

A Stochastic Decision Model for the Collaborative Building Cluster Considering the Benefit Requirements of Buildings

Rui Zhou, Jia Li, Dong Yang*, Xiaolin Chu

Glorious Sun School of Business & Management, Donghua University, Shanghai
Email: yangdong@dhu.edu.cn

Received: Aug. 25th, 2019; accepted: Sep. 13th, 2019; published: Sep. 20th, 2019

Abstract

The building cluster's operation is an important contributor to better energy efficiency and lower energy cost. Yet, the existing research only emphasizes the optimization of the entire building cluster's collective benefit and neglects the benefit requirements of buildings in the cluster. This will curb the operation of the building cluster when buildings belong to different owners as such owners are profit-seeking. To handle this problem, this paper considers the benefit requirements from buildings, that is, building owners require that the operation of the building cluster provide at least a certain amount of operational cost savings. Otherwise, they would refuse to join in the operation of the building cluster. Additionally, this paper also takes into account the uncertainty in building energy demands. To study the operation of the building cluster with random energy loads considering the benefit requirement from buildings, this research adopts scenario-based stochastic programming to formulate a stochastic mixed-integer programming model. In this model, buildings' benefit requirements are expressed as constraints. Numerical experimental results demonstrate that, compared to the collaborative operation of the building cluster without buildings' benefit requirements, the one considering such requirements can provide building owners with the operational cost saves required by them, such as 15% of cost savings, and does not increase the total operational cost of the building cluster, which is still about 31% savings of cost.

Keywords

Smart Building, Random Energy Demand, Stochastic Programming, Benefit Requirement

考虑单个建筑盈利需求的协作式建筑群随机规划决策模型

周 瑞, 李 嘉, 杨 东*, 楚晓琳

*通讯作者。

东华大学旭日工商管理学院, 上海
Email: yangdong@dhu.edu.cn

收稿日期: 2019年8月25日; 录用日期: 2019年9月13日; 发布日期: 2019年9月20日

摘要

建筑群运营是建筑节能减排的有效方式。然而, 现有研究只强调建筑群整体利益的最优, 忽略群内单个建筑的盈利需求。这将阻碍建筑群的运营, 尤其在建筑属于不同实体所有时, 因为建筑所有者是追逐利益的。对此, 研究考虑单个建筑的盈利需求, 即建筑所有者要求建筑群运营为自己节约至少一定的建筑运营成本, 否则它们将退出建筑群。此外, 研究也考虑了建筑能源需求的不确定性。针对能源需求不确定的, 考虑单个建筑盈利需求的建筑群协作运营优化问题, 研究采用基于场景的随机规划构建随机混合整数规划模型, 将单个建筑的盈利需求表示为约束。算例实验表明, 与不考虑单个建筑盈利需求的建筑群运营相比, 考虑这些盈利需求的建筑群运营能为建筑所有者提供它们所要求的运营成本节约量, 例如15%的成本节约, 同时保障建筑群的总运营成本不增加, 仍然节约近31%的总运营成本。

关键词

智能建筑, 随机能源需求, 随机规划, 盈利需求

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人口的增长和对舒适环境的要求日益增多, 建筑消耗了越来越多的能源。在2016年, 建筑的能源消耗占到了全球能源消耗的20.1% [1]。根据美国能源信息管理机构的预测, 建筑对能源的需求将每年平均增加1.5% [2]。然而, 由于全球能源总量是有限的, 可供建筑使用的能源量也是有限的。建筑日益增长的能源需求和有限的可使用能源供应量之间存在冲突。由于这一冲突日渐严重, 研究人员开始关注提高建筑的能源使用效率和降低建筑消耗的能源量。近年来, 建筑群的运营获得了越来越多的研究关注, 因其能明显降低建筑的能源消耗[3] [4]。建筑群通常由互联的地理位置相近的一群建筑组成, 这些建筑和相同的供能基础设施(例如电网)相连[5]。这些建筑要么共享供能系统, 要么独自拥有自己的供能系统。在运营时, 群内建筑可以共享能源和信息来满足它们的能源需求。

建筑群运营的优化已经引起学者的极大关注。Hu 等对建筑群运营优化进行了第一步探索, 提出了一个双层运营决策框架[3]。Dai 等为建筑群的运营提出了一种协作运营策略, 并证实该策略能有效节约建筑群的能源成本、减少建筑群的能源消耗和碳排放量[6]。Huang 等提出了一种响应动态能源价格的协作式需求控制方法[7], 一种针对智能建筑群的由上至下的控制方法[8]以及一种针对大规模建筑群的分级需求相应控制方法[9]来优化建筑群的运营。现有建筑群运营优化的研究都表明, 建筑群能减少整个建筑群的运营成本和整个建筑群的能源消耗。它们都隐含了一个假设, 即群内建筑都愿意为最大化建筑群的整体利益而相互合作。然而, 这一假设在实际中难以实现。因为建筑群内不同的建筑所有者通常有各自的不同甚至是冲突的目标或利益, 且它们都是逐利的[10], 希望或要求参与建筑群运营能为自己带来一定的

利益。在只追求整体利益最大化而忽略参与建筑的所有者利益时，建筑所有者对合作组成建筑群协作运营来最大化建筑群的整体利益存在着抗拒心理，尤其当建筑属于不同实体所有时。对此，本文提出，在参与建筑群运营时，建筑所有者会提出盈利需求[10]，要求建筑群的运营会为自己带来一定量的运营成本的节约来保障自己的利益；一旦它们不能获得所要求的运营成本节约量，它们将退出建筑群的运营。因此，本文将研究考虑建筑所有者的盈利需求的建筑群协作运营的优化。

本研究也考虑了建筑群运营过程中的不确定性。这是因为在实际应用中，建筑群的运营面临着来自能源价格、能源需求、住户行为等方面各种各样的不确定性。一旦这些不确定性出现，建筑群很难按确定环境下最优运营决策所要求的来运营。因此，在建筑群的运营优化中考虑不确定性很重要。此外，在建筑群运营优化问题中考虑不确定性的研究数目目前较少。例如，为应对建筑供能系统和运营环境中存在的不确定性，Hu 等采用容噪的数据融合技术来校正确定型的决策模型[11]。Wakui 等针对变动的能源需求，将基于 SVR 的能源需求预测法集成到住宅建筑群的运营管理系统中[12]。

基于上述研究的不足，本文研究能源需求不确定下，考虑建筑所有者的盈利需求的协作式建筑群的运营优化问题，采用基于场景的随机规划方法[13]为该问题建立了随机规划决策模型，并采用实际数据来展开算例实验，探究盈利需求对建筑所有者利益和建筑群整体利益的影响。

2. 问题描述

本文研究为满足随机的建筑能源需求，考虑参与建筑所有者的盈利需求的协作式建筑群的运营决策问题。有一组地理位置相近的建筑，它们对能源(电能、冷能和热能)的需求是随机变动的。这些建筑属于不同的所有者。每一个所有者视满足建筑随机能源需求的运营成本为自己的利益。同时，这些所有者都是逐利的，希望协作运营建筑群能给自己带来好处，例如，参与协作运营后，自己能节约一定的建筑运营成本。对此，每一个建筑所有者提出盈利需求，即要求一个最低的运营成本节约值；如果不能保障它们获得要求的运营成本节约量，它们将拒绝或退出建筑群。这些所有者的盈利需求规定参与建筑协作运营会给它们带来一定的运营成本的节约。具体来说，建筑所有者为逐利而提出的盈利需求是，相比于独立运营，协作运营带来建筑运营成本节约的百分比；如果要求的成本节约百分比得不到满足，建筑所有者将退出建筑群协作运营。在提出盈利需求后，这些所有者进行合作，将建筑组成建筑群并协作运营该建筑群来满足变动的建筑能源需求。

如图 1 所示，组成的建筑群共享所有供能系统。供能系统具体包括冷热电联供(CCHP)系统、太阳能电板、蓄电池和热能源储存系统(TES)。在 CCHP 系统内，发电机组通过气涡轮产生电能，借助回收系统回收高温余热来产生热能源；锅炉通过燃烧燃料直接产生热能源；热交换机和吸收式制冷机直接向建筑提供冷能和热能。由于供能系统产生能源的成本更低，每个群内建筑首先通过 CCHP 系统、太阳能电板和蓄电池输出的电能来满足自身的电能需求，通过 CCHP 系统和 TES 输出的热能源来满足自身的冷能和/或热能需求。如果供能系统产生的能源不能满足建筑的能源需求，群内建筑将从电网购买电能和从本地热能源市场购买冷能和/或热能来弥补未被满足的能源需求。如果供能系统产生的能源过剩，剩余部分将被出售给电网和本地热能源市场。其中，电网和本地热能源市场分别允许电能和热能源的交易。本文假设本地热能源市场是基于分布式能源网络的，可以通过相互连接的管道交易热能源来获得收益[14]。

建筑群运行时，建筑所有者将相互协作来首先决定太阳能电板、发电机组、锅炉、蓄电池和 TES 的工作状态，再决定不同能源需求场景下 1) CCHP 系统、太阳能电板和蓄电池为某一群内建筑产生或释放的电能的多少，2) 某一群内建筑从电网购买的电能的多少或向电网出售的电能的多少，3) CCHP 系统和 TES 为某一群内建筑提供的热能源的多少和，4) 某一群内建筑从本地热能源市场购买的热能源的多少或向本地热能源市场出售的热能源的多少。通过最优地做出上述决策，这些建筑所有者最小化整个建筑群

的运营成本,同时满足它们的盈利需求,保证每个参与者都获得一定量的运营成本。因此,本文研究的问题也是,在满足单个建筑所有者的盈利需求约束下最小化整个协作式建筑群总运营成本的决策问题。

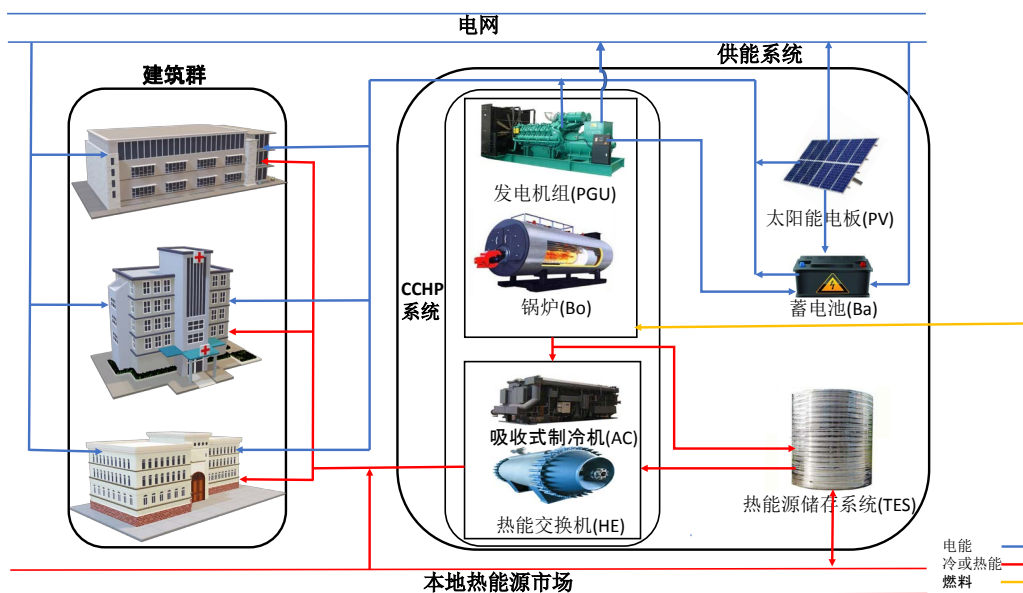


Figure 1. System architecture for the collaborative building cluster
图 1. 协作式建筑群的系统结构图

3. 数学模型

如上所述,建筑所有者是逐利的,提出盈利需求来保证协作运营建筑群能为自己带来一定的运营成本的节约。在这里,建筑所有者的盈利需求表示为协作运营时,建筑 i 的运营成本相比于独立运营时节约了一定的百分比 $\hat{\gamma}_i$ 。在提出盈利需求后,建筑所有者相互合作来协作运营建筑群从而满足建筑变动的能源需求。对于建筑变动的能源需求(电能需求、冷能需求和热能需求),本研究采用一组场景来描述。每个场景描述了这些随机能源需求的一种实现。针对所研究的问题,本研究采用基于离散场景的随机规划[13]来构建数学模型。对满足单个建筑所有者的盈利需求约束下最优化建筑群整体运营决策(SB-BC)这一问题,数学模型构建如下。模型的参数的符号定义在表 1 中详细列出。

$$\min H_{total} = \sum_{i=1}^N H_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_i = & \sum_{s=1}^S Pr_s \sum_{t=1}^T \{ P_{fPG} fPG_{t,i,s} + P_{fBo} fBo_{t,i,s} + P_{pe} (epB_{t,i,s} + epb_{t,i,s}) \\ & + P_{pc} (cpB_{t,i,s} + cpT_{t,i,s}) + P_{ph} (hpB_{t,i,s} + hpT_{t,i,s}) \\ & - P_{se} (esPV_{t,i,s} + esPG_{t,i,s}) - P_{sc} csT_{t,i,s} - P_{sh} hsT_{t,i,s} \} \end{aligned} \quad (2)$$

$$H_i \leq Href_i \cdot (1 - \hat{\gamma}_i) \quad \forall i \quad (3)$$

$$ePGB_{t,i,s} + ePVB_{t,i,s} + ebB_{t,i,s} + epB_{t,i,s} \geq EL_{t,i,s} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (4)$$

$$cPGB_{t,i,s} + cBoB_{t,i,s} + cTB_{t,i,s} + cpB_{t,i,s} \geq CL_{t,i,s} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (5)$$

$$hPGB_{t,i,s} + hBoB_{t,i,s} + hTB_{t,i,s} + hpB_{t,i,s} \geq HL_{t,i,s} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (6)$$

Table 1. Nomenclature for parameters
表 1. 参数的符号定义

集合	
T	决策时间段的集合, 索引为 t
N	建筑的集合, 索引为 i
S	场景的集合, 索引为 s
重要参数	
Δt	决策时间段的长度
Pr_s	场景 s 的概率
P_{pG}	发电机组所使用燃料的购买价格
P_{bBo}	锅炉所使用燃料的购买价格
P_{pe}	从电网购买电能的价格
P_{se}	向电网出售电能的价格
P_{pc}	从本地热能源市场购买冷能的价格
P_{sc}	向本地热能源市场出售冷能的价格
P_{ph}	从本地热能源市场购买热能的价格
P_{sh}	向本地热能源市场出售热能的价格
$\hat{\gamma}_i$	建筑 i 的所有者要求的运营成本的节约百分比
$Href_i$	建筑 i 独立运营时的期望运营成本
$EL_{t,i,s}$	场景 s 中建筑 i 在 t 时段的电能需求
$CL_{t,i,s}$	场景 s 中建筑 i 在 t 时段的冷能需求
$HL_{t,i,s}$	场景 s 中建筑 i 在 t 时段的热能需求
SOL_t	t 时段太阳辐射量
SeG	电网的容量大小
StL	本地热能源市场的大小
SPV	太阳能电板的大小
SPG	发电机组的容量大小
SBo	锅炉的容量大小
β_{PVe}	太阳能电板发电效率系数
β_{PGe1}	发电机组的发电效率系数 1
β_{PGe2}	发电机组的发电效率系数 2
β_{PGt}	发电机组的燃料转换成热能源的转换系数
β_{Bot}	锅炉的燃料转换成热能源的转换系数
β_{bc}	蓄电池的充电效率系数
β_{bd}	蓄电池的放电效率系数
β_{Te}	TES 的储能效率系数
β_{Td}	TES 的释能效率系数

Continued

Eb_{\min}	蓄电池的最小蓄电量限制
Eb_{\max}	蓄电池的最大蓄电量限制
Ebc_{\min}	蓄电池的最小充电量限制
Ebc_{\max}	蓄电池的最大充电量限制
Ebd_{\min}	蓄电池的最小放电量限制
Ebd_{\max}	蓄电池的最大放电量限制
TT_{\min}	TES 的最小蓄能量限制
TT_{\max}	TES 的最大蓄能量限制
TTc_{\min}	TES 的最小储能量限制
TTc_{\max}	TES 的最大储能量限制
TTd_{\min}	TES 的最小释能量限制
TTd_{\max}	TES 的最大释能量限制

$$\sum_{i=1}^N (ePVB_{t,i,s} + ePVb_{t,i,s} + esPV_{t,i,s}) \leq SPV \cdot SOL_t \cdot \beta_{PVe} \cdot sPV_t \quad \forall t \quad \forall s \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N fPG_{t,i,s} \leq sPG_t \cdot SPG \quad \forall t \quad \forall s \quad (8)$$

$$ePGB_{t,i,s} + ePGB_{t,i,s} + esPG_{t,i,s} \leq (fPG_{t,i,s} - \beta_{PGe2} \cdot sPG_{t,s}) / \beta_{PGe1} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (9)$$

$$cPGB_{t,i,s} + hPGB_{t,i,s} + tPGT_{t,i,s} \leq fPG_{t,i,s} \cdot \beta_{PGt} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N fBo_{t,i,s} \leq sBo_t \cdot SBo \quad \forall t \quad \forall s \quad (11)$$

$$cBoB_{t,i,s} + hBoB_{t,i,s} + tBoT_{t,i,s} \leq fBo_{t,i,s} \cdot \beta_{Bot} \quad \forall t \quad \forall i \quad \forall s \quad (12)$$

$$sbc_t + sbd_t \leq 1 \quad \forall t \quad (13)$$

$$Eb_{\min} \leq eb_{t,s} \leq Eb_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (14)$$

$$sbc_t \cdot Ebc_{\min} \leq ebc_{t,s} \leq sbc_t \cdot Ebc_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (15)$$

$$sbd_t \cdot Ebd_{\min} \leq ebd_{t,s} \leq sbd_t \cdot Ebd_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (16)$$

$$ebc_{t,s} = \sum_{i=1}^N (ePGB_{t,i,s} + ePVb_{t,i,s} + ePb_{t,i,s}) \cdot \beta_{bc} \quad \forall t \quad \forall s \quad (17)$$

$$ebd_{t,s} = \sum_{i=1}^N ebB_{t,i,s} / \beta_{bd} \quad \forall t \quad \forall s \quad (18)$$

$$eb_{1,s} = eb_0 + (ebc_{1,s} - ebd_{1,s}) \cdot \Delta t \quad \forall s \quad (19)$$

$$eb_{t,s} = eb_{t-1,s} + (ebc_{t,s} - ebd_{t,s}) \cdot \Delta t \quad \forall t \geq 2 \quad \forall s \quad (20)$$

$$sTc_t + sTd_t \leq 1 \quad \forall t \quad (21)$$

$$TT_{\min} \leq tT_{t,s} \leq TT_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (22)$$

$$sTc_t \cdot TTc_{\min} \leq tTc_{t,s} \leq sTc_t \cdot TTc_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (23)$$

$$sTd_t \cdot TTd_{\min} \leq tTd_{t,s} \leq sTd_t \cdot TTd_{\max} \quad \forall t \quad \forall s \quad (24)$$

$$tTc_{t,s} = \sum_{i=1}^N (tPGT_{t,i,s} + tBoT_{t,i,s} + hpT_{t,i,s} + cpT_{t,i,s}) \cdot \beta_{Tc} \quad \forall t \quad \forall s \quad (25)$$

$$tTd_{t,s} = \sum_{i=1}^N (hTB_{t,i,s} + hsT_{t,i,s} + cTB_{t,i,s} + csT_{t,i,s}) / \beta_{Td} \quad \forall t \quad \forall s \quad (26)$$

$$tT_{1,s} = tT_0 + (tTc_{1,s} - tTd_{1,s}) \cdot \Delta t \quad \forall s \quad (27)$$

$$tT_{t,s} = tT_{t-1,s} + (tTc_{t,s} - tTd_{t,s}) \cdot \Delta t \quad \forall t \geq 2 \quad \forall s \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^N (epB_{t,i,s} + epb_{t,i,s}) \leq SeG \quad \forall t \quad \forall s \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^N (esPV_{t,i,s} + esPG_{t,i,s}) \leq SeG \quad \forall t \quad \forall s \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^N (cpB_{t,i,s} + cpT_{t,i,s} + hpB_{t,i,s} + hpT_{t,i,s}) \leq StL \quad \forall t \quad \forall s \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^N (csT_{t,i,s} + hsT_{t,i,s}) \leq StL \quad \forall t \quad \forall s \quad (32)$$

所研究的 SB-BC 问题的目标是最小化整个建筑群的期望运营成本, 即协作运营时群内建筑的期望运营成本之和, 如公式(1)所示。公式(2)表示的是协作运营建筑群时建筑 i 的期望运营成本 H_i , 具体包括购买发电机组和锅炉所使用燃料的费用、从电网购买电能用于满足建筑 i 电能需求和为蓄电池充电的费用、从本地热能源市场购买冷能用于满足建筑 i 冷能需求和为 TES 蓄能的费用、从本地热能源市场购买热能用于满足建筑 i 热能需求和为 TES 蓄能的费用、向电网出售电能的收入和向本地热能源市场出售冷能和热能的收入。公式(3)是建筑 i 所有者提出的盈利需求, 即相比于独立运营时的期望运营成本 $Href_i$, 协作运营时建筑 i 的期望运营成本 H_i 减少至少 $\hat{\gamma}_i$ (百分比); 否则建筑 i 将退出协作运营建筑群。其中, 独立运营时的成本 $Href_i$ 通过求解建筑 i 独立运营的模型(见附录 1)获得。当建筑 i 独立运营时, 它只能依靠电网和本地热能源市场来满足自身的能源需求。盈利需求中的运营成本节约百分比 $\hat{\gamma}_i$ 由建筑所有者协商来决定。

公式(4)~(6)表达了场景 s 下 t 时段建筑 i 的能源需求(电能需求 $EL_{t,i,s}$ 、冷能需求 $CL_{t,i,s}$ 和热能需求 $HL_{t,i,s}$)必须得到满足。以电能需求为例, 建筑 i 通过发电机组和太阳能电板产生的电能、蓄电池释放的电能以及从电网购买的电能来满足。公式(7)表示场景 s 下 t 时段太阳能电板产生的电能受电板的大小、 t 时段的太阳辐射量、电板的发电效率和 t 时段电板的工作状态限制。该公式的左端描述了太阳能电板产生的电能可以用于向建筑供电、为蓄电池充电或者出售给电网。公式(8)表示场景 s 下 t 时段发电机组消耗的燃料量不能超过它的容量。公式(9)~(10)强调场景 s 下 t 时段发电机组为建筑 i 产生的电能量和热能源量和它所消耗的燃料量、发电效率系数 1 β_{PGe1} 、发电效率系数 2 β_{PGe2} 和它的燃料-热能源转换系数 β_{PGt} 有关。类似地, 锅炉的容量大小也限制场景 s 下 t 时段锅炉所消耗的燃料量, 如公式(11)所示; 场景 s 下 t 时段锅炉为建筑 i 产生的热能源的多少和它所消耗的燃料量和它的燃料-热能源转换系数 β_{Bot} 有关(见公式(12))。

公式(13)~(20)描述了蓄电池的工作状态和工作过程。公式(13)强调蓄电池有休息、充电和放电这三种状态, 但只能选择一种状态来工作。公式(14)~(16)分别表示了场景 s 下 t 时段蓄电池的蓄电量的大小限制、充电量的大小限制和放电量的大小限制。公式(17)和公式(18)分别描述了场景 s 下 t 时段蓄电池充电活动和放电活动。其中 β_{bc} 和 β_{bd} 是蓄电池的充电效率和放电效率。公式(19)和公式(20)表示了场景 s 下 t 时段

蓄电池的蓄电量由上一时刻的蓄电量和这一时刻的充/放电量决定。公式(21)~(28)是 TES 的工作状态约束和工作过程约束。公式(21)表示 TES 有三种状态,即休息状态、储能(储存能源)状态和释能(释放能源)状态。但在工作时, TES 只能表现一种状态。公式(22)~(24)分别对 TES 场景 s 下 t 时段的蓄能量的大小、储能量的大小和释能量的大小提出了限制。公式(25)和公式(26)分别描述了场景 s 下 t 时段 TES 储能活动和释能活动。其中 β_{rc} 和 β_{rd} 是 TES 的储能效率和释能效率。与蓄电池相似, TES 在场景 s 下 t 时段的蓄能量由上一时段的蓄能量、这一时段的储能量和释能量所决定,见公式(27)和公式(28)。公式(29)~(32)表示了电网和本地热能源市场在场景 s 下 t 时段的买卖交易规模不能超过电网和本地热能源市场的容量大小。

关于决策变量,需要说明的是,为了研究建筑群内每栋建筑的能源流动,本文将与向建筑分配能源相关的变量进行了拆分,例如 $ePVB_{t,i,s}$, $fPG_{t,i,s}$, $fBo_{t,i,s}$ 和 $ebB_{t,i,s}$ 。这些变量在实际应用中是不可拆分的。此外,上述模型涉及的所有决策变量都是非负的,它们的下标 t , i 和 s 分别是决策时间段 T 、建筑集合 N 和场景集合 S 的索引。例如, $epB_{t,i,s}$ 表示场景 s 下建筑 i 在 t 时段从电网购买的电能的量。

4. 算例实验结果及其分析

本文使用算例来研究能源需求不确定下考虑建筑所有者的盈利需求的协作式建筑群的运营,探讨并分析建筑所有者盈利需求对建筑所有者利益和建筑群整体利益的影响。

4.1. 算例数据

所使用算例中的建筑群由位于美国亚利桑那州凤凰城的两栋商业建筑组成。算例中的太阳辐射量的大小使用了凤凰城 2010 年的太阳辐射数据[15]。算例的每个决策时间段 Δt 为 1 小时,总决策时长为 744 小时。算例以凤凰城当地的电能提供商¹的售电价作为从电网购买电能的价格,以天然气的购买价格 0.027 \$/kWh 作为发电机组和锅炉使用的燃料的购买价格[6]。从本地热能源市场购买热能源的价格假定介于售电价和燃料价格间。能源(电能、冷能和热能)的出售价格假定是能源的购买价格的一半[16]。电网和本地热能源市场的容量以建筑的最大能源需求为准。供能系统的技术系数的取值在表 2 中详细列出[6] [17]。对群内建筑随机变动的能源需求,如第三章所述,本研究采用场景来描述它们。假定建筑的电能需求、冷能需求和热能需求是相互独立。并且这些需求的概率分布服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 满足 $1.96\sigma = 0.2\mu$ [18]。基于这一假设,利用凤凰城建筑群夏季的能源需求数据,本研究通过 MATLAB 的随机数生成器生成了 3 个场景,分别是需求较低的场景、需求较高的场景和需求较平均的场景[13]。这三个场景的概率都是 1/3。

4.2. 盈利需求的影响

建筑所有者都是逐利的,因而在加入协作运营建筑群时会提出盈利需求,即要求协作运营时,它的建筑运营成本相比于独立运营时节约一定的百分比(不低于 $\hat{\gamma}_i$); 如果建筑运营成本节约百分比低于 $\hat{\gamma}_i$, 建筑将退出协作运营建筑群。本文将研究建筑所有者的盈利需求是否能为建筑所有者带来它们要求的运营成本节约量,来保障建筑所有者的利益,以及它们对建筑群整个运营成本(整体利益)的影响。对此,本文将考虑建筑所有者盈利需求的建筑群协作运营和不考虑建筑所有者盈利需求的建筑群协作运营进行对比。其中,不考虑建筑所有者盈利需求的建筑群协作运营不涉及第三章的公式(3) (盈利需求约束),其余的约束和考虑盈利需求的建筑群协作运营的约束一样[6]。在对比实验中,本文设计了四组盈利需求组合,分别是(20%, 15%), (25%, 20%), (30%, 25%)和(30%, 30%)。以第一组为例,凤凰城建筑群的参与建筑所有者提出的盈利需求是,建筑 1 节约至少 20%的运营成本,建筑 2 节约至少 15%的运营成本。

¹Detailed information of SPR electricity price is available at <https://www.srpnet.com/>.

Table 2. Main technological parameters and their values
表 2. 主要技术参数及其值

技术参数	符号	值
太阳能电板发电效率系数	β_{PVe}	0.8
发电机组的发电效率系数 1	β_{PGe1}	2.97
发电机组的发电效率系数 2	β_{PGe2}	11.66
发电机组的燃料转换成热能源的转换系数	β_{PGt}	0.51
锅炉的燃料转换成热能源的转换系数	β_{Bot}	0.9
蓄电池的充电效率系数	β_{bc}	0.9
蓄电池的放电效率系数	β_{bd}	0.9
TES 的储能效率系数	β_{Te}	1
TES 的释能效率系数	β_{Td}	0.95

表 3 展示的对比结果证实, 在考虑建筑所有者的盈利需求后, 建筑群协作运营能向建筑所有者提供它们要求的运营成本节约比(量), 有效保障它们的利益, 同时也没有损害建筑群的整体利益。如表 3 中“协作运营总成本”和“协作运营总成本节约百分比”列所示, 考虑建筑所有者的盈利需求与否的建筑群协作运营带来的总成本几乎是一样的, 大约为 703 \$, 并且总成本的节约百分比也一样, 接近 31%。这表明, 建筑所有者的盈利需求不会损害建筑群的整体利益, 不会带来整个建筑群运营成本的增加。但是, 当关注群内建筑各自的成本节约百分比时, 考虑盈利需求的建筑群协作运营明显优于不考虑的。如表 3 所示, 不考虑盈利需求的协作运营将为建筑 1 带来 48.48% 的运营成本节约, 却只为建筑 2 带来了 5.87% 的成本节约。而建筑 2 的所有者要求了最低 15% 的运营成本节约, 此时建筑 2 的所有者要求的成本节约量没有被满足, 它会拒绝加入或退出建筑群来协作运营。在这种情况下, 建筑群不能形成, 建筑 1 的所有者无法获得 48.48% 的成本节约。相比之下, 考虑盈利需求的协作运营能够满足建筑 1 和 2 的所有者对运营成本节约量的要求, 为每个建筑所有者带来它们要求的成本节约量。此外, 如(30%, 30%)这组盈利需求所示, 通过合理设置盈利需求, 协作运营能使所有参与建筑的运营成本减少大致相同的百分比, 更好地保障建筑所有者的利益, 更有效地促进建筑群协作运营。

Table 3. Comparison between the operation of the building cluster considering the benefit requirements of buildings and the one without the benefit requirements of buildings

表 3. 考虑建筑所有者的盈利需求与否的协作式建筑群运营的对比

建筑群	盈利需求($\hat{\gamma}_i$)		独立运营(H_{ref})			协作运营(H_i)			协作运营成本节约百分比		
	建筑 1	建筑 2	建筑 1	建筑 2	总成本	建筑 1	建筑 2	总成本	建筑 1	建筑 2	总成本
考虑盈利需求	20%	15%	598.78	419.33	1018.11	346.78	356.44	703.22	42.08%	15.00%	30.93%
	25%	20%	598.78	419.33	1018.11	367.79	335.47	703.26	38.57%	20.00%	30.92%
	30%	25%	598.78	419.33	1018.11	389.19	314.51	703.69	35.00%	25.00%	30.88%
	30%	30%	598.78	419.33	1018.11	409.95	293.54	703.49	31.53%	30.00%	30.90%
不考虑盈利需求	-	-	598.78	419.33	1018.11	308.49	394.72	703.21	48.48%	5.87%	30.93%

5. 结论

建筑群的运营受到了越来越多的研究关注, 因它能够有效提高建筑能源利用效率和降低建筑运营成本。然而, 大多数的建筑群运营优化的研究只追求建筑群整体利益的最大化(例如总运营成本的最低), 忽略了当参与建筑属于不同所有者时, 逐利的所有者参加建筑群运营时是希望获得一定量运营成本的节约这一事实。对此, 本研究提出逐利的建筑所有者在协作运营建筑群时会提出盈利需求, 即要求建筑群的协作运营必须降低它们的运营成本一定的百分比。此外, 本研究也考虑了建筑能源需求的不确定性, 提供更鲁棒的运营决策。本文研究了建筑能源需求不确定时, 考虑建筑所有者盈利需求的协作式建筑群的运营决策问题, 并采用随机规划为此问题构建了混合整数规划, 通过对比实验证明, 盈利需求能有效保证建筑群协作运营为参与建筑的所有者带来它们所要求的运营成本节约量, 保障它们的利益, 同时不会导致建筑群整个运营成本增加, 不会损伤建筑群的整体利益。研究的下一步方向是在考虑建筑所有者盈利需求的基础上, 从能源消耗、碳排放量等多个方面来评价建筑群的运营, 利用多目标规划来探究盈利需求对建筑群能源消耗、碳排放量多个方面的影响。

基金项目

上海市哲学社会科学规划课题(2018BGL002)。

参考文献

- [1] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. (2008) A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy and Buildings*, **40**, 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [2] US Department of Energy, Energy Information Administration (2016) International Energy Outlook. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- [3] Hu, M., Weir, J.D. and Wu, T. (2012) Decentralized Operation Strategies for an Integrated Building Energy System Using a Memetic Algorithm. *European Journal of Operational Research*, **217**, 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.09.008>
- [4] Jafari-Marandi, R., Hu, M. and Omaitou, O.A. (2016) A Distributed Decision Framework for Building Clusters with Different Heterogeneity Settings. *Applied Energy*, **165**, 393-404. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.088>
- [5] Vigna, I., Perneti, R., Pasut, W. and Lollini, R. (2018) New Domain for Promoting Energy Efficiency: Energy Flexible Building Cluster. *Sustainable Cities and Society*, **38**, 526-533. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.038>
- [6] Dai, R., Hu, M., Yang, D. and Chen, Y. (2015) A Collaborative Operation Decision Model for Distributed Building Clusters. *Energy*, **84**, 759-773. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.042>
- [7] Huang, P. and Sun, Y. (2019) A Collaborative Demand Control of Nearly Zero Energy Buildings in Response to Dynamic Pricing for Performance Improvements at Cluster Level. *Energy*, **174**, 911-921. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.192>
- [8] Huang, P., Wu, H., Huang, G. and Sun, Y. (2018) A Top-Down Control Method of nZEBs for Performance Optimization at nZEB-Cluster-Level. *Energy*, **159**, 891-904. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.199>
- [9] Huang, P., Fan, C., Zhang, X. and Wang, J. (2019) A Hierarchical Coordinated Demand Response Control for Buildings with Improved Performances at Building Group. *Applied Energy*, **242**, 684-694. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.148>
- [10] 曼昆 NG. 经济学原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [11] Hu, M. (2015) A Data-Driven Feed-Forward Decision Framework for Building Clusters Operation under Uncertainty. *Applied Energy*, **141**, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.047>
- [12] Wahui, T., Sawada, K., Kawayoshi, H., Yokoyama, R., Litaka, H. and Aki, H. (2017) Optimal Operations Management of Residential Energy Supply Networks with Power and Heat Interchanges. *Energy and Buildings*, **151**, 167-186. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.041>
- [13] Birge, J.R. and Louveaux, F.V. (2011) Introduction to Stochastic Programming. 2nd Edition, Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0237-4>
- [14] Mehleri, E.D., Sarimveis, H., Markatos, N.C. and Papageorgious, L.G. (2012) A Mathematical Programming Approach

for Optimal Design of Distributed Energy Systems at the Neighbourhood Level. *Energy*, **44**, 96-104.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.009>

- [15] National Renewable Energy Laboratory (2019) National Solar Radiation Data Base. http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/
- [16] Tan, Z., Zhang, H., Shi, Q., Song, Y. and Ju, L. (2014) Multi-Objective Operation and Evaluation of Large-Scale NG Distributed Energy System Driven by Gas-Steam Combined Cycle in China. *Energy and Buildings*, **76**, 572-587. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.029>
- [17] Cho, H., Mago, P., Luck, R. and Chamra, L. (2009) Evaluation of CCHP Systems Performance Based on Operational Cost, Primary Energy Consumption, and Carbon Dioxide Emission by Utilizing an Optimal Operation Scheme. *Applied Energy*, **86**, 2540-2549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.012>
- [18] Zhou, Z., Zhang, J., Liu, P., Li, Z., Georgiadis, M.C. and Pistikopoulos, E.N. (2013) A Two-Stage Stochastic Programming Model for the Optimal Design of Distributed Energy Systems. *Applied Energy*, **103**, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.019>

附录 1

建筑 i 的独立运营模型如下:

$$\min Href_i \quad (33)$$

受限制于(subject to)公式(4)~(32),

$$sPV_t = sPG_t = sBo_t = sbc_t = sbd_t = sTc_t = sTd_t = 0 \quad \forall t \quad (34)$$