

计及配电网灵活性的多园区综合能源系统分布式优化调度

陈剑飞, 李珂[†], 蒋超, 张承慧

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250000)

摘要: 多园区综合能源系统与配电网的交互方式决定多能潮流分布和能量传输损耗, 进而将直接影响整个系统的优化运行. 本文提出了一种计及多园区综合能源系统与配电网之间接入影响的分布式协同优化调度方案. 首先, 提出一种包含综合能源系统及配电网的双层分布式优化系统架构. 然后, 以各园区综合能源系统用能成本最低、配电网网损最小为目标, 以能源园区接入配电网的位置及配电网网络拓扑为调控手段给出协同优化模型, 并通过改进自适应步长交替方向乘法实现问题分布式求解, 实现了系统的整体高效调度, 提升了配电网灵活性及园区综合能源系统运行经济性. 最后, 通过仿真算例验证了本文所提方法的准确性及有效性.

关键词: 综合能源系统; 能源集线器; 分布式优化; 配电网重构; 信息物理系统

引用格式: 陈剑飞, 李珂, 蒋超, 等. 计及配电网灵活性的多园区综合能源系统分布式优化调度. 控制理论与应用, 2022, 39(10): 1898 – 1906

DOI: 10.7641/CTA.2022.10927

Distributed optimal dispatching of multiple park integrated energy system considering the flexibility of distribution network

CHEN Jian-fei, LI Ke[†], JIANG Chao, ZHANG Cheng-hui

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: The interaction between multiple park integrated energy system (PIES) and distribution network determines the multi energy power flow distribution and energy loss, which will directly affects the optimal operation of the whole system. This paper proposes a distributed collaborative optimization scheduling scheme that takes into account the impact of the access between the multiple park integrated energy system and the distribution network. Firstly, a bi-level distributed optimal system architecture including integrated energy system and distribution network is proposed. Then, the location of the PIES connecting to the distribution network and the distribution network topology are given as control methods to get collaborative optimization model, and the goal is to minimize the energy cost of the integrated energy system of each PIES and minimize the loss of the distribution network. By improving the alternating direction method of multipliers with dynamic step size, the distributed solution of the problem is realized. The overall efficient dispatch of the system is realized, the flexibility of the distribution network and the operation economy of the PIES are improved. Finally, a case study verifies the accuracy and effectiveness of the method proposed in this paper.

Key words: integrated energy system; energy concentrator; distributed optimization; distribution network reconfiguration; cyber physical system

Citation: CHEN Jianfei, LI Ke, JIANG Chao, et al. Distributed optimal dispatching of multiple park integrated energy system considering the flexibility of distribution network. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(10): 1898 – 1906

1 引言

近年来, 随着世界各国社会经济高速发展, 各类化石能源大量消耗, 随之带来的气候变化问题日益凸显. 为了积极应对气候变化, 改变传统能源建设路径, 推

动能源生产和消费革命势在必行^[1]. 综合能源系统(integrated energy systems, IES)通过多能协同、互补互济的方式提高了能源利用效率, 是推动减污降碳协同增效, 实现能源转型的重要途径. 随着IES的发展, 一

收稿日期: 2021-09-29; 录用日期: 2022-02-24.

[†]通信作者. E-mail: like@sdu.edu.cn; Tel.: +86 531-88392906.

本文责任编辑: 朱善迎.

国家自然科学基金项目(62133008, 61821004, 61733010), 山东省重大基础研究项目(ZR2019ZD09), 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010901), 济南市高校创新团队项目(2019GXRC003)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62133008, 61821004, 61733010), the Major Fundamental Research Program of the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2019ZD09), the Major Science and Technology Innovation Program of Shandong Province (2019JZZY010901), and the Innovation Team Project of Jinan Science and Technology Bureau (2019GXRC003).

些IES相互连接并构成了一个集成的多能互补互济的能源网络,即多园区综合能源系统(multiple park integrated energy system, MPIES),进一步增强了不同园区间各类能源的互济和协同转化^[2]。

对于园区综合能源系统的优化调度问题,目前已开展较多研究.文献[3]利用非线性问题处理办法将园区综合能源系统优化调度问题进行转化求解,实现了建设运行总成本的优化;文献[4]建立了智能园区平台调度中心,实现了园区利益最大化;文献[5-6]采用了集中式优化方法解决了综合能源系统内考虑供给侧和需求侧的协同优化问题,实现了多能源互补互济,降低了系统运行成本.上述研究多使用集中式优化方法进行求解,通信成本高,且忽略了各主体之间的信息壁垒,而分布式优化凭借其所需通信数据量少、信息隐私性强的特性可以更好地贴合综合能源系统的发展方向.文献[7]提出了一种用于综合能源系统优化运行的分散式调度方法,通过引入多个耦合环节作为一致性变量,根据各子系统之间的物理相互作用对系统的最优运行问题解耦,使原模型可以求解.文献[8]构建了含多个EH的综合能源系统的典型架构,基于交替方向乘子的分布式优化方法,提出计及碳排放的多主体运营的IES经济调度模型并验证了分布式算法与集中式算法的一致性.文献[9]以能源枢纽作为分布式决策者,考虑电力供热和天然气能源网络的产生、输送和消费的协同相互作用,提出仅需相邻交互信息的完全分布ADMM方法对系统进行经济性优化.文献[10]提出一种多智能体框架,并基于一致性理论设计了分布式优化算法,用于解决能源互联网的能源管理问题.文献[11]提出一种基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度方法,在保证各微电网隐私的情况下,仅需提供“期望交换功率”,即可通过交互迭代实现互联系统的最优调度.文献[12]提出了一种基于个体的分布式并行方法,用于考虑异构结构的综合能源系统的运行优化,并与集中式方法的优化结果进行了比较,验证了该算法的准确性.上述研究中采用了不同算法思路解决了多园区综合能源系统之间的协同优化问题,各主体通过交互必要信息便能实现整个系统的分布式优化调度,但其未考虑多园区综合能源系统接入配电网这一主体后彼此之间的交互影响,无法实现配电网与MPIES间的协同优化调度.

电力是MPIES中一种重要能源,而配电网更是系统中电力供应的关键一环,通过与园区综合能源系统的互动有助于提高多能源综合利用能力^[13].而园区与配电网大多亦分属不同主体,彼此之间的信息及能量交互问题亦制约着各主体的经济可靠运行.在现有研究中,文献[14]将配电系统可重构网络拓扑作为控制变量集成到最优混合潮流算法中,进一步降低了综合能源系统的运行成本;文献[15]同时考虑微能源网日

运行费用和配电网综合满意度建立重复博弈优化模型,并求解实现了系统协同经济运行;文献[16]考虑配电网信息物理耦合关系,以失负荷量最少为优化目标进行网络重构,并在确定的网络拓扑结构上对电-气综合能源系统经济性优化;文献[17]采用级联分析法优化了园区内部设备处理,协调了配网-园区联络线功率兼顾了网络安全性和运行经济性.上述文献较少考虑园区间的能量交互对配网运行状态的影响,大多分别对园区和配网问题进行求解缺少整体求解方法,且随着园区所需配网供电电量的增加,其在配网中接入节点位置的选择亦影响了配网的运行状态.

针对上述问题,本文综合考虑园区综合能源系统与配网的交互影响、配网网络拓扑,建立双层配电网-综合能源系统协同优化框架.园区综合能源系统调度层协调优化调度多园区的设备出力及园区间的能量交互;园区-配网调度层给出园区及配网的运行策略及园区在配网中的接入方案实现园区综合能源系统的经济性并兼顾配网的灵活稳定运行.针对该框架,采用基于交替方向乘子法的分布式算法对其求解,两层优化调度内各主体间仅需交互部分必要信息便可实现整体协调优化.

2 系统架构及建模

实际运行中,多园区综合能源系统与配电网的管理通常分属不同运营主体,且各个园区也大多分属不同管理主体,彼此之间存在信息壁垒.同时各园区通过彼此互联的方式实现各种能量的互补互济,而本着各园区经济性最优以及能量供需平衡的原则,其交互的能量以及从电网购置电量受到大电网电价的影响.同时配电网的潮流分布状态受其各个节点接入负荷的大小影响,具体来说在进行最优潮流计算时,各个园区接入电网的位置将直接影响电网内某些节点的电力负荷,进而影响配电网的全网网损.

综合考虑上述因素,本文提出如下配电网-综合能源系统双层分布式优化系统架构.其中各个园区之间通过电力联络线及热力联络线实现能量互联互通,通过信息交互服务器进行信息交互来达到各园区最优运行目标,而各园区与配电网之间通过电量配额调度中心与配电网交互必要的信息用以最优运行方案的制定,实现双层分布式优化调度.双层分布式优化结构图如图1所示.

2.1 配电网模型

文中配电网潮流模型,采用二阶锥规划(SOCP)方法建立模型^[18]

$$\tilde{V}_j = \tilde{V}_i - 2(P_{ij}r_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\tilde{I}_{ij}, \quad (1)$$

$$p_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - \tilde{I}_{ij}r_{ij}) + g_j\tilde{V}_j, \quad (2)$$

$$q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in n(j)} (Q_{ij} - \tilde{I}_{ij} x_{ij}) + b_j \tilde{V}_j, \quad (3)$$

$$\tilde{I}_{ij} \tilde{V}_i \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \Leftrightarrow \left\| \begin{array}{c} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_{ij} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_i, \quad (4)$$

式中: \tilde{V}_i 为节点 i 电压幅值的平方; \tilde{I}_{ij} 为线路 ij 电流幅值的平方; P_{ij}, Q_{ij} 分别为线路 ij 上有功功率和无功功率; r_{ij}, x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗; p_j, q_j 分别为节点 j 注入的有功功率和无功功率; P_{jk}, Q_{jk} 分别为与节点 j 相连的节点 k 他们之间线路 jk 上有功功率和无功功率; g_j, b_j 分别为节点 j 的电导和电纳. 同时还应满足以下通用约束:

节点电压约束:

$$\underline{V}_j^2 \leq \tilde{V}_j \leq \bar{V}_j^2, \quad (5)$$

支路电流约束:

$$\underline{I}_{ij}^2 \leq \tilde{I}_{ij} \leq \bar{I}_{ij}^2, \quad (6)$$

式中: $\bar{V}_j, \underline{V}_j$ 分别为节点 j 电压幅值的上下限; $\bar{I}_{ij}, \underline{I}_{ij}$ 分别为线路 ij 电流幅值的上下限.

配电网中通过联络开关和分段开关的开关来进行配电网网络重构, 而网络重构的过程中为了减小短路电流应保持配电网仍为辐射状网络, 并且应防止零注入孤立节点的存在保证网络的连通性与有效性^[19-20], 因此在潮流模型基础上应添加如下约束:

辐射状网络约束:

$$\begin{cases} \sum_{ij \in \Phi_l} z_{ij} = n_l - n_s, \\ z_{ij} \in \{0, 1\}, \forall ij \in \Phi_l, \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_l 为网络节点总数; n_s 为根结点数; z_{ij} 为 0-1 变量用以表征线路 ij 的通断状态, 0 表示断开, 1 表示连通, Φ_l 为配电网中所有线路集合.

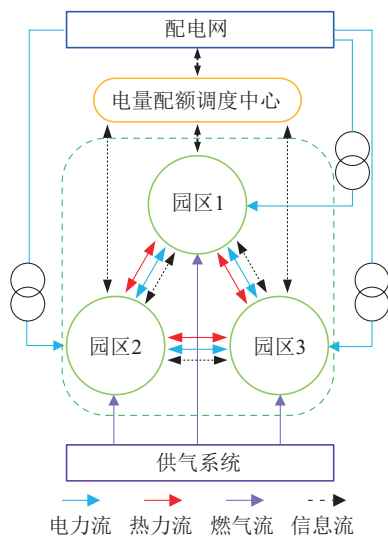


图1 整体系统结构

Fig. 1 The overall structure of the system

2.2 园区综合能源系统模型

园区综合能源系统内部包含风电等分布式能源, 燃气锅炉、电制冷机组等单一供能设备, CHP机组、吸收式制冷机组等能量耦合设备, 以及电储能与热储能系统, 如图2所示.

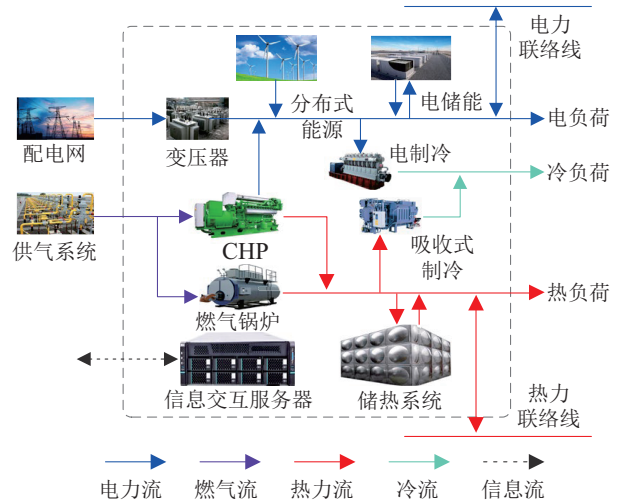


图2 园区综合能源系统结构

Fig. 2 The structure of park integrated energy system

本文采用能源集线器模型描述园区内部各种能量转换关系, 搭建园区综合能源系统模型

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \\ L_c \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} \eta_T & \eta_{gee} & 0 \\ 0 & \eta_{geh} & \eta_{gh} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_C \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ P_{ge} \\ P_{gh} \end{bmatrix}_P + \begin{bmatrix} P_{echar} - P_{edis} \\ P_{hchar} - P_{hdis} \\ 0 \end{bmatrix}_S + \begin{bmatrix} P_{PVe} \\ P_{PVh} \\ 0 \end{bmatrix}_R + \begin{bmatrix} -P_{ei} \\ -P_{hi} \\ P_{eic} + P_{hic} \end{bmatrix}_W + \begin{bmatrix} P_{exe} \\ P_{exh} \\ 0 \end{bmatrix}_{EX}, \quad (8)$$

式中: L_e, L_h 和 L_c 分别为电负荷、热负荷、冷负荷; $\eta_T, \eta_{gee}, \eta_{geh}, \eta_{gh}$ 分别为变压器效率、CHP机组产电效率、CHP机组产热效率、燃气锅炉效率; P_e, P_{ge}, P_{gh} 分别为购电量、CHP机组耗气量、燃气锅炉耗气量; $P_{echar}, P_{edis}, P_{hchar}, P_{hdis}$ 分别为电储能系统充放电功率、热储能系统充放电功率; P_{PVe}, P_{PVh} 分别为分布式能源发电、发热功率; P_{eic} 为电制冷机组耗电功率, P_{hic} 为吸收式制冷机组消耗热功率; P_{eic}, P_{hic} 分别为电制冷机组和吸收式制冷机组产冷功率; P_{exe}, P_{exh} 为流入园区的电功率、热功率.

对单个园区内的储能过程描述:

$$S_{e,t+1} = S_{e,t} \cdot \delta_e + P_{echar,t} \cdot \eta_{echar} \cdot \Delta t -$$

$$P_{edis,t}/\eta_{edis} \cdot \Delta t, \quad (9)$$

$$S_{h,t+1} = S_{h,t} \cdot \delta_h + P_{hchar,t} \cdot \eta_{hchar} \cdot \Delta t -$$

$$P_{hdis,t}/\eta_{hdis} \cdot \Delta t. \quad (10)$$

同时还应保证储能的起始状态保持一致:

$$S_{e,t_0} = S_{e,t_e}, \quad (11)$$

$$S_{h,t_0} = S_{h,t_e}, \quad (12)$$

式中: $S_{*,t}$ 为储能设备在 t 时刻的储能状态, δ_* 为静态储能效率, $P_{*char,t}$, $P_{*dis,t}$ 分别为 t 时刻充能与释能的功率, η_{*char}^i , η_{*dis}^i 分别为充能与释能的能量效率, t_0 , t_e 分别为起始时刻和终止时刻。

为保证系统内各设备安全运行, 还应满足如下约束:

供能设备容量约束:

$$\underline{P}_{chp} \leq P_{chp} \leq \bar{P}_{chp}, \quad (13)$$

$$\underline{P}_{qg} \leq P_{qg} \leq \bar{P}_{qg}, \quad (14)$$

$$\underline{P}_{eic} \leq P_{eic} \leq \bar{P}_{eic}, \quad (15)$$

$$\underline{P}_{hic} \leq P_{hic} \leq \bar{P}_{hic}, \quad (16)$$

式中: P_{chp} , P_{qg} 分别为 CHP 机组和燃气锅炉的燃气功率; \bar{P}_* , \underline{P}_* 分别为各设备功率的上下限。

储能设备容量约束

$$0 \leq P_{echar} \leq \bar{P}_{echar}, \quad (17)$$

$$0 \leq P_{edis} \leq \bar{P}_{edis}, \quad (18)$$

$$0 \leq P_{hchar} \leq \bar{P}_{hchar}, \quad (19)$$

$$0 \leq P_{hdis} \leq \bar{P}_{hdis}, \quad (20)$$

$$\underline{S}_e \leq S_{e,t} \leq \bar{S}_e, \quad (21)$$

$$\underline{S}_h \leq S_{h,t} \leq \bar{S}_h, \quad (22)$$

式中: \bar{S}_* , \underline{S}_* 分别为储能设备储能状态的上下限。

各个园区之间通过电力联络线及热力联络线进行互联, 为了系统稳定运行应保证园区之间交互的各种能量达到平衡, 对于系统内的园区 i 有

$$\sum_{j=1}^{j \in \Omega} P_{exe,ij} = 0, \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^{j \in \Omega} P_{exh,ij} = 0, \quad (24)$$

$$\underline{P}_{exe} \leq P_{exe} \leq \bar{P}_{exe}, \quad (25)$$

$$\underline{P}_{exh} \leq P_{exh} \leq \bar{P}_{exh}, \quad (26)$$

式中: Ω 为与园区 i 互联的园区的集合; $P_{exe,ij}$, $P_{exh,ij}$ 分别为园区 j 与园区 i 交互的电功率、热功率。

3 问题求解

3.1 目标函数

多个互联园区以运行成本最低为优化目标, 建立系统经济运行目标函数。各园区综合能源系统的运行

成本包括从配电网购电成本, 购气成本以及园区内部各类设备的运行维护成本, 如式(27):

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i=1}^N f_i, \\ f_i = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N C_{*,t} \cdot P_{*,t}^i + \sum_{j \in M} C_{om,t}^j \cdot P_t^{i,j} \right), \end{cases} \quad (27)$$

式中: $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 为园区的个数, $C_{*,t}$ 为 t 时刻各类能源价格, $C_{om,t}^j$ 为 j 设备在 t 时刻的运维成本。

上层配电网部分以配电网全天运行网络网损最小为优化目标, 建立目标函数, 如式(28):

$$G(x_n, x_l) = \sum_{m=1}^T \sum_{n=1}^{n_l} R(x_n, x_l)_n \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2}, \quad (28)$$

式中: x_n 为网络拓扑组合, x_l 为园区接入配电网位置组合, T 为时段总数, $R(x_n, x_l)_n$, P_n , Q_n , V_n 分别为线路 n 的电阻、流过的有功功率、无功功率以及线路 n 末端的节点电压。

本文所提的系统结构, 通过单个园区综合能源系统内部能量转化, 多个园区之间能量交互的运行模式, 实现了系统内的多能互补, 提高了系统运行经济性。同时, 电量配额调度中心根据各园区所需购电量, 给出配电网最优潮流运行方案。该优化问题可以表述为

$$\begin{cases} \min F + \alpha G, \\ \text{s.t.} \begin{cases} (1)-(3), (8)-(10), (23)-(24), \\ (4)-(6), (13)-(22), (25)-(26), \\ (7), (11)-(12), \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

式中 α 为网损成本系数。

3.2 基于交替方向乘子法的求解

3.2.1 交替方向乘子法标准形式

对于某些结构复杂且可能非凸, 非光滑的优化问题, 交替方向乘子法提供了一个适用范围广泛, 求解简易, 且可靠性较强的解决方案^[21]。其求解问题的标准形式如下:

$$\begin{cases} \min_{x_1, x_2} f_1(x_1) + f_2(x_2), \\ \text{s.t.} A_1 x_1 + A_2 x_2 = b, \end{cases} \quad (30)$$

式中: f_1 , f_2 为适当的闭凸函数, 但不要求光滑, $x_1 \in \mathbb{R}^n$, $x_2 \in \mathbb{R}^m$ 为优化变量; $A_1 \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $A_2 \in \mathbb{R}^{p \times m}$, $b \in \mathbb{R}^p$ 为等式约束参数。

下面给出式(30)的增广拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L_\rho(x_1, x_2, y) = & f_1(x_1) + f_2(x_2) + \\ & y^T (A_1 x_1 + A_2 x_2 - b) + \\ & \frac{\rho}{2} \|A_1 x_1 + A_2 x_2 - b\|_2^2, \end{aligned} \quad (31)$$

式中 $\rho > 0$ 是二次罚项的系数.

对上式中 x_1, x_2 交替求极小, 其迭代格式为

$$x_1^{k+1} = \arg \min_{x_1} L_\rho(x_1, x_2^k, y^k), \quad (32)$$

$$x_2^{k+1} = \arg \min_{x_2} L_\rho(x_1^{k+1}, x_2, y^k), \quad (33)$$

$$y^{k+1} = y^k + \tau \rho (A_1 x_1^{k+1} + A_2 x_2^{k+1} - b), \quad (34)$$

式中 ρ 为步长.

3.2.2 问题转化

对于上文构造的目标函数, 对其进行转化, 构建拉格朗日函数形式如下:

$$L = F + \alpha G + y_1^T (A_1 x + A_2 z - b_1) + \frac{\rho}{2} \|A_1 x + A_2 z - b_1\|_2^2 + y_2^T (A_3 x + A_4 z - b_2) + \frac{\rho}{2} \|A_3 x + A_4 z - b_2\|_2^2. \quad (35)$$

将上述式子解耦, 分别得到两个子系统用以求解, 其形式如下:

$$L_1 = F + y_1^T (A_1 x + A_2 z - b) + \frac{\rho}{2} \|A_1 x + A_2 z - b\|_2^2 + y_2^T (A_3 x + A_4 z - b_1) + \frac{\rho}{2} \|A_3 x + A_4 z - b_2\|_2^2, \quad (36)$$

$$L_2 = \alpha G + y_1^T (A_1 x + A_2 z - b) + \frac{\rho}{2} \|A_1 x + A_2 z - b\|_2^2 + y_2^T (A_3 x + A_4 z - b_1) + \frac{\rho}{2} \|A_3 x + A_4 z - b_2\|_2^2. \quad (37)$$

此时问题(29)已经解耦为多园区综合能源系统及配电系统两个子优化问题, 且多园区综合能源系统内可以继续解耦为每个园区综合能源系统的子优化问题, 使每个最优化问题计算量极小, 且通过交互部分必要信息便可以完成迭代求解, 实现整个系统的分布式优化.

3.2.3 收敛性判断

在问题求解过程中, 采用原始残差和收敛残差作为收敛标准

$$r^k = \|A_1 x_1^k + A_2 x_2^k - b\|_2, \quad (38)$$

$$s^k = \|\rho A_1^T A_2 (x_2^{k-1} - x_2^k)\|_2. \quad (39)$$

设置收敛条件为

$$r^k \leq \varepsilon_1, \quad (40)$$

$$s^k \leq \varepsilon_2, \quad (41)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为两个充分小的正数, 当同时满足上述两个收敛条件时, 原问题的求解已经收敛.

3.2.4 自适应步长调整

为了平衡原始残差和对偶残差的收敛速度, 引入自适应步长调节机制, 来加快算法整体收敛过程^[22]. 其基本思想是, 求解迭代过程中, 根据每一次的迭代的结果, 对惩罚因数进行动态调整, 其调整形式如式(42)所示:

$$\rho^k = \begin{cases} \rho^{k-1} (1 + \lg \frac{r^k}{s^k}), & \frac{r^k}{s^k} > 10, \\ \rho^{k-1}, & \text{其他}, \\ \rho^{k-1} / (1 + \lg \frac{r^k}{s^k}), & \frac{r^k}{s^k} < 10. \end{cases} \quad (42)$$

4 算例分析

本文采用改进IEEE33节点配电网系统、3个园区通过电力联络线和热力联络线进行能量交互组成的多园区综合能源系统以及供气系统搭建仿真算例, 具体结构如图3所示. 其中3个园区负荷分别为北方3个不同园区冬季典型负荷.

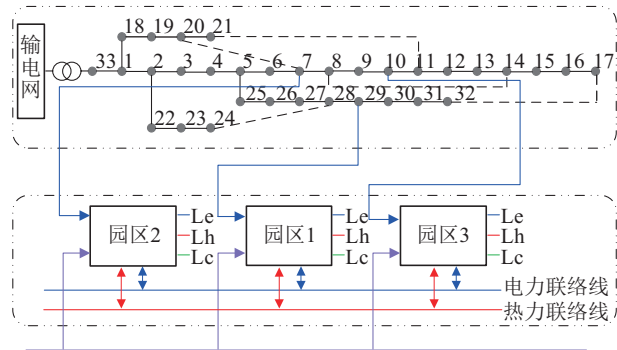


图3 算例示意图

Fig. 3 Diagram of case study

图4为配电网重构方案, 其中红线代表节点间联络开关闭合, 园区1, 2, 3分别接入29节点, 23节点, 10节点, 对原有的配电网进行重构既实现了全部负荷节点的有效连接又保证配电网全天网损最小.

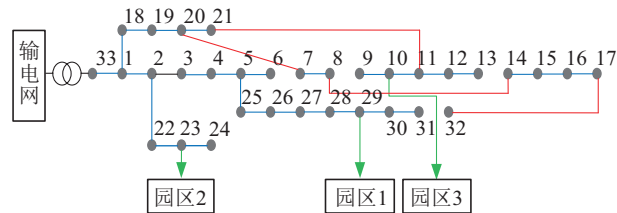


图4 配电网重构方案

Fig. 4 The scheme of distribution network reconfiguration

图5以优化得到的接入组合4的网损作为基准, 给出了其他接入组合配电网全天网损差值. 从图中可以看出, 组合4状态下配电网全天网损最小, 组合9相比于组合4全天网损差值最大.

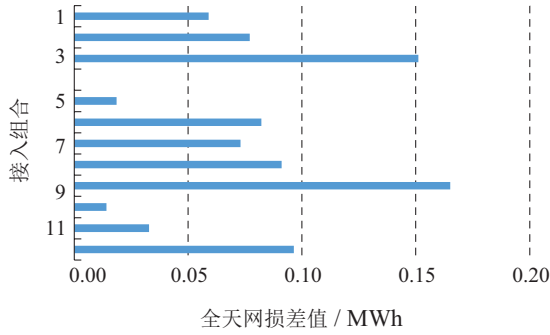


图 5 网损对比

Fig. 5 The comparison of network loss

在上述算例基础上,进一步对比了园区在配电网中接入方式对配电网的影响,其结果如图6所示,其中绿色点标注组合为配电网潮流不收敛组合,红色点标注为配电网网损最小组合.从图中可以看出若不考虑网络重构可能会导致园区接入配电网后,配电网潮流不收敛,而网络重构可以极大增强配电网的韧性.同时园区按照组合4的接入方式接入配电网无论是否网络重构都可以相对其他接入方式使得配电网网损更小.

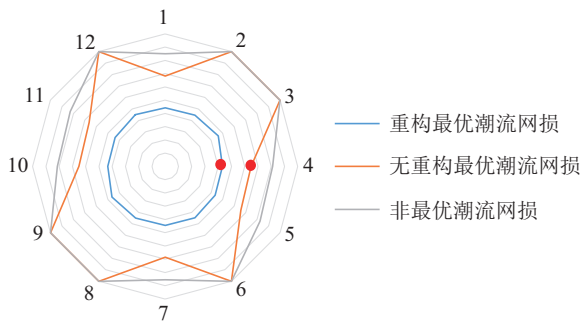
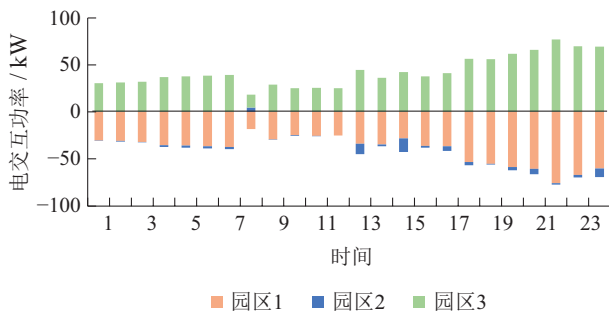


图 6 不同方法优化结果对比

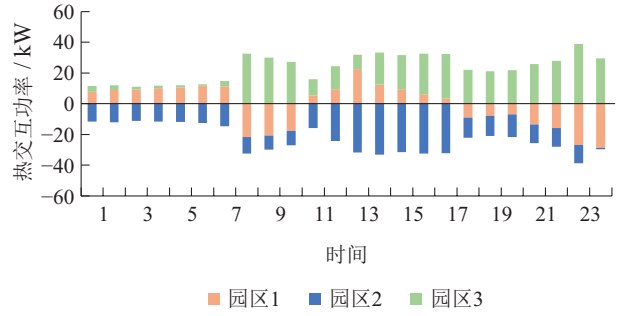
Fig. 6 Comparison of optimization results of different methods

各园区综合能源系统能量交互结果如图7所示.

由于园区间各种能量交互成本低于系统直接购能成本,因此园区之间通过能量交互实现了综合能源系统内的能量互补,降低系统运行成本.



(a) 园区间电交互功率

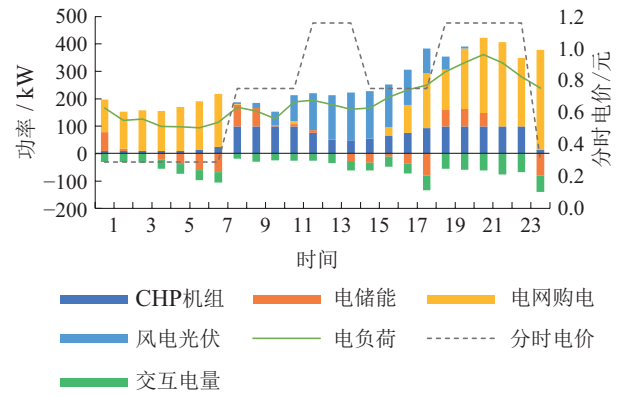


(b) 园区间热交互功率

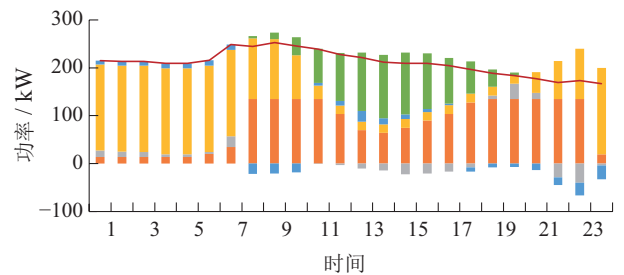
图 7 园区间能量交互优化结果

Fig. 7 Optimization results of energy interaction between parks

3个园区内负荷曲线及各设备出力状态优化结果如图8-10所示.



(a) 园区1电平衡优化结果



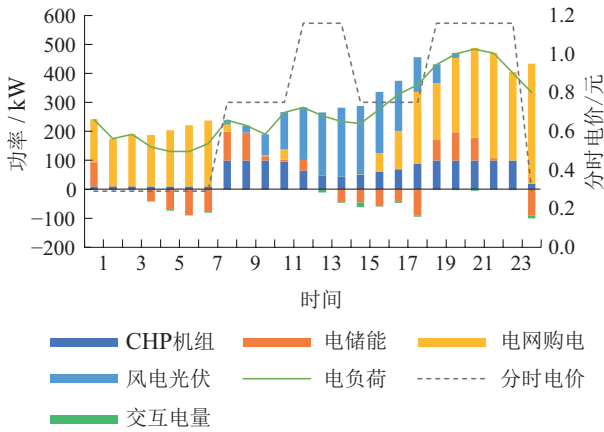
(b) 园区1热平衡优化结果

图 8 园区1优化结果

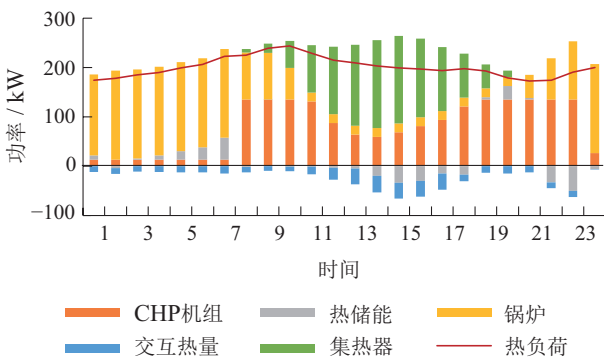
Fig. 8 Optimization results of Park 1

以园区3为例,从图10(a)中可以看出电负荷主要通过配电网、风电光伏等分布式能源、CHP机组供应,在10~18时风电光伏的出力较多,系统会优先选择成本最低的分布式能源来供给电负荷,在购电价格较高且分布式能源不足以供给电负荷时CHP机组会投入运行,以此来降低系统运行成本.而电储能系统的接入会在深夜电价谷值时充电,而在电价峰值时放电

供给电负荷,实现了电能在时间上的转移,提高了系统的经济性.从图10(b)可以看出系统内主要通过太阳能集热器、锅炉、CHP机组供应,在光照强度较强的时段,优先通过太阳能集热器供给热负荷.由于园区内CHP机组采用“以电定热”的工作模式,在CHP机组出力较多时,锅炉出力减少,而在半夜时段主要通过产热效率更高的锅炉来供给热负荷,保证系统经济稳定运行.

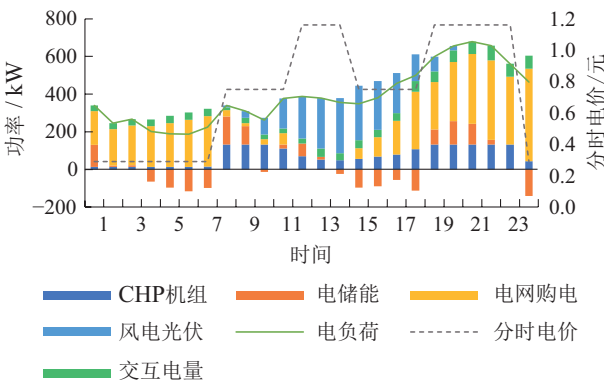


(a) 园区2电平衡优化结果

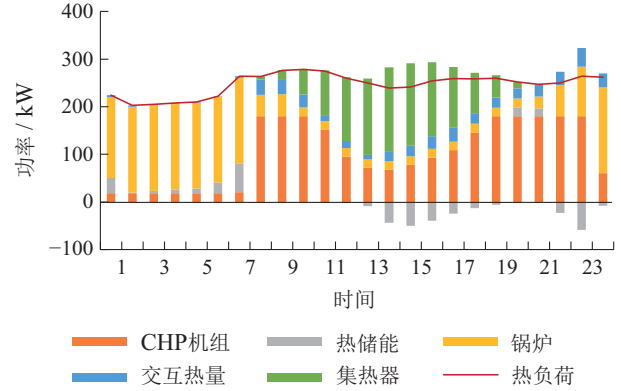


(b) 园区2热平衡优化结果

图9 园区2优化结果
Fig. 9 Optimization results of Park 2



(a) 园区3电平衡优化结果



(b) 园区3热平衡优化结果

图10 园区3优化结果
Fig. 10 Optimization results of Park 3

图11为本文求解算法的收敛结果图,从图11可以看出采用了自适应步长方法迭代过程中原始残差和对偶残差收敛趋势相近,近乎同步收敛并最终均达到收敛精度.

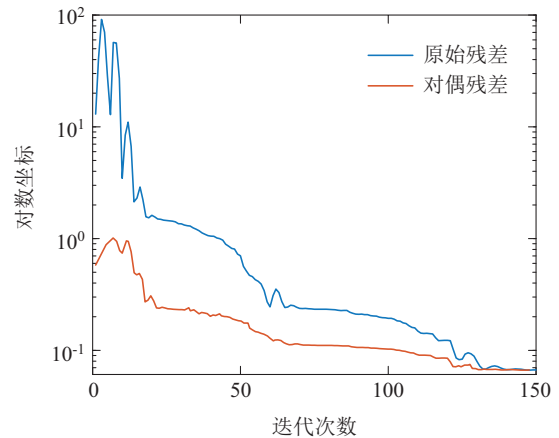


图11 残差收敛过程

Fig. 11 Residual convergence process

本文算例分析求解过程基于MATLAB语言编写,采用MDCE框架搭建计算集群,集群内包含四台同配置电脑,部分关键配置为:8核i7-9700CPU,16 GB内存.过程中涉及的求解均采用Gurobi+IPOPT求解器进行求解.分别用本文提出的分布式优化调度方法及传统集中式优化算法对该问题进行求解四次,其各项指标如表1-3所示.

表1 多园区总运行成本对比

Table 1 Comparison of total operating costs of MPIES

方法	多园区总运行成本/元			
	1	2	3	4
双层分布式优化	28015.51	28015.51	28014.92	28015.32
传统集中式优化	28013.26	28014.44	28015.47	28015.48

表 2 配电网全天网损对比
Table 2 Comparison of network loss of DN

方法	配电网全天网损/MWh			
	1	2	3	4
双层分布式优化	2.1545	2.1545	2.1543	2.1545
传统集中式优化	2.1538	2.1539	2.1542	2.1545

表 3 优化速度对比
Table 3 Comparison of optimization speed

方法	求解时间/s				交互变量维度
	1	2	3	4	
双层分布式优化	61	63	61	62	$96 \times 3 + 72$
传统集中式优化	107	112	114	111	$266 \times 3 + 72$

从表1-2中可以看出采用本文提出的分布式优化调度方法与传统集中式优化分别重复进行了四次求解, 其求解结果一致, 可见分布式优化求解方法也可以收敛到最优解。从表3可以看出, 采用本文提出的分布式优化算法, 求解过程中交互变量维数明显变少, 由 $266 \times 3 + 72$ 维变为 $96 \times 3 + 72$ 维, 省去了传输各园区内所有设备的详细参数数据, 只需进行期望交换功率的传输。本文提出的双层分布式优化算法可以同时进行园区间以及园区与配电网间的交互优化问题, 避免集中式优化算法分步进行, 在问题求解及通信占用方面更占优势。

5 结论

本文考虑了综合能源系统与配电网之间的互动影响, 通过调整多园区综合能源系统内各园区在配电网中的接入位置、配电网的网络拓扑及园区综合能源系统内部各设备出力情况来实现系统的经济高效运行。首先分别以运行成本最小及有功网损最小为优化目标, 建立了配电网-多园区综合能源系统协同优化模型。其次为了保证系统信息交互的隐私性, 采用自适应步长的交替方向乘子法对该问题进行了解, 同时给出了一个调度周期内配电网及综合能源系统的运行控制方案。最后通过仿真算例, 并将其余传统集中式优化调度算法进行对比, 验证本文所提方法的可行性、高效性、准确性。

参考文献:

[1] ZENG Ming. Fight a hard battle to achieve carbon peak and carbon neutralization. *The People's Daily*, 2021-07-28(9). (曾鸣. 打好实现碳达峰碳中和这场硬仗. 人民日报, 2021-07-28(9).)

[2] HUANG Haitao, ZHA Junji, CHEN Xi, et al. Research on distributed cooperative optimization of multi-agent integrated energy system based on ADMM algorithm. *Electrical Measurement & Instrumentation*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210506.1312.006.html>. 2021: 1 - 9.

(黄海涛, 查俊吉, 陈曦, 等. 基于ADMM算法的多主体综合能源系统分布式协同优化研究. 电测与仪表. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210506.1312.006.html>. 2021: 1 - 9.)

- [3] GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Heat network modeling and system operation optimization of multi-area integrated energy system. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1305 - 1316. (顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305 - 1316.)
- [4] WU Jiechen, AI Xin, ZHANG Yan, et al. Day-ahead optimal dispatch of electric energy in high-proportion distributed energy parks under allocation and separation environment. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1709 - 1719. (吴界辰, 艾欣, 张艳, 等. 配售分离环境下高比例分布式能源园区电能日前优化调度. 电网技术, 2018, 42(6): 1709 - 1719.)
- [5] ZHAO Haipeng, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Research on optimal operation strategy for regional integrated energy system considering cold-heat-electric demand coupling response characteristics. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 573 - 589. (赵海彭, 苗世洪, 李超, 等. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 573 - 589.)
- [6] ZHAO Pengxiang, LI Zhen, WANG Nan, et al. Optimal operation of district integrated energy system based on stackelberggame with supply and demand sides. *Proceedings of the CSU-EPSSA*, 2021, 33(9): 109 - 116, 122. (赵鹏翔, 李振, 王楠, 等. 基于源荷双侧主从博弈的园区综合能源系统运行优化策略. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 109 - 116, 122.)
- [7] A W L, B X J, B H J, et al. Decentralized optimal scheduling for integrated community energy system via consensus-based alternating direction method of multipliers. *Applied Energy*, 2021, 302: 117448.
- [8] SHI Jiaqi, HU Hao, ZHANG Jianhua. Distributed low-carbon economy scheduling for integrated energy system with multiple individual energy-hubs. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 150 - 159. (史佳琪, 胡浩, 张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度. 电网技术, 2019, 43(1): 150 - 159.)
- [9] XU D, WU Q, ZHOU B, et al. Distributed multi-energy operation of coupled electricity, heating and natural gas networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 1(4): 2457 - 2469.
- [10] HUANG B, LI Y, ZHANG H, et al. Distributed optimal co-multi-microgrids energy management for energy internet. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(4): 357 - 364.
- [11] WANG Cheng, LIU Nian. Distributed optimal dispatching of interconnected microgrid system based on alternating direction method of multipliers. *Power System Technology*, 2016, 40(9): 2675 - 2681. (王程, 刘念. 基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度. 电网技术, 2016, 40(9): 2675 - 2681.)
- [12] WANG L X, ZHENG J H, JING Z X, et al. Individual-based distributed parallel optimization for operation of integrated energy systems considering heterogeneous structure - ScienceDirect. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 118: 105777.
- [13] PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3511 - 3521. (蒲天娇, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3511 - 3521.)
- [14] JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Calculation of optimal hybrid power flow for integrated community energy system considering electric distribution network reconfiguration. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(1): 18 - 24, 56. (靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑配电网重构的区域综合能源系统最优混合潮流计算. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 18 - 24, 56.)

- [15] LI Peng, WANG Zixuan, HOU Lei, et al. Analysis of repeated game based optimal operation for regional integrated energy system. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 81 – 89.
(李鹏, 王子轩, 侯磊, 等. 基于重复博弈的区域综合能源系统优化运行分析. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 81 – 89.)
- [16] CHEN Jian, LIN Ziliang, ZHAO Haoran, et al. Optimization method for resilience of integrated electric-gas system with consideration of cyber coupling. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6854 – 6864.
(陈健, 林咨良, 赵浩然, 等. 考虑信息耦合的电-气综合能源系统韧性优化方法. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6854 – 6864.)
- [17] LI Peng, CHEN Bo, WANG Zixuan, et al. Decentralized coordinated dispatch of multi-community integrated energy system considering network security constraints and multi-energy collaborative interaction. *Electric Power Automation Equipmen*, 2020, 40(12): 15 – 25.
(李鹏, 陈博, 王子轩, 等. 计及网络安全约束和多能协同交互的多园区综合能源系统分散协调调度. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 15 – 25.)
- [18] GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(6): 1634 – 1645.
(高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1634 – 1645.)
- [19] FU Changyi, YANG Jingfei, HU Jiyun. Discriminate method of radiality for distribution network based on improved loop encoding method. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2021: 1 – 8.
(傅长熠, 杨镜非, 胡继匀. 基于改进环网编码法的配电网辐射性判别方法. 电测与仪表, 2021: 1 – 8.)
- [20] WU Wenchuan, ZHANG Bomin, SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(9): 111 – 118.
(吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 111 – 118.)
- [21] YANG Qingrun, LI Cheng, DING Tao, et al. Fully distributed dynamic economical dispatching method for power system based on alternating direction multiplier method. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 709 – 716.
(杨青润, 李澄, 丁涛, 等. 基于交替方向乘子法的电力系统完全分布式动态经济调度方法. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 709 – 716.)
- [22] HAN Yuxin, CHEN Laijun, WANG Zhaojian, et al. Distributed optimal power flow in direct current distribution network based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(11): 26 – 37.
(韩禹歆, 陈来军, 王召健, 等. 基于自适应步长ADMM的直流配电网分布式最优潮流. 电工技术学报, 2017, 32(11): 26 – 37.)

作者简介:

陈剑飞 硕士研究生, 目前研究方向为综合能源系统分布式优化,

E-mail: 201934449@mail.sdu.edu.cn;

李珂 教授, 目前研究方向为综合能源系统、新能源与储能控制,

E-mail: like@sdu.edu.cn;

蒋超 硕士研究生, 目前研究方向为综合能源系统分布式优化,

E-mail: 202034932@mail.sdu.edu.cn;

张承慧 教授, 目前研究方向为新能源发电与高效节能、控制理论

与应用, E-mail: zchui@sdu.edu.cn.