

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-276-09

小型建筑分布式能源系统设计及优化

吕涛 鲁月红 王昌龙 李娇 刘雪梅

(安徽工业大学建筑工程学院 马鞍山 243002)

【摘要】 合理利用太阳能、地热能等可再生资源是解决环境污染和减少碳排放的有效途径之一, 满足当下高效利用可再生资源 and 能源利用多样化的需求。以安徽省合肥市三栋小型建筑为对象, 在 TRNSYS 动态仿真软件内按照零能耗建筑设计标准确定三种建筑的围护结构及内热源参数, 计算三种建筑的冷、热、电及生活热水的负荷, 并以使用周期总费用 LCC 为目标函数, 供冷/热、生活热水、零能耗建筑要求为约束条件, 采用单目标 Hooke-Jeeves 算法对三种建筑的埋管深度及太阳能集热器参数进行优化并得到最优解集。结果表明, 相对于未优化前全寿命周期成本 LCC 分别减少了 26.99%、25.41%、31.30%。优化后的参数可保证系统稳定运行且更具有经济、节能效益。

【关键词】 地源热泵; 分布式能源系统; 单目标优化; GenOpt

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Design Optimization of Distributed Energy System for Small Buildings

Lv Tao Lu Yuehong Wang Changlong Li Jiao Liu Xuemei

(School of Constructional Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, 243002)

【Abstract】 Reasonable use of renewable resources such as solar energy and geothermal energy is one of the effective ways to solve environmental pollution and reduce carbon emissions, and meet the current demand for efficient use of renewable resources and diversified energy utilization. This paper takes three small buildings in Hefei City, Anhui Province as the object. In the TRNSYS dynamic simulation software, the envelope structure and internal heat source parameters of the three buildings are determined according to the zero-energy building design standards, and the cold, heat, electricity and heat sources of the three buildings are calculated. The load of domestic hot water, with the total life cycle cost LCC as the objective function, and the cooling/heating, domestic hot water, and zero-energy building requirements as constraints. The single-objective Hooke-Jeeves algorithm is used for the buried pipes of the three buildings. The depth and solar collector parameters are optimized and the optimal solution set is obtained. The results show that LCC has been reduced by 26.99%, 25.41%, and 31.30% compared to the full life cycle cost before optimization. The optimized parameters can ensure the stable operation of the system and have more economic and energy-saving benefits.

【Keywords】 Ground source heat pump; distributed energy system; single objective optimization; GenOpt

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608001)

作者简介: 吕涛 (1998-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为建筑节能, E-mail: lvtao456@163.com

通讯作者: 鲁月红 (1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为零能耗建筑, E-mail: luyuehongtuzi@163.com

收稿日期: 2021-08-05

0 引言

分布式供能系统最主要优点体现于冷热电联产, 联产符合总能系统的“梯级利用”的准则, 可

达到高效利用能源的目的, 且适用于负荷种类多、热电波动大的建筑, 具有很大的发展前景。分布式能源系统是一种清洁高效的新型能源利用技术, 在

近几年来得到广泛关注。将分布式能源与国家电网相结合被视为未来电力市场发展的主要方向^[1-3], 在当前国内外现状下拥有巨大的应用前景。

目前, 国内外对于小型分布式能源系统设计及优化均有一定的研究^[4-9]。其中, 文献[10]建立了一个含有可再生能源以及冷、热、电多种能源形式的分布式能源模型, 并结合实际案例研究了该模型方案的可行性, 结果表明, 该模型可有效优化能源分配、降低运行成本。文献[11]从节能与经济效益两方面比较传统产能系统与联供系统, 结果表明, 采用联供系统更具有优势。文献[12]为降低分布式能源系统的运行成本, 在建筑与电网交互端设计上网电价、可再生能源激励机制, 探究系统的环保及经济效益, 结果表明, 该方法可有效降低碳排放, 同时可使分布式能源系统更具有经济性。

中外学者对于优化分布式能源系统的配置以及运行方案的方法也有很多种^[13-18]。文献[19]基于联供系统冷电输出特性与用户动态供需匹配的原则, 归纳总结了冷热电联供系统的设计与优化方法。文献[20]以能源应用侧互补、互动和互利为原则, 同时兼顾个人公平与整体效率, 为分布式能源系统探求最佳决策方案。而 GenOpt 作为一种可与 TRNSYS 平台联合优化仿真的软件, 现已被广泛应用于能源系统设计优化^[21-23]。其中 Nikola^[24]等结合 GenOpt 优化软件对建筑方案进行优化, 结果表明, 最优成本的冷热源方案是气-水热泵结合气凝锅炉; 此外讨论了上述模型在采用不同标准时的适用性。Li^[25] 等对典型的住宅区、商业区进行分析, 利用 GenOpt 优化平台以最低生命周期成本为目标对参数进行优化。结果表明, 系统的经济效益明显较优化前增加。

分布式能源系统具有明显的节能与环境方面的优势, 但其初投资过高、系统设备安装繁琐, 所以需根据运行情况对系统容量进行设计。目前, 针对大型分布式能源系统的优化设计的研究较多, 但

对不同类型的小型建筑分布式能源系统设计优化研究较少。本文结合建筑设计标准^[26]设计三种不同用途建筑 (i.e., 办公建筑, 宾馆建筑, 住宅建筑), 并以使用周期成本为目标函数设计三种建筑的分布式能源系统, 为之后工程实际提供参考。

1 建筑负荷模拟

1.1 设计参数

本文研究的建筑位于安徽省合肥市, 系夏热冬冷地区, 其月平均温度及逐时干球温度如图 1 所示。根据合肥地区的温度数据可确定该地建筑的供冷热季节设计室内参数。由图可知, 合肥地区月平均温度最高在 7 月, 为 22.11℃; 最低在 1 月, 为 -8.4℃。年最高温度出现于 5126h, 为 35.74℃; 最低出现于 696h, 为 -8.6℃。

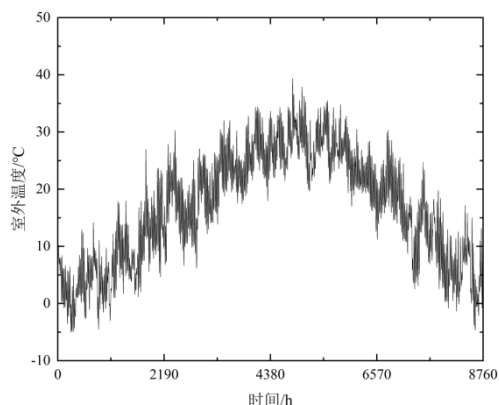


图 1 合肥市全年温度

Fig.1 Annual temperature of Hefei

本文设计了三种类型建筑 (i.e., 办公建筑、宾馆建筑、住宅建筑), 由于这三种建筑在使用时间、设备类型上存在差异, 其负荷也存在一定差异。

(1) 建筑类型

建筑 1 类型为办公楼, 共三层; 建筑 2 类型为宾馆建筑, 共四层; 建筑 3 类型为居民住宅小区, 共五层, 各建筑的简易构造如图 2 所示; 三种不同类型建筑的基本概况如表 1 所示。

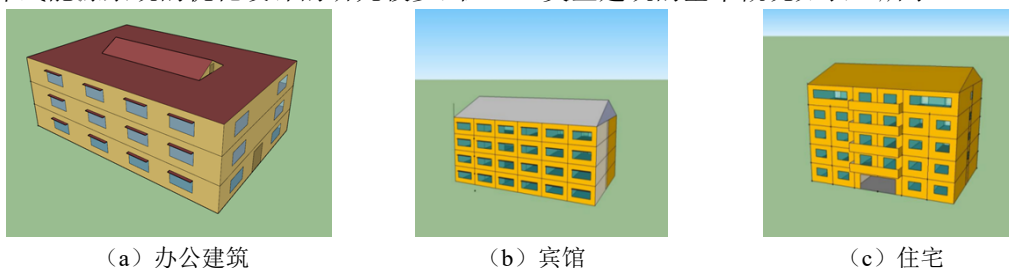


图 2 各建筑示意图

Fig.2 Schematic diagram of each building

表 1 各建筑基本概况

Table 1 Basic situation of each building

建筑类型	走廊		卫生间		保安室		房间		盥洗室	
	个数	面积	个数	面积	个数	面积	个数	面积	个数	面积
住宅	5	50.4m ²	21	15m ²	0	0m ²	20	81m ²	21	15m ²
宾馆	4	50.4m ²	30	15m ²	1	27m ²	30	27m ²	4	27m ²
办公楼	3	48m ²	3	30m ²	1	30m ²	18	30m ²	0	0m ²

(2) 围护结构参数

通过查阅零能耗建筑围护结构设计标准规范^[26]及能耗指标要求,改变当前常规建筑选用的围护结构构造类型,选用传热系数较低的围护结构。例如,与常规采用的水泥砂浆砖墙的方法构造外墙相

比,该建筑外墙与屋面均加入 0.05m 厚度的保温砂浆夹层,从而达到降低整个墙体围护结构传热系数的目的。外窗均采用双层中空玻璃以及配合外遮阳的方法,达到减小围护结构的吸热量及太阳辐射的吸热量,具体围护结构及其传热系数如表 2 所示。

表 2 建筑围护结构参数

Table 2 Building envelope parameters

围护结构	结构做法	传热系数/W·m ⁻² ·K ⁻¹
外墙	砖墙+隔热层+石灰+保温砂浆	0.236
楼板	加气混凝土+隔热层+保温砂浆	0.215
外窗	双银 Low-E 中空玻璃(夹层充氩气)	1.55
屋面	混凝土+挤塑聚苯板+隔热层+保温砂浆	0.142

(3) 建筑内热源参数

办公建筑、宾馆建筑、住宅建筑的使用时间分别为 8 时至 18 时、0 时至 24 时、0 时至 24 时;按

照建筑设计标准^[26],单位面积的照明功率以及设备功率如表 3、4 所示。

表 3 规范照明设计功率

Table 3 Specifications for lighting design power

	空间类型					
	办公室	卫生间	保安室	客房	走廊(门厅)	盥洗室
灯光规范(W/m ²)	6	3	5	6	2	5

表 4 设备设计功率

Table 4 Equipment design power

设备名称	洗衣机/230kW		电饭锅/500kW		冰箱/75kW		电视机/100kW		电脑/150kW	
	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数
住宅	21	0.5	21	0.8	21	1	21	0.4	20	0.5
宾馆	4	0.25	0	0	6	1	30	0.4	10	0.5
办公楼	3	0.25	0	0	3	1	4	0.5	30	1

设备名称	电热水器/1000kW		吹风机/425kW		台式风扇/66kW		台灯/425kW		抽油烟机/140kW	
	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数	数量	同时使用系数
住宅	21	0.5	21	0.4	21	0.2	40	0.4	21	0.5

宾馆	30	0.5	30	0.3	20	0.25	24	0.4	0	0
办公楼	0	0	0	0	24	0.5	24	0.5	0	0

1.2 建筑冷热电及热水负荷

1.2.1 冷热负荷

参照夏热冬冷地区供冷、热时间^[27], 设置办公建筑设计供冷、热时间分别为: 5 月 15 日-10 月 15 日、11 月 15 日-3 月 1 日; 宾馆及住宅建筑的设计供冷、热时间分别为 6 月 10 日-10 月 15 日、11 月 15 日-3 月 1 日。在过渡季节, 可通过通风实现人们对舒适室内环境的需求, 因而三种建筑的冷热负荷基本为 0。三种建筑的整年逐时冷热负荷如图 3 所示。

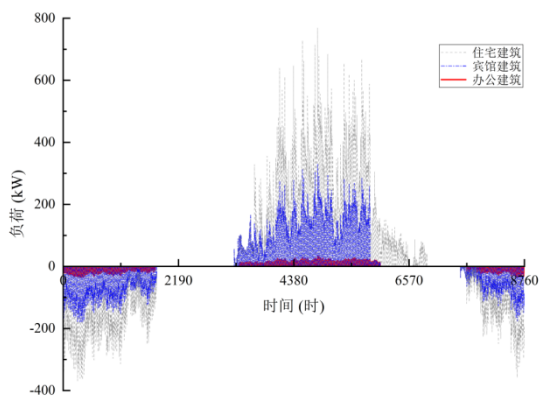


图 3 各建筑负荷计算结果

Fig.3 Calculation results of each building load

模拟结果显示, 办公楼、住宅、宾馆建筑冷负荷分别为 34.42kW、439.18kW、334.35kW; 热负荷分别为 33.30kW、188.28kW、191.70kW。

1.2.2 用户热水负荷

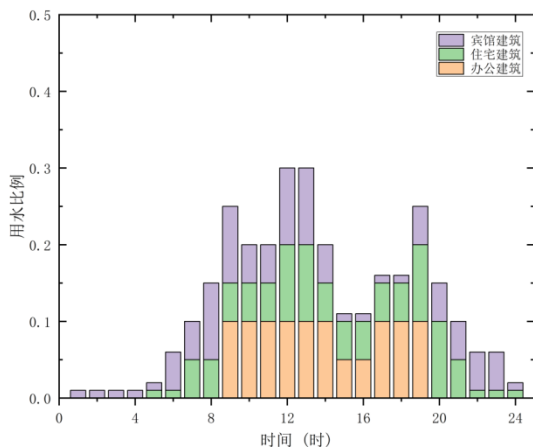


图 4 各建筑用水比例

Fig.4 Proportion of water used in each building

由图 4 各建筑的每日用水比例, 用户侧生活用

水设计参数主要与建筑用途及使用时间有关, 结合生活用水设计定额可得各时刻用水量。生活热水由太阳能与自加热水箱联产, 选用合适的光伏光热板面积与蓄热水箱的加热功率, 确保每日用水时刻温度与流量均满足人员需要。

1.2.3 用电负荷

在某一时刻, 建筑的用电负荷主要分为户式设备用电及供能设备用电。户式设备用电前文 1.1 内已经介绍了三种建筑的用电设备功率、数量以及同时使用系数。供能设备用电负荷计算如式 (1), 主要由制冷机组用电负荷、水泵用电负荷、生活用水加热水箱组成。

$$P_z = P_{jz} + P_{pump} + P_{sx} \quad (1)$$

式中: P_z 为某时刻供能系统用电负荷, kW; P_{jz} 为制冷机组用电负荷, kW; P_{pump} 为水泵用电负荷, kW; P_{sx} 为水箱用电负荷, kW。

图 5 为冬季某日用电负荷变化。

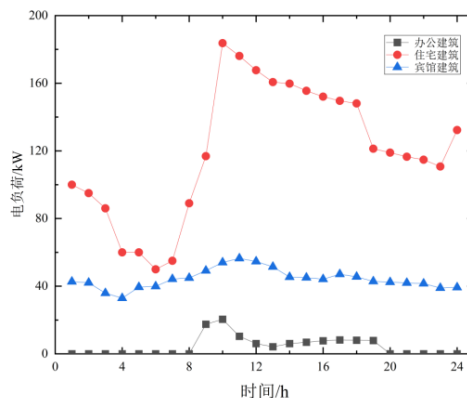


图 5 各建筑冬季某日用电负荷

Fig.5 Power load of each building on a day in winter

2 分布式能源系统建立

太阳能光伏/热 (PV/T) 技术是将光伏和光热结合在一起, 可实现较高的太阳能利用率^[28]。在小型分布式能源系统中设置 PV/T 模块可以满足系统对于热能、电能的需要。在冬季设置一部分光伏/热模块与地源热泵机组耦合, 共同承担冬季供热负荷, 减少热泵机组需从地下换热的需求量, 提升机组运行的 COP, 减少对于地表浅层温度的扰动。在耦合的同时也能在光照条件良好的情况下作为系统产电的一部分, 与其他光伏模块相结合, 负责

整个系统产电。

基于零能耗建筑要求在 TRNSYS 平台设计了

一种适用于夏热冬冷地区并网分布式能源系统，系统原理图如图 6 所示。

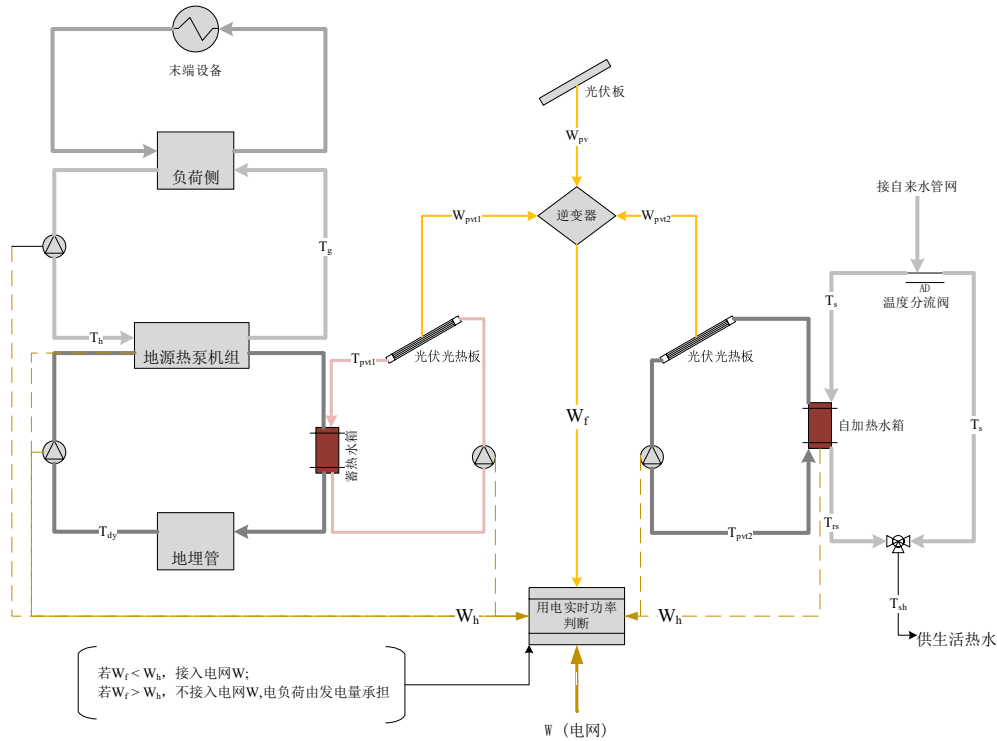


图 6 分布式能源系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of distributed energy system

注：图中符号含义如下： W_f 为能耗总量，kW； W_h 为发电总量，kW； T_g 为负荷侧供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_h 为负荷侧回水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{pv1} 为耦合热泵光伏/热板出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{dy} 为地源侧供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； W_{pv} 为光伏板发电量，kW； W_{pv1} 为耦合热泵光伏/热板发电量，kW； W_{pv2} 为生活用水侧光伏/热板发电量，kW； T_{rs} 为生活热水水箱出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_{sh} 用水点温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

针对三种建筑不同的负荷，选用的地源热泵机组的参数如表 5 和 6 所示。

表 5 地源热泵机组选型

Table 5 Selection of ground source heat pump unit

地源热泵机组选型				
类型	冷负荷 (kW)	热负荷 (kW)	设备制冷量 (kW)	设备制热量 (kW)
宾馆	334.35	191.70	350	325
住宅	439.18	188.28	450	220
办公楼	34.42	33.30	35	30

表 6 地源热泵机组设计参数

Table 6 Design parameters of ground source heat pump unit

地源热泵系统负荷侧（制冷工况）设计参数						
类型	设计供回水温差 ($^{\circ}\text{C}$)	负荷侧流量 (m^3/h)	地源侧流量 (m^3/h)	地埋管管径 (mm)	单 U 管孔数	埋管深度 (m)
宾馆	5	55.85	44.29	26	90	100
住宅		77.33	68.11	32	102	100
办公		5.16	4.95	26	8	100

3 优化设计

前文使用 TRNSYS 动态仿真软件建立了适用于三种建筑的小型并网分布式能源系统模型,但是存在能量分布不均衡、设置参数非按最佳寿命周期费用所设置,为了实现最佳经济型和保证系统能源供应负荷要求,本文利用 TRNSYS 软件内 GENOPT 模块的 Hooke-Jeeves 算法对相关变量进行优化,得到最优参数集。并对系统优化前后的结果进行对比和分析,使该分布式能源系统的设计更加具体、更具经济性。

3.1 优化过程

在对复杂的系统模型进行优化时,由于多个参数之间的相互作用导致直接人为确定参数不一定能使系统运行达到最优的目标,因此通过 TRNSYS 软件内的 GenOpt 优化模块可以有效解决上述问题。图 7 为 GenOpt 优化过程,在设置的参数范围内,软件对各个参数进行等步长迭代计算直至找到最优解。

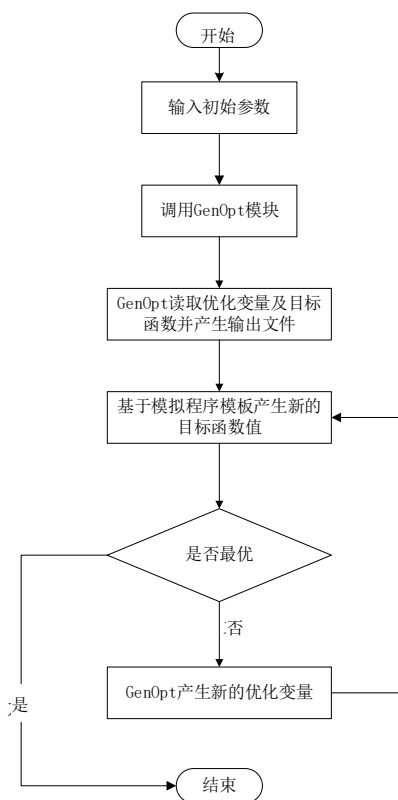


图 7 GenOpt 优化过程

Fig.7 GenOpt optimization process

3.2 优化变量

本文选取地理埋管深度 Length_C、光伏/热板面积 Area_PVT、光伏板串联数量 PV_Line 为优化变量,按照系统设计要求的参数初始值,对三个参数变量进行优化,使其达到经济性与性能均最优。以办公楼建筑为例,优化变量的初始值及优化范围如表 7 所示。

表 7 优化参数初始参数

Table 7 Optimized parameters Initial parameters

优化参数	初始值	优化范围
地理管深度 (Length_C)	100	20~100
光伏板数量 (PV_line)	10	1~50
光伏光热板面积 (AREA_PVT)	50	10~50

3.3 目标函数

采用 LCC 作为优化的目标函数, LCC (全生命周期成本, Life Cycle Cost, 简称 LCC), 也被称为全寿命周期费用。它是指产品在有效使用期间所发生的与该产品有关的所有成本,包括产品设计成本、制造成本、采购成本、使用成本、维修保养成本、废弃处置成本等。

$$LCC=CI+CO+CM+CF+CD \quad (2)$$

式中, CI (cost of investment) 投资成本,即一次或两次设备购买投入成本; CO (cost of operation) 运行成本; CM (cost of maintenance) 养护成本; CF (cost of fault) 维修成本; CD (cost of disposal) 废置处理成本。CI 主要包括购入热泵系统、水箱、水泵、太阳能光伏/热(光伏)等设备的费用; CO 主要包括设备运行电费等; CM、CF、CD 取投资成本的 10% 计算。

以办公楼建筑为例,计算初投资如表 8 所示。

表 8 初投资计算表

Table 8 Calculation table of initial investment

设备	初投资		
	数量	单价 (元)	总价 (元)
地源热泵机组	1	80000	80000
负荷侧水泵	1	808	808
地源侧水泵	1	1050	1050
辅助加热水泵	1	540	540
生活热水泵	1	808	808
负荷侧水箱	1	200	200
生活用水侧水泵	1	400	400

光伏板 (PV)	100	550	55000
光伏光热板 (PVT)	50	2000	100000
地埋管	700	60	42000
安装费			20000
合计 (元)			300806

3.4 限制函数

该系统的优化是基于冷、热、电及热水多方约束下进行的,需保证优化后的变量在运行时满足各方面负荷。

供冷约束 (以夏季工况为例):

$$Q_{CF} \leq Q_C \quad (3)$$

式中: Q_{CF} 为夏季冷负荷, kW; Q_C 为热泵机组供冷量, kW。

由式 (3) 可知, 机组负荷需不小于实际负荷, 且设置的冬夏季热泵机组出口水温与设计水温偏差不应过大。本文通过比较热泵出口水温与地埋管出口水温为监视因子, 优化变量应尽量减少运行周期内不满足符合要求的次数。

生活热水约束:

$$T_{sh} \geq T_{sj} \quad (4)$$

式中: T_{sh} 为实际使用热水温度, °C; T_{sj} 为设计用水点温度, 50°C。

零能耗约束:

$$W_f \geq W_h \quad (5)$$

式中 W_f 为系统发电量, kW; W_h 为建筑能耗 kW。

3.5 优化过程

在优化过程开始前需设置优化系统基本参数, 如优化年限、寿命周期年利率等, 具体参数设置如表 9 所示。通过上述初始参数数值、参数范围以及限制函数的确定, 结合三种建筑用户侧模拟周期内

各种负荷的情况, 以寿命周期费用 LCC 为目标函数, 在 TRNSYS 内使用 GenOpt 进行优化, 优化过程简化如图 8 所示。

表 9 优化基本设置

Table 9 Optimizing basic Settings

参数名称	数值
模拟年限	5 年 (43800 时)
电价/元·kWh ⁻¹	0.6
年利率%	7
设备残值率	0

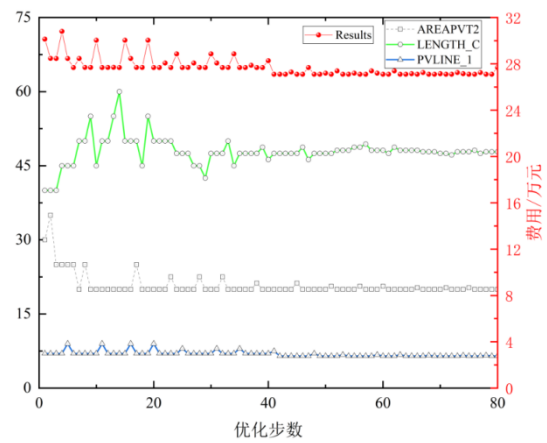


图 8 GENOPT 优化过程

Fig.8 GENOPT optimization process

3.6 优化结果

表 10 为办公建筑的优化最终结果, 当地埋管深度 (Length_C) 为 47.81m、光伏板串联数量 (PV_line) 为 6.5、光伏/热板面积 (AREA_PVT) 为 20.31m² 时, 整个模型达到最小费用为 20.22 万元, 相比较未优化之前 LCC 的 27.11 万元, 减少了 26.99%, 因此利用优化计算能带来明显的经济效益。

表 10 优化结果

Table 10 Optimization results

优化参数	初始值	优化范围	优化后	差值
地埋管深度 (Length_C)	100	20~100	47.81	-52%
光伏板数量 (PV_line)	10	1~50	6.50	-35%
光伏/热板面积 (AREA_PVT)	50	10~50	20.31	-59%

三种建筑的变量优化前后对比如表 11 所示,

优化后的变量均比初始值小, 所以优化后的小型分

布式能源系统初始投资均降低了, 优化后的寿命周期费用 LCC 如图 9 所示。

表 11 优化变量比较

Table 11 Comparison of optimization variables

类型	优化前			优化后			差值		
	Length (m)	Area_PVT (m ²)	PV_Lin e	Length (m)	Area_PVT (m ²)	PV_Li ne	Length (m)	Area_PVT (m ²)	PV_Li ne
宾馆	100.00	50.00	40.00	69.97	25.00	29.00	0.30	0.50	0.28
办公	100.00	30.00	10.00	47.81	21.00	6.50	0.52	0.30	0.35
住宅	100.00	50.00	40.00	98.50	25.00	38.00	0.02	0.50	

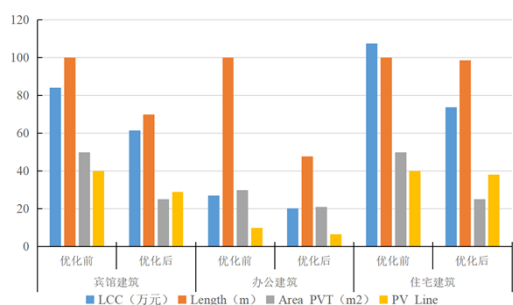


图 9 优化结果比较

Fig.9 Comparison of optimization results

由图 9 可知, 对于宾馆建筑, 优化前的 LCC 为 84.15 万元, 优化后为 61.43 万元; 对于办公建筑, 优化前的 LCC 为 27.11 万元, 优化后为 20.22 万元; 对于住宅建筑, 优化前为 107.49 万元, 优化后为 73.83 万元。若可再生能源发电量全部用于建筑负载, 则实际 LCC 分别为: 办公建筑为 18.96 万元、住宅建筑为 57.35 万元、宾馆建筑为 51.46 万元; 相对于未优化前 LCC 分别减少了 26.99%、25.41%、31.30%。

4 结论

本文以零能耗建筑设计标准于安徽省合肥市设计了三栋小型建筑, 通过分析各建筑的负荷特性, 设计了一种小型零能耗标准分布式能源系统。在 TRNSYS 软件平台建立模型, 并调用 GenOpt 优化模块, 以使用周期费用为目标函数, 采用单目标 Hooke-Jeeves 算法对三种参数进行优化并得到最优解集, 并与初始设计参数进行对比, 其结论如下:

(1) 根据 TRNSYS 动态仿真软件内设置零能耗建筑标准的围护结构以及设备功率标准, 计算得办公楼、住宅、宾馆建筑冷负荷分别为 34.42kW、439.18kW、334.35kW; 热负荷分别为 33.30kW、

188.28kW、191.70kW。

(2) 以使用周期总费用为目标函数, 以负荷侧制冷/热、生活热水温度、零能耗建筑为约束条件, 得到三种建筑使用该系统的最佳参数集。优化得办公楼、住宅、宾馆的使用周期最低费用分别为 18.96 万元、57.35 万元、51.46 万元。

(3) 与常见的分布式能源系统相比, 本系统结合了地表浅层热能以及太阳能两种可再生能源, 加大了可再生能源使用的范围, 构建得到的系统最优方案具有运行节能以及环保优势。

参考文献:

- [1] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-15.
- [2] 金红光, 隋军, 徐聪. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.
- [3] 王文涛, 刘燕华. 分布式结构——中国可持续发展的能源出路[J]. 经济纵横, 2014, (5): 21-24.
- [4] Joseph M J, Kurt M, Jelle L. Influence of centralized and distributed thermal energy storage on district heating network design[J]. Energy, 2020, 202: 117689.
- [5] Markus B, Adrian B, Markus F, et al. Multi-period investment pathways-Modeling approaches to design distributed energy systems under uncertainty[J]. Applied Energy, 2021, 285: 116368.
- [6] Fiona C, Bogdan D, Evgenia M, et al. Optimal design of heating and cooling pipeline networks for residential distributed energy resource systems[J]. Energy, 2021, 235: 121430.
- [7] 叶琪超, 楼可炜, 张宝, 等. 多能互补综合能源系统设计及优化[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 5-12.

- [8] 卢胤龙, 韩明新, 任洪波, 等. 多能互补分布式能源系统优化设计研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(3): 229-235.
- [9] 薛小代, 刘彬卉, 汪雨辰, 等. 基于压缩空气储能的社区微能源网设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3306-3314.
- [10] 甘霖, 陈瑜玮, 刘育权, 等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 275-281.
- [11] 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.
- [12] Tim S, Fiona C, Bogdan D, et al. Optimal design and operation of distributed energy resources systems for residential neighbourhoods[J]. Smart Energy, 2021: 100049.
- [13] Jiacheng G, Peiwen Z, Di W, et al. A new collaborative optimization method for a distributed energy system combining hybrid energy storage[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103330.
- [14] Bahman A, Oguzhan C, Aydogan O. A multi-objective optimization evaluation framework for integration of distributed energy resources[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 103005.
- [15] 董雷, 刘梦夏, 陈乃仕, 等. 基于随机模型预测控制的分布式能源协调优化控制[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3219-3227.
- [16] 叶琪超, 楼可炜, 张宝, 等. 多能互补综合能源系统设计及优化[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 5-12.
- [17] 卢胤龙, 韩明新, 任洪波, 等. 多能互补分布式能源系统优化设计研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(3): 229-235.
- [18] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3334.
- [19] 王江江, 王壮, 杨颖, 等. 分布式冷热电联供系统集成设计与优化研究进展[J]. 分布式能源, 2017, 2(2): 1-10.
- [20] Hongbo R, Qiong W, Qifen L, et al. Optimal design and management of distributed energy network considering both efficiency and fairness[J]. Energy, 2020, 213: 118813.
- [21] Frantz S, Matthieu M, Audrey J, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a 10MW OTEC Rankine cycle in Reunion Island with the equivalent Gibbs system method and generic optimization program GenOpt[J]. Applied Ocean Research, 2015: 54-66.
- [22] M S Fernandes, A R Gaspar, V A F Costa, et al. Optimization of a thermal energy storage system provided with an adsorption module – A GenOpt application in a TRNSYS/MATLAB model[J]. Energy Conversion and Management, 2018: 90-97.
- [23] Dimitri B, Frédéric M, Harry B, et al. Model optimization and validation with experimental data using the case study of a building equipped with photovoltaic panel on roof: Coupling of the building thermal simulation code ISOLAB with the generic optimization program GenOpt[J]. Energy and Buildings, 2013: 333-347.
- [24] Nikola V, Damir D. Cost-optimal energy performance calculations of a new nZEB hotel building using dynamic simulations and optimization algorithms[J]. Journal of Building Engineering, 2021: 172-182.
- [25] Ji Li, Wei Xu, Ping Cui, et al. Optimization configuration of regional integrated energy system based on standard module[J]. Energy and Buildings, 2020: 85-110.
- [26] GB 50189-2005, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [27] 李峥嵘, 蒿玉辉, 赵群, 等. 夏热冬冷地区超低能耗建筑热工优化设计及负荷分析[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 182-187.
- [28] 董丹, 秦红, 刘重裕, 等. 太阳能光伏/热(PV/T)技术的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(5): 1020-1024.