

考虑气象随机性的太阳能热水系统供能可靠性分析

李啸远, 田 喆, 叶 创, 牛纪德, 吴 霞

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 采用太阳能供应生活热水是一种普遍认可的方式, 然而太阳能固有的间歇性和不确定性使得系统供能存在较大的不确定性。针对太阳能热水系统的供能可靠性进行探究分析, 基于 Dymola 仿真平台和 Genopt 优化软件完成系统模型构建与优化设计, 采用天津市 30 年历史气象数据来表征气象条件的随机性, 对确定性优化设计方案进行可靠性评估。为提高系统的供能可靠性, 针对系统关键设计环节的额外投资方案进行了分析评价。以天津市某居住建筑为案例进行可靠性分析。研究表明: 由于确定性设计方法未能考虑气象条件的随机性, 因此在 80% 的场景下系统的供能可靠性不满足预期设计目标; 而适当的增加设计方案中辅助热源的功率和贮水箱的容积可有效弥补确定性设计方法的不足, 从而提升系统抵御不确定性的能力。

关键词: 太阳能热水系统; 优化设计; 不确定性; 可靠性分析

中图分类号: TU832.1; Tk15

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0804-07

Reliability analysis of solar water-heating system considering meteorological randomness

LI Xiaoyuan, TIAN Zhe, YE Chuang, NIU Jide, WU Xia

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The use of solar energy to supply domestic hot water is a widely accepted method, but the inherent intermittent and uncertainty of solar energy make the system energy supply uncertain. This paper analyzes the energy supply reliability of the solar water heating system. First, the system model construction and optimization design are completed based on Dymola simulation platform and Genopt optimization software. Then, the randomness of meteorological conditions is represented by the historical meteorological data of Tianjin in 30 years, and the deterministic design plan is evaluated for reliability. Finally, to improve the reliability of the system's energy supply, additional investment options for key design aspects of the system are analyzed and evaluated. The reliability analysis of a residential building in Tianjin shows that the energy supply reliability of the system does not meet the expected design goal in 80% of the scenarios because the deterministic design method fails to consider the randomness of meteorological conditions, while appropriately increasing the power of auxiliary heat source and the volume of water storage tank in the design scheme can effectively make up for the deficiency of deterministic design method, so as to enhance the ability of resisting uncertainty of the system.

Key words: solar water-heating system; optimal design; uncertainty; reliability analysis

目前, 建筑在运行过程中由于耗能而产生的碳排放占全国碳排放总量的 28%, 其中 2/3 源于快速增长的用电量^[1]。因此, 提升可再生能源在建筑供能中的渗透比例, 加快建筑能源系统结构转型显得意义重大。随着建筑被动式技术的发展, 围护结构的保温性能不断提升, 生活热水负荷在建筑能耗中的占比也愈发突显。据统计显示, 生

活热水总负荷已占到建筑总能耗的 26%^[1], 且随着居民生活水平的不断提高, 生活热水的“量”与“质”也亟需得到保证。因此, 发展低碳能源系统, 同时满足居民日益增长的生活舒适性需求, 将成为建筑节能的必然趋势。目前, 利用太阳能供应生活热水是一种普遍认可的方式, 而合理可靠的设计是保证太阳能热水系统在未来长期高效运行

收稿日期: 2021-07-31

修改稿日期: 2021-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978449)

第一作者: 李啸远(1998—), 男, 硕士生, 主要从事太阳能热水系统不确定性设计方面的研究。E-mail: lixiaoyuan@tju.edu.cn

通信作者: 牛纪德(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事综合能源系统规划设计方面的研究。E-mail: niujide@tju.edu.cn

的前提关键。

目前关于太阳能热水系统的设计方法可大致分为:基于仿真的参数分析法、基于相关性模型设计法和全生命周期优化设计法。其中,基于仿真的设计方法通常采用参数化研究的方式比较不同设计方案的系统性能。文献[3]基于 TRNSYS 仿真软件,对加拿大蒙特利尔地区的家庭住宅太阳能热水系统进行仿真模拟,通过分析关键设计参数的变化对系统太阳能保证率的影响来确定最佳设计值,从而得到了适用于该地区独立住宅家庭的太阳能热水系统设计参数取值范围。但是这种方法在对比分析时每次只能改变一个设计变量,设计成本耗时耗力,而且在仿真过程中设计边界的输入也必将面临不确定性的困扰。文献[2]采用了五种仿真软件模拟英国某零能耗建筑的 DHW 系统,并依据各软件所遵从的规范标准作为仿真边界的输入,研究发现:仿真模拟的结果与实测值之间存在 $-30\% \sim 40\%$ 的偏差,而模拟的准确度主要取决于仿真设计值的输入。

为了简化太阳能热水系统仿真设计的工作量,美国威斯康辛大学^[4]基于大量仿真模拟实验,提出了太阳能保证率的概念,并建立了 F-chart 相关性模型用于太阳能集热器面积的设计。文献[5]对 F-chart 相关性模型进行了系数修正,使其满足于巴西地区的气象条件,并根据市面上主流的太阳能集热器的性能参数建立了设备信息数据库,开发了适用于巴西地区的太阳能热水系统优化设计软件。

由于 F-chart 法是一种稳态的设计方法,模型基于经验,无法以动态的边界描述热水负荷的特性。因此,采用数学规划理论对太阳能热水系统进行全生命周期评价的优化设计方法受到了学者们的青睐。文献[6]采用非线性数学规划法对太阳能热水系统进行建模,以系统全生命周期费用为目标函数,利用遗传算法对模型进行全局寻优搜索,并对优化变量进行了敏感性分析。然而上述设计方法均属于确定性设计,仅以日均太阳辐射或典型气象年难以反映气象条件的随机特征,因此太阳能热水系统在未来长期运行过程中可能会面临供能不可靠的风险。

针对上述问题,本文首先基于 Dymola 仿真平台对太阳能热水系统进行动态建模,借助 Genopt 优化软件调用粒子群智能算法对系统关键设计变量进行优化设计,得到系统的确定性优化设计方案。然后,采用天津市 30 年历史气象数据来表征

气象条件的随机性,对该设计方案进行了供能可靠性评估。最后,为了进一步提升太阳能热水系统抵御气象不确定性的能力,并保证系统稳定可靠运行,本文针对系统关键设计环节进行了投资改善,并给出了合理的投资建议。

1 供能可靠性分析方法

本文以集中集热、集中供热的太阳能热水系统为研究对象,建立了系统供能可靠性分析的整体框架流程,如图 1 所示。整个可靠性分析过程分为三个步骤:

(1)基于 Dymola 仿真平台建立太阳能热水系统的动态模型,分别以地区典型年气象和居民生活热水需求量作为系统的源/荷侧设计边界,采用全生命周期评价方式,同时考虑经济性和可靠性,对太阳能热水系统进行确定性优化设计,得到系统的优化设计方案。

(2)采用历史气象数据表征气象条件的随机特征^[7],并在 Dymola 仿真环境中,将确定性优化设计方案置于历史气象边界下进行可靠性分析。

(3)如果系统的可靠性不满足预期设计目标,则针对系统的关键设计环节进行额外投资以提高系统的供能可靠性,同时对各方案进行分析评价,给出合理的投资建议。

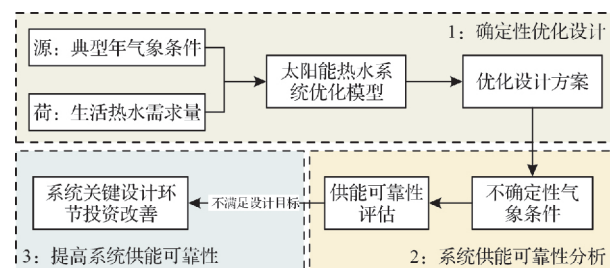


图 1 太阳能热水系统供能可靠性分析流程图

Fig. 1 Flow chart of energy supply reliability analysis of solar hot water system

1.1 太阳能热水系统模型

图 2 为间接强制循环的太阳能热水系统原理示意图。

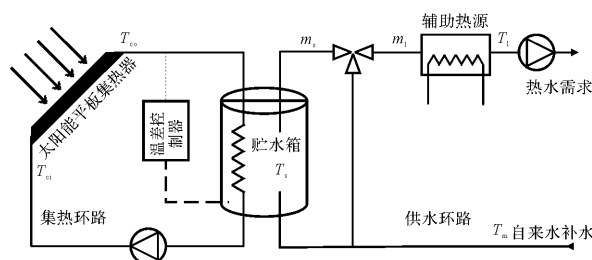


图 2 太阳能热水系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar water heating system

整个系统主要由太阳能集热系统和热水供应系统构成,包括:集热设备、贮水箱、辅助热源、控制系统、热交换器、循环泵和温差控制器等设备和附件。

1.1.1 系统建模

(1) 太阳能平板集热器

根据太阳能平板集热器的瞬时平衡方程得到平板集热器有效集热量表达式(1),为

$$Q_u(t) = A_{col} [F_R(\tau\alpha)I_T - F_R U_L(T_{ci}(t) - T_a(t))] \quad (1)$$

式中: Q_u 为太阳能集热器的有效集热量, W; A_{col} 为平板集热器的面积, m^2 ; $F_R(\tau\alpha)$ 为集热器瞬时效率曲线的截距, 无因次; $F_R U_L$ 为集热器瞬时效率曲线的斜率, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; I_T 为倾斜面入射太阳辐照量, W/m^2 ; T_{ci} 为太阳能集热器的进口温度, $^\circ C$; T_a 为环境温度, $^\circ C$ 。

(2) 贮水箱:

贮水箱是太阳能热水系统的能量枢纽,其内部逐时能量平衡方程如式(2)所示。

$$(\rho c_p V_s) \frac{dT_s}{dt} = Q_u(t) - Q_{load}(t) - Q_{loss}(t) \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c_p 为水的定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; V_s 为贮水箱容积, m^3 ; T_s 为贮水箱温度, $^\circ C$; t 为时间步长, s; Q_{load} 为从贮水箱中抽取的热量, W; Q_{loss} 为贮水箱散热损失, W。

贮水箱被抽取的热量 Q_{load} 和水箱的散热损失 Q_{loss} 计算分别如式(3)和式(4)所示。

$$Q_{load}(t) = m_s c_p (T_s(t) - T_m(t)) \quad (3)$$

$$Q_{loss}(t) = CU_{tank} A_S (T_s(t) - T_a) \quad (4)$$

式中: m_s 为从水箱抽取热水的质量流量, kg/s ; T_m 为自来水补水温度, $^\circ C$; C 为贮水箱保温材料的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; U_{tank} 为贮水箱保温层厚度, m。

在 Dymola 仿真平台中,基于 Buildings 模型库^[8]完成太阳能热水系统的动态模型构建,如图 3 所示。其中,系统各部分组件的对应模块说明如表 1 所示。

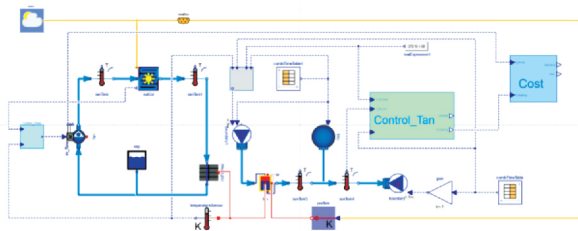


图 3 太阳能热水系统 Dymola 仿真示意图

Fig. 3 Dymola simulation diagram of solar hot water system

表 1 Dymola 模型说明

Tab. 1 Dymola model description

系统模型	Buildings 库对应模块
太阳能平板集热器	Buildings. Fluid. SolarCollectors. ASHRAE93
换热器	Buildings. Fluid. Storage. BaseClasses. IndirectTankHeatExchanger
贮水箱	Buildings. Fluid. Storage. StratifiedEnhanced
循环水泵	Buildings. Fluid. Movers. FlowControlled _ m _ flow
补水源	Buildings. Fluid. Sources. MassFlowSource _ T

1.1.2 系统控制策略

在系统集热环路中,集热设备将集取的太阳能转化为热能,并由集热工质的流动将热量传递到贮水箱中进行换热。系统通过温差控制器监测集热器出口的工质温度 T_{co} 和贮水箱中的水温 T_s ,当两者之间的温差小于 T_{off} 时,集热环路水泵关闭;当温差大于 T_{on} 时,水泵再次开启。

在供水环路中,当从水箱中抽取的热水温度 T_s 高于热水供应温度设定值 T_l 时,则供水环路中的补水阀门打开,抽取的高温热水与自来水补水进行混水调和以达到供水设定温度;当抽取的热水温度 T_s 小于设定温度 T_l 时,抽取的热水将直接被辅助热源加热以达到温度设定值。为了防止夏季贮水箱出现过热现象,系统设定当水箱温度高于最大设定温度 T_{max} 时,集热环路停止运行;当水箱温度低于 T_{turn} 时,集热环路开启。控制策略流程图如图 4 所示:

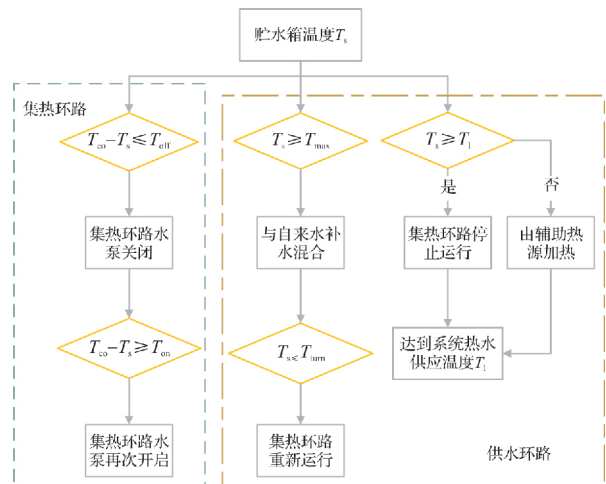


图 4 系统控制策略流程图

Fig. 4 Flow chart of system control strategy

1.2 优化设计方法

为了同时考虑系统的经济性与可靠性,采用

年化生命周期成本对太阳能热水系统进行全生命周期评价。以等年值费用 C_{LCC} 作为优化目标函数, 其包括: 设备年化投资成本 C_{inv} 、系统年运行费用 C_{ope} 和系统因不满足可靠性目标所承担的经济性惩罚 C_{pun} , 计算如式(5)所示。

$$C_{LCC} = C_{inv} + C_{ope} + C_{pun} \quad (5)$$

(1)设备年化投资成本:

$$C_{inv} = CF_{col} A_{col} P_{col} + CF_s V_s P_s + CF_{aux} W_{aux} P_{aux} \quad (6)$$

$$CF = BER \times \frac{(1 + BER)^N}{(1 + BER)^N - 1} \quad (7)$$

式中: CF 为投资资本回收系数; BER 为年利率, 本文取值 0.08; W_{aux} 为辅助热源的额定容量, kW; N 、 P 分别为设备寿命和设备单价。

(2)系统运行费用:

系统运行费用包括水泵和辅助热源的耗电费用。

$$C_{ope} = \left(\int Q_{aux}(t) dt + \int Q_m(t) dt \right) E_p \quad (8)$$

式(8)中, Q_{aux} 为辅助热源的能耗, kWh; Q_m 为水泵能耗, kWh; E_p 为电价, 元/kWh。

(3)惩罚费用:

由于生活热水负荷属于柔性负荷, 具备一定的弹性特征, 如果追求完全可靠的设计方案则会导致太阳能热水系统存在一定程度的过设计。因此, 本文采用不保证 30 h 作为系统的可靠性约束, 即系统在实际运行中的不保证小时数只要低于 30 h, 则认为系统是可靠的。

$$C_{pun} = \begin{cases} 0, & Unable_time \leq 30 \\ M, & Unable_time > 30 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, M 代表系统超出可靠性设计目标所带来的惩罚, 用于引导优化算法的搜索方向, 本文取值 10 000 元; $Unable_time$ 为系统的全年实际运行中的不保证时长, h。

2 案例分析

本文以天津市某居住建筑为例, 该建筑共有 36 所住户, 采用集中式太阳能热水系统供应生活热水。系统选用平板集热器作为集热设备, 选用电锅炉作为辅助热源, 各类设备性能参数和经济性参数分别如表 2 和表 3 所示。假定每户全年日均生活热水需求量为 100 L/d。由 DHWcalc 软件^[9]生成全年 8 760 h 的生活热水流量, 如图 5 所示。采用天津市典型年气象作为系统的源侧设计边界。

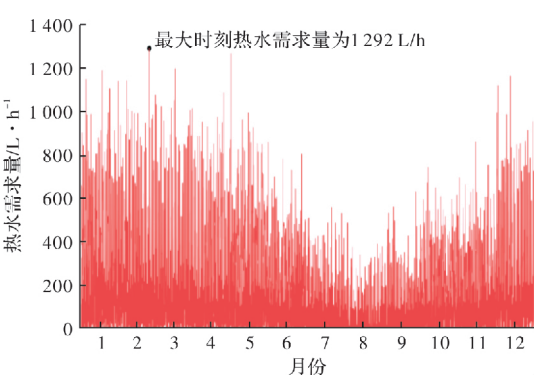


图 5 太阳能热水系统荷侧设计边界

Fig. 5 Demand side design boundary of solar hot water system

表 2 设备性能参数表

Tab. 2 Table of equipment performance parameters

参数	参数描述	数值
β	太阳能集热器安置倾角/ $^{\circ}$	50
$F_R(\tau\alpha)$	太阳能集热器瞬时效率曲线截距	0.76
$F_R U_L$	太阳能集热器瞬时效率曲线斜率/ $W \cdot (m^2 \cdot ^{\circ}C)^{-1}$	5.74
η_{ele}	电锅炉效率	0.95
H_c	集热环路水泵扬程/m	50
η_p	水泵效率	0.7
η_m	电机效率	0.7
m_c	集热工质流量/ $kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$	0.01
T_{max}	贮水箱最大设定温度/ $^{\circ}C$	90
T_{on}	温度控制盲区上限/ $^{\circ}C$	7
T_{off}	温度控制盲区下限/ $^{\circ}C$	2
T_m	自来水补水温度/ $^{\circ}C$	18
T_l	供应热水设定温度/ $^{\circ}C$	50
U_{tank}	水箱保温层厚度/m	0.1
C	保温材料导热系数/ $W \cdot (m \cdot ^{\circ}C)^{-1}$	0.3

表 3 设备经济性参数表

Tab. 3 Table of equipment economic parameters

参数类型	数值	单位
单位面积平板集热器价格 P_{col}	500	元/ m^2
单位体积贮水箱价格 P_s	800	元/ m^3
电锅炉价格系数 P_{aux}	140	元/kW
太阳能平板集热器生命周期	15	a
贮水箱生命周期	20	a
电锅炉生命周期	20	a
电价 E_p	0.6	元/kWh

2.1 确定性优化设计

基于前文所述的优化设计方法, 采用 Genopt 优化软件调用粒子群智能算法对 Dymola 模型进行迭代寻优搜索, 其中优化变量的搜索范围及变化步长如表 4 所示。表 5 为系统优化设计结果。在优化设计方案中, 系统选用了 $5.75 m^3$ 的贮水箱, 大于日均热水总需求量 $3.6 m^3$ 。而电锅炉额定容量

仅配置 27 kW, 远小于最大时刻生活热水负荷 48.1 kW. 可以看出, 系统倾向于选用较大容积的贮水箱来获益于更多的日间太阳辐射, 且由于可再生能源系统的容量价值^[10], 仅配置较小额定功率的电锅炉便可满足可靠性设计目标.

表 4 Genopt 优化参数输入

Tab. 4 Optimization parameter input of Genopt

待优化变量	初始值	变化范围	变化步长
平板集热器面积/m ²	100	80~110	1
水箱容积/m ³	6	4~9	0.5
辅助热源功率/kW	30	20~40	1

表 5 确定性优化设计方案

Tab. 5 Deterministic optimization design scheme

平板集热器面积/m ²	水箱容积/m ³	电锅炉额定容量/kW	设备总投资成本/元	年运行费用/元
102.5	5.75	27	59 630	13 350

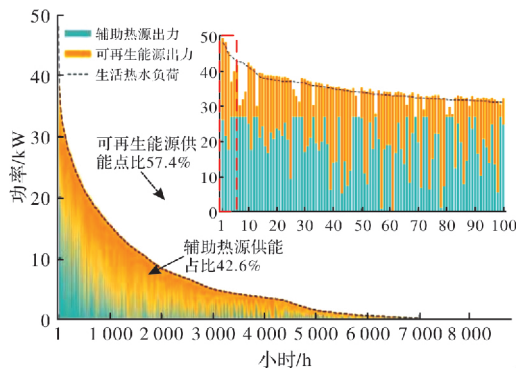


图 6 确定性优化设计方案系统运行能量堆栈图

Fig. 6 Stack diagram of deterministic optimization design scheme system operation energy

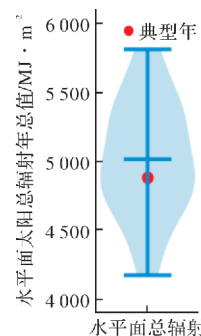
图 6 为生活热水负荷降序排列下的系统运行能量堆栈图. 可以看出: 系统的生活热水负荷由可再生能源和辅助热源两者共同承担, 其中可再生能源的全年供能占比达到了 57.4%; 可再生能源出力波动性较大, 在热水负荷最大的 100 h 中, 部分时刻下可再生能源供能几乎可承担全部的热负荷, 但也存在可再生能源供能不足导致系统不保证运行的时刻. 如子图中红色虚线框所示, 在热水负荷最大时刻下, 可再生能源出力达到了 21.1 kW; 在热水负荷最大的第 2 小时和第 3 小时内, 可再生能源出力依旧可观, 系统甚至不需要辅助热源满负载运行便可满足居民的生活热水高峰需求. 由此可见, 太阳能热水系统具备可观的容量价值, 能够在高峰用水时段内缓解辅助热源的供能负担.

然而可再生能源的出力状况受限于气象条件, 系统在典型年边界下的容量价值并不能代表未来

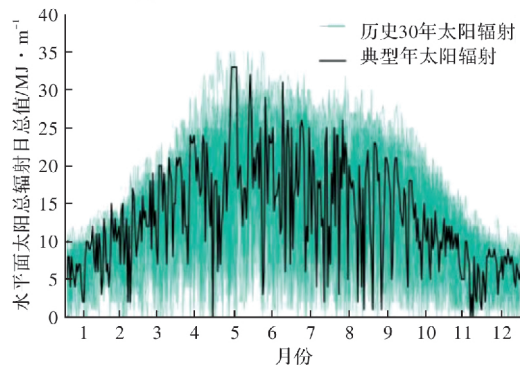
所有年场景, 因此有必要对太阳能热水系统进行供能可靠性分析, 以探究系统在不确定性气象条件下的供能可靠性.

2.2 供能可靠性分析

太阳能热水系统的供能波动性源于气象条件中太阳辐射的变化无常, 图 7 为天津市典型年气象与历史 30 a(1981—2010)气象的对比. 子图(a)中, 红点表示典型年水面太阳总辐射的年总值 4 879 MJ/m², 而历史 30 a 的水平面太阳总辐射年总值的分布状况如蓝色区域所示, 可以看出典型年的水平面太阳总辐射年总值仅为历史 30 a 的近似平均值反映. 子图(b)为水平面太阳总辐射日总值的全年逐日变化, 黑色实线为典型年水平面太阳总辐射日总值变化情况, 可以看出: 太阳辐射日总值变化具有很强的随机性, 仅仅通过典型年气象难以反映所有可能发生的太阳辐射场景. 因此, 当确定性设计方法采用典型年气象数据作为系统的源侧设计边界时, 会在一定程度上忽视了气象条件的随机特征, 故设计方案在未来长期运行过程中可能会面临供能不可靠的风险.



(a) 水平面太阳总辐射年总值对比



(b) 水平面太阳总辐射日总值对比

图 7 典型年气象与历史 30 年气象对比

Fig. 7 Comparison between TMY and 30 years of historical meteorology

为了探究上述现象, 本文将 2.1 中的确定性优化设计方案置于天津市 30 a(1981—2010)历史气象数据中进行可靠性评估, 得到的历年不保证小时数的频数分布如图 8 所示.

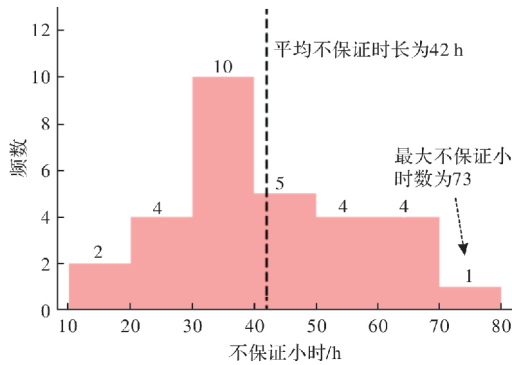


图 8 历年不保证小时频数分布

Fig. 8 Frequency distribution of non-guaranteed hours of each scenario

可以看出, 在 30 a 历史气象条件下, 存在 24 个年场景的生活热水不保证小时数高于预期目标设计值, 其发生概率可达 80%。并且在所有年场景下的不保证时长平均值为 42, 相比于目标设计值增加了 40%, 其中最极端场景下的热水不保证时长达到了 73 h。由此可见, 单一的确定性设计边界未能考虑气象条件的随机性, 导致系统设计方案在长期运行中与预期目标设计值偏差较大, 生活热水的供应存在不可靠的风险。

3.3 系统供能可靠性改善

为了弥补确定性优化设计方案的不足, 并提升系统的供能可靠性, 本文针对系统的关键设计环节进行额外投资, 并分析在等额投资情况下不同方案所带来的可靠度提升和经济性效益, 如表 6 所示。在 Dymola 仿真环境下, 分别将每种投资方案置于 30 a 历史气象条件中进行可靠性评估, 得到的历年不保证小时数分布情况如图 9 所示, 可以看出:

(1)随着投资贮水箱费用的等额增加, 系统在 30 a 场景下的平均不保证时长呈下降趋势, 且当额外投资达到 2 000 元时, 系统的可靠性并不随着贮水箱容积的增大而提升。这是由于增大贮水箱容积可以使系统获益于更多的日间太阳能, 但随着水箱容积的增大, 水箱利用率逐渐下降, 并且这种改善方式无法从源头上提升系统供能可靠性, 因此存在一定程度的边际效应, 仅适用于对生活热水舒适度要求不高的设计场景;

(2)增加平板集热器的面积并不能显著降低系统在 30 a 场景下的平均不保证时长。这是因为单位面积的平板集热器造价相对较高, 且其供能方式受气象条件随机性的影响存在波动。因此, 出于系统长期稳定可靠运行的考虑, 选择投资平板集热器以提升系统供能可靠性并不是一种明智的决策;

(3)额外投资电锅炉的额定容量可以为系统的可靠性带来质的提升, 仅增加 7 kW 即可保证系统在全部场景下均达到预期设计目标。

表 6 系统关键环节投资改善方案

Tab. 6 Investment improvement scheme for key links of the system

投资 方案	额外投 资费用 /元	增加电锅 炉额定容 量/kW	增加平板 集热器面 积/m ²	增加贮水 箱容积/m ³
方案 A	1 000	7	2	1.25
方案 B	2 000	14	4	2.50
方案 C	3 000	21	6	3.75
方案 D	4 000	28	8	5.00

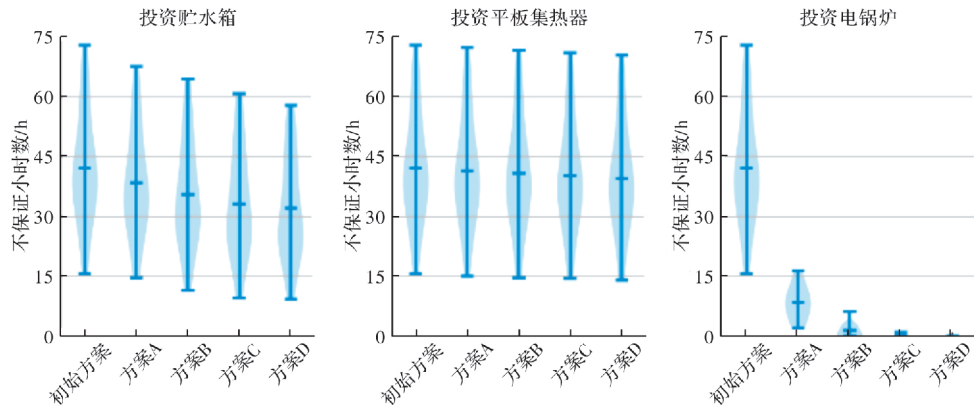


图 9 各方案历年不保证小时数的小提琴图

Fig. 9 Violin plots for non-guaranteed hours over 30 years of each scheme

图 10 为各投资方案在 30 a 气象条件下的系统平均运行费用, 可以看出: 增大贮水箱的容积可以降低系统在所有年场景下的平均运行费用, 但整体变化趋势也呈现出一定的边际效应; 投资平

板集热器会为系统带来稳定的经济性反馈; 然而增大电锅炉的额定功率并不会为系统带来任何经济性效益, 反而会因耗电量的增长使得系统平均运行费用增大。

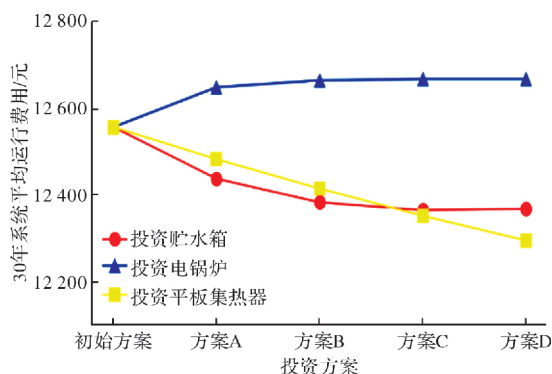


图10 各方案30年平均运行费用

Fig. 10 Average operating costs for each scheme over 30 years

综上所述,在等额投资费用下,选择增大电锅炉的额定容量是提升系统可靠性的最直接方式,但其并不会带来任何的经济性反馈,适用于对生活热水舒适度要求较高的设计场景。而在贮水箱和平板集热器两者之间,无论是出于可靠性还是经济性的考虑,适当的投资前者都更具优势,适用于对生活热水舒适度需求不高的设计场景。

3 结论

本文基于 Dymola 仿真平台和 Genopt 优化软件完成太阳能热水系统的动态建模和优化设计,并采用天津市 30 a 历史气象数据表征气象条件的不确定性,对确定性优化设计方案的供能可靠性进行探究分析,得到如下结论:

(1)太阳能热水系统的供能方式受气象条件随机性的影响而存在较大的波动,且由于确定性设计方法的设计边界未能描述所有可能发生的太阳辐射场景,导致系统在 24 个年场景下存在供能不可靠的风险,且所有年场景下的平均热水不保证时长可达 42 h,高于目标设计值 40%。因此,有必要在设计阶段对系统的关键设计环节进行额外投资以提升系统的供能可靠性。

(2)在确定性优化设计方案中额外投资辅助热源和贮水箱均可带来可靠度提升。其中,增大辅助热源的额定功率可以快速提升系统的供能可靠性,适用于对生活热水舒适度要求较高的场景。而适当增加贮水箱容积可以使系统获益于更多的日间太阳辐射,有利于改善系统的供能可靠性,同时也会得到一定程度的经济性反馈,但这种改善方式存在边际效应。

(3)由于单位面积的集热器造价较高,且其供能方式受气象随机性影响较大。因此,不建议采用增加集热器面积的方式来提升系统的供能可靠性。

参考文献 References

- [1] 郝斌,彭琛.从“太阳能”到太阳“能”:太阳能热水系统的效能与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2018. HAO Bin, PENG Shen. From "solar energy" to solar "capability": Efficiency and design of solar water heating system [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [2] MARINI D BR, HOPFE C. A critical software review-how is hot water modelled in current building simulation [C]//Proceedings of the 14th International IBPSA conference. India: Hyderabad, 2015.
- [3] ALIREZA Hobbi, KAMRAN Siddiqui. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS[J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 700-714.
- [4] KREITH F. Review of solar heating design by the F-chart method[J]. Solar Energy, 1978, 20(5): 439-440.
- [5] VIDOTTO M L, TONIAZZO Nogueira C E C. Software for designing solar water heating systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 361-375.
- [6] KOM J. A novel design method for optimizing an indirect forced circulation solar water heating system based on life cycle cost using a genetic algorithm[J]. Energies, 2015, 8(10): 11592-11617.
- [7] GANG Wenjie, WANG Shengwei, GODFRIED Augenbroe, et al. Robust optimal design of district cooling systems and the impacts of uncertainty and reliability [J]. Energy and Buildings, 2016, 122: 11-22.
- [8] ZUO W, NOUIDUI T, WETTER M. Modelica buildings library[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2014, 7(4): 253-270.
- [9] VAJEN K, JORDAN U. Realistic domestic hot-water profiles in different time scales[R]. Universitt Marburg IEA-SHC Task 26: Solar combisystems, 2001, 26.
- [10] LAN Bo, TIAN Zhe, NIU Jide, et al. Improving the design method of a solar heating system considering weather uncertainty and system reliability[J]. Energy and buildings, 2020, 208: 1-11.

(编辑 吴海西 沈波)