第 50 卷 第 2 期：704-720 高电压技术 Vol.50, No.2: 704-720
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230536

考虑灵活性不足风险的园区综合能源系统优化调度

黎观海[1]，朱建全[1]，赵文猛[2]，朱文凯[1]，刘海欣[1]，曾　恺[1]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510663）

摘　要：园区综合能源系统可以实现能源的高效利用，提高可再生能源的消纳能力。但是，随着可再生能源的渗透率升高，系统的运行灵活性需求激增，给其安全、经济运行带来了巨大挑战。在这种背景下，该文提出一种考虑运行灵活性不足风险的电-热园区综合能源系统优化调度方法。首先，综合考虑电力子系统与非电(热力)子系统的运行灵活性需求，给出园区综合能源系统的运行灵活性需求和供给的数学表达，并以运行灵活性裕量和运行灵活性不足风险成本作为系统运行灵活性的评价指标。然后，基于条件风险价值，推导出系统运行灵活性不足风险约束的数学表达。由于考虑灵活性不足风险的电-热园区综合能源系统优化调度问题具有随机性、非凸性、非线性和 0/1 离散整数变量，在数学上属于 NP-hard 问题，因此，在马尔可夫决策过程框架下对其进行建模，并采用近似动态规划算法对所提模型进行求解。最后，通过算例验证了所提方法的有效性。
关键词：园区综合能源系统；优化调度；灵活性；条件风险价值；近似动态规划

Optimal Dispatch of Park-level Integrated Energy Systems Considering the Risk of Insufficient Operational Flexibility

LI Guanhai[1], ZHU Jianquan[1], ZHAO Wenmeng[2], ZHU Wenkai[1], LIU Haixin[1], ZENG Kai[1]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Park-level integrated energy system (PIES) enables efficient utilization of energy and improves the consumption of renewable energy source. However, as the penetration of renewable energy source increases, the operational flexibility demand increases sharply, which poses great challenges to the safe and economic operation of the PIES. Consequently, this paper proposes an optimal dispatch method for the electric and thermal PIES, in which the risk of insufficient operational flexibility is taken into consideration. First, based on the comprehensive consideration of the operational flexibility demand of the electric system and non-electric (thermal) system, the mathematical expressions of the operational flexibility demand and supply of PIES are derived, and the operational flexibility margin and the risk cost of insufficient operational flexibility are taken as the evaluation indicators of the operational flexibility. Second, based on the conditional value-at-risk (CVaR), the mathematical expression of the risk soft constraint of insufficient operation flexibility is derived. Because the proposed optimal dispatch model of electric-thermal PIES considering the risk of insufficient operational flexibility is stochastic, non-convex, and nonlinear and has 0/1 integer variables, it belongs to NP-hard problem mathematically. Therefore, the proposed model is established under the framework of Markov decision process and is solved by approximate dynamic programming (ADP) algorithm. Finally, numerical simulations are carried out to verify the effectiveness of the proposed method.
Key words: park-level integrated energy system; optimal dispatch; flexibility; conditional value-at-risk; approximate dynamic programming

0　引言

园区综合能源系统(park-level integrated energy system, PIES)可以实现多能源的有效互补，促进可再生能源就地消纳[1-3]。然而，随着可再生能源的广泛接入，PIES 的随机性和间歇性剧增，灵活性不足风险加大[4]。在这种背景下，研究考虑运行灵活性不足风险的优化调度问题，对于 PIES 的安全经济运行具有重要意义。

目前，国内外学者已针对 PIES 的优化调度问题开展了大量研究。文献[5]以运行成本最小为目标

基金资助项目：直流输电技术国家重点实验室开放基金(SKLHVDC-2021-KF-09)。
Project supported by State Key Laboratory of HVDC (SKLHVDC-2021-KF-09).

建立了一个含热电联产机组与电锅炉设备的 PIES 经济调度模型，但忽略了风电出力不确定性的影响，可能与实际情况出现较大差异。为此，文献[6]进一步考虑了风电出力以及负荷的不确定性，并利用耦合矩阵简化多能流输入和输出之间的耦合关系，建立了一个新的 PIES 优化调度模型。随着“碳中和、碳达峰”目标的提出以及电力市场的推进，PIES 的优化调度问题也呈现更为多样化的发展态势。例如：文献[7]考虑了 PIES 在减少碳排放方面的环境效益，将碳捕集设备引入到园区中，提出了一个以环境效益和运行成本最小为目标的 PIES 低碳优化调度模型；文献[8]综合考虑了用户、供应商以及服务商 3 方的收益，提出了一个基于博弈理论的 PIES 经济调度模型；文献[9]针对 PIES 的负荷变化特征及低碳化需求，提出了一个考虑综合需求响应与氢储能的电-热-气 PIES 低碳经济调度模型。上述研究各有特点，但忽略了运行灵活性需求。随着可再生能源渗透率的不断提高，在实际过程中可能因灵活性不足而出现较为严重的弃电和限电问题。

为解决这个问题，学者们主要从灵活性需求建模、灵活性供需平衡分析、灵活性评估等角度展开研究。其中，文献[10]分析了负荷以及新能源的时序波动对灵活性需求的影响，由此建立了电力系统的运行灵活需求模型。文献[11]从燃气机组、可中断负荷和储能设备的运行特性出发，建立了电力系统的运行灵活性供给模型。文献[12-13]从电源侧灵活性裕度以及灵活性供需平衡的角度建立了电力系统灵活性评价体系。为了充分挖掘 PIES 的灵活性调节能力，文献[14-15]分析了天然气网络与热力网络的动态储能特性对系统灵活性的影响。文献[16]在此基础上建立了一个计及综合灵活性资源的 PIES 优化调度模型，能显著提升 PIES 对风光能源的消纳水平。文献[17]则从运行灵活性的多时间尺度特征出发，建立了考虑次小时尺度运行灵活性约束的 PIES 优化调度模型，能更好地挖掘 PIES 在短时间尺度的灵活性。需要说明的是，上述文献侧重于研究如何满足电力系统的灵活性需求，对非电系统的运行灵活性需求考虑较少，因而未能全面反映 PIES 的灵活性需求[18]。此外，这些文献一般将系统运行灵活性需求作为一个刚性的约束嵌入优化调度模型，缺少灵活性不足风险相关的评估，因而可能存在调度方案过于保守的问题。

灵活性不足风险的研究本质上是一个风险度量问题。常用的风险度量指标有 2 种：条件风险价值 (conditional value-at-risk, CVaR) 和风险价值 (value-at-risk, VaR)[19]。相比 VaR，CVaR 具有次可加性、一致性等良好的数学性质，且能够考虑 VaR 以外的尾部风险，因而在电力系统得到了较多的应用。比如，文献[20-21]利用 CVaR 量化风力、光伏发电不确定性给电力系统优化调度带来的风险，建立了基于 CVaR 的电力系统随机优化调度模型。但是，有关 CVaR 在 PIES 运行灵活性方面的研究仍未见报道。

在此背景下，本文提出了一种计及运行灵活性不足风险的 PIES 优化调度方法。相对于现有研究，本文全面考虑了 PIES 中电力系统和非电系统运行灵活性需求，能更好地保障 PIES 的运行安全。此外，本文从 CVaR 的角度对各个系统的灵活性不足风险进行度量，所建立的调度方案能更为理性地规避 PIES 运行过程中的灵活性不足风险，解决传统方法因满足灵活性需求而使决策过于保守的问题。

为实现 PIES 的优化调度，本文提出了附录 A 图 A1 所示的技术框架，主要包括灵活性分析、调度模型和求解算法 3 个环节的内容。其中，灵活性分析环节侧重于分析电、热 2 个子系统的运行灵活性需求和供给情况，并给出了相应的灵活性度量指标。调度模型环节侧重于在马尔可夫决策过程框架下建立一个 PIES 优化调度模型。与传统的 PIES 优化调度模型不同，本文在该环节基于 CVaR 概念构建了运行灵活性不足风险约束，以控制可能出现的极端场景运行灵活性不足风险。考虑到传统方法难以求解前述模型，本文还进一步基于近似动态规划提出了一种新的求解算法。

1 PIES 的运行灵活性分析

本文研究的 PIES 由电力子系统和热力子系统 2 部分组成，其架构如附录 A 图 A2 所示。其中，电力子系统包括燃气机组(gas-fired turbine, GT)、电储能(electric storage, ES)、风电机组(wind turbine, WT)、光伏机组(photovoltaic, PV)和电负荷(electric load, EL)。热力子系统包括热储能(heat storage, HS)、热负荷(heat load, HL)。热电联产机组(combined heating and power, CHP)和电锅炉(electric boiler, EB)是 PIES 中的电-热耦合元件。

1.1 运行灵活性需求分析

本文中考虑的 PIES 运行灵活性需求由电力子

系统运行灵活性需求以及热力子系统运行灵活性需求 2 部分综合而成，这 2 部分又分别包括上调运行灵活性需求和下调运行灵活性需求 2 方面，计算式为：

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}} = P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{eu}} + P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hu}} \\ P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}} = P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{ed}} + P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hd}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}}$、$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}}$ 分别为 PIES 在时段 t 的上调以及下调运行灵活性需求；$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{eu}}$、$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{ed}}$、$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hu}}$、$P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hd}}$ 分别为电力子系统和热力子系统在时段 t 的上调以及下调运行灵活性需求。电力子系统和热力子系统的具体灵活性需求计算式可参见附录 A 式(A1)—式(A3)。

1.2 运行灵活性供给能力分析

PIES 中的运行灵活性供给来自其中具有灵活运行调节能力的可调度灵活性资源。本文考虑的灵活性资源包括 GT、CHP、EB、ES 以及 HS。与运行灵活性需求情况类似，PIES 的运行灵活性供给由电力子系统运行灵活性供给和热力子系统运行灵活性供给 2 部分综合而成，这 2 部分也分别包括上调运行灵活性供给和下调运行灵活性供给 2 方面，计算式为：

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu}} \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd}} \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,gt}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,chp}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,eb}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,es}} \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,gt}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,chp}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,eb}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,es}} \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,chp}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,eb}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,hs}} \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd}} = P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,chp}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,eb}} + P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,hs}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}$ 分别为 PIES 在时段 t 的上调、下调运行灵活性供给能力；$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd}}$ 分别为电力子系统和热力子系统在时段 t 的上调、下调运行灵活性供给；$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,gt}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,chp}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,eb}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,es}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,gt}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,chp}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,eb}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,es}}$ 分别为 GT、CHP、EB、ES 设备提供的电力子系统上调、下调运行灵活性供给；$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,chp}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,eb}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,hs}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,chp}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,eb}}$、$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,hs}}$ 分别为 CHP、EB、HS 设备提供的热力子系统上调、下调运行灵活性供给。系统灵活性资源的具体灵活性供给计算式可参见附录 A 式(A4)—式(A12)。

1.3 运行灵活性评价指标

基于上述运行灵活性供需分析，本文从裕量和风险 2 个角度出发，采用运行灵活性裕量和运行灵活性不足风险成本作为 PIES 运行灵活性的评价指标。其中，运行灵活性裕量可以反映系统当前时段 t 运行灵活性的充裕情况，具体的计算式可参见附录 A 式(A13)、(A14)；运行灵活性不足风险成本可以反映系统出现运行灵活性缺额时的运行风险成本大小，包括上调运行灵活性不足风险成本 $C^{\mathrm{u,lack}}$ 和下调运行灵活性不足风险成本 $C^{\mathrm{d,lack}}$，具体的计算式可参见附录 A 式(A15)、(A16)。PIES 运行灵活性需求、供给以及风险关系，如附录 A 图 A3 所示。当出现上调运行灵活性缺额时，PIES 会面临切负荷风险；当出现下调运行灵活性缺额时，PIES 将面临摒弃部分能源(例如风/光/热)出力的弃能风险。

2 考虑运行灵活性不足风险的 PIES 优化调度模型

在本节中，所提考虑运行灵活性不足风险的 PIES 优化调度模型在马尔可夫决策过程框架下被建立。从数学上看，其为一个混合整数非线性规划问题。下面将首先定义马尔可夫决策过程的基本元素，即：状态变量、决策变量、外部信息、转移函数和即时成本。然后，给出 PIES 优化调度的目标函数和约束条件。

2.1 马尔可夫决策过程的基本元素定义

2.1.1 状态变量

PIES 的状态变量定义为：

$$S_t = \begin{Bmatrix} P_{t-1,x}, u_{t-1,\mathrm{gt}}, R_{t,\mathrm{es}}, H_{t,\mathrm{hs}}, \\ P_{t,y},\ P_{t,\mathrm{ld}}, h_{t,\mathrm{ld}}, c_t^{\mathrm{price}}, \tau_t^{\mathrm{amb}} \end{Bmatrix} \tag{3}$$

式中：$P_{t-1,x}$ 为时段 t−1 的可调度机组(GT、CHP 和 EB)的出力，$x \in \{\mathrm{gt}, \mathrm{chp}, \mathrm{eb}\}$；$u_{t-1,\mathrm{gt}}$ 为 GT 在时段 t−1 的启停状态，是一个 0/1 整数变量，1 表示处于开机状态、0 表示处于关机状态；$R_{t,\mathrm{es}}$ 和 $H_{t,\mathrm{hs}}$ 分别为 ES 和 HS 在时段 t 的储能容量；$P_{t,y}$ 为时段 t−1 的可再生能源机组(WT 和 PV)的出力，$y \in \{\mathrm{wt}, \mathrm{pv}\}$；$P_{t,\mathrm{ld}}$ 和 $h_{t,\mathrm{ld}}$ 分别为时段 t 的 EL 和 HL 需求；c_t^{price} 和 τ_t^{amb} 分别为时段 t 的购电电价和环境温度的实际值。

2.1.2 决策变量

PIES 的决策变量定义为：

$$a_t = \left\{ v_{t,\mathrm{gt}}, w_{t,\mathrm{gt}}, P_{t,x}, P_{t,\mathrm{gd}}, P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{cha}}, P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{dis}}, h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{cha}}, h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{dis}} \right\} \tag{4}$$

式中：$v_{t,\mathrm{gt}}$ 和 $w_{t,\mathrm{gt}}$ 分别为时段 t 的 GT 开机、关机动作；$P_{t,\mathrm{gd}}$ 分别为时段 t 的购电功率；$P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{cha}}$、$P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{dis}}$、$h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{cha}}$、$h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{dis}}$ 分别为时段 t 的 ES 和 HS 充、放功率。

2.1.3 外部信息

PIES 的外部信息定义为：

$$W_t = \left\{ \hat{P}_{t,\mathrm{wp}}^{\mathrm{F}}, \hat{P}_{t,\mathrm{pv}}^{\mathrm{F}}, \hat{P}_{t,\mathrm{ld}}^{\mathrm{F}}, \hat{h}_{t,\mathrm{ld}}^{\mathrm{F}}, \hat{c}_t^{\mathrm{price,F}}, \hat{\tau}_t^{\mathrm{amb,F}} \right\} \tag{5}$$

式中：$\hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{wp}}$、$\hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{pv}}$、$\hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}}$、$\hat{h}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}}$、$\hat{c}^{\mathrm{price,F}}_{t}$、$\hat{\tau}^{\mathrm{amb,F}}_{t}$ 分别为当前时段 t 的 WT 出力、PV 出力、EL 需求、HL 需求、购电电价和环境温度的预测偏差。

2.1.4 转移函数

状态变量的转移函数为：

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{wp}} = P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{wp}} + \hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{wp}} \\ P_{t,\mathrm{pv}} = P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{pv}} + \hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{pv}} \\ P_{t,\mathrm{ld}} = P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}} + \hat{P}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}} \\ h_{t,\mathrm{ld}} = h^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}} + \hat{h}^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}} \\ c^{\mathrm{price}}_{t} = c^{\mathrm{price,F}}_{t} + \hat{c}^{\mathrm{price,F}}_{t} \\ \tau^{\mathrm{amb}}_{t} = \tau^{\mathrm{amb,F}}_{t} + \hat{\tau}^{\mathrm{amb,F}}_{t} \\ R_{t,\mathrm{es}} = R_{t-1,\mathrm{es}} + \eta_{\mathrm{es}} P^{\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{es}} - P^{\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{es}} / \eta_{\mathrm{es}} \\ H_{t,\mathrm{hs}} = H_{t-1,\mathrm{hs}} + \eta_{\mathrm{hs}} h^{\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{hs}} - h^{\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{hs}} / \eta_{\mathrm{hs}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{wp}}$、$P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{pv}}$、$P^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}}$、$h^{\mathrm{F}}_{t,\mathrm{ld}}$、$c^{\mathrm{price,F}}_{t}$、$\tau^{\mathrm{amb,F}}_{t}$ 分别为当前时段 t 的 WT 出力、PV 出力、EL 需求、HL 需求、购电电价和环境温度的预测值；η_{es}、η_{hs} 分别为 ES 和 HS 的充、放效率系数。

2.1.5 即时成本

即时成本 $C_t(S_t, a_t)$定义为在当前时段状态 S_t 下执行决策 a_t 所对应的运行成本，即：

$$\begin{aligned} C_t(S_t,a_t) = \sum_{i\in I_{\mathrm{bus}}} & (\gamma_{\mathrm{SUgt}} v^i_{t,\mathrm{gt}} + \gamma_{\mathrm{SDgt}} w^i_{t,\mathrm{gt}} + c^i_{\mathrm{gt}} P^i_{t,\mathrm{gt}} + \\ & c^i_{\mathrm{eb}} P^i_{t,\mathrm{eb}} + a^i_{\mathrm{chp}} (P^i_{t,\mathrm{chp}})^2 + b^i_{\mathrm{chp}} (h^i_{t,\mathrm{chp}})^2 + \\ & c^i_{\mathrm{chp}} P^i_{t,\mathrm{chp}} h^i_{t,\mathrm{chp}} + d^i_{\mathrm{chp}} P^i_{t,\mathrm{chp}} + e^i_{\mathrm{chp}} h^i_{t,\mathrm{chp}} + f^i_{\mathrm{chp}} + \\ & c^{\mathrm{price}}_{t} P^i_{t,\mathrm{gd}} + c^i_{\mathrm{es}} (P^{i,\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{es}} / \eta^i_{\mathrm{es}} + P^{i,\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{es}} \eta^i_{\mathrm{es}})) + \\ & \sum_{k\in \Phi_{\mathrm{sn}}} (c^k_{\mathrm{hs}} (h^{k,\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{hs}} / \eta^k_{\mathrm{hs}} + h^{k,\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{hs}} \eta^k_{\mathrm{hs}})) \end{aligned} \tag{7}$$

式中：I_{bus} 为电网的节点集合；γ_{SUgt}、γ_{SDgt} 分别为 GT 的开机、停机成本费用系数；带上标 i 的字母表示电网节点 i 上的相应设备参数；c^i_g 为电网节点 i 上 GT 和 EB 的运行成本费用系数，$\forall g \in \{\mathrm{gt,eb}\}$；$a^i_{\mathrm{chp}}$、$b^i_{\mathrm{chp}}$、$c^i_{\mathrm{chp}}$、$d^i_{\mathrm{chp}}$、$e^i_{\mathrm{chp}}$、$f^i_{\mathrm{chp}}$ 为节点 i 上的 CHP 运行成本费用系数；$h^i_{t,\mathrm{chp}}$ 为节点 i 和时段 t 的 CHP 热功率；Φ_{sn} 为热网的源节点集合；带上标 k 的字母表示热网节点 k 上的相应设备参数；c^k_{hs} 为热网节点 k 上 HS 的运行成本费用系数。

2.2 目标函数

本文以 PIES 在调度周期 $\mathcal{T}$ 内的运行成本期望值 C_{op} 最小化为目标，有：

$$C_{\mathrm{op}} = E[\sum_{t\in\mathcal{T}} C_t(S_t,a_t)] \tag{8}$$

式中：$E[\cdot]$为期望值算子。

2.3 约束条件

为保障 PIES 的安全经济运行和控制运行灵活性不足引起的弃能以及切负荷风险，本文考虑如下约束条件[16,22]。限于篇幅，本文仅给出部分约束，其他常规运行约束见附录 A。

2.3.1 电力子系统运行约束

节点功率平衡约束为：

$$\begin{aligned} & P^i_{t,\mathrm{gd}} + P^i_{t,\mathrm{gt}} + (P^i_{t,\mathrm{wp}} - P^{i,\mathrm{curt}}_{t,\mathrm{wp}}) + (P^i_{t,\mathrm{pv}} - P^{i,\mathrm{curt}}_{t,\mathrm{pv}}) + \\ & P^i_{t,\mathrm{chp}} - P^i_{t,\mathrm{eb}} + \left(P^{i,\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{es}} - P^{i,\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{es}}\right) - (P^i_{t,\mathrm{ld}} - P^{i,\mathrm{shed}}_{t,\mathrm{ld}}) = \\ & U^i_t \sum_{j\in I_{\mathrm{bus}}} U^j_t (G^{ij}\cos\delta^{ij}_t + B^{ij}\sin\delta^{ij}_t), \forall i \in I_{\mathrm{bus}} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} & Q^i_{t,\mathrm{gd}} + Q^i_{t,\mathrm{gt}} + Q^i_{t,\mathrm{wp}} + Q^i_{t,\mathrm{pv}} + Q^i_{t,\mathrm{chp}} - Q^i_{t,\mathrm{eb}} - Q^i_{t,\mathrm{ld}} = \\ & U^i_t \sum_{j\in I_{\mathrm{bus}}} U^j_t (G^{ij}\sin\delta^{ij}_t - B^{ij}\cos\delta^{ij}_t), \forall i \in I_{\mathrm{bus}} \end{aligned} \tag{10}$$

式中：$P^{i,\mathrm{curt}}_{t,\mathrm{wp}}$、$P^{i,\mathrm{curt}}_{t,\mathrm{pv}}$、$P^{i,\mathrm{shed}}_{t,\mathrm{ld}}$ 分别为在节点 i、时段 t 的弃风、弃光发电功率以及切电负荷量；U^i_t、U^j_t、δ^{ij}_t 分别为节点 i、j 的电压幅值和相角差；G^{ij}、B^{ij} 分别为节点 i、j 之间的节点导纳实部和虚部；$Q^i_{t,\mathrm{gd}}$、$Q^i_{t,\mathrm{gt}}$、$Q^i_{t,\mathrm{wp}}$、$Q^i_{t,\mathrm{pv}}$、$Q^i_{t,\mathrm{chp}}$、$Q^i_{t,\mathrm{eb}}$、$Q^i_{t,\mathrm{ld}}$ 分别为在节点 i、时段 t 上的购电、GT、WT、PV、CHP、EB 以及 EL 的注入无功功率。

电力子系统考虑的其他常规运行约束包括：节点电压约束，线路传输容量约束，购电功率约束，弃电、切电负荷约束，机组发电出力约束，机组灵活性爬、滑坡约束，机组最小启停时间约束，机组启停动作约束和电储能运行约束，详见附录 A 式(A17)—式(A39)。其中节点功率平衡约束具有非线性，机组启停动作约束具有 0/1 离散整数变量。

2.3.2 热力子系统运行约束

E抿侧的功率约束为：

$$h_{t,\mathrm{s}} = \sum_{i\in I_{\mathrm{bus}}} (h^i_{t,\mathrm{chp}} + h^i_{t,\mathrm{eb}} - h^{i,\mathrm{curt}}_{t}) + \sum_{k\in\Phi_{\mathrm{sn}}} (h^{k,\mathrm{dis}}_{t,\mathrm{hs}} - h^{k,\mathrm{cha}}_{t,\mathrm{hs}}) \tag{11}$$

式中：$h_{t,\mathrm{s}}$ 为热网在时段 t 的总输入功率；$h^i_{t,\mathrm{eb}}$ 为节点 i、时段 t 的 EB 热功率；$h^{i,\mathrm{curt}}_{t}$ 为节点 i、时段 t 的弃热功率。

热力子系统考虑的其他常规运行约束包括：热源侧的功率-温度关系约束，热负荷侧的功率约束，热网管道流体流量上、下限约束，热网管道流体流量平衡约束，弃热、切热负荷约束，热网管道温度上、下限约束，热网管道温度混合约束，热网管道温度损耗约束和热储能运行约束，详见附录 A 式(A40)—式(A54)。

2.3.3 耦合约束

本文中，PIES 的耦合约束包括 EB 耦合约束以及 CHP 耦合约束，如下所示。

1）EB 耦合约束

$$h_{t,\mathrm{eb}}^{i}=\eta_{\mathrm{eb}}P_{t,\mathrm{eb}}^{i} \tag{12}$$

式中：η_{eb}为 EB 的产热效率系数。

2）CHP 耦合约束

$$h_{t,\mathrm{chp}}^{i}=P_{t,\mathrm{chp}}^{i}\eta_{\mathrm{hr}}\left(1-\eta_{\mathrm{chp}}-\eta_{\mathrm{loss}}\right)/\eta_{\mathrm{chp}} \tag{13}$$

式中：η_{hr}、η_{chp}、η_{loss}分别为 CHP 的热回收效率、产电效率系数、能量损失率。

2.3.4 运行灵活性约束

由于可再生能源发电的出力以及各子系统负荷需求具有波动性和不确定性，PIES 存在运行灵活性不足风险。要保障所有调度场景下都满足运行灵活性需求，会使调度决策过于保守，存在较大灵活性备用冗余和系统的运行经济性变差问题。因此，本文基于 CVaR，考虑运行灵活性不足风险，构建运行灵活性供需平衡风险约束，如附录 A 式(A55)—式(A58)所示。此风险约束不但可约束灵活性不足场景出现的概率，还可以约束灵活性不足缺额的风险大小。

由于式(A55)—式(A58)涉及到系统运行灵活性不足风险的概率密度，一般很难获得其准确的概率密度函数。为此，本文基于蒙特卡洛采样近似的思想，将式(A55)—式(A58)重构为：

$$l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{u}}=\max(P_{t,\mathrm{fd}}^{\xi,\mathrm{u}}-P_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{u}},0),\forall\xi\in\Xi \tag{14}$$

$$l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{d}}=\max(P_{t,\mathrm{fd}}^{\xi,\mathrm{d}}-P_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{d}},0),\forall\xi\in\Xi \tag{15}$$

$$\frac{1}{(1-\theta)M}\sum_{\xi=1}^{M}l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{u}}\le\phi_{\mathrm{loss}}^{\mathrm{u}},\forall\xi\in\Xi \tag{16}$$

$$\frac{1}{(1-\theta)M}\sum_{\xi=1}^{M}l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{d}}\le\phi_{\mathrm{loss}}^{\mathrm{d}},\forall\xi\in\Xi \tag{17}$$

式中：Ξ为场景集合；$l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{u}}$、$l_{t,\mathrm{fs}}^{\xi,\mathrm{d}}$分别为场景$\xi$下在时段$t$的上调、下调运行灵活性供给不足功率；$\theta$为置信水平；$M$为蒙特卡罗采样场景数；$\phi_{t,\mathrm{loss}}^{\mathrm{u}}$、$\phi_{t,\mathrm{loss}}^{\mathrm{d}}$分别为系统上调和下调运行灵活性不足的条件风险价值(即，在给定置信水平θ条件下，超过灵活性缺额边界值的期望值)的允许上限。

综上，式(1)—式(17)以及式(A1)—式(A54)构成了本文考虑运行灵活性不足风险的 PIES 优化调度模型。

3 基于近似动态规划的求解算法

从数学上看，上述建立的 PIES 优化调度模型是一个包含随机性的多时段混合整数非线性规划问题，状态空间和决策空间巨大，传统方法难以求解。本文采用近似动态规划算法对其进行求解。首先，基于贝尔曼最优性原理将原问题解耦为一系列单时段随机优化子问题。其次，针对外部信息的随机变量未知所导致的值函数期望值求解难问题，引入决策后状态对值函数重构，使单时段随机优化子问题进一步变为一系列单时段确定性场景的优化子问题。此外，在单时段决策的搜索过程中，采用基于表格的近似值函数能够确定原问题中的整数变量，从而将各个单时段确定性场景混合整数非线性规划子问题进一步转化为单时段确定性场景的非线性规划问题，提高求解的效率。最后，只要得到训练好的值函数表，就可以快速求解得到原问题的近似最优解。

基于贝尔曼最优性原理，原问题式(8)可以等效解耦为一系列单时段随机优化子问题式(18)[22]。

$$V_t\left(S_t\right)=\min_{a_t}\left(C_t\left(S_t,a_t\right)+E[V_{t+1}(S_{t+1})]\right) \tag{18}$$

式中：$V_t\left(S_t\right)$为状态S_t下的值函数。

由于外部随机信息的存在，很难直接求得下一时段的状态值函数精确期望值$E[V_{t+1}(S_{t+1})]$。为此，本文引入决策后状态S_t^a，并采用蒙特卡洛方法对值函数期望值$E[V_{t+1}(S_{t+1})]$进行估计，进而将式(18)解耦成一系列确定性采样场景下的优化问题式(19)，序贯求解。

$$v_{t-1}^{n}\left(S_{t-1}^{a,n}\right)=\min_{a_t}\left(C_t\left(S_{t-1}^{a},a_t,W_t^{n}\right)+\bar{V}_t\left(S_t^{a}\right)\right) \tag{19}$$

式中：$v_{t-1}^{n}(\cdot)$为上一时段t−1 的第n批采样场景的决策后状态值函数采样值；W_t^n为第n批采样场景的外部信息；$\bar{V}_t\left(S_t^a\right)$为时段$t$的决策后状态的值函数期望值的估计值。

在得到了决策后状态值函数的采样值后，将其均值作为该决策后状态值函数期望值的估计值，有：

$$\bar{V}_{t-1}\left(S_{t-1}^{a}\right)=\frac{1}{N_\xi}\sum_{\xi\in\Xi}v_{t-1}^{n}\left(S_{t-1}^{a,n}\right) \tag{20}$$

式中：N_ξ为采样次数。

由于引入决策后状态的值函数状态空间依然非常巨大，直接求解式(19)会遇到“维数灾”问题。为此，本文采用近似动态规划方法对式(19)的决策后状态值函数进行近似。常用的值函数近似方法有：分段线性近似和表格近似。分段线性近似方法不适用含有 0/1 离散变量的模型，故对本文不适用。基

于表格的近似值函数是一种经典且有效的方法，可以处理 0/1 离散变量，适用于本文模型。此外基于表格的近似值函数可以通过记录各个时段子问题的当前状态、决策动作以及对应的即时成本，从而避免冗余的重复计算，可进一步降低求解时间。因此，本文采用基于表格近似的方法构造近似值函数。

首先，将状态与决策变量中的连续变量离散化，离散过程为：

$$\hat{Z} \in \{Z_{\min}, Z_{\min}+\Delta Z, \cdots, Z_{\max}-\Delta Z, Z_{\max}\} \quad (21)$$

$$\Delta Z = \frac{Z_{\max}-Z_{\min}}{d_z} \quad (22)$$

式中：$\hat{Z}$ 为离散化后的状态变量或决策变量；$Z_{\max}$、$Z_{\min}$ 分别为该进行离散化变量的上、下限值；ΔZ 为该变量的单位离散化间隔值；d_z 为该变量的离散状态数。

其次，为了足够逼近准确值函数，基于表格的近似值函数需要通过以下 2 个过程迭代更新。

1）前向过程：目的是通过从时段 1 到时段 T 迭代地求解式(19)来获得各个时段的即时成本和值函数采样值，传递当前时段最优决策后状态给下一时段子问题。

2）后向过程：目的是通过从时段 T 到时段 1 迭代地求解(19)来更新各时段的值函数表。

在基于表格的近似值函数更新过程中，已知当前状态与决策动作后，即时成本可通过求解一系列与时段无关的变量组成的确定性的非线性规划(nonlinear programming, NLP)子问题得到。此时，各个子问题的状态与决策均是确定的，整数变量也已被消除，因此可调用 NLP 通用求解器进行求解。

上述近似值函数的更新过程是耗时的，但可以通过离线训练的形式提前训练好各种状态下的近似值函数来解决耗时的问题。所提算法的离线训练流程图如附录 B 图 B1 所示。每个迭代过程中，利用蒙特卡洛仿真随机生成一批训练场景。当迭代次数达到预先设置的阈值时或连续多次出现相邻迭代得到的最优决策相同且值函数更新增量小于某一预先设置的阈值时，算法迭代终止，输出充分训练好的值函数表。所提算法可以利用训练好的值函数，结合外部信息预测值进行快速在线调度决策。在线决策过程的总体框架与离线训练过程相同，不需要进行迭代计算，这大大减少了计算量，提高了决策效率。

4 算例分析

4.1 仿真设置

为验证所提模型和算法的有效性，在一个由 14 节点电力系统和一个 6 节点热力系统组成的园区综合能源系统中进行仿真分析。其系统结构和外部信息的预测曲线如附录 B 图 B2、B3 所示。假定仿真系统的外部信息(购电电价、电负荷需求、气负荷需求、风电和光伏)的预测误差服从高斯分布，标准差分别为各自预测值的 2%、5%、5%、10%和 10%。利用蒙特卡洛采样生成 100 组训练场景和 100 组测试场景。调度周期为 24 h，调度时间间隔为 1 h，置信水平 θ 设为 0.95，上调、下调运行灵活性不足的条件风险价值允许上限 $\phi^{\mathrm{u}}_{t,\mathrm{loss}}$ 和 $\phi^{\mathrm{d}}_{t,\mathrm{loss}}$ 设为 1 kW，其余参数见附录 B 表 B1、B2。所有的仿真分析均在 GAMS 24.3 平台编程实现。计算机配置为 Intel Core-i7-10700 处理器，内存为 16 GB。

4.2 计及非电系统运行灵活性需求的有效性

本文在传统只考虑电力系统运行灵活性需求的优化调度方法基础上，提出了计及非电系统运行灵活性需求的优化调度方法。为验证所提方法的有效性，设置以下 2 种调度方案进行对比分析。

调度方案 1：仅考虑电力系统的运行灵活性需求，但不考虑运行灵活性不足风险。

调度方案 2：综合考虑电力系统和非电系统的运行灵活性需求，但不考虑运行灵活性不足风险。

2 种不同灵活性需求调度方案的优化结果如表 1 所示。由表 1 可知，相比传统的调度方案 1，本文所提的调度方案 2 总成本更优、运行灵活性更高。此外，可以看出传统调度方案 1 的调度结果存在切负荷以及弃能情况。这是因为传统的调度方案 1 没有考虑非电系统的运行灵活性需求，导致未能准确评估系统的运行灵活性需求，因此部分时段出现上调/下调灵活性缺额(具体的各时段缺额情况见图 1)，进而造成部分时段出现切负荷和弃能。从图 1 可以看出，传统的调度方案 1 的上调运行灵活性缺额和出现下调运行灵活性缺额并不在同一时段出

表 1 不同灵活性需求调度方案的优化结果

Table 1 Optimization results of scheduling cases with different flexibility requirements

方案	总成本/元	$C^{\mathrm{u,lack}}$ /元	$C^{\mathrm{d,lack}}$ /元	C_{op} /元
1	89 782.6	1285.5	1535.6	86 961.5
2	88 683.4	0	0	88 683.4

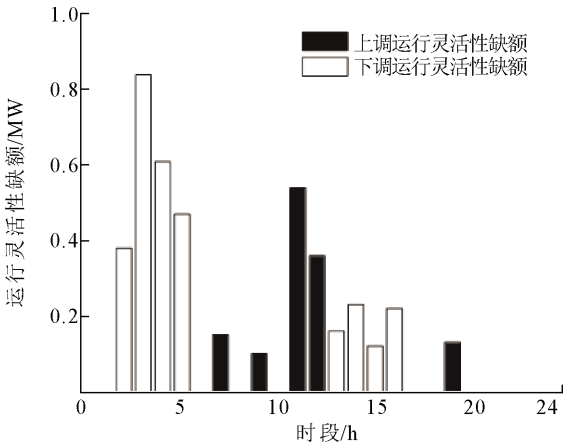


图 1 调度方案 1 的运行灵活性缺额情况

Fig.1 Operational flexibility vacancy of scheduling case 1

现。这是因为上调运行灵活性需求较大的时段，下调运行灵活性需求一般较小。而调度方案 2 因综合考虑了电力和非电系统运行灵活性需求，能更准确地应对系统运行灵活性需求，从而更好地调度灵活性资源应对各时段系统的运行灵活性需求(具体的各时段灵活性资源供给情况见图 2)。

从图 2 可以看出，本文所提计及非电系统运行灵活性需求的调度方案 2，各时段的上调、下调运行灵活性需求都得到满足，且部分时段出现较大的运行灵活性供给冗余。出现部分时段运行灵活性供给冗余较大的原因是调度方案 2 没有对系统的运行灵活性不足风险进行合理约束，而直接要求每时段的运行灵活性供给不少于运行灵活性需求会造成 PIES 运行灵活性供给的调度决策过于保守。为此，在计及运行灵活性需求的同时有必要考虑运行灵活性不足风险以权衡经济性和灵活性需求。本文将在 4.3 节分析所提计及灵活性运行不足风险模型的效果。

4.3 计及运行灵活性不足风险的有效性

为解决调度方案 2 调度决策过于保守或灵活性冗余问题，本文在调度方案 2 的基础上进一步计及系统运行灵活性不足风险。为验证所提计及运行灵活性不足风险优化调度方法的有效性，设置调度方案 3 与调度方案 2 进行对比分析。

调度方案 3：综合考虑电力系统和非电系统的运行灵活性需求，且考虑运行灵活性不足风险。

2 种不同风险调度方案的优化结果如表 2 所示，调度方案 3 具体的各时段灵活性资源供给情况见图 3。由表 2 可知，相比没有考虑运行灵活性不足风险的调度方案 2，采用本文所提的考虑运行灵活性不

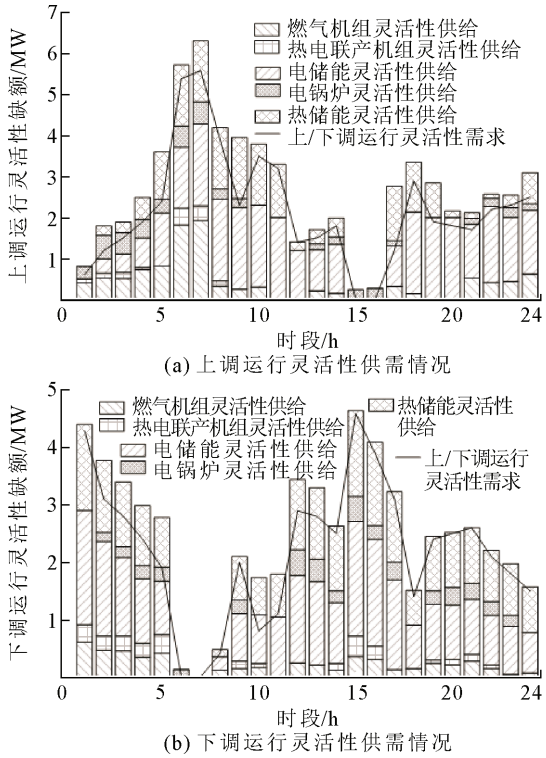


图 2 调度方案 2 的运行灵活性供需情况

Fig.2 Operation flexibility supply and demand of scheduling case 2

表 2 不同风险调度方案的优化结果

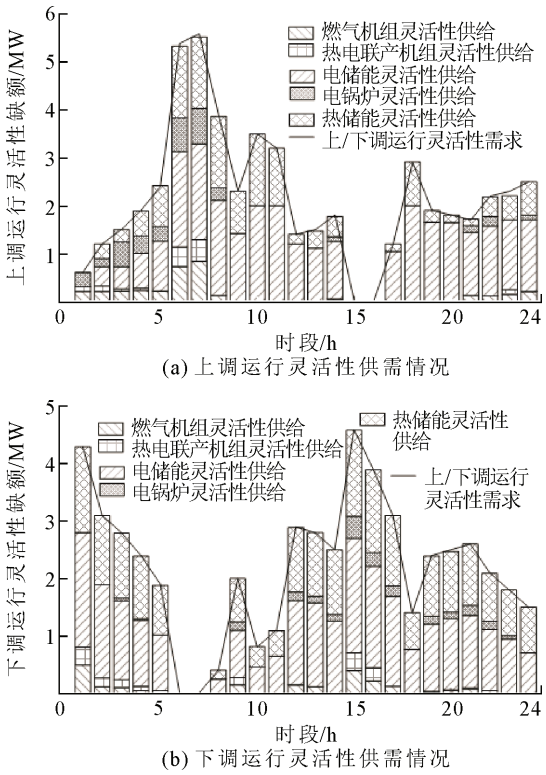
Table 2 Optimization results of different risk scheduling cases

方案	总成本/元	$C^{\mathrm{u,lack}}$ /元	$C^{\mathrm{d,lack}}$ /元	C_{op} /元
2	88 683.4	0	0	88 683.4
3	87 625.6	135.6	173.7	87 316.3

足风险的调度方案 3 的总成本更优，同时系统的上调和下调运行灵活性不足风险成本都在可接受范围。此外，对比图 2、3 可以看出，考虑运行灵活性不足风险约束后，调度方案 2 部分时段灵活性供给冗余的问题得到解决。这是因为采用本文所提基于条件风险价值的运行灵活性不足风险约束的调度方案 3 允许一定概率的场景不满足运行灵活性供给不少于运行灵活性需求，但控制每个时段的运行灵活性不足缺额，这使得调度方案 3 的运行灵活性调度决策相比调度方案 2 不那么保守，经济性更好，同时能保持较高的运行灵活性。

4.4 风险约束置信水平对调度结果的影响分

所提方法可以通过调节灵活性不足风险约束的置信水平权衡运行灵活性不足风险和运行成本。为探究不同置信水平对系统运行灵活性不足风险以及运行成本的影响，在调度方案 3 的基础上，选取不同的置信水平 θ 进行仿真分析，结果如表 3 所示。



(a) 上调运行灵活性供需情况

(b) 下调运行灵活性供需情况

图 3　调度方案 3 的运行灵活性供需情况

Fig.3　Operation flexibility supply and demand of scheduling case 3

由表 3 可见，系统运行成本随着θ的增大而升高，运行灵活不足风险成本则随着θ的增大而降低。由此可见，运行灵活性不足风险的降低是以牺牲部分系统运行经济性为代价的。综合考虑系统运行成本和灵活不足风险成本后，系统的总成本呈现先下降后上升的趋势，并在θ=0.95 左右达到最小值。

4.5　网络约束对调度结果的影响分析

为验证园区系统网络约束对调度结果的影响，在调度方案 3 的基础上对考虑网络约束前后的计算结果进行对比分析，结果如表 4 和图 4 所示。从表 4 可以看出，若不考虑网络约束对系统优化调度的影响，系统运行的总成本会降低。这是因为，忽略网络约束后运行成本小的机组可以不受线路传输功率约束优先出力，有利于降低运行成本。但从图 4 可见，当设置线路最大传输功率为 10 MW 时，不考虑网络约束会引起线路传输功率和节点电压(基准值为 10 kV)出现越限现象。因此，为保证系统安全运行，有必要在模型中考虑网络约束条件。

表 3　不同置信水平下的优化结果

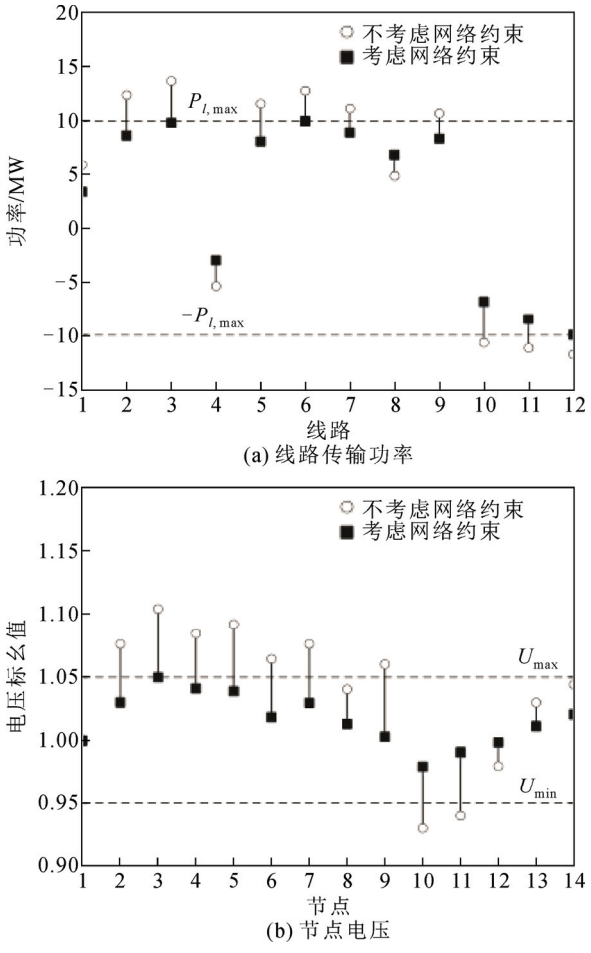
Table 3　Optimization results with different confidence levels

θ	总成本/元	$C^{\mathrm{u,lack}}$ /元	$C^{\mathrm{d,lack}}$ /元	C_{op} /元
0.91	88 020.5	476.8	497.6	87 046.1
0.93	87 687.3	249.4	298.1	87 139.8
0.95	87 625.6	135.6	173.7	87 316.3
0.97	88 614.4	89.3	97.5	88 427.6
0.99	88 669.7	15.6	19.4	88 634.7

表 4　考虑网络约束前后的优化结果对比

Table 4　Comparison of the optimization results considering grid constraints or not

模型	总成本/元	$C^{\mathrm{u,lack}}$ /元	$C^{\mathrm{d,lack}}$ /元	C_{op} /元
不考虑网络约束	87 582.5	129.4	168.3	87 284.8
考虑网络约束	87 625.6	135.6	173.7	87 316.3



(a) 线路传输功率

(b) 节点电压

图 4　考虑网络约束前后线路传输功率及节点电压对比

Fig.4　Comparison of the line transmission power and bus voltage considering grid constraints or not

5　结论

1）与传统仅考虑电力系统运行灵活性的优化调度方法相比，本文所提方法有利于提高电-热园区综合能源系统的整体灵活性，减少切负荷和弃能现

象发生。

2）与不考虑灵活性不足风险的优化调度方法相比，本文所提可以控制运行灵活性不足风险，有效解决调度决策过于保守或灵活性冗余问题。

3）所提考虑运行灵活性不足风险的电-热 PIES 优化调度模型是一个随机多阶段优化问题，传统方法难以求解。本文结合其特点设计了一套基于近似动态规划的求解算法，能获得有效结果。

4）未来可以将本文所提方法进一步拓展应用于园区系统不同子系统的分散优化调度中。此外，如何构建更精细的综合能源系统运行灵活性不足模型也值得深入研究。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 朱建全，刘海欣，叶汉芳，等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2469-2482.
ZHU Jianquan, LIU Haixin, YE Hanfang, et al. Review on optimal operation of park-level integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2469-2482.

[2] 张淑婷，陆 海，林小杰，等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.

[3] LU S, GU W, ZHANG C, et al. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: a convex optimization approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4818-4832.

[4] CHEN X Y, KANG C Q, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.

[5] 崔 杨，陈 志，严干贵，等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报，2016，36(15)：4072-4080.
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4080.

[6] 卜凡鹏，田世明，方 芳，等. 基于能源集线器模型的园区混合能源系统日前优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2017，29(10)：123-129.
BU Fanpeng, TIAN Shiming, FANG Fang, et al. Optimal day-ahead scheduling method for hybrid energy park based on energy hub model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(10): 123-129.

[7] 李嘉祺，陈艳波，陈来军，等. 工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3190-3200.
LI Jiaqi, CHEN Yanbo, CHEN Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3190-3200.

[8] 陈永龙，朱金大，杨冬梅，等. 基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J]. 高电压技术，2021，47(1)：102-110.
CHEN Yonglong, ZHU Jinda, YANG Dongmei, et al. Research on economic optimization operation technology of park-level integrated energy system based on multi-party interest game[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 102-110.

[9] 熊宇峰，陈来军，郑天文，等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：31-38.
XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.

[10] 吉兴全，张 旋，于一潇，等. 考虑综合能源系统运行灵活性的输配协同优化调度[J]. 电力系统自动化，2022，46(23)：29-40.
JI Xingquan, ZHANG Xuan, YU Yixiao, et al. Coordinated optimal dispatch of transmission and distribution power systems considering operation flexibility of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 29-40.

[11] SHAO C Z, DING Y, WANG J H, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361-370.

[12] 杨 珺，李凤婷，张高航. 考虑灵活性需求的新能源高渗透系统规划方法[J]. 电网技术，2022，46(6)：2171-2181.
YANG Jun, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Power system planning method with high new energy penetration considering flexibility requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2171-2181.

[13] 高庆忠，赵 琰，穆昱壮，等. 高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J]. 电网技术，2020，44(10)：3761-3768.
GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Flexibility optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3761-3768.

[14] ZHAO Y N, XU X D, QADRDAN M, et al. Optimal operation of compressor units in gas networks to provide flexibility to power systems[J]. Applied Energy, 2021, 290: 116740.

[15] LI X, LI W M, ZHANG R F, et al. Collaborative scheduling and flexibility assessment of integrated electricity and district heating systems utilizing thermal inertia of district heating network and aggregated buildings[J]. Applied Energy, 2020, 258: 114021.

[16] 潘 超，范宫博，王锦鹏，等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报，2023，38(6)：1633-1647.
PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633-1647.

[17] 吉兴全，刘 健，张玉敏，等. 计及运行灵活性约束的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化，2022，46(16)：84-94.
JI Xingquan, LIU Jian, ZHANG Yumin, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering operation flexibility constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 84-94.

[18] 汤翔鹰，胡 炎，耿 琪，等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(4)：81-90.
TANG Xiangying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.

[19] LI P, YU D W, YANG M, et al. Flexible look-ahead dispatch realized by robust optimization considering CVaR of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5330-5340.

[20] 张　涛，刘　景，杨晓雷，等. 计及主/被动需求响应与条件风险价值的微网经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3292-3302.
ZHANF Tao, LIU Jing, YAND Xiaolei, et al. Economic dispatch of microgrid considering active/passive demand response and conditional value at risk[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3292-3302.

[21] 程基峰，严　正，李明节，等. 基于条件风险价值与出力预测的富余新能源电力跨省交易计划优化方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：467-476.
CHENG Jifeng, YAN Zheng, LI Mingjie, et al. Optimization method of interprovincial trading plan for surplus renewable energy power based on CVaR and output prediction[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 467-476.

[22] 卓叶林，陈嘉俊，朱建全，等. 基于改进近似动态规划的园区综合能源优化调度[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2597-2606.
ZHUO Yelin, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal scheduling of park-level integrated energy systems based on improved approximate dynamic programming[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2597-2606.



LI Guanhai

黎观海
1997—，男，硕士生
主要从事综合能源系统的优化调度和风险管理方面的研究
E-mail: 991967133@qq.com



ZHU Jianquan
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

朱建全(通信作者)
1982—，男，博士，副教授
主要从事电力系统建模、分析与优化及电力市场等方面的研究
E-mail: zhujianquan@scut.edu.cn

收稿日期　2023-05-06　修回日期　2023-08-10　　编辑　程子丰

附录 A

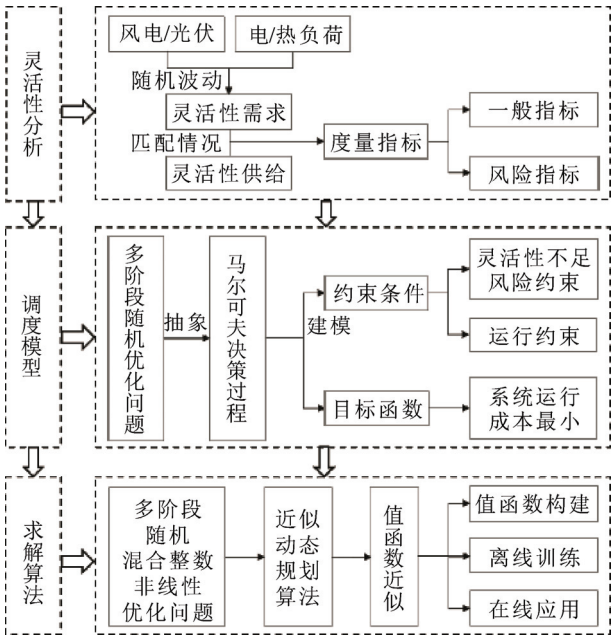


图 A1　PIES 优化调度技术框架

Fig.A1　Framework of optimal dispatch of PIES

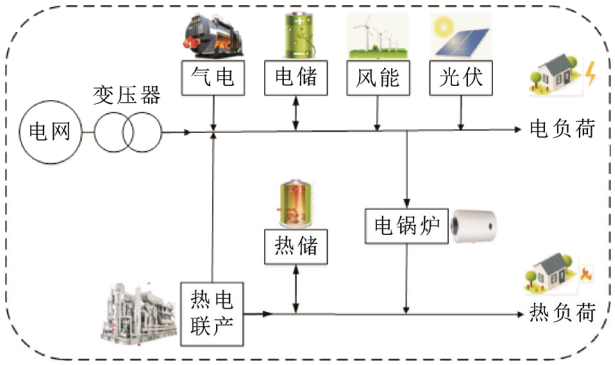


图 A2　园区综合能源系统架构图

Fig.A2　Configuration of PIES

1）电力子系统的运行灵活性需求

电力子系统的运行灵活性需求表征为应对电力净负荷随机变化所需要的系统运行调节能力，其大小受单位时间内可再生能源发电和 EL 需求的时序波动以及预测偏差影响，如下所示:

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{eu}} = \max(P_{t+1,\mathrm{ne}} - P_{t,\mathrm{ne}}, 0) \\ P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{ed}} = \max(P_{t,\mathrm{ne}} - P_{t+1,\mathrm{ne}}, 0) \end{cases} \tag{A1}$$

$$P_{t,\mathrm{ne}} = \sum_{i \in I_{bus}} (P_{t,\mathrm{ld}}^{i} - P_{t,\mathrm{wp}}^{i} - P_{t,\mathrm{pv}}^{i}) \tag{A2}$$

式中：$P_{t,\mathrm{ne}}$ 为电力子系统在时段 t 的净负荷实际值；$P_{t,\mathrm{wp}}$、$P_{t,\mathrm{pv}}$、$P_{t,\mathrm{ld}}$ 分别为在电网节点 i 的 WT、PV 发电量、EL 在时段 t 的实际值。

2）热力子系统的运行灵活性需求

与电力子系统的运行灵活性需求类似，热力子系统的运行灵活性需求表征为应对 HL 随机变化所需要的系统运行调节能力，其大小受单位时间内 HL 的时序波动以及预测偏差影响，如下式所示:

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hu}} = \max(\sum\limits_{k \in \Phi_{ln}} \eta_{\mathrm{h2p}} (h_{t+1,\mathrm{ld}}^{k} - h_{t,\mathrm{ld}}^{k}), 0) \\ P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{hd}} = \max(\sum\limits_{k \in \Phi_{ln}} \eta_{\mathrm{h2p}} (h_{t,\mathrm{ld}}^{k} - h_{t+1,\mathrm{ld}}^{k}), 0) \end{cases} \tag{A3}$$

式中：η_{h2p} 为热转电灵活性系数；$h_{t,\mathrm{ld}}^{k}$ 为在热网节点 k 的 HL 需求在时段 t 的实际值。

3）GT 的运行灵活性供给能力

在满足出力约束条件下，GT 可通过增大机组出力为电力子系统提供上调运行灵活性；下调运行灵活性提供情况与上调类似。此外，GT 的运行灵活性供给能力还受到机组爬坡约束的限制。GT 向电力系统提供的上调以及下调的运行灵活性供给能力可表示如下:

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,gt}} = \min(r_{\mathrm{gt}}^{\mathrm{u}} \Delta T, P_{\mathrm{gt}}^{\max} - P_{t,\mathrm{gt}}) \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,gt}} = \min(r_{\mathrm{gt}}^{\mathrm{d}} \Delta T, P_{t,\mathrm{gt}} - P_{\mathrm{gt}}^{\min}) \end{cases} \tag{A4}$$

式中：$r_{\mathrm{gt}}^{\mathrm{u}}$、$r_{\mathrm{gt}}^{\mathrm{d}}$ 分别为 GT 的爬、滑坡率；ΔT 为运行灵活性时间尺度；$P_{\mathrm{gt}}^{\max}$ 和 $P_{\mathrm{gt}}^{\min}$ 分别为 GT 的出力上、下限。

4）CHP 的运行灵活性供给能力

CHP 作为系统的电-热耦合设备，可为系统同时提供电力子系统运行灵活性供给和热力子系统运行灵活性供给，具体如下:

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{eu,chp}} = \min(r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{u}} \Delta T, P_{\mathrm{chp}}^{\max} - P_{t,\mathrm{chp}}) \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{ed,chp}} = \min(r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{d}} \Delta T, P_{t,\mathrm{chp}} - P_{\mathrm{chp}}^{\min}) \end{cases} \tag{A5}$$

$$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,chp}} = \min(\eta_{\mathrm{h2p}} \eta_{\mathrm{hr}} (1 - \eta_{\mathrm{chp}} - \eta_{\mathrm{loss}}) / \eta_{\mathrm{chp}} r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{u}} \Delta T, \eta_{\mathrm{h2p}} \eta_{\mathrm{hr}} (1 - \eta_{\mathrm{chp}} - \eta_{\mathrm{loss}}) / \eta_{\mathrm{chp}} (P_{\mathrm{chp}}^{\max} - P_{t,\mathrm{chp}})) \tag{A6}$$

$$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,chp}} = \min(\eta_{\mathrm{h2p}} \eta_{\mathrm{hr}} (1 - \eta_{\mathrm{chp}} - \eta_{\mathrm{loss}}) / \eta_{\mathrm{chp}} r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{d}} \Delta T, \eta_{\mathrm{h2p}} \eta_{\mathrm{hr}} (1 - \eta_{\mathrm{chp}} - \eta_{\mathrm{loss}}) / \eta_{\mathrm{chp}} (P_{t,\mathrm{chp}} - P_{\mathrm{chp}}^{\min})) \tag{A7}$$

式中：$r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{u}}$、$r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{d}}$ 分别为 CHP 的爬、滑坡率；$P_{\mathrm{chp}}^{\max}$ 和 $P_{\mathrm{chp}}^{\min}$ 分别为 CHP 的发电出力上、下限。

5）EB 的运行灵活性供给能力

与 CHP 类似，EB 作为系统的电−热耦合设备，可为系统同时提供电力子系统运行灵活性供给和热力子系统运行灵活性供给，具体如下:

$$\begin{cases} P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{pu,eb}} = \min(r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{u}} \Delta T, P_{\mathrm{eb}}^{\max} - P_{t,\mathrm{eb}}) \\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{pd,eb}} = \min(r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{d}} \Delta T, P_{t,\mathrm{eb}} - P_{\mathrm{eb}}^{\min}) \end{cases} \tag{A8}$$

$$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,eb}} = \min(\eta_{\mathrm{h2p}} \eta_{\mathrm{eb}} r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{u}} \Delta T, \eta_{\mathrm{eb}} (P_{\mathrm{eb}}^{\max} - P_{t,\mathrm{eb}})) \tag{A9}$$

$$P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,eb}}=\min(\eta_{\mathrm{h2p}}\eta_{\mathrm{eb}}r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{d}}\Delta T,\eta_{\mathrm{eb}}(P_{t,\mathrm{eb}}-P_{\mathrm{eb}}^{\min})) \quad \text{(A10)}$$

式中：$r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{u}}$、$r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{d}}$ 分别为电锅炉的爬、滑坡率；$P_{\mathrm{eb}}^{\max}$ 和 $P_{\mathrm{eb}}^{\min}$ 分别为电锅炉的出力上、下限。

6）ES 的运行灵活性供给能力

ES 的运行灵活性供给能力与其当前充放电运行状态、功率大小以及储电量状态相关。ES 可在上调运行灵活性需求高峰时段通过放电为电力子系统提供上调运行灵活性，类似地可在下调运行灵活性需求高峰时段通过充电为电力子系统提供下调运行灵活性。ES 的灵活性供给能力可由下述式子表述。

$$\begin{cases}P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{pu,es}}=\min((E_{t,\mathrm{es}}-\underline{E}_{\mathrm{es}})/(\eta_{\mathrm{es}}\Delta T),\bar{P}_{\mathrm{es}}^{\mathrm{dis}}-P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{dis}})\\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{pd,es}}=\min((\bar{E}_{\mathrm{es}}-E_{t,\mathrm{es}})\eta_{\mathrm{es}}/\Delta T,\bar{P}_{\mathrm{es}}^{\mathrm{cha}}+P_{t,\mathrm{es}}^{\mathrm{cha}})\end{cases} \quad \text{(A11)}$$

式中：$E_{t,\mathrm{es}}$ 为 ES 设备在时段 t 的储电容量；$\bar{E}_{\mathrm{es}}$、$\underline{E}_{\mathrm{es}}$ 分别为 ES 设备的储电容量上、下限；$\bar{P}_{\mathrm{es}}^{\mathrm{cha}}$、$\bar{P}_{\mathrm{es}}^{\mathrm{dis}}$ 分别电储能设备的最大充、放电功率。

7）HS 的运行灵活性供给能力

与 ES 类似，HS 的运行灵活性供给能力与其当前充放热运行状态、功率大小以及储热量状态相关。HS 可通过放热为热力子系统提供上调运行灵活性，通过蓄热提供下调运行灵活性。HS 的灵活性供给能力可由下述式子表述。

$$\begin{cases}P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hu,hs}}=\min((H_{t,\mathrm{hs}}-\underline{H}_{\mathrm{hs}})/(\eta_{\mathrm{hs}}\Delta T),\bar{h}_{\mathrm{hs}}^{\mathrm{dis}}-h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{dis}})\eta_{\mathrm{h2p}}\\ P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{hd,hs}}=\min((\bar{H}_{\mathrm{hs}}-H_{t,\mathrm{hs}})\eta_{\mathrm{hs}}/\Delta T,\bar{h}_{\mathrm{hs}}^{\mathrm{cha}}+h_{t,\mathrm{hs}}^{\mathrm{cha}})\eta_{\mathrm{h2p}}\end{cases} \quad \text{(A12)}$$

式中：$\bar{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{cha}}$、$\bar{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{dis}}$ 分别为 HS 设备的储热、放热功率上限；$\bar{H}_{\mathrm{tst}}$、$\underline{H}_{\mathrm{tst}}$ 分别为HS 设备的储热容量上、下限。

8）运行灵活性裕量

运行灵活性裕量可表示为在相同时段、同一方向的运行灵活性供给与需求的差值，具体的具体计算公式如下:

$$\begin{cases}P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{u}}=P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}-P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}}\\ P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{d}}=P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}-P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}}\end{cases} \quad \text{(A13)}$$

式中：$P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{u}}$ 和 $P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{d}}$ 分别为在时段 t 的 PIES 上调运行灵活性裕量和下调运行灵活性裕量。

当 $P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{u}}\geq 0$ 时表示在时段 t 的 PIES 上调运行灵活性充裕；反之则表示该时段的 PIES 上调运行灵活性不足，即存在上调运行灵活性缺额。下调运行灵活性情况与上调类似，不再赘述。运行灵活性缺额的计算如下式：

$$\begin{cases}P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{u}}=\left|P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{u}}\right|,P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{u}}\leq 0\\ P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{d}}=\left|P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{d}}\right|,P_{t,\mathrm{fm}}^{\mathrm{d}}\leq 0\end{cases} \quad \text{(A14)}$$

式中：$P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{u}}$ 和 $P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{d}}$ 分别为系统在时段 t 的 PIES 上调、下调运行灵活性缺额。

9）运行灵活性不足风险成本

在 PIES 随机优化调度中，为度量运行灵活性不足给系统运行带来的风险成本大小，提出了两个运行灵活性不足风险评估指标，即上调运行灵活性不足风险成本和下调运行灵活性不足风险成本。

(1)上调运行灵活性不足风险成本

$$C^{\mathrm{u,lack}}=\sum_{t\in\mathcal{T}}c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{shed}}P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{u}} \quad \text{(A15)}$$

式中；$C^{\mathrm{u,lack}}$ 为系统在调度周期内的上调运行灵活性不足风险成本；$c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{shed}}$ 为出现上调运行灵活性不足而造成的切负荷风险惩罚系数。

(2)下调运行灵活性不足风险成本

$$C^{\mathrm{d,lack}}=\sum_{t\in\mathcal{T}}c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{curt}}P_{t,\mathrm{fv}}^{\mathrm{d}} \quad \text{(A16)}$$

式中；$C^{\mathrm{d,lack}}$ 为系统在调度周期内的下调运行灵活性不足条件风险成本；$c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{curt}}$ 为出现下调运行灵活性不足而造成的弃能风险惩罚系数。

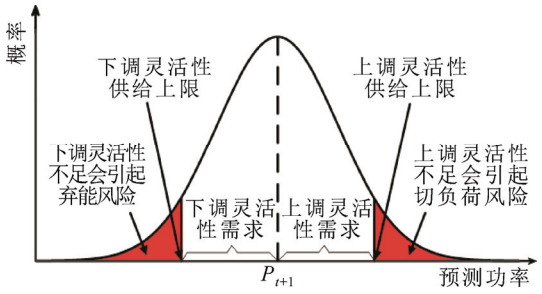


图 A3　PIES 运行灵活性需求、供给以及风险关系

Fig.A3　Relationship among flexibility demand, supply and risk of PIES

10）节点电压约束

$$U_{\min}^{i}\leq U_{t}^{i}\leq U_{\max}^{i} \quad \text{(A17)}$$

$$-\pi\leq\delta_{t}^{ij}\leq\pi \quad \text{(A18)}$$

式中：$U_{\min}^{i}$、$U_{\max}^{i}$ 分别为节点 i 上的电压幅值下限、上限值。

11）线路传输容量约束

$$-P_{l,\max}\leq P_{l,t}\leq P_{l,\max},\forall l\in L_{\mathrm{line}} \quad \text{(A19)}$$

式中：$P_{l,\max}$ 为线路 l 的传输容量极限；L_{line} 为电网线路集合。

12）购电功率约束

$$0\leq P_{t,\mathrm{gd}}^{i}\leq P_{t,\mathrm{gd}}^{i,\max} \quad \text{(A20)}$$

式中：$P_{t,\mathrm{gd}}^{i,\max}$ 为在节点 i 和时段 t 向上级电网的购电功率上限值。

13）弃电、切电负荷约束

$$0 \le P_{t,\mathrm{wp}}^{i,\mathrm{curt}} \le P_{t,\mathrm{wp}}^{i} \tag{A21}$$

$$0 \le P_{t,\mathrm{pv}}^{i,\mathrm{curt}} \le P_{t,\mathrm{pv}}^{i} \tag{A22}$$

$$0 \le P_{t,\mathrm{ld}}^{i,\mathrm{shed}} \le P_{t,\mathrm{ld}}^{i} \tag{A23}$$

14）机组发电出力约束

$$u_{t,\mathrm{gt}}^{i} P_{\mathrm{gt}}^{i,\min} \le P_{t,\mathrm{gt}}^{i} \le P_{\mathrm{gt}}^{i,\max} u_{t,\mathrm{gt}}^{i} \tag{A24}$$

$$P_{\mathrm{chp}}^{i,\min} \le P_{t,\mathrm{chp}}^{i} \le P_{\mathrm{chp}}^{i,\max} \tag{A25}$$

$$P_{\mathrm{eb}}^{i,\min} \le P_{t,\mathrm{eb}}^{i} \le P_{\mathrm{eb}}^{i,\max} \tag{A26}$$

式中：$P_{\mathrm{gt}}^{i,\max}$、$P_{\mathrm{gt}}^{i,\min}$、$P_{\mathrm{chp}}^{i,\max}$、$P_{\mathrm{chp}}^{i,\min}$、$P_{\mathrm{eb}}^{i,\max}$、$P_{\mathrm{eb}}^{i,\min}$分别为节点 i 上的 GT、CHP 以及 EB 的发电出力上、下限值。

15）机组灵活性爬、滑坡约束

$$-r_{\mathrm{gt}}^{i,\mathrm{d}} \le (P_{t,\mathrm{gt}}^{i} - P_{t-1,\mathrm{gt}}^{i}) / \Delta T \le r_{\mathrm{gt}}^{i,\mathrm{u}} \tag{A27}$$

$$-r_{\mathrm{chp}}^{i,\mathrm{d}} \le (P_{t,\mathrm{chp}}^{i} - P_{t-1,\mathrm{chp}}^{i}) / \Delta T \le r_{\mathrm{chp}}^{i,\mathrm{u}} \tag{A28}$$

$$-r_{\mathrm{eb}}^{i,\mathrm{d}} \le (P_{t,\mathrm{eb}}^{i} - P_{t-1,\mathrm{eb}}^{i}) / \Delta T \le r_{\mathrm{eb}}^{i,\mathrm{u}} \tag{A29}$$

式中：$r_{\mathrm{gt}}^{i,\mathrm{d}}$、$r_{\mathrm{gt}}^{i,\mathrm{u}}$、$r_{\mathrm{chp}}^{i,\mathrm{d}}$、$r_{\mathrm{chp}}^{i,\mathrm{u}}$、$r_{\mathrm{eb}}^{i,\mathrm{d}}$、$r_{\mathrm{eb}}^{i,\mathrm{u}}$分别为节点 i 上的 GT、CHP 以及 EB 的爬、滑坡率。

16）机组最小启停时间约束

$$(Z_{t-1,\mathrm{gt}}^{i} - T_{\mathrm{on,gt}}^{i})(u_{t-1,\mathrm{gt}}^{i} - u_{t,\mathrm{gt}}^{i}) \ge 0, \forall i \in I_{\mathrm{bus}} \tag{A30}$$

$$(T_{\mathrm{off,gt}}^{i} - Z_{t-1,\mathrm{gt}}^{i})(u_{t,\mathrm{gt}}^{i} - u_{t-1,\mathrm{gt}}^{i}) \ge 0, \forall i \in I_{\mathrm{bus}} \tag{A31}$$

式中：$Z_{t-1,\mathrm{gt}}^{i}$为在节点 i 的 GT 在时段 $t-1$ 的持续开机或关机小时数状态，正数为开机状态，负数为关机状态；$T_{\mathrm{on,gt}}^{i}$、$T_{\mathrm{off,gt}}^{i}$为在节点 i 的 GT 的最小开机、关机时间。

17）机组启停动作约束

$$v_{t,\mathrm{gt}}^{i} \ge u_{t,\mathrm{gt}}^{i} - u_{t-1,\mathrm{gt}}^{i} \tag{A32}$$

$$w_{t,\mathrm{gt}}^{i} \ge -u_{t,\mathrm{gt}}^{i} + u_{t-1,\mathrm{gt}}^{i} \tag{A33}$$

$$v_{t,\mathrm{gt}}^{i}, w_{t,\mathrm{gt}}^{i}, u_{t,\mathrm{gt}}^{i} \in \{0,1\} \tag{A34}$$

18）电储能运行约束

$$0 \le P_{t,\mathrm{es}}^{i,\mathrm{cha}} \le \overline{P}_{\mathrm{es}}^{i,\mathrm{cha}} \tag{A35}$$

$$0 \le P_{t,\mathrm{es}}^{i,\mathrm{dis}} \le \overline{P}_{\mathrm{es}}^{i,\mathrm{dis}} \tag{A36}$$

$$P_{t,\mathrm{es}}^{i,\mathrm{cha}} \cdot P_{t,\mathrm{es}}^{i,\mathrm{dis}} = 0 \tag{A37}$$

$$\underline{R}_{\mathrm{es}}^{i} \le R_{t,\mathrm{es}}^{i} \le \overline{R}_{\mathrm{es}}^{i} \tag{A38}$$

$$R_{1,\mathrm{es}}^{i} = R_{T+1,\mathrm{es}}^{i} \tag{A39}$$

式中：$\overline{P}_{\mathrm{es}}^{i,\mathrm{cha}}$、$\overline{P}_{\mathrm{es}}^{i,\mathrm{dis}}$分别为节点 i 上的 ES 设备的最大充、放电功率；$\overline{R}_{\mathrm{es}}^{i}$、$\underline{R}_{\mathrm{es}}^{i}$分别为节点 i 上的 ES 设备的储电容量上、下限；T 为调度周期的最后一个时段。

19）热源侧的功率−温度关系约束

$$h_{t,s} = c_w m_t^v \left(\tau_{t,s}^{k} - \tau_{t,r}^{k}\right), v \in \Phi_p^{k+} \tag{A40}$$

式中：r 为热网的回水侧；c_w 为水的比热容；m_t^v 为管道 v 在时段 t 的流体流量；$\tau_{t,s}^{k}$、$\tau_{t,r}^{k}$ 分别为节点 k 在时段 t 的进水侧和回水侧温度；Φ_p^{k+} 为流入节点 k 的管道集合。

20）热负荷侧的功率约束

$$h_{t,\mathrm{ld}}^{k} - h_{t,\mathrm{ld}}^{k,\mathrm{shed}} = c_w m_t^v \left(\tau_{t,\mathrm{s}}^{k} - \tau_{t,\mathrm{r}}^{k}\right), \forall k \in \Phi_{\mathrm{ln}}, v \in \Phi_p^{k-} \tag{A41}$$

式中：$h_{t,\mathrm{ld}}^{k,\mathrm{shed}}$分别为在节点 k 和时段 t 的切热负荷值；Φ_{ln}为热网的荷节点集合；Φ_p^{k-}为流出节点 k 的管道集合。

21）热网管道流体流量上、下限约束

$$0 \le m_t^v \le \overline{m}^v \tag{A42}$$

式中：$\overline{m}^v$为热网管道流体流量的上限值。

22）热网管道流体流量平衡约束

$$\sum_{v \in \Phi_p^{k+}} m_t^v = \sum_{q \in \Phi_p^{k-}} m_t^q \tag{A43}$$

23）弃热、切热负荷约束

$$0 \le h_t^{i,\mathrm{curt}} \le h_{t,\mathrm{chp}}^{i} + h_{t,\mathrm{eb}}^{i} \tag{A44}$$

$$0 \le h_{t,\mathrm{ld}}^{k,\mathrm{shed}} \le h_{t,\mathrm{ld}}^{k} \tag{A45}$$

24）热网管道温度上、下限约束

$$\underline{\tau}_x \le \tau_{t,x,in}^{v} \le \overline{\tau}_x, x \in \{s,r\}, v \in \Phi_p \tag{A46}$$

$$\underline{\tau}_x \le \tau_{t,x,out}^{v} \le \overline{\tau}_x, x \in \{s,r\}, v \in \Phi_p \tag{A47}$$

式中：$\overline{\tau}_x$、$\underline{\tau}_x$分别为热网管道温度的上、下限；$\tau_{t,x,in}^{v}$、$\tau_{t,x,out}^{v}$分别为在时段 t 的 x 侧管道 v 流入和流出温度；Φ_p为热网管道集合。

25）热网管道温度混合约束

$$\sum_{v \in \Phi_p^{k+}} m_t^v \left(\tau_{t,x,in}^{v} - \tau_{t,x,out}^{v} \mid_{\forall v \in \Phi_p^{k-}}\right) = 0, k \in \Phi_{in} \tag{A48}$$

式中：Φ_{in}为热网的交叉节点集合。

26）热网管道温度损耗约束

$$\tau_{t,x,out}^{v} = \left(\tau_{t,x,in}^{v} - \tau_t^{amb}\right) e^{-\frac{\lambda L}{c_w m_t^v}} + \tau_t^{amb} \tag{A49}$$

式中：λ、L 分别为管道 p 的换热系数和长度。

27）热储能运行约束

$$0 \le h_{t,\mathrm{hs}}^{k,\mathrm{cha}} \le \overline{h}_{\mathrm{hs}}^{\mathrm{cha}} \tag{A50}$$

$$0 \le h_{t,\mathrm{hs}}^{k,\mathrm{dis}} \le \overline{h}_{\mathrm{hs}}^{\mathrm{dis}} \tag{A51}$$

$$h_{t,\mathrm{hs}}^{k,\mathrm{cha}} \cdot h_{t,\mathrm{hs}}^{k,\mathrm{dis}} = 0 \tag{A52}$$

$$\underline{H}_{\mathrm{hs}}^{k} \le H_{t,\mathrm{hs}}^{k} \le \overline{H}_{\mathrm{hs}}^{k} \tag{A53}$$

$$H_{1,\mathrm{hs}}^{k} = H_{T+1,\mathrm{hs}}^{k} \tag{A54}$$

式中：$\overline{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{cha}}$、$\overline{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{dis}}$分别为热网节点 k 的 HS 设备的储热、放热功率上限；$\overline{H}_{\mathrm{tst}}^{k}$、$\underline{H}_{\mathrm{tst}}^{k}$分别为热网节点 k

的 HS 设备的储热容量上、下限。

28）上调运行灵活性供需平衡风险约束

$$\min_{l^{\mathrm{u}}}(l^{\mathrm{u}} \mid \mathrm{Prob}(P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}} \le l^{\mathrm{u}}) \ge \theta) = \eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}} \quad \text{(A55)}$$

$$E((P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}) \mid (P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}) \ge \eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}) \le \phi_{t,\mathrm{loss}}^{\mathrm{u}} \quad \text{(A56)}$$

式中：l^{u} 为系统因上调运行灵活性不足而造成的运行灵活性缺额阈值；$\mathrm{Prob}(P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{u}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}} \le l^{\mathrm{u}})$ 为系统上调运行灵活性缺额阈值内的概；$\eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{u}}$ 为系统上调运行灵活性不足的风险价值(即，在给定置信水平 θ 条件下，上调运行灵活性缺额边界值)。

29）下调运行灵活性供需平衡风险约束

$$\min_{l^{\mathrm{d}}}(l^{\mathrm{d}} \mid \mathrm{Prob}(P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}} \le l^{\mathrm{d}}) \ge \theta) = \eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}} \quad \text{(A57)}$$

$$E((P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}) \mid (P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}) \ge \eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}) \le \phi_{t,\mathrm{loss}}^{\mathrm{d}} \quad \text{(A58)}$$

式中：l^{d} 为系统因下调运行灵活性不足而造成的运行灵活性缺额阈值；$\mathrm{Prob}(P_{t,\mathrm{fd}}^{\mathrm{d}} - P_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}} \le l^{\mathrm{d}})$ 为系统下调运行灵活性缺额阈值内的概率；$\eta_{t,\mathrm{fs}}^{\mathrm{d}}$ 为系统下调运行灵活性不足的风险价值。

附录 B

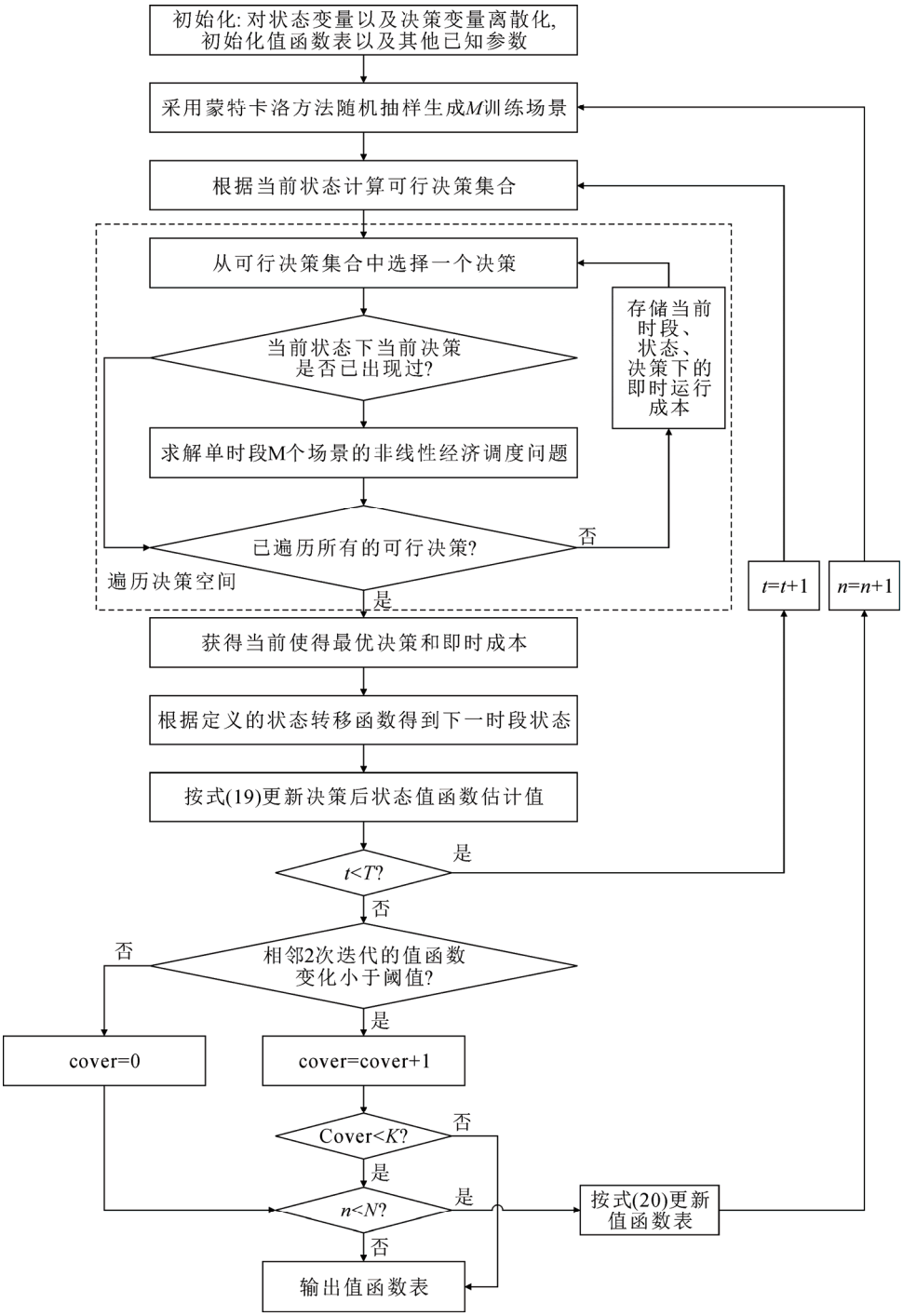


图 B1　所提算法的离线训练流程图

Fig.B1　Offline training flow chart of the proposed algorithm

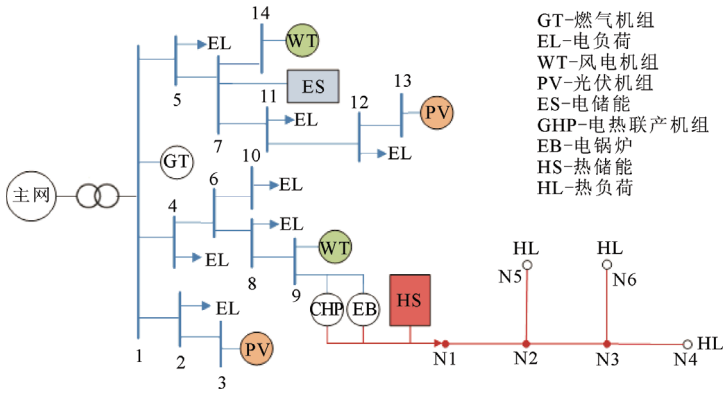


图 B2　园区综合能源测试系统结构图

Fig. B2　Diagram of 14+6 PIES

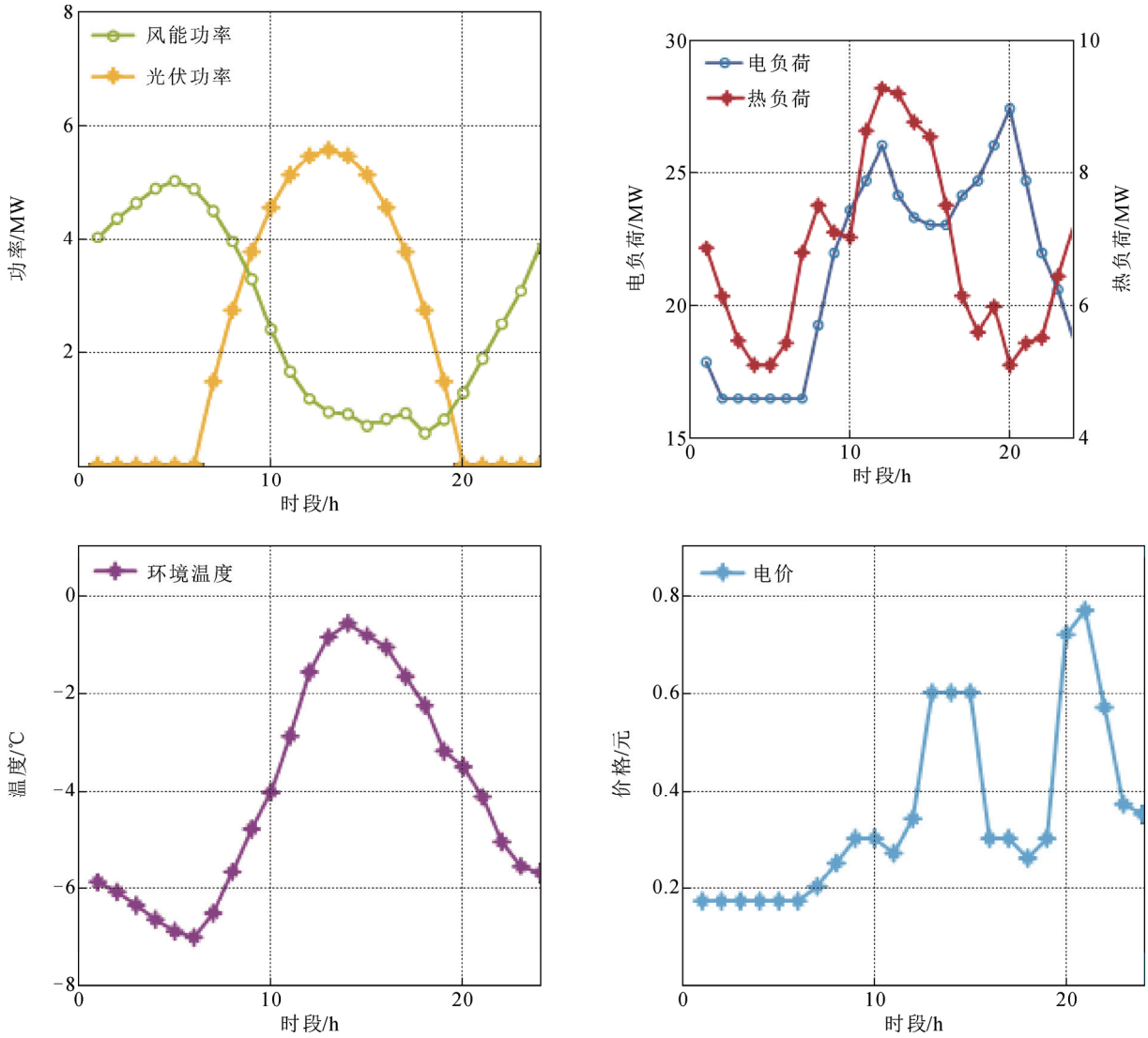


图 B3　测试系统的预测曲线

Fig.B3　Forecast data of the test system

表 B1　运行成本系数参数

Table B1　Parameters of the operation cost

参数名称	c_{tg} /元	γ_{SUtg} /元	γ_{SDtg} /元	a_{chp} /(元·kW^{-2})	b_{chp} /(元·kW^{-2})	c_{chp} /(元·kW^{-2})	d_{chp} /(元·kW^{-1})
数值	3.65	500	500	9.32×10^{-6}	1.78×10^{-7}	2.55×10^{-6}	0.03
参数名称	e_{chp} /(元·kW^{-1})	f_{chp} /元	c_{eb} /元	c_{bt} /元	c_{tst} /元	$c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{shed}}$ /(元·kW^{-1})	$c_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{curt}}$ /(元·kW^{-1})
数值	9.82×10^{-3}	3.65	4.35	0.25	0.3	300	200

表 B2　运行设备参数

Table B2　Parameters of the operation equipment

参数名称	$P_{\mathrm{tg}}^{\min}$ /MW	$P_{\mathrm{tg}}^{\max}$ /MW	$P_{\mathrm{chp}}^{\min}$ /MW	$P_{\mathrm{chp}}^{\max}$ /MW	$P_{\mathrm{eb}}^{\min}$ /MW	$P_{\mathrm{eb}}^{\max}$ /MW
数值	0	8	0	5	0	6
参数名称	$\overline{P}_{\mathrm{bt}}^{\mathrm{cha}}$ /MW	$\overline{P}_{\mathrm{bt}}^{\mathrm{dis}}$ /MW	$\overline{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{cha}}$ /MW	$\overline{h}_{\mathrm{tst}}^{\mathrm{dis}}$ /MW	$\underline{E}_{\mathrm{bt}}$ /MWh	$\overline{E}_{\mathrm{bt}}$ /MWh
数值	5	5	2	2	10	10
参数名称	$\underline{H}_{\mathrm{tst}}$ /MWh	$\overline{H}_{\mathrm{tst}}$ /MWh	$r_{\mathrm{tg}}^{\mathrm{u}}$ /MW	$r_{\mathrm{tg}}^{\mathrm{d}}$ /MW	$r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{u}}$ /MW	$r_{\mathrm{chp}}^{\mathrm{d}}$ /MW
数值	0	4	8	8	5	5
参数名称	$r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{u}}$ /MW	$r_{\mathrm{eb}}^{\mathrm{d}}$ /MW	$P_{\mathrm{gd}}^{\max}$ /MW	$P_{l,\max}$ /MW	$T_{\mathrm{on,tg}}$ /h	$T_{\mathrm{off,tg}}$ /h
数值	6	6	10	10	1	1
参数名称	$\underline{\tau}_{\mathrm{s}}$ /℃	$\overline{\tau}_{\mathrm{s}}$ /℃	$\underline{\tau}_{\mathrm{r}}$ /℃	$\overline{\tau}_{\mathrm{r}}$ /℃	λ	η_{h2p}
数值	80	100	60	80	0.75	0.85
参数名称	η_{bt}	η_{tst}	η_{eb}	η_{hr}	η_{chp}	η_{loss}
数值	0.9	0.9	0.75	0.9	0.3	0.3