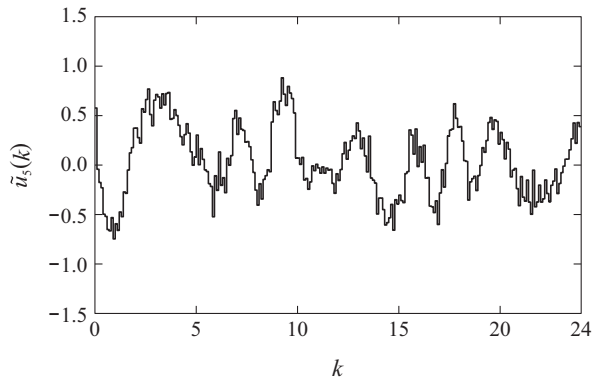


图 11 盐穴储气系统输入 $\bar{u}_5(t)$ 和 $\tilde{u}_5(t)$ 在模型预测控制下的仿真结果(输入约束由点划线给出)

Fig. 11 Input $\bar{u}_5(t)$ and $\tilde{u}_5(t)$ profile evolutions of hot tank system under the applied model predictive control (input constraints are given by dash-dot line)

5 结论

本文根据能量平衡原理, 利用常微分方程、双曲偏微分方程和耦合PDE–ODE建立了盐穴压缩空气储能系统数学模型. 然后, 通过应用Cayley–Tustin时间离散化方法获得盐穴压缩空气储能系统的离散时间系统模型. 提出了一种考虑扰动测量的压缩空气存储系统模型预测控制器设计方法, 控制系统对盐穴压缩空气储能系统进行温度跟踪和抗干扰控制, 为电力系统在高峰期间提供稳定能源保障. 下一步研究作为耦合PDEs–ODEs系统自抗扰模型预测控制, 包括跟踪器, 状态观测器和反馈控制设计, 为解决更多工业问题提供理论基础.

参考文献:

- [1] KIM Y M, FAVRAT D. Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system. *Energy*, 2010, 35(1): 213 – 220.
- [2] SUCCAR S, WILLIAMS R H. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. Princeton environmental institute report, 2008: 81.
- [3] GRAZZINI G, MILAZZO A. Thermodynamic analysis of caes/tes systems for renewable energy plants. *Renewable Energy*, 2008, 33(9): 1998 – 2006.
- [4] LIU G, JIANG T, OLLIS T B, et al. Distributed energy management for community microgrids considering network operational constraints and building thermal dynamics. *Applied Energy*, 2019, 239(1): 83 – 95.
- [5] ESTRADA-FLORES S, CLELANDAC, CLELANDDJ. Prediction of the dynamic thermal behaviour of walls for refrigerated rooms using lumped and distributed parameter models. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24(3): 272 – 284.
- [6] LIU L, FENG L, XU Q, ZHENG L, et al. Flow and heat transfer of generalized maxwell fluid over a moving plate with distributed order time fractional constitutive models. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 116: 104679.
- [7] ZHANG G, ZHANG Y, YANG Y, et al. Dynamic heat transfer performance study of steam generator based on distributed parameter method. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 63(1): 658 – 664.
- [8] MOHARIR M, POURKARGAR D B, ALMANSOORI A, et al. Graph representation and distributed control of diffusion-convection-reaction system networks. *Chemical Engineering Science*, 2019, 204: 128 – 139.
- [9] KRSTIC M, SMYSHLYAEV A. *Boundary Control of PDEs: A Course on Backstepping Designs*. Singapore: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008.
- [10] SMYSHLYAEV A, KRSTIC M. Closed-form boundary state feedbacks for a class of 1-d partial integro-differential equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(12): 2185 – 2202.
- [11] GUOW, GUO B Z. Parameter estimation and non-collocated adaptive stabilization for wave equation subject to general boundary harmonic disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(7): 1631 – 1643.
- [12] KRSTIC M. Adaptive control of an anti-stable wave PDE. Dynamics of continuous, discrete impulsive systems, Series A. *Mathematical Analysis*, 2010, 17(6): 853 – 882.
- [13] REBARBER R, WEISS G. Internal model based tracking and disturbance rejection for stable well-posed systems. *Automatica*, 2003, 39(9): 1555 – 1569.
- [14] HE W, ZHANG S, GE S S. Boundary output-feedback stabilization of a Timoshenko beam using disturbance observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 99: 1 – 9.
- [15] GUO B, ZHOU H. The active disturbance rejection control to stabilization for multi-dimensional wave equation with boundary control matched disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(1): 143 – 157.
- [16] WEISS G, ZHAO X. Exact controllability of coupled PDE–ODE systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, 42(6): 290 – 294.
- [17] TANG, S, XIE C. State and output feedback boundary control for a coupled PDE–ODE system. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(8): 540 – 545.
- [18] ZHOU H C, GUO B Z, WU Z H. Output feedback stabilisation for a cascaded wave PDE–ODE system subject to boundary control matched disturbance. *International Journal of Control*, 2016, 89(12): 2396 – 2405.
- [19] WU Z H, ZHOU H C, GUO B Z, et al. Review and new theoretical perspectives on active disturbance rejection control for uncertain finite-dimensional and infinite-dimensional systems. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 101(12): 935 – 959.
- [20] KAZANTZIS N, KRAVARIS C. Time-discretization of nonlinear control systems via Taylor methods. *Computers Chemical Engineering*, 1999, 23(6): 763 – 784.
- [21] HAVUV, MALINEN J. The Cayley transform as a time discretization scheme. *Numerical Functional Analysis Optimization*, 2007, 28(7-8): 825 – 851.
- [22] XU Q, DUBLJEVIC S. Linear model predictive control for transport-reaction processes. *AIChE Journal*, 2017: 2644 – 2659.
- [23] GAUTHIER J P, XU C Z. H-control of a distributed parameter system with non-minimum phase. *International Journal of Control*, 1991, 53(1): 45 – 79.
- [24] RAY W H. *Advanced Process Control*. New York: McGraw-Hill Companies, 1981.
- [25] HE W, LUO X, EVANS D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system. *Applied Energy*, 2017, 208(15): 745 – 757.
- [26] RAJU M, KHAITAN S K. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the huntorf plant. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 474 – 481.
- [27] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 71 – 81.
- [28] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3rd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [29] MUSKE K R, RAWLINGS J B. Model predictive control with linear models. *AIChE Journal*, 1993, 39(2): 262 – 287.

附录: 耦合PDE-ODE系统算子 A_c 计算方法

式(20)中描述的耦合PDE-ODE系统的拉普拉斯变换如下:

$$\begin{aligned}\frac{\partial z_7(\zeta, s)}{\partial \zeta} &= (s + \beta_7)z_7(\zeta, s) - \beta_7 z_8(\zeta, s) - z_7(\zeta, 0) - \beta_7 B_8(\zeta)\tilde{x}_4(s), \\ \frac{\partial z_8(\zeta, s)}{\partial \zeta} &= \beta_8 z_7(\zeta, s) - (s + \beta_8)z_8(\zeta, s) + z_8(\zeta, 0) + \beta_8 B_7(\zeta)\tilde{x}_6(s), \\ \tilde{x}_4(s) &= \frac{1}{s + \beta_3/K_1}\tilde{x}_4(0), \quad \tilde{x}_6(s) = \frac{1}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}}\tilde{x}_6(0).\end{aligned}$$

矩阵 $\bar{A} = \begin{bmatrix} s + \beta_7 & -\beta_7 \\ \beta_8 & -(s + \beta_8) \end{bmatrix}$ 是常数矩阵, 可以通过拉普拉斯逆变换 $e^{\bar{A}s} = \mathcal{L}^{-1}\{[\bar{s}I - \bar{A}]^{-1}\}$ 来计算 $e^{\bar{A}s}$

$$e^{\bar{A}s} = \begin{bmatrix} e^{a\bar{s}} \cosh(b\bar{s}) + ce^{a\bar{s}} \sinh(b\bar{s}) & -\frac{\alpha_1}{b} e^{a\bar{s}} \sinh(b\bar{s}) \\ \frac{\alpha_2}{b} e^{a\bar{s}} \sinh(b\bar{s}) & e^{a\bar{s}} \cosh(b\bar{s}) - ce^{a\bar{s}} \sinh(b\bar{s}) \end{bmatrix},$$

其中: $a = \frac{\beta_7 - \beta_8}{2}$, $b = \sqrt{\frac{(\beta_7 - \beta_8)^2}{4} + s^2 + (\beta_7 + \beta_8)s}$ 和 $c = \frac{2s + \beta_7 + \beta_8}{2b}$.

式(20)中运算符 A_c 的解析表达式如下:

$$\begin{aligned}R_{11} &= \frac{e^{a\zeta} \cosh(b\zeta) + ce^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 [e^{a(1-\eta)} \cosh(b(1-\eta)) + ce^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta))] (\cdot) d\eta - \\ &\quad \int_0^\zeta [e^{a(\zeta-\eta)} \cosh(b(\zeta-\eta)) + ce^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta))] (\cdot) d\eta, \\ R_{12} &= \frac{e^{a\zeta} \cosh(b\zeta) + ce^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 \frac{\beta_7}{b} e^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta)) (\cdot) d\eta - \int_0^\zeta \frac{\beta_7}{b} e^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta)) (\cdot) d\eta, \\ R_{13} &= \frac{e^{a\zeta} \cosh(b\zeta) + ce^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 \frac{\beta_7}{b} e^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta)) \frac{\beta_7 B_8(\eta)}{s + \beta_3/K_1} (\cdot) d\eta - \\ &\quad \int_0^\zeta \frac{\beta_7}{b} e^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta)) \frac{\beta_7 B_8(\eta)}{s + \beta_3/K_1} (\cdot) d\eta, \\ R_{14} &= \frac{e^{a\zeta} \cosh(b\zeta) + ce^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 [e^{a(1-\eta)} \cosh(b(1-\eta)) + ce^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta))] \frac{\beta_8 B_7(\eta)}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}} (\cdot) d\eta - \\ &\quad \int_0^\zeta [e^{a(\zeta-\eta)} \cosh(b(\zeta-\eta)) + ce^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta))] \frac{\beta_8 B_7(\eta)}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}} (\cdot) d\eta, \\ R_{21} &= \frac{\frac{\beta_8}{b} e^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 [e^{a(1-\eta)} \cosh(b(1-\eta)) + ce^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta))] (\cdot) d\eta - \\ &\quad \int_0^\zeta \frac{\beta_8}{b} e^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta)) (\cdot) d\eta, \\ R_{22} &= \frac{\frac{\beta_8}{b} e^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 \frac{\beta_7}{b} e^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta)) (\cdot) d\eta + \int_0^\zeta [e^{a(\zeta-\eta)} \cosh(b(\zeta-\eta)) - \\ &\quad ce^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta))] (\cdot) d\eta, \\ R_{23} &= \frac{\frac{\beta_8}{b} e^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 \frac{\beta_7}{b} e^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta)) \frac{\beta_7 B_8(\eta)}{s + \beta_3/K_1} (\cdot) d\eta + \\ &\quad \int_0^\zeta [e^{a(\zeta-\eta)} \cosh(b(\zeta-\eta)) - ce^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta))] \frac{\beta_7 B_8(\eta)}{s + \beta_3/K_1} (\cdot) d\eta, \\ R_{24} &= \frac{\frac{\beta_8}{b} e^{a\zeta} \sinh(b\zeta)}{e^a \cosh(b) + ce^a \sinh(b)} \int_0^1 [e^{a(1-\eta)} \cosh(b(1-\eta)) + ce^{a(1-\eta)} \sinh(b(1-\eta))] \frac{\beta_8 B_7(\eta)}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}} (\cdot) d\eta - \\ &\quad \int_0^\zeta \frac{\beta_8}{b} e^{a(\zeta-\eta)} \sinh(b(\zeta-\eta)) \frac{\beta_8 B_7(\eta)}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}} (\cdot) d\eta, \\ R_{33} &= \frac{1}{s + \beta_5\alpha_5 u_{4ss}/x_{5ss}} (\cdot), \quad R_{44} = \frac{1}{s + \beta_3/K_1} (\cdot).\end{aligned}$$

作者简介:

徐晴晴 讲师, 硕士生导师, 研究方向为分布参数系统、模型预测控制, E-mail: xuqq@cup.edu.cn;

宋凯 硕士研究生, 研究方向为压缩空气储能系统控制, E-mail: 2019215692@student.cup.edu.cn.