

基于可信分析的太阳能中央热水系统的热水储量控制算法^①

卢宇^{1,2}, 陈锦莹¹, 管立伟¹, 陈宏敏³, 吴允平⁴

¹(福建师范大学 物理与能源学院 福建省量子调控与新能源材料重点实验室, 福州 350117)

²(福建师范大学 协和学院, 福州 350117)

³(福建师范大学 教育学院, 福州 350117)

⁴(福建师范大学 光电信息工程学院, 福州 350117)

摘要: 太阳能中央热水系统的安全储水库存量对平衡用户需求及能源消耗具有重要作用, 设计并建立良好安全储水库存的规划模型能有效节约太阳能中央热水系统的辅助热源耗能量. 可信性理论近来已经广泛应用于解决不确定性工程、产品管理、库存管理、电力系统模糊设计等. 分析太阳能中央热水工程运行中的各种热损耗参数, 结合可信性理论, 设计符合太阳能中央热水工程的安全储水库存模型, 并将模型优化结果应用于太阳能中央热水系统的现场控制系统, 运行数据表明该模型所得的最优解能够减少辅助热源能耗, 提高能源利用率.

关键词: 太阳能中央热水系统; 可信性理论; 安全储水库存; 辅助热源能耗

Hot Water Stock Control Algorithm for Solar Central Water Heater Based on the Credibility Theory

LU Yu^{1,2}, CHEN Jin-Ying¹, GUAN Li-Wei¹, CHEN Hong-Min³, WU Yun-Pin⁴

¹(Fujian Province Key Laboratory of Quantum Manipulation and New Energy Materials, College of Physics and Energy, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

²(Concord University College, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

³(College of education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

⁴(College of photonic and electronic engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: The safety hot water stock of solar central water heater plays an important role in balancing the user demand and energy consumption. To design and establish a suitable safety hot water stock model can effectively reduce the energy consumption in the auxiliary heat source in the system. The credibility theory recently has been widely applied to solve the problems in engineering uncertainty, product management, inventory management and the ambiguous design in power system, etc. All heat losses parameters of solar central water heater are analyzed in this paper with the purpose of designing a safety hot water stock model suitable for solar central hot water engineering based on the credibility theory and further the optimized result to control the solar central water heater being used in the field control system of the solar system to help the solar central water heater to reduce auxiliary heat source energy consumption. The running results show that the model of the optimal solution design in this paper can improve energy utilization and reduce energy consumption in the auxiliary heat source.

Key words: solar central water heater; credibility theory; safety hot water stock; consumption of auxiliary energy

1 引言

太阳能作为可再生清洁能源, 受到能源界的广泛关注, 利用太阳能加热低温热水的太阳能热水系统,

是当前太阳能热利用中技术最成熟、经济上最具竞争力、应用最广泛的领域^[1,2]. 集群应用的太阳能中央热水系统有效地提高了太阳能的利用范围, 太阳能热水

① 基金项目:福建省重点科技项目(2012H0021);福建省教育厅重点项目(JA12064)

收稿时间:2015-12-22;收到修改稿时间:2016-01-27 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005302]

系统能量来源于太阳能辐射能量和辅助加热设备, 目前针对太阳能中央热水系统的能效研究主要集中在集热器效率、保温措施等局部器件的性能上, 对太阳能中央热水系统的系统整体控制方面基本没有涉及^[3]. 可信性理论是 Liu 在 Kaufmann、Nahmias 等研究者提出模糊变量、可能性空间的基础上提出的一种概率测度的方法, 利用可信性理论研究模糊环境下的库存优化已是目前一个新的热点研究问题, 而利用该理论研究热水系统的预存储量尚处于起步阶段. 目前的已运行的热水系统, 无论用户是否使用热水, 储水水箱长期处于较高水位, 这给热水系统带来的直接影响就是辅助加热设备消耗能量的不断增加, 用以维持用户需求的水箱中的水温及补充水箱散热等热量散失. 如何在尽可能满足用户日常用水的前提下减少热水的预储备, 从而达到降低热损耗的目标成为太阳能中央热水提高系统热效能的研究重点. 在热水系统中影响储水量最重要的因素就是用户用水量, 而用户用水量则是最典型的模糊变量, 用户用水这一个过程可看成一个模糊事件, 可能性理论无法完全刻画模糊事件的全部信息, 而可信性理论却可以克服这一缺陷. 因此, 本文结合可信性理论建立太阳能热水系统安全储水模糊控制模型, 并将应用于太阳能中央热水系统的控制, 旨在通过该模型实现在满足用户用水的前提下, 尽可能减少库存热量, 最大限度地减少辅助加热能源消耗, 达到节能的目标^[4].

2 控制模型设计

2.1 模型设计基础

可信研究已经在众多领域得以应用, 也先后提出了多种测算方案^[5,6], 可信性理论是 Liu^[7,8]提出的一种解决模糊决策问题的有力工具, 并已广泛库存控制^[9]、产品组合^[10]、供应链管理^[11]、电力^[12]等工程领域. Liu 在 Nahmias 给出的可能性测度的定义上给出了第四条公理定义了乘积空间上的可能性测度. 可信性测度的概念如下:

假设 ξ 是一模糊变量, 其隶属函数为 $\mu_{\xi}(x)$, 对于非空集合上的任意集合 A , 模糊事件 $\xi \in A$ 的可信性测度如式(1)所示:

$$Cr\{\xi \in A\} = \frac{1}{2}(Pos\{\xi \in A\} + Nec\{\xi \in A\}) \quad (1)$$

其中 $Pos\{\xi \in A\}$ 为模糊事件 $\{\xi \in A\}$ 的可能性测度,

$Nec\{\xi \in A\}$ 为模糊事件 $\{\xi \in A\}$ 的必要性测度. 那么, 由上式可知, 当一个事件的可信性为 1 时, 该事件必然会发生; 当一个事件的可信性为 0 时, 它必然不会发生.

在可信性理论中, 我们利用模糊变量的概念描述模糊事件或者模糊约束. 假设 ξ 是梯形模糊变量 (r_1, r_2, r_3, r_4) , 其中 $r_1 < r_2 \leq r_3 < r_4$, 利用可信性理论^[13], 可知梯形模糊量 (r_1, r_2, r_3, r_4) 的可信性分布如式(2), (3)所示:

$$Cr\{\xi \leq r\} = \begin{cases} 0, & r \leq r_1 \\ \frac{r-r_1}{2(r_2-r_1)}, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0.5, & r_2 \leq r \leq r_3 \\ \frac{r-2r_3+r_4}{2(r_4-r_3)}, & r_3 \leq r \leq r_4 \\ 1, & other \end{cases} \quad (2)$$

$$Cr\{\xi \geq r\} = \begin{cases} 1, & r \leq r_1 \\ \frac{r-2r_2+r_1}{2(r_1-r_2)}, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0.5, & r_2 \leq r \leq r_3 \\ \frac{r-r_4}{2(r_3-r_4)}, & r_3 \leq r \leq r_4 \\ 0, & other \end{cases} \quad (3)$$

对于给定一个置信水平 $\alpha (\alpha \geq 0.5)$ (文中只讨论置信水平不小于 0.5 的情况), 由(2)式可得, 当 $Cr\{\xi \leq r\} \geq \alpha$ 时有

$$\begin{cases} Cr\{\xi \leq r\} = \frac{r-2r_3+r_4}{2(r_4-r_3)} \geq \alpha \\ r_3 \leq r \leq r_4 \end{cases} \quad \text{或者} \quad \begin{cases} Cr\{\xi \leq r\} = 1 \\ r \geq r_4 \end{cases} \quad (4)$$

通过移项等操作易证当 $\alpha \geq 0.5$ 时, 上述式子可简化为:

$$r \geq (2-2\alpha)r_3 + (2\alpha-1)r_4 \quad (5)$$

同理, 当给定一个置信水平 $\beta (\beta \geq 0.5)$, 由(3)式可得, 当 $Cr\{\xi \geq r\} \geq \beta$ 时有

$$\begin{cases} Cr\{\xi \geq r\} = \frac{r-2r_2+r_1}{2(r_1-r_2)} \geq \beta \\ r_1 \leq r \leq r_2 \end{cases} \quad \text{或者} \quad \begin{cases} Cr\{\xi \geq r\} = 1 \\ r \leq r_1 \end{cases} \quad (6)$$

易证当 $\beta \geq 0.5$ 时, 上述式子可简化为:

$$r \leq (2\beta-1)r_1 + (2-2\beta)r_2 \quad (7)$$

此外, Liu^[13]还提出模糊相关机会规划和模糊机会约束规划. 模糊相关机会规划是在模糊环境下, 为使事件的机会函数在不确定环境下达到最大值而给出的

最优规划, 可建立如式(8)所示的机会规划^[13]:

$$\begin{cases} \max Cr\{h_k(x, \xi) \leq 0, k=1,2,3,\dots,q\} \\ \text{s.t.} \\ g_j(x, \xi) \leq 0, j=1,2,3,\dots,p \end{cases} \quad (8)$$

其中 x 为 n 维决策向量, ξ 为模糊变量, $Cr\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 的可信性, $\{h_k(x, \xi) \leq 0, k=1,2,3,\dots,q\}$ 为模糊事件, $g_j(x, \xi) \leq 0, j=1,2,3,\dots,p$ 为不确定环境。

模糊机会约束规划是允许决策者所做的决策在某种程度上不满足约束条件, 但是模糊约束条件成立的可信性不小于决策者预先给定的置信水平^[13]。模糊机会约束规划规定置信水平 α , 使得 $Cr\{g_j(x, \xi) \leq 0, j=1,2,3,\dots,p\} \geq \alpha$ 成立。本文将采用计算机模糊模拟技术检验约束条件的可行性。对于模糊系统, 利用模糊模拟技术计算 $Cr\{f(x, \xi) \leq 0\}$ 的值, 记 $L = Cr\{f(x, \xi) \leq 0\}$, 可由可信性测度的定义近似求得:

$$L = \frac{1}{2} \times \left(\max_{1 \leq k \leq N} \{\mu(\mu_k) | f(x, u_k) \geq 0\} + \min_{1 \leq k \leq N} \{1 - \mu(\mu_k) | f(x, u_k) < 0\} \right) \quad (9)$$

2.2 太阳能中央热水系统的热水量控制模型设计

为达到优化控制模式提高目前在运行的太阳能中央热水系统热效率的目标, 本文将利用可信理论对太阳能中央热水系统的用水需求储量加以优化控制, 根据太阳能热水系统相关参数进行建模分析, 系统需解决的实际问题描述如下:

某建筑上的太阳能中央热水系统每天的运行周期的时段 $[1, T]$ 内向用户提供热热水, 热水的热量源于太阳能集热板以及辅助加热设备产生的热量, 用于用户使用、库存剩余以及散热损失。那么, 整个周期 T 内通过辅助设备加热的热水热量如式 10 所示:

$$\sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_t \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_t) \cdot T_t) \quad (10)$$

其中, c 为水比热容; T_0 为用户需水温度; k 为系统能量散失系数; ξ_t 为第 t 时段用户用水量, T_{st} 为第 t 时段系统水箱温度, T_t 为第 t 时段集热器出水水温; x_t 为第 t 时段系统需库存水量。

每个时段 t 内, 用户需要的水量和库存的热水水量不可超过储水箱的体积 V , 即

$$V - x_t > \xi_t$$

为使一天多个时段内的辅助加热总和最小, 本文确立如下式 11 所示的控制模型:

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_t \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_t) \cdot T_t) \\ \text{s.t.} \\ 0 \leq T_{st} \leq 100, t=1,2,3,\dots,T \\ \xi_t \geq 0, t=1,2,3,\dots,T \\ V - x_t > \xi_t, t=1,2,3,\dots,T \end{cases} \quad (11)$$

记 $X = (x_1, x_2, \dots, x_T), \xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_T)$, 上述的目标函数可简记为:

$$f(X, \xi) = \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_t \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_t) \cdot T_t) \quad (12)$$

接着, 在模糊环境下基于可信理论对该问题进行处理。首先利用相关机会约束规划处理目标函数, 管理者预先设定辅助加热期望值 Q_{aux0} , 我们希望 $f(X, \xi) \leq Q_{aux0}$ 的可信性要尽可能大, 即

$$\max Cr\{f(X, \xi) \leq Q_{aux0}\}$$

然后再利用模糊机会约束规划处理约束条件。在实际的热水生产过程中, 由于太阳能辐射量的不稳定性和可能的用户用水需求的变化性, 决策者只需要在一定程度上满足约束条件即可。因此, 系统管理员预先给定某一置信水平 α , 当约束条件的可信性大于或者等于 α , 即:

$$Cr\{V - x_t > \xi_t, t=1,2,3,\dots,T\} \geq \alpha$$

那么, 模糊环境下辅助加热最小化的可信性规划模型如式 13 所示:

$$\begin{cases} \max Cr\{f(X, \xi) \leq Q_{aux0}\} \\ \text{s.t.} \\ 0 \leq T_{st} \leq 100, t=1,2,3,\dots,T \\ \xi_t \geq 0, t=1,2,3,\dots,T \\ Cr\{V - x_t > \xi_t\} \geq \alpha, t=1,2,3,\dots,T \end{cases} \quad (13)$$

式中, $Cr\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 的可信性。

由于用户需水的模糊性, 因此假设用户用水量 ξ_t 为梯形模糊变量。记为 $\xi_t = (\xi_{t1}, \xi_{t2}, \xi_{t3}, \xi_{t4})$, 该式一个等价的语义描述是: 决策者认为用户用水量最有可能的取值范围在 $[\xi_{t2}, \xi_{t3}]$ 之中, 决策者对用户用水量的估计不会低于 ξ_{t1} 且不会高于 ξ_{t4} 。模型中 $f(X, \xi)$ 是关于 ξ_t 的线性函数, 根据 Zadeh 扩展原理可知 $f(X, \xi)$ 仍然为梯形模糊变量。记 $f(X, \xi) = (r_1(x), r_2(x), r_3(x), r_4(x))$ 。

最后将问题转化成清晰化的描述。在式(13)中, 设 $g(x) = \max Cr\{f(X, \xi) \leq Q_{aux0}\}$ 。由上述相关内容可得

$$g(x) = \begin{cases} 0, & Q_{aux0} \leq r_1(x) \\ \frac{Q_{aux0} - r_1(x)}{2(r_2(x) - r_1(x))}, & r_1(x) \leq Q_{aux0} \leq r_2(x) \\ 0.5, & r_2(x) \leq Q_{aux0} \leq r_3(x) \\ \frac{Q_{aux0} - 2r_3(x) + r_4(x)}{2(r_4(x) - r_3(x))}, & r_3(x) \leq Q_{aux0} \leq r_4(x) \\ 1, & \text{other} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$r_1(x) = \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_{t1} \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_{t1}) \cdot T_t)$$

$$r_2(x) = \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_{t2} \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_{t2}) \cdot T_t)$$

$$r_3(x) = \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_{t3} \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_{t3}) \cdot T_t)$$

$$r_4(x) = \sum_{t=1}^T (c \cdot \xi_{t4} \cdot T_0 + c \cdot x_t \cdot T_0 + k \cdot (T_0 - T_{st}) - c \cdot (x_t + \xi_{t4}) \cdot T_t)$$

本文中只考虑置信水平不小于 0.5 的情况, 由上述可知

$$Cr\{V - x_t \geq \xi_t\} \geq \alpha \Leftrightarrow V - x_t \geq 2(1 - \alpha)\xi_{t3} + 2(\alpha - 1)\xi_{t4}$$

综上, 该模型的清晰等价形式如式 15 所示:

$$\begin{cases} \max g(x) \\ s.t. \\ 0 \leq T_{st} \leq 100, \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \\ \xi_t \geq 0, \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \\ V - x_t \geq 2(1 - \alpha)\xi_{t3} + 2(\alpha - 1)\xi_{t4}, \quad t = 1, 2, 3, \dots, T \end{cases} \quad (15)$$

2.3 模型求解算法

本研究结合模糊模拟直接搜索的特点以及遗传算法具有高度的鲁棒性避免在局部最优解附近徘徊的特性^[15]实现算法设计. 算法步骤如下:

Step1: 初始化各类参数, 包括设置遗传算法中的各项参数, 例如种群规模、交叉概率、变异概率等. 以上的内容按照通常做法进行设置, 例如交叉概率用于控制交叉算子的使用频率, 使得解达到最希望的解区域. 过大的交叉概率可能导致过早收敛, 通常交叉概率取值范围在 0.6~1 之间, 因此, 本文中的交叉概率取 0.75. 变异概率用于控制变异算子的使用频率及算法局部搜索能力, 通常的取值范围是在 0~0.1, 文中将该值置为 0.1.

Step2: 种群初始化, 采用计算机模糊模拟技术进行可行性验证并求解适应度. 根据文中模型的变量取值范围, 种群中的染色体采用实数编码方式进行编码, 精确到 0.1. 该步骤的主要目的是保证产生的每个染色体均符合不确定环境的要求. 模糊模拟过程如下:

初始化种群个数计数变量 $k=1$;

从模糊变量 ξ_i 的 ε 水平截集 (ε 为充分小的正数)

中随机产生 u_i ; 令

$$u_k = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n), \mu(u_k) = \mu_1(u_1) \wedge \mu_2(u_2) \wedge \dots \wedge \mu_n(u_n)$$

若 k 不大于设置的个数且根据 2.1 中内容计算出可信性测度, 若得出的可信度满足要求则认为染色体可行, $k=k+1$; 否则不可行, 继续生成.

适应度的计算将根据上述产生的模糊变量按照相同的方法进行, 适应度函数为 2.2 中提到的 $Cr\{f(X, \xi) \leq Q_{aux0}\}$.

Step3: 交叉、变异操作, 并采用 Step2 中的模糊模拟技术进行验证, 保留可行染色体到下一代. 根据

Step1 中设定的交叉概率与变异概率, 交叉操作采用的是单点交叉运算, 变异操作采用的是基本位变异算子的运算方法. 对于新产生的染色体, 需要检验染色体的可行性, 因此, 须执行 Step2 中的步骤进行检验, 符合要求者进入下一步, 不符合要求者重新执行变异交叉操作, 直至符合要求为止.

Step4: 通过轮盘赌方法进行染色体选择. 轮盘赌方法是遗传算法中常用的一种选择方法, 它先计算每个染色体的累计概率, 随后随机生成一变量, 根据该变量的值选择染色体, 一直重复该步骤, 得到新种群. 计算新种群的适应度.

Step5: 重复 Step3, 直到满足终止条件为止, 输出最优解.

3 实验与结果

3.1 储水量模型实验

将基于可信性理论设计的太阳能热水系统热水储水量模型, 结合福建省某建筑的太阳能中央热水系统工程实现实际系统测算过程, 系统模拟数据取自于南方某大学校园一栋学生宿舍楼太阳能热水系统某日历史正常运行的数据. 太阳能热水系统的辐射能量在每天 6:00 到 23:00, [1,17]时段内生产热水, 用户用水需求量、集热器出水温度、水箱水温分别如表 1、表 2、表 3 所示. 其他相关数据如表 4 所示.

表 1 用户用水需求量 ξ_t

时段 t	1	2	3
用户热水需求(吨)	(0.8, 1, 1.5, 2.5)	(2, 3, 5, 7)	(1.5, 2, 4, 5)
时段 t	4	5	6
用户热水需求(吨)	(1, 1.5, 2, 2.5)	(0.3, 0.5, 1.0, 1.5)	(1, 1.5, 2.5, 3.5)
时段 t	7	8	9
用户热水需求(吨)	(2, 3, 4, 5)	(2, 3, 4.5, 5.5)	(1, 1.5, 2.5, 3.5)
时段 t	10	11	12
用户热水需求(吨)	(0.5, 1, 1.2, 2)	(0.8, 1.2, 1.5, 2.0)	(2, 3, 4, 5)
时段 t	13	14	15
用户热水需求(吨)	(2, 3, 5, 5.5)	(3, 6, 7, 8)	(4, 6, 7, 10)
时段 t	16	17	
用户热水需求(吨)	(4, 6, 8, 10)	(4, 7, 8, 10)	

注: 第 1 时段时间为: 6:00~7:00; 第 2 时段时间为: 7:00~8:00; 以此类推.

表 2 集热器出水温度 $T_t(^\circ\text{C})$

时段 t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
集热器出水温度	--	45	50	50	50	50	50	50	50
时段 t	10	11	12	13	14	15	16	17	
集热器出水温度	50	45	40	40	--	--	--	--	

注: 第 1 时段时间为: 6:00~7:00; 第 2 时段时间为: 7:00~8:00; 以此类推.

表 3 水箱水温 $T_{st}(^\circ\text{C})$

时段 t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
水箱水温	43	43	48	48	49	49	49	49	48
时段 t	10	11	12	13	14	15	16	17	
水箱水温	48	48	48	47	46	46	47	46	

注: 第 1 时段时间为: 6:00~7:00; 第 2 时段时间为: 7:00~8:00; 以此类推.

表 4 其他相关控制数据

数据名称	期望辅助热源 $Q_{aux0}(\text{MJ})$	用户需水温度 $T_0(^\circ\text{C})$	水的比热容 $c(\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
数据值	28.8	50	4200
数据名称	水箱容积 $V(\text{吨})$	能量散失系数 $k(\text{W}/^\circ\text{C})$	种群规模
数据值	10	24.5707	100
数据名称	交叉概率	变异概率	置信水平 α
数据值	0.75	0.1	0.8

由于已将模糊模型转换成清晰等价模型, 因此将采用遗传算法求解模型最优解. 根据上述数据并利用遗传算法进行 1000 次迭代即可得到最优解如表 5 所示.

表 5 预储水量最优解

时段 t	1	2	3	4	5	6	7	8	9
预储水量(吨)	0.3	0.5	1.4	0	0	0	0	0	0
时段 t	10	11	12	13	14	15	16	17	
预储水量(吨)	0	0	2.2	3.1	4.9	5.1	6.1	6.2	

注: 第 1 时段时间为: 6:00~7:00; 第 2 时段时间为: 7:00~8:00; 以此类推.

3.2 结果及分析

选取两栋相邻的学生宿舍楼, 安装的太阳能热水系统系统型号相同, 往年使用的历史用电量相当, 分别采用不同的控制方法加以控制, 其中系统 A 采用目

前常用的定时、定温、定量的标准控制方法运行, 未进行优化控制, 系统 B 通过数据仓库获取该建筑所属系统近年同期有关数据, 预测今年相关数据, 利用模型进行优化控制. 在测试阶段内两套测试系统除控制不同外其他设置均保持一致. 在测试结果中, 若优化方案中辅助能耗消耗量低于未优化方案天数的 90%, 则认为该试验成功. 这里取值 90% 的原因是因为存在一定的临时用水或者用水量的临时波动导致的数据的不准确.

测试时间为每天 6:00~23:00, 每天间隔 10 分钟上传一次系统数据, 其中包括水位、辅助能源消耗量、温度等. 测试期间, 对比两套系统辅助能源耗能量数据, 结果如图 1 所示.

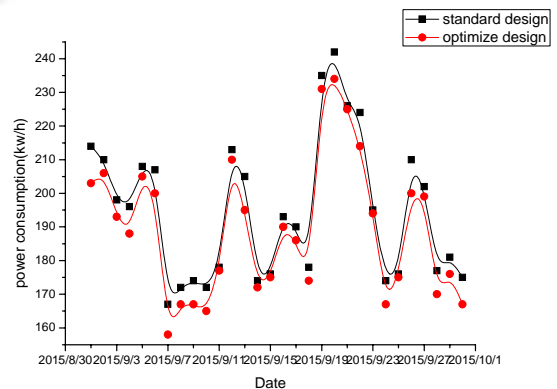


图 1 测试期间辅助能耗数据对比

由图 1 可见, 测试期间未优化系统 A 每日辅助加热能耗数据均高于优化系统 B. 此外, 为进一步说明该优化方法有一定的节能效果, 我们采用平均相对误差(MRE)评价辅助能源消耗量, 具体公式如下:

$$MRE = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T \left(\frac{| \text{优化消耗量} - \text{未优化消耗量} |}{\text{未优化消耗量}} \times 100\% \right)$$

利用 MRE 计算上图中优化与未优化的能耗数据, 我们可得到优化方法相比于未优化方法可平均节约 2.68% 的辅助能耗消耗量. 综上, 采用优化设计可以达到一定的节能效果.

4 总结

基于可信性理论, 本文建立一个太阳能热水系统储水量模糊优化模型, 并给出其清晰等价模型. 为了求解模糊模型, 文中利用遗传算法设计了一个混合智能算法, 通过一个数值例子说明太阳能热水系统在满

足用户一定用水量的前提下仍需存储多少热水以满足系统辅助加热耗能量最少以及用户用水量的临时增长,最后应用到实际项目中观察数据结果。模拟数据和实际应用数据表明,该模型可以在一定程度上降低太阳能热水系统的辅助加热量,达到节能的目标。

参考文献

- 1 闫晓娜,陈光明,洪大良,徐坚,唐黎明,郑瑞澄.新型双热源吸收式循环性能分析.太阳能学报,2015,36(4):916-921.
- 2 陈冠益,陈程,于兵,张芸芸.工业用太阳能热水系统动态仿真及分析.太阳能学报,2013,34(9):1656-1660.
- 3 秦永熙,李王彪,卢宇,管立伟,蔡声镇.太阳能中央热水系统节能控制算法的设计与实现.福建师范大学学报:自然科学版,2013,29(3):53-58.
- 4 罗运俊,何梓年,王长贵著.太阳能利用技术.北京:化学工业出版社,2005.
- 5 吕艳霞,田立勤,孙珊珊.云计算环境下基于FANP的用户行为的可信评估与控制分析.计算机科学,2013,40(1):132-135.
- 6 田野,彭新光,李宏滨,张屹峰.网络用户行为可信性集值统计度量方法.小型微型计算机系统,2013,34(10):2354-2357.
- 7 Liu B. Theory and Practice of Uncertain Programming. Heideberg: Physica-Verlag, 2002.
- 8 Liu B. Dependent-chance programming in fuzzy environments. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 109(1): 97-106.
- 9 高峻峻,胡乐江.模糊环境下分销系统的库存决策问题研究.系统工程学报,2007,22(4):407-411.
- 10 熊虎,向铁元,陈红坤,林芳,苏井辉.含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究.中国电机工程学报,2013, 33(13):36-44.
- 11 张连怀,周宝刚,郭亚军.基于风险态度的两级供应链设计与优化.运筹与管理,2012,21(6):56-62.
- 12 毛安家,何金.一种基于可信性理论的电网安全星综合评估方法.电力系统保护与控制,2011,39(18):80-87.
- 13 Liu B. Uncertainty Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- 14 Liu B, Iwamura K. Change constrained programming with fuzzy parameters. Fuzzy Sets & Systems, 1998, 94(2): 227-237.
- 15 刘宝碇,赵瑞清,王纲.不确定规划及应用.北京:清华大学出版社,2003.
- 16 郑帅丽,李成严.基于改进模糊模拟的混合遗传算法.计算机工程,2013,39(5):169-173.