

控制与决策

Control and Decision

不确定因素下建筑集群冷热电联供系统多目标优化

楚晓琳, 杨东

引用本文:

楚晓琳, 杨东. 不确定因素下建筑集群冷热电联供系统多目标优化[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 195–204.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0596>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于随机模型预测控制的含大规模风电接入的电力系统优化调度](#)

Optimization and scheduling of power system stochastic model predictive control based optimization and scheduling for power system with large scale wind integrated

控制与决策. 2019, 34(8): 1616–1625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1418>

[智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望](#)

Smart energy—Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system

控制与决策. 2018, 33(5): 938–949 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1632>

[区间参数高维多目标集合进化优化方法](#)

Optimizing many-objective problems with interval parameters using set-based evolutionary algorithms

控制与决策. 2018, 33(12): 2213–2217 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0938>

[传摘时间约束下的运输与批处理机生产协调调度](#)

Coordinated scheduling of transportation and production on batching-machine with tracking time constraint

控制与决策. 2017, 32(6): 995–1000 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0489>

[基于参考点的高维多目标粒子群算法](#)

Reference-point-based particle swarm optimization algorithm for many-objective optimization

控制与决策. 2017, 32(4): 607–612 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0387>

[多策略改进的多目标粒子群优化算法](#)

Improved multi-objective particle swarm optimization algorithm based on multiple strategies

控制与决策. 2017, 32(3): 435–442 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0091>

[手势分割问题的多目标优化模型及其进化求解方法](#)

Multi-objective optimization model and its evolution-based solution for gesture segmentation problems

控制与决策. 2017, 32(1): 100–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1159>

[基于鲁棒多目标优化的智能体群组协同任务规划](#)

Cooperative task scheduling method for agent group using robust multi-objective optimization approach

控制与决策. 2016, 31(11): 2045–2052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1573>

不确定因素下建筑集群冷热电联供系统多目标优化

楚晓琳, 杨 东[†]

(东华大学 旭日工商管理学院, 上海 200051)

摘 要: 为降低建筑楼宇的能源消耗, 研究建筑集群中的多个建筑楼宇共享冷热电联供系统、热能存储装置以及电池时的能源调度优化问题. 考虑到建筑楼宇的能源需求和能源价格具有随机性, 并且每个建筑楼宇以各自的费用最小化为目标, 从随机规划和多目标的角度, 建立建筑集群供能系统的两阶段多目标随机规划模型. 为了提高模型的求解效率, 提出将线性规划松弛与 Benders 分解算法相结合, 从而获得建筑楼宇共享能源系统的 Pareto 最优解集. 算例分析中通过 CPLEX 软件求解, 对比分析不同随机因素对最优化建筑集群供能系统总费用以及建筑楼宇各自费用的影响程度, 结果表明了所提出算法的有效性以及所构建的模型可以有效提高最优化决策的准确性.

关键词: 建筑集群; 冷热电联供系统; 热能存储; 随机规划; Benders 分解算法; Pareto 最优解集

中图分类号: C931; TK01+9

文献标志码: A

Multi-objective programming for building clusters combined cooling, heating and power system under uncertainty

CHU Xiao-lin, YANG Dong[†]

(Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: To achieve the energy consumption reduction of buildings, the energy operation strategy of combined cooling, heating and power (CCHP) system, thermal storage and battery shared by buildings in the building clusters is addressed. The energy demands and energy prices are stochastic, and each building aims to minimize its cost. The stochastic programming approach and multi-objective theory are applied to formulate a two-stage multi-objective stochastic programming model. In order to obtain the Pareto optimal solutions, the LP-Relaxation and Benders decomposition algorithm are adopted to solve the energy schedule model with high solving efficiency. Finally, the mathematical model is solved by CPLEX software, and comparative studies are performed to evaluate the effect of the different stochastic parameters on the optimal building cluster total cost and every building cost. The experimental results show that the hybrid algorithm is effective for solving the optimal model and the multi-objective stochastic programming model can significantly improve the accuracy of the optimal decisions.

Keywords: building clusters; CCHP system; thermal storage; stochastic programming; Benders decomposition algorithm; Pareto optimal solutions

0 引 言

近年来,随着全球能源资源紧缺以及环境污染严重等问题的日益突出,如何提高能源利用率和保护环境引起了学术界的广泛关注. 建筑能耗的不断增长加剧了许多环境、经济和健康等相关问题. 为了缓解环境压力和能源危机,联供系统作为一种经济、节能和环保的供能系统,广泛地应用于为建筑楼宇提供能源. 冷热电联供系统(combined cooling, heating and power system, CCHP system)是较为典型的一类供能系统,它是指其供能设备以小型化、分散化的形式布

置在终端用户附近,向用户同时提供电能、冷能和热能,并通过对高温余热的回收利用大大提高了一次能源利用率^[1]. 因此,研究 CCHP 系统的优化问题,对于提高建筑能源利用率以及实现能源的可持续发展具有重要意义.

目前,对于 CCHP 系统的优化研究大多集中于单个建筑楼宇冷热电联供系统的设计和 optimization 问题,包括确定性模型和随机模型. 例如,在确定性环境下, Yokoyama 等^[2]考虑了 CCHP 系统的设备容量为离散型数值时,以单个建筑楼宇总成本最小为目标,

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71371045); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(18YJA630129).

责任编辑: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: yangdong@dhu.edu.cn.

寻求设备容量、设备个数以及能源调度的最优决策方案。Roman等^[3]分析了单个建筑楼宇CCHP系统中,由往复式内燃机、微型燃气轮机、燃料电池分别作为电力发电机组时,相比于电能、热能分别供应的分供系统,在经济成本节省、能源消耗节省、环境污染减少等方面的优势。此外,将蓄能装置引入冷热电联供系统中可以实现削峰填谷的作用,进一步提高能源利用率,常见的蓄能装置有热能存储装置和电池^[4-9]。在随机环境下,大部分研究人员考虑的随机因素有能源需求、市场数据(如燃料价格和电价)、设备技术水平(如产能效率)以及相关政策(如政府激励机制)等^[10]。当只考虑CCHP系统在运营阶段决策能源调度方案时,Hu等^[11]和Kuznia等^[12]以单个建筑楼宇的冷热电联供系统为优化对象,构建了随机混合整数规划模型;当考虑联供系统的设计阶段(决策设备容量和类型)以及运营阶段时,常采用两阶段随机规划方法建立优化模型。例如,Zhou等^[13]和Ji等^[14]为了获得最优化的设备配置和能源调度方案,分别构建了两阶段随机规划模型和两阶段随机鲁棒优化模型,并通过数值实验验证了模型的有效性。Mohammadi等^[15]考虑了能源需求和能源价格为不确定因素时,对于引入蓄能装置的单个建筑楼宇CCHP系统的设计和优化问题,采用场景减少法,避免了设计两阶段随机规划模型的高维问题。

上述研究主要集中于CCHP系统为单个建筑楼宇供能时的优化问题。然而,随着智能电网的推广,多个建筑楼宇可以组成一个建筑集群共享供能系统,从而实现更大程度的能源节省。因此,针对建筑集群中的建筑楼宇之间的共享和竞争关系,如何优化供能系统值得深入研究。例如,不考虑随机因素的影响,Hu等^[16]研究了CCHP系统为两个建筑楼宇组成的建筑楼宇供能时的最优化运行问题,构建了混合整数规划模型,并用模拟退火方法进行求解。在此基础上,Hu等^[17]进一步研究如何高效求解该模型,从而提出了改进的多目标粒子群优化算法。Dai等^[18]针对建筑集群中的建筑楼宇共享供能系统的优化问题,建立了协作模式下的多目标优化模型,以获得Pareto最优设计和运营决策。尽管上述关于确定性环境下建筑集群供能系统的优化研究已经取得了一定的成果,但是,对于随机因素影响下的建筑集群CCHP系统优化问题的研究,仅有Marino等^[19]考虑了建筑集群中建筑楼宇电能需求随机时,通过构建两阶段随机规划模型解决建筑楼宇共享供能系统的优化问题。

综合以上分析可知,目前对于建筑集群供能系统

的研究大多基于假设已知所有参数的信息构建确定性模型,较少有文献探讨随机情境下的建筑集群供能系统的最优问题。忽略现实中供能系统的优化问题存在的多种随机因素,往往会造成决策不准确以及预期的效益不能达到,因此,最优化供能系统运行决策时,考虑随机因素的影响是十分必要的。本文采用广泛应用于解决随机问题的基于场景的随机规划方法^[20],建立供能系统优化问题的随机规划模型。此外,随机规划模型的求解难度会随着场景数的增加而变得更加复杂,设计高效的求解算法有助于提高求解效率。鉴于已有研究的不足,本文进行建模和求解算法的设计。考虑能源需求和能源价格的随机性,提出协作决策模型来研究建筑集群中建筑楼宇之间的共享与竞争关系。CCHP系统、热能存储装置和电池组成供能系统,共同为建筑集群供能。以最小化各个建筑楼宇总费用为多个目标,构建多目标随机规划模型,以有效解决随机因素影响下的建筑集群供能系统的优化问题。此外,综合模型特点和算法优势,采用Benders分解算法对模型进行求解以获得Pareto曲线,既可保证解的质量,又能提高问题的求解效率。

1 问题描述及符号定义

1.1 问题描述

本文研究建筑集群中的建筑楼宇共享CCHP系统、热能存储装置以及电池的能源调度优化问题,供能系统结构如图1所示,建筑集群中的所有建筑楼宇都可以共享该供能系统。

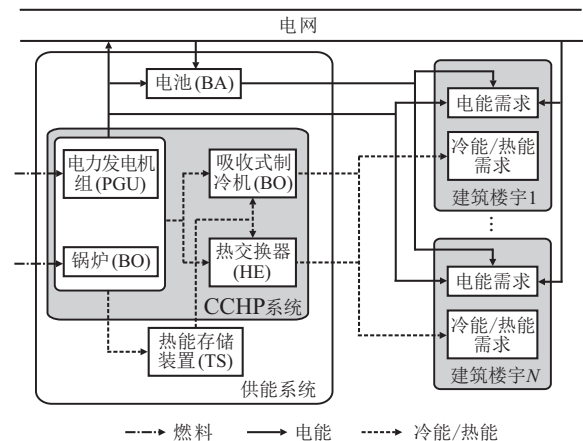


图1 建筑集群供能系统结构

热能存储装置和电池具有消峰填谷的作用,可以进一步降低建筑能源消耗。CCHP系统包括电力发电机组(power generation unit, PGU)、锅炉(boiler, BO)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、热交换器(heat exchanger, HE)、热能存储装置(thermal energy storage, TS)以及电池(battery, BA)。图1中的实线表示电能的

流动方向,虚线表示冷能或热能的流动方向. 每个建筑楼宇需要的电能都可以由电力发电机组、电池以及电网供应. 其中,电力发电机组以燃气轮机为例,通过燃烧天然气产生电能,其高温余热可以被回收利用. 当电力发电机组和电池提供的电能不满足建筑楼宇对电能的需求时,可以购买电网的电能;反之,若电力发电机组产生的电能过多,则可以出售给电网. 每个建筑楼宇需要的冷能或热能都可以由吸收式制冷机和热交换器来满足. 锅炉通过燃烧天然气产生热能,用于弥补电力发电机组供热的不足. 电池存储的电能来自电力发电机组和电网,释放的电能直接供给建筑楼宇. 热能存储装置存储的热能来自电力发电机组被回收的高温余热和锅炉产生的热能,释放的热能供给吸收式制冷机和热交换器. 电池和热能存储装置在建筑能源需求较低时存储能量,在建筑能源需求较高时释放能量,因而避免了CCHP系统产能设备容量设定过大或过小的问题,提高了设备利用率.

在建筑集群供能系统的优化问题中,存在两类决策:设计决策和运营决策. 设计决策是指决策设备的容量,产生相应的设备投资成本和设备维护成本;运营决策是指决策设备能源调度方案,包括设备的运营负荷、蓄能装置的充能放能状态和购买电网的电量等,产生相应的运营成本. 在考虑随机因素影响下,将该优化问题的建模分为两个阶段:第1阶段,决策设备容量,其取值不受随机因素变化的影响,即 **here-and-now** 决策;第2阶段,决策能源调度方案,其取值根据随机场景的不同而发生改变,即 **wait-and-see** 决策. 此外,多个建筑楼宇在共享供能系统时,存在着对能源的竞争冲突. 例如,某一个建筑楼宇过多地使用CCHP系统产生的电能,则其他建筑楼宇将被迫需要购买电网更多的电能,进而产生较高的运营成本. 建筑集群中的每个建筑楼宇都以各自的总成本最小为目标,为了权衡不同建筑楼宇之间的冲突,需要构建多目标优化模型. 因此,从多目标和随机的角度,建筑集群供能系统的优化问题可建模为两阶段多目标随机规划模型.

1.2 符号定义

1) 集合.

t 表示第 t 个决策周期, $t = 1, 2, \dots, T$, T 为总决策周期; i 表示第 i 个建筑楼宇, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为建筑集群中建筑楼宇总个数; ξ 表示第 ξ 个场景,对应的概率为 P^ξ , $\xi \in \Xi$, Ξ 为场景集合; k_1 表示除存储以外的设备,包括电力发电机组、锅炉、吸收式制冷机、

热交换器, $k_1 \in \{\text{pgu}, \text{bo}, \text{ac}, \text{he}\}$; k_2 表示存储系统的设备,包括电池和热能存储装置, $k_2 \in \{\text{ba}, \text{ts}\}$.

2) 参数.

$f_{\text{cost},i}$ 表示建筑楼宇 i 的总费用; $f_{\text{cc},i}$ 表示建筑楼宇 i 的设备投资费用; $f_{\text{mc},i}$ 表示建筑楼宇 i 的设备维护费用; $f_{\text{operation},i}^\xi$ 表示 ξ 场景下,建筑楼宇 i 的运营成本; \mathbf{IE} 表示除蓄能装置以外的设备每 1 kW 容量所对应的初始安装成本; \mathbf{IS} 表示蓄能装置每 1 kWh 容量所对应的初始安装成本; r 表示年利率; n 表示设备的使用年限; \mathbf{ME} 表示除蓄能装置以外的设备每 1 kW 容量的维护成本; \mathbf{MS} 表示蓄能装置每 1 kWh 容量的维护成本; R_p 表示购买电网 1 kWh 电能的成本; R_f 表示电力发电机组或锅炉消耗的天然气的单位成本; R_s 表示出售给电网 1 kWh 电能的价格; \mathbf{Egm} 表示购买电网电能的上限; η_{pgu} 表示电力发电机组的发电效率系数; η_p 表示电力发电机组余热回收系数; η_b 表示锅炉产生热能系数; η_c 表示吸收式制冷机将热能转化为冷能的系数; η_h 表示热交换器进行制热的效率系数; η_{td} 表示热能存储装置释放热能的系数; utc_{min} 表示电力发电机组和锅炉向热能存储装置存储热能的下限比例系数; utc_{max} 表示电力发电机组和锅炉向热能存储装置存储热能的上限比例系数; utd_{min} 表示热能存储装置释放热能的下限比例系数; utd_{max} 表示热能存储装置释放热能的上限比例系数; us_{min} 表示热能存储装置中存储的热能的下限比例系数; us_{max} 表示热能存储装置中存储的热能的上限比例系数; η_{bc} 表示电池充电的效率系数; η_{bd} 表示电池放电的效率系数; ubc_{min} 表示电力发电机组和锅炉向电池存储电能的下限比例系数; ubc_{max} 表示电力发电机组和锅炉向电池存储电能的上限比例系数; ubd_{min} 表示电池释放电能的下限比例系数; ubd_{max} 表示电池释放电能的上限比例系数; ub_{min} 表示电能中存储的电能的下限比例系数; ub_{max} 表示电能中存储的电能的上限比例系数; M 表示足够大的正数; $\text{El}_{t,i}^\xi$ 表示在 ξ 场景下,决策周期 t 内,建筑楼宇 i 对电能的需求; $\text{Qc}_{t,i}^\xi$ 表示在 ξ 场景下,决策周期 t 内,建筑楼宇 i 对冷能的需求; $\text{Qh}_{t,i}^\xi$ 表示在 ξ 场景下,决策周期 t 内,建筑楼宇 i 对热能的需求.

3) 决策变量.

第1阶段决策变量: cap_{k_1} 表示除蓄能装置以外的设备容量设定; cap_{k_2} 表示蓄能装置容量设定.

第2阶段决策变量,在 ξ 场景下,决策周期 t 内,具体含义如下:

$Ecg_{t,i}^{\xi}$ 表示电力发电机组为建筑楼宇 i 供电而将多余的电能出售给电网的电量; $Epl_{t,i}^{\xi}$ 表示电力发电机组产生的电能直接供给建筑楼宇 i 的电量; $Epb_{t,i}^{\xi}$ 表示电力发电机组为建筑楼宇 i 供能生产的电能存储在电池中的电量; $Egb_{t,i}^{\xi}$ 表示购买电网的、存储在电池中的电量; Ebc_t^{ξ} 表示电池存储的实际电能; Eb_t^{ξ} 表示电池中所存储的电能; Ebd_t^{ξ} 表示电池实际释放的电能; $Ebl_{t,i}^{\xi}$ 表示电池向建筑楼宇 i 提供的电能; $Egl_{t,i}^{\xi}$ 表示建筑楼宇 i 直接从电网购买的电量; $Fp_{t,i}^{\xi}$ 表示电力发电机组为建筑楼宇 i 提供电能所消耗的燃料量; $Fb_{t,i}^{\xi}$ 表示锅炉为建筑楼宇 i 提供热能所消耗的燃料量; $Qfc_{t,i}^{\xi}$ 表示吸收式制冷机消耗的来自电力发电机组和锅炉的热能; $Qfh_{t,i}^{\xi}$ 表示热交换器为满足建筑楼宇 i 热能需求而消耗的来自电力发电机组和锅炉的热能; $Qfs_{t,i}^{\xi}$ 表示来自电力发电机组和锅炉的热能存储在热能存储装置中的量; Qtc_t^{ξ} 表示蓄能装置存储的实际热能; Qs_t^{ξ} 表示热能存储装置中所存储的热能; Qtd_t^{ξ} 表示蓄能装置实际释放的热能; $Qsc_{t,i}^{\xi}$ 表示热能存储装置为建筑楼宇 i 提供给吸收式制冷机的热能; $Qsh_{t,i}^{\xi}$ 表示热能存储装置为建筑楼宇 i 提供给热交换器的热能; $Qcb_{t,i}^{\xi}$ 表示供能系统为建筑楼宇 i 提供的冷能; $Qhb_{t,i}^{\xi}$ 表示供能系统为建筑楼宇 i 提供的热能。

Stc_t^{ξ} 0-1 变量, 表示热能存储装置是否处于充能状态, 是则取 1, 否则取 0; Std_t^{ξ} 0-1 变量, 表示热能存储装置是否处于放能状态, 是则取 1, 否则取 0; Sbc_t^{ξ} 0-1 变量, 表示电池是否处于充电状态, 是则取 1, 否则取 0; Sbd_t^{ξ} 0-1 变量, 表示电池是否处于放电状态, 是则取 1, 否则取 0。

2 两阶段多目标随机优化模型

2.1 第1阶段

对于图 1 所示的引入蓄能装置的建筑集群 CCHP 系统的设计和优化问题, 建立两阶段随机规划模型. 第 1 阶段是供能系统设备容量的决策, 该阶段的模型是多目标线性规划模型, 建模如下:

$$\min f_{cost,i} = f_{cc,i} + f_{mc,i} + E_{\xi}(f_{operation,i}^{\xi}). \quad (1)$$

$$f_{cc,i} = \left\{ \sum_{k_1} IE_{k_1} cap_{k_1} + \sum_{k_2} IS_{k_2} cap_{k_2} \right\} \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \frac{T}{8760} \frac{1}{N}, \quad \forall k_1, k_2; \quad (2)$$

$$f_{mc,i} = \left\{ \sum_{k_1} ME_{k_1} cap_{k_1} + \sum_{k_2} MS_{k_2} cap_{k_2} \right\} \times \frac{T}{8760} \frac{1}{N}, \quad \forall k_1, k_2. \quad (3)$$

式(1)为目标函数, 包括 3 部分: 第 1 阶段设备投

资费用、设备维护费用以及第 2 阶段目标函数在多个场景下的期望值. 而第 2 阶段的目标函数又是第 1 阶段决策变量与随机场景的函数. 其中, 设备投资成本和设备维护成本按照一年 365 天, 一天 24 小时, 分摊到每一个小时, 具体可由式(2)和(3)分别计算得出. 第 1 阶段需要决策供能系统的设备容量, 容量约束如下所示:

$$cap_{pgu}, cap_{bo}, cap_{ac}, cap_{he}, cap_{ba}, cap_{ts} \geq 0. \quad (4)$$

此外, 供能系统设备容量的取值约束的上限可根据决策者需求设定, 本文假设可在非负数范围内取值.

2.2 第2阶段

第 2 阶段是在已经决策供能系统所有设备容量, 且知道能源价格或能源需求的随机信息之后, 决策能源调度方案, 目标是建筑楼宇 i 所有决策周期内的运营成本, 其模型为

$$\min f_{operation,i}^{\xi} = \sum_{i=1}^T \{ R_p(Egl_{t,i}^{\xi} + Egb_{t,i}^{\xi}) + R_f Fp_{t,i}^{\xi} + R_f Fb_{t,i}^{\xi} - R_s Ecg_{t,i}^{\xi} \}. \quad (5)$$

式(5)为目标函数, 包括 3 个部分: 从电网购买电能的成本、消耗燃料的成本以及产生过多出售给电网电能的收益. 相关的设备运行约束条件如下.

1) 电力购买约束

$$\sum_{i=1}^N (Egl_{t,i}^{\xi} + Egb_{t,i}^{\xi}) \leq Egm, \quad \forall \xi, t. \quad (6)$$

式(6)表示在每个决策周期内, 建筑集群中的建筑楼宇从电网购买的电能(包括存储在电池中的电能和直接为建筑楼宇供能的电能)不能超过电网供电能力的上限, 设为 30 kW.

2) 电能平衡约束

$$Fp_{t,i}^{\xi} = \eta_{pgu}(Epl_{t,i}^{\xi} + Epb_{t,i}^{\xi} + Ecg_{t,i}^{\xi}), \quad \forall \xi, t, i; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N (Epl_{t,i}^{\xi} + Epb_{t,i}^{\xi} + Ecg_{t,i}^{\xi}) \leq cap_{pgu}, \quad \forall \xi, t; \quad (8)$$

$$Epl_{t,i}^{\xi} + Egl_{t,i}^{\xi} + Ebl_{t,i}^{\xi} \geq El_{t,i}^{\xi}, \quad \forall \xi, t, i. \quad (9)$$

式(7)表示电力发电机组燃烧天然气所产生的电能用于电池存储、直接供给建筑楼宇以及出售给电网; 式(8)保证了电力发电机组产生的电能不能超过其容量限制; 式(9)说明电力发电机组直接向建筑楼宇提供的电能、从电网直接购买的电能以及电池向建筑楼宇释放的电能之和, 必须满足该建筑楼宇对电能的需求.

3) 冷能/热能平衡

$$Q_{fc,t,i}^{\xi} + Q_{fh,t,i}^{\xi} + Q_{fs,t,i}^{\xi} \leq \eta_p F_{p,t,i}^{\xi} + \eta_b F_{b,t,i}^{\xi}, \quad \forall \xi, t, i; \quad (10)$$

$$Q_{cb,t,i}^{\xi} - \eta_c (Q_{fc,t,i}^{\xi} + Q_{sc,t,i}^{\xi}) = 0, \quad \forall \xi, t, i; \quad (11)$$

$$Q_{hb,t,i}^{\xi} - \eta_h (Q_{fh,t,i}^{\xi} + Q_{sh,t,i}^{\xi}) = 0, \quad \forall \xi, t, i; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \eta_b F_{b,t,i}^{\xi} \leq \text{cap}_{bo}, \quad \forall \xi, t; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{cb,t,i}^{\xi} \leq \text{cap}_{ac}, \quad \forall \xi, t; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{hb,t,i}^{\xi} \leq \text{cap}_{he}, \quad \forall \xi, t; \quad (15)$$

$$Q_{cb,t,i}^{\xi} \geq Q_{c,t,i}^{\xi}, \quad \forall \xi, t, i; \quad (16)$$

$$Q_{hb,t,i}^{\xi} \geq Q_{h,t,i}^{\xi}, \quad \forall \xi, t, i. \quad (17)$$

式(10)表示电力发电机组和锅炉供给吸收式制冷机和热交换器的热能以及向热能存储装置存储的热能之和,不超过电力发电机组发电时被回收的高温余热和锅炉燃烧天然气所产生的热能之和;式(11)保证了吸收式制冷机产生的冷能和消耗的热能之间的能量守恒;式(12)保证热交换器产生的热能和消耗的热能之间的能量守恒;式(13)、(14)、(15)分别表示锅炉、吸收式制冷机和热交换器的容量限制约束;式(16)说明供能系统提供给建筑楼宇的冷能要满足该建筑楼宇对冷能的需求;式(17)说明供能系统提供给建筑楼宇的热能要满足该建筑楼宇对热能的需求。

4) 热能存储约束

$$Q_{tc,t}^{\xi} - \sum_{i=1}^N Q_{fs,t,i}^{\xi} \leq 0, \quad \forall \xi, t; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^N (Q_{sc,t,i}^{\xi} + Q_{sh,t,i}^{\xi}) - \eta_{td} Q_{td,t}^{\xi} = 0, \quad \forall \xi, t; \quad (19)$$

$$\text{Stc}_t^{\xi} + \text{Std}_t^{\xi} \leq 1, \quad \forall \xi, t; \quad (20)$$

$$\text{utc}_{\min} \text{Stc}_t^{\xi} \text{cap}_{ts} \leq Q_{tc,t}^{\xi} \leq \text{utc}_{\max} \text{Stc}_t^{\xi} \text{cap}_{ts}, \quad \forall \xi, t; \quad (21)$$

$$\text{utd}_{\min} \text{Std}_t^{\xi} \text{cap}_{ts} \leq Q_{td,t}^{\xi} \leq \text{utd}_{\max} \text{Std}_t^{\xi} \text{cap}_{ts}, \quad \forall \xi, t; \quad (22)$$

$$(Q_{tc,t}^{\xi} - Q_{td,t}^{\xi}) \Delta t - (Q_{s,t}^{\xi} - Q_{s,t-1}^{\xi}) = 0, \quad \forall \xi, t; \quad (23)$$

$$\text{us}_{\min} \text{cap}_{ts} \leq Q_{s,t}^{\xi} \leq \text{us}_{\max} \text{cap}_{ts}, \quad \forall \xi, t; \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^T (Q_{sc,t,i}^{\xi} + Q_{sh,t,i}^{\xi} - \eta_{td} Q_{fs,t,i}^{\xi}) \leq 0, \quad \forall \xi, i. \quad (25)$$

式(18)表示热能存储装置实际存储的热能,不超过该时刻电力发电机组和锅炉为所有建筑楼宇供能而向热能存储装置存储的热能之和;式(19)表示热能

存储装置释放的有效热能,用于吸收式制冷机制冷和热交换器制热,从而为所有建筑楼宇提供冷能和热能;式(20)表明热能存储装置不能同时处于充能和放能的状态;式(21)表示 t 时刻热能存储装置存储热能的上下限;式(22)表示 t 时刻热能存储装置释放热能的上下限;式(23)表示 t 时刻与 $t-1$ 时刻热能存储量之间的关系, Δt 保证了充能、放能与存储量之间的单位统一;式(24)表示 t 时刻内,热能存储装置中存储的热能的上下限;式(25)表示建筑楼宇 i 所存储的热能不低于为该建筑楼宇释放的热能,即保证在所有周期内,供能系统为建筑楼宇 i 所存储的热能都能被其所用。

5) 电池约束

$$\text{Ebc}_t^{\xi} / \eta_{bc} - \sum_{i=1}^N (\text{Epb}_{t,i}^{\xi} + \text{Egb}_{t,i}^{\xi}) = 0, \quad \forall \xi, t; \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^N \text{Ebl}_{t,i}^{\xi} - \eta_{bd} \text{Ebd}_t^{\xi} = 0, \quad \forall \xi, t; \quad (27)$$

$$\text{Sbc}_t^{\xi} + \text{Sbd}_t^{\xi} \leq 1, \quad \forall \xi, t; \quad (28)$$

$$\text{ubc}_{\min} \text{Sbc}_t^{\xi} \text{cap}_{ba} \leq \text{Ebc}_{t,i}^{\xi} \leq \text{ubc}_{\max} \text{Sbc}_t^{\xi} \text{cap}_{ba}, \quad \forall \xi, t; \quad (29)$$

$$\text{ubd}_{\min} \text{Sbd}_t^{\xi} \text{cap}_{ba} \leq \text{Ebd}_{t,i}^{\xi} \leq \text{ubd}_{\max} \text{Sbd}_t^{\xi} \text{cap}_{ba}, \quad \forall \xi, t; \quad (30)$$

$$(\text{Ebc}_t^{\xi} - \text{Ebd}_t^{\xi}) \Delta t - (\text{Eb}_t^{\xi} - \text{Eb}_{t-1}^{\xi}) = 0, \quad \forall \xi, t; \quad (31)$$

$$\text{ub}_{\min} \text{cap}_{ba} \leq \text{Eb}_t^{\xi} \leq \text{ub}_{\max} \text{cap}_{ba}, \quad \forall \xi, t; \quad (32)$$

$$\sum_{t=1}^T \{ \text{Ebl}_{t,i}^{\xi} - (\text{Epb}_{t,i}^{\xi} + \text{Egb}_{t,i}^{\xi}) \} \leq 0, \quad \forall \xi, i. \quad (33)$$

式(26)表示电池充电的实际电能来自于电力发电机组产生的电能和从电网购买的电能;式(27)保证了电池释放的电能与该时刻所有建筑楼宇供电量之间的能量守恒;式(28)表明电池不能同时处于充电和放电的状态;式(29)表示 t 时刻内电池存储电能的上下限约束;式(30)表示 t 时刻内电池释放电能的上下限约束;式(31)表示 t 时刻与 $t-1$ 时刻电能存储量之间的关系, Δt 保证了充电、放电与存储量之间的单位统一;式(32)表示 t 时刻电池中存储的电能的上下限约束;式(33)表示建筑楼宇 i 所存储的电能不低于电池向该建筑楼宇所释放的电能,即保证在所有周期内,供能系统为建筑楼宇 i 存储的电能都能被其所用。

第2阶段的决策变量取值范围约束如下:

$$\text{Ec}_{g,t,i}^{\xi}, \text{Epl}_{t,i}^{\xi}, \text{Epb}_{t,i}^{\xi}, \text{Egb}_{t,i}^{\xi}, \text{Ebc}_t^{\xi}, \text{Eb}_t^{\xi}, \text{Ebd}_t^{\xi},$$

$$\text{Ebl}_{t,i}^{\xi}, \text{Egl}_{t,i}^{\xi}, \text{Fp}_{t,i}^{\xi}, \text{Fb}_{t,i}^{\xi}, \text{Q}_{fc,t,i}^{\xi}, \text{Q}_{fh,t,i}^{\xi}, \text{Q}_{fs,t,i}^{\xi},$$

$$\text{Q}_{tc,t}^{\xi}, \text{Q}_{td,t}^{\xi}, \text{Q}_{s,t}^{\xi}, \text{Q}_{sc,t,i}^{\xi}, \text{Q}_{sh,t,i}^{\xi}, \text{Q}_{cb,t,i}^{\xi}, \text{Q}_{hb,t,i}^{\xi} \geq 0,$$

$$\forall \xi, t, i; \quad (34)$$

$$\text{Stc}_t^\xi, \text{Std}_t^\xi, \text{Sbc}_t^\xi, \text{Sbd}_t^\xi \in \{0, 1\}, \forall \xi, t. \quad (35)$$

3 模型求解

本文构建的建筑集群供能系统的优化模型是一个0-1混合整数多目标随机规划模型,多个建筑楼宇的总成本之间存在相互影响和相互制约的关系,若仅考虑其中一个目标,则不能判断出所对应决策方案的优劣,因此,需要寻找多目标优化问题中的Pareto最优解集.由于能源需求和能源价格两类随机变量为只取有限多个离散值的变量,可以将该随机模型转化为等价的确定性多目标规划模型.模型可以采用商业优化软件进行求解,但是,随着场景数的增加,数学模型的求解规模会随之大幅增加,软件求解模型效率也会比较差^[21].为了提高模型求解效率,需要根据本文模型特点选择合适的求解算法.

本文构建的数学模型为两阶段多目标随机规划模型.求解多目标优化问题典型的方法有加权法、约束法以及混合法等^[22],本文采取加权法将第1阶段的多目标规划转化为单目标规划,用不同权重组合下的单目标问题最优解来近似Pareto最优解集.考虑到第2阶段模型具有非线性特点,采用线性处理方法和线性松弛方法(LP-relaxation)将其转化为线性规划模型,这样原问题就由混合整数非线性规划模型转化为混合整数线性规划模型.转化后的线性规划模型可以采用单纯形法、原始-对偶算法、Benders分解算法等进行求解^[23].其中,基于延迟约束生成和割平面的Benders分解算法被认为是求解约束条件较多的混合整数线性规划模型最有效的算法之一^[24-25].Benders分解算法可以将该优化模型分解成一个整数规划模型和一个线性规划模型,从而大大降低模型的规模,进而提高计算效率.因此,本文采用Benders分解算法求解该多目标优化模型,从而获得建筑集群供能系统优化问题的Pareto最优解集.

3.1 多目标处理

构建的两阶段随机规划模型中,能源需求和能源价格两类随机变量的信息采用离散的场景来表示,每一个场景出现的概率为 P_ξ ,概率在0~1之间取值,并且概率之和为1.通过该方法可以将随机规划模型转化为等价的确定性模型.于是,目标函数(1)可以转化为

$$f_{\text{cost},i} = f_{\text{cc},i} + f_{\text{mc},i} + P_\xi f_{\text{operation},i}^\xi. \quad (36)$$

第1阶段以各个建筑楼宇的总费用最小化为目标,本文采用加权的方法对不同建筑楼宇总费用赋予

权重.权重值越大,表示其重要程度越高.于是,目标函数(36)可以转化为如下单目标函数:

$$f_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^N w_i (f_{\text{cc},i} + f_{\text{mc},i} + P_\xi f_{\text{operation},i}^\xi). \quad (37)$$

在目标函数(37)中, w_i 表示建筑楼宇*i*总费用 $f_{\text{cost},i}$ 的权重, $0 \leq w_i \leq 1$,并且权重之和为1.权重数值越大,表示其重要程度越高.若考虑到建筑集群中的每个建筑楼宇同等重要,则可设 $w_i = 1/N$.通过将多目标问题转化为单目标问题,可以增强决策的柔性.

3.2 线性化处理

经过权重加权法处理之后,建筑集群供能系统的两阶段随机规划模型转化为单目标的混合整数非线性规划(MINLP)模型.其中,非线性是由于约束条件(21)、(22)、(29)、(30)的存在.为了降低求解难度,采用线性化处理方法将MINLP模型转化为混合整数线性规划(MILP)模型.以式(21)左侧不等式 $\text{utc}_{\min} \text{Stc}_t^\xi \text{cap}_{\text{ts}} \leq \text{Qtc}_t^\xi$ 为例,引入变量 $u_{\text{ts},t}^\xi$,并且满足以下约束:

$$u_{\text{ts},t}^\xi \leq \text{cap}_{\text{ts}}, \forall \xi, t; \quad (38)$$

$$u_{\text{ts},t}^\xi \leq M \text{Stc}_t^\xi, \forall \xi, t; \quad (39)$$

$$u_{\text{ts},t}^\xi \geq \text{cap}_{\text{ts}} - M(1 - \text{Stc}_t^\xi), \forall \xi, t; \quad (40)$$

$$u_{\text{ts},t}^\xi \geq 0, \forall \xi, t; \quad (41)$$

$$\text{Qtc}_t^\xi \geq \text{utc}_{\min} u_{\text{ts},t}^\xi, \forall \xi, t; \quad (42)$$

其中 M 是一个足够大的正数.

同理,将式(21)中的右侧不等式以及式(22)、(29)、(30)进行线性化处理,同样可以生成相应的约束条件,限于篇幅,此处不再列出转化后的约束条件.

经过上述的权重加权法和线性化技术处理之后,建筑楼宇共享CCHP系统、热能存储装置和电池的随机优化模型即可转化为等价的单目标确定性MILP模型.第1阶段目标函数为式(37),决策变量约束为式(4);第2阶段目标函数为式(5),约束条件为式(6)~(20)、(23)~(28)、(31)~(33)、(38)~(42),决策变量取值范围约束为式(34)和(35).

3.3 Benders分解算法

此时,建筑集群供能系统的优化模型为混合整数线性规划模型,为了进一步提高求解效率,采用Birge等^[26]的两阶段Benders分解结合线性规划松弛(LP-relaxation)方法求解该MILP模型.第2阶段中存在的0-1变量如式(35)所示,采用LP-relaxation方法,将其转化为

$$0 \leq \text{Stc}_t^\xi, \text{Std}_t^\xi, \text{Sbc}_t^\xi, \text{Sbd}_t^\xi \leq 1, \forall \xi, t. \quad (43)$$

对于建筑集群供能系统的优化问题, 构建两阶段随机规划模型, 根据 Benders 分解的思想, 将第1阶段模型视为主问题, 目标函数由式(37)改为

$$\min \sum_{i=1}^N w_i (f_{cc,i} + f_{mc,i}) + \theta, \text{ 决策变量约束依然为式(4); 第2阶段模型视为子问题, 目标函数由式(5)改为}$$

$$\theta \geq \sum_{\xi,t,i} \{ \pi 6_t^\xi \text{Egm} + \pi 9_{t,i}^\xi \text{El}_{t,i}^\xi + \pi 16_{t,i}^\xi \text{Qc}_{t,i}^\xi + \pi 17_{t,i}^\xi \text{Qh}_{t,i}^\xi + (\pi 40_t^\xi + \pi 45_t^\xi + \pi 50_t^\xi + \pi 55_t^\xi)(-M) + (\pi 38_t^\xi + \pi 40_t^\xi + \pi 43_t^\xi + \pi 45_t^\xi + \pi 48_t^\xi + \pi 50_t^\xi + \pi 53_t^\xi + \pi 55_t^\xi + \pi 241_t^\xi \text{us}_{\min} + \pi 242_t^\xi \text{us}_{\max}) \text{cap}_{\text{ts}} + (\pi 58_t^\xi + \pi 60_t^\xi + \pi 63_t^\xi + \pi 65_t^\xi + \pi 68_t^\xi + \pi 70_t^\xi + \pi 73_t^\xi + \pi 75_t^\xi + \pi 321_t^\xi \text{ub}_{\min} + \pi 322_t^\xi \text{ub}_{\max}) \text{cap}_{\text{ba}} + (\pi 8_t^\xi \text{cap}_{\text{pgu}} + \pi 13_t^\xi \text{cap}_{\text{bo}} + \pi 14_t^\xi \text{cap}_{\text{ac}} + \pi 15_t^\xi \text{cap}_{\text{he}}) \}, \quad (44)$$

$$\sum_{\xi,t,i} \{ \pi 6_t^\xi \text{Egm} + \pi 9_{t,i}^\xi \text{El}_{t,i}^\xi + \pi 16_{t,i}^\xi \text{Qc}_{t,i}^\xi + \pi 17_{t,i}^\xi \text{Qh}_{t,i}^\xi + (\pi 40_t^\xi + \pi 45_t^\xi + \pi 50_t^\xi + \pi 55_t^\xi)(-M) + (\pi 38_t^\xi + \pi 40_t^\xi + \pi 43_t^\xi + \pi 45_t^\xi + \pi 48_t^\xi + \pi 50_t^\xi + \pi 53_t^\xi + \pi 55_t^\xi + \pi 241_t^\xi \text{us}_{\min} + \pi 242_t^\xi \text{us}_{\max}) \text{cap}_{\text{ts}} + (\pi 58_t^\xi + \pi 60_t^\xi + \pi 63_t^\xi + \pi 65_t^\xi + \pi 68_t^\xi + \pi 70_t^\xi + \pi 73_t^\xi + \pi 75_t^\xi + \pi 321_t^\xi \text{ub}_{\min} + \pi 322_t^\xi \text{ub}_{\max}) \text{cap}_{\text{ba}} + (\pi 8_t^\xi \text{cap}_{\text{pgu}} + \pi 13_t^\xi \text{cap}_{\text{bo}} + \pi 14_t^\xi \text{cap}_{\text{ac}} + \pi 15_t^\xi \text{cap}_{\text{he}}) \} \leq 0, \quad (45)$$

其中 π 表示相应约束条件的对偶变量, 例如 $\pi 6_t^\xi$ 是指约束条件(6)的对偶变量. 需要特别指出的是 $\pi 241_t^\xi$ 、 $\pi 242_t^\xi$ 、 $\pi 321_t^\xi$ 、 $\pi 322_t^\xi$ 分别代表约束条件(24)和(32)左右两边不等式的对偶变量.

对于上述的建筑集群供能系统优化问题的确定性多目标线性规划模型, 采用 Benders 分解对其进行求解. 以两个建筑楼宇所组成的建筑集群为例, 具体步骤如下.

初始化: 建筑楼宇权重组合 $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.9$.

Step 1: 设置 $r = s = v = 0$, r 、 s 、 v 分别表示可行割平面个数、最优割平面个数以及迭代次数.

Step 2: 令 $v = v + 1$, 求解修改目标函数后的第1阶段线性规划模型, 约束条件中增加可行割平面(45), 以及最优割平面式(44), 得出最优解 $(\text{cap}_v^v, \theta^v)$. 若此时没有最优割平面和可行割平面, 则设 $\theta = -\infty$, 在满足约束条件下初始化 cap 值.

Step 3: 判断 cap 取值是否在第2阶段模型的可行域内, 若不在, 则增加可行割平面, 令 $r = r + 1$, 转到 Step 2; 若在, 则转到 Step 4.

Step 4: 对于每个场景 $\xi \in \Xi$, 将 cap^v 值代入第2阶段, 进而求解修改目标函数后的第2阶段线性规划模型, 得出该阶段模型的解. 进一步判断: 1) 若 θ^v 不满足式(44), 则令 $s = s + 1$, 增加最优割平面, 返回 Step 2; 2) 若 θ^v 满足式(44), 则迭代终止, 得出该权重组合下的最优解. 然后, 更新建筑楼宇的权重组合 $w_1 = w_1 + 0.1$, $w_2 = w_2 - 0.1$. 若 $w_1 < 1$, 则转 Step 1,

$\sum_{\xi,i} P_\xi w_i f_{\text{operation},i}^\xi$, 决策变量取值约束依然为式(34)和(35). 首先求解主问题, 得出设备容量决策值并代入子问题中; 然后进行求解. 若满足最优解条件, 则迭代终止; 若不满足, 则不断向主问题添加最优割平面或可行割平面, 具体公式如下:

得出最优解; 若 $w_1 = 1$, 则计算终止, 即可得出建筑楼宇所有权重组合下的 Pareto 最优解集.

4 算例分析

4.1 算例描述与求解

本文采用 CPLEX 软件进行具体的模型求解, 实验的程序运行配置环境为: 4核处理器-2.20 GHz-Intel-Core-i5, 内存 4 G. 以文献[18]中美国亚利桑那州凤凰城的两个建筑楼宇所组成的建筑集群为实验对象, 将7月份某一天的24小时数据作为实验数据来源, 即 $T = 24$, $N = 2$. 两个建筑楼宇对电能和冷能的需求量分别如图2(a)和图2(b)所示, 对热能的需求为0. 此外, 假设每个决策周期内, 建筑楼宇对电能、冷能和热能的需求量之间相互独立.

本文考虑建筑楼宇的能源需求和能源价格为随机因素. 能源需求包括电能需求、冷能需求以及热能需求. 由文献[10]可知, 每个决策周期内, 三者各自服从正态分布 $\theta \sim N(\mu, \sigma^2)$, 并且满足 $1.96\sigma = 20\% \mu$, μ 为图2中已给出的数值. 能源价格(包括电价和燃料价格)随着市场的变动而发生改变, 假设其服从均匀分布^[10], 如表1所示. 设备单位容量成本和设备单位维护成本如表2所示. 其中: 设备单位容量成本包括 IE (\$/kW) 和 IS (\$/kW), 设备维护单位成本包括 ME (\$/kW) 和 MS (\$/kW). 设备性能参数见表3. 其他参数值设置: utc_{\min} , utd_{\min} , us_{\min} , ubc_{\min} , ubd_{\min} , ub_{\min} 为 0.1; utc_{\max} , utd_{\max} , ubc_{\max} , ubd_{\max} 为 0.5; us_{\max} , ub_{\max} 为 0.9.

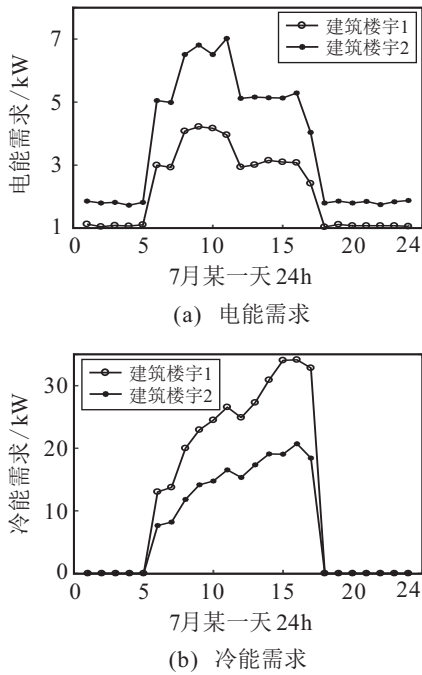


图2 建筑楼宇7月某一天24h内的能源需求

表1 能源价格的均匀分布

能源价格/\$	均匀分布
R_p	[0.012, 0.212]
R_f	[0.017, 0.037]

表2 设备单位容量成本(\$/kW)和维护成本(\$/kW)

IE_{pgu}	IE_b	IE_{ac}	IE_{he}	IS_{ba}	IS_{hs}
1000	186	250	300	33	33
ME_{pgu}	ME_b	ME_{ac}	ME_{he}	MS_{ba}	MS_{hs}
15	3	2	5	1	1

表3 设备性能参数

η_{pgu}	η_p	η_b	η_c	η_h	η_{td}	η_{bc}	η_{bd}	$r/\%$	n
6.97	0.51	0.9	0.7	0.85	0.95	0.9	0.9	3	20

根据上述构建的随机规划模型,可以对比分析随机的能源需求、随机的能源价格、两者同时随机对建筑集群供能系统最优化决策影响程度.因此,设计以下4个实验:

case 1:确定性模型,能源需求和能源价格以均值代替;

case 2:能源需求为随机变量,服从正态分布;

case 3:能源价格为随机变量,服从均匀分布;

case 4:能源需求和能源价格均为随机变量.

以case 4为例,验证本文算法对于建筑集群供能系统优化问题有效性.当两个建筑楼宇重要程度相同时(权重组合为(0.5,0.5)),在场景数分别为5、10、30下,对比直接采用CPLEX软件与采用Benders分解算

法在模型求解时间和最优解方面的差异,结果如表4所示.表4说明了本文提出的方法不仅可以提高模型求解效率,而且也可以保证解的质量.其中,场景是在服从特定分布的情况下随机产生的,并假设每个场景发生的概率相等.

表4 case4 在不同场景数下,模型求解效率对比

指标	变量及方法	场景数		
		5	10	30
问题规模	约束变量	7 102	14 202	42 602
	决策变量总数	5 768	11 528	34 568
求解时间/s	直接求解(CPLEX)	88.62	1 208.76	3 742.58
	Benders分解算法求解	5.41	19.87	26.93
最优解/\$	直接求解(CPLEX)	24.29	24.11	23.17
	Benders分解算法求解	24.24	24.03	23.09

4.2 算例分析

由前述可知,对于建筑集群供能系统的优化模型,本文提出的算法具有更高的求解效率.进一步,为了能够在合理的时间内求得建筑集群供能系统最优决策方案,需要通过收敛性试验获得适当的场景数.选取case 4在权重组合为(0.5,0.5)时,求解获得场景数从1~50不断变化下的最优化目标函数,结果如图3所示.由图3可知,当场景数大于30时,最优化目标函数值呈现平稳趋势.因此,30个场景可以保证最优化结果的准确性.

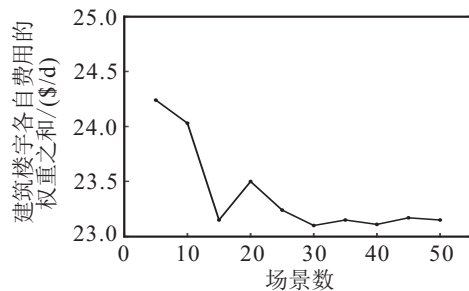


图3 不同场景数下,case 4中建筑楼宇各自总费用的权重之和

选择场景数为30时,对比分析不同随机因素对建筑集群供能系统优化结果的影响程度.采用Benders分解算法求解该多目标优化模型,得出两个建筑楼宇的Pareto最优决策下的费用曲线,如图4所示.4条曲线分别代表着供能系统在case 1~case 4下,建筑集群中的两个建筑楼宇总费用的Pareto最优解曲线.

为了更清晰地对比不同随机因素对最优化决策的影响,表5列出了权重组合为(0.5,0.5)时,case 1~case 4情况下建筑集群总费用和两个建筑

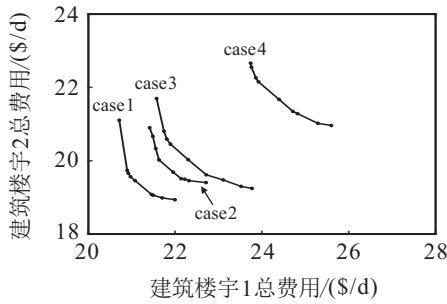


图4 case 1 ~ case 4, 两个建筑楼宇各自总费用的Pareto最优曲线

表5 建筑集群总费用以及建筑楼宇各自费用

成本	case1 确定值 (\$/d)	case2		case3		case4	
		随机值 /(\$/d)	相比 case1/%	随机值 /(\$/d)	相比 case1/%	随机值 /(\$/d)	相比 case1/%
总费用	40.54	41.65	2.7	42.33	4.4	46.06	13.6
建筑楼宇1	21.08	21.96	4.2	22.30	5.8	24.39	15.7
建筑楼宇2	19.46	19.69	1.2	20.03	2.9	21.67	12.9

5 结论

本文考虑在能源需求和能源价格随机的情况下, 针对引入蓄能装置的建筑集群CCHP系统的设计和优化问题, 从多目标和随机规划的角度建立了多目标随机规划模型. 采用权重加权法和Benders分解算法对模型进行求解, 并通过随机生成场景进行算例分析, 验证了模型和算法的有效性. 本文假设随机因素之间相互独立. 在后续的研究中, 可以探讨随机因素相关时的建筑集群供能系统的优化问题, 以及设计更加高效的求解算法.

参考文献(References)

[1] Jafari-Marandi R, Hu M Q, Omitaomu O F A. A distributed decision framework for building clusters with different heterogeneity settings[J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 393-404.

[2] Yokoyama R, Ito K. Optimal design of gas turbine cogeneration plants in consideration of discreteness of equipment capabilities[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(2): 336-343.

[3] Roman K K, Alvey J B. Selection of prime mover for combined cooling, heating, and power systems based on energy savings, life cycle analysis and environmental consideration[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 110: 170-181.

[4] 郑春元, 翟晓强, 吴静怡, 等. 基于TRNSYS的冷热电联供系统建模与蓄能策略分析[J]. *化工学报*, 2015, 66(S2): 311-317. (Zheng C Y, Zhai X Q, Wu J Y, et al. Modeling of CCHP and analysis of thermal storage strategy by using TRNSYS

楼宇各自的费用. 由表5可以看出, 不考虑随机因素影响的case 1最优化决策下总费用最低. 也就是说, 不考虑随机因素时的最优化总费用是被低估的, 可能无法达到. 表5数据同时表明随机的能源价格相比于随机的能源需求, 对建筑集群总费用影响程度更大. 此外, 两类随机因素对总费用具有累计影响效果. 尽管优化建筑集群供能系统时, 考虑随机因素会增加最优化总费用, 但是可以提高决策的准确性.

software[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(S2): 311-317.)

[5] Mago P J, Luck R. Evaluation of a baseloaded combined heating and power system with thermal storage for different small building applications[J]. *International Journal of Energy Research*, 2013, 37(2): 179-188.

[6] Bianchi M, De Pascale A, Melino F. Performance analysis of an integrated CHP system with thermal and electric energy storage for residential application[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 928-938.

[7] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. *电网技术*, 2017, 41(2): 418-425. (Hu R, Ma J, Li Z K, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating power system[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(2): 418-425.)

[8] 王鲁浩, 李歧强, 王桂荣, 等. 多可再生资源冷热电联供微网系统环境经济优化调度[J]. *控制与决策*, 2016, 31(5): 913-918. (Wang L H, Li Q Q, Wang G R, et al. Optimal environmental economic scheduling of combined cooling heating and power microgrid system with multi-renewable energy[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 913-918.)

[9] Wei M L, Yuan W X, Fu L, et al. Summer performance analysis of coal-based CCHP with new configurations comparing with separate system[J]. *Energy*, 2018, 143: 104-113.

[10] Yang Y, Zhang S J, Xiao Y H. Optimal design of distributed energy resource systems based on two-stage stochastic programming[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1358-1370.

- [11] Hu M Q, Cho H J. A probability constrained multi-objective optimization model for CCHP system operation decision support[J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 230-242.
- [12] Kuznia L, Zeng B, Centeno G, et al. Stochastic optimization for power system configuration with renewable energy in remote areas[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 210(1): 411-432.
- [13] Zhou Z, Zhang J Y, Liu P, et al. A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems[J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 135-144.
- [14] Ji L, Niu D X, Huang G H. An inexact two-stage stochastic robust programming for residential micro-grid management-based on random demand[J]. *Energy*, 2014, 67: 186-199.
- [15] Mohammadi S, Soleymani S, Mozafari B. Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 54: 525-535.
- [16] Hu M Q, Weir J D, Wu T. Decentralized operation strategies for an integrated building energy system using a memetic algorithm[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 217(1): 185-197.
- [17] Hu M Q, Weir J D, Wu T. An augmented multi-objective particle swarm optimizer for building cluster operation decisions[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 25: 347-359.
- [18] Dai R, Hu M Q, Yang D, et al. A collaborative operation decision model for distributed building clusters[J]. *Energy*, 2015, 84: 759-773.
- [19] Marino C, Marufuzzaman M, Hu M Q, et al. Developing a CCHP-microgrid operation decision model under uncertainty[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2018, 115: 354-367.
- [20] 张人千, 张兰慷. 基于收益-风险双目标规划的随机能力扩张模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(7): 1678-1688.
(Zhang R Q, Zhang L K. Stochastic capacity expansion model based on bi-objective programming of return and risk[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(7): 1678-1688.)
- [21] 葛洪磊, 刘南. 复杂灾情情境下应急资源配置的随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3024-3042.
(Ge H L, Liu N. A stochastic programming model for relief resources allocation problem based on complex disaster scenarios[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3024-3042.)
- [22] 王海军, 杜丽敬, 马士华. 震后应急物流系统中双目标开放式选址: 路径问题模型与算法研究[J]. *管理工程学报*, 2016, 30(2): 108-115.
(Wang H J, Du L J, Ma S H. Model and algorithms for integrated open location and routing problem in emergency logistics under earthquake[J]. *Journal of Industrial Engineering Management*, 2016, 30(2): 108-115.)
- [23] 陈涛, 黄钧, 朱建明. 基于信息更新的两阶段鲁棒-随机优化调配模型研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 67-77.
(Chen T, Huang J, Zhu J M. Two-stage stochastic decision model for relief allocation based on disaster scenario information update[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(10): 67-77.)
- [24] Birge J R, Louveaux F V. A multicut algorithm for two-stage stochastic linear programs[J]. *European Journal of Operational Research*, 1988, 34(3): 384-392.
- [25] You F, Grossmann I E. Multicut Benders decomposition algorithm for process supply chain planning under uncertainty[J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 210(1): 191-211.
- [26] Birge J R, Louveaux F V. *Introduction to stochastic programming*[M]. New York: Springer Science and Business Media, 2011.

作者简介

楚晓琳(1992—), 女, 博士生, 从事能源运作优化的研究, E-mail: cxlin2016@126.com;

杨东(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源运作优化、产品配置及优化等研究, E-mail: yangdong@dhu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)